



KR0000523

KAERI/TR-1569/00

측면 충격하중에 의한 지지격자체의  
좌굴거동 해석

Buckling Behavior Analysis of Spacer Grid  
by Lateral Impact Load

한국원자력연구소

31 / 47

**PLEASE BE AWARE THAT  
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT  
WERE ORIGINALLY BLANK**

## 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2000년도 “고성능지지격자 구조기술개발과제”의 “측면 충격하중에 의한 지지격자체의 좌굴거동 해석”에 대한 기술보고서로 제출합니다.

2000년 5월

과제책임자 : 송 기 남

주 저 자 : 윤 경 호(고성능지지격자 구조기술개발과제)

공동저자 : 강 흥 석, 김 형 규, 송 기 남(고성능지지격자 구조기술개발과제)

## 요 약

경수로용 핵연료집합체에서 지지격자는 연료봉들이 횡방향 및 종방향으로 정 위치를 유지하도록 하여 연료봉간의 냉각경로가 보장되도록 하며, 또한 핵연료집합체가 하나의 지지 구조물을 형성하게 하는 핵심구조부품이다. 핵연료집합체는 냉각재상실사고나 지진사고시에 인접한 핵연료로부터 측면 충격하중을 받게 되며, 이러한 측면의 충격하중을 지지격자체가 주로 감당하고 있다. 만약 지지격자가 과도하게 변형되어 제어봉의 삽입을 보장하지 못한다면 노심의 긴급정지가 제대로 이루어지지 않게 되어 궁극적으로는 노심의 용융을 일으킬 수도 있다. 고성능지지격자 구조기술개발과제에서는 연료봉 지지부위에서 연료봉의 프레팅 마멸을 억제시킬 수 있고 연료봉에서 발생된 열을 냉각수로 효과적으로 전달시킬 수 있는 고유모형의 지지격자 형상을 개발 중에 있다. 도출된 고유형상의 지지격자에 대한 기계/구조적 성능을 비교 평가하고 이를 토대로 기계/구조적 성능이 향상된 지지격자의 고유형상을 정립하고자 도출된 고유형상의 지지격자 시편에 대한 기계/구조적 성능시험을 수행하였다. 또한 개발 중인 고유모형의 지지격자 한 가지 모델에 대한 비선형 충격해석을 수행하여 이를 충격시험 결과와 비교하여 해석방법을 정립하고자 하였다.

## SUMMARY

The spacer grid is one of the main structural components in the fuel assembly, which supports the fuel rods, guides cooling water, and protects the system from an external impact load, such as earthquakes. Therefore, the mechanical and structural properties of the spacer grids must be extensively examined while designing it. In this report, free fall type shock tests on the several kinds of the specimens of the spacer grids were also carried out in order to compare the results among the candidate grids. A free fall carriage on the specimen accomplishes the test. In addition to this, a finite element method for predicting the critical impact strength of the spacer grids is described. FE method on the buckling behavior of the spacer grids are performed for a various array of sizes of the grids considering that the spacer grid is an assembled structure with thin-walled plates and imposing proper boundary conditions by nonlinear dynamic impact analysis using ABAQUS/explicit code. The simulated results also similarly predicted the local buckling phenomena and were found to give good correspondence with the shock test results.

# 목 차

제출문	
요 약	
SUMMARY	
표목차	
그림목차	
사진목차	
제 1 장 서 론 .....	1
1절 개 요 .....	1
2절 연구목적 및 내용 .....	1
제 2 장 충격 시험 .....	3
1절 개 요 .....	3
2절 시험 목적 .....	3
3절 시험장치 및 방법 .....	4
4절 좌굴 하중 .....	11
5절 시험 결과 .....	11
제 3 장 유한요소 해석 .....	82
1절 개 요 .....	82
2절 유한요소 모델 및 경계조건 .....	82
3절 해석 절차 .....	86
4절 해석 결과 .....	87
제 4 장 결과 및 고찰 .....	100
1절 충격시험에 대한 고찰 .....	100
2절 충격시험 결과와 유한요소 해석결과와의 비교 .....	106
제 5 장 결 론 .....	107
참고문헌 .....	108

## 표 목 차

- 표 2.1 Geometry of 4 kinds of the 3×3 cell grid specimens
- 표 2.2 Geometry of 4 kinds of the 5×5 cell grid specimens
- 표 3.1 Material properties for dynamic impact analysis
- 표 4.1 Comparisons of the critical impact force of 3×3 cell grid by impact test
- 표 4.2 Comparisons of the critical impact velocity of 3×3 cell grid by impact test
- 표 4.3 Comparisons of the critical impact force of 5×5 cell grid by impact test
- 표 4.4 Comparisons of the critical impact velocity of 5×5 cell grid by impact test
- 표 4.5 Comparison results between test and analysis of H type 3×3 cell grid
- 표 4.6 Comparison results between test and analysis of H type 5×5 cell grid

## 그림 목 차

- 그림 2.1 Free fall shock machine
- 그림 2.2 Schematic view of data acquisition and analysis program
- 그림 2.3 Schematic view for impact velocity calculation
- 그림 2.4 Impact velocity as drop height
- 그림 2.5 Configuration of KOFA type 3×3 cell grid
- 그림 2.6 FRF data of KOFA type 3×3 cell grid(No. 1) by free fall test
- 그림 2.7 FRF data of KOFA type 3×3 cell grid(No. 2) by free fall test
- 그림 2.8 FRF data of KOFA type 3×3 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.9 FRF data of KOFA type 3×3 cell grid(No. 4) by free fall test
- 그림 2.10 Impact test results of KOFA type 3×3 cell grid
- 그림 2.11 Configuration of Doublet type 3×3 cell grid
- 그림 2.12 FRF data of Doublet type 3×3 cell grid(No. 1) by free fall test

- 그림 2.13 FRF data of Doublet type 3×3 cell grid(No. 2) by free fall test
- 그림 2.14 FRF data of Doublet type 3×3 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.15 Impact test results of Doublet type 3×3 cell grid
- 그림 2.16 Configuration of Swirl type 3×3 cell grid
- 그림 2.17 FRF data of Swirl type 3×3 cell grid(No. 1) by free fall test
- 그림 2.18 FRF data of Swirl type 3×3 cell grid(No. 2) by free fall test
- 그림 2.19 FRF data of Swirl type 3×3 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.20 FRF data of Swirl type 3×3 cell grid(No. 4) by free fall test
- 그림 2.21 Impact test results of Swirl type 3×3 cell grid
- 그림 2.22 Configuration of H type 3×3 cell grid
- 그림 2.23 FRF data of H type 3×3 cell grid(No. 1) by free fall test
- 그림 2.24 FRF data of H type 3×3 cell grid(No. 2) by free fall test
- 그림 2.25 FRF data of H type 3×3 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.26 FRF data of H type 3×3 cell grid(No. 4) by free fall test
- 그림 2.27 Impact test results of H type 3×3 cell grid
- 그림 2.28 Configuration of Swirl type 5×5 cell grid
- 그림 2.29 FRF data of Swirl type 5×5 cell grid(No. 1) by free fall test
- 그림 2.30 FRF data of Swirl type 5×5 cell grid(No. 2) by free fall test
- 그림 2.31 FRF data of Swirl type 5×5 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.32 FRF data of Swirl type 5×5 cell grid(No. 4) by free fall test
- 그림 2.33 Impact test results of Swirl type 5×5 cell grid
- 그림 2.34 Configuration of H type 5×5 cell grid
- 그림 2.35 FRF data of H type 5×5 cell grid(No. 1) by free fall test
- 그림 2.36 FRF data of H type 5×5 cell grid(No. 2) by free fall test



- 그림 2.37 FRF data of H type 5×5 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.38 FRF data of H type 5×5 cell grid(No. 4) by free fall test
- 그림 2.39 Impact test results of H type 5×5 cell grid
- 그림 2.40 Configuration of Dipper type 5×5 cell grid specimen
- 그림 2.41 FRF data of Dipper type 5×5 cell grid(No. 1) by free fall test
- 그림 2.42 FRF data of Dipper type 5×5 cell grid(No. 2) by free fall test
- 그림 2.43 FRF data of Dipper type 5×5 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.44 FRF data of Dipper type 5×5 cell grid(No. 4) by free fall test
- 그림 2.45 Impact test results of Dipper type 5×5 cell grid
- 그림 2.46 Configuration of Multi-spring type 5×5 cell grid
- 그림 2.47 FRF data of Multi-spring type 5×5 cell grid(No. 1) by free fall test
- 그림 2.48 FRF data of Multi-spring type 5×5 cell grid(No. 2) by free fall test
- 그림 2.49 FRF data of Multi-spring type 5×5 cell grid(No. 3) by free fall test
- 그림 2.50 FRF data of Multi-spring type 5×5 cell grid(No. 4) by free fall test
- 그림 2.51 Impact test results of Multi-spring type 3×3 cell grid
- 그림 2.52 Impact velocity profile by impact test
- 그림 3.1 FE model of H type specimen for dynamic analysis
- 그림 3.2 Boundary condition for dynamic analysis
- 그림 3.3 Impact force of H type 3×3 cell grid by dynamic analysis
- 그림 3.4 Impact force of H type 3×3 cell grid by dynamic analysis
- 그림 3.5 von Mises equivalent stress contour of H type 3×3 cell grid
- 그림 3.6 Equivalent plastic strain contour of H type 3×3 cell grid
- 그림 3.7 Impact mode shape of H type 3×3 cell grid
- 그림 3.8 Impact force of H type 5×5 cell grid by dynamic analysis

- 그림 3.9 Impact force of H type 5×5 cell grid by dynamic analysis
- 그림 3.10 von Mises equivalent stress contour of H type 5×5 cell grid
- 그림 3.11 Equivalent plastic strain contour of H type 5×5 cell grid
- 그림 3.12 Impact mode shape of H type 5×5 cell grid
- 그림 3.13 Critical impact force of H type 3×3 cell grid by dynamic analysis
- 그림 3.14 Comparison of critical impact velocity of H type 3×3 cell grid
- 그림 4.1 Comparison result of impact force of H type 3×3 cell grid
- 그림 4.2 Duration time of H type 3×3 cell grid by impact test
- 그림 4.3 Comparison result of impact force of H type 5×5 cell grid
- 그림 4.4 Duration time of H type 5×5 cell grid by impact test

## 사진목차

- 사진 2.1 Impact buckling mode shape of KOFA type 3×3 cell grid
- 사진 2.2 Impact buckling mode shape of Doublet type 3×3 cell grid
- 사진 2.3 Impact buckling mode shape of Swirl type 3×3 cell grid
- 사진 2.4 Impact buckling mode shape of H type 3×3 cell grid
- 사진 2.5 Impact buckling mode shape of Swirl type 5×5 cell grid
- 사진 2.6 Impact buckling mode shape of H type 5×5 cell grid
- 사진 2.7 Impact buckling mode shape of Dipper type 5×5 cell grid
- 사진 2.8 Impact buckling mode shape of Multi-spring type 5×5 cell grid

# 제 1 장 서 론

## 1절 개 요

경수로용 핵연료집합체에서 지지격자는 연료봉들이 횡방향 및 종방향으로 정위치를 유지하도록 하여 연료봉간의 수로가 보장되도록 하며, 또한 핵연료집합체가 하나의 지지구조물을 형성하게 하는 핵심 구조부품이다[1]. 고성능지지격자 구조기술개발 과제에서는 연료봉 지지부위에서 연료봉의 프레팅 마모를 억제시킬 수 있고 또한 연료봉에서 발생된 열을 냉각수로 효과적으로 전달시킬 수 있는 지지격자의 형상을 개발중에 있다. 개발한 4가지 형상과 KOFA형상의 지지격자에 8종에 대한 기계/구조적 성능을 비교 평가하고 이를 토대로 기계/구조적 성능이 더욱 향상된 고유의 지지격자 모델을 정립하고자 이들 형상의 지지격자 시편에 대한 기계/구조적 특성시험을 수행하였다. 참고문헌 2에 따르면 외국의 핵연료 선도업체들은 지지 격자판의 기계적 성능, 즉 스프링 및 덤플의 특성시험과 지지격자의 정적 좌굴 및 동적 충격시험을 통하여 개발된 지지격자의 기계/구조적 성능을 평가하여 왔다.

따라서 본 보고서에서는 지지격자체의 측면 충격하중에 의한 좌굴거동을 해석하기 위해 자유낙하식 충격시험을 수행하였고, 이를 유한요소법을 적용하여 비선형 충격해석을 수행한 결과와 비교 검증하였다. 또한 여러 가지 형태의 시편과 3×3 셀 및 5×5 셀을 갖는 부분 격자체 모델을 작성하여 좌굴에 영향을 미치는 인자들을 해석을 통하여 파악하고자 하였다.

## 2절 연구목적 및 내용

여러 형태의 기하학적 형상을 갖는 지지격자체의 충격 시험을 수행하여 좌굴하중을 구하였으며, 시험 결과와 유한요소법을 사용하여 동적 충격해석을 수행한 결과와 비교하여 그 유용성을 확인하였다. 충격시험은 자유낙하식 충격시험기에서 측면방향의 충격거동을 파악하기 위해 정해진 중량을 갖는 충격해머를 일정한 높이에서부터 점차로 낙하높이를 증가시키면서 충격시험을 수행하여 낙하높이 대 충격력 및 충격 가속도를 측정하는 시험장치를 사용하였다. 이때 격자구조물이 감당할 수 있는 충격력이 비교적 작은 셀을 갖는 시편의 경우 충격해머의 중량이 상대적으로 지나치게 커 매우 작은 높이에서의 낙하에도 좌굴이 발생하였다. 따라서 해머의 상단에 스프링으로 된 덤플을 부착하여 충격속도가 감속되도록 하였다. 또한 이 충격시험을 모사할 수 있는 동적 충격해석은 시편과 동일한 기하학적 형상을 갖는 모델의 상부에 이

모델의 상부 면에 충격해머의 질량과 동일한 질량을 갖도록 질량 요소를 강제면(rigid surface)의 중앙 절점에 정의한 후 이 강제 면과 지지격자체의 상부 면을 접촉시키고 이 강제 면에 초기 속도로 충격을 가하도록 하여 충격속도 대 충격력 및 좌굴 모드를 구하였다.

## 제 2 장 충격시험

### 1절 개요

충격의 측정은 충격시 전체 작용시간(duration)에 걸쳐 충격 파라미터의 시간-이력(time-history)이다. 충격 파라미터는 운동(가속도, 속도나 변위 같은) 혹은 하중(힘, 압력, 응력이나 토크)으로 정의될 수 있다. 이것은 계측(instrumentation)으로부터 왜곡(distortion)된 결과를 제거하기 위해 어떤 보정(correction)이 필요하게 된다. 하중 경로(path)는 펄스일 수도 혹은 천이 진동(transient vibration)일 수도 있다. 종종, 운동이나 하중의 시간-이력 형태의 충격 측정은 직접적으로는 유용하지 않을 때도 있다. 따라서 이것을 다른 형태로의 변환이 필요하게 되며, 데이터 변환의 형태는 데이터의 기본적인 사용에 따라 달라진다.

시험적으로 결정된 것과 기록된 시간-이력의 비교를 통해 이론적으로 예측된 결과와의 상관식(correlation)을 결정하는 것은 어렵다. 일반적으로, 이것은 실험적으로 얻은 결과들에 영향을 미칠 수 있는 모든 효과들을 고려하기란 이론적 해석에 있어서는 비 현실적이다. 예를 들면, 측정된 충격 신호들에 종종 부착된 충격 측정장치가 구조물 고유의 응답에 포함되기 때문이다. 그래서 측정된 데이터의 변환은 이론과 시험의 유사한 경향을 비교할 수 있도록 측정된 데이터의 부적절함을 최소화하거나 제거하는데 유용하다. 이것은 종종 원래 시간-이력의 데이터에 대해 비교하기가 불가능할 수도 있다.

### 2절 시험 목적

측면에서의 충격하중에 의한 지지격자체의 충격특성(임계 좌굴하중, 좌굴 모드 및 반발계수)을 구하여 외부 하중(지진하중이나 충격하중과 같은)에 따른 구조물의 좌굴 거동을 파악하고자 하였다. 격자구조물의 좌굴 특성을 파악하기 위한 시험방법은 여러 형태가 있을 수 있으나 충격시험을 위한 신호의 신뢰성 및 안정성 측면을 고려하여 자유낙하 형태의 충격시험을 수행하였다. 지지격 자체는 그 격자의 수 및 크기에 따라 충격량도 달라지게 되므로 해머의 중량을 변화시켜야 하나 시험장비의 구조상 해머의 중량을 가변으로 하는 것은 제약이 있어 해머의 상부에 스프링 댐퍼를 부착하여 충격 속도를 완화할 수 있도록 하였다.

본 보고서에서는 측면에서 충격하중을 받는 지지격 자체의 충격시험을

위해 자유낙하 형태의 충격시험기를 설정하였다. 자유낙하 높이가 높아짐에 따라 충격속도가 커지므로 일정한 높이에서 충격시험을 시작하여 낙하높이를 증가시키면서 시편으로부터 얻는 충격량이 이전의 단계에서보다 작아질 때까지, 즉 격자체에 좌굴현상이 발생할 때까지 이러한 시험과정을 반복하였다.

### 3절 시험장치 및 방법

#### 1. 시험 장치

유한요소 해석 결과를 고려하여 초기 해머의 자유낙하 높이를 설정하였다. 자유낙하 형태의 충격시험기[3]를 그림 2.1에 나타내었으며, 이 시험기는 충격 시험 시나 지진 시에도 바닥면으로부터 전달되는 노이즈를 제거할 수 있도록 견고히 고정하였다. 이 시험기의 상부 구조물은 두 개의 안내봉(guide rods)과 두 개의 지지 기둥(support column)이 기준면으로부터 직립으로 세워져 있다. 시험 목적상 왕복대(carriage)나 시편 고정치구는 두 개의 안내봉 사이에 위치해 있다. 이 왕복대는 일체형으로 된 알루미늄 주조품이며 최소 중량 하에서도 최대의 견고성을 갖도록 강체(rigid) 형상으로 되어 있다. 왕복대의 공진주파수는 진동신호가 울리는 현상(ringing)을 방지하기 위하여 최소의 펄스 신호에 네 배에서 열 배 사이의 값으로 하였다. 왕복대의 순수 질량은 20.43 kg이며, 크기는 254 × 254 mm이고, 최대 낙하 높이는 1676.4 mm이다. 충격가속도는 최대 4000 g 까지 이다. 충격력의 측정은 충격시 시편으로부터 직접 힘 변환기(force transducer)를 사용하여 충격력을 얻는 방법과 스트레인 게이지(strain gauge)를 사용하여 충격시 시편으로부터의 변형률을 측정하는 방법이 있다. 힘 변환기를 사용하는 방법은 적용하기가 쉬우나 충격력에 대해 제한이 있으며, 스트레인 게이지를 사용하는 방법은 하중 신호값에 대한 선형성을 점검할 필요가 있는 예비시험에 사용하나 신호에 대한 검증(verification)이 어렵고 적용하기가 곤란한 점이 있다. 따라서 본 시험에서는 적용성이 용이하며, 신호에 대한 확인이 상대적으로 쉬운 점을 고려하여 힘 변환기를 왕복대의 하부, 즉 시편과 충돌하는 면, 에 부착하는 방법을 적용하였다. 힘 변환기는 격자구조물의 비선형 동적 충격해석으로부터 구한 최대 충격력을 고려하여 RION사의 모델 PF-31을, 가속도계는 시험시의 충격 가속도 범위를 고려하여 충격시험용인 ENDEVCO사의 모델 2225를 선정하였다.

충격시험의 초기 높이는 에너지 보존의 원리(energy conservation law)와 계의 힘 평형 원리(force equilibrium)로부터 구한 충격속도를 자유높이로 환산하여 설정하였다. 충격력은 좌굴이 발생하기 전까지는 자유낙하 높이에

따라 증가하게 되므로 초기높이로부터 6.35 mm씩 증가하면서 충격신호를 저장하고 이전의 단계에서보다 충격력이 감소하는 높이까지 시험을 수행하였다. 시험을 위한 소프트웨어는 I-STAR[4]를 사용하였으며, 저장된 시험 데이터는 시험 및 해석 데이터 분석을 위한 FEMtools[5]로 분석을 수행하였다. 이 자유낙하 충격시험시 시험의 수행, 데이터의 수집 및 저장을 위한 전체 시스템의 개략을 그림 2.2에 나타내었다.

## 2. 시험 절차

자유낙하형태의 충격시험 절차는 다음과 같다.

- 1) 왕복대, 힘 변환기 및 가속도계를 포함한 이동 질량(moving mass)을 기록한다.
- 2) 왕복대를 들어 올리고 시편을 고정할 공간을 확보한다.
- 3) 시험기의 전원을 차단한다.
- 4) 시편을 고정치구에 고정한다.
- 5) 시편을 왕복대의 중심선과 정확히 일치시킨다.
- 6) 힘 변환기 케이블을 앰프에 연결한다.
- 7) 데이터 저장 시스템을 기동한다.
- 8) 시편의 고정상태를 확인한다.
- 9) 시험기의 전원을 켜다.
- 10) 이동 질량을 초기 낙하높이로 들어올린다.
- 11) 이동 질량을 자유낙하 시킨다.
- 12) 충격력 대 시간의 그래프를 얻는다.
- 13) 최대 충격력과 자유낙하 높이를 기록한다.
- 14) 초기 낙하높이를 정해진 단계만큼 증가시킨 후 단계 10)에서 13)까지를 반복하여 충격력이 이전 단계에서 보다 작아질 때까지 반복한다.

고정치구로부터 시편을 분리하고 데이터 시트에 좌굴 발생위치를 기록한다. 이 시험에서 충격시험기로부터 충격속도  $v$ 는 에너지 보존의 원리와 계의 힘 평형 원리로부터 구할 수 있다. 그림 2.3에서,

$$\begin{aligned}
 & -mg(x_0 - l) + \frac{1}{2}k(x_0 - l)^2 \\
 & = \frac{1}{2}mv^2 - mg(x_0 + h) + \frac{1}{2}k(x_0 + h)^2
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

계의 힘 평형으로부터

$$mg = kx_0 \tag{2.2}$$

이 식을 식 (2.1)에 대입하면

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(l^2 - h^2)} \quad \text{or} \quad \omega_n \sqrt{l^2 - h^2} \tag{2.3}$$

여기서	m	왕복대의 이동 질량
	g	중력가속도
	x <sub>0</sub>	스프링 댐퍼의 자유길이
	l	초기 왕복대의 높이
	h	에너지 평형시의 왕복대 높이
	v	충격속도
	k	스프링 댐퍼의 스프링 상수
	ω <sub>n</sub>	계의 고유진동수 (여기서의 고유진동수는 1.27)

최종적으로, 왕복대가 시편에 충격을 가할 때의 충격속도는 식 (2.3)으로부터 구할 수 있다. 충격시 충격속도를 구할 수 있는 식 (2.3)을 사용하여 자유낙하 높이 대 충격속도의 변화를 그림 2.4에 나타내었다.



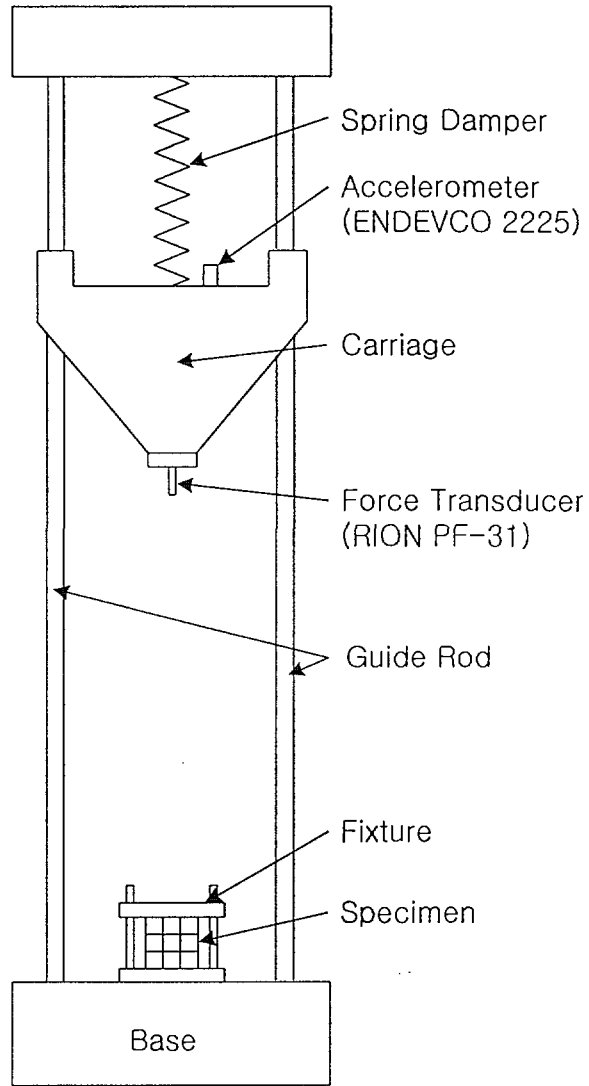


그림 2.1 Free fall shock machine

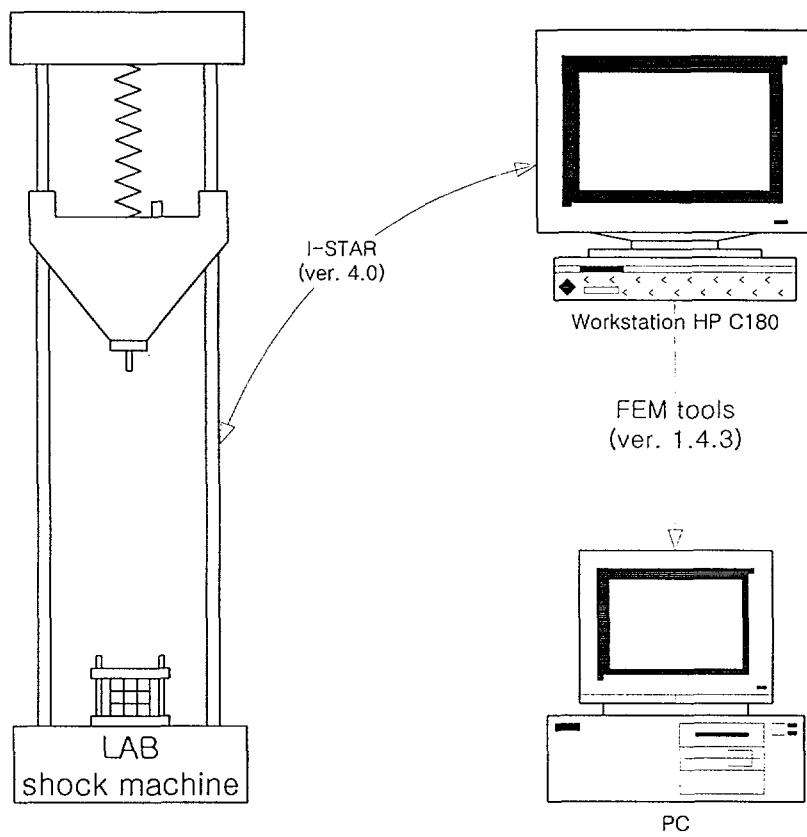


그림 2.2 Schematic view of data acquisition and analysis program

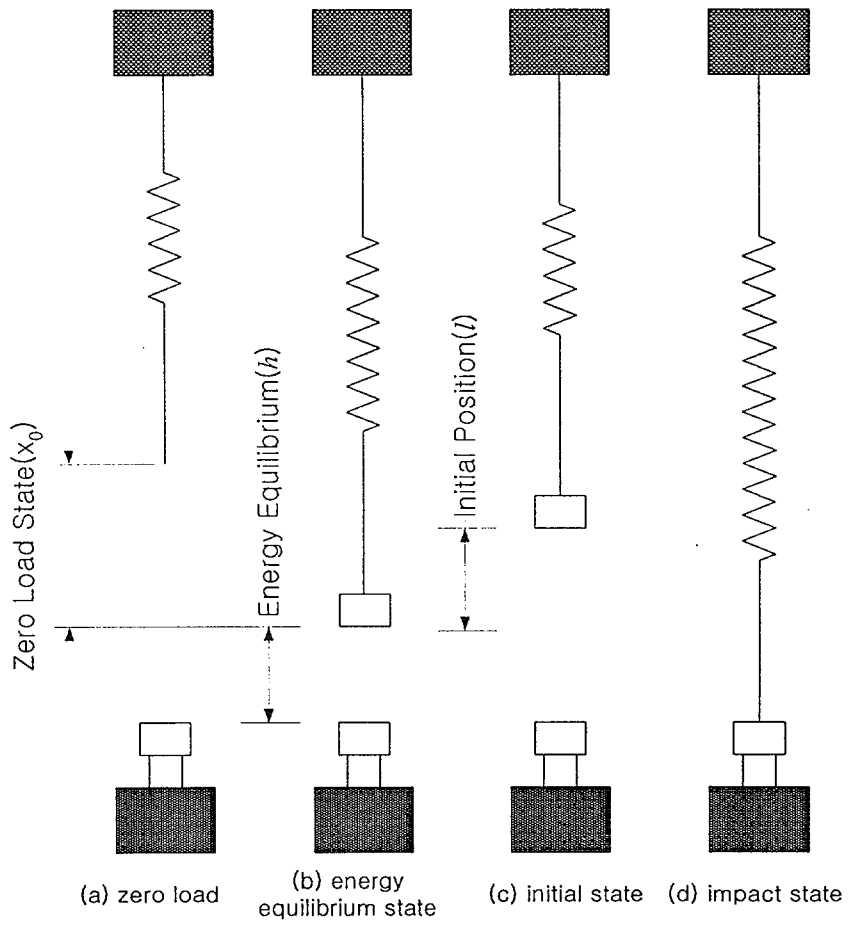


그림 2.3 Schematic view for impact velocity calculation

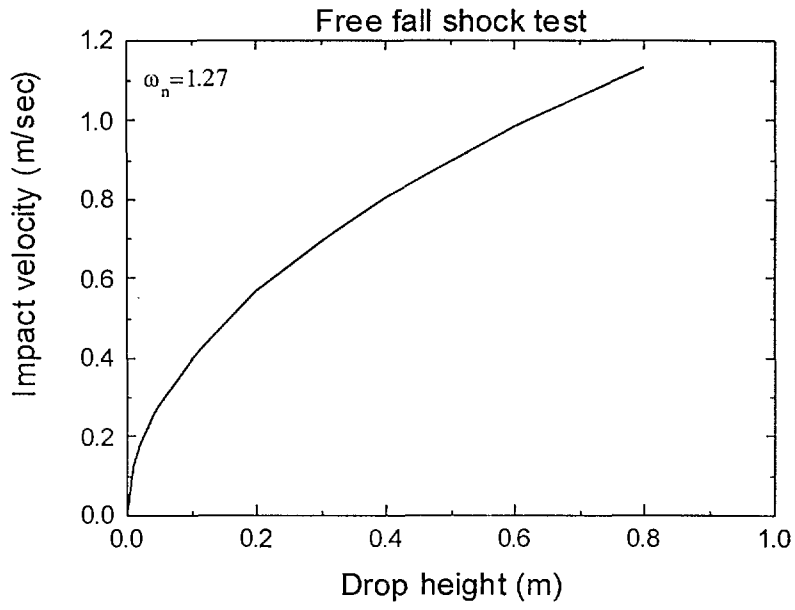


그림 2.4 Impact velocity as drop height

#### 4절 좌굴 하중

일반적으로 좌굴이라 하면 외력을 받고 있는 구조물이 돌연 붕괴(collapse)되는 것으로 인식하고 있으며, 따라서 대변형과 갑작스러운 구조물의 파괴를 연상하게 된다. 그러나 과학적 혹은 공학적 관점에서 보면 좌굴현상은 구조물이 크게 변형되지 않거나 또는 미소 변형되었을 때, 즉 변형이 아주 커지기 전에 일반적으로 발생하게 된다. 쉘 구조물에 어떤 하중이 가해지는 경우, 이 하중을 아주 작게 증가시켰음에도 쉘의 평형상태가 불평형 상태에 이르게 되면 이 하중을 좌굴하중이라 한다. 평형상태가 깨지게 되면 처짐(deflection)이 크게 증가하게 되고, 쉘의 형상은 초기의 형상에서 변화가 생길 수도 있고 혹은 그렇지 않을 수도 있다. 때로는 주어진 좌굴의 의미가 실제 구조물에 적용하기 어려울 때도 있고, 쉘 형상의 변화는 아주 점진적(gradual)일 수도 있으며, 실제 좌굴이 발생하는 위치는 상당히 임의적(arbitrary)이다. 그러나 대부분 쉘의 기하학적 형상과 하중조건에 대해서 좌굴하중은 분명하고 구별하기가 용이하다.

#### 5절 시험 결과

##### 1. 3×3 셀 격자 시편

3×3 셀 지지격자의 시편은 그 기하학적 형상이 서로 다른 네 가지 형태의 시편을 두께 0.6 mm의 스테인레스강 판으로 성형(forming)하여 격자판 형태를 만들고 이들을 서로 엇갈리도록 끼운 후 이들의 교차 부위를 레이저 용접하여 제조하였다. 이들은 그 기하학적 형상의 균일성을 얻기 위해 비접촉식 3차원 측정기를 사용하여 시편 주요 부위의 치수를 정밀 측정하였다. 이들 각 시편의 기하학적 데이터를 표 2.1에 요약하였다. 시험 데이터의 평가를 위해 네 가지 3×3 셀 지지격자 시편 4개씩 충격시험을 행하였다. 시험 데이터는 FEMtools를 통하여 분석을 하였다.

표 2.1 Geometry of 4 kinds of the 3×3 cell grid specimens

Classification	Thickness (mm)	Height (mm)	Cell Size (mm)	Width (mm)
KOFA Type	0.6	53.0	12.8	38.4
Doublet Type	0.3×2	35.0	12.8	38.4
Swirl Type	0.6	39.0	12.8	38.4
H Type	0.6	35.0	12.8	38.4

그림 2.5와 같은 KOFA형 시편의 경우, 충격시의 유지시간(duration time)은 좌굴이 발생하기 전까지는 6 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 6 msec 보다 긴 8 msec 이었다. 좌굴이 발생한 시점의 평균 자유낙하 높이는 0.06985 m이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.32 m/sec이었다. 충격력의 범위는 3470 N ~ 6916 N이었고, 충격가속도는 13.9 g (136.3 m/sec<sup>2</sup>) ~ 27.2 g (266.8 m/sec<sup>2</sup>) 의 범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.6에서 그림 2.9에 나타내었다. 그림 2.10에는 이들을 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다. 충격력 및 충격가속도는 각 시편에 따라 그 차이가 심하여 이들 3개 시편에 대한 데이터를 산술 평균하여 임계 충격력 및 임계 충격가속도를 결정하였다.

그림 2.11과 같은 이중관 격자체 시편의 경우, 충격시의 유지시간은 좌굴이 발생하기 전까지는 8 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 8 msec 보다 긴 14 msec이었다. 좌굴이 발생한 시점의 평균 자유낙하 높이는 0.0635m이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.30 m/sec이었다. 충격력의 범위는 2340 N ~ 3271 N이었고, 충격가속도는 9.6 g (94.2 m/sec<sup>2</sup>) ~ 13.5 g (132.4 m/sec<sup>2</sup>) 의 범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.12에서 그림 2.14에 나타내었다. 그림 2.15에는 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다.

그림 2.16과 같은 회전유동형 격자체 시편의 경우, 충격시의 유지시간은 좌굴이 발생하기 전까지는 9 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 9 msec 보다 긴 11 msec 이었다. 좌굴이 발생한 시점의 평균 자유낙하 높이는 0.079375m이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.34 m/sec이었다. 충격력의 범위는 3051 N ~ 7606 N이었고, 충격가속도는 12.6 g (123.6 m/sec<sup>2</sup>) ~ 30.4 g (298.2 m/sec<sup>2</sup>) 의 범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.17에서 그림 2.20에 나타내었다. 그림 2.21에는 이들을 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다.

그림 2.22와 같은 H형 격자체 시편의 경우, 충격시의 유지시간은 좌굴이 발생하기 전까지는 7 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 7 msec 보다 긴 9 msec 이었다. 좌굴이 발생한 시점의 평균 자유낙하 높이는 0.08255m 이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.35 m/sec이었다. 충격력의 범위는 3474 N ~ 6402 N이었고, 충격가속도는 14.0 g (137.3 m/sec<sup>2</sup>) ~ 25.8 g (253.1 m/sec<sup>2</sup>) 의

범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.23에서 그림 2.26에 나타내었다. 그림 2.27에는 이들을 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다.

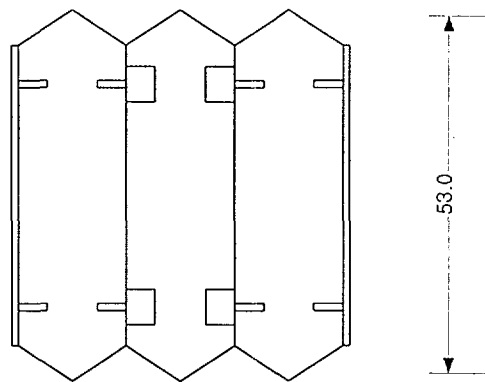
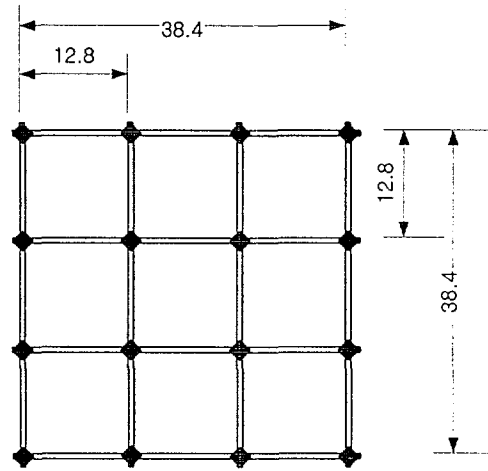
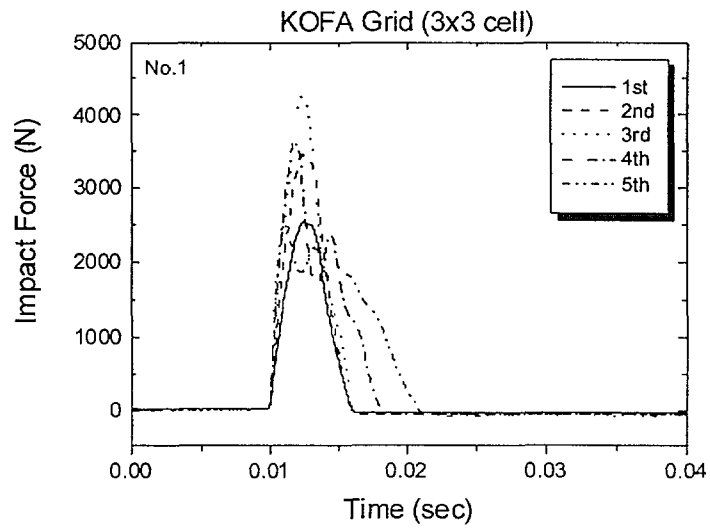
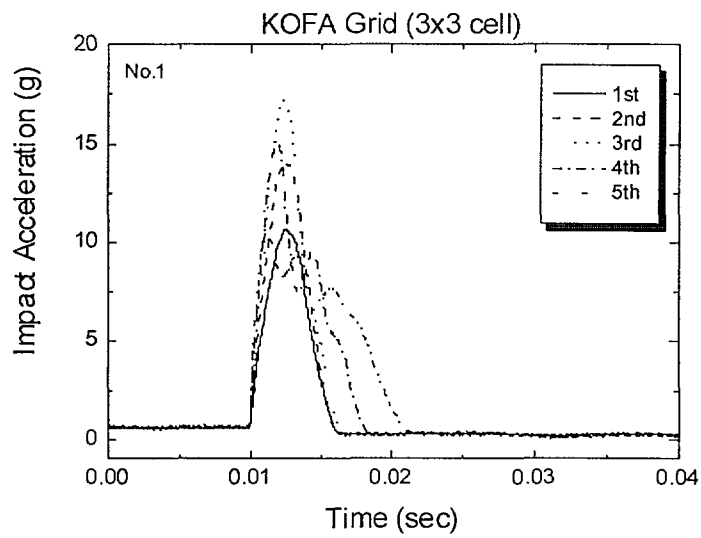


그림 2.5 Configuration of KOFA type 3×3 cell grid



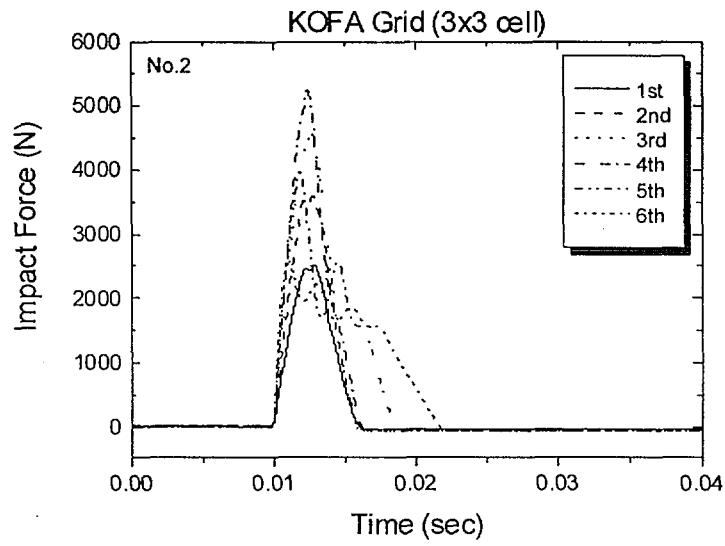


(a) impact force

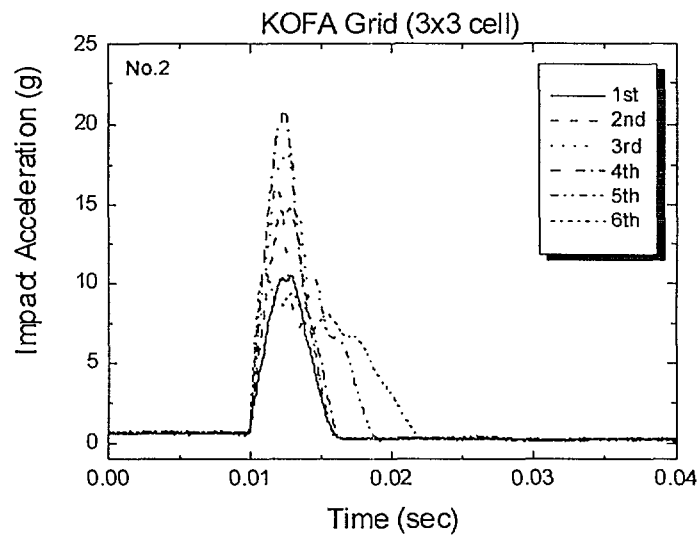


(b) impact acceleration

그림 2.6 FRF data of KOFA type 3x3 cell grid (No. 1) by free fall test

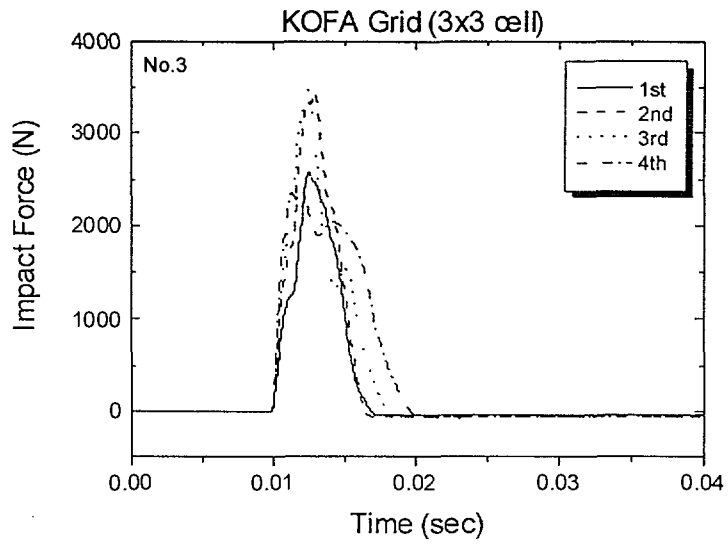


(a) impact force

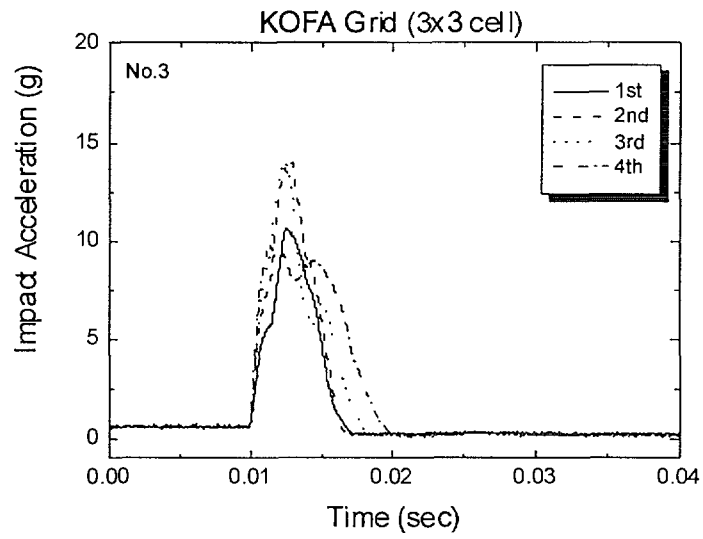


(b) impact acceleration

그림 2.7 FRF data of KOFA type 3x3 cell grid (No. 2) by free fall test

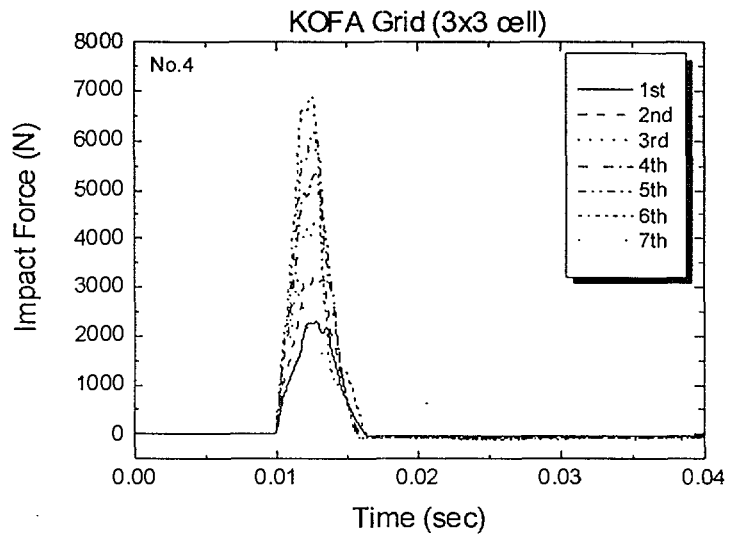


(a) impact force

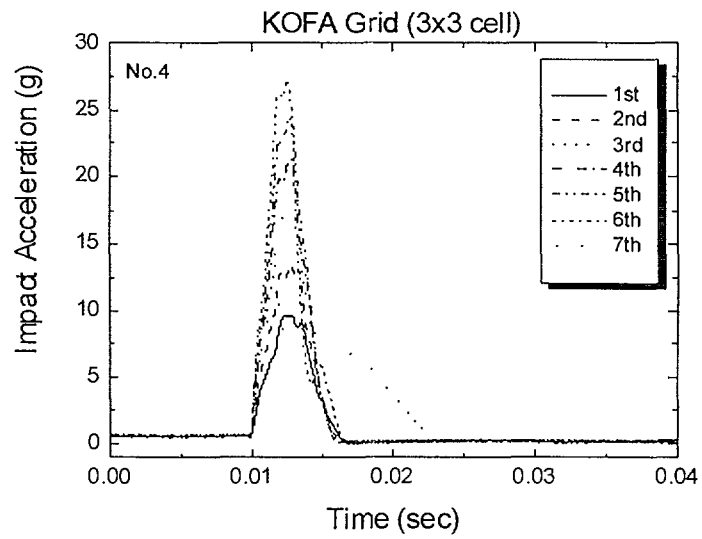


(b) impact acceleration

그림 2.8 FRF data of KOFA type 3x3 cell grid (No. 3) by free fall test

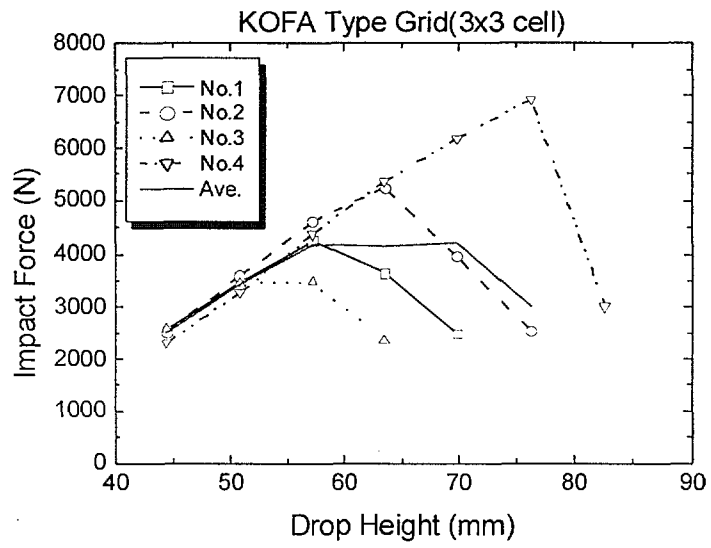


(a) impact force

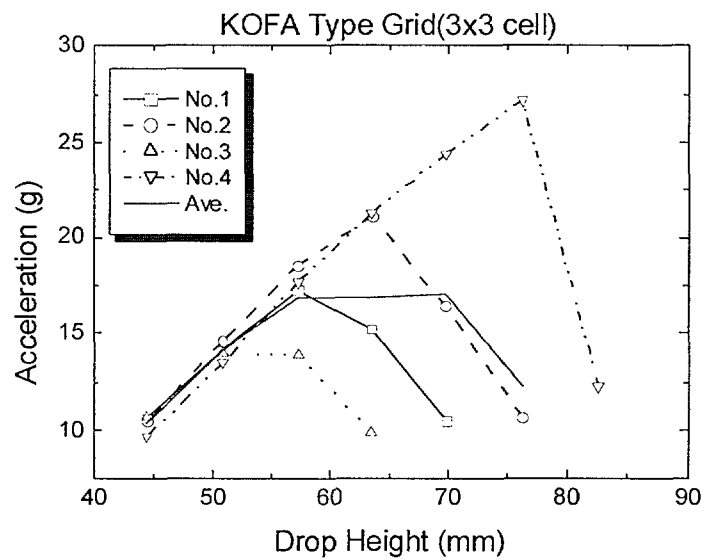


(b) impact acceleration

그림 2.9 FRF data of KOFA type 3x3 cell grid (No. 4) by free fall test



(a) impact acceleration



(b) impact acceleration

그림 2.10 Impact test results of KOFA type 3x3 cell grid

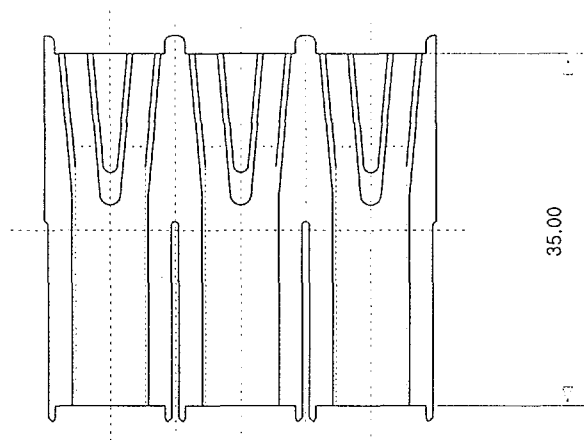
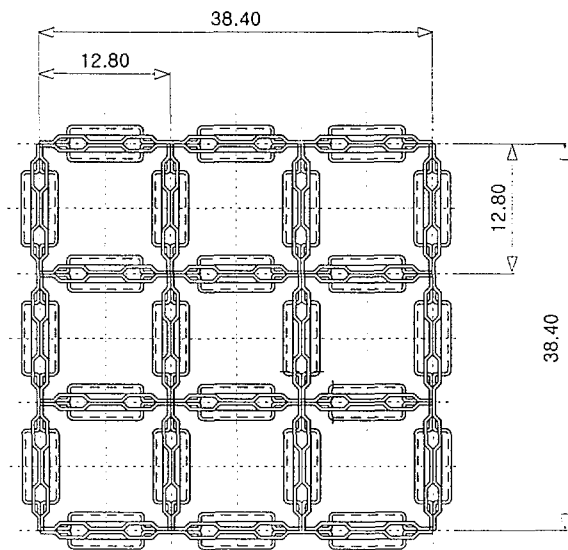
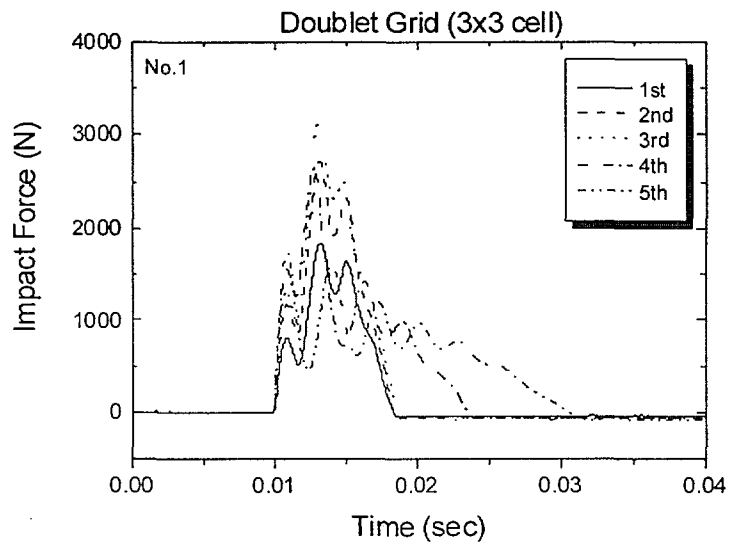
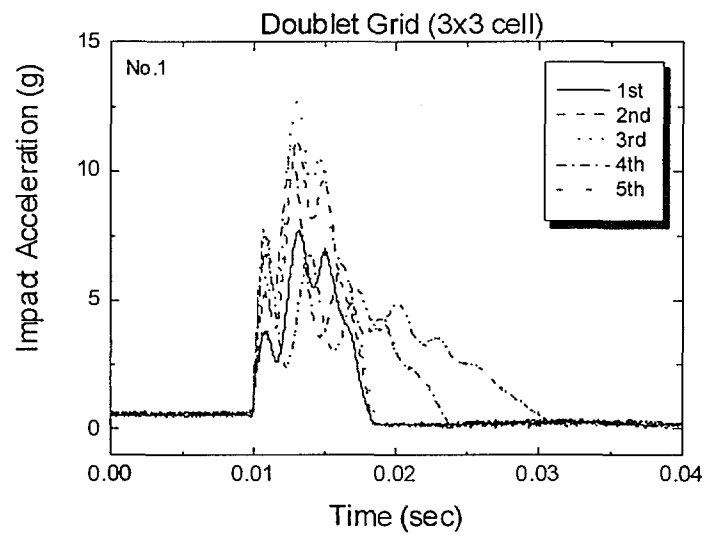


그림 2.11 Configuration of Doublet type 3x3 cell grid

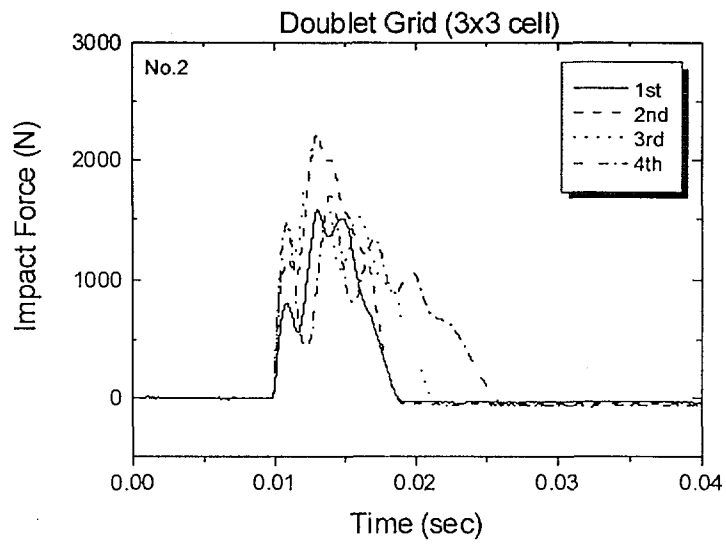


(a) impact force

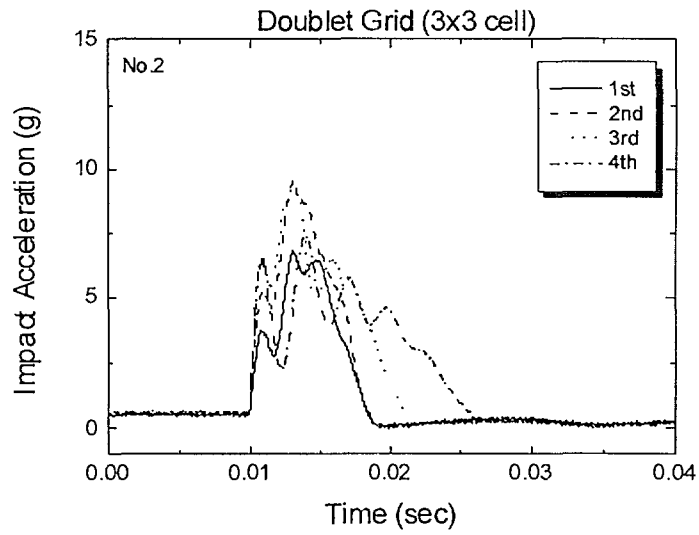


(b) impact acceleration

그림 2.12 FRF data of Doublet type 3×3 cell grid (No. 1) by free fall test



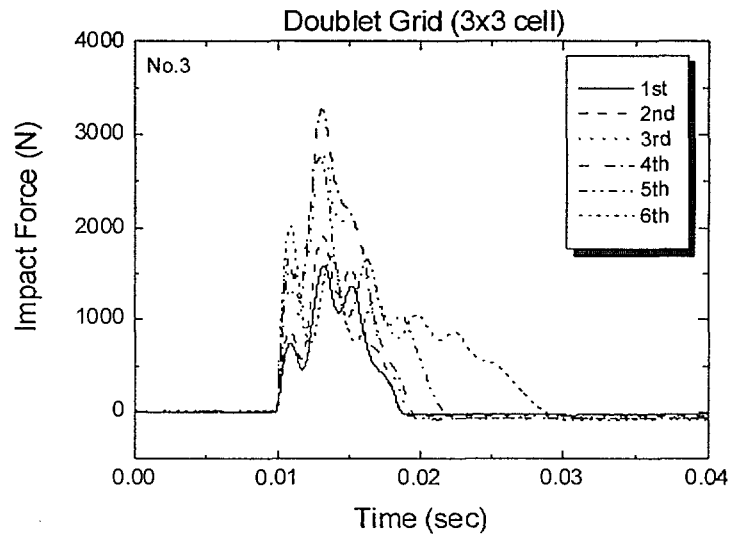
(a) impact force



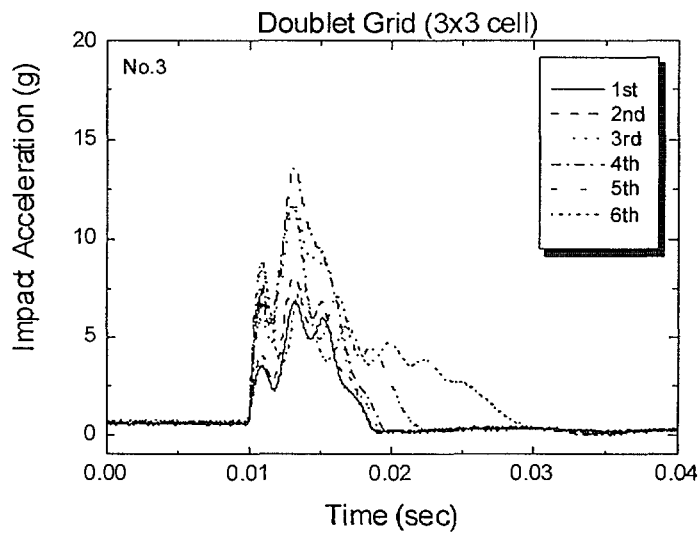
(b) impact acceleration

그림 2.13 FRF data of Doublet type 3×3 cell grid (No. 2) by free fall test



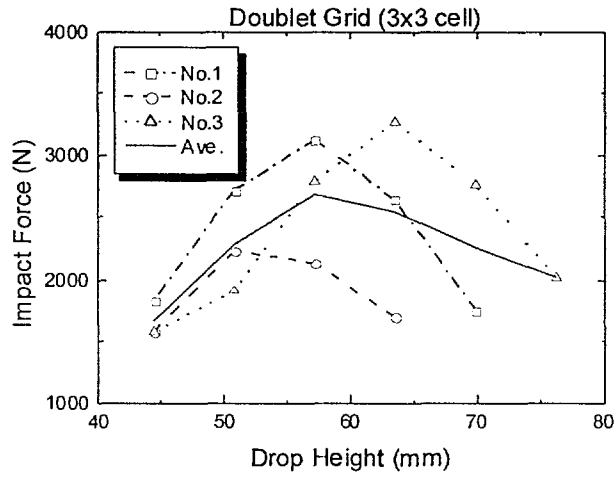


(a) impact force

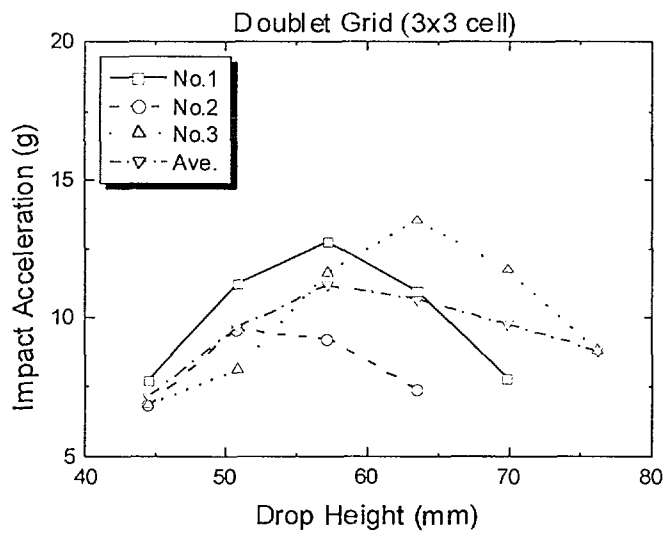


(b) impact acceleration

그림 2.14 FRF data of Doublet type 3×3 cell grid (No. 3) by free fall test



(a) impact force



(b) impact acceleration

그림 2.15 Impact test results of Doublet type 3×3 cell grid

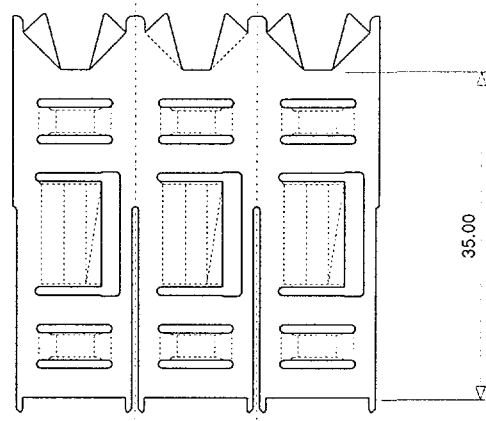
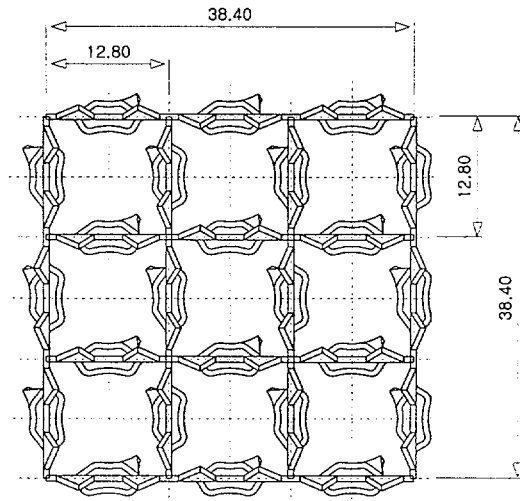
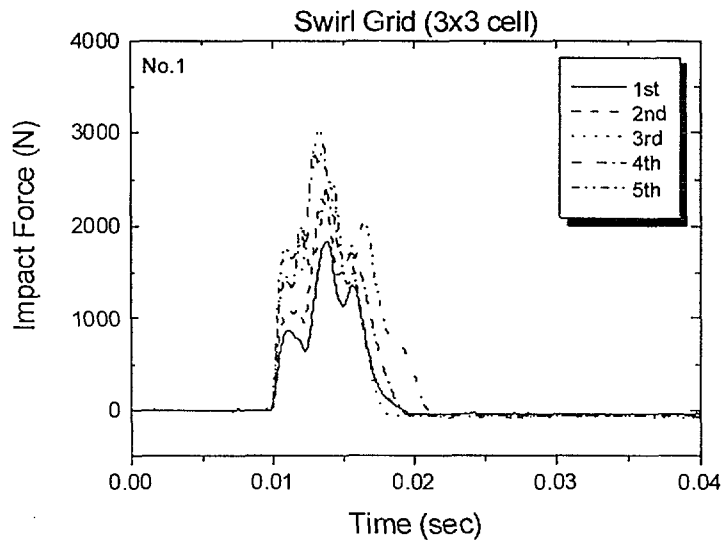
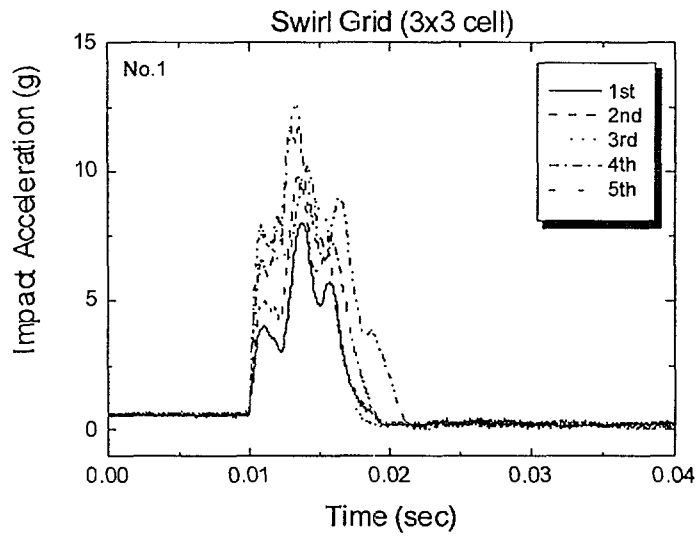


그림 2.16 Configuration of Swirl type 3×3 cell grid

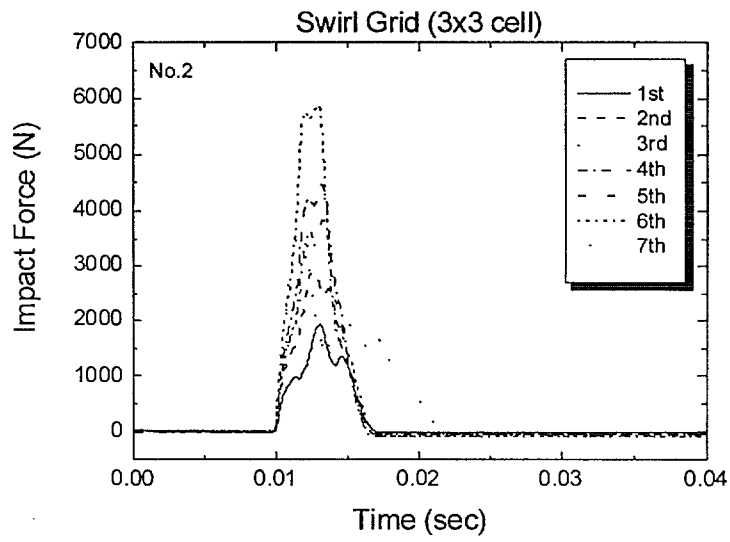


(a) impact force

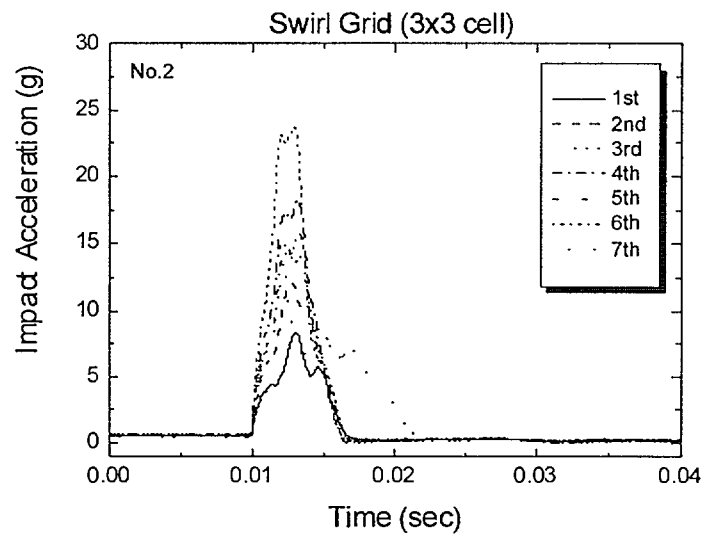


(b) impact acceleration

그림 2.17 FRF data of Swirl type 3x3 cell grid (No. 1) by free fall test

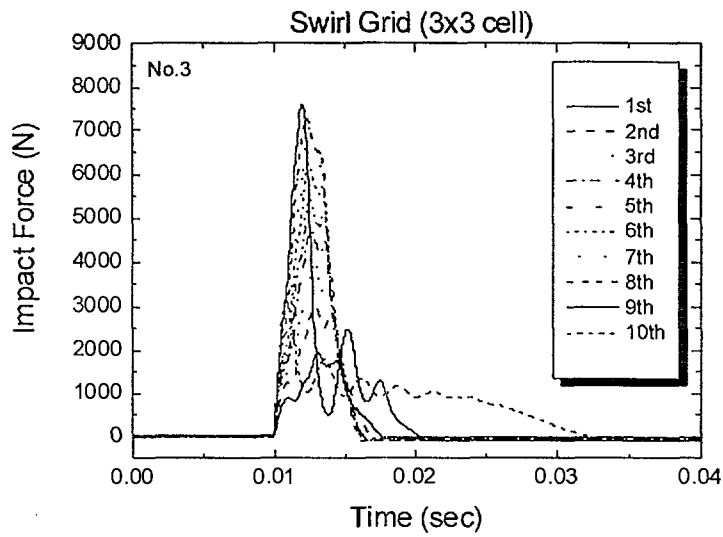


(a) impact force

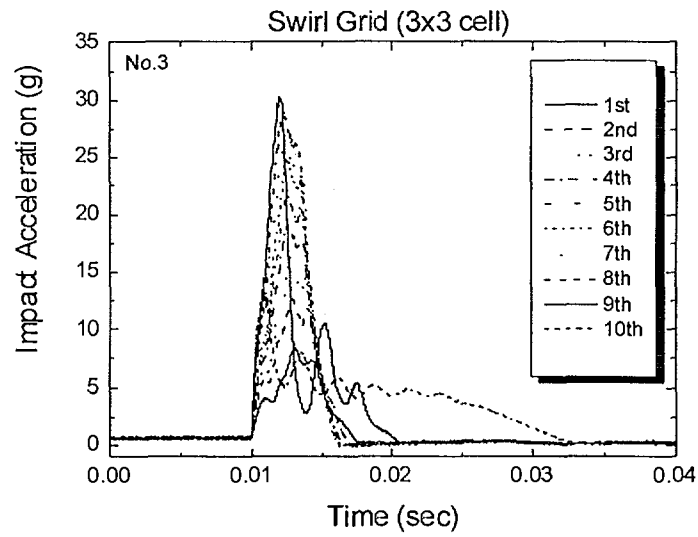


(b) impact acceleration

그림 2.18 FRF data of Swirl type 3x3 cell grid (No. 2) by free fall test

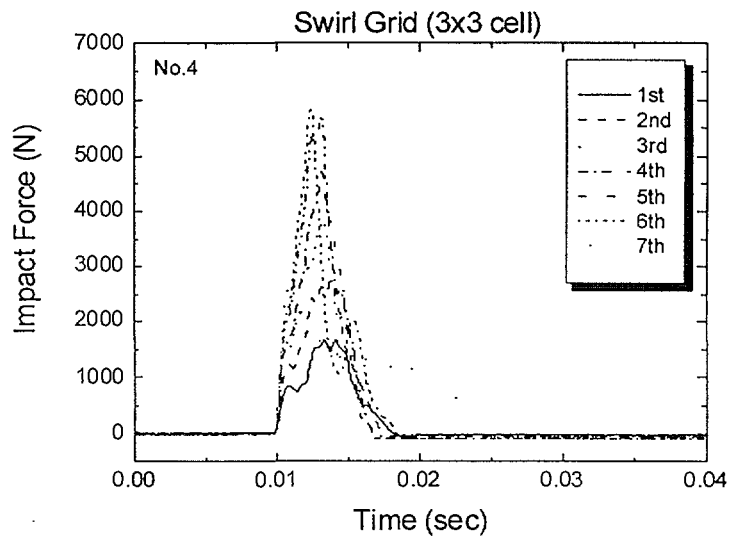


(a) impact force

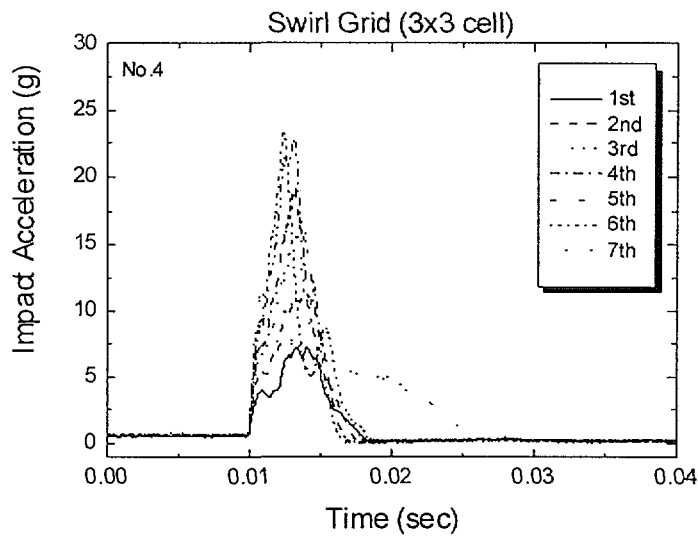


(b) impact acceleration

그림 2.19 FRF data of Swirl type 3×3 cell grid (No. 3) by free fall test

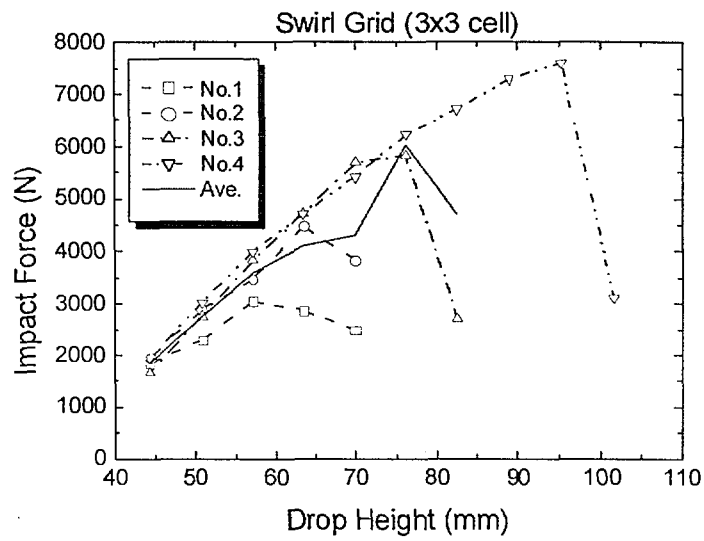


(a) impact force

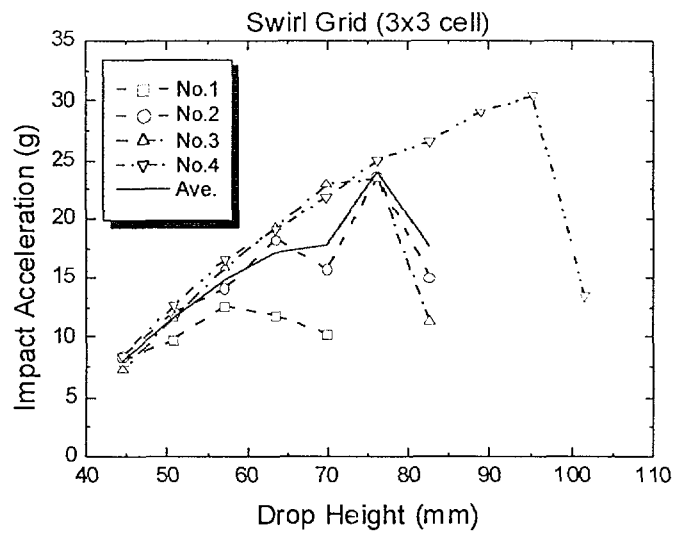


(b) impact acceleration

그림 2.20 FRF data of Swirl type 3x3 cell grid (No. 4) by free fall test



(a) impact force



(b) impact acceleration

그림 2.21 Impact test results of Swirl type 3×3 cell grid



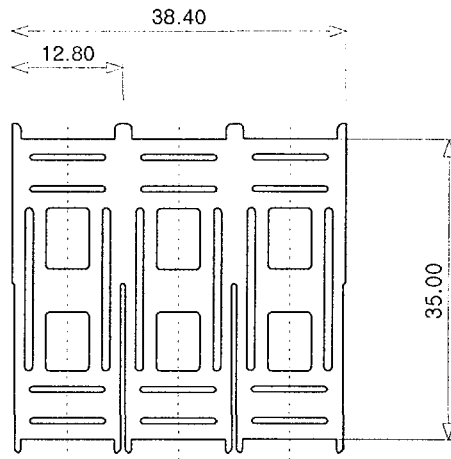
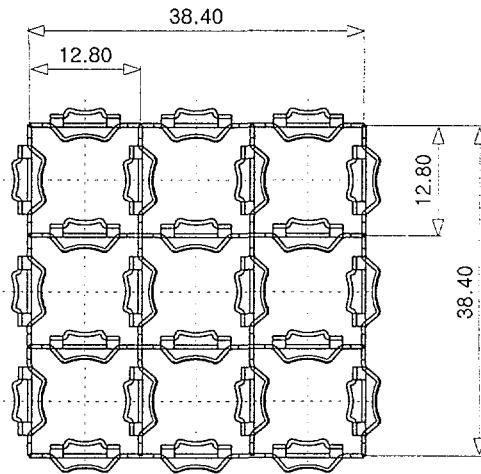
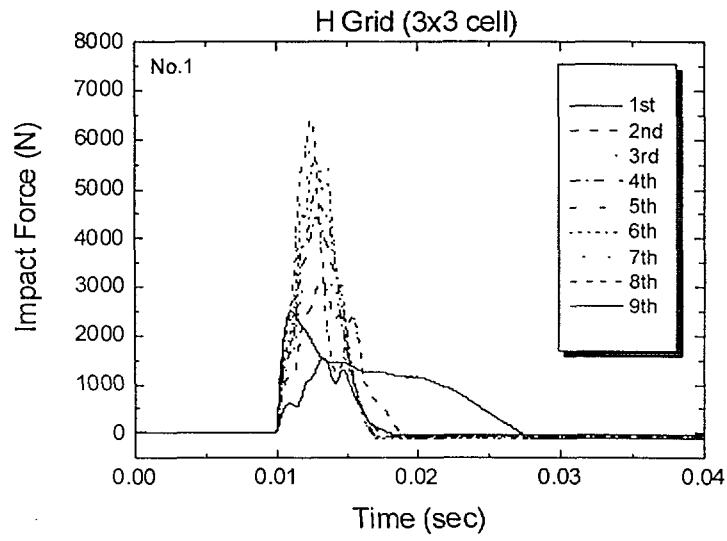
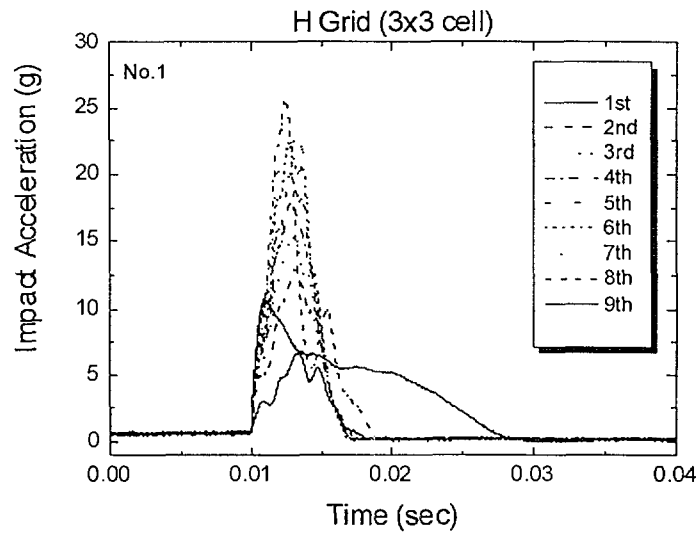


그림 2.22 Configuration of H type 3×3 cell grid

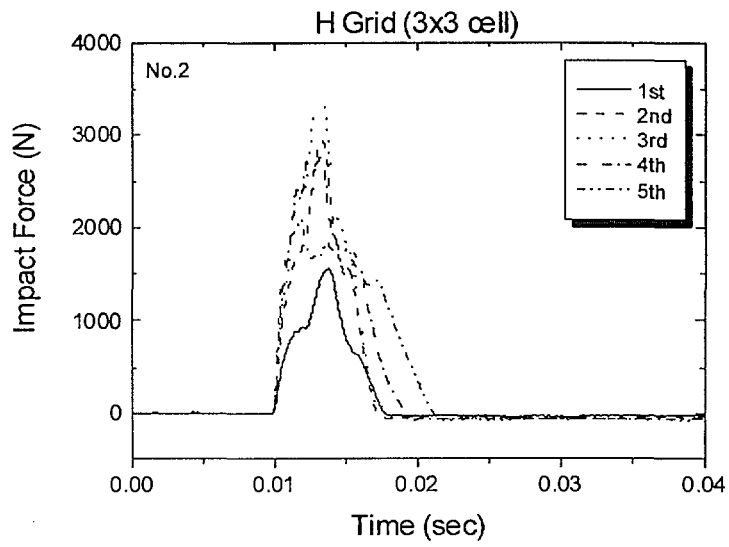


(a) impact force

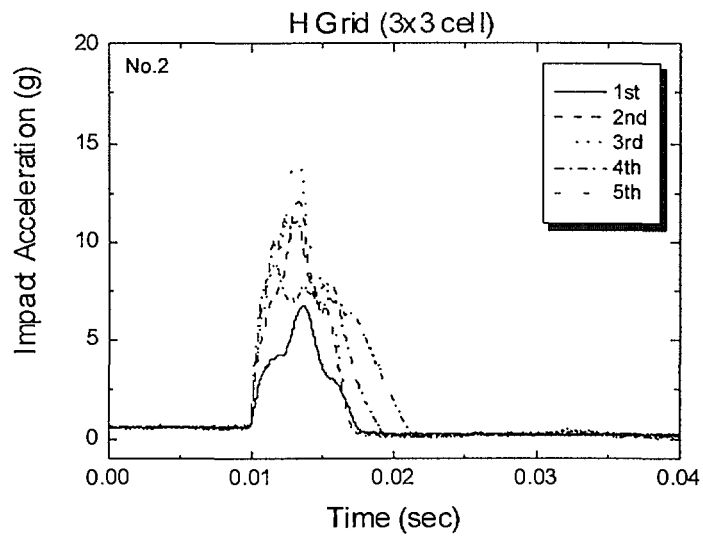


(b) impact acceleration

그림 2.23 FRF data of H type 3x3 cell grid (No. 1) by free fall test

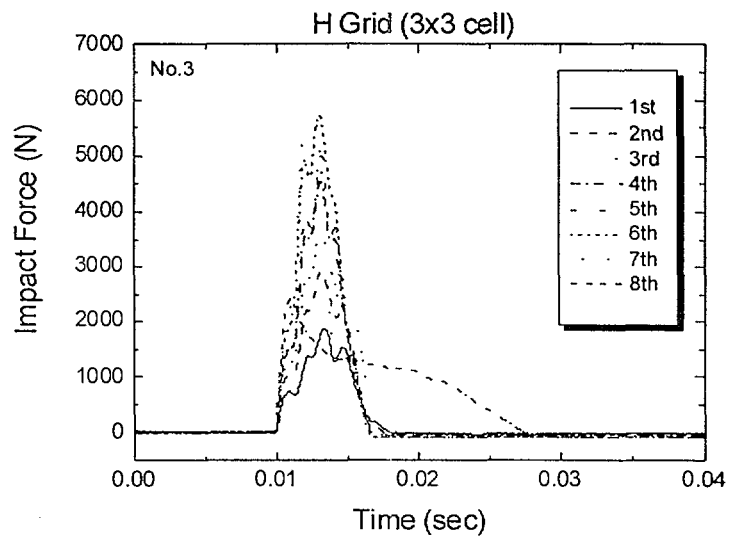


(a) impact force

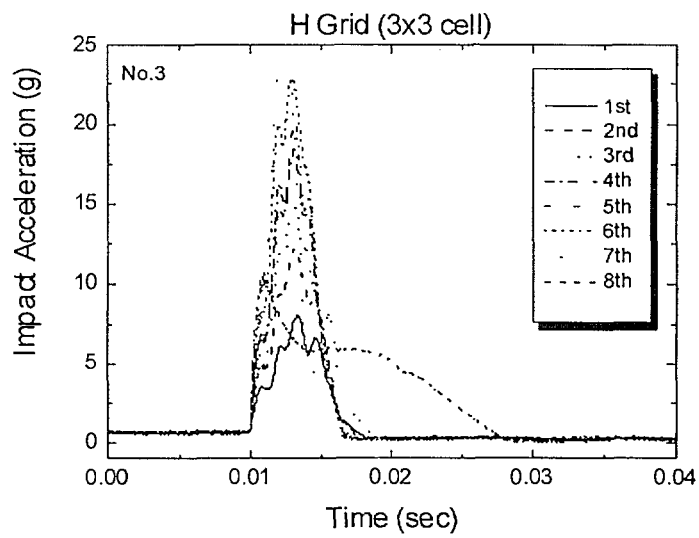


(b) impact acceleration

그림 2.24 FRF data of H type 3×3 cell grid (No. 2) by free fall test

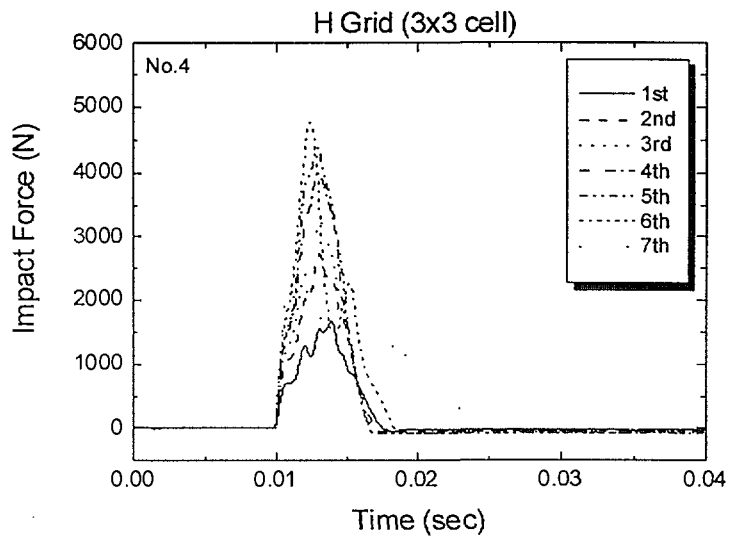


(a) impact force

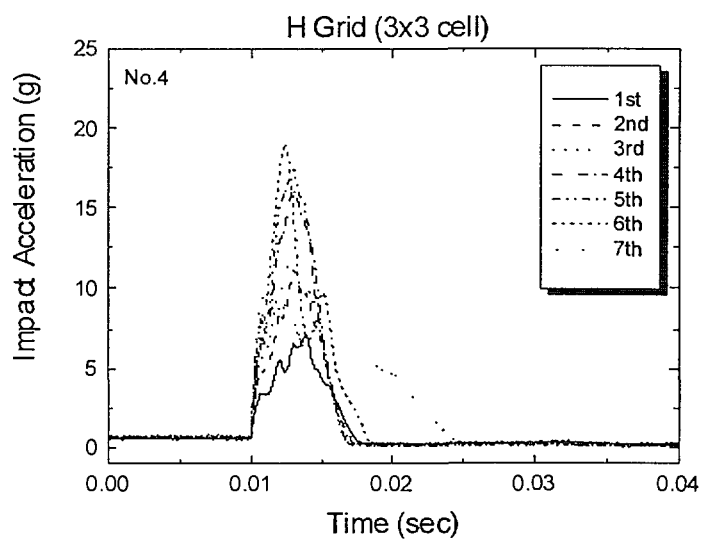


(b) impact acceleration

그림 2.25 FRF data of H type 3x3 cell grid (No. 3) by free fall test

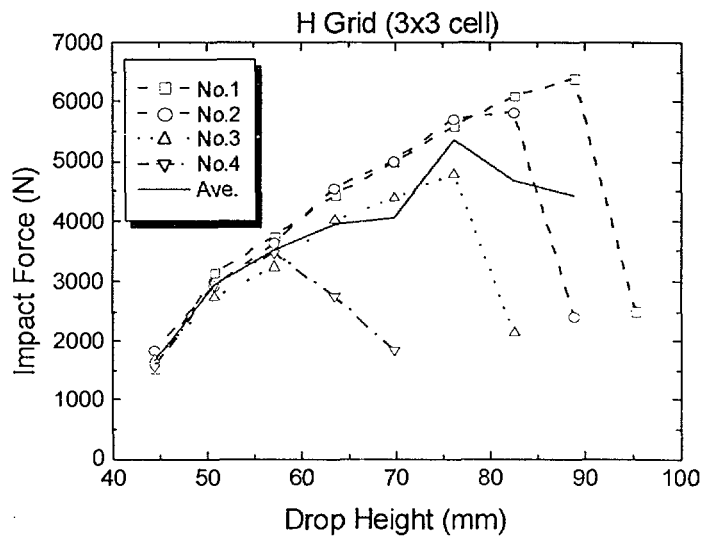


(a) impact force

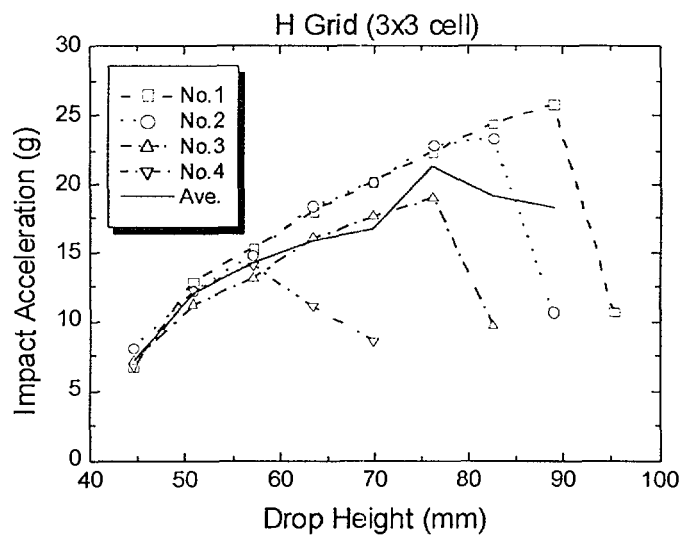


(b) impact acceleration

그림 2.26 FRF data of H type 3×3 cell grid (No. 4) by free fall test



(a) impact force



(b) impact acceleration

그림 2.27 Impact test results of H type 3x3 cell grid

## 2. 5×5 셀 격자 시편

5×5 셀 격자구조의 시편은 그 기하학적 형상이 서로 다른 네 가지 형태의 시편을 두께 0.457 mm의 지르칼로이 판으로 성형(forming)하여 격자판 형태를 만들고 이들을 서로 엇갈리도록 끼운 후 이들의 외곽은 내부에서의 판보다는 약간 두꺼운 0.664 mm의 판으로 둘레를 연결하였다. 이들의 내부 상하의 교차 부위와 외부의 모서리 연결 부위를 레이저 용접하여 제조하였다. 이들은 그 기하학적 형상의 균일성을 확인하기 위해 비접촉식 3차원 측정기를 사용하여 시편 주요 부위의 치수를 정밀 측정을 행하였으며, 각 시편들의 기하학적 데이터를 표 2.2에 요약하였다. 시험 데이터의 평가를 위해 네 가지의 5×5 셀 격자구조 시편 4개를 충격시험을 행하였다. 시험 데이터는 FEMtools를 통하여 분석을 하였다.

표 2.2 Geometry of 4 kinds of the 5×5 cell grid specimens

Classification	Thickness (mm)	Height (mm)	Cell Size (mm)	Width (mm)
Swirl Type	0.457	39.0	12.8	64.0
H Type	0.457	35.0	12.8	64.0
Dipper Type	0.457	41.6	12.8	64.0
Multi-spring Type	0.457	48.7	12.8	64.0

그림 2.28과 같은 회전유동형 격자체 시편의 경우, 충격시의 유지시간은 좌굴이 발생하기 전까지는 6 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 6 msec 보다 길어졌다. 좌굴이 발생한 시점의 자유낙하 높이는 203.2 mm에서 234.95 mm이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.4 m/sec이었다. 충격력의 범위는 3470 N ~ 6916 N이었고, 충격가속도는 13.9 g (136.3 m/sec<sup>2</sup>) ~ 27.2 g (266.8 m/sec<sup>2</sup>)의 범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.29에서 그림 2.32에 나타내었다. 그림 2.33에는 이들을 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다. 충격력 및 충격가속도는 각 시편에 따라 그 차이가 심하여 이들 4개 시편에 대한 데이터를 산술 평균하여 임계 충격력 및 임계 충격가속도를 결정하였다.

그림 2.34와 같은 H형 격자체 시편의 경우, 충격시의 유지시간은 좌굴이 발생하기 전까지는 8 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 8 msec 보다 길어졌다. 좌굴이 발생한 시점의 자유낙하 높이는

203.2 mm에서 215.9 mm이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.4 m/sec이었다. 충격력의 범위는 2340 N ~ 3271 N이었고, 충격가속도는 9.6 g (94.2 m/sec<sup>2</sup>) ~ 13.5 g (132.4 m/sec<sup>2</sup>) 의 범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.35에서 그림 2.38에 나타내었다. 그림 2.39에는 이들을 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다. 충격력 및 충격가속도는 각 시편에 따라 그 차이가 심하여 이들 4개 시편에 대한 데이터를 산술 평균하여 임계 충격력 및 임계 충격가속도를 결정하였다.

그림 2.40과 같은 바가지형 격자체 시편의 경우, 충격시의 유지시간은 좌굴이 발생하기 전까지는 6 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 6 msec 보다 긴 7 msec 이상이었다. 좌굴이 발생한 시점의 평균 자유낙하 높이는 0.0762 m이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.0.33 m/sec이었다. 충격력의 범위는 3051 N ~ 7606 N이었고, 충격가속도는 12.6 g (123.6 m/sec<sup>2</sup>) ~ 30.4 g (298.2 m/sec<sup>2</sup>) 의 범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.41에서 그림 2.44에 나타내었다. 그림 2.45에는 이들을 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다. 충격력 및 충격가속도는 각 시편에 따라 그 차이가 심하여 이들 4개 시편에 대한 데이터를 산술 평균하여 임계 충격력 및 임계 충격가속도를 결정하였다.

그림 2.46과 같은 다중스프링형 격자체 시편의 경우, 충격시의 유지시간은 좌굴이 발생하기 전까지는 7 msec이며, 좌굴이 발생한 이후는 유지시간이 좌굴이 발생하기 전의 7 msec 보다 긴 8 msec 이었다. 좌굴이 발생한 시점의 평균 자유낙하 높이는 0.073025 m이었으며, 이것을 식(2.3)을 사용하여 계산한 충격시점의 속도는 약 0.33 m/sec이었다. 충격력의 범위는 3474 N ~ 6402 N이었고, 충격가속도는 14.0 g (137.3 m/sec<sup>2</sup>) ~ 25.8 g (253.1 m/sec<sup>2</sup>) 의 범위를 나타내었다. 시간영역에서의 충격력 및 충격가속도를 그림 2.47에서 그림 2.50에 나타내었다. 그림 2.51에는 이들을 각 시편에 대한 자유낙하 높이에서 각 시편의 충격력 및 충격가속도를 요약하여 나타내었다. 충격력 및 충격가속도는 각 시편에 따라 그 차이가 심하여 이들 4개 시편에 대한 데이터를 산술 평균하여 임계 충격력 및 임계 충격가속도를 결정하였다.

그림 2.52에는 지지격자체의 측면 충격시험으로부터 얻은 가속도 신호를 적분 알고리즘을 내장한 앰프를 사용하여 직접 적분하여 구한 속도 윤곽(velocity profile)이다. 이 그림에서 충격 시점인 0.01초에서 충격이 시작되어 최대 충격속도 0.47 m/sec를 나타내고, 충격 해머가 구조물에 충격을 한 이후에는 속도가 0으로 감소하는 현상을 나타내고 있다. 속도값이 음의



신호를 나타내는 것은 충격의 방향과 가속도계의 방향이 서로 반대 방향으로 설정되어 있음을 의미한다.

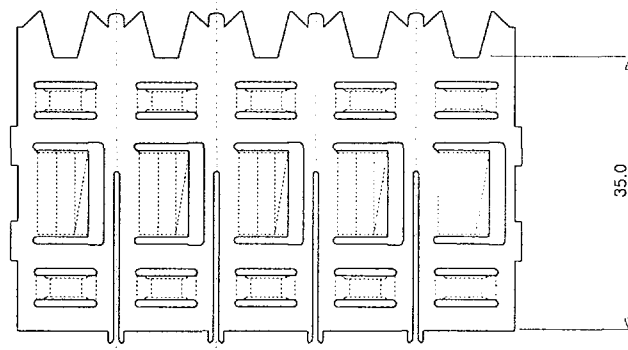
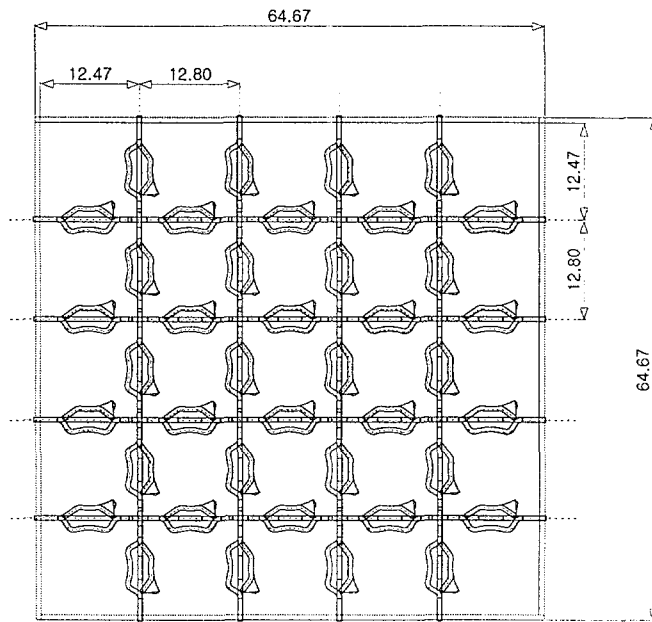
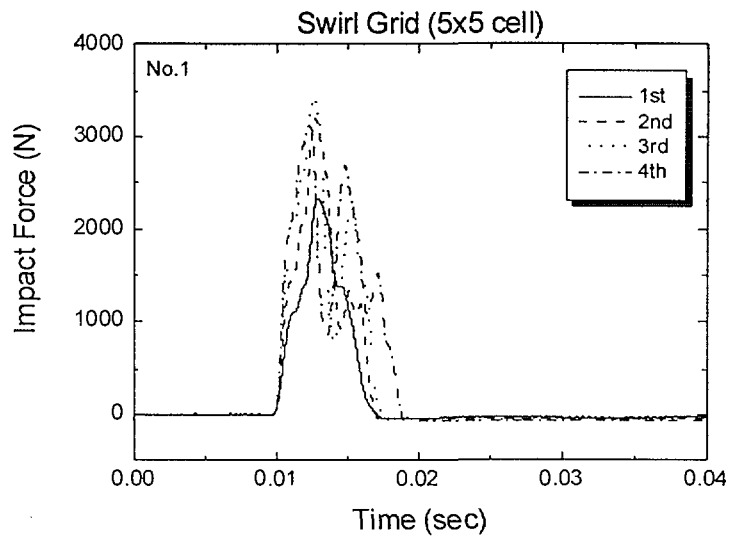
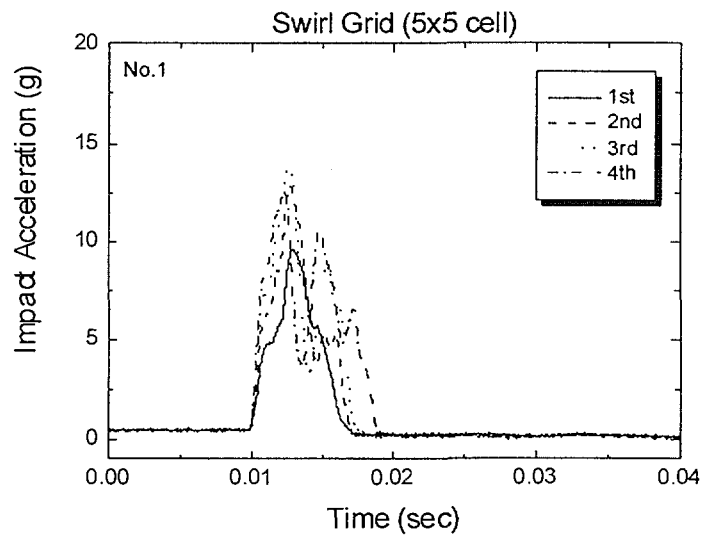


그림 2.28 Configuration of Swirl type 5×5 cell grid

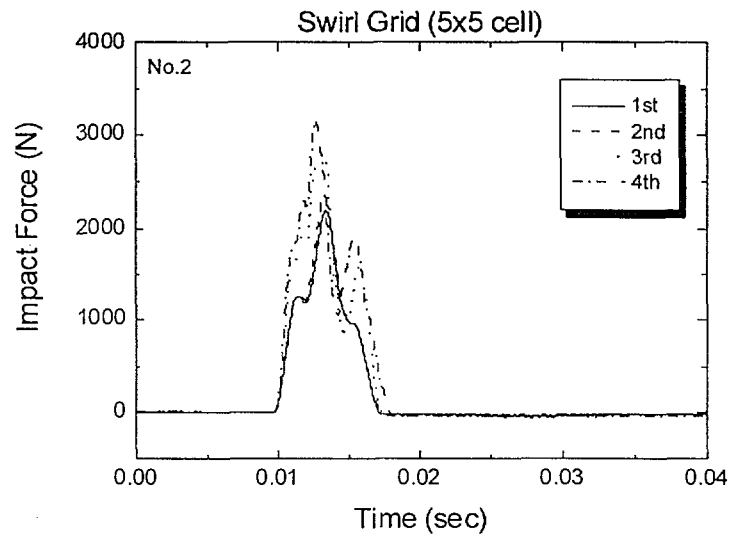


(a) impact force

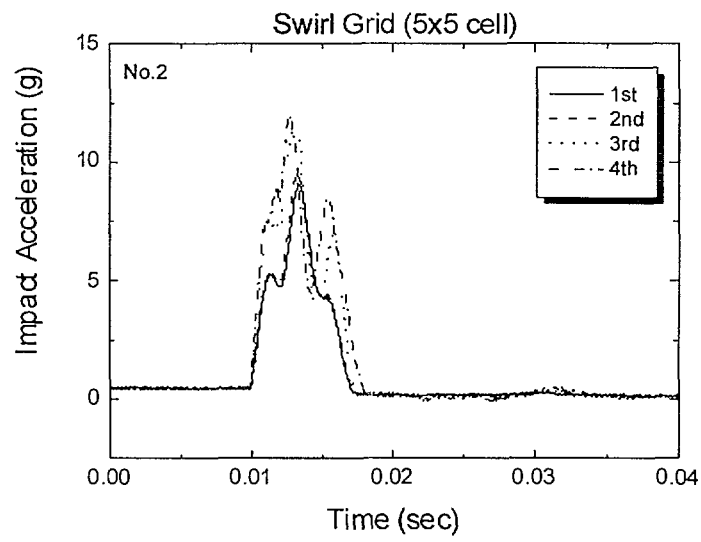


(b) impact acceleration

그림 2.29 FRF data of Swirl type 5x5 cell grid (No. 1) by free fall test

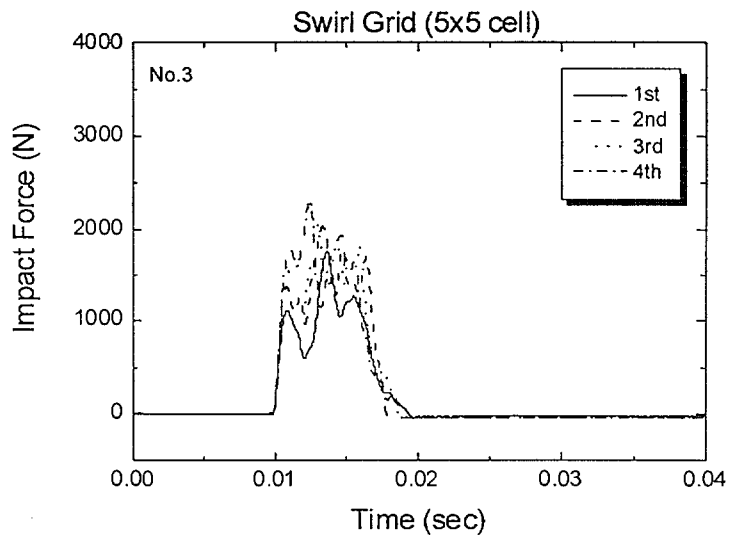


(a) impact force

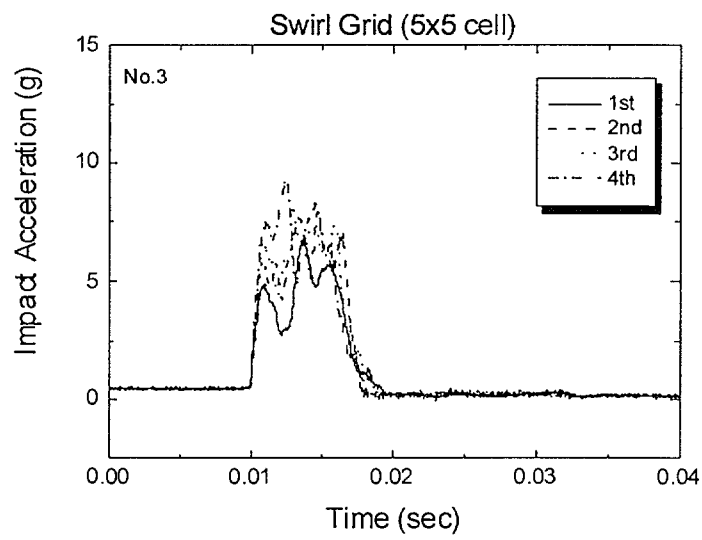


(b) impact acceleration

그림 2.30 FRF data of Swirl type 5x5 cell grid (No. 2) by free fall test

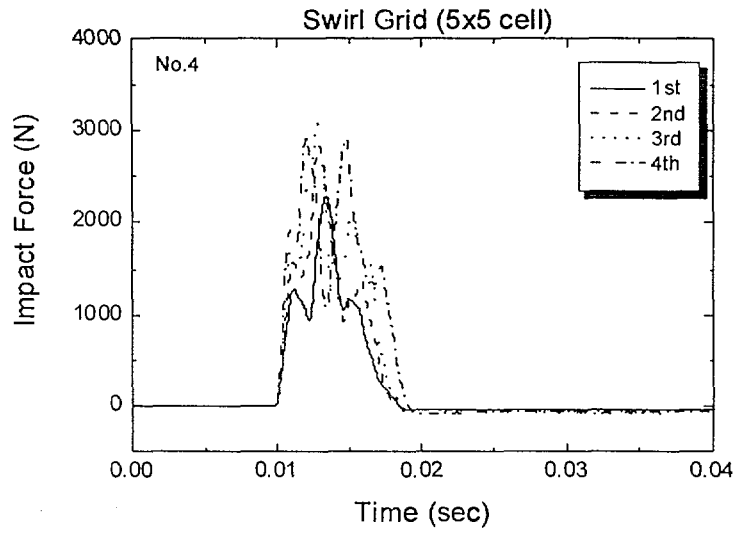


(a) impact force

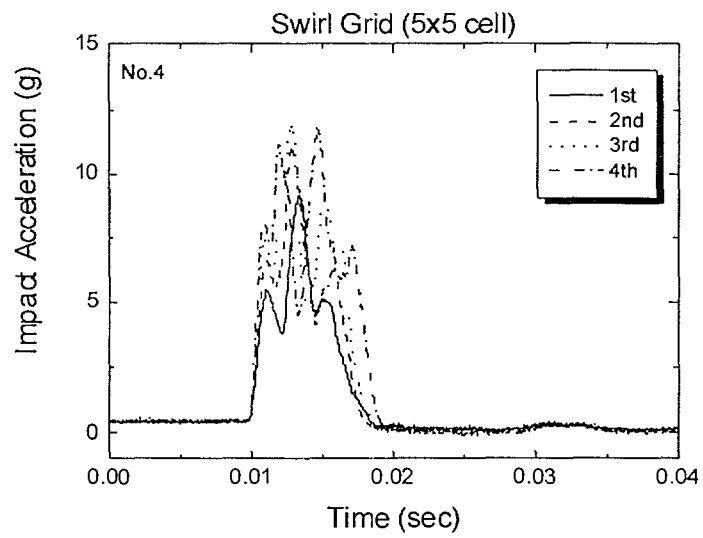


(b) impact acceleration

그림 2.31 FRF data of Swirl type 5x5 cell grid (No. 3) by free fall test

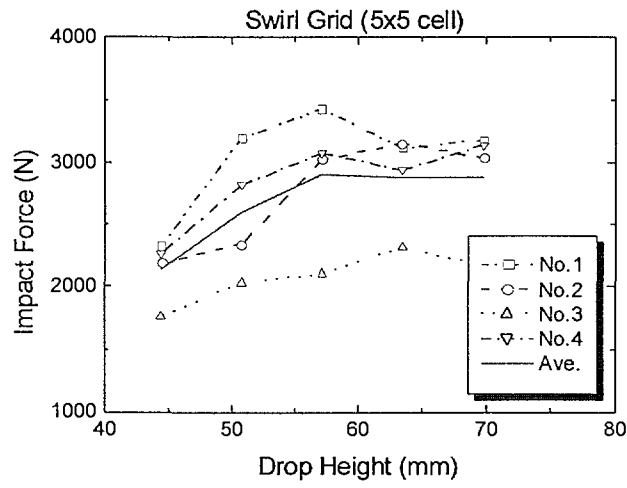


(a) impact force

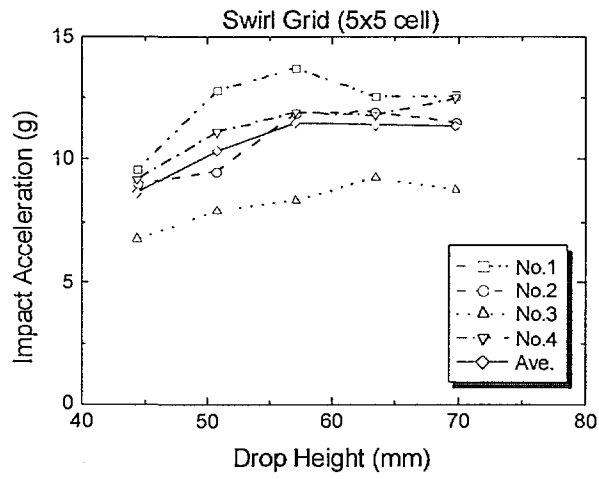


(b) impact acceleration

그림 2.32 FRF data of Swirl type 5×5 cell grid (No. 4) by free fall test



(a) impact force



(b) impact acceleration

그림 2.33 Impact test results of Swirl type 5x5 cell grid

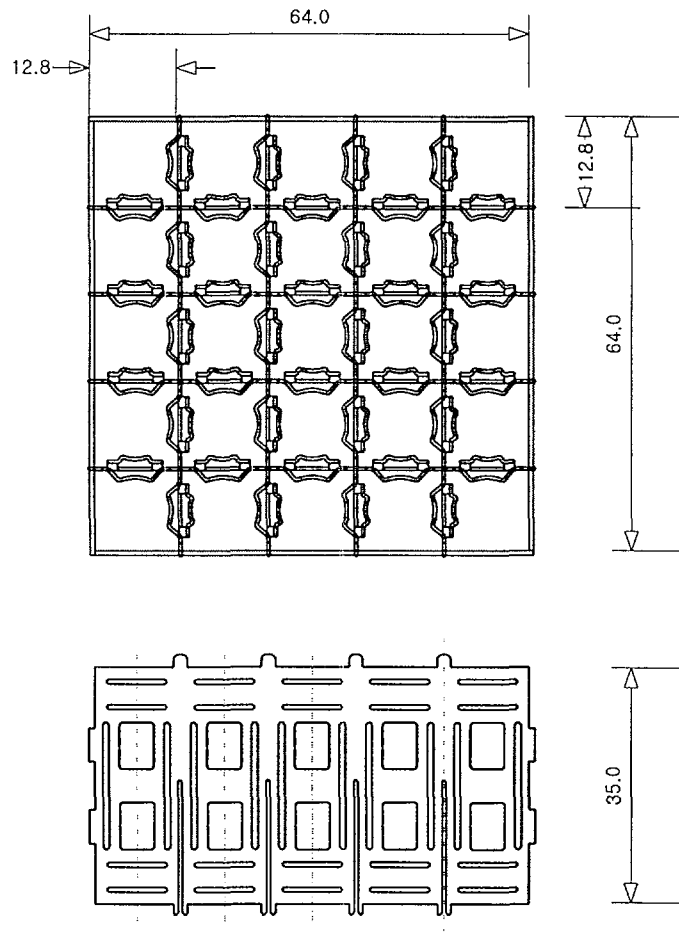
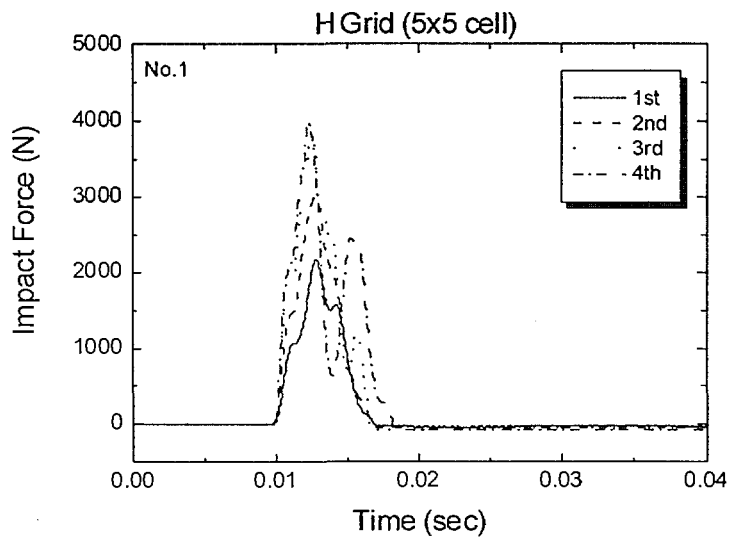
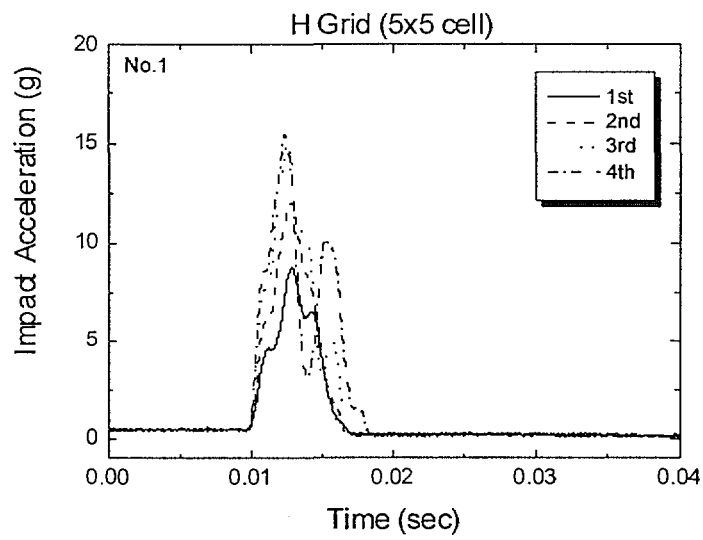


그림 2.34 Configuration of H type 5×5 cell grid



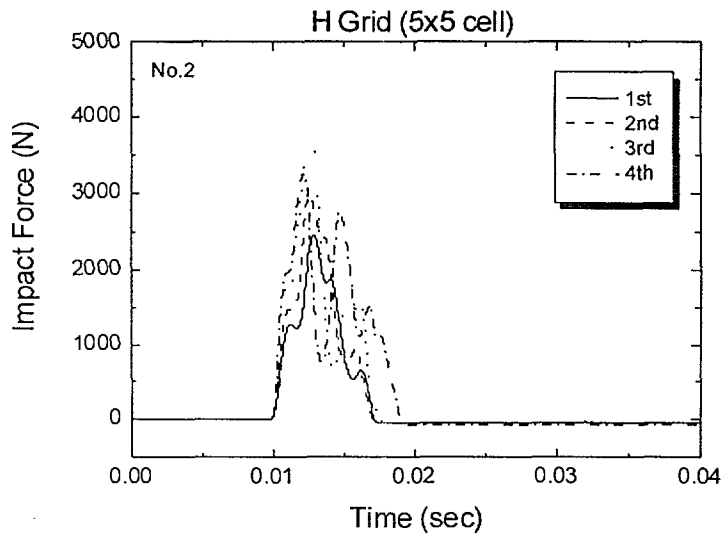


(a) impact force

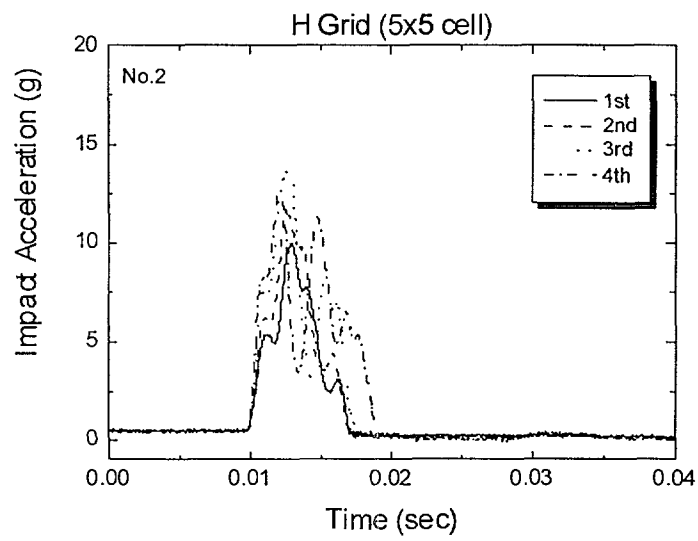


(b) impact acceleration

그림 2.35 FRF data of H type 5x5 cell grid (No. 1) by free fall test

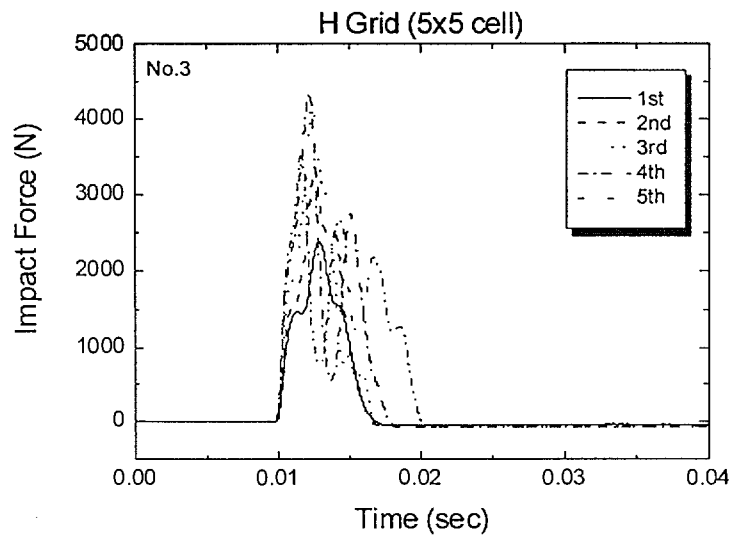


(a) impact force

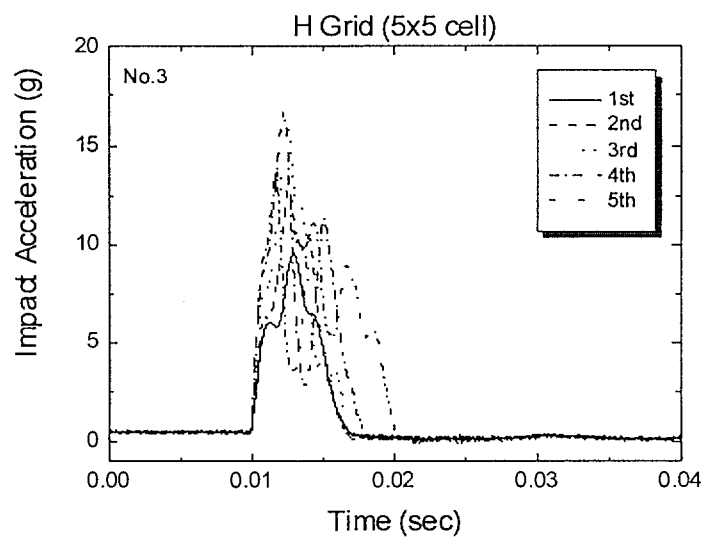


(b) impact acceleration

그림 2.36 FRF data of H type 5×5 cell grid (No. 2) by free fall test

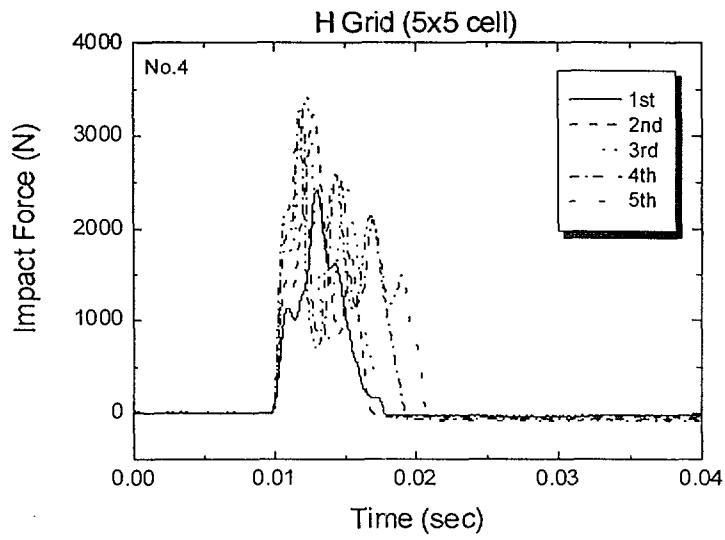


(a) impact force

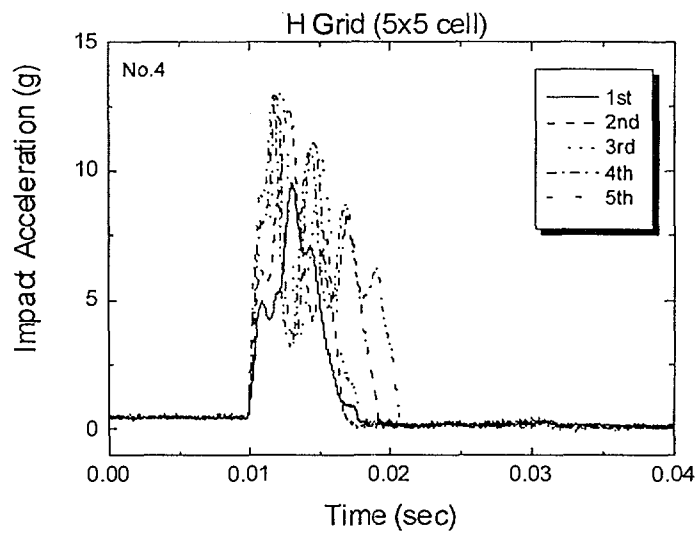


(b) impact acceleration

그림 2.37 FRF data of H type 5×5 cell grid (No. 3) by free fall test

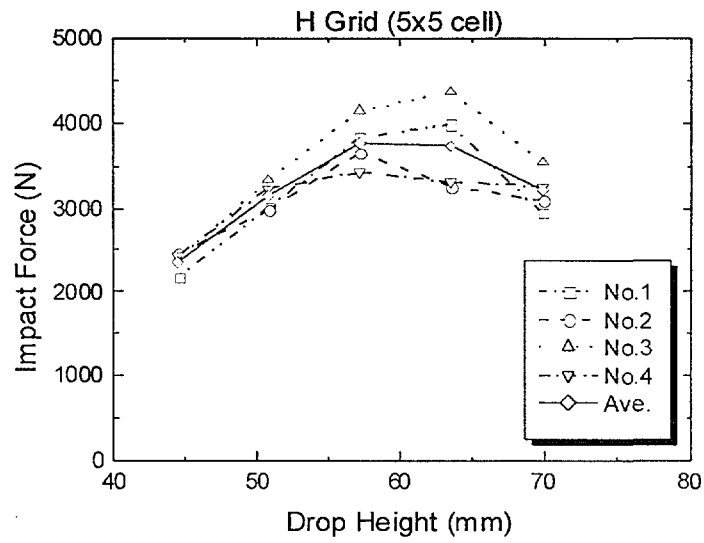


(a) impact force

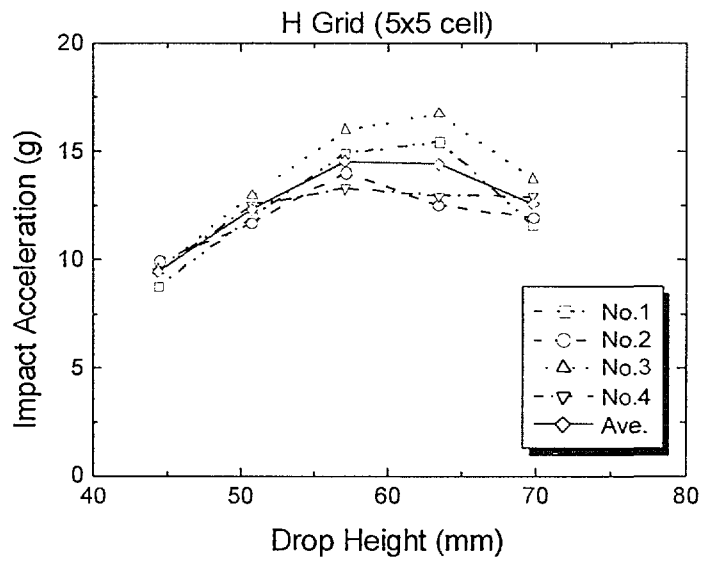


(b) impact acceleration

그림 2.38 FRF data of H type 5×5 cell grid (No. 4) by free fall test



(a) impact force



(b) impact acceleration

그림 2.39 Impact test results of H type 5x5 cell grid

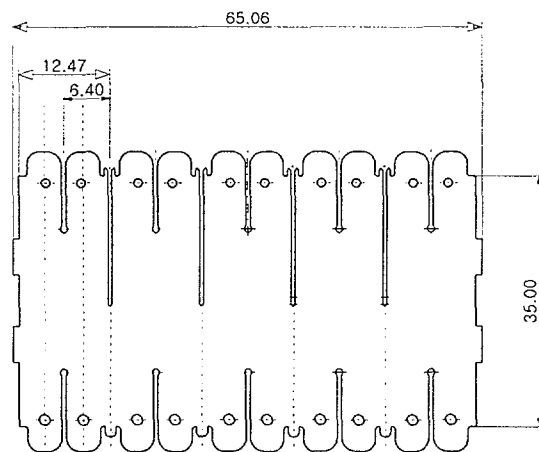
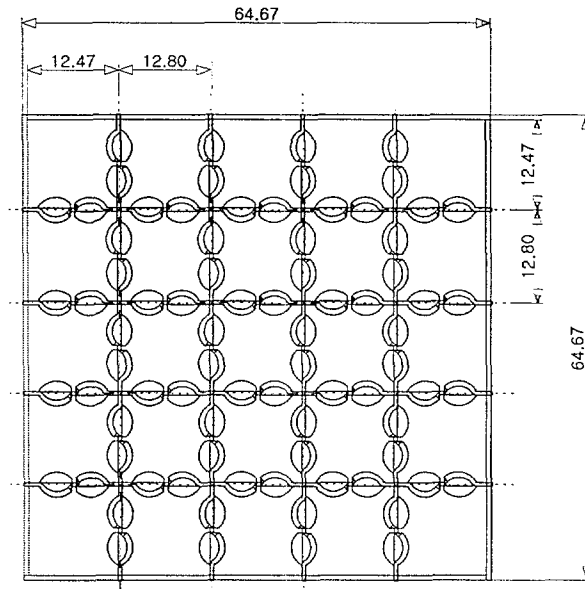
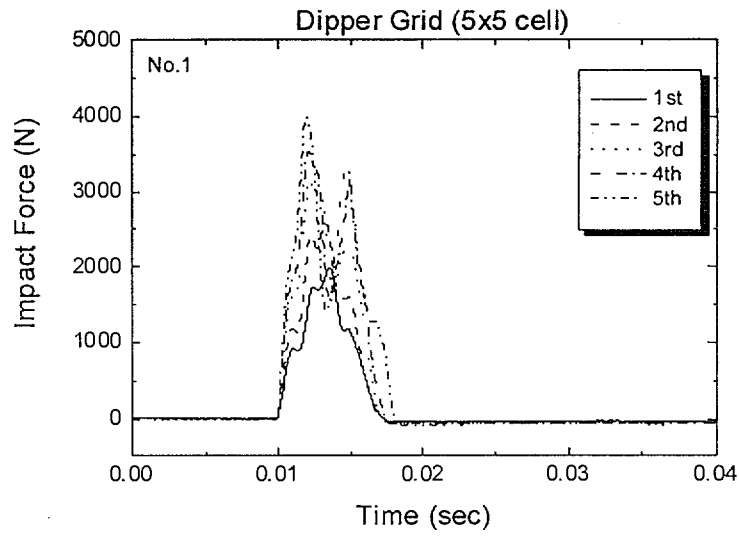
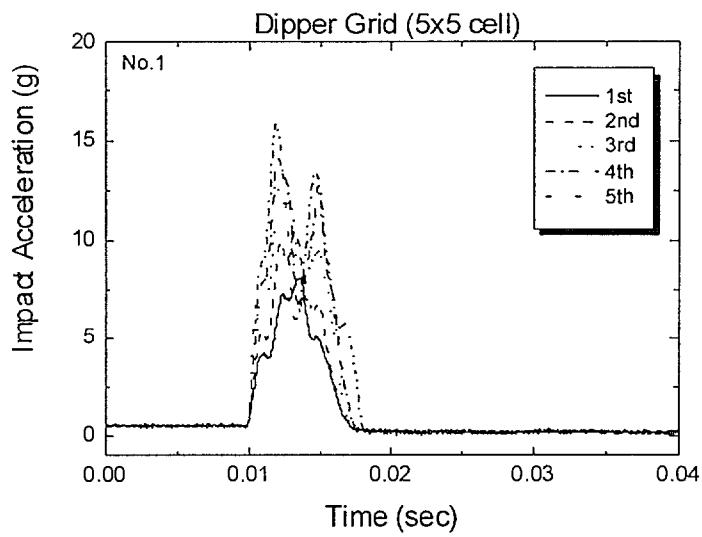


그림 2.40 Configuration of Dipper type 5×5 cell grid

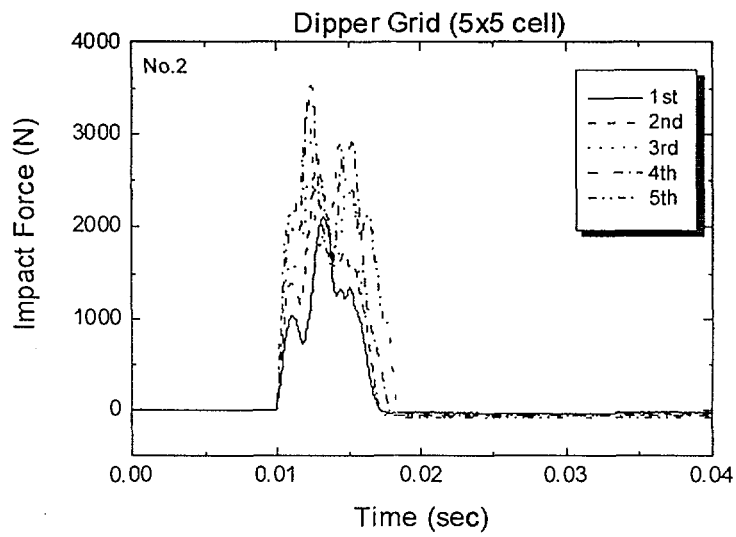


(a) impact force

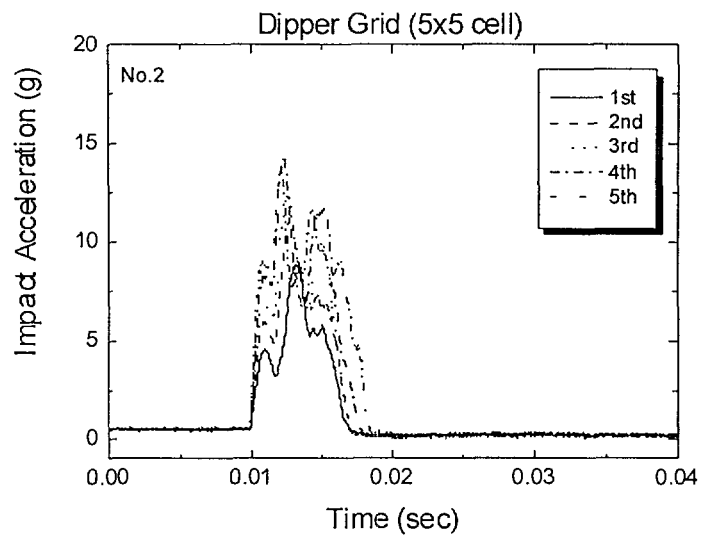


(b) impact acceleration

그림 2.41 FRF data of Dipper type 5x5 cell grid (No. 1) by free fall test



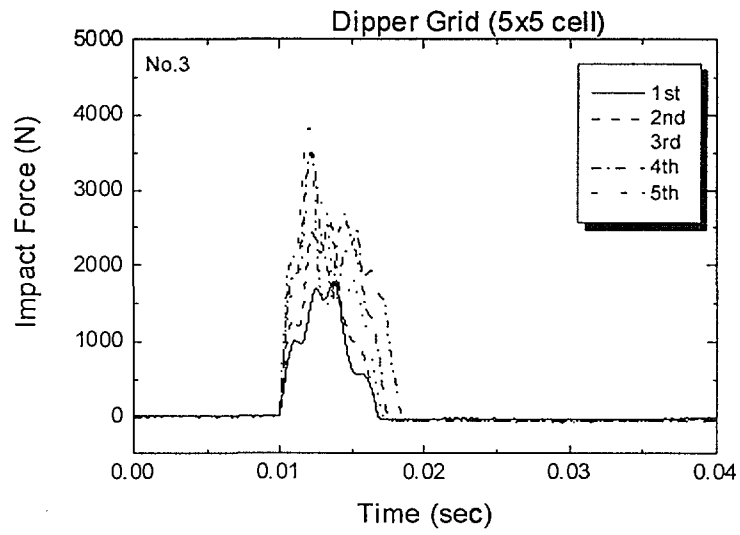
(a) impact force



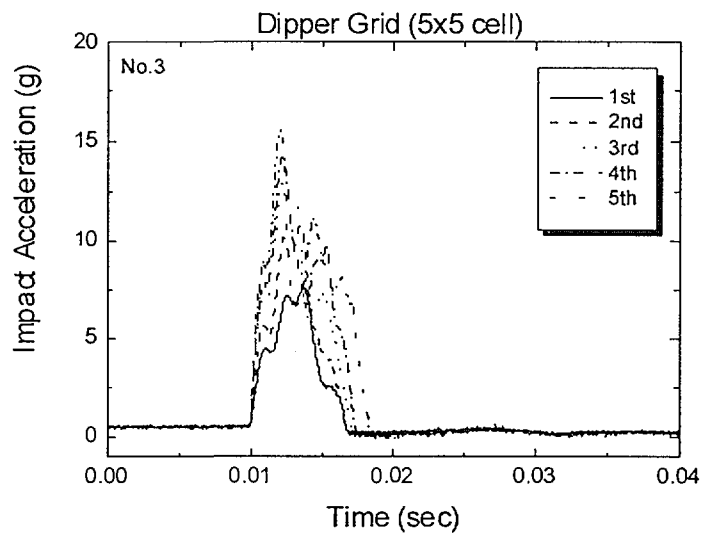
(b) impact acceleration

그림 2.42 FRF data of Dipper type 5x5 cell grid (No. 2) by free fall test



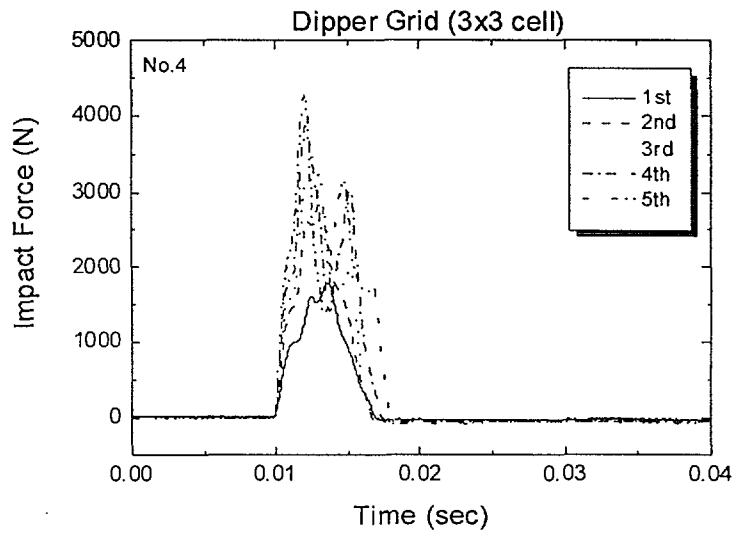


(a) impact force

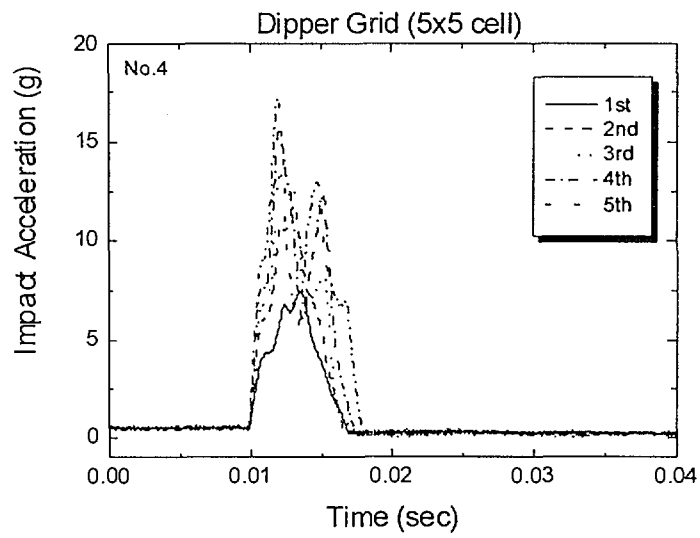


(b) impact acceleration

그림 2.43 FRF data of Dipper type 5x5 cell grid (No. 3) by free fall test

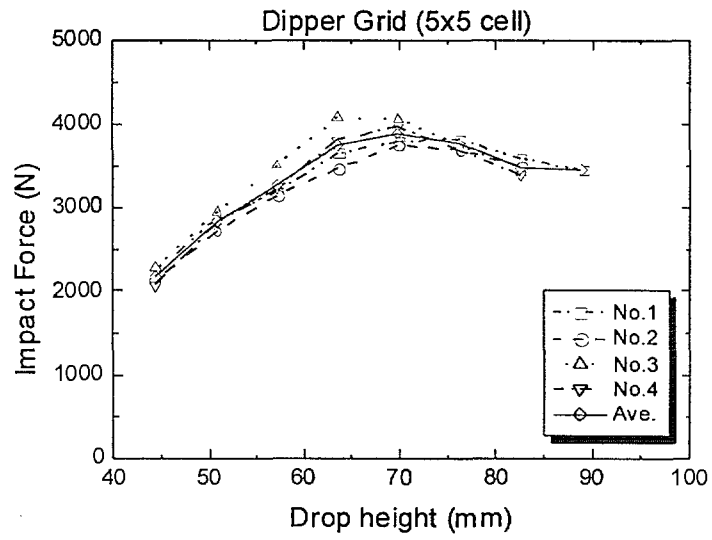


(a) impact force

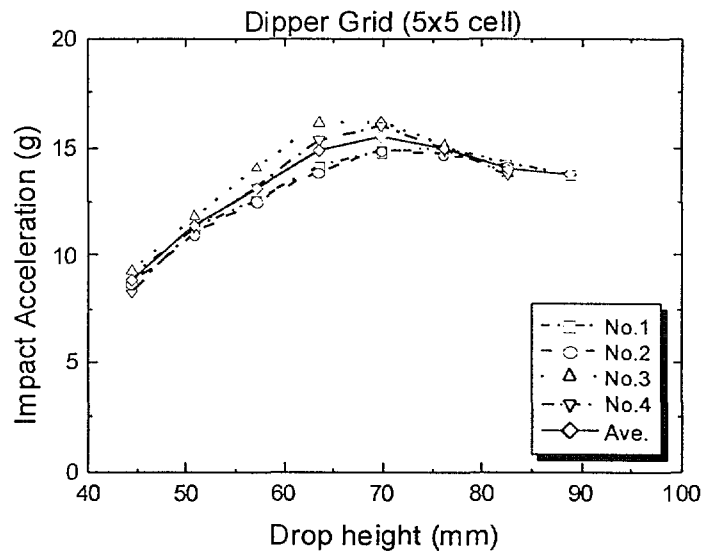


(b) impact acceleration

그림 2.44 FRF data of Dipper type 5x5 cell grid (No. 4) by free fall test



(a) impact force



(b) impact force

그림 2.45 Impact test results of Dipper type 5x5 cell grid

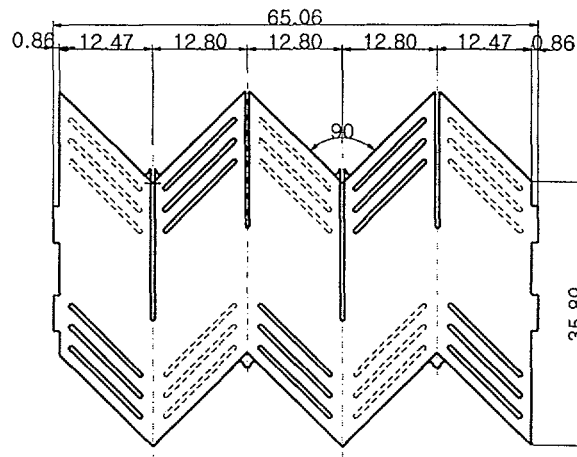
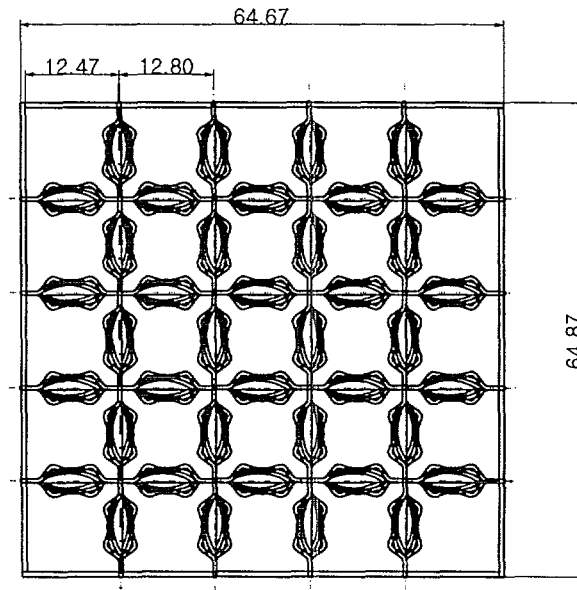
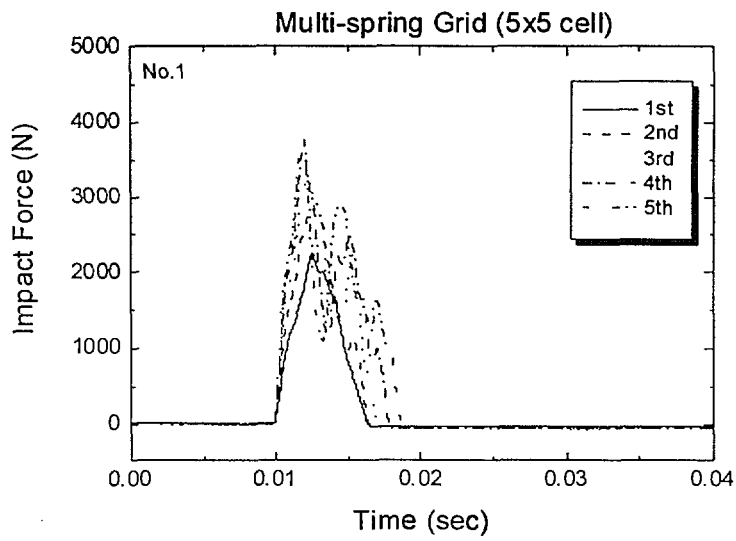
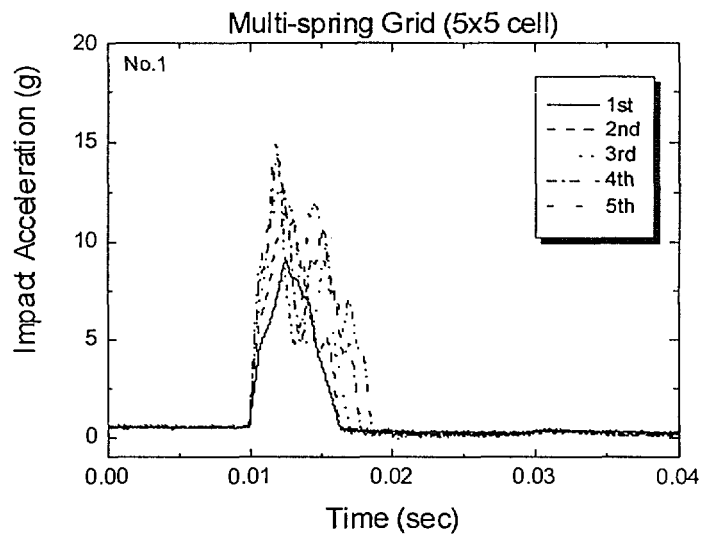


그림 2.46 Configuration of Multi-spring type 5x5 cell grid

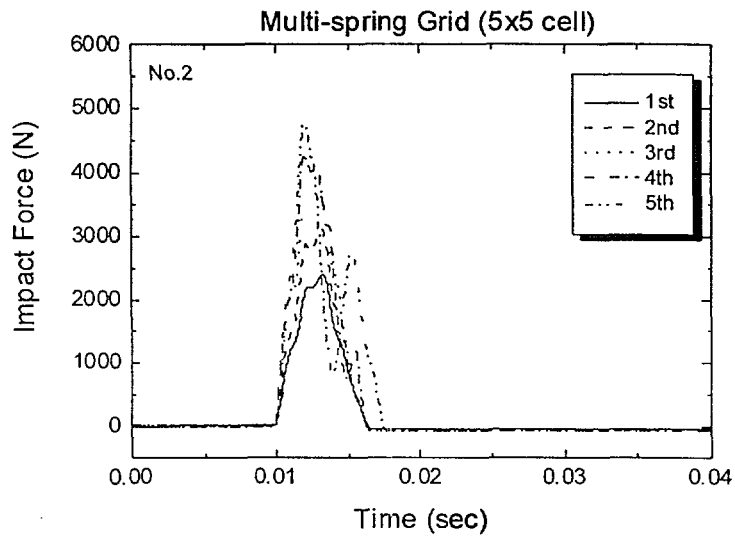


(a) impact force

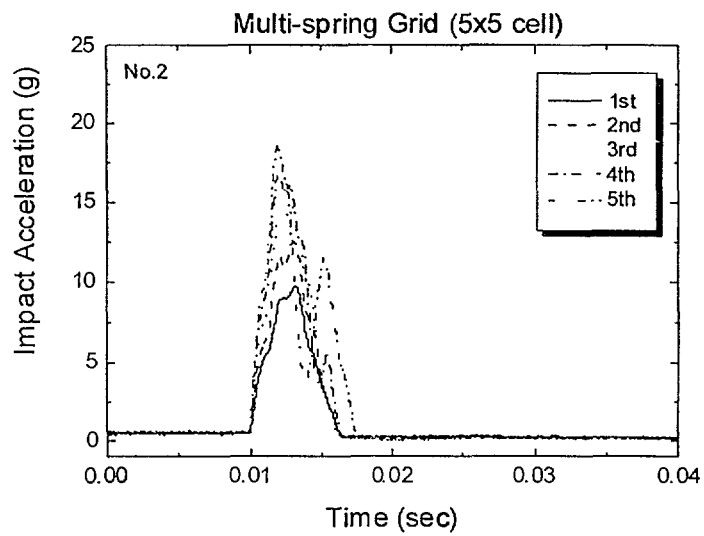


(b) impact acceleration

그림 2.47 FRF data of Multi-spring type 5x5 cell grid (No. 1) by free fall test

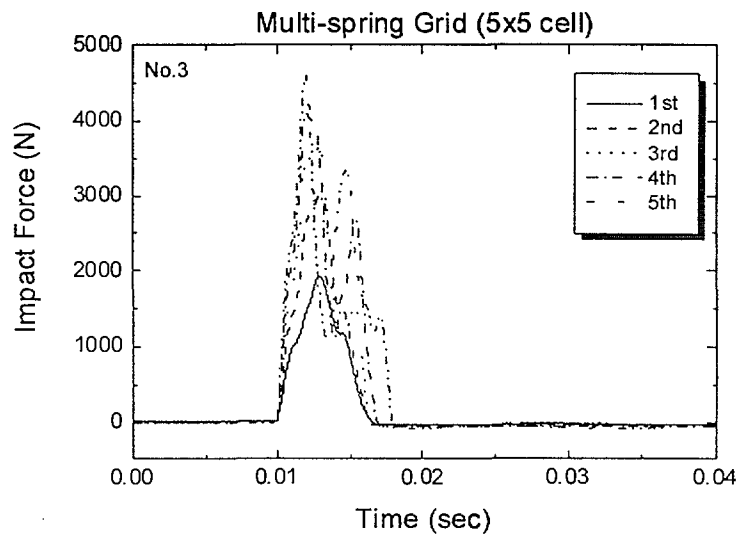


(a) impact force

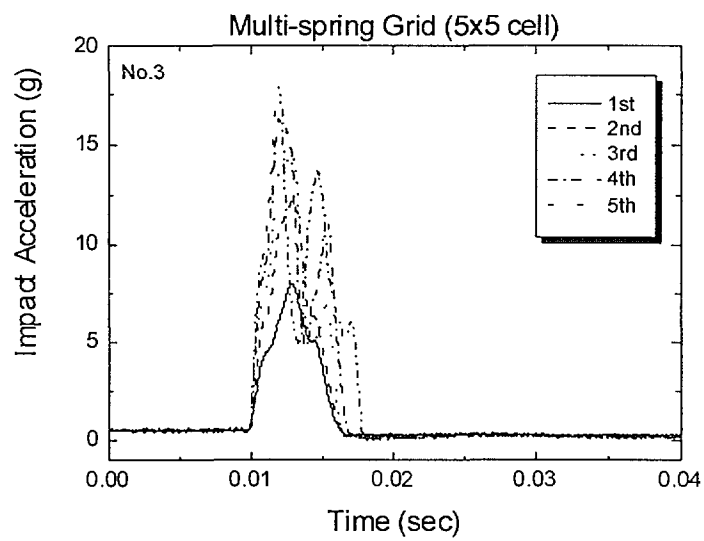


(b) impact acceleration

그림 2.48 FRF data of Multi-spring type 5x5 cell grid (No. 2) by free fall test

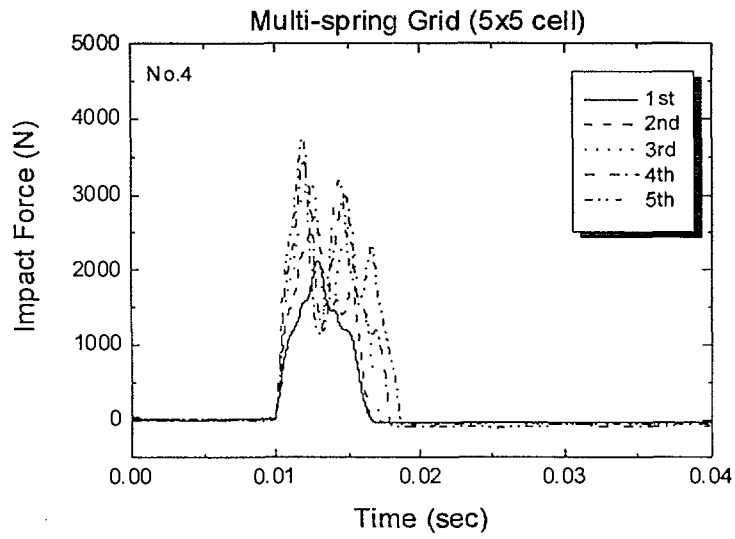


(a) impact force

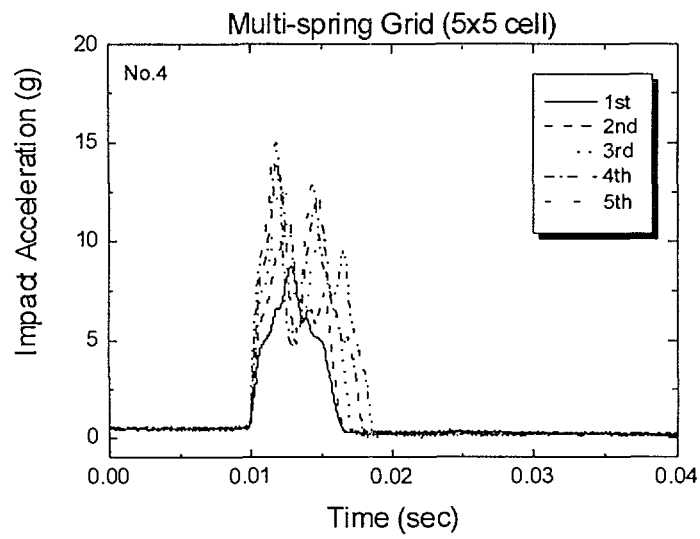


(b) impact acceleration

그림 2.49 FRF data of Multi-spring type 5x5 cell grid (No. 3) by free fall test



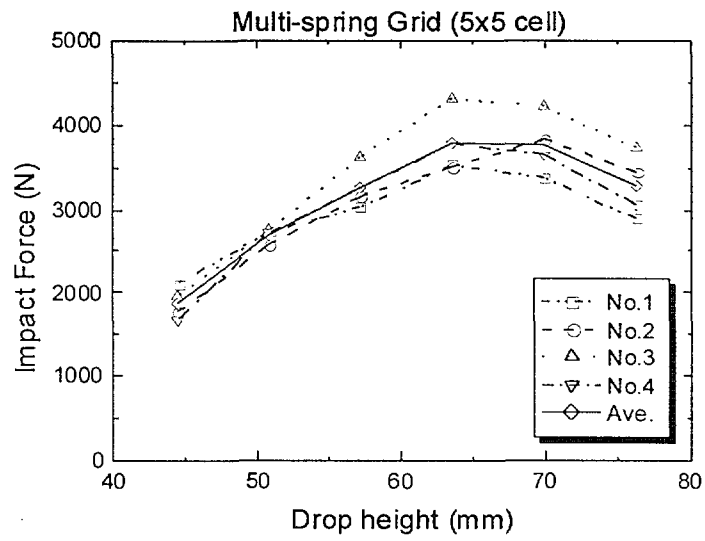
(a) impact force



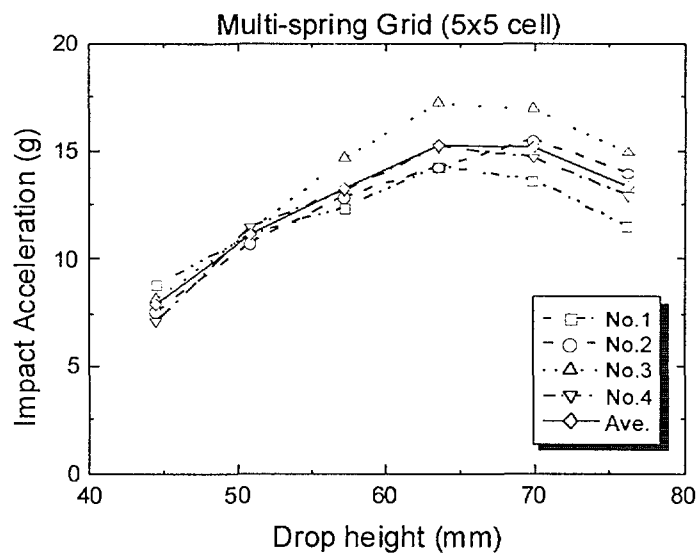
(b) impact acceleration

그림 2.50 FRF data of Multi-spring type 5×5 cell grid (No. 4) by free fall test





(a) impact force



(b) impact acceleration

그림 2.51 Impact test results of Multi-spring type 5x5 cell grid

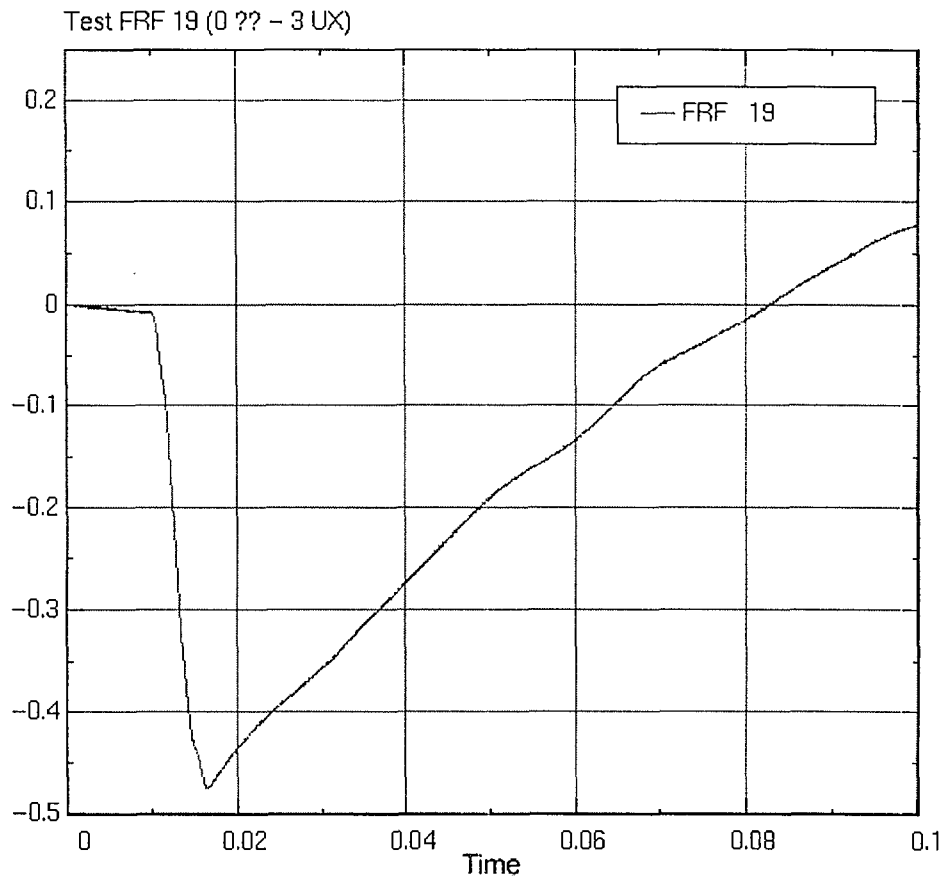


그림 2.52 Impact velocity profile during impact test

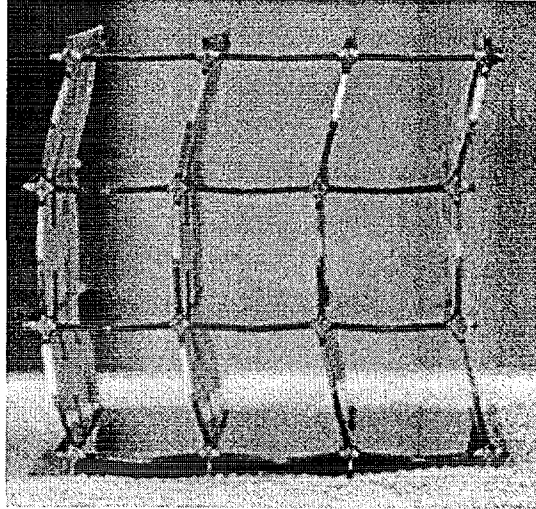
### 3. 충격에 의한 지지격자체의 좌굴모드

#### 가 3×3 셀 지지격자체

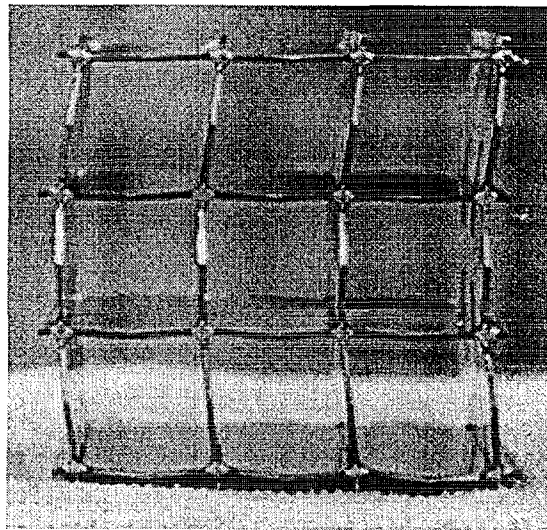
3×3 셀 지지격자체의 측면에서의 충격하중에 의한 좌굴모드를 사진 2.1에서 2.4에 나타내었다. 이들 4가지 형상의 3×3 셀 격자 시편의 충격하중에 의한 좌굴모드는 최상층 및 최하층(즉 제 1 열 및 3 열)에서는 전단하중이 작용할 때의 좌굴모드와 같은 형상으로 좌굴이 발생하였다. 이것은 시험에서는 관찰할 수 없었으나 유한요소 해석 결과에서 나타난 바와 같이 최상층 및 최하층에서 응력집중이 발생하였고, 따라서 이 격자를 형성하기 위한 교차부의 용접 부위에서 변형률 집중현상이 발생하였다. 이러한 변형률 집중은 이 영역에서 국부 좌굴을 일으키며, 이것은 좌굴이 전체 영역으로 전개되기 이전에 국부적 좌굴 현상이 심화하게 된다. 이러한 국부적 좌굴이 발생한 이후에는 소성변형이 발생한 영역에서만 변형이 진행되기 때문에 중간의 셀들은 단순히 아래 방향으로의 이동(moving)만이 나타나게 된다. 즉 지지격자의 좌굴은 전체적인 좌굴 현상이 아니라 국부적 좌굴이 전체 구조물의 좌굴강도를 결정하게 된다. 이 사진들에서 나타난 좌굴형상은 실제 측면에서의 충격시험에서 임계 자유낙하 높이에 도달하여 구조물에는 국부적 좌굴이 발생하였음에도 낙하높이를 임계 낙하높이 이상으로 시험을 수행한 결과이다. 왜냐하면 실제 지지격자체에 좌굴이 발생하는 자유낙하 높이는 매우 낮으며, 이로 인해 충격하중에 의한 지지격자체의 변위는 매우 작아 좌굴이 발생한 시점에서 시험을 종료하게 되면 명확한 좌굴 모드를 확인할 수가 없기 때문이다.

#### 나 5×5 셀 지지격자체

5×5 셀 지지격자체의 좌굴모드는 3×3 셀의 지지격자체와는 다른 형상을 나타내었다. 즉, 3×3 셀의 지지격자체는 최상층 및 최하층의 셀에서만 전단 형태의 국부적 좌굴을 일으키고 중간의 셀들은 원래의 형상을 유지하는 좌굴모드와는 달리 구조물의 좌굴을 지배하는 인자가 지지격자를 형성하기 위한 외부의 판에 의한 영향 때문으로 해석된다. 즉 5×5 셀 지지격자체 시편은 내부의 셀들은 3×3 셀들과 동일하게 형성하고 최외곽을 내부의 판들보다 상대적으로 두꺼운 판으로 중첩시켜 셀의 형상을 구성함으로써 인해 이 판이 외부에서의 충격하중에 주로 저항하는 역할을 하는 것으로 나타났다. 따라서 이 외부의 판들이 수평축을 중심으로 대칭인 좌굴모드를 일으키게 되며 이 외부의 판의 변형 형상에 따라 내부의 판들이 변형을 일으키는 형상으로 나타났다. 따라서 5×5 셀의 지지격자체는 최상층 및 최하층에서만 전단형태의 좌굴을 일으키지 않고 전체 지지격자체가 단일 셀의 1차모드와 같은 형태의 좌굴모드를 갖는다.

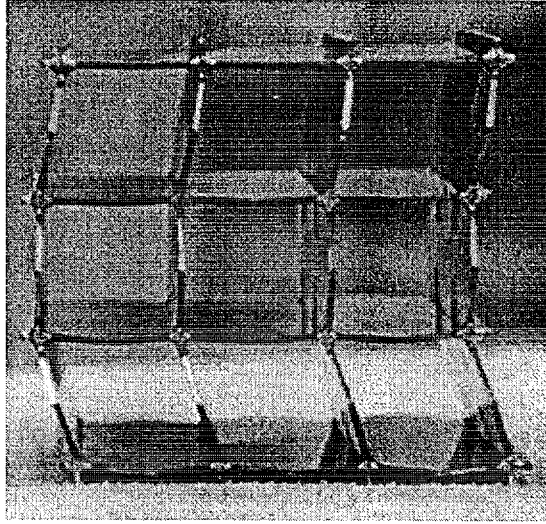


(a) No.1 specimen



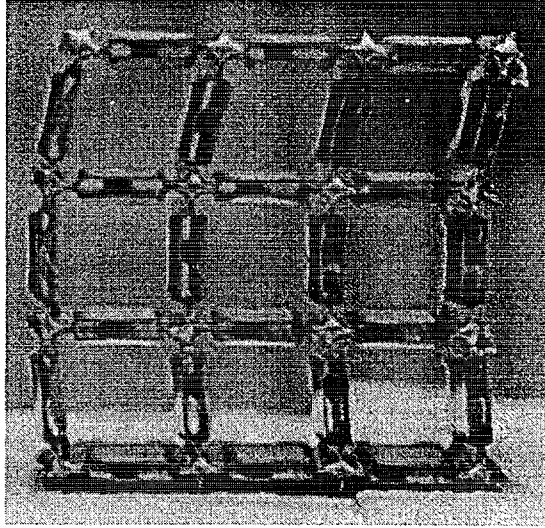
(b) No.2 specimen

사진 2.1 Impact buckling mode shape of KOFA type 3×3 cell grid

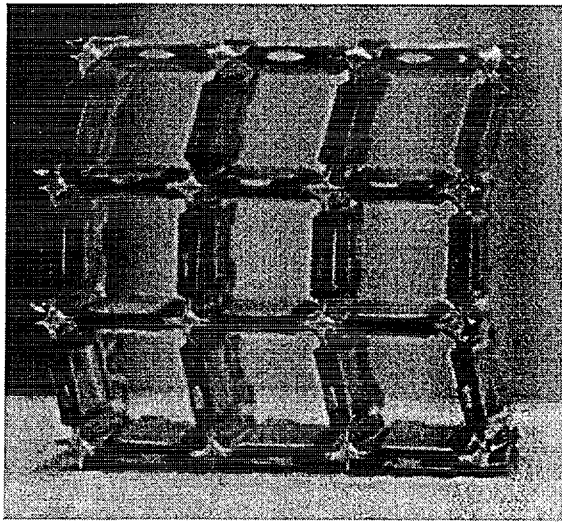


(c) No.3 specimen

사진 2.1 Impact buckling mode shape of KOFA type 3×3 cell grid(continued)

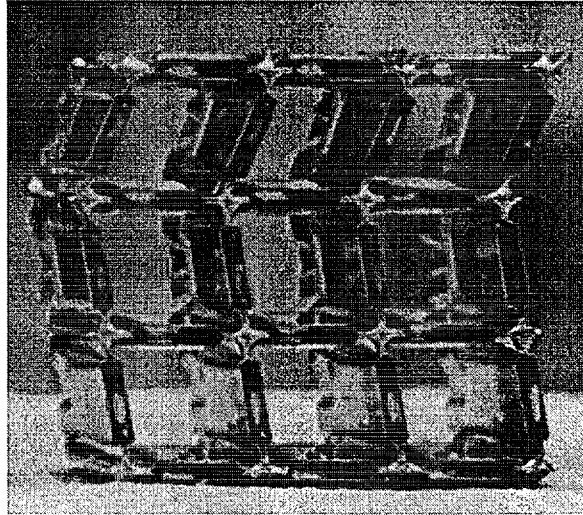


(a) No.1 specimen



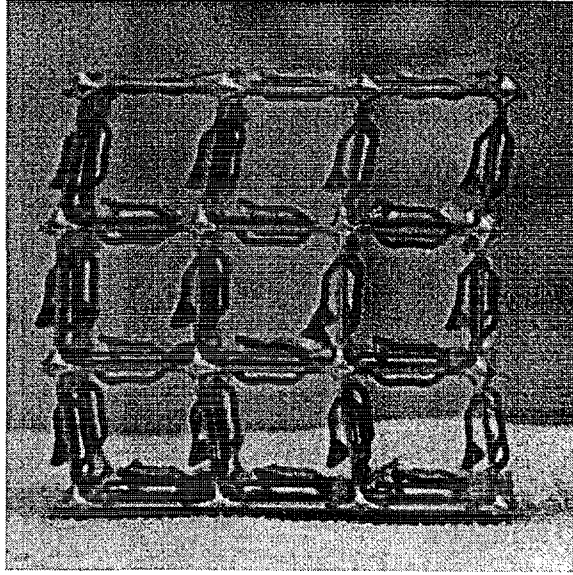
(b) No.2 specimen

사진 2.2 Impact buckling mode shape of Doublet type 3×3 cell grid

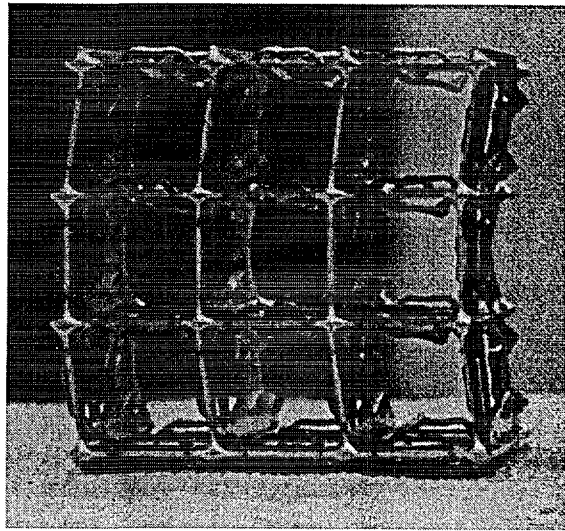


(c) No.3 specimen

사진 2.2 Impact buckling mode shape of Doublet type 3×3 cell grid(continued)



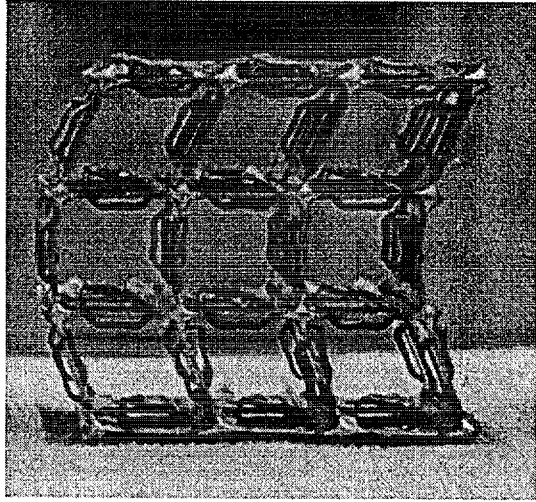
(a) No.1 specimen



(b) No.2 specimen

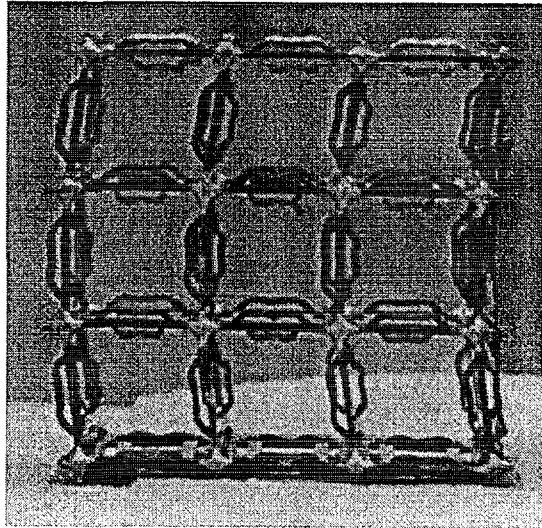
사진 2.3 Impact buckling mode shape of Swirl type 3×3 cell grid



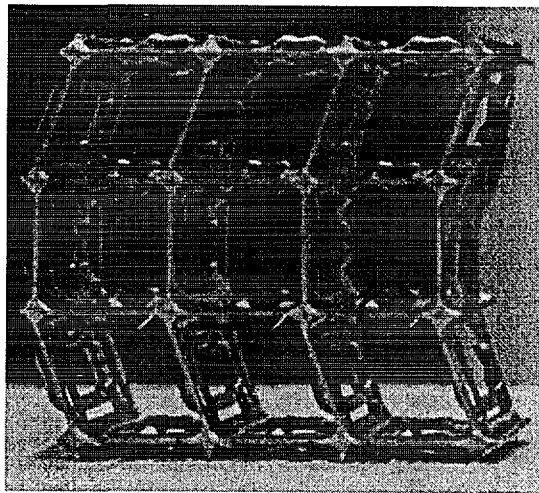


(c) No.3 specimen

사진 2.3 Impact buckling mode shape of Swirl type 3×3 cell grid(continued)

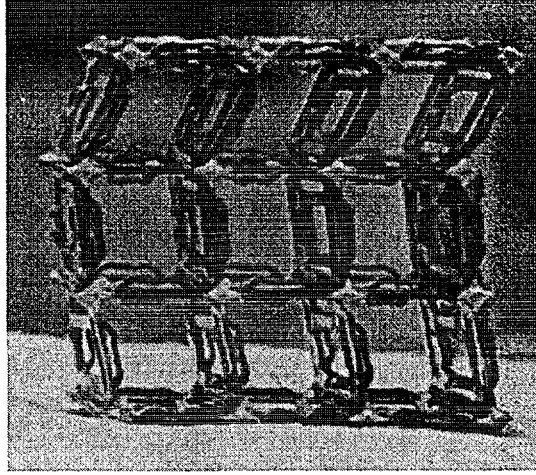


(a) No.1 specimen



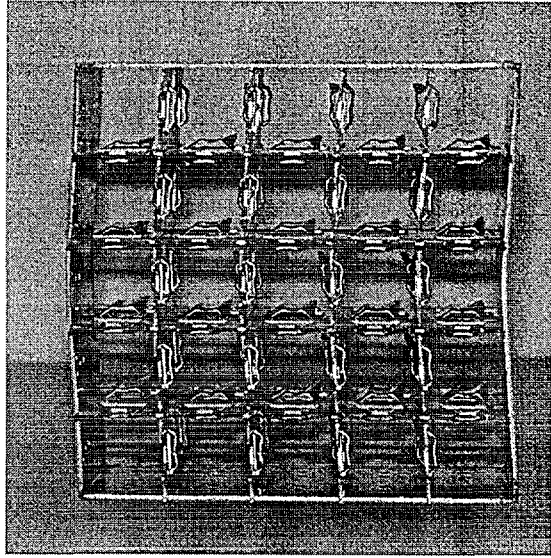
(b) No.2 specimen

사진 2.4 Impact buckling mode shape of H type 3×3 cell grid

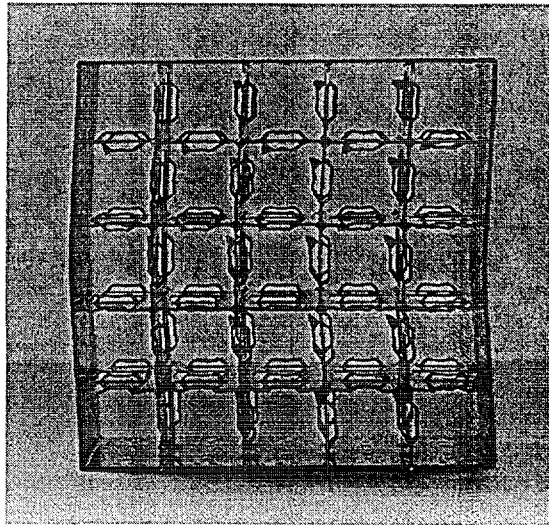


(c) No.3 specimen

사진 2.4 Impact buckling mode shape of H type 3×3 cell grid(continued)

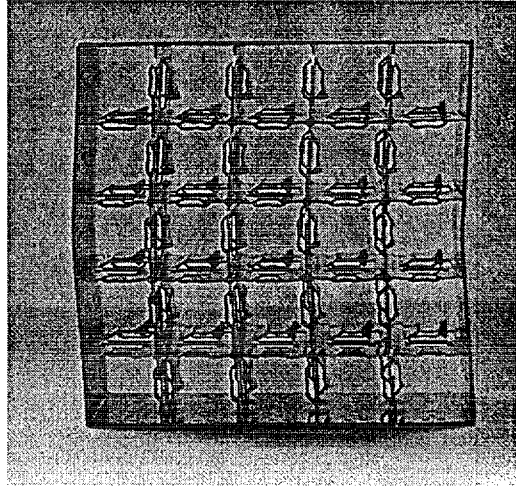


(a) No. 1 specimen



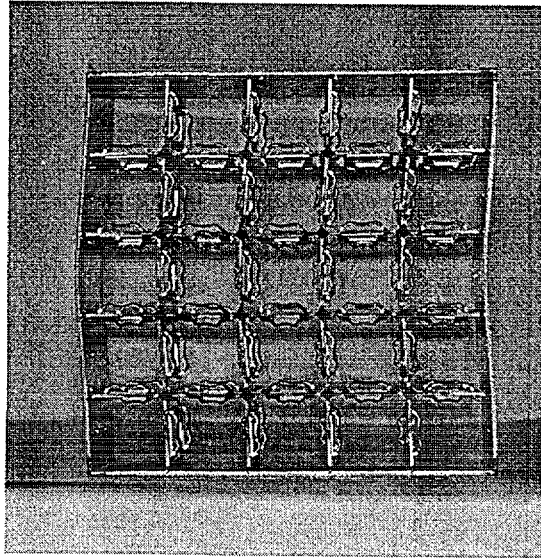
(b) No. 2 specimen

사진 2.5 Impact buckling mode shape of Swirl type 5×5 cell grid

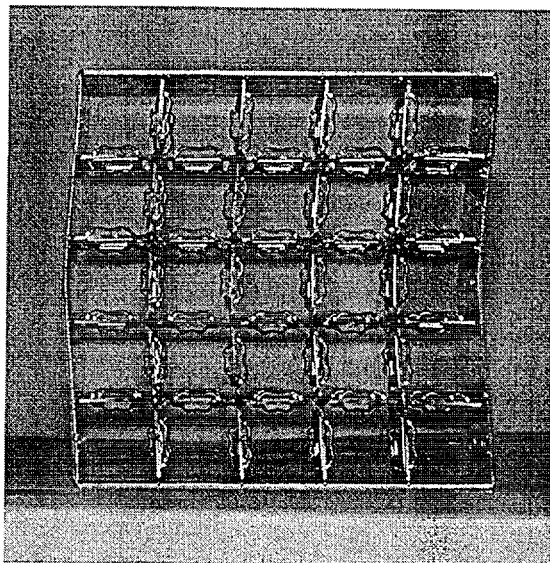


(c) No. 3 specimen

사진 2.5 Impact buckling mode shape of Swirl type 5×5 cell grid(continued)

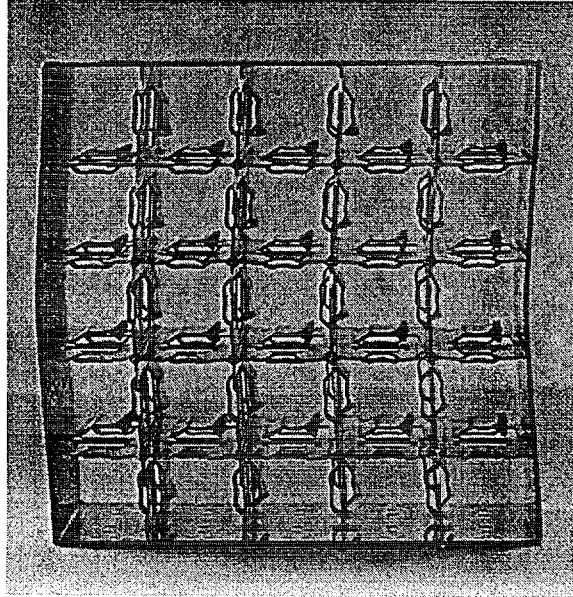


(a) No. 1 specimen



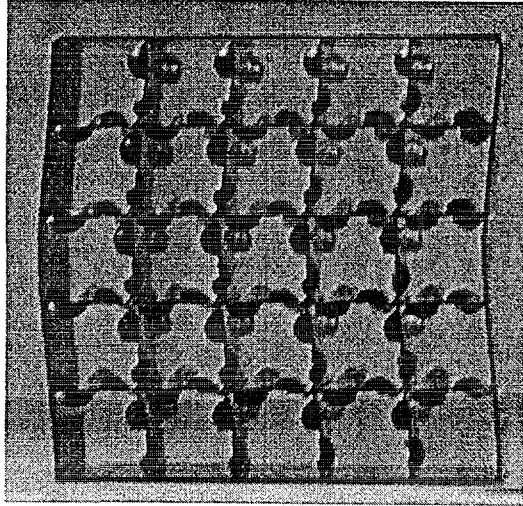
(b) No. 2 specimen

사진 2.6 Impact buckling mode shape of H type 5x5 cell grid

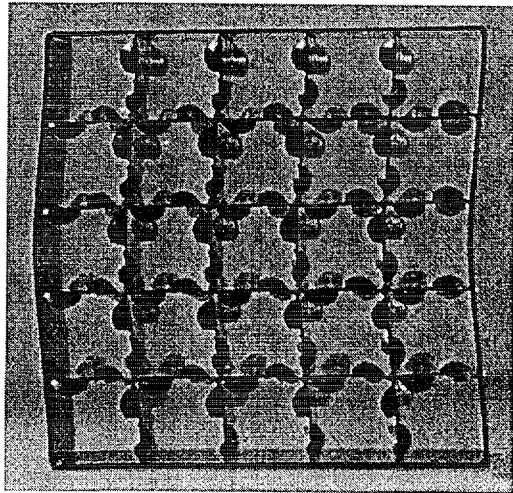


(c) No. 3 specimen

사진 2.6 Impact buckling mode shape of H type 5×5 cell grid(continued)



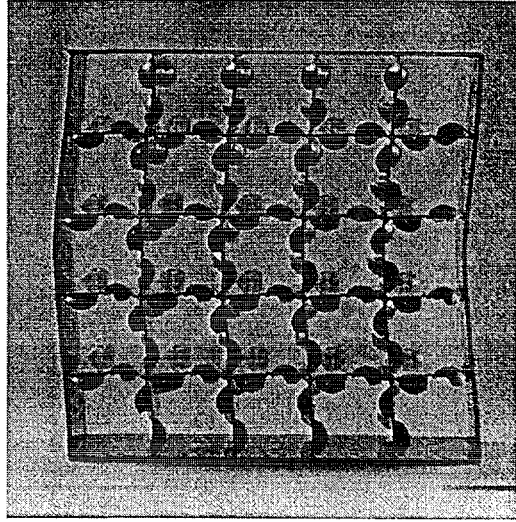
(a) No.1 specimen



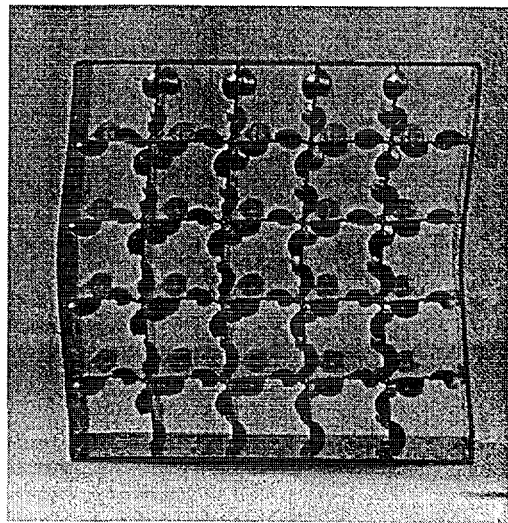
(b) No.2 specimen

사진 2.7 Impact buckling mode shape of Dipper type 5×5 cell grid



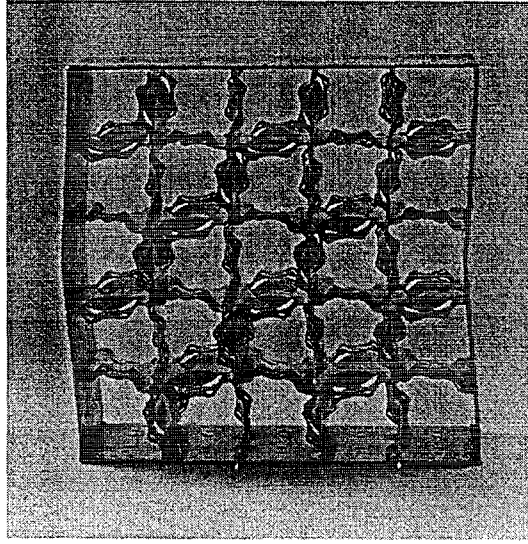


(c) No.3 specimen

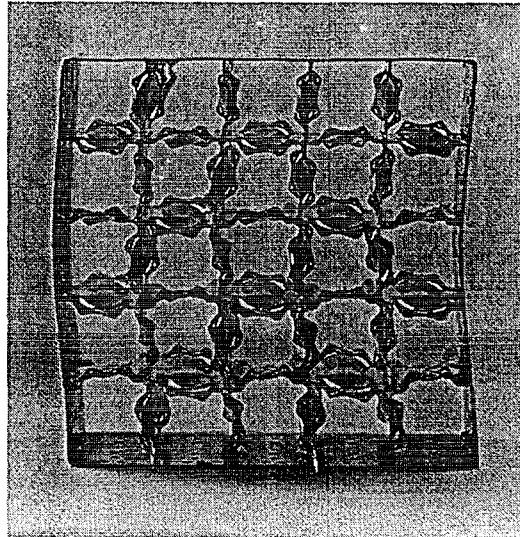


(d) No.4 specimen

사진 2.7 Impact buckling mode shape of Dipper type 5×5 cell grid(continued)

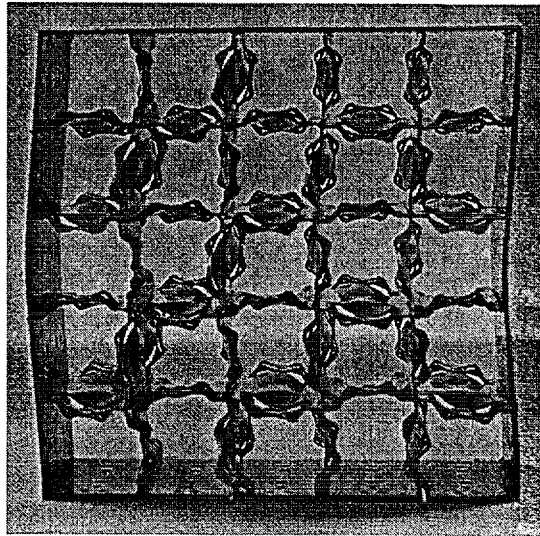


(a) No.1 specimen

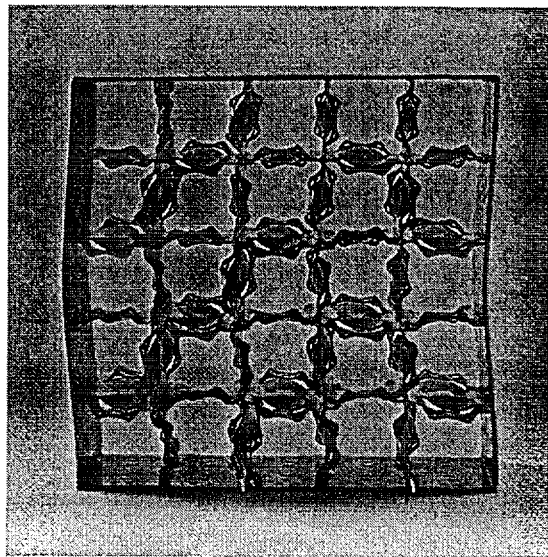


(b) No.2 specimen

사진 2.8 Impact buckling mode shape of Multi-spring type 5×5 cell grid



(c) No. 3 specimen



(d) No. 4 specimen

사진 2.8 Impact buckling mode shape of Multi-spring type 5×5 cell grid(continued)

## 제 3 장 유한요소 해석

### 1절 개요

이론해석 및 충격시험 결과의 타당성을 검증하기 위해 상용 구조해석 코드인 ABAQUS/Explicit[6]를 사용하여 격자구조물의 충격해석을 수행하였다. 충격시험에 사용된 시편의 기하학적 형상 데이터 및 재료의 물성을 적용하여 해석을 수행하여 충격력, 충격속도 및 충격모드를 검토한다.

본 코드를 사용한 구조물의 충격해석은 H형 시편의 기하학적 형상이 비교적 단순하고 모델링이 용이하여 이에 대한 3x3 셀 및 5x5 셀의 수를 갖는 시편에 대해 모델링을 수행하고, 시험시 시편의 고정상태 및 시험절차를 고려한 경계조건을 적용하였다.

### 2절 유한요소 모델 및 경계조건

유한요소 모델은 시편이 크기에 비해 두께가 얇은 박판으로 성형하여 지지격자를 이루고 있으므로 셀 요소를 사용하였다. 그림 3.1(a)는 3x3 셀에 대한 유한요소 모델을 나타내고 있으며, 절점 수는 3296개이며, 요소 수는 2352개이다. 그림 3.1(b)는 5x5 셀에 대한 유한요소 모델을 나타내고 있으며, 절점 수는 8177개이며, 요소 수는 5880개이다. 기하학적 형상 외에 지지격자를 이루고 있는 재질인 스테인레스강의 영의 계수는 186.8 GPa을, 프와송비는 0.3을 사용하였다. 한편, 시편과 동일한 재료의 인장시편을 ASTM[7]에 따라 제조하여 인장시험을 수행하여 해석에 적용하였다. 재료의 항복강도는 258.6 MPa이고, 등방성 경화라 가정하여 표 3.1과 같은 재료의 탄성 및 소성 영역에서의 응력-변형을 관계를 비선형 탄소성 해석을 위해 적용하였다. 이와 마찬가지로 지르칼로이 재질에 대한 인장시험의 결과를 해석에 적용하였으며, 영의 계수는 136.64 Gpa, 프와송비는 0.294, 그리고 항복강도는 319 Mpa으로 이를 표 3.1에 요약하였다.

해석모델은 4절점 셀요소인 S4R[6]을 사용하였다. 이것은 유한 막 변형률(finite membrane strains)과 임의 방향의 대회전(large rotations)을 고려한 것으로 대 변형률 해석에 아주 유효하다고 알려져 있다. ABAQUS/Explicit에서 3차원 셀 요소는 요소의 내력(internal force) 벡터를 계산하기 위해 더욱 낮은 차수의 적분을 사용하며, 따라서 질량 행렬 및 분포된 하중들은 더욱 정확하게 적분된다. 축소된 적분은 보통 더욱 정확한 결과를

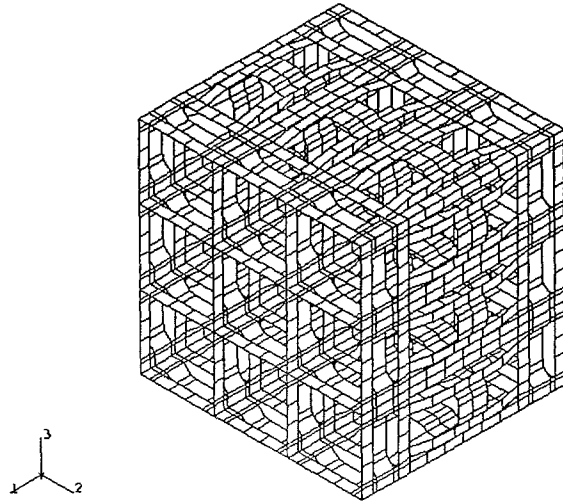
제공하며, 특히 3차원 해석에 있어서는 계산시간을 현저히 감소시켜 준다.

Table 3.1 Material properties of dynamic impact analysis model

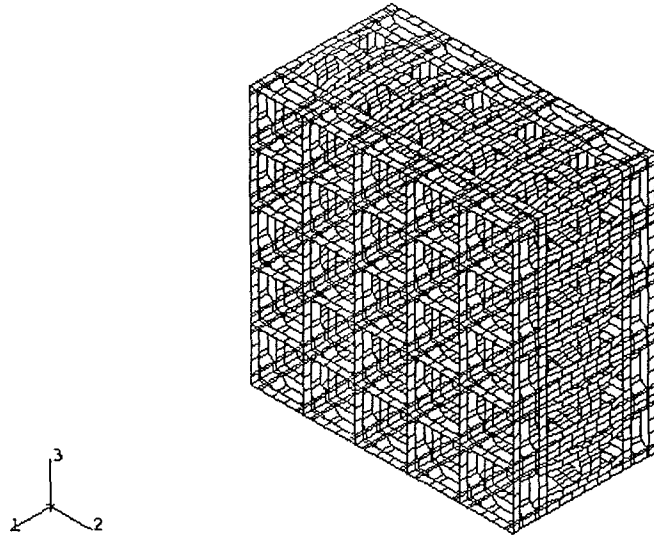
Classification	Elastic				Plastic	
	E(GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$
STS	186.8	258.6	7913	0.3	258.6	0.0
					1582.9	0.6986
Zircaloy-4	136.6	319.0	6550	0.294	319.0	0.0
					469.0	0.3234

- E Young's modulus
- $\sigma_y$  Yield stress
- $\rho$  Density
- $\nu$  Poisson's ratio
- $\sigma$  Stress
- $\epsilon$  Strain

그림 3.2(a) 및 그림 3.2(b)는 해석에 사용된 하중 및 경계조건을 나타내고 있으며, 이는 충격시험시 시편이 평판 위에 고정되므로 밀면의 연직방향의 변위를 구속하였으며, 시편의 회전을 방지하기 위해 밀면의 전위의 모서리 절점은 모든 방향으로의 자유도를 구속하였고, 모델의 회전을 방지하기 위하여 후위의 모서리 절점은 y 방향으로의 변위를 구속하였다. 하중은 시험 시 충격 해머가 시편의 상면에 충격을 가하므로 모델의 상면에 접촉하는 강체 면 (rigid surface)을 R3D4 강체 요소로 모델링하고 이 강체 면에 왕복대 (해머)의 이동질량에 해당하는 질량요소(mass element)를 모델링하였으며, 여기에 연직방향 만으로의 초기 속도를 부여하였다. 비선형 동적 충격해석이므로 해석시간은 충격시험시 대개의 충격 유지시간은 6 msec에서 10 msec인 것을 고려하여 40 msec까지를 매 해석의 증분 시간을 2 msec로 하여 20회의 충격이력이 저장되도록 하였다. 강체 면에 부여한 초기 속도는 격자 셀의 크기를 고려하여 0.1 m/sec에서부터 증분을 0.1로 하여 초기 속도를 증가시켜가면서 해석을 수행하였다. 만일 이 강체 절점에 정의하는 초기속도로 인해 나타나는 충격력이 이전의 단계에서의 해석 결과보다 작아지게 되면 임계 충격력은 현재의 해석단계와 이전의 해석단계에서의 임의의 속도에서 임계 충격력이 존재하게 되므로 초기속도의 증분을 0.01로 줄여 해석을 수행하여 최종의 임계 충격속도를 결정하도록 하였다.

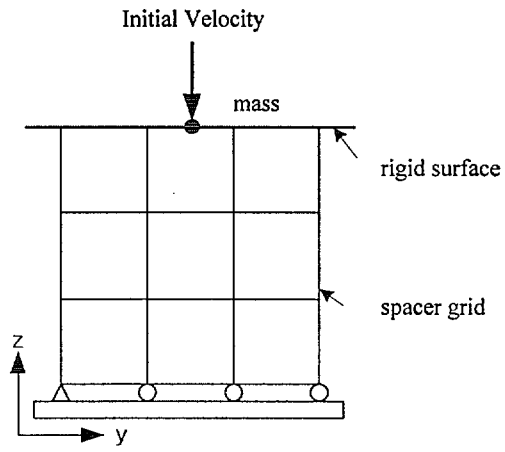


(a) 3×3 cell grid

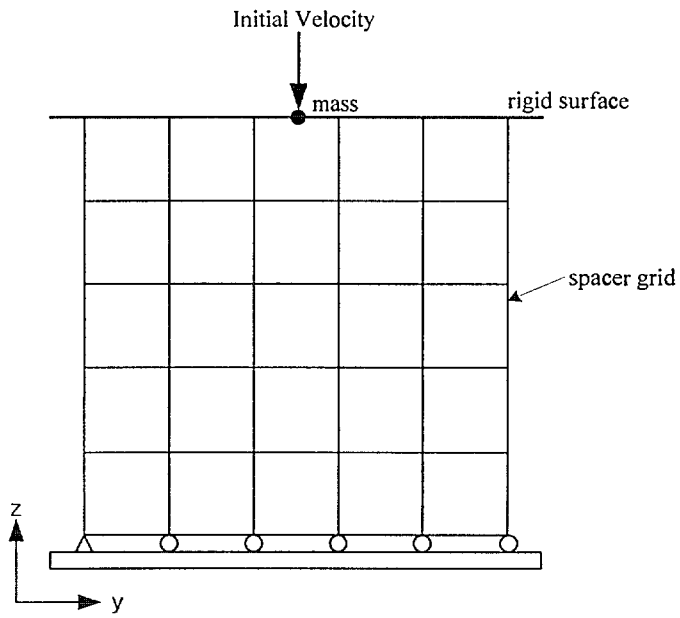


(b) 5×5 cell grid

그림 3.1 FE model of H type specimen for dynamic analysis



(a) 3×3 cell grid



(b) 5×5 cell grid

그림 3.2 Boundary condition for dynamic analysis

### 3절 해석 절차

유한요소 혹은 유한차분 메쉬와 같은 이산(discrete) 모델에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{D}\} = \{F^{ext}\} - \{F^{int}\} \quad (3.1)$$

여기서  $\{F^{ext}\}$ 은 적용된 이산화 하중이며,  $\{F^{int}\}$ 은 연속체, 혹은 구조물의 내부 절점력이고,  $[M]$ 은 이산 질량이며,  $\{D\}$ 는 절점 변위이다. 절점 내력들은 다음과 같이 주어진다.

$$\{F^{int}\} = \sum_e [L]^T \int_V [B]^T \{\sigma\} dV \quad (3.2)$$

여기서  $[L]$ 은 연결행렬이고,  $[B]$ 는 변형률-절점변위 행렬이며,  $\{\sigma\}$ 는 응력 행렬이고  $V$ 는 요소의 체적이다.

유한요소 해석을 위한 적분은 explicit 적분 알고리즘을 사용하였다. 운동방정식의 explicit 적분에서 매 시간 스텝에서의 가속도는 식(3.1)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\{\ddot{D}\} = [M]^{-1} (\{F^{ext}\} - \{F^{int}\}) \quad (3.3)$$

따라서 매 시간 스텝에서의 변위 및 속도는 다음과 같이 식(3.3)에 의해 얻어진다.

$$\begin{aligned} \{D(t+\Delta t)\} &= \{D(t)\} + \Delta t \{\dot{D}(t)\} \\ &\quad + \Delta t^2 \left[ \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \{\ddot{D}(t)\} + \beta \{\ddot{D}(t+\Delta t)\} \right] \end{aligned} \quad (3.4a)$$

$$\{\dot{D}(t+\Delta t)\} = \{\dot{D}(t)\} + (\Delta t/2) \left[ \{\ddot{D}(t)\} + \{\ddot{D}(t+\Delta t)\} \right] \quad (3.4b)$$

만일 질량행렬이 대각행렬 이면, 이 방법은 역행렬을 필요로 하지 않는다. Explicit 적분에서 미분 연산을 위해 가장 일반적으로 사용되는 것은 중앙 차분 연산이나  $\beta=0$ 인 Newmark- $\beta$  등가 연산이다. 일반적으로 explicit 적분 프로그램에서는 강성행렬을 도입하는 것이 가장 효과적인 것은 아니나 내력을 구하기 위해 직접 적용하면 식(3.3)은 다음과 같이 된다.

$$\{\ddot{D}\} = [M]^{-1} \left( \{F^{ext}\} - \sum_e [L]^T \int_V [B]^T \{\sigma\} dV \right) \quad (3.5)$$



위 식에서의 적분은 매 시간 스텝에서 수치적으로 계산된다. 강성행렬은 전혀 사용되지 않는다. 이러한 형태는 큰 문제, 비선형 천이 프로그램에서 Belytschko 및 Chiapetta [8]에 의해 먼저 도입되었다. 이 방법은 강성행렬을 포함한 방법보다 더욱 효율적이다. 사실 강성행렬의 사용은  $\{D\}$ 에 대한  $\{F^{int}\}$ 의 미분을 계산하는 것과 동가이며, 이 미분값에  $\{\Delta D\}$ 를 곱해  $\{F^{int}\}$ 를 얻는다. 이것은 직접  $\{F^{int}\}$ 를 계산하는 것보다 훨씬 효율적이다.

#### 4절 해석 결과

##### 1. 3×3 셀 지지격자체

해석에서의 지지격자체에 가해진 충격력은 연직방향으로의 변위 구속조건이 적용된 끝단에서의 반력의 합으로 구하였고, 초기 속도가 증가함에도 충격력이 오히려 작아지는 시점의 충격속도를 임계 충격속도로 간주하였다. 충격 모드는 해석이 매 2 msec마다 저장되므로 충격력, 즉 반력이 최대가 되는 시점의 변형된 형상을 충격 모드로 하였다.

임계 충격력은 초기 충격속도가 0.4 m/sec일때 5457 N이었고, 이 충격하중의 유지시간은 8 msec이었다. 초기 충격속도에 따른 충격력의 변화를 그림 3.3에 나타내었고, 충격속도 0.4 m/sec의 충격하중이 모델에 가해졌을 때 시간 영역에서의 충격력의 변화 추이를 그림 3.4에 나타내었다. 그림 3.5는 충격 해석시의 임계 충격강도에 도달했을 때의 von Mises 등가 응력 분포를 도시하였고, 이를 살펴보면 외부의 충격에 저항하는 부분은 지지격자에서 충격속도에 연직한 방향의 모서리 다리(corner leg) 부분임을 알 수 있었다. 그림 3.6은 충격시의 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain)을 나타내고 있으며, 지지격자를 구성하기 위한 용접부 주변에서 응력의 집중 현상이 발생하게 되고 좌굴이 진행됨에 따라 용접부 주변의 소성 힌지(plastic hinge)에서 변형률 집중(strain localization) 현상이 일어났음을 알 수 있었다. 즉, 구조물에서 일단 소성변형이 발생하게 되면 소성변형이 발생한 영역에서는 국부적으로(locally) 재료의 강성이 저하된다. 따라서 대부분의 변형이 이 영역에 집중되게 되고 이에 의해 탄성영역에서는 제하(unloading) 현상이 일어나 좌굴후 구조물의 강도가 급격히 감소하게 된다. 이는 전단띠(shearing band) 발생시 전단띠 내에서는 전단 변형률 집중이 일어나지만, 변형률 집중이 일어나는 전단띠 바깥 영역에서는 탄성 제하가 일어나는 것과 유사한 현상이다. 이때 변형률 집중이 발생하는 영역에서의 요소를 세분화해야만 변형률 집중 거동을 정확히 묘사할 수 있다[9]. 이와 같은 변형률 집중에 의해 탄성영역에서는 좌굴 순간까지 일어났던 변형 형상(deformed shape)이 좌굴 후

탄성 제하에 의해 다시 초기의 형상으로 돌아가려는 경우도 있는데 본 지지격자체의 해석 시에도 이러한 현상을 발견하였다.

충격 모드는 좌굴이 발생한 임계 시점의 초기 충격속도를 가한 경우의 매 해석 단계에서 변형된 형상으로 확인하였다. 그림 3.7은 3x3 셀을 갖는 지지격자체의 매 2 msec 단위로 변형된 형상을 도시하고 있다. 이것은 강체면이 구조물에 접촉한 시점에서부터 일정 시간 충격을 유지하고 반발되어 튀어나가는 현상을 아주 잘 나타내고 있다. 강체면에는 오직 연직방향을 제외하고 모든 방향으로의 자유도를 구속하였으므로 강체면은 연직방향으로 튀어나감을 알 수 있었다. 임계 초기 충격속도인 0.40 m/sec의 속도로 강체면이 모델에 충격이 가해진 경우 외부 하중에 저항하는 모서리 다리 부분에서 변형을 집중으로 이 부분에서 소성변형이 심해져 최상단 및 최하단 층의 격자에서 국부적 좌굴현상이 발생하였다. 이는 이 셀의 층에서 모든 격자들은 전단형태의 좌굴을 일으키게 되며 따라서 좌굴모드는 충격시험에서 얻은 좌굴모드와 상당히 유사한 것으로 나타났다.

## 2. 5x5 셀 지지격자체

해석에서 지지격자체에 가해진 충격력은 3x3 셀 지지격자와 동일한 연직방향으로의 변위 구속조건이 적용된 6개 끝단에서의 반력의 합으로 구하였고, 초기 속도가 증가함에도 충격력이 오히려 작아지는 시점의 충격속도를 임계 충격속도로 간주하였다. 충격 모드는 해석이 매 2 msec마다 저장되므로 충격력, 즉 반력이 최대가 되는 시점의 변형된 형상을 충격 모드로 하였다.

임계 충격력은 초기 충격속도가 0.50 m/sec일때 8017 N이었고, 이 충격하중의 유지시간은 8 msec이었다. 이를 그림 3.8에 나타내었고, 각 초기 충격속도별 충격력의 변화 추이는 그림 3.9에 나타내었다. 그림 3.10은 충격 해석시의 von Mises 등가 응력 분포를 나타내고 있으며, 이를 살펴보면 외부의 충격에 저항하는 부분은 지지격자에서 충격속도에 연직한 방향의 모서리 다리(corner leg) 부분임은 3x3 셀 지지격자와 동일하나 셀의 수가 증가함에 따라 충격력이 유지되는 현상은 이와는 다르게 나타났다. 즉, 임의의 초기속도로 충격이 구조물에 가해지면 이 충격력은 구속된 경계조건을 갖는 하부의 6개 끝단에서 응력이 증가하게 되며 이것이 시간이 흐름에 따라 전체 구조물로 전파되는 현상으로 전개되었다. 그림 3.10에서 충격시의 von Mises 등가 응력은 하부 두 개의 층에서 최대 응력을 보이고 있으나, 다른 상부의 층에서는 이보다는 작은 응력을 나타내었다. 이것은 그림 3.11에서와 같이 임계

충격속도에서는 이 하부 두 개의 층에서 먼저 소성변형이 발생하게 되고 이로 인한 변형률 집중현상에 의해 이 층들에서만 국부 좌굴현상이 발생하게 됨을 알 수 있다. 그러나 최대 등가 응력은 3×3 셀 구조물과 크게 다르지는 않은 것을 알 수 있다.

따라서 이 5×5 셀 격자를 갖는 구조물의 경우 하부 두 개 층에서의 변형률 집중현상이 더욱 심화하여 이 부분에서 국부 좌굴거동을 보임을 알 수 있다. 충격 모드는 좌굴이 발생한 시점의 초기 충격속도를 가한 경우의 매 해석 단계에서 변형된 형상을 도시하였다. 그림 3.12는 5×5 셀을 갖는 지지격자체의 2 msec 단위로 변형된 형상을 도시하고 있다.

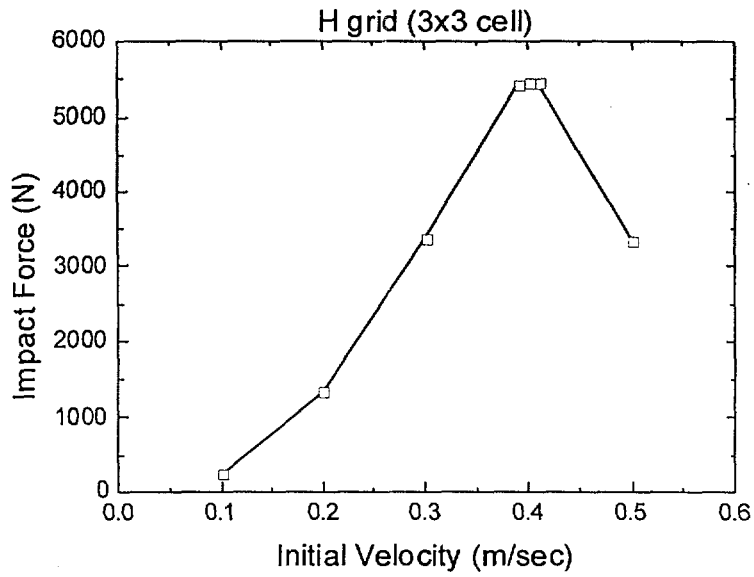


그림 3.3 Impact force of H type 3x3 cell grid by dynamic analysis

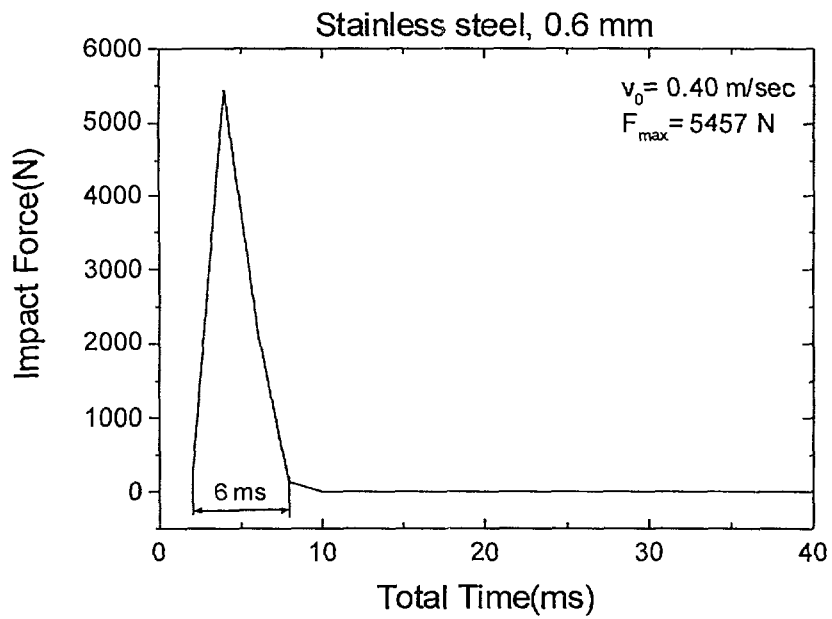


그림 3.4 Impact force of H type 3x3 cell grid by dynamic analysis

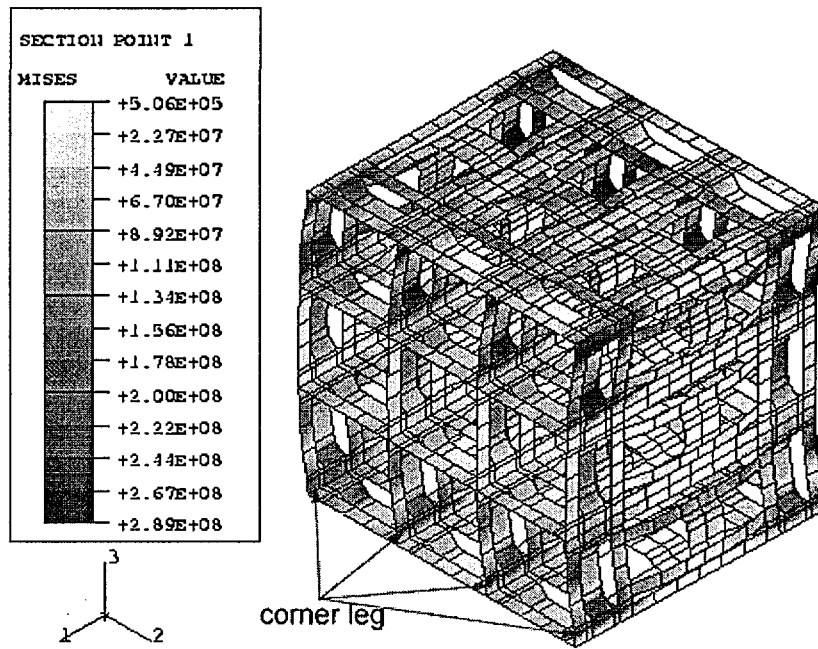


그림 3.5 von Mises equivalent stress contour of H type 3x3 cell grid

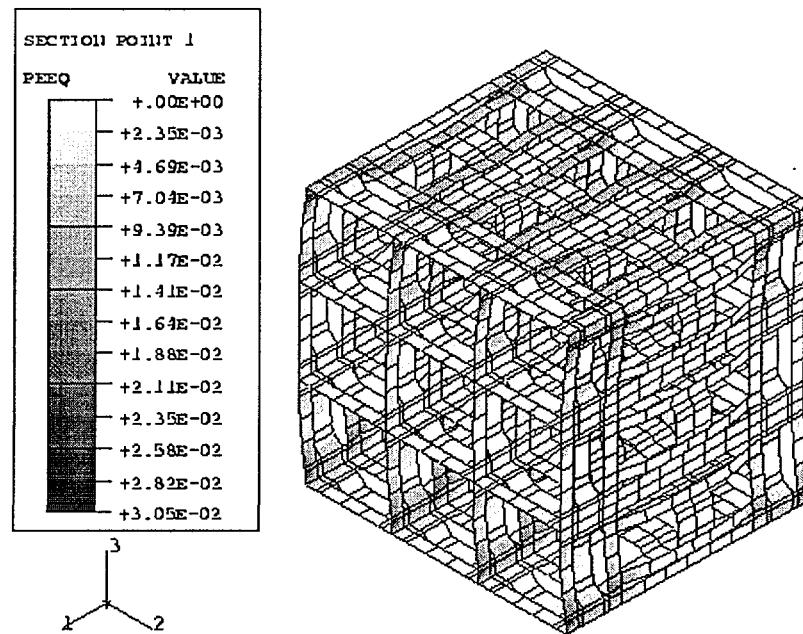
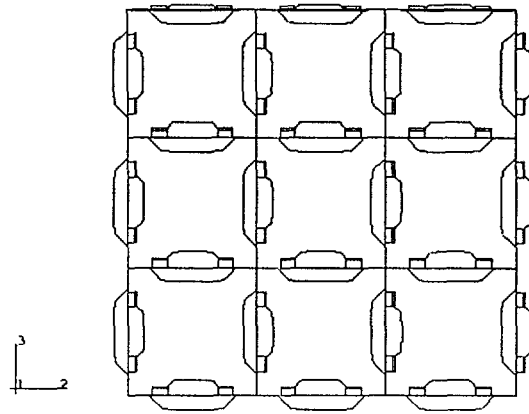
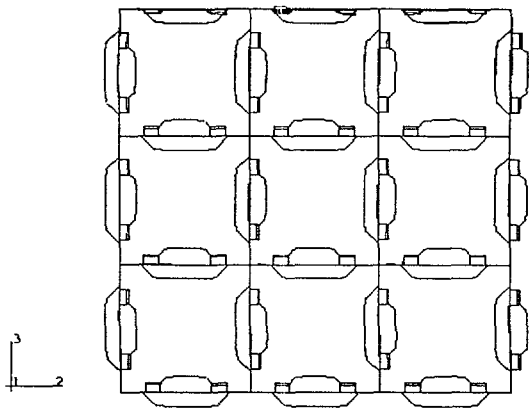


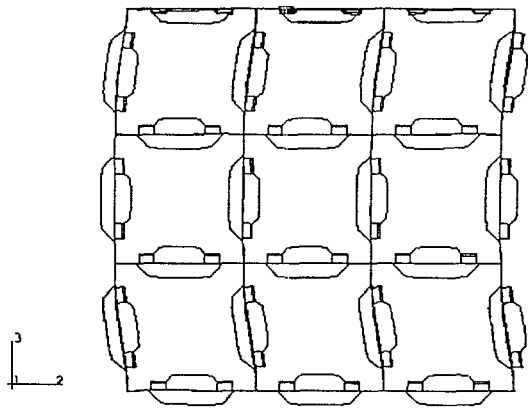
그림 3.6 Equivalent plastic strain contour of H type 3x3 cell grid



(a) 2 msec

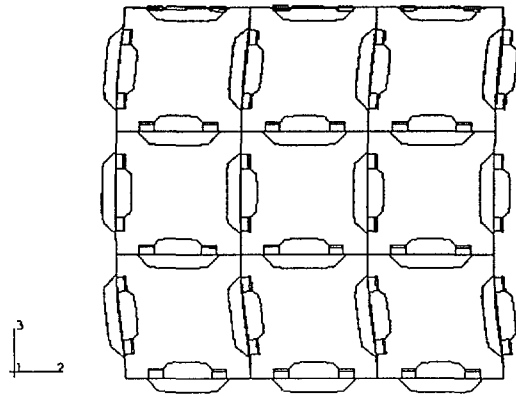


(b) 4 msec

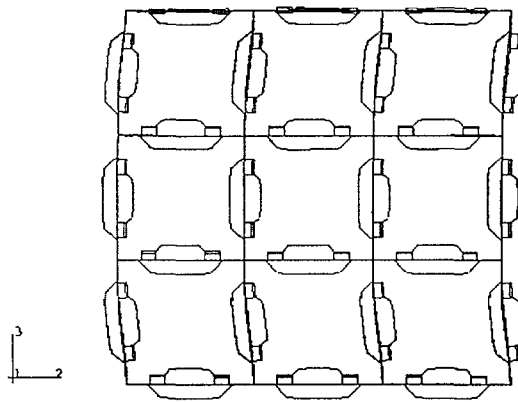


(c) 6 msec

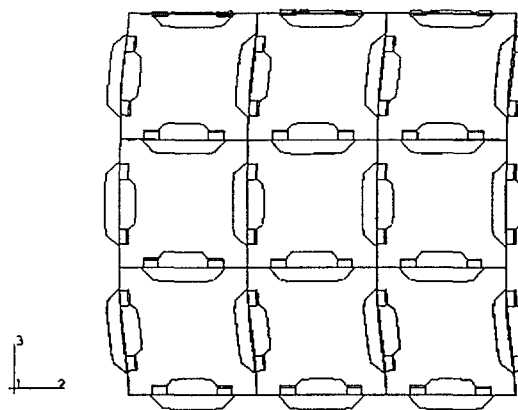
그림 3.7 Impact mode shape of H type 3×3 cell grid



(d) 8 msec



(e) 10 msec



(f) 12 msec

그림 3.7 Impact mode shape of H type 3×3 cell grid(continued)

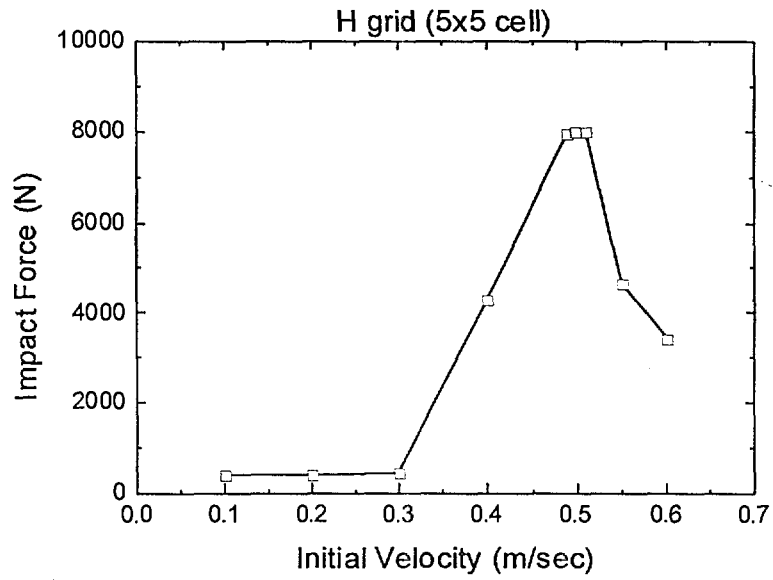


그림 3.8 Impact force of H type 5x5 cell grid by dynamic analysis

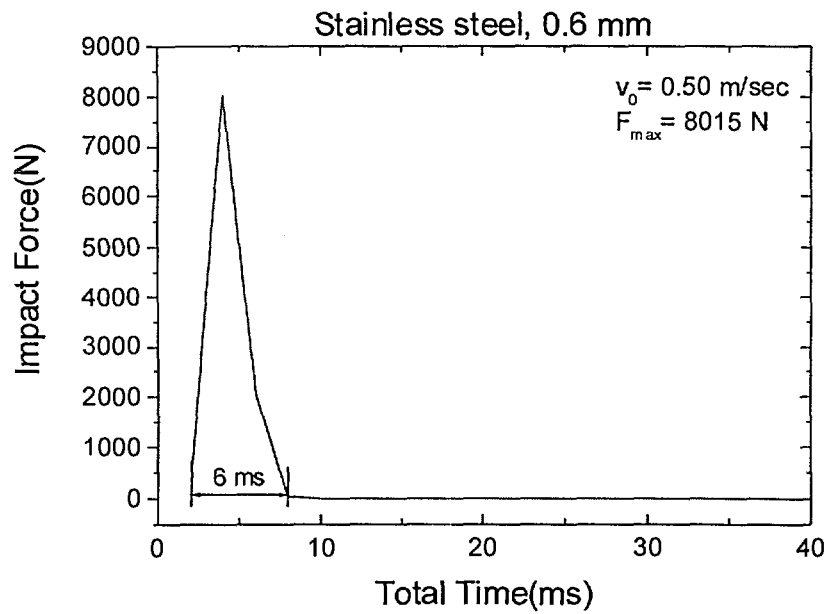


그림 3.9 Impact force of H type 5x5 cell grid by dynamic analysis



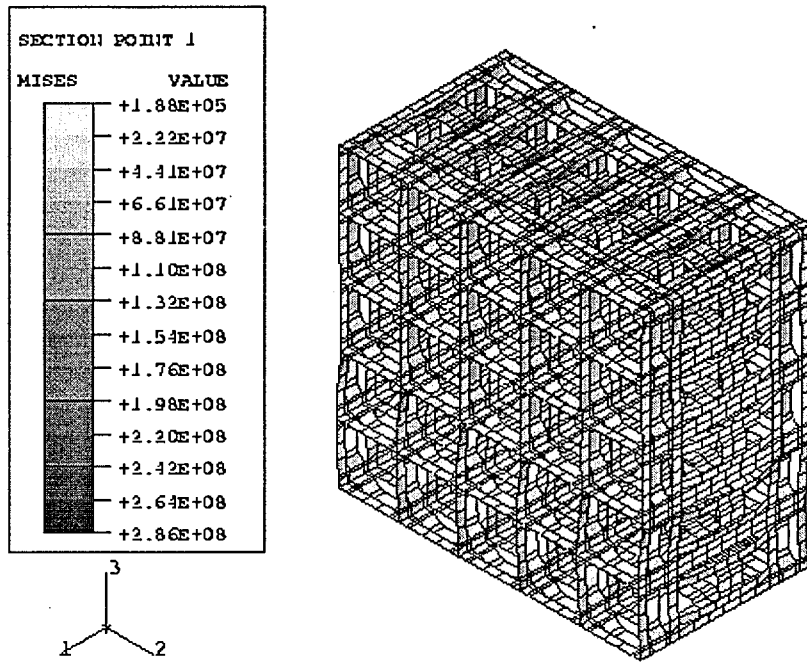


그림 3.10 von Mises equivalent stress contour of H type 5x5 cell grid

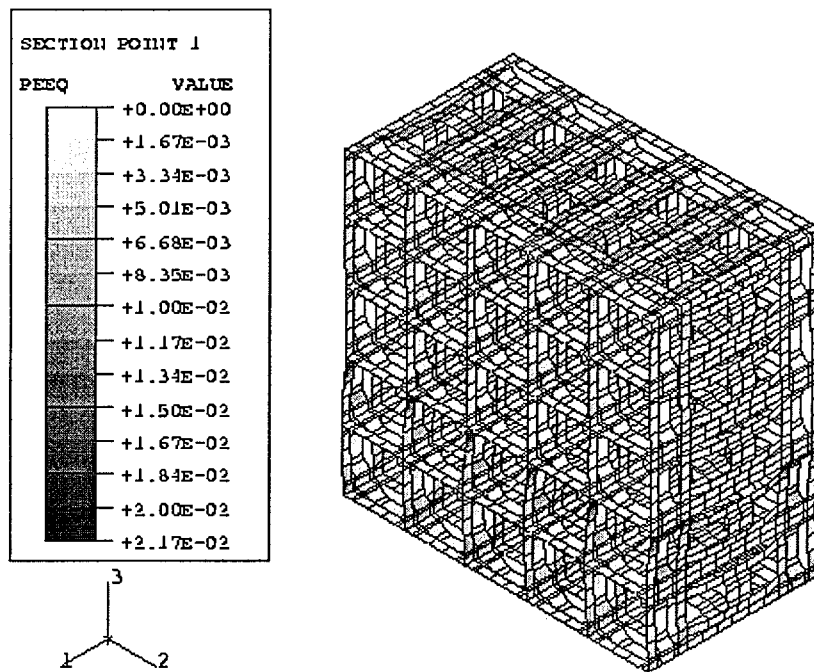
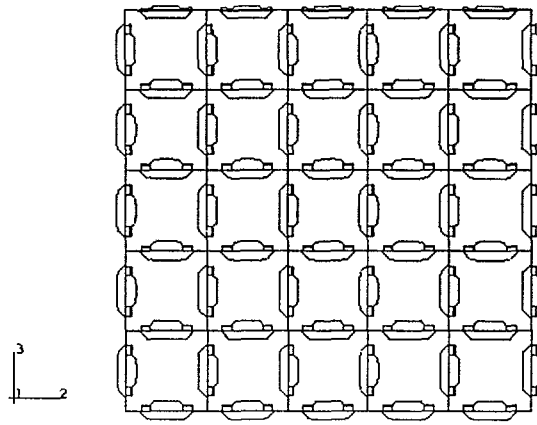
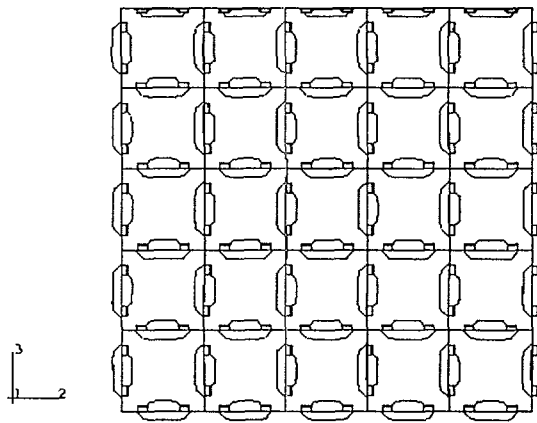


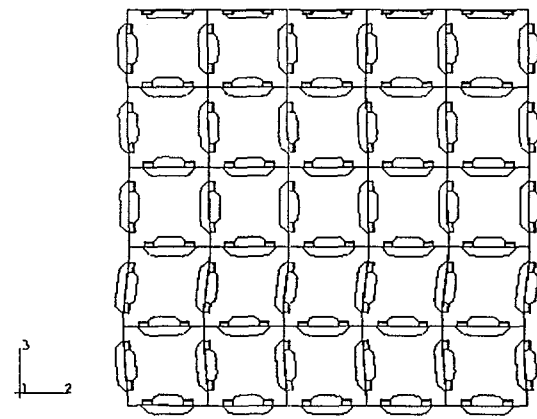
그림 3.11 Equivalent plastic strain contour of H type 5x5 cell grid



(a) 2 msec

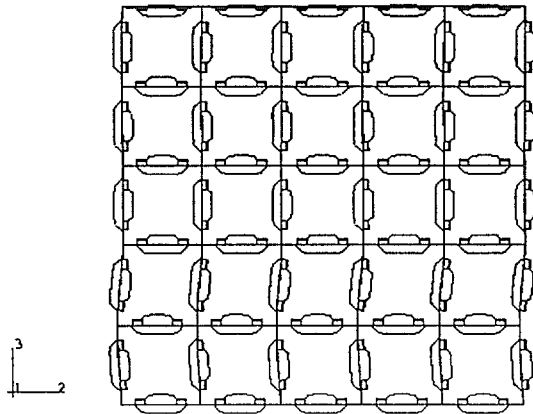


(b) 4 msec

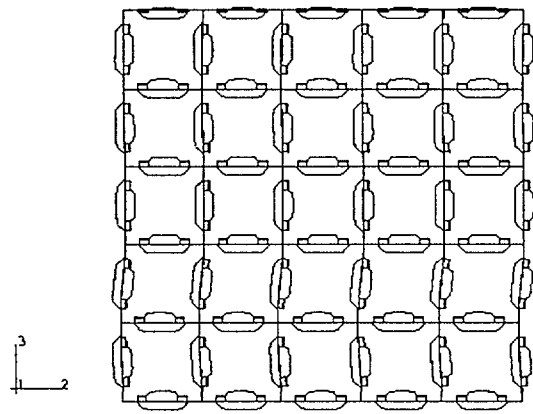


(c) 6 msec

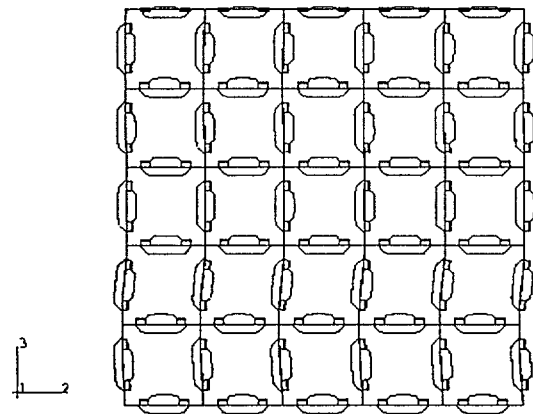
그림 3.12 Impact mode shape of H type 5x5 cell grid



(d) 8 msec



(e) 10 msec



(f) 12 msec

그림 3.12 Impact mode shape of H type 5×5 cell grid(continued)

### 3. 재질에 따른 지지격자체의 좌굴 거동

비선형 동적 충격해석을 위한 유한요소 모델을 사용하여 지지격자의 사용 재질에 따른 좌굴 거동을 파악하고자 하였다. 지지격자체의 충격시험을 스테인레스강과 지르칼로이 재질로 시편을 제조하여 시험을 수행하였기에 이 재질의 물성을 소성 영역까지 확장하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 스테인레스강 및 지르칼로이의 물성은 ASTM에 따른 인장시편을 제조하여 인장시험한 표 3.1에 나타낸 결과를 사용하였다. 지지격자체를 구성하고 있는 판의 두께는 공히 0.6 mm를 사용하였으며, 지지격자체의 형상은 3×3 셀로 하였다.

#### 가 임계 충격강도

지지격자체의 재질에 따른 충격강도를 유한요소법을 사용하여 고찰하였다. 사용된 재질은 스테인레스강과 지르칼로이의 동일한 두께를 갖는 3×3 셀 격자에 대해 동적 충격해석을 수행한 결과 임계 충격강도는 스테인레스강의 경우 5457 N이었으나 지르칼로이의 경우 4527 N으로 스테인레스강에 비해 약 17 % 작은 값을 나타내었다. 이것은 동일한 기하학적 형상을 가진 지지격자체의 임계 충격하중은 단순히 재료의 탄성계수에 의존한다는 것을 나타내며, 그림 3.13에 이를 비교하여 나타내었다.

#### 나 임계 충격속도

임계 충격속도는 스테인레스강의 경우 0.40 m/s로 나타났으나 지르칼로이의 경우는 0.30 m/s로 나타났다. 또한 충격 유지시간이 스테인레스강이 6 ms인데 비해 지르칼로이의 경우 4 ms로 충격 유지시간이 약간 짧다. 충격해머의 질량은 동일하므로 충격시 충격 가속도는 스테인레스강과 지르칼로이의 경우를 비교하면 그림 3.14와 같이 지르칼로이 재질을 사용한 구조물이 더 작은 속도의 충격에서 좌굴을 일으킨다는 것을 알 수 있었다.

#### 다 충격에 의한 좌굴모드

충격에 의한 좌굴모드는 스테인레스강이나 지르칼로이 재질의 경우 탄성 제하에 의해 좌굴 발생후 변형 형상이 원래의 형상으로 되돌아가려는 현상이 나타났다. 그러나 재질의 변화가 충격모드 형상의 변화를 가져오지는 않았으며, 다만 임계 충격속도와 임계 충격력의 차이만을 나타내었다.

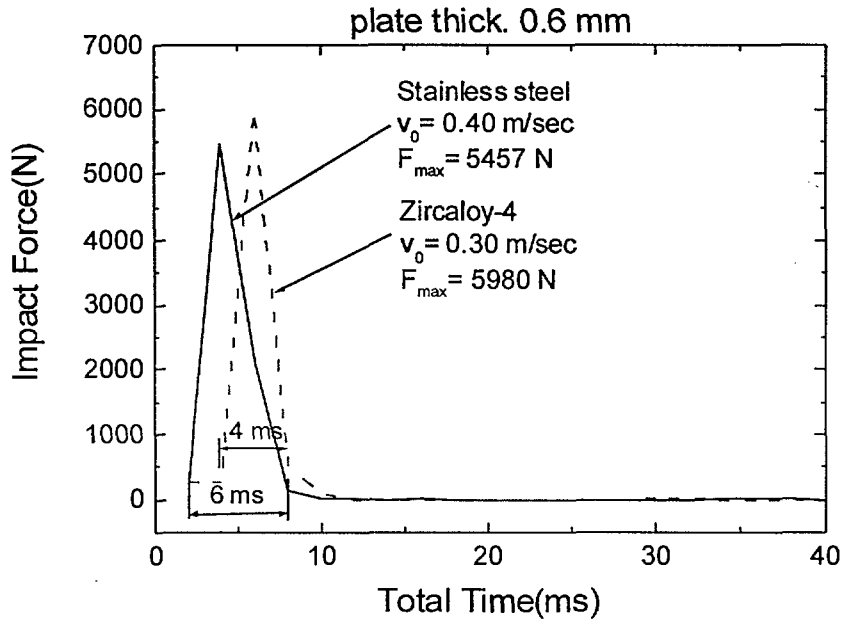


그림 3.13 Critical impact force of H type 3x3 cell grid by dynamic analysis

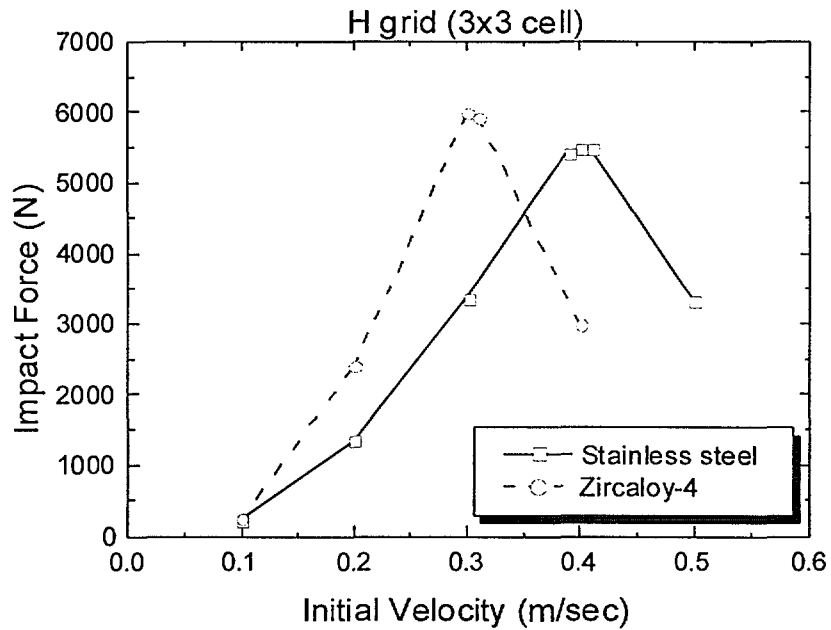


그림 3.14 Comparison of critical impact velocity of H type 3x3 cell grid

## 제 4 장 결과 및 고찰

본 장에서는 여러 형태를 갖는 지지격자체의 이론해석 결과와 충격시험에서 얻은 결과를 비교하였다. 충격시험은 시험시 충격에 의한 노이즈를 엄밀히 제거할 수 있는 베드에 고정치구를 통하여 시편을 고정하여 여러 재질 및 여러 형태의 격자 형태를 갖는 시편에 대해 시험을 수행하였다. 동일한 모델에 대하여 유한요소법을 사용하여 충격해석을 수행한 결과와 시험에서 얻은 결과를 비교하였다.

### 1절 충격시험에 대한 고찰

#### 1. 3×3 셀 지지격자

##### 가 임계 충격강도

두께 0.6 mm의 스테인레스강 판으로 제조한 3×3 셀 격자 시편 4종에 대한 자유낙하 충격시험을 수행하여 그 결과를 표 4.1에 요약하였다. KOFA형 격자 시편의 경우 평균 약 57 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 4107 N을 나타내었다. 이중판형 격자 시편의 경우 역시 평균 약 57 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 2687 N을 나타내었다. C 형 격자 시편의 경우, 평균 약 64 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 4019 N을 나타내었다. D 형 격자 시편의 경우, 평균 약 76 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 5364 N을 나타내었다. 자유낙하 충격시험시 정적 하중에 의한 좌굴과 같이 좌굴하중이 명확히 구분되지 않으므로 충격시험시 하중의 유지시간(duration time) 변화를 추적하였다. 물론 낙하높이에서의 충격력 변화로도 좌굴 발생시점을 파악할 수 있으나 지지격자체에 좌굴이 발생하면 에너지 흡수에 의해 유지시간이 좌굴 발생 이전과는 다르게 나타날 것이기 때문에 각 시편별 유지시간을 살펴보면 좌굴 이전에는 6 ~ 8 msec를 유지하다가 좌굴이 발생한 이후에는 8 ~ 14 msec로 증가하였다.

표 4.1 Comparisons of the critical impact force of 3×3 cell grid by impact test

Classification	Critical drop height (mm)	Critical impact force (N)	Critical impact acceleration (g)
KOFA type	57.15	4107	16.6
Doublet type	57.15	2687	11.19
Swirl type	63.5	4019	16.4
H type	76.2	5364	21.45

나 임계 충격속도

임계 충격속도는 평균 임계 자유낙하높이를 구하여 이를 식 3.3에 대입하여 계산하였다. 자유낙하 충격시험의 경우 임계 충격속도는 낙하높이에 따라 결정된다. 3×3 셀 격자 시편의 경우 각 시편에 따라 5 % 내외의 차이를 나타내고 있으며, KOFA형과 이중판 격자체 시편의 경우 0.27 에서 0.30 m/sec, 회전유동 격자체 시편의 경우는 0.29 에서 0.33 m/sec, H형 격자체 시편의 경우는 0.33 에서 0.36 m/sec를 나타내었다.

표 4.2 Comparisons of the critical impact velocity of 3×3 cell grid by impact test

Classification	Critical impact velocity range (m/sec)	Average value (m/sec)
KOFA Type	0.27 ~ 0.30	0.29
Doublet Type	0.27 ~ 0.30	0.29
Swirl Type	0.29 ~ 0.33	0.30
H Type	0.33 ~ 0.36	0.33

다 충격모드

지지격자의 충격하중에 의한 좌굴모드는 시편의 형상에 관계없이 모두 유사하였다. 즉, 지지격자의 좌굴은 전체적 좌굴거동이 발생하기 전 격자부를 형성하기 위한 용접부 주변에서 국부적 응력집중이 발생하게 되고 좌굴이 진행됨에 따라 이 영역에서의 변형률 집중 현상이 나타나게 된다. 이 변형률 집중현상은 각 셀의 모서리 부근에서 심화하게 되며 따라서 최상층과 최하층의 셀에서 발생하기 시작한 국부 좌굴현상으로 인해 이 층에서 전단 하중이 작용하는 것과 같은 좌굴모드가 발생하였다. 그러나 이 최상층과 최하층을 제외한 다른 중간의 셀 층에서는 전단 형태의 변형이 발생하지 않았고, 다만 연직방향으로의 이동만을 나타내었다.

## 2. 5×5 셀 지지격자

### 가 임계 충격강도

지르칼로이 0.457 mm 두께를 갖는 얇은 판으로 제조한 5×5 셀 격자 시편 4종 각 4개씩을 자유낙하 충격시험을 수행하여 그 결과를 표 4.1에 요약하였다. 회전유동 격자체 시편의 경우 평균 약 57 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 2912 N을 나타내었다. H형 격자체 시편의 경우 역시 평균 약 57 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 3766 N을 나타내었다. 바가지형 격자체 시편의 경우, 평균 약 70 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 3892 N을 나타내었다. 다중스프링형 격자체 시편의 경우, 평균 약 63.5 mm의 낙하높이에서 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 그 값은 약 3784 N을 나타내었다. 자유낙하 충격시험시 정적하중에 의한 좌굴과 같이 좌굴하중이 명확히 구분되지 않으므로 충격시험시 하중의 유지시간 (duration time) 변화를 추적하였다. 물론 낙하높이에서의 충격력 변화로도 좌굴 발생시점을 파악할 수 있으나 지지격자체에 좌굴이 발생하면 에너지 흡수에 의해 유지시간이 좌굴 발생 이전과는 다르게 나타날 것이기 때문에 각 시편별 유지시간을 살펴보면 좌굴 이전에는 6 ~ 7 msec를 유지하다가 좌굴이 발생한 이후에는 8 ~ 10 msec로 증가하였다.

표 4.3 Comparisons of the critical impact force of 5×5 cell grid by impact test

Classification	Critical drop height (mm)	Critical impact force (N)	Critical impact acceleration (g)
Swirl type	57.15	2912	11.48
H type	57.15	3766	14.53
Dipper type	63.5	3892	15.49
Multi-spring type	76.2	3784	15.24

### 나 임계 충격속도

임계 충격속도는 평균 임계 자유낙하높이를 구하여 이를 식 2.3에 대입하여 계산하였다. 자유낙하 충격시험의 경우 임계 충격속도는 낙하높이에 따라 결정된다. 5×5 셀 격자 시편의 경우 각 시편에 따라 5 % 내의 차이를 나타내고 있으며, 그 값은 회전유동형과 H형 격자체 시편의 경우는 0.29 에서 0.30 m/sec, 바가지형격자체 시편의 경우는 0.30 에서 0.33 m/sec, 다중스프링형 격자체 시편의 경우는 0.30 에서 0.32 m/sec를 나타내었다.



표 4.4 Comparisons of the critical impact velocity of 5×5 cell grid by impact test

Classification	Critical impact velocity range (m/sec)	Average value (m/sec)
Swirl Type	0.29 ~ 0.30	0.29
H Type	0.29 ~ 0.30	0.29
Dipper Type	0.30 ~ 0.33	0.32
Multi-spring Type	0.30 ~ 0.32	0.30

다 충격모드

지지격자의 충격하중에 의한 좌굴모드는 시편의 형상에 관계없이 모두 유사하였다. 그러나 이 5×5 셀 구조를 갖는 시편들은 3×3 셀 구조의 시편들과는 달리 최외곽의 바깥은 내부보다 두께가 두꺼운 다른 판들을 중첩시켜 시편을 제조하였다. 따라서 이 부분에 교차부 용접에 추가로 외부의 박판들이 서로 중첩하는 부분에 시임용접을 하였다. 이 외부의 시임 용접부는 외부 측면에서의 충격하중에 저항하는 힘이 내부 교차부에서의 저항력보다 상대적으로 커 이 교차부에서 먼저 국부 좌굴이 발생하게 된다. 이러한 외부에서의 하중에 저항하는 힘이 다르게 나타나는 불균형은 3×3 셀 구조의 시편과는 그 좌굴모드가 다르게 나타났다. 즉, 지지격자체의 1차 모드와 같은 형태의 좌굴모드로 변형이 일어났다. 이 변형모드는 중앙의 셀 층을 기준으로 z-축방향으로 대칭을 이루는 형태를 가졌다.

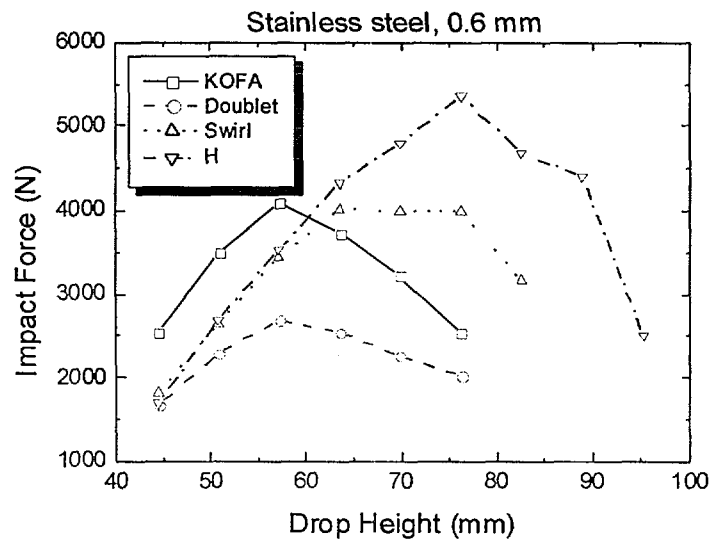


그림 4.1 Comparison result of impact force of 3×3 cell grid

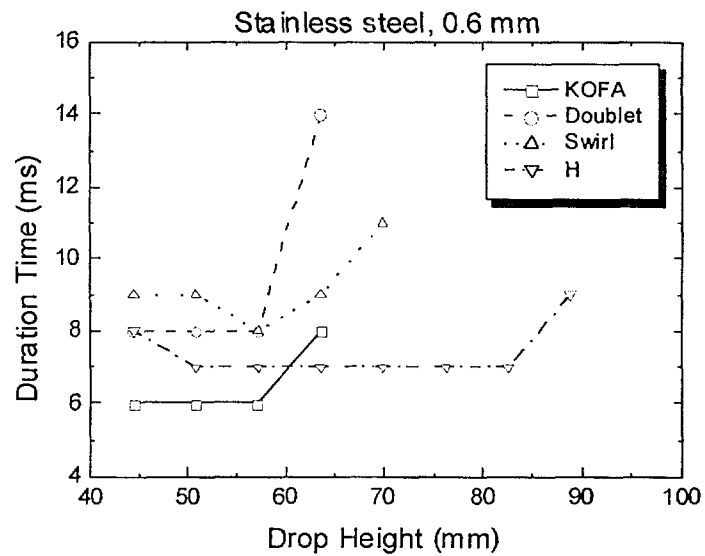


그림 4.2 Duration time of 3×3 cell grid by impact test

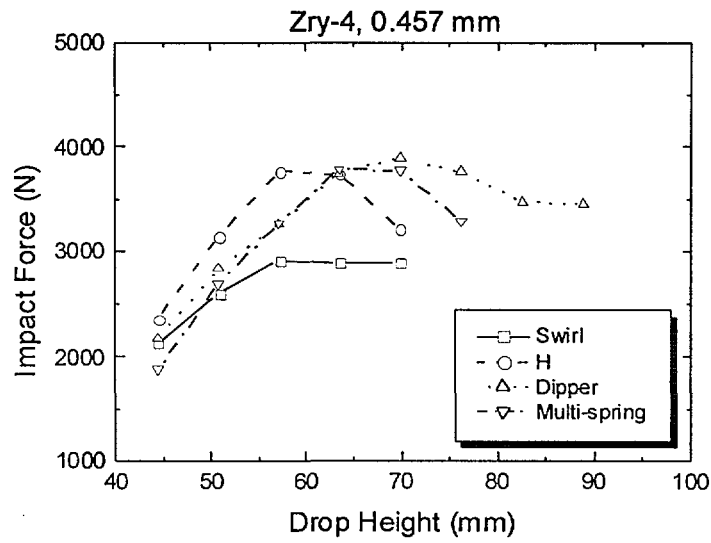


그림 4.3 Comparison result of impact force of 5×5 cell grid

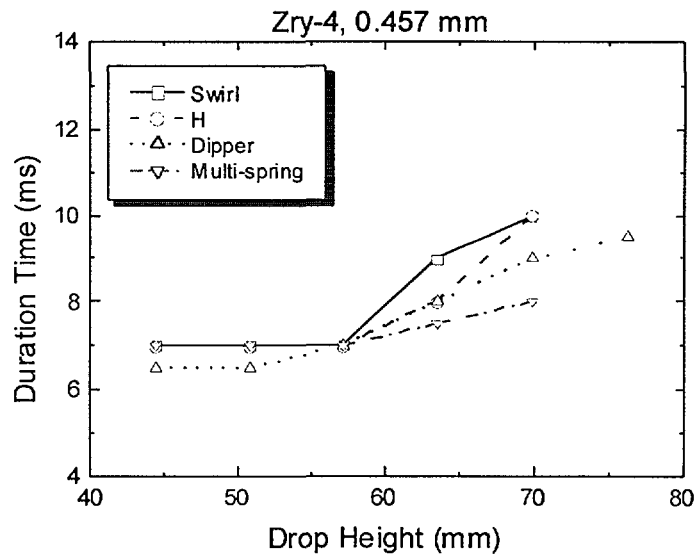


그림 4.4 Duration time of 5×5 cell grid by impact test

## 2절 충격시험 결과와 유한요소 해석결과와의 비교

본 절에서는 자유낙하 충격시험 결과와 이 시험을 모사한 비선형 동적 충격해석 결과를 비교하였다. H형 격자체 시편의 충격시험으로부터 얻은 결과와 비선형 동적 충격해석으로부터 얻은 결과를 비교해 보면 임계 충격력, 좌굴모드 및 하중 작용시간은 해석 결과들과 시험 결과들이 아주 유사하였으나 임계 충격속도는 약 21 % 정도의 차이를 나타내고 있다. 이것은 해석모델이 실제 시편의 기하학적 형상을 엄밀히 모델링하기가 어렵고 또한 적용된 경계조건이 시험에서의 경계조건과 완전히 동일하다고는 할 수 없고 시편은 기하학적 형상과 용접 상태 등 모든 조건에서의 미소한 차이가 존재하기 때문으로 판단된다. 그러나 다른 충격특성, 즉 임계 충격력이나 좌굴모드 및 변형된 형상이 해석 결과와 시험 결과가 비교적 잘 일치하고 있으므로 지지격자체의 유한요소 해석 모델 및 해석절차는 타당성이 있는 것으로 확인하였다.

표 4.5 Comparison results between test and analysis of H type 3×3 cell grid

Classification	$P_{cr}$ (N)	$V_{cr}$ (m/sec)	Mode shape	Duration time (msec)
Impact test	5364	0.33	Shear mode	7
Dynamic analysis	5457	0.40	“	8
Difference	- 1.7	- 21.2 %	NA	-14.3 %

표 4.6 Comparison results between test and analysis of H type 5×5 cell grid

Classification	$P_{cr}$ (N)	$V_{cr}$ (m/sec)	Mode shape	Duration time (msec)
Impact test	5364	0.33	Shear mode	7
Dynamic analysis	5457	0.40	“	8
Difference	- 1.7	- 21.2 %	NA	-14.3 %

$P_{cr}$  : critical impact force

$V_{cr}$  : critical impact velocity

$$Difference = \frac{(test\ value - analysis\ result)}{test\ value}$$

## 제 5 장 결 론

본 보고서에서는 얇은 판으로 이루어진 지지격자체의 측면 충격에 의한 좌굴거동을 충격시험 및 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 지지격자체 시편을 스테인레스 및 지르칼로이 재질을 사용하여 여러 형상을 갖는 3x3 셀 및 5x5 셀 구조의 형태로 제조하였다. 이 시편들에 대하여 일정한 질량을 갖는 해머를 일정한 높이에서부터 자유낙하시키는 충격시험을 수행하여 지지격자의 기하학적 형상, 재질 및 셀의 수에 따른 좌굴특성을 파악하고자 하였으며, 상용 유한요소 해석코드인 ABAQUS/Explicit를 사용한 비선형 동적 충격해석을 통해 얻은 해석결과와 시험결과를 비교하여 해석모델의 신뢰성을 검증하였다.

측면에서의 충격하중에 의한 지지격자체의 좌굴은 국부적 좌굴이 임계하중을 지배하는 것으로 나타나고 있으며, 박판이 서로 연결되는 용접 부위에서의 변형을 집중에 의하여 국부적인 좌굴현상이 발생하며, 변형 형태는 최상단 및 최하층에서만 전단 형태의 좌굴모드를 보이고 있으나 그 외의 다른 중간층에서는 변형이 나타나지 않으며 다만 하중이 작용하는 방향으로의 이동만이 발생하였다. 그러나 내부의 판과 외부의 판이 서로 다른 형상을 갖는 박판을 seam 용접으로 연결한 지지격자체의 경우는 이와는 달리 외부의 하중에 저항하는 힘이 내부에 비해 상대적으로 큰 외부의 저항력에 의해 최상층과 최하층에서의 전단 형태의 좌굴모드를 보이지 않고 전체 지지격자체가 1차 좌굴모드와 같은 형태의 변형 양상을 보였다. 얇은 판으로 이루어진 지지격자체의 좌굴 현상은 매우 불안정한 거동으로 좌굴이 발생하면 구조물내 소성 힌지에서 생기는 변형을 집중현상에 의해 탄성 영역에는 제하 현상이 발생하게 되고 결국 좌굴 순간을 기점으로 구조물의 임계 하중은 급격히 감소하게 된다. 또한 탄성 제하로 인해 좌굴시와 좌굴 후의 변형형태는 상이함을 보였다. 지지격자체의 좌굴 발생시 최대 압축응력은 격자의 수와는 관계가 없으며, 따라서 최대 응력은 격자 수의 증가에도 거의 비슷한 값을 나타내었으나 변형률은 지지격자의 형태에 따라 다르며, 3x3 셀 구조물이 5x5 셀 구조물보다 큰 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- [1] 윤경호 외 3인, 노내 지지격자 스프링의 지지거동 예측을 위한 방법론 개발, KAERI/TR-1041/98, 한국원자력연구소, 1998.
- [2] 강흥석 외 4인, 핵연료집합체 지지격자체에 대한 기계적 시험, KAERI/TR-868/97, 한국원자력연구소, 1997.
- [3] C. M. Harris and C. E. Crede, "Shock and vibration handbook", 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Book Co., 1996.
- [4] "I-STAR User's manual (version 4.0)", Concurrent Computer Corporation, 1996.
- [5] "FEMtools User's manual (version 1.4.3)", Dynamic Design Solutions, Louven, Belgium, 1998.
- [6] H.D. Hibbitt, G.I. Karlsson, E.P. Sorensen, "ABAQUS/Explicit User's Manual (version 5.8)", Vol. I and II, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., RI, USA, 1998.
- [7] ASME, Section III, Division I, Appendix I, 1986.
- [8] T. Belytschko and R. L. Chiapetta, "A computer code for dynamic stress analysis of media-structure problems with nonlinearities", Technical report AFWL-TR-72-104, Vol. 1, AFM, Mexico, 1973.
- [9] Z. P. Bazant and L. Cedolin, "Stability of structures; elastic, inelastic, fracture, and damage theories", Oxford university press, Oxford, UK, 1991.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1569/00					
제목/부제	측면 충격하중에 의한 지지격자체의 좌굴거동 해석				
연구책임자/부서명 (TR,AR경우 주저자)	윤경호(핵연료제조기술개발팀)				
연구자 및 부서명	강홍석,김형규,송기남(핵연료제조기술개발개발팀)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2000.05.
페이지	108 p	도표	있음( √ ), 없음( )	크기	19×26cm
참고사항	고성능지지격자 구조기술개발과제				
비밀여부	공개( √ ), 대외비( ), _급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관		계약번호			
초록(15-20줄내외)	<p>경수로용 핵연료집합체에서 지지격자는 연료봉들이 횡방향 및 종방향으로 정위치를 유지하도록 하여 연료봉간의 냉각경로가 보장되도록 하며, 또한 핵연료집합체가 하나의 지지 구조물을 형성하게 하는 핵심구조부품이다. 핵연료집합체는 냉각재상실사고나 지진 사고시에 인접한 핵연료로부터 측면 충격하중을 받게 되며, 이러한 측면의 충격하중을 지지격자체가 주로 감당하고 있다. 만약 지지격자가 과도하게 변형되어 제어봉의 삽입을 보장하지 못한다면 노심의 긴급정지가 제대로 이루어지지 않게 되어 궁극적으로는 노심의 용융을 일으킬 수도 있다. 고성능지지격자 구조기술개발과제에서는 연료봉 지지부위에서 연료봉의 프레팅 마멸을 억제시킬 수 있고 연료봉에서 발생된 열을 냉각수로 효과적으로 전달시킬 수 있는 고유모형의 지지격자 형상을 개발 중에 있다. 도출된 고유형상의 지지격자에 대한 기계/구조적 성능을 비교 평가하고 이를 토대로 기계/구조적 성능이 향상된 지지격자의 고유모형을 정립하고자 도출된 고유형상의 지지격자 시편에 대한 성능시험을 수행하였다. 또한 개발 중인 고유모형의 지지격자 한 가지 모델에 대한 비선형 충격해석을 수행하여 이를 충격시험 결과와 비교하여 해석방법을 정립하고자 하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	고성능지지격자, 자유낙하 충격시험, 비선형 충격해석, 변형률 집중, 충격모드, 좌굴강도, 충격속도				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-1569/00					
Title/Subtitle		Buckling Behavior Analysis of Spacer Grid by Lateral Impact Load			
Project Manager and Department		Yoon, Kyung Ho(Advanced Fuel Development Team)			
Researcher and Department		Kang, Heung Seok, Kim, Hyung Kyu, Song, Kee Nam (Advanced Fuel Development Team)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1998. 09.
Page	108 p.	Ill. & Tab.	Yes( <input checked="" type="checkbox"/> ), No ( <input type="checkbox"/> )	Size	26 Cm.
Note					
Classified	Open( <input checked="" type="checkbox"/> ), Restricted( <input type="checkbox"/> ), ___ Class Document		Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)		<p>The spacer grid is one of the main structural components in the fuel assembly, which supports the fuel rods, guides cooling water, and protects the system from an external impact load, such as earthquakes. Therefore, the mechanical and structural properties of the spacer grids must be extensively examined while designing it. In this report, free fall type shock tests on the several kinds of the specimens of the spacer grids were also carried out in order to compare the results among the candidate grids. A free fall carriage on the specimen accomplishes the test. In addition to this, a finite element method for predicting the critical impact strength of the spacer grids is described. FE method on the buckling behavior of the spacer grids are performed for a various array of sizes of the grids considering that the spacer grid is an assembled structure with thin-walled plates and imposing proper boundary conditions by nonlinear dynamic impact analysis using ABAQUS/explicit code. The simulated results also similarly predicted the local buckling phenomena and were found to give good correspondence with the shock test results.</p>			
Subject Key words (About 10 words)		High Performance Spacer Grid, Free Fall Shock Test, Nonlinear Dynamic Impact Analysis, Strain Localization, Impact Mode, Critical Buckling Strength, Initial Impact Velocity			