

## 스틸 스티드 모듈러 건축물 접합부위의 결로방지성능 개선방안 평가

### Evaluation of Condensation Resistance of Steel Stud Wall Corner Details in Modular Buildings

오지현\* · 양시원\*\* · 조봉호\*\*\* · 김선숙\*\*\*†

Oh Ji Hyun\*, Yang Si Won\*\*, Cho Bong Ho\*\*\* and Kim Sun Sook\*\*\*†

(Submit date : 2014. 5. 1., Judgment date : 2014. 5. 2., Publication decide date : 2014. 6. 27.)

**Abstract :** Modular systems are widely used in various building types including housing, dormitory, and barracks. Steel studs have many advantages over other materials as construction components of modular buildings in terms of seismic performance, durability and maintenance. However, steel stud modular systems also have weakness in condensation resistance due to high thermal conductivity of steel. The purpose of this study is to investigate the condensation resistance of steel stud wall corner details in modular buildings by thermal simulation. The condensation resistance was evaluated by temperature difference ratio according to ISO 13788. The result showed that there was little difference between the alternatives of adding cavity and insulation. Separation of interstitial steel studs showed outstanding effect on the improvement of temperature difference ratio.

**Key Words :** 스틸 스티드(Steel stud), 모듈러 건축물(Modular building), 열교부(Thermal bridge), 결로방지성능(Condensation resistance), 단열성능(Thermal performance)

\*\*\*† 김선숙(교신저자) : 아주대학교 건축학과  
E-mail : kss@ajou.ac.kr, Tel : 031-219-3571

\*오지현 : 아주대학교 건축학과 건축학 전공

\*\*양시원 : 아주대학교 대학원 건축학과

\*\*\*조봉호 : 아주대학교 건축학과

\*\*\*† Kim Sun Sook(corresponding author) : Department of  
Architecture, Ajou University

E-mail : kss@ajou.ac.kr, Tel : 031-219-3571

\*Oh Ji Hyun : Architecture Major, Department of Architecture,  
Ajou University

\*\*Yang Si Won : Graduate School, Department of Architecture,  
Ajou University

\*\*\*Cho Bong Ho : Department of Architecture, Ajou University

## 기 호 설 명

$f_{Rsi}$	: 온도계수
$T_{DR}$	: 온도차이비율
$T_m$	: 최저 실내표면온도(°C)
$T_i$	: 실내온도(°C)
$T_e$	: 실외온도(°C)
$R_T$	: 벽체 열저항(m <sup>2</sup> K/W)
$R_{si}$	: 실내 표면열저항(m <sup>2</sup> K/W)
$U$	: 열관류율(W/m <sup>2</sup> K)
$\lambda$	: 열전도율(W/mK)
$h$	: (m <sup>2</sup> K/W)
$\epsilon$	: 방사율 (-)

## 1. 서 론

모듈러 건축물은 공장에서 유닛형태로 사전 제작하고 현장에서 조립, 적층하는 공법으로, 일반적인 현장 시공공법과 비교하여 공기단축, 공장생산에 따른 품질관리 용이성, 공사비용 절감 등의 장점이 있어 최근 적용이 확대되고 있다. 실제로 국내외에서 공공임시주택, 기숙사, 군부대 생활관, 숙박시설 등 단기간 시공 및 대량생산이 필요한 다양한 시설유형에 모듈러 건축물이 활용되고 있다.

모듈러 건축물은 주요 구성부재의 종류에 따라 스틸, 목조, 프리캐스트 콘크리트 모듈러 건축시스템으로 구분된다. 이 중에서도 스틸 스티드를 활용한 모듈러 건축시스템은 형강, 각형강관, 스틸 스티드들을 용접 및 볼트로 결합하는 건식공법으로 제작되기 때문에, 내진·내구성이 뛰어나고 비교적 경량이어서 운송비용이 절감된다는 장점이 있다. 그러나 열적 성능의 관점에서 보면, 열전도율이 높은 스틸 부재가 구조체를 이루기 때문에 내부 구조

부재 및 모서리 접합부에 열교(Thermal bridge)가 발생할 우려가 크다. 이러한 열교현상은 건물의 단열성능을 저하시켜 에너지 손실을 유발할 뿐만 아니라, 벽체의 온도가 실내공기의 노점온도보다 낮아질 경우 표면결로현상까지 발생시키게 된다.

특히 구조체의 접합부에서는 스틸 스티드 뿐 아니라 각형강관 등 열전도율이 낮은 결합용 부재의 사용량 및 접촉 면적이 증가하여 표면온도가 상대적으로 낮아지게 되므로, 각 구조체가 평균열관류율 기준을 만족한다 하더라도 해당부위에 선형열교 및 점형열교가 발생하므로 열교현상에 따른 표면결로가 발생할 가능성이 더욱 커지게 된다. 이러한 표면결로 현상은 구조체를 훼손시킬 뿐만 아니라 가구 및 실내공간을 오염시키고 거주자의 쾌적도를 떨어뜨리기 때문에 거주공간에서 중요하게 다뤄져야하는 문제이다.

국토교통부는 이와 같은 결로의 문제점을 인지하고, 공동주택의 결로방지성능 평가방법 및 기준에 대해 구체적으로 명시한 「공동주택 결로 방지를 위한 설계기준」<sup>1)</sup>을 2013년에 제정하여 고시하였다. 또한 이 기준에서 제시한 성능을 만족시키기 위한 구체적인 단열상세도를 포함한 「공동주택 결로방지를 위한 상세도 가이드라인」<sup>2)</sup>도 함께 제시하였다.

그러나 스틸 스티드 모듈러 건축물의 경우 구조적 특성상 벽식 구조를 기본으로 하는 이 가이드라인의 단열상세도를 그대로 활용할 수 없다는 한계가 있다. 또한 스틸 스티드 주택을 공업화주택으로 인정받고자 할 경우에는 「공업화주택의 성능 및 생산기준」<sup>3)</sup>에서 규정하는 결로방지성능 기준까지 준수해야 하므로 열교부위 상세 설계시 단열성능에 대한 고려가 더욱 필요하다. 그러므로 단열성능 향상을 위해 일반적으로 사용하는 각각의 개선대안들

이 결로방지성능 향상에 얼마나 영향을 주는 지 파악함으로써 결로방지성능 기준 달성을 위하여 단열상세 개선에 효과적으로 활용되고 자 한다.

이에 본 연구에서는 스틸 스티드 모듈러 건축물의 결로방지성능과 관련된 기준들을 확인하고, 열교부위 결로방지성능 향상을 위한 각 단열상세 개선방안들을 시뮬레이션한 후, 그 효과를 비교·평가하고자 한다.

## 2. 연구 방법 및 대상

### 2.1 결로방지성능 평가지표 및 기준 설정

건축물의 부위별 결로방지성능 평가지표로는 ISO 13788<sup>4)</sup>과 ISO 10211<sup>5)</sup>에서 제시하고 있는 식(1)의 온도계수(Temperature factor)가 널리 사용되고 있다. 임의의 실내외 온도조건에서의 최저 실내표면온도를 통해 산출된 온도계수를 활용하면 다양한 실내외 조건에서의 결로발생 여부를 확인할 수 있다.

$$f_{Rsi} = \frac{R_T - R_{si}}{R_T} = \frac{T_m - T_o}{T_i - T_o} \quad (1)$$

「공업화주택의 성능 및 생산기준」에서는 결로방지의 성능시험방법으로 ISO 10211등 국제표준에 적합한 프로그램을 사용하여 실시한 건축물 결로방지성능 시뮬레이션에 의하여 측정하되, 접합부위의 표면온도와 실내·외 온도의 온도차이비율이 0.2 이하여야한다고 명시하고 있으며, 온도차이비율 TDR (Temperature Difference Ratio)는 식(2)를 이용하여 산정한다. 온도차이비율과 온도계수는 같은 의미이나 계산방법에 차이를 가지므로 온도계수는 1에 가까울수록, 온도차이비율의 경우 0에 가까울수록 결로방지성능이 우수함을 의미한다.

$$TDR = \frac{T_i - T_m}{T_i - T_o} \quad (2)$$

다음으로 국내의 결로방지성능 평가기준을 살펴보면, 규정에 따라 표 1과 같이 온도차이 비율 허용치를 제시하거나 결로방지를 위한 방습층 또는 흡방습 건축자재 등의 적용을 권장하고 있다. 본 연구에서는 결로방지성능 개선방안을 정량적으로 평가하기 위하여 온도차이비율을 평가지표로 선정하였으며, 보다 강화된 기준인 「공업화주택의 성능 및 생산기준」의 허용치 0.2 이하를 평가기준으로 설정하였다.

Table 1. Standards of Condensation Resistance by Application Building in Korea

구분	적용대상	평가지준	
공업화 주택 인정	공업화 주택 인정 대상	TDR 0.2 이하	
공동주택 결로방지 설계기준	500세대 이상 공동주택	지역 I	TDR 0.23 이하
		지역 II	TDR 0.25 이하
		지역 III	TDR 0.28 이하
건축물의 에너지절약 설계기준 <sup>6)</sup>	모든 건축물	KS A 1013 또는 KS F 2607 따른 방습층 사용 권장	
건강친화형 주택 건설기준 <sup>7)</sup>	1000세대 이상 공동주택	흡방습·항곰팡이 건축자재 적용 권장	

### 2.2 평가대상 부위 설정

공업화주택 인정기준에서 규정하는 평가대상 부위는 ‘외벽·최상층 반자·최하층 바닥 및 냉교부, 비난방실과 난방실 사이의 벽체, 접합부위’이다. 이 중에서도 특히 접합부위는 열전도율이 높은 연결철물이 많이 사용되므로, 열교현상이 발생할 우려가 매우 큰 부위 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 결로방지

성능 기준을 만족하기 어려운 대표적인 부위인 스틸 모듈러 건축시스템의 측벽-외벽 접합 부위를 평가대상 부위로 선정하였다. 스틸 모듈러 건축시스템의 단열성능을 강화하기 위하여 압출법보온판과 유리면보온판으로 내·외 단열을 동시에 적용하고 접합부의 취약점을 보완하기 위해 열반사 단열재를 사용하는 것이 일반적이므로, 그림 1 및 표 2와 같은 벽체 상세를 기본 해석모델로 설정하였다.

Table 2. Construction of Wall

구분	두께 (mm)	
	측벽	외벽
아연도금강판	1.6	1.6
단열재(압출법보온판)	30	30
공기층	50	50
CRC 보드	3	3
단열재(유리면보온판)	125	100
석고보드	25	25
계	234.6	209.6

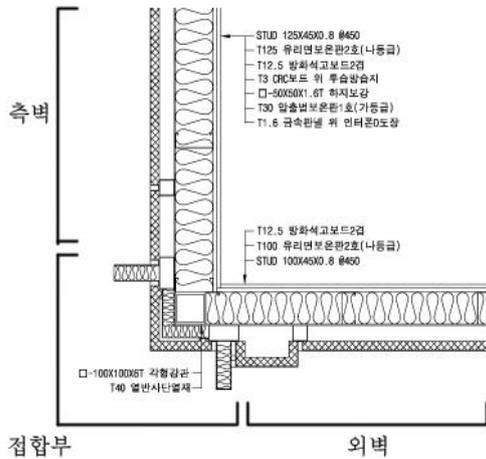


Fig 1. Construction Detail of Base Model

기본 해석모델의 열관류율은 측벽이 0.20 W/m<sup>2</sup>K, 외벽이 0.23W/m<sup>2</sup>K로, 「건축물의 에너지절약 설계기준」, 「공업화주택의 성능 및 생산기준」 및 「친환경 주택 건설기준 및 성능」<sup>8)</sup>을 모두 만족한다.

### 2.3 결로방지성능 개선대안 설정

표면결로는 실내표면온도가 노점온도 이하 일 때 발생하므로 결로방지를 위해서는 열교부의 단열성능을 향상시킬 필요가 있다. 기본 해석모델에서 외벽은 측벽에 비해 단열성능이 낮고 두께가 얇으므로, 본 연구에서는 외벽과

Table 3. Base model & Alternatives of Condensation Resistance

기본 해석모델	결로방지성능 개선 대안		
	Case 1	Case 2	Case 3
기본 해석모델의 외벽에 중공층 또는 단열재를 각각 10, 30, 50, 70, 90mm 씩 추가	Case 1의 대안 중 적정안을 선택한 후, 각형강관과 스틸 스티드를 분리하여 접합부위 상세 변경	추가적인 보완으로 각형강관과 스틸 스티드가 직접 접하는 부위에 열전도율이 낮은 부틸을 삽입	

접합부위를 대상으로 단열상세 변경을 통해 결로방지성능 개선대안별 효과를 평가하고자 한다.

일반적으로 벽체의 열관류율을 낮추기 위해서는 중공층 또는 단열재의 두께를 증가시키는 방법을 가장 우선적으로 고려할 수 있다. 다음으로는 스틸 모듈러 건축시스템에서 가장 열적으로 취약한 부위가 각형강관과 스틸 스티드가 맞닿아 선형열교 및 점형열교가 발생하는 벽체 접합부위이므로, 이를 분리시켜 실내외 주요 열전달경로가 되지 않도록 상세를 변경하는 방법으로 열교부 단열성능을 향상시키는 방안을 생각해 볼 수 있다. 이 밖에 추가적인 방법으로 스틸 커튼월의 단열성능 향상 방안<sup>9)</sup>을 응용하여, 접합부에 열전도율이 낮은 열교차단재를 적용하는 방안도 가능하다.

이를 종합하여, 결로방지성능 개선을 위한 단열상세로서 표 3의 CASE 1~3과 같은 대안을 도출하여 결로방지성능 비교를 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

### 2.4 결로방지성능 평가 시뮬레이션 방법

시뮬레이션에는 3차원 정상상태 열해석 프로그램인 Pysibel Trisco 12.0W를 이용하였으며, 벽체의 해석대상 치수는 ISO 10211에 따라 1000×1000×1000 mm로 설정하였다. 실내외 경계조건은 표 4와 같이 「공동주택 결로방지를 위한 설계기준」의 실내외온도 조건과 「건축물의 에너지절약 설계기준」 별표 5의 실내외 표면 열전달저항값을 적용하였다.

Table 4. Boundary Condition for Thermal Analysis

	실외	실내
표면 열전달저항 (m <sup>2</sup> K/W)	0.043	0.11
온도 (°C)	-15	25

열반사단열재를 포함하고 있는 접합부위 중공층의 경우, 두께 1cm로 대류에 대한 영향을 고려하지 않고  $\lambda_g$ 의 일정한 열전도율을 갖는 균일한 물질로 가정하여 해석하였다<sup>5)</sup>. 「건축물의 에너지절약 설계기준」 별표 5를 이용해 반사형 단열재가 설치된 중공층의 열저항 값 ( $R_g$ )을 알 수 있으므로, ISO 10211에 제시된 계산식 (3)을 통해 공기층의 열전도율 값  $\lambda_g$  (0.058W/mK)을 구하였다. 벽체 구성 재료의 열전도율 및 방사율은 ISO 10456<sup>10)</sup>에 따라 표 5의 값을 사용하였다.

$$\lambda_g = \frac{d_g}{R_g} \quad (3)$$

Table 5. Material Property

재료	열전도율 (W/m.K)	방사율 (-)
아연 합판	44.000	0.9
스틸	50.000	0.9
CRC 보드	1.400	0.9
석고보드	0.180	0.9
실리콘	0.350	0.9
부틸	0.240	0.9
압출보온판	0.028	0.9
유리면보온판	0.034	0.9
열반사 단열재	0.012	0.1
중공층	0.058	0.9

### 3. 평가 결과 및 분석

기본 해석모델 벽체의 온도분포는 그림 2와 같이 나타났으며, 최저 실내표면온도는 10.6 4°C, 온도차이비율은 0.36으로 평가기준 0.2를 초과하는 것으로 나타났다. 예상한 바와 같이

각형강관과 스틸 스티드 등 스틸 부재끼리 직접 접하는 부위가 주요 열교부가 되어, 벽체 접합부 모서리 부분의 실내표면온도가 최저가 됨을 알 수 있다.

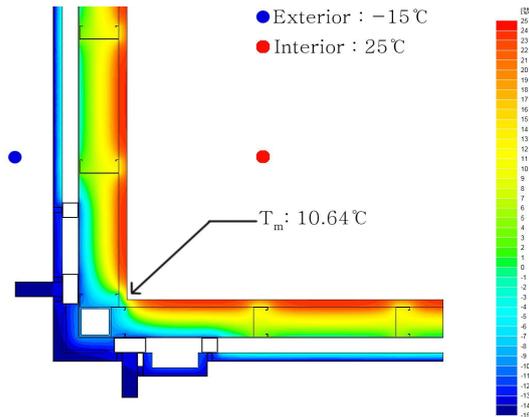


Fig 2. Thermal Analysis Result of Base Model

절로방지성능 개선을 위한 첫 번째 대안으로 단열재 또는 중공층을 각각 10mm부터 90mm까지 증가시킨 Case 1의 온도차이비율 및 최저 실내표면온도는 그림 3 및 표 6 과 같다. 동일 두께의 단열재와 중공층을 추가할 때 온도차이비율 감소 효과에는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 단열재 비용을 고려하면 중공층 두께를 증가시키는 것이 보다 경제적일 것으로 판단된다.

또한 단열재 또는 중공층을 90mm까지 추가하면 온도차이비율을 평가기준 0.2까지 낮출 수는 있으나, 50mm 이상 두께를 증가시킨 경우 추가 두께 대비 온도차이비율 감소 효과가 상대적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 벽체 두께가 증가할수록 사용 면적이 감소하게 되므로, 단열재나 중공층을 계속 증가시키는 것보다는 온도차이비율을 낮출 수 있는 추가 적 대안을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

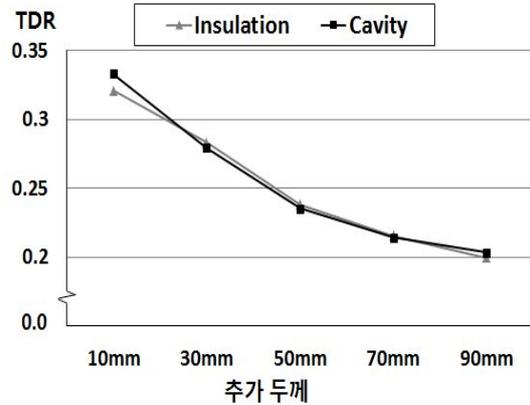


Fig 3. The Change of TDR according to Additional Thickness of Insulation and Cavity

Table 6. Minimum Internal Surface Temperature in Case 1

재료	추가 두께(mm)				
	10	30	50	70	90
$T_m$ (°C)	12.16	13.67	15.47	16.38	17.01
중공층	11.67	13.83	15.59	16.43	16.87

두 번째 대안인 Case 2에서는 접합부위 주요 열전달 경로인 스틸 부재가 맞닿는 부위를 최소화하도록 단열상세를 변경하였다. Case 1의 분석 결과를 바탕으로 단열재 비용 부담 및 벽체 두께 등을 고려하여 중공층 50mm 추가안을 적정안으로 선정하고, 각형강관과 스틸 스티드를 분리하여 Case 2의 단열상세 개선에 적용하였다. 표 7에 나타난 바와 같이 Case 2의 최저 실내표면온도는 16.52°C로 중공층 50mm를 추가한 Case 1의 최저 실내표면온도 15.59°C에 비해 0.93°C 정도 높게 나타났다. 온도차이비율은 0.21로 평가기준치에는 약간 못 미치나 Case 1의 온도차이비율 0.24 보다 개선되었다. 이는 기본 해석모델에 단열재나 중공층 두께를 70mm 추가한 것과 유사한 정도의 효과로 각형강관과 스틸 스티드를 분리하여 접합부 상세를 변경하는 방안이 결

로방지성능 향상에 효과적임을 알 수 있다.

마지막으로 Case 2에 부틸을 삽입한 Case 3의 경우, 표 7에 나타난 바와 같이 최저 실내 표면온도는 16.84℃, 온도차이비율은 0.20으로 Case 2보다 더 개선되어 결로방지성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 기본 해석모델에 중공층 또는 단열재 90mm를 추가한 정도의 효과로, 접합부 상세 변경 및 열전도율이 낮은 차단재의 사용을 통해 추가하여야 하는 두께를 줄이면서 결로방지성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

건축물에서의 결로 현상은 곰팡이 발생, 악취, 실내공기 오염 등 거주자의 쾌적 및 건강상의 문제 뿐 아니라 마감재 손상, 구조체 내 구성 및 단열성능 저하 등 건물 성능 측면에서 다양한 문제를 유발할 수 있다. 또한 단열미비, 열교 부위 등 구조적인 문제로 인해 발생된 결로를 환기 또는 난방 등의 방법으로 해결하고자 한다면 불필요한 에너지 사용을 초래할 수 있기 때문에 건축물의 결로방지성

능은 중요하게 고려되어야 할 성능 항목이다.

본 연구에서는 표면결로에 취약한 스틸 스티드 모듈러 건축물의 열교부위 결로방지성능을 향상시킬 수 있는 개선대안들을 도출하고, 전열해석 시뮬레이션을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 접합부위의 단열성능을 강화하기 위하여 단열재 또는 중공층을 추가할 경우, 동일 두께 조건에서의 온도차이비율 차이는 1% 미만으로 결로방지성능 향상 효과가 거의 비슷한 것으로 나타났다. 따라서 단열재 비용을 고려하면 중공층 두께를 증가시키는 것이 보다 경제적일 것으로 판단된다.
- (2) 단열재 또는 중공층 두께를 추가할수록 온도차이비율 감소 효과도 증가하나, 추가 두께 50mm 이상이 되면 추가 두께 대비 감소 효과가 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 벽체두께 증가에 따른 실내 사용면적 손실을 고려할 때, 무조건 단열재나 중공층의 두께를 늘리는 것보다는 추가 두께 대비 온도차이비율 감소 효과가 급격히 떨어지는 두께를 찾은 후 부가적

Table 7. Simulation Result of Thermal Bridge Detail Alternatives

-	기본 해석모델	결로방지성능 개선 대안		
		Case 1(중공층 50mm 추가)	Case 2	Case 3
$T_m$ (°C)	10.64	15.59	16.52	16.84
TDR	0.36	0.24	0.21	0.204

- 인 방안을 적용하는 것이 바람직하다.
- (3) 또한 스틸 부재가 접하는 부위를 최소화하도록 단열상세를 변경하여 접합부위의 열교 경로를 단절시킨 결과, 온도차이비율이 0.24에서 0.21로 감소하여 단열재나 중공층 두께를 증가시키는 것과 유사한 수준의 결로방지성능 향상 효과를 나타내었다.
- (4) 스틸 부재 사이에 열교차단재인 부틸을 삽입한 대안의 경우, 온도차이비율이 0.2까지 감소하여 기준치를 만족시킬 수 있었다. 이와 같이 단열재 또는 중공층 두께 추가, 단열상세 변경에도 불구하고 결로방지성능을 만족하지 못할 경우, 타 방법에 비해 향상 효과가 크지는 않으나 스틸 부재 사이에 열교차단재인 부틸을 삽입하는 방안을 고려해 볼 수 있다.

## Reference

1. Condensation Resistance Design Standard for Collective Housing, Republic of Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013.12
2. Condensation Resistance Detailed Design Guideline, Republic of Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013.12
3. Performance and Manufacture Standard for Prefabricated Housing, Republic of Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011
4. EN ISO 13788:2001 Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods, International Organization for Standardization, 2001
5. ISO 10211 :2007 Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations, International Organization for Standardization, 2007
6. Design Plan for Energy Saving, Republic of Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012
7. Construction Standard of Healthy Friendly Housing, Republic of Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013.11
8. Construction Standard of Green House and Performance, Republic of Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013.4
9. Kim Sun-sook, Cho Bong-Ho, Evaluation of the Thermal Performance and Condensation Resistance of a Steel Frame Curtain Wall System, The Korean Solar Energy Society, 2013
10. ISO 10456 : 2007 Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values, International Organization for Standardization, 2007