

# 내충격성을 고려한 사용후연료 수송용기 내부구조물의 설계 연구

## Study on the Impact-proof Internal Structure Design of a Spent Nuclear Fuel Transport Cask

신 태 명\* · 김 갑 순\*

Taemyung Shin and Kapsun Kim

(2008년 12월 17일 접수 ; 2009년 3월 12일 심사완료)

**Key Words** : Transport Cask(수송용기), Spent Fuel(사용후연료), Basket(바스켓), Drop Impact(낙하충격)

### ABSTRACT

A simple preliminary analysis is often useful to check a validity of design alternatives before the detailed analysis phase in the viewpoint of efficiency. This paper describes a preliminary analysis procedure for the selection among basket design candidates for the spent fuel shipping cask of Korean standard nuclear power plant. As the cask should maintain the structural integrity in hypothetical accident condition, the case of 9 m drop is significantly considered as the worst scenario among the accident conditions in structural design viewpoint in this paper. As basket design options, totally four different types are considered and analyzed in the point of structural integrity at drop impact and weldability for fabrication. As a result, an insertion round plate type with densely spaced supports turns out to be the best in both of the viewpoints, though the weld plate type shows a bit more design margin.

### 1. 서 론

사용후연료 수송용기는 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료를 필요시 소내외의 저장시설로 운반하는데 사용되는 용기로서 그 안전상의 중요도로 인하여 임계, 차폐, 열, 구조 등의 다양한 관점에서 엄격한 설계가 요구되고 있다. 구조적 설계요건 중에서 가장 관심을 끄는 부분은 아마도 가상사고에 해당되는 9 m 낙하조건으로서 이는 경험적으로 볼 때 구조적으로 가장 큰 영향을 주고 있기 때문일 것이다<sup>(1,2)</sup>.

국내 경수로 원전에 사용되는 사용후연료 수송용기의 경우 초기에는 소형 수송용기를 제작하여 사용하다가 최근에는 그간의 설계 및 제작 경험을 바

탕으로 경제성과 효율성을 고려하여 한번에 더 많은 핵연료를 운송·저장할 수 있도록 용기를 대형화하려는 추세이다<sup>(3)</sup>. 용기가 대형화할수록 수송용기 내부에서 핵연료를 구조적으로 지지하고 비임계 상태 유지 기능을 담당하는 내부구조물의 구조는 더욱 복잡해진다.

이 논문에서는 18개의 사용후핵연료 다발을 운반할 수 있는 국내 표준원전용 사용후연료 수송용기 내부구조물의 설계방안 선정을 위하여 예비해석 과정을 통하여 얻은 기술사항들을 논의하고자 한다. 원전시스템의 경우 상세설계가 확정되지 않은 설계초기에 주요부품 설계의 대안들 중에서 선택이 필요한 경우, 시간과 비용이 많이 드는 상세해석을 수행하기 보다는 경험적으로 볼 때 결과에 지배적인 영향을 준다고 판단되는 조건의 간단한 예비해석을 통하여 최적의 방안을 우선적으로 찾는 것이 일반적이다. 따라서 이 논문에서는 기본적인 안전요건과 선진국의 설계 사례 등의 조사·분석을 통하여 국내에 적합한

\* 교신저자; 정회원, 충주대학교 항공기계설계학과  
E-mail : tmshin@cjnu.ac.kr

Tel : (043)820-5377, Fax : (043)820-5370

\* 코네스코퍼레이션(주)

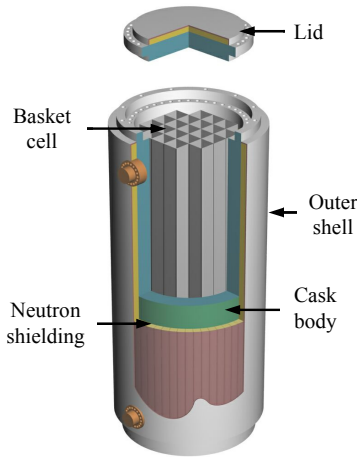


Fig. 1 Schematic view of spent fuel transport cask

몇 가지 설계방안을 제시하고, 제시된 설계안들에 대해 각각 구조적으로 중요도가 높은 9 m 낙하사고 해석을 실시하여 가장 적절한 설계방안을 이끌어내는 절차와 방법을 소개함으로써 해석 난이도가 높거나 비용이 많이 드는 유사설계에 참고가 되고자 한다. 그리고, 용기 내 내부구조물의 설계형상에 따른 충격하중 영향과 그 기술적 특성을 검토하고자 한다.

표준원전용 사용후연료 수송용기의 형상은 기본적으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 단조된 탄소강재의 두꺼운 벽을 가진 실린더형 격납용기이고, 볼트 체결형 스테인리스강재의 뚜껑으로 닫히게 되며 핵연료를 바스켓에 넣어 헬륨가스나 물로 채워지는 내부공간에서의 방사성물질의 격납 기능을 제공한다. 구조적 건전성 유지 및 감마선 차폐체의 기능을 겸하고 있는 본체에는 탄소강을 사용하고, 차폐로 중성자 차폐를 위해 수지를, 열전도율을 높이기 위해 구리 방열판을 사용하며 외부 표면은 스테인리스강을 사용한다. 본체 내부에는 수송 도중 핵연료를 지지/보호하는 내부구조물로서 바스켓을 설치하며, 또한 격납을 위한 기밀은 용기 뚜껑부에 설치한 개스킷(gasket)에 의해 이루어진다. 이외에도 용기 인양을 위한 상·하부 트러니언 등이 있다<sup>(4)</sup>.

## 2. 용기 내부구조물 설계 방안의 도출

### 2.1 기본 설계요건의 검토

이 논문에서 다루는 사용후연료 수송용기는 경수

로원전으로부터 나오는 고준위 폐기물인 사용후핵연료를 건식 또는 습식으로 운송하기 위한 용기로서 방사능 물질의 안전한 취급과 수송을 위한 특별한 설계가 요구된다.

이러한 수송용기를 안전하게 설계하기 위한 기본 안전요건으로서 일반적으로 방사성물질의 포장 및 안전 운송에 관한 규정들이 적용되는데 국제적으로는 IAEA Safety series ST-1, 미연방규정 10CFR 71, 미원자력규제위원회 규제지침 7.6 및 7.8 등이, 국내에서는 교육과학기술부 고시 2008-69 등이 적용된다<sup>(5-7)</sup>. 구조적인 관점에서 각 요건들은 목적에 따라 조금씩 차이는 있지만 공통적인 내용을 중요도 관점에서 정리하여 보면 구조해석 시 고려해야 할 조건으로서 크게 정상운반 조건 및 가상사고 조건의 두 가지로 나눌 수 있다. 주요 내용을 요약하면 정상운반 조건에는 고온 및 저온의 온도 조건, 외압조건, 진동 및 피로조건, 자유낙하 등이 있으며 가상사고 조건에는 9 m 자유낙하, 1 m 봉상낙하, 화재 및 침수 조건 등이 있다. 일반적으로 상세설계 과정에서는 이러한 조건에 해당하는 구조해석을 각각 실시하여 코드에서 제시하는 하중조합 및 허용기준을 만족하는지를 검토하고 있다<sup>(8)</sup>. 앞선 참조설계들을 참고하면 정상조건 및 가상사고 조건들 중에서 1 m 봉상낙하 조건이 드물게 결과에 영향을 주기도 하지만 핵연료 수송용기의 경우 일반적으로 9 m 자유낙하 조건에 의한 해석 결과가 지배적이다<sup>(1-3)</sup>. 여기서는 예비해석 목적상 이러한 설계 경험적 관점으로부터 내부구조물 설계방안 선정을 위한 9 m 낙하해석을 대표적으로 수행하여 결과를 분석한 다음 도출된 설계안들 중에서 최적방안을 결정하는 방법과 과정에 대해 다음절에서 상세히 설명하려 한다.

### 2.2 국내외 설계사례 검토

수송용기 내부구조물로서 핵연료를 지지하고 보호하는 역할을 하는 바스켓의 형태는 격판형과 원판형 등 크게 두가지 형태의 설계가 주로 가능하다. 격판형 바스켓이란 핵연료를 지지하는 구조가 개개의 격판으로 구성된 사각기둥형 셀을 용접하여 벌집형상의 구조를 미리 제작한 다음 용기내부 지지대 사이로 삽입하는 설계이며 원판형 바스켓이란 원판에 핵연료 단면형상의 사각 구멍을 뚫어 일정

간격으로 배치하고 지지봉으로 보강한 뒤 여기에 사각셀을 삽입하여 고정하는 형태의 설계를 말한다. 일반적으로 원판형은 미리 제작된 지지대에 사각셀을 삽입하여 맞추고 다시 원통에 삽입하므로 현장 제작이 효율적이지만 원판 및 사각구멍 간의 높은 정밀도를 요구하며, 격판형은 각 셀을 미리 용접·제작하므로 구조적으로 안정적이거나 지지대와 외부 원통의 접합이 쉽지 않다고 알려져 있다.

격판형 바스켓의 예로서는 24다발의 PWR 사용후 연료를 장전할 수 있도록 설계된 HI-STAR MPC (multi purpose canister)는 바스켓 각각의 면에 중성자 흡수체인 Boral이 부착되어 있으며 바스켓 내부로는 상부 또는 하부 스페이서(spacer)에 의해 연료집합체가 축방향으로 지지된다. NAC- MAGNASTOR는 37다발의 PWR 또는 87다발의 BWR 사용후연료를 장전할 수 있도록 설계되어 있다. CASTOR V/21 및 CASTOR X/28은 각각 핵연료 21 및 28개를 저장하도록 Borated 스테인리스강 판재로 설계된 직각기둥형의 셀 구조를 갖는다. 이에 비해 원판형 바스켓 설계를 적용한 Fuel solution W21 MPC (multi purpose canister)는 저장, 수송, 처분을 위한 다목적 캐니스터이며 가압경수형 사용후연료 21다발을 장전할 수 있도록 설계되었다. 각각의 바스켓

을 지지하기 위하여 총 35개의 디스크형 스페이서 플레이트(spacer plate)가 구조적 지지체의 역할을 한다. 스페이서 플레이트는 지지봉으로 체결된다. NEO Cask의 경우 바스켓은 단조 가공된 알루미늄 합금판을 용접을 하지 않고 쌓아 올리는 구조로 제작하여 검사와 취급이 용이하도록 하였다. 중성자 흡수판은 봉산알루미늄을 단조 가공된 알루미늄판 사이의 틈새에 끼워 넣는 방법으로 제작되었다. 최근 국내에서 설계된 KN-12의 경우도 가압경수로형 12다발의 핵연료를 장전하도록 Boral 재료를 사용한 스테인리스강 격판형으로 설계되었다. 참고로, Table 1에서는 최근까지 설계된 수송용기를 바스켓 설계별로 분류하고 그 특징을 비교하였다.

### 2.3 설계 방안의 도출

우선 기본적으로 제시된 소유자의 요구사항과 연계설계 요건 등을 종합적으로 검토한 결과 표준원전 수송용기 바스켓 설계를 위한 전제조건 및 제한사항은 다음과 같이 요약된다.

- 바스켓은 18개의 핵연료집합체를 수용하도록 함.
- 바스켓 벽체는 스테인리스강으로 설계함.
- 중성자흡수체인 봉산알루미늄은 바스켓 벽체에 부착시킴.
- 바스켓 셀 배열은 최소반경인 4-5-5-4 배열로 함.
- 용기 총중량(인양구 포함)은 110톤 이하를 유지함.

상기한 기본요건과 최근까지의 국내의 수송용기의 바스켓 형태 및 설계를 고려하여 크게 네 가지의 설계안을 도출하였다. 바스켓 특성에 따라 원판

**Table 1** Comparison of reference designs for cask

Cask designs	Basket type	Description
HI-STAR MPC-24	Weld type	· 24 PWR fuel assy · Stainless steel Basket using Boral & Al
NAC-MA GNASTOR	Weld type	· 38 PWR / 87 BWR fuel assy · Stainless steel Basket using Borated SS
CASTOR V/21	Weld type	· 21 PWR fuel assy · Stainless steel Basket using Borated SS
CASTOR X/28	Weld type	· 28 PWR fuel assy · Stainless steel Basket using Borated SS
Fuel Solution W21 MPC	Round type	· 21 PWR fuel assy · Basket supported by 35 round plates
NEO Cask	Round type	· 21 PWR fuel assy · Forged Al Basket using Boral
KN-12	Weld type	· 12 PWR fuel assy · Stainless steel Basket using Boral plate

**Table 2** Comparison of basket design options

Design options	Details	Design characteristics
Round type A	· 20 plates · 20 mm thick · Cell pitch 261 mm	· Thick plate with large gap · Simpler weld · High stress in support
Round type B	· 40 plates · 10 mm thick · Cell pitch 271 mm	· Thin plate with smaller gap · More assembly works · Stiffer between cells
Weld type A	· 20 supports · 20 mm thick	· Thick plate with large gap · Complicated weld · High stress in basket
Weld type B	· 40 supports · 10 mm thick	· Thin plate with smaller gap · Tough weld / better stress · High fabrication cost

형과 격판형으로 구분하고 지지부의 간격을 고려하여 각각 다시 두가지 형태로 분류하였는데, 원판 개수 및 두께는 참조설계를, 셀피치는 임계해석 결과 여유도를 참고로 하여 선정하였다. 그리고 각각에 대해 9m 낙하사고에 대한 예비해석을 수행하고 제작성 등을 검토하여 최종 설계안을 정하려 한다. 참고로 설계방안에 대한 특징 및 장단점을 비교하면 Table 2와 같다.

바스켓 배열 및 대략적인 구조형상을 3차원 유한요소모델로 표현하면 Fig. 2와 같다.

예비해석은 핵임계해석과 구조해석을 중심으로 수행하는데 다음절에서 설명하는 구조해석에 앞서 핵임계해석을 통해 바스켓의 배열과 중성자흡수체 배치의 최적조건을 도출하여 수송용기의 내경을 확정하는 다음 현재 고려중인 4-5-5-4 배열 형태의 구조적 취약 부위에서의 최대변형을 유발할 것으로 예상되는 9m 수평낙하 시 바스켓의 구조적 안전성과 핵연료집합체간의 상대변위를 산출하여 그 적합성을 판단하게 된다.

### 3. 구조 해석

#### 3.1 9m 낙하충돌 해석을 위한 모델링

앞 절에서 도출된 설계방안에 대해 9m 수평 자유낙하 사고조건 시 바스켓의 구조적 안전성을 사전 검토하고, 또한 낙하 시 핵연료집합체간의 상대변위를 산출하여 임계안전성을 재평가하기 위하여 구조해석을 수행한다. 바스켓 셀 배열 형태에서는 바스켓 셀이 엮배열되는 부위에서 최대변위의 발생이 예상되므로 대표적으로 수평낙하에 대해서만 예비해석을 수행한다. 참고로 해석을 위한 가정과 절차를 요약하면 아래와 같다.

- 예비해석은 바스켓 단면의 응력, 변형거동이 주 관심사이므로, 용기본체는 모델을 간략화해서 작성하고, 바스켓은 상세모델링을 하되 부분모델을 적용함.
- 전체모델은 1/2 대칭모델로 작성하고, 내부 바스켓은 중앙부 3스팬만 잘라 대칭모델로 작성(Fig. 3 참조)
- 기타부분의 바스켓 중량 및 외부에 추가되는 부품들에 대한 중량을 고려하기 위해 용기본체 밀도를 보정.
- 해석모델은 수송용기 본체, 상·하부 충격완충체(강재 케이싱은 비교려), 디스크(spacer plate), 지지봉(support rod), 바스켓플레이트, Boral, 가상연료집합체(dummy)로 구성.

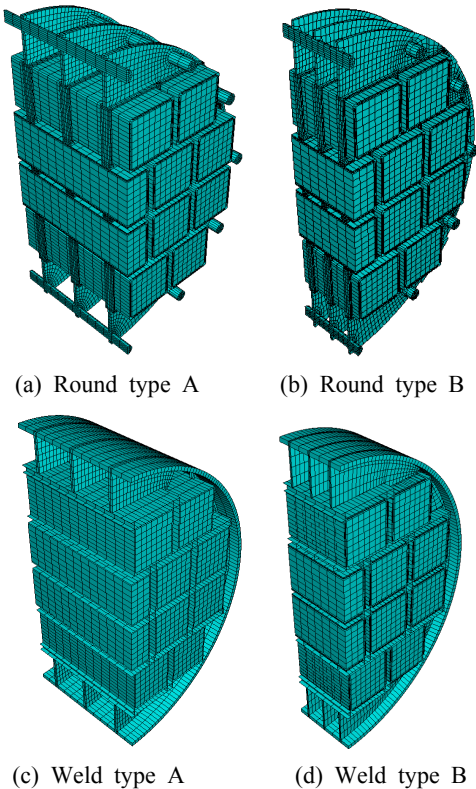


Fig. 2 Shape of FEM models for basket options

Table 3 Mechanical properties of cask components

Component	Material	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	Stress limit (MPa)	Temp.
Cask body	C/S SA350	258.6	482.6	337.8(*)	Room temp.
Basket component	S/S SA-240/321	167.1	641.4	448.9(**)	167°C
Neutron absorber	BORAL	20.14	47.17	33.0(**)	167°C
Impact limiter	Beech wood	KN-12 Side Drop Property		N/A	Room temp.
Fuel assy	Dummy	Stiffness of Steel, Equivalent mass		N/A	-

(\*) ASME Section III Division 3

(Pm < lesser of 2.4Sm, 0.7Su)

(\*\*)ASME Section III Division 1,

Appendix F(Pm < large of 0.7Su, Sy +1/3(Su-Sy))

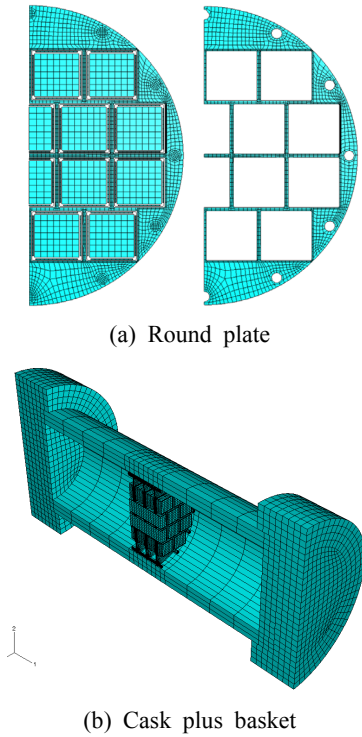


Fig. 3 Analysis model for round-plate type basket

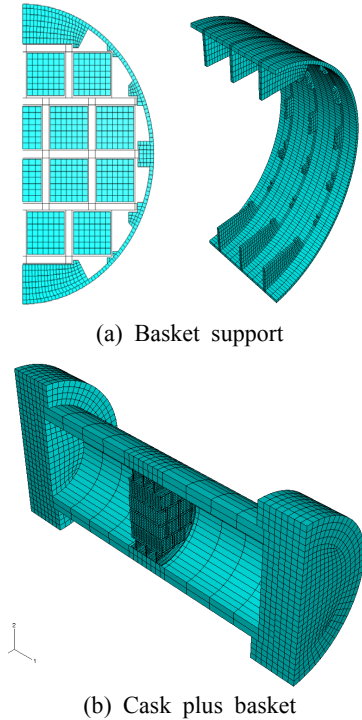


Fig. 4 Analysis model for weld-plate type basket

수평낙하해석 조건은 전체 용기 조합모델이 강체 면 위로 9 m 높이에서 수평 자유낙하하는 조건으로, 9 m 자유낙하에 대한 충격직전의 속도 13.29 m/sec을 초기속도 조건으로 입력하여 외연적 방법으로 해석한다. 여기서 해석용 프로그램은 ABAQUS Explicit V6.5를 사용하였다<sup>9)</sup>. 해석에 적용되는 용기 부품의 기계적 성질은 아래 Table 3과 같다.

참고로, 구조해석 모델은 8절점 평판요소와 육면체 요소를 위주로 작성하여 탄소성 해석을 수행한다. 원판형과 격판형의 바스켓 구조변경에 따른 임계해석 결과로 산정된 바스켓 간 최소 이격거리에 의해 용기 내경이 변경되어 나타난 구조해석용 용기모델의 주요 제원 범위와 구조해석 모델링 결과는 다음과 같다.

- 용기본체 두께 : 220~230 mm
- 용기 내경 : 1454~1480 mm
- 용기 길이 : 5060~5070 mm
- 충격완충체 두께 : 400~500 mm
- 충격완충체 길이 : 800~1200 mm
- Number of total node : 29,481-76,411 EA
- Number of total element : 21,298-51,512 EA

그리고 구조해석모델 단순화에 따른 불확실성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 해석모델은 충격완충체 강재케이싱을 무시하였기 때문에 실제 충격력은 해석결과보다 다소 크게 발생 가능.
- 바스켓 부분은 중앙부만 잘라 대칭모델로 모델링하였기 때문에, 바스켓 자체의 길이방향 휨변형을 고려하지 못하므로, 실제결과와 해석결과보다 다소 큰 응력 및 변형 발생 가능.
- 외부 중성자차폐체, 스테인리스강 셸 등이 고려되지 않았고, 초기조건으로 온도분포, 내압조건의 단순화 등의 영향.

이러한 오차요인들은 용기 내부구조물 해석관점에서는 상대적인 영향이 우려할 수준이 못되며 서로 상쇄되기 때문에 이 논문 해석 목적상 추가로 고려하지는 않았다.

### 3.2 해석결과 및 논의

본문에서 설정한 원판형과 격판형 설계방안에 대해 A, B형 설계에 크기가 조금 차이나는 충격흡수체를 가정하여 각 설계에 적합한 형상의 독립모델

을 작성하고 각각 9 m 낙하 해석을 수행하였다. 충격흡수체는 금속 케이싱을 무시하고 목재부만 가정하여 해석하였으며 탄소성 해석을 수행하였다. 예로서 Fig. 5와 Fig. 6에는 원판형 B형 모델에 대해 차례로 낙하충돌 시의 에너지-시간 이력과 충격력-시간 이력을 보이고 있다. 충돌직후 최대값을 가진 운동에너지는 약 15 ms 부근에서 최소가 되며 이 때 최대 충격력을 갖게 되고 따라서 내부탄성에너지도 최대값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에는 해석결과와 예로서 원판형 B형 모델에 대해 용기 및 바스켓 모델의 낙하직후 변형형상과 내부 바스켓의 응력분포를 나타내고 있는데 수평낙하 시 용기 몸통은 큰 변화가 없지만 충격흡수체나 내부 바스켓의 경우 관성력에 의하여 하부의 손상이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림에서 보듯이 바스켓은 핵연료 삽입셀 격자판과 지지판 사이의 강성도 차이로 최외각 접합부

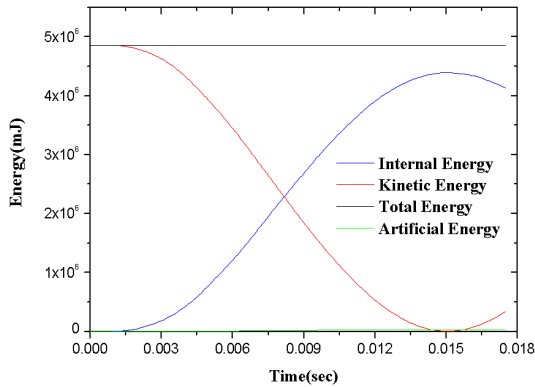


Fig. 5 Energy-time history at impact(round-plate B)

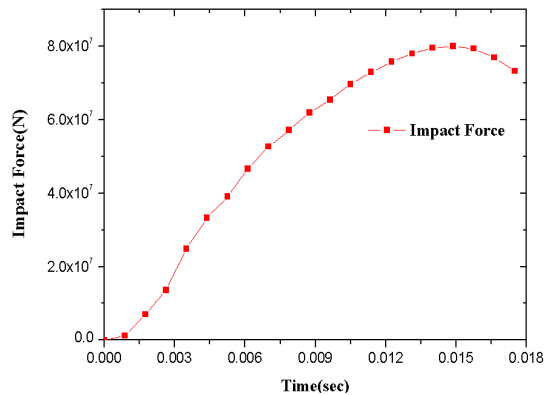


Fig. 6 Impact-time history at impact(round-plate B)

에서 큰 변형이 발생함을 알 수 있었다.

앞서 제시한 수송용기 내부구조물 네가지 설계방안에 대해 각각 바스켓, 지지부, 중성자흡수체 부분의

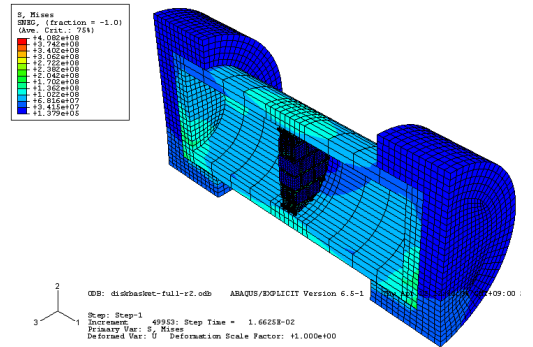
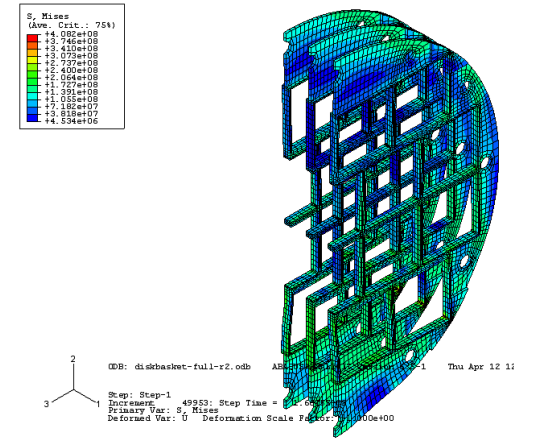
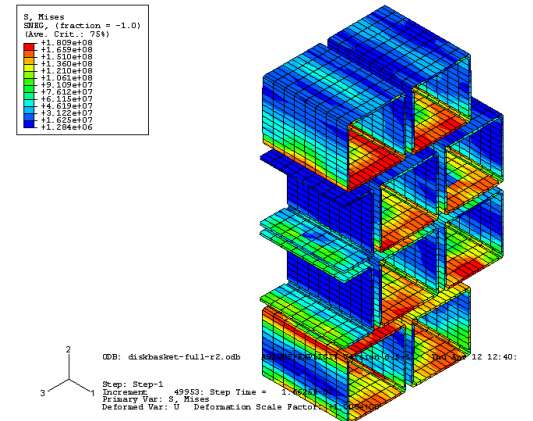


Fig. 7 Deformation shape at impact(round-plate B)



(a) Support plate



(b) Basket cell

Fig. 8 Stress distribution at impact(round-plate B)



9 m 낙하사고 시 최대응력의 계산결과를 ASME 코드의 허용응력값과 비교하여 Table 4에 제시하였다. Table에서 알 수 있듯이 원판형 A는 우선 지지부 응력이 허용기준을 초과하고 있으며 또한, 원판형 A 및 격판형 A는 사고 시 임계안전성 유지에 중요한 역할을 하는 중성자흡수체의 설계 여유도가 너무 부족하여 신뢰성이 부족함을 알 수 있다.

Table 5에는 바스켓 설계방안별 임계해석 결과에 의한 x, y축 방향의 최소 이격거리와 실제 낙하충돌시 최대변형량을 표시하여 그 적합성을 판단하였으며 참고로 적합한 설계에 대해 총중량을 계산에 의해 추정하였다.

원판형 A와 격판형 A는 최대변위가 바스켓간 간격보다는 작지만 앞서 논의했듯이 모델 단순화에 따른 불확실성을 고려할 때 설계여유도가 충분치 않다고 판단하여 제외시키고 표에서는 각 설계안 B에 대해서 중량을 보수적으로 계산하여 총중량을 검토하였다. 두가지 설계안 B의 경우 공히 약 110 톤으로 예상하는 크레인 용량에 문제가 없는 것으로 나타났다.

**Table 4** Comparison of max stress for basket options

Design options	Basket (MPa)	Support (MPa)	Neutron absorber (MPa)
Round type A	213.0	491.8	32.1
Round type B	180.9	408.2	21.7
Weld type A	292.9	391.0	32.1
Weld type B	191.9	230.0	21.3
Allowable limit	448.9	448.9	33.0

(\*) ASME Section III, Division 1, Appendix F  
 ( $P_m < \text{large of } 0.7S_u, S_y + 1/3(S_u - S_y)$ )

**Table 5** Comparison of max displ. for basket options

Results	Criticality analysis		Structural analysis	Total Wt. [ton]	
	L1* (mm)	L2* (mm)	Rel. Displ. [mm]	Displ. Compensated	Judgement
Round A	17	19	8.270	N/A	N/A
Round B	16	18	3.736	108.2	O K
Weld A	22	20	7.825	N/A	N/A
Weld B	22	22	3.834	109.7	O K

\* L1, L2 are minimum gaps between basket cells w.r.t. X axis and Y axis, respectively.

이상과 같이 예비 수평낙하 해석을 통해 계산된 최대 응력 및 변위를 비교 검토한 결과 대부분의 경우에 응력 제한치 이내로 평가되었지만, 원판형 A의 경우 바스켓 부근의 응력집중으로 인해 허용범위를 상회하였고 격판형 A의 경우 중성자흡수판의 설계여유도가 충분치 않음을 알 수 있었다. 결국 구조적 건전성이 확보되는 원판형 B 및 격판형 B 설계안 중에서 다음절에서 설명하는 제작성 및 효율성을 검토하여 최종 선정하기로 한다.

## 4. 제작성 등 기타 특성

### 4.1 바스켓 용접 및 조립

원판형은 원판에 사각형의 구멍을 내고 바스켓 셀을 삽입하는 형태이므로 상대적으로 바스켓 조립시 용접작업이 적다. 원판형 바스켓의 제작 과정에서 용접이 필요한 부위는 개별 바스켓 셀 제작시 필요하고 원판과 지지봉 용접 이음에 필요하다. 이 경우 용접작업은 충분한 작업공간을 확보할 수 있으므로 원판형의 용접제작성은 양호하다. 이에 비해 격판형은 격판을 서로 용접하여 연결하여야 하므로 많은 용접작업이 요구되며 용접 공간 확보 측면에서도 어려움이 많다. 특히 용접제작성이 어려운 부위는 격판사이의 용접으로서 격판과 격판 사이는 간격 24 mm, 길이 약 150 mm~300 mm이므로 이 틈새로 용접봉을 삽입하여 용접을 수행하기에 어려운 점이 있다. 특히 불활성가스 용접의 경우 용접토치의 직경이 최소 약 30 mm이므로 용접공간이 부족하다. 만일 소형 특수 용접토치의 개발이 불가능할 경우 판을 여러 조각으로 나누어 접합부의 외면에서 용접해야 하는 데 이 경우 용접 개소는 약 100여개소가 된다. 용접을 다수 수행할 경우 열처리, 변형 등을 고려할 때 격판형은 바스켓 제작이 용이하지 않다.

### 4.2 바스켓 진직도 및 열변형

바스켓은 전체 길이가 약 4.5 m이며 물리적으로 핵연료집합체와 접하고 또한 용기내부 지지대와 접촉하게 된다. 또한 조립체 전체를 용기에 삽입 인출 가능하여야 하므로 직진도 검토가 요구되며 적절한 제작 허용공차를 적용하여야 한다. 격판형 바스켓의 경우 핵연료저장대와 유사하게 허용공차 요건이 비

교적 엄격하여 원판형에 비해 효율성이 떨어진다. 열팽창에 의한 열응력 발생을 방지토록 설정한 부품 간의 간격은 원판형의 경우 원판과 용기본체 간격 6 mm, 격판형은 바스켓과 본체와 간격 5 mm로서 원판형이 조금 여유가 있지만 대체로 유사하다.

## 5. 결 론

이상과 같이 사용후연료 수송용기 내부구조물 설계방안의 적절한 선택을 위해 9 m 낙하사고 예비해석을 통하여 구조적 건전성과 제작성을 검토하였다. 국내외 참조설계와 경험을 토대로 제시된 네가지 바스켓 설계방안에 대하여 종합적으로 볼 때 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 적절한 공학적 판단과 예측에 의해 간단한 예비해석만으로도 설계방향을 효율적으로 결정할 수 있음을 보였다.

(2) 표준형 원전의 사용후핵연료 수송용기 내부 바스켓 구조물의 낙하충격에 대한 구조적건전성은 지지대 개수가 더 많은 것이 좋고 제작효율성은 원판형이 유리하다.

(3) 구조적 강성이 뛰어난 격판형 바스켓 구조를 선택할 경우 설계초기에 용접효율성을 동시에 고려한 설계가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2006년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

(1) Dreier, G., Diersch, R., Hueggenberg, R., Spilker, H. and Bantle, S., 1997, "Benchmark

Calculations for Mechanical Stresses upon a Transport Cask," Nuclear Engineering and Design, Vol. 176, No. 3, pp.207~214.

(2) Lee, Y. S., Ryu, C. H., Kim, H. S. and Choi, Y. J., 2005, "A Study on the Free Drop Impact of a Cask using Commercial FEA Codes," Nuclear Engineering and Design, Vol.235, No. 20, pp. 2219~2226.

(3) Chung, S. H., Lee, H. Y., Song, M. J., Rudolf Diersch, Reiner Laug, 2002, "Evaluation of the KN-12 Spent Fuel Transport Cask by Analysis," Nuclear Eng. and Technology, Vol. 34, pp. 187~201.

(4) Shin, T. M., Kim, K. S., Kim, J. S. and Choi, G. S., 2007, "Drop Impact Analysis for Basket Design Selection in Spent Fuel Shipping Cask for Korean Standard NPP," SMiRT-19, J06/5.

(5) IAEA Safety Standards Series, No. ST-1, 2005, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material."

(6) Regulatory Guide 7.6, 1978, "Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels," Rev. 1.

(7) ASME B&PV Code Section III, Division 1&3, 1998.

(8) Jhung, M. J., Jang Y. K. and Lee J. B., 1996, "Structural Integrity of a Fuel Assembly for the Secondary Side Pipe Breaks," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 823~834.

(9) ABAQUS/Explicit User's Manual Ver 6.5, H.K.S. Inc.