

사용후핵연료 금속저장용기에서 적재 중량 증가에 따른 자유낙하 조건의 구조평가

Structural Evaluation on Free Drop Condition according to the Increase of Loaded Weight in Spent Fuel Metal Storage Cask

서기석, 주준식, 이주찬, 박홍윤,*홍성인
한국원자력연구소, *충남대학교
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후핵연료를 용융염 공정으로 고방사능 및 고방열 핵종을 제거시키고 저장부피까지 감소된 금속저장체는 저장 효율을 증대시킬 수 있다. 그러나 저장부피감소에 따라 저장방식의 적재하중 증가를 고려하여야 한다. 이러한 사용후핵연료 금속체의 저장방식은 구조적 안전성이 좋으며, 향후 중간저장시설로 직접 운반이 가능한 금속수송저장용기가 유리하다. 본 논문은 기존 금속저장용기에 금속저장체의 적용 가능성을 알기 위해 저장 기술 기준 중에 자유낙하 사고조건에 대한 구조적 안전성을 평가하였다.

Abstract

Spent nuclear fuel can be changed to the metallic form, in which the nuclides including high radioactive and decay heat are eliminated through the molten salt process. The storage efficiency of metallic form can be also increased as its volume is reduced. But the increase of loaded weight must be considered according to the storage volume reduction. The metal storage cask has various advantages to be capable of directly transporting to the intermediate storage facility and to have more structural integrity comparing with other storage methods. This paper describes the structural safety under free drop conditions specified in storage regulations are evaluated in order to adapt the metallic form to metal storage cask.

1. 서론

국내 경수로 원자력발전소 내에 사용후핵연료 저장시설의 용량이 포화됨에 따라, 발전소 소내 저장시설이 현재 시급한 실정이다. 해외에서 개발되었거나 현재 사용중인 사용후핵연료 저장방식의 종류는 금속 및 콘크리트 저장용기 방식과 모듈형으로서 수평 및 수직 저장방식 등으로 구분될 수 있다. 용기 저장방식으로서 금속용기는 일반적으로 저장과 함께 수송 기능을 겸용화하고 있으며, 콘크리트 용기는 단지 저장기능만을 갖고 있다. 모듈형 저장방식은 일반적으로 대용량 저장을 할 경우에 저장효율이 뛰어나며, 자연대류의 통한 열 냉각 효율 측면에서 유리하다. 하지만, 대단위 건축 시설이 요구되며 초기 투자가 상대적으로 과도하다. 그리고, 콘크리트의 용기 혹은 모듈 저장방식은 장기 저장에서 콘크리트의 방사선 열화 현상으로 구조적 안전성 저하와 같은 약점을 갖고 있으며, 향후 중간 혹은 영구저장시설로의 운반을 위한 별도의 수송체계가 확보되어야 하므로 전체적인 저장과 수송 전반에 걸쳐 볼 때 결코 유리한 것만은 아니다. 특히, 금속저장체의 저장방식은 적재중량의 증가로 구조적 안전성이 좋은 겸용화한 금속저장용기가 적합할 것이다.

사용후핵연료를 저장한 경우에 저장부피를 감소시킨다면, 저장효율이 월등히 향상될 것이다. 원자력연구소에서 사용후핵연료의 우라늄 및 핵분열성물질을 금속화시키는 연구를 진행하고 있다. 금속화된 사용후핵연료는 저장부피의 감소와 함께 용융염 공정에서 고방사능 및 고방열성 핵종인 Cs 및 Sr이 제거됨에 따라, 사용후핵연료 금속저장체는 부피와 함께 방사능 및 방열량이 1/4로 감소된다. 이와 같은 결과는 금속저장체를 기존의 사용후핵연료 저장방식에 적용한다면 4배의 저장량을 가질 수 있다. 기존저장 방식은 금속저장체를 4 배까지 저장할 경우 안전성 평가 측면에서 본다면 방사선 차폐 및 열전달 건전성에는 영향을 받지 않을 것이다. 다만, 기존 저장방식에서 사용후핵연료 집합체를 적재하는 사각형 단면의 바스켓 구조물에 대해 금속저장체의 단위 저장크기를 고려한다면 사용후핵연료의 최대 2.5 배 적재 중량을 갖는다. 따라서, 기존 저장방식에 사용후핵연료 금속저장체를 저장할 경우에 구조 안전성 평가가 대단히 중요하다.

저장 안전성 평가에 대한 기술기준 및 법규는 국내에는 아직 마련되어 있지 않아, 국제기준인 IAEA 및 미국의 10CFR72 등을 검토하였다.[1] 해당 저장방식에 대한 구조 안전성 평가는 정상운전 및 사고에 대한 조건을 만족하여야 한다. 정상조건은 고온 및 저온조건에 대한 내압 및 열응력 평가, 격납경계 유지를 위한 뚜껑 구조 안전성, 바스켓 구조에 대한 중력 하중 및 열팽창 평가 등이 있다. 사고조건은 취급높이 낙하, 폭풍 및 홍수로 인한 전복사고, 지진에 대한 평가가 있다. 여기서, 사용후핵연료를 저장하는 기존 방식에 금속저장체를 적용할 경우에 내부 저장물의 중량 증가 측면에서 가장 중요한 조건은 취급높이 낙하에 대한 안전성 평가이다. 따라서, 본 논문은 기존 사용후핵연료 금속저장용기에서 적재중량 증가에 따른 낙하조건에 대한 구조안전성 평가에 대한 내용을 기술하였다.

2. 적재하중 증가에 따른 금속저장용기의 자유낙하 구조해석 모델링

2.1 금속저장용기의 적용구조 및 재질

사용후핵연료 저장용기는 차폐체를 포함한 구조물로서의 용기 본체, 격납경계에 중요한 뚜껑과 사용후핵연료를 적재할 수 있는 바스켓 구조물로 구성되어 있다. 용기 본체 및 뚜껑은 구조적 안전성 및 차폐기능을 하고 있으므로, 다층 셸(shell)의 구조를 갖고 있다. 제일 외곽의 외부 셸은 중성자 차폐체를 보호하는 기능을 갖고 있다. 감마선 차폐체를 납으로 사용하는 경우는 중간 셸이 있으며, 감마선 차폐체는 중간 셸과 내부 셸 사이에 있다. 감마선 차폐체를 철로 하는 경우는 중간 셸이 없으며 내부 셸로 구성되어 있다. 이와 같은 구조는 용기 본체의 측면에 해당하는 셸의 구조뿐만 아니라 용기본체 바닥과 뚜껑 부분도 같은 구조로 되어 있다. 뚜껑은 일반적으로 이중으로 되어 있으며 용기 본체에 볼트로 체결되어 격납 경계를 이루고 있다. 금속저장용기의 용량은 점차 대형화되어 현재 24개의 경수로 사용후핵연료를 적재할 수 있도록 개발되었다. 미국에서 인허가를 받은 대표적인 금속저장용기로 HI-STAR 100 및 NAC-STC 등이 있다.[2],[3] 각각의 감마선 차폐체는 HI-STAR 100 경우에 철로 되어있고, NAC-STC 경우는 납으로 되어 있어 셸의 구조가 다르다. 내부 중량 증가에 대한 낙하조건의 구조안전성 평가가 본 연구목적이므로, 구조적 강도가 좋을 것으로 예상되는 HI-STAR 100의 구조를 본 논문의 평가 대상으로 고려하였다.

전산 해석평가를 위한 금속저장용기의 재질도 마찬가지로, HI-STAR 100의 구조재를 적용하였다. 표 1과 같이 재질의 특성치는 ASME code, Section II에서 얻은 값들을 동적 해석에 적합하게 단위 변환한 것이다. SA516 grade 70, SA350-LF3 및 SA203-E의 각각의 재질은 용기 본체인 셸, 뚜껑 및 용기 바닥 재질로 적용하였다. 기하학적 모델링의 단위가 mm 이므로, 응력 단위는 MPa로, 밀도는 $7.84E-9 \text{ ton/mm}^3$ 를 각각 적용하였다. 최대 소성 응력 값은 최대인장강도인 ultimate strength로 가정되었고, 최대 소성변형율은 0.5로 가정하여 소성해석을 수행하였다.

표 1. 금속저장용기(HI-STAR 100)의 적용재질 특성치

Material Properties	SA516 grade 70	SA350-LF3	SA203-E
Young Modulus (MPa)	202293.43	190296.48	190296.48
Poisson' Ratio	0.3	0.3	0.3
Yield Stress(MPa)	262	258.56	275.79
Ultimate Stress(MPa)	482.64	482.64	482.64

2.2 구조해석 모델링

구조해석 모델링은 적용 전산코드를 ABAQUS-EXPLICIT ver. 6.2.2로 활용하였으며, 저장용기의 형상은 원통형으로 길이방향 전체와 원주 방향에서 90도에 해당하는 부분만을 고려하여 저장용기의 1/4형상만 모델링 하였다. 삼차원 solid 요소로 6535 개, 절점은 8599 개가 적용되었다.

저장용기의 길이 방향으로 수직 자유낙하를 하므로 경계면의 수평 자유도는 고정시켰다. 저장용기가 수직낙하로 바닥면에 충돌하므로 이를 강체로 가정하여 rigid body 요소를 적용하였으며, 용기 본체와 바닥면은 접촉면(contact surface) 처리를 하였다. 바스켓 및 사용후핵연료 혹은 금속저장체는 저장용기 내부에 있어 자유낙하 충돌시 자체 관성력에 의해 저장용기 내부에 2차 충격을 가하므로 동등한 질량을 가진 원통형으로 모델링하여 저장용기 본체의 내부에 대해 접촉면을 적용하였다. 모든 접촉면의 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 그밖에 구조적 강도에 기여하지 않는 전열판 및 증성자 차폐체는 모델링에서 무시되었으며, 뚜껑 부분은 본체와 분리하지 않은 모델로 가정되었다. 또한 저장용기의 운반시 즉 수송용기로 활용될 때 장착하는 충격완충체는 모델링에 포함되지 않았다. 왜냐하면, 저장용기는 30 - 70 cm의 높이의 취급되기 때문에 장착되지 않기 때문이다.

2.3 하중조건의 변화

금속저장용기의 적재 하중의 변화를 주기 위해 내부구조물 및 저장물 즉 사용후핵연료와 금속저장체를 함께 고려하였다. 특히, 바스켓 자체 중량 이외에 사용후핵연료 혹은 금속저장체의 중량은 저장용기 내부에 동일한 부피를 갖고 있지만, 해당하는 질량이 되도록 밀도를 변경시켜 적용하였다. 첫 번째 경우는 24 다발의 사용후핵연료 spent fuel 18.327 ton을 적용하였으며, 이때의 금속용기 총중량 91.5 ton이다. 두 번째의 경우는 사용후핵연료 96다발에 해당하는 금속저장체 45.818 ton을 적용하여 금속용기 총중량 117.88 ton이 되도록 하였다.

다음의 하중의 조건의 변화는 낙하높이에 있다. 금속 저장용기의 평가 대상으로 삼은 NAC-STC와 HI-STAR 100은 취급높이가 각각 15 inch(38.1 cm)와 26 inch(66 cm)이다. 이 취급높이 기준은 금속운반용기의 구조적 강도 및 금속저장용기를 보관하는 저장시설의 바닥면 강도 등을 고려하여 결정되었으므로, 이 높이들을 평가기준으로 고려하였다. 전산해석에서는 낙하 높이에 해당하는 초기 속도로 입력되므로 $V=\sqrt{2gH}$ 로 계산하여 2733 및 3639 mm/sec로 각각 적용하였다.

3. 계산결과 및 토의

사용후핵연료 금속저장용기에서 적재 중량을 증가시키면서 자유낙하 조건을 평가한 구조해석은 전산코드 ABAQUS /EXPLICIT을 활용하여 수행하였다. 금속저장용기 자유낙하 충격해석에 대한 경계조건과 초기조건은 응력 분포도로 확인하였다. 적재중량 증가로 낙하 충격에 대한 금속저장용기의 건전성은 금속저장용기의 상단, 중단 및 하단의 대표적 요소에 대한 시간-응력 선도를 이용하여 평가하였다.

그림 1.은 충격 직후부터 시간에 따른 응력 분포도를 나타내고 있다. 초기에 금속저장용기 바닥면의 충격력이 용기 셸을 따라 용기 상단으로 전파되고 있는 것을 잘 보여주고 있다. 각 시간증분에 대한 금속저장용기 전체의 최대 응력을 평가하였다.

그림 2.와 3.은 사용후핵연료 혹은 금속저장체를 금속저장용기에 적재시 시간에 대한 응력선도이며, 상단 그래프에서 4600 요소의 해당 위치는 충격면에 가까우며, 두 번째 그래프의 1791 요소는 금속용기 본체의 중앙부위에 해당되고, 세 번째 그래프의 2679 요소는 충격면과 반대인 뚜껑 부위에 해당된다. 마지막 그래프는 충격 바닥면의 reaction force 양이다. 또한 좌측의 그래프들은 계산결과에서 출력하는 시간 구간을 $1E-5$ sec 즉 0.01 msec로 상당히 작게 주어졌기 때문에 높은 주파수 형태로 나타내고 있어, 우측의 그래프들과 같이 300 Hz로 필터링하였다. 그 근거는 가속도에 대한 cut-off frequency의 범위를 규정한 IAEA의 기술기준에 따라 수행하였다.[4] 낙하충격의 가속도 실험에서 1차 고유주파수보다 큰 값 이하로 필터링하게 되어 있다. 그림 2와 3의 왼 쪽 그래프들과 같이 출력 간격이 작은 경우에는 응력 평가가 불가능할 뿐만 아니라 반대로 출력 간격을 크게 준다면 최대값을 놓치는 aliasing effect가 발생할 것이다. 따라서, 전산해석 결과의 출력 간격은 작게 하되 1차 고유진동수를 고려한 필터링 등과 같은 실험적 처리 방식이 필요하다.

표2와 같이 최대 응력과 반력에 대한 해석결과로 사용후핵연료 적재 중량에 비해 2.5배 중량을 가진 금속저장체를 적재시 충격량은 약 20 % 증가하고 있다. 충격면 근처에 발생하는 금속저장용기 하단의 응력만 증가 할 뿐, 중단과 상단의 응력은 변화를 보이고 있지 않다. 최대 응력 상태는 소성항복 응력 이하이며, 위치별로 큰 차이를 보이고 있다. 따라서, 일반적인 취급높이의 자유낙하 조건에서 기존 사용후핵연료 금속저장용기에 금속저장체를 적재하는 경우 안전성이 유지된다고 볼 수 있다. 실제로 적재하중의 증가로 금속저장용기의 응력 크기가 증대되는 것보다 낙하높이의 증가에 따른 응력 증가의 차이가 크게 나타났다. 위치에너지를 살펴보면 중량 증가분은 1.288 배이며, 높이 증가분은 1.737 배이기 때문으로 당연한 결과로 여겨진다. 금속저장체를 적재시 낙하사고를 고려한 최대 취급높이에 대한 평가가 필요하며, 이 경우에 바닥면을 실제의 콘크리트로 고려하여야 할 것이다.

표 2. 적재하중과 낙하높이에 따른 최대 응력 및 반력

Storage Content	Spent Fuel		Metallic Form	
	38 cm	66 cm	38 cm	66 cm
Drop Height	38 cm	66 cm	38 cm	66 cm
Bottom Side(EL.4600)	133.86	172.59	217.68	193.27
Mid Side(EL.1791)	89.02	118.23	88.32	117.25
Top Side(EL.2679)	181.56	211.30	177.32	212.38
Reaction Force	7.89E7	9.69E7	9.53E7	1.14E8

4. 결 론

기존 사용후핵연료 금속저장용기에 금속저장체를 저장하여 적재 중량을 증가 시켰을 때, 취급 높이로부터 수직 낙하하여 충격을 받는 금속저장용기의 구조 안전성 평가에 대한 결론은 다음과 같다.

-사용후핵연료의 저장 중량에 비해 2.5 배 증가된 금속저장체를 금속저장용기에 적재하였을 때, 일반적인 취급높이의 수직낙하 충격에서 기존 금속저장용기는 안전성을 유지하고 있다. 충격 바닥면이 강체로 가정되어 있어 실제의 콘크리트 바닥에 비해 보수적 평가를 수행한 결과이다.

-낙하 충격의 동적 전산해석을 하여 시간에 따른 응력 결과를 평가하는 경우, 가속도 측정 실험 평가에서 적용되고 있는 cut-off frequency 개념을 적용하는 것이 필요하다. 그렇지 않다면 계산 결과의 출력에서 시간증분 구간에 따라 최대 응력이 변화하므로 신뢰성 있는 평가를 할 수 없기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였음.

참고문헌

- 1) IAEA, "Design of Spent Fuel Storage Facilities", 1994.
- 2) HOLTEC International, "Topical Safety Analysis Report for the Hi-STAR 100 Cask System", 1997
- 3) NAC International, "Topical Safety Analysis Report for the NAC Storable Transport Cask for Use at an Independent Spent Fuel Storage Installation", 1995
- 4) IAEA, "Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", Safety Series No. 37, 1973.

그림 1. 낙하충격에 따른 응력분포도

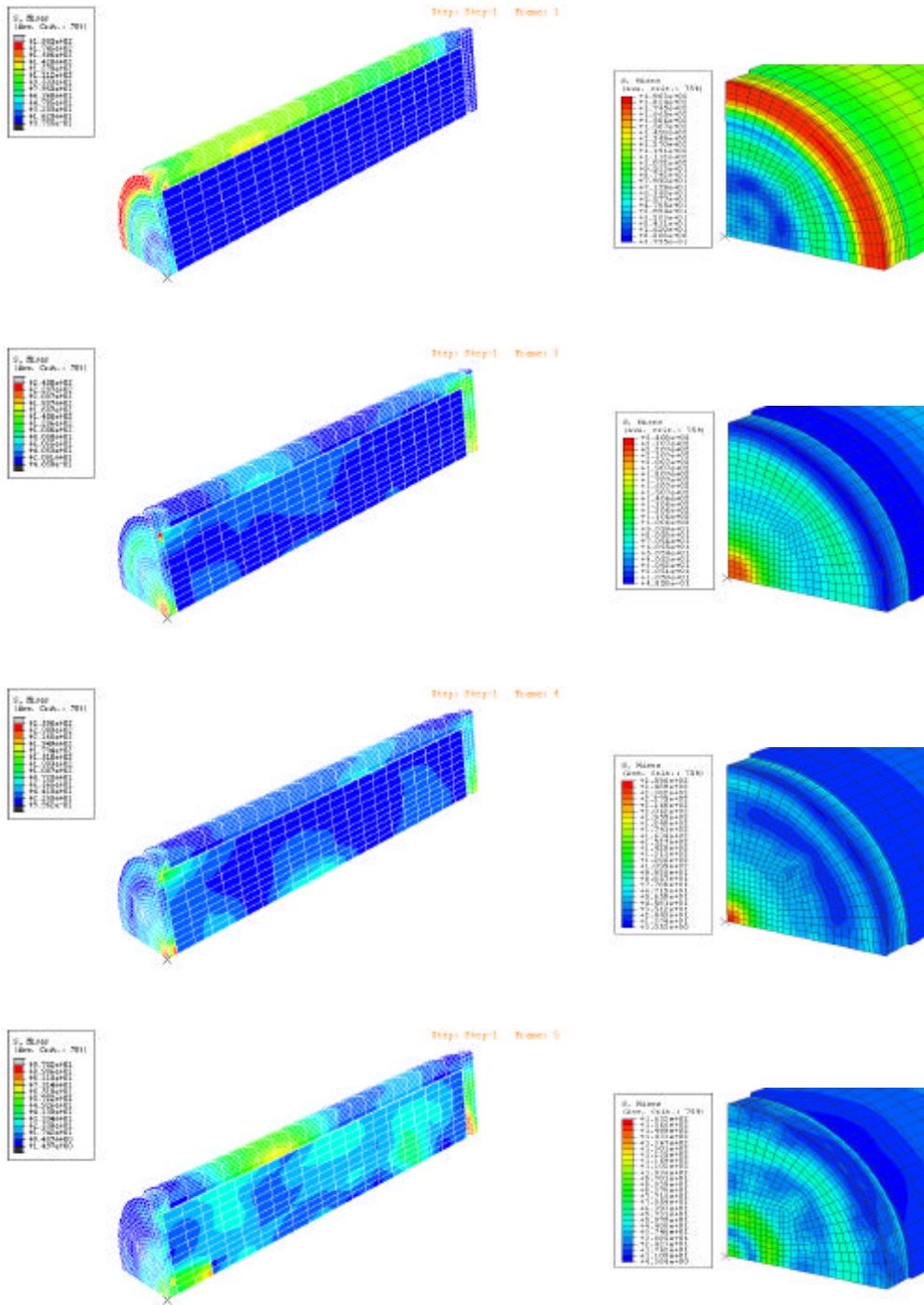


그림 2. 금속저장용기에 사용후핵연료 적재시 응력 및 충격면의 반력.

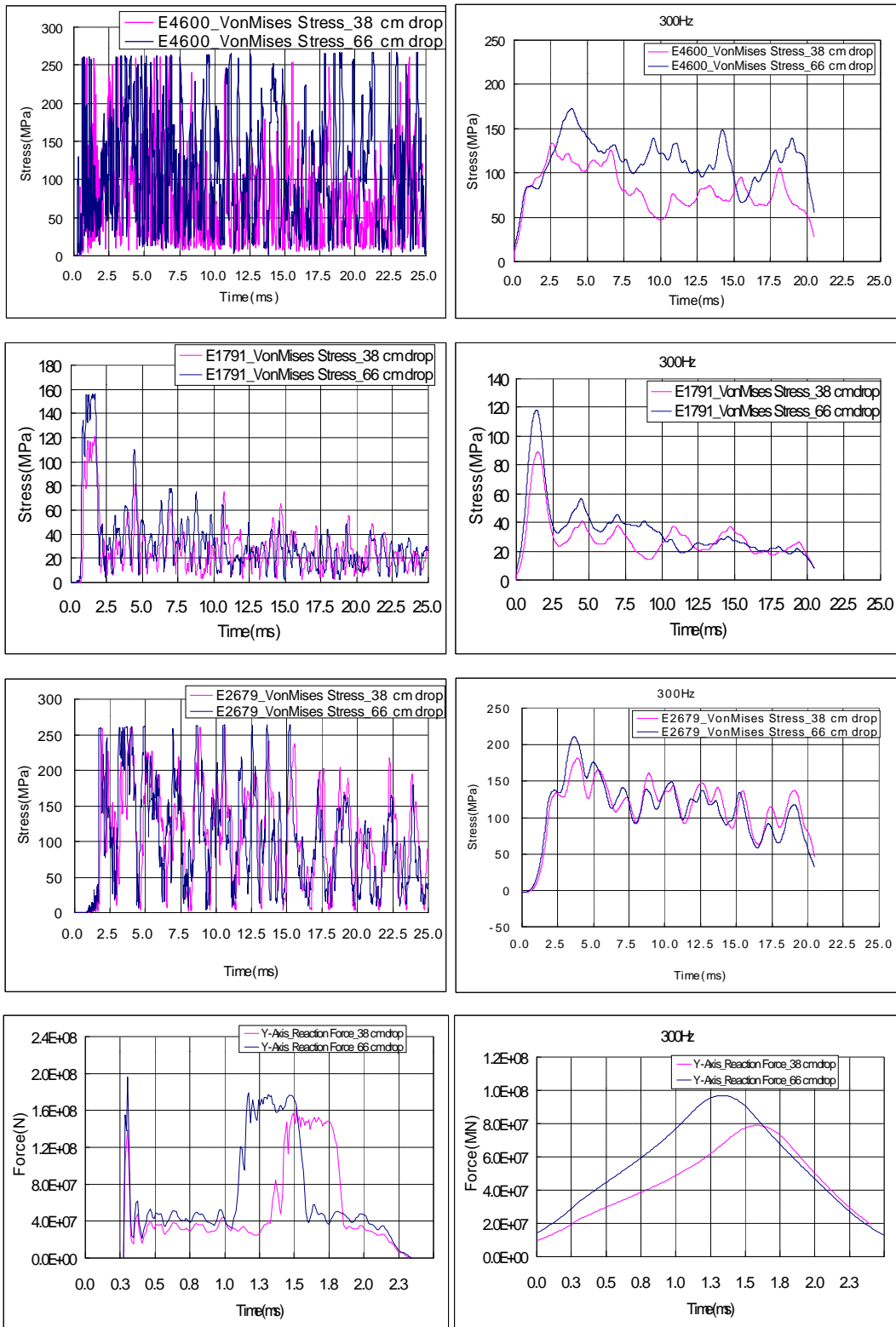


그림 3. 금속저장용기에 금속저장체 적재시 응력 및 충격면의 반력.

