

폴리아미드섬유를 사용한 초고강도 콘크리트의 내화성능에 관한 연구

A Study on Fire-proof Characteristics of Ultra High Strength Concrete Using Polyamide Fiber

이수철[†] · 전종규* · 전찬기**

Lee, Soo-Choul · Jeon, Joong-Kyu · Jeon, Chan-Ki

Abstract Accordingly architectural structure is getting high-rise and bigger, a use of high strength and high performance concrete has been increased. High performance concrete has cons of explosion in a fire. This explosion in the fire can cause the loss of the sheath on a concrete surface, therefore it effects that increasing a rate of heat transmission between the steel bar and inner concrete. Preventing this explosion of high performance concrete in the fire, many kinds of researches are now in progressing. Typically, researches with using polypropylene-fiber and steel-fiber can prove controlling the explosion, but the reduction of mobility was posed as a problem of workability. Consequently, to solve the problem as mentioned above, concrete cans secure fire resisting capacity through the using of coating liquid, including Ester-lubricant and non-ionic characteristic surfactant. This research has been drawn a ideal condition in compressive strength areas of concrete by an experiment. When applying 13mm of polyamide fiber, proper fiber mixing volume by compressive strength areas of concrete more than 2.5kg in 160MPa. These amount of a compound can control the explosion.

Keywords Ester-lubricant, Non-ionic Characteristic Surfactant, Polyamide Fiber, High Strength Concrete, Fire Resistance

요 지 최근 건축구조물은 초고층화, 대형화에 따라 고강도 및 고성능콘크리트의 사용이 증가하고 있는데, 고성능콘크리트는 화재 시 발생하는 폭발현상에 취약한 문제가 있다. 폭발은 화재 시 콘크리트 피복의 손실을 초래하여 내부콘크리트와 철근의 열전달률(rate of heat transmission)을 높여 콘크리트와 철근의 온도를 상승시키는 작용을 한다. 이러한 고강도콘크리트의 화재 시 폭발을 막기 위하여 여러 가지 연구들이 진행되고 있으며 대표적으로 폴리프로필렌(Polypropylene)섬유, 강섬유를 사용한 연구들이 폭발제어성능을 입증되었으나 유동성 저하에 따른 시공성 문제점이 제기되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 위와 같은 문제를 에스테르계 윤활제 및 비이온성 계면활성제를 포함한 코팅액으로 코팅된 polyamide 섬유를 혼입하여 내화성능을 확보하였으며 강도영역별 최적 조건을 실험을 통하여 도출하였다. 13mm의 polyamide 섬유 적용시 강도영역별 적정 섬유 혼입량은 160MPa는 2.5kg이상에서 폭발제어가 가능할 것으로 사료된다.

핵심어 에스테르계 윤활제, 비이온성 계면활성제, 폴리아미드 섬유, 고강도, 내화

[†] 교신저자 : 정희원, 가천대학교 경원캠퍼스 토목환경공학과 교수
E-mail : lee0104@kyungwon.ac.kr
TEL : (031)750-5498 FAX : (031)750-5344

* 정희원, 코오롱건설 기술연구소 책임연구원

** 정희원, 인천대학교 도시건설공학과 교수

1. 서론

최근 건축구조물은 초고층화, 대형화에 따라 고강도 및 고성능콘크리트의 사용이 증가하고 있는데, 고성능콘크리트는 화재 시 발생하는 폭발현상에 취약한 문제가 있다. 폭발은 화재 시 콘크리트 피복의 손실을 초래하여 내부콘크리트와 철근의 열전달률 (rate of heat transmission)을 높여 콘크리트와 철근의 온도를 상승시키는 작용을 한다(Ali, 2002).

이에 50MPa 이상의 고강도콘크리트 사용시에는 사전에 콘크리트 내부 종 방향 철근의 온도 이력을 통한 내화성능 평가를 실시하는 국가 관리기준이 신설되게 되었다(국토해양부, 2008). 이러한 고강도콘크리트의 화재시 폭발을 방지하기 위하여 여러 가지 연구들이 진행되고 있으며 대표적으로 폴리프로필렌섬유(polypropylene fiber), 강섬유(steel fiber)를 사용한 연구들이 폭발 제어성능을 입증하였다. 그러나 폴리프로필렌섬유 등의 유기섬유는 혼입 시 분산이 제대로 되지 않아 유기섬유 간 뭉침현상(fiber ball)등에 의해 시공성은 물론 내구성이 떨어지는 문제가 있으며 강섬유의 경우는 보관, 시공 시 부식의 우려가 있고, 또한 강섬유의 큰 비중으로 인하여 생산 및 운반 시 콘크리트와 분리되는 문제가 발생하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 시공성을 유지하면서 내화성을 향상시킬 수 있는 방법으로 polyamide 섬유를 사용하여 주요 강도 영역별 적정 혼입량 및 폭발특성 등을 검토함으로써, 고성능 RC구조물의 최적 폭발제어방법을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 폴리아미드 섬유

상기 polyamide 섬유는 섬유표면에 에스테르계 윤활제 및 비이온성 계면활성제를 포함하는 코팅액으로 코팅되어 있어 콘크리트 내 분산성과 콘크리트와 결합력이 크게 향상될 수 있다. 이로써 콘크리트의 강도가 저하되는 것을 방지할 수 있게 되는 것이며, 섬유 뭉침 현상을 개선하여 시공성이 저하되는 것을 막을 수 있다. 특히 콘크리트 내에 고르게 분포되는 polyamide 섬유에 의해 콘크리트 내에서의 편중이 없이 증기압을 전체적으로 감소시키고 섬유의 직경이 23 μm 이므로 보편적으로 사용되는 polypropylene 섬유의 직경(40 μm)보다 작아 동일 사용량 사용시 보다 많은 개체수가 적용되어 내화성 측면에서 그 효과가 증대될 수 있다.

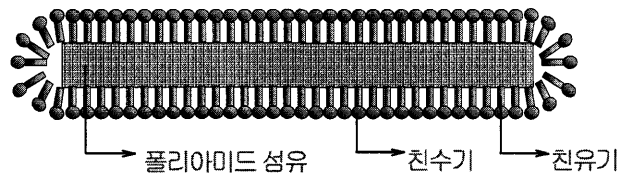


Fig. 1. 폴리아미드 섬유의 형상

2.2 폭발 메커니즘

화재시 발생하는 폭발현상의 원인은 급격한 고온, 높은 함수율 및 낮은 물시멘트로 인하여 생긴다고 많은 연구자들이 연구하여 발표한바 있다. 현재까지 폭발의 원인으로서 제기될 수 있는 이론으로는 열응력설, 수증기압설, 열응력과수증기압의 복합작용 등으로 종합 할 수 있다. 폭발 방지 대책에는 콘크리트 자체의 내화성을 향상 시키는 방법, 내화피복에 의한 부재의 온도상승을 억제하는 방법, 폭발한 콘크리트 박편의 비산을 방지하는 방법등이 제시되고 있다. 본 연구는 내화성을 향상시키는 방법중 수증기압설의 이론의 유기섬유 혼입으로 화재시 고열을 받는 콘크리트가 콘크리트 내부에 포함된 섬유가 녹아 네트워크 형성을 하여 콘크리트 조직의 내부 수증기가 밖으로 빠져나가는 것을 유도하여 폭발을 방지하고자 하였다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 개요

본 연구는 압축강도 160MPa에 대하여 polyamide 섬유, polypropylene 섬유의 길이별(6~13mm), 혼입량별(0.00~2.50%) 비교평가를 통하여 최적 조건을 산출하고자 하였으며 실험계획은 Table 1과 같다.

목표 슬럼프 플로는 작업성을 고려하여 700±100mm으로 하였다. 공기량은 3.5%이하로 하였으며, 목표 품질 미달 시 혼화제 사용량을 조정하여 유동성을 확보코자 하였다. 굳지 않은 콘크리트와 경화 콘크리트의 실험사항은 Table 1, 배합사항은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. 실험 계획

실험 변수	구 분		실 험 수 준	
	설계 강도(MPa)		160	
	섬 유	종 류	2	polyamide (PA), polypropylene(PP)
길이(mm)		2	6, 13	
혼입량(kg/m ³)		4	0.0, 1.5, 2.0, 2.5	
실험 항목	굳지 않은 콘크리트		슬럼프 플로우, 공기량	
	경화 콘크리트		압축강도(재령 3, 7, 28일) 내화 시험	

Table 2. 배합재료량

규 격	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					
			W	B	S	G	AD	Fiber
10-160-700	15.0	48.5	155	1033	622	700	23.76~36.16	0.0~2.5

3.2 사용 재료

본 실험에 사용한 시멘트는 S사의 고강도용 혼합시멘트를 사용하였고, 잔골재는 사용 골재의 강도를 고려하여 안산암계 잔골재와 굵은 골재는 10mm 백운석 골재를 사용하였으며 혼화제는 M사의 폴리카복산계를, polyamide 섬유는 K사의 제품을, PP섬유는 S사의 단섬유를 사용하여 비교실험을 하여 각 재료의 물리적 성질을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. 재료의 물리적 성질

재 료	물리적 성질	
	비중(g/cm ³)	기타 특성
결합재	2.98	분말도(㎎/g) : 8,550
굵은 골재(10mm)	2.70	조립율 : 5.5
부순 잔골재	2.60	조립율 : 3.0
화학 혼화제	1.05	폴리카복산계
섬유	폴리아미드	인장 강도 : 594 MPa
	폴리프로필렌	인장 강도 : 450 MPa

3.3 실험 방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 이축믹서를 사용하였으며, 실험 원재료 및 섬유를 일괄투입 후 30초간 건비빔 후 300초의 혼합시간을 주어 충분히 혼합하였다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프플로우는 KS F 2594에 의거 최대 및 그와 직교하는 플로 지름의 평균값을 기록하였으며 공기량은 KS F 2421의 공기실 압력법에 의거 측정하였다. 경화 콘크리트의 실험으로 내화시험전후의 압축강도는 KS F 2405에 따라 300t 만능시험기(UTM)를 사용하여 매초 0.15~0.35MPa의 재하속도로 압축강도를 측정하였다.

내화시험은 $\Phi 100 \times 200 \text{mm}$ 시험체를 제작하여 비재하 내화시험 가열로(한국방재시험연구원, 이천소재) 내에 수직으로 배치한 후 KS F 2257-1에서 규정한 표준온도가열곡선으로 3시간 가열을 실시하였다.

1차 내화시험(공시체대상)후 폭열여부를 육안으로 확인하여 강도영역별 최적의 섬유조건을 결정하고 RC기둥(크기:500x500x1,500mm) 모의부재를 제작하여 최종 성능평가를 하였다. 시험체 제작은 국토해양부 고시, 고강도콘크리트 기둥,보의 내화성능 관리기준에 준하여 제작하였고, 주철근의 평균온도를 측정하기 위해 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 4개의 K-Type열전대를 매립 하였으며, 실험체의 정면도 및 단면도는 Fig.2, 3과 같다.

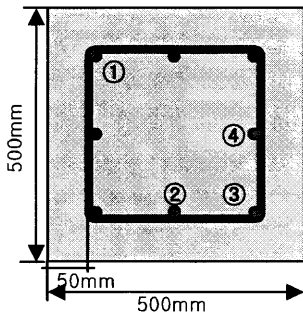


Fig. 2. Elevation of RC columns(mm)

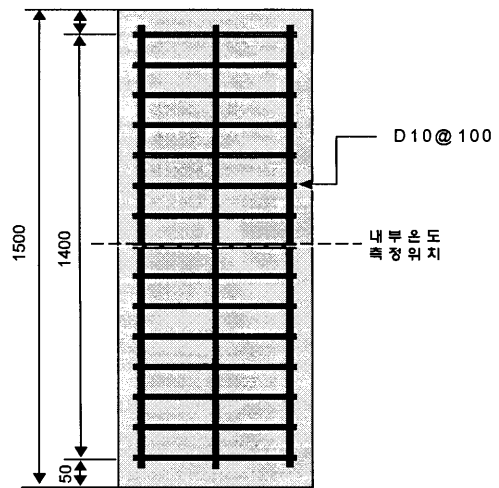


Fig. 3. Cross-section of RC columns(mm)

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 기초 특성

4.1.1 굳지 않은 콘크리트

1) 슬럼프 플로

고강도콘크리트의 유동성 평가 중 대표적 항목인 슬럼프 플로는 섬유의 길이가 길수록, 혼입량이 증가 할수록 감소하는 경향을 보였으며 혼화제 사용량을 추가하여 동일 유동성을 확보하고자 하였다.

또한 PP섬유 혼입 시 현저한 유동성 감소를 보였는데 이는 PP섬유 혼입에 따른 섬유의 뭉침 현상으로 유동성이 저하한 것으로 사료된다.

* PA-6-1.5 : PA(폴리아미드 섬유), PP(폴리프로필렌 섬유) - 6,13(섬유 길이(mm)) - 1.5, 2.0, 2.5(섬유 혼입량)

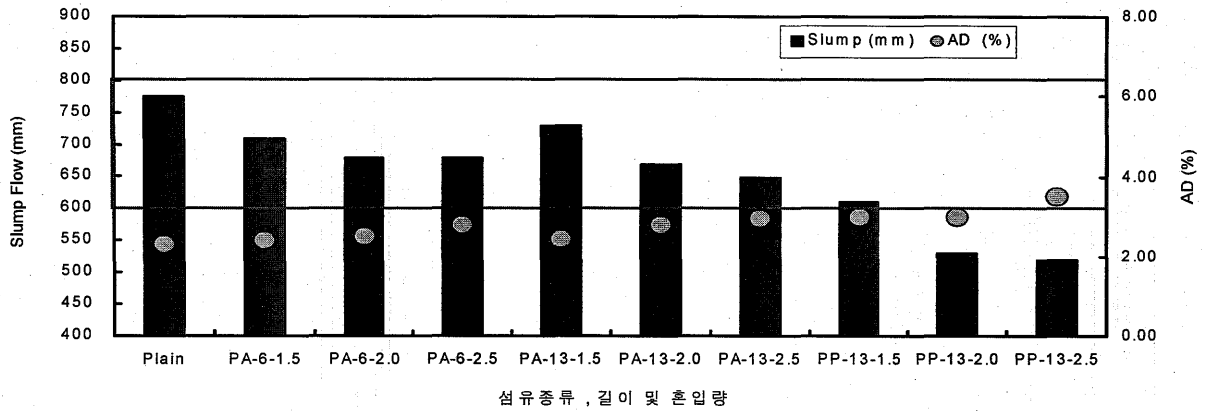


Fig. 4. 슬럼프 플로 시험결과

2) 공기량

고강도콘크리트의 특성상 AD제에 첨가된 AE제량이 미량 투입으로 인해 전 수준 2.1~2.5% 범위의 결과치를 보였다.

4.1.2 경화 콘크리트

재령별 압축강도는 Fig. 5에 나타낸바와 같이 섬유 혼입량일 증가 할수록, 섬유길이 가 길수록 감소하는 경향을 나타내었다. 폴리아미드 13mm, 2.5kg 혼입한 실험체, PP섬유 13mm, 2.5kg 혼입한 실험체는 plain대비 약 7~15% 감소하였다. 이는 콘크리트 내부조직에 과다한 섬유가 콘크리트 경화시 수화반응 및 조직결합력에 영향을 미쳐 강도발현이 저조한 것으로 판단된다. 과다한 섬유 혼입량은 유동성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 압축강도 발현에도 영향을 끼치므로 배합설계시 주의가 필요한 것으로 사료된다.

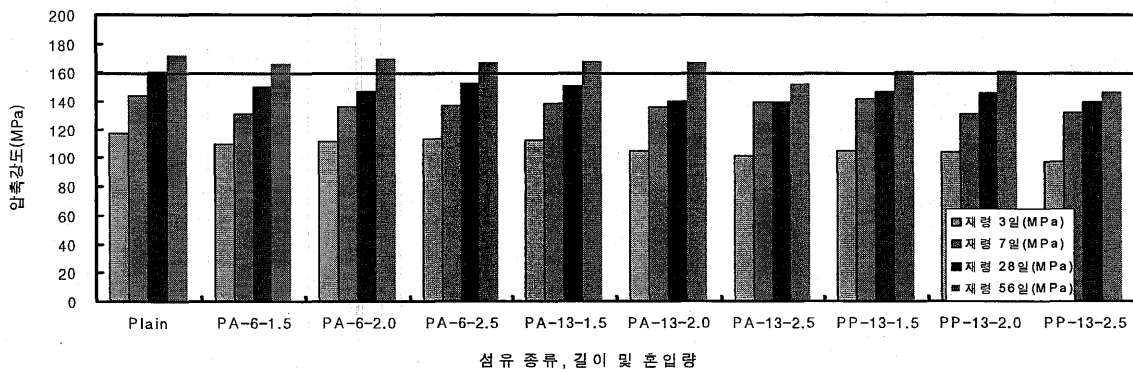


Fig. 5. 압축강도 시험 결과

4.2 열적 특성

4.2.1 질량손실률

Fig 6는 3시간 내화시험 후 각 공시체의 폭렬 모습을 나타낸 것이다.

고강도콘크리트의 내화특성을 확인하기 위해 질량손실률을 확인해 본 결과 plain, polyamide 섬유 6mm, 2.0kg 이하의 경우는 폭렬이 발생하여 질량손실률이 약50%이상 발생하였고, 그 외 수준은 약 20%의 질량손실률을 보였다.

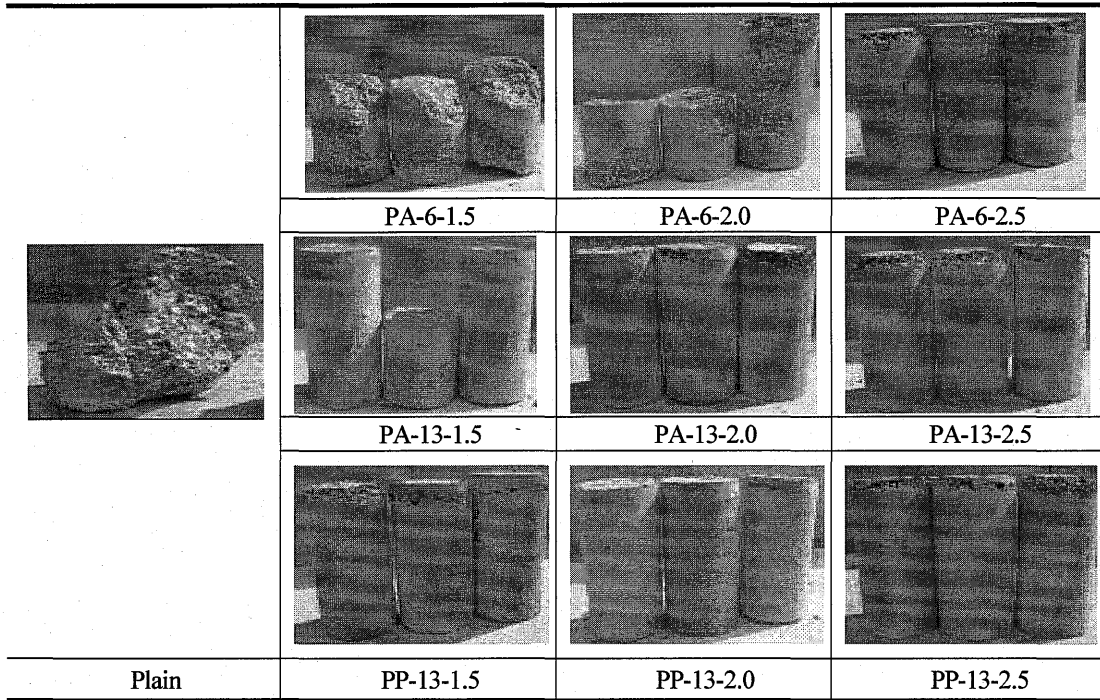


Fig. 6. 내화시험 후 공시체 형상

4.2.2 내부 온도

기초특성 및 1차 내화성능실험을 통하여 강도 영역별 최적의 조건을 산출한 결과는 Table 5와 같다. 섬유종류 선정 결과는 polyamide 섬유, PP섬유 모두 공시체 평가 시 동등수준의 내화성능을 보였으나 유동성 평가에서 우수한 결과를 보인 polyamide 섬유를 선정 하였으며 적정 섬유 길이는 13mm가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 조건으로 제작한 RC 기둥체를 실내에서 약35일간 대기양생 후 비재하 수평가열로에서 3시간 내화실험을 실시하였으며 결과 및 내화실험 후 시험체 사진은 Table 6, Fig 7과 같다.

Table 6. 주철근 온도(°C)

구 분	평균(°C)		최대(°C)		비 고
	1번	2번	1번	2번	
성능 기준	≤538		≤649		3시간 가열
결 과	474	447	524	541	

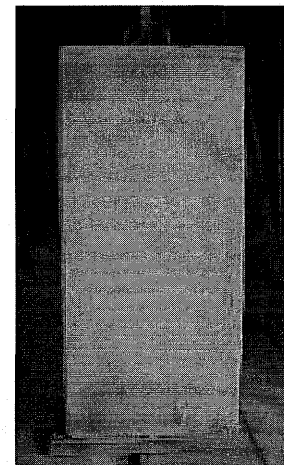


Fig. 7. 내화시험 후 RC 형상(1번)

Table 5. 최적 배합표

규격	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m ³)			
			W	B	G	Fiber
10-160-700*	15.0	48.5	155	1033	700	2.5

*10-160-700 : 10(굵은골재 최대치수) - 160(콘크리트 호칭강도) - 700(슬럼프 플로)

실험결과 내화 인증조건(주철근 온도, 평균:538℃, 최고:649℃이하)을 만족하였으며 이는 사용된 섬유 종류 및 혼입량이 부재내 수증기압을 효과적으로 제어한 것으로 사료된다.

또한 RC 기둥의 내화실험결과 모서리 철근과 중앙 철근의 평균 온도차가 큰 것을 확인할 수 있었으며 전체적으로 500℃ 초·중반에서 온도 제어가 되는 결과를 보였다. 전반적으로 polyamid 섬유에 의해 효과적으로 폭열이 제어되었으며 모서리 주철근의 온도가 높은 이유는 한쪽면에서 열에너지가 유입되는 중앙 주철근에 비해 양쪽면에서 열에너지가 유입되는 모서리 주철근이 온도상승에 더 유리한 조건으로 시험체의 모서리 부분이 화재에 취약함을 알 수 있었다(염광수 등, 2009).

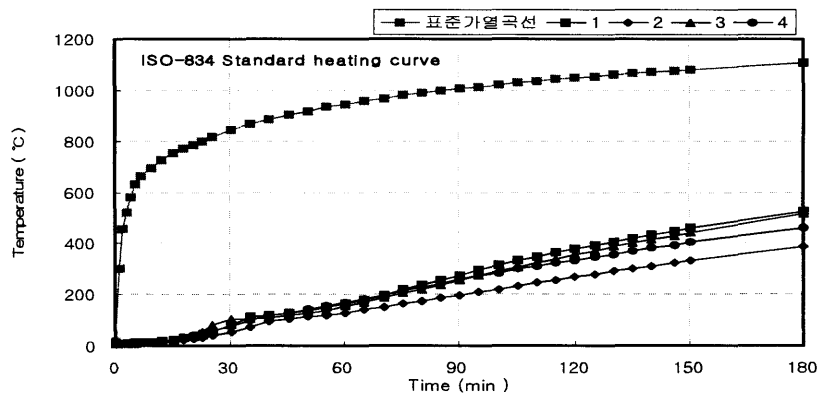


Fig. 8. 온도이력곡선

특히 온도분포에서 특이한 점은 30~50분 사이에 온도상승추세가 순간 둔화되는데 이는 polyamid 섬유를 혼입한 콘크리트의 온도구배가 낮기 때문이고(원종필 등, 2008). 또한 철근 주변으로 이동한 수분과 수분의 막힘현상(moisture clogging)으로 철근의 온도가 일시적으로 상승하지 못하는 현상 때문이다(Chung et al., 2005). Polyamid 섬유가 녹아 생긴 통로로 내부 잉여 수증기가 외부로 방출 되지 못하면 내부공극압력이 콘크리트의 인장강도를 초과하여 폭열이 발생하며, 철근의 온도도 급격하게 올라가게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 시공성을 유지하면서 내화성을 향상 시킬 수 있는 방법을 검토하여 강도영역별 적정 섬유 혼입조건을 제시하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존 PP섬유 혼입시 발생하는 섬유뭉침(fiber ball)현상은 polyamid 섬유 혼입시 발생하지 않았으며 섬유표면에 에스테르계 윤활제 및 비이온성 계면활성제를 포함하는 코팅액으로 코팅되어 있어 plain대비 유동성 손실을 최소화할 수 있었다.
- 2) 섬유 길이가 길어질수록, 혼입량이 증가할수록 콘크리트의 유동성은 저하되는 경향을 보이거나 내화성능은 유리한 결과를 나타냈으며, 최적 섬유조건으로 polyamid 섬유 13mm를 선정하였다.
- 3) 강도 영역별 plain대비 PP섬유, polyamid섬유 혼입시 혼입량이 증가할수록 약 2~20%의 강도 감소를 보였다.
- 4) Polyamid섬유 혼입량은 2.5kg이상에서 폭열제어가 가능할 것으로 사료된다.

5) RC 기둥의 내화실험결과 시험체의 경우는 내화 인증조건(주철근 온도, 평균: 538℃, 최고: 649℃ 이하)을 만족하였다.

참고문헌

- [1] Ali, F. (2002). "Is high strength concrete more susceptible to explosive spalling than normal strength concrete in fire?" *Fire and Materials*, Vol.26, pp.127-130.
- [2] Chung, J.H., Consolazio, G.R. (2005). "Numerical modeling of transport phenomena in reinforced concrete exposed to elevated temperatures." *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp.597-608.
- [3] Lie, T.T Ko, V.K.R. (1996). "Thermal and mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete at elevated temperatures." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.23, pp.511-517.
- [4] 국토해양부 (2008). 고강도콘크리트 기둥,보의 내화성능 관리기준. 고시 제2008-334호.
- [5] 염광수, 전현규, 김홍열 (2009). "섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥의 비재하 내화시험." *콘크리트학회지*, Vol.21, No.4, pp.465-471.
- [6] 원종필, 장창일, 이상우, 김홍열, 김완영 (2008). "하이브리드 섬유보강 고강도콘크리트 기둥부재의 내화성능." *콘크리트학회 논문집*, Vol.20, No.6, pp.827-832.
- [7] 한천구, 양성환, 이병열, 황인성, 전선천 (2002). "폴리프로필렌 섬유의 혼입률 및 부재크기 변화에 따른 고성능 콘크리트의 내화특성." *콘크리트학회지*, Vol.14, No.4, pp.449-456.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 10월 25일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 10월 27일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 11월 10일