

조사후 충격특성을 이용한 사용후 핵연료 저장·수송용기의 구조건전성평가

A Study on the Structural Integrity Evaluation of the Dual Purpose Casks for the Spent Fuel Storage and Transport with HANARO Irradiation Impact Tests

김현수¹⁾, 이영신¹⁾, 강영환²⁾, 정성환³⁾

¹⁾충남대학교
대전광역시 유성구 궁동 220

²⁾한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

³⁾원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

요 약

본 연구는 조사후 충격특성을 적용한 사용후핵연료 저장·수송겸용용기의 구조건전성을 평가하기 위해 수행되었다. 용기의 주재료에 대해 충격시편을 제작하고 조사시험을 수행하였다. 조사된 충격시편과 노외충격시편에 대하여 충격시험을 수행하고 시험결과로 구한 충격특성을 관련규정에 따른 충격해석에 적용하여 조사후에도 사용후 핵연료 저장·수송겸용용기가 구조적 건전성을 유지함을 확인하였다.

Abstract

This study is conducted in order to evaluate structural integrity of the dual propose casks for the spent fuel storage and transport after 30 years storage. Charpy impact specimen was manufactured and material irradiation test was performed using the HANARO. For the irradiated and unirradiated Charpy impact specimen with v-notch, the impact test was conducted, then the impact test results were applied in the impact analysis of the dual propose casks for the spent fuel storage and transport. From the impact analysis results, we confirmed that the structural integrity of the dual propose cask was maintained under original and irradiation conditions.

1. 서 론

사용후핵연료 저장·수송 용기를 이루고 있는 재료들은 내부에 적재되는 사용후핵연료로 인하여 방사선분위기에서 사용되므로 설계 및 해석시 정확한 재료특성이 고려되어야 한다. 특히, 저장·수송 용기 재료는 사용 기간중 장기간에 걸쳐 방사선에 조사되므로 재료에 각종 조사결함이 생성될수 있으며, 이러한 결함은 기계적 성질에 영향을 주고 있다. 본 연구에서 수행된 사용후핵연료 저장·수송용기 재료는 저장·수송용기 외에도 고속증식로, 핵융합로의 노심재료로는 물론

경수로의 핵연료 집합체의 부품 등에 널리 사용되고 있는 재료이다. 국내에서 사용후핵연료 저장·수송 검용 용기는 현재까지 개발된 적이 없으며, KSC-1, KSC-4 등과 같은 수송용기에 대한 일부 설계 및 제작이 이루어진 실정이다. 특히 저장·수송용기의 개발과 가상사고에 대한 안전성 확보 차원에서 이들 주요 재료의 충격특성에 대한 조사의 영향 고찰은 대단히 중요하다.

본 연구에서는 사용후 핵연료 저장·수송용기에 널리 적용되고 있는 두 재료 즉, SA240 type304와 SA350 LF2재료에 대하여 충격시험을 수행하고 조사 및 온도조건에 따른 재료의 충격 특성을 분석하여 동일한 효과를 낼 수 있는 자유낙하조건을 적용하여 용기의 충격해석을 수행하고 구조적 건전성을 평가하였다. 사용후 핵연료 저장·수송용기의 자유낙하해석에서는 관련규정 [1,2,3]의 가상사고 조건에 따라 9m 높이에서의 수직, 수평 및 20° 경사낙하 조건에 대해 고려하였다.

2. 본 론

2.1 조사시험

사용후핵연료 저장·수송용기의 사용재료에 대해 장기간 적재되는 사용후핵연료의 방사능으로 인한 재료의 기계적 물성 변화와 그에 따른 충격특성을 연구하기 위해 용기재료의 노외 및 노내 충격시편을 제작하고 조사시험 및 충격시험을 실시한다.

충격시험은 충격력에 대한 재료의 저항 또는 인성을 측정하는 시험으로서, 일반적으로 시험편에 노치를 만들어 1회의 충격력을 가하여 재료가 파단될 때 흡수되는 에너지를 측정한다. 본 연구에서는 샤르피 충격시험법을 이용하여 V형 노치를 갖는 충격시편을 사용하였다. 충격시험에서 구한 재료의 파괴인성은 유한요소해석을 위한 충격해석에 직접 적용되지는 않지만 재료의 파괴특성을 평가하는 척도로 사용된다.

Fig. 1은 조사시험 및 노외충격시험을 위해 제작된 충격시험시편의 사진이다.

본 연구에서 해석모델로 삼은 12다발 PWR 사용후핵연료의 10년 냉각후에 발생하는 총 방사능량은 4×10^{16} [Ci]이며, 사용후핵연료가 30년간 저장될 때 발생하는 방사능 환경을 구현하기 위해서는 고속중성자 기준 총 조사량 5×10^{19} [n/cm^2] 및 사용후 핵연료의 적재시 내부에서 발생하는 온도인 320°C가 요구된다. 조사시험은 하나로 연구용 원자로 IR2 시험공에서 대학연구지원용 00M-01U 계장캡슐을 이용하여 수행되었으며 시편에 대한 희망조사량 및 온도와 실제조사시험결과는 Table 1과 같다. 조사시험결과 시편에 대한 총 조사량이 당초 요구치보다 다소 증가된 $5.48 \sim 7.64 \times 10^{19}$ [n/cm^2] 조사되었고 시험시 측정된 온도는 325 ± 10 °C이다.

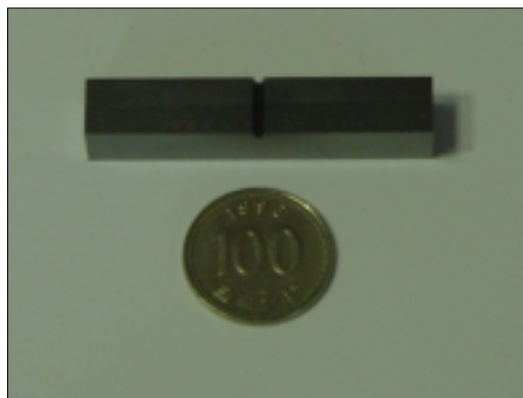


Fig. 1 The photograph of Charpy specimen for impact test

Table 1 Requirement conditions of specimen and results of the irradiation test

Specimen / Holder I.D.	*Holder position	Neutron Fluence [n/cm^2]		Temperature [$^{\circ}C$]	
		Requirment	Calculate	Requirment	Measure
CS1(Charpy)	S2-No2-1	5E19	5.92E+19(5.48~6.35E+19)	300 ~ 350	325±10
CS2(Charpy)	S2-No2-2		7.17E+19(7.12~7.22E+19)		
CS3(Charpy)	S2-No3-1		5.87E+19(5.54~6.20E+19)		
CL1(Charpy)	S2-No3-2		7.29E+19(6.96~7.61E+19)		
CL2(Charpy)	S2-No4-1		6.09E+19(5.78~6.40E+19)		
CL3(Charpy)	S2-No4-2		7.34E+19(7.03~7.64E+19)		

* : S(stage)-Number-Sequence.

본 연구에서의 연구대상인 SA240 type 304와 SA350 LF2 두 재료의 기계적 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2 Mechanical property of the cask materials for free drop impact analysis

Property	SA240 type304	SA350 LF2
Young's modulus, GPa	195.1	207.0
Poisson's ratio	0.3	0.3
Crush strength or yield strength, MPa	206.4	260.0
Ultimate strength, MPa	517.1	485.0
Density, kg/m^3	7913.0	7850.0

2.2 충격시험

샤르피 충격시험은 일반적으로 가장 널리 사용되는 충격시험방법으로서 시편을 40mm 간격의 시편 지지대(anvil)위에 올려놓고 노치(notch)의 배면을 해머로 충격하여 시편이 파괴 될 때 흡수하는 에너지를 구하는 시험이다[4]. 본 연구에서는 재료의 조사후에 변화하는 충격특성을 연구하기 위해 조사전시편편과 조사후시편편에 대해 수행하였다. 조사전 시편에 대한 충격시험에서 시험온도는 사용후 핵연료저장환경의 정확한 모사를 위해 320 $^{\circ}C$ 를 구현하여야 하지만 충격시험 heat용량의 한계 때문에 최고시험온도를 200 $^{\circ}C$ 로 제한하였다. 참고적으로 충격시험장치는 Tinius-Olsen Model 84를 이용하였고 시험기의 용량은 396.07J이다.

조사전 SA240 type304 및 SA350 LF2 두 재료에 대하여 온도에 따른 흡수에너지변화를 Table 3에 제시하였다. 실험결과부터 두 재료가 서로 상반되는 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 조사전 SA350 LF2의 경우 온도가 22.0 $^{\circ}C$ 에서 200.0 $^{\circ}C$ 로 증가함에 따라 흡수에너지는 203.05J에서 245.03J로 약 20.6%증가하나 SA240 type304의 경우 흡수에너지가 86.34J에서 72.81J로 18.5%감소한다. 이러한 경향은 온도 증가에 따라 흡수에너지가 증가되는 것으로 알려진 일반적인 특성과는 상반되는 경향이다.

하나로 연구용원자로에서 중성자조사시험을 수행한 충격시험편을 한국원자력연구소 핫셀시설에서 조사후 시편편에 대한 충격시험을 수행하였다. 온도조건은 상온, 100 $^{\circ}C$ 그리고 287.8 $^{\circ}C$ 에 대해 충격시험이 수행하였다. 본래 시험규격에 따르면 각각의 시험조건에 대해 두 개 이상의 시편을 시험하도록 추천되나, 조사후 시험에서는 조사시험용 캡슐의 내부 시편적재공간의 제한으로 인해 각각의 재료에 대해 3개의 시편만을 장입하였다.

조사후 시험편에 대한 충격시험에서도 시험온도는 사용후 핵연료저장환경의 정확한 모사를 위해 320℃를 구현하여야 하지만 핫셀 충격시험기 히터용량의 한계 때문에 최고시험온도를 287.8℃로 제한되어 수행되었다.

중성자 조사후 SA240 type304 및 SA350 LF2재료의 온도에 따른 흡수에너지변화는 Table 4에 제시되었다. 시험결과 두 재료는 조사이전과 유사한 경향을 보인다. 즉, SA240 type304는 온도가 상온에서 287.8℃로 증가함에 따라 흡수에너지가 76.3J에서 57.7J로 약 32.2%감소되나 SA350 LF2 재료는 온도가 상온에서 287.8℃로 증가됨에 따라 흡수에너지는 251.1J에서 341.1J로 약 35.8%증가된다.

Table 3 The Charpy impact test results for the unirradiated materials with various thermal conditions

Test temperature [°C]	Absorption energy [Joule]	
	SA240 type304	SA350 LF2
22.0	86.34	203.05
100.0	78.73	229.21
200.0	72.81	245.03

Table 4 The Charpy impact test results for the irradiated materials with various thermal conditions

Test temperature [°C]	Absorption energy [Joule]	
	Irradiated SA240 type304	Irradiated SA350 LF2
22.0	76.30	251.05
100.0	63.98	257.38
287.8	57.68	341.14

2.3 충격해석에 대한 충격시험결과의 적용

충격시험은 충격에너지 흡수량과 같은 재료의 충격특성을 조사하기 위한 시험으로 재료의 기계적 물성치를 구하는 시험과는 그 결과가 다르다. 따라서 본 연구에서는 충격시험결과로 구한 흡수에너지 변화량을 유한요소법을 이용한 충격해석에 적용하기 위하여 사용후 저장·수송용기의 자유낙하에 의해 발생하는 충격에너지를 조절하는 방법을 사용하였다.

SA240 type304의 경우 중성자 조사후 온도가 증가함에 따라 흡수에너지가 감소되는데 이 경우 재료가 충격에 대한 저항력이 낮아진다고 가정하여 감소되는 흡수에너지와 동일한 효과를 구현할 수 있도록 충돌속도를 증가시키는 방법이다. 즉, SA240 type304는 충격시험결과에서 조사전 상온 상태에서 86.4J의 흡수에너지를 가지고 조사후 287℃의 조건에서는 57.7J로 흡수에너지가 49.7% 감소되므로 등가의 충격에너지는 9m 자유낙하에 비해 49.7% 증가된다고 가정하면 유한요소해석에서 초기 충돌속도가 13.28m/s에서 16.25m/s로 변경되어 결국 49.7% 증가된 충격에너지가 적용되어 해석이 수행된다.

SA350 LF2 재료의 경우 충격시험결과에서 방사능 조사후 흡수에너지가 오히려 증대되는 특성을 보인다. 즉, 조사전 상온에서 203.1J의 흡수에너지가 조사후 287°C의 온도조건에서 341.1J로 68%의 흡수에너지증가를 보인다. 따라서, 충격해석에서는 충격에너지가 68% 감소된 7.51m/s의 초기충돌속도로 해석을 수행하였다. Table 5는 유한요소해석에서 적용된 충격시험결과에 따른 해석조건이다.

Table 5 The analysis condition of unirradiated and irradiated materials

Materials	Unirradiation		Irradiation		Remarks
	Absorption Energy	Analysis condition	Absorption Energy	Analysis condition	
SA240 type304	86.4J	13.28m/s	57.7J	16.25m/s	* $\Delta E = +49.7\%$
SA350 LF2	203.1J	13.28m/s	341.1J	7.51m/s	$\Delta E = -68.0\%$

* ΔE : a change quantity of impact energy

2.4 충격해석

본 연구에서 해석을 수행한 사용후 핵연료 저장·수송용기의 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 내부(cavity)의 장전통(basket)에 사용후핵연료 집합체를 장전하여 운반이 가능하도록 하는 구조물로서 본체(body), 뚜껑(lid assembly) 및 상하부의 충격완충체로 구성된다. 저장·수송용기의 본체는 기본구조재로서 감마선 차폐체인 원통형 셸구조물 및 중성자 차폐체로 이루어지고, 뚜껑은 방사성물질의 개폐, 밀봉 및 상부방향의 차폐를 위한 구조로 되어 있다. 본체의 양단에는 충돌 사고 시 본체에 전해지는 충격하중을 완화시키기 위하여 충격완충체를 설치한다. 충격완충체는 일반적으로 사용후핵연료 저장·수송용기에 널리 사용되는 충격흡수력이 뛰어난 발사우드 및 레드우드를 적용하였다. Fig.2에 나타낸 저장·수송용기는 PWR 사용후핵연료 집합체 12다발을 운반할 수 있는 용량으로, 핵연료가 장전되는 내부공간(cavity)의 직경은 1,192mm, 길이는 4,190mm, 본체의 외경은 1,942mm, 길이는 4,809mm이며, 감마선 차폐 및 격납경계를 이루는 본체의 반경방향 두께는 375mm, 하부의 두께는 329mm, 뚜껑(lid)의 두께는 290mm이며, 전체중량은 내부의 사용후 핵연료 집합체의 중량 약 7톤을 포함하여 약 75톤이다.

저장·수송용기가 정상저장·수송조건 및 가상사고조건에서 받게될 충격하중조건은 IAEA Safety standards series No. ST-1[1]의 규정에 따라 9m 자유낙하 경계조건을 적용한다. 자유낙하해석은 수직낙하, 20° 경사낙하, 수평낙하 3종류에 대하여 ABAQUS/Explicit version 6.1[5] 코드를 이용하여 수행하였다. 해석을 위한 유한요소 모델은 해석시간절감을 위해 내부의 사용후핵연료 및 장전통을 제외하고 1/2만을 모델링하여 대칭경계조건을 가정하였고 3차원 solid 요소를 사용하였다. 이전의 연구에서는 동일한 모델에 대해 유한요소해석에서 내부 바스켓질량의 영향을 고려하였지만 그 차이가 미미하기 때문에 본 연구에서는 생략하고 해석을 수행하였다. 충격해석에서 저장·수송용기재료는 탄성 그리고 충격체는 탄성-완전소성거동을 하는 것으로 가정을 하고 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 수직낙하를 위한 사용후 핵연료저장·수송용기의 유한요소모델로서 동일한 모델을 수평낙하 및 경사낙하해석에 적용하였다.

용기가 충돌하게 되는 바닥면은 강체면 요소를 사용하였으며, 본체와 충격완충체 사이에는 접촉조건을 적용하였다. 모델링에 사용된 절점수는 총 6,644개, 요소수는 총 5,329개이다. 저장·수

송용기가 9m의 높이에서의 자유낙하로 인한 13.3m/sec의 초기속도로써 바닥면에 충돌하는 문제로 구성하였으며, 전체해석시간은 수직낙하의 경우 20msec, 수평낙하는 20msec, 경사낙하의 경우 조사전 재료에 대해서는 150msec 그리고 조사후 재료에 대해서는 200msec로 하였다.

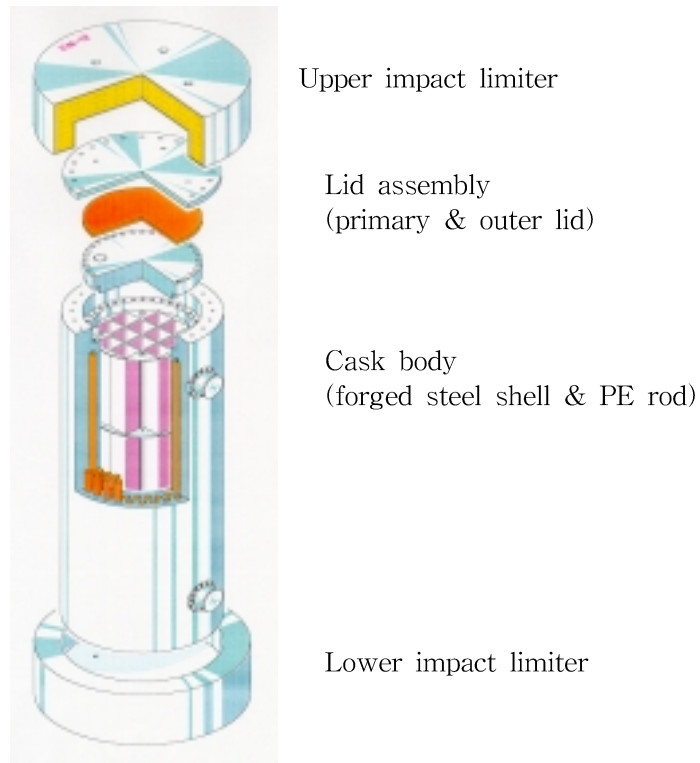


Fig. 2 Overview of the spent fuel storage and transport cask

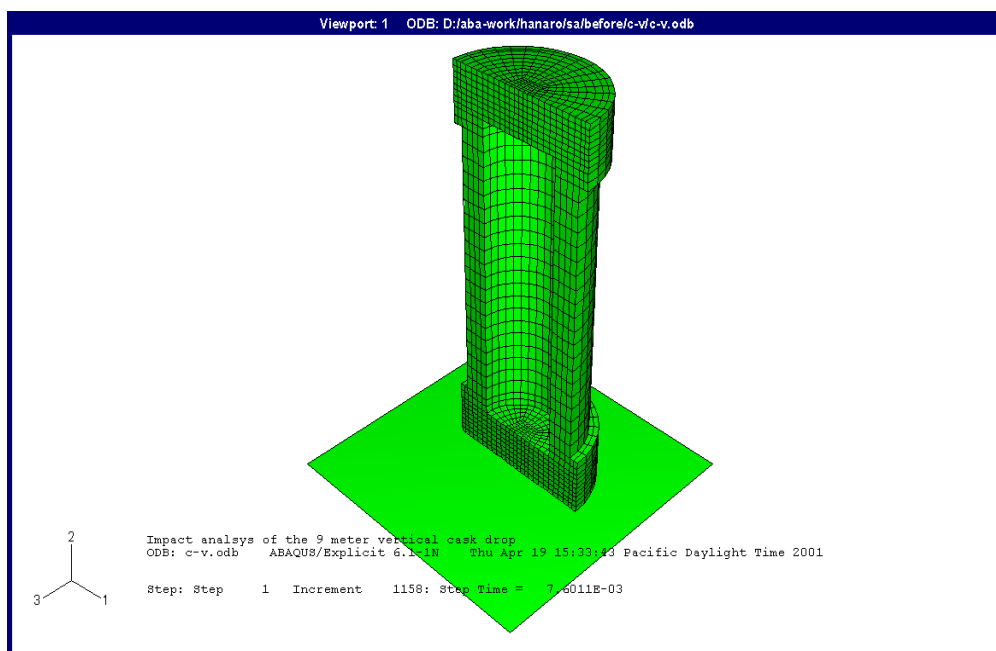


Fig. 3 Finite element analysis model for vertical drop

2.5 충격해석결과

2.5.1 조사이전의 충격특성

2.5.1.1 수직낙하

SA240 type304재료에 대하여 수직낙하시 시간에 따른 운동에너지와 내부에너지의 시간이력을 Fig. 4에 제시하였다. 수직낙하시 최대에너지는 3.346MJ로서 수송용기가 바닥에 충돌후 운동에너지와 위치에너지가 반전되는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 수직낙하시 저장·수송용기의 충돌면에 작용하는 충격력의 변화를 나타내는 것으로 충돌이 시작되면 충돌초기에 충격력이 급격히 증가하여 5.6msec에서 75MN정도로 최대에 이른 후 약 12.4msec정도에서 충돌이 거의 종료됨을 알 수 있다. 초기의 급격한 충돌력 증가는 충돌 초기 충격완충제 케이스와 balsa wood, red wood 등이 찌그러지기 전에 탄성적으로 거동하는 구간에서 발생하는 것이다.

Fig. 6은 저장·수송용기의 중앙부분에서 발생하는 가속도의 이력을 나타내는 것으로 충돌후 약 0.6 msec 에서 최대 5839g의 최대가속도가 발생하였다.

저장·수송용기의 최대 응력이 발생하는 부분의 이력은 Fig.7에 제시하였다. 최대응력은 저장·

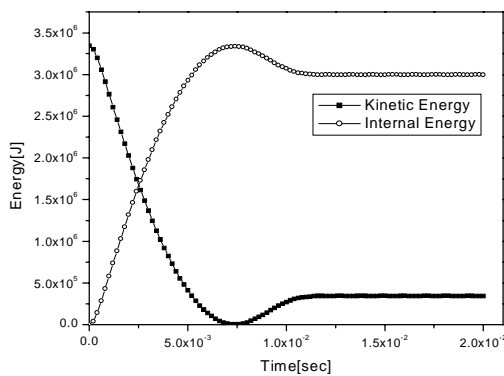


Fig. 4 Energy time history for vertical drop of the cask for SA240 type304 with unirradiated properties by finite element analysis

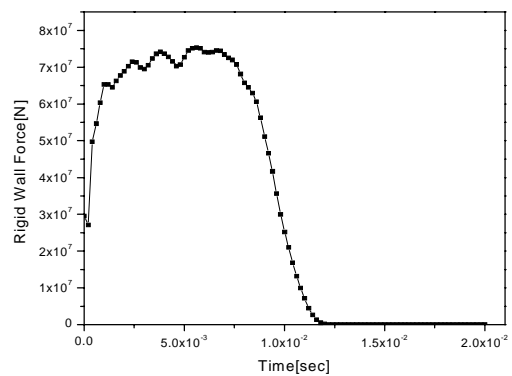


Fig. 5 Impact force time history for vertical drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

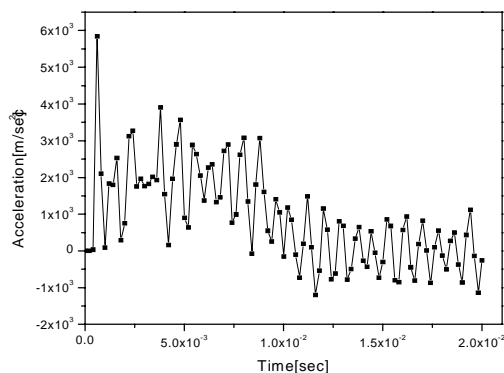


Fig. 6 Acceleration time history on center for vertical drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

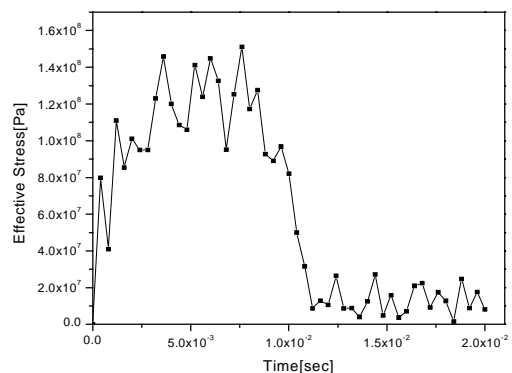


Fig. 7 Stress time history on bottom for vertical drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

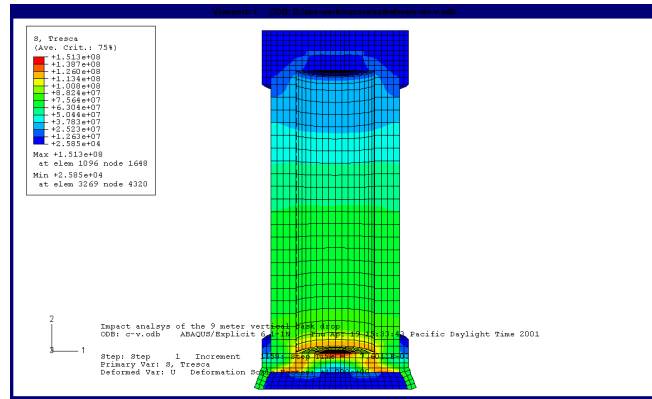


Fig. 8 Maximum stress and deflection contour for vertical drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties property by finite element analysis

수송용기의 바닥부에서 발생하며 그 크기는 151.3MPa이다. Fig. 8은 수직 낙하시 최대응력이 발생할 때의 저장·수송용기의 응력분포 및 변형형상이다. 수직낙하에서는 대부분의 응력이 용기셀의 하부에서 집중적으로 발생함을 알 수 있다. SA350 LF2재료에 대해서는 지면상 위의 그래프들에 대한 제시를 생략한다. 해석결과 에너지의 시간이력, 바닥면에서의 충격력, 응력분포 및 변형형상이 SA240 type304재료와 거의 유사하게 발생하였다. 최대응력은 SA240 type304재료와 거의 동일한 바닥면에서 다소 증가된 153.2MPa이 발생하였다.

2.5.1.2 수평낙하

SA240 type304재료에 대하여 사용후 핵연료 저장·수송용기의 9m수평낙하시 시간에 따른 운동에너지와 내부에너지의 시간이력을 Fig. 9에 제시하였다. 수평낙하시 최대에너지는 수직낙하와 동일한 3.346MJ이다.

Fig. 10은 수평낙하시 저장·수송용기의 충돌면에 작용하는 충격력의 변화를 나타내는 것으로 충돌이 시작되면 충격력이 8.2msec에서 최대 약 85.9MN에 이르기까지 계속 증가한 후 감소하여 약 11.8msec 정도에서 충돌이 거의 끝나감을 알 수 있다. 수평낙하에서는 수직낙하에 비해 충돌

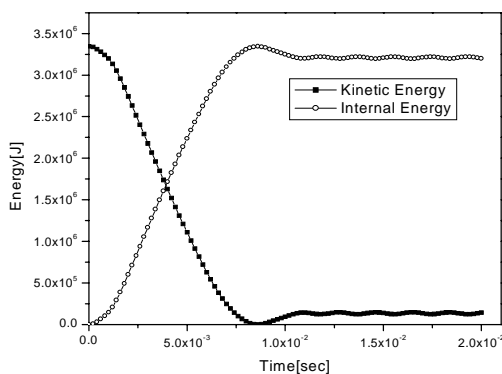


Fig. 9 Energy time history for horizontal drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

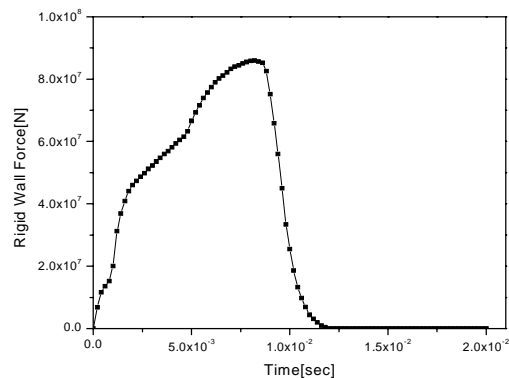


Fig. 10 Impact force time history for horizontal drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

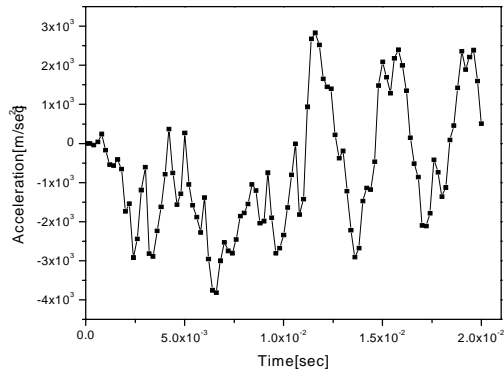


Fig. 11 Acceleration time history on center for horizontal drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

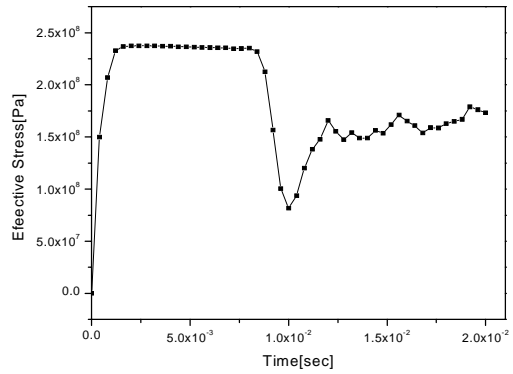


Fig. 12 Stress time history on bottom end for horizontal drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

초기의 충격력의 증가가 급격하지 않은 것은 충격완충체의 등근 측면이 충돌하기 때문에 작은 충돌면에서 시작하여 충돌이 진행함에 따라 충돌면적이 점차 증가하기 때문에 초기 충돌력이 크지 않기 때문이다.

Fig. 11은 저장·수송용기의 중간부에서 발생하는 가속도의 이력을 나타내는 것으로 충돌후 SA240 은 약 11.6msec 에서 최대 2830.7g의 가속도가 발생하였다.

Fig. 12는 자유낙하시 저장·수송용기의 최대응력이 발생하는 끝단지점에서의 응력 이력이다. 최대 응력은 저장·수송용기의 바닥판 코너에서 발생하며 그 크기는 238.3MPa이다. 수평낙하에서는 수직낙하에서 보다 최대 가속도가 작은데 반해 응력이 더 크게 발생하는 특성을 보인다. Fig. 13은 저장·수송용기의 수평 낙하시의 응력분포 및 변형형상을 나타내고 있다.

지면관계상 SA350 LF2재료에 대한 여러 결과 그림들의 제시는 생략한다. 해석결과, 최대 가속도 및 최대응력은 SA240 type304보다 다소 증가되는 경향을 보였는데 그 크기는 각각 3402.1g와 300.1MPa이다. 응력분포 및 변형형상은 SA240 type304재료와 거의 동일한 형태로 발생하였다.

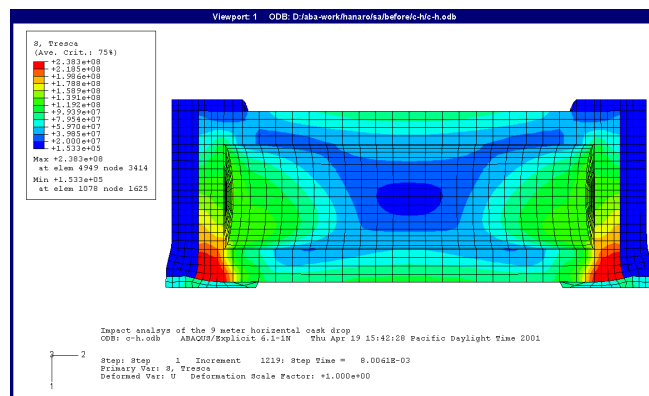


Fig. 13 Maximum stress and deflection contour for horizontal drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

2.5.1.3 20° 경사낙하

SA240 type304와 SA350 LF2 두 재료를 적용하여 20° 경사 낙하 해석을 수행하였다. 지면관계상 SA240 type304재료에 대한 결과만 제시하였다. Fig. 14는 저장·수송용기가 경사낙하할 때 발생하는 에너지이력으로서 최대에너지는 3.394 MJ이다. 20° 경사를 갖는 저장·수송용기의 자유낙하에서는 2차 충격의 응력이 최대응력이 되는 것이 일반적인 경향이지만 본 해석에서는 두 재료 모두에서 1차 충격과 2차 충격의 응력값이 238.3 MPa로 동일한 최대응력이 발생하였다. 하지만 Fig. 15에서 1차 충격력에 비해 2차 충격력이 훨씬 큰 것을 볼 수 있는데 이같은 결과로부터 충격해석이 올바르게 수행된 것으로 판단하였다. 충격력이력은 충돌이 시작되면 저장·수송용기의 바닥부분으로 1차 충돌하여 18msec에서 충격력이 8.6MN에 이른 다음 급격히 감소한 후 94.5 msec 에서 저장·수송용기의 상부가 충돌하는 2차 충돌이 시작되어 102msec 에서 충격력이 최대 15.4MN에 이른 후 급격히 감소 약 105msec에서 충돌이 완전히 종료됨을 볼 수 있다. 또한 가속도이력으로부터 2차 충격이 발생하는 시점에서 가장 큰 가속도 변화가 발생됨을 알 수 있다.

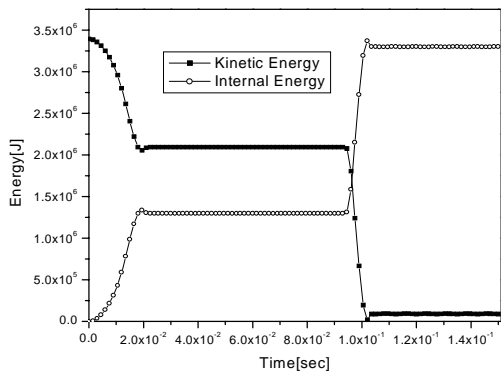


Fig. 14 Energy time history for 20° oblique drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

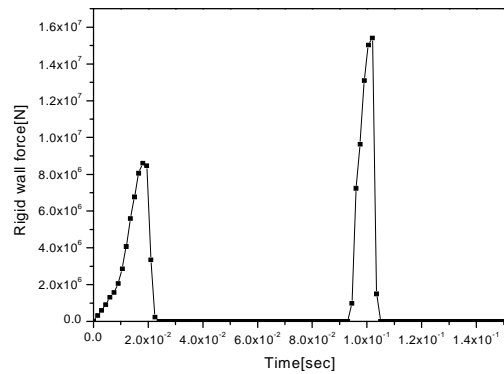


Fig. 15 Impact force time history for 20° oblique drop of the cask for SA240 LF2 with unirradiation properties by finite element analysis

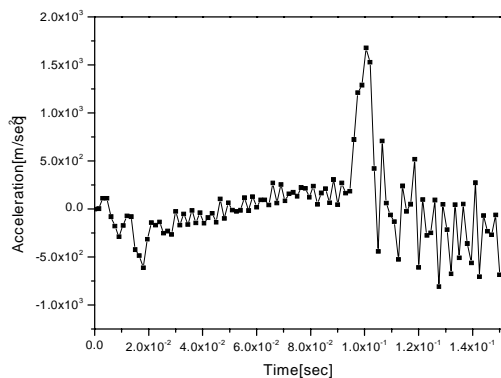


Fig. 16 Acceleration time history on center for 20° oblique drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

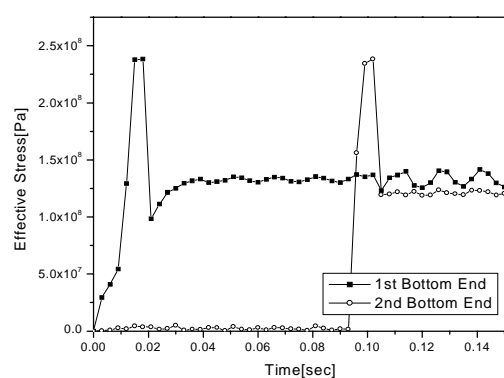
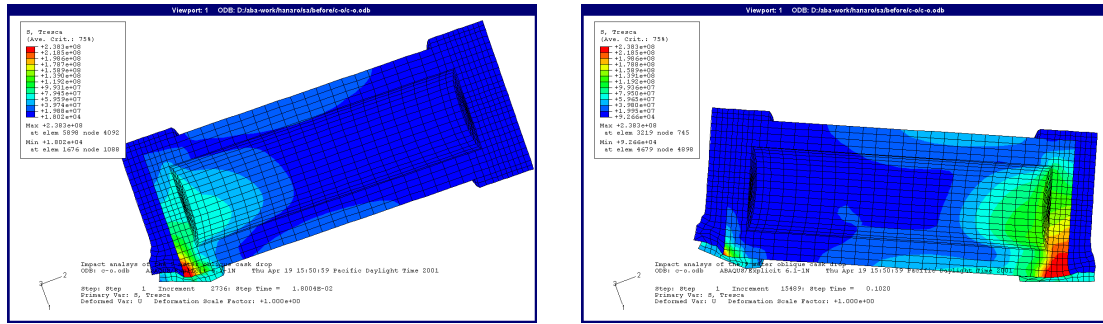


Fig. 17 Stress time history on bottom end for 20° oblique drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

Fig. 18은 20° 경사낙하에 의한 1차 충격과 2차 충격시의 응력 및 변형형상으로 용기바닥부의 충돌면에서 가장 큰 응력이 발생함을 볼 수 있다.



(a) 1st impact

(b) 2nd impact

Fig. 18 Maximum stress and deflection contour for 20° oblique drop of the cask for SA240 type304 with unirradiation properties by finite element analysis

2.5.2 조사이후의 충격특성

SA240 type304와 SA350 LF2 두 재료에 대하여 중성자 조사이후의 충격시편에 대한 시험결과를 바탕으로 충격흡수량 변화를 적용하여 사용후핵연료 저장·수송용기의 자유낙하해석을 수행하였다. 유한요소해석에서 중성자 조사로 인한 충격특성변화는 충격흡수량의 변화량과 동일한 비율의 충돌에너지를 조절함으로써 적용되었다.

2.5.2.1 수직낙하

조사후 SA240 type304재료를 적용한 저장·수송용기의 수직낙하시 에너지이력을 Fig. 20에 제시하였다. 최대에너지는 5.01MJ로 조사이전의 에너지와 비교해 감소된 흡수에너지의 비율과 같은 49.7%가 증가되었다. 지면관계상 충돌력이력 가속도이력 및 변형형상은 생략하였다. 수직낙하에서 최대응력이 발생하는 바닥부분의 응력이력을 Fig. 21에 제시하였는데, 충돌후 약 0.6msec에서 173.8MPa의 최대응력이 발생하였다.

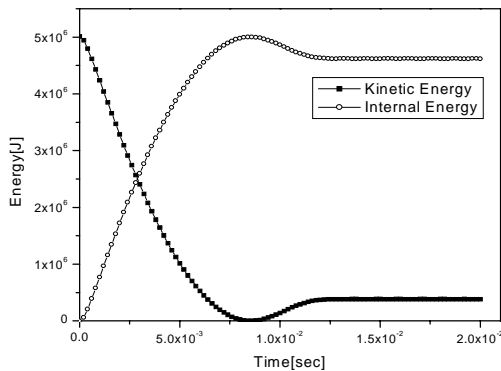


Fig. 20 Energy time history for vertical drop of the cask for SA240 type304 with irradiation properties by finite element analysis

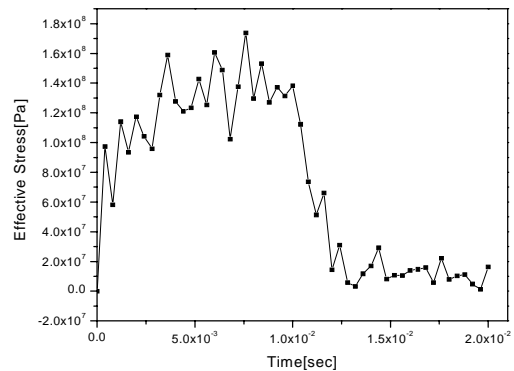


Fig. 21 Stress time history on bottom for vertical drop of the cask for SA240 type304 with irradiation properties by finite element analysis

조사후 SA350 LF2재료에 대한 충격해석결과도 조사전과 마찬가지로 에너지의 시간이력, 바닥면에서의 충격력, 응력분포 및 변형형상이 SA240 type304재료와 거의 유사하였다. 최대응력은 SA240 type304재료와 동일한 바닥면에서 113.2MPa이 발생하였다. SA240 type304의 경우 조사전에 비해 발생응력이 증가하였는데 이는 중성자 조사로 인해 감소된 충격흡수량을 해석에서 고려하였기 때문이고 SA350 LF2는 증가된 충격흡수량을 적용하였기 때문에 응력이 감소되었다.

2.5.2.2 수평낙하

조사후 SA240재료를 적용한 저장·수송용기의 에너지이력을 Fig. 22에 제시하였다. 최대에너지는 5.01MJ로 조사이전의 에너지와 비교해 감소된 흡수에너지의 비율과 동일한 49.7%가 증가되었다. Fig. 23은 최대응력이 발생하는 부분인 바닥판 코너부에서의 응력이력으로 238.3MPa의 최대응력이 발생하였다.

조사후 SA350 LF2재료의 충격해석결과 역시 지면관계상 생략하였다. 충격해석결과, 조사후 충격특성변화를 적용하였을때 수직낙하와 마찬가지로 최대에너지가 1.1MJ로 조사이전의 에너지와 비교해 증가된 흡수에너지비율과 등가인 68%감소되었고 최대응력은 260.0MPa이 발생되었다.

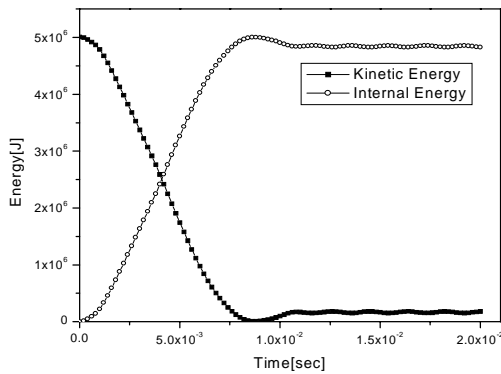


Fig. 22 Energy time history for horizontal drop of the cask for SA240 type304 with irradiation properties by finite element analysis

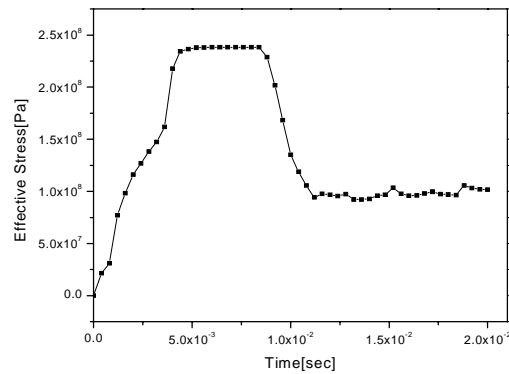


Fig. 23 Stress time history on bottom end for horizontal drop of the cask for SA240 type304 with irradiation properties by finite element analysis

2.5.2.3 20° 경사낙하

조사후 SA240 type304재료를 적용한 저장·수송용기의 에너지이력을 Fig. 24에 제시하였는데 최대에너지는 5.01MJ로 조사이전의 에너지와 비교해 감소된 흡수에너지의 비율과 동일한 49.7% 증가되었다. Fig. 25는 1차충격과 2차충격이 최대가 되는 지점에서의 응력이력으로 조사전의 해석결과와 마찬가지로 1차 충격과 2차 충격모두에서 238.3MPa의 최대응력이 발생하였다. 일반적으로 수송용기의 20° 경사낙하의 경우 2차 충격에서 1차 충격보다 더 큰 응력이 발생하나 본 연구에서 해석대상으로 삼은 용기의 경우 다른 용기에 비해 길이가 반경에 비해 상대적으로 짧은 구조 때문에 이러한 해석결과가 발생하는 것으로 판단되며 본 용기 자체의 충격특성으로 여겨진다.

경사낙하에 대한 조사후 SA350 LF2재료의 충격해석결과 역시 지면관계상 생략하였다. 조사후 충격해석결과로부터 조사이전의 에너지와 비교해 증가된 흡수에너지비율과 등가인 68%감소되었다. 최대응력은 조사전 SA240 및 SA350 그리고 조사후 SA240재료와는 달리 2차 충격에서 300.1MPa의 최대응력이 발생하였다. 이러한 현상은 원통형 저장·수송용기의 20° 경사낙하에서 일반적으로 발생하는 현상으로서 저장·수송용기의 무게 중심이 1차 충돌부위인 하부 충격완충체

와 많이 떨어져 있기 때문에 1차 충돌의 발생과 함께 회전하며 더 큰 속도로 반대방향에 2차 충돌을 발생시키기 때문이다.

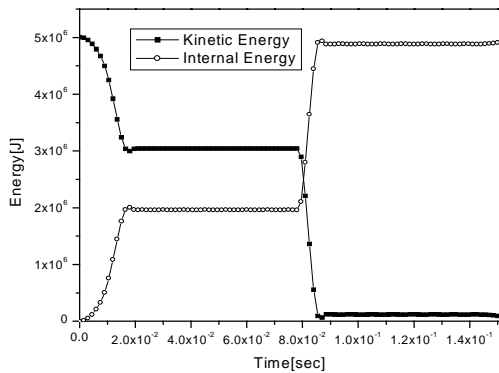


Fig. 24 Energy time history for 20° oblique drop of the cask for SA240 type 304 with irradiation properties by finite element analysis

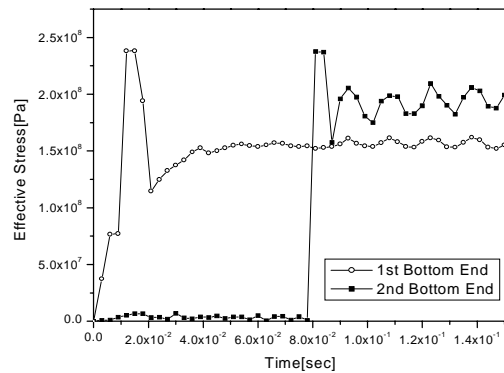


Fig. 25 Stress time history on bottom end for 20° oblique drop of the cask for SA240 type 304 with irradiation properties by finite element analysis

2.5.2 조사의 충격특성에 대한 영향 고찰

조사시험이전과 이후의 충격특성을 적용하여 수행된 충격해석의 결과를 Table 6에 제시하였다.

Table 6 Maximum stresses intensity for each drop of the storage and transport cask resulted from finite element analysis before and after irradiation (Unit : MPa)

Drop conditions		Unirradiated SA240 type304	Unirradiated SA350 LF2	Irradiated SA240 type304	Irradiated SA350 LF2
Vertical drop	bottom	151.3	153.2	173.8	113.2
Horizontal drop	bottom end	238.3	310	238.3	260.0
20° oblique drop	bottom end	238.3	300.2	238.3	300.1
Allowable stress	Sy*	206.4	260	206.4	260.0
	3.6 Sm (Su)**	517.1	485	517.1	485.0

* Sy: yield strength

** Su: ultimate strength

Sm: design stress intensity

Table 6에서 조사시험이전의 충격특성을 적용한, 즉 재료본래의 기계적물성치와 초기충돌속도를 적용하여 해석한 저장·수송용기의 최대응력은 SA240 type304와 SA350 LF2 두 재료에 대해 수직낙하할 때 각각 151.3MPa, 153.2MPa, 수평낙하에 대해서는 각각 238.3MPa, 300.1MPa 그리고 20° 경사낙하일때는 각각 238.3MPa, 300.2MPa로 20° 낙하에서 가장 큰 응력이 발생함을 알 수

있다.

조사시험이후의 충격특성을 적용하였을 때 즉, 중성자조사로 인한 충격흡수량의 변화량과 동일한 비율의 충돌에너지를 조절하여 수행하였을 때 최대발생응력은 SA240 type 304와 SA350 LF2 두재료에 대해 수직낙하일 때 각각 173.8MPa, 113.2MPa, 수평낙하에 대해서는 각각 238.3 MPa, 260.0MPa 그리고 20° 경사낙하일때는 각각 238.3MPa, 300.1MPa로 20° 낙하에서 가장 큰 응력이 발생함을 알 수 있다.

저장·수송용기는 관련규정의 기술기준에 따라 가상사고인 9m자유낙하조건에서 저장·수송용기의 각 부위에 발생한 최대응력강도가 재료의 극한강도(Su: ultimate strength)의 응력에 해당하는 설계응력강도(Sm: design stress intensity)의 3.6 배를 초과하지 않아야 구조적 건전성을 유지한다. 본 연구의 수평, 수직 및 20° 경사낙하충격에서 격납경계인 용기본체의 각 부위에 발생한 최대응력강도는 중성자 조사전과 조사후 모든 경우에 대해 관련규정의 허용치인 3.6Sm보다 훨씬 낮기 때문에 결론적으로 처음 가정한 30년의 사용후 핵연료 저장후에도 저장·수송용기는 9m 자유낙하조건에 대하여 구조적 건전성을 유지하는 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 이러한 장시간의 방사능조사에 대한 사용후 핵연료 저장·수송용기의 충격안전성을 평가하기 위해 수행되었다. 용기재료의 충격특성에 대한 방사능 조사의 영향을 고려하기 위해서 하나로 연구용 원자로를 이용하여 사용후 핵연료 저장·수송용기재료의 충격시험편에 대한 조사시험이 수행되었고 다양한 온도조건에 대한 조사전재료 및 조사후 재료의 충격시험을 수행하였다. 충격시험결과로부터 구한 재료의 충격특성변화를 적용하여 관련규정에 따른 사용후 핵연료 저장·수송용기의 가상사고조건에 대한 유산요소해석이 수행되었으며 다음의 결론을 얻었다.

(1) 중성자 조사이전의 충격특성과 중성자조사로 인해 변경된 충격특성을 적용한 사용후 핵연료 저장·수송용기의 자유낙하해석결과로부터 모든 경우에 재료의 허용응력범위를 만족시켰으므로 중성자 조사이후에도 핵연료 저장·수송용기는 충격에 대한 구조건전성을 유지하는 것으로 판단된다.

(2) 충격특성만을 고려한다면 SA350 LF2 재료가 SA240 TYPE304재료에 비해 더 우수한 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 과학기술부에서 시행한 하나로이용연구지원사업의 연구결과이며, 관계자여러분께 깊은 감사를 드립니다.

4. 참고문헌

1. IAEA Safety Standards Series No. ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996
2. 과학기술부 고시 제96-38호, "방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정", 1996
3. US 10 CFR Part 71, "Packaging and Transportation of Radioactive Material", 1997
4. "재료시험법", 한국표준연구소, 재료연구실, 1987
5. H.K.S. Inc., "ABAQUS/Explicit User's Manual Ver.6.1", 2001