2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수소운반용기의 열해석

Thermal analysis of hydrogen isotope containers

이민수, 정흥석, 백승우, 안도희, 임성팔, 이성호, 김광락
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

수소동위원소 저장용기를 안전하게 운반하기 위한 운반용기를 설계하고, 운반용기의 수송 안전성을 평가하기 위하여 열해석을 수행하였다. 수소동위원소의 붕괴열에 따른 내부 저장용기의 온도 상승을 계산하였으며, 800℃의 외부 조건에 30 분간 노출되었을 때, 내부 저장용기의 온도 상승을 수치해석으로 가늠해 보왔으며 실제 열시험을 수행하여 비교분석하였다. 열 평가 결과, 운반용기는 붕괴열로 인해 과열되지 않는다고 판단되었으며, 800℃의 화재 조건에서도 내부 저장용기를 보호할 수 있다고 결론내렸다.

Abstract

The thermal evaluation of hydrogen isotope containers was carried out. The containers were consisting of secondary storage vessel and drum shell. It is important to estimate the thermal safety issues in the containers for radioactive material, because thermal energy is generated from inner storage vessel and the container is required to show its high integrity in 800°C fire test.

1. 서 론

월성 원자력발전소의 삼중수소 제거시설에 필요한 수소저장 및 운반용기를 설계하였다. 운반용기는 B 형 운반용기의 기술기준을 적용하여 운반용기의 열적 안전성을 분석하였다. 운반용기는 15kgf/cm^2 의 내압과 400℃의 열적 조건에서도 건전성을 유지하도록 설계되었다.

운반용기의 제원에 대해 설명하면 다음과 같다. 운반용기는 크게 2 차 저장용기와 3 차 드럼용기로 구성된다. 2 차 저장용기는 1 차 저장용기에서 방사성 물질이 누설될 경우에 대비한 2 차 밀봉용 용기이다. 3 차 드럼용기는 외부의 물리적 충격이나 화재로 인한 열이 내부 용기로 전달되는 것을 최소화하는 구실을 한다. 또한 3 차 드럼용기는 운반에 적합한 외관을 지니고 있다. 1 차 저장용기를 포함한 운반용기의 전체 무게는 약 120 ㎏ 이며, 외형은 원통형 드럼 형태로서 높이 820 ㎜, 직경 420 ㎜, 전체 밀도는 약 1.056 g/㎤로 추정된다. 그림 1 에 운반용기의 구조도를 나타내었다.

세부적으로, 2 차 저장용기의 제원에 대해 설명하면 다음과 같다. 2 차 저장용기는 플랜지 형태로 개폐가 가능한 스테인리스강 304 재질의 고압용기로서 전체 높이 660㎜, 몸체 외경 216㎜, 몸체 두께 6.5㎜ 이다. 플랜지부 외경 300㎜, 그리고 전체 무게 48.52㎏ 의 제원을 갖고 있다. 2 차 저장용기의 상부 플랜지를 열고 1 차 저장용기를 넣게 된다.

세부적으로, 드럼용기의 제원에 대해 설명하면 다음과 같다.드럼용기는 마개를 여닫을 수 있는 드럼 형태로서 스테인리스강 304 를 사용하여 제작하였다. 드럼 용기 내부에는 열차폐를 위한 단열재와 물리적 충격을 감소시키기 위한 완충재가 포함된다. 단열재는 내부의 2 차 저장용기 외부를 포장하고 있으며, 드럼 쉘과 2 차 단열재 사이의 빈 공간은 충격을 흡수하기 위해 완충용 우레탄 폼으로 마감되어 있다. 한편, 우레탄 폼이 2 차 저장용기에 의해 국부적으로 눌리는 것을 방지하기 위해서 2 차 저장용기 바닥쪽에는 하중을 분산시키기 위한 단단하면서도 열충격에 강한 세라믹 보드가 받치고 있다. 드럼의 외형을 살펴보면 다음과 같다. 고온 화재시험 시, 내부 완충재 및 방열재에서 발생되는 기체를 배기하기 위한 배기구가 드럼 윗면에 설치되어 있다. 그리고 운반용기의 운반 및 취급에 용이하도록 고리를 상단 외벽에 부착하였다. 드럼 용기는 외경 420 ㎜, 두께 3 ㎜, 전체 높이 820 ㎜, 무게 50 ㎏의 제원을 갖고 있다.

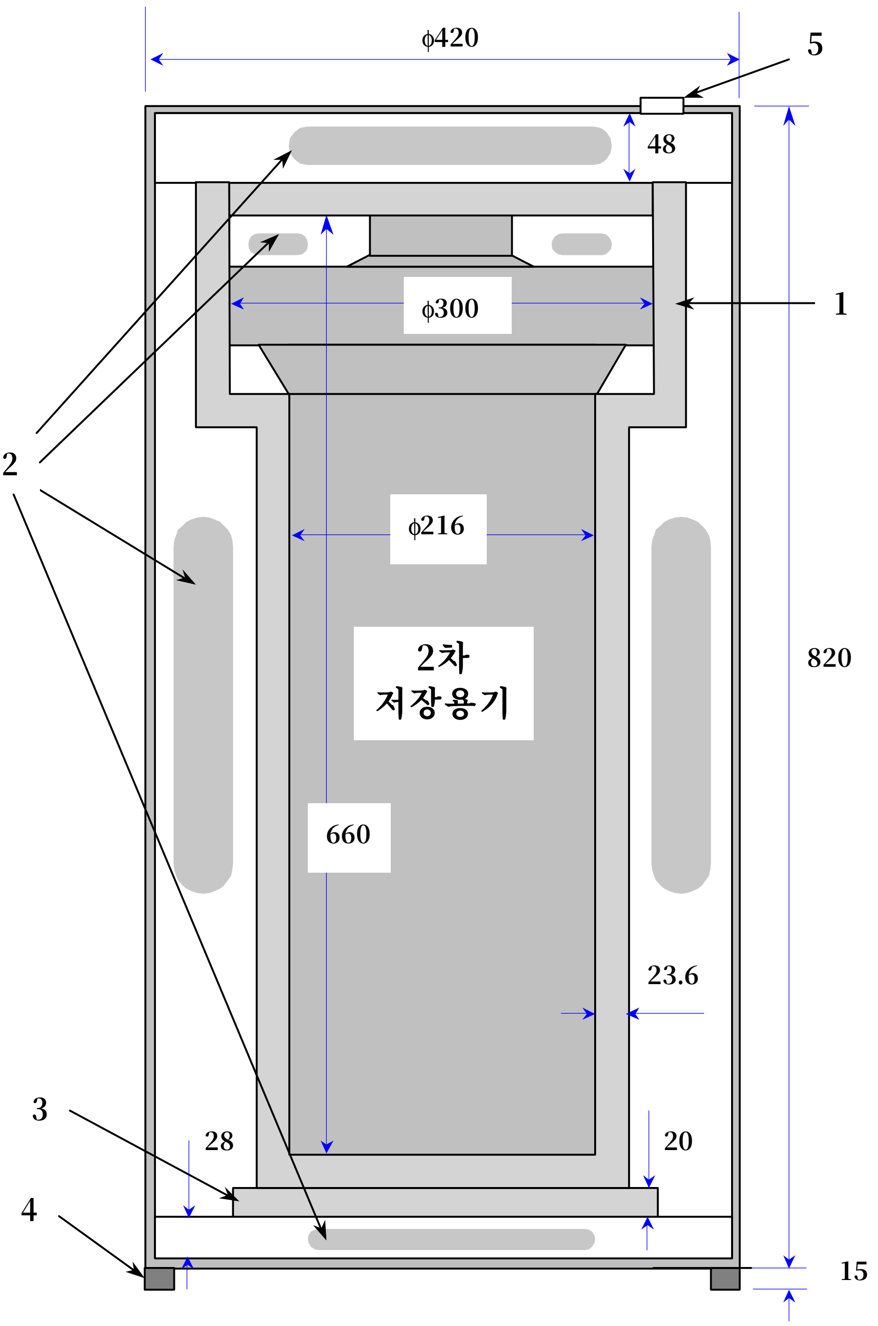

그림 1. 운반용기 구조도

(1-3M 단열재, 2-우레탄폼, 3-플랜지 부위, 4-드럼받침대, 5-배기구)

2. 수소 운반용기의 열해석

2-1. 붕괴열에 의한 내부온도 계산

과학기술부고시 제 2001-23 호 제 26 조(B(U)형 운반용기의 기술기준) 14 호에서는 섭씨 -40 도 내지 섭씨 38 도의 주변온도의 환경에서 건전성이 유지될 것을 규정하고 있다. 1 차 저장용기에는 500 kCi 의 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 1 차 저장용기의 건전성이 손상받기 때문이다. 섭씨 38 도의 외부환경에 노출된 경우, 내부 저장용기의 온도 상승을 예측하고자 한다.

트리튬의 붕괴열은 다음과 같이 계산된다.
1 Ci = 3.7×10^{10} β-photon/sec 에 해당되므로,
붕괴열(Hc)= 붕괴량 x 베타선 평균에너지 = 500 kCi x 3.7×10^{10} β-photon/Ci · sec x 5.69 keV/β-photon = 1.053×10^{17} keV/sec = 16.87 J/sec = 16.87 W

1 차 저장용기 내의 트리튬은 시간이 지남에 따라 그 양이 감소한다. 하지만 반감기가 12.3 년으로 충분히 길기 때문에 운반용기에서와 같이 장기간 취급을 요하는 상황이 아닌 경우에는 무시할 수 있다.

a. 내부온도 계산 I

1 차 및 2 차 저장용기의 구조재는 스테인리스강으로 그 열전달율은 다른 완충용 우레탄 폼이나 3M 단열재에 비해 충분히 크다. 운반용기의 방열구조에서 드럼 상하부로 전달되는 열량은 없다고 가혹하게 방열 조건을 가정하면, 운반용기 구조는 그림 2 의 원통 형태로 간략하게 모델링할 수 있다.

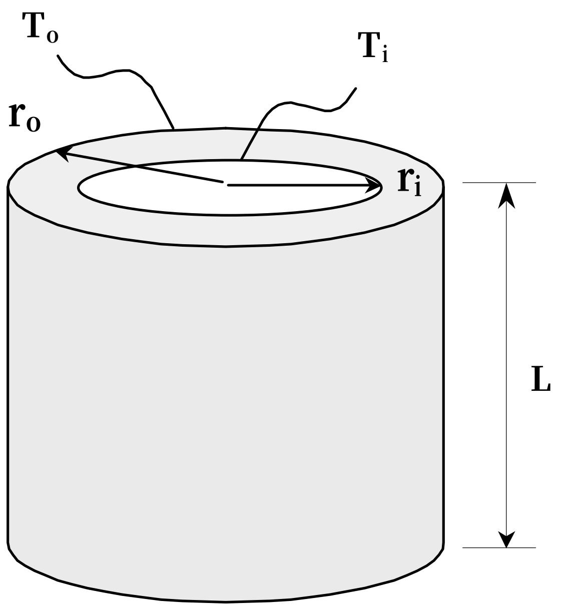

그림 2. 원통 모델

원통용기의 내부 온도가 방열로 인해 외부와 평형상태에 있다고 가정하면, 다음과 같이 Fourier's law 를 적용할 수 있다 [1).

$$Q = kA_r \frac{\Delta T}{\Delta r} = k2\pi rL\frac{\Delta T}{\Delta r}$$

$$Q = -2\pi kLr\frac{dT}{dr} = const$$

$$\frac{Q}{2\pi kL}\frac{dr}{r} = -dT$$

$$\frac{Q}{2\pi kL}\int_{r_i}^{r_o}\frac{dr}{r} = -\int_{T_i}^{T_o}dT$$

$$\frac{Q}{2\pi kL}\ln\frac{r_o}{r_i} = T_i - T_o$$

$$\therefore Q = 2\pi kL\frac{T_i - T_o}{\ln\frac{r_o}{r_i}} = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln\frac{r_o}{r_i}}{2\pi kL}} = \frac{T_i - T_o}{R_{th}}$$

여기서 $\dot{Q}$ 는 thermal energy release rate, $R_{th} = \frac{\ln\frac{r_o}{r_i}}{2\pi kL}$ thermal resistance, A 는 통 표면적, k 는 의 열전도 상수이다.

내부 1 차 및 2 차 저장용기를 하나의 단일체로 본다면, 외부 3M 단열재 층, 우레탄 완충재 층, 및 드럼 쉘로 방열작용이 저항받고 있는 셈이다. 따라서 이러한 직렬로 쉘이 형성되어 있는 경우에 있어서, 총열저항(thermal resistance)의 계산은 다음과 같다.

$$R_{th,\,total} = R_{3M} + R_{Urethane} + R_{drum} = \sum R_{th}$$

$$Q = \frac{\Delta T_{overall}}{\sum R_{th}} = \frac{T_{저장용기} - T_{외부}}{\sum R_{th}}$$

먼저 3M 단열재에서의 열저항을 가늠하면 다음과 같다. 내부 저장용기를 높이 66 ㎝(2 차 저장용기 전체 길이), 외경 21.6 ㎝(2 차 저장용기 하부관 외경)의 원통형으로 간략화 하고, 그 표면에 2.36 ㎝(3 겹) 두께로 3M 단열재를 둘렀다고 하면, 다음식과 같이 열저항이 계산된다.

$$R_{3M} = \frac{\ln\frac{r_{3M}}{r_{저장용기}}}{2\pi k_{3M}\,L_{3M}} = \frac{\ln\frac{0.132}{0.108}}{2\pi\times 0.151\times 0.66} = 0.32\ ℃/W$$

여기서, r_{3m} = 13.2 ㎝ : 단열재 반경, r 저장용기 = 10.8 ㎝ : 2 차 저장용기 하부관 반경, L_{3M} = 66 ㎝ : 2 차 저장용기 전체 길이, k = 0.151W/m.℃(93℃) : 3M 단열재의 열전도 상수이다.

우레탄 폼의 열저항을 가늠하면 다음과 같다. 내부 원통을 높이 70.7 ㎝(3M 단열제를 포함한 2 차 저장용기 전체 길이), 외경 26.3 ㎝(3M 층 외경)의 원통형으로 간략화 하고, 외경 41.4 ㎝ 의 우레탄 폼으로 그 둘레를 감싸고 있다면, 다음식과 같이 열저항이 계산된다.

$$R_{3M} = \frac{\ln \frac{r_{Urethane}}{r_{3M}}}{2\pi k_{Urethane} L_{Urethane}} = \frac{\ln \frac{0.207}{0.132}}{2\pi \times 0.0186 \times 0.707} = 5.445 \ ℃/W$$

드럼 쉘의 열저항을 가늠하면 다음과 같다. 내부 원통을 높이 81.4 ㎝(우레탄 폼 층의 전체 길이), 외경 41.4 ㎝(우레탄 폼 외경)의 원통형으로 간략화 하고, 외경 42.0 ㎝ 의 스테인리스강으로 그 둘레를 감싸고 있다면, 다음식과 같이 열저항이 계산된다.

$$R_{st} = \frac{\ln \frac{r_{st}}{r_{Urethane}}}{2\pi k_{st} L_{st}} = \frac{\ln \frac{0.21}{0.207}}{2\pi \times 16.245 \times 0.814} = 1.732 \times 10^{-4} \ ℃/W$$

여기서, r_{st} = 21.0 cm : 단열재 반경, $r_{Urethane}$ = 20.7 ㎝ : 우레탄 쉘 반경, $L_{Urethane}$ = 70.7 cm : 2 차 저장용기 전체 길이, k = 0.0388 cal/cm.sec.℃ = 16.245 W/m.℃ : STS304 의 상온 열전도 상수이다.

따라서, 전체 열저항은 다음과 같다.

$$R_{th,total} = R_{3M} + R_{Urethane} + R_{drum} = 0.32 + 5.445 + 1.732 \times 10^{-4} = 5.765 \ ℃/W = \sum R_{th}$$

T 외부온도는 38℃ 이고, 방열량은 16.8 W 이므로, 평형상태에서의 내부온도는 다음과 같이 나타난다.

$$Q = \frac{T_{저장용기} - T_{외부}}{\sum R_{th}}$$

$$\therefore T_{저장용기} = Q \times \sum R_{th} + T_{외부} = 16.8 \times 5.765 + 38 = 134.8 \ ℃$$

이 값은 상하면이 완전 단열된다고 가정하여 나온 값이므로 실제보다 내부 온도가 높게 산정되어 있다.

b. 내부온도 계산 II

운반용기 구조를 그림 3 과 같이 원통 쉘 형태로 모델링하고, 각 쉘의 전체 면에서 열량이 발산된다고 가정할 수 있다.

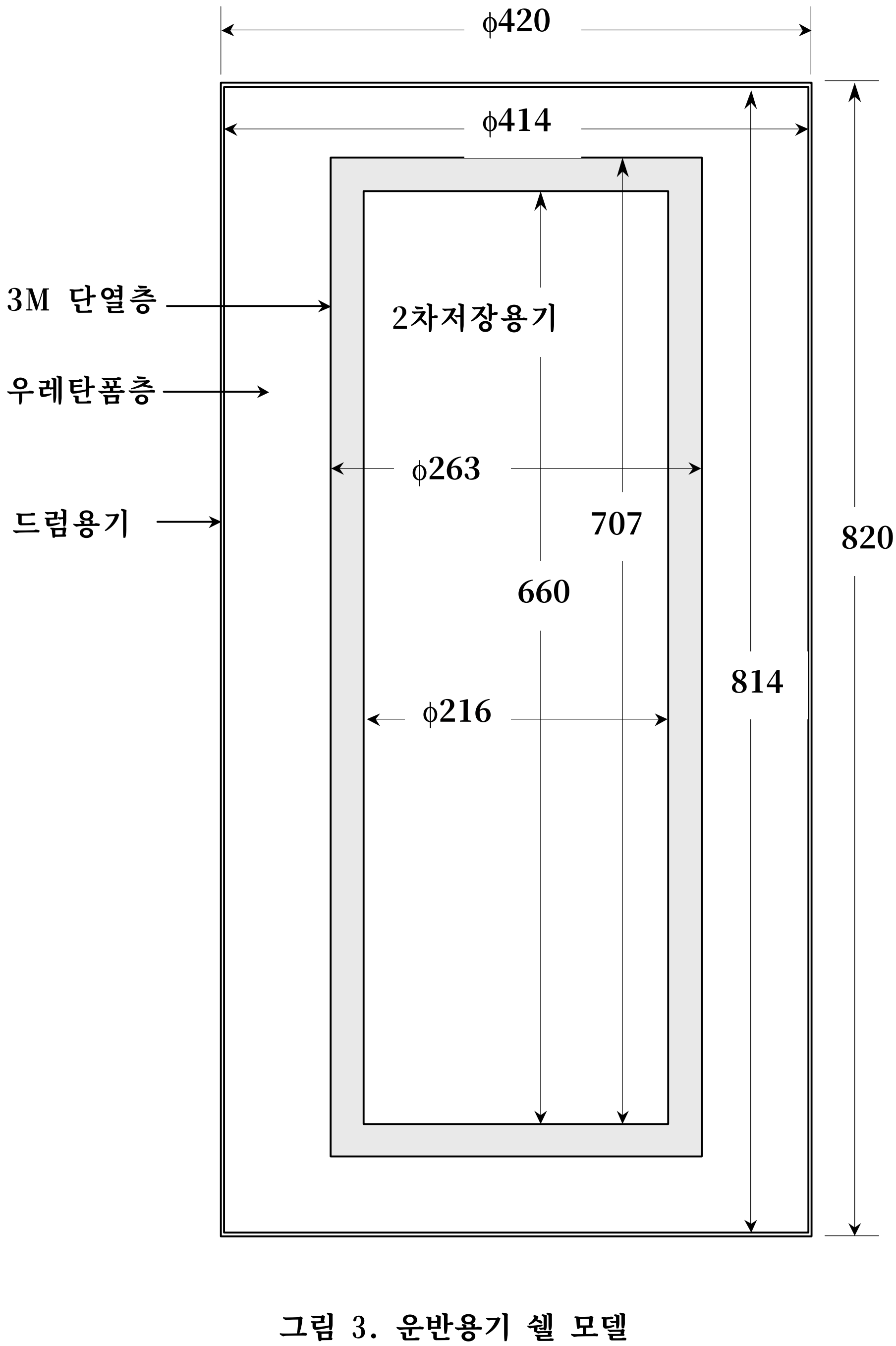

그림 3. 운반용기 쉘 모델

일반적인 Fourier's law 를 적용하여 방열량을 산출하여 보면 다음과 같다.

$$Q = kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{kA}} = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

$$R_{th} = \frac{\Delta x}{kA} \quad : \text{thermal resistance}$$

여기서, $\Delta x \approx r_o - r_i$: 단열층 두께, A : 열전달 면적, k :열전도 상수이다. 열전달 면적 A는 쉘의 중간 값을 대표값으로 산정하여 계산에 활용하고자 한다.

먼저 3M 단열재에서의 열저항을 가늠하면 다음과 같다.

$$\overline{A_{3M}} = 2\pi\ \overline{r_{3M}}\ \overline{L_{3M}} + 2\pi\ \overline{r_{3M}}^2$$

$$= 2\pi \times 0.2395 \times 0.6835 + 2\pi \times 0.2395^2$$

$$= 1.389\ m^2$$

$$\overline{R_{3M}} = \frac{\Delta x_{3M}}{k_{3M}\overline{A_{3M}}} = \frac{0.0236}{0.151 \times 1.389} = 0.1125\ ℃/W$$

여기서 $\overline{r_{3M}} =$ (0.216+0.263)/2, $\overline{L_{3M}} =$ (0.660+0.707)/2, $\Delta x_{3M} =$ 0.0236 m, k_{3M}=.151W/m.°C(93°C) 이다.

우레탄 완충재에서의 열저항을 가늠하면 다음과 같다.

$$\overline{A_{Ur}} = 2\pi\ \overline{r_{Ur}}\ \overline{L_{Ur}} + 2\pi\ \overline{r_{Ur}}^2$$

$$= 2\pi \times 0.3385 \times 0.7605 + 2\pi \times 0.3385^2$$

$$= 2.337\ m^2$$

$$\overline{R_{Ur}} = \frac{\Delta x_{Ur}}{k_{Ur}\overline{A_{Ur}}} = \frac{0.0755}{0.0186 \times 2.337} = 1.737\ ℃/W$$

여기서 $\overline{r_{Ur}} =$ (0.263+0.414)/2, $\overline{L_{Ur}} =$ (0.707+0.814)/2, $\Delta x_{Ur} =$ 0.0755 m, $k_{Ur} =$0.0186W/m.°C 이다.

드럼 쉘에서의 열저항을 가늠하면 다음과 같다.

$$\overline{A_{ST}} = 2\pi\ \overline{r_{ST}}\ \overline{L_{ST}} + 2\pi\ \overline{r_{ST}}^2$$
$$= 2\pi \times 0.417 \times 0.817 + 2\pi \times 0.417^2$$
$$= 3.233\ m^2$$
$$\overline{R_{ST}} = \frac{\Delta x_{ST}}{k_{ST}\overline{A_{ST}}} = \frac{0.003}{16.245 \times 2.337} = 7.9 \times 10^{-5}\ ℃/W$$

여기서 $\overline{r_{ST}}=$ (0.420+0.414)/2, $\overline{L_{ST}}=$ (0.820+0.814)/2, $\Delta x_{ST}=$ 0.003 m, $k_{ST}=$ 16.245 W/m.℃ : STS304의 상온 열전도 상수이다.

따라서, 전체 열저항은 다음과 같다.

$$\sum R_{th} = R_{3M} + R_{Ur} + R_{ST} = 0.1125 + 1.737 + 7.9 \times 10^{-5} \approx 1.85\ ℃/W$$

T외부온도는 법규에서 제시하는 38℃ 이고, 방열량은 16.8 W이므로, 평형상태에서의 내부온도는 다음과 같이 나타난다.

$$Q = \frac{T_{저장용기} - T_{외부}}{\sum R_{th}}$$
$$\therefore T_{저장용기} = Q \times \sum R_{th} + T_{외부} = 16.8 \times 1.85 + 38 = 69.1\ ℃$$

계산결과, 내부 스테인리스 저장용기의 온도는 섭씨 69 도까지 상승함을 예측할 수 있다. 실제로는 바닥면에서 세라믹 보드로 인해 열전달이 방해받고 있으므로 내부 온도는 이보다 약간 높게 나타날 것으로 예상된다. 하지만 이 값은 앞선 계산 I에 비해 현실적인 값이라고 할 수 있다.

따라서, 붕괴열로 인한 저장용기의 온도는 섭씨 70 도 에서 134 도 사이에 있을 것으로 예상된다.

2-2. 일반운반조건에서의 내부온도 계산

과학기술부고시 제 2001-23 호 제 25 조(A형 운반용기의 기술기준) 5 호는 B(U)형용 운반용기에도 해당되는 사항이다. 이 경우, 운반용기의 구성품은 섭씨 -40 도 내지 섭씨 70도의 범위에 해당하는 온도의 환경에서 손상받지 않아야 한다.

앞서 내부온도 계산 II 에서도출된 식을 이용하여, 외부온도와 평형상태에서의 내부 저장용기의 온도를 산출하면 다음과 같다.

외부환경 -40 ℃ : 내부저장용기 섭씨 -8.9 ℃
외부환경 70 ℃ : 내부저장용기 섭씨 101.1 ℃

따라서, 내부 저장용기의 온도는 -8.9 ℃에서 101.1℃에 해당되는 조건에 놓이게 되며, 이러한 온도는 내부 1 차 저장용기의 건전성을 해칠 정도는 아니라고 판단된다.

3-3. 화재사고에 의한 열차폐 계산

1 차 저장용기는 2 차 저장용기로 보호되며, 이들 저장용기들은 3M 단열재로 보호된다. 완충재로 사용되는 우레탄 폼은 내열온도가 180 ℃로서 그 이상의 온도에서는 분해된다. 따라서 열 차폐 성능이 좋지않은 드럼용기 및 완충재보다는, 3M 단열재의 단열 특성이 중요하다고 할 수 있다. 따라서 3M 단열재를 기준으로 섭쌔 800 도 화재시험시의 내부 저장용기의 온도 상승을 가늠해 보고자 한다. 단 30 분간의 짧은 시간이므로 미량의 내부 붕괴열은 무시하기로 한다. 그리고 초기 내부 설정 온도를 앞서 붕괴열에서 계산한 섭씨 69 도로 한다.

아래 그림 4 와 같이 섭씨 800 도의 화염에 노출되었을 때, 3M 단열제를 차폐재로 하여 내부 저장용기를 69 도에서 200 도로 올리는데 걸리는 시간을 계산하면 다음과 같다.

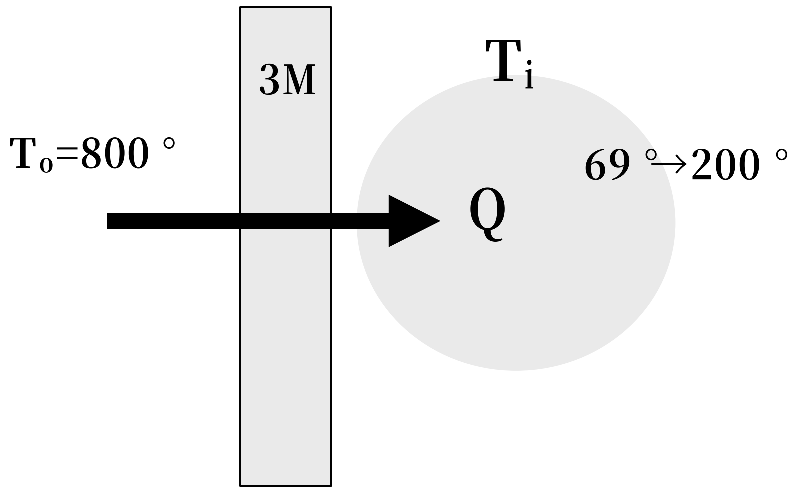

그림 4. 3M 단열재에서의 열이동

열 전달량에 관한 Fourier's law 를 적용하면 다음과 같다.

$$Q = \frac{dQ}{dt} = kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = kA\frac{(800℃ - T_i)}{\Delta x}$$

$$dQ = kA\frac{(800℃ - T_i)}{\Delta x}\,dt$$

여기서 k = 0.175W/m.K = 4.18x10^{-4} cal/cm.s.℃(177℃) 3M 단열재의 열전달율, Δx = 2.36 cm : 3M 단열재의 두께, T_i : 내부저장용기 온도, A = $\overline{A_{3M}} = 1.389\ m^2 = 13890\ cm^2$: 3M 단열재의 열전달 면적이다.

내부로 전달된 열량에 의한 내부저장용기의 온도 상승은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dQ = dT_i\,\rho M$$

여기서 ρ= 0.12 cal/g.℃ : 내부저장용기 STS304 의 비열, M = 66.17 kg :내부저장용기의 전체 무게이다.

따라서,

$$dT_i\,\rho M = kA\frac{(800℃ - T_i)}{\Delta x}\,dt$$

$$dt = \frac{\Delta x\rho M}{kA}\,\frac{dT}{(800℃ - T)}$$

$$\int dt = \int_{69℃}^{200℃}\frac{\Delta x\rho M}{kA}\,\frac{dT}{(800℃ - T)}$$

$$t = \frac{\Delta x\rho M}{kA}\ln\frac{(800℃ - T_1)}{(800℃ - T_2)}$$

이다. 여기서 초기온도 T_1 = 69 도, 한계온도 T_2 = 200 도 이므로, 내부저장용기를 69 도에서 200 도로 가온하는데 걸린 시간은 다음과 같다.

$$t = \frac{\Delta x\rho M}{kA}\ln\frac{(800℃ - T_1)}{(800℃ - T_2)} = \frac{2.36\times 0.12\times 66170}{4.18\times 10^{-4}\times 13890}\ln\frac{(800℃ - 69℃)}{(800℃ - 200℃)}$$

$$= 637.4\ \text{sec} = 10.6\ \text{min}$$

한편, 30 분 후의 내부저장용기의 온도를 위식으로부터 계산하면 약 381.5 도로 상승하게 된다. 이값은 드럼 쉘이나 우레탄폼이 없다고 가정하고 3M 단열재만의 열저항을 고려한 값으로서 실제 값은 이보다 낮게 나타날 것으로 판단된다. 그리고 내부 저장용기의 설계온도가 400℃이므로 두께 2.36cm 의 3M 단열재는 충분한 열적 건전성을 운반용기에 제공할 수 있다고 판단된다.

이론적으로 내부저장온도가 400℃로 상승해도 4.39x10^{-4} atm 의 진공이 유지되므로 내부저장용기는 내압이 걸리지 않으며, 1 차 저장용기에서 누설 가능한 부위인 밸브의 한계 온도인 632℃ 보다 낮기 때문에 1 차 저장용기의 건전성에 전혀 무리가 가지 않는 것으로 나타난다.

3. 수소 운반용기의 열시험

열차폐 계산 결과를 확인하기 위하여 2 차저장용기를 3M 단열재를 두께 2.36㎝ 의 3 겹으로 제작하였다. 800℃에서 30 분의 화재시험은 방재시험연구원에 있는 가열로를 이용하여 시험하였다.

2 차저장용기 단열체를 가열로내에 설치한 다음, 그림 5 와 같이 가열로 문을 닫고 가열하였다. 가열 5 분 후 가열로의 내부온도는 760℃, 7 분 후 787℃, 9 분후 795℃, 10 분 후 809℃ 로 나타났으며, 이후 805±5℃의 일정 온도를 유지하였다.

그림 5. 방재시험연구원의 가열로에 설치된 2 차저장용기 단열 시험체의 모습

실제 800℃, 30 분 가열 조건의 시험에서 2 차저장용기 내부는 내부온도를 100℃

이하로 유지할 수 있었다. 2 차저장용기 내부온도는 85 90℃로 측정되었으며, 2 차저장용기 표면온도는 115 120℃로 측정되었다. 이와 같은 시험결과는 예상수치해석 결과보다 훨씬 낮게 나왔다.

2 차저장용기 내부온도가 수치해석에 비해 시험결과가 낮게 나온 이유로는 초기 붕괴열에 따른 내부온도상승을 시험에 적용하지 않은 데 그 원인을 찾을 수 있다. 그리고 단열재 첫번째 겹 표면이 170 180℃로 실제 시험에서는 측정되었는데, 이론적인 해석에서는 초기 조건을 모든 3M 단열재 표면이 800℃라고 엄격하게 두었기 때문에 실제보다 높게 2 차저장용기 내부온도가 도출되었다고 판단되었다.

이상과 같이 실제 시험에서는 3M 단열재는 800℃, 30 분 가열 조건에서 2 차용기를 완벽하게 단열시키고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

트리튬의 붕괴열에 따른 내부 저장용기의 온도 상승을 계산하였으며, 섭씨 800 도의 외부 조건에 30 분간 노출되었을 때, 내부 저장용기의 온도 상승을 Fourier's law 를 적용하여 가능한 결과는 다음과 같았다.

- 저장용기 내부의 트리튬 붕괴열 16.87 W 에 의한 운반용기 내부의 저장용기의 평형 온도는 섭씨 70 도 에서 134 도 사이로 나타났다.

- 붕괴열을 고려하여 화재시험조건인 800℃, 30 분 노출 조건에서, 3M 단열재를 이용하여 내부 저장용기의 온도상승을 계산한 결과, 약 381℃로 나타났으며, 이는 엄격한 외부 온도조건을 가정하여 실제상황보다 높게 해석된 것으로 판된되었다.

- 실제 3M 단열재를 이용하여 2 차저장용기의 800℃, 30 분 노출 화재 시험을 수행한 결과, 내부 저장용기의 온도상승은 100℃ 미만으로 나타났으며, 결론적으로 3M 단열재는 800℃, 30 분 가열 조건에서 2 차용기 를 완벽하게 단열시키고 있다고 판단되었다.

6. 참고 문헌

1. Warren L. McCabe, Julian C. Smith, and Peter Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, Fifth Edition. McGraw-Hill, Singapore 1995, Chap 10.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.