

액체형 방사성물질 운반용기의 관통조건에 대한 구조해석 및 시험

Structural Analysis and Test for Penetration Condition of Transportation
Cask Loaded the Liquid Radioactive Material

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

요 약

방사성물질 운반용기에 대한 국내 법규는 최근에 A형 운반용기의 설계기준에 대한 추가항목을 포함하여 개정되었다. 이러한 용기들은 살수, 적층, 낙하 및 관통조건에 대한 설계기준을 만족하여야한다. 얇은 셸을 가진 운반용기의 관통시험은 액체형 방사성물질을 적재하는 경우에 다른 시험조건에 비해 더욱 심각한 경우가 될 수 있다. 이 논문은 관통조건에 대한 개정된 설계기준을 만족시키기 위해 구조 해석과 안전성시험을 수행하였으며 적절한 시험 방법을 제시하였다.

Abstract

Domestic regulations for radioactive material cask were changed recently with the additional requirements to the design criteria of the A type casks. These casks should satisfy the design criteria for the water spray, stacking, drop and penetration condition. Penetration test for cask with thin shell is to be more severe case than the other test in the case of loading liquid radioactive material. This paper describes that the structural analysis and safety test were performed under the penetration condition in order to confirm the new design criteria and the adaptable test methods are suggested.

1. 서론

방사성물질 운반용기의 관련 법규가 96-38호에서 2001-23호 혹은 IAEA ST-1으로 변경됨에 따라 개정된 규정에 대한 평가를 필요로 한다. 특히, 액체형 운반용기의 관통조건에 대한 평가에 있어 시험조건 규정은 변경되지 않았으나, 그에 대한 평가기준과 격납경계에 대한 기술기준 등이 추가되어 있다. 1), 2)

과기부고시 2001-23호에서 A형 운반용기의 시험조건은 정상운반조건을 견딜 수 있는 능력을 증명할 수 있는 시험을 수행하여야 한다. 그 시험의 순서는 살수시험을 수행한 후에 낙하시험, 적층시험 및 관통시험을 수행하도록 되어 있다. 살수시험은 운반용기에 한 시간동안 5 cm/hr 양의 물로 적시어 다른 연속적인 시험 전에 운반용기가 충분히 흡수된 상태를 요구하는 것으로 운반용기 외부에 철재로 만들어진 경우에 물 흡수가 안되므로 필요가 없으며, 특히, 액체형 및 기체형 운반물은 살수시험을 요구하지 않는다. 따라서, 외부가 철재로 만든 액체형 운반용기는 살수시험 없이 독자적인 관통시험이 가능하다. 본 논문은 액체형 운반용기의 관통조건을 해석적 방법과 시험적 방법으로 평가하였으며, 운반용기의 건전성 평가측면에서 방사성물질의 손실과 분산에 대한 평가기준을 시험적으로 제시하였고, 차폐손실에 대한 해석적 및 시험적 평가를 수행하였다.

2. 액체형 방사성물질 운반용기의 관통조건에 대한 구조해석

2.1 액체형 운반용기의 구조 및 관통조건

과기부고시 2001-23호의 개정된 내용에서 액체형 운반용기의 구조에 대해 다음과 같이 명시하고 있다. 운반하는 방사성물질이 액체상태인 경우 2 가지 형태의 운반용기 내부구조를 가질 수 있으며, 첫째로 액체상태의 방사성내용물 체적의 2배를 흡수할 수 있는 충분한 흡수재를 갖추어야 하며, 흡수재는 누출이 발생할 경우 액체와 용이하게 접촉하도록 최적의 장소에 위치하여야 한다. 둘째로 1차 내부 및 2차 외부의 격납으로 이루어진 격납계통을 갖추어야 하며, 1차 내부격납에서 누설이 발생하면 2차 외부격납 안에서 액체 내용물을 확실히 유지할 수 있어야 한다.

현재 관통 조건에 대한 구조해석 평가할 운반용기의 구조는 내부로부터 주사약병(vial), 납 차폐체, 스트로폼 및 주석 강통으로 구성되어 있다. 주사약병은 고무마개와 이를 고정시키는 알미늄 캡으로 봉인되므로 crimping 혹은 rolling 형식의 조임장치를 사용한 1차 격납 계통이 된다. 주사약병은 납 차폐체에 놓이지며 납 차폐체의 뚜껑과 용기는 접착 테이프 형식의 조임장치로 고정되어 2차 격납계통으로 간주 될 수 있다. 납 차폐체는 다시 스트로폼에 놓이지고, 최종적으로 주석 강통에 조립된다. 주석 강통도 마찬가지로 접착 테이프로 고정된다.

일반적인 정상운반에서 관통조건은 시험물을 움직이지 않도록 단단하고 편평한 수평면

위에 고정시켜 놓은 후, 적합한 강봉으로 격납 계통을 타격하며 봉을 시험물로부터 1미터 높이에서 시험물의 가장 약한 부분의 중심부위에 수직으로 낙하시키는 것이다. 강봉의 특징은 직경이 3.2센티미터이고 중량이 6킬로그램이며, 타격하는 부분이 반구형으로 타격으로 인하여 변형되지 않도록 되어있다. 특히, 액체형 및 기체형 운반물의 경우는 낙하 및 관통조건에 대한 추가시험이 있다. 액체형 운반물의 관통조건에 대한 추가시험은 강봉의 크기, 형상 및 무게는 동일하지만 강봉의 낙하높이가 1.7 m로 상승되어있다.

2.2 관통 충돌에서 원형 평판의 구조계산

고전적 해석방법인 Rorak의 평판에 대한 처짐 방정식은 보수적 결과를 얻기 위해 전단 강도를 고려하지 않은 근사해의 식은 아래와 같다. 3)

$$d = d_{\max} \left[1 + \left\{ 1 + 2 \left(\frac{H}{d_{\max}} \right) \right\}^{0.5} \right]$$

d : 타격봉의 충격하중에 의한 수직 변형

d_{\max} : 정적하중으로 적용된 타격봉의 중량으로 인한 수직 변형

H : 타격봉의 낙하높이 170 cm

$$d_{\max} = \frac{3W(m-1)(3m+1)a^2}{4\pi E m^2 t^3}$$

W : 강봉의 중량 6 kg

ν : 프와송 비 0.3

$$m = \frac{1}{\nu} : 3.333$$

a : 타격할 원판의 반경 5.35 cm

E : 타격할 원판의 탄성계수 $1.01E6 \text{ kg/cm}^2$

t : 타격할 원판의 두께 0.03 cm

여기에서 구한 d_{\max} 는 3.5 cm 이며, d 값은 38.2 cm 이다. 이 식에 따른 액체형 운반물의 처짐량 계산은 상당히 과도하게 평가되고 있어, 이 식의 적용은 주석 깡통 형상의 얇은 평판에 적용되는 것이 아니라, 두꺼운 평판의 관통 충돌의 처짐량 계산에 적용하여야 한다. 그밖에 다른 처짐 계산식이 있지만 변형에 대한 정확한 예측과 차폐체의 건전성 등을 평가하기 위해 소성변형을 고려한 동적 전산해석이 필요하다.

2.3 관통조건의 전산해석

관통조건의 전산해석을 위해 운반용기의 길이 방향에 따른 1/2 형상과 수직 관통자를 모델링하였다. 수직 관통 조건은 길이 방향의 축에 따라 축 대칭이 되므로, axisymmetric

element를 적용하였다. 부품으로 납 차폐체, 스트로폼, 관통자 및 주석깁통만 모델링하였고, 주사약병은 구조적 영향이 적으므로 제외 시켰다. 전산해석은 동적 소성해석에서 일반적으로 사용하고 있는 ABAQUS/EXPLICIT 6.31에서 수행하였다. 모델은 그림 1과 같이 주석깁통은 두께가 0.3 mm로 2차원 solid 요소를 적용할 수 없으므로, 쉘 요소로 적용하였다. 구속 조건은 관통자의 수직 방향 낙하이므로 절단 단면에 대해 수평방향은 구속시키지 않았으며, 수직방향은 구속시켰으며, 운반용기의 바닥면은 강체 위에 놓이도록 하였다. 운반용기의 각 부품은 내부 납 차폐체를 스트로폼에 넣고, 다시 스트로폼은 주석깁통에 넣었으므로, 각 부품의 상호관계상 구속요소가 없으므로 하중방향에 따라 각 모델 요소가 관통하지 않도록 접촉면(contact surface)을 지정하였다. 하중조건은 관통자의 1.7 m 자유낙하에 대한 충돌 순간의 초기 속도 5.772 m/s로 적용하였다.

주석깁통 및 납 차폐체의 항복강도는 일반적인 자료에서 제시하고 있는 240 MPa 및 150 MPa으로, 또한 소성변형은 강소성으로 가정하였다. 일반적으로 불리우는 주석깁통은 실제적으로 강관에 주석도금을 한 경우이므로 일반 탄소강의 기계적 특성치로 사용하였다. 관통조건 평가에서 제일 중요한 기계적 특성치가 필요한 스트로폼은 관통자의 낙하에너지를 충격완충을 하여 관통 에너지를 소멸시키는 재질로서 소성변형률에 대한 소성 응력이 필요하므로 이에 대한 실험을 수행하여 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. 스트로폼의 true stress-strain

순번	true strain (mm/mm)	true stress (MPa)
1	0.062	2.320
2	0.115	3.537
3	0.340	7.153
4	0.457	11.490
5	0.543	18.781
6	0.583	29.957
7	0.619	44.581
8	0.640	70.808

구조해석은 관통 순간의 15 msec 구간에 대해 수행하였으며, 최대 변형을 나타나는 순간은 관통 충돌 후 7.5 msec에서 발생하였다. 납 차폐체의 건전성평가는 충돌 기간 동안 최대 응력이 나타나는 응력분포를 평가하였으며 그림 2와 같다. 충격거동의 형상변화와 응력은 그림 3과 같이 운반용기 상부 쉘의 충돌, 쉘의 변형 후 다시 충격완충체인 스트로폼의 충돌과 스트로폼의 최대변형 순간에서 전체의 응력분포를 나타내었다. 하중조건에

대한 검증을 위해 관통충돌에 대한 전체에너지를 평가하기 위해 그림 4와 같이 계산되었으며, 해석과 실험의 결과 비교를 위해 상부 쉘의 변형량은 그림 5와 같이 평가되었다.

3. 관통조건에 대한 시험

3.1 시험모델 및 절차

액체형 방사성물질 운반용기의 부품은 그림 6과 같이 주사약병, 납 차폐체, 스트로폼 및 주석깁통 등이 있다. 관통시험은 그림 7과 같이 단단한 강판위 운반용기를 놓고, 중량 및 크기 측정을 수행한 강봉을 준비하였다. 해당 높이에서 관통시험 순서는 운반용기의 각 구성품에 대한 치수 검사, 중량 측정, 시험 전 누설시험, 조립 및 치수검사, 관통시험, 외관 및 치수검사, 누설시험 및 중량측정으로 진행한다. 치수검사는 주석깁통 및 납 차폐체의 변형량이 중요하며 납 차폐체의 변형량은 차폐손실로 인한 방사선량률 20% 감소량에 대한 평가 자료로 활용된다. 누설여부의 가시적인 확인을 위해 주사약병 내부에 액체형 방사성물질 대신에 빨간색 물을 넣었다. 중량 측정은 전체 조립의 중량도 중요하지만 주사약병의 중량을 정밀하게 측정하여 누설시험 전후의 변화량 확인에 초점을 둔다. 누설시험은 vacuum bubble 시험형식으로 에틸렌글리콜 액체에 주사약병만을 넣어 진공 감압상태를 유지하여 A형 일반기준인 60 kPa 혹은 항공 운반기준인 5 kPa까지 떨어뜨린다. 이때에 1 차 격납 계통인 주사약병의 누설은 bubble 여부로서 정성적인 평가를 하고 누설시험 전후에서 주사약병의 중량을 측정하여 정량적으로 비교하였다. 관통시험은 운반용기를 수직과 수평자세로 단단한 강판에 고정시켜 놓고 운반용기의 최상단 부분과 강봉의 최하단 부분의 거리가 1.7 m로 되도록 한 후에 release 장치로 강봉을 자유낙하 시켰다. 관통시험은 운반용기의 자세를 수직방향과 수평방향으로 각각의 모델에 대해 수행하였으며, 변형 형상은 그림 8-11과 같다.

3.2 관통 시험의 격납경계 평가

관통조건에 대한 시나리오는 운반 내용물이 격납 계통으로부터 빠져나오지 않아야 되며, 금속 튜브 혹은 쓰러지는 자전거의 핸들 등의 기다란 물체가 운반용기의 바깥 층을 가격하거나 관통한다면 차폐체 혹은 격납 계통이 손상되지 않는 것을 관통시험을 통해 확인하는 것이다.

과기부고시 2001-23호에서 A형 운반용기의 기술기준에서 명시된 바와 같이 격납계통의 부분으로 지정된 운반용기의 구성품을 둘러싸고 있는 방사선 차폐체는 차폐체로부터 구성품이 이탈하는 것을 방지할 수 있어야 하며, 방사선 차폐체와 내부의 구성품이 각각 분리된 별개단위로 이루어져 있는 경우에 방사선 차폐체와 격납계통은 독립적인 강력한 조임장치로 운반용기의 구조물에 안전하고 견고하게 고정하여야 한다. 또한, 격납계통은 주위압력이 60 kPa의 계기압력까지 감소되어도 방사성내용물을 유지할 수 있어야 한다. 이

러한 격납 계통의 조임장치가 의도적이 아닌 방법 혹은 운반용기 내부의 압력 상승으로 열리지 않도록 설계되어야 한다. 조임장치의 예는 용접, 나사, snap-fit lid, crimping, rolling, peening, 열수축 및 접착 테이프 혹은 접착제 등이 있다.

정상운반조건의 시험을 거친 후에 평가기준으로서 방사성내용물의 유실 또는 분산이 없으며, 외부표면에서의 방사선량률이 20퍼센트 이상 증가할 수 있는 차폐능력의 상실이 없는 기준에 적합할 것으로 되어있다. 평가기준에 해당하는 방사성내용물의 유실 또는 분산이 없다는 것은 정성적인 사항이다. 따라서, IAEA ST-2에 제시한 바에 따르면, 고체, 분말 및 액체형 운반물에서 방사성내용물의 유실 또는 분산이 없는 것에 대한 요구항목을 만족시킬 수 있는 한가지 방법은 진공시험 혹은 운반물의 유출을 가시적으로 판단할 적절한 시험을 수행함으로써 운반용기를 검사하는 것이다. 액체형 운반물에서는 내부 흡수재를 시험의 척도로서 사용될 것이다. 그 다음에 외관검사는 운반용기의 건전성 유지와 누설 발생 여부를 조심스럽게 확인한다. 또 다른 적절한 방법은 누설 발생여부를 결정할 진공시험의 전후에 운반용기의 무게를 측정하는 것이다. 방사성물질의 유실 또는 분산에 대한 평가는 진공시험과 무게 측정이 정성적이지 않고 정량적 평가가 될 수 있으므로 이를 채택하였다. 4)

4. 계산결과 및 토의

관통조건에 대한 구조해석의 결과는 먼저 하중조건의 정확성이다. 초기에너지는 관통자의 위치에너지와 같으며 그 값은 $mgh = 99.96 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이며, 전산해석의 입력조건에 대한 평가를 위해 그림 4와 같이 전체 에너지는 약 $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 으로 동일하게 평가되었다. 해석 방식에 있어 운반용기 부품의 접촉면 처리가 중요한 항목으로 그림 3과 같이 변형 순간과 각 부품사이의 접촉현상이 잘 진행되는 것이 중요하다.

관통 조건에 대한 법적 요구조건으로서 20% 이상의 차폐손실이 없어야 하므로 납 차폐체의 최대응력이 탄성범위에 있는가가 중요하다. 관통충돌 시 납 차폐체의 최대 응력은 84.65 MPa 로 순수한 납의 항복강도보다 낮게 계산되었으며, 변형도도 무시할 만큼 작게 나타났다. 시험결과와 비교하기 위한 해석결과로서 운반용기 상부 쉘의 변형도는 최대 28 mm 로 계산되었으며, 탄성회복 후 영구변형량은 약 18 mm 로 평가되었다.

관통시험은 수직과 수평에서 운반용기의 정확한 위치에 대한 타격은 이루어지지 않았다. 관통자인 강봉은 hoist와 release 장치에 매달려 있어 진자형태로 움직였으며, 바람의 속도가 0.5 m/s 이하에서 시험을 수행하였음에도 관통 중심 위치를 약간씩 벗어났다. 따라서, 뚜껑에 가하는 힘이 편중되어 1/2이상의 접착 테이프부분이 떨어졌으며, 구속상태를 벗어난 뚜껑은 예상보다 대변형을 일으키게 되었다. 특히 수평시험에서는 운반용기를 수평으로 놓았을 때 수평자세에서 뚜껑 부분의 돌출된 부분으로 인해 약간 기울기를 갖게 되어 초기 충돌 후 관통자가 미끄러지면서 최종적으로 길이 방향의 1/3 부분에서 최대 변형을 갖게 되었다. 시험의 정확성은 부족하였지만, 관통조건에서 최대손상을 가하도록

되어 있기 때문에 어느 시험조건이 가혹한 상태인지 여부는 평가를 하여야 한다. 법적 요구조건인 시험 결과는 운반용기의 건전성 유지를 위한 차폐체 손상여부와 주사약병의 누설여부이다. 차폐체는 운반용기의 수직 및 수평자세의 관통에서 전혀 손상되지 않았으며, 납차폐체 측면에서 보면 해석과 시험 모두 변형이 발견되지 않았으므로 관통조건에 대해 건전성을 유지한다고 판단된다. 주사약병은 상온에서 진공도 60 kPa 조건으로 vacuum bubble 시험을 통해 누설량이 발견되지 않았고, 시험전후의 주사약병 중량 변화도 발생하지 않았다. 해석 검증을 위한 시험모델의 치수검사는 수직낙하에서 운반용기 상부 쉘의 최대 손상 높이를 3.5 cm로 측정하였다. 이는 해석에서 시험결과와 같이 상부 쉘의 구속조건이 깨지지 않아 덜 변형되었기 때문이다.

5. 결 론

방사성물질 운반용기의 관련규정이 96-38호에서 2001-23호로 변경함에 따라 액체형 운반용기의 관통조건에 대한 해석 및 시험을 개정된 평가기준에 적용하였을 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 관통해석 방법에 대해 각 부품이 조립되어 있는 운반용기의 경우에 각 부품의 상호간의 접촉면 조건을 활용하여 해석평가가 가능하며, 운반용기 차폐체의 변형도에 대한 평가로서 차폐체에 대한 건전성 결과를 확인할 수 있었다.
- 관통조건 후 A형 평가기준에서 방사성물질 손실 및 분산에 대한 평가기준은 IAEA ST-2의 근거에 따라 진공시험으로 누설과 중량 평가함으로써 가능하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였음.

참고문헌

- 1) 과학기술부, 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정, 과학기술부 고시 제 2001-23호, 2001.
- 2) IAEA, Regulations for the safe transport of radioactive material, IAEA Safety Standard Series TS-R-1(ST-1), 2000.
- 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 Materials for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standard Series TS-G-1.1(ST-2), 2002.

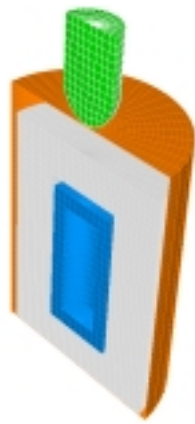


그림 1. 액체형 운반용기의 관통해석 모델.

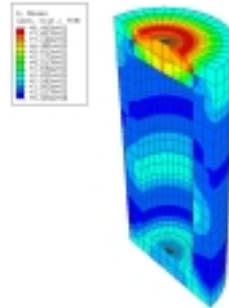


그림 2. 납차폐체 관통충격 응력분포.

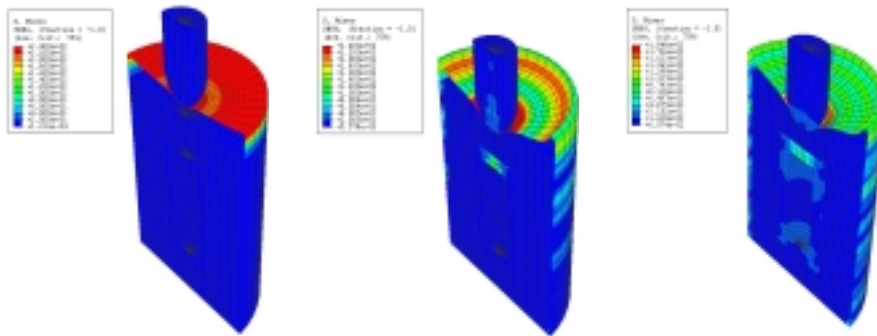


그림 3. 관통자의 충돌에 의한 운반용기의 변형 거동.

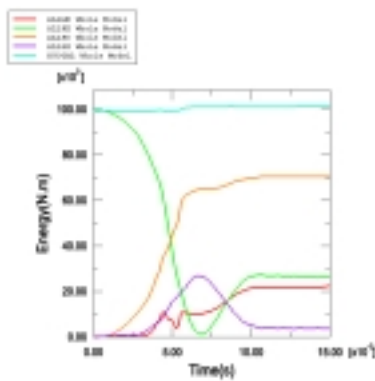


그림 4. 관통 충돌에 의한 전체에너지.

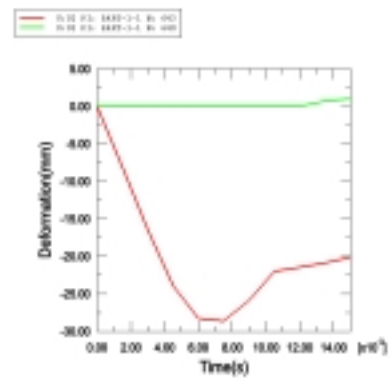


그림 5. 운반용기 상부의 변형량.



그림 6. 액체형 운반용기의 구성품.

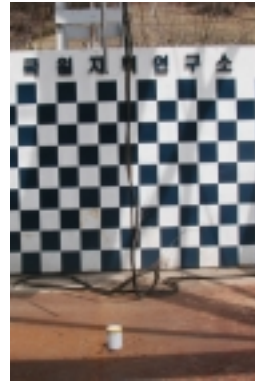


그림 7. 관통시험준비.



그림 8. 수직 관통에서 용기 변형.



그림 9. 수직 관통에서 용기 부품의 변형.



그림 10. 수평 관통에서 용기 변형.



그림 11. 수평 관통에서 용기 부품의 변형.