

발룬 펄라이트를 사용한 무기단열재의 특성 연구

A Characteristic Study of Inorganic Insulation Using Balloon Pearlite

Chanki Jeon^{a,*}, Jongpil Park^{b,1}, Hoon Chung^{c,2}, Jaeseong Lee^{d,3}, jaeyeong Shim^{e,4}

^a Department of Urban Construction Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

^b Master course of Urban Construction Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

^c Master of Chemistry Engineering, SunHan M&T, 663-13 Gogjan - dong, Nandong-gu, Incheon 405-818, Republic of Korea

^d Master course of Urban Construction Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

^e Ph.D student of Urban Construction Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

ABSTRACT

The insulation in buildings is very important. Insulation used in the building is largely divided into organic and inorganic insulation by its insulation material. Organic insulations material which are made of styrofoam or polyurethane are extremely vulnerable to fire. On the other hand, inorganic insulation such as mineral-wool and glass-wool are very week with moisture while they are non-flammable so that its usage is very limited. In this study, inorganic heat insulating material developed and the properties of thermal conductivity evaluated. The thermal conductivity and the water absorption of the sample in less than 50mm thickness of the board is less than 0.05W/mk, 3.0%. Bending strength and the water repellency is more than 25N/cm², 98%.

KEYWORDS

Insulation
Pearlite
Balloon Pearlite
Thermal Conductivity
Inorganic Insulation

건축물에서 단열재는 매우 중요하다. 건축물에 사용하는 단열재는 재료에 따라 유기단열재와 무기단열재로 크게 나누는데 스티로폼이나 우레탄으로 만들어진 유기단열재는 화재에 매우 취약하다. 반면 펄라이트 무기단열재는 불연재이나 습기에 매우 취약하여 사용범위가 제한적이다. 본 연구에서는 단열성능이 보드의 두께가 50mm 이내의 샘플에서 열전도율과 흡수율은 각각 0.05W/mk, 3.0% 이하, 휨강도와 발수율은 각각 25N/cm², 98% 이상인 무기단열재를 개발하고 열전도 특성을 평가하였다.

단열재
펄라이트
발룬 펄라이트
열전도율
무기단열재

© 2016 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-32-835-8776. Fax. 82-32-835-4939.
Email. johnland@inu.ac.kr

1 Tel. 82-10-4704-3465. Email. jp@inu.ac.kr
2 Tel. 87-10-3785-9829 Email. chch0129@hotmail.com
3 Tel. 82-10-8742-9572. Email. js@inu.ac.kr
4 Tel. 82-10-3350-6352 Email. ibytech@inu.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Sep. 14, 2016
Revised Sep. 20, 2016
Accepted Sep. 27, 2016

1. 서론

에너지절약과 이산화탄소의 감축 문제는 모든 나라의 관심사이며, 중대한 연구과제이다. 이를 위하여 건축분야에서는 에너지 효율이 극대화된 제품개발이 이루어지고 있고, 최근에는 흡드실리카를 이용한 VIP(Vacuum Insulation Panels), 공기보다 열전도율이 낮은 아르곤(Ar), 크립톤(Kr), 제논(Xe) 가스를 적용한 GFP(Gas-Filled Panels)와 에어로젤(Aerogel), PCM(Phase Change Material)과 같은 단열 신소재 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(E. W. Lemon et al., 2004; Park, J. M et al., 2012)

단열 보드는 현대의 건축물이나 기타 산업 등에서 다양하게 사용되고 이러한 단열 보드는 다양한 형태로 제조되어 사용되고 있다. 그러나 대부분의 단열재는 제품의 내부에 기공을 형성시켜 만든 발포 형태의 합성수지성 단열재, 섬유상의 재료를 부직포 형태로 만든 유리섬유나 미네랄 울을 사용한 섬유형태의 단열재 그리고 펠라이트나 세라믹 볼 등을 이용하여 시멘트 등의 무기 결합제를 사용하여 board화 시킨 제품들이 출시되고 있다.

단열재는 원료의 종류, 형태 및 사용 용도에 따라 분류할 수 있으나 재질에 의한 분류가 일반적이다. 재질에 따라 단열재는 크게 무기단열재와 유기단열재로 나눌 수 있다. 유기단열재의 경우 단열성능이 우수하고 내흡수성, 시공성이 뛰어나서 국내시장의 90% 이상을 점유하고 있으나 화재 발생 시 난연 처리되지 않은 스티로폼이나 우레탄의 경우 착화시간이 5초 이내이며, 화염이 확산되는데 걸리는 시간은 50여 초로(Song, J. Y. et al., 2011) 연소하면서 화재가 급속히 확대되고, 연소 시 발생하는 포름알데히드나 에틸렌시아나이드(CH=CHCN), 염산가스, 시안가스(HCN)와 같은 유독가스는 인체에 매우 치명적이다(Lee, H. P. et al., 2011).

무기단열재의 경우 내화특성은 매우 우수하나 흡수성이 매우 강해 단열재의 고유기능인 단열성능이 떨어지는 단점이 있다(Yoo, S. H. et al., 2013). 공기의 열전도율은 0.026W/mk임에 반해(K. Kadoya, et al., 1995), 물은 공기의 열전도율의 23배인 0.598W/mk에 이르고 있다(J. V. Sengers. et al., 1986). 뿐만 아니라 얼음의 경우 공기의 열전도율의 약 90배 이상인 1.9kcal/m^h°C의 열전도율을 가지고 있으므로(Anne-Marie KIETZIG. et al., 2010) 재료의 함수율은 열전도율을 결정짓는 가장 큰 영향 요소라고 할 수 있다(Langlais. C. et al., 1982).

수분 흡수에 따른 단열재의 열전도율 변화는 많이 보고되어 있으나, 단열효과를 유지시키기 위한 연구는 보고되지 않아, 본 연구에서는 수분방지제를 개발하고 이를 펠라이트와 발룬 펠라이트로 만든 무기단열재에 처리한 후, 습기에 노출시켜 수분의 증가량과 열전도율을 측정하여 무기단열재의 열전도율 변화를 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 시편

열전도계수를 측정하는 방법으로는 평판비교법, 평판 열류계법, Hot-wire법 등이 있으나 본 연구에서의 열전도계수 측정 방법은 KS L 9016 시험법에 따라 시험하였고, 열전도율 시험 장치는 평판열류계법 방식의 열전도율 측정기(HFM-436)를 사용하여 시험하였다. 시편 크기는 KS L 9016, KS F 4714 시험 규격인 300x300x50mm로 제작하였다. 측정된 시편은 시편의 두께를 정밀하게 측정하였으며, 실험부 주위의 온도를 일정하게 유지된 곳에서 열전도율을 측정하였다. 측정된 시편의 열전도 계수는 푸리에(Fourier) 열전도 법칙인 (식 1)에 의하여 계산하였다.

$$\frac{dQ}{dT} = -Ak \frac{\delta T}{\delta x} \quad (\text{식 1})$$

$$\frac{dQ}{dT} : \text{열 유동흐름 비 / 열 유량밀도 } [J/(m^2s)] = [Watt/m^2]$$

- : 열 흐름 방향이 온도 감소 방향

A : 단면적(m²)

k : 열전도율(도)[J/(msK)]

$$\frac{\delta T}{\delta x} : \text{온도 기울기(열 흐름 구동력)}(K/m)$$

식 (1)을 보면 단위시간에 전도되는 열량은 온도차와 접촉된 단면적에 비례하고 거리에 반비례함을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 시편은 발룬(balloon) 펄라이트와 진주암 펄라이트를 무기바인더를 사용하여 제작하였다. 본 연구에 사용한 펄라이트 재료의 특성을 살펴보면 화산적으로 된 진주석, 흑요석 등을 900~1,400℃로 소성한 후 분쇄하여 소성 팽창한 것으로 내부에 미세 공극을 가지는 경량 구상 형의 작은 입자로 구성되어 경량골재 및 단열, 보온, 흡음 등의 목적으로 사용되고 비중은 0.04~0.20, 공극률 90%이며, 흡수성이 매우 강한 성질을 가진다.

발룬 펄라이트는 셀의 팽창은 최대로 유도하되 비누거품방울 같이 밀폐 기공을 가진 중공(hollowness)체 제품으로 미국의 Grefco, Silbrico 등에서 생산되며, 발룬 제품들은 고부가가치 상품으로써 시장에서의 신장률이 괄목할만한 상황이다. 본 연구에서 사용한 발룬 펄라이트의 샘플을 SEM(Scanning Electron Microscope) Qunata 200으로 촬영한 결과 완전히 밀폐된 구조는 아니지만 펄라이트보다는 구형에 가까웠다(Fig 1).

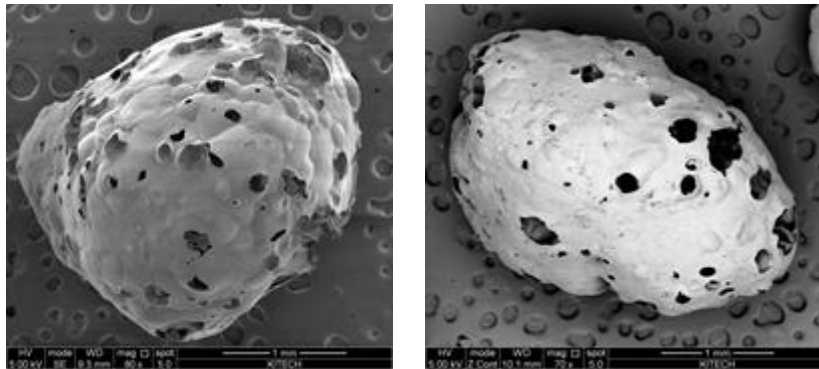

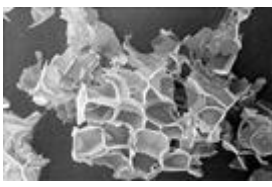


Fig. 1 Balloon Pearlite SEM picture

Table 1은 발룬 펄라이트와 진주암 펄라이트의 물성표이다.

Table 1. Properties of balloon pearlite and Pearlite

Classification	Balloon Pearlite	Pearlite
현미경 사진		
발포율	5~20배	10~30배
발포온도	1000℃	1000℃
입경	0~70mm	0~5mm
열전도율	0.03~0.044W/mk	0.03~0.05W/mk
입상	경질	연질
비중	0.08~0.3	0.05~0.15
평균흡수율	40%	90%
보수성	작음	90%
배수성	크다	작다
통기성	크다	작다

2.2 고체바인더

발룬 펠라이트와 진주암 펠라이트의 열전도율을 비교 시험하기 위하여 바인더의 양과 물의 양, 흡수 방지제의 양 등의 실험조건을 같이하여 비교하였다. 무기 액상 바인더는 Y사의 액상 규산나트륨 용액을 사용하였고, 고체바인더는 아래 구성비를 가진 Y사의 고체바인더 사용하였으며, 내 흡수 성능을 위한 흡수방지제는 직접 제조하여 사용하였다.

Table 2. Component ratio of solid binder

Contents	Chemical Composition(%)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	S	Total Fe	MnO	기타
	33	41	14	6	1	0.5	1	3.5

2.3 흡수방지제(SH-AF)의 제조

(1) 실리카 졸의 합성

에탄올 1.4kg(29.8mol)과 진한 염산 30g(0.3mol)을 물 3.0ℓ에 넣고 교반하면서 테트라에톡시실란 2.08kg(10mol)과 메틸트리에톡시실란 178g(1.0mol)을 미리 혼합하여 놓은 용액에 넣고 교반한다. 그리고 실온에 4시간 교반하여 실리카 졸 용액을 얻는다. 이 과정은 SEM과 나노 입자 분석기로 확인하였으며, 그 반응식은 Fig 2와 같다.

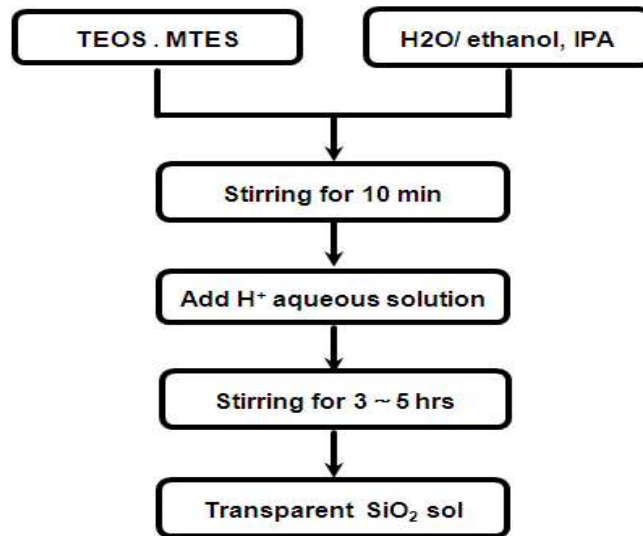


Fig. 2 Synthesis of silica sol

합성된 실리카 졸을 Malvern사의 Zetasizer Nano ZS90으로 측정한 결과 평균입자 크기는 20.0nm였으며, 입도분포가 $\pm 0.553\text{nm}$ 로 매우 균일한 크기의 나노 실리카 입자가 합성되었다. 합성된 실리카 졸 용액을 1 : 20 비율로 에탄올에 희석하여 TEM(Transmission Electron Microscope) 사진으로 관찰한 결과 입도분석 결과와 유사하게 20.0nm 정도 크기의 구형 나노 실리카 입자가 형성되었다.

(2) 플루오르알킬 그룹을 포함하는 오르가노실록산 제조

정제수 3.0kg에 트리데카플루오르-1,1,2,2,테트라하이드로옥틸-1-트리에톡시실란 2.25kg(5mol)을 녹인 다음 3-아미노프로필-트리에톡시실란 1.10kg(5mol)을 천천히 첨가한다. 이 용액을 교반하면서 초산 60g(1mol)을 넣고 8시간 교반하여 트리데카

플루오르-1,1,2,2,테트라하이드로옥틸-1-트리아미노트리 에톡시실란(플루오르오르가노실록산)을 제조한다.

2.4 원료 배합 및 성형

시험용 샘플을 만들기 위해서는 물 150cc와 고체 바인더 150g, 액체바인더 150g를 충분히 교반하여 혼합하면서 펠라이트 600g를 투입하고 충분히 혼합한 후 넓은 용기에 담아서 충분히 혼합한다. 이 과정에서 고체 바인더와 액체바인더가 섞이면서 반응하여 급속 경화를 하는데, 미리 구비해 둔 300x300x50mm 공시체에 투입하고 10~20kg/cm²의 압력으로 성형하였다. 이 때 실험오차를 줄이기 위하여 주문 제작한 압축 성형기를 사용하였다.

또한 시험체는 60℃ 환경에서 3시간 양생 후 72시간 건조를 하여야 충분한 굳기의 보드를 얻을 수 있었다. 그러나 진주암 펠라이트는 20kg/cm²의 압력, 발룬 펠라이트는 10kg/cm² 이상으로 가압할 수 없었다. 따라서 발룬 펠라이트의 최적의 성형 조건을 찾기 위하여 성형 압력에 따른 부피 변화율을 측정하였다. 이후에 성형한 단열보드에 흡수방지제는 0.4L/m²의 양으로 도포하고 24시간 실온에서 건조하였다.

2.5 단열보드의 물성시험

열전도계수 측정은 KS L 9016(보온재의 열전도율 측정 방법) 시험법에 따라 하였고, 열전도율 시험 장치는 평판열류계법 방식의 열전도율 측정기(HFM-436)를 사용하여 시험하였으며, 100x100x50mm의 단열보드 시편을 650±15℃의 온도로 오븐에 넣고 3시간 후 측정하여 선수축률 값을 구하였다(식 2).

$$\text{선수축률 (\%)} = \frac{\text{가열 후 표시선 길이} - \text{가열 전 표시선의 길이}}{\text{가열 전 표시선의 길이}} \quad (\text{식 2})$$

발수도는 측정은 KS F 4714(시멘트계 바탕 바름재) 시험법에 따라서 150x300x50mm 시험편을 45° 경사면에 놓고 1분 동안 물이 1L가 되도록 하여 60분간 뿌린 후 표면의 물방울을 제거하고 질량을 측정하였다. 흡수량은 KS M 3809 시험과 같이 100x100x25mm를 수면아래 50mm까지 하여 10초간 담근 후 꺼내서 무게를 측정하여 구할 수 있었다(식 3).

$$\text{흡수율 (\%)} = \frac{\text{흡수 후 무게} - \text{흡수 전 무게}}{\text{표면적}} \times 100 \quad (\text{식 3})$$

휨강도 측정은 KS F 4714(발수성 펠라이트 보온재)에 따라서 250x75x50mm의 시험편을 제작한 후, 외부에 시험을 의뢰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전도율

발룬 펠라이트와 진주암 펠라이트의 열전도율 시험 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Thermal conductivity of Balloon perlite and perlite

Classification	Balloon Perlite		Pearlite	
	흡수방지제 도포 전	흡수방지제 도포 후	흡수방지제 도포 전	흡수방지제 도포 후
열전도율 (W/mk)	0.0629	0.0616	0.0650	0.0648

일반적으로 많이 사용하는 진주암 펄라이트의 경우 오픈 셀 구조로서 성형 시 가압하면 셀의 구조가 쉽게 무너졌다. 이는 단열효과를 떨어뜨리는 요인으로 볼 수 있다. 반면에 발룬 펄라이트는 원형 형태의 닫힌 구조를 가지고 있어 단열 효과 면에서 매우 우수한 것으로 나타났다. 흡수방지제를 처리하지 않은 펄라이트의 단열보드에 습기가 열전도율에 미치는 영향을 측정하기 위하여 완전히 건조한 상태에서 실온에서 10일간 노출 시킨 후 무게 변화와 열전도율을 측정한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Absorption rate and the thermal conductivity in the natural state

물 흡수율(%)	열전도율(W/mk)
0	0.065
5.5	0.087
7.2	0.100
11.6	0.112

실험결과에 의하면 자연 상태에서 펄라이트 단열재의 경우 11.6% 정도의 물을 흡수하였고, 열전도율은 72.3% 상승하였음을 알 수 있었다.

3.2 선수축률, 발수율, 내습수 및 휨강도 성능

선수축률, 발수율, 내습수 및 휨강도 성능에 사용한 모든 샘플은 흡수방지제를 처리하여 사용하였으며 시험 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Insulation board properties test results of balloon perlite and perlite

Classification	Balloon perlite	Pearlite
외관 및 표면경도	표면이 매끄럽고 단단함	표면이 거칠고 잘게 부서짐
선수축률(%)	0.65	0.80
발수율(%)	100	100
흡수율(%)	2.8	3.9
휨강도(N/cm ²)	32	50
불연성	불연	불연

실험 결과 발룬 펄라이트 및 진주암 펄라이트의 단열보드 선수축률, 발수율 및 휨강도 성능은 KS 기준보다 높게 나왔으며, 진주암 펄라이트의 흡수량은 유기단열재의 흡수율 기준인 3.0% 보다 높게 나왔지만, 발룬 펄라이트는 기준치 이하인 2.8%로 나왔다.

이 때 발룬 펄라이트는 표면이 매우 단단하여 진주암 펄라이트보다 잘 부서지지 않았으며 성형 시 진주암 펄라이트에 비해 부피가 약 80% 정도 덜 줄어들었다. 이는 발룬 펄라이트의 경우 진주암 펄라이트에 비해 약 80% 적은 양을 사용하여도 펄라이트와 같은 부피의 단열보드를 제작할 수 있음을 의미하며, 또한 보다 많은 기공을 가지므로 단열 효과를 극대화 할 수 있음을 의미하기도 한다.

Fig 3은 성형압력에 따른 부피와 부피 감소율을 나타낸다. 이 때 단열판재 제작을 위해서 내경이 300x300x100mm인 알루미늄 성형 틀에 혼합한 재료를 넣고 유압기를 사용하여 일정한 압력을 가한 후에 부피 변화를 살펴보았다. 실험 결과 Fig 3에서처럼 발룬 펄라이트의 경우 압력 10kg 이후 부피가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이 때 펄라이트의 셀이 무너

지면서 밀도가 증가한 것으로 판단되었다. 그러나 성형 압력은 10kg/cm² 이상으로 하면 셀이 무너져 단열 성능이 떨어졌는데, 이는 압력에 대한 변화율은 펄라이트 각 셀의 압축강도가 서로 상이하기 때문에 발생한 것으로 보인다. 한편 열전도율은 보드를 이루는 셀의 밀도와 관계가 있으며 밀도가 증가 할수록 열전도율은 감소함을 알 수 있었다.

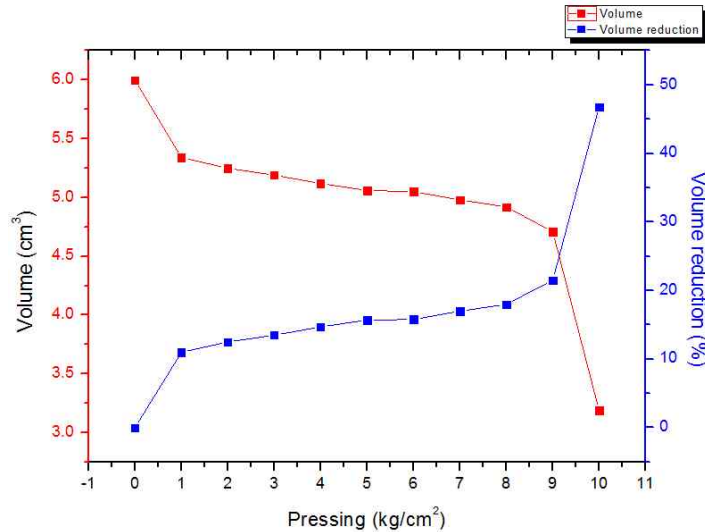


Fig. 3 The volume change according to the compression moulding of Balloon perlite

4. 결론

발룬 펄라이트와 진주암 펄라이트의 단열보드 샘플을 제작하여 열전도율, 선수축률, 발수율, 내흡수 및 휨강도 성능을 비교한 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 조건하에서 제작된 발룬 펄라이트와 진주암 펄라이트의 단열보드 열전도율의 경우 단힌 구조를 가진 발룬 펄라이트가 열린 구조를 가진 진주암 펄라이트보다 열전도율이 약간 낮게 나왔다.
- (2) 흡수방지제를 처리한 단열보드는 흡수방지제를 처리하지 않은 단열보드보다 열전도율이 낮게 나왔으나 크게 향상되지는 않았다.
- (3) 무기 바인더를 이용하여 만든 펄라이트, 발룬 펄라이트 단열재는 불연성을 나타내었다.
- (4) 흡수방지제를 코팅하지 않은 단열보드는 10일 방치 후 습기를 약 11.6% 흡수하였으며, 열전도율은 72.3% 높게 나왔다.
- (5) 흡수방지제를 코팅한 단열재 샘플의 발수율은 100%로 나타났다.
- (6) 흡수방지제를 코팅한 단열재 샘플은 흡수율이 3% 이하로 유기 단열재와 비슷한 효과를 보였다.
- (7) 발룬 펄라이트의 경우 성형압력을 10kg/cm² 이하로 할 경우 셀의 깨짐을 방지할 수 있었다.

향 후, 바인더의 종류나 양을 조절한다면 열전도율은 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 에너지기술평가원의 에너지 효율분야 지원 사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 에너지기술평가원에 감사드립니다.

과제번호 - 20132020102400

References

- E. W. Lemon, R. T. Jacobsen (2004), "Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon and Air.", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 1, pp.21~69.
- Park, J. M., Kim, D. H., Suh, D. J. (2012), "Recent Research Trends for Green Building Thermal Insulation Materials" Vol. 18, No. 1, pp.14~21
- Song, J. Y. et al. (2011), "A Study on the Combustion Characteristic of Building Materials" *Journal of the 24 KOSOS*, Vol. 26, No. 3, pp.23~28
- Lee, H. P., Park, Y. J. (2011), "A study on Combustion Gas Toxicity of Architecture Surface Material" pp.441~446
- Yoo, S. H., Kim, T. H. (2013), "A Study on the Effect of Water Absorption on the Thermal Conductivity of Insulation Materials", *Korean Journal of Air-Condition and Refrigeration Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp.119~125
- K. Kadoya, et al. (1995), "Viscosity and Thermal Conductivity of Dry Air in the Gaseous Phase", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 14, No. 4, pp.947~970
- J. V. Sengers and J. T. R. Watson. (1986), "Improved international formulations for the viscosity and thermal conductivity of water substance", *J. Phys. Chem. Ref.*
- Anne-Marie KIETZIG, Savvas G. HATZIKIRIAKOS, Peter ENGLEZOS, (2010), "Ice friction: the effect of thermal conductivity", *Journal of Glaciology*, Vol. 56, No. 197, pp.473~479
- Langlais. C., Hyrien. M and Klarsfeld. S. (1982), "Moisture migration in fibrous insulating material under the influence of a thermal gradient and its effect on thermal resistance", *ASTM STP*, Vol. 779, pp.191~206