고성능 콘크리트의 폭열 방지 및 내화 성능 향상 기술

- PP 섬유0.1% 혼입한RC 기둥과메탈라스횡구속의병용이효과적 -

건축 구조물은 화재시 인명 안전과 재산 보호라는측면에서일정시간동안내화성능을 확보해야 한다. 따라서, 우리나라「건축법」에서는공공시설물및공동주택등의 주요 구조부를 내화 구조로 시공하도록 규정하고있는데, 특히최근과같이건축물이 고층화할수록 화재시 안전 대책의 마련은 더욱중요하다.

인류가 개발한 많은 재료 중 콘크리트는 비강도(강도/비중), 경제성 지수(강도/단가) 등이 우수하고, 특히 내화성이 우수함에 따라널리사용되고있는건설재료이다. 그러나, 최근에는일반강도와달리고강도등고성능 콘크리트의 활용이 증가됨에 따라, 조직치밀화에따른화재시폭열발생및내화성능 저하가 문제시되고 있지만, 이에 대한 뚜렷한내화대책은아직미미한실정이다.

현재 국내의 방안으로는 콘크리트의 폭열방지및내화성능향상을목적으로폴리프로필렌 섬유(이하 PP 섬유)와 메탈라스 횡구속에의한내화성능 향상에대한연구가 진행되어오고 있으나, 실구조체를 대상으로 장시간가열에의한 검토는미흡한실정이다.

폭열 방지 대책에 대한 이론적 고찰

낮은온도에서점진적으로가열되어고온에 이르는 콘크리트의 내화성과 관련하여 내화성을 확보하기 위한 기존에 알려진 방안으로는 ① 내화성이 작은철근을 보호하기 위하여 피복 두께를 충분히 하는 것, ② 내화성이높은골재를사용하는것, ③부재 표면을 회반죽 등의 단열재로 보호하는 것, ④피복 부재가 박리되는것을방지하기 위하여메탈라스등을사용하는것등이있다.

그러나, 콘크리트의폭열은내부수증기압이주원인으로, 고강도 · 고성능콘크리트일수록 내부 조직이 치밀하여 폭열이 발생하기 쉬운 것으로 알려지고 있어 내화성과는다른특성을나타내고있다. 화재시고성능콘크리트의폭열방지방안으로는①콘크리트의온도상승을억제하는방법으로서 내화피복이나내화도료를적용하는것, ② 빠르게내부수분을이동시키는방법, ③콘크리트의비산을억제하는방법으로서강판피복이나 메탈라스에 의한 비산 방지 등을 들수있다. 단, 이들 방법은콘크리트 자체가폭열을방지하는것이아니라외부 조건에의한폭열방지방안이다. 또한, 내화피복이나내화도료의적용은부재단면을크게 하고, 경제적으로도현실적이지 못하며, 강판피복이나메탈라스의사용은시공성의 확보와경제성의문제가있다.

따라서, 가장 효율적인 폭열 방지 방안은 콘크리트내부의수분을빠르게이동시켜콘크리트자체의내폭열성을높이는방안이다.

콘크리트 강제 건조 방법

Ø10×20cm 공시체를 60℃ 건조로에서 강제 건조하여 함수율을 3.5% 이하로 하면 폭열을방지할수 있는것으로보고되고있다. 그러나, 실제 모의 부재 실험 결과에서는 60℃, 30% R.H. 조건하에서강제 건조하여함수율을 3.1%로조정한RC 기둥에서도자연건조한경우와같은폭열이발생하여강제건조에의한폭열방지를확인할수 없었다. 이는실제모의부재가고강도콘크리트 중의 잉여수를 완전히 제거하는 것이 곤란한점과콘크리트중의수분이외의요인이폭열발생에영향을준것으로보인다.

원심 성형 방법

원심 성형 프리캐스트 콘크리트 형틀(이하 PCF라함)은형틀로서뿐만아니라, 구조체콘크리트의일부로서적용할수있기때문에 PCF에 사용하는 콘크리트는 충전 콘크리트와 같은 고강도 콘크리트를 사용할 필요가있다.

압축 강도 70MPa의 고강도 콘크리트에 원심력을작용시킴으로써원심성형에의한 PCF를제작하고, PCF를사용한RC 기둥에 표준가열곡선으로실시한내화실험결과에서 폭열 발생이 대부분 발견되지 않았으나, 진동 다짐으로성형한 PCF에서는일반 고강도콘크리트의RC 기둥과같은폭열을 일으켰다.

이는 PCF 성형시 원심력에 의해 콘크리트 중의 잉여수가 방출되었기 때문에 수증기압에 의한 폭열이 억제된것으로보인다. 따라서, 원심성형에의한폭열방지효과는 진동 다짐과 비교하여 우수하게 나타남을 알수있다.

PP 섬유의 혼입

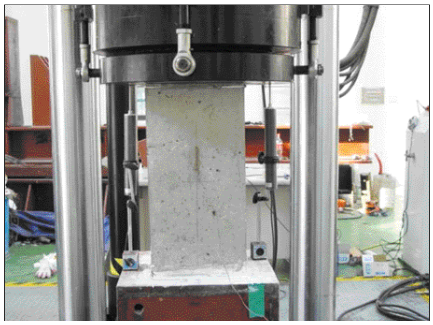
PP 섬유를 콘크리트의 체적에 대하여 0.15% 혼입한 Ø10×20cm 원주형 공시체

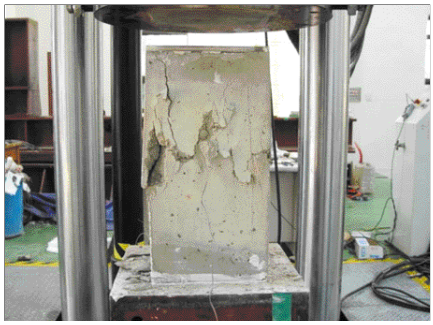
와PP 섬유를혼입하지않은공시체를대상으로 화재를 상정하여 가열 실험(가열온도 750℃)을실시한후의폭열모습을보면 PP 섬유를 혼입하지 않은 공시체는 3개 모두 폭열하여 공시체 형상을 알 수 없었으나, PP 섬유를혼입한공시체는폭열이발생하지않고공시체형상을그대로유지하고있는것이보고되고있다.

또한, 콘크리트의압축강도에미치는PP 섬유의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있고, 강도특성이외에길이변화등의내구특성도무혼입의경우와큰차이가없는것이보고되고 있어 PP 섬유를혼입한콘크리트의 실용상문제는없는것으로판단된다.

폭열 방지 및 내화 성능 향상 연구

현재국내에서는폭열방지및내화성능 향상에 대한특별한대책이없는것이현실이다. 단, 내화구조의선진국인일본에서는 PP 섬유를혼입하여 콘크리트의 폭열을 방지하고 있는데, 국내의 경우에는 청주대학교와두산산업개발이고성능콘크리트의내화대책에대한대안으로서PP 섬유를혼입하여 폭열을 방지하고, 메탈라스로 횡구속하여 잔존 내력을 향상시키는 공법을 연구하고있다.





고성능콘크리트의 비가력 mock-up 실험모습(모의부재 압축강도측정모습).

mock-up 실험

본 실험에서는 현재 실무에서 적용되고 있는고성능RC 기둥인플레인과가력실험에서내화성능이입증된PP 섬유혼입, PP 섬유와 메탈라스의 횡구속의 병용 및 마감재로내화 PC판을부착한실제기둥부재를 대상으로3시간재하가열실험을실시하여 실제 구조체 조건에서의 화재시 고성능 콘크리트구조물의폭열및내화성능을검토하였다.

내화실험은 한국건설기술연구원방내화실험동의 기둥 가열로 내에 수직으로 배치하여 놓고, 최대 설계 축하중의 50%인 93.5톤재하한후같이KS F 2257-1에서 규정하는표준가열곡선으로3시간가열을 실시한 후 RC 기둥 부재의 폭열 성상을 관찰하였다. 이때, RC 기둥부재의중심부및 표면에 K타입 열전대를 매설한 후 데이터로거를 이용하여 내부 온도 이력을 측정하였다.

RC 기둥의폭열 성상

다음 쪽의 사진은 마감이 없는 플레인과 내화 PC판으로마감한실제 기둥부재, PP 섬유를 0.1% 혼입한 실기둥 부재 및 PP 섬유 0.1% 혼입과메탈라스 횡구속을 병용한 실제기둥부재를대상으로재하 가열실험을실시한후의폭열모습을나타낸것이다.

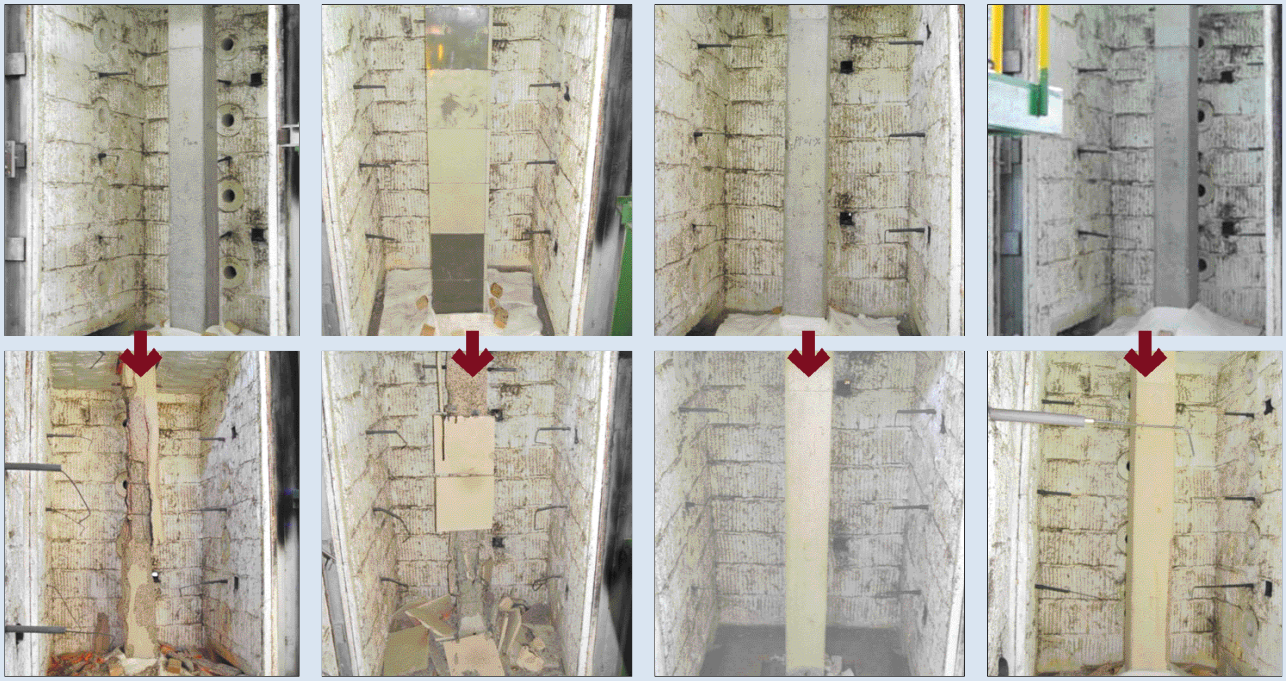
먼저, 플레인은심한파괴폭열로철근이 노출되었고, 이후 철근이 고온을 받음으로써 구조내력이저하하여 재하가열실험 2시간 만에 주근이 좌굴되어 붕괴되었으며, 내화 PC판은플레인과유사한경향으로파괴 폭열이 발생하였으나, 재하가열 실험 1시간 40분으로 플레인보다 오히려 빠른 시간에 붕괴되었다. 이는 내화 PC판이 재하가열 실험 초기 내화 PC판에 의해 고온이 차단되었으나, 계속적인 고온에 의해 고정철물이기능을상실하여내화 PC판이탈락함으로써갑작스런고온이콘크리트표면에 접하면서더욱심한파괴폭열과 함께철근이 노출되어 플레인보다 다소 빠른 시간에 붕괴된것으로보인다.

한편, PP 섬유를0.1% 혼입한RC 기둥과 메탈라스횡구속을병용한경우는효과적으로폭열이방지되어기둥부재의 형상을그대로유지하고, 재하가열 3시간의내화성

폭열 방지 및 내화 성능 향상 연구 진행 사항

구 분	연 구 내 용
1999. 12	PP 섬유를이용한고성능모르타르의폭열방지특성
2000. 10	PP 섬유를이용한고성능콘크리트의폭열방지특성 - 물시멘트비변화 - PP 섬유혼입률변화 - 골재변화 - 혼화재종류및치환율변화
2001. 1	PP 섬유를이용한 RC기둥부재의폭열방지특성
2002. 5	PP 섬유및횡구속변화에따른내화성능향상방안
2003. 5	PP 섬유및횡구속재보강에의한폭열방지및내화성능향상방안
2004. 8	PP 섬유및메탈라스를이용한고성능콘크리트의비가력mock-up 실험
2004. 9	PP 섬유및메탈라스를이용한고성능콘크리트의가력mock-up 실험
2004. 10	현장적용(부산두산We've 포세이돈현장)
2005. 4	건설신기술제 454호지정

가력 Mock-up 내화시험 전후 모습



플레인 내화 PC판 PP 섬유 PP 섬유+메탈라스

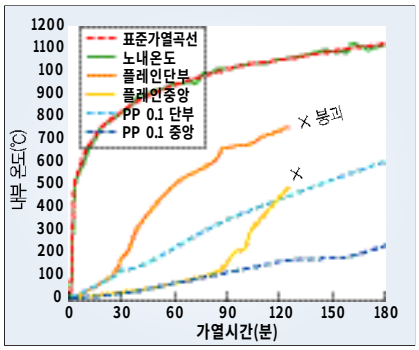
능을만족하는것으로나타났다.

RC 기둥의내부 온도 이력

아래그래프는플레인과PP 섬유를0.1% 혼입한재하가열기둥부재에대한내부온도이력을나타낸것이다.

먼저, 기둥가열로내부온도는표준가열곡선을 만족하는 온도 이력으로 나타났고, 마감이 없는플레인기둥의 온도이력은피복두께 40mm의띠철근위치에 매설한단부의 경우 가열 시간 30분 이후, 중앙 부분은 90분 이후부터 온도가 급격히 상승하였는데, 이는폭열에의해피복콘크리트가탈락한것에기인하여 단부및 중앙부의 온도가급격히상승한것으로판단된다. 또한, 플레인은 계속적인 폭열 발생으로 철근이 노출되어가열시간 60분이후부터강재의허용 온도인 500℃를 초과하였고, 이후 계속적인 온도 상승으로 구조 내력이 상실되어 120분만에플레인기둥부재가붕괴되었다.

플레인및PP 섬유를0.1% 혼입RC 기둥부재의 재하가열시내부온도이력



한편, PP 섬유를0.1% 혼입한RC 기둥은 PP 섬유에 의한 폭열 방지 효과로 단부 및 중앙부모두가열로내온도상승에따라비례적으로증가하였고, 단부의경우가열 시간 150분부터강재의허용온도를초과하였으나, 3시간 내화는 만족하였다. 이때, 3시간내화실험후의단부최고온도는 590℃, 중앙부최고온도는220℃로나타났다.

고성능 콘크리트 내화 성능 향상에효과적

본고에서는 향후 초고층 건축물에 주로 사용될 고성능 콘크리트의 화재시 폭열 방지 및 내화 성능 향상에 대한 대처 방안의 하나로 mock-up 실험을중심으로 소개하였다.

선진국인일본의경우에는PP 섬유만으로도 폭열을 방지하고 있으나, 이는 콘크리트의 주재료인 골재가 불에 강한 안산암인 경우로, 국내의 불에 약한 화강암이 주재료인 경우에는폭열방지뿐만아니라잔존내력을 향상시켜야 한다는 결론을 얻게 되었다. 따라서 본 방법과 같은 메탈라스로 부재를 횡구속하여야만 잔존 내력 향상에 의한 내화 성능을유지할수있을것으로판단된다.

현재까지의 연구 결과를 토대로 앞으로 기술 개발을 지속시켜 나아간다면 향후 고성능콘크리트의폭열방지및내화성능향상을위한효과적인방법으로 활용될 수 있을 것이다.

지석원
두산산업개발기술연구소부장