

## SOFC를 위한 고온용 적층단열재 개발

최종균 · 황승식 · 최규홍<sup>†</sup>

<sup>†</sup>(주)하이넨드

## Development of Multiple Layers Insulation for SOFC

CHONGGUN CHOI, SEUNG-SIK HWANG, GYU-HONG CHOI<sup>†</sup>

HINEND Co., Ltd., Suit 113-1, Kookmin University, Business incubator, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
ghchoi@hinend.com

Received 10 July, 2018  
Revised 26 August, 2018  
Accepted 31 August, 2018

**Abstract >>** Fuel cells are known as eco - friendly energy facilities that can use heat energy and electric energy at the same time. Fuel cells are classified according to the temperature and material used, and solid oxide fuel cell (SOFC) is relatively high temperature (700-800 °C). SOFC requires a hot box consisting of a high temperature stack, a reformer, a burner, and the heat exchangers in order to use energy efficiently. The hot box needs to maintain heat insulation performance at high temperature to reduce heat loss. However, Fibrous insulation, which is widely used, needs to be improved because it has a disadvantage that the thermal conductivity is rapidly increased due to the increase of temperature. Therefore, this study was carried out to develop a thermal insulation, which is applied to multiple layers insulation (MLI) technic, that can be used under SOFC operating conditions and prevent a drastic drop in thermal conductivity at high temperature. The developed insulation is consist of a thermally conductive material, a spacer, and a reflective plate. The thermal conductivity of the insulation was measured by in the thermal conductivity measuring device at high temperature range. As a result, it was confirmed that the developed layers insulation have an good thermal conductivity (0.116 W/mK) than fibrous insulation (0.24 W/mK) as a radiation shielding effect at a high temperature of 1,173 K.

**Key words :** Solid oxide fuel cell(고체산화물 연료전지), Multiple layers insulation(다층 박막 단열재, 적층단열재), Insulation(단열재), High temperature insulation(고온 단열)

## Nomenclature

$\dot{q}$  : Heat (W)

$\dot{m}$  : mass (kg/s)

$C_p$  : Specific heat (J/kg-°C)

T : Temperature (°C)

- R : Thermal resistance (K/W)  
 k : Thermal conductivity (W/m-K)  
 L : Thickness (m)  
 A : Area (m<sup>2</sup>)

## Subscripts

- hm : heat transfer meter  
 ht : heat transfer part  
 c : contact material  
 s : sample

## 1. 서 론

연료전지는 열에너지와 전기에너지를 동시에 사용할 수 있고 이 과정에서 근본적으로 물만 배출하는 친환경적인 에너지 설비로 알려져 있다. 연료전지는 사용온도와 재질에 따라 분류되고 있는데, solid oxide fuel cell (SOFC)는 상대적으로 고온(700-800°C)에서 사용되어 폐열 회수가 용이한 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

SOFC는 고온 작동으로 인하여 250°C 이하의 온도에서 작동되는 PAFC 또는 PEMFC와는 달리 비싼 백금 촉매를 사용하지 않고도 반응을 가속화시킬 수 있어 경제적으로 높은 잠재력을 가지고 있다. 또한, 배출되는 양질의 배열을 이용한 배열회수 및 복합발전이 가능하여 전체 발전 시스템의 효율을 향상시킬 수 있어 55%에 육박하는 높은 발전 효율을 가지고 있다. 또한 SOFC는 고온의 스택이 포함된 핫박스(hot box)가 있으며, 필요한 열을 공급하기 위한 버너가 필수적으로 구성된다. 핫박스는 스택, 개질기, 버너, 열교환기 등으로 구성되고 에너지 효율을 극대화하기 위해서는 단열조건 최적화 설계가 필요하다.

일반적으로 널리 사용되고 있는 단열재는 보드 또는 울 형태로 단열재를 적용해야 할 곳의 온도조건 즉, 단열재 내부와 외부의 온도가 정해지면 단열재의 두께를 쉽게 구할 수 있었다. 하지만 고온용 단열재는 국내 일부 기업에서만 생산하고 있고 종류가 다

양하지 않아 상당량을 수입에 의존하고 있다. 사용자(본 연구 협력기관, 시스템 제조사) 측은 현재 유통되는 고온용 단열재와 관련하여 다음과 같은 두 가지 문제점을 제기하고 있다. 1) 단열재1: 가격은 낮으나 고온조건에서 단열성능이 저하되어 단열재 두께의 증가로 부피가 증가하는 문제와 정비를 위한 해체 및 조립에 따른 단열재 손상과 재조립 어렵다. 2) 단열재2: 단열성능은 우수하나 가격이 높고 정비를 위해서는 별도의 작업 및 장비가 개발되어야만 가능하여 일회성 혹은 연구 테스트용으로 제한된다.

본 연구는 시스템 제조사에서 필요로 하는 단열재(SOFC 작동조건에서 사용가능하고 가격이 낮고 정비성이 우수한 단열재) 개발을 위하여 수행되었다. 본 연구는 고온에서 열전도도의 급격한 하락을 방지하기 위하여 인공위성의 다층박막 기술(multiple layers insulation, MLI)<sup>1)</sup>을 응용한 적층형 단열재를 개발하고자 하였다. SOFC용 적층형 단열재는 선행연구자들이 정의한 단열재 구성요소를 활용하고 신규 소재 개발 없이 적절한 소재를 선정하여 개발되었다. 개발된 단열재는 열전도 측정 장치를 사용하여 온도 범위별 실험으로 성능을 검증하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험 장치

실험 장치는 기본적으로 ASTM C177과 KS L ISO 8302 규격을 참조하여 제작하였다<sup>2-4)</sup>. Fig. 1은 제작된 실험 장치를 나타낸다. 실험 장치는 열원부(히터), 흡열부(열유량계), 샘플(시편) 및 계측 장치로 구성되었다. 또한, 실험 장치는 내부 열원의 전도 및 대류로의 열손실을 막기 위해 진공 상태가 가능하도록 설계되었다. 히터는 전기 히터를 사용하였으며 내부 형상은 전열면에 균일한 열을 주기 위하여 Fig. 2(a)와 같이 나선 형태로 구성하였다.

시편의 열전도 성능을 측정하기 위해서는 시편 주변의 단열 또는 보조히터를 구성하여 수평방향으로 발생하는 열전달을 최소화하고 수직 방향 열전달을

측정하도록 해야 한다<sup>2)</sup>. 본 연구에서는 히터 주변에는 에너지손실을 막아 시편의 수평방향 열전달을 최소화하기 위하여 단열재와 복사 차폐재를 설치하였다. 열유량계 측의 형상은 히터와 같은 동일한 목적으로 Fig. 2(b)와 같이 나선형태의 유로를 통하여 전 열면에 고르게 유체가 흘러가도록 하였다. 시편의 히터쪽과 열유량계 쪽 온도는 반경방향에 따라 설치된 3개의 k타입 열전대에서 측정한 온도의 평균값을 사용하였다.

열유량계를 통하여 측정되는 입구/출구 온도는 작은 온도차에서 발생하는 오차를 줄이기 위하여 Pt100 열전대를 사용하였으며 흡열된 열량 계산에 사용하였다. 열유량계에 사용된 유체는 물과 비교하여 낮은 비열로 측계되는 온도차를 더욱 큰 값을 갖게 해주는 FC-40 (Fluorinert™ Electronic Liquid, 25℃

기준 비열: 1,100 J/kg·℃)을 사용하였다.

### 2.2 실험 시편

실험 시편은 3종류의 금속시편과 고온용 적층 단열재 시편 1종류를 사용하였다. 금속시편은 고온용 적층 단열재의 성능 측정에 앞서 실험 장치 자체를 검증하기 위하여 사용하였다. 실험 장치는 시편의 단열 성능 혹은 열전달 성능을 측정하기 위한 장치로 상용 판매는 제한적이다. 따라서 관련 단열 측정 장치는 연구기관마다 관련규격의 내용을 바탕으로 제작한 장치를 사용하는데 본 연구에서도 Fig. 1과 같이 별도로 제작된 실험 장치를 사용하였다. 제작된 실험 장치의 객관성과 재현성 확보를 위하여 검증 실험은 물성이 알려진 금속 시편을 사용하였다. 금속 시편은 각각 99.95%의 순도를 갖는 철, 구리, 알루미늄을 사용하였다(Fig. 3).

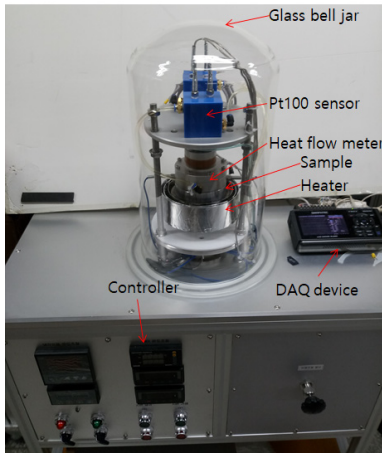


Fig. 1. The apparatus for measuring thermal conductivity

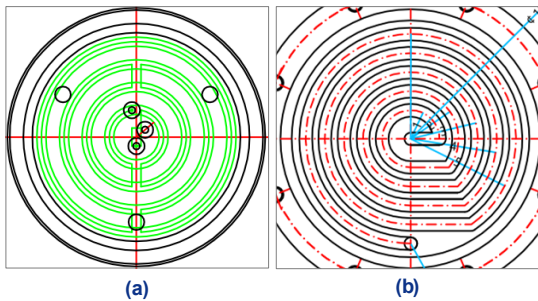


Fig. 2. Heat source and sink parts: (a) cross-section view of heater, (b) cross-section view of heat flow meter



Fig. 3. The metallic samples: Aluminum (L), Copper (M), Iron (R)

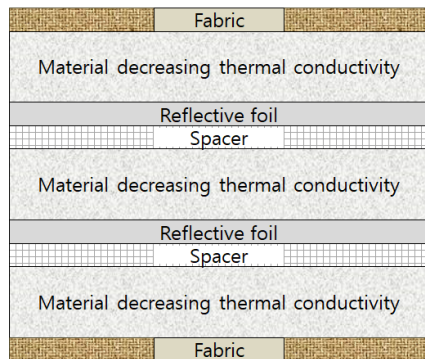


Fig. 4. The composition of insulation of multiple layers

연구에 사용된 단열재 시편은 우주항공에서 도입된 다층박막 단열기술이 응용된 고온용 적층 단열재 시편이다<sup>5)</sup>. 고온용 적층 단열재는 Fig. 4와 같이 전도 감소재와 복사차폐재와 간극 유지재(spacer)의 조합으로 구성되고 바깥은 단열재의 결속을 위하여 고온용 섬유 재질이 사용되었다. 전도 감소재는 기본적인 단열성능을 만들어주는 역할을 한다. 복사차폐재는 매질 없이 전달되는 복사 에너지의 방열을 막아주는 역할을 한다. 또한 간극 유지재는 일반적으로 사용되는 금속계의 복사차폐재의 전도를 막아주기 위한 적정 간극을 만들어 주는 역할을 한다.

### 2.3 실험조건

실험은 금속 시편을 통한 장치 자체가 갖는 열저항을 측정하고 해당 값을 바탕으로 적층단열재의 단열성능을 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 금속 시편에 대한 실험은 히터 설정온도를 기준으로 50℃에

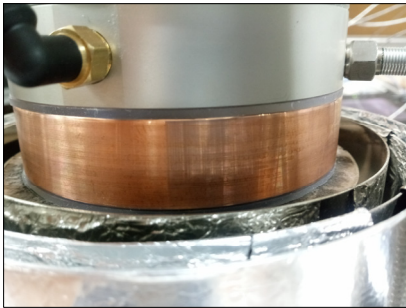


Fig. 5. The installed metallic sample together with silicon lubricant

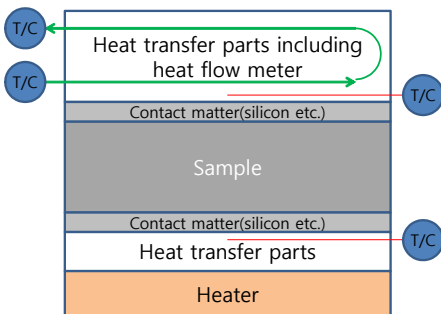


Fig. 6. Configuration of heat transfer matter

서 수행되었다. 이때 실험 장치와 금속시료 사이의 접촉저항으로 발생할 수 있는 오차를 줄여 주기 위하여 Fig. 5와 같이 두께 1 mm 실리콘 고무를 사용하였다.

적층단열재는 고온에서의 열전도 특성을 알아보기 위해 200℃, 600℃, 900℃에서 실험을 진행하였다. 이때 적층단열재의 경우는 접촉저항으로 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위하여 단열재의 높이를 5 cm에서 2 cm까지 압축하여 진행하였다. 규격에서는 본 연구에서 전도 감소재로 사용한 연질재료에 대한 압축 및 접촉 저항에 대한 기준이 마련되어 있지 않아 본 연구에서는 충분히 압축되어 접촉저항이 무시될 것으로 판단되는 기준을 바탕으로 실험하였다.

### 2.4 계산 방법

금속 시편을 예시로 보면 히터에서 생성된 열은 Fig. 6과 같이 열전달부(sus재질의 실험 장치)를 통하여 접촉저항 감소를 위하여 설치한 실리콘 고무를 지나 시편으로 전달되고 다시 상부의 열유량계 쪽으로 실리콘고무와 열전달부를 통하여 전달된다.

상부로 전달된 열은 열유량계를 통과하는 유체에 그 열에너지를 전달하여 입출구의 온도차를 발생시킨다. 이때 측정된 온도와 제어된 유량을 바탕으로 열량이 계산된다. 이 열량은 진공과 단열재의 설치로 이론적으로 시편을 통과한 열량과 같게 된다. 이를 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\dot{q} = \dot{m} Cp \Delta T_{hm} = \frac{dT}{R} \quad (\text{식 1})$$

이렇게 측정된 열량은 열전달부, 접촉물질, 시편이 갖는 총괄열저항 값과 온도차를 기준으로 계산될 수 있다. 이때 필요한 총괄열저항은 아래의 식과 같이 계산된다.

$$R = \left( \frac{L_{ht}}{k_{ht}} + \frac{L_c}{k_c} + \frac{L_s}{k_s} \right) * \frac{1}{A} \quad (\text{식 2})$$

**Table 1.** Experimental results of metal samples

Samples		Fe	Al	Cu	Unit
Heat flow meter	Flow rate	97	94.5	89.1	ccm
	Inlet temp.	22.5	21.9	21.8	°C
	Outlet temp.	24.6	24.2	24.2	°C
	Temp. difference	2.1	2.3	2.4	°C
	Heat	6.37	6.96	6.85	W
Sample	Thickness	30	30	30	mm
	Hot side	49.53	50.40	51.27	°C
	Cold side	26.93	26.40	27.13	°C
	Temp. difference	22.60	24.00	24.13	°C
	Heat	6.37	6.84	6.89	W
Apparatus	sus thick	10	10	10	mm
	Silicon thick	1	1	1	mm

## 2.5 실험방법

시편은 실험 장치에 설치하고 시편의 특성에 따라 충분한 압력을 가하여 오차를 줄이도록 설치하였다. 이때 압력은 히터와 열유량계를 상하부로 이동시켜 밀착시키는 것으로 설정하였다. 다음으로 진공펌프를 가동하여 유리종병 내부가 진공상태가 되도록 하였다. 진공이 형성되는 것이 확인되면 열유량계에 유체를 흘려보내고, 히터 쪽에 전원을 인가하였다. 실험은 히터 쪽 온도와 시편의 하부 쪽 온도 및 열유량계쪽 온도가 정상상태에 도달하면 측정된 데이터를 바탕으로 열전도도를 계산하는 과정으로 진행되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 금속 시편 측정 결과

금속 시편으로 측정된 값들은 실험 장치 자체의 안정적 데이터 확보에 대한 검증을 위한 것이다. 각 시편에 적용된 열전도도는 철: 72.7 W/m-K, 알루미늄: 240 W/m-K, 구리: 393 W/m-K이다. 금속시편을

사용해 도출된 실험 결과는 Table 1과 같다. 적용된 물성과 열유량계와 시편 상하부의 데이터를 바탕으로 식 (1)에서 언급한 것과 같이 두 개의 열량을 구할 수 있다. 이 값을 확인해 보면 열유량계에서 측정된 열량과 시편 상하부에서 측정된 온도를 기준으로 도출된 열량을 비교해 보면 알루미늄 시편에서 가장 큰 차이를 보여 1.82%의 오차를 보였고 철과 구리는 각각 0.01%와 0.5%를 갖는 것으로 나타났다. 이는 동일한 시편을 통하여 동일조건 실험에서 실험 장치가 최대 1.82%의 오차를 나타낼 수 있다는 것을 보여준다.

### 3.2 적층 단열재 실험 결과

적층 단열재 실험은 각 온도대별로 총 세 번의 재현실험을 진행하였고 그 결과는 Table 2와 같다. 고온에서의 성능 측정을 위하여 설정 온도를 200°C에서 600°C와 900°C로 높임에 따라 자명하게 열유량계에서 측정되는 열에너지는 많아졌다. 또한, 시편 상하부의 온도차도 증가하는 결과를 보였다.

각 실험의 결과를 통하여 역산 열전도도를 분석한 결과는 Table 3과 같다. 먼저 열전도도를 온도대별로 보면 200°C에서 평균 0.049 W/mK의 값을 갖는 것으로 나타났고 이때의 실험 회수에 따른 오차는 4.2%로 나타났다. 600°C에서는 평균 0.082 W/mK의 값을 갖는 것으로 나타났고 이때의 오차는 5.8%를 갖는 것으로 나타났다. 900°C에서는 0.116 W/mK와 3.6%의 오차를 갖는 것으로 나타났다.

### 3.3 단열성능에 대한 고찰

Fig. 7은 적층단열재에 사용된 전도 감소재의 제조사 측에서 제공하는 자체 열전도도와 실험으로 얻은 적층단열재의 열전도도 그리고 선행연구자<sup>6)</sup>의 실험 연구를 바탕으로 구해진 계산식으로 도출된 열전도도를 비교한 것이다. 먼저 순수하게 전도 감소재의 열전도도를 보면 200°C에서 0.05 W/mK의 값을 갖다가 온도가 올라감에 따라 급격하게 증가하여

**Table 2.** Experimental results of multiple layers insulation

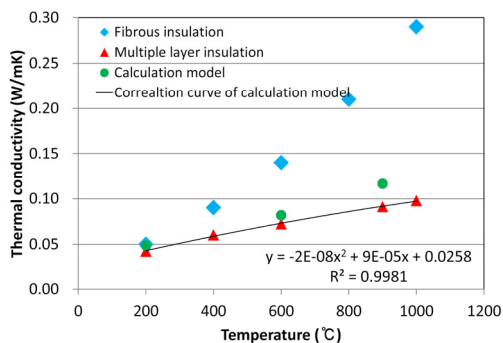
Condition		200℃			600℃			900℃			Unit
Part	Number of times	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	-
Heat flow meter	Inlet temp.	23.4	23.2	23.3	25.1	26.4	26.7	30.5	28.7	28.7	℃
	Outlet temp.	24.6	24.4	24.6	31.0	32.5	32.9	42.5	40.1	40.9	℃
	Temp. difference	1.2	1.2	1.3	5.9	6.1	6.2	12.0	11.4	12.2	℃
	Flow rate	89.1	83.7	83.7	89.1	94.5	94.5	100.2	100.2	100.2	ccm
	Density	1,852.7	1,853.1	1,852.9	1,849.0	1,846.2	1,845.6	1,837.4	1,841.3	1,841.3	kg/m <sup>3</sup>
	Specific heat	1,037.8	1,037.5	1,037.7	1,045.2	1,047.4	1,048.0	1,059.6	1,056.6	1,057.0	J/kg-℃
	Heat	3.4	3.2	3.4	16.9	18.6	18.9	39.0	37.0	39.7	W
Sample side	Hot side	201.77	201.90	201.93	604.13	604.73	607.47	899.63	900.50	900.50	℃
	Cold side	27.03	27.30	27.43	36.57	38.13	38.87	51.37	50.67	50.67	℃
	Temp. difference	174.73	174.60	174.50	567.57	566.60	568.60	848.27	849.83	849.83	℃
	Thickness	20	20	20	20	20	20	20	20	20	mm
	Heat	3.4	3.2	3.4	16.9	18.6	18.9	39.0	37.0	39.7	W

**Table 3.** The inverse operating thermal conductivity of multiple layers insulation

Condition	200℃			600℃			900℃			Unit
Number of times	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	-
Thermal conductivity of sample	0.049	0.046	0.050	0.076	0.084	0.085	0.118	0.112	0.120	W/m-K
Average	0.049			0.082			0.116			W/m-K
*STDEV	0.0021			0.0047			0.0042			-
**Error	4.2			5.8			3.6			%
Negative error	0.0023			0.0054			0.0047			W/m-K
Positive error	0.0017			0.0033			0.0032			W/m-K

\*Standard deviation.

\*\*Error=standard deviation/average×100 (%).

**Fig. 7.** Comparison of fibrous insulation, multiple layers insulation and calculation model

900℃에서는 0.24 W/mK 정도의 값을 갖는 것으로 나타난다.

반면에 다층 단열재는 온도가 올라감에도 상대적으로 낮은 열전도도의 증가를 보여준다. 이것은 온도가 올라감에 따라 증가하는 복사 열전달을 단열재의 구성 중 하나인 복사 차폐재가 설계한 목적에 맞게 복사 열전달을 감소시켜 나타난 것으로 보인다. 모델식과 실험값과 비교를 해보면 같은 온도대에서 실험값의 열전도도가 높게 나타났다. 이는 선행연구에서 사용된 소재와 본 연구에서의 소재 차

이 및 계산식에 적용된 경험 계수 값의 차이로 보여진다.

#### 4. 결론

본 연구는 SOFC용 단열재를 개발하기 위하여 수행된 연구이다. 연구 결과로 다층박막단열재이 응용된 고온용 적층단열재를 개발하였다.

동일 소재의 전도 감소재만 사용된 일반 단열재는 고온에서 열전도도가 급격하게 저하하는 특성을 갖는데 반하여 개발된 단열재는 실험을 통하여 고온에서 열전도도 상승이 완화되어 상대적으로 단열성능을 유지하는 것으로 나타났다. 고온조건에서 단열성능이 유지되는 점은 단열재 두께를 감소시킬 수 있는 가능성을 보여줘 시스템의 외부 크기를 결정하는 단열재의 두께를 줄여 소형화에도 도움을 줄 수 있다는 것을 보여준다. 개발된 단열재는 별도의 소재 개발 없이 적정소재 선정으로 개발된 적층단열재로 가격 상승을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 구조적으로 정비(분해 및 재조립) 부분이 해결된다면 SOFC 상용 단열재로 활용될 수 있다고 판단된다. 이를 위해 후속 연구는 기존의 고성능 단열재와의 성능 비교를 통하여 성능향상의 지표를 가격과 성능측면에서 측정하는 연구와 실제 상용 SOFC 설비에 적용하기 위하여 단열재 자체의 결속 및 설치

방안에 대한 연구를 수행하고자 한다.

#### 후 기

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

#### References

1. T. S. Park, T. Ho. Nam, D. G. Lee, S. K. Lee, and J. S. Moon, "A Study of Deduction of evaluation Items for Design of SOFC stack safety performance evaluation system", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 21, No. 6, 2017, pp. 81-87.
2. ASTM C177, ASTM International, <https://doi.org/10.1520/C0177>.
3. KS L ISO 8302.
4. A.J. Slifka, B.J. Filla, and J.M. Phelps, "Thermal Conductivity of Magnesium Oxide From Absolute, Steady-State Measurements," Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 103, No. 4, 1998, pp. 357-363.
5. B. S. Hyun, H. K. Kim, and J. M. Choi, "Comparison on Thermal Analysis Methods for Multi-Layer Insulation", KSME Symposium, 2003, pp. 290-295.
6. A. Kan, L. Kang, and C. Wang, "A Simple and Effective Model for Prediction of Effective Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panels," Fut Cit & Env, Vol. 1, 2015, p. 4.