

## 화재에 의해 성능 저하된 콘크리트구조물의 진단 및 보수공법에 관한 연구

권영진    장재봉\*    김용로\*\*

김재환\*\*    장종호\*\*    김무한\*\*\*

호서대학교 환경안전 공학부 소방학과 교수·공박,

충남대학교 대학원 건축공학과 석사과정\*, 충남대학교 대학원 건축공학과 박사과정\*\*,

충남대학교 건축공학과 교수·공박\*\*\*

## A Study on the Diagnosis and Repair Method of deteriorated Concrete Structure by Fire Damage

Kwon, Young Jin    Jang, Jea Bong\*    Kim, Yong Ro\*\*,

Kim, Jae Hwan\*\*    Jang, Jong Ho\*\*    Kim, Moo Han\*\*\*

*Hoseo University Professor of Department of Fire Protection Engineering,*

*Chung Nam National University Master's Course of the Architectural Engineering\*,*

*Chungnam National University Doctor's Course of the Architectural Engineering\*\*,*

*Chungnam National University Professor of the Architectural Engineering\*\*\**

### 1. 서론

산업화·도시화에 따른 건축물의 밀집과 고층화의 환경에서 화재 재해 발생은 인명피해 및 재산피해에 치명적인 결과를 가져올 수 있으며 화재로 인한 인명 및 재산 피해는 두말할 것도 없이 막대한 국가적 손실을 초래한다고 할 수 있다.

한편 통계에 의하면 국내 화재 건수는 평균 30,000 건/년으로서 주택 및 아파트, 차량, 공장, 음식점 등 주로 건축물에 많이 발생하고 있으며<sup>1)</sup>, 건축물의 주요 구조 부재를 이루는 콘크리트는 다른 구조 재료에 비해 열전도율이 낮고 완전 붕괴에 도달하기까지의 에너지소산 능력이 우수하기 때문에 화재등과 같은 비상상황에서 충분한 대피시간을 확보할 수 있게 한다. 그러나 콘크리트구조부재가 화재 등과 같은 고온에 장시간 노출될 경우 부분적 혹은 전체구조시스템에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 손상이 발생할 수 있다.

이러한 이유로 일반적 콘크리트 구조물에서의 화재 메커니즘을 바탕으로 화재를 입은 콘크리트 구조물의 재사용 여부 및 피해 등급을 결정하기 위해 콘크리트 구조물의 성능 저하를 정확히 진단할 필요가 있으며, 성능저하 상황에 따른 보수·보강공법의 적용은 필연적이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 진단 방법 및 보수공법에 관한 조사 분석을 통해 실제 화재 피해를 입은 콘크리트구조물의 진단 및 보수·보강 사례를

제시함으로써 화재발생 후 콘크리트 구조물의 재사용 여부 또는 보수 보강의 필요성, 자산평가의 과학적인 근거를 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

## 2. 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 열화 메커니즘과 성능저하조사 및 진단 방법

### 1. 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 열화 메커니즘

콘크리트가 화열을 받게 되면 열팽창계수가 상이한 시멘트경화물과 골재는 각각 다른 팽창수축거동을 하여 콘크리트의 조직은 연화되고 단부의 구속 등에 의해 나타난 열응력 및 공극수의 증기압 등에 따라 균열이 나타나고 박락하며 이로인해 철근의 직접적 노출이 발생하기도 한다.

즉 수열온도의 상승에 따라 100℃ 이상에서는 자유공극수가 방출되며 100℃~200℃에서는 물리적 흡착수가 방출되어 이들의 분리·소실에 의해 수축하기 시작한다. 그러나 이때까지는 강도의 저하현상이 그다지 나타나지 않으며 그림 1에서 나타낸 바와 같이 화재로부터 12개월후에는 95%이상의 강도가 회복되는 것을 알 수 있다<sup>2)</sup>. 수열온도가 300℃ 이상이 되면 콘크리트의 중의 시멘트수화물이 화학적으로 변질되며 400℃ 이상에서는 화학적 결합수가 방출된다. 그러나 500℃ 이내의 수열온도에서는 화재 피해 후 일정 기간 경과시 압축강도가 90%까지<sup>2)</sup> 복원된다고 알려져 있어 콘크리트 구조물을 재사용 할 수 있는 안전한계온도는 500℃로 판단하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 수열온도가 500℃를 넘으면 가열에 의한 강도의 저하정도가 50% 까지 나타나며 500℃~580℃에서는 콘크리트 내의 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이 열분해되어 알칼리성을 소실하는 화학적 피해를 입게 되므로 철근을 방식하는 능력이 저감되어 철근콘크리트구조물의 내구성능을 현저하게 저감시킨다<sup>3)</sup>. 수열온도 600℃까지는 시멘트 페이스트가 수축하고 골재는 팽창하는 상반된 거동을 나타내며, 600℃~800℃에서부터는 파열하여 손상된다<sup>4)</sup>. 이것이 화재에 의한 열화의 메커니즘이며 사진 1에 그 일례를 나타내었다.

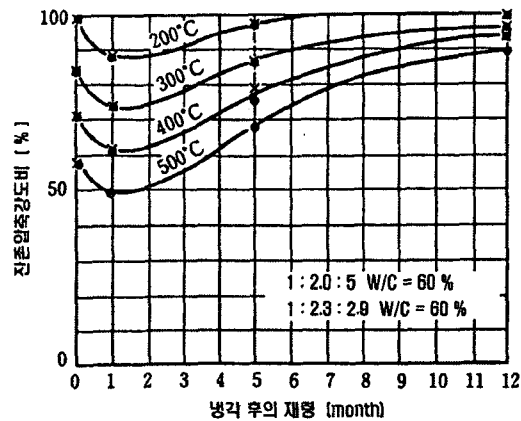


그림 1. 가열된 콘크리트 강도의 자연회복

### 2. 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 성능저하 조사 및 진단

화재를 입은 철근 콘크리트 구조물의 재사용 여부를 결정하는 가장 중요한 요소는

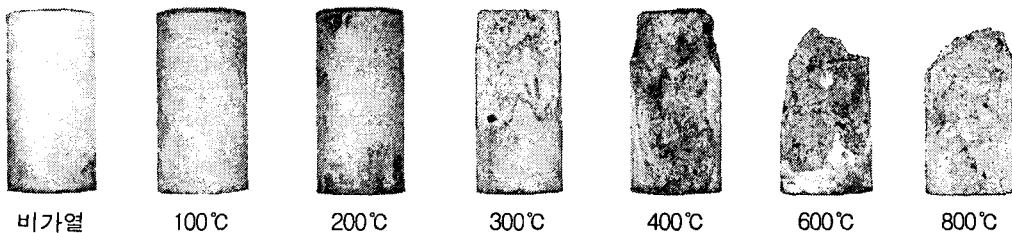


사진 1. 수열온도에 따른 콘크리트 시험체의 외관 변화

구조물의 성능 저하를 정확히 측정해내는 일이다. 철근 콘크리트구조물의 성능 저하 추정을 위한 조사는 육안조사를 주로 하는 1차조사와 재료시험 혹은 구조시험에 의한 2차조사로 나누어 실시하는 것이 일반적이다.

1차조사는 육안관찰로 가능한 외관상의 피해상황을 관찰하고 화재상황을 조사하여 피해등급의 설정을 목적으로 한다. 철근콘크리트 구조물이 화재를 입은 경우, 외관상의 피해로는 보나 상판의 휨, 균열, 콘크리트의 결손 등이 있고, 콘크리트표면의 변색상황으로부터 콘크리트표면의 수열온도를 추정할 수 있으며 그 관계는 표 2에 나타내었다. 이러한 육안관찰결과로부터 화재개소에서 표면 수열온도를 개략적으로 추정하여 상세한 조사 대상 부위의 범위를 선정할 수 있고 콘크리트의 변색, 폭열의<sup>주1)</sup> 유무와 크기·깊이, 균열의 유무<sup>주2)</sup>와 폭·깊이, 들뜸이나 박리의 유무, 부재의 휨이나 변형 철근의 상태 등에 주안점을 두어 피해 등급을 판정하고 재사용여부를 판정한다. 화재피해의 등급판정기준은 표 3에 나타내었다.

표 2. 콘크리트의 변색상황과 수열온도의 관계

변색상황	온도범위
그을음 등이 부착	300℃ 미만
핑크색	300~600℃
회백색	600~950℃
담황색	950~1200℃
용융상태	1200℃ 이상

표 3. 피해등급과 외관상의 피해

피해등급	재사용 판정	상태
I 급	보수의 필요가 없음 (내장 등, 콘크리트이외의 마감재부분 교환)	· 무피해의 상태 ① 피해가 전혀 없음 ② 마감재료 등이 남아 있음
II 급	보수의 필요가 없음 (콘크리트 표면세척)	· 마감재부분에 피해가 있는 상태 ① 구체에 그을음 부착 ② 콘크리트표면의 수열온도 500℃ 이하 ③ 상판, 보의 박리가 약간 있음
III 급	보수 (표층으로부터 피복콘크리트부분 까지 타설)	· 철근위치에 도달하지 않은 피해 ① 미세한 균열 ② 피복콘크리트의 수열온도 500℃ 초과 (부근위치까지는 500℃ 이하) ③ 기둥의 폭열이 약간 있음
IV 급	보강 (부재로서의 보강)	· 주근의 부착에 문제가 있는 상태 ① 표면에 수 mm 폭의 균열 ② 철근의 일부 노출
V 급	부재의 교환 또는 새로운 부재의 설치	· 주근의 좌굴 등 실질적 피해가 있는 상태 ① 구조부재로서의 손상이 큼. ② 폭열의 범위가 넓음 ③ 철근노출이 심함 ④ 휨이 두드러지게 나타남

주1) : 콘크리트부재는 화재초기에 표면부 콘크리트의 박락을 발생시켜 철근을 노출시킴으로서 특이한 파괴현상을 일으키는데 이를 콘크리트의 폭열이라 부른다.

주2) : 화재에 의해 새롭게 발생한 균열에는 그을음이 부착되지 않으므로 균열이 화재에 의한 것인지의 여부를 육안을 통해 용이하게 판단할 수 있다.

2차조사는 1차조사를 기본으로 하여 피해규모와 경제성·효과를 고려하여 2차조사를 행하며, 1차조사의 등급별 적부 판단 근거를 얻게 된다. 1차 조사 실시결과가 피해등급 I 급(무피해) 이외의 경우라면 반발경도시험, 중성화시험, 콘크리트·코아 및 철근의 채취시험 등을 할 수 있으며, 필요하다면 재하시험 및 진동시험 등을 할 수 있다. 이중에서 콘크리트·코아의 채취시험은 가능한 최소로 실시하도록 하며 철근에 이상이 있다고 판단되는 경우에는 철근의 채취시험을 행한다. 재하시험 및 진동시험의 대상은 구조부재인 경우로서 엄밀한 판단이 필요한 경우에만 행하고, 콘크리트의 안전한계로 생각되는 온도 500℃의 깊이를 조사할 필요가 있는 경우에는 수열온도를 추정한다. 피해등급의 판단이 곤란한 경우에는 콘크리트·코아채취시험, 콘크리트의 수열온도추정 등의 상세조사를 실시한다.

### 3. 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 보수공법

보수·보강의 방법선정은 화재에 의한 열화상태, 변형의 유무에 따라 열화도를 판정하여 처리가 필요할 것으로 판단되면 긴급도에 따라 최악의 경우 해체 및 철거를 결정하고 사용제한 등의 조치를 내리게 된다. 단 열화도에 따라 보수 및

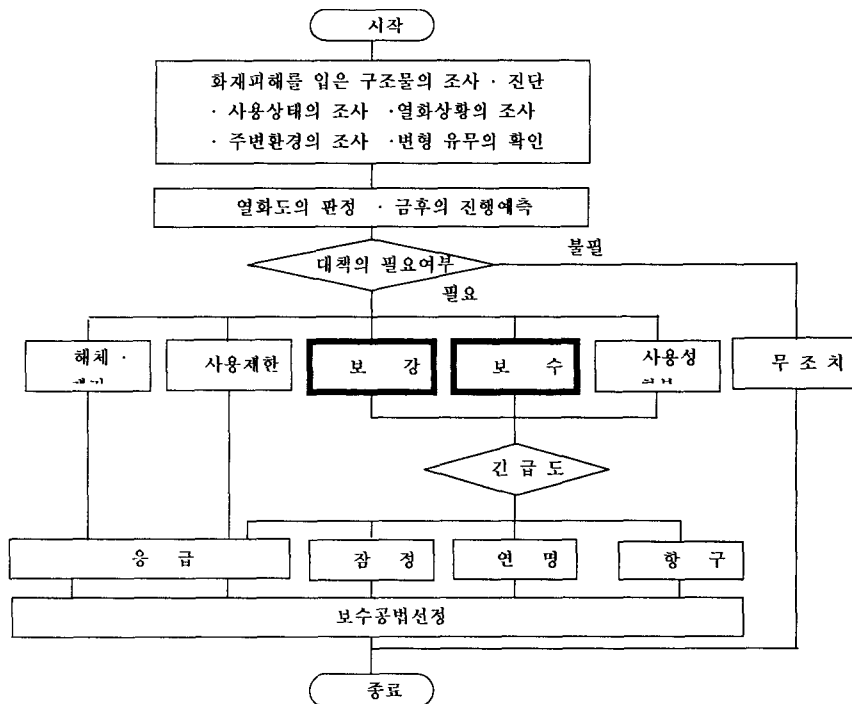


그림 2. 화재를 입은 콘크리트구조물의 보수공법선정 흐름도



사진 2. 화재를 입은 콘크리트기둥

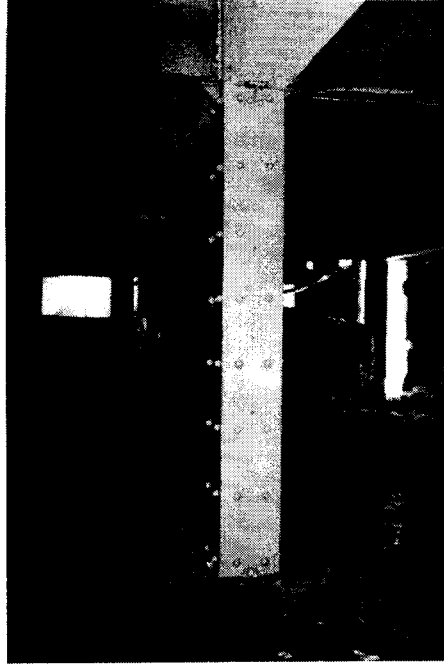


사진 3. 강판보강공법



사진 4. 뽀칠공법

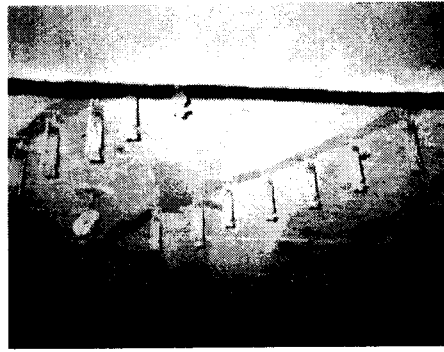


사진 5. 주입공법

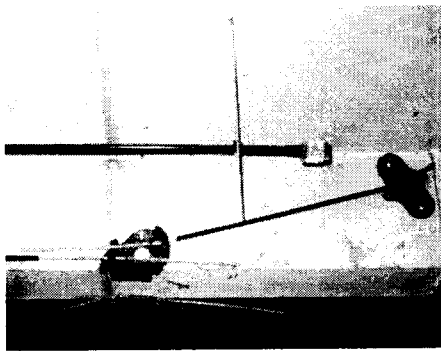


사진 6. 포스트텐션공법



사진 7. 탄소섬유보강공법

보강이 필요한 상태로 판단되면 긴급도에 따라 잠정적, 수명연장, 또는 영구적으로 보수·보강할 것인지를 결정하고 국부적으로 필요한 상태인지 총체적 보수 보강이 필요한 상태인지를 확인하여 적절한 보수 및 보강의 공법을 선정하고 대책을 수립하여야 한다.

화재피해를 입은 콘크리트의 보수 공법으로는 크게 균열보수공법과 단면 수복공법, 표면 피복공법으로 나눌 수 있고 균열보수공법으로는 표면 처리공법, 주입공법, 침투성 방수제 도포공법, 충전공법, 단면 수복공법에는 코트공법, 뿔칠공법, 형틀공법, 표면 피복공법에는 도장공법, 코팅공법, 라이닝공법 등이 있다.

### 3. 결론

국내의 경우 화재를 입은 콘크리트구조물의 성능저하진단 방법 및 보수공법에 대한 선정 규정이 극히 미비하며 연구진행도 거의 전무한 실정으로서 이에 대한 연구가 시급하다. 이를 위해서는 먼저 실제 화재 시 콘크리트구조물의 거동과 화재 후 부재의 잔존내력을 보다 정확히 평가하고 화재를 입은 구조물의 안전성 검토를 통하여 재사용 여부의 판단, 재사용을 위한 보수를 실시하여 구조적 거동을 평가함으로써 보수 후 거동을 평가하는 시스템이 확립되어야 한다. 따라서 이러한 연구를 기초로 철근콘크리트 구조물에 대한 내화성능의 합리적인 평가 방법과 화재 시 및 화재 후 성능 저하된 콘크리트구조물의 진단 및 보수공법선정의 타당성을 평가할 수 있는 해석적·합리적 기법을 확립해야 할 것이다.

#### 참고문헌

- 1) 행정자치부, "화재통계연보," 2000
- 2) 日本コンクリート工學協會, 콘크리트 診断技術'01[基礎編] 2001.
- 3) 조재열, "고온에 노출된 콘크리트의 잔류압축강도 특성에 관한 연구," 서울대학교 석사학위 논문, 1995.
- 4) 박현준, 권영웅, "콘크리트의 피복두께와 내화성," 콘크리트 학회지, 11권 4호, 1999.9, pp.25-31
- 5) 한국콘크리트학회, "최신콘크리트공학" 기문당 1999.
- 6) 허은진, "철근콘크리트 휨 부재의 내력성능에 관한 해석적 연구," 부산대학교 석사학위 논문, 2001.
- 7) 콘크리트 구조설계기준, 건설교통부, 1999.
- 8) 오창희, "화재건물의 구조내력에 관한 연구," 조선대학교 박사학위 논문, 1983.
- 9) T.D.Lin, R.I.Zwiers, R.G.Burg, T.T.Lie, and R.J.McGrath, "Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns," Portland Cement Association, PCA R&D Serial Nos. 1870 and 1871, 1992.
- 10) M.Maruta, M.Yamazaki, and T.Miyashita, "A Study on Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Subject to Long-term Heating", Nuclear Engineering and Design, No.156, 1995, pp.29~37.
- 11) H.L.Malhotra, "The Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Aug., 1965.
- 12) N.G.Zoldners, "Effect of High Temperature on Concrete Incorporating Different Aggregate", ASTM, Material Journal, Vol. 87, No. 1, 1990, pp.47-53,