

방사성 동위원소 B형 운반용기  
적용을 위한 난연성 우레탄 열 시험

Thermal Test of Noncombustible Urethane  
for Applying to Type B Packages for Radioisotope

방경식, 이주찬, 서기석

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에서 생산되는 방사성 동위원소를 생산단계에서 소비단계까지의 유통체계를 확립하기 위해서는 방사성동위원소를 안전하게 운반하기 위한 운반용기를 개발하여야 한다. 따라서, 원자력연구소에서는 Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기를 개발하고 있다. B형 운반용기는 법규에서 규정하고 있는 800 °C 열 조건에서 30분 이상 동안 견딜 수 있는 능력을 갖추어야 하지만, 충격완충체로 사용된 폴리우레탄은 열에 매우 약한 특성을 갖고 있기 때문에 차폐체인 납의 용융점인 327 °C 이하로 유지시키기 매우 어렵다. 따라서, 난연성 우레탄 및 우레탄을 열로부터 보호할 수 있는 방화재들을 조합 적용한 시편을 제작하여 800 °C 열 조건에 대한 실험적 평가를 수행하였다.

Abstract

The package to safely transport the radioisotope, which is produced from HANARO, has to be developed to establish the distribution system of the radioisotope from production to consumption. KAERI is developing the type B package for Ir-192 600 ci. The type B package must be able to endure from thermal condition of 800 °C. However, it is very difficult that the polyurethane, which is used as shock absorber, is maintained less than 327 °C that is melting point of lead used as shielding material. Therefore, the specimens, which are applied noncombustible urethane and fireproof materials, are made. The experimental estimation for thermal condition of 800 °C was conducted.

1. 서 론

국내 방사성 동위원소(Radioactive Isotope)는 산업, 의료, 식품, 농업분야 등에 걸쳐

서 광범위하게 사용되고 있으며, 각 분야의 발전과 더불어 꾸준히 확대되는 추세로, 국내 방사성 동위원소 이용기관의 수가 1990년 698개 기관에서 2000년 1,692개 기관으로 약 2.5배 증가하였으며, 2001년에는 1,822개 기관으로 130개 기관이 증가하였다.

우리나라는 2010년까지 방사성 동위원소 관련 산업을 국가 중점사업의 하나로 육성하여 발전 대 비발전 비중을 매출액 기준으로 7:3의 수준으로 증대시키기 위하여, 방사성 동위원소의 안정적 생산 기반을 구축하고, 생산단계에서 소비단계까지의 유통체계를 확립하여 국산화율을 2000년 4%에서 2006년 25%로 제고하기 위하여 2001년 7월 제2차 방사선 및 방사성 동위원소 이용 진흥계획을 수립하여 추진하고 있다[1].

방사성 동위원소의 이용개발을 제고하기 위해서는 방사성 동위원소의 생산 확대와 더불어 생산단계에서 소비단계까지의 운반체계를 확립하는 것이 무엇보다 중요하다. 미국의 경우에 있어서는 2000년 기준으로 방사성 물질의 운반 중 의료용 방사성 동위원소의 운반이 전체의 62%나 차지할 정도로 방사성 동위원소의 운반체계가 잘 확립되어 있으며 [2], 국내도 마찬가지로 2000년 기준으로 방사성 동위원소의 운반건수는 무려 58,935건으로 방사성 폐기물 운반건수 756건의 약 80배에 이를 정도로 많은 운반을 하고 있다[3].

국내에서 생산되는 방사성 동위원소는 연구용 원자로인 하나로에서 생산되는 방사성 동위원소인 I-131, Ir-192, Co-60, Mo-99 및 Tc-99m 등이 있으며, 원자력 의학원의 싸이크로트론에서 생산되는 방사성 동위원소인 I-123, Ga-67 Tl-201 및 F-18 등이 있다.

국내에서 생산되는 이들 방사성 동위원소는 주로 의료용과 산업용으로 사용되고 있으며, 방사성 동위원소를 생산지에서 소비지까지 안전하게 운반하기 위해서는 운반용기를 필요로 하게 된다. 방사성 동위원소 운반용기는 동위원소의 방사능 세기에 따라 A형 운반용기와 B형 운반용기로 구분할 수 있으며, 운반용기는 과학기술부 고시 제 2001-23호, IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1 및 US 10 CFR Part 71 등에서 규정하고 있는 조건들에 만족하여야 한다[4~6].

원자력연구소에서는 그림 1과 같은 Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기를 개발하고 있다. Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기는 Ir-192 150 ci NDT용 밀봉선원 4개를 적재할 수 있으며, 4개의 밀봉선원 안내관, 납 및 DU 차폐체, 폴리우레탄 충격완충체, 외부 케이스, 밀봉선원 잠금장치 및 마개장치 등으로 구성되어 있다.

B형 운반용기는 법규에서 규정하고 있는 800 °C 열 조건에서 30분 이상 동안 견딜 수 있는 능력을 갖추어야 하지만, 충격완충체의 재질인 폴리우레탄은 열에 매우 약한 특성을 갖고 있기 때문에 차폐체인 납의 용융점인 327 °C 이하로 유지시키기 매우 어렵다.

따라서, 난연성 우레탄 및 우레탄을 열로부터 보호할 수 있는 방화재들을 조합 적용한 시편을 제작하여 800 °C 열 조건에 대한 실험적 평가를 수행하였다.

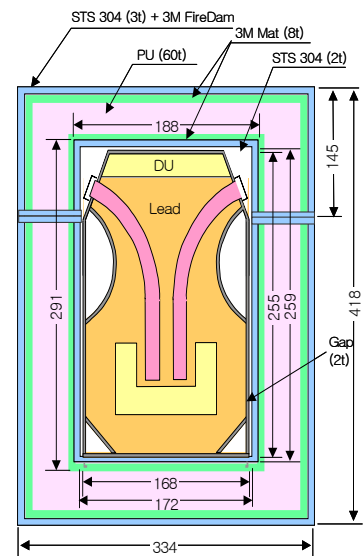


그림 1. Ir-192 밀봉선원 운반용기 개념도.

## 2. 열 시험

### 가. 시험모델

Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기의 완충체로는 폴리우레탄을 적용하였다. Ir-192 600 ci 밀봉선원 용기는 B형 운반용기이므로 가상 사고조건인 800℃의 화재조건에서 30분간 견딜 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 그러나, 우레탄은 열에 약한 특성을 가지고 있다. 따라서, 열에 강한 난연성 우레탄 폼 및 우레탄 폼을 열로부터 보호할 수 있는 방화재 중 산업용 bulk 선원 용기에 적용할 수 있는 방화재를 조사하였다.

난연성 우레탄에 대한 평가를 수행하기 위해 그림 2와 같은 시편을 제작하여 간단한 화재시험을 수행하였다. 화재시험은 그림 3과 같이 토오치로 1 분 이상 가열한 후, 난연성 우레탄 폼의 형상을 평가하였다. 난연성 우레탄은 그림 4에서와 같이 가열된 부분이 까맣게 탔지만 시험 전의 형상은 그대로 보존하고 있는 것을 알 수 있었다.



그림 2. 난연성 우레탄.



그림 3. 화재시험모습.



그림 4. 시험 후 모습.

난연성 우레탄으로 제작한 시편의 화재시험에서 실패할 경우를 대비하여 Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기에 적용하기 위한 방화재로는 한국 3M사의 방화매트(EP-5-A), FireDam Spray 및 세린테크닉의 Variform을 시편들에 적용하였다.

한국 3M사의 방화매트(EP-5-A)는 사용후핵연료 수송용기의 화재시험에서 열전대 및 전열선을 보호하기 위해 사용하던 재질로서 사용후핵연료 수송용기 화재시험에서 그 성능이 입증된 바 있으나, 복잡한 성형이 어렵고 가격이 비싸다는 단점이 있다. 세린 테크닉의 Variform은 세라믹 계열의 물질로서 전기로 등의 보수재로 사용되므로 성능이 우수하다고 판단되나, 충격완충체로 사용하기에는 너무 단단한 단점을 가지고 있다.

한국 3M사의 방화재인 FireDam Spray는 방재시험 연구원으로부터 2시간 동안 내화력을 제공하는 제품으로 인증 받은 것으로 조사되었으나 운반용기에 적용 가능성 여부를 점검하기 위하여 실험을 수행하였다. 화재시험은 강철판에 FireDam Spray를 두께 2 mm로 바른 후 토오치로 30분간 가열하는 방법으로 두 가지 경우에 대해 수행하였다. 하나는 운반용기에 적용될 경우와 같은 후면에서 가열하는 조건으로 수행하였으며, 다른 하나는 FireDam Spray 개발 시 고려된 전면에서 가열하는 조건으로 수행하였다. 그림 5는 후면에서 토오치로 30분간 가열한 시험결과를 보여주고 있으며, 그림 6은 전면에서 토오치로 30분간 가열한 시험결과를 보여주고 있다.



그림 5. 후면에서 가열한 시편모습.



그림 6. 전면에서 가열한 시편모습.

토오치로 30분간 가열한 시험에서 FireDam Spray는 그림 5~6과 같이 상당한 부피로 팽창하였다. 후면에서 가열한 시험에서 가열한 반대방향에서 측정된 표면의 온도는 약 280 °C로 측정되었으며, 전면에서 FireDam Spray에 직접 가열한 화재시험에서 FireDam Spray는 그림 6과 같이 까맣게 타면서 부피가 팽창하였으며, 가열하는 반대방향에서 측정된 표면의 온도는 약 230 °C 정도로 측정되었다. 따라서, FireDam Spray는 전면에서 가열하였을 경우가 후면에서 가열하였을 경우보다 우수한 내화력을 제공하는 것으로 나타났으며, 내화력의 원리는 가열 시 체적이 팽창하며 공간을 제공하여 공기에 의한 열 저항을 크게 하므로써 온도를 억제시키는 것으로 판단된다.

화재시험을 수행하기 위한 시험모델은 Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기와 같은 두께 1.5 mm의 스테인레스강 재질로 100 mm × 100 mm × 120 mm의 상자를 만들고 그 안에 난연성 우레탄판을 적용한 시험모델, 난연성 우레탄에 3M사의 매트를 적용한 시험모델 등을 표 6과 같이 제작하고, 모델 중앙의 온도를 측정하기 위하여 K type의 열전대를 시험모델의 중앙에 설치하였다.

#### 나. 측정시스템

열 시험에 사용한 온도측정시스템은 그림 7과 같으며, National Instruments 사에서 제작한 제품으로 열전대 탐지기, 신호 조절기, 아날로그/디지털 변환기 및 P/C로 구성된다. 열전대 탐지기는 32개의 열전대를 부착할 수 있는 SCXI-1303 모델 3개로 구성되어 있다. 열전대 탐지기에서 탐지된 신호는 모델 SCXI-1102인 신호 조절기를 통해 filtering되고 증폭되어 아날로그/디지털 변환기로 전송되며, 아날로그 신호는 아날로그/디지털 변환기에서 디지털 신호로 변환되어 P/C에 설치된 소프트웨어에 의해 분석되고 저장되며, 과도시간에 따른 온도변화를 모니터링하게 된다.



그림 7. 측정 시스템.

### 다. 시험방법

열 시험은 그림 8과 같이 전기로(electric furnace)에 난연재 시험모형을 넣고 시험을 수행하였다. 먼저, 전기로를 켜고 전기로의 온도를 800 ℃로 설정한 후 전기로의 온도가 800 ℃에 도달한 후 그림 8과 같이 시험모형을 넣고 30분 동안 그 상태를 유지하며 시험모형 중앙의 온도를 측정한다. 30분 경과 후 전기로와 측정시스템의 가동을 중단하고 시험을 종료하였다.



그림 8. 열 시험모습.

### 3. 결과 및 토의

Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기의 충격완충체로 사용하기 위한 우레탄은 열에 약한 특성이 있으므로, 난연성 우레탄 및 우레탄을 열로부터 보호할 수 있는 방화재들을 조합하여 적용한 시편을 제작하여 800 ℃의 온도조건에서 30분 동안 수행한 시험 결과는 표 4와 같다.

난연성 우레탄만을 적용하여 제작한 시험모형은 800 ℃의 전기로에 넣은 후 얼마 지나지 않아 연소하기 시작하여 15분 경과 후 시험모형의 중심온도는 800 ℃를 초과하여, 시험을 중단하였다.

난연성 우레탄과 매트 조합한 시험모형은 그림 9와 같이 약 5분 경과 후 연소하기 시작하여 15분 경과 후 급격히 온도가 상승하여 22분 경과 후 800 ℃를 초과하였다.

난연성 우레탄과 매트 그리고 spray를 혼합 적용한 시험모형에서는 그림 10에서와 같이 약 5분 경과 후 연소를 시작하여 22분 경과 때까지 완만하게 상승하였으며 잠시 상승곡선이 주춤하다 다시 상승하여 30분 경과 후 약 510 ℃를 기록하였다. 이것은 spray의 실험 때와 마찬가지로 약 5분 경과 후 spray가 연소하며 체적이 팽창하여 공기에 의한 열 저항을 제공하여 온도 상승을 억제하므로써 나타난 결과로 판단된다.

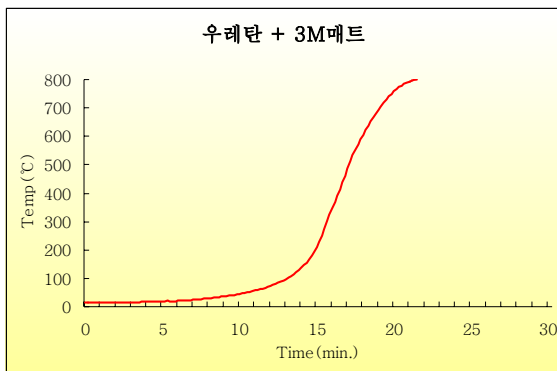


그림 9. 시편 2의 과도시간에 따른 온도.

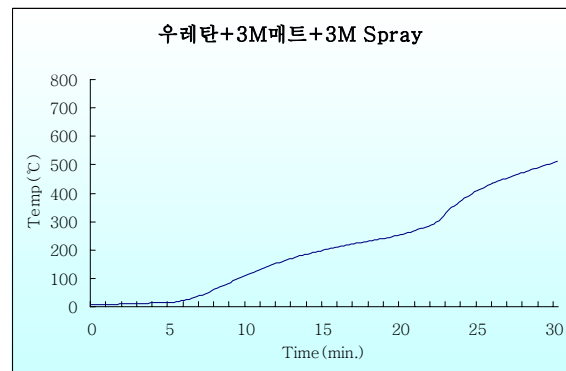


그림 10. 시편 3의 과도시간에 따른 온도.

지금까지 시험한 모델들은 납의 용융점인 327 °C 이하로 만족시켜 주지 못하였다. 따라서, Variform의 성능을 시험하기 위하여 난연성 우레탄 대신 Variform만을 적용한 시험모델을 사용하여 열 시험을 수행하였다. 시험결과 시험모델은 연소하지 않았으며, 온도는 30분이 경과한 후 107 °C로 측정되었다. 그러나, Variform은 충격 특성에 매우 약한 단점을 가지고 있기 때문에 Variform만을 적용하기는 매우 어렵기 때문에 Variform을 적용한 조합형 시험모델을 제작하여 시험을 수행하였다.

난연성 우레탄과 매트에 Variform을 조합한 시험모델은 약 20분이 경과 후 연소하기 시작하였으며, 그림 11과 같이 30분 경과 후 357 °C로 측정되어 납의 용융점인 327 °C 이하로 만족시켜 주지 못하였다. 따라서, 난연성 우레탄에 매트를 두 겹으로 하고 Variform을 적용하여 시험을 수행하였다. 시험모델은 약 25분이 경과한 후 연소하기 시작하였으며, 그림 11에서와 같이 30분 경과 후 시험모델의 온도는 153 °C로 측정되었다. 이것은 납의 용융점인 327 °C에 훨씬 못 미치는 온도로 이 조합형을 사용한다면, 800 °C의 열 조건을 만족시켜 줄 수 있다.

이상의 시험결과로부터 B형 운반기에 충격 완충체로 난연성 우레탄을 적용하기 위해서 난연성 우레탄의 발화시간을 최대한 지연시키는 것이 가장 중요한 핵심사항임을 알 수 있었다.

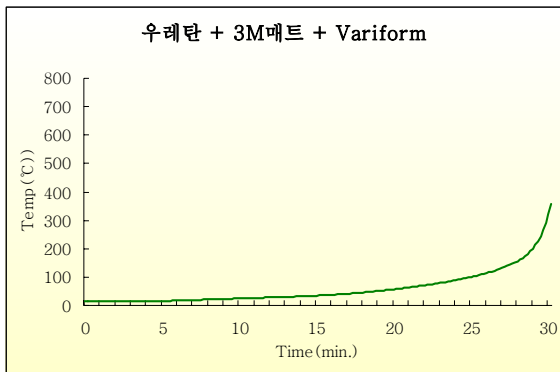


그림 11. 시편 5의 과도시간에 따른 온도.

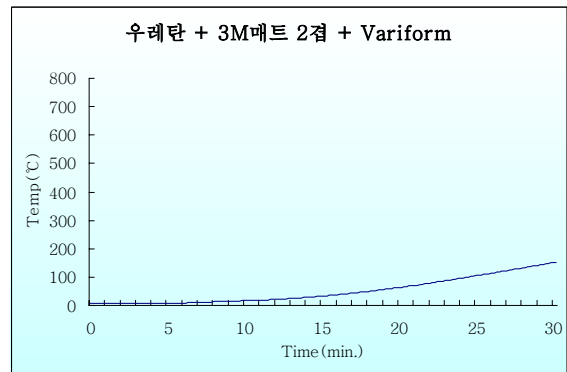


그림 12. 시편 6의 과도시간에 따른 온도.

표 4. 완충체 시편의 종류에 따른 화재시험결과

	우레탄	매트	Spray	Variform	시험결과
시편1	○				15분 경과 후 800 °C 초과
시편2	○	○			20분 경과 후 800 °C 초과
시편3	○	○	○		30분 경과 후 515 °C로 측정
시편4				○	30분 경과 후 107 °C로 측정
시편5	○	○		○	30분 경과 후 358 °C로 측정
시편6	○	○○		○	30분 경과 후 153 °C로 측정

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Ir-192 600 ci 밀봉선원 산업용 B형 운반용기의 충격완충체로 적용하기 위한 난연성 우레탄에 대한 실험적 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

충격 완충체로 난연성 우레탄만을 적용하는 것은 매우 어렵다. 그것은 난연성 우레탄이 연소하기 때문이며, 난연성 우레탄을 적용하기 위해서는 난연성 우레탄의 발화시간을 최대한 지연시키는 것이 가장 중요한 핵심사항이다. 따라서, 차폐체인 납의 건전성을 유지시키기 위해서는 차폐체 외부에 충격완충체로 사용된 난연성 우레탄의 온도를 납의 용융점인 327 °C 이하로 억제하여야 하며, 그러기 위해서는 완충체의 구조를 방화재인 매트 두 겹에 Variform을 혼합하여 적용하는 것이 가장 바람직하다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. 과학기술부, “원자력관련 주요현황 및 통계자료”, 2002.
2. Brookhaven National Laboratory, “Transportation”, 2000.
3. 과학기술부, “2000년도 제6회 원자력산업실태조사”, 2001.
4. 과학기술부 고시 제 2001-23호, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”.
5. IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, 2000 Ed.
6. U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, “Packaging of Radioactive Material for Transport and Transportation of Radioactive Material under Certain Conditions”, as revised in Federal Register, Vol. 48, No. 165, 1983.