

특

집

신기능 콘크리트

# 비폭열성 콘크리트 Concrete with Spalling Resistance



한천구\*

## 〈편집자주〉

콘크리트는 인공강도가 크고, 내구·내화성을 갖는 동양호한 품성과 모양을 자유롭게 만들 수 있는 우수한 시공성 및 제조비의 극저감이라는 지렛대 등 경제적인 이유에서 벽체, 석재 등과 함께 건설용 구조재료로 널리 쓰여져 왔다. 또한, 이벽건은 콘크리트는 근년에 들어 산업발전과 더불어 전통적인 기능과 성능인 높은강도 및 양호한 시공성 뿐 만 아니라 내화성, 장수명성, 고위성 등 자체 용량의 계양위에 석상, 방음, 조습, 폐기물활용 등 환경과의 대응 및 발열 등 특수성능의 부여면에 있어서도 기존의 상성을 초월할 정도로 많은 응용의 다양성을 보이고 있다.

따라서 본 특집에서는 이와같은 다양한 요구에 의해 개발되어진 많은 콘크리트 중 비교적 새로운 기능을 갖는 것으로서 이제까지 많이 알려지지 않은 콘크리트를 중심으로 이러한 새로운 기능의 콘크리트가 출현한다는 것과 그 특징 등에 대하여 소개하고자 한다. 물론 콘크리트의 이해는 이하에 소개되는 시기는 콘크리트 외에도 다양한 기능의 콘크리트가 출현하겠지만, 서민관계상 고위성은 범용성 인정하에 생략한다. 아울러 계속적으로 개발되는 신기능 콘크리트의 활용에도 한참과 되어질 것이다는 마음에서 이와같은 주제를 다루게 되었다.

(특집주관: 정주대학교 건축공학과 한천구 교수)

\* 장희원, 정주대학교 건축공학과 교수

## 1. 서 언

화재와 관련된 가장 대표적인 철근콘크리트 건축물의 사고로는 1993년 1월 7일 발생한 청주 우암상가 화재 붕괴사건을 들 수 있다.

그동안 우리나라에서는 크고 작은 많은 건축물의 화재사고가 있었지만 붕괴에까지는 이르지 않았으나, 이 경우에 특히 붕괴까지 이르게 된 것은 부족한 단면에 과대하중과 아울러 높은 화재온도에 따른 콘크리트의 폭열현상이 구조체 콘크리트의 단면결손 및 철근의 내력까지 저하시켜 붕괴까지 초래한 결과로 사료된다.

특히, 최근의 건축구조물은 초고층화, 대규모화가 진행되면서 콘크리트는 고강도화 및 고성능화가 꾸준히 이루어져 왔는데, 화재시 고온에 의해 발생하는 폭열현상은 특히 고강도화와 같이 조직이 치밀할수록 더욱 문제시되어 현대개념의 고품질·고성능 콘크리트에서는 반드시 검토하고, 해결하여야만 하는 사항으로 등장하고 있다.

따라서, 본고에서는 최근의 연구에서 고성능 콘크리트의 폭열현상은 폴리프로필렌(Polypropylene :이하 PP라 칭함)섬유 등 내열성이 작은 섬유를 일정량 콘크리트에 혼입해 줌으로써 방지될 수 있다는 연구자료가 발표되면서 새로운 국면을 맞이하게 되었는데, 이와같이 콘크리트에서 발생할 수 있는 폭열의 발생기구(Mechanism) 및 특성과 아울러 방지대책에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 콘크리트의 내화성 및 폭열특성

### 2.1 콘크리트의 내화성

콘크리트는 건축구조재료 중 내화성이 우수한 재료중의 하나이기는 하지만, 화재와 같이 고열을 받으면 큰 피해를 입는다. 피해정도는 화재의 최고온도, 지속시간 등도 중요하지만, 화재시의 가열속도도 매우 중요한데, 매우 급속한 경우는 폭열로 연관되고, 비교적 낮은 온도에서부터 서서히 고온에 이르게 되는 경우는 내화성과 관련되어 검토하게 된다.

즉, 콘크리트가 저온에서 고온으로 서서히 진행될수록 먼저 시멘트페이스트 경화체와 골재는 열팽창률 차이에 의해 조적이 이완되기 시작하고, 약 260℃ 이상이 되면 시멘트페이스트 경화체 중 결합수가 소실되기 시작하여 강도가 저하하기 시작하여, 500℃에서는 구조체의 많은 균열과 함께 상온 강도의 약 절반 이하로 저하하게 된다(탄성계수는 20% 전후까지 저하한다). 따라서, 이와같은 온도이력을 받은 콘크리트는 구조재로 재사용하는 것은 아주 위험하므로 안전진단기관 등에서는 온도이력의 평가 및 피해 깊이 등의 파악에 신중을 기하여야만 한다.

이와같은 현상과 관련한 내화성의 영향 요인으로는 물시멘트비 등 배합에 의한 영향은 비교적 적고, 사용골재의 암질에 의하여 크게 지배되는데, 암석의 경우는 화성암의 경우로 반심성암 및 분출암계(안산암, 현무암, 경석 등)는 우수하고, 심성암계(화강암 등) 및 수성암의 석회암계는 내화성이 매우 떨어진다.

### 2.2 폭열 특성

콘크리트의 폭열이란 화재시 급격한 가열, 즉 짧은 시간에 고온의 화열이 콘크리트 표면에 접하게 되면 순식간에 표면 콘크리트는 고온으로 되는데, 이와같은 급격한 가열에 따라 부재표면 콘크리트가 폭발적인 음과 함께 탈락 및 박리되는 현상을 말한다 (사진 1 참조).



사진 1 화재후 콘크리트 구조체의 폭열모습

이와같이 발생한 폭열은 피복콘크리트가 결손되므로서 구조체 내부까지 고온이 전달되고, 특히 그림 1과 같이 철근이 노출되어 고온을 받게 되므로서 궁극적으로는 치명적인 구조부재의 내력저하로 말미암아 건축물은 붕괴를 일으킬 수 있다.

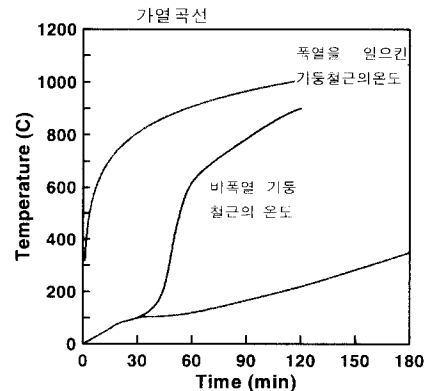
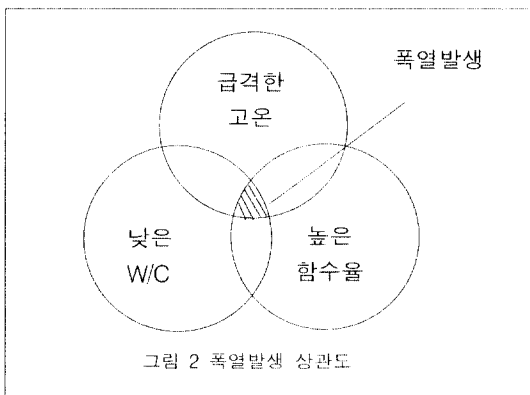


그림 1 화재시 철근콘크리트 기동중의 철근온도

이와같은 폭열현상의 발생기구(Mechanism)로는 아직까지 명확하게 밝혀지지는 않았지만 고열에 의하여 발생한 콘크리트 내부의 수증기가 외부조직의 치밀화로 말미암아 배출되지 못하고 내부에 갇히게 되면 고온상승에 따라 수증기압이 점점 크게 상승하게 되는데, 점점 상승된 수증기압이 콘크리트의 인장강도보다 커지게 되면 표면조직이 폭발음과 함께 탈락·박리를 일으키게 된다. 물론, 이때는 내외부의 심한 온도차에 의한 비정상적인 열응력이라든가, 골재 종류에 따라 흡수율이 크거나 내화성이 약한 화강암 등의 골재는 많은 수증기의 발생 및 석영분의 팽창 붕괴 등과 연관되어 콘크리트의 인장강도를 낮추므로서 폭열은 더욱 쉽게 발생하게 된다. 또한, 일반적으로 콘크리트의 내화성은 전의 실험과 같이 W/C 등 배합과는 큰 관련성이 없는 것으로 알려져 있지만, 폭열의 경우는 배합사항과 밀접하게 관련되어, 즉 W/C가 작아 조직이 치밀해지면 폭열면적도 크고, 폭열발생 깊이 또한 깊어지는 것으로 알려지고 있는데, 단 W/C 50~55% 이상에서는 조직이 거칠어 수증기압의 방출이 용이하여 폭열은 거의 발생하지 않는 것으로 보고되고 있다 (그림 2 참조).

또한, 폭열현상은 콘크리트 내부의 함수율과도 밀접한 관련이 있다. 즉, 함수율이 높은 콘크리트는 폭열이 용이하게 발생하여 문제시 되는데, 역으로 W/C 25%인 고강도 콘크리트 일지라도 함수율이 3.5%이하라면 폭열은 발생하지 않는 것으로 보고되고 있다.



### 3. 콘크리트의 폭열방지

낮은 온도에서부터 점진적으로 가열되어 고온에 이르는 콘크리트의 내화성과 관련하여, 내화성을 확보하기 위한 기준에 알려진 방안은 다음과 같다.

- ① 내화성이 작은 철근을 보호하기 위하여 피복두께를 충분히 한다.(피복두께 2cm는 1시간 내화, 3cm는 2시간 내화 등)
- ② 내화성이 높은 골재를 사용한다.
- ③ 콘크리트의 표면을 회반죽 등의 단열재로 보호한다.
- ④ 피복콘크리트가 박리되는 것을 방지하기 위하여 메탈라스 등을 사용한다.

그러나, 전에 언급한 바와같이 콘크리트의 폭열현상은 내화성과는 다른 특성을 나타내고 있는데, 즉, 폭열을 방지하기 위한 기본방안으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- ① 콘크리트의 급격한 온도상승을 억제한다.
- ② 함수율이 낮은 골재의 사용 및 콘크리트의 함수율이 3.5% 이하가 되도록 건조시킨다.
- ③ 콘크리트 내부의 수증기압이 발생하지 않도록 빠른 시간내에 수증기의 이동을 가능하게 한다.
- ④ 콘크리트의 탈락·박리물이 비산하지 않도록 고정시킨다.

따라서, 위의 방안을 구체적으로 해결하기 위한 방법으로는 ①의 경우는 내화도료나 내화피복 등을, ②의 경우는 콘크리트의 강제 건조 혹은 함수율이 적도록 원심성형법으로 제조된 것을 형태로 이용 및 ④의 경우 콘크리트 표면을 메탈라스, 강판피복 및 매스철근에 의한 비산방지를 검토할 수 있으나, 가장 간편하고, 저렴하며 효과적인 방안으로는 ③의 경우로 콘크리트에 내열성이 작은 PP섬유 등 유기질 섬유를 혼입하여 화재시 섬유가 녹으므로써 그 녹은 섬유위치의 관로로부터 내부 수증기압을 빠른시간내에 제거하는 방법이다.

#### 4. PP섬유 혼입에 의한 폭열방지

그림 3은 W/C 30%로 슬럼프플로우 65±5cm 인 고성능 콘크리트에 PP단섬유(섬유길이 19mm, 비중 0.9)를 0~0.20 %/v.의 혼입률 변화에 따라 화재조건을 상정한 가열 전·후의 압축강도 및 동탄성계수를 비교한 그래프이다.

가열 전후 공히 PP섬유가 혼입될수록 압축강도 및 동탄성계수가 크고, 화재후 잔존강도도 커짐을 알 수 있는데, 압축강도의 잔존비는 50~60%, 동탄성계수는 20~30%로 나타났다.

또한, 사진 2는 가열된 혼입률별 고성능 콘크리트의 폭열양상을 나타낸 것으로 PP섬유 혼입률 0.1%/v. 이상 혼입되게 하면 폭열이 방지됨을 알 수 있다. 이는 그림 4의 투수시험 결과에서 가열전에는 PP섬유 혼입률에 관계없이 투수량이 매우 적

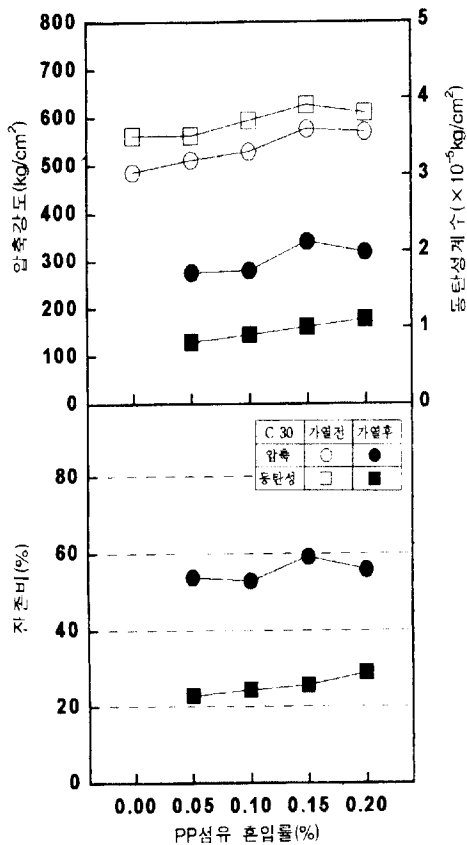


그림 3 가열전후의 압축강도, 동탄성계수 및 잔존비

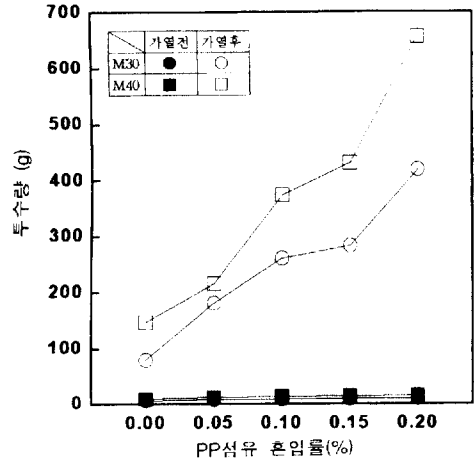


그림 4 가열 전후의 투수시험

혼입률 (%v)	가열 전	가열 후
0		
0.05		
0.1		
0.15		
0.2		

사진 2 폭열 성상

게 나타났으나 가열후 투수량은 PP섬유 혼입량이 증가할수록 매우 커지므로써 170℃전후에서 용해한 PP단섬유가 수증기압의 배출통로로 작용하여 폭열이 방지된 결과임을 입증하는 것이다.

참고로 그림 5는 화재후 강도가 저하된 콘크리트를 다시 28일간 수중양생하였을 때 강도 회복 정도를 분석한 그래프로서 휨강도는 균열의 영향으로 화재전의 강도를 100% 회복하지 못하였으나, 압축강도는 화재전의 압축강도를 대부분 회복함을 알 수 있었는데, 특히 PP섬유 혼입이 증가할수록 강도회복률은 향상되는 것을 알 수 있었다.

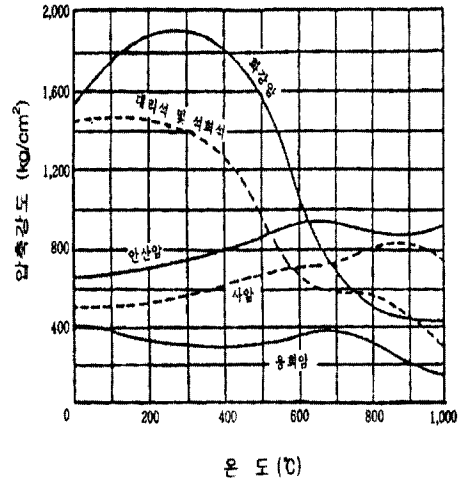


그림 6 석재의 내화강도

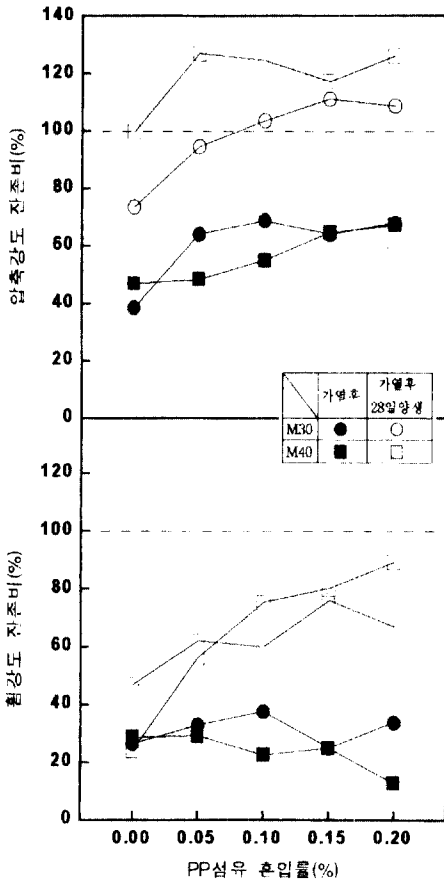


그림 5 가열후 및 가열후 28일 수중양생후의 압축강도 및 휨강도 잔존비

## 5. 결 언

화재시 콘크리트 구조물의 내화성 향상 및 폭열방지와 관련하여 이론적 고찰 및 PP단섬유 혼입 콘크리트의 폭열방지 특성을 소개하였다.

그러나, 현재로는 PP섬유를 혼입한 고성능 콘크리트의 비폭열성에 관한 연구가 단순히 초기단계로서 이와같은 신기술을 실용화하기 위하여는 더욱 구체적인 폭열 메카니즘, 발생조건 및 실용화 기술 등 다양한 측면의 검토가 계속되어야만 효과적인 활용이 가능할 것이다.

특히 이와같은 폭열문제와 관련하여 유념해야 할 사항은 콘크리트용 골재의 주 압종이 일본의 경우는 안산암으로 내화성이 강한 골재가 주로 이용되는 반면 우리나라의 경우는 화강암이 주압종으로 그림 6과 같이 내화성으로도 불리한 골재입에 유념하여 더욱더 콘크리트의 내화성 향상방안 및 폭열방지에 대하여 역점을 두어야만 할 것이다.

## 참고문헌

- 1) 한천구, 양성환, 한민철, 황인성, 채민수 ; 폴리프로필렌 섬유의 혼입률 변화에 따른 고성능 시멘트 모

르터의 폭열방지 특성에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회, 1998. 10.

2) 한천구, 양성환, 김기철, 한민철, 황인성 : 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 특성 및 폭열방지에 관한 연구, 한국구조물진단학회 가을학술발표회, 1998. 11.

3) 오창희, 강병희 : 고온수열 콘크리트의 성장에 관한 실험적 연구(1), 대한건축학회논문집, 1987. 12.

4) 오창희, 강병희 : 고온수열 콘크리트의 성장에 관한 실험적 연구(2), 대한건축학회논문집, 1989. 8.

5) 西田 朗 外 2人 : ホリプロピレン短纖維を混入した高強度コンクリート部材の耐火性, 日本建築學會大會學術講演集, PP. 63~66, 1998. 9.

6) 吉田 正友 外 1人 : 콘크리트의 爆熱に及ぶ 콘크리트 내부의 空隙および含水量의 영향에 관한 연구, 日本建築學會大會學術講演集, PP. 33~34, 1998. 9.

7) 古平 章夫 外 3人 : ホリプロピレン纖維を混入した高強度コンクリートRC柱의 耐火性能, 日本建築學會大會學術講演集, PP. 35~36, 1998. 9.

8) 西田 朗 外 3人 : 폭열방지용 폴리프로필렌短纖維를 混入した高強度콘크리트性狀에 관한 연구, 日本建築學會大會學術講演集, PP. 331~338, 1994. 9.

9) 西田 朗 外 2人 : 高強度콘크리트部材의 耐火性에 관한 연구, 日本建築學會大會學術講演集, PP. 229~236, 1996. 9.

10) 井上明人 外 2人 : 高強度콘크리트部材의 耐火性의 評價에 관한 연구, 日本建築學會大會學術講演集, PP. 531~532, 1990. 10.

11) 井上明人 外 2人 : 高強度콘크리트部材의 耐火性의 評價에 관한 연구(骨材의 岩種及 含水量의 影響), 日本建築學會大會學術講演集, PP. 739~740, 1991. 9.

12) 高 治遠 外 2人 : 高強度콘크리트의 폭열 성장에 관한 연구, 日本建築學會大會學術講演集, PP. 1393~1394, 1992. 8.

13) 金和中 : 高溫度에 於ける 콘크리트의 力學的 舉動에 관한 實驗的 研究, 東京工業大學 博士學位論文, 1988. 3. [2]

건설교통부 중앙건설기술심의위원회 심의판

## 콘크리트 표준시방서 영문 완역본

STANDARD SPECIFICATIONS FOR CONCRETE STRUCTURES

- 내 용 : DESIGN (설계편)  
CONSTRUCTION (시공편)  
PAVEMENT (포장콘크리트)  
DAM (댐콘크리트)
- B5판 1,294 면 (한정부수 보급)
- 회 원 : 45,000원                      비회원 : 50,000원 (발송료 3,000원 별도)