

A Structural Analytic Evaluation of a Concrete Pad In a Spent Fuel Dry Storage Cask

사용후핵연료 건식저장용기의 콘크리트 받침대에 대한 구조해석평가

Dong-Hak Kim, Ki-Seog Seo, Ju-Chan Lee,

Yeon-Do Lee*, Chun-Hyung Cho* and Dae-Ki Lee*

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 DuckJin-Dong, Yuseong-Ku, Daejeon

*Nuclear Environment Technology Institute, P.O Box 149 Yuseong, Daejeon

dhkim@kaeri.re.kr

김동학, 서기석, 이주찬, 이연도*, 조천형*, 이대기*

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

*한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received December 12, 2005 / Approved April 6, 2006)

Abstract

A spent fuel storage cask is required to prove the safety of a canister under a hypothetical accidental drop condition. A hypothetical accidental drop condition means that a canister is assumed to be a free drop on to a pad of the storage cask during loading it into a storage cask. A pad of the storage cask absorbs shock to maintain the structural integrities of a canister under a hypothetical accidental drop condition. In this paper a finite element analysis for various pad structures was carried out to improve the structural integrity of a canister under a hypothetical accidental drop condition. A pad of a storage cask was designed a steel structure with concrete. The 1/4 height of a pad was modified with a structure composed of a steel and a polyurethane foam as a impact limiter. The effect of a shape of a steel structure was studied. The effects of the thickness of a steel structure and the density of a polyurethane foam was also studied.

Key Words : Spent fuel, Dry storage cask, Drop accident condition, Impact limiter, Structural integrity

요 약

사용후핵연료 건식저장용기는 낙하사고조건에서 캐니스터의 건전성이 입증되어야 한다. 낙

낙사고조건은 캐니스터를 건식저장용기에 장입하기 위하여 저장용기의 상부에서 크레인으로 취급하는 도중에 캐니스터가 저장용기 내부의 받침대로 자유 낙하하는 조건이다. 저장용기 내부의 받침대는 이러한 조건에서 캐니스터의 구조적 건전성을 유지하도록 완충효과가 좋아야 한다. 본 연구에서는 다양한 저장용기 내부 받침대에 대한 3차원 유한요소해석을 통하여 낙사고조건에서 캐니스터의 구조적 건전성을 향상시킬 수 있는 구조를 결정하였다. 저장용기 내부 받침대는 탄소강으로 만들어진 원통 쉘의 내부에 콘크리트를 장입한 구조와 받침대 높이의 변화 없이 콘크리트 높이의 1/4정도에 탄소강과 폴리우레탄폼을 이용한 구조물을 사용하여 완충효과를 보완하고자 수정된 구조를 고려하였다. 완충체의 형상 및 구조를 결정하기 위하여 십자형상이나 원형의 탄소강 구조물을 받침대 상부에 위치하여 그 영향을 알아보았다. 이때 탄소강 구조물의 두께를 24 mm, 12 mm, 6 mm로 변화를 주었다. 또한, 탄소강 구조물 사이에 충전하는 폴리우레탄 폼의 밀도에 대한 영향을 알아보았다.

중심단어 : 사용후핵연료, 건식저장용기, 낙사고조건, 완충체, 구조적 건전성

I. 서론

국내 사용후연료 발생 누적량이 발전소 내 저장조의 저장용량을 초과함에 따라 발전소 외에 별도의 저장시설이 필요하게 되었다. 중수로 사용후연료는 이미 발전소 외에 건식저장 시설로 건설하여 저장되고 있으나, 경수로 사용후연료의 경우는 기존 발전소 내 저장조의 확장 혹은 발전소 간의 사용후연료 수송 등을 통해 저장용량 초과를 해결하고 있다. 그러나 경수로 사용후연료의 저장은 저장조의 확장과 소내 수송의 방법을 적용하여도 2008년이면 한계용량에 도달하게 된다[1]. 따라서 발전소 외 저장시설의 건설이 시급한 실정이다. 경수로 사용후연료의 저장방식은 발전소 내의 저장조와 같이 습식저장과 발전소 외 별도의 저장시설로서 건식 저장으로 구분될 수 있다. 건식 저장의 장점은 안전성이 뛰어나며, 운영비가 상대적으로 적고, 저장 용량 및 확장성이 월등하다는 것이다.

사용후연료를 안전하게 저장 관리하기 위해서 저장시스템은 수명기간동안 국내·외 관련법규 및 규정[2,3]에서 요구하고 있는 정상(normal), 비정상(off-normal) 및 사고조건(incident)에서 만족하도록 그 건전성을 입증하여야 한다. 특히, 캐니스터를 건식저장용기에 장입하기 위하여 저장용기의 상부에서 크

레인으로 취급하는 도중에 캐니스터가 낙하하는 조건에서도 캐니스터의 구조적 건전성이 입증되어야 한다. 이러한 조건을 낙사고조건이라 하며 이를 묘사하기 위하여 캐니스터를 저장용기 내부의 받침대로 자유 낙하하는 시험을 실시한다. 캐니스터를 위한 저장용기 내부의 받침대는 이러한 조건에서 캐니스터의 구조적 건전성을 유지하도록 완충효과가 좋아야 한다. 미국 Holtec사의 HI-STORM 100의 경우 캐니스터 낙사고 조건에서 완충효과를 보완하기 위하여 캐니스터의 적재 시에 공기주머니를 저장용기 받침대의 상부에 놓고 일정한 높이로 캐니스터가 적재한 후 공기주머니를 제거하는 방식을 사용하였다.

본 연구에서는 캐니스터의 적재 시에 완충효과를 보완하는 다양한 저장용기 내부 받침대에 대한 유한요소해석을 통하여 낙사고조건에서 캐니스터의 구조적 건전성을 향상시킬 수 있는 구조를 결정하였다. 저장용기 내부 받침대는 탄소강으로 만들어진 원통 쉘의 내부에 콘크리트를 장입한 구조와 캐니스터의 구조적 건전성을 향상시키기 위하여 받침대 높이의 변화 없이 콘크리트 높이의 1/4정도에 탄소강과 폴리우레탄폼을 이용한 구조물을 사용하여 완충효과를 보완하고자 수정된 구조를 고려하였다. 완충구조를 결정하기 위하여 십자형상이나 원형의 탄소강 구조물을 받침대 상부 1/4정도에 위치하여 그 영향을 알

아보았다. 이때 탄소강 구조물의 두께를 24 mm, 12 mm, 6 mm로 변화를 주었다. 또한, 탄소강 구조물 사이에 충전하는 폴리우레탄폼(Polyurethane form, PU)의 밀도를 다섯 가지 조건에 대하여 수행하여 영향을 알아보았다.

II. 유한요소해석

가. 사용후연료 건식저장용기

저장용기 내부 받침대로 캐니스터가 자유낙하하는 낙하사고조건에 대한 해석을 실시하였다. 저장용기 본체인 콘크리트 저장용기는 사용후연료가 적재된 캐니스터를 저장하기 위한 단단하고 튼튼한 원통형 셀(shell) 구조물로서 내외부의 탄소강 셀 사이에 차폐기능 및 압축강도를 가진 콘크리트 차폐체가 채워지며, 용기본체의 상하부에는 사용후연료로부터 발생하는 붕괴열을 자연대류에 의한 공기순환방식으로 제거하기 위하여 공기 흡배기구가 설치된다. 사용후연료를 장전하기 위한 캐니스터는 용접된 원통형 셀 구조물로서 콘크리트 저장용기에 대한 격납경계(confinement boundary)를 제공하는데, 캐니스터는 PWR 사용후연료 집합체 24다발을 장전하기 위한 24개의 정방형 셀(cell)을 갖는 바스켓(basket) 구조물이 설치되고, 캐니스터의 내부에 헬륨을 충전하여 장기간 저장 시 사용후연료의 건전성이 유지되도록 한다. 캐니스터의 외부 구조물인 원통형 셀, 캐니스터 뚜껑, 바닥 판은 스테인리스강(SA240 Type 304) 재

질을 적용하였으며, 캐니스터의 외경은 1,840 mm, 길이는 4,845 mm 이며, 내부공간의 내경과 길이는 1,790 mm 및 4,535 mm이다. 캐니스터와 콘크리트 저장용기의 개념도는 Fig. 1에 나타내었으며 주요 재료 및 제원은 Table 1과 같다. 바스켓 구조물은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 바스켓 셀의 중심과 중심 사이의 간격을 290 mm로 하고, 바스켓 셀과 셀 사이의 간격을 42 mm가 되도록 배치하였으며, 총 24개의 대칭 구조 배열로 구성하였다.

나. 유한요소모델

ABAQUS/Explicit 상용코드[4]를 이용하여 대칭면을 고려한 1/2 모델에 대하여 3차원 충돌해석을 수

Table 1. Materials and dimensions of the canister and the concrete storage cask

Component	Material	Dimension(mm)
^o Canister		
- Shell	SA240 Type 304	25t × OD1,840 × 4,845L
- Lid	SA240 Type 304	250t
- Basket		
.Shell	SA240 Type 304	8t × 239 × 239
^o Concrete storage cask		
- Inner shell	SA350 LF5	50t × OD1,980
- Outer shell	SA350 LF5	20t × OD3,520
- Lid		
.Shell	SA350 LF5	80t / 30t
- Shielding material	Concrete	700t

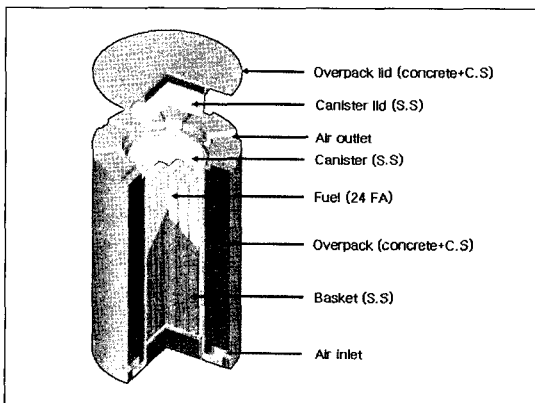


Fig. 1 An overview of a concrete storage cask

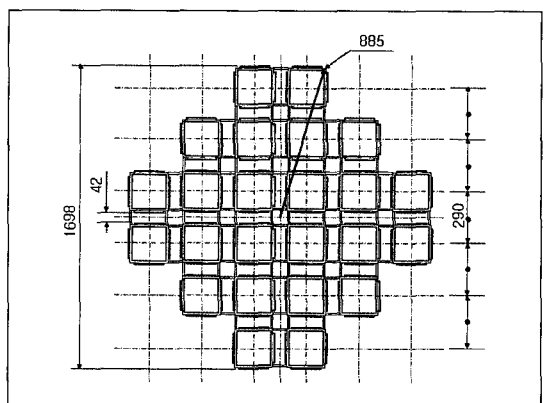


Fig. 2 The cross section of the basket

행하였다. 저장용기의 뚜껑과 옆면을 제외한 콘크리트 받침대와 바스켓과 모의 연료를 포함한 캐니스터를 고려하였다. 먼저 캐니스터가 콘크리트 받침대와 강체에 자유 낙하하는 경우를 해석하였다. 또한 완충효과를 보완하기 위하여 콘크리트 받침대에서 상부 1/4 정도를 탄소강을 이용하여 Fig. 3과 같이 원형이나 십자형의 구조물로 수정하여서 해석을 수행하였다. 이 때 탄소강의 두께는 콘크리트 받침대의 두께와 동일한 24 mm로 하였다. 원형 구조물에서 탄소강의 두께를 12 mm, 6 mm로 감소하여 탄소강

의 두께의 영향을 알아보았으며 탄소강의 사이에 폴리우레탄폼을 충전한 구조에 대한 해석을 수행하여 폴리우레탄폼의 영향을 고려하였다. 여기서 폴리우레탄폼의 밀도는 85, 105, 120, 150, 185, 240 kg/mm³을 사용하였다. 해석 조건에 대하여 요약하면 Table 2와 같다. Fig. 4는 해석모델 중에서 콘크리트 받침대의 경우, 폴리우레탄 폼을 충전하지 않고 24 mm의 원형구조물을 사용한 경우, 폴리우레탄폼과 함께 12 mm의 원형구조물을 사용한 경우에 대하여 나타낸 그림이다.

해석에 사용한 요소는 3차원 8절점 육면체감차요소인 C3D8R(8-node linear brick, reduced integration with hourglass control)로 총 요소 수와 절점 수는 모델에 따라 다르다. Table 3은 각 조건에 따른 총 요소 수, 절점 수 및 자유도를 나타낸다. 중앙면은 대칭면으로 구속하였다. 자유낙하에 따른 해석시간을 줄이기 위하여 5.195 m의 낙하높이에서의 위치에너지에 상당하는 운동에너지를 가지도록 초기 속도(10.09 m/s)를 결정하여 충돌 직전의 모델에 적용하였다. 바닥면과 재질별 사이는 접촉면으로 간주하였다. 받침대는 강체 위에 놓여있으며 받침대는 초

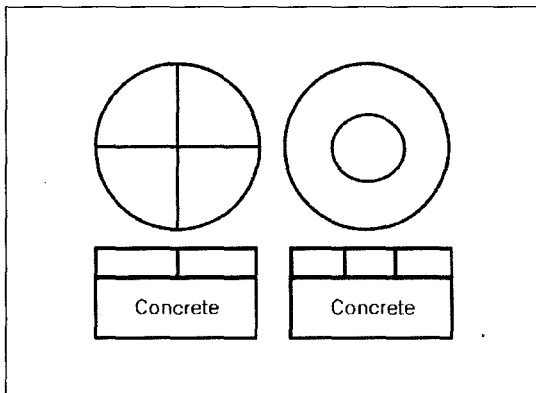


Fig. 3 A cross type structure and a circle type structure

Table 2. Conditions of the pad considered

	Type of structure	Thickness of structure (mm)	Polyurethane form
Concrete pad	No using impact limiter		
Rigid plate	Assume a pad as rigid body		
No PU, 24t cross structure	Cross section	24	Not use
No PU, 24t circle structure	Circle section	24	Not use
No PU, 12t circle structure	Circle section	12	Not use
No PU, 6t circle structure	Circle section	6	Not use
105PU, 24t circle structure	Circle section	24	105kg/ m ³ PU
105PU, 12t circle structure	Circle section	12	105kg/ m ³ PU
105PU, 6t circle structure	Circle section	6	105kg/ m ³ PU
85PU, 12t circle structure	Circle section	12	85kg/ m ³ PU
120PU, 12t circle structure	Circle section	12	120kg/ m ³ PU
150PU, 12t circle structure	Circle section	12	150kg/ m ³ PU
185PU, 12t circle structure	Circle section	12	185kg/ m ³ PU
240PU, 12t circle structure	Circle section	12	240kg/ m ³ PU

기속도를 가지고 있지 않고 캐니스터와 강체 사이에서 완충체의 역할을 한다.

콘크리트와 모의 연료는 탄성재료로 가정하였으며 탄소강, 스테인레스강 및 폴리우레탄폼은 탄소성 재료로 가정하여 증분소성이론을 적용하였다. 사용된 탄소강, 콘크리트 및 스테인레스강에 대한 재료물성치는 Table 4에 나타내었다. 탄소강의 인장응력은 소성변형을 0.2에서 400 MPa로, 스테인레스강의 인장응력은 0.1919의 소성변형을에서 562.6 MPa로 가

정하였다. 항복응력 이후 선형으로 인장응력까지 소성이 발생하고 인장응력 이후에는 완전소성거동을 한다고 가정하였다. 폴리우레탄 폼은 6 가지 종류의 밀도에 대하여 고려하였다. Fig. 5는 밀도에 따른 압축시편을 사용하여 압축시험을 실시한 결과 얻어진 응력-변형률 선도와 유한요소해석에서 사용된 응력-변형률 관계를 나타낸 그림이다. 실선은 압축시험에 의한 응력-변형률 선도이며 점은 사용된 응력-변형률 관계이다. 압축시험결과에서 마지막 두 데이터의 기

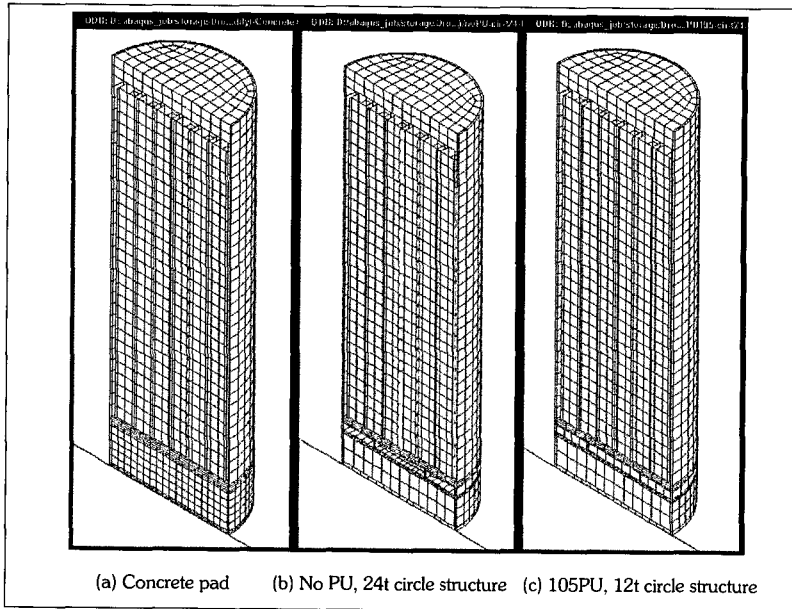


Fig. 4 Finite element model

Table 3. Degrees of freedom and numbers of elements and nodes

	Number of nodes	Number of elements	Degrees of freedoms
Concrete pad	8873	6634	35982
Rigid plate	6331	4996	28356
No PU, 6t circle structure	8132	5877	33759
No PU, 12t circle structure	8056	5841	33531
No PU, 24t circle structure	8020	5821	33423
No PU, 24t cross structure	8764	6411	35655
105PU, 6t circle structure	8288	5927	34227
105PU, 12t circle structure	8252	5907	34119
105PU, 24t circle structure	8364	5963	34455

울기를 이용한 선형의압을 통하여 소성변형율이 1이 되는 경우까지의 응력-변형률 관계를 결정하여 해석에 사용하였다. Table 5는 해석에 사용된 폴리우레탄 폼의 재료물성치를 나타낸다.

III. 결과 및 토론

가. 반력 선도 및 에너지 선도

Fig. 6은 받침대의 형상에 따른 바닥 강체의 고정점에서의 반력을 나타낸다. 받침대 없이 강체에 낙하한 경우에 260 MN의 최대 반력이 나타난다. 콘크리트 받침대에 낙하한 경우 반력이 감소하며 구조물로 완충체를 사용하는 경우에는 더욱 감소한다. 구조물의 형상에 따라서 반력은 큰 변화가 없지만 두께가 증가할수록 반력이 증가하지만 반력이 감소하기 시작하는 시간은 빨라진다. 폴리우레탄폼을 사용하는 경우, 그 영향이 탄소강 구조물의 두께의 영향에 비하여 작으며 반력이 약 5 MN 정도 증가한다. 폴리우레탄폼 밀도가 증가할수록 반력이 증가하지만 반력

이 감소하기 시작하는 시간은 빨라진다. 폴리우레탄 폼 없이 6 mm 두께의 탄소강으로 원형 구조물을 만들어 콘크리트 받침대를 보완하는 경우 최소반력이 나타난다.

Fig. 7은 캐니스터와 저장용기 받침대를 포함한 모델 전체의 운동에너지를 나타낸다. 바스켓과 모의 연료를 포함한 캐니스터에 대한 모델 중량은 15.325톤

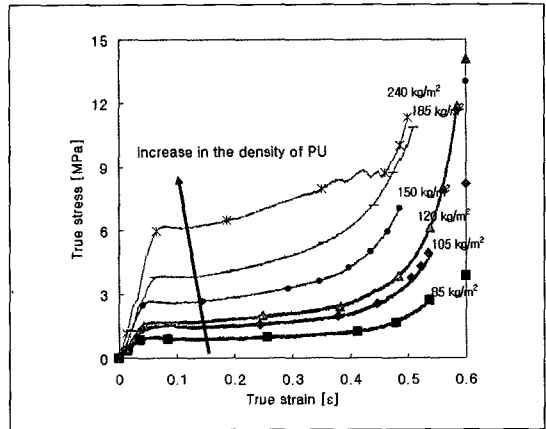


Fig. 5 Stress-strain curves of the polyurethane foams

Table 4. Material properties of the carbon steel, the concrete and the stainless steel

Material Properties	Carbon steel	Concrete	Stainless steel (Type304)
Young's modulus(MPa)	2.0×10^5	1.9×10^4	1.94×10^5
Poisson' ratio	0.29	0.20	0.30
Yield stress(MPa)	200.00	-	206.84
Ultimate stress(MPa)	482.64	-	562.60
Density(ton/m ³)	7.89×10^{-9}	2.40×10^{-9}	8.03×10^{-12}

Table 5. Material properties of polyurethane foams with various densities

Material Properties	Density (ton/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson' ratio	Yield stress (MPa)
85PU	85.85×10^{-12}	24.27	0.1	0.87
105PU	106.03×10^{-12}	34.68	0.1	1.39
120PU	120.07×10^{-12}	35.75	0.1	1.63
150PU	152.96×10^{-12}	60.35	0.1	2.52
185PU	184.68×10^{-12}	62.04	0.1	3.82
240PU	237.77×10^{-12}	92.85	0.1	5.98

으로, 낙하높이 5.195 m에 해당하는 위치에너지는 780 kJ($15,325 \text{ kg} \times 5.195 \text{ m} \times 9.8 \text{ m/sec}^2$)이다. 초기운동에너지 781 kJ는 이러한 위치에너지와 거의 같다. 강체에 낙하하는 경우 짧은 순간에 최소값이 되었다가 반발된 이후 일정한 값을 나타낸다. 콘크리트 받침대의 경우 강체에 낙하하는 경우에 비하여 낮은 최소값을 보이며 더 완만한 변화를 보이며 더 큰 일정한 값을 보인다. 즉, 콘크리트 받침대에 낙하하

는 경우가 1차 반발이 일어난 이후 모델의 평균속도가 강체에 낙하하는 경우에 비하여 크다. 탄소강 구조물이 완충체 역할을 하는 경우 콘크리트 받침대에 비하여 완충효과가 더 커서 1차 반발이 일어난 이후 모델의 평균속도는 감소함을 알 수 있다. 원형 또는 십자형의 탄소강 구조물로 보완된 경우 운동에너지가 매우 낮은 9 kJ 정도의 최소값을 보이며 시간이 지 나면서 1차 반발이 일어난 이후에는 콘크리트 받침

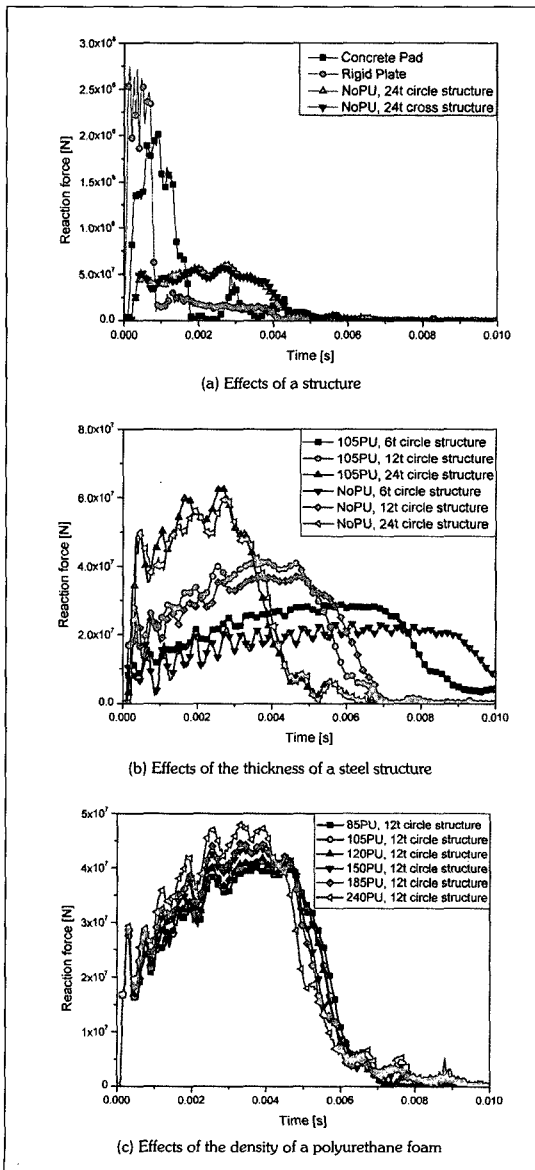


Fig. 6 Reaction force curves for various conditions

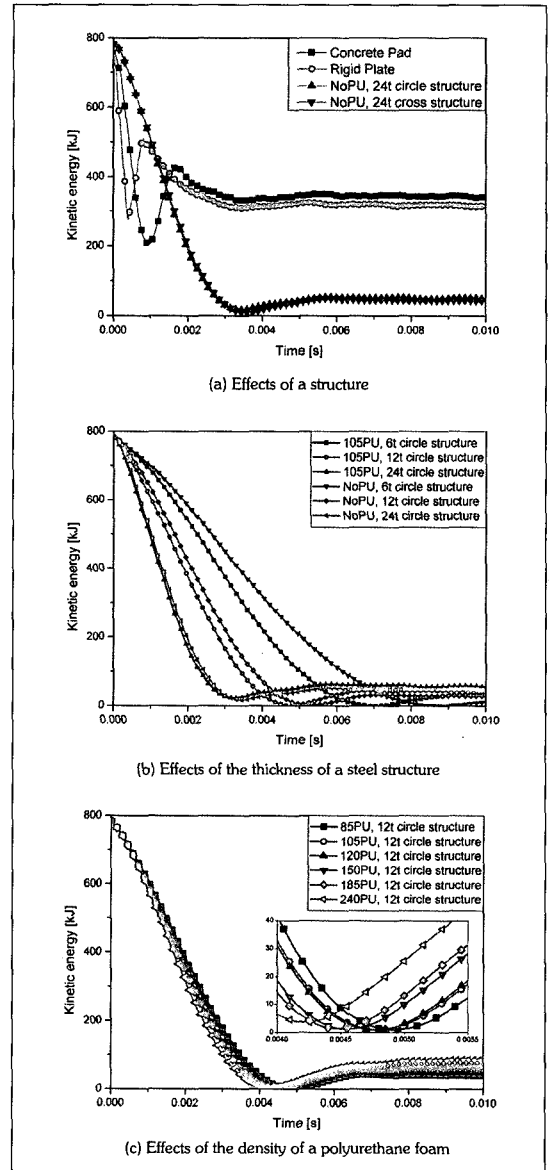


Fig. 7 Kinetic energy curves for various conditions

대를 사용한 경우(345 kJ)보다 더 낮은 일정한 값(44 kJ)을 보인다. 탄소강 구조물 형상의 영향은 미미하다. 탄소강의 두께가 얇을수록 완충효과가 좋아서 완만한 운동에너지의 변화를 보인다. 폴리우레탄폼을 사용하는 경우 폴리우레탄폼을 사용하지 않는 경우보다 더 빠른 운동에너지의 변화를 보인다. 특히, 6 mm 두께의 탄소강 구조물에 대하여 폴리우레탄폼의 영향은 크다. 또한 폴리우레탄폼의 밀도가 증가할수록 더 빠른 운동에너지 변화를 보이며 안정화된 운동에너지가 더 높다.

Fig. 8은 모델의 내부에너지로 모델의 운동에너지의 감소량이 내부에너지로 변화하므로 내부에너지에 대한 받침대의 영향은 운동에너지와 유사하다. 충돌에 의하여 내부에너지는 증가하다가 1차 반발이 시작하면 탄성회복에 의한 내부에너지의 감소가 나타나며 동시에 반발에 의한 내부에너지의 증가가 나타난다. 강체에 낙하하는 경우 초기 내부에너지 증가에서보다 반발이후(3.45 msec)에 더 큰 내부에너지를 보인다. 완충효과가 있는 탄소강 구조물을 사용하는 경우 탄성회복 등에 의한 내부에너지의 감소가 크며 바닥의 반발력을 탄소강 구조물이 완충효과를 보이므로 내부에너지의 증가가 적지만 강체와 콘크리트 받침대의 경우에는 탄성회복 등에 의한 내부에너지의 감소보다 강체의 반발력에 의해 발생하는 내부에너지에 의한 값이 크기 때문에 생각된다. Table 6은 최대 반력, 최소 운동에너지, 최대 내부에너지와 그러한 경우의 시간을 정리한 것이다.

나. 응력분포와 최대 응력

Fig. 9는 받침대 형상에 따른 캐니스터와 바스켓에서 최대값이 나타나는 순간의 Tresca 응력분포를 나타낸다. 강체에 낙하하는 경우와 콘크리트 받침대의 경우, 캐니스터의 원통 셀과 모서리부에서 큰 응력이 나타나며 바스켓의 아래바닥 가운데 부분에서 큰 응력이 나타난다. 십자형상의 구조물을 이용한 받침대의 경우 캐니스터에서는 바닥면과 원통 셀 부근에서, 바스켓에서는 바닥면에서 전체적으로 큰 응력이 발생한다. 하지만 원형구조물을 이용한 받침대의 경우, 캐니스터에서는 원통셀과 바닥면이 연결되는 모서리

에서 국부적으로 큰 응력이 발생하며 바스켓에서는 아래 바깥쪽에서 큰 응력이 발생한다. 완충구조를 보완하는 탄소강의 두께가 감소하면 캐니스터에서는 집중하중이 더 커진다. 폴리우레탄폼이 있는 경우 바스켓은 전반적으로 낮은 응력 분포를 보이지만 국부적으로 집중하중이 존재한다.

Fig. 10은 최대 Tresca 응력이 나타나는 위치를 나타낸다. 캐니스터의 경우 최대 Tresca 응력은 바닥면

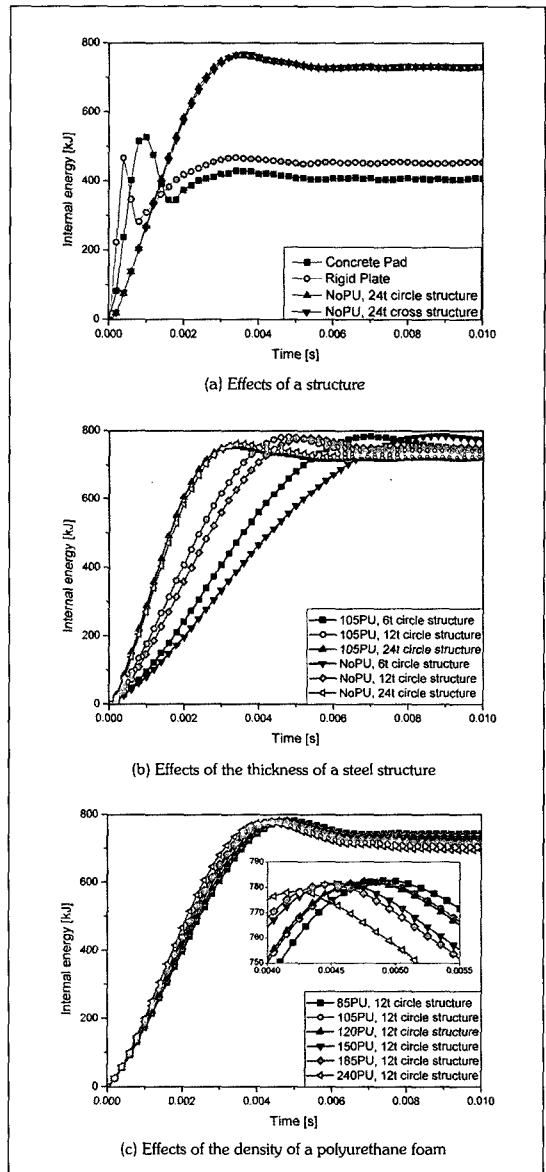


Fig. 8 Internal energy curves for various conditions

의 모서리 부근에서 발생한다. 바스켓의 경우 최대 응력은 아래바닥에서 발생하는데 강체나 콘크리트 받침대, 십자형상의 구조물 받침대의 경우에는 가운데 부분에서 발생하며 원형 구조물 받침대의 경우 바깥쪽에서 발생한다. 이러한 위치에서 시간에 따른 Tresca 응력의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 강체에 낙하하는 경우, 초기에 높은 응력이 발생하며 이후에 응력이 감소한다. 콘크리트 받침대에 낙하하는 경우를 해석한 결과 강체에 낙하하는 경우보다 낮은 응력

은 보이지만 최대 응력 발생 후 응력의 감소가 작다. 십자형상의 구조물 받침대의 경우 원형형상의 구조물 받침대에 비하여 바스켓에서 응력이 매우 증가하였으며 캐니스터에서의 응력은 큰 변화가 없다. 탄소강 구조물의 두께가 감소할수록 초기 응력증가 기울기는 감소하지만 캐니스터에서 응력이 증가하는 시간이 커서 6 mm 두께일 경우 매우 높은 응력을 보인다. 폴리우레탄폼을 탄소강 구조물사이에 충전한 받침대에서는 응력이 일정한 값 이상에서 응력 증가를

Table 6. The maximum reaction force, the minimum kinetic energy and the maximum internal energy for various conditions.

		The maximum reaction force [MN]	The minimum kinetic energy [J]	The maximum internal energy [kJ]
Concrete pad	Value	200.0	203352.0	520.4
	Time [ms]	0.90	0.95	1.00
Rigid plate	Value	275.0	275478.0	467.6
	Time [ms]	0.15	0.40	3.45
No PU, 24t cross structure	Value	56.6	8811.7	767.8
	Time [ms]	2.70	3.60	3.60
No PU, 24t circle structure	Value	60.2	17491.2	763.2
	Time [ms]	2.75	3.40	3.45
No PU, 12t circle structure	Value	37.3	1807.4	779.4
	Time [ms]	3.85	5.30	5.30
No PU, 6t circle structure	Value	23.6	295.3	786.4
	Time [ms]	6.10	8.76	8.75
105PU, 24t circle structure	Value	63.0	24347.3	755.3
	Time [ms]	2.65	3.25	3.30
105PU, 12t circle structure	Value	41.2	968.0	782.4
	Time [ms]	3.90	4.80	4.80
105PU, 6t circle structure	Value	27.0	212.3	783.9
	Time [ms]	5.50	7.00	7.00
85PU, 12t circle structure	Value	40.1	1016.3	782.7
	Time [ms]	4.55	4.90	4.95
120PU, 12t circle structure	Value	41.8	990.2	782.2
	Time [ms]	3.90	4.75	4.75
150PU, 12t circle structure	Value	43.8	1239.8	781.6
	Time [ms]	3.85	4.55	4.55
185PU, 12t circle structure	Value	44.7	1548.0	781.0
	Time [ms]	3.4	4.45	4.45
240PU, 12t circle structure	Value	48.1	3774.4	778.2
	Time [ms]	3.35	4.20	4.20

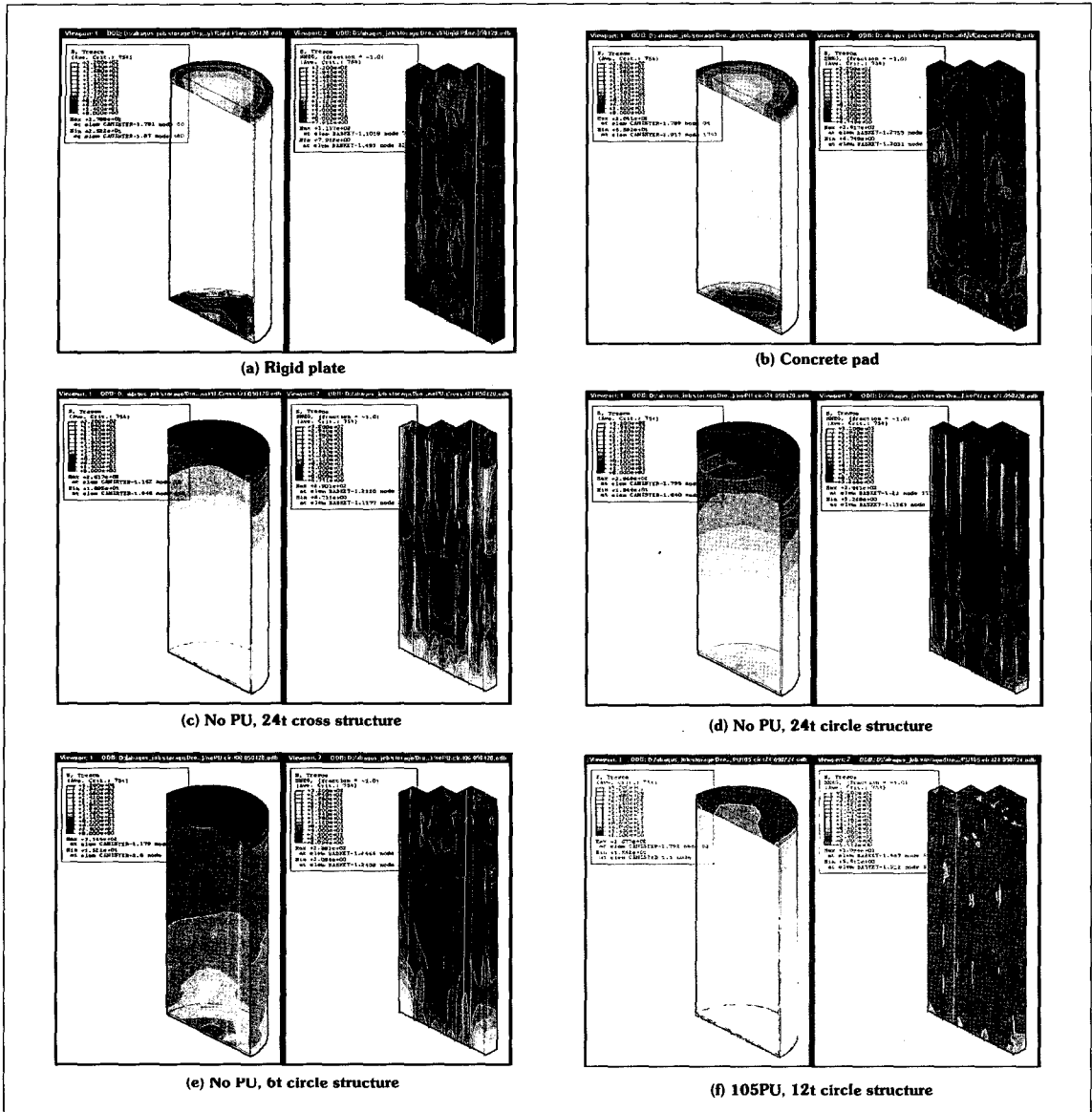


Fig. 9 Tresca stress contours for various conditions

보이지 않는다. 바스켓의 최대 응력 도달 이후에 감소하는 시간이 작다. 폴리우레탄폼의 밀도에 대한 최대 응력의 영향은 작다.

Table 7은 낙하사고조건에서 받침대에 따른 바스켓과 캐니스터의 최대 응력값을 나타낸다. 낙하사고 조건에서 기존의 받침대의 경우 바스켓에서 매우 큰 응력이 나타난다. 받침대를 강체로 가정한 경우 캐니스터에서 높은 응력을 보인다. 폴리우레탄폼이 없는

경우 십자형상이나 원형에 대하여 캐니스터의 최대 응력은 유사하지만 바스켓의 최대 응력은 십자형상에서 높은 값을 보인다. 십자형상의 구조물의 경우, 캐니스터의 바닥면과 바스켓의 아래 부분에서 전반적으로 높은 응력을 보인다. 특히 십자형상의 구조물의 경우 캐니스터에서의 최대 응력은 원형 구조물의 경우보다 약간 증가하지만 바스켓의 아래 부분에서 큰 최대 응력을 보이므로 원형의 구조물이 십자형 구

Table 7. Maximum Tresca stress of canister and basket for various conditions.

	Canister		Basket	
	Maximum Tresca stress [MPa]	Time [ms]	Maximum Tresca stress [MPa]	Time [ms]
Rigid plate	278.8	1.60	307.2	1.90
Concrete pad	254.1	1.60	301.6	2.00
No PU, 24t cross structure	270.3	3.15	334.7	7.40
No PU, 24t circle structure	267.4	3.50	263.6	3.15
No PU, 12t circle structure	288.9	5.75	250.7	4.15
No PU, 6t circle structure	319.2	8.75	251.6	9.55
105PU, 24t circle structure	267.7	3.25	271.4	4.90
105PU, 12t circle structure	252.8	4.95	236.6	2.25
105PU, 6t circle structure	246.1	6.95	244.1	5.40
85PU, 12t circle structure	241.8	4.95	236.8	2.25
120PU, 12t circle structure	253.5	4.80	235.5	2.25
150PU, 12t circle structure	251.2	4.60	234.7	1.55
185PU, 12t circle structure	250.9	4.60	235.1	1.90
240PU, 12t circle structure	249.1	4.05	238.1	2.75

조물 보다 캐니스터의 전반적인 건전성을 더욱 높이는 것으로 판단된다. 탄소강 구조물의 두께가 얇아질수록 캐니스터의 최대 응력은 증가하지만 바스켓에서는 24 mm의 탄소강의 구조물의 경우 최대 응력이 가장 크다. 폴리우레탄폼을 사용하지 않는 경우, 바스켓에서 최대 응력이 더 큰 십자형상보다는 원형형상의 구조로 캐니스터의 최대 응력이 더 작은 24 mm 두께의 탄소강을 이용하여 받침대를 보완한 경우에

캐니스터의 전반적인 구조적 건전성을 보다 높일 수 있다. 폴리우레탄을 탄소강 구조물 사이에 사용하는 경우, 탄소강의 두께가 감소할수록 캐니스터에서 더 낮은 최대 응력을 보인다. 바스켓의 최대 응력은 탄소강의 두께가 12 mm일 때 가장 작다. 구조적 건전성의 평가 대상인 바스켓과 캐니스터를 모두 고려한 최대 응력이 가장 작은 경우는 6 mm의 탄소강이 원형 구조물을 사용한 구조로 최대 응력값은 246.1

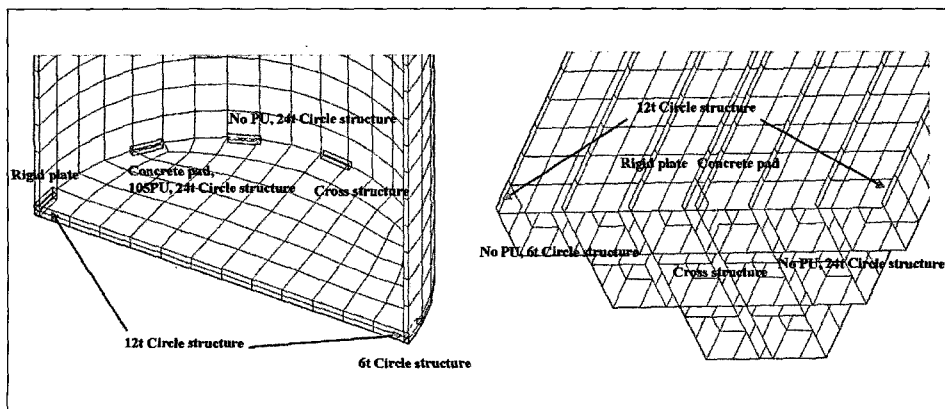


Fig. 10 Positions of the maximum Tresca stresses for various conditions

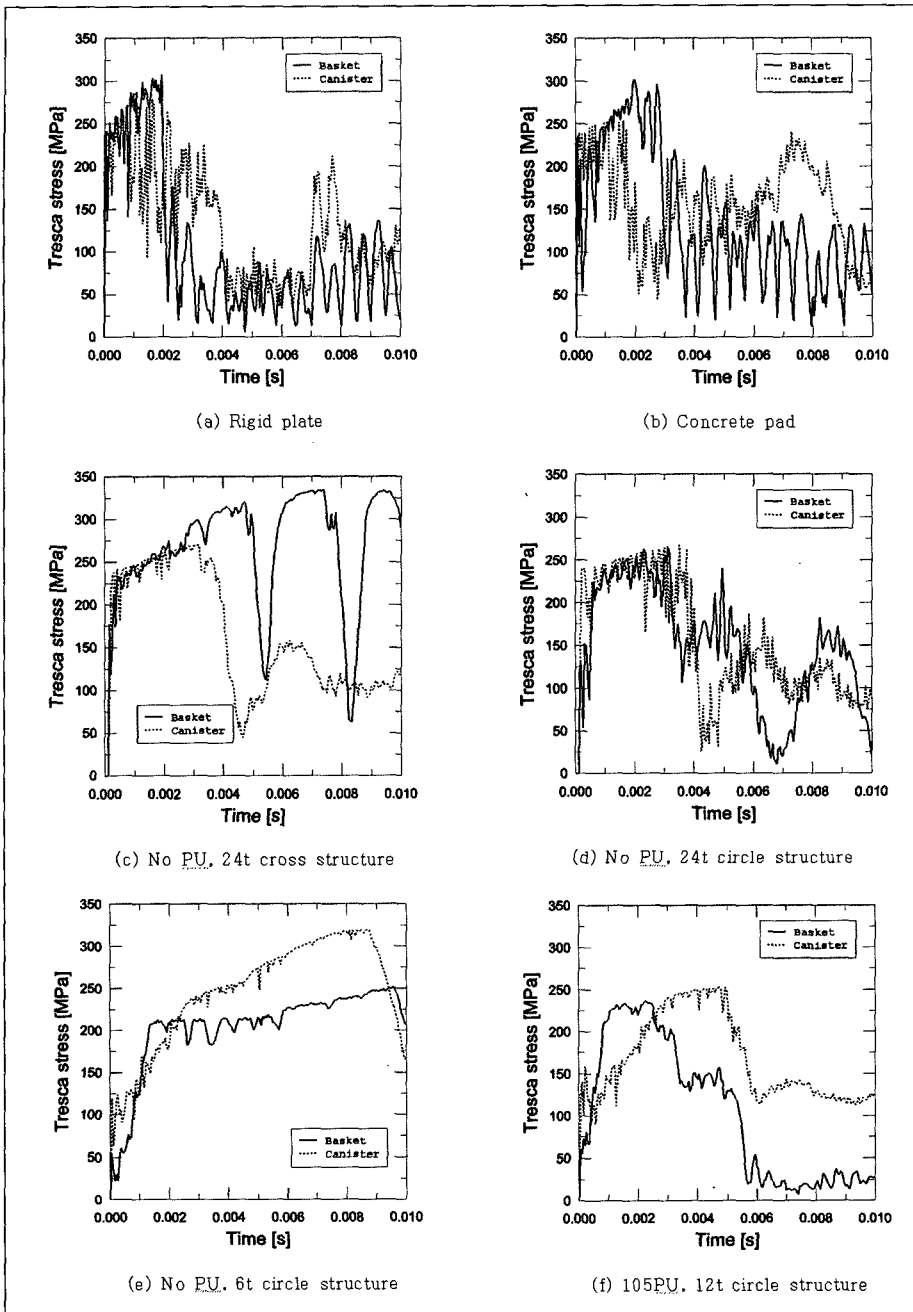


Fig. 11 Tresca stress curves for various conditions.

MPa이다. 그러나 폴리우레탄폼과 함께 6mm의 원형탄소강을 사용하여 완충효과를 보완하는 경우 캐니스터의 자중에 의하여 탄소강이 받는 응력은 7.54 MPa이다. 일반사용조건에서 크레인 등을 이용하여 캐니스터를 취급하는 경우에 자중에 의한 하중보다

더 큰 하중을 저장용기 받침대에 작용한다. 그러므로 6mm의 원형탄소강을 사용하는 경우에는 사용조건에서 변형이 발생되거나 크립 등에 의한 장기 저장조건에 대한 구조적 건전성에 대한 입증은 필수적으로 요구된다. 그러므로 6mm의 원형탄소강을 사용하지

않고 폴리우레탄폼과 함께 12 mm의 탄소강을 원형으로 구조물을 만들어 완충효과를 보완하는 구조로 받침대의 상부 1/4를 수정한다면 캐니스터와 바스켓의 건전성을 보다 높일 수 있는 구조가 될 것이다.

12 mm의 탄소강을 원형으로 만든 구조물에 충전하는 폴리우레탄폼의 밀도의 영향을 알아보기 위하여 5가지 종류를 고려한 결과, 본 연구에서 고려한 조건에서 85 kg/m³의 밀도를 가진 폴리우레탄 폼을 충전한 12 mm 두께의 원형 구조물 받침대의 경우, 캐니스터의 최대 응력이 가장 작으며, 150kg/m³의 밀도를 가진 폴리우레탄 폼을 충전한 12 mm 두께의 원형 구조물 받침대의 경우, 바스켓의 최대 응력이 가장 작다. 85 kg/m³의 밀도를 가진 폴리우레탄 폼을 충전한 12 mm 두께의 원형 구조물 받침대의 경우에 평가 대상인 바스켓과 캐니스터를 모두 고려한 최대 응력이 가장 작아서 이러한 구조가 캐니스터와 바스켓의 구조적 건전성이 더 좋다. 평가대상인 바스켓과 캐니스터에서의 최대 Tresca 응력은 241.8 MPa로 항복응력보다는 크지만 인장응력의 50%정도로 건전성은 충분히 유지하고 있다. 폴리우레탄폼이 존재하는 경우 반력이나 최대 내부에너지 등은 증가하지만 폴리우레탄 폼의 변형이 충분히 발생하기 때문에 캐니스터와 바스켓에서 전반적인 응력값이 증가하더라도 국부적인 최대 응력값이 감소하는 것으로 사료된다. 그러므로 반력의 감소가 캐니스터의 건전성을 향상시킨다고 단순 비교할 수는 없다.

IV. 결론

저장용기에 대한 낙하사고조건에 대하여 캐니스터의 건전성을 향상시키기 위하여 콘크리트 받침대 높이의 변화 없이 콘크리트 두께의 1/4 정도를 다른 두께의 십자형상이나 원형의 탄소강과 밀도가 다른 폴리우레탄폼을 이용한 구조물을 완충체로 보완한 다양한 저장용기 내부 받침대의 구조에 대하여 3차원 유한요소해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 콘크리트 받침대에 비하여 구조물을 이용하여 완충효과를 보완한 받침대의 경우 더 낮은 반력

을 보이며 운동에너지의 최소값과 내부에너지의 최대값이 더 크다.

- (2) 구조물 단면의 형상에 대한 영향은 매우 적어서 반력이나 에너지 선도, 캐니스터의 최대 응력값의 변화는 거의 없다. 하지만 십자형상의 구조물의 경우, 캐니스터의 바닥면과 바스켓의 아래 부분에서 전반적으로 높은 응력을 보인다. 특히 십자형상의 구조물의 경우 캐니스터에서의 최대 응력은 원형 구조물의 경우보다 약간 증가하지만 바스켓의 아래 부분에서 큰 최대 응력을 보이므로 원형의 구조물이 십자형 구조물 보다 캐니스터의 전반적인 건전성을 더욱 높이는 것으로 판단된다.
- (3) 폴리우레탄폼이 없이 탄소강으로 만들어진 구조물의 경우 탄소강의 두께가 감소함에 따라서 반력이 더 작고 에너지 선도의 기울기가 감소한다. 캐니스터의 최대 응력은 증가하여 캐니스터의 건전성은 약화시킨다.
- (4) 폴리우레탄폼을 사용한 구조물을 이용하여 보완한 받침대의 경우, 폴리우레탄 폼이 없는 경우보다 반력이 더 높고 에너지 선도의 기울기가 증가한다. 폴리우레탄 폼을 사용하지 않는 경우와는 달리 폴리우레탄폼을 사용한 구조일 경우에는 탄소강의 두께가 얇아질수록 캐니스터의 최대 응력이 더 작아서 캐니스터의 건전성을 향상시킨다.
- (5) 6 mm의 탄소강을 이용하여 구조를 보완하는 경우 12 mm의 탄소강을 이용하는 경우에 비하여 바스켓의 최대 응력은 크지만 캐니스터의 최대 응력과 유사한 최대 응력을 보이므로 6 mm의 탄소강을 이용하는 구조가 더 좋은 구조적 건전성을 보인다. 하지만 6 mm의 탄소강을 이용하여 구조를 보완하는 경우 캐니스터의 자중에 의한 응력이 커서 장기 저장조건에 대한 구조적 건전성에 문제를 유발할 수 있으므로 12 mm의 탄소강을 이용하여 완충효과를 보완하는 구조가 좋다.
- (6) 폴리우레탄폼의 밀도가 증가함에 따라서 반력이 증가하고 에너지 선도의 기울기가 증가하지

만 그 크기가 작다. 또한 캐니스터와 바스켓의 최대 응력의 변화는 미미하다.

- (7) 85 kg/m³의 밀도를 가진 폴리우레탄폼이 충전된 12 mm 두께의 탄소강을 원형형상의 구조물로 콘크리트 받침대의 상부 1/4정도를 수정한 받침대가 고려한 구조 중에서 캐니스터 및 바스켓의 건전성을 향상시키므로 건식저장용기의 받침대로써 사용하는 것이 좋다.

참고문헌

- [1] 과학기술부, "원자력관련 주요 현황 및 통계자료," 2002, pp. 88.
- [2] NUREG-1536, "Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems," US Nuclear Regulatory commission, 1997.
- [3] NUREG-1567, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities," US Nuclear Regulatory commission, 2000.
- [4] Hittit, Karlson and Sorensen, "ABAQUS/Explicit User's Manual for Revision 6.5," 2005.