

축소모형 실험을 통한 벽체의 열관류 측정¹

장윤성² · 김세종² · 심국보² · 이상준² · 한연중³ · 박용건⁴ · 여환명^{3,4,†}

Assessment on Thermal Transmission Property of Wall Through a Scaled Model Test¹

Yoon-Seong Chang² · Sejong Kim² · Kug-Bo Shim² · Sang-Joon Lee² ·
Yeonjung Han³ · Yonggun Park⁴ · Hwanmyeong Yeo^{3,4,†}

요약

구조용 부재의 단열성능에 대한 적절한 평가와 냉난방에너지에 대한 합리적 제어는 건물의 에너지효율을 향상시키기 위하여 매우 중요하다. 한국의 일반적인 주택 난방방식은 바닥난방이다. 이와 같은 복사난방방식은 국내의 지정학적인 조건 또는 기후에 적합할 뿐만 아니라 온열감에 따른 정서적 안정감을 준다는 장점을 가진다.

국내의 바닥난방시스템을 적용하여, 목조공간과 콘크리트조 공간을 대상으로 축소모형을 제작하였다. 천장은 스티로폼으로 단열하고 벽과 바닥은 각각 합판과 콘크리트로 구성하였다. 바닥에는 난방필름을 부착하였다. 바닥난방에 따른 실내의 온도분포는 열전대로 측정하였고, 벽체 표면의 온도는 적외선 열화상 카메라로 측정하였다. 목조주택의 에너지효율 향상을 위한 데이터베이스 구축을 위해 축소모형의 단열성능을 평가하였다. 다양한 벽체와 바닥구성을 지닌 모형들의 단열성능평가 자료는 실제 주택의 열환경 분석시 참고기준으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

Appropriate evaluation of thermal insulation property of structural member and valid control of cooling/heating energy are important for improving building's energy efficiency. The typical heating system of house in Korea is the floor heating one. The radiation heating system is not only appropriate to climate and geographic conditions of Korea, but also advantageous to provide emotional comfort by the warm feeling of floor.

Based on living conditions in Korea, scaled models of the wooden house and concrete house were designed. The ceiling was made of styrofoam insulation and the four sided walls and bottom were made of plywood and concrete,

¹ Date Received September 30, 2015, Date Accepted November 20, 2015

² 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, 57 Hoegiro, Dongdaemun-gu, Seoul, 02455, Republic of Korea

³ 서울대학교 농생명과학연구원. Research Institute of Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Republic of Korea

⁴ 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부. Department of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Republic of Korea

† 교신저자(Corresponding author): 여환명(e-mail: hyeo@snu.ac.kr)

respectively. The floor was heated by heating film. Indoor vertical temperature distributions by floor heating system were measured by thermocouple, and surface temperatures on walls were measured by infrared thermography.

Also, thermal insulation property of wooden wall was evaluated to build database for improving energy efficiency of wooden building. It is expected that collected data during tests of various types of floor and wall composition could be referenced for evaluating thermal environment of actual conditions of houses.

Keywords : heat transfer, scaled model, thermal insulation properties, wooden house, concrete house, thermocouple, Infrared thermography

1. 서 론

최근, 국내 에너지수급의 해외의존도는 약 97%에 달하며, 전체 에너지의 30%가 건물부문에서 소비되고 있다(Kang and Joo, 2007). 또한 건물로부터 빠져나가는 에너지의 양은 약 40%에 달한다(Cha *et al.*, 2011). 이러한 이유로, 난방에너지 비용을 절감하고 온실가스배출을 저감하기 위해 건물의 난방에너지 효율을 높이고자 하는 노력들이 수행되어왔다. 해외의 경우 건축물의 환경성과 에너지 효율에 대한 인증제도로 미국은 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), 영국은 BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), 일본은 CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency), 호주는 Green star를 만들고 시행함으로써 건축물에서의 에너지절감을 꾀하고 있다. 이들 국가에서는 건물의 운영에너지를 절감할 수 있는 기술들에 초점을 맞추어 단열 벽체와 창호 및 신재생에너지활용 설비를 적용할 뿐만 아니라 건축물의 생애주기 관점에서 접근한 효율적인 자재이용을 통하여 건축물의 연간 에너지 소비량을 상당 부분 저감하려고 노력하고 있다. 국내의 경우, 2000년대에 들어 GBCC (Green Building Certification Criteria: 국내 친환경 건축물 인증제도)를 시행하여 건물의 에너지를 절감하려는 노력을 진행하고 있다.

한국의 일반적인 주택 난방방식은 바닥난방이다. 이와 같은 복사난방방식은 한국의 지정학적인 조건 또는 기후에 적합할 뿐만 아니라 온열감에 따른 정서적 안정감을 준다는 장점을 가진다(Song *et al.*, 2006). 적합한 난방방식은 인간의 건강과 안정을 위

해 중요하며, 더 나아가 적합한 재료의 선택은 건물을 좋은 상태로 유지하기 위해 중요하다(Sakaguchi *et al.*, 2008). 국내에서는 주거건물의 에너지 절감을 위해 축소모형을 이용한 열환경 평가(Jeon *et al.*, 2011)와 시뮬레이션을 통한 건물에너지 절약요소 적용에 따른 목조주택의 에너지 성능 개선에 관한 연구를 진행하였다(Kim *et al.*, 2013).

본 연구에서는, 콘크리트조와 목조 공간의 열환경을 축소모형실험을 통해 평가하였다. 바닥난방에 따른 실내의 온도분포는 열전대로 측정하였고, 벽체 표면의 온도는 적외선 열화상 카메라로 측정하였다. 이를 이용하여 모델의 열관류율을 비교·분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

국내의 바닥난방 시스템을 고려하여, 목조공간과 콘크리트조 공간의 축소모형을 제작하였다. 공간의 열환경평가를 위하여 실내 공기의 수직온도분포와 벽체의 온도분포를 측정하였다. 축소모형은 500 mm (가로) × 500 mm (세로) × 450 mm (높이)로 제작하였다. 천장은 두께 10 mm의 스티로폼 판으로 단열하였다. 목조 모형의 벽체와 바닥은 두께 10 mm의 미송(Douglas Fir) 합판으로 제작하였고, 콘크리트조 모형의 벽체와 바닥은 두께 10 mm의 시멘트로 제작하였다. 바닥은 60℃까지 가열가능한 난방필름과 PVC 장판을 설치하여 실제 주거공간과 유사하게 구성하였다(Fig. 1). 실험실 온습도조건은 온도 27.8℃, 상대습도 30%이었다.

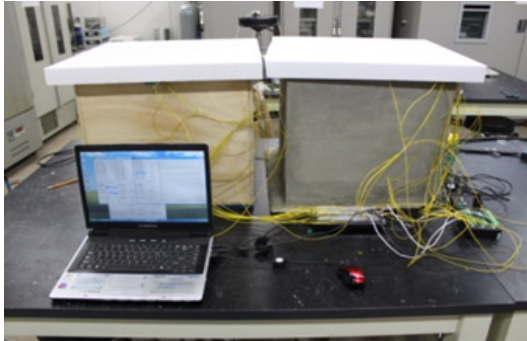


Fig. 1. Scaled building model with wood and concrete.

2.2. 실험방법

J-type의 열전대(thermocouple)를 이용하여 바닥난방에 따른 실내수직온도를 측정하였다. 난방필름에 열전대를 부착하여 실제 가열온도를 측정하였고, 바닥 중심부에 기둥을 세우고 높이별로 5개의 열전대를 부착하여 실내온도분포를 측정하였다. 또한 벽체 내표면, 중심부, 벽체 외표면의 온도를 측정하였다(Fig. 2).

각 모형별로 난방필름을 60℃로 동일하게 조절한 후, 3시간 가열, 3시간 냉각을 주기로 총 60시간 동안 변화하는 실내 및 벽체온도를 측정·비교하였다. 벽체 단열성능에 의한 열손실을 해석하고자 적외선 카메라를 이용하여 벽체 외부의 표면온도를 측정하였다. 단열성이 높을수록 실외표면온도는 실외 공기온도와 유사하고, 실내표면온도는 실내공기온도와 유사하게 측정된다. 이러한 원리를 통하여 구성된 KS F 2829 (적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법)에 제시된 상대온도차비(TDR: Temperature Difference Ratio)라는 지표로 목조와 콘크리트조 축소모형의 벽체단열성능을 평가하였다(KS F 2829; Choi *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2010). 실험에 사용한 적외선 카메라(MobIR M4, GUIDIR)의 측정범위는 -20~250℃, 열감도는 0.01℃, 파장은 8~14μm 이다.

정상상태에서, 대류에 의한 열유속(heat flow rate,

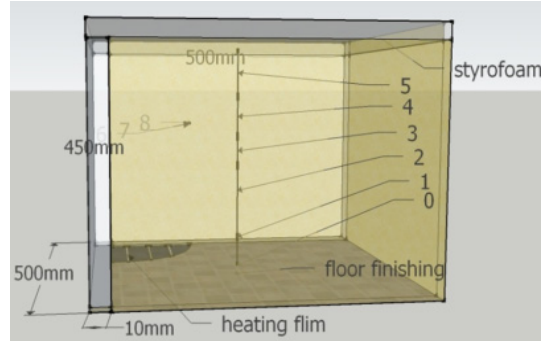


Fig. 2. Thermal sensors in scaled model.

q_{conv})과 전도에 의한 열유속(q_{cond})은 벽체의 어느 곳에서나 같다고 가정할 수 있다(Holman, 2010). 실외 표면온도차비율(TDR_o)은 실내외 공기온도차에 대한 실외공기온도와 실외표면온도의 차를 비율로 나타낸 것이다. TDR_o가 의미하는 바는 단열상태가 우수할수록 실외표면온도는 실외온도와 가까워지므로 0에 수렴하게 되며, 단열상태가 나쁠수록 실외표면온도가 실내온도에 접근하게 되어 -1에 수렴한다는 가정에 근거한다. 따라서, 열평형방정식은 아래의 그림과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 3).

$$TDR_o = \frac{T_o - T_{os}}{T_i - T_o} \quad (1) \text{ (Song, 2006)}$$

where TDR_o: Outside Temperature Difference Ratio,
T_i: inside temperature, T_o: outside temperature
and T_{os}: outside surface temperature of wall.

위의 식에 따라, TDR_o을 이용하여 도출된 열관류율을 K_{TDRo}로 정의하였다. 이를 벽체구성재료의 열적 특성에 따른 열관류율과 비교하였다(Table 1).

3. 결과 및 고찰

3.1. 축소모형의 열성능평가

60℃로 세 시간 동안 가열한 후, 목조벽체의 벽체 외표면과 내표면의 차이는 콘크리트에 비해 큰 값을

Table 1. Thermal properties of wall materials

Materials	Thermal conductivity, k (W/m · K)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific heat, C _p (J/kg · K)
Wood (plywood)	0.12	545	1215
Concrete	0.72	1860	780

* wall thickness: 10 mm

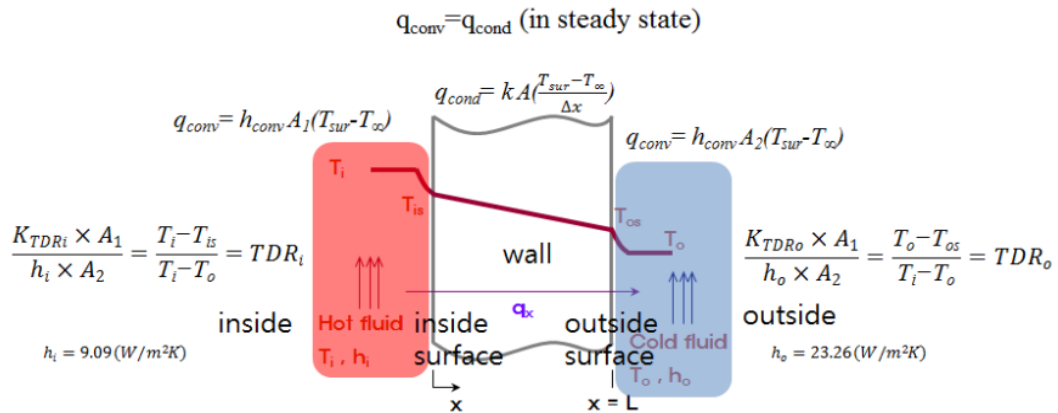


Fig. 3. Theoretical background of TDR.

나타내었다(Fig. 4). 이는 목재의 열전도율이 콘크리트의 열전도율보다 낮아 벽체를 통한 외부로의 열손실이 작기 때문으로 생각된다. 난방초기의 콘크리트조 모델의 내부온도는 목조 모델에 비해 급격히 상승하는 경향을 보였는데 이는 목조벽체를 가열하기 위해 투입되는 열량의 일부가 목재세포 내의 결합수를 제거하는데 이용된 것으로 생각된다. 또한 목조 모델이 콘크리트조 모델에 비해 낮은 열전도율(k of wood = 1/6 k of concrete)과 낮은 열확산율(α of wood = $k/\rho \cdot C_p$, 1/3 α of concrete)을 보이기 때문으로 생각된다. 따라서, 목조벽체는 콘크리트벽체에 비해 높은 단열성능을 보인다고 생각된다.

60℃로 조절된 난방필름으로 가열된 목조와 콘크리트조 축소모형 실내온도분포를 측정하였다(Fig. 5). 세 시간 가열, 세 시간 냉각을 한 주기로 열 번의 주기 동안 목조주택 모델의 온도분포는 45℃에서 27℃까지 변화하였으며, 콘크리트주택 모델의 온도분포는 42℃에서 26℃까지 변화하였다. 동일한

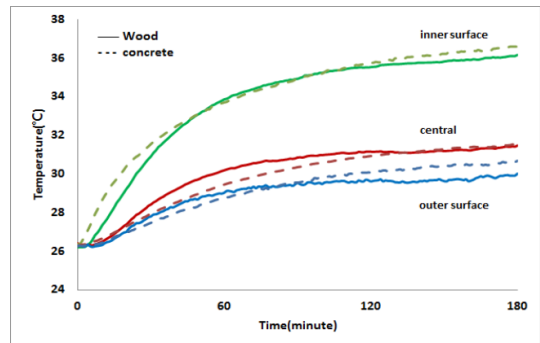


Fig. 4. Temperature of wooden and concrete model during 3 hours heating.

난방조건에서 목조주택 모델의 실내온도는 콘크리트 모델의 실내온도에 비해 약 3℃ 높은 값을 나타내었다.

Table 2. Thermal transmission of wall materials

Materials	Outdoor Temp. (°C)	Outdoor surface Temp. (°C)	Indoor Temp. (°C)	Thermal transmission (K) (W/m ² · K)	
				K _{TDRo}	K (k/s)
Wood (plywood)	27.8	31.4	37.7	8	12
Concrete		35.2	38.9	16	72

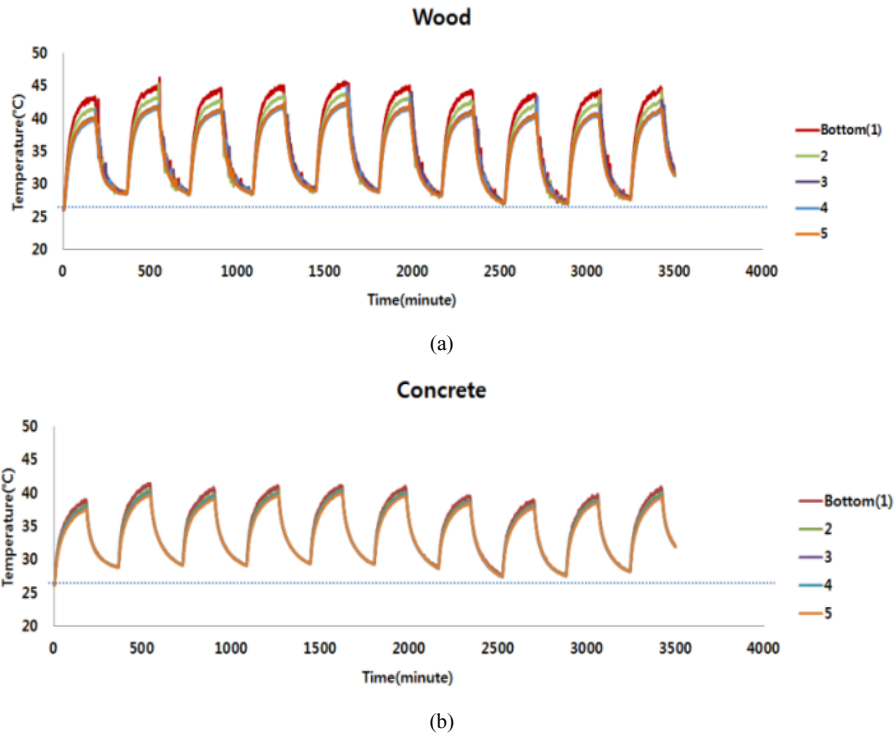


Fig. 5. Vertical temperature distribution change in wooden (a) and concrete (b) model during repetitive heating and un-heating with three hours interval.

3.2. 열관류율 평가를 위한 적외선열화상 분석

난방 중 축소모형의 외부벽체 표면온도를 적외선 카메라를 이용하여 측정하였다(Fig. 6). 목조와 콘크리트 모형의 열관류율을 TDR을 이용한 단열성능 측정방법(KS F 2829)에 따라 평가하였다(Table 2). TDR을 이용한 콘크리트조벽체의 열관류율(K_{TDRo} , 15 W/m² · K)은 목조벽체의 열관류율(6 W/m² · K)

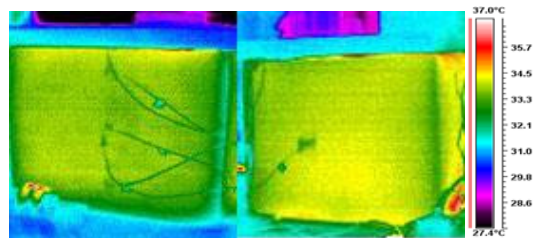


Fig. 6. IR image of wooden (left) and concrete (right) wall in the same heating condition.

에 비해 높은 값을 보였다.

4. 결 론

동일한 두께의 벽에서 목조벽체는 콘크리트조벽체에 비해 우수한 단열성능을 보였다. 다시 말하면, 콘크리트 벽체는 목조벽체와 동일한 단열성능을 보이기 위해서는 추가적인 단열시공을 수행해야 하므로, 실내열환경의 관점에서 목조공간은 콘크리트조공간에 비해 높은 에너지효율과 낮은 단열비용이라는 장점을 가진다. 적외선 열화상을 이용하여 모형의 에너지 손실부분을 효과적으로 탐지할 수 있으며 단열성능을 비파괴적인 방법으로 평가가능함을 입증할 수 있었다. 다양한 벽체와 바닥구성을 지닌 모형들의 단열성능평가 자료는 실제 주택의 열환경분석 시 참고 기준으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2015년도 국립산림과학원 석·박사연구원의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Cha, J., Seo, J., Kim, S. 2011. Correlation analysis of the thermal conductivity heat flow meter and MTPS (Modified Transient Plane Source) method using wood flooring and wall materials. *Journal of the Korea Furniture Society* 22(2): 118-125.
- Chang, Y.S., Eom, C.D., Park, J.H., Lee, J.J., Park, J.S., Park, M.J., Yeo, H. 2010. Thermal environments evaluation of wooden house using Infra-red thermal image and temperature difference ratio (TDR). *Journal of The Korean Wood Science Technology* 38(6): 518-525.
- Choi, B.H., Choi, G.S., Kang, J.S., Lee, S.E. 2009. Insulation performance evaluation of apartment housing using infra-red camera. *Proceedings of international journal of air-conditioning and refrigeration*. p. 718-724.
- Holman, J.P. 1989. *Heat Transfer*. Singapore. McGraw-Hill.
- Kang, M.H., Joo, S.J. A study on the elements affecting the demand of wooden house. *J the Architectural Institute of Korea* 23(1): 21-28.
- Kim, S.J., Park, J.S., Lee, J.J. 2013. Improvement of energy efficiency in wood frame house with energy efficient methods. *Journal of The Korean Wood Science Technology* 41(1): 77-86.
- KS F 2829: 2005. *Thermal performance of buildings*.
- Jeon, J., Seo, J., Kim, S. 2011. Suggestion of thermal environment miniature for evaluation of heating efficiency based on thermal conductivity measurement method of building materials. *Journal of The Korean Wood Science Technology* 39(3): 269-280.
- Sakaguchi, J., Akabayashi, S., Hasegawa, H., Asama, H. 2008. Study on the heat loss of the detached house when heated by both floor heating and air-conditioning. *Journal of Environmental Engineering* 73: 735-742.
- Song, S.Y., Song, S.Y., Hwang, H.Z. 2006. Thermal property of the earth construction material and thermal environment of test room with earth structure in summer. *Journal of the architectural institute of korea planning & design* 22(12): 327-334.