

# 초고층 아파트의 커튼월 결로 예측 방법에 관한 연구

Article 05

A Study on the Prediction Method of Condensation on the Curtain Wall  
of the High-rise Apartment Unit



**임 정 희**  
금호건설 설비부장  
건설안전기술사  
건축설비기술사

**Abstract :** Recently, the condensation of walls often occurring in domestic high-rise apartment buildings is an important problem.

The main purpose of this study is to develop the prediction method for the surface condensation on curtain wall in high-rise apartment buildings. Therefore, in this study, we first analyzed exterior climate factors through the analysis of the Seoul climate data and predicted the change of indoor temperature by using Apache program to find the cause of the condensation state and to prevent condensation. Also, according to this result, exterior climate factors and interior factors, which caused the condensation, was examined. The thermal performance of the curtain wall and the range of potential condensation were analyzed to focus on high-rise apartment buildings through computer simulation programs.

The results are as follows; <sup>1)</sup> The frame edge of curtain wall has a higher U-value than in the center by 30%. <sup>2)</sup> Because of stack effect, the rooms on the higher floor have a lower external ventilation rate resulting to a higher relative humidity. <sup>3)</sup> Installing a ventilation system(20m<sup>3</sup>/h · person) makes it possible to have a higher external ventilation rate, resulting to a lower relative humidity.

**키워드 :** 초고층 아파트, 커튼월, 결로, 환기성능, 시뮬레이션

**Key Words :** high-rise apartment, curtain wall, condensation, ventilation performance, simulation

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

현대 건축물에서 커튼월(Curtain Wall)은 단순한 외피 장식재가 아닌 주요한 건축물의 구성요소로서 부각되고

있으며 관련 통계자료에 따르면 국외(미국과 동남아 국가 등)의 경우, 건물의 전면을 커튼월(Curtain Wall)로 구성하는 경우가 전체 건물의 약 45~50%에 이르고 있는 것으로 나타나 있고<sup>1)</sup>, 국내에서도 초고층 건물을 비롯하여 최근에는 저층 건물과 주거용 건물에 이르기까지

지 건물외피의 상당부분이 커튼월로 건축되고 있는 추세이다.

특히 2000년을 전후하여 고소득층을 대상으로 대형평수의 고급주택을 대량으로 공급할 수 있는 초고층 아파트가 증가하고 있다. 이러한 초고층 아파트는 고층부의 강풍에 대한 안전성과 고단열과 고기밀등 에너지 절약적 측면에서 자연환기를 위한 창호의 개폐가 자유롭지 않으며 외벽의 면적에 비해 개폐 가능한 창호의 면적도 상대적으로 적은 커튼월 구조로 계획되고 있다. 이로 인해 자연환기보다는 기계식 환기에 의존이 높으며<sup>2)</sup> 환기와 습도의 조절이 어렵고 실내·외 온도차로 인해 커튼월의 표면에 결로가 발생하기 쉽다. 더욱이 발생된 결로수의 부적절한 처리로 인해 곰팡이와 각종 세균 등의 번식을 확산시켜 실내공기의 질을 악화시키고 있다.<sup>3)</sup>

주택의 결로에 대한 연구는 초고층 아파트가 등장하기 이전인 1980년도부터 국내·외의 연구기관들에 의해 시공방법과 소재개발 등에 초점을 맞추어 진행되었다. 그러나 초고층의 열환경 특성과 병행하여 커튼월과 같은 복잡하고 다양한 구조의 창문 등에 대한 열성능 해석, 결로 판정과 대안비교 등을 쉽게 할 수 있는 전산해석기법이 미흡한 실정이다.

**□ 기호설명**

- ti : 실내온도(°C)
- to : 실외온도(°C)
- td : 노점온도(°C)

- tis : 실내측 표면부근의 온도
- pw : 수증기분압(kPa)
- pws: 포화수증기압(kPa)
- $\alpha$  :  $\ln(pw)$
- T : 절대온도(  $T = t_i + 273.15$  )
- $\phi$  : 실내의 상대습도(%)
- U : 열관류율(W/m<sup>2</sup>K)
- kis: 실내측 표면의 열전달율(W/m<sup>2</sup> K)
- R : 열관류저항(R=1/U)
- ris: 실내측 표면의 열전달저항( $r_{is} = 1/k_{is}$ )

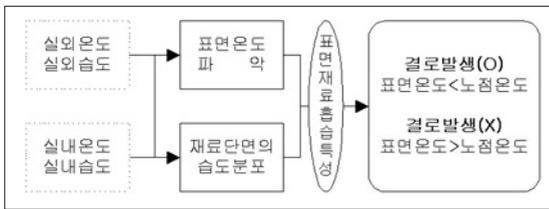
**□ 계수설명**

- C1 : 6.54
- C2 : 14.426
- C3 : 0.7389
- C4 : 0.09486
- C5 : 0.4569
- C6 : -5.674359E+03
- C7 : 6.3925247E+00
- C8 : -9.6778430E+03
- C9 : 6.2215701E-07
- C10 : 2.0747825E-09
- C11 : -9.4840240E-13
- C12 : 4.1635019E+00
- C13 : -5.8002206E+03
- C14 : 1.3914993E+00
- C15 : -4.8640239E-02
- C16 : 4.1764768E-05
- C17 : -1.44520932E-08
- C18 : 6.5459673E+00

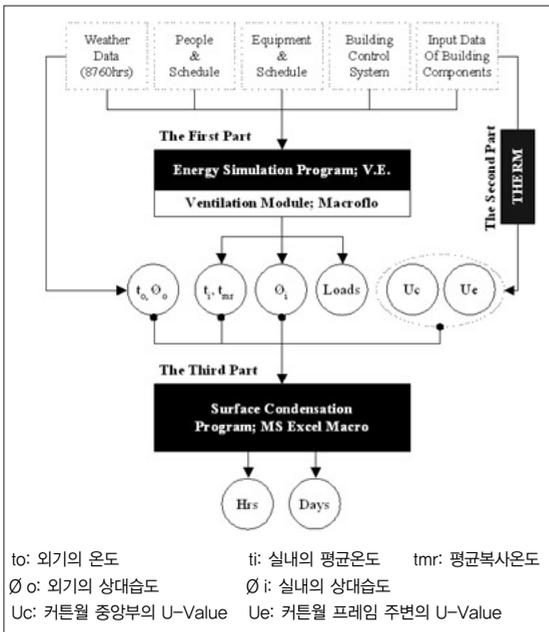
1) 삼성중공업기술, 초고층 요소기술, 기문당, 2002.5  
 2) 이성복, “공동주택에서의 결로발생 현황 및 분석”, [www.apartnetwork.com/tomak11.htm](http://www.apartnetwork.com/tomak11.htm)  
 3) 김광우, 송승영, “공동주택에서의 결로발생 및 대책”, [www.apartnetwork.com/tomak12.htm](http://www.apartnetwork.com/tomak12.htm)

## 1.2 연구의 목적과 방법

본 연구의 목적은 에너지 시뮬레이션을 활용하여, 커튼월의 결로를 진단하기 위한 해석방법을 제시하고, 이러한 해석방법을 초고층 아파트의 커튼월 사례에 적용함으로써 최소 환기량 또는 환기유닛의 용량에 따른 커튼월의 결로시간을 예측하는 데 있다. 이를 위한 연구의 방법으로 첫 번째, 커튼월의 부위별 U-factor를 계산하는 프로그램과 에너지 시뮬레이션을 활용하여 노점온도와 표면온도를 구하는 새로운 결로 해석방법을 제시한다.



[그림 1] 표면결로의 발생 유무 판정순서



[그림 2] 결로 예측방법 예시도

두 번째, 애플리케이션으로 새로운 결로 해석방법을 초고층 아파트 사례에 적용하여 층별 실내환경의 변화와 결로시간을 예측한다.

애플리케이션을 위한 절차는 다음과 같다.

- 1) 실제 커튼월의 결로문제가 발생하는 초고층 아파트를 사례로 선정하여 결로가 발생했을 때의 온도와 습도를 측정한다. 습기를 유발하는 잠열부하를 추정하기 위하여, 에너지 시뮬레이션에서 잠열부하를 변화시켜 온도와 습도가 측정치와 동일하도록 조정한다.
- 2) THERM을 이용하여 커튼월의 프레임주변과 중앙부분의 실제 열관류율을 계산한다.
- 3) 사례건물에 대한 에너지 시뮬레이션을 통해 환기량에 따른 실내온도(MRT 포함)와 습도, 환기회수를 구한다.
- 4) 실내온도(MRT 포함)와 습도 등, 에너지 시뮬레이션의 결과를 이용하여 1년(8760시간)동안 매시간 노점온도와 커튼월의 내부표면온도를 비교하여 결로 시간과 일수를 예측한다.

본 연구에서 사용된 에너지 시뮬레이션 프로그램은 영국 IES4D사의 VE(Virtual Environment)이며 ESP-r을 엔진으로 사용하고 있다. VE는 환기(MacroFlo)와 일사(Suncast)를 고려한 냉·난방부하뿐만 아니라 실내의 온도, 습도 등을 매시간 구할 수 있다. Weather Data는 1983년 서울지방 기상데이터를 사용하였다.

## 2. 결로 예측 방법의 개요

### 2.1 에너지 시뮬레이션의 응용: The First Part

기존의 선행연구에서는 [그림 1], [그림 2(the third part)]와 같이 표면결로의 계산절차를 이용하여 특정시점에서 특정온도와 습도에 대한 순간적인 결로의 발생

유무를 결정하고 있다. 그러나 이러한 방법은 사후검사의 의미가 강하다. 즉 건물이 완공되고 사용중인 특정시점에서 온도와 습도를 측정하여 결로를 판정하는 것이다. 만약 결로문제가 심각하게 발생한다면 이러한 사후 실측을 통해 그에 대한 원인을 찾고 건물의 개?보수에 들어간다.

그러나 건축가가 원하는 것은 이러한 사후적인 검사가 아니라 설계단계에서 특정시점이 아닌 시간에 따라 건물의 실내 온열환경을 예측하고, 발생될 수 있는 문제를 사전에 예방하는 것이다. 만일 설계자가 설계한 건물의 1년간 결로발생 시간과 일수를 알 수 있다면, 그로 인해 결로문제를 사전에 예측한다면, 설계자는 적정 환기량과 적정 단열성능을 찾아서 사전에 설계에 반영할 것이다.

이런 점에서 에너지 시뮬레이션은 다양한 조건하에서 실내환경의 변화를 예측할 수 있다. 에너지 시뮬레이션의 Weather Data는 1년 동안의 외기에 대한 정보를 시간단위로 제공해 주고 있으며 또한 건물의 형태와 용도에 따른 특징, 외벽을 구성하는 건축요소의 물성치, 그리고 실내의 기기와 인체에 의한 발열부하 등을 조절할 수 있다. 또한 에너지 시뮬레이션의 결과로 냉?난방부하, MRT를 포함한 실내온도, 실내습도 등을 얻을 수 있으며, 이와 같은 값들을 기존의 결로예측 방법인 그림2의 Third Part부분에 입력시키면 연간 결로발생 시간과 일수를 예측할 수 있다.

## 2.2 커튼월의 U-Value(열관류율) : The Second Part

커튼월의 결로를 예측하기 위해서는 주요구성 요소인 유리의 정확한 U-Value가 필요하다. 유리의 U-Value

는 제조하는 업체에서 제공하고 있지만 유리를 지지하는 프레임 주변의 U-Value는 중앙부의 U-Value 보다 현저하게 차이가 나고 있다.

본 연구에서는 프레임의 영향을 고려하기 위해 미국 LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory, 미국)에서 만든 THERM을 이용하여 프레임 주변과 중앙부의 U-Value를 구하고 있다.

## 2.3 결로발생 결정 프로그램: The Third Part

결로발생 결정 프로그램은 MS Excel Macro에 의해 작성된 것으로 그림2의 Third Part에 해당되며, “표면온도가 노점온도보다 낮을 때 결로가 발생한다.”는 기본 원리를 이용하고 있다. 노점온도와 표면온도를 구하기 위해서는 입력변수로 외기의 온도와 습도, 실내의 온도와 습도, 평균복사온도(MRT), U-Value를 포함한 커튼월의 물성치 등이 필요하다.

이러한 입력변수들의 정확한 수치는 에너지 시뮬레이션과 THERM 시뮬레이션에서 얻을 수 있다. First Part인 에너지 시뮬레이션에서 1년(8360시간)동안 매시간 실내온도와 평균복사온도, 실내습도 등을 입력변수로 받고 있으며, 외기의 온도와 습도는 Weather Data를 이용하고 있다.

또한 Second Part인 THERM 시뮬레이션에서 커튼월의 부위별 U-Value를 입력변수로 받고 있다. 이러한 매시간당 입력변수들은 방정식(1)~(6)에 대입되어 매시간당 노점온도와 커튼월의 내표면온도를 구할 수 있으며, 이를 비교함으로써 1년동안의 결로 시간과 일수를 예측할 수 있다. 노점온도와 표면온도를 구하는 일련의 방정식은 [표 1]에서 유도하고 있다.

[표 1] 결로예측과 관련된 수식설명

수식설명	
$t_d = C_1 + C_2\alpha + C_3\alpha^2 + C_4\alpha^3 + C_5\alpha^4(p_w)^{0.1884}$ .....	식(1)
$t_d = 0.09 + 12.60\alpha + 0.4959\alpha^2$ .....	식(2)
$\varnothing = \frac{p_w}{p_{ws}} t_p \times 100$ .....	식(3)
$\ln(p_{ws}) = C_6/T + C_7 + C_8T + C_9T^2 + C_{10}T^3 + C_{11}T^4 + C_{12}\ln T$ .....	식(4)
$\ln(p_{ws}) = C_{13}/T + C_{14} + C_{15}T + C_{16}T^2 + C_{17}T^3 + C_{18}\ln T$ .....	식(5)
$t_d = t_{is} - \frac{U}{K_{is}}(t - t_o) = t - \frac{r_{is}}{R}(t - t_o)$ .....	식(6)

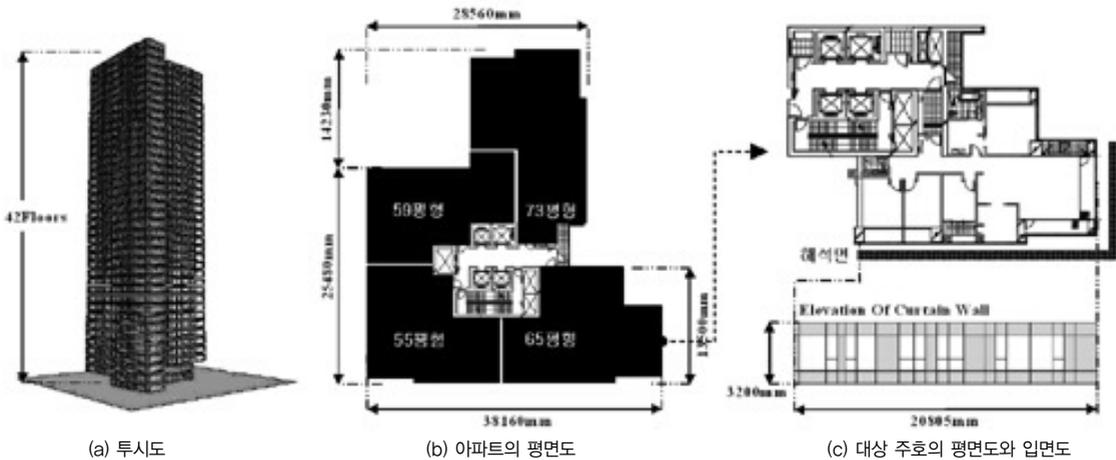
1) 노점온도(Dew-point Temperature)

습공기에 대한 노점온도는 노점온도의 범위에 따라 다음의 식(1) 또는 식(2)를<sup>4)</sup> 이용하여 구할 수 있다. 노점온도의 범위가 0~93℃일 때는 식(1)을 이용하며, 노점온도

의 범위가 0℃이하일 때 식(2)를 사용한다.

그러나 식(1)과 식(2)를 이용하여 노점온도를 구하기 위해서는 수증기분압인 Pw의 값이 필요하다. 수증기분압(Pw)를 구하기 위해서는 실내의 상대습도(φ)와 포화수증기압(Pws)를 알고 있다는 조건하에서 식(3)을<sup>5)</sup> 이용하여 계산할 수 있다.

여기서 실내의 상대습도(φ)와 실내온도(ti)는 에너지 시뮬레이션의 결과값을 입력값으로 사용하면 되지만 포화수증기압(Pws)은 다시 실내의 온도에 따라 식(4) 또는 식(5)를<sup>6)</sup> 이용하여야 한다. 실내온도의 범위가 -100℃~0℃일 때는 식(4)을 이용하며, 실내온도의 범위가 0℃~200℃일 때 식(5)를 사용한다.



[그림 3] 사례아파트의 입면과 평면특징

4) Peppers, V.W. 1988. Unpublished paper. Available from ASHRAE; ASHREA HANDBOOK FUNDAMENTAL(1997), pp6.9-6.10  
 5) ASHREA HANDBOOK FUNDAMENTAL(1997), pp6.9  
 6) Hyland, R.W. and A. Wexler. 1983a, Formulations for thermodynamic properties of dry air from 173.15K to 473.15K, and of saturated moist air from 173.15K to 372.15K, at pressures to 5MPa. ASHRAE Transactions 89(2A):520-35.

## 2) 표면온도(Surface Temperature)

실외온도가 실내온도에 미치는 영향은 벽체를 구성하는 재료들의 열저항에 비례하기 때문에 실내측 벽과 커튼월의 표면온도는 각각 식(6)에 의해 구할 수 있다.

식(6)에서 실내온도( $t_i$ )와 실외온도( $t_o$ ), 실내측 표면부근의 온도( $t_{is}$ )은 에너지시뮬레이션을 통해 얻을 수 있으며, 열관류율( $U$ )과 실내측 표면의 열전달율( $k_{is}$ ), 그리고 열관류저항( $R$ )과 실내측 표면의 열전달저항( $r_{is}$ )은 실제

[표 2] 내·외 벽체의 물성치

항 목	물성치		
	내벽	외벽	바닥
열전달률(U-value, W/m <sup>2</sup> K)	0.588	0.436	4.525
Solar Absorptivity	0.700	0.700	0.700
Internal Emissivity	0.900	0.900	0.900
External Emissivity	0.900	0.900	0.900

[표 3] 인체의 발열부하와 재실스케줄<sup>7)</sup>

시간 요일	시간																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
평 일	100	100	100	100	100	100	100	50	25	25	25	25	0	0	0	25	25	50	50	75	100	100	100	100
토요일	100	100	100	100	100	100	100	50	25	25	25	25	25	25	25	50	50	75	75	75	100	100	100	100
일요일	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	25	25	50	50	75	75	75	100	100	100	100

\* 직장인, 주부, 중학생, 초등학교 등 4인가족 기준, 현열량 90W/p, 잠열량 60W/p

[표 4] 조명부하(전력부하: 5.58W/m<sup>2</sup>, 발열부하: 3.82W/m<sup>2</sup>)와 이용스케줄<sup>8)</sup>

구분	단위	대 수	총 W	1W당 조명발열량	조명발열량	이용스케줄 (%)	시간																									
				(kcal/h · W)	(kcal/h)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
직관형광램프	40	8	320	0.66	211.2	0	0	0	0	34	67	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	67	100	100	67	34	34
백열전구	60	3	180	0.62	111.6	0	0	0	0	33	67	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	67	100	100	67	33	33
전구식형광등기구	20	8	160	0.41	65.6	0	0	0	0	33	67	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	67	100	100	67	33	33
계					388.4	평균	0	0	0	0	33	67	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	67	100	100	67	33	33

[표 5] 개구부의 유형별 틈새유동계수( $I_s-1m-1Pa-0.6$ )<sup>9)</sup>

항 목		Quartile		
		Lower	Median	Upper
Windows (Weatherstripped)	Hinged	0.086	0.130	0.410
	Sliding	0.079	0.150	0.210
Windows (Non-Weatherstripped)	Hinged	0.390	0.740	1.100
	Sliding	0.180	0.230	0.370
Internal Doors		1.100	1.300	2.000
External Doors (Weatherstripped)	Hinged	0.082	0.270	0.410
	Sliding	1.000	1.500	2.000
External Doors (Non-Weatherstripped)	Hinged	1.100	1.200	1.400
	Sliding	1.100	1.200	1.400
Elevator Doors		0.550	0.650	1.000

[표 6] THERM 시뮬레이션의 외부조건

	외부온도 (°C)	외표면 열전달*1*3	내부온도 (°C)	내표면 열전달*2*3
NFRC100-2002 Winter	-18.0	25.4W/m <sup>2</sup> K	21.0	2.61W/m <sup>2</sup> K

\*1) ASHRAE/NFRC Outside Convection 25.4 W/m<sup>2</sup>K, 외부풍속 5.5 m/s

\*2) ASHRAE/NFRC Inside Convection 2.61 W/m<sup>2</sup>K

\*3) Emissivity 0.84

[표 7] THERM에 의한 측정위치별 열관류율값(U-Value, W/m<sup>2</sup>K)

	Mullion1			Mullion2		
	P1-1	P1-2	중앙값*	P2-1	P2-2	중앙값
계산값	2.34	1.76	1.75	2.34	1.76	1.75

참고) \*중앙값은 제조업체에서 제공한 열관류율

7) 박성훈, 웹 기반 건물에너지 성능 평가 도구 개발에 관한 연구, 연세대학교 석사논문, 2002.2

8) 김문수 외, 실내조명광원에 있어 조명발열량 실측에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집, 1997.

9) Air Infiltration and Ventilation Centre, An analysis and data summary of the AIVC's numerical database, Technical Note AIVC 44, 1994.3

설계도면에 나와 있는 물성치를 통해서 구할 수 있다.

### 3. 사례를 통한 결로 예측 방법의 적용

#### 3.1 기본모델의 선정

본 연구의 결로 예측 방법을 적용하기 위해, I사의 삼성동 초고층 아파트를 사례로 선정하였고, [그림 3]에서 101동의 65평형을 중심으로 시뮬레이션을 실시하였다. 원활한 시뮬레이션을 위해서 평면을 단순화시킨 모델을 사용하였고 해석면은 굽은 선으로 나타냈다. 결로의 해석에 사용된 시뮬레이션 프로그램으로서 커튼월의 열관

류율 계산의 경우, THERM을 이용하였고 환기율과 온도 및 습도 해석을 위해서는 영국 IES4D사의 VE-Sim과 VE-MacroFlo를 사용하였다.

#### 3.2 기본모델의 물리적 특성

시뮬레이션을 위한 입력조건은 중요한 사항에 대해서만 언급하도록 하겠다.

##### 1) 커튼월의 물리적 특성

① 유리모델 : 6mm 투명유리+ 12mm 공기층+6mm 로이 유리

② 중앙부위의 열관류율: 1.75 W/m<sup>2</sup>K

③ 창호의 열관류율: 1.21 W/m<sup>2</sup>K

④ 창호의 틈새유동계수(Crack Flow Coefficients, ls<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>Pa<sup>-0.6</sup>) : [표 5] 참조

④ 창호틈새의 길이: 8.6m

##### 2) 기본 입력조건

내·외벽과 바닥의 물성치, 각 층 부하 및 스케줄 등을 요약하면 [표 2], [표 3], [표 4]와 같다.

##### 3) 실내온도 조건

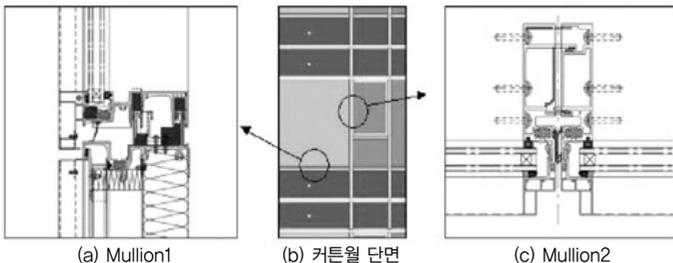
동계 공동주택의 실내온도는 KS F2295나 난방설계시 사용되는 설계온도 등과 같이 20℃로 설정하는 것이 대부분이지만, 실제로 선행연구의 공동주택 사용현황에 대한 난방온도 측정치(1)10)을 보면, 일반적으로 약 23℃~약 26℃의 범위에서 난방온도를

[표 8] 세대별 온·습도 현황조사

호 수	온 도(℃)			습 도(%)			절대습도(kg/kg)*			비 고
	최저	최고	평균	최저	최고	평균	①	②	평균	
11층A호(동쪽)	19.5	21.0	20.0	27.0	40.0	30.8	0.0042	0.0056	0.0045	결로 미 발생
11층B호(남쪽)	12.0	31.0	21.1	26.0	56.0	37.8	0.0073	0.0049	0.0059	
12층A호(북쪽)	15.0	20.0	18.6	23.0	28.0	25.1	0.0024	0.0033	0.0033	
12층B호(서쪽)	18.5	27.0	20.5	28.0	36.0	32.0	0.0037	0.0062	0.0048	
23층A호(동쪽)	20.0	25.0	23.5	58.0	68.0	61.0	0.0099	0.0115	0.0110	결로 발생
22층A호(동쪽)	14.0	21.5	17.8	50.0	76.0	64.5	0.0075	0.0080	0.0082	
23층B호(북쪽)	22.0	25.0	23.9	42.0	69.0	61.7	0.0083	0.0114	0.0114	
23층C호(남쪽)	15.0	30.0	20.2	42.0	87.0	73.8	0.0092	0.0111	0.0109	
24층A호(서쪽)	18.5	30.0	20.8	48.0	86.0	72.1	0.0115	0.0128	0.0111	

참고) \* 자연형 기후설계도움(송승영, 이화여대) Ver2.0을 이용한 계산값임

- ① : 최고습도, 최저습도시의 절대습도
- ② : 최저온도, 최고습도시의 절대습도
- 평균 : 평균온도, 평균습도시의 절대습도



[그림 4] 창호의 THERM 시뮬레이션 위치

유지하고 있다. 본 연구에서도 보다 현실적인 결로해석을 위해 24℃를 기준으로 난방온도를 설정하였다.

**4) 실내습도 조건-내부습도 발생량**

에너지 시뮬레이션 프로그램은 직접 습도발생량을 입력하는 요소는 없다. 단지 내부부하의 요소중 현열부하를 0W로 두고 잠열부하를 변화시켜 실내습도를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 결로를 유발하는 잠열부하를 추정하기 위해서 [표 8]의 실측자료를 이용하였다.

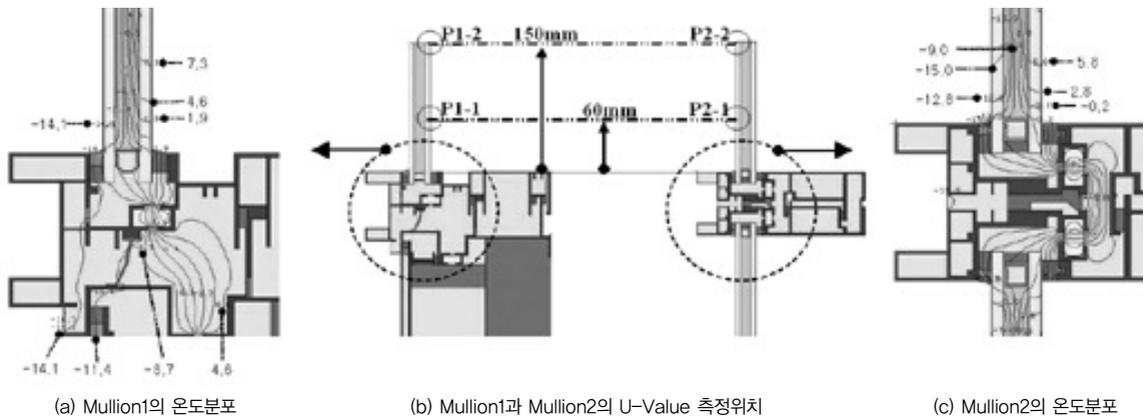
[표 8]은 I회사의 초고층 아파트(P)로서 커튼월의 결로 문제가 심각하게 발생하고 있다. 잠열부하를 추정하는 방법은 I사의 아파트(P)를 에너지 시뮬레이션상에 동일하게 구현시키며, 잠열부하와 환기횟수를 미세 조정하여, 실측치의 현상이 나타나도록 유도하는 것이다. 0.5ACH의 환기횟수하에서 잠열부하를 조정하여 절대 습도를 분석한 결과, 실내에서 4.5W/m<sup>2</sup>의 잠열이 발생

했을 때 저층의 습도가 0.005kg/kg, 고층부의 습도가 0.011kg/kg정도의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 표8과 유사한 실측값으로서 본 시뮬레이션에서는 잠열부하를 4.5W/m<sup>2</sup>로 추정하였다.

**3.3 커튼월의 중앙과 창호부위의 열관류율 해석**

단열유리유닛의 모서리부분에서 철재 스페이서는 단열유리 중앙부보다 열흐름이 훨씬 많기 때문에 유리 바깥 모서리 부분을 따라 열손실이 증가한다. 이로 인해 커튼월 주변부는 유리의 중앙부에 비하여 높은 열관류율값을 가지게 되어 결로를 발생시키게 된다.

따라서 커튼월 주변부 열관류율값의 정확한 계산을 위해 THERM을 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 특히 시뮬레이션 위치로서 그림4와 같이 대상 기본모델의 커튼월 입면중 두 위치를 선정하였으며 기본적인 외기조건은 [표 6]과 같다.



[그림 5] 각 Mullion의 측정점 위치와 온도분포

10)송승영, “실내표면 결로방지를 위한 열교부위의 적정 단열정도 설정방법에 관한 연구”, 대학건축학회논문집, 1998.10

11) 건설기술연구소, “외피 결로 단열 기밀성능 및 소음발생 현상의 저감방안에 관한 연구”, 2000.3

1) 온도분포

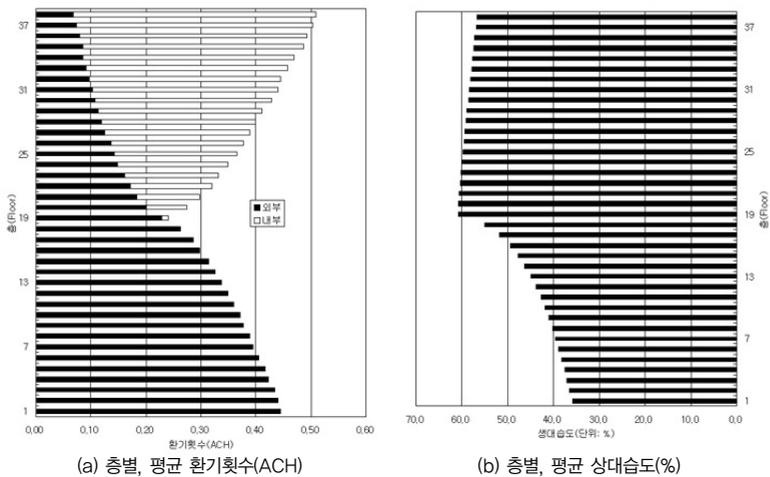
외기온도가 -18℃이고 실내온도가 21℃인 경우, 창호 부분의 온도분포는 그림5(a)(c)에 나타나 있다. 내부 표면온도를 보면 Mullion1은 -3.1℃, Mullion2는 -2.1℃ 까지 내려가는 것으로 나타났다.

2) 유리의 중앙과 창호부분 유리의 열관류율

창틀의 온도는 외기온도에 의한 변화가 크기 때문에 결로를 예측하기가 어렵다. 따라서 열관류율값을 통하여 수식을 이용한 온도계산이 필요하다.

다음은 창틀로부터 6cm떨어진 지점과 15cm떨어진 지점의 열관류율을 계산하였다. 계산된 지점의 위치는 [그림 5(b)]와 같다.

[표 7]의 결과값을보면, 창틀에서 6cm떨어진 부분의 열관류율은 2.34W/m<sup>2</sup>K이며, 창틀에서 15cm떨어진 부분은 1.76W/m<sup>2</sup>K로 나타났다. 15cm떨어진 경우의 열관류율은 계획상에 제시된 값인 1.75W/m<sup>2</sup>K와 거의 일치한 값을 가진다. 앞서 언급되었듯이 창틀의 열전달에 의하여 유리 주변부분의 열관류값이 30%이상 증가한 것을 알 수 있다.



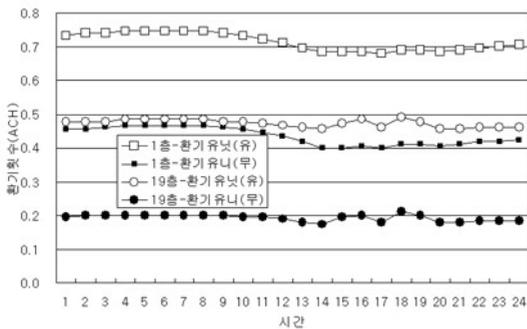
[그림 6] 1월 17일, 층별 평균 환기횟수와 평균 상대습도

3.4 층별 환기량과 습도 해석

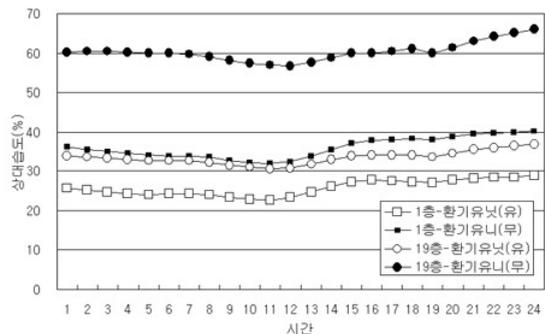
기본모델을 대상으로 결로시간을 예측하기 위해 환기시스템에 대한 환기량과 습도를 분석할 필요가 있으며 환기량에 따른 실내습도의 층별 변화를 분석하기로 하겠다.

1) 1월 17일, 환기횟수와 습도(환기 유닛-무)

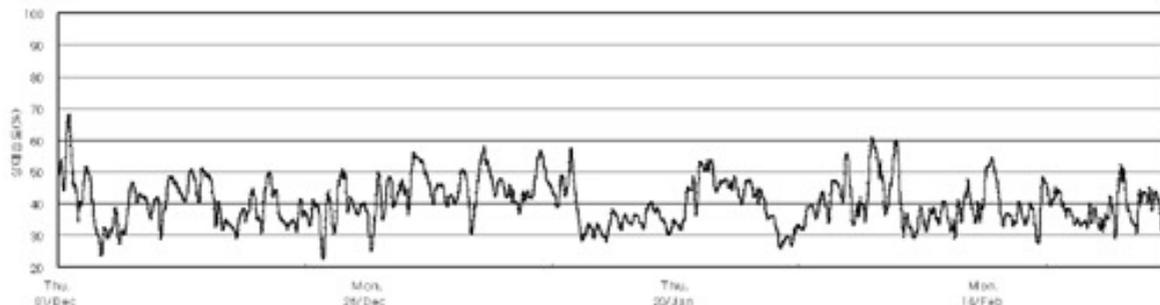
앞서 [표 8]에서의 현장실측 결과



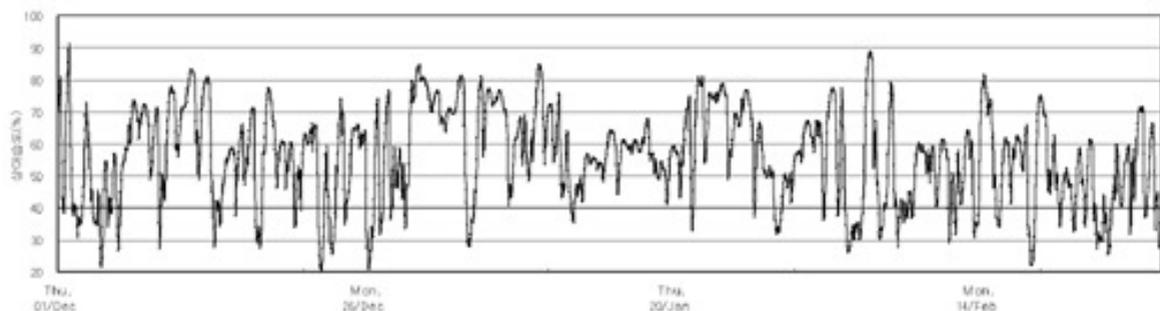
[그림 7] 환기유닛의 유무에 따른 환기횟수의 변화



[그림 8] 환기유닛의 유무에 따른 상대습도의 변화



[그림 9] 겨울철 1층의 상대습도 변화



[그림 10] 겨울철 19층의 상대습도 변화

를 보면, 23층의 B호는 외기온도  $-8^{\circ}\text{C}$ , 실내온도  $24.5^{\circ}\text{C}$ , 실내상대습도 60%인 경우  $0.114\text{kg/kg}$  절대습도값을 가지는 것으로 조사되었다.

기상데이터를 비교한 결과, 이와 비슷한 외기를 보이고 있는 날은 1월17일이며 이날을 중심으로 1층과 19층의 환기횟수와 습도변화를 검증해 보기로 하겠다.

#### ① 1월 17일, 기상데이터

실내습도는 외기와의 환기량에 의해 변화하므로 외기온도에 영향을 받는다. 풍향과 풍속 또한 환기량에 영향을 미치는 중요 요소이다. 1월 17일의 외기온도의 시간별 변화를 요약하면 최저값은  $-10^{\circ}\text{C}$ , 최고값은  $-2^{\circ}\text{C}$ , 평균온도는  $-4^{\circ}\text{C}$ 를 보이고 있다. 최고풍속은  $2.1\text{m/s}$ 로 나타났다.

#### ② 1월 17일, 층별 평균 환기횟수의 변화

환기의 특징을 나타낼 수 있는 평균 환기횟수의 경우, [그림6(a)]를 보면 1층은  $0.45\text{ACH}$  정도의 환기량을 보이고 있으며, 19층이 가장 낮은 값인  $0.24\text{ACH}$ 를, 최고층인 38층이  $0.51\text{ACH}$ 로 가장 큰 값을 보이고 있다. 이는 고층건물에서 일어나는 연돌효과에 의해 중앙층인 19층이 환기가 잘 안되는 것으로 사료된다. 하지만 환기량을 외부와 내부로 분류해 보면 외부에서 들어오는 환기량의 경우 1층의  $0.45\text{ACH}$ 에서 38층의  $0.07\text{ACH}$ 로 점진적으로 줄어들고 있다. 다만 19층 이후로는 현관문을 통하여 코어 등에 있는 공기가 실내로 유입되기 때문에 외부 환기량에 대비하여 증가하는 내부 환기량은 19층의 경우  $+0.01\text{ACH}$ 로 지속적인 증가를 보여 38층의 경우에는  $+0.44\text{ACH}$ 라는 높은 값을 보이고 있다.

[표 9] 각 세대별 환기유닛(20m³/h·p) 설치시 환기량과 환기횟수

실명	급기 풍량	배기 풍량	환기유닛 사용시 환기량 증가분		
			체적(m³)	환기량(m³/h)	+ACHr
거실	80	-			
주인침실	40	-			
침 실-1	20	-			
침 실-2	20	-	646.9	180	0.28
침 실-3	20	-			
식 당	-	140			
드레스룸	-	40			
소계	180	180			

③ 1월 17일, 층별 상대습도의 변화

각 층수의 실별 습도발생량은 일정하게 설정하였으며 객실자 스케줄과 발열량이 동일하므로 층별 상대습도값은 환기량과 내·외부에서 유입되는 공기에 영향을 받게 된다. [그림 6(b)]은 층별 상대습도의 변화를 나타낸 것이다.

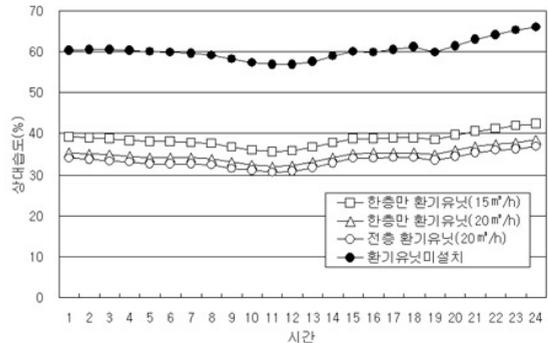
결과를 분석해 보면, 1층은 평균 습도 35.9%이며 19층의 경우에는 평균 60.7%정도로 약 26%정도의 습도차이를 보이는 것으로 나타났다. 상대습도는 19층까지 지속적으로 증가하다가 내부환기량의 증가로 인해 20층 이후로는 약간 씩 감소하여 59~63%사이의 값을 보이고 있다. 이는 앞서 표8에서의 실측값과 큰 차이를 보이지 않고 있어 해석결과의 유의성을 설명해 주고 있다.

2) 1월 17일, 환기횟수와 습도(환기유닛-유)

앞서 환기유닛이 없는 상태에서 침기에 의한 환기량과 습도의 변화를 분석해 보았다. 다음은 계획된 환기유닛의 환기용량하에서 습도의 변화를 분석해 보기로 하겠다.

① 환기유닛의 개요

20m³/h·p의 환기유닛을 설치시 증가되는 환기횟수



[그림 11] 19층의 환기유닛에 따른 상대습도 변화

는 [표 9]와 같다.

② 1월 17일, 환기횟수와 습도변화

다음의 [그림 7]과 [그림 8]은 환기유닛의 유무에 따른 1층과 19층의 환기횟수와 상대습도의 변화를 보여주고 있다.

[표 10] 겨울철, 겨울 시간과 일수 예측시뮬레이션 조건-환기유닛(무)

항목	환기	내부온도	개폐여부	기간
조건	환기유닛(무)	24℃	창문 닫음	12월1일 ~2월28일

1층의 환기유닛 유무에 따른 비교결과를 보면, 환기유닛을 설치한 경우, 평균 습도는 35.9%에서 25.8%로 10.1%감소하였고 환기횟수는 0.40ACH에서 0.68ACH로 0.28ACH만큼 증가하였다. 0.28ACH는 기계환기에서 설정해 준 값으로 설비시스템이 이상적으로 작동하고 있음을 나타내고 있다.

19층의 환기유닛 유무에 따른 비교결과, 환기유닛을 설치한 경우, 평균 습도는 60.3%에서 33.4%로 26.9%감소하였고 환기횟수는 0.17ACH에서 0.46ACH로 0.29ACH만큼 증가하였다. 1층에 비하여 19층의 경우 환기횟수의 변화는 약 0.28ACH로 같은 반면 습도는

27%정도만큼 큰 폭으로 감소된 것을 알 수 있다.

③ 1월 17일, 한층만 환기유닛 작동시 환기횟수와 습도변화 19층에서 상대습도가 큰 폭으로 감소한 이유는 크게 두 가지 경우로 들 수 있다. 첫 번째는 하부층의 습도감소로 상부층으로 상승되는 습기가 줄어든 경우와 환기 성능의 높아 실내에서 발생하는 습기와 하부층에서 유입되는 습기보다 더 빨리 습기를 배출할 경우이다.

이를 위해 다른 세대는 환기유닛을 작동시키지 않고 19층의 한 세대만 작동을 시킬 경우 습도의 변화를 보면 그림11과 같다. 한층만 환기유닛을 가동했을 경우는 다른 층에도 환기유닛을 가동했을 경우에 비하여 약 1.5% 정도 상대습도가 높은 것으로 나타났다. 이는 환기횟수가 0.27ACH로 큰 값을 가져 아래에서 올라오는 습기량 보다는 방출되는 양이 많기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 실질적으로 아래층에서 상승하여 유입되는 습도는 큰 영향을 미치지 않으므로 습도가 발생하는 층만 적절한 환기시스템을 설치하여도 충분한 효과를 낼 수 있을 것으로 판단된다.

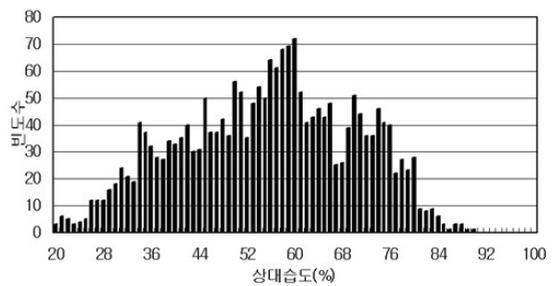
### 3.5 커튼월의 결로해석

#### 1) 시뮬레이션 조건

기본모델중 65평을 중심으로 상대습도가 가장 높은 19층과 가장 낮은 1층을 대상으로 각 환기유닛에 따라 결로발생 유무와 결로발생 일수를 분석하였다. 기본모델의 입력조건은 3.2에서 정의되었으며, 커튼월의 열관류율은 3.3에서 분석한 결과를 바탕으로 중앙부는 1.75W/m<sup>2</sup>K, 창호의 주변부는 2.34W/m<sup>2</sup>K로 나누어 설정하였다.

#### 2) 환기유닛(무), 겨울철 결로 시간과 일수

기계적 환기유닛이 없는 경우, 추가적인 입력조건은 아래의 [표 10]과 같다. 1층과 19층의 시뮬레이션 결과, 겨울철 내부습도의 변화는 [그림 9]와 [그림 10]과 같이 나타났다.



[그림 12] 겨울철, 19층 상대습도의 발생 빈도수

[표 11] 겨울철, 19층의 결로 시간과 일수-환기유닛 미설치

발생위치 발생시간	유리의 중앙부	유리의 경계
	1.75W/m <sup>2</sup> K	2.34W/m <sup>2</sup> K
결로발생시간1	341시간	839시간
결로발생시간2	324시간	795시간
결로발생일수	42일	44일

결로발생시간 : 일사에 고려하지 않은 결로발생  
 결로발생시간2 : 일사에 의한 유리의 표면 온도상승을 고려하여 10시~16시까지 결로없음을 가정

#### ① 1층의 결로 시간과 일수 예측-환기유닛(무)

[그림 9]와 [그림 10]은 겨울철(12월 1일~2월 28일) 2160시간동안의 상대습도의 변화를 1층과 19층에 대해 보여주고 있다. 1층의 경우 겨울철의 평균습도가 약 40%정도에서 19층보다는 상대적으로 좁은 폭으로 변하고 있다. [그림 2]의 알고리즘에 의한 결로 예측프로그램 결과를 보면, 1층의 경우 일사의 유무에 관계없이 환기유닛이 설치되어 있지 않더라도 커튼월의 중앙부나 주변부에 결로가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

② 19층의 결로 시간과 일수 예측-환기유닛(무)

19층의 경우, 1층의 경우보다 겨울철의 평균습도가 약 60%정도에서 상당히 큰 폭으로 변하고 있으며, [그림 12]와 [표 11]의 결로 예측프로그램에 의한 결과를 보면, 일사를 고려할 때 중앙부는 324시간, 경계부분은 795시간동안 결로가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 일사를 고려하지 않는다면 중앙부의 경우 341시간, 경계부분의 경우 839시간의 결로가 발생하며, 결로일수는 12월에서 2월까지 90일중 중앙부는 42일, 경계부분은 44일정도 결로가 발생하는 것으로 나타났다.

3) 환기유닛(유), 겨울철 결로 시간과 일수 예측

환기용량이 10m³/h · p과 20m³/h · p인 환기유닛을 설치한 경우, 각 각의 겨울철 평균습도는 35%와 40%를 중심으로 상대적으로 적은 폭으로 변화하고 있으며 이는 환기유닛이 없는 1층의 경우와 유사한 형태를 보이고 있다. 결로 예측프로그램에 의한 결과를 보면, 일사의 유무에 관계없이 외기에 의한 환기량이 증가하여 커튼월의 중앙부나 주변부에 결로가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

4. 결론

디자인 단계에서 초고층 아파트의 결로현상을 정량적으로 예측하기 위해 본 연구에서는 결로의 해석방법을 제시하였다. 제시된 방법으로 결로를 해석하고 검증하기 위해 우선 초고층 아파트의 기본모델을 설정하였고 기본모델의 외피구성요소인 커튼월의 열성능을 분석하여 커튼월의 실제 열관류율 등을 도출하였다. 또한 층별 환기분석을 통해 실내 온 · 습도와 환기횟수의 변화를

파악하였고 서로 상반되는 두개의 층을 선택하였다. 선택된 두 개층에 대해 다시 환기 성능분석을 수행하였으며 환기시스템의 환기량에 따른 온도와 습도의 겨울철 데이터를 이용하여 노점온도와 표면온도를 구하는 식에 대입함으로써 커튼월의 결로정도를 알아보았다. 결로해석 방법에 의한 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) THERM 시뮬레이션에서 열관류율을 보면, 유리의 중앙부는 1.75W/m²K이며, 창틀에서 6cm 떨어진 부분은 2.32W/m²K 그리고 15cm 떨어진 부분의 열관류율은 1.75W/m²K 값을 가지는 것으로 나타나 유리의 중앙부에 비하여 주변부분이 창호의 열흐름에 의하여 30%정도 더 높은 열관류율 값을 가지는 것으로 나타났다.
- 2) 겨울철(12월1일~2월28일) 평균 환기횟수의 경우 1층은 0.45ACH 정도의 환기량을 보이고 있으며 중앙층이 가장 낮은 값인 0.24ACH를, 최고층인 38층의 경우가 0.51ACH로 가장 큰 값을 보이고 있다. 실질적으로 고층건물에서 일어나는 연돌효과에 의해 중앙층인 19층이 환기가 가장 안 되는 것으로 나타났다. 이처럼 상부층보다 중앙층이 환기량이 낮은 이유는 외부에서 들어오는 환기량을 보면 알 수 있다. 1층의 0.45ACH에서 중앙층 0.23ACH 그리고 38층의 0.07ACH로 중앙층보다는 상부층으로 갈수록 외부환기량이 점차적으로 줄어들고 있는 반면에 20층이후로는 거실문을 통하여 코어 등에 있는 내부환기량이 증가하여 상부층의 환기량이 중앙층의 환기량 보다 늘어나게 된 것이다.
- 3) 1층은 평균 습도 37%, 19층의 경우에는 63.2%정도로 약 26%정도의 습도차이를 보이는 것으로 나타났다. 상대습도는 19층까지 지속적으로 증가하다가 20층 이후는 약간씩 감소하여 59~63%사이의 값을 보이고 있다. 즉 고층으로 갈수록 외기를 통한 환기율이 낮아지므로 높은 습도를 가지는 것으로 나타났으며 겨울철 저층보다는 고층이 결로발생 가능성이 높다.
- 4) 19층의 경우 내부습도 감소를 위하여 20m³/h?p의 환기시스템을 사용할 경우 1월 17일 평균 습도값은 60.3%에서 33.4%로 27%정도나 감소하였고 환기횟수는 0.17ACH에서

0.46ACH로 0.29ACH 증가하였다. 1층에 환기시스템을 설치할 경우 습도의 감소폭은 6.5%정도의 값을 가지는 반면, 19층의 경우 환기량의 변화는 1층과 같이 0.28ACH정도인데도 습도는 27%정도로 큰 폭의 감소를 보이고 있다. 이러한 결과는 하부층의 습도감소 때문에 상부층에 유입되는 습

기량이 줄어든 것에도 영향이 있지만 19층 한층만 환기유닛을 가동한 결과에서 보듯이 환기성능이 우수해 유입되거나 발생하는 습기에 비해 제거되는 습기가 더 많기 때문인 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- 1) 삼성중공업기술, 초고층 요소기술, 기문당, 2002.5
- 2) 이성복, "공동주택에서의 결로발생 현황 및 분석", [www.apartnetwork.com/tomak11.htm](http://www.apartnetwork.com/tomak11.htm)
- 3) 김광우, 송승영, "공동주택에서의 결로발생 및 대책", [www.apartnetwork.com/tomak12.htm](http://www.apartnetwork.com/tomak12.htm)
- 4) Peppers, V.W. 1988. Unpublished paper. Available from ASHRAE; ASHREA HANDBOOK FUNDAMENTAL(1997), pp6.9-6.10
- 5) ASHREA HANDBOOK FUNDAMENTAL(1997), pp6.9
- 6) Hyland, R.W. and A. Wexler. 1983a. Formulations for thermodynamic properties of dry air from 173.15K to 473.15K, and of saturated moist air from 173.15K to 372.15K, at pressures to 5MPa. ASHRAE Transactions 89(2A):520-35.
- 7) 박성훈, 웹 기반 건물에너지 성능 평가 도구 개발에 관한 연구, 연세대학교 석사논문, 2002.2
- 8) 김문수 외, 실내조명광원에 있어 조명발열량 실측에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집, 1997.
- 9) Air Infiltration and Ventilation Centre, An analysis and data summary of the AIVC's numerical database, Technical Note AIVC 44, 1994.3
- 10) 송승영, "실내표면 결로방지를 위한 열교부위의 적정 단열정도 설정방법에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 1998.10
- 11) 건설기술연구소, "외피 결로 단열 기밀성능 및 소음발생 현상의 저감방안에 관한 연구", 2000.3
- 12) 삼성중공업기술, "초고층 요소기술", 기문당, 2002.5
- 13) 조균형, "초고층 아파트의 단위세대 주방 환기에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 2001.12
- 14) R. McCluney, "Sensitivity of Fenestration Solar Gain to Source Spectrum and Angle of Incidence", ASHRAE Transactions 10, June 1996
- 15) 김광우, 정광섭 공저, "건축공기조화설비", 서울, 기문당, 1993. P265
- 16) Mechler. M. "Indoor Air Quality Design Guidebook", Lilbum, The Faimont Press, 1991 p.118
- 17) Hines A.L. et al, "Indoor Air Quality and Control", New Jersey: PTR Prentice Hall. 1993, pp.53 ~ 55
- 18) 윤재욱, "공동주택의 실내청정도를 고려한 환기설계 기준 설정방법에 관한 연구", 박사학위 논문, 연세대학교 대학원 건축공학과, 1989.12 p.8
- 19) Samet, J.M. and Spengler J.D., "Indoor and pollution: a health perspective, London", The Jones Hopkins Press, 1991. p.16