

방사성물질 운반용기 CASTOR/KN-12의 낙하충격시험

Free Drop Test for CASTOR/KN-12 Radioactive Material Transportation Cask

서기석, 구정희, 이주찬, 방경식, 구경희, *정성환, **박홍윤
한국원자력연구소, *한국수력원자력주식회사, **충남대학교
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일부 경수로 원자력 발전소의 사용후핵연료 저장조가 포화됨에 따라 발전소 호기간에 상호 운반할 수 있는 CASTOR/KN-12 사용후핵연료 운반용기가 개발 중에 있다. 운반물 대상은 국내의 고연소 및 고농축 사용후핵연료 12 다발이다. 이 운반용기의 자유낙하 충격시험은 국내 과학기술부 고시 및 IAEA ST-1의 기술기준에 따라 수행하였다. CASTOR/KN-12 운반용기의 1/3 축소모델을 9 m에서 강체 면에 자유낙하, 1 m에서 pin에 대한 관통시험을 수행하여 구조적 안전성을 평가하였다. 변형량, 가속도 및 변형율의 측정을 통해 전산 계산평가에 대한 검증자료를 생산하였고, 낙하충격에 대한 운반용기의 구조적 거동을 실험적으로 평가하였다.

Abstract

Spent nuclear fuel transportation cask called CASTOR/KN-12 is developed due to the saturation of spent fuel storage pool in some PWR nuclear power plants. Transportation contents of this cask is 12 spent nuclear fuel assemblies considering high burn-up and high enrichment. Free drop impact tests were performed according to the test requirements of domestic MOST notice and IAEA ST-1. Structural safety were evaluated by means of dropping a 1/3 scaled model of this cask from 9 m height to unyielding surface or from 1 m height to pin. The verification data for computer calculation were produced by measuring the displacements, accelerations and strains and the structural behavior during the drop impact moment was evaluated by experimental method.

1. 서 론

자유낙하조건은 과학기술부고시 제 2001-23호와 IAEA ST-1에서 제시된 바와 같이 B형 운반용기의 가상사고 시험으로 낙하조건과 관통조건이 있다.^{1),2)} 낙하조건은 운반용기를 9 m 높이로부터 비소성 강판에, 관통 조건은 운반용기를 1 m 높이로부터 pin에 각각 최대 손상을 가하는 자세로 떨어뜨리는 조건들이다.

CASTOR/KN-12 운반용기는 경수로 사용후핵연료 12 다발을 습식 혹은 건식으로 운반할 수 있게 설계되었다. 이 운반용기는 한국수력원자력 주식회사의 요청에 의해 독일 GNB사에서 설계되었고, 두산 중공업에서 제작 중에 있다. 독일 GNB사는 3차원 유한요소 해석을 LS-DYNA 전산코드로 수행하여 낙하조건에 대한 운반용기 본체의 안전성분석보고서를 작성하였다. 한국원자력연구소는 낙하시험을 통해 전산 해석결과에 대한 검증 자료를 생산하였다.

일반적으로 운반용기 본체의 크기와 중량이 크므로 경제적 및 시험여건을 고려하여, IAEA No. 37에 따라 축소모델에 의한 낙하시험이 가능하다.³⁾ 낙하시험에 대한 전산해석의 검증은 낙하 충격 순간에 운반용기의 변형율과 가속도량을 측정하여 전산해석 결과와 비교함으로써 해석방법에 대한 보수성 및 건전성을 확인하는 것이다. 본 논문은 CASTOR/KN-12의 구조 안전성분석에 대한 전산해석 검증을 위해 1/3 축소모델로 9 m 자유낙하시험과 1 m 관통시험을 수행한 방법과 결과를 설명하였다.

2. 1/3 축소모델 및 자유낙하 실험방법

2.1 1/3 축소모델

운반용기 본체의 모든 치수는 선형적으로 1/3 비율로 축소하여 모델을 설계되었고, 운반용기 본체와 같은 재질로 축소모델을 동일하게 그림 1과 같이 제작하였다. 운반용기 본체의 주요 치수로 직경은 1942 mm, 길이는 4809 mm 및 셸 두께는 375 mm이며, 모델의 치수는 각각 647 mm, 1605 mm 및 124.5 mm로 1/3 이다. 운반용기의 본체 재질은 SA350 Gr. LF3이며 모델은 SA350 Gr. LF2을 적용하였으며, 저온 파괴 특성이 다소 차이가 있으나 상온 자유낙하에 의한 충격 시험에는 동일한 기계적 특성치를 갖고 있다. 운반용기 내부의 basket 본체 구조는 복잡하고 핵연료 및 물 등 내부 운반물을 모델링하기 어려우므로 무게 감소비를 적용한 단순한 구조의 basket 모델이 적용되었다. 운반용기 본체의 내부에 있는 basket을 포함한 모든 중량은 17.185 톤이며, 치수에 대한 선형 감소비가 1/3이므로 부피 감소비는 1/27이 된다. 따라서 같은 재질로 사용된다면 부피와 중량의 감소비가 같으므로 basket 모델은 약 641 kg으로 적용되었다. 이와 같이 CASTOR/KN-12 운반용기 본체의 전체 중량은 84.3 톤이므로, 모델 중량은 약 3.096 톤으로 감소되었다. 특히 1 m 관통시험의 pin은 운반용기 본체 기준일 때 직경 150 mm을 1/3로 축소한 50 mm로 적용하였다.

2.2 변형을 및 가속도 측정계통

운반용기의 자유낙하시험에서 충격 순간에 대한 모델의 동적 거동을 알기 위해서는 변형 및 가속도 측정이 필요하다. CASTOR/KN-12의 1/3 축소모델에 대한 자유낙하시험에서도 변형 및 가속도 측정계통을 그림 2와 같이 설치하였다. 먼저, 변형 측정계통은 스트레인게이지, 신호증폭기(signal conditioning amplifier), 레코더, 필터 및 디지털 처리 등으로 표 1과 같이 구성되어 있다. 신호증폭기를 통한 전압량을 변형으로 전환하기 위해서는 다음과 같은 식을 적용하였다. 신호증폭기에서 1000 $\mu\epsilon$ 를 최대량으로 조정하였을 때,

$ST = \frac{MV \times 1000000}{S \times EV \times M \times G}$ 이다. 그리고, quarter 브리지 구성을 하였을 때 $S = \frac{K \times N}{4}$ 이므로,

$$ST = \frac{MV \times 4000000}{K \times EV \times M \times G}$$

ST : Strain ($\mu\epsilon$)

S : Sensitivity ($\mu V / V / \mu\epsilon$)

MV : Measured voltage on amplifier (V)

EV : Excitation voltage on amplifier (V)

M : Multiplier on amplifier

G : Gain on amplifier

K : Gage factor of strain gauge

N : Bridge constant = 1 if quarter bridge

신호증폭기의 출력전압에 대한 변형을 비는 각 낙하시험에서 약 900 - 950 $\mu\epsilon / V$ 로 적용하였다.

변형 측정계통과 마찬가지로 가속도 측정계통은 가속도계, 전압증폭기(voltage amplifier), 레코더, 필터 및 디지털 처리 등으로 표 1과 같이 구성되어 있다. 전압증폭기를 통한 전압량을 가속도로 전환하기 위해서는 다음과 같은 식을 적용하였다. 전압증폭기에서 100 g를 최대량으로 조정하였을 때,

$$AC = \frac{MV \times 1000}{M \times S} \text{ 이다.}$$

AC : Acceleration (g)

S : Sensitivity (mV/g)

MV : Measured voltage on amplifier (V)

M : Multiplier on amplifier

전압증폭기의 출력전압에 대한 가속도 비는 각 낙하시험에서 약 110 - 125 g/V로 적용하였다.

Table 1. Data Acquisition System for Strain and Acceleration

Kinds	Equipment	Model	Specification
Strain acquisition	Strain gauge	CEA-06-125UW-350	Uni-axial strain gauge
		CEA-06-125WT-350	Two axial (90 degree) strain gauge
	Signal amplifier	M&M 2120A	Range $\pm 2000 \sim 6000 \mu\epsilon$
Acceleration acquisition	Accelerometer	PCB 350 B04	Max. range 5000g
	Voltage amplifier	PCB 494A	Output range 1~10V
Data treatment	Low pass filter	Krohn-Hite 3382	Channel number - 2
	Data recorder	TEAC RD-200T	Channel number - 16 (at freq. Band 2kHz)
	A/D converter	DT 2821V	A/D Module - DT5712-PGH

각 변형율과 가속도의 측정계통에 대한 오차 평가를 위해 불확도 계산을 ASME PTC 19.1에 따라 수행하였다.⁴⁾ 낙하시험의 특성상 반복시험이 어려우므로 임의 오차(random error)는 고려하지 않았으며, 여러 측정 장비를 구성하여 발생된 계통오차(systematic error)만을 평가하였다. 센서 및 증폭기 외에 레코더, 필터와 A/D board 등을 고려하였을 때, 95 % 신뢰구간을 유지하는 변형율 측정계통의 불확도는 약 $\pm 2.32 \%$ 로, 가속도 측정계통의 불확도는 약 $\pm 6.93 \%$ 로 각각 평가되었다.

2.3 자유낙하 실험방법

자유낙하 시험은 9 m 자유낙하와 1 m 핀에 대한 관통 낙하시험이 있다. 9 m 자유낙하 시험은 최대손상을 가하는 낙하자세를 요구하므로 수직 낙하 2회, 경사 낙하 2회 및 수평 낙하 1회로 각각 수행되었다. 수직 낙하는 모델용기의 축방향이 타격 면과 수직이 되도록 모델용기의 뚜껑 면과 바닥 면이 각각 아래가 되도록 수행되었다. 첫 번째 경사 낙하는 1 차 충격만을 평가하는 시험에서는 모델용기의 무게 중심과 모델용기의 최하점이 일치하는 낙하 자세로서, 모델용기의 축 방향과 타격 면사이의 각도가 68도를 이루고 있다. 두 번째 경사 낙하는 2 차 충격이 최대가 되는 낙하자세로 모델용기의 축 방향이 타격 면과 15도를 이루고 있다. 수평 낙하는 모델용기의 축 방향과 타격 면이 평행이 되도록 수평한 자세로 낙하되었다. 모델용기의 9 m 자유낙하에 대한 5 종류의 자세와 모델용기의 충격 완충체의 조립상태는 그림 3과 같다.

1 m 핀에 대한 관통시험은 수직 1회 및 수평 1회로 각각 수행되었다. 핀이 타격 면에 수직으로 장착되어 있으며, 핀 상단으로부터 1 m 상부에서 모델용기를 수직 자세로 낙하시켜 모델용기에 관통을 가하는 시험이다. 첫 번째 수직관통시험은 모델용기의 축 방향을 타격 면에 있는 핀의 방향과 같이 수직한 자세에서 충격완충체를 장착한 상태에서 모델용기의 뚜껑 면을 하부로 하여 낙하되었다. 두 번째 수평관통시험은 충격완충체가 없는 상태에서 모델용기 본체가 수평자세로 핀에 직접 가격하는 자세로 낙하되었다. 1 m 관통

시험의 방법은 그림 4와 같다.

낙하절차에서 모델용기의 전체 중량은 계산으로 추정된 3.096 톤을 정확하게 실제 모델용기의 중량이 맞지 않으며 특히 충격완충체를 일부 장착하거나 하지 않는 경우가 있으므로, 운반용기 본체의 낙하높이가 9 m 혹은 1 m로 규정되어 있으므로, 모델용기의 낙하 에너지를 맞추고, 축소모델에 대한 측정결과를 축소 이론(scale theory)에 따라 평가하기 위해서는 낙하시험 별로 모델의 시험중량에 따라 낙하높이 조정이 필요하다. 이에 대한 계산식은 다음과 같다.

$$H' = H \times G / G'$$

H' : actual height of drop (m)

H : nominal height of drop (1 m or 9 m)

G : Mass of drop object with shock absorbers

G' : Actual mass of drop object

3. 운반용기 낙하시험 결과

운반용기의 낙하시험 결과는 대표적인 낙하형태로서 9 m 수평, 수직 및 경사 자유낙하와 1 m 수평 관통낙하에 대한 시험결과는 다음과 같다. 최대 변형율과 가속도량은 표 2 및 3에 정리하였다. 4 가지 낙하 자세에서 스트레인게이지 및 가속도계는 그림 10과 11 및 그림 14와 15에 설치하였다. 그리고, 시간에 대한 스트레인 및 가속도량은 그림 12와 13 및 그림 16과 17에 제시하였다.

9 m 수평 자유낙하(drop 3.)는 상하부 충격완충체를 장착한 상태에서 모델용기의 방위 각 90°방향으로 타격면에 그림 6과 같이 충돌되었으며, 최대 인장 변형율은 90°방향에 모델용기의 외부표면 가운데에 있는 D5a에서 나타났다. 최대 압축 변형율은 0°와 180°에 모델용기의 상부 내부 표면에 있는 D12와 D13에서 발생하였다. 수평낙하의 최대 가속도는 288.59 g와 300.42 g로 나타났다. 모델 용기의 9 m 자유낙하에 대한 충격은 주로 충격완충체가 흡수한다. 따라서 대부분의 변형은 충격완충체에 발생한다. 수평낙하에서 충격완충체 반경 방향으로 최대 변형량은 상부 23 mm, 하부 30 mm로 측정되었다. 일반적으로 수평낙하는 상하부의 충격완충체가 타격면과 접촉하므로 운반용기는 축방향 즉 길이 방향에 대해 굽힘거동을 하므로 축방향 중심에서 최대 변형율을 가질 수 있다고 판단될 수 있다. 그러나, 운반용기의 형상은 상부에 뚜껑 구조를 갖고 있고 운반용기 본체와 뚜껑이 볼트로 조립되어있으므로 운반용기 하부의 평면 부위가 본체와 용접되어 있는 구조에 비해 강도가 낮아 뚜껑 부위의 운반용기 상부면에서 원의 찌그러짐(ovality)가 발생하여 최대 변형율이 나타났다.

1 m 관통 자유낙하(drop 4.)는 모델용기 방위각270°방향의 축방향 중심을 pin으로 그림 7과 같이 가격되었으며, 최대 인장 변형율은 0°방향에 모델용기의 외부표면 가운데에 있는 D7a에서 나타났다. 최대 압축 변형율은 270°에 모델용기의 외부에 타격 pin 근처에 있는 D3u'에서 발생하였다. 수평낙하의 최대 가속도는 181.60 g로 나타났다. 1 m 관

통시험에서는 모델용기의 본체에는 거의 변형이 발생되지 않았고, pin 만 변형되었다. 수평자세의 관통시험에서 pin의 길이 변형량은 140.14 mm에서 120.42 mm로 19.72 mm만큼 감소되었고, 직경은 초기 50 mm에서 최대 54.51 mm로 변형되어 4.51 mm만큼 증가되었다. 관통 낙하에서 용기에 가하는 핀의 타격은 용기 본체에 변형이 발생하기보다는 핀의 변형이 상대적으로 크게 변형되었다. 이 결과는 본체 재질의 항복강도가 317 MPa 이고 Pin의 항복강도가 289 MPa로 작기 때문인 것으로 사료된다.

9 m 수직 자유낙하(drop 5.)는 상부 충격완충체를 장착한 상태에서 모델용기의 수직 방향으로 타격 면에 그림 8과 같이 충돌되었으며, 최대 인장 변형율은 모델용기 뚜껑의 외부표면 가운데에 있는 D4에서 나타났다. 최대 압축 변형율은 모델용기의 뚜껑 내부 쪽에 있는 D1에서 발생하였다. 수평낙하의 최대 가속도는 284.02 g로 나타났다. 수직낙하에서 충격완충체의 변형된 위치는 타격 면 쪽이 아니라 모델용기 쪽에서 발생하였다. 충격완충체의 높이 방향에서 21 mm 만큼 감소되었다. 뚜껑에 대한 변형율을 인장 혹은 압축의 방향을 살펴보면, 충격면과 가까운 뚜껑 표면에 압축과 내면에 인장이 발생할 수 있으리라 예상할 수 있으나, 운반용기의 내부 바스켓이 타격면에 충돌시에 이차적으로 운반용기 뚜껑을 가격하여 최대 변형율이 발생한 것으로 판단된다.

9 m 경사 자유낙하(drop 7.)는 상하부 충격완충체를 장착한 상태에서 모델용기가 수평면에 15°만큼 기울어진 상태에서 모델용기의 하부를 낮게하여 타격 면에 그림 9와 같이 충돌되었으며, 최대 인장 변형율은 모델용기 길이 방향의 외부표면 가운데에 있는 D3a에서 나타났다. 최대 압축 변형율은 모델용기의 상부의 내부 표면에 있는 D12u에서 발생하였다. 수평낙하의 최대 가속도는 372.41 g로 나타났다. 수직 혹은 수평낙하에 비해 경사낙하에서 충격완충체의 변형량을 정량적으로 설명하기가 어렵다. 그림 5은 경사낙하에서 충격완충체의 변형을 그림으로 설명하였다. 일반적으로 경사낙하는 이차충격이 일차충격에 비해 높게 발생한다. 특히 D12u의 변형율이 모든 낙하 형태 중 최대로 측정된 결과로부터 이차 충격방향이 뚜껑인 경우가 모든 낙하형태 중 최대의 손상 방향이 될 수 있다.

Table 2. Peak Values of Strain (300 Hz)

Drop No. 3		Drop No. 4		Drop No. 5		Drop No. 7	
Location	Strain (µε)	Location	Strain (µε)	Location	Strain (µε)	Location	Strain (µε)
D5a	406.21	D2a''	32.65	D1	-403.17	D1	-149.97
D5u	-41.02	D2u	-193.19	D4	590.10	D3a	374.05
D7a	-113.65	D3a	27.85	-	-	D3u	-58.59
D7u	34.27	D3u	-47.43	-	-	D4	126.10
D9a	-133.98	D3a'	14.74	-	-	D7u	35.16
D10u	59.67	D3u''	-205.74	-	-	D10a	-149.37
D12	-1064.48	D7a	71.81	-	-	D10u	20.44
D13	-1076.67	D8u''	-170.36	-	-	D12u	-1219.94

Table 3. Peak Values of Acceleration (300Hz)

Drop No. 3		Drop No. 4		Drop No. 5		Drop No. 7	
Location	Accel. (g)	Location	Accel. (g)	Location	Accel. (g)	Location	Accel. (g)
B4	288.59	B3	69.56	B1	284.02	B3	160.49
B11	300.42	B4	181.60	B2	275.99	B4	174.81
-	-	B11	65.19	B9	278.25	B7	372.41
-	-	-	-	B10	281.72	B8	303.12

4. 결 론

운반용기의 대표적인 낙하자세인 9 m 수평, 수직 및 경사 자유낙하와 1 m 수평 관통낙하에 대해 변형량, 변형율 및 가속도를 측정함으로써 전산계산의 검증자료를 생산하였으며, 이 시험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 9 m 수평 자유낙하에서는 운반용기의 굽힘거동으로 축방향 중심에서 최대 변형율을 가질 수 있다고 판단될 수 있으나, 운반용기의 상부에 뚜껑 형상구조를 갖고 있으므로 운반용기 상부 내면에서 최대 변형율이 나타난다.
- 2) 9 m 수직 자유낙하에서는 운반용기의 내부 바스켓이 타격면에 충돌시에 이차적으로 운반용기 뚜껑을 가격하여 최대 변형율이 발생한 것으로 판단된다.
- 3) 모든 9 m 자유낙하에서는 경사낙하가 최대이며, 경사낙하에서 이차충격이 일차충격에 비해 높게 발생한다. 이차 충격방향이 뚜껑인 경우가 모든 낙하형태 중 최대의 손상 방향이 된다.

5. 참고문헌

- 1) 과학기술부, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”, 과학기술부고시 제2001-23호, 2001.9.18.
- 2) IAEA, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", Safety Standards Series No. TS-R-1, 2000.
- 3) IAEA, "Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", Safety Series No. 37, 1973.
- 4) ASME, "Test Uncertainty", ASME PTC-19.1, 1998.

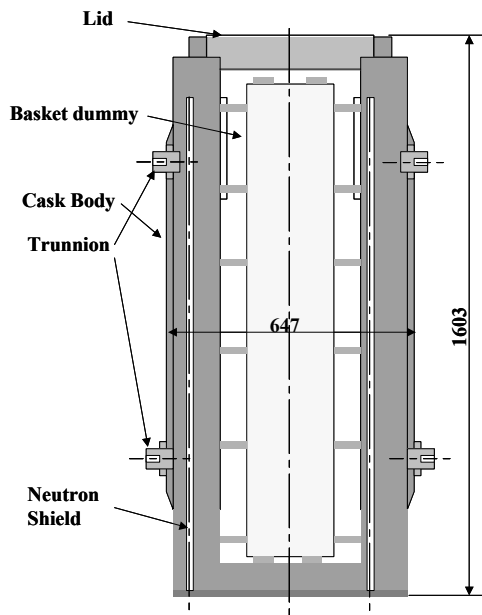


Figure 1. 1/3 Scale Model

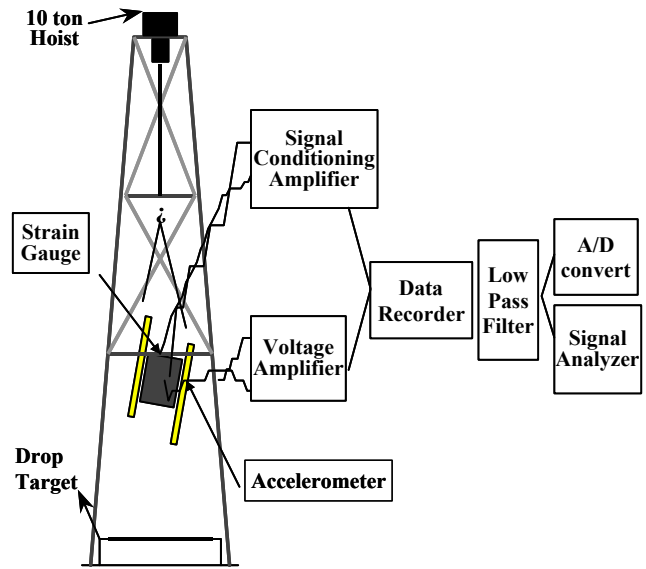


Figure 2. Data Acquisition System and Drop Facility.

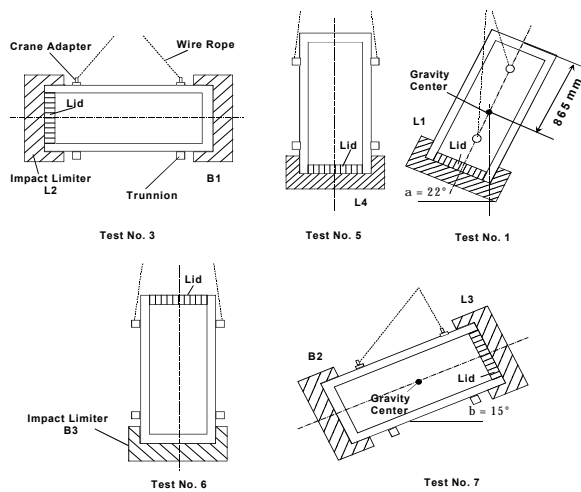


Figure 3. 9 m Free Drop Positions of 1/3 Scale Model.

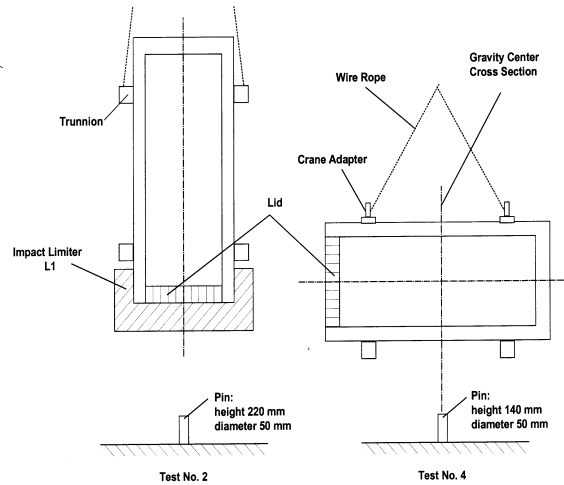


Figure 4. 1 m Puncture Drop Positions of 1/3 Scale Model

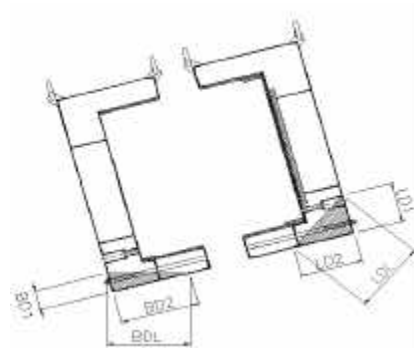


Figure 5. Deformed Shape of Both Shock Absorbers on Drop Test No. 7



Figure 6. 9 m Horizontal Free Drop Test



Figure 7. 1 m Horizontal Puncture Drop Test



Figure 8. 9 m Vertical Free Drop Test



Figure 9. 9 m Corner Free Drop Test

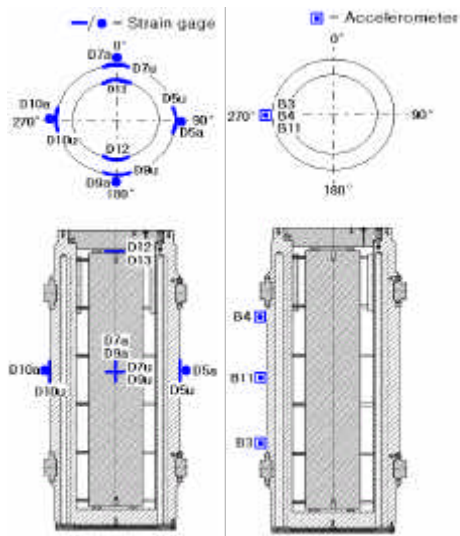


Figure 10. Strain Gauges and Accelerometers Location on Drop 3.

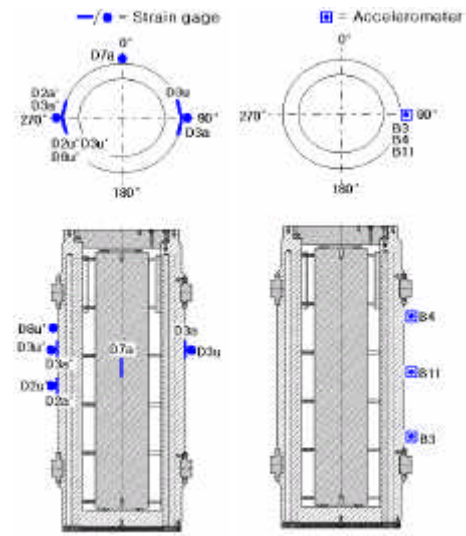


Figure 11. Strain Gauges and Accelerometers Location on Drop 4.

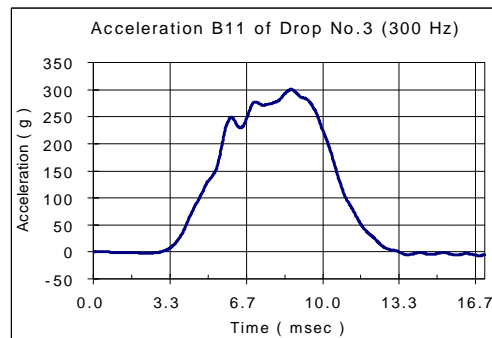
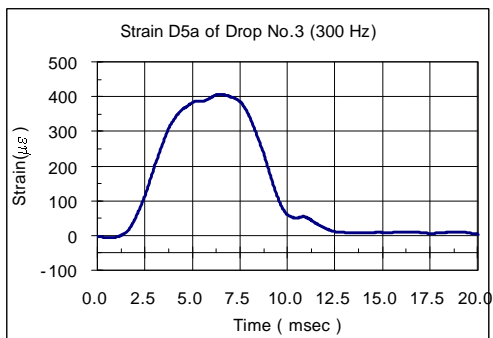


Figure 12. Strain and Acceleration Time History on Drop 3.

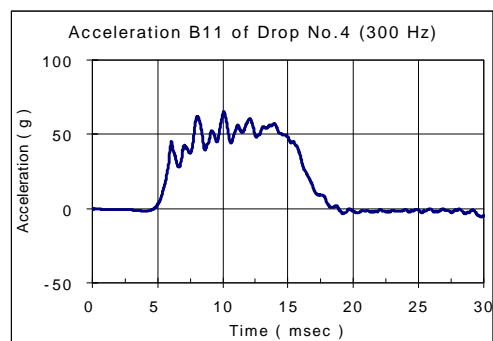
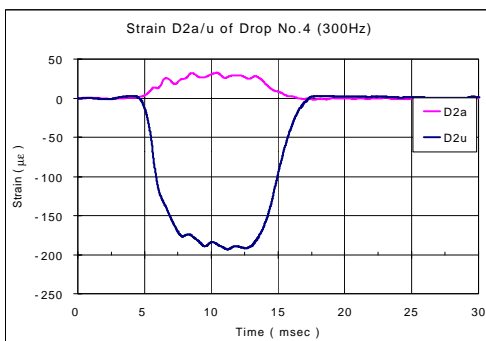


Figure 13. Strain and Acceleration Time History on Drop 4.

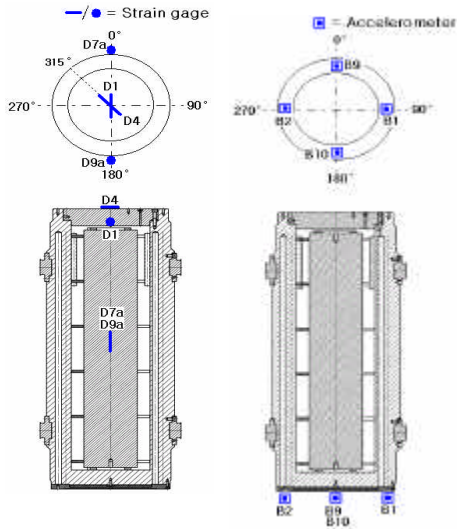


Figure 14. Strain Gauges and Accelerometers Location on Drop 5.

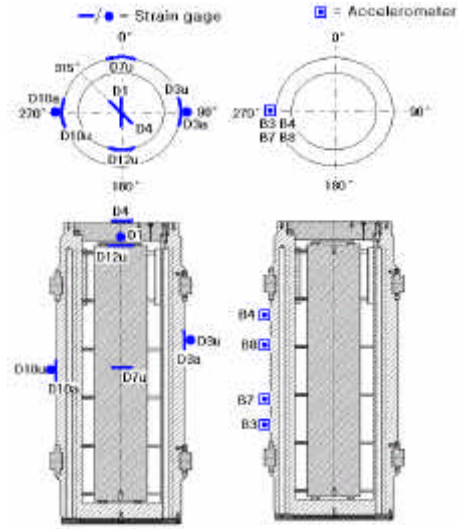


Figure 15. Strain Gauges and Accelerometers Location on Drop 7.

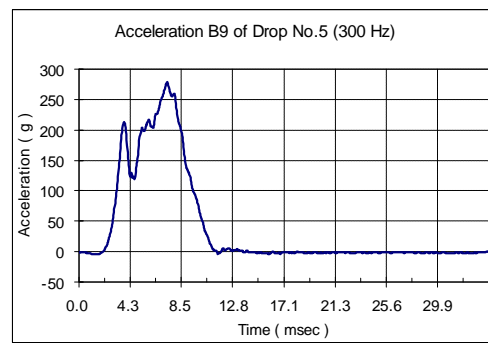
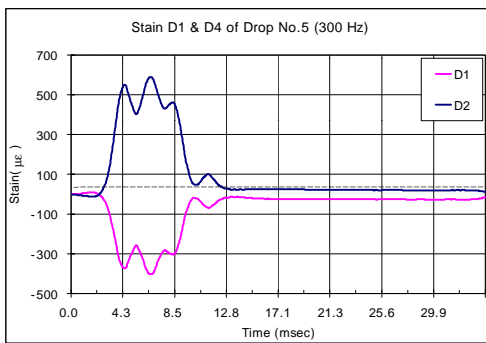


Figure 16. Strain and Acceleration Time History on Drop 5.

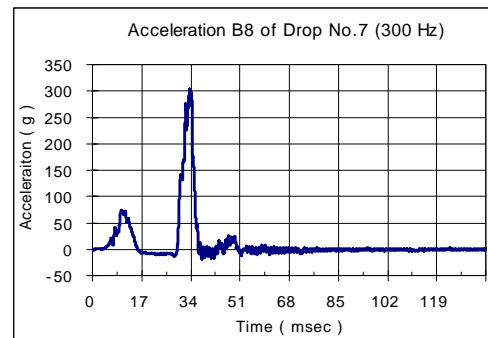
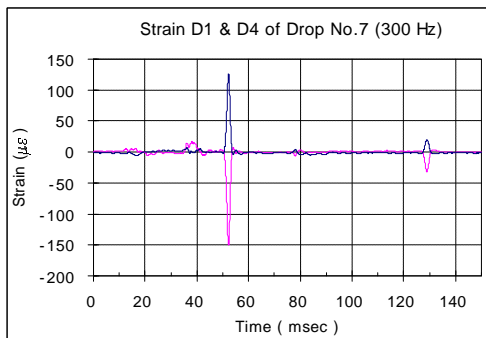


Figure 17. Strain and Acceleration Time History on Drop 7.