

## Safety evaluation of type B transport container for tritium storage vessel

### B형 삼중수소 운반용기 안정성 평가

**Minsoo Lee**, Seung-Woo Paek, Kwang-Rag Kim, Do-Hee Ahn, Sung-Paal Yim, Hongsuk Chung,  
Heui-Joo Choi, Jeong-Won Choi, Soon-Hwan Son\* and Kyu-Min Song\*  
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon  
\*Korea Electric Power Research Institute 103-16 Munji-dong, Yuseong-Gu, Daejeon

[minm@kaeri.re.kr](mailto:minm@kaeri.re.kr)

이민수, 백승우, 김광락, 안도희, 임성팔, 정홍석, 최희주, 최종원, 손순환\*, 송규민\*  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150  
\*한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16

(Received April 20, 2007 / Approved June 12, 2007)

#### Abstract

A transport container for a 500 kCi tritium storage vessel was developed, which could be used for the transport of metal tritide from Wolsong TRF facility to a disposal site. The structural, thermal, shielding, and confinement analyses were performed for the container in a view of Type B. As a result of structural analysis, the developed container sustained its integrity under normal and accidental conditions. The maximum temperature increase of the inner storage vessel by radiation was evaluated at 134.8 °C at room temperature. In 800 °C fire test, The thermal barrier of container sustained the inner vessel at 405 °C after 30 min, which temperature was allowable for the container integrity since maximum design temperature of inner vessel was 550 °C. In the evaluation of the shielding, the activity of radiation was nearly zero on the outer surface of inner vessel. Consequently the transport container for a 500 kCi tritium was evaluated to pass all the safety tests including accidental condition, so it was concluded that the designed transport container is proper to be used.

**Key words** : tritium, container, transport, safety evaluation

#### 요약

월성 원자력 발전소의 TRF 시설에서 수집된 트리튬을 metal hydride 형태로 보관하고 있는

500 kCi급 트리튬 1차 저장용기를 발전소 밖의 폐기물 저장고로 안전하게 운반하기 위하여 트리튬 운반용기를 개발하였다. B형 운반용기의 기술기준을 적용하여 구조평가, 열평가, 방사선차폐 평가, 격납평가 등을 수행하여 운반용기의 안전성을 분석하였다. 트리튬 운반용기는 정상운반조건 및 사고운반조건에서도 격납 경계가 손상되지 않는다고 평가되었다. 붕괴열로 인한 운반용기 내부 저장용기의 온도상승은 수치해석 결과, 원통형 모델에서는 134.8℃로 나타났다. 운반사고 조건에 대한 열 평가로서 800℃ 외부환경에 30분간 노출되었을 경우에는 단열재만의 열차폐를 고려하여 계산한 결과, 약 405℃로 나타났으며, 내부 온도 상승은 1차 격납 경계인 1차 저장용기의 허용 온도인 550℃에도 미치지 못하였다. 격납 차폐 평가에서도 사고조건인 800℃의 외부 환경에 노출된 경우에서도 충분히 운반용기의 격납 성능을 유지할 수 있다고 판단되었다. 방사선에 대한 차폐 특성을 조사한 결과, 트리튬에서 발생된  $\beta$ -ray 선량은 1차 저장용기 외부 표면에서 0으로 계산되었다. 이상과 같이 500 kCi 급 트리튬 운반용기에 대한 안전성을 평가한 결과, 운반사고조건에서도 트리튬 운반용기는 전혀 이상이 없는 것으로 나타났다.

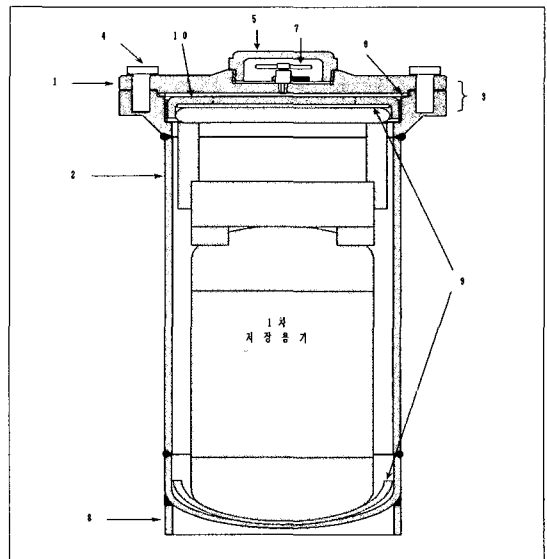
**중심단어** : 삼중수소, 운반용기, 수송, 안전성 평가

### 1. 서 론

월성 원자력 발전소의 Tritium Removal Facility(TRF) 시설에서 수집된 트리튬을 금속수소화물 형태로 보관하고 있는 500 kCi급 트리튬 1차 저장용기를 발전소 밖의 폐기물 저장고로 안전하게 운반하기 위하여 트리튬 운반용기를 개발하였다. 방사능으로 분류되는 운반용기의 규격은 국내 원자력법 과 학기술통고서 제2001-23호에 의거하여 B(U)형 운반용기로 분류하였으며[1], B형 운반용기의 기술기준을 적용하여 구조평가, 열평가, 방사선차폐평가, 격납평가 등을 수행하여 운반용기의 안전성을 분석하였다 [2]. 개발된 운반용기의 제원에 대해 설명하면 다음과 같다. 트리튬 운반용기는 크게 2차 저장용기와 3차 드럼용기로 구성된다. 2차 저장용기는 500kCi급 트리튬 1차 저장용기에서 방사성 물질이 누설될 경우에 대비한 2차 밀봉용 용기이다. 2차 저장용기의 구조는 Fig. 1과 같다. 3차 드럼용기는 외부의 물리적 충격이나 화재로 인한 열이 내부 용기로 전달되는 것을 최소화하는 구실을 한다. 또한 3차 드럼용기는 운반에 적합한 외관을 지니고 있다. 3차 드럼용기의 구조는 Fig. 2와 같다. 1차 저장용기를 포함한 운반용기의 전체 무게는 약 130 kg이며, 외형은 원통형 드럼

형태로서 높이 840 mm, 직경 420 mm, 전체 밀도는 약 1.056 g/cm<sup>3</sup>로 추정된다.

세부적으로, 2차 저장용기의 제원에 대해 설명하면 다음과 같다. 2차 저장용기는 설계압력 1.5 MPa@38℃의 고압용기로 설계하였으며, 2차 저장용기는 플랜지 형태로 개폐가 가능한 스테인리스강



**Fig. 1.** The structure of 2nd storage vessel (1; upper flange, 2; vessel body, 3; flange part, 4; flange bolt, 5; valve cap, 6; metal o-ring, 7; sampling valve, 8; support, 9; silicone rubber pad, 10; fixing jig)

304 재질의 고압용기로써 설계압력 1.5 MPa@38℃로 제작하였다. 2차 저장용기는 전체 높이 660mm, 몸체 외경 216mm, 몸체 두께 6.5mm이다. 플랜지부 외경 300mm, 그리고 전체 무게 48.52kg의 제원을 갖고 있다. 2차 저장용기의 상부 플랜지를 열고 1차 저장용기를 넣게 된다. 플랜지의 기밀은 금속 o-ring을 사용하여 유지시키고 있다. 2차 저장용기는 정상상태에서는 상온 상압 상태로 유지된다. 2차 저장용기의 내적은 약 18.4 l 이다. 1차 저장용기가 차지하는 부피 8.7 l 를 제외한 빈 공간의 내적은 약 9.7 l 가 된다.

세부적으로, 드럼용기의 제원에 대해 설명하면 다음과 같다. 드럼용기는 마개를 여닫을 수 있는 드럼 형태로서 스테인리스강 304를 사용하여 제작하였다. 드럼 용기 내부에는 열차폐를 위한 단열재와 물리적 충격을 감소시키기 위한 완충재가 포함된다. 먼저 단열재는 2차 저장용기를 감싸게 되며, 단열재 설치를 위해 2차저장용기는 금속 원통(Inner Shell)에 넣는다. 금속 원통은 오직 단열재 설치의 편의를 제공하는 데 그 목적이 있다. 그리고 드럼 셸과 2차 단열재 사이의 빈 공간은 충격을 흡수하기 위해 완충용 우레탄 폼으로 마감되어 있다. 드럼의 외형을 살펴보면 다음과 같다. 고온 화재시험 시, 내부 완충재 및 방열재에서 발생하는 기체를 배기하기 위한 배기구가 드

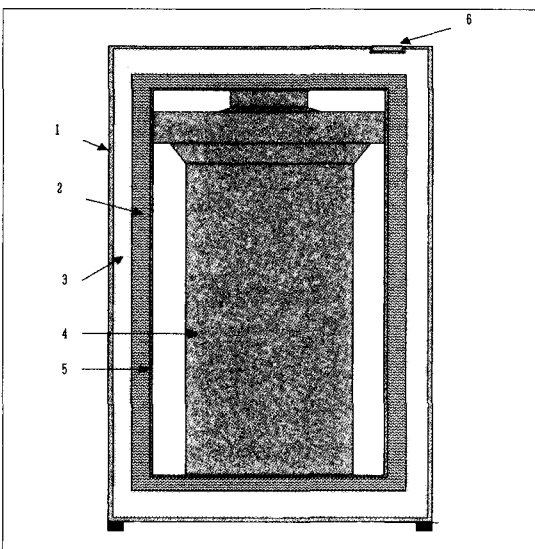


Fig. 2. The structure of 3rd drum container (1;drum body, 2;3M thermal barrier, 3;urethane foam, 4;2nd storage vessel, 5;inner steel shell, 6;ventilation hole

럼 윗면에 설치되어 있다. 그리고 운반용기의 운반 및 취급에 용이하도록 고리를 상단 외벽에 부착하였다. 드럼 용기는 외경 420 mm, 두께 3 mm, 전체 높이 820 mm, 무게 50 kg의 제원을 갖고 있다.

본문에서는 개발된 트리튬 운반용기의 열평가, 구조평가, 차폐평가, 격납평가 및 그 결과에 대해 자세히 언급하고자 한다.

## II. 방사성내용물의 개요

트리튬 운반용기의 운반대상물은 500kCi급 트리튬 1차 저장용기가 된다. 1차 저장용기는 소내 이동용으로 제작된 것으로서 그 자체로서 1차 격납 경계를 가지는 특징이 있다. Fig. 3에 트리튬 1차 저장용기의 개략도를 나타내었다. 1차 저장용기는 KEPIC QAP의 18개 항목의 요건에 따라 제작된 것이다. 방사성 물질인 트리튬은 1차 저장용기 내에서 티타늄 스폰지에 흡장되어 metal hydride의 고체 형태로 저장되어 있다. 트리튬은 상온에서 거의 방출되지 않고 안정된 고체상의 metal hydride 상태를 유지하도록 되어 있다. 트리튬 1차 저장용기는 스테인리스강 316 l 재질의 원통형 Sch. 40 고압용기 구조로서 트리튬 기체의 흡입과 배출을 위한 2개의 밸브가 설치되어 있다. 1

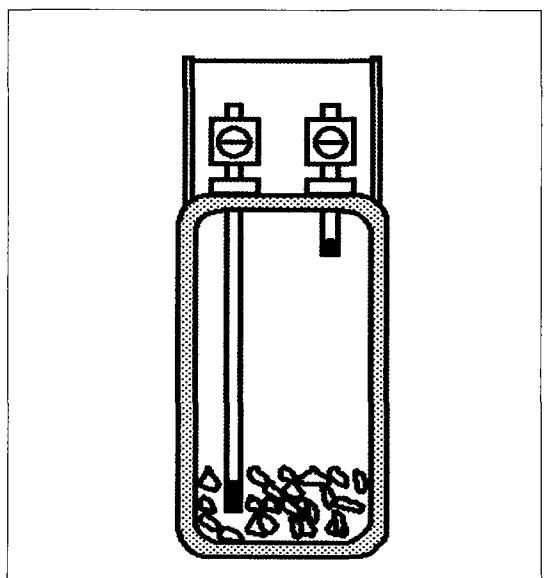


Fig. 3. Schematic diagram of 1st tritium storage vessel

차 저장용기의 재원은 무게 17.65kg, 높이 568mm, 몸체 외경 168mm, 몸체 두께 7.1mm, 밸브 보호캡 외경 192 mm이다. 1차 저장용기의 내적은 6.5 l 이며, 흡장물질인 티타늄 스폰지는 약 0.178 l 의 부피를 차지하고 있다. 트리튬은 티타늄 스폰지에 TiH의 1:1의 원소비의 metal hydride 고체상으로 저장된다. 1차 저장용기의 금속체 부피를 중량으로부터 환산하면 약 2.23 l 에 달하며, 1차 저장용기 전체 부피는 약 8.7 l 이다.

정상상태에서 1차 저장용기 내부의 상온 압력은 고진공 상태이며, 1차 저장용기의 설계 압력은 7.4MPa@38°C이며, 동시에 10-5~10-6kPa@550°C를 만족한다. 시간이 지나면서 1차 저장용기는 붕괴되면서 <sup>3</sup>He가 발생되면서 내부에 압력이 발생된다. 하지만 티타늄은 한 원자당 0.3개의 <sup>3</sup>He를 저장할 수 있기 때문에 초기 저장 후, 7년 동안은 1차 저장용기 내부의 측정 가능한 압력발생은 생겨나지 않는다. 최종적으로 50년의 장기 저장이 끝나면 <sup>3</sup>He의 발생에 따라서 약 46 기압이 생겨난다. 따라서 본 운반용기에 적용되는 1차 저장용기는 트리튬 장입 후, 7년 이내의 것이거나, <sup>3</sup>He를 배출시켜 0.1기압 이하로 낮춘 용기에 한정된다. 다시 말하면 정상상태에서 1차 저장용기 내부 압력이 1기압 이하로 검증된 것에 국한된다. Fig. 4에 1차 저장용기의 시간에 따른 40°C에서의 압력발생 양상을 나타내었다.

트리튬 운반용기의 설계기준인 트리튬의 한도량은 500kCi이다. 이 값은 해당 트리튬의 A2 값  $4 \times 10^4$ (TBq)  $\approx$  1,000 Ci을 초과하며, A2 값의 3,000 배

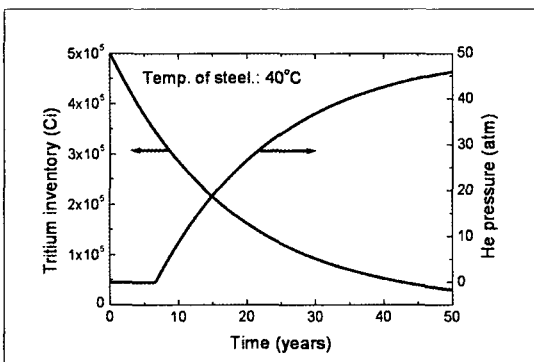


Fig. 4. Time dependance of a tritium inventory (Ci) and a <sup>3</sup>He pressure in 1st storage vessel

를 초과하지 않는다. 따라서 트리튬 운반용기는 ‘방사선안전관리등의기술기준에관한규칙’ 제84조에 의거하여 B형 운반물로 분류된다(1).

방사성 원소는 트리튬(Tritium, or <sup>3</sup>H)으로써 베타 선을 방출하면서 <sup>3</sup>He로 안정화된다. 트리튬의 붕괴 반감기는 12.3년이다. 트리튬은 천연적으로는 소량 존재하는 물질이지만 원자로나 중성자 산란장치 등에서 인공적으로 생성된다. 대개의 경우 인공적으로 생성된 트리튬은 기타 목적에 이용되기보다는 인체에 위해한 방사성 물질로 인식되어 적절한 방법으로 자연으로부터 격리시킨다. 베타선의 에너지는 최대 18.54 keV 정도이며, 평균적으로는 5.69 keV 정도이다. 공기 중에서 베타선의 이동거리는 최대 6mm 정도이며, 수중에서는 최대 7 μm 정도이다.

### III. 법적 적용기준

트리튬 운반용기는 과학기술부고시 제2001-23호 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정 제26조의 B(U)형 운반용기의 기술기준을 준수하도록 제작하였다. 따라서 트리튬 운반용기는 정상운반조건에 대한 입증시험과 운반사고조건에 대한 입증시험을 실시하고, 제39조에 의거하여 안전성에 대한 평가를 실시하게 된다.

### IV. 구조 평가

500kCi급 트리튬 1차 저장용기를 운반하기 위한 트리튬 운반용기를 설계한 후, 안전성에 대한 구조평가를 실시하였다. 정상운반조건에 대한 구조평가 항목으로 1.2m 자유낙하시험, 적중시험 및 관통시험 조건에 대해 평가하였으며, 운반사고조건에 대한 구조평가 항목으로는 9m 자유낙하시험, 1m 봉위 낙하시험 및 15m 침수 조건에 대해 평가하였다. 사고조건에 대한 해석은 FEM 해석용 프로그램인 ABAQUS Version 5.8을 사용하였다.

#### 가. 구조 설계

2차 저장용기는 설계압력 1.5 MPa@38°C의 고압

용기로 설계하였다. 정상 운반조건에서 2차 저장용기는 상압상태로서 압력이 걸리지 않는다. 화재사고시, 운반용기의 온도가 상승할 경우, 2차 저장용기는 기체팽창으로 내압이 상승한다. 한편 1차 저장용기 내에서 트리튬의 탈장에 의해 내압 상승은 400℃에서 0.0004 atm 으로서 지극히 작다. 1차 저장용기의 장입전 최대 허용 압력인 1기압을 가정하면, 최대 사용 온도인 450℃가 되어도 1차저장용기와 2차 저장용기와의 내부 압력차가 발생되지 않는다. 최고 설정 온도인 400℃가 되면, 2차 저장용기의 내부압력은 0.227 MPa가 된다. 따라서 400℃의 설계 압력 1.2MPa는 안전율 5.3을 갖는다.

최대 사용온도 조건인 400℃는 2차 저장용기의 기밀과 관련된 샘플링 밸브, 급속 O-ring, STS 304 용기 재질 중에서 가장 낮게 평가된 샘플링 밸브의 최고 사용온도 조건인 454℃를 기준으로 설정하였다.

운반용기를 취급하기 위한 인양장치는 드럼용기 상부의 4 곳에 인양고리(lifting lug)가 설치된다. 인양고리는 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제22조에 따라 포장재료의 항복강도를 초과하지 아니하고 운반물 중량의 3배에 상당하는 하중을 지탱할 수 있어야 한다. 인양고리는 폭이 70 mm, 두께가 6 mm로 드럼용기 상단 외벽에 용접된다. 설계하중은 대칭된 4개의 인양고리가 운반용기의 전체 하중을 지탱한다고 가정하여 계산하였다.

한편, 운반용기는 수송차량에 수직상태로 운반하게 된다. 결속장치는 IAEA Safety Series No.37 Appendix VII에 의거하여 원통형 운반용기를 수직상태로 운반하는 경우에 대해 설계하였다[3].

트리튬 운반용기의 주요 부품에 대한 중량 및 무게 중심에 대하여 계산한 결과는 다음과 같다. 중량은 실측한 것이며, 무게 중심은 ABAQUS 프로그램을 통해서 산출하였다. 각부품은 중심축을 기준으로 대칭을 이루고 있으므로 무게 중심은 중심축상에 위치한다. 무게중심은 운반용기의 바닥면을 기준한 것이며, 운반용기의 전체적인 무게중심은 운반용기의 운반용기 바닥으로부터 중심축상에 약 456 mm 높이에 위치하는 것으로 나타났다.

## 나. 운반용기 재료

트리튬 운반용기에서 2차 저장용기 및 운반드럼의 주요재료는 구조재로서 stainless steel type 304(약칭: STS304)를 사용하였고, 2차 저장용기 받침판으로는 단단하면서도 열충격에 강한 세라믹보드(Ceraboard 100 (주) 가람)를 단열재로서는 3M 방열재(3M)를, 충격흡수재는 A/B형 우레탄폼(Nanbang Chemicals Co., LTD)을 사용하였다.

STS 304는 항복용력이 258.6 MPa, 열팽창계수가  $1,057 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 를 나타낸다. 3M 단열재는 원자력 발전소 등의 비상전원 전산 등을 화재시에 보호하기 위하여 제조된 것으로 겹쳐진 두께에 따라 1,000℃의 외부 온도에서 30분~1시간 동안 내부 온도를 176℃ 이하로 유지할 수 있다. 우레탄 폼은 가장 내충격성이 좋은 물질 중의 하나로서 완충제로 사용된다. 이 밖에도 2차저장용기와 1차 저장용기 사이에는 실리콘 고무판이 삽입되는데, 실리콘 고무판은 일반산업용 유백색 고무판을 사용하였다. 사용된 고무판은 고무판 재료는 ShinEtsu 일반성형용 고무폼파운드로 성형된 것을 사용하였다.

## 다. 정상운반조건에 대한 구조평가

운반조건에 대한 구조평가에서 자유낙하시험, 적층시험 및 관통시험 조건에 대한 해석은 FEM 해석용 프로그램인 ABAQUS Version 5.8을 사용하였다. 해석에 필요한 수학적 모델링은 Hyper mesh 프로그램을 사용하여 구성하였고 1차 저장용기는 강체로 취급하였다. 트리튬 운반용기 모델은 총 30,639 nodes, 14 component, 4 materials, 그리고 20 contact point 로 구성하였다. Fig. 5는 모델링된 운반저장용기를 나타내고 있다.

### ① 운반용기 내압 조건

초기 조건에서 1차 트리튬 저장용기 내부는 진공 상태이며, 2차 저장용기 및 드럼 용기의 내압은 상압이다. 모델링에서는 1차 저장용기 및 2차 저장용기를 상압으로 가정하고 해석하였다.

### ② 살수 시험

제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제45조 제1항에는 시간당 5센티미터의 강우량

에 상당하는 물을 1시간 이상 살수한 후, 적층 및 관통시험을 수행하도록 하고 있다. 강우의 경우 냉각 효과 이외에 특별한 하중 조건이 없으므로 해석에서 제외하였다.

**③ 1.2m 자유낙하 시험**

과학기술부고시 제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제45조 제1항 2호에는 5000 kg 이하의 운반물에 대해 1.2m 자유낙하 시험을 실시하도록 되어 있다. 1.2m 자유낙하에서 가장 충돌 가능성이 높은 바닥 하부면이 충돌하는 조건에 대해 해석한 후, 평가하였다. 드럼용기는 한단에 강한 충격을 받아서 약간의 변형이 관측되며, 2차 격납경계인 2차 저장용기에서는 변형이 전혀 나타나지 않았다. 2차 저장용기에서의 최대응력은 등근 바닥면에서 최대 170 MPa로 나타났으며, 이 값은 STS304의 항복응력 258 MPa 보다 낮으므로 변형이 나타나지 않았다. Fig. 6은 1.2m 낙하 시험의 FEM 해석결과를 나타낸 것이다.

**④ 적층 시험**

적층시험은 과학기술부 고시에서 운반물 중량의 5 배에 해당하는 하중과 운반물의 수직투영 면적에 13 킬로파스칼을 곱한 값에 해당하는 하중 중에서 큰 값의 하중에 견뎌야 한다.

첫째 조건에 대해 중량 130 kg인 운반용기의 5배 하중인 650 kg의 하중이 운반용기 상부면에 모두 작

용한다고 가정하면 상부면에 미치는 압력은 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{5 \times W_t}{A_{Lit}} = \frac{5 \times 130}{\pi \times 21.0^2} = 0.469 \text{ kg/cm}^2 = 46.0 \text{ kPa}$$

따라서, 첫째 조건이 훨씬 가혹하므로 운반물 중량(130 kg)의 5배에 해당하는 650 kg의 하중에 대해 평가하였다. 650kg의 하중을 용기 상부면 둘 경우 걸리는 평균 응력은, 약 0.04 MPa로서 1.2 m 자유낙하시 발생되는 최대 응력치 170 MPa 및 재료 STS304의 항복응력치 258MPa에 비해서 지극히 낮으므로 적층 평가는 해석에서 제외하였다.

**⑤ 관통 시험**

직경 3.2센티미터, 중량이 6킬로그램, 반구형 타격면을 가진 타격봉을 1m 높이에서 수직으로 운반용기 윗면 중앙지점과 닥 중앙면에 떨어지게 하여 관통 시험을 평가한다.

타격봉의 자유낙하로 인한 운동에너지는,

$$E = WH = 6 \times 100 = 600 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

여기서, W는 타격봉의 중량이고 H는 자유낙하높이이다.

타격봉이 운반용기 재료인 스테인리스 강판(STS304)을 변형시키는 데 필요한 에너지의 계산은

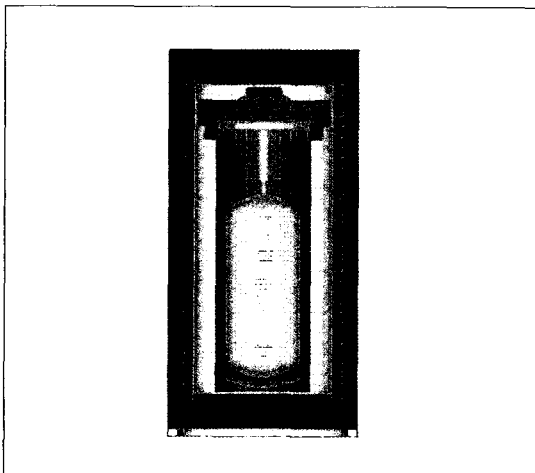


Fig. 5. The FEM model for a tritium transport container

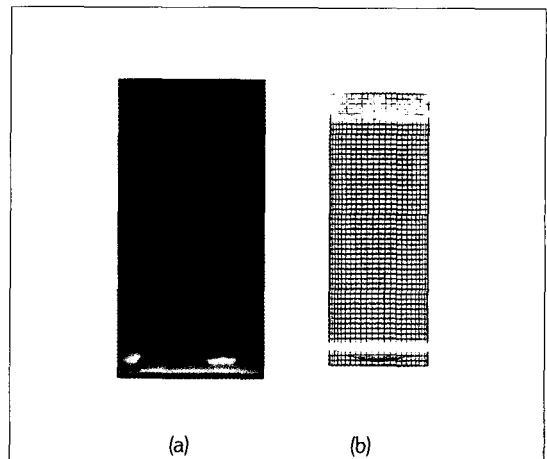


Fig. 6. Simulation results of 1.2 m vertical drop for tritium transport vessel (a) 3rd drum, (b) 2nd storage vessel

다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 {}^1U &= K F t = K \tau \pi d t^2 \\
 &= 0.39 \times 1254 \times \pi \times 3.2 \times 0.3^2 \\
 &= 442.3 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \\
 \tau &= 0.6 S_y = 0.6 \times 2090 \\
 &= 1254 \text{ kgf/cm}^2
 \end{aligned}$$

여기서,  $K$ 는 penetration to fracture ratio (스테인리스강 = 0.39)이며,  $F$ 는 전단력,  $t$ 는 강판의 두께,  $\tau$ 는 스테인리스강의 전단응력,  $S_y$ 는 STS304의 최소항복응력이다[4].

따라서 타격봉으로 인해 운반용기에서 0.3cm 두께의 드럼 표피는 변형된다는 것을 판단할 수 있다. 하지만, 2차 격납 경계인 0.65cm 두께의 2차 저장용기의  $U$ 값은 2074 kg/cm<sup>2</sup>으로서 안전율은 2074/600=3.5로서 타격봉이 직접 2차 저장용기에 충돌한다고 가정하여도 변형이 되지 않는다. 따라서 운반용기는 관통 시험으로 인한 격납경계에 손상이 발생하지 않는다고 판단할 수 있었다.

## 라. 운반사고조건에 대한 구조평가

운반사고조건에 대한 구조평가는 9m 자유낙하시험, 1m 봉위 낙하시험 및 15m 침수시험이 있다. 운반사고조건에 대한 구조평가 해석은 FEM 해석용 프로그램인 ABAQUS Version 5.8을 사용하여 정상운반조건과 동일한 해석모델을 사용하였다.

### ① 9m 자유낙하시험

과학기술부고시 제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제45조 제1항 제1호에 의거하여 9미터 자유낙하시험을 통해 구조평가를 실시한다. 시험 바닥면은 과학기술부고시 제2001-23호 제40조에 의거하여 시험물의 충격으로 인한 변위 또는 변형에 대한 저항의 증가로 인하여 시험물의 손상이 심각하게 증가하지 아니하는 견고하고 편평한 수평면으로 한다. 시험높이는 과학기술부고시 제2001-23호 제41조에 의거하여 시험바닥면으로부터 시험물의 하부면까지 측정된 길이로 한다. 운반용기의 자유낙하해석은 하부수직낙하와 30° 경사낙하의 조건에

대해 수행하였다. 하중조건은 9m 자유낙하로 인한 초기속도 13.3 m/sec로 수평면에 충돌한다고 가정하였다.

### - 하부수직낙하

드럼용기는 한단에 강한 충격을 받아서 하단에 주름 형태의 변형이 관측되며, 2차 격납경계인 2차 저장용기 바닥면에서 최고 응력이 걸리는 시점에서 탄성변이가 나타났으며, 변이는 충격 후 원상 회복되었다. 2차 저장용기에서의 최대응력은 등근 바닥면에서 최대 238 MPa로 나타났으며, 이 값은 STS304의 항복응력 258 MPa 보다 낮게 나타났으며, 용기의 건전성은 유지되었다. Fig. 7은 9m 하부 수직낙하 시험에서 최대응력이 걸리는 시점의 FEM 해석결과를 나타낸 것이다.

### - 30° 경사낙하

드럼용기는 한단 모서리에 강한 충격을 받아서 심한 변형이 관측되며, 2차 격납경계인 2차 저장용기 바닥면에서 탄성변이가 나타났으나, 충격 후 원상회복 되었다. 2차 저장용기에서의 최대응력은 등근 바닥면에서 최대 254 MPa로 나타났으며, 이 값은 STS304의 항복응력 258 MPa과 비슷하게 나타났다. 하지만 STS304의 최소 인장강도 520 MPa 보다 낮으므로 2차 저장용기의 건전성은 유지되었다. Fig. 8은 9m 하부 30° 경사낙하 시험의 FEM 해석결과를 나타낸 것이다.

### ② 1m 봉위 낙하시험

과학기술부고시 제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제45조 제1항 제1호에 의거

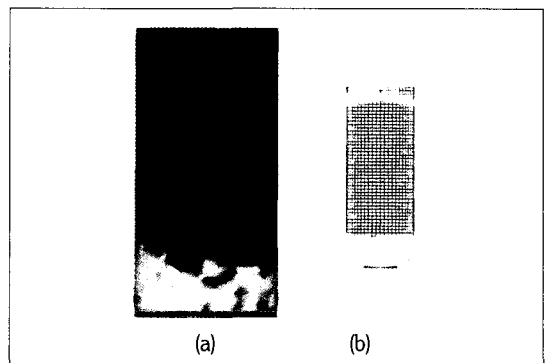


Fig. 7. Simulation results of 9 m vertical drop for tritium transport vessel (a) 3rd drum, (b) 2nd storage vessel

하여 1미터 봉위 낙하시험을 통해 구조평가를 실시한다. 세부사항은 9m 자유낙하시험과 동일하게 적용한다. 직경이 15센티미터이고 길이가 20센티미터인 연강봉을 수직으로 견고하게 고정시켜 놓고, 운반용기를 1미터 높이에서 봉 위에 낙하시켜서 구조를 평가한다. 봉은 상단부는 평탄하다. 운반용기의 1m 봉위 낙하시험 해석은 하부수직낙하, 상부수직낙하, 수평낙하의 조건에 대해 수행하였다. 하중조건은 1m 자유낙하로 인한 초기속도 4.43 m/sce로 봉위면에 충돌한다고 가정하였다.

드럼용기는 한단 중앙부에 강한 충격을 받아서 심한 변형이 관측되며, 2차 격납경계인 2차 저장용기 바닥면에서 변이가 나타났다. 2차 저장용기에서의 최대응력은 등근 바닥면에서 최대 342 MPa로 나타났다. 이 값은 STS304의 항복응력 258 MPa 보다 높게 나타났다. 하지만 STS304의 최소 인장강도 520 MPa 보다 낮으므로 2차 저장용기의 건전성은 유지되었다. 아래 Fig. 9는 1m 봉위 낙하시험의 FEM 해석결과를 나타낸 것이다.

V. 열 평가

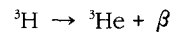
과학기술부고시 제2001-23호 제45조 정상운반조건에 대한 입증시험 항목에는 열시험에 대해 명시되어 있지 않다. 다만, 제22조(운반용기의 일반기준)

제2항 제2호, 제25조(A형 운반용기의 기술기준) 제5호, 및 제26조(B(U)형 운반용기의 기술기준) 제14호에서는 각각 -40℃ 내지 55℃, -40℃ 내지 70℃, -40℃ 내지 38℃의 범위에 해당하는 온도의 환경에서 건전성이 유지되도록 하고 있다.

운반사고조건에 대한 열평가 기준은 과학기술부고시 제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제45조 제1항 제2호에 의거하여 이루어진다. 운반용기는 제26조 제3호의 별표의 규정에 의한 일광조건과 방사성내용물로 인한 내부 발생열의 최대설계조건에서 38℃의 주위온도조건 및 열적 평형상태에 있는 시험물을 800℃의 화재환경에 30분간 두도록 하고 있다.

가. 붕괴열 평가

1차 저장용기는 재질이 스텐인레스강으로 내부 용적은 약 6.5 l로 850g의 티타늄 스펀지가 들어 있다. 각 저장용기 당 약 500 kCi의 트리튬이 저장된다. 트리튬은 약 12.33년의 반감기를 가지며 아래 반응식과 같이 붕괴하여 <sup>3</sup>He를 생성시키므로 일정기간 이상 장기 저장시 헬륨을 수용할 수 있는 압력용기 이어야 한다.



트리튬 붕괴시 발생되는 β선 에너지 값은 최대

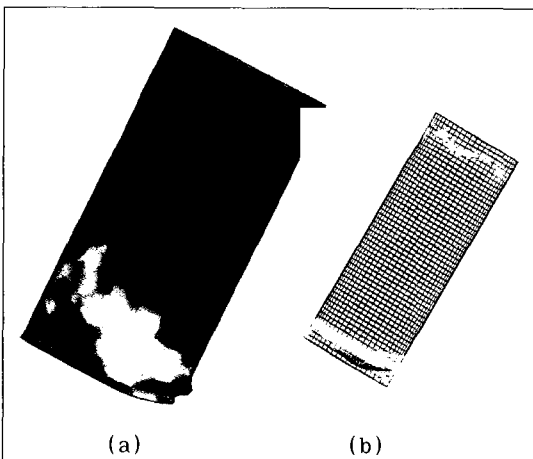


Fig. 8. Simulation results of 9 m slope(30°) drop for tritium transport vessel (a) 3rd drum, (b) 2nd storage vessel

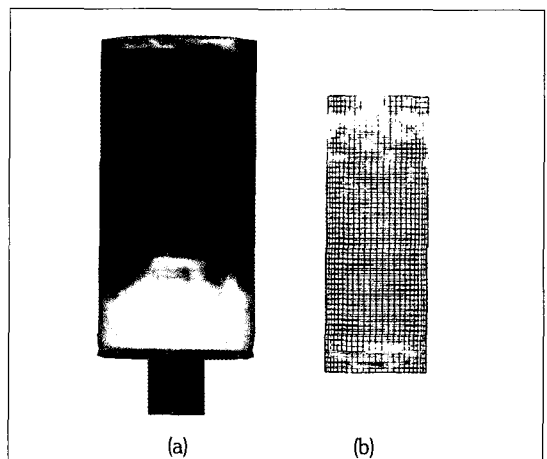


Fig. 9. Simulation results of 1 m drop on a bar for tritium transport vessel (a) 3rd drum, (b) 2nd storage vessel



15.895 keV 그리고 평균 5.69 keV 값을 갖는다. 초기 500 kCi의 트리튬이 티타늄에 흡장된 티타늄 트리타이드의 시간에 따른 붕괴열( $H_d(t)$ )은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$H_d(t) = 5 \times 10^6 \times 3.7 \times 10^{10} s^{-1} \times 5.69 \text{ keV } s^{-1} \times e^{(-\lambda t)}$$

$$= 16.9 e^{(-\lambda t)} \text{ W}$$

이 식에서 붕괴상수( $\lambda$ )는

$$\lambda = 1.78 \times 10^{-9} s^{-1}$$

이며 저장 초기에 많은 발열이 예상된다. 따라서 티타늄 저장재에서 500 kCi의 트리튬을 흡장했을 경우 저장 초기 붕괴열은 약 17W 정도로 발열량이 예측되며, 저장 시간에 따라 트리튬이 붕괴 감소하여서 발열량도 줄어들 것이다. 예로서 12.33년 후에는 약 8.4W의 발열이 수반된다.

### 나. 정상운반조건에 대한 열평가

1차 저장용기에는 500 kCi의 트리튬이 들어 있으며 베타선 붕괴에 의한 내부열이 발생된다. 베타선의 에너지는 최대 18.54 keV 정도이며, 평균적으로는 5.69 keV 정도이다. 이러한 미열로 인한 내부 저장용기의 온도 상승을 예측하는 것이 중요하다. 왜냐하면 저장용기의 단열 작용으로 말미암아 내부온도가 지나치게 상승하면 1차 저장용기의 건전성이 손상받기 때문이다. 섭씨 38 도의 외부환경에 노출된 경우, 내부 저장용기의 온도 상승을 HEATING 7[5]코드를 통해 예측하였다. 미국 방사선 안전정보 컴퓨터 센터(Radiation Safety Information Computational Center, RSICC)에서 관리되고 있는 HEATING 7은 범용 다차원 유한차분 열전달 해석 코드로서 정상상태와 전이상태의 열전달 문제를 1, 2, 3차원으로 직교좌표, 원형좌표, 원통형좌표로서 계산할 수 있다.

#### ① 고온조건

법규에서 규정하고 있는 고온 조건은 주변 온도가 38℃에서 최대의 태양 복사열이 용기표면에 흡수되는 경우이다. 가장 보수적인 조건으로 곡면의 운반용

기 표면에 1일당 일광량이 400 W/m<sup>2</sup>인 열적 환경과 상기에서 계산된 500kCi 트리튬의 양에 해당하는 저장 초기 붕괴열 값을 용기 내부에 발생하는 것으로 적용해서 계산을 수행하였다. 트리튬이 고정화된 직후, 드럼 용기 내에 넣어져 정상적으로 운반되는 것을 가정한 것으로 외부 환경 및 초기 온도 조건을 38℃로 설정하고 붕괴열에 의한 온도 상승에 대해서 모사 시간은 7일로 설정하였다. Fig. 10은 티타늄 저장재에 흡장된 트리튬이 붕괴되면서 자연적으로 발생하는 붕괴열을 그 열원으로 하여 트리튬 운반용기의 열전달 현상을 해석한 결과이다. 트리튬 저장재, 2차 저장용기 외부, 내부 셸, 3M 단열재와 운반용기 외부면 등 주요부위의 온도 추이를 나타내었다.

저장용기가 7일 동안 수송상태에 있을 경우 1차 저장용기 내부의 티타늄 스펀지 저장재 부분의 온도가 약 140℃ 이상 상승하는 것으로 나타났다. 운반용기 외부 표면은 4일 만에 정상상태의 약 50℃의 온도로 정상상태에 도달되었지만 폴리우레탄폼의 단열효과가 우수하여 내부 온도들은 8일 이후에야 약 143℃로 정상상태에 도달되었다. 이것은 트리튬으로부터 지속적으로 발생되는 붕괴열은 용기 본체를 이루는 스테인레스강의 열전도율이 비교적 커서 열전달이 잘되지만 완충재로 사용되어진 두꺼운 폴리우레탄폼 층의 낮은 열전도율에 의해 나타난 결과이다. 운반용기 표면의 온도가 약 50℃까지 상승한 주요인은 트리튬의 붕괴열과 외부의 태양열에 의한 영향이라고 판단된다.

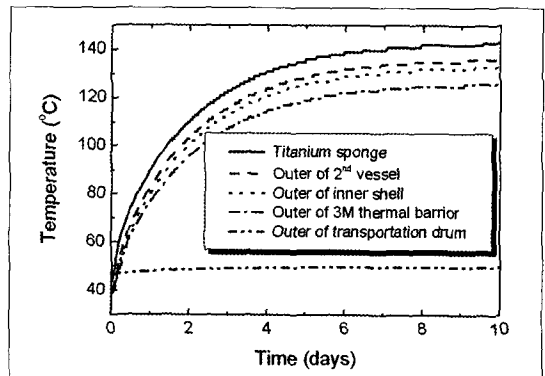


Fig. 10. The temperatures changes of container components in a high weather condition (400 W/m<sup>2</sup> sunlight and 38 °C environment)

티타늄에 흡장된 트리튬의 평형 해리압력은 400 ℃까지도 거의 무시할만한 수준으로 저장용기 내 트리튬 분압을 형성하지 않기 때문에 외부 유출이나 용기벽 확산은 없다. 저장재의 온도는 이보다 훨씬 낮고 주변 2차 저장용기나 단열재의 열적 건전성이 충분히 유지됨을 알 수 있다. 1차 저장용기 내 트리튬 붕괴열은 운반용기 외부에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서, 현재 제작된 저장용기와 운반용기는 열적 안전성 측면에서 붕괴열에 대한 부분에 있어서도 운반 중에는 안전성을 확보하고 있다고 판단할 수 있다.

② 저온조건

저온조건은 주변온도가 -40 ℃에서 태양 복사열이 없는 경우이며, 이때 내부 트리튬의 붕괴열이 없다고 가정하면 가장 보수적인 조건이 된다. 이 상태가 오랫동안 지속된다면 운반용기 모든 부위의 온도가 -40℃ 가 될 것이며, 이 경우에도 운반용기를 이루는 재료들의 열적 건전성에는 하등의 문제가 없는 것으로 판단된다.

나. 운반사고조건에 대한 열평가

과학기술부고시 제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제45조 제1항 2호에는 운반 사고조건에 대한 열시험 항목이 명시되어 있다. 운반용기는 제26조제3호의 별표의 규정에 의한 일광조건과 방사성내용물로 인한 내부 발생열의 최대설계조건에서 섭씨 38도의 주위온도조건 및 열적 평형상태에 있는 시험물을 섭씨 800도의 화재환경에 30분간 노출된 후 자연 냉각하도록 하고 있다. HEATING 7 코드를 이용하여 트리튬 운반용기의 운반사고조건에 대한 열평가를 수행하였다.

가장 보수적인 경우를 평가하기 위하여 가상화재 사고조건 해석을 위한 초기조건으로 주변 온도가 38 ℃에서 최대의 태양 복사열이 용기표면에 흡수되는 경우의 고온 조건에서 7일간 방치한 경우를 열적 정상상태의 초기조건으로 하였다. 그리고 용기 내부 완충제인 폴리우레탄폼이 타서 없어지고 3M 단열재 외벽이 직접 800 ℃ 화염이 닿는 경우의 보수적인 조건으로 가정하여 해석을 하였다. 고온조건에서 정상

상태의 온도를 구한 후, 이 온도를 열적 평형상태인 초기조건으로 가정하여 화재사고시 시간 변화에 따른 과도상태(transient state)에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 11은 초기 143 ℃에서 열적 평형상태에 있는 운반용기의 3M 단열재가 직접 800 ℃의 화재 온도상태에 30분 노출된 후 자연 냉각되는 가상 화재사고 조건의 경우를 모사하였다. 운반용기의 3M 단열재의 외부 온도는 화재가 종료되는 시점인 30분에서 780 ℃ 정도의 피크 온도를 보여준다가 시간이 지남에 따라 냉각되었다. 그러나 내부 저장용기 및 티타늄 저장재의 온도는 200 ℃를 조금 상회하는 수준으로 평가되었다.

결과를 살펴보면, 저장용기와 저장재의 경우 거의 비슷한 온도 변화를 나타내고 있으며 초기 온도 143 ℃의 열적 평형상태에서 30분간의 화재조건을 지나 약 2시간이 경과한 후에는 약 200 ℃ 이하로 자연 냉각되는 것으로 나타났다. 내부 쉘 외부의 경우를 보면, 외부 온도의 영향으로 30분의 시간이 경과한 후 약 300 ℃ 정도 부근까지 상승하는 것을 볼 수 있고, 3M 단열재 외부는 30분 후 자연 냉각되어 2시간 후에는 약 80 ℃ 정도까지 냉각됨을 보여주고 있다. 이러한 결과만을 고려한다면, 운반용기의 단열 효과는 급격한 온도 변화에서도 1차 및 2차 저장용기를 안전한 300 ℃ 이하 온도 범위 내에서 유지할 수 있는 결론을 얻을 수 있다.

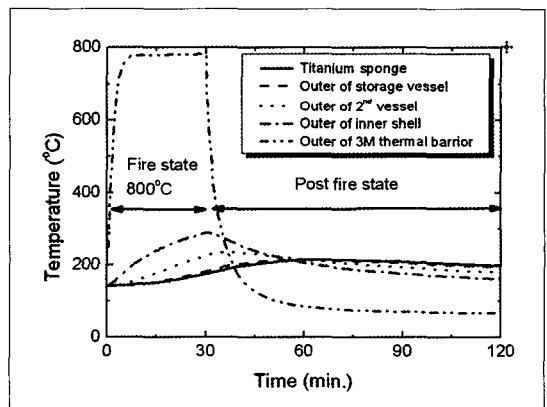


Fig. 11. The temperatures changes of container components during 30 min, 800 ℃ test and natural cooling after that

## VI. 격납 평가

운반 대상물인 1차 저장용기는 그 자체로 고온 고압조건에서 방사성 물질의 누설되지 않도록 설계된 것으로서 1차 격납경계를 형성한다. 1차 저장용기에 대하여 ASME SEC VIII Revision 2, Alternative Rules Part AT(ARTICLE T-4, Pneumatic Tests)의 규정에 따라 용기의 내압성 및 기밀성 시험을 각각 수행하여 밀봉확인 및 누설이 없는 것으로 확인된 것이다[6].

정상운전 조건에서는 1차 저장용기에서 트리튬의 평형압력은 극도로 낮은 수준이므로 압력 차에 의한 2차 용기로의 유출은 거의 일어나지 않는다. 다만 수소 분위기와 접하고 있는 금속은 그 표면에 용해되어 금속내부로 농도차에 의한 확산에 의해 2차 용기 내부로 유출을 고려할 수 있다. 이들의 확산계수를 Table 1에 나타내었다. 그러나 앞서 언급된 실온에서 1차 저장용기 내에 형성되는 트리튬의 분압이나 용기 재료내 확산계수는 극도로 낮은 수준이므로 용기 금속을 통한 확산은 일어나지 않는다. 따라서 2차 격납 경계인 2차 저장용기 내부에서 트리튬 형성은 무시할 수 있다. 따라서 2차 격납 경계인 2차 용기의 주요 역할은 방사성 물질의 격납보다 물리적인 완충과 단열을 할 수 있는 1차 용기의 보호기능을 담당한다고 할 수 있다.

2차 격납공간을 제공하는 2차 저장용기의 개폐는 막음 플랜지를 통하게 되며, 밀봉은 금속 O-링으로 한다. 금속 O-링의 사용압력범위는 초진공(Ultra High Vacuum) ~ 4100 bar(60000 psi)이며, 공인 씰링성능(Sealing Performance)은 헬륨 기체 누설을 기준으로  $Q < 10^{-9}$  Torr, Liters, s<sup>-1</sup>(Q: leak rate)이다. 격납 용기의 모든 연결부는 용접되었으며, 모든 용접은 ASME sec. IV[7]에 부합되도록 하였다.

록 하였다.

## 가. 정상운반 조건에 대한 격납평가

방사성물질 수송시스템에서의 격납은 공공의 건강에 영향을 미칠 수 있는 방사성물질의 방출을 방지하기 위해 매우 중요하다. 따라서 과기부 고시 제 2001-23호, IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1 및 10 CFR Part 71에서는 방사성물질을 운반하기 위한 수송시스템은 방사성물질을 운반하는 동안 안전성 문제를 야기하지 않도록 격납 시스템을 설계하고 평가하여야 한다고 명시하고 있다. 미국규격인 ANSI N14.5와 국제규격인 ISO 12807에서는 격납 평가에 대한 절차를 기술하고 있다. 따라서, ANSI N14.5 및 ISO 12807의 규정에 따라 트리튬 500 kCi를 운반하는 경우에 대한 격납 평가를 수행하였다.

### ① 허용 누설률

격납 평가를 수행하기 위해 국내·외 관련법규에서 규정하고 있는 트리튬(H-3)의 A<sub>2</sub> 값은  $1.08 \times 10^3$  ci이다. 따라서, 방사능의 허용 방출률(RN)은 식 (1)로부터  $3.0 \times 10^{-7}$  ci로 계산되었다.

$$R_N = A_2 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3600} \text{ ci} \quad \dots\dots\dots (1)$$

허용 누설률은 단위 시간당 격납 경계로부터 누설되는 유체의 허용 체적이므로 단위 체적 당 방사능 농도로부터 결정된다. 트리튬 운반용기의 격납 경계는 트리튬을 티타늄 트리타이드 형태로 고정하여 저장하고 있는 1차 저장용기이다. 저장용기의 내부 체적은 6,500 cm<sup>3</sup>이고, 티타늄 트리타이드의 체적은 6,322 cm<sup>3</sup>이므로, 저장용기의 자유체적(V<sub>N</sub>)은 178 cm<sup>3</sup>이다.

트리튬 1차 저장용기 내 트리튬은 크기 2~12 mm

Table 1. Diffusivity and solubility constant of hydrogen in a stainless steel

	Equation	Pre-exponential	Activation energy
Diffusivity, cm <sup>2</sup> /s	$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right)$	$D_0$	$E_D$
		$8.17 \times 10^3$	-55,990
Solubility constant, cm <sup>3</sup> /(cm <sup>3</sup> Pa <sup>1/2</sup> )	$S = S_0 \exp\left(-\frac{E_S}{RT}\right)$	$S_0$	$E_S$
		$3.36 \times 10^3$	-7,213

정도의 티타늄에 티타늄 트리타이드 형태로 고정되어 있으며, 시간에 따라 티타늄 트리타이드 내의 트리튬은 β 붕괴하여 <sup>3</sup>He 기체를 일부 방출하게 된다. 그러나 <sup>3</sup>He 기체는 방사성물질이 아니므로 격납 평가에 있어 고려하여야 할 방사성물질은 트리튬 단일 핵종뿐이다.

티타늄 트리타이드는 상온에서는 완전한 고체로 볼 수 있지만, 온도가 상승함에 따라 트리튬을 기체 상태로 방출하게 된다. 따라서, 온도에 따른 트리튬의 발생량 및 방사선량은 Table 2에 나타내었으며, 단위체적 당 방사능 농도(C<sub>N</sub>)은 식 (2)로부터 6.5 × 10<sup>-18</sup> ci/cm<sup>3</sup>로 계산되었다.

$$C_N = \frac{RI_{TN}}{V_N} \text{ ci/cm}^3 \dots\dots\dots (2)$$

따라서, 트리튬 500 kCi를 운반할 경우 허용 누설률(L<sub>N</sub>)은 식 (3)으로부터 4.6 × 10<sup>10</sup> cm/s로 평가되었다.

$$L_N = \frac{R_N}{C_N} \dots\dots\dots (3)$$

**② Reference Helium Leak Rate**

단위체적당 허용 누설률(L<sub>N</sub>)은 운반용기의 압력 및 온도에 의존한다. 따라서, 누설시험을 수행하기 위해서는 허용 누설률은 reference air 또는 helium leak rate로 변환되어야 한다.

운반용기의 누설시험은 helium leak test로 수행한다. 따라서, reference helium leak rate를 산출하였다.

Helium leak test에서의 stream은 up-stream 조건이므로 reference helium leak rate(L<sub>he</sub>)는 식 (4)에

의해 2.9 × 10<sup>6</sup> cm/s로 평가되었다.

$$L_{he} = (F_c + F_m) (P_u - P_d) (P_a/P_u) \text{ cm}^3/\text{s} \quad (4)$$

$$F_c = (2.49 \times 10^6 \times D^4) / \mu \text{ cm}^3/\text{atm} \cdot \text{s} \quad \dots (5)$$

$$F_m = [3.81 \times 10^3 \times D^3 (T/M)^{0.5}] / a P_a \text{ cm}^3/\text{atm} \cdot \text{s} \quad (6)$$

여기서, F<sub>c</sub> : coefficient of continuum flow

F<sub>m</sub> : coefficient of free molecular flow

P<sub>u</sub> : fluid up-stream pressure

P<sub>d</sub> : fluid down-stream pressure

P<sub>a</sub> : average stream pressure

a : leakage hole length

D : leakage hole diameter

μ : fluid viscosity

M : molecular weight

T : fluid absolute temperature

**나. 운반사고 조건에 대한 격납평가**

**① 허용 누설률**

격납 평가를 수행하기 위한 사고조건에서의 방사능의 허용 방출률(R<sub>A</sub>)는 식 (7)로부터 1.7 × 10<sup>3</sup> Ci로 계산되었다.

$$R_A = A_2 \times 10^{-6} \times \frac{1}{86400} \times \frac{1}{7} \text{ ci} \quad \dots (7)$$

허용 누설률은 단위 시간당 격납 경계로부터 누설되는 유체의 허용 체적이므로, 단위 체적 당 방사능 농도로부터 결정된다. 따라서 1차 저장용기 내의 방사선량이 얼마나 되는가 하는 것은 매우 중요하다.

**Table 2. Temperature dependance of a tritium releasing and the equivalent radioactivity from a titanium tritide**

온도 °C(K)	트리튬 발생량 (mole)	방사선량 (Ci)	온도 °C(K)	트리튬 발생량 (mole)	방사선량 (Ci)
25(298)	2.05 × 10 <sup>-20</sup>	1.15 × 10 <sup>-15</sup>	400(673)	5.17 × 10 <sup>-05</sup>	2.91
50(323)	2.92 × 10 <sup>-18</sup>	1.85 × 10 <sup>-13</sup>	500(773)	1.87 × 10 <sup>-03</sup>	1.05 × 10 <sup>02</sup>
100(373)	7.94 × 10 <sup>-15</sup>	4.48 × 10 <sup>-10</sup>	600(873)	2.94 × 10 <sup>-02</sup>	1.66 × 10 <sup>03</sup>
200(473)	3.73 × 10 <sup>-10</sup>	2.11 × 10 <sup>-05</sup>	700(973)	2.59 × 10 <sup>-01</sup>	1.46 × 10 <sup>04</sup>
300(573)	3.96 × 10 <sup>-07</sup>	2.23 × 10 <sup>-02</sup>	800(1,073)	1.51	8.49 × 10 <sup>05</sup>

티타늄 트리타이드로부터 발생하는 트리튬은 표 2에서와 같이 온도에 의존하므로, 방사선량이 얼마나 되는지 알기 위해서는 저장용기 내의 기체 온도가 얼마인지 알아야 한다.

트리튬 운반용기는 사고조건 시 1차 저장용기 표면의 온도는 200 ℃ 이하이다. 그러나, 격납평가에서는 보수적인 평가를 위하여 200 ℃에서 발생하는 방사선량을 적용하였다.

트리튬 운반용기의 격납 경계인 저장용기의 자유 체적(VA)는 178 cm<sup>3</sup>이므로, 단위체적 당 방사능 농도(CA)는 식 (2)와 표 2로부터  $2.5 \times 10^{-12}$  ci/cm<sup>3</sup>로 계산되었다.

따라서, KT-500 수송용기에 트리튬 500,000 ci를 운반할 경우 허용 누설률(L<sub>A</sub>)는 식 (3)으로부터  $1.2 \times 10^5$  cm<sup>3</sup>/s로 평가되었다.

### ㉓ Reference Helium Leak Rate

운반용기의 압력 및 온도에 의존하는 단위체적당 허용 누설률(L<sub>A</sub>)는 누설시험 수행 시의 허용 누설률인 reference helium leak rate로 변환하였으며, reference helium leak rate(L<sub>he</sub>)는 식 (4)에 의해  $9.2 \times 10^6$  cm<sup>3</sup>/s로 평가되었다.

## VII. 방사선차폐 평가

과학기술부고시 제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제22조 운반용기의 일반기준 14항에서는 운반이 가능한 최대수량이 들어 있을 때 운반용기 외부표면에서의 방사선량률은 시간당 2밀리시버트를 초과하지 아니하고 전용운반의 경우에는 시간당 10밀리시버트를 초과하지 아니하도록 하고 있다. 또한 제2001-23호 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 제26조(B(U)형 운반용기의 기술기준 제6항에서는 가상사고조건을 수행 한 후, 외부표면으로부터 1미터 지점에서 방사선량률이 시간당 10밀리시버트를 초과하지 아니하도록 하고 있다. 이에 트리튬 운반용기는 위의 규정을 준수할 수 있는지 평가하였다.

방사선 차폐평가는 트리튬 운반용기의 방사선 분포를 계산하고 결정하는 것에 기초한다. 트리튬 운반용기에서 누출되는 방사선에 대한 차폐 특성 및 용기

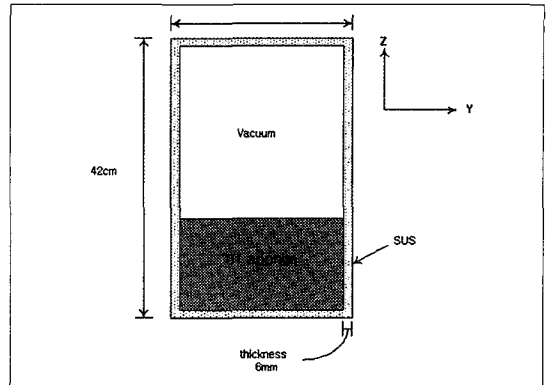


Fig. 12. Shielding model for a tritium storage vessel

표면의 방사선량을 계산하기 위해 MCNP 방사선 차폐용 전산코드를 사용하였다[8].

운반대상물인 트리튬 1차 저장용기는 모양이 원통 형태를 띠기 때문에 Fig. 12와 같이 원통으로 가정했다. 원통형 차폐모델의 크기는 지름 16.5cm 에 높이 42cm로 실제 1차 저장용기의 크기에 가깝게 설정하였다. 1차 저장용기의 재질은 STS316L이다. 용기내의 방사선량은 500 kCi의 트리튬을 저장하는 것으로 가정하고 코드 작업시에 입력변수로서 사용하였다. 트리튬 붕괴 과정에서 발생하는 방사선은 β-ray이다. 따라서 본 계산에서도 방사선의 에너지와 종류를 트리튬에 맞도록 설정해서 코드 작업을 수행하였다.

본 계산 결과에서 트리튬에서 발생된 β-ray 선량은 저장용기 외부 표면에서 0으로 계산되었다. 일반적으로 감마선 방출 핵종을 저장 및 운반하는 용기에 대해서는 이러한 외부 피폭에 관련된 차폐계산이 중요하게 고려되어야 한다. 하지만 트리튬은의 경우에서는 비교적 약한 베타선을 방출하기 때문에 외부피폭에 의한 영향은 무시될 수 있을 것으로 보여진다.

1차 저장용기 밖으로 방출되는 방사선량이 없으므로 운반용기 전체에 대한 차폐평가는 무시한다.

## VIII. 결론

월성 원자력 발전소의 TRF 시설에서 수집된 트리

트륨을 metal hydride 형태로 보관하고 있는 500 kCi급 트리튬 1차 저장용기를 발전소 밖의 폐기물 저장고로 안전하게 운반하기 위하여 트리튬 운반용기를 개발하였다. 방사능의 양으로 분류되는 운반용기의 규격은 국내 원자력법 과학기술부고시 제2001-23호에 의거하여 B(U)형 운반용기로 분류하였으며, B형 운반용기의 기술기준을 적용하여 구조평가, 열평가, 방사선차폐평가, 격납평가 등을 수행하여 운반용기의 안전성을 분석하였다.

정상운반조건에 대한 구조평가 항목으로 1.2 m 자유낙하시험, 적층시험 및 관통시험 조건에 대해 평가하였으며, 운반사고조건에 대한 구조평가 항목으로는 9 m 자유낙하시험, 1 m 봉위 낙하시험 및 15 m 침수 조건에 대해 평가하였다. 사고조건에 대한 해석은 FEM 해석용 프로그램인 ABAQUS Version 5.8을 사용하였다. 그 결과, 트리튬 운반용기는 정상운반조건 및 사고운반조건에서도 격납 경계가 손상되지 않는다고 평가되었다.

붕괴열로 인한 운반용기 내부 저장용기의 온도상승은 주변 환경 섭씨 38 °C에서 Fourier's law를 적용한 수치해석 결과, 원통형 모델에서는 섭씨 134. °C로 나타났으며, 쉘형 모델에서는 110.9 °C로 나타났다. 또한 HEATING 7 코드를 이용한 열전달 해석 프로그램에서는 약 98 °C로 나타났다.

정상운반조건에 대한 열 평가에서는 쉘형 모델을 이용하여 계산한 결과, 외부환경 -40 °C에서는 섭씨 32.9 °C, 외부환경 70 °C에서는 섭씨 142.9 °C로 나타났다. 운반사고조건에 대한 열 평가로서 800 °C 외부환경에 30분간 노출되었을 경우에는 단열재만의 열차폐를 고려하여 계산한 결과, 약 405 °C로 나타났다. 이상과 같이 열 평가 결과, 트리튬 운반용기는 정상운반조건 및 사고운반조건에서의 내부 온도 상승은 1차 격납 경계인 1차 저장용기의 허용 온도인 550 °C에도 미치지 못하였다.

격납 차폐 평가에서도, 1차 격납 경계인 1차 저장용기는 트리튬의 평형압력은 극도로 낮은 수준이므로 압력 차에 의한 2차 용기로의 유출은 거의 일어나지 않는다고 판단되었다. 사고조건인 800 °C의 외부환경에 노출된 경우, 2차 격납 경계인 2차 용기는 최

대 400 °C 가까이 온도가 상승할 수 있으며, 이때 최대 내부압력은 2.2기압 정도이다. 2차 저장용기의 설계압력이 1.5 MPa@38 °C이며, 최고허용온도가 400 °C이므로 가상사고에서도 충분히 운반용기의 격납 성능을 유지할 수 있다고 판단되었다.

트리튬 운반용기에서 누출되는 방사선에 대한 차폐 특성 및 용기 표면의 방사선량을 계산하기 위해 MCNP 방사선 차폐용 전산코드를 사용하여 계산한 결과, 트리튬에서 발생된  $\beta$ -ray 선량은 1차 저장용기 외부 표면에서 0으로 계산되었다. 따라서  $\beta$ -ray는 1차 저장용기 벽을 투과하지 못하는 것으로 나타났으며, 트리튬 운반용기는 방사선차폐에는 전혀 이상이 없는 것으로 나타났다.

이밖에 트리튬은 핵연료물질이 아니며, 핵분열성 물질의 면제기준에 해당되어 핵임계평가는 제외하였다.

이상과 같이 500 kCi 급 트리튬 운반용기에 대한 안전성을 평가한 결과, 운반사고조건에서도 트리튬 운반용기는 전혀 이상이 없는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] 과학기술부령 제17호 “방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙”
- [2] 과학기술부고시 제2001-23호 “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”
- [3] IAEA Safety Series No.37 “Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of radioactive Material”.
- [4] 이주찬 외 10인, “KRI(B)-2 운반용기 안전성 분석보고서” KAERI-NEMAC/TR-20-94
- [5] K. W. Childs, G. E. Giles, C. B. Bryan and C. K. Cobb, “Heating: a Computer Program for Multidimensional Heat Transfer Analysis (Version 7.2), Sect. F10 of SCALE: a Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R3, Martin Marietta Energy Systems, Inc., Oak Ridge Natl. Lab., February (1990).

- [6] ASME boiler and pressure vessel code Sec VIII  
Division 2 - Alternative Rules.
- [7] ASME boiler and pressure vessel code Sec IV -  
Rules for Construction of Heating Boilers.
- [8] J. Briesmeister, MCNP, a general Monte Carlo code  
for neutron and photon transport, version 3A, LA-  
7396-M, Rev. 2, Los Alamos National Laboratory  
and Summary of MCNP Commands, Version 4.2,  
LANL Draft (1991).