

## 목조건축물 구조부재의 열전도율에 따른 건물외피의 단열 성능\*<sup>1</sup>

김 석 환\*<sup>2</sup> · 유 슬 기\*<sup>2</sup> · 서 정 기\*<sup>2</sup> · 김 수 민\*<sup>2†</sup>

## Thermal Performance of Wooden Building Envelope by Thermal Conductivity of Structural Members\*<sup>1</sup>

Sughwan Kim\*<sup>2</sup> · Seulgi Yu\*<sup>2</sup> · Jungki Seo\*<sup>2</sup> · Sumin Kim\*<sup>2†</sup>

### 요 약

국내에서 주로 사용되고 있는 건물에너지 성능평가 시뮬레이션 마다 상이한 재료의 열전도율로 평가 되고 있음이 파악되었다. 시뮬레이션을 통한 정확한 건물에너지부하를 평가하기 위하여, 각 시뮬레이션에서 목조건축물의 스테르도 사용되고 있는 목재의 열전도율을 확인하고, 이에 따른 벽체의 열관류율과 부재 접합부위에서의 선형열교 차이를 연구하였다. 각 시뮬레이션은 동일 수종에 대해 상이한 열전도율을 채택 후, 각 시뮬레이션에서 추출한 열전도율 간의 차이가 가장 상이한 소나무의 열전도율을 스테르도에 적용하였다. 시뮬레이션 간 지붕, 벽체, 지면 슬래브의 열관류율 중 최대오차는  $0.023 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이었으며, 지붕의 서까래 접합부, 지붕-벽체 접합부, 지면슬래브-벽체 접합부 중 최대 선형열교 오차는  $0.025 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이었다. 또한, HEAT2 정상상태전열해석 프로그램을 활용하여 선형열교 및 벽체의 온도변화에 대한 전열해석 이미지를 분석하였다. 구조체에 온도 분포를 선으로 표시하여 단열이 부족한 곳에서는 온도선이 급격하게 변하는 것이 확인되었고, 온도선이 급격하게 변하는 부위에서는 다른 곳보다 온도가 낮으며, 다른 구조체 부분보다 더 많은 열류가 손실됨이 확인되었다.

### ABSTRACT

Building energy simulations which are mainly used in Korea have evaluated the building energy performance with the different thermal conductivity of construction materials. In order to evaluate the energy consumption accurately, the difference in thermal conductivity of the wood used in stud for wooden structure was confirmed from the each simulation. In addition, the thermal

\*<sup>1</sup> 접수 2013년 5월 3일, 채택 2013년 11월 28일

\*<sup>2</sup> 송실대학교 건축학부 건축환경재료연구실, Building Environment and Materials Lab, School of Architecture, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김수민(e-mail: skim@ssu.ac.kr)

transmission of building members and the thermal bridge at the conjunction of building members according to thermal conductivity from each simulation programs were researched. The thermal conductivity of pine that has the largest variation among the energy simulations was applied to the thermal properties of studs in wooden structure. The maximum error between the maximum and minimum thermal transmission of roof, wall, and floor slab was  $0.023 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Plus, that thermal bridge at Rafter junction on the roof, roof-wall joint, and floor slab-wall joint was  $0.025 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . The heat transfer image for changes in temperature and the heat exchange were analyzed by HEAT2 program. The distorted temperature lines were found around the insufficient insulated connection parts. It was predicted that the temperature at the distorted parts in the analyzed image was lower than that of the other portion of the other structures.

**Keywords:** wooden building, structural members, thermal conductivity, thermal transmission, thermal bridge, building energy

## 1. 서 론

온실가스 배출 증가와 이에 따른 기후변화는 국제적인 화두가 되고 있다. 이에 따라 국제기후변화협약은 선진국에 온실가스 감축 의무를 부여하고, 선진국들은 온실가스 감축목표를 제시하였다. 국내 건축분야에서 배출하는 온실가스량은 현재 약 24.5%를 차지하고 있으며, 향후 선진화됨에 따라 전체 배출량의 40.0%까지 증가 될 것으로 예상되고 있다. 따라서 건축 분야의 온실가스 감축 노력은 국가 전체 온실가스 감축의 중추적인 역할을 할 것으로 예상된다.

건물 외피 성능은 건축물의 에너지소비와 재실자가 거주하는 실내환경에 큰 영향을 준다. 냉·난방 부하를 최소화하기 위해서는 우수한 성능의 외피를 구축하는 것이 저에너지건축물을 만들기 위한 첫 걸음이다. 최근, 녹색건축물의 효과적인 방안으로 목조건축이 주목받고 있다. 목재는 자연적으로 태양 에너지를 사용하여 성장하기 때문에 재생 가능하며 지속가능한 자원으로 특히 이산화탄소를 흡수하고 분해 또는 연소 시에 이산화탄소를 배출하기 때문에 건축재료 및 가구 등의 제품으로 사용될 경우 탄소 고정효과가 탁월하다[1,2]. 에너지적인 측면에서 목재를 실내 마감재로 사용하였을 시에는 우수한 단열 성능 덕분에 건물에너지 소요량이 최대 7.0% 이상 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 목재가 가지고 있

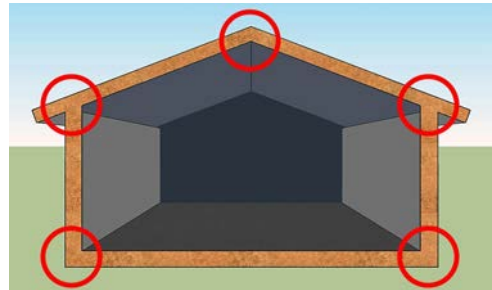


Fig. 1. Location of thermal bridges in buildings.

는 조습 성능과 천연의 향은 재실자의 심리와 건강에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 연구되어 있다 [3]. 또한 시공이 비교적 단순하고 공기가 짧다는 장점을 가지고 있다. 즉, 목재를 건축물에 적용하게 된다면, 전생애주기적인 측면에서 건물에서 발생시키는 부하를 감소시켜주기 때문에 온실가스 저감을 위한 효과적인 방안이 될 뿐만 아니라 재실자의 건강에도 긍정적인 영향을 미치게 된다.

목조주택은 목재의 우수한 절연성 덕분에 벽체 단열재와 함께 구성 시 높은 단열성능을 얻을 수 있다. 하지만, 목재 스티드와 단열재가 함께 조립을 이루는 벽체와 달리 지붕-벽체, 벽체-지면과 같이 벽체와 벽체가 만나는 접합부에서는 단열재가 시공되지 않아, 단열재보다 상대적으로 열전도율이 높은 목재 스티드로 열손실이 집중되는 문제점이 있다 (Fig. 1). 또한, 국내에서는 외피의 단열성능 기준으



Fig. 2. Outbreak of black mould by thermal bridge[5].

로 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙에서 모든 외피부위의 단열성능을 열관류율로 규정하고 있으나, 이는 1차원 열류가 발생하는 경우에 해당하는 내용이므로, 다차원 열류가 발생하는 열교부위의 단열성능으로는 적용이 불가능하며, 건축물 에너지절약설계기준의 에너지절약계획서에서 에너지성능지표 계산 시 열교를 근원적으로 차단할 수 있는 외단열 시스템 적용 시 가점을 주기는 하나 이는 정량적인 단열성능 평가에 해당한다고 보기 힘들므로 국내 단열 규정상에서는 구체적인 정량적인 열교부위의 성능 규정이 미흡한 실정이다[4]. 열교는 재료의 열전도율이 상대적으로 클 경우 열류 전달이 증가되어 발생하기 때문에 열교는 건축물 열적성능에 주요한 영향을 준다. 특히, 겨울철에 열교부위를 통하여 열을 빼앗기게 되면 실내표면 온도가 낮아지고 그 결과 실내 벽체 표면에 곰팡이 또는 결로가 발생하게 된다. Fig. 2[5]에는 열교로 인하여 구조체 접합부에서 집중적으로 열손실이 발생하였고, 이 때문에 열교부위 표면에서 수분응축으로 곰팡이가 발생하였다. Theodosiou와 Erhorn[6,7]의 연구에 따르면, 고성능의 단열 창호 및 벽체를 사용한 주거건물에서는 열교에 의해 최대 30%의 난방에너지가 손실된다고 한다. 이러한 고심과 함께 최근에는 건물을 시공단계 전 디자인 단계에서 건축물 에너지 성능 평가 시물레이션을 이용하고 있다.

본 연구에서는 국내에서 주로 사용되고 있는 시물레이션들이 각기 상이한 재료의 열전도율 기준으로 건물에너지지를 평가하고 있음을 파악하였다. 일반적

으로 건축물 에너지 시물레이션의 경우 시물레이션의 데이터베이스에서 제시하는 재료의 물성을 사용하게 되는데 시물레이션별로 같은 수종의 목재라도 열전도율의 차이가 많으며 최대 3배가 넘는 차이를 보이는 수종들도 존재하였다. 이러한 오차는 주로 목재의 열전도율 측정방법 및 환경에 따라 발생하였거나, 같은 수종이라도 함수율에 따라 물성이 크게 변하는 목재의 특성에 의한 것이다[8]. 따라서 향후 관련 연구를 진행함에 있어서 특히 국내에서 주로 사용되는 목재의 열전도율과 관련된 데이터베이스의 확립이 우선적으로 필요할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 목조건축물에너지의 오차로 예측하기 위해, 각 시물레이션에서 스테드모 사용되고 있는 목재의 열전도율을 확인하고, 이에 따른 목구조 벽체의 열관류율과 부재 접합부위에서의 열교를 연구하였다.

## 2. 건물외피의 단열성능 요소

### 2.1. 열관류율 산출방법

벽, 창 등과 같은 구조체를 통해 온도가 높은 실내에서 온도가 낮은 실외로 열이 이동할 때 구조체의 재질에 따라 이동하는 정도에 차이가 있다. 즉, 재질에 따라 열의 관류가 쉽게 되는 경우가 있고 어렵게 되는 경우가 있는데, 이와 같이 열관류가 이루어지는 정도를 수치로 나타낸 것을 열관류율이라 한다. 열관류율 산출방법은 KS L ISO 6946[9]에서 건축물

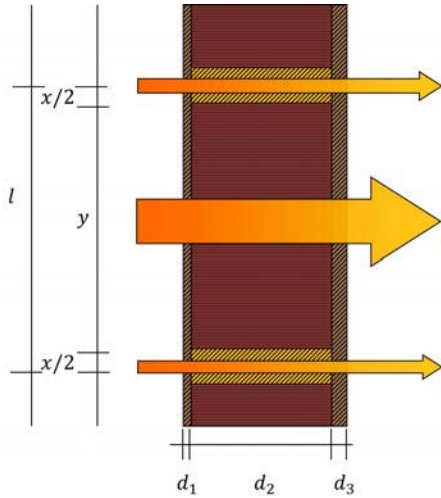


Fig. 3. Thermal transmission of inhomogeneous layer wall.

을 구성하고 있는 여러 재료들의 각각의 열전도저항 값을 합하고 여기에 실내 · 외의 표면 열전달저항값 ( $m^2 \cdot K/W$ )을 더한 값인 열관류저항의 역수 ( $1/R$ )를 열관류율로 규정하고 있다. 열관류율의 계산식은 아래와 같다.

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + d_3/\lambda_3 + R_{se}} \quad (1)$$

- $U$  : 열관류율 ( $W/m^2 \cdot K$ )
- $R_{si}$  : 내표면열전달저항 ( $m^2 \cdot K/W$ )
- $R_{se}$  : 외표면열전달저항 ( $m^2 \cdot K/W$ )
- $d$  : 재료의 두께 ( $m$ )
- $\lambda$  : 재료의 열전도율 ( $W/m \cdot K$ )

경량목조건축물은 목재 스테르드가 구조체를 이루

고, 그 사이에 단열재를 삽입하여 단열성을 확보하는 방식이므로 비균질한 층의 벽체를 구성하고 있다. 비균질한 층으로 구성된 부재의 총 열저항을 구하는 방법은 Fig. 3과 같이 비균질한 면에서 서로 다른 두 재료의 열전도율에 각각의 재료가 단위 길이 당 계획된 길이의 비가 적용된 열전도율을 열관류율식에 적용한다. 비균질한 층의 열관류율 산출식은 식 (2)와 같다.

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se}} \quad (2)$$

$$\text{where, } R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2} = \frac{d_2}{\lambda_{2x} \times \frac{x}{l} + \lambda_{2y} \times \frac{y}{l}}$$

- $l$  : 목재 스테르드 간 중선 간격 ( $m$ )
- $x$  : 스테르드 길이 ( $m$ )
- $y$  : 비스테르드 구간 길이 ( $m$ )

본 연구에서는 사용된 실내 · 외의 표면열전달저항 값은 Table 1과 같으며, 이 값은 KS L ISO 6946(9)에서 규정하고 있는 값을 사용하였다.  $R_{si}$ 는 복사율 0.9, 20°C에서 평가한 흑체 복사계수 5.7  $W/m^2 \cdot K$ 을 이용되었으며,  $R_{se}$ 는 복사율 0.9, 10°C에서 평가한 흑체 복사계수 5.1  $W/m^2 \cdot K$ , 풍속 4 m/s를 이용하여 계산된 값이다.

## 2.2. 선형열교 산출방법

건물 에너지성능 평가를 위해 열교부위성능 평가 지표로써 선형열교를 이용하고 있으며, 선형열교는 국제표준인 ISO 10211과 ISO 14683에서 산출방법

Table 1. Heat transfer resistance

Heat transfer Resistance ( $m^2 \cdot K/W$ )	Direction of heat flow		
	Upward	Horizontal	Downward
$R_{si}$	0.10	0.13	0.17
$R_{se}$	0.04	0.04	0.04

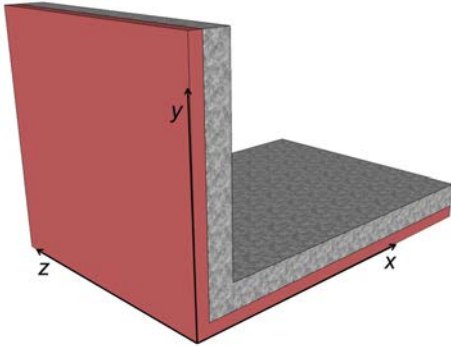


Fig. 4. 3D conceptual image of thermal bridge.

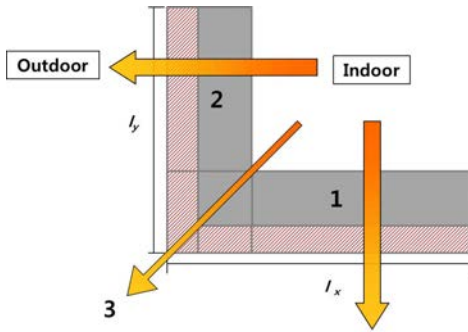


Fig. 5. 2D conceptual image of thermal bridge.

을 제공하고 있다. ISO 10211에서는 선형열교의 산출방법 및 모델링 시 경계조건 등에 대하여 정하고 있으며, ISO 14683에서는 전형적으로 열교가 발생하는 경우에 따른 선형열교값을 제공하고 있다[10]. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 선형열교( $\psi$ )는 정상상태에서 단위 길이 당(Fig. 4의 z축방향) 실내외 온도 차에 의하여 발생하는 전열량( $W/m \cdot K$ )을 뜻한다. 즉, 이 값이 증가하면 단열성능이 떨어지는 것을 의미한다. Fig. 5는 단위 길이의 벽체 단면을 나타내고 있다. 온도차에 의하여 실내에서 실외로 이동하는 1, 2번 화살표는 벽체를 통하여 열이 손실되는 것을 나타낸 것이고, 3번은 선형열교로 열이 손실되는 것을 나타낸다. 선형열교의 개념을 나타낸 Fig. 5를 바탕으로 선형열교 산출식은 식 (4), (5), (6)과 같다. 선형열교를 계산 시 수식의 총 손실열량 값을 얻기 위해서는 HEAT2 시뮬레이션을 활용하며, 본 시뮬

레이션은 2차원 정상상태 전열해석 프로그램으로 ISO 10211에서 명시하고 있는 선형열교산출 방식을 기반으로 하고 있다. 본 연구에서는 HEAT2를 활용하여 국내 건축물 설비 등에 관한 규칙[11]에서 명시하고 있는 경계조건인 실내온도  $20^{\circ}C$ , 외부온도  $-10^{\circ}C$ 에 따라 목구조의 서까래, 지붕-벽체 접합부, 지면 슬래브-벽체 접합부에서의 선형열교를 분석하였다.

$$Q_{2D} = q_x + q_y + q_z \quad (4)$$

$$= U_x \times A_x \times \Delta T_x + U_y \times A_y \times \Delta T_y + \Psi \times l_z \times \Delta T_z$$

$$Q_{2D(l=1m)} = U_x \times l_x \times \Delta T_x + U_y \times l_y \times \Delta T_y + \Psi \times (1m) \times \Delta T_z \quad (5)$$

$$\Psi = \frac{Q_{2D} - (U_x \times l_x \times \Delta T_x + U_y \times l_y \times \Delta T_y)}{\Delta T_z} \quad (6)$$

$Q_{2D}$  : 벽체 단면에서의 총 손실 열량( $W/m$ )

$q_n$  : n 벽체 단면의 손실열량( $W/m$ )

$U_n$  : n 벽체의 열관류율( $W/m^2 \cdot K$ )

$A_n$  : n 벽체의 면적( $m^2$ )

$\Delta T_n$  : n 벽체의 실내-외 온도 차( $^{\circ}C$ )

$\Psi$  : 선형열교값( $W/m \cdot K$ )

### 3. 건물외피의 단열성능 평가 및 결과

#### 3.1. 수종별 스테드의 열전도율

국내 수종 중 목조건축의 구조재료로 사용되는 낙엽송(Larix leptolepis), 소나무(Pinus densiflora), 전나무(Abies holophylla)의 열전도율( $K$ )을 각 시뮬레이션에서 추출하였다. 건축물에너지 성능평가 시뮬레이션인 Design Builder, ECOTECT, TRNSYS에서 조사한 수종별 열전도율은 Table 2와 같고, 목조건축의 지붕, 벽체, 지면 슬래브의 구성 및 물성을 Table

Table 2. Thermal conductivity of stud from simulation program

Species	Thermal conductivity (W/m · K)		
	Design Builder	ECOTEECT	TRNSYS
Larch	0.12	0.13	0.20
Pine	0.17	0.23	0.13
Fir	0.12	0.12	0.13

Table 3. Structure and properties of building components

Component	Material	Thickness (mm)	Thermal conductivity (W/m · K)
Roof	Gypsum board	20	0.210
	Air	38 × 38 @ 450	0.184
	Polyethylene sheet	.	.
	Glass fiber insulation	240	0.040
	Wood stud	38 × 240 @ 610	[Table 2]
	Building paper	.	.
	Air	38 × 38 @ 450	0.184
	Brick veneer	20	1.590
Wall	Gypsum board	10	0.210
	Air	38 × 38 @ 450	0.184
	Polyethylene sheet	.	.
	Glass fiber insulation	140	0.040
	Wood stud	38 × 140 @ 610	[Table 2]
	OSB	20	0.130
	Air	38 × 38 @ 450	0.184
	Wood siding	20	0.431
Slab	Wood finishing floor	10	0.125
	OSB	20	0.130
	Glass fiber insulation	140	0.040
	Wood stud	38 × 140 @ 510	[Table 2]
	OSB	20	0.130
	Glass fiber insulation	180	0.040
	Wood stud	38 × 180 @ 650	[Table 2]
	OSB	20	0.130
Concrete	100	2.700	

3에 나타내었다. 시뮬레이션 별로 목구조의 구조용 스티드로 사용되는 수종의 열전도율을 확인해보았다. Design Builder의 목재 평균 열전도율은 0.14

W/m · K, ECOTEECT은 0.17 W/m · K, TRNSYS는 0.15 W/m · K 이었다. 즉, 각 시뮬레이션 별 목재 열전도율은 ECOTEECT, TRNSYS, Design Builder 순

Table 4. Thermal transmission of roof, wall, and slab

Component	Species	Thermal transmission ( $W/m^2 \cdot K$ )			
		Design Builder	ECOTEECT	TRNSYS	$\Delta(U_{max} - U_{min})$
Roof	Larch	0.172	0.174	0.187	0.015
	Pine	0.182	0.192	0.174	0.018
	Fir	0.172	0.172	0.174	0.002
Wall	Larch	0.265	0.267	0.284	0.019
	Pine	0.277	0.290	0.267	0.023
	Fir	0.265	0.265	0.267	0.002
Slab	Larch	0.124	0.125	0.132	0.008
	Pine	0.129	0.134	0.125	0.009
	Fir	0.124	0.124	0.125	0.001

으로 높은 값의 데이터 물성을 사용하고 있다.

### 3.2. 목조건물 벽체 열관류율

각 수종의 열전도율을 스테드의 물성에 대입하여 지붕, 벽체, 지면 슬래브의 열관류율( $U$ )을 2.1 열관류율 산출방법에서 언급한 비균질 부재의 열전도율 공식을 이용하여 계산하였다. 계산된 각 부재의 열관류율은 Table 4에 나타내었다. 각 시뮬레이션 간에 가장 큰 열전도율의 차이를 보이는 소나무의 경우를 대표적으로 언급하면, 지붕의 열관류율은 TRNSYS에서 추출한 열전도율을 대입하였을 때 최소 0.174  $W/m^2 \cdot K$ , ECOTEECT의 데이터를 사용하였을 경우 최대 0.192  $W/m^2 \cdot K$  로 두 데이터 값의 차이는 0.018  $W/m^2 \cdot K$ 의 차이를 보였다. 벽체와 지면 슬래브의 경우도 지붕의 경우와 마찬가지로, 벽체 열관류율 최소 0.267  $W/m^2 \cdot K$ 에서 최대 0.290  $W/m^2 \cdot K$ , 지면 슬래브 열관류율 최소 0.125  $W/m^2 \cdot K$ 에서 최대 0.134  $W/m^2 \cdot K$ 이 나왔다. 지붕, 벽체, 지면 슬래브의 최대, 최소 열관류율 차이를 보면 벽체 0.023  $W/m^2 \cdot K$ , 지붕 0.018  $W/m^2 \cdot K$ , 지면 슬래브 0.009  $W/m^2 \cdot K$  순으로 나타났다. 이러한 열관류율의 차이는 각 건물 부재별로 단위 면적당 목조 스테드가 차지하는 비율에 따라 발생하였다.

### 3.3. 목조건물 접합부 선형열교

Table 5에는 각 시뮬레이션의 수종 별 접합부에서의 선형열교값( $\Psi$ )을 나타내었다. 그리고 Tables. 6~8에는 시뮬레이션에서 추출한 열전도율 중 가장 큰 차이를 보이는 TRNSYS와 ECOTEECT에서 조사된 소나무의 열전도율을 스테드에 적용 시 열관류율, 선형열교, 온도변화의 전열해석 결과를 나타내었다.

지붕의 서까래 접합부의 선형열교 또한 TRNSYS에서 추출한 열전도율을 대입하였을 때 최소 0.025  $W/m \cdot K$ , ECOTEECT의 데이터를 사용하였을 경우 최대 0.046  $W/m \cdot K$ 로, 그 차이는 0.021  $W/m \cdot K$ 이었다. 지붕-벽체 및 지면 슬래브-벽체 접합부의 선형열교에서도 서까래 접합부 경우와 마찬가지로, TRNSYS에서 최소 ECOTEECT에서 최대값이 산출되었다. 지붕-벽체 접합부 선형열교값 최소 -0.033  $W/m \cdot K$ 에서 최대 -0.008  $W/m \cdot K$ , 지면 슬래브-벽체 선형열교값 최소 0.051  $W/m \cdot K$ 에서 최대 0.053  $W/m \cdot K$ 가 계산되었다. 그 차이는 각각 0.025  $W/m \cdot K$ 과 0.002  $W/m \cdot K$ 이었다. 열관류율과 마찬가지로 서까래 접합부, 지붕-벽체 접합부, 지면 슬래브-벽체 접합부의 최대, 최소 선형열교 차이를 보면 지붕-벽체 0.025  $W/m \cdot K$ , 지붕 서까래 0.021  $W/m \cdot K$ ,

Table 5. Thermal bridge at connections of the components

Connection	Species	Thermal bridge (W/m · K)			
		Design Builder	ECOTEECT	TRNSYS	$\Delta(\psi_{\max} - \psi_{\min})$
Rafter	Larch	0.022	0.025	0.040	0.018
	Pine	0.034	0.046	0.025	0.021
	Fir	0.022	0.022	0.025	0.003
Roof-Wall	Larch	-0.036	-0.033	-0.014	0.022
	Pine	-0.022	-0.008	-0.033	0.025
	Fir	-0.036	-0.036	-0.033	0.003
Slab-Wall	Larch	0.051	0.051	0.053	0.002
	Pine	0.052	0.053	0.051	0.002
	Fir	0.051	0.051	0.051	0

지면 슬래브-벽체 0.002 W/m · K 순으로 나타났다. 벽체와 지붕은 거의 유사하다고 볼 수 있는데, 그 이유는 열관류율의 경우와 동일하게 단위 길이 당 목조 스티드가 차지하는 비율의 차이에서 기인한 것이다. 하지만 지붕과 지면 슬래브의 선형열교 발생량이 차이가 다른 경우보다 확연히 크다고 볼 수 있다. 그 이유는 앞의 경우는 단순히 스티드의 비율에 따른 것이지만, 이 경우는 지면 슬래브와 벽체사이의 접합부는 대기에 노출되어있는 것이 아니라, 지면 또는 지면 아래에서 만나기 때문이다. KS에서 명시하고 있는 외부온도, 내부온도, 지중온도에 따라, 실내 · 외가 직접 대기와 맞닿는 경우 외기 온도차는 31°C 이지만 지면 슬래브-벽체의 경우 온도차는 21°C이기 때문에 외부 · 내부 온도차가 적어 열교가 적게 발생한 것으로 보인다.

시뮬레이션에서 추출한 열전도율 중 가장 큰 차이를 보이는 TRNSYS와 ECOTEECT에서 조사된 소나무의 열전도율을 스티드에 적용 시 열관류율, 선형열교, 온도변화의 전열해석 결과를 표현한 Tables. 6~8에서 앞에서 언급한 선형열교차이를 이미지를 통해 분명히 확인할 수 있다. 건축물 구조체의 온도 분포를 열선으로 표시하면 단열이 부족하거나 시공상에 부실이 있는 경우 끊어진 두 개의 열선을 볼 수 있다. 끊어진 부분이 다른 부분보다 온도가 낮고, 또

이 부위를 통해 다른 보통의 구조체보다 더 많은 열이 흐른다는 것을 의미한다. 지붕 서까래 접합부, 지붕-벽체 접합부, 지면 슬래브-벽체 접합부의 온도 변화를 살펴보면, 스티드가 단열재 부위에 비하여 온도가 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 소나무의 열전도율이 0.13 W/m · K인 경우(TRNSYS)는 열전도율이 0.23 W/m · K인 경우(ECOTEECT)에 비하여 스티드 주변에서 온도 감소 속도 및 변화 곡선이 보다 완만하게 나타난 것을 볼 수 있다. 유사하게 열류량의 차이를 나타낸 그림을 보면, TRNSYS의 열전도율을 사용한 경우는 접합부 스티드에서 낮은 열류량을 상징하는 청색 계열로 표현되고, 그 내부에서 외부로 이동하는 백터크기가 작다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 상향의 열전도율을 사용하는 ECOTEECT의 경우 높은 열류량을 의미하는 적색 계열로 나타냄과 동시에 내부에서 외부로 향하는 백터양과 크기가 크게 표시되었다.

단순히 목재뿐만 아니라 타 건축재료의 열전도율 차이 0.10 W/m · K이 매우 낮고, 건물 전체에 어떠한 영향도 주지 않는 수치로 보일 수도 있다. 하지만 작은 열전도율의 차이임에도 불구하고 건물은 작은 부재들이 조합되어 하나의 거대한 구조체를 이루는 과정이기 때문에 재료의 작은 열전도율 차이는 건축물의 규모가 커질수록 부재의 열관류율 및 접합부의



목조건축물 구조부재의 열전도율에 따른 건물외피의 단열 성능

Table 6. Thermal performance and temperature at rafter by thermal conductivity of pine

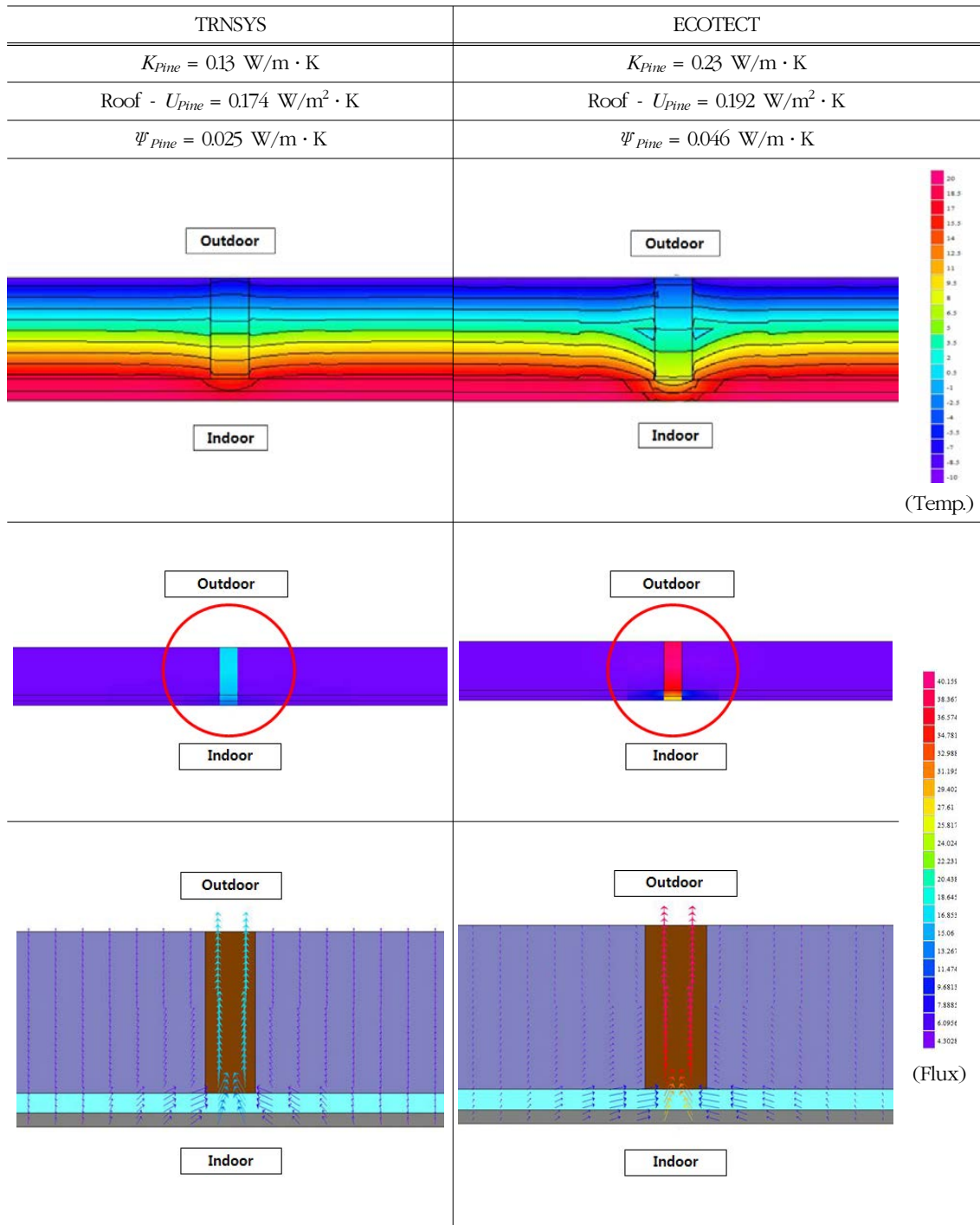


Table 7. Thermal performance and temperature at roof-wall by thermal conductivity of pine

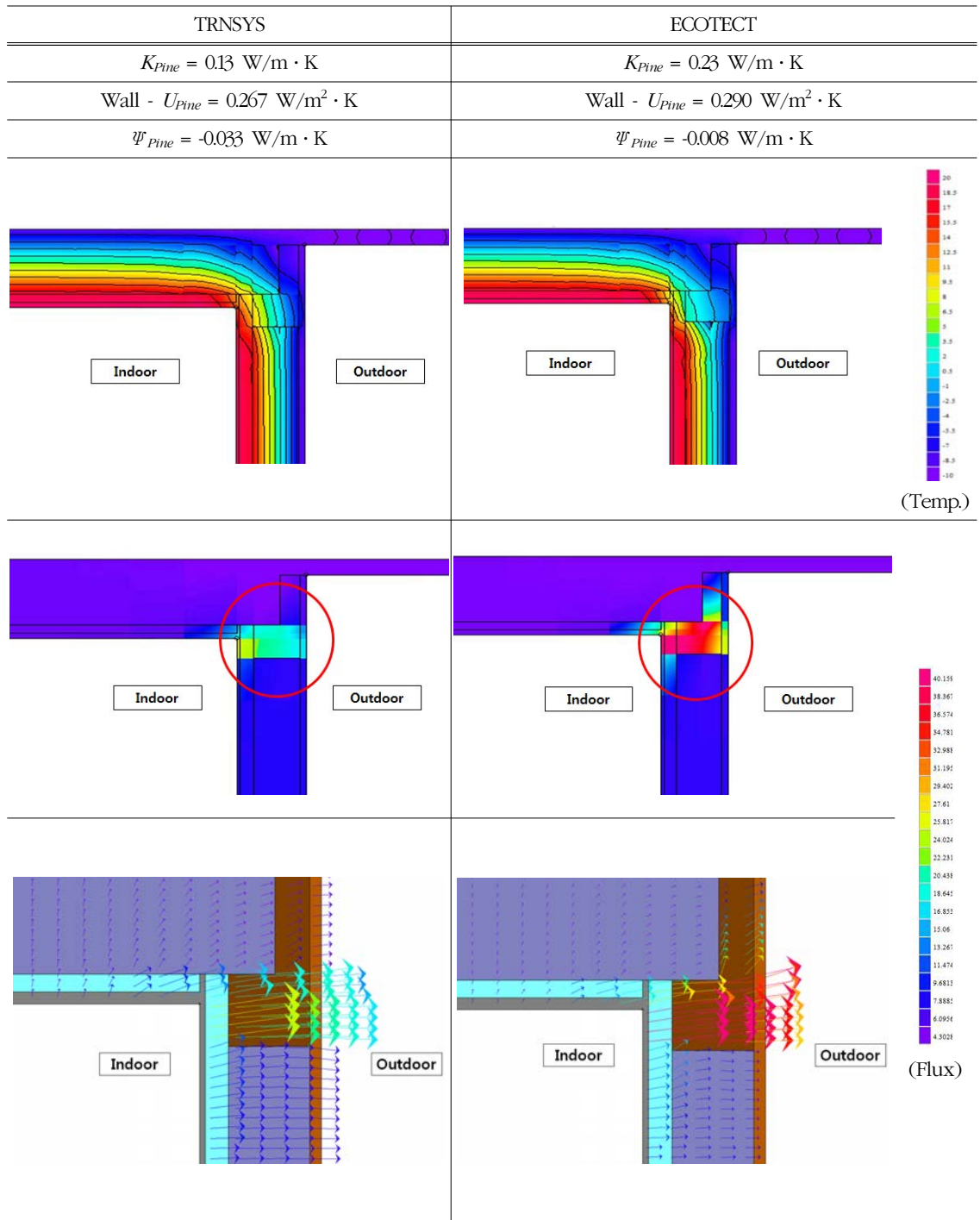
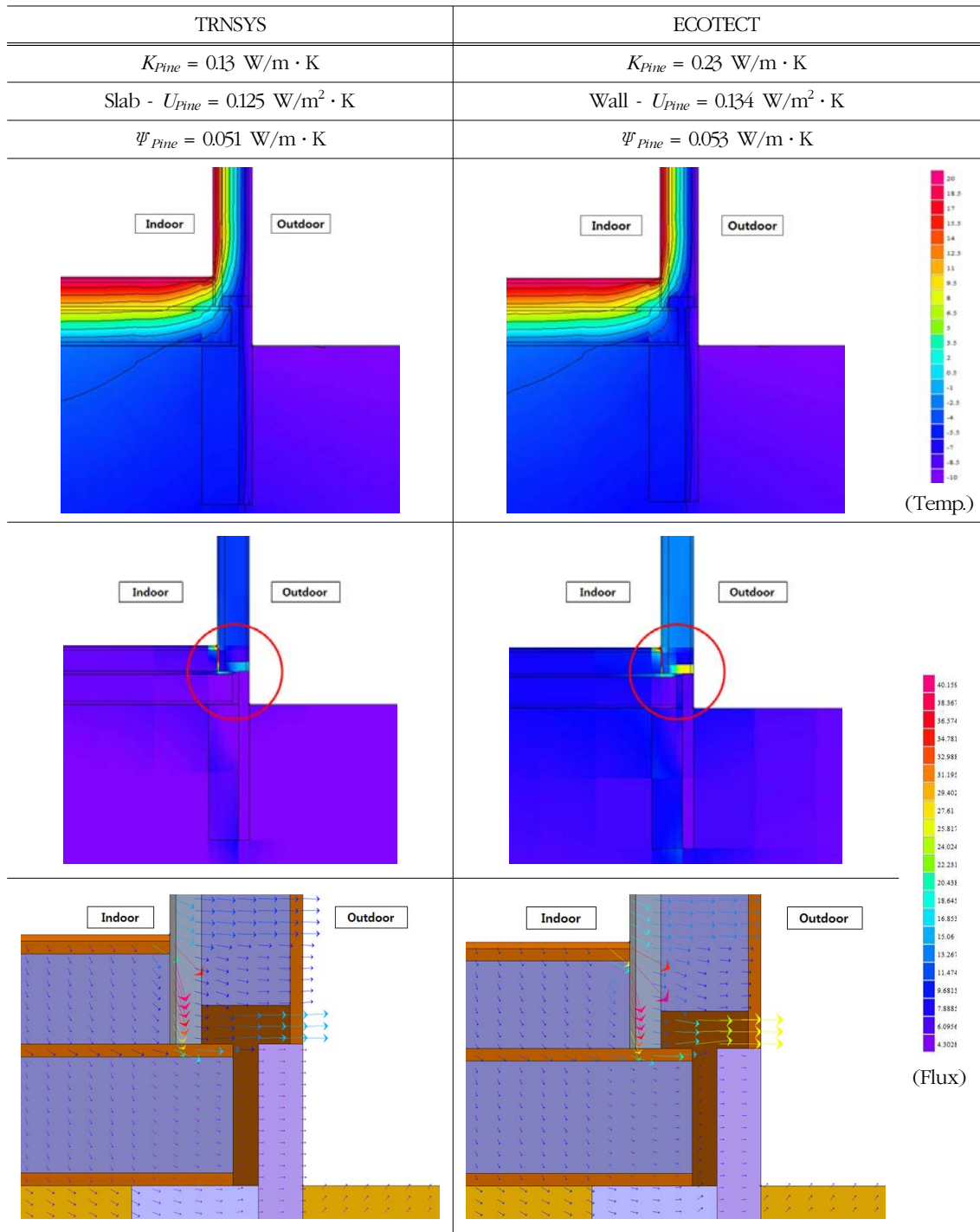


Table 8. Thermal performance and temperature at slab-wall by thermal conductivity of pine



열교량에 영향을 주게 되고, 결국 전체 건물에너지 성능에도 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 반드시 고려해야 한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 높은 신뢰도로 사용되고 있는 건축물에너지 성능평가 시뮬레이션들 마다 상이한 재료의 열전도율 값으로 평가되고 있음을 파악하였다. 시뮬레이션을 통한 정확한 건물에너지를 평가하기 위하여 각 시뮬레이션에서 스티드로 사용되고 있는 목재의 열전도율을 확인하고, 이에 따른 목구조 벽체의 열관류율과 부재 접합부위에서의 선형 열교를 연구하였다.

시뮬레이션에서 추출한 열전도율 중 가장 큰 차이를 보이는 TRNSYS와 ECOTECT에서 조사된 소나무의 열전도율을 스티드에 적용하였다. 이때, 지붕, 벽체, 지면 슬래브의 최대, 최소 열관류율 차이는 지붕  $0.018 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , 벽체의 경우  $0.023 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , 지면 슬래브  $0.009 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 로, 시뮬레이션 간의 열전도율 평균 오차는  $0.017 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이었다. 열관류율 연구와 동일하게 서까래 접합부, 지붕-벽체 접합부, 지면 슬래브-벽체 접합부의 최대, 최소 선형 열교 차이를 보면 지붕 서까래  $0.021 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , 지붕-벽체에서  $0.025 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , 지면 슬래브-벽체  $0.002 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이었으며, 시뮬레이션 별 열전도율 차이에 따른 평균 선형 열교의 오차는  $0.016 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이었다. 독일 패시브하우스 협회에서 초에너지절약형 건축물을 실현시키기 위하여 Passive House 기준으로 열교부위의 선형 열교를  $0.01 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  이하가 되도록 정하여 열교부위의 단열성능을 확보하도록 하고 있다. 하지만 본 연구에서 진행된 일반 목구조주택의 경우 독일 패시브하우스 협회에서 명시한 선형 열교 성능보다 약 2.5배 이상을 상회한 값을 보였다. 또한, HEAT2 선형 열교 해석 프로그램을 통하여 각 부재의 접합부에서의 선형 열교 및 온도변화에 대한 전 열 해석 이미지를 분석하였다. 전 열 해석 이미지를 활용하여 건축물 구조체의 온도 분포를 열선으로 표시하여 단열이 부족한 곳에서 끊어진 두 개의 온도선을 확인하였고, 끊어진 부분은 다른 부분보다 온도

가 낮으며, 이 부위를 통해 다른 구조체 부분보다 더 많은 열류가 흐른다는 것을 예측할 수 있었다.

부실한 열관류율과 열교부위로 인하여 기존 난방 장치로 겨울철에 충분한 난방을 제공하지 못하게 되어 보다 많은 난방에너지를 사용하게 되고, 이는 다량의  $\text{CO}_2$ 를 방출하게 되는 결과를 초래한다. 또한, 실내 열적 쾌적감이 저하, 실내표면에 결로현상 및 곰팡이 서식으로 인한 실내 공기질 악화, 습기 유입으로 구조체 및 마감재의 구조적, 시각적 문제, 건물 가치 하락과 내구성 저하를 야기하여 경제적 손실을 유발할 수 있다. 결국 정확한 열관류율 및 선형 열교를 시뮬레이션을 활용하여 예측하기 위해서는 각 목질재료의 열전도율을 규정할 수 있는 조사가 필요할 뿐만 아니라, 목구조의 열교를 줄일 수 있는 새로운 접합부 상세 디자인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013-058448).

## 참 고 문 헌

1. Dodoo, A., L. Gustavsson, and R. Sathre. 2012. Effect of thermal mass on life cycle primary energy balances of a concrete- and a wood-frame building. *Applied Energy* 92: 462~472.
2. Nassen, J., F. Hedenus, S. Karlsson, and J. Holmberg. 2012. Concrete vs wood in buildings e An energy system approach. *Building and Environment* 51: 361~369.
3. McGraw Hill Construction. Wood Rates: How Wood Products Stack Up in Green Building Systems / How Wood Products Stack Up in Green Building Systems. [continuingeducation.construction.com](http://continuingeducation.construction.com).
4. Koo, B.-K., J.-H. Lim, and S.-Y. Song. 2011. Improvement schemes of regulation related to thermal bridges in residential buildings. *Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*: 55~58.

5. Inspect A pedia. Mold inspect test remove. www.inspectapedia.com.
6. Theodosiou, T. G. and A. M. Papadopoulous. 2008. The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings* 40: 2083~2089.
7. Erhorn, H., H. Erhorn-Kluttig, M. Citterio, M. Cocco, D. V. Orshoven, and A. Tilmans. 2010. An effective handling of thermal bridges in the EPBD context. Final Report of the IEE ASIEPI Work on Thermal Bridges.
8. Jeon, J. S., J. K. Seo, and S. M. Kim. 2011. Suggestion of thermal environment miniature for evaluation of heating efficiency based on thermal conductivity measurement method of building materials. *Mokchae Konghak* 39: 269~280.
9. Korean Standard Association. 2007. ISO 6946 Building components and building elements Thermal resistance and thermal transmittance Calculation method.
10. Koo, B-K., J-H. Lim, and S-Y. Song. 2011. Statistical analysis on the prediction of linear thermal transmittances for wall-slab joints in internally and externally-insulated apartment buildings. *Journal of Architectural Institute of Korea* 27: 305~312.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2013. Regulation for Facility in Building.