

기계시스템 원천기술개발

A Study on the Development of the Key
Technology on Machine Systems

광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 기술 개발

Development of Technology of Structural Health
Monitoring Using Fiber Optic Sensors

한국과학기술원

과학기술부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “기계시스템 원천기술 개발”과제 (세부과제 “광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 기술 개발”) 의 보고서로 제출합니다.

2002 . 9 . 30

주관연구기관명 : 한국과학기술원

주관연구책임자 : 김 천 곤

연 구 원 : 홍 창 선

협동연구기관명 : (주) 도남 시스템

협동연구책임자 : 고 연 완

보고서 초록

과제관리번호	99-NG-01-A-06	해당단계 연구기간	1999.10.1-2002.9.30	단계 구분	2단계 / 2단계
연구사업명	중 사업명	기계시스템 원천기술 개발			
	세부사업명	기계설비요소기술개발사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 기술 개발			
연구책임자	김 천 곤	해당단계 참여연구원수	총 : 14명 내부 : 2명 외부 : 12명	해당단계 연구비	정부: 460,788 천원 기업: 127,500 천원 계: 588,288 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국과학기술원/항공우주공학과		참여기업명	(주) 도남 시스템	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	106
<p>광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 시스템 개발</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 파장이동광섬유레이저 개발 2. 실시간 변형률 및 온도 측정 프로그램 개발 3. 광원 분기 시스템 개발 4. 다중 병렬 채널의 개발 및 다중 지점 변형률 측정 5. 광섬유 센서의 일반 구조물로의 적용 방법 개발 6. 구조물의 온도 및 변형 동시 측정을 위한 광섬유 센서 시스템 개발 7. 광섬유 센서를 이용한 복합재료 압력 탱크의 건정성 모니터링 검사 성공적 실시 8. 협력 업체와의 공동 연구를 통한 상용시스템 개발 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	광섬유, 센서, 기계, 변형률, 모니터링, 시스템			
	영 어	optical fiber, sensor, mechanical, strain, monitoring, system			

요 약 문

I. 제 목 : 광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구개발의 목적은 광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 기술을 개발하는 것이다. 본 연구에서 구조물에 적용할 광섬유 센서는 현재까지 사용되고 있는 구조안전진단용 센서를 대체할 것으로 예상되어 현재 선진국에서도 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구 분야는 국내외적으로 시작한지 얼마 되지 않는 첨단 분야로써 본 연구팀의 기술 수준도 선진국과 대등하다고 여겨지며 향후 산업적/학문적으로 파급 효과가 클 것으로 예상된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1차년도 연구개발목표는 광섬유 WSFL 광원 시스템 구성 및 신호처리 프로그램을 제작하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 WSFL 광원 시스템을 개발하였고 실시간 변형률 측정 프로그램을 개발하였다.

2차년도 연구개발목표는 실제 구조물 적용을 위한 여러 종류의 센서 개발 및 실험을 수행하는 것이다. 이를 위해 WSFL 시스템의 광원 분기 시스템을 개발하였고, 다중 병렬 채널의 개발과 다중지점 변형률 측정 실험을 수행하였다. 또한 광섬유 센서를 이용해 구조물의 동적 특성을 파악하는 실험과 구조물의 온도를 실시간으로 측정하는 시스템을 개발하였다.

3차년도 연구 목표는 통합된 광섬유 센서 시스템 완성 및 광섬유 센서 시스템의 적용 연구이다. 이를 위해 광섬유 센서 안전진단시스템의 모듈 통합화를 통한 단순화 및 경량화를 이룩하였고, 인터넷 활용을 통한 원거리 측정 시스템 개발과 이를 이용한 여러 가지 응용 연구를 수행하였다. 또한 FBG 센서를 실 구조물에 적용할 때 발생하는 여러 가지 문제점들을 파악하였고 이를 해결할 수 있는 방법들을 제안하였다. 마지막으로 구조물의 온도 및 변형률 동시에 측정할 수 있는 광섬유 센서를 개발하였고 이를 응용한 실험을 수행하였다.

IV. 연구개발결과

본 연구개발을 통해 최근 각광받고 있는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 구조안전진단 시스템을 완성하였다. 본 시스템은 핵심 기술인 파장 이동 광섬유 레이저 광원과 이를 구동하고 신호처리를 담당하는 통합 구동 모듈로 구성된다. 본 연구는 벤처 기업과의 긴밀한 협조를 통해 실제 제품화 단계에까지 시스템을 개발하였다. 그리고 실제 구조물로의 적용을 위한 여러 케이스 스터디들을 통해 여러 적용 연구를 수행하였고, 이를 통해 실 구조물에 적용하기 위한 문제점과 해결책을 제시하였다. 결과적으로 본 연구를 통해 개발된 시스템은 수년 내에 실제 현장에 배치되어 여러 대형 기계 구조물의 건전성 판단 시스템으로서 활용될 것으로 기대된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

현재 광섬유 센서는 세계적으로 구조물의 안전진단을 위한 가장 이상적인 방법으로 각광받고 있으나 이에 대한 연구가 시작된 지 얼마 되지 않아 실제 구조물에 적용한 사례가 세계적으로 드물다. 본 연구결과는 구조물의 변형 및 파손을 실시간으로 감지하여 삼풍백화점 사고나 성수대교 붕괴와 같은 불의의 사고를 미연에 방지할 수 있고 대형기계나 항공우주구조와 같은 기계구조물의 이상 유무를 판단할 수 있는 구조안전진단 시스템 등에 활용될 수 있다. 이를 위해 실제 적용과 시스템 개선을 위한 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

SUMMARY

I. Title : Development of Technology of Structural Health Monitoring Using Fiber Optic Sensors

II. Objective and Need

The objective is to develop the health-monitoring technique using a smart technique in large structures. This technique will be very fruitful in application to real structures such as dam, bridge, nuclear plant, oil-tanker, etc. In addition, the condition of the structure can be notified real-timely so that the structure can be prevented from catastrophe beforehand, which will reduce the cost to repair and to maintain structure. Moreover, the development of this technology will be influential in over the society. Therefore, this technique is worth researching.

III. Scope

In the first year, we successfully accomplished the objective of the project, the development of optical fiber sensor system such as WSFL(Wavelength Swept Fiber Laser), the light source of the system, and the design of the computer code for the signal processing.

In the second year, we performed the several experiments in order for the application of the developed system to the actual fields. The module dividing the light source was developed to increase the quantity of sensors. the dynamic and structural analysis was carried out with the sensor system. Moreover, the system measuring the temperature with optical fiber sensor was developed.

In the third year, the final objective of the project is the development of the optical fiber sensor system for monitoring the structural health in-situ. The WSFL was upgraded to guarantee its stability for a long term and the united module for driving the system was developed. In addition, the several problems induced from the application of fiber Bragg grating (FBG) sensor were solved. Finally, the sensor system was developed for measuring temperature and strain

of the structure at the same time with only one optical fiber sensor.

IV. Results

We have successfully developed the united optical fiber sensor system for the health-monitoring of the structure. The system was composed of the WSFL, the laser source, and the united module for driving system. For the application of fiber optic sensor to the real structure, we performed the several experiments. In addition, the several problems induced from the application of fiber Bragg grating (FBG) sensor were also solved.

V. Application plan

Recently, fiber optic sensors were widely used in various fields. The technical abilities and skills of optical sensors are, however, in initial stage in the developed countries. Moreover, the applied cases with fiber optic are very rare to be found. Therefore, this results will be very fruitful in application to real structures such as dam, bridge, nuclear plant, oil-tanker, etc. In addition, the condition of the structure can be notified real-timely so that the structure can be prevented from catastrophe beforehand, which will reduce the cost to repair and to maintain structure. This technology can also be applied to the advanced field, such as aerospace structure, military equipment, etc.

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction

Chapter 2 State of domestic and foreign technical development

Chapter 3 Substances and results of research

Section 1 Improvement of fiber optic sensor system for health monitoring of structures

Section 2 Problems and solutions on applying FBG sensors to the fields

Section 3 Development of a hybrid fiber optic sensor for the stimulated monitoring of temperature and strain of a structure

Section 4 Cure monitoring of composite using hybrid fiber optic sensor

Section 5 Health monitoring of filament wound composite pressure vessel using FBG sensors

Chapter 4 Achievement degree of goal of research and contribution

Chapter 5 Application plan of results

Chapter 6 Survey of foreign scientific and technical informations

Chapter 7 References

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 광섬유 센서 구조 안전 진단 시스템의 성능 향상

제 2 절 브래그 격자 센서의 실제 구조물 적용에 따른 문제점 및 해결 방안

제 3 절 구조물의 온도 및 변형 동시 측정을 위한 광섬유 센서 시스템 개발

제 4 절 광섬유 센서를 이용한 복합재료의 성형 모니터링

제 5 절 광섬유 센서를 이용한 필라멘트 외인당된 복합재료 압력 탱크의 건전성 모니터링

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 연구개발과제의 개요

교량이나 원자력 발전소 시스템과 같은 대형구조물과 고속전철, 잠수함, 항공기와 같이 복잡한 구조물은 사고시 많은 인명피해를 유발하는 대형사고를 초래하므로 이러한 비상사태를 조기에 발견하고 미연에 방지하기 위한 구조물의 적절한 유지보수를 위해서는 효과적인 구조안전진단 기술이 필요하다. 또한 이러한 구조물의 경우 시스템의 안전 유지를 위한 검사방법이 매우 복잡하고 전체 시스템의 광범위한 검사가 어려우므로, 이러한 단점 개선과 함께 더 효율적인 구조물의 진단기술이 필요하며, 이러한 구조물 스스로 외부 환경 변화에 능동적으로 대응할 수 있는 구조물에 대한 연구의 필요성이 대두되었다. 구조물 자체가 외부환경의 변화를 스스로 감지하고 능동적으로 대처하는 기능을 가진 구조물을 스마트 구조물(smart structure) 또는 지능 구조물(intelligent structure)이라고 한다. 스마트 구조물은 유기체와 유사하게 외부 환경 변화 및 구조물 자체의 거동과 손상 여부를 감지하는 신경계에 해당하는 센서와 센서로부터 취득된 신호를 처리하고 판단하여 적절한 응답을 할 수 있는 정보를 제공하는 두뇌계인 중앙처리장치, 그리고 중앙처리장치로부터 보내진 신호에 따라 능동적으로 작동하는 근육계에 해당하는 작동기로 구성된다. 스마트 구조물의 신경계인 센서로는 압전 센서나 광섬유 센서(FOS : fiber optic sensor), 반도체 센서, 금속 박막 센서 등이 이용되며 작동계에는 압전세라믹이나 형상기억합금(shape memory alloy), ER(electro-rheological)유체, 그리고 MR(magneto-rheological)유체 등이 이용된다. Fig. 1.1은 이러한 스마트 구조물의 개념도이다.

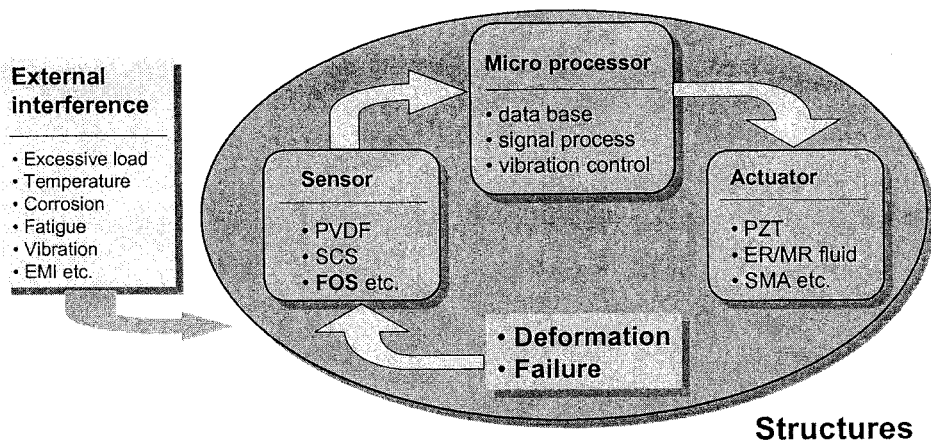


Fig. 1.1 Concept of smart structure.

특히 광섬유 센서를 이용하여 감지계를 구성하는 경우, 광섬유 재질이 실리카

(SiO₂) 계통의 전기절연체이므로 전자기파의 영향을 받지 않는 장점이 있으므로 전자기파 환경이나 구조물의 운용 중에 사용할 수 있으며 온도특성이 우수하여 사용 온도 범위가 넓다. 또한 크기가 작고 가벼우므로 구조물에 적용할 경우 무게 집중 효과가 적으며, 직경이 매우 작고 유연하여 사용자가 원하는 크기로 센서를 제작할 수 있으며 주재료의 물성을 저해하지 않고 재료 내부에 삽입이 용이하다. 또한 광섬유 센서를 복합재료에 삽입할 경우에는 광섬유가 복합재료 보강섬유와 성질이 비슷하여 삽입시 구조물의 강성이나 강도의 저하가 거의 없다. 따라서 구조물 제작시 광섬유 센서를 삽입하면 구조물의 제작 과정을 모니터링 할 수 있고 구조물이 제작된 후에는 삽입된 상태 그대로 구조물의 거동 및 환경 변화 측정이 가능하다. 또한 정보 전달 매체인 광섬유는 대용량의 정보를 손실 없이 먼 거리까지 전송할 수 있는 장점이 있으며 현재 통신망이 점차 광섬유로 대체되어가는 상황이므로 광섬유 센서를 스마트 구조물에 적용시 외부 구조물과의 연계 측면에서 통합된 사회기반구조물(infra-structure)을 다른 센서에 비해 용이하게 구성할 수 있다. 기존의 감지계와 비교하여 많은 장점을 가지고 있는 광섬유 센서는 향후 기존의 감지계를 대체할 것으로 예상되고 있다.

그리고 광섬유 센서를 이용한 구조물의 안전진단을 위한 본 연구는 아래의 Fig. 1.2 에서와 같이 광섬유 센서 기술, 광원 및 시스템 구성 기술, 구조물에의 광섬유 적용 기술, 신호처리 기술, 구조거동 분석 기술 등이 유기적으로 연결되며 복합적으로 연구·개발되어야 한다.

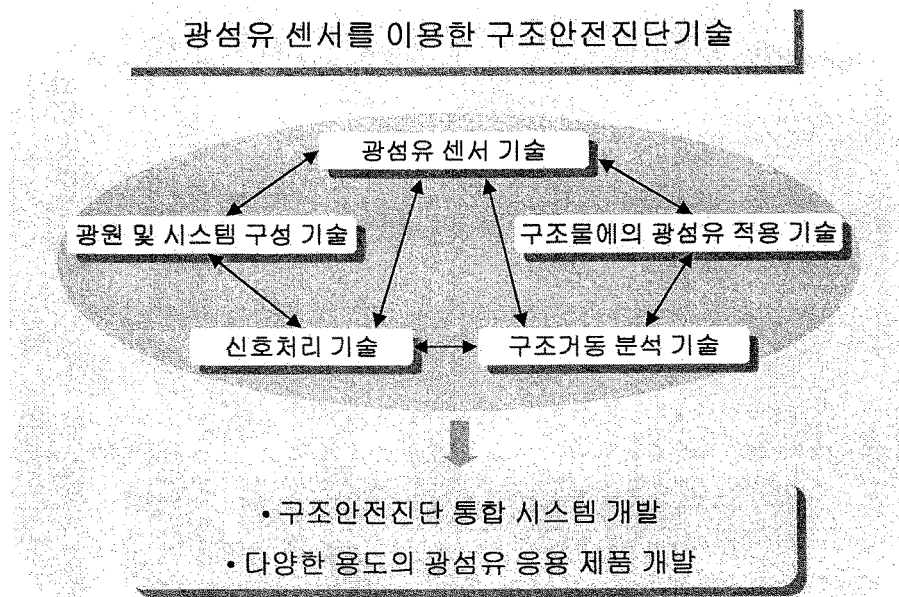


Fig. 1.2 Chart of health monitoring system using fiber optic sensor

본 연구개발의 최종목표는 스마트 구조기법을 이용한 대형기계설비의 안전진단

기술의 개발로써 2단계가 완료되는 시점에 기계설비 및 항공기 구조물에 응용 가능한 광섬유 구조안전진단 시스템을 개발하는 것이다. Figure 1.3은 2단계에서 수행된 연구 내용이다.

1차년도 연구개발목표는 광섬유 WSFL 광원 시스템 구성 및 신호처리 프로그램을 제작하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 WSFL 광원 시스템을 개발하였고 실시간 변형률 측정 프로그램을 개발하였다.

2차년도 연구개발목표는 실제 구조물 적용을 위한 여러 종류의 센서 개발 및 실험을 수행하는 것이다. 이를 위해 WSFL 시스템의 광원 분기 시스템을 개발하였고, 다중 병렬 채널의 개발과 다중지점 변형률 측정 실험을 수행하였다. 또한 광섬유 센서를 이용해 구조물의 동적 특성을 파악하는 실험과 구조물의 온도를 실시간으로 측정하는 시스템을 개발하였다.

2단계의 마지막 3차년도 연구 목표는 통합된 광섬유 센서 시스템 완성 및 광섬유 센서 시스템의 적용 연구이다. 이를 위해 광섬유 센서 안전진단시스템의 모듈 통합화를 통한 단순화 및 경량화를 이룩하였고, 인터넷 활용을 통한 원거리 측정 시스템 개발과 이를 이용한 여러 가지 응용 연구를 수행하였다. 또한 FBG 센서를 실 구조물에 적용할 때 발생하는 여러 가지 문제점들을 파악하였고 이를 해결할 수 있는 방법들을 제안하였다. 마지막으로 구조물의 온도 및 변형률 동시에 측정할 수 있는 광섬유 센서를 개발하였고 이를 응용한 실험을 수행하였다.

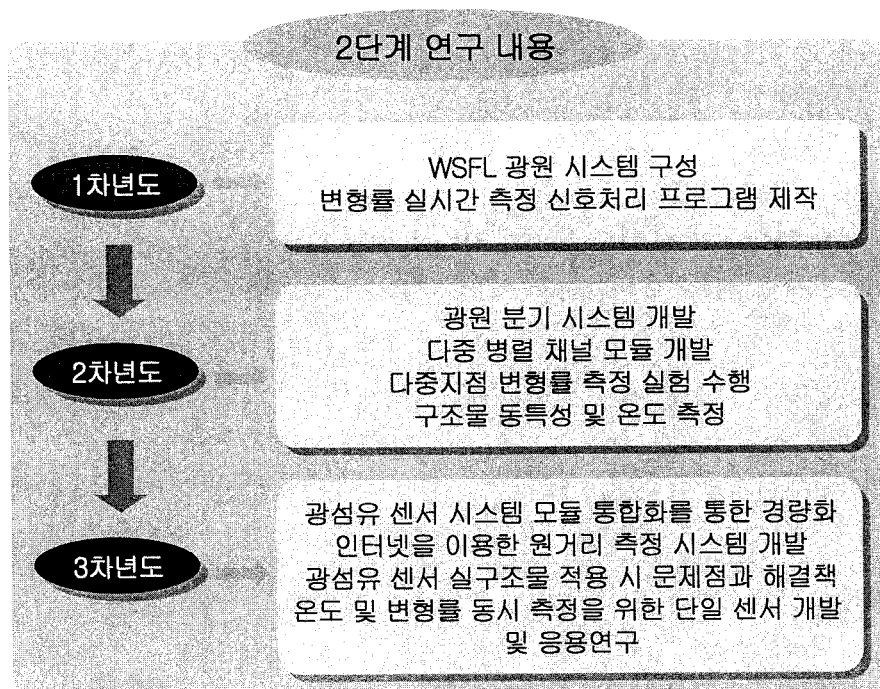


Figure 1.3 Scope of research at the second stage

제 2 장 국내외 기술개발 현황

광섬유 센서는 군수산업과 일반산업에 광범위하게 적용되고 있으며 의료기기 및 환경 분야 센서로 많이 적용되고 있다. 그러나 실제 구조물에 대한 적용은 광섬유 센서가 전투기, 위성체 및 잠수함과 같은 군수 및 항공우주와 같은 첨단 분야에 적용되고 있으므로 이에 대한 구체적인 자료의 비공개로 인해 자료가 부족하고 접근이 쉽지 않다. 광섬유 센서는 잠수함이나 군함의 음향탐지기, 항공기의 구조진단 센서체계 및 위성체의 센서계로 많이 적용된다고 알려져 있다. 광섬유 센서를 항공우주 등과 같은 첨단 분야의 적용은 이 분야에서 가장 앞서 있는 미국의 경우 역시 80년대 중반부터 비행체의 변형률 측정 및 미사일과 로켓 등 엔진의 motor case 실험 등에 적용되고 있다. 그러나 실제 현장의 적용은 90년대 들어 기초적인 연구가 시도되고 있는 실정이다.

선진국의 연구는 광섬유 센서 기술에 대한 기초 기술 개발이 대부분 성숙 단계에 접어들고 있으며 그에 따라 실제 항공기 구조물에 응용하는 연구를 시작하고 있다. 향후 발전 추세는 센서가 구조물과 일체가 된 구조물 제작에 대한 연구가 더욱 가속화할 것으로 보이며 여러 개의 센서에 의한 구조 안전 진단을 위한 인공 지능 기법과의 연계가 본격화할 것으로 보인다. 일반 구조물에의 적용은 주로 토목, 건축과 같은 기간산업시설에 많이 적용되고 있으며 실제 구조물에 적용된 구체적인 예는 다음과 같다.

1. 온도 보상을 한 FBG 센서로 복합재료 보강재를 사용한 교량의 변형률 모니터링(1997, 미국)
2. 실제 공기 부양 쌍동선의 모형에 FBG센서를 적용하여 굽힘 모멘트와 과도로 인한 Slamming force를 측정(1997, 노르웨이)
3. 자중, 바람등으로 인해 30 km 길이의 송전선에 작용하는 하중을 FBG 센서로 모니터링(1997, 일본)
4. F-15 전투기의 날개에 가해지는 동하중에 의한 피로시험을 EFPI 센서로 수행(1991, 미국)
5. FBG 센서를 이용하여 수중 음향파(AE)를 탐지함으로써 수중 물체 감지(1999, 일본)
6. FBG 센서 시스템을 이용하여 수로 개폐문(Waterway lock gate)의 변형률 및 파손 모니터링(2000, 프랑스)

7. C/KC-135 기의 부식 측정 및 감시(1996, 미국)
8. Braunschweig 공항의 유도로(taxiway)에서의 국부적 교통량 모니터링(2000, 독일)
9. 1:20 축소 쌍동선 모형의 탄성 거동 특성을 파악(1996, 노르웨이)
10. 실제 운용중인 쇄빙선의 프로펠러에 부딪히는 얼음의 영향 연구(1996, 캐나다)
11. 훈련선 SOJI-MARU호의 건전성 평가와 운행정보 획득(1998, 일본)
12. 해군 고속순찰정의 건전성 감시용 시스템 제작(1999, 노르웨이)
13. FBG 센서 시스템을 이용하여 Waterjet의 동적 응답특성 모니터링(1999, 미국)
14. HOPE-X 복합재 구조의 변형률과 온도의 동시측정을 통해 성형모니터링(일본)
15. 우주구조물 ASTREX의 수동, 능동 진동제어를 위한 연구수행(진행중)
16. F-22의 Avionics 시스템에 Fiber optic data transmission 기술 채택(진행중)
17. JSF(Joint Strike Fighter)에 FBL(Flight-by-Light) Control System 적용(진행중)

국내의 광섬유 스마트 구조물에 관한 연구는 개별적 광섬유 센서에 대한 기초적인 수준이다. 광섬유 센서는 광학, 전자, 기계 분야가 결합된 복합적인 분야로 각 분야의 균형된 수준이 요구되나 국내의 실정은 선진국에 비해 많이 뒤떨어져 있다. 90년대 초부터 일부 대학 및 기업 연구소에서 광섬유 스마트 구조물에 대한 연구가 진행되고 있으나, 광섬유 센서 관련 기간산업이 제대로 갖추어져 있지 않고, 개별적인 센서에 대한 연구가 제한적으로 진행되고 있다. 최근에 광섬유 센서를 이용하여 실험실 규모에서 여러 점에서의 변형률을 한 가닥의 광섬유에 배열된 센서를 이용하여 측정하는 다점측정이 성공적으로 수행된 바 있다.

국내에서 광섬유 센서를 사용한 스마트 구조물에 대한 연구를 수행하고 있는 기관은 손에 꼽을 정도로 작다. KAIST 항공우주공학과에서는 90년대 초부터 광섬유

센서 및 이를 응용한 구조물에 대한 연구를 활발히 진행하고 있으며 본 기관에서 행해지고 있는 연구가 국내에서 이루어지고 있는 광섬유를 이용한 스마트 구조물에 대한 연구의 대부분이라고 할 수 있다. 또한 국내 산업 분야의 고른 발전이 이루어지지 않아 개별적 광섬유 센서에 대해서는 기초적인 수준이나, 일부 기술에서는 선진국과 본 기관의 기술이 대등하다. 그러나 최근에는 몇몇 벤처 회사와 연구실에서 광섬유 센서를 이용한 구조물의 안전 진단 및 기타 센서기술로서 많은 활용을 시도하려는 사례가 많이 보고 되고 있다. 그리고 기존 센서로 접근이 어려웠던 분야에 광섬유 센서를 적용하려는 시도들이 항공분야 및 여러 민간 부분에서 나타나고 있는 실정이다.

하지만 아직까지도 연구실 수준에서의 결과를 실 구조물에 적용하기에는 여러 문제점을 내포하고 있으며 이를 해결하기 위한 후속 연구들이 계속적으로 진행 중에 있다. 따라서 몇 가지 실질적인 적용 문제들이 해결된다면 기존의 센서 시스템을 교체하는 획기적인 기회를 가질 수 있을 것으로 예상된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 광섬유 센서 구조 안전 진단 시스템의 성능 향상

1. 광원 안정화 및 시스템의 단순화

본 연구에서 사용되는 광섬유 센서 구조 안전 진단 시스템은 1차년도 연구를 통해 개발되었고 2차년도의 많은 적용 연구를 통해 그 성능을 검증하였다. 1, 2차 년도의 연구를 통해 본 과제를 통해 요구되는 목표 성능 치를 달성하였다. 그러나 2차년도에는 실험실 수준의 규모에서 개발된 시스템을 비교적 단시간 동안 적용한 연구가 수행되었다. 따라서 실제 구조물에 적용하기 위해서는 시스템을 장시간 사용할 때 그 안정성이 보장되어야 하며 실제 적용분야에서 사용자가 사용하기 쉽도록 구동 방법을 단순화해야 한다. 이를 위해 진단 시스템의 여러 부분들을 하나의 모듈로 구성하는 등의 시스템 단순화가 필요하다.

따라서 본 3차년도 연구를 수행하면서 시스템의 장시간 안정성을 확보하기 위해 WSFL 광원 시스템을 개선하였다. 그리고 여러 부분으로 나누어져 있는 광 신호 취득 부분과 신호 처리부 등, 기타 부분들을 하나의 모듈로 간략화 하였다.

가. 광원 안정화

WSFL 광원은 광세기가 우수하여 광분할기를 이용하여 여러 채널을 구성할 수 있었다. 그리고 각 채널에 여러 센서가 구성되어 있는 한 가닥의 광섬유를 연결함으로써, 하나의 광원을 이용한 다점 변형 측정을 성공적으로 수행하였다. 그러나 본 시스템의 경우, 광원 시스템에 포함되는 광 부품들의 온도 안정성이 불확실해 장시간 작동시 일정한 파장 대역의 광원이 생성되지 못하고 점점 파장대역이 이동하는 문제점을 갖고 있었다. 그러나 이러한 문제점을 해결하기 위해, 신호 처리부에서 일정 간격으로 파장 이동량을 보상해 주는 작업을 수행하였다. 하지만 이러한 보상 방법은 파장 이동량을 보상해 주는 작업으로 인해, 변형량 측정을 위한 신호 취득 속도에 제한을 발생시켜 높은 속도로 변화하는 변형량을 측정하는 것이 불가능하였다.

따라서 본 연구에서는 WSFL 내의 여러 광소자들 중에 주변 온도에 의해 가장 영향을 크게 받는 부품이 무엇인지를 판단하는 실험을 수행하였다. 이를 통해 페브리-페로 필터가 주위 온도 변화에 민감하게 반응하여 오차를 발생시킨다는 점을 찾아내었다. 이러한 오차를 줄이기 위해 Fig. 3.1.1에서와 같이 패브리-페로 필터 위에 냉각판을 부착하였다. 그리고 이러한 냉각판의 온도를 조절할 수 있도록 온도 조절 회로부를 추가하였고, 온도 조절기를 피드백 조절해 주기 위한 기준 신호를 취득하

기 위해 주변 온도에 고립되도록 설계된 FBG 센서(Bragg Photonics Inc., $\lambda_B=1550.430$ nm)를 이용하였다.

나. 시스템 단순화

기존의 광섬유 센서 구조 안전 진단 시스템은 WSFL 광원 외에 WSFL을 구동할 수 있도록 삼각파를 구현해 주는 함수 발생기, 디지털 신호 처리를 위한 전자회로부, 시간 영역을 주파수 영역으로 상사시켜주는 에탈론, 에탈론 전원 공급장치, 온도 보상 및 에탈론 신호의 주파수 영역으로의 상사를 위한 기준 신호를 알려주는 기준 FBG 센서 그리고 광검출부 모듈 이렇게 5개의 큰 부분으로 분리되어 있다. 그리고 진단 시스템이 복잡하기 때문에 실제 구조물에 적용 시 시스템의 이동 및 작업 시 불편 사항이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 부분들을 하나의 모듈로 통합한 통합 구동 모듈을 개발하였다.

Fig. 3.1.2는 통합 구동 모듈을 보여주는 것으로서 이전에 언급한 5개의 장치들이 하나로 통합되어 있으며 또한 광원의 온도 보상을 위한 조절 회로부가 포함되어 있다. 이를 통해 숙련자가 아닌 일반인들도 쉽게 진단 장비를 구동할 수 있도록 시스템이 단순화되었다. 따라서 본 시스템은 Fig. 3.1.1(b)에서 보여지는 WSFL 광원과 Fig. 3.1.2(b)의 통합 구동 모듈 두 개의 시스템만으로 간략하게 구성된다. 이를 통해 많은 활용 분야에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 예상하며 또한 일반인들이 쉽게 사용할 수 있도록 시스템이 간단화 되어, 안전 진단 시스템의 보급 속도가 한층 빨라질 것으로 예상된다.

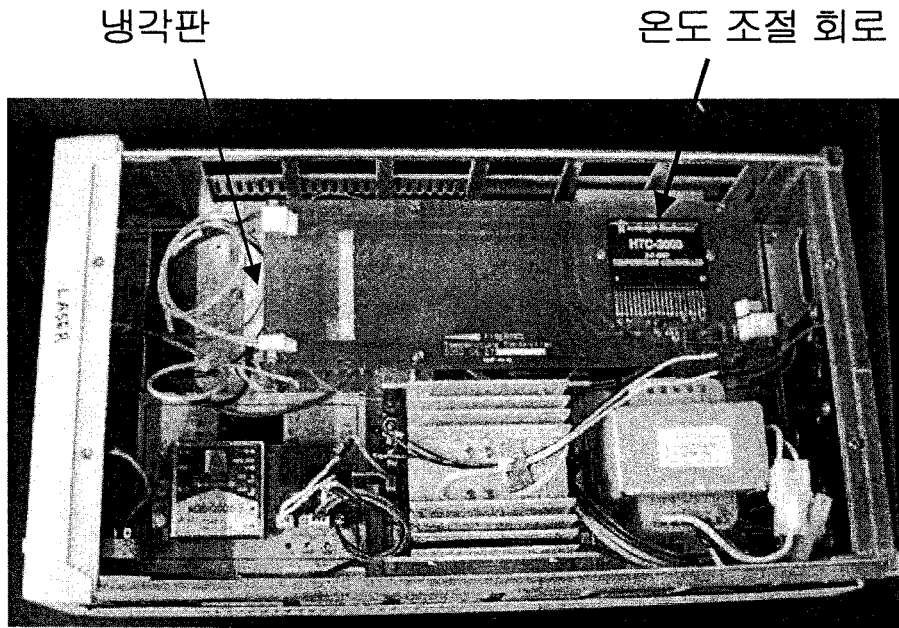
다. 온도 안정성 실험

두 개로 시스템으로 간단화 된 전체 안전 진단 시스템의 WSFL 광원 부분의 장시간 온도 안정성을 검증해 보기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

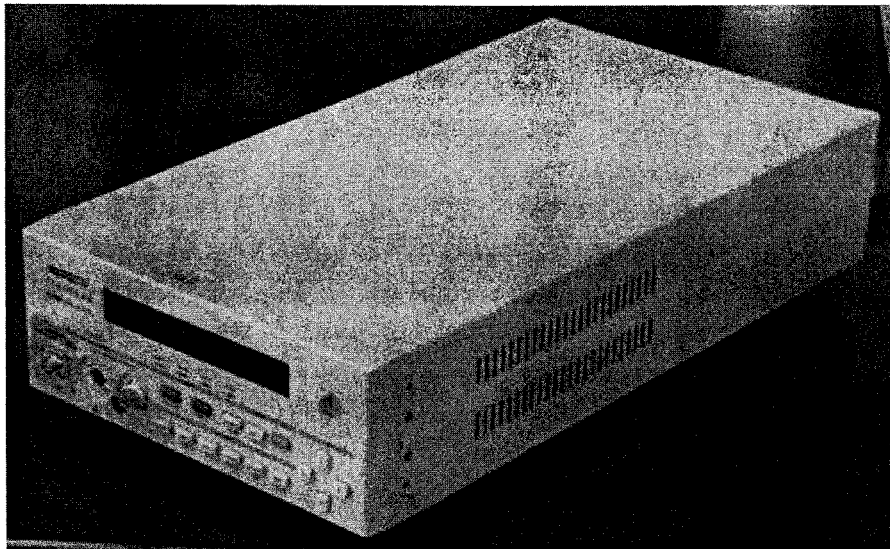
Fig. 3.1.3 에서와 같이 주변 온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 항온 챔버 내에 기준 FBG (Bragg Photonics Inc., $\lambda_B=1550.430$ nm)를 넣고 본 연구에서 새롭게 개발된 WSFL 광원과 통합 구동 모듈에 연결하였다. 온도 변화가 없는 상태에서 챔버 내의 FBG 센서의 브래그 파장의 이동량을 측정함으로써 WSFL 광원이 어느 정도 일정하게 광대역 광원을 발생시키는지 측정해 보았다. 본 실험을 위해 기준 FBG 센서는 어떠한 변형도 받지 않아야 한다. 따라서 온도에 의한 파장 변화를 최소화하기 위해 항온 챔버 내에서 주위 온도를 28°C로 일정하게 유지하도록 조절하였다.

Fig. 3.1.4 는 항온 챔버 안에 넣어놓은 기준 FBG 센서의 반사 파장 즉, 브래그 파장의 이동량을 30시간 동안 1초 간격으로 측정한 결과이다. 본 결과 그래프를 보면, 30시간 동안 측정된 결과의 최대값과 최소값 사이의 차이가 0.0029 nm 발생하

였고, 이는 변형량으로 환산하면 약 2.4 μ -strain에 해당되는 크기이다. 따라서 본 차년도에 개선된 시스템은 이전 시스템에 비해 드리프트 현상이 제거되었고, 잡음 정도도 약 75%정도 감소되어 기존 시스템에 발생했던 문제점들을 모두 제거하였다. 따라서 실제 기계구조물이나 대형 인프라 구조물의 장시간 모니터링에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.



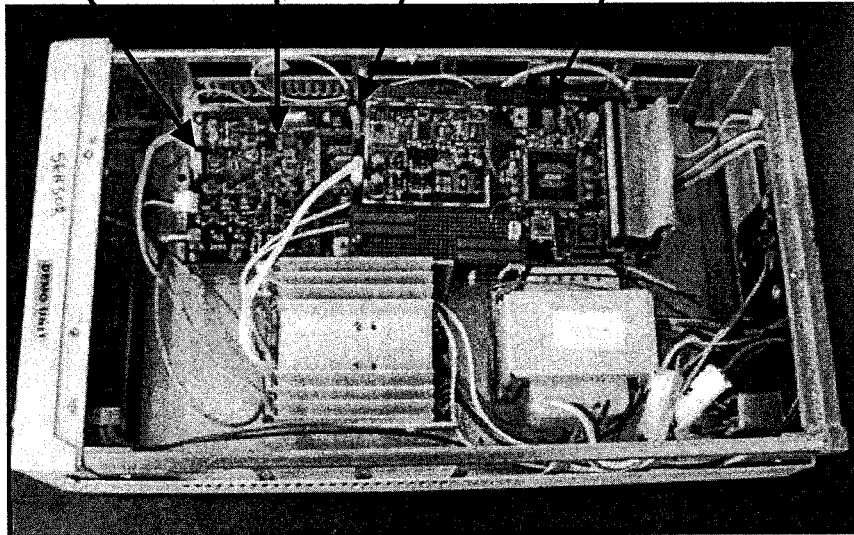
(a) WSFL 내부



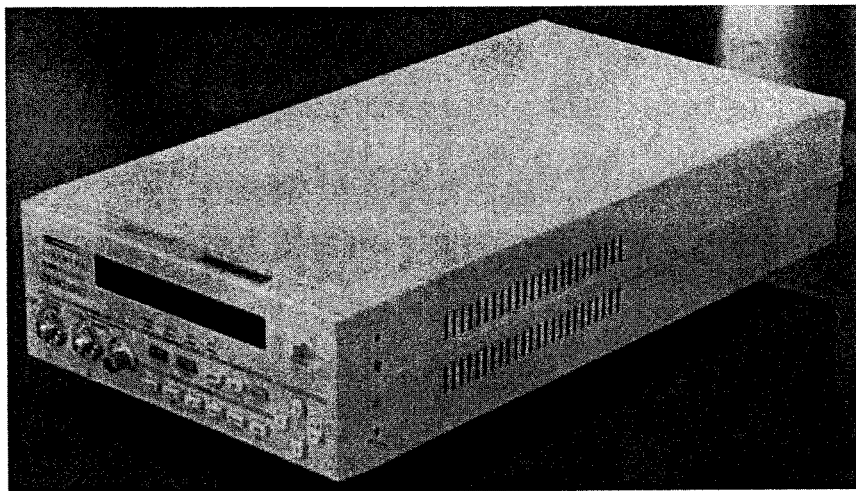
(b) WSFL 외부

Fig. 3.1.1 냉각팬과 온도조절회로를 이용한 온도 보상 WSFL 광원

에탈론 함수 발생기 광검출기 온도보상 및 신호 처리부



(a) 통합 구동 모듈 내부



(b) 통합 구동 모듈 외부

Fig. 3.1.2 WSFL 구동 및 통합 신호처리를 위한 통합 구동 모듈

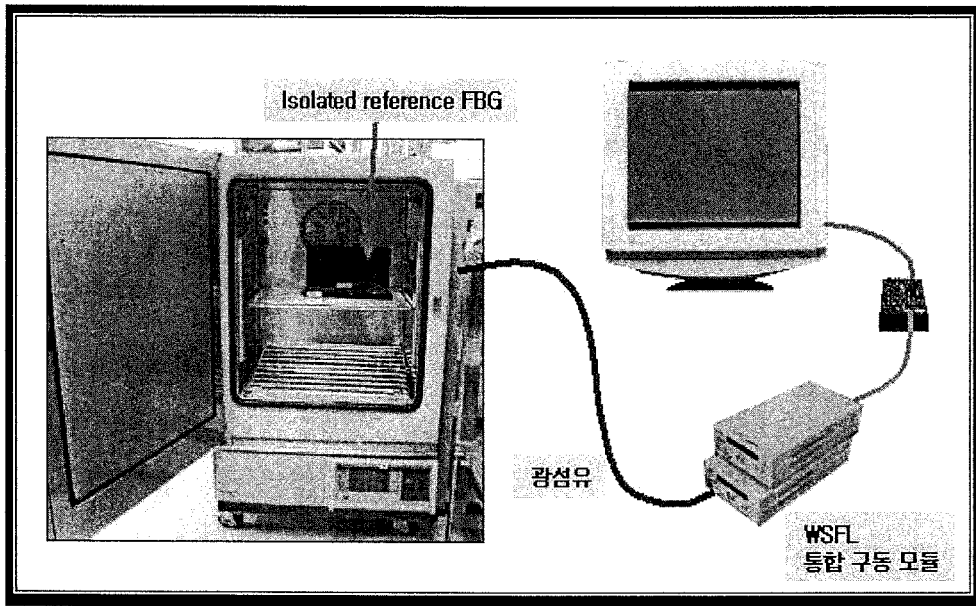


Fig. 3.1.3 항온 챔버 내의 FBG 센서를 이용한 WSFL 온도 안정성 실험.

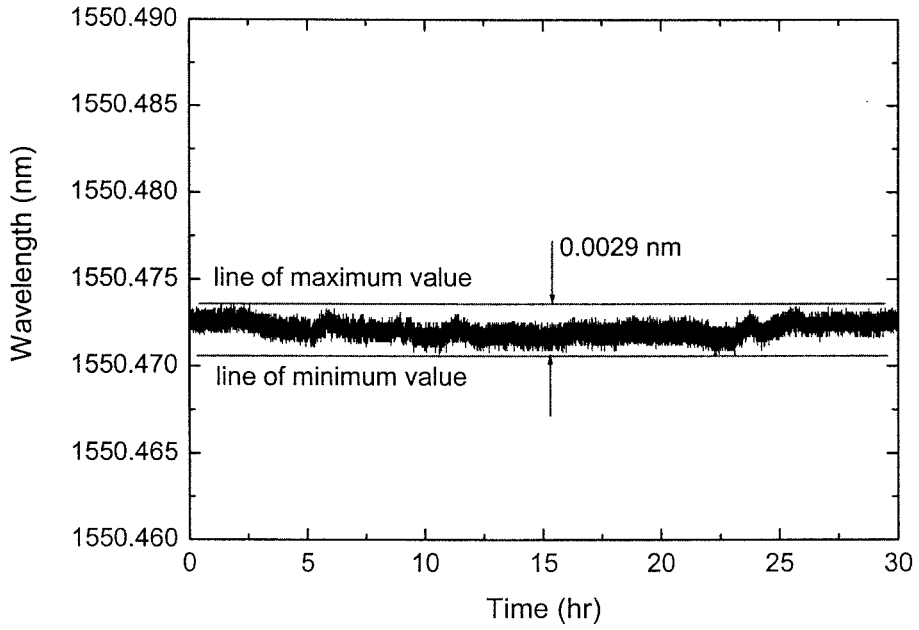


Fig. 3.1.4 30시간 동안의 항온 챔버 내의 FBG 센서 브래그 파장 이동량 측정 결과

2. 인터넷을 이용한 원거리 변형률 모니터링

본 절에서는 TCP/IP 프로토콜을 통한 인터넷 회선을 이용하여 원격지에 있는 FBG 센서시스템을 조종하여 복합적층판의 실시간 변형률을 모니터링하고자 한다.

기존에 통신망용으로 설치되어있는 전화선이나 광통신용 광섬유 네트워크를 이용하여 원격지로부터의 하중상태를 모니터링하는 이 방법은 센서부와 모니터링 컴퓨터 사이에 별도의 케이블을 설치하지 않아도 되는 장점이 있으며, 원자력 발전소나 교량과 같이 센서부착지점에 사람이 상주하여 구조물의 하중상태를 상시모니터링 하기가 어려운 경우 시스템 운용에 대한 편의성을 제공한다.

본 연구에서는 10개의 FBG 센서가 삽입된 날개모형을 복합재로 일체 성형하여 제작하였고, 원격지의 복합재구조물에 삽입된 FBG 센서와 센서 시스템을 인터넷전용회선망을 통해 원거리에서 조종하여 변형률로 표시되는 구조물의 하중상태를 실시간 모니터링 하였다.

가. 시스템 구성 및 실험 방법

(1) 실시간 신호처리 및 전송을 위한 시스템

구성된 광섬유 FBG센서 시스템을 이용하여 원격지로부터의 실시간 구조 변형률 모니터링을 하기 위해 graphic user interface(GUI)를 지원하는 National Instrument사의 소프트웨어인 LabVIEW를 이용하여 신호처리 및 전송프로그램을 개발하였다. 신호처리 프로그램은 패브리-페로 에탈론을 이용하여 파장에 관련된 좌표를 생성하는 과정과, 주어진 좌표에 대해 각 센서의 중심파장 변이를 이용해 변형율을 계산하는 과정의 두 단계로 구성되어 있다. Fig. 3.1.5의 그림에서 보여진 바와 같이 전체 시스템에는 두 대의 컴퓨터가 사용되게 되는데 원격지에 있는 컴퓨터는 데이터 송신용 서버역할을 하며 다른 하나는 수신용 클라이언트로써 화면에 실시간으로 변형률을 모니터링 해주는 역할을 한다. 변형률 계산용 신호처리 프로그램의 위치는 전용회선의 속도 및 데이터의 양에 따라서 서버용 컴퓨터에 위치할 수도 있으며 클라이언트용 컴퓨터에 위치할 수도 있다. 클라이언트는 원격지에서 서버를 비롯한 신호처리 시스템 전체를 조종하는 역할을 하며 서버는 원격지에있는 센서로부터의 초기신호 또는 변형률로 신호 처리된 신호를 원거리에 있는 클라이언트로 전송하는 역할을 한다.

(2) 시편제작 및 실험방법

원격지에서의 구조물의 변형률을 실시간으로 측정하는 실험을 위해 (주)한국화이버사의 CU-125 NS graphite/epoxy 프리프레그 테이프를 사용하여 시편을 제작하였

다. 시편은 $[0_3/90_3]_s$ 의 적층순서로 적층하였다. 시편의 형상과 크기 그리고 센서 위치는 Fig. 3.1.6에 나타내었다. 센서 라인 1에 5의 센서, 센서 라인 2에 5개의 센서로 전부 10개의 센서를 시편중앙에 동일 간격으로 삽입하여 오토클레이브에서 시편과 함께 동시성형을 하였다.

변형을 모니터링을 위한 실험 방법은 원격지에 있는 날개형태의 복합재 구조물에 정현파 형태의 동하중을 가하여 멀리 떨어져 있는 모니터링 터미널로부터의 변형률을 얻어내는 것이다. WSFL광원을 위한 페브리-페로 필터에 부가한 삼각파의 주파수는 200 Hz 로 하였고 따라서 센서에서 나오는 신호는 100 Hz 까지 관찰이 가능하다.

나. 실험결과 및 고찰

제작된 복합재 날개를 Fig. 3.1.5와 같이 지그에 수평으로 고정시킨 다음 보가 천천히 움직이도록 날개 끝단에 추를 부착해 추가질량을 가한 후 초기 변위를 준 후에 자유진동을 시켰다. 보가 자유진동하는 동안 두 센서라인의 10개의 센서에서 얻어지는 신호는 컴퓨터에 저장되는 동시에 실시간으로 신호 처리되어 클라이언트 컴퓨터를 통하여 모니터링 하였다. Fig. 3.1.7은 센서라인 1에서의 5개 센서에 대한 변형률 모니터링 상황을 나타내고 있다. 복합재 날개의 지지점으로부터 날개 끝단까지 위치한 5개의 FBG 센서로부터 취득된 변형률의 값은 끝단으로 갈수록 변형의 크기가 작아지는 하중상태를 실시간으로 보여주고 있으며 연속적으로 변화하는 동하중에 대해서도 끊김 없이 안정된 신호처리 결과를 보여주었다. 신호처리부를 서버에 설치한 경우나 클라이언트용 컴퓨터에 설치한 경우 모두 안정적으로 원거리 변형률 모니터링이 가능함을 보였으며 안정된 고속 통신회선을 사용하는 경우 신호처리부를 클라이언트용 컴퓨터에 설치하여 서버의 용량을 줄일 수 있고 좀 더 세부적인 시스템 조절이 가능하였다.

이러한 실험 결과로부터 광섬유 FBG센서를 이용하여 원격지의 구조물에 대하여 여러 지점의 동적 변형률을 동시에 측정함으로써 구조물의 하중상태를 모니터링 할 수 있음을 확인하였다. 이러한 장점을 이용할 경우 별도의 신호전송 라인을 설치하지 않고 기존에 설치되어있는 통신망을 이용하여 쉽게 시스템을 구성할 수 있으며, 센서의 부착범위가 넓은 대형구조물의 변형률 모니터링과 같은 경우에도 한 대의 모니터링용 컴퓨터를 이용하여 여러 곳에 설치되어 있는 센서시스템을 관리 모니터링할 수 있다.

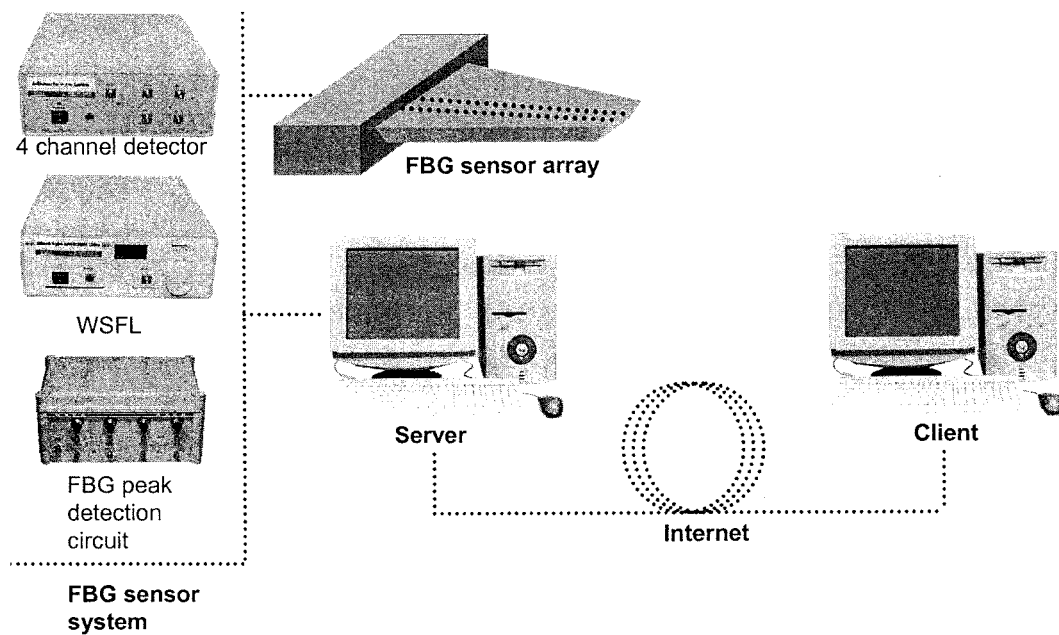


Fig. 3.1.5 FBG sensor remote strain monitoring system

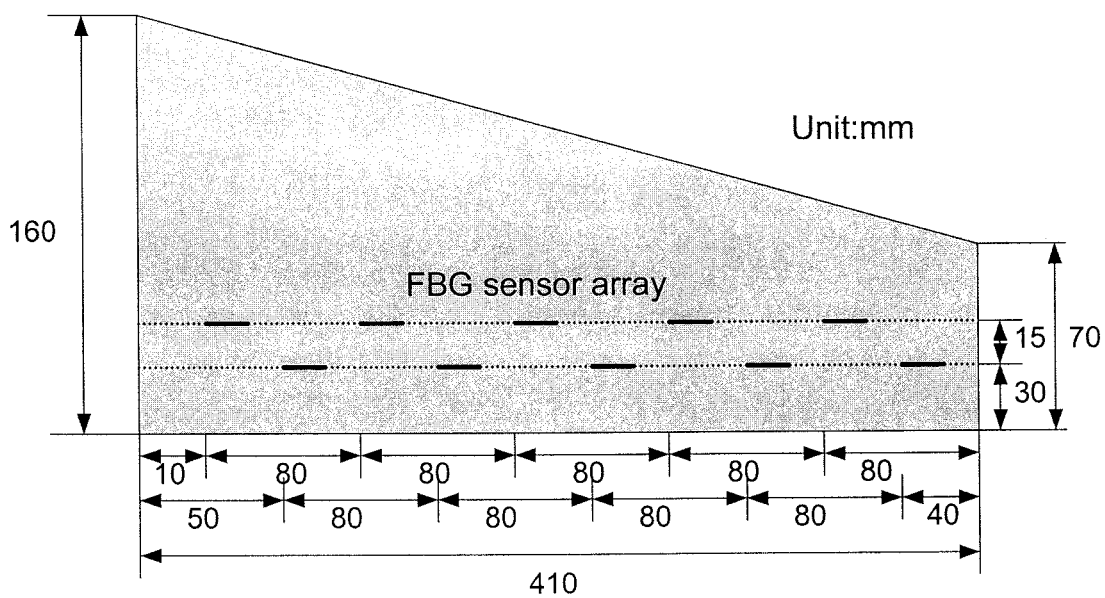


Fig. 3.1.6 Specimen for remote strain monitoring

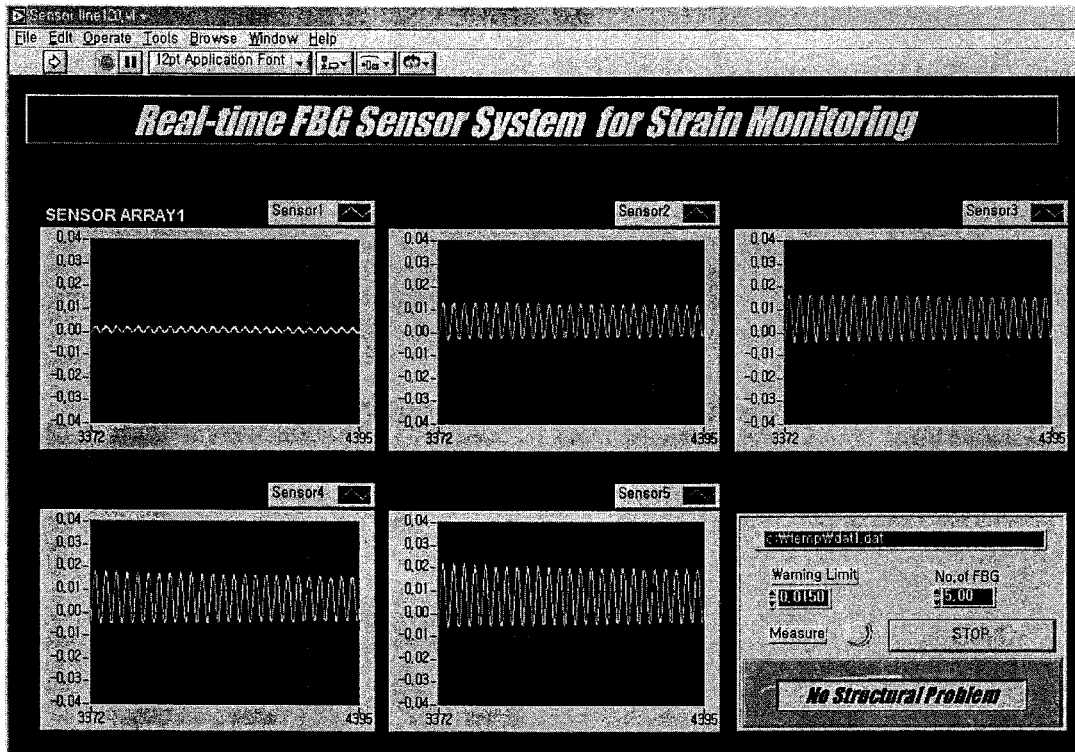


Fig. 3.1.7 Real-time strain monitoring of FBG remote strain monitoring system

제 2 절 브래그 격자 센서의 실제 구조물 적용에 따른 문제점 및 해결 방안

1. 브래그 격자 센서의 유도 복굴절 현상과 센서 신호 특성

가. 광섬유 브래그 격자의 복굴절

이상적인 형태의 단일 모드 광섬유(single-mode fiber)는 입력광의 편광 상태(state of polarization, SOP)를 유지한다. 하지만, 실제 일반적인 광섬유들은 다음과 같은 요인들에 의해 복굴절이 발생한다.

1. 광섬유 코어의 기하학적 비대칭성(타원형)
2. 광섬유 내부의 응력
3. 횡방향 응력
4. 광섬유의 굽힘

1과 2는 광섬유의 고유 복굴절(intrinsic birefringence)로 분류되고 광섬유 고유의 이방성(built-in anisotropies)을 나타내며 3과 4는 유도 복굴절(induced birefringence)로 분류된다. 일단 광섬유가 제조되고 나면 실리카(silica)의 높은 탄성계수(Young's modulus)때문에 광섬유의 형상을 수정하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 외부에서 가해진 응력과 변형은 광탄성 효과(photoelastic effect)에 의해 광섬유에 유도 복굴절을 야기할 수 있다.

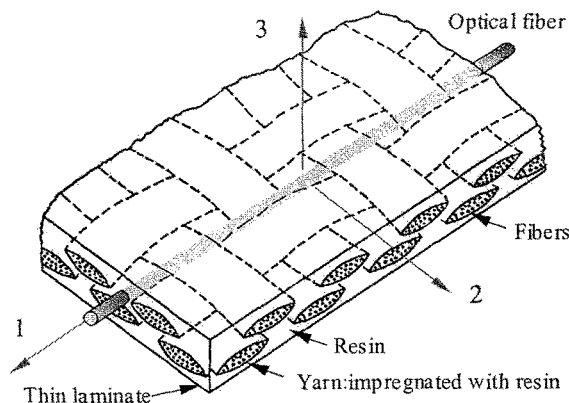


Fig. 3.2.1 Axis orientation of optical fiber embedded in a thin composite laminate.

만약 고유 복굴절이 없다면, 전기장 분포는 두 개의 선형 편광(linear polarization, LP)모드에 의해 근사화 될 수 있다. 그러나 광섬유가 복굴절을 경험할 때는 2-편광된 빛이 3-편광된 빛에 비해 다른 위상 변화를 겪게 된다. Fig. 3.2.1은 복합 재료에 삽입된 광섬유의 좌표축을 나타내며 정규화(normalized) 된 복굴절 양은 다음과 같

이 정의된다.

$$B = \frac{\delta\beta}{\beta} \quad (2-1)$$

여기서, $\beta = (\beta_2 + \beta_3)/2 = (\lambda_2 + \lambda_3)/2$ 는 평균 전파 상수를
 $\delta\beta = \beta_3 - \beta_2 = \lambda_3 - \lambda_2$ 는 복굴절량을 나타낸다.

다시 말하면, 2-편광과 3-편광의 선형 편광 모드는 광섬유 코어가 기하학적인 비대칭성을 보이거나 이방성 응력에 의해 굴절률의 이방성을 보일 경우 더 이상 같은 전파 상수를 가지지 않게 된다.

결론적으로, 격자를 새기기 위해 재킷이 벗겨진 부분은 복합재료의 잔류 응력과 같은 이방성 응력에 노출된다. 그러므로 광섬유 브래그 격자의 반사 스펙트럼은 두 개의 피크를 가지게 되고 광학적 이방성 매질은 빠른 축(fast axis)과 느린 축(slow axis)으로 불려진다.

이렇게 형성된 두 개의 피크로 인해 동적 변형률을 측정할 경우 어려움이 따른다. 횡방향 민감성 격자(transverse sensitive grating, TSG)의 편광 축에서 브래그 파장 이동량은 다음과 같은 복잡한 형태를 보인다.

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{2,0}} = \epsilon_1 - \frac{n_2^2}{2} [p_{11}\epsilon_2 + p_{12}(\epsilon_1 + \epsilon_3)] \quad (2-2)$$

$$\frac{\Delta\lambda_3}{\lambda_{3,0}} = \epsilon_1 - \frac{n_2^2}{2} [p_{11}\epsilon_3 + p_{12}(\epsilon_1 + \epsilon_2)] \quad (2-3)$$

2와 3은 각각 빠른 축과 느린 축에서의 공진 파장을 나타낸다. '0'은 외란이 가해지지 않은 상태를 나타낸다. 오토클레이브(autoclave)를 이용한 진공백 성형법으로 복합재료를 제작할 때 나타나는 횡방향 잔류 응력은 복합재료에 재킷이 벗겨진 광섬유 브래그 격자가 삽입될 경우 위와 같은 복굴절을 일으킬 수 있다. 반대로 이러한 점은 제한적인 응용 분야에서 구조물의 축방향 변형률과 횡방향 변형률을 동시에 측정하는데 사용할 수 있다. 복합재료에 삽입된 광섬유 브래그 격자에 대해 다음과 같은 두 가지 단순화 가정을 한다.

1. 횡방향 전단(transverse shear) 효과 무시
2. Fig. 3.2.1에서 1-2평면에 대해 평면 응력(plane stress) 상태 가정

균일 등방성(homogeneous isotropic) 재료에 대한 훅의 법칙(Hooke's law)에 의해, 아래와 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_f & -\nu_f/E_f & -\nu_f/E_f & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_f/E_f & 1/E_f & -\nu_f/E_f & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_f/E_f & -\nu_f/E_f & 1/E_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (2-4)$$

여기서, E_f 와 G_f 는 영률과 광섬유의 전단률(shear modulus)이다.

가정 1, 2는 σ_1, σ_2 가 '0'이 아니고 적층판(laminate)의 중심면(middle plane)에 수직인 응력들은 모두 '0'임을 의미한다. 즉, $\sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$ 이며 광섬유의 주 방향(principal direction)들에 대한 변형률 성분은 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_f}(\sigma_1 - \nu_f \sigma_2), \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E_f}(\sigma_2 - \nu_f \sigma_1), \quad \varepsilon_3 = -\frac{\nu_f}{E_f}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2-5)$$

식 (2-5)를 식 (2-2), (2-3)에 대입하면 빠른 축의 파장 이동량(λ_2)과 느린 축의 파장 이동량(λ_3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{2,0}} \\ \frac{\Delta\lambda_3}{\lambda_{3,0}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ T_1 & T_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}$$

$$T_1 = \frac{1}{E_f} \left\{ 1 - \frac{n_e^2}{2} [(1 - \nu_f) p_{12} - \nu_f p_{11}] \right\}, \quad T_2 = \frac{1}{E_f} \left\{ -\nu_f - \frac{n_e^2}{2} [p_{11} - 2\nu_f p_{12}] \right\}$$

$$T_3 = \frac{1}{E_f} \left\{ -\nu_f - \frac{n_e^2}{2} [(1 - \nu_f) p_{12} - \nu_f p_{11}] \right\} \quad (2-6)$$

T 행렬의 역변환과 Table 3.2.1의 값들을 이용하면 복굴절이 작용하는 광섬유 브래그 격자의 두 피크의 파장 이동량을 측정함으로써 축방향과 횡방향 응력을 분리해낼 수 있다.

Table 3.2.1. Specifications and strain-optic coefficients of optical fiber.

Property	Value
Outer coating diameter	243.99 μ strain
Inner coating diameter	193.13 μ strain
Cladding diameter	124.58 μ strain
Core diameter	8.61 μ strain
Coating material	Acrylate
Poisson's ratio	0.16 ^[20]
Effective core index	1.4476
Photoelastic constant	$p_{11} = 0.113$ ^[21] $p_{12} = 0.252$ ^[21]
Young's modulus	70 GPa

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} = 70 \begin{bmatrix} 2.6939 & -1.4394 \\ 5.9172 & -5.9172 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \frac{\lambda_2}{\lambda_{2,0}} \\ \Delta \frac{\lambda_3}{\lambda_{3,0}} \end{pmatrix} \text{ GPa} \quad (2-7)$$

복굴절이 일어나지 않은 광섬유 브래그 격자는 단일의 브래그 파장 ($\lambda_{B,0} = \lambda_{2,0} = \lambda_{3,0}$)을 가지기 때문에 횡방향 응력이 두 피크 사이의 거리에 비례함을 알 수 있다. 반면에, 횡방향 둔감성 격자(transverse insensitive grating, TIG)의 경우 빠른 축과 느린 축을 진행하는 편광 모드들이 거의 같다. 그래서 모드들 간의 에너지 교환은 매우 쉽고 반사 스펙트럼은 같은 브래그 파장(λ_B)을 가지며 중첩된 하나의 피크를 보인다. 이 경우 축방향 변형률(ϵ_1)과 브래그 파장 이동과의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_{B,0}} = \epsilon_1 \left[1 - \frac{n_e^2}{2} \{ p_{12} - \nu_f (p_{11} + p_{12}) \} \right] \quad (2-8)$$

나. 광섬유 브래그 격자의 신호 특성과 삽입 안정성

복합재료에 삽입 적용된 광섬유 브래그 격자의 복합재료 경화 후 광섬유 원주에서의 응력 상태 변화에 의한 스펙트럼 관찰과 삽입 안정성을 확인하기 위해서 1번 시편($[0_5/\{0\}/0_5]_T$)의 경우 강화 섬유와 평행하게, 2번 시편($[90_5/\{0\}/90_5]_T$)의 경우 강화 섬유와 직각으로 광섬유 브래그 격자를 삽입하였다. 사용된 복합재료는 프

리프레그(prepreg)의 두께가 0.125 mm인 그라파이트/에폭시(Graphite/epoxy) 이다. 또한, 직조된(fabric) 그라파이트/에폭시 복합재료에도 광섬유 브래그 격자를 삽입 적용하였다. 직조된 복합재료의 경우 물결 형태로 존재하는 강화 섬유 다발로 인해 일방향으로 적층된 복합재료와 매우 다른 형태를 가진다. 3번 시편 ($[4\text{ plies}/\{OF\}/4\text{ plies}]_T$)의 경우 프리프레그의 두께가 0.18 mm인 200 E-유리 섬유를 사용하였고 4번 시편 ($[3\text{ plies}/\{OF\}/3\text{ plies}]_T$)의 경우 프리프레그의 두께가 0.22 mm인 600 E-유리 섬유를 사용하였다. 여기서, '{}'는 광섬유 브래그 격자가 삽입된 위치를 나타내고 안의 숫자는 삽입 방향을 나타낸다. 재킷이 벗겨진 광섬유의 직경과 그라파이트 섬유, 유리 섬유의 직경은 각각 125 μstrain , 7 μstrain , 10 μstrain 이다.

각 시편들의 크기는 1,2번 시편의 경우 250mm×100mm×1.25mm이고 3번 시편의 경우에는 250mm×100mm×1.44mm, 4번 시편의 경우에는 250mm×100mm×1.32mm이다. Fig. 3.2.3(b)를 보면 광섬유 브래그 격자의 삽입 위치와 시편의 내부로 광섬유를 삽입하는 기법을 알 수 있다.

복합재료의 경화 후 잔류 응력에는 다음의 두 가지가 가장 큰 영향으로 작용한다.

1. 경화 과정동안 에폭시 레진(resin)의 수축
2. 모재와 강화 섬유 사이의 열팽창 계수(CTE) 불일치

일방향 프리프레그만을 사용한 1, 2번 시편을 이용하여 경화 과정동안의 에폭시 레진의 수축에 의한 영향을 알아보았고 직조된 프리프레그를 사용한 3번 시편을 이용하여 큰 잔류 응력이 작용할 경우에 대해 알아보았다. 성형 전과 후의 브래그 격자 센서 스펙트럼의 변화 결과는 Fig. 3.2.2와 Fig. 3.2.3에 잘 나타나 있다.

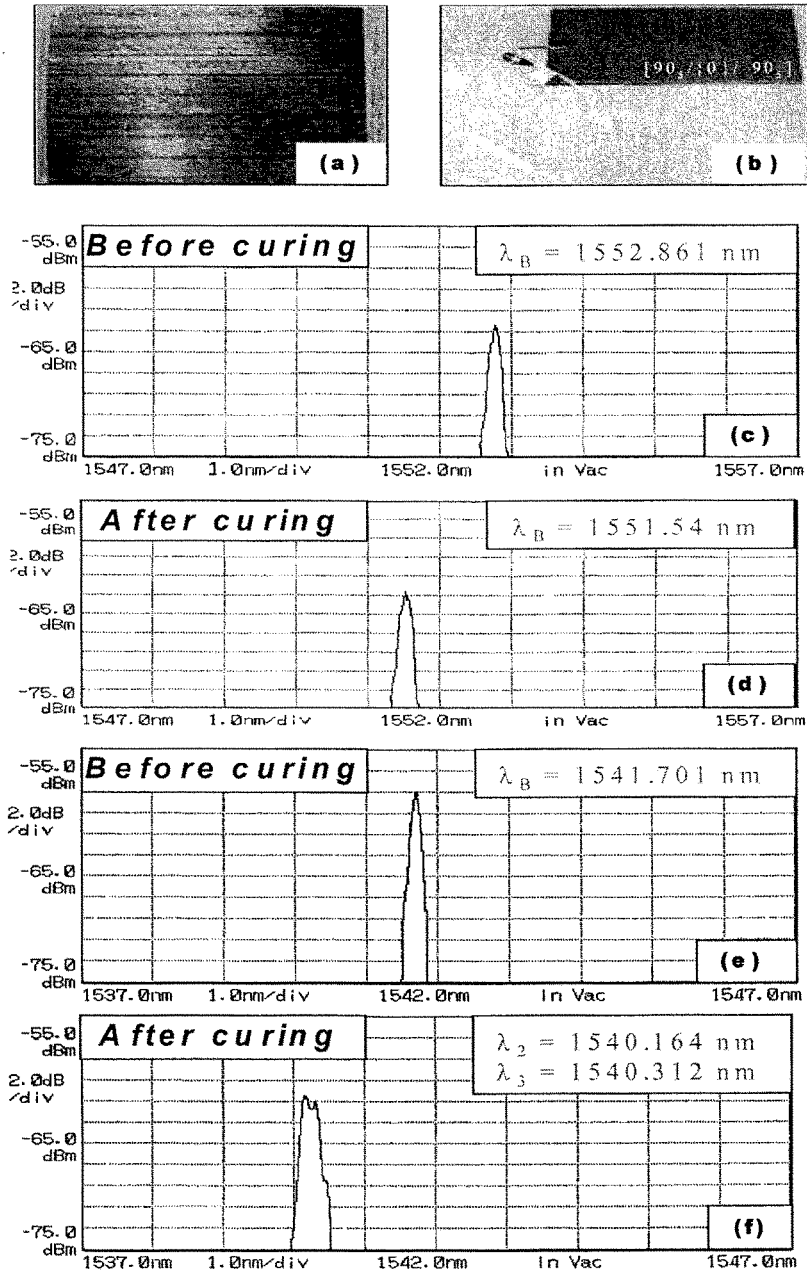


Fig. 3.2.2 Reflected spectra of Case I and Case II : (a) Unidirectional prepreg of Case I and Case II, (b) Specimen of Case II, (c) Case I before curing, (d) Case I after curing, (e) Case II before curing, (f) Case II after curing (by LED- OSA system).

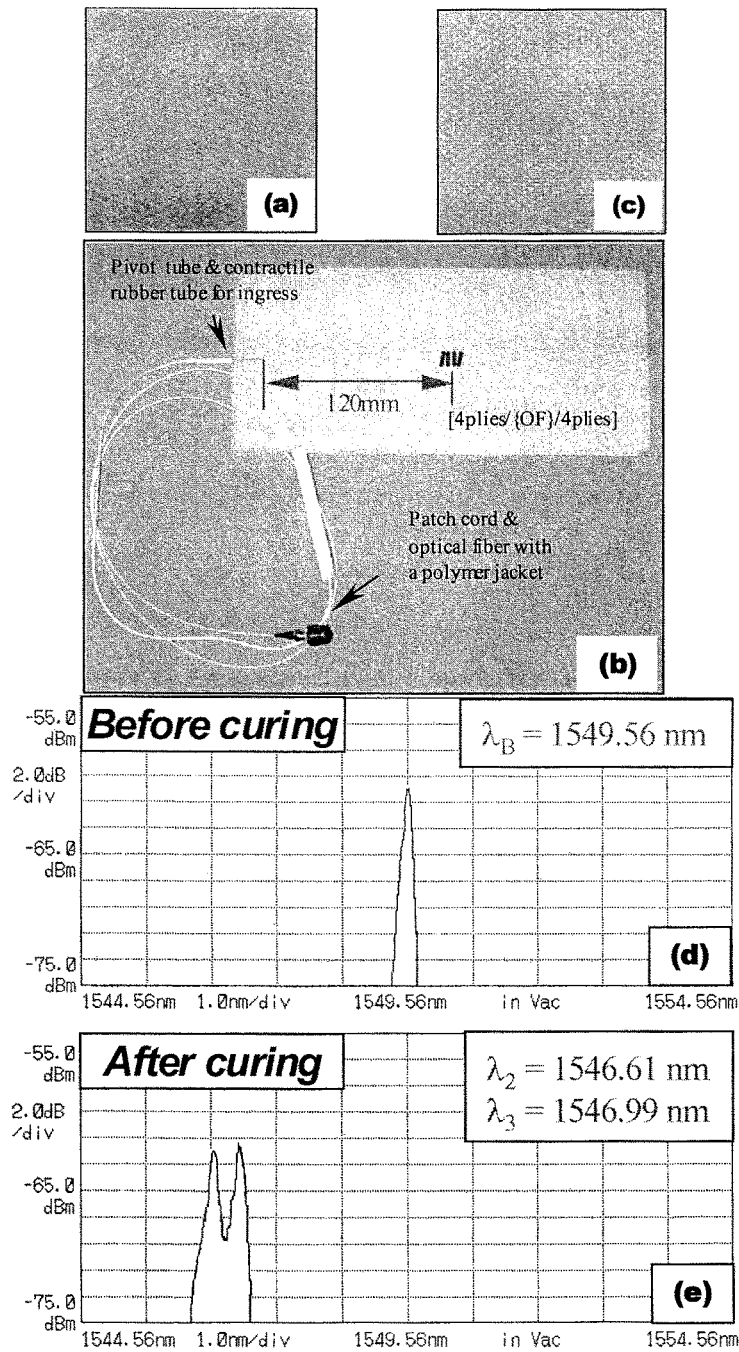


Fig. 3.2.3 Reflected spectra of Case III and Prepreg of Case IV : (a) Prepreg of Case III, (b) Specimen of Case III, (c) Pre preg of Case IV with bigger yarns, (d) Spectrum of Case III before curing, (e) Spectrum of Case III after curing.

일반적으로 직조된 복합 적층판의 경우가 작은 섬유 함유율(fiber volume fraction)과 서로 수직으로 교차하는 섬유들과 모재와의 열팽창 계수 불일치로 인해 복합재료 경화 후 더 큰 잔류 응력이 발생한다고 알려져 있다.

4번 시편은 1, 2, 3번 시편에 비해 매우 큰 미소 굽힘(micro bending)에 대한 광섬유의 삽입 안정성을 확인하기 위해 제작되었으며 Fig. 3.2.4(a)-(c)는 2, 3, 4번 시편의 미소 굽힘 정도를 보여주고 있다. Fig. 3.2.2(f)와 Fig. 3.2.3(e)에 나타난 것처럼 경화 후 횡방향 응력이 광섬유에 복굴절을 발생 시켰다. 다시 말하면, 복굴절이 단일 브래그 파장의 피크를 2번 시편의 경우에는 작은($B=9.61 \times 10^{-5}$), 3번 시편의 경우에는 두 개의 피크가 뚜렷할 정도의 큰($B=2.46 \times 10^{-4}$) 피크 갈라짐을 유발하였다. 식 (2-7)에 의해 3번 시편이 2번 시편보다 더 큰 횡방향 응력을 받았음을 알 수 있다. 결국 이러한 점은 빠른 동적 변형률 측정을 어렵게 하며 측정 오차로서 작용하게 된다.

광섬유의 삽입 환경에 대한 이해를 돕기 위해 시편의 단면을 연마(polishing)하여 광학 현미경(OLYMPUS)으로 관찰하였고 결과는 Fig. 3.2.4(d)-(h)와 같으며 그림을 통해 광섬유를 삽입할 경우 광섬유는 다양한 삽입 특성을 보일 수 있음을 알 수 있다. 1번 시편의 경우에는 Fig. 3.2.4(d)에서처럼 레진의 수축에도 불구하고 광섬유 브래그 격자는 단일 파장을 유지한 반면 2번 시편의 경우에는 Fig. 3.2.4(e)에서와 같이 강화 섬유에 수직으로 삽입된 광섬유 브래그 격자는 경화 후 횡방향 응력에 의해 피크가 갈라졌다. Fig. 3.2.4(f)는 3번 시편에 삽입된 광섬유의 단면을 보여주고 있으며 이 경우에는 Fig. 3.2.13(e)에서처럼 단일 피크가 두 개의 매우 선명한 피크로 갈라졌다.

Fig. 3.2.4(g)에서 이중 아크릴 레이트(dual acrylate) 코팅은 코팅이 횡방향 응력에 대해 완충제 역할을 함을 알 수 있다. 이와 마찬가지로 광섬유 브래그 격자에 리코팅을 할 경우에도 완충제 역할을 하여 피크가 갈라지는 것을 방지할 수 있다. Fig. 3.2.4(h)는 4번 시편에 대한 리코팅된 광섬유 브래그 격자의 삽입 환경을 보여주고 있으며 횡방향 잔류 응력에 대해 안정함을 알 수 있다.

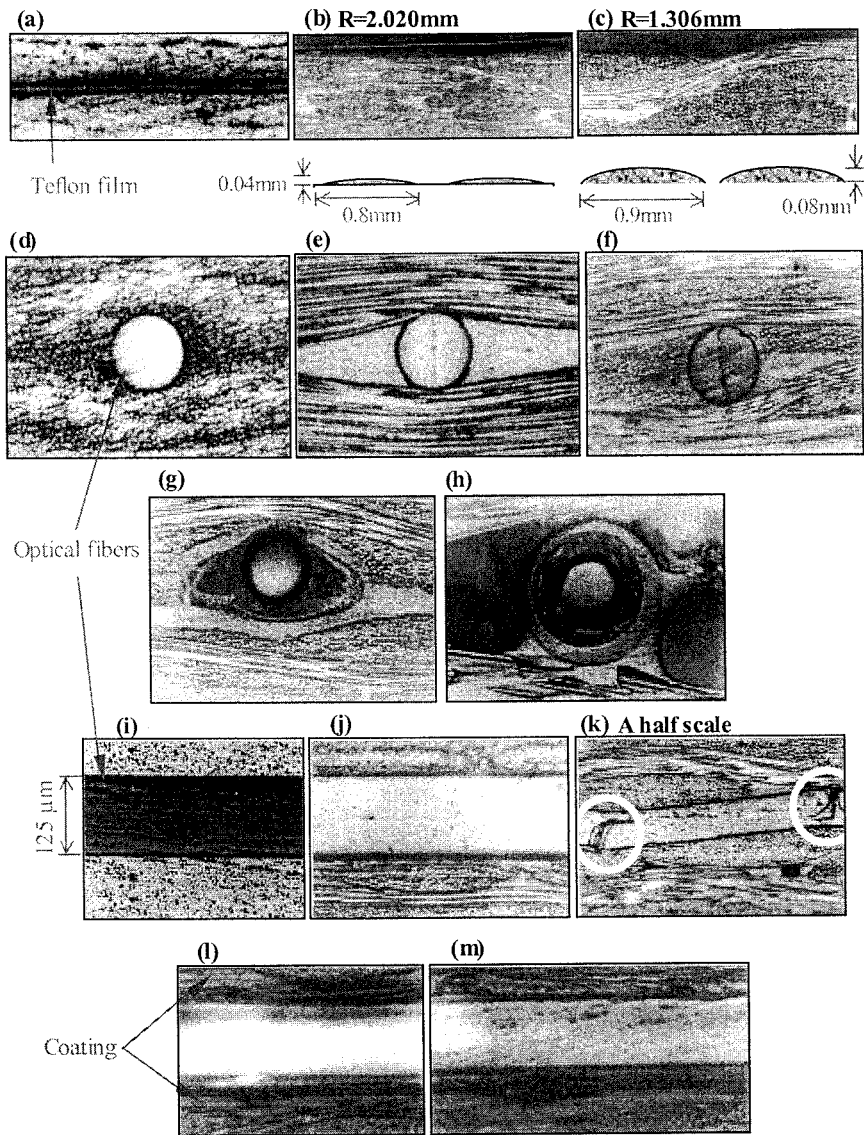


Fig. 3.2.4 Embedding environments of bare optical fibers and coated optical fibers: (a), (b) and (c) Embedding environments of Case II, III and IV, (d), (e) and (f) Cross sections of bare optical fibers embedded in Case I, Case II, Case III, (g) and (h) Cross sections of optical fibers with dual acrylate coatings in Case III and Case IV, (i), (j) and (k) Side sections of bare optical fiber in Case II, Case III and Case IV, (l) and (m) Side sections of optical fibers with dual acrylate coatings in Case III and Case IV.

광섬유 브래그 격자의 피크 신호의 경우 광섬유가 파손에 의해 깨어지기 전까지는 빛의 손실이 별로 중요하지 않기 때문에 광학적 미소 굽힘(optical micro bending) 보다는 기계적 미소 굽힘(mechanical micro bending) 효과가 더욱 중요하다. Fig. 3.2.4(a)-(c)에서 매우 얇은 테프론(teflon) 필름을 2, 3, 4번 시편에 삽입하여 기계적 미소 굽힘에 의한 영향을 알아보았다. Fig. 3.2.4(i)-(j)와 달리 Fig. 3.2.4(k)에서는 응력에 의한 광섬유의 파손을 관찰할 수 있다. 하지만, Fig. 3.2.4(l)-(m)에서와 같이 3, 4번 시편의 경우 광섬유를 리코팅 할 경우에는 파손을 방지할 수 있다. 또한, 복합재료의 경화 온도(130 ℃)가 아크릴 레이트 코팅이 타는 온도(150 ℃)와 가까움에도 불구하고 Fig. 3.2.4(g),(j),(l),(m)에서 볼 수 있듯이 복합재료 경화 후에도 코팅이 잘 보존됨을 알 수 있다.

결과적으로, 광섬유 브래그 격자의 복굴절은 횡방향 잔류 응력의 정도와 관계된 강화 섬유에 대한 광섬유의 삽입 각에 의존하며 리코팅을 할 경우 광학적, 기계적으로 미소 굽힘에 의한 복굴절 예방에 효과가 있음을 알 수 있다.

다. 횡방향 응력에 의한 유도 복굴절

횡방향 응력이 유도 복굴절에 미치는 영향을 알아보기 위해 경화 모니터링 동안 광섬유 브래그 격자 신호의 반사 스펙트럼을 알아보는 실험을 수행하였다. 시편의 형상은 Fig. 3.2.3(b)와 같다. 사용된 광섬유는 재킷이 벗겨진 것과 리코팅된 브래그 격자를 사용하였다. 실험에 사용된 브래그 격자는 248 nm의 파장을 갖는 MPB 사의 ASX-750 엑시머 레이저와 위상 마스크를 이용하여 직접 제작하였고 VYTRAN 사의 VYT-200-C 리코팅 머신을 이용하여 리코팅 작업을 수행하였다. 복합재료 내의 미소 굽힘에 의한 광손실 때문에 2.2 mW의 높은 출력을 가지는 WSFL[1]-DPO 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험 장치의 모습은 Fig. 3.2.5와 같다. Fig. 3.2.6(a)는 복합재료 경화 과정 동안의 온도와 압력 사이클을 보여주고 있으며 Fig. 3.2.6(b)는 경화 과정동안 광섬유 브래그 격자의 파장 이동량을 보여주고 있다. 그림에서처럼 복굴절이 경화 시작 후 약 182 분 경에 시작됨을 알 수 있다.

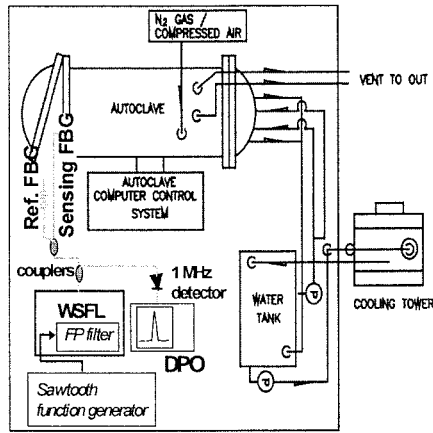


Fig. 3.2.5 Experimental setup for cure monitoring.

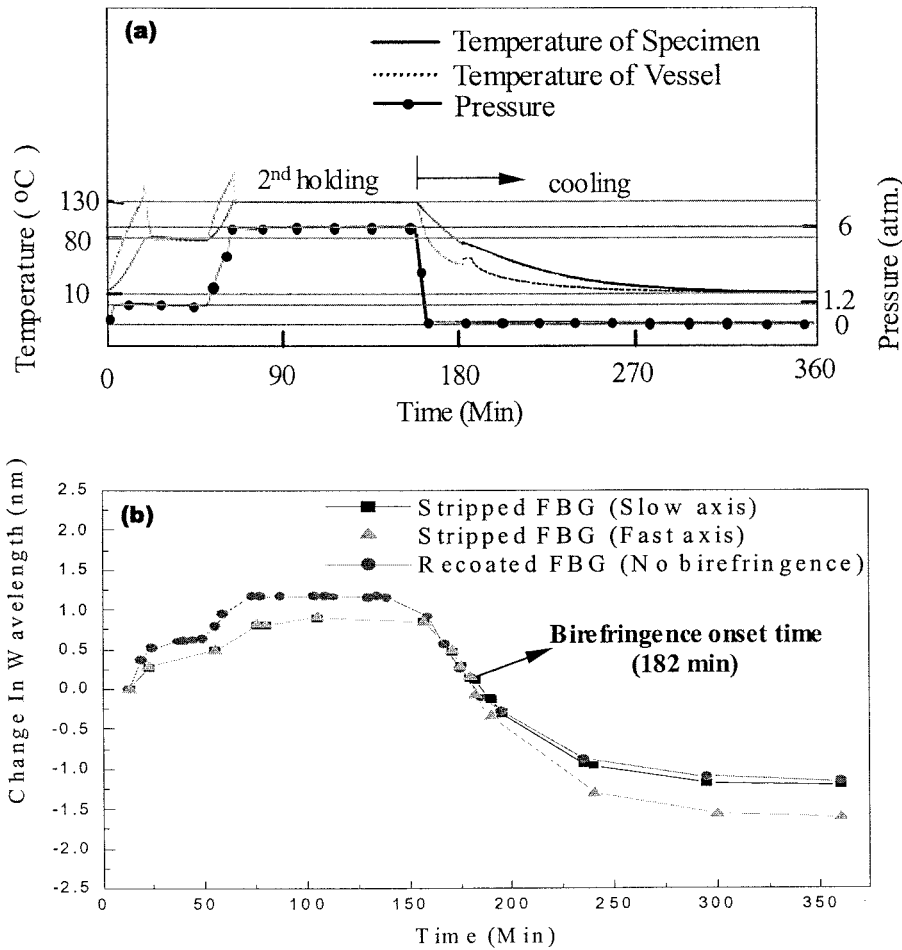


Fig. 3.2.6 Changes in wavelength of a stripped FBG and a recoated FBG : (a) Cure cycle, (b) Cure monitoring.

또한, 경화 과정 중 2차 온도 지속기간(2nd holding)동안 발생하는 에폭시 레진의 점진적인 수축 현상이 복굴절을 발생시킬 정도로 크지는 않음을 알 수 있다.

경화 과정 중 마지막 단계인 압력(6 기압 = 607.95 KPa)을 제거한 상태에서의 냉각 단계에서 강화 섬유와 에폭시 레진과의 열팽창 계수 불일치로 인해 잔류 응력의 빠른 증가가 나타났고 약 182 분 경부터 복굴절로 인해 피크 갈라짐 현상이 발생하였다.

Fig. 3.2.7은 복합재료 시편을 오토클레이브에서 빼낸 후 편광을 조절함에 따른 광섬유 브래그 격자의 반사 스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 3.2.7(b)에서처럼 리코팅된 브래그 격자의 경우 추가적인 피크 갈라짐은 보이지 않았다. 재킷이 벗겨진 브래그 격자의 경우에는 정규화 된 복굴절 양, 축방향과 횡방향 변형률은 각각 2.56×10^{-4} , $-1,436 \mu\text{strain}$, $-1,267 \mu\text{strain}$ 을 보였다.

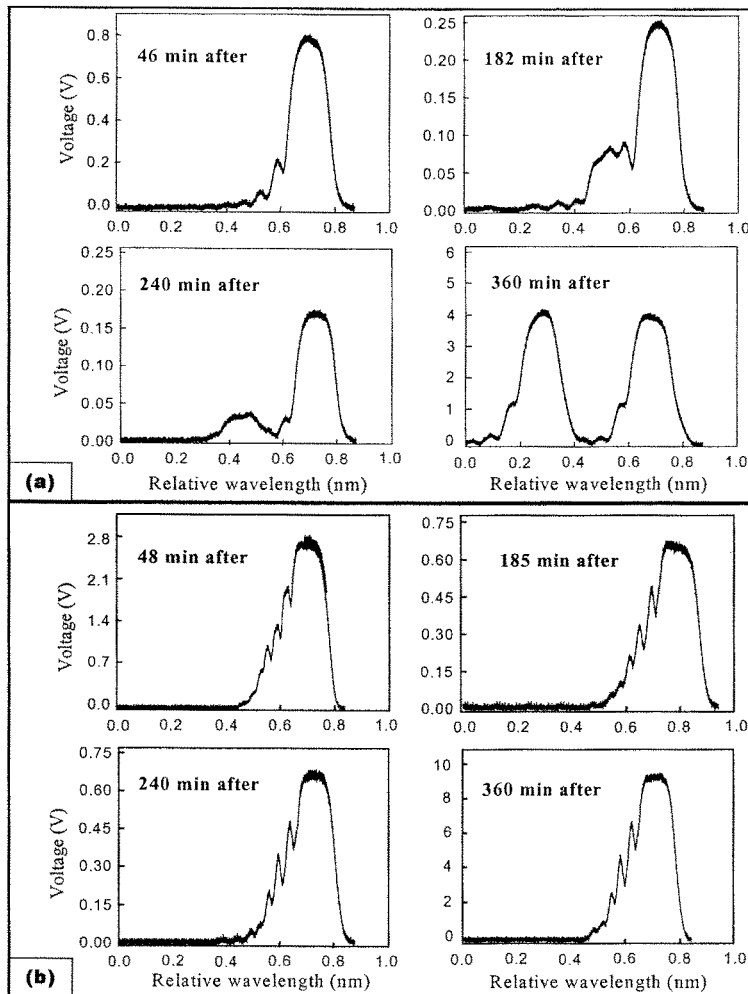


Fig. 3.2.7 Changes in spectrum : (a) Stripped, (b) Recoated FBG.

2. 광섬유 브래그 격자의 변형률 전달성 검증

가. 복굴절 방지를 위한 센서 헤드 처리

앞에서 설명한 것처럼 광섬유 브래그 격자의 복굴절 방지를 위해서 리코팅을 하는 경우가 있는데 최근에는 유리 모세관을 이용한 보호법도 많이 적용되고 있다. 특히, 유리 모세관을 이용한 보호법은 광섬유 브래그 격자를 이용한 온도 센서를 비롯하여 여러 가지 형태와 특성을 가지는 센서 제작으로 응용이 가능하기 때문에 더욱 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 재킷이 벗겨져 있는 일반적인 브래그 격자에 비해 위의 두 가지 처리법을 사용하였을 경우 발생할 수 있는 변형률 전달성 문제에 대해 알아보았다. 마찬가지로 VYTRAN 사의 VYT-200-C 리코팅 머신을 이용하여 리코팅을 수행하였고 유리 모세관으로 보호한 경우는 격자 부분을 광학 현미경을 이용하여 석영(quartz) 재질의 유리 모세관 속에 삽입한 후 모세관의 양쪽 끝단을 상온경화 에폭시로 접착하였다. 사용된 모세관의 내경과 외경은 각각 $128\ \mu\text{m}$, $280\ \mu\text{m}$ 이다. 제작된 각 센서의 모습은 Fig. 3.2.8과 같다.

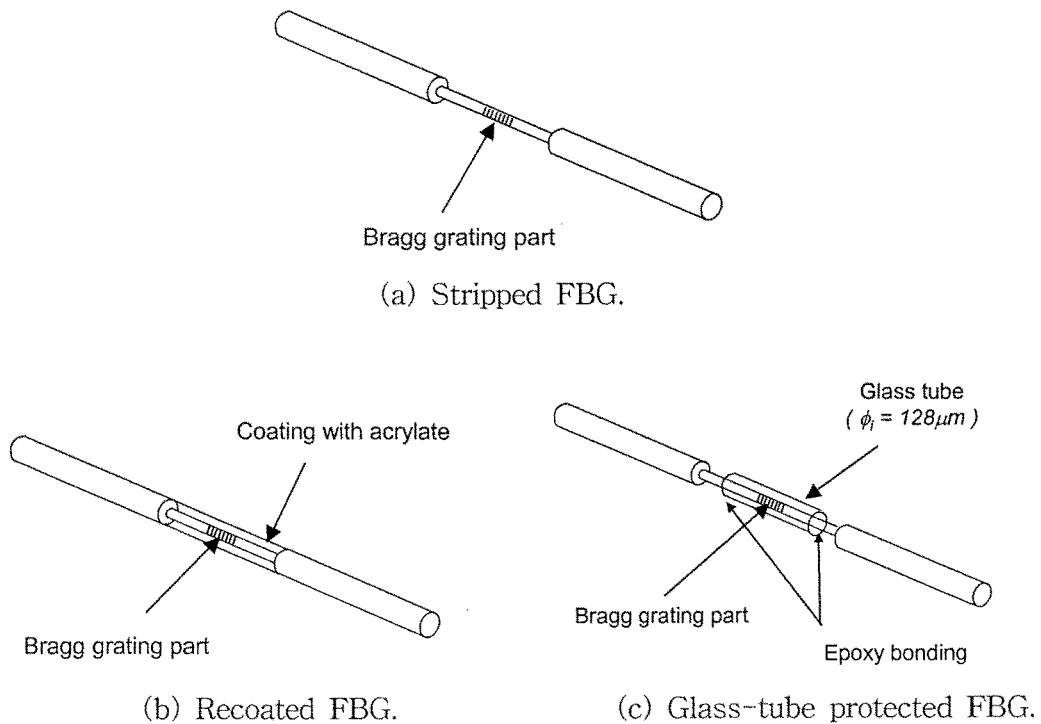


Fig. 3.2.8 Head treatment methods of FBGs.

실험에 사용된 모든 광섬유 브래그 격자는 IBSEN 사의 피치간격 $1061.58\ \text{nm}$ 인

위상 마스크를 이용하여 90 %의 반사율을 가지도록 MPB 사의 ASX-750 엑시머 레이저로 직접 제작하였다. 복합재료 시편은 (주)한국화이바의 CU-125NS 그래파이트/에폭시 프리프레그 테이프를 사용하여 $[0_8/\{0\}/0_8]_T$ 으로 적층하여 제작하였다. '{}'는 광섬유 브래그 격자가 삽입된 위치를 나타내고 안의 숫자는 센서의 삽입 방향을 나타낸다. 시편의 끝단에는 성형 과정 중 광섬유를 보호하고 광섬유 브래그 격자를 실험 장치와 연결하기 위해 직경 0.6 mm의 스테인리스 튜브를 삽입하여 보강하였다. Fig. 3.2.9에서 광섬유는 시편의 중립면에 삽입하였고 같은 지점의 시편 표면에는 변형률 게이지를 부착하였으며 실험 결과의 신뢰성을 위해 각 센서의 종류에 따라 세 개씩의 시편을 제작하였다. 실험에 사용된 변형률 게이지는 모두 TML 사의 게이지 길이가 5 mm인 FLA-5-11-11 단축 게이지이다.

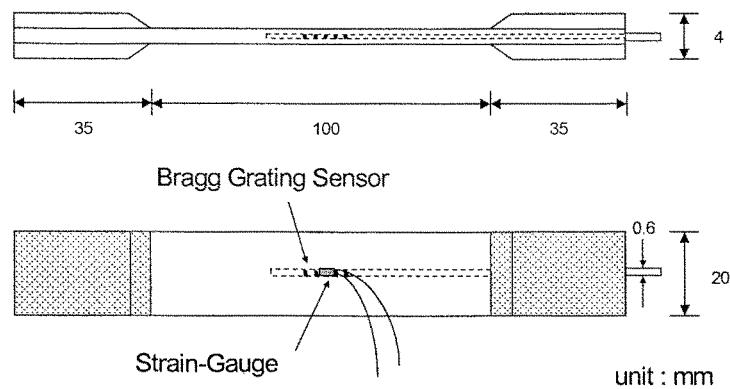


Fig. 3.2.9 Configuration of tension test specimen.

나. 변형률 전달성 실험의 결과 및 분석

변형률 전달성 실험은 만능시험기에서 1 mm/min 의 변위 제어로 인장(tension)을 가하면서 시편이 최종 파단에 이르기까지 수행하였다. 구성된 실험 장치는 Fig. 3.2.10과 같다.

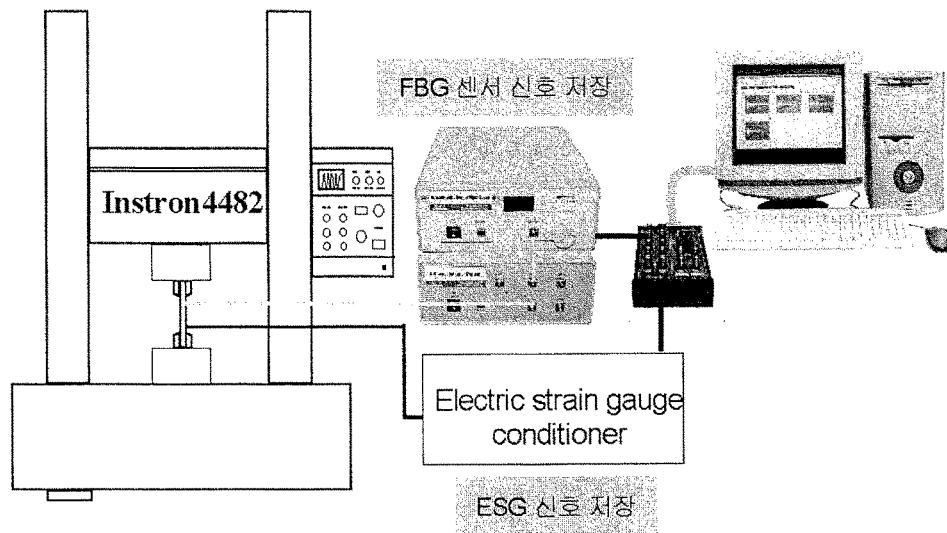
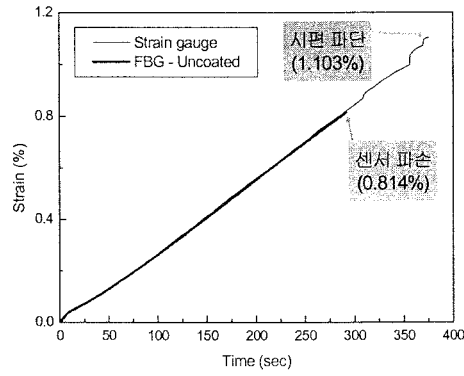
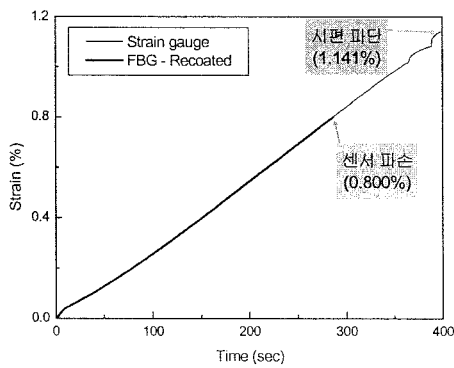


Fig. 3.2.10 Experimental setup for tension test.

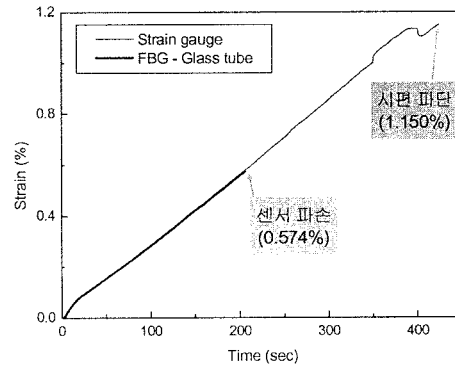
Fig. 3.2.10에서처럼 인장을 받는 동안 광섬유 브래그 격자의 신호는 광섬유 센서 시스템을 통해, 변형률 게이지 신호는 컨디셔너를 거친 후 컴퓨터의 DAQ 보드를 통해 컴퓨터에 동시에 저장되도록 하였다. 실험을 통해 취득된 결과는 Fig. 3.2.11과 같다.



(a) Stripped FBG sensor.



(b) Recoated FBG sensor.



(c) Glass-tube protected FBG sensor.

Fig. 3.2.11 Results of strain transfer experiment.

Fig. 3.2.11의 (a), (b), (c)에서는 각 처리 기법에 따른 세 가지 시편의 인장 실험에 대한 결과 그래프를 보여주고 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 격자에 리코팅이나 유리 모세관과 같은 처리를 하더라도 광섬유가 파손되기 전까지 변형률을 오차 없이 잘 전달함을 알 수 있다. 그러나 세 가지 경우 모두 시편이 파단에 이르기 전에 광섬유가 먼저 파손되는 경향을 보였는데 이는 광섬유 브래그 격자를 제작할 때 피복 제거기(jacket stripper, Clauss CFS-1)를 사용하여 광섬유의 재킷을 벗기는 과정에서 클래딩(cladding)에 생긴 미소 결함(scratch)들이 시편이 인장력을 받음에 따라 균열로 진전했기 때문이다. 이를 검증하기 위해 재킷을 벗긴 광섬유의 표면에 대하여 SEM(scanning electron microscope) 사진 촬영을 하였다.

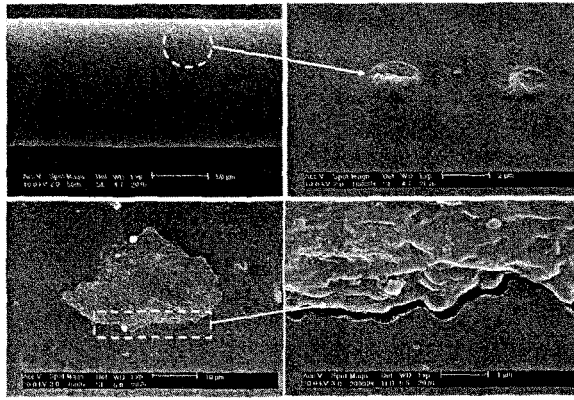


Fig. 3.2.12 SEM photograph of stripped optical fiber.

Fig. 3.2.12에서 알 수 있듯이 광섬유의 재킷을 벗기는 과정에서 클래딩 표면에 2~20 μ strain 정도의 미세 결함들이 생겼음을 확인할 수 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 재킷을 벗길 때 가열장치(heat gun)를 이용해 열을 가하는 방법과 클로로포름(chloroform)과 같은 화학약품을 이용해 재킷만을 녹이는 방법이 있다.

3. 광섬유 브래그 격자의 내부 변형률 구배에 의한 신호 특성

광섬유 브래그 격자에 내부 변형률 구배를 일으키는 요인으로는 구조물의 기하학적인 형태에 의한 변형률 구배와 응력 집중 등과 같은 하중 조건에 의한 변형률 구배의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 경사진 알루미늄 시편에 대한 인장 실험을 통해 기하학적 형태가 광섬유 브래그 격자의 신호에 미치는 영향을 확인하였고, 초기 균열이 존재하는 복합재료로 보강된 콘크리트 빔의 4점 굽힘 실험을 통해 균열에 따른 응력 집중이 광섬유 브래그 격자의 신호에 미치는 영향에 대해서도 알아보았다.

가. 구조물의 기하학적인 형태에 의한 변형률 구배

Fig. 3.2.13에서와 같은 기하학적 형태를 갖는 알루미늄 6061 시편에 대해 게이지 길이 10 mm의 브래그 격자가 시편이 인장력을 받음에 따라 어떤 신호 특성을 보이는지 확인하였다. 또, 시편의 반대 면에는 변형률 게이지를 부착하여 신호의 이상이 변형률에 미치는 영향을 확인하였다. 마찬가지로 세 가지 형태의 시편에 대해 실험을 수행하였고 실험 결과는 Fig. 3.2.14와 같다.

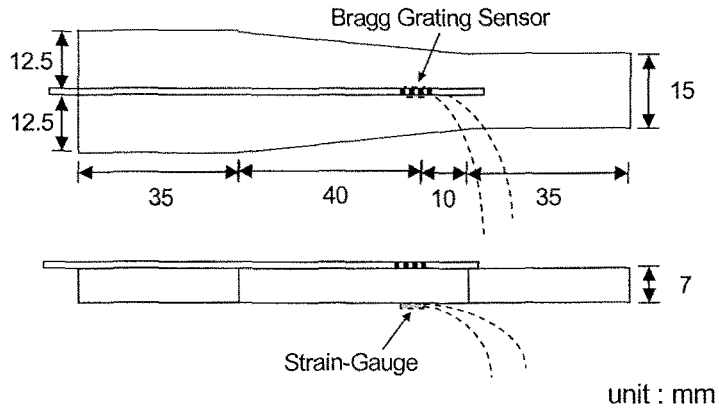
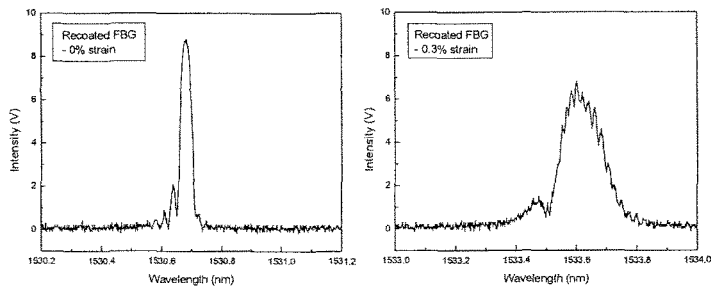
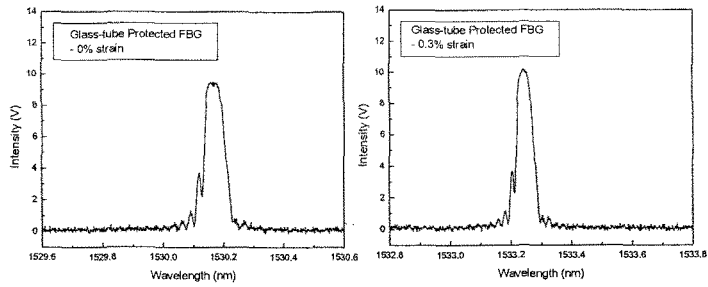


Fig. 3.2.13 Configuration of tapered aluminum specimen.



(a) Stripped and recoated FBGs.

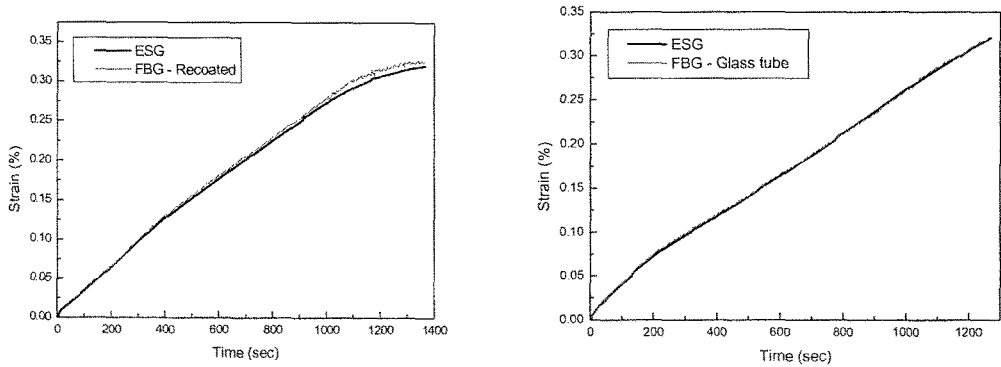


(b) Glass-tube protected FBG.

Fig. 3.2.14 Signal characteristics of FBGs.

결과에서 알 수 있듯이 재킷이 벗겨진 경우와 리코팅 된 브래그 격자의 경우에는 구조물의 변형률 구배가 브래그 격자에 그대로 전달되므로 변형률이 증가함에 따라 피크 신호가 갈라져 다중 피크로 변화함을 확인 할 수 있다. 반면, 유리 모세관으로 보호한 브래그 격자의 경우에는 구조물에 발생한 변형률 구배가 모세관에는 그대로 전달되지만 브래그 격자에는 평균화된 값으로 전달되므로 브래그 격자의 신호에는 아무런 영향을 미치지 않았다.

Fig. 3.2.15에서 알 수 있듯이 재킷이 벗겨진 경우와 리코팅 된 브래그 격자의 경우에는 변형률 값에 오차가 발생하였고 유리 모세관으로 보호한 브래그 격자의 경우에는 아무런 오차 없이 변형률을 잘 측정할 수 있었다.



(a) Stripped and recoated FBGs.

(b) Glass-tube protected FBG.

Fig. 3.2.15 Strain results of FBGs.

나. 응력 집중으로 인한 변형률 구배

광섬유 브래그 격자에 내부 변형률 구배를 일으키는 또 다른 요인인 응력 집중에 의한 효과를 알아보기 위해 하중이 가해질 경우 응력 집중이 발생하도록 Fig. 3.2.16과 같이 초기 균열이 존재하는 복합재료로 보강된 콘크리트 빔 시편을 사용하였다.

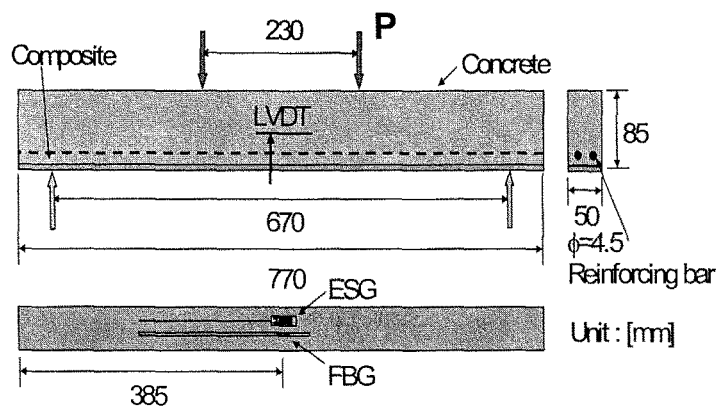


Fig. 3.2.16 Configuration of composite specimen with initial crack.

실험에는 복합재료의 중심 부분에 광섬유 센서와 변형률 값의 비교를 위한 변형률 게이지를 함께 부착하였다. 시편의 제작에 사용된 복합재료는 Hexcel사의 G1059 탄소 섬유와 CIBA사의 LY5052 에폭시를 이용하여 제작한 탄소/에폭시 (Carbon/epoxy) 복합재료이다. 사용된 변형률 게이지는 TML 사의 게이지 길이가 5 mm인 FLA-5-11-11 단축 게이지 이다.

시편 중 콘크리트 부의 중앙 부근에는 약 50 mm길이의 초기 균열이 있어 시편이 하중을 받을 경우 응력 집중 현상이 나타나게 되며 시편에 있는 균열의 실제 모습은 Fig. 3.2.17과 같다.

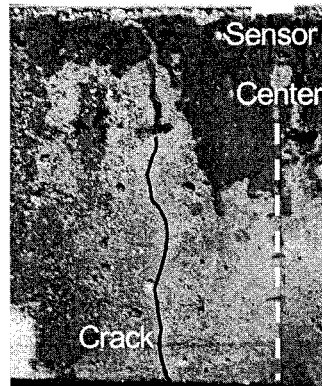


Fig. 3.2.17 Initial crack of concrete beam specimen.

실험에 사용된 지그(jig)와 시편이 만능시험기에 장착된 모습은 Fig. 3.2.18과 같고 실험은 ASTM C78-94를 이용하여 수행하였다.

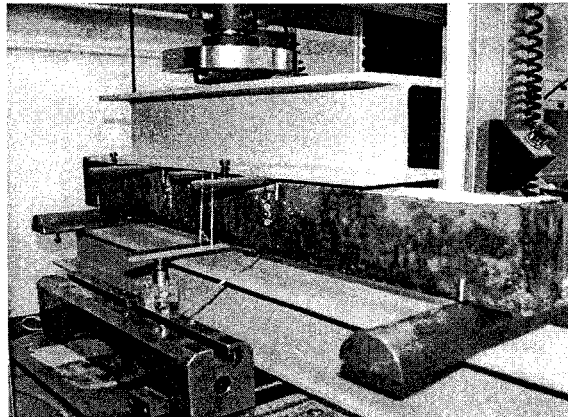


Fig. 3.2.18 Experimental setup of 4-point bending test.

실험 방법은 만능시험기에서 0.5 mm/min의 변위 제어로 압축을 가하면서 시편에는 지그에 의해 4점 굽힘이 가해지도록 하였다. 구성된 실험 장치는 Fig. 3.2.19와 같다.

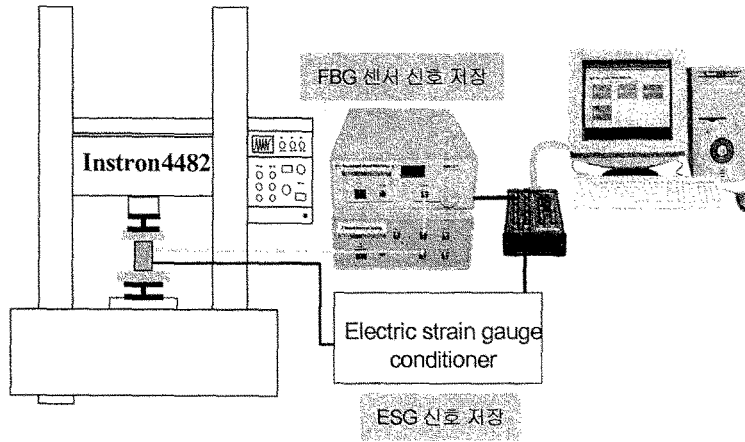


Fig. 3.2.19 Schematic diagram of experimental equipments.

Fig. 3.2.19에서처럼 굽힘을 받는 동안 광섬유 브래그 격자 센서의 신호는 광섬유 센서 시스템을 통해, 변형률 게이지 신호는 컨디셔너를 거친 후 컴퓨터의 DAQ 보드를 통해 0.2 Hz의 간격으로 컴퓨터에 동시에 저장되도록 하였다.

본 실험에 앞서 응력 집중이 생길 때 재킷이 벗겨져 있는 일반적인 광섬유 브래그 격자 센서가 나타내는 신호 특성을 알아보는 실험을 수행하였다. 이 경우 Fig. 3.2.20에서 알 수 있듯이 하중이 약 0.5 KN일 때부터 하나의 센서 피크가 두 개로 갈라져 이후의 하중에 대해서는 정확한 변형률을 측정할 수 없었다. 이는 응력 집중으로 인한 변형률 구배가 균일하던 브래그 격자의 간격에 구배를 유발하였기 때문이다. 이러한 현상은 마찬가지로의 이유로 인해 리코팅을 한 광섬유 브래그 격자에도 똑같이 나타났다.

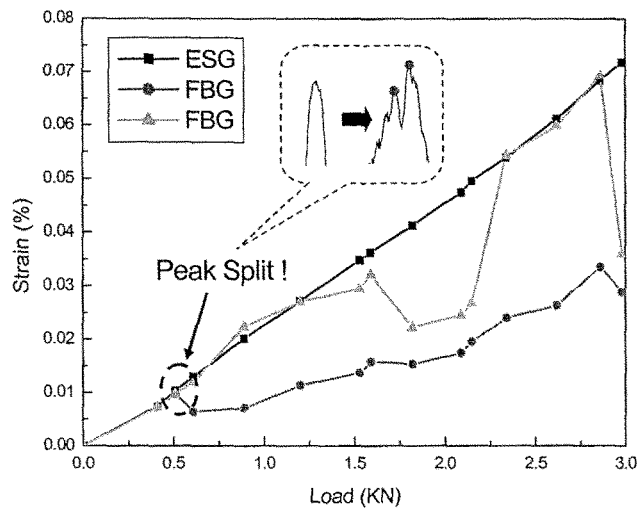


Fig. 3.2.20 Peak split induced by stress concentration.

이를 해결하기 위해 격자 부분을 유리 모세관으로 보호한 광섬유 브래그 격자에 대해 굽힘 실험을 수행하였다. 실험 결과 Fig. 3.2.21에서처럼 하중이 증가하여도 브래그 격자의 신호는 갈라짐 없이 전 하중 구간에 걸쳐 변형률을 잘 측정하였다. 측정된 변형률 값은 변형률 게이지와 최대 3 %이내의 오차를 보이며 잘 일치하였다.

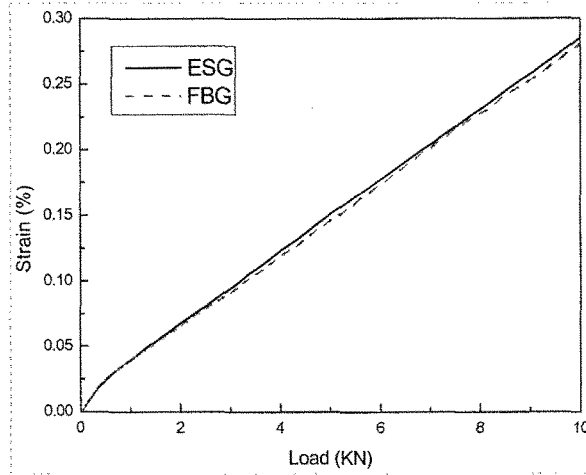


Fig. 3.2.21 Strains measured by FBG and ESG.

Fig. 3.2.22는 하중에 따른 차동 변압기(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)로 측정된 변위값을 나타내고 있다. 실험의 초기부분에서 변위가 증가함에 따라 하중이 거의 증가하지 않는 이유는 콘크리트의 초기 균열이 닫히는 과정동안에는 하중을 지지하지 못하기 때문이다.

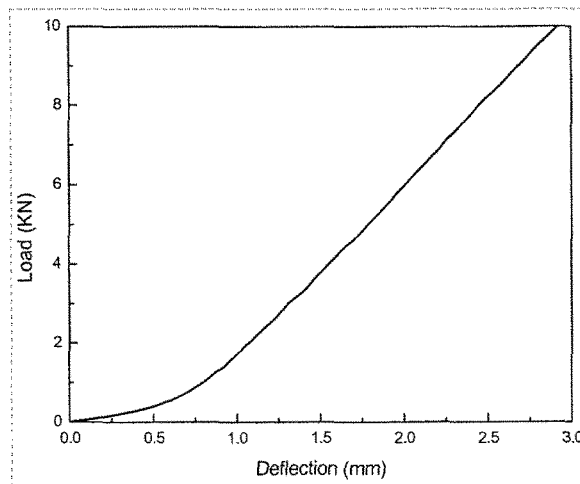


Fig. 3.2.22 P- δ (load vs deflection) curve.

4. 결론 및 고찰

가. 유도 복굴절에 따른 광섬유 브래그 격자의 신호 특성과 삽입 안정성

복합재료에 광섬유 브래그 격자를 삽입 적용할 경우 복합재료의 강화 섬유는 복합재료의 경화 과정을 통해 광섬유에 횡방향 응력이 가해지고 결과적으로 광섬유에 유도 복굴절을 발생시킬 수 있다. 다시 말하면, 강화 섬유의 방향에 따른 광섬유의 삽입 방향이 가장 큰 인자로 작용하며 유도 복굴절량에 따라서 광섬유 브래그 격자의 피크 신호의 갈라짐 여부가 결정된다. 갈라진 피크 신호는 변형률을 측정할 때 오차요인으로 작용하게 된다.

복합재료 시편의 단면을 연마한 후 광학 현미경으로 촬영한 사진을 통해 복합재료 내에서 광섬유의 삽입 안정성에 대한 의미 있는 결과를 도출하였다. 재킷이 벗겨져 있는 광섬유는 광섬유의 삽입 방향에 따라 횡방향 응력에 영향을 주는 레진이 과도한 영역(resin rich region)이 발생할 수 있고 복합재료 강화섬유의 섬유 가닥의 크기는 광섬유에 기계적인 미소 굽힘으로 작용하며 크기에 따라 심할 경우 광섬유의 파손으로까지 이어질 수 있다. 이를 방지하기 위한 기법으로 아크릴 레이트를 이용하여 리코팅하는 방법이 있으며 코팅 후 단면 사진에서 광섬유의 코팅과 광섬유 사이에 공기층에 횡방향 응력에 대해 완충제 역할을 함으로써 횡방향 응력에 대해 안정하였음을 확인하였다. 또한, 아크릴 레이트 리코팅제는 복합재료 경화시의 상대적으로 높은 온도에도 불구하고 코팅효과가 잘 보존됨을 알 수 있었다. 결과적으로, 광섬유 브래그 격자의 복굴절은 횡방향 잔류 응력의 정도와 관계된 강화 섬유에 대한 광섬유의 삽입 각에 의존하며 리코팅을 할 경우 광학적, 기계적으로 미소 굽힘에 의한 복굴절 예방에 효과가 있음을 알 수 있었다. 경화 모니터링을 통해 횡방향 응력이 유도 복굴절에 미치는 영향을 알아보았다. 경화 모니터링 동안 광섬유 브래그 격자 신호의 반사 스펙트럼의 관찰을 통해 재킷이 벗겨진 광섬유 브래그 격자의 경우 2차 온도 지속기간까지는 광섬유 브래그 격자에 복굴절을 일으킬 정도의 횡방향 응력은 작용하지 않았으며 경화 사이클 중에서 냉각 과정에 해당하는 경화 시작 후 약 182 분경에 유도 복굴절이 발생하여 피크 갈라짐 현상으로 이어졌다. 실험에는 복합재료 내의 미소 굽힘에 의한 광손실로 인해 높은 출력을 가지는 WSFL-DPO 광섬유 브래그 격자 센서 시스템이 필요하였다. 한편, 리코팅된 브래그 격자의 경우에는 피크 갈라짐이 발생하지 않았으며 경화 과정을 통해 재킷이 벗겨진 브래그 격자의 경우에는 정규화 된 복굴절 양, 축방향과 횡방향 변형률은 각각 2.56×10^{-4} , $-1,436 \mu\text{strain}$, $-1,267 \mu\text{strain}$ 을 보였다.

나. 광섬유 브래그 격자의 변형률 전달성 실험

복합재료 내에 광섬유 브래그 격자를 삽입 적용할 경우 발생할 수 있는 유도 복굴절 현상은 리코팅이나 유리 모세관을 이용한 보호법 등으로 예방할 수 있다. 하

지만, 이러한 처리 기법은 센서로 브래그 격자를 사용할 경우 변형률 전달성에 문제를 일으킬 수 있다. 복합재료 내에 세 가지 형태의 광섬유 브래그 격자 센서 (Stripped FBG, Recoated FBG, Glass-tube protected FBG)를 삽입 적용한 시편을 제작하고 이 시편들의 인장실험을 통해 리코팅이나 유리 모세관과 같이 센서 헤드 부위에 처리를 하더라도 광섬유가 파손되기 전까지 변형률을 오차 없이 잘 전달함을 확인하였다. 그러나 세 가지 경우 모두 광섬유 브래그 격자 제작시 재킷을 벗기는 과정에서 발생한 미소 결함들에 의해 시편이 파단에 이르기 전에 광섬유가 먼저 파손되는 경향을 보였으며 광섬유 표면의 SEM사진을 통해 이 사실을 확인하였다. 광섬유 표면에 생긴 미소 결함의 크기는 2~20 μ strain 정도였고 이를 방지하기 위한 방법으로 가열장치를 이용하거나 클로로포름과 같은 화학약품을 이용하여 광섬유의 재킷을 벗기는 방법을 이용할 필요가 있다.

다. 광섬유 브래그 격자의 내부 변형률 구배에 의한 신호 특성

광섬유 브래그 격자에 내부 변형률 구배를 일으키는 요인으로서는 구조물의 기하학적 형태에 의한 변형률 구배와 응력 집중 등과 같은 하중 조건에 의한 변형률 구배의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 인위적으로 제작한 경사진 알루미늄 시편에 대한 인장 실험을 통해 기하학적 형태로 인해 발생된 변형률 구배가 광섬유 브래그 격자의 신호에 미치는 영향을 확인하였고, 초기 균열이 존재하는 복합재료로 보강된 콘크리트 빔의 4점 굽힘 실험을 통해 균열에 따른 응력 집중이 광섬유 브래그 격자의 신호에 미치는 영향에 대해서도 알아보았다. 실험 결과에서 내부 변형률 구배는 브래그 격자의 브래그 조건을 만족시키는 파장의 다중화를 초래하고 이로 인해 반사 스펙트럼에서 피크 신호의 갈라짐을 유발하였다. 그러므로 재킷이 벗겨진 경우와 리코팅 된 브래그 격자의 경우에는 구조물의 변형률 구배가 브래그 격자에 그대로 전달되므로 변형률이 증가함에 따른 피크 신호의 갈라짐을 막을 수 없었지만 유리 모세관으로 보호한 브래그 격자의 경우에는 구조물에 발생한 변형률 구배가 모세관에는 그대로 전달되지만 브래그 격자에는 평균화된 값으로 전달되므로 피크 신호의 갈라짐 없이 변형률을 잘 측정함을 확인할 수 있었다.

한편, 응력 집중으로 인한 변형률 구배가 광섬유 브래그 격자에 미치는 영향을 알아보는 실험에서는 재킷이 벗겨져 있는 일반적인 광섬유 브래그 격자 센서의 경우에는 실험 시작 후 얼마 되지 않아 하나의 센서 피크가 두 개로 갈라져 이후의 하중에 대해서는 정확한 변형률을 측정할 수 없었다. 이는 응력 집중으로 인한 변형률 구배가 균일하던 브래그 격자의 간격에 구배를 유발하였기 때문이다. 이러한 현상은 마찬가지로의 이유로 인해 리코팅을 한 광섬유 브래그 격자에도 똑같이 나타났다. 하지만, 유리 모세관으로 격자 부분을 보호한 광섬유 브래그 격자의 경우에는 유리 모세관에 의해 평균화된 변형률이 광섬유 브래그 격자에 전달되어 피크 갈라짐 현상이 발생하지 않고 변형률을 잘 측정하였다.

제 3 절 구조물의 온도 및 변형 동시 측정을 위한 광섬유 센서 시스템 개발

구조물이 받는 기계적, 열적 영향을 모니터링하기 위해서는 구조물의 변형률과 온도를 측정하는 일이 매우 중요하다. 일반적으로 구조물에 가해진 1°C의 온도 변화는 10 $\mu\epsilon$ 의 변형률 변화와 같은 영향을 주는 것으로 알려져 있으며 구조물이 반복적인 열하중을 받게 되면 열변형에 의한 구조물의 강도·강성저하 뿐만 아니라 구조물의 치수 안정성에 문제가 생길 수 있다. 따라서 구조물의 열변형 특성 및 거동 파악을 위해 변형률 뿐만 아니라 온도까지 동시에 측정할 수 있는 방법이 필요하다

1. 센서 보정 실험을 통한 센서 특성행렬 역변환법

변형률과 온도를 측정하는데 있어서 가장 간단한 방법은 각각의 물리량 측정을 위하여 물리적으로 다른 센서를 사용하는 것이다. 그러나 최근 들어 단일 광섬유 감지 요소를 사용하여 구조물의 변형률과 온도를 동시에 측정하기 위한 광섬유 센서의 구성 및 신호처리 기법 개발에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다[2~14]

일반적으로 광섬유 센서의 출력 ϕ_1 과 ϕ_2 에 대한 변형률 ϵ 과 온도변화 ΔT 간의 관계는 다음 식 (3.1)과 같이 주어진다.

$$\begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1\epsilon} & K_{1T} \\ K_{2\epsilon} & K_{2T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

식 (3.1)에서 센서의 출력 ϕ_1 과 ϕ_2 는 측정을 위해 사용되는 센서의 종류에 따라 달라지는데, 이중 브래그 격자(dual-wavelength fibre grating sensors)를 사용하는 경우[2]는 사용된 브래그 격자들의 브래그 파장 이동을 나타내는 $\Delta\lambda_{B1}$ 과 $\Delta\lambda_{B2}$ 가 되며, FBG/EFPI 센서와 같이 브래그 격자와 외부 패브리-페로 간섭계를 혼합한 복합 센서의 경우[9]에는 패브리-페로 간극 길이의 변화인 Δd 와 FBG의 브래그 파장 이동 $\Delta\lambda_B$ 가 된다. 식 (3.1)에서 센서의 특성행렬 K 의 계수들은 센서의 변형률과 온도에 대한 민감도를 나타낸다. 센서의 특성행렬의 계수들을 구하기 위하여 대부분의 연구에서는 센서를 구조물에 적용하기 전에 보정실험을 수행하였다. 이러한 보정실험은 변형률만을 가한 실험을 통해 계수 K_{1s} 과 K_{2s} 를 구하고, 또한 온도만을 가한 실험을 하여 K_{1T} 와 K_{2T} 를 각각 구하는 방법을 사용한다. 보정실험을 통해 구해진 행렬의 각 계수들을 식 (3.1)에 대입하고 역변환하면, ϕ_1 과 ϕ_2 로부터 변

형률과 온도를 구할 수 있는 식 (3.2)와 같이 나타내어진다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1\varepsilon} & P_{2\varepsilon} \\ P_{1T} & P_{2T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 P 행렬은 식 (3.1)의 K 행렬의 역행렬이다. 이렇게 구해진 식 (3.2)를 사용하여 센서의 출력으로부터 변형률과 온도를 동시에 구할 수 있다. 그러나 게이지 길이와 같은 센서의 사양이 다른 센서를 사용하게 되면, 이러한 사양이 다른 각각의 센서에 대해 K 행렬의 계수들을 구하기 위해 보정실험을 매번 수행해야 하므로 시간을 많이 소요하며 비경제적이다. 그리고 행렬 역변환 방법에서의 가장 큰 단점은 작은 행렬식(determinant)에 의해 역변환에서 poor condition이 발생하며 결과적으로 오차가 커지게 되며 정확성이 낮아지는 현상이 자주 발생한다는 것이다. 따라서 행렬 역변환법을 이용하지 않고 센서의 특성행렬(P 행렬)을 구할 수 있는 방법이 요구되며 본 연구에서는 이러한 문제점의 해결책으로서 FBG/EFPI 센서에 대해 특성행렬을 이론적으로 유도하였다.

2. FBG/EFPI 센서 특성행렬의 이론적 유도

FBG/EFPI 센서의 형상은 Fig. 3.3.1과 같다. FBG가 외부 변형률로부터 격리되기 위하여 유리 모세관(capillary)에 삽입된다. EFPI의 공진 간극(cavity)은 유리 모세관에 삽입된 FBG와 가까운 광섬유의 끝단면과 모세관 반대쪽에 삽입된 광섬유의 수직 절단면에 의해 형성된다. 유리 튜브에 의해 외부와 격리된 FBG는 변형률을 받지 않는 상태(strain-free condition)가 되며 모세관 내부의 온도 변화에 의해서만 영향을 받는다. 반면에, 유리 모세관과 두 광섬유 반사면으로 구성된 EFPI는 구조물에 모세관이 접착되므로 센서에 가해진 열변형률과 기계적 변형률에 모두 영향을 받는다. 이러한 FBG/EFPI 센서에 광대역 광원을 조사하면, FBG는 고반사율의 좁은 대역폭을 가지는 반사 스펙트럼을 보여주며, 반면에 저피네스 간섭계(low-finesse interferometer)인 EFPI는 출력이 낮은 정현파 형태의 광대역 반사 스펙트럼을 보여준다

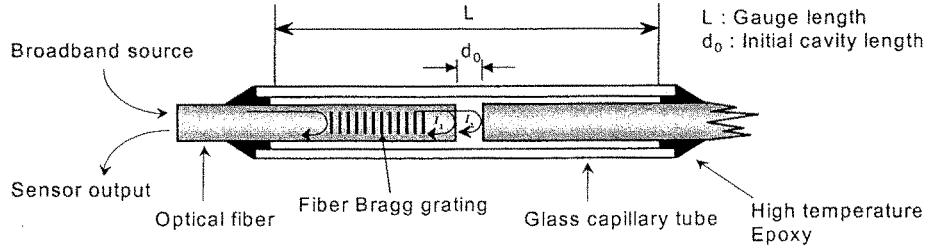


Fig. 3.3.1 Configuration of FBG/EFPI sensor.

유리 모세관 내부에 삽입되어 있으므로 변형률을 받지 않는 FBG의 브래그 파장의 이동으로부터 아래의 식 (3.3)을 이용하여 온도 변화를 측정할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha_f + \xi_f} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (3.3)$$

식 (3.3)에서 α_f 는 광섬유의 열팽창 계수이고 ξ_f 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수이다.

반면, EFPI는 구조물에 가해진 기계적 변형률뿐만 아니라 열 변형률에 의해서도 영향을 받는다. 구조물이 열하중을 받을 때, 센서가 구조물에 완전 접촉되었다고 가정하면 센서의 열팽창계수는 주구조물의 열팽창계수와 같도록 구속된다. 그러므로 구조물에 삽입되거나 부착된 광섬유 센서의 열팽창은 구조물의 열팽창과 같다.

광대역 광원을 사용한 EFPI 센서의 간극 길이 변화로부터 식 (3.4)를 사용하여 변형률을 측정할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_o}{L} = \frac{\Delta d}{L} \quad (3.4)$$

그리고 식 (3.4)에서 L 은 센서의 게이지 길이, d_o 는 변형을 가하기 전 초기의 간극 길이, d_n 는 변형이 가해진 후의 간극 길이, 그리고 Δd 는 변형 전후의 간극 길이의 차이이다. FBG/EFPI 센서가 삽입되거나 부착된 구조물에 온도와 변형률이 가해졌을 때, 모세관 내부 간극을 형성시키는 두 광섬유의 길이는 온도 변화에 따른 광섬유의 열팽창계수에 의해 변한다. 반면, 유리 모세관은 구조물의 열 변형률과 기계적 변형률을 모두 받게 된다. 따라서 모세관 내부의 두 광섬유와 모세관 사이의 길이 변화 차이에 의해서 반사광의 스펙트럼이 변하게 되고 이를 통해 구조물에 가해진 총 변형률을 구할 수 있다. EFPI의 간섭 신호로부터 구해진 변형률은 다음 식과 같다.

$$\varepsilon_{EFPI} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{f,T} = \frac{\Delta d}{L} \quad (3.5)$$

식 (3.5)에서 ε_{tot} 는 구조물에 가해진 열 변형률과 기계적 변형률의 합, 즉 총 변형률이며, $\varepsilon_{f,t}$ 는 모세관 내부의 광섬유의 열 변형률이다. 광섬유 센서가 기계적 변형률만을 받는다면 식 (3.4)에 의해 변형률을 측정할 수 있지만, 센서에 열이 가해지면 내부 광섬유도 열팽창계수에 따라 길이가 늘어나게 되므로 간극 길이를 감소시키게 된다. 따라서 취득된 EFPI 센서 신호가 나타내는 변형률은 식 (3.5)와 같이 구조물의 총 변형률에서 내부 광섬유의 열 변형률을 빼 준 만큼만을 나타내게 된다. 그러므로 구조물의 총 변형률을 구하기 위해서는 EFPI 센서 신호로부터 구한 변형률에 모세관 내부 광섬유의 열팽창에 의한 항을 더해 주어야 하며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\Delta d}{L} + \varepsilon_{f,T} = \frac{\Delta d}{L} + \frac{L-d_0}{L} \cdot \alpha_f \cdot \Delta T \quad (3.6)$$

식 (3.6)에서 온도 변화에 관한 항을 소거하기 위하여 식 (3.3)을 식 (3.6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_{st} = \frac{\Delta d}{L} + \frac{L-d_0}{L} \cdot \frac{\alpha_f}{\alpha_f + \xi_f} \cdot \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (3.7)$$

온도에 관련된 식 (3.3)과 변형률에 관계된 식 (3.7)을 결합하면, 변형률과 온도 변화에 대한 센서 출력의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{L-d_0}{L} \cdot \frac{\alpha_f}{\alpha_f + \xi_f} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \\ 0 & \frac{1}{\alpha_f + \xi_f} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d \\ \Delta \lambda_B \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

식 (3.2)와 식 (3.8)을 비교하면 센서 특성행렬(P 행렬)의 계수들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{1\varepsilon} &= \frac{1}{L} \quad , \quad P_{2\varepsilon} = \frac{L-d_0}{L} \cdot \frac{\alpha_f}{\alpha_f + \xi_f} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \\ P_{1T} &= 0 \quad , \quad P_{2T} = \frac{1}{\alpha_f + \xi_f} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \end{aligned} \quad (3.9)$$

식 (3.8)로부터 센서의 특성행렬은 센서의 게이지 길이, FBG의 브래그 파장, 그리고 광섬유의 열팽창계수와 열광학계수와 같은 센서의 사양에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 기존의 행렬 역변환 방법에서는 사양이 다른 모든 센서에 대해 실제 적용에 앞서 센서의 특성행렬을 구하기 위해 보정실험을 수행하여야 한다. 그러나 식 (3.8)을 사용함으로써 센서의 알고 있는 사양들로 특성행렬을 쉽게 구할 수 있고 구조물의 변형률과 온도를 보정실험 없이 동시에 측정할 수 있다.

3. FBG/EFPI 센서 제작

실험에 사용된 FBG/EFPI 센서는 Fig. 3.3.1과 같으며 유리 모세관 내부에 삽입된 FBG의 길이는 10 mm이고 FBG를 외부 변형률과 격리시키기 위해 사용된 모세관의 내경과 외경은 각각 약 140 μm , 300 μm 이다. 센서 제작을 위해 사용된 광섬유의 열팽창계수는 0.5 ppm/ $^{\circ}C$ 이고 열광학계수는 6.2 ppm/ $^{\circ}C$ 이다. 또한 광섬유 센서의 게이지 길이는 27.15 mm이고 변형률과 온도를 가하기 전의 초기 간극 길이는 541 μm , 그리고 FBG의 브래그 파장은 1536.96 nm이다. 센서 공진 간극에서의 내부 반사율을 높이고 센서의 피네스 및 감지도를 증대시키기 위해 두 번째 반사면인 광섬유의 수직절단면에 금을 진공증착하였다. 또한 고온에서도 사용할 수 있도록 센서 제작시 광섬유와 유리 모세관을 접착하기 위해 국도화학의 고온용 에폭시 ($\sim 250^{\circ}C$)를 사용하였다. 제작된 센서의 사양은 Table 3.3.1과 같다.

Table 3.3.1 Specification of FBG/EFPI sensor.

Specification	Symbol	Value
Gage length	L	27.15 mm
CTE of optical fiber	α_f	0.5 ppm/ $^{\circ}C$
Thermo-optic coefficient	ξ_f	6.2 ppm/ $^{\circ}C$
Bragg wavelength	λ_B	1536.96 nm
Initial cavity length	d_0	541 μm

4. 실험 장치 및 방법

Fig. 3.3.2는 실험장치의 구성도이다. 제작된 광섬유 센서를 알루미늄 합금 보 접착필름을 사용하여 부착하고, 반대면에는 변형률을 비교하기 위한 고온용의 옆면에 CYNAMID사의 FM-73M 스트레인 게이지와 온도를 비교하기 위한 K-type의 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 사용된 고온용 게이지는 게이지 길이가 5 mm

인 TML사의 BFLA-5-3 모델이며, 구조물과 스트레인 게이지의 열팽창 차이 및 스트레인 게이지의 온도에 의한 저항값의 변화에 따른 오차를 보상해 주기 위해 회로 보상법을 사용하였다. 회로보상법은 저항이나 전압의 변화를 통해서 외부에서 주어진 변형률을 변형률 게이지의 열변형률과 상쇄되도록 하는 방법이다. 이를 위해서는 열변형률이 극히 작은 기준 물질이 필요하며 본 연구에서는 기준 물질로서 열팽창계수가 극히 작은($\alpha \approx 0.3 \text{ ppm/C}$) 티타늄 실리케이트(titanium silicate)를 사용하였다[15~16]. 회로의 구성은 측정하고자 하는 시편과 기준 물질에 각각 한 개의 변형률 게이지를 부착하고 하프브리지(half bridge)로 구성하였다.

광섬유 센서와 스트레인 게이지, 그리고 열전대를 부착한 알루미늄 합금보의 한 쪽 끝을 고정지지하고 열챔버에 내부에 설치하였다. 광원으로는 WSFL을 사용하였으며 파장 좌표계 설정을 위해 피크간 간격이 1 nm인 패브리-페로 에달론을 사용하였다. 광검출기로 감지된 광섬유 센서의 반사 신호는 National Instruments사의 A/D 변환 보드(PCI 6110E)를 통해 컴퓨터로 취득하였으며 신호처리 프로그램을 사용하여 신호를 처리하고 저장하였다. 열챔버 내에서의 실험 온도 범위는 20 °C - 100 °C이다. 취득된 광섬유 센서의 신호의 후처리를 통하여 알루미늄 외팔보에 가해진 변형률과 온도를 구하였다.

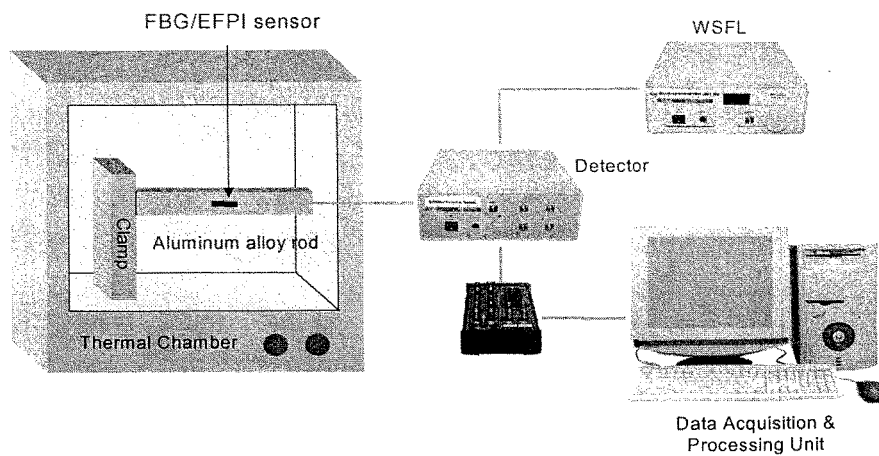


Fig. 3.3.2 Schematic diagram of experimental set-up

5. 실험 결과 및 토의

Table 3.3.1과 같은 센서의 사양을 식 (3.8)에 대입하면 다음과 같은 센서 출력과 온도 및 변형률과의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 36.82 & (\mu\varepsilon / \mu m) & 47.40 & (\mu\varepsilon / nm) \\ 0 & (^{\circ}C / \mu m) & 97.17 & (^{\circ}C / nm) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d \\ \Delta \lambda_B \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

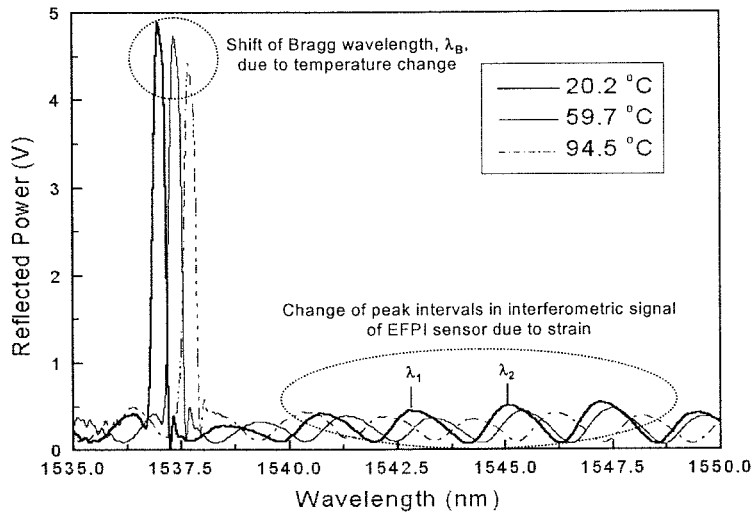


Fig. 3.3.3 Reflected spectrum of the FBG and EFPI sensors along the temperature elevation.

Fig. 3.3.3은 열챔버 내에서 열하중을 받는 알루미늄 외팔보에 부착된 FBG/EFPI 센서의 온도에 따른 반사 스펙트럼을 보여준다. 이 반사 스펙트럼에서, FBG의 브래그 파장 이동($\Delta\lambda_B$)을 관찰하여 온도 변화를 측정할 수 있으며, EFPI의 간섭 신호에서 피크간 간격의 변화로부터 구한 공진 간극의 길이 변화량(Δd)을 측정하여 구조물에 가해진 총변형률을 구할 수 있다. 그리고 식 (3.10)을 이용하여 구조물에 가해진 변형률과 온도 변화를 동시에 측정할 수 있다.

Fig. 3.3.4는 광섬유 센서와 스트레인 게이지로 측정한 변형률을 보여주며, Fig. 3.3.5는 광섬유 센서와 열전대로 측정한 온도를 보여준다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이 FBG/EFPI 센서를 사용한 변형률과 온도의 동시 측정이 센서의 보정실험 없이 이론적으로 유도된 식을 사용하여 성공적으로 수행되었다. 광섬유 센서와 스트레인 게이지로 측정한 변형률 사이의 상관관계는 99.8 %의 일치성을 보였으며, 측정된 온도 사이의 관계는 99.9 %의 상관관계를 보였다. 실험 결과, 0-2000 μ strain의 변형률 범위와 20-100 $^{\circ}C$ 의 온도 범위에서 측정된 변형률과 온도의 표준편차는 각각 35.9 $\mu\varepsilon$, 1.1 $^{\circ}C$ 였다.

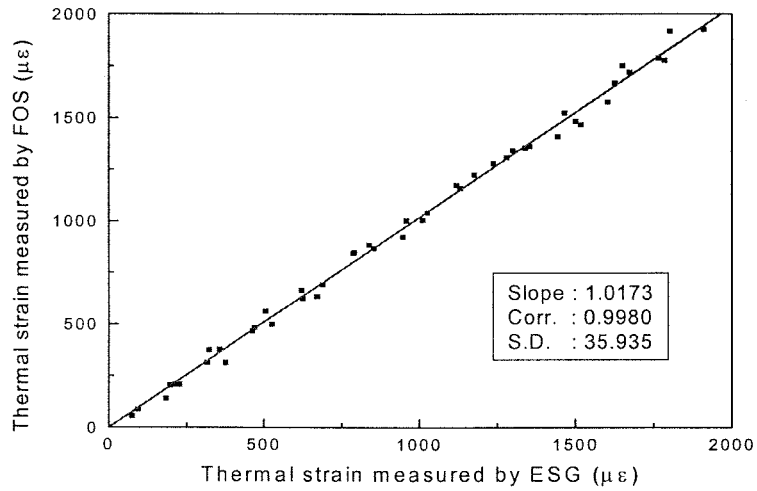


Fig. 3.3.4 Thermal strains measured by FOS and ESG.

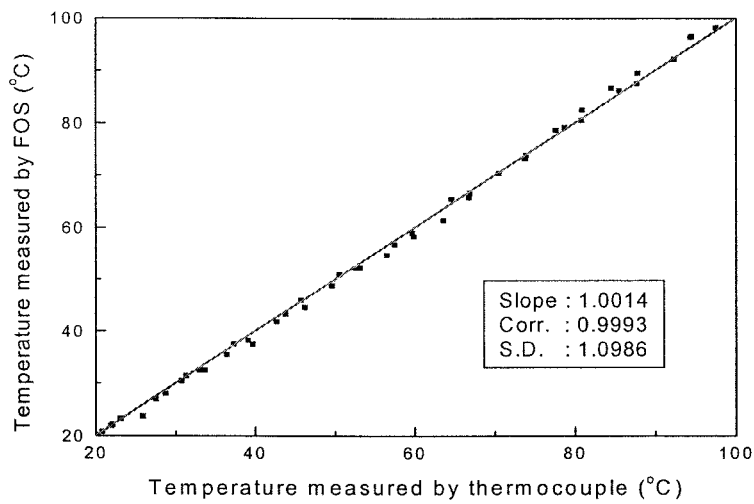


Fig. 3.3.5 Temperatures measured by FOS and thermocouple.

기존의 행렬 역변환 방법을 사용할 경우, 변형률과 온도에 대해서 각각 1 번씩, 최소한 2 번의 보정 실험이 필요하며 정확한 값을 구하기 위해서는 많은 실험을 통해 얻어진 데이터 통계적 처리가 필요하기 때문에, 센서 보정 실험은 시간을 소비하며 비경제적이다. 그러므로 본 연구에서 제안한 센서 보정 실험이 필요 없는 이론적 유도식을 사용한 방법이 더욱 효율적임을 알 수 있다.

제 4 절 광섬유 센서를 이용한 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력 탱크의 건전성 모니터링

1. 광섬유 센서를 이용한 성형 모니터링의 필요성

복합재료 구조물은 진공백 오토클레이브 성형법, hot press, RTM(resin transfer molding), 펄트루전(pultrusion), 그리고 필라멘트 와인딩(filament winding) 등 여러 가지 성형 방법에 의해 제작된다. 이러한 방법들 중에서 오토클레이브 성형법은 고품질의 항공우주 구조물의 제작에 많이 사용되고 있다. 복합재료 성형 중에 발생하는 성형변형률은 warpage나 spring-in과 같은 중대한 문제점을 발생시켜 제작된 복합재료 구조 부재의 조립을 어렵게 만든다. 또한 성형 사이클의 냉각단계에서 복합재료 보강섬유와 모재간의 열팽창계수 차이 및 다른 적층각을 갖는 층간의 열팽창 차이에 의해 복합재료 내부에 잔류응력이 발생하며 이러한 잔류응력은 압축좌굴 강도와 파괴 강도, 그리고 피로 강도 등의 복합재 구조물의 기계적 물성치를 저하시킨다[24]. 또한 잔류응력은 복합재료 내부에 미소응력에 큰 영향을 주며 외부의 기계적 하중에 의해 발생하는 응력과 더해져 균열 초기화 및 빠른 균열 진전의 원인이 될 수 있다[25-26]. 잔류응력의 영향은 일반적으로 비대칭 적층판에의 워핑(warping)에서 쉽게 볼 수 있으며 비대칭 적층판의 상온에서의 형상은 고전적층판 이론(classical laminate theory)의 예측과 항상 일치하지는 않으므로 성형후의 비대칭 복합적층판의 형상을 해석적으로 예측하기 위한 연구들도 수행되어 왔다[27-32]. 잔류응력은 제작된 복합재료 구조물의 품질에도 영향을 주므로 성형에 의해 모재뿐만 아니라 보강섬유에 발생하는 잔류응력을 감소시키기 위한 성형조건 최적화에 대한 연구가 수행되어 왔다[33-36].

최종적으로 제작된 복합재료 부재의 품질은 성형시간, 온도, 그리고 압력과 같은 성형 조건에 의해 직접적으로 영향을 받는다. 그러므로 성형되는 복합재료 내부에서의 온도, 잔류응력의 발생, 점성, 성형도(degree of cure), 그리고 수지 흐름과 같은 정보는 성형 동안 적층판 내부의 시간과 위치에 대한 함수로서 정량화될 필요가 있다[37]. 성형 조건에 대한 지식은 제작 비용을 감소시키면서 고품질의 복합재료를 제작하는데 큰 도움을 주며, 따라서 최적 성형 조건을 결정하는 것은 매우 중요하다. 지금까지 성형 조건은 여러 번의 trial-and-error test를 통해 실험적으로 결정되었다. 그러나 이러한 과정은 시간을 많이 소모하며 비효율적이다. 그러므로 복합재료의 내부의 지점에서 실시간으로 성형 과정을 모니터링할 수 있는 센서가 필요하다.

복합재료에 쉽게 삽입될 수 있는 광섬유 센서는 복합재료의 성형 모니터링을 위한 가장 알맞은 센서이다. 광섬유 센서는 크기가 작아 복합재료의 기계적 물성에 거의 영향을 주지 않으면서 프리프레그 내부에 원하는 방향과 위치로 적용될 수 있다. 또한 전기저항식 방법과 유전기법 등과 같은 다른 성형 모니터링 기법과 비교

하여 광섬유 센서를 이용한 방법의 장점은 전자기 간섭의 영향을 거의 받지 않는다는 것이다. 그러므로 광섬유 센서는 성형과정 동안 성형변형률과 온도 등과 같은 여러 가지 파라미터들을 모니터링하는데 이용될 수 있으며 성형후 구조물의 운용 중에는 구조물의 건전성을 평가하는데 이용될 수 있다.

광섬유 센서를 이용한 복합재료 성형 모니터링에 관한 대부분의 연구들은 성형변형률만을 측정하였다[17-23]. 그러나 최근 광섬유 센서를 이용하여 변형률과 온도를 동시 모니터링하는 기법에 대한 연구들이 많이 수행되어 왔으며 이러한 기법들을 이용함으로써 단일 광섬유 센서로 성형변형률과 성형온도를 동시에 모니터링할 수 있다.

2. FBG/EFPI 센서를 이용한 복합재료 적층판의 성형 모니터링

가. FBG/EFPI 센서를 삽입한 복합재료 적층판의 제작

4 가지의 복합재료 적층판에 대해 각각 2개씩의 FBG/EFPI센서를 방향이 서로 수직이 되도록 삽입하여 성형 모니터링 실험을 수행하였다. (i) 일방향 적층: $[0_{12}/\{0,90\}/0_{12}]_T$, (ii) 대칭 직교적층: $[0_3/\{0\}/0_3/90_6/\{90\}/90_6/0_6]_T$, (iii) 비대칭 직교적층: $[0_6/\{0\}/0_6/90_6/\{90\}/90_6]_T$, (iv) 평직 적층: $[Fabric_8/\{0,90\}/Fabric_8]_T$. 적층각 표기에서 {} 는 광섬유 센서의 삽입 위치와 방향을 나타낸다. 일방향 적층과 대칭비대칭 직교적층에 사용된 일방향 프리프레그는 한국화이버(주)의 graphite/epoxy 프리프레그인 CU-125NS이며 평직 적층에 사용된 프리프레그는 carbon/epoxy 직물 프리프레그인 CF-3327 EPC이다.

복합재료 적층판의 성형 모니터링에 적용된 광섬유 센서는 Fig. 3.4.1과 같은 FBG/EFPI 센서이다. FBG/EFPI 센서의 유리 모세관 내부에 삽입된 FBG의 게이지 길이는 10 mm이며 각 복합재료 적층판에 사용된 센서들의 사양은 Table 3.4.1과 같으며 센서의 사양을 식 (3.8)에 대입하면 각 센서들에 대한 특성행렬의 성분들을 Table 3.4.2와 같이 구할 수 있다.

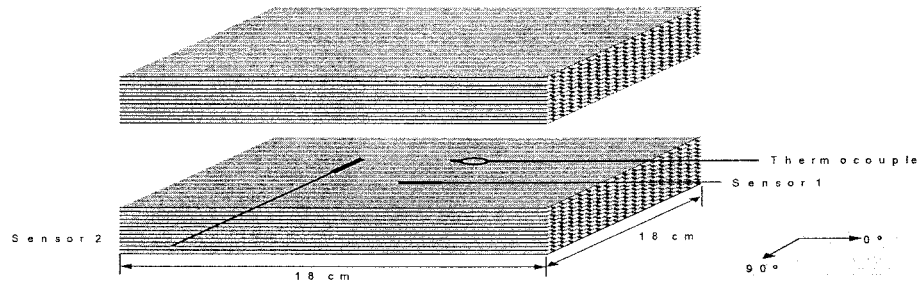
Table. 3.4.1 Specifications of embedded FBG/EFPI sensors for cure monitoring.

Specifications	Gage length	Bragg wave-length	Initial cavity length	CTE optical fiber	Thermo-optic coeff.	
Symbol	L	λ_B	d_o	α_f	ξ_f	
Unit	mm	nm	μm	$ppm/^\circ C$	$ppm/^\circ C$	
$[0_{12}/\{0,90\}/0_{12}]_T$	Sensor 1	24.3	1532.003	664.56	0.5	6.2
	Sensor 2	24.5	1532.441	642.66		
$[0_3/\{0\}/0_3/90_6/\{90\}/90_6/0_6]_T$	Sensor 3	24.8	1532.050	660.55	0.5	6.2
	Sensor 4	23.9	1532.070	680.55		
$[0_6/\{0\}/0_6/90_6/\{90\}90_6]_T$	Sensor 5	29.6	1536.595	551.21	0.5	6.2
	Sensor 6	25.3	1536.579	600.31		
$[Fabric_8/\{0,90\}/Fabric_8]_T$	Sensor 7	25.6	1536.135	587.53	0.5	6.2
	Sensor 8	24.0	1536.201	633.87		

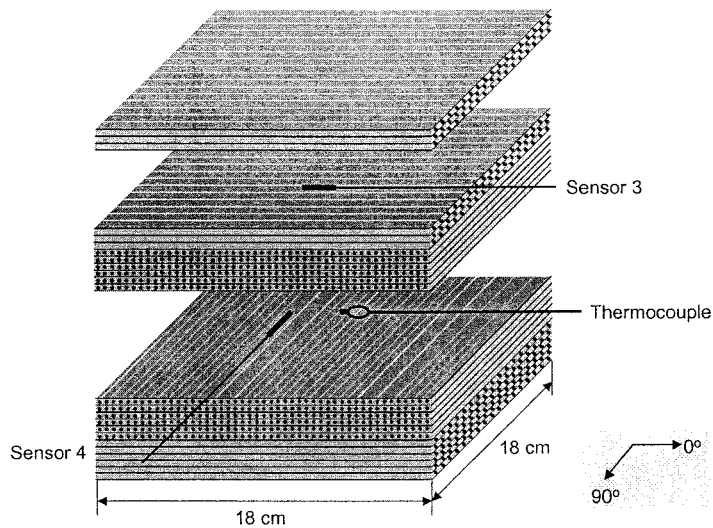
Table. 3.4.2 Components of characteristic matrices of embedded FBG/EFPI sensors for cure monitoring.

Symbol	$P_{1\varepsilon}$	$P_{2\varepsilon}$	P_{1T}	P_{2T}	
Unit	$\mu\varepsilon/\mu m$	$\mu\varepsilon/nm$	$^\circ C/\mu m$	$^\circ C/nm$	
$[0_{12}/\{0,90\}/0_{12}]_T$	Sensor 1	41.15	47.38	0	97.42
	Sensor 2	40.82	47.42	0	97.40
$[0_3/\{0\}/0_3/90_6/\{90\}/90_6/0_6]_T$	Sensor 3	40.32	47.41	0	97.42
	Sensor 4	41.84	47.32	0	97.42
$[0_6/\{0\}/0_6/90_6/\{90\}90_6]_T$	Sensor 5	33.78	47.66	0	97.13
	Sensor 6	39.53	47.41	0	97.13
$[Fabric_8/\{0,90\}/Fabric_8]_T$	Sensor 7	39.06	47.47	0	97.16
	Sensor 8	41.67	47.30	0	97.16

Fig. 3.4.1은 4 가지의 적층판에 대하여 각각 두 개의 광섬유 센서와 열전대를 삽입한 모습을 보여준다. 광섬유 센서들과 함께 오토클레이브 작동시 온도 제어와 기준 온도 측정을 위해 K-type의 열전대를 각 시편의 중간층에 삽입하였다.

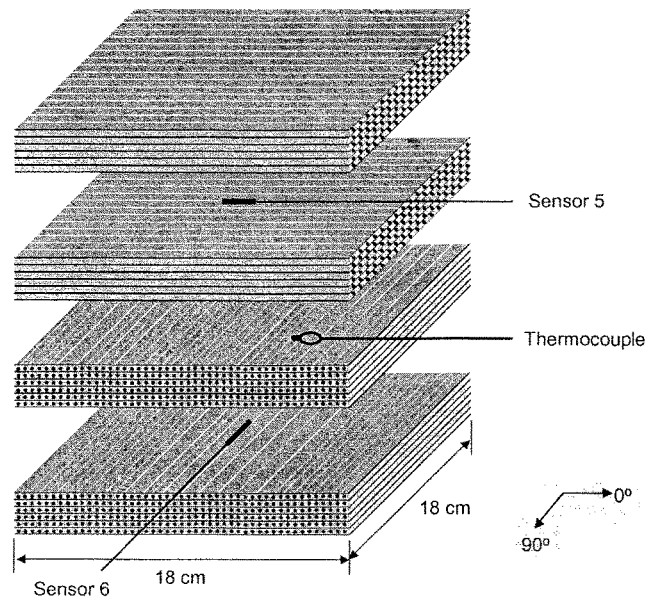


(a) Unidirectional laminate: $[0_{12}/\{0,90\}/0_{12}]_T$

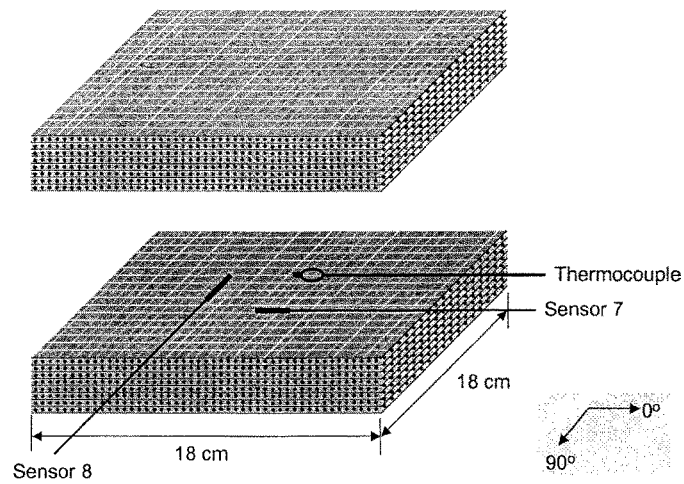


(b) Symmetric cross-ply laminate: $[0_3/\{0\}/0_3/90_6/\{90\}/90_6/0_6]_T$

Fig. 3.4.1 Directions and locations of FBG/EFPI sensors embedded in laminates (Cont'd).



(c) Unsymmetric cross-ply laminate: $[0_6/\{0\}/0_6/90_6/\{90\}/90_6]_T$



(d) Fabric laminate: $[Fabric_8/\{0,90\}/Fabric_8]_T$

Fig. 3.4.1 Directions and locations of the fiber optic sensors embedded in laminates

나. 실험 장치 및 방법

Fig. 3.4.2는 graphite/epoxy 복합재료의 일반적인 성형 사이클이다. 일반적으로 Gr/Ep 복합재료의 오토클레이브 성형법은 크게 3단계로 구분된다. 1단계는 수지의 점성을 낮춰 적층판 내부의 기포를 제거하고 수지를 골고루 분산시키기 위하여 온도를 80℃까지 올려 30분간 유지한다. 2단계에서는 적층판의 온도를 최종 성형온도(130℃)로 올리고 약 2시간 동안 유지하여 성형시킨다. 그리고 마지막 3단계에서는 적층판의 온도를 상온으로 냉각한다. 이러한 일련의 성형과정을 거치면서 복합재료는 극심한 온도 변화를 겪게 되고 적층판 내부에 성형변형률 및 응력이 발생하게 된다.

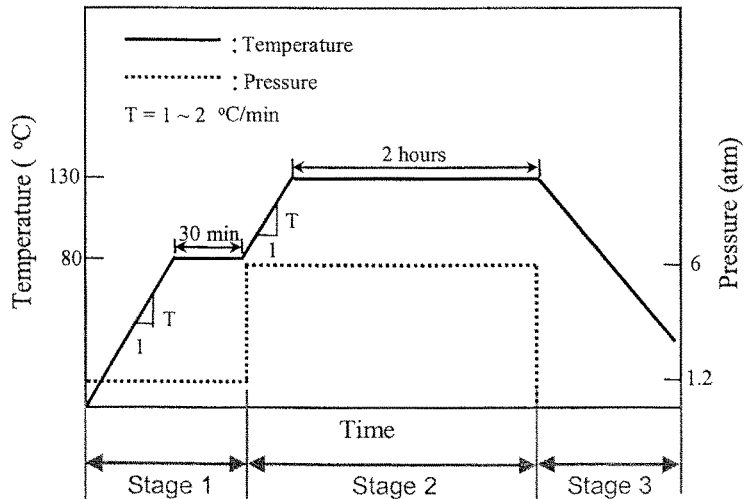


Fig. 3.4.2 Curing cycle of graphite/epoxy composite in the autoclave molding.

Fig. 3.4.3은 성형 모니터링 실험장치의 구성도이다. Fig. 3.4.1과 같이 적층된 복합재료 적층판을 오토클레이브 내에 설치하고 Fig. 3.4.2의 성형 사이클에 따라 성형하였다. 광섬유 센서와 연결된 광섬유들과 열전대의 선을 오토클레이브의 외부로 빼내어 광원 및 신호취득/처리 시스템에 연결하였다. 센서로부터 반사된 광대역 스펙트럼은 National Instruments사의 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 구성된 신호처리 프로그램을 통해 실시간으로 변형률과 온도로 계산되어 화면에 표시되고 저장되며 데이터 취득을 위한 A/D 변환 보드는 National Instruments사의 PCI-6110E가 사용되었다. 광섬유 센서를 이용하기 위한 광대역 광원으로는 파장 이동 광섬유 레이저(WNFL : wavelength-swept fiber laser)를 사용하였다. 본 실험에서는 WNFL에서 파장 좌표계를 설정하기 위해 투과광의 파장 대역에서 피크들의 간격이 정확히 0.8 nm인 E-Tek사의 패브리-페로 파장 고정기(FPWL)를 사용하였다. 실험 간격으로 센서 신호를 취득하여 처리 및 저장하였다.

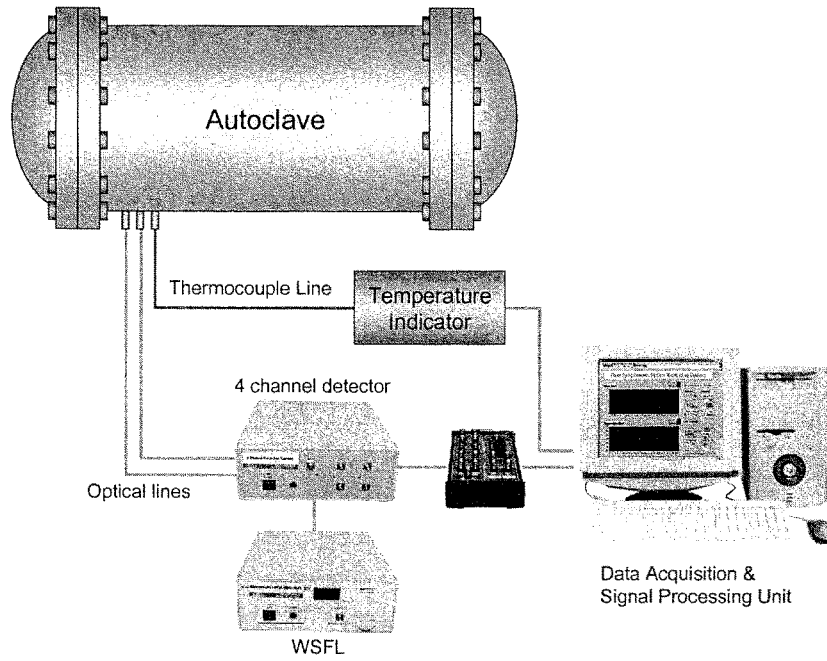


Fig. 3.4.3 Experimental set-up for cure monitoring.

다. 실시간 신호처리 프로그램의 제작

구성된 센서 시스템을 이용하여 실시간으로 복합재료의 성형변형률과 온도를 모니터링하기 위하여 graphic user interface(GUI)를 지원하는 National Instruments사의 소프트웨어인 LabVIEW를 이용하여 신호처리 프로그램을 제작하였다. 신호처리 프로그램의 알고리즘은 Fig. 3.4.4와 같이 Fabry-Perot wavelength locker(FPWL)와 기준 FBG를 이용하여 파장에 대한 좌표를 설정하는 과정과 주어진 파장 좌표에 대해 FBG의 중심파장 이동량을 측정하여 온도를 계산하고 AEFPI의 광대역 신호에서 피크간의 간격 변화를 측정하여 변형률을 측정한 후 변형률과 온도에 대한 선도를 그리는 두 단계로 구성되어 있다.

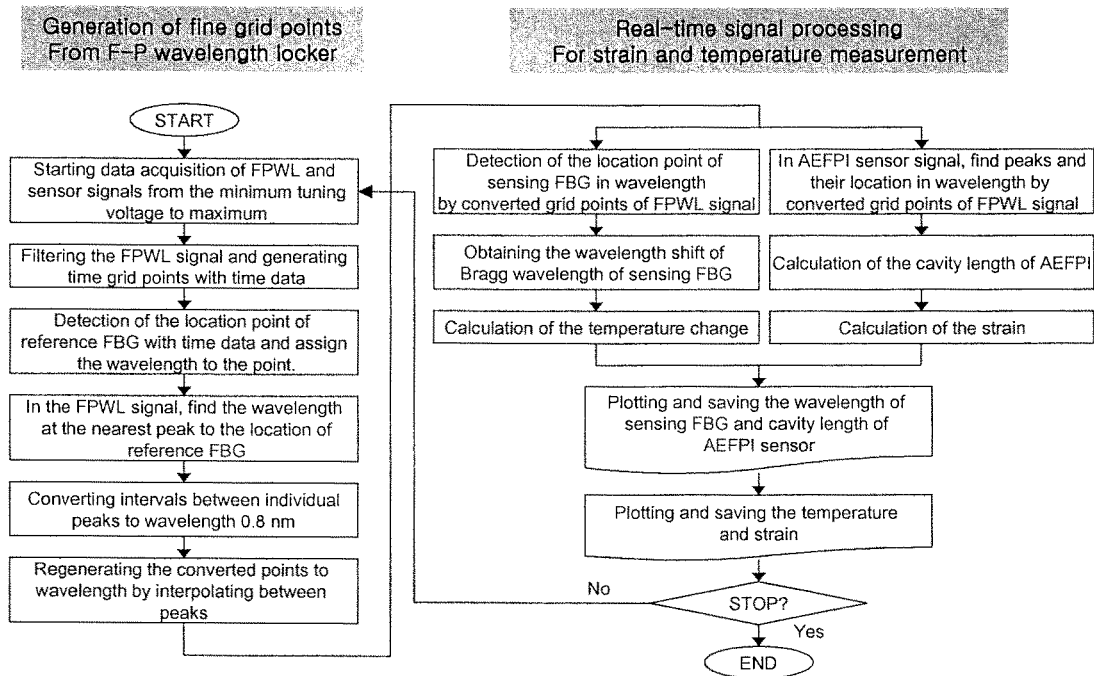


Fig. 3.4.4 Flow chart of signal processing program for cure monitoring.

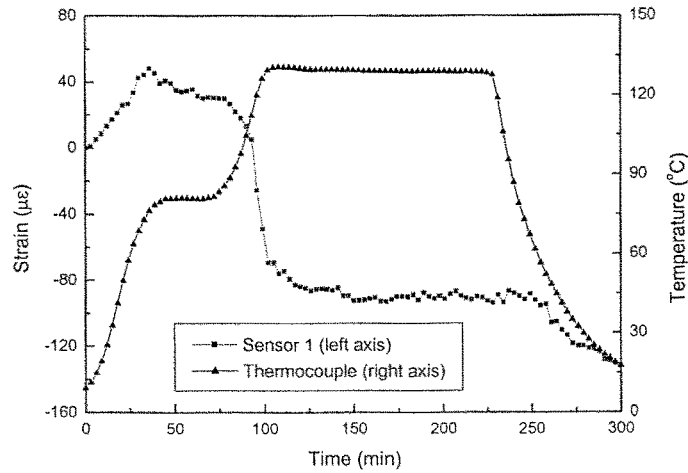
첫번째 단계에서는 패브리-페로 필터의 압전 세라믹에 인가되는 전압의 최소최대 지점을 트리거(trigger)하여 데이터 샘플링 시간(data sampling time)에 해당하는 미세 좌표를 설정한다. 그리고 FPWL에서 반사되는 광신호에서 각각의 피크가 되는 지점을 찾아 그 피크들에 대해 미리 지정된 좌표를 상사시켜 위치를 입력시킨다. 그리고 각각의 피크들 간의 거리를 전부 0.8 nm가 되도록 정규화시키고 입력된 기준 FBG의 중심 파장을 기준으로 하여 미세 파장 좌표계를 설정하여 필터의 비선형성을 제거하도록 하였다.

두번째 단계에서는 취득된 신호로부터 FBG 센서의 중심 파장을 구하고 초기 중심 파장으로부터의 파장 이동량을 구하여 온도 변화량을 구한다. 또한 AEFPI 센서의 광대역 간섭 신호에서 각 피크들의 파장을 구해 간극길이를 구하고 초기 간극길이로부터의 변화량을 구하여 센서에 가해진 총 변형률을 구한다. 구해진 FBG 센서의 중심 파장과 AEFPI 센서의 간극길이를 저장하고 변형률과 온도에 대한 선도를 그리고 각 값들을 저장한다.

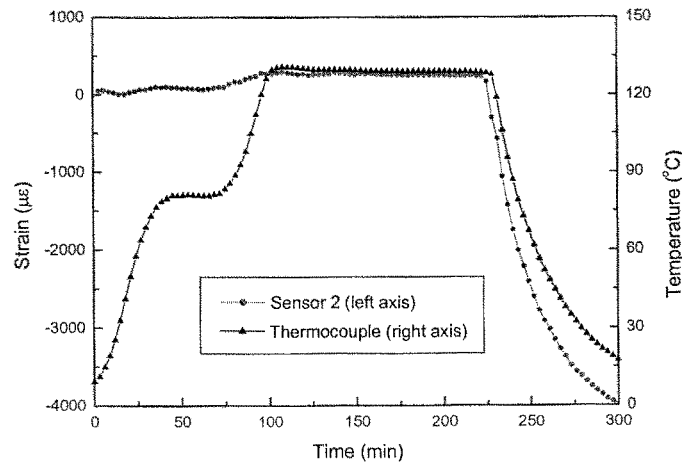
라. 실험 결과 및 토의

Fig. 3.4.5는 일방향 적층판인 $[0_{12}/(0,90)/0_{12}]_T$ 의 성형 동안 측정된 변형률을 보여준다. Fig. 3.4.5(a)는 복합재료 보강섬유 방향(0°)으로 삽입된 sensor 1로 측정된 변형률이며 Fig. 3.4.5(b)는 섬유 직각 방향(90°)으로 삽입된 sensor 2로 측정된 변형

물이다. 성형이 끝난 후 보강섬유 방향과 보강섬유 직각방향에 대한 최종 압축변형률은 각각 약 $-130\mu\text{strain}$ 과 $-4000\mu\text{strain}$ 이었으며 냉각 단계에서의 압축변형률은 각 방향에 대해 각각 약 $-40\mu\text{strain}$ 과 $-4200\mu\text{strain}$ 이었다. 보강섬유 직각방향의 압축변형률이 보강섬유 방향의 압축변형률보다 훨씬 큰 값을 보였다.



(a) Strain measured by sensor 1.



(b) Strain measured by sensor 2.

Fig. 3.4.5 Fabrication strain measurement of $[0_{12}/\{(0,90)/0_{12}\}_T]$ laminate.

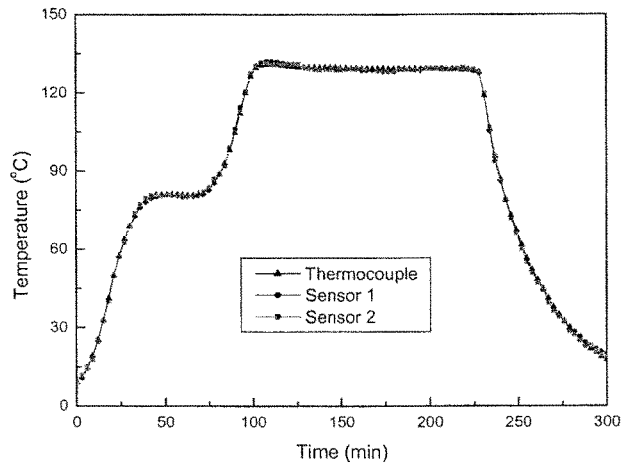


Fig. 3.4.6 Temperature measurement of $[0_{12}/\{0,90\}/0_{12}]_T$ laminate

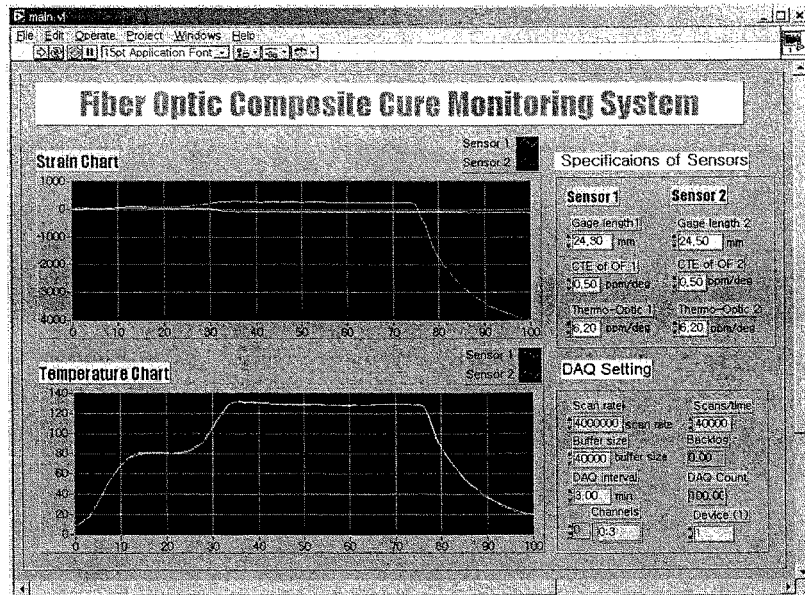
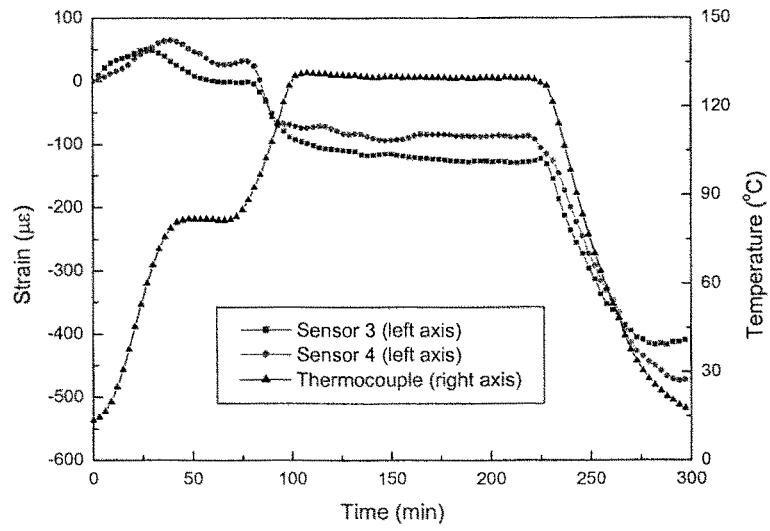


Fig. 3.4.7 Signal processing program for cure monitoring.

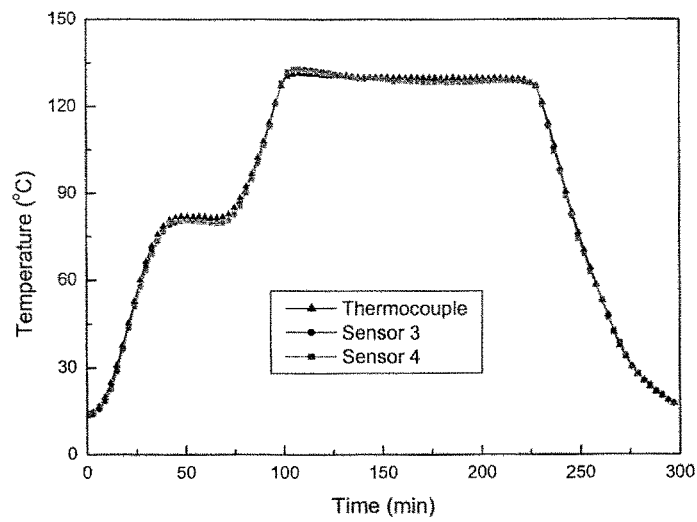
특히 냉각단계에서 보강섬유 직방향에서는 매우 큰 압축변형률이 발생하였으나 보강섬유 방향에서는 거의 발생하지 않았다. 이 이유는 프리프레그 횡방향의 특성이 성형 동안 큰 열적/화학적 변형을 보이는 에폭시 모재에 의해 주로 지배를 받기 때문이다. 광섬유 센서와 열전대로 측정된 온도는 Fig. 3.4.6에서와 같이 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 3.4.7은 신호처리 프로그램으로 변형률과 온도를 실시간으로 측정한 그림이다.

Fig. 3.4.8은 대칭 직교 적층판인 $[0_3/(0)/0_3/90_6/90_6/0_6]_T$ 의 성형 동안 측정된 변형률 및 온도를 보여준다. Fig. 3.4.8(a)에서와 같이 측정된 최종 압축변형률은 0° 방향(sensor 3)에서 약 $-410\mu\text{strain}$ 이며 90° 방향(sensor 4)에서 약 $-470\mu\text{strain}$ 이었으며 냉각 단계에서 발생한 압축변형률은 각 방향에 대해 각각 약 $-280\mu\text{strain}$, $-380\mu\text{strain}$ 이었다. 또한 Fig. 3.4.8(b)에서 알 수 있듯이 광섬유 센서와 열전대로 측정된 온도는 잘 일치하였다. Fig. 3.4.9는 비대칭 직교 적층판인 $[0_6/(0)/0_6/90_6/90_6]_T$ 의 성형 동안 측정된 변형률과 온도를 보여준다. Fig. 3.4.9(a)에서와 같이 측정된 최종 압축변형률은 0° 방향(sensor 5)에서 약 $-440\mu\text{strain}$ 이며 90° 방향(sensor 6)에서 약 $-520\mu\text{strain}$ 이었으며 냉각 단계에서 발생한 압축변형률은 각 방향에 대해 각각 약 $-330\mu\text{strain}$, $-320\mu\text{strain}$ 이었다. 또한 Fig. 3.4.9(b)에서 알 수 있듯이 광섬유 센서와 열전대로 측정된 온도는 잘 일치하였다.

Fig. 3.4.10은 평직 적층판인 $[Fabric_8/(0,90)/Fabric_8]_T$ 의 성형 동안 측정된 변형률과 온도를 보여준다. Fig. 3.4.10(a)에서와 같이 측정된 최종 압축변형률은 0° 방향(sensor 5)에서 약 $-210\mu\text{strain}$ 이며 90° 방향(sensor 6)에서 약 $-240\mu\text{strain}$ 이었으며 냉각 단계에서 발생한 압축변형률은 각 방향에 대해 각각 약 $-360\mu\text{strain}$, $-350\mu\text{strain}$ 이었다. 또한 Fig. 3.4.10(b)에서 알 수 있듯이 광섬유 센서와 열전대로 측정된 온도는 잘 일치하였다.

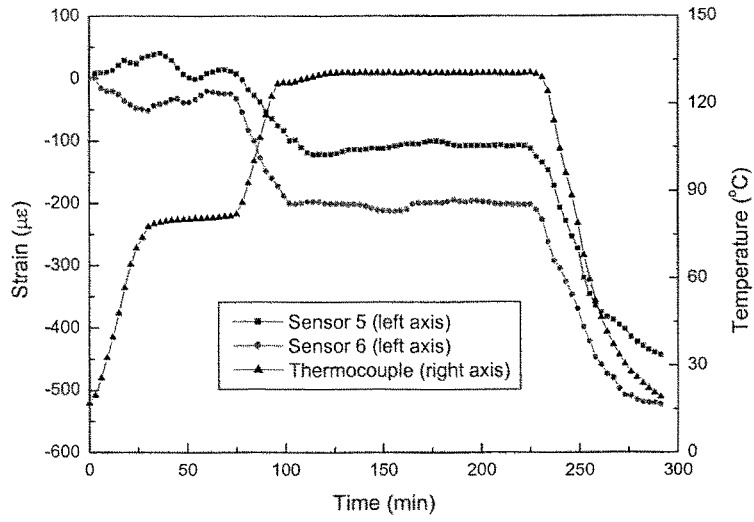


(a) Strain measurement.

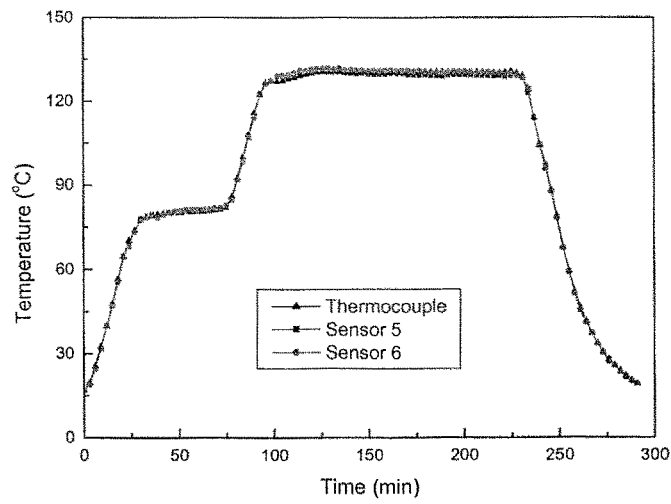


(b) Temperature measurement.

Fig. 3.4.8 Strain and temperature measurement of $[0_2/(0)/0_3/90_6/(90)/90_6/0_6]_T$ laminate.

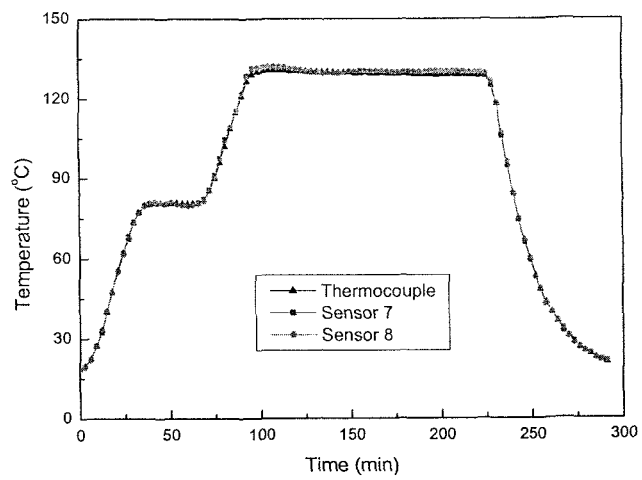


(a) Strain measurement.



(b) Temperature measurement.

Fig. 3.4.9 Strain and temperature measurement of $[0_6/\{0\}/0_6/90_6/\{90\}/90_6]_T$ laminate.



(b) Temperature measurement.

Fig. 3.4.10 Strain and temperature measurement of $[\text{Fabric}_s/\{0,90\}/\text{Fabric}_s]_r$ laminate.

복합재료 성형 사이클의 2단계의 2번째 온도 상승 구간까지는 복합재료 모재가 성형되지 않아서 센서에 하중을 충분히 전달할 수 있을 만큼 딱딱하지 않다. 변형률 측정 그래프에서 보면 알 수 있듯이, 2번째 온도 상승 구간까지 측정되는 변형률은 압력을 높여주는 온도 상승 구간에서 주로 나타나므로 이 구간까지 변형률이 발생하는 원인은 증가하는 압력에 의해 눌러지는 프리프레그의 체적 변화 등에 의한 변형으로 생각할 수 있다. 또한 수지의 화학적 수축과 점성이 낮아진 수지의 유동에 의한 영향도 있을 것이다. 그러나 이러한 변형률은 수지의 낮은 점성에 의한 응력완화(stress relief) 효과에 의해 복합재료의 잔류변형률 및 잔류응력에는 큰 영향을 주지 않을 것이다. 따라서 복합재료의 성형 과정에서 발생하는 재료의 물성에 중대한 영향을 미치는 잔류 압축변형률 및 잔류응력은 마지막 냉각 단계에서 복합재료 보강섬유와 모재의 열팽창계수 불일치 및 적층각이 다른 인접층간의 열팽창 차이에 의해 발생한다. 냉각 단계에서 발생한 압축변형률은 잔류변형률로서 성형후 복합재료 구조물에 잔류하게 되며 특히, 비대칭 복합적층판의 경우에는 warping이나 spring-in 등의 현상이 발생하게 된다. 복합재료 층간의 접착층의 두께는 매우 얇고 완전접착(perfect bonding)이라고 가정할 수 있으므로 제작된 복합재료 적층판은 단일 재료로서 거동을 하게 된다. 그러므로 각 층들은 변형이 자유롭지 않으며 인접층들의 변형에 의해 제약 받게 되므로 복합재료 내부에 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 압축변형률을 측정함으로써 복합재료 내부의 잔류응력을 구할 수 있다. 실험에 사용된 4 가지 적층판의 냉각 단계에서 발생하는 압축변형률을 Table 3.4.3과 같이 정리하였다. Table 3.4.3에서 알 수 있듯이 Fig. 3.4.5의 일방향 적층판은 이방성을 가지므로 보강섬유 방향의 수축보다 성형 동안 큰 열적/화학적 변형을 보이는 에폭시 모재에 의해 주로 지배를 받는 횡방향의 수축이 훨씬 컸다. 반면에 Fig. 3.4.8에서 Fig. 3.4.10의 0° 방향과 90° 방향이 모두 보강된 적층판들에 삽입된 센서들에 의해 측정된 변형률들은 서로 비슷하였다.

Table 3.4.3 Compressive strains during cool-down period.

Laminate	Sensor	Compressive strain
[0 ₁₂ /0,90/0 ₁₂] _T	Sensor 1	- 40 με
	Sensor 2	- 4200 με
[0 ₃ /0/0 ₃ /90 ₆ /0,90/90 ₆ /0 ₆] _T	Sensor 3	- 280 με
	Sensor 4	- 380 με
[0 ₆ /0/0 ₆ /90 ₆ /0,90/90 ₆] _T	Sensor 5	- 330 με
	Sensor 6	- 320 με
[Fabric ₈ /0,90/Fabric ₈] _T	Sensor 7	- 360 με
	Sensor 8	- 350 με

이러한 실험을 통해 복합재료 성형 과정 동안 광섬유 센서로 복합재료 내부의 변형률 및 온도를 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에 적용된 방법을 이용함으로써 성형 과

정에 대한 정보와 함께 최적 성형 조건을 갖는 효율적인 스마트 프로세싱에 대한 기초를 얻을 수 있을 것이다.

3. 비대칭 직교 적층판의 온도에 따른 열변형 거동 모니터링

가. 실험 장치 및 방법

Fig. 3.4.1(c)와 같이 성형 모니터링 과정을 거쳐 제작된 비대칭 직교적층 복합적층판의 온도에 열변형을 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 제작된 적층판은 상온에서 안장 형상(saddle shape)을 하고 있었다.

복합재료 성형 과정 중 발생한 압축변형률에 의해 광섬유 센서들의 간극 길이가 변했으며 실험 시작 온도가 다르므로 FBG의 중심파장이 성형 모니터링시와 다르다. 따라서 간극 길이 및 FBG의 중심파장을 다시 측정하여 센서의 특성행렬의 계수들을 재생성해야 한다. 열변형 측정 실험시에 측정된 센서들의 사양은 Table 3.4.4와 같으며 이를 통해 구한 센서 특성행렬의 계수들은 Table 3.4.5와 같다. 성형 과정 동안 센서에 가해진 압축변형률의 크기가 작으므로 Table 3.4.2와 Table 3.4.5를 비교해 보면 센서 특성행렬에서 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

Table 3.4.4 Specifications of FBG/EFPI sensors for thermal strain measurement.

Sensor Spec.	Symbol	Unit	[0 ₆ /0 ₆ /90 ₆ /90 ₆] _T	
			Sensor 5	Sensor 6
Gage length	L	mm	29.6	25.3
Bragg wavelength	λ_B	nm	1536.691	1536.731
Initial cavity length	D_0	μm	539.28	587.53
CTE of optical fiber	α_f	ppm/°C	0.5	
Thermo-optic coefficient	ξ_f	ppm/°C	6.2	

Table 3.4.5 Components of characteristic matrices of FBG/EFPI sensors for thermal strain measurement.

Components of characteristic matrix	Unit	[0 ₆ /0 ₆ /90 ₆ /90 ₆] _T	
		Sensor 1	Sensor 2
$P_{1\varepsilon}$	$\mu\varepsilon / \mu\text{m}$	33.78	39.53
$P_{2\varepsilon}$	$\mu\varepsilon / \text{nm}$	47.68	47.43
P_{1T}	°C / μm	0	0
P_{2T}	°C / nm	97.13	97.12

Fig. 3.4.11은 비대칭 적층판의 열변형 측정을 위한 실험장치의 구성도이다. 두 개의 FBG/EFPI 센서가 삽입되어 제작된 비대칭 적층판을 열챔버 내부에 설치하고 센서와 연결된 광섬유를 열챔버 외부로 빼내어 광원 및 신호취득/처리 시스템에 연결하였다. 취득된 신호는 Fig. 3.4.4의 신호처리 프로그램에 의해 실시간으로 처리되어 화면에 표시하고 저장하였다. 2분 간격으로 센서의 신호를 취득하고 처리하였다.

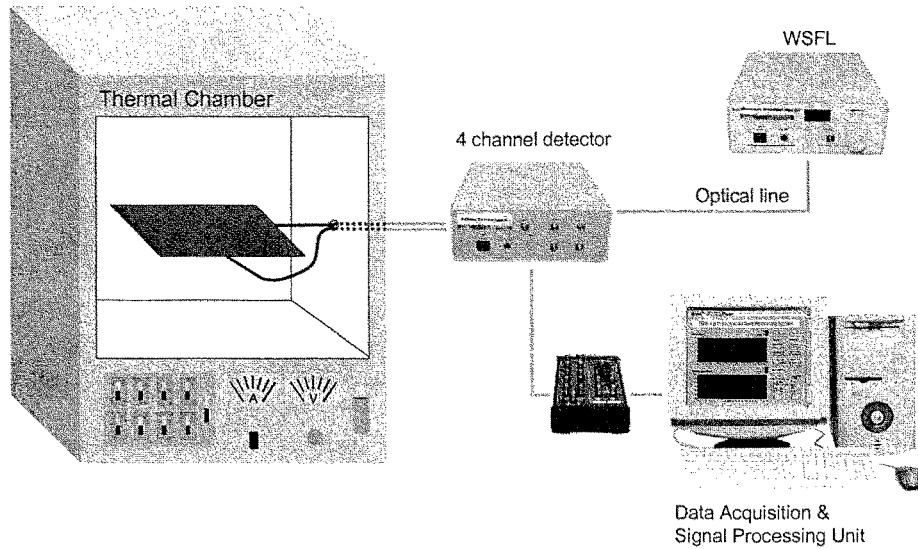


Fig. 3.4.11 Experimental set-up for thermal strain measurement of unsymmetric laminate.

나. 실험 결과 및 토의

Fig. 3.4.12 는 열챔버 내부의 온도를 20℃에서 220℃까지 증가시키면서 광섬유 센서로 취득한 열변형률이다. 적층판의 온도는 sensor 5로 측정하였다. Fig. 3.4.12 에서 보듯이, sensor 5로 측정된 변형률은 20℃ 에서 140℃까지 증가하다가 약 140℃이후부터는 약 280 μ strain 으로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 반면, sensor 6으로 측정된 변형률은 140℃까지 증가한 후 140℃에서 160℃까지 약 250 μ strain 으로 일정한 모습을 보이다가 다시 인장변형률을 지속적으로 받는 모습을 보인다. 이러한 이유는 Fig. 3.4.13 과 같이 초기에 안장형(saddle shape)의 형태를 했던 비대칭 적층판이 온도를 가함에 따라 평평해지다가 다시 뒤집혀 원통형(cylinder shape)으로 형상이 변했기 때문으로 생각할 수 있다. 적층판의 형상이 변하면서 sensor 5가 삽입된 방향이 원통의 축방향이 되었기 때문에 적층판의 형태가 안장형에서 원통형으로 바뀌면서 변형률을 거의 받지 않게 된 것이다. 반면에 sensor 6이 삽입된 방향

은 원통의 원주방향이 되었기 때문에 지속적으로 인장변형률을 받게 된다. 이러한 실험을 통해 비대칭 적층판의 열적 거동에 대한 지식을 얻을 수 있다.

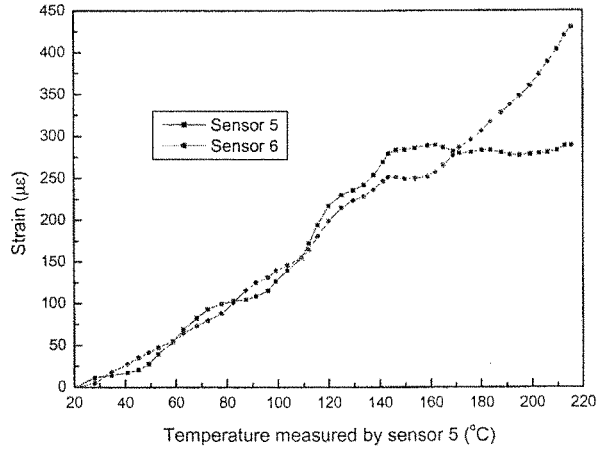


Fig. 3.4.12 Thermal strain measurement of $[0_6/\{0\}/0_6/90_6/\{90\}/90_6]_T$ laminate.

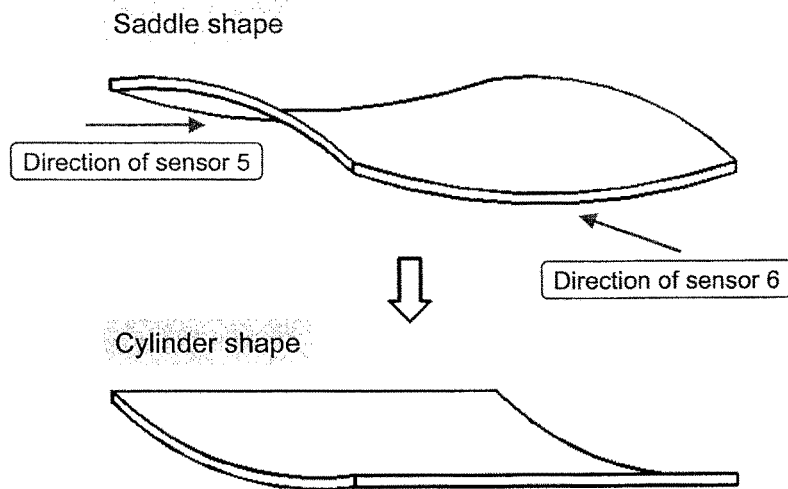


Fig. 3.4.13 Shape variation of unsymmetric composite laminate along the temperature elevation.

제 5 절 광섬유 센서를 이용한 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력 탱크의 건전성 모니터링

인공위성 발사체, 우주왕복선, 미사일 등과 같은 항공우주구조물은 구조적 요구 조건을 만족하면서 무게가 절감되는 것이 필수적이며 이를 만족시키는 최적의 재료는 비강도 및 비강성이 우수한 고등 복합재료이다. 특히 로켓이나 미사일 등에 사용되는 연소관이나 연료 탱크, 가압 탱크 등의 압력 탱크와 같은 축대칭(axisymmetry) 구조물을 복합재료로 제작하기 위하여 필라멘트 와인딩(filament winding) 방법이 많이 적용된다. 필라멘트 와인딩 공정은 섬유상의 안(yarn)이나 토우(tow)에 수지를 함침시킨 후 회전하는 맨드렐(mandrel) 주위에 일정하게 감은 후 경화시키는 공정이다. 이 방법은 원통형이나 곡률을 가진 구조물을 일체성형으로 쉽게 제작할 수 있고, 하중 전달 방향으로 섬유를 집중적으로 보강함으로써 복합재료가 가지고 있는 장점을 극대화할 수 있으며 공정에 컴퓨터나 로봇 등을 이용하면 생산공정의 균일성을 이룩할 수가 있기 때문에 제품의 복제성이 좋다. 그러나 필라멘트 와인딩에 의해 제작된 제품은 곡면 형상을 하고 있으므로 인장 시험 등을 통하여 성능을 평가하기 어렵고 비파괴 검사법을 병행하여야 한다. 따라서 복합재료를 발사체 구조물에 적용하기 위해서는 제작 장비의 개발부터 제작 후 필라멘트 와인딩 구조물의 구조 해석과 실험을 통한 구조 검증에 이르는 전반적인 선행 연구가 필요하다.

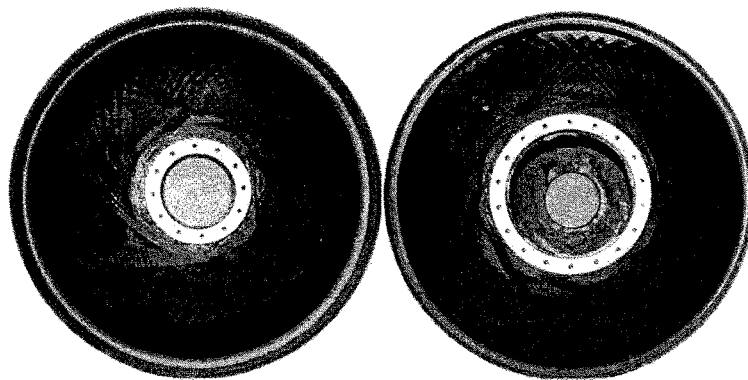
본 장에서는 필라멘트 와인딩으로 제작된 압력 탱크의 압력에 따른 변형률을 모니터링하기 위하여 압력 탱크의 표면에 20개의 FBG 센서를 스트레인 게이지와 함께 부착하여 수압 실험을 수행하였다. 또한 FBG 센서와 스트레인 게이지로 측정된 결과와 유한 요소 해석에 의해 구해진 변형률을 비교하였다.

1. 압력 탱크의 유한 요소 모델링

가. 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력 탱크

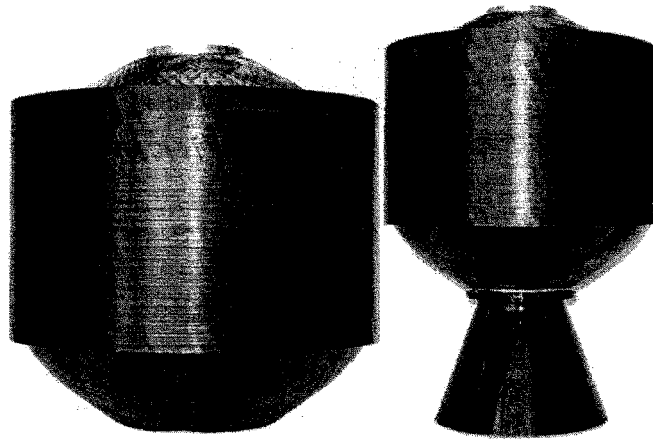
본 연구가 수행된 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력 탱크는 위성체의 3단 모터 케이스(motor case)로 사용되며 Fig. 3.5.1과 같이 개구부가 작은 전방돔과 개구부가 큰 후방돔으로 나뉘어져 있으며 체결을 위한 스키투가 있다. 전방돔 쪽 스키투 길이는 140 mm이고 이중 실린더 접합부에서 80 mm까지의 실린더와 스키투 사이에는 에폭시 필러(filler)로 채워져 있다. 또한 후방돔 쪽 스키투 길이는 75 mm이며 실린더와 스키투 사이의 전 부분에 에폭시 필러로 채워져 있다. 필러의 목적은 돔과 실린더의 접속부에서 급격한 두께 및 곡률 변화에 의한 응력집중을 방지하는 것이다.

실험에 사용된 압력 탱크는 토우(tow) 프리프레그 드라이 와인딩 방법에 의해 제작되었다. 토우 프리프레그 와인딩이란 넓은 폭을 가지는 복합재료 테이프를 와인딩하여 제작하는 방법이다. 이 방법은 섬유를 헬리컬 와인딩할 때에 실린더 부위 직경에 비해 보스(boss) 부위의 직경이 현저히 작기 때문에 발생하는 돔의 보스 부분에서의 국부적인 두께 증가(polar thickness increase)를 예방할 수 있으며 와인딩 시간이 단축되므로 경제적이다. 프리프레그 테이프의 폭이 넓어지면 돔과 같은 3차원 곡면 제작시 주름이 발생할 수 있으므로 일반적으로 사용되는 테이프의 폭은 실린더 반경의 5 % 정도이다[38]. 실험에 사용된 압력 탱크의 제작시 사용된 토우 프리프레그의 폭은 헬리컬 방향으로 8.5 mm이고 후프 방향으로 9.0 mm이며 각 방향 단층의 두께는 헬리컬 방향으로 0.42 mm이고 후프 방향으로 0.2 mm이다.



(a) Front dome.

(b) Aft dome.



(c) Side View.

(d) Assembly with nozzle.

Fig. 3.5.1 Filament wound composite tank.

압력 탱크 제작에 사용된 복합재료 프리프레그의 수는 22도의 헬리컬 와인딩 (helical windig) 6층과 후프 와인딩(hoop winding) 10층이며 탱크의 주요 치수와 해석에 사용한 재료의 물성치는 각각 Table 3.5.1과 Table 3.5.2와 같다. 그리고 필러에 사용된 에폭시의 강도와 포아송비는 각각 1.31 *GPa*과 0.3이며 알루미늄 보스 (boss)의 강도와 포아송비는 각각 80 *GPa*과 0.3이다.

Table 3.5.1 Dimensions of filament wound composite tank.

	Forward Dome	Aft Dome
Cylinder radius, R_c	250 mm	
Boss radius, R_b	50 mm	85 mm
Cylinder thickness, t_c	2.92 mm	
Thickness of 1 st skirt	4.16 mm	
Thickness of 2 nd skirt	3.68 mm	

Table 3.5.2 Material properties of filament wound composite tank.

	T800/Epoxy
E_1	142 <i>GPa</i>
E_2, E_3	3.14 <i>GPa</i>
G_{12}, G_{13}	4.69 <i>GPa</i>
G_{23}	1.0 <i>GPa</i>
ν_{12}, ν_{13}	0.33
ν_{23}	0.45
X_t	2687 <i>MPa</i>
X_c	1411.2 <i>MPa</i>
Y_t	36.36 <i>MPa</i>
Y_c	70 <i>MPa</i>
Density, ρ	1.5×10^{-6} <i>kg/mm</i> ³

나. 유한 요소 해석

유한 요소 해석을 위해 ABAQUS에서 제공하는 3차원 고체 요소(C3D27R)를 사용하여 와인딩의 각 층을 모델링하였으며, 필라멘트 와인딩이 진행됨에 따라 두께 방향으로 발생하는 와인딩 각도 변화를 고려한 해석을 수행하였다. 탱크 구조물이 축대칭이므로 3차원 고체 요소로 1/4에 해당하는 부분만을 모델링하고, 주기적 반복 대칭 조건을 부여하여 계산하였다. Fig. 3.5.2는 해석에 사용된 유한 요소 모델을 보여준다.

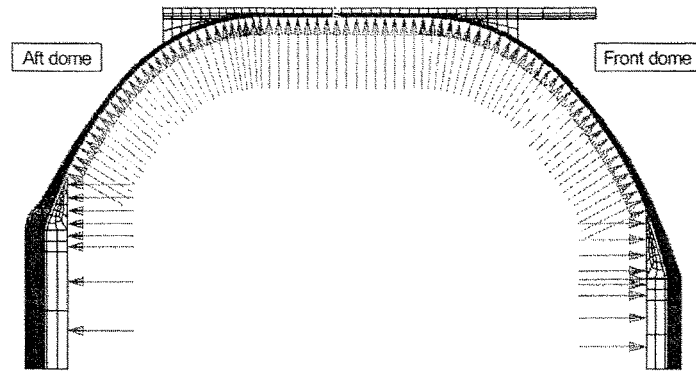


Fig. 3.5.2 Finite element model of filament wound composite tank.

가해진 압력에 따른 거동을 보기 위하여 1000 *psi*의 내압을 안쪽 층의 고체 요소 표면에 가하였고, 금속재료 보스 부분과 복합재료 사이에는 gasket element (GK3D19)를 사용하여 내열재인 EPDM 층을 모델링하였다. 이 요소는 전단과 두께 방향의 물성을 독립적으로 모델링할 수 있으므로 복합재료와 금속재료 간에 존재하는 전단층의 모사가 용이하고 보스 이탈 등의 거동을 모델링할 수 있다.

2. 다채널 FBG 센서 시스템

가. FBG 피크 감지 회로

본 연구에 사용된 FBG 센서 시스템은 광원인 WSFL에 4채널까지 확장 가능한 다채널 광검출 시스템을 결합하여 수십 개의 FBG 센서를 동시에 사용할 수 있다. 또한 아날로그 신호처리 기법과는 달리 신호처리부에서 하드웨어적으로 Fig. 3.5.3와 같은 디지털 펄스 생성회로[39]를 결합한 디지털 신호처리 방식을 채택하여 빠른 속도로 신호취득 및 처리가 가능하도록 하였다.

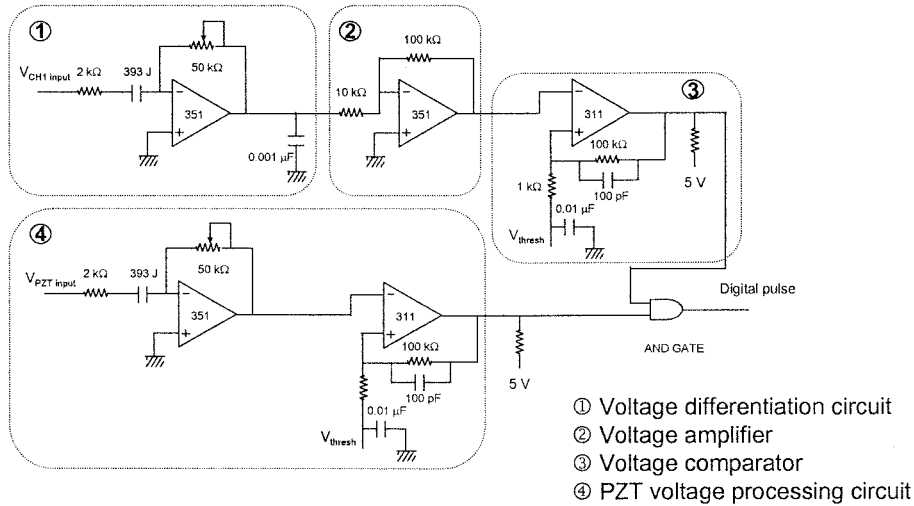
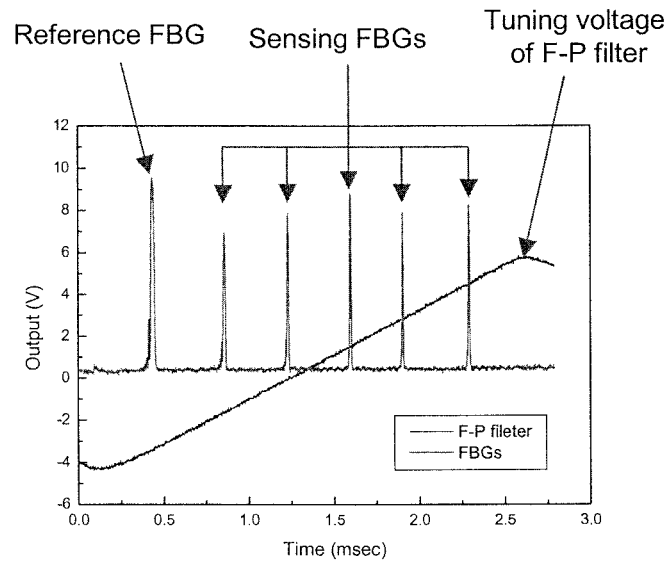


Fig. 3.5.3 Electric circuit for signal processing[39].

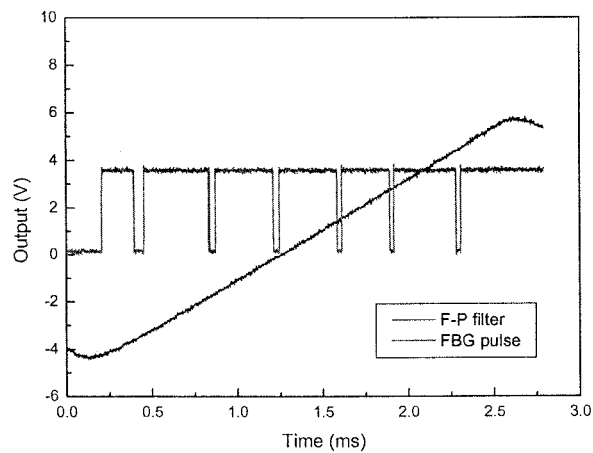
각각의 FBG 센서 배열에서의 신호를 디지털 펄스 생성회로를 통해 미분과 증폭 과정을 거쳐 각 FBG의 피크(peak)의 위치만을 디지털 신호로 출력하도록 하여 컴퓨터로 전송되는 데이터의 양을 최소화함으로써 신호처리 시간을 단축하였다. 이러한 방법을 사용함으로써 기존의 아날로그 신호처리 방법의 단점인 신호처리 시간의 지연에 의한 구조물의 동적 변형률 측정이 어려운 점을 해결하였다. 아날로그 신호처리 방법은 각 센서의 취득된 데이터를 A/D 변환기로 모두 변환하여 컴퓨터로 취득하고 컴퓨터 내의 신호처리 프로그램을 통해 소프트웨어적인 방법으로 센서의 피크를 찾아 변형률을 계산하는 과정을 거친다. 따라서 센서 및 채널의 수가 증가하면 컴퓨터의 처리 속도에 장애가 발생하여 실시간 신호처리가 불가능하다. 따라서 디지털 신호처리 방법을 사용함으로써 아날로그 신호처리 방법에 비해 더욱 많은 수의 센서를 사용할 수 있게 되었으며 진동과 같은 구조물의 동적 거동도 실시간으로 측정이 가능하다.

회로의 역할은 Fig. 3.5.4에서 볼 수 있듯이 FBG 센서의 피크에서 디지털 신호(TTL signal)인 펄스를 발생시키는 것이다. 센서에서 변형률을 판별하는 것은 피크의 시간축에 대한 변화량이므로 피크에서 펄스를 발생시킴으로써 센서 시스템의 복조에 충분한 정보를 컴퓨터로 입력시킬 수 있다. Fig. 3.5.3과 같이 구성된 회로는 네 부분으로 구성되어 있다[39]. 첫 번째 부분은 FBG 센서의 신호를 미분하는 부분이다. FBG 센서의 신호를 미분하면 피크에서 미분된 신호는 전압이 0 V가 된다. 두 번째 부분은 미분된 신호를 증폭하는 반전 증폭기이다. WSFL의 파워가 광분할기를 통하여 여러 채널로 나누어질 경우 광검출기를 통해 나오는 센서 신호의 크기가 작아지므로 신호의 증폭이 필요하다. 세 번째 부분은 미분된 신호가 전압이 0 V인 점을 지나가는 부분에서 디지털 펄스 신호로 변환해 주는 비교기(comparator)이다. 취득되는 전체 센서 신호 중에서 패브리-페로 필터의 입력 전압인 삼각파에서 전압 상승 구간의 신호만이 필요하다. 입력 삼각파 전압의 상승 구간만을 선택하기 위하

여 삼각파를 미분하고 미분된 신호를 비교기에서의 비교를 통해 전압이 상승하는 구간만 5 V가 되도록 하는 회로를 네 번째 부분으로 구성하였다. 센서 신호에서 나온 디지털 펄스 신호와 삼각파에서 얻어진 디지털 펄스 신호를 AND 게이트(gate)를 통과시키면 삼각파 상승 구간에서만 디지털 펄스 신호를 얻을 수 있다.



(a) Original FBG sensor signals and tuning voltage of F-P filter.



(b) TTL signal of FBG sensor signals and tuning voltage of F-P filter.

Fig. 3.5.4 Processing of FBG sensor signals by electric circuit.

나. 디지털 펄스 신호 취득 장치

먼저 파장에 대한 좌표축을 설정하기 위해 사용된 E-Tek사의 패브리-페로 파장 고정기(FPWL : Fabry-Perot wavelength locker)의 신호는 National Instruments사의 A/D 변환 보드(PCI 6110E)를 이용하여 5 MHz의 샘플링 속도로 취득하였다. FPWL는 출력 스펙트럼에서 피크들의 파장간 간격이 0.8 nm로 고정되어 있으며 외부 온도에 영향을 받지 않도록 패키징되어 있다. 사용자가 입력한 기준 FBG의 파장과 일정 파장 간격을 가지는 FPWL의 출력 신호를 이용하여 시간축으로 입력된 데이터를 파장 격자 형성 프로그램(wavelength grid maker)을 통해 파장에 대한 좌표계로 변환시켜 파장 좌표를 설정한다.

변형률의 측정은 외부 회로에서 출력된 디지털 펄스 신호 사이의 간격(rising edge 사이의 간격)을 반복적으로 측정함으로써 FBG의 중심 파장의 이동에 의한 펄스 신호의 변화량에 따라 변형률을 측정하게 된다. FPWL을 이용하여 파장축에 대한 좌표를 설정한 후, 변형률 측정을 위한 디지털 펄스 신호의 취득을 위해 National Instruments사의 카운터(PCI 6602)를 이용하였다. 카운터는 32 bit로 데이터를 처리하며 20 MHz로 카운팅을 하므로 고해상도의 변형률 측정 시스템을 구성할 수 있다. 측정된 디지털 펄스 신호 사이의 간격을 통해서 기준 FBG와 구조물에 적용된 센서 사이의 시간 간격이 수치적으로 출력된다. 출력된 시간 간격의 카운팅 값을 FPWL로 구한 파장 좌표계에 상사시키면 각 센서의 중심 파장을 구할 수 있다. 센서에 변형이 가해지면 센서가 파장 축에서 이동하게 되고 이에 따라 센서 사이의 카운팅된 시간 간격 값들이 변화하게 되며 이 변화량으로부터 각 센서의 변형률을 실시간으로 측정할 수 있다.

다. 실시간 신호처리 프로그램의 제작

구성된 센서 시스템을 이용하여 실시간으로 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력 탱크의 변형률을 모니터링하기 위하여 graphic user interface(GUI)를 지원하는 National Instruments사의 소프트웨어인 LabVIEW를 이용하여 신호처리 프로그램을 제작하였다. 신호처리 프로그램의 알고리즘은 Fig. 3.5.5와 같이 패브리-페로 파장 고정기(FPWL)와 기준 FBG를 이용하여 파장에 대한 좌표를 설정하는 과정과 주어진 파장 좌표에 대해 FBG의 중심파장 이동량을 측정하여 변형률을 측정한 후 변형률에 대한 선도를 그리는 두 단계로 구성되어 있다.

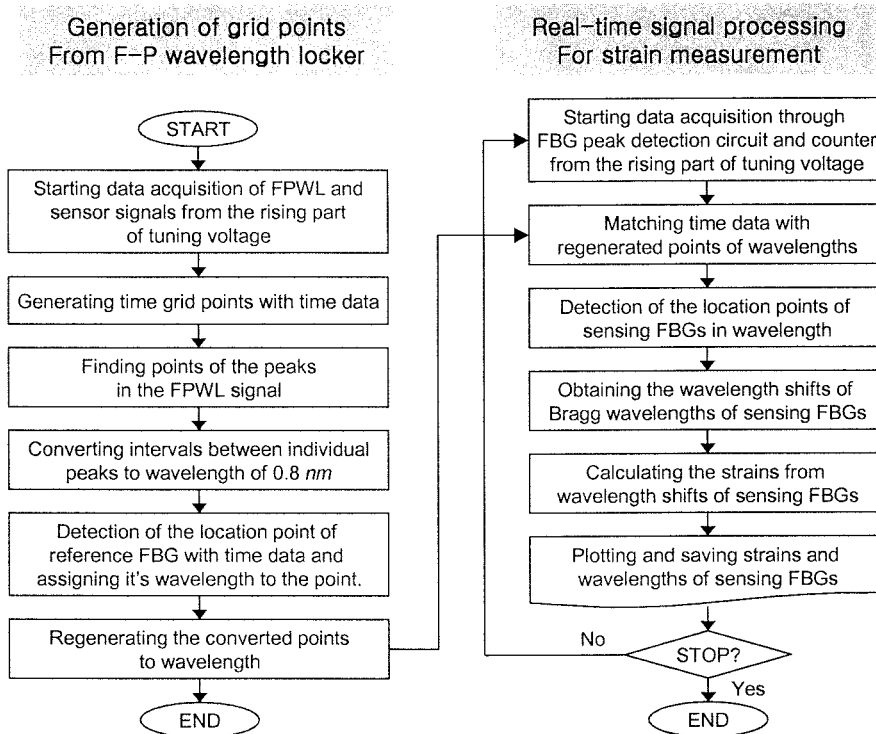


Fig. 3.5.5 Flow chart of the real-time strain measurement program.

첫번째 단계는 PCI 6110E A/D 변환기를 통해 취득된 가변 패브리-페로 필터의 삼각파 구동 전압과 FPWL의 신호, 그리고 기준 FBG 신호를 컴퓨터로 취득하여 파장 좌표계를 설정하는 파장 격자 형성 단계이다. 패브리-페로 필터의 압전 세라믹에 인가되는 전압의 최소최대 지점을 측정하여 데이터 샘플링 시간(data sampling time)에 해당하는 미세 좌표를 설정한다. 그리고 FPWL에서 반사되는 광신호에서 각각의 피크가 되는 지점을 찾아 그 피크들에 대해 미리 지정된 시간 좌표를 상사시켜 위치를 입력시킨다. 그리고 각각의 피크들 간의 거리를 전부 0.8 nm가 되도록 정규화시키고 입력된 기준 FBG의 중심 파장을 기준으로 하여 파장 좌표계를 설정한다.

변형률 측정 단계인 두번째 단계에서는 먼저 FBG 피크 감지 회로와 디지털 카운터를 통해 취득된 신호를 앞서 구성된 파장 좌표계에 대응시킨다. 파장 좌표계에 대응된 취득 신호로부터 FBG 센서들의 중심 파장을 구하고 초기 중심파장으로부터의 파장 이동량을 구하여 각 센서에 가해진 변형률을 계산한다. 그리고 구해진 변형률에 대한 선도를 화면에 표시하고 계산된 변형률 값들과 FBG 센서들의 중심 파장을 저장한다. 저장된 FBG 센서들의 중심 파장 데이터는 실험 종료 후 후처리를 통해 사용될 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

압력에 따른 압력 탱크의 거동을 모니터링하기 위해 수압실험을 수행하였으며 Fig. 3.5.6은 실험 장치의 구성도이다. 20개의 광섬유 FBG 센서와 함께 20개의 스트레인 게이지를 압력 탱크의 표면에 부착하였다. 필라멘트 와인딩된 압력 탱크에서 대부분의 하중은 섬유가 지지하게 되므로 섬유에 작용하는 변형률의 크기가 중요하다. 또한 압력 용기의 실린더 부위는 후프 방향의 응력이 축방향 응력의 2배이므로 후프 방향의 변형률 크기도 중요하다. 따라서 돔과 실린더에 섬유방향으로 많은 센서를 부착하였다. 돔 부분에는 Fig. 3.5.7과 같이 표면에 와인딩된 토우 프리프레그 테이프 중 하나의 섬유 방향을 따라 FBG 센서와 스트레인 게이지를 헬리컬 와인딩 방향으로 옆으로 평행하게 전후방돔에 각각 5개씩 부착하였다. 또한 Fig. 3.5.8과 같이 실린더와 스커트 부분에 적용된 FBG 센서들 중에 8개는 FBG 센서와 스트레인 게이지를 동일한 축방향 위치에 후프 와인딩 방향인 원주 방향으로 부착하였고, 2개는 동일한 축방향 위치에 실린더의 축방향으로 평행하게 부착하였다. FBG 센서들은 1 채널당 5개의 FBG 센서를 연결하여 총 4채널을 사용하였으며 채널 1은 전방돔(Fig. 3.5.7(a)), 채널 2는 후방돔(Fig. 3.5.7(b)), 그리고 채널 3, 4의 센서들은 실린더와 스커트(Fig. 3.5.8(a), (b))에 부착하였다. 실험에 사용된 FBG 센서들의 게이지 길이는 10 mm이고 변형률-광학 계수는 0.227이며, 스트레인 게이지는 게이지 길이가 5 mm이고 게이지 팩터가 2.13인 TML사의 FLA-5-11 타입이다.

Fig. 3.5.7은 전후방돔에 부착된 센서들의 위치와 방향을 나타내며 Fig. 3.5.8은 실린더와 스커트에 부착된 센서들의 위치와 방향을 나타낸다. 채널 1과 채널 2의 센서들은 모두 전후방돔의 헬리컬 와인딩된 섬유 방향을 따라 부착되었으며 채널 3의 센서들은 모두 실린더와 스커트의 원주 방향으로 부착하였고 채널 4의 센서들 중 3개는 원주 방향으로 부착하고 2개는 실린더의 축방향으로 부착하였다.

수동 가압 장비를 이용하여 압력 탱크에 유입되는 고압의 물에 의해 탱크에 가해지는 압력을 1000 psi까지 100 psi 단위로 단계적으로 증가시키면서 변형률을 측정하였다. 4채널 광검출기로 감지된 FBG 센서들의 신호는 FBG 피크 감지 회로와 카운터를 통해 컴퓨터로 취득되고 신호처리 프로그램을 통해 각 센서들의 변형률로 환산되어 실시간으로 화면에 표시되고 저장된다. 카운터로 취득되는 데이터 샘플링을 20 MHz로 하고 가변 패브리-페로 필터의 스캐닝 주파수는 200 Hz로 하여 1초에 4번씩 FBG 센서의 신호를 취득하고 변형률을 구하였다. 스트레인 게이지의 데이터는 strain gage conditioner인 National Instruments사의 SCXI-1001 을 통해 1초에 4번씩 컴퓨터로 취득하여 변형률을 측정하고 저장하였다. 또한 압력에 대한 정보를 얻기 위하여 압력 변환기(pressure transducer, Sensys)로 측정된 압력을 디지털 인디케이터(Sensys, SC200)를 통해 컴퓨터로 취득하여 저장하였다.

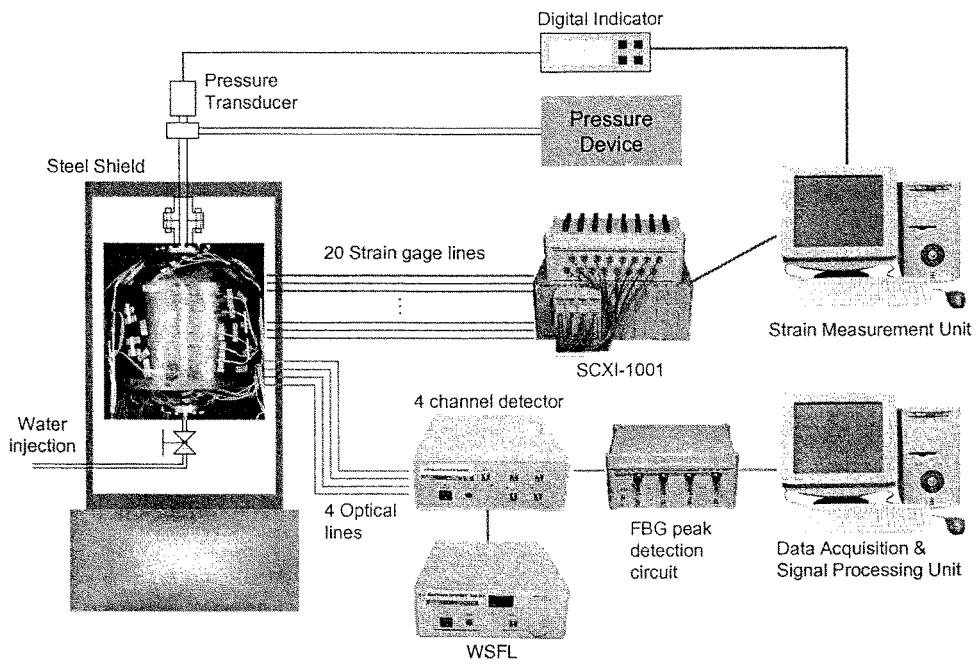
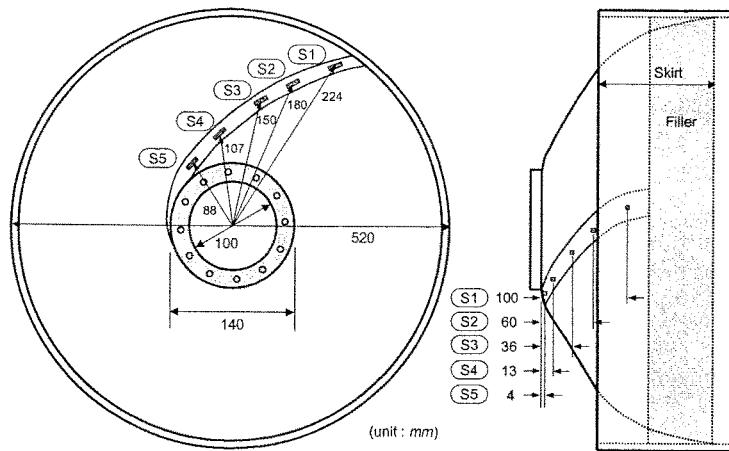
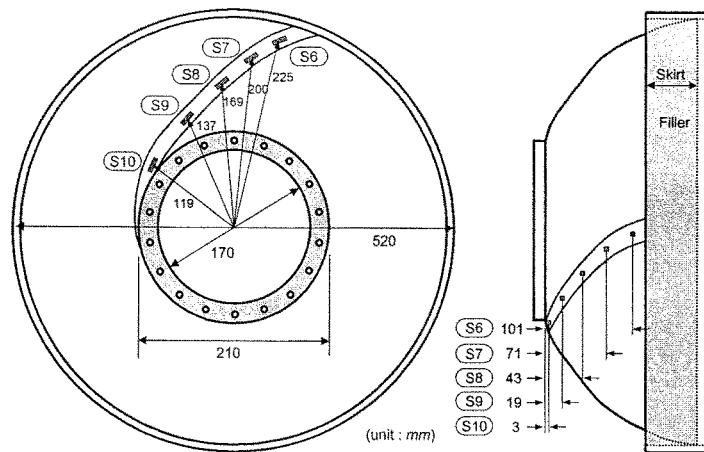


Fig. 3.5.6 Experimental set-up for strain monitoring of filament wound composite tank.

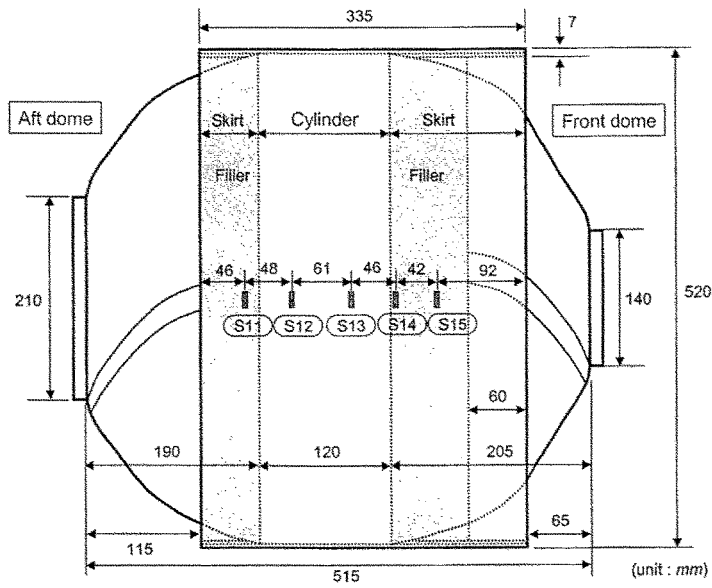


(a) Front dome - FBG channel 1.

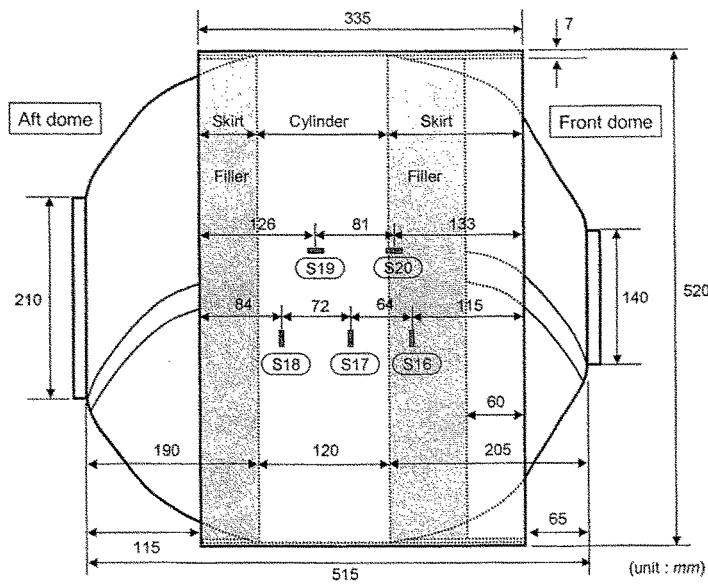


(b) Aft dome - FBG channel 2.

Fig. 3.5.7 Locations and directions of sensors attached on domes



(a) Cylinder - FBG channel 3.



(b) Cylinder - FBG channel 4.

Fig. 3.5.8 Locations and directions of sensors attached on cylinder

4. 실험 및 해석 결과

가. FBG 센서와 스트레인 게이지의 변형률 측정 결과

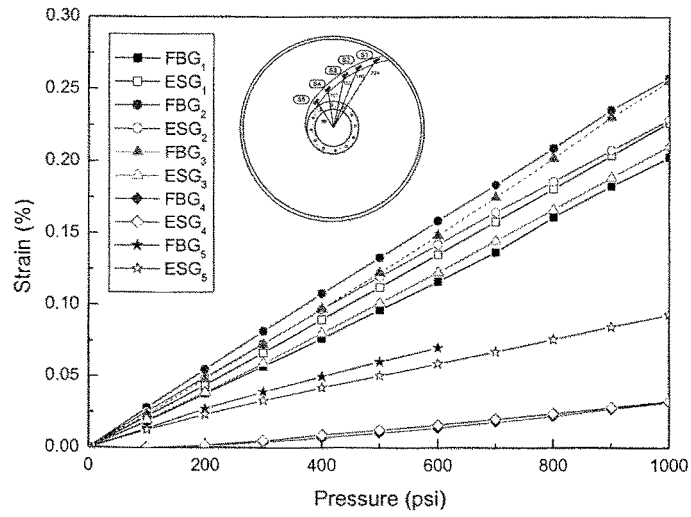
Fig. 3.5.9는 전후방돔에 부착한 FBG 센서와 스트레인 게이지(ESG)로 측정된 압력에 따른 변형률을 보여주며 Fig. 3.5.10은 실린더에 부착한 센서들로 측정된 변형률을 보여준다. 각 센서들로 측정된 변형률은 센서가 부착된 위치에서 섬유 방향의 변형률이다.

Fig. 3.5.9(a)의 전방돔의 변형률 측정 그래프에서 FBG₅는 600 *psi* 이후의 압력에서 피크가 갈라져서 더 이상의 압력에서는 측정할 수 없었다. FBG 센서와 스트레인 게이지로 측정된 변형률들의 경향은 모두 선형적으로 증가하고 있으나 두 가지 센서의 측정치가 일치하는 FBG₄를 제외하고는 측정 결과에서 차이를 보였다. FBG 센서들의 측정 결과에서 FBG₂와 FBG₃의 변형률이 높게 나타나고 다음에 FBG₁, FBG₅의 순으로 변형률이 크게 측정되었으며 FBG₄의 변형률은 매우 작았다. 이러한 측정 결과로부터 가해진 하중에 의해 전방돔이 팽창하기 때문에 돔의 중간 부분에 가장 큰 변형이 생김을 알 수 있다.

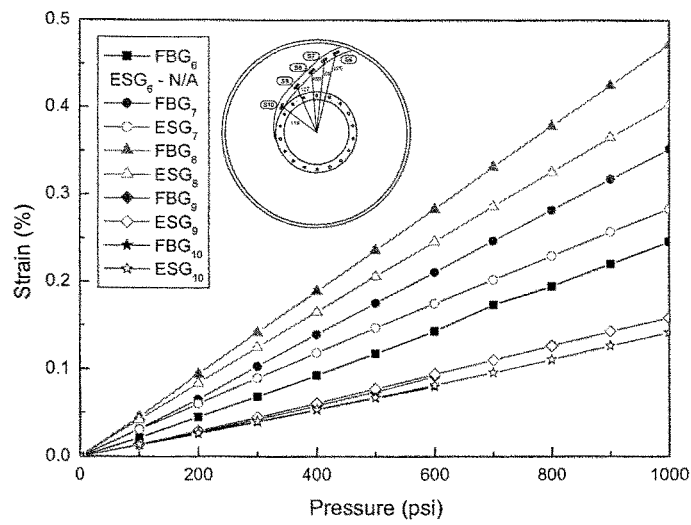
Fig. 3.5.9(b)의 후방돔의 변형률 측정 그래프에서 ESG_{6e}는 전선이 단락되어 초기부터 변형률을 측정할 수 없어 FBG₆와 측정 결과를 비교할 수 없었으며 FBG₉와 FBG₁₀은 600 *psi* 이후의 압력에서 피크가 갈라져서 더 이상의 압력에서는 측정할 수 없었다. FBG 센서와 스트레인 게이지로 측정된 변형률들의 경향은 모두 선형적으로 증가하고 있으나 두 가지 센서의 측정치가 일치하는 FBG₉와 FBG₁₀을 제외하고는 측정 결과에서 차이를 보였다. FBG 센서들의 측정 결과에서 FBG₈와의 변형률이 매우 크게 나타나고 다음에 FBG₇, FBG₆의 순으로 변형률이 크게 측정되었으며 FBG₉와 FBG₁₀의 변형률은 거의 비슷했다. 측정 결과로부터 전방돔과 마찬가지로 가해진 하중에 의해 후방돔이 팽창하기 때문에 돔의 중간 부분에 가장 큰 변형이 생김을 알 수 있다. Fig. 3.5.10(a)에서 볼 수 있듯이 실린더의 원주방향 변형률 측정에서는 FBG 센서와 스트레인 게이지로 측정된 변형률이 대체로 잘 일치하였다. 실린더의 중앙 부분에 부착된 FBG₁₂와 FBG₁₃로 측정된 변형률은 일치하였으며 스커트 부분에 부착된 FBG₁₁과 FBG₁₅는 매우 작은 변형률 측정치를 보였으며 전방돔쪽의 스커트와 실린더의 접속 부분에 부착된 FBG₁₄는 중간 정도의 변형률을 측정하였다. 스커트 부분에 부착된 FBG₁₁과 FBG₁₄로 측정된 변형률에서 차이가 나는 이유는 FBG₁₄가 부착된 전방돔 쪽의 스커트가 더 길고 필러 충전 부위도 넓기 때문에 전방돔 쪽 스커트에 후방돔 쪽의 스커트보다 더 많은 하중이 전달되었기 때문으로 생각된다. 측정 결과로부터 실린더 중앙 부위에서 하중을 많이 받으며 스커트 쪽은 내압에 의한 하중을 거의 받지 않음을 예측할 수 있다.

Fig. 3.5.10(b)의 변형률 측정 그래프에서 실린더의 축방향으로 부착한 FBG₁₉와 FBG₂₀은 각각 300 *psi*와 200 *psi* 이상의 압력에서 피크가 갈라져 그 이후의 압력에

서는 변형률을 측정할 수 없었다. 실린더의 원주 방향으로 부착한 FBG 센서들과 스트레인 게이지의 변형률 측정치는 거의 일치하였다. 실린더의 중앙 부분에 부착한 FBG₁₇과 FBG₁₈의 변형률이 크게 측정되었으며 전방돔 쪽 스커트에 부착한 FBG₁₆의 변형률은 작았다. FBG₁₆과 Fig. 3.5.10(a)의 FBG₁₄, FBG₁₅의 부착 위치 및 측정된 변형률을 비교해 보면 스커트 안쪽에서부터의 위치와 변형률의 크기가 FBG₁₄, FBG₁₆, 그리고 FBG₁₅의 순임을 알 수 있다. 따라서 스커트의 바깥쪽으로 갈수록 하중이 적게 걸려 변형률이 작아짐을 알 수 있다.

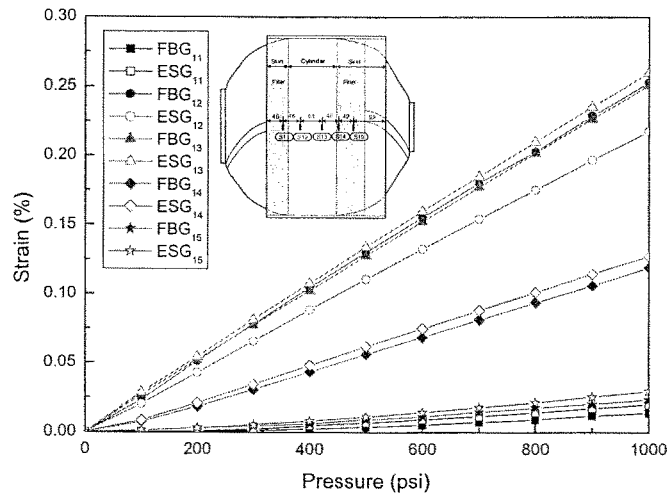


(a) Front dome - FBG channel 1.

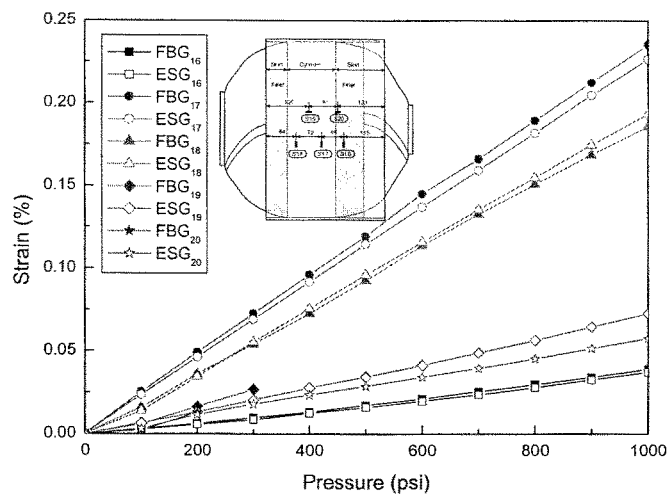


(b) Aft dome - FBG channel 2.

Fig. 3.5.9 Strains measured by FBG and ESG attached on domes



(a) Cylinder - FBG channel 3.



(b) Cylinder - FBG channel 4.

Fig. 3.5.10 Strains measured by FBG and ESG attached on cylinder

나. 유한 요소 해석 결과

Fig. 3.5.11은 유한 요소 해석 결과로 구해진 돔의 변형 전후의 모습이다. 1000 *psi*의 내압 조건에서의 변형 형상이며 확실한 구분을 위하여 변형된 형상은 20배로 확대하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 돔과 실린더의 접속 부분에서는 스커트와 필러의 영향으로 반경 방향의 변형이 제한되는 것을 알 수 있다. 이것은 접속 부에서 급격한 두께 및 곡률 변화에 의한 응력집중을 방지하기 위하여 스커트와 복합재 사이에 필러를 채워 넣어 두께가 상대적으로 얇은 돔의 반경 방향 변형을 스커트로 제한함으로써 과도한 변형 및 응력집중을 막는 효과가 있기 때문이다. 또한 스커트 부분도 변형이 거의 되지 않은 모습을 볼 수 있다. 반면에 내압에 의해 전후방 돔의 중간 부분과 실린더의 중간 부분이 상대적으로 많이 팽창하는 것을 알 수 있다. 이러한 해석 결과로부터 많이 팽창된 부분의 보강이 더 필요함을 알 수 있다.

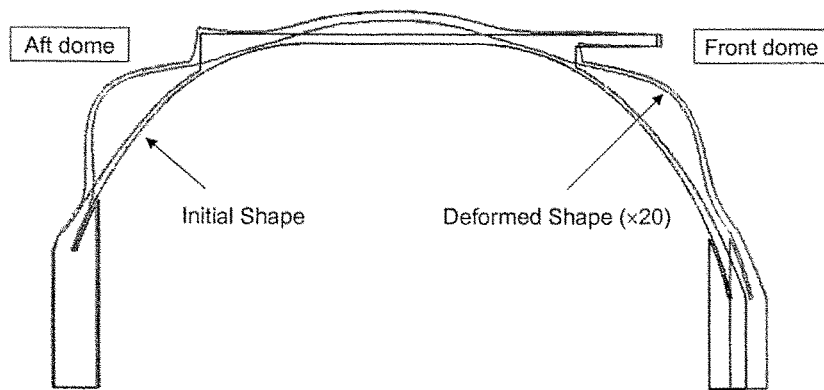


Fig. 3.5.11 Initial and deformed shape of filament wound composite tank.

돔의 팽창을 줄이기 위해서는 돔의 원주 방향으로의 보강이 필요하며 이를 위해서는 헬리컬 와인딩의 적층수를 증가시키거나 헬리컬 와인딩 각도를 증가시키는 방법이 있다. 또한 실린더의 팽창을 줄이기 위해서는 후프 와인딩의 적층수를 증가시키는 방법이 있다.

압력 탱크의 변형 거동은 Fig. 3.5.12의 섬유 방향 변형을 해석 결과에서도 확인할 수 있다. 그래프에서 그림자 색이 채워진 부분은 필러가 채워진 부분이다. 돔의 중간과 실린더의 중간 부분에서 팽창하기 때문에 이 부분의 변형률이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 실린더와 돔의 접속부 사이의 필러를 채워 넣은 부분의 변형률도 스커트와 실린더의 하중 분담에 의해 변형률이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 그리고 스커트 부분은 끝으로 갈수록 변형률을 적게 받는 것을 알 수 있으며 따라서 체결을 위한 스커트는 하중 지지에는 큰 역할을 못 한다는 것을 알 수 있다.

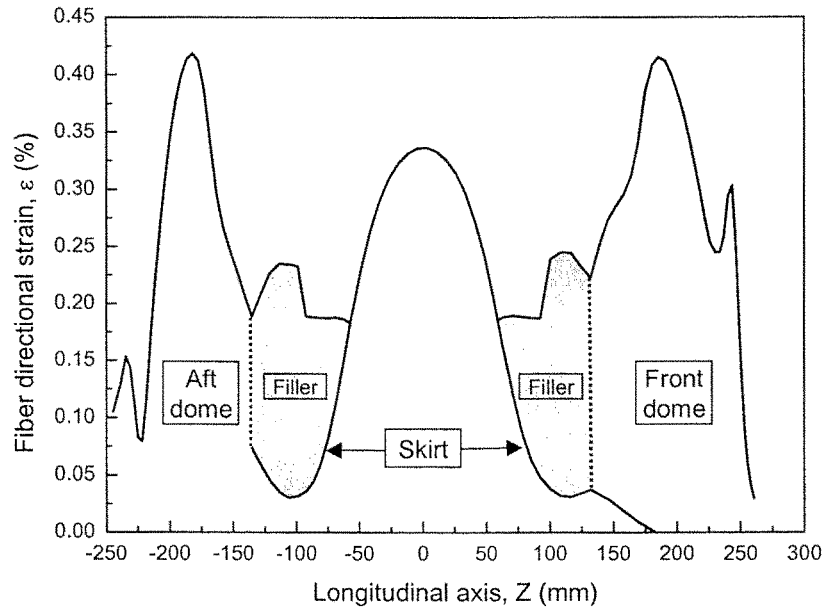


Fig. 3.5.12 Strain result of FE analysis.

5. 토 의

가. 해석과 측정 결과의 비교

Fig. 3.5.13은 FBG 센서와 스트레인 게이지로 측정한 변형률과 유한 요소 해석으로 구한 섬유 방향 변형률의 비교 그래프이다. 필러를 채운 부분은 필러 바깥쪽의 스킵트에 센서들을 부착하여 측정하였다. 센서들로 측정한 변형률과 해석으로 구한 변형률은 실린더의 일부와 스킵트 부분에서는 일치하는 값을 보이나 돔 부분에서는 차이가 많이 남을 알 수 있다. 측정과 해석에서의 이러한 차이는 해석에서 사용된 재료의 물성치와 탱크의 두께 분포가 실제와 다르기 때문으로 생각된다. 그러나 측정과 해석의 변형률 분포 경향은 어느 정도 일치하고 있으므로 해석은 실험전의 대체적인 경향 파악에 이용될 수 있으며 정확한 변형률 분포를 알기 위해서는 실험을 병행해야 함을 알 수 있다.

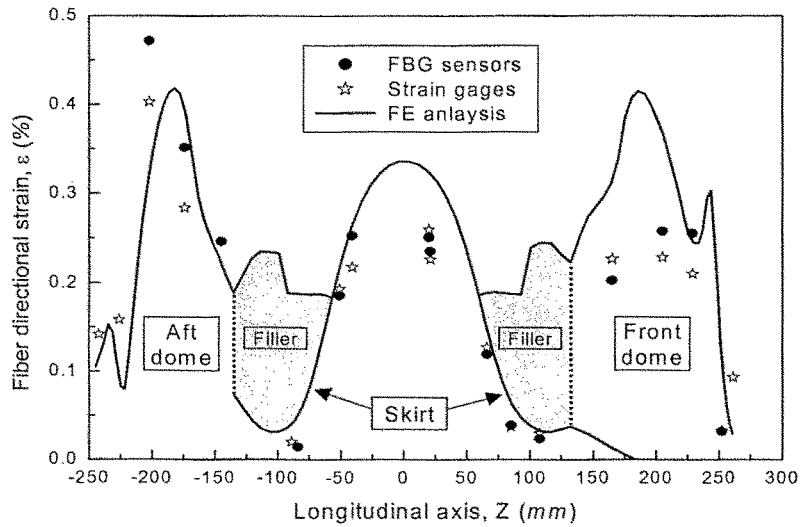


Fig. 3.5.13 Comparison of strains of FBG sensors, strain gages, and FE analysis.

나. FBG 센서와 스트레인 게이지의 측정 결과 차이

변형을 측정 결과에서 알 수 있듯이 실린더 부분에 부착한 FBG 센서와 스트레인 게이지의 변형을 측정 결과는 잘 일치하였다. 그러나 돔 부분에 부착한 FBG 센서와 스트레인 게이지의 변형을 측정 결과에서는 차이를 보이는 측정 위치가 많았다. 피크가 갈라지기 전까지의 모든 FBG 센서들은 변형을 잘 측정하고 있었으므로 센서의 성능상의 문제는 아닌 것으로 생각되며 그 원인으로서는 다음과 같은 몇 가지를 생각할 수 있다.

먼저 FBG 센서와 스트레인 게이지의 부착시 부착 방향이 정확히 섬유 방향이 아니고 어느 하나의 센서의 각도가 틀어져서 부착되었을 경우에 섬유 방향으로 걸리는 변형을 동일하게 측정할 수 없다. 두 번째 원인으로서는 두 가지 센서가 동일한 축방향 위치에 부착되지 않았을 경우를 생각할 수 있다. 돔의 중앙을 중심으로 하여 동심원 상으로 같은 축방향 위치에 부착되지 않았을 경우에 해석 결과에서 볼 수 있듯이 돔 부분의 변형률 변화율이 크기 때문에 위치가 조금만 달라져도 각 위치에서의 변형률 크기가 달라진다. Fig. 3.5.13의 해석 결과에서도 돔 부분에서 축방향으로 변형률의 변화율이 큼을 알 수 있다. 따라서 동일한 섬유일지라도 축방향 위치가 조금이라도 달라지면 변형률의 크기가 다르게 된다.

세 번째 원인으로 생각할 수 있는 것은 압력 탱크의 제작에 사용된 폭이 넓은 토우 프리프레그의 동일한 축방향 위치에서 돔의 자오선(meridian line)에 대한 섬유의 각도가 달라 각 위치의 섬유 방향에 가해지는 변형률의 크기가 다른 것을 고

려할 수 있다.

Jeusette와 Laschet 등은 10 mm의 폭을 가지는 프리프레그의 와인딩을 통해 제작된 압력 탱크에 압력을 가했을 때 동일한 축방향 위치의 프리프레그 폭 방향으로 양 끝 지점에서의 각도 차이 변화와 섬유 방향 응력 차이 변화에 대해 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 압력 탱크의 헬리컬 와인딩의 각도는 5.5이였으며 Fig. 3.5.14와 같이 프리프레그 폭 방향으로 양 끝의 두 점(P_1 , P_2)에서 자오선과의 각도 차이는 최대 35까지 발생하였다. 섬유의 각도가 달라지므로 각 위치에서 섬유 방향으로 작용하는 응력도 달라지며 두 점에서의 섬유 방향 응력은 최대 40 % 이상 발생함을 보였다.

본 실험에서 FBG 센서와 스트레인 게이지를 부착한 돔에서의 섬유 다발의 폭은 약 20 mm 였으며 동일한 위치에 부착된 FBG 센서와 스트레인 게이지의 거리는 프리프레그의 폭 방향으로 약 6~8 mm이다. 따라서 두 가지 센서들을 모두 섬유 방향으로 정확히 부착하였다고 하더라도 센서 부착위치에서의 자오선에 대한 섬유 각도가 다르므로 변형률이 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서 사용한 유한 요소 해석에서는 이러한 효과를 고려하지 않았기 때문에 변형률 측정 결과와 해석 결과가 다를 수 있다.

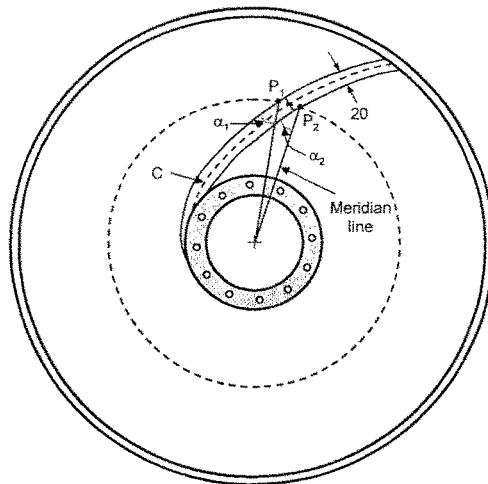


Fig. 3.5.14 Angle variation along width of prepreg tape (P_1 , P_2) on a given parallel.

다. FBG의 피크 갈라짐

실험에 사용된 총 20개의 FBG 센서 중 5개의 센서에서 가압 도중 피크가 갈라지는 현상이 발생했다. 전방돔에 부착된 FBG_5 와 후방돔에 부착된 FBG_9 와 FBG_{10} 은

600 *psi* 이후의 압력에서 피크가 갈라졌으며 실린더에 축방향으로 부착된 FBG₁₉와 FBG₂₀은 각각 300 *psi*와 200 *psi* 이후의 압력에서 피크가 갈라졌다. FBG의 피크가 갈라지는 원인은 FBG에 가해진 횡방향 하중에 의한 복굴절(birefringence) 현상에 의한 것과 FBG의 게이지 부분에서의 급격한 변형률 변화율(gradient)이나 불균일한 변형률 분포, 그리고 미소 굽힘에 인해서 FBG의 격자 간격이 불균일하게 되는 것에 의한 영향이 있다. 일반적으로 복굴절 현상에 의한 피크 갈라짐은 피복을 제거한 FBG를 복합재료 내부에 보강 섬유 직각 방향으로 삽입하여 성형하였을 때에 냉각 동안에 발생하는 압축 잔류응력에 의해 발생하거나 직접적으로 횡방향 하중을 가했을 때에 발생한다. 본 실험에서는 탱크의 표면에 부착하였고 FBG 횡방향 하중이 가해지지 않으므로 FBG의 피크가 갈라지는 원인은 FBG가 부착된 지점의 변형률 변화율이 급격하거나 불균일한 변형률 분포, 또는 미소 굽힘이 발생하여 FBG의 격자 간격이 불균일하게 되어 발생하는 피크 퍼짐 현상으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 FBG의 격자 간격을 연속적으로 변화하게 제작하는 chirped grating에서 쉽게 볼 수 있다.

FBG 센서를 이용한 변형률 측정에서 FBG 센서의 피크가 갈라진 센서들은 모두 5개이며, 전방돔의 보스 부분에 부착한 FBG₅, 후방돔의 보스 부분에 부착한 FBG₉와 FBG₁₀, 그리고 실린더의 축방향으로 부착한 FBG₁₉와 FBG₂₀이다. 센서가 부착된 위치와 변형률 분포를 Fig. 3.5.13의 해석 결과와 비교해 보면, 먼저 돔의 끝 부분은 축방향 거리에 대한 변형률의 기울기가 매우 급한 것을 알 수 있다. 따라서 이 부분에 부착된 센서들은 급격한 변형률 변화율에 의한 FBG 격자 간격의 불균일에 의해 피크가 갈라지는 것으로 보인다. 또한 실린더 부분을 살펴보면, 실린더는 후프와 인딩되었으므로 섬유 방향인 원주 방향으로는 변형률이 일정하지만 실린더의 축방향은 실린더의 팽창에 의해 변형률의 변화율이 크다. 따라서 실린더의 원주 방향으로 부착한 FBG들의 피크는 갈라지지 않았으나 축방향으로 부착한 FBG들의 피크는 갈라짐을 알 수 있다.

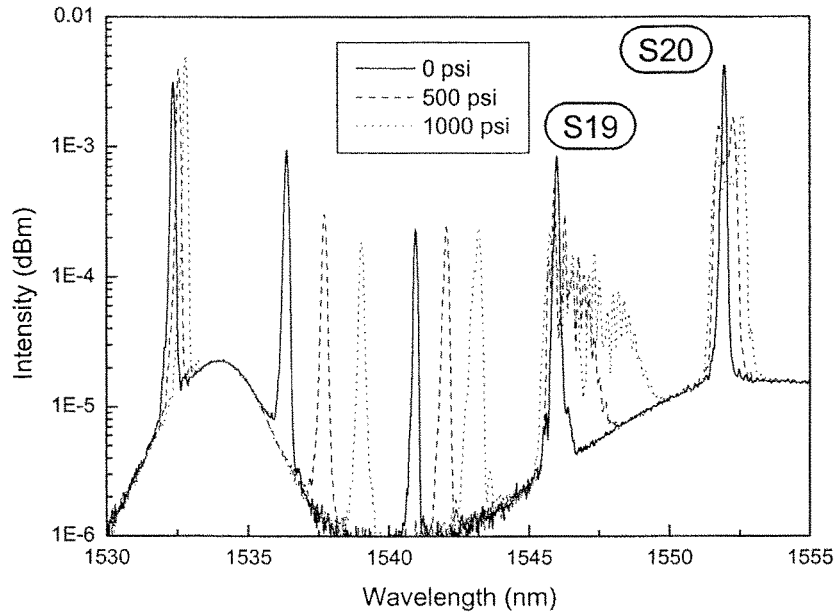


Fig. 3.5.15 Variation of FBGs spectrum of channel 4 according to pressure elevation.

Fig. 3.5.15는 광원으로 EDFA를 사용하고 분광분석기로 취득한 실린더에 부착된 채널 4의 FBG 센서들이 압력 증가에 따라 피크가 이동하고 갈라지는 모습을 보여 준다. 실린더의 원주 방향으로 부착된 앞의 3개의 FBG들은 1000 *psi*의 압력까지 피크가 갈라지지 않고 변형률에 따라 중심파장이 이동되는 모습을 보이는 반면, 실린더의 축방향으로 부착된 뒤의 두 센서들은 압력이 증가함에 따라 피크가 심하게 갈라지는 모습을 보인다. 그러나 스트레인 게이지들은 게이지 부분에서 변형률에 의한 저항변화에 의해 변형률을 측정하게 되므로 게이지 길이 부분의 변형률을 평균하여 나타낸다. 따라서 급격한 변형률 변화율과 미소 굽힘의 영향을 거의 받지 않게 되고 Fig. 3.5.9와 Fig 3.5.10 에서 볼 수 있는 바와 같이 높은 압력까지 변형률을 측정할 수 있었다. 그러므로 FBG 센서도 Fig. 3.5.16과 같이 FBG의 게이지 부분을 유리 튜브로 보호[40]하여 횡방향 하중에 의한 복굴절 현상을 예방하고 유리 튜브의 게이지 길이 부분의 변형률의 평균값을 측정하도록 한다면 피크 갈라짐 현상을 없앨 수 있다.

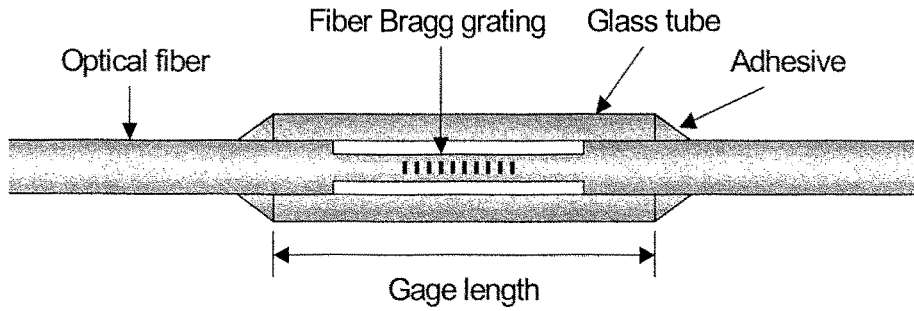


Fig. 3.5.16 Configuration of protected fiber Bragg grating sensor.

이상의 실험 결과에서 알 수 있듯이 필라멘트 와인딩된 압력 탱크와 같은 변형을 분포가 복잡한 구조물의 변형을 분포를 정확히 측정하기 위해서는 센서의 제작과 부착 위치 등에 대한 연구가 더 필요하며, 더 많은 FBG 센서를 사용한 분포된 측정 시스템을 구성하여 많은 위치에서의 측정이 필요함을 알 수 있다. 또한 실험 전에 해석을 수행하여 대체적인 변형률 분포 경향을 파악하고 돔과 같이 변형률 변화율이 큰 부분에 센서들을 집중적으로 배치하여야 할 것이다.

라. 측정 장치의 효율성

실험 장치의 측면에서 보면, 변형률 측정을 위해 사용된 스트레인 게이지는 각각의 게이지에 대해 전선이 연결되고 각 채널별로 출력신호의 증폭을 위한 증폭기 (strain gage conditioner)가 연결되어 많은 지점의 변형률을 측정할 경우, 게이지로부터 나오는 전선들과 각 채널에 연결된 신호 증폭기들에 의해 실험 장치가 방대해지는 단점이 있다. 그러나 FBG 센서는 파장분할 다중화(WDM) 기법을 이용하여 광섬유 한 채널당 여러 개의 센서를 설치하게 되므로 구조물의 많은 지점의 변형률을 측정할 경우에 적용이 훨씬 용이하다. 그리고 스트레인 게이지는 전자기파의 영향을 받아 신호잡음(noise)이 발생하기 쉬우며 미세한 저항차이에 의해 측정치에 오차가 발생하기 때문에 스트레인 게이지의 연결선을 연장하는데 최대 수십 m 정도까지의 한계가 있다. 그러나 광섬유는 전자기파의 영향을 받지 않고 전반사를 통해 광섬유를 전파하는 빛의 손실이 거의 없기 때문에 수십 km 의 거리까지 연장하여 사용할 수 있으므로, 폭발위험이 있는 압력 탱크 가압 실험, 연소관 실험과 같은 위험한 실험을 할 경우에 먼거리에서 원격 측정이 가능하다. 또한 기존의 광대역 광원들에 비해 파워를 크게 향상시킨 파장 이동 광섬유 레이저를 사용함으로써 많은 채널을 이용할 경우에도 기존의 방법보다 훨씬 효율적이다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

본 연구의 각 연도별 연구개발목표 및 계획대비 달성도는 아래의 표와 같다.

연구기간	당초연구계획	연구수행실적	달성도
1차년도 (1999. 10. 1 - 2000. 9. 30)	광섬유 WSFL 광원시스템 구성 및 신호처리 프로그램 제작 - prototype system 개발	<ul style="list-style-type: none"> - WSFL 광대역 광원의 안정화 및 개선 - Graphic user interface를 지원하는 신호처리 및 display 프로그램 제작 - WSFL 시스템의 소형화와 사용편리성을 위한 연구를 수행하여 1차 시제품 제작 및 제작된 시스템의 개선점 파악 	100%
2차년도 (2000. 10. 1 - 2001. 9. 30)	실제 구조물 적용을 위한 여러 종류의 센서 개발 및 실험	<ul style="list-style-type: none"> - WSFL 광대역 광원의 분기와 다중 채널 모듈 개발 - 다중 채널을 사용한 다점 동시 변형률 측정 실험 - 광섬유 센서를 이용한 동적 변형률의 진동 측정 - 단일 광섬유 센서를 이용한 구조물의 변형률과 파손신호 동시 측정 - 광섬유 센서를 이용한 온도 측정 	100%
3차년도 (2001. 10. 1 - 2002. 9. 30)	통합된 광섬유 센서 시스템의 완성 및 광섬유 센서 시스템이 실제 적용	<ul style="list-style-type: none"> - 광섬유 센서 구조 안전 진단 시스템의 성능 향상 - 브래그 격자 센서의 실제 구조물 적용에 따른 문제점 및 해결 방안 - 구조물의 온도 및 변형 동시 측정을 위한 광섬유 센서 시스템 개발 - 광섬유 센서를 이용한 복합재료의 성형 모니터링 - 광섬유 센서를 이용한 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력 탱크의 건전성 모니터링 	100%

본 과제는 1단계 연구를 기초로 수행한 2단계 연구로서 단점 센서 중심으로 연구하던 1단계 연구와는 달리 다점에서 동시에 물리량을 측정할 수 있는 시스템 연구에 중점을 두었다. 동시 다점 측정 가능한 안전진단시스템 개발을 목표로 수행된 본 과제는 3년에 걸쳐 체계적으로 수행되었으며 그 결과물로서 광섬유 안전 진단 시스템을 구축할 수 있었다.

본 연구가 수행되기 전, 국내에서는 광섬유 센서에 대한 연구가 선진국에 비해 늦고 연구하는 기관도 극소수였다. 그래서 광섬유 센서를 사용하여 구조물의 변형을 동시에 여러 지점에서 측정할 수 있는 광섬유 센서 시스템을 구성하는 기술은 전무하다 할 수 있었다. 따라서 1단계 1차년도에서는 동시 다점 변형 측정에 적합한 광원 개발과 광섬유 센서 신호를 효과적으로 처리할 수 있는 신호처리 방법에 대한 기초적인 연구를 수행하였다. 이런 연구를 통해 선진국에서만 진행되어온 광섬유 센서 시스템의 구성 기술을 국내에서 체득할 수 있도록 기여하였으며 센서의 제작 및 신호처리 방법에 대한 기초연구로 앞으로 발전되어 나갈 광섬유 센서 안전 진단 통합시스템 제작의 초석을 쌓았다고 할 수 있다.

2차년도에는 1차년도에 제작한 광원 시스템과 신호처리 시스템의 확장을 통해 사용 가능한 센서의 개수를 획기적으로 증가시킬 수 있었으며 이를 통해 구조물의 여러 지점에서의 변형률을 동시에 측정할 수 있는 시스템을 구축할 수 있었다. 또한 비행기 축소 모형인 복합재 wing box의 다점 모니터링을 본 시스템을 이용해 성공적으로 수행함으로써 개발된 안전 진단 시스템의 실 구조물로의 적용 가능성을 확인 할 수 있었다. 마지막으로 구조물의 변형률 뿐 아니라 온도를 측정할 수 있는 센서와 시스템을 개발함으로써 광섬유 센서의 다양한 활용성을 입증하는 계기가 되었다.

마지막 년도인 3차년도에서는 실 구조물로의 적용성을 확인하기 위해 콘크리트 구조물에 광섬유 센서를 부착하여 변형을 측정하였다. 이를 통해 광섬유 센서를 실 구조에 적용할 때 발생할 수 있는 여러 문제점을 확인할 수 있었으며 이를 해결할 수 있는 방법도 제안하였다. 그리고 본 과제를 통해 개발된 안전 진단 시스템의 여러 부분들을 통합함으로써 시스템의 단순화와 경량화를 이룩하였다. 마지막으로 여러 가지 적용 연구들을 통해 본 시스템의 우수성과 활용 가능성을 확인하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

최근 다점측정이 가능한 브래그 격자 광섬유 센서의 연구가 활발히 진행됨에 따라 국내외에서 본 센서를 응용한 연구들이 활발히 진행 중이다. 또한 그 활용범위도 광범위하여 다양한 활용이 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서도 대형 기계구조물의 건전성을 안정적으로 모니터링 함으로써 유지 보수비의 절감 및 효율성을 극대화시킬 수 있는 광섬유 센서 안전 진단 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 앞에서 언급한 브래그 격자 센서를 이용한 안전 진단 시스템으로서 광섬유 한 가닥에 여러 개의 센서를 배열할 수 있고 동시 다점 측정이 가능하며 또한 장시간의 구조안전 진단에도 적합하다.

이러한 광섬유 센서는 기술적으로 향후 항공기, 로켓 발사체, 인공위성 같은 기계구조물이나 원자력 발전소, 도로, 교량, 댐과 같은 대형구조물에 적용이 가능하다. 따라서 광섬유 센서를 사용할 경우 앞으로 '제2의 삼풍백화점 사고'나 '성수대교 붕괴'와 같은 대형구조물의 사고를 미연에 방지할 수 있는 길이 열리게 된다.

또한 본 과제를 통하여 수행한 스마트 구조물의 핵심기술들을 습득한 전문가들의 양성을 통하여 국내 산업의 국제 기술 경쟁력 확보에 활용한다. 그리고 본 과제를 수행하면서 각 분야의 전문가들이 기업체에 전문적인 자문을 수행하여 간접적으로 산업계를 도와주거나, 각종 프로젝트를 통하여 관련 장비 및 제품 개발을 직접적으로 도울 수 있을 것이다. 본 연구개발을 통하여 얻은 연구 논문이나 특허출원 등을 통한 지적재산권 확보와 인터넷에서 홈페이지 구축 등을 통하여 산업계에서 용이한 자료 접근으로 기술발전에 활용될 수 있도록 한다. 그리고 상업성이 있는 연구 결과에 대해서는 본 과제를 수행한 연구원이 벤처회사를 설립하여 국내 산업을 직접적으로 선도하고, 수입대체 및 외화획득에 이바지할 수 있을 것이다.

또한 연구결과에 대한 기대성과를 경제·산업적인 측면에서 살펴보면 광섬유 센서 기술은 광통신, 광학소자 산업과 정밀측정 및 구조안전진단 기술 개발에 관련되어 있고, 전세계적으로 최소 1백여 개의 소규모 관련업체가 있다고 추산된다. 광섬유 센서는 현재 실험실과 소규모 기업에서 소량 생산하여 가격이 비싸지만 대량생산을 통해 가격이 낮아질 것이다. 일본의 OITDA (Optoelectronics Industry and Technology Development Association)은 1994년 현재 광섬유 센서만의 시장을 연간 920만 달러로 평가하였다.[41] 그러므로 광섬유 센서를 사용한 시스템이나 그에 필요한 부대 장비들의 시장까지 계산한다면 몇 억 달러를 상회할 것이다. 국내 시장 규모는 이 부분에 대한 통계 자료가 전무하여 정확히 파악할 수는 없지만 앞으로의 시장 성장가능성은 크다고 보여진다. 과거에는 국내 기업에서 광섬유 기술에 관련된 제품을 생산하는 업체가 없어 필요한 핵심 장비를 선진국에서 전량 수입하고 있었다. 그러나 소수의 국내 대기업과 벤처기업에서도 몇 년 전부터 광섬유 관련 장비를 개발하고 있다. 또한 OIDA(The North American Optoelectronics Industry Development Association)은 21 세기초 처음 10년 동안 광섬유 감지기

시장은 연간 5억 달러에 이를 것으로 평가하였으며, 특히 스마트 구조와 관련된 시장도 상당히 커질 것으로 예상하였다. 그리고 현재 광섬유 센서 하나의 가격이 약 200달러 정도인데 이 가격이 점점 하락하고 응용범위가 넓어지면 응용하는 구조물에 따라서 부가가치는 매우 클 것이다. 하나의 예로 자동차의 자동항법장치인 GPS에 쓰이는 광섬유 자이로 센서의 경우 몇 백만 원대의 고가로 일부 고급 승용차에 적용되고 있으나, 스마트 구조기술의 발달로 저가모델이나 일반 기계구조물에 적용될 수 있을 정도로 가격의 하락을 유도할 수 있으리라 예상된다. 이에 따라 이 분야에서의 각종 제품들의 국제경쟁력이 크게 신장될 것이다. 광섬유 센서 안전진단 시스템은 고부가가치 상품으로 향후 역외수출이 가능하고 구조물의 유지관리 보수에 대한 경비를 크게 절감할 수 있다. 또한 안전진단에 대한 신뢰성 확보로 구조설계시 안전을 하향조정 등을 통해 설비비 및 무게감소 등과 같은 부수적인 효과도 얻을 수 있다. 이러한 연구는 항공우주구조물과 같은 첨단 분야뿐만 아니라 대형건물, 교량, 댐 및 발전소 등과 같은 기간산업의 안전진단 시스템에 쉽게 적용될 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 보고서의 제 2장 국내외 기술개발 현황에 나와 있듯이 선진국의 경우 센서 기술 개발 과정을 넘어서 기술의 상품화 단계 및 시장 개척 단계에 있다. 미국의 경우 광부품 및 소자 기술을 선도하고 있는 Micron Optics 사에서 본 연구에서 개발한 상품과 유사한 상품을 개발 및 판매를 하고 있다. Fig. 6.1은 판매되고 있는 제품과 사양을 나타내고 있다.



Fiber Bragg Grating Swept Laser Interrogator

Specifications	
Optical	
Number of channels	4
Maximum number of FBGs/channel	64
Wavelength range	1520 - 1570 nm
Optical power/channel	-10 dBm
Optical dynamic range (4 software controlled gain settings)	30 dB
Resolution	1 pm
Laser linewidth	1 GHz
Scan frequency	100 Hz
Minimum FBG spacing	0.5 nm
Optical connector	FC/APC
Hardware and Software	
Computer interface card, DAQcard™	ISA, PCMCIA or PCI* (*Inquire with MOI)
Interface cable	52 pin, 1 meter
FBG-SLI Software for Windows 98 (stand-alone and sample LabView™ VI library)	included
Electrical	
Power supply	95-135 VAC or 190-265 VAC, 15W
Uncalibrated analog output - BNC connectors	Ch 1-4, sync

Fig. 6.1 Micron Optics 사의 광섬유 센서 진단 시스템

또한 유럽의 경우 프랑스, 영국, 스위스 등 선진국에서도 본 연구에서 개발된 시스템과는 다른 방식의 광섬유 센서 제품을 출시한 상태이다.

그리고 선진국의 경우 제품 개발과 더불어 센서 시스템의 현장 적용 연구가 활발히 진행 중에 있다. 교각, 원자력 발전소, 그리고 댐과 같은 대형 토목 구조물에 적용을 많이 하고 있으며 또한 선박 및 항공기와 같은 고등 기계 구조물의 건전성 모니터링에도 적극 활용하고 있는 실정이다.

본 연구를 통해 개발된 광섬유 센서 시스템 역시 세계적인 경쟁력을 갖춘 제품으로서 외국 기업의 시장 선점을 막기 위해 좀 더 정밀한 제품의 안정성 확보와 많은 적용 사례를 확대 함으로서 제품의 경쟁력을 한 층 더 높일 수 있을 것이라 예상된다.

제 7 장 참고문헌

- [1] S. H. Yun, D. J. Richardson and B. Y. Kim, "Interrogation of Fiber Grating Sensor Arrays with a Wavelength-Swept Fiber Laser," *Optics Letters*, Vol. 23, No. 11 1998, pp. 843-845.
- [2] Xu, M.G., Archambault, J.-L., Reekie, L. and Dakin, J.P. (1994), Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors, *Electronics Letters*, Vol.30, No.13, 1085-1087.
- [3] Patrick, H.J., Williams, G.M., Kersey, A.D., Pedrazzani, J.R., and Vengsarkar, A.M. (1996), Hybrid fiber Bragg grating / long period fiber grating sensor for strain / temperature discrimination, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, No. 9, 1223-1225.
- [4] James, S.W., Dockney, M.L. and Tatam, R.P. (1996), Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors, *Electronics Letters*, Vol.32, No.12, 1133-1134.
- [5] Bhatia, V., Campbell, D., Claus, R.O., and Vengsarkar, A.M. (1997), Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings, *Optics Letters*, Vol.22, No. 9, 648-650.
- [6] Fallon, R.W., Zhang, L., Gloag, A., and Bennion, I. (1997), Identical broadband chirped grating interrogation technique for temperature and strain sensing, *Electronics Letters*, Vol. 22, No. 8, 705-707.
- [7] Kanellopoulos, S.E., Handerek, V.A., and Rogers, A.J. (1995), Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber gratings, *Optics Letters*, Vol.20, No.3, 333-335.
- [8] Ferreira, L.A., Lobo Ribeiro, A.B., Santos, J.L., and Farahi, F. (1996), Simultaneous measurement of displacement and temperature using a low finesse cavity and a fiber Bragg grating, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.8, No.11, 1519-1521.
- [9] Liu, T., Fernando, G.F., Zhang, L., Bennion, I., Rao, Y.J. and Jackson, D.A. (1997), Simultaneous strain and temperature measurement using a combined fibre Bragg grating/extrinsic Fabry-Perot sensor, in *Proc. of the 12th International Conference on Optical Fiber Sensors: (OFS-12)*, VA, USA, 40-43.
- [10] Jin, X.D. and Sirkis, J.S., Chung, J.K. and Venkat, V.S. (1998), Embedded in-line fiber etalon/Bragg grating hybrid sensor to measure strain and temperature in a composite beam, *J. of Intelligent Material*

Systems and Structures, Vol.9, No.3, 171-181.

- [11] Du, W.D., Tao, X.M., and Tam, H.Y. (1999), Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 1, 105-107.
- [12] Jung, J.H., Nam, H., Lee, J.H., Park, N.K., and Lee, B.H. (1999), Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single-fiber Bragg grating and an erbium-doped fiber amplifier, *Applied Optics*, Vol. 38, No. 13, 2749-2751.
- [13] Posey, Jr., R. and Vohra, S.T. (1999), An eight-channel fiber optic Bragg grating and stimulated Brillouin sensor system for simultaneous temperature and strain measurements, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 12, 1641-1643.
- [14] Liu, T., Fernando, G.F., Zhang, Z.Y., Grattan, K.T.V. (2000), Simultaneous strain and temperature measurements in composites using extrinsic Fabry-Perot interferometric and intrinsic rare-earth doped fiber sensors, *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 80, No. 3, 208-215.
- [15] Measurement Group, Inc., Tech Note TN-513-1 (1986), Measurement of thermal expansion coefficient using strain gage.
- [16] 윤광준, 이형주, 김주식, 구남서, (1999) 스트레인 게이지를 이용한 열변형을 측정 및 열응력 해석 기법, 제 9차 유도무기 학술대회 논문집, 국방과학연구소, 601-606.
- [17] Suopajarvi, P., Lyori, V., Nissila, S., Kopola, H., and Johansson, R. (1995), Indicating cure and stress in composite container using optical fibers, *Optical Engineering*, Vol. 34, No. 9, 2587-2591.
- [18] Lawrence, C.M., Nelson, D.V., Bennett, T.E., and Spingarn, J.R. (1998), An embedded fiber optic sensor method for determining residual stresses in fiber-reinforced composite materials, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 9, No. 10, 788-799.
- [19] Chen, J.Y., Hoa, S.V., Jen, C.K., and Wang, H. (1999), Fiber-optic and ultrasonic measurements for in-situ cure monitoring of graphite/epoxy composite, *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 20, 1860-1881.
- [20] Kalamkarov, A.L., Fitzgerald, S.B., and MacDonald, D.O. (1999), The use of Fabry Perot fiber optic sensors to monitor residual strains during pultrusion of FRP composites, *Composites: Part B*, Vol. 30, No. 2, 167-175.
- [21]. Osaka, K., Kosaka, T., Asano, Y., and Fukuda, T. (2000), Measurement

- of internal strains in FRP laminate with EFPI optical fiber sensor during autoclave molding; measurement in off-axis directions, *Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000)*, Hong, C.S. and Kim, C.G., Editor, Vol. II, Kyongju, Korea, 1117-1122.
- [22] O'Dwyer, M.J., Maistros, G.M., James, S.W., Tatam, R.P., and Partridge, I.K. (1998), Relating the state of cure to real-time internal strain development in a curing composite using in-fiber Bragg gratings and dielectric sensors, *Measurement Science and Technology*, Vol. 9, 1153-1158.
- [23] Dewynter-Marty, V., Ferdinand, P., Bocherens, E., Carbone, R., Beranger, H., Bourasseau, S., Dupont, M., and Balageas, D. (1998), Embedded fiber Bragg grating sensors for industrial composite cure monitoring, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 9, No. 10, 785-787.
- [24] Hahn, H.T. (1984), Effects of residual stresses in polymer matrix composites, *Journal of Astronautical Sciences*, Vol. 32, No. 3, 253-267.
- [25] Folias, E.S., Hohn, M., and Nicholas, T. (1998), Predicting crack initiation in composite material systems due to a thermal expansion mismatch, *International Journal of Fracture*, Vol. 93, 335-349.
- [26] White, S.R. and Hahn, H.T. (1990), Mechanical property and residual stress development during cure of a Gr/BMI composite, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 30, No. 22, 1465-1473.
- [27] Jun, W.J. and Hong, C.S. (1990), Effect of residual shear strain on the cured shape of unsymmetric cross-ply thin laminates, *Composite Science and Technology*, Vol. 38, 55-67.
- [28] Jun, W.J. and Hong, C.S. (1992), Cured shape of unsymmetric laminates with arbitrary lay-up angles, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 11, 1352-1366.
- [29] Peeters, L.J.B., Powell, P.C., and Warnet, L. (1996), Thermally-induced shapes of unsymmetric laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 5, 603-626.
- [30] Schlecht, M., Schulte, K., and Hyer, M.W. (1995), Advanced calculation of the room-temperature shapes of thin unsymmetric composite laminate, *Composite Structures*, Vol. 32, 627-633.
- [31] Dano, M.-L. and Hyer, M.W. (1998), Thermally-induced deformation

- behavior of unsymmetric laminates, *International Journal of Solids Structures*, Vol. 35, No. 17, 2101-2120.
- [32] Schlecht, M. and Schulte, K. (1999), Advanced calculation of the room-temperature shapes of unsymmetric laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 16, 1472-1490.
- [33] Madhukar, M.S. and Genidy, M.S. (2000), A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, Part I: Test method, *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 22, 1883-1904.
- [34] Genidy, M.S., Madhukar, M.S., and Russell, J.D. (2000), A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, Part II: Closed loop feedback control system, *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 22, 1905-1925.
- [35] Russell, J.D., Madhukar, M.S., Genidy, M.S., and Lee, A.Y. (2000) A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, Part III: Correlating stress history to viscosity, degree of cure, and cure shrinkage, *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 22, 1905-1925.
- [36] White, S.R. and Hahn, H.T. (1993), Cure cycle optimization for the reduction of processing-induced residual stresses in composite materials, *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, No. 14, 1352-1378.
- [37] Roberts, S.S.J. and Davidson, R. (1993), Cure and fabrication monitoring of composite materials with fibre-optic sensors, *Composite Science and Technology*, Vol. 49, 265-276.
- [38] Jeusette, J.P., Laschet, G., Charpentier, P., and Deloo, Ph. (1987), Finite element analysis of composite revolution structures wound by wide plies, *Composite Structures*, Vol. 8, 221-237.
- [39] Koo, B.Y., Ryu, C.Y., Hong, C.S., and Kim, C.G. (2000), Vibration and mode sensing of a composite beam using fiber Bragg grating sensor arrays, *Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000)*, Hong, C.S. and Kim, C.G., Editor, Vol. II, Kyongju, Korea, 1147-1152.
- [40] Foedinger, R.C., Rea, D.L., Sirkis, J.S., Baldwin C.S., Troll, J.R., Grande, R., Davis, C.S., and VanDiver, T.L. (1999), Embedded fiber optic sensor arrays for structural health monitoring of filament wound composite pressure vessels, *Proceeding of SPIE* Vol. 3670, 289-301.
- [41] JTEC(Japanese Technololy Evaluation Center) Panel, "Optoelectronics in Japan and the United States", <http://itri.loyola.edu/opto/toc.htm>, 1996

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	중점국가연구개발사업		
	세부사업명	기계설비 요소기술개발 사업		
과제명		광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 기술 개발		
연구기관		한국과학기술원	연구책임자	김 천 곤
총연구기간		1999년. 10월. 1일. ~ 2002년. 9월. 30일. (36개월)		
총 연구비 (단위 : 천원)		정부출연금	민간부담금	합계
		460,788	127,500	588,288
기술분야		기반 기술		
참여기업		(주)도남시스템		
공동연구기관				
위탁연구기관				
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)		1. 기업화 (√)	2. 기술이전()	3. 후속연구추진()
		4. 타사업에 활용()	5. 선행 및 기초 연구()	6. 기타목적활용 (교육,연구)()
		8. 기타()		
<p>특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.</p> <p>첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부. 2. 기술요약서 1부</p> <p style="text-align: right;">2002 년 9 월 30 일</p> <p style="text-align: right;">연구책임자 : 김 천 곤 (인) 연구기관장 : 홍 창 선 (직인)</p> <p>과학기술부장관 귀하</p>				

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

최종목표	광섬유 센서를 이용한 기계구조 안전진단 기술 개발 - 기계설비 및 항공기 구조물의 구조안전진단
내용	1. 광섬유 WSFL 광원시스템 구성 및 신호처리 프로그램 제작 -Prototype system 개발 2. 실제 구조물 적용을 위한 여러 종류의 센서 개발 및 실험 3. 통합된 광섬유 센서 시스템의 완성 및 광섬유 센서 시스템이 실제 적용

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고
광섬유 구조물 변형방지 시스템	특허 제 0329042호	02.3.6.	홍창선 외 3인	대한민국	

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고
-	-	-	-	-

다. 노하우 내역

파장 이동 광섬유 레이저 제작 핵심 기술 및 실구조물로의 광섬유 센서 적용
핵심 기술

라. 발생품 및 시작품 내역

광섬유 센서와 파장 이동 광섬유 레이저를 이용한 구조안전진단 시스템

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제 목	년도	호	국명	발행기관	SCI여부
Journal of Composite Materials	Detection of Buckling and Crack Growth in the Delaminated Composites Using Fiber Optic Sensor	2000.	Vol.34, No.19	미국	Technomic Pub.	listed
Smart Materials and Structures	Development of Fiber Optic Ingress/Egress Methods for Smart Composite Structures	2000.	Vol.9, No.2	영국, 미국	institute of Physics Pub.	listed
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	Simultaneous Measurement of Strain and Temperature of Structures Using Fiber Optic Sensor	2001.	Vol.12, No.4	미국	Technomic Pub.	listed
Smart Materials and Structures	Cure Monitoring of Composite Laminates Using Fiber Optic Sensors	2002.	Vol.11, No.2	영국, 미국	institute of Physics Pub.	listed
Smart Materials and Structures	Development of Fiber Bragg Grating Sensor System Using Wavelength-Swept Fiber Laser	2002	Vol.11, No.3	영국, 미국	institute of Physics Pub.	listed
Journal of Composite Materials	Structural Analysis And Strain Monitoring Of The Filament Wound Motor Case	2002.5	accepted	미국	Technomic Pub.	listed
Smart Materials and Structures	Strain Monitoring of Filament Wound Composite Tank Using Fiber Bragg Grating Sensors	2002.7	accepted	영국, 미국	institute of Physics Pub.	listed
Measurement Science and Technology	Simultaneous Measurement of Strain, Temperature and Vibration Using a Fiber Optic Sensor	2002.8	Vol.13, No.8	영국, 미국	institute of Physics Pub.	listed

한국항공우주학회지	광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 변형을 측정에 관한 연구	2000.	제28권, 제5호	한국항공우주학회
한국항공우주학회지	광섬유 센서를 이용한 구조물의 열변형 및 온도 측정	2000.	제28권, 제8호	한국항공우주학회
한국항공우주학회지	광섬유 AEFPI 센서를 이용한 구조물의 동적 변형을 측정	2001.	제29권, 제1호	한국항공우주학회
한국항공우주학회지	광섬유 FBG/EFPI 센서를 이용한 구조물의 변형을 및 온도의 동시 측정	2001	제29권, 제3호	한국항공우주학회
한국항공우주학회지	필라멘트 와인딩된 복합재 탱크의 거동 해석과 변형을 측정, II. 광섬유 센서를 이용한 변형을 측정	2001.	제29권, 제8호	한국항공우주학회
한국복합재료학회지	광섬유 센서를 이용한 복합재의 파손 및 변형을 동시 측정	2001.	14권 5호	한국복합재료학회
한국복합재료학회지	변형을 전달성을 고려한 광섬유 브래그 격자 센서의 삽입 적용 기법 개발	2001	제14권, 제6호	한국복합재료학회
한국항공우주학회지	광섬유 센서를 이용한 변형을, 온도, 진동의 동시 측정	2002.	제30권, 제1호	한국항공우주학회
한국항공우주학회지	비대칭 직교적층 복합재료 적층판의 성형시 및 성형후 광섬유 센서를 이용한 변형을 및 온도의 동시 모니터링	2002.	제30권, 제1호	한국항공우주학회
한국항공우주학회지	광섬유 센서를 이용한 복합재료 적층판의 성형 모니터링	2002.	제30권, 제2호	한국항공우주학회
한국항공우주학회지	광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 필라멘트 와인딩된 복합재료 탱크의 변형을 모니터링	2002.	제30권, 제3호	한국항공우주학회
한국소음진동공학회 논문집	광섬유 센서와 압전 작동기를 이용한 평판의 최적 진동 제어	2002.	제12권, 제4호	한국소음진동공학회
한국항공우주학회지	금 증착된 광섬유 외부 패브리-페로 간섭(EFPI) 센서를 이용한 구조물의 동적 변형을 측정	2002.	제30권, 제2호	한국항공우주학회
한국복합재료학회지	복합재 평판에 삽입된 광섬유 브래그 격자의 스펙트럼특성과 응력유도복굴절	2002.	제15권, 제3호	한국복합재료학회

○ 학술회의 발표 실적

학술회의명	제 목	년도	호	국명	장소
SPIE Conference	Strain Monitoring of Smart Bridge Using Fiber Bragg Grating Sensor System with Wavelength-Swept Fiber Laser	2000.		U.S.A.	Newport Beach
ACCM-2000	Vibration and Mode Sensing of a Composite Beam Using Fiber Bragg Grating Sensor Arrays	2000		Korea	Kyongju,
ICTAM 2000	Experiments for Smart Composite Structures Using Optical Fiber Sensors	2000		U.S.A	Chicago
ICAST-11	Simultaneous Measurement of Strain and Temperature of Structures Using Fiber Optic Sensor	2000		Japan,	Nagoya,
SPIE 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics	Monitoring of Fabrication Strain and Temperature During composite Cure Using Fiber Optic Sensor	2001		USA	California

학술회의명	제 목	년도	호	국명	장소
SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials	Buckling Behavior Monitoring of Composite Wing Box Model Using Fiber Bragg Grating Sensor System	2001.		USA	California
ICCM-13	Real-time damage detection for smart composite materials using optical fiber sensors	2001		China,	Beijing
ISMS-21	Damage Detection and Identification of Smart Composites Using Optical Fiber Sensors	2001		Japan	Osaka
AIAA Space 2001 Conference and Exposition	Strain Monitoring of Smart Composite Structures Using Fiber Bragg Grating Sensor System	2001		USA	Albuquerque
1st European Workshop on SHM	Strain Monitoring of Filament Wound Composite Tank Using Fiber Bragg Grating Sensors	2002		Paris	France
ACCM-2002	Measuring Dynamic Strain of Composites using a Gold-Deposited EFPI	2002		New Zealand	

학술회의명	제 목	년도	호	국명	장소
한국복합재료학회	광섬유 센서를 이용한 구조물의 열변형 및 온도 측정	2000.4.14.			부산대학교
한국복합재료학회	광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의 실시간 파손감지	2000.11.17.			서울대학교,
한국복합재료학회	복합재 평판 내부에 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서의 삽입안전성과 신호 특성에 관한 연구	2000.11.17.			서울대학교
한국항공우주학회	광섬유 센서를 이용한 변형률 및 온도의 동시 측정	2000.11.11.			울산대학교
우주발사체기술 심포지움	광섬유 센서를 이용한 필라멘트 와인딩된 복합재 탱크의 변형률 측정	2001.3.30.			한국과학기술원
한국항공우주학회	광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의 실시간 파손감지	2001.4.14.			경상대학교
한국항공우주학회	복합재료 성형 시 광섬유 센서를 이용한 변형률 및 온도의 동시 모니터링	2001.4.14			경상대학교
한국복합재료학회	비대칭 복합적층판의 성형시 및 성형후 광섬유 센서를 이용한 변형률 및 온도의 동시 측정	2001.5.4.			한국기계연구원(창원)
군사과학기술학회	스마트 복합재료 구조물에 광섬유 브래그 격자 센서를 삽입 적용하기 위한 기법 개발	2001.8.21.			한국과학기술원,
군사과학기술학회	광섬유 EFPI 센서를 이용한 복합적층판의 파손감지 및 변형률 동시측정	2001.8.21.	Vol.1		한국과학기술원
군사과학기술학회	금코팅한 외부 패브리-페로 간섭계를 이용한 변형률 측정	2001.8.21	Vol.1		한국과학기술원
복합재료학회 한일 조인트 세션	Cure Monitoring of Composite Laminates Using Fiber Optic Sensors	2001.10.18.			서울대학교
복합재료학회 한일 조인트 세션	Measuring Dynamic Strain of Composites using a Gold-Deposited EFPI	2001.10.18.			서울대학교,
한국항공우주학회	스트레인 전달성을 고려한 광섬유 브래그 격자 센서의 삽입 적용 기법 개발	2001.11.10.			세종대학교

학술회의명	제 목	년도	호	국명	장소
한국소음진동공학회	광섬유 센서를 이용한 평판의 진동 감지 및 제어	2001.11.15.			용평리조트
한국항공우주학회	편광 유지 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 하중 측정	2002.4.12.			무주리조트
한국항공우주학회	FBG, Fabry-Perot 필터와 광섬유센서를 이용한 복합재 구조물의 변형률 및 파손 동시 모니터링	2002.4.13.			무주리조트
한국항공우주학회	광섬유 센서를 이용한 우주환경하에서 복합재료 적층시편의 노화에 따른 열팽창계수변화 측정	2002.4.13.			무주리조트
한국복합재료학회	PMFBG 센서를 이용한 횡방향 변형률 측정	2002.5.17.			전남대학교
한국복합재료학회	신경망 제어기를 이용한 광섬유가 부착된 복합재 보의 진동 제어	2002.5.17.			전남대학교
한국복합재료학회	고주파 진동 측정을 위한 FBG 센서 시스템 개 및 복합재 시편의 고유진동수 측정	2002.5.17.			전남대학교,

3. 연구성과

본 연구를 통해 22건의 국내외 논문게제 및 33건의 학술회의 참석 그리고 1건의 특허를 등록하였다. 그리고 국내외 불모지와 같았던 광섬유 센서 제작 및 센서를 이용한 구조물 건전성 모니터링 분야의 학문적 기틀과 산업화 기틀을 확립할 수 있었다. 또한 협력 업체인 (주)도남시스템을 통해 연구실 수준의 R&D Product를 상용화 제품으로 출시할 예정이다. 이를 통해 기술의 산업화를 이룩하였으며 구조 안전진단 시스템의 사용을 통한 대형 구조물의 신뢰성 확보에 획기적인 발전을 가져올 것으로 예상된다.

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

국방과학연구소와 협력해 본 연구를 통해 개발된 진단 시스템을 실제 사용되는 로켓 압력 용기의 실시간 건전성 모니터링에 적용할 계획이다.

나. 활용방법

여러 기계 구조물과 인프라 구조물에 개발된 시스템을 적용 시도해 볼 계획이다.

다. 차년도이후 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

대략 1년 간 개발된 안전진단시스템의 지속적인 적용 연구를 통해 실구조물에 적용시 발생할 수 있는 문제점들을 파악하고 그에 따른 해결책을 수립해 데이터베이스화 할 계획이다. 이를 바탕으로 대규모 토목 구조물이나 교각 및 빌딩의 건설시 본 시스템을 적용하여 스마트 교각 및 빌딩을 건설할 계획이며 또한 이러한 구조물들을 한곳에서 통합적으로 관리할 수 있는 센터를 구축할 계획이다.

5. 기대효과

세계는 점차로 하나의 정보망으로 통합되어가는 추세이며 이러한 추세는 광섬유를 이용한 광 통신망을 통해서 가능하다. 본 연구개발 결과는 기술적으로 향후 항공기, 로켓 발사체, 인공위성 같은 기계구조물 뿐만 아니라 원자력 발전소, 도로, 교량, 댐과 같은 대형 구조물에 적용 시 점차 확대되어가는 광 통신망과의 연계 가능성으로 인하여 구조물들간의 정보교환을 통해 효율적이고 적은 유지비용을 갖는 통합된 진단시스템을 갖출 수 있다. 또한 광섬유 센서 관련 사업은 본 연구 개발 결과를 토대로 지식 집약형 고부가가치 산업으로 발전할 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 개발된 진단 시스템을 판매할 경우 대략 2005년 기준 대략 50대 정도 판매될

경우 25억 정도의 경제적 이득을 얻을 수 있을 것으로 예상되며 이를 이용해 구조물의 건전성을 모니터링 함으로서 기존의 시스템을 대체함으로써 발생하는 이익이 대략 50억 정도의 경제적 이익을 줄 것으로 예상된다. 또한 기술의 수입을 줄이고 반대로 수출을 통한 로열티 이익을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

6. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

해당 사항 없음

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

1. 파장이동광섬유레이저 및 통합 구동 모듈 제작 기술
2. 실구조물에 적용하기 위한 광섬유 센서 제작 및 적용 기술

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	99-NG-01-A-06			
과제명	광섬유 센서를 이용한 구조안전진단 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	기계설비 요소기술개발 사업			
연구기관	한국과학기술원	기관유형	대학	
참여기관(기업)	(주)도남시스템			
총연구기간	1999. 10. 1 ~ 2002. 9. 30			(3년)
총연구비	정부(460,788)천원 민간(127,500)천원 합계(588,288)천원			
연구책임자 1	성명	김 천 곤	주민번호	
	근무기관 부서	기계공학과 항공우주공학전공	E-mail	cgkim@kaist.ac.kr
	직위/직급	교수 (책임급)	전화번호	042-869-3719
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명	김 대 현	소속/부서	기계공학과 항공우주공학전공
	직위/직급	박사과정	E-mail	frank@kaist.ac.kr
	전화번호	042-869-3781	FAX	042-869-3710
	주소	(305-701) 대전시 유성구 구성동 한국과학기술원		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

광섬유 센서를 이용한 구조물 건전성 모니터링 기술 내에는 크게 광섬유 센서 제작 기술과 여러 광소자 및 부품을 통합해 제작하는 광원기술 그리고 이러한 광원에 적합한 통합 모듈을 개발하는 기술 마지막으로 광섬유 센서 및 시스템을 실 구조물에 적용하기 위한 시공 및 적용 기술이 통합적으로 구성된다. 본 연구를 통해 브래그 격자 센서 제작 기술을 확보하였고 센서 시스템의 핵심적인 기술인 광원 제작 및 통합 구동 모듈 제작 기술을 선진국 수준으로 끌어올릴 수 있었다. 마지막으로 실 구조물에 브래그 격자 센서와 센서 시스템을 적용하기 위해 필요한 실질적인 기술들을 여러 경험을 바탕으로 확립할 수 있었다.

<기술적 특징>

- (1) 광학, 전기 및 전자, 재료 및 기계 기술의 통합적 기술이 필요함
- (2) 선진국에서의 기술이전이 어려움
- (3) 고부가가치 기술임
- (4) 대형 구조물 안전진단 기술의 한 단계 진보를 통한 사회적 안정 확보

[용도·이용분야]

- (1) 광섬유 센서를 이용한 대형 토목 구조물의 실시간 건전성 모니터링
- (2) 기존의 전기적인 센서로 접근하기 어려웠던 극한 환경 속에 놓인 구조물의 건전성 모니터링 (발전소, 제철공장, 유독 물질 처리공장 등등)
- (3) 광섬유 센서의 삽입이 용이한 고강도, 고강성 재료인 복합재료의 스마트 성형 및 성형 후의 건전성 모니터링

■ 기술의 분류

[기술코드] 812 (3 Digit) (KISTEP 홈페이지 기술요약서용 기술분류표 참조)

[기술분야] (1개만 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

- 정보산업 기계설비 소재 정밀화학·공정 생명과학
 원자력 자원 에너지 항공·우주 해양
 교통 보건·의료 환경 기초·원천 기타

[기술의 활용유형] (1개만 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

- 신제품개발 신공정개발 기존제품개선 기존공정개선
 기타 ()

[기술의 용도] (복수 선택(✓로 표시)가능합니다)

- 기계설비 부품소재 원료재료 소프트웨어
 가공처리기술 자동화기술 불량률 감소 등 현장애로기술
 제품설계기술 공정설계기술 기타 ()

■ 산업재산권 보유현황(기술과 관련한)

권리유형	명 칭	국가명	출원단계	일자	등록번호
특 허	광섬유 구조물 변형방지 시스템	대한민국	등록	02.3.6.	특허 제 0329042호

* '권리유형'란에는 특허, 실용신안, 의장, 컴퓨터프로그램, 노하우 등을 선택하여 기재

* '출원단계'란에는 출원, 공개, 등록 등을 선택하여 기재

■ 기술이전 조건

이전형태	<input type="checkbox"/> 유상 <input type="checkbox"/> 무상	최저기술료	천원
이전방식	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전 소요기간	년 개월	실용화예상시기	년도
기술이전시 선행요건			

* 기술이전시 선행요건 : 기술이전을 위한 사전준비사항(필수 설비 및 장비, 전문가 확보 등)을 기술

* 실용화예상시기 : 기술을 활용한 대표적인 제품이 최초로 생산이 시작되는 시기를 기재

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도] (1개씩 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
V	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기] (1개씩 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기: 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
V	④ 기술적용 성장기: 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는단계
	⑤ 기술적용 성숙기: 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기: 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적용시킴
V	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호			
과제명			
사업명			
세부사업명			
연구기관		기관유형	
참여기관(기업)			
총연구기간			
총연구비	합계 : ()백만원 - 정부 : ()백만원 민간 : ()백만원		
연구책임자	소속		성명
	전화번호		E-mail
연구개발 주요내용			