

# 사각 관 구조물의 충격에 의한 좌굴특성

윤경호\*, 송기남\*, 강흥석\*

## Buckling Behavior of a Square Tube Structure by Lateral Impact Load

K-H Yoon, K-N Song, H-S Kang

**Key Words :** Square Tube Structure(사각 관 구조물), Lateral Impact Load(측면 충격하중), Buckling Behavior(좌굴 특성), Impact Test(충격시험), Deformed Shape(변형 형상)

### Abstract

The drop type impact test and finite element analysis are established for examining the buckling behavior of a square tube under the lateral impact load. Based on these results, the effects by the boundary conditions for supporting the structure are reviewed, which are as follows. One is pinned condition by screw; the other is fixed by welding. The critical impact force and acceleration by test are nearly same between two cases. However, the critical impact velocity of the pinned condition is higher than that of the fixed case. Therefore, the dynamic buckling behavior of a pinned structure is better than the fixed condition in view of critical impact velocity. These test and analysis results will be adaptable for predicting the dynamic structural integrity of a tube structure not only the axial impact event but the lateral impact event.

### 1. 서론

사각 관 구조물이 측면에서 지진이나 사고로 인해 측면에서 충격하중을 받게 될 때 구조물의 좌굴특성을 파악하기 위해 낙하식 충격시험을 수행하였으며, 아울러 충격하중에 의한 구조물의 좌굴특성을 모사하고자 유한요소모델 및 해석방법을 제시하였다. 또한 사각 관 구조물을 고정하기 위한 하부 두 예지들의 경계조건을 충격하중이 작용하는 방향의 변위 자유도만을 구속한 편 지지 조건과 모든 방향의 변위 및 회전자유도를 구속한 고정 경계조건 하에서의 충격에 의한 좌굴특성을 파악하고자 하였다. 낙하식 충격시험은 일정한 질량의 충격해머를 초기 정해진 높이에서부터 구조물에 충격을 가하기 시작하여 구조물에 소성좌굴이 발생하기까지 해머의 초기 낙하높이를 증가시키면서 충격시의 충격력, 충격속도 및 충격가속도를 시간의 영역에서 얻을 수 있도록 하였다[1].

또한 이 낙하식 충격시험을 모사할 수 있는 유한요소 해석방법으로서 사각관 구조물은 셸(shell) 요소로, 충격해머는 동일한 질량을 갖는 강체요소로 모델링하고 충격시험시 시편에 충격하중을 가하는 상부면은 강체요소와 접촉하는 것으로 모델링하였으며, 구조물에 가해지는 충격하중은 강체 요소에 초기 충돌속도를 부여하여 구조물 반력의 합을 충격력으로 평가하였다[2]. 유한요소 해석을 위한 코드로는 ABAQUS/Explicit[3]를 사용하여 비선형 충격해석을 수행하였다.

### 2. 낙하식 충격시험

#### 2.1 시험방법

사각 관 구조물의 낙하식 충격시험을 위한 장치의 개략을 Fig. 1에 나타내었다[4]. 시험장치는 크게 시편에 충격을 가하는 상부 구조물과 시편이 고정되고 전체적인 강성을 유지하는 하부구조물로

\* 한국원자력연구소

구성되어 있다. 시편에 충격을 가하는 충격해머(carriage)의 질량은 약 23.5 kg 으로 이는 시편에 비해 중량이 너무 커서 충격해머의 상단에 스프링으로 된 댐퍼를 설치하였다. 충격해머가 시편의 상단에 충격하중을 가하는 시점의 충격 가속도를 측정하기 위한 가속도계(accelerometer)와 동일한 종류의 다른 가속도계로부터 취득한 가속도 신호를 적분 알고리즘을 내장한 애플[5]를 통하여 적분하여 속도신호로 변환하기 위한 가속도계를 부착하였다. 예비 충격시험시 운동량 보존을 확인하기 위해 가속도계로부터의 가속도 신호와 힘 변환계로부터 얻은 충격력의 신호가 잘 일치하고 있음을 확인하여 힘 변환계는 낙하시험시 부착하지 않았다.

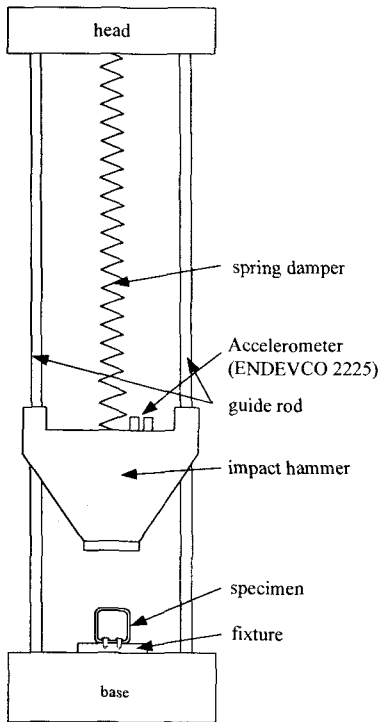


Fig. 1 Drop type shock machine

## 2.2 시편의 형상 및 경계조건

사각 관의 충격시험을 위한 시편은 표준 규격의 관 중에서 적절한 크기의 것을 선택하였다. 이 사각 관은 스테인레스 304(STS304), 두께 1.0 mm

의 관을 절곡하고 맞대인 부분을 시임 용접한 것이다. 사각 관 및 고정치구의 기하학적 형상은 Fig. 2 와 같다. 사각 관의 기본 모델은 폭, 높이 및 길이가 각각 50 mm 이며, 두께는 1.0 mm 의 것으로 하였다.

시편의 고정은 시편의 하단 에지에서 연직방향의 변위를 구속할 수 있도록 하였으며, 밑면 전체는 자유인 상태로 경계조건을 설정하기 위해 Fig. 2 와 같은 치구에 시편을 나사로 고정하였다. 또한 충격해머의 충격이 시편의 상단 면에 균일하게 가해질 수 있도록 해머의 상단 충격면을 평면으로 하였다.

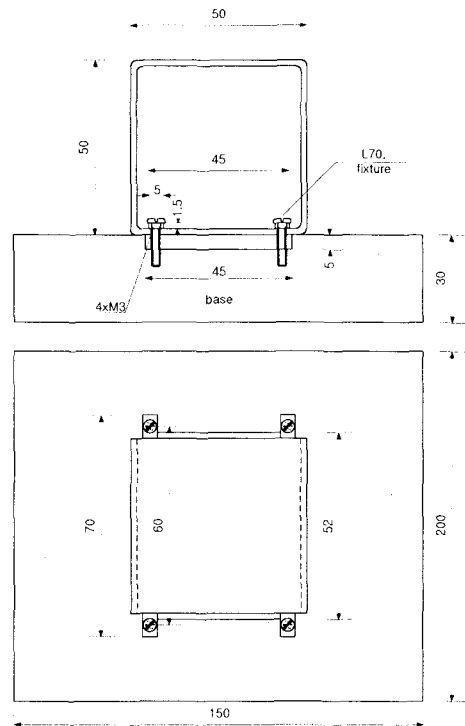


Fig. 2 Configuration of a square tube and specimen fixture

## 2.3 시험결과

### 2.3.1 핀 지지 경계조건의 사각 관

사각 관의 충격시험을 통해 얻게 되는 충격속도는 충격해머의 상부에 부착한 두 개의 가속도계

중 하나는 가속도 신호로 데이터를 저장하였고, 다른 하나의 가속도계로부터 얻은 가속도 신호를 적분하여 속도의 데이터로 저장을 하였다. 가속도 신호를 직접 적분하는 것은 충격시험시의 주파수가 2 Hz 이하에서는 신뢰할 수 없는 왜곡된 데이터를 생산하지만 그 이상의 주파수에서는 신뢰할 수 있는 데이터를 생산한다고 알려져 있고, 본 연구에서 사각 관의 충격시험은 대개 고 주파수 영역에서 시험이 수행되게 되므로 이 가속도계로부터 얻은 신호를 적분한 데이터를 충격속도로 평가하였다. 그러나 이 가속도 데이터는 충격시의 고 주파 성분의 잡음을 포함하고 있어 충격시의 최대 가속도 데이터를 추출하기가 어렵다. 따라서 이 가속도 데이터를 주파수영역으로의 변환을 통하여 오토 스펙트럼(autospectrum)을 구한다[6]. 이것을 Origin 프로그램[7]에서 FFT 를 수행하고 나면 Fig. 3 과 같은 변경 가능한 문턱치(threshold) 기준선과 함께 주파수 성분 스펙트럼이 표시된다.

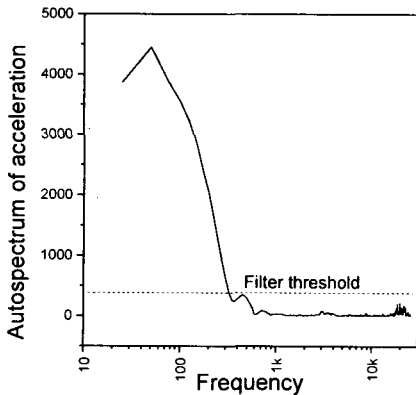


Fig. 3 Autospectrum of acceleration data in the frequency domain of 50x50-L50 square tube at the critical drop height 11.25" from impact test

수집된 가속도 신호로부터 특정 문턱치 기준 이하의 주파수 성분의 노이즈를 제거하기 위해 문턱치 기준을 정해 필터링을 하면 모든 주파수 성분의 노이즈가 제거된 가속도 값을 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 노이즈를 제거한 시간에 따른 최종 가속도를 Fig. 4 에 나타내었다. 이 가속도 값의 최대치가 감소하는 낙하높이가 구조물에 좌굴을 발생시키는 임계 낙하높이가 되며, 이 낙하높이에서의 충격속도를 임계 충격속도로 평가하였다. 이 문턱치 필터링을 수행한 후의 사각 관 50x50-

L50 에 대한 최대 충격가속도는 31.76 g 이었으며, 충격 유지시간(duration)은 약 5 ms 이었다.

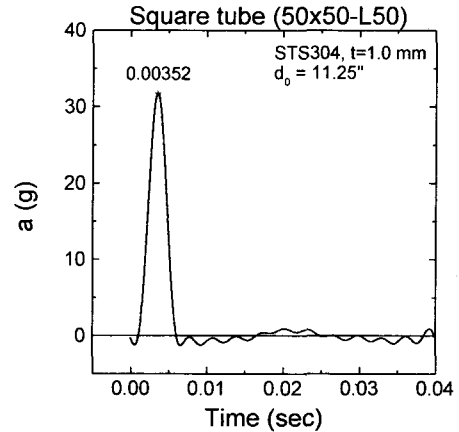


Fig. 4 Acceleration time history at the critical drop height 11.25 inch from drop test

Fig. 5 에는 해머의 초기 낙하높이 대 충격가속도를 나타내고 있으며, 관의 크기 50x50-L50 인 경우는 초기 낙하높이 11.25 인치에서 최대 가속도 31.76 g 를 나타내고, 그 이후에는 초기 낙하높이가 증가함에도 오히려 최대 가속도는 감소한다는 것을 알 수 있다.

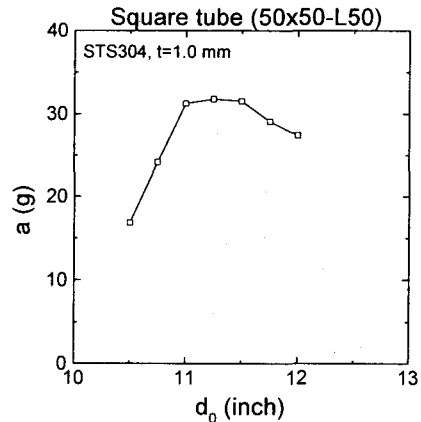


Fig. 5 Acceleration as a function of initial drop height of 50x50-L50 square tube under pinned boundary condition from impact test

임계 가속도를 나타낸 이후에는 가속도의 최대

치도 떨어지게 되며, 따라서 충격력도 작아지게 되나, 충격력의 유지시간이 길어지게 되어 충격량은 좌굴이 발생하기 이전에 비해 약간 증가하게 된다. 시험으로부터 얻은 속도 윤곽(velocity profile)은 낙하높이에 따른 충격속도가 그 낙하높이에 따라 증가하게 되며 구조물에 충격을 가한 이후에는 감소되어 최종 해머가 정지하는 것을 잘 나타내고 있다. 50×50-L50의 임계 충격속도는 낙하높이 11.25 인치에서의 1.13 m/sec 로 나타났다. 시험에 사용한 낙하시험기는 충격시 운동량 보존 법칙에 의해 가속도 신호를 충격해머의 질량을 곱하여 변환하였다. 좌굴이 발생하는 낙하높이 11.25 인치에서의 가속도 신호에 해머의 질량을 곱해서 얻은 충격력의 데이터는 예비시험시 힘 변환계와 가속도계 데이터의 비교를 통하여 운동량 보존을 확인하였으므로 본 시험에서는 가속도 신호만을 저장하고 이 가속도 신호에 해머의 질량을 곱하여 충격력의 데이터를 얻었다. 관의 길이 50 mm 시편의 경우 임계 충격력은 7319.3 N 이었다.

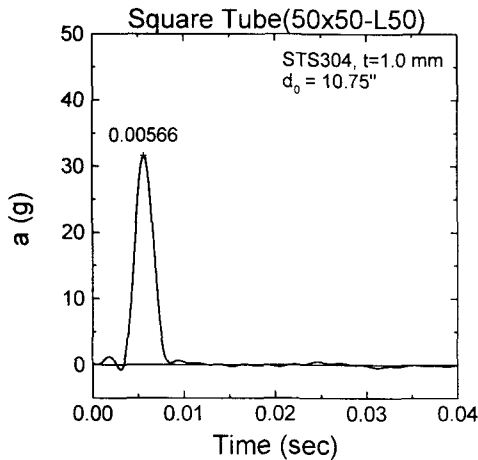


Fig. 6 Acceleration time history at the critical drop height 10.75 inch from impact test

### 2.3.2 고정 경계조건의 사각 관

핀 지지 경계조건을 갖는 사각 관의 경우와 마찬가지로 관 하단의 모서리 에지를 전둘레 용접을 시행한 시편의 문턱치 필터링을 수행한 후의 최대 충격가속도는 Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 31.62 g

이었으며, 충격 유지시간(duration)은 약 6 ms 이었다. Fig. 7 에는 해머의 초기 낙하높이 대 충격가속도를 나타내고 있으며, 초기 낙하높이 10.75 인치에서 최대 가속도 31.62 g 를 나타내고, 그 이후에는 초기 낙하높이가 증가함에도 오히려 최대 가속도는 감소한다는 것을 알 수 있다. 50×50-L50의 임계 충격속도는 낙하높이 10.75 인치에서의 0.94 m/sec 로 나타났다.

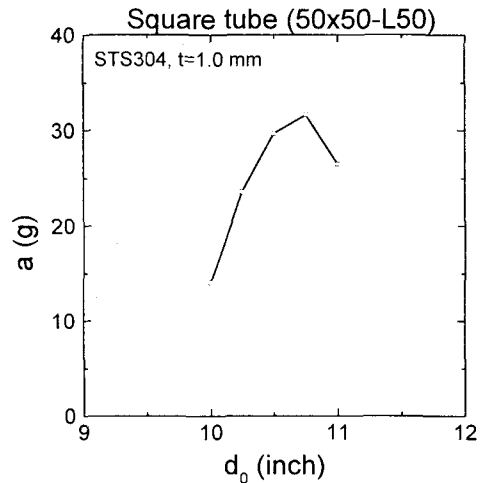


Fig. 7 Acceleration as a function of initial drop height of 50×50-L50 square tube under fixed boundary condition from impact test

### 2.4 경계조건에 따른 관의 좌굴특성 비교

사각 관 하단 모서리의 경계조건 변화에 따른 좌굴특성을 파악하기 위해 충격시험을 수행한 결과를 비교하였다. 관의 임계 충격가속도는 핀 지지 관의 경우 31.76 g 이었으며, 임계 충격력은 7319.3 N 이었다. 또한 좌굴을 일으키는 초기 낙하높이는 11.25 인치인 것으로 나타났다. 고정 경계조건의 경우 임계 충격가속도는 31.62 g 이었으며, 임계 충격력은 7286.1 N 이었다. 또한 좌굴을 일으키는 초기 낙하높이는 10.75 인치인 것으로 나타났다. 따라서 충격력이나 충격가속도의 차이는 크지 않았으나, 임계 낙하높이의 차이에 따른 임계 충격속도는 시편 하단을 나사에 의한 핀 지지의 경우가 용접에 의한 고정의 경우보다 큰 것으로 나타났다. 초기 해머의 낙하높이에 따라 관 하단의 경계조건 변화에 따른 최대 충격가속도를 Fig. 8

에 나타내었다. 이것은 외부 측면에서 충격하중을 받게 될 경우 구조물의 지지를 핀 지지와 가까운 경계조건을 갖게 하는 것이 용접과 같은 고정으로 지지하는 것에 비해 충격에 대한 저항성이 크다는 것을 나타낸다. 이러한 현상은 유한요소 해석을 통한 결과와 비교하여 다시 논의하기로 하겠다.

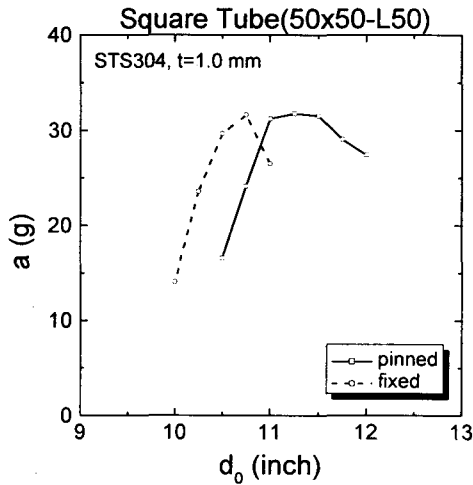


Fig. 8 Acceleration as a function of initial drop height of 50x50-L50 square tube for various boundary conditions from impact test

### 3. 지지격자 구조물의 동적 충격해석

#### 3.1 기하학적 형상 및 재료의 물성

충격시험에 사용된 사각 관 형상(Fig. 2 참조)에 대하여 동적 충격해석을 수행하였다. 셀의 외형 치수는  $50 \times 50 \times 50$  mm 이고, 판재의 두께는 1.0 mm 이다. 판재의 재질은 스테인레스강으로 재료의 탄성계수는 197.0 GPa 이고, 포아송비는 0.3 으로 하였다. 해석과정은 탄-소성으로 하였으므로 재료의 항복응력 이후의 응력-변형률 값을 ASTM[8]의 절차에 따라 인장시험을 시편과 동일한 재질로 제조하고 이의 단순 인장시험을 통하여 얻은 물성을 사용하였다. 해석에 사용된 스테인레스강의 응력-변형률을 Table 1 에 요약하였다.

Table 1 Material properties of stainless steel

Material	Elastic	Plastic	
		stress	strain
STS 304	E : 197.0 GPa	259.0	0.0
		292.0	0.0371
		339.0	0.0660
		395.0	0.1221
		459.0	0.2100
		518.0	0.3356
		564.0	0.5113
590.0	0.6981		

#### 3.2 유한요소 모델 및 경계조건

사각 관 구조물의 동적 충격해석을 위한 유한요소 모델을 Fig. 9 에 나타내었다. 유한요소 해석을 위한 모델은 ABAQUS 의 4 절점 쉘요소(S4R)를 사용하여 작성하였으며, Fig. 9 의 유한요소 모델에 사용된 절점의 수 및 요소의 수는 각각 1764, 1680 이다.

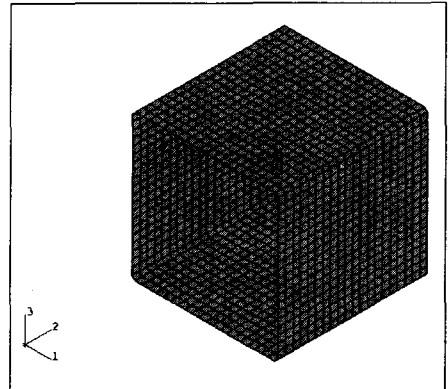


Fig. 9 FE model for nonlinear impact analysis

해석을 위한 경계조건은 핀 지지 경계조건을 모사할 수 있도록 관 하부의 두 에지들에서 모든 방향의 변위를 구속하였다. 또한 하부의 두 에지를 고정치구에 용접한 고정 경계조건을 모사하기 위해 하부 두 에지들의 모든 자유도를 구속하였다. 충격하중은 이 사각 관의 상부에 구조물의 상부면과 접촉하도록 한 강체면(rigid surface)을 모델링하고 이 강체면은 자유낙하 충격시험시의 충격해머와 동일한 질량을 갖도록 질량요소를 정의하였다. 집중질량이 정의된 강체 면의 중앙에 초기 충돌속도를 부여하여 관에 충격을 가하도록 하였다. 해석은 시험에서의 결과를 고려하여 시간의 증분을 2 ms 로, 전체 해석시간을 40 ms 로 하여 총 20 개의 단계로 해석을 수행하였다.

### 3.3 해석 결과

사각 관 하단 에지들의 경계조건 변화에 따른 충격특성을 파악하기 위해 유한요소법을 사용하여 해석을 수행하였다. 관 하단부의 에지들에 대한 변위 구속조건을 핀 지지 - 즉 하중이 작용하는 방향의 변위자유도는 구속하고 회전자유도는 자유인 - 로 하여 해석을 수행한 결과 임계 충격속도는 0.87 m/sec 로 나타났으며, 그 때의 충격력은 6563 N 이었다. 이와 같이 하단 에지를 핀 지지라 가정하여 에지 연직방향의 변위만을 구속한 경우 충격 유지시간은 약 12 ms 로 나타났다. 이에 비해 하단 에지를 변위 및 회전자유도 모두를 구속한 고정 경계조건으로 가정하여 해석한 결과 임계 충격속도는 0.29 m/sec 이었으며, 이 때의 충격력은 7918 N 으로 핀 지지로 가정하여 해석한 결과에 비해 임계 충격속도는 작았으나 임계 충격력은 크게 나타났다. 이러한 관 하단의 경계조건 변화에 따른 충격력의 변화를 Fig. 10 에 나타내었다.

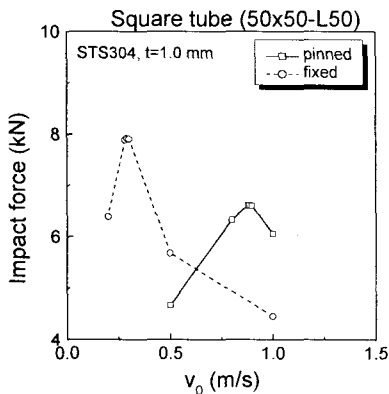


Fig. 10 Impact force as a function of initial impact velocity of a square tube for different boundary conditions from FE analysis

이것은 기둥의 경우 하단의 경계조건을 고정으로 한 경우가 핀 지지인 경우에 비해 임계 좌굴하중은 크게 나타난 결과와 유사하다. 즉, 지지부의 구속을 엄밀하게 할수록 구조물의 강성이 커지며, 따라서 임계 충격력은 커지는 것으로 나타났다. 그러나 하단의 경계조건을 엄밀하게 고정된 상태에서 외부 충격하중이 작용하게 될 경우 구조물은 외부의 충격하중에 저항할 수 있는 충격흡수 능력이 떨어지게 되어 임계 충격력은 크게 나타나

나 임계 충격속도는 핀 지지 조건에 비해 작게 나타나는 것으로 보인다. 그러므로 핀 지지 조건에 비해 고정 경계조건인 경우가 오히려 작은 충격에 너지에서 좌굴이 발생한다는 것을 의미한다. 이것은 핀 지지 경계조건에 비해 충격 유지시간이 3 ms 로 핀 지지 조건의 경우인 12 ms 에 비해 훨씬 짧아지는 것으로도 알 수 있다. 따라서 충격에 저항하는 고정단의 경계조건을 연직방향의 변위자유도만을 구속하는 핀 지지로 경계조건을 설정할 경우 구조물의 임계 충격력은 작아지나 더욱 큰 충격속도에서 좌굴이 발생하게 되고 충격 유지시간도 길어져 구조물의 건전성 측면에서는 오히려 유리할 것으로 판단된다. 비선형 동적 충격해석에서 얻은 사각 관의 (시간의 변화에 따른) 변형된 형상변화는 Fig. 11 에 나타내었다.

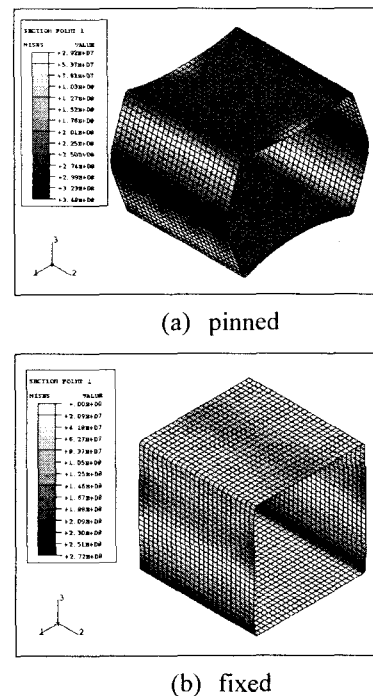


Fig. 11 Deformed shape and von Mises equivalent stress of a square tube for different boundary conditions from FE analysis

이 그림으로부터 관의 충격모드는 핀 지지의 경우 팽윤형상의 좌굴모드를 나타내고 있으며, 고정 지지의 경우 하부면의 변형이 거의 발생하지 않는 핀 지지의 경우와는 다른 형상의 좌굴모드를 가졌다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 사각 관의 좌굴거동

사각 관에서 측면 충격에 의한 좌굴거동을 보면 구조물을 고정하는 경계조건에 따라 시험 및 해석 모두에서 임계 충격속도는 다른 것으로 나타났다. 충격시험에 의한 결과에서는 임계 충격력 및 충격가속도의 차이는 미미한 것으로 나타났고 임계 충격속도만이 서로 다르게 나타났다. 그러나 유한요소 해석에 의한 결과는 임계 충격속도 뿐 아니라 임계 충격력 및 충격가속도에서도 큰 차이를 나타내었다. 충격시험에 의한 결과가 큰 차이를 나타내지 않는 것은 시험 수행에 따른 오차, 시편간의 차이, 그리고 엄밀한 경계조건 구현의 어려움 등이 있을 수 있다.

### 4.2 충격모드

충격시험 및 해석에 의한 결과로부터 사각 관의 경계조건 변화에 따른 좌굴모드를 살펴보면 편 지지의 경우 하단의 두 예지들에서는 연직방향의 변위자유도만이 구속되었기 때문에 양 예지들에서의 횡방향 미끄러짐이 발생할 수 있으며, 사각 관 전체의 좌굴형상을 팽윤(*swelling*) 형태의 좌굴모드를 가지게 하는 것으로 보이나 고정 경계조건의 경우 하단의 두 예지는 연직방향의 변위 뿐 아니라 모든 방향으로의 변위 및 회전자유도가 구속되기 때문에 하단면은 변형이 거의 발생하지 않게 되어 하단면을 제외한 다른 세 면의 변형 형상은 편 지지 경계조건의 경우와 거의 유사한 것으로 나타났다. 그러나 충격시험에서는 이러한 엄밀한 경계조건을 구현하기가 어려워 해석으로부터 얻은 변형형상과 다르게 보이고 있으며, 이것은 시험에서 엄밀한 좌굴모드를 추출하지 못하고 구조물 내부에 좌굴이 발생했다 하더라도 계속되는 충격으로 인해 해석결과와는 다른 형상의 좌굴모드를 나타낸 것으로 보인다.

## 5. 결론

관 구조물의 측면에서의 충격에 의한 좌굴특성을 낙하식 충격시험 및 유한요소 해석을 통하여

파악하였다. 또한 이러한 결과를 토대로 구조물을 고정하기 위한 경계조건의 차이에 따른 좌굴특성을 파악하였고, 그 결과 구조물의 지지 경계조건을 고정 경계조건으로 하는 것 보다는 편 지지의 경계조건으로 하는 것이 외부 충격하중에 대한 좌굴 저항성이 큰 것으로 나타났다. 이러한 충격시험 및 해석결과는 축방향 충격에 대한 구조물의 설계 뿐 아니라 구조물이 측면에서 충격을 받게 되는 경우에 대한 구조물의 설계에 적용할 수 있을 것이다.

## 6. 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

### 참고문헌

- (1) K. H. Yoon and K. N. Song, 2000, "Nonlinear Dynamic Buckling Analysis of a Grid Structure", *Key Engineering Materials*, Vols. 183~187, pp. 451~456.
- (2) 윤경호 외 2인, 2000, "지지격자체의 비선형 동적 측면 좌굴거동", 대한기계학회 2000 춘계 학술대회 논문집, 00S044.
- (3) Hibbitt, H. D., Karlsson, G. I. and Sorensen, E. P., 1998, "ABAQUS/Explicit User's Manual (version 5.8)", Vol. I and II, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, R.I., USA.
- (4) Harris, C. M., 1996, "Shock and Vibration Handbook, 4<sup>th</sup> ed.", McGraw-Hill Book Co.
- (5) Instruction Manual, 1999, "Two-Channel Charge Amplifier UV-06", RION Co., Ltd.
- (6) N. M. M. Maia and J. M. M. Silva, 1997, "Theoretical and Experimental Modal Analysis", Research Studies Press Ltd.
- (7) 1999, "ORIGIN User's Manual (version 6.0)", Microcal Software, Inc.
- (8) ASTM E8M-99, 1999, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials".