

고성능 콘크리트의 폭열방지 및 내화성 향상 대책

한 천 구 (청주대학교 건축공학과 교수)

황 인 성 (청주대학교 산업과학연구소 연구위원)

1. 서 언

건축물은 화재시 인명안전, 재산보호의 관점에서 일정시간 내화성능의 확보와 함께 구조적인 안전대책이 중요한 과제로 지적되고 있다. 이러한, 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 붕괴를 초래한 결과로 사료된다.

특히, 최근의 건축구조물은 초고층화, 대규모화가 진행되면서 콘크리트는 고강도화 및 고성능화가 꾸준히 이루어져 왔는데, 화재시 고온에 의해 발생하는 폭열현상은 특히 고강도화, 고성능화와 같이 조직이 치밀할수록 더욱 문제시 되어 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 함성섬유를 일정량 콘크리트에 혼입해 줌으로써 방지될 수

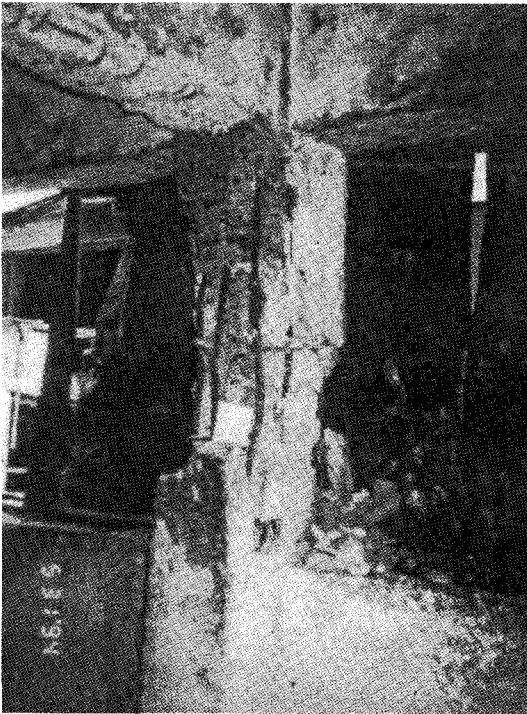
있다는 연구자료가 발표되면서 새로운 국면을 맞이하게 되었는데, 이와 같이 콘크리트에서 발생할 수 있는 폭열의 발생기구(Mechanism) 및 특성과 아울러 고성능 콘크리트의 폭열방지 대책에 대하여 소개하고자 한다.

2. 콘크리트의 내화성 및 폭열특성

가. 콘크리트의 내화성

콘크리트는 건축구조 재료 중 내화성이 우수한 재료 중의 하나이기는 하지만, 화재와 같이 고열을 받으면 큰 피해를 입는다. 피해정도는 화재의 최고온도, 지속시간 등도 중요하지만, 화재시의 가열속도도 매우 중요하다. 즉, 화재시 가열속도가 매우 급속한 경우는 폭열과 연관되므로 이에 대한 검토가 중요하고, 비교적 낮은 온도에서부터 서서히 고온에 이르게 되는 경우는 내화성과 관련되어 검토하게 된다.

화재시 콘크리트의 거동으로는 콘크리트가 저온에서 고온으로 서서히 진행하게 되면 먼저 시멘트페이스트 경화체와 골재는 열팽창률 차이에 의해 조직이 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 저하



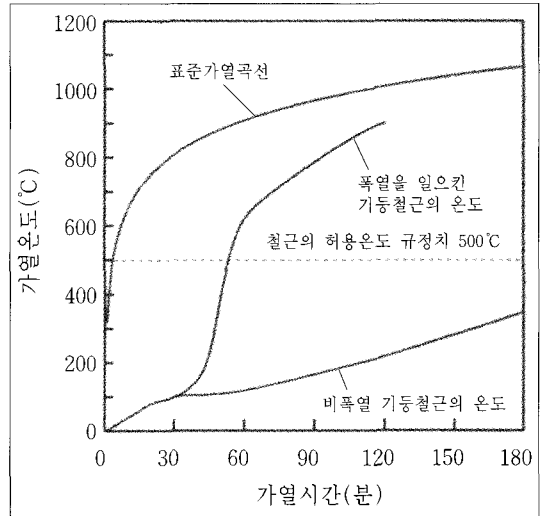
〈사진-1〉 RC기둥의 화재후 폭열모습

되며, 탄성계수는 20% 전후까지 저하한다. 따라서, 이와 같은 온도이력을 받은 콘크리트는 구조재로 재사용하는 것은 아주 위험하므로 안전진단기관 등에서는 온도이력의 평가 및 피해 깊이 등의 파악에 신중을 기하여야만 한다.

이와 같은 현상과 관련한 내화성의 영향 요인으로는 물시멘트비 등 배합에 의한 영향은 비교적 적고, 사용골재의 압질에 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.

나. 폭열 특성

콘크리트의 폭열이란 화재시 급격한 가열, 즉 짧은 시간에 고온의 화열이 콘크리트 표면에 접하게



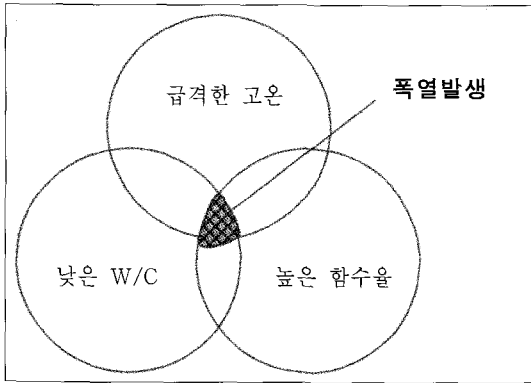
〈그림-1〉 화재시 RC 기둥의 철근온도

되면 순식간에 표면 콘크리트는 고온으로 되는데, 이와 같이 급격한 고온에 의해 부재표면 콘크리트가 폭발적인 음과 함께 〈사진-1〉과 같이 탈락 및 박리되는 현상을 말한다.

이와 같이 발생한 폭열은 피복콘크리트가 결손되므로써 구조체 내부까지 고온이 전달되고, 특히 〈그림-1〉과 같이 철근이 노출되어 고온을 받게 되므로써 궁극적으로는 치명적인 구조부재의 내력저하로 말미암아 건축물은 붕괴를 일으킬 수 있다.

이러한 폭열현상의 발생기구는 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 낮추므로써 폭열은 더욱 쉽게 발생하게 된다.



〈그림-2〉 폭열발생 상관도

일반적으로 콘크리트의 내화성은 전의 설명과 같이 W/C 등 배합과는 큰 관련성이 없는 것으로 알려지고 있지만, 폭열의 경우는 배합사항과 밀접하게 관련되어, 즉 W/C가 작아 조적이 치밀해지면 폭열 면적도 크고, 폭열발생 깊이 또한 깊어지는 것(〈그림-2〉 참조)으로 알려지고 있다. 단, W/C 50~55% 이상에서는 조적이 거칠어 수증기압의 방출이 용이하여 폭열은 거의 발생하지 않는 것으로 보고되고 있다.

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 내화 및 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 바와 같이 콘크리트의 폭열 현상은 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 방법으로 ①의 경우는 내화도료나 내화피복 등을, ②의 경우는 콘크리트의 강제건조 혹은 함수율이 적도록 원심성형법으로 제조된 것을 형태로 이용 및 ④의 경우 콘크리트 표면을 메탈라스, 강판피복 및 매스철근에 의한 비산방지를 검토할 수 있다. 이중 가장 간편하고, 저렴하며 효과적인 방안으로는 ③의 경우로 콘크리트에 내열성이 작은 PP섬유 등 유기질 섬유를 혼입하여 화재시 섬유가 녹으므로써 그 녹은 섬유위치의 관료로부터 내부 수증기압을 빠른 시간내에 제거하는 방법이다. 한편, 최근에는 PP섬유만 혼입한 경우는 잔존내력이 저하하는 문제점이 지적됨에 따라 이를 보완하기 위한 방안으로 PP섬유와 메탈라스 황구속을 병행하는 방안이 검토되어지고 있다.

4. 고성능 콘크리트의 폭열방지 및 내화성 향상 대책의 일예

〈사진-2〉는 W/B 40%인 고강도 콘크리트를 대상으로 PP섬유 혼입, 메탈라스 황구속 및 PP섬유

W/B (%)	PP섬유 혼입률 (vol.%)	플레인			횡구속재					
		A	B	C	메탈라스 M ₁			메탈라스 M ₂		
					A	B	C	A	B	C
40	0									
	0.05									
	0.10									

〈사진-2〉 내화시험 후 시험체의 폭열성상

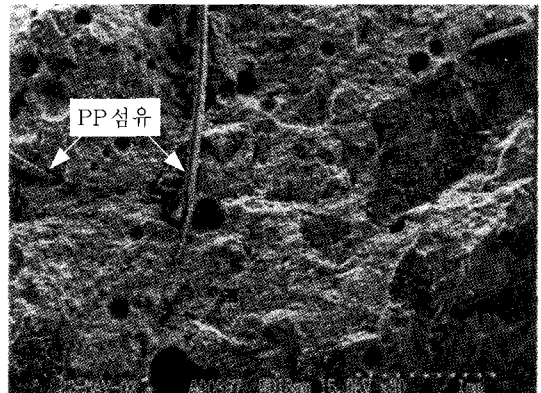
와 메탈라스 횡구속을 병용한 시험체에 대하여 화재 조건을 상정한 내화시험을 실시하고난 후 시험체의 폭열성상을 나타낸 것이다.

먼저, PP섬유를 혼입하지 않고, 횡구속도 하지 않은 플레인의 경우는 급격한 고온과 내부 수증기압에 의해 심한 파괴폭열을 일으켰고, PP섬유를 0.1% 이상 혼입한 경우는 모두 폭열이 발생하지 않아 PP섬유 혼입에 의한 폭열방지 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

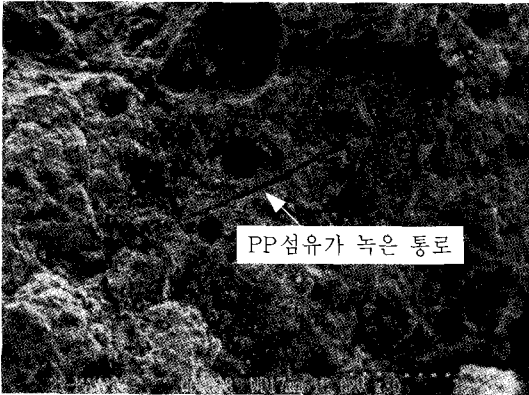
또한, PP섬유를 혼입하지 않은 플레인에 있어 메탈라스로 횡구속한 경우는 내부 수증기압에 의한 폭열에너지보다 메탈라스의 횡구속력이 큰 것에 기인하여 양호한 폭열방지 성능을 나타내었다.

한편, PP섬유 혼입 및 메탈라스 횡구속을 병행한 경우는 대부분 폭열을 일으키지 않아 폭열방지 성능이 양호함을 알 수 있는데, 이는 〈사진-3〉, 〈사진-

4〉와 〈그림-3〉의 폭열방지 모식도에서 알 수 있듯이 콘크리트 내부에 있는 PP섬유가 고온에 의해 녹아내어 내부 수증기압을 효과적으로 배출해 주는 통로역할을 하는 것과 또한, 메탈라스의 횡구속력이



〈사진-3〉 내화시험 전 콘크리트 내부의 PP섬유 모습

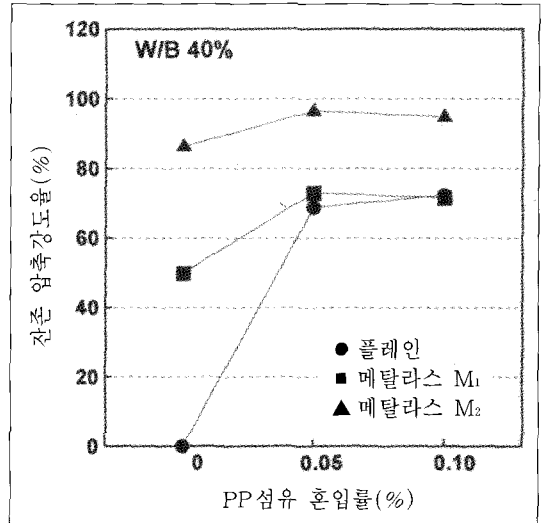


〈사진-4〉 콘크리트 내부에서 PP섬유가 녹은 모습

내부 수증기압보다 크게 작용하는 복합적인 원인에 기인되어 폭열이 방지된 것으로 사료된다.

〈그림-4〉는 메탈라스 횡구속별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 내화시험 후 잔존 압축강도율을 나타낸 것이다.

먼저, PP섬유를 혼입하지 않고 메탈라스 횡구속을 하지 않은 플레인(Plain)은 모두 파괴폭열을 일으켜 잔존 압축강도의 측정이 불가능하였고, 메탈라스만으



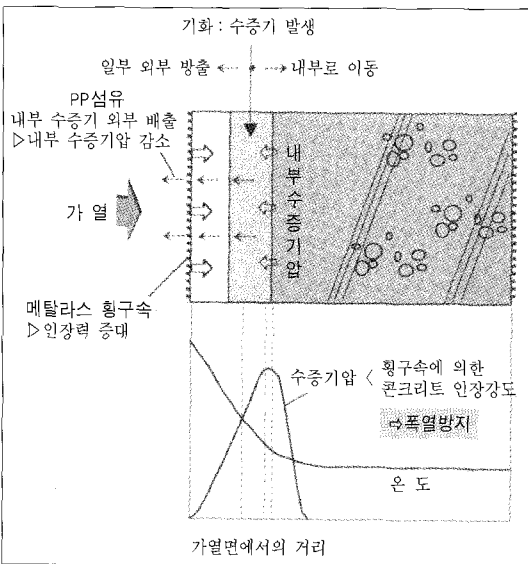
〈그림-4〉 메탈라스 횡구속별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 내화시험 후 잔존 압축강도율

로 횡구속한 경우는 두께가 0.6T인 M₁이 50% 전후, 두께가 1.6T인 M₂가 85% 전후로 메탈라스 두께가 두꺼울수록 잔존 압축강도율이 크게 나타났다.

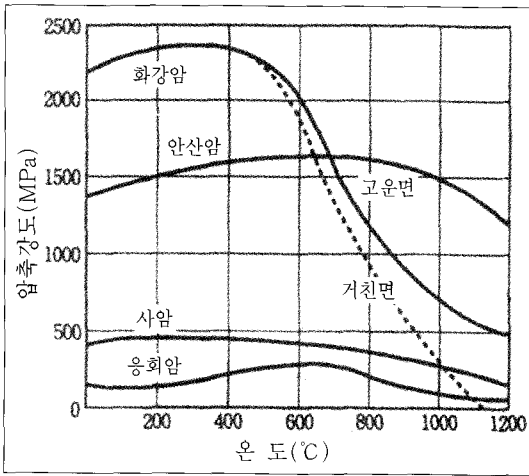
또한, PP섬유만 혼입한 경우는 잔존 압축강도율이 70% 전후로 나타난 반면 PP섬유와 두께 1.6T의 메탈라스 횡구속을 병행한 경우는 PP섬유 혼입에 의한 폭열방지와 메탈라스에 의한 큰 횡구속력에 기인하여 잔존 압축강도율이 90% 전후로 가장 크게 향상되어 나타났다.

따라서, 화재시 고성능 콘크리트의 폭열은 PP섬유의 혼입에 의해 방지할 수 있으나, 잔존강도가 다소 저하하는 반면, PP섬유와 메탈라스 횡구속을 병행한 경우는 폭열방지 뿐만 아니라 잔존내력의 향상에도 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

특히 이와 같은 폭열문제와 관련하여 유념해야 할 사항은 콘크리트용 골재의 주암종이 일본의 경우는 안산암으로 내화성이 강한 골재가 주로 이용되는 반면 우리나라의 경우는 화강암이 주암종으로 〈그림-5〉와 같이 내화성으로도 불리한 골재임에 유념하여 고성능 콘크리트의 폭열방지 및 내화성능 향상방안에 대하여 역점을 두어야만 할 것이다.



〈그림-3〉 PP섬유 및 메탈라스 횡구속에 의한 폭열방지 모식도



〈그림-5〉 석재의 내화강도

5. 결 언

화재시 콘크리트 구조물의 내화성 향상 및 폭발방지와 관련하여 이론적 고찰과 PP섬유 혼입 및 메탈라스 횡구속에 의한 고성능 콘크리트의 폭발방지 대책을 소개하였다.

그러나, 현재로는 PP섬유를 혼입한 고성능 콘크리트의 폭발방지 및 메탈라스 횡구속에 의한 내화성 향상에 관한 연구가 단순히 초기단계로서 이와 같은 신기술을 실용화하기 위하여는 더욱 구체적인 폭발 메카니즘, 발생조건 및 실용화 기술 등 다양한 측면의 검토가 계속되어져야만 효과적인 활용이 가능할 것으로 사료된다. ▲

시사 용어 해설

▶ 지주회사(持株會社)

지주회사란 다른 회사 주식 소유를 목적으로 설립된 회사를 말한다. 그러나 독점규제법상 규제되는 지주회사는 '주식 소유를 통하여 국내 회사의 사업을 지배하는 것을 주된 사업으로 하는 회사'를 말한다. 여기서 '다른 회사'란 자회사(종속회사)를 뜻한다. 그리고 자회사는 국내 회사여야 한다. 해외사업 투자를 목적으로 외국 회사 주식을 보유하는 경우는 지주회사 규제 대상이 되지 않는다. 또 회사의 지배목적이 아니고 주식투자를 목적으로 주식을 소유하는 것을 주된 사업으로 하는 투자회사는 지주회사가 아니다. 지주회사에는 두가지 종류가 있다. 지주회사는 그 자신이 다른 본업을 영위하고 있는지 여부에 따라 순수지주회사와 사업지주회사로 구분된다. 순수지주회사는 다른 본업을 행하지 않고 오로지 다른 회사의 사업활동을 지배하는 것만을 사업목적으로 하는 지주회사이고 사업지주회사는 스스로 생산·판매 등 고유사업(본업)을 영위하면서 주식 소유를 통해 다른 회사를 지배하고 있는 회사를 말한다. 따라서 독점규제법상 규제되는 지주회사는 다른 회사의 사업을 지배하는 것을 '주된 사업'으로 하는 회사 즉 순수지주회사에 해당하고, 본업을 영위하면서 부수적으로 다른 회사를 지배하는 사업지주회사는 규제 대상이 되지 않는다. 지주회사는 소규모 자본으로 다수의 대기업 지배권을 확보할 수 있는 경영지배권 창출의 레버리지 효과를 갖고 있기 때문에 기업 규모 대형화, 사업 다각화, 경영조직 복잡화 등 현대적 기업의 성장과정에서 많이 활용되어 왔다.