

# 건축에 있어서의 결로

석 호 태 (영남대 교수)

## 1. 결로의 발생

냉장고에서 꺼낸 맥주병 등에서 쉽게 볼 수 있는 결로현상을 이론적으로 살펴보면, 공기속의 수증기가 온도가 낮은 부위에서 포화되어 액체가 되는 현상으로 설명될 수 있다.

이를 좀 더 쉽게 이해하기 위해서는 공기와 물의 관계를 파악하며 된다. 우리가 숨쉬고 있는 이 공기 속에는 물(기체형태, 수증기)이 포함되어 있다 각각의 온도에서 공기가 포함할 수 있는 물의 양은 다르며, 온도가

낮아질수록 포함할 수 있는 물의 양은 작아진다. 공기를 물을 담을 수 있는 그릇으로 생각하면, 온도가 낮아져 그릇이 작아지게 되므로 물이 그릇을 넘쳐서 결로가 발생한다고 볼 수 있다. 이와 같이 결로현상 이해의 핵심은 공기 중에는 물(수증기)이 포함되어 있으며, 온도가 낮아지면 포함할 수 있는 물의 양이 작아지기 때문에 넘치는 수증기가 물방울로 되는 것이다.

## 2. 결로의 발생원인

표 1. 결로발생 원인

결로의 기본조건	원인 요인	구체적 행위
높은 습도의 공기	기후조건	봄, 하계의 고온다습한 외기
	난방방식 및 실내온도	비난방 공간의 온도하강에 의한 상대습도 증가 대류난방시 폴드 드래프트
	환기의 부족	환기부족에 의한 실내습기의 증가 공간배치의 부적절한 의한 고습공기의 국부적 정체 겨울철의 공간밀폐
	외피재료의 사용특성	방습재의 미사용 및 부적절한 배치 외피재료의 투습저항 부족 초기 합습율이 높은 자재의 사용
	건물의 사용방법	목욕, 세탁, 조리, 관상식물, 관상수조, 가습기의 사용 개방형 난방기의 사용
	건축물의 사용조건	과도한 재실인원(호흡 및 발한)
차가운 표면	기후조건	혹서지역의 낮은 외기온의 침투
	건축물의 부위별 결함	모서리, 우각부 등의 기본적 결함 창호 및 문의 단열저항 부족 긴결 철물의 구조체 관통
	단열시공의 미흡	단열 시공 결함 및 단열재 누락
	일사 수열의 부족	북쪽외벽 내표면의 온도하강 비난방 무창 건물 등의 바닥면 온도하강
	지중면에 면한 부위	지중에 면한 바닥부위의 냉각(봄, 여름) 지중에 면한 비단열 벽체의 온도하강



표 2. 결로발생의 책임주체

설계자	평면계획	실내 온도차, 북향벽장 등
	단면계획	단열두께 부족, 수분트랩, 방습층 설치 등
	재료선정	고함수재 사용 등
	설비계획	난방능력부족, 환기부족 등
시공자	시공양생	강우대책 불충분, 양생기간부족, 시공중의 결로 등
	시공 정밀도	단열, 방습 시공 정밀도 부족 등
사용자	수증기 과다	난방기기 선택, 가습기 사용, 환기부족 등
	온도분포	난방기기 선택, 가구 배치, 개폐시간
	온도변동	간헐난방 등 운전조건
	거주자 특성	유아 및 노인이 있는 가정

일반적으로 건축물에서 결로가 발생할 수 있는 기본 조건은 앞서 살펴본 바와 같이 높은 습도의 공기와 차가운 표면으로 구분할 수 있으나, 실제 건물에서의 결로의 방지 및 결로발생시 원인구명과 대책이 쉽지 않은 이유는 건축물에서 높은 습도와 차가운 표면을 유발하는 요인은 기후조건, 건축물 사용상태, 설비시스템의 사용조건, 단열 및 축열 성능, 환기방식, 입주자의 활동 등 다양하기 때문이다. 결로의 발생원인을 기본조건, 원인요인, 구체적 행위로 구분하여 <표 1>에 나타내었다.

결로발생의 책임주체에 대하여 설계자, 시공자, 사용자의 측면에서 분석하면 <표 2>와 같다. 결로의 방지를 위해서는 설계자에 의해서 사전에 결로발생에 대한 분석이 이루어져 발생 방지디테일이 마련되어야 할 것이며, 시공자는 정확한 시공을 수행하여야 한다. 또한 거주자의 활동으로 인해 결로발생이 달라지

므로 이 세 가지에 대한 총체적인 검토가 필요하다.

### 3. 결로피해

건축물에 있어서 결로로 인한 피해는 직접적 피해와 간접적 피해로 구분되며, 직접적인 피해는 결로수 자체에 의한 피해로 천정에 맺힌 결로수의 낙하에 의해 재료나 제품에 손상을 입히기도 하며, 겨울철 외부 마감부위에서 발생한 결로수가 고드름이 되어 낙하함으로써 건물 주변에 위험요인이 되기도 한다. 간접적 피해는 결로수가 건축 부위의 함습율을 증가시켜 발생시키는 피해로서 곰팡이 발생, 마감재의 박리 또는 오염, 목재의 변색, 석고보드의 붕괴, 카펫의 젖음 등과 같은 실내측에서 발생하는 피해와 내부 결

## 학술 기사

로에 의해 구조체 훼손 등이 있다. 한편 발생된 곰팡이류가 직접 피부에 닿거나 호흡기를 통하여 인체에 침입하여 각종 염증이나 알레르기성 피부 질환을 유발하는 등 인체건강에 해를 끼치기도 한다.

록 그릇을 크게 하는 방법과 수증기의 양을 줄이는 방법이 있다. 이를 기본으로 하여 건물의 구조별 용도별, 결로발생 원인과 방지대책을 <표 3>, <표 4>에 나타내었다.

### 4. 결로방지 대책

결로를 방지하기 위해서는 수증기가 넘치지 않도록

#### 1) 열교부위 최적단열정도 결정방법

여러 실내의 온습도 조건에 대해, 열교부위의 단열 정도에 따른 결로 발생여부를 손쉽게 결정할 수 있는

표 3. 건축물 구조별 결로의 방지대책

건물종류	결로발생원인	방지 대책
목조 주택	석고보드, 목재, 유리섬유 등 자재의 수분함습 목재 간결 철물에 의한 냉/열교 발생	외기측에 통기, 방풍층 설치 실내측에 방습층 설치 간결철물의 구조체 관통방지 및 단열보강
콘크리트 주택	콘크리트의 수분 구조특성에서 발생하는 열교부위(우각부) 평면계획상의 결함 단열공법상의 결함 난방방식 환기부족	방습층의 설치 모서리 단열보강(내벽측60cm, 천장측 45cm 이상) 수납장의 실내측 배치(북측외벽 배치 금지) 내단열보다 외단열 권장 실내 개방형 난방기의 사용 억제 욕실 등에 배기구의 성능 강화
콘크리트 건물	콘크리트, 석고보드 등 사용자재의 수분 공조기습 공기 전산실, 향온합습실 등의 단열시공 철저	방습층의 정밀시공 개구부 주변의 단열 시공 철저
철골조 건물	내화피복재의 함유수분 테크플레이트 또는 콘크리트 슬래브의 함유수분 석재 거튼월의 함유수분 커튼월 결합시 열교부위 발생	방습층의 정밀 시공 외부 통기층의 설치 고습도시 실내 공조에 의한 제습 실시 열교부위의 보완 대책 설정
지하공간	토양으로부터의 습기 방출 무단열 벽체 및 바닥 환기부족	지반면에 방습시트 시공 벽체 및 바닥의 단열시공 또는 이중벽시공 환기대책 설정(환기구의 계획, 제습기의 하계 상시 가동)
냉동, 냉장고	철구조의 철물 관통에 의한 냉/열교 단열재 부족에 의한 하계 외표면 결로	조립용 철물의 단열피복 조립용 철물의 완전관통 방지 방습층을 단열재 외기측에 설치 단열 두께의 강화
기타 공통사항	가구 및 집기의 북측면 밀착 배치 개방형 난방기기의 사용 금속재 창호의 사용 실내 수증기의 과다 발생 단열재 이음부 틈새	기구의 후면, 하부 등에 5cm이상 이격 유지 개방형 난방기기 사용 억제 플라스틱 창호 또는 열교차단재 부착 창호 사용 결로수의 결빙낙하 방지를 위한 배수 경로를 실내측에 설치 환기 대책 설정 틈새방지테이프 및 방습층으로 보완

표 4. 건축물 용도별 결로방생원인과 방지대책

건축물 용도	결로 발생 특성과 원인	대 책
공동주택	생활에서의 과도한 수증기 발생 복측 불박이장 내부의 결로 베란다 창고 내부의 결로 다용도실 외벽 및 천장부위의 결로 외벽에 밀착된 가구 면에서의 결로 장기 방치된 커튼 뒷면에서의 결로 설비 샤프트에 면한 실내 우각부의 결로 베란다를 확장하여 실내공간으로 사용시의 결로발생	생활에서의 수증기 발생 억제 및 수증기 발생시 신속한 환기 실시 불박이장 내 단열시공강화, 단열 강화가 불가능할 경우는 가능한 창문을 열어둘 것 베란다 창고내는 결로에 안전한 물건의 적재 및 과다적재 방지 다용도실의 새시 시공 금지, 새시 시공을 하는 경우에는 환기가 가능하도록 창문을 열어둘 것 외벽에 접한 가구는 적절한 이격 거리 유지 커튼을 수시로 개폐 설비 샤프트의 실내측 벽의 단열 근본적으로 베란단의 확장금지, 확장시 충분한 단열 보강 실시
사무소용 건물	커튼월 구조의 결로 복측면 창호사시의 결로 글라스 커튼월인 경우, 야간 비공조시 유리면 결로 하계 지하공간 무단열 바닥의 결로 전산실(향온항습실)의 결로	방습층의 기밀시공 알루미늄 창호에 Thermal Break의 적용 또는 플라스틱 창호의 채택 결로수의 배출통로 설치 지반면 단열재 시공 외피의 단열 및 기밀 정밀 시공(방습층의 설치)
호텔	욕실 수증기의 창면 결로 주방 발생 수증기의 확산	욕실 자동 배기 장치 설치 주방 배기 시스템의 용량 증대
대형 체육관	지붕 단열재의 함습에 의한 하계 결로 유발 금속재 지붕 냉교 발생 부위의 결로	지붕 단열재 하부에 방습층 설치 냉교 발생부위의 단열보강 또는 구조개선
실내 수영장	온수풀에서의 대량의 수증기 발생으로 인한 인접공간 및 천장 내부에서의 결로	온수풀을 부압(-)으로 유지 천장내부를 정압(+)으로 유지 외벽가장자리에 접한 지붕면에서의 물끓기 장치 설치하여 결로수를 수영장 내부로 유도 단열 새시의 채택
공장	수증기 발생이 높은 공장인 경우 천장면에 발생한 결로수의 낙하로 제품 손상 유발 연간 일정한 온도도 제어가 되는 경우가 많아 일정 부위에서 습기가 장기 축적되며 결로의 발견이 지연되는 경우도 있음	기본적으로 수증기 발생원을 제거하거나 수증기를 국소 제거 천장 부위의 가압(+)으로 수증기를 공간내로 확산처리 천장부재의 냉교 부위 제거 및 보완
창고	창고시설은 일사의 유입이 적고 난방이 가동되지 않음에 따라 봄, 여름의 경우 차가워진 바닥에 고 습의 외부공기가 닿아 결로 발생	열용량이 적은 바닥재를 시공 결로 발생시는 외기유입을 차단하고 제습기를 가동
아트리움	유리창, 알루미늄 등 단열능력이 약한 재료에 결로 발생 지붕면에서 Top light에서 결로발생	복층창의 시공 단열 새시의 적용 결로수 받아 앵글의 적용 복사난방방식 등 공조방식 개선
냉동실, 냉장실 등	냉동, 냉장실 외벽 및 인접실의 불 및 하계의 결로	냉동/냉장실 출입구에 외기의 직접 유입 방지장치 적용 냉동 냉장실 주변에 비공조실 배치 자체 또는 단열 강화

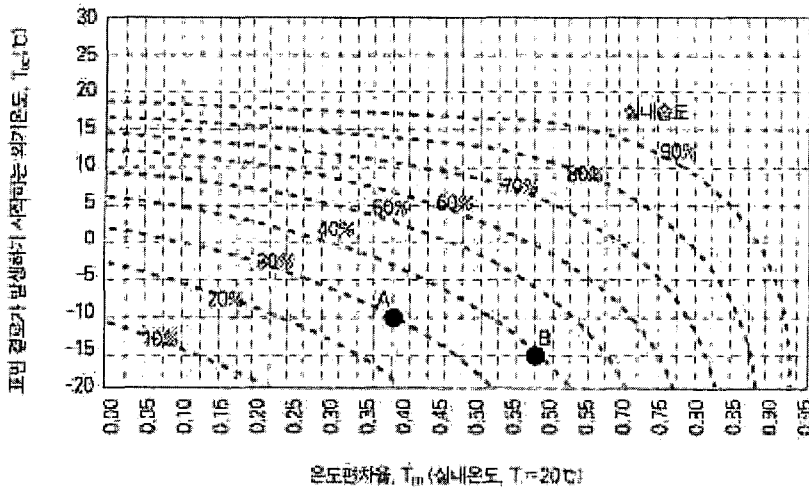


그림 1. 온도편차율과 실내습도별로 표면결로가 발생하기 시작하는 외기온도

방법과 열교부위의 결로현상을 방지할 수 있는 적정 단열정도를 결정할 수 있는 방법을 제시한 연구이다.

• 표면결로 평가지표

실내의 표면결로는 실내 온습도와 외기온도 조건에 따라 발생여부가 달라지므로 각 조건의 여러 조합에 대해서 결로발생여부를 온도편차율이라는 값을 이용하여 실내온도에 따른 온도편차율과 실내습도로서 표면결로가 발생하는 외기온도를 구할 수 있는 도표를 작성하였다.

• 표면결로 방지를 위한 적정 단열정도 판단기준  
 공동주택 외피에서 흔히 발생하는 발코니 콘크리트 외벽-침거실간 콘크리트 내벽 접합부의 열교부위를 선정하여 해당 부위의 단열이 단열 모르타르가 적용되고 있음을 근거로 두께 20mm에 대하여 폭을 달리한 대안 7가지(0~600mm를 100mm간격으로 분할한 대안)를 작성 평가하여, 결로 방지를 위한 적정 단열 정도를 결정하였다. 적정 단열정도의 판단기준을 온도편차율 자료로 하였으며, 실내 온습도 및 온도의 표준조건에 대하여 자체 개발된 2차원 전열해석 프로그램을 이용하였다.

대안들에 대한 평가 결과 중부지방을 기준으로 할 경우 단열 모르타르의 폭이 200mm 이상이면 온도편차율 기준인 0.84를 만족하는 것으로 나타났다. 단열 모르타르의 폭 증가에 따른 온도 편차율의 변화를 보면 폭 200mm까지는 급격히 증가하며, 폭 300mm 이상이면 오히려 약간씩 감소하나 그 정도는 매우 작은 것으로 나타났다. 이를 통해 단열 모르타르의 경우 두께를 20mm로 했을 때 폭이 200mm 이상이면 표면결로 방지를 위한 적정 단열 정도임을 알 수 있었다.

2) 결로방지용 도료의 성능평가

공동주택에서 결로방지를 목적으로 사용되고 있는 단열 모르타르와 결로방지용 도료의 열성능 및 결로방지성능을 실험으로 평가한 자료로서 먼저 시뮬레이션을 수행하였으며, 실험은 압출 폴리스티렌 폼, 단열 모르타르, 결로방지도료 A, B 등 4가지에 대하여 온도분포, 열류량 분포, 노점온도 도달 및 표면상태, 결로 발생 소요시간 및 표면상태 등에 대한 측정을 수행하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

- 시뮬레이션 결과, 벽체 접합부의 열교부위에서는 결로발생의 위험이 있음에 따라 적절한 재료의 적용이 필요한 것으로 나타났다.
- 열성능 실험결과, 결로방지용 도료의 경우 단열 모르타르에 비해 실내의 표면온도가 약 3℃ 낮게 나타나 동절기에 난방부하를 증가시키는 동시에 국부적인 냉기류의 발생이나 불균등 복사를 야기하여 거주자들에게 불쾌감을 형성시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- 결로방지성능 측면에 있어서는 단열 모르타르 및 결로방지용 도료 모두 합습효과를 가짐에 따라 노점온도에 도달한 이후에도 곧바로 표면결로는 나타나지 않았으며, 시간적 지연효과를 가지는 것이 확인되었다.
- 열성능 및 결로방지성능 측면에서 결로방지용 도료는 단열모르타르에 비해 우수하지 않은 것으로 나타났으며, 도료의 종류별로 두드러진 성능차이를 발견할 수 없었으나, 도료의 도포두께, 현장시공성, 경제성 등에서는 결로방지용 도료가 장점이 있으므로 열성능의 단점으로 발생하는 부하증가 및 재실자의 불쾌감의 위험이 적은 지하주차장이나 발코니 벽체의 내표면 마감에는 충분히 적용할 수 있을 것을 판단된다.

## 5. 결로관련 지원사례

### 1) 아파트 벽체 결로문제

단열미비로 인한 열교부위는 아파트의 외벽체에서 흔히 발생하게 되며, 겨울철에 열손실이 크게 되어 실내 표면온도가 낮아지므로, 결로발생 가능성이 매우 높은 위약부위가 되고 있으며, 실제 아파트에서 빈번히 발생하고 있다. 본 지원사례도 열교부위에서 겨울철에 결로가 발생하여 실내에 곰팡이가 발생한 사례

로 현장조사, 설계/시공자표 분석, 적외선 촬영으로 결로발생 원인을 규명하고 대책을 마련한 경우이다.

- 결로발생상황 및 적외선 촬영 결과 : 화장실 벽체 및 건물 외벽체 모서리부에서 결로가 발생하여 물방울이 벽체를 타고 하부로 흘러내리고 있었으며, 곰팡이가 발생한 상태였다.

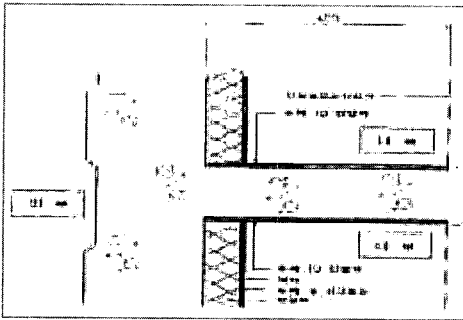
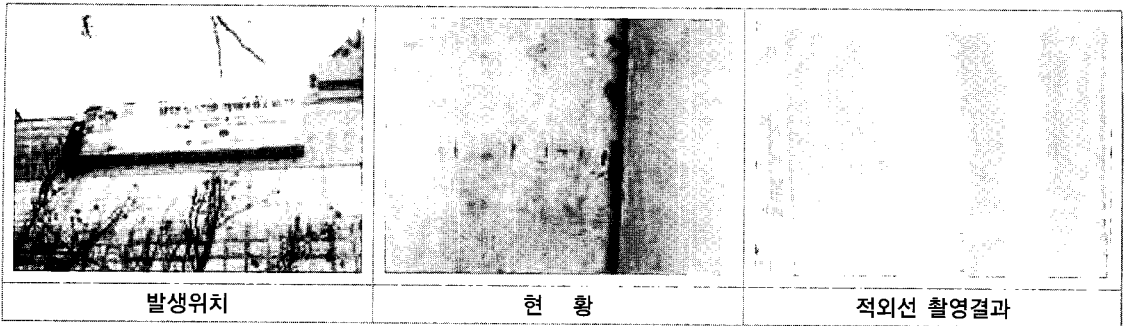
#### • 원인분석 및 해결방안 제시

동절기에 안방 내부벽체에서 발생한 결로발생의 근본원인은 외부벽체와 내부벽체의 접합부인 열교부위가 단열처리 미흡으로 외부의 온도가 영하 10℃이하로 떨어질 경우 내부 모서리부의 표면온도가 내부공기의 노점온도보다 낮아져 결로가 발생하는 것으로 조사되었으며, 해결방안은 추가적인 단열시공이다. 벽체의 단열성능확보를 위하여 여러 가지 방안이 검토되었으나, 가장 현실성이 높은 단열페인트 바름공법이 적용되었다.

사용된 단열 페인트는 열전도율이 0.029Kcal/m<sup>2</sup>hr℃이며 도장 두께 1.2~1.5mm정도로 표면온도를 약 10~15℃ 저하시킨다. 곰팡이, 습기, 먼지 등 이 물질을 깨끗이 청소하여 완전 건조시킨 후, 3~4회 정도 롤러나 붓을 이용하여 칠하며 물이 흐르거나 습기가 심한 곳은 환기 후 시공하거나 급결재, 일반 방수작업 또는 시멘트 가루를 뿌리고 붓으로 문질러 표면이 건조된 후 시공한다. 완전건조에는 약 4시간정도가 소요된다.

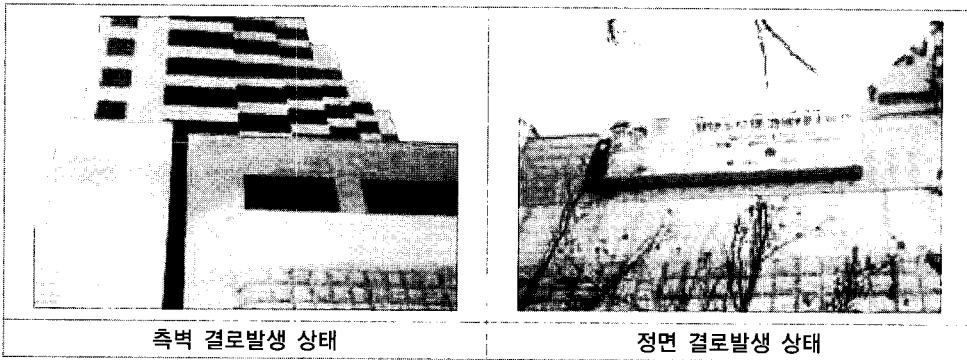
#### • 추후 확인사항

해당 아파트의 경우 결로방지를 위하여 단열페인트 시공을 하였으며, 시공 후 적외선카메라를 이용하여 표면온도를 조사한 결과, 단열페인트에 의하여 벽체의 열전달이 지연되고 있음이 확인되었으며, 결로방지에 효과가 있는 것으로 나타났다. 현재 당사에서는 해당 열교부위에 대한 결로방지 디테일을 마련하여 사용하고 있으며, <그림 2>에 아파트 벽체 접합부 단열상세를 나타내었다.



- ① 두께 10 단열재는 특기사항이 없는 경우 두께 10 아이소핑크를 사용한다.
- ② 측벽에 면한 단열재 두께(중부지방 700이상, 남부지방 500이상, 제주도 400이상)
- ③ 측벽에는 양면 합지판을 사용한다.

그림 2. 아파트 벽체 접합부 단열상세



2) 수영장 외벽제 결로 문제

앞서 <표 4>의 건축물 용도별 결로발생 원인과 대책에서 살펴본 것과 같이 실내 수영장은 온수풀에서 대량의 수증기 발생으로 인한 인접공간 및 천장 내부에서의 결로발생 가능성이 매우 높다. 본 지원사례의 경우도 이런 수영장 부분의 외벽체에서 발생한 결로현상으로 설계상태, 설비가동상태, 시공상태, 적외선 촬영

등을 통하여 원인을 분석하고 대책을 제시하였다.

- 결로발생상황  
수영장 측벽의 경우 창문 상부 및 기둥에서 결로가 발생하여 물방울이 기둥을 타고 하부로 흘러 내리고 있는 상태였으며, 수영장 정면에서는 화강석 연결철물위치에서 점박이 형태의 결로가 발생하고 있었다.
- 해당 수영장 외벽체에 발생한 결로현상은 수영

장에서 발생한 다습한 공기가 천장배기방식(Plenum return system)인 환기방식으로 인하여 천장공간내에 머무르게 되고, 천장공간내 수영장 창틀상부와 외부화강석 마감 공간사이의 관통으로 인한 누기가 겨울철에 냉각되어있는 화강석 벽체와 창문상부에서 결로로 발생한 것이다.

• 결로방지방안

결로는 수영장에서 발생한 다습한 공기가 설비시스템의 잘못된 계획과 화강석 커튼월 설치부분의 단면미흡으로 외부로 누출됨에 따라 발생한 것이었다. 해결방안으로는 공기제어방식과 단열 및 방습처리방식으로 구분될 수 있다. 공기제어방식으로는 현재 수영장에서 천장배기방식(Plenum return system)을 덕트를 설치하여 배기하는 Return duct system으로 바꾸어 다습한 공기가 천장공간내에 정체하지 않도록 하는 방법이다. 이러한 방법은 수영장 상부의 천장을 완전히 제거하고 덕트를 설치해야 하므로 상당한 작업기간과 비용이 필요하게 되어 단열 및 방습처리방식인 보하부와 창틀사이의 틈새공간을 완전히 충전하여 수영장의 투습저항이 크며 시공성이 우수한 액형 폴리우레탄폼을 사용하였

다. 그러나 틈새충진을 통한 단열성능과 투습저항을 높이는 방법은 완전히 결로를 없앨 수는 없는 것으로 판단된다.

6. 결론

이번 겨울을 지나면서 많은 건물의 외벽이 결로로 인해 젖어서 보기 흉한 모습을 하고 있고, 아파트의 많은 곳에서 결로현상이 발생해 문제가 되고 있는 것을 보면서 결로문제를 살펴보게 되었다. 아직까지는 결로관련 문제가 설계 당시 결로발생에 대한 단열 및 환기, 외벽 디테일 등에 대한 엄밀한 검토부족 및 기밀시공 부족, 사용자의 생활양식 등에 의해 준공 후 발생하는 하자관련 사항이다. 이는 설계자나 시공자가 쉽게 참고로 하여 검토할 수 있는 자료가 미비되고 있고 열교부위나 외벽체 부위에 대한 상세도 등이 정확한 검토없이 작성되고 있기 때문이다.

앞으로 설계자가 설계시 단열, 환기 시스템에 대하여 쉽게 검토할 수 있는 Hand book 등이 필요한 실정이며, 돌로 마감되는 커튼월의 경우 돌붙임 부분에 대한 결로를 방지할 수 있는 표준 디테일이 연구되어야 할 것이다.