

통계 분석을 통한 내, 외단열 공동주택 벽-슬라브 접합부 열교부위의 선형 열관류율 예측에 관한 연구

Statistical Analysis on the Prediction of Linear Thermal Transmittances for Wall-Slab Joints in Internally and Externally-Insulated Apartment Buildings

구 보 경* 임 재 한** 송 승 영***
Koo, Bo-Kyoung Lim, Jae-Han Song, Seung-Yeong

Abstract

In Korean apartment buildings, internal insulation system is usually applied, so the layer of insulation is disconnected due to structural component at wall-slab and wall-wall joints in envelope. In particular, the amount of heat loss is significant at the wall-slab joints adjacent to hot water heating pipes. In Europe, EPBD(Energy Performance of Buildings Directive) came into effect, and national building energy performance evaluation tool is needed for issuing EPC(Energy Performance Certificate). Though thermal bridges are not explicitly mentioned in EPBD, they are included in the calculation of building energy performance. Linear thermal transmittance is required for energy performance calculation including the effect of these thermal bridges and it should be calculated by an expert with an experience of 2-D heat transfer simulation. If a non-expert can get a linear thermal transmittance without complex calculation, it would be very helpful. So, in this way, in most of European nations, simplified assessment methods for thermal bridges are provided in the national building energy performance evaluation standard. In this study, the regression models which predict linear thermal transmittances for three types of wall-slab joints (internal insulation, internal insulation with subsidiary insulation under slab, and external insulation) are suggested. 2-D heat transfer simulations were performed to calculate linear thermal transmittances for several variables, and then regression equations were derived, which showed a good match with 2-D heat transfer simulation results with p values <0.0001. These regression models can be used for the building energy performance calculation including the effects of thermal bridges.

키워드 : 열교, 선형 열관류율, 외단열, 회귀분석, 공동주택

Keywords : Thermal Bridge, Linear Thermal Transmittance, External Insulation and Finish System, Regression Analysis, Apartment building

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건물의 온실가스 배출 영향이 막중함을 인식하게 되면서부터 국내외 각 국에서는 건물에서의 에너지절약을 위한 여러 노력들을 경주하고 있다. 특히 국내에서는 대표적인 주거용 건물인 공동주택을 대상으로 건축물에너지효율등급인증제도를 확대 적용하고, 기존 공동주택 대비 에너지 소비량을 30~100% 단계적으로 절감하는 친환경 주택 보급 정책이 입안되었으며, 기존 공동주택 외피에서의 단열 강화 및 열교방지 대책이 중요시 되고 있다.

국내 공동주택은, 거의 대부분 외벽에 내단열을 적용하

고 있어 벽-슬라브, 벽-벽 접합부에서는 단열재가 불연속될 수밖에 없으므로 필연적으로 열교부위가 다수 발생하고 있다. 특히 국내 공동주택에는 난방용 온수배관이 바닥에 설치되므로 구조체를 통한 실외로의 전도 열손실방지가 매우 중요함에도 불구하고, 벽-슬라브 접합부 열교부위를 통해 매우 큰 전도 열손실이 발생하고 있는 실정이다.

국내의 경우, 건축물의 에너지절약 설계기준에서 열교를 근원적으로 차단할 수 있는 외단열을 적용한 경우 면적비율에 따라 에너지성능지표(EPI, Energy Performance Index) 계산시 가점을 주는 등 외단열 적용을 권장하고 있다. 그러나 실상은, 커튼월이 설치되는 기동식 초고층 공동주택(건물 외부에 연속하여 설치하는 커튼월 패널 속에 단열재가 내장되므로 자동으로 외단열이 됨) 등의 극히 일부 경우에만 외단열이 적용되고 있을 뿐, 국내 공동주택의 절대 다수를 차지하는 벽식 공동주택에는 거의 대부분 내단열이 적용되고 있다.

* 이화여대 대학원 건축학과 박사과정
(교신저자, E-mail : hiina9@naver.com)

** 이화여대 건축공학과 조교수, 공학박사

*** 이화여대 건축공학과 교수, 공학박사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20090084666)

그리고 단열규정상 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙에서 모든 외피 부위의 단열성능을 열관류율로만 규정함으로써 열교부위에 대한 고려 자체를 못해주고 있다(열관류율은 실내외 방향의 일차원 열류경로를 가정할 수 있는 일반부위에만 적용 가능하며, 다차원 열류경로가 발생하는 열교부위에는 적용 불가능함). 또한 열교부위의 단열성능 평가, 열교부위 전열량 평가, 열교부위의 요구 단열성능 설정 등과 같이 열교 제거를 위한 적극적이고 구체적인 기준 및 제도가 전혀 마련된 바 없어, 열교 발생으로 인한 많은 에너지손실이 초래되고 있는 실정이다.

반면, 국제 표준인 ISO에서는 이미 열교부위의 단열성능 지표라고 할 수 있는 선형 열관류율 산출 방법을 표준화하고 있다. 그리고 유럽연합에서는 건물 에너지성능 지침(EPBD, Energy Performance of Buildings Directive)을 통해 건물의 에너지성능인증서(EPC, Energy Performance Certificate) 발급과 함께 신축, 매매, 임대시 첨부서류화를 요구하고 있으며, 각 국에서는 EPC 발급을 위한 건물 에너지요구량 산출시 국제 표준상의 선형 열관류율을 이용 열교부위 전열량도 포함되게 함으로써, 열교 제거를 적극 유도하고 있다.

한편, 다차원 열류경로가 발생하는 열교부위의 선형 열관류율을 산출하기 위해서는 전문 지식이 필요한 2차원 전열해석이 수행되어야 한다는 제약이 있게 된다. 이러한 제약을 해결하기 위해 유럽연합 각 국에서는, 공인된 건축 디테일을 따라 설계한 경우 국가에서 제시하는 해당 열교부위에 대한 표준 선형 열관류율 값을 사용하게 하거나, 해당 국가의 건축 양식에 따라 자주 발생하는 열교부위들에 대한 선형 열관류율 값을 제시해줌으로써, 전열해석이 불가능한 비전문가도 손쉽게 선형 열관류율 값을 구할 수 있게 하고 있다.

기존 연구¹⁾결과 국내 내단열 공동주택에서 열교부위를 통한 손실열량은 연간 난방에너지 요구량의 8.9%를 차지할 정도로 막대하므로, 국내에서도 유럽연합 각 국에서와 마찬가지로 건축물에너지효율등급인증제도(국토해양부고시 제2009-1306호), 친환경주택의 건설기준 및 성능(국토해양부고시 제2010-421호) 등과 같은 국가 제도적 차원에서 공동주택 에너지성능 평가에는 반드시 열교부위를 통한 전열량이 포함되어야만 할 것으로 판단된다. 그리고 이 경우 비전문가도 손쉽게 국내 공동주택 열교부위의 선형 열관류율 값을 구할 수 있게 해주어야만 한다. 이에 본 연구에서는 국내 내단열 공동주택의 가장 대표적 열교부위라고 할 수 있는 벽-슬라브 접합부를 대상으로, 기존 내단열 적용시, 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시, 열교제거가 가능한 외단열 적용시의 세 가지 경우에 대해, 벽체 콘크리트 및 단열재의 여러 두께별로 선형 열

관류율 값을 예측할 수 있는 예측식을 도출함으로써, 추후 공동주택의 에너지성능 평가시 열교부위 전열량 반영을 위한 입력 자료로 활용될 수 있게 하고자 하였다.

1.2 연구의 방법 및 범위

벽-슬라브 접합부를 대상으로, 내단열 적용시, 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시, 외단열 적용시의 세 가지 경우에 대해, 선형 열관류율 값에 영향을 주는 주요 변수인 벽체 콘크리트 및 단열재 두께를 달리하며 2차원 정상상태 전열해석을 실시, 각각의 경우들에 대한 선형 열관류율 값들을 산출하였다.

내단열과 외단열 적용시의 선형 열관류율 예측식은, 선형 열관류율 산출식을 바탕으로 예측식의 형태를 설정한 후, SAS 프로그램을 이용 각 변수의 계수를 결정하여 도출하였다. 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시의 경우 벽체 구성이나 재료 두께 등은 내단열 적용시의 경우와 동일하고 단지 슬라브 하부에 보조단열재만 추가되어 선형 열관류율이 감소되는 것이므로, SAS 프로그램을 이용, 내단열 적용시 선형 열관류율 값들에 대한 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시 선형 열관류율 값들의 상관관계를 따져 예측식을 도출하였다.

2. 선형 열관류율 산출 방법 및 활용 현황

2.1 선형 열관류율의 산출 방법

열교란 건물 외피에서 구성 재료가 달라지거나 두께의 변화 혹은 실내외 면적 차이 등이 발생하여 균일하던 열저항에 변화가 생기는 부분을 말한다. 선형 열교(Linear Thermal Bridge)란 그림1과 같이 공간상의 3개 축 중 하나의 축을 따라 동일한 단면이 연속되는 열교를 뜻하며, 선형 열관류율(ψ , Linear Thermal Transmittance)이란 정상상태에서 선형 열교부위만을 통한 단위 길이당(그림1의 경우 Z축 방향), 단위 실내외 온도차당 전열량(W/mK)을 뜻하고, 클수록 단열성능이 떨어짐을 의미한다.

선형 열관류율의 산출 방법 및 산출시 경계조건 등은 ISO 10211²⁾에서 규정하고 있으며, 선형 열관류율은 식(1)을 통해 산출할 수 있다. 식(1)에서 ϕ 는 2차원 정상상태 전열해석 프로그램(Physibel Bisco, HEAT2 등)을 이용하여 산출할 수 있고, 이 값을 해석시 적용된 실내외 온도차로 나눈 후, 열교가 발생하지 않고 구조체 재료 구성이 연속되는 일반부위(그림2의 F1, F2부위)의 “열관류율×길이”의 합을 감해, 열교부위(그림2의 C부위)의 선형 열관류율 값을 구한다. 이때 열교부위에 이웃하는 일반 부위의 길이는 건축물의 연속되는 단면의 경우, 대칭선을 기준으로 하되, 이 길이는 적어도 벽체두께의 3배와 1,000 mm 중 더 큰 값이 되도록 하고 있다. 이상에서와 같이 열교부위 선형 열관류율을 구한 후 해당 열교부위 길이(그

1) 송승영, 구보경, 임재한, 「ISO 13790의 Monthly Calculation Method를 이용한 내단열 대비 외단열 공동주택의 열교 제거와 열용량 증가에 의한 난방 및 냉방 에너지절약 효과 분석」, 대한건축학회논문집(계획계) 26권 7호, 2010

2) ISO 10211 Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperature - Detailed calculation, 2007

림1의 경우 Z축 방향)를 곱해주면 외피 전열량 산출시 열교부위 전열량을 반영할 수 있게 된다.

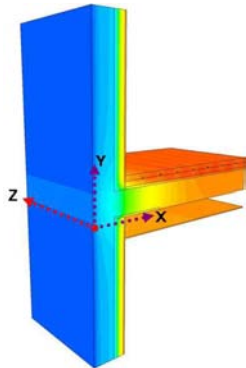


그림1. 선형 열교 사례

$$\psi = \frac{\Phi}{\theta_i - \theta_o} = \sum U_i l_i \quad (1)$$

여기에서,

- ψ : 선형 열관류율(W/mK)
- Φ : 평가대상 부위 전체를 통한 단위 길이당 전열량(W/m)
- θ_i : 실내측 설정온도(°C)
- θ_o : 실외측 설정온도(°C)
- U_i : 열교와 이웃하는 일반부위의 열관류율(W/m²K)
- l_i : U_i 의 열관류율 값을 가지는 일반부위 길이(m)

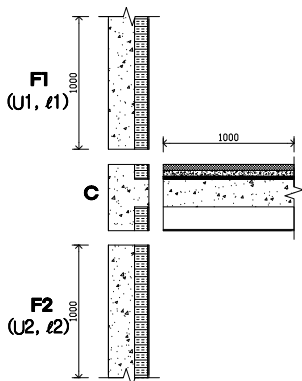


그림2. 선형 열관류율을 구하기 위한 단면 예 (C : 열교부위, F1~F2 : 열교부위에 이웃하는 일반 부위)

2.2 건물 에너지성능 평가시 선형 열관류율 활용 현황

유럽 연합 각 국에서는 건물 에너지성능 지침(EPBD, Energy Performance of Building Directive)의 발효로 인해, EPC 발급을 위한 건물의 전체 에너지요구량을 해석할 수 있는 계산 방법을 구축해야하는 상황이 되었다. EPBD에서 열교에 대한 내용은 명백하게 명시되지 않았지만, 열교는 건물 외피의 열적 특성 중 일부이므로 건물의 에너지성능 계산에 포함되어야 한다고, 실제 유럽 연합

각국에서 EPC 발급을 위한 건물 에너지성능 계산시 열교부위 전열량을 포함하고 있다.

열교부위 전열량은 해당 열교부위의 선형 열관류율에 열교부위 길이를 곱해 산출된다. 이 때 사용되는 선형 열관류율은 두 가지 방법으로 구할 수 있는데, ISO 10211 기준을 따라 2차원 전열해석을 통해 산출하는 해석적 방법과 법 규정 혹은 국가 표준에서 제시하는 대표적 열교부위별 선형 열관류율 표 혹은 카탈로그에서 선택하여 적용하는 단순 방법이 있다. 유럽 연합 각 국에서는 해석적 방법과 더불어 단순 방법을 모두 제공하고 있으며, 그 예로, 영국의 경우, 선형 열관류율 값을 인정받은 전문가가 산출하게 하거나 또는 공인된 건축 디테일에 대한 선형 열관류율 값을 표로 제시해주고 있다. 표로 제시된 값들은 창호 인방보의 경우 0.3~0.5W/mK, 창호 프레임의 경우 0.04~0.05W/mK, 구조체의 경우 -0.09~0.24W/mK 등으로, 전열해석을 통해 선형 열관류율을 산출할 수 없는 비전문가도 쉽게 이용할 수 있게 하고 있다.

프랑스에서도 건물 에너지성능 평가시 선형 열관류율을 이용, 열교부위 전열량을 포함시키고 있는데, 이 때 필요한 선형 열관류율은 그림3과 같은 표를 통해 선택할 수 있게 하고 있다. 또한 법적으로 선형 열관류율의 상한치를 두어 그 값을 넘지 못하도록 하여 열교부위에서의 단열성능 확보 및 열손실 방지를 위해 노력하고 있다.³⁾⁴⁾

이 밖에도 핀란드, 벨기에, 네덜란드 등 유럽 연합 각국에서 건물 에너지성능 평가시 선형 열관류율을 이용하여 산출된 열교부위 전열량을 포함하게 하고 있으며, 전문가의 전열해석을 통한 선형 열관류율 산출 뿐만 아니라 영국이나 프랑스의 경우와 마찬가지로 규정된 단면에 대한 선형 열관류율 참고값을 설정하여, 이 값을 이용할 수 있게 하고 있다.⁵⁾

한편 국가 규정은 아니지만, 1991년 독일에서 시작되어 2000년 들어서는 유럽전역으로 확산되고 있는 Passive House는 Thermal Bridge-Free Construction을 중시하고 있으며, Passive House 인증을 위한 단위면적당 연간 난방 및 냉방 에너지요구량 산출시 외피 구조체에서의 열교, 창호 프레임 부위의 열교, 건물과 지면사이에서의 열교 등을 통한 전열량을 모두 포함하게 하고 있다. 또한 열교부위 선형 열관류율은 반드시 0.01W/mK 이하로 유지되도록 하고 있으며, 이 값을 달성하기 위한 구조체 부위별 시공 디테일 예시 및 디테일 표준화 작업을 진행 중에 있다.⁶⁾

3) ASIEPD(Assessment and Improvement of the EPBD Impact), An effect handling of thermal bridges in the EPBD context- Final report of the IEE ASIEPI work on thermal bridges, ASIEPI, 2010

4) Réglementation thermique 2005, TH-U 1/5 Ponts Thermiques, CSTB, 2006

5) <http://www.buildup.eu>

6) 송승영, 구보경, 이병인, 「정적 열부하 계산법에 의한 열교제거형 외단열 공동주택의 동단위 연간 난방부하 절감 효과 분석」, 대한건축학회논문집(계획계), 25권 8호, 2009

| Mur | A | B | C | D | E |
|---|-----------------------|-------|--------------------|-----------------------|-------|
| | Isolé par l'intérieur | | Isolation répartie | Isolé par l'extérieur | |
| | Maçonnerie | Béton | | Maçonnerie | Béton |
| Plancher bas | | | | | |
| Planchers bas à entrevous isolant | | | | | |
| | 0.30 | 0.33 | 0.28 | 0.47 | 0.74 |
| Planchers bas en béton ou à entrevous béton ou terre cuite isolés en sous-face $R_{e} \geq 1.4(\text{m}^2\text{K/W})$ | | | | | |
| | 0.60 | 0.70 | 0.48 | 0.49 | 0.79 |
| | | | | | |
| | 0.51 | 0.61 | 0.45 | 0.47 | 0.76 |
| | | | | | |
| | 0.55 | 0.66 | 0.40 | 0.28 | 0.39 |
| Planchers bas en béton ou à entrevous béton ou terre cuite isolés en sous chape $R_{e} \geq 2(\text{m}^2\text{K/W})$ | | | | | |
| | 0.07 | 0.07 | 0.10 | 0.38 | 0.62 |
| | | | | | |
| | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.25 | 0.35 |

그림3. 프랑스의 열교부위별 선형 열관류율 카탈로그 (Réglementation thermique 2005-Règles Th-U Fascicule 5/5) 예시

3. 내, 외단열 공동주택 벽-슬라브 접합부 열교부위의 선형 열관류율 예측

3.1 선형 열관류율 예측 변수 선정

벽-슬라브 접합부에서 선형 열관류율 산출시 영향을 주는 변수, 즉 그림 4과 같은 단면에서 전열량에 영향을 주는 주요 변수는 벽체 구성재료(콘크리트, 단열재 등)의 두께 및 열전도율, 바닥 구성재료(콘크리트, 기포 콘크리트, 시멘트 몰탈 등)의 두께 및 열전도율 등이 있다. 공동주택에서 바닥 구조체의 경우, 대부분 층별로 콘크리트

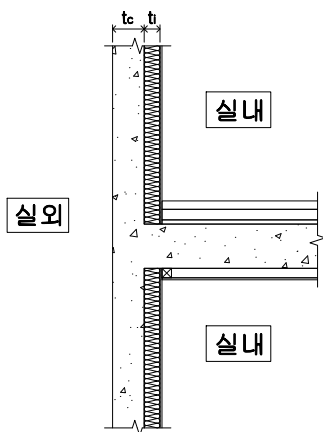


그림4. 선형 열관류율 예측식 도출을 위한 벽-슬라브 접합부 단면(내단열)

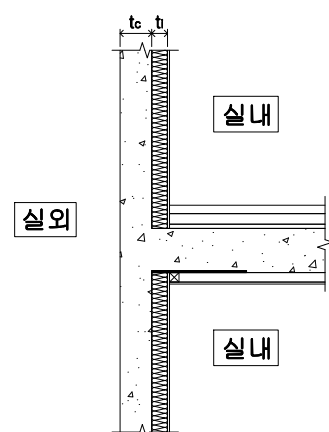


그림5. 선형 열관류율 예측식 도출을 위한 벽-슬라브 접합부 단면 (내단열 및 슬라브 하부 보조단열재(450mm×10mm XPS) 삽입)

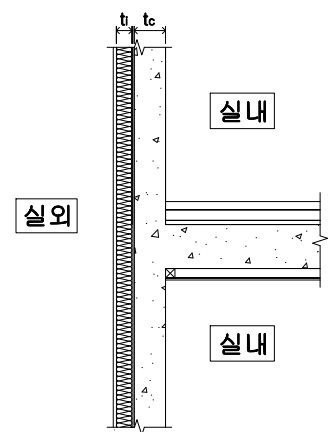


그림6. 선형 열관류율 예측식 도출을 위한 벽-슬라브 접합부 단면 (외단열)

두께가 변하지 않고, 구성 재료 또한 반복하여 적용이 되고 있으므로 바닥 구성재료의 두께 및 열전도율은 고정하는 것으로 하고, 공동주택 전후면 외벽, 측벽 등 부위에 따라 달라지게 되는 벽체의 콘크리트 및 단열재의 두께 (그림4~6에서 t_c 및 t_i)만을 변화시켜 선형 열관류율 예측식을 도출하는 것으로 하였다.

선형 열관류율 산출식(식(1))에서 전체 단면의 전열량 (Φ)은, 벽체 콘크리트 및 단열재의 열저항에 따라 달라질 것이며, 식(2)와 같은 표현이 가능하다. 이를 함수로 나타내면 식(3)과 같이 되고, 이를 다시 식(1)에 대입하면 식(4)와 같은 표현이 가능하다.

$$\Phi \propto \frac{1}{R_c + R_i} \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{a}{bR_c + cR_i + d} + e \quad (3)$$

$$\psi = \frac{a}{bR_c + cR_i + d} + e - \frac{f}{R_T} \quad (4)$$

- R_c : 벽체 콘크리트 열저항($\text{m}^2\text{K/W}$)
- R_i : 벽체 단열재 열저항($\text{m}^2\text{K/W}$)
- R_T : 벽체 총 열저항($\text{m}^2\text{K/W}$)
- a~f : 각 항의 계수

본 연구에서는 식(4)를 벽-슬라브 접합부의 내단열 및 외단열 적용시 선형 열관류율 예측식 형태로 설정하고⁷⁾ 각 변수의 계수(a~f)를 회귀분석을 통하여 산출하였다.

3.2 전열해석을 통한 선형 열관류율 산출

전열해석을 통하여 선형 열관류율을 산출하고 이 값들을 토대로 예측식을 도출한 후, 식으로 예측한 값과 전열 해석 결과로 나온 값을 상호 비교하였다.

(1) 전열해석 개요

Physibel Bisco 프로그램을 이용하여 그림4~그림6 부위의 벽체 콘크리트 및 단열재 두께별 선형 열관류율을 산출하였다. Physibel Bisco 프로그램은 2차원 정상상태 해석 프로그램으로, triangular mesh의 auto generation이 가능하다.

ISO10211에 따른 열교부위 모델링 기준에 맞추어 각 부위별 모델링을 수행하였고, 전열해석에 적용된 실내외 설정온도 및 실내외 표면 열전달저항, 재료 물성치는 표1~표2와 같다. 실내외 표면 열전달저항 값은 선형 열관류율 산출 방법의 국제 표준인 ISO 10211에서 규정하고 있는 바와 같이, BS EN ISO 6946:1997(Building components and building elements Part 4: Thermal resistance and thermal transmittance Calculation method)을 참조하였다. 또한 재료 물성치는 건축물의 에너지절약 설계기준 해설서 중 열관류율 계산을 위한 건축 자재의 열전도율 표를 참조하였고, 외단열 시스템 구성 자재의 경우 시편을 제작하여 공인시험기관을 통해 측정된 물성을 적용하였다.

그림4~그림6과 같은 단면에서 벽체 콘크리트 두께는 150mm, 200mm, 300mm인 경우로 하여 발코니 확장을 했을 때의 외벽과 축벽의 콘크리트 두께를 모두 반영할 수 있게 하였고, 단열재는 건축물의 에너지절약설계기준 상의 가등급 단열재를 적용한 경우로 하고 두께를 45mm~160mm로 하여 선형 열관류율을 산출하였다. 단열재두께는 건축물의 에너지절약설계기준 상의 [별표2]를 참조하여 지역별, 부위별 단열재 두께(가등급 단열재 사용시) 중 단열재 최소 두께 및 최대 두께를 참조하여 설정하였다.

이상의 설정은 중부, 남부, 제주도 지역 공동주택의 발코니 확장 전후면 외벽 및 축벽-슬라브 접합부 열교부위 모두 포함 가능한 범위이다.

평가 대상 부위의 구조체 단면 구성은 표3과 같다. 바닥 구조체의 경우, 주택건설기준 등에 관한 규정에서 공동주택 바닥충격음 차단성능을 확보하기 위한 표준 바닥 구조 단면상세를 제시하고 있으며, 콘크리트 슬라브 두께 210mm 이상 + 단열재(또는 완충재) 20mm 이상 + 경량기포 콘크리트 40mm 이상 + 마감 모르타 40mm 이상으로 하도록 하고 있다. 표3의 바닥 단면 구성은 최근 일반적으로 적용되고 있는 공동주택의 바닥 단면 구성 현황을 토대로 설정한 것이다. 한편 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시(그림5 참조), 보조단열재는 최근 현황을 반영, 슬라브 하부에 깊이 450mm×두께 10mm의 XPS를 삽입하는 것으로 설정하였다.

(2) 선형 열관류율 산출 결과

전열해석을 통해 산출한 각 부위별 선형 열관류율 값은 표7에서와 같다.

7) 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시는 내단열 적용시에 대한 상관관계를 따져 예측식을 도출하는 것으로 함.

표1. 실내외 설정 조건

| 실 내 | | 실 외 | |
|------|-------------------------|------|-------------------------|
| 설정온도 | 표면 열전달저항 | 설정온도 | 표면 열전달저항 |
| 20℃ | 0.13m ² ·K/W | 0℃ | 0.04m ² ·K/W |

표2. 재료 물성치

| 재료명 | 열전도율(W/mK) |
|---------------------|------------|
| 콘크리트 | 1.6 |
| 경량기포콘크리트 | 0.13 |
| 시멘트몰탈 | 1.4 |
| 석고보드 | 0.18 |
| 단열재(가등급) | 0.034 |
| 압출법보온판 | 0.029 |
| (외단열) 접착제 | 0.353 |
| (외단열) 보강 메쉬 + 베이스코팅 | 0.181 |
| (외단열) 마감재 | 0.196 |

표3. 구조체 단면 구성

| 내단열 벽체 단면 구성 | 실내 | |
|--------------|----------------------|---------------------|
| | 석고보드 | 9.5mm |
| 단열재 | 45~160mm (ti) | |
| 콘크리트 | 150, 200, 300mm (tc) | |
| 외단열 벽체 단면 구성 | 실외 | |
| | 콘크리트 | 150, 200, 300mm(tc) |
| 접착제 | 4mm | |
| 단열재 | 45~160mm(ti) | |
| 보강메쉬+베이스코팅재 | 2.5mm | |
| 마감재 | 15mm | |
| 슬라브 단면 구성 | 실외 위 | |
| | 시멘트몰탈 | 40mm |
| 기포콘크리트 | 50mm | |
| 압출법보온판 | 20mm | |
| 콘크리트 | 210mm | |
| 중공층 | 45mm | |
| 석고보드 | 9.5mm | |
| | 아래 | |

3.3 선형 열관류율 예측식 도출 결과

(1) 예측식 도출 개요

선형 열관류율 예측식(식(4))의 각 계수는 SAS 프로그램을 이용하여 결정하였다. 비선형회귀모형 및 Gauss-Newton 방법을 통해 계수를 결정하였다.

일반적으로 어떠한 값을 예측하기 위한 회귀식을 도출할 때, 회귀식의 적합도는 결정계수(R²), F비 등의 값으로 측정할 수 있는데, 기본적으로 F비의 값은 특정변수(들)로 설명된 분산과 설명 안 된 분산의 비(ratio)를 취하여 구하게 된다.(식(5) 참조)

$$F = \frac{\text{회귀분산(설명된분산)}}{\text{오차분산(설명안된분산)}} = \frac{\text{회귀제곱평균}}{\text{오차제곱평균}} \quad (5)$$

이렇게 구해진 F비의 값이 주어진 유의도 수준에서 F비의 임계값보다 크면 독립변수와 종속변수 간에 유의미한 관계가 성립한다고 볼 수 있다. F비의 임계값은 회귀모형과 잔차의 자유도 값을 통해 F 분포표에서 확인해야 하나 여기에서는 간단하게 유의확률(p) 값으로 유의 수준을 확인하였다.

또한 결정계수 R^2 은 독립변수의 종속변수에 대한 설명력의 크기를 나타내는 척도로 식(6)으로 구할 수 있고, 이 값이 1에 가까울수록 독립변수의 설명력이 크고 추정된 회귀식의 적합도가 높은 것으로 평가할 수 있다.

$$R^2 = \frac{\text{회귀제곱합}}{\text{총제곱합}} \quad (6)$$

(2) 예측식 도출 결과

① 내단열 적용시

벽-슬라브 접합부의 선형 열관류율 예측식은 식(7)과 같이 나타났고, 유의도는 표4와 같다.

$$\psi_i = \frac{2.7781}{11.2775R_c + 1.0019R_i + 2.5534} - \frac{0.1554}{R_T} + 0.3210 \quad (7)$$

ψ_i : 내단열 적용시 선형 열관류율 예측치

본 예측식 도출을 위한 회귀분석 결과, F비 값은 44,046.3으로 매우 크며, 유의확률이 0.0001보다 작아 모형과 변수들이 매우 유의함을 알 수 있다(표4 참조). 또한 결정계수 $R^2=0.9995$ 로 자료 전체의 산포 중에서 약 99.95%가 함수에 의하여 설명되는 것으로 나타났다. 전열 해석에 의한 선형 열관류율 값과 예측식을 통해 예측된 선형 열관류율 값을 비교한 결과는 그림7, 표7에서와 같다. 전열 해석과 예측식을 통한 선형 열관류율 값의 오차는 $\pm 0.003 \text{ W/mK}$ 내에 존재하는 것으로 나타났다(표7 참조).

② 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시

내단열 시스템 적용시 선형 열관류율과의 상관관계(그림8 참조)로 선형 열관류율 예측식을 도출하였으며 그 결과는 식(8)과 같다.

$$\psi_{ai} = 0.722\psi_i + 0.083 \quad (8)$$

ψ_{ai} : 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시 선형 열관류율 예측치

내단열 적용시 선형 열관류율과의 상관관계에 근거한 본 예측식은, F비 값이 26,719.5로 매우 크며, 유의확률이 0.0001보다 작아 모형과 변수들이 매우 유의함을 알 수 있다(표5 참조). 또한 결정계수 $R^2=1.0000$ 로 자료 전체의 모든 산포가 함수에 의하여 설명되는 것으로 나타났다. 전열해석과 예측식에 의한 각각의 선형 열관류율은 표7에서와 같다. 전열 해석과 예측식을 통한 선형 열관류율 값의 오차는 $\pm 0.003 \text{ W/mK}$ 내에 존재하는 것으로 나타났다(표7 참조).

③ 외단열 적용시

벽-슬라브 접합부의 선형 열관류율 예측식은 식(9)와 같고, 유의도는 표6과 같다.

$$\psi_o = \frac{0.1946}{0.8910R_c + R_i + 0.3763} + \frac{0.1752}{R_T} + 0.000768 \quad (9)$$

ψ_o : 외단열 적용시 선형 열관류율 예측치

본 예측식 도출을 위한 회귀분석 결과, F비 값이 279,999로 매우 크며, 유의확률이 0.0001보다 작아 모형과 변수들이 매우 유의함을 알 수 있다(표6 참조). 또한 결정계수 $R^2=1.0000$ 로 자료 전체의 모든 산포가 함수에 의하여 설명되는 것으로 나타났다. 전열해석에 의한 선형 열관류율 값과 예측식을 통해 예측된 선형 열관류율 값을 비교한 결과는 그림9, 표7에서와 같다. 전열 해석과 예측식을 통한 선형 열관류율 값의 오차는 $\pm 0.001 \text{ W/mK}$ 내에 존재하는 것으로 나타났다(표7 참조).

표4. 선형 열관류율 예측식의 유의도(내단열 적용시)

| 모형 | 자유도 | 제곱합 | 제곱평균 | F비 값 | 유의확률(p) |
|------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 회귀모형 | 4 | 0.2057 | 0.0514 | 44,046.3 | <0.0001 |
| 잔차 | 46 | 0.000054 | 1.168E-6 | | |
| 합계 | 50 | 0.2058 | | | |

표5. 선형 열관류율 예측식의 유의도(내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시)

| 모형 | 자유도 | 제곱합 | 제곱평균 | F비 값 | 유의확률(p) |
|-------|-----|-------|-------|----------|---------|
| 회귀 모형 | 1 | 0.070 | 0.070 | 26,719.5 | <0.0001 |
| 잔차 | 49 | 0.000 | 0.000 | | |
| 합계 | 50 | 0.070 | | | |

표6. 선형 열관류율 예측식의 유의도(외단열 적용시)

| 모형 | 자유도 | 제곱합 | 제곱평균 | F비 값 | 유의확률(p) |
|------|-----|----------|---------|---------|---------|
| 회귀모형 | 4 | 0.0847 | 0.0212 | 279,999 | <0.0001 |
| 잔차 | 46 | 3.477E-6 | 7.56E-8 | | |
| 합계 | 50 | 0.0847 | | | |

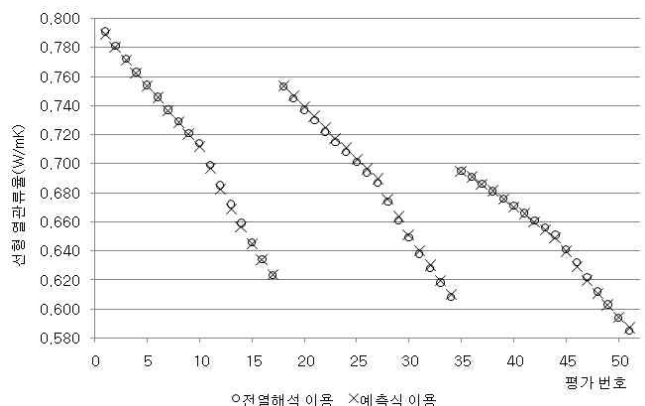


그림7. 전열해석과 예측식에 의한 선형 열관류율 비교(내단열 적용시)

표7. 전열해석에 의한 선형 열관류율의 산출 결과와 예측식을 통한 예측 결과

| 평가 부위 번호 | 콘크리트 벽체두께 (m) | 콘크리트 열저항 (m ² K/W) | 단열재 두께 (m) | 단열재 열저항 (m ² K/W) | 내단열 적용시 | | | 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시 | | 외단열 적용시 | | |
|----------------|---------------------|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | | | | 벽체 총열저항 (m ² K/W) | 전열해석 선형 열관류율 (W/mK) | 예측식 선형 열관류율 (W/mK) | 전열해석 선형 열관류율 (W/mK) | 예측식 선형 열관류율 (W/mK) | 벽체 총열저항 (m ² K/W) | 전열해석 선형 열관류율 (W/mK) | 예측식 선형 열관류율 (W/mK) |
| 1 | 0.15 | 0.094 | 0.045 | 1.324 | 1.640 | 0.791 | 0.789 | 0.655 | 0.653 | 1.692 | 0.213 | 0.213 |
| 2 | 0.15 | 0.094 | 0.050 | 1.471 | 1.787 | 0.781 | 0.780 | 0.647 | 0.646 | 1.838 | 0.197 | 0.197 |
| 3 | 0.15 | 0.094 | 0.055 | 1.618 | 1.934 | 0.772 | 0.772 | 0.640 | 0.640 | 1.984 | 0.183 | 0.183 |
| 4 | 0.15 | 0.094 | 0.060 | 1.765 | 2.081 | 0.763 | 0.763 | 0.633 | 0.634 | 2.132 | 0.170 | 0.170 |
| 5 | 0.15 | 0.094 | 0.065 | 1.912 | 2.228 | 0.754 | 0.754 | 0.627 | 0.627 | 2.278 | 0.160 | 0.160 |
| 6 | 0.15 | 0.094 | 0.070 | 2.059 | 2.375 | 0.746 | 0.745 | 0.621 | 0.621 | 2.427 | 0.150 | 0.150 |
| 7 | 0.15 | 0.094 | 0.075 | 2.206 | 2.522 | 0.737 | 0.736 | 0.615 | 0.615 | 2.577 | 0.142 | 0.142 |
| 8 | 0.15 | 0.094 | 0.080 | 2.353 | 2.669 | 0.729 | 0.728 | 0.609 | 0.609 | 2.725 | 0.134 | 0.134 |
| 9 | 0.15 | 0.094 | 0.085 | 2.500 | 2.817 | 0.721 | 0.720 | 0.604 | 0.603 | 2.865 | 0.128 | 0.128 |
| 10 | 0.15 | 0.094 | 0.090 | 2.647 | 2.964 | 0.714 | 0.712 | 0.598 | 0.597 | 3.012 | 0.122 | 0.122 |
| 11 | 0.15 | 0.094 | 0.100 | 2.941 | 3.258 | 0.699 | 0.697 | 0.588 | 0.586 | 3.311 | 0.111 | 0.111 |
| 12 | 0.15 | 0.094 | 0.110 | 3.235 | 3.552 | 0.685 | 0.683 | 0.579 | 0.576 | 3.597 | 0.102 | 0.102 |
| 13 | 0.15 | 0.094 | 0.120 | 3.529 | 3.846 | 0.672 | 0.669 | 0.569 | 0.566 | 3.891 | 0.095 | 0.095 |
| 14 | 0.15 | 0.094 | 0.130 | 3.824 | 4.140 | 0.659 | 0.657 | 0.560 | 0.557 | 4.184 | 0.088 | 0.088 |
| 15 | 0.15 | 0.094 | 0.140 | 4.118 | 4.434 | 0.646 | 0.645 | 0.552 | 0.549 | 4.484 | 0.082 | 0.082 |
| 16 | 0.15 | 0.094 | 0.150 | 4.412 | 4.728 | 0.634 | 0.634 | 0.544 | 0.541 | 4.785 | 0.077 | 0.077 |
| 17 | 0.15 | 0.094 | 0.160 | 4.706 | 5.022 | 0.623 | 0.624 | 0.536 | 0.533 | 5.076 | 0.073 | 0.073 |
| 18 | 0.2 | 0.125 | 0.045 | 1.324 | 1.671 | 0.753 | 0.753 | 0.628 | 0.627 | 1.724 | 0.210 | 0.210 |
| 19 | 0.2 | 0.125 | 0.050 | 1.471 | 1.818 | 0.745 | 0.747 | 0.621 | 0.622 | 1.869 | 0.194 | 0.194 |
| 20 | 0.2 | 0.125 | 0.055 | 1.618 | 1.965 | 0.737 | 0.740 | 0.615 | 0.617 | 2.016 | 0.180 | 0.180 |
| 21 | 0.2 | 0.125 | 0.060 | 1.765 | 2.112 | 0.730 | 0.732 | 0.609 | 0.612 | 2.165 | 0.168 | 0.168 |
| 22 | 0.2 | 0.125 | 0.065 | 1.912 | 2.260 | 0.722 | 0.725 | 0.604 | 0.606 | 2.309 | 0.158 | 0.158 |
| 23 | 0.2 | 0.125 | 0.070 | 2.059 | 2.407 | 0.715 | 0.718 | 0.599 | 0.601 | 2.457 | 0.149 | 0.148 |
| 24 | 0.2 | 0.125 | 0.075 | 2.206 | 2.554 | 0.708 | 0.710 | 0.593 | 0.596 | 2.604 | 0.140 | 0.140 |
| 25 | 0.2 | 0.125 | 0.080 | 2.353 | 2.701 | 0.701 | 0.703 | 0.588 | 0.591 | 2.755 | 0.133 | 0.133 |
| 26 | 0.2 | 0.125 | 0.085 | 2.500 | 2.848 | 0.694 | 0.696 | 0.583 | 0.585 | 2.899 | 0.126 | 0.126 |
| 27 | 0.2 | 0.125 | 0.090 | 2.647 | 2.995 | 0.687 | 0.689 | 0.579 | 0.580 | 3.049 | 0.120 | 0.120 |
| 28 | 0.2 | 0.125 | 0.100 | 2.941 | 3.289 | 0.674 | 0.676 | 0.570 | 0.571 | 3.344 | 0.110 | 0.110 |
| 29 | 0.2 | 0.125 | 0.110 | 3.235 | 3.583 | 0.661 | 0.663 | 0.561 | 0.562 | 3.636 | 0.101 | 0.101 |
| 30 | 0.2 | 0.125 | 0.120 | 3.529 | 3.877 | 0.649 | 0.651 | 0.552 | 0.553 | 3.922 | 0.094 | 0.094 |
| 31 | 0.2 | 0.125 | 0.130 | 3.824 | 4.171 | 0.638 | 0.640 | 0.545 | 0.545 | 4.219 | 0.087 | 0.087 |
| 32 | 0.2 | 0.125 | 0.140 | 4.118 | 4.465 | 0.628 | 0.630 | 0.538 | 0.538 | 4.525 | 0.082 | 0.082 |
| 33 | 0.2 | 0.125 | 0.150 | 4.412 | 4.760 | 0.618 | 0.620 | 0.531 | 0.530 | 4.808 | 0.077 | 0.077 |
| 34 | 0.2 | 0.125 | 0.160 | 4.706 | 5.054 | 0.608 | 0.610 | 0.524 | 0.524 | 5.102 | 0.073 | 0.073 |
| 35 | 0.3 | 0.188 | 0.045 | 1.324 | 1.734 | 0.695 | 0.695 | 0.584 | 0.585 | 1.786 | 0.203 | 0.203 |
| 36 | 0.3 | 0.188 | 0.050 | 1.471 | 1.881 | 0.691 | 0.690 | 0.580 | 0.581 | 1.934 | 0.188 | 0.188 |
| 37 | 0.3 | 0.188 | 0.055 | 1.618 | 2.028 | 0.686 | 0.686 | 0.576 | 0.578 | 2.079 | 0.175 | 0.175 |
| 38 | 0.3 | 0.188 | 0.060 | 1.765 | 2.175 | 0.681 | 0.681 | 0.572 | 0.575 | 2.227 | 0.164 | 0.164 |
| 39 | 0.3 | 0.188 | 0.065 | 1.912 | 2.322 | 0.676 | 0.676 | 0.568 | 0.571 | 2.375 | 0.154 | 0.154 |
| 40 | 0.3 | 0.188 | 0.070 | 2.059 | 2.469 | 0.671 | 0.670 | 0.565 | 0.567 | 2.519 | 0.145 | 0.145 |
| 41 | 0.3 | 0.188 | 0.075 | 2.206 | 2.616 | 0.666 | 0.665 | 0.561 | 0.563 | 2.667 | 0.137 | 0.137 |
| 42 | 0.3 | 0.188 | 0.080 | 2.353 | 2.763 | 0.661 | 0.660 | 0.558 | 0.559 | 2.817 | 0.130 | 0.130 |
| 43 | 0.3 | 0.188 | 0.085 | 2.500 | 2.910 | 0.656 | 0.655 | 0.554 | 0.556 | 2.959 | 0.124 | 0.124 |
| 44 | 0.3 | 0.188 | 0.090 | 2.647 | 3.057 | 0.651 | 0.649 | 0.550 | 0.552 | 3.106 | 0.118 | 0.118 |
| 45 | 0.3 | 0.188 | 0.100 | 2.941 | 3.351 | 0.641 | 0.639 | 0.544 | 0.545 | 3.401 | 0.108 | 0.108 |
| 46 | 0.3 | 0.188 | 0.110 | 3.235 | 3.646 | 0.632 | 0.629 | 0.537 | 0.537 | 3.704 | 0.100 | 0.100 |
| 47 | 0.3 | 0.188 | 0.120 | 3.529 | 3.940 | 0.622 | 0.620 | 0.530 | 0.531 | 3.984 | 0.092 | 0.093 |
| 48 | 0.3 | 0.188 | 0.130 | 3.824 | 4.234 | 0.612 | 0.611 | 0.523 | 0.524 | 4.292 | 0.086 | 0.086 |
| 49 | 0.3 | 0.188 | 0.140 | 4.118 | 4.528 | 0.603 | 0.602 | 0.517 | 0.518 | 4.587 | 0.081 | 0.081 |
| 50 | 0.3 | 0.188 | 0.150 | 4.412 | 4.822 | 0.594 | 0.594 | 0.511 | 0.512 | 4.878 | 0.076 | 0.076 |
| 51 | 0.3 | 0.188 | 0.160 | 4.706 | 5.116 | 0.585 | 0.587 | 0.504 | 0.507 | 5.155 | 0.072 | 0.072 |

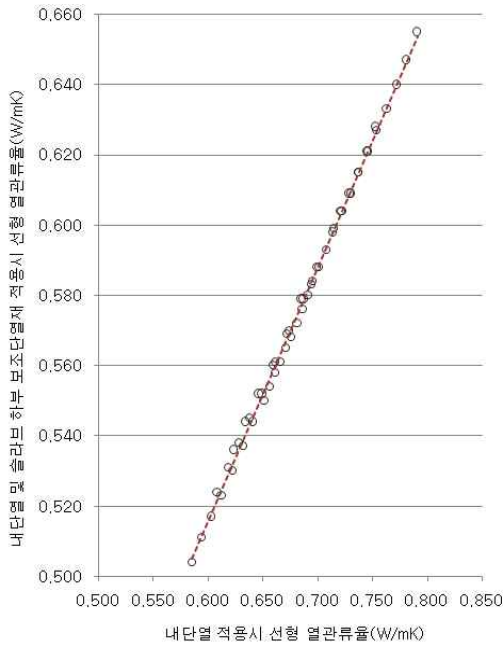


그림8. 내단열 적용시와 내단열 및 슬라브 하부 보조단열 적용시 선형 열관류율 상관 관계

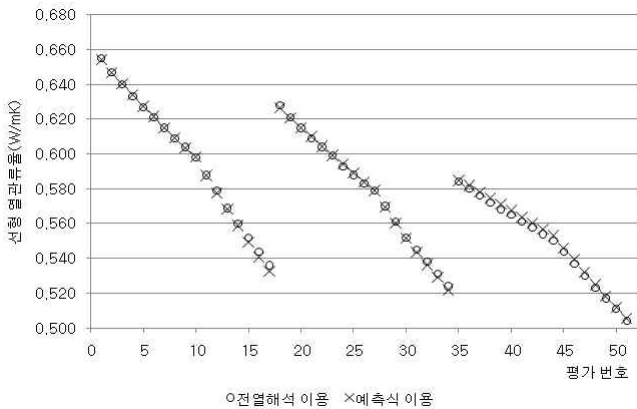


그림9. 전열해석과 예측식에 의한 선형 열관류율 비교 (외단열 적용시)

4. 결 론

국제 표준인 ISO에서는 열교부위의 단열성능 지표로서 선형 열관류율 산출 방법을 표준화하고 있고, 유럽연합 각 국에서는 건물 에너지성능인증서(EPC) 발급을 위한 건물 에너지성능 평가시, 선형 열관류율을 이용, 열교부위 전열량이 포함되게 함으로써 열교 제거를 적극 유도하고 있다. 2차원 열류경로가 발생하는 선형 열교부위의 선형 열관류율 값은 전문가의 전열해석으로 구하게 하거나 혹은 주요 열교유형별 선형 열관류율 표 혹은 카탈로그를 국가 차원에서 제공해줌으로써 비전문가도 손쉽게 적용할 수 있게 하고 있다.

국내 대부분의 내단열 공동주택에서는 반복적으로 발생하는 열교부위를 통한 전열량이 전체 난방 에너지요구량의 상당 부분을 차지하고 있으므로 국내에서도 유럽연합 각 국에서와 마찬가지로 건축물에너지효율등급인증제도 등과 같은 국가 제도적 차원에서 공동주택 에너지 성능 평가에는 반드시 열교부위를 통한 전열량이 포함되어야 할 것으로 판단되며, 이 경우 비전문가도 손쉽게 열교부위 선형 열관류율 값을 구할 수 있게 해주어야만 한다. 이에 본 연구에서는 국내 공동주택의 대표적 열교부위인 벽-슬라브 접합부 열교부위의 단열공법별, 벽체 콘크리트 및 단열재 두께별 선형 열관류율을 예측할 수 있는 예측식을 도출하고자 하였고, 그 결과 2차원 전열해석에 의한 선형 열관류율 산출값과 비교했을 때, 유의수준 $p < 0.0001$ 의 매우 유의한 예측식이 도출되었다.

본 연구 결과는 벽-슬라브 접합부 열교부위에 대해 적용 가능한 것으로, 추후 여타 열교부위에 대한 선형 열관류율 예측식 도출을 계속 진행할 예정이다.

참고문헌

1. 김두섭, 강남준, 『회귀분석: 기초와 응용』, 나남출판, 2008
2. 송승영, 「공동주택 외피 접합부 열교부위의 최적 단열상세 결정 방법에 관한 연구」, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1998
3. 송승영, 이수진, 「건물에너지효율등급인증제도 개선방향에 관한 연구」, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 27권 1호, 2007
4. 송승영, 구보경, 이병인, 「정적 열부하 계산법에 의한 열교 제거형 외단열 공동주택의 동단위 연간 난방부하 절감 효과 분석」, 대한건축학회논문집 계획계, 25권 8호, 2009
5. 송승영, 구보경, 임재한, 「ISO 13790의 Monthly Calculation Method를 이용한 내단열 대비 외단열 공동주택의 열교 제거와 열용량 증가에 의한 난방 및 냉방 에너지절약 효과 분석」, 대한건축학회논문집 계획계, 26권 7호, 2010
6. A. Ben Larbi, Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings, Energy and Buildings 37, p.p.945~951, 2005
7. ASIEPD(Assessment and Improvement of the EPBD Impact), An effect handling of thermal bridges in the EPBD context- Final report of the IEE ASIEPI work on thermal bridges, ASIEPI, 2010
8. BS EN ISO 6946 Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method, 1997
9. ISO 10211 Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperature - Detailed calculation, 2007

(接受: 2011. 5. 5)