

SOFC용 고온 적층 단열재의 해석적 고찰

최종균 · 황승식 · 최규홍[†]

(주)하이낸드

An Analysis Using Numerical Model of Composite Multi-Layer Insulation for SOFC

CHONGGUN CHOI, SEUNG-SIK HWANG, GYU-HONG CHOI[†]

Hinend Inc., 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Korea

[†]Corresponding author :
ghchoi@hinend.com

Received 14 October, 2019
Revised 5 December, 2019
Accepted 30 December, 2019

Abstract >> This study was conducted to develop insulation for solid oxide fuel cell (SOFC). The developed insulation is based on the lamination technology and the radiation shielding technology of the satellite insulation. The insulation material is consisting of insulation material for conduction resistance, spacer, and radiation shielding material. The experimental apparatus consisting vacuum bell jar, pump, heater and temperature recording device has developed to verify the performance of the insulation. The experimental values were used as reference data for the modeling development. In this paper, heat transfer is assumed to be one-dimensional phenomena for the prediction of insulation performance and internal temperature distribution in high temperature region of SOFC. The developed model was used to compare the performance difference of insulation types according to composition materials. The analysis result shows that the insulation including spacer and radiation shielding has better heat insulation performance than other cases. In this study, the thickness reduction effect of about 20% was shown compared to the insulation including only conductive material. It is noted that the radiant shielding material should be carefully selected for durability, because SOFC insulation should be used for a long time at high temperature.

Key words : Solid oxide fuel cell(고체 산화물 연료 전지, SOFC), Composite multi-layer insulation(적층 단열재), Insulation(단열재), High temperature insulation (고온 단열)

Nomenclature

Q : Heat [W]

T : Temperature [$^{\circ}\text{C}$]

k : Thermal conductivity [W/m-K]

L : Thickness [m]

A : Area [m^2]
 Ra : Rayleigh Number [-]
 σ : Stefan-Boltzmann Constant ($5.76e-8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
 ϵ : Emissivity [-]
 ϕ : Porosity [-]

Subscripts

rad : Radiation
 cond : Conduction
 C : Insulation material for conduction resistance
 S : Spacer
 Fa : Fabric cover
 R : Radiation shielding material

1. 서 론

Solid oxide fuel cell (SOFC)은 600-1,000°C 정도의 고온에서 운전되기 때문에 발전효율이 높고, 발전에 필요한 연료의 다양성과 경제성이 높다는 장점이 있어 현재 연료전지 분야에서 가장 연구와 개발이 활발히 진행되고 있는 분야이다¹⁾. 반면, 제조 단가가 비싸고 고온 작동으로 인한 급속 기동의 어려움과 부식에 취약한 문제점을 지니고 있으며, 열팽창계수 차이로 인한 고온에서의 밀봉 기술이 어렵다는 단점이 있는데 이를 해결하고자 하는 연구 역시 활발하게 진행 중이다.

SOFC 열차폐 장치는 작동 온도를 유지하고 설치가 쉽고 SOFC 표면과 물리적으로 잘 일치하며 셀의 온도 변동을 미세하게 조절할 수 있는 기능이 있는 것이 좋기 때문에²⁾ SOFC를 위한 단열재도 기존의 파우더 형태보다는 설치가 쉬우면서 SOFC 표면과 물리적으로 잘 결속할 수 있는 세라믹 계열의 소재가 마감재로 사용하는 것도 고려할 필요가 있다.

연료전지에 대해서는 결합된 전기 화학의 여러 가지 이론적 및 수치적 모델 SOFC의 열 및 유체 공정이 이미 개발 및 출판되었는데³⁾ SOFC 전체 시스템

의 열관리에 관한 기존 문헌에서의 노력은 시스템의 모든 구성 요소와 주변과의 상호 작용을 파악하는 것이 아니라 일반적인 경계 조건과 단열 평형 플랜트 하드웨어에서 절연 스택을 처리하는 데 주로 초점을 맞추고 있다⁴⁾. 지난 수십 년 동안 SOFC에 결합된 전기 화학적, 열적, 유체적 변환 과정에 대해 점점 더 상세하고 이론적이고 수치적인 모델이 개발되었다. 그리고 이와 관련하여 여러 논문이 발표되었다.

SOFC에 대해 실험적인 연구와 더불어 수치해석을 통한 연구가 진행되는 이유는 불안정한 조건에서 SOFC 작동에 대한 실험적 연구가 어려워 수치적으로 접근하는 것이 유용하기 때문이다. 실제로 많은 수의 연구들이 열 분포를 예측하기 위하여 수치 모델에 초점을 두고 있다⁵⁾.

SOFC의 단열 연구가 심화되면서 Damm과 Fedorov⁶⁾는 스택 열 관리 및 재료 개발을 포함하여 열 모델링 작업에서 복사 열전달을 특별히 고려하고 Coquard 등⁷⁾은 두 가지 유형의 폼에서 복사 열전달을 고려하였으며, Spinnler 등⁸⁾은 고온 영역에서 복사뿐만 아니라 전도, 대류 등의 조건을 고려하여 연구하였다.

(주)하이낸드가 개발한 SOFC를 위한 적층 단열재는 인공위성 단열재의 적층 기술 및 복사 차폐 기술을 기반으로 하였다. 본 논문에서는 SOFC의 고온 영역에 맞춰 개발된 적층 단열재의 성능 예측을 위해 일차 열전달을 가정하고 적층 단열재 내부 열전달 경로인 전도, 복사를 고려하여 적층 구성에 따른 단열재의 성능 차이를 비교하였다. 예측한 성능을 검증하기 위하여 고온 열전도 장치를 통해 실험한 적층 단열재의 실험값과 비교하였으며, 이를 통해 향후 개발되는 적층 단열재의 단열 성능을 예측하고자 하였다.

2. 실험 조건 및 실험 데이터

2.1 적층 단열재 및 실험 장치

해석에 사용된 단열재는 선행연구에 적용된 단열재와 같은 적층 단열재이다. 적층 단열재는 SOFC를 위해 개발된 고온용 단열재로 형상은 Fig. 1과 같다.

단열재는 전도 감소재와 복사 차폐재(radiant shielding material)와 간극 유지재(spacer)로 구성되고 단열재 결속을 위해 고온용 섬유 재질이 외피로 사용됐다. 전도 감소재는 기본적인 단열성능을 만들어주는 역할을 한다. 복사 차폐재는 매질 없이 전달되는 복사 에너지 방열을 막아주는 역할을 한다. 간극 유지재는 복사 차폐재 기능 구현을 위해 필요한 적정 간격을 만들어 주는 역할을 한다.

실험 장치는 규격(ASTM C177, KS L ISO 8302)을 참조하여 제작하였는데⁹⁻¹¹⁾, 외형을 보면 Fig. 2와 같다. 실험 장치는 유리병종이 있고 내부에 열원부(히터), 흡열부(열유량계), 샘플(시편)을 설치하도록 되어있다. 유리종병은 진공을 만들어 외기 영향을 줄여주고 단열재를 통과하는 열이 1차원적 흐름을 나

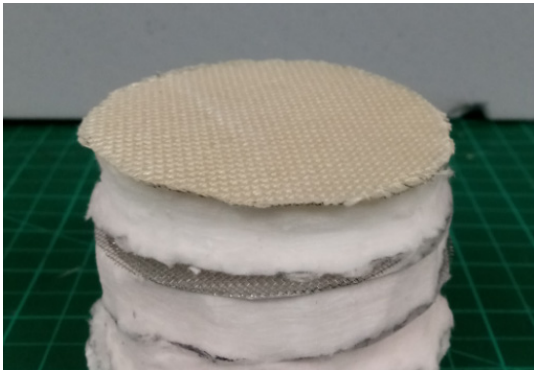


Fig. 1. Composite multi-layer insulation in this study

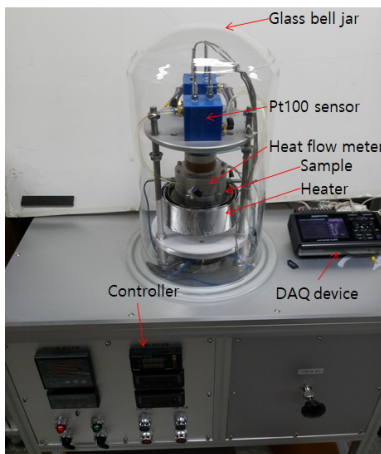


Fig. 2. The apparatus for measuring thermal conductivity

타내 성능 측정의 정확도를 높이기 위하여 사용됐다.

2.2 실험 조건 및 결과

본 연구에 사용된 실험 데이터는 선행연구와 동일한 실험 절차로 획득하였다. 실험은 Table 1과 같이 200℃, 600℃, 900℃ 조건에서 수행되었다. 실험 결과 본 연구에 사용된 적층 단열재의 열전도율은 온도별로 0.044 W/mk, 0.078 W/mK, 0.109 W/mK로 나타났다.

실험 결과는 해석 모델의 개발 및 검증에 활용하였다. 특히, 900℃ 실험값은 단열재 구성에 따른 결과를 보기 위한 기준 모델의 데이터로 사용하였다.

3. 해석모델

3.1 해석 대상 단열재

적층 단열재의 구성 및 열전달 방법은 Fig. 3과 같이 정의되었다. 적층 단열재는 내부의 간격 및 공극

Table 1. Experimental results of composite multi-layer insulation

Condition	200℃	600℃	900℃	Unit	
Heat flow meter	Inlet temp.	25.8	26.3	27.2	℃
	Outlet temp.	26.3	28.9	32.0	℃
	Temp. difference	0.5	2.6	4.8	℃
	Flow rate	80.7	92.1	105.9	ccm
	Density	1,847.5	1,846.5	1,844.5	kg/m ³
	Specific heat	1,040.7	1,042.9	1,048.4	J/kg·℃
	Heat	1.27	7.69	16.38	W
Sample	Thickness	45	45	45	mm
	Hot side	211.83	616.63	904.40	℃
	Cold side	28.57	34.60	42.57	℃
	Temp. difference	183.27	582.03	861.8	℃
	Heat	1.40	7.89	16.38	W
	Thermal conductivity	0.040	0.076	0.109	W/m-K

이 1 mm이며 Ra 수를 계산하였을 때 10 이하로 충분히 작다. 따라서 단열재 내부에서는 대류 열전달이 없는 것으로 가정하였다¹²⁾.

각 소재 층별로 보면 페브릭 마감재, 전도 감소재,

복사 차폐재에서는 전도로만 열이 전달되는 것으로 정의하였다. 간극 유지재는 전도 및 복사로 열이 전달되는 것으로 정의하였다. 또한, 사용된 단열재 기준으로 각 위치에 T1-T10으로 온도를 정의하였다.

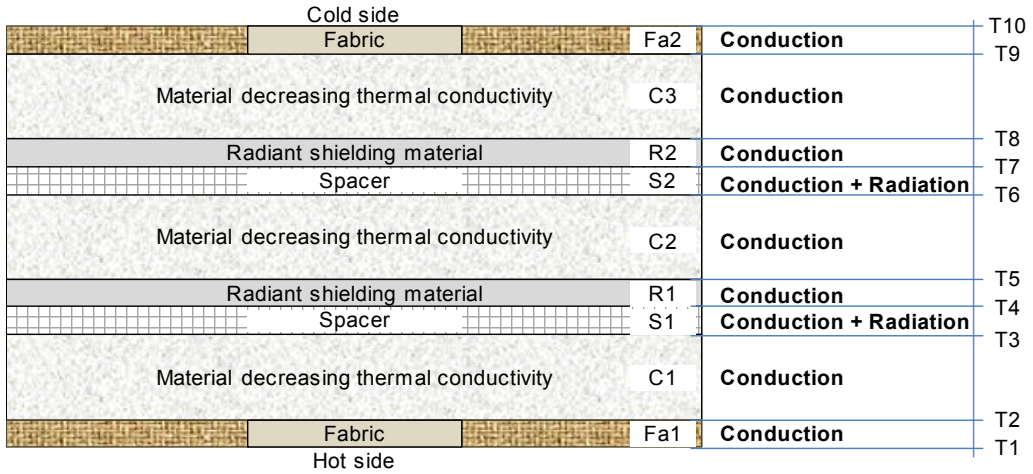


Fig. 3. The configuration of composite multi-layer insulation and the heat-transfer schematic diagram

Table 2. Equations for composite multi-layer insulation modeling

Material	Equation	No.
Fabric cover	$Q_{Fa} = k_{Fa} \times A \times \Delta T / L$	(1)
	$k_{Fa} = 0.2$	(2)
Insulation material for conduct resistant	$Q_C = k_C \times A \times \Delta T / L$	(3)
	$k_C = a\bar{T}^2 + b\bar{T} + c$	(4)
	$\bar{T} = 0.5 \times (T_{hot} + T_{cold})$	(5)
Spacer	$Q_S = Q_{rad} + Q_{cond}$	(6)
	$Q_{cond} = (k_{solid} \times (1 - \phi) + k_{air} \times \phi) \times A \times \Delta T / L$	(7)
	$k_{solid} = -2e^{-6} \times \bar{T} + 1.62e^{-2} \times \bar{T} + 14.622$	(8)
	$k_{air} = 0.0241 \left(\frac{\bar{T} + 273.15}{273.15} \right)^{0.9}$	(9)
	$Q_{rad, no\ reflect} = \sigma \times A \times \epsilon_C \times ((T + 273.15)_{hot}^4 - (T + 273.15)_{cold}^4)$	(10)
	$Q_{rad, reflect} = \frac{\sigma A}{(1/\epsilon_C + 1/\epsilon_R - 1)} \times ((T + 273.15)_{hot}^4 - (T + 273.15)_{cold}^4)$	(11)
	$\epsilon_C = 0.9$	(12)
	$\epsilon_R = 6e^{-5} \times T + 0.0397$	(13)
	$Q_R = k_R \times A \times \Delta T / L$	(14)
Radiation shielding material	$k_R = -5e^{-5} \times \bar{T} - 2.23e^{-2} \times \bar{T} + 243.64$	(15)

3.2 해석 모델

적층 단열재 각 소재의 열전달 관계식 및 물성식은 Table 2와 같으며 각각을 살펴보면 다음과 같다.

- 페브리크 마감재 구간은 전도만 고려되었으며 열전도율은 식 (1)과 (2)와 같이 고정값을 사용하였다.

- 전도 감소재 구간은 전도만 고려됐으며(식 [3]), 단열재의 특성상 단열재의 압축 유무에 따라 열전도율이 변할 수 있는 점을 고려하였다. 기본적으로 열전도율은 전도 감소재 제조사에서 제공하는 온도에 대한 물성을 기준으로 2차 온도함수로 적용하였다(식 [4]). 물성은 고온부와 저온부의 평균온도를 기준으로 선정하였다(식 [5]).

전도 감소재의 열전도율 식에서 계수(a, b, c)는 공기층과 고체로 구성된 전도 감소재의 특성을 고려해 압축률을 반영하였다. 적용된 압축률을 바탕으로 계산된 고체 함량 증가량과 기공 감소량을 통해 열전도율값을 추산하였다(Fig. 4). 제조사에서 제공한 물성으로 구해진 계수는 a: $2e-7$, b: $9e-5$, c: 0.026 이고 연구에 적용된 압축률(자연 상태로 50 mm인 단열재를 45 mm로 압축한 실험값)이 반영된 전도 감소재의 계수는 a: $5e-7$, b: $1e-4$, c: 0.0284이다.

또한, 전도 감소재 구간 해석은 다른 소재 구간과는 다르게 단열재 두께의 대부분을 차지하는 구간인 점을 고려해 구간의 이산화 유무에 따른 민감도 해

석을 진행하였다. 이산화 수에 따라 저온부 온도결과 는 Fig. 5와 같다. 이산화를 하지 않은 경우, 저온부 온도는 106°C 이고 2개로 이산화한 경우는 246°C 로 계산되었고 더 많은 수로 이산화한 경우 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 전도 감소재 구간은 이산화하여 계산하였다.

- 간극 유지재 구간 열전달은 식 (6)과 같이 복사 와 전도 열전달의 합으로 구하였다. 전도 열전달은 매쉬 형태인 간극 유지재의 특성을 고려해 간극 유지재 고체의 전도와 간극에 존재하는 공기층의 전도의 합으로 식 (7)과 같이 정의하였다. 또한 공기와 고체물질 각각의 열전도율은 온도의 함수로 활용하였다(식 [8], [9]).

간극 유지재 구간에서 발생하는 복사열전달 모델은 복사 차폐재 유무에 따라 두 가지로 구분된다. 복사 차폐재가 없는 경우는 간극 유지재 상하에 있는 두 전도 감소재 사이의 복사 열전달이 식 (10)과 같이 계산하였다.

복사 차폐재가 있는 경우는 식 (11)과 같이 반사되는 복사 에너지를 고려해 계산하였다¹³⁾.

복사 열전달계산에 필요한 방사율은 식 (12), 식 (13)과 같이 정의하였다.

- 복사 차폐재 구간 열전달은 식 (14)와 같이 전도 만 고려하여 계산하였다.

이때, 복사 차폐재의 열전도율은 식 (15)와 같다.

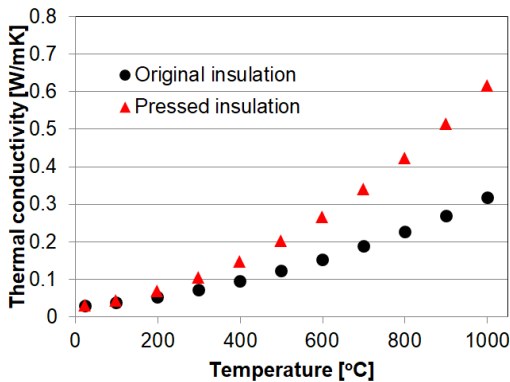


Fig. 4. Thermal conductivity of original conduct insulation and pressed conduct insulation

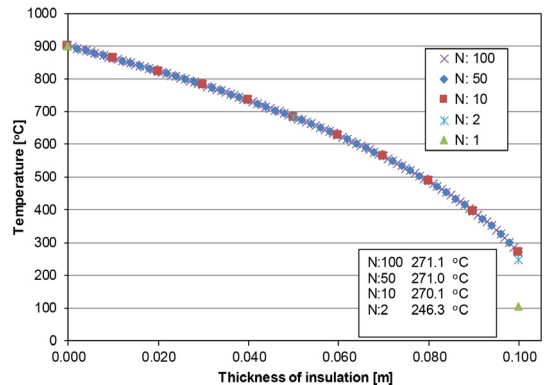


Fig. 5. The sensitivity analysis as the number of discretization on the conduct insulation model

3.3 해석 방법 및 해석 조건

계산은 정의된 모델을 바탕으로 엑셀의 vba 코드를 사용하여 수행됐다. 수렴은 각 층별로 trail error 방법으로 해를 찾고 적층 단열재 전체에 대한 변수(말단의 온도, 두께)에 따라 계산되었다. 단열재의 종류는 단열재 구성(간격 유지재, 복사 차폐재 유무)에 따라 Fig. 6과 같이 구분하였다. 단열재 종류가 다른 경우는 900°C 실험값을 토대로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 조건에 대한 해석

Fig. 7은 실험결과와 이를 바탕으로 만든 해석 모델의 단열재 열전도율 결과이다. 온도 조건 변화에 따라 열전도율 변화 경향은 유사하게 나타났으며 해석 모델이 실험 결과의 오차범위 이내로 나타나 단열재 성능 경향 분석에 사용 가능한 것으로 나타났다.

Fig. 8은 적층 단열재 실험결과에 대한 해석 모델의 분석결과를 나타낸다. 고온부 온도 200°C에서 600°C와 900°C의 모든 조건에서 온도는 두께 방향에

따라 계단 형태로 감소하는 경향을 보여준다. 온도 그래프의 전체 형태는 유사하나 고온부 온도가 높을수록 계단식 하락 온도의 폭이 더 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

재질별 온도 하락을 살펴보면 전도 감소재 구간에서 온도 하락은 선형적이고 기울기가 완만하게 나타났다. 반면에 간극 유지재가 있는 위치에서 계단 형태로 온도가 떨어진 것을 볼 수 있다. 고온부 온도가 높을수록 큰 온도 하락이 나타나는 점과 복사 차폐를 위한 간극 유지재 구간에서의 큰 온도 하락이 나타난 점을 볼 때 복사 차폐재와 간극 유지재의 기능으로 복사에너지가 큰 고온부에서 열저항을 크게 만든 것으로 판단된다.

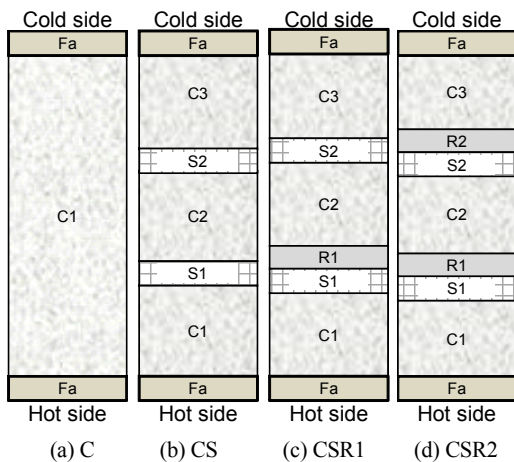


Fig. 6. Type of Insulation according to composition material (a) only insulation, (b) insulation and spacer, (c) insulation, spacer and 1 radiation shielding, (d) insulation, spacer and 2 radiation shielding

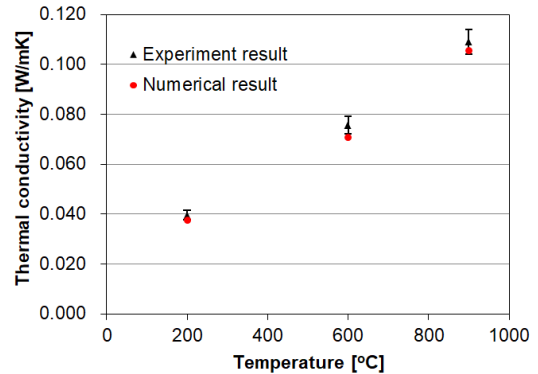


Fig. 7. Comparison of experimental and numerical result

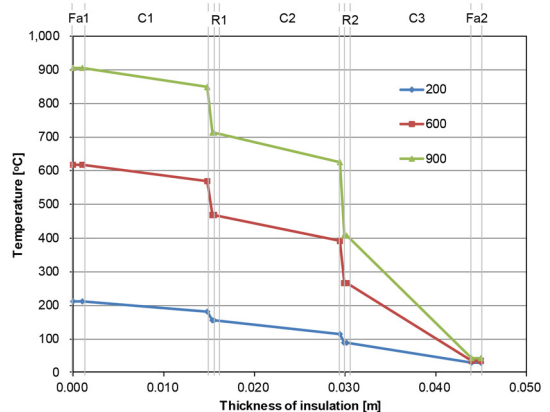


Fig. 8. Numerical result on experimental conditions

3.2 단열재 구성별 온도 비교

적층 단열재의 성능을 보다 자세히 알아보기 위해 단열재의 구성을 Fig. 6과 같이 다르게 하였을 때 동일한 고온부 온도와 열량이 흐르는 조건에 대한 해석을 진행하였다. 각 단열재 조건별로 고온부에서 저온부로 온도 변화는 Fig. 9와 같이 분포차이를 보였다.

먼저, 전도 감소재만 적용된 단열재를 보면 선형적인 감소형태를 보였고 저온부 온도는 800°C 정도로 나타났다.

전도 감소재와 간극 유지재가 적용된 모델(CS)의 경우를 보면 간극 유지재가 있는 구간에서 계단형태의 온도 감소가 나타났다. 하지만 상대적으로 복사 차폐재가 적용된 모델들(CSR1, CSR2)에 비해서는 감소폭은 작았다.

복사 차폐재 1개가 적용된 모델(CSR1)의 경우는 복사 차폐재가 있는 고온부쪽의 간극 유지재 구간에서 급격한 온도 변화를 보였다.

복사 차폐재가 2개 적용된 모델(CSR2)은 CS 모델과 CSR 모델과의 간극 유지재 위치에서의 온도변화 차이를 명확하게 보여준다. 단열재의 구성에 따라 열전달의 특성이 달라졌고 특히, 복사 차폐재와 간극 유지재가 동시에 적용된 구간에서 단열 성능이 큰 것으로 나타났다.

간극 유지재만 적용된 구간은 공기층이 형성되어 고체 물질보다는 우수한 성능의 단열성능은 보였지

만 복사 열전달은 감소시키지 못한 것을 보여준다. 복사 차폐재와 간극 유지재가 동시에 적용된 구간에서 복사 차폐재가 복사열을 고온부로 반사하여 단열 효과 상승을 유도하였다고 할 수 있다.

간극 유지재에서 복사와 전도 열전달 비율을 정리해보면 Table 3과 같다. 간극 유지재만 적용된 모델에서는 85% 이상의 열전달이 복사로 전달된 반면 복사 차폐재 2개가 적용된 모델에서는 38% 이하의 열만 복사로 전달됐다. 또한 복사 차폐재가 1개 적용된 모델과 2개 적용된 모델을 비교해보면 두 번째 간극 유지재에서 복사 차폐재의 유무에 따라 열전달 방식이 차이나는 것을 보여, 복사 차폐재가 본연의 목적을 구현하고 있는 것을 보여준다.

복사 차폐재가 2개 적용된 모델에서 첫 번째 간극 유지재와 두 번째 간극 유지재에서 열전달을 비교해보면 고온인 첫 번째 간극 유지재 영역에서 복사의 비율이 높은 것을 보여준다. 이것은 복사 열전달이 고온에서 더 강하게 나타나는 복사 열전달 메커니즘을 보여주는 자명한 결과라고 할 수 있다.

3.3 단열재 구성별 길이 비교

일반적으로 단열재의 성능은 물리적인 수치로는 열전도율을 사용하고 적용하는 사용처에서는 동일 조건에서 사용되는 두께가 곧 성능이라고 할 수 있다. 단열재 필요 두께를 알아보기 위해 고온부는 900°C를 해석 조건으로 선정하고, 산업 현장이나 장비의 단열재 외벽온도 통상 사용되는 50°C를 저온부 온도로 선정하였다. 이때 각 단열재 구성별로 열전달

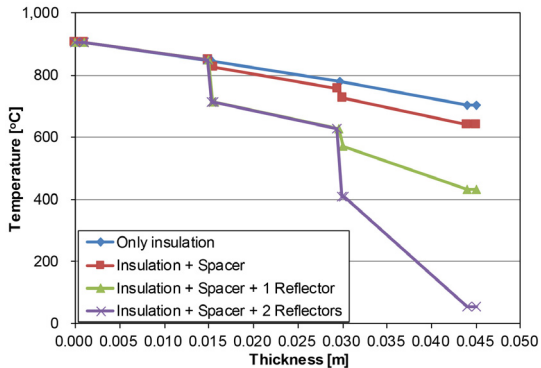


Fig. 9. Numerical result on four insulation types of constant thickness

Table 3. The percentage of heat transfer mechanism in spacer zone

Zone	Heat transfer mechanism	Insulation +Sp	Insulation +Sp+R1	Insulation +Sp+R2	Unit
Spacer 1	Conduction	10.8	61.4	61.3	%
	Radiation	89.2	38.6	38.7	
Spacer 2	Conduction	14.2	22.6	85.3	
	Radiation	85.8	77.4	14.7	

량은 동일한 것으로 가정하여, 고온부와 저온부를 만족하는 단열재의 두께를 산출하기 위한 해석을 진행하였다. 단열재 구성별로 온도 분포는 Fig. 10과 같이 나타났다.

전도 감소재만 있는 경우는 앞서 언급한 이산화유무에 따른 오차를 줄이기 위하여 이산화하여 계산한 결과로 단열재 두께가 0.2 m 이상일 때 50°C로 하락하는 것으로 나타났다. 또한, 전도 감소재의 열전도율이 온도 상승에 따라 2차 함수 형태로 증가하는 결과를 그대로 반영한 분포로 나타났다.

간극 유지재가 추가된 경우 온도분포는 전도 감소재만 있는 경우와 유사하나 간극 유지재를 통하여 소폭의 계단형 온도 감소 구간이 나타났다.

간극 유지재와 복사 차폐재 1개가 적용된 단열재는 고온부에 적용된 복사 차폐의 효과로 계단식 온도하락 구간을 고온부쪽 간극 유지재에서 보였다. 간극 유지재와 복사 차폐재 2개가 적용된 단열재는 두차례의 계단식 온도하락 구간이 나타났다.

고온부와 저온부의 온도가 같게 나타나는 단열재의 길이를 전도 감소재만 있는 경우를 기준으로 상대 길이를 살펴보면 Fig. 11과 같이 나타났다. 상대 길이를 기준으로 간극 유지재와 복사 차폐재가 적용된 경우 필요한 단열재의 두께가 감소하는 것을 보여주는데, 복사 차폐재가 2개 적용된 단열재의 경우 약 21.7%의 두께 감소를 보였다.

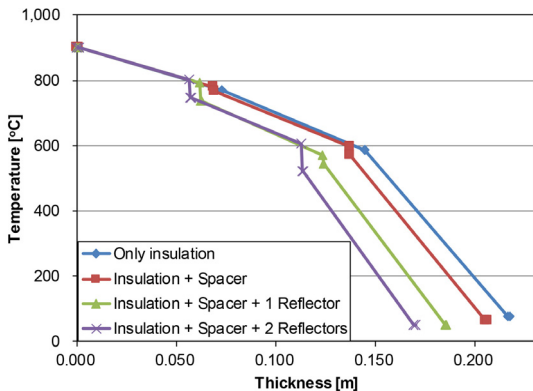


Fig. 10. Numerical result on thickness of four insulation types of same condition(hot and cold side temperature)

3.4 적층형 단열재에 대한 고찰

복사 차폐재가 적용된 적층 단열재는 실험과 수치적 해석을 통해 전도 감소재만 적용된 단열재에 비해 단열 성능이 향상된 것을 확인하였다. 단열재는 보통 설비의 수명보다는 긴 것으로 인식되고 있어 한번 설치된 단열재는 설비의 정비 혹은 교체 전까지 사용하고 있다. 이 점을 고려하면 적층형 단열재의 성능도 장기적인 관점에서 검토해볼 필요가 있다.

Fig. 12는 고온부(900-1,000°C)에서 100시간 이상 연속 운전 후 단열재 간극 유지재 구간에서의 단면이다. 저온부쪽은 단열재 원래의 모습을 잘 유지한 반면, 고온부는 육안으로 확인 가능할 정도로 변색된 것을 볼 수 있다. 간극 유지재 구간에서 변색은 결국 복사 차폐재도 변색될 경우 차폐효과의 감소 즉, 단

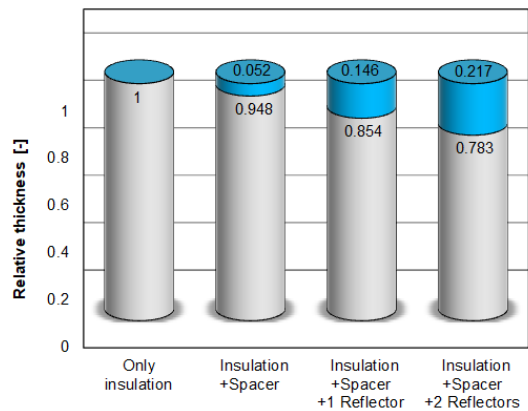


Fig. 11. The composition of four insulation types

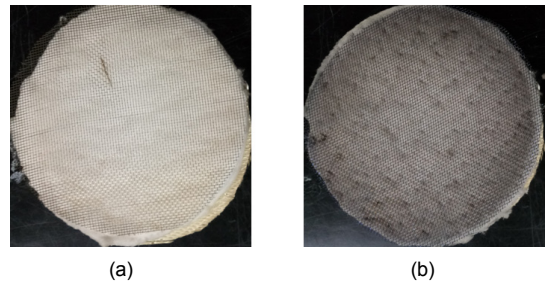


Fig. 12. Cross section of insulation after using (a) insulation surface close to cold side (b) insulation surface close to hot side

열재 성능의 감소가 발생할 가능성을 보여주는 것이다. 이는 해석결과에서의 온도분포로도 추측이 가능하다. Fig. 8에서 900°C 해석모델의 고온부쪽 차폐재 온도는 700-850°C로 나타나, 실험에 사용된 복사 차폐재의 내구성에 대한 보완 필요성이 대두된다.

실험과 해석 결과를 볼 때 적층 단열재 중 복사 차폐재는 복사 차폐 기능을 가지면서 장시간 성능에 변화가 없는 재질이 선정되어야 하는 필요성을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 SOFC용 단열재를 개발하기 위해 수행된 연구이다. 연구 결과로 고온용 적층 단열재에서 나타나는 온도 분포를 분석할 수 있었다. 또한, 단열재 저온부 말단의 온도나 필요한 단열재의 두께를 예측 가능한 모델을 개발하였다. 연구 결과는 적층 단열재의 소재나 구성 변경에 따른 단열재의 성능 변화를 예측 가능하게 했다고 할 수 있다.

후속 연구로는 복사 차폐를 적용하는 데 필요한 적정 소재 선정과 적층 수를 경제적인 관점에서 연구하는 것이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20163030031820).

References

1. S. K. Dong, W. N. Jeong and K. Rashid, "Numerical Analysis of various types SOFC stack used in SOFC system", SAREK, 2014, pp. 827-831. Retrieved from <https://dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06065022>.
2. Y. W. Lo, W. C. J. Wei, and C. H. Hsueh, "Low thermal conductivity of porous Al₂O₃ foams for SOFC insulation", Material Chemistry and Physics Vol. 129, No. 1-2, 2011, pp. 326-330, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.04.023>.
3. M. Chnani, M. C. Péra, R. Glises, J. M. Kauffmann, and D. Hissel, "Transient thermal behaviour of a solid oxide fuel cell", The Fifth International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, 2007, pp. 28. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00582364/>.
4. K. J. Kattke and R. J. Barun, "Implementing Thermal Management Modeling Into SOFC System Level Design", J. Fuel Cell Sci. Technol., Vol. 8, No. 2, 2011, pp. 021009, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4002233>.
5. L. Barelli, G. Bidini, G. Cinti, and A. Ottaviano, "SOFC regulation at constant temperature: Experimental test and data regression study", Energy Conversion and Management, Vol. 117, 2016, pp. 289-296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.028>.
6. D. L. Damm and A. G. Fedorov, "Radiation heat transfer in SOFC materials and components", Journal of Power Sources, Vol. 143, No. 1-2, 2005, pp. 158-165, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.11.063>.
7. R. Coquard, D. Baillis, and J. Randrianalisoa, "Homogeneous phase and multi-phase approaches for modeling radiative transfer in foams", International Journal of Thermal Sciences Vol. 50, No. 9, 2011, pp. 1648-1663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.012>.
8. M. Spinnler, E. R. F. Wintera, R. Viskantab and T. Sattelmayer, "Theoretical studies of high-temperature multilayer thermal insulations using radiation scaling", Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Vol. 84, 2004, pp. 477-491.
9. ASTM C177-19, "Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus", ASTM International, doi: <https://doi.org/10.1520/C0177-19>.
10. KS L ISO 8302, "Thermal insulation Determination of Steady-state thermal resistance and related properties-Guarded hot plate apparatuses", KS Standard, ICS: <https://www.iso.org/ics/27.220/x/>.
11. A. J. Slifka, B. J. Filla, and J. M. Phelps, "Thermal Conductivity of Magnesium Oxide From Absolute, Steady-State Measurements", J. Res. Natl. Inst. Stand Technol., Vol. 103, No. 4, 1998, pp. 357-363, doi: <https://doi.org/10.6028/jres.103.021>.
12. Y. Haim, Y. Weiss, and R. Letan, "Effect of spacers on the thermal performance of an annular multi-layer insulation", Applied Thermal Engineering, Vol. 65 No. 1-2, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.041>.
13. F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, "Introduction to Heat Transfer", Heisenbooks, USA, 2006, 5th ed.