

WUFI를 이용한 공동주택 붙박이가구의 층별·형태별 결로 생성 비교 평가

유 지원, 장 성 진, 이 종 기, 위 승 환, 김 수 민[†]

승실대학교 건축학부 건축환경재료연구소

Comparative Evaluation of Condensation by Type and Layer Around Built-in Furniture of Apartment Buildings

Jiwon Yoo, Seong Jin Chang, Jongki Lee, Seunghwan Wi and Sumin Kim[†]

Building Environment & Materials Lab, School of Architecture, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

Abstract: Recently, as the continuously increasing of the one-person households, builders were focusing on a built-in furniture development for efficiency. Through the dead space of the space can be reduced. Also, Condensation that occurs in a built-in furnitures installation space may result in different results depending on the room's direction, floor, finish, adjacent room effect, occupant's lifestyle. In this background, it can be considered in terms of functional aspect and morphological aspect by using WUFI2D simulation system. As a result, the tendency of occurrence of condensation was examined by comparing the water content and the growth potential of fungus graph which came from WUFI2D. Results of this study are as follows: Built-in furniture, both top & bottom open, is more stable to condensation than the built-in furniture with the top or bottom open. Also, Among from the top floor built-in furniture to the bottom of it, the bottom one is more stable to condensation.

Keywords: Built-in furniture, WUFI2D simulation analysis, Water contents, Growth potential of fungus, Indoor air quality

1. 서 론

정부는 삶의 질 향상에 따라 주거환경에 대한 관심 증가와 각종 민원 및 분쟁의 급증에 따라 주거복지 구현에 대한 요구가 증대하자 '생활밀착형 공동주택 성능 향상 기술'이란 이름하에 소음, 실내공기질, 결로, 누수 등 국민의 일상생활과 밀착되는 여러 문제를 다각적, 통합적으로 해결하여 주거복지를 구현하기 위한 정책·제도, 기준·표준 등의 공적 지원체계 및 각종 요소 기술을 연구하

는 대책 과제를 제시하였다. 정부는 그중 '주택건설기준 등에 관한 관리규정'에서 공동주택에서 결로 방지 성능 평가를 수행해 실내 결로 발생 저감을 유도하고 쾌적한 주거환경을 확보하도록 노력하고 있다. 일반적으로 국내 공동주택에서 결로 취약 부위는 창, 문, 붙박이가구, 드레스 룸, 비 확장 발코니로 크게 구분할 수 있다. 이 중에서도 붙박이가구는 일반적으로 공동주택에서 안방이나 거실 등에 설치하고 있으며 재실 자가 붙박이가구 내부에 의복이나 침구류를 밀실하게 적재함으로써 국부적인 온도 저하 및 환기 부족으로 인한 결로 피해가 보고되고 있다. 붙박이가구가 설치된 공간은

2017년 12월 15일 접수; 2017년 12월 30일 수정; 2018년 1월 10일 게재확정

[†] 교신저자 : 김 수 민 (skim@ssu.ac.kr)

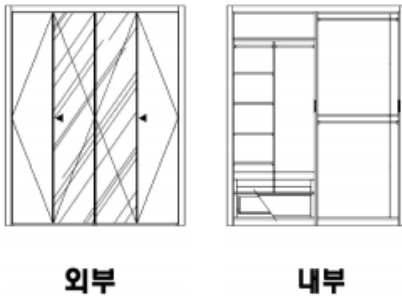


Fig. 1. 불박이장의 기본구성의 예(이와 임 2010).

구조체 우각 부위의 열교현상으로 인한 국부적인 표면온도 저하 및 내부 환기의 어려움 등 여러 가지 복합적인 원인으로 인해 결로 발생에 상당히 취약하다. 이런 불박이가구에 발생하는 결로는 일반적으로 불박이가구 뒤판(가구재)과 인접 벽면(일반적으로 벽지 마감) 또는 바닥면, 천장 면에서 발생하며 바닥면과 마감재 표면에서 결로 수가 발생함으로 인해 가구재와 마감재에서 손상이 발생하고 곰팡이가 생기는 등의 피해사례가 있다.

최근 1인 가구의 지속적인 증가 및 도시집중화 현상으로 소형 주택건설이 증가함에 따라 공간 효율성 확보를 위해 최근 건설사들은 다양한 기능과 형태를 갖는 다목적, 다기능적 불박이가구 개발에 주력하고 있다. 이에 따라 불박이 가구와 다른 가구를 결합시켜 단순히 장으로서의 기능뿐만이 아닌 인체계 가구, 작업용 가구, 생활가구에도 활용할 수 있다. 또한 이를 통해 공간의 데드스페이스를 감소시킬 수 있다. 이러한 배경에서 불박이가구를 기능적 측면과 형태적 측면에서 나누어 시뮬레이션에 적용시켰다(김 외 2012; 이 2008).

본 논문에서는 형태적 측면에서의 불박이가구 특징에 따라 크게 3가지로 나누어 결로현상에 대해 분석하였다. 3가지의 형태는 상부 개방형, 하부 개방형, 상·하부 개방형 불박이가구를 모델링해 시뮬레이션을 실시하였다. 또한, 불박이가구 설치 공간에서 발생하는 결로는 같은 건물 내 동일한 평면 형태의 세대이더라도 공간의 향, 층, 마감재, 인접실 영향, 재실자 생활 습관 및 공간 사용 등에 따라 결과가 다르게 나타날 수 있으나 이에 대한 구체적인 실증적 연구가 부족해 각각의 경우에



Fig. 2. 불박이가구 형태(www.hyndailivart.co.kr).

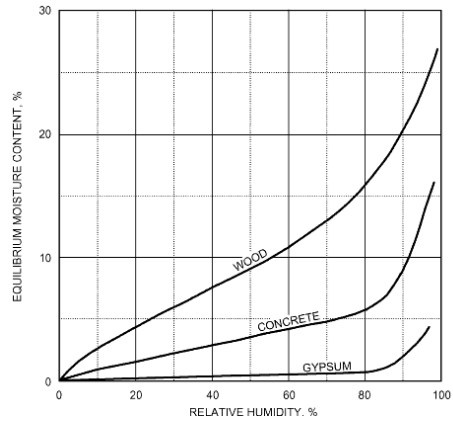


Fig. 3. 재료별 흡착(등온)곡선(ASHRAE HANDBOOK, 2005).

다른 결로 발생 예방책이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 세대별 층간 위치에 따라 결로 발생 결과가 어떻게 나타나는지 주목하기로 했고 앞서 불박이가구 형태에 따라 결로 발생 가능성을 비교 분석한 후, 세대별 층간 위치에 따라 결로 발생 가능성에 대한 시뮬레이션 분석을 실시하였다.

2. 측정 요소

본 논문은 시뮬레이션을 실시해 불박이가구 주변의 수분함량과, 곰팡이 발생 가능성을 분석하였다. 건축물을 시공할 때 사용하는 재료는 주로 다공성 재료이고 이로 인하여 상대습도에 따른 모세관 응축현상이 발생할 가능성이 높아진다. 평형 함수율은 상대습도와 온도의 변화에 따라 변화하게 되며 Fig. 3에 상대습도에 따른 평형 함수율을 나타내었다.

또한 곰팡이 성장 요인으로는 온습도 조건과 이에 대한 노출 시간이 많은 영향을 준다. 따라서 본 논문에서는 곰팡이의 성장 가능성을 파악하기 위하

Table 1. 콘크리트 조 벽체 구성 재료 물성

Materials	Thermal Conductivity (W/mK)	Bulk density (kg/m ³)	Porosity (m ³ /m ³)	Specific Heat Capacity (J/kgK)	Water vapour Diffusion Resistance Factor (-)
Concrete	1.6	2200.0	0.18	850.0	92.0
Plaster	0.87	1310.0	0.36	850.0	8.0
Gypsum board	0.2	625.0	0.73	850.0	8.33
Insulation (EPS)	0.04	15.0	0.95	1500.0	30.0
Built-in Furniture (PB-board)	0.12	620.0	0.74	2500.0	44.0
Aerated concrete	0.072	386.0	0.85	850.0	9.9

여 시뮬레이션 분석을 진행하고 곰팡이 성장 가능성 정도를 확인하였다(Fedorik & Illikainen, 2012).

3 시뮬레이션 모델링

3.1. 평가 방법

WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär) 시뮬레이션 프로그램은 Fraunhofer IBP (Institute in Building Physics)에서 개발되었으며 건물의 열·습기 거동을 평가하기 위해 일차원 또는 이차원 모델을 구성한다. 프로그램의 분석 결과 값은 실험실에서의 실측 실험과 IBP의 야외 테스트를 통한 데이터를 이용하여 자연 기후 조건에 노출된 열·습기 성능을 측정과 비교에 의해 프로그램의 유효성이 검증되었다(강과 김 2016). 벽체 내 수분함량에 대한 분석을 진행함으로써 결로 취약부위를 예측할 수 있다. 이는 구성된 벽체 내에 수일·수년간 수분이 축적되는 정도를 평가하기 위함이다(Chang et al. 2017; Yu et al. 2016).

본 논문에서는 2차원 비정상상태 전열 및 투습 해석이 가능한 WUFI2D 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 건물 외피의 열·습기 HAM (heat and moisture)분석을 위해 설계된 가장 강력한 툴이다. WUFI2D는 각 경계별 세부조건을 설정할 수 있으며, 외부, 내부, 단열경계로 구분하여 경계조건을 입력할 수 있다. 또한, 열전달계수(W/m²K)와 Sd 값(m) 등 외부에 영향을 많이 받는 입력변수에 대한 구체적인 값을 정확히 입력하여 시뮬레이션의 정확도를 높일 수 있다.

3.2. 벽체 구성 및 입력 조건

본 논문에 사용된 벽체는 콘크리트 조 벽체이고 불박이가구 주변의 결로 가능성을 평가하기 위해 불박이가구가 외기에 면해 측벽에 설치된 전용면적 84 m²인 단위세대를 평가 대상 기준으로 선정하였다(이 외 2016). 불박이가구가 설치된 측벽은 ‘건축물의 에너지 절약 설계기준’에 따라 두께 155 mm의 가 등급 단열재를 적용(중부지방, 외기에 직접 면하는 거실의 외벽 기준)하였다. 그리고 두께 10 mm의 열교차단 단열재를 300 mm 길이로 설치하고 바닥 난방 배관과 벽면 이격 거리 800 mm, 가구 뒤판과 벽체 사이 공동층 폭 20 mm, 불박이가구 내부에 침구류가 100% 적재되어 채워진 조건을 기준안 평가 모델로 설정하였다(Lee et al. 2016). 또한 불박이가구는 문이 닫힌 상태로 가정하였다. 더 정확한 측정을 위해선 열린 상태 닫힌 상태 모두 측정해야 하지만 결로 발생 가능성이 더 높은 쪽으로 가정하였다. Table 1에 콘크리트 조의 벽체구성과 열·습기 물성을 나타내었다. 이 벽의 열관류율은 0.148 W/m²K이다.

WUFI2D 시뮬레이션 프로그램은 시간당 건구온도, 일사량, 습도, 바람의 속도와 방향을 포함하여 1년 동안의 기후 데이터를 필요로 한다. 본 논문에서 실외의 기후조건은 서울의 기상데이터를 사용하였다. 실내 기후조건은 Fig. 4와 같이 EN13788을 적용했고 실내 표준 온도를 23°C로 설정하여 시뮬레이션 분석을 실시하였다(Chang et al. 2017).

위층과 중간층의 온습도 조건은 Fig. 5와 같은 상태로 설정하여 분석하였으며, 대지에 맞붙어 있는 면은 지중온도의 영향을 받아 10.8°C의 온도를

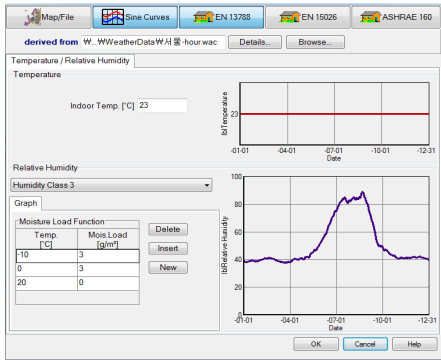


Fig. 4. EN13788의 연간 실내기후변화 그래프.

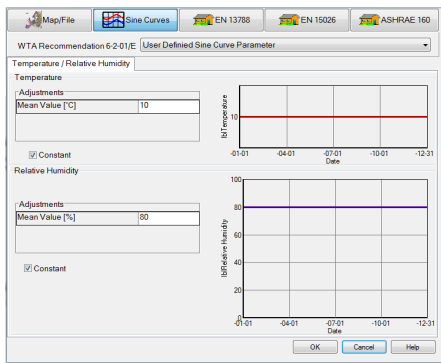


Fig. 5. WUFI상에서의 지중의 온·습도 그래프.

계속 유지하는 조건으로 시뮬레이션을 분석하였다 (Fraunhofer IBP). 본 논문에서는 1년 간의 시뮬레이션 데이터를 분석하였다.

4. 불박이가구 형태별 비교 분석

4.1. 측정 방법

4.1.1. 측정 위치

기존 결로 관련 하자분쟁 사례를 분석해보면 불박이가구의 결로 및 곰팡이는 공기가 정체되어 절대습도가 높아지는 불박이가구 후면부에서 주로 나타난다. 따라서 Lee et al. 2016은 실내온도를 ‘공동주택 결로 방지를 위한 설계기준’에 따라 25°C로 설정하였다. 실외온도는 지역Ⅱ(외기온도 -15°C)를 대상으로 전열해석을 실시해 불박이가구 주변 결로 취약부위로 불박이가구 내부 가구재 표면, 불박이가구 뒤 공기층, 불박이가구 뒤 구조체

Table 2. 위치별 예상 결로 발생부위 1

	위치(Point)
천장-벽 우각부	5
천장-벽	1, 2
벽체 표면 벽	3
벽-바닥	4
벽-바닥 우각부	6
불박이가구 밑	7

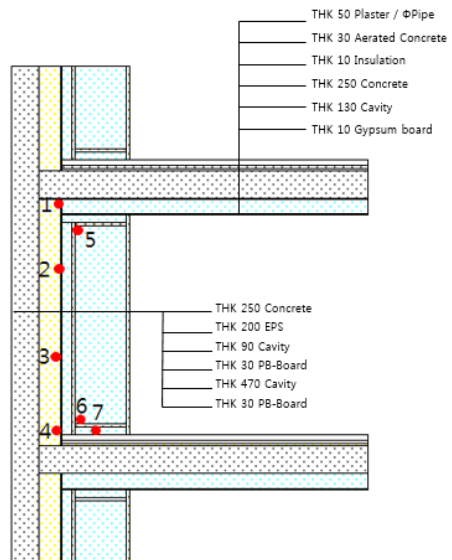


Fig. 6. 각 재료별 두께와 예상 결로 발생부위.

(천장, 벽, 바닥) 표면으로 선정하였다. 또한 기준안의 결로 취약부위에서 결로 발생 가능성을 평가하기 위해 불박이가구 내부 최저온도, 불박이가구 벽 사이 공기층 온도, 구조체 표면온도를 비교하였다. Lee et al. 2016; 오 외 2016은 이러한 조건에서 겨울철 실내 난방 운전 시, 실내가 외기에 비해 다소 습한 환경조건으로 유지되어 불박이가구 설치 공간에서 노점온도가 높게 나타나고, 불박이가구이나 벽체의 표면온도를 16°C 이상으로 유지할 경우 결로 발생 가능성을 저감할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 불박이가구 주변 온도 분포가 Fig. 6과 같이 겨울철 16°C 미만으로 결로 발생 가능성이 있는 지점을 표시한 결과가 다음과 같다(Table 2).

Table 3. 불박이가구 형태별 WUFI 모델

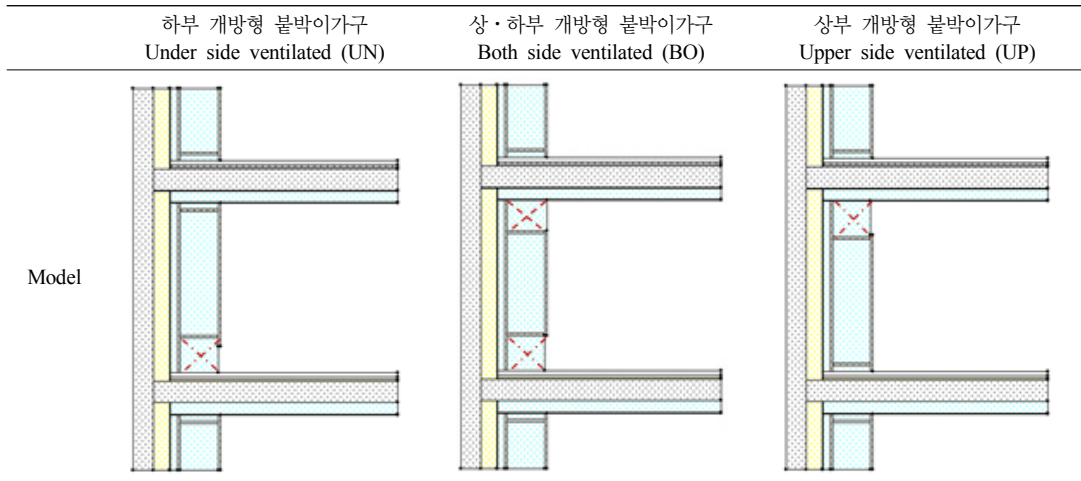
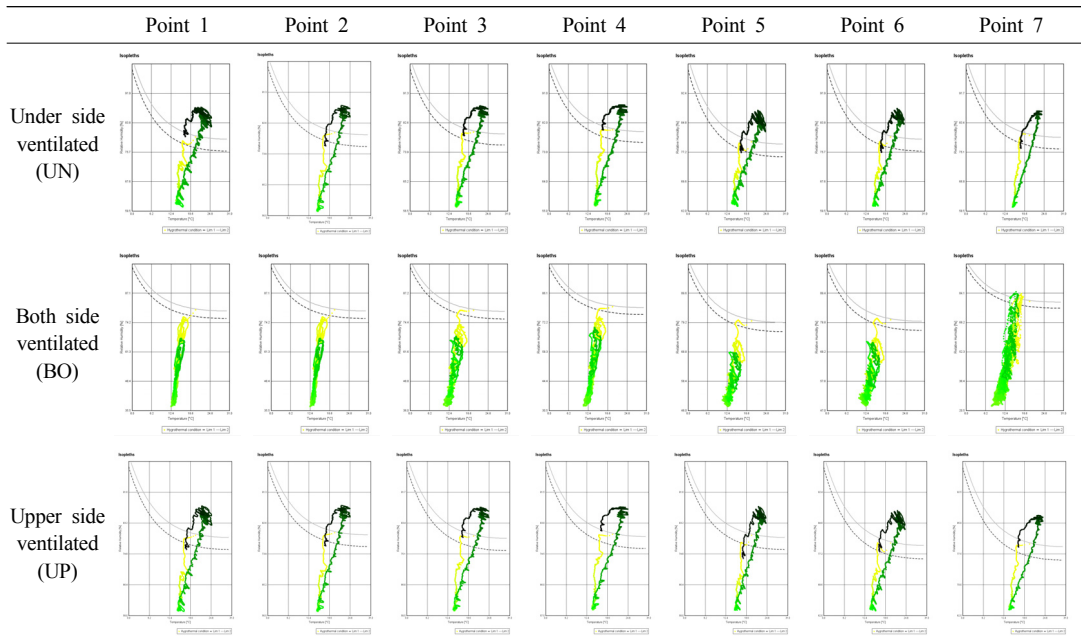


Table 4. 불박이가구 형태별 LIM그래프



4.1.2. 가구 형태에 따른 구분

최근 불박이가구들의 다양한 출현을 반영해 하부 개방형 불박이가구와 상부 개방형 불박이가구, 그리고 상·하부 개방형 불박이가구로 분류하였다 (Table 3).

4.2. 측정 결과

4.2.1. 불박이가구 형태별 곰팡이 발생 가능성
위 그래프(Table 4)에서 가로는 '온도'를 세로는 '상대습도'를 나타낸다. 이것은 곰팡이 발생 위험에 대해 Lowest Isopleth for Mold growth (LIM) 그래프를 이용해 평가한 결과다(Yu et al. 2016;

Table 5. LIM그래프의 최댓값

		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7
UN	MAX	88.2%	87.8%	87.7%	87.6%	88.1%	87.8%	86.8%
BO	MAX	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	80.3%	80.5%	85.2%
UP	MAX	88.0%	87.6%	87.8%	87.5%	87.8%	88.0%	87.0%

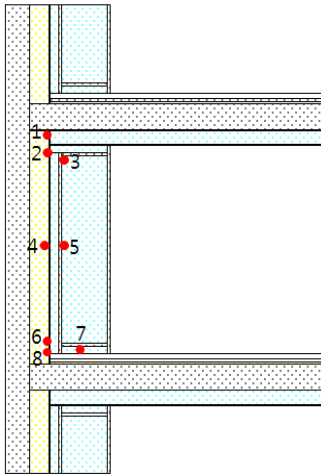


Fig. 7. 결로 취약부위 측정 위치 (2).

장 외 2016). Table 5에서 UN과 UP는 상대습도가 평균 87.7% 정도로 확인되어 곰팡이 발생의 가능성이 높은 반면, BO의 경우 Point 1~7까지의 분석부위에서 상대습도가 평균 80.9% 정도 확인되어 곰팡이 발생 가능성이 UN과 UP보다 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 습도와 온도의 정도를 분석한 결과 상·하부 모두 막힌 불박이가구가 다른 형태에 비해 곰팡이에 가장 취약하다는 것이 분석되었다. 이것은 상·하부가 막혀 있는 경우 원활한 공기 유동이 없기 때문에 상대습도가 증가한 것으로 인한 결과로 분석된다. 세대별 층간 결로 발생 차이를 분석하기 위한 시뮬레이션에는 상·하부가 모두 막힌 불박이가구로 설정하여 분석하였다.

5. 불박이가구의 층별 비교 분석

5.1. 측정 방법

본 논문에서는 위와 같이 선행연구에서 도출한 불박이가구 설치공간의 결로 취약부위에 대해 시

Table 6. 위치별 예상 결로 발생부위 2

		위치(Point)
불박이가구 내부		5
천장-벽 우각부		3
	천장-벽	1,2
벽체 표면	벽	4
	벽-바닥	6,8
불박이가구 밑		7

뮬레이션을 실시하였다. 이번 장에서는 최상층과 중간층 그리고 최하층을 대상으로 하였다. 전체 건물은 총 3개의 층으로 이루어져 있다. 높이는 Table 7에서와 같다. 설치된 최상층 불박이가구와 중간층 불박이가구 최하층 불박이가구가 맞붙어 있는 면의 열·습기적 영향을 비교해 보고자 하였다.

5.1.1. 측정 위치

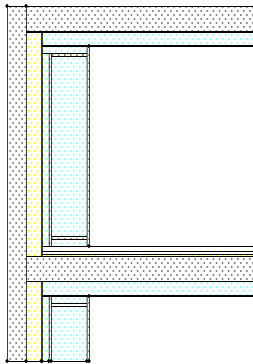
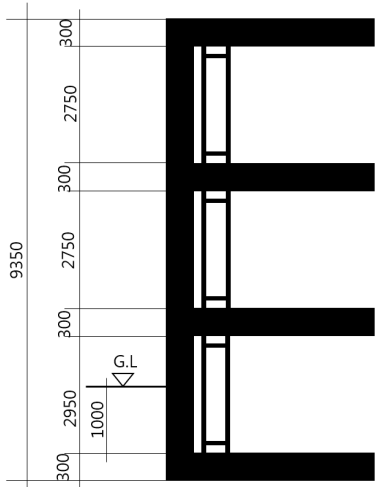
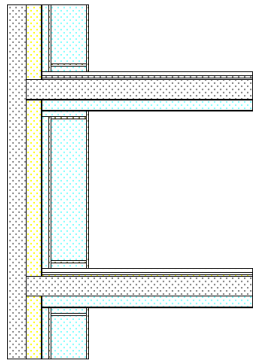
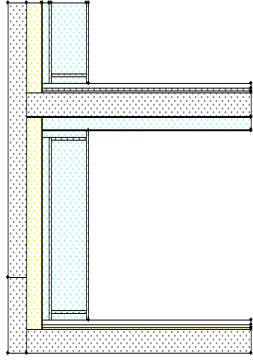
본 측정 위치는 Fig. 7과 같이 3장에서 시뮬레이션을 거친 후 결로에 더욱 취약한 부위를 반영한 결과다(Table 6).

5.2. 측정 결과

5.2.1. 불박이가구 층별 결로 취약 부위 수분함량 분석

1년간 3개 케이스의 수분함량 상태 최댓값과 최소값을 Figs. 8, 9, 10에 나타냈다. 최상층의 수분함량의 최댓값은 Point 8에서 7.297 kg/m^3 , 최소값은 Point 4에서 0.683 kg/m^3 으로 확인되었고 중간층에서의 수분함량은 Point 3에서 최대 3.377 kg/m^3 , Point 1에서 최소 0.713 kg/m^3 의 값을 나타냈다. 그리고 최하층에서는 Point 8에서 최대 3.019 kg/m^3 , Point 1에서 최소 0.768 kg/m^3 로 확인됐다. 최하층의 경우 지면과 접하고 있기 때문에 지중온도의 영향이 비교적 안정된 수치를 보이

Table 7. 불박이가구 층별 WUFI 모델과 단면도

	Model	Section view
최상층(Top floor) 불박이가구		
중간층(Middle floor) 불박이가구		
최하층(Lowest floor) 불박이가구		

며 중간층의 경우는 상하부에 최하층과 최상층이 존재하여 외기에 대한 완충작용을 했기 때문에 안정적인 수치를 보이는 것으로 분석되었다. 하지만 최상층의 경우 지붕층의 두께가 보다 얇고 외기 노출 면적이 크기 때문에 다른 층보다 수분함량이 높은 것으로 분석되었다.

5.2.2. 불박이가구 층별 결로 취약 부위 곰팡이 발생 가능성

Fig. 11은 LIM그래프의 최댓값을 지점별로 비교한 표이다. 최상층에서 최하층으로 갈수록 곰팡이 발생 가능성이 낮아지고 안정된다. Fig. 11과 같이 최상층에서 곰팡이 발생 가능성이 높은 것은

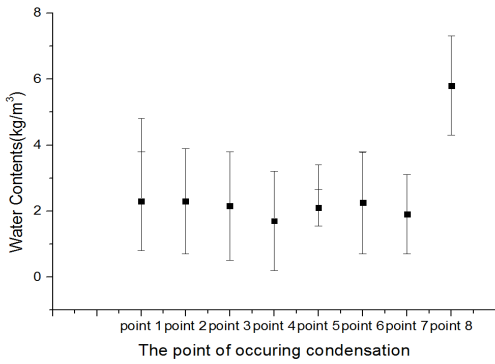


Fig. 8. 최상층(Top floor) 불박이가구의 지점별 수분함량.

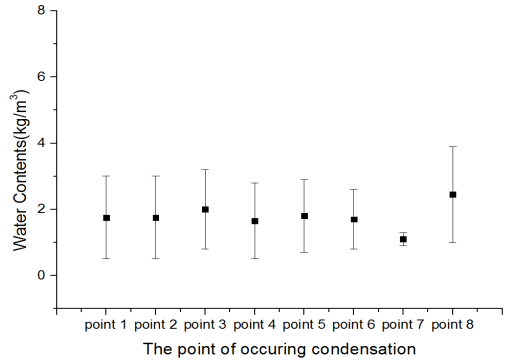


Fig. 10. 최하층(Lowest floor) 불박이가구의 지점별 수분함량.

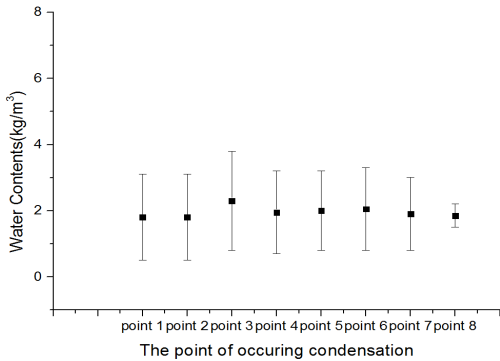


Fig. 9. 중간층(Middle floor) 불박이가구의 지점별 수분함량.

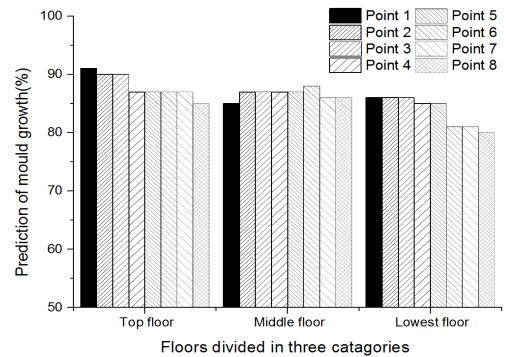


Fig. 11. 지점별 곰팡이 발생가능성의 최댓값 비교.

외부 환경의 영향으로 바람, 비와 같은 자연현상에 대해 직접적으로 영향을 받기 때문이다. 또한 최상층은 불안정한 온도로 습공기의 노점온도 보다 구조체 온도가 내려갈 가능성이 더 높지만, 최하층의 경우 지반의 영향으로 상대적으로 안정적인 온도를 유지한다(강 외 2016).

6. 결 론

본 논문에서는 공동주택 외벽에 면하는 불박이가구를 대상으로 한 선행연구를 바탕으로 불박이가구 주변 결로 취약부위의 수분 함유량과 곰팡이 발생 가능성을 층별·형태별로 비교 분석하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 곰팡이 발생 가능성에 대해 평가한 결과 상

부개방형과 하부개방형 불박이가구는 상대습도가 평균 87.7% 정도로 확인되어 곰팡이 발생의 가능성이 높은 반면 상·하부 개방형 불박이가구는 상대습도가 평균 80.9% 정도 확인되어 곰팡이 발생 가능성이 상부개방형과 하부개방형보다 그 가능성이 낮은 것으로 확인되었다. 이로부터 상·하부 공기가 순환할 수 있는 공간이 원활한 공기 유동을 시켜 줌으로써 상대습도를 증가시켜 곰팡이 발생 저감에 도움을 준 것으로 분석되었다.

(2) 1년간 최상층, 중간층, 최하층에서 불박이가구의 수분함량 상태 최댓값과 최솟값을 나타낸 결과 최상층의 최댓값은 Point 8에서 7.297 kg/m³, 최솟값은 Point 4에서 0.683 kg/m³으로 확인되었고 중간층에서의 수분함량은 Point 3에서 최대 3.377 kg/m³, Point 1에서 최소 0.713 kg/m³의 값을 나타냈다. 그리고 최하층에서는 Point 8에서

최대 3.019 kg/m³, Point 1에서 최소 0.768 kg/m³로 확인됐다. 최상층으로 갈수록 결로에 취약한 것으로 확인되었다. 최하층의 경우 안정된 지중온도의 영향으로, 중간층의 경우 또한 상하부 층의 완충작용으로 안정적인 수치를 보이는 반면 최상층의 경우 지붕 층의 두께가 얇고 외기 노출 면적이 크기 때문에 상대적으로 수분함량이 높은 것으로 분석되었다.

(3) 층별 불박이가구의 곰팡이 발생 가능성을 분석하여 그 최댓값을 비교하였다. 이것의 결과 또한 최상층에서 최하층으로 갈수록 곰팡이 발생 가능성이 낮아지고 안정되었다. 따라서 불박이가구는 최상층 상·하부 모두 막힌 불박이가구에서 가장 취약하다.

추후 다양한 결로 방지 대책을 선정하기 위하여 실증적 데이터를 얻고자 한다. 또한 불박이가구를 닫힌 상태로 가정하였는데 이는 실제상황과의 간극을 일으킬 수 있다. 따라서 불박이가구 내부에 기후데이터를 입력하여 시뮬레이션을 실시하는 등 다양한 상황 설정을 통해 결로 방지를 위한 데이터를 얻고자 한다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(2016R1A1A1A05921937).

참 고 문 헌

Seong Jin Chang, Yujin Kang, Seunghwan Wi, Su-Gwang Jeong, and Sumin Kim. 2017. Hygrothermal performance improvement of the Korean wood frame walls using macro-packed phase change materials (MPPCM), *Thermal engineering*, 457-465.

Filip Fedorik and Kimmo Illikainen. 2012. HAM and mould growth analysis of a wooden wall, *International Journal of Sustainable Built Environment*,

Volume 2, Issue 1, 19-26.

Seulgi Yu, Seong Jin Chang, and Sumin Kim. 2016. Comparison of Hygrothermal Performance between Wood and Concrete Wall Structures using Simulation Program, *목재공학*, 283-293.

Hyun-Hwa Lee, Hae-Rin Oh, Jae-Han Lim, and Seung-Yeong Song. 2016. Evaluation of the thermal environment for condensation and mold problem diagnosis around built-in furniture in Korean apartment buildings during summer and winter, *Energy Procedia*, 601-612.

ASHRAE HANDBOOK. 2005. Fundamentals, Thermal and Moisture Control in Insulated Assemblies Fundamentals (Chapter 23).

강유진, 장성진, 김수민. 2016. 실내의 기후 조건에 따른 목조 벽체의 열·습기 성능 평가, *대한건축학회 학술발표대회 논문집*, 281-282.

강유진, 김수민. 2016. WUFI 시뮬레이션 프로그램을 이용한 목조주택 벽체 레이어 구성에 따른 hygrothermal 성능 평가, *목재 공학*, 75-84.

김다영, 이윤혜, 차승언, 김미경. 2012. 소형공동주택 모델하우스에 나타난 불박이가구의 계획특성, *한국생활과학회 학술대회 논문집*, 202-203.

이가경, 임석호. 2010. 공동주택 안목치수 설계기준에 의한 불박이장의 표준화방안 연구, *한국주거학회논문집* 21(6), 53-60.

오혜린, 이현화, 임재한, 송승영. 2016. 기존 공동주택 불박이장에서 보조선방장치 설치조건에 따른 표면 결로 방지 성능 평가, *대한건축학회 학술발표대회 논문집*, 517-518.

이현화, 오혜린, 임재한, 송승영. 2016. 공동주택 불박이장 설치 공간에서 결로 발생 현상 진단을 위한 동계 실내 온열 환경 평가, *대한건축학회 논문집 - 계획계* 32(7), 131-140.

이승용. 2008. 불박이장의 형태, 구조 변화와 소비자 특성 연구, *한국콘텐츠학회논문지*, 8(3), 146-155.

장성진, 강유진, 위승환, 정수광, 김수민. 2016. 국내 농어촌 표준 목조주택의 hygrothermal 성능 분석, *목재 공학*, 440-448.

www.hyndailivart.co.kr.