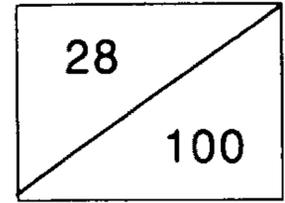


제 1 차년도
연차보고서



자동차 충돌해석 소프트웨어 개발 연구(I)

A Study on the Development of Car Crashworthiness Software(I)

연구기관

한국과학기술연구원
시스템공학연구소

과학기술처

배 포 선

사본번호	부수	배 포 처
1/100	1	시스템공학연구소 영구보존용
2/100	1	시스템공학연구소 도서관 보관용
3/100-6/100	4	시스템공학연구소 연구관리과 보관용
7/100-8/100	2	시스템공학연구소 시스템응용연구부
9/100-11/100	3	과학기술처
12/100-100/100	89	기타 배포기관

제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 "자동차 충돌해석 소프트웨어 개발 연구(I)" 과제의 연차
보고서로 제출합니다.

1993년 10월 20일

주관연구기관명	:	시스템공학연구소
연구책임자	:	임 철 호
선임연구원	:	서 영 성
연구원	:	황 찬 규 조 창 빈
연구조원	:	임 동 숙
연구원보	:	구 자 춘 정 근 영 김 현 섭 김 세 호 이 충 호 이 창 배 유 충 근

여 백

요 약 문

I. 제 목

자동차 충돌해석 소프트웨어 개발 연구 (I)

II. 연구개발의 목적 및 중요성

자동차 구조는 저속에서의 충돌을 견디기 위하여 한정된 영구변형내에서 설계되어야 하므로 운동에너지를 흡수하고 충돌력을 감소할 수 있도록 최적화 설계를 하여야 한다. 충돌은 공간적이며 시간적인 현상이므로 대변형 및 대변위의 기하학적인 비선형 효과와 소성변형의 재료학적인 비선형 효과 뿐만아니라 시간영역내에서의 접촉력에 의한 접촉충돌현상도 해석이 되어져야 한다. 이와 같은 충돌문제는 실험적방법, 또는 수치적 방법으로 해석할 수가 있는데 경비나 시간적인 문제로 인하여 최근에는 유한요소법을 이용한 수치해석적 방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 수치해석 방법을 이용할 경우 충돌문제의 복잡한 현상으로 인하여 시뮬레이션에 필요한 계산시간이 막대하게 증가하므로 속도가 빠른 슈퍼컴퓨터를 이용하지 않으면 해석이 불가능한 경우가 많다.

기술선진국에서는 위와같은 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 비선형 동적유한요소법을 이용한 충돌해석 소프트웨어를 개발하여 활용하고 있다.

즉 PAM-CRASH(프랑스), RADIOSS(프랑스), LS/DYNA(미국), MSC/DYNA(미국), SUPERWHAMS(일본, 미국)등 여러 종류의 충돌해석 프로그램을 개발하여 자동차 제작사의 Cray 등 슈퍼컴퓨터상에서 기본설계에 사용하고 있다.

국내의 자동차 산업은 해외 수출이나 국내 수요의 증가에 힘입어 가장 빠른 성장을 하고 있는 산업분야 중의 하나가 되었다. 그러나 핵심기술은 아직도 외국에 의존하고 있는 분야가 적지 않으며 특히 개념 및 기본 설계분야는 기술정립이 되어 있지 못한 실정이다. 최근 국내 고유 자동차 모델의 설계 필요성이 높아지면서 컴퓨터를 이용하는 CAD/CAM/CAE 기술분야 소프트웨어의 도입 및 활용이 대폭 증가하고 있다. 특히 충돌해석분야에서는 시뮬레이션 소프트웨어를 자동차 설계에 활용하고 있으나 PAM-CRASH, LS/DYNA, MSC/DYNA 등 외국에서 개발된 소프트웨어를 비싼값으로 사용하고 있어 국내 기술로 충돌해석 소프트웨어를 개발하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구과제에서는 이와같은 자동차 충돌해석 소프트웨어의 초기 원형시스템(Prototype)인 비선형 동적 유한요소해석 프로그램과 실험결과나 기존의 전·후처리 시스템의 연계프로그램 개발을 목표로 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

국내 자동차 산업에서의 컴퓨터 시스템을 활용한 충돌해석 시뮬레이션 기술 및 현황, 기술선진국에서 개발된 충돌해석 소프트웨어 및 활용현황과 관련 자료조사를 통하여 개발 예정인 소프트웨어에 대한 사전연구를 수행하였다. 국내 5개 자동차 제작사에서 사용하고 있는 외국의 소프트웨어를 대체하고

국내 기술발전을 유도하기 위해서는 외국에서 개발된 소프트웨어의 기능을 거의 포함하거나 더욱 발전시킨 소프트웨어를 개발하여야 할 뿐만 아니라 실제 실험과 수치 실험과의 근사한 결과를 얻기위한 여러가지 기반기술이 본 소프트웨어에 포함되어야 한다. 그러나 이러한 소프트웨어의 개발에는 충분한 기간과 인력이 필요할 것으로 생각되므로 본 연구에서는 이러한 소프트웨어의 초기 원형시스템을 개발하기로 한다. 또한 비선형 동적 유한요소해석 프로그램을 개발하는 방법론을 결정하여야 하는데 본 연구 개발에서는 기존의 공공 소프트웨어를 활용하는 방법을 선택하였다. 따라서 미국의 국립 로렌스 리버모어 연구소에서 개발된 DYNA3D는 본 연구목적에도 적합하고 기존의 충돌해석 소프트웨어인 LS/DYNA, MSC/DYNA, PAM-CRASH등이 DYNA3D를 기본으로 개발되었기 때문에 이를 기반으로 전후처리 시스템이나 실험결과등의 연계에 필요한 사용자 연계 (User Interface) 기능을 추가하고 필요한 요소나 알고리즘을 확장할 수 있도록 개발예정 소프트웨어의 시스템 설계를 수행하고 있다.

본 1차년도 연구에서는 먼저 관련 자료조사를 통하여 소프트웨어의 개념설계를 수행하고 DYNA3D 프로그램을 당 연구소에 설치된 Cray-2s 슈퍼컴퓨터에 이식(Migration) 한 후 상자형 프레임의 충격해석등 실제 응용을 통하여 기능을 확인하는 연구를 수행하였다. 2차년도 연구에서는 소프트웨어 기본설계를 연구 초기에 완성하고 1993년 11월에 당 연구소의 Cray-2s 가 Cray Y-MP 슈퍼컴퓨터로 교체될 예정이므로 이에 따른 DYNA-3D의 재이식(Remigration)과 최적화 과정을 거쳐 프로그램을 정비한 후 실험결과나 기존의 전.후처리 시스템과의 연계를 위한 프로그램을 개발하여 충돌해석 소프트웨어의 초기원형시스템을 구현할 예정이다.

IV. 연구개발의 결과 및 활용방안에 대한 건의

자동차 충돌해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션용 소프트웨어의 원형(Prototype) 시스템 개발을 위하여 개념설계를 완료하고 기본 설계를 수행중이며 차기년도의 지속적인 연구를 통하여 이 소프트웨어의 개발이 완료되면 이 프로그램이 고안전 차체 종합 설계 시스템의 일부분으로 구성될 수 있도록 함으로써 자동차 설계 기술 고도화를 기대할 수 있다. 또한 개발될 충돌해석 시스템을 당 연구소의 Cray Y-MP 슈퍼컴퓨터에 설치하고 자동차 설계에 직접 활용될 수 있도록 함으로써 실제 실험 횟수를 줄여 경비를 절감하고 고안전 자동차를 생산할 수 있는 환경을 조성하도록 한다.

SUMMARY

I. Title

A Study on the Development of Car Crashworthiness Software (I)

II. Major objectives and tasks of the study

Vehicle structures must be dimensioned to withstand impacts at low speeds with limited permanent deformation. The design must therefore be optimized for impact attenuation and its ability to absorb kinetic energy. The crash phenomenon is both spacial and temporal, so only non-linear effects with large strains and contact forces in time domain should be considered. The path-and time-dependent nature of the crash problem makes its solution very time consuming. Therefore for an analytical simulation of a crash as frontal impact, the use of a supercomputer is a prerequisite. Only then the engineering refinement of the structure can be achieved within a reasonable time frame. In the technically developed countries, the crashworthiness software using nonlinear finite element method are developed for computer simulation. So the foreign automobile companies use for the preliminary design the various kinds of computer simulation programs developed such as PAM-CRASH (France), RADIOSS(France), LS/DYNA(USA), MSC/DYNA(USA), SUPERWHAMS(Japan and USA), etc, on the supercomputers like Cray systems.

The domestic automobile industry is one of the industries that have shown the fastest growth, but the kernel technologies are not still unsatisfactory, especially the conceptual and basic design skills are mainly relied on the technology of foreign countries. As the needs to domestic car models are increased, it is an increasing trend to use the CAD/CAM/CAE technologies which are concerned with automobile industries, but the related software are mainly developed in foreign countries. Especially in the crashworthiness technology field, several foreign commercial software such as PAM-CRASH, LS/DYNA, MSC/DYNA are utilized for crash analysis in car industries. But this kind of software developed in our country is not still appeared.

So the objective of this research is to develop of a nonlinear finite element analysis program and an interface program for the given pre-and post-processors and the results of experiment, as a prototype of car crashworthiness software.

III. Contents and scope of the study

The car crashworthiness technology and status in the domestic automobile industries, the crashworthiness software developed by the foreign countries and its application, and the related data were investigated for the preliminary study. To replace the software utilized in the domestic car industries and to progress the car crashworthiness technology, the program which has the same capability as the present software should be developed. But the prototype of car crashworthiness analysis will be developed, since this research is beyond of this kind of criteria in software development. And a public domain software DYNA3D

is based on this research, because this program was based on the development of PAM-CRASH, MSC/DYNA, LS/DYNA, etc. The concept design was performed by investigating the related materials, papers, and DYNA3D which was migrated on Cray-2s supercomputer, and the crash analysis of a box-typed chassis frame was applied using this program.

IV. Conclusions and propositions of the study

The concept design was performed by investigating the related materials. An initial prototype system of car crashworthiness analysis was migrated on Cray-2s supercomputer, and was verified by the response analysis of a simply supported flat plate subjected to rapidly applied load, by the stress wave propagation analysis of flat beam subjected to impact force, and by the box-typed beam crash analysis.

After developing the prototype system of car crashworthiness analysis, this program will be installed on the Cray Y-MP supercomputer substituted for Cray-2s, and can be utilized by the domestic car industries.

여 백

CONTENTS

Chapter 1.	Introduction	-----	15
Chapter 2.	Car Crashworthiness	-----	19
Section 1.	Computer Simulation	-----	21
Section 2.	Overview of Car Crashworthiness	-----	23
Section 3.	Application Software for Car Crashworthiness	-----	30
Section 4.	Pre-and Post-Processors	-----	41
Chapter 3.	Program Development	-----	49
Section 1.	Methodology of Program Development	-----	51
Section 2.	Concept Design of Program	-----	55
Section 3.	Formulation of Equation	-----	62
Chapter 4.	Program Application	-----	77
Section 1.	Plate Analysis under Dynamic Pressure	-----	79
Section 2.	Stress Wave Propagation Analysis	-----	85
Section 3.	Box-typed Beam Crash Analysis	-----	91
Chapter 5.	Conclusions	-----	95
References		-----	99

여 백

목 차

제 1 장	서 론	15
제 2 장	자동차 충돌해석	19
제 1 절	컴퓨터 시뮬레이션	21
제 2 절	충돌해석 개요	23
제 3 절	충돌해석 소프트웨어	30
제 4 절	전·후처리 시스템	41
제 3 장	프로그램의 개발	49
제 1 절	프로그램의 개발 방법론	51
제 2 절	프로그램의 개념설계	55
제 3 절	프로그램의 정식화	62
제 4 장	프로그램의 응용	77
제 1 절	동압력 하중하의 평판해석	79
제 2 절	박판형 막대의 응력과 전달해석	85
제 3 절	상자형 프레임의 충격해석	91
제 5 장	결 론	95
참고문헌		99

여 백

제 1 장 서 론

여 백

제 1 장 서 론

자동차 안전도 기술은 저공해 기술과 더불어 세계 각국의 환경 및 안전성 규정법안등의 규제조치로 1990년대 중반경까지 자동차 산업에서 필수적으로 갖추어야 할 기술이다. 특히 자동차 안전도 기술중 고안전 차체기술은 공기 주머니(Air Bag) 나 고안전 범퍼 또는 충격흡수 자동차 구조등 여러분야를 포함한 고안전 차체 종합설계 기술이 필요하며 이들의 공통기반 기술인 승객보호해석 소프트웨어, 충돌해석 소프트웨어 및 경량 안전차체 해석 소프트웨어 등의 개발이 선행되어야 한다. 이러한 차체 안전도 기술중에서 충돌해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 기술은 경비가 많이 드는 실제 자동차의 충돌 실험 횟수를 현저히 줄일 수 있기 때문에 최적의 고안전 자동차를 생산할 수 있어 기술 선진국에서는 널리 사용되고 있다. 특히 자동차 전체 모델의 충돌해석 시뮬레이션에 소요되는 계산시간이 막대하므로 속도가 빠르고 용량이 큰 슈퍼컴퓨터 이용이 필수적이다. 국내 자동차 회사에서는 최근에 들어 충돌해석 시뮬레이션을 자동차 설계에 활용하고 있으나 외국에서 개발된 소프트웨어를 고가에 사용하고 있어 국내 기술로 충돌해석 소프트웨어를 개발하는 것이 필요하다.

외국에서는 1980년도 초기부터 충돌실험과 간단한 비선형 유한요소기법을 공통으로 사용한 하이브리드 방법으로 충돌문제를 해석하였다. 컴퓨터 용량과 속도가 커지면서 수치실험이 가능해져 1980년도 중반부터 개발된 관련 소

소프트웨어로는 미국 국립 로렌스 리버모어 연구소에서 개발한 DYNA3D를 비롯하여 프랑스의 ESI사에서 개발한 PAM-CRASH, 프랑스 MECALOG사에서 개발한 RADIOSS, 미국 MSC사에서 개발한 MSC/DYNA 및 MSC/DYTRAN, 미국 LSTC사에서 개발한 LSDYNA 및 일본 Fujitsu사와 미국의 KBS2사가 공동으로 개발한 SUPERWHAMS 등이 있는데 이들은 상용 소프트웨어로 세계 각국의 자동차 제작사에 보급되어 있다. 한편 국내에서도 1980년도 후반부터 관련 분야 연구가 시작되었으나 아직까지는 외국에서 개발된 소프트웨어를 대체할 수 있는 프로그램의 개발은 이루어지지 않고 있다. [1-14, 3441]

따라서 본 연구에서는 비선형 동적유한요소해석 기법을 이용한 자동차 충돌해석의 원형 시스템을 개발하기 위하여 관련 문헌조사 및 이에 적합한 공공 프로그램을 더욱 발전시키는 방법을 택하여 1차년도 연구를 수행하였다. 제 1장의 서론에 이어 제 2장에서는 자동차 충돌해석에 관련된 자료 조사 및 국내외 현황등을 기술하였고 제 3장에서는 공공 프로그램인 DYNA-3D를 이용하여 당 연구소의 Cray-2s 슈퍼컴퓨터에서 운용될 수 있는 연구와 개발예정 소프트웨어의 개념설계 및 프로그램 정식화 (Formulation)를 수행하였으며 제 4장에서는 이 프로그램의 간단한 응용예를 통하여 개발예정 소프트웨어의 당 위성을 검증하였다.

제 2 장 자동차 충돌해석

여 백

제 2 장 자동차 충돌해석

제 1 절 컴퓨터 시뮬레이션

전반적인 학문분야에서 이론과 실험으로 구분되던 방법론이 컴퓨터의 등장으로 컴퓨터 시뮬레이션이라는 방법이 추가되면서 여러분야에 이용되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션은 특정분야에 관련된 프로그램을 이용하여 실제상황과 유사한 상황을 모델링하여 그 현상을 해석하는 기법으로 물리, 화학, 수학 등의 기초학문 뿐만 아니라 유체해석, 구조해석, 전기전자공학, 원자력등의 응용분야에 까지 폭넓게 활용되고 있는 추세이다. 컴퓨터 시뮬레이션 기법은 실제 현상을 모델화한 데이터를 입력시켜 컴퓨터로 처리하여 계산 결과를 얻는 수치 해석기법과 이 결과를 컴퓨터 그래픽스 및 영상처리 기법을 이용하여 컴퓨터상에서 실제 실험결과와 유사한 영상으로 처리하는 기법으로 구성되어 있으며 실제실험과 유사한 모의실험으로 정의할 수 있다.[9]

일반적으로 새로운 자동차의 개발은 안전성 요구도 증가, 전자분야등 관련 산업의 기술적인 발전, 교통정책이나 환경등의 사회적인 변화 및 생산자동화의 발전 등 여러가지 요인에 크게 좌우되고 있다. 또한 자동차 산업에서의 세계적인 경쟁으로 인하여 상대적으로 짧은 기간내에 새로운 모델을 개발하여야 할 뿐만 아니라 생산성 향상과 기술개발 그리고 자동차 모델의 다양화 등이 필수적으로 요구된다. 특히 각종 실험 및 이론적 해석의 한계성으로 인하여 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 기술이 자동차 산업계에서 폭넓게 이용되

고 있으며 이는 주로 운동학, 정 및 동적해석, 피로해석 및 부품설계등의 구조적인 분야와 음향학, 공기역학, 공기조화, 엔진내 유동해석, 자동차 성능해석 및 실험결과 처리 등의 비 구조적인 분야로 나눌 수가 있다.

이러한 다양한 분야의 컴퓨터 응용 기술은 새로운 자동차의 설계 및 개발에 필수적으로 이용되고 있는데 구조적인 분야에서는 설계과정에서 우선형상결정 및 치수계산에 이용되며 각 부품이나 전체적인 형태의 최적화를 위한 시뮬레이션에도 폭넓게 사용되고 있다. 또한 각 부품이나 전체 자동차 시스템에 대한 구조해석, 피로해석, 충돌해석 시뮬레이션은 자동차 설계에 필수적인 분야이다. 이러한 기법은 실험단계에서 설계형태로부터 얻은 실험결과를 아직 실험이 이루어지지 않은 비슷한 설계형태에 이용함으로써 어떠한 부분이 약하고 파손이 일어날 것이라는 예상을 가능하게 해 줄 뿐만 아니라 통계적인 방법으로 실험결과를 평가할 수도 있다. 비 구조적인 분야에서는 최근에 주행 시뮬레이션 기법이 개발되어 진동 및 주행역학의 실시간 시뮬레이션(Real-Time Simulation)도 가능하게 되었고 엔진내부의 연소현상 시뮬레이션, 자동차의 내부 및 외부에서의 공기 흐름 시뮬레이션 및 소음해석등도 자동차 설계에 필수적인 분야가 되고 있다.

제 2 절 충돌해석 개요

1. 서 론

자동차 충돌해석을 포함한 공학적 충돌문제는 일반적으로 다음과 같이 분류할 수 있다. [10]

가. 저속충돌 (0 - 10 km/h)

자동차 범퍼의 충돌, 헬리콥터의 경착륙(Hard Landing) 또는 정적 및 준정적(Quasi-Static) 충돌현상등에서 일어나며 관성력이 거의 없는 상태이므로 국부적이거나 전반적인 탄소성 버클링 현상의 운동학으로써 해석할 수 있다.

나. 중속충돌 (10-200 km/h)

자동차, 기차, 배 사이의 충돌이나 비행기의 경착륙시 일어나며 상대적으로 큰 관성력이 작용하므로 박판부품의 국부적인 탄소성현상에 영향을 미쳐 구조의 휘어짐과 전반적인 파괴현상의 상호작용에 이르게 된다. 재료자체는 변형율도(Strain Rate)에 크게 영향을 받지 않지만 재료내에서 음속으로 전파되는 응력파 전달에 의하여 축방향으로 겹치거나 휘거나, 버클링이 일어나는 현상까지 발생한다.

다. 고속충돌 (200 - 1000 km/h) 및 초고속 충돌 (10 km/sec 이상)

고속충돌은 비행기의 추락이나 미사일의 충돌 등에서 일어나며 초고속 충

돌은 폭탄이나 인공위성에 부딪히는 소형 운석등에서 발생한다. 응력이나 충격파의 전달이 매우 크므로 재료자체가 항복점을 월등히 초과하여 액화되거나 기화되는 현상까지 발생한다.

자동차 충돌해석은 저속 및 중속충돌 문제해석이 목표가 되므로 한 구조의 에너지 흡수능력과 다른 구조 부분에서의 관성력 전달에 관한 해석이 필요하다. 따라서 심히 변형된 부분에서의 국부적인 응력분포는 거의 중요하지 않다고 볼 수 있다. 그러나 충돌시 자동차 구조의 변형 및 비선형 에너지 해석은 초기 설계과정에서 필수적으로 다루어져야 한다. 이와같은 수치계산은 충돌 금속성형(Crash Metalforming)이 근본이 되어 기하학적 및 재료학적 비선형 유한요소해석 기법을 이용하여 수행되고 있다.

2 안전규정

자동차 충돌해석은 초기설계단계에서 법적으로나 혹은 계약상으로 구조설계에 필수적으로 포함되고 있는데 미국의 자동차 학회 (Society of Automotive Engineers : SAE)의 충돌 표준규격(Impact Standard)에는 다음과 같은 항목이 포함되어 있다. [33]

- Barrier Collision Tests
- Bodyforms for Use in Motor Passenger Compartment Impact Development
- Collision Deformation Classification
- Human Tolerance to Impact Conditions as Related to Motor Vehicle Design
- Instrument for Impact Tests

- Moving Barrier Collision Tests
- Passenger Car Door System - Crush Test Procedure
- Steering Control System - Passenger Car - Laboratory Test Procedure
- Wheels - Passenger Cars - Impact Performance Requirements Test

Procedures

이중 벽면충돌실험(Barrier Collision Tests)은 자동차 충돌형태중 가장 심각한 것으로 자동차의 구조적인 안전성과 탑승자의 안전을 평가할 수 있는 척도가 되고 있는데 30 mph (약 50 km/h)의 충돌속도가 표준 평가기준으로 되어 있다.

3. 자동차 충돌해석 시뮬레이션

자동차설계에 있어서 충돌해석의 목적은 특정한 충돌시 승객들이 받는 동적인 충격력을 가능한한 줄여서 그들 주위에 어느정도 안전한 환경을 유지시키는데 있다. 일반적으로 이와같은 목적을 달성하기 위하여는 이러한 환경의 외부에 있는 자동차구조가 충격에너지를 대부분 흡수하고 감쇄시켜 주어야 한다. 최소한의 시간과 노력으로 이러한 충돌기준에 이르기 위하여는 가능한 초기설계 단계에서 충돌현상을 예상할 수 있는 적당한 방법을 이용하는 것이 필수적이라 하겠다. [2]

현재의 충돌해석 방법에는 실험적 방법, 하이브리드 방법 및 이론적인 방

법이 있다.

- 실험적 방법 : 실제 자동차나 축소모델 자동차의 충돌실험
- 하이브리드 방법 : 실험적인 방법과 수치적인 방법을 혼합한 방법으로 자동차 구조를 여러개의 부분으로 나누어 막대나 비선형 스프링 요소로 취급한다. 이 부분들의 충돌 특성은 요소의 경화특성(Stiffness Characteristics)을 변화시켜 가면서 실험이나 각 부분에 대한 수치해석을 통하여 결정된다.
- 이론적인 방법 : 자동차구조를 막대나 박판등의 요소로 나누어 유한요소기법을 이용한다. 변화되는 경화특성은 내부적으로 계산되며 하중경로나 재료특성 또는 구조물의 변화되는 형상등에 그 값이 좌우된다.

충돌실험은 실제현상을 규명하기 위하여 여러회에 걸쳐 수행되어지는데 컴퓨터 시뮬레이션기법을 이용하여 이러한 충돌실험 횟수를 현저히 줄일 수가 있다. 이러한 관점에서 보면 충돌 시뮬레이션은 구조의 세분화된 모델이 충돌조건에 의하여 어떻게 해석되는지를 알 수 있는 수치적인 실험이라고 볼 수 있다.

하이브리드 방법과 이론적인 방법의 기본적인 차이점은 실제의 구조적인 정도와 질량 특성의 세부사항이 표현되는 방법의 차이에 있다. 하이브리드 방법에서는 상대적으로 적은 수의 질점이 비선형 스프링이나 막대 요소에 의하여 연결된 상태로 형상화가 이루어진다. 실제 자동차로부터 구조물의 대표

적인 부분을 모델화하여 충돌특성을 정력학적인 실험을 통하여 해석한다. 이러한 방법으로 특정한 재료로 구성되어 있는 구조물의 거동을 부분적인 충돌 실험을 통하여 해석하거나 혹은 자세한 정적 유한요소기법을 이용하여 구조물의 변형도를 해석한다. 충돌데이터의 입력 작성은 경비가 많이 들고 시간이 오래 걸리는 작업이며 이 데이터는 한 순간에 여러 종류의 힘이나 모멘트를 변화 시켜가면서 얻은 것이기 때문에 미리 알 수 가 없는 몇가지의 하중 성분의 조합으로 일어나는 실제적인 비선형변형은 이와 맞지 않을 수도 있다. 따라서 하나의 특별한 경우에서의 정확도가 여러종류의 충돌방향과 속도벡터에 대해서도 정확하다고 가정할 수가 없게 된다. 구조적인 요소의 모델 갯수는 비선형 경화도를 얻기 위한 공학적인 어려움으로 그 숫자에 있어 한계가 있고 유한요소해석 방법보다 모델링 및 해석시간이 덜 걸리므로 하이브리드 방법은 자동차의 동적해석을 대강 수행하거나 예비정보를 얻는데 이용될 수 있다.

유한요소해석기법은 실제구조물의 존재여부에는 관계가 없고 요소의 형상과 재료특성에만 관계되어 있기 때문에 부분적인 구조물의 계산은 할 필요가 없고 전체모델에 대한 상세한 해석을 수행할 수 있다. 자동차의 유한요소모델이 일단 설정이 되면 각각의 부분에 대한 재료학적 및 기하학적 특성을 바꿀 수가 있기 때문에 상세한 설계평가 및 최적화가 수행되어 질 수 있다. 유한요소해석 기법을 이용하여 충돌시뮬레이션을 수행하기 위하여는 이 기법이 비선형구조해석, 수치해석 및 전산학등을 포함하는 몇가지 분야를 상호연계하여 해석하는 방법이기 때문에 탄소성 대변형, 변화하는 접촉 및 분리현상등에 의한 비선형 경계조건, 충돌해석에 필요한 유한요소 및 정확하고 효율적인 수

치적 시간적분법 등에 알맞는 이론적 배경을 갖추어야 한다.

충돌현상은 비선형 동적현상이므로 이러한 비선형 특징은 소성변형과 같은 재료적 비선형과 대변위, 변형율과 변위의 비선형 관계식, 접촉 및 분리에 의한 경계조건의 변화등에 의한 기하학적 비선형으로 부터 유래된다. 위와같은 유한요소해석 프로그램을 이용하여 충돌해석 시뮬레이션을 수행할 경우 어느정도 자세한 유한요소 모델링이 필요하며 계산시간은 어느정도 하여야 만족할만한 결과를 얻을 것인가 하는 문제가 발생한다. 따라서 다양한 기능을 갖는 컴퓨터 프로그램으로 적절한 모델링기법을 이용하여 해석을 하여야 최소한의 시간과 경비로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있는데 개발된 프로그램의 성능에 대한 철저한 이해와 충분한 경험을 바탕으로 문제에 접근하여야 한다. 모델링의 효율 문제는 대변위, 대변형 및 대회전등 비선형 문제에서 특히 중요한데 이 경우 대단히 많은 증분단계를 거쳐 계산을 하여야 하기 때문이다. 일반적으로 유한요소해석기법을 이용한 충돌해석은 기존의 데이터가 없는 상황에서는 수행하기가 어렵고 비슷한 차종에 대한 과거의 충돌실험결과나 자동차의 일부분에 대한 충돌해석 결과와 같은 가능한 모든 정보를 이용하여 수행한다.

특히 압축과 휨상태에서 상자형 프레임의 파괴현상과 같은 중요한 부분적인 변형형태는 특별한 모델링 과정을 필요로 한다. 자동차 일부분에 대한 정적 버클링 실험은 모델링 선택에 유용하지만 정적 버클링 실험은 동적 충돌 실험과 일치하지 않는 경우가 많아서 주의를 할 필요가 있다. 소성 항복 응력을 초과하여 정적으로 버클링이 일어난 철 구조물은 변형율도 감도(Strain

Rate Sensitivity)에 의한 재료의 항복 응력의 증가로 인하여 동적 충돌에서는 상당히 경화될 수가 있기 때문이다. 또한 덧붙인 질량에 의한 관성력이 민감한 경우에는 상자형 프레임 구조물의 국부적인 거동을 상당히 변화시킬 수가 있다.

제 3 절 충돌해석 소프트웨어

1. 충돌해석 프로그램의 분류

가. 수치해석 기법에 의한 분류

저속, 중속 및 고속등의 충돌해석 시뮬레이션에 이용되고 있는 프로그램은 그 종류가 많은데 크게 하이브리드 방법과 이론적 방법등 두가지로 분류할 수가 있다. 하이브리드 방법에 의한 충돌해석 프로그램에는 KRASH등이 있는데 이는 자동차의 중요부분을 막대나 비선형 스프링 요소로 단순화하여 충돌 해석을 수행한다. 또한 이론적 방법에 의한 유한요소해석 프로그램에는 ACTION, DYCAST, WRECKER, MENTOR, MARC, ABAQUS, DYNA-3D, PAM-CRASH, RADIOSS, MSC/DYNA, MSC/DYTRAN, LS/DYNA, SUPERWHAMS등이 있는데 ACTION, WRECKER, MARC, ABAQUS등은 내연적 유한요소기법을 이용하고 있고 DYCAST, MENTOR, DYNA-3D, PAM-CRASH, RADIOSS, MSC/DYNA, MSC/DYTRAN, LS/DYNA, SUPERWHAMS등은 외연적 유한 요소 기법을 이용하고 있다. 이중에서 PAM-CRASH, RADIOSS, MSC/DYNA, LSDYNA등은 미국 로렌스 리버모어 국립연구소(Lawrence Livermore National Laboratory)에서개발된 공공프로그램(Public Domain Program) 인 DYNA-3D로부터 개발된 프로그램으로 자동차 제작 회사들에서 널리 이용되고 있는 소프트웨어들이다. [1-23]

나. 유한요소해석 기법에 의한 분류

충돌시뮬레이션을 위한 유한요소해석 프로그램은 외연적 및 내연적 기법으로 분류할 수가 있다.

- 내연적 유한요소법 (Implicit Finite Element Method)

내연적 유한요소법은 각각의 시간증분(Time Increment)에서 반복법(Iteration Method)을 통하여 비선형 동적방정식을 해석하는 기법으로 시간이 많이 소요되는 단점이 있고 어느 특정한 문제가 고도로 비선형적일 경우에는 해석결과가 정확하지 않을 수가 있다. 즉 이 방법은 각각의 시간증분 단계에서 수만 개의 자유도를 갖는 연립방정식을 만들고 해석하기 때문에 행렬의 역을 구하는데 주로 시간을 소비하여 시간이 많이 걸리게 된다. 더구나 아주 복잡한 비선형 문제인 경우에는 각각의 시간증분 단계에서 적절한 해를 구하기 위하여 너무 많은 반복작업을 필요로 하기 때문에 비능률적이 될 수 있다. 그러나 이러한 내연적 방법은 사용될 수 있는 시간증분의 크기에 수학적 제한이 없기 때문에 조건없이 안정된 방법이라는 장점이 있다.

- 외연적 유한요소법 (Explicit Finite Element Method)

외연적 유한요소법은 주로 중앙차분기법(Central Difference Technique)을 사용하여 시간에 대한 동력학적 미분을 수행하는 데 이는 조건적으로 안정한 방

법이며 따라서 매우 작은 시간 증분의 사용을 요구한다. 그러나 이 방법은 외연적이기 때문에 어떠한 연립방정식을 풀 필요가 없으며 매 시간증분 단계 당 걸리는 해석 시간이 작다는 잇점이 있다. 이 방법에서는 우선 동적 평형 방정식으로 부터 각 자유도에 대한 가속도를 임의로 지정하고 이것으로부터 속도 및 변위 증분을 중앙차분기법으로 구한다. 충돌해석을 하기 위하여 이 방법을 사용하면 시간이 문제크기에 따라 선형적으로 증가하기 때문에 비선형적으로 막대하게 증가하는 내연적인 방법보다는 유리하다고 볼 수 있다. 각각의 시간 증분이 문제의 안정성을 결정하게 되는데 가장 작은 유한요소들을 통과하는 충격파 전달을 정확하게 계산하기 위하여는 충분히 작은 시간 증분으로 계산하여야 한다. 즉 Courant의 충격파 전달조건을 이용하면

$$DT < DL / C$$

여기서 DT : 시간증분

DL : 구조물의 최소 특성길이 (Characteristic Length)

C : 관련재료내의 음속

따라서 비선형특성을 정확하게 해석할 수 있도록 하기 위하여는 시간 증분이 충분히 작고 각 시간 증분내에서 변형율이 매우 크지 않아야 할 필요가 있다 (30 mph 충돌시 수 마이크로 초의 시간증분이 요구됨). 그러나 충돌현상이 상대적으로 길어지면 (10 m/sec 이하의 저속 충돌시) 계산시간이 증가되므로 이 방법은 중속 및 고속 충돌시에만 이용될 수 있다 (10 m/sec - 10 km/sec).

2 충돌해석 프로그램의 개요

가. DYNA3D

미국 국립 로렌스 리버모어 국립연구소(LLNL)에서 개발한 DYNA3D는 대 변형이 있는 경우 비탄성 구조의 동적반응을 해석하는 외연적 3차원 유한요소해석 프로그램이다. DYNA3D는 효율적이고 실제와 유사한 충돌현상을 모델링 하기 위해 다음과 같은 4가지 종류의 기능이 있다.

- 최적화된 비선형 고체, 셸, 그리고 보 요소를 이용한 구조물의 모델화
- 재료적인 거동을 표현하기 위한 다양한 종류의 구성모델
- 충격시의 상호작용을 표현하기 위한 접촉 알고리즘
- 강체를 표현하는 기능

DYNA3D는 완전히 벡터화된 프로그램으로 Cray 슈퍼컴퓨터등 벡터 프로세서의 장점을 최대한 사용한 프로그램들 중의 하나이다. 또한 요소의 고착현상(Locking phenomena)을 없애고 계산시간을 절약할 목적으로 1점 적분에 의한 모래시계형(Hourglass)의 제어에 의한 강성행렬을 사용한다. 재료 모델중 강체요소를 포함시키는 외에도 강체벽을 제공하는 기능을 가진다. 또한 접촉 알고리즘에서는 절점구속법(Nodal constraints), 벌칙법(Penalty method) 및 분포계수법(Distributed parameter) 등 기본적인 3종류의 접촉형태를 허용하고 있다. 재료의 모델은 선형탄성, 직교이방성 탄성, 운동학적 또는 등방성 탄소성, 열적탄소성, 선형점탄성(Viscoelastic), 하이퍼탄성(Hyperelastic), 온도 종속적 탄

소성 유체역학, 파괴가 있는 등방성 탄소성등이 있다.[15-17]

나. PAM-CRASH

프랑스 ESI(Engineering Systems International)사가 개발한 PAM-CRASH는 쉘, 막대, 보, 평판, 고체요소 그리고 강체로 이루어진 구조물의 대변형 충돌 문제를 해석하기 위한 전산 프로그램이다. 이 프로그램은 그 적용대상이 주로 자동차나 비행기의 충돌, 선박의 충돌, 방어용 무기의 파괴해석등이다. 해석대상은 3차원이며, 시간적분 방법은 외연적방법중의 하나인 중앙차분법을 사용하였다. 해석기법으로는 Eulerian - Lagrangian 표기법을 사용하였으며 여러 종류의 재료 모델을 선택 할수있는데 이들 중에서 대표적인 것으로는 선형탄성, 경화와 파괴를 표현할 수 있는 소성(Plastic with Hardening and Rupture), 그리고 분쇄거품(Crushable foams) 모델등이 있다. 이 프로그램은 충돌 및 충격 문제를 해석하기 위한 여러가지 기능이 있는데 표면상의 미끄러짐(Sliding on Surface), 균열 확대(Opening of Void), 운동량의 전달(Momentum Transfer), 그리고 마찰(Friction)등의 현상을 고려한 해석이 가능하며 대변위 뿐만 아니라 대회전의 문제에도 적용할 수 있다.

PAM-CRASH는 유한요소의 강성행렬 구성시 모래시계형 제어 방법을 사용하며 변형도율(Strain rate) 효과도 고려할 수 있다. 특히 이 프로그램은 국부적 또는 전체적인 대형, 고속 변형과 붕괴가 있는 고 에너지 상태의 구조물 해석에 적합하다. 또한 무한 혹은 유한한 크기를 갖는 여러개의 강체벽을 동시에 사용할 수 있다. 주적용 대상으로는 자동차의 안전도 평가와 충돌시 공기 주머니(Airbag) 및 사람모형의 거동을 해석하는 문제등이다.[18]

다. MSC/DYNA

미국 MSC(Macneal-Schwendler Corp.)사가 개발한 MSC/DYNA는 장벽(Barrier)에의 자동차 충돌, 미사일의 충돌, 핵 폐기물 저장 용기의 낙하등과 같은 고도의 비선형 과도기적 동적거동해석(Highly Nonlinear Transient Analysis)을 수행할 수 있는 프로그램이다. 전형적인 적용대상은 다음과 같다.

- 자동차 충돌해석
- 비행기나 헬리콥터의 충돌해석
- 지진에 의한 구조물의 거동해석
- 핵운반 용기의 낙하해석
- 미사일의 장갑차 충돌해석
- 폭발물의 구조해석
- 핵 발전소 혹은 화학공장의 안전분석
- 비행기 엔진부분의 조류(Birds)충돌 시뮬레이션

이 프로그램은 접촉면을 모형화 하는데 있어서 미끄러짐면과 분리면을 허용하며, 마찰 효과를 고려할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 단면 접촉(Single Surface Contact)의 경우는 좌굴(Buckling)과 같이 구조물이 접혀지는 경우에 유용하다.

금속, 플라스틱, 세라믹, 고 폭발물, 복합재료, 목재, 토질, 암반 및 콘크리트와 같은 재료들을 모델링하기 위하여 많은 재료 모델들이 제공되며 이들중 대부분의 재료 모델들은 붕괴기준(Failure Criteria)을 포함하고 있다. MSC/DYNA는 범용구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN과 서로 호환성이 있

는 입력 데이터를 사용할 수 있으므로 구조해석과 충돌해석에 필요한 시간과 비용을 줄일 수 있다. [19]

라. MSC/DYTRAN

미국 MSC사가 개발한 MSC/DYTRAN은 고체, 구조물, 그리고 유체의 동적거동을 시뮬레이션 하기 위한 범용 3차원 프로그램이다. 이 프로그램은 외연적 시간적분법을 사용하며 구조물과 유체의 상호작용에 의한 동적해석을 수행할 수 있다. MSC/DYTRAN은 짧은 시간동안에 발생하는 구조물-유체의 상호작용, 혹은 극단적인 대변형 재료들의 문제를 해석할수 있는데 전형적인 적용분야는 다음과 같다.

- 자동차 충돌시 공기주머니의 전개해석
- 승객의 안전도해석
- 조류와 비행기와의 충돌해석
- 사고시 위험물 저장용기의 거동해석
- 구조물의 폭발에의한 거동해석
- 장갑차의 설계시의 폭발해석
- 발사체의 충격과 충돌해석

이 프로그램의 가장 큰 특징은 구조물과 유체의 상호작용을 해석할 수 있는데 있으며, 고도의 비선형 거동을 보이는 충돌문제 해석과 시뮬레이션에 적합하다. [20]

마. RADIOSS

RADIOSS는 프랑스 MECALOG사가개발한 압축성 고체와 유체의 2차원 또는 3차원 비선형 동적해석을 위한 다양한 여러 모듈로 이루어진 범용의 유한요소해석 시스템이다. [22]

- RADIOSS-CRASH : 자동차, 헬리콥터등의 충돌해석을 위한 Lagrangian 프로그램
- RADIOSS-ALE : 미사일등의 충돌해석을 위한 가변적 Eulerien Lagrangian 프로그램

이 시스템은 두개의 핵심부분으로 구성되어 있다.

- RADIOSS-ENGINE : 벡터화된 병렬컴퓨터에 적합한 방정식의 고속 수치 계산용 부분
- RADIOSS-MANAGER : 사용자와의 상호작용을 위하여 계산결과를 영상처리할수 있는 그래픽 소프트웨어와의 연계 부분 (PATRAN, MOVIE.BYU등)

바. LS/DYNA

미국 LSTC사(Livermore Software Technology Corp. Inc.)가 개발한 LSDYNA는 DYNA-3D를 수정 보완하여 상품화한 소프트웨어로 전.후처리 시스템과 사용자 연계 프로그램을 보강하여 공급하고 있다. [23]

사. SUPERWHAMS

미국 KBS2사와 일본 Fujitsu사가공동으로 개발한 SUPERWHAMS는 구조물의 대변형을 시뮬레이션하기 위하여 고속의 외연적 시간적분법을 사용함으로써 과도적인 비선형 3차원구조의 동적거동을 해석할 수 있는 프로그램이다. SUPERWHAMS는 서로 다른 물체들간의 충돌 및 충격의 비선형 효과를 해석할수 있기 때문에 자동차, 선박 및 항공기의 충돌해석, 각종 제품 제조시나 운반시의 낙하해석, 운동기구의 충격해석, 플랜트 산업에서의 파손해석등에 활용될 수 있다. SUPERWHAMS는 프로그램의 사용을 편리하게 하기위한 기능으로 유한요소의 H형적응체분화(H-Adaptive Mesh Refinement)기능을 도입함으로써 해석오차가 큰부분 혹은 변형이 많이 일어나는 영역의 유한요소를 자동적으로 세분화하여 줌으로써 사용자의 편의성과 해석결과의 신뢰성을 높인다. 또한 이 프로그램은 충격 및 접촉문제의 시뮬레이션을 수행함에 있어서 특별한 입력이 없어도 자동적으로 처리하는 기능을 가지고 있으며 NASTRAN 과 서로 호환성을 갖는 입력데이터 형태를 지원한다. 비선형 동적 해석을 수행하는 경우에는 많은 시간이 소요되는데 SUPERWHAMS는 이러한 점을 해결하기 위해 프로그램의 작성시 벡터화 기법을 사용함으로써 벡터슈퍼컴퓨터 상에서 고속의 계산이 가능하다. 또한 사용자의 입력에 의하지 않는 모래시계형 제어방법의 사용과 공기주머니 모델 및 파괴현상등을 표현하는 기능이 있으며, 혼합시간적분법(Mixed Time Integration)을 채용함으로써 다른 유한요소그룹에 대해서는 다른 시간간격을 가지고 적분하도록하여 계산시간을 줄이며, 핀볼 접촉(Pinball contact) 알고리즘을 사용함으로써 충격-접촉해석을 자동적으로 수행할수 있다. [21]

아. DYCAST

DYCAST (Dynamic Crash Analysis of Structures)는 미국 Grumman 항공사가 개발한 비선형 동적 유한요소해석 컴퓨터 코드로 임의의 3차원 구조를 해석할 수 있다. 이 코드는 비선형 동역학, 비선형 정역학, 진동 모드, 좌굴모우드 등의 문제를 해석할 수가 있다. 동역학적인 문제로는 정지 또는 움직이는 구조물이 동적 하중을 받았을때의 충돌문제를 해석할 수 있으며 정역학적인 문제로는 하중과 변위와의 관계 문제를 해석할 수 있다. 이 프로그램으로는 비행기, 자동차등 수송수단의 충돌문제를 시뮬레이션하는 기법을 이용하여 소성, 붕괴, 파괴 현상등을 해석할 수 있다. 해석이가능한 요소들로서는 막대, 막판, 판, 각, 비선형 스프링(탄성과 비탄성), 접촉(또는 비접촉) 요소들이 포함된다. 탄성소성, 등방성 또는 직교이방성, 비선형성이 있는 여러 형태의 재료 특성에 대한 해석이 가능하다. [2]

자. MENTOR

MENTOR 컴퓨터 프로그램은 항공우주, 원자력발전, 기관차 산업등의 영역에서 폭발용접(Blast Welding) 및 봉인설계(Seal Design), 자동차 및 기타 수송시스템의 충돌, 금속성형(Metal Forming)등의 문제에 적용될수 있는데 다음과 같은 해석을 수행할 수 있다.

- 각이나 막대구조물에서의 큰 변형율 특성
- 단면적 변화
- 변형율도에 종속적인 재료의 특성

- 가변적 표면충격
- 일반적 구조물의 내부 및 외부충격
- 정적 미끄러짐 마찰효과
- 초기조건으로서의 가변적 속도 및 방향

제 4 절 전후처리 시스템

전.후처리 시스템의 개발은 본 연구과제의 내용에는 포함되어 있지 않으나 기존의 과학적 가시화(Scientific Visualization) 소프트웨어와의 연계 프로그램을 다양하게 개발하여 이들을 활용할 수 있도록 하기 위하여 이에 대한 조사 연구를 수행하였다. 이러한 프로그램으로는 INGRID/TAURUS, MOVIE.BYU, MOVIESTAR.BYU, PATRAN II, HYPERMESH, MPGS 등이 당 연구소에서 이용될 수 있다.

1. INGRID / TAURUS

INGRID는 LLNL에서 개발하여 비선형 유한요소시스템을 모델링하기 위한 3차원 격자형성기로 정확한 면방정식과 면교차는 정교한 모델을 다룰 수 있으며 복잡한 격자에서 유용하게 사용할 수 있도록 하기 위하여 보이지 않는 선의 알고리즘(Hidden Line Algorithm)이 있다. 이 프로그램의 용량과 크기는 비선형 구조해석 프로그램에서 필요한 경계조건과 하중 및 물성치와 관계되어 있는데 많은 문제들이 일반적으로 형상과 격자에 대한 정의보다도 경계조건이나 하중에 대하여 더 많은 테이타를 요구한다. 중립파일(Neutral File)을 작성하기 위하여 일반적인 명령어를 사용하는 것보다는 직접 입력화일을 만들어 각각의 경우에 대하여 사용자의 노력을 절감하기 위한 특별한 명령어들이 있는데 개별적인 해석에서는 각각의 하중과 경계조건을 요구하기 때문에 이러한 명령어는 특히 중요하다고 할 수 있다.

TAURUS는 LLNL에서개발된 비선형 구조해석 프로그램의 후처리 장치로 시간진행에 따른 변형된 형상등에서 사용되었던 2차원 및 3차원 유한요소 코드에 의하여 만들어진 이진플롯(Binary Plot) 화일을 읽을 수 있다. 판, 각, 고체요소 등으로 구성되어 있는 격자상에서 여러 종류의 등고선(Contour) 그릴 수 있으며 변형을 및 제한된 경계선을 따른 반동력과 모우멘텀을 계산할 수 있다. [24,25]

TAURUS에서 명령어는 아주 간단하고 이해하기 쉽게되어 있고 효과적으로 데이터를 그리기 위해서 적은 양의 명령어만이 필요하며 다음의 3단계로 구성되어 있다.

- Phase 0 : 초기화 (Initialization)
- 1 : 물리량의 등고선을 갖는 기하적 형상표현 (Geometry Display with Contouring)
- 2 : 시간진행에 따른 처리 (Time History Processing)

2. MOVIE.BYU 및 MOVIESTAR.BYU

MOVIE 시스템은 미국 Brigham Young University 에서개발된 범용 그래픽 소프트웨어로 계산 데이터들을 조절하고 이 데이터들을 다각형 요소 (Polygonal Element)와 등고선들로 정의하여 그 형상을 표현할 수 있는 수학적 또는 위상학적 모델링 기능이 있다. MOVIE 시스템중 MOVIE.BYU는 VMS(VAX O.S.)상에서 MOVIESTAR.BYU는 UNIX상에서 작동하는데 다음과 같은 특징이 있다. [26,27]

- 컬러화된 선과 래스터 영상형태로서 투시화법적인 또는 정사도적인 그림을 보여준다.
- 내부의 면을 나타내기 위하여 3차원적인 유한요소시스템을 자르거나 이동시킬 수 있다.
- 수정, 미분, 부가 또는 대칭화의 방법으로 형상화일을 벡터화일, 스칼라화일로 바꿀 수가 있다.
- 새로운 모델과 그림의 제목표현 할 수 있다.
- 복잡한 등고선의 정의를 면의 다각형 요소형태로 바꿀 수가 있다.
- 계층적 데이터 구조를 사용한다.

MOVIE 시스템은 아래와 같이 각각의 기능을 수행하는 부 프로그램으로 구성되어 있다. 각각의 부 프로그램은 대화식으로 되어 있어 주어진 메뉴를 선택하면서 쉽게 데이터를 수정하거나 사용자의 의도에 맞게 그림을 그릴 수가 있다.

- DISPLAY는 이 시스템의 핵심부분이다. 이것은 다각형의 요소로된 모델을 그리기 위한 대화식 프로그램으로 계층적 구조를 이용한 3차원 데이터베이스 상에서 작동된다. 이 프로그램은 컬러화, 보이지 않는 선처리, 벡터 또는 스칼라 함수의 표시등 다양한 그래픽 기능을 지니고 있다.
- UTILITY는 각 또는 고체 요소 모델에 대한 대화식 모델형성 프로그램이다.
- SECTION은 DISPLAY 프로그램에 맞도록 데이터를 수정하는 질문형식

의 특별한 프로그램이다.

- TITLE은 2차원 또는 3차원의 글자를 형성하기 위한 프로그램이다.
- MOSAIC은 면에 대한 다각형 요소의 근사형태를 만들기 위하여 복잡한 등고선 형태를 조정할 수 있는 대화식 프로그램이다.

3. PATRAN

PATRAN은 미국 PDA (PDA Engineering Inc.)사에서 개발한 개방형 (Open-ended) 범용 3차원 MCAE(Mechanical Computer Aided Engineering) 패키지로 공학 설계를 위한 3차원 모델링과 해석후 계산결과를 연계할 수 있는 대화식 그래픽 시스템으로 구성되어 있다. 이 시스템의 특징은 다음과 같다.

[28]

- 하나의 데이터베이스를 사용한 다섯개의 집약모듈로 구성되어 있으므로 외부 데이터와의 전송이 필요치 않으며 어느때든지 어떤 모듈과도 연결될 수 있다.
- 프로그램, 데이터파일 및 기존의 데이터베이스 등에 대해 기억용량을 최소화 함으로써 컴팩트하고 효과적인 파일구조를 갖는다.
- 수정 및 재 사용이 가능한 회기(Session) 명령어 화일이 자동적으로 형성된다.

PATRAN은 3차원 고체 모델러로 광범위한 그래픽 영상 능력, 유한요소 모델러, 해석결과의 대화식 표현 및 개방형인 Gateway 모듈등을 포함하고 있다. Gateway모듈은 모든 CAD 프로그램과 해석 및 제조 프로그램을 연결할 수

있는 기능이 있다. PATRAN은 제품을 제조하기에 앞서 사용자로 하여금 컴퓨터상에서 제품을 개념화하고 다양하게 테스트할 수 있는 능력을 갖게하여 주며 다음과 같은 6개의 모듈로 구성되어 있다.

- P/SOLID에서는 해석고체 (Analytic Solid) 모델과 장식면 (Trimmed Surface) 모델링의 방법으로 물체의 형상을 구현하여 준다.
- P/FEM에서는 수치해석을 위한 모델을 준비하여 준다. 이때 사용자는 P/SOLID에서만들어진 형상에 직접 연결되어 유한요소격자를 만들고 하중과 경계조건을 적용하고 물성치들을 정의할 수 있다.
- P/IMAGE에서는 완벽한 그래픽 기능을 제공한다. 이 모듈에는 명령어에 대한 그래픽 귀환장치 (Feed Back)가 포함되어 있고 음영 (Shading) 기능을 제공하며 해석을 수행하기에 앞서 시각적인 확인을 할 수 있도록 되어 있다.
- P/POST에서는 생성된 모델에 대하여 빠르고 정확하게 해석결과를 그림으로 보여준다. 해석 결과값들이 절점이나 요소에 관계되어 있다면 여러분야의 적용문제에 있어서 그 해석결과를 처리할 수 있다.
- P/PLOT에서는 공학적인 X-Y도표를 그려준다. 이 모듈에서는 두개의 데이터 셋 (Data Sets) 또는 결과들을 그림으로 비교하여 줌으로써 공학적 최적화 영역을 결정하도록 한다.
- G/GATEWAY는 다른 외부 패키지와 PATRAN을 연결 시켜주는 유틸리티 프로그램들로 구성되어 있다.

4. HYPERMESH

HYPERMESH는 미국 ACI(Altair Computing, Inc.)사에서 개발한 유한요소법이나 유한차분법을 이용한 각종 해석의 전·후처리 시스템으로 3차원 모델링, 데이터변환, 계산결과의 영상처리등의 기능이 있으며 다른 유사시스템에 비하여 고속처리가 가능하며 사용하기가 용이한 특징이 있다. 특히 설치된 하드웨어의 그래픽 기능을 이용함으로써 처리 속도가 빠르며 유한요소 모델에 적합한 데이터구조를 통하여 데이터 크기가 간단하여 주 메모리만으로 대형문제를 해석할 수 있다. HYPERMESH는 최근의 프로그래밍 기법인 목적지향(Object-Oriented) 데이터베이스를 이용하였다. 또한 사용자가 손쉽게 이용할 수 있도록 하는 메뉴 형태의 구조를 활용하여 인접요소 검색, 요소수정, 그림 요소 작성, 요소분리, 접촉요소 작성, 그래프 적분등 다양한 기능이 있으며 ABAQUS, MSC/NASTRAN, LS/DYNA, PAM-CRASH등 여러 종류의 상용 구조 해석 소프트웨어와의 연계가 가능하다. [30]

5. MPGS

MPGS는 미국 Cray Research 사에서 개발한 과학적 가시화(Scientific Visualization) 소프트웨어인 다목적 그래픽 시스템(Multi Purpose Graphic System)으로 Cray슈퍼컴퓨터와 공학워크스테이션의 분산시스템을 최대한 이용할 수 있는 시스템이다. 특히 MPGS는 공학 계산결과의 후처리(Post-processing)를 수행할 수 있는 프로그램으로 유한차분법과 유한요소법으로 구성된 각종 해석 소프트웨어의 다음과 같은 후처리를 수행할 수 있다.

[29]

- 국부변형도 표현 (Local Transformation)
- 색감 편집 (Color Editor)
- 은선처리 (Hidden Line Removal)
- 음영처리 (Shaded Surfaces)
- 입자 추적 처리 (Particle Traces)
- 줄무늬나 등고선 처리 (Fringe and Contours)
- 3차원 형상의 2차원 절단 처리 (Clipping)
- 주요 프레임의 동적영상 처리 (Keyframe Animation)

여 백

제 3 장 프로그램의 개발

여 백

제 3 장 프로그램의 개발

제 1 절 프로그램의 개발방법론 [31-32]

소프트웨어 개발은 소프트웨어의 특성 때문에 진행 과정과 결과의 확인이 쉽지 않으므로 반드시 잘 정의된 몇가지 단계로 분할되어 개별적으로 각 단계를 관리 할 수 있어야 한다. 수명환 (Life cycle)은 소프트웨어 개발 사업의 시작부터 끝까지 따라야 할 단계와 그에 따른 형태 변화를 말하고 수명환 모델은 수명환을 모델화하여 간단하게 표현한 것을 말하는데, 특정한 소프트웨어 개발에 적용하기 위하여 채택한 수명환을 수명환 모델이라고 부른다. 수명환과 수명환 모델을 구성하는 목적은 첫째 소프트웨어 개발 수행중에 해야 할 업무들과 그 업무들의 순서를 정의하고, 둘째 소프트웨어 개발의 가시성을 높여 관리를 가능하게 하고, 셋째 소프트웨어 개발에서 무엇이 언제 수행되는지를 통제할 수 있게 하며, 넷째 여러 다른 소프트웨어 개발과 단계적 (Phased) 구현에서 일관성을 유지하게 하는 것이 수명환과 수명환 모델은 개발 방법론에 따라 여러 가지 형태가 있을 수 있으나 소프트웨어의 정의, 작성 및 유지보수의 범위내에서 주요 업무와 업무의 결과에 따른 산물로 표현된다. 정의단계에서는 앞으로 만들 소프트웨어 산물이 무엇을 할 것인지에 중점을 두고, 작성 단계에서는 그 산물을 어떻게 구현할 것인지에 중점을 두며, 유지보수 단계에서는 그 산물의 변경에 중점을 준다.

수명환의 기본적인 개념을 바탕으로 하여 전형적인 예를 들면 그림 3.1.1

과 같은 수명환 모델이 있는데 이는 요구사항 정의, 개념설계, 기본설계, 구현, 통합시험, 시스템시험, 유지보수의 8 단계로 구성되는데 하향식을 적용하며 차례대로 한 단계씩 단계별로 수행되는 것을 나타내고 있다. 개발 수행과정에서 발생하는 귀환작업(feedback)은 필요에 따라 바로 전 단계를 포함하여 해당 단계로 귀환하는 것을 나타내고 있다. 각 단계의 구성은 먼저 정의 단계와 관련하여 계획 및 요구사항 정의 단계가 있으며 개발단계는 개념 설계와 기본설계를 차례대로 단계화하고, 코딩과 단위 시험을 묶어서 구현 단계로 단계화하며, 통합 시험과 시스템 시험을 차례대로 단계화한 것이다. 마지막으로 유지보수를 단계화함으로써 수명환 모델을 완성한다.

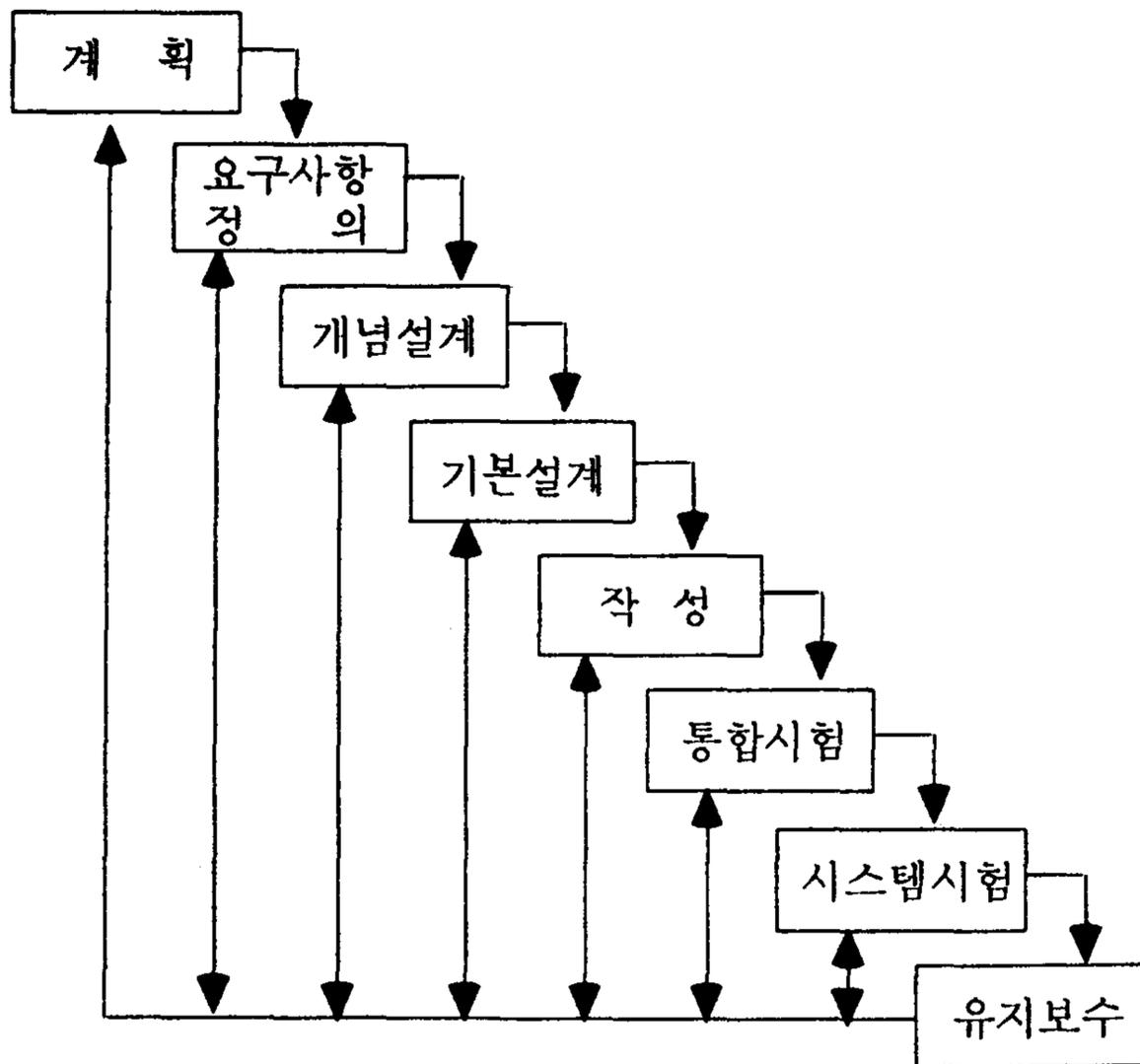


그림 3.11. 전형적인 수명환 모델

정의의 주요 구성 부분은 개발 계획과 요구사항이다. 개발 계획은 과업 범위, 작성과정, 조직, 비용, 자원, 시간계획, 기법, 도구 등 개발사업에 관련되는 거의 모든 것을 포함한다. 요구사항의 목적은 사용자의 운용관점에서 개발 계획에서 제안된 과업 범위에 대한 상세한 정의를 내리는 것이다. 요구사항에서 정의된 내용을 구현하는 것이 작성인데 이는 개념설계, 기본설계, 코딩 및 시험을 포함한다. 개념 설계는 소프트웨어의 구조를 만드는 단계로서 소프트웨어 산물을 구성하는 중요한 부분들과 그들간의 관계를 정의한다. 기본설계는 개념설계와 관련하여 구현 단위의 구체적인 처리 절차를 정의하는 것이다. 코딩은 채택된 프로그래밍 언어를 이용하여 이 처리 절차에 상응하는 프로그램을 만드는 것이다. 시험은 단위시험, 통합시험 및 시스템 시험을 차례대로 수행하는 것을 의미한다. 단위 시험은 설계의 최소 단위인 모듈에 대한 시험이다. 각각의 모듈이 하나의 단위로서 독립적으로 그 기능을 적절히 수행하는지에 시험의 중점을 둔다. 다음에 모듈들이 완전한 소프트웨어 산물을 구성하는지를 확인하는 통합 시험이 있다. 설령 모듈별로 완벽한 완벽한 단위 시험이 수행되었더라도 연계 (Interface) 상의 오류 등을 찾기 위한 통합 시험은 필요하다. 마지막으로 소프트웨어 산물이 요구사항에 대하여 기능, 성능, 신뢰도 등이 부합되는지를 확인하는 시스템 시험을 수행하여야 한다. 유지보수는 정의와 개발 단계에서 만들어진 소프트웨어 산물이 사용자에게 인도된 다음에 이루어지는 소프트웨어 산물에 대한 수정과 보완을 뜻한다.

이러한 방법론을 적용하여 소프트웨어의 원형(Prototype)을 개발완료전에 구성하는 방식이 있는데 이는 대상이 되는 산물 전체 또는 일부분에 대해서

실제로 동작하는 모델을 조기에 구성하는 것으로, 산물의 규모를 축소하고 기능을 제한하여 구성하는 방법이다. 이것의 목적은 소프트웨어 산물의 동작과 특징을 사전에 명확히 하여 실제로 산물이 동작하는 것을 보고 알 수 있도록 하기 위한 것이며 이 초기원형 시스템으로부터 지속적인 개발을 통하여 소프트웨어를 완성하기 위한 것이다.

본 연구과제도 자동차 충돌해석 소프트웨어의 원형 시스템을 개발하는 것으로 위에 언급된 소프트웨어 개발의 수명환 모델과 유사하게 개발계획, 요구사항 정의, 개념설계, 기본설계, 작성, 통합시험, 시스템 시험을 수행할 예정이며 본 1차년도 연구에서는 개발계획에서부터 개념설계 단계까지를 수행하였다.

제 2 절 프로그램의 개념설계

1. 개발계획

개발계획에는 계획준비, 자료수집, 환경조사, 내용산정, 계획수립 및 계획승인 등이 있는데 계획수립을 제외하고는 본 연구과제에 필요한 계획준비, 자료수집, 환경조사등은 제 2장에서 수행하였기 때문에 이 절에서는 개발계획만을 수립하였다.

공학해석 소프트웨어를 개발하기 위하여는 적절한 수학적 방정식을 이용하여 이에 맞는 최적의 알고리즘을 선택하고 특정한 컴퓨터 하드웨어 환경에 맞는 언어를 사용하여 프로그램을 개발하여야 한다. 이와같은 소프트웨어 개발 방법에는 처음부터 프로그램을 작성하여 개발하는 방법과 유사한 분야에서 이미 개발되어 있고 일반에게 공개되어 있는 공공프로그램(Public domain program)을 활용하여 이를 더욱 발전시키는 방법 등 크게 2가지 기법이 있다. 연구개발 기간이 충분하고 기존의 공개된 연구결과가 불충분할 경우는 첫째 방법이 유리하고 그렇지 않은 경우는 둘째방법이 유리하다고 볼 수 있다. 본 연구는 단기간내에 자동차 충돌해석 소프트웨어의 원형 시스템을 개발하는 과제로 기존의 공공프로그램을 활용하는 방법을 사용하고자 한다. 미국의 LLNL에서 개발된 DYNA-3D 프로그램은 본 연구목적에도 적합하고 기존의 PAM-CRASH, RADIOSS, LS/DYNA, MSC/DYNA 등의 상용소프트웨어가 모두 DYNA-3D를 발전시킨 프로그램이기 때문에 본 연구과제도 이러한 방법론을

채택하였다.

2. 요구사항 분석

요구사항 분석에는 개발내용의 분석, 현황조사, 타당성 검토, 요구정의, 시스템 정의 및 분석 승인이 있는데 본 연구과제는 DYNA-3D를 기본으로 충돌 해석 프로그램을 개발하는 것이기 때문에 이를 분석함으로써 요구사항 분석이 완료될 수 있다.

자동차 충돌해석 프로그램은 크게 주해석분야, 전.후처리 시스템 분야 및 사용자 연계분야 등 3개로 구성되어 있다. 본 과제에는 전.후처리 시스템의 개발은 포함이 되어 있지 않으므로 기존의 전.후처리 시스템이나 실험결과등을 연계할 수 있는 사용자 연계 분야와 주해석 분야를 대상으로 한다. 주해석분야는 비선형 동적구조해석을 수행하기 위한 3차원 외연적 유한요소해석 프로그램으로 이들은 소성과 같은 재료특성에 따른 재료학적 비선형 특성, 대변위, 대변형 및 대회전 등 구조의 변형에 따른 기하학적 비선형 특성과 접촉 및 충격등에 따른 경계조건의 비선형 특성이 포함되어야 한다. 본 프로그램은 DYNA-3D (1989년판)를 기본 모델로 하였으므로 이 프로그램의 전반적인 특성을 고찰하고 이로부터 개발예정 소프트웨어의 개념설계를 수행하기로 한다.

[15-17]

가. 재료모델

- 탄성모델 (Linear elastic model) : 선형탄성, 직방성 탄성 (Orthotropic elastic), 열직방성, 12개의 곡선을 갖는 열직방성
- 점탄성 모델 (Viscoelastic model) : 선형점탄성
- 고무 모델 : Blatz-Ko형 고무, Mooney-Rivlin형 고무, Frazer-Nash형 고무
- 토양모델 : 토양 및 분쇄형 거품 (Crushable foam), 붕괴가 있는 토양 및 분쇄형 거품, 의 TENSOR 지질학 모델 (Pseudo TENSOR geology), 비점성 2차 불변지리학적 캡 (Inviscid, two invariant geological cap), 직방성 분쇄형 거품
- 탄소성 모델 (Elastic-plastic model) : 열탄소성, 온도의존 탄소성, 등방성 탄소성, 붕괴 (Failure)가 있는 탄소성, 파괴 (Fracture)가 있는 탄소성
- 강소성 모델 (Rigid-plastic model) : 운동성/등방성 소성, Johnson/Cook 소성, 변형률도 의존소성, 부분적 선형 등방성 소성 (Piecewise linear isotropic plasticity), 통합소성 (Resultant plasticity), 폐쇄형 갱신각 소성 (Closed form update shell plasticity)
- 동수력학 모델 (Hydrodynamic model) : 편향응력 (deviatoric stresses) 이 없는 동수력학, 탄소성 동수력학
- 기타모델 : 고퍃발분사 (High explosive burn), 강성 (Rigid), 복합재료 손상모델 (Composite damage model)

나. 상태방정식 모델

- 선형다항식 (Linear polynomial)
- JWL 고폭발식(JWL high explosive)
- Sack "Tuesday" 고폭발식
- Gruneisen 식
- 다항식의 비례식 (Ratio of polynomials)
- 에너지 침전 (Energy deposition)을 갖는 선형 다항식
- 고폭발 반응의 점화와 성장식 (Ignition and growth of reaction in high explosive)
- 테이블 형태의 Compaction 식
- 테이블 형태의 식
- TENSOR기공 붕괴식 (TENSOR pore collapse)

다. 유한요소 모델

- Hughes-Liu 사각형 보와 각요소
 - Belytschko-Tsay 보와 각요소
 - Belytschko 삼각형 각 요소
 - 8절점 고체요소 (1점적 분이나 정밀 적분을 통한 Flanagan - Belytschko 일정 응력 정식화)
 - 강체요소, 집중질량요소, 스프링 요소, Dashpot 요소
- 각요소의 중간면에 수직인 응력이 0이 되도록 응력텐서를 조정하는

3차원 평면응력식이 각 요소에 사용될 수 있으며 각 요소 두께 방향으로 각각의 적분점에서 응력치를 구할 수 있다. 각과 고체요소에서의 영에너지 모드는 모래시계형 점성이나 강성 (Hourglass viscosity or stiffness)에 의하여 제어된다. 또한 모든 요소는 강체 (Rigidbody)의 일부로써 이용될 수 있다.

라. 미끄러짐 접촉면 모델

- 미끄러짐 접촉면 (비대칭이므로 보다 적은 요소가 포함된 면이 주면임)
- 틈 (Gap)이 있는 미끄러짐 접촉면 (접촉 마찰력 포함가능)
- 연결(Tied) 접촉면(비대칭이므로 보다 적은 요소가 포함된 면이 주면임)
- 일면(Single Surface) 접촉면 (종면으로 정의되고 접촉마찰력 포함가능)
- 접촉면에 충돌하는 별개의 절점(접촉마찰력 포함가능)
- 접촉면에 연결된 별개의 절점
- 각 요소면에 연결된 각요소 선단 (Shell edge)
- 접촉면에 스폿트 용접된 절점 (접촉 마찰력 포함가능)
- Tie break 접촉면 (접촉 마찰력 포함가능)
- 틈과 마찰이 있는 미끄러짐 일방취급 접촉면 (접촉 및 마찰력 포함가능하고 강체와 동시 사용시 강체가 주면임)

3. 개념설계

개념설계에는 기본형식 설계, 자료구조설계, 입출력 화면설계, 입출력장표 설계 및 시스템처리 설계등이 있는데 기존의 DYNA-3D 를 기본으로 하고 또한 기존의 전.후처리 시스템을 활용할 예정으므로 기본형식, 자료구조, 입출력 화면, 입출력장표등의 기본골격은 그대로 두고 시스템 흐름을 설계하는 시스템 처리 설계만을 수행하였다.

SERI-DYNA는 전장과 같은 요구조건에 따라 그림 3.1.2 와 같은 형태로 개념설계를 수행하였다. 기존의 DYNA-3D 프로그램이 가지고 있는 입력, 재시동, 초기화, 해석 모듈을 근간으로 이 모듈들에 대한 수정 및 삭제를 통한 프로그램의 최적화를 도모하며 사용자 편의성을 위하여 각종 실험 결과와 전.후처리 시스템의 연계를 위한 연계 모듈을 추가하여 개발함으로써 초기원형의 충돌해석 소프트웨어를 구현할 예정이다. 따라서 DYNA-3D를 분석하고 연구하여 이를 토대로 1차년도에 당 연구소의 Cray-2s 슈퍼컴퓨터에서 활용할 수 있는 환경을 조성하고 여러 분야의 자료조사를 통한 소프트웨어의 개념설계를 수행한 후 2차년도에는 1993년 11월에 Cray-2s 와 교체예정인 Cray Y-MP/C916 슈퍼컴퓨터에서 활용될 수 있도록 하고 소프트웨어의 기본설계를 수행하여 원형 충돌해석 소프트웨어를 개발한 후 상용소프트웨어인 PAMCRASH등과의 비교분석을 수행할 예정이다.

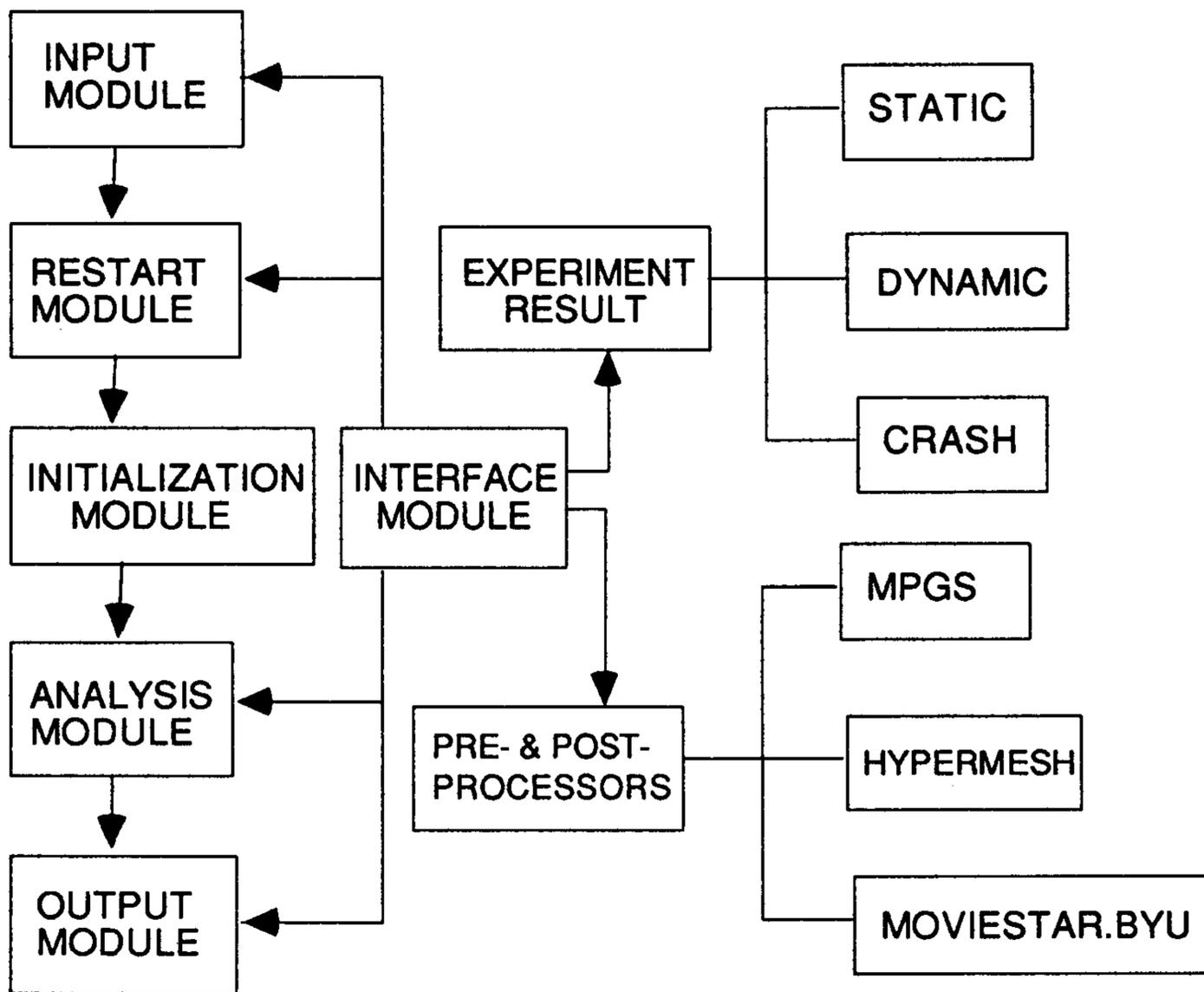


그림 3.12 SERIDYNA의 개념설계

제 3절 프로그램의 정식화

1. 운동방정식

자동차충돌해석은 재료특성과 접촉현상, 심한 변형도 및 하중조건등에 의해서 비선형 거동을 유발하는데 이는 기하학적 비선형 (Geometric nonlinear)과 재료학적 비선형 (Material nonlinear)으로 구분된다. 이러한 비선형 문제의 경우 변형후 형상(Deformed 또는 Current Configuration)과 변형전 형상(Undeformed 또는 Original Configuration)의 관계에 의해 구조물의 변형을 표현할 수 있는 효과적인 방법이 필요하다. 구조물의 변형도를 정의하는데 사용되는 물리량은 변형전 형상을 기준으로 정의하면 Lagrangian형 물리량, 변형후 형상을 기준으로 정의하면 Eulerian형 물리량으로 구분되어 진다. 즉, 변형을 나타내는데 사용되는 물리량을 변형전 좌표계로 나타내는 방법을 Lagrangian 표기법이라 하고, 변형후 좌표계로 나타내는 방법을 Eulerian 표기법이라 하며, 이 두 표기법사이에는 서로 관계식이 존재하며 임의의 물리량은 두가지 표기법으로 표현될 수 있다. [16]

연속체의 변형을 표현하는 대표적인 두가지 표기법은 각각 나름대로의 장점을 가지지만, Lagrangian 표기법은 주로 구조해석 문제에 사용되어지며 Eulerian 표기법은 유체해석 문제에 주로 이용되어 진다. 여기서는 프로그래밍이 비교적 용이하고 문제의 특성에 적합한 Lagrangian 표기법을 이용하고자 한다. 즉, 연속체는 변형전 형상에 의해 정의 되어질 수 있으며 공간에서의

현재의 위치는 다음과 같은 초기 위치의 함수로 나타낼 수 있다.(Fig3.3.1)

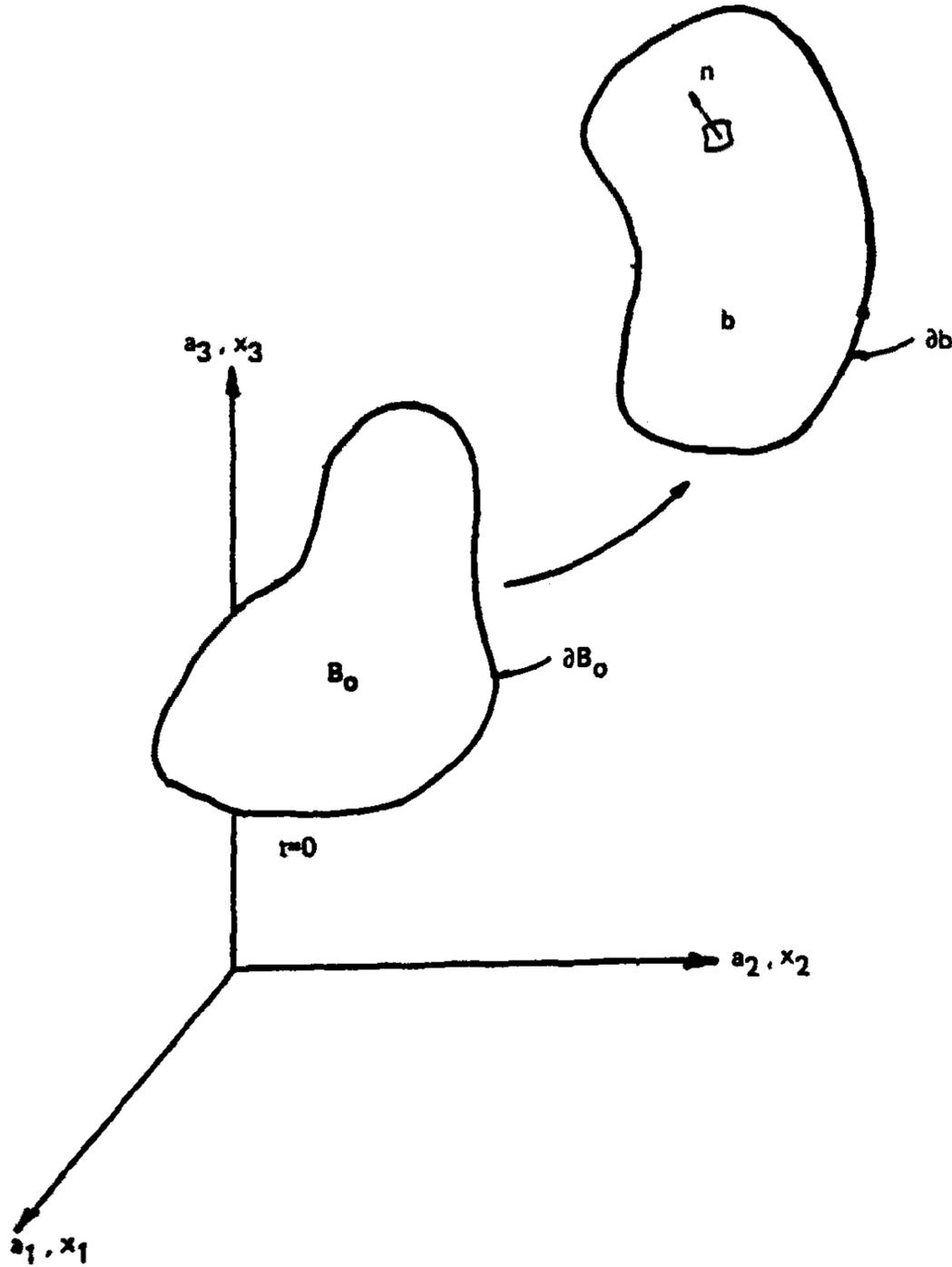


Fig. 3.3.1. 좌표계의 정의

$$x_i = x_i(a_\alpha, t)$$

위에서 a_α 는 초기위치이다.

연속체내의 한점에서의 평형방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} + \rho f_i &= \rho \ddot{x}_i \\ \sigma_{ij} n_j &= t_i(t) \quad \text{on } \partial b_1 \\ x_i(a_\alpha, t) &= D_i(t) \quad \text{on } \partial b_2\end{aligned}$$

여기서, ab_1 은 표면력(Traction)이 작용하는 경계이며, ab_2 는 변위가 제약된 경계이다. ab_3 또한 서로 인접한 연속체의 경계 ab_3 에서는 다음과 같은 표면력의 평형상태(Reciprocal theorem)를 만족하여야 한다.

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_j = 0$$

여기서 σ_{ij} 는 Cauchy 응력, ρ 는 밀도, f_i 는 체적력 밀도, n_j 는 경계면에 수직인 단위 벡터이다

이상의 식들로부터 가중잔여법(Weighted Residual Method 또는 Weak form)을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_V (\rho \ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - \rho f_i) \delta x_i dv + \int_{\partial b_1} (\sigma_{ij} n_j - t_i) \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds = 0$$

위의 식에서 Green 정리 (혹은 Divergence theorem)을 적용하면

$$\int_b (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dv = \int_{\partial b1} \sigma_{ij} n_j \delta x_i ds + \int_{\partial b3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds$$

이므로 결국은 다음과 같은 '가상일의 원리로 불리는 식이 도출된다.

$$\delta \pi = \int_b \rho \ddot{x} \delta x_i dv + \int_b \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_b \rho f_i \delta x_i dv - \int_{\partial b1} t_i \delta x_i ds = 0$$

2 공간의 분화 (Spatial Discretization)

연속체를 유한요소로 세분화하였을 때 우리는 요소내 임의의 점의 좌표를 절점의 좌표로 부터 보간할 수 있다. 형상함수(Shape Function)이라 불리는 함수들에 의해 임의의 좌표를 보간하게 되는데 연속체가 8절점 고체요소 (Solid Element 혹은 Brick Element)로 세분화 되었을 때의 변형전 형상의 보간은 다음과 같다.

$$x_i(a_\alpha, t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t)$$

여기서 형상함수 ϕ_j 는 다음과 같다.

$$\phi_j = (1/8)(1 + \xi \xi_j)(1 + \eta \eta_j)(1 + \zeta \zeta_j)$$

위의 식에서 ξ, η, ζ 는 무차원 좌표계 (Natural Coordinate)로서 수치적분을 비롯한 여러가지 계산에 편의를 위해 사용되어지는 좌표계이다.

한개 유한요소에서의 관계식이 정립되어 지면, 그 다음에는 요소별 관계식을 전체 연속체와의 상관성을 유지하기 위하여 각 요소들은 조합할 필요가 있다. 위에서 언급된 가상일의 원리를 이용하여 조합된 결과를 정리하여 보면 다음과 같은 연속체 전체의 거동을 표현하는 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=1}^N \left(\int_{V_n} \rho \underline{N}^t \underline{N} dv \underline{a} + \int_{V_n} \underline{B}^t \underline{\sigma} dv - \int_{V_n} \rho \underline{N}^t \underline{b} dv - \int_{\partial V_n} \underline{N}^t \underline{t} ds \right) = 0$$

여기서 \underline{N} 은 3*24의 보간행렬(Interpolation Matrix)이며 $\underline{\sigma}$ 는 6*1의 응력행렬, \underline{B}^t 는 6*24의 변형도-변위 관계 행렬이다. 또한 $\underline{\alpha}$ 는 절점의 가속도 벡터이며, \underline{b} 와 \underline{t} 는 각각 체적력 벡터와 표면장력 벡터이며 N은 유한요소의 전체 갯수이다.

동적인 해석 문제에 있어서 계산의 효율성이나 사용 메모리의 절감을 위해서 질량행렬을 대각행렬(Diagonal Matrix)로 만드는 것이 바람직한 경우가 많다. 이와같은 경우에 있어서 형상함수의 총합이 1이 되는 것을 이용하면 k번째 대각선 항은 다음과 같다.

$$n_{kk} = \int_v \rho \phi_k \sum_{i=1}^8 \phi_i dv = \int_v \rho \phi_k dv$$

공간을 보간하는 과정에서 무차원 좌표계를 이용하므로 변형도-변위행렬의 계산에 있어 보간행렬의 미분값을 구할때 혹은 체적의 계산에 있어서

Jacobian 행렬 혹은 그 역행렬의 계산이 요구된다. Jacobian 행렬은 연쇄 법칙(Chain Rule)에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix}$$

따라서 Jacobian 행렬 \mathbf{J} 의 역행렬을 계산하고 다음과 같은 관계식을 이용하면 변형도-변위 관계 행렬의 계산을 용이하게 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix}$$

3. 체적 적분

유한요소법에서 사용되어지는 적분은 해석적 해 (Analytical Solution)를 구할 수 없기 때문에 수치적분 (Numerical Intergration)법을 사용하게 되는데 널리

사용되는 방법으로는 Gauss적분 (Gauss Quadrature) 방법이 있다. 다음과 같은 적분식이 있을때

$$\int_v g dv = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g |J| d\xi d\eta d\zeta$$

위의 적분식은 근사적으로

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n g_{jkl} \left| J \right|_{jkl} w_j w_k w_l$$

와 같이 표현된다. 여기서 w_j, w_k, w_l 은 가중치 (Weighting Factor)들이다. 만약 1점 적분이라면

$$n = 1$$

$$w_j = w_k = w_l = 2$$

$$\xi_1 = \eta_1 = \zeta_1 = 0$$

이므로

$$\int g dv = 8g(0,0,0) \left| J(0,0,0) \right|$$

이다. 여기서 $8|J(0,0,0)|$ 은 요소체적의 근사치이다.

4. 시간적분

시간의 변화에 따른 연속체 혹은 소재의 거동을 구하고자 할 경우, 주어진 식이 변위 및 변위의 미분치인 속도와 가속도의 관계식으로 나타내어져 있기 때문에 시간에 대한 적분을 수행하여야 한다. 여기에 사용되는 시간적분 알고리즘으로는 크게 내연적 방법 (Implicit Method)과 외연적 방법 (Explicit Method)이 있다. 이 두가지 방법은 여러가지 개발된 알고리즘들을 분류하는 기준으로서, 이미 알고 있는 정보를 가지고 다음 시간 단계 (Time step)에서의 값을 구하는 방법을 외연적 방법이라고 하며, 구하고자 하는 값이 전단계에서의 값과 다음 단계에서의 값 모두에 종속적인 방법을 내연적 방법이라고 한다.

이 두가지 방법은 각각 장단점을 가지고 있는데 외연적 방법의 경우는 조건적으로 안정 (Conditionally Stable) 하며 시간간격을 아주 작게 잡아야 하므로 많은 계산시간이 필요하다. 반면에 전체 구조계에 대한 강성행렬을 한번 계산하여 이를 이용하므로 메모리의 사용이 작으며 시간간격이 작아서 정확한 계산결과를 산출할 수 있고, 재료학적 비선형의 경우에 알고리즘의 간편성이 뛰어난 장점을 가진다. 내연적 방법의 경우는 예측과 수정이라는 절차에 의하여 해의 수렴성을 향상시켜 무조건적 안정 (Unconditionally Stable)성이 보장되거나 시간간격을 크게 하였을 경우 계산결과가 틀릴 가능성이 잠재되어 있다. 또한 프로그램 구현의 경우 보다 복잡한 절차를 거쳐야 하며, 거대한 크기의 강성행렬을 매회마다 처리하여야 하므로 많은 양의 메모리를 요구한다. 따라서 위와같은 이유들 때문에 자동차충돌 해석 문제에서 거동이 아주 짧은 시간 동안에만 일어나는 경우에는 외연적인 적분 알고리즘이 적합하다.

외연적 시간적분 알고리즘에는 여러 종류가 있으나 여기서는 중앙차분법 (Central Difference Method)만을 이용하였다. $t=t_0$ 일때의 운동방정식은 다음과 같은 행렬식으로 간단히 나타낼 수 있다.

$$\underline{M}\underline{a}^n = \underline{P}^n - \underline{F}^n + \underline{H}^n$$

단 \underline{M} 은 대각질량행렬 (Diagonal Mass Matrix)

\underline{P}^n 은 외력과 체적력의 합

\underline{F}^n 은 내부력 (Internal Force)

\underline{H}^n 은 아워글래스 저항력 혹은 점성력

위와같은 정보를 가지고 $n+1$ 번째 시간에서의 값을 계산하기 위해 중앙차분법을 사용하면

$$\underline{a}^n = \underline{M}^{-1}(\underline{P}^n - \underline{F}^n + \underline{H}^n)$$

$$\underline{v}^{n+1/2} = \underline{v}^{n-1/2} + \underline{a}^n \Delta t^n$$

$$\underline{x}^{n+1} = \underline{x}^n + \underline{v}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2}$$

$$\Delta t^{n+1/2} = (\Delta t^n + \Delta t^{n+1})/2$$

와 같다. 위의 식에서 알 수 있듯이 만약 질량행렬이 대각행렬이라면 계산이 매우 용이하다.

5. 응력

응력은 물체에 작용하는 힘의 평형상태에서 계산되는 내부상태 변수로서 힘의 평형이 변형된 물체형상에서 이루어지기 때문에 응력은 Eulerian 개념의 물리량이 된다. 따라서 변형된 물체형상에서 정의되는 응력을 Cauchy응력이라고 하며 이 응력은 대칭이고 강체회전에 불변(Objectivity)인 특성이 있다.

일반적으로 많이 알려진 응력으로는 Lagrangian 개념으로 제1종 및 제2종 Piola-Kirchhoff응력, Biot응력, 공칭(Nominal)응력등이 있고, Eulerian 개념으로는 Cauchy응력, Kirchhoff응력, Denis응력등이 있다. 또한 시간에 따른 응력의 변화는 대변형 해석에 중요한 역할을 하는데 많이 알려진 응력율(Stress rate)로는 Jaumann율, Truesdell율 등과 같은 것들이 있다.

대변형해석에 사용되는 응력과 응력율은 대칭이고, 강체운동에 불변(Objectivity)인 성질을 만족해야 할 뿐 아니라 에너지 공액쌍(Energy Conjugate Pairs)을 이루는 변형도율이 존재하여야 한다. 위에서 열거된 응력과 응력율중 절대적인 장점을 갖는 양은 없으나 일반적으로 Cauchy응력, 제2차 Piola-Kirchhoff 응력, Jaumann 응력율등이 가장 많이 쓰이고 있다. 특히 응력률의 경우에는 아래와 같이 시간에 따른 적분에 의해 응력을 개선(Update)하여야 한다.

$$\sigma_{ij}(t + dt) = \sigma_{ij}(t) + \dot{\sigma}_{ij} dt$$

이에 대한 프로그램 구현은 Jaumann Stress Rate를 이용하여 계산된다.

6. 모래시계형 조절

계산상의 잇점을 위하여 요소적분시 1점 적분을 생각할 수 있으나 이 경우 모래시계형 모드(Hourglass Mode)로 불리는 영에너지 모드(Zero Energy Mode)가 발생한다. 따라서 이러한 모래시계형 모드를 없애주기 위하여 안정화 기법인 점성저항(Viscous Damping)을 이용한 방법으로 보다 정확한 계산이 가능하다. 이 방법의 적용시 압축되는 요소에는 인위적인 점성항이 응력을 계산하기 전에 압축력에 더해진다. 또한 외연적 방법의 사용시 내연적 방법의 경우와는 달리 조건부로 안정한 알고리즘이므로 허용치 보다 작은 시간 간격이 요구되어 진다. 따라서 프로그램 내부에서 시간간격을 알맞게 조절하여 주는 시간 자동 제어 기법이 필수적이다.

7. 접촉 알고리즘

두 면이 접촉하게 될때 그 접촉하는 면을 포함하는 요소들의 영역이 접촉면을 서로 공유하는 영역을 갖지 않아야 한다. 이를 위하여 다른 한면이 접촉면을 통과하였을때 벌칙함수법(Penalty Method)을 사용하여 이를 제거할 수 있다. 접촉의 경우 서로 독립된 두면이 접촉하는 양면접촉의 경우와 한면이 좌굴등의 원인에 의하여 그 면 자체가 서로 접촉하는 일면접촉의 경우가 있다. 이러한 접촉의 경우 절점이 접촉면을 관통하게 되면 벌칙함수법이 적용되어 관통 방향의 반대 방향으로 관통정도에 비례하는 벌칙힘을 가하게 되며 접촉면을 정의하는 절점들에게도 반력을 가하게 된다. 이때 접촉면에 수직인 힘 뿐만 아니라 상대 접촉속도의 함수로 표현되는 마찰력도 필요한 경우에

가하게 된다. 벌칙함수법은 두면이 접촉하여 두면상의 절점들이 서로 관통이 일어났을때 이를 막아주는 방법으로 절점들 사이에 일종의 스프링과 같은 것을 달아 놓은 것으로 생각할 수 있다. 즉, 관통이 일어난 절점들의 관통거리에 비례하여 관통방향의 반대방향으로 반력을 가해주는 방법이다. 이때 스프링 상수값에 해당하는 벌칙값을 적절히 선택하는 것이 필요하다. 접촉 알고리즘에서 가장 어려운 점은 어느면에서 접촉이 발생하는가를 탐색하는 알고리즘에 있는데 양면 접촉 문제는 일면 접촉문제에 비해 훨씬 단순한 탐색 논리 때문에 계산시간에 유리하다.

양면 접촉에서 한면을 주면(Master Surface)이라 하고 다른 한면을 종속면(Slave Surface)이라 한다. 본 탐색기법에서는 주면상에서 각 종속면상의 절점에 대해 가장 가까운 점을 찾게 되는데 종속절점에서 주면의 최단거리로 수직한 선을 긋는다(Fig.3.3.2)

주면상에서 미끄러지고 있는 종속절점 n_s 가 있을때 탐색을 수행하여 n_s 에서 가장 가까운 주면상의 점 m_s 를 찾아냈다고 가정하자. 이때 n_s 와 m_s 가 일치하지 않는다면 n_s 는 다음과 같은 식의 검증을 거쳐 s_i 면에 있게 된다.(Fig.3.3.3)

$$\begin{aligned} (c_{-i} * s) * (c_{-i} * c_{-i+1}) &> 0 \\ (c_{-i} * s) * (s * c_{-i+1}) &> 0 \end{aligned}$$

여기서 c_{-i} 와 c_{-i+1} 는 m_s 에서 s_i 면을 따라서 나오는 벡터이고 s 는 m_s 에서 시작하여 n_s 에서 끝나는 벡터 의 탐색되는 면으로의 투영벡터이다.(Fig.3.3.4)

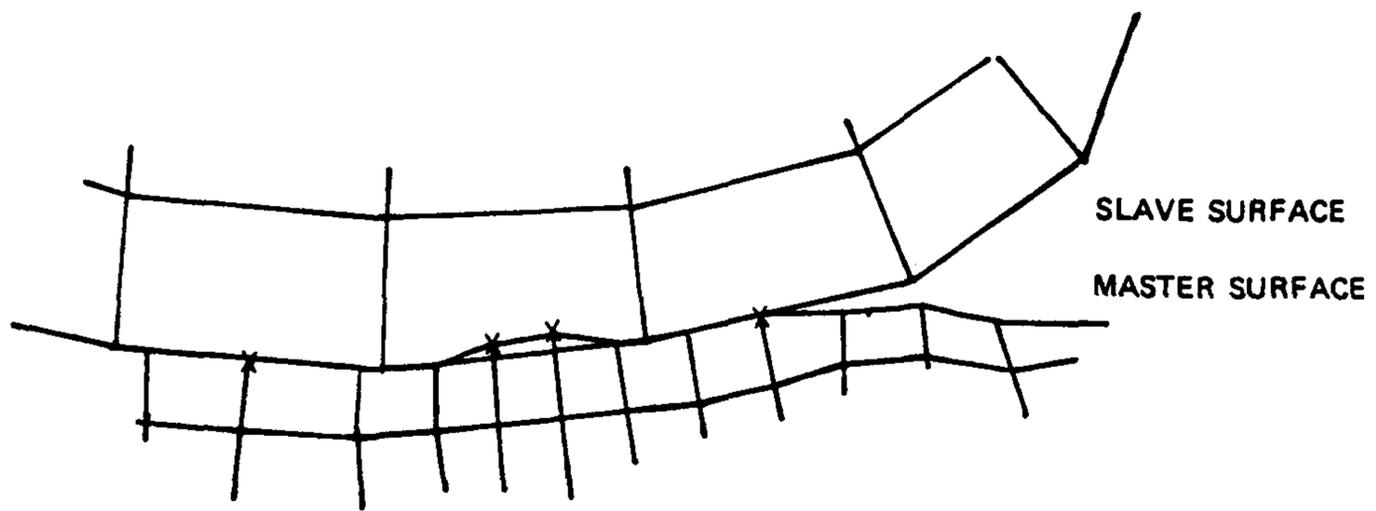


Fig. 3.3.2. 절점구속법에서 자유면 절점으로 취급되는 주부분의 절점 (X표시)

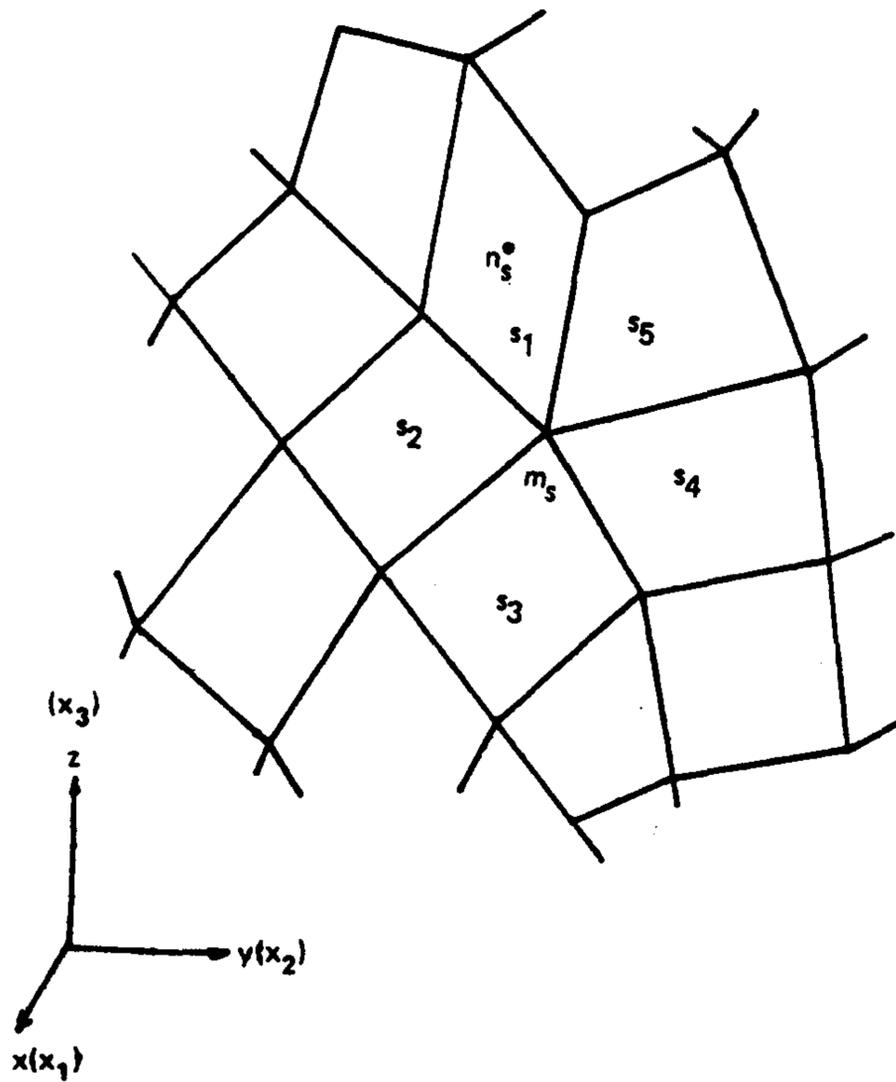


Fig. 3.3.3. 종속절점에 가장 가까이 있는 주절점 m_s 에 이웃하는 5개의 주부분 S_i

$$\underline{s} = \underline{g} - (\underline{g}^* \underline{m}) \underline{m}$$

단, s 면에 대해서

$$\underline{m} = \frac{\underline{c}^* \underline{c}}{\begin{vmatrix} -i & -i+1 \\ \underline{c}^* \underline{c} \\ -i & -i+1 \end{vmatrix}}$$

미끄럼 구속조건은 n_s 를 반드시 주면상에는 아니지만 이에 가깝도록 유지시키도록 하나 두개 주면의 교차선이나 그 근처에 있게 되면 위 검증식은 맞지 않을수도 있다. 이 식이 맞지 않는 경우 n_s 는 다음식의 최대치를 가져오는 교차선에 존재하는 것으로 가정한다.

$$\frac{\underline{g}^* \underline{c}_i}{|\underline{c}_i|} \quad i=1,2,3,4,\dots$$

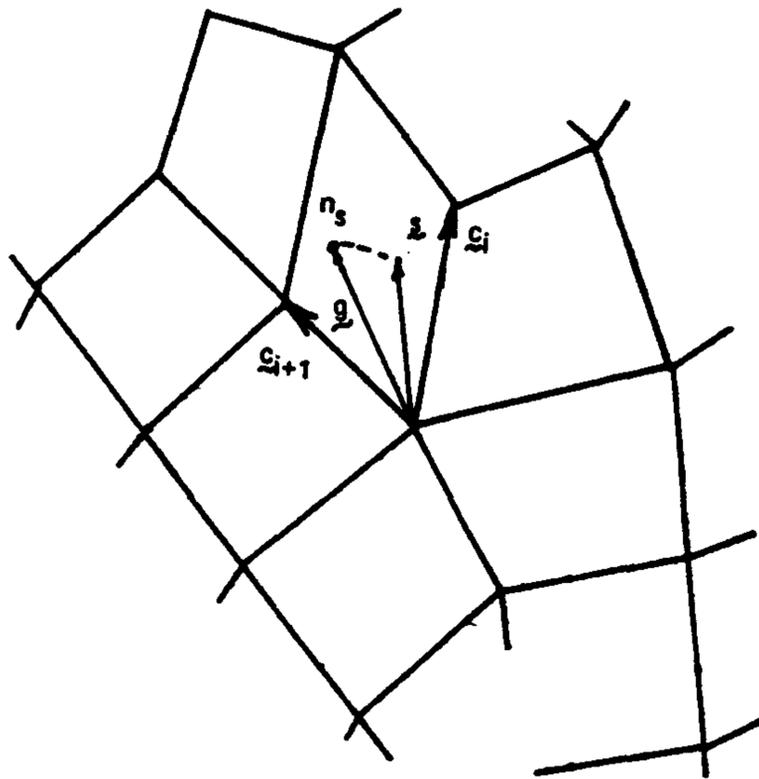


Fig. 3.3.4. g 의 주변 S 상에의 투영도

여 백

제 4 장 프로그램의 응용

여 백

제 4 장 프로그램의 응용

제 1 절 등압력 하중하의 평판 해석

1. 유한요소 모델링

본 문제는 단순지지된 금속평판에 갑작스런 등압력 하중이 작용할때 평판의 변형거동해석으로 계산결과는 고유진동수, 최대응력 및 최대변위들의 이론적인 결과와 비교가 가능하다. 이 모델의 기하학적인 형상은 10" x 10" 인 정사각형면과 1/2" 의 두께를 갖는 평판으로 이를 해석할 경우에는 대칭되는 두 평면을 이용하여 1/4 부분만을 모델링하여 사용할수있다. 이때 대칭의 기준면은 x-z, y-z 의 두 면이다. 본 모델링에서는 총 16개의 쉘 요소를 사용였으며, 평판의 두께 방향으로 5개의 적분점을 갖도록 하였다.(Fig. 4.1.1) 또한, 평판의 재료는 알루미늄으로 탄소성특성을 이용하였으나 항복응력은 인위적으로 큰 값을 선정하여 소성을 방지함으로써 완전 탄성 알루미늄으로 가정하였다. 해석에 사용된 재료적 성질은 Table 4.1.1과 같다. 하중조건은 300 psi의 등분포압력이 평판의 윗면에 시간 0에 갑자기 가해져서 종료시간인 12 msec까지 일정하게 유지되는 것으로 하였다. [17]

2 해석 및 결과

본 해석의 결과 최대 변위는 평판의 중앙점에 해당하는 1번 절점에서 z방

Simply supported plate. (in, sec, lb s²/in)
 time = 0.

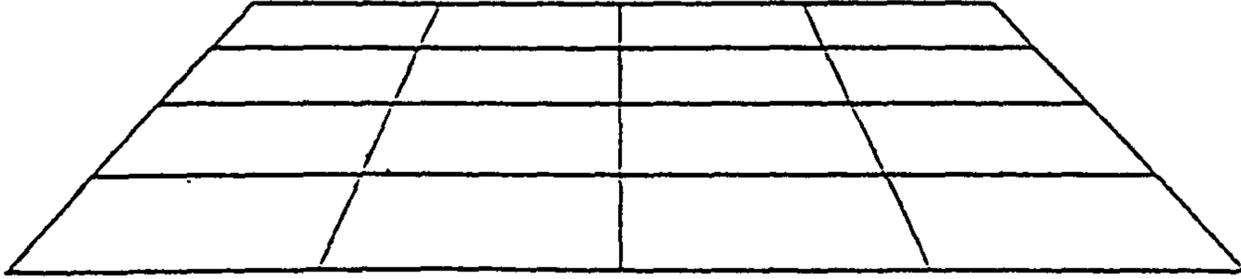


Fig 4.1.1. 평판의 유한요소 모델링

Material Model	Elastic - Plastic
Density (lb s ² / in ⁴)	2.588*10 ⁻⁴
Elastic Modulus (psi)	1.0*10 ⁷
Hardening Modulus (psi)	0.0
Poisson's Ratio	3.0*10 ⁻¹
Yield Strength (psi)	1.00*10 ⁵
Hardening Parameter	1.0

Table 4.1.1. 재료특성

향으로의 변위가 아래방향으로 0.218"로 나타났다. 이때의 시간은 0.55 msec 이다. 1번 절점의 z-방향변위곡선은 Fig.4.1.2 와 같다.

본 문제와 같은 등분포압력을 받는 정사각 평판의 이론적인 최대 변위의 추정치는 다음과 같은 이론식에서 구할수 있다.

$$\delta_{\max} = \frac{\alpha q a^4}{D}$$

여기서 q 는 등분포압력, a 는 변의 길이, D 는 휨강성, 그리고 α 는 준 경험적인 계수이다. 위 식은 평판이 완전 탄성이며 균질하고, 등방성의 재료적 성질을 갖고, 변의 길이에 비해 평판의 두께가 얇다는 가정에 의해 탄성 평판 이론으로부터 유도되어진 것이다. 위식을 이용하여 최대 변위를 구해보면 주어진 평판의 중앙점에서 0.11"의 정적 변위가 최대이다. 동적하중에 의한 변위는 일반적으로 정적하중에 의한 변위에 동적하중계수를 곱하여 얻을수있다. 대변형상태의 평판에서 이러한 하중계수를 구하는 것이 쉽지 않지만 대략 2.0이 적합하므로 동적하중에 의한 최대변위는 0.22"로 볼수 있다.

본 해석에서 평판의 자유진동시 고유진동수는 절점1의 z방향변위를 그린 그림으로부터 근사적인 값을 구할수 있다. Fig.4.1.2로부터 구조물의 진동주기는 대략 1.10 ms 이므로 고유진동수는 909 Hz가 된다.

평판의 진동주기는 이론식에 의해 구할수 있는데 이는 다음과 같다.

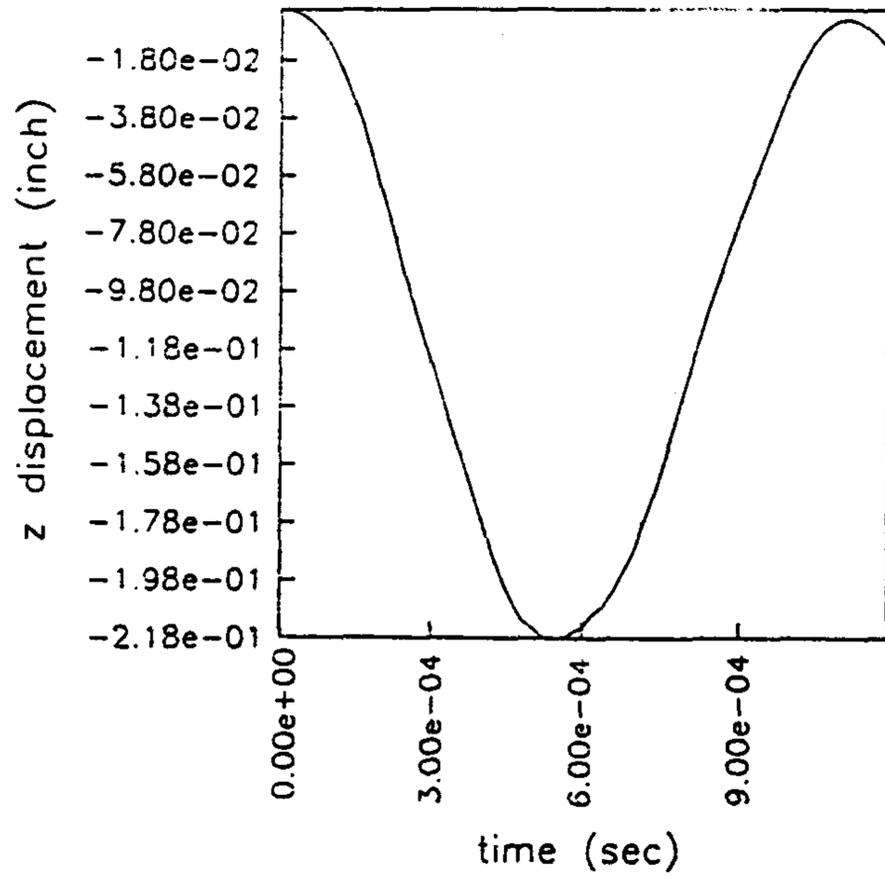


Fig. 4.1.2. 질점 1의 Z방향 변위

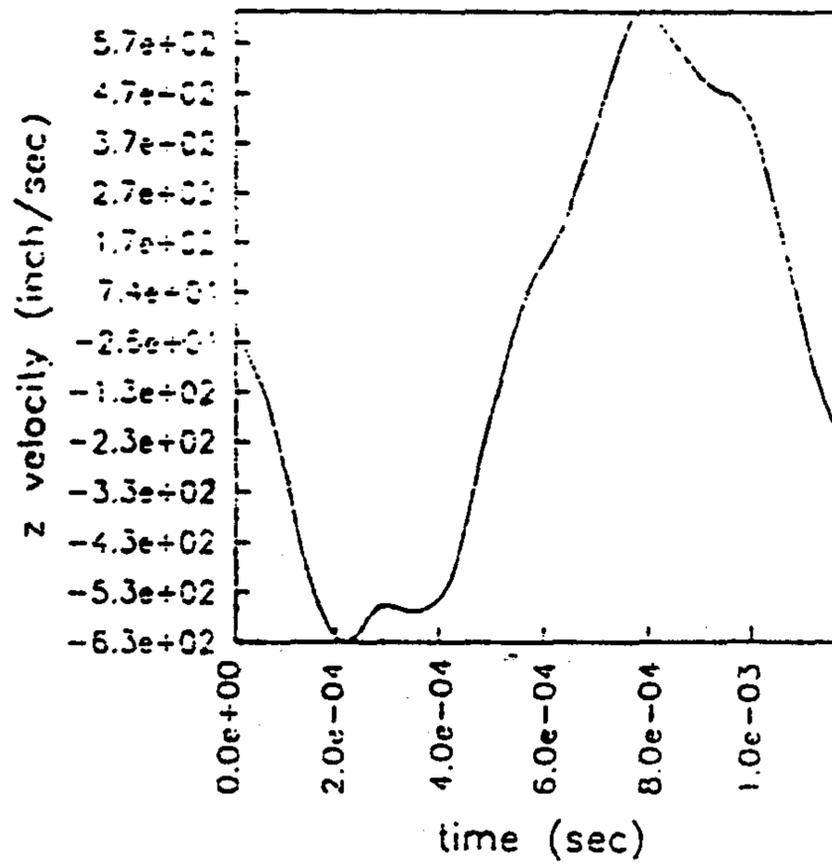


Fig. 4.1.3. 질점 1의 Z방향 속도

$$T = \frac{a^2}{\pi} \sqrt{\frac{\rho t}{D}}$$

여기서, ρ 는 질량밀도이고 t 는 평판의 두께이다. 이 식은 평판의 최대변위를 구하기위한 가정과 동일한 가정에 의해 유도된 식이다. 위식의 결과로 평판의 1차 진동주기는 1.07ms로되므로 진동수는 935 Hz이다.(Fig.4.1.3, Fig.4.1.4)

Fig. 4.1.5는 요소1에서의 응력 σ_{xx} 의 시간-이력곡선을 그린 것이다. 이 그림은 평판의 아랫면, 즉 인장면의 거동에 해당하는 곡선이다. 이 때의 응력 σ_{yy} 는 대칭의 성질 때문에 Fig.4.1.5의 시간-이력곡선 그림과 완전히 일치한다. 이때 최대응력은 최대변위가 일어나기 0.03 ms전에 발생하며 그 값은 67.7kpsi이다.

평판의 최대응력을 나타내는 이론식은 다음과 같다.

$$\sigma_{xx,max} = \frac{\beta q a^2}{t^2}$$

여기서, q 는 하중, a 는 변의 길이, t 는 두께, β 는 준 경험적인 계수이다. 이 식은 탄성론에 근거하여 유도되었으며, 하중을 619psi로 하여 적용하였을 때 최대 응력은 712 ksi가 된다.

위와 같이 해석의 결과를 이론치와 비교하여 본 결과 비교적 근사한 결과를 보임을 알수있었다.

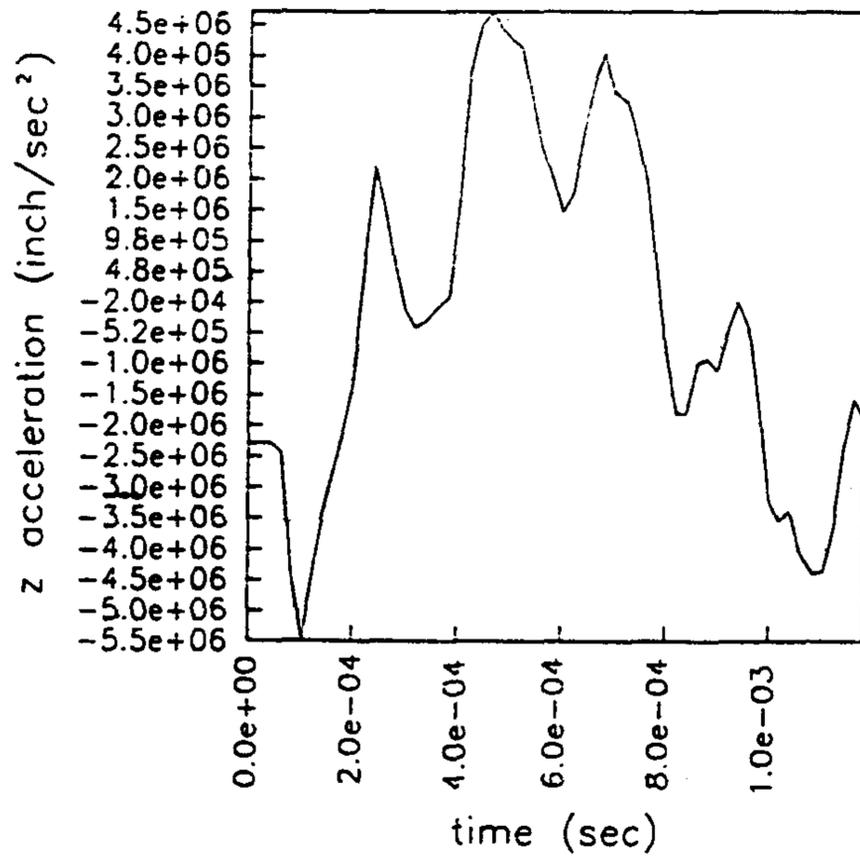


Fig. 4.1.4. 질점 1의 Z방향 가속도

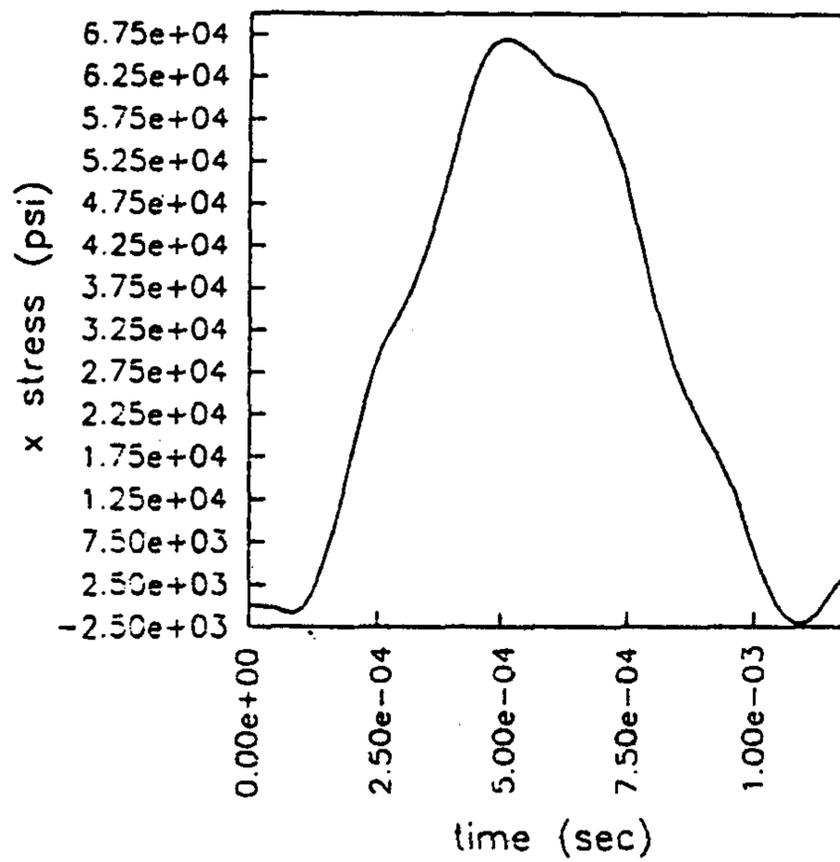


Fig. 4.1.5. 요소 1의 X방향 응력의 이력도

제 2절 박판형 막대의 응력파전달 해석

1. 유한요소 모델링

본 문제는 양단이 고정된(Clamped) 경계조건을 갖고, 두께가 0.125 in이고 가로 및 세로가 각각 10 in, 1.2 in이며 구리재료로 된 박판형 막대의 중앙부에 충격이 발생하여 그 초기속도가 5 in/ms(약 127 m/sec)인 상태에서 탄소성 응력파가 전달되어 가는 과정을 컴퓨터 시뮬레이션하였다. Fig. 4.2.1. 에 박판형 막대의 기하적 형상과 경계조건 및 하중조건을 나타내었다. 박판형 막대는 알루미늄으로 탄성 및 완전소성(Elastic-perfectly plastic) 재료로 가정하였으며 항복응력이 41,400 psi인 특성을 갖도록 하였다. (Fig. 4.2.2) 본 문제는 x축 및 y축에 대해서 대칭이므로 박판형 막대의 1/4만을 모델링하여 10개의 4절점 각 요소와 22개의 절점을 취하였다. Fig. 4.2.3은 박판형 막대의 전체에 대한 유한요소모델링을 보여주고 있다.[17]

2 해석 및 결과

본 해석은 1 ms에서 계산이 끝나도록 하였으며 매 0.01 ms 마다 4절점 각 요소의 응력 결과를 프린트해서 결과를 그림으로 나타내었다. 이때 각 요소는 Belytschko-Lin-Tasy 각 이론을 적용하여 면에 대하여는 1점 Gauss 적분을 두께 방향으로 3점에 대한 적분을 수행하였다. 모래시계형 점성계수는 0.05, 2차 용적(Quadratic Bulk) 점성계수는 1.2, 선형용적(Linear Bulk) 점성계수

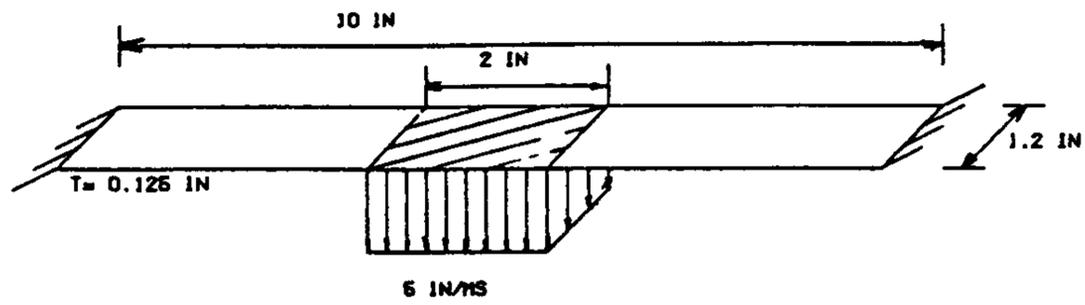


Fig 421. 박판형 막대의 기하적 형상, 경계조건 및 하중조건

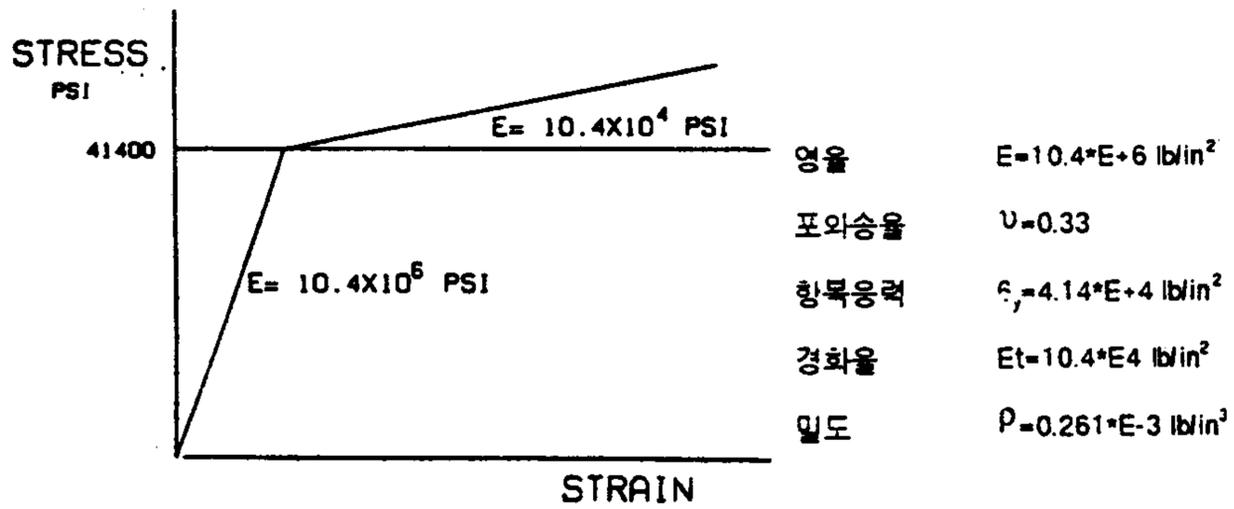


Fig 422 박판형 막대의 재료적 특성

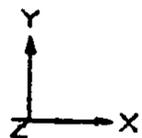
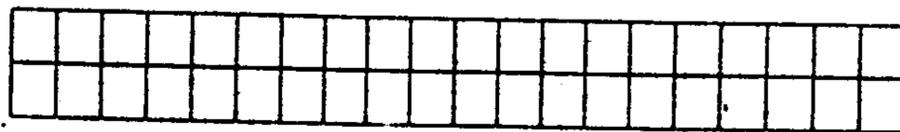


Fig 423. 박판형 막대의 유한요소 모델링

는 0.06을 취하였다.

Fig. 4.2.4는 초기상태에서 부터 충격이 발생한 후 0.01 ms씩 증가하여 0.20 ms까지의 시간변화에 따른 좌우 x 방향으로의 유효응력전파(Effective Stress Propagation) 형태를 보여주고 있다. 그림에 나타나있는 바와 같이 0.01 ms후에는 박판형 막대의 중앙부분은 이미 항복응력을 초과하여 소성영역에 들어가 있고 0.03 ms후에는 막대의 거의 모든 부분이 소성영역에 들어가 있음을 알 수 있다. 또한 0.01 ms의 시간이 지난후에 충격을 받은 중앙부분보다는 그 바로 바깥쪽에 약 400,000 psi 정도의 최대 유효응력이 발생하여 시간이 지남에 따라 안쪽과 바깥쪽으로 동시에 응력파가 전달되고 양끝에서 반사(Reflection) 현상까지 발생하여 아주 복잡한 소성파 전달이 이루어짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 4.2.5는 초기상태에서 부터 충격이 발생한 후 0.01 ms증가하여 0.1 ms까지와 그후에 0.05 ms씩 증가하여 0.65 ms까지의 시간변화에 따른 xy면의 z방향 변위를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 0.01 ms 후에 중앙부에 소성 변형이 일어나기 시작하여 응력파가 좌우로 진행함에 따라 양쪽 끝까지 소성변형이 일어나게 되어 0.35 ms 후에는 중앙부에서 최대 소성 변위가 약 0.89 in정도가 되어 0.65 ms 까지 거의 변위가 없는 영구변형 상태를 유지함을 알 수 있다.

본 문제는 횡방향 충격력이 작용하였을때의 탄소성파 전달현상을 해석하는 것으로 이론적으로는 매우 복잡하고 풀기 어려운 문제이나 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용하여 어느정도 근사한 해를 구할 수 있다. 본 문제에 대한 정확한 해석은 고체에서의 응력파 전달에 관한 연구가 더욱 진행되어야만 할 수 있을 것으로 판단되며 2차년도 연구에서 더욱 정밀한 해석을 수행할 예정이다.

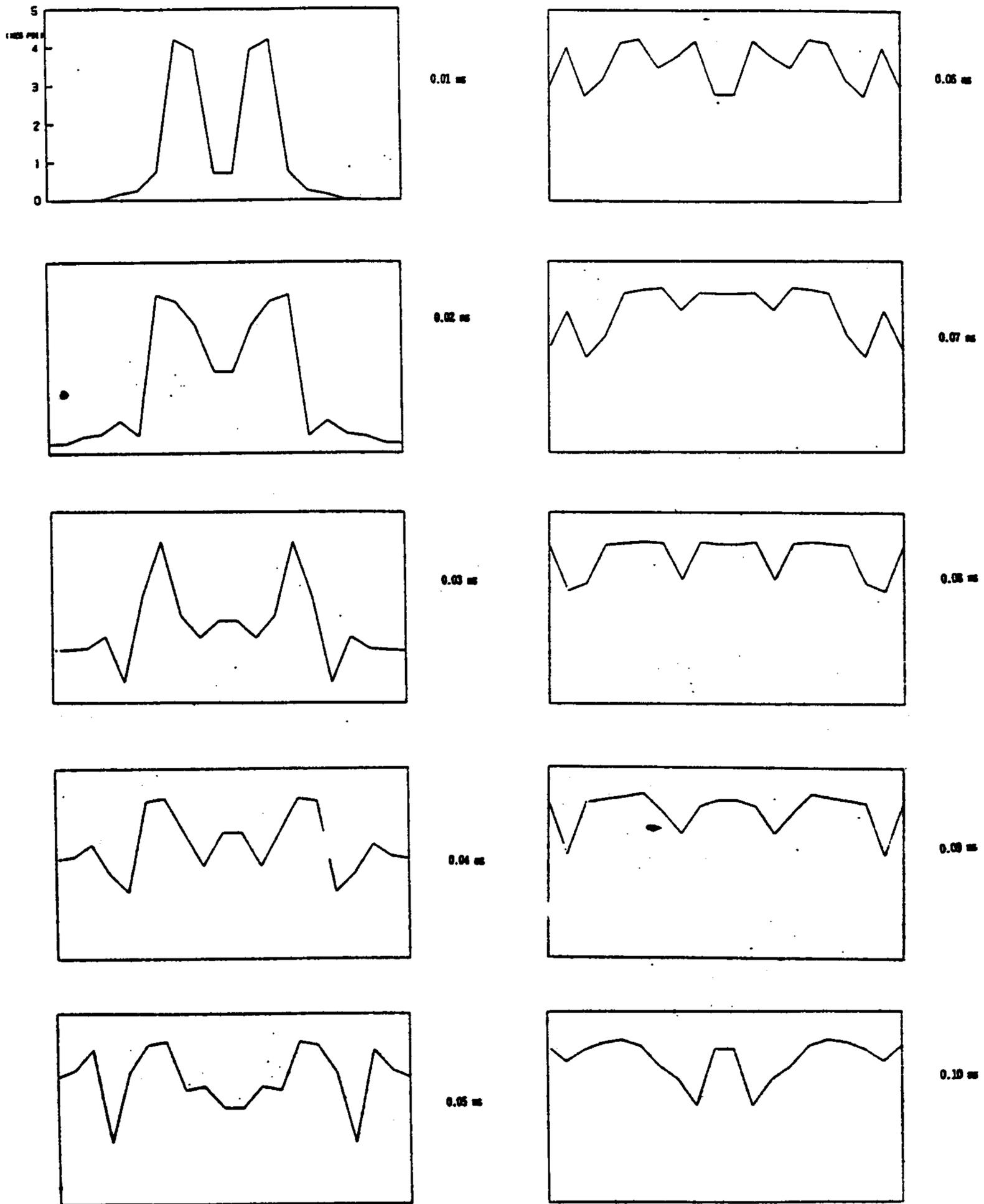


Fig 424. a 충격이 발생한 후 박판형 막대의 응력과 전달현상

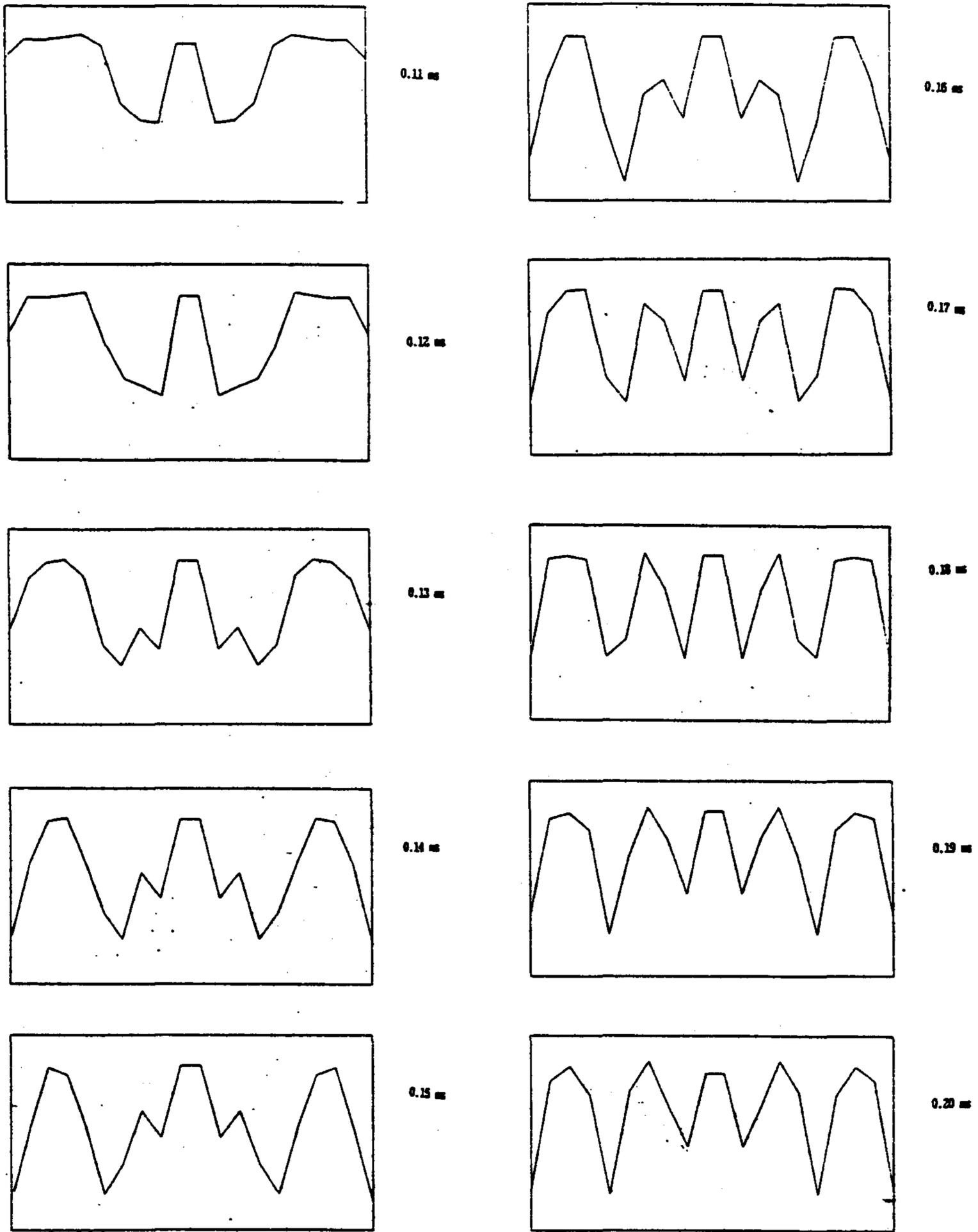


Fig 424.b 충격이 발생한 후 응력과 전달현상

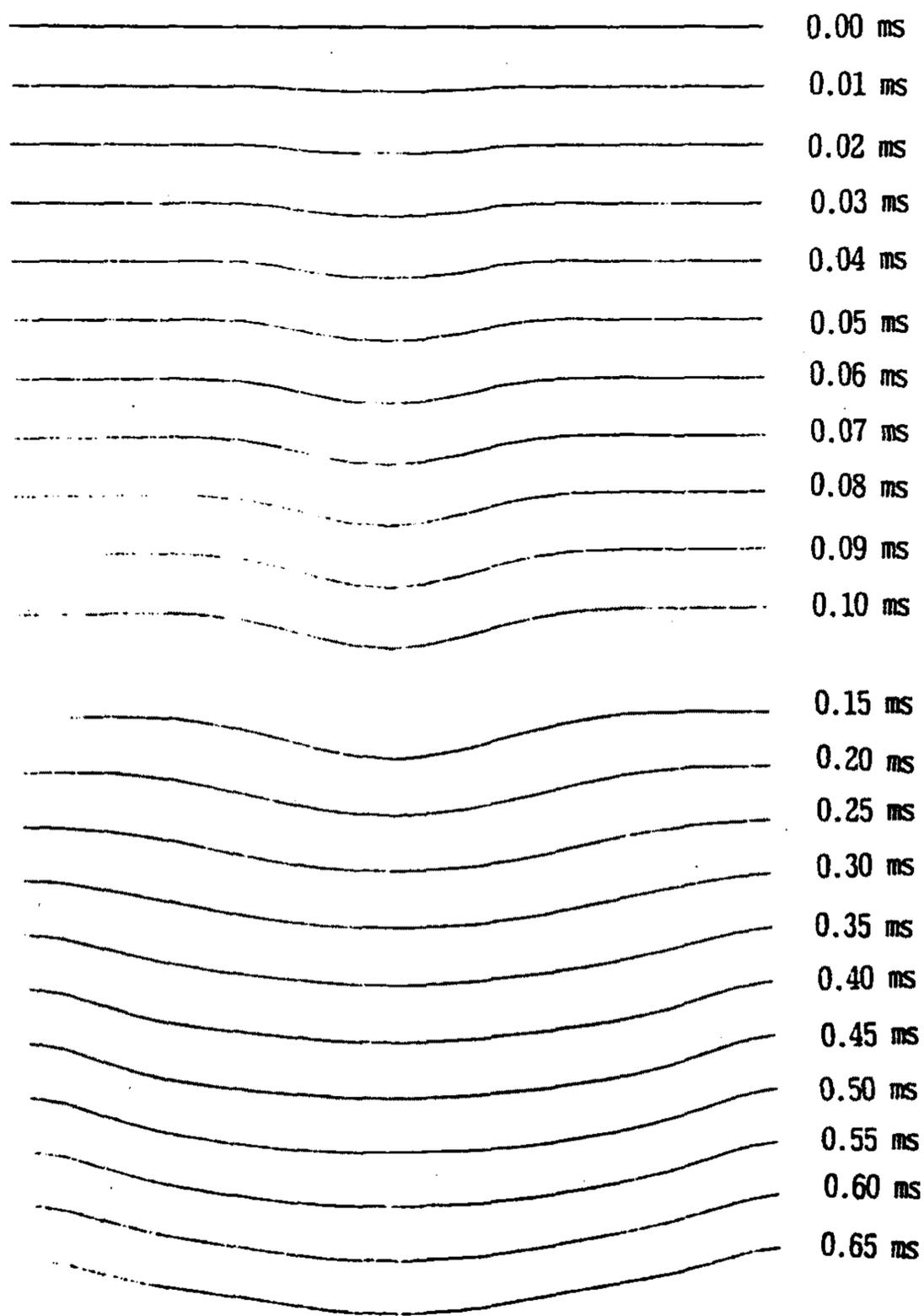


Fig 425 충격이 발생한 후 박판형 막대의 z방향의 변위

제 3절 상자형 프레임의 충격해석

1. 유한요소 모델링

본 문제는 자동차 충돌해석 시뮬레이션의 성능테스트(Benchmark Test)로 이용되는 문제중의 하나로 상자형 프레임(Box-typed Chassis Frame)이 한쪽 끝은 고정벽면(Stone wall)에 고정되어 있고 다른 한쪽 끝에 큰 충격력이 발생하여 273.4 in/sec(약 25 km/h)의 초기속도가 충돌이 끝날 때까지 계속 유지되는 경우의 충돌 해석이다. Fig. 4.3.1은 상자형 프레임의 기하적형상과 경계조건 및 하중조건을 나타내고 있다. 고정벽면은 $z=0$ 에 위치하고 있으며 상자형 프레임의 두께는 0.0591 in로 일정하며 길이는 12.598 in이다. 상자형 프레임은 강철로 되어 있으며 등방성 탄소성 재료로 가정하였으며 항복응력은 30,000 psi로 취하였다. (Fig. 4.3.2). 본 문제는 X축만 Y축에 대하여 대칭이므로 상자형 프레임의 1/4 부분만을 모델링하였는데 1,800개의 4절점 각 요소가 1911개의 절점들로 연결되어 있다. Fig. 4.3.3은 상자형 프레임의 전체적인 유한요소 모델링을 보여주고 있다. [17]

2 해석 및 결과

본 해석은 40 ms에서 계산이 끝나도록 하였으며 매 5 ms마다 모든 절점의 변위, 속도 및 가속도의 계산결과와 4절점 각 요소의 응력계산결과를 얻었

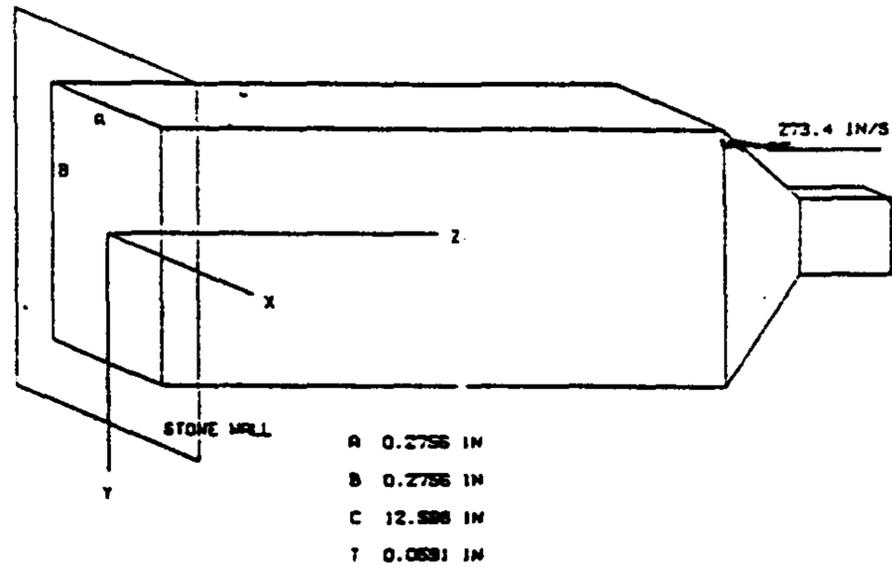


Fig 431. 상자형 프레임의 기하적 형상, 경계조건 및 하중조건

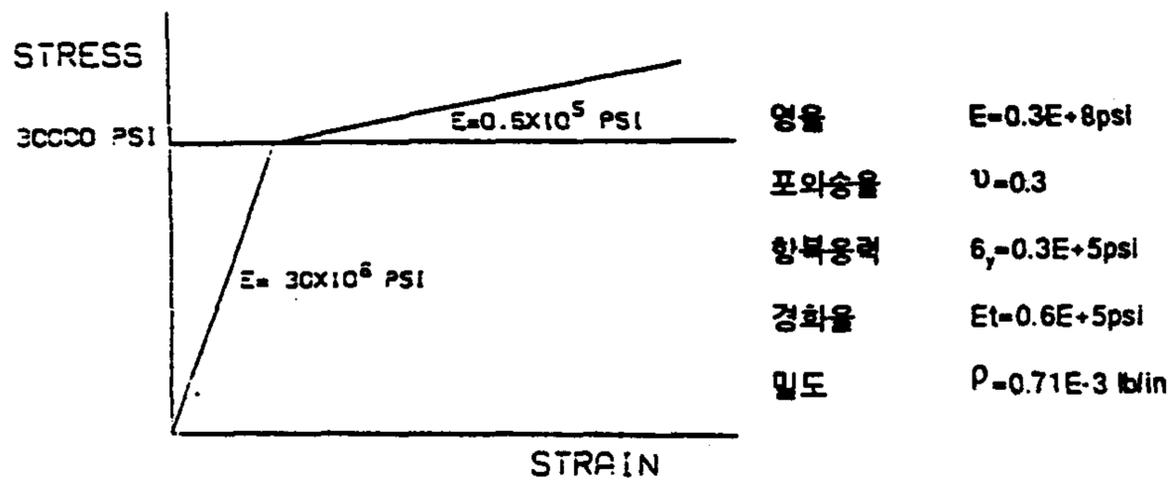


Fig 432. 상자형 프레임의 재료적 특성

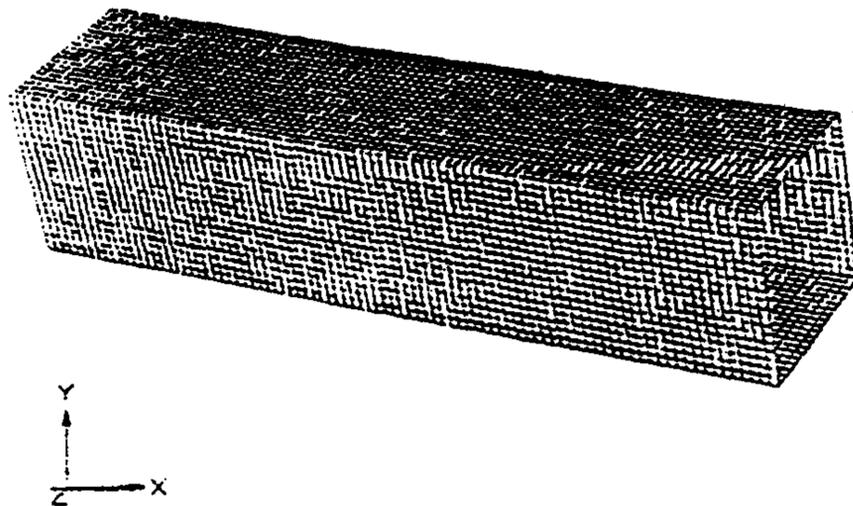


Fig 433. 상자형 프레임의 유한요소 모델링

다. 4절점 각 요소는 Belytschko-Lin-Tsay 각 이론을 이용하였으며 각의 면방향으로는 1점 Gauss 적분을 수행하고 두께방향으로는 3점에 대하여 각각 적분을 수행하였는데 미끄러짐 경계면 (Sliding Interface) 입력항으로부터 일면접촉(Single Surface Contact) 현상을 고려하여 각 면이 서로 관통하지 못하도록 상자형 프레임의 접촉충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 경계조건으로는 고정벽면에 위치한 끝 부분은 변위와 회전 모두가 구속되어 있고 충격을 받는 부분은 상자형 프레임의 단면 접촉현상으로 인한 부위가 프레임의 z 방향 외부로 돌출되는 현상을 방지하기 위하여 끝 부분부터 z방향으로 12개까지의 절점들은 모두 z방향으로의 변위만을 허용하였다.

한편 1점 Gauss 적분의 문제점인 영 에너지 모드 (Zero Energy Mode)에 의한 모래시계 현상을 조절하기 위하여 점성계수는 0.1, 2차 용적 점성계수는 1.44, 선형용적 점성계수는 0.06으로 취하였다. Fig. 4.3.4는 상자형 프레임의 초기형태와 충격이 발생한 후 5 ms씩 시간이 증가하여 35 ms까지의 변형된 모습을 보여주고 있다. 충격이 가해진 부분에서 5 ms의 시간이 경과하기 전에 큰 소성 변형이 발생하여 위, 아랫면과 양옆면이 중간면에 대하여 서로 대칭으로 변위가 일어나며 X-Y 한 단면에서 관찰하는 경우 위, 아랫면이 바깥쪽으로 튀어나오면 양옆면은 안쪽으로 들어가는 변형현상을 관찰할 수가 있다. 또한 10 ms와 15 ms 사이에서 일면 접촉현상이 발생하기 시작함을 알 수가 있는데 이 모든 현상은 일종의 동적소성 좌굴 (Dynamic Plastic Buckling) 현상으로 소성 변형이 일어나면서 프레임이 충격에너지를 흡수하여 안정한 상태에 도달하려는 상황으로 볼 수가 있다. 한편 이 프레임은 일정한 속도로 충격이 계속 가해지고 있으므로 변위가 일정하게 줄어들어 35 ms 후에는 본래 전체 길이의 약 25%가 됨을 알 수 있다.

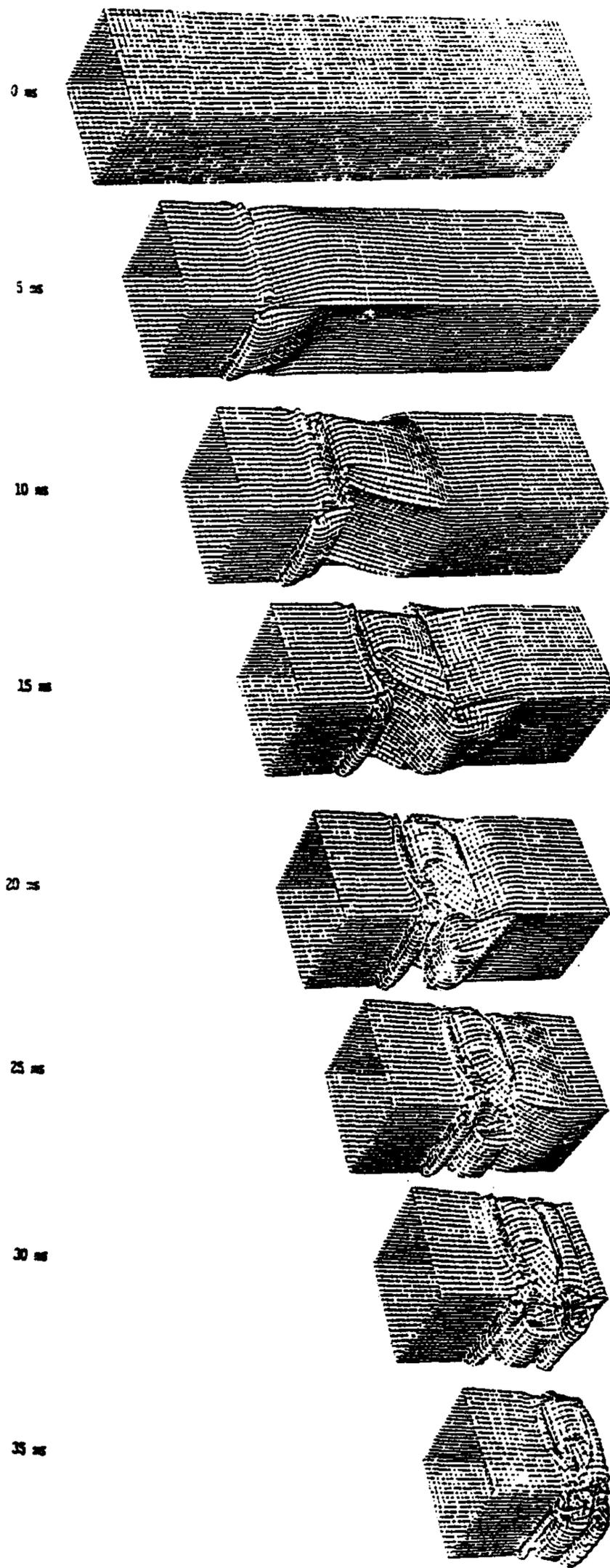


Fig 434 충격발생 전후의 상자형 프레임 변형형태

제 5 장 결 론

여 백

제 5 장 결 론

본 1차년도 연구에서는 자동차 충돌해석 소프트웨어의 원형 시스템을 개발하기 위하여 자료조사를 통한 유사소프트웨어의 분석연구와 이를 바탕으로 개발 소프트웨어의 개념설계를 수행하였으며 본 연구에 적합한 공공프로그램인 DYNA-3D의 Cray-2s 슈퍼컴퓨터 시스템에의 이식(Migration) 및 이를 이용한 등압력 하중하의 평판해석, 박판형 막대의 응력파 전달해석 및 상자형 프레임의 충격해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 기존의 충돌해석 소프트웨어의 기능과 사용현황을 파악할 수 있었는데 현재 세계적으로 자동차 회사에서 이용하고 있는 소프트웨어로는 PAM-CRASH와 LS/DYNA가 많았으며 이들 모두 지속적인 연구개발을 수행하고 있어 현재에도 최신의 기술들이 이들 프로그램에 추가되고 있다. 따라서 개발 예정 소프트웨어의 개념설계에 있어서 이러한 기술들이 표현될 수 있도록 사용자 연계나 전후처리 시스템의 활용 및 새로운 해석 알고리즘등이 중요한 개발 방향이 되었다. 기존의 DYNA-3D가 Cray-2s 슈퍼컴퓨터상에서 효율적으로 운영될 수 있도록 이식하였으며 적정성 확인을 위한 응용예에서도 이론치나 물리현상에 계산결과가 일치됨을 알 수 있었다. 당 연구소의 Cray-2s 시스템이 1993년도 11월중에 Cray Y-MP 슈퍼컴퓨터로 교체될 예정으로 있어 2차년도 연구에서는 DYNA-3D의 Cray Y-MP 시스템에로의 이식과 개발 프로그램의 기본설계를 수행한 후 DYNA-3D를 발전시켜 충돌해석 소프트웨어의 원형시스템을 개발하고 기존의 전후처리 시스템인 PATRAN, HYPERMESH, MPGS, MOVIESTAR.BYU등과 연계될 수

있도록 하여 유한요소 모델링이나 계산결과의 가시화에 이들을 활용할 수 있도록 할 예정이다. 또한 각종 실제 실험결과를 직접 활용할 수 있는 사용자 연계(User interface) 기능을 추가하고 다양한 충돌문제 해석 시뮬레이션을 통한 개발 프로그램의 적정성 확인과 PAM-CRASH 와의 비교분석을 통한 개발 프로그램의 품질관리(Quality Control)를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. T.J.R. Hughes et al : A Finite Element Method for a Class of Contact-Impact Problems, Comp. Meth. in Appl. Mech. & Eng. Vol. 8. P249-276, 1976.
2. A.B. Pifko, R. Winter : Theory and Applications of Finite Element Analysis to Structural Crash Simulation, Comp. & Struc., Vol. 13, P. 277-285, 1981.
3. J.O. Hallquist et al. : Sliding Interface with Contact-Impact in Large-Scale Lagrangian Computations, Comp. Meth. in Appl. Mech. & Eng., Vol. 51, P.107-137, 1985.
4. D.J. Benson, J.O. Hallquist : A Simple Rigid Body Algorithm for Structural Dynamics Programs, Int. J. for Num. Meth. in Eng., Vol. 22, p.723-749, 1986.
5. J. Argyris et al : Computer Simulation of Crash Phenomena, Int. J. for Num. Meth. in Eng. Vol. 22, P.497-519, 1986.
6. G. Hocking : Crash Simulation using the Discrete Element Method, Proc. of the 1st Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P193-214, 1986.
7. J. F. Chedmail et al : Numerical Techniques, Experimental Validation and Industrial Applications of Structural Impact and Crashworthiness Analysis with Supercomputers for the Automotive Industries, Proc. of the 1st Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P127-146, 1986.
8. T. Scharuhorst, R-W, Schettler-Kohler : FEM-CRASH Experiences at

- Volkswagen Research, Proc. of the 1st Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P75-86, 1986.
9. K. Hieronimus, E. Nalepa : Introduction and Use of a Supercomputer at OPEL E.G. for Crash Simulation, Proc. of the 1st Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P29-42, 1986.
 10. T. Scharnhorst : Simulation of a Frontal Car Crash on the CRAY X-MP, Proc. of the 3rd Int. Symp. of Sci. and Eng. on Cray Supercomputers, CRI, P327-340, 1987.
 11. Z. Zhi-Hua, L. Nilsson : Implementation of a Contact-Impact Interface Algorithm and Contact Searching Algorithm in 3-D Dynamic FEM Analysis on CRAY Supercomputer, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P395-404, 1988.
 12. P.J.A. de Coo et al : Computing Time Reduction by Subcycling with and Application to Numerical Crash Simulation, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P347-372, 1988.
 13. B. Hazet, M. Guiraud : Some Applications of Crash Simulation in Car Manufacturing, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P21-34, 1988.
 14. J. Stanger et al : A Numerical Simulation of the Proposed European Side Impact Test Procedure, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Supercomputer Appl. in Automotive Industry, CRI, P9-20, 1988.
 15. J.O. Hallquist : DYNA3D User's Manual, LLNL, Rept. UCID-19592, 1983.
 16. J.O. Hallquist : Theoretical Manual for DYNA-3D, LLNL, Rept. UCID-19401,

- 1983.
17. S.C.Lovejoy et al : DYNA-3D Example Problem Manual, LLNL, Rept. UCRL-MA-105259, 1990.
 18. ESI: PAM-CRASH User's Manual, 1987.
 19. MSC : MSC/DYNA Introduction Material, 1991.
 20. MSC : MSC/DYTRAN Introduction Material, 1992.
 21. T.Belytschko et al : SUPERWHAMS Intorduction Material, 1993.
 22. MECALOG: RADIOSS Introduction Material, 1988.
 23. LSPC: LS/DYNA Introduction Material, 1992.
 24. D.W Stillman, J.O Hallquist : INGRID-A Three - Dimensional Mesh Generator for Modeling Nonlinear Systems, LLNL, 1985.
 25. B.E. Brown, J.O. Hallquist : TAURUS-An Interactive Post-processor for the Analysis Code DYNA3D, LLNL, 1985.
 26. H.N. Christiansen et al : MOVIE.BYU Training Text, CRI, 1987.
 27. MOVIESTAR.BYU Programmer's Manual, BYU, 1992.
 28. P3 / PATRAN User Manual, Vol.1, PDA Eng. 1993.
 29. MPGS Reference Manual, CRI, 1993.
 30. HYPERMESH Introduction Guide, Altair Computing, 1993.
 31. 천유식 : 무에서 무형으로 (소프트웨어 공학의 실제), 교학사, 1989.
 32. 고상기외 : 소프트웨어 개발공정 표준화 방안에 관한 연구, 과학기술처 연구보고서 (시스템공학연구소), 1990.
 33. SAE : SAE Handbook, 1985.
 34. 임철호, 김동수, 우경식, 김해일 : 자동차 충돌해석 시뮬레이션을 위한 프

- 로그래밍 개발연구, 시스템공학연구소 연구보고서, 1989. 5.
35. 허승진: 차량의 Crush-Crash 해석 기법 및 응용 예, 한국자동차공학회 학술 강연회 초록집, PP.32-44, 1989. 5.
 36. 김동수, 우경식, 임철호, 권상순, 김현수: 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 자동차 프레임의 충돌해석, 한국자동차 공학회 1989년도 추계학술대회 논문집, PP. 148-152. 1989. 11.
 37. 김승권, 박운정: 차량 안전에 관한 고찰, 한국자동차 공학회지(자료), PP. 29-33, 1991. 4.
 38. 배한일, 강성룡: 승용차 Front Bumper 5 mph 충돌해석, 한국자동차공학회 학술강연 초록집, PP.29-40. 1991. 5.
 39. 박규환: One-box Car 충돌대비 차체구조, 한국자동차공학회지(해설), PP. 19-24, 1991. 6.
 40. P. DuBois : A Review of Numerical Simulation Applied to Automotive Crashworthiness, Proc. of 4th KIA Int. Academic Seminar on the Automotive Technology for Safety and Environment, PP. 33-48, Nov. 1991.
 41. 최양욱: 설계 초기 단계의 충돌해석법에 관하여, 한국자동차공학회지 (해설) PP. 10-14, 1992. 10.