

수직으로 설치된 비균질 평판 단열재용 성능시험장치 개발

Development of Thermal Performance Tester for Non-Homogeneous Insulation Pannels Installed Vertically

오홍영(Hong Young Oh), 송기오(Ki O Song)[†], 전현익(Hyun Ik Jeon), 조선영(Sun Young Cho)
케이엘이에스 주식회사 부설연구소
Research Institute, KLES Inc., Daejeon, 34015, Korea

(Received January 26, 2016; revision received March 28, 2016; Accepted: March 30, 2016)

Abstract In case of metal insulation, which is produced by stacking stainless steel sheets and air layers in a multi-stack manner at a specific thickness, insulation performance will be evaluated based on thermal transmittance rather than the intrinsic physical properties of each material such as thermal conductivity. However, there is no standard for measuring thermal transmittance targeted for non-homogeneous insulation which is used in relatively high temperature conditions such as a power station. In this study, the thermal conductivity of homogeneous insulation acquired by the standardized guard hot plate method and the thermal conductivity of homogeneous insulation measured by the newly developed performance tester were compared to verify the confidence level of the tester. As a result, thermal conductivity acquired by the newly developed thermal transmittance tester was about 6% higher than the thermal conductivity measured by the existing guard hot plate method under the anticipated service temperature conditions.

Key words Guarded hot plate method(보호 열판법), Guarded hot box method(보호 열상자법), Non-homogeneous (비균질 단열재), Thermal transmittance(열관류율), Thermal conductivity(열전도율), Heat loss(열손실)

[†] Corresponding author, E-mail: kionsong@kles.co.kr

기호설명

k : 열전도도 [$W/m \cdot K$]
 T : 절대온도 [K]
 Q : 전력 [W]
 q : 소모전력 [W]
 L : 두께 [m]
 A : 면적 [m^2]
 t : 시간 [min]

하첨자

OM : 계측상자 외면
 IM : 계측상자 내면
 OA : 외부 공기
 IA : 내부 공기
 OS : 시편 외면
 IS : 시편 내면

1. 서 론

원전냉각재상실 사고 시 발생하는 이물질로 인해 재

순환 집수조 여과기가 막히거나 여과기를 통과한 이물질이 노심의 안정성을 저해하는 GSI-191 현안의 해결을 위해 여과기 설비개선이 이루어지고 있으며, 이와 같은 맥락으로 미국 원자력규제위원회는 SECY-12-93에서 제시한 바와 같이 기존 섬유질 단열재보다 수두손실 발생요인이 적은 내, 외피가 모두 스테인리스 재질인 금속단열재 사용을 권고하고 있다.^(1, 2) 금속단열재는 스테인리스 박판과 공기층이 적층된 다층구조로 원전설계 상 반영된 단열재 두께범위 이내에서 요구되는 단열재의 단열성능이 확인되어야 한다. 단열재를 대상으로 한 표준화된 성능시험 장치에는 비교적 저온에서 행해지는 건축용 자재에 대한 열관류율 측정용 보호열상자 시험장치(Guarded Hot Box)⁽³⁾와 고온 환경에 사용하고 있는 균질한 섬유질단열재를 대상으로 한 열전도율 측정용 보호열판 시험장치(Guarded Hot Plate)가 있다. 특정 두께로 공기층과 금속박판이 겹겹이 적층된 비균질 단열재의 경우, 열관류율로 단열특성이 평가되지만 건축용 단열재를 대상으로 한 보호열상자 시험법은 열전달 모드 중 절대온도의 4제곱에 비례하는 복사 특성까지 고려해야하는 고온용 금속단열재 시험방법으

로는 부적합하다. 또한 보호열판법은 균질한 단열재⁽⁴⁾를 대상으로 한 열전도율 측정법으로 비균질 단열재의 단열성능을 평가하기에는 무리가 있다. 본 연구에서는 산업현장에서 많이 사용되고 있는 섬유질단열재를 사용하여 예상시험온도에서의 열전도율을 보호열판 시험장치(GHP)⁽⁵⁾로 측정한 후, 동일한 단열재를 개발된 보호열상자 시험장치(GHB)를 통해 열전도율을 측정한 결과와 상호 비교하여 장치신뢰성을 검증하고자 하였다.

2. 실험장치

2.1 장치구조 및 원리

개발된 단열성능 시험장치는 크게 보호상자(Guard box), 계측상자(Metering box) 그리고 항온실로 구분되며 개략적 구조, 온도측정 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 정상상태에서의 온도변화를 최소화하기 위해 계측상자와 보호상자는 사용온도범위 내에서 1.0 W/m·K 이하의 열전도율을 가지는 균질한 섬유질 단열재로 제작하였다. 시편으로 열을 공급하기 위한 평판형 히터를 계측상자 내부에 배치하였으며, 시편에 수직인 방향으로 소모되는 열만을 고려하기 위해 보호상자 내에도 히터를 배치하여 이들 상자 사이에서의 열교환을 최소화하고자 하였다. 또한 계측상자 내·외면의 균일한 온도분포를 형성시키기 위해 보호상자 내부에는 순환용 팬을 설치하였다. 계측상자 개구부 면적은 시편고정이 가능하도록 시편보다 가로, 세로가 각 10 mm 작게 설계되었으며, 시편과 접하는 계측상자 모서리에는 섬유질 단열재를 제작된 가스켓으로 사용하여 구조물을 통해 외부로 전달되는 열과 보호상자와 계측상자 간 대류에 의한 열전달을 억제하였다. 그리고 시험 중 시편측면과 접해 있는 보호상자 사이에는 이들 간 전도에 의한 열전달을 최소화하기 위해 균질한 섬유질 단열재를 배치하였다.

목표온도 도달 시 정상상태에서의 전력을 측정하기 위해 실효값(Root Mean Square) 측정이 가능하며 측정정밀도가 0.1%인 전력분석기를 사용하였다. 계측상자를 구성하는 개구부를 제외한 5면에는 정상상태 확인 및 각 면에서 손실되는 전력을 측정하기 위해 0.2 m² 당 1쌍의 열전대를 내외부에 9쌍을 설치하였으며, 1면을 제외한 나머지 4면의 면적은 동일하게 제작되었다. 모든 히터는 정류된 교류전원을 사용하였고 보호상자는 온도제어 방식으로 온도를 유지하였으며, 계측상자는 공급되는 정확한 전력을 측정할 수 있도록 전력조정기를 사용하여 전력제어방식으로 온도를 가감할 수 있게 설계하였다. 개발된 장비는 시험 중 외기온도를 일정하게 유지시키기 위해 항온실 내 구축하였다.

2.2 시험방법

개발된 GHB 시험장치의 신뢰 수준을 확인하기 위해

밀도가 359 kg/m³이며, 크기가 0.92×0.92×t0.05(m)인 균질한 섬유질 단열재를 시편으로 사용하여 열전도율을 측정한 후 동일한 재질로 크기가 0.5×0.5×t0.05(m)인 시편을 GHP 방법을 통해 측정한 열전도율과 비교하였다. 시편의 수직방향으로 전달되는 전력량은 정상상태에서 1분 간격으로 총 4시간 측정 후 평균값을 사용하였으며, 정상상태 판단기준은 계측상자 내·외부 총 10면의 온도가 각 ±3 K로 유지될 때를 기준으로 하였다. 열전도율 계산에 사용된 시편 표면온도는 내·외면 모두 K타입 열전대를 등간격으로 9개소에 배치하여 수집된 데이터의 평균값을 사용하였다. 또한 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 시편의 수직방향이 아닌 오스테나이트계 스테인리스박판과 섬유질 단열재가 적층된 계측상자의 5면을 통해 유입·유출되는 소모전력은 식(1)을 이용하여 계산하였다. 개발된 GHB 시험장치의 예상사용온도 구간에서 계측상자를 구성하는 균질한 섬유질 단열재의 온도에 따른 열전도율을 보호열판법을 통해 측정하였다. 그리고 추세선을 이용해 실험온도 조건에서의 열전도율 값을 계산한 후 계측상자 설치된 열전대로 내·외면 간 온도편차, 각 면의 면적과 두께로 계측상자의 유입·유출되는 전력을 계산하였다. Table 1에 나타낸 GHB 시험온도 조건은 시편의 고온부 온도를 기준으로 비균질 금속 단열재가 설치되는 원전 운전온도 범위와 유사하도록 3조건을 임의로 선택하였다. 각 시험온도에서의 외기온도는 ±2 K이내로 유지하였다.

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot (\Delta T)}{L} [W] \tag{1}$$

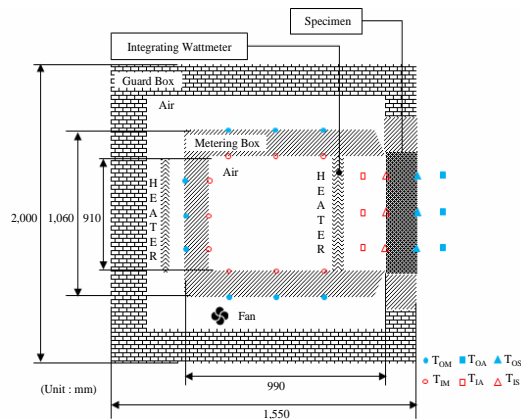


Fig. 1 Schematic diagram of developed GHB tester.

Table 1 Temp. condition inside insulation specimen for thermal conductivity measurement

	1	2	3
Temp.(K)	500	570	590

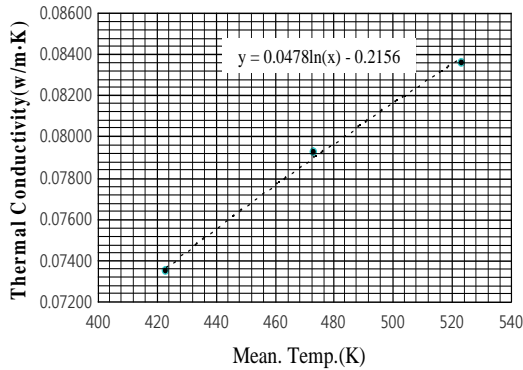


Fig. 2 Thermal conductivity of metering material according to temperature.

Table 2 Consumption power of metering box according to temp. at steady state

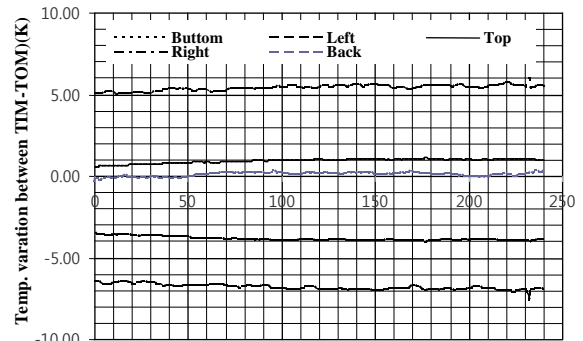
Temp. (K)	Side	Cons. Power(W)		Total power (W)	Cons./Total (%)
		Each	Sum.		
500	Bottom	5.39		144.2	-2.87
	Left	-6.82			
	Top	0.95	-4.14		
	Right	-3.86			
	Back	0.09			
570	Bottom	7.65		205.2	1.48
	Left	-8.49			
	Top	1.77	3.04		
	Right	-3.69			
	Back	6			
590	Bottom	6.39		235.49	0.57
	Left	-7.57			
	Top	-0.71	1.33		
	Right	-1.14			
	Back	4.57			

3. 실험결과 및 고찰

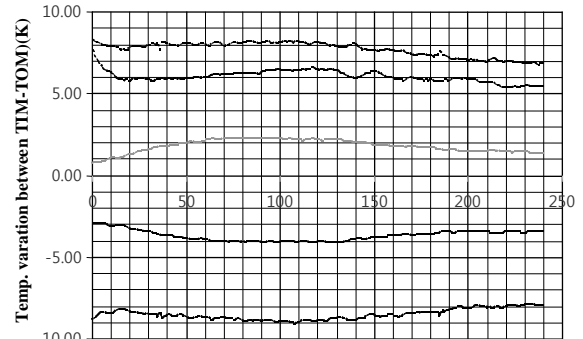
3.1 정상상태에서의 GHB 특성분석

3가지 온도 별 계측상자 5면에서 발생하는 내·외면 간 열전달 방향을 확인하기 위해 Fig. 3에 온도차 (T_{in}-T_{om})를 나타내었다. 모든 온도조건에서 정상상태인 4시간 동안의 온도변화는 최대 ±3 K이내였으며, 계측상자 하단면(Bottom)에서는 570 K 온도에서 최대 +8 K로 내부에서 외부로의 열전달, 좌측면(Left)에서는 최

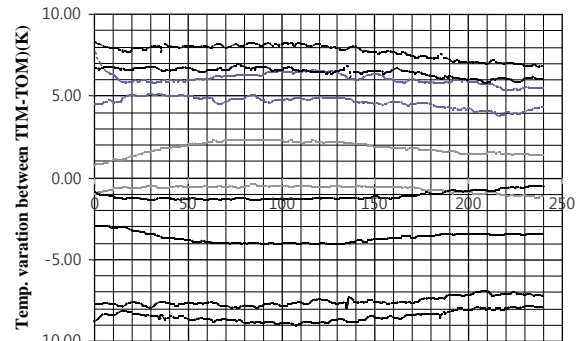
대 -9 K로 외부에서 내부로의 열전달이 확인되었다. 상단면(Top)은 모든 온도조건에서 ±3 K이내로 다른 면에 비해 적은 온도편차가 보였으며, 우측면(Right)은 ±4 K이내의 온도편차를 나타내었다. Table 2는 계측상자 히터로 공급된 전체 전력과 계측상자 5면을 통해 유입·유출되는 평균 전력을 비교한 결과이다. 500 K 온도조건에서는 전체 전력의 2.8% 수준으로 외면에서 내면으로의 유입, 570 K에서는 1.3% 수준으로 내면에서 외면으로의 유출, 590 K에서는 0.5%가 내면 유입이 있는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 500 K

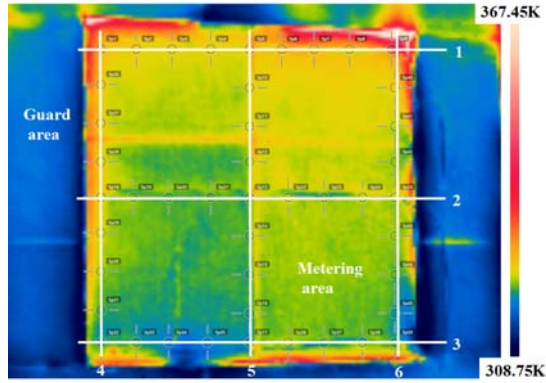


(b) 570 K

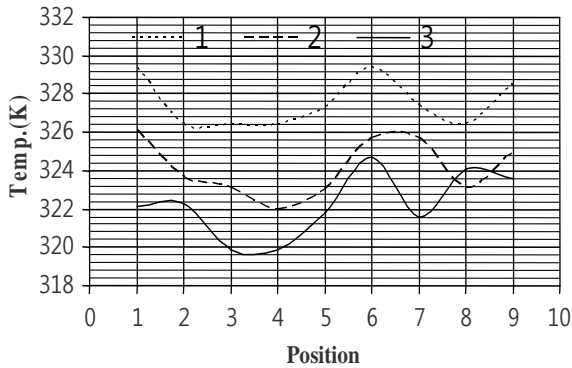


(c) 590 K

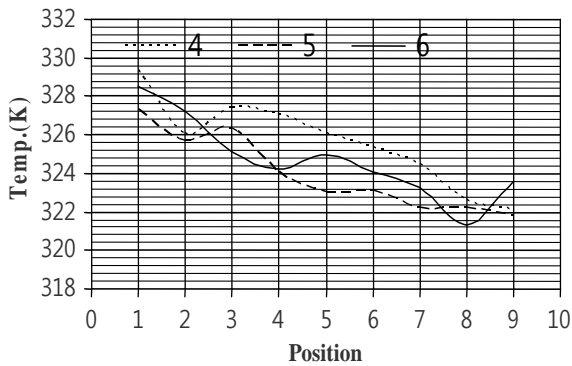
Fig. 3 Temp. variation of inside and outside metering box at steady state.



(a) Temp. contour



(b) Temp. profile from left to right



(c) Temp. profile from top to bottom

Fig. 4 Temp. contour and profile of out surface of a specimen at 590 K.

Fig. 4는 정상상태에서 시편 외면온도의 분포특성을 확인하기 위해 열화상카메라를 사용하여 3가지 온도 조건 중 시편 내면온도가 가장 높은 590 K일 때를 대표적으로 측정된 결과이다. Fig. 4(a)를 통해 계측부인 시편과 보호부가 접하는 위치에서 발열이 발생되고 있음을 확인 할 수 있었다. 발열은 주로 시편측 모서리 부근에서 발생되고 있었으며, 이는 시편과 보호부 간 밀착성 문제로 발생하는 예상하지 못한 계측부 열손실

의 결과로 판단된다. Fig. 4(b), Fig. 4(c)는 시편의 좌측에서 우측 그리고 상단에서 하단부로의 위치별 온도를 나타낸 것이다. 좌·우 측면에서는 위치 별 온도편차가 최대 4.8 K로 계측부와 보호부가 접하는 모서리부에서의 열교환이 다른 곳에 비해 비교적 높은 것을 예상할 수 있었으며, 상·하단부에서 나타나는 최대 7.7 K의 온도편차는 외기가 자연대류 조건임을 고려해 볼 때, 밀도차에 의한 부력효과⁽⁵⁾가 이에 기인한 것으로 판단된다.

3.2 시험결과 비교

시편 내·외면에 부착된 열전대를 통해 수집된 3가지 온도 별 정상상태에서의 온도 평균을 Fig. 5에 나타내었다. 시편 내면온도가 500 K에서 570 K로 상승하면 시편 외부온도는 대략 8 K정도 상승하였으나, 570 K에서 590 K로의 온도상승은 1 K 미만이었다. 또한 측정기간 중 시편의 온도변화는 외면 ± 1 K 미만, 내면 ± 2 K 이내로 정상상태에서의 내·외면의 온도변화는 미미한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 GHP와 GHB 방법을 통해 측정된 3가지 온도조건에서의 열전도율로써 고온부와 저온부 간 온도차가 20 K이내에서만 측정이 가능한 GHP 방법과 내·외면 온도차(고온부와 저온부)가 200 K 이상인 GHB 방법을 직접 비교하기 위해 내·외면 온도평균으로 나타낸 것이다. 평균온도가 약 410 K에서는 GHB 방법이 $0.0682 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 GHP에 비해 5.23%, 440 K에서는 $0.07471 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 5.44%, 450 K에서는 $0.07623 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 5.61%가 높게 나타났다. 이로써 GHB 방법을 통해 측정된 열전도율은 사용예정인 온도범위에서 GHP 방법에 비해 최대 6%가 높은 값이 측정됨을 확인할 수 있다. 이는 앞서 제 3.1절에 언급한 바와 같이 계측부의 시편과 보호부 간 밀착성 문제로 계측상자 내부에 위치한 히터의 소모전력의 증가가 원인으로 예상된다.

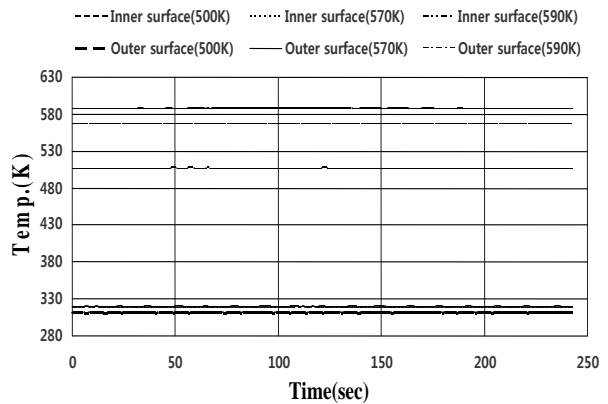


Fig. 5 Temp. profile of inner and outer surface of a specimen at steady state.



Fig. 6 Comparison of thermal conductivity measured by GHP and GHB method.

4. 결 론

본 논문에서는 비균질 단열재의 단열특성을 평가하기 위해 개발된 GHB 시험장치와 GHP법을 통해 측정된 열전도율 측정결과를 동일한 균질 단열재 시편을 사용하여 상호 비교함으로써 신뢰성을 확인하고자 하였다.

3가지 온도조건에서 계측상자 5면을 통해 유입·유출되는 소모전력의 합은 계측상자 히터로 공급되는 총 전력의 $\pm 3\%$ 이내 수준이었으며, 정상상태에서 각 내·외면에서의 온도변화는 ± 3 K 이내로 나타났다. 시편과 외기와 접촉하는 시편 외부 상·하단부 간 온도편차는 시편이 수직형태로 설치됨으로 인해 발생하는 부력효과로 시험조건에서 최대 8 K 가량의 차이를 보였다.

개발된 GHB법의 경우, 계측부인 시편 모서리부에서의 국부적 발열로 인해 표준시험법인 GHP법 대비 6% 가량 높은 열전도율이 측정되었다. 대형 비균질 시편을 사용하는 GHB법 특성 상 보호부와 계측부를 균질

한 시편을 사용하는 GHP법과 같이 단열 문제를 완벽히 해소하기는 어려울 것을 판단된다. 따라서 정상상태에서의 시편 모서리부를 통해 소모되는 전력을 측정하여 보정 값으로 사용한다면 개발된 GHP법의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 : 2013T100200005).

References

1. USNRC, 2003, Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Collant Accident, Regulatory Guide 1.82, Rev. 3.
2. USNRC, 2005, GSI-191 : Experimental Studies of Loss of Coolant Accident Generated Debris Accumulation and Head Loss with Emphasis on the Effects of Calcium Silicate Insulation, NUREG/CR-6874.
3. KATS, 2012, Determination of Steady State Thermal Transmission Properties-Calibrated and Guarded Hot Box, KS F 2277.
4. KATS, 2012, Test Methods for Thermal Transmission Properties of Thermal Insulation, KS L 9016.
5. John, G., William, A., and Marc, J., 2014, Measurement Instrumentation and Sensors Handbook, CRC PRESS, Second Edition, pp. 33-34.
6. Neil, E. and Mujid, S., 2012, Nuclear Systems, CRC PRESS, Vol. 1, p. 828.