

목질마루바닥재와 벽체용 재료를 이용한 평판열류계법과 MTPS (Modified Transient Plane Source)법의 열전도율 상관관계 분석

차 정 훈, 서 정 기, 김 수 민[†]

승실대학교 건축학부 건축환경재료연구소

Correlation Analysis of the Thermal Conductivity Heat Flow Meter and MTPS (Modified Transient Plane Source) Method Using Wood Flooring and Wall Materials

Junghoon Cha, Jungki Seo, Sumin Kim[†]

Building Environment & Materials Lab, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, Korea

Abstract: These days global warming is the most important problem and the most important factor is high emission of carbon dioxide. The 23% of carbon dioxide emission for building construction must be reduced. Thermal conductivity is the most basic factor that can decrease the energy consumption especially insulation. Therefore, an accurate and continuous thermal conductivity measurement can be a way to save energy. In this paper, there are methods about how to investigate thermal conductivity measurements and comparing two methods which are the Heat Flow Meter 436 and TCI.

Keywords: energy conservation, heat flow meter 436, TCI, thermal conductivity

1. 서 론

지난 100~200년에 걸친 인류의 무분별한 화석 연료의 사용은 지구 온난화로 이어져 세계각지에서 일어나는 자연재해의 원인이 되고 있다. 또한 이러한 화석연료의 사용은 매장량의 감소로 이어져 BP (영국석유)의 자료에 따르면 화석연료의 가채연수가 석유는 약 40년, 천연가스는 약 65년, 석탄은 약 155년으로 전망하고 있어 에너지자원 고갈에 대한 위기감이 고조되고 있다. 이에 세계 각 국에서는 에너지 절약의 필요성을 인식하고 코

펜하겐 기후협약 및 교토의정서 등 여러 가지 협약을 통한 공동의 약속을 이끌어내었다. 또한 우리나라의 경우 에너지수요의 97% 이상을 해외에 의존하고 있어 범지구적인 차원에서 뿐만 아니라 경제적인 측면을 위해서도 에너지 저감은 반드시 필요하다라고 많은 전문가들이 지적하고 있다. 현재 우리나라는 2020년까지 2005년 CO₂ 방출량 대비 4%를 감축하는 것을 목표로 여러 가지 정책을 시행하고 있다. 이는 2020년까지 BAU (Business as usual)대비 약 30%를 감축해야 하는 양에 해당해 목표달성을 위하여 국가적으로 상당한 노력이 요구된다. 또한 2008년 부문별 에너지 소비를 보면 산업분야 58.4%, 건축분야 22.3%, 수송분야 19.3% 정도를 차지하는데 산업분야 같은 경우 에너지 저

2011년 1월 5일 접수; 2011년 2월 26일 수정; 2011년 4월 14일 게재확정

[†] 교신저자 : 김 수 민 (skim@ssu.ac.kr)

감을 위하여 여러 가지 제약을 걸다보면 국가 생산량에 영향을 미쳐 오히려 국가 성장에 마이너스가 될 우려가 있어 어느 분야 보다도 건축분야에서의 에너지 저감이 필요하다. 건축물에서의 에너지 소비를 줄이는 가장 효율적인 방법 중의 하나로 외피를 통한 열손실·획득을 줄이는 것이 있다. 외피를 통한 열손실·획득이 건물의 냉·난방부하의 40% 이상을 좌우하고 있어 이를 줄이는 것이 에너지 저감측면에서 효과적이다. 즉, 설계 및 시공 시 외피의 단열성을 확보하기 위해 낮은 열전도율을 갖는 재료를 사용하는 것이 냉·난방부하를 줄이고 나아가서 에너지 소비를 줄일 수 있는 효율적인 방법이라고 할 수 있다.

이와 같은 단열재의 열전도율은 에너지 절약을 위해 고려해야 할 중요한 요소임을 알 수 있다. 따라서 정확한 열전도율의 측정을 바탕으로 단열재의 성능에 신뢰성을 부여하는 것은 중요하다. 현재 열전도율을 측정하는 국내 기준으로는 정상상태 측정법과 비정상 열선법과 레이저 플래시법이 있다. 각각의 측정법에 맞는 측정 장비를 가지고 열전도율을 측정할 수 있는데 정상상태 측정법은 평판 열류계법으로 측정하는 장치인 HFM (Heat Flow Meter 436)을 사용한다. 또한 작은 크기의 재료를 이용하여 빠르게 열전도율을 측정할 수 있는 MTPS법을 이용한 TCi라는 열전도율 측정방법이 있다.

본 논문에서는 TCi와 기존의 국내 열전도율 측정기준에 있는 HFM을 가지고 여러 가지 건축 재료의 열전도율을 측정함으로써 측정값들 간의 상관관계를 분석한다.

2. 재료 및 방법

실험에는 총 10가지의 재료가 사용되었고 사용 장소에 따라 벽체용 재료와 목질 마루 바닥재로 나누었다. 벽체용 재료는 압출 스티로폼, 스티로폼, 그라스울, 미네랄울, 일반 석고보드, 방수 석고보드, 방화 석고보드가 사용되었고 목질 마루 바닥재는 강화마루, 원목마루, 합판마루가 사용되었다.

2.1. 벽체용 재료

2.1.1. 압출 스티로폼

대형 구조물이나 조각 등을 제작할 때 사용되며 단열재로도 널리 사용되는 재료이다. 공작 및 재단이 용이하여 칼이나 우드락 커터기를 사용하여 여러 가지 형태로 작업이 가능하다. 단열재 외에도 인테리어, 디스플레이, 광고물제작, 모형재료, 문자판 조각, 조감도 재료 등의 다양한 용도로 사용이 가능하다(Table 1).

2.1.2. 스티로폼

건축 재료로서 스티로폼은 동종의 제품들 중 가장 많이 활용되며 색상은 흰색이다. 건축 시공 시 기본적으로 외장재를 설치하기 전 내부와 외부 사이에 설치한다. 제품의 기능으로는 방한, 온열, 방습, 방음 등의 기능이 있으며, 유사한 내장재에 비해 가격, 품질 면에서 뛰어나다. 포장용에 비해 단열재로 쓰이는 용도는 입자가 조밀하고 강도가 높은 특징을 갖는다(Table 1).

2.1.3. 그라스울

그라스울은 무기질 섬유 보온 단열재로서 KS, ASTM 등 국내의 시험규격에 합격한 1급 불연재로 불에 타지 않으며 인체에 해로운 유독가스도 발생하지 않는다. 유연하고 부드러워 작업성이 매우 좋으며 칼이나 가위 등으로 쉽게 절단되므로 어떠한 장소나 형태에도 시공이 용이하다(Table 1).

2.1.4. 미네랄울

미네랄울은 광물섬유라고도 하며 내열성, 불연성, 경량성, 단열, 흡음성, 내구성의 특징을 가진 단열재이다. 또한 건축 설비, 플랜트 설비의 단열재 및 방·내화 재료 및 식물섬유·합성섬유와 같은 섬유 의 일종으로 보온·방음재로도 사용된다(Table 1).

2.1.5. 일반 석고보드

이수석고($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)를 약 $130\sim 160^\circ\text{C}$ 로 소성하여 결정수의 일부를 탈수 시킨 소석고(Plaster:

Table 1. List of materials and shapes

분류	재료명	형상	두께
			mm
단열재	(a) 압출 스티로폼		50.208
	(b) 스티로폼		49.467
	(c) 그라스울		50.000
	(d) 미네랄울		49.979
석고 보드	(a) 일반 석고보드		9.6030
	(b) 방수 석고보드		12.685
	(c) 방화 석고보드		12.765
목질 마루 바닥재	(a) 강화 마루		8.2410
	(b) 원목 마루		9.5300
	(c) 합판 마루		7.9430

$CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O$)를 주원료로 하여 물과 혼화재료를 섞어 표면을 원지로 피복 성형한 판재로 건축물의 불연내장재의 한 종류이다. 실험에 사용된 일반 석고보드의 크기는 300 mm × 300 mm이다 (Table 1).

2.1.6. 방수 석고보드

방수석고보드는 말 그대로 화장실과 같은 부분에 시공되어 석고보드가 일정한 수준의 내수성을 발휘하는 것으로서 석고보드 원지에 방수 처리된 제품이다. 욕실, 발코니 등 습기 노출이 우려되는 부위에 적용 가능하며, 제품 자체로도 마감시공이 가능하다. 방수 석고보드는 특수 원지 및 고성능 방수액 처리된 석고로 인해 표면흡수량, 전흡수량 등 내수 성능이 월등히 우수하며, 자체로도 마감시공이 가능하다. 또한 도막방수를 최소화 할 수 있어 공사비 절감이 가능하다(Table 1).

2.1.7. 방화 석고보드

일반주택에서 내화성능은 크게 중요한 성능은 아니지만 아파트와 같은 공동주택에서는 내화성능이 보장되어야만 한다. 특히 비상구 혹은 통로와 같은 대피수단으로서 사용되는 공간에는 1시간에서 길게는 2시간의 내화성능이 보장되어야만 화재 시 대피할 수 있는 시간을 부과할 수 있다. 일반 석고보드로도 난연재료로서 내화성능을 유지하지만 더 높은 내화성능을 위해 별도의 방화 석고보드가 있다. 실험에 사용된 방화 석고보드의 크기는 300 mm × 300 mm, 두께는 12.5 mm이다(Table 1).

2.2. 목질마루바닥재

2.2.1. 강화마루

강화마루는 기존의 가구나 인테리어용으로 사용하던 파티클보드나 High-density fiberboard (HDF)를 소재로 하여 표면을 High-pressure laminate (HPL), Low-pressure laminaate (LPL) 처리한 표면이 강하고 유지관리의 편리성을 높인 소재의 마루이다. 강화마루는 온돌마루와는 달리 온돌용(가정용)과 매장용(상업용)으로 모두 사용할 수 있을

정도로 스크래치(긁힘)가 적어 오랜 기간 사용 할 수 있는 것이 장점이고 또, 합판마루처럼 기존의 바닥을 철거하지 않고 바로 시공이 가능하기 때문에 리모델링 시장에서 각광받는 아이템이다. 실험에 사용된 마루의 크기는 300 mm × 300 mm, 두께는 8.241 mm이다(Table 1).

2.2.2. 원목마루

원목마루는 원목을 그대로 이용해 질감이 우수하므로 최고급 바닥재로 인식되고 있다. 일반적으로 두께가 두꺼워 바닥 난방이 불가능하므로 가정용으로는 적합하지 않다. 충격 흡수성이 우수하여 스포츠센터나 교실 등에 바닥재로 많이 쓰인다. 촉감이 좋고 모양이 아름다울 뿐 아니라 원목을 그대로 사용하므로 인체에 해가 없다. 그러나 원목의 대부분을 수입에 의존하므로 값이 비싸고, 내마모성이 약해 표면이 잘 손상되며, 못질 시공으로 인해 소음이 많고 변색 및 퇴색의 우려가 있다. 실험에 사용된 마루의 크기는 300 mm × 300 mm, 두께는 9.530 mm이다(Table 1).

2.2.3. 합판마루

합판마루는 국내에 가장 먼저 알려진 마루로 구조나 표면 처리에 따라 품질에 차이가 나며 기존의 국산품이나 일본, 중국, 인도네시아에서 가장 많이 들어오고 있다. 강화마루와는 달리 얇은 합판을 가로 세로로 서로 엇갈리게 겹쳐 부착하였고 표면을 얇게 켄 천연 무늬목을 입힌 마루이다. 표면층이 원목으로 처리되어있어 원목의 질감을 느낄 수 있고 시공법이 접착시공이므로 열전도율이 우수하여 난방비가 절약된다. 실험에 사용된 합판마루의 크기는 300 mm × 300 mm, 두께는 7.943 mm이다(Table 1).

2.3. 실험 방법

2.3.1. 정상상태 측정법의 Heat Flow Meter 436을 이용한 평판 열류계법

열전도율을 측정하는 방법 중에 정상상태 측정법의 평판열류계법은 ‘KS L 9016 보온재의 열전

Table 2. Specification of HFM 436

	HFM 436/3/0	HFM 436/3/1 (E)	HFM 436/6/1E
열관 온도 범위	0°C to 40°C 고정	0°C~100°C 온도변경	-30°C~90°C 온도변경
냉각 시스템	공랭식	공랭식	외장형 수냉식
열관 온도 조절		Peltier 시스템	
프로그램 데이터 개수	1	10	10
시편 크기	30 × 30 × 10 cm ³	30 × 30 × 10 cm ³	60 × 60 × 20 cm ³
온도 저항 범위		0.1~8.0 m ² K/W	
열전도율 범위		0.005~0.50 W/mK	
재현성		0.5%	
정확도		+/- 1 to 3%	
크기	48 × 63 × 51 cm ³	48 × 63 × 51 cm ³	80 × 95 × 80 cm ³

Table 3. Specification of TCi

재료 형태	최소 두께	K 범위	온도범위	재료 상태	접촉 물질
	mm	W/mK	°C		
Liquids	1	0~0.6	-50 to 192	50mL 비커에 35mL를 채운다.	
Powders	1	0~0.6	-50 to 192		없음
Foams	2	0.04~0.09	-50 to 192	샘플을 센서 위에 놓는다.	
Polymers	5	0.2~1.2	-50 to 192		
Ceramics	5	1.2~29	-50 to 192	접촉 물질을 올려 놓고 샘플을 센서 위에 놓는다.	-50 ~ 5°C: 3방울의 글리콜 5 ~ 70°C: 3방울의 물
Metals	5~12	6~120	125		70 ~ 170°C: 3방울의 글리세린

**Fig. 1.** Heat flow meter 436.

도율 측정 방법'에 규정되어 있고 NETZSCH에서 개발한 Heat Flow Meter 436 (HFM 436)라는 측정 장치를 이용하여 간단하게 열전도율을 측정할 수 있다. Table 2에 HFM 436 시리즈의 기술 사양이 있다. 이번 실험에서 사용한 측정 장치는 이 중에서 HFM 436/3/1으로서 각 재료의 시편의

크기는 300 mm × 300 mm으로 제작하여 실험을 하였다. 실험 방법은 ① HFM 측정 장치의 입구를 열어 재료를 넣을 수 있도록 고열원과 저열원 사이의 높이를 조절한다. ② 고열원과 저열원 사이에 재료를 넣고 두께가 조절이 안될 때까지 줄여주고 입구를 닫는다. ③ 고열원에서 저열원으로 흐르는 열을 측정하여 열전도율을 측정한다. ④ Status가 Fine이 나올 때까지 반복적으로 실험을 한다. ⑤ Fine이 나오면 실험을 중지하고 열전도율 값을 읽는다. ⑥ 재료를 빼내고 재료와 측정 장치의 상태를 확인한다(Fig. 1).

2.3.2. MTPS (Modified transient plane source)법의 TCi

열전도율을 측정하는 방법 중에 C-Therm사에서 개발한 TCi는 MTPS라는 방법을 이용하여 열전도율을 측정하는 장치이다. 아주 작은 크기의 재료를

Table 4. Thermal Conductivity of HFM 436 and TCi

재료	HFM	TCi
	W/mK (표준편차)	W/mK (표준편차)
강화 마루	0.1254 (5.20×10^{-8})	0.2200 (5.38×10^{-7})
원목 마루	0.1127 (2.86×10^{-8})	0.1281 (2.18×10^{-7})
합판 마루	0.0913 (1.00×10^{-10})	0.0799 (3.39×10^{-8})
방수 석고 보드	0.2045 (6.00×10^{-10})	0.1180 (2.93×10^{-8})
일반 석고 보드	0.1431 (2.00×10^{-9})	0.1110 (7.39×10^{-7})
방화 석고 보드	0.2021 (5.50×10^{-9})	0.1385 (7.62×10^{-3})
압출 스티로폼	0.0293 (1.10×10^{-9})	0.0465 (2.22×10^{-8})
스티로폼	0.0415 (1.00×10^{-10})	0.0342 (2.75×10^{-8})
미네랄울	0.0352 (1.00×10^{-10})	0.0469 (4.73×10^{-8})
그라스울	0.0362 (9.00×10^{-9})	0.0432 (5.82×10^{-8})

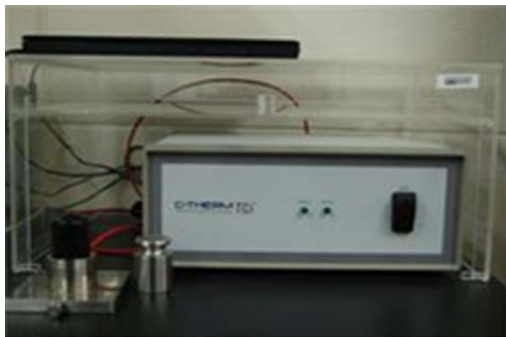


Fig. 2. TCi.

갖고 열전도율을 측정할 수 있고 다른 측정 장치들과는 달리 고체, 액체, 가루뿐만 아니라 반죽상태의 재료까지도 열전도율을 측정할 수 있다. 이렇게 여러 가지 상태의 재료를 측정할 수 있는 TCi는 실제로 많은 연구나 실험에서 더욱 더 빠르고 정확한 결과를 낼 수 있는 측정 장치로 사용되어질 수 있을 것이다. 또한 TCi는 열전도를 측정함에 있어 한쪽 면만 있어도 된다. 시스템은 전체적으로 한쪽 면에만 있는 sensor, controller electronics와 computer software로 구성되어있다. 센서 중앙에는 나선형으로 둘러싸인 가열원이 있고 그 중앙에서 열이 발생한다. 따라서 한쪽 면에서 나온 열은 sensor를 통해 재료로 들어가게 된다. 이 때 짧은 순간에 가열원에서 전압강하가 일어나

고 열전도율은 전압 강하 데이터에 의해 계산된다.

TCi는 빠르고 간단하게 열전도율을 측정할 수 있다. Table 3는 TCi의 기술 사양이다. 실험 방법은 ① 재료를 센서에 올려놓기 전에 센터를 예열한다. ② 센서와 재료 사이에 온도가 통할 수 있도록 재료를 올려놓는다. ③ 재료가 Polymer, Ceramic, Metal일 경우에는 접촉 물질을 떨어뜨려주어서 재료와 시료가 완벽하게 접하도록 한다. ④ 재료가 센서에 적당한 압력으로 밀착할 수 있도록 500 g 짜리 추를 재료 위에 올려놓는다. ⑤ 프로그램을 이용하여 재료의 열전도율을 측정한다. ⑥ 결과 값이 나오면 재료와 센서를 분리하고 상태를 확인한 후 정리를 한다(Fig. 2).

3. 결과 및 고찰

HFM 436과 TCi를 이용한 열전도율 측정값은 Table 4와 같다.

측정 결과 값에 대해서 재료의 사용 장소에 따라 목질 마루 바닥재(강화 마루, 원목 마루, 합판 마루)와 벽체용 재료(일반·방수·방화 석고보드, 압출 스티로폼, 스티로폼, 미네랄울, 그라스울)로 나누어 분석을 했다.

두 측정 장치에서 열전도율 값은 각 5회 측정의 평균값을 사용하였고 표준편차가 매우 작은 것으

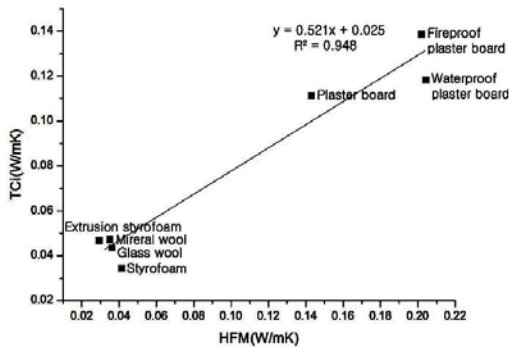


Fig. 3. Correlation graph on wall materials thermal conductivity of heat flow meter and TCi.

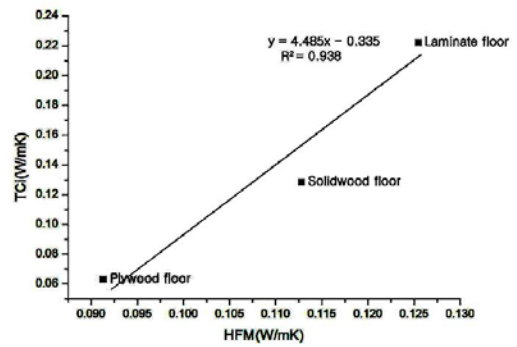


Fig. 4. Correlation graph on wood flooring thermal conductivity of heat flow meter and TCi.

로 보아 한 번의 측정으로 매우 정확한 측정값을 얻을 수 있다고 생각된다.

HFM 436에서 목질 마루 바닥재를 열전도율 측정값은 강화 마루(0.1254 W/mK) > 원목 마루(0.1127 W/mK) > 합판 마루(0.0913 W/mK) 순이었다. 그리고 TCi에서는 강화 마루(0.2200 W/mK) > 원목 마루(0.1281 W/mK) > 합판 마루(0.0799 W/mK) 순으로 두 측정 장치는 목질 마루 바닥재의 열전도율 증가 순서가 같았다. 이러한 결과 값은 강화 마루의 경우 평균 밀도가 높아 열을 더 많이 전달하므로 상대적으로 높은 열전도율이 나왔다고 생각되고 각 재료별 열전도율 증가 순서도 같은 것으로 보아 목질 마루 바닥재에서 두 측정 장치 사이의 상관성이 있음을 확인할 수 있다.

벽체용 재료는 단열재 종류와 석고보드 종류로 크게 두 가지로 분류되었다. 단열재 4종은 HFM 436과 TCi 두 측정 장치에서 대체적으로 0.05 W/mK 이하의 낮은 열전도율을 값이 측정되었고 석고보드는 단열재에 비해서 높은 열전도율 값이 나타났다. 그 결과 HFM 436에서 석고보드는 단열재에 비해 2배에서 5배 정도 높은 열전도율 값이 측정되었고 TCi에서도 2배에서 4배 정도 높은 열전도율이 측정되었다. 이러한 비슷한 증가 추세로 보아 벽체용 재료에서도 두 측정 장치 사이의 상관성이 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3과 Fig. 4에 있는 그래프는 측정 결과 값이 어느 정도 신빙성이 있는가를 살펴보는 상관관계 분석을 이용하여 두 결과 값을 비교한 것이다.

상관관계 분석에서 상관계수(R^2) 값이 0.9 이상이나오면 두 변수 사이의 상관성이 매우 높다고 할 수 있다. 분석 결과 벽체용 재료의 열전도율에 대한 상관계수(R^2) 값은 0.948이었고 마루 바닥재의 열전도율에 상관계수(R^2) 값은 0.938이었다. 두 분류에 대해서 상관계수(R^2) 값이 0.9 이상이기 때문에 두 변수 사이에는 높은 상관관계를 보인다고 할 수 있다.

4. 결 론

열전도율을 측정하는 기준은 국가나 단체별로 명확한 기준이 정해져 있으며 그 중 건축 재료의 열전도율을 측정하는 대표적인 방법은 정상상태 측정법의 평판 열류계법이다. 이러한 측정은 실험 장치를 구성하여 측정할 수도 있지만, 기준에 맞춰 설계되어 만들어진 HFM 436이라는 측정 장치를 사용하여 간단하게 측정할 수 있다.

TCi는 작은 크기의 재료를 이용하여 열전도율을 측정할 수 있고 한 가지의 측정 장치를 이용하여 다양한 형태의 재료(고체, 액체, 가루, 반죽)를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 열전도 측정 시간이 짧기 때문에 빠르게 실험을 진행하여 결과를 얻을 수 있으므로 효율적인 실험을 진행할 수 있다.

건축 재료의 대표적인 열전도 측정방법인 HFM 436과 새로운 측정 방법인 TCi의 상관성을 분석하기 위해 10가지의 건축 재료를 선정하여 재료의

사용 장소에 따라 2가지의 그룹으로 분리하여 변수사이의 상관성을 분석하는 상관관계 분석방법을 이용하여 분석하였다. 그 결과 목질 마루 바닥재는 상관계수(R^2)이 0.948, 벽체용 재료는 상관계수(R^2)이 0.938이 나와 대체적으로 높은 상관계수(R^2) 값을 얻을 수 있었다. 따라서 국내 열전도율 측정 기준에 따라 측정한 값과 TCi로 측정한 값이 유사성이 높음을 알 수 있다.

건축물에 있어 열전도율은 에너지 효율과 관련된 중요한 요소이다. 그리고 정확한 열전도율 측정은 에너지 절약에 기초적인 요소라고 할 수 있겠다. 따라서 TCi를 사용하여 정확한 열전도율을 빠르게 측정함으로써 건축물 에너지 소비 저감에 기여할 수 있을 것이라고 본다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업에 의해 이루어진 것임. 본 연구는 2011년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단).

참 고 문 헌

- 서정기, 김수민. 2010. 목질마루바닥재의 열전도성능 분석을 통한 열전도율 개선 방안 연구. 한국태양에너지학회 VOL. 30, NO. 1, 2010. 4. 8. 대구EXCO 춘계 학술발표대회 논문집.
- 권영철. 그린빌딩을 위한 고효율 단열재. *Journal of the KGBC 0406 Vol. 10, No. 2.*
- C-Therm TCi Operator Manual Book.
- Dina Kuvandykova. A New Transient Method to Measure Thermal Conductivity of Asphalt. *C-Therm Technologies, July 2, 2010.*
- Kuvandykova, D. and St-Laurent, R. Application of the Modified Transient Plane Source Technique in Testing the Thermal Conductivity of Concrete. *C-Therm Technologies, June 18, 2010.*
- <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/ko/products/detail/pid,27.html>.
- http://www.ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/how_the_tci_works/.