

대형용기의 열저항에 의한 열특성시험

방경식 · 이주찬 · 서기석 · 도재범 · 민덕기
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

PWR 사용후핵연료 집합체를 운반하기 위한 대형용기는 다층구조로 구성되며, 층과 층사이의 접합부에서의 열전달이 발생한다. 이러한 열전달은 고체간의 열전달과 접합부에서의 공극안 기체를 통한 열전달로 구분되며, 후자에 의한 영향을 크게 받는다. 따라서, 2개의 chamber로 구성된 고온열시험장치에 대형용기의 section모델을 넣고 각각의 chamber에 다른 열용량을 유입한 시험을 수행하고 동일조건하의 열해석을 수행하여 열저항계수를 산출하였다.

1. 서 론

원자력발전소에서 연소하여 방출되는 사용후핵연료를 안전하게 운반하기 위한 수송용기는 주요 구조물인 스테인레스강과 구조물사이에 감마선차폐재인 납과 중성자차폐재를 주조하여 채운 복합층의 형태로 구성되어 있다.

이런 다양한 재질로 구성된 복합층 형태의 용기를 제작할 경우 층과 층사이에 air gap이 생기게 되며, air gap은 국내의 원자력법규에서 규정하고 있는 정상조건의 경우 수송용기 내부에 적재되어 있는 사용후핵연료로부터 나오는 고온의 붕괴열을 외부로 방출하는데 적지 않은 열저항을 가져오게 되며, 가상사고조건의 경우에는 화염으로 인한 외부의 높은 열을 적절히 차단하는 열차폐효과를 하게 된다. 따라서, 점차 대형화해 가는 용기의 개발에 있어 중량감소와 최적화한 해석을 수행하기 위한 입력자료를 생산하는 것이 중요하다.

임의의 열전도계수를 가진 2개의 물질을 그림 1(a)와 같이 접촉시켰을 경우 막대의 옆면이 절연되었다면 열은 그림에서 표시한 방향으로만 흐를 것이고 정상상태하에서 열의 흐름은 일정할 것이다. 이때 두 물질을 통한 온도의 분포는 그림 1(b)와 같이 단면 2, 즉 접촉면에서의 접촉열저항에 의해 급격한 온도변화가 발생하는 것을 기존연구결과^{1, 2}에서 입증되었다. 열흐름방정식은 두 물질의 에너지균형으로부터 다음의 식³으로 설명된다.

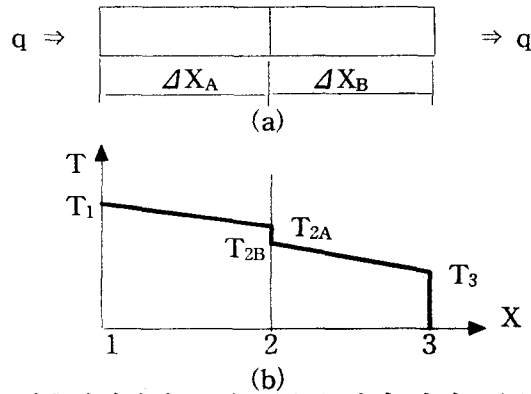


그림 1. 접촉열저항의 효과 (a) 물리적 상태, (b) 온도분포.

$$q = k_A A \frac{T_1 - T_{2A}}{\Delta X_A} = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{1/h_c A} = k_B A \frac{T_{2B} - T_3}{\Delta X_B} \dots\dots (1)$$

또는
$$q = \frac{T_1 - T_3}{\Delta X_A/k_A A + 1/h_c A + \Delta X_B/k_B A} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $1/h_c A$ 를 접촉열저항이라 하고 h_c 를 접촉계수라 하며, 두 물질을 접촉시키는 경우가 실제로 대단히 많기 때문에 접촉열저항은 열전달연구에서 대단히 중요하다. 완전무결하게 매끈한 표면이란 실제로 존재할 수 없고 표면의 조도(roughness)로 인해서 접촉열저항이 발생하게 되며, 접합부에서의 열전달은

- 접촉점에서의 고체간의 열전도
- 접촉부의 공극(void space)안의 기체를 통한 열전도

로 구분되며, 기체의 열전도계수가 고체의 경우보다 매우 작기 때문에 주로 후자에 기인한다.

고체간의 접촉면적을 A_c , 공극안의 기체와의 접촉면적을 A_v 라 하면

$$q = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{L_g/2k_A A_c + L_g/2k_B A_c} + k_f A_v \frac{T_{2A} - T_{2B}}{L_g} = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{1/h_c A} \dots (3)$$

이다. 여기서 L_g 는 공극의 두께이고, k_f 는 공극 안에 밀폐된 유체의 열전도계수이며 A 는 두 물질의 총 단면적이다. 위 식을 접촉계수 h_c 에 관해서 풀면 다음과 같다.

$$h_c = \frac{1}{L_g} \left(\frac{A_c}{A} \frac{2k_A k_B}{k_A + k_B} + \frac{A_v}{A} k_f \right) \dots\dots\dots (4)$$

대부분의 경우 공극 내의 유체는 공기이고 만약 접촉면적 A_c 가 작다면 대부분의 열저항은 공극에서 일어난다. 접촉열저항 문제는 이론적으로는 매우 간단한 것 같으나 실제의 경우 표면적의 조건은 매우 복잡하기 때문에 접촉면에서의 A_c , A_v 및 L_g 의 값을 구하기는 매우 어려운 문제이며, 모든 형태의 물질에 대한 접촉열저항을 예측할 수 있는 만족할 만한 이론이나 실험식은 존재하지 않는다. 따라서, 특수한 물질이 다층형으로 구성되는 사용후핵연료를 운반하기 위한 수송용기에 대해 열저항에 의한 열특성시험을 수행하고 동일조건하의 열해석결과와 비교 검토하여 초과

층사이의 air gap에 대한 열저항계수를 산출하여 보다 정확한 해석결과를 얻고자 열저항에 의한 특성시험을 수행하였다.

2. 열특성시험

시험모델

열저항시험모델은 PWR 사용후핵연료 28다발을 수송할 수 있는 대형 수송용기를 535 mm(W)×363 mm(L)×605 mm(H)의 section으로 자른 크기로 본체와 같은 재질을 적용하여 제작하였으며, 주요 구조물인 내부셀은 38 mm, 중간셀은 70 mm 그리고, 외부셀은 15 mm로 하였다. 또한, 감마선차폐체인 납은 90 mm로, 중성자차폐체인 실리콘복합체는 150 mm로 하였으며, 각층부위의 온도를 측정하기 위하여 온도감지선이 크로멜-알루멜로 되어있는 K type의 열전대를 부착하였다.

고온열시험장치

시험장치는 내부크기가 700 mm(W)×1500 mm(L)×615 mm(H)이며, 2개의 chamber로 구성되어 있다. Chamber 1은 온도를 1000 ℃까지 유지하기 위해 30 kW 용량의 heater가 설치되어 있으며, chamber 2는 300 ℃까지 온도를 유지할 수 있도록 10 kW 용량의 heater가 설치되어 있으며 각각 별도의 제어 시스템으로 구성되어 있다.

측정시스템

열저항특성시험에 대한 온도측정계통은 그림 2와 같다. 대형용기의 section 모델에 부착된 Chromel-Alumel(K type) 열전대의 S.S-316 sheathed 직경은 1.6 mm로 사용하였으며, 이들 열전대는 열전대 scanner의 각 channel을 통하여 interface인 A/D converter를 거쳐 P/C로 연결된다. 이 시스템에 구성되어 있는 열전대 scanner는 모델 ACRO-931로서 K-type의 열전대에 대해 ± 0.24 ℃의 정확도를 가지며, 모두 5개의 input module로 구성되어 있으며, 1 module에는 8 channel의 온도측정이 가능하며 5개의 module로부터 총 40 channel까지의 온도측정이 가능하다. 열전대 scanner에서 측정된 온도는 50 ms의 전송속도를 갖는 A/D converter를 통하여 analog 신호가 digital 신호로 바뀌어 P/C에 내장된 software에 저장되고 분석되어지며, 과도시간에 따른 온도변화를 monitoring 하게 된다.⁴



그림 2. 측정시스템.

열특성시험

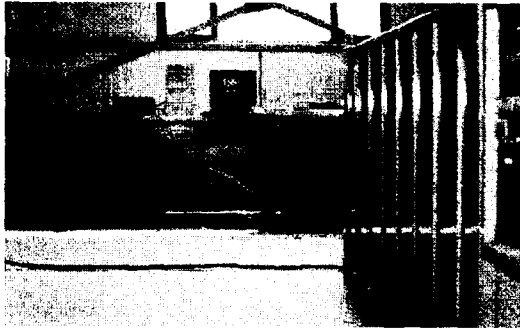


그림 3. 열특성시험.

열특성시험은 그림 3과 같이 고온열시험장치에 section 모델을 넣고 측정시스템을 구성하여 시험을 수행하였다. 시험조건은 대형용기의 cavity에 해당하는 고온열시험장치의 chamber 1 온도는 200 °C, 250 °C인 2가지의 경우를, 주변온도에 해당하는 chamber 2의 온도는 법규⁵⁻⁷에서 규정하고 있는 38°C를 적용하여 section 모델의 온도분포가 평형상태에 도달한 후 고온열시험장치의 가동을 중지하고 시험을 종료하였다.

열해석

대형용기 section 모델에 대한 열해석은 Heating-7.2 code⁸ 를 사용하여 해석을 수행하였다. 이 코드를 사용한 열해석에 있어서의 경계조건으로는 대형용기의 내부셀의 heat transfer modes에 대해 밀폐된 공간에서의 자연대류에 의한 열전달을 적용하였으며, chamber 1과 chamber 2 사이의 대형용기 section 모델의 heat transfer modes에 대해서는 수송용기 몸체를 통한 전도열전달을 section 모델표면에서는 자연대류 및 복사열전달을 고려하였다. 또한, 상하부로는 단열되는 조건을 적용하였다.

3. 결과 및 토의

열특성시험 및 해석결과는 표 1 및 그림 4에 나타내었다. 표 1에서 보면, 열특성시험결과에 있어서 내부셀과 납의 접합부인 내부셀 외벽의 온도는 chamber 1의 온도가 200 °C인 경우 시험에서는 121 °C, 해석에서는 124 °C로 3 °C 정도의 온도차이가 있었으며, chamber 2의 온도가 250 °C인 경우는 시험에서는 155 °C로 해석에서의 159 °C보다 4 °C 정도 온도가 낮게 나타났음을 알 수 있다. 이것은 열전도계수가 서로 다른 2개의 물질이 접촉됨에 따른 접촉열저항에 의한 온도강하가 발생한 것임을 알 수 있다.

열저항계수를 식 (3) 및 (4)로부터 산출하는 것은 매우 어려운 문제이다. 그것은 접촉면에서의 표면적의 조건이 매우 복잡하여 A_c , A_v 및 L_g 의 값을 구하기가 어려우며, 모든 형태의 물질에 대한 접촉열저항을 예측할 수 있는 만족할만한 이론이나 실험식이 존재하지 않기 때문이다. 따라서, 특수한 물질이 다층형으로 구성되는 대형용기에 대해 열특성시험을 수행하여 얻어진 온도를 역으로 아래의 식에 대입하여 열저항계수를 산출하였다.

표 1. Comparisons of Section Model Temperatures between Test and Analysis

Location	Temperature(℃)			
	Test	Analysis	Test	Analysis
Innershell 내벽	126	126	162	162
Innershell 외벽	121	124	155	159
Lead Shield	118	123	153	158
Intermediate-shell 내벽	115	122	150	156
Intermediate-shell 외벽	114	120	148	153
Silicone Mixture	106	112	136	141
Model Surface	96	102	122	127
Chamber 1 Temp.	200		250	

접촉표면의 온도차를 ΔT_C 라 하고 두 물질의 온도차를 ΔT 라 하면

$$\Delta T_C = \frac{R_C}{\sum R_{th}} \Delta T \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum R_{th} = R_{th} + R_C \dots\dots\dots (6)$$

이다. 여기서, $R_C = 1/hcA$ 로서 접촉열저항이고, R_{th} 는 각물질의 열저항이다.

식 (5) 와 (6)으로부터 접촉열저항 R_C 는 다음과 같다.

$$R_C = \frac{\Delta T_C(R_{th})}{\Delta T - \Delta T_C} = \frac{1}{hcA} \dots\dots\dots (7)$$

대형용기에서의 열저항은 주로 내부셀과 납, 그리고 납과 중간셀의 접합부에서 발생하게 된다. 이것은 내부셀과 중간셀사이에 주조되어 채워지는 감마선차폐재인 납이 수축되며 발생하는 air gap에 의해 발생하게 되며, 중간셀과 외부셀사이의 중성자차폐재인 실리콘복합체는 주조 후 약간의 수축현상이 발생하나 이 물질은 낮은 온도에서도 열팽창이 발생하여 완전밀착이 되므로 열저항현상은 거의 발생치 않는다. 따라서, 열특성시험 및 해석을 수행하여 얻어진 내부셀과 납의 접합부에서의 온도강하 ΔT_C 를 위의 식에 대입하여 air gap에서의 열저항계수를 아래와 같이 산출하였다.

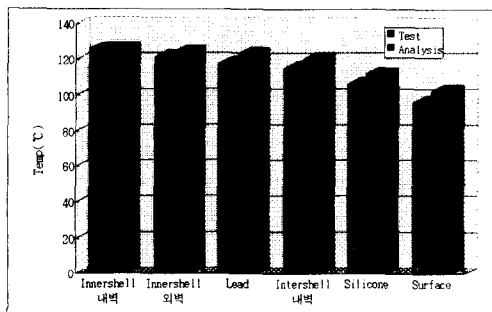
- Chamber 1의 온도가 200 ℃인 경우 : $1/hc = 1.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{℃}/\text{W}$

- Chamber 1의 온도가 250 ℃인 경우 : $1/hc = 2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{℃}/\text{W}$

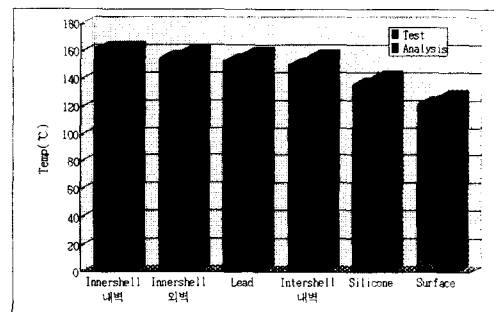
지금까지 얻어진 열저항계수만으로는 열해석 입력자료로 활용하는데는 미흡한 점이 많이 있다. 이것은 chamber 1의 온도가 200 ℃와 250 ℃의 두 가지 경우에 대하여만 수행한 결과로 온도대에 따른 경우의 수가 너무 작아 입력자료로 활용할 온도대 함수가 너무 적기 때문이다. 앞으로는 더 많은 온도대에 따른 시험을 수행하여 온도대에 따른 지수함수를 산출하여 산출한 지수함수를 해석입력자료로 활용하여 보다 정확한 열해석을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. Sziklas, E. A. : "An Analysis of the Compressible Laminar Boundary Layer with Foreign Gas Injection", United Aircraft Corp. Res. Sr-0539-8, 1956.
2. Xckert, E. R. G., et al.: "Mass Transfer Cooling of a Laminar Boundary Layer by Injection of a Light Weight Foreign Gas", Jet Propulsion, Vol. 28, pp. 34-59, 1958.
3. J. P. Holman, "Heat Transfer", International Student Edition 4th Ed, pp. 59-62, 1976.
4. 도재범 외, "수송용기 안전성시험기술개발", KAERI-NEMAC/RR-134/94, 한국원자력연구소, 1994.
5. 과학기술처, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 과학기술처 고시 제 96-38호, 1996.
6. IAEA Safety Series No.6, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1985 Ed., Amended 1990.
7. 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.
8. K. W. Childs, "Heating-7.2f", Multi-Dimensional Finite Difference Heat Conduction Analysis, ORNL/CAD, 1993.



(Chamber 1 Temp. 200°C)



(Chamber 1 Temp. 250°C)

그림 4. Comparisons of Test and Analysis Result.