

# 鐵骨造學校 스틸스터드 壁體의 斷熱 및 結露防止 性能 評價를 위한 實驗的 研究

## Experimental Study to Evaluate the Thermal and Condensation Performance of Steel Stud Walls in Steel-Framed Schools

劉 永 東\* 金 甲 得\*

Yu, Young-Dong Kim, Gap-Deug

### Abstract

The thermal and condensation performance of steel stud walls are monitored in steel-framed schools of Ee-Wol Elementary School and kindergarten using temperature and humidity sensors installed. The monitoring process carried out during the summer and winter period, shows decrement effect of the external heat flow to be quite remarkable and excellent. And steel stud walls provides a highly efficient time-lag effect in spite of its light weight property, with 30 minutes to 4 hours time-lag for external heat flow, which variation mainly depends on its location of each part of the wall. Any condensation phenomena are not observed in either external or internal surfaces.

키워드 : 철골조 학교, 단열성능, 결로

Keywords : Steel-framed schools, Thermal performance, Condensation

### 1. 서 론

일반적으로 건축물의 열손실은 구조체를 통하여 가장 크게 발생하며 여기에 개구부와 환기, 틈새에 의해서 열손실이 부가된다. 이러한 열손실 부위들을 필요에 따라 억제하는 것이 쾌적한 실내 환경 유지와 에너지 절약을 위해 필요하며 이를 위해 구조체의 단열이나 기밀화 방안, 개구부를 통한 채열·채광, 통풍효과 등이 고려되어야 한다. 기밀화는 일반적으로 실내공간과 동시에 구

조체 내부를 차단함으로써 습기 이동의 대부분을 차지하는 대류 열전달의 저감 및 수증기의 투습이나 확산억제에도 도움이 된다. 일반적으로 결로방지를 위해 구조체내에 설치되는 방습층과 기밀층은 건물의 단열화 개념에서 필요한 요소라고 할 수 있다.

철골조 학교에 적용되는 벽체는 스틸스터드를 사용한 경량벽체를 사용하고 있어 스틸스터드를 통한 열의 손실과 아울러 내부 및 표면결로의 발생 우려가 있으므로 이 부위의 단열성능 및 결로방지 성능의 확보는 학교 건축물의 거주성

\* 정회원, 포항산업과학연구원 선임연구원

능을 결정하는데 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 본 연구는 시범사업으로 건립된 진천 이월초등학교와 포항 지곡초등학교를 대상으로 적용된 벽체의 단열성능 및 결로방지 성능을 실험을 통하여 검증하고 설계자료를 제시하는 데 그 목적이 있다.

2. 단열성능 기준 및 이론적 고찰

2.1 국내 단열 기준

국내 건축법규에서 건물의 열손실 방지를 위한 건물 외피 부위별 단열기준은 열관류율 또는 단열재의 두께에 의해 지역별로 기준이 설정되어 있다. 단열기준은 수차례 개정과정을 통하여 계속 강화되어 왔으며, 단열 부위를 세분화하고 난방도일에 따라 지역기후를 구분하여 차등 규제하는 등 합리적인 방향으로 발전되어 왔다. 표 1~표 3은 지역에 따른 건물부위별 열관류율 및 단열재의 두께기준을 나타낸다.

표 1. 적용대상지역

지역구분	해당시도
중 부	서울특별시·경기도·인천직할시·충청북도·강원도
남 부	충청남도·전라북도·광주직할시·전라남도·경상북도·경상남도·대구직할시·부산직할시
제 주	제주도

(단위 : W/m<sup>2</sup>℃, 괄호 안은 kcal/m<sup>2</sup>h℃)

그러나 부위별 단열기준은 벽체의 열관류율이나 단열재의 두께를 제한하는 방법으로 작성이나 확인과정이 간편하다는 장점이 있으나 건물의 종합적인 열성능을 파악하기 힘들고 특히 설계의 융통성을 보장하기 힘든 문제점이 있어 에너지 절약을 위한 최소 기준으로 이용되고 있다. 특히, 결로성능에 대한 기준이 명확하게 제시되어 있지 않아 건축설계자들이 벽체설계시 많은 어려움이 있으며 스틸드 벽체의 경우는 스틸드의 열교로 인하여 기준을 그대로 적용하기에는 다소 무리가 따른다.

표 2. 지역에 따른 건물부위별 열관류율표

구 분	중부	남부	제주도
거실의 외벽, 최하층에 있는 거실의 바닥 (외기에 면하는 바닥을 포함한다)	0.58이하 (0.5)	0.76 이하 (0.65)	1.16 이하 (1.0)
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	0.41이하 (0.35)	0.52 이하 (0.45)	0.76 이하 (0.65)
공동주택의 측벽	0.47 이하 (0.4)	0.70 이하 (0.6)	0.81 이하 (0.7)
거실의 외기에 면하는 창	3.37 이하 (2.9)	3.60 이하 (3.1)	5.81 이하 (5.0)

표 3. 지역에 따른 단열재 두께기준

구 분	구분	암면(광석면), 유리면티난연성발포폴리스티렌폼, 요소발포보온재폴리우레탄폼 (단위 : mm)	기타재료:열전도 저항이 다음의 값에 적용하는 재질의 두께일 것 (단위:m <sup>2</sup> ℃/W, 괄호 안은 m <sup>2</sup> h <sup>2</sup> ℃/kcal)	
			중 부	남 부
거실의 외벽, 최하층에 있는 거실의 바닥 (외기에 면한 바닥을 포함)	중 부	50 이상	1.38(1.60) 이상	
	남 부	40 이상	1.07(1.25) 이상	
	제주도	30 이상	0.86(1.00) 이상	
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	중 부	80 이상	2.15(2.50) 이상	
	남 부	60 이상	1.63(1.90) 이상	
	제주도	40 이상	1.07(1.25) 이상	
공동주택의 측벽	중 부	70 이상	1.89(2.20) 이상	
	남 부	50 이상	1.38(1.60) 이상	
	제주도	40 이상	1.07(1.25) 이상	

2.2 이론고찰

2.2.1 포화수증기압 및 수증기압의 계산<sup>1)</sup>

벽체 각 부위별의 온·습도를 이용하면 실내 포화수증기압(PWS)을 구할 수 있으며 포화수증기압은 온도에 관한 함수로서 (식 1)과 (식 2)로 구한다.

① 상온 ≥ 0℃ 일 때의 포화수증기압 (식 1)

$$P_{ws} = \exp\left(\frac{-5,800.22}{T_{ab}} + 1.3914993 - 0.0486402 \times T_{ab} + 0.41764768 \times 10^{-4} \times T_{ab}^2 - 0.1445209 \times 10^{-7} \times T_{ab}^3 + 6.5459673 \times \log_e(T_{ab})\right)$$

1) 1993 ASHRAE HANDBOOK, FUNDAMENTALS, pp. 6.9-6.10

② 상온 < 0℃ 일 때의 포화수증기압 (식 2)

$$P_w = \exp\left(\frac{-5.674.53}{T_{ab}} + 6.3925247 - 0.9677843 \times 10^{-2} \times T_{ab} + 0.62215701 \times 10^{-6} \times T_{ab}^2 - 0.20747825 \times 10^{-9} \times T_{ab}^3 - 0.9484024 \times 10^{-12} \times T_{ab}^4 + 4.1635019 \times \log_e [T_{ab}]\right)$$

여기서,  $T_{ab}[K] = \text{temperature}(C) + 273.15$

위의 (식 1)과 (식 2)에서 구한 포화수증기압을 이용하여 (식 3)과 같이 수증기압( $P_w$ )을 구할 수 있다.

$$P_w[kPa] = P_w \times \text{상대습도}(\%) \dots \dots \dots \text{(식 3)}$$

2.2.2 노점온도의 계산

노점온도는 (식 4)와 (식 5)로써 구할 수 있으며, 계산된 노점온도와 각 벽체 내에 설치된 채널의 온도값을 비교함으로써, 결로가능성 여부를 최종적으로 판단하게 된다.

① ( $0 \leq T_d \leq 93^\circ C$ )의 경우

$$T_d = C_{14} + C_{15}\alpha + C_{16}\alpha^2 + C_{17}\alpha^3 + C_{18}[P_w]^{0.1984} \dots \dots \text{(식 4)}$$

② ( $T_d < 0^\circ C$ )의 경우

$$T_d = 6.09 + 12.608\alpha + 0.4959\alpha^2 \dots \dots \dots \text{(식 5)}$$

여기서,

- $T_d$  = 노점온도,  $^\circ C$
- $\alpha = \ln(P_w)$
- $P_w$  = 수증기압, kPa
- $C_{14} = 6.54$
- $C_{15} = 14.526$
- $C_{16} = 0.7389$
- $C_{17} = 0.09486$
- $C_{18} = 0.4569$

2.2.3 벽체의 스틸스터드 열교현상

스틸스터드를 포함하고 있는 건식벽체의 경우 스틸스터드가 단열재 등의 다른 자재에 비하여 열전도율이 높으므로 열교현상이 발생된다.

이와같이 열교는 재료나 물질의 열전도율이 상대적으로 클 경우 열류발생을 증가하면서 나타난다. 즉 열류는 금속스터드가 단열재층을 통과할 때 발생한다. 열교영향은 단열재의 위치에 영향을 받는다. 열교는 노출된 곳이 따뜻한 곳이라면 비교적 따뜻하게 유지 될 것이다. 그 반대로 마찬가지로이다. 열손실 및 열취득가운데 어느 것이 지배적인 문제이냐에 따라서 단열재의 위치는 약간 차이가 있을 것이다. 물론 이것은 결로

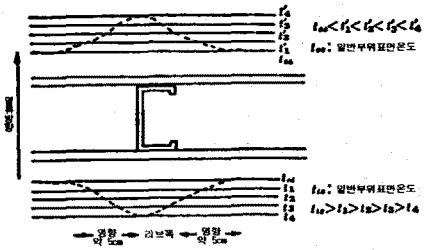


그림 1. 벽체의 온도분포

문제와 같이 균형을 이루어야 한다. 스틸스터드를 가지고 있는 벽체의 내부 온도분포는 그림 1)과 같다.

이것은 중공층(cavity) 부분에만 단열재를 시공한 것으로서 이하 중단열 공법이라고 한다.

이처럼 중단열을 시공한 벽체의 경우 스틸스터드를 통한 열교는 나타나게 되고 스테르드가 있는 부위에서는 실내 표면측으로 표면 결로와 비스테르드 부위에서는 벽체내부 보드측에서의 내부결로가 발생할 가능성은 크게 된다.

따라서 이러한 현상을 방지하기 위해서는 벽체의 외측에 단열을 시공하여 외기에 의한 스틸스터드 및 외측보드류의 온도저하를 방지하고, 실내측으로 방습지를 설치하여 벽체 내부로 수증기가 투습되는 것을 방지하는 것이 성능측면에서는 유리할 것이다.

3. 벽체 단열성능 및 결로방지성능 평가

3.1 실험방법 및 개요

본 연구에서는 실제 학교건물에 적용된 벽체를 대상으로 그 성능을 검토하기 위하여 현장 실험을 실시하였다. 칠골초학교의 단열 및 결로 방지 성능의 평가를 위한 현장실험은 온·습도 모니터링을 통하여 실시하였다. 벽체 온습도 모니터링은 이월초등학교 및 유치원사의 벽체 우각부를 중심으로 동·하계로 실시하여, 결로의 판정과 벽체 내부온도 사이클링을 분석하였다.

그림 2는 실험대상인 학교의 외벽 단면을 나타낸다. 이월초등학교의 경우 외벽은 아크릴계수지마감으로 시공하였고 외벽의 창문하부 마감은 비닐사이딩 마감을 사용하였다.

2) 山田雅士, 建築の斷熱, 井上書院, pp. 60.

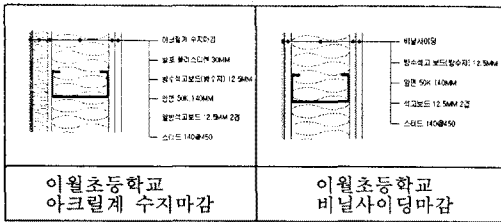


그림 2. 실험대상 학교 외벽 단면

철골조학교의 단열 및 결로성능을 평가하기 위하여 총 211점의 온도 및 습도센서를 이월초등학교 및 유치원사의 각 벽체에 설치하였다. 센서의 위치는 향별, 층별, 스틸드와 비스티드 부위로 구분하였으며 비교적 결로가 발생하기 쉬운 벽체의 우각부를 선정하였다. 벽체 및 지붕 내부의 온·습도를 모니터링하기 위한 측정기기는 표 5와 같다.

표 5. 모니터링 측정기기 및 측정부위

측정 요소	측정기기	측정 간격	측정 점수	측정부위
외기 온·습도	HD 8508TC150 (Temp/Humidity Sensor)	30분	6	각 실의 외기온도
실내 온·습도	HD 8508TC150 (Temp/Humidity Sensor)	30분	6	각 실
온·습도	HD 8508TC150 (Temp/Humidity Sensor)	30분	6	각 구조체
온도	thermocouple (T-type)	30분	193	측정구조체의 각 부위
표면 온도	열화상장치 (Thermal Imaging Radiometer, THV 550)	수시	-	철골조학교의 내/외피 구조체

(주) Data Logger 장비 사양 : DATASCAN 7300 series

각 벽체에 설치된 센서의 위치는 그림 3과 같다.

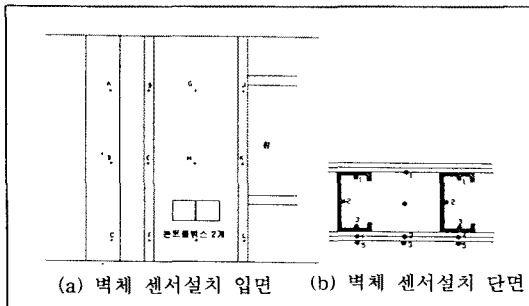


그림 3. 센서설치위치

모니터링은 하계와 동계로 구분하여 실시하였고 기간은 표 6과 같다.

표 6. 이월초등학교 모니터링 기간

구분	측정 위치	동계 기간	하계 기간
1차	3층 일반교실	'99.1.8 ~ '99.1.12	'98.8.13 ~ '98.8.18
2차	2층 컴퓨터실	'99.1.12 ~ '99.1.15	'98.8.10 ~ '99.8.13
3차	1층 유치원사	'99.1.15 ~ '99.1.18	'99.8.18 ~ '99.8.21

### 3.2 실험결과 및 분석

#### 3.2.1 실내온도 사이클링

건축물의 외피는 여름철의 더위와 겨울철의 추위를 막는 저항체의 작용을 하며, 외부 주기 열류의 진폭감소로써 단열의 정도를 파악할 수 있다.

이월초등학교의 외벽은 저항형 단열재를 이용한 경량벽체에임에도 불구하고 온도모니터링을 통하여 벽체의 지연효과를 볼 수 있었다. 외벽의 열류 지연시간은 부위에 따라 30분에서 4시간 정도로 나타나 외부의 더운(찬)기온이 실내로 유입될 때 열류의 지연효과가 있음을 알 수 있었다. 즉 외피의 일사 취득으로 인한 실내온도의 즉각적인 반응은 없다는 것을 나타낸다.

또한 외벽의 외단열 시공으로 그림 4와 같이 실내측으로 올수록 스틸드부위의 온도가 안정되어 실내온도의 변화는 5~8℃ 범위에서 안정된 사인파(sine)형태로 나타났다. 이러한 진폭감소는 외단열시공에 따른 지연효과에 기인한다고 보여진다.

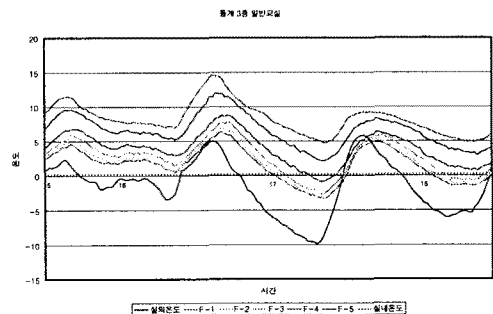


그림 4. 동계 실내온도 사이클링

3.2.2 계절별 비교 분석

이월초등학교 모니터링은 동하계에 걸쳐 실시되었고 이 기간동안 최저 외부온도는 -10.4℃ (99년 1월 12일, 2층 전산실)로 나타났고 최고 외부온도는 40.4℃(98년 8월22일, 1층 유치원사)로 나타났다. 모니터링을 통한 실내·외 온도의 차이는 동계시 비냉방공간에서 10~15℃, 난방공간(2층 전산실)에서 3~20℃로 나타났고, 하계시 비냉방공간에서는 2~12℃, 냉방공간(2층 전산실)에서는 5~9℃로 나타났다. 동하계시 외부의 주기열류가 감소되어 실내온도가 안정된 사인파형을 나타내었지만 여름철에는 방학으로 인해 교실이 사용되지 않는 밀폐된 공간이었기 때문에 창호 등을 통한 일사취득으로 실내온도는 높은 온도분포를 나타내었다.

학교 교실의 경우 적정조도 유지를 위하여 외피면적에 대한 창호 면적이 크므로 일사 및 외부 열취득으로 인하여 여름철의 실내온도는 상승되는 경우가 많다. 따라서 이에 대한 해결책으로는 냉방설비를 이용한 기계적 조절(active control)보다는 적절한 차양의 설치 등을 통한 자연형 조절(passive control)이 고려되어야 할 것으로 사료된다. 그림 5와 그림 6은 계절별 벽체온도분포를 나타낸다.

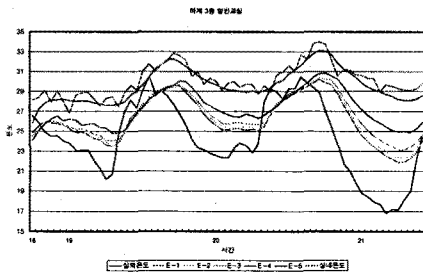


그림 5. 여름철 온도분포

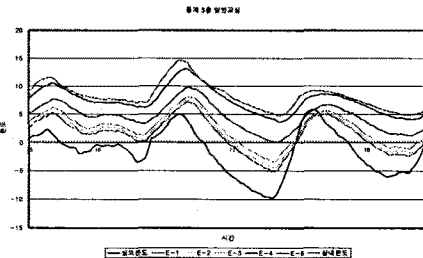


그림 6. 겨울철 온도분포

이월초등학교의 계절별 실내외 온도진폭은 표 7과 같다.

표 7. 실내외 온도진폭감쇠

구 분	최한 (난)일	측정 위치	온도진폭감쇠	
			실외진폭-실내진폭	진폭 감쇠량
겨울철	99년 1월 12일	2층 전산실	30.6℃ - 19℃	11.6℃
여름철	98년 8월 22일	1층 유치원사	19.2℃ - 3.9℃	15.3℃

3.2.3 향별 비교 분석

실내 열환경의 온도변화는 실외 기후조건외 변화보다 시간적으로 지연되는 경향이 있다. 이러한 지연효과(time-lag)의 크기는 건물 외피의 열용량에 좌우된다. 즉, 구성재료의 밀도와 질량이 증가할수록 지연효과는 길어진다. 또한 남향이 북향에 비하여 일사취득에 유리하므로 벽체의 향에 따라 벽체온도 분포가 달라진다.

일반적으로 중량 구조체는 실내온도조건이 안정되는 반면, 경량구조물은 외부일사량 변화에 즉각적인 반응을 보인다. 하지만 본 연구에서 실내온도조건은 일사의 영향을 받고 있지만 외단열의 시공에 따라 경량벽체임에도 불구하고 즉각적인 반응은 없었으며 매우 안정적인 것으로 나타났다.

이월초등학교의 배치가 정확히 방위와 일치하지 않기 때문에 전형적인 향에 따른 벽체온도 프로파일과는 다소 차이가 있었다. 그림 7과 그림 8은 향별 벽체온도 분포를 나타낸다.

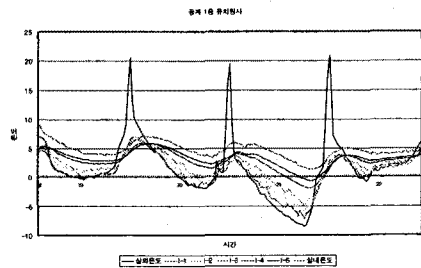


그림 7. 남향 벽체온도 분포

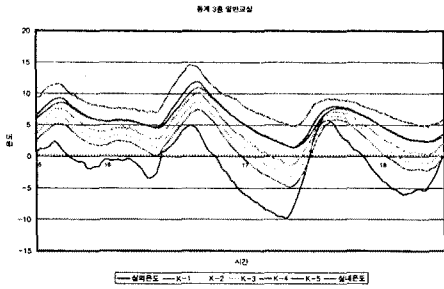


그림 8. 북향 벽체 온도 분포

3.2.4 스티드와 비스티드의 비교분석

일반적으로 건식 경량벽체의 스티드부위의 온도는 실내·외의 온도변화에 민감하게 반응한다. 겨울철의 경우에 일사의 영향을 받는 시간대에 스티드부위 온도가 즉각적으로 상승하고 일사의 영향이 없는 경우에는 외기온도의 영향을 받아 스티드부위 온도가 낮게 나타난다. 그러나 외단열 공법에 따른 열저항체를 시공하면

즉각적인 온도변화는 사라지게 된다. 또한 겨울철에 스티드부위는 열교현상(heat bridge)이 발생하지만 실외측 마감재의 온도를 상승시켜 결로발생의 문제에 있어서는 오히려 잇점으로 작용하는 것으로 나타났다. 하지만 비스티드 부위는 외피측으로 항상 낮은 온도가 되므로 벽체 내부에 습기가 유입될 경우에는 내부결로 가능성이 높다. 따라서 이러한 문제점을 방지하기 위해서는 외단열 시공을 통하여 외피온도를 상승시키거나 방습지를 설치하여 벽체내부로의 습기 유입을 막는 것이 가장 효과적이라 할 수 있다.

본 모니터링에서 이월초등학교는 외단열 시공을 통하여 스티드부위와 비스티드부위 간의 온도분포가 상호 유사한 사인(sine)파형을 나타내어 우수한 단열성능을 나타내었다.

그림 9는 일반교실의 벽체 온도 모니터링을 통한 스티드와 비스티드 부위의 동계 벽체 온도 분포를 나타낸 것이다.

구분	온도 분포	분석	센서 위치 및 설치
교사 일반교실 H 부위		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동계시 비스티드부위</li> <li>• layer1은 정오를 중심으로 외기온도에 민감하게 반응</li> <li>• 각 layer별 온도분포가 안정된 분포를 보임</li> </ul>	<p>&lt; 센서 제널 &gt;</p>
교사 일반교실 L 부위		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동계시 스티드부위</li> <li>• 외단열로 인해 효과적으로 외부열류를 차단하고 있음을 layer1의 온도분포로 나타남</li> <li>• 지연효과가 뚜렷함</li> </ul>	<p>&lt; 데이터 수거장치 &gt;</p>
교사 일반교실 N 부위		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동계시 스티드부위</li> <li>• N부위는 창호주위의 스티드로써 각 layer별 분포가 등분포로 나타나고 있음</li> </ul>	<p>&lt; 데이터 스케닝 &gt;</p>

그림 9. 동계 스티드부와 비스티드부 온도분포

3.2.5 결로 분석

표면 및 내부결로로 구분되는 결로를 파악하기 위하여 측정된 벽체의 온습도를 이용하여 노점 온도를 계산하고 결로가능성을 판정하였다.

결로분석의 방법은 수거된 온습도 데이터를 이용하여 벽체의 수증기압 및 노점온도를 ASHRAE<sup>3)</sup> 이론식에 따라 계산하고 이 값을 각 레이어(layer)의 온도와 비교하여 결로를 판정하였다. 결로판정의 흐름도는 그림 10과 같다.

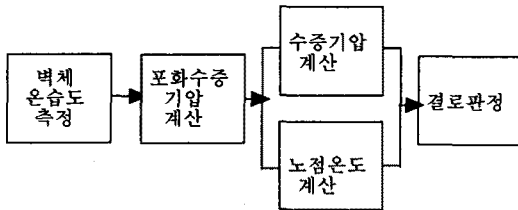


그림 10. 결로판정 흐름도

본 연구에서는 실험 결과 얻어진 자료를 분석 (약 135,000건)하기 위해서 기존의 이론식<sup>3)</sup>을 이용하여 프로그램을 작성하여 이용하였다. 프로그램의 계산순서는 다음과 같다.

- ① 기본 측정치의 입력
- ② 포화수증기압 및 수증기압의 계산
- ③ 노점온도( $T_d$ )의 계산

상기의 입력값과 계산값을 이용하여 프로그램 내에서 결로여부를 판정하게 되며 프로그램은 Microsoft Visual-C++을 이용하여 작성하였다. 본 연구에선 단열성능 및 결로방지 성능으로 구분되는 열성능을 평가하기 위하여 총 211개의 온·습도 센서를 이월초등학교 및 유치원사에 설치하고 동하계기간 동안 135,268개의 데이터를 수거하였다.

이월초등학교 및 유치원사의 데이터 분석결과 벽체 내부에는 결로가 발생하지 않았으며 이는 중단열과 외단열을 동시에 적용하여 벽체 내부온도를 노점온도 이상으로 유지하여 결로를 방지한 것으로 사료된다. 이월초등학교 및 유치원사의 결로판정결과는 표 9와 같다.

표 9. 이월초등학교의 결로판정결과

구 분	측정 데이터 수(회)		결로판정
	동계	하계	
1층 유치원사	45,592	10,720	결로발생없음
2층 전산실	29,256	6,254	
3층 일반교실	33,228	10,218	
합 계	108,076	27,192	135,268 회

그림 11은 동계 이월초등학교 및 유치원사의 최한일 벽체온도분포를 이용한 결로실험 결과를 나타낸다.

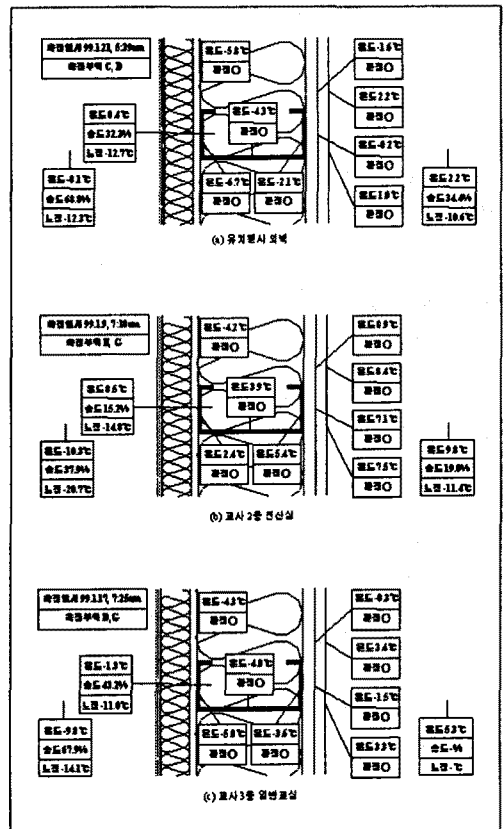


그림 11. 이월초등학교 및 유치원사 동계 결로실험 결과

3) 1993 ASHRAE HANDBOOK, FUNDAMENTALS, pp. 6.9-6.10

4. 결 론

데이터 분석결과 이월초등학교와 유치원사의 경우 외부열류의 진폭감쇠현상은 겨울철 11.6℃와 여름철 15.3℃의 실내·외온도차를 나타내었다. 또한 경량벽체임에도 불구하고 지연효과(time-lag)가 나타나 부위에 따라 30분에서 4시간 정도의 외부열류 지연효과가 나타났다. 실내온도의 경우 5~8℃ 정도의 온도 진폭을 가지며 안정된 사인 파형을 나타내었다. 벽체의 결로는 동·하계 기간동안 전혀 발생하지 않았다. 이것은 이월초등학교와 유치원사의 외벽에 외단열 시공을 통하여 외벽을 통한 주기열류를 효과적으로 차단했기 때문으로 사료된다.

따라서 외단열을 채용한 칠골초등학교의 경우 균일한 표면온도와 안정된 실내온도를 나타내는 단열성능을 확인할 수 있었으며 이월초등학교의 온습도 모니터링 결과 결로발생이 나타나지 않는 결로방지 성능을 확인할 수 있었다.

또한 외단열을 적용할 경우 벽체의 두께를 크게 할 뿐만 아니라 이에 따른 공사비 상승의 요인이 될 수 있기 때문에 경제성 및 요구성능을 보다 만족시킬 수 있는 스틸스터드 건식벽체에 대한 연구가 차후 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Kosny, J. and J.E.Christian, "Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls, Energy and Buildings, 1995, pp.157~163.
2. Blomberg, T. and J. Claesson, "Heat transmission through walls with slotted steel U-girders," The International Conference on Steel in Green Building Construction, March, 1998.
3. W.C Brown and D.G. Stephenson, Guarded hot box measurements of the dynamic heat transition characteristics of seven wall specimens : Part II, ASHRAE transactions, 99(1) (1993) pp.643-660.
4. H.A. Trethowen, Thermal insulation and contact resistance in metal-framed panels, ASHRAE transactions, 94(2) (1988) pp.1802-1817.
5. Lechner, N., Heating, Cooling, Lighting Design Methods for Architects, John Wiley & Sons, 1991.

6. Markus, T.A. and E.N. Morris, Buildings, Climate and Energy, Spottiswoode Ballantyne Ltd., 1980.
7. Balcomb, J.D., R.W. Jones, R.D. McFarland and W.O. Wray, Passive Solar Heating Analysis : A Design Manual. Los Alamos National Laboratory, 1984.
8. Boonyatikarn, S., A Method for Developing Energy Budgets and Energy Design Guidelines for Institutional Buildings, The University of Michigan, 1982.
9. ASHRAE, ASHRAE/IES Standard 90.1-1989 Energy-efficient design of new buildings except low-rise residential buildings, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1989.
10. Christian, J.E., "Thermal Mass Credits Relating to Building Envelope Energy Standards," ASHRAE Transactions, Vol. 97, Part 2, 1991.
11. ASHRAE/IES Standard 90.1-1989, Table 8C-2
12. ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS, p 22.10, 1993.
13. Stzepek, W.R. 1990. ASTM/STP 1030, "Thermal resistances of metal frame wall constructions incorporating various combinations of insulating materials, insulation materials, testing and applications," 1990.
14. 建築省エネルギー特別委員會編輯, 「事務所建築の省エネルギー-基準と計算の手引」, 住宅·建築 省エネルギー-機構, 1980.