

KRI-BGM 방사성동위원소 운반용기의 열안전성 평가

이주찬, 김동학, 방경식, 서기석
 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 sjclee@kaeri.re.kr

국내 하나로에서 방사성동위원소(RI) 양산체계가 확립됨에 따라 동위원소의 국내 공급 및 해외 수출을 위하여 운반효율이 향상된 대량 선원 운반용기의 개발을 추진하고 있다. 원자력연구소에서 개발중인 KRI-BGM 동위원소 운반용기는 운반물의 방사선원으로 고체형 Ir-192 370 TBq (10,000 Ci), 또는 액체형 Mo-99 29.6 TBq (800 Ci) 및 액체형 I-131 37 TBq (1000 Ci) 등을 고려하고 있다. 본 논문에서는 KRI-BGM 운반용기의 정상 및 사고조건에 대한 열안전성 평가를 기술하였다. KRI-BGM 운반용기는 그림 1과 같이 원통형 구조를 가진 운반용기로 완충용기(over-pack)와 차폐용기(Sheilded package)로 구성된다. 완충용기는 사고조건에서 충격흡수 및 단열을 목적으로 사용하며, 탄소강 케이싱 내부에 난연성 폴리우레탄 폼과 방화재로 3M 매트를 채워 넣는 구조이다. 운반용기의 중량과 체적을 최소화하기 위하여 운반용기의 차폐체로 감손 우라늄과 텅스텐을 사용하였으며, 차폐용기는 차폐체와 스테인리스강으로 구성된다. KRI-BGM 운반용기는 B형 운반용기로 정상운반조건 및 가상 화재사고조건에서 안전성이 유지되어야 한다. 즉, 정상운반조건에서는 운반용기 내부의 동위원소로부터 방출되는 붕괴열(decay heat)을 외부로 적절하게 방출시켜야 하며, 가상 사고조건인 800 °C 화재조건에서는 외부 화염으로부터 유입되는 열을 적절히 차단하여 설계압력 유지 및 차폐체의 건전성이 유지되도록 하여야 한다.

운반용기에서의 열전달은 전도, 대류 및 복사 등 3가지 열전달 모드로 이루어지며, 용기의 외부 표면에서 대기에 의한 자연대류 열전달계수는 다음 식으로 정의된다.

$$H = Nu(k/L) \dots\dots\dots (1)$$

$$Nu = c(Gr_L \cdot Pr)^a, \quad Gr_L = g\beta(\Delta T)L^3/\nu^2 \dots\dots\dots (2)$$

위와 같은 관계식과 실험식을 이용하여 용기 표면에서의 대류열전달계수($H = 4 \text{ W/m}^2\text{-K}$)를 구하였다. 운반용기 외부표면에서 복사열전달이 일어나며, 복사열전달은 다음 식으로 설명된다.

$$q/A = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_a^4) \dots\dots\dots (3)$$

이와 같은 복사열전달은 재료의 방사율(emissivity)에 영향을 받는다. 운반용기 완충체의 표면은 탄소강으로 구성되며, 노란색 또는 흰색으로 도색된다고 가정하여 정상조건에서의 방사율을 0.85로 가정하였다. 태양복사열은 수직 평면에서는 800 W/m^2 , 곡면에서는 400 W/m^2 을 고려하였다. 열해석 조건은 법규에서 규정하고 있는 정상수송 및 화재사고조건을 적용하였고 Ir-192 동위원소 10,000 Ci로 설정하여 동위원소로부터 방출되는 붕괴열은 60 W 로 고려하였다. 전산 프로그램은 범용 열 유동해석 코드인 FLUENT 코드를 사용하였으며, 고온조건에 대한 정상상태의 온도를 구한 후에 화재사고조건에 따른 과도상태(transient state)에 대한 해석을 수행하였다.

표 1은 정상 및 화재조건에 대한 열해석 결과이며, 정상조건에서 동위원소 및 감손우라늄의 최대 온도는 각각 $230 \text{ }^\circ\text{C}$ 및 $117 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 상승하지만 안전성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 폴리우레탄 폼의 최대온도도 $115 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 충격완충 및 단열 기능이 충분히 유지될 것으로 판단된다. 국내 파기부고시 제2001-23호 제22조, IAEA Standard Safety Series No. TS-R-1 Para. 617 및 US 10 CFR Part 71.43에서는 항공으로 운반할 경우 운반용기의 접촉 가능한 표면온도는 일광효과를 고려하지 아니한 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 주변온도의 환경에서 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 태양복사열이 없는 경우 운반용기 표면의 최대온도는 $49.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 계산되어 허용치에 근접하나 실제 항공운반 시에는 운반용기를 별도 포장하게 되므로 접촉 가능한 표면에서의 온도는 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 보다 낮을 것으로 예측된다. 최대온도로 계산된 $49.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 는 운반용기의 국소 부위의 온도이며, 평균온도는 $46.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 허용치 보다

낮게 나타났다. 따라서 항공운반 시에 접촉 가능한 지점에서의 표면온도는 법규에서 규정하는 허용치 이내로 유지될 수 있을 것이다. 화재사고조건에서 운반용기의 충격완충체로 사용된 폴리우레탄 폼의 온도는 500 °C 이상 상승하지만 DU 차폐체의 온도는 226 °C로 폴리우레탄 폼의 온도에 비하여 훨씬 낮게 나타났다. 이것은 용기 본체와 over-pack 사이에 약 4.5 mm의 air gap이 존재하여 화재사고 시 단열층 역할을 함으로써 나타난 결과이다. 화재사고 시 DU 차폐체의 온도가 226 °C까지 상승하지만 스테인리스강으로 DU 차폐체를 보호해 주므로 차폐체의 열적 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다. 따라서 KRI-BGM 동위원소 운반용기는 법규에서 규정하는 정상 및 사고조건에서 열적 건전성이 충분히 입증되었다.

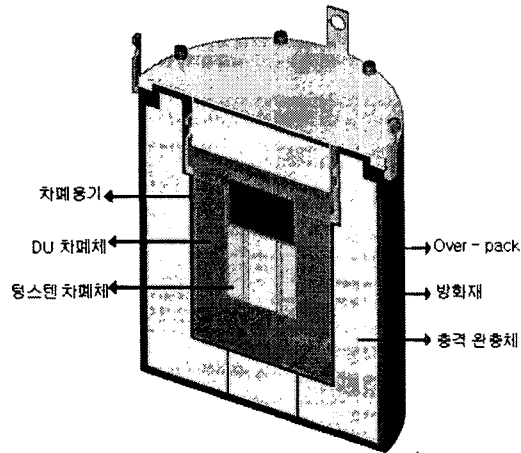


그림 1. 운반용기 개요도.

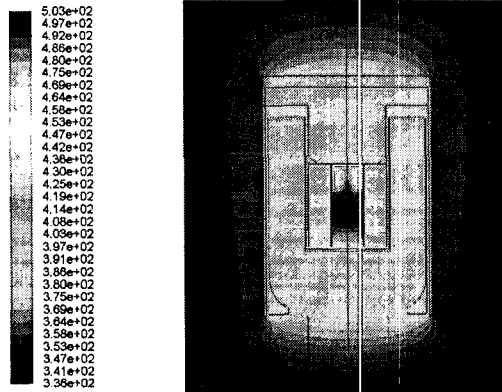


그림 2. 정상조건 온도분포(단위: K).

표 1. 정상운반 및 화재사고조건에 대한 열전달해석 결과

| Location | Calculated temperatures (°C) | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------------|------------|-----|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| | Normal | Fire state | | Post fire state (t > 0.5 h) | | | | | | Max. |
| | | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | |
| RI source | 230 | 230 | 234 | 250 | 275 | 306 | 314 | 314 | 310 | 314 |
| Tungsten | 158 | 158 | 167 | 191 | 217 | 245 | 252 | 251 | 247 | 252 |
| Inner-shell(middle) | 144 | 146 | 163 | 196 | 217 | 237 | 240 | 237 | 232 | 240 |
| DU shield | 117 | 124 | 169 | 211 | 223 | 226 | 222 | 216 | 209 | 226 |
| O-ring | 110 | 128 | 179 | 216 | 223 | 222 | 214 | 206 | 198 | 223 |
| Polyurethane(core) | 74 | 415 | 536 | 356 | 260 | 179 | 147 | 131 | 121 | 536 |
| 3M Mat | 73 | 488 | 598 | 350 | 255 | 175 | 142 | 127 | 117 | 598 |
| Outer surface | 68 | 750 | 770 | 248 | 194 | 141 | 119 | 108 | 101 | 770 |