

노후화된 RC 라멘조 APT의 화재시 구조거동에 관한 해석적 연구

신이철, 조호신*, 박승환*, 서정호*, 윤성호*, 권영진**

호서대학교 소방방재학과 건설 방화 및 방재연구실, **호서대학교 소방방재학과 교수·공박

An Analytical Study on the Structural Behavior of Deteriorated RC Rahmen Structures caused by Fire

Yi-Chul Shin, Ho-Shin Cho*, Seung-Hwan Park*, Jung-Ho Seo*,
Seong-Ho Yoon*, Young-Jin Kwon**

Lab for Disaster prevention & safety Technology.

**Professor, Dep. of Fire and Disaster prevention Eng.

1. 서 론

1950년대 APT 주거문화가 국내에 도입된 이래 오늘날까지 수많은 APT가 건립되어 지고 있다. 또한 시간이 경과함에 따라 APT의 형태는 점차적으로 고층화 되어 초고층 건물에 대한 연구가 많이 이루어진 반면, 노후화된 APT에 관한 연구와 정책은 현재 극히 미비한 상태이며, 화재 발생시 구조적 안전은 확보 할 수가 없다.

노후화라 하면 건물의 구조적인 측면과 소화설비적인 측면에서의 노후화를 언급 할 수 있으며, 이 두가지 조건은 긴밀한 연관성을 가지고 있다. 둘 중 어느 한 것이라도 불완전 할 경우 화재시 위험성은 배로 증가되기 때문이다. 단적인 사례로 청주 우암상가를 들 수 있으며, 이는 소화 설비의 미작동으로 화재가 크게 확대 되었고 구조체의 노후화로 인하여 건축물이 붕괴까지 이르게 되었다.

따라서 본 연구는 기존 신규건축물에 대하여 이루어 졌던 연구와는 차별성을 두어 APT 구조의 변천 및 노후화 과정에 대해 분석하고, 그 중 1960년대 RC라멘조 APT의 화재시 구조거동 특성을 규명하기 위하여 철근콘크리트의 열적·역학적 특성을 토대로 범용 유한요소 해석프로그램(DIANA)을 이용하여 노후화된 RC라멘조 APT의 화재시 구조거동(콘크리트와 철근의 강도 변화)에 관해 해석적으로 고찰하고 향후 연구 방향을 제시 하였다.

2. 국내 APT의 구조 시스템 변천과 노후화 과정

2.1 국내 APT의 구조 시스템 변천

APT 구조 변천사는 그림 1과 같이 1950년대 조적조를 시작으로 1960년대는 규칙적으로 기둥과 보를 시공하는 규칙적인 라멘조를 도입하였다.

라멘조에 이어서 1970년대는 불규칙 라멘조로 벽의 양 끝 부분을 벽두계와 일치하는 작은 기둥을 배열하고 그 사이에 작은 보로 연결하는 방식이 사용되었다.

1970년 말에 내력벽 시스템이 도입되어 5층에 머물러 있었던 층이 12층으로 큰 무리 없이 높아 졌으며, 구조는 세대간벽이나 칸막이벽을 콘크리트 구조 벽으로 대체한 벽식 구조이다. 이후 1990년대에는 타워형 중심의 다양한 구조형식이 등장하면서 S(철골), SRC(철골철근콘크리트), CFT(콘크리트충전강관) 등 다양한 재료를 복합적으로 적용하였으며, 2000년대 이후엔 주택성능등급표시제 등 기준강화로 벽식구조에 기둥, 보의 요소를 가미한 무량전식벽체시스템, 이중골조시스템이 사용되고 있다. 약 50년이 경과하여 현재 상당히 노후화가 진행된 1960년대 RC라멘조 APT는 이로 인하여 라멘조의 주요 구조부인 보와 기둥에 장기간 응력이 가해져 구조체가 전반적으로 안정도가 떨어지는 경향이 있다. 또한 이러한 구조체에 화재가 발생 할 경우 피해는 가중 되며, 붕괴의 우려도 배제 할 수는 없다.

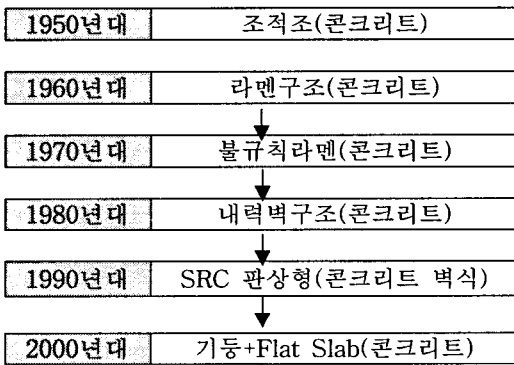


그림 14. 국내 APT 구조 시스템의 변천

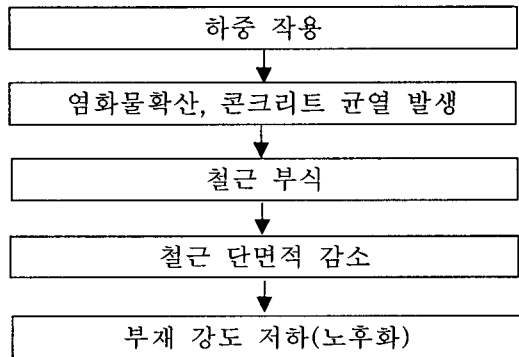


그림 2. 철근콘크리트 휨부재의 노후화 과정

2.2 노후화 과정

철근콘크리트 부재의 노후화 과정(그림 2)에 영향을 미치는 인자들을 보면 철근부식, 콘크리트의 염해 및 동결융해, 중성화, 알칼리 골재반응 등으로 나타난다. 이러한 노후화인자들은 실질적으로 그 자체로서의 문제보다는 철근부식에 영향을 미침으로써 결손에 의한 부재 강도의 저하를 유발한다.

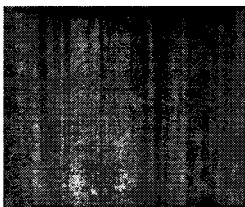


그림 3. 부식 발생



그림 4. 균열 발생



그림 5. 동결융해 발생

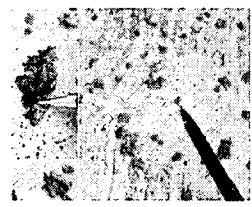


그림 6. 알칼리 골재반응 발생

철근부식의 메커니즘은 구조부재의 조건, 즉 부재의 응력상태에 따라 부식진행 과정도 상이하게 나타난다. 철근 콘크리트 휨 부재의 경우는 콘크리트의 휨 균열이 발생하기 전까지 콘크리트의 중성화나 염화물의 확산에 의한 노후화가 진행되며, 콘크리트의 휨 균열이 발생하게 되면 실제적으로 철근부식의 환경이 조성되어 부식이 일어나며, 철근 단면적 결손에 의한 구조부재의 노후화가 발생하게 된다. 그림 3,4,5,6은 철근 및 콘크리트의 노후화 사례를 나타낸 것이다.

3. RC골조 재료의 열적·역학적 특성 및 화재시 구조거동에 관한 해석

일반 신규 건축물의 화재시 구조거동을 해석함으로써 노후화 된 건축물에 화재가 발생하였을 시 부재의 구조거동은 앞서 언급했던 철근부식, 동결융해 등으로 위험성이 가중 될 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 범용 유한요소프로그램(DIANA)을 이용하여 일반 신규 건축물의 구조거동을 분석하고, 이를 바탕으로 노후화된 건축물의 화재시 구조거동을 판단하고자 한다.

3.1 콘크리트의 열적·역학적 특성

콘크리트 및 철근이 고온에 노출되는 경우 제 역학적 특성이 변화하며, 일반적으로 압축강도 및 인장강도, 탄성계수는 감소하고 최대 강도시 변형률은 증가하게 된다.

또한 열적 특성값도 온도에 따라 변화한다. 즉 콘크리트의 수분이 위상변화하면서 유발되는 잠열이나 수증기의 확산 등에 의해 밀도, 비열, 열전도율에 영향을 미치게 된다.

콘크리트의 밀도와 비열에 대한 온도의 영향을 보면, 밀도는 그림 7과 같이 온도가 증가할수록 감소하는 특성을 보인다.

비열은 골재의 밀도와 함수량으로 결정되며, 온도가 증가하게 되면 수분증발과 골재의 성분 변화 시 잠열에 의하여 비열 증가가 나타나게 된다. 그림 8은 규준에서 제시하고 있는 콘크리트의 열용량에 대한 온도함수를 나타낸 것으로, 콘크리트는 115°C 근처에서 콘크리트 내 함유된 수분의 증발에 의한 비열의 변화를 고려하고 있으며, 함수율에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

열전도율은 사용골재의 종류, 비중, 콘크리트 강도 등에 따라 많은 차이를 보이며, 그림 9는 규준에서 콘크리트의 열전도율을 온도함수로 나타낸 것으로 1.36~2.3 W/m°C 범위에 있음을 알 수 있다. 이러한 특성을 토대로 유한요소 해석프로그램(DIANA)을 이용하여 모델링을 분석하였다.

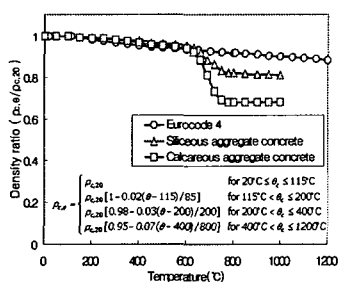


그림 7. 콘크리트의 밀도변화

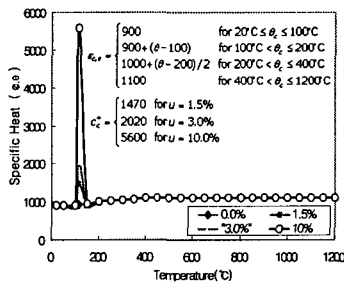


그림 8. 콘크리트의 열용량

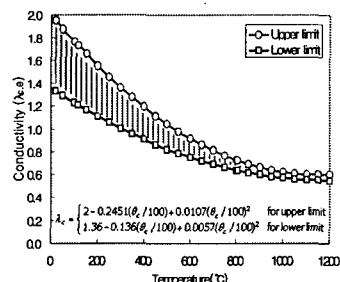
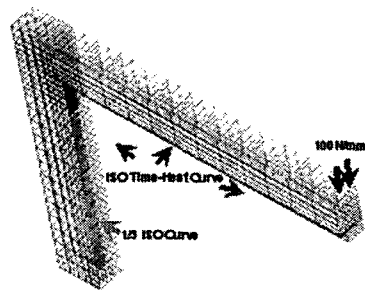


그림 9. 콘크리트의 열전도율

3.2 해석 모델링

본 연구에서 대상으로 한 철근콘크리트 골조에 대한 유한요소 모델링은 대상골조 경간 8,000mm, 층고 6,000mm의 1경간을 대칭성을 고려하여 4,000×3,000mm×200mm(1/8)로 분할하여 경계조건을 부여하였다. 요소분할(Mesh)은 100×100mm를 기준으로 화재에 직접 노출되는 부분을 세분하였다. 요소는 콘크리트의 경우 3D Solid 요소(CHX60), 철근의 경우 DIANA의 “Embedded Reinforcements”를 적용하였으며, 온도 하중을 고려하기 위하여 경계면은 가상의 요소(BQ4HT)로 모델링하였다.



3.3 비정상 온도분포해석 결과

그림 10을 분석한 결과 골조의 열전달 특성은 250분에 표면온도가 852°C에 이르는 것을 나타냈으며, 철근의 온도(피복으로 부터 50mm)는 120분(2시간)후 251°C로써 콘크리트의 피복두께가 충분한 내화성능을 발현하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 화재가 지속되게 되면 180분에는 350°C, 250분에는 448°C까지 상승하는 것으로 나타났다. 이에 따라 철근의 콘크리트 내화 피복 두께의 내화성능 대한 중요성을 알게 되었으며, 이러한 실험 결과를 바탕으로 노후화 된 건축물의 중성화, 알칼리 골재반응, 동결융해 반응 등에 의하여 콘크리트의 철근 내화피복 효과가 현저하게 저하 될 것으로 사료된다.

3.3.1 콘크리트 함수율에 따른 온도해석

그림 11은 콘크리트 내에 포함되어 있는 함수율에 따른 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트 내의 함수율이 클수록 온도상승 구배는 완만한 것으로 나타났으며 함수율이 10%인 경우 115°C부분에서 매우 완만한 것을 확인 할 수 있었다. 그러므로 구조물의 열 해석 시 콘크리트 내부 함수율이 미치는 영향과 이에 대한 적절한 평가를 통하여 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 판단되었다.

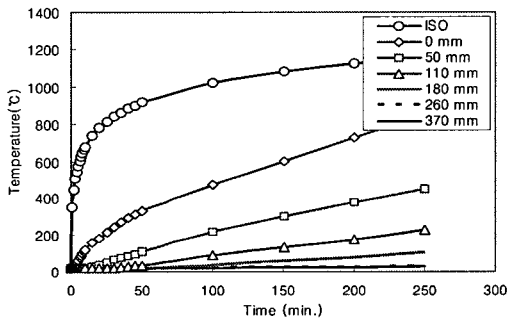


그림 10. 골조의 깊이별 온도구배 비교

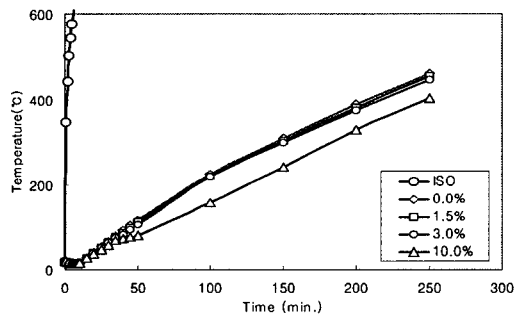


그림 11. 함수율에 따른 온도 곡선

3.4 비선형 유한요소해석 결과

그림 12 및 그림 13은 대상 골조의 비선형 유한요소해석 결과 및 온도이력 지속시간에 따른 중앙부 처짐을 나타낸 것이다. 그림 12로부터, 대상 골조는 일정 하중 작용 시에도 부재내의 온도구배 상승에 따른 중앙부 처짐이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이때의 온도에 의한 주응력(그림 12(c))은 우각부 모서리에서 가장 크게 나타나고 있었다.

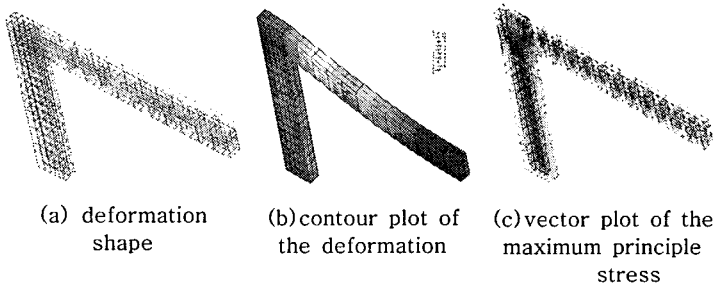


그림 12. 대상 골조의 비선형 유한요소해석 결과 (250분 이후)

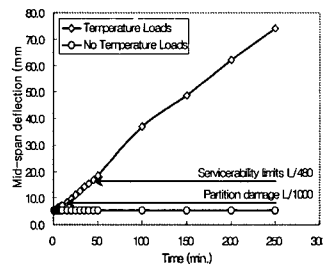


그림 13.

대상 골조의 보의 중앙부 처짐을 분석해 보면(그림 13) 온도하중을 고려하지 않은 상태에서의 비선형 해석결과(5.18mm)에 비하여, 온도하중을 고려하는 경우 지속시간 100분시 32.8mm, 200분시 62.2mm, 250분시 74.1mm로써 각각 7.1배, 12.0배, 14.3배 증

가하는 것으로 나타나 화재가 발생하는 경우 중앙부 처짐이 급격하게 증가하는 특성을 잘 나타내고 있었다. 또한, 규준에 의한 골조하부 비구조부재의 피해 한계 처짐(Partition damage, L/1000) 및 사용성 한계상태(Serviceability limit, L/480)에 대한 비교에서는 화재 발생이후 각각 13분, 50분에 이러한 처짐을 초과하는 것으로 나타나 철근콘크리트 구조체가 장시간 화재에 노출되는 경우 구조물이 심각한 붕괴상태에 도달할 가능성도 있는 것으로 분석되었다.

표 1. 보의 처짐

지속시간	처짐정도	한계처짐비교
100분	32.8mm	7.1배
200분	62.2mm	12.0배
250분	74.1mm	14.3배

4. 결 론

화재와 같은 고온 환경에서 철근콘크리트 구조물의 열적·역학적 특성 및 거동을 규명하기 위해 수행된 비선형 유한요소 해석을 통하여 내화성능이 우수한 것으로 알려졌던 철근콘크리트 구조체도 장시간 화재에 노출되는 경우 구조물이 심각한 붕괴상태에 도달할 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 일반적인 데이터 값을 이용하여 실험한 결과로 볼 때 노후화가 약 50년 정도 진행된 라멘조 APT의 화재시 위험성은 심각할 것으로 판단된다.

국내의 경우 노후화된 RC구조 APT의 내화안전성에 관한 화재위험성평가 및 보수공법에 대한 규정이 극히 미비하므로 이에 대한 연구가 시급하며, 이를 위해서 APT의 노후화의 정도에 따른 부재의 잔존 내력을 정확히 평가하고 내화안전성 검토를 통하여 구조적 거동을 평가함으로써 보수공법의 시스템이 확립되어야 한다.

또한 현재 신규건축물에만 적용되고 있는 주택성능평가제도를 모든 건축물로 확대 실시해야만 하며, 범용 프로그램을 이용하여 건축물의 안전성을 평가하고 그 결과에 따른 대책이 강구되어야 한다. 이와 더불어 법규화 된 화재위험성평가에 대한 구체적인 시행령이 속히 제정되어 노후화된 건축물이 건축적 측면과 소방적 측면 양방향에서 안전할 수 있는가의 타당성을 평가할 수 있는 해석적·합리적 기법이 확립되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 한병찬, 권영진, 김재환, 신영수, 최응규, “화재에 노출된 철근콘크리트 골조의 구조 거동”, 한국콘크리트학회 논문집, pp. 11-18(2006)
2. 권영진, 김용로, 장재봉, 김무한, “고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성”, 한국화재소방학회논문지, 1738-7167, 제18권 1호, pp. 31-36(2004)
3. 장재봉, 신영수, 권영진, 김무한, “화재피해를 입은 콘크리트의 구조성능에 관한 문헌적 고찰”, 한국화재소방학회 추계학술논문 발표회 논문집, pp. 155-159(2004)
4. 조봉석, 김용로, 강석표, 권영진, 김무한, “화재피해를 입은 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적 연구”, 한국화재소방학회 02 추계학술대회논문집, pp 10-14(2002)
5. 김희규, 홍영균, 홍기섭, “강도노후화 모델을 적용한 철근콘크리트 보의 시간의존적 신뢰성해석에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집-구조계 대한건축학회논문집-구조계 제 20권 제2호, pp 23-30(2004.2)