

## 화재에 의한 콘크리트 구조물의 손상

Fire Damages and Deteriorations of Concrete Structures



김성수\*  
Seong-Soo Kim



박광필\*\*  
Kwang-Pil Park

### 1. 서론

주지하는 바와 같이 콘크리트는 다른 어떤 건설재료 보다 내화성이 우수한 재료로 인식되어 왔다. 실제로 미국에서 발생한 초고층건물의 비행기 충돌에 의한 두 건의 큰 화재사건을 비교해보면 콘크리트 구조물이 강구조물 등의 다른 건설재료에 비해 내화성이 우수함을 입증하고 있다. 1945년 7월 미공군 소속 B-25폭격기가 엔파이어 스테이트빌딩 102층에 충돌하여 큰 화재가 발생하고 다수의 인명피해와 재산상의 손상을 입었지만 콘크리트 구조물은 보수하여 지금까지도 건전하게 사용되고 있다. 그러나 2001년 전세계인을 경악하게 하였던 9월 11일, 테러로 인한 세계무역센터빌딩은 화재로 강구조물인 건물전체가 고열을 받아 전파되었음은 이미 알려진 사실이다. 콘크리트 구조물도 화재에 의해 고열을 받을 경우 화재지속시간이 길어지면 심각한 손상을 입으며, 특히, 콘크리트 속에 매입되어 있는 철근이나 PSC 강선까지 고열을 받을 경우 구조물의 안전성에 큰 문제가 발생할 수 있다.

본 고에서는 콘크리트 구조물이 화재의 영향을 받을 경우 화재온도에 따른 콘크리트의 물리적, 화학적 손상정도를 고찰하고자 한다. 또한 실제 콘크리트 구조물이 화재손상을 입은 경우, 콘크리트의 손상정도를 평가하기 위하여 화재온도 및 지속시간의 추정방법과 화재온도에 따르는 콘크리트의 손상정도를 평가하는 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

### 2. 고열을 받은 콘크리트의 성능변화

#### 2.1 색상변화

콘크리트가 고온에 노출되면 온도에 따라 물리적 성질이 크게 변화한다. 대표적으로 화재 손상정도를 외관적으로 판단할 수 있는 것이 콘크리트의 색상변화이며, <그림 1>은 노출온도에 따른 콘크리트의 색상변화를 나타낸 것으로써 노출온도가 300℃

까지는 거의 색상변화가 없었으나 300 ~ 600℃에서는 분홍색으로, 600 ~ 900℃에서는 밝은 회색으로, 900℃ 이상에서는 담황색으로 변한다. 따라서 콘크리트가 화재에 의해 고온에 노출된 경우 콘크리트의 표면색에 의해서도 어느 정도 화재에 노출된 온도를 추정할 수 있다<sup>1, 2)</sup>.

#### 2.2 압축강도

화재에 의해 고온에 노출된 콘크리트의 압축강도는 콘크리트 배합과 재료의 성질, 특히 골재의 성질에 의해서 크게 다르기 때문에 간단하게 서술 할 수 없지만 일반적인 경향은 다음과 같다. 온도가 100℃ 정도까지는 상온의 경우에 비하여 그다지 변화가 없지만 200℃를 초과하면 강도의 저하가 현저하게 되고, 온도가 500℃ 정도가 되면 강도는 상온의 경우의 1/2 정도까지 저하하는 경우가 있다.

고온에 노출된 콘크리트의 압축강도는 과거 많은 연구자에 의해 보고되어 있고 그 중 대표적인 가열온도와 잔존 압축강도율과의 관계를 <그림 2>에 나타내었다.

잔존 압축강도율은 가열 개시 전(20℃)의 압축강도에 대해서 일정 온도에서 가열이 완료된 후의 압축강도와와의 비로 나타낸다. 가열온도 20 ~ 800℃에서 1시간 가열하면 그림에서와 같이 가열온도 200℃ 이하에서는 극단적인 압축강도저하를 확인할 수 있다. 또 가열 온도 400℃ 이상에서는 급격한 강도저하를 나타내며 약 700℃에서는 상온에서의 압축강도의 약 20 ~ 40%까

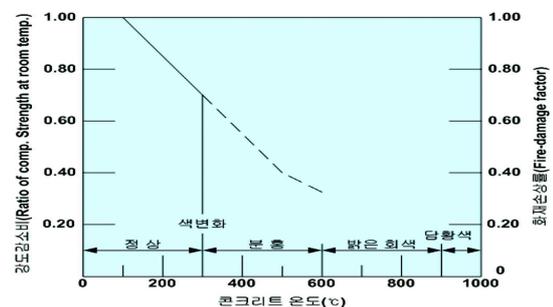


그림 1. 콘크리트의 노출 온도에 따른 색상 변화

\* 정희원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수  
sskim@daejin.ac.kr

\*\* 정희원, 대전대학교 건설시스템공학과 선임연구원

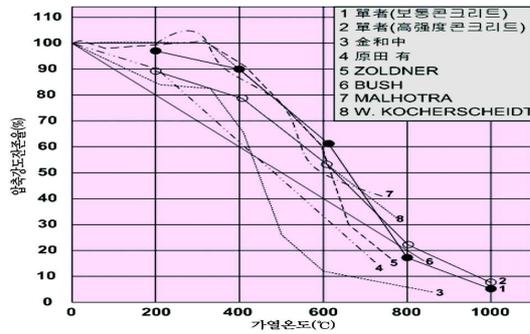


그림 2. 가열온도에 따른 압축강도 잔존율<sup>3)</sup>

지 저하한다. 이는 연구자에 따라 다소 차이는 보이고 있으나 콘크리트가 화재에 의하여 고온의 열을 받게 되면 압축강도는 크게 저하한다는 사실을 확인할 수 있다. 보통 화재 온도는 대략 700 ~ 1,200°C로 추정되며, 이 온도에서 가열된 콘크리트는 구조적으로 매우 위험하다. 또한 저하된 압축강도는 화재 후 어느 정도의 기간이 경과되면 <그림 3>과 같이 압축강도가 자연 회복되며, 수열 온도가 500°C 이내이면 어느 정도로 재사용이 가능한 상태로 회복된다<sup>3, 4)</sup>.

2.3 탄성계수

콘크리트가 가열되면 골재와 시멘트 페이스트 간의 열팽창률의 차에 의한 조적 이완이나 수분의 이동 증발에 기인한 물리적 및 화학적 변화가 일어나므로 탄성계수의 저하가 생긴다. 이 때문에 인장강도와 같이 탄성계수는 고온가열의 영향을 쉽게 받는다.

고온에 놓인 콘크리트의 탄성계수는 압축강도와 같이 온도가 높게 됨에 따라 저하량이 커지게 된다. 그러나 저하비율은 압축강도의 경우보다 크고, 온도가 400°C에서 상온의 경우의 약 30%, 500°C에서 20% 정도까지 저하하는 것이 있다. 온도와 콘크리트의 탄성계수의 관계의 예를 <그림 4>에 나타내었다.

<그림 5>에 가열온도와 잔존 탄성계수율과의 관계를 나타내었다. 그림에서와 같이 100°C 이하의 가열 온도에서도 상온에서의 탄성계수의 약 70% 정도까지 감소한다. 가열 온도가 100°C 이상의 범위에서는 탄성계수는 다른 특성에 비해 훨씬 저하가 뚜렷하고 가열 온도가 300°C가 되면 잔존 탄성계수율은 약 40%에 이

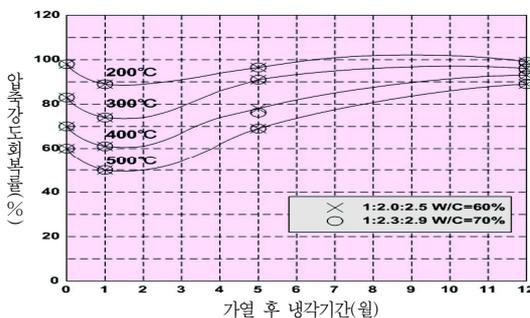


그림 3. 가열된 콘크리트의 압축강도 회복율<sup>5)</sup>

다. 또한 잔골재율에 따른 잔존 탄성계수율은 200°C와 600°C의 가열에서는 큰 차이를 보이지만 가열온도 800°C와 1,000°C에서는 잔골재율에 따른 잔존탄성계수는 거의 변화가 없다<sup>6)</sup>.

2.4 크리프

콘크리트에 응력이 작용하면 팽창, 수축, 탄성계수 등이 변화하지만 크리프는 응력이 작용하지 않아도 시간이 경과함과 동시에 그 변형이 증가하는 성질을 갖고 있다. 특히, 고온이 되면 크리프 변형은 커지는 경향이 있다.

<그림 6>은 각종의 온도조건 하에서 Naaser가 실시한 크리프 시험 결과를 나타낸다. 이 결과에서 1.7 ~ 71°C의 온도 범위에서는 크리프 속도는 온도의 상승에 따라 증가하지만 71 ~ 230°C의 온도 범위가 되면 반대로 작아지는 경향을 나타낸다고 보고하고 있다. 또 佐久田는 20 ~ 80°C의 온도 하에서 공시체의 밀봉조건을 변화시킨 크리프 시험을 실시하여 크리프에 미치는 온도의 영향이 수분의 증발 속도의 차에 의한다는 것을 보고하

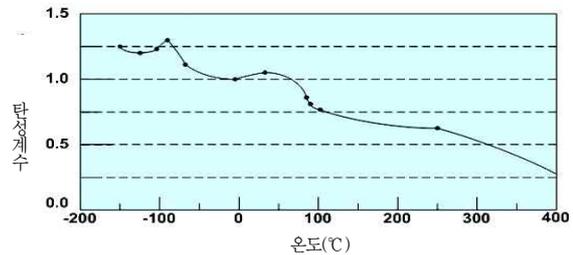


그림 4. 콘크리트의 탄성계수에 미치는 온도의 영향

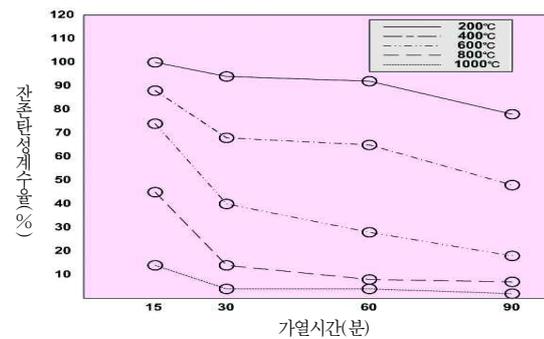


그림 5. 가열온도에 따른 잔존탄성계수율

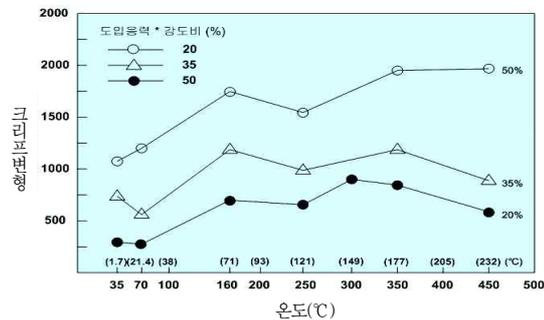


그림 6. 크리프 변형과 온도와의 관계<sup>d)</sup>

고 있다. 가열 온도 50°C 이하에서의 크리프 변형은 온도 증가에 따라 커진다. 가열 온도 20°C에서의 크리프 변형과 비교하면 약 1.5 ~ 2.5배가, 80°C에서는 약 2.5 ~ 6배가 된다. 그러나 50 ~ 100°C의 온도 범위에 대한 실험 결과는 연구자에 따라 실험 결과치의 차이를 볼 수 있다. Cruz는 고온에서 5시간의 크리프 시험에서 260°C에서의 크리프 변형은 상온에서의 크리프 변형보다 6.4배, 649°C에서는 32.6배의 크리프 변형이 커진다고 보고하고 있다. 또 일정한 온도조건에서는 크리프 변형은 지속 응력과 비례관계이며, 또한 회복 크리프는 크리프 변형에 비해서 현저히 작고 온도와 응력의 크기에 의존하지 않는다고 한다.

### 2.5 밀도

콘크리트의 밀도는 골재의 밀도에 크게 관련되어 있고 특히 20 ~ 150°C의 온도 범위에서는 콘크리트의 함수율에도 큰 영향을 받는다. 수중양생 된 석회암 콘크리트는 20 ~ 150°C의 온도 범위에서 0.1 mg/m<sup>3</sup>의 밀도 변화가 생긴다. 습윤 상태의 석회암 콘크리트는 수열온도 150°C에서 600°C 범위까지 밀도 감소가 거의 없으나 600 ~ 900°C의 범위에서 탄산화가 시작되어 중국적으로 매우 다공인 콘크리트가 된다(밀도는 약 0.1 mg/m<sup>3</sup>). 더욱 가열하면 중량이 일정한 데 비하여 콘크리트는 팽창하고 밀도는 계속 감소하나 그 후 소결현상에 의하여 강도가 약간 증가한다. 용해하기 시작하면 밀도는 증가하며 결국 2.2 ~ 2.6 mg/m<sup>3</sup>이 된다. <그림 7>은 규암질 골재를 사용한 콘크리트의 강도는 실온에서부터 700°C 온도 범위까지 밀도가 급격하게 감소한다. 밀도의 초기 감소는 수분의 증발에 의해 결정되며 고온에서는 규암골재의 열팽창에 의해 밀도가 급격하게 저하한다<sup>4, 7)</sup>.

## 3. 화재에 의한 콘크리트의 성분 및 조직의 변화

### 3.1 시차열분석에 의한 화재온도 분석

무기질 재료를 가열 또는 냉각하는 과정에서 결정구조가 변화할 때 흡수 또는 방출하는 에너지를 열량으로 변환하여 측정

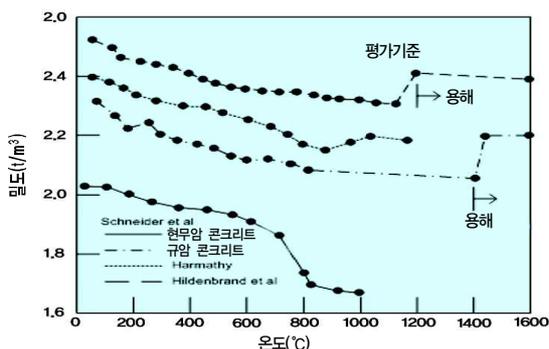


그림 7. 규암질 골재를 사용한 콘크리트의 밀도<sup>4)</sup>

하거나 용점이나 응고점에 대한 열량의 수치, 수화물의 결합수와 흡착수 등이 이탈하는 과정의 열변화 등을 측정하고 그 물성의 변화와 수화물에 대한 물의 결합 형태를 파악하는데 유용한 역할을 하는 것이 열분석이다. 주로 시멘트 화학에서 사용되는 방법으로는 시차열분석(DSC; differential scanning calorimetry)을 실시하여 콘크리트 중의 시멘트 수화물의 온도에 대한 반응정도를 확인할 때 신뢰성이 좋은 방법이다.

콘크리트는 시멘트의 수화 반응에 의해 많은 수화생성물을 함유하고 있으며 이들 수화생성물은 온도의 변화에 따라 결정구조가 변화되며 변화할 때에 에너지를 흡수 또는 방출한다. 또한 수화물의 결합수와 흡착수 등이 이탈하는 과정에서도 열변화 등을 일으키기 때문에 미리 열변화를 일으킨 시료를 열분석 할 경우 그 온도에서는 특별한 에너지의 흡수나 방출은 발생하지 않는다. 따라서 열변화를 일으키지 않은 시료를 열분석하고 열변화를 일으킨 시료를 열분석하여 비교 분석함으로써 콘크리트의 화재온도를 추정할 수 있다.

<그림 8>은 구조물에서 건전한 부위의 시료를 채취하여 전기로에 각각 100 ~ 1,200°C로 10분 및 30분간 가열한 시료와 중성화 부위에서 채취한 시료로부터 500 ~ 1,200°C로 30분간 가열한 시료의 열분석한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 200°C까지는 모세관수 및 겔수의 증발로 인한 강한 흡열피크가 일어나고, 520°C 정도에서 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 분해로 인해 흡열피크가 생성된다. 720°C 정도에서 칼사이트(CaCO<sub>3</sub>)의 분해로 인해 또 한번의 강한 흡열반응이 발생한 것을 알 수 있다. 또한 가열온도 400, 700, 900°C 부근에서는 비정질 실리카상의 전이(conversion)로 인한 흡열피크가 발생되었다. 따라서 화재에 의해 고온을 받은 콘크리트는 그 온도에서 미리 흡열반응을 일으키기 때문에 다시 열을 가하여 시차적 열분석을 실시하면 흡열반응의 피크가 없거나 적게 나타난다. 예를 들면 <그림 8>에서 온도가 400°C에 노출된 경우 DSC 측정 결과는 400°C 부근에서 발생하는 흡열피크가 없으며, 600°C의 경우에는 520°C 정도에서 나타나는 수산화칼슘의 분해로 인한 흡열피크가 생성되지 않음을 알 수 있다<sup>4)</sup>.

### 3.2 X-ray에 의한 반응생성물 분석

콘크리트의 X선 회절분석은 고온에 의하여 콘크리트 중의 시멘트 수화물의 변화를 정량적으로 추정하여 화재온도와 온도의 작용시간을 추정하기 위한 방법으로 사용한다. 콘크리트의 반응생성물을 정성적으로 분석하고 시멘트 수화물이 고온에 의하여 어떤 물질로 변하고 얼마나 변하였는지를 정량적으로 분석하여 콘크리트가 화재에 의해 받은 온도와 가열시간을 추정할 수 있다.

콘크리트 시료를 전기로에서 100 ~ 1,200°C로 가열한 시료를 X선 회절 분석한 결과를 나타낸 것이 <그림 9>이다. 이 분석 결과를 보면 400°C까지는 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)가 존재하지만

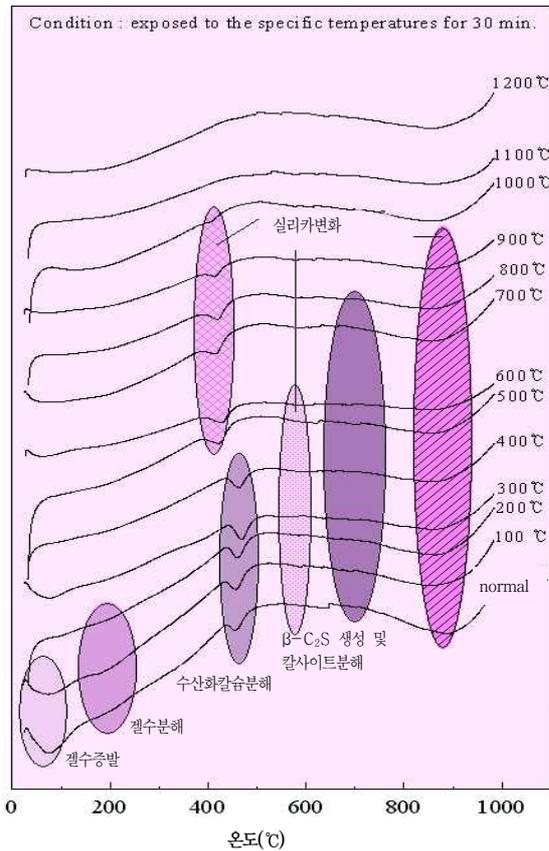


그림 8. 콘크리트의 DSC 분석 결과(지속시간 30분, 건전부위)<sup>3,4)</sup>

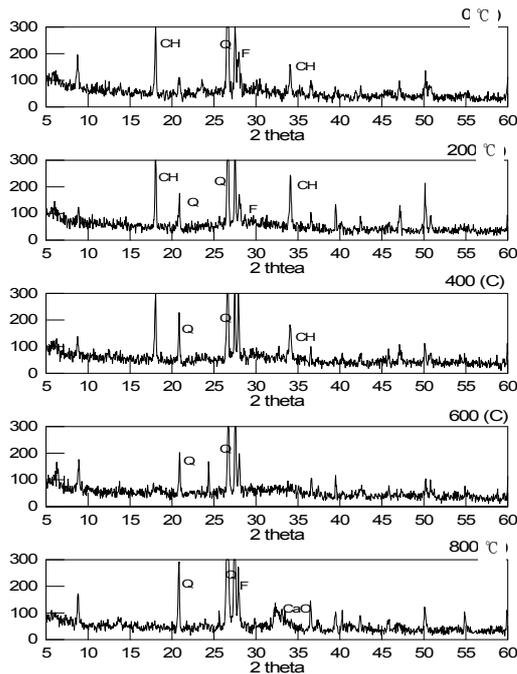


그림 9. 콘크리트 시료의 XRD 분석 결과

600°C 이상부터는 수산화칼슘 성분은 거의 소멸되고 산화칼슘(CaO)의 성분이 나타났으며, 온도가 높을수록 생성량이 증가하고 있다. 이것은 화재때 콘크리트의 온도가 증가될수록 수산화칼슘이 분해되고 또한 칼사이트(CaCO<sub>3</sub>)가 분해되어 산화칼슘으로 변환되기 때문이다.

#### 4. 맺음말

최근 유조차량의 화재나 교량하부에서 발생한 화재 등에 의해 콘크리트 구조물이 크게 손상되는 사례가 종종 발생되고 있다. 건물이나 구조물 주위에서 발생한 화재는 온도가 거의 1,000°C 이상이 되며, 콘크리트 구조물이 이러한 고온에 장시간 노출될 경우 콘크리트 및 강재의 특성이 변하여 구조물의 안전성에 문제가 발생될 수 있다. 특히, PSC 구조물의 경우에는 일시적으로나마 이러한 고온에 노출될 경우 PSC 구조물의 내력 또한 크게 저하될 수 있다. 따라서 화재가 발생한 콘크리트 구조물의 안정성을 평가함에 있어서 구조물이 받은 화재온도와 이에 따른 콘크리트 및 강재의 성능저하 정도를 평가하는 것이 매우 중요하다.

본 고에서는 화재에 의해 고온에 노출된 콘크리트의 특성변화와 화재온도 추정에 대한 기본적인 평가방법에 대하여 기술하였으며, 중요한 콘크리트 구조물에 화재가 발생할 경우에는 반드시 정확한 화재온도 및 분포를 분석하여 구조물의 안전성을 검토해야 하겠다. □

#### 참고문헌

1. 김성수, 최창식, 김일근, '유조차 전복에 의한 노량대교 화재구간 콘크리트 열화 및 내구성 조사', 한국구조물진단학회지, Vol. 2, No. 2, 1998.
2. 시설안전기술공단, '원효대교북단 진입고가교 화재구간 내구성 및 물성시험 보고서', 1998. 3.
3. 한국콘크리트학회, '철근콘크리트 구조물의 내화특성', 2005.
4. 森永 繁 監修, 'コンクリートの熱的性質', 技報堂出版, 1983.
5. 吳昌熙, '鐵筋 콘크리트造火災建物の火害とその補修に関する研究', 東京工業大學 博士學位論文, 1985. 7.
6. 中根淳, 長尾覺博, '高温履歴おけるコンクリート物性關實驗的研究', 日本建築學會構造系論文集, 第457 1994. 3
7. Seaman. J. C., G.W.Wash, "Variation of Mortar and Concrete Properties with Temperature", ACI Journal, Vol. 54, No.5, 1957. 11.

담당 편집위원 :  
정해문(한국도로공사) haimoon@ex.co.kr