



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

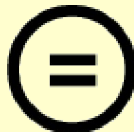
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

바닥 복사 난방 시스템이 적용된
공동주택의 벽체-슬래브 접합부
선형 열관류율 분석

2019년 2월

부경대학교 대학원

건축공학과

김 민 성

공학석사 학위논문

바닥 복사 난방 시스템이 적용된
공동주택의 벽체-슬래브 접합부
선형 열관류율 분석

지도교수 이 규 남

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 2월

부경대학교 대학원

건축공학과

김 민 성

이 논문을 김민성의 공학석사 학위논문으로 인준함

2019년 2월 22일

위 원 장 공학박사 정 근 주



위 원 공학박사 이 규 남



위 원 공학박사 정 철 우



목 차

I 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구의 방법 및 범위	3
II 열교 및 선형 열관류율 이론	5
1. 열교 개요	5
2. 선형 열관류율 정의	8
3. 주요 부위의 선형 열관류율 기본 값	10
4. 실측 데이터를 활용한 선형 열관류율 분석	12
III 바닥 복사 난방 시스템의 열교 영향도 분석 방법	16
1. 시뮬레이션 모델 건물 개요	16
2. 시뮬레이션 모델 해석 조건	22
IV 시뮬레이션 해석 결과	25
1. 측벽의 선형 열관류율 해석 결과	25
2. 전면벽의 선형 열관류율 해석 결과	33
3. 선형 열관류율 고찰 및 활용 방안	43
V 선형 열관류율을 활용한 에너지 해석	45
1. 선형 열관류율의 에너지 해석 적용 방법	45
2. 바닥 복사 난방 시스템 적용 건물의 열교 개선 방안	49
가. 저온수 난방 시스템	49

나. 창호 프레임의 위치 조절.....	50
3. 에너지 해석 개선 방안.....	53
VI 결 론.....	54
참고문헌.....	56



표 목 차

표 2.1 건물 에너지 소비량에서 열교의 영향 및 비중	6
표 2.2 국가 별 열교 개선 시 에너지 절감 비율	7
표 2.3 국가 별 열교의 비중	7
표 3.1 시뮬레이션 모델	18
표 3.2 구조체 구성요소	19
표 3.3 시뮬레이션 케이스 별 모델 형상	20
표 3.4 시뮬레이션 케이스	21
표 3.5 실내외 설정 온도 및 표면 열전달 저항	22
표 3.6 대류 열전달 계수, h	23
표 3.7 벽체 재료 물성	23
표 3.8 슬래브 재료 물성	24
표 4.1 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(비난방)	26
표 4.2 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 50℃)	26
표 4.3 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 60℃)	27
표 4.4 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 70℃)	27
표 4.5 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(비난방)	28
표 4.6 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 50℃)	28
표 4.7 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 60℃)	29
표 4.8 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 70℃)	29
표 4.9 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포 비교	30
표 4.10 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(비난방)	34

표 4.11 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 50℃)	34
표 4.12 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 60℃)	35
표 4.13 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 70℃)	35
표 4.14 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(비난방)	36
표 4.15 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 50℃)	37
표 4.16 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 60℃)	38
표 4.17 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 70℃)	39
표 4.18 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포 비교(실내측)	40
표 4.19 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포 비교(실외측)	41
표 4.20 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교	43
표 4.21 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교	44
표 5.1 시뮬레이션 해석 케이스	48
표 5.2 해석 케이스 별 연간 난방 에너지 소비량 비교	48
표 5.3 난방수 공급 온도 별 연간 난방 에너지 소비량	49
표 5.4 창호 프레임의 위치에 따른 선형 열관류율 비교	51
표 5.5 창호 프레임의 위치에 따른 연간 난방 에너지 소비량 비교	52

그림 목 차

그림 1.1 연구 흐름도	4
그림 2.1 공동주택의 열교 현상	5
그림 2.2 선형 열관류율 계산 예시	19
그림 2.3 선형 열관류율 기본 값 매개변수	10
그림 2.4 선형 열관류율 기본 값	11
그림 2.5 현장 측정 실험 장소	12
그림 2.6 열교 부위 열류 센서 설치 상태	13
그림 2.7 선형 열관류율 시간 변화	14
그림 2.8 선형 열관류율 비교	14
그림 3.1 분석 대상 공동주택 평면도	17
그림 3.2 확장형 발코니 전면벽 상세	17
그림 4.1 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교	31
그림 4.2 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교	42
그림 5.1 건물 에너지 해석 시뮬레이션 모델	46
그림 5.1 바닥 복사 난방 시스템 모델	47

Analysis of Wall-Slab Joints Linear Thermal Transmittance in Apartment Building with Radiant Floor Heating System

Minseong Kim

Department of Architectural Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The purpose of this paper is to study an energy analysis method considering linear thermal bridge at wall-slab joints in apartment building with radiant floor heating system. In order to analyze linear thermal bridge of wall-slab joints, linear thermal transmittance was used to represent heat loss at thermal bridges. Linear thermal transmittances were calculated from the heat flow through the wall and the equation defined by ISO 10211. The heat flow was simulated by heat transfer program 'PHYSIBEL TRISCO v13.0w'.

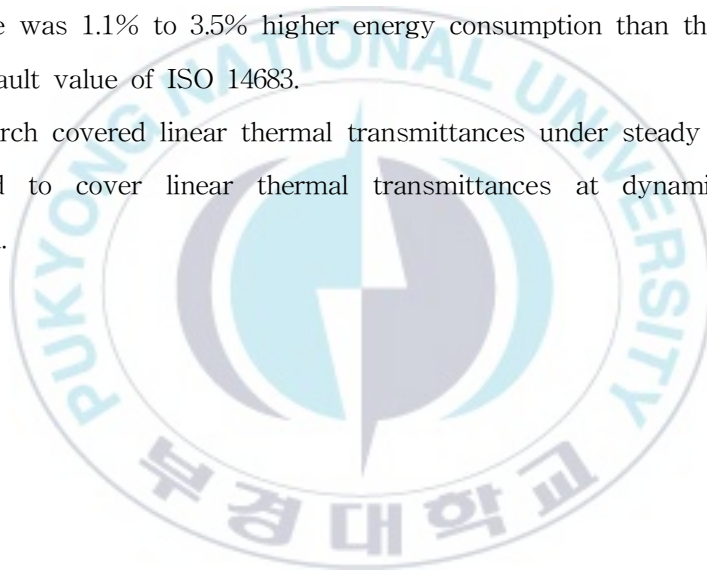
The simulation was conducted for the side walls and the expanded balcony front walls in typical residential buildings. For each case, the impact of insulation methods(internal and external insulation systems) and hot water temperatures on the linear thermal transmittances were investigated. As a reference, linear thermal transmittances of structures without radiant floor heating system were calculated. An evaluation standard is used with linear thermal transmittances obtained by ISO 14683. In addition, the annual heating energy consumption with adjusted linear

thermal transmittances were simulated by building energy simulation program 'DesignBuilder v5.5'.

The results of this study are as follows; at the side walls, the linear thermal transmittances with radiant floor heating system were 15% to 38% higher than the linear thermal transmittances without radiant floor heating system. At the front walls, the linear thermal transmittances with radiant floor heating system were 10% to 17% higher than the linear thermal transmittances without radiant floor heating system.

Regarding annual heating energy consumption, the adjusted linear thermal transmittance was 1.1% to 3.5% higher energy consumption than that is calculated with the default value of ISO 14683.

This research covered linear thermal transmittances under steady states. Further studies need to cover linear thermal transmittances at dynamic states with weather data.



I 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

현재 대부분의 건물 에너지 시뮬레이션에서는 모델링을 간소화하고 계산 부하를 경감하기 위해 외피와 직교 방향의 1차원 열류만 해석하는 것이 일반적이다. 하지만 1차원 열류만 해석하게 되면 구조체의 접합부 및 창호 프레임 등을 통한 열교 현상을 반영하지 못하여 냉난방 부하 및 건물 에너지 소비량이 과소평가될 가능성이 있다. 또한 점차 강화되고 있는 에너지 절약 설계 기준을 충족하기 위해 단열 성능이 향상되고 있음을 감안한다면(Capozzoli et al., 2013; Cappelletti et al., 2010) [5,6], 외피의 단열 성능이 향상될수록 열교로 인한 열손실이 상대적으로 커지기 때문에 건물의 에너지 성능 평가 시 열교 영향을 반영해야 할 필요성은 매우 높다고 할 수 있다.

열교 영향을 에너지 해석에 반영하는 방법으로는 열교에 의한 열류를 보정한 수정 열관류율을 적용하는 방법(Anderson, 2002; Erhorn-Kluttig and Erhorn, 2009) [1,8], 다차원 전열 해석을 건물 에너지 시뮬레이션과 연계시키는 방법(Ascione et al., 2012; Gao et al., 2008; Ge and Baba, 2015) [2,11,12], 선형 및 점형 열관류율을 이용하여 열류를 추가하는 방법(ISO, 2007; Song et al., 2011) [15,17] 등이 있다. 이 중 열관류율을 보정하는 방법은 가장 간단하지만 보정 값에 대한 기준이 불명확하며 결과의 정확도가 다소 낮은 단점이 있고, 다차원 전열 해석을 건물 에너지 시뮬레이션과 연계시키는 방법은 가장 정확한 결과를 얻을 수 있으나 모델링 및 해석에 소요되는 노력과 시간이 과도하게 증가하는 단점이 있다. 반면 선형 및 점형 열관류율을 이용하여 열류를 추가하는 방법은 비교적 단순한 모델링으로 열교에 의한 열류를 반영할 수

있어 연간 에너지 해석이 편리하고 정확도가 높다는 장점이 있다.

이러한 관점에서 국제 표준인 ISO 14683 [16]에서는 카탈로그 형태로 주요 부위의 선형 열관류율이 제시되어 있고, 이를 건물 외피 모델링에 반영하여 건물 에너지 해석에 활용하고 있다. 그러나 ISO 14683의 선형 열관류율 기본 값은 실내외 온도 차이에 의해 발생하는 열류를 기준으로 산정된 것으로 바닥 복사 난방 시스템과 같이 구조체 내부의 발열 요소에 의해 구조체를 통한 열류가 변화하는 것을 반영하기 어렵다. 즉, 바닥 복사 난방 시스템에서 온수 배관으로 인해 열교 부위(벽체-슬래브 접합부)와 실외의 온도 차이가 커지게 되는 경우 ISO 14683의 선형 열관류율 기본 값을 적용하게 되면 열류 해석의 정확도가 떨어질 수 있다. 따라서 ISO 14683의 선형 열관류율 기본 값을 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 주거 건물에 적용하기 위해서는 해당 부위의 선형 열관류율 값에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

이에 본 연구에서는 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 주거 건물에서 벽체-슬래브 접합부의 선형 열관류율을 단열 방식 및 난방 운전 조건에 따라 분석하고, 도출된 선형 열관류율을 ISO 14683의 기본 값과 비교하여 그 적합성을 검토하였다. 이를 토대로 주거 건물에서 바닥 복사 난방 시스템을 고려할 경우 선형 열관류율의 기준을 정립하기 위한 기초 자료를 제시하고, 보정된 선형 열관류율 값을 적용한 공동주택의 연간 난방 에너지 소비량을 비교 분석하여 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택의 열교 개선 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택의 측벽과 전면벽을 대상으로 세부 조건에 따라 해석 케이스를 분류하여 진행되었다. 바닥 복사 난방이 선형 열교에 미치는 영향은 단열 방식이나 난방 운전 조건에 따라 달라질 수 있기 때문에 내단열 시스템과 외단열 시스템에서 각각 비난방 및 온수 온도 50℃, 60℃, 70℃의 조건에 대해 분석하였다. 외기 조건은 우리나라 중부 지역의 설계 외기온으로 설정하고, 에너지 절약 설계 기준을 참고하여 실내 설계 온도를 20℃로 설정하였다.

사전 측정을 통해 바닥 복사 난방 시스템이 선형 열관류율에 미치는 영향을 간략하게 검토해보았고, 다차원 열전달 해석 시뮬레이션으로 해당 부위를 해석하여 구조체를 통해 흐르는 총 열류 및 1차원 열류를 도출하였다. ISO 10211 식을 활용하여 해석 케이스 별로 선형 열관류율을 산출하였고, 산출된 선형 열관류율 값을 건물 에너지 해석 시뮬레이션에 적용하여 연간 난방 에너지 소비량을 분석하였다. 그림 1.1은 본 연구의 진행 과정을 도식화한 것이다.

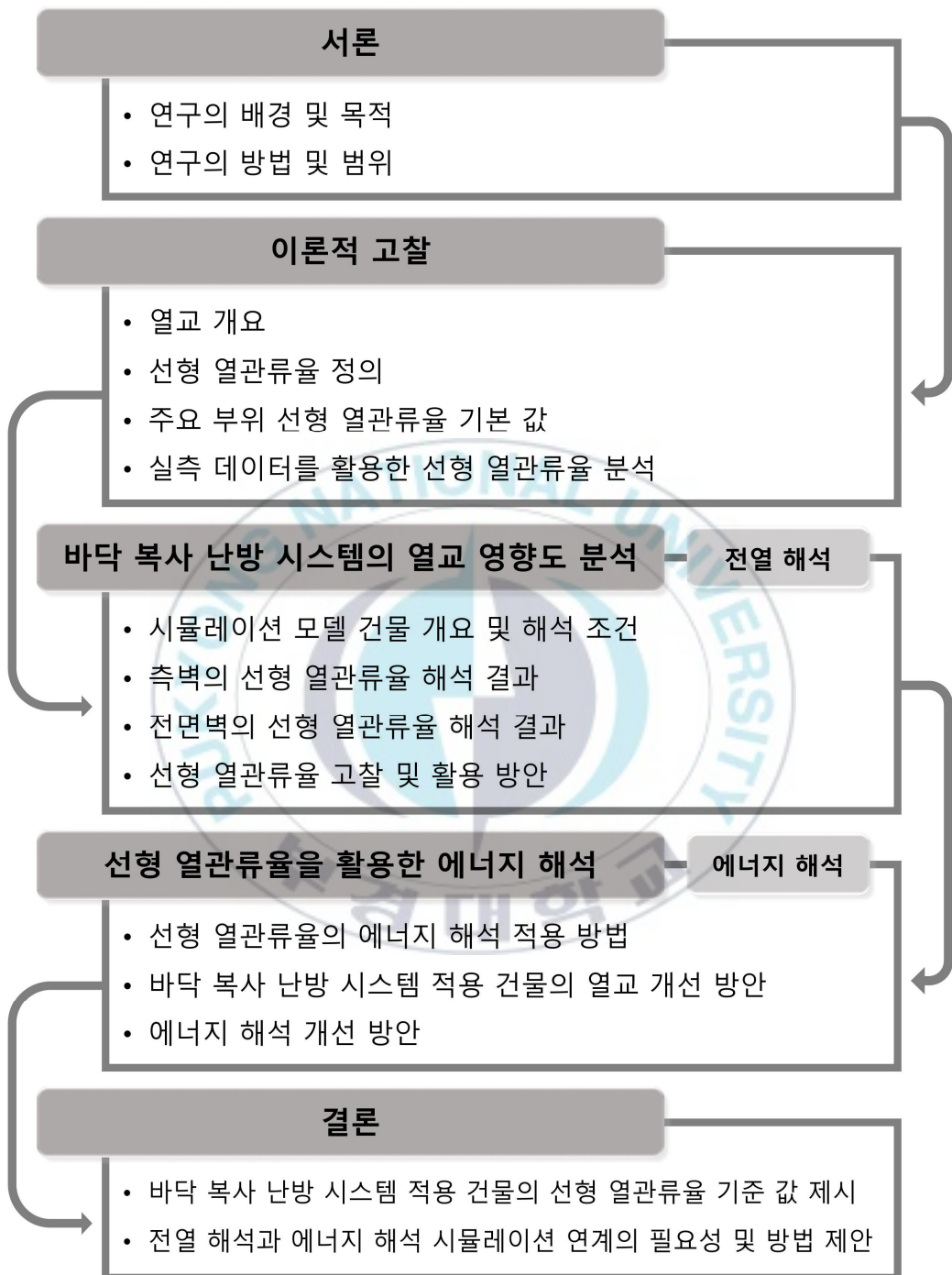


그림 1.1 연구 흐름도

II 열교 및 선형 열관류율 이론

1. 열교 개요

열은 온도가 높은 지점에서 낮은 지점으로 향하여 흐른다. 그 과정에서 열은 저항이 가장 적은 경로를 따라 흐르게 되는데, 이 때 국소 부위로 열의 흐름이 집중되어 인접부위와 비교해서 열의 흐름이 달라지는 건물 외피의 작은 부분을 열교(thermal bridge)라 부른다. 열교 부위에서는 일반적으로 열의 흐름이 증가하여 열손실이 커지고, 내부 표면온도가 감소하여 최악의 경우 건물 구성요소에 수분이 침투하여 곰팡이가 생성될 수 있다. 그림 2.1*은 일반 공동주택의 전면벽을 열화상 카메라로 촬영한 것으로 벽체-슬래브 접합부의 열교 현상을 관측할 수 있다.

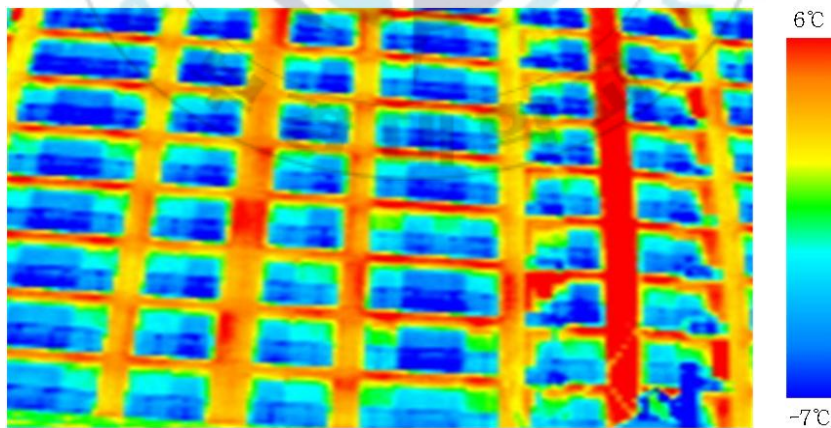


그림 2.1 공동주택의 열교 현상

* “[쾌적한家, 건강한家] 열교, 곰팡이, 단열”, 〈월간 전원주택 라이프〉, 2018.03.27.,
〈https://www.countryhome.co.kr:454/atl/view.asp?a_id=6239〉 (접속일:2018.11.09.).

Baba and Ge [3] 의 선행 연구 결과에 따르면 열교로 인한 연간 난방 에너지 부하가 37.4%~42.2% 증가하고, 1차원 열류만 해석 시 연간 난방 에너지 부하의 12.5%~14.8%를 과소평가하게 되며, 열교에 의해 발생된 단열의 불연속성으로 인해 건물 외피를 통한 에너지 소비를 30% 이상 증가시키는 것으로 보고되었다. Deque et al. [7]은 전체 열손실에서 열교가 차지하는 비중이 5%~35%에 달하는 것으로 보고하였고, Theodosiou, Papadopoulos [18] 는 전체 열손실에서 열교의 비중이 5%~35%라고 보고하였다. Berggren, Wall [4] 은 열교로 인해 증가하는 열류가 프리캐스트 콘크리트 벽에서 20%~38%, 나무 프레임 벽에서 12%~26%에 이르는 것으로 보고하였으며, Evola et al. [9] 는 건물의 유형에 따라 열교의 비중이 난방 에너지 요구량의 17.5%~25%, 냉방 에너지 요구량의 3.5%를 차지하며, 열교 개선 시 연간 에너지의 8.5%를 절감할 수 있음을 연구하였다. 건물 에너지 소비량에서 열교의 영향 및 비중을 요약하면 표 2.1과 같다.

표 2.1 건물 에너지 소비량에서 열교의 영향 및 비중

연구자 명	열교의 영향	연구자 명	열교의 비중
Baba and Ge	+37.4%~42.2%	Deque et al.	5%~35%
		Theodosiou, Papadopoulos	5%~35%
Berggren, Wall	+20%~38%*	Evola et al.	17.5%~25%
	+12%~26%**		3.5%

또한 유럽 ASIEPI(Assessment and improvement of the EPBD Impact) 프로젝트 [13] 의 수행 결과에 의하면 독일의 경우 열교 개선 시 1차 에너지 소

* 프리캐스트 콘크리트 벽에서 증가하는 열류 비율

** 나무 프레임 벽에서 증가하는 열류 비율

비량의 30% 이상을 절감할 수 있고, 프랑스의 경우 열교 개선으로 난방 에너지 소비량의 15% 이상을 절감할 수 있으며, 네덜란드의 경우 건물 유형에 따라 에너지의 3.75%~11.25%를 절감할 수 있다고 보고하였다(표 2.2). 또한 열교의 비중 측면에서 체코의 경우 전체 실내 부하에서 열교의 비중이 7%~28%에 달하고, 폴란드의 경우 건물 외피를 통한 열손실 중 열교에 의한 부하가 5.9%, 벨기에의 경우 최대 10%에 이르며, 그리스의 경우 난방 부하의 30%, 냉방 부하의 3%를 열교가 발생시키는 것으로 보고하였다(표 2.3). 이에 대부분의 유럽 국가에서는 열교로 인한 열손실을 건물 에너지 해석에 반영하려고 하고 있으며, 새 건물 설계 시 북유럽 국가의 35%, 중앙유럽 국가의 100%, 남유럽 국가의 50%는 열교 영향을 반영하고 있다고 보고하였다.

표 2.2 국가 별 열교 개선 시 에너지 절감 비율

국가 명	열교의 비중	국가 명	열교의 비중
독일	30%	네덜란드	3.75%~11.25%
프랑스	15%		

표 2.3 국가 별 열교의 비중

국가 명	열교의 비중	국가 명	열교의 비중
체코	7%~28%	벨기에	10%
폴란드	5.9%	그리스	30%*
			3%**

* 난방부하에서 열교의 비중

** 냉방부하에서 열교의 비중

2. 선형 열관류율 정의

선형 열관류율(linear thermal transmittance)은 선형 열교에서 발생하는 정상 상태의 열류를 선형 열교의 길이와 실내외 온도차로 나눈 값을 의미한다. 주로 벽체-슬래브 접합부 및 창호 프레임과 같은 열교 부위의 단열 성능을 평가할 때 쓰이는 값으로서 기호는 ψ (psi)로 표시하고 단위는 $W/m \cdot K$ 를 사용한다.

$$\Phi_T = (\sum U_i A_i + \sum \psi_j l_j + \sum \chi_k)(\theta_i - \theta_o) \quad (W) \quad (1)$$

$$\psi = \left(\frac{\Phi_T}{\theta_i - \theta_o} - \sum U_i A_i \right) \frac{1}{l} \quad (W/m \cdot K) \quad (2)$$

여기서, Φ_T : 구조체를 통한 열류 (W)

ψ : 선형 열관류율 ($W/m \cdot K$)

l : 선형 열교의 길이 (m)

θ_i : 실내 온도 ($^{\circ}C$)

θ_o : 실외 온도 ($^{\circ}C$)

χ : 점형 열관류율 (point thermal transmittance)

(단, 일반적으로 점형 열교의 영향은 무시할 수 있음, ISO 14683)

U_i : 열교와 이웃하는 부위의 1차원 열관류율 ($W/m^2 \cdot K$)

A_i : U_i 의 열관류율 값을 가지는 부위의 면적 (m^2)

(단, 벽체 높이 및 슬래브 길이는 벽체 두께의 3배 또는 1,000mm 중 큰 값)

구조체를 통한 열손실은 ISO 10211의 식(1)과 같이 “면”, “선”, “점”을 통해 발생한다. 점을 통한 열류를 무시한다고 가정하면, 단위 길이의 선형 열교에 대해 실내외 온도차가 1 K일 때 구조체를 통한 총 열손실에서 면을 통해 전달되는 1차원 열류를 뺀 값이 선형 열관류율이다. 선형 열관류율은 절점의 온도와 열류를 계산할 수 있는 Laplace 방정식, 대류 열전달을 통한 열류를 계산할 수 있는 Newton 방정식, 다원 1차 연립 방정식의 해석법인 가우스 반복법(Gauss Seidel iteration method) 및 가우스 소거법(Gauss elimination method) 등을 이용하여 계산할 수 있지만 복잡한 다차원 구조체에서의 열류를 계산해야 하는 어려움이 있다(이종성 외, 2014 [19]).

본 연구에서는 다차원 열전달 해석 시뮬레이션인 PHYSIBEL을 활용하여 정상 상태(steady state)에서 구조체를 통한 총 열류 및 1차원 열류를 도출하고, ISO 10211의 식(2)를 이용하여 선형 열관류율 값을 계산하였다. 그림 2.2는 식(2)를 도식화한 것으로 전열 해석 시뮬레이션 모델링에 참고한 내용이다.

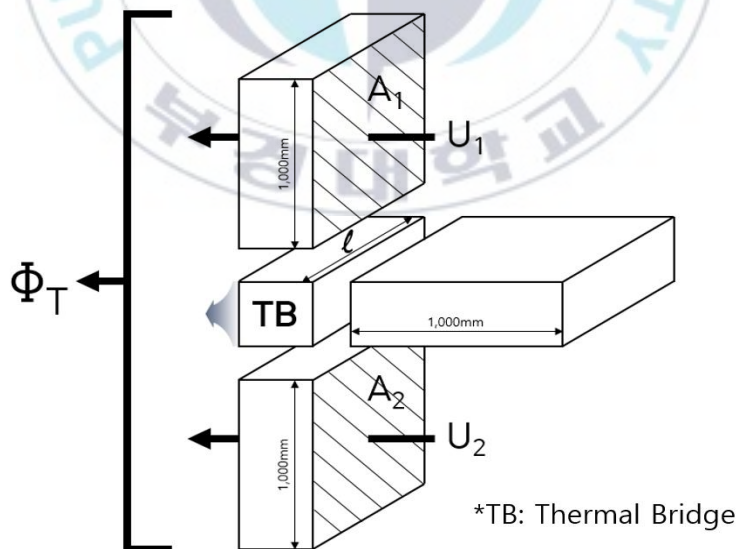


그림 2.2 선형 열관류율 계산 예시

3. 주요 부위의 선형 열관류율 기본 값

국제 표준인 ISO 14683에서는 다양한 형태의 벽체에 대한 선형 열관류율 기본 값을 카탈로그 형태로 제시하고 있고, 이 기본 값을 건물 외피 모델링에 반영하여 건물 에너지 해석에 활용하고 있다. 유럽의 경우, 프랑스, 영국 등은 안목치수를 기준으로 계산하고, 독일, 벨기에 등은 바깥치수를 기준으로 계산하기 때문에 ISO 14683에서는 국가 별 선형 열관류율 계산 시 모델링에 적용하는 치수의 차이를 고려하여 안목치수(internal dimensions), 바깥치수(external dimensions), 전체 안목치수(overall internal dimensions)로 계산한 값을 모두 제시하고 있다. 그림 2.3, 그림 2.4는 ISO 14683:2008 Annex A에 제시된 구조체 별 선형 열관류율 기본 값 중 본 연구에 참고한 일부 내용을 보이고 있다.

For all details:		$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$
For external walls:		$d = 300 \text{ mm}$
For internal walls:		$d = 200 \text{ mm}$
For walls with an insulation layer:	— thermal transmittance	$U = 0,343 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
	— thermal resistance of insulation layer	$R = 2,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
For lightweight walls:		$U = 0,375 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
For ground floors:	— floor slab	$d = 200 \text{ mm}$
	— thermal conductivity of ground	$\lambda = 2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
	— thermal resistance of insulation layer	$R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$
For intermediate floors:		$d = 200 \text{ mm}$
		$\lambda = 2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
For roofs:	— thermal transmittance	$U = 0,365 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
	— thermal resistance of insulation layer	$R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$
For the frames in openings:		$d = 60 \text{ mm}$
For columns:		$d = 300 \text{ mm}$
		$\lambda = 2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

그림 2.3 선형 열관류율 기본 값 매개변수(ISO 14683, 2008)

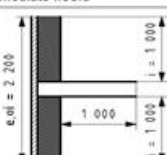
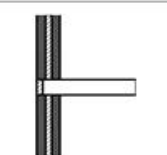
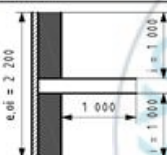
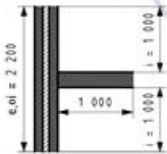
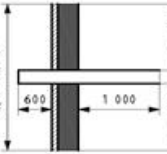
	Wall		Lightweight wall (including lightweight masonry and timber frame walls)		Insulating layer		Slab/pillar		Window frame
Intermediate floors									
									
IF1	$\psi_e = 0,00$ $\psi_{cl} = 0,00$ $\psi_i = 0,10$	IF2	$\psi_e = 0,95$ $\psi_{cl} = 0,95$ $\psi_i = 1,05$	IF3	$\psi_e = 0,90$ $\psi_{cl} = 0,90$ $\psi_i = 1,00$	IF4	$\psi_e = 0,70$ $\psi_{cl} = 0,70$ $\psi_i = 0,80$		
									
IF5	$\psi_e = 0,60$ $\psi_{cl} = 0,60$ $\psi_i = 0,65$	IF6	$\psi_e = 0,90$ $\psi_{cl} = 0,90$ $\psi_i = 1,00$	IF7	$\psi_e = 0,70$ $\psi_{cl} = 0,70$ $\psi_i = 0,80$	IF8	$\psi_e = 0,45$ $\psi_{cl} = 0,45$ $\psi_i = 0,60$		
Internal walls									
									
IW1	$\psi_e = 0,00$ $\psi_{cl} = 0,00$ $\psi_i = 0,10$	IW2	$\psi_e = 0,95$ $\psi_{cl} = 0,95$ $\psi_i = 1,05$	IW3	$\psi_e = 0,90$ $\psi_{cl} = 0,90$ $\psi_i = 1,00$	IW4	$\psi_e = 0,00$ $\psi_{cl} = 0,00$ $\psi_i = 0,20$		
									
IW5	$\psi_e = 0,00$ $\psi_{cl} = 0,00$ $\psi_i = 0,10$	IW6	$\psi_e = 0,00$ $\psi_{cl} = 0,00$ $\psi_i = 0,10$						
Balconies									
									
B1	$\psi_e = 0,95$ $\psi_{cl} = 0,95$ $\psi_i = 1,05$	B2	$\psi_e = 0,95$ $\psi_{cl} = 0,95$ $\psi_i = 1,05$	B3	$\psi_e = 0,90$ $\psi_{cl} = 0,90$ $\psi_i = 1,00$	B4	$\psi_e = 0,70$ $\psi_{cl} = 0,70$ $\psi_i = 0,80$		

그림 2.4 선형 열관류율 기본 값(ISO 14683, 2008)

4. 실측 데이터를 활용한 선형 열관류율 분석

바닥 복사 난방 시스템 적용 시에는 구조체 온도 상승으로 인해 열류가 증가하여 선형 열관류율이 증가할 것이라는 가설을 세울 수 있다. 이러한 가설을 실제로 검토하기 위하여 그림 2.5와 같은 실제 공동주택에서 바닥 복사 난방 또는 온풍난방 시 벽체-슬래브 접합부에서 빠져나오는 열류를 측정하고 이를 활용하여 각각의 선형 열관류율을 도출 후 비교 분석해보았다.

실험은 일간 외기온이 가장 낮은 03:20부터 05:20까지 2시간 동안 진행하였으며 열교 부위를 통한 열류 측정을 위해 그림 2.6과 같이 열류 센서를 설치하여 1분 간격으로 데이터를 기록하였다. 실험 장소인 남부지방의 특성 상 외기온이 다소 높은 점을 고려하여 실내외 온도차를 크게 하기 위해 실내 온도는 25℃로 설정하였다.



그림 2.5 현장 측정 실험 장소



그림 2.6 열교 부위 열류 센서 설치 상태

그림 2.7은 바닥 복사 난방 시스템과 온풍난방의 현장 측정 데이터를 기반으로 계산한 선형 열관류율을 시간 변화에 따라 나타낸 그래프이고, 그림 2.8은 그림 2.7의 데이터를 Boxplot으로 비교한 것이다. 전반적으로 바닥 복사 난방 시스템의 선형 열관류율이 온풍난방의 선형 열관류율 보다 높은 경향을 보이고 있으며, 각 난방 시스템에서 전체 데이터의 평균값을 비교해보았을 때 바닥 복사 난방 시스템에서 $0.244 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 온풍난방에서 $0.107 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 보다 약 127% 높은 것을 확인할 수 있다.

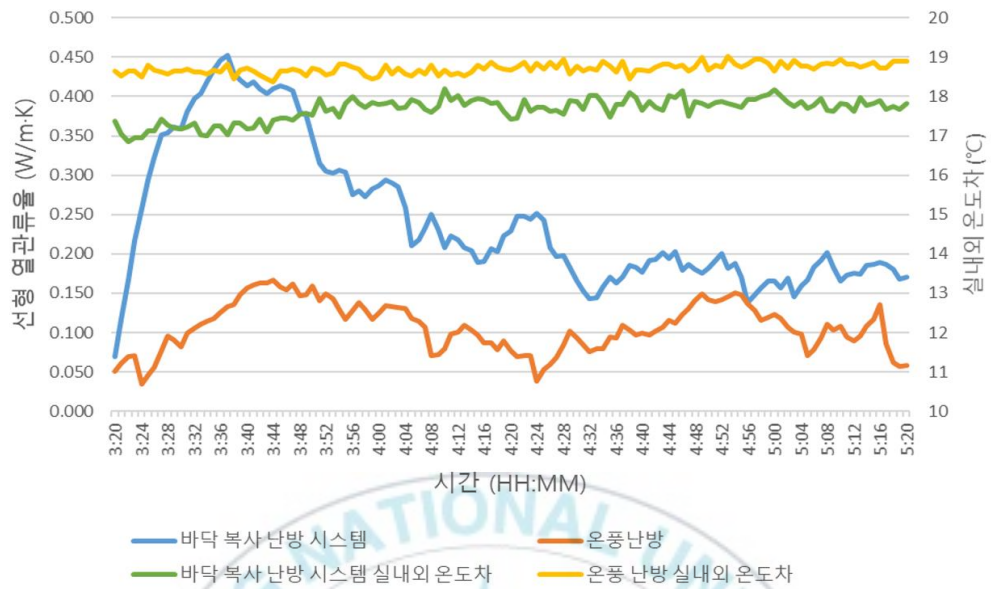


그림 2.7 선형 열관류율 시간 변화



그림 2.8 선형 열관류율 비교

이와 같이 카탈로그 형태로 제공된 ISO 14683 선형 열관류율 기본 값은 실내외 온도 차이에 의해 발생하는 열류를 기준으로 계산된 값이기 때문에 바닥 복사 난방 시스템과 같이 구조체 내부에 발열요소가 있을 경우 구조체 내부를 통한 열류의 변화를 반영하기 어렵다. 따라서 바닥 복사 난방 시스템의 온수 배관으로 인해 벽체-슬래브 접합부 부위와 실외의 온도 차이가 커지게 될 경우, ISO 14683의 선형 열관류율 기본 값을 그대로 적용하게 되면 열류 해석의 정확도가 떨어질 수 있다. 즉, 선형 열관류율을 활용하여 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택의 열교 영향을 에너지 해석에 반영하기 위해서는 해당 부위의 선형 열관류율 값에 대한 추가적인 검토가 필요하다.



III 바닥 복사 난방 시스템의 열교 영향도 분석 방법

1. 시뮬레이션 모델 건물 개요

본 연구에서는 그림 3.1, 그림 3.2*와 같은 우리나라에 실제로 시공된 공동주택의 설계도를 참고하여 측벽 및 확장형 발코니 전면벽과 슬래브 구조체를 모델링하고, 내경 14mm XL(cross-linked polyethylene) 배관을 5m × 4m 크기의 방에 250mm 간격으로 외벽과 평행하게 배치하여 바닥 복사 난방 시스템을 구축하였다. 실제 바닥 복사 난방 시스템에서는 온수 배관에서의 방열에 의해 관내 온수 온도가 점차 강하하게 되지만 일반적으로 외주부부터 온수가 공급된다는 점, 그리고 열교가 발생하는 외주부의 온수 온도 조건이 중요한 점을 감안하여 관내 온수 온도는 일정한 것으로 가정하였다. 벽체와 슬래브 구조체의 모델 및 구성요소는 표 3.1과 표 3.2에 나타나있다.

* 현대건설 (2008), 아파트 표준상세도(발코니확장관련 도면), p.32.

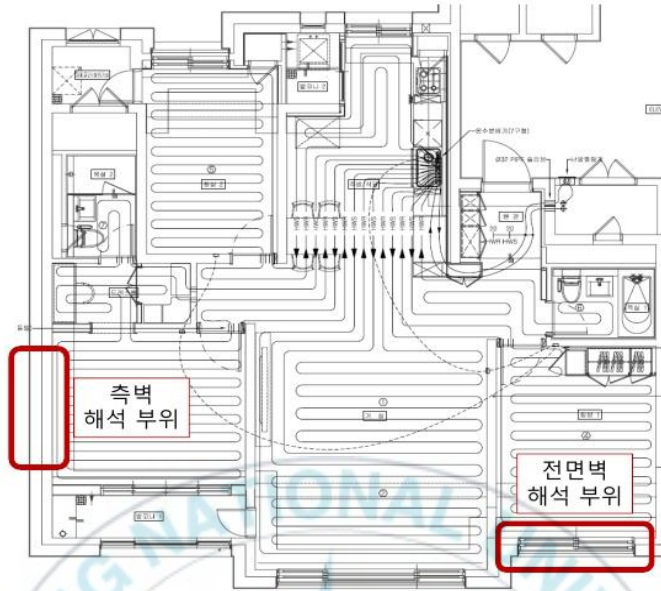


그림 3.1 분석대상 공동주택 평면도

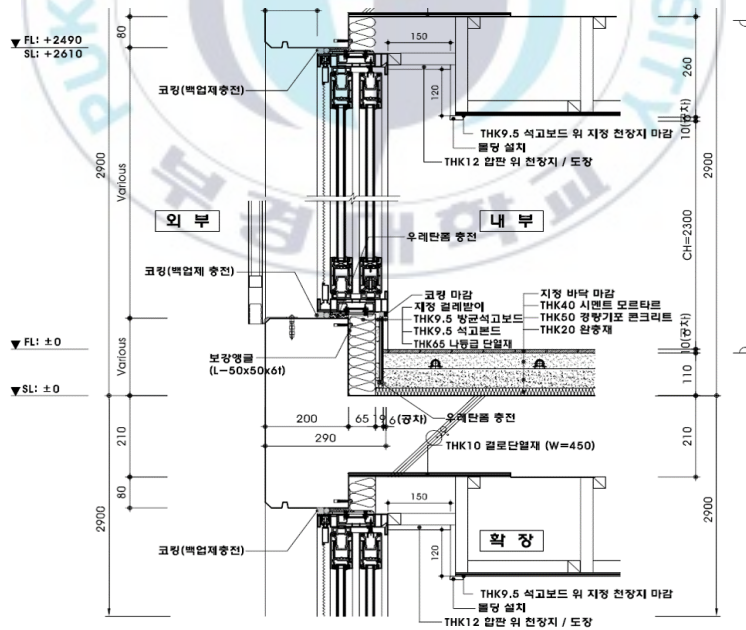


그림 3.2 확장형 발코니 전면벽 상세

표 3.1 시뮬레이션 모델

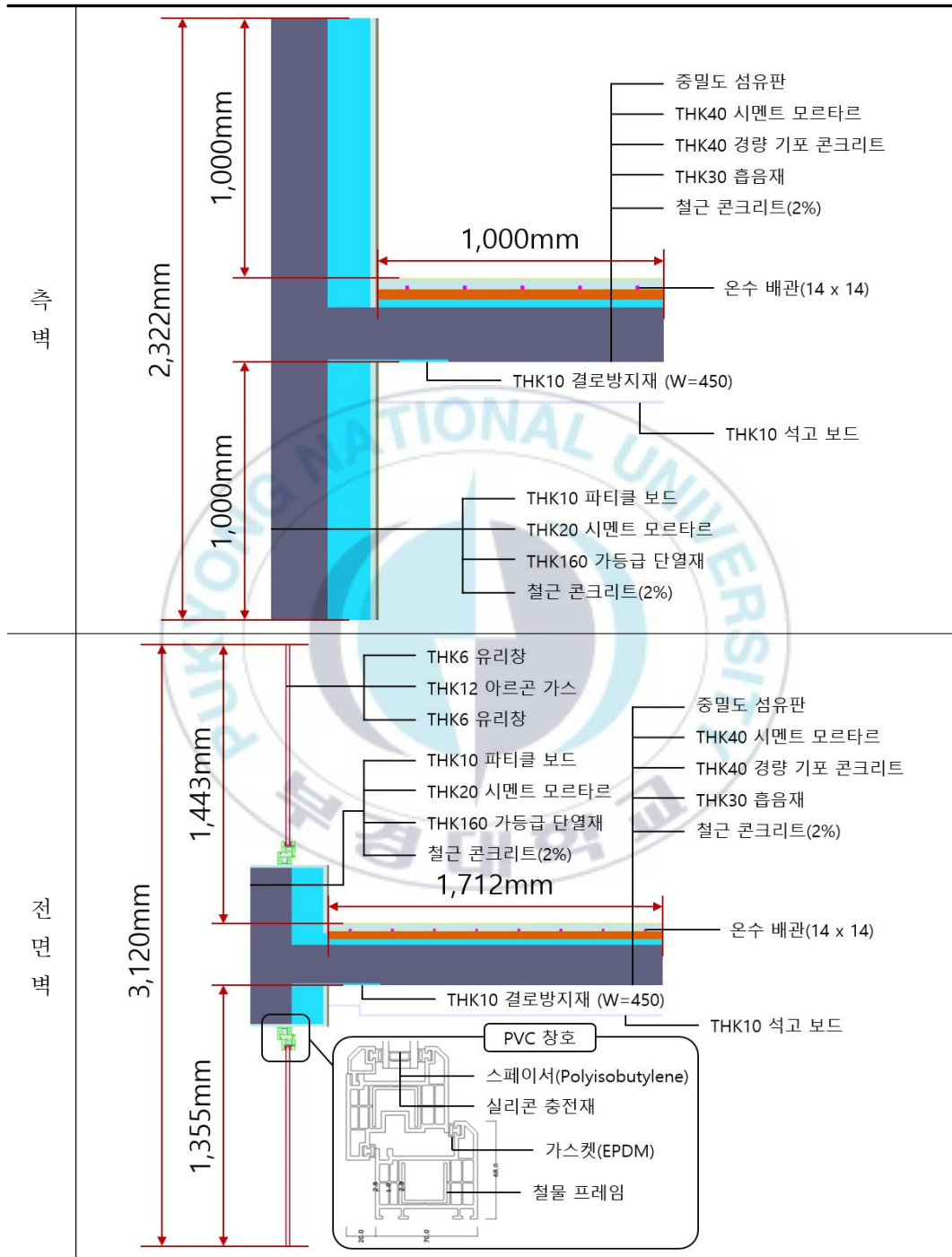


표 3.2 구조체 구성요소

		벽 (외부 → 내부의 순서)		슬래브 (위 세대 → 아래 세대의 순서)	
측 벽	내 단 열	철근 콘크리트(2%)	210mm		
		가등급 단열재	160mm	중밀도 섬유판	2mm
		시멘트 모르타르	20mm	시멘트 모르타르	40mm
		파티클 보드	10mm	경량 기포 콘크리트	40mm
	외 단 열	시멘트 모르타르	20mm	흡음재	30mm
		가등급 단열재	160mm	철근 콘크리트(2%)	210mm
		철근 콘크리트(2%)	210mm	결로 방지재	10mm
		파티클 보드	10mm		
전 면 벽	내 단 열	철근 콘크리트(2%)	210mm		
		가등급 단열재	160mm	중밀도 섬유판	2mm
		시멘트 모르타르	20mm	시멘트 모르타르	40mm
		파티클 보드	10mm	경량 기포 콘크리트	40mm
	외 단 열	시멘트 모르타르	20mm	흡음재	30mm
		가등급 단열재	160mm	철근 콘크리트(2%)	210mm
		철근 콘크리트(2%)	210mm	결로 방지재	10mm
		파티클 보드	10mm		
	창 호	유리창	(6+12+6)mm		
		프레임	(123×93)mm	사춤 모르타르	15mm

또한 선형 열교를 통한 열손실은 외벽의 단열 조건 및 바닥 복사 난방 시스템의 운전 조건에 영향을 받게 되므로 단열 방식과 난방수 온도에 따라 해석 케이스를 구분하였다. 단열 방식으로는 내단열 시스템과 외단열 시스템으로 구분하고, 내단열 시스템은 발열층(온수 배관 매설층)의 측면 단열 유무로 세분화하였다. 난방수 온도는 국내 바닥 복사 난방 시스템의 온수 온도 운전 범위를 고려하여 50℃, 60℃, 70℃ 세 가지 케이스로 분류하였다. 해석 케이스 및 바닥 복사 난방 시스템 운전 조건은 표 3.3과 표 3.4에 나타나있다.

표 3.3 시뮬레이션 케이스 별 모델 형상

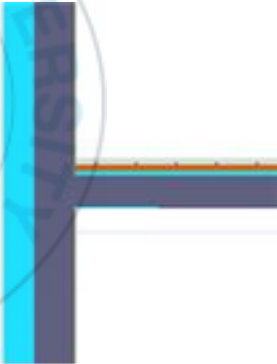
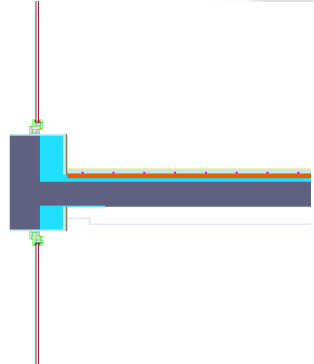
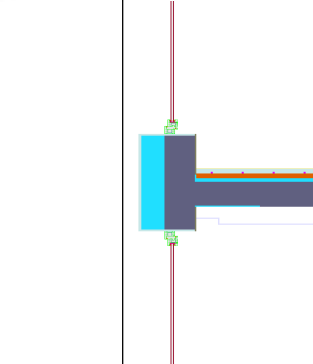
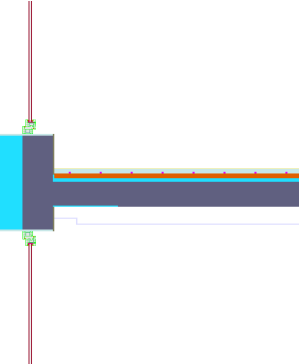
	내단열		외단열
	측면 단열 O	측면 단열 X	
측벽			
전면벽			

표 3.4 시뮬레이션 케이스

해석 부위	단열 방식	운전 조건
측벽	내단열 1 (발열층 측면 단열)	바닥 복사 난방 미적용
		온수 온도 50℃
		온수 온도 60℃
		온수 온도 70℃
	내단열 2 (발열층 측면 미단열)	바닥 복사 난방 미적용
		온수 온도 50℃
		온수 온도 60℃
		온수 온도 70℃
	외단열	바닥 복사 난방 미적용
		온수 온도 50℃
		온수 온도 60℃
		온수 온도 70℃
전면벽	내단열	바닥 복사 난방 미적용
		온수 온도 50℃
		온수 온도 60℃
		온수 온도 70℃
	외단열	바닥 복사 난방 미적용
		온수 온도 50℃
		온수 온도 60℃
		온수 온도 70℃

2. 시뮬레이션 모델 해석 조건

단열 방식과 바닥 복사 난방 시스템의 유무 및 난방수 온도에 따라 분류한 각 케이스의 전열 해석을 위하여 다차원 열전달 해석 시뮬레이션 PHYSIBEL TRISCO v13.0w를 사용하였다. 정상 상태에서 각 해석 케이스의 벽체를 통한 총 열손실 및 1차원 열관류율을 도출하고, 도출된 값을 ISO 10211의 식(2)에 매개변수로 적용하여 각각의 선형 열관류율을 계산하였다.

실내외 설정 온도 및 표면 열전달 저항(surface thermal resistance)은 ISO 6946 [14] 을 참조하여 표 3.5에 표시하였으며, 온수 배관 내의 경계 조건은 온수 온도 및 관내 대류 열전달 계수(convective heat transfer coefficient)로 설정하여 표 3.6에 표시하였다. 관내 대류 열전달 계수의 경우 온수 온도에 따라 상태 및 값이 변화하기 때문에 해석 공간의 단위 난방 부하를 60 W/m^2 로 가정하여* 산출된 유량 $1.72 \text{ lpm}((60 \text{ W/m}^2 \times 20 \text{ m}^2)/(4184 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \times 10^\circ\text{C}) \times 60)$ 을 적용해서 각 온수 온도 별 계산된 관내 유동 대류 열전달 계수 값을 사용하였다(Frank et al., 2002 [10]). 구조체 모델링에 적용된 벽체의 재료 물성은 표 3.7, 슬래브의 재료 물성은 표 3.8과 같으며 이와 같은 과정을 거쳐 얻어진 선형 열관류율 값을 그림 2.4의 ISO 14683의 기본 값과 비교 분석하였다.

표 3.5 실내외 설정 온도 및 표면 열전달 저항

	설정 온도	표면 열전달 저항
실내	20℃	0.13 $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
실외	-10℃	0.04 $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$

* 서울에너지공사, 『열사용시설기준(2017.01.03.)』, 제19조 4항 난방 열교환기 연결열 부하의 산정, [표3] 공동주택의 단위연결열부하.

표 3.6 대류 열전달 계수, h

온수 온도	상태	대류 열전달 계수, h
50℃	난류(Turbulent)	1254.46 W/m ² ·K
60℃	난류(Turbulent)	1353.40 W/m ² ·K
70℃	난류(Turbulent)	1414.74 W/m ² ·K

표 3.7 벽체 재료 물성

재료명		열전도율 (W/m·K)	비중량 (kg/m ³)	비열 (J/kg·K)
철근 콘크리트(2%)		2.500	2,400	880
시멘트 모르타르		1.000	1,800	1,050
가등급 단열재		0.030	30	1,647
파티클 보드		0.140	600	1,700
창호	유리창	0.760	2,700	840
	프레임 (PVC)	0.170	1,390	900
	가스켓 (EPDM)	0.250	1,150	1,000
	스페이서 (polyisobutylene)	0.200	930	1,100
	충전재 (silicon)	0.350	1,200	1,000
	브라켓 (steel)	50.000	7,800	450

표 3.8 슬래브 재료 물성

재료명	열전도율 (W/m·K)	비중량 (kg/m ³)	비열 (J/kg·K)
철근 콘크리트(2%)	2.500	2,400	880
경량 기포 콘크리트	0.190	470	1,172
시멘트 모르타르, 사춤 모르타르	1.000	1,800	1,050
흡음재, 결로방지재	0.030	30	1,647
석고 보드	0.300	790	1,000
중밀도 섬유판 (medium density fibreboard)	0.070	250	1,700
온수 배관 (cross-linked polyethylene)	0.500	980	1,800

IV 시뮬레이션 해석 결과

1. 측벽의 선형 열관류율 해석 결과

표 4.1~표 4.4는 측벽의 선형 열관류율을 산출하는 과정으로, 해석 케이스별 벽체를 통한 총 열류, 실내외 온도차, 1차원 열관류율, 1차원 열관류율 값을 가지는 부위의 면적을 활용하여 계산하였다. 표 4.5~표 4.9는 측벽에서의 전열 해석 결과로, 표 4.5~표 4.8에서는 단열 방식에 따른 열류 및 온도 분포 차이를 비교할 수 있고 표 4.9에서는 온도 범위를 일정하게 하여 온수 온도에 따른 열류 및 온도 분포 차이를 비교할 수 있다. 그림 4.1은 단열 방식 및 온수 온도에 따른 선형 열관류율을 비교한 것으로 온수가 흐르지 않는 케이스, 즉 바닥 복사 난방 시스템이 운전되지 않는 경우를 기준 케이스로 하여 선형 열관류율을 비교 분석한 결과이다.

표 4.1 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(비난방)

	단열 조건		시뮬레이션 결과
열류	내단열	측면 단열 O	$Q_{2D} = 34.16 \text{ W}$
		측면 단열 X	$Q_{2D} = 36.77 \text{ W}$
	외단열		$Q_{2D} = 12.26 \text{ W}$
실내외 온도차	30°C		
1차원 열관류율	$U_i = 0.176 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$		
면적	2m^2		
선형 열관류율	내단열	측면 단열 O	$\psi = 0.787 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
		측면 단열 X	$\psi = 0.874 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열		$\psi = 0.057 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.2 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 50°C)

	단열 조건		시뮬레이션 결과
열류	내단열	측면 단열 O	$Q_{2D} = 37.77 \text{ W}$
		측면 단열 X	$Q_{2D} = 41.35 \text{ W}$
	외단열		$Q_{2D} = 12.65 \text{ W}$
실내외 온도차	30°C		
1차원 열관류율	$U_i = 0.176 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$		
면적	2m^2		
선형 열관류율	내단열	측면 단열 O	$\psi = 0.907 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
		측면 단열 X	$\psi = 1.026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열		$\psi = 0.070 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.3 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 60℃)

	단열 조건		시뮬레이션 결과
열류	내단열	측면 단열 O	$Q_{2D} = 38.91 \text{ W}$
		측면 단열 X	$Q_{2D} = 42.77 \text{ W}$
	외단열		$Q_{2D} = 12.78 \text{ W}$
실내외 온도차	30℃		
1차원 열관류율	$U_i = 0.176 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$		
면적	2m^2		
선형 열관류율	내단열	측면 단열 O	$\psi = 0.945 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
		측면 단열 X	$\psi = 1.074 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열		$\psi = 0.074 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.4 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 70℃)

	단열 조건		시뮬레이션 결과
열류	내단열	측면 단열 O	$Q_{2D} = 40.06 \text{ W}$
		측면 단열 X	$Q_{2D} = 44.19 \text{ W}$
	외단열		$Q_{2D} = 12.91 \text{ W}$
실내외 온도차	30℃		
1차원 열관류율	$U_i = 0.176 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$		
면적	2m^2		
선형 열관류율	내단열	측면 단열 O	$\psi = 0.983 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
		측면 단열 X	$\psi = 1.121 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열		$\psi = 0.078 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.5 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(비난방)

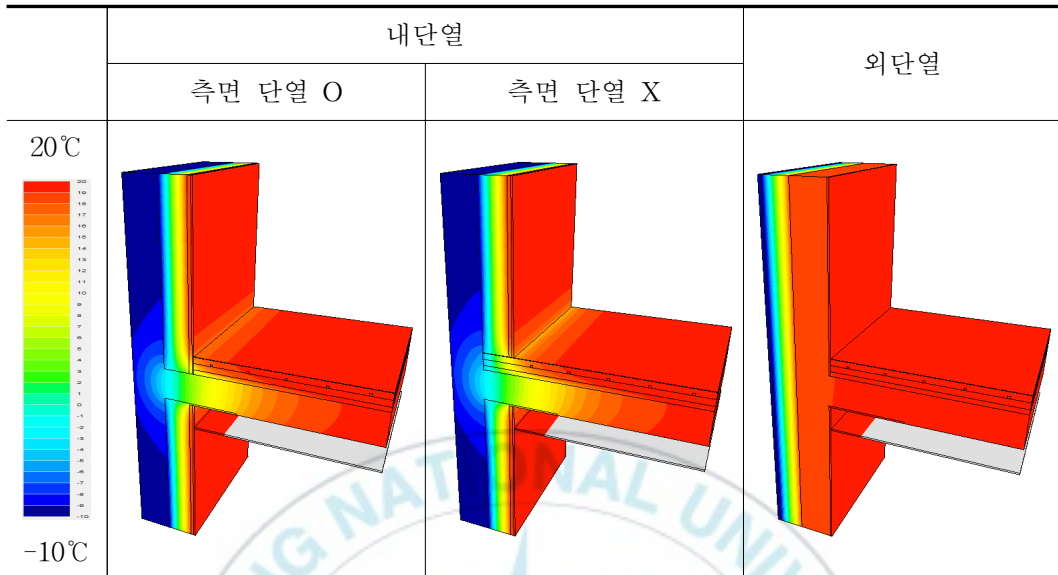


표 4.6 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 50℃)

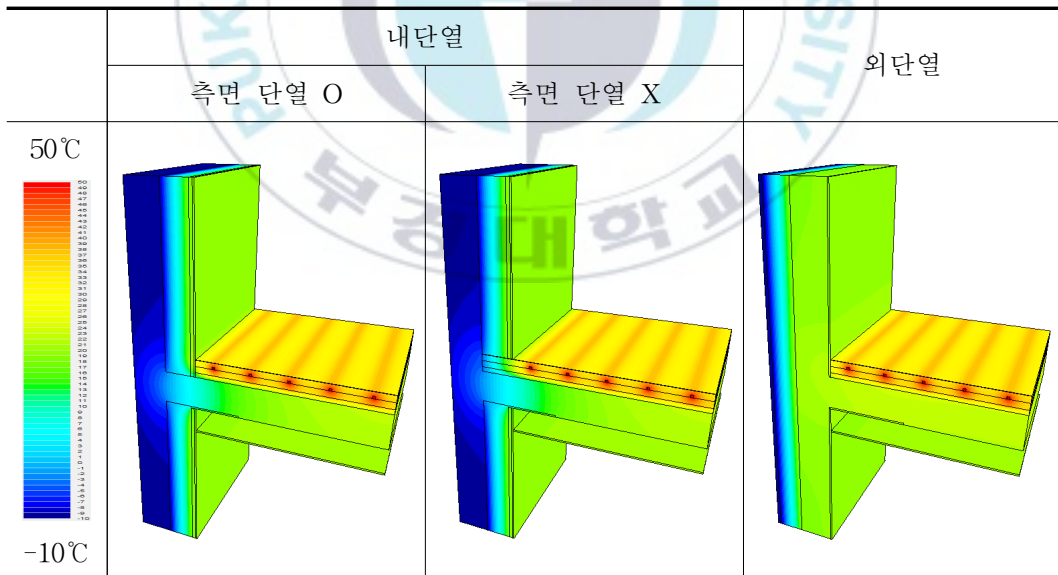


표 4.7 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 60℃)

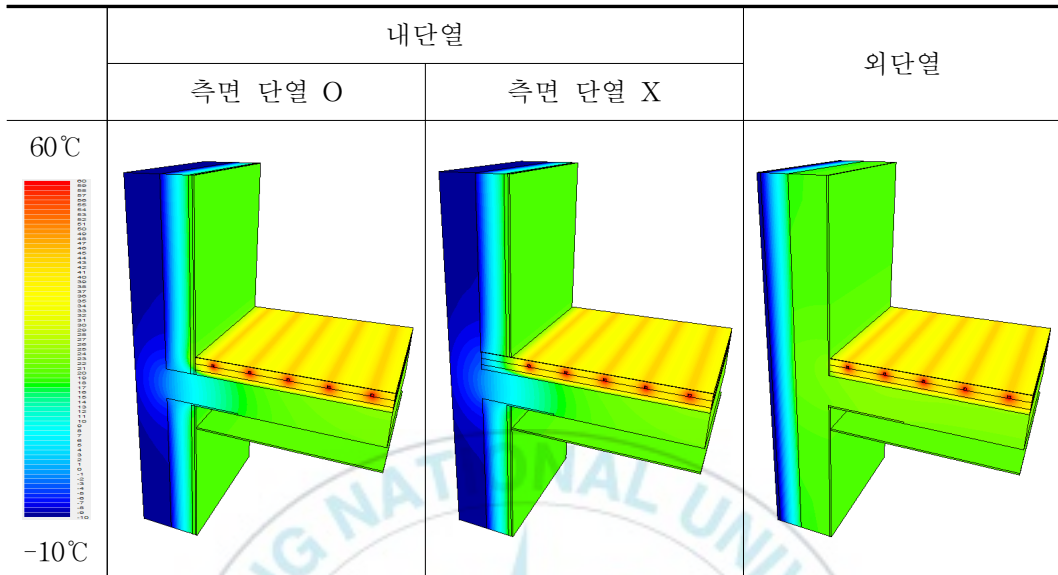


표 4.8 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 70℃)

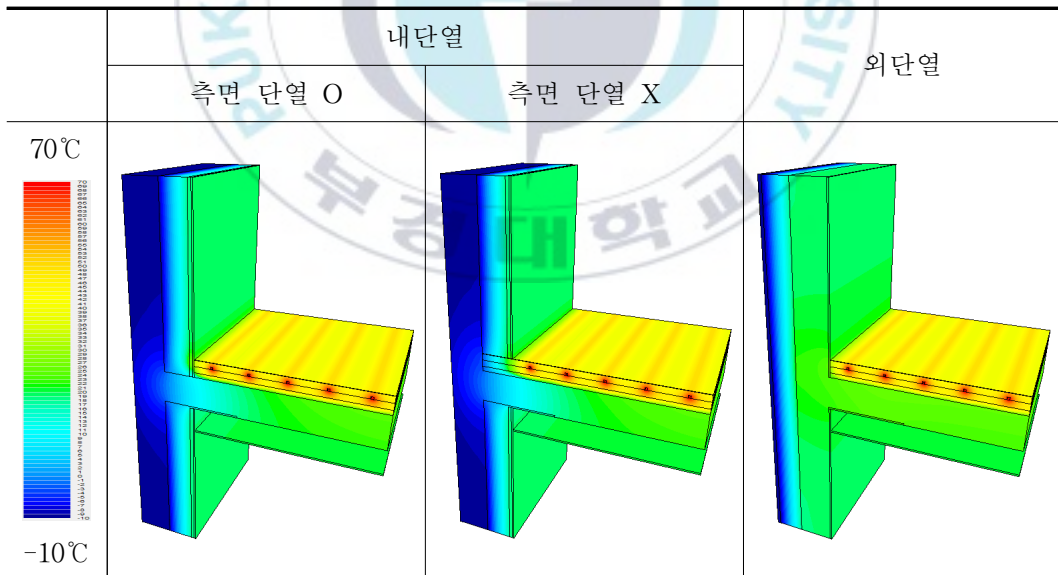
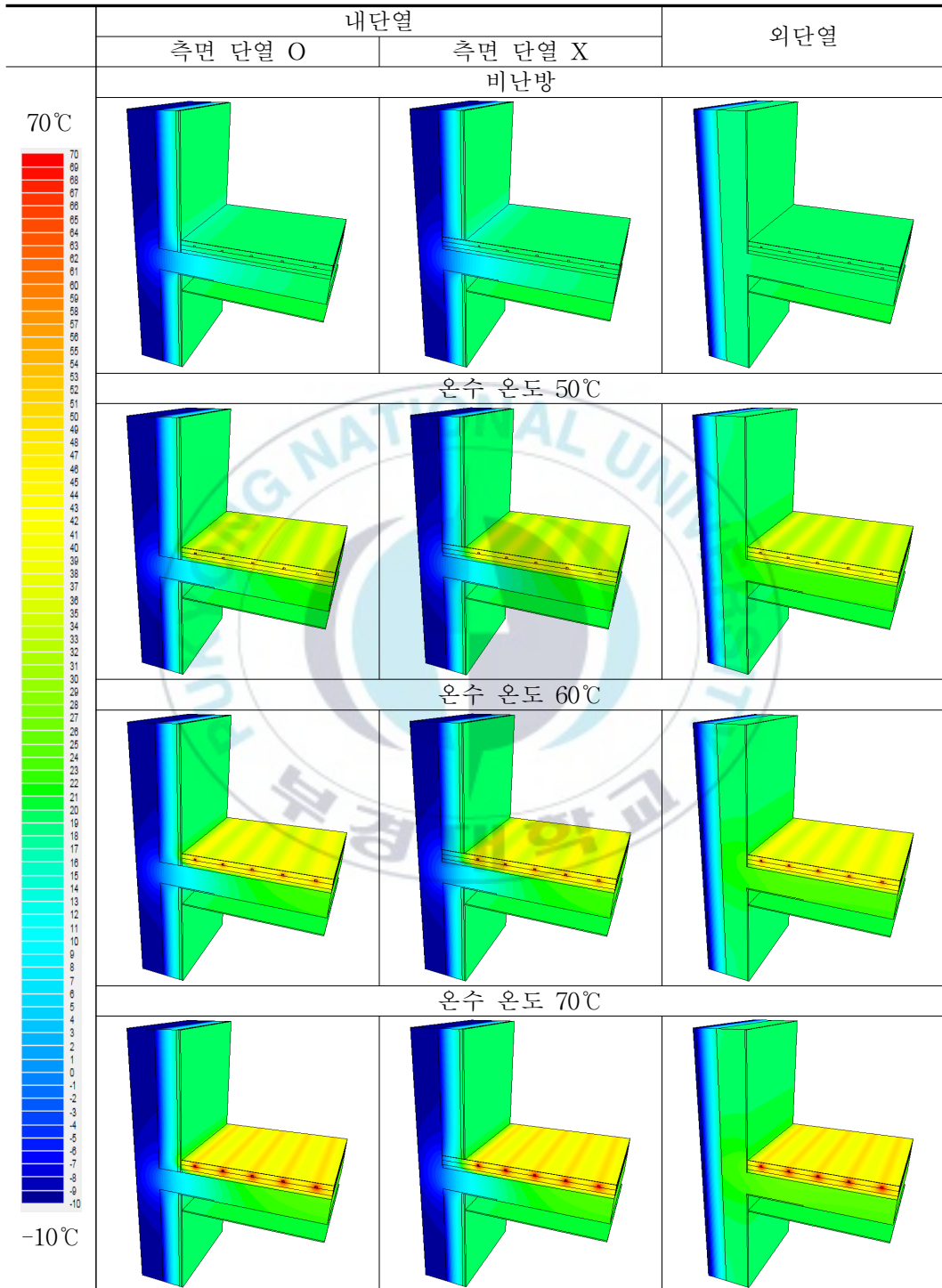


표 4.9 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포 비교



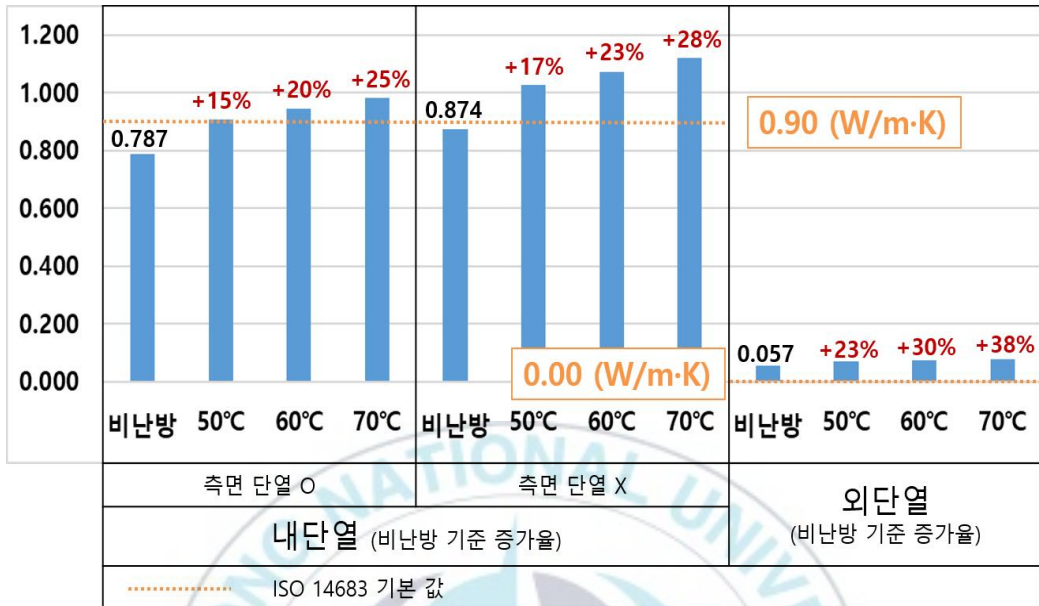


그림 4.1 축벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교

바닥 복사 난방 시스템이 가동되면 열교 부위와 실외 사이의 온도 차이가 증가하여 열류 및 선형 열관류율이 증가하였다. 측면 단열이 된 내단열 시스템에서 선형 열관류율이 0.787 W/m²K인 비난방 기준 케이스와 비교 시, 온수 온도 50°C의 경우 선형 열관류율이 15% 증가하여 0.907 W/m²K로 나타났고, 60°C의 경우 20% 증가한 0.945 W/m²K, 70°C의 경우 25% 증가한 0.983 W/m²K로 나타났다. 측면 단열이 되지 않은 모델은 열류가 더 크게 발생하였으며, 온수 온도에 따른 선형 열관류율의 증가율 또한 높은 것으로 분석되었다. 선형 열관류율 0.874 W/m²K인 비난방 기준 케이스와 비교 시, 온수 온도 50°C의 경우 선형 열관류율이 17% 증가하여 1.026 W/m²K로 나타났고, 60°C의 경우 23% 증가한 1.074 W/m²K, 70°C의 경우 28% 증가한 1.121 W/m²K로 나타났다. 내단열 시스템에서는 측면 단열의 유무와 상관없이, 온수 온도가 가장 낮은 50°C의 경우에도 ISO 14683 기준인 0.90 W/m²K 이상의 선형 열관류율

을 보였다.

외단열 시스템의 경우 선형 열관류율이 0에 가깝게 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 선형 열관류율이 $0.057 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인 기준 케이스와 비교 시 배관에 온수가 흐르게 되면 50°C 에서 23% 증가한 $0.070 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, 60°C 에서 30% 증가한 $0.074 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, 70°C 에서 38% 증가한 $0.078 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 나타났다.



2. 전면벽의 선형 열관류율 해석 결과

표 4.10~표 4.13은 전면벽의 선형 열관류율 산출 과정이며 측벽과 마찬가지로 해석 케이스 별 벽체를 통한 총 열류, 실내외 온도차, 1차원 열관류율, 1차원 열관류율 값을 가지는 부위의 면적을 활용하여 계산하였다. 표 4.14~표 4.19는 전면벽에서의 전열 해석 결과로, 표 4.14~표 4.17에서는 단열 방식에 따른 열류 및 온도 분포 차이를 비교할 수 있고 표 4.18 및 표 4.19에서는 온도 범위를 일정하게 하여 온수 온도에 따른 열류 및 온도 분포 차이를 비교할 수 있다. 전면벽의 경우 창호 프레임의 영향으로 열교 현상이 일어나는 접합부의 수가 증가하였기 때문에 실내로부터 실외로 빠져나오는 열류를 관측하여 열교 현상이 발생하는 부위를 파악할 수 있도록 실외측 해석 결과도 각 표에 같이 나타내었다. 그림 4.2는 단열 방식 및 온수 온도에 따른 선형 열관류율의 변화를 비교한 것으로 비난방 케이스를 기준으로 증가율을 비교하였으며, 확장형 발코니의 경우 ISO 14683에 기본 값이 제시되어 있지 않기 때문에 비확장형 발코니 전면벽의 기본 값을 활용하여 분석하였다.

표 4.10 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(비난방)

	단열 조건	시뮬레이션 결과
열류	내단열	$Q_{2D} = 122.70 \text{ W}$
	외단열	$Q_{2D} = 107.87 \text{ W}$
실내외 온도차	30°C	
1차원 열관류율	$U_i = 1.122 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	
면적	2.798m^2	
선형 열관류율	내단열	$\psi = 0.951 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열	$\psi = 0.456 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.11 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 50°C)

	단열 조건	시뮬레이션 결과
열류	내단열	$Q_{2D} = 125.51 \text{ W}$
	외단열	$Q_{2D} = 109.25 \text{ W}$
실내외 온도차	30°C	
1차원 열관류율	$U_i = 1.122 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	
면적	2.798m^2	
선형 열관류율	내단열	$\psi = 1.044 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열	$\psi = 0.502 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.12 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 60℃)

	단열 조건	시뮬레이션 결과
열류	내단열	$Q_{2D} = 126.41 \text{ W}$
	외단열	$Q_{2D} = 109.70 \text{ W}$
실내외 온도차	30°C	
1차원 열관류율	$U_i = 1.122 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	
면적	2.798m^2	
선형 열관류율	내단열	$\psi = 1.074 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열	$\psi = 0.517 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.13 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 산출(온수 온도 70℃)

	단열 조건	시뮬레이션 결과
열류	내단열	$Q_{2D} = 127.32 \text{ W}$
	외단열	$Q_{2D} = 110.15 \text{ W}$
실내외 온도차	30°C	
1차원 열관류율	$U_i = 1.122 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	
면적	2.798m^2	
선형 열관류율	내단열	$\psi = 1.105 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	외단열	$\psi = 0.532 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

표 4.14 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(비난방)

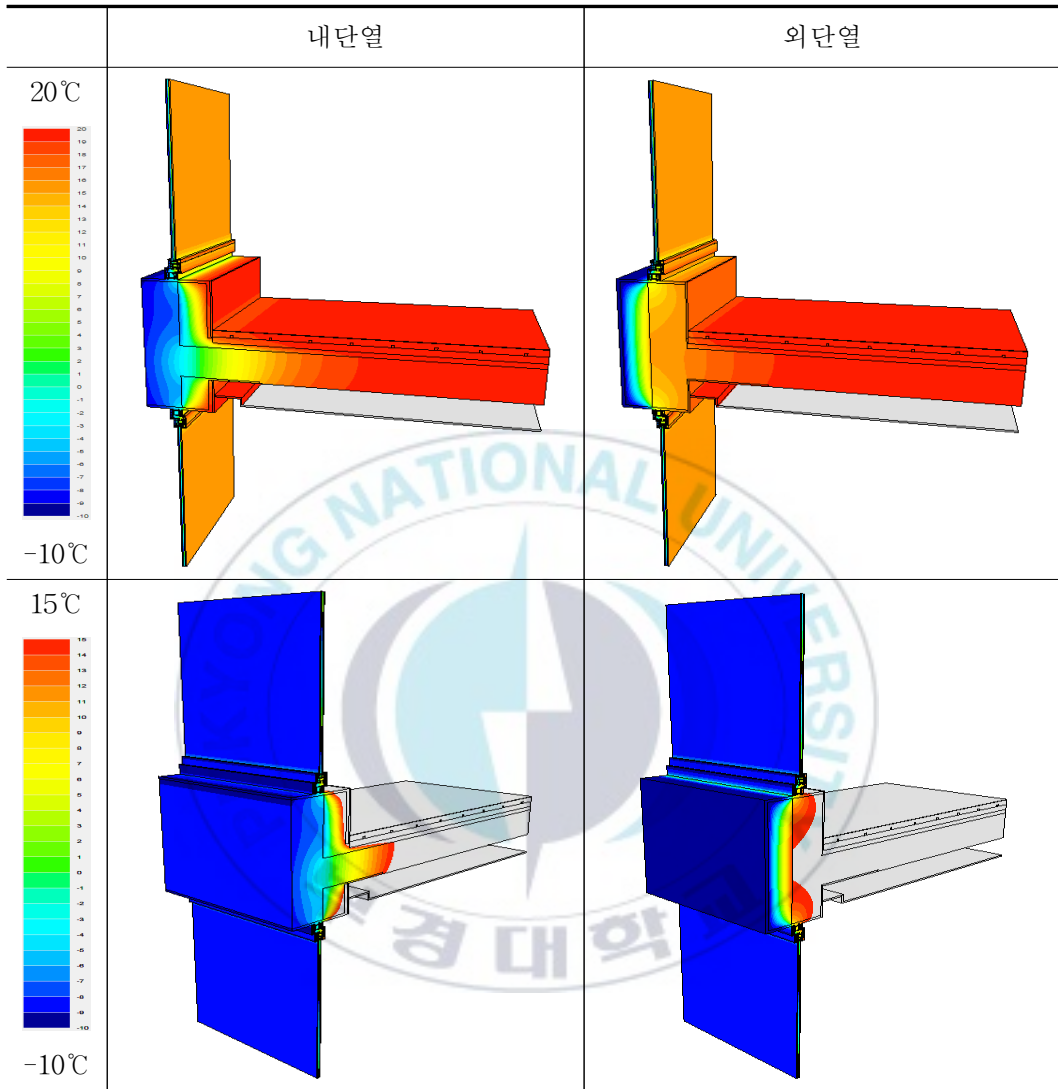


표 4.15 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 50℃)

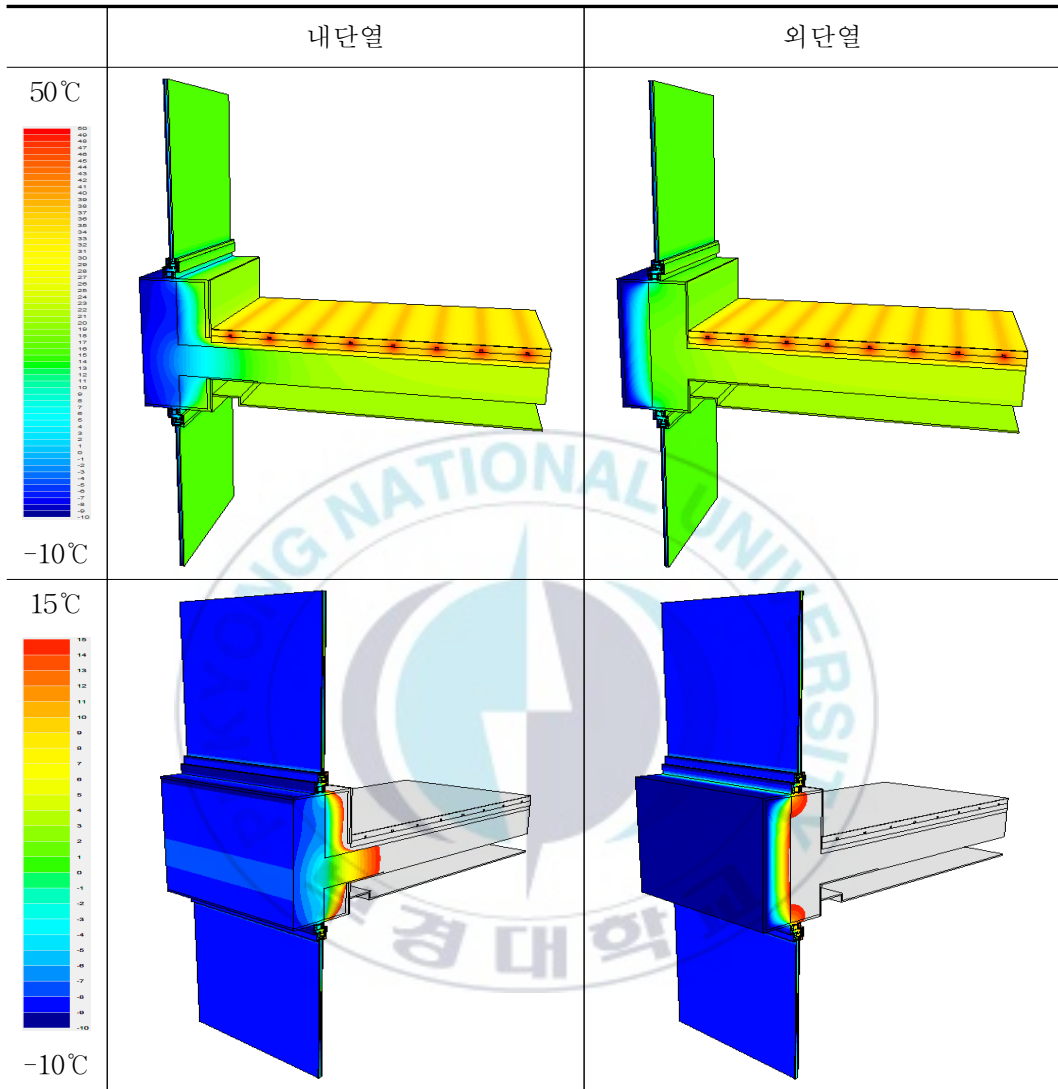


표 4.16 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 60℃)

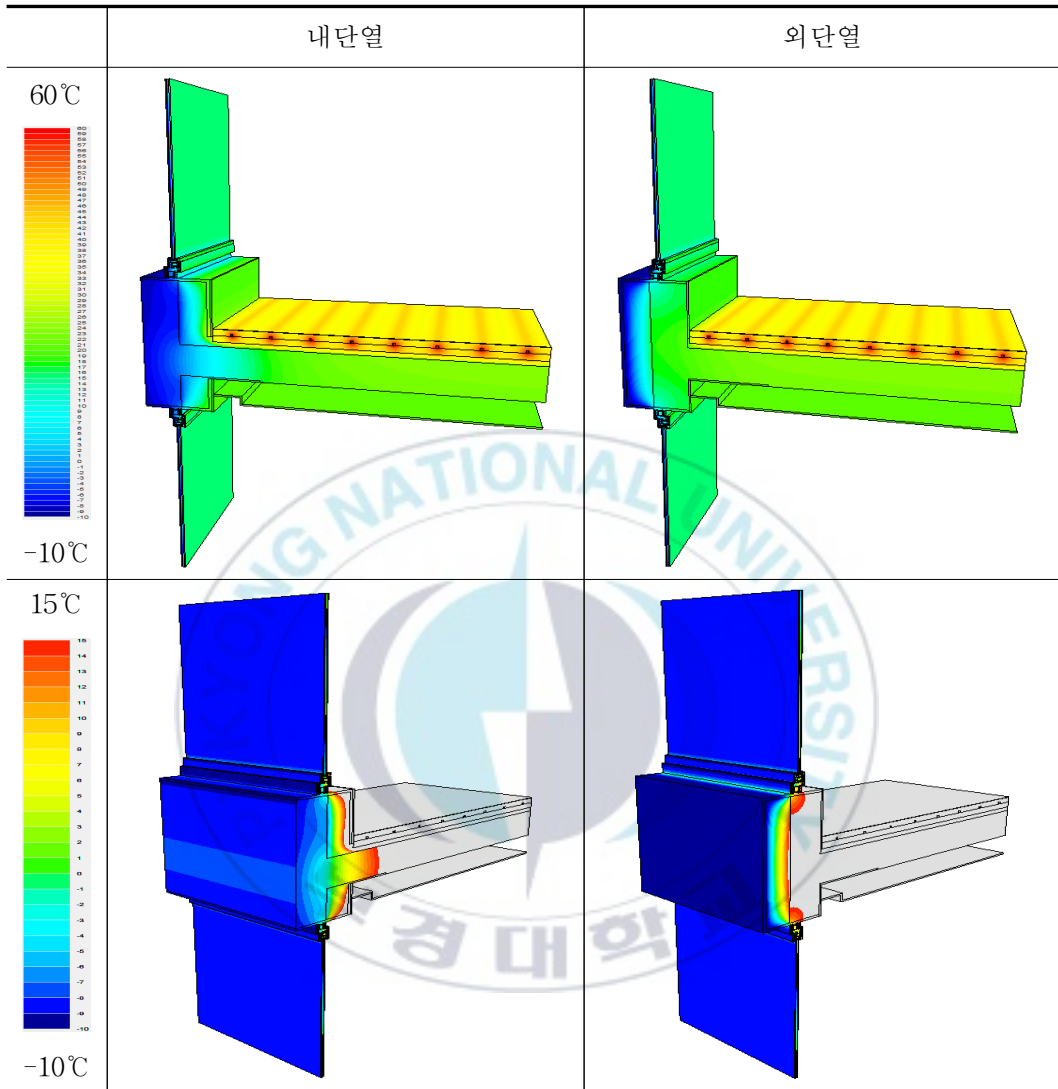


표 4.17 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포(온수 온도 70℃)

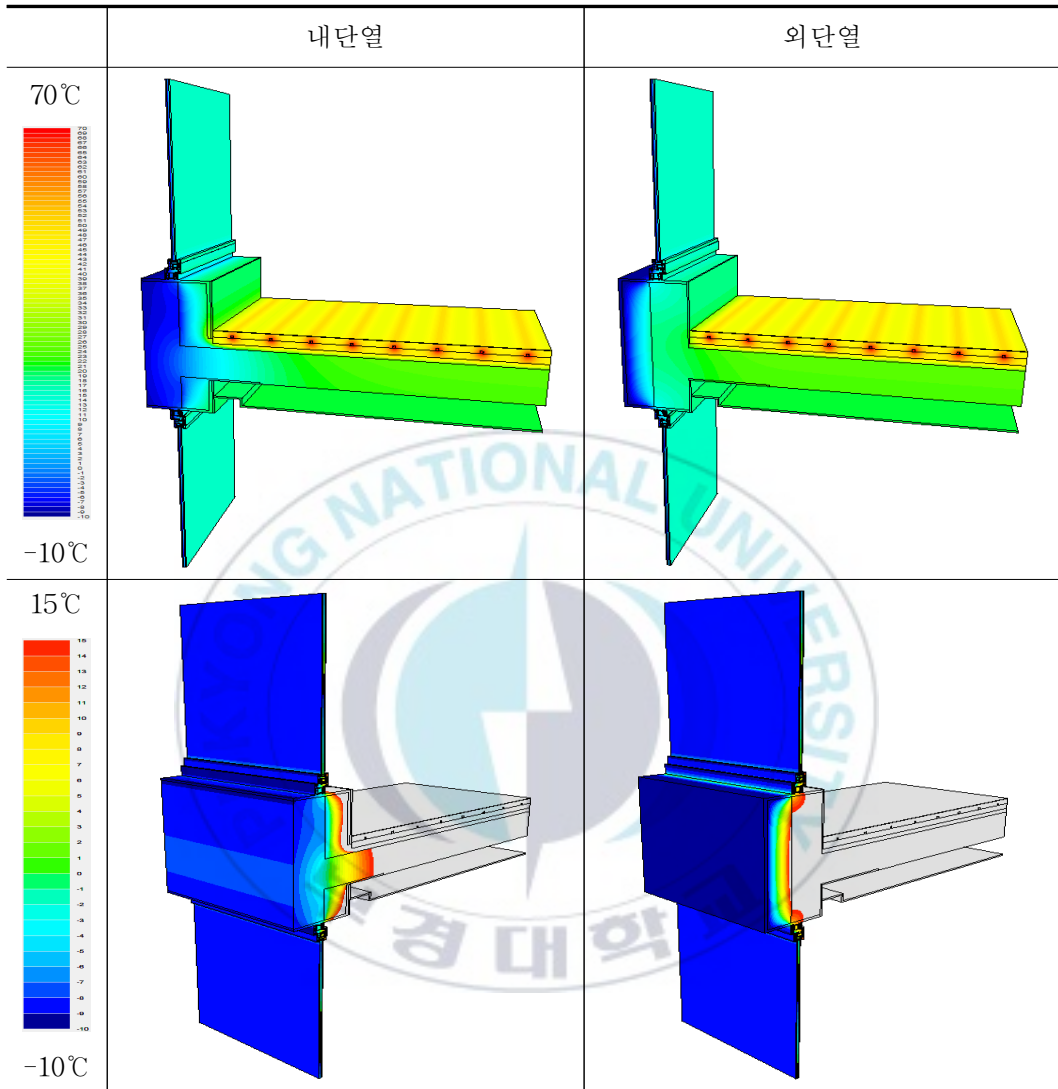


표 4.18 축벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포 비교(실내측)

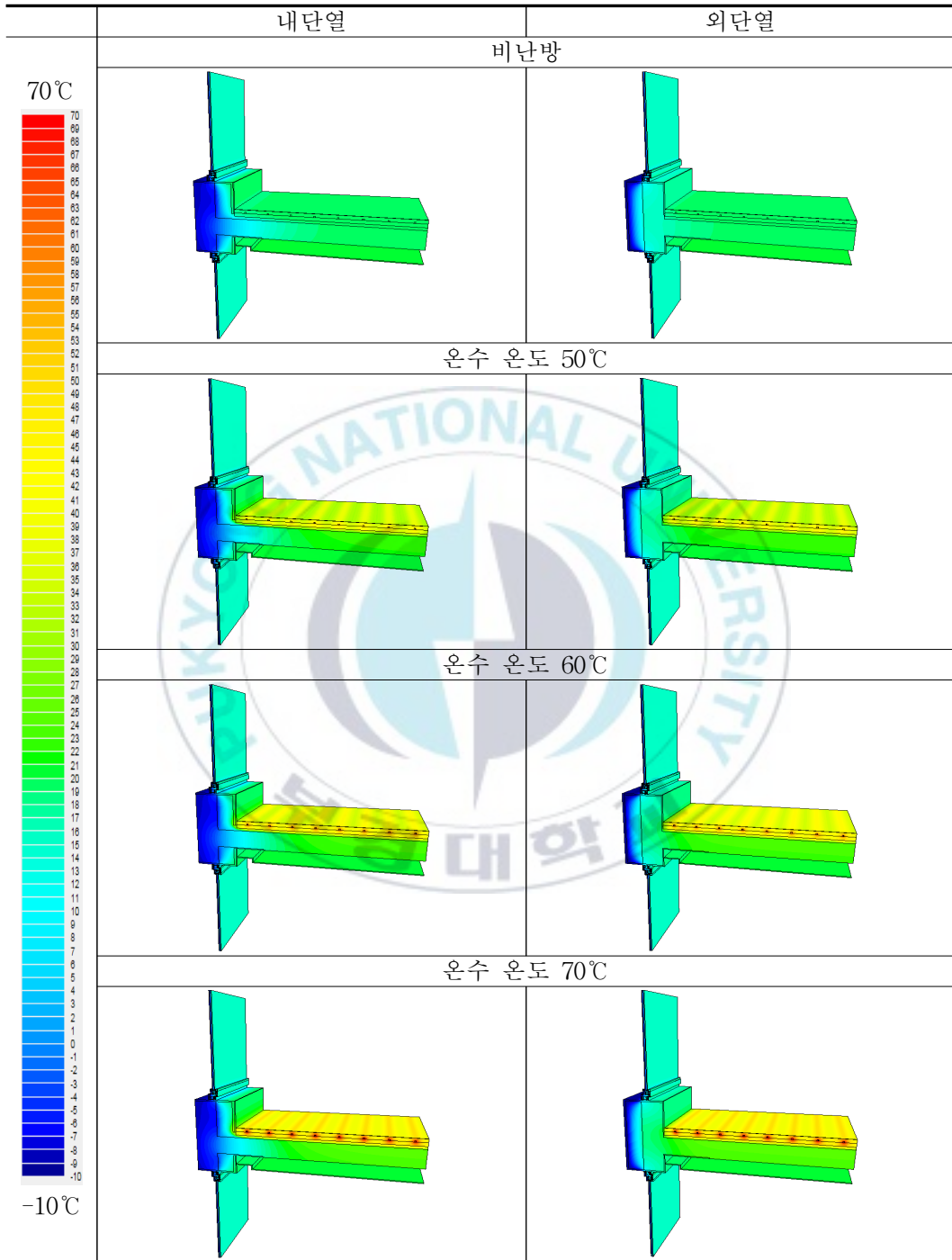
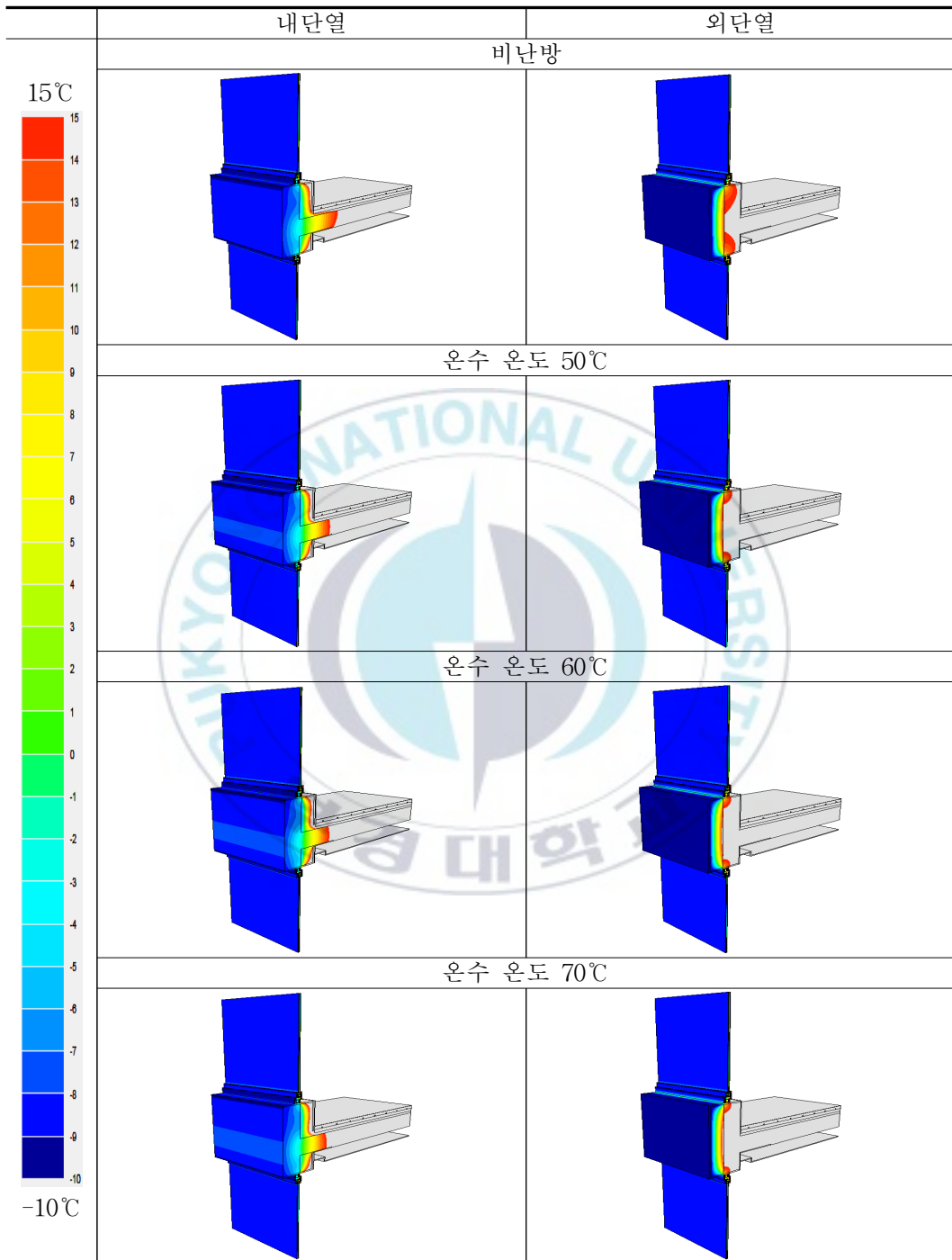


표 4.19 측벽의 벽체-슬래브 접합부 온도 분포 비교(실외측)



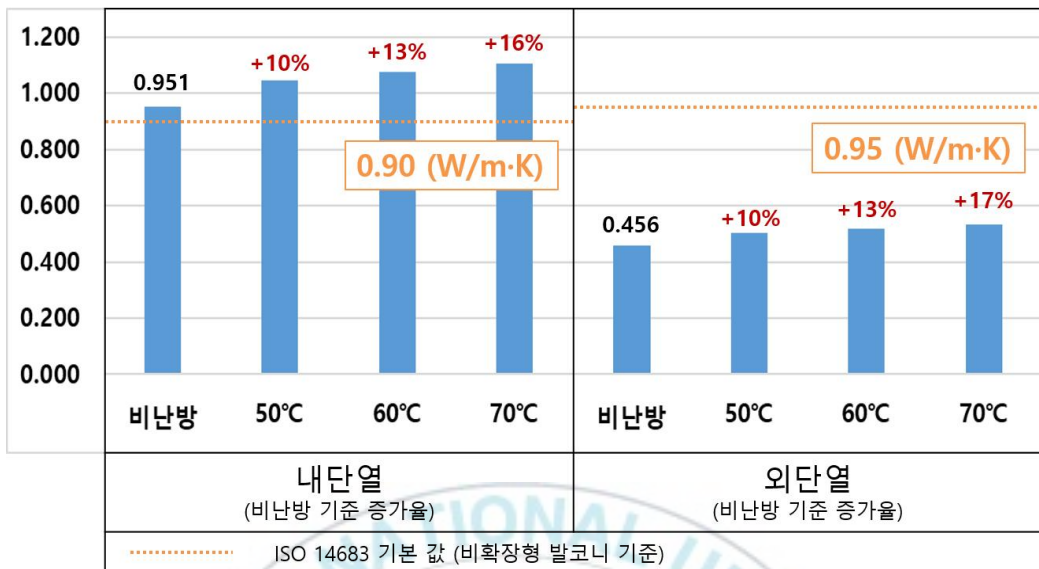


그림 4.2 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교

전면벽의 경우 내단열 시스템에서 온수가 흐르지 않는 비난방 기준 케이스의 선형 열관류율도 0.951 W/m·K로 ISO 14683 기본 값인 0.90 W/m·K를 초과하는 것으로 나타났다. 바닥 복사 난방 시스템을 가동할 경우 50°C의 온수가 흐를 시 기준 대비 10% 증가하여 1.044 W/m·K, 60°C의 온수가 흐를 시 13% 증가하여 1.074 W/m·K, 70°C의 온수가 흐를 시 16% 증가하여 1.105 W/m·K로 나타났다.

전면벽은 측벽의 선형 열관류율 변화 양상과 다르게 외단열 시스템에서 선형 열관류율이 0으로 수렴하는 열교 개선 효과를 기대할 수 없었다. 바닥 복사 난방 시스템이 가동하지 않는 기준 케이스인 비난방에서 선형 열관류율이 0.456 W/m·K로 나타났고, 바닥 복사 난방 시스템을 가동할 경우 50°C에서 10%, 60°C에서 13%, 70°C에서 17% 증가하여 각각 0.502 W/m·K, 0.517 W/m·K, 0.532 W/m·K 값을 보였다.

3. 선형 열관류율 고찰 및 활용 방안

DesignBuilder, TRNSYS 등 상용 시뮬레이션 프로그램에서는 ISO 14683 등에서 제시된 선형 열관류율 값을 입력하여 건물 에너지 해석에 열교 영향을 반영할 수 있게 되어 있다. 그러나 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 국내 공동주택에서는 ISO 14683의 기본 값에 제시된 부위와 열교 부위의 구성이 다소 상이하고, 바닥 구조체 내부의 발열로 인해 벽체-슬래브 접합부의 선형 열관류율 차이가 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 선형 열관류율의 차이는 단열 방식 및 난방 조건에 따라 측벽에서 비난방 대비 15%~38%까지 증가하는 것으로 나타나고(표 4.20 참조), 전면벽에서 비난방 대비 10%~17%까지 증가하는 것으로 나타나(표 4.21 참조) 구조체 물성 조건으로 선형 열관류율을 입력할 때 기존에 제시된 선형 열관류율을 조정할 필요성이 있다고 판단된다.

표 4.20 측벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교

선형 열관류율 (W/m·K)		내단열 (ISO 14683 기본 값 = 0.90 W/m·K)		외단열 (ISO 14683 기본 값 = 0.00 W/m·K)
		측면 단열 O	측면 단열 X	
측벽	비난방	0.787 (-)	0.874 (-)	0.057 (-)
	50℃	0.907 (+15%)	1.026 (+17%)	0.070 (+23%)
	60℃	0.945 (+20%)	1.074 (+23%)	0.074 (+30%)
	70℃	0.983 (+25%)	1.121 (+28%)	0.078 (+38%)

표 4.21 전면벽의 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율 비교

선형 열관류율 (W/m·K)		내단열 (ISO 14683 기본 값 = 0.90 W/m·K)	외단열 (ISO 14683 기본 값 = 0.95 W/m·K)
측 벽	비난방	0.951 (-)	0.456 (-)
	50℃	1.044 (+10%)	0.502 (+10%)
	60℃	1.074 (+13%)	0.517 (+13%)
	70℃	1.105 (+16%)	0.532 (+17%)



V 선형 열관류율을 활용한 에너지 해석

1. 선형 열관류율의 에너지 해석 적용 방법

건물 에너지 해석 시뮬레이션인 DesignBuilder에서는 건물의 주요 부위에 선형 열관류율 값을 입력하여 열교 영향을 반영한 연간 에너지 소비량을 도출할 수 있다. 이에 본 연구에서는 DesignBuilder v5.5를 활용하여 ISO 14683 기본 값에 제시된 선형 열관류율 값과 전열 해석 시뮬레이션을 통해 계산된 보정 선형 열관류율 값을 적용한 연간 난방 에너지 소비량을 도출하고 이를 비교 분석해보았다. 또한 바닥 복사 난방 시스템의 유무에 따른 연간 난방 에너지 소비량 변화를 분석하기 위해 표 5.1과 같이 각각의 선형 열관류율을 적용하였을 경우에 대하여 ‘비가동’, ‘온수 온도 60℃’로 해석 케이스를 세부 분류하였다. 에너지 해석 시뮬레이션을 위한 모델은 그림 3.1의 설계도를 참고하여 공동주택의 기준층을 설계한 것으로 그림 5.1과 같으며, 바닥 복사 난방 시스템의 모델은 그림 5.2와 같다.

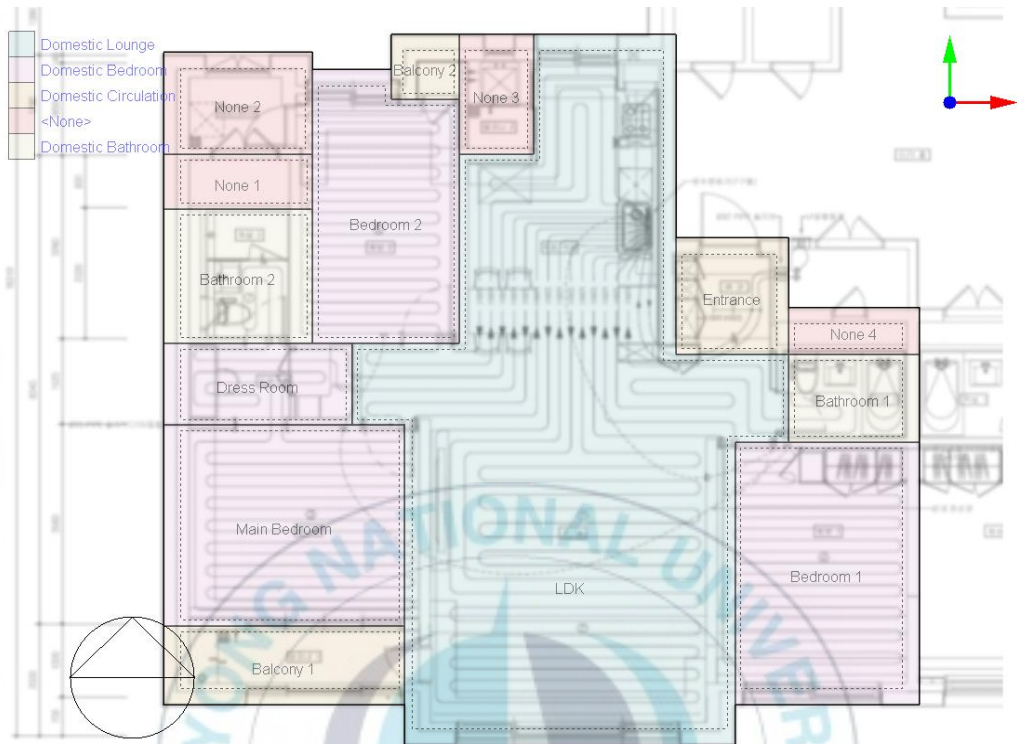


그림 5.1 건물 에너지 해석 시뮬레이션 모델

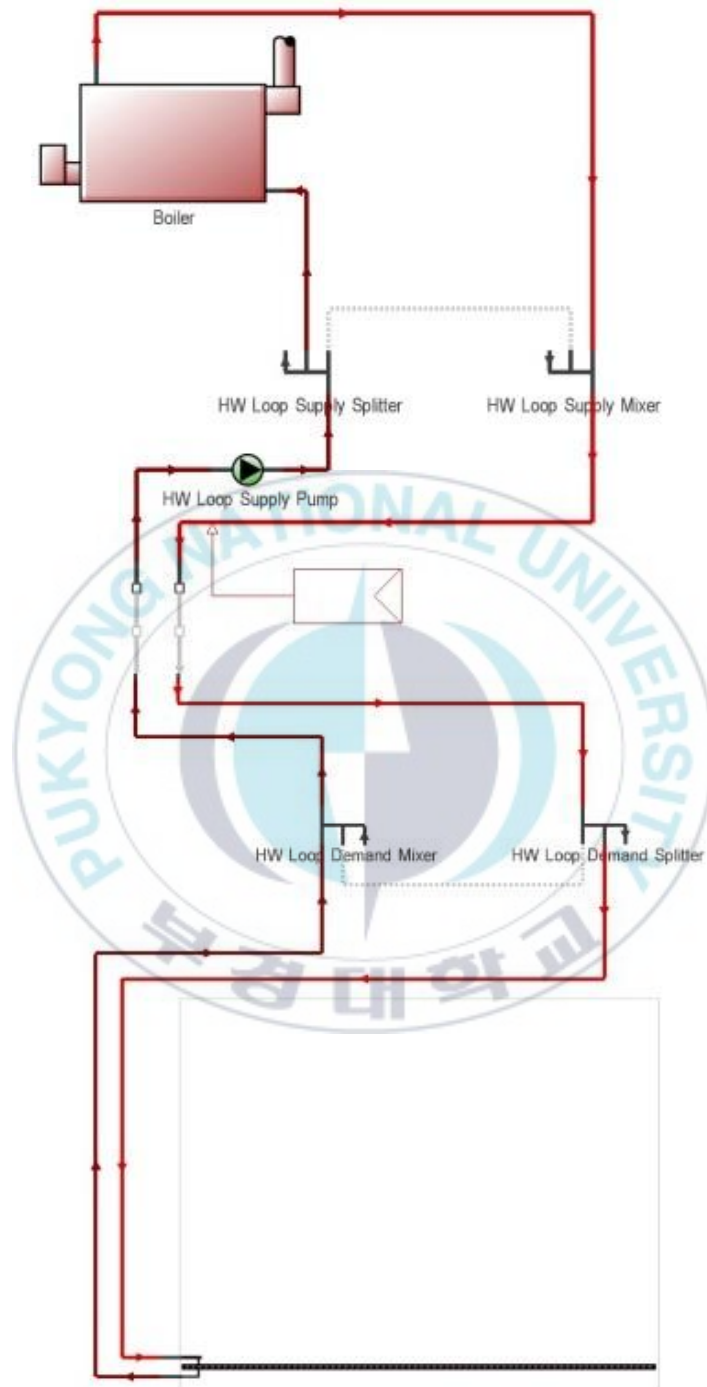


그림 5.2 바닥 복사 난방 시스템 모델

표 5.1 시뮬레이션 해석 케이스

내단열 (측면 단열 X)		ISO 14683 기본 값 적용 (W/m·K)	보정 선형 열관류율 적용 (W/m·K)
비가동	측벽	0.90	0.874
	전면벽	0.90	0.951
온수 온도 60℃	측벽	0.90	1.074
	전면벽	0.90	1.074

시뮬레이션 해석 결과는 표 5.2와 같다. 바닥 복사 난방 시스템을 가동하지 않고 실내외 온도 조건만 설정하여 해석했음에도 불구하고, 보정 선형 열관류율을 적용하였을 경우 ISO 14683 선형 열관류율 기본 값을 적용했을 경우 보다 연간 난방 에너지 소비량이 약 1.1% 정도 높게 나타났다. 바닥 복사 난방 시스템이 가동될 경우 이 차이는 더 커지게 되는데, 60℃의 온수가 흐를 경우 보정 선형 열관류율을 적용한 케이스가 ISO 14683 기본 값을 적용한 케이스 보다 연간 난방 에너지 소비량이 약 3.5% 높게 나타났다.

표 5.2 해석 케이스 별 연간 난방 에너지 소비량 비교

	ISO 14683 기본 값 적용 (kWh)	보정 선형 열관류율 적용 (kWh)
비가동	4,299 (-)	4,347 (+1.1%)
온수 온도 60℃	4,501 (-)	4,659 (+3.5%)

2. 바닥 복사 난방 시스템 적용 건물의 열교 개선 방안

가. 저온수 난방 시스템

바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택에서 보정 선형 열관류율을 적용하여 연간 난방 에너지 소비량을 도출한 결과, 동일한 실내 온도 조건임에도 불구하고 난방수 공급 온도가 높을수록 연간 난방 에너지 소비량이 높은 것을 확인할 수 있었다(표 5.3). 온수 온도가 올라감에 따라 구조체 내부의 온도 및 방열량이 상승하게 되고, 그 결과 벽체-슬래브 접합부의 선형 열관류율이 증가하게 되어 연간 난방 에너지 소비량의 증가로 이어지게 된다. 따라서 바닥 복사 난방 시스템에서 선형 열교의 개선을 위한 방안으로 난방수 공급 온도를 낮게 설정하는 ‘저온수 난방 시스템’을 제시할 수 있다.

표 5.3 난방수 공급 온도 별 연간 난방 에너지 소비량

난방수 공급 온도	선형 열관류율 (W/m ² ·K)		연간 난방 에너지 소비량 (kWh)
	측벽	전면벽	
온수 온도 50℃	측벽	1.026	4,626
	전면벽	1.044	
온수 온도 60℃	측벽	1.074	4,659
	전면벽	1.074	
온수 온도 70℃	측벽	1.121	4,717
	전면벽	1.105	

나. 창호 프레임의 위치 조절

전면벽의 경우 측벽과 같이 외단열 시스템에서 선형 열관류율이 0으로 수렴하는 열교 개선 효과를 기대할 수 없었다. 이는 벽체-슬래브 접합부뿐만 아니라 창호 프레임과 구조체 사이를 통한 열교 효과로 인해 선형 열관류율이 증가하기 때문으로 사료된다. 즉, 외단열 시스템을 적용하더라도 단열재가 끊기는 부위가 발생하므로, 측벽과 같은 열교 차단 효과를 기대할 수 없는 것이다.

이처럼 이질 재료의 접합으로 인해 단열재의 불연속이 반드시 생길 경우, 표 5.4에 나타난 것과 같이 창호 프레임의 위치를 구조체 위에서 단열재 쪽으로 이동하게 되면 선형 열관류율이 감소하는 것을 알 수 있다. 일반 공동주택의 적정 난방수 공급 온도가 60℃인 점을 고려하여* 온수 온도 60℃의 모델을 기준 케이스로 창호 프레임의 위치에 따른 선형 열관류율을 산출하고, 그 값을 건물 에너지 해석 시뮬레이션에 적용하여 연간 난방 에너지 소비량을 도출하였다. 그 결과, 구조체 위에 창호가 놓인 경우와 비교 시 단열재 위에 창호가 놓일 경우 선형 열관류율이 45% 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 연간 난방 에너지 소비량이 5.9% 절감되는 것을 확인할 수 있었다(표 5.5).

비록 전열 해석하여 계산된 보정 선형 열관류율 값이 기존의 ISO 14683 기본 값 보다 전반적으로 작은 값을 보였지만, 확장형 발코니와 비확장형 발코니의 파라펫 형상이 상이한 것을 고려하지 않고 비교한 결과로서 단순 비교에 무리가 있다. 따라서 창호가 외기에 직접적으로 닿는 확장형 발코니 전면벽의 선형 열관류율을 평가하기 위한 새로운 기준 값이 필요할 것으로 사료된다.

* 서울에너지공사, 『열사용시설기준(2017.01.03.)』, 제20조 4항 열교환설비의 2차측 열매체의 설계온도, [표6] 단위 열교환설비의 2차측 열매체의 설계온도.

표 5.4 창호 프레임의 위치에 따른 선형 열관류율 비교

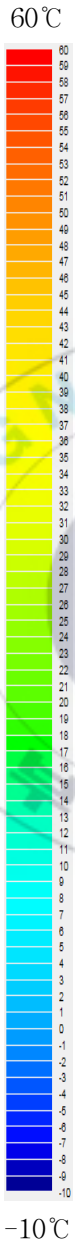
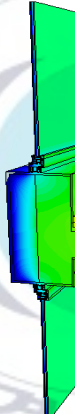
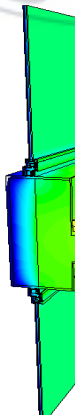
창호 프레임 위치	온도 분포	선형 열관류율
철근 콘크리트		0.517 W/m·K (-)
철근 콘크리트 & 단열재		0.408 W/m·K (-21%)
단열재		0.287 W/m·K (-45%)

표 5.5 창호 프레임의 위치에 따른 연간 난방 에너지 소비량 비교

창호 프레임 위치	선형 열관류율 (W/m·K)		연간 난방 에너지 소비량 (kWh)
철근 콘크리트	측벽	1.074	4,122 (-)
	전면벽	0.517	
철근 콘크리트 & 단열재	측벽	1.074	4,004 (-2.9%)
	전면벽	0.408	
단열재	측벽	1.074	3,881 (-5.9%)
	전면벽	0.287	



3. 에너지 해석 개선 방안

DesignBuilder와 같은 건물 에너지 해석 시뮬레이션 프로그램에서는 주요 부위의 선형 열관류율 값을 입력하여 건물 에너지 해석에 열교 영향을 반영할 수 있게 되어 있다. 하지만 외기온 및 일사의 일중 변화, 난방 제어에 따른 방열량 변화를 고려한다면 고정된 선형 열관류율을 건물 에너지 해석 시뮬레이션에 적용할 경우 열류가 과도하게 해석될 가능성이 있다.

실제 바닥 복사 난방 시스템은 실내 온도, 외기 온도, 난방 설정 온도에 따라 ON/OFF를 반복하여 열교 부위를 통한 열류가 고정되지 않고 연속적으로 변화할 수 있다. 따라서 보다 정확한 건물 에너지 해석을 위해서는 선형 열관류율이 연속적인 난방 운전에 따라 어느 정도 범위에서 변화하는지를 분석하여 평균 선형 열관류율을 산출하고, 이를 시뮬레이션에 반영할 필요가 있다.

또는 전열 해석 시뮬레이션과 건물 에너지 해석 시뮬레이션을 연계하는 방법이 있다. 건물 에너지 해석 시뮬레이션에서 실내 설정 온도 및 외기온 등을 전열 해석 시뮬레이션에 전달하면 이를 이용하여 열교 부위의 열류 및 선형 열관류율을 산출하고, 이를 다시 건물 에너지 해석 시뮬레이션의 입력 값으로 전달하여 연간 에너지 해석하는 방법을 고려할 수 있으며, 이를 위한 후속 연구의 진행이 필요하다고 사료된다.

VI 결 론

본 연구에서는 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택의 에너지 해석에 열교 영향을 반영하기 위한 대안으로 벽체-슬래브 접합부 선형 열관류율의 적합성을 검토하였다. 이를 위해 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택의 측벽과 전면벽에 대해 전열 해석을 수행하여 선형 열관류율을 산출하고 산출된 값을 ISO 14683에 제시된 선형 열관류율 기본 값과 비교 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 정상 상태 시뮬레이션 해석 결과, 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택에서 벽체-슬래브 접합부의 선형 열관류율은 단열 방식 및 온수 온도에 따라 측벽의 경우 비난방 대비 최소 15%에서 최대 38%까지 증가하고, 전면벽의 경우 최소 10%에서 17%까지 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 모든 케이스에서 온수 온도가 가장 낮은 50℃의 경우에도 ISO 14683 기본 값 이상의 선형 열관류율을 보였다(표 4.20, 표 4.21 참조).
- (2) 내단열 시스템이 적용되거나 난방수 온도가 높을수록 선형 열관류율이 더 크게 나타났다. 내단열 시스템이 대부분이며 높은 난방 온수 온도를 선호하는 국내 공동주택의 현황을 감안한다면 선형 열관류율 기본 값에 대한 보정 필요성이 더 높다고 하겠다.
- (3) 선형 열관류율을 건물 에너지 해석 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 공동주택에서 열교 영향을 반영한 연간 난방 에너지 소비량을 도출한 결과, 보정 선형 열관류율을 적용한 경우 ISO 14683 기본 값을 적용

하였을 때 보다 연간 난방 에너지 소비량이 약 1.1% 높게 나타났다. 바닥 복사 난방 시스템이 가동될 경우 그 차이는 더 커지며 60℃의 온수가 흐를 경우 3.5%의 증가율을 보인다(표 5.2 참조).

- (4) 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택에서 열교의 개선 방안으로 ‘저온수 난방 시스템’과 창호 프레임의 위치 조절 등을 제시할 수 있다. 이와 같이 선형 열관류율을 활용하여 연간 에너지 소비량을 도출하고 열교의 개선 방안을 연구하기 위해서는 건물 에너지 해석 시뮬레이션에 적절하게 적용 가능한 선형 열관류율과 관련된 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 정상 상태의 열류 해석 결과에 기반한 선형 열관류율을 분석하였다. 그러나 실내외 온도 차이에 의해서 계산된 선형 열관류율을 건물 에너지 해석 시뮬레이션에 고정 값으로 입력할 경우, 외기온 및 일사의 변화, 난방 제어에 따른 방열량의 변화, 구조체의 축열 변화 등 일중 변화하는 외부 조건을 반영하지 못하여 열교 부위를 통한 열류가 과도하게 해석될 가능성이 있다. 그러므로 추가 연구로서 비정상 상태 전열 해석을 통해 선형 열관류율의 일간 변화를 분석하여 건물 에너지 시뮬레이션에 입력할 수 있는 선형 열관류율 대푯값을 도출할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Anderson B (2002), Conventions for U-value calculations, CRC.
- [2] Ascione F., Bianco N., de’Rossi F., Turni G., Vanoli G. P. (2012), Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates, *Applied Energy*, 97, pp.405-418.
- [3] Baba F., Ge H. (2016), Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of residential buildings in BC, *eSIM 2016 Conference Proceedings*, IBPSA.
- [4] Berggren B., Wall M. (2013), Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes - Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology, *Energy and Building*, 65, pp.331-339.
- [5] Capozzoli A., Gorrino A., Corrado V. (2013), A building thermal bridges sensitivity analysis, *Applied Energy*, 107, pp.229-243.
- [6] Cappelletti F., Corrado V., Gasparella A., Gorrino A. (2010), Detailed assessment of thermal bridges in highly insulated buildings, In *Proceedings of the 10th REHVA World Congress’ Sustainable Energy Use in Buildings*, Antalya, Turkey, pp.9-12.
- [7] Deque F., Ollivier F., Roux J. J. (2001), Effect of 2D modelling of thermal bridges on the energy performance of buildings: numeric application on the Matisse apartment, *Energy and Buildings*, 33(6), pp.583-587.
- [8] Erhorn-Kluttig H., Erhorn H. (2009), Impact of thermal bridges on the energy performance of buildings, *Information Paper P148 of the EPBD*

Buildings Platform.

- [9] Evola G., Margani G., Marletta L. (2011), Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 43(9), pp.2385-2393.
- [10] Frank P. Incropera, David P. DeWitt (2002), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer Fifth Edition*, JOHN WILEY & SONS.
- [11] Gao Y., Roux J. J., Zhao L. H., Jiang Y. (2008), Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses, *Energy and Buildings*, 40(12), pp.2236-2243.
- [12] Ge H., Baba F. (2015), Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building, *Energy and Buildings*, 105, pp.106-118.
- [13] IEE. (2010), *Assessment and Improvement of the EPBD Impact (for new buildings and building renovation)*, IEE SAVE ASIEPI project, Intelligent Energy Europe.
- [14] ISO. (2007), *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*, ISO 6946, International Organization for Standardization.
- [15] ISO. (2007), *Thermal bridge in building construction - Heat flows and surface temperature - Detailed calculations*, ISO 10211, International Organization for Standardization.
- [16] ISO. (2008), *Thermal bridge in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified method and default values*, ISO 14683, International Organization for Standardization.
- [17] Seung-Yeong Song (2011), *Energy Efficiency Analysis of Internally and Externally Insulated Apartment Buildings - Comparison of*

Insulation Systems for Thermal Bridges Adjacent to Hot Water Heating Pipes, Journal of Asian Architecture and Building Engineering.

- [18] Theodosiou T. G., Papadopoulos A. M. (2008), The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, Energy and Buildings, 40(11), pp.2083-2089.
- [19] 이종성, 이도현, 전명훈 (2014), 공동주택의 단열형태별 선형열관류율 평가, LHI Journal, 5(4), pp.315-323.

