

3차원 정상상태 해석에 의한 공동주택 단열성능 평가

- TDR(온도상대비)을 중심으로 -

최 보 혜[†], 최 경 석, 강 재 식, 이 승 언, 이 용 준*

한국건설기술연구원 건축도시연구본부 건축계획·환경연구실, *EAN Technology

Insulation Performance Evaluation of Apartment Housing

Bying a Three-Dimensional Steady State Simulation

Bo-Hye Choi[†], Gyoung-Seok Choi, Jae-Sik Kang, Seung-Eon Lee, Yong-Jun Lee

ABSTRACT: The purpose of this study is to consider improvement performance to prevent condensation and draw the optimum insulation design method for building using simulation tool. In this study, the three corners, weak part in condensation, were conducted by three-dimensional steady state simulation. From the results, it is required to strengthen insulation design, and it is founded that existing insulation system typically applied to most Korean apartment buildings has serious insulation defect that insulation is disconnected by structural components at the joints of wall-slab and wall-wall in envelope. So, it is considerate to need a concrete technology improvement.

Key words: Temperature Difference Ratio(TDR, 상대온도비), Thermal Performance(단열성능), Steady State(정상상태), Condensation(결로)

기 호 설 명

T_i : 실내 온도 [°C]

T_o : 외기 온도 [°C]

T_{is} : 벽체 실내표면온도 [°C]

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 유가변동 및 환경부하저감을 위한 지속적 건물에너지절약이 강화되고 있으며 건설 환경 변화에 따라 신기술, 신공법, 고성능 단열재 수요가 증가하고 있다. 그러나 제도권과 건설 환경의 변화에 대응할 수 있는 고성능, 고기능, 친환경성

단열제품의 실질적 시장 보급 및 활성화는 수요 증가에 대비하여 상대적으로 미흡하다고 할 수 있다. 이는 보수적 성향의 우리나라 건설시장 특성과 이러한 신기술 제품의 전략적 시장 진출 시 필수적으로 요구되는 표준 매뉴얼 등 설계와 시공에 대한 실무 기술의 미흡이 가장 큰 요인으로 지적되고 있다.

2000년대 이후 우리나라 건설 환경의 변화는 제도권의 변화와 맞물려 그 이상의 급격한 변화와 진화과정을 거치고 있다. 가장 대표적인 예가 공동주택에서의 발코니 공간 확장이며, 그 외에도 건강주택에 대한 관심, 초고층 건축물의 대중화, 리모델링 건축시장의 본격적 활성화, 주거환경에 대한 질적 향상에 따른 결로 등 하자 문제의 근본적 대응기술 수요 증가 등이 있다. 이러한 변화는 종래의 단열재, 단열 공법으로는 최적의 대응이 미흡한 실정이며, 결국 보다 구체적인 대응 기술개발이 필요한 실정이다.

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0145; fax: +82-31-910-0361

E-mail address: bh5304@kict.re.kr

따라서 본 연구에서는 결로 성능을 중심으로 시뮬레이션을 통해 현행 법규 및 법규 대비 단열 성능 강화에 따른 결로 방지 성능 향상을 고찰하며 최적 단열설계 방안을 도출하고자 하였다.

2. 결로 발생 위험도 판단 기준의 고찰

2.1 결로 및 열교현상 평가지표

실제 건물에서 열적으로 가장 취약한 부위는 외기에 직접 면한 외벽체 모서리 접합부위이며, 이 부위는 벽체 자체의 단열성능이 우수하고 단열 설계가 양호한 경우에도 열교(heat bridge)에 의한 전열손실이 다른 부위에 비해 크게 발생한다.

이에 벽체 접합부위의 단열성능과 결로발생에 대한 적정성여부를 진단하는 방법으로써 접합부위의 표면온도와 실내·외 온도사이의 상호 관계로부터 각 요소의 온도차이비율(TDR : Temperature Difference Ratio)에 따라 접합부위의 열성능을 평가하고, 이때 실내의 상대습도 조건에 따라 접합부위의 결로발생을 판정할 수 있는 간이 평가법을 제시하였다.

$$TDR = \frac{T_i - T_{si}}{T_i - T_o} \quad (1)$$

본 해석에서는 해석대상 부위별 평가 결과를 TDR 평가지표를 활용하였으며, 열교현상에 따른 결로발생 가능성을 분석에 이용하였다.

2.2 TDR에 의한 열성능 평가

TDR의 산정방법은 먼저, 벽체가 열적으로 안정상태에 도달하였을 때, 벽체 접합부위의 표면온도와 실내온도 등의 실측자료를 다음의 식에 대입하여 산정한다. 식에 따라 도출된 TDR값은 Table 1과 같이 4등급으로 구분한다.

TDR에 의해 판단하는 등급이 1급일 경우에는 모서리 부위의 열교현상이 극히 적은 것으로 판단할 수 있고, 2급 이상은 열적으로 양호한 상태로서 접합부위의 내표면에서 결로가 발생할 가능성이 적은 것으로 판단할 수 있다. 그러나 3급 이하인 경우에는 접합부 내표면에서 결로 등의

열적 결함이 발생할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

Table 1에서 등급이 1급일 경우에는 모서리 부위의 열교현상이 극히 적은 것으로 판단할 수 있고, 2급 이상은 열적으로 양호한 상태로서 접합부위의 내표면에서 결로가 발생할 가능성이 적은 것으로 판단할 수 있다. 그러나 3등급 이하인 경우에는 접합부 내표면에서 결로 등의 열적 결함이 발생할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

Table 1 Index of condensation decision in inside surface wall by TDRi

열적 성능	열발생 교생위	TDR	결로 발생 확률	해당 사례
우수	무시	<0.15	실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 최소한 상대습도 85%이하에서는 결로가 발생하지 않는 성능	-표면벽의 U값이 1.2 W/m ² K 이하 -외벽모서리 U값이 0.6 W/m ² K 이하 -단열시공된 인방
양호 (보통)	적당	0.15 ~ 0.2	실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 상대습도 80% 이하에서는 결로가 발생하지 않으나, 85% 이상에서는 결로 발생	-표면벽의 U값이 1.2 W/m ² K 이상 -외벽 모서리 U값이 0.6 W/m ² K 이상
불량	심함	0.2 ~ 0.3	실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 상대습도 70%이하에서는 결로가 발생하지 않으나 80% 이상에서는 결로 발생	-외벽모서리 U값이 0.9 ~ 1.5 W/m ² K -단열시공 안된 콘크리트 벽 및 바닥
매우 불량	매우 심함	>0.3	실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 상대습도 70%미만에서도 결로가 발생할 수 있는 경우	-2D 모서리 U값이 1.5 W/m ² K 이상 -3D 모서리 U값이 1.0 W/m ² K 이상인 바닥 및 단열벽

3. Case별 최적 단열설계 방안을 위한 평가 개요

3.1 평가 목적

본 해석은 공동주택의 실내 결로 발생 위험도를 판단할 수 있는 평가 지표인 TDR을 이용하여 현재 건축법규 상에서 정하고 있는 단열 기준에 따라 건축되고 있는 공동주택의 실내 결로 발생의 위험도를 판단하고 이를 방지하기 위한 적

정 단열 강화 기준을 정립하기 위한 기초 자료를 제공하는 데 목적이 있다.

3.2 평가 방법

상기의 해석 목적을 위하여 공동주택의 평면 형태 중 가장 빈번하게 나타나는 부위 중 결로에 취약한 우각부 부위 3개 형태를 선정하였다. 선정된 부위는 다음과 같다.

- ▶ Case 1 : 발코니와 인접한 외벽과 내벽이 형성하는 3차원 우각부
- ▶ Case 2 : 축벽과 내벽이 형성하는 3차원 우각부
- ▶ Case 3 : 발코니와 인접한 외벽과 외벽이 형성하는 3차원 우각부

상기의 우각부에 대하여 3차원으로 부위별 TDR 등급을 고찰하였으며 선정된 해석대상 부위에 대하여 현재 적용되고 있는 단열기준에 따른 단열재를 적용하여 열전달 해석을 실시하였다. 단열 기준 중 가장 적용 빈도가 높은 ‘가’등급 단열재 적용 시 두께 기준을 기준으로 두께의 30%에서 50%, 100%까지 두께를 증가시키면서 각 분석 지점별 TDR 값을 산정하여 단열재 두께에 따른 결로 발생 위험도를 판단 및 결로 방지 성능 향상의 효과를 확인하고자 하였다.

3.3 평가 조건

본 평가에서는 단열재 두께 변화에 따른 열전달 해석을 위하여 3차원 정상상태 해석 프로그램인 Physibel Trisco를 이용하였다. 본 프로그램은 건물 전체 및 일부분의 열류 흐름, 열전도 상태, 습도 상태 등의 건축 환경 관련요소를 도표와 그래픽 영상으로 가시화하여 건물의 열환경을 3차원 정상상태에서 평가하는 시뮬레이션 프로그램이다.

Physibel Trisco 프로그램에 의한 평가 시 적용된 시뮬레이션의 경계조건 및 입력 재료 물성치는 Table 2, 3과 같다.

3.4 시뮬레이션 모델링 및 분석지점

Physibel Trisco 프로그램에 의한 시뮬레이션을 위하여 Table 4와 같이 각 분석 부위별 모델

링을 실시하였으며, 각 부위별 분석 지점에 대하여 외기에 면하는 단열재의 두께를 변경하면서 표면온도를 도출하였다.

Table 2 Boundary conditions

항 목		경계조건	비 고
건구 온도 (°C)	실 내	20	TDR 등급의 실내외 온도조건
	외 기	-10	
상대 습도 (%RH)	실 내	70, 75, 80, 85, 90, 95	TDR 등급 설정을 위한 실내습도
실내측 표면 열전달율 (W/m²K)		25.0	-
실외측 표면 열전달율 (W/m²K)		7.7	-
온 도	온수온도(°C)	40	-
	온돌파이프 열전달율 (W/m²K)	1500	-

Table 3 Material properties

적용 재료	밀도 (kg/m³)	비열 (kcal/kg °C)	열전도율 (kcal/mh °C)
일반콘크리트	2240	0.21	1.4
누름콘크리트	1200	0.24	0.55
기포콘크리트	710	0.27	0.30
석고보드	863	0.27	0.12
시멘트모탈	2020	0.21	1.2
단열재	-	-	0.029
방습층	700	0.31	0.18
타일	2280	0.20	1.1

Table 4 Simulation model of evaluation part

부 위	모델링		
	최상층	기준층	최하층
Case 1 발코니+ (외벽/ 내벽) 접합부			
Case 2 축벽 /내벽 접합부			
Case 3 발코니+ (외벽/ 외벽) 접합부			

• 3차원 우각부 ① 상부(천정) ② 하부(바닥)

4. Case별 최적 단열설계 방안을 위한 해석 결과

4.1 Case 1(발코니+(외벽/내벽) 접합부) 해석 결과

발코니와 인접한 내벽과 외벽이 형성하는 3차원 우각부에 대해 건축법 단열기준 대비 단열두께를 30%, 50%, 100% 증가시켰을 때 각각에 대해 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 그 결과, 기준층 하우각부(바닥)에 건축법 단열기준 대비 단열두께 30% 강화 시 표 7에서와 같이 열적 결합이 심한 상태인 3등급에서 2등급으로 단열 상태가 양호해지는 것으로 나타났다. 그러나 건축법 단열기준 만족 시 기준층 하우각부(바닥)와 최하층 하우각부(바닥)의 TDR이 3등급으로 나타난 것에 비해 표 8과 같이 건축법 단열기준 대비 단열두께를 50% 증가시킬 경우이나 TDR 2등급으로 단열상태가 양호해지는 것으로 나타났으며, 마찬가지로 표 9에서는 기준층 상우각부(천장)에 대한 단열두께를 100% 강화하였을 때 단열상태가 TDR 2등급에서 1등급으로 향상되는 것을 볼 수 있다.

따라서 부위별로 현행 단열기준과 같이 단열하였을 때 단열 두께 강화만으로 해결 할 수 없는 부위를 확인할 수가 있었다.

Table 5 Case 1 : Applying to the building law insulation standard

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	65 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	90 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	55 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	18.46	0.16	2		
	우각부 하	16.56	0.21	3		
최상층	우각부 상	19.64	0.12	1		
최하층	우각부 하	16.76	0.20	3		

4.2 Case 2(측벽/내벽 접합부) 해석 결과

측벽과 내벽이 형성하는 3차원 우각부에 대해

Table 6 Case 1 : 30 % increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	84.5 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	117 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	71.5 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	18.57	0.15	2		
	우각부 하	17.01	0.20	2		
최상층	우각부 상	19.93	0.11	1		
최하층	우각부 하	17.16	0.19	2		

Table 7 Case 1 : 50 % increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	97.5 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	135 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	82.5 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	18.65	0.15	2		
	우각부 하	17.27	0.19	2		
최상층	우각부 상	20.00	0.11	1		
최하층	우각부 하	17.39	0.19	2		

Table 8 Case 1: 100 % increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	130 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	180 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	110 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	18.83	0.15	1		
	우각부 하	17.80	0.18	2		
최상층	우각부 상	20.23	0.11	1		
최하층	우각부 하	17.86	0.17	2		

건축법 단열기준 대비 단열두께를 30%, 50%, 100% 증가시켰을 때 각각에 대해 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 그 결과 각 분석 부위별 단열 상태는 대체로 양호하거나 우수한 상태로 나타났

다. 기준층 하우각부(바닥)에 건축법 단열기준 대비 단열두께 100% 강화 시 표 13에서와 같이 열적 성능이 보통인 2등급에서 1등급으로 단열상태가 우수해지는 것으로 나타났다.

Table 9 Case 2 : Applying to building law insulation standard

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	65 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	90 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	55 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	19.31	0.13	1		
	우각부 하	17.46	0.18	2		
최상층	우각부 상	20.23	0.11	1		
최하층	우각부 하	17.35	0.19	2		

Table 10 Case 2: 30 % increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	84.5 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	117.0 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	71.5 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	19.56	0.13	1		
	우각부 하	17.91	0.17	2		
최상층	우각부 상	20.41	0.10	1		
최하층	우각부 하	17.77	0.18	2		

Table 11 Case 3: 30 % increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	97.5 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	135.0 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	82.5 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	19.72	0.12	1		
	우각부 하	18.17	0.16	2		
최상층	우각부 상	20.49	0.10	1		
최하층	우각부 하	18.01	0.17	2		

Table 12 Case 2: 100% increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	130 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	180 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	110 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	20.06	0.11	1		
	우각부 하	18.71	0.15	1		
최상층	우각부 상	20.62	0.10	1		
최하층	우각부 하	18.50	0.16	2		

4.3 Case 3(발코니+(외벽/외벽) 접합부) 해석 결과

발코니와 인접한 외벽과 외벽이 형성하는 3차원 우각부에 대해 건축법 단열기준 대비 단열두께를 30%, 50%, 100% 증가시켰을 때 각각에 대해 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 그 결과 건축법 단열기준 만족 시 최하층 하우각부(바닥)의 단열 상태는 열적 결함이 심한 것으로 나타났다. 그러나 동일 부위에 대해 단열두께를 각각 30%, 50%, 100% 증가시켜 강화했을 경우에도 Table 15, 16, 17에서 보는바와 같이 TDR 3등급인 열적 성능이 불량한 것으로 나타나 결과가 우려되고 있다.

이를 통해 부위별로 현행 단열기준과 같이 단열하였을 때 열적 결함이 심하여 결과가 우려되는 부위에 단열 두께 강화만으로는 해결 할 수 없는 것을 확인할 수가 있었다.

Table 13 Case 3 : Applying to building law insulation standard

분석부위		구 분		외벽	가등급 단열재	65 T
		구 분		최상층 지붕/측벽	가등급 단열재	90 T
		구 분		최하층 바닥	가등급 단열재	55 T
		표면온도 (°C)	TDR	등급		
기준층	우각부 상	21.03	0.08	1		
	우각부 하	17.16	0.19	2		
최하층	우각부 하	14.64	0.26	3		

Table 14 Case 3: 30 % increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		가등급 단열재	
		외벽		84.5 T	
		최상층 지붕/측벽		가등급 단열재	
		최하층 바닥		가등급 단열재	
		표면온도 (°C)	TDR	등급	
기준층	우각부 상	21.04	0.08	1	
	우각부 하	17.19	0.19	2	
최하층	우각부 하	14.68	0.26	3	

Table 15 Case 3: 50 % increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		가등급 단열재	
		외벽		97.5 T	
		최상층 지붕/측벽		가등급 단열재	
		최하층 바닥		가등급 단열재	
		표면온도 (°C)	TDR	등급	
기준층	우각부 상	21.02	0.08	1	
	우각부 하	17.21	0.19	2	
최하층	우각부 하	14.70	0.26	3	

Table 16 Case 3: 100% increase of insulation thickness comparing to building law

분석부위		구 분		가등급 단열재	
		외벽		130 T	
		최상층 지붕/측벽		가등급 단열재	
		최하층 바닥		가등급 단열재	
		표면온도 (°C)	TDR	등급	
기준층	우각부 상	21.94	0.09	1	
	우각부 하	17.26	0.19	2	
최하층	우각부 하	14.75	0.26	3	

5. 결론

본 연구에서는 공동주택의 평면 형태 중 가장 빈번하게 나타나는 부위 중 결로에 취약한 부위인 발코니와 인접한 외벽과 내벽이 형성하는 우각부, 측벽과 내벽이 형성하는 우각부, 발코니와 인접한 외벽과 외벽이 형성하는 우각부 3부위를 선정하여 3차원 정상상태 시뮬레이션 해석을 통해 현행 법규 및 법규 대비 단열성능 강화에 따른 결로 방지 성능 향상을 고찰하고 최적 단열설계 방안을 도출하고자 하였다. 그 결과 결로에 취약한 부위가 단열 두께를 증가시키면 단열상태가 양호한 편으로 나타나기도 했으나, 단열 두께를 증가시켜도 단열상태가 향상되지 않는 부위도 있었다.

이를 통해 현행 단열기준과 같이 단열하였을 때 열적 결함이 심하여 결로가 우려되는 부위에 단열 두께 강화만으로는 해결 할 수 없는 것을 확인할 수가 있었다. 따라서 현재 건축법 단열설계 이상의 강화된 단열설계가 필요하다는 타당성을 확보하였으며, 국내 공동주택에서 주로 적용하고 있는 내단열 공법으로 시공하였을 때 모서리, 접합부 등의 열적인 결함이 있음을 알 수 있다.

발코니 공간 확장, 건강주택에 대한 관심, 초고층 건축물의 대중화 등의 건설 환경의 급격한 변화는 종래의 단열재, 단열 공법으로는 최적의 대응이 미흡한 실정이며, 결국 보다 구체적인 대응 기술개발이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 최경석 외, 적외선 열화상 분석기법에 의한 건축물 현장 단열성능 평가법 개발, 대한설비공학회 추계학술발표대회 논문집, 2004.11
2. ASHRAE, ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, ASHRAE, 2001
3. Physibel, RADCON manual, Physibel, 2007