

GOVP1200511953

M10104000042-01J000001700

3차원 균열 암반에서의 지하유체 거동 해석 시스템 개발

Development of an Integrated Analysis System for the
Transport Behavior in 3D Fractured Rock Media

서울대학교

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “3차원 균열 암반에서의 지하유체 거동 해석 시스템 개발에 관한 연구
과제의 1단계 결과 보고서로 제출합니다.

2003. 8.

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 강 주 명

보고서 초록

과제관리번호	M10104000042-01 J000001700	해당단계 연구기간	2001.7.11-2003.7.10	단계 구분	1 / 2
연구사업명	중 사업명	특정연구개발사업			
	세부사업명	국가지정연구실사업			
연구과제명	중 과제명	3차원 균열 암반에서의 지하유체 거동 해석 시스템 개발			
	세부(단위)과제명				
연구책임자	강 주 명	해당단계 참여연구원수	총 : 14 명 내부 : 2 명 외부 : 12 명	해당단계 연구비	정부: 547,600 천원 기업: 천원 계 : 547,600 천원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경시스템공학부 지하유체공학연구실		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
위 탁 연 구	연구기관명 : 한국해양대학교 해양개발공학부 석유공학 연구실 연구책임자 : 임 종 세				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	271면
<ul style="list-style-type: none"> · 현장에서 수집한 2차원 균열 추적자료로부터 3차원 균열 반경, 공간적 분포 및 방향성을 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하였음. · 가변간극 균열면을 유리질로 복제하여 삼승법칙의 적용범위를 파악하고 균열 형태에 따른 수정된 삼승지수를 유도하였음. · Baecher 모델, Polygon 모델, 프랙탈 모델, 지구통계학적 모델 등의 알고리즘을 사용하여 3차원 균열 매질 생성하였으며 OpenGL을 사용하여 가시화하였음. · 가변간극 균열의 복제판 실험자료 해석을 통해 가변 단일 균열에서 용질이동의 돌파시점 변화 양상을 파악하였고 유선 시뮬레이션 기법을 개발하여 실험자료와 비교 분석하였음. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	균열특성화, 다상거동, 가변간극, 가시화, 3차원			
	영 어	fracture characterization, multiphase behavior, variable aperture, visualization, 3 dimension			

요 약 문

I. 제 목

3차원 균열 암반에서의 지하유체 거동 해석 시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구의 필요성

(1) 기술적 측면

- 균열 저류층에서의 유전 개발, 에너지 지하저장 비축시설, 지하수의 오염 방지, 핵폐기물 저장시설 등 대규모 산업시설 등에 대한 해석을 하기 위해서는 균열 특성화 기법을 통한 지하유체 거동 해석 기술 습득이 필요.
- 균열망에서의 유체거동은 세계적으로 완벽한 이론 정립에 되어 있지 않은 상태 이므로 이를 해석하기 위해서는 균열을 통한 유체유동 및 용질이동에 대한 실험적 연구 수행이 필요함.
- 기존의 균열과 암반의 물리적 성질을 평균화시킨 연속체 개념 모델 또는 2차원 균열망 모델로는 불연속체인 3차원 균열망에서의 유체거동을 정확히 예측할 수 없음.

(2) 경제·산업적 측면

- 지하유체거동 해석기술은 환경오염에 대한 효과적인 오염 정화기법 제시, 원자력발전예 따른 방사성 물질의 저장의 안정성 파악, 그리고 균열저류층의 석유회수법 연구 등에 적용되어 경제·산업적인 효율성 극대화에 기여.

- 기술의 자립화로 인한 외국 기술 도입비로 지출되는 외화 절감 효과.

(3) 사회·문화적 측면

- 사회적으로 문제가 되고 있는 유류 저장탱크 주변의 환경 오염 문제나 방사성 폐기물 매립지 선정 문제에 대하여 효과적인 방안을 제시함으로써 환경 오염에 대한 국민의 불안감 해소.
- 이 기술의 개발은 현재까지 국내에서 연구되어 온 자원, 환경분야의 모든 기술력이 집적된 것으로 이 분야에 있어 선진국과 대등한 기술력을 갖게 되는 계기가 됨.

2. 연구목표

이 연구의 최종 목표는 3차원 균열 암반에서의 지하유체 거동 해석 시스템 개발이며 단계목표는 3차원 균열 매질 모델 개발 및 가변 간극 균열에서의 용질 이동 파악이다. 이를 위하여 다음의 세부 목표를 둔다.

- 3차원 균열매질 모델링 프로그램 개발
- 가변간극 균열에서 유체유동 및 용질이동에 대한 실험적 해석 기술 구축

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (2001년)	<p>3차원 균열 모델링 기법 연구</p> <p>가변간극 단일 균열에서의 유동 해석 실험</p>	<p>(1) 현장에서 수집한 2차원 균열 추적자료로부터 3차원 균열 반경, 공간적 분포 및 방향성을 결정하는 최적의 분포 함수</p> <p>(2) 균열의 가변 간극분포 측정 실험을 통한 프랙탈 및 지구통계학적 균열 간극 분포 특성 파악</p> <p>(3) 가변간극 균열의 수리학적 특성에 미치는 설정 변수의 영향에 대한 실험실 규모 실험</p> <p>(4) 가변간극 특성화 변수에 따른 삼승법칙의 적용성에 대한 실험적 분석 및 기존의 혹은 개선된 경험식 유도</p>
2차년도 (2002년)	<p>3차원 균열 매질 모델링 시스템 개발</p> <p>가변간극 단일 균열에서의 용질 이동 해석</p>	<p>(5) 1차년도에서 결정한 인자를 사용하여 결정론적, 추계론적 방법으로 3차원 균열 매질 생성</p> <p>(6) 생성된 균열의 연결성 분석 및 무균열 암반 블록의 크기 분포 분석</p> <p>(7) OpenGL을 사용하여 3차원 모델링의 가시화</p> <p>(8) 가변간극 균열의 용질이동 특성에 미치는 간극 특성화 변수의 영향에 대한 실험실 규모 실험 및 실험자료 해석을 통한 가변 단일 균열에서의 용질이동 주 메카니즘 분석</p> <p>(9) 계산속도 향상을 위한 유선 시뮬레이션 (stream-line simulation) 기법</p>

IV. 연구개발결과

- 3차원 균열 모델링 기법 개발과 3차원 균열 매질 모델링 시스템 개발

복잡하고 불균질한 지하매질을 효과적으로 모델링하기 위해서는 균열간의 간격과 빈도, 균열의 방향성(경사방향/경사각), 균열면의 거칠기, 균열간극, 균열간의 연결성 및 균열군의 크기, 균열의 크기 및 형태, 균열로 구분되는 블록의 크기, 균열내 충전물질 등 현장에서 획득한 다양한 정보와 과학적으로 타당한 예측이 필요하다. 이를 위한 자료를 획득은 시추를 통한 시추공조사(borehole survey)와 노면이나 사면에 노출된 균열을 조사하는 측정선조사(scanline survey)와 면적조사(areal survey) 방법 등을 수행하여 이루어진다. 획득한 균열조사 자료는 정방향모델링을 통해 현장의 특징을 잘 모사할 수 있는 분포함수를 결정한다.

현장에서 수집한 2차원 균열 추적자료로부터 3차원 균열 반경, 공간적 분포 및 방향성을 결정하기 위해서 개발된 알고리즘, 균열 반경을 결정하기 위해 적용된 시행착오법과 방향성을 결정하는 알고리즘인 신경망 기법을 사용하여 DATAFRAC을 개발하였다. 3차원 균열 모델링 기법으로는 Baecher 모델, Polygon 모델, 프랙탈 모델, 지구통계학적 모델 등의 알고리즘을 완성하였으며, 이를 바탕으로 3차원 균열 매질 모델링 시스템인 SNUFRACS을 개발하였다. 이 프로그램은 균열망의 연결성을 분석할 수 있으며 OpenGL을 사용하여 3차원 균열 모델링을 가시화하였다.

이 연구에서는 DATAFRAC을 통해서 정방향모델링을 수행한 후 적절한 분포함수를 획득하고, SNUFRACS을 이용하여 3차원 개념모델을 구성한다. 기존의 3차원 연속체 모델이나 2차원 분리 균열 모델은 균열의 불균질성을 적절히 반영하지 못할 뿐만 아니라 균열을 통한 유체 유동에 대한 신뢰성 있는 예측을 할 수 없었다. SNUFRACS는 Baecher, Polygon, 프랙탈 Levy-Lee, 지구통계학적 모델 등의 4가지 개념모델을 이용하여 현장의 균열 현상과 유사한, 다양한 형태를 가지는 균열망을 생성한다. 또한, 객체 지향적 코드 생성과 이중연결리스트를 이용하여 균열망의 클러스터와 균열, 유정과의 연결성 정보를 효율적으로 관리·저장한다.

SNUFRACS는 크게 시스템 크기, 균열망 개념모델, 균열모델의 통계적 변수와 유정 위치 정보 입력을 위한 입력 모듈과 3차원 균열망 시각화, 생성한 균열망 모델의 통계적 분석 모듈로 구성되어 있다. 균열망 모델의 자료 입력 모듈은 시스템 크기와 선택할 개념모델, 균열군의 중심, 길이, 방향성, 간극분포와 균열 밀도 입력항을 포함하고 있다. 균열망 모델의 3차원 시각화 모듈은 대표적인 3D 그래픽스 제작용 인터페이스인 OpenGL을 사용하여 균열망의 전방향 회전, 확대, 축소화면과 내부 절단 투영등의 다양한 화면을 제공한다. 한편 통계적 분석 모듈은 생성한 3차원

균열망 및 2차원 단면의 균열 길이, 간극, 방향성 분포 특성에 대한 통계적 분석기능을 갖추고 있다.

SNUFRACS에서 균열군의 해석은 개별적인 균열들의 연결성을 파악하는데 핵심적인 부분으로 유동 시점으로 가정된 유정의 유동영역에 연결된 균열 더미를 이용하여 다음과 같이 이루어진다.

균열군을 설명하기 위해서는 먼저 균열과 균열간의 연결성 해석이 선행되어야 하는데 이를 위해서 3차원 공간좌표와 공간도형의 특징을 이용하였다. 3차원 공간도형은 기본적으로 원으로 가정하였으며, 다각형 균열의 경우는 원에 내접하는 볼록 다각형으로 가정하였다. 연결성 해석을 위해, 각 균열과 균열이 교차하는 교차점과 원의 중심간의 위치관계, 교선의 존재 여부를 파악한다. 그 이후, 교선위에 존재하는 균열과 교선의 교차점의 위치관계를 좌표의 내적 부호를 이용하여 균열과 균열이 교차하는 선분을 계산한다. 좌표의 내적부호를 이용하는 방법은 기존의 좌표의 순차적 배열이나 정렬과 발생할 수 있는 많은 계산 소요시간의 문제를 해결할 수 있으며, 3차원 공간상에서 꼬인 위치나 평행의 경우를 적절히 표현할 수 있는 특징이 있다.

인위 균열 자료와 개발된 DATAFRAC과 SNUFRACS을 활용하여 네 가지 개념 모델들에 대한 균열망을 생성하고 다양한 시각화 옵션과 2차원 및 3차원 통계적 분석을 통하여 균열매질의 분포와 특성을 비교·분석하였다. 이와 같이 적용성을 검토한 결과 개발한 시스템은 향후 다공성 균열매질에서의 이상유동 및 용질 거동을 모사하기 위한 기본 모델로써 유용하게 활용될 것이다.

- 가변간극 단일 균열에서의 유체유동과 용질이동 해석실험

기존 연구들은 균열 내부에서의 유체유동이나 물질이동을 간극이 일정한 평판 균열에서 유동이 간극의 삼승에 비례하는 삼승법칙을 통해 모사하여 왔다. 또한, 응력 변화에 따른 간극 변화 모델을 삼승법칙에 부합되는 평균적인 균열 간극으로 예측하여 유동을 모사하였지만 실험적 검증을 하지 않아서 실제 균열 간극 특성은 무시되었다. 그러나, 비균질 간극분포를 갖는 균열이나 균열압반에서 용질이나 이상유동 양상은 간극분포의 지구통계학적 특성에 매우 큰 영향을 받는다.

이 연구에서는 가변간극 균열의 수리학적 특성에 영향을 미치는 설정 변수에 대한 단상 유동 실험과 유체투과율에 대한 균열 특성변수의 민감도를 분석하였다. 또한, 가변 간극 균열에서 간극 특성화 변수가 용질이동 특성과 용질이동의 분산도에 미치는 영향을 파악하고 지하 심부의 응력변화에 따른 삼승법칙의 적용성에 대한 실험적 분석 및 개선된 경험식을 유도하였다. 용질 이동 모사를 위해서는 유선 시

물레이션 기법을 개발하여 수치분산 오차를 줄이고 빠른 계산을 수행하였다.

가변간극 단일 균열에서의 유체유동과 용질이동 해석 실험을 통해서 얻은 결과는 다음과 같다.

첫째, 암반의 균열면을 본뜬 투명 균열 재생판을 제작하여 단일 균열에서 유체 유동 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 측정된 균열 간극 분포와 유량을 입력 자료로 하여 전산 모사를 통해 삼승법칙을 기본 가정으로 하는 레이놀즈 방정식을 풀어 지수를 구하였다. 계산된 지수는 약 3.18~3.25의 범위를 나타내었으며 이 값으로부터 삼승법칙을 적용하여 얻은 유량은 대략 실제 유량의 130~135 % 정도였다. 지수는 변동계수가 증가할수록 커지며 동일한 상관길이(correlation length)를 갖는 경우에는 비등방비(anisotropy ratio)가 커질수록 작아졌다. 또한, 비등방비가 증가하면 실제 유량은 삼승법칙으로 계산한 유량에 가까워지며 일정한 비등방비에서는 변동계수가 증가할수록 삼승법칙에서 벗어나는 경향을 보였다. 썸기각(wedge angle)이 10° 보다 작은 경우 연결투과율(link transmissivity)의 선택은 지수의 계산에 큰 영향을 주지는 못하였다.

둘째, 응력이 가해진 상태에서 균열면의 접촉 면적의 변화에 따라 유체투과율의 변화 양상을 조사한 결과, 응력이 증가함에 따라 실제로 유체가 흐를 수 있는 공간은 줄어들고 변동 계수(coefficient of variation)는 증가하였으며 유체 거동에 관련하는 채널의 형태와 유선 수가 변화하였다. 그리고, 균열 간극의 표준편차가 작을수록 유체투과율 감소가 적게 발생한다.

셋째, 균열시료에서의 용질이동 실험에서 용질의 분산은 변동계수와 왜도계수에 의해 좌우되며 이 값들이 증가할수록 분산이 심화되었다. 비등방비는 분산에는 그리 큰 영향을 미치지 않으나 용질도달시간에 큰 영향을 미쳤으며, 비등방비가 커지면 용질도달시간이 빨라지는 경향을 보였다. 비등방비는 용질도달시간으로부터 예측이 가능하였고 균열에서의 용질도달곡선과 누적간극분포의 유사성을 통하여 변동계수의 경우 오차 범위 24%와 왜도계수의 경우 오차범위 35% 내에서 추정할 수 있었다. 이로써 자료획득이 어려운 균열 간극분포 측정에 비해 비교적 간단한 유동 실험을 통해 간극분포의 형태적 특성을 파악할 수 있었다.

마지막으로, 유선 시물레이션 기법을 이용하여 단일 균열 내 용질이동을 모사하고 실험 자료와 비교를 통해 유선 시물레이션 기법의 타당성을 검증하였다. 시물레이션 결과 용질이동곡선은 실험에 의한 결과와 잘 일치하였으며 용질이동 양상도 실제 용질이동 형태를 유사하게 모사하였다. 각 유선에 서로 다른 변형 페클레 수(Peclet Number)을 할당하여 시물레이션을 수행하고, 이 결과를 전 유동영역에 대해 하나의 대표 변형 페클레 값을 사용한 시물레이션 결과와 비교하였다. 그 결과, 각 유선은 실제로 다른 변형 페클레 값을 갖지만 그 영향은 미미한 것으로 나타났

다. 따라서, 단일 균열에서의 용질이동 모사 시, 하나의 대표 변형 폐클레 값이 전 유선에 대해 효과적으로 사용될 수 있다.

이 연구 결과를 통하여 다양한 심부 압력 조건에서 단일 균열의 유체유동과 용질 이동 양상을 더 효율적으로 묘사할 수 있다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 이 연구에서 개발되는 성과물은 오염원 누출 경로로 추정되는 균열대의 기초 지질조사를 사용하여 비교적 정확히 실제 누출 경로와 양상을 파악할 수 있다. 이러한 지하 환경오염 문제는 최근 문제가 되고 있는 녹사평 역에서의 유류 누출뿐만 아니라 지하 저장유류 탱크가 있는 어느 지역에서나 발생할 수 있으며, 연구가 2단계를 거쳐 성공적으로 수행하여 얻은 성과는 지하 유류 등의 오염원의 확산과 이동양상을 파악하는데 유용하게 이용될 수 있다.
- OECD의 권고에 따라 우리 나라도 석유공사, SK 건설 등에서 지하에 유류 저장시설을 건설하고 있다. 이러한 저장시설은 균열이 존재하는 화강암질에 건설되기 때문에 이 연구에서 개발된 모델을 사용하여 암석의 균열대를 모델링하여 저장시설의 기밀성을 확보함으로써 저장기지를 안정적으로 운영할 수 있다.
- 우리 나라는 약 20%의 에너지를 원자력발전에서 얻고 있으며 방사성 폐기물의 처리장의 안정성은 매우 민감한 문제로 대두되고 있다. 따라서 개발된 프로그램을 사용하여 폐기물 처리시설 주변의 균열특성을 파악하면 폐기물 누출시 누출 경로와 양상을 신속하게 파악하여 재난방지 및 피해의 최소화에 적극 활용할 수 있다.
- 우리 나라가 수행한 해외개발유전의 대표적인 KODECO사의 마두라유전은 균열을 포함한 저류층이 상당히 많으며 최근에 개발된 베트남의 화강암 유전은 암반의 특성상 균열대를 포함하고 있다. 이러한 균열 저류층에서의 에너지생산을 효율적으로 수행하기 위해서는 균열망의 구조를 정확히 파악하여 유체유동을 예측해야 하며, 이에 개발된 프로그램은 균열 저류층에서 안정적이고 효율적으로 에너지를 생산하는데 적용될 수 있다.

S U M M A R Y

I. TITLE

Development of an integrated analysis system for the transport behavior in 3D fractured rock media

II. OBJECTIVES AND NECESSITIES

1. Necessity of the Researches

(1) Technological Aspects

- Previous works show that continuum model and 2-dimensional fracture networks model cannot describe properly the fluid flow and mass transport in 3-dimensional fracture networks.
- It is necessary to acquire new technique analysing the behavior of underground fluids, which adopts the characterizing techniques for fractures, in order to deal with large-scale facilities such as fractured reservoirs, underground caverns for storing energy, and sites for nuclear wastes disposal.
- There being no theory to describe exactly the behavior of fluids in fracture networks, experimental approaches are needed to analyse the fluid flow and mass transport in the fractures.

(2) Economical and Industrial Aspects

- The new technology can maximize the economical and industrial benefits in the fields of cleanup of environmental pollution, stability test for the site of nuclear wastes disposal, and enhanced oil recovery for fractured reservoirs.
- Self-supporting technology will cut down on the rate of dependence on

imports for foreign technology.

(3) Social and Cultural Aspects

- The technology can provide effective methods to prevent environmental pollution around the underground storage tanks and determine the sites for nuclear wastes disposal. Thus, it can help to relieve people from uneasiness.
- This study will be an integration of most researches in the field of energy resources and environmental pollution and can be equal to the highest level of advanced countries.

2. Objective of The Research

The final objective of the research is to develop a system analysing the behavior of underground fluids in 3-dimensional fractured media. And, the objective of the first step is to make a modeling system for 3-dimensional fractured masses and to understand the mechanism of fluid behaviors in a single fracture with variable aperture. The details are as follows;

- To design computer programs to model 3-dimensional fractured bedrocks.
- To complete a theory to understand the mechanism experimentally for fluid flow and solute transport in a single fracture with variable aperture.

III. MAJOR ACTIVITIES AND SCOPE OF THE STUDY

section	Object	Contents
1st year (2001)	To research the methodology for modelling 3-dimensional fracture Experiments for fluid flow in a single fracture with variable aperture	<ul style="list-style-type: none"> - Choosing optimal distribution functions for radius, orientation and spacing of fracture using 2-dimensional trace in field, respectively. - Determining fractal and geostatistical characteristics of fracture aperture by measuring the aperture experimentally. - Understanding experimentally the effects of the parameters of aperture distributions on the hydraulic characteristics of fracture. - Analyzing the applicability of the cubic law in the case of considering the characteristic parameters of variable aperture and derive an revised empirical equation.
2nd year (2002)	Development of a system for modelling 3-dimensional fractured media Analysis of solute transport in a single fracture with variable aperture	<ul style="list-style-type: none"> - generating 3-dimensional fractured rocks by using the parameters determined in first-year research. - Identifying the connectivity of the generated fractures and analysis of the size distribution of unfractured blocks. - Visualizing the developed modeling system by using OpenGL(the open graphic library). - Researching experimentally the effects of the parameters of variable aperture on the solute transport and the mechanism of solute transport through a single fracture with variable aperture. - Developing streamline simulation in fractures in order to save computational time.

IV RESULTS

- Development of a system for modelling 3-dimensional fractured media

Topological data and statistical distribution functions must be investigated to simulate complex and heterogeneous fractured porous media efficiently, which can be obtained from field test (bore hole survey, scan line and areal survey etc.). They involve aperture distribution, orientation, distance among fractures, matrix size and type of infilled materials. Most acceptable statistical distribution is found through forward modelling of field experiments.

Optimal distribution functions for radius, orientation and spacing of fracture are determined by using 2-dimensional trace in field, respectively. Estimation of the radius distribution are performed by the forward modeling technique which utilizes CG, SA for solution method, KS-test, CS-test for goodness-of-fit test, averaging technique for reducing noise. The distributions of orientation are classified by using self-organizing artificial neural network technique. Putting above processes together, DATAFRAC is developed.

It is crucial to know geometrical properties of fracture networks for characterizing flow networks and predicting fluid flow on them. Previous studies such as 3-dimensional continuum model and 2-dimensional discrete fracture network model did not consider heterogeneity and connectivity of fractures properly.

In this study, a new 3-dimensional discrete fracture network modeling system, SNUFRACS is developed. The reliable and efficient algorithm can be established by object-oriented programming. Using doubly linked lists, a connectivity modification of fracture networks is processed when the fracture networks change, in order that they add or merge the intersection of fractures and fracture clusters efficiently.

The developed system is composed of three modules, just input data processing, 3-dimensional visualization, and statistical analysis. Input data processing module includes options to select system size, conceptual models, statistical parameters and well information. Generated fracture networks are visualized by using 3-dimensional graphics programming interface, or OpenGL. In addition, this modeling system can perform statistical analysis for geometry

and topology of generated fracture networks.

Clusters of fractures from well are observed to analyze the connectivity of fractures. Set of clusters is defined by connecting with well, which flow can be occurred in. Space figures represented the relationship of these locations in 3D are examined to see whether the fractures are crossed or not. Figures are basically described circles or polygons. The new cipher relationship of dot products among intersected coordinates is introduced to test a across possibility, which can explain the skewed or parallel positions and reduce computing time.

This technique has the advantage over the conventional methods owing to the capability of handling conceptual model, managing connectivity information and visualizing various picture plane. This modeling system may provide an useful tool for predicting fluid flow and solute transport in fractured porous media.

- Analysis of fluid flow and solute transport in a single fracture with variable aperture

Fractures have been treated as a flat plate whose apertures are constant at all locations until recent years. Therefore, fluid flow through a fracture has been commonly described by the cubic law. Geostaticistical characteristics of apertures, however, have great effects on solute transport and two-phase flow through variable aperture fractures with or without rock matrix.

Previous studies used to measure the permeability of rock fracture by changing the stress without considering aperture distribution. Some applied the theory of contact mechanics but lack flow experiment. Also, validity of the streamline simulation method is not verified with dispersion dominant solute transport phenomena.

This study conducted experiments and numerical simulation on fluid flow in a single fracture to investigate the change of permeability and contact area. The fracture surfaces are measured with a mechanical profilometry and maps of asperity heights. And then, resulting local apertures are calculated. The local aperture distribution measured using a 3D laser profilometry is assumed as the true hydraulic aperture distribution. The contact area of rock fracture at various confining pressure is obtained by a numerical simulation, and moreover, streamline simulation has been tried to accelerate the computational speed and

free from numerical dispersion.

Experiments and numerical simulation on fluid flow in a single fracture were conducted to obtain an exponent instead of the exponent, '3', in cubic law. The exponent calculated by experiments and simulation ranges between 3.18 and 3.25. The flow rates predicted by the cubic law is overestimated at 30~35 % of those in actual cases. The adjusted exponent also increases as the coefficient of variation increases, but it decreases as anisotropy ratio increases. In case that wedge angles of a fracture are less than 10° , the effect of alternative definitions for link transmissivities are small in adjusting the exponent.

Followings are observed from the tracer tests through the fracture replicas. Dispersion is mainly affected by the values of coefficient of variation and skewness coefficient. Anisotropy plays a minor role in dispersion itself but affects breakthrough time significantly. Early breakthrough is observed when anisotropy ratio is high. Cumulative aperture distributions and normalized tracer breakthrough curves show similarity in tracer transport through fracture. It shows the possibility of estimating statistical parameters of variable aperture such as coefficient of variation and skewness coefficient. Estimation error of coefficient of variation is less than 24 % and that of skewness coefficient is less than 35 %. Also, rough estimation of anisotropy ratio can be possible from observation of breakthrough time. These results can provide useful information when various flow and transport phenomena through a fractured medium are investigated in laboratory scale, which are highlighted subject recently.

This study applied the streamline simulation for the modeling of solute transport in a single fracture and verified the streamline simulation with experimental data. It was observed that the tracer breakthrough curves from the simulation match those from the experiments well. In addition, the tracer displacement profiles from the simulation also show resemblance to those from the experiments. Transport simulation was performed by allocating different modified Peclet values along streamlines. Results were compared with the simulation results using a single representative modified Peclet value over the entire flow domain. Although streamlines actually have different modified Peclet values, its effect was found to be insignificant. Therefore, a representative modified Peclet value can be used for modeling transport through the whole streamlines in a single fracture.

This study can make it possible accurate predictions of flow rate in a single fracture and can be useful for the description of fluid flow in fractures.

V. APPLICABILITY

- Underground environments are frequently polluted with oil spill in gas station or the leakage of radioactive waste. This research can be useful to identify the route of contamination in field and to suggest efficient remediations.
- KNOC, SKEC, etc. of the country have been constructing underground storage caverns(USC) for oil and gas to secure stable energy sources. Generally, USC's being located at fractured bedrocks, the gas tightness has to be guaranteed in USC's. The developed model can be applied for testing the gas tightness and completing safe operation of the USC's.
- Atomic power generates about 20% of the total electric energy in the country. It is very important to dispose of nuclear wastes from atomic power plants safely in underground storage facilities. The developed program can identify the characteristics of the fractures around the facilities and can suggest a rapid remediation in case that waste spill breaks out.
- Many reservoirs have fractures, for example, reservoirs of CODECO in Madura, Indonesia and a new reservoir of KNOC in Vietnam. This study can be helpful to maximize the efficiency of oil recovery in fractured reservoirs by identifying the structure of fractures and predicting fluid behavior through the fracture networks.

C O N T E N T S

S U M M A R Y	11
C O N T E N T S	19
LIST OF TABLES	21
LIST OF FIGURES	22
CH. 1. OUTLINES OF THE STUDY	27
CH. 2. MAJOR ACTIVITIES OF THE STUDY	31
CH. 3. RESULTS	35
1. 3-D MODELING SYSTEM	35
2. ANALYSIS OF FLUID FLOW AND SOLUTE TRANSPORT	147
CH. 4. ACHIEVEMENTS	254
CH. 5. APPLICABILITY	257
CH. 6. EXTERNAL SCIENTIFIC TECHNIQUES	259
CH. 7. REFERENCES	260

< 목 차 >

제 출 문	1
보고서 초록	2
요 약 문	3
S U M M A R Y	11
C O N T E N T S	19
<목차>	20
<표 차례>	21
<그림 차례>	22
제 1 장 연구개발과제의 개요	27
제 2 장 국내외 기술개발 현황	31
제 3 장 연구 개발 내용 및 결과	35
제 1 절 3차원 균열 모델링 시스템	35
1. 균열 자료 수집 및 개념 모델	35
2. 균열자료의 해석	66
3. 3차원 균열시스템 구성	92
4. 시스템 개발 결과	119
제 2 절 단일 균열에서 유체유동 및 용질이동 실험	147
1. 절대유체투과율과 특성변수의 민감도 분석	147
2. 단상유체 유동 해석 실험을 통한 삼승법칙의 적용성 분석	191
3. 가변간극분포가 용질 이동 현상에 미치는 영향에 관한 실험적 연구	224
4. 단일균열의 용질 이동 모사에 적합한 유선 시뮬레이션 기법에 관한 연구	239
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	254
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	257
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	259
제 7 장 참고문헌	260

< 표 차례 >

Table 1.2.1 연차별 연구개발목표	30
Tabel 3.1.1 시추공 조사의 장단점	41
Table 3.1.2 정방향 모델링 특성	69
Table 3.1.3 SNUFRACS 입력자료	122
Table 3.1.4 Baecher 모델의 균열 입력 자료	132
Table 3.1.5 2차원 단면의 길이 분포의 통계 변수	137
Table 3.1.6 2차원 단면의 간극 분포의 통계 변수	138
Table 3.1.7 Polygon 모델의 균열 입력 자료	141
Table 3.1.8 프랙탈 모델의 균열 입력 자료	144
Table 3.2.1 균열 시료	160
Table 3.2.2 균열 간극 분포의 통계치	169
Table 3.2.3 균열시료의 초기 간극분포에 대한 통계적 특성	178
Table 3.2.4 다양한 수리해석모델에 대한 균열시료의 유동특성인자	180
Table 3.2.5 물의 점성도	183
Table 3.2.6 봉압변화에 따른 정규화된 균열의 접촉면적	187
Table 3.2.7 토크-압력 단위변환을 위한 설정변수들	199
Table 3.2.8 토크-압력 단위변환	199
Table 3.2.9 픽셀크기-균열간극 변환계수	200
Table 3.2.10 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들(봉압=69 psig)	209
Table 3.2.11 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들(봉압=124 psig)	209
Table 3.2.12 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들(봉압=165 psig)	210
Table 3.2.13 각 봉압에서 유량에 따라 계산된 지수(n)들	210
Table 3.2.14 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들	218
Table 3.2.15 조화 평균 사용 시 계산된 지수(n)	222
Table 3.2.16 기하평균 사용 시 계산된 지수(n)	222
Table 3.2.17 균열 시료의 간극분포 특성화 변수	233
Table 3.2.18 시료들의 분산도	236
Table 3.2.19 전산모사에 필요한 조건 설정	245
Table 3.2.20 변형 페클레수 분석	251

< 그림 차례 >

Fig. 1.1.1 개발기술의 활용분야	28
Fig. 3.1.1 균열이 포함된 다공성 매질의 기본적인 물성과 형태	37
Fig. 3.1.2 경사(dip angle)와 주향(strike azimuth)	41
Fig. 3.1.3 (a) 측정선 조사와 (b) 면적조사법(Bear et al., 1993)	42
Fig. 3.1.4 3차원 공간에 존재하는 원형 균열의 구성요소	46
Fig. 3.1.5 3차원 공간에서 균열방향성을 대표하는 θ 와 φ (Bear et al., 1993)	46
Fig. 3.1.6 SGS를 이용한 자료구성도	53
Fig. 3.1.7 Random path 알고리즘	53
Fig. 3.1.8 Baecher 모델을 이용한 3차원 균열망 구성과정	55
Fig. 3.1.9 Levy flights 함수	58
Fig. 3.1.10 Levy Flights 방법의 실행 결과	58
Fig. 3.1.11 프랙탈 차원 결정법	59
Fig. 3.1.12 균열의 방향성 결정	59
Fig. 3.1.15 정방향 시뮬레이션(Forward simulation) 순서도	68
Fig. 3.1.16 DATAFRAC 초기화면	69
Fig. 3.1.17 트레이스 맵 정보창	71
Fig. 3.1.18 Global system 및 색상정보 탭	72
Fig. 3.1.19 3차원상에 도시한 현장의 균열 정보	73
Fig. 3.1.20 역산 모델 설정탭	75
Fig. 3.1.21 Conjugate gradient method에 따른 현장자료의 역산결과	76
Fig. 3.1.22 현장자료 균열망(Reference Trace Map)과 Conjugate gradient method 를 통해 역산된 균열망(Simulated Trace Map)	77
Fig. 3.1.23 Simulated Annealing과정에 따른 현장자료의 역산결과	78
Fig. 3.1.24 현장자료 균열망(Reference Trace Map)과 Simulated annealing을 통해 역산된 균열망(simulated Trace Map)	79
Fig. 3.1.25 트레이스 길이의 히스토그램(All Fracture Sets)	81
Fig. 3.1.26 트레이스 방향의 히스토그램(All Fracture Sets)	82
Fig. 3.1.27 트레이스 맵(All Fracture Sets)	83
Fig. 3.1.28 뉴런 모식도	85
Fig. 3.1.29 인공 신경망 방법의 순서도	87
Fig. 3.1.30 자기 조직망의 배열	89
Fig. 3.1.31 자기조직화 신경망의 자율학습 과정	91

Fig. 3.1.32 균열 및 균열망 모델 클래스 계층도	96
Fig. 3.1.33 이중연결리스트의 리스트노드 정의(C++)	96
Fig. 3.1.34 균열시스템의 클러스터 구성도(원형 이중연결 리스트)	97
Fig. 3.1.35 클러스터에 균열노드 추가 동작	97
Fig. 3.1.36 클러스터 병합 동작	98
Fig. 3.1.37 유정과 연결된 클러스터 구성도	98
Fig. 3.1.38 원이 포함된 3차원 무한평면의 교차	101
Fig. 3.1.39 차원 공간상에 존재하는 두 개의 원과 그 수선의 발	105
Fig. 3.1.40 균열B와 교차하는 균열 A와 교선상의 상관관계	108
Fig. 3.1.41 교선과 원과의 두 개의 교점	109
Fig. 3.1.42 두 개의 원이 3차원 공간에서 교차하는 경우의 수와 반환 좌표	110
Fig. 3.1.43 두 원형균열이 만나는 교점 반환 순서도	111
Fig. 3.1.44 단층면에 교차하는 원의 두 교점(A1,A2)와 연장선과 단층면사이의 교점(P1,P2)	114
Fig. 3.1.45 원에 내접하는 다각형과 교선, 교선상의 4개의 교점	116
Fig. 3.1.46 (a) 유정과 균열이 교차하는 형태 및 교점의 좌표 (b) 유정과 원형 균열의 연결성 해석을 위한 순서도	118
Fig. 3.1.47 SNUFRACS 인터페이스(입력자료, 3차원 시각화 모듈)	121
Fig. 3.1.48 SNUFRACS 인터페이스(통계적 분석 모듈)	121
Fig. 3.1.49 유정 설치(Positioning) 정보 입력창	123
Fig. 3.1.50 균열망 입력자료 텍스트 출력창	123
Fig. 3.1.51 3차원 균열망 시각화	124
Fig. 3.1.52 유정과 연결된 균열 클러스터	124
Fig. 3.1.53 3차원 균열망 클러스터의 컬러 지정 옵션	125
Fig. 3.1.54 통계적 분석 옵션	127
Fig. 3.1.55 3차원 균열망과 x축에 수직인 평면	128
Fig. 3.1.56 2차원 균열 단면도	128
Fig. 3.1.57 3차원 균열망의 길이분포 히스토그램	129
Fig. 3.1.58 2차원 균열 단면도의 균열길이 베리오그램	129
Fig. 3.1.59 Baecher 모델의 자료 입력결과	133
Fig. 3.1.60 Baecher 모델로 구성한 3차원 균열망	134
Fig. 3.1.61 시스템 경계면과 교차하는 균열 단면도	134
Fig. 3.1.62 3차원 균열망의 길이 분포도(Baecher 모델)	135
Fig. 3.1.63 3차원 균열망의 간극 분포도(Baecher 모델)	135

Fig. 3.1.64 3차원 균열망과 y축에 수직인 평면($y=10$)	136
Fig. 3.1.65 2차원 균열 단면도($y=10$)	136
Fig. 3.1.66 2차원 균열 단면의 길이 분포도	137
Fig. 3.1.67 2차원 균열 단면의 간극 분포도	138
Fig. 3.1.68 2차원 균열 단면의 등방성 베리오그램(길이)	139
Fig. 3.1.69 2차원 균열 단면의 등방성 베리오그램(간극)	139
Fig. 3.1.70 2차원 균열 단면의 등방성 베리오그램(중심)	139
Fig. 3.1.71 Polygon 모델의 균열형태 설정	141
Fig. 3.1.72 Polygon 모델로 구성한 3차원 균열망(정육각형)	142
Fig. 3.1.73 Polygon 모델로 구성한 3차원 균열망	142
Fig. 3.1.74 Polygon 모델로 구성한 3차원 균열망 (육각형)	143
Fig. 3.1.75 Polygon 모델로 구성한 3차원 균열망	143
Fig. 3.1.76 프랙탈 Levy-Lee 모델로 구성한 3차원 균열망	144
Fig. 3.1.77 지구통계학적 모델의 균열중심 분포 자료 입력	145
Fig. 3.1.78 지구통계학적 모델로 구성한 3차원 균열망	145
Fig. 3.2.1 균열의 정의 (Hakami and Larsson, 1996)	149
Fig. 3.2.2 표면표고법 (Lespinasse와 Sausse, 2000)	149
Fig. 3.2.3 주입법 (Hakami and Larsson, 1996)	150
Fig. 3.2.4 구조법 (Yeo, 1997)	150
Fig. 3.2.5 균열분포에 대한 공간상관관계	152
Fig. 3.2.6 Hertzian 접촉 이론 (Lespinasse and Sausse, 2000)	156
Fig. 3.2.7 3차원 레이저 측정기 (배기윤, 1999)	158
Fig. 3.2.8 봉압 변화에 따른 유체투과율 측정을 위한 장치	160
Fig. 3.2.9 균열 시료 준비	161
Fig. 3.2.10 균열 간극 결정 과정	163
Fig. 3.2.11 균열 간극 계산 프로그램	163
Fig. 3.2.12 대칭 썩기의 개념 모델	167
Fig. 3.2.13 최적 접촉지도 조사를 위한 흐름도	167
Fig. 3.2.14 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S1)	170
Fig. 3.2.15 균열면의 평면 명암도(균열시료 S1)	170
Fig. 3.2.16 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S2)	171
Fig. 3.2.17 균열면의 평면 명암도(균열시료 S2)	171
Fig. 3.2.18 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S3)	172
Fig. 3.2.19 균열면의 평면 명암도(균열시료 S3)	172

Fig. 3.2.20 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S4)	173
Fig. 3.2.21 균열면의 평면 명암도(균열시료 S4)	173
Fig. 3.2.22 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S5)	174
Fig. 3.2.23 균열면의 평면 명암도(균열시료 S5)	174
Fig. 3.2.24 균열시료의 간극분포 히스토그램	175
Fig. 3.2.25 초기 균열 간극 분포의 방향성 배리오그램	178
Fig. 3.2.26 유체투과율 vs. 봉압(Gangi(1978) 수리해석모델과 비교)	180
Fig. 3.2.27 유체투과율 vs. 봉압(Gale(1982) 수리해석모델과 비교)	181
Fig. 3.2.28 유체투과율 vs. 봉압(Swan(1983) 수리해석모델과 비교)	181
Fig. 3.2.29 유체투과율 vs. 봉압(30 °C에서)	183
Fig. 3.2.30 유체투과율 vs. 봉압(60 °C에서)	184
Fig. 3.2.31 유체투과율 vs. 봉압(90 °C에서)	184
Fig. 3.2.32 온도변화에 따른 균열시료의 유체투과율 vs. 봉압	185
Fig. 3.2.33 봉압 vs. 균열면의 정규화된 접촉면적	187
Fig. 3.2.34 봉압 vs. 정규화된 유체투과율	188
Fig. 3.2.35 봉압 vs. 정규화된 균열접촉면적	188
Fig. 3.2.36 봉압 vs. 정규화된 유체투과율	189
Fig. 3.2.37 봉압 vs. 정규화된 균열접촉면적	189
Fig. 3.2.38 실험장치 모식도	194
Fig. 3.2.39 실리콘 고무와 본다글라스를 이용한 암석균열복제판 제작 과정	195
Fig. 3.2.40 균열복제판 고정 및 테스트 셀 구성	197
Fig. 3.2.41 픽셀값-균열간극크기 사이의 변환계수를 찾기 위한 실험 장치	199
Fig. 3.2.42 픽셀값과 균열간극의 관계	200
Fig. 3.2.43 간극의 기하학적 형상을 무시한 개념 모델	205
Fig. 3.2.44 간극의 기하학적 형상을 고려한 개념 모델	205
Fig. 3.2.45 수치해석 순서도	205
Fig. 3.2.46 F1 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상	207
Fig. 3.2.47 F2 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상	207
Fig. 3.2.48 F3 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상	207
Fig. 3.2.49 F3 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상	208
Fig. 3.2.50 F5 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상	208
Fig. 3.2.51 F1 균열간극 분포 히스토그램	211
Fig. 3.2.52 F2 균열간극 분포 히스토그램	212
Fig. 3.2.53 F3 균열간극 분포 히스토그램	213

Fig. 3.2.54 F4 균열간극 분포 히스토그램	214
Fig. 3.2.55 F5 균열간극 분포 히스토그램	215
Fig. 3.2.56 봉압과 총유량의 관계	217
Fig. 3.2.57 관측된 유량과 삼승법칙으로 추정된 유량	217
Fig. 3.2.58 상관길이와 유량차의 관계	218
Fig. 3.2.59 상관길이와 지수(n)의 관계	219
Fig. 3.2.60 변동계수와 유량차의 관계	221
Fig. 3.2.61 변동계수와 지수(n)의 관계	221
Fig. 3.2.62 용질 이동 실험장치 모식도	227
Fig. 3.2.63 균열 복제판 고정장치 및 테스트 셀 (a) 평면도 (b) AA'단면도	227
Fig. 3.2.64 시료들의 균열간극분포 관측 영상	230
Fig. 3.2.65 시료들의 균열간극분포 재구성 영상(단계표의 단위는 μm)	231
Fig. 3.2.66 누적 간극 분포 (선으로 표현) 와 히스토그램	232
Fig. 3.2.67 Ogata와 Banks 방정식을 이용한 용질이동곡선의 적합(fitting) 결과 1~5: FS1~5	235
Fig. 3.2.68 시간 변화에 따른 유동 전면(flowing front) 이미지	236
Fig. 3.2.69 누적 간극 분포와 정규화된 용질 도달 곡선 비교	237
Fig. 3.2.70 전산모사를 통해 추적된 유선 분포들	245
Fig. 3.2.71 계산된 TOF 분포	247
Fig. 3.2.72 시간에 따른 용질 이동 양상	248
Fig. 3.2.73 변형 페클레수 변화에 따른 용질도달곡선	249
Fig. 3.2.74 (a) 가변 변형 페클레수 분포 히스토그램, (b) 가변 변형 페클레수와 대 표 변형 페클레수의 선택에 따른 용질 도달 곡선 비교	252

제 1 장 연구개발과제의 개요

균열 특성화 기법 개발을 통한 지하유체 거동 해석 기술은 자원, 환경, 원자력 분야에 적용할 수 있는 기술로서, 한계 저류층에서의 탄화수소 에너지 생산, 지하 결정 암반에 건설되는 에너지 지하저장시설의 운영, 핵폐기물 지하처리 시설의 입지선정, 대수층 주변의 지하수 오염 해석 등에 광범위하게 이용되는 핵심적 기술이다. 이 연구는 다음과 같은 요소 기술들로 구성되어 있다.

- 가변 간극 균열에서의 단상 및 이상 유동과 용질 이동 예측을 위한 실험적 해석 기술
- 균열과 암반간의 상호작용을 고려한 단상 및 이상 유체 유동 해석을 위한 실험 및 전산 모델링 기술
- 지하 암반 매질 내 용질 이동 예측 기술
- 현장 규모의 지하 균열 암반을 3차원 분리 균열 모델로 특성화하는 기술

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 경제·사회·기술적 중요성

가. 기술적 측면

(1) 기술의 기반성

이 기술은 전세계적으로 중요성이 크게 대두되고 있는 에너지, 방재, 환경, 원자력 관련 분야(Fig. 1.1.1 참조)에 활용 가능한 핵심 기술로서, 균열 저류층에서의 유전 개발, 에너지 지하저장 비축시설, 지하수의 오염 방지, 핵폐기물 저장시설 등 대규모 산업시설에 적용 가능한 기반 기술이다. 구체적으로 살펴보면, 첫째, 대륙붕 천연가스 개발로 관심이 증가되고 있는 자원개발 분야에서는 균열 저류층에서 석유 또는 가스의 회수율을 높이기 위한 2, 3차 증진회수법 수행에서 다상 유체의 거동을 정확히 예측함으로써 생산을 최적화할 수 있다. 둘째, 지하 방재 분야에서는 세계적인 규모로 다수 설치되어 있는 지하 유류저장 기지 주변의 지하유체 거동 해석을 통하여 저장기지의 효율적 운영과 수리공학적 안정성 확보에 큰 도움을 줄 수 있다. 셋째, 환경 분야에서는 폐기물 매립지, 주유소, 저장탱크 등에서 누출된 오염

물질(석유류 등)이 지하의 균열 암반에서 거동하는 양상을 파악하는 예측기법과 오염된 균열 대수층의 정화기법에 기초적인 방향을 제시할 수 있다. 넷째, 방사능 폐기물 매립지 선정과 관련하여 논란이 계속되고 있는 원자력 분야에서는 지하 심부의 암반 균열 내로 누출된 방사능 폐기물의 이동경로와 이동시간 등을 미리 예측하여 안전한 지하 방사선 폐기물 매립지 선정에 활용할 수 있다.

(2) 기술의 핵심성

균열 특성화 기법을 통한 지하유체 거동 해석 기술은 지구통계학 및 추계론적 기법을 적용하여 한정된 자료로부터 지하 균열 암반을 3차원 이산 균열 모델로 특성화함으로써 기존의 균열과 암반의 물리적 성질을 평균화시킨 연속체 개념 모델의 한계성을 극복할 수 있다. 또한, 균열 내 유체거동과 다공성 매질 내 유체거동을 모두 고려할 수 있는 유동 해석을 수행한다. 모델의 정확성 및 대표성을 위하여 세계적으로도 아직 연구가 미완성 분야인 가변 간극 균열에서 단상유동, 이상유동 및 용질이동의 실험실 시험을 수행한다. 수많은 균열을 내포하는 지하 암반 모델의 경우에서 발생할 수 있는 수치분산 문제 및 계산속도의 한계를 극복할 수 있는 유선 시뮬레이션 기술을 개발한다. 개발된 기술들을 모듈화하여 통합하고 이를 통해 사용자 중심의 3차원 지하 균열 암반에서의 지하유체 거동 해석 시스템을 구축한다.

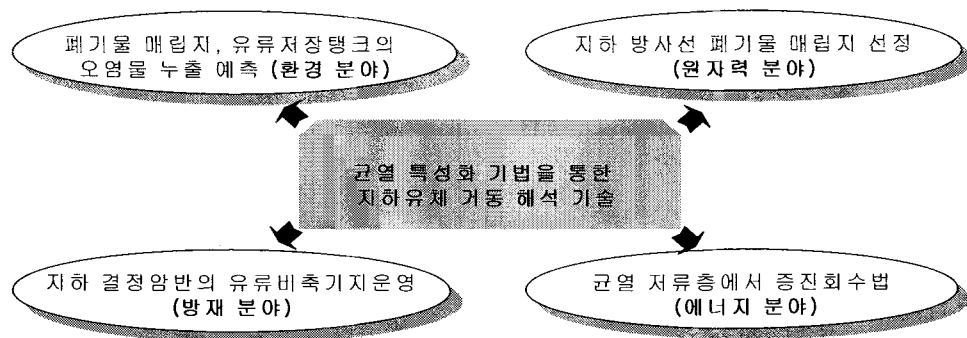


Fig. 1.1.1 개발기술의 활용분야

나. 경제, 산업적 측면

개발된 기술은 다양한 분야의 대규모 산업시설에 적용이 가능하다. 예를 들어, 환경 분야에서는 지하매질을 통한 오염 정도를 정확히 파악함으로써 환경 부담금의 책정 및 효과적 오염 정화 기법을 제시할 수 있으며, 원자력 분야에서는 지하 암반

을 통한 방사성 물질의 이동을 정확하게 모사함으로써 누출 영향도 평가와 정화 기술 선택의 방향을 제시할 수 있다. 그리고, 에너지 분야에서도 석유 증진 회수시 생산량 예측과 생산계획 수립의 평가자료가 될 수 있다. 언급한 분야의 국내·외 시장규모(·전세계 토양 및 지하수 오염 정화 기술 시장 규모: 94년 143억불에서 98년 195억불로 증가, ·핵폐기물 매립산업: 한국전력이 99년 핵폐기물 처분 및 관리비용으로 3조 1천억 원 투자, ·석유 개발 산업: 현재 국내 전체 기업의 해외유전 진출 사업은 21개국 53개 사업이고 총 투자비는 2000년 6월까지 약 30억불을 고려해 볼 때, 제안된 기술이 개발될 경우 경제적 파급력이 클 뿐만 아니라 외국 기술 도입비로 지출되는 외화를 크게 절감할 수 있을 것이다.

다. 사회, 문화적 측면

이 기술의 적용분야는 앞에서 기술한 바와 같이 매우 다양하다. 특히 사회적으로 문제가 되고 있는 유류 저장탱크 주변의 환경 오염 문제나 방사성 폐기물 매립지 선정 문제에 대하여 효과적인 방안을 제시함으로써, 환경 오염에 대한 국민의 불안감을 해소하는데 큰 역할을 할 수 있다. 또한 이 기술의 개발은 현재까지 국내에서 연구되어 온 자원, 환경분야의 모든 기술력이 집적된 것으로 이 분야에 있어 선진국과 대등한 기술력을 갖게 되는 계기가 된다.

제 2 절 연구의 범위

이 연구는 2년동안 3차원 균열매질 모델링 시스템을 개발하는 것으로 세부적인 연구개발 목표 및 내용은 Table 1.2.1에 요약하였다.

Table 1.2.1 연차별 연구개발목표

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (2001년)	3차원 균열 모델링 기법 연구 가변간극 단일 균열에서의 유동 해석 실험	(1) 현장에서 수집한 2차원 균열 추적자료로부터 3차원 균열 반경, 공간적 분포 및 방향성을 결정하는 최적의 분포 함수 (2) 균열의 가변 간극분포 측정 실험을 통한 프랙탈 및 지구통계학적 균열 간극 분포 특성 파악 (3) 가변간극 균열의 수리학적 특성에 미치는 설정 변수의 영향에 대한 실험실 규모 실험 (4) 가변간극 특성화 변수에 따른 삼승법칙의 적용성에 대한 실험적 분석 및 기존의 혹은 개선된 경험식 유도
2차년도 (2002년)	3차원 균열 매질 모델링 시스템 개발 가변간극 단일 균열에서의 용질 이동 해석	(5) 1차년도에서 결정한 인자를 사용하여 결정론적, 추계론적 방법으로 3차원 균열 매질 생성 (6) 생성된 균열의 연결성 분석 및 무균열 암반 블록의 크기 분포 분석 (7) OpenGL을 사용하여 3차원 모델링의 가시화 (8) 가변간극 균열의 용질이동 특성에 미치는 간극 특성화 변수의 영향에 대한 실험실 규모 실험 및 실험자료 해석을 통한 가변 단일 균열에서의 용질이동 주 메카니즘 분석 (9) 계산속도 향상을 위한 유선 시뮬레이션 (stream-line simulation) 기법

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외 기술개발 현황

3차원 균열모델링 연구는 지구통계학 및 추계론적 기법을 적용하여 한정된 자료로부터 지하 균열 압반을 3차원 이산 균열 모델로 특성화하고, 균열 내 유체 유동과 다공성 매질 내 유체 유동을 모두 고려할 수 있는 유동 해석을 수행한다. 이러한 연구는 국내·외에서 최근에 시도되고 신기술 분야이다.

해외의 경우는 환경오염 복원 및 방지기술 개발에 집중적 지원으로 지난 10년간 일본, 미국, 스웨덴, 스페인, 스위스, 영국 등이 합작하여 균열망 형성 및 단상유동 모델링의 단위 분야에만도 약 1300만불이 투자되어 활발한 연구가 진행되고 있으며, 향후 균열과 압반의 상호작용을 고려한 용질이동 및 다상유동 예측 기술에 대대적인 투자가 계획이 구체화되고 있다. 1995년 이후 Cornell Fracture Group, Schlumberger Cambridge Research, Schlumberger Dowell 등에서 3차원 경계요소법을 이용한 균열 생성 및 전파 모델링에 관한 연구가 진행되고 있으며, 특히 Cornell Fracture Group에서는 균열면을 원판으로 모사하여 균열면의 정확한 기술을 위한 거칠기에 관한 연구가 수행되고 있는 단계이다. Lawrence Berkeley 국립연구소와 Idaho 국립공학연구소에서는 비포화대에서의 유체 및 오염원의 이동에 대한 특성화 연구가 이루어지고 있다. 2000년도에 Keele 대학에서는 3차원 균열시스템 및 유체유동에 관한 연구가 제안되었다.

이 분야의 연구에 선두를 달리고 있는 미국 Golder사도 균열 생성 프로그램인 Fracman의 개발을 마치고 미흡한 수준을 보강하고자 해당 업계와 컨소시엄을 형성하여 FRED라는 새로운 프로그램 개발에 착수하였다. 지난 해 말에 균열자료를 분석하여 균열망을 형성하는 단계까지 완료하고, 유동 해석 모듈 개발을 위한 추가계획을 세워 놓은 상태이다. Fracman과 더불어 3차원 균열망을 생성하고 유동을 해석하는 프로그램은 AEA사의 Avizier, Nammu, NAPSAC과 CONNECTFLOW등의 프로그램이 있다. 이 프로그램들은 암석과 토양 등에서 발생하는 오염물의 거동과 이동양상을 모사함에 있어서 분리균열모델을 사용하였으며, 그 형태는 주로 4각형 중심의 다각형이다. 동양에서는 일본 JAPEX가 일본 Yufutsu 균열지역자료를 이용하여, 3차원 원형 분리균열모델을 개발하여 압력거동을 분석한 예가 있다 (Tamagawa et al, 2002). 이 JAPEX 모델은 순차지표시물레이션(Sequential Indicator Simulation, SIS)을 이용하여 지구통계학적 접근법의 타당성을 검증하고 있다. 균열이 포함된 다공성 균열매질을 통한 유체거동을 해석하기 위해서는 다공

성 매질과 균열간이 물질이동 기술에 관한 연구가 반드시 필요하다. 이를 위해서 실제 균열매질을 기존 연구결과와 유사하게 유추하기 위해 이원공극모델로 변환시키는 기술과 2차원 균열이 포함된 매질을 self-adaptive meshing 과정을 통해 격자화하는 기술이 활발히 연구되고 있으나, 3차원 다공성 균열매질에 적용한 사례는 아직 보고되지 않고 있다(Castaing et al, 2002; Bourbiaux et al, 1999; Huyakorn et al, 1984).

가변간극을 가지는 단일균열을 통한 유체거동실험은 간극분포의 특징을 분석하는 것이 중요하며, 이를 효과적으로 분석하기 위해서 외국에서는 빛을 이용하여 간극 분포를 측정하는 기술이 개발되었다(Detwiler et al., 1999). 에폭시를 가공하여 성형한 균열면의 경우 빛의 흡수와 굴절로 인해 간극값에 많은 오차를 가질수 있기 때문에 Isakov 등[2001]은 유리질의 합성수지를 이용하여 균열판을 성형하는 기술을 개발하였다. 유리질의 경우 에폭시에 비해 강화될 때 발열량이 많아 유리질 재료가 쉽게 변형되므로, 에폭시에 비해 성형이 어렵다. 그렇지만, 유리의 경우 빛의 굴절과 흡수에 관한 영향이 적으며, 산처리등으로 인해 가공표면에 여러 가지 균열의 특징을 제공할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

제 2 절 국내 기술개발 현황

선진국의 활발한 연구 상황에 비해 국내에서는 아직까지 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 암반 지하수 유동 해석을 위한 균열망 모델에 대하여 서울대학교, 한국지질자원연구원, 한국원자력연구소, 연세대학교, 한양대학교 등에서 연구가 수행되어져 왔다. 90년대에 들어 전술한 연구소와 대학을 중심으로 균열에서의 유체 유동에 대한 연구가 활발히 수행되었다(• 서울대: 파쇄 대수층에서 수리전도도의 불균질성과 이방성을 확률론적 기법을 이용하여 추정, • 연세대: 중금속 오염거동 규명을 위한 균열망 수리 시스템 연구, • 한국자원연구소: 균열암반 내 지하수 유동 및 흡착특성 연구, • 한국원자력연구소: 암반지하수유동 해석을 위한 균열망 모델 개발 등). 모델링의 기초가 되는 균열 간극의 통계적 특성이 지하 유체 거동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구가 서울대학교를 중심으로 활발히 이루어져 온 반면, 다른 기관들은 실제 균열을 2차원 또는 채널모델 등으로 단순화시켜 지하유체 거동을 전산 해석하거나, 외국의 3차원 분리균열망 모델링 상용프로그램을 이용하여 관련 연구를 수행하였다.

제 3 절 현 기술상태의 취약성

산업발전에 따른 에너지의 사용이 증가함에 따라, 이로 인해 발생하는 환경오염 문제를 억제하기 위해서 세계 각국은 오염방지법 등의 환경법을 제정하여 지하수 수질정화 및 수질 오염 방지를 위해서 노력하고 있다. 또한 구미 선진국이나 일본, 중국 등은 이러한 법제정시 세부사항까지 규정하고 있는 실정이다. 우리 나라의 경우 지금까지 산업시설의 무분별한 개발 및 확충에만 급급하여 환경오염 문제나 이와 관련된 정화 및 치유 기술개발에 소극적이었다. 그러나 최근 지하수 개발법이나 오염규제에 관한 법률을 제정 및 강화함으로써 지하수와 지표수의 관리에 역점을 두기 시작했다. 이와같이 수자원의 중요성이 강조되기 시작했음에도 불구하고 아직까지 지하환경에 부정적인 영향을 초래할 수 있는 오염원으로부터 누출물 발생시 유용한 시설물이나 지하환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 관리기법 연구분야는 극히 취약한 상황이다.

또한 지난 60여 년간 퇴적암과 같이 비교적 균질한 지하 암반에서의 지하유체 거동에 관한 연구는 연속체 개념을 이용하여 수없이 이루어져 왔다. 그러나, 이러한 연구는 에너지, 자원분야에서 적용하기에는 한계가 있다. 기존에 개발된 균열 구성 및 지하유체 거동기법은 3차원 연속체 모델 또는 2차원 분리 균열 모델을 이용한다. 3차원 연속체 모델은 균열의 밀도가 높은 경우 균열 매질을 등가 유체투과율을 가지는 다공성 매질로 모사하거나, 이원 공극 모델을 사용하여 규칙적으로 연결된 균열망과 그 사이에 다공성 매질을 두어 다공성 매질은 유체가 저장되는 곳으로, 균열은 유체가 흐르는 통로로 나타내는 방법이다. 그러나 균열이 존재하는 환경에서는 균열을 통한 유체이동이 지배적이기 때문에 균열의 상호 연결성이 매우 중요하다. 실제에 있어서도 유체이동에 참여하는 균열은 전체 균열의 30% 이하이며 이러한 현상은 위의 방법으로는 모사할 수 없다. 또한, 2차원 분리 균열 모델의 경우, 관측된 유체 유동을 보장하는 시스템 구성을 하지 못하기 때문에 그 결과를 신뢰할 수 없다. 따라서, 균열 특성화 기법을 통한 지하유체 거동 해석 기술 개발이 절실히 요구된다.

제 4 절 앞으로의 전망

균열 특성화 기법을 통한 지하유체 거동 해석 기술은 국내외에서 최근에 시도되고 신기술 분야이다. 국내의 경우 지난 5년간 이 분야에 대한 투자 규모는 약 10억 원 정도이며 여러 기관에 분산투자 되어 집중적인 연구가 이루어지지 못하였으나, 해외의 경우 환경오염 복원 및 방지기술 개발에 집중적 지원으로 지난 10년간 일본, 미국, 스웨덴, 스페인, 스위스, 영국 등이 합작하여 균열망 형성 및 단상유동 모델링의 단위 연구분야에만도 약 1300만불 규모의 연구가 진행되어 왔고 향후 균열과 암반의 상호작용을 고려한 용질이동 및 다상유동 예측 기술에 대대적인 투자가 계획되어 있다. 이러한 미흡한 투자로 인하여 현재 국내의 선진국 대비 기술은 답보상태이다. 그러나 향후 5년간 지속적인 투자가 이루어진다면 당 연구실이 보유하고 있는 세계적인 수준의 실험 기술을 활용하여 코아분석 등 실험실 규모의 연구를 통한 연구와 이를 바탕으로 한 현장 규모의 전산모델 연구로부터 균열을 특성화함으로써 2~3년 안에 3차원 지하 균열 암반의 모델링 기술을 개발할 수 있다. 또한, 지하 균열 암반의 등가모델을 개발하고 지구통계학적 기법을 사용하여 균열의 특성과 대상체의 규모에 따른 지하유체 거동 양상을 연구함으로써 5년 내에 지하 균열 암반에서의 지하유체 거동 모델링 기술을 선진국과 대등한 수준으로 확보할 수 있다. 특히, 현장 균열 간극 분포의 프랙탈 특성과 대규모 균열 매질이 스미기 상태에 있다는 최신 이론을 적극 반영하고 모델의 검증 및 수정 보완 단계에서 기존에 획득된 국내 균열 대수층의 추적자 시험 현장 자료 및 외국의 상용 데이터베이스를 적극 활용한다면 보다 현장 지향적인 모델을 개발할 수 있다. 개발된 자주적 기술은 국내 대륙붕 천연가스 개발과 핵폐기물 저장 부지 선정, 지하오염 해석 및 제거 기법 개발 등 에너지, 자원 및 환경분야에서 폭넓게 사용될 수 있다.

제 3 장 연구 개발 내용 및 결과

제 1 절 3차원 균열 모델링 시스템

1. 균열 자료 수집 및 개념 모델

지하매질은 다공성 매질과 균열로 대표되는 불연속면, 불규칙적으로 분포하는 버그(vug)등으로 인해 매우 복잡하고 불균질하다. 이러한 지하매질을 효과적으로 모델링하기 위해서는 다양한 정보와 과학적으로 타당한 예측이 선행되어야 한다. 이를 위해 여기서는 3차원 균열자료를 수집하고 분석하여 적절한 분포함수를 예측하는 기법을 설명한다. 마지막으로 분포함수와 균열면의 특징을 이용한 개념모델을 제시한다.

가. 3차원 모델링을 위한 균열자료 수집

(1) 균열의 기본 인자와 물성

3차원 다공성 매질내에 존재하는 불연속면은 크게 균열(fracture), 단층면(fault), 절리(joint)등으로 나눌 수 있다. 그러나, 이 용어들은 크기와 생성요인, 주변의 상황등으로 구분되는 것으로 전산 모델링에서는 크기와 형태의 차이로 볼 수 있다. 여기서는 불연속면을 균열과 같은 개념으로 설명하며, 다공성 매질내 형태적 변형활동이 없는 기계적으로 깨어진 지형 혹은 갈라진 형태로 정의하겠다. 균열이 포함된 다공성 매질의 기본적인 구성과 형태는 Fig. 3.1.1과 같다. 모델링을 위해서 기본적으로 측정하여야할 물성은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 균열간의 간격과 빈도
- 균열의 방향성(경사방향/경사각)
- 균열면의 거칠기
- 균열간극
- 균열간의 연결성 및 균열군의 크기
- 균열의 크기 및 형태
- 균열로 구분되는 블록의 크기
- 균열내 충전물질

여기서, 균열의 간극과 균열면의 거칠기는 유체 이동현상을 특성화하는데 매우 중요한 요소로 작용할 수 있으며, 균열 간극과 빈도, 연결성, 블록의 크기, 방향성은 균열의 형태학적 모사에 중요한 인자로 작용한다. 균열의 간격과 빈도, 블록의 크기는 균열의 밀도와 분포함수로 특성화 할 수 있으며, 균열군의 크기는 균열이 연결되어 있는 클러스터의 개수로 균열군을 구분할 수 있다. 즉 균열 사이에 연결되어 있는 균열 더미의 개수가 균열군의 개수이다. 이러한 물성을 조사하는 방법은 크게 지하매질내 시추를 통한 시추공 조사(borehole survey)와 지표혹은 노두에 노출된 균열을 조사하는 측정선 조사(scanline survey)와 면적조사(areal survey)로 구분한다.

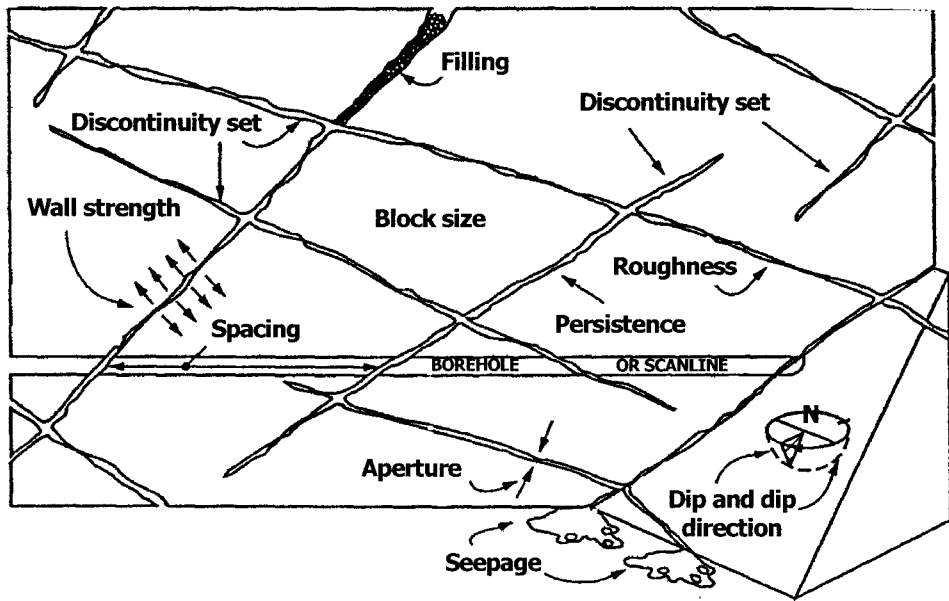


Fig. 3.1.1 균열이 포함된 다공성 매질의 기본적인 물성과 형태
(Harrison and Hudson, 1997)

(가) 시추공 조사(borehole survey)

Fig. 3.1.1에서처럼 시추를 통해 시추공이 존재한다. 이 시추공내로 관찰도구(카메라 혹은 내시경등)나 로깅을 통해 시추공 주변의 균열의 형태, 균열의 존재, 방향과 위치, 밀도, 다공성매질의 공극률, 함수율등을 측정한다. 또한, 시추를 통해 지하매질내 코어를 획득할 수 있는 장점이 있다. 이 코어를 이용하여 전단응력, 변형정도, 충전물질, 공극률, 유체투과율등을 실험실규모로 측정할 수 있다.

시추공조사는 현장에서 로깅을 통해 유체거동과 관련된 함수율, 공극률, 전기비저항 등을 측정할 수 있으며, 코어를 통한 실험실 규모의 실험도 가능하다는 장점이 있다. 반면 1차원 조사로 인해 전체 균열길이의 측정이 불가능하며, 코어자료 획득시 오차를 발생시킬 수 있는 여러 가지 인자를 내포하고 있다는 단점이 있다. 코어가 지상으로 추출시 회전할 가능성이 있으며, 충전 물질이 다른 물질과 혼합되거나 시추이수로 인해 오염될 수도 있다. 이를 정리한 것이 Table 3.1.1이다.

(나) 측정선 조사(scanline survey)

측정선 조사는 시추공을 통해 코어를 획득하는 방법과 달리, 노두에 노출된 균열에 대해 일정한 측정선(scanline)을 따라서 균열의 간격, 밀도, 균열군의 존재, 충전물질, 분포형태를 측정하는 1차원 방법이다. 코어 획득이 불가능하며 측정 기준 역시 확립되어 있지 않다. 측정선 조사를 통해 획득할 수 있는 주요 자료와 정의는 다음과 같다.

① 교차선 간격(intersection distance)

측정선을 따라 균열이 교차하는 교차점간의 간격이다.

② 균열의 방향성(orientation)

경사각(dip angle)과 주향(strike azimuth)은 실버 콤파스로 측정이 가능하다. 경사각과 주향으로 대표되는 균열의 방향성은 하나의 균열마다 다양한 값을 가진다. 이것의 형태와 정의는 Fig. 3.1.2와 같다.

경사(dip 혹은 plunge)은 균열이 수평면과 이루는 각으로 균열면을 가로지르는 선분(Fig. 3.1.2에서 Dip으로 표시한 것으로 $\overline{P_A P_B}$ 와 수직인 선분)과 수평면이 이루는 각이다. 90도와 -90도 사이의 크기를 가지며 아래쪽 방향을 +방향으로 가정한다.

주향(Trend 혹은 strike azimuth)은 수평면의 북쪽에서 수평면을 따라 시계방향으로 균열과 만나는 각도이다. 0도와 360도 사이의 각을 가진다. 균열의 방향성은 주향/경사로 표시하며 예를 들어 260/30은 균열면이 수평면과 30도의 경사를 이루며, 수평면의 북쪽에서 시계방향으로 260도에 위치하고 있음을 의미한다.

③ 반-트레이스 길이(Semi-trace length)

교차점에서 측정선 위쪽의 균열끝까지의 길이이다. 반-트레이스 길이는 측정선 위쪽부분만을 측정영역으로 간주하기 때문에 측정선 아래 부분의 균열길이는 무시하기 때문에 실제 균열의 트레이스와는 다른 개념이다(Fig. 3.1.3(a)). 측정선과 만나지 않는 균열은 무시된다.

④ 종결 변수(termination)

측정선에 위치한 교차점 중 다른 균열과 교차하는 균열의 개수에 대한 백분율로 다음과 같이 정의한다.

$$T_i = \frac{100N_i}{N_i + N_a + N_o} \quad (3.1.1)$$

여기서, N_i 는 반-트레이스의 종결점이 측정영역에 있는 전체 균열의 개수이며, N_a 는 종결점이 다른 균열선상에 있는 균열의 개수, N_o 는 소멸되었거나 모호한 나머지 균열의 개수이다.

⑤ 거칠기(roughness)

JRC(Joint Roughness Coefficient)와 프랙탈 차원으로 대표할 수 있는 변수이다. 일반적으로 현장에서는 JRC 차트와 균열면의 거칠기를 대비하여 값을 결정한다.

⑥ 표면 굴곡도(curvature)

과장값이 100mm 이상인 표면의 불규칙도를 의미한다.

⑦ 암석평가 자료

균열 모델링과는 큰 연관관계는 없으나, 균열이 포함된 코어의 고결도, 강도등과 관련된 RQD(Rock Quality Designation)와 Q-system 등이 있다.

(다) 면적 조사(areal survey)

1차원 조사방법에서 측정하는 방법과 달리 노두 표면에 일정한 측정영역을 설정하여 균열의 물성을 측정하는 방법이다(Fig. 3.1.3(b)). 이 방법을 통해서 지하매질 내의 2차원 측정은 불가능하지만 지표나 절리면에 노출된 균열의 길이를 측정할 수 있는 장점이 있다. 측정선 조사방법으로 결정할 수 있는 모든 인자를 획득할 수 있으며, 반-트레이스 길이보다는 어느 정도 보정된 트레이스를 획득할 수 있는 장점이 있다. 측정 영역을 세분화하여 균열 중심의 분포와 개수에 대한 정보 획득도 가능하다. 측정 영역은 일반적으로 20~100개 정도의 균열이 포함된 정도가 일반적이다.

Tabel 3.1.1 시추공 조사의 장단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> · 코어 획득 · 로깅을 통한 현장자료 획득 · 지하 매질 내 균열 관련 정보 직접 획득 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 추출시 코어회전 가능성 · 작은 코어로 전체 균열망 대표 가능성 · 충전물질의 혼합 및 이수로 인한 오염 · 2차원자료(균열 길이 및 블록 크기) 획득 불가능

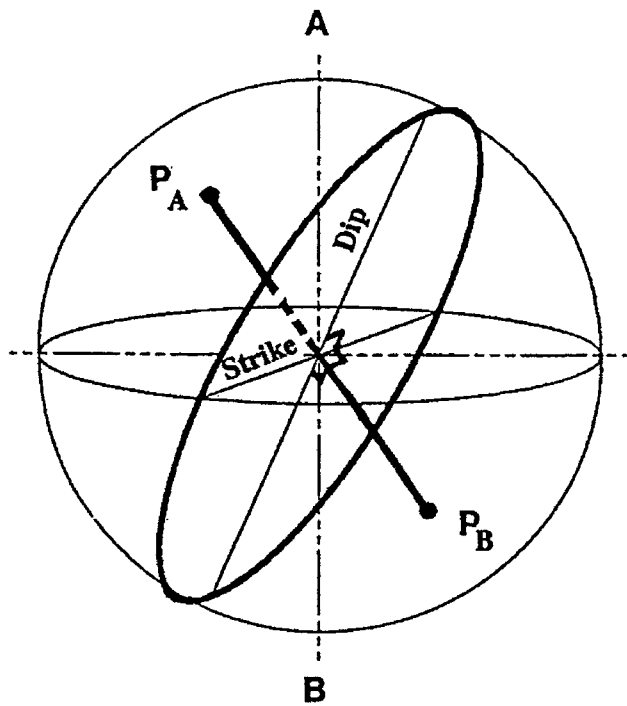
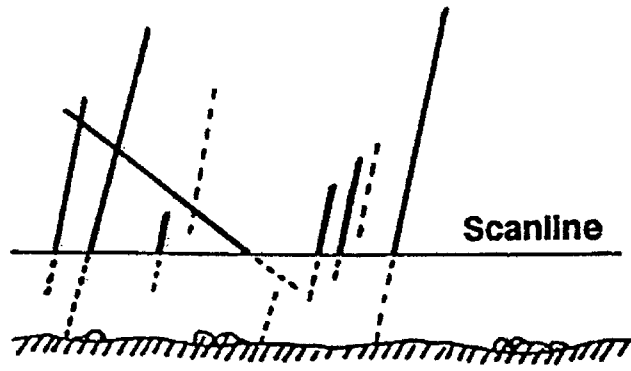
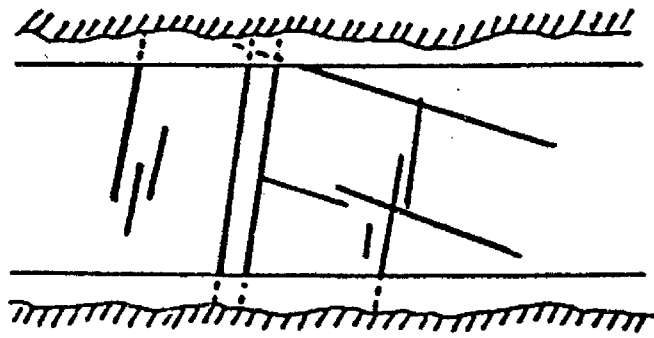


Fig. 3.1.2 경사(dip angle)와 주향(strike azimuth)



(a)



(b)

Fig. 3.1.3 (a) 측정선 조사와 (b) 면적조사법(Bear et al., 1993)

나. 3차원 모델링 요소

3차원 기하학적 균열 모델링을 위한 통계적 균열자료는 이미 설명한 현장 측정 균열자료중에서 균열의 길이, 균열밀도, 균열방향성, 균열군 등이 있다. Fig. 3.1.4는 3차원 공간에 존재하는 균열의 형태를 원으로 도시한 것이다. Fig. 3.1.4에서와 같이 원형 균열의 경우 원의 중심은 균열의 중심을 의미하며, 원의 반지름은 균열의 반-트레이스를 의미한다. 원이 포함된 무한평면의 법선벡터(normal vector)는 균열의 방향성 자료로 나타난다.

(1) 균열의 중심

균열 중심은 노면에 노출된 트레이스의 중점의 좌표로 생각할 수 있다. 3차원 균열중심은 (x, y, z) 의 값을 가지며, 각각은 균등분포에서 무작위로 선정한다. 이렇게 무작위로 생성한 균열의 균열군이 시스템의 4면과 연결되어 유체거동이 가능하게 되는 스며들문턱(percolation threshold) 시점에서는 균열을 통한 유체경로가 일정한 프랙탈 차원을 지닌다고 알려져 있다.

SNUFRACS에서는 유동시점을 유정으로 가정하였기 때문에 시스템과 연계된 균열군이 아니라, 유정의 유동영역에 직접 연결된 균열군을 주 대상으로 한다.

(2) 균열의 길이

현장자료에서 획득되는 균열 길이의 분포는 로그-정규분포가 일반적이다. Samaniego(1985)는 균열의 길이 및 2차원에서 발견되는 트레이스의 분포가 음지수 분포이며 균열간격과 간극의 구성은 지질학적으로 로그정규분포 양상을 띄며, 추계학적 방법에서 역시 로그정규분포를 이용한 사례가 있다고 설명하고 있다. 여러 균열길이 연구에서 로그정규분포를 따르는 균열길이 분포 및 간극분포를 사용한 예들 역시 많이 있다. 최근에는 현장자료와 실험실 실험을 통해서 멱급수 길이분포가 널리 사용된다(Davy et al., 1990; Bour and Davy, 1997; de Dreuzy et al., 2001; Bonnet et al., 2001).

(3) 균열밀도

균열밀도는 현장조사에서 획득한 균열의 개수 또는 길이에 관한 함수이다. 균열밀도는 현장에서는 일정한 하나의 값만을 가지며, 이는 모델링에서 균열생성이 중단

되는 시점이다. 균열밀도는 크게 균열의 개수, 균열의 길이, 균열의 면적에 관한 다음의 3가지 함수로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{N_f}{L_s} \\ d_2 &= \frac{\sum L_f}{A_A} \\ d_3 &= \frac{\sum A_f}{V_{sys}} \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

여기서, N_f 는 측정선을 통과하는 균열의 개수이며, L_s 는 측정선의 길이이다. 그러므로 d_1 의 단위는 [개/m]이다. 두 번째 정의인 d_2 는 면적 조사의 측정면적인 A_A 내에 포함된 균열길이(L)의 합이다. d_3 는 균열면의 면적 즉 균열의 간극과 균열길이의 곱의 총 합과 3차원 공간의 부피와의 비이다. 그러므로, d_2, d_3 의 단위는 [L^{-1}]이다.

(4) 균열방향성

균열의 방향성은 실제 현장에서 측정하는 경사와 주향을 이용하여, 원의 법선벡터로 변환하여야 하며, 수학적으로 사용하는 기준 역시 북쪽 축이 아니다. 그러므로, 3차원 공간에 균열을 도시하기 위해서는 주향을 대표할 수 있는 새로운 변수 ϕ 를 이용한다(Fig. 3.1.5). 경사와 주향을 이용하여 한 점 P의 법선벡터 (l, m, n 는 방향코사인을 이용한 다음의 수식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} l &= u_x = \sin \theta \cos \phi \\ m &= u_y = \sin \theta \sin \phi \\ n &= u_z = \cos \theta \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

여기서, ϕ 는 2π -strike 이며, θ 는 경사각(dip angle)이다. 법선벡터 (l, m, n 는 방향코사인)이므로 $l^2 + m^2 + n^2 = 1$ 관계식이 성립한다.

균열방향성을 나타내는 대표적인 분포는 피셔분포(Fisher distribution)이며, 이는

경사각은 일정한 주방향에 대해 분포하고, 주향은 무작위로 분포시키는 방법이다 (Fish, 1953; Einstein and Baecher, 1983; Priest, 1993). 주방향에 대한 군집도는 피셔상수 K 로 대표할 수 있으며 현장자료에서 피셔상수는 다음의 과정을 통해 계산한다.

- 현장 지질조사를 거쳐, 경사(dip angle)과 주향(strike)값을 이용하여 법선벡터 (l, m, n) 를 각각 계산한다.
- 실제 균열조사에서 n 개의 균열방향자료가 얻어졌다면, 이를 평균하여 평균단위 법선벡터 (l_R, m_R, n_R) 와 매개변수 $|R|$ 을 계산한다.

$$\begin{aligned}
 l_R &= \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{|R|} \\
 m_R &= \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{|R|} \\
 n_R &= \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{|R|} \\
 |R| &= \left[\left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n m_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n n_i \right)^2 \right]^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{3.1.4}$$

- 균열방향자료의 개수 n 에 대해서 피셔상수는 다음과 같다.

$$K = \frac{n}{n - |R|}
 \tag{3.1.5}$$

(5) 균열군

균열망에서 발견되는 균열들의 연결성은 다공성 매질에서 유체투과율을 평균화하는 기법과 전지전자에서 저항과 전류의 전체 평균과 유사한 개념이다. 전체 균열의 수와 균열과 균열이 연결되어 있는 균열군은 유체투과율의 변화를 가져오며, 유동의 특징을 반영한다. 균열로 연결된 유동경로는 균열의 연결성을 대표하며 일반적으로 프랙탈 특성을 띄고 있는 것으로 알려져 있다(Sahimi, 1995).

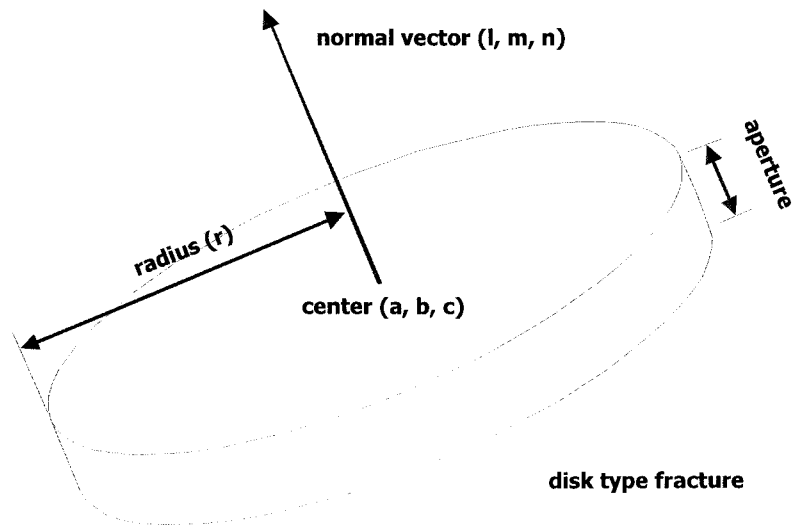


Fig. 3.1.4 3차원 공간에 존재하는 원형 균열의 구성요소

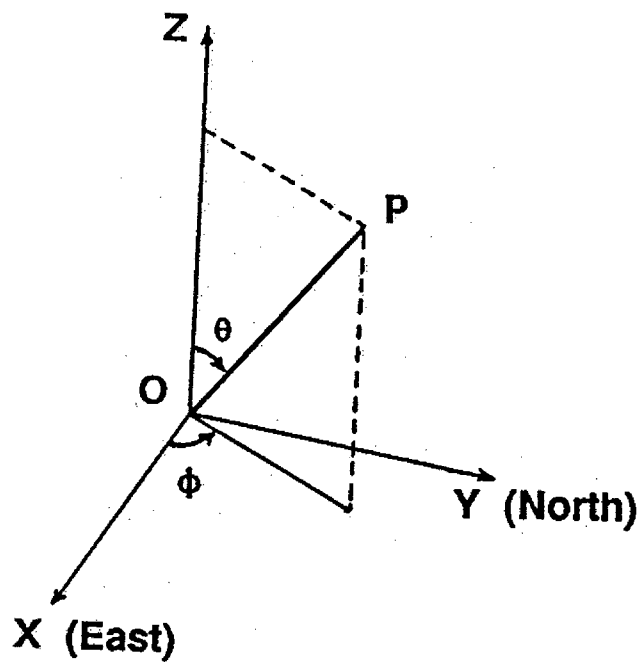


Fig. 3.1.5 3차원 공간에서 균열방향성을 대표하는 θ 와 ϕ (Bear et al., 1993)

다. 모델링 요소의 분포함수

"나. 3차원 모델링 요소"에서 설명한 모델링 요소는 3차원 균열망에서는 무작위변수를 이용하여 획득하며, 전체 자료를 통합하였을 때 일정한 분포가 나타나도록 구성한다.

(1) 균등분포(Uniform distribution)

균등분포는 임의의 무작위수를 추출하는 가장 기본적인 방법으로, 추출되는 확률변수 x 가 동일한 구간내에서 균등하게 분포한다. 확률밀도함수는 식(3.1.6)과 같다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & elsewhere \end{cases} \quad (3.1.6)$$

여기서, $[a,b]$ 구간이 일정한 확률로 존재하는 구간이다. 이 경우 평균과 분산은 구간 $[a,b]$ 에서 a 와 b 를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{a+b}{2} \\ \sigma_x^2 &= \frac{(b-a)^2}{12} \end{aligned} \quad (3.1.7)$$

여기서, μ 는 균등분포의 평균이며, σ_x^2 는 분산이다. 이 연구에서 사용된 난수는 균등분포에서 추출하는 것을 기본으로 하였으며, Seed수를 무작위적으로 추출하여 균등분포를 발생시키는 Numerical Recipes in C++ (Press et al., 2002)의 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘을 사용하여 시스템의 크기가 무한히 커질 경우 같은 무작위수가 추출되는 문제점을 해결하였다.

(2) 음지수분포(Negative exponential distribution)

음지수분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 정의된다(Meyer, 1970).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b} e^{-(x-a)/b} & x > a \\ 0 & x < a \end{cases} \quad (3.1.8)$$

이 확률밀도함수는 평균이 $(a+b)$ 이며 분산이 b^2 을 따른다. 0과 1사이의 균등분포에서 발생시킨 난수 Rn 을 이용하여 음지수분포를 따른 확률변수 X 는 식()을 이용하여 산출할 수 있다.

$$X = a - b \ln(Rn) \quad (3.1.9)$$

시스템에 적용한 음지수 확률분포는 확률변수 X 에 따른 분포함수가 음의 방향과 양의 방향 모두 무한으로 발산하므로, 상한값과 하한값의 범위를 지정한다.

(3) 정규분포(Normal distribution)

정규분포를 갖는 확률변수 x 의 확률밀도함수는 평균 μ 와 분산 σ_x^2 을 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$f(x) = \frac{q}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma_x^2} \quad (3.1.10)$$

정규분포를 따르는 난수를 발생시키기 위해서는 평균이 0이며 분산이 1인 표준화된 정규분포를 이용한다.

$$f(z) = \frac{q}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \quad (3.1.11)$$

획득한 확률변수 Z 에서 정규분포로 변화시키기 위해서 정규분포변수 X 는 표준정규분포 Z 와 다음의 관계를 가진다.

$$X = (\mu + \sigma_x Z) \quad (3.1.12)$$

여기서, μ 와 σ_x 는 정규분포의 평균과 분산이다.

표준정규분포를 따르는 확률변수 Z 를 얻기 위해서 Numerical Recipe C의 알고리즘을 사용하였다.

(4) 로그정규분포(Log-normal distribution)

평균과 분산이 각각 μ 와 σ_X^2 를 가지는 정규분포를 가지는 확률변수 X가 있을 경우, $Y = e^X$ 인 확률변수 Y가 로그정규분포를 가진다. 수학적으로 정의된 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X} \cdot y} e^{-(\ln y - \mu)^2 / (2\sigma_X^2)} \quad (3.1.13)$$

이 연구에서는 평균 μ_Y 와 분산 σ_Y^2 를 가지는 로그 정규분포를 다음의 수식을 이용하여 평균 μ_X 와 분산 σ_X^2 를 가지는 정규분포로 변환한다. 그 후, "(3) 정규분포"에서 언급한 방법을 이용하여 무작위수를 발생시키고 이를 지수화(e^x)한 것을 확률변수 Y로 사용하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_X^2 &= \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_Y}{\mu_Y} \right)^2 \right] \\ \mu_X &= \ln(\mu_Y) - 0.5 \cdot \sigma_X^2 \end{aligned} \quad (3.1.14)$$

(5) 멱급수분포(Power-law distribution)

멱급수분포는 밀도함수가 변수의 멱급수에 비례한다는 것으로 다음과 같이 확률 밀도함수를 표현할 수 있다.

$$f(x) = Ax^{-a} \quad (3.1.15)$$

여기서, A는 비례상수이며, a은 입력값으로 주어지는 지수값이다. 이를 균등분포에서 획득한 무작위수와 비례식을 이용하여 계산하면 무작위수로 표현할 수 있다.

$$X = \left[\frac{1-a}{A} Rn + X_{\min}^{1-a} \right]^{\frac{1}{1-a}} \quad (3.1.16)$$

여기서, $A = \frac{1-a}{X_{\max}^{1-a} - X_{\min}^{1-a}}$ 이고, Rn 은 (0,1)의 범위를 가지는 균등분포에서 획득한 무작위수이다. 이와 같이, 멱급수분포는 상한값과 하한값이 주어지면 임의의

확률변수값 X 를 계산할 수 있다.

(6) 피셔분포(Fisher distribution)

Fisher 분포는 균열의 방향성중 경사를 대표하는 분포이다. 방향자료의 모집단이 어떤 참값을 중심으로 분포하고 있다고 가정하고 있으며, 균열군이 하나의 대표방향을 가지면서 분포하는 것을 의미한다. 균등분포에서 획득한 무작위수를 이용하여 구성할 수 있다(Priest,1993). Fisher 분포는 경사의 분포를 나타내므로 확률밀도변수 θ 를 표현하였다.

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta \cdot e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (3.1.17)$$

여기서, θ 는 평균 혹은 실제 방향값에서의 차이를 의미하며, K 는 피셔상수(Fisher's constant)로써 자료의 균집도를 나타낸다. 이 식을 0에서 θ 까지 적분하게 되면 확률변수가 참값과 θ 사이의 각도에 존재할 확률을 계산할 수 있다.

$$Prob(X < \theta) = \frac{e^K - e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (3.1.18)$$

일반적으로 K 값이 5이상의 값을 가지는 경우에는 e^{-K} 항은 무시할 수 있으나, 임의 방향의 절리군을 해석할 경우에는 5 이상의 경우도 사용한다. (0,1)범위를 가지는 균등분포에서 획득한 무작위수 Rn 에서 Fisher분포를 따르는 경사각 θ 값을 구하는 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{\ln(1 - Rn)}{K} + 1 & K \geq 5 \\ \cos \theta &= \frac{\ln(e^K - Rn(e^K - e^{-K}))}{K} & K < 5 \end{aligned} \quad (3.1.19)$$

균열의 분포가 Fisher분포를 나타내기 위해서는 경사각(θ)은 위의 방법으로 구성하고, 주향을 대표할 수 있는 변수 $\varphi(=2\pi$ -strike)는 $(0, \pi)$ 의 균등분포를 사용하면 얻을 수 있다.

(7) SGS 정규분포(Normal distribution using Sequential Gaussian Simulation)

SGS는 순차가우스 시뮬레이션으로 공간상의 위치정보를 이용하여 새로운 값을 추정하는 지구통계학 시뮬레이션의 일종이다. 이미 획득한 n개의 자료와 공분산합수를 이용하여 새로운 N개의 값을 추정하는데 매 단계 이후는 이전 자료의 값을 새로운 값을 추정하는데 사용한다(최종근,2002). 자료가 정규 분포를 따를 때 적용이 가능하며 새로운 값 역시 정규분포를 따르게 된다. 과정은 Fig. 3.1.6에 도시한 바와 같다.

- 주어진 자료가 정규분포를 따르고 있는지 검사하고, 정규분포로 변환한다.
- 자료가 없는 지점은 임의의 경로(random path)를 지정하여, 순차적으로 새로운 값을 추정함에 있어서 임의성을 가미한다.
- 균열 조사를 통해 얻어진 자료값($Z_i ; i=1 \sim n$)을 이용하여 베리오그램을 생성한다.
- 베리오그램과 획득 자료값 Z_i 를 이용한 정규 크리깅(Ordinary kriging)을 통해 새로운 값 Z^* 과 오차분산 σ_{OK}^2 을 획득한다.
- Z^* 를 평균으로, 오차분산을 각각 정규분포의 평균과 분산으로 가정하고, "(3) 정규분포"와 같은 방법으로 정규분포에서 임의의 값을 생성한다. 이 값이 새로운 값이 된다.
- 새로운 값을 이미 알려진 값으로 가정하고, 임의의 경로를 이동시키며 위의 과정을 N번 반복한다.

여기서, 임의의 경로는 Fig. 3.1.7과 같은 알고리즘을 사용하여 새로운 값을 생성시켜야 할 지점으로 임의로 이동하며, C++의 random_shuffle 함수를 이용하였다. 정규크리깅은 가중치 λ 의 합이 1이라는 점을 가정하고 있으며 새로운 값을 추정하기 위해 공분산의 행렬 식 (3.1.20)와 제약식 식 (3.1.21)을 이용하여 가중치를 추정한다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \cdots & \sigma_{1n}^2 & -1 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \cdots & \sigma_{2n}^2 & -1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \cdots & \sigma_{nn}^2 & -1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdots \\ \lambda_n \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{01}^2 \\ \sigma_{02}^2 \\ \cdots \\ \sigma_{0n}^2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.1.20)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3.1.21)$$

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$$

여기서, σ_{ij}^2 는 i와 j간의 공분산이며, 추정하고자하는 값의 위치는 0이다. ij는 1~n까지의 자료를 나타내는 아래첨자이다. 오차분산은 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{OK}^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{oi}^2 + w \quad (3.1.22)$$

여기서, σ^2 는 자료의 분산값이며, 베리오그램에서 쉽게 얻어진다. 베리오그램을 이용하여 자료간의 이방성을 표현할 수 있으며, 이방성은 상관거리로 대표된다(최종근, 2002).

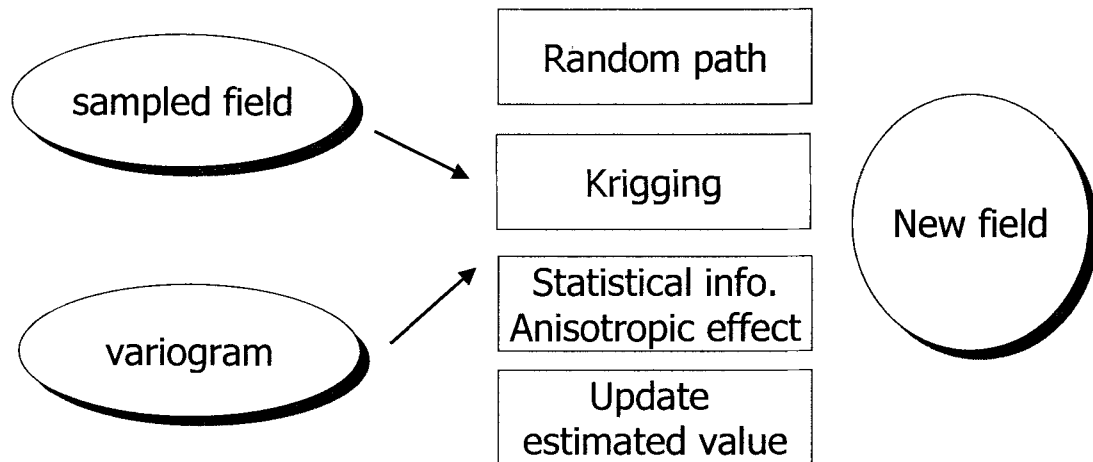


Fig. 3.1.6 SGS를 이용한 자료구성도

```

struct RandomInteger{
    operator() (int m) {return rand() %m;}
}random1;

void ranPath(int *arr)
{
    time_t t;
    srand((unsigned) time(&t));
    vector<int> v(arr,arr+Totgrid);
    random_shuffle(v.begin(),v.end(),random1);
    for (int i=0;i<Totgrid;i++) arr[i]=*(v.begin()+i);
}
  
```

Fig. 3.1.7 Random path 알고리즘

라. 3차원 개념모델

(1) 배처 모델(Baecher model)

Baecher 등(1977)이 제안한 Baecher 모델은 Barton(1980), Einstein 등(1980), Warburton(1980), Long(1983), Long 등(1985)에 의해 암석역학분야에 사용되어왔다.

Baecher 모델의 가장 큰 특징은 원형판 또는 타원형 형태로 균열을 구성하는 것이다. 이러한 균열형태는 균열 역학적 관점에서 많은 현장자료나 문헌에 활용되고 있다. 원형판 균열의 경우 균열의 길이를 반지름으로 대표할 수 있어 균열의 연결성 해석을 효율적으로 수행할 수 있다. 균열망 구성 시 필요한 입력자료는 균열의 중심 위치, 길이, 방향성, 간극분포 등이다. 일반적으로 균열의 중심은 시스템에 균일하게 분포하는 포아송 분포로부터 결정한다. 한편 현장에서 균열의 길이나 간극을 직접 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 지수분포, 로그-정규분포, 정규분포 등을 이용한다. 균열의 방향성 인자, 선경사(plunge)와 선주향(trend)은 Fisher 분포나 정규분포를 이용하여 산출한다. 이러한 방향성 인자는 균열의 법선벡터로 나타낼 수 있다. Fig. 3.1.8은 균열망 구성과정을 나타낸 순서도이다. 주어진 시스템의 중심 위치, 길이, 방향성, 간극등의 입력자료에 따라 균열을 생성한 후 기존의 균열과 연결성 해석을 수행한다. 이러한 과정을 균열시스템의 밀도를 만족할 때까지 반복 수행한다.

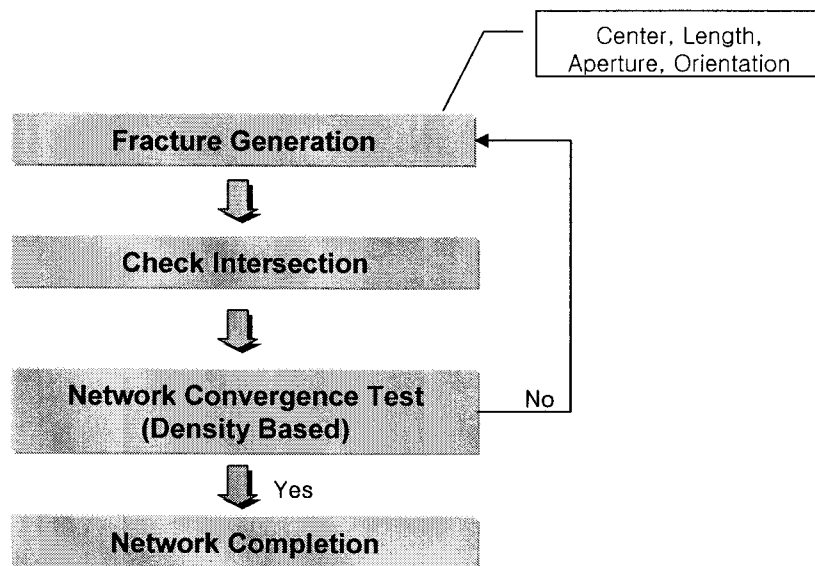


Fig. 3.1.8 Baecher 모델을 이용한 3차원 균열망 구성과정

(2) Levy-Lee 프랙탈 모델(Levy-Lee Fractal model)

Levy-Lee 프랙탈 모델은 수학적으로 프랙탈 형태를 보이는 "Levy flight"의 과정에 의해서 균열을 생성한다. "Levy flight"는 무작위 거동(random walk)의 한 형태로서 프랙탈 차원에 대해서 지수함수적 거동을 하며, 한 번의 거동은 1차원적으로 움직이나 전체적인 움직임은 3차원의 형태를 띠게 된다. 균열의 생성위치를 결정하기 위한 Levy flights에서 전 단계의 도약(jump, L)보다 더 크게 도약(L')할 확률은 다음의 식으로 결정한다.

$$P_L(L' > L) = L^{-D} \quad (3.1.23)$$

여기서 D는 프랙탈 차원이고 0과 3사이의 값을 가진다. Fig. 3.1.9는 프랙탈 차원에 대한 Levy flights의 함수를 나타낸 그림이다. 0과 1사이에서 무작위수를 발생시켜 이 값에 대응하는 L 값을 얻게 된다. Fig. 3.1.10는 Levy flights 방법으로 flights를 반복적으로 생성한 그림이다. 한편 Fig. 3.1.11은 프랙탈 차원을 결정하기 위한 그림이다. 균열의 클러스터 중심부근에 여러 개의 동심원을 그리고 동심원 안에 포함된 균열 중심의 개수를 센다. 균열중심의 수와 동심원의 반지름을 축으로 하는 로그-로그 그래프의 기울기로부터 프랙탈 차원을 다음의 식으로부터 결정한다.

$$N = kr^D \quad (3.1.24)$$

프랙탈 Levy-Lee 모델의 균열생성과정은 다음과 같다.

- ① 3차원 도메인의 크기를 충분히 크게 정한다.
- ② 균열을 생성할 시작점을 임의로 선택하여 균열 생성을 시작한다.
- ③ Levy flights의 방법에 의해서 다음 균열의 생성 위치까지의 거리를 찾는다.
- ④ 새로운 균열을 생성시킬 위치에 대한 방향 벡터를 무작위수를 생성하여 구한다.

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right), \quad \theta = \cos^{-1}\left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}\right) \quad (3.1.25)$$

$$u_x = \sin \theta \cos \phi, \quad u_y = \sin \theta \sin \phi, \quad u_z = \cos \theta \quad (3.1.26)$$

여기서 a, b, c는 무작위수이고 u_x, u_y, u_z 는 x, y, z축의 방향벡터이다.

- ⑤ 단계 ③과 단계 ④에서 구한 방향벡터와 Levy-flights를 이용하여 균열의 중심을 얻는다.

$$(x, y, z) = L(u_x, u_y, u_z) \quad (3.1.27)$$

- ⑥ 균열의 길이는 지수분포를 따른다. 따라서, 현장자료로부터 균열의 길이에 대한 평균과 분산으로부터 균열의 길이를 결정한다.
- ⑦ 균열면의 방향성을 구한다. 균열면의 방향은 전 단계 균열까지의 거리에 비례하여 변위를 갖는다(Fig. 3.1.12).

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2 + l_{\max} x}}{c - x}\right) \quad (3.1.28)$$

- ⑧ 일정한 균열밀도가 될 때까지 단계 ④에서 단계 ⑦까지를 반복한다.

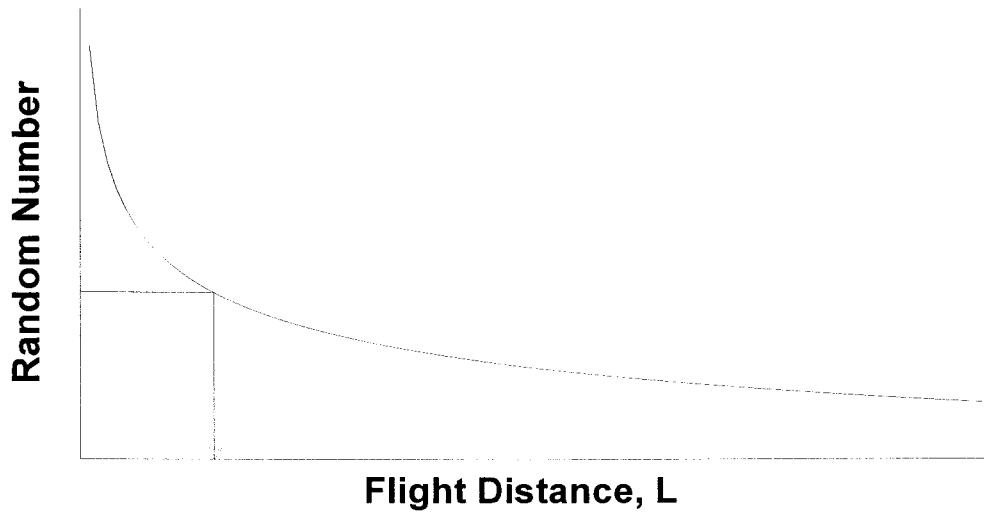


Fig. 3.1.9 Levy flights 함수

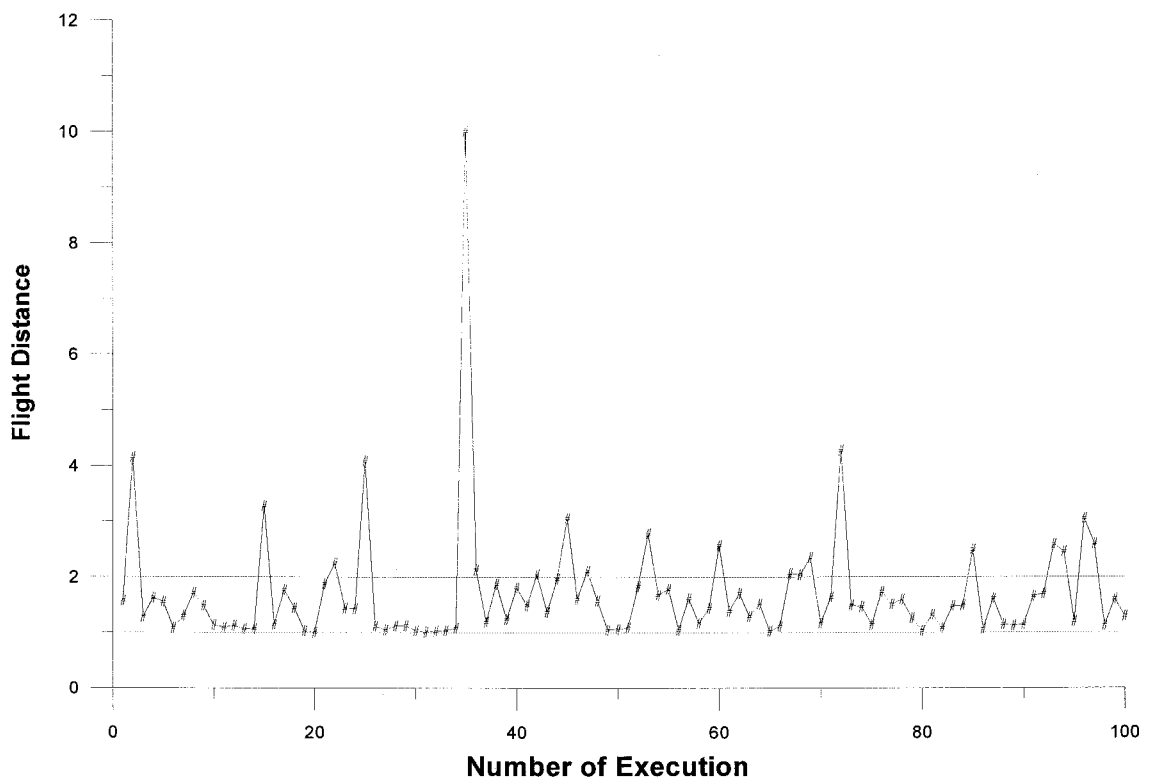


Fig. 3.1.10 Levy Flights 방법의 실행 결과

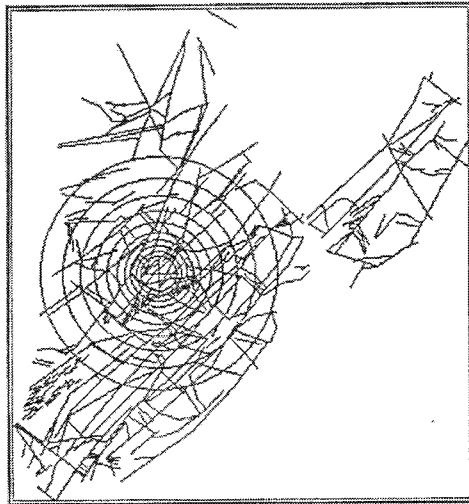


Fig. 3.1.11 프랙탈 차원 결정법

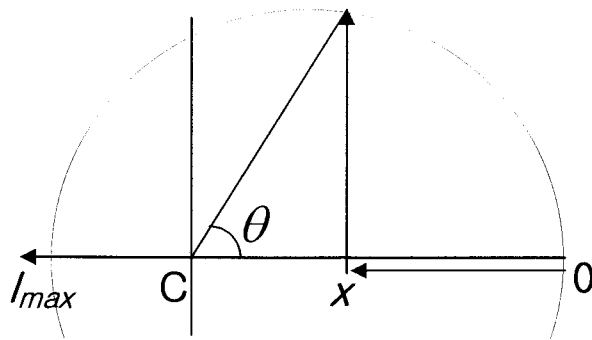


Fig. 3.1.12 균열의 방향성 결정

(3) 지구통계학적 모델(Geostatistical model)

지구통계학적 모델은 통계적인 균열자료를 독립적으로 사용하는 모델이 아닌 자료의 이방성과 자료상호간의 연관관계를 고려한 모델이다. 지구통계학적 방법은 SGS를 이용하며, 균열의 중심과 균열의 길이분포의 이방성을 모사할 수 있다.

(가) 균열중심의 이방성을 고려한 지구통계학적 모델

기존의 개념모델은 균열중심을 균등분포에서 획득한 무작위수의 조합으로 나타내었다. 이 경우에는 균열중심의 분포는 각각의 균열에 대해서 독립이며, 상호 연관성이나 이방성은 고려할 수 없다. 이를 고려하기 위해서 사용한 균열중심의 분포 방법이 Parents-daughter 방법(Billaux et al., 1989; Chiles, 1988)이다.

이 방법의 순서도는 Fig. 3.1.13과 같다.

- 면적조사 지역에서 격자망을 형성하여 균열의 중심의 분포를 획득한다. 균열의 중심은 면적조사 지역에 노출된 균열길이의 중점으로 한다.
- 각 격자마다 균열길이 중심의 개수를 계산하여, 2차원 균열중심지도를 획득한다.
- SGS 와 2차원 균열중심지도를 이용하여, 3차원 격자구조내에 포함될 수 있는 균열의 중심의 개수를 모두 정한다.
- 균열의 중심의 개수가 결정되면, 이 개수만큼 각 격자내에 각각의 균열의 중심을 무작위로 분포시킨다.

SNUFRACS에서 사용한 베리오그램모델은 구형모델로써, 다음의 관계식을 가진다.

$$\gamma(h) = C_0 Sph_a(h) = \begin{cases} C_0 \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{for } h \leq a \\ C_0 & \text{for } h > a \end{cases} \quad (3.1.29)$$

여기서, h 는 측정길이이며 a 가 이방성을 나타내는 상관거리이다. C_0 는 자료값의 분산과 동일하다.

지구통계학적 구성 방법은 기존의 Baecher 모델이나 Levy-Lee 프랙탈모델과 달리, 균열밀도가 균열생성을 종결시키는 역할을 담당하는 것이 아니라, 전체 균열의

중심 개수가 이 역할을 담당한다. 그래서, SNUFRACS에서는 특정한 균열밀도가 입력값으로 주어진다면, 균열밀도값까지 균열생성이 이루어지고 균열망의 생성이 완료되는 옵션과 균열밀도와 달리 격자내에 균열의 중심의 개수만큼 생성시키는 옵션으로 나누었다. 전자의 옵션은 만약 주어진 중심분포를 이용하고도 주어진 균열밀도가 이루어지지 않는다면, Baecher 모델과 동일하게 무작위로 분포를 계속시킬 수 있다. 이러한 정보는 SNUFRACS 정보창에 표시되도록 구성되어 있다.

(나) 균열길이의 이방성을 고려한 지구통계학적 모델

균열길이의 이방성을 고려하기 위해서는 (가)의 경우처럼 격자를 나누어 구성할 필요가 없다. 조사한 영역을 3차원 영역에 표현하고 이 값을 참값으로 하여 SGS를 실시한다.

이 과정은 다음과 같다.

- 면적조사 혹은 정방향모델링(DATAFRAC)을 통해 길이분포함수를 획득한다.
- 면적조사에서 측정한 측정값 l_i ($i=1 \sim n$)를 이용하여 베리오그램을 작성한다.
- 균열의 중심은 배척모델처럼 임의로 분포시킨다.
- 균열 중심 근처(상관거리 이내)에 균열의 중심이 존재하는 자료의 개수를 계산하고, 베리오그램을 이용하여 SGS를 실시한다.
- SGS를 통해 얻은 자료값을 길이값으로 입력하고 위의 과정을 특정 균열밀도에 도달할때까지 반복수행한다.

SGS를 통해 획득한 분포는 정규분포이므로 이를 로그-정규분포로 변환하여 로그-정규분포를 따르는 길이분포를 이용할 수도 있다.

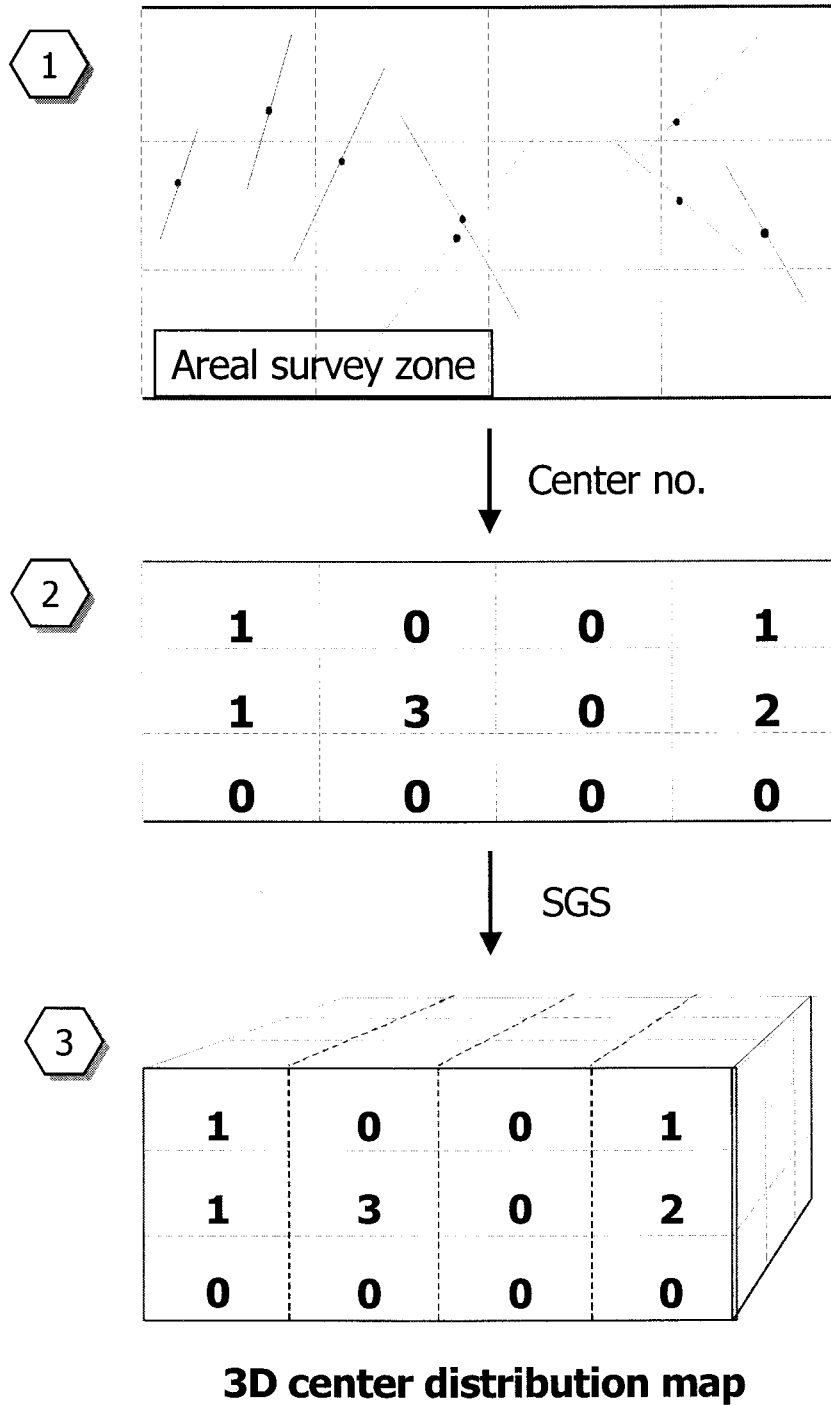


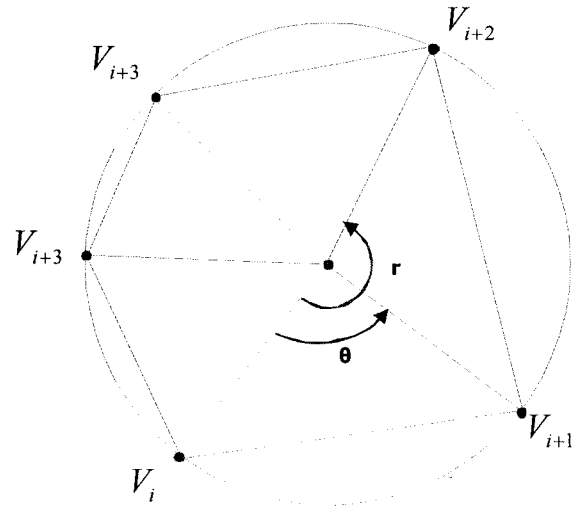
Fig. 3.1.13 균열중심의 이방성을 대표하는 지구통계학적 모델링

(4) 다각형 모델(Polygon model)

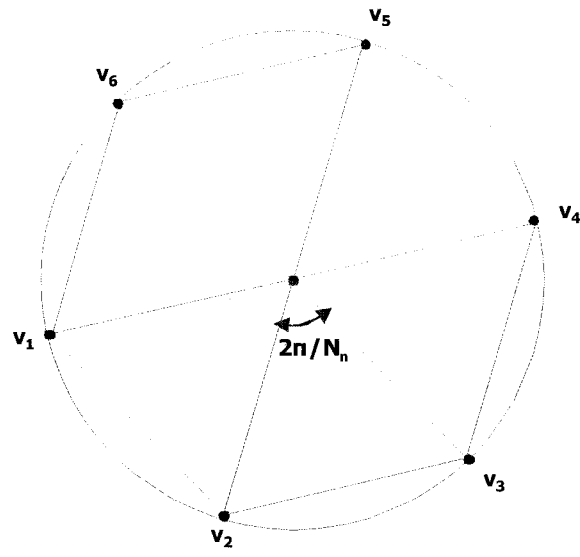
다각형 모델은 원에 내접하는 볼록 다각형을 균열으로 가정한 모델이다. 3차원 지하매질에 존재하는 균열의 형태는 복잡하고 다양한 형태를 지니고 있다는 사실에 착안하여 볼록 다각형 형태로 구성된 모델이다. 이 모델의 구성법은 Baecher 모델이나 지구통계학적 모델 구성법을 적용할 수 있다. 길이분포는 멱급수길이분포, 로그-정규분포, 정규분포등을 따르게 구성할 수 있으며, 중심분포는 포아송 분포를 기본으로 한다. 구성방법은 다음과 같다.

- x, y 평면에서 원에 내접하는 다각형의 내각을 변화시키며 꼭지점을 계산한다.
- Fisher분포를 따르는 방향성에 띄게 각 꼭지점을 원과 함께 좌표변환한다.
- 교차점 및 연결성 분석을 실시한다.
- 유정과 연결된 균열군을 획득한다.

SNUFRACS에서 다각형은 정 4,5,6각형을 가지거나, 불규칙한 볼록다각형의 형태이다. 불규칙한 볼록다각형(Fig. 3.1.14(a))을 구성하기 위해서 $0 \sim \pi/2$ 사이에서 균등분포를 따르는 임의의 수를 내각으로 정했다. 임의성으로 인해 꼭지점이 각 사분면 내지 특정한 지역에 집중되는 현상을 방지하기 위해서 n 각형의 임의의 내각은 $0 < \theta \leq \frac{2\pi}{n}$ 범위를 가진다. 정각 n 각형의 경우 내각은 $\frac{2\pi}{n}$ 이다(Fig. 3.1.14(b)).



(a)



(b)

Fig. 3.1.14 다각형모델의 형태 (a) 불규칙 다각형, (b) 정내각 육각형

(5) 기타 개념 모델

위의 개념모델을 제외한 기타 개념모델로는 향상배치모델(Enhanced Baecher Model), 이웃모델(Nearest neighbor model), 워존모델(War zone model), 프랙탈 박스모델(Fractal box model), 스며듦모델(Percolation model)등이 있다. 이 모델들에 관한 장단점과 특징은 SNUFRACS과 기존모델과 비교하면서 간략히 정리하였다.

- 향상배치모델

Baecher 모델을 변형시킨 모델로써, 임의의 균열간의 연결성을 분석하는 것이 아니라, 다음 균열의 생성을 이전 생성된 균열의 중심에서 발생시킨다. 그러므로, 균열이 교차하여서 반환하는 좌표, 균열군의 밀도와 크기도 정해진다.

- 이웃모델

이웃모델은 거대 크기의 균열을 몇 개 생성시킨 이후에 그 주변에 작은 균열을 포아송 분포시키는 방법이다. 거대균열주변에 작은 균열이 많이 생성되어 있는 생성상의 특징을 지닌 지형을 모사하기에 적합하다. SNUFRACS에서는 균열군의 통계적인 변수를 조정함으로써 이러한 효과를 얻을 수 있다.

- 워존모델

추계학적 방법과 통계적방법을 서로 접목한 방법으로 순차적으로 균열을 생성시켜서 응력으로 인해 암반이 파괴되어 과정을 이용하였다. Levy-Lee 프랙탈모델에서 프랙탈 차원을 변화시킴으로 인해 일정한 영역에 집중적으로 분포하는 균열군의 양상을 모사할 수 있다.

- 프랙탈 박스모델

프랙탈 박스모델은 분리균열모델이라기 보다는 격자모델처럼 프랙탈차원이 주어지면 그 차원에 따라 격자를 세분화시키고, 균열이 존재하는 지 여부를 판단한다.

- 스며듦모델

스며듦모델은 시스템의 4면이 하나의 거대한 균열군(infinite cluster)에 의해서 연결되는 시점에서 균열생성을 멈춘다. 그렇게 되면 균열을 통한 유체경로는 프랙탈 특징을 띄게되고 스며듦이론을 이용하여 유체투과율과 연결성을 분석할 수 있다. SNUFRACS에서는 유정과 연결된 균열군의 경로를 해석할 때 스며듦이론과 접목시킬 수 있다.

2. 균열자료의 해석

가. 균열자료로부터 균열반경분포 결정

일반적으로 균열의 크기는 균열면적과 같은 면적을 갖는 원의 반경으로 표시한다. 균열의 반경을 추정하기 위해 단지 관찰면에서 균열의 추적길이만을 관측할 수 있기 때문에 균열의 크기 측정은 현재 기술수준에서 균열특성 관련인자 중에서 신뢰도가 가장 낮은 인자라 할 수 있다. 균열추적길이의 측정에는 측정선을 따라 측정하는 직선수집(line sampling)과 일정한 샘플링구역 안에서 측정하는 면적수집(area sampling) 기법이 있다. Priest와 Hudson(1981)은 직선수집기법에 의한 추적길이 계산식을 유도하였고 Kulatilake와 Wu(1984a; 1984b)는 제한된 노출면에서 전 영역의 추적길이의 평균을 어떠한 확률분포도 가정하지 않고 결정하는 식을 유도하였다.

추적길이를 측정하여 균열의 크기를 추정하는 과정에서 다음과 같은 편차가 발생하므로 추정과정에서 이를 고려하여 수정하여야 한다: 첫째, 균열의 노출은 균열과 노출면의 방향성의 관계에 의존한다. 수평터널에서는 수직 방향의 균열이 더 높은 빈도로 발견되며, 수직 시추공에서는 수평방향의 균열이 상대적으로 더 많이 발견된다. 둘째, 큰 균열이 작은 균열보다 노출면에 나타날 확률이 더 크다. 셋째, 노출면의 샘플링 구역에서 긴 추적길이는 짧은 추적길이 보다 나타날 확률이 더 크다. 넷째, 어떤 한계길이 이상의 균열은 더 작은 균열로 인식될 수 밖에 없다(truncation bias). 다섯째, 노출면의 범위를 벗어난 균열의 전 길이를 측정할 수 없다(censoring error). 균열추적길이의 측정에 수반되는 불확실성을 보정하는 방법은 Baecher 등(1978), Barton(1973), Pahl(1981), Einstein와 Baecher(1983) 및 Rouleau와 Gale(1985) 등에 의해 시도된 바 있지만 현재까지 정확하게 보정하는 방법이 알려져 있지 않다.

균열추적길이로부터 균열의 크기를 추정하기 위해서는 균열크기의 분포형상과 균열의 형태, 그리고 측정방법에 따라 각기 다른 식이 유도된다. 균열크기의 통계적 성질에 관한 많은 분포함수중 대표적인 것은 로그정상 분포와 음지수 분포이다. 균열의 형태는 디스크 형태의 균열과 평행사변형의 균열로부터 다각형의 균열까지 다양하나 어떤 형태이든 등가반경을 구할 수 있다. 그러나 이러한 자료들이 명확하지 않은 경우에 대해 La Pointe 등(1993)은 정방향 모델링 기법을 이용해 균열크기를 산정하는 기법을 제시하였는데, 이 기법은 균열추적길이 자료로부터 균열의 크기를 추정하기 위해 시행착오법을 적용하는 방법이다. Fig. 3.1.15는 정방향 모델링 기법의 순서도이며 Table 3.1.2는 정방향 모델링에서 구현한 세부사항이다.

이 연구에서는 정방향 모델링 기법을 적용하여 균열 추적자료로부터 균열의 크기 분포를 결정할 수 있는 모델 DATAFRAC을 개발하였다(Fig. 3.1.16). DATAFRAC은 현장에서 측정된 균열 추적 길이분포와 시뮬레이션으로 생성된 균열 추적 길이분포를 비교하여 두 분포가 일치할 때까지 균열 반경 분포를 조정한다. 조사창에 대한 정보 및 조사창에서 얻은 균열 정보를 입력하는 부분과 이 자료를 conjugate gradient(CG) 또는 simulated annealing(SA) 등으로 분석하여 균열의 길이와 방향의 분포함수, 평균 및 분산 등의 통계적 특성을 얻는 부분, 그리고 이를 통해 원하는 단면에 균열을 발생시키는 부분 등 크게 세 부분으로 구성된다.

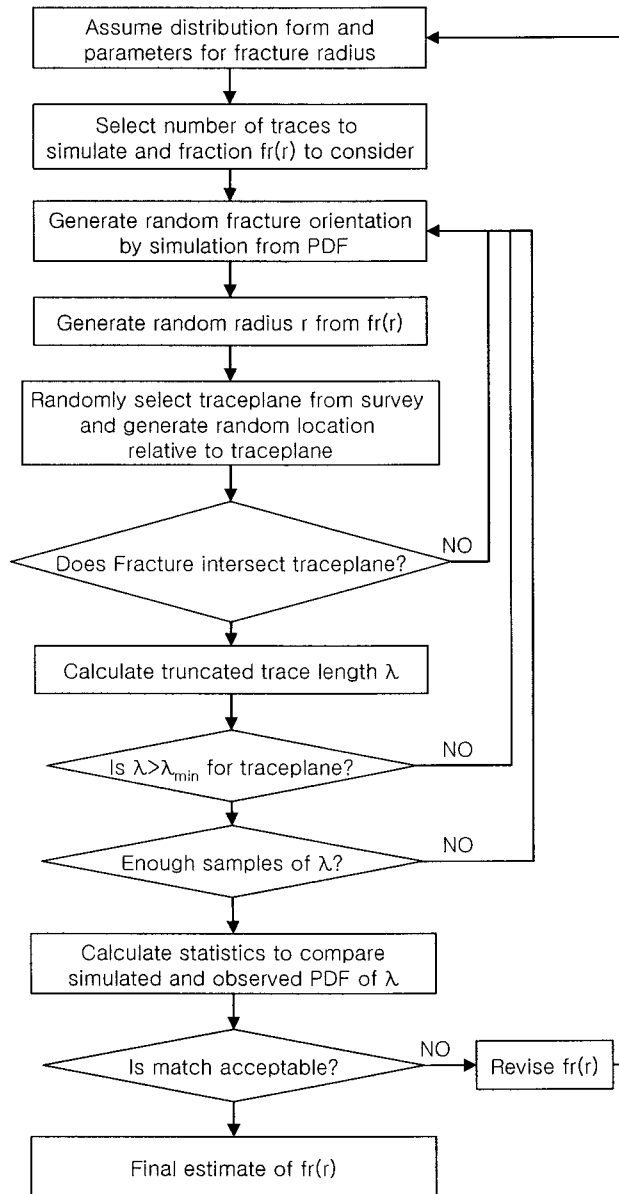


Fig. 3.1.15 정방향 시뮬레이션(Forward simulation) 순서도

Table 3.1.2 정방향 모델링 특성

특 성	방 법
균열반경 분포	균일분포, 대수정규분포, 음지수 분포, 멱급수분포
적합도 판별법	Kolmogorov-Smirnov test, Chi-squared test
탐색법	Conjugate gradient, Simulated annealing

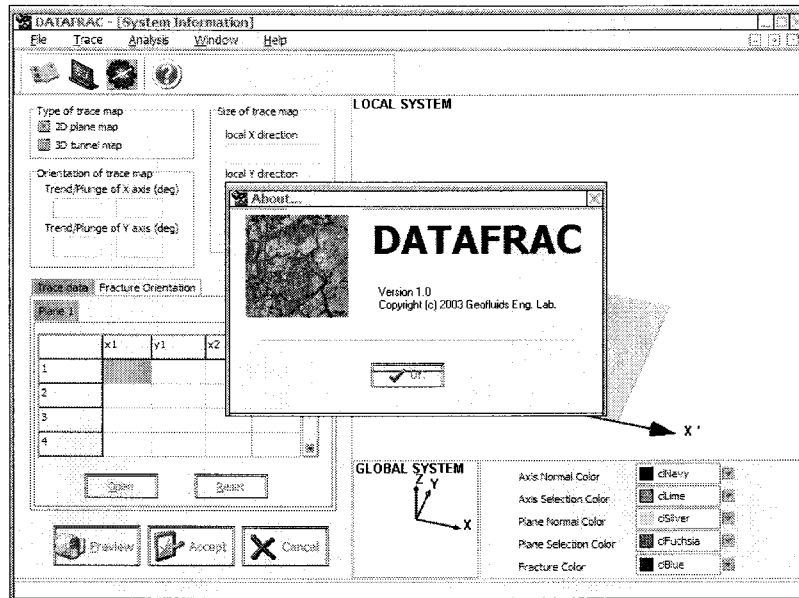


Fig. 3.1.16 DATAFRAC 초기화면

(1) 현장 자료의 입력

조사창에 대한 정보와 조사창에서의 균열 정보를 입력하는 창은 직사각형 형태의 조사창의 유형(2D 혹은 3D), 조사창의 각 축방향의 주향과 경사 및 길이를 입력하는 부분과 현장 조사창에서 획득한 균열 정보를 저장한 파일을 읽는 부분, 각 균열군의 분포형태(Fisher 분포 또는 정규분포), 평균 방향 및 평균 방향각, 그리고 그 분산정도(Fisher's K 또는 variance)를 입력하는 부분으로 되어있다(Fig. 3.1.17).

Type of trace map 에서는 조사창의 형태로 2D 단면 또는 3차원 형상의 터널을 선택할 수 있다. Orientation of trace map 에서는 직사각형 형태의 trace map의 x, y축의 방향을 local system으로 표시하도록 되어있다. 그리고 Size of trace map 에서는 x, y축의 길이를 입력해야 한다.

Trace map 탭에서는 현장에서 조사한 균열정보(균열 양 끝단의 좌표값)를 저장한 파일을 읽고, Fracture Orientation 탭에서 각 균열군의 분포형태, 평균방향 및 방향각, 분산정도 등을 입력한다.

이와 같은 과정이 끝나면 3차원 공간상에 트레이스 맵이 도시된다(Fig. 3.1.18). Fig. 3.1.18은 단면의 x, y, z축을 local system으로 한다. Global system은 그 밑에 도시되며 공간상에서 단면과 트레이스의 색은 이들의 색 정보 변경창을 통해서 변경가능하다(Fig. 3.1.19).

Type of trace map
 2D plane map
 3D tunnel map

Size of trace map
 local X direction: 100
 local Y direction: 100
 local Z direction: []

Orientation of trace map
 Trend/Plunge of X axis (deg): 90 0
 Trend/Plunge of Y axis (deg): 0 0

Trace data | Fracture Orientation
 Plane 1

	x1	y1	x2	y2
1	4.17203	79.3916	77.9314	86.8825
2	5.73214	91.2502	0	70.8504
3	91.9626	84.7684	100	98.2597
4	48.5583	81.8526	39.5476	93.9484

Open Reset

Preview Accept Cancel

Type of trace map
 2D plane map
 3D tunnel map

Size of trace map
 local X direction: 100
 local Y direction: 100
 local Z direction: []

Orientation of trace map
 Trend/Plunge of X axis (deg): 90 0
 Trend/Plunge of Y axis (deg): 0 0

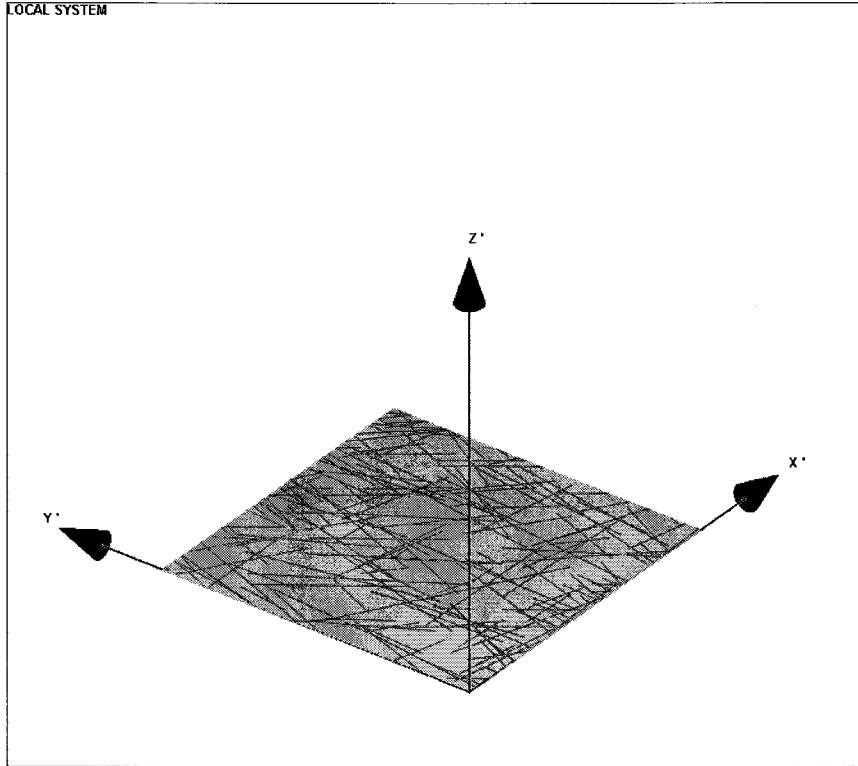
Trace data | Fracture Orientation
 Number of Fracture Sets: 3

Distributions of Fracture Orientation

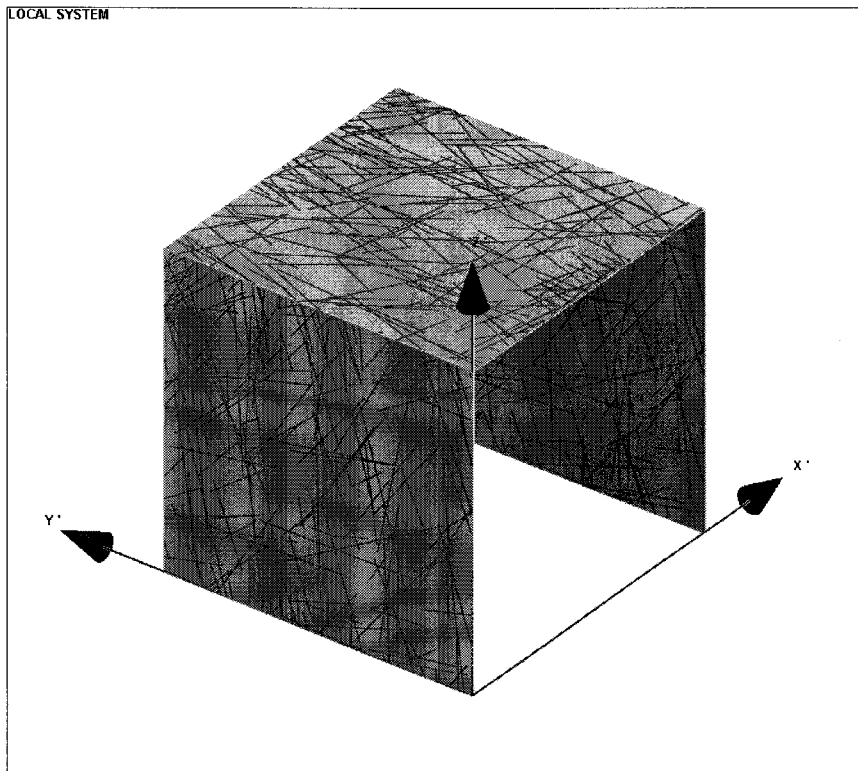
	Set 1	Set 2	Set 3
PDF	Fisher	Fisher	Fisher
Trend	186.5	102.5	48.0
Plunge	75.5	38.5	63.5
Variance			
Fisher K	70	70	70

Preview Accept Cancel

Fig. 3.1.17 트레이스 맵 정보창



(a) 2D trace map



(b) 3D tunnel map

Fig. 3.1.18 Global system 및 색상정보 맵

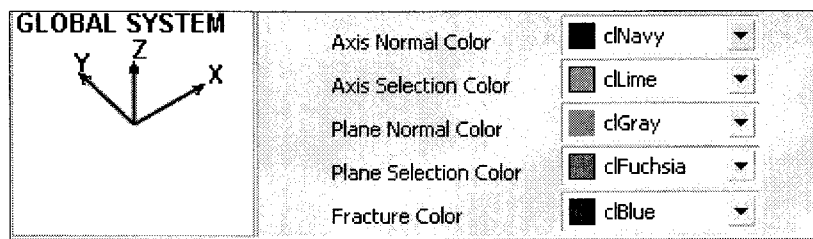


Fig. 3.1.19 3차원상에 도시한 현장의 균열 정보

(2) 균열반경 추정

DATAFRAC의 두 번째 부분은 현장자료를 통해 균열시스템을 역산하여 원하는 단면상에 새로운 균열망을 발생한다. 이 부분은 역산 모델 설정창(Fig. 3.1.20)과 모델로부터 계산된 목적함수 그래프 및 균열길이의 누적확률밀도함수를 실시간으로 표시하는 창, 그리고 역산된 균열시스템을 조사창위에 새롭게 도시하여 현장자료와 비교할수 있는 창으로 구성된다.

역산 모델 설정창은 SA 또는 CG의 역산 모델을 설정탭(Solving method)과 변수 설정탭(Solver Parameters), Kolmogorov-Smirnov test 또는 Chi-square test의 적합도 검사 설정탭(Goodness of Fitness Test), 구속조건을 입력탭(Constraints), 해석을 수행할 균열군 설정탭(Fracture Set to be Optimized), 그리고 초기값을 통해 균열 반지름의 평균과 분산을 추정하여 표시하는 부분(Fracture radius guess) 등으로 구성되어 있다.

CG에 의해 현장 자료를 역산한 결과는 Fig. 3.1.21 및 Fig. 3.1.22와 같다. 역산을 위해 균열 길이의 평균 및 분산의 초기 추정값을 각각 20m로 하고, 40개의 ensemble study를 수행하였다. 그 결과, 전체 균열에 대한 균열 길이의 평균은 16.90m, 분산은 23.54m로 추정되었다. SA에 의해 현장자료를 분석한 결과는 Fig. 3.1.23 및 Fig. 3.1.24와 같다. 이 역시 균열 길이의 평균 및 분산의 초기 추정값을 각각 20m로 하여 40개의 ensemble study를 통해 추정한 결과이다. 그 결과 균열 길이는 평균 15.83m, 분산 14.59로 추정되었다. 두 방법 모두 목적함수의 변화 추이가 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며, 목적함수값이 0.05이하에서 역산이 종료되었다.

Solving method

- Conjugate Gradient
- Simulated Annealing

Solver Parameters

Max. Iteration	
Tolerance	

Goodness of Fitness Test

- Kolmogorov-Smirnov test
- Chi-Square test

Fracture Set to be Optimized

Fracture Set 1 ▼

Constraints

Density of fracture (No.) 201

Same as the number of trace data

Number of Ensemble

1

	Min	Max
Mean of Radius		
Variance of Radius		
Range of Radius		
Range of Trace Length	0.13624	67.6051

No. of CDF Bins

10

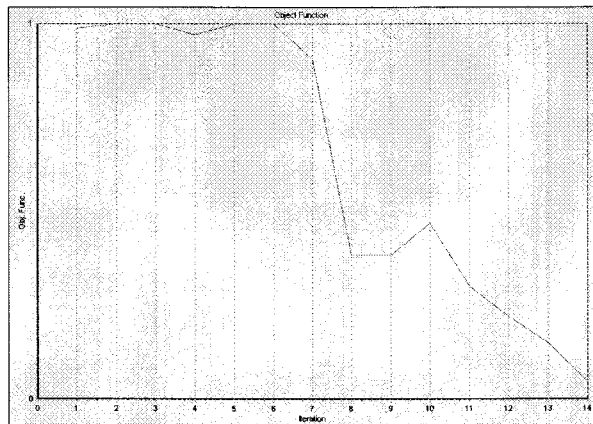
Fracture radius guess

	Init. Guess	Result
PDF		
Mean		
Variance		
Exponent		

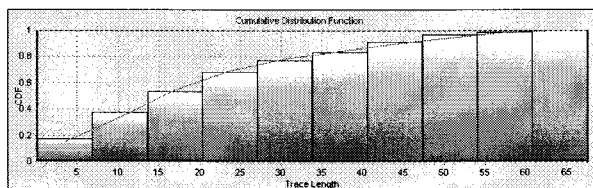
Fig. 3.1.20 역산 모델 설정탭

Fracture radius guess		
	Init. Guess	Result
PDF	Log Normal	Log Normal
Mean	20	16.900161743
Variance	20	23.546676635
Exponent		

(a) 역산 결과값



(b) 목적함수의 변화



(c) 최종 누적확률밀도함수

Fig. 3.1.21 Conjugate gradient method에 따른 현장자료의 역산결과

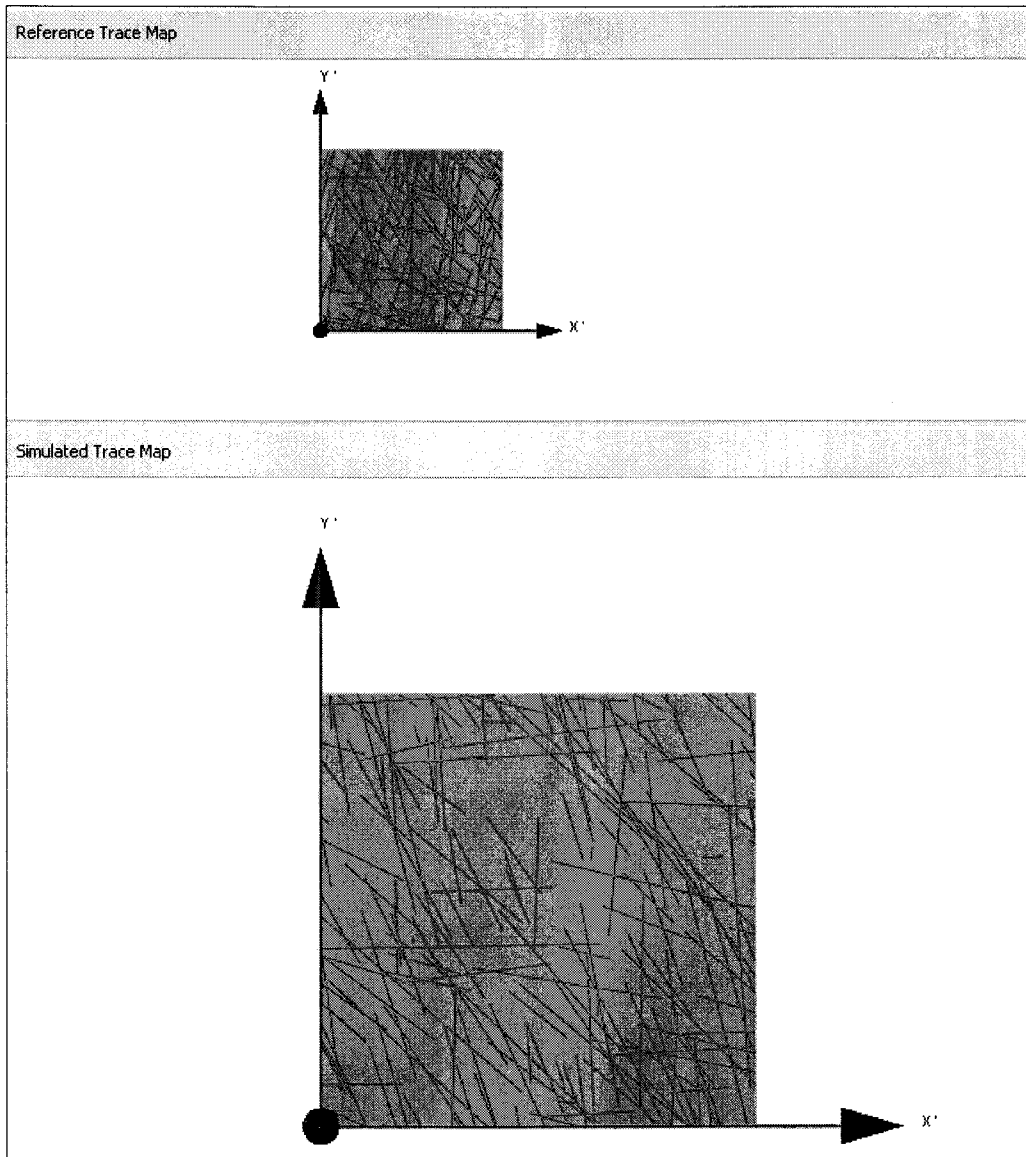
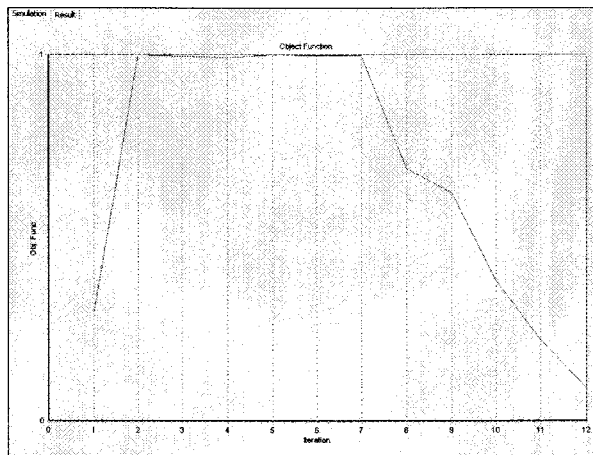


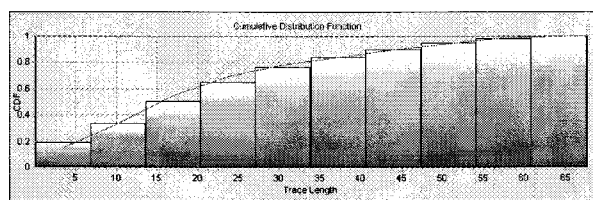
Fig. 3.1.22 현장자료 균열망(Reference Trace Map)과 Conjugate gradient method를 통해 역산된 균열망(Simulated Trace Map)

Fracture radius guess		
	Init. Guess	Result
PDF	Log Normal	Log Normal
Mean	20	15.8258733741
Variance	20	14.5932474131
Exponent		

(a) 역산 결과값



(b) 목적함수의 변화



(c) 최종 누적확률밀도함수

Fig. 3.1.23 Simulated Annealing 과정에 따른 현장자료의 역산결과

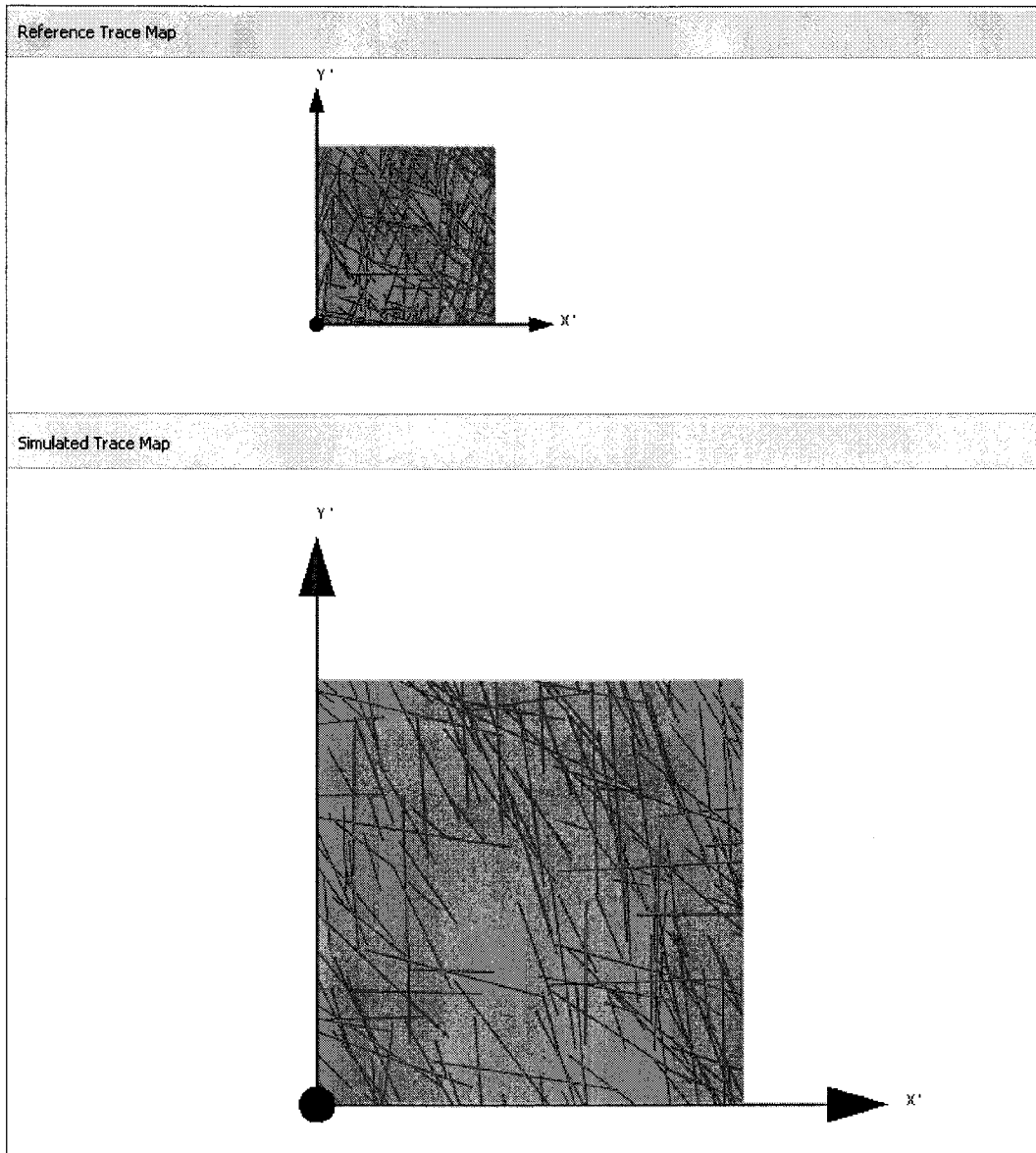


Fig. 3.1.24 현장자료 균열망(Reference Trace Map)과 Simulated annealing을 통해 역산된 균열망(simulated Trace Map)

(3) 추정된 균열 반경에 의한 균열망 생성

DATAFRAC은 현장의 조사창을 통해 수집한 균열 트레이스 자료로부터 균열반경을 추정한 후 특정한 위치의 단면에 대하여 균열망을 생성할 수 있는 기능이 추가되어 있다. 앞의 예에서 조사창의 방향과 다른 단면 예를 들어, x축 및 y축의 trend/plunge가 각각 80/00, 350/-90인 임의의 단면에 대한 균열망을 생성하면 Fig 3.1.25 ~Fig. 3.1.27와 같다.

Bin	Probability
3.510	0.184
10.257	0.200
17.003	0.159
23.750	0.124
30.497	0.098
37.244	0.070
43.991	0.061
50.738	0.043
57.485	0.040
64.232	0.019

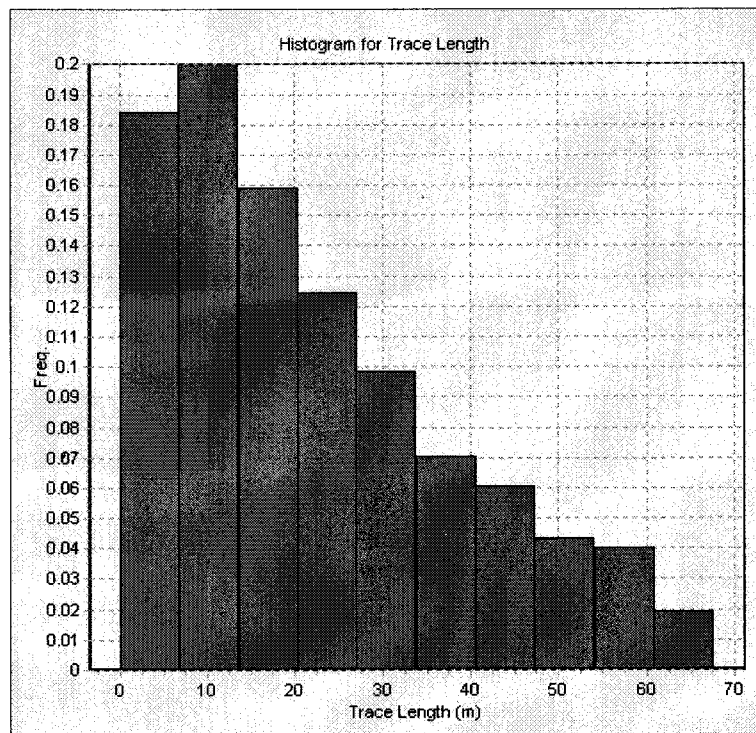


Fig. 3.1.25 트레이스 길이의 히스토그램(All Fracture Sets)

Bin	Probability
-77.25	0.000
-71.75	0.004
-66.25	0.022
-60.75	0.035
-55.25	0.083
-49.75	0.011
-44.25	0.079
-38.75	0.085
-33.25	0.096
-27.75	0.077
-22.25	0.048
-16.75	0.128
-11.25	0.115
-5.75	0.045
-0.25	0.076
5.25	0.066
10.75	0.024
16.25	0.005
21.75	0.001
27.25	0.000

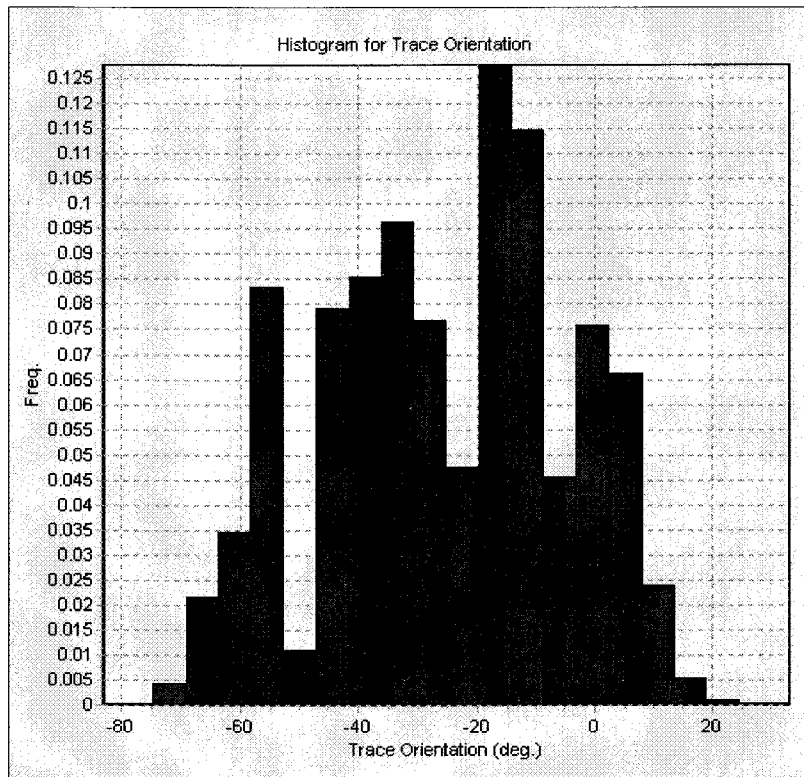


Fig. 3.1.26 트레이스 방향의 히스토그램(All Fracture Sets)

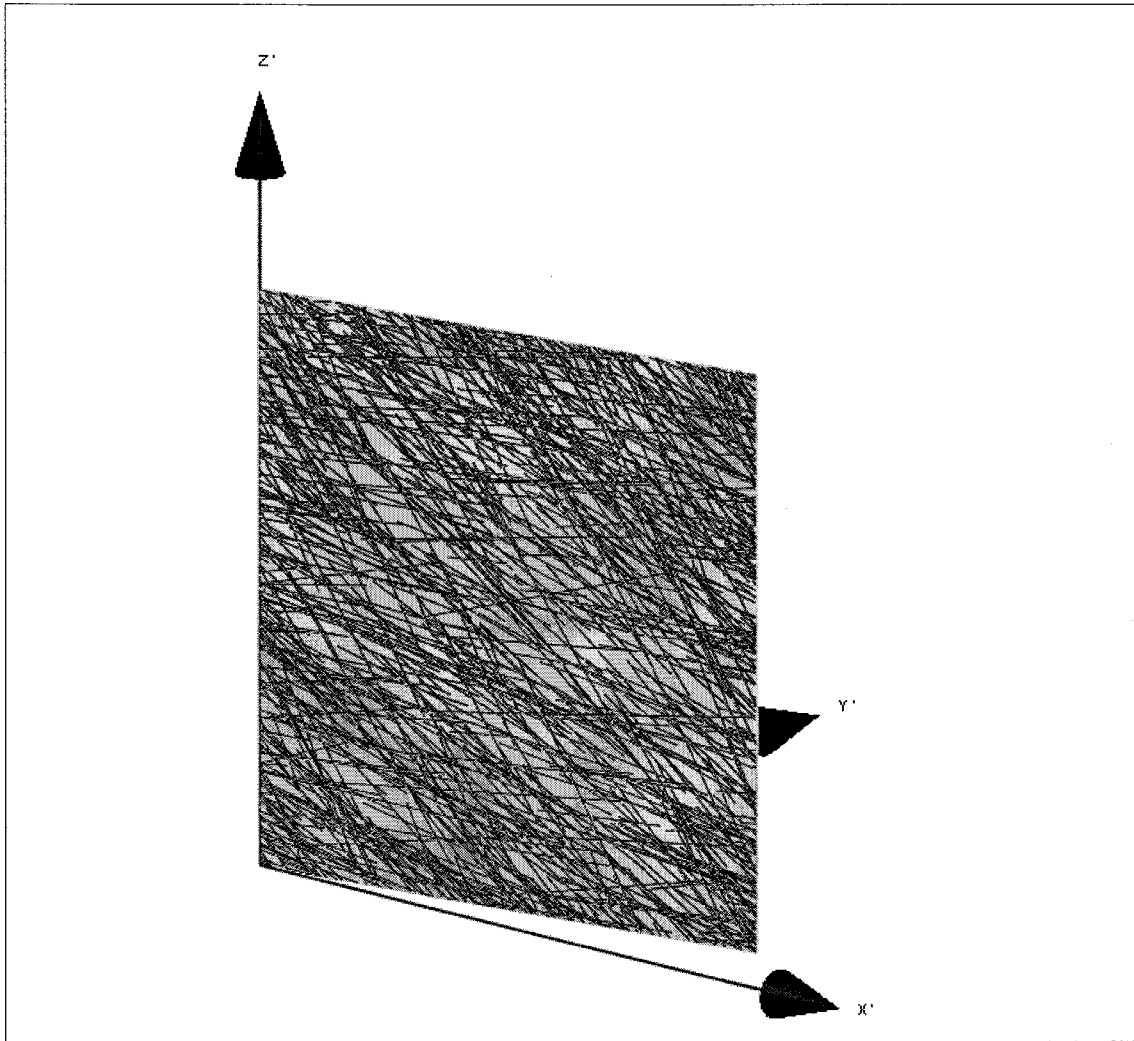


Fig. 3.1.27 트레이스 맵(All Fracture Sets)

나. 균열의 방향성 해석을 위한 인공신경망 기법

(1) 균열의 방향성

균열의 기하학적 속성 중 균열의 방향성은 균열의 크기(size), 밀도 등과 함께 균열 매질 모델링을 위한 중요한 특성 변수이다.

균열의 방향에 대한 표현은 여러 가지로 정의하여 적용분야에 따라서 다양하게 표시할 수 있으나, 일반적으로 주향과 경사로 표시할 수 있다. 방향성 자료의 대표적인 통계적 분포 모델은 균등분포, Fisher 분포, Bingham 분포, 이변량 정규 분포 등이 있으며, 일반적으로 각 균열의 방향성에 대한 도시 방법은 등면적 투영법(equal area projection)과 등각 투영법(equal angle projection) 등의 평사 투영법을 사용한다.

균열매질의 모델링은 균열군(fracture set) 별로 수행하게 되는 데, 이는 각 균열군의 생성 원인 및 기하학적 속성에 대한 통계적 특성이 각기 다르게 나타나기 때문이다. 일반적으로 이러한 균열 군은 균열 방향성에 따라 분류한다.

방향성 자료를 이용한 균열 군을 분류하는 방법은 군집분석(cluster analysis)과 같은 다변량 통계분석법(multivariate analysis)과 인공 신경망(artificial neural networks; ANN) 해석 방법 등이 있다. 이 연구에서는 인공 신경망 해석 기법을 이용하여 방향성 자료로부터 균열 군을 분류하고자 한다.

(2) 인공신경망 해석 기법

인공신경망은 인간 두뇌의 신경세포 또는 뉴런(neuron)을 모방하여 만든 것으로, 지금까지 사용해온 일반적인 프로그램과는 전체적으로 상당히 다른 구조를 가지고 있다. 인간 신경계는 신경계를 제어하는 중추신경계(central nervous system)와 감각기관에서 자극을 중추신경계로 전달하거나 반대로 중추신경계에서 반응을 감각기관으로 전달하는 말초신경계(peripheral nervous system), 마지막으로 심장, 폐, 혈관 등 인간 장기의 수축 및 이완작용을 담당하는 자율신경계(autonomic nervous system)로 구성되어 있다. 인간이 신체를 통해 얻는 자극은 말초신경계의 감각기관의 수용기를 통해 받아들여져서 그 자극에 해당하는 중추신경계로 전달되어, 적절히 반응할 수 있도록 신경흥분을 해당 기관에 전달한다. 이런 신경계의 최소단위는 뉴런이며 뉴런이 존재하는 위치에 따라 형태와 기능이 다양하다.

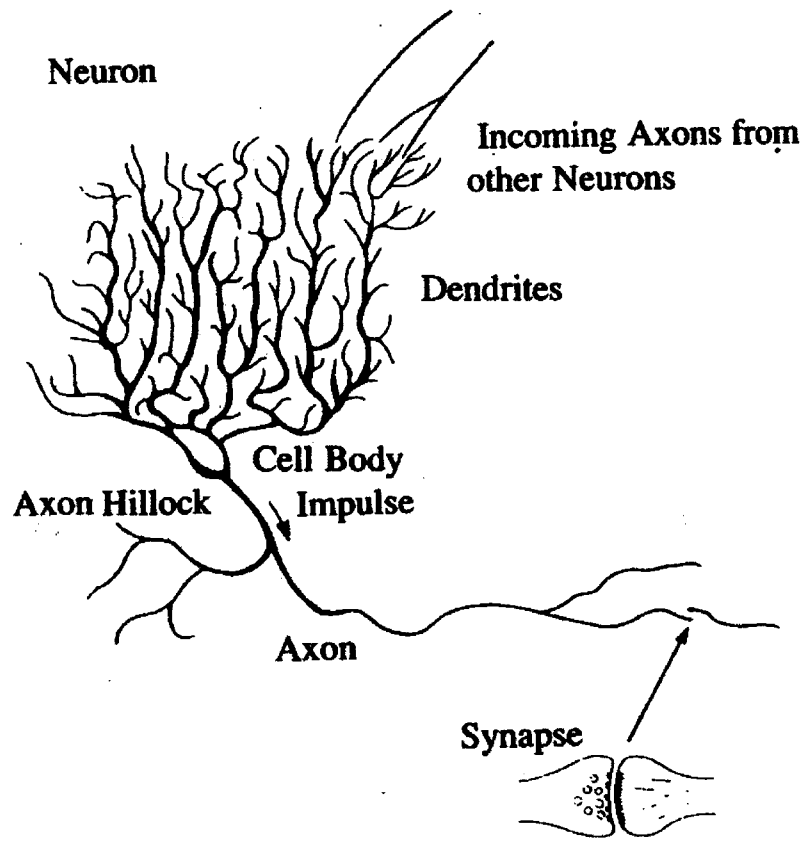


Fig. 3.1.28 뉴런 모식도

Fig. 3.1.28과 같이 뉴런은 크게 세포체(somma, cell body), 수상돌기(dendrite), 축삭돌기(axon)의 3부분으로 구분되어 있다. 이런 뉴런들이 인간 두뇌에 약 10^{11} 개가 있으며 각 뉴런들은 $10^3 \sim 10^4$ 개의 뉴런들과 서로 연결되어 있다. 상호 연결된 뉴런들 간에는 시냅스(synapse)라는 간격이 있어 더욱 신경흥분의 전달속도가 빨라져서 반응이 빠르게 나타날 수 있게 된다. 시냅스는 신경흥분(자극)을 단방향으로만 전달하며, 흥분성(excitatory)과 억제성(inhibitory)의 두 가지 종류가 있다. 만약 두 뉴런이 흥분성 시냅스로 연결되어 있다면 뉴런의 활성화 가능성을 증가시킬 수 있지만, 억제성 시냅스로 연결되어 있다면 반대로 활성화 기능을 감소시킨다.

뉴런이 활성화되기 위해서는 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 우선 자극의 크기가 임계치보다 커야하며, 일정시간 이상 자극이 지속적이어야 한다, 만약 자극이 약할 경우에는 반복적이어야 한다. 그리고 일단 활성화된 뉴런은 일정시간(불응시간: refractory period)을 경과해야 원래 상태로 되돌아가므로, 이 시간이 지난 후에 자극에 의해 뉴런이 활성화 될 수 있다.

인공 신경망은 인간 두뇌의 복잡하게 연결되어 있는 수많은 뉴런(neuron)들의 신경망 조직을 모델링한 것이다. 인공 신경망 모델은 다음 두 가지 면에서 인간 두뇌와 유사점을 가지고 있다. 첫 번째, 미리 학습(learning process)을 통해서 지식을 습득하거나 어떤 일을 수행할 수 있다. 이때 학습이란 뉴런간의 연결강도(connection weight)를 변화시키는 과정이다. 두 번째로 뉴런간의 연결강도에 의해 정보를 저장하는 점이다. 인공 신경망의 기본은 뉴런으로 입력신호는 각 뉴런에 입력된 외부자극이며, synaptic weight는 각 뉴런에 해당하는 연결강도, summing junction은 입력된 외부자극의 가중합이다. 이것이 활성화 함수의 조건에 만족하면 출력하고 그렇지 못한 경우에는 연결강도를 계속 변화시켜 나감으로 학습시킨다.

인공 신경망의 학습은 지도학습(supervised learning)과 자율학습(unsupervised or self-adjusted learning)으로 나눌 수 있으며, 학습은 계산값과 목표값 간의 차이, 즉 오차를 최소화하는 과정으로 이루어진다. 일반적으로 인공 신경망의 절차는 Fig. 3.1.29와 같다.

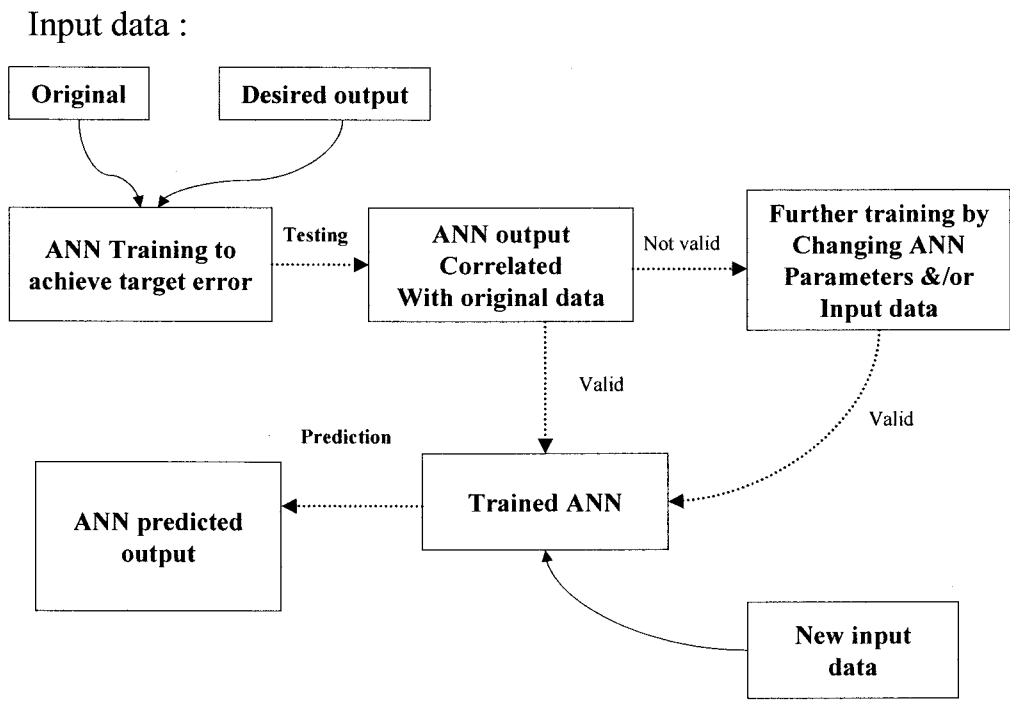


Fig. 3.1.29 인공 신경망 방법의 순서도

인공 신경망의 특징 및 장점으로 인해 다른 여러 분야에 응용할 수 있는데, 주로 패턴 인식이나, 패턴 분류, 필터링 등에 사용하며 지구과학의 여러 분야에 응용할 수 있다.

ANN을 이용한 균열 군 분류하는 방법으로는 지도학습방법 중의 하나로 오차를 역전파 시켜 연결강도를 적절하게 변화시키는 다층 구조의 BP(Back Propagation), Bayes 최적값에 근접하는 판단면을 생성하는 PNN(Probabilistic Neural Network), 자율신경학습법으로 목적값을 제공하지 않고 스스로 연결강도를 변화시켜 학습하는 방법인 자기조직화(self-organizing) 신경망 등이 있다. 이 연구에는 자율학습법인 자기조직화 신경망 기법을 사용하여 해석하고자 한다.

(3) 자기조직화(Self-Organizing) 신경망 기법

“자기조직화”란 주어진 입력패턴에 대하여 정확한 해답을 미리 주지 않고 자기 스스로 학습할 수 있는 능력을 말한다. 일반적으로 이러한 신경망들은 신경 생리학적 시스템을 모방하여 모델링한 것이다. 이러한 모델은 자율학습법을 사용하며 순방향 신경망 구조를 갖는다.

Teuvo Kohonen이 제시한 자기조직화 신경망은 일반적으로 2개의 층으로 이루어져 있으며 첫 번째 층은 입력층(input layer)이고 두 번째 층은 경쟁층(competitive layer)으로 구성된다. 경쟁층은 Fig. 3.1.30과 같이 뉴런을 1차원으로 배열하는 방법과 2차원으로 배열하는 방법이 있다. 모든 연결들은 첫 번째 층에서 두 번째 층의 방향으로 되어 있으며 두 번째 층은 완전 연결(fully connected)되어 있다. 이 뉴런들은 경쟁층에서 고밀도로 연결되어 있다.

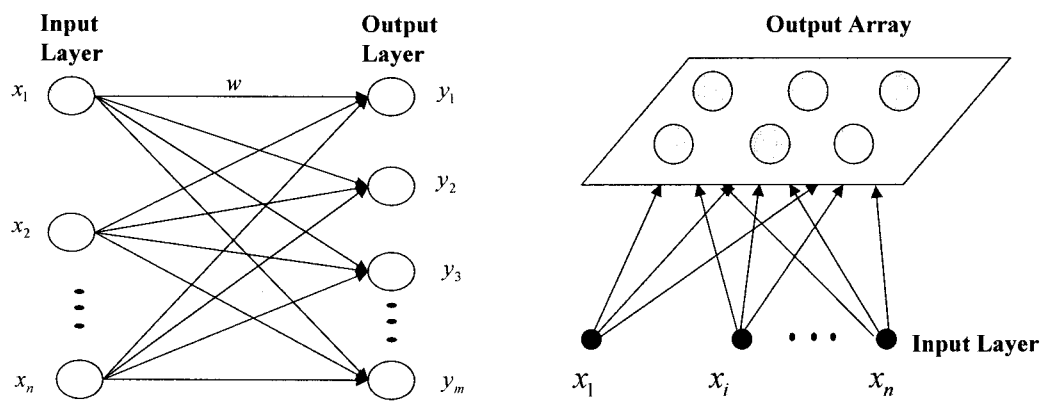


Fig. 3.1.30 자기 조직망의 배열

이러한 신경망은 층 내의 뉴런의 연결강도 벡터가 임의 값을 가지면서 적합하게 초기화되어야 하며, 연결강도 벡터와 입력 벡터는 일반적으로 0에서 1사이의 정규화된(normalized) 값을 사용한다.

자기조직화 신경망에서 사용하는 자율학습법은 목적값을 제공하지 않고 스스로 연결강도를 변화시켜 학습하는 방법이다. 학습에서 각 뉴런은 연결강도 벡터와 입력 벡터의 유사도(similarity) 계산한다. 각 뉴런들은 학습할 수 있는 특권을 부여받으려고 서로 경쟁하는데 유사도가 가장 가까운 뉴런이 승리하게 된다. 이 승자(winner) 뉴런이 출력 신호를 보낼 수 있는 유일한 뉴런이다. 또한 일반적으로 이 뉴런과 이와 인접한 이웃 뉴런들만이 제시된 입력벡터에 대하여 학습이 허용된다. 자율학습 동안에 입력 벡터와 가장 유사한 연결 강도를 갖는 출력층 뉴런 j 가 승자 뉴런이 된다. 이 승자 뉴런을 중심으로 반경 r 을 설정하고 이 범위내의 모든 뉴런들과 연결된 연결강도를 조정한다. 이러한 학습 방법을 경쟁 학습(competitive learning)이라 한다. Fig. 3.1.31은 이 연구에서 사용된 자기조직화 신경망의 자율학습 과정을 나타낸다.

유사도는 두 벡터간의 연관성을 알아보기 위하여 서로 일치하는 정도를 표현한 것으로 해밍거리(Hamming distance), 상관계수(correlation coefficient), 내적(inner product), 방향코사인(direction cosine), 유클리드 거리(Euclidean distance) 등을 사용하여 계산하는 데, 일반적으로 유클리드 거리의 제곱을 사용한다.

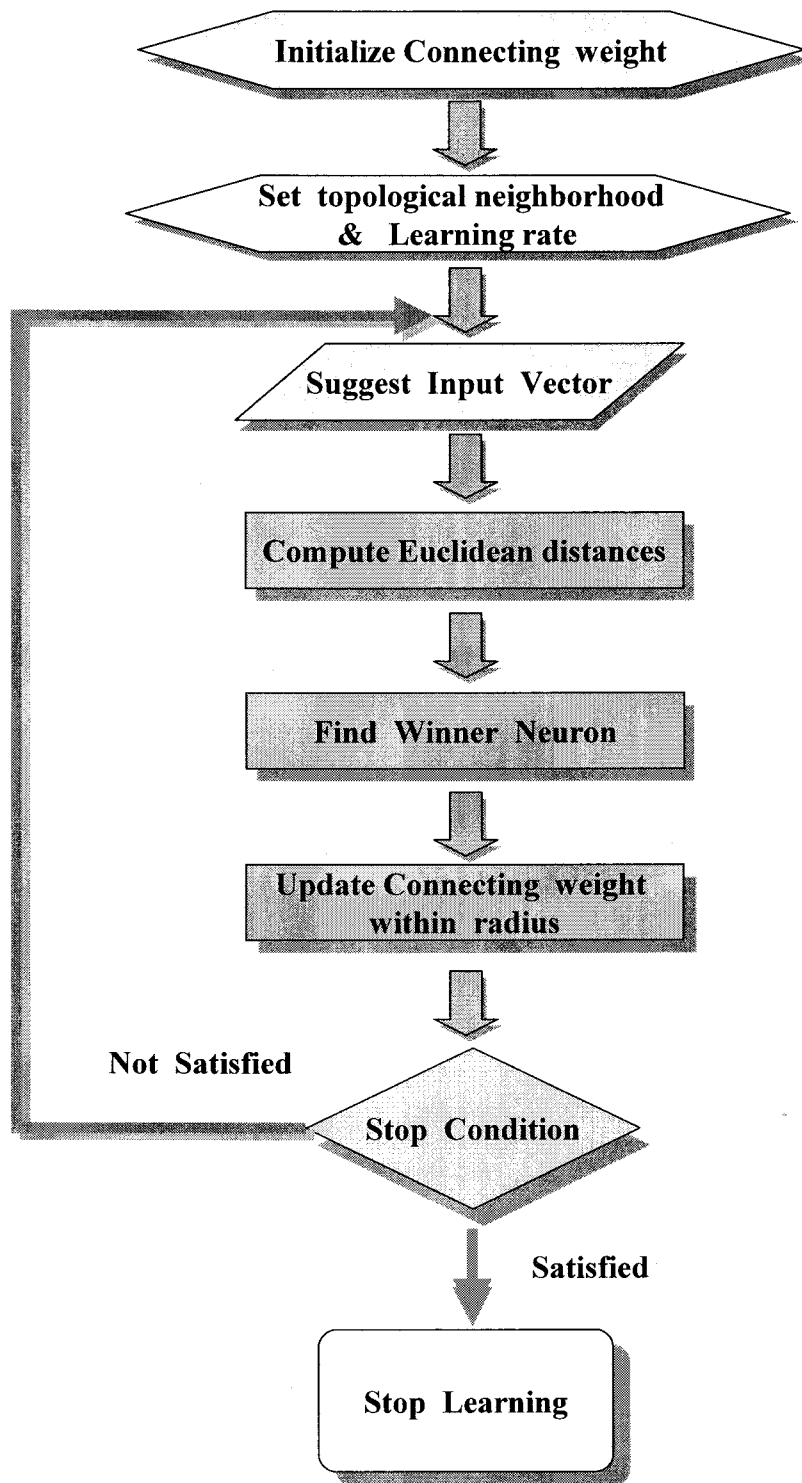


Fig. 3.1.31 자기조직화 신경망의 자율학습 과정

3. 3차원 균열시스템 구성

가. 객체지향 프로그래밍(OOP, Object Oriented Programming)

컴퓨터 프로그램은 자료(data)와 알고리즘(Algorithm)의 두 가지 개념으로 구성된다. 자료는 프로그램이 사용하고 처리하는 정보로 구성되고 알고리즘은 프로그램이 자료를 처리하는 방법을 나타낸다. FORTRAN과 BASIC같은 초기 절차 언어들은 프로그램이 점차 커짐에 따라 문제를 유기적으로 나누게 되었다. 그러나 많은 경우 전체 프로그램들은 그 분기가 산만하게 구성되어 있어서 프로그램의 이해와 수정이 어렵게 되었다. 이후 구조적 프로그래밍이라는 새로운 형태의 방법은 분기에 제약을 두어 정형화된 구문으로 실행할 수 있게 하였다.

또 다른 원리 중의 하나인 하향식(top-down) 설계는 큰 규모의 프로그램을 작은 작업 모듈로 나누는 방법이다. 전체 프로그램을 관리할 수 있는 최소단위로 세분화하여 개별적인 작업 모듈인 함수 단위로 프로그램을 개발하게 된다.

이러한 구조적 프로그래밍 원리가 프로그램의 간결성과 신뢰성 및 유지의 용이성 향상에 큰 기여를 했지만, 대규모 프로그램 개발측면에서는 여전히 많은 문제점을 안고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 객체지향 프로그래밍은 문제 해결을 언어의 절차적인 접근 방법에 맞추기 보다 언어를 문제 해결 방식에 맞춘 방법이다. 즉, 자료의 형태를 해결해야 할 문제의 본질적인 특성에 대응할 수 있도록 설계한, 자료에 주안점을 둔 프로그래밍 기법이다. C++언어에서 클래스(class)는 새로운 자료 형태를 나타내는 것이고 객체(object)는 그런 계획에 따라 생성된 특별한 자료 구조인 것이다. 일반적으로 클래스는 특정 객체를 나타내는데, 사용할 자료와 그 자료를 가지고 수행할 수 있는 동작(operation)을 정의한다. 이러한 동작은 클래스의 방법(method)으로 정의한다.

프로그램을 설계하는데 있어서 객체 지향적 접근 방법은 프로그램이 다루려고 하는 대상을 정확하게 나타내는 클래스를 설계하는 것이다. 이후 이러한 클래스들의 객체를 이용하는 프로그램을 작성하는 순서로 진행한다. 이와 같이 클래스와 같은 저수준으로부터 프로그램의 설계와 같이 고수준으로 진행되는 것을 상향식 프로그램(bottom-up)이라고 한다. 객체지향 프로그래밍의 대표적인 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 데이터 추상화(Data Abstraction)
- 캡슐화(Encapsulation)와 정보 은닉(Data Hiding)

- 다형성(Polymorphism)
- 상속성(Inheritance)

객체지향 프로그래밍은 재사용 가능한 코드 생성이 쉬워 많은 반복 작업을 줄일 수 있고 정보은폐로 예기치 않은 자료 접근으로부터 자료를 보호할 수도 있다. 연산자와 함수 정의를 여러 번 가능하도록 하여 프로그램의 문맥에 따라 적당한 연산자나 함수를 사용할 수 있다. 또한 이전의 클래스를 상속함으로써 상당한 수준의 확장성, 유연성을 제공한다.

이 연구에서는 다양한 3차원균열모델을 구성하고 효율적으로 확장할 수 있는 객체지향 언어인 C++를 사용하였다.

나. 균열망 생성 및 구조

3차원 공간의 균열은 균열의 중심, 길이분포, 방향분포, 간극분포, 균열밀도 등의 통계적 특성자료를 이용하여 생성하게 된다. Fig 3.1.32는 이 연구에서 설계한 균열 및 균열모델의 클래스 계층도를 나타낸 그림이다.

개별균열의 정보는 BaseFracture 클래스를 기본으로 각 균열 모델의 특성에 따라 상속 클래스를 이용하여 구현하였다. 균열 클래스는 균열의 공간상 중심위치, 길이, 간극, 방향성에 대한 정보와 균열간 연결성 분석을 위한 함수로 구성되어 있다. BaseFracture 클래스의 상속 클래스인 PolygonFracture는 BaseFracture 클래스의 자료 외에도 다각형의 종류, 다각형 꼭지점의 3차원 공간상 좌표를 정의하는 변수를 포함하고 있다.

균열망 모델은 BaseModel을 기본으로 균열망 모델의 특성에 따라 BaseModel의 상속 클래스인 PolyModel, GeoModel로 구성하였다. 이와 같은 균열망 모델 클래스는 정해진 시스템의 밀도와 생성 알고리즘에 따라 균열(균열 클래스 객체)을 생성하고 균열간 연결성을 조사하여 균열망을 구성한다. 또한 균열 모델 클래스는 시스템의 클러스터와 유정과 연결된 균열 및 클러스터 정보를 저장하는 다양한 함수를 포함하고 있다. 이 외에도 균열망 시스템의 유정, 연결성과 통계적 분포를 정의하기 위한 WellInfo, FracFromWell, List/ListNode, BaseDistribution을 균열망 모델 클래스의 지지(support) 클래스로 사용하였다. WellInfo 클래스는 균열망 시스템의 유정 위치 및 형태, 유정의 압력, 유량 등의 정보를 나타내기 위한 클래스이고 FracFromWell은 유정과 교차하는 균열을 지정하기 위한 클래스이다. List, ListNode 클래스를 이용하여 균열간의 연결성 및 균열과 유정간의 연결성 정보를 저장한다. 기본 통계적 분포함수를 갖는 BaseDistribution 클래스와 균열 중심, 길

이, 방향성, 간극분포에 대한 BaseDistribution 상속 클래스들은 균열을 다양한 통계 분포에 따라 생성 할 수 있도록 설계하였다.

일반적으로 3차원 균열망은 서로 연결된 균열들로 이루어진 다수의 클러스터를 형성한다. 3차원 균열 모델에서는 하나의 균열에서부터 수 개 또는 수십 개의 균열로 이루어진 다양한 크기의 클러스터들이 존재한다. 균열 모델 생성 시 생성한 균열은 기존의 균열과의 연결성 분석을 통하여 특정 클러스터에 포함 여부가 결정된다. 생성한 균열은 서로 다른 두 개 이상의 클러스터와 연결되어 클러스터들이 병합될 수 있으므로 균열시스템의 클러스터에 대한 정보 갱신이 즉각적으로 이루어져야 한다. 또한 균열시스템의 유동 및 용질거동해석을 위해서 유정과 연결된 균열들로 이루어진 클러스터에 대한 사전정보가 반드시 필요하다. 따라서 이 연구에서는 균열 생성 시 균열 시스템의 연결성 정보관리 및 균열의 추가, 병합 동작을 효율적으로 수행하기 위하여 컴퓨터 자료구조론에서 널리 사용되는 이중연결리스트(doubly linked list)를 사용하였다.

이중연결리스트는 포인트 기능을 가진 C 또는 C++언어에서 매우 유용한 자료구조로서 리스트 원소를 노드라고 부른다. Fig. 3.1.33에서 리스트노드는 균열자료를 저장하기 위한 data와 좌우 노드를 연결하기 위한 Left_link, Right_link 포인터로 구성되어있다. 연결 리스트는 일반적인 배열과 달리 순차적인 자료를 처리할 때 리스트 중간에 노드의 삽입이나 삭제 과정을 매우 효율적으로 수행할 수 있다. 또한 사용한 리스트는 헤드노드를 가지는 원형 이중연결리스트로써 C++의 균열 클래스를 매개변수로 하는 템플릿(template) 클래스를 이용하여 균열 모델에 관계없이 재사용할 수 있다. 여기서 헤드노드는 일반적인 노드와 동일한 노드이지만 값을 할당하지 않는 추가적인 노드를 의미한다. 이 연구에서는 균열망 시스템의 클러스터와 유정과 균열망의 연결성 정보를 관리하기 위한 ClusterListAdmin, WellInfoAdmin 리스트를 생성하였다. 각 리스트의 구성도가 Fig. 3.1.34, Fig. 3.1.37에 나타나 있다.

ClusterListAdmin은 균열망의 클러스터 및 클러스터에 소속된 개별 균열 정보를 저장·관리하기 위한 리스트이다. 균열망 시스템의 클러스터를 지정하는 lnptr은 리스트 형태의 data를 갖는 템플릿 클래스이다. lnptr의 data는 각 클러스터에 포함된 균열들의 정보를 관리하는 동작을 수행한다. 개별균열의 정보는 노드 bfptr의 data에 균열 클래스의 형태로 저장되어 균열의 중심위치, 크기, 방향성 등에 대한 모든 정보를 직접 참조할 수 있다. 새로운 균열이 하나 생성되면, ClusterListAdmin에 포함된 모든 클러스터 노드(lnptr)를 순차적으로 탐색하여 각 클러스터에 포함된 균열(bfptr)과 연결성 해석을 수행한다. 이 때 특정 클러스터에 포함된 균열과 교차할 경우 생성한 균열을 클러스터 리스트에 추가한다. Fig. 3.1.35는 균열망 클러스터에 생성한 균열을 추가하는 동작을 나타낸 모식도이다. 클러스터 리스트에 포함된 최

중 균열노드의 Right_Link와 헤드노드의 Left_Link의 연결을 끊고 생성한 노드의 Right_Link를 헤드노드, Left_Link를 최종 균열노드와 연결한다. 그리고 헤드노드의 Left_Link와 최종 균열노드의 Right_Link를 생성한 노드와 연결하여 균열노드 추가 작업을 마무리한다. 한편 생성한 균열이 두 개 이상의 클러스터와 교차할 경우 클러스터들을 병합함으로써 균열 생성 시 균열간 교차정보, 클러스터의 변경사항을 효율적으로 저장·관리 할 수 있다. Fig 3.1.36는 클러스터의 병합과정을 나타낸 그림이다. 병합할 클러스터 노드와 헤드노드를 삭제한 후 각 클러스터의 최종 균열노드와 첫 번째 균열노드를 연결한다. 이후 병합할 클러스터의 최종 균열노드와 헤드노드를 연결하여 새로운 클러스터 리스트를 구성하게 된다. WellInfoAdmin은 유정과 연결된 균열 및 클러스터를 저장·관리하기 위한 리스트이다. WellInfoAdmin의 헤드노드와 연결되어 있는 wnptr은 data가 WellInfo 클래스인 노드로써 균열망 시스템에 설치된 유정의 위치, 물성 등에 대한 정보를 저장하고 있다. WellInfo 클래스는 유정과 연결된 균열(fwptr)과 클러스터(acptr) 노드를 관리하기 위한 WConnectFracs, WActiveCluster 리스트를 포함하고 있다. 균열망 시스템에 유정이 설치되면 ClusterListAdmin의 모든 클러스터와 균열을 순차적으로 탐색하여 유정과 연결된 균열노드와 클러스터의 포인트를 WConnectFracs, WActiveCluster 리스트에 추가한다. 이러한 노드의 추가는 ClusterListAdmin의 노드 추가 동작과 동일한 방법으로 수행한다.

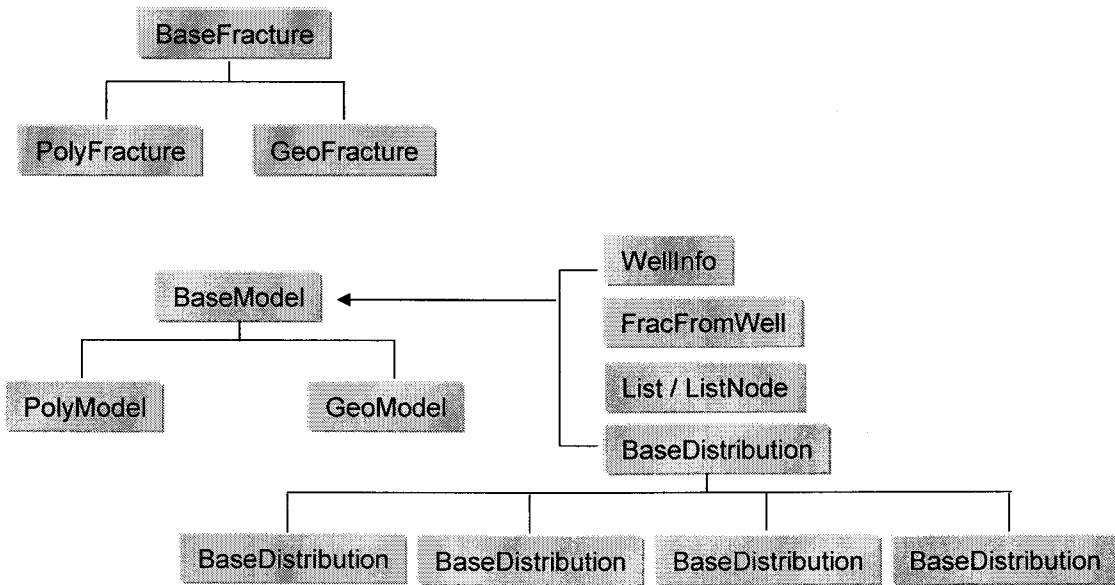


Fig. 3.1.32 균열 및 균열망 모델 클래스 계층도

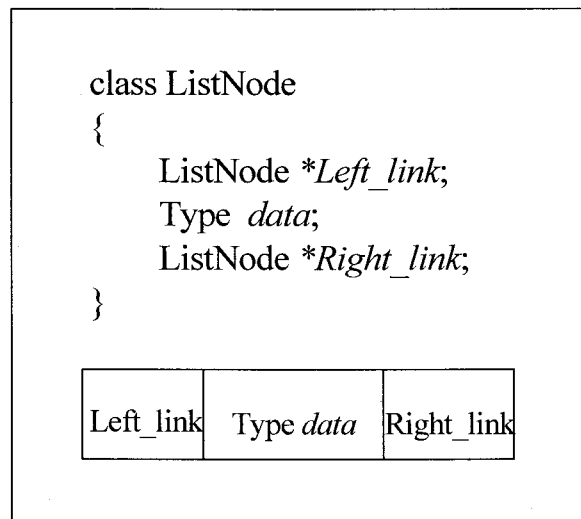


Fig. 3.1.33 이중연결리스트의 리스트노드 정의(C++)

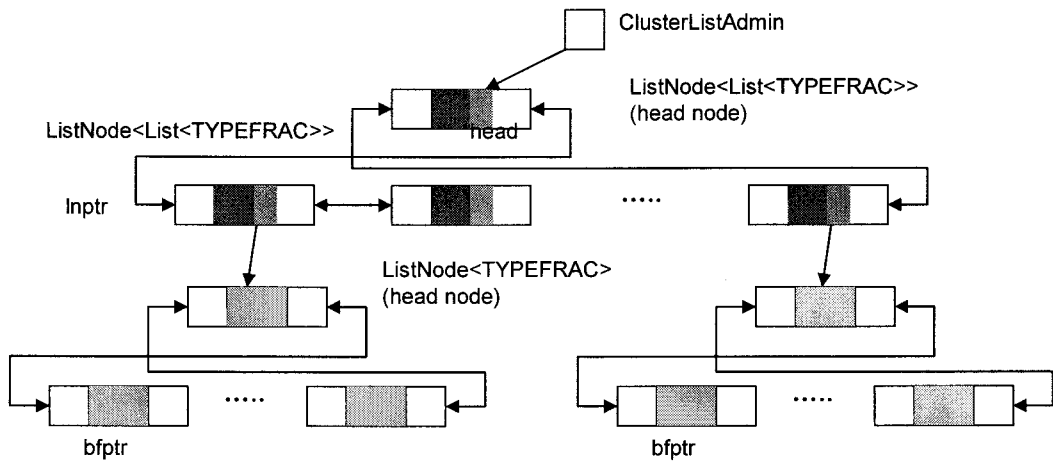


Fig. 3.1.34 균열시스템의 클러스터 구성도(원형 이중연결 리스트)

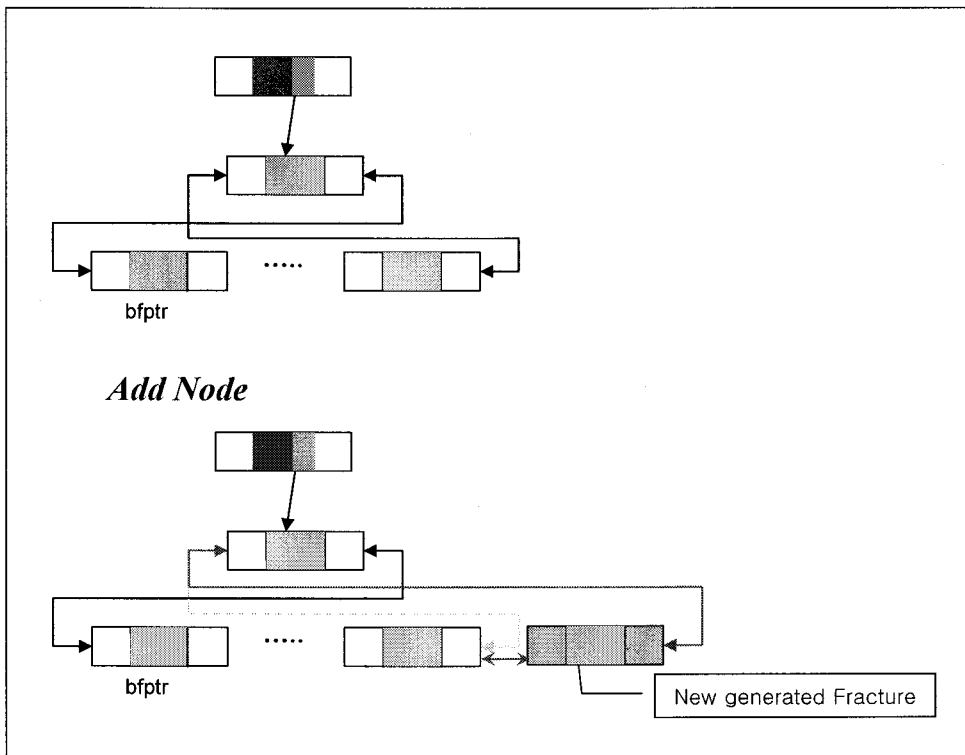


Fig. 3.1.35 클러스터에 균열노드 추가 동작

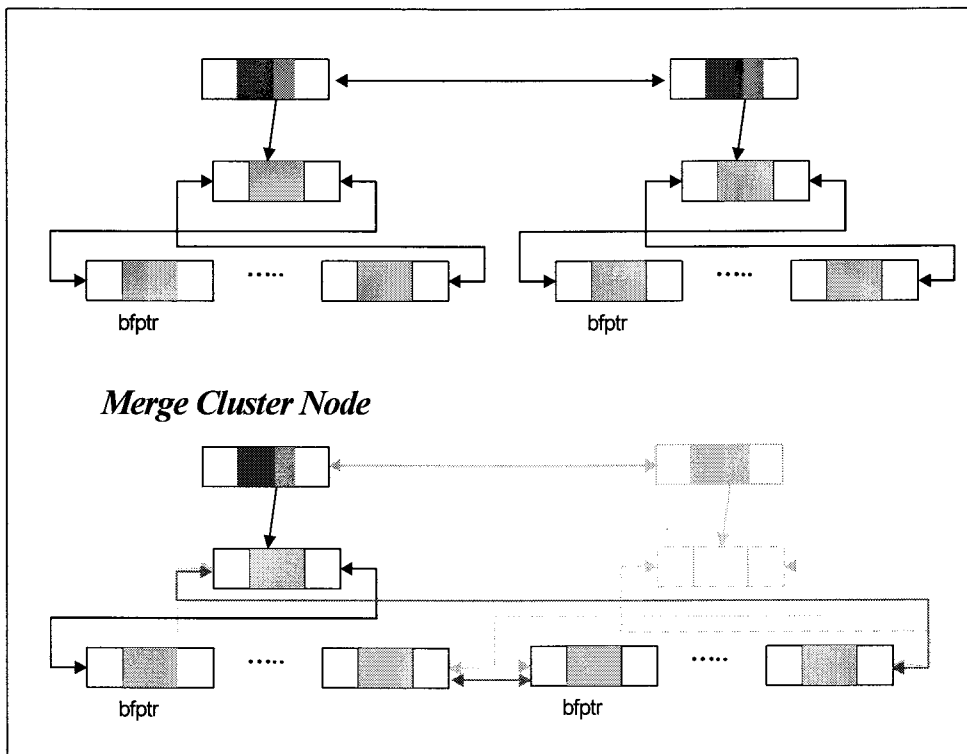


Fig. 3.1.36 클러스터 병합 동작

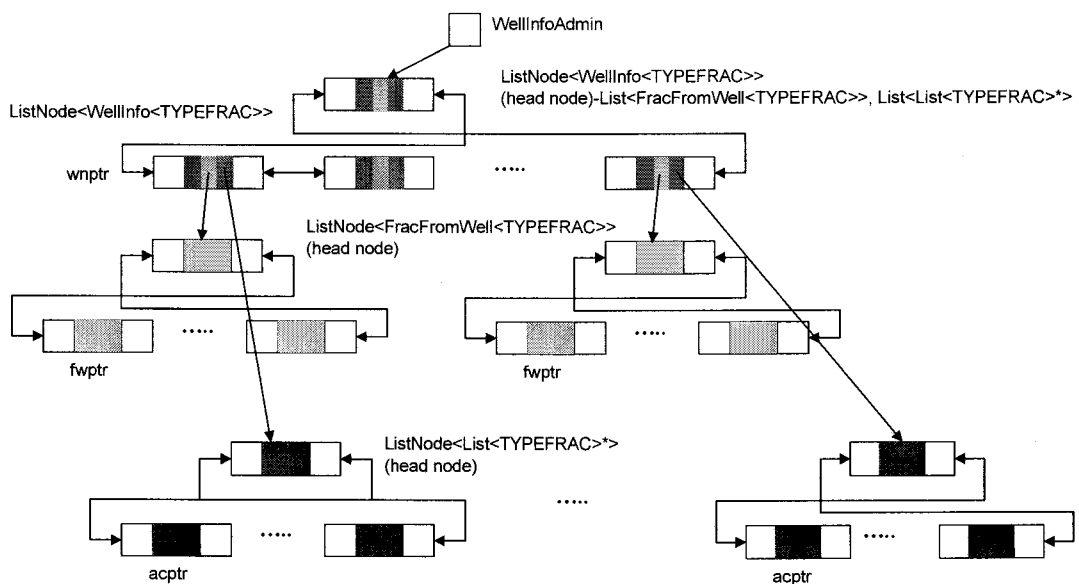


Fig. 3.1.37 유정과 연결된 클러스터 구성도

다. 3차원 균열의 연결성 분석

(1) 두 개의 원형 균열면의 연결성 해석

균열과 균열이 교차하는 연결성 분석 역시 기본적으로 두 개의 원이 교차하는 문제에서 시작한다. Fig. 3.1.38은 두 개의 원이 공간적으로 교차하는 경우를 도시한 그림이다.

서로 다른 중심과 반지름을 가지는 불연속면 A, B를 가정하자. Fig. 3.1.38에 나타난 것처럼 두 불연속면의 중심의 좌표는 $C_A(a_A, b_A, c_A)$ 와 $C_B(a_B, b_B, c_B)$ 이며, 반지름은 각각 r_A 와 r_B 이다. 두 개의 균열이 교차하기 위해서는 가장 먼저 아래의 수식처럼 원이 포함된 두 개의 구가 교차하지 않으면 안 된다. 이를 위해서는 구의 반지름의 합이 구의 중심간의 거리보다 커야만 한다.

$$\overline{O_A O_B} < (r_A + r_B) \quad (3.1.30)$$

식 (3.1.30)이 성립하였다면, 두 개의 원형 균열의 교차여부를 결정하는 수학적 과정은 다음과 같다.

- 두 원이 만나는 교선 구하기
- 각각의 원에서 교선과의 거리 구하기
- 교선과 각각의 원이 만나는 교점 구하기(총 4개의 교점이 반환)
- 교선상의 4개의 교점의 위치관계를 파악하여 내부의 교점 2개를 반환한다.

(가) 두 원형 균열이 교차하는 교선의 방정식

두 개의 불연속면 A, B가 공간상에서 만나는 경우에는 일정한 교선이 존재한다. 이 교선의 방정식은 3차원 직선상의 임의의 한 점 (x_0, y_0, z_0) 와 교선의 방향벡터로 표현된다. 여기서는 공간상에 존재하는 무한평면의 방정식을 연립하여 교선의 방정식을 구하는 일반적인 방법과 두 평면이 평행한 경우, 교선과 3차원 좌표축이 평행한 문제를 해결하기 위해 개발한 방법을 소개한다.

① 3차원 평면의 방정식을 연립하여 계산하는 방법

먼저 Fig. 3.1.38에 도시한 것처럼 공간상에 불연속면이 포함된 무한평면 A, B의 법선벡터를 각각 (a, b, c) 와 (l, m, n) 라 하면 두 개의 무한평면의 방정식은 식 (3.1.31)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} ax + by + cz &= aa_A + bb_A + cc_A = d \\ lx + my + nz &= la_B + mb_B + nc_B = d' \end{aligned} \quad (3.1.31)$$

무한평면 A에 포함된 불연속면 A의 중심의 좌표는 무한평면상에 존재하는 좌표이므로 3차원 평면의 방정식의 상수항을 법선벡터와의 내적으로 계산할 수 있다. 이 값을 각각 d 와 d' 로 표현하였다. 식 (3.1.31)을 하나의 변수 x 에 대해서 연립하면 식 (3.1.32)와 같은 교선의 방정식을 구할 수 있다.

$$x = \frac{y + \frac{dn - d'c}{mc - bn}}{\frac{an - lc}{mc - bn}} = \frac{z + \frac{dm - d'b}{bn - mc}}{\frac{am - lb}{bn - mc}} \quad (3.1.32)$$

식 (3.1.32)는 교선이 x 축과 평행하지 않다는 가정하에서 구성한 것으로, x 축과 평행이거나 꼬인 위치에 있는 교선에는 사용할 수 없다. 이를 방지하기 위해서는 각각의 좌표축과의 존재양상까지 고려하여야하는 문제점이 있다.

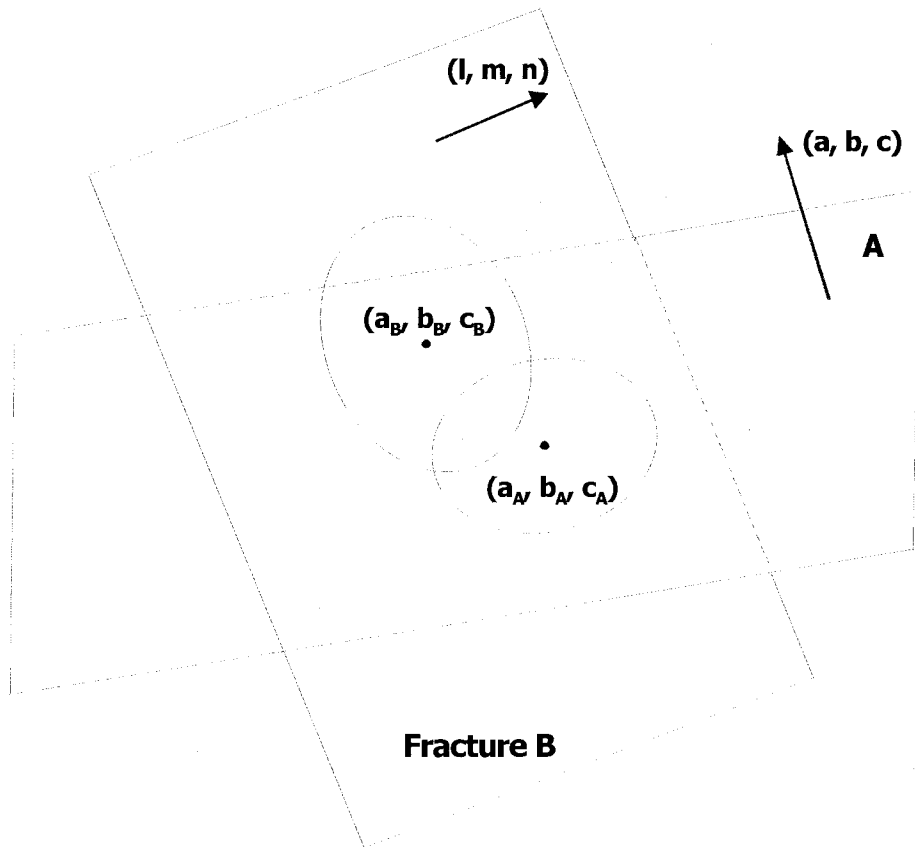


Fig. 3.1.38 원이 포함된 3차원 무한평면의 교차

② 방향벡터와 교선상의 임의의 한 점을 이용한 방법

①에서 설명한 바와 같이, 일반적으로 사용하는 방법은 교선의 방향벡터의 원소중 하나 혹은 그 이상이 0을 가질 경우에는 새로운 방정식으로 도출하여야하며 이 과정에서 많은 시간이 소요된다. 또한 방정식의 형태 역시 식 (3.1.32)과 달리, 2개 혹은 3개의 방정식으로 나타나는 문제점이 있다. 그래서, 방향벡터와 교선상의 임의의 한 점을 이용하여 교선을 특성화시키는 방법을 개발하였다. 가장 먼저 두 개의 무한 평면이 평행인 경우를 제외한다. 평면이 평행하다면 교선이 존재하지 않으며, 두 개의 평면은 교차하지도 않기 때문이다. 두 평면이 평행하다면, 평면의 법선벡터의 외적이 (0,0,0) 인 경우이다. 반면, 두 평면이 평행하지 않다면, 두 평면 사이에는 반드시 교선이 존재하게 되며, 식 (3.1.31)에 나타난 두 개의 무한 평면의 방정식의 법선 벡터를 외적하면 교선의 방향벡터를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & (a, b, c) \times (l, m, n) \\ &= (bn - cm, -an + lc, am - bl) \\ &= (p, q, r) \end{aligned} \quad (3.1.33)$$

식 (3.1.33)에서 방향벡터의 값 중 한 두 개가 0의 값을 가져도, 식 (3.1.32)의 분모에 사용되지 않기 때문에 수식적으로 전혀 문제가 없다.

마지막으로, 교선상의 임의의 한 점 (x, y, z) 을 계산한다. 이를 위해서는 방향벡터의 원소값이 0인지 여부를 판단하여야 한다. 이 과정을 정리하면 다음과 같다.

㉞ $bn - cm \neq 0$ 인 경우

$$\begin{aligned} & by + cz = d, \quad my + nz = d' \\ & y = \frac{nd - cd'}{bn - cm}, \quad z = \frac{-md + bd'}{bn - cm} \end{aligned}$$

㉟ $bn - cm = 0$ 인 경우, 연립2원1차 방정식을 통해 두 개의 좌표 획득, 나머지 하나는 0으로 고정시켜서 구한다.

$$1) \quad b=0, \quad c=0$$

$$\textcircled{1} \quad n=0, \quad m \neq 0 : x = \frac{d}{a}, \quad y = \frac{1}{m}(d' - lx), \quad z = 0$$

$$\textcircled{2} \quad \text{else} \quad : x = \frac{d}{a}, \quad y = 0, \quad z = \frac{1}{n}(d' - lx)$$

$$2) \quad b=0, \quad c \neq 0$$

$$ax + cz = d, \quad lx + nz = d', \quad y = 0$$

$$3) \quad b \neq 0, \quad c = 0$$

$$ax + by = d, \quad lx + my = d', \quad z = 0$$

$$4) \quad b \neq 0, \quad c \neq 0$$

$$x = \frac{d'}{l}, \quad y = 0, \quad z = \frac{1}{c}(d - ax)$$

(나) 불연속면에서 교선과의 거리

(가)과정의 교선을 계산하였다면 무한평면상에 존재하는 원형 균열 A, B가 교선과 교차하는 지 여부를 결정하여야 한다. 이를 위해서는 원형의 불연속면의 중심에서 교선에 내린 수선의 발 H와의 거리가 반지름보다 작아야한다.

Fig. 3.1.39와 같이 수선의 발 $H_A(u, v, w)$ 는 교선상에 있는 점이며 $\overrightarrow{C_A H_A}$ 와 교선의 방향벡터는 수직을 이루고 있다. $H_A(u, v, w)$ 는 교선의 방향벡터 (p, q, r) 와 교선상의 임의의 한 점 (x_0, y_0, z_0) 매개변수 t를 이용하여 식 (3.1.34)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= pt + x_0 \\ v &= qt + y_0 \\ w &= rt + z_0 \end{aligned} \tag{3.1.34}$$

벡터 $\overrightarrow{C_A H_A}$ 와 방향벡터 (p, q, r) 의 내적이 0이라는 식 (3.1.35)를 이용하면 매개변수 t의 값을 구할 수 있으며, 이 값을 다시 식 (3.1.34)에 대입하면 $H_A(u, v, w)$

계산할 수 있다. 계산한 t 의 값은 식 (3.1.36)과 같다. 이를 이용하여 선분 $\overline{C_A H_A}$ 의 길이를 계산할 수 있다.

$$(u - a_A, v - b_A, w - c_A) \cdot (p, q, r) = 0 \quad (3.1.35)$$

$$t = \frac{p(a_A - x_0) + q(b_A - y_0) + r(c_A - z_0)}{p^2 + q^2 + r^2} \quad (3.1.36)$$

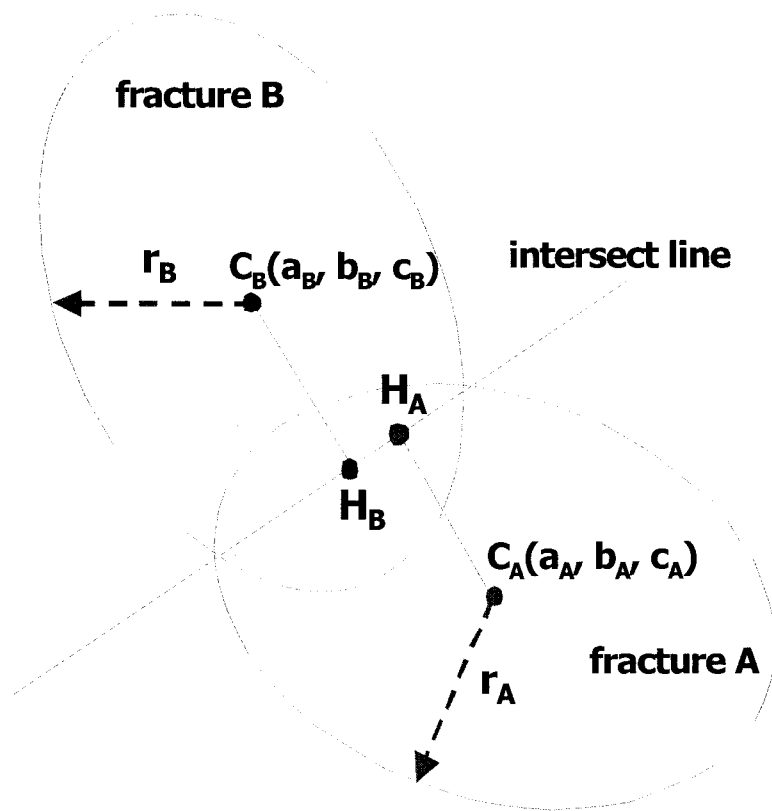


Fig. 3.1.39 차원 공간상에 존재하는 두 개의 원과 그 수선의 발

(다) 원형 균열과 교선이 만나는 교점

(나)과정의 균열과 교선과의 거리를 각각의 균열에 대해 계산하여 이 값이 각각의 균열의 반지름과 비교하여 작은 값을 가진다고 두 균열은 교차한다고 단정지을 수는 없다. 이는 두 개의 균열이 각각 전혀 별개의 위치에서 교선과 교차할 수 있기 때문이다(Fig. 3.1.40). Fig. 3.1.40의 ①과 같은 경우를 제외하기 위해서는 원형균열과 교선이 만나는 교점인 P_1, P_2 를 계산하여 위치관계를 규명하여야 한다.

Fig. 3.1.41에서와 같이 원형균열 A와 교차하는 교점을 P_{A1}, P_{A2} 라고 하자. 이 두 점은 교선과 원을 포함하고 있는 구의 표면에 모두 존재하는 점이다. 3차원 공간에 도시되는 원의 방정식은 존재하지 않기 때문에, 구의 방정식을 이용하여 이 값들을 계산할 수 있다. 교점의 좌표를 $P(u, v, w)$ 로 정의하자. 그러면, 이 P 는 다음의 관계식을 모두 만족한다.

$$\begin{aligned} u &= pt + x_0 \\ v &= qt + y_0 \\ w &= rt + z_0 \end{aligned} \tag{3.1.37a}$$

$$(u - a_A)^2 + (v - b_A)^2 + (w - c_A)^2 = r_A^2 \tag{3.1.37b}$$

이를 연립하여 계산하면 t 에 관한 이차방정식이며, 두 개의 실근 t 를 얻을 수 있다. 이차방정식이 매개변수 X, Y, Z 를 이용하여 $Yt^2 - 2Xt + Z = 0$ 라면, 근의 공식에 의해 t 의 값은 식 (3.1.38)과 같이 표현되며, 각각의 요소는 교선의 방향벡터와 원의 반지름, 원의 중심으로 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{X \pm \sqrt{X^2 - YZ}}{Y} \tag{3.1.38}$$

여기서,

$$X = p(a_A - x_0) + q(b_A - y_0) + r(c_A - z_0) \quad Y = p^2 + q^2 + r^2$$

$$Z = (a_A - x_0)^2 + (b_A - y_0)^2 + (c_A - z_0)^2 - r_A^2$$

이 t 값을 다시 식 (3.1.37a)에 대입하면, P_{A1} , P_{A2} 을 얻을 수 있다.

(라) 두 원형균열의 교차와 교차선분

(다)과정까지 마치게 되면 교선상에는 각각의 균열이 교선과 만나는 2개의 교점, 총 4개의 점이 위치하게 된다. 교점들의 위치관계를 이용하여 Fig. 3.1.41의 교차선분 $\overline{P_{B1}P_{A2}}$ 를 구한다. 교차선분은 두 개의 원형균열이 교차하여 이루는 선분이며, 차후 균열을 통한 유동모사시 경계선(boundary line)의 역할을 담당할 수 있다. 또한, 이러한 교차선분은 균열과 단층면이 만나서 생성시키는 균열 트레이스 지도(trace map)에서 트레이스를 의미하기도 한다.

교선상에서 실제 두 원형 균열이 교차하는 두 개의 좌표를 획득하기 위해, 점의 위치를 일정한 순서로 정렬하는 것이 필요하다. 그렇지만, 3차원 공간에서 직교좌표계 중 하나의 좌표축을 선정하여 정렬하였을 경우, 많은 소요시간과 경우의 수를 가지게 되는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 도입한 방법이 바로 두 점 사이의 내적 부호를 이용하는 방법이다. 하나의 점에서 나머지 점을 바라볼 때 동일한 방향으로 바라본다면 내적의 부호는 양수이다. 반면 하나의 점이 나머지 점 사이에 존재한다면 내적의 부호는 음이 된다. 교선상에 존재하는 4개의 점(균열 A와 교선이 만나는 점은 $A1$, $A2$, 균열 B가 교선과 만나는 점은 $B1, B2$ 로 표시)의 위치관계와 그 경우 반환되어야 할 점은 Fig. 3.1.42 에 정리하였다. $\overline{A1A2}$ 는 $A1$ 의 좌표에서 $B1$ 의 좌표를 뺀 것을 의미한다. 교차선분이 반환되는 경우는 다음의 순서도(Fig. 3.1.43)와 같으며 교차여부와 교차선분의 좌표가 최종적으로 획득된다.

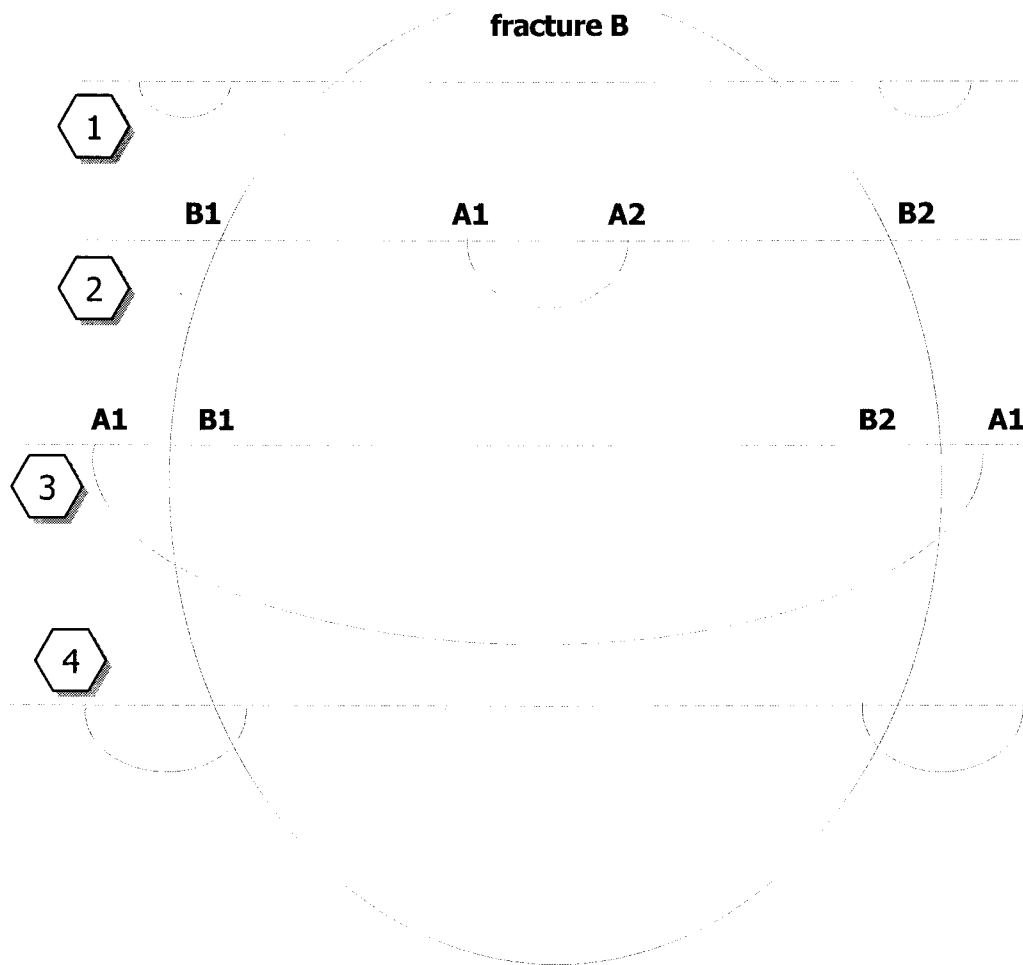


Fig. 3.1.40 균열B와 교차하는 균열 A와 교선상의 상관관계

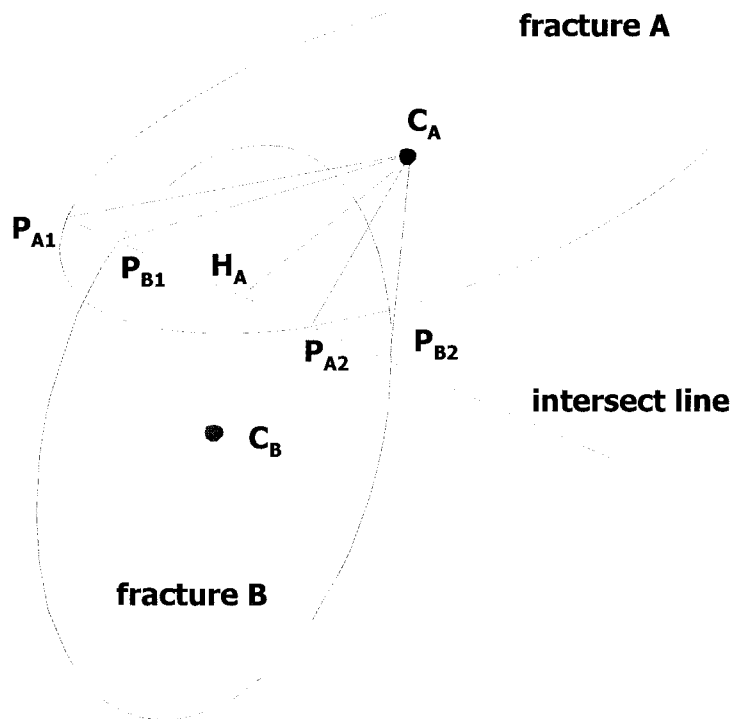


Fig. 3.1.41 교선과 원과의 두 개의 교점

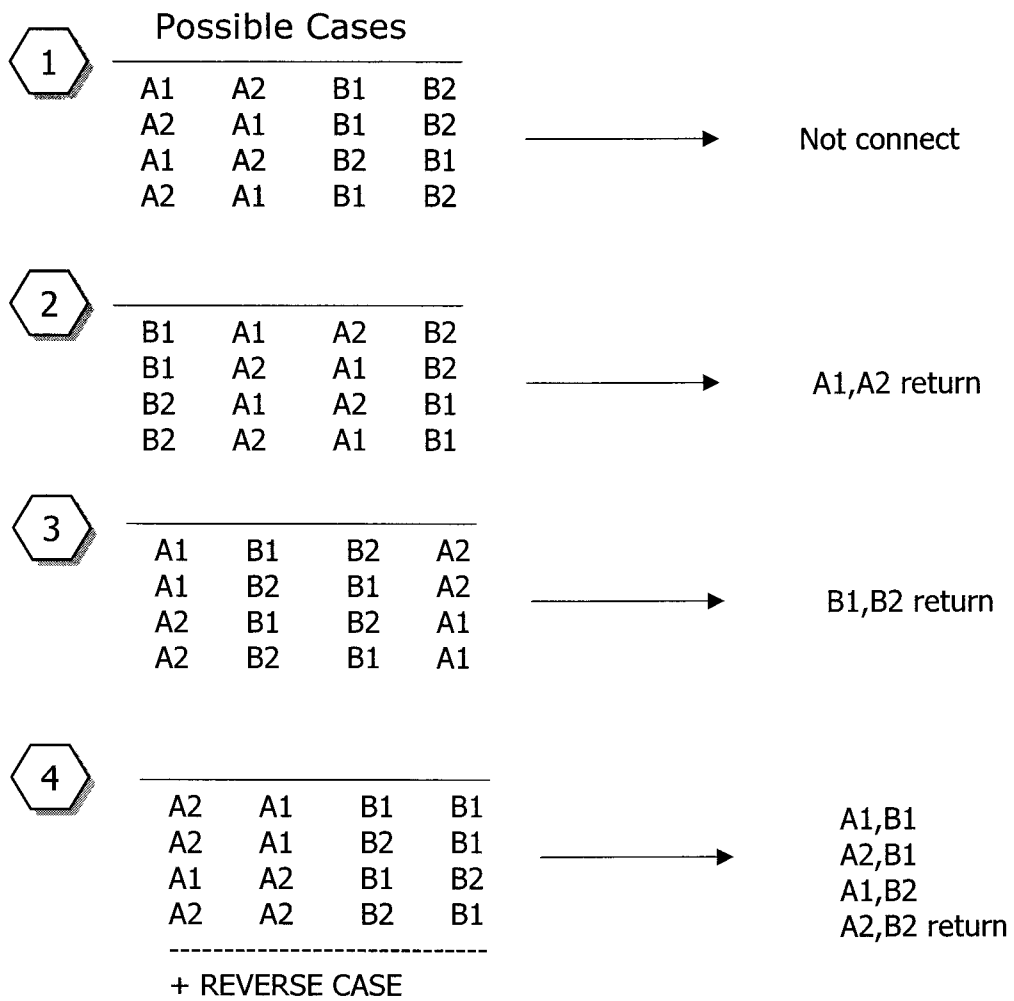


Fig. 3.1.42 두 개의 원이 3차원 공간에서 교차하는 경우의 수와 반환 좌표

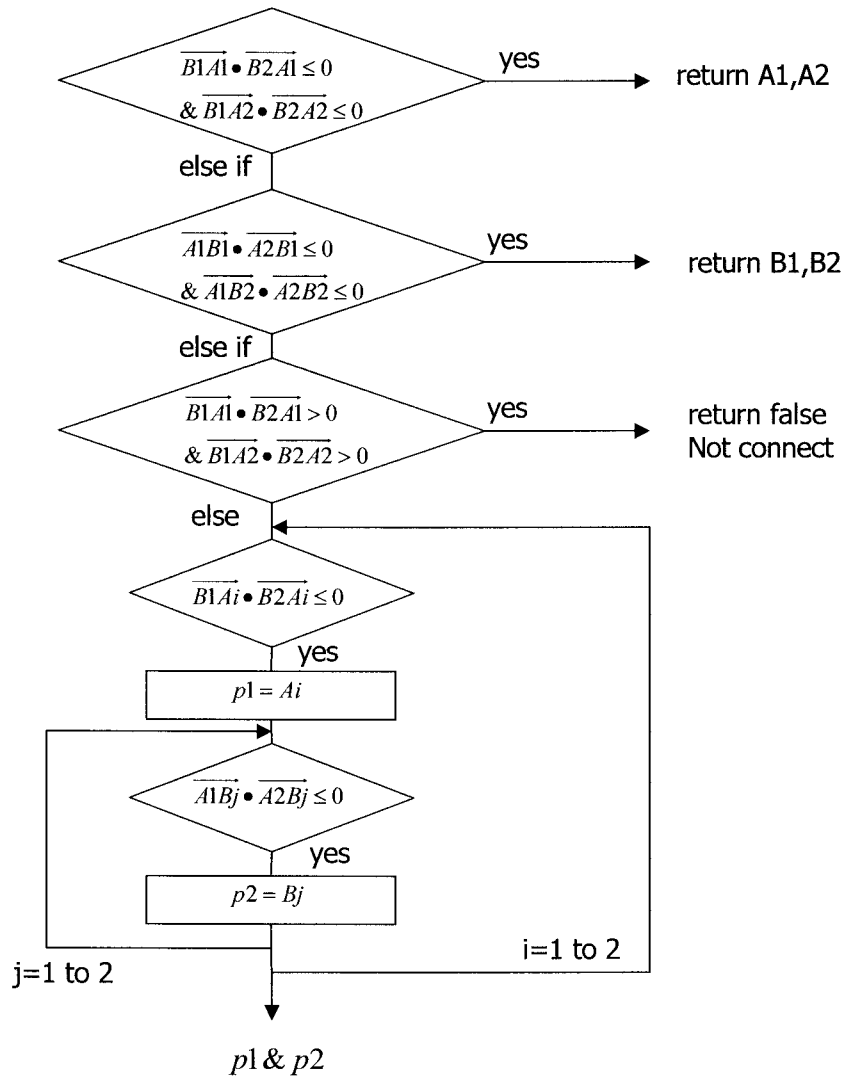


Fig. 3.1.43 두 원형균열이 만나는 교점 반환 순서도

(2) 다각형 단층면과 원형 균열간의 연결성 해석

3차원 균열망에서 일정한 크기의 단층면이 존재할 경우, 혹은 사면의 절단 등으로 인해 균열이 노두에 노출된 경우가 있다. 전자의 경우는 거대 균열이 존재하는 경우이며, 후자의 경우는 2차원 균열자료조사시 발생할 수 있다.

SNUFRACS에서는 다각형 단층면을 도시하기 위해 입력값으로 꼭지점의 좌표가 주어진다. 단층면이 원형일 경우는 앞에서 설명한 원형균열간의 연결성 해석과 동일하다. 다각형 단층면과 원형 균열간의 연결성해석 역시 "(1) 두 개의 원형 균열면의 연결성 해석"방법을 이용할 수 있으며, 수학적인 순서는 다음과 같다.

- 다각형이 포함된 평면의 방정식 구하기
- 원과 다각형이 만나는 교선 구하기
- 원과 교선사이의 수선의 발과 교점 구하기(교점 2개 반환)
- 교선상의 두 점을 연결한 직선과 다각형의 변과 만나는 두 점 구하기(교점 2개 반환)
- 교선상의 4개의 점의 위치관계 파악하여 두 개의 교점을 반환한다.

(가) 다각형이 포함된 평면의 방정식

다각형의 꼭지점 중 3개의 꼭지점을 이용하여 평면의 방정식을 계산할 수 있다. 평면의 방정식에 3개의 꼭지점을 입력하여, 법선벡터와 상수항으로 구성된 아래와 같은 4원 1차 연립방정식을 연립한다.

$$\begin{aligned}lx_0 + my_0 + nz_0 &= d \\lx_1 + my_1 + nz_1 &= d \\lx_2 + my_2 + nz_2 &= d \\.....\end{aligned}\tag{3.1.39}$$

(나) 원과 다각형이 만나는 교선

위의 원이 포함된 무한 평면간의 교선 구하는 방법과 동일하다.

(다) 원과 교선 사이의 수선의 발과 교점

(1)의 (다)와 동일한 방법으로 계산 가능하다.

(라) 교점을 연결한 직선과 다각형의 변과의 교점

다각형의 변은 두 개의 꼭지점으로 주어지므로, 두 개의 꼭지점을 이용하여 3차원 교선의 방정식을 계산할 수 있다. 교선의 방향벡터는 두 꼭지점의 차이이며, 교선상에 존재하는 하나의 점은 두 꼭지점 중 하나를 선택하면 된다. 교선과 이 직선간에 만나는 점이 두 꼭지점 사이에 존재한다면 이 점이 바로 교차점이 된다(Fig. 3.1.44의 P1,P2).

교선상에는 원과 교선의 교점과 교점의 연결선이 다각형의 두 변과 만나는 두 개의 점, 모두 4개의 점이 존재한다(Fig. 3.1.40의 경우와 동일한 형태임). 이중에서 교차하는 경우 모두 두 개의 점을 반환한다. 이것은 교선상에 4개의 점의 위치관계를 파악하는 Fig. 3.1.42 와 Fig. 3.1.43과 동일한 방법으로 계산한다.

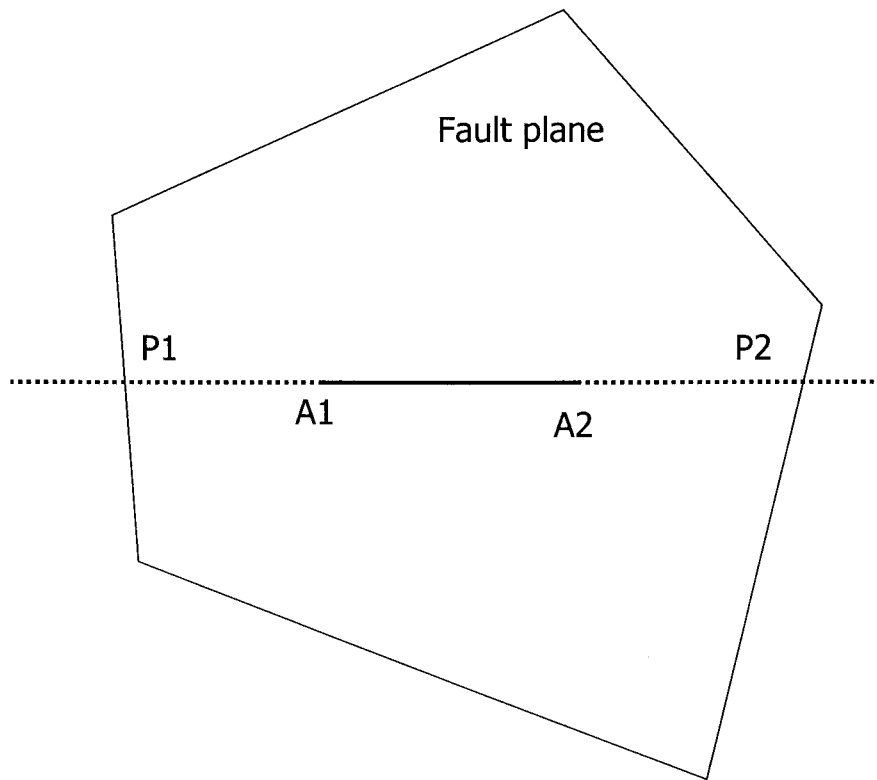


Fig. 3.1.44 단층면에 교차하는 원의 두 교점(A1,A2)와 연장선과 단층면사이의 교점(P1,P2)

(3) 다각형(Polygon) 균열간의 연결성 해석

다각형균열과 원형균열의 연결성 해석은 (2)의 방법을 사용하면 가능하다. 반면, 다각형 균열간의 연결성은 다각형에 대한 특징을 먼저 파악한 후 (1)과 (2)의 방법을 모두 사용하면 해석할 수 있다. 3차원 공간상에 다각형을 도시하기 위해서는 다각형의 각 꼭지점을 계산하여야만 하고, 각 꼭지점은 하나의 평면상에 존재하여야만 한다. 다각형 균열간의 연결성 해석 역시 원형 균열간의 연결성 해석과 유사하지만, 교선상에 있는 교점의 위치파악 과정이 추가된다. 이 과정은 다음과 같다.

- 원에 포함되는 다각형의 꼭지점 구하기
- 원이 포함된 무한평면간의 교선 구하기
- 다각형과 교선이 만나는 교점 구하기(각각 2개의 교점, 총 4개의 교점이 반환)
일례로 균열 A가 교선과 만나는 점이 원의 경우 A1,A2이라면 다각형과 교선이 만나는 점은 A1, P2가 된다(Fig. 3.1.45). 이것을 두 개의 균열에 대해 실시하면 다각형과 교선이 실제로 만나는 4개의 점을 획득할 수 있다.
- 다각형의 4개의 교점의 위치관계 파악

Fig. 3.1.45에서 알 수 있듯이 원과 교선이 만나는 교점의 연결선은 다각형의 두변과 만나게 된다. 그러므로, 원내에서는 4개의 점이 교선상에 존재하게 되고, 이 4개의 교점중에서 2개의 점이 반환된다. 이 2개의 점이 다각형과 교선이 만나는 점이다. 이를 위해서는 “(2) 다각형 단층면과 원형 균열간의 연결성 해석”의 “(라) 교점을 연결한 직선과 다각형의 변과의 교점”의 방법을 사용할 수 있다.

각 다각형당 2개의 교점이 반환되었다면 Fig. 3.1.42를 이용하여 4개의 교점 중 교점 2개를 반환할 수 있다.

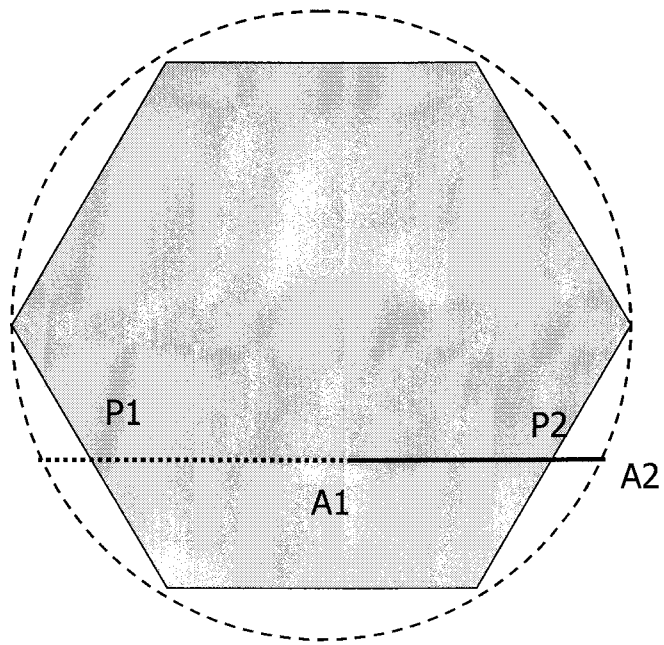


Fig. 3.1.45 원에 내접하는 다각형과 교선, 교선상의 4개의 교점

(4) 유정과 균열간의 연결성 해석

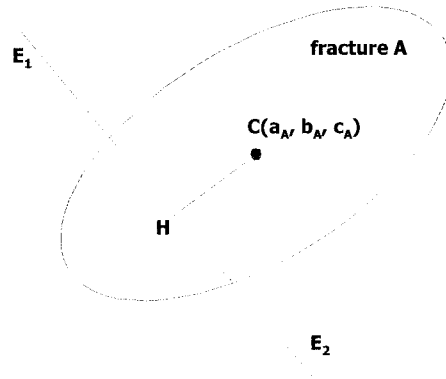
지하 에너지 생산과 지하균열관찰을 위해 사용하는 유정은 일반적으로 단면이 원형인 원기둥형태이다. 또한, 지하유체 생산에 사용하기 위해 일정 영역을 천공하게 되는데, 이 위치가 유체 유동이 시작되는 시작점이 된다. 연결성 해석을 위해 유정은 균열면을 완전히 관통하며, 유정과 유정의 천공지점은 일직선상에 존재한다고 가정한다. 이러한 가정으로 인해, 원기둥의 유정을 하나의 직선형태로 간략화 할 수 있다. Fig. 3.1.46(a)와 같이 직선형태의 유정에 존재하는 유동 가능 영역 혹은 관심 영역 E_1E_2 가 존재하며, 균열이 포함된 평면과 만나는 점을 $H(u, v, w)$ 가 있다. Fig. 3.1.46(b)는 전체 과정을 순서도로 나타낸 것이다.

먼저 E_1E_2 의 교선의 방향벡터와 교선상의 임의의 점으로 교선의 방정식을 구해야 한다. 교선의 방향벡터는 E_1 의 좌표에서 E_2 의 좌표를 빼면 구할 수 있으며, 교선상의 임의의 한 점은 E_1 을 택하였다. $H(u, v, w)$ 는 교선과 평면상에 존재하는 교점이므로 이미 설명한 “(다) 원형 균열과 교선이 만나는 교점의 방법”을 이용하여 획득할 수 있다(식 3.1.37(a),(b)와 식 3.1.38을 이용). $H(u, v, w)$ 를 계산하고 난 이후, 유동영역 E_1E_2 내에서 균열과 교차하기 위해서는 $H(u, v, w)$ 는 원 A에 포함되어 있어야 하며, 교선상에 E_1HE_2 의 순서로 존재하여야만 한다. 이는 다음의 두 조건을 만족하면 충족된다.

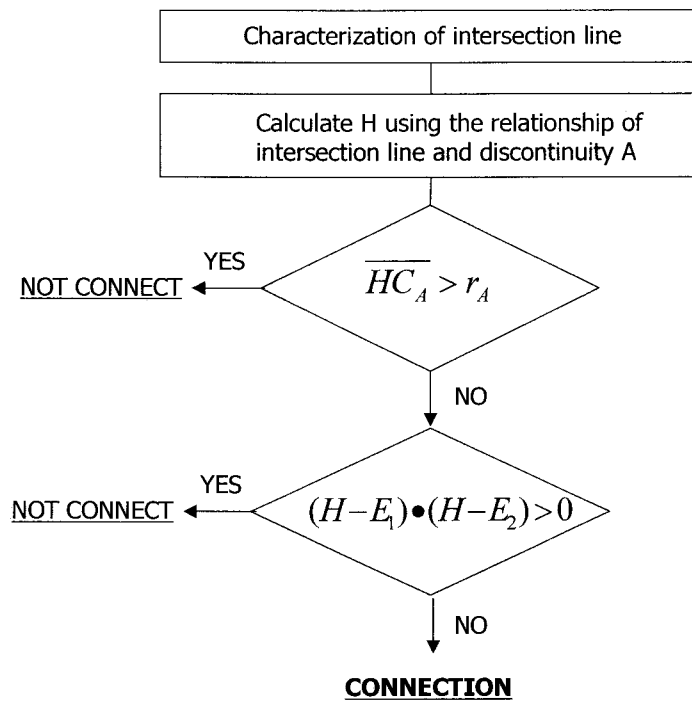
$$\begin{aligned} \overline{HC_A} &\leq r_A \\ \overrightarrow{HE_1} \cdot \overrightarrow{HE_2} &\leq 0 \end{aligned} \quad (3.1.40)$$

다음으로 다각형 균열과 유정과 연결여부를 확인하기 위해서는 위에서 구한 $H(u, v, w)$ 의 좌표와 위치파악이 중요하다. 원의 중심과 $H(u, v, w)$ 를 연결하는 직선과 다각형이 만나는 두 점은 동일한 선분상에 존재하게 된다. 두 개의 점 P_1 과 P_2 사이에 H 가 존재하면 되기 때문에 식 (3.1.40)과 다음의 수식 (3.1.41)까지 만족한다면 다각형과 유정은 교차하는 것이다.

$$\overrightarrow{HP_1} \cdot \overrightarrow{HP_2} \leq 0 \quad (3.1.41)$$



(a)



(b)

Fig. 3.1.46 (a) 유정과 균열이 교차하는 형태 및 교점의 좌표 (b) 유정과 원형 균열의 연결성 해석을 위한 순서도

4. 시스템 개발 결과

이 연구에서는 Baecher, Polygon, Fractal, 지구통계학적 개념모델을 이용하여 OOP 기반의 3차원 균열망 모델링 시스템, SNUFRACS를 개발하였다. 개발 시스템은 Borland C++builder 6을 사용하였다.

SNUFRACS는 크게 시스템 크기, 균열망 개념모델, 균열모델의 통계적 변수와 유정 위치 정보 입력을 위한 입력 컨트롤과 3차원 균열망 시각화, 생성한 균열망 모델의 통계적 분석 모듈로 구성되어 있다. 균열망 모델의 자료 입력 모듈은 시스템 크기와 선택할 개념모델, 균열군의 중심, 길이, 방향성, 간극분포와 균열 밀도 입력 탭을 포함하고 있다. 균열망 모델의 3차원 시각화 모듈은 대표적인 3D 그래픽스 제작용 프로그래밍 인터페이스인 OpenGL을 사용하여 균열망의 전방향 회전, 확대, 축소화면과 내부 절단 투영 등의 다양한 화면을 제공한다. 한편 통계적 분석 모듈은 생성한 3차원 균열망 및 2차원 단면의 균열 길이, 간극, 방향성 분포 특성에 대한 통계적 분석기능을 갖추고 있다. Fig. 3.1.47, Fig. 3.1.48은 SNUFRACS의 인터페이스를 나타낸 그림이다.

가. 균열군 통계적 자료입력 모듈

3차원 균열망 생성 시 필요한 입력자료는 균열 형태, 균열망 모델과 균열군의 통계적 자료(Fig. 3.1.47), 유정의 설치 정보이다. SNUFRACS는 선택한 개념모델에 따라 필요한 입력자료 목록을 활성화한다. 입력창이 활성화되면 균열군의 중심, 길이, 방향성, 간극 등에 대한 분포함수를 선택하고 필요한 통계적 변수를 입력하게 된다. 유정 설치 입력창은 유정의 개수, 형태, 직경, 깊이, 유량·압력 등의 자료 항목으로 구성되어 있다. Fig. 3.1.49는 유정의 설치정보 항목과 입력 예를 나타낸 그림이다. 이상의 균열망 입력자료는 "data"파일로 저장하여 재 사용할 수 있다. 이 연구에서 사용한 개념모델과 필요한 입력자료가 Table 3.1.3에 나타나 있다. 시스템의 모든 입력자료는 메모창을 통하여 사전검토 하거나 텍스트 파일로 편집·저장할 수 있다(Fig. 3.1.50). 균열망 구성을 위한 자료입력이 완료되면 실행 버튼(Generate)을 눌러 균열망 생성 연산을 수행한다. 균열망 모델을 변경할 경우 Reset 버튼을 눌러 시스템을 초기화한 후 위와 같은 순서로 선택한 개념모델에 해당하는 균열망을 재구성할 수 있다.

나. 3차원 시각화 모듈

3차원 물체를 가시화 하는 방법으로는 공개 라이브러리인 SGI(Silicon Graphics Inc.)의 OpenGL과 마이크로소프트사의 DirectDraw가 있으며 이중 OpenGL은 사용하기가 쉽고 플랫폼에 독립적이기 때문에 이 연구에서는 OpenGL을 사용하여 균열 매질을 가시화한다. SNUFRACS는 생성한 균열망 모델의 3차원 및 축에 수직인 2차원 단면도 화면 등의 다양한 시각화 기능을 갖추고 있다. 균열망 시스템에 존재하는 클러스터를 컬러 지정 옵션(Fig. 3.1.53)을 통하여 다양한 색으로 구현할 수 있고, 설치된 유정과 교차하는 균열 클러스터를 개별적으로 시각화 할 수 있다. Fig. 3.1.51은 4개의 클러스터로 이루어진 균열망과 시스템 중앙에 설치된 유정을 나타낸 그림이다. 화면 왼쪽의 시스템 회전, 확대, 축소 기능을 이용하여 다양한 각도에서 균열망 분포형태를 살펴볼 수 있다. Fig. 3.1.52는 유정과 교차하고 있는 균열 클러스터를 나타내고 있다. 이와 같은 교차 균열 클러스터 그림은 균열망 시스템의 유체 유동 및 용질 거동 해석의 주요 경로와 같은 유용한 시각적 정보를 제공한다.

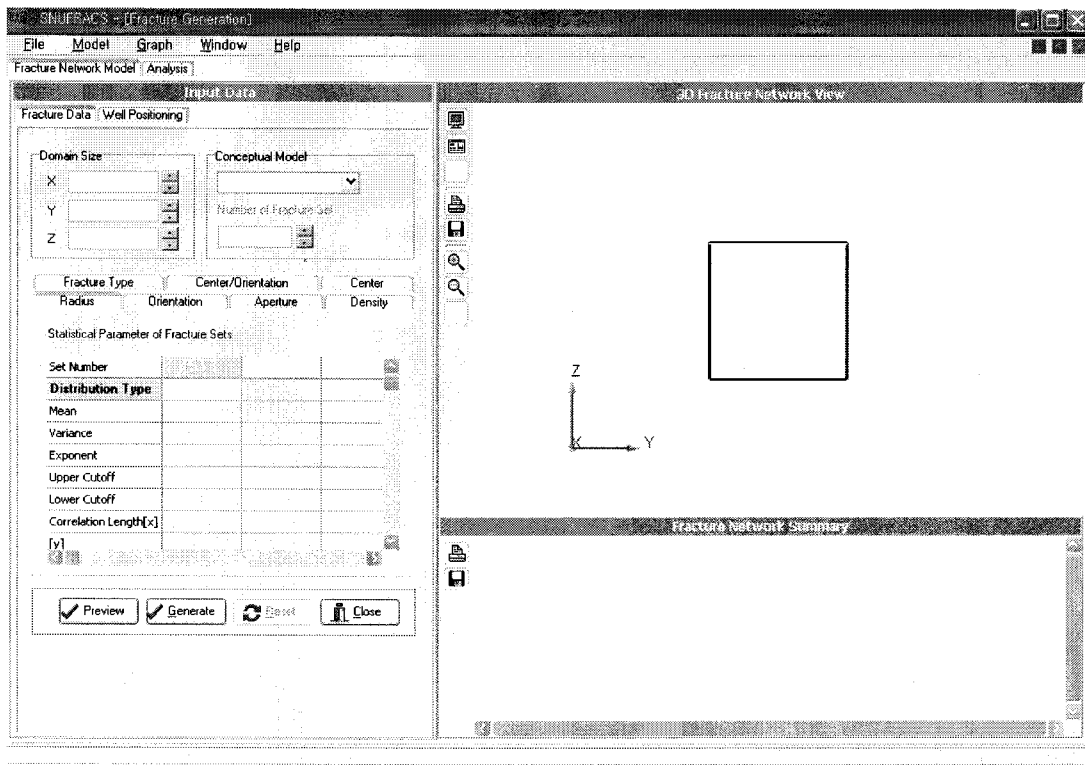


Fig. 3.147 SNUFRACS 인터페이스(입력자료, 3차원 시각화 모듈)

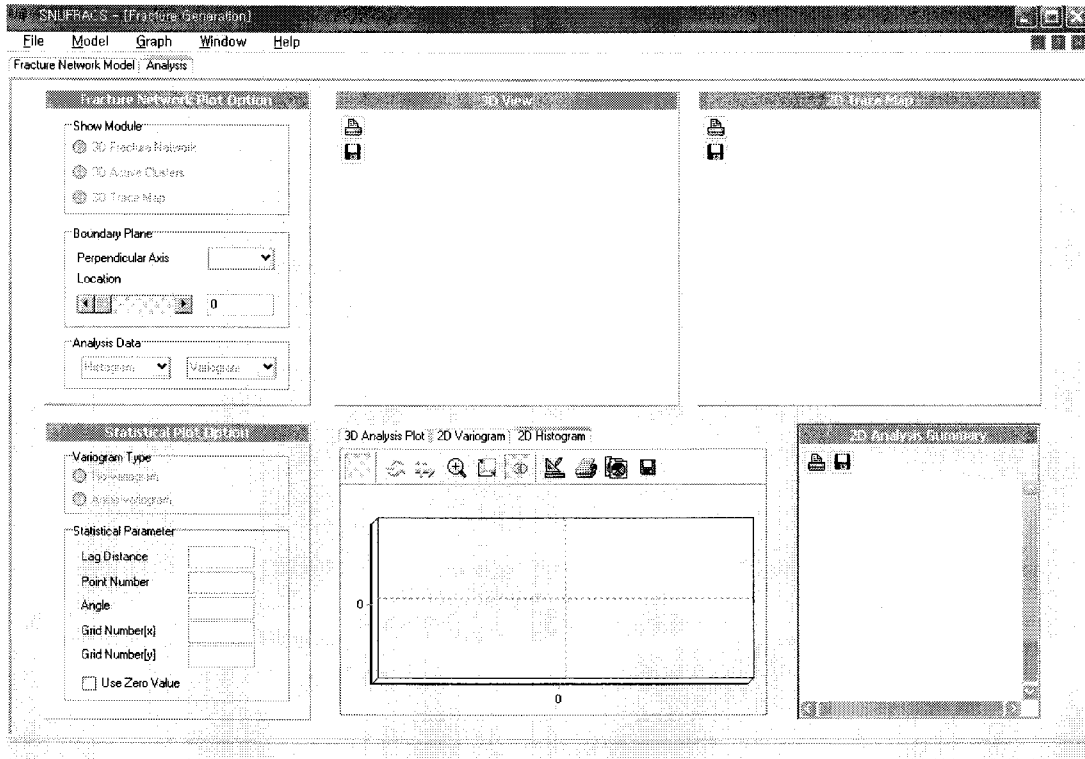


Fig. 3.148 SNUFRACS 인터페이스(통계적 분석 모듈)

Table 3.1.3 SNUFRACS 입력자료

System Size	X, Y, Z (3 Dimension)
Conceptual Model	Baecher Model Polygon Model Fractal Model Geostatistical Model
Statistical Data for Fracture Set	Fracture Set Center(Possion/SGS) Radius Orientation Aperture Density Fractal Dimension(for Levy-Lee Fractal Model)
Well Data	Number of Wells Well Type Location Well Depth Radius Value(Pressure/ Flowrate)

Input Data

Fracture Data | Well Positioning

Well Data

Well Number 2

Well Number	1	2
Well Type	Constant Pressure	constant Flowrat
End1X	5	10
End1Y	5	10
End1Z	0	0
End2X	5	10
End2Y	5	10
End2Z	20	20
Flow1X	5	10
Flow1Y	5	10
Flow1Z	0	0
Flow2X	5	10
Flow2Y	5	10
Flow2Z	5	3
Value	1500	30
Radius	0.2	0.2

Well Positioning

Fig. 3.1.49 유정 설치(Positioning) 정보 입력창

Fracture Network Summary

System information

X	Y	Z
20.00	20.00	20.00

Model : Baecher

Number of Fracture Sets : 3

Set Number : 1

Fig. 3.1.50 균열망 입력자료 텍스트 출력창

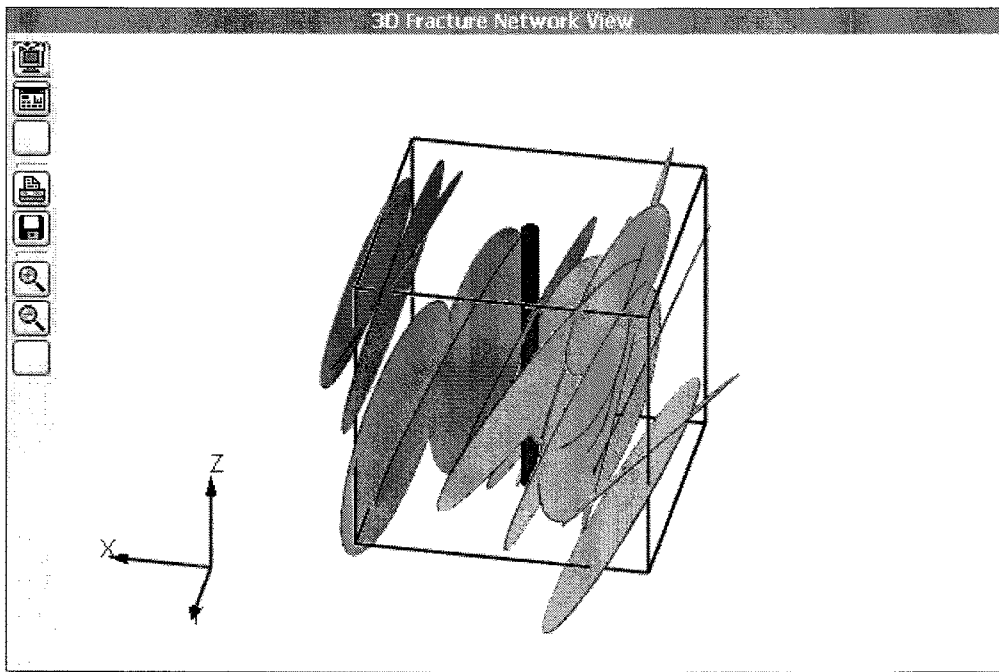


Fig. 3.1.51 3차원 균열망 시각화

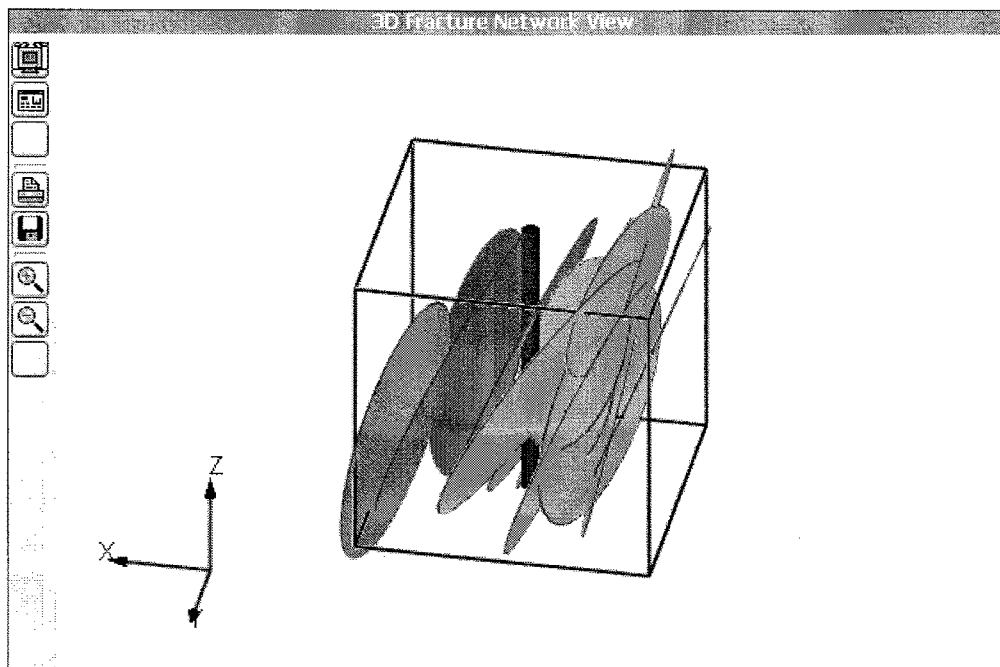


Fig. 3.1.52 유정과 연결된 균열 클러스터

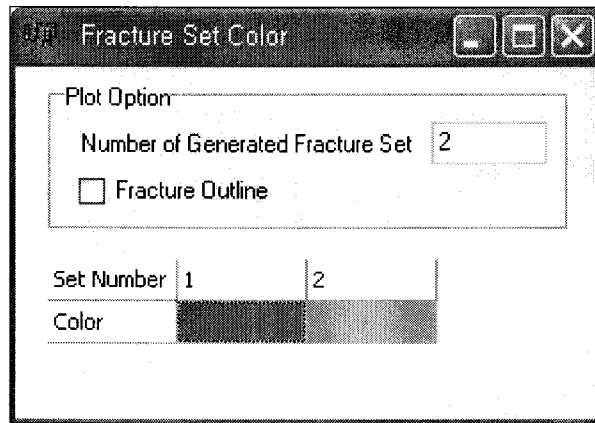


Fig. 3.1.53 3차원 균열망 클러스터의 컬러 지정 옵션

다. 통계적 분석 모듈

생성한 균열망 모델의 타당성 검증을 위하여 2차원 단면의 균열분포 특성을 현장 균열 자료와 비교할 필요가 있다. 통계적 분석 모듈에서는 시스템의 세 축에 수직인 임의의 평면과 교차하는 균열 단면도를 이용하여 균열망의 중심위치, 길이, 간극, 방향성 분포에 대한 다양한 통계적 분석을 수행한다. 이상의 분석 결과는 균열의 통계적 분석 옵션(Fig. 3.1.54)을 통하여 균열 특성인자에 대한 히스토그램, 등방성 및 비등방성 베리오그램(variogram)으로 도시할 수 있다. 통계적 분석 옵션은 3차원 균열망 화면 선택, 균열망에 수직인 평면 설정과 히스토그램, 베리오그램 설정 변수 항목을 포함하고 있다. 균열망 자료의 선택과 베리오그램 종류에 따라 필요한 입력변수 항목은 자동적으로 활성화된다. 또한 유정과 연결된 균열 클러스터에 대해서도 같은 분석을 수행할 수 있다. Fig. 3.1.55는 3차원 균열망의 x축과 교차하는 평면을 나타낸 예이고, Fig. 3.1.56은 이 평면과 교차하는 균열 단면도이다. 균열망 시스템의 크기는 $20 \times 20 \times 20(m^3)$ 이고, yz 평면에 수직인(x=9) 평면이다. Fig. 3.1.57과 Fig. 3.1.58은 이 균열망의 길이분포에 대한 3차원 히스토그램과 균열단면도의 베리오그램 예이다. 한편 사용자는 분석 메모창을 통하여 2차원 균열망의 통계적 분포 특성 변수를 실시간으로 확인 할 수 있다.

Fracture Network Plot Option

Show Module

3D Fracture Network

3D Active Clusters

3D Trace Map

Boundary Plane

Perpendicular Axis x ▾

Location

◀
▶
 9

Analysis Data

Radius ▾ Aperature ▾

Statistical Plot Option

Variogram Type

Iso-variogram

Aniso-variogram

Statistical Parameter

Lag Distance

Point Number

Angle

Grid Number[x]

Grid Number[y]

Use Zero Value

Fig. 3.154 통계적 분석 옵션

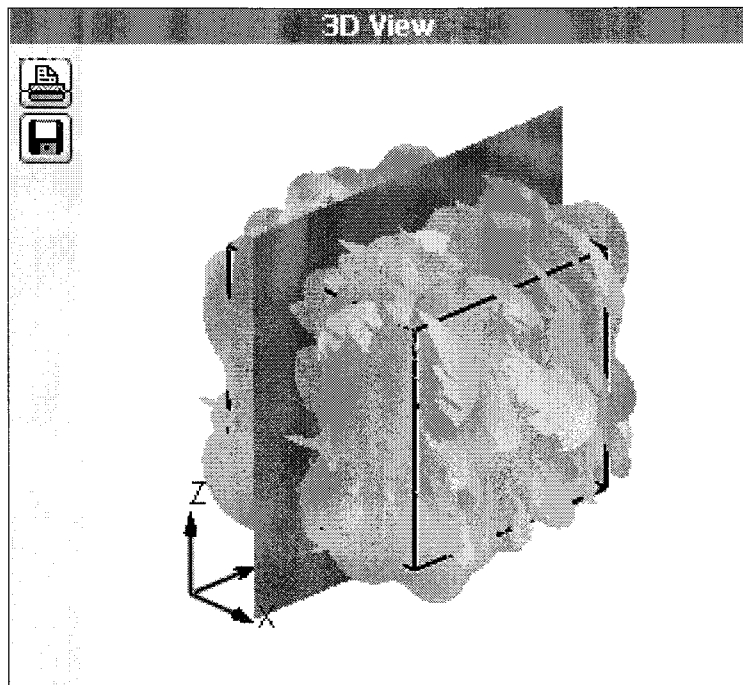


Fig. 3.1.55 3차원 균열망과 x 축에 수직인 평면
(시스템 크기: $20 \times 20 \times 20$, 평면 위치: $x=9$, 단위(m))

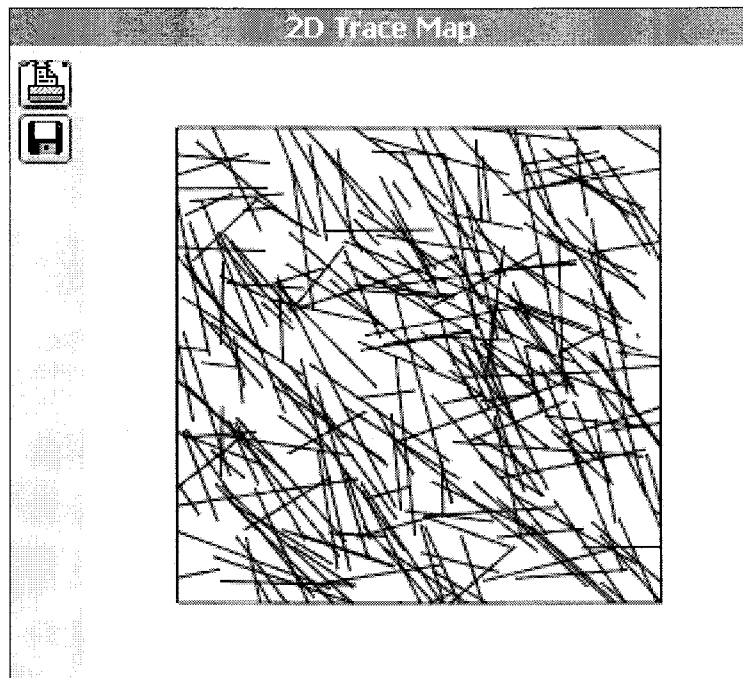


Fig. 3.1.56 2차원 균열 단면도

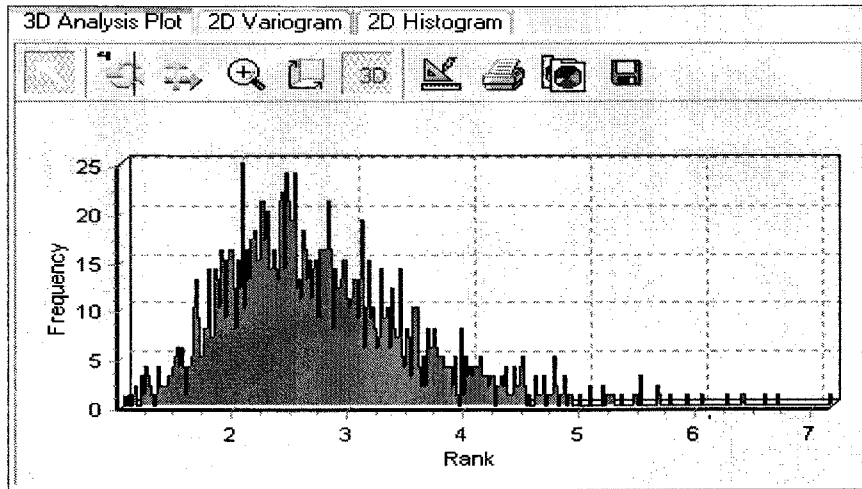


Fig. 3.1.57 3차원 균열망의 길이분포 히스토그램

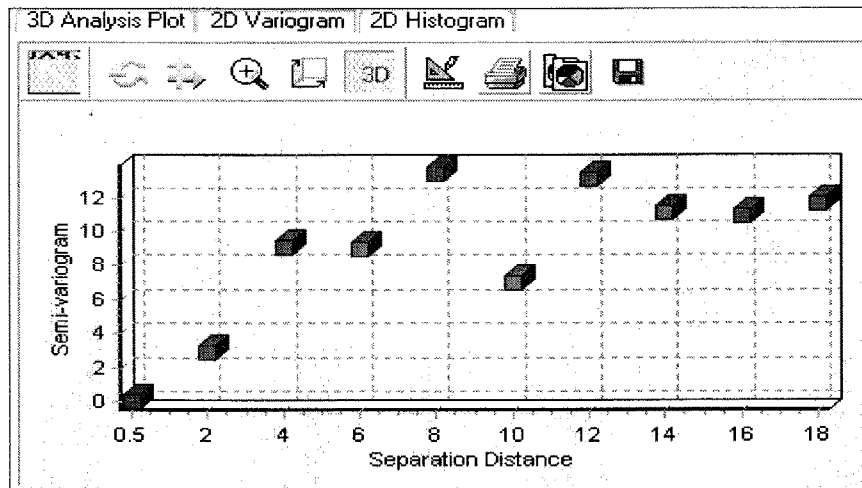


Fig. 3.1.58 2차원 균열 단면도의 균열길이 베리오그램

라. 개념 모델별 균열망 시스템 모델링 결과

앞서 언급한 바와 같이 이 연구에서는 현장 적용성과 활용성이 높은 Baecher, Polygon, Levy-Lee Fractal, 지구통계학적 모델을 사용하여 균열망 시스템을 구성하였다. 이 절에서는 각 모델의 입력변수와 균열분포 특성, 생성결과를 살펴보고자 한다.

(1) Baecher 모델

Baecher 모델은 원형판(disk) 형태의 균열로 이루어진 대표적인 분리 균열모델이다. Baecher 모델에 필요한 입력 자료는 균열 중심, 길이, 간극, 방향성 분포와 시스템의 균열밀도이다. 일반적으로 Baecher 모델의 균열중심은 시스템에 균일하게 위치하는 포아송 분포를 따르고 길이, 간극, 방향성 분포는 현장자료로부터 선택할 수 있게 설계하였다. Fig. 3.1.59는 Baecher 모델의 자료 입력 결과를 나타낸 창이다. 우선 균열군의 분포함수를 선택하고 필요한 통계적 변수를 표에 입력한다. Table 3.1.4는 이 연구에서 사용한 균열망 인위자료이다. 균열망 자료는 3개의 균열군으로 구성되어 있고 길이, 간극은 로그-정규분포, 방향성은 Fisher분포를 따른다고 가정하였다. 시스템 크기는 $20 \times 20 \times 20(m^3)$ 이고 균열의 밀도는 균열의 총 개수, 1570개로 설정하였다. Fig. 3.1.60은 Table 3.1.4의 자료로 구성한 균열망이다. 생성한 균열망의 모든 균열은 서로 연결되어 하나의 클러스터로 존재한다.

생성한 균열망의 검증을 위하여 3차원 및 2차원 단면 균열자료에 대한 통계적 분석을 수행하였다. Fig. 3.1.61은 균열망 시스템의 경계면과 교차하는 균열단면을 나타낸 그림이다. 이러한 균열 단면도를 이용하여 현장의 균열자료와 비교 검증할 수 있다. Fig. 3.1.62와 Fig. 3.1.63은 생성한 균열망의 길이 및 간극 분포를 나타낸 그림이다. 균열망의 길이와 간극 분포는 로그-정규분포를 따르고 있으며 간극 분포의 경우 분산이 큰 입력자료의 분포 특성을 적절히 반영하고 있다.

현장 균열자료는 2차원 형태이므로 균열망 모델의 2차원 단면의 균열분포 특성과 비교 분석을 통하여 생성한 균열망 모델의 타당성을 검증할 수 있다. Fig. 3.1.64와 Fig. 3.1.65는 균열망과 교차하는 y축에 수직인 한 평면과 2차원 단면을 나타낸 그림이다. Fig. 3.1.66과 67은 Fig. 3.1.65에 나타낸 2차원 단면의 균열 길이와 간극 분포 히스토그램이다. 2차원 단면의 균열 분포는 3차원 균열망의 분포와 유사하게 나타남을 알 수 있다. Table 3.1.5와 Table 3.1.6은 2차원 균열망의 길이 및 간극에 대한 평균, 분산, 왜곡도 등의 통계적 변수 결과이다. SNUFRACS는 임의의 평면과 교차하는 균열면의 통계적 변수들을 실시간으로 갱신하여 통계적 분석을 효율적으로

로 수행할 수 있다.

2차원 균열자료의 공간적 상호관계는 베리오그램(variogram)으로 표현할 수 있다. 베리오그램은 일정한 거리만큼 떨어진 자료들이 가지고 있는 상관관계의 정도를 나타낸다. 등방성 및 이방성을 고려한 베리오그램을 계산하고 주어진 모든 영역에서 베리오그램 값을 정의할 수 있도록 이론적 베리오그램을 작성한다. 해석하고자 하는 자료가 균열의 중심일 경우에는 우선 2차원 단면을 미리 지정한 격자로 나눈다. 이때 각 격자의 공간정보(격자의 중심좌표)에 해당하는 물리량은 해당 격자에 포함되어 있는 균열 중심의 개수이다. 입력한 공간정보와 물리량을 이용해 세미베리오그램을 그리게 된다. 이러한 2차원 단면 균열자료의 길이, 간극, 중심에 대한 베리오그램 자료를 이용하여 균열분포의 상관거리, 공분산 등의 공간적 분포특성을 분석할 수 있다. Fig. 3.1.68~70은 Fig. 3.1.65에 나타난 2차원 균열망의 길이, 간극, 중심에 대한 베리오그램이다. 균열중심에 대한 베리오그램의 경우, 시스템의 격자를 5×5 로 설정하였다.

Table 3.1.4 Baecher 모델의 균열 입력 자료

Input Item	Fracture Set		
	Set #1	Set #2	Set #3
Center	Position		
Radius	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
Mean(m)	2.74	2.91	2.45
Variance	0.8	1.2	0.5
Orientation	Fisher	Fisher	Fisher
Trend(degree)	158.59	251.41	67.78
Plunge(degree)	90.47	87.20	15.58
Fisher Constant	9.95	7.46	7.17
Aperture	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
Mean(mm)	2.78	3.01	3.90
Variance	12.21	12.18	20.85
Density(NF, %)	64	24	12

Fracture Data Well Positioning

Domain Size

X 20

Y 20

Z 20

Conceptual Model

Baecher Model

Number of Fracture Set

3

Fracture Type Center Radius Orientation Aperture Density

Statistical Parameter of Fracture Sets

Set Number	1	2	3
Distribution Type	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
Mean	2.74	2.91	2.45
Variance	0.8	1.2	0.5
Exponent			
Upper Cutoff	20.0	30.0	10.5
Lower Cutoff	1.0	1.0	1.0

Preview Generate Reset Close

Fig. 3.1.59 Baecher 모델의 자료 입력결과

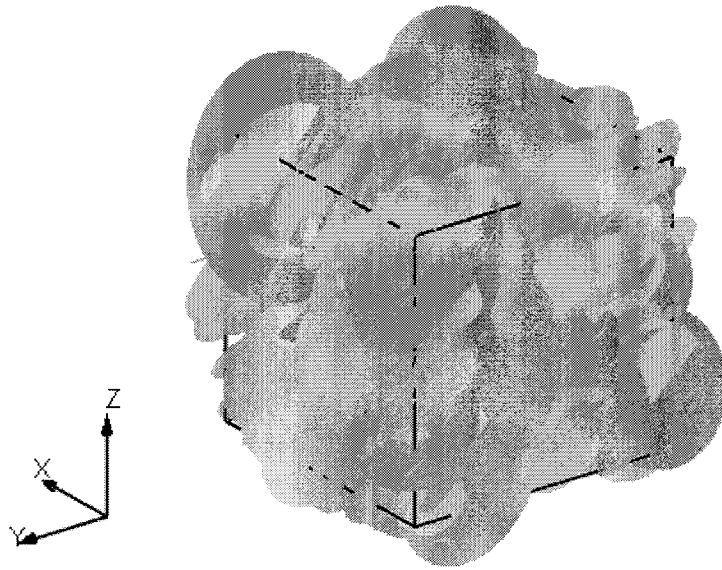


Fig. 3.1.60 Baecher 모델로 구성된 3차원 균열망

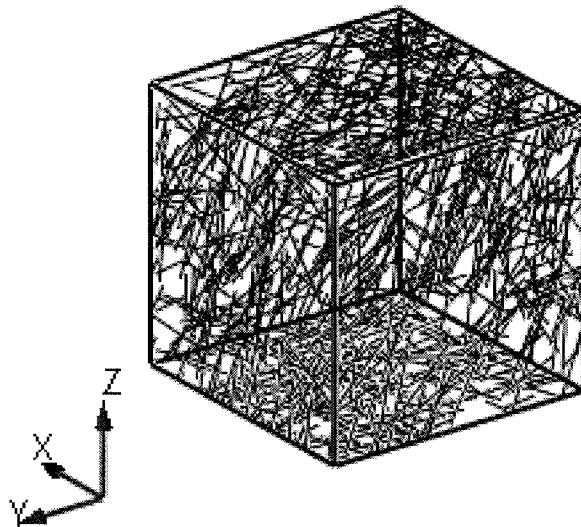


Fig. 3.1.61 시스템 경계면과 교차하는 균열 단면도

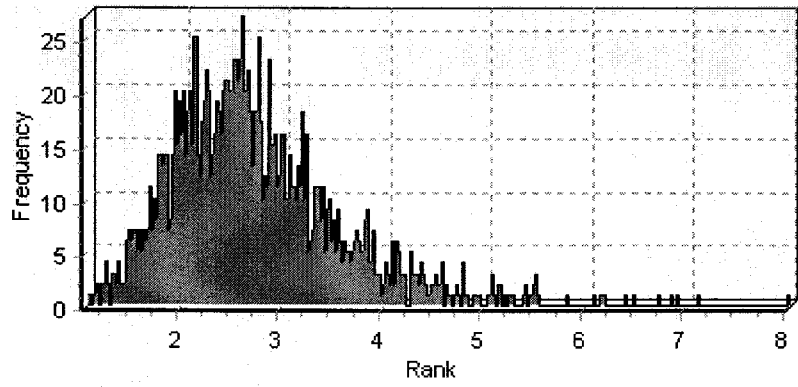


Fig. 3.1.62 3차원 균열망의 길이 분포도(Baecher 모델)

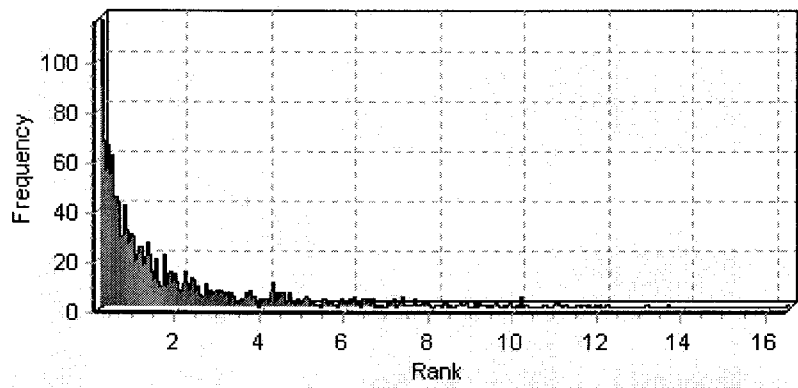


Fig. 3.1.63 3차원 균열망의 간극 분포도(Baecher 모델)

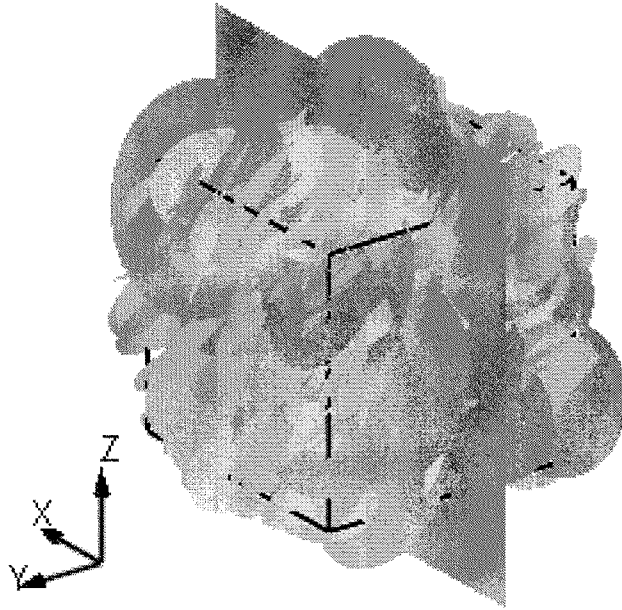


Fig. 3.1.64 3차원 균열망과 y축에 수직인 평면($y=10$)



Fig. 3.1.65 2차원 균열 단면도($y=10$)

Table 3.1.5 2차원 단면의 길이 분포의 통계 변수

Statistical Parameter	Value
Mean	4.28
Average Deviation	1.45
Standard Deviation	1.86
Variance	3.47
Skewness	0.68
Kurtosis	0.87

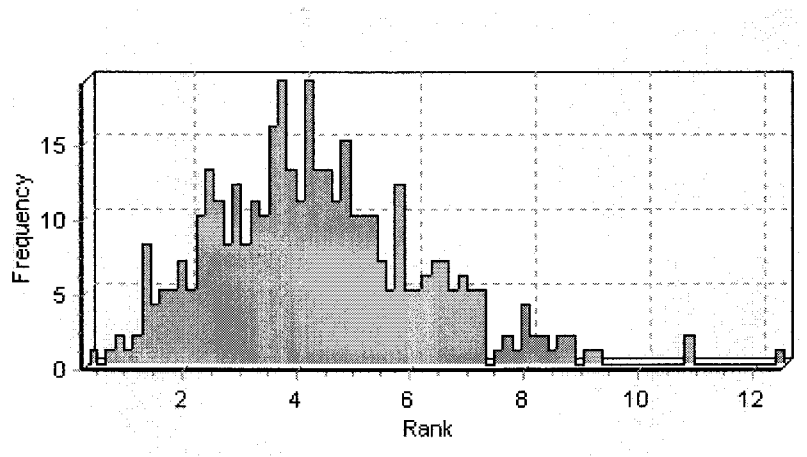


Fig. 3.1.66 2차원 균열 단면의 길이 분포도

Table 3.1.6 2차원 단면의 간극 분포의 통계 변수

Statistical Parameter	Value
Mean	1.86
Average Deviation	1.65
Standard Deviation	2.36
Variance	5.58
Skewness	2.41
Kurtosis	7.17

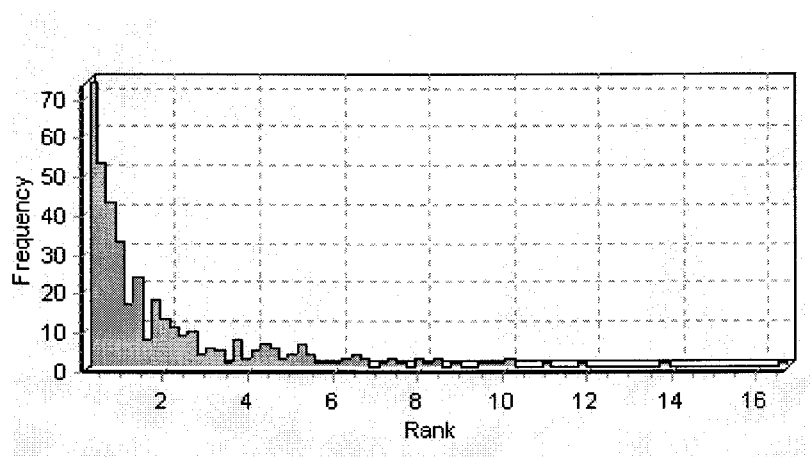


Fig. 3.1.67 2차원 균열 단면의 간극 분포도

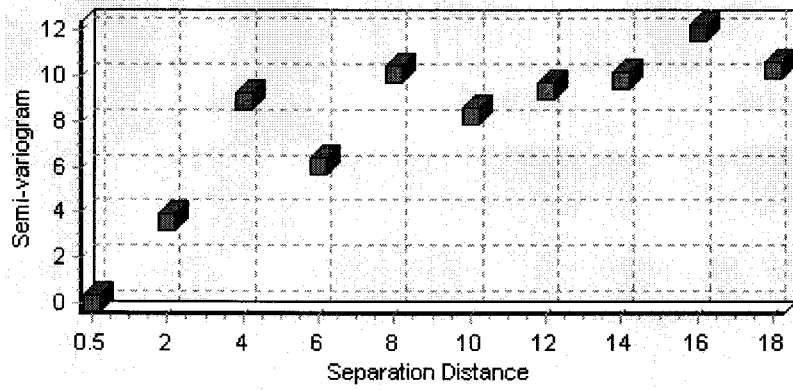


Fig. 3.1.68 2차원 균열 단면의 등방성 베리오그램(길이)

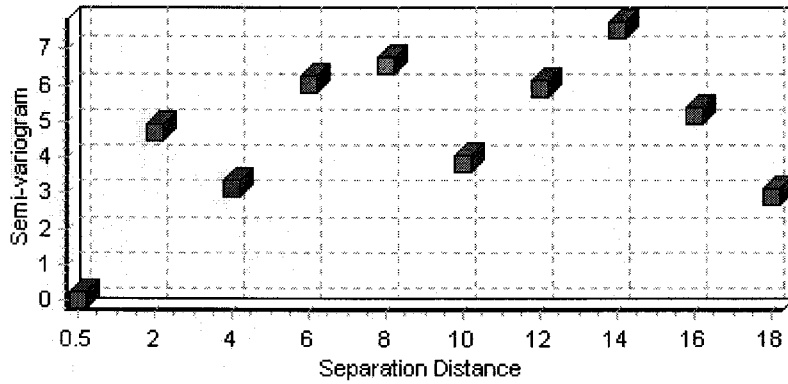


Fig. 3.1.69 2차원 균열 단면의 등방성 베리오그램(간극)

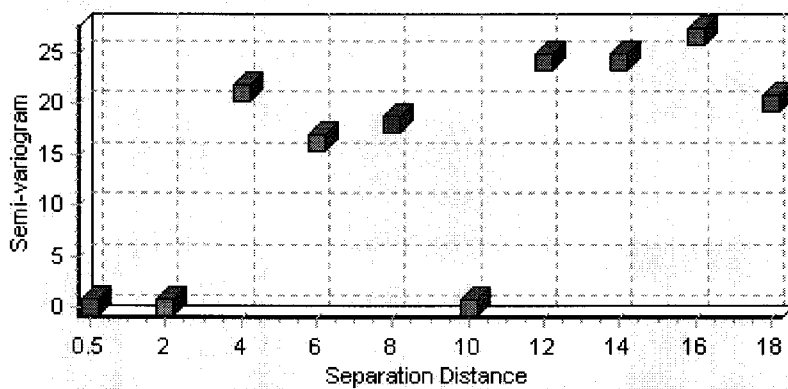


Fig. 3.1.70 2차원 균열 단면의 등방성 베리오그램(중심)

(2) Polygon 모델

Polygon 모델은 균열을 다각형으로 표현한다. 균열망 모델의 입력자료는 Baecher 모델과 유사하다. Polygon 모델에서는 균열의 형태를 다음의 4가지로 설정할 수 있다(Fig. 3.1.71).

- 정육각형(Regular Hexagon)
- 정사각형, 정오각형, 정육각형 조합(Regular Square, Pentagon, Hexagon)
- 육각형
- 사각형, 오각형, 육각형 조합

Table 3.1.7를 입력자료로 하여 네 가지 균열형태 옵션에 따라 구성한 Polygon 모델을 Fig. 3.1.72~75 에 나타내었다. 설정한 시스템은 Baecher 모델과 같고 300개의 균열을 생성하였다.

(3) Levy-Lee 프랙탈모델

Levy-Lee 프랙탈 모델의 입력자료는 균열 생성 위치 설정을 위한 프랙탈 차원, 방향성 해석을 위한 매개 변수와 길이, 간극분포 인자이다. 프랙탈 모델의 입력자료와 생성한 균열망이 Table 3.1.8 과 Fig. 3.1.76에 나타나 있다. 프랙탈 차원은 2.7, 균열은 500개를 생성하였다. 생성한 균열망은 균열이 시스템에 고르게 분포하지 않고 클러스터를 이루는 모델 특징을 잘 반영하고 있다.

(4) 지구통계학적 모델

지구통계학적 모델은 SGS 기법을 이용하여 균열의 중심이나 길이를 분포시킨다. SGS 분포함수는 평균, 분산, 격자크기 및 x,y,z 방향으로의 상관길이에 대한 입력변수를 필요로 한다. Fig. 3.1.77은 균열 중심을 SGS 기법으로 분포시킬 때 필요한 입력변수를 나타낸 창이다. Fig. 3.1.78은 지구통계학적 기법으로 구성한 균열망을 나타낸 그림이다. 균열의 중심은 SGS 분포, 길이와 간극 및 방향성은 배척모델의 자료를 사용하였고 500개의 균열을 생성하였다.

Table 3.1.7 Polygon 모델의 균열 입력 자료

Input Item	Fracture Set		
	Set #1	Set #2	Set #3
Center	Possion		
Radius	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
Mean(m)	2.74	2.91	2.45
Variance	0.8	1.2	0.5
Orientation	Fisher	Fisher	Fisher
Trend(degree)	158.59	251.41	67.78
Plunge(degree)	90.47	87.20	15.58
Fisher Constant	9.95	7.46	7.17
Aperture	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
Mean(mm)	2.78	3.01	3.90
Variance	12.21	12.18	20.85
Density(NF, %)	64	24	12

Fracture Type Center Radius Orientation Aperture Density

Fracture Shape

Circle

Polygon

Block

Polygon Type

Regular Hexagon

Regular Square/Pantagon/Hexagon

Hexagon with Variable inner angles

Square/Pantagon/Hexagon with variable inner angels

Fig. 3.1.71 Polygon 모델의 균열형태 설정

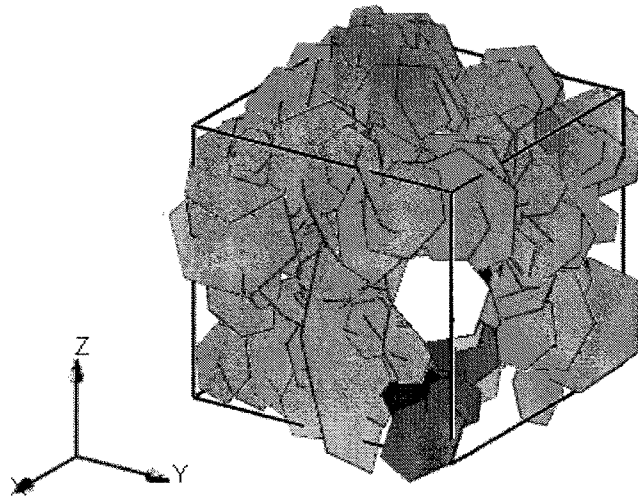


Fig. 3.1.72 Polygon 모델로 구성된 3차원 균열망(정육각형)

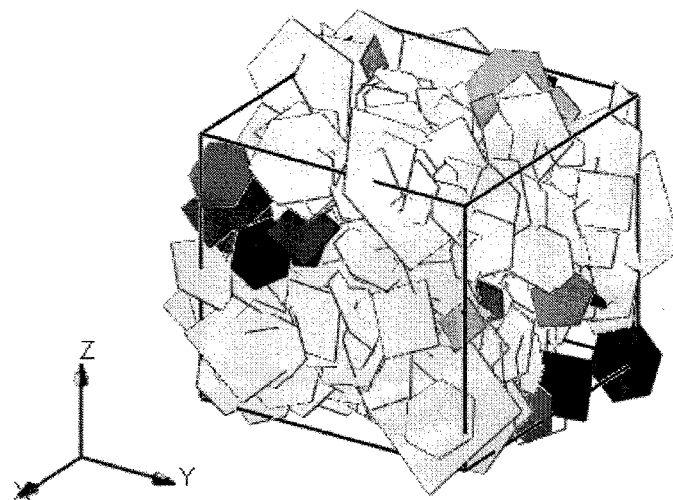


Fig. 3.1.73 Polygon 모델로 구성된 3차원 균열망
(정사각형, 정오각형, 정육각형 조합)

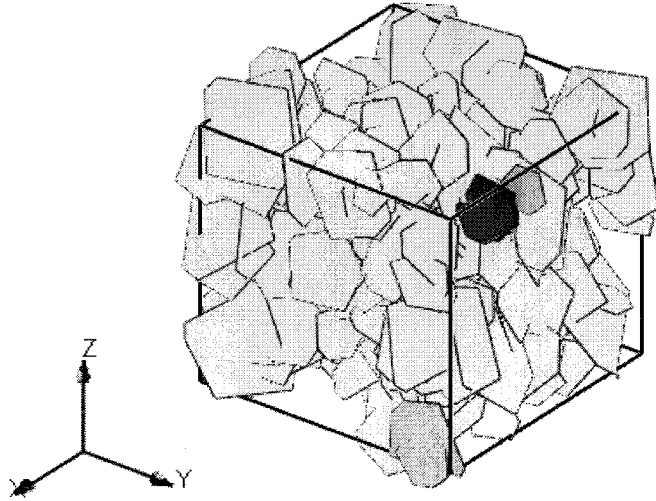


Fig. 3.1.74 Polygon 모델로 구성된 3차원 균열망 (육각형)

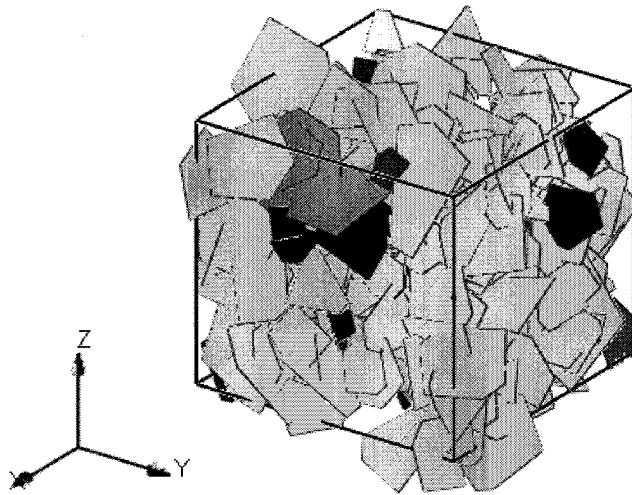


Fig. 3.1.75 Polygon 모델로 구성된 3차원 균열망
(사각형, 오각형, 육각형 조합)

Table 3.1.8 프랙탈 모델의 균열 입력 자료

Input Item	Fracture Set
Center	Levy-Flights
Fractal Dimension	2.7
Center for Orientation	5
Radius	Negative Exponential
Mean(m)	2.74
Variance	0.8
Exponential	2.5
Aperture	Log-Normal
Mean(mm)	2.78
Variance	12.21

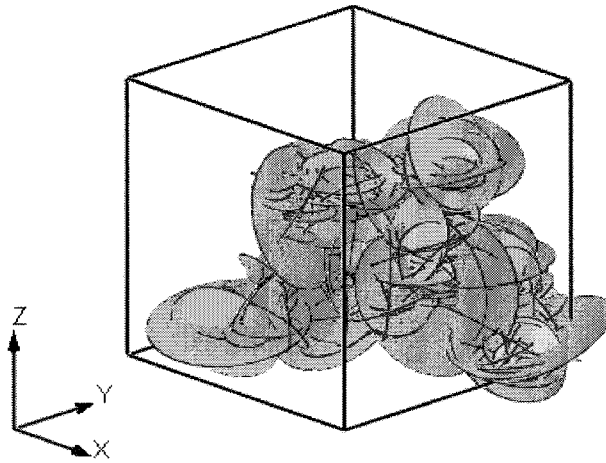


Fig. 3.1.76 프랙탈 Levy-Lee 모델로 구성한 3차원 균열망

Fracture Type	Center	Radius	Orientation	Aperture	Density
Center Distribution					
<input type="radio"/> Poission <input checked="" type="radio"/> SGS					
Statistical Parameter					
Mean	20	Correlation Length[x]	5		
Variance	3	[y]	5		
Block Size	5	[z]	5		

Fig. 3.1.77 지구통계학적 모델의 균열중심 분포 자료 입력

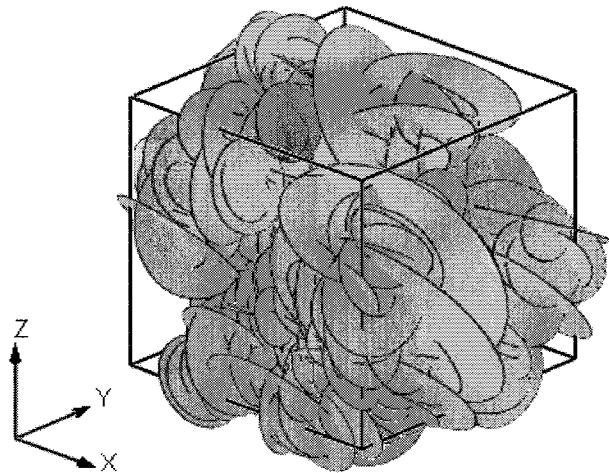


Fig. 3.1.78 지구통계학적 모델로 구성한 3차원 균열망

기존의 3차원 연속체 모델이나 2차원 분리 균열 모델은 균열의 불균질성을 적절히 반영하지 못할 뿐만 아니라 균열을 통한 유체 유동에 대한 신뢰성 있는 예측을 할 수 없었다. 이 연구에서 개발한 3차원 균열모델링 시스템, SNUFRACS은 4가지 개념모델을 이용하여 현장의 균열 현상과 유사한, 다양한 형태를 가지는 균열망을 생성한다. 객체 지향적 코드 생성과 이중연결리스트를 이용하여 균열망의 클러스터와 균열, 유정과의 연결성 정보를 효율적으로 관리·저장한다. 또한 다양한 시각화 옵션과 3차원 및 2차원 통계적 분석을 통하여 균열매질의 분포와 특성을 쉽게 파악할 수 있다. 개발한 시스템은 향후 다공성 균열매질에서의 이상유동 및 용질 거동을 모사하기 위한 기본 모델로써 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

제 2 절 단일 균열에서 유체유동 및 용질이동 실험

1. 절대유체투과율과 특성변수의 민감도 분석

가. 서론

단일 균열에서의 유체투과율은 균열 간극의 삼승에 비례하는 것으로 알려져 있고 균열 간극의 국부적 변화를 통해 다양한 값을 가질 수 있다고 알려져 있다. 특히 다양한 압력 조건에서 유체의 유동 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 균열의 간극 특성이다.

균열 간극 특성 파악은 단면계로 측정된 두 균열 표면을 서로 수치적으로 중첩시켜서 균열 간극을 측정하려는 시도를 시작으로 투명한 균열 재생판을 제작하여 이미지 해석기법을 통한 균열 간극 측정과 주입법을 이용하여 균열 간극 특성과 편류 유동 특성에 대한 연구 등이 있었다. 또한, 수직하중 변화에 따른 유체투과율을 실험을 통해 측정하여 수직하중과 유체투과율의 관계를 경험식으로 나타내고 온도 변화에 따른 균열 간극 변화를 측정하는 연구가 수행되었다.

이러한 연구들은 유체유동에 대한 간극 분포의 영향을 고려하지 않고 전산 모사를 통해 수직하중에 따른 유체투과율 변화를 예측하였으나 실험을 통한 검증은 이루어지지 않았다. 따라서, 이 연구에서는 무봉압하에서 3차원 레이저 측정기로 실측한 간극의 분포가 수리학적인 간극 분포와 동일하다는 가정 하에 전산 모사를 통해 각각의 봉압 상태에 대한 접촉 면적과 간극 모형을 예측하고, 접촉 면적의 변화양상에 따른 유체투과율의 변화 양상을 설명하고자 한다. 즉, 실험 시료의 서로 다른 유체투과율 변화 양상을 실험과 전산 모사를 통해 구한 접촉 면적을 이용하여 설명하고 온도 변화에 따른 유체투과율 변화 양상을 측정하고자 한다. 또한, 균열 간극 분포의 공간 상관 관계를 베리오그램을 이용하여 분석하고 간극 분포에 따른 유체투과율 변화도 분석하고자 한다.

나. 본론

(1) 이론적 배경

(가) 간극의 정의와 측정법

간극(aperture, $b(x, y)$)이란 Fig. 3.2.1에 의해 설명된 것처럼 정의될 수 있다. 즉,

간극은 한 점에서 기준면에 수직한 방향으로 양쪽 균열 표면 사이의 거리이다. 간극은 0부터 최대값 사이의 값을 가진다. 접촉 면적은 간극이 0이 되는 부분의 면적으로 정의한다.

간극 측정법은 측정 절차에 따라 다음과 같이 크게 세 가지로 분류된다.

- 표면 표고법(surface topography method)은 표면의 각 위치를 따라 이동하면서 단면계를 사용하거나, 또는 레이저 변위계를 사용하여 표면을 측정하는 방법이다. 이 방법은 균열 단면을 따라서 위치와 균열 표면 높이를 측정한 후 두 단면을 수치적으로 중첩시켜서 간극을 계산한다(Fig. 3.2.2).
- 주입법(injection method)은 시료에 수직하중이 가해지는 동안 균열을 통해 수지를 주입하고 수지를 경화시켜 균열에 수직한 방향으로 절단한다. 그리고 균열 단면을 현미경으로 측정하거나, 이미지 해석기법을 사용하여 측정한다(Fig. 3.2.3).
- 주조법(casting method)은 암석의 균열을 그대로 본뜬 투명 균열 재생판을 제작하여 수지를 주입한 후 수지 색깔의 두께 차이에 따른 농도 차이를 이미지 해석 기법을 통해 균열 간극을 측정한다. 또한 빛 투과 기법을 이용해 투과된 빛의 세기를 CCD(charge-coupled device) 카메라로 측정한 후 측정된 화소값을 길이로 전환하여 균열의 간극을 계산한다(Fig. 3.2.4).

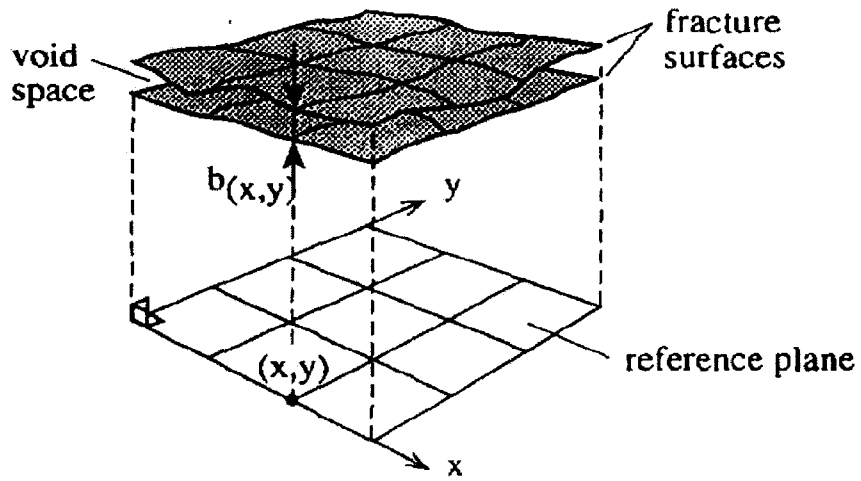


Fig. 3.2.1 균열의 정의 (Hakami and Larsson, 1996)

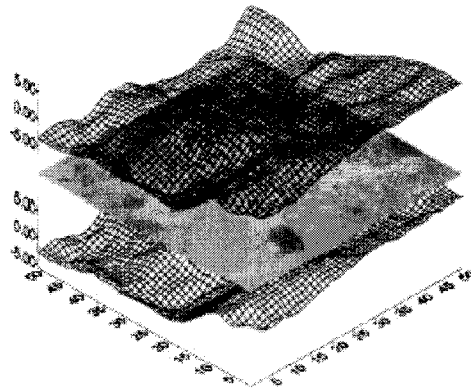


Fig. 3.2.2 표면표고법 (Lespinasse와 Sausse, 2000)

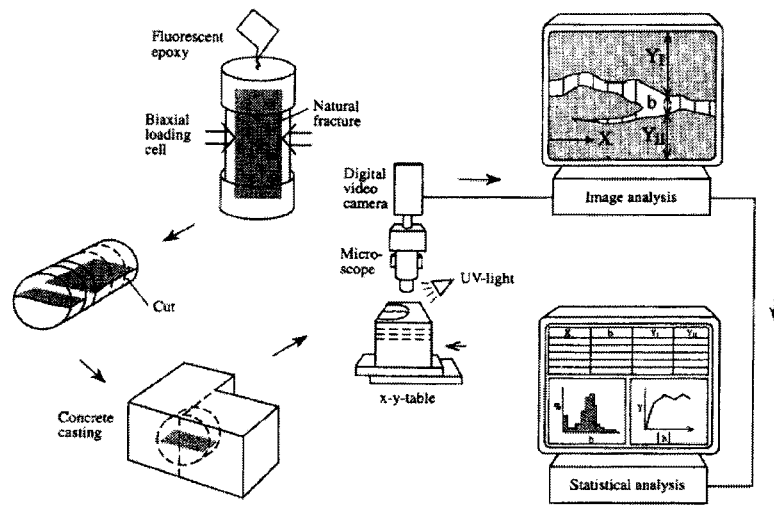


Fig. 3.2.3 주입법 (Hakami and Larsson, 1996)

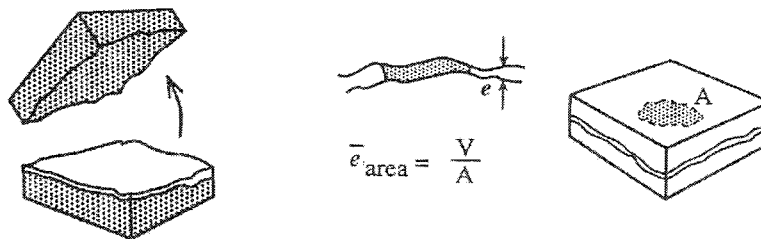


Fig. 3.2.4 구조법 (Yeo, 1997)

(나) 균열 간극 분포 특성화 변수

균열의 간극 분포는 주로 로그 정규 분포나 가우시안 분포의 형태로 나타나며 평균과 표준편차로 정량화 된다. Tsang 등(1990)의 전산모형 연구 결과는 간극 분포의 평균, 표준편차, 그리고 상관거리 등을 간극의 특성을 나타낼 수 있는 변수로 제시하였다. 그리고 간극분포의 지구통계학적 특성을 통해 균열내부 유체유동을 예측할 수 있는 가능성이 제시되었다.

이 연구에서는 균열 간극 분포의 특성을 정량화하기 위하여 변동계수, 왜도계수, 이등방비를 선택하였다. 각 변수들의 물리적 개념을 살펴보면 다음과 같다. 평균간극 크기에 대한 표준편차의 비로 정의되는 변동계수는 실제 균열의 형태와 평판 모형간의 편차를 나타낸다. 변동계수가 클수록 주입되는 물이 편류현상(channeling)을 일으킬 가능성이 증가한다. 왜도계수는 간극분포의 대칭성을 나타내는 것으로 동일 변동계수를 갖더라도 왜도계수의 절대값이 클수록 편류현상은 심화된다. 이등방비는 흐름방향 상관거리와 횡방향 상관거리의 비로 정의되며 각 상관거리는 이방성 세미베리오그램 분석으로부터 구한다. Fig. 3.2.5는 서로 다른 공간 상관 관계가 세미베리오그램에 어떻게 반영되는 지를 보여준다. 간극의 연결성은 이등방비 각이 1보다 작으면 횡방향으로, 1보다 크면 흐름방향으로 더 우수함을 나타낸다. 이 연구의 경우, 암석 코어시료의 길이방향인 축방향이 흐름방향이 되고 이 방향의 수직방향인 직경방향이 횡방향이 된다.

전술한 간극분포의 지구통계학적 변수 외에도 균열표면의 거칠기(roughness)나 만곡도(waviness), 그리고 평균간극 크기 등도 석유생산에 영향을 줄 수 있다. 이 연구에서는 사용된 균열시료가 매우 균질한 베레아지역의 사암이므로 균열표면의 거칠기는 모든 균열 시료에서 동일한 영향을 미치는 것으로 가정하였으며, 동일 암질 시료에서는 거칠기의 효과가 균열간극분포 자체의 영향에 비해 작을 것이라 사료되어 거칠기의 영향은 고려하지 않았다. 그리고 생성된 균열시료의 육안 검사 결과 균열의 전체적인 형태가 직선에 매우 가까워 시료들간의 만곡도 차이는 발견할 수 없었다. 평균 간극 크기는 석유생산 양상에 큰 영향을 미치는 주입유체의 평균 유동속도 계산에 평균간극이 포함되어 있으며, 간극 내부에서 중력에 의해 석유와 물이 층을 형성하여 유동하게 되는 분리유동(segregated flow)의 형태를 띄지 않는 한 평균유속의 영향으로 생각할 수 있다.

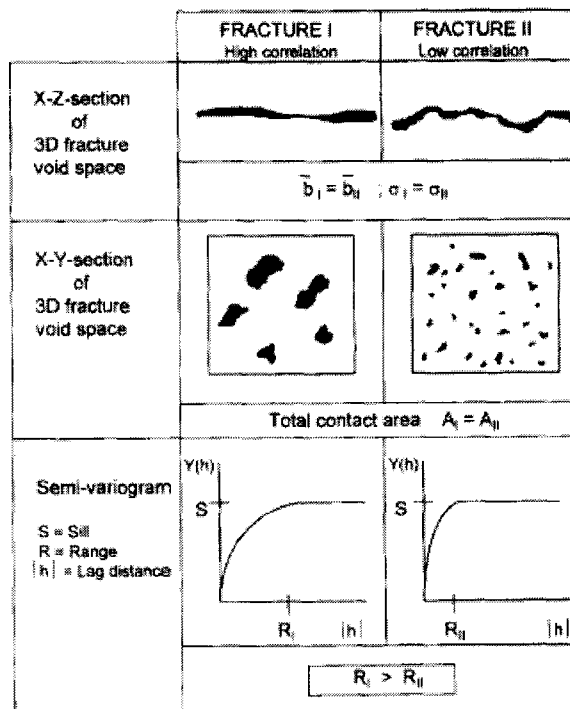


Fig. 3.2.5 균열분포에 대한 공간상관관계

(다) 균열 내 유체 유동

균열 내 유체 유동은 기본적으로 간극과 관련이 있다. 간극에는 역학 간극 (mechanical aperture)과 수리 간극(hydraulic aperture)이 있으며 균열 내 유체 유동을 이해하기 위해서는 역학 간극과 수리 간극의 관계가 중요하다. 단일 균열에서의 유체 유동은 두 개의 평판 사이의 층류 유동과 비슷하다는 가정 하에 유체의 유동을 삼승법칙(cubic law)으로 나타낸다.

$$Q = \frac{Wb^3}{12\mu} \frac{dP}{dl} \tag{3.2.1}$$

위의 식에서 Q는 유량이고 b는 균열의 간극이며 W는 유체의 유동 방향에 수직인 방향의 균열 폭이다. 그리고 μ 는 유체의 점성도이며 dP/dl 은 유동 방향의 압력 구배이다. 즉, 균열을 통해 흐르는 유체의 유량은 균열의 간극인 b의 세제곱에 비례한다는 것이 삼승법칙이다. 위의 식을 Darcy 법칙과 비교해보면 평행판 균열의 고유 유체 투과율은 $k=b^2/12$ 임을 알 수 있다.

(라) 봉압 변화에 따른 균열 내 유체 유동

Walsh(1981)는 봉압(p_c)과 공극유체압(p_0)의 다음과 같은 함수를 이용하여 봉압에 따른 수리전도도 변화를 묘사하는 해석적 관계를 유도하였다.

$$\frac{\langle k \rangle}{\langle k_0 \rangle} = \left(1 - \sqrt{2 \left(\frac{h}{a_0} \right) \ln \left(\frac{p_c}{p_0} \right)} \right)^3 \left(\frac{1 - b(p_c - p_0)}{1 + b(p_c - p_0)} \right) \tag{3.2.2}$$

여기서 $\langle k_0 \rangle$ 와 a_0 는 각각 어떤 기준 압력 p_0 에서의 수리전도도와 간극의 1/2값이며 b는 $\sqrt{3\pi(f/h)/E(1-\nu^2)}$ 이며 f는 자기 상관 거리, h는 기준면에서부터 암석 표면까지의 길이 분포의 평균 제곱값(root mean square), E는 영률, ν 는 포아송비이다. 여기에서 우변의 첫 번째 항은 균열 간극에 관련된 것이고, 두 번째 항은 비틀림(tortuosity)에 관련된 것이다. Walsh는 수리전도도가 봉압을 포함한 유효 압력에 따라 변화한다고 결론지었다.

$$k^{\frac{1}{3}} \propto A - B \ln p_e \tag{3.2.3}$$

또한 유효 압력은 봉압(p_c)과 공극압(p_b)에 관한 함수로 나타낼 수 있다.

$$p_e = p_c - s p_b \quad (3.2.4)$$

s는 인장 균열에서는 0.56이고 다듬어진 표면에서는 약 0.9이다.

Bernabe(1986)는 Walsh의 식을 단순화시켜 다음과 같은 관계를 나타내었다.

$$k = (1 - A \log p_c)^3 \left(\frac{B - B' p_c}{B + B' p_c} \right) \quad (3.2.5)$$

여기서 A, B 그리고 B'는 균열 형상과 암석 성분의 탄성계수에 의존하는 상수이다.

Gale(1982)은 절리전도도(k_f)와 화강편마암에서의 천연 또는 인공 균열에 대한 응력 사이의 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$k_f = \beta \sigma_n^{-\alpha} \quad (3.2.6)$$

인공 균열에서 β 와 α 값은 실험을 통해 구해지는 값이다.

Swan(1983)은 수직응력 변화에 따른 균열 간극 변화를 구형 접촉 이론을 이용하여 정규화 된 수리전도도($\frac{k}{k_0}$)와 수직하중(P) 사이의 관계를 구했다.

$$\sqrt{\frac{k}{k_0}} = c - m \ln P \quad (3.2.7)$$

(마) 응력에 따른 균열 간극 변화

수직응력에 따른 균열의 변형은 Fig. 3.2.6과 같은 Hertz의 접촉 이론을 이용하여 나타낼 수 있다. 균열 상·하면의 표면고도 측정값인 Z_A , Z_B 를 더하여 균열 표면의 합성 고도를 Z_c 라 하면, Z_c 값이 최대인 점들은 응력을 가하였을 때 잠재적으로

접촉할 수 있는 지점이 된다. 두 표면 사이의 거리가 L만큼 감소했을 때의 각 접촉점에서의 하중(Δw)은 Hertz의 접촉 이론을 사용하면 다음과 같다.

$$\Delta w_i = \frac{4}{3} E' R_c^{1/2} \Delta l_i^{3/2} \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (3.2.8)$$

여기서 Δl 은 접촉 이후에 감소한 거리, N_c 는 접촉 격자의 개수, E' 는 감소된 영률이고 다음과 같이 구한다.

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (3.2.9)$$

여기서 E_1 , E_2 그리고 ν_1 , ν_2 는 각각 균열 상 하면의 영률과 포아송비를 나타낸다. 또한 접촉 면적(Δs)과 접촉면에서의 압력(Δp)은 다음과 같이 구한다.

$$\Delta s_i = \pi R_c \Delta l_i \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (3.2.10)$$

$$\Delta p_i = \Delta w_i / \Delta s_i \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (3.2.11)$$

여기에서 각 접촉점에서의 압력(Δp)의 평균값인 평균 압력(p_m)은 다음과 같이 사용될 수 있다.

$$p_m = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \Delta p_i \quad (3.2.12)$$

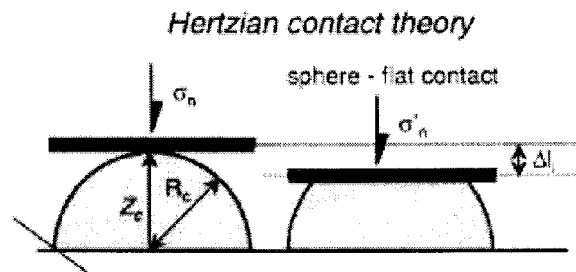
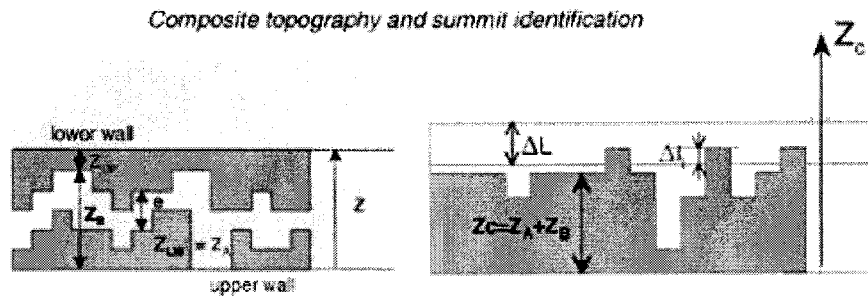


Fig. 3.2.6 Hertzian 접촉 이론 (Lespinasse and Sausse, 2000)

(2) 연구내용

(가) 실험장치

연구에 사용된 실험 장치는 온도 및 봉압에 따른 유체투과율의 측정을 하기 위하여 제작되었다. 일정 유량을 주입할 수 있도록 정량 주입 펌프를 사용하였고 온도를 일정하게 유지시키기 위해서 오븐을 사용하였으며, 봉압 변화를 위하여 Syringe Pump를 사용하였다. 또한 간극 측정을 위하여 3차원 레이저 측정기를 사용하였다.

① 3차원 레이저 측정기

Fig. 3.2.7은 3차원 레이저 측정기의 각 부분을 도해적으로 나타낸 것이다. 3차원 레이저 측정기는 레이저 변위계(laser profilometer), 위치 지정 시스템(positioning system), 자료 출력과 전체 시스템을 제어할 수 있는 컴퓨터 이렇게 세 부분으로 되어 있다. 위치 지정 시스템은 위치 지정 제어부와 작업 테이블로 나뉜다. 위치 지정 제어기의 X축은 좌우로 움직이고 Y축은 앞뒤로 이동하며 Z축은 상하 운동을 한다. 각 축은 각기 독립적으로 구동할 수 있으며 Z축의 끝에는 레이저 변위계가 연결되어 있다. 변위계가 레이저를 측정 지점에 쏘 때 그 측정 지점에서 반사된 빛의 각도에 의해 변위를 측정한다. 레이저 파장의 최소 측정한도는 $0.5\mu\text{m}$ 이고 센서헤드로부터 5cm 떨어진 지점을 중심으로 $\pm 8\text{mm}$ 사이가 가능 측정 범위가 된다. 레이저 변위계, 위치지정 제어부 전체를 제어하는 컴퓨터 프로그램은 특정 위치에 레이저 변위계를 위치시키고 레이저 변위계에서 읽어들이 측정값을 파일로 저장시키는 기능을 가지며 측정 범위와 측정 간격만 입력시키면 모든 과정이 자동으로 이루어진다.

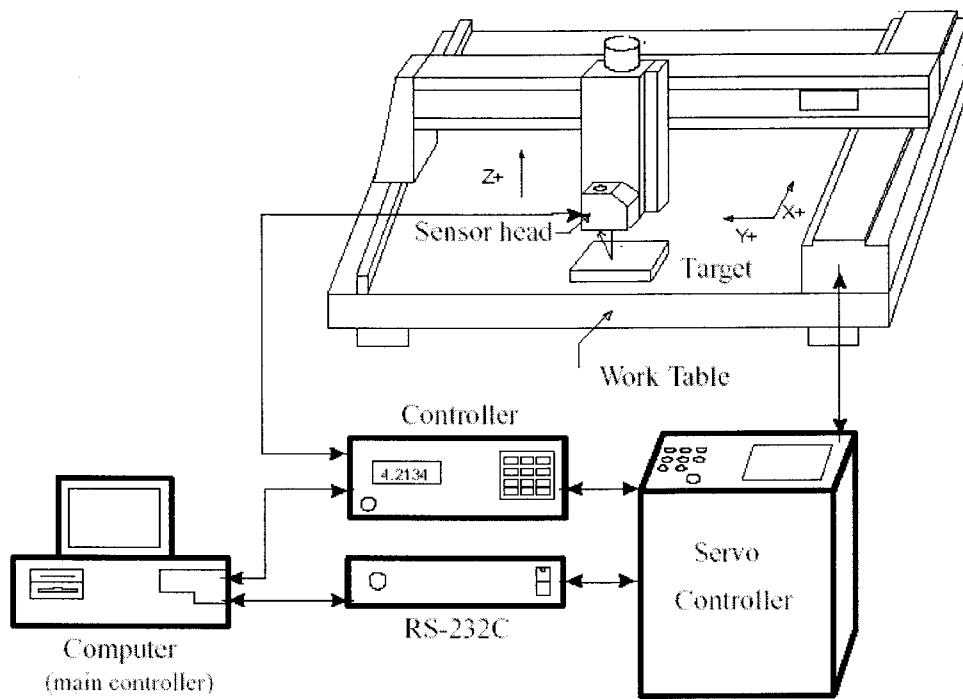


Fig. 3.2.7 3차원 레이저 측정기 (배기윤, 1999)

② 유체 유동 실험

Fig. 3.2.8은 봉압 변화에 따른 유체투과율 측정을 위한 장치를 도해적으로 나타낸 것이다. 유체 유동 실험 장치는 봉압을 변화시켜 주는 부분과 일정 유량으로 유체를 주입시키는 부분, 지하 심부 환경에 해당하는 코어홀더 이렇게 세 부분으로 되어 있다.

봉압을 변화시켜주기 위해 Syringe Pump를 사용하여 봉압을 변화시키고 변화시킨 이후에 일정하게 유지를 하였다. 물의 온도와 점성도를 일정하게 유지하기 위하여 오븐을 사용하였다. 증류수만을 사용할 경우 균열 내부에서 미생물에 의한 클로킹 현상이 발생하기 때문에 염소(NaOCl) 1ppm을 투여하여 클로킹 현상을 방지하였다. 또한 주입수가 코어홀더에 주입되기까지 온도 변화를 막기 위하여 파이프를 길게 하여 온도 변화에 의한 오차 요인을 제거하였다. 코어홀더에 주입수가 주입되기 전에 압력 게이지를 설치하여 시료 양단의 압력 차이를 측정하였다.

(나) 시료제작

실험에 사용한 시료는 속초 지역 지하 심도 0m~500m지점의 화강암을 코어링한 후 인위적인 균열을 내었다. 또한 균열 간극 분포의 변화를 위하여 전단 시험기를 사용하여 1mm 전단 변형을 하였다. 시료의 기초 물성은 Table 3.2.1과 같고, 시료의 성형작업은 Fig. 3.2.9에 나타내었다.

Table 3.2.1 균열 시료

	Length (cm)	Diameter (cm)	Fracture Volume (cm ³)	Mechanical Aperture (μm)
S1	6.72	3.78	1.52	600.69
S2	7.18	3.78	1.82	670.06
S3	6.95	3.78	1.45	550.45
S4	6.28	3.78	1.29	544.33
S5	6.36	3.78	2.13	898.62

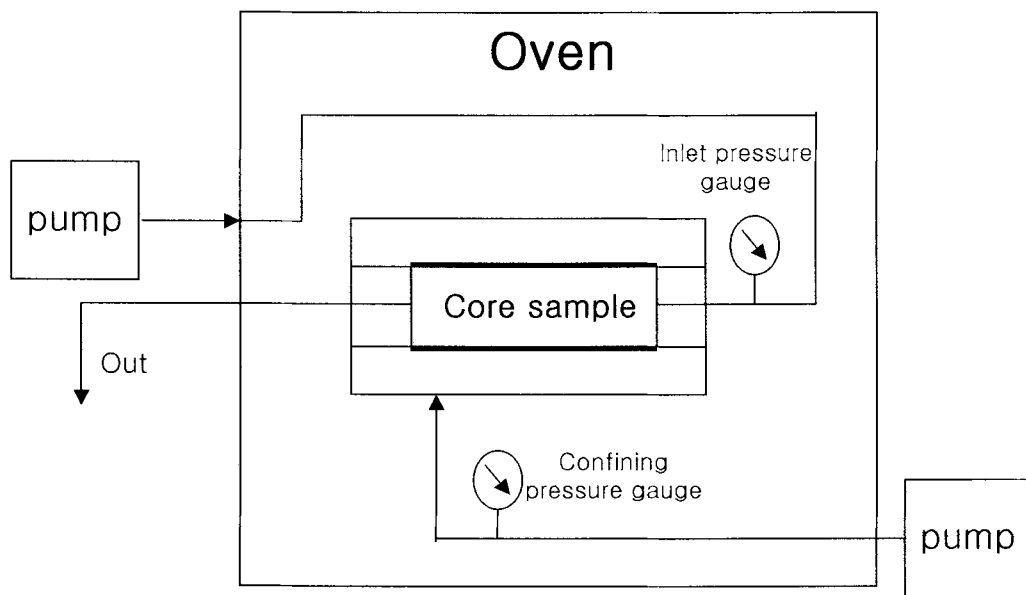


Fig. 3.2.8 봉압 변화에 따른 유체투과율 측정을 위한 장치

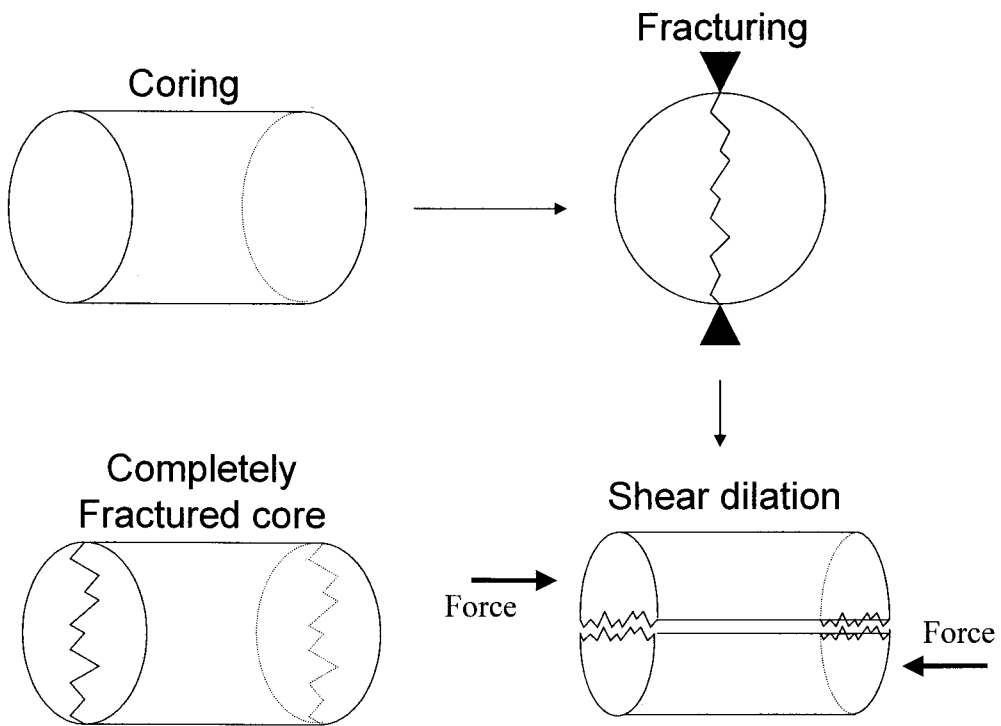


Fig. 3.2.9 균열 시료 준비

(다) 균열 간극 측정

이 연구에서는 레이저 변위계를 이용한 표면 표고법을 이용하여 균열 간극을 측정하였다. 광학적인 방법으로 측정할 때 동일한 높이를 측정하더라도 측정점의 색깔 및 반사 정도에 따라 측정값이 다르게 나오기 때문에 레이저 변위계의 산란에 따른 측정 오차를 막기 위해 균열 표면을 흰색 아크릴 물감으로 고르게 칠한다. 본 연구에서는 코어 형태의 시료를 사용했기 때문에 약간의 기울임 정도에도 값의 변화가 커지게 되어 정확한 측정이 어렵다. 따라서 실리콘으로 4각형 형태의 주물을 만들어 시료의 상·하면이 정확하게 평행이 되도록 하였다. 균열 간극 측정을 위하여 균열 표면의 상·하면에 대하여 측정을 할 때 상·하면의 위치가 정확히 일치해야 하므로 우선 X-Y 테이블 상에 정확히 시료의 위치를 표시하고 정밀하게 상·하부 시료를 놓은 후에 균열 표면 4면의 위치를 먼저 검사해서 균열의 상·하면이 정확히 일치하도록 위치시키고 상·하면에 대해서 X, Y 방향으로 각각 0.5mm 간격으로 최소 측정한도 0.5 μ m의 한계로 균열 표면의 상대 높이를 측정한다. 균열 간극 계산 방법은 간극 계산 프로그램을 통해 두 표면의 높이를 수치적으로 중첩시켰다. 여기에서 계산되는 균열 간극은 두 표면들 사이의 단순한 산술차이다. 하지만 균열 표면 측정값은 측정시 표면이 모두 다 정확한 경사로 측정될 수 없고 특정한 방향으로 기울어 측정되기 때문에 생기는 추세값(trend)을 포함하고 있다. 그러므로 이 추세값을 다중 회귀 분석에 의해 제거하고 나머지 잔차 값들을 사용하여 간극을 계산하면 표준화된 간극 값을 구할 수 있다.

다중 회귀 분석의 방법을 사용하여 2차원 평면 추세면은 최소 제곱법을 통해 구할 수 있다.

$$Z = b_0 + b_1X + b_2Y \quad (3.2.13)$$

여기서 표면 높이 Z는 관측의 평균과 관련되는 일련의 상수 값(b_0)과 동-서 방향의 좌표 성분(b_1)과 남-북 방향의 좌표 성분(b_2)의 선형 함수로서 간주된다. 이 식은 3개의 변수를 포함하므로 해를 구하기 위해서는 세 개의 정규방정식이 필요하다.

$$\begin{aligned} \sum Z &= b_0 n + b_1 \sum X + b_2 \sum Y \\ \sum XZ &= b_0 \sum X + b_1 \sum X^2 + b_2 \sum XY \\ \sum YZ &= b_0 \sum Y + b_1 \sum XY + b_2 \sum Y^2 \end{aligned} \quad (3.2.14)$$

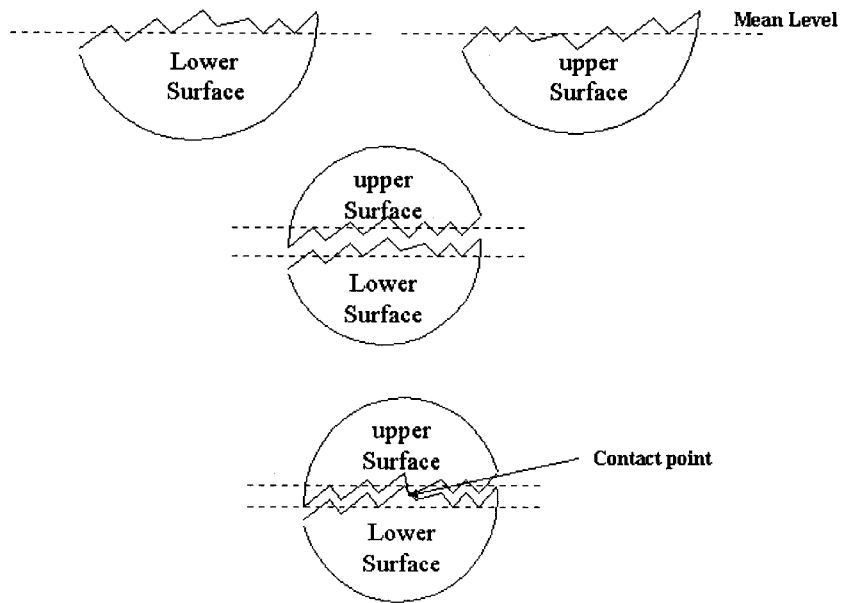


Fig. 3.2.10 균열 간극 결정 과정

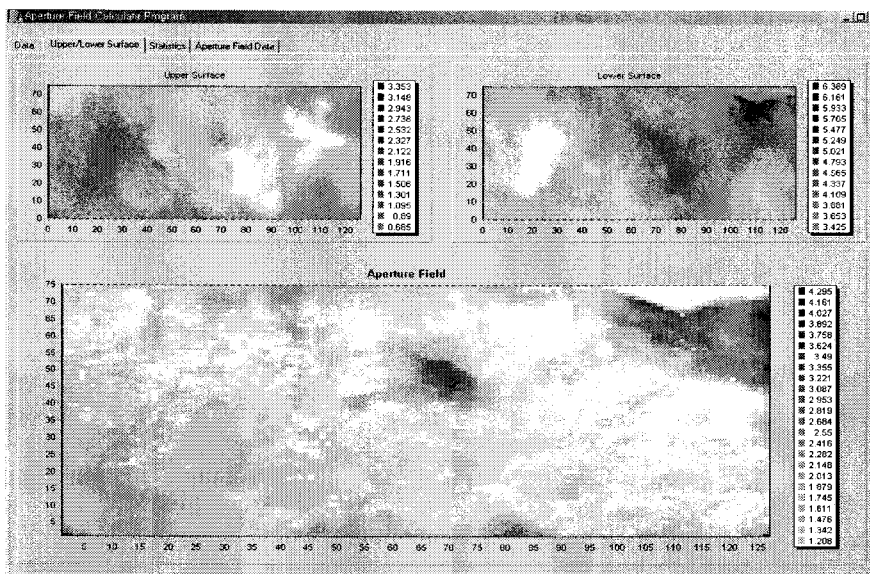


Fig. 3.2.11 균열 간극 계산 프로그램

여기에서 X, Y는 각 측정 지점의 좌표이고 Z는 측정된 균열 표면의 높이이다. 이 세 개의 방정식을 풀면 Fig. 3.2.10 같은 최적 회귀 선형 추세면(trend surface)을 얻을 수 있다. 최적 회귀 선형 추세면을 구한 다음 각 좌표의 원래 측정값에서 추세값을 빼주면 측정 및 회전 등에 의한 오차를 제거한 표준화된 값이 된다. 균열 간극 값은 Fig. 3.2.11의 간극 계산 프로그램을 통해 구할 수 있다. 접촉 영역은 수치적으로 간극 값이 0보다 작거나 같은 영역으로 선정하였다.

(라) 봉압 및 온도 변화에 따른 유체투과율 측정

준비된 시료의 기초 물성(시료의 지름, 길이, 공극률 등)을 측정한 다음 코어홀더에 시료를 넣고 봉압을 가한다. 여기서 봉압은 균열의 간극에 영향을 미쳐 초기 압력을 변화시키기 때문에 50psi로 일정하게 유지한다. 시료 내부를 물로 완전히 포화시키기 위하여 균열 내부를 진공펌프를 이용하여 충분히 진공시킨다. 확장압 시료는 공극 부피가 매우 작기 때문에 약 2~3시간 동안 진공시키면 충분하다.

염소 1ppm을 투여한 물을 사용하여 시료를 포화시키고 나면 염소 1ppm을 투여한 물을 일정 유량으로 주입하여 압력이 안정화될 때까지 기다린 후 유체투과율과 주입 유량에서 시료 양단에 걸리는 초기 압력을 결정한다. 이 때 오븐을 이용하여 각 시스템의 온도를 30°C/60°C/90°C로 일정하게 유지시키고 봉압을 각각 단계별로 증가시키면서 시료 양단에 걸리는 압력을 측정한다. 이렇게 한번의 실험이 완료되면 다른 시료에 대해서도 같은 방법을 적용하여 모두 5개의 시료에 대하여 실험을 수행하였다.

(마) 전산 모형

실험을 통해 얻어진 균열 초기 간극과 유량을 입력 자료로 하여 압력장과 유동장을 계산하고 봉압에 따라 균열 간극의 변화를 예측하는 전산 모형을 개발하였다.

① 지배방정식

레이놀즈 방정식은 균열이 부분적으로 평행하다고 했을 때 균열면에서의 유체 유동이 평행관 사이에서의 유체 유동과 비슷하다는 가정에 기초한다. 즉 2차원 유동의 경우에 레이놀즈 방정식은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{b(x,y)^3 g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{b(x,y)^3 g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.2.15)$$

여기서 b 는 균열 간극(cm), p 는 압력(psig), μ 는 유체의 점성도(cp)를 나타내며 g 는 중력가속도(cm/s^2)이다. 위의 식을 블럭 중심으로 유한 차분화 시키면 다음과 같은 최종 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta y \frac{b^3_{i+1/2,j} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\Delta x} \right) - \Delta y \frac{b^3_{i-1/2,j} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{\Delta x} \right) \\ + \Delta x \frac{b^3_{i,j+1/2} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\Delta y} \right) - \Delta x \frac{b^3_{i,j-1/2} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.2.16)$$

여기서 Δx 와 Δy 는 각각 x , y 방향으로의 격자 간격이고 $b^3_{i+1/2,j}$ 와 $b^3_{i-1/2,j}$ 등의 항들은 연결투과율이다.

② 연결투과율

비압축성 유체의 경우에 Darcy's 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = TW \left(\frac{\Delta h}{L} \right) \quad (3.2.17)$$

여기서 Q 는 체적 유량(cc/sec), T 는 균열 투과율($\text{cm}^4/\text{s}^2 \cdot \text{cp}$), W 는 균열의 폭(cm)이고, L 은 균열의 길이(cm)를 나타낸다.

그런데 유체가 평행판 사이를 흐를 때 균열 투과율은 삼승법칙에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{b^3 g}{12\mu} \quad (3.2.18)$$

여기서 g 는 중력가속도(cm/s^2)이며 μ 는 유체의 점성도(cp)이다.

2차원 균열에서 각각의 격자들은 고유한 균열 투과율을 갖게 되는데 인접한 두 격자의 균열 투과율들의 평균값이 바로 연결투과율이다. 여기서 두 격자의 균열 투과율을 평균화하는 방법에 따라 연결투과율을 다양하게 정의할 수 있고 그 중 균열

의 기하학적 특징을 반영하고 있는 대칭 썬기(symmetric wedge)를 이용하여 전산 모사를 수행하였다(Fig. 3.2.12).

- 대칭 썬기

$$b^3_{i+1/2,j} = \frac{2 b^2_{i,j} b^2_{i+1,j}}{b_{i,j} + b_{i+1,j}} \frac{3(1 - \theta \cot \theta)}{4 \tan^2(\theta/2)} \quad (3.2.19)$$

③ 수치해석 방법

개발된 전산 모형에서 단위 격자는 0.5mm×0.5mm로 하였으며 외부 경계 조건은 비유동 경계 조건이다. 초기 간극 분포값을 이용하여 수리 간극을 계산하고 실험에서 구한 봉압하의 수리 간극과 비교하여, 다른 경우에 Hertz의 접촉 이론을 이용하여 간극 분포 값을 변화시켜 일치할 때까지 반복적으로 계산하였다. 여기에서 초기 간극 분포와 수리 간극 분포가 일치한다는 가정을 하였다. 봉압하의 수리 간극 분포를 계산하여 봉압-간극 분포를 살펴보고 접촉 면적에 따른 유체투과율 변화를 통해 접촉 면적이 유체투과율 변화에 미치는 영향을 살펴본다.

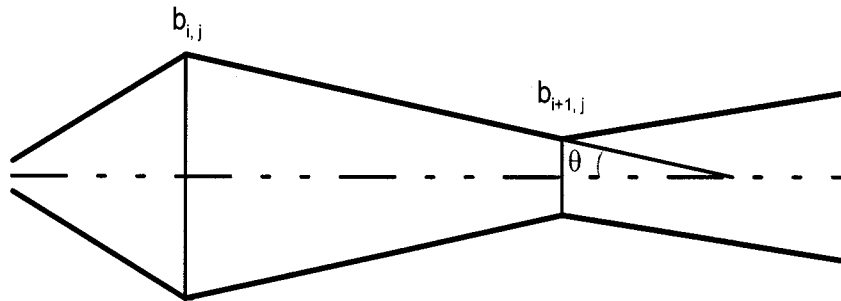


Fig. 3.2.12 대칭 췌기의 개념 모델

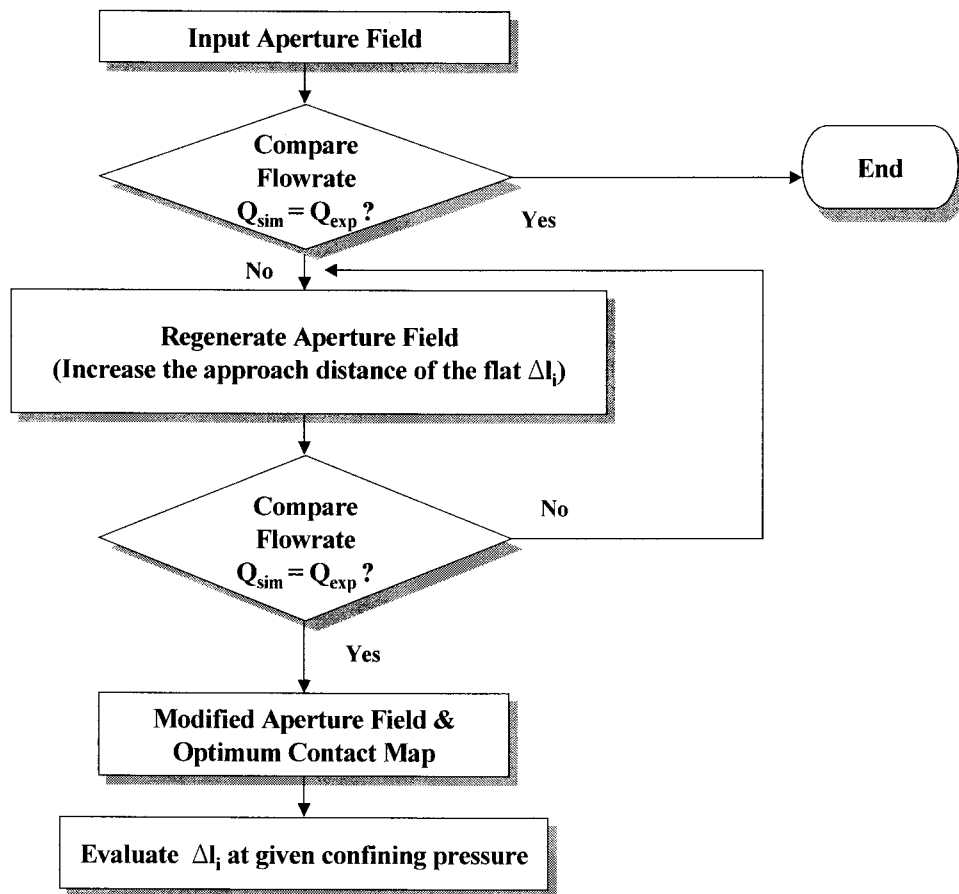


Fig. 3.2.13 최적 접촉지도 조사를 위한 흐름도

다. 결과 및 고찰

(1) 균열의 특성

(가) 간극 분포 특성

3차원 레이저 측정기를 이용하여 측정한 균열 간극 분포의 통계치는 Table 3.2.2과 같으며 균열 간극 분포는 Fig. 3.2.14~23과 같다. 각 시료 균열 간극의 평균은 $544.33\mu\text{m}$ ~ $898.62\mu\text{m}$ 이고 이는 기존의 실험 값인 Esaki 등(1998)의 $615\mu\text{m}$, Lespinasse와 Sausse(2000)의 $448\mu\text{m}$ ~ $748\mu\text{m}$ 와 비슷한 결과이다.

실험을 통해 얻어진 균열 간극 분포의 히스토그램을 Fig. 3.2.24에 나타내었다. 모든 균열 간극 분포의 히스토그램은 로그-정규분포 형태를 나타낸다.

Table 3.2.2 균열 간극 분포의 통계치

	S1	S2	S3	S4	S5
$E_{\text{mean}} (\mu\text{m})$	600.69	671.62	550.45	544.33	898.62
Standard deviation (μm)	365.40	362.57	298.53	361.46	602.83
Coeff. of variation	0.6083	0.5398	0.5423	0.6640	0.6708
Coeff. of skewness	1.6566	1.8687	2.0735	2.2475	1.9967
Covariance	0.1335	0.1315	0.0891	0.1307	0.3634
Correlation length (mm)	18.15	5.074	12.37	7.1	14.1

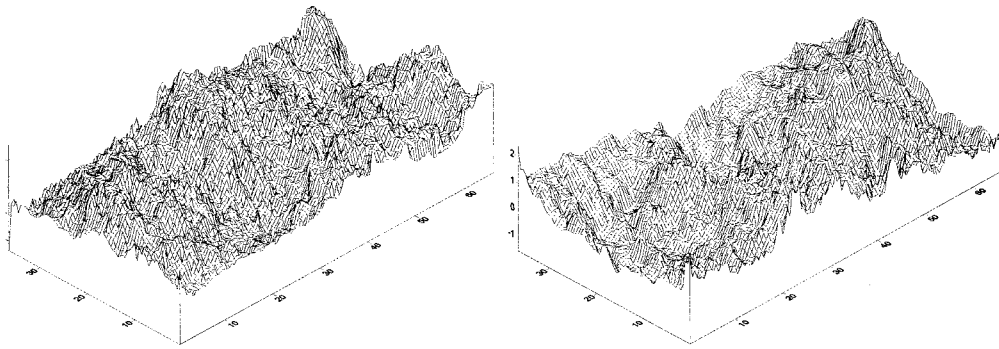


Fig. 3.2.14 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S1)

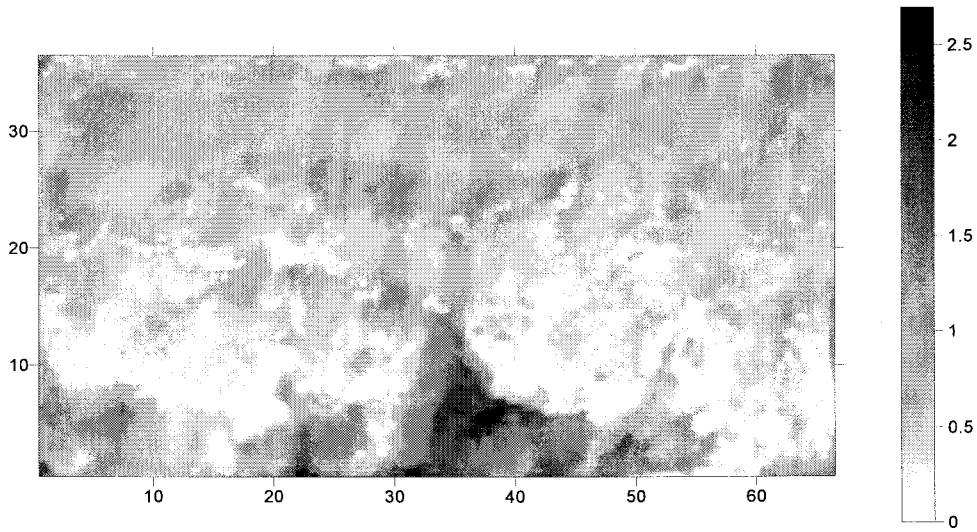


Fig. 3.2.15 균열면의 평면 명암도(균열시료 S1)

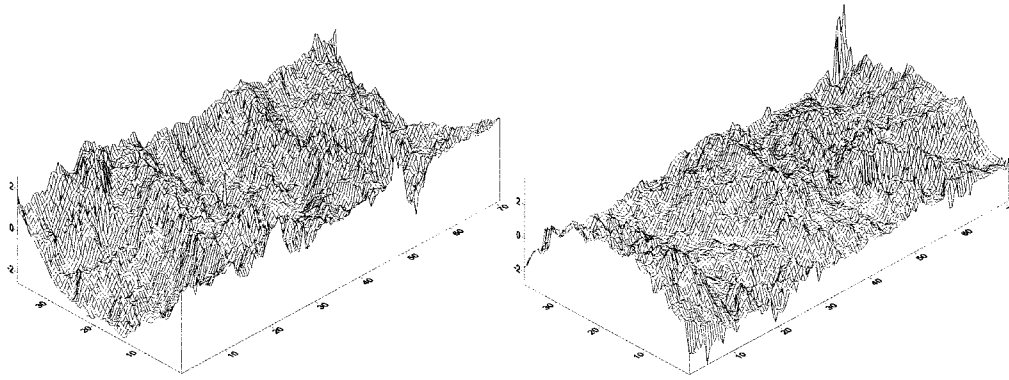


Fig. 3.2.16 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S2)

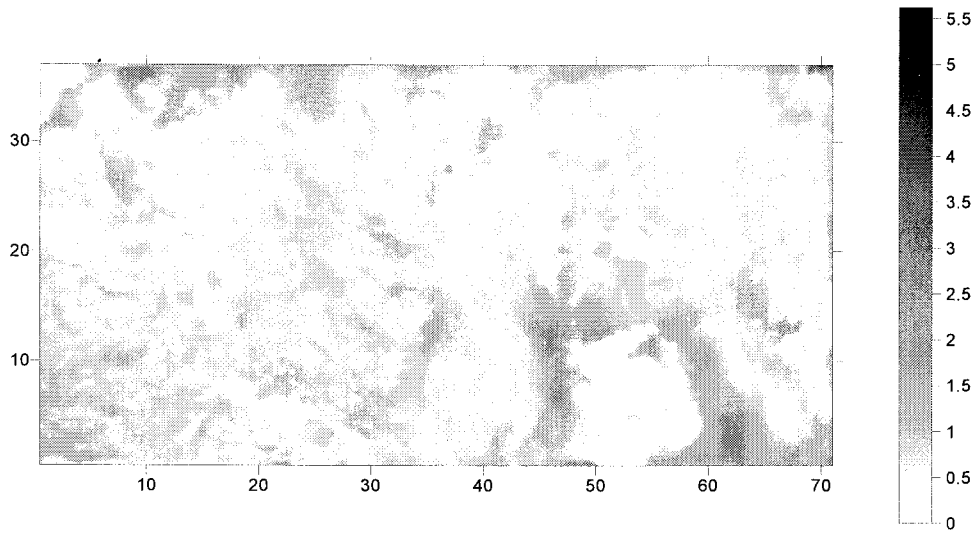


Fig. 3.2.17 균열면의 평면 명암도(균열시료 S2)

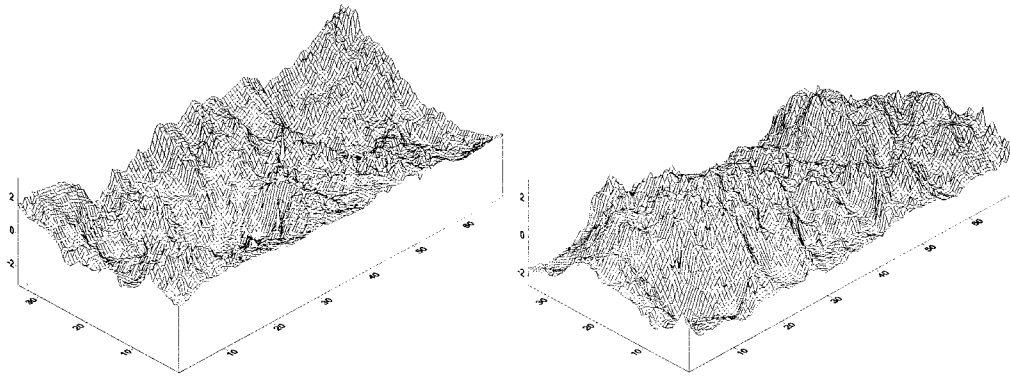


Fig. 3.2.18 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S3)

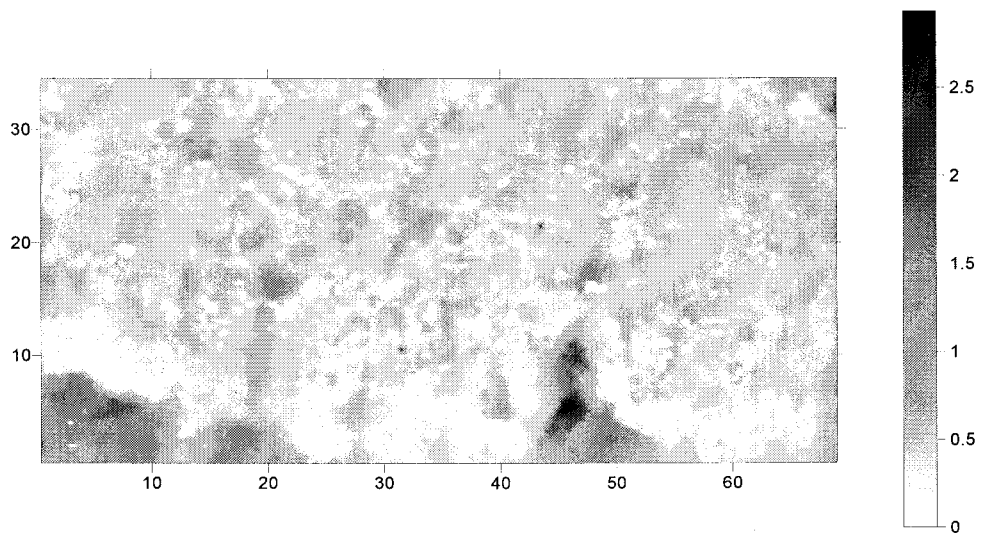


Fig. 3.2.19 균열면의 평면 명암도(균열시료 S3)

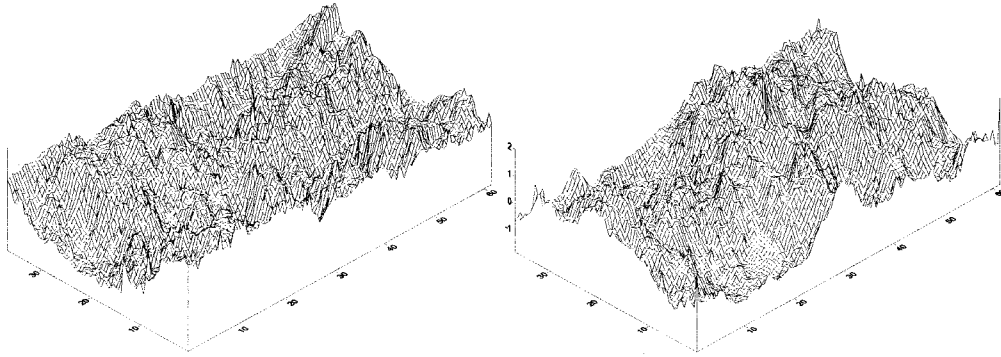


Fig. 3.2.20 균열면 형태의 3차원 묘사(균열시료 S4)

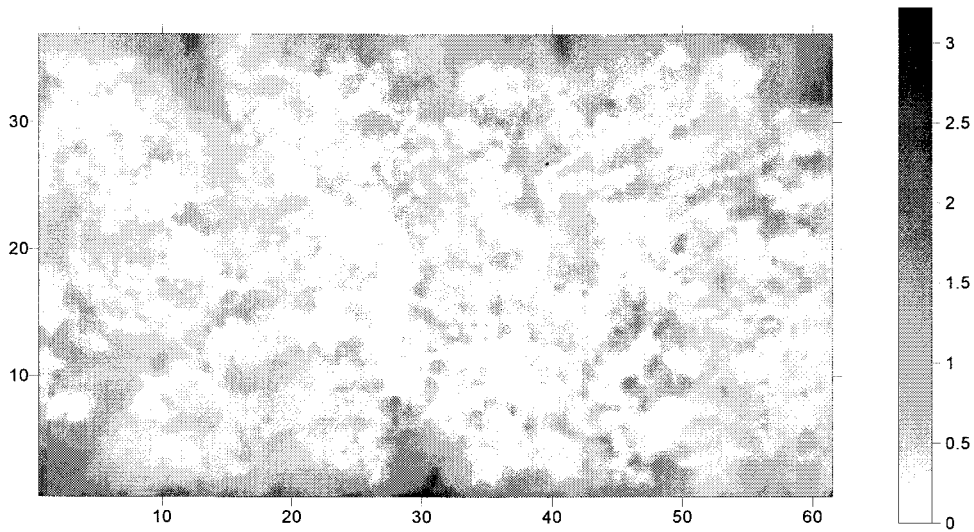


Fig. 3.2.21 균열면의 평면 명암도(균열시료 S4)

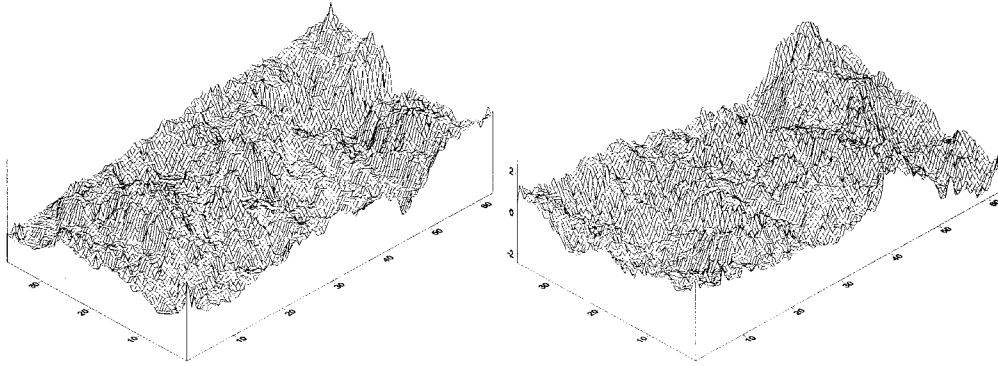


Fig. 3.2.22 균열면 형태의 3차원 모사(균열시료 S5)

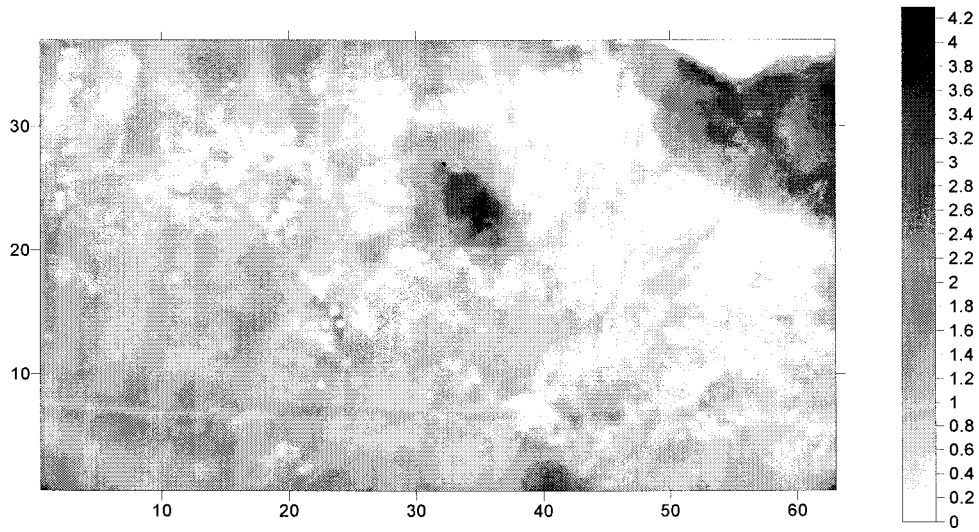


Fig. 3.2.23 균열면의 평면 명암도(균열시료 S5)

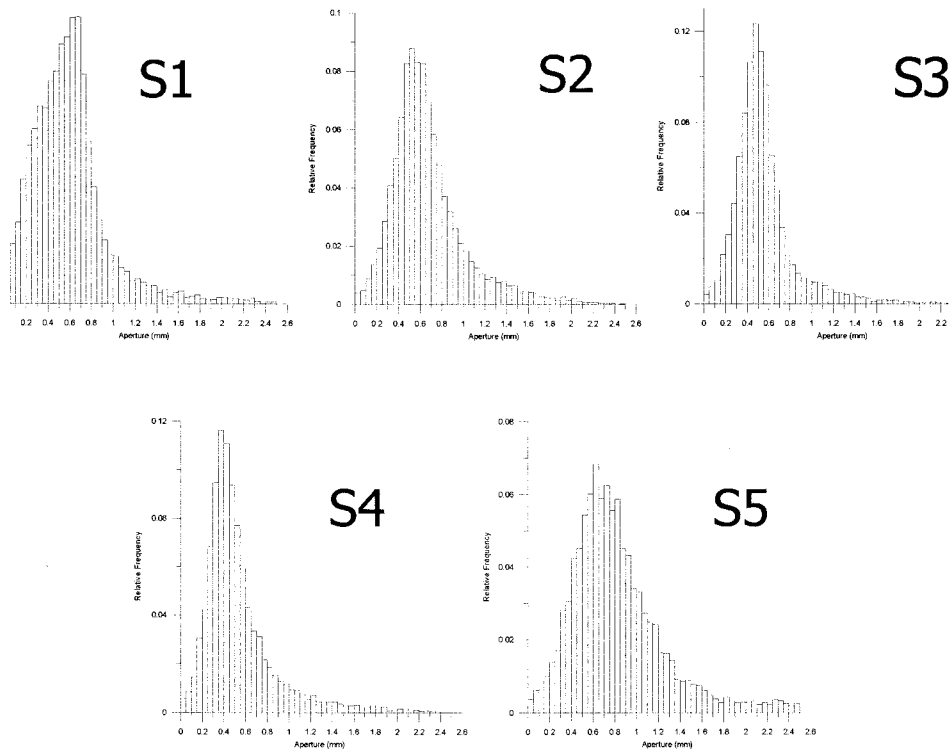


Fig. 3.2.24 균열시료의 간극분포 히스토그램

(나) 간극 분포의 공간 상관 해석

간극 분포와 공간 상관 관계를 해석하기 위해 간극 분포의 베리오그램을 이용하여 지구통계학적 해석을 하였다. 간극 분포에 대해 지연 거리 h 를 최소 1mm부터 1mm간격으로 30mm까지 하여 베리오그램을 작성하였다. 방향에 따른 공간 상관의 변화를 보기 위하여 허용 각도 5° 로 하여 각각 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 범위의 베리오그램을 작성하였다. 간극 분포의 베리오그램은 베리오그램 모델 중 지수 모델, 구형 모델과 가장 근사하였고 이는 Iwano와 Einstein(1993)의 기존 결과와 비슷하다. 베리오그램은 Fig. 3.2.25와 같고 간극 분포의 통계값들은 Table 3.2.3과 같다.

공분산, 상관 거리, 문턱값(sill value)을 기준으로 하여 세 그룹으로 분류할 수 있다.

- I 그룹: 베리오그램 값이 지연 거리에 따라 계속 증가하다 감소하고 상관 거리 범위를 정하기 어려운 그룹 - S1
- II 그룹: 영향 범위가 작고 베리오그램 값이 거의 일정한 그룹 - S2, S4
- III 그룹: 공분산과 문턱값이 비슷하고 베리오그램 값이 지연 거리에 따라 계속 증가하다가 일정해진 이후 감소하는 구멍 효과를 나타내는 그룹 - S3, S5

I 그룹은 상관 거리가 크고 지연 거리에 따라 베리오그램 값들이 계속해서 증가하다 감소하는 경우이다. 이러한 그룹은 공분산보다 문턱값이 더 크게 나오고 상관 거리가 일정하지 않고 상관 영역이 지연 거리 증가에 따라 계속 커진다. 이런 경우는 간극 값이 큰 영역과 작은 영역이 뚜렷하게 나뉘어 있는 경우이며 유체 유동의 비틀림 정도가 작고 한쪽 방향으로의 편류의 형태를 보이는 경우가 많다. 또한 붕압에 따라서 유동 경로의 변화가 적기 때문에 유체투과율의 변화가 작은 특징이 있다.

II 그룹은 지연 거리에 따라 베리오그램 값이 일정하게 나타났으며 이는 간극 분포가 균질하다는 것을 의미한다. S2 시료는 각도가 0° , 30° , 45° 일 때 즉 X방향과 X방향으로 30° , 45° 일 때 비슷한 균열 간극 값들의 분포가 나타났으며 S4 시료는 각도가 0° 일 때 비슷한 균열 간극 값들의 분포가 나타났으며 다른 각도일 경우에는 I 그룹과 비슷한 형태가 나타났다. 상관 거리가 5.074mm~7.1mm로 다른 시료에 비해 작게 나타나 다른 시료에 비해 균등하고 독립적인 균열 간극 분포를 나타낸다. X방향으로의 유동은 비슷한 값들이 일정하게 반복되므로 붕압에 따라서 균열 간극이 단히게 되어 붕압 변화에 따라 유체투과율의 변화가 가장 크게 나타난다.

III 그룹은 공분산과 문턱값이 비슷하고 베리오그램 값이 지연 거리에 따라 계속

증가하다가 일정해진 이후 감소하는 경우이다. 이와 같은 경우는 간극 분포가 균질하지 않은 경우이고 이런 베리오그램은 구멍 효과를 나타낸다. 구멍 효과는 주기적으로 비슷한 값이 나오는 경우에 볼 수 있다. 이런 형태의 베리오그램이 나오는 시료는 봉압에 따라 유체투과율이 일정하게 변화하는 특징이 있다. 즉 초기 봉압 상태에서 봉압이 커짐에 따라 급격한 유체투과율의 변화는 일어나지 않는다. S3, S5 시료의 경우 균열 간극 값이 아주 큰 영역이 있으며 이 영역의 영향에 의해 이와 같은 형태의 베리오그램이 나타난다.

Table 3.2.3 균열시료의 초기 간극분포에 대한 통계적 특성

	S1	S2	S3	S4	S5
Covariance	0.1335	0.1315	0.0891	0.1307	0.3634
Range (mm)	18.15	5.074	12.37	7.1	14.1
Sill (mm ²)	0.1613	0.109	0.08663	0.076	0.3483

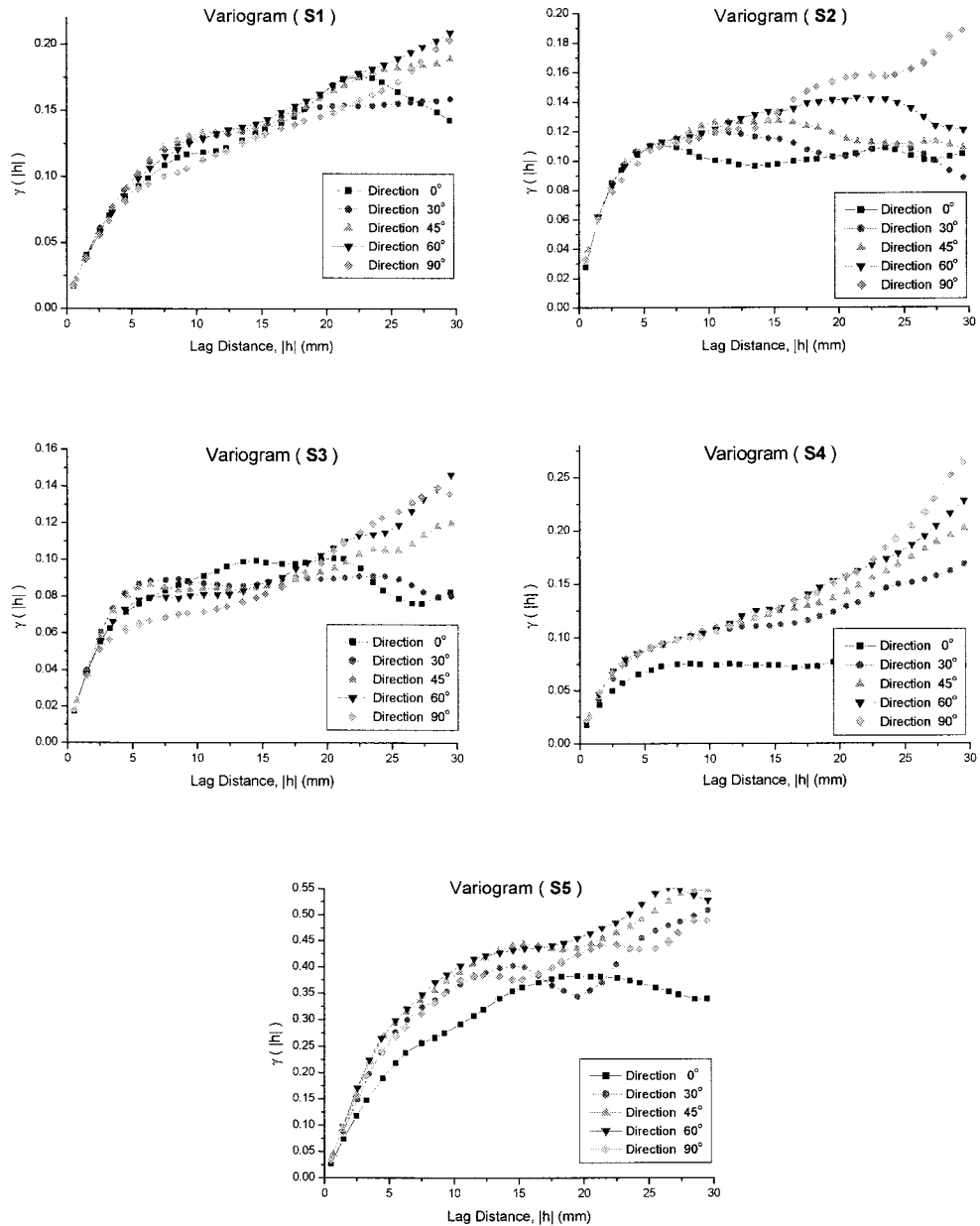


Fig. 3.2.25 초기 균열 간극 분포의 방향성 베리오그램

(2) 봉압에 따른 유체투과율의 변화

봉압을 50~2000psi까지 변화시키면서 봉압에 따른 유체 투과율을 측정하였다. 봉압 변화에 따라 유체투과율은 감소하는 경향이 나타난다. 이는 봉압이 증가함에 따라 시료의 균열이 압축을 받아서 균열의 간극이 전체적으로 줄어들고, 실제로 유체가 흐를 수 있는 공간이 줄어들고 유동 경로가 복잡해지기 때문이다. 측정 결과를 Gangi(1978), Gale(1982) 그리고 Swan(1983)의 모델을 이용하여 비선형 회귀 분석을 실시하였다. 각 시료에 대한 각 모델의 상수를 Table 3.2.4에 나타내었으며 각 모델 별 결과를 Fig. 3.2.26~28에 도시하였다. 대부분의 모델이 실험 결과와 잘 근사하였다. 봉압에 따른 유체투과율 변화 양상도 베리오그램을 이용하여 분류한 3가지 그룹으로 분류된다. S1은 봉압에 따른 유체투과율의 변화 폭이 가장 작게 나타났고, S3, S5는 봉압에 따라 유체투과율이 일정하게 감소하는 경향을 보이며, S2, S4는 봉압에 따라 유체투과율의 변화 폭이 가장 크게 나타났다. 이는 균열 간극 분포 특성에 따른 것이다.

Table 3.2.4 다양한 수리해석모델에 대한 균열시료의 유동특성인자

	Gangi(1978)		Gale(1982)		Swan(1983)	
	$k = k_0 \left(1 - \left(\frac{p_c}{D} \right)^{1/n} \right)$		$k = \beta p_c^{-\alpha}$		$k = k_0 (c - m \ln p_c)$	
	D	n	α	β	c	m
S1	14370.40	2.68	793.79	0.45	1.44	0.14
S2	1356.15	1.58	9034.32	1.04	2.28	0.34
S3	3542.85	1.33	3722.83	0.47	1.73	0.18
S4	1352.88	1.19	8821.16	0.78	2.11	0.27
S5	2818.70	1.46	4886.28	0.56	1.77	0.20

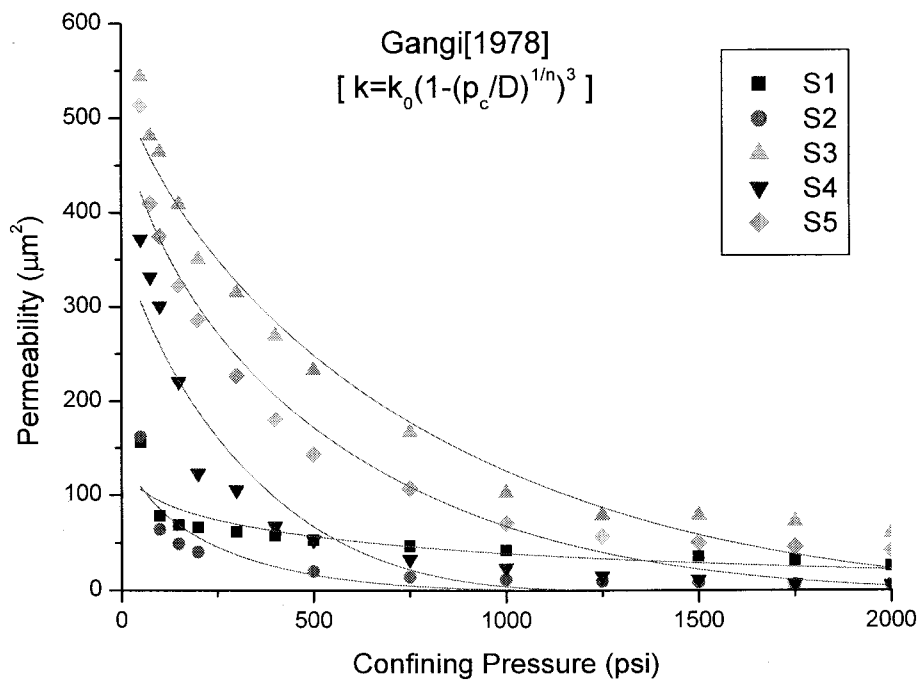


Fig. 3.2.26 유체투과율 vs. 봉압(Gangi(1978) 수리해석모델과 비교)

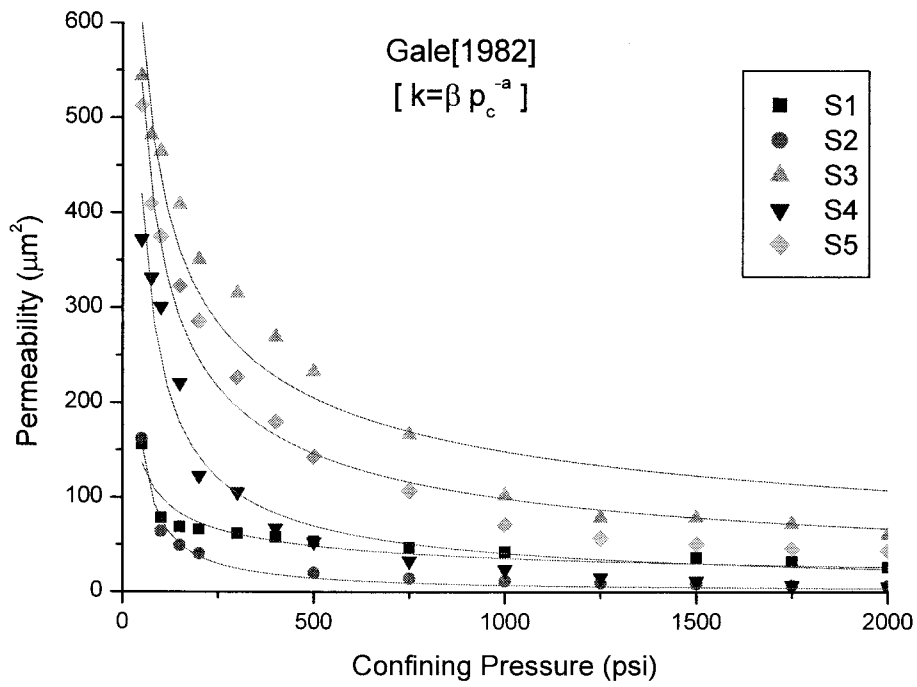


Fig. 3.2.27 유체투과율 vs. 봉압(Gale(1982) 수리해석모델과 비교)

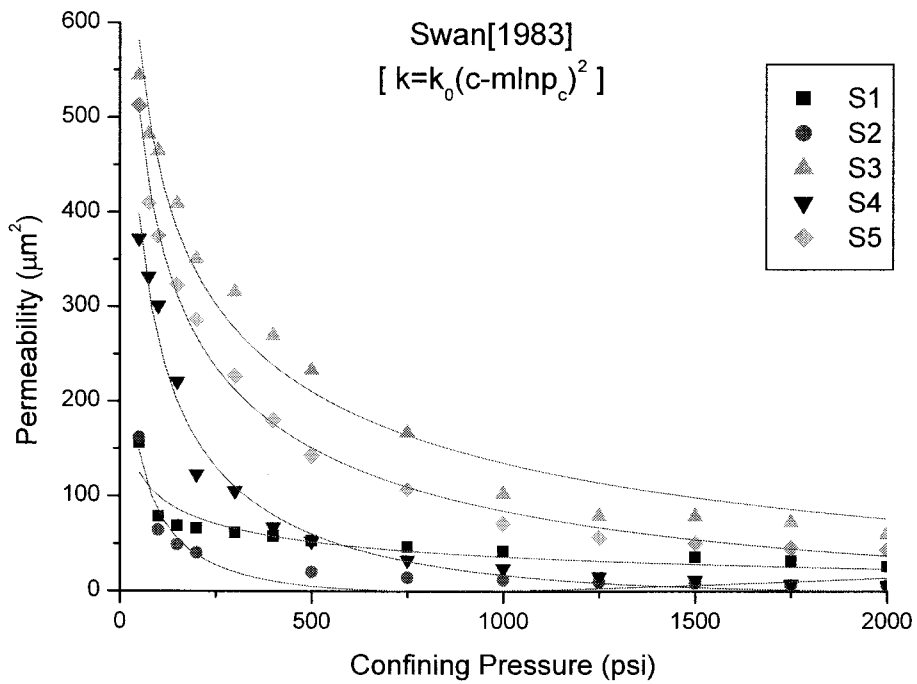


Fig. 3.2.28 유체투과율 vs. 봉압(Swan(1983) 수리해석모델과 비교)

(3) 온도 변화에 따른 유체투과율의 변화

온도를 30℃, 60℃, 90℃로 변화시키면서 온도 변화에 따른 유체 투과율을 측정하였다. 측정시 일정 온도에서 봉압을 변화시키면서 유체투과율을 측정하였고 온도 변화시 실험 장치의 온도가 안정화 될 때까지 3시간 정도의 시간이 경과한 후 측정하였다. 장기간의 유체 유동 실험은 미세 균열에 의해 균열 발전이 급격히 증가한 다거나 광물 입자와 물의 화학 반응으로 인하여 침전물들이 생기게 되어 유체투과율의 감소가 일어난다는 보고가 있기 때문에 본 실험에서는 수 일 이내의 단기간의 실험을 수행하였다.

실험 결과, 온도 증가에 따라 유체투과율은 감소하는 경향이 나타났다. 이는 온도 증가에 따라 암석이 열팽창을 하므로 암석 입자 사이의 체적 팽창이 일어나서 균열 간극이 닫히는 효과가 발생하기 때문이다. 또한 온도 증가에 따라 물의 점성도 값이 30℃일 때의 0.798에서 90℃일 때는 0.315로 작아지기 때문에 Darcy 법칙을 통해 계산한 유체투과율은 감소하게 된다. 각 온도별 유체투과율 측정 결과는 Fig. 3.2.29~31에 나타내었으며, 각 시료별 온도에 따른 유체투과율은 Fig. 3.2.32에 나타내었다. 온도별 물의 점성도는 Table 3.2.5와 같다.

Table 3.2.5 물의 점성도

	30℃	60℃	90℃
Viscosity (cp)	0.798	0.466	0.315

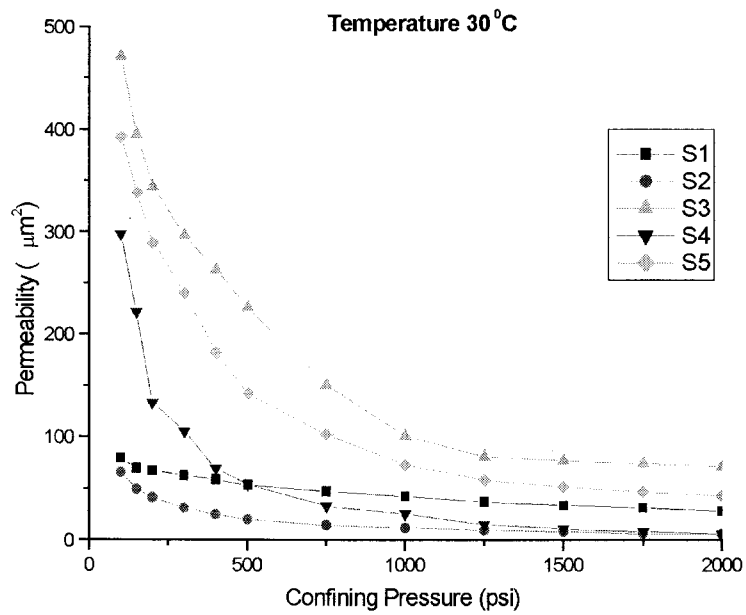


Fig. 3.2.29 유체투과율 vs. 봉압(30 °C에서)

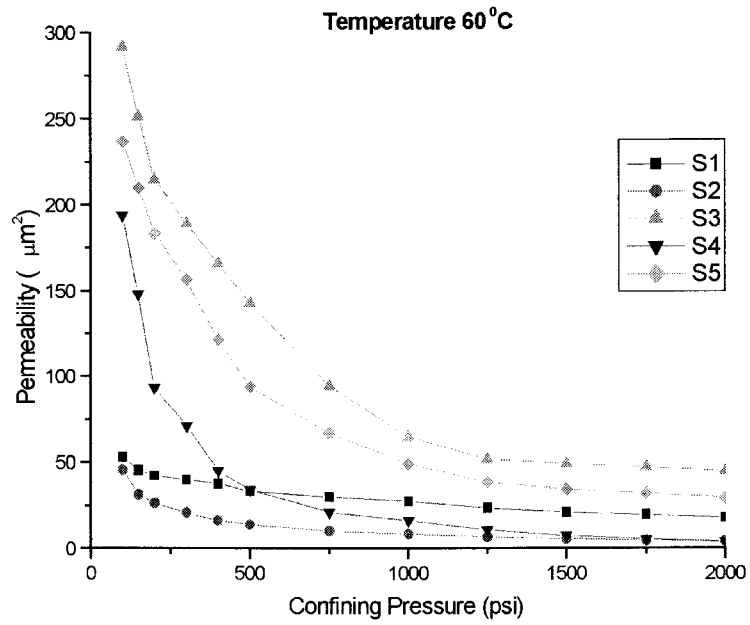


Fig. 3.2.30 유체투과율 vs. 봉압(60 °C에서)

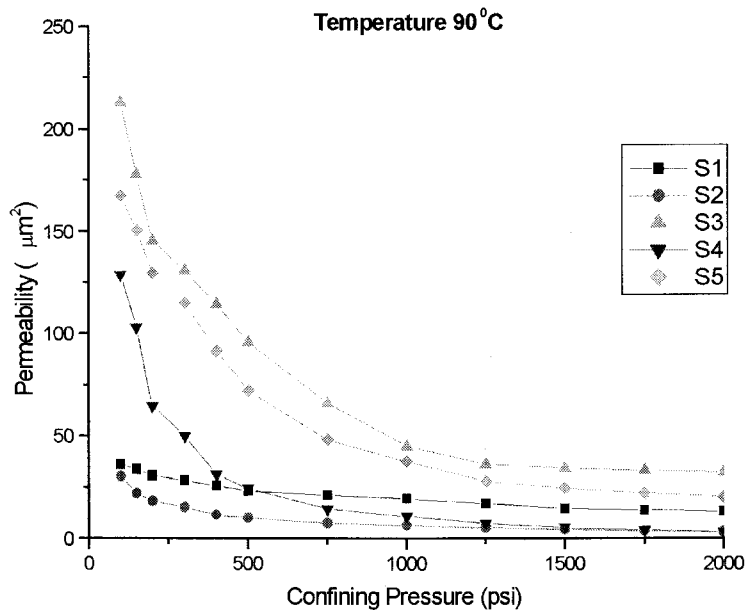


Fig. 3.2.31 유체투과율 vs. 봉압(90 °C에서)

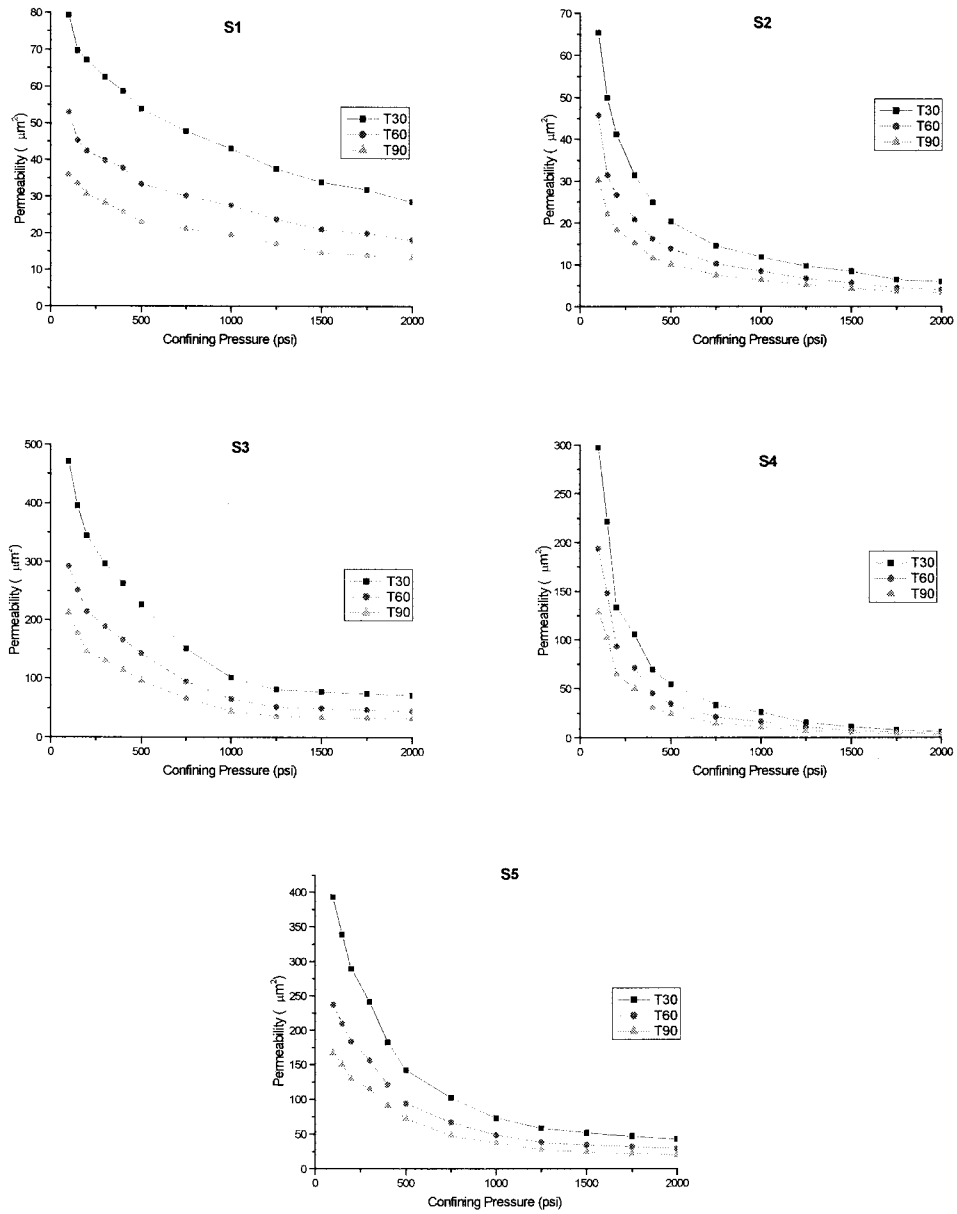


Fig. 3.2.32 온도변화에 따른 균열시료의 유체투과율 vs. 봉압

(4) 접촉 면적에 따른 유체투과율 변화

봉압하에 접촉 면적의 변화는 실험을 통해서도 직접 측정이 불가능하다. 이 연구에서는 Hertz의 접촉 이론을 이용하여 봉압하에 접촉 면적을 계산하였다. 접촉 면적과 유체투과율의 변화를 분석하기 위하여 정규화된 값을 사용하였고 Fig. 3.2.33에 도시하였다.

계산된 접촉 면적의 변화를 통하여 비균질 간극 분포를 보이는 S1, S2, S4시료의 유체투과율 변화 양상을 분석할 수 있다. S1시료와 S4시료의 유체투과율은 봉압이 150psi에서 200psi 사이에서 값의 변화 폭이 다르게 나타난다. 이는 S4시료의 접촉 면적 변화가 S1시료의 접촉 면적 변화보다 크기 때문에 S4시료의 유체투과율 감소 폭이 S1시료보다 더 크게 나타나고 이는 Fig. 3.2.34과 Fig. 3.2.35을 통해 확인할 수 있다. 같은 방법으로 S2시료와 S4시료의 유체투과율 변화를 비교해보면 S2시료와 S4시료의 유체투과율은 봉압이 750psi 전후에서 값의 변화 폭이 다르게 나타난다. 이는 마찬가지로 S4시료의 접촉 면적 변화가 S2시료의 접촉 면적 변화보다 크기 때문에 S4시료의 유체투과율 감소 폭이 S1시료보다 더 크게 나타나고 이는 Fig. 3.2.36과 Fig. 3.2.37을 통해 확인할 수 있다. 봉압과 정규화된 접촉 면적 값은 Table 3.2.6과 같다.

Table 3.2.6 봉압변화에 따른 정규화된 균열의 접촉면적

		Confining pressure								
		50	100	150	200	300	400	500	750	1000
Normalized contact area	S1	1	1.03567	1.03949	1.04032	1.04264	1.04430	1.04596	1.04895	1.05127
	S2	1	1.04378	1.04881	1.05383	1.05448	1.05535	1.05578	1.05578	1.05632
	S4	1	1.01542	1.02952	1.04521	1.04694	1.05186	1.05332	1.05625	1.05811

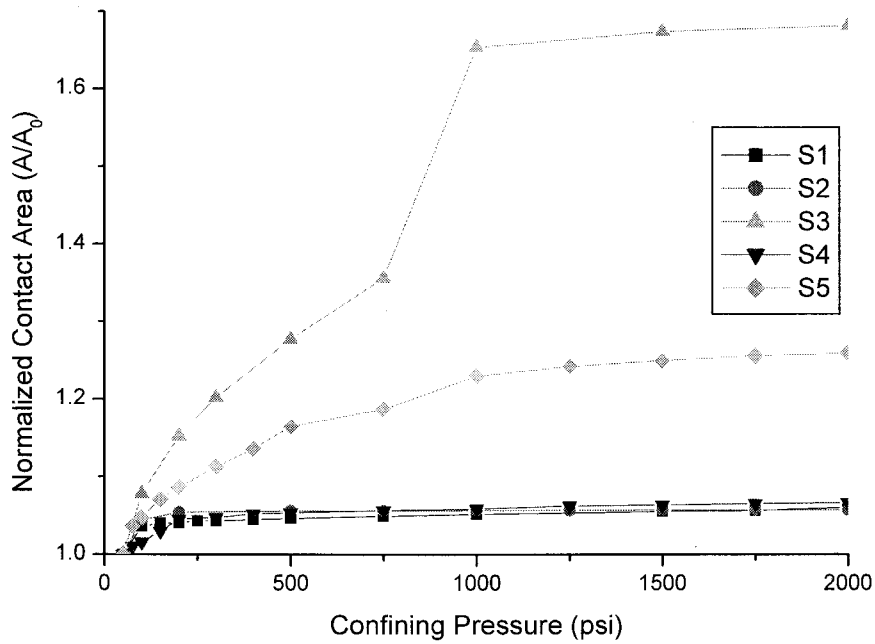


Fig. 3.2.33 봉압 vs. 균열면의 정규화된 접촉면적

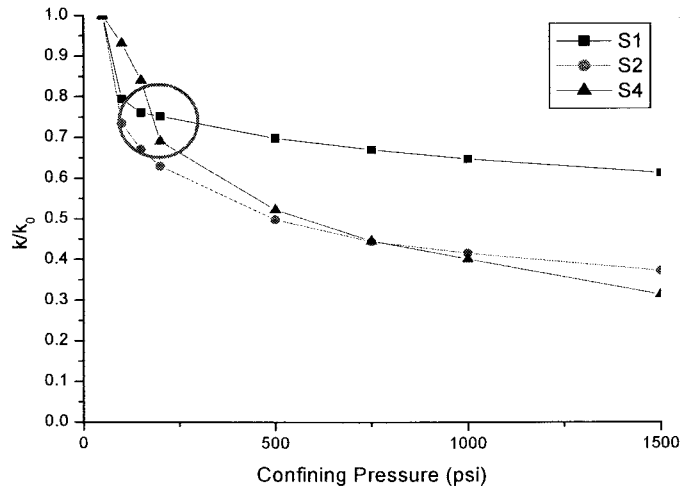


Fig. 3.2.34 봉압 vs. 정규화된 유체투과율
(전반부 교차점)

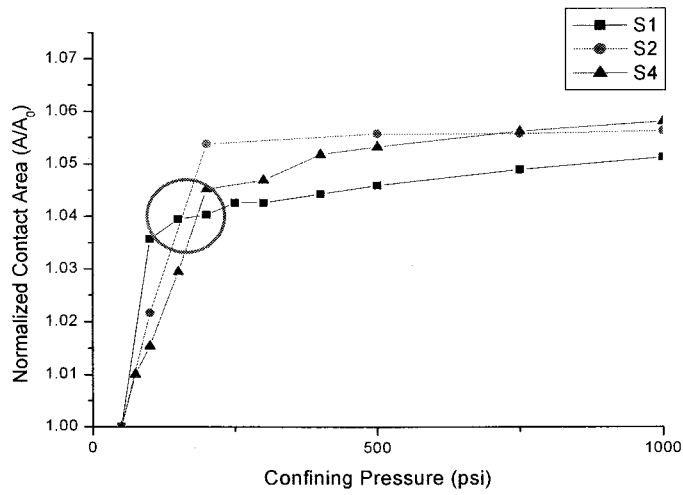


Fig. 3.2.35 봉압 vs. 정규화된 균열접촉면적
(전반부 교차점, 일부시료)

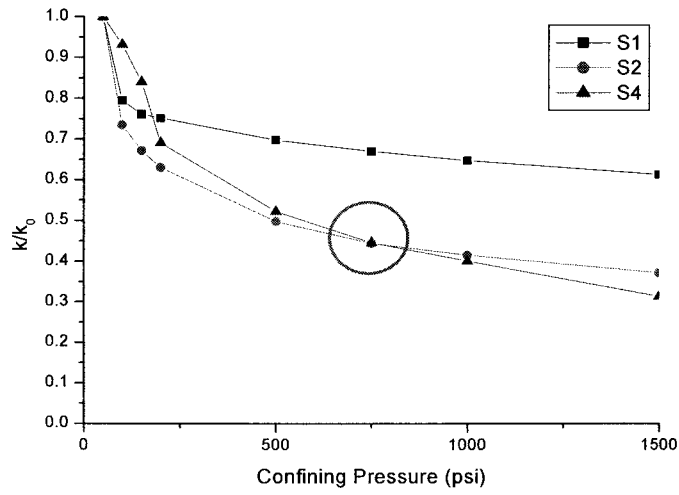


Fig. 3.2.36 봉압 vs. 정규화된 유체투과율
(후반부 교차점)

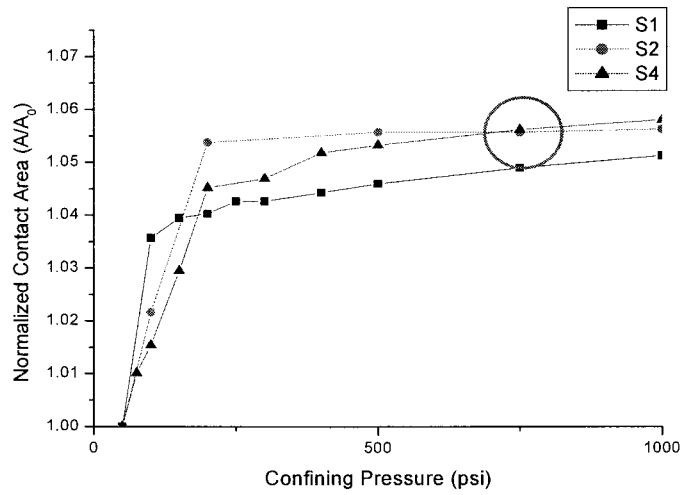


Fig. 3.2.37 봉압 vs. 정규화된 균열접촉면적
(후반부 교차점, 일부시료)

라. 결론

1. 본 실험에서 사용한 화강암 인공 균열의 간극 측정 결과, 초기 평균 간극은 $544.33\mu\text{m} \sim 898.62\mu\text{m}$ 범위를 보였으며 로그-정규분포 형태를 보였다. 균열 간극 분포의 베리오그램은 지수 모델, 구형 모델과 가장 근사하였다. 비균질 시료는 베리오그램 값이 증가하다가 감소하는 형태를 보였고 유체투과율 변화 폭도 크게 나타났으며, 균질 시료는 베리오그램 값이 일정한 문턱 값을 가지는 형태로 나타났으며 유체투과율 변화도 거의 일정하게 나타났다.

2. 봉압 변화에 따라 유체투과율은 감소하는 경향이 나타나고 기존 모델들을 이용하여 비선형 회귀분석을 실시한 결과 모두 실험 결과와 비슷하였다.

3. 온도 증가에 따라 유체투과율이 감소하는 경향을 보였으며 이는 열팽창으로 인한 균열 간극 감소와 온도 증가에 의한 물의 점성도 값의 감소 때문이다.

4. 비균질 간극 분포를 보이는 시료에서 서로 다른 유체투과율 변화를 접촉 면적 변화를 통해 설명할 수 있었다. 접촉 면적이 커지면 유체투과율 변화 폭이 작아짐을 이론과 실험을 통해 규명하였다.

5. 균질 간극 분포를 보이는 시료는 탄성이론을 따르고 봉압 변화에 따른 유체투과율 변화는 거의 일정하였다. 비균질 간극 분포를 보이는 시료가 2000psi일 때의 접촉 면적이 50psi일 때의 접촉 면적에 비해 5.70~6.62% 증가했으나 균질 간극 분포를 보이는 시료는 2000psi일 때의 접촉 면적이 50psi일 때의 접촉 면적에 비해 25.89~68.17% 증가하여 접촉 면적의 변화가 비균질 간극 분포를 보이는 시료에 비해 크게 나타났다.

2. 단상유체 유동 해석 실험을 통한 삼승법칙의 적용성 분석

가. 서론

단일 균열에서의 유체 유동은 두 개의 평행판 사이의 층류 유동과 비슷하다는 가정 하에서 삼승법칙(cubic law)으로 표현된다. 삼승법칙에 의하면 유량은 평행판 사이의 틈인 균열 간극(aperture)의 삼승과 압력 구배에 비례한다. 삼승법칙이 함축하고 있는 중요한 점은 비록 속도가 거리에 따라 변하지만 유체의 유동을 균열의 간극으로 완전히 특성화할 수 있다는 것이다.

그러나 실제 균열은 평행하지도 않고 간극이 변화하며 거칠고 접촉면적이 존재하기 때문에 삼승법칙이 자연 상태의 균열에서 유체의 유동을 얼마나 정확히 예측할지는 아직도 의문이다. 일반적으로 유체가 실제 균열을 따라 움직일 때는 복잡한 경로를 따라 움직이며 그로 인해 삼승법칙에서 벗어나는 경향을 보인다.

Iwai(1976)의 실험적 연구에서는 임계 최소 간극(critical minimum aperture)의 개념을 사용하여 삼승법칙의 타당성은 암석의 종류나 균열에 가해진 응력 같은 인자에 의해 결정됨을 보여주었으며, Raven과 Gale(1985)은 응력 외에도 시료의 크기가 삼승법칙으로부터의 편향에 영향을 준다는 결론을 제시하였다. Schrauf와 Evans(1986)에 의한 또 다른 실험적 연구에서는 수력학적 간극(hydraulic aperture)과 기계적 간극(mechanical aperture)의 비교를 통하여 삼승법칙으로 실제 유량을 설명할 수 없다는 결론을 내렸다.

삼승법칙으로부터의 편향을 설명하기 위해 균열의 간극을 새롭게 정의하려는 연구들이 많은 사람들에 의해 이루어졌는데, Tsang과 Witherspoon(1981)은 가중 평균 간극(weighted average aperture)이라는 개념을 이용하여 수직하중에 따른 균열에서의 유체 유동을 분석하였으며 Neuzil과 Tracy(1981)는 균열 모델로부터 간극 빈도 분포(aperture frequency distribution)를 생성시켜 삼승법칙에 적용하고자 하였다. Ge(1997)는 유동방향에 수직한 방향의 간격을 '실제 간극(true aperture)'이라 정의하였으며, Waite 등(1998)은 Ge(1997)의 실제 간극을 삼승법칙에 적용해본 결과 기존의 정의들보다는 실제 유량에 비교적 가까움을 확인하였다.

한편, 1980년대부터는 간극변화를 고려한 연구들이 많이 진행되었는데 Tsang(1984)은 전기적 저항의 개념을 도입하여 삼승법칙을 적용하였을 때도 무시하지 못할 오차가 발생함을 제시하였다. Brown(1987, 1989)은 균열의 평균 간극과 표준편차의 비가 클 때에만 삼승법칙이 유효하며 실제 유량은 균열 표면의 거칠기 등의 인자로 인해 평행판 모델을 사용해서 얻어진 유량의 70~90% 정도라는 결론을 내렸다. Tsang(1988)은 간극변화를 고려한 유동 채널 모델(flow channel model)

을 이용하여 기존에 설명할 수 없었던 편류현상 현상(channeling)은 균열의 간극변화에 기인한다는 것을 보여주었으나 유량은 실제와 차이를 나타냈다. Sahimi(1995)는 실제 자연적인 균열 면에서의 유량을 나타내기 위해 균열 간극에 대한 삼승법칙의 지수는 6까지 커질 수 있다고 주장하였으며 Zimmerman과 Bodvarsson(1996)은 삼승법칙을 적용하기 위해서는 균열 간극의 평균과 분산이 특성 길이(characteristic length)보다 작아야 한다는 것을 보여주었다. 또 유효 간극은 간극의 평균을 표준편차로 나눈 값만큼 평균 간극보다 작아야 한다고 결론 내렸다.

그리고 Detwiler 등(1999)은 빛 투과 이론(light transmission theory)을 적용한 영상 분석 장치로 균열 간극을 측정할 때 문제가 되는 오차들을 정량화하고 최적화하여 전산 모사에 미치는 영향을 분석하였다. 같은 해에 Nicholl 등(1999)은 Detwiler 등(1999)이 사용했던 영상 분석 장치를 이용하여 균열 간극의 측정 방법과 연결투과율(link transmissivity)의 선택에 따른 민감도 분석을 수행하였다.

위에서 열거한 모든 연구들의 공통적인 문제점은 삼승법칙에 잘 부합되는 어떤 평균적인 균열 간극을 찾으려 했다는 것이고 삼승법칙을 적용하여 유량을 계산한 결과가 실제 실험에서 측정된 유량과는 차이가 있다는 것이다. 즉, 유량을 균열 간극의 삼승에 비례시키면 거의 대부분이 실험 값보다 큰 값이 나온다는 것이다. 따라서 이 연구에서는 투명한 균열 재생판을 사용하여 단일 균열에서의 유체 유동 실험을 수행하고 실험 결과를 토대로 전산 모사를 통해 삼승법칙의 지수 3보다 정확하게 실제 유량을 예측할 수 있는 지수를 구하고자 한다. 또한 여러 가지 통계학적 변수들과 균열의 기하학적 특징 및 유체 유동과의 연관성을 살펴보고 연결투과율의 선택이 전산 모사에 미치는 영향을 알아보하고자 한다.

나. 본 론

균열이나 균열망을 통한 유체의 유동에 대한 수많은 실험들이 균열 간극 측정의 어려움으로 인해 큰 성과를 보이지 못하였으나 최근에 빛 투과 기법(light transmission technique)을 이용함으로써 기존의 방법보다 훨씬 더 용이하게 균열 간극의 측정이 가능하게 되었다(Detwiler *et al.*, 1999; Nicholl *et al.*, 1999). 빛 투과 기법은 Beer-Lambert 법칙을 기본 이론으로 하는 방법으로서 투과된 빛의 세기를 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라로 측정된 후 측정된 화소값(pixel value)을 길이로 전환하여 균열의 간극을 계산해내는 방법이다(Persoff and Pruess, 1995). 이 연구에서는 이와 같은 빛 투과 기법을 이용하여 균열의 간극을 측정하였다. 여기서 중요한 것이 재생판의 투명도이다. 기존의 연구에서는 투명도가 떨어지며 옅은 황색을 띄는 에폭시를 사용하여 대부분의 빛을 균열 재생판이 흡수해 일정 농도 이상

은 측정할 수 없는 한계가 있었다. 투명한 균열 재생판을 제작하기 위해 성형재료로서 유리질 성형재료인 본다글라스(Bondaglass)를 사용하였다.

(1) 실험 장치

연구에 사용된 실험장치는 크게 일정한 압력으로 유체를 주입할 수 있는 유체 주입 부분과 주입된 유체의 유동을 관찰할 수 있는 영상획득 부분, 그리고 흘러나오는 유체의 유량을 측정하는 부분으로 나누어진다(Fig. 3.2.38). 일정한 압력으로 유체를 주입하기 위해 유체 축적기(fluid accumulator)를 사용하였으며 질소(N₂) 가스를 이용하여 일정한 압력으로 유체가 주입될 수 있게 하였다. 영상획득 부분은 영상 분석 장치(BioMedLab BiPS 3.0) 안에 투명한 균열 재생판을 설치한 것으로 컴퓨터와 연결된 CCD 카메라를 이용하여 실시간으로 영상을 획득하여 분석할 수 있는 부분이다. 배출부는 디지털 유량계(Fisher Scientific Model 1000 Liquid Flow)와 연결되어 균열판을 통해 흘러나오는 유체의 유량을 매우 정확하게(측정범위: 0.1~30 ml/min, 오차: 1 % 이내) 측정할 수 있었다.

(2) 유리질 균열 재생판 제작

암석의 균열을 그대로 본뜬 투명한 균열 재생판은 1989년 Gentier에 의해서 처음으로 개발되었으며 Hakami(1990, 1996) 등에 의해 널리 사용되기 시작하였다. 투명한 균열 재생판을 제작함으로써 영상 분석 장치로 유체의 유동을 관찰할 수 있으며 균열의 간극을 측정할 수 있다. 이러한 투명 균열 재생판을 제작하는 방법은 다음과 같다(Fig. 3.2.39). 먼저 실리콘 고무(silicone rubber)인 주재(Shin-Etsu Silicone KE1600)와 경화제(Shin-Etsu CAT-1600)를 10 : 1의 비율로 섞어 잘 혼합한 다음 충분한 시간동안 진공 시켜 공기를 제거시킨다. 그 후에 암석 시료의 균열 표면에 붓고 굳을 때까지 하루정도 기다린다. 완전히 굳으면 실리콘 고무를 암석으로부터 떼어 내고 투명한 유리질 성형재료 본다글라스(Bondaglass)를 역시 주재와 경화제 100 : 1의 비율로 섞는다. 그리고 혼합할 때 발생한 기포를 제거하기 위해 마찬가지로 충분한 시간동안 진공을 시킨 후에 실리콘 고무 위에 붓고, 0°C에서 완전히 굳을 때까지 기다린다. 하루정도 지난 후에 실리콘 고무로부터 떼어내면 비로소 투명한 유리질 균열 재생판이 완성되는 것이다.

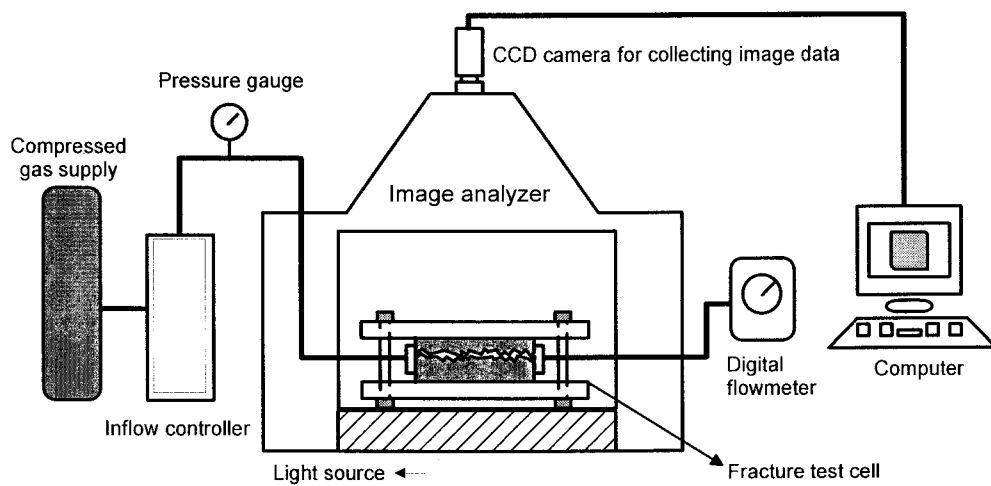


Fig. 3.2.38 실험장치 모식도

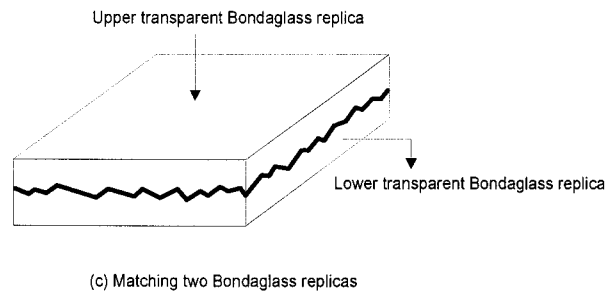
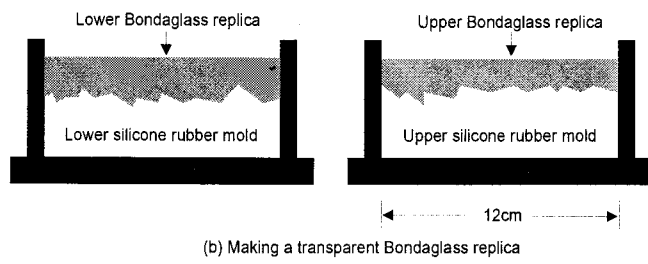
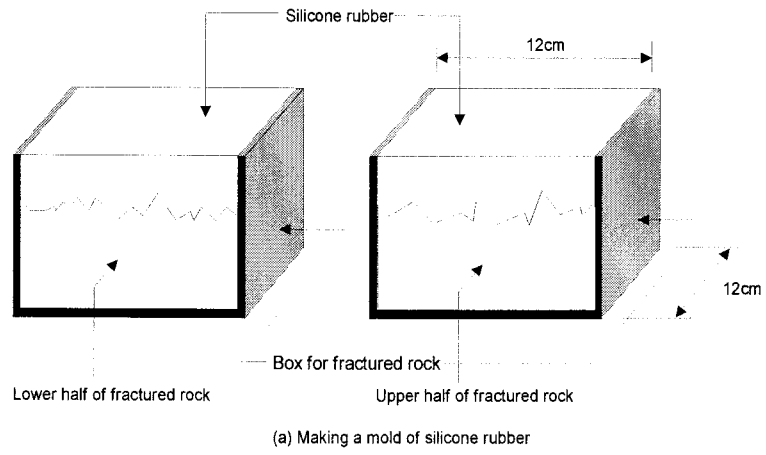


Fig. 3.2.39 실리콘 고무와 본다글라스를 이용한 암석균열복제판 제작 과정

(3) 테스트 셀(fracture test cell) 제작

위와 같은 방법으로 만들어진 5쌍의 투명한 본다글라스 균열 재생판들을 실험에 이용하기 위해 가로, 세로 모두 12cm로 평면 가공한 후 옆면은 실리콘으로 완전히 막고 두개의 모서리 부분에는 유체의 주입과 배출을 위해 endpiece를 부착하였다 (Fig. 3.2.40). 그리고 가로와 세로 30cm 길이, 0.8cm 두께의 투명한 아크릴 판을 사용하여 균열 재생판에 봉압을 가하였다. 봉압을 주기위해 토크렌치를 사용하여 일정한 토크(torque)로 두 아크릴 판을 조여주었다.

실험에서는 봉압을 주기 위해 네 개의 미터 보통 나사(M6 - 이하 나사)를 사용하였다. 나사에 걸리는 토크를 나사가 시료에 가하는 힘으로 변환하는 식은 다음과 같다(Crandall et al., 1978).

$$T = F \tan(\lambda + \rho') \frac{d_e}{2} \quad (3.2.20)$$

$$\tan \lambda = \frac{l}{\pi d_e}, \quad \tan \rho' = \mu' \quad (3.2.21)$$

$$\mu' = \frac{\mu}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (3.2.22)$$

여기서 T는 네 개의 나사에 공통적으로 걸리는 토크(in · lb), F는 나사 하나가 시료에 가하는 힘(lb), d_e 는 나사의 유효지름(in), l은 나사의 피치(in), λ 는 나사의 리드각(radian), ρ' 은 나사면의 마찰각(radian), μ 는 나사면의 마찰계수, μ' 는 나사면의 유효마찰계수, α 는 나사산 각도(radian)를 말한다.

따라서, 하나의 나사가 시료에 주는 힘은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$F = \frac{2T}{\tan(\lambda + \rho') d_e} \quad (3.2.23)$$

시료의 면적을 A(in²)이라고 하면, 나사가 네 개이기 때문에 봉압(P, psi)은 다음과 같다.

$$P = \frac{4F}{A} \quad (3.2.24)$$

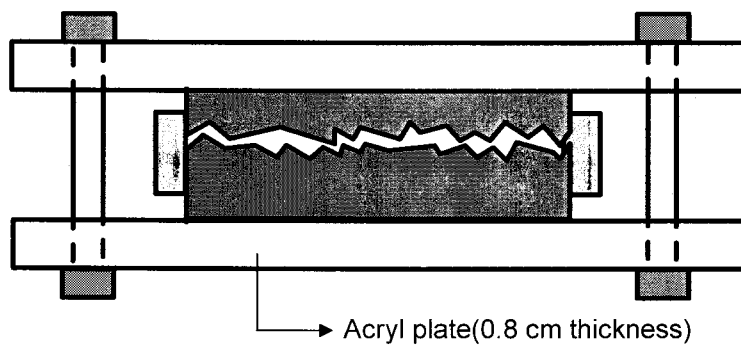
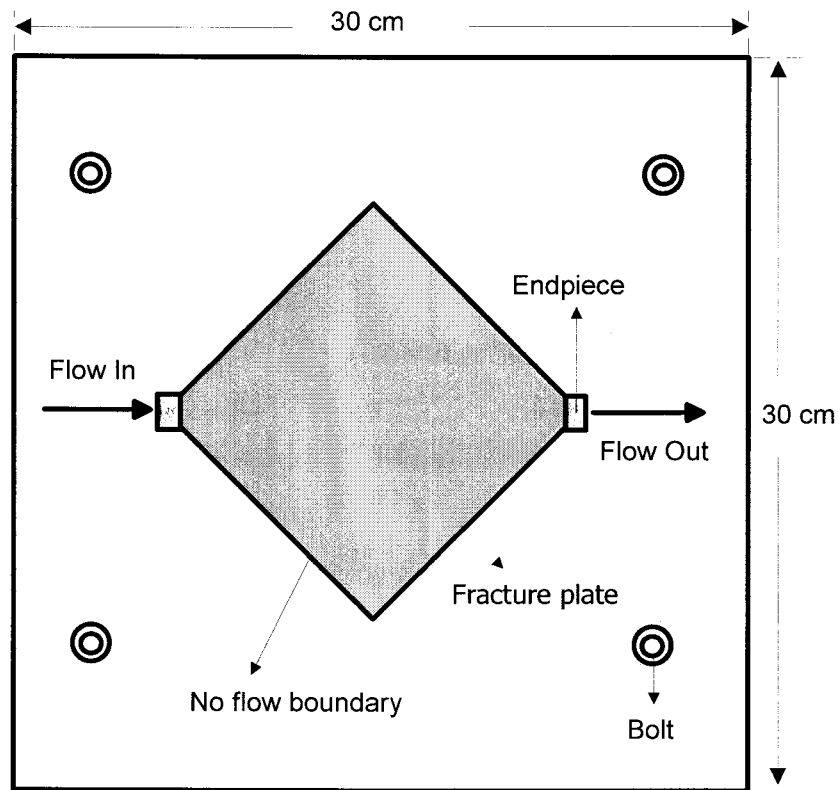


Fig. 3.2.40 균열복제판 고정 및 테스트 셀 구성

여기서 λ , l , d_e , A 는 실제 측정값을 사용하였고 μ 와 α 는 문헌의 값을 참고하였다(최대용, 1999). 다음 표는 토크를 압력으로 변환하기 위해 사용된 값들이다.

실험에서는 10, 18, 24in·lb의 토크를 주었으며 아래 식에 의해 토크는 압력으로 변환된다.

$$\text{봉압}(psi) = 6.89 \times \text{토크}(in \cdot lb) - 0.006216 \quad (3.2.25)$$

Table 3.2.7에는 토크-압력 단위변환을 위한 입력값이, Table 3.2.8에 토크와 변환된 힘, 그리고 압력이 정리되어 있다.

(4) 균열 간극 측정

영상 분석 장치 BiPS를 이용해서 투명한 균열 재생판의 균열 간극을 측정하였다. 측정 방법은 다음과 같다. 먼저 물 1L당 0.25g의 메틸렌블루(Methylene blue dihydrate: SHOWA Chemical CO. LTD)를 섞어 주입수를 만든다. 이렇게 염색된 물을 주입부를 통하여 순수한 물로 포화된 균열 재생판 안으로 주입시킨다. 균열 재생판 안이 염색된 물로 포화되면 CCD 카메라를 이용해 영상을 획득한다. 이 영상에서 순수한 물로 포화되어 있을 때 획득한 영상을 뺀다. 그리고 이 영상을 반전(reverse)시킨 후에 측정하고자 하는 영역을 선택하여 BiPS의 내장 프로그램을 사용해 데이터 파일을 생성시킨다. 이렇게 생성된 데이터 파일은 모두 화소값을 나타내므로 이를 길이(균열 간극)로 변환시켜 균열 간극에 대한 데이터 파일을 만들어야 한다.

여기서 화소값을 길이로 변환시키기 위해 균열 재생판 대신에 이미 두께를 알고 있는 시료를 평평한 분다글라스 판 사이에 끼워 동일한 조건에서 영상을 획득하여 변환식을 얻었다. 사용된 시료는 두께 0.016mm의 알루미늄 호일과 약 0.6~0.8mm 두께의 쇠링(iron ring)이다.

Fig. 3.2.41은 화소값을 길이로 전환하기 위해 사용된 실험장치를 나타내고 있으며 Table 3.2.9는 실험 결과이다.

실험결과 균열 간극과 화소값의 관계는 Fig. 3.2.42와 식(3.2.26)과 같다.

$$\text{균열간극}(mm) = -0.0061358 \times \text{화소값} + 1.586 \quad (3.2.26)$$

Table 3.2.7 토크-압력 단위변환을 위한 설정변수들

λ (radian)	l (inch)	d_e (inch)	A (inch ²)	μ	α (radian)
0.0595	0.0394	0.2106	22.32	0.16	0.5236

Table 3.2.8 토크-압력 단위변환

토크(in · lb)	힘(lb)	압력(psi)
10	384.48	68.90
18	692.07	124.03
24	922.76	165.37

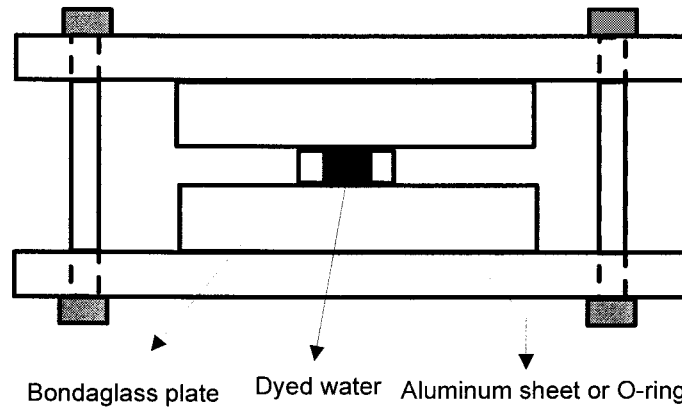


Fig. 3.2.41 픽셀값-균열간극크기 사이의 변환계수를 찾기 위한 실험 장치

Table 3.2.9 픽셀크기-균열간극 변환계수

화소값(pixel value)	길이(mm)
114.0313	0.867
178.8939	0.519
194.2949	0.388
222.3341	0.256
236.431	0.128
241.0889	0.096
247.6218	0.064
249.8951	0.048
252.9674	0.032
253.9635	0.016

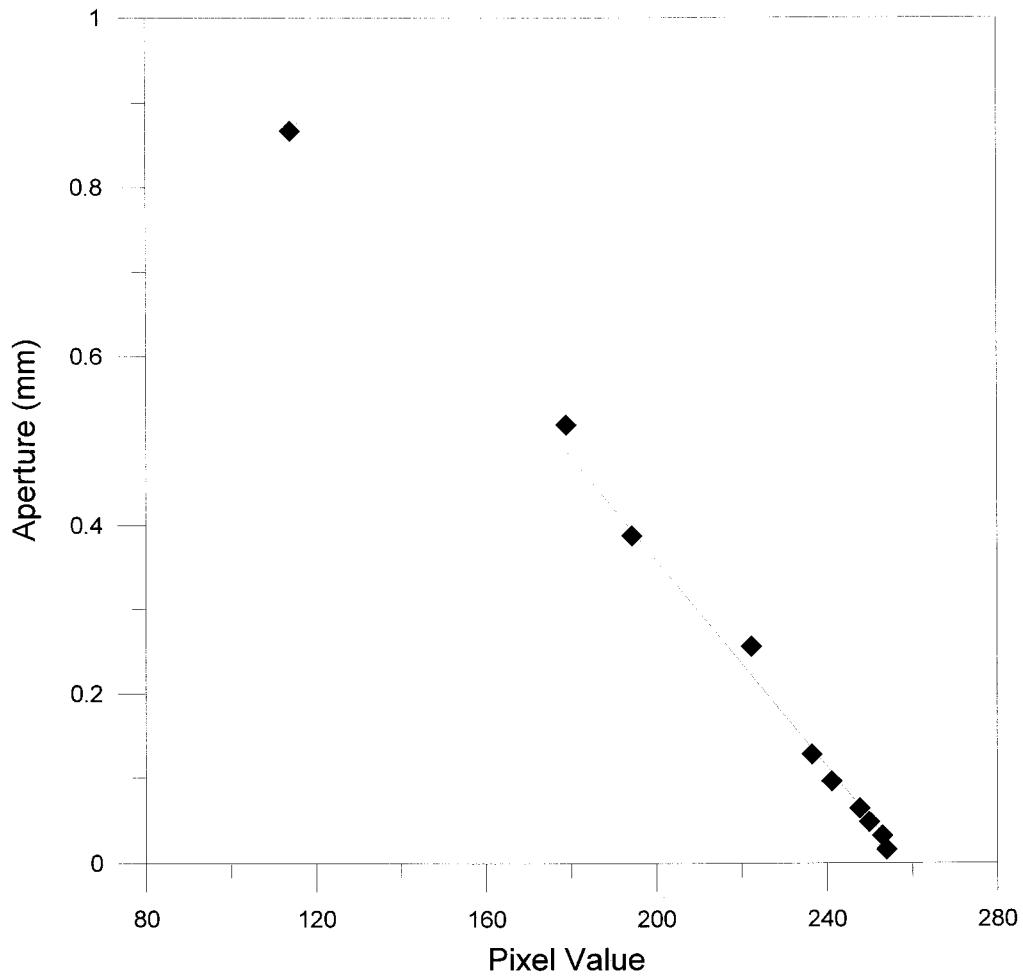


Fig. 3.2.42 픽셀값과 균열간극의 관계

(5) 실험 과정

준비된 균열 재생판의 기초 물성(균열 재생판의 가로와 세로 길이, 대략적인 유체 전도도 등)을 측정된 후에 아크릴판 사이에 균열 재생판을 놓고 봉압을 가한다. 봉압은 균열의 간극에 영향을 미쳐 유량이나 압력을 변화시킬 수 있으므로 실험이 끝날 때까지 항상 일정하게 유지되도록 한다.

균열 재생판 내부를 순수한 물로 100% 포화시키기 위해 균열 내부를 진공펌프를 이용하여 충분한 시간동안 진공시킨다. 그리고 균열 부피를 측정하기 위하여 균열 재생판을 뷰렛과 연결시켜 균열 안으로 빨려 들어간 물의 부피를 측정하였다. 이 부피에서 부동부피(dead volume)을 빼면 순수한 균열만의 부피가 계산되는 것이다.

균열 재생판을 포화시킨 후에 영상 분석 장치 안에 설치하고 질소 가스를 사용하여 미리 준비된 유체 측정기 안의 염색수를 0.5psig의 일정한 압력으로 주입되게 하였다. 이때 균열 재생판에 염색수를 주입하기 전과 주입한 후의 영상을 CCD 카메라를 통해 획득하여 균열 간극을 계산할 수 있도록 한다. 그런데 염색수의 농도가 변하게 되면 화소값에 직접적인 영향을 미쳐 결과적으로 균열 간극의 계산이 잘못될 수 있으므로 실험의 전과정을 거쳐 염색수의 농도를 일정하게 유지시키는 것이 매우 중요하다. 그리고 배출부의 압력은 대기압(0psig)으로 디지털 유량계와 연결하여 균열을 통해 흘러나오는 유체의 유량을 측정하였다.

이렇게 한번의 실험이 완료되면 봉압을 풀고 균열 재생판을 압축공기와 물로 세척한 뒤 봉압을 변화시켜서 위의 과정을 반복하였다. 하나의 균열 재생판에 대한 실험이 완전히 끝나면 다른 균열판에 대해서도 같은 방법을 적용하여 모두 5개의 균열판에 대해 3가지 봉압으로 실험을 수행하였다.

(6) 전산 모형

실험을 통해 얻어진 균열 간극과 유량을 입력 자료로 하여 압력장(pressure field)과 유동장(flow field)을 계산하고 삼승법칙의 보다 정확한 지수 값을 도출하는 전산 모형을 개발하였으며 사용한 언어는 Digital Visual Fortran Version 6.0 이다.

(가) 지배방정식

레이놀즈 방정식(Reynolds equation)은 균열이 부분적으로 평행하다고 했을 때 균열면에서의 유체 유동이 평행판 사이에서의 유체유동과 비슷하다는 가정에 기초한다. 즉 2차원 유동의 경우에 레이놀즈 방정식은 다음 식과 같이 쓸 수 있다(Tsang

and Tsang, 1989; Zimmerman and Bodvarsson, 1996).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{b(x,y)^3 g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{b(x,y)^3 g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.2.27)$$

여기서 b 는 균열 간극(cm)이고, p 는 압력(psig), μ 는 유체의 점성도(cp), g 는 중력가속도(cm/s^2)이다.

그러나 이 연구의 목적은 더 정확한 삼승법칙의 지수를 구하는 것이므로 윗 식의 지수를 3이 아닌 n 으로 두면 레이놀즈 방정식은 아래 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{b(x,y)^n g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{b(x,y)^n g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.2.28)$$

윗 식을 블록 중심으로 유한 차분화(block centered finite difference discretization) 시키면 다음과 같은 최종 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta y \frac{b^n_{i+1/2,j} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\Delta x} \right) - \Delta y \frac{b^n_{i-1/2,j} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{\Delta x} \right) \\ + \Delta x \frac{b^n_{i,j+1/2} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\Delta y} \right) - \Delta x \frac{b^n_{i,j-1/2} g}{12\mu} \left(\frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.2.29)$$

여기서 Δx 와 Δy 는 각각 x , y 방향으로의 격자 간격이고 $b^n_{i+1/2,j}$ 와 $b^n_{i-1/2,j}$ 등의 항들은 연결투과율이다.

(나) 연결투과율

2차원 균열에서 각각의 격자들은 고유한 균열 투과율을 갖게 되는데 인접한 두 격자의 균열 투과율들의 평균값이 바로 연결투과율이다. 여기서 두 격자의 균열 투과율을 평균화하는 방법에 따라 연결투과율을 다음과 같이 다양하게 정의할 수 있다.

산술평균(arithmetic average) (Bear, 1979)

$$b^n_{i+1/2,j} = \frac{b^n_{i,j} + b^n_{i+1,j}}{2} \quad (3.2.30)$$

조화평균(harmonic average) (Bear, 1979)

$$b^n_{i+1/2,j} = \frac{2 b^n_{i,j} b^n_{i+1,j}}{b^n_{i,j} + b^n_{i+1,j}} \quad (3.2.31)$$

중간점(midpoint) (Brown, 1987, 1989; Brown et al., 1998)

$$b^n_{i+1/2,j} = \left(\frac{b_{i,j} + b_{i+1,j}}{2} \right)^n \quad (3.2.32)$$

기하평균(geometric average) (Zimmerman and Bodvarsson, 1996)

$$b^n_{i+1/2,j} = \sqrt{b^n_{i,j} b^n_{i+1,j}} \quad (3.2.33)$$

레이놀즈 썰기(Reynolds wedge)

$$b^n_{i+1/2,j} = \frac{(n-1) b^{n-1}_{i,j} b^{n-1}_{i+1,j} (b_{i+1,j} - b_{i,j})}{b^{n-1}_{i+1,j} - b^{n-1}_{i,j}} \quad (3.2.34)$$

스토크스 썰기(Stokes wedge)

$$b^n_{i+1/2,j} = \frac{(n-1) b^{n-1}_{i,j} b^{n-1}_{i+1,j} (b_{i+1,j} - b_{i,j})}{b^{n-1}_{i+1,j} - b^{n-1}_{i,j}} \frac{3(\tan \theta - \theta)}{\tan^3 \theta} \quad (3.2.35)$$

수정 레이놀즈 썰기 (Ge, 1997)

$$b^n_{i+1/2,j} = \frac{(n-1) b^{n-1}_{i,j} b^{n-1}_{i+1,j} (b_{i+1,j} - b_{i,j})}{b^{n-1}_{i+1,j} - b^{n-1}_{i,j}} \left(\frac{2 \cos \theta}{\cos \frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta)} \right) \quad (3.2.36)$$

대칭 썰기(symmetric wedge)

$$b^n_{i+1/2,j} = \frac{(n-1) b^{n-1}_{i,j} b^{n-1}_{i+1,j} (b_{i+1,j} - b_{i,j})}{b^{n-1}_{i+1,j} - b^{n-1}_{i,j}} \frac{3(1 - \theta \cot \theta)}{4 \tan^2(\theta/2)} \quad (3.2.37)$$

식 (3.2.30~34)에 정의된 연결투과율에서는 균열의 기하학적 특징을 반영하지 않으며(Fig. 3.2.43) 식 (3.2.35~37)은 기하학적 특징을 반영하고 있다(Fig. 3.2.44). 기하학적 특징을 반영하기 위해 식 (3.2.37)을 사용하였다.

(다) 수치해석 방법

개발된 전산 모형에서 계의 크기는 100×100 이고 외부경계조건은 비유동 경계조건이다. 출구 부분에서의 총 유량이 계산되면 실험에서 측정된 유량과 비교하여 다를 경우에 지수값 n 을 변화시켜 일치할 때까지 반복적으로 계산하였다. 수치해의 안정성을 조건에 관계없이 만족시키기(unconditionally unstable) 위해, 음역법(Implicit method)으로 지배방정식을 유한차분하였다. 또한, 수렴을 가속시키기 위해 LSOR(line successive over-relaxation) 방법을 사용하였다. 전산모형에 사용된 기본 알고리즘은 Fig. 3.2.45와 같다.

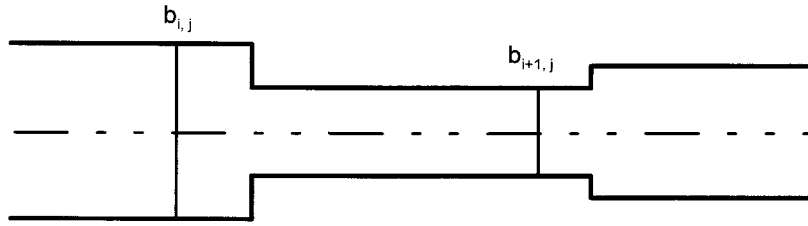


Fig. 3.2.43 간극의 기하학적 형상을 무시한 개념 모델

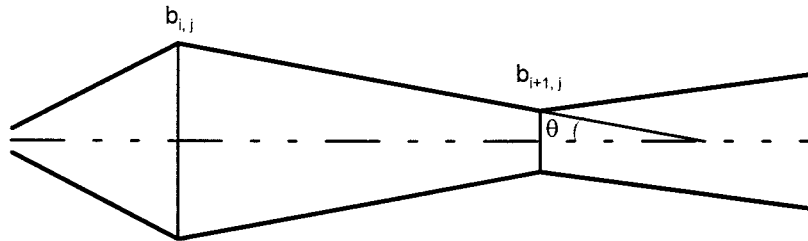


Fig. 3.2.44 간극의 기하학적 형상을 고려한 개념 모델

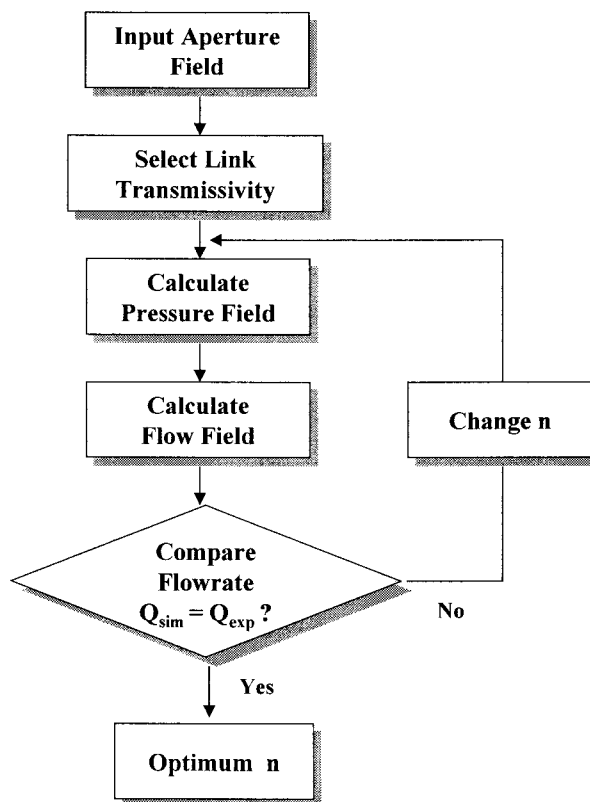


Fig. 3.2.45 수치해석 순서도

다. 결과 및 고찰

(1) 균열의 특성

균열 재생판에서의 유동 실험 중 CCD 카메라를 이용하여 획득한 영상으로부터 약 450×450 개(약 20만개)의 균열 간극 자료를 얻었다. 그러나 전산모사에 입력자료로 사용할 때는 효율적인 컴퓨터 처리를 위하여 100×100 개의 자료를 추출하여 사용하였다. 자료 추출은 약 20개의 격자마다 기하 평균을 사용하여 하나의 대표값을 계산하는 방법을 사용하였다. 획득한 균열 간극 자료로 균열 간극 분포를 재구성해본 결과 CCD 카메라를 통해 획득한 원래의 영상과 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다(Fig. 3.2.46~50).

실험을 통해 얻어진 균열 간극과 균열 간극 분포의 통계치들은 다음 Table 3.2.10~12과 같다.

봉압의 변화에 따른 각 균열판에 대한 균열 간극 분포와 히스토그램은 다음 Fig. 3.2.51~55에 나타나있다.

(2) 지수의 계산

균열 재생판의 양 끝단에 걸리는 압력 차는 모든 실험에서 0.5psi로 일정하게 두었다. 각각의 균열 재생판에서 봉압의 변화에 따라 측정된 유량과 개발된 전산 모형을 통해 계산된 지수는 다음 Table 3.2.13와 같다.

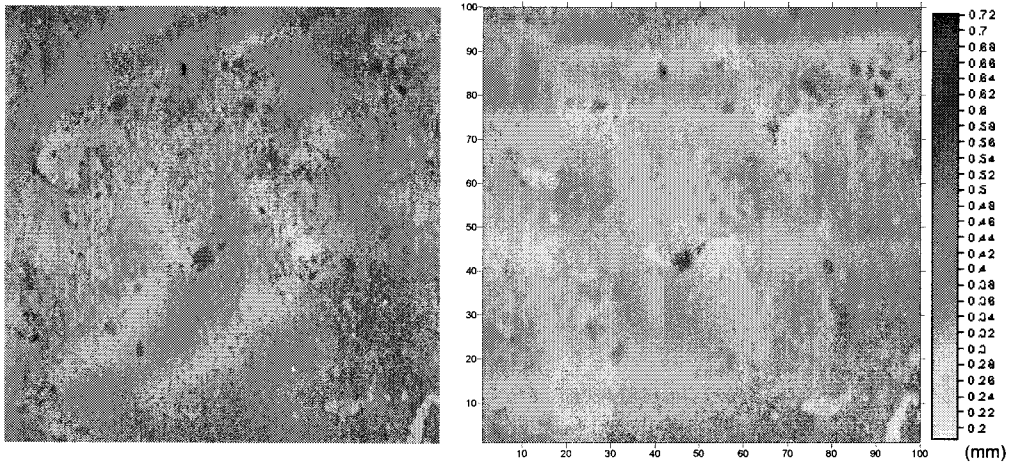


Fig. 3.2.46 F1 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상

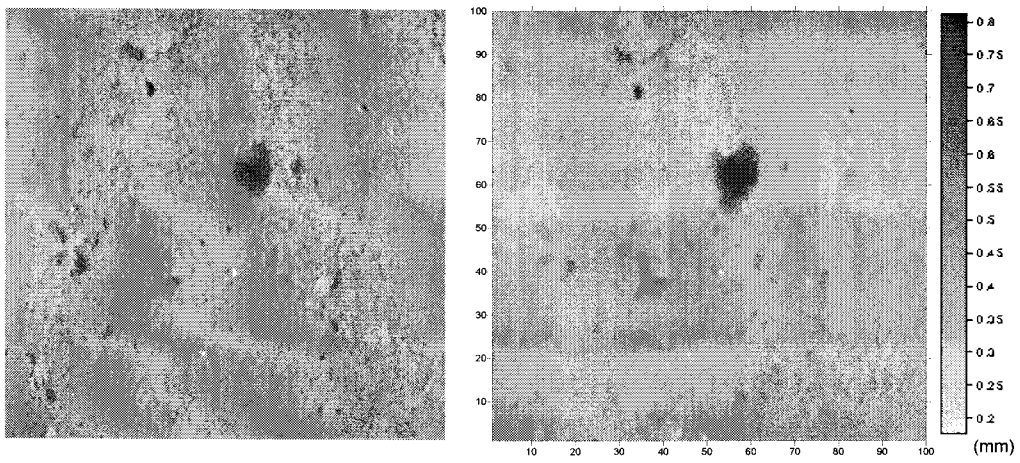


Fig. 3.2.47 F2 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상

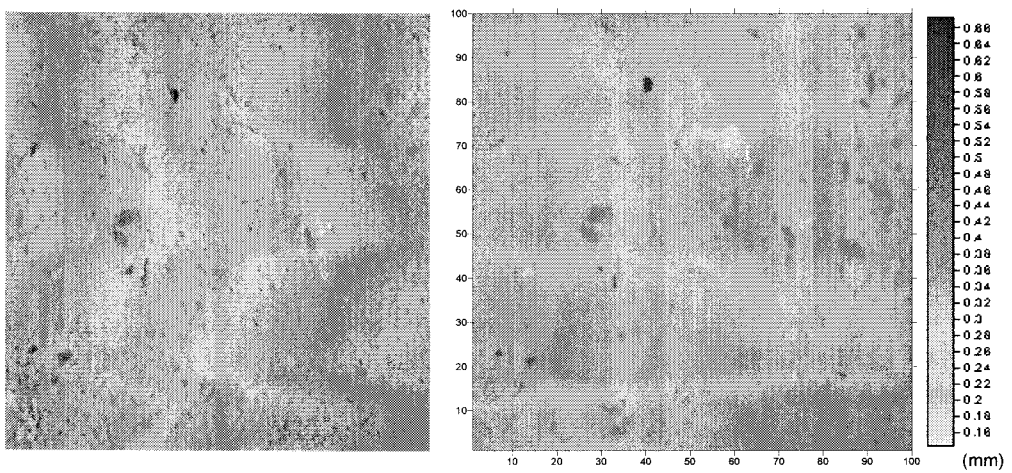


Fig. 3.2.48 F3 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상

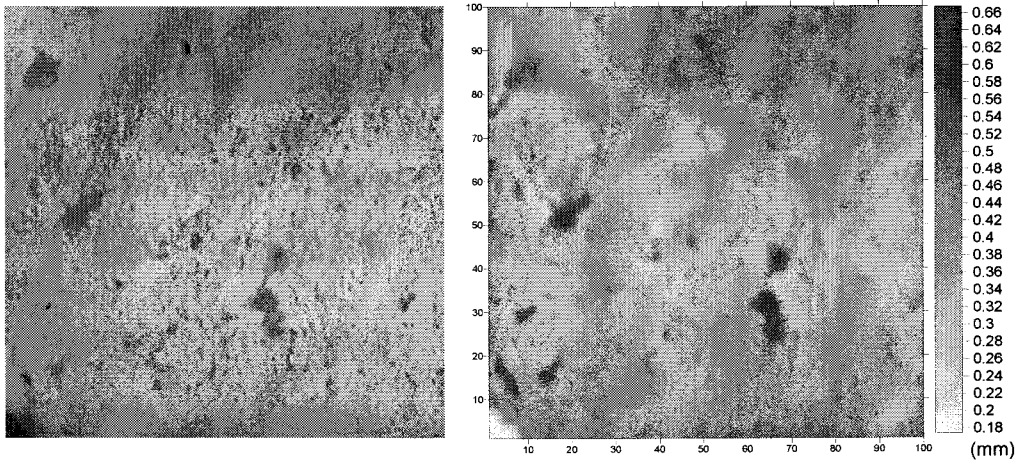


Fig. 3.2.49 F3 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상

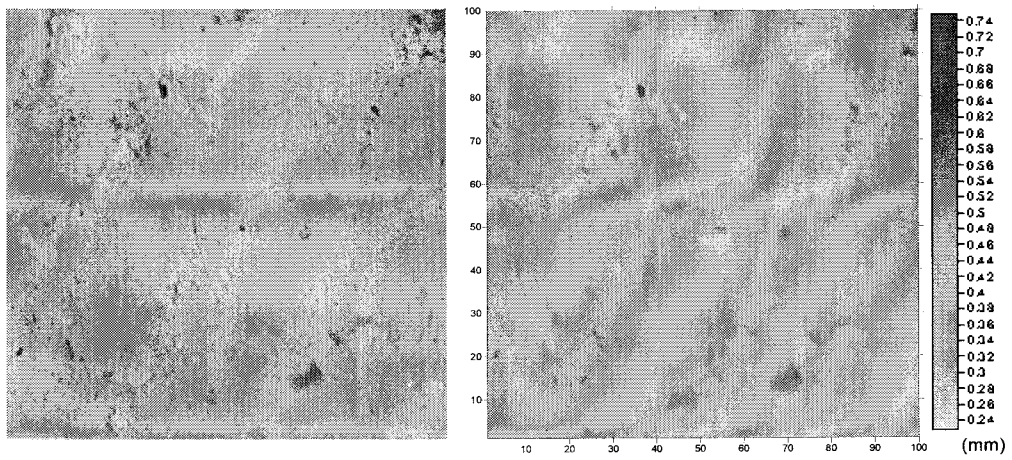


Fig. 3.2.50 F5 시료의 균열간극분포 관측 영상과 재구성 영상

Table 3.2.10 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들(봉압=69 psig)

	F1	F2	F3	F4	F5
Fracture volume(v_f , cm^3)	6.3	6.6	6.2	6.2	7.3
Mean aperture($\langle b \rangle$, μm)	519	521	500	483	580
Standard deviation(σ , μm)	132.62	121.39	118.54	105.73	112.21
Coeff. of variation(C_v)	0.256	0.233	0.237	0.219	0.221
Trans. corr. length(λ_T , cm)	3.18	2.62	3.92	2.59	2.84
Long. corr. length(λ_L , cm)	6.15	5.27	7.76	5.40	5.38
Correlation length(λ , cm)	5.30	3.83	6.30	3.89	3.75

Table 3.2.11 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들(봉압=124 psig)

	F1	F2	F3	F4	F5
Fracture volume(v_f , cm^3)	6.0	6.4	5.8	5.8	6.8
Mean aperture($\langle b \rangle$, μm)	493	497	485	465	474
Standard deviation(σ , μm)	132.70	117.24	116.50	105.52	114.13
Coeff. of variation(C_v)	0.269	0.236	0.240	0.227	0.241
Trans. corr. length(λ_T , cm)	2.68	2.29	3.12	2.22	2.25
Long. corr. length(λ_L , cm)	6.43	5.74	7.69	5.51	5.52
Correlation length(λ , cm)	5.45	3.86	6.24	3.92	3.81

Table 3.2.12 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들(봉압=165 psig)

	F1	F2	F3	F4	F5
Fracture volume(v_f , cm^3)	5.8	6.2	5.5	5.4	6.4
Mean aperture($\langle b \rangle$, μm)	474	471	453	437	441
Standard deviation(σ , μm)	128.57	117.67	116.35	107.93	113.68
Coeff. of variation(C_v)	0.278	0.250	0.257	0.247	0.258
Trans. corr. length(λ_T , cm)	2.24	2.05	2.78	1.89	2.11
Long. corr. length(λ_L , cm)	6.27	5.76	7.73	5.39	5.97
Correlation length(λ , cm)	5.08	3.90	6.28	3.90	3.83

Table 3.2.13 각 봉압에서 유량에 따라 계산된 지수(n)들

		F1	F2	F3	F4	F5
O.P.=69 psi	Q(cc/s)	0.4043	0.2500	0.2630	0.2792	0.4625
	n	3.221	3.201	3.248	3.200	3.185
O.P.=124 psi	Q(cc/s)	0.3873	0.2356	0.2373	0.2518	0.4022
	n	3.218	3.192	3.246	3.197	3.183
O.P.=165 psi	Q(cc/s)	0.3374	0.2249	0.2104	0.2048	0.3819
	n	3.216	3.185	3.245	3.193	3.181

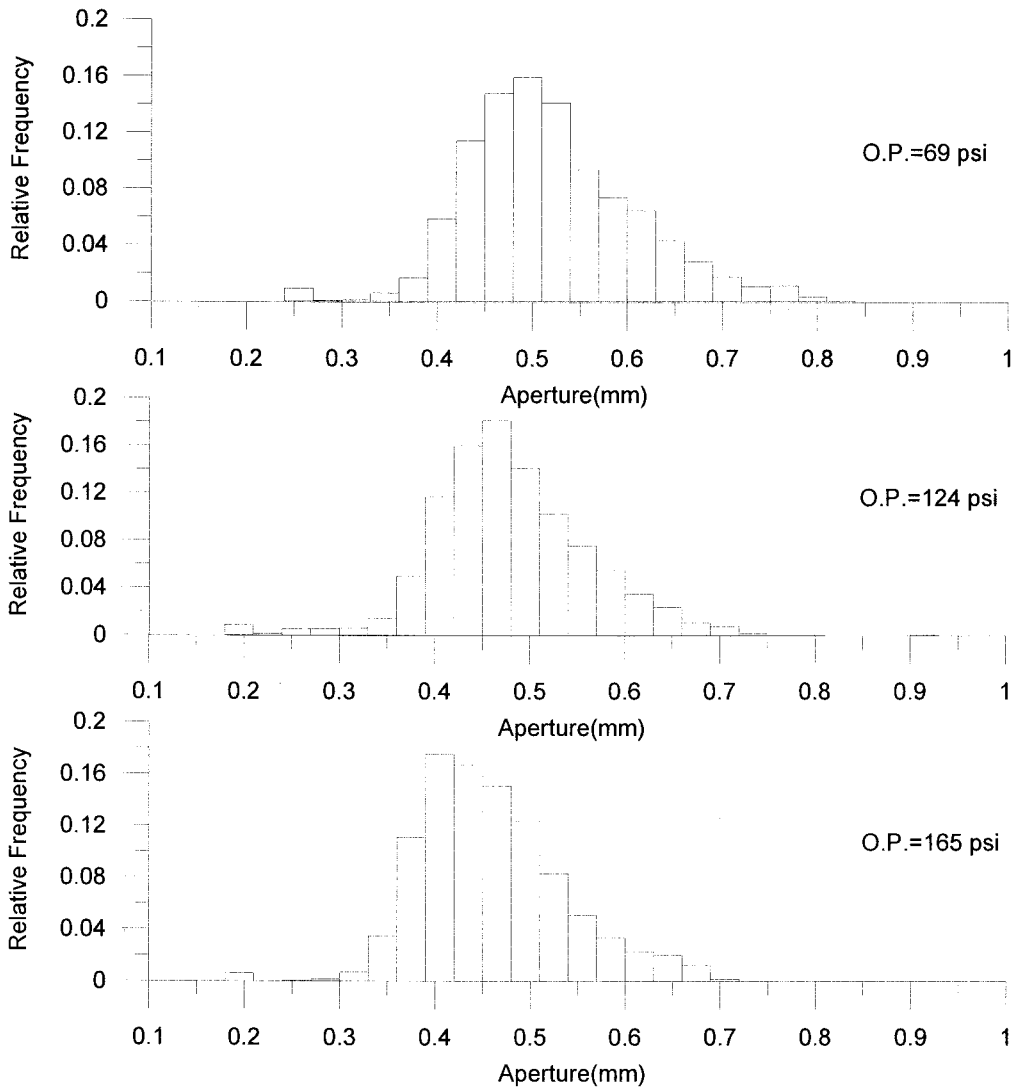


Fig. 3.2.51 F1 균열간극 분포 히스토그램

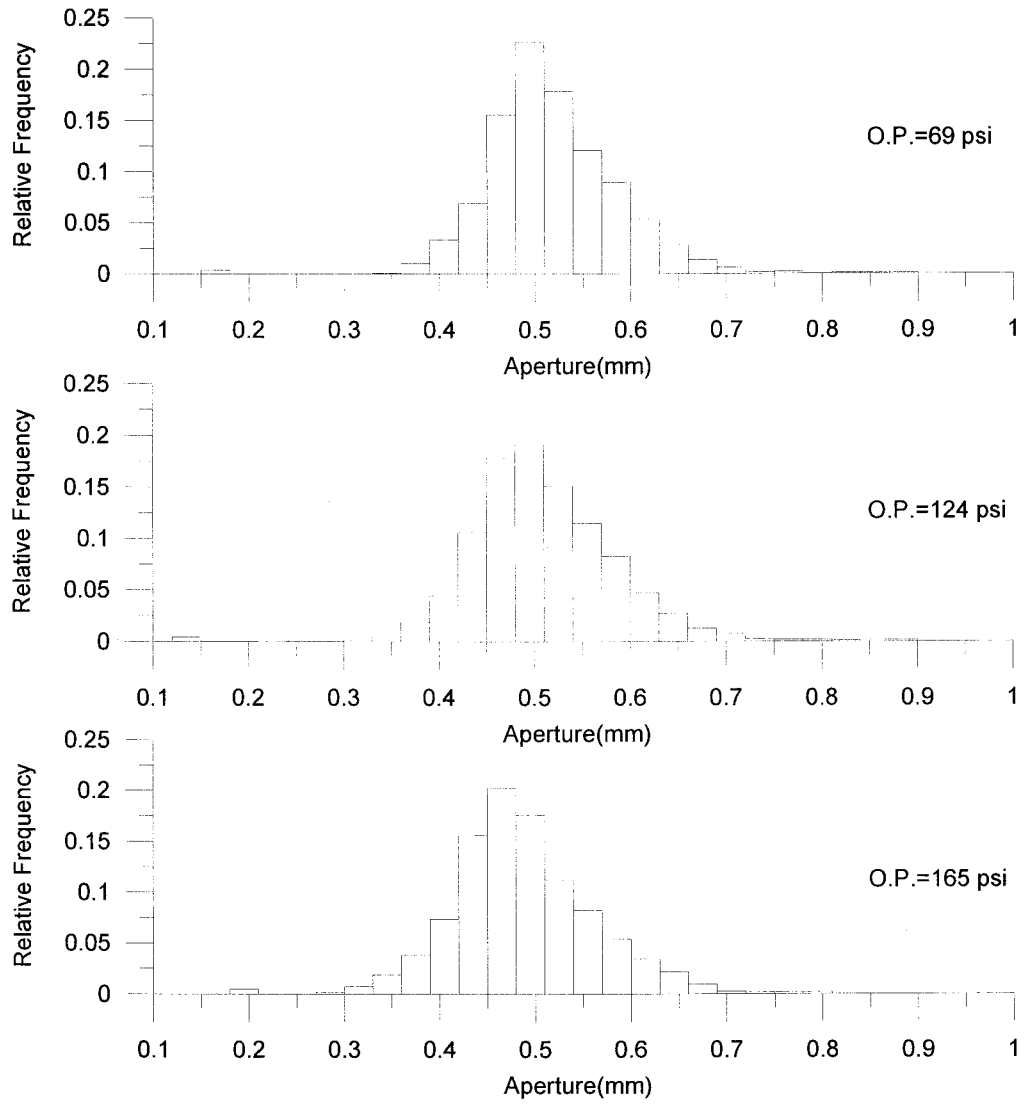


Fig. 3.2.52 F2 균열간극 분포 히스토그램

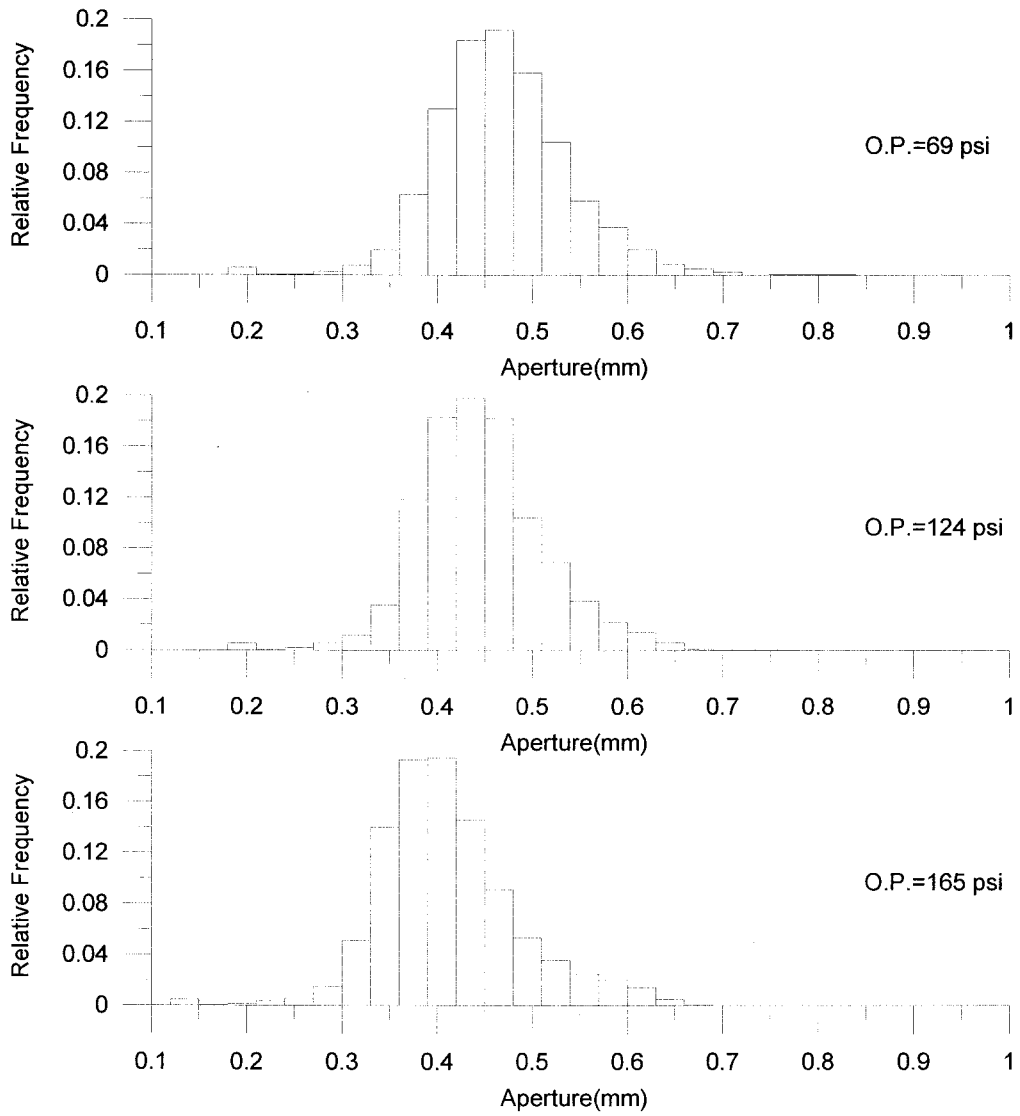


Fig. 3.2.53 F3 균열간극 분포 히스토그램

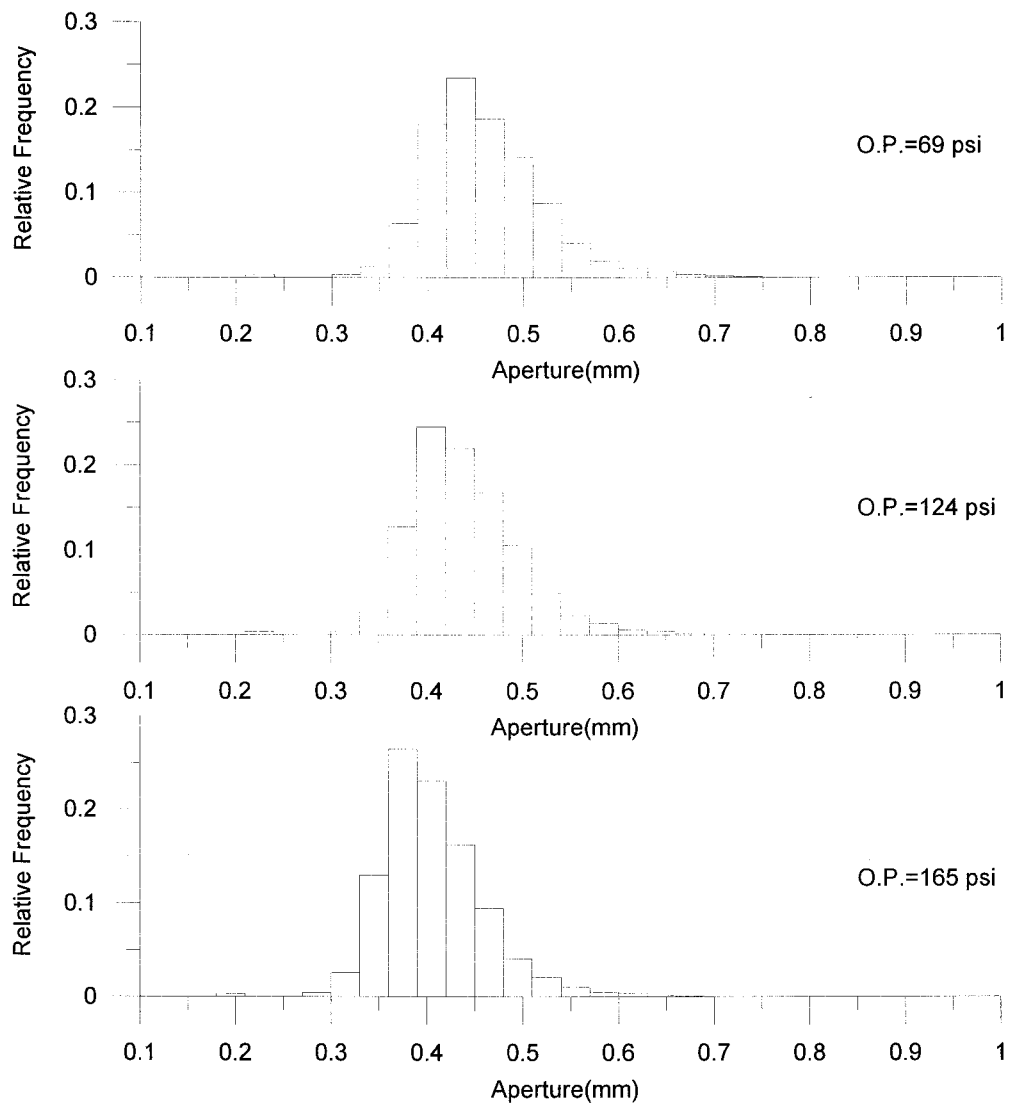


Fig. 3.2.54 F4 균열간극 분포 히스토그램

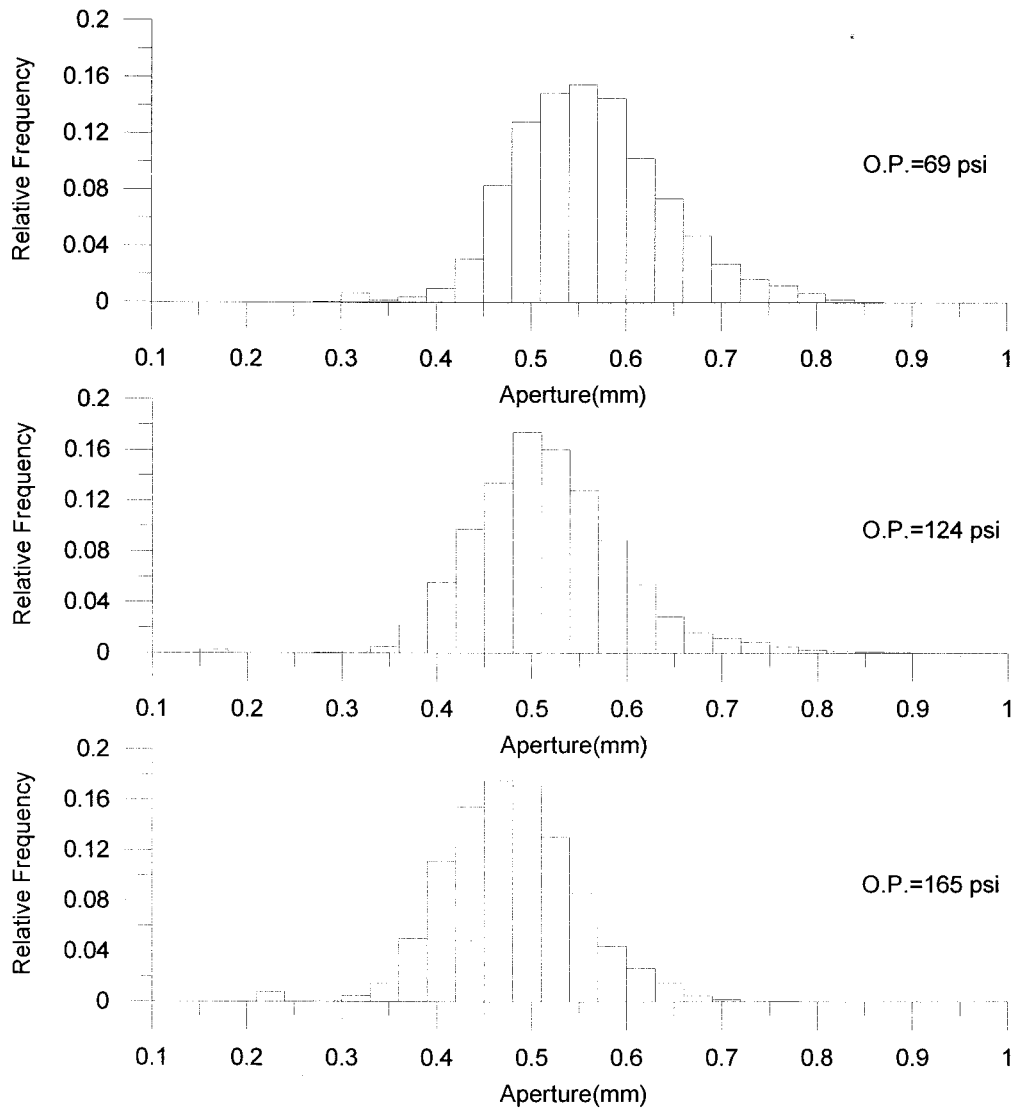


Fig. 3.2.55 F5 균열간극 분포 히스토그램

(3) 유량 분석

균열 재생판에 가해진 봉압과 배출부에서의 총 유량과의 관계가 Fig. 3.2.56에 나타나있다. 그림에서 보듯이 모든 균열판에서 봉압이 증가함에 따라 총유량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 봉압이 증가함에 따라 균열판이 압축을 받아서 균열의 간극이 전체적으로 줄어들어 실제로 유체가 흐를 수 있는 공간이 줄어들고 유동 경로가 더 복잡해지기 때문이다. 봉압이 증가함에 따라 균열의 간극이 전체적으로 줄어들었음을 앞의 Fig. 3.2.51~55에서 확인할 수 있다.

한편 실험 유량과 삼승법칙을 이용하여 계산된 유량의 차이는 다음 Fig. 3.2.57과 같다. 삼승법칙을 이용하여 계산된 유량은 실제유량보다 28.8 %에서 35.5 %를 크게 예측하였다.

(4) 통계 변수들을 이용한 지수 분석

실험결과를 봉압에 따라 세 개의 그룹으로 나눠 각 그룹별로 통계 변수들의 대략적인 범위를 다음 Table 3.2.14에 요약하였다.

(가) 상관길이와 비등방비의 영향

Fig. 3.2.58은 삼승법칙으로 계산한 유량과 실험에서 측정된 유량과의 차이를 상관길이에 따라 나타낸 그래프이고 Fig. 3.2.59는 상관길이와 지수의 관계를 나타낸다. 예측 유량과 실제 유량의 차이는 상관길이에 비례하여 커지며 결과적으로 지수 또한 상관길이에 비례함을 확인하였다. 한편, 서로 다른 그룹이지만 상관길이가 비슷한 경우에는 비등방비가 클수록 유량의 차이와 지수는 작아졌다.

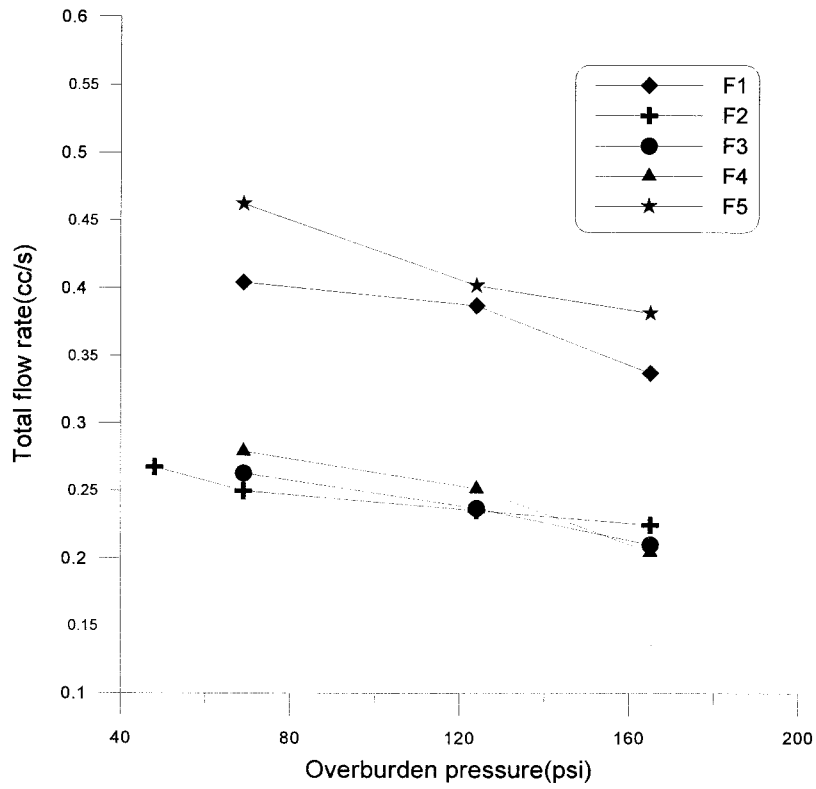


Fig. 3.2.56 봉압과 총유량의 관계

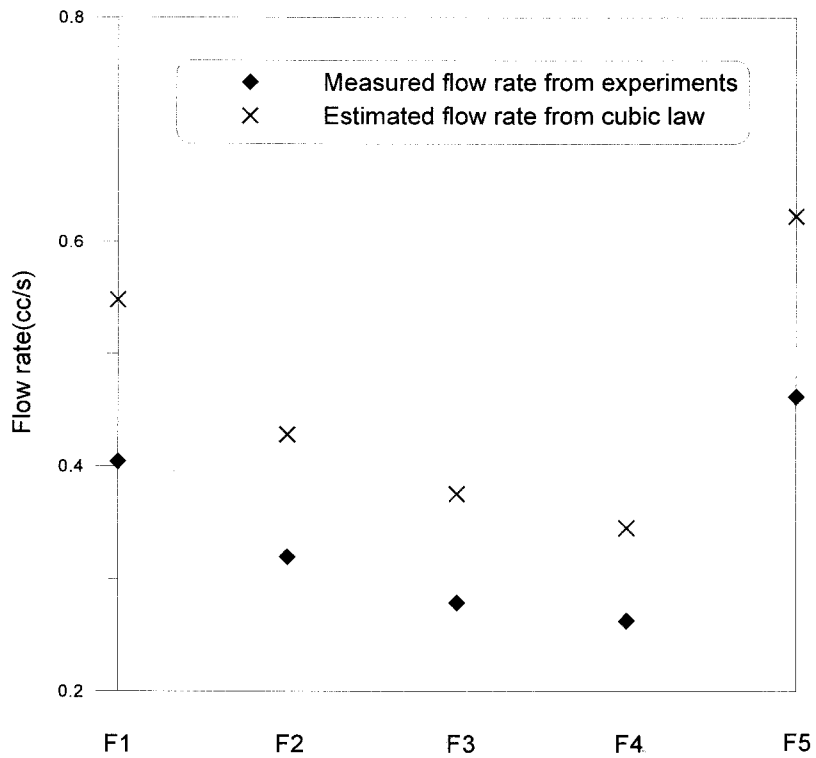


Fig. 3.2.57 관측된 유량과 삼승법칙으로 추정된 유량

Table 3.2.14 각 균열 시료에 균열간극분포 특성변수들

	O.P.=69 psi	O.P.=124 psi	O.P.=165 psi
	Group A	Group B	Group C
C_v	0.219~0.256	0.227~0.269	0.247~0.278
λ (cm)	3.75~6.30	3.81~6.24	3.83~6.28
AR	1.894~2.085	2.399~2.506	2.782~2.859

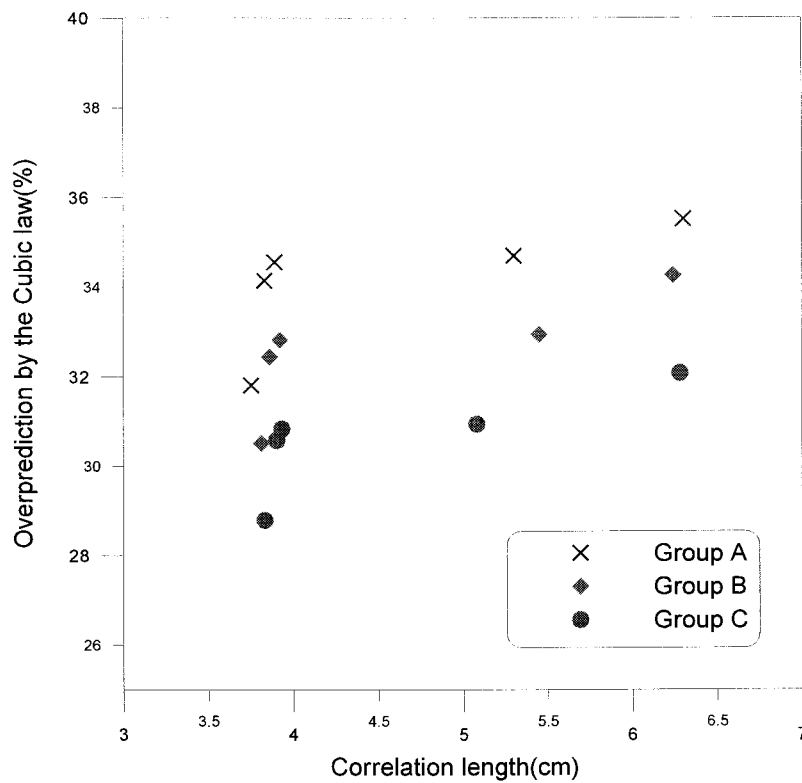


Fig. 3.2.58 상관길이와 유량차의 관계

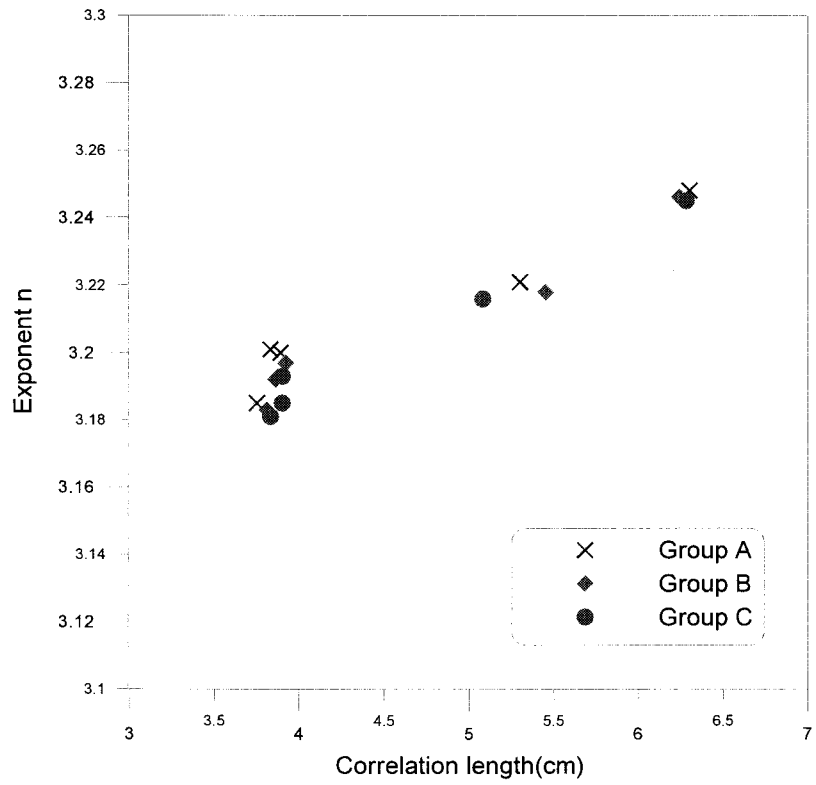


Fig. 3.2.59 상관길이와 지수(n)의 관계

(나) 변동계수와 비등방비의 영향

Fig. 3.2.60은 변동계수에 따른 예측 유량과 실제 유량과의 차이를 나타내고 있으며, Fig. 3.2.61은 변동계수와 지수의 관계를 나타내고 있다. 같은 그룹에서는 변동계수가 증가할수록 지수가 커짐을 확인할 수 있었다. 이는 변동계수가 증가할수록 균열이 평행판으로부터 벗어나는 정도가 커지기 때문이다. 또한 다른 그룹에 속해 있지만 변동계수가 비슷한 경우에는 비등방비가 클수록 지수는 작음을 확인하였다. 비등방비가 커질수록 주 흐름 방향으로 편류현상이 일어날 확률이 높아지므로 평행판에 가까워진다고 생각할 수 있다. 따라서 Fig. 3.2.60에서는 비등방비가 증가할수록 실제유량은 삼승법칙으로 계산한 유량에 접근하며 비등방비가 비슷한 동일 그룹 내에서는 변동계수가 증가함에 따라 삼승법칙에서 벗어남을 확인하였다.

(5) 연결투과율의 선택에 따른 지수의 계산

이 연구에서는 균열 간극의 기하학적 특징을 반영하는 연결투과율 중 대칭 썸기틀을 사용하여 지수를 계산하였으나 기하학적 특징의 반영 여부가 전산 모사에 미치는 영향을 알아보기 위하여 조화 평균과 기하 평균을 사용하여 지수를 계산해 보았다. Table 3.2.15와 Table 3.2.16에 조화 평균과 기하 평균을 사용했을 때의 결과가 나타나있다. 분석결과 썸기각이 10° 보다 큰 것의 개수가 전체의 3 % 미만인 경우에는 지수의 계산에 큰 영향을 주지는 못함을 확인하였다.

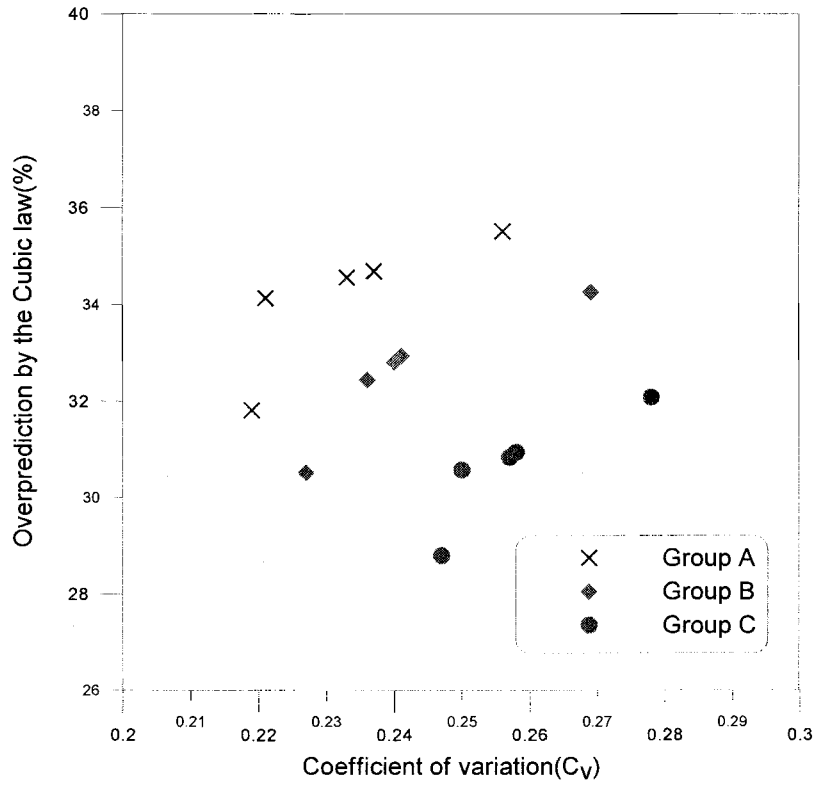


Fig. 3.2.60 변동계수와 유량차의 관계

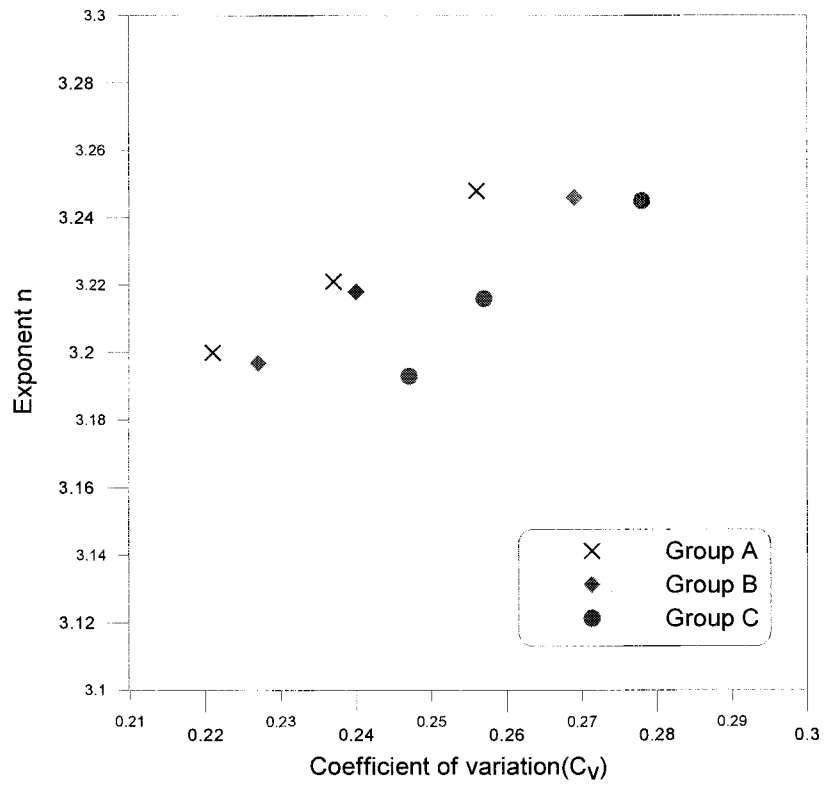


Fig. 3.2.61 변동계수와 지수(n)의 관계

Table 3.2.15 조화 평균 사용 시 계산된 지수(n)

O.P.	F1	F2	F3	F4	F5
69 psi	3.219	3.200	3.268	3.180	3.183
124 psi	3.217	3.191	3.265	3.176	3.178
165 psi	3.215	3.183	3.264	3.175	3.174

Table 3.2.16 기하평균 사용 시 계산된 지수(n)

O.P.	F1	F2	F3	F4	F5
69 psi	3.220	3.201	3.269	3.182	3.186
124 psi	3.218	3.191	3.266	3.178	3.184
165 psi	3.216	3.185	3.265	3.177	3.183

라. 결 론

이상과 같은 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 균열에서의 유체 유동은 삼승법칙으로부터 상당히 벗어남을 확인할 수 있었으며 이 연구를 통하여 실제 단일 균열에서의 유체 유동을 더 효과적으로 해석할 수 있다.
2. 실제 유량을 더 정확하게 예측할 수 있는 지수를 구하였으며 지수의 범위는 균열판에 따라 대략 3.18 에서 3.25 정도이다. 이로부터 삼승법칙을 이용하여 계산된 유량은 실제 유량보다 28.8 % 에서 35.5 % 크다는 것을 확인할 수 있었다.
3. 지수는 상관길이에 비례하여 커지며 상관길이가 동일할 경우 비등방비가 커질수록 작아진다.
4. 비등방비가 증가할수록 실제유량은 삼승법칙으로 계산한 유량에 접근하며 비등방비가 일정할 때는 변동계수가 증가함에 따라 삼승법칙에서 벗어난다.
5. 췌기각이 10° 미만인 경우에 다양한 연결투과율의 선택은 지수의 계산에 큰 영향을 미치지 못하는 못하였다.

3. 가변간극분포가 용질 이동 현상에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

가. 서론

핵폐기물 저장소나 유류 저장소의 경우, 미량의 저장 물질 누출만 일어나도 주변의 자연 환경과 사람에게 악영향을 준다. 누출된 저장 물질은 지하수와 함께 다공성 매질이나 균열망을 통하여 이동한다. 우리나라와 같이 고령의 지질 구조를 가진 곳에서는 오랜 풍화 작용으로 많은 균열망들이 존재하며, 이곳을 통해 누출된 용질이 다공성 매질에서보다 빠르게 전파된다.

특히, 핵폐기물은 유체 전달 능력이 거의 없는 화강암반에 저장하게 되므로, 방사능 물질의 균열을 통한 전파가 일반적이다. 방사능 물질은 분산(diffusion)으로 인해 지면까지 전파되는 시간이 지연되는 동안 자연 붕괴하기 때문에, 물질 이동에서 분산 메커니즘을 파악하는 것이 중요하다.

용질 이동에서 분산의 중요성은 평행 판 모델(parallel plate model)을 가정한 이론해(Tsang et al., 1981)와 수치해석해(Grisak and Pickens, 1980)에도 나타난다. Johns와 Roberts(1991), Dykhuizen(1992) 등은 편류(channel)가 분산에 미치는 영향에 대해서 전산모사를 통해 밝혔다. 편류를 형성하기 위해 평행 판 모델에 이송(advection)이 지배적인 지역과 간극이 작아 분산(diffusion)이 지배적인 지역을 함께 두었다. 하지만, 자연계에 존재하는 균열은 위 삼승법칙에 관한 연구에서도 밝혔듯이 평행 판과 달리 거칠며, 간극도 끊임없이 변화한다(Bear et al., 1993). Firoozabadi와 Tan(1994)은 용질 이동에서 균열의 불균질성(heterogeneity)이 미치는 영향에 대해 언급하고 있다.

단일 균열을 좀 더 현실적으로 모사하기 위한 연구는 꾸준히 계속되어 왔다. Gentier(1986)과 Gale(1987)은 실험실 규모의 균열 시료를 사용하여 직접 측정법(direct measurement)으로 단일 균열 간극 분포가 로그 정규 분포를 따른다고 하였다. Brown(1995), Hakami와 Lassen(1996) 등은, 간극 분포는 가우스 분포(Gaussian distribution)을 따른다고 주장하였다.

한편, 간극 분포가 어떤 분포를 따르든지 간극분포 특성화 변수, 즉, 평균 간극, 표준편차, 변동계수, 상관길이 등등을 이용하여 용질 이동 현상을 해석하려는 시도가 있었다. Tsang과 Tsang(1990)은 수치해석을 통해서 평균 간극과 표준편차, 상관 길이가 유체 유동 형태를 대표할 수 있는 인자임을 밝혔고, Keller 등(1999)은 간극 분포 특성화 변수로부터 용질 도달 곡선을 근사하게 추정할 수 있다고 하였다.

이전의 연구들은 두 가지 한계를 가지고 있다. 실험을 통한 검증이 충분하지 않았으며, 제시한 특성화 변수들의 대표성을 충분히 검토하지 못했다. 균열간극의 비등

방성(anisotropy)이 용질 이동에 미치는 영향에 대해서 Yeo(1997)가 연구했을 뿐 거의 없었으며, 왜도계수(skewness)의 영향도 연구가 이루어지지 않았다. 비등방비는 용질 이동이 용이한 방향을 추정하는데 도움이 되며, 왜도계수는 작은 간극과 큰 간극의 상대적인 비율을 표현하여 편류현상(channeling)을 이해하는데 도움을 줄 것이다. 이 연구에서는 위 2에서와 같은 방법으로 단일 균열의 간극 분포를 측정하고, 용질 이동 실험을 수행하여 균열 특성화 변수들이 용질 이동에 미치는 영향을 파악한다.

나. 연구 방법

(1) 실험장치

Fig. 3.2.62는 실험장치의 모식도이다. 실험장치는 주입 부분, 배출 부분, 균열 복제판 부분, 영상 자료 획득 부분, 압력 자료 획득 부분, 농도 자료 획득 부분으로 이루어진다. 영상 자료 획득 부분은 위 연구와 동일하다.

주입 부분은 이차 증류수를 정량으로 주입하기 위한 펌프 한 대, 용질을 정량으로 주입하기 위한 펌프 한 대, 그리고, 제어판(control panel)으로 구성된다. 이차 증류수는 불순물과 이온을 제거한 물을 말한다. 이차 증류수를 실험에서 사용하는 것은 불순물에 의해 용질이 이동하는데 어려움을 주지 않고, 항상 같은 물의 상태를 유지해 주기 위해서이다. 사용하는 펌프는 모두 정량 주입 펌프로 주입하는 유량을 제어할 수 있으므로 별도의 유량계는 사용하지 않는다.

배출부분은 파이프 라인을 통해 대기로 유체를 방류하게 되어있다. 파이프 라인은 진공 펌프나 스펙트라포토미터(Spectrophotometer)를 연결할 수 있도록 설계되었다. 복제 균열판에 유체를 포화시킬 때 진공 펌프를 사용하고, 용질 이동 실험을 할 경우에는 스펙트라포토미터(MiltonRoy Spectronic 401)를 연결하여 연속적으로 용질의 농도를 측정할 수 있다.

균열 복제판 부분은 Fig. 3.2.63과 같다. 용질 이동 실험 시 가해지는 유체 주입 압력으로 인해 수시로 균열 간극분포가 변하는 것을 막기 위해서 고정판을 만들었다. 고정판은 아크릴판과 알루미늄 프레임으로 이루어진다. 아크릴판은 영상 획득 시 용질 외에 다른 매질에서 빛이 흡수되는 것을 최대한 줄이기 위해서 사용하며, 알루미늄 프레임은 아래와 위의 두 아크릴판을 볼트를 이용하여 고정시키기 위해 이용한다. 여섯 개의 볼트는 각각 0.2in · lb.의 토크를 균일하게 주었다. 가해진 토크를 견디기 위해서 아크릴판과 알루미늄 프레임의 두께를 1.5cm로 하였다. 균열 복제판의 양 옆은 비유동 경계조건을 주기 위하여 실리콘으로 막았다. 유체가 주입되

고 배출되는 곳에는 파이프 라인 결합을 용이하게 하고, 주입된 용질이 균열의 주입단면 전체에 균일하게 퍼지게 하기 위해서 Endpiece를 부착하였다.

압력 자료 획득 부분은 수압력계(water manometer)를 사용하였다. 수압력계를 주입부와 배출부에 연결하여 연결된 부분의 압력차를 측정할 수 있다. 실험실 규모의 단일 균열 시료에서는 주입부와 배출부의 압력차가 약 0~5psi.으로 작기 때문에 수압력계를 사용하였다. 농도 자료 획득부는 스펙트라포터미터로 구성되어있다.

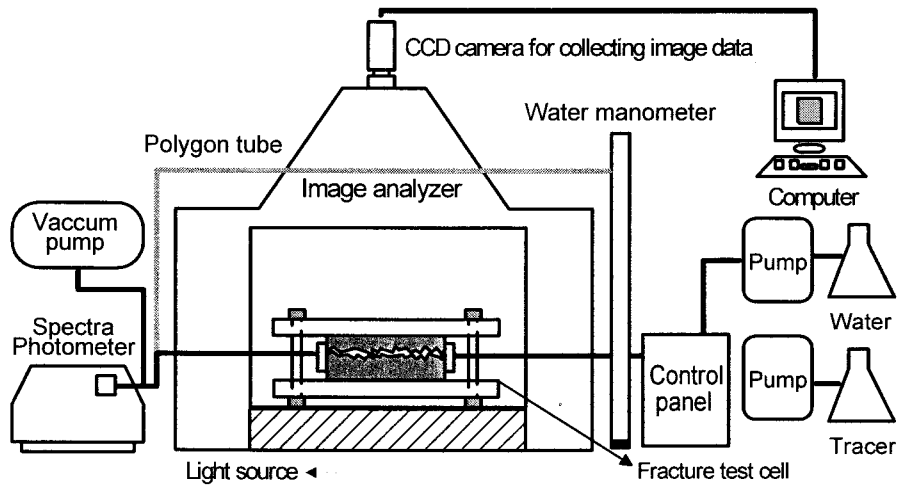


Fig. 3.2.62 용질 이동 실험장치 모식도

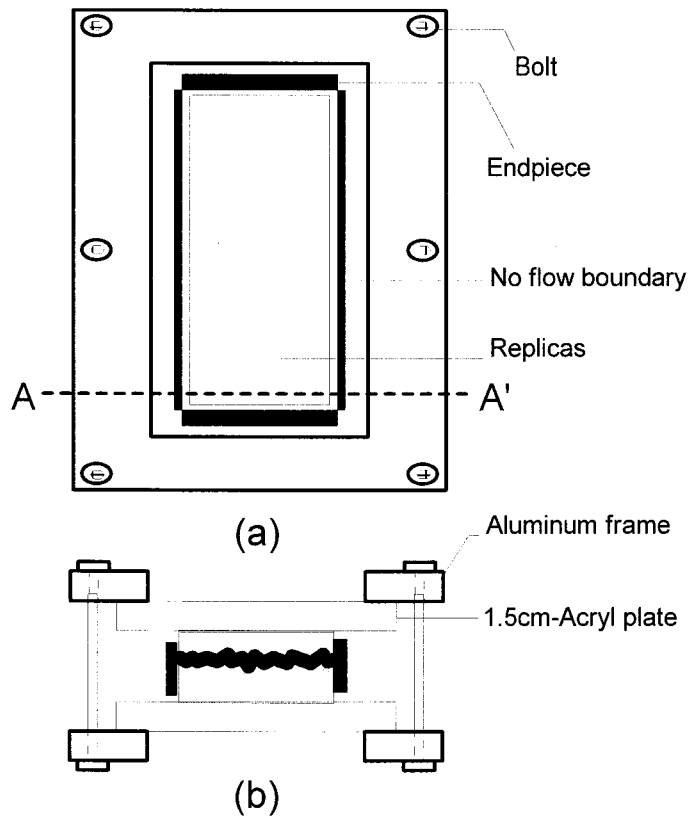


Fig. 3.2.63 균열 복제판 고정장치 및 테스트 셀

(a) 평면도 (b) AA'단면도

(2) 유리질 단일 균열 복제판 제작

용질 이동에서 분산의 효과는 균열 시료의 길이가 길수록 확연히 드러나기 때문에, 위 연구에서와는 달리 균열면의 크기를 $29\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 로 한다. 현실적인 균열 표면 특성을 반영하기 위해서 실제 화강암에 인위적으로 균열을 내어 균열 복제판을 제작하는데 사용한다. 인위적으로 균열을 낸 암석 중에서 육안으로 관찰했을 때, 균열 표면의 거칠기가 서로 다른 다섯 개의 시료를 선택해 FS1~5로 명명한다. 균열 복제판을 제작하는 방법은 위 연구와 동일하다.

본다글라스는 주재와 경화제를 섞을 때 발생하는 발열반응으로 경화된다. 시료의 크기가 증가함에 따라 발열반응이 많이 일어나게 되고, 과도한 발열반응은 본다글라스의 재료 특성에 의해 경화 시, 길이 방향으로의 휨 현상을 동반하게 된다. 휨 현상을 제거하기 위해 주재와 경화제의 비율을 1000 : 5로 낮추어 준다.

(3) 실험 과정

균열 간극분포 특성화 변수들을 계산하기 위해서 다섯 개 단일 균열들의 간극 분포를 알아야 한다. 간극 분포는 위 연구에서 사용한 방법으로 구한다.

용질 이동 현상을 이해하는데 있어서 실제 용질이 이동하는 형태를 육안으로 관찰하는 것은 도움이 된다. 균열의 간극분포를 측정하기 위해서 사용하는 투명한 균열 복제판을 그대로 용질 이동 실험에 사용하는 것은 이를 위해서이다. 균열이 있는 다공성 매질에서 실험하는 것과 균열 복제판에서 실험하는 것은 차이가 있다. 첫째, 다공성 매질인 경우 다공성 매질과 균열 사이에 용질 이동이 이루어질 수 있지만 균열 복제판인 경우 본다글라스가 합성수지이기 때문에 용질 이동이 불가능하다. 둘째, 실제 암석과 본다글라스는 흡착도(wettability)가 다르다. 이런 두 가지 차이점이 있으나, 이 실험에서는 다공성 매질이 아니라 유체가 이동할 수 없는 화강암반의 균열망을 고려하고 있으며 단상 유체 유동 현상인 용질 이동을 다루기 때문에 균열 복제판을 이용한 용질 이동 실험은 유효하다.

준비된 균열 복제판을 Fig. 3.2.63과 같이 고정장치에 설치한 후, 실리콘을 이용하여 균열 복제판 양옆의 비유동 경계 조건을 만들어 준다. 실리콘으로 균열 양옆을 메운 후 반드시 0~5 psi. 조건에서 공기가 세어나갈 틈이 없는지 시험(leaking test)을 수행한다. 만들어진 테스트 셀은 Fig. 3.2.62와 같이 설치한다.

진공펌프를 사용하여 이차증류수를 균열 내부에 포화시킨다. 정량 주입 펌프들을 이용하여 이차증류수와 용질을 동시에 이동시킨다. 이 때, 유량을 1 cc/min, 2 cc/min, 4cc/min으로 변화시키며 각각의 경우에 수압력계를 이용하여 주입부와 배

출부의 압력차를 측정한다. 이 때, 일정한 시간간격으로 배출부에 연결되어 있는 스펙트라포토미터를 통해서 연속적으로 농도 자료를 획득하고, 영상 자료 획득 장치를 통해서 연속적으로 용질이 이동하는 모습을 촬영한다. 한 유량에 대해서 자료 획득이 끝나면 이차증류수만을 주입하여 균열 복제판과 스펙트라포토미터에 잔류 용질을 완전히 제거하고, 다음 유량에 대해서 실험을 반복적으로 수행한다.

다. 결과 및 고찰

(1) 균열의 간극 분포 특성화 변수

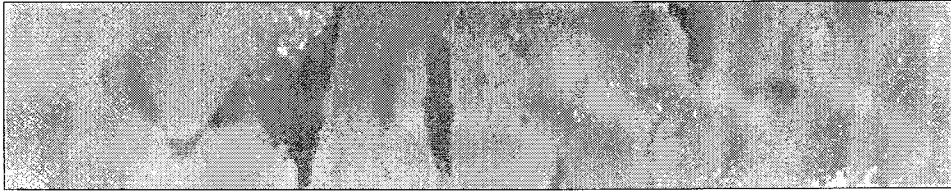
Fig. 3.2.64는 균열 복제판의 간극분포를 알기 위해서 CCD 카메라를 이용하여 촬영한 이미지이고, Fig. 3.2.65는 촬영한 이미지를 위 연구의 방법을 사용하여 균열 간극 값으로 재구성한 이미지이다. 두 영상은 같은 경향을 보여주므로 연구에서 균열 간극분포 측정을 위해 사용한 방법이 유효함을 알 수 있다.

균열 복제판 각각의 누적간극분포와 간극분포 히스토그램은 Fig. 3.2.66과 같다. 시료들의 비교를 위해서 간극은 각각의 평균간극으로 나누어 준다. Table 3.2.17은 측정된 간극분포의 통계학적 특성을 보여준다. 횡방향과 종방향의 상관관계는 GAM2(GLSIB, programmed by Deutsh)와 멱급수 모델을 이용하여 계산하였다.

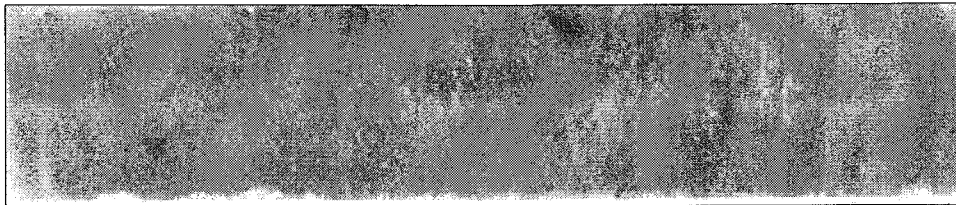
변동계수는 FS5를 제외하면 0.66~0.87의 값을 가진다. 변동계수만을 고려한다면 FS5, FS2, FS3, FS1, 그리고 FS4의 순으로 편류현상의 가능성이 크다. FS1의 경우 비등방비가 1보다 작은 값을 가지므로, 유동 방향인 종방향보다 횡방향으로 비슷한 간극들이 잘 연결되어 있다. 용질이 횡방향으로 잘 퍼져나갈 수 있다는 것이므로 편류현상이 일어나기 힘들음을 함축하고 있다. 다른 시료의 경우에는 모두 종방향의 연결성이 더 좋다. 특히, FS1, FS3, 그리고 FS4는 다른 두 시료에 비해 높은 왜도 계수를 가지므로 편류현상이 일어날 가능성이 있다.

종합하면, FS1의 경우 높은 변동계수와 왜도계수를 가지므로 편류현상이 일어날 가능성이 크다. 또, 낮은 비등방비를 가지므로 횡방향의 용질 이동이 활발히 일어나 용질 도달 시간이 지연될 가능성이 있다. FS2는 편류현상이 일어날 가능성이 거의 없으며, 낮은 분산을 가질 것이다. FS3은 FS1과 FS2의 중간 형태를 띠 것으로 예상된다. 가장 편류현상이 활발히 일어나는 것은 FS4이다. 편류현상과 더불어 큰 비등방비는 짧은 용질 도달 시간을 예상할 수 있게 한다. FS5의 경우에는 아주 작은 분산을 가지며, 편류현상도 거의 일어나지 않을 것으로 예상된다.

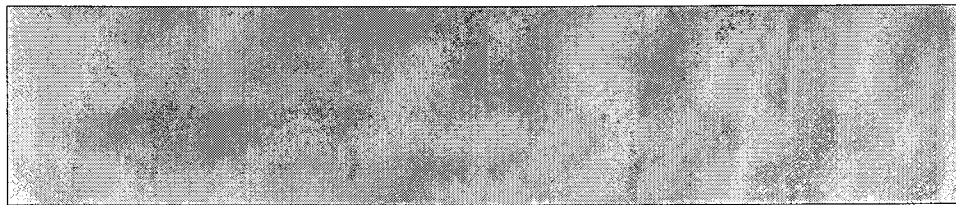
FS1



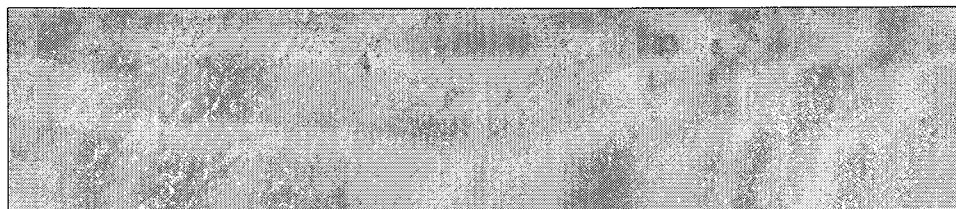
FS2



FS3



FS4



FS5

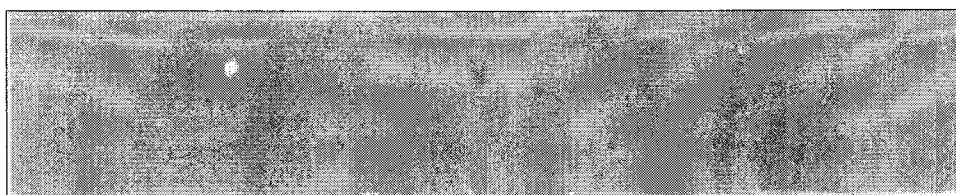
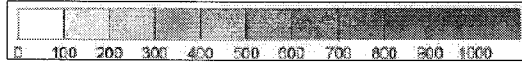
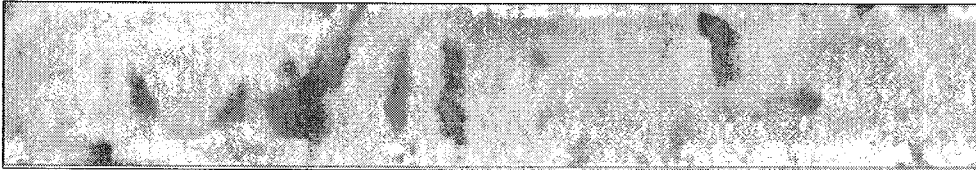


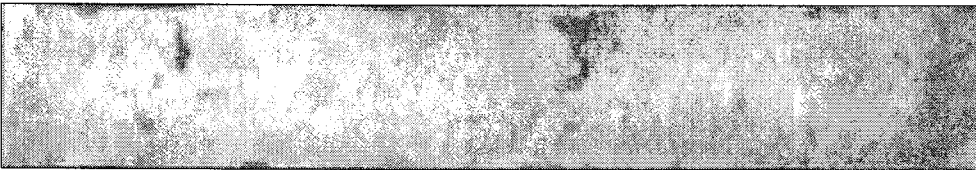
Fig. 3.2.64 시료들의 균열간극분포 관측 영상



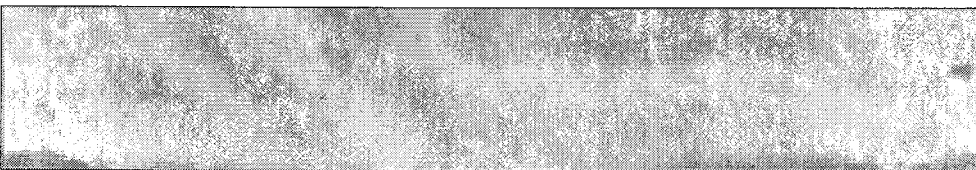
FS1



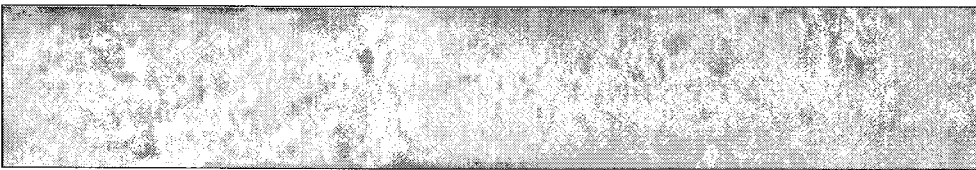
FS2



FS3



FS4



FS5

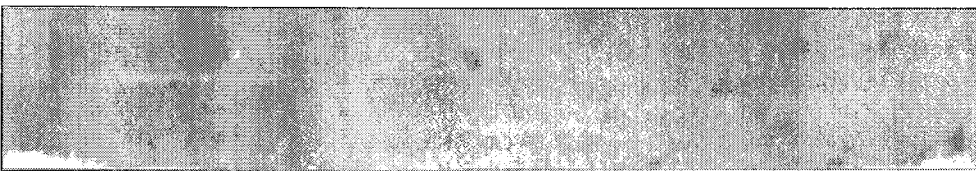


Fig. 3.2.65 시료들의 균열간극분포 재구성 영상(단계표의 단위는 μm)

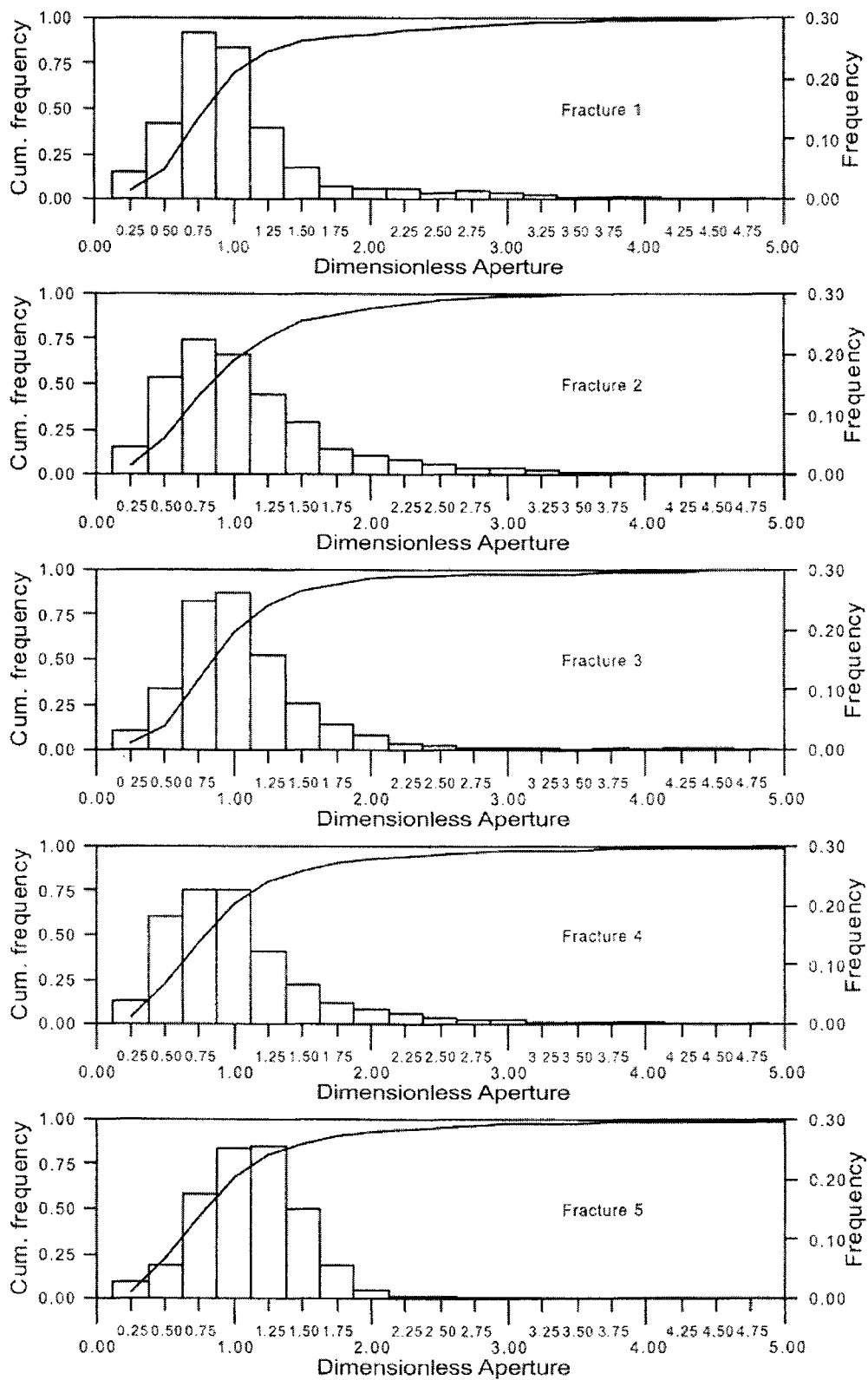


Fig. 3.2.66 누적 간극 분포 (선으로 표현) 와 히스토그램

Table 3.2.17 균열 시료의 간극분포 특성화 변수

Sample	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5
Fracture volume(cm ³)	4.40	5.02	4.59	3.53	5.45
Mean aperture(μ m)	323	383	351	259	384
Standard deviation(μ m)	264	253	246	226	153
Coeff. of variation	0.817	0.661	0.701	0.872	0.398
Skewness	2.62	1.77	2.54	2.55	1.63
Tras. corr. length(cm)	2.1	3.2	2.1	2.2	3.5
Long. corr. length(cm)	1.4	11.1	12.5	12.8	11.4
Anisotropy ratio	0.67	3.57	5.95	5.82	3.26

(2) 가변 간극 분포 특성화 변수가 용질 이동에 미치는 영향

Fig. 3.2.67은 실험에서 얻은 용질 도달 곡선과 1차원 Ogata와 Banks 방정식으로 적합한 곡선(breakthrough curve fit)을 나타낸 그래프이다. 그래프는 정규화된 시간에 대한 정규화된 농도의 형태를 사용했다. 정규화된 시간은 주입된 누적용질부피를 균열의 총부피로 나눈 값을 사용했다. Fig. 3.2.68은 유동 형태에 대한 이해를 돕기 위해서, 시간에 따라 용질이 전파되는 양상을 직접 촬영한 것이다. 흰색 부분으로 갈수록 늦은 시간의 용질 분포 전면을 나타낸다. FS3의 경우, 시료 중간 부분이 흰색으로 나타나 있는데, 이는 용질이 균열의 가장자리를 통해서 빨리 빠져나가 버리기 때문이다. 특히, 아래쪽 가장자리의 선으로 나타나는 편류가 주요한 요소로 보인다. 이것의 영향으로 FS3의 용질 도달 곡선은 적합 곡선과 잘 일치하지 않는 결과를 보인다.

적합 곡선으로 찾아낸 몇 가지 매개 변수 값들이 Table 3.2.18에 나타나있다. 큰 변동계수를 가지는 시료일수록 큰 분산도(dispersivity)를 가진다. 분산도에 대한 변동계수의 영향은 왜도계수가 높을수록 크다. 왜도계수가 높을수록 큰 간극들이 많이 분포되어 있어서 편류현상이 두드러지게 나타난다. 편류현상으로 인해 용질 이동 현상은 분산에 영향을 많이 받게 된다. Fig. 3.2.68에서도 편류현상이 FS1, FS3, FS4에서 확연히 나타난다. 비등방비가 작으면 작은 분산도 값을 가질 것으로 예상했었다. 하지만, FS1의 경우 비등방비가 작음에도 불구하고 왜도계수가 커서 큰 분산도 값을 가지게 된다. 따라서, 분산도는 비등방비보다는 변동계수와 왜도계수의 함수라고 보는 것이 타당하다.

Fig. 3.2.67을 보면 용질 도달 시간은 변동계수와 더불어 비등방비의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. FS3과 FS4에 비해 FS1은 변동계수와 왜도계수가 크지만, 비등방비가 작기 때문에 용질 도달 시간이 지연되었다. 따라서, 용질 도달 시간은 비등방비에 가장 많은 영향을 받는다.

Fig. 3.2.69는 용질 이동 곡선과 누적 간극 분포를 함께 나타낸 그림이다. 여기서 용질 이동 곡선의 경우 정규화된 시간에 대한 상대농도로 표현하였고, 누적 간극 분포의 경우 평균 간극으로 정규화한 간극에 대한 누적 도수를 총도수로 나눈 값으로 나타내었다. 이 그림에서 용질 이동 곡선과 누적 간극 분포가 비슷한 경향을 가진다. 현장에서의 용질 이동 실험 결과판으로도 간극 분포를 얻어낼 수 있다. 간극 분포를 얻어낼 수 있다면 변동계수, 왜도계수, 비등방비를 직접 계산할 수 있는 것이다. 하지만, 이러한 결과를 일반화하기 위해서는 더 많은 실험이 필요하다. 어쨌든 용질 이동 시험 외에는 어떤 자료도 가지고 있는 상황에서는 이 결과를 이용하여 의미있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

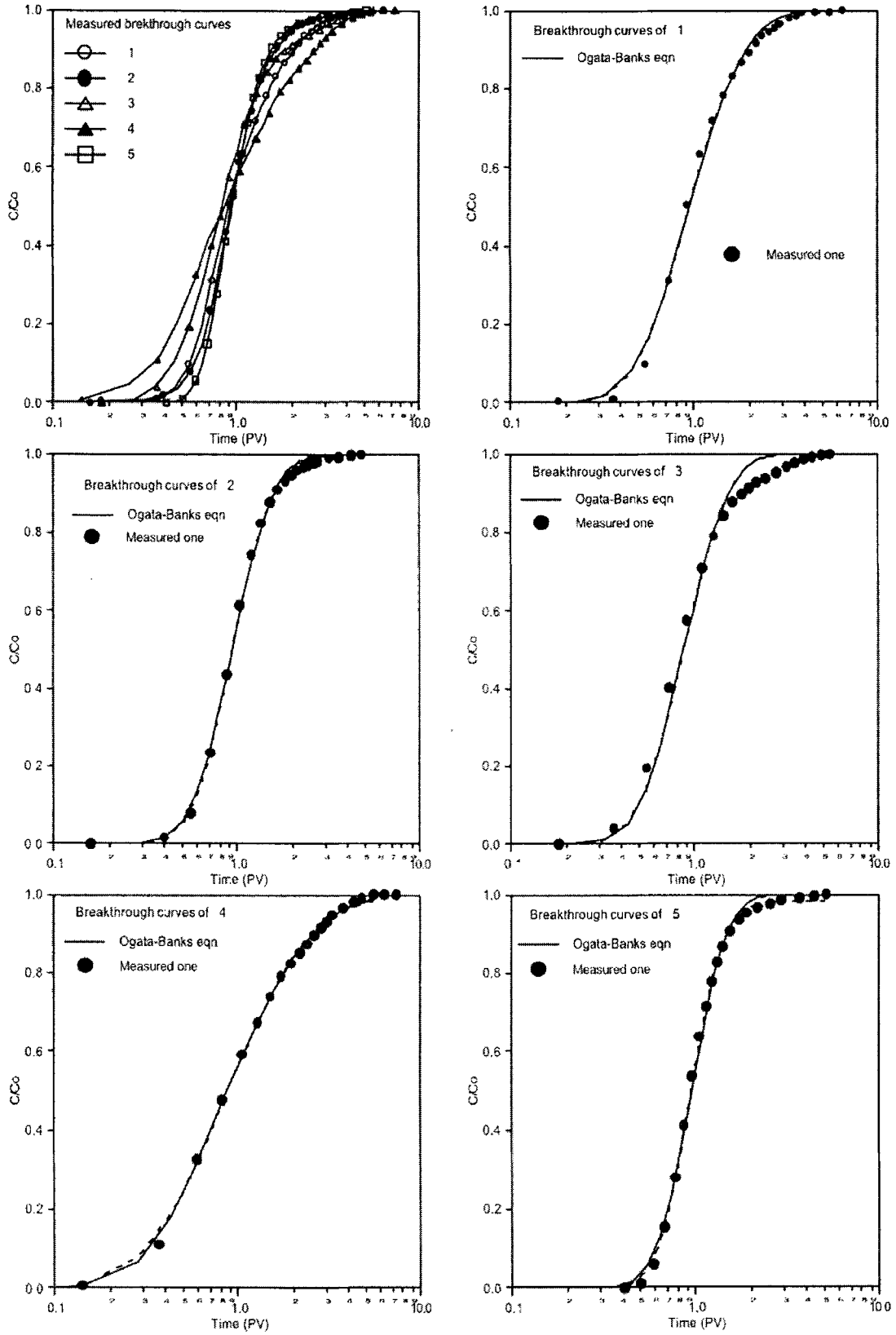


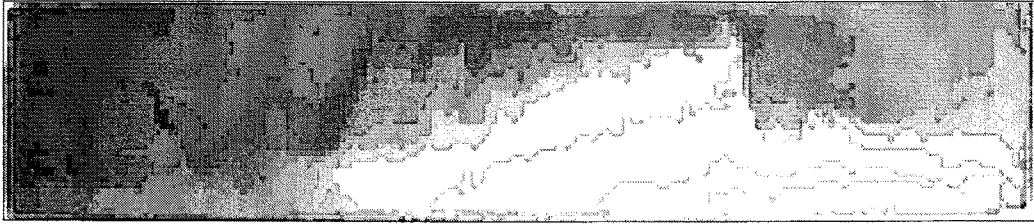
Fig. 3.2.67 Ogata와 Banks 방정식을 이용한 용질이동곡선의 적합(fitting) 결과

1~5: FS1~5

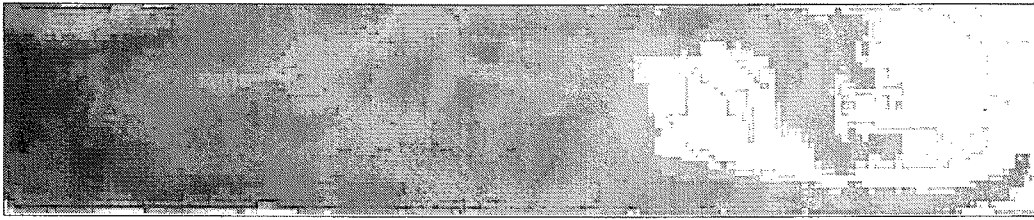
Table 3.2.18 시료들의 분산도

	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5
Dispersivity(cm)	13.1	11.0	2.38	12.0	3.4

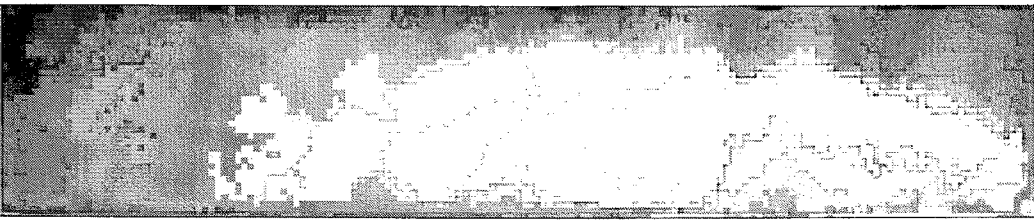
FS1



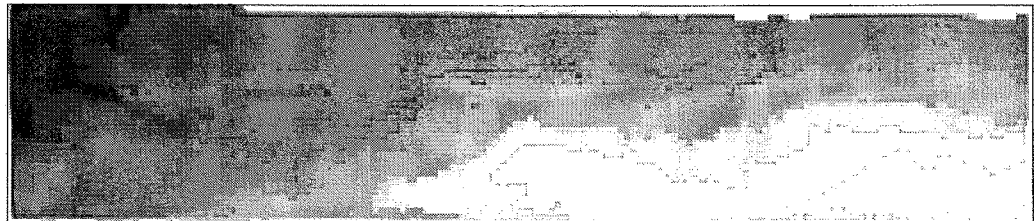
FS2



FS3



FS4



FS5

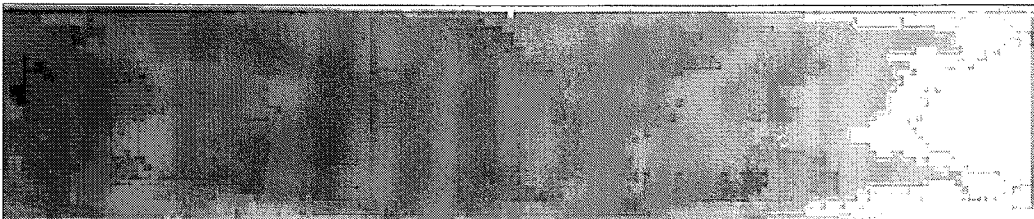


Fig. 3.2.68 시간 변화에 따른 유동 전면(flowing front) 이미지

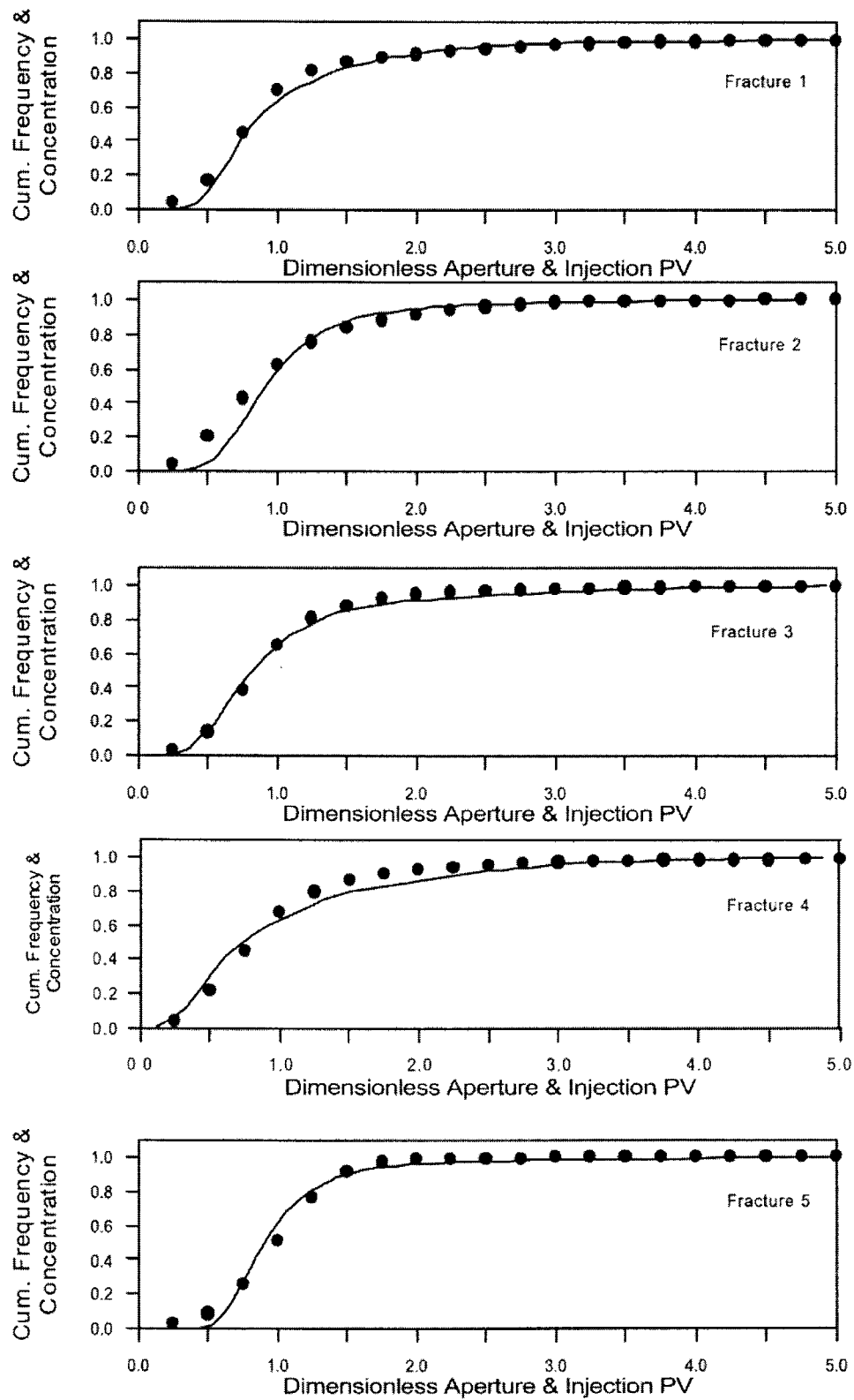


Fig. 3.2.69 누적 간극 분포와 정규화된 용질 도달 곡선 비교

라. 결론

1. 용질의 분산은 변동계수에 영향을 받는다. 왜도계수도 변동계수와 함께 분산에 중요한 역할을 한다. 변동계수와 왜도계수가 증가하면 분산도 증가하는 경향을 보인다. 비등방비의 영향은 변동계수와 왜도계수의 영향에 비해 적다.
2. 용질 도달 시간은 비등방비에 가장 크게 영향을 받는다. 비등방비가 크면 용질 도달 시간이 단축된다.
3. 단일 균열에서 용질 이동이 일어나는 경우, 누적 간극 분포와 정규화된 용질 도달 곡선은 비슷한 경향성을 보인다. 이러한 경향성으로부터 용질 도달 곡선만을 이용하여 24%오차 안에서 변동계수를 추정할 수 있었고, 35%오차 안에서 왜도계수를 추정할 수 있다.

4. 단일균열의 용질 이동 모사에 적합한 유선 시뮬레이션 기법에 관한 연구

가. 서론

석유, 가스 그리고 핵폐기물 지하저장과 관련하여 지하환경에서 물질이동을 효율적으로 기술하는 것은 매우 중요하다. 대부분의 저장시설이 치밀암반에 위치하므로 만약 누출이 발생한다면 누출물은 대부분 균열을 따라 전파한다. 균열 내 물질이동을 지배하는 메카니즘으로는 이송(advection), 분산(dispersion), 그리고 기타 기체들이 있다(Bear et al., 1993; Kitnidis, 1994). 입자추적기법(particle tracking technique)은 이송이 지배적인 이동을 모사하는데 널리 이용되어왔다. 입자추적기법이 직관적이고 널리 사용되기는 하지만 몇 가지 단점을 갖고 있다. 격자 단위에서 물질평형이 유지되지 못하며 모델의 정확도가 추적에 사용되는 입자의 수에 상당히 민감하다. 균열의 불균질성이 심할 경우 많은 양의 입자 그리고 결과적으로 많은 양의 컴퓨터 메모리를 요구하게 된다(Crane and Blunt, 1999).

최근 수년간 저류층 시뮬레이션 분야에서는 오일 회수량을 예측하는데 유선 시뮬레이션(streamline simulation) 기법이 활발히 사용되고 있다. 유선 시뮬레이션의 신속함과 효율성은 수백만 셀을 가지며 3차원 지질학적, 지구물리학적 자료를 포함하는 저류층 모델의 개발을 가능하게 하였다(King and Datta-Gupta, 1998). 유선 시뮬레이션의 또 다른 장점은 유선을 따라서 1차원 방정식을 이용하므로 격자의 안정성 제한조건이 완화될 수 있다는 것이다(Batychy et al., 1996; Batychy et al., 1997; Blunt et al., 1996). Batychy 등(1997)은 유선 시뮬레이션을 적용한 3차원 다상 저류층 시뮬레이터를 개발하였다. 이 모델을 용질이동, 물주입법(waterflooding), 일차접촉 혼합물공법(first-contact miscible displacement)에 적용하여 기존의 유한차분법을 이용한 저류층 모델과 결과를 비교 분석하였다. 이 모델은 수치분산오차를 제거하였고 기존의 일반적인 저류층 시뮬레이터에 비해 10-1000 배 가까운 계산속도의 향상을 보였다.

Crane과 Blunt(1999)는 다공질 매질에서의 물질이동 모사에 유선 시뮬레이션 기법을 적용하였다. 분산의 영향을 고려하지 않고 이송 메카니즘에 초점을 맞추었으며, 유선 시뮬레이션의 신속함과 효율성을 제시하였다. 가상의 불균질 구속 대수층에 대한 유선 시뮬레이션 결과를 입자추적모델, 기존의 유한차분법을 이용한 결과와 비교하여 용질의 농도분포가 잘 일치됨을 확인하였다.

기존의 유선 시뮬레이션을 이용한 연구들은 물질이동 모사 시 분산의 영향을 고려하지 않았다. 또한, 균열의 모든 격자점 자료를 가진 실험결과와 유선 시뮬레이션의 타당성을 검증하는 연구는 매우 미비하였다.

이 연구에서는 유선 시뮬레이션 기법을 단일균열 내 물질이동 모사에 적용하였고 실험 자료와 비교함으로써 그 타당성을 입증하였다. 이송 뿐만 아니라 분산의 영향도 고려하여 물질 거동 양상을 보다 실제와 가깝게 모사하였다. 시뮬레이션의 용질 도달곡선과 용질이동 실험결과를 비교하였고 용질의 전파 양상을 시각화하여 시간의 진행에 따라 분석하였다.

나. 본론

(1) 유선 시뮬레이션 기법

유선 시뮬레이션의 핵심 개념은 유체 유동의 다차원 문제를 유선을 따라 해석하는 1차원 문제의 집합으로 분해하는 것이다. 유체가 기존 방법에서와 같이 이산격자 사이를 따라 이동하는 것으로 해석하는 것이 아니라 유선을 따라 움직이는 것으로 간주한다. 이러한 접근으로 유동 영역은 유한개의 유선으로 분해되고 각 유선에서의 용질 이동은 1차원 문제로 해석될 수 있다. 이 1차원 이동 문제의 해를 구하면 모든 유선상의 해를 구할 수 있다. 그런 다음 이 해들은 원래 유동영역으로 역매핑(remapping) 하고 최종 농도 분포를 위치와 시간의 함수로 얻게 된다. 이런 접근법은 이산격자체계와 물리적 유동계산을 분리시킴으로써 기존의 유한차분법에서 발생하는 수치분산오차를 제거할 수 있으며 계산 효율을 증진시킨다(King and Datta-Gupta, 1998; Thiele et al., 1996).

(가) 유선 입자 추적

균열면 내의 유동을 모사하는 전형적인 접근법은 각 격자가 고유한 간극(aperture) 값을 갖는 평형 판의 세트로 특성화하는 것이다(Bear and Ghislain, 1993; Masciopinto, 1999). 가변간극균열(variable aperture fracture) 내 유체 유동은 일정 유량의 경계조건으로 계산하였으며 균열의 양 측단에는 비유동 경계조건을 적용하였다. 유동시뮬레이션으로 압력장이 결정되면 입자 경로를 추적함으로써 유선장(streamline field)을 계산할 수 있다.

격자 내에서 속도장이 x, y 방향으로 선형적으로 변한다고 가정하면 격자 내 임의 지점에서의 속도는 선형 내삽법을 가정하여 계산할 수 있다. 격자 내에 국소 좌표계를 도입하면, 격자 내 x 지점의 속도는 식 (3.2.38)과 같이 나타난다.

$$v_x = v_{x0} + m_x(x - x_0) \quad (3.2.38)$$

여기서, 는 좌표의 원점, v_{x0} 는 x_0 에서의 속도, 그리고 m_x 는 식 (3.2.39)과 같이 정의 되는 속도 변화량이다.

$$m_x = \frac{v_{x\Delta x} - v_{x0}}{\Delta x} \quad (3.2.39)$$

여기서, Δx 는 격자의 x 방향 크기이다. 식 (3.2.39)로부터 입자의 격자 내 상주시간(residence time)은 식 (3.2.40)과 같이 계산된다(Pollock, 1988).

$$\Delta t_{ex} = \int dt = \int_{x_i}^{x_e} \frac{dx}{v_x} = \frac{1}{m_x} \ln \frac{v_{xe}}{v_{\xi}} \quad (3.2.40)$$

여기서 v_{xe} 는 출구속도이고 v_{ξ} 는 입구속도이다. y 방향으로의 상주시간도 같은 방법으로 계산할 수 있으며 격자내의 입자 상주시간은 Δt_{ex} 와 Δt_{ey} 중에서 더 작은 값으로 결정된다. 격자 내 상주시간을 알면, 식 (3.2.38)과 (3.2.40)을 결합하여 유선의 출구 위치를 식 (3.2.41)와 (3.2.42)와 같이 계산할 수 있다.

$$x_e = \frac{1}{m_x} (v_{\xi} \exp(m_x \Delta t_e) - v_{x0}) + x_0 \quad (3.2.41)$$

$$y_e = \frac{1}{m_y} (v_{yi} \exp(m_y \Delta t_e) - v_{y0}) + y_0 \quad (3.2.42)$$

이런 과정으로 유선을 결정한 후, 직교 좌표계를 TOF(Time Of Flight) 개념을 이용하여 유선을 따르는 좌표계로 변환한다. 수학적으로, TOF는 식 (3.2.43)과 같이 정의된다(Batychy *et al.*, 1997; Datta Gupta and King, 1995; Thiele *et al.*, 1996).

$$\tau(s) = \int_0^s \frac{d\zeta}{v(\zeta)} \quad (3.2.43)$$

여기서, ζ 는 유선을 따르는 좌표이다. 따라서, 유선을 따라 입자의 위치에서의 TOF는 유선이 지나는 격자들의 거주시간의 합으로 계산된다.

$$\tau = \sum_{i=1}^{N_b} \Delta t_{ei} \quad (3.2.44)$$

여기서, N_b 는 유선이 지나는 격자의 수이다.

(나) 이론해의 맵핑

균열 내 비압축성 유동과 1차원 연속 오염원 조건을 가정하면, 식 (3.2.45)의 이송 분산 지배방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial s} + D \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \quad (3.2.45)$$

여기서 C 는 농도이고 D 는 분산계수이다(Kitanidis, 1994). 식 (3.2.43)을 미분하고 변형하면, 좌표변환 식 (3.2.46~48)을 얻게 된다.

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{1}{v} \quad (3.2.46)$$

$$v^2 d\tau^2 = ds^2 \quad (3.2.47)$$

$$v^2 d\tau^2 = ds^2 \quad (3.2.48)$$

좌표 변환을 이송 분산 방정식 (3.2.45)에 적용하면, 식 (3.2.49)와 같이 TOF와 시간의 함수형태로 재구성된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial s} + D \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} = -\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{1}{Pe_m} \frac{\partial^2 C}{\partial \tau^2} \quad (3.2.49)$$

여기서, Pe_m 은 식 (3.2.50)과 같이 정의되는 변형 페클레수(modified Peclet value)이다.

$$Pe_m = \frac{v^2}{D} \quad (3.2.50)$$

변환된 이송 분산 방정식을 유도하면서, 변형 페클레수의 개념을 새롭게 도입하였다. 이것은 유관(streamtube)에 대한 변형된 이송 분산 방정식을 유도하는

과정에서 나타나는 페클레수에 대응되는 개념이다. 변형 페클레수는 균열에서의 이송과 분산 정도의 평균 비를 의미한다. 식 (3.2.49)의 이론해는 식 (3.2.51)와 같다(Thiele et al., 1996).

$$\frac{C(\tau, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\tau - t}{2\sqrt{t/Pe_m}}\right) \quad (3.2.51)$$

이 해로부터 주어진 시간에 유선 상의 임의의 위치에 상응하는 TOF에서의 농도를 계산할 수 있다.

(다) 격자 농도 계산

평균격자농도는 그 격자를 통과하는 여러 유선 농도의 가중 농도로 계산하며 이때 가중치는 각 유선의 유량에 비례하여 결정한다(Crane and Blunt, 1999).

$$C_b = \frac{\sum_i q_i \Delta \tau_i C_i(\tau)}{\sum_i q_i \Delta \tau_i} \quad (3.2.52)$$

여기서, C_b 는 격자의 농도이고, $\Delta \tau_i$ 는 i 번째 유선의 격자 내 거주시간이며, q_i 는 i 번째 유선의 유량이다. 유선을 포함하지 않는 누락된 격자(missed gridblock)의 경우, TOF를 계산할 수 없으므로 격자농도를 계산할 수 없다. 누락격자의 TOF를 계산하기 위해, 유선을 포함하는 가장 인접한 격자로 새로운 유선을 추가하고 역추적한다. 그런 다음, 누락된 격자의 TOF는 근접격자의 TOF와 역추적에 소요된 시간의 합으로 결정한다.

$$\tau_{missed} = \overline{\tau}_b + \tau_{back} \quad (3.2.53)$$

여기서, $\overline{\tau}_b$ 는 근접격자의 TOF이고 τ_{back} 는 누락격자까지 역추적하는데 소요되는 시간이다.

(2) 결과 및 고찰

유선 시뮬레이션의 타당성 검증을 위해 FS1, FS2, FS5로 세 개의 균열 시료의

용질 이동실험 결과와 유선 시뮬레이션의 결과를 비교하였다. 경계조건은 실험조건과 동일하게 적용하였다.

(가) 입력자료

실제 균열의 간극 분포를 280×20 의 격자값으로 디지털화하고, 정상상태에서 유동 시뮬레이션 하여 압력장과 속도장을 계산하였다.

일반적으로 유선 수가 증가하면 격자의 농도계산 시 정확도는 향상된다. 그러나, 유선 수가 일정 한계 이상이면 유선 수의 영향은 그렇게 크지 않다. 이 연구에서는 유선 수가 200개 이상에서 결과의 큰 차이가 없었으므로, 제시된 모든 결과들은 200개의 유선을 사용한 것이다.

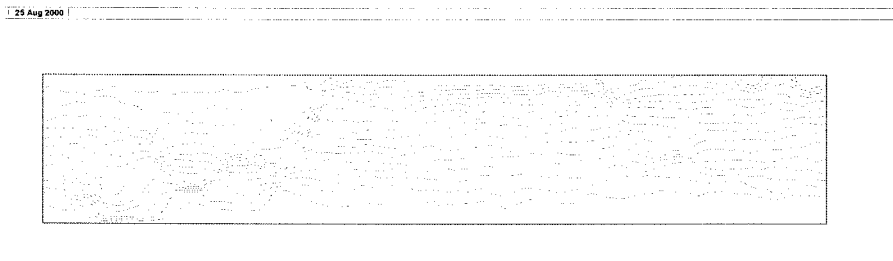
Table 3.2.19는 시뮬레이션 입력 자료를 요약한 표이다. 모든 경우에 대해, 유량은 0.017cc/s 로 유지하였다. 실험으로 획득한 용질도달곡선을 Ogata와 Banks의 이론해로 근사하여, 시뮬레이션에 사용할 균열 분산계수의 대표값과 변형 페클레수를 결정하였다.

(나) 전산모사 결과

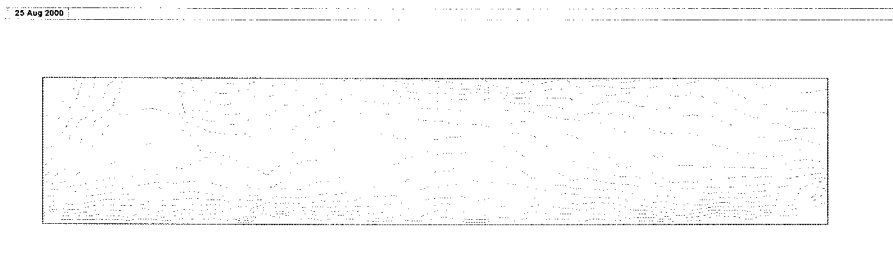
Fig. 3.2.70은 계산된 균열의 유선장으로서 유선이 밀집되어 있는 곳이 유량이 큰 곳을 나타낸다. Fig. 3.2.65의 간극분포와 Fig. 3.2.70의 유선장의 비교로부터 간극 값이 크게 나타나는 부분에서 유동이 집중됨을 알 수 있다. 세 균열 중에서 비균질도가 가장 높은 FS1의 유동장이 가장 복잡하게 나타나며, 반대로 FS5는 상대적으로 균질한 유동 형태를 나타낸다.

Table 3.2.19 전산모사에 필요한 조건 설정

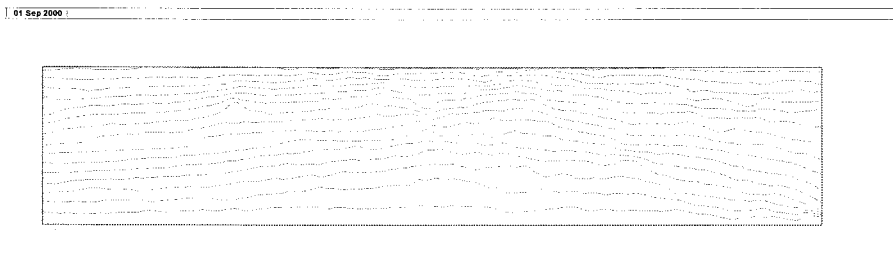
Sample	FS1	FS2	FS5
Length in x direction, cm	29.3	29.3	29.1
Length in y direction, cm	4.6	4.5	4.8
Fracture volume, cc	4.4	5.0	5.5
Mean aperture, cm	0.0323	0.0383	0.0384
Standard deviation, cm	0.0264	0.0253	0.0153
Coefficient of variation	0.82	0.66	0.40



(a) FS1



(b) FS2



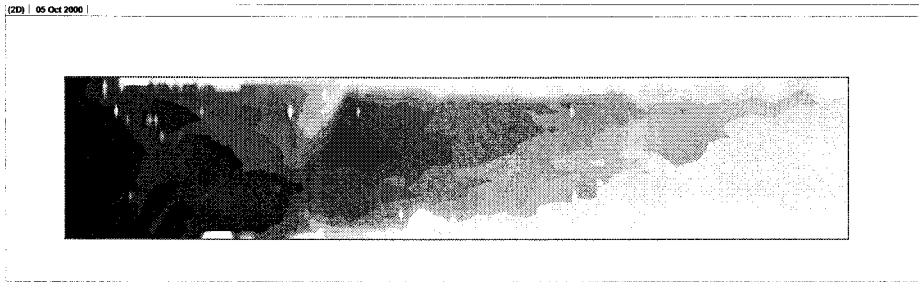
(c) FS5

Fig. 3.2.70 전산모사를 통해 추적된 유선 분포들

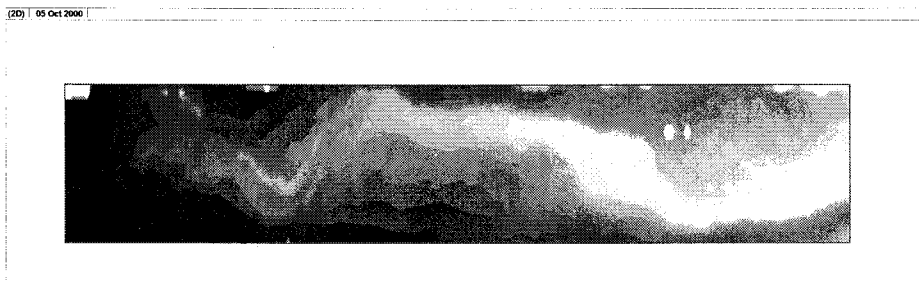
(다) 실험 결과와 전산모사 결과 비교

실험과 시뮬레이션의 용질 이동 양상을 비교하기 위해 도시한 시뮬레이션의 TOF 분포는 Fig. 3.2.71과 같다. 용질 이동 경향이 실험에서 얻은 용질 이동 양상(Fig. 3.2.68)과 매우 유사하며, 특히 유체투과율 분포의 비균질성에 따른 물질이동 양상을 잘 반영함을 알 수 있다. 시간에 따른 용질 이동 양상을 관찰하기 위해, F2의 시간 단계별 용질 이동 영상을 Fig. 3.2.72에 도시하였다. 시간이 흐를수록 균열 상부 경계와 하부 경계에서 용질이동이 빠르게 진행하며 균열 중심부에 위치한 경로로는 느린 이동양상을 보이고 있다. 이 결과는 FS2의 용질 이동 실험 양상과 유사한 형태이다.

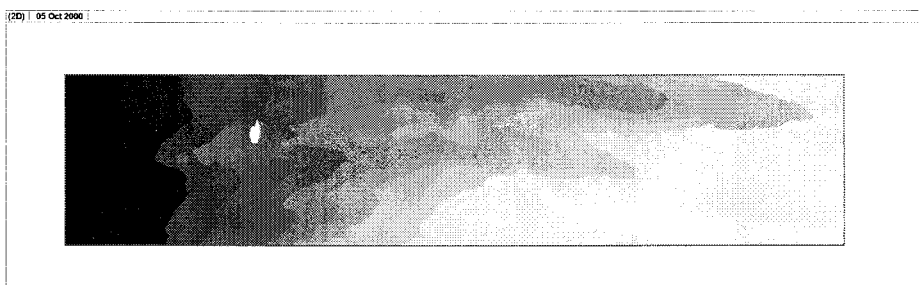
Fig. 3.2.73는 실험과 시뮬레이션으로부터 얻은 용질도달곡선을 도시한 그래프이다. 분산의 영향을 무시한 이송이 지배적인 이동을 가정할 경우($Pe_m=1000$), 시뮬레이션에 의한 용질도달곡선은 실험결과와 차이를 보인다. 시뮬레이션의 용질도달곡선은 용질도달이 시작되는 초기 시간 영역에서 급격한 농도 증가와 후기시간대의 급격한 농도 감소를 나타낸다. 반면, 실험자료와 이론식의 근사로 획득한 변형 페클레수를 사용할 경우($Pe_m=0.05$), 분산의 영향으로 나타나는 초기 시간에서의 부드러운 농도 증가와 후기 시간대의 부드러운 농도 감소 경향을 잘 모사하고 있다. 이와 같이 균열의 변형 페클레수라는 새로운 인자를 적용함으로써 유선 시뮬레이션은 분산 이동 효과를 반영할 수 있으며 용질이동곡선 예측의 정확도도 향상시킬 수 있다.



(a) FS1



(b) FS2



(c) FS5

Fig. 3.2.71 계산된 TOF 분포

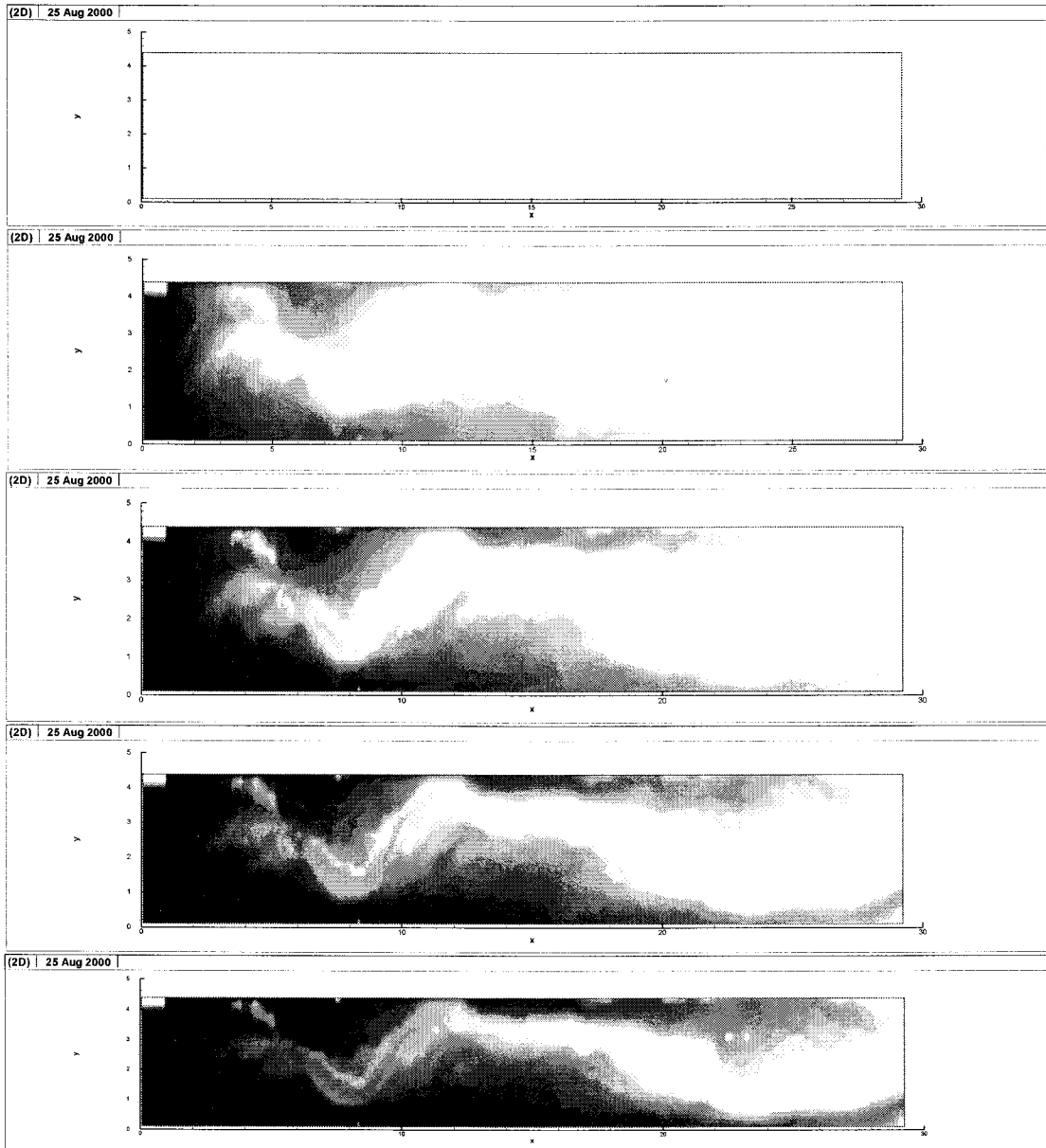


Fig. 3.2.72 시간에 따른 용질 이동 양상

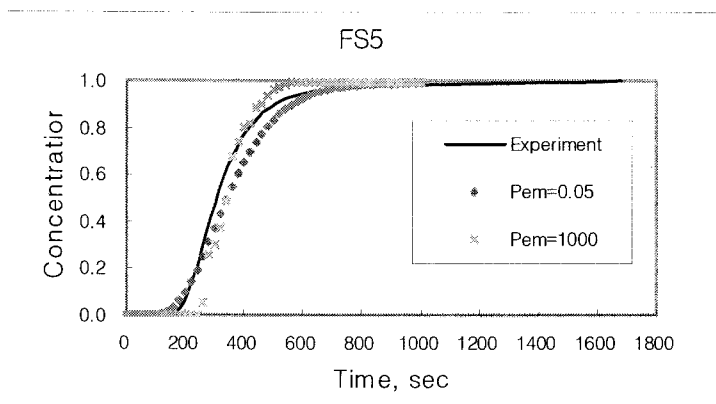
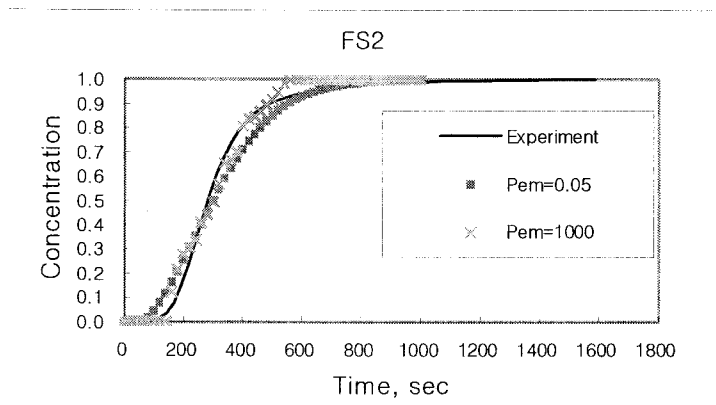
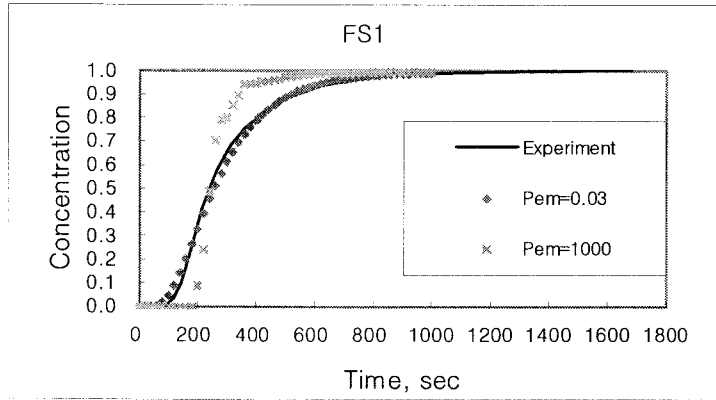


Fig. 3.2.73 변형 페클레수 변화에 따른 용질도달곡선

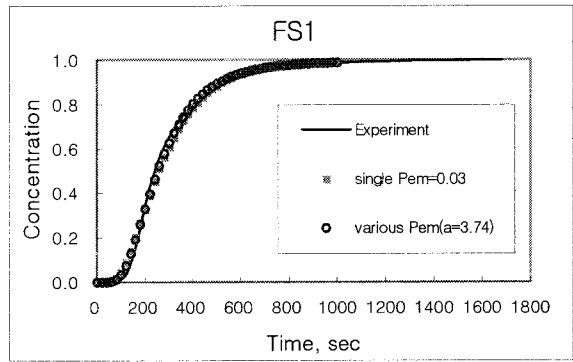
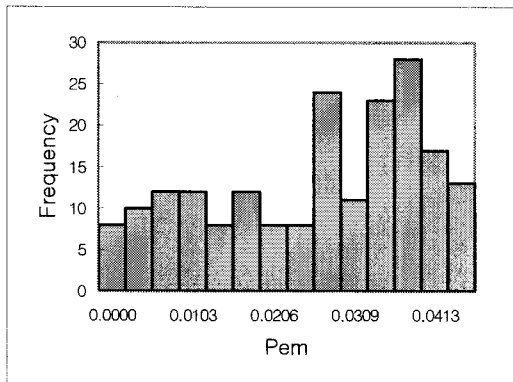
(라) 변형 페클레값 분석

앞의 결과는 전 유동영역에 하나의 대표 변형 페클레수를 사용한 것이다. 그러나 격자 단위의 관점에서 보면 각 유선을 따라 평균 유속이 다르므로 유선을 따라 분산계수 또한 다른 값을 갖게 된다. 이런 특징을 반영하기 위해 용질도달곡선의 근사로부터 결정된 분산도 값과 유선의 평균유속으로부터 각 유선의 분산계수를 독립적으로 계산하여 시뮬레이션에 사용하였다. Table 3.2.20은 독립적으로 계산된 유선들의 변형 페클레수의 통계값들을 요약한 표이다. Fig. 3.2.74는 유선의 변형 페클레수의 분포와 가변 변형 페클레수를 사용한 시뮬레이션 결과를 함께 도시한 것이다. 변형 페클레수의 정의로부터, 변형 페클레수가 크면 유선을 따라 유속이 분산도에 비해 상대적으로 높음을 의미하며, 이송이 분산에 비해 유선에 큰 영향을 미친다. 반대로 변형 페클레수가 작으면 분산의 영향이 이송보다 크게 작용한다. Fig. 3.2.74(a)를 보면, FS2와 FS3에서 변형 페클레수의 분포가 다름에도 불구하고, 0.05의 동일한 대표 변형 페클레수를 갖는다. FS3의 히스토그램은 오른쪽으로 치우쳐져 있어(skewness=1.06) 많은 유선들이 분산보다 이송의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 반면, FS2의 히스토그램은 대칭에 가까우며(skewness=0.29), 분산의 영향이 FS3 보다 상대적으로 크다. 이는 Fig. 3.2.74(b)의 용질이동곡선에서도 확인할 수 있다. 즉, FS2의 용질이동곡선은 상대적으로 FS3 보다 넓게 퍼진 형태를 띄어 분산이 크게 나타난다.

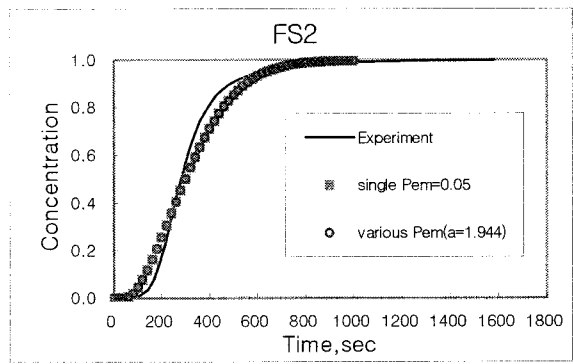
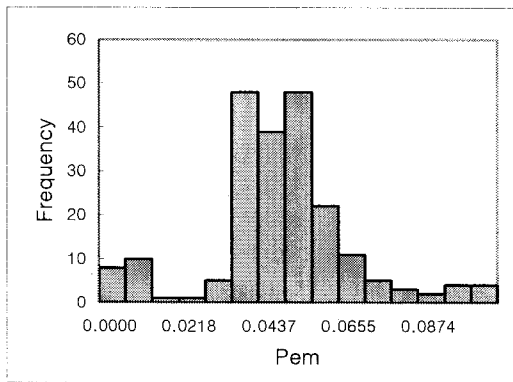
개별 유선이 서로 다른 변형 페클레수를 가짐에도 불구하고, 대표 변형 페클레수를 이용한 용질이동곡선과 가변 변형 페클레수의 결과는 Fig. 3.2.74(b)의 3개의 용질도달곡선에서 큰 차이를 보이지 않는다. 그러므로, 변형 페클레수의 결정에서 단일 대표값의 사용이 유선 시뮬레이션에 충분함을 알 수 있다.

Table 3.2.20 변형 페클레수 분석

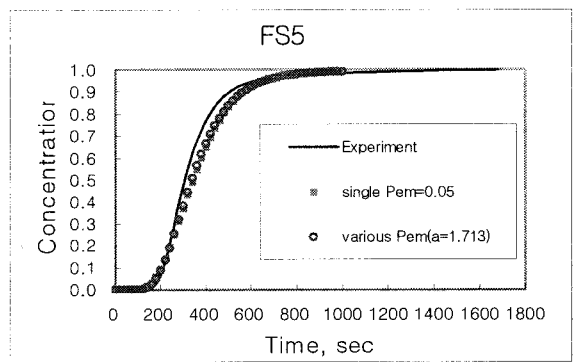
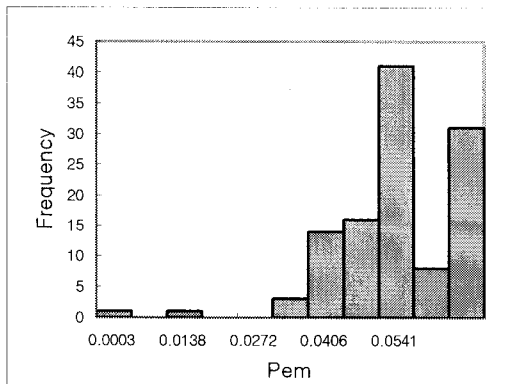
Sample	FS1	FS2	FS5
Representative P_{em} from curve fitting	0.03	0.05	0.05
Mean	0.024	0.043	0.050
Standard deviation	0.013	0.019	0.013
Median	0.026	0.043	0.050
Skewness	0.40	0.29	1.06



<F1>



<F2>



<F5>

(a)

(b)

Fig. 3.2.74 (a) 가변 변형 페클레수 분포 히스토그램, (b) 가변 변형 페클레수와 대표 변형 페클레수의 선택에 따른 용질 도달 곡선 비교

다. 결론

1. 시뮬레이션으로 구한 용질이동곡선은 용질이동실험 결과와 잘 일치하였으며, TOF 분포 또한 실험에서 획득한 유동전단면 영상과 유사한 형태를 보였다. 이 결과로부터 유선 시뮬레이션이 단일균열 내 용질이동을 효과적으로 모사할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 분산이동의 영향을 모사하기 위해 변형 페클레값이라는 새로운 인자를 도입하였으며, 이는 변환된 용질이동 방정식에서 이송과 분산의 상대적인 비로 정의된다.

3. 유선을 따라 서로 다른 변형 페클레수를 할당하는 것은 변형 페클레수를 하나의 대표값으로 사용한 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 실제로 유선은 서로 다른 변형 페클레값을 갖지만 유선 시뮬레이션 상에서 그 영향은 크지 않았다. 따라서 단일균열 내 물질이동 모사에서 하나의 대표값을 변형 페클레수 인자로 사용하여 효과적으로 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구목표 달성도

3차원 균열 모델링 기법을 연구를 통해 3차원 균열 모델링 시스템을 개발하였으며 단일 균열을 통한 유체유동 및 물질이동에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음 단계 연구를 위한 초석을 수립하였다. 연구 전반에 걸친 목표대비 달성도는 100% 이상 달성하였다.

- 현장에서 수집한 2차원 균열 추적자료부터 3차원 균열 반경, 공간적 분포 및 방향성을 결정하는 프로그램을 개발하였다.
- Baecher 모델, Polygon 모델, 프랙탈 모델, 지구통계학적 모델 등의 알고리즘을 완성하고 이것을 적용하여 3차원 균열 매질을 생성할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 균열망의 연결성을 분석할 수 있으며 사용자 편의를 위하여 OpenGL을 사용하여 생성된 균열망을 3차원으로 가시화하였으며 다각적인 분석을 할 수 있다.
- 유리질 캐스팅 기술을 바탕으로 균열판을 재생하였으며 가변간극 균열의 수리학적 특성에 영향을 미치는 특성변수에 대한 단상 유동 실험을 수행하였다. 또한, 절대 유체투과율과 특성변수의 민감도 분석을 수행하였다.
- 가변간극 특성화 변수에 따른 삼승법칙의 적용성에 대한 실험적 분석 및 개선된 경험식을 유도하였다. 이는 다음 차년도 연구 과제인 균열을 통한 유체 유동 모델링에 직접 적용할 수 있는 기초 자료로 사용될 것이다.
- 가변간극 균열의 용질이동 특성에 미치는 간극 특성화 변수의 영향에 대한 실험실 규모 실험을 수행하였고 균열간극의 분포 특성이 용질이동의 분산도에 미치는 영향을 파악하였다. 이 결과 또한 다음 차년도의 연구의 기초자료로 사용될 것이다.
- 단일균열의 용질 이동을 모사할 수 있는 유선 시뮬레이션 기법을 개발하였다. 이 기술의 개발로 복잡한 균열망에서의 용질이동 모델링을 기존의 방법에 비해

매우 효율적으로 수행할 수 있는 계기를 마련하였다.

제 2 절 관련분야에의 기여도

1. 유리질 합성 수지 캐스팅 기술 확보

이 기술은 암석의 복제판을 제작할 때 유리표면에 화학처리를 함으로써 암석표면 특성을 정확히 재생할 수 있다. 기존에는 에폭시를 사용하여 복제판을 제작하였는데, 이 경우 흡착도를 변화시킬수 없으며 높은 빛 흡수율로 인한 균열 간극 크기 측정의 부정확성으로 인해서 균열면에서의 유동을 정확히 해석할 수 없었다. 이러한 문제점을 극복한 유리질 복제 기술은 균열에서의 유체 거동을 정확히 해석할 수 있게 해 줄 뿐만 아니라, 다양한 표면처리 및 화학처리로 다양한 유동 현상을 적절히 모사할 수 있다.

2. 3차원 균열망 모델링 기술 개발

비선형 최적화 기법을 적용한 3차원 균열 모델링 기술을 개발하였다. 이 기술을 개발함으로써 3차원 균열망에서 유체거동 전산 모델을 개발하기 위한 틀이 마련된 것이다. 균열간의 연결성분석은 균열군의 존재 및 균열내에 유동이 발생할 경우 기본적인 경계조건을 제공하는 중요한 역할을 담당한다. 3차원 균열망의 경우 2차원 균열군과 달리 공간도형간의 평행, 꼬인위치, 부분적으로 교차하는 현상 등 다양한 경우의 수가 존재한다. 이를 위해서는 좌표의 정렬과 위치관계에 관한 알고리즘이 필요하지만, 이러한 알고리즘은 많은 컴퓨팅 계산시간을 필요로하게 된다. 이를 효과적으로 처리하기 위해서, 교차점의 내적관계를 적절히 이용하여 좌표의 정렬과정 없이 간단하면서 효과적인 알고리즘을 개발하였다. 또한 균열군의 특징을 손쉽게 분석하기 위해 이중연결리스트를 이용하여 효율성을 확보하였다. 이러한 기술을 바탕으로 2단계 연구를 성공적으로 수행하였을 때 얻는 성과는 현재 우리가 직면하고 있는 에너지와 환경 문제인 '유류 저장기지의 안정성 평가', '균열저류층의 석유·가스 생산 예측', '지하수 오염 예측 및 환경 영향평가' 등의 분야에 활용될 수 있다.

3. 유동특징과 균열의 기하학적 특징의 상호 연관성 규명

가변간극 단일균열의 유동은 실제 현장과 유사하게 유동을 발생시켜서, 유동의 특징과 기하학적 특징을 분석하는 방법이다. 실제 현장에서는 간극분포를 직접 획득

하기 어려우며, 실험실 규모의 측정에서도 오차를 많이 발생시킬수 있다. 이 연구에서 수행한 가변간극 단일균열의 유동을 통해 현장의 추적자 실험으로 획득한 용질도달 곡선과 누적간극분포의 유사성을 확인하였다. 그 결과, 자료획득이 어려운 균열간극분포 측정에 비해 비교적 간단한 유동실험을 통해 균열 간극의 변동계수와 왜도계수의 오차범위를 획득하였으며 이는 여러 가지 물질이동 연구와 간극분포의 형태적 분석연구에 기여할 것으로 사료된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구결과의 활용계획

- 녹사평 역에서의 기름유출과 같은 환경문제는 면밀한 지질조사 등을 수행했음에도 불구하고 정확한 유출경로를 파악하는데 어려움이 많았다. 이러한 지역에서의 오염원은 주로 균열을 통해서 이동함으로써 균열대가 우선적으로 조사되는데, 모든 가능 지역을 굴착하는 것은 현실적으로 어렵기 때문이다. 이 연구에서 개발될 성과물은 오염원 누출 경로로 추정되는 균열대의 기초 지질조사를 사용하여 비교적 정확히 실제 누출 경로와 양상을 파악할 수 있다. 이러한 지하 환경오염 문제는 녹사평 역뿐만 아니라 지하 저장유류 탱크가 있는 어느 지역에서나 발생할 수 있으며, 우리의 연구가 2단계를 거쳐 성공적으로 수행하여 얻은 성과는 지하 유류 등의 오염원의 확산과 이동양상을 파악하는데 유용하게 이용될 수 있다.
- 에너지 위기는 국가의 발전에 가장 위협적인 요소로서 이를 극복하기 위하여 유류를 지하저장시설에 비축하도록 OECD에서 권고하고 있다. 우리나라도 석유공사, SK 건설 등에서 지하에 유류 저장시설을 건설하고 있다. 이러한 저장시설은 균열이 존재하는 화강암질에 건설되기 때문에 이 연구에서 개발된 모델을 사용하여 암석의 균열대를 모델링하여 저장시설의 기밀성을 확보함으로써 저장기지를 안정적으로 운영할 수 있다.
- 우리나라는 약 20%의 에너지를 원자력발전에서 얻고 있다. 세계적으로 원자력발전의 위험성이 대두되고 있고 체르노빌 사고와 같은 원전 사고가 발생하기도 했다. 다행히도 우리나라에서는 큰 원자력 발전 관련 사고는 보고되지 않았으나, 70년대에 세워진 고리나 월성원자력 발전소는 노후화로 인하여 언제든지 사고의 가능성을 내포하고 있다. 또한 우리나라는 원유의 의존도를 낮추기 위해 원자력발전으로부터 일정량 이상의 에너지를 확보해야 하는 실정이다. 따라서 방사성 폐기물 처리시설의 확보도 증가할 것이며 이미 20여년간 사용한 기존 시설의 노후화로 인한 폐기물의 누출 가능성은 우리를 위협하고 있다. 따라서 개발된 프로그램을 사용하여 폐기물 처리시설 주변의 균열특성을 파악하면 폐기물 누출시 누출 경로와 양상을 신속하게 파악하여 재난방지 및 피해의 최소화에 적극 활용할 수 있다.

- 우리나라가 수행한 해외개발유전의 대표적인 KODECO사의 마두라우전은 균열을 포함한 저류층이 상당히 많은 것으로 알려져 있다. 따라서 생산성 예측과 안정적인 압력 운영에 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 최근에 개발된 베트남의 화강암 유전은 암반의 특성상 균열대를 포함하고 있다. 이러한 균열저류층에서의 에너지생산을 효율적으로 수행하기 위해서는 균열망의 구조를 정확히 파악하여 유체유동을 예측해야 하며, 이에 개발된 프로그램은 균열저류층에서 안정적이고 효율적으로 에너지를 생산하는데 적용될 수 있다.

제 2 절 추가연구의 필요성

이 연구는 균열 특성화 기법을 통해서 지하유체 거동 해석 기술을 개발하는 것이다. 핵심 개발 기술은 다음과 같이 구성되어 있다.

- 가변 간극 균열에서의 단상 및 이상 유체 유동과 용질 이동의 실험적 해석 기술
- 균열과 암반간의 상호작용을 고려한 단상 및 이상 유체 유동의 실험적 해석 및 전산 모델링 기술
- 지하 암반 매질 내 용질 이동 예측 기술
- 현장 규모의 지하 균열 암반을 3차원 분리 균열 모델로 특성화하는 기술

1단계 연구에서는 가변간극 균열에서 단상 유체유동과 용질이동의 실험적 해석과 3차원 균열망 생성 모델 개발에 주안점을 두었다. 2단계에서는 이상 유체유동 및 용질이동의 실험적 해석을 기반으로 하여 3차원 균열망에서 유체유동 및 용질이동 전산모델을 개발하는 것이다. 1단계 연구는 2단계 연구의 근간이 되는 것이다. 즉, 1 단계에서 개발한 균열망 생성 모델을 사용하여 이 연구의 최종 결과물인 3차원 균열망에서 유체 거동 전산모델을 2단계에서 개발하고자 한다.

또한, 에너지 부족과 환경오염의 문제가 더욱 부각되고 있는 실정에서 구미 선진국을 비롯한 해당 국가들은 국가적인 차원에서 에너지 개발과 환경 정화에 고차원적인 기술 개발에 역량을 쏟고 있다. 따라서, 개발 기술의 활용범위는 현재까지 알려진 수치적 시장 규모보다 더 큰 잠재적 시장이 형성되어 가고 있다. 따라서, 향후 수 년 이내에 해당 기술의 자립화를 이루지 못할 경우 국가 근간 산업의 발전에 저해되는 상황이 초래될 수도 있고 제안된 기술이 개발될 경우 얻는 경제적 파급력과 외국 기술 도입비 절감 등을 고려할 때 “3차원 균열 특성화 기술”의 개발은 국가적인 차원에서 행해져야 하는 중대한 문제이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 유리질 합성 수지 캐스팅 기술 확보

기존의 에폭시를 사용할 때 나타나는 문제점인 높은 빛 흡수율로 인한 균열간극 측정의 부정확성 및 복제판의 유체유착도 조정의 난해성을 극복할 수 있는 유리질 합성수지 캐스팅 기술을 확보하였다.

2. 격자 분리를 이용한 3차원 균열망내 유동해석 기술

3차원분리균열모델에서 유동과 연결성을 해석할 경우에는, 원의 중심과 교차선의 중점을 연결시킨 유동경로를 결정하여 경로에 따라 유체투과율을 계산하는 1차원 분석이 주로 이루어졌다. 최근에는 균열면을 2차원으로 FEM 격자모델로 구성한 이후에 균열면을 따라 2차원 유동이 발생한다고 가정한 2차원 유동분석기술이 개발되었다(Koudina et al, 1998).

3. ANN을 이용한 방향성 분석 기술

균열의 방향성은 주방향에 존재하며 균열이 그 주방향 주변에 걸쳐 존재하는 분포가 일반적이며, 균열의 생성이론에 따라 일정한 방향성을 지니고 있다. 이를 올바르게 해석하기 위해서, 인공 신경망(artificial neural networks; ANN) 해석 방법을 이용하여 학습과 복제를 통해 주방향을 찾아내는 정방향 모델링 기술을 확보하였다.

제 7 장 참고문헌

배기윤, 1999, 레이저 변위계를 이용한 암석절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.

이석민, 1999, 탄화수소 지하 비축기지의 안정적인 운영을 위한 주입용수 수질에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.

이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.

최대용, 1999, 최신 KS규격데이터북, 성안당.

최종근, 2002, 공간정보 모델링, 구미서관.

Andersson, J. and Dverstorp, B., 1987, "Conditional Simulations of Fluid Flow in Three-Dimensional Networks of Discrete Fractures," Water Resources Research, Vol. 23, No. 10, pp. 1876-1886.

Baecher, G. B. and Lanney, N. A., 1978, "Trace Length Bias in Joint Surveys," Proc. of the 19th U. S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 56-65.

Barton, N. R., 1973, "Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints," Engineering Geology, Elsevier, pp. 287-332.

Batycky, R. P., Blunt, M. J., and Thiele, M. R., 1997, "A 3D Field Scale Streamline Based Simulator," SPE Reservoir Engineering, Vol. 12, pp. 246-254.

Batycky, R. P., Thiele, M. R., and Blunt, M. J., 1996, "A Streamline Simulator to Model Field Scale Three Dimensional Flow," Proc of the 5th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Eur Assoc of Geosci and Eng.

Bauer, S. J. and Johnson, B., 1979, "Effects of Slow Uniform Heating on the

Physical Properties of the Westerly and Charcoal Granite," Proc. of 20th U.S. Rock Mechanics Symp., Texas, Jun. 4-6, pp. 7-18.

Beacher, G. B., N. A. Lanney, and H. H. Einstein, 1977, "Statistical Description of Rock Properties and Sampling," Proceedings 18th US Symp. On Rock Mechanics, AIME, 5C1, pp. 1-8.

Bear, J., 1979, *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York.

Bear, J., Tsang, C. F., and Marsily, G., 1993, *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, Academic Press, San Diego.

Bernabe, Y., 1986, "The Effective Pressure Law for Permeability in Chelmsford Granite and Barre Granite," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, Vol. 23, No. 3, pp. 267-275.

Billaux, D., Chiles, J. P., Hestir, K., and Long, J., 1989, "Three-Dimensional Statistical Modelling of Fractured Rock Mass - An Example from the Fanay-Augeres Mine," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, Vol. 26, No. 3, pp. 281-299.

Blunt, M. J., Liu, K., and Thiele, M. R., 1996, "A Generalized Streamline Method to Predict Reservoir Flow," *Petroleum Geoscience*, Vol. 2, pp. 259-269.

Bonnet, E., Bour, O., Odelling, N. E., Davy, P., Main, I., Cowie, P., and Berkowitz, B., 2001, "Scaling of Fracture Systems in Geological Media," *Reviews of Geophysics*, Vol. 39, No. 3, pp. 347-383.

Bour, O. and Davy, P., 1997, "Connectivity of Random Fault Networks Following A Power Law Fault Length Distribution," *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 7, pp. 1567-1583.

Bourbiaux, B., Granet, S., Landereau, P., Noetinger, B., Sarda, S., Sabathier, J.C., 1999, "Scaling-up Matrix-fracture Transfers in Dual-porosity Models:

Theory and Application," SPE 56557 Presented at the 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 3-6 October.

Brar, N. S. and Stesky, R. M., 1980, "Permeability of Intact and Jointed Rock," *Eos*, Vol. 61, p. 1112.

Brown, S. R., 1987, "Fluid Flow Through Rock Joints: The Effect of Surface Roughness," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. B2, pp. 1337-1347.

Brown, S. R., 1989, "Transport of Fluid and Electric Current Through a Single Fracture," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. B7, pp. 9429-9438.

Brown, S. R., 1995, "Simple Mathematical Model of a Rough Fracture," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B4, pp. 5941-5952.

Brown, S. R. and Scholz, C. H., 1985, "Broad Bandwidth Study of the Topography of Natural Rock Surfaces," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, pp. 12575-12582.

Brown, S. R. and Scholz, C. H., 1986, "The Closure of Rock Joints". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. B5, pp. 4939-4948.

Brown, S. R., Caprihan, A., and Hardy, R., 1998, "Experimental Observation of Fluid Flow Channels in a Single Fracture," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. B3, pp. 5125-5132.

Castaing, C., Genter, A., Bourguin, B., Chiles, J.P., Wendling, J., and Siegel, P., 2002, "Taking into Account the Complexity of Natural Fracture Systems in Reservoir Single-phase Flow Modelling," *Journal of Hydrology*, No. 266, pp. 83-98.

Chiles, J.P., 1988, "Fractal and Geostatistical Methods for Modeling of a Fracture Network," *Mathematical Geology*, Vol. 20, pp. 631-654.

Crandall, S. H., Dahl, N. C., and Lardner, T. J., 1978, *An Introduction to the*

Mechanics of Solids, McGraw Hill Inc..

Crane, M. J. and Blunt, M. J., 1999, "Streamline Based Simulation of Solute Transport," *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 10, pp. 3061-3077.

Datta Gupta, A. and King, M. J., 1995, "A Semianalytic Approach to Tracer Flow Modeling in Heterogeneous Permeable Media," *Advances in Water Resources*, Vol. 18, pp. 9-24.

Davis, J. C., 1973, *Statistics and data analysis in geology*, John Wiley & Sons.

Davy, P., Sornette, A., and Sornette, D., 1990, "Some Consequences of a Proposed Fractal Nature of Continental Faulting," *Nature*, No. 348, pp. 56-58.

de Dreyzy, J. R., Davy, P., and Bour, O., 2001, "Hydraulic Properties of Two-Dimensional Random Fracture Networks Following a Power Law Length Distribution: 1. Effective Connectivity," *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 8, pp. 2065-2078.

Dershowitz, W. S. and Einstein, H. H., 1988, "Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 21, pp. 21-51.

Detwiler, R. L., Pringle, S. E., and Glass, R. J., 1999, "Measurements of Fracture Aperture Fields using Transmitted Light: An Evaluation of Measurement Errors and Their Influence on Simulations of Flow and Transport through a Single Fracture," *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 2605-2617.

Dykhuisen, R. C., 1992, "Diffusive Matrix Fracture Coupling Including the Effects of Flow Channeling," *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 9, pp. 2447-2450.

Einstein, H. H. and Baecher, G. B., 1983, "Probabilistic and Statistical Methods

in Engineering Geology-Specific Methods and Examples(Part I: Exploration)," Rock Mechanics and Rock Engineering., Vol. 16, pp. 39-72.

Esaki, T., Du, S., Jiang, Y., Wada, Y., and Mitani, Y., 1998, "Relation between Mechanical and Hydraulic Apertures during Shear-Flow Coupling Test," Proceedings of 10th Japan Symposium on Rock Mechanics, pp. 91-96.

Firoozabadi, A. and Tan, J. C. T., 1994, "Miscible Displacement in Fractured Porous Media: Part II-Analysis," paper SPE/DOE 27837 Presented at the 1997 4th SPE/DOE Ninth Symposium.

Fisher, R., 1953, "Dispersion on a Sphere," Proc. of the Royal Society of London, Vol. A217, pp. 295-305.

Frisak, G. E. and Pickens, J. F., 1980, "Solute Transport Through Fractured Media 1. The Effect of Matrix Diffusion," Water Resources Reseach, Vol. 16, No 4, pp. 710-730.

Gale, J. E., 1982, "The Effects of Fracture Type (Induced versus Natural) on the Stress-Fracture Closure-Fracture Permeability Relationships", Proc., The 23rd U.S. Rock Mechanics Symposium, Berkeley, Aug. 25-27, pp. 290-298.

Gale, J. E., 1987, "Comparison of Coupled Fracture Deformation and Fluid Flow models with Direct Measurements of Fracture Pore Structure and Stress-flow Properties," Proc., The 28th U.S. Symposium of Rock Mechanics, Tucson, Arizona.

Gale, J. E., MacLeod, R., and LeMessurier, P., 1990, "Site Characterization and Validation-Measurement of Flowrate, Solute Velocities and Aperture Variation in Natural Fractures as a Function of Normal and Shear Stress," Stripa Project, TR90-11, SKB, Stockholm.

Gangi, A. F., 1978, "Variation of Whole and Fractured Porous Rock Permeability with Confining Pressure," International Journal of Rock Mechanics

and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 15, pp. 249-257.

Ge, S., 1997, "A Governing Equation for Fluid Flow in Rough Fractures," Water Resources Research, Vol. 33, No. 1, pp. 53-61.

Gentier, S., 1986, Morphologie et comportement hydromechanique d'une fracture naturelle dans une granite sous contrainte normale, Ph. D. dissertation, l'universite d'Oreleans, France.

Gentier, S. and Hopkins, D. L., 1997, "Mapping Fracture Aperture as a Function of Normal Stress using a Combination of Casting," Image Analysis And Modeling Techniques, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, No. 3/4, pp. 359.

Gentier, S., Billiaux, D., and van Vliet, L., 1989, "Laboratory Testing of the Voids of a Fracture," Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 149-157.

Hakami, E. and Larssen, E., 1996, "Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single natural Fracture," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 33, No. 4, pp. 395-404.

Hakami, E. and Barton, N., 1990, "Aperture Measurement and Flow Experiments using Transparent Replicas of Rock Joints," Proc. of the International Symposium on Rock Joints, edited by N. Barton and O. Stephansson, Balkema, Rotterdam, pp. 383-390.

Harrison, J. P. and Hudson, J. A., 1997, Engineering Rock Mechanics : An Introduction to the Principles, Pergamon, UK.

Heard, H. C. and Page, L., 1982, "Elastic Moduli, Thermal Expansion, and Inferred Permeability of Two Granites to 350°C and 55 Megapascals," Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No. B11, pp. 9340-9348.

Heuze, F. E., 1983, "High-Temperature Mechanical, Physical and Thermal Properties of Granitic Rocks-A Review," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 20, pp. 3-10.

Isakov, E., Ogilvie, S. R., Taylor, C. W., and Glover, P., 2001, "Fluid Flow Through Rough Resolution Aperture Determinations," Earth and Planetary Science Letters, No.191, 267-282.

Iwai, K., 1976, Fundamental Studies of the Fluid Flow Through a Single Fracture, Ph. D. dissertation, University of California, Berkeley, USA.

Iwano, M. and Einstein, H. H., 1993, "Stochastic Analysis of Surface Roughness, Aperture and Flow in a Single Fracture," Eurock '93, Proc. of ISRM International Symposium on Safety and Environmental Issues in Rock Engineering, Lisbon, pp. 135-141.

Johns, A. J. and Roberts, P. V., 1991, "A Solute Transport Model for Channelized Flow in a Fracture," Water Resources Research, Vol. 27, No. 8, pp. 1797-1808, 1991.

Keller, A. A., 1998, "High Resolution Non-destructive Measurement and Characterization of Fracture Apertures," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 35, No. 8, pp. 1037-1050.

Keller, A. A., Roberts, P. V., and Blunt, M. J., 1999, "Effect of Fracture Aperture Variations on the Dispersion of Contaminants," Water Resources Research, Vol. 35, No. 1, pp. 55-63.

King, M. J. and Datta Gupta, A., 1998, "Streamline Simulation: A Current Perspective," In Situ, Vol. 22, No. 1, pp. 91-117.

Kitanidis, P. K., 1994, "Particle Tracking Equations for the Solution of the Advection Dispersion Equation with Variable Coefficients," Water Resources Research, Vol. 30, No. 11, pp. 3225-3227.

Koudina, N., Garcia, R. G., Thovert, J. F., and Adler, P. M., 1998, "Permeability of Three-dimensional Fracture Networks," *Physical Review E*, Vol. 57, No. 4, pp. 4466-4479.

Krantz, R. L., Frankel, A. D., Engelder, T., and Scholz, C. H., 1979, "The Permeability of Whole and Jointed Barre Granite," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, Vol. 16, pp. 225-234.

Kulatilake, P. and Wu, T. H., 1984a, "The Density of Discontinuity Traces in Sampling Windows," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, Vol. 21, No. 6, pp. 345-347.

Kulatilake, P. and Wu, T. H., 1984b, "Estimation of Mean Trace Length of Discontinuities," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 17, pp. 215-232.

La Pointe, P. R., Wallmann P. C., and Dershowitz, W. S., 1993, "Stochastic Estimation of Fracture Size through Simulated Sampling," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, Vol. 30, No. 7, pp. 1611-1617.

Lapcevic, P. A., Novakowski, K. S., and Sudicky, E. A., 1999, "The Interpretation of a Tracer Experiment Conducted in a Single Fracture under Conditions of Natural Groundwater Flow," *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 2301-2312.

Lespinasse, M. and Sausse, J., 2000, "Quantification of Fluid Flow : Hydro-Mechanical Behavior of Different Natural Rough Fractures," *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 69-70, pp. 483-486.

Masciopinto, C., 1999, "Particles' Transport in a Single Fracture under Variable Flow Regimes," *Advances in Engineering Software*, Vol. 30, pp. 327-337.

Meyer, P. L., 1970, *Introduction Probability and Statistical Applications*, Addison-Wesley, Amsterdam.

Moore, D. E., Lockner, D. A., and Byerlee, J. D., 1994, "Reduction of Permeability in Granite at Elevated Temperatures," *Science*, Vol. 265, pp. 1558-1561.

Neuzil, C. E. and Tracy, J. V., 1981, "Flow Through Fractures," *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 191-199.

Nicholl, M. J., Rajaram, H., Glass, R. J., and Detwiler, R. L., 1999, "Saturated Flow in a Single Fracture: Evaluation of the Reynolds Equation in Measured Aperture Fields," *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 11, pp. 3361-3373.

Pahl, P. J., 1981, "Estimating the Mean Length of Discontinuity Traces," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, Vol. 18, pp. 221-228.

Persoff, P. and Pruess, K., 1995, "Two-Phase Flow Visualization and Rough-Walled Rock Fractures," *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 1175-1186.

Pollock, D. W., 1988, "Semi Analytical Computation of Pathlines for Finite Difference Models," *Ground Water*, Vol. 26, No. 6, pp. 743-750.

Potter, J. M., 1978, *Experimental Permeability Studies at Elevated Temperature and Pressure of Granitic Rocks*, Rep. LA-7224-T, Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M..

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., 2002, *Numerical Recipes in C++*, 2nd Ed., Cambridge University Press, UK.

Priest, S. D. 1993, *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, London.

Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, "Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys," *International Journal of Rock Mechanics*

and Mining Sciences, Vol. 18, pp. 183-197.

Raven, K. G. and J. E. Gale, 1985, "Water Flow in a Natural Rock Fracture as a Function of Stress and Sample Size," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 22, No. 4, pp. 251-261.

Roko, R. O., Daemen, J., and Myers, D. E., 1997, "Variogram Characterization of Joint Surface Morphology and Asperity Deformation during Shearing," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, No. 1, pp. 71-84.

Rouleau, A. and Gale, J. E., 1985, "Statistical Characterization of the Fracture System in the Stripa Granite, Sweden", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 22, pp. 353-367.

Sahimi, M., 1995, Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock, VCH, New York.

Samaniego, J. A., 1985, Simulation of Fluid Flow in Fractured Rock: A Probabilistic Approach, Ph.D dissertation, Univ. of London.

Schrauf, T. W. and Evans, D. D., 1986, "Laboratory Studies of Gas Flow Through a Single Fracture," Water Resources Research, Vol. 22, pp. 1038-1050.

Summers, R., Winkler, K., and Byerlee, J., 1978, "Permeability Changes during the Flow of Water through Westerly Granite at Temperatures of 100-400°C," Journal of Geophysical Research, Vol. 83, No. B1, pp. 339-344.

Suzuki, K., Oda, M., Yamazaki, M., and Kuwahara, T., 1998, "Permeability Changes in Granite with Crack Growth During Immersion in Hot Water," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 35, No. 7, pp. 907-921.

Swan, G., 1983, "Determination of Stiffness and Other Joint Properties from

Roughness Measurements," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16, pp. 19-38.

Tamagawa, T., Matsuura, T., Anraku, T., Tezuka, K., and Namikawa, T., 2002, "Construction of Fracture Network Model using Static and Dynamic Data," SPE 77741 Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 2 September - 2 October.

Tang, D. H., Frind, E. O., and Sudicky, E. A., 1981, "Contaminant Transport in Fractured Porous Media: Analytical Solution for a Single Fracture," *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 3, pp. 555-564.

Thiele, M. R., Batycky, R. P., Blunt, M. J., and Orr, F. M. Jr., 1996, "Simulating Flow in Heterogeneous Media Using Streamtubes and Streamlines," *SPE Reservoir Engineering*, Vol. 10, pp. 5-12.

Tidwell, V. C. and Glass, R. J., 1994, "X Ray and Visible Light Transmission for Laboratory Measurement of Two-dimensional Saturation Fields in Thin-slab Systems," *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 2873-2882.

Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1951, *Theory of elasticity*, McGraw-Hill, New York.

Tsang, Y. W., 1984, "The Effect of Tortuosity on Fluid Flow Through a Single Fracture," *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 9, pp. 1209-1215.

Tsang, Y. W. and Tsang, C. F., 1989, "Flow Channeling in a Single Fracture as a Two-dimensional Strongly Heterogeneous Permeable Medium," *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 9, pp. 2076-2080.

Tsang, Y. W. and Witherspoon, P. A., 1981, "Hydromechanical Behavior of a Deformable Rock Fracture Subject to Normal Stress," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. B10, pp. 9287-9298.

Tsang, Y. W. and Tsang, C. F., 1990, "Hydrological Characterization of Variable-Aperture Fractures," Proc. The International Symposium on Rock Joints, edited by N. Barton and O. Stephansson, pp. 423-430.

Tsang, Y. W., Tsang, C. F., Neretnieks, I., and Moreno, L., 1988, "Flow and Tracer Transport in Fractured Media: A Variable Aperture Channel Model and Its Properties," Water Resources Research, Vol. 24, No. 12, pp. 2049-2060.

Waite, M. W., Ge, S., Spetzler, H., and Bahr, D. B., 1998, "The Effect of Surface Geometry on Permeability: A Case Study Using a Sinusoidal Fracture," Geophysical Research Letters, Vol. 25, pp. 813-816.

Walsh, J. B., 1981, "Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 18, pp. 429-435.

Yeo, I. W., 1997, Anisotropic Hydraulic Properties of a Rock Fracture under Normal and Shear Loading, Ph. D. dissertation, University of London, UK.

Yoshioka, N., 1994, "Elastic Behavior of Contacting Surfaces under Normal Loads: A Computer Simulation using Three-Dimensional Surface Topographies," Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. B8, pp. 15549-15560.

Zhao, J. and Brown, E. T., 1992, "Hydro-Thermo-Mechanical Properties of Joints in the Carnmenellis Granite," Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 25, pp. 279-290.

Zimmerman, R. W. and Bodvarsson, G. S., 1996, "Hydraulic Conductivity of Rock Fractures," Transport in Porous Media, Vol. 23, pp. 1-30.