

하이브리드 섬유를 적용한 고강도 내화콘크리트의 단면크기에 따른 내화성능에 관한 실험적 연구

김홍열* · 김형준* · 조범연* · 민병렬* · 안찬솔*
한국건설기술연구원*

An Experimental Study on The Fire Resistance Performance of High Strength Concrete Column mixed Fiber-Cocktail in Standard Fire Condition

Kim, Heung Youl*, Kim, Hyung Jun* · Cho, Bum Yean* ·
Min Byung Youl* · Ahn Chan Sol*
Korea Institute of Construction Technology*

요 약

최근 고강도 콘크리트의 내화성능이 사회적 이슈로 부각되고 국토해양부에서 고강도 콘크리트의 내화성능 관리기준(안)이 고시되면서 국내에서도 고강도 콘크리트의 내화성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 유기질 섬유인 폴리프로필렌 섬유(PP섬유)와 강섬유를 하이브리드한 Fiber Cocktail를 혼입한 고강도 내화콘크리트 개발을 위한 연구를 수행하였다. PP섬유는 160°C의 온도에서 용융되어 콘크리트 내부에 미세한 통로를 형성하여 고강도 콘크리트 부재 내의 수증기압 및 공기압을 효과적으로 배출하여 고강도 콘크리트의 폭발발생을 억제시키는 데 효과적이며, 강섬유는 PP섬유가 용융된 후의 고강도 콘크리트 부재의 균열 발생을 억제하며 외부로부터 침투하는 열기를 차단할 수 있다. 100MPa 고강도 콘크리트의 내화실험을 실시하여 최적단면 조건을 도출하기 위해 철근온도를 분석한 결과, 단면이 커질수록 철근온도는 점차 낮아지는 경향이 나타났으며 600×600mm, 800×800mm 단면에서 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, 이중 경제성을 고려할 경우 600×600mm 단면이 최적단면으로 도출되었다. 또한 도출된 600×600mm 단면에 대해서 철근의 온도를 분석한 결과 PP섬유 1.5kg/m³와 강섬유 40kg/m³를 배합한 Fiber Cocktail이 최적배합비로 나타났다.

1. 서 론

건축물이 초고층화 되어감에 따라 콘크리트는 고강도화 되어가고 있다. 이에 따라 대형 화재 발생 시 초고층 건축물에 적용되는 고강도 콘크리트의 내화성능 또한 사회적 이슈로

부각되고 국토해양부에서 고강도 콘크리트의 내화성능 관리기준(안)이 고시되면서 국내에서도 고강도 콘크리트의 내화성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 섬유보강은 일반적으로 인장강도가 높고 신장률이 큰 섬유를 콘크리트 내에 불규칙하게 분포시켜서 모재와 섬유간의 부착력에 의해 균열 증대를 억제하고 취성적인 콘크리트 특성을 연성적으로 전환시키는 것이 주목적이었다. 그러나 최근에는 섬유가 콘크리트의 폭발발생 전에 용해되어 수증기, 공기, 가스 등을 콘크리트 내부로 배출될 수 있는 미세 통로를 형성하여 고온에서 콘크리트 내부의 열응력 및 공극압을 효과적으로 배출시키는 데 효과적인 것으로 알려지며 콘크리트의 내화성능을 향상시키는 내화보강재로 사용되고 있다. 현재 국내에서의 고강도 콘크리트 내화성능을 향상시키기 위한 연구는 유기질섬유를 혼입한 비폭렬 고강도 콘크리트의 개발이 주를 이루고 있다. 이러한 내화성능 확보기술은 비재하 상태에서의 철근온도(주철근 평균 538℃, 최대 649℃ 이하)를 기준으로 평가되고 있는 현 시점에서는 내화성능을 확보할 수 있으나 일본의 내화성능 판정기준과 같이 재하 가열시험을 통한 구조물의 최대축방향 수축량이나 최대변형량을 기준으로 내화성능을 평가하게 되면 성능판정 기준을 확보하기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유기질 섬유인 폴리프로필렌 섬유(PP섬유)와 강섬유를 하이브리드한 Fiber Cocktail를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 내화성능 확보 위한 연구를 수행하였다. PP섬유는 160℃의 온도에서 용융되어 콘크리트 내부에 미세한 통로를 형성하여 고강도 콘크리트 부재 내의 수증기압 및 공극압을 효과적으로 배출하여 고강도 콘크리트의 폭발발생을 억제시키는 데 효과적이며 강섬유는 PP섬유가 용융된 후의 고강도 콘크리트 부재의 균열 발생을 억제하며 외부로부터 침투하는 열기를 차단할 수 있다.

2. 연구범위 및 실험계획

2.1 실험변수 및 배합설계

본 연구에서는 하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 내화성능 확보를 위한 최적단면 및 최적배합 조건을 도출하기 위하여 Fiber Cocktail 혼입량과 단면 크기별로 내화실험을 실시하였다. 최적단면 조건 도출을 위해 단면크기는 실제 시공조건을 고려하여 최소 400×400mm, 최대 800×800mm의 4가지 변수로 설정하였고, 최적배합 조건 도출을 위해 Fiber Cocktail 혼입량은 최적배합 도출을 위해 선행연구의 결과를 바탕으로 PP섬유 적정 혼입량인 1.5kg/m³과 강섬유의 혼입량을 30kg/m³과 40kg/m³의 2가지 변수로 설정하여 배합설계를 실시하였다. 표 1은 하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 배합표이며, 표 2는 하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트 기둥 실험체 실험변수 및 계획이다.

표 1. 하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 배합설계

규격	W/C (%)	S/a (%)	배합비(kg/m ³)							PP섬유 (kg/m ³)	강섬유 (kg/m ³)
			W	C	S	G	SF	FA	SP		
C-0-0	21.0	41.5	168	680	572	834	120	95	7.5	무 혼입	무 혼입
C-1.5-30										1.5	30
C-1.5-40										1.5	40

표 2. 하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트 기둥 실험체 실험변수 및 계획

실험체명	Fiber Cocktail (kg/m ³)		형상 (B×D×L)	콘크리트	철근
	PP섬유	강섬유			
S1	0	0	400×400×1500mm	● 강도 :100MPa, ● 골재 :규산질계	● 주근 :8-D22 ● 늑근 :D10@300 ● 피복 :40mm
S2	1.5	30			
S3	1.5	40			
S4	0	0	500×500×1500mm		
S5	1.5	30			
S6	1.5	40			
S7	0	0	600×600×1500mm		
S8	1.5	30			
S9	1.5	40			
S10	0	0	800×800×1500mm		
S11	1.5	30			
S12	1.5	40			

2.2 실험체 상세

하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 내화실험을 위한 기둥 실험체는 단면크기 최소 400×400mm, 최대 800×800mm로 하고, 높이 1500mm로 제작하였으며, 철근은 SS400을 원재료로 하여 주근 D22, 늑근 D10으로 그림 1과 같이 배근하였고, 열전대는 주근에 총 4개소를 설치하였다.

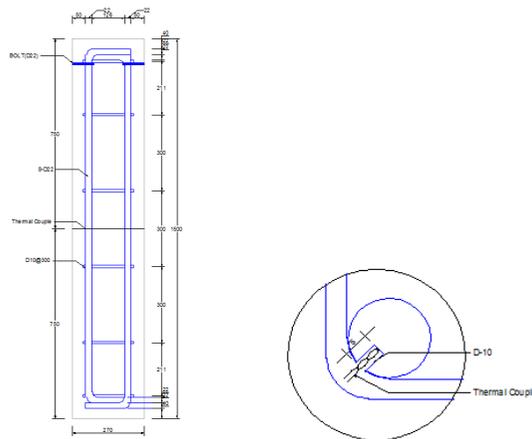


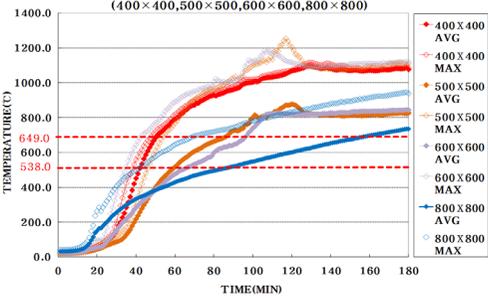
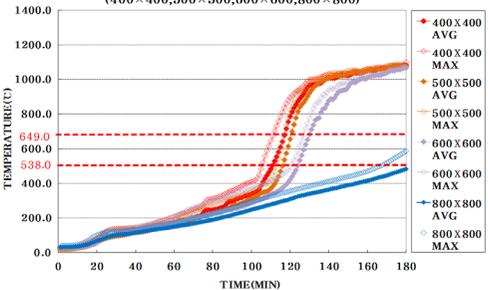
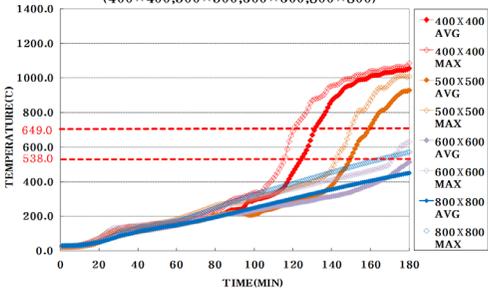
그림 1. 실험체 및 열전대 설치 상세

3. 실험결과

하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 내화성능 확보를 위한 최적단면 및 최적배합 조건을 도출하기 위하여 Fiber Cocktail을 혼합한 100MPa급 고강도 콘크리트에 대하여 비재하 조건에서 3시간 내화실험을 수행하였다. 내화실험은 ISO 834 화재곡선에 따라 부재를 가열하여 철근의 온도를 측정하여 분석하였다.

3.1 최적단면 조건

단면 크기별 실험체의 철근온도를 측정한 결과 하이브리드 섬유를 혼입하지 않은 경우, 그림 2와 같이 단면크기별로 43분에서 60분까지의 내화성을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, PP섬유 1.5kg/m³와 강섬유 30kg/m³과 40kg/m³의 하이브리드 섬유를 혼입한 경우, 그림 3, 4와 같이 단면크기별로 각각 76분에서 125분, 118분에서 180분까지의 내화성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 단면이 커질수록 철근온도는 점차 낮아지는 경향이 나타났으며 600×600mm, 800×800mm 단면에서 내화성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 경제성을 고려할 경우, 600×600mm 단면이 최적단면으로 도출되었다.

섬유배합 설계별 실험체 철근 내부온도 분포	내화성능
<p style="text-align: center;">섬유 무혼입시 단면별 철근온도 (400×400, 500×500, 600×600, 800×800)</p>  <p style="text-align: center;">그림 2. 섬유 무혼입(S1,S4,S7,S10)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● S1(400×400): 43분 :평균온도 538°C 초과 ● S4(500×500): 51분 :최대온도 649°C 초과 ● S7(600×600): 40분 :최대온도 649°C 초과 ● S10(800×800): 60분 :최대온도 649°C 초과
<p style="text-align: center;">PP섬유 1.5kg/m³+강섬유 30kg/m³혼입시 단면별 철근온도 (400×400, 500×500, 600×600, 800×800)</p>  <p style="text-align: center;">그림 3. PP섬유 1.5kg/m³+강섬유 30kg/m³ (S2,S5,S8,S11)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● S2(400×400): 110분 :최대온도 649°C 초과 ● S5(500×500): 116분 :최대온도 649°C 초과 ● S8(600×600): 125분 :평균온도 538°C 초과 ● S11(800×800): 76분 :최대온도 649°C 초과
<p style="text-align: center;">PP섬유 1.5kg/m³+강섬유 40kg/m³혼입시 단면별 철근온도 (400×400, 500×500, 600×600, 800×800)</p>  <p style="text-align: center;">그림 4. PP섬유 1.5kg/m³+강섬유 40kg/m³ (S3,S6,S9,S12)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● S3(400×400): 118분 :최대온도 649°C 초과 ● S6(500×500): 148분 :최대온도 649°C 초과 ● S9(600×600): 180분 :3시간 이상 내화성능 확보 ● S12(800×800): 180분 :3시간 이상 내화성능 확보

3.1 최적배합 조건

최적단면으로 도출된 600×600mm 단면에 대해서 철근의 온도를 분석한 결과, 하이브리드 섬유를 혼입하지 않은 경우 내화성능은 40분을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, PP섬유 1.5kg/m³와 강섬유 30kg/m³과 40kg/m³의 하이브리드 섬유를 혼입한 경우 각각 125분과 180분의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이처럼 강섬유의 혼입량이 많아질수록 철근온도는 낮아지는 경향을 나타냈으며 PP섬유 1.5kg/m³와 강섬유 40kg/m³를 배합한 Fiber Cocktail이 최적배합비로 나타났으며 600×600mm 단면보다 클 경우 3시간 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 표 3은 600×600mm 단면크기의 배합별 철근 온도 측정결과이며, 그림 5는 600×600mm 단면크기의 배합별 철근온도이다.

표 3. 600×600mm 단면크기의 배합별 내화성능

시험체명	섬유배합	538℃ 초과시간	649℃ 초과시간	내화성능
S-7	섬유 무혼입	71분	40분	40분
S-8	PP1.5kg/m ³ +Steel 30kg/m ³	125분	126분	125분
S-9	PP1.5kg/m ³ +Steel 40kg/m ³	180분	180분	180분

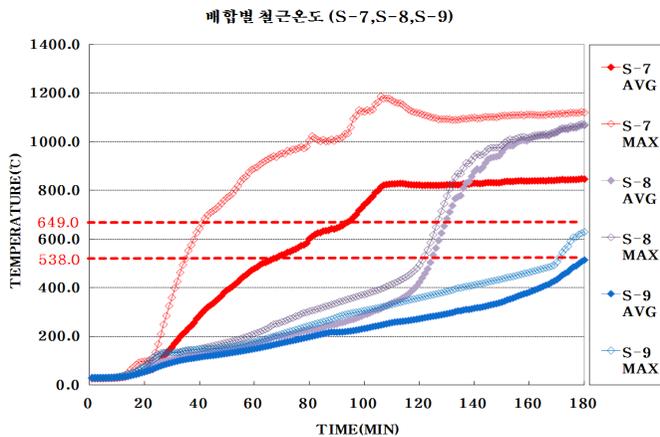


그림 5. 600×600mm 단면크기의 배합별 철근온도(S7,S8,S9)

4. 결 론

하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 내화성능 확보를 위한 최적단면 및 최적배합 조건을 도출하기 위하여 Fiber Cocktail을 혼합한 100MPa급 고강도 콘크리트에 대해서 Fiber Cocktail 혼입량과 단면 크기별로 내화실험을 실시하여 철근의 온도를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트의 내화실험을 실시한 결과, 단면이 커질수록 철근온도는 점차 낮아지는 경향이 나타났으며 PP섬유 1.5kg/m³와 강섬유 40kg/m³를 하이브리드한 섬유를 혼입한 경우 600×600mm, 800×800mm 단면에서 내화성능을

확보할 수 있는 것으로 나타나, 경제성을 고려할 경우 600×600mm 단면이 최적단면으로 도출되었다.

(2) 최적단면으로 도출된 600×600mm 단면에 대해서 배합별 철근의 온도를 분석한 결과, PP섬유 1.5kg/m³와 강섬유 40kg/m³를 배합한 Fiber Cocktail이 최적배합비로 나타났으며 600×600mm 단면보다 클 경우 3시간 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 도출된 최적단면(600×600mm) 및 최적배합(PP섬유 1.5kg/m³, 강섬유 40kg/m³) 조건을 기초로 향후 재하가열실험을 통해 하이브리드 섬유를 혼입한 100MPa급 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원하여 국가 R&D로 수행하고 있는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “구조물 성능기반 화재거동해석 및 설계기술연구(2011)”과제와 관련한 연구에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Philip J. Dinunno, P.E. et al, "SEPE Handbook of Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association and Society of Fire Protection Engineers, 1988
2. Hertz K.D., "Limits of spalling of fire-exposed concrete", Fire Safety journal pp. 103-116, 2003
3. John A Purkiss, "Fire Safety Engineering Designn of Structures", Butterworth-Heinemann, 1996
4. Anderberg Y., "Spalling phenomena of HPC and OC", NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete in Gaithersburg, 1997
5. Franssen, J. M., "Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire", Fire Safety Journal, 34, pp191-207, 2000
6. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, "Fiber Cocktail을 혼입한 고강도 콘크리트의 고온시 압축강도특성 및 모델제시에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트 학회 학술대회 발표논문집 제 19권 2호, 2007
7. 김홍열, 김형준, 전현규, 염광수, "표준화재 재하조건 Fiber Cocktail을 혼입한 고강도 콘크리트 기둥의 전열 특성 및 화재 거동에 관한 연구" 한국콘크리트 학회 Vol. 22, No. 1, pp. 29-39, 2010
8. 김형준, 한상훈, 최승관, "화재시 콘크리트요소 폭렬영향성 고찰", 화재소방학회 논문집 Vol. 21, No. 2, 2007
9. 김홍열, "고온가열시 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집 제 8권 제 118호, 2002