

고성능 콘크리트의 폭발 현상과 대책에 관한 연구 동향

Research Trends for the Explosive Spalling of High Performance Concrete



권영진*
Young-Jin Kwon



장재봉**
Jae-Bong Jang



나철성**
Na-Chul Sung



김무한***
Moo-Han Kim

1. 머리말

콘크리트의 화재피해는 구조적 피해와 화학적 피해로 구분할 수 있는데, 먼저 화학적 피해로는 100°C 이상에서 자유공극수가 방출되며, 100 ~ 200°C에서는 물리적 흡착수가 방출되어 이들의 분리·소실에 따라 콘크리트 중의 시멘트수화물이 수축하기 시작하고 300°C 이상이 되면 화학적으로 변질되며 수열 온도 400°C 이상에서는 화학적 결합수가 방출되고 수열 온도 500 ~ 580°C에서는 콘크리트의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 열분해 되어 알칼리성이 소실되는 화학적 피해를 입게 되므로 500°C를 넘으면 가열에 의한 콘크리트의 강도저하가 50%까지 나타나며 철근을 방식하는 능력이 저감되는 등 철근콘크리트 구조물의 내구성이 현저하게 감소된다.¹⁾

또한 구조적 피해로는 철근을 직접적인 고온에 노출시키며 유효단면의 결손을 야기시켜, 화재시 구조물 붕괴의 원인이 되기도 하는 콘크리트의 폭발이 있다(〈사진 1〉 참조). 이러한 콘크리트의 폭발은 지역적인 특성을 배제할 수 없는 골재 등과 같은 사용재료 및 물-결합재비 등의 배합요인에 따라 그 피해 상황이 다르게 나타나는 것으로 알려져 있으며²⁾, 특히 고성능 콘크리트의 경우 일반강도 콘크리트에 비하여 취성적인 특성이 있어 폭발에 더 취약한 것으로 알려져 있다.

최근 국내에서도 고성능 콘크리트의 사용이 보편화 되면서 고성능 콘크리트의 화재 성능에 관한 문제가 제기되고 있어³⁾, 고성능 콘크리트의 안전한 사용을 위해서는 현재 국내에서 유통되고 있는 콘크리트용 재료를 사용한 고성능 콘크리트의 화재 성능 특히 폭발 저감을 위한 다각적인 연구가 필요하다.

2. 국내 콘크리트의 폭발 및 폭발 저감에 관한 최근의 연구 동향

최근 대형화재 사건이 연이어 발생하여 건축물의 화재 안전성에 관한 사회적 관심이 집중되었으며, 특히 2001년 WTC의 붕괴로 고온에서의 콘크리트의 폭발에 관한 관심이 높아져 국외에서 뿐만 아니라 최근 5년간 국내 콘크리트의 폭발 및 폭발 저감에 관한 석·박사학위 논문 현황(표 1)에서 보는 바와 같이 국내에서도 이에 관한 연구가 진행되고 있다. 국내에 유통되는 재료를 사용한 콘크리트 폭발 및 이의 저감에 관한 국내의 연구 데이터는 국내 건설업계에 바로 적용할 수 있는 유용한 자료로서, 콘크리트에 사용된 재료에 많은 영향을 받는 폭발의 특성상 그 활용도가 높아 이러한 연구가 지속적으로 이루어지는 것은 매우 바람직한 현상이라 할 수 있다.

또한 정부출연 연구소 및 각 기업 연구소에서 최근 콘크리트의 폭발에 관한 연구를 진행하고 있으며 그 방법으로서 콘크리트의 배합을 조정하는 방법, 콘크리트 표면에 폭발 저감물질을 보강하는 구조적인 방법⁵⁾ 등이 고려되고 있다.

특히 콘크리트의 배합상의 요인으로서 여러 가지 혼화재료가 다양한 배합 조건에서 실험 되었으며⁶⁾ 폭발 저감에 효과가 있다고 알려진 폴리머 계열의 섬유 혼입을 통한 폭발⁷⁾ 저감 방법도 다각도로 연구 되고 있다.

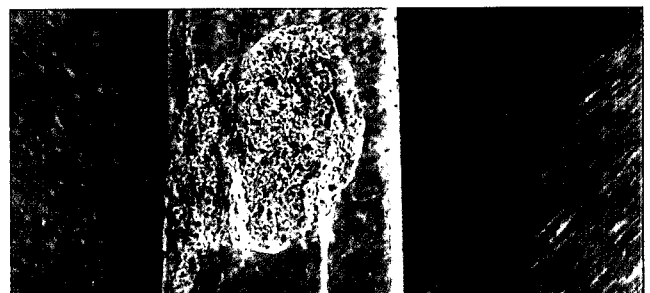


사진 1. 화재를 입은 실구조물의 폭발 예

* 정희원, 호서대학교 소방학과 교수
refrete@lycos.co.kr

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 대학원생

*** 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

표 1. 최근 5년간 국내 콘크리트의 폭발 및 폭발저감에 관한 석·박사학위 논문현황

논문명	저자	대학	년도	비고
고온에 노출된 철근콘크리트 기둥의 거동해석	이지용	서울대	2004	석사
화재피해를 입은 고강도 철근 콘크리트휨부재의 구조성능에 관한 연구	신미경	이화여대	2004	석사
고온의 철근 콘크리트 단순보 거동 및 잔여강도 해석	김형도	서울대	2003	석사
화재 피해를 입은 일반강도 철근콘크리트휨부재의 구조성능에 관한 연구	이소진	이화여대	2003	석사
화재시 고성능 콘크리트의 폭발 방지에 관한 연구	이병열	청주대	2002	박사
화재에 의한 건축물의 피해에 관한 사례연구	유래선	전북대	2001	석사
화재시 고성능 콘크리트의 폭발에 미치는 재료 및 배합 요인의 영향	황인성	청주대	2000	석사

3. 콘크리트의 폭발 특성

3.1 폭발 메커니즘

일반적으로 철근 콘크리트 구조는 콘크리트가 철근을 피복함으로써 화재시 일정시간동안 직접적인 고온으로부터 철근을 보호하게 된다. 그러나 콘크리트는 고온 환경에서 폭발하여 철근을 고온에 직접적으로 노출시키게 된다. 특히 고성능 콘크리트의 경우 폭발에 의한 유효단면의 손실은 열에 의한 화학적 피해보다 크게 작용하는 것으로 나타났다⁶⁾. 따라서 이러한 폭발을 저감시키기 위해서는 먼저 폭발의 메커니즘을 이해할 필요가 있다.

콘크리트는 열전도성이 낮고 비열이 높기 때문에 열에너지의 소산이 용이하지 않다. 때문에 화재시 화열을 받은 콘크리트는 국부적으로 열응력이 집중되며, 콘크리트의 수열온도 상승에 따라 100°C 이상에서는 자유공극수가 방출되어 <그림 1>의 모식도와 같이 콘크리트 내부의 수증기압이 증가하여 표층부에 콘크리트의 인장강도 이상 축적되어 폭음과 함께 박락하게 되는데 이를 폭발이라 하고, 급가열 개시 이후 5~25분 사이에 대부분 발생하기 때문에 이 구간을 콘크리트의 폭발영역 (explosive window)이라 한다.

콘크리트의 폭발은 콘크리트 내부의 수증기압 및 열응력이 주요 원인으로 작용하여 발생하는 것이나, 이외에도 콘크리트의 밀도 및 콘크리트에 사용된 골재의 특성 및 성분 조성 등에도 영향을 받으며, 화재시 콘크리트에 작용하는 하중, 콘크리트가 가열되는 속도 및 온도 분포 등의 조건과 콘크리트의 강도 등에도 영향을 받게 된다.

3.2 폭발에 영향을 미치는 요인

3.2.1 재료 및 배합상의 요인

고성능 콘크리트에서 폭발은 콘크리트의 강도와 밀도는 높을수록, 물-시멘트비와 단위수량은 낮을수록 폭발이 쉽게 발생한다. 혼화재를 사용한 경우에는 일반적으로 콘크리트의 조직이 치밀해지기 때문에 혼화재를 사용하지 않은 경우에 비하여 폭

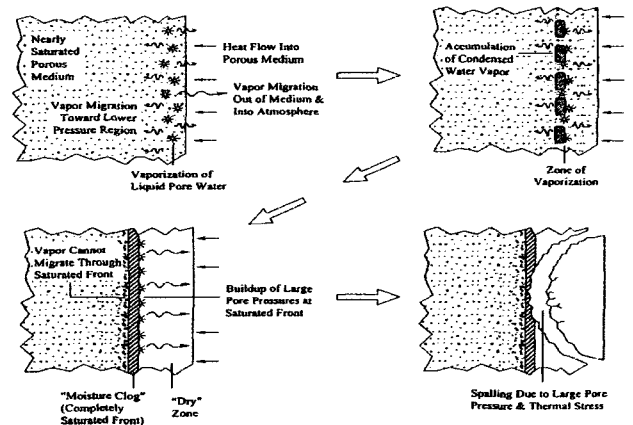


그림 1. 폭발 개념도⁸⁾

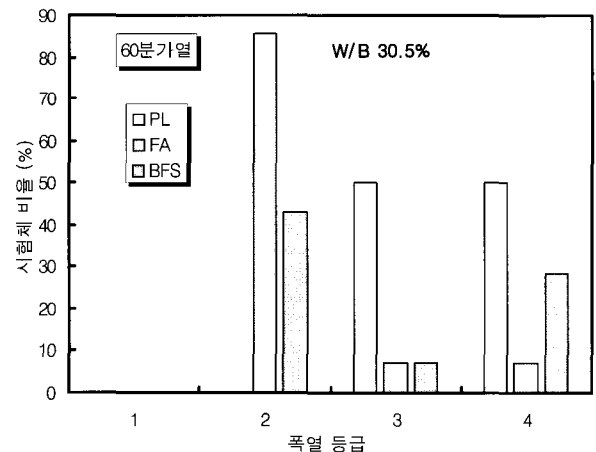


그림 2. 표준 가열곡선에 따라 60분 가열된 혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 폭발⁴⁾

발이 쉽게 발생한다.

그러나 고로슬래그미분말 또는 플라이애쉬와 같은 내열재료를 사용한 콘크리트 시험체를 표준가열곡선에 따라 폭발영역 이상인 60분 가열한 다음 폭발 정도에 따라 폭발이 발생하지 않은 시험체를 1등급으로 하는 4등급으로 분류하여 그 결과를 나타낸다⁴⁾. <그림 2>에서 보는 바와 같이 모든 시험체에서 폭발이 발생한 것으로 나타났으나 혼화재료를 사용하지 않은 PL에 비하여 고로슬래그미분말(BFS) 또는 플라이애쉬(FA)를 사

표 2. 실리카폼 혼입시험체의 내화시험 결과

	SFC-25				SFC-35	
	101				73	
단위용적중량(kg/m ³)	2322				2311	
실험시의 함수율(%)	2.5	2.6	2.7	2.9	2.9	3.4
균열의 유무	○	○	○	○	○	○
팝아웃의 유무	○	○	○	○	×	○
철근노출유무	×	○	○	○	×	×
최대폭렬깊이(mm)	17	24	55	63	-	16
평균폭렬깊이(mm)	7	12	20	41	-	12
폭렬개시시간(min)	5	6	11	9	-	10
폭렬종료시간(min)	13	14	22	27	-	24
폭렬시의 열유속(kw/m ²)	49.0	51.5	62.5	63.3	-	63.9
폭렬시의 노내온도(°C)	608	627	676	642	-	658
주근의 최고온도(°C)	456	511	602	717	365	458
보주근의 최고온도(°C)	564	824	-	954	450	559

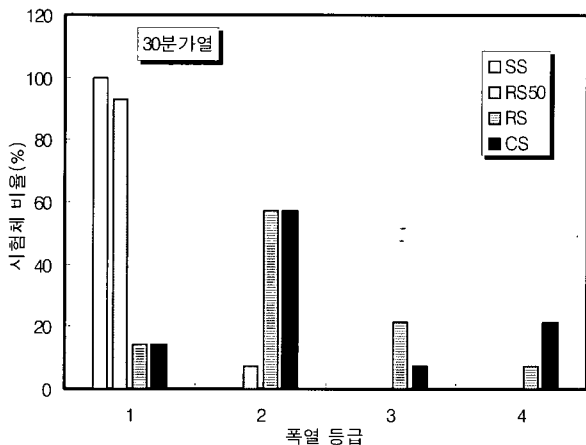


그림 3. 표준가열곡선에 따라 30분 가열된 각종 잔골재를 사용한 콘크리트의 폭렬⁴⁾

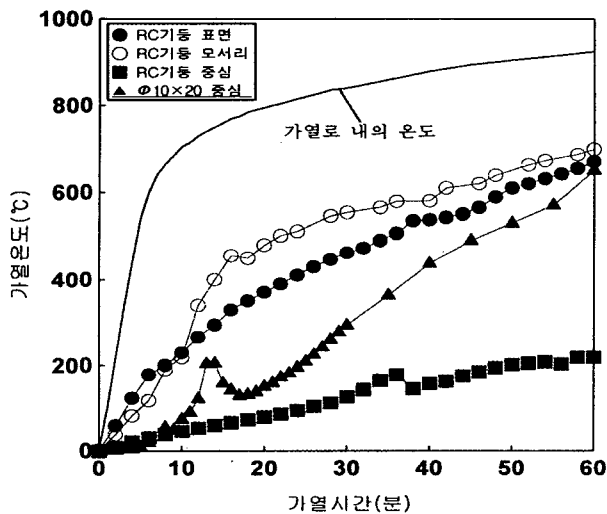


그림 4. 시험체 내부의 온도분포 일례¹⁰⁾

용한 경우에서 양호한 폭렬상태를 보였으며 플라이애쉬를 사용한 경우가 고로슬래그미분말을 사용한 경우에 비하여 좀 더 양호하게 나타났다.

한편 W/B 25%(SFC-25)와 35%(SFC-35)의 실리카폼을 사용한 고성능 콘크리트의 경우에는⁹⁾ <표 2>에 나타낸바와 같이 실험시의 콘크리트 함수율에 관계없이 대부분 폭렬이 발생하여 이에 관한 대책이 필요한 것으로 나타났다.

또한 편마암, 점판암, 등의 골재를 사용한 경우 폭렬이 쉽게 일어나며, 안산암, 현무암 등 반심성암 및 분출암계의 암석은 폭렬에 보다 안정적이며 심성암계의 화강암 및 수성암계의 석회암 등은 매우 취약하다¹⁰⁾. 또한 탄산염계 암석보다 규산질계 골재를 사용했을 때 폭렬이 적게 나타나며¹¹⁾, 경량골재 또는 재생골재만을 사용한 경우 폭렬에 취약한 것으로 나타났다.¹²⁾

잔골재의 경우에는 국내에서 일반적으로 사용되는 바다모래(SS), 재생잔골재(RS) 및 부순모래(CS)와 바다모래와 잔골재를 중량비 1:1로 혼합한 골재(RS50)를 사용하여 W/C 55%의 콘크리트를 제작한 다음 이를 표준가열곡선에 따라 30분 가열한 시험체의 폭렬 상태를 관찰한 실험 결과⁴⁾, <그림 3>과 같이 부순모래 또는 재생잔골재만을 사용한 경우의 시험체에서 많은 수의 시험체가 열악한 상태의 폭렬을 보임으로서, 재생잔골재 또는 부순모래만을 사용한 콘크리트의 경우 바다모래만을 사용한 경우에 비하여 폭렬에 취약하다고 할 수 있다.

3.2.2 기타 요인

표준 가열의 경우 가열개시 5~25분 사이에 대부분의 폭렬이 발생하며, 가열속도가 빠를수록 폭렬이 발생하기 쉬우며 복수면 가열의 경우 폭렬 확률이 증가한다.

또한 콘크리트의 함수율이 높을수록 가열시 수증기압의 발생이 용이해지므로 폭렬이 쉽게 발생하고, 외력이 작용할 경우 폭렬의 발생가능성은 높아진다.

표 3. 실험 계획 및 배합

W/B (%)	섬유 종류	혼입률 (%)	혼화제 혼입량	S/a (%)	단위수량 (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³)			
						C	FA	S	G
30.5	PVA 34	0	0.85 %	43	174	485	86	696	958
	PVA 100	0.05							
	PP	0.1							
		0.3							

시험조건 중 시험체의 크기와 형상에 따라 폭렬의 양상이 다르게 나타나기도 하는데, <그림 4>에 나타난 50×50×150 cm의 RC 기둥 시험체와 공시체 내부의 온도 분포 일례에 나타난 바와 같이 시험조건 중 시험체의 크기와 형상에 따라 온도 분포가 다르게 나타나기 때문에 폭렬 양상 역시 다른 결과를 나타내기도 한다.¹⁰⁾

4. 폭렬 저감 대책

폭렬의 메커니즘을 바탕으로 콘크리트의 폭렬을 저감시킬 수 있는 방법으로는 콘크리트 표면에 내화피복, 내화도료 등을 사용하여 화재시 콘크리트의 온도상승을 일시적으로 저감시킬 수 있는 방법이 있으며, 강판, 섬유시트, 메탈라스 등을 시공하여 구조적으로 콘크리트의 비산을 억제하는 방법, 섬유를 콘크리트에 혼입하여 화재와 같은 고온 하에서 콘크리트 내부의 수증기를 외부로 배출시켜 수증기압을 저감하는 방법 등이 고려되고 있다.

특히 콘크리트 부재의 단면 크기 변화 없이 화재시 콘크리트의 폭렬을 저감할 수 있는 방법으로 콘크리트에 섬유를 혼입하는 방법이 주목받고 있어 섬유 혼입에 관한 최적 혼입비율 및 적정섬유 종류의 선택에 관한 문제가 초미의 관심사로 대두되고 있다.

따라서 본고에서는 다양한 섬유를 다양한 혼입비율로 콘크리트에 혼입하는 방법을 통해 고성능 콘크리트의 폭렬 저감효과를 실험함으로써 고성능 콘크리트의 폭렬을 저감시키는 최적 섬유 혼입률 및 섬유 종류 등을 규명하기 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

4.1 실험계획 및 실험 방법

본 연구의 실험계획 및 배합은 표 3과 같이 고성능 콘크리트에서 가장 양호한 성상을 나타낸 혼화재료인 플라이애쉬를 사용한 배합을 바탕으로, 친수성 섬유인 PVA섬유와 소수성 섬유인 PP섬유를 선정하여 실험을 계획 하였으며, 섬유의 직경은 각각 PVA의 경우 34, 100 μm로 하였고, PP섬유의 경우 40 μm로 설정하여 각각 콘크리트 용적의 0.05, 0.1, 0.3 %를 혼입

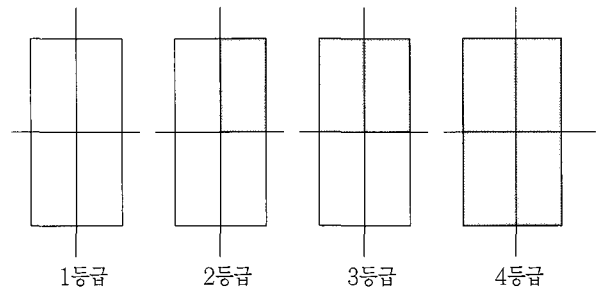


그림 5. 폭렬 등급 분류 모식도

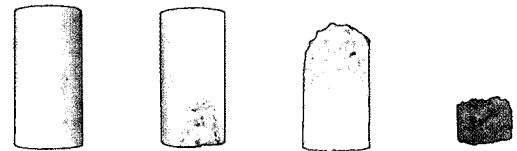


그림 6. 폭렬 등급 분류 일례

표 4. 사용재료의 물리적 성질

종류	물리적 성질
시멘트	1종 보통포틀랜드시멘트 강열 감량 0.97 %, 비중 3.15, 분말도 3,630 cm ² /g
혼화 재료	보령산 플라이애쉬 강열 감량 4.10 %, 비중 2.12, 분말도 2,976 cm ² /g
잔골재	S : 공주산 강모래 최대치수 5 mm, 비중 2.56, 흡수율 1.25 %, 조립률 2.41
굵은 골재	G : 공주산 부순자갈 최대치수 25 mm, 비중 2.68, 흡수율 0.65 %, 조립률 7.47
섬유 종류	PVA 34 : Polyvinyl alcohol Fiber(친수성) 직경 34 μm, 길이 12 mm, 인장강도 880 MPa, 비중 1.3
	PVA 100 : Polyvinyl alcohol Fiber(친수성) 직경 100 μm, 길이 12 mm, 인장강도 880 MPa, 비중 1.3
	PP : Polypropylene Fiber(소수성) 직경 40 μm, 길이 12 mm, 인장강도 350 ~ 770 MPa, 비중 1.3

한 다음 φ10×20 cm 시험체를 제작하여 20±3°C Rh 60 %의 대기중에서 28일간 기건양생한 후 바닥용 내화시험 가열로를 사용하여 표준가열곡선에 따라 30분 가열을 실시하였다. 가열된 공시체는 <그림 5>에서 보는바와 같이 콘크리트 표준시방서상의 피복 두께규정¹³⁾ 및 화재시 외관상의 피해에 따른 화재 등급분류에¹⁾ 근거하여 4등급으로 분류하여 폭렬상태를 검토하였으며 그 분류 일례를 <그림 6>에 나타내었다.

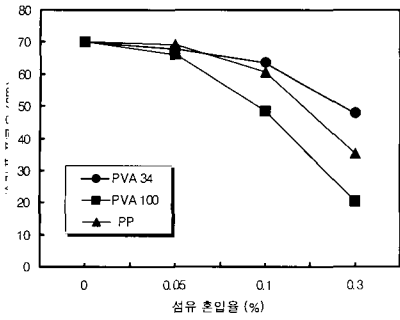


그림 7. 섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로우

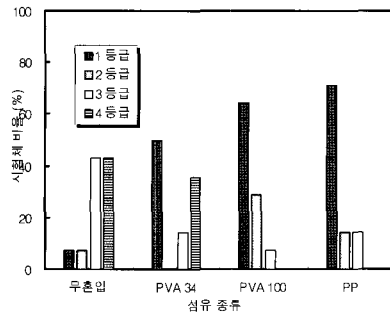


그림 8. 각 섬유를 0.05% 혼입한 시험체의 폭렬성상

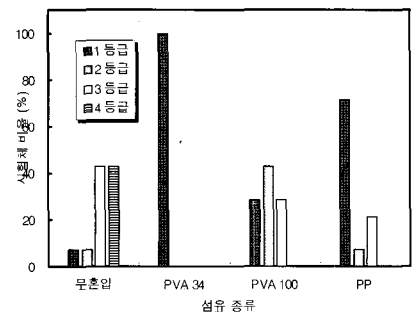


그림 9. 각 섬유를 0.1% 혼입한 시험체의 폭렬성상

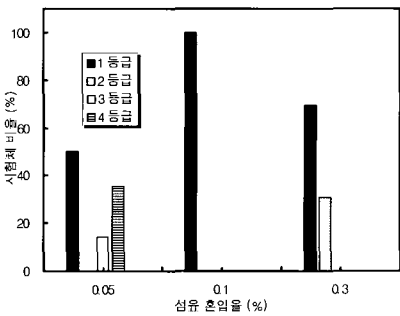


그림 10. PVA 34 μm 섬유를 혼입한 시험체의 폭렬성상

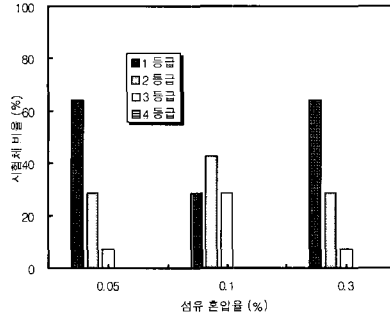


그림 11. PVA 100 μm 섬유를 혼입한 시험체의 폭렬성상

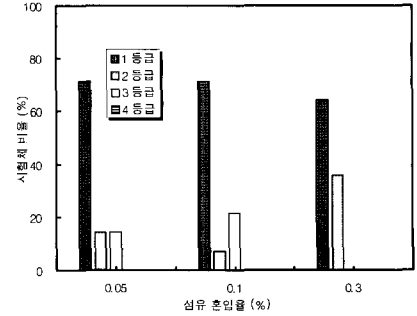


그림 12. PP 40 μm 섬유를 혼입한 시험체의 폭렬성상

4.2 사용재료

본 연구에 사용한 재료의 물리적 성질은 <표 4>에 나타내었으며 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 감수제를 일괄적으로 0.85% 혼입하여 섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로우의 변화를 관찰하였다.

4.3 실험 결과 및 고찰

4.3.1 섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로우

<그림 7>은 섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로우를 나타낸 것으로 섬유를 0.05% 혼입한 경우 섬유 종류에 관계없이 슬럼프 플로우의 저하는 미세하였으며, 0.1% 혼입시에도 PVA 34 μm의 경우 63.5cm PP의 경우 60.5cm를 나타내고 있어 섬유를 혼입하지 않은 경우의 슬럼프 플로우 70cm에 대하여 약 90%의 수준을 나타내고 있다.

4.3.2 섬유 종류에 따른 콘크리트의 폭렬 특성

<그림 8> 및 <그림 9>는 각 섬유를 0.05% 및 0.1% 혼입한 시험체의 섬유 종류에 따른 콘크리트의 폭렬 성상을 나타낸 것으로서 PVA 34 μm를 0.05% 혼입한 경우에서만 4등급 폭렬이 발생하였다. 또한 PVA 100 μm 및 PP 40 μm를 0.05% 혼

입한 경우 폭렬성상이 유사하게 나타났으며 섬유를 0.1% 혼입한 경우에는 PVA 34 μm 및 PP 40 μm를 혼입한 경우의 폭렬성상이 유사하게 나타나 섬유특성상의 친수성 또는 소수성의 수성이 폭렬성상에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 또한 PVA 34 μm 및 PVA 100 μm에 있어서 0.05% 및 0.1% 혼입시에 각각 다른 양상의 폭렬상태를 나타내고 있으며 PVA 34 μm 및 PP 40 μm를 0.1% 혼입한 경우 유사한 폭렬성상을 나타내고 있어 섬유의 직경 및 형상비가 폭렬에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.3.3 섬유 혼입률에 따른 콘크리트의 폭렬특성

<그림 10 ~ 12>는 각 섬유의 혼입률별 폭렬 성상을 나타낸 것으로 섬유를 혼입한 모든 경우에서 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 폭렬 저감 효과가 나타났으며, 섬유를 0.1% 혼입한 경우에는 PVA 34 μm의 경우 폭렬이 발생하지 않았으나 PVA 100 μm를 0.05% 혼입한 경우에 비하여 3등급으로 분류된 시험체가 약 21%, 2등급으로 분류된 시험체가 약 14% 증가하였으며, PP 40 μm를 혼입한 경우에는 0.05% 혼입한 경우에 비하여 3등급으로 분류된 시험체가 약 7% 증가하였으며 1등급 시험체의 비율은 유사하게 나타났다. 섬유를 0.3% 혼입한 경우에는 섬유 종류에 관계없이 유사한 폭렬성상을 나타내었다.

또한 PVA 100 μm 및 PP 40 μm 를 혼입한 경우 0.05% 와 0.3%의 혼입률에 있어서 유사한 폭발성상을 나타내고 있으며, PVA 34 μm 를 혼입한 경우에는 혼입률 0.1%에서 가장 양호한 폭발성상을 나타내고 있다.

그러므로 본 연구의 범위에서 섬유 혼입에 의한 고성능 콘크리트의 폭발저감효과를 위한 섬유의 최적 혼입률은 콘크리트 용적 대비 0.1% 이내의 범위에서 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 소결론


고성능 콘크리트의 폭발저감을 위한 최적 섬유 혼입률 및 섬유 종류 등을 규명하기 위한 기초 자료를 제시하고자 다양한 섬유 종류 및 혼입률에 따른 고성능 콘크리트의 폭발저감 효과에 관한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 섬유 종류에 따른 고성능 콘크리트의 폭발저감 효과는 섬유의 수성보다는 직경 및 형상비에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) PVA 34 μm 를 혼입한 콘크리트의 경우 혼입률 0.1%에서 가장 양호한 폭발저감 효과를 나타내었으며 PVA 100 μm 및 PP 40 μm 를 혼입한 경우는 0.05% 및 0.3%를 혼입한 경우 폭발저감 효과가 보다 양호하게 나타나고 있어 섬유 혼입률 0.1% 범위 내에서 고성능 콘크리트의 폭발저감을 위한 최적의 혼입비율이 도출될 것으로 판단된다.

5. 맺음말

최근 고성능 콘크리트의 폭발과 이의 저감방법에 관한 연구가 사회적 이슈와 맞물려 다각적으로 진행되고 있는 것은 매우 바람직한 현상이다.

특히 고성능 콘크리트의 폭발을 저감시킬 목적으로 섬유를 혼입하는 방법에 관한 연구가 진행되고 있어 본고에서는 국내에 유통되는 재료를 사용하여 고성능 콘크리트를 제작하고, 고성능 콘크리트의 폭발을 저감시키기 위한 최적 섬유 혼입률 및 섬유 종류 등을 규명하기 위한 실험에 대하여 살펴보았다.

이러한 국내의 연구 데이터는 국내 건설업계에 바로 적용할 수 있는 유용한 자료로서, 콘크리트에 사용된 재료에 많은 영향을 받는 폭발의 특성상 그 활용도가 높아 이러한 연구가 일회성에 그치지 않고 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 

참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會, '콘크리트 診斷技術'01(基礎編), 2001.
2. 김무한 외, "고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성", 한국화재·소방학회 제 18권 1호, 2004, pp.31~36.
3. 김무한 외, "화재피해를 입은 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적 연구", 한국화재·소방학회 추계 학술논문발표회 논문집, 2002, pp.230~235.
4. 김무한 외, "잔골재 및 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 폭발성상에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 2003, pp.667~670.
5. 한천구 외, "황구속 방법에 따른 고성능 RC 기둥 콘크리트의 내화특성", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 2004, pp.553~556.
6. Kim, Moo Han, et.al, "An Experimental Study on the Engineering Properties of deteriorated Concrete by Fire Damage," Proceeding of the CTBUH 2004 Seoul Conference, 2004, pp.588~595.
7. Pierre Kalifa, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers from spalling to micro structure," Cement and Concrete Research, 1. Jun. 2001, pp.1487~1499.
8. Y. andrberg, "Spalling phenomena of HPC and OC," Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-strength Concrete, NIST, 1997, pp.69~73.
9. 소양섭 외, "고성능 실리카폼 콘크리트의 압축강도와 휨수율에 따른 폭발특성", 대한건축학회 논문집 통권 191호, 2004, pp.111~117.
10. 이병열, "화재시 고성능 콘크리트의 폭발 방지에 관한 연구", 청주대학교 박사학위 논문, 2001.
11. "Fire Performance of High-Strength Concrete : A Report of the State-of-the-Art", NIST, Dec, 1996.
12. 김무한 외, "화재피해를 입은 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구" 대한건축학회 논문집 통권 195호, 2005, pp.107~114.
13. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서 해설", 2003. 기문당.
14. T. D. Lin, R. I. Zwiers, R. G. Burg, T. T. Lie, and R. J. McGrath, "Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns," Portland Cement Association, PCA R&D Serial Nos. 1870 and 1871, 1992.
15. M. Maruta, M. Yamazaki, and T. Miyashita, "A Study on Shear Behavior of Reingorced Concrete Beams Subject to Long-term Hearting," Nuclear Engineering and Design, No.156, 1995, pp.29~37.