

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

동위원소 운반용기 최적설계를 위한
단열재 열전달 특성 평가

Thermal Characteristic of Insulation
for Optimum Design of RI Transport Package

이주찬, 방경식, 서기석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

방사성 동위원소 등의 고준위 방사성물질을 운반하기 위한 운반용기는 국내외의 관련법규에 따라 정상수송은 물론 가상사고조건에서도 방사성물질의 누설이 발생되지 않도록 방사선 차폐, 열 및 구조적 건전성이 유지되어야 한다. 본 연구에서는 Ir-192 밀봉선원 600 Ci를 운반할 수 있는 동위원소 운반용기의 단열재에 대한 열전달 특성을 평가하여 용기 최적설계를 위한 단열재 두께를 결정하였다. 화재사고조건에서 용기의 열적 건전성을 유지하기 위한 단열재의 최적 두께는 폴리우레탄 폼의 경우 10 mm로 분석되었다. 또한, 최적 단열재를 갖는 운반용기에 대한 열해석을 수행하여 용기의 열적 건전성을 평가하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 RI 운반용기의 최적설계를 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

Abstract

A package to transport the high level radioactive materials is required to withstand the hypothetical accident conditions as well as normal transport conditions according to IAEA and domestic regulations. The regulations require that the package should maintain the shielding, thermal and structural integrities to release no radioactive material. Thermal characteristics of insulations were evaluated and optimum insulation thickness was deduced for RI transport package. The package has a maximum capacity of 600 Curies for Ir-192 sealed source. The insulation thickness was decided with 10 mm of polyurethane foam to maintain the thermal safety under fire accident condition. Thermal analysis was carried out for RI transport package, and it was shown that the thermal integrity of the package was maintained. The results obtained this study will be applied to a basic data for design of RI transport cask.

1. 서 론

방사성 동위원소는 의료분야, 산업분야, 기타 농학분야 등 각 분야에서 널리 사용되고 있으며, 국내에서 방사선 및 방사성동위원소 이용 관련업체는 1995년에 1,000여개 업체에서 2000년에 1,700여개 업체로 증가하였고 앞으로도 지속적으로 증가할 것으로 전망된다. 하나로에서는 산업용 밀봉선원인 Ir-192, Co-60과 같은 방사성 동위원소 생산체계를 확립하여 국내에 공급하고 있으며, 향후 생산량 및 생산종류를 확대하여 국내 공급량을 증대시킬 예정이다.

국내에서 의료 및 산업용에 사용되는 RI 운반용기의 대부분은 수입에 의존하고 있어 국산 RI 제품의 유통과 수출에 많은 지장을 초래하므로 국제시장에서 경쟁하기 위해서 독자적인 RI 운반체계를 확립이 필요하다. RI 운반용기는 미국 등의 선진국이 세계 시장을 대부분 독점한 상태이기 때문에 국내에서 개발하지 않으면 해외 운반용기의 수입으로 외화를 낭비하고 동위원소 종류에 따른 다양한 운반용기를 연속적으로 해외에 의존하게 되어 기술 종속이 우려된다.

1996년 이후 국제원자력기구의 규정 IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material ST-1[1] 및 국내 과기부고시 제 2001-23호[2]에서는 방사성물질 운반용기에 대한 기술기준을 강화하였다. 방사성동위원소의 운반용기는 운반물의 밀봉 형태에 따라 특수형 방사성물질과 그 외 것으로 구분되고, 핵종의 방사선 세기에 따라 L형, A형, B형 및 C형 운반용기로 구분된다. 법규에 따르면 L형 및 A형을 제외한 특수형 방사성물질, B형 및 C형의 운반용기에 대해서는 인허가를 받도록 규정하고 있다.

국내에서 사용되고 있는 B형 운반용기는 비파괴시험 업체에서 방사선투과시험 목적으로 사용되는 source projector가 대부분을 차지하며, 2002년도 현재 1,000개 이상의 운반용기가 수입되어 사용되고 있다. Source projector중에는 amersham 660 model이 전체의 90 % 이상을 차지하고 있으며, 밀봉선원으로는 Ir-192가 대부분을 차지하고 있다.

국내 하나로에서 RI 양산체계가 확립됨에 따라 수출 및 국내용 비파괴검사 선원을 4개 혹은 10개를 동시에 적재할 수 있는 운반효율이 좋은 대량 밀봉선원 용기가 필요하다. 본 연구에서는 Ir-192 150 Ci 밀봉선원 4개를 운반할 수 있는 B형 동위원소 운반용기에 대한 모델을 설정하여 화재사고조건에서 용기를 보호하는 단열재에 대한 열전달 특성을 평가하여 최적단열재 두께를 도출하고 운반용기의 열적 건전성을 평가하였다.

2. 운반용기 모델 설정

동위원소 밀봉선원 운반용기에 대한 개념설계 단계로 산업용 조사기로 사용되는 Ir-192 150 Ci 밀봉선원 4개 운반용기에 대한 기본 모델을 설정하였다.

그림 1은 운반용기에 대한 단면도를 나타내고 있으며, 운반용기의 차폐체로는 납과 감손 우라늄(Depleted Uranium)을 사용하는 2가지를 고려하였다. Ir-192 밀봉선원 600 Ci 용량의 운반용기에서 용기 표면의 허용 방사선량률을 만족하기 위한 차폐체 두께는 납의 경우는 80 mm, DU 차폐체의 경우는 약 50 mm로 설정하였다.

운반용기는 B형 운반물로 구분되며, 따라서 법규에서 규정하고 있는 9 m 자유낙하, 1 m 파열 및 800 °C 화재사고조건 등의 가상사고조건에서 운반용기의 건전성이 유지되어야 한다. 운반용기의 사고조건에서 충격완충 및 단열을 목적으로 일반적으로 폴리우레탄 폼 또는 코르크 등이 사용되며, 이들 재료는 충격완충 및 단열효과가 우수한 특성을 갖고 있다.

본 연구에서는 운반용기의 화재사고조건에서 단열재로 사용된 폴리우레탄 및 코르크 두께를 5 ~ 20 mm로 변화시켜 가면서 해석을 수행하여 최적 단열재 두께를 설정하였다.

3. 열해석 모델링

운반용기에서의 열전달은 전도, 대류 및 복사 등 3가지 열전달 모드로 이루어지며, 원통형 좌표에 대한 열전도 지배방정식은 다음과 같이 표현된다[3].

$$\frac{1}{\alpha(T)} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \text{ ----- (1)}$$

여기에서, $\alpha(T)$ 는 열확산율(thermal diffusivity)을 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha(T) = \frac{k(T)}{\rho(T)c_p(T)} \text{ ----- (2)}$$

식 (1), (2)에서와 같이 비정상상태의 열전도에 영향을 미치는 재료의 물성치로는 열전도율, 밀도 및 비열이 있으며, 표 1은 운반용기에 사용된 주요 재료의 상온에서 열적 물성치를 나타내고 있다. 이들 물성치는 온도에 따라 값이 달라지며, 해석에서는 온도에 따른 물성치를 적용하였다. 단열재로 사용된 폴리우레탄 및 코르크의 열전도율은 각각 0.08 W/m-K, 0.04 W/m-K로 코르크가 폴리우레탄 폼에 비하여 단열 특성이 더 우수하다. 차폐체로 사용된 납 및 DU는 열전도성이 비교적으로 좋지 만 납의 경우에는 용융온도가 327 °C로 낮은 단점을 갖고 있다.

Table 1. Thermal Properties of Materials

Material	Thermal properties		
	Conductivity (W/m-°C)	Density (kg/m³)	Specific heat (W-h/kg-°C)
Depleted uranium	25.5	19,290	132
Lead	35.3	11,340	129
Polyurethane form	.08	320	1760
Cork	.04	150	1670
Stainless steel	16	7860	477
Titanium	22	4500	522
Air	0.026	1.22	1006

운반용기 외부표면에서 대기에 의한 자연대류 열전달은 다음과 같이 표현된다.

$$q = H_{nc}A(T_s - T_a) \text{ ----- (3)}$$

$$H_{nc}(\text{surface}) = Nu_d \frac{k}{d} \text{ ----- (4)}$$

여기서,

$$Nu_d = c(Gr \ Pr)^a, \ Gr_d = g \ \beta \ (\Delta T)d^3/\nu^2 \text{ ----- (5)}$$

k : Thermal conductivity of ambient air (W/m-K)

a : Exponent dependent on the flow regime

c : Coefficient dependent on the flow regime and geometry

g : Acceleration of gravity (m/sec²)

d : Diameter of cask (m)

β : Coefficient of volumetric expansion (1/K)

ΔT : Temperature difference between cask surface and ambient air (K)

ν : Dynamic viscosity of ambient air (m²/s)

위와 같은 관계식을 사용하여 운반용기 외부표면에서의 대류열전달계수($H_{nc} = 4.0 \text{ W/m-K}$)를 얻었다.

운반용기 외부표면에서 복사열전달이 일어나며, 복사열전달은 다음 식으로 설명된다.

$$q = A\sigma\epsilon(T_s^4 - T_a^4) \text{ ----- (6)}$$

여기서,

q : Heat flow (W)

A : Heat transfer area (m²)

σ : Stefan-Boltzmann constant (= 5.669x10⁻⁸ W/m² K⁴)

ε : Emissivity of surface material

T_s : Surface temperature (K)

T_a : Ambient temperature (K)

이와 같은 복사열전달은 주로 고온에서 크게 일어나며, 같은 온도에서는 재료의 방사율(emissivity)에 영향을 받는다. 운반용기의 외부 표면은 스테인레스강으로 구성되고 스테인레스강에 대한 방사율은 0.36 ~ 0.44[4]의 범위를 가지며, 열전달해석에서는 0.4로 적용하였다. 또한, 화재사고조건에서는 IAEA Safety Ser. No. 37[5]에서 규정하는 표면 방사율(ε)을 0.9로 외부화염으로부터의 흡수율(α)을 0.8로 적용하였다. 따라서, 화재사고조건에서 용기표면의 유효방사율(effective emissivity)은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{(1/\epsilon - 1/\alpha - 1)} = 0.735$$

태양복사열은 법규에서 규정하고 있는 운반용기 형상이 곡면일 경우의 태양열유속 400 W/m²을 고려하였다. 이러한 상태가 오랫동안 지속된다고 가정하여 열적으로 정상상태(steady state)에서 800 °C 화재가 30분간 진행된 후 자연냉각 되는 조건에 대한 해석을 수행하였다. 밀봉선원인 Ir-192 600 Ci에서 발생하는 붕괴열은 5.2 W로 고려하였으며, 범용 열유동해석 프로그램인 Fluent[6] 코드를 이용하여 해석을 수행하였다.

5. 최적 단열재 두께 결정을 위한 열해석

운반용기의 800 °C 화재사고조건에서 방사선 차폐체로 납 및 DU를 사용할 경우 단열재의 종류 및 두께에 따른 열전달 특성을 평가함으로써 용기의 열적 건전성을 유지하기 위한 단열재의 최적 두께를 설정하였다.

가상 사고조건에서 차폐체의 용융 또는 손상이 발생하지 않아야 하며, 납은 용융온도가 327 °C로 비교적 낮은 반면 DU는 1132 °C로서 화재사고조건에서 화염의 온도보다 낮다. 따라서 DU 차폐체의 경우에는 화재사고조건에서 DU를 보호하는 있

는 스틸 케이스가 손상되지 않는다면 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

차폐체로 납을 사용할 경우 단열재에 따른 온도분포를 계산하였으며, 그림 2는 단열재로 폴리우레탄 폼을 사용할 경우 화재사고조건에서 과도시간에 따른 납 차폐체의 최대온도를 나타내고 있다. 폴리우레탄 단열재를 사용할 경우 우레탄 두께가 5 mm에서 납의 온도는 용융온도인 327 °C보다는 낮지만 300 °C 이상 상승하는 것으로 나타났다. B형 운반용기는 9 m 자유낙하 및 1 m 파열조건 시험 이후에 800 °C 화재시험에서 용기의 건전성을 유지하여야 하므로 낙하 또는 파열시험에서 단열재의 일부가 압축되어 찌그러질 수 있으므로 폴리우레탄 폼의 경우 단열재 두께는 10 mm가 적당할 것으로 판단된다.

그림 3은 단열재로 코르크를 사용할 경우 단열재 두께에 따른 납의 최대온도를 나타내고 있다. 코르크는 폴리우레탄 폼에 비하여 열전도율이 약 1/2로 낮기 때문에 코르크 5 mm의 두께에서 납의 온도가 폴리우레탄 10 mm 두께의 경우와 비슷한 온도를 보였다. 코르크를 사용할 경우에는 두께 5 mm에서도 납의 용융이 발생하지 않아 단열재의 두께는 약 5 mm 이상이면 충분할 것으로 판단된다. 따라서 B형 운반용기의 최적설계를 위한 단열재로 폴리우레탄 폼 10 mm 또는 코르크 5 mm로 설정하였다.

5. 동위원소 운반용기의 열해석 평가

B형 운반용기의 화재사고조건은 운반용기가 800 °C의 화염에 30분간 노출된 후 자연냉각 되는 조건이다. 화재사고조건은 초기조건은 주변온도 38 °C 및 태양복사열이 유입되는 고온조건이며, 고온조건은 정상상태 온도를 구한 후에 화재사고조건에 시간의 변화에 따른 과도상태(transient state)에 대한 해석을 수행하였다. 앞에서 최적 단열재로 선정된 폴리우레탄 폼 10 mm 두께를 적용할 경우 운반용기의 정상 및 사고조건에 대한 열해석을 수행하였다.

표 2는 납 차폐체 용기에서 단열재로 폴리우레탄 폼 10 mm를 사용한 경우의 용기의 주요부위의 온도를 나타내고 있다. 정상조건인 고온조건에서 용기의 표면온도는 63 °C로 계산되었다. 38 °C의 주변온도에서 용기표면 온도가 63 °C로 상승한 것은 동위원소에서 발생된 붕괴열보다는 용기 표면에서의 태양복사열에 의한 영향으로 판단된다. 수송 관련 법규에서 항공 운반시 운반용기의 표면온도는 태양복사열을 고려하지 않은 38 °C의 주변온도의 환경에서 섭씨 50 °C를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 태양복사열이 없을 경우 용기 표면온도는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$q/A = h (T_s - T_a) + \sigma \epsilon (T_s^4 - T_a^4) \text{ ----- (7)}$$

동위원소에서 발생하는 붕괴열이 5.2 W 이고 운반용기 외경이 250 mm, 길이가 350 mm이므로 용기 표면적은 0.373 m²이다. 용기표면에서 대류열전달 계수가 4 W/m²-K, 주변온도가 38 ℃, 표면 방사율이 0.4이므로 식 (7)에 의하여 용기표면 온도는 40 ℃로 계산되었다. 따라서 태양복사열이 없을 경우 운반용기 표면의 온도가 50 ℃이내이므로 항공운반 기준을 만족한다.

화재사고조건에서 납차폐체의 최대온도가 217 ℃로 납의 용융온도보다 훨씬 낮으므로 납차폐체의 건전성이 유지됨을 알 수 있다. 동위원소 선원의 온도는 236 ℃까지 상승하지만 열적으로 문제가 없을 것으로 판단된다. 그림 4는 과도시간에 따른 용기 주요부위의 온도분포를 나타내고 있다. 용기 표면온도는 화재가 시작되면서 급격히 상승하였다가 급격히 떨어지는 반면에 동위원소 선원은 화재가 시작된 후 서서히 상승하여 1시간 이후에 최대온도를 보이고 있다.

Table 2. Summary of Calculated Temperatures for Lead Cask under Fire
Accident Condition (Insulation : polyurethane 10 mm)

Location	Calculated temperatures (℃)										
	Steady state	Transient time (minutes)									Max.
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	
RI source	83	88	119	159	197	220	231	236	235	233	236
Titanium tube	67	85	131	175	207	218	221	221	218	214	221
Lead shield	65	101	148	190	212	217	217	216	213	210	217
Polyurethane (core)	64	422	458	481	305	243	214	198	187	179	481
Cask outer surface	63	778	787	788	369	257	203	174	157	147	788

DU 차폐체 용기의 경우에는 DU 차폐체가 스틸 케이스로 보호되므로 사고조건에서 외부 케이스의 파손이 발생되지 않으면 차폐체의 건전성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. DU 차폐체 용기의 경우에는 단열재가 없는 경우와 10 mm의 폴리우레탄 폼 단열재 10 mm가 있는 두가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. 표 3은 단열재를 고려하지 않은 경우 용기 주요부위의 온도를 나타내고 있다. 단열재를 고려하지 않을 경우 DU 차폐체의 온도가 750 ℃까지 상승하며, DU를 보호하는 케이스

의 파손이 발생할 경우 공기 유입으로 인하여 DU의 연소 가능성이 있으므로 DU 차폐체의 경우에도 적절한 단열이 필요할 것으로 판단된다.

표 4는 DU 차폐체 용기에서 폴리우레탄 폼 단열재 10 mm를 고려할 경우 운반 용기의 온도를 나타내며, DU 차폐체의 최대온도는 224 ℃까지 상승하지만 차폐체의 건전성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 그림 5는 10 mm의 단열재를 고려한 경우 화재사고조건에서 과도시간에 따른 용기 주요부위의 온도분포를 나타내고 있다. 그림 6은 화재가 시작된 후 30분 및 60분 후에 운반용기의 온도분포를 나타내고 있다.

Table 3. Summary of Calculated Temperatures for DU Cask under Fire Accident Condition (No insulation)

Location	Calculated temperatures (℃)							
	Steady state	Transient time (minutes)						Max.
		10	20	30	40	50	60	
RI source	84	206	440	623	669	625	559	669
Titanium tube	68	342	600	726	644	559	491	726
DU shield	66	427	653	750	640	548	482	750
Cask outer surface	65	566	720	774	605	523	461	774

Table 4. Summary of Calculated Temperatures for DU Cask under Fire Accident Condition (Insulation : polyurethane 10 mm)

Location	Calculated temperatures (℃)										
	Steady state	Transient time (minutes)									Max.
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	
RI source	87	92	122	163	200	222	234	239	239	236	239
Titanium tube	71	89	134	179	210	221	224	224	221	217	224
DU shield	68	107	152	194	218	223	223	222	218	215	223
Polyurethane(core)	66	430	466	488	310	247	217	199	188	180	488
Cask outer surface	64	780	788	789	372	261	206	175	158	147	789

5. 결 론

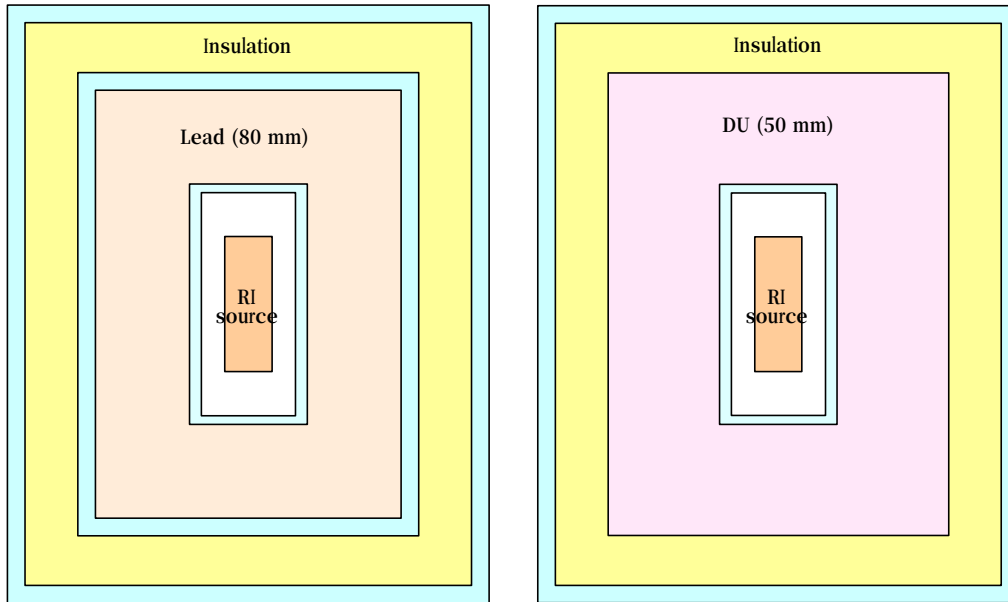
Ir-192 밀봉선원 600 Ci를 운반할 수 있는 B형 동위원소 운반용기의 기본 모델을 설정하고 화재사고조건에서 단열재의 재질 및 두께 변화에 따른 열전달 특성을 평가하여 최적 단열재 두께를 설정하였다. 차폐체로는 납 80 mm와 DU 50 mm를 고려하였으며, 화재사고조건에서 차폐체의 건전성을 유지하기 위한 단열재는 폴리우레탄 폼의 경우 10 mm, 코르크 단열재의 경우에는 5 mm로 설정하였다. 또한, 최적 두께의 단열재를 갖는 운반용기에 대한 열적 건전성을 평가하였다. 태양 복사열을 고려하지 않을 경우 운반용기 표면온도가 40 °C로 계산되어 항공운반시 제한치인 50 °C 이내로 만족하였다. 10 mm 두께의 폴리우레탄 폼 단열재를 고려할 경우 납의 용융이 발생하지 않았으며, DU 차폐체의 경우에도 차폐체의 열적 건전성이 유지될 것으로 판단된다. 따라서 단열재로 10 mm의 폴리우레탄 폼을 사용할 가상 사고조건에서 용기의 건전성이 충분히 입증되는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 동위원소 운반용기의 최적설계를 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] IAEA Safety Series No.ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material," 1996.
- [2] 과학기술부 고시 제2001-23호, 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정, 2001.
- [3] J. P. Holman, "Heat Transfer," International Student Edition 5th Ed. (1985).
- [4] A.F. Mills, "Basic Heat and Mass Transfer", University of California, 1995.
- [5] IAEA Safety Series No 37, "Advisory Material of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 3rd Ed., 1985.
- [6] "FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 5", Fluent Inc., 1998.



(a) Lead cask

(b) DU cask

Fig. 1. Conceptual Drawing of RI Transport Cask.

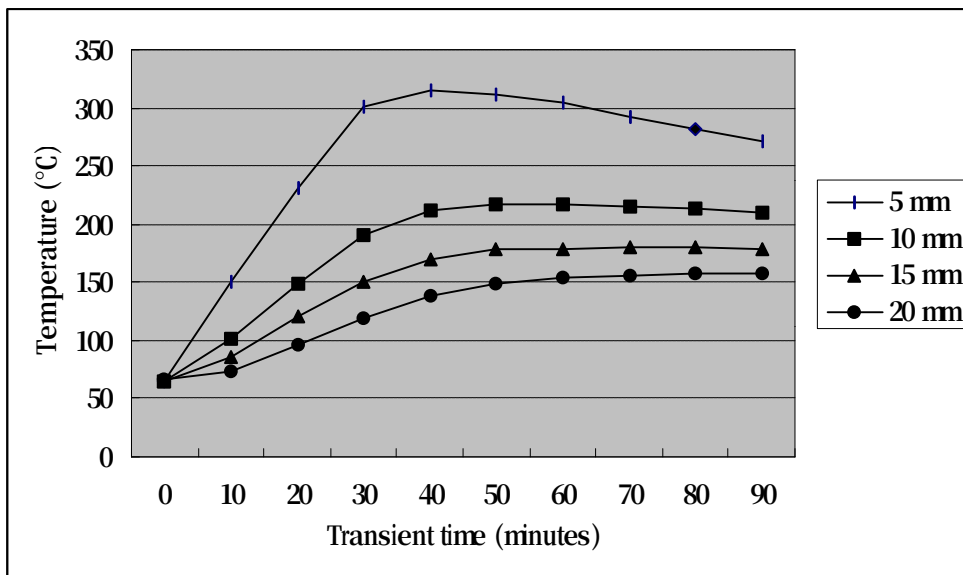


Fig. 2. Temperature Profiles of Lead Shield as a Variation of Insulation Thickness (Insulation : polyurethane).

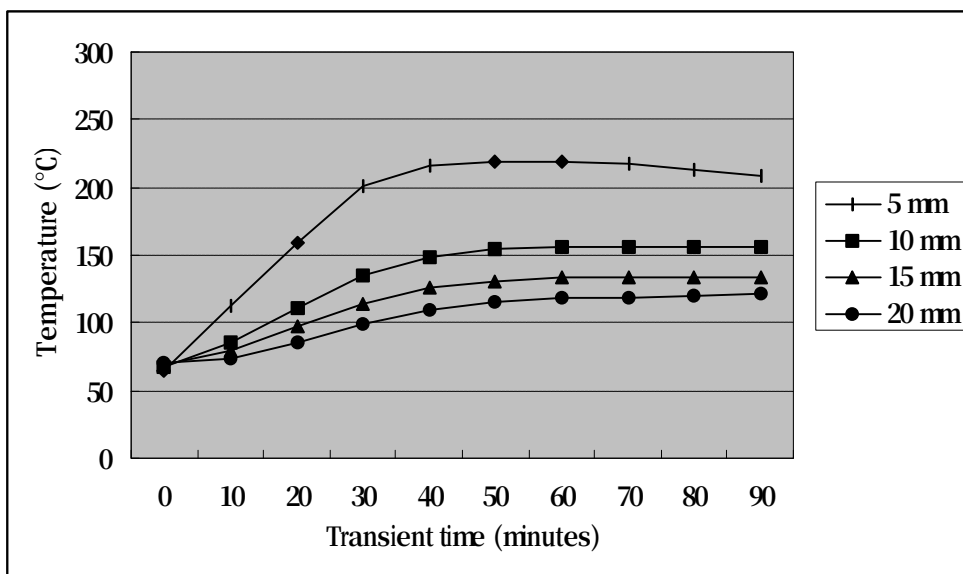


Fig. 3. Temperature Profiles of Lead Shield as a Variation of Insulation Thickness (Insulation : cork).

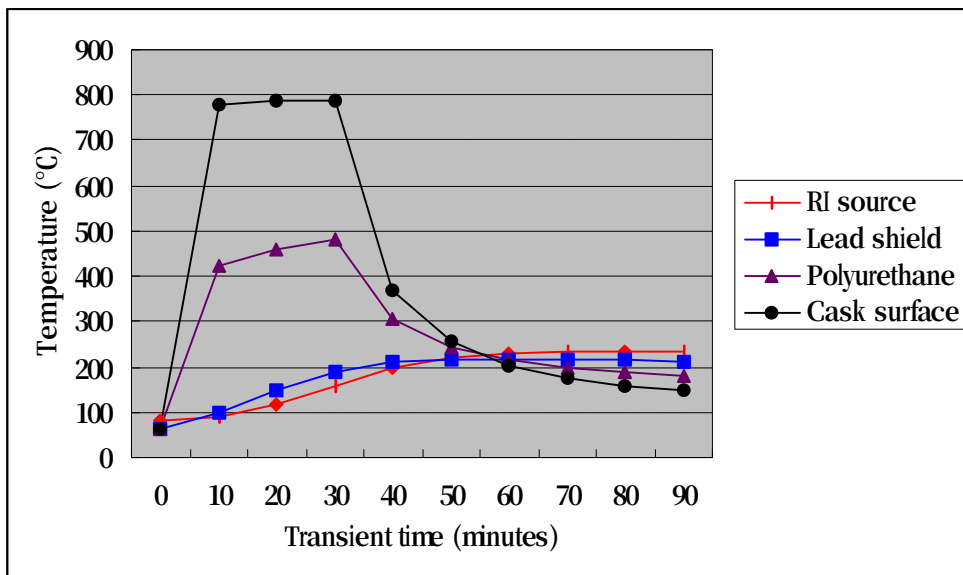


Fig. 4. Temperature Profiles of Lead Cask under Fire Accident Condition.

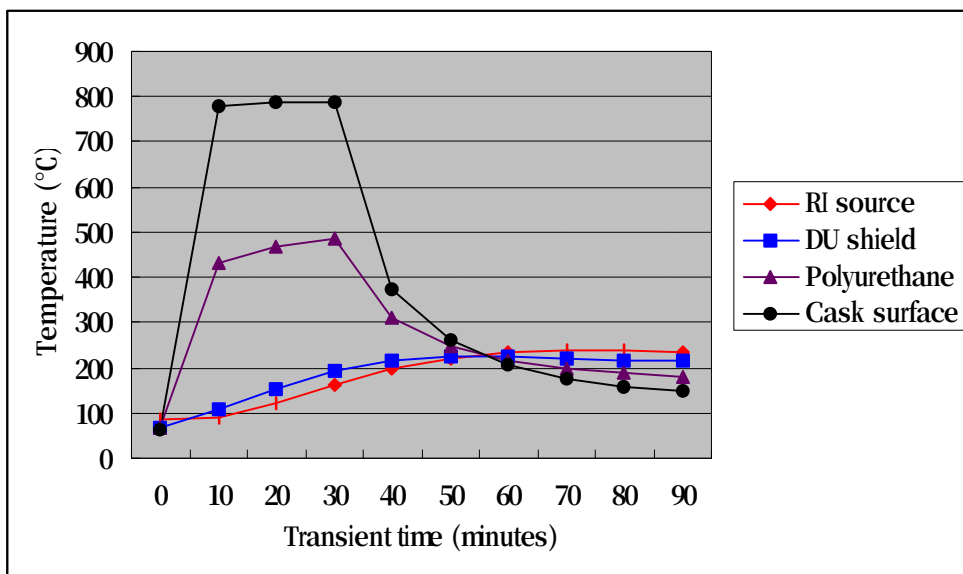
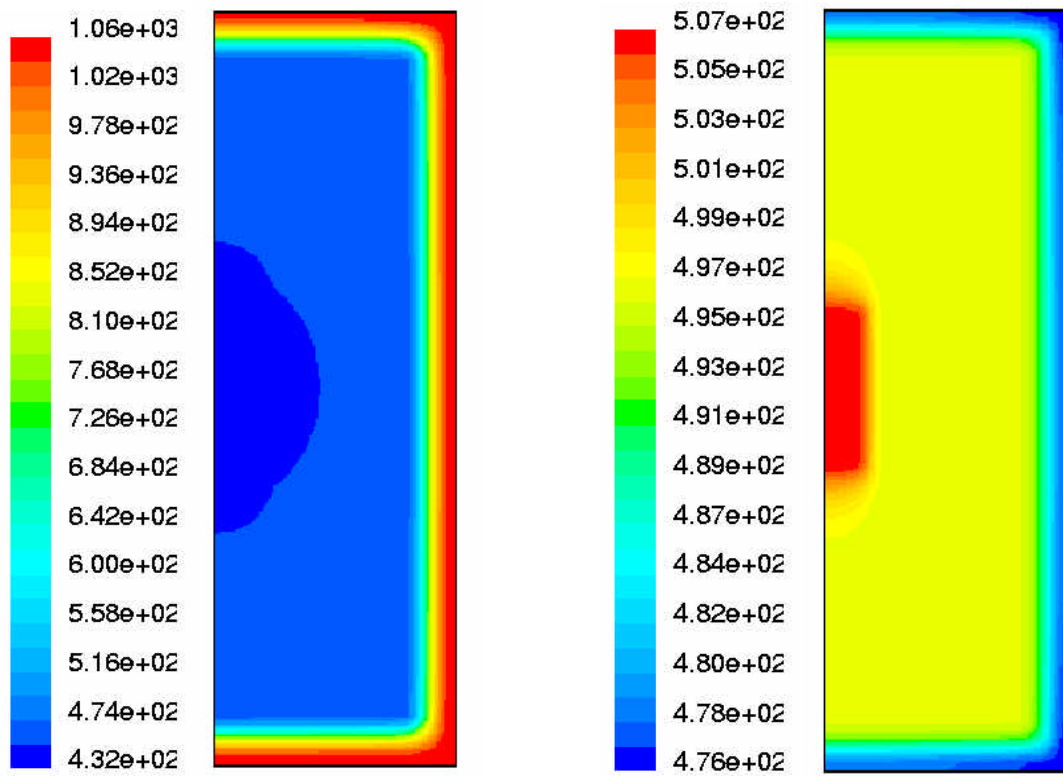


Fig. 5. Temperature Profiles of DU cask under Fire Accident Condition.



(a) $t = 30$ minutes

(b) $t = 60$ minutes

Fig. 6. Temperature Contours for DU cask [unit : K].