

새로운 폭열 대책용 섬유를 이용한 150 MPa급 초고강도 콘크리트 개발

- Fire Protection of Ultra-High Strength Concrete
with a Specified Design Strength of 150 MPa -



김도겸*
Kim, Do Gyeum

본 논문은 에틸비닐알콜공중합체(EVA)의 섬유를 콘크리트에 적절히 혼입하여 사용할 경우, 시공성과 내화성이 우수하고 압축강도 f_c 150MPa 급의 고강도 콘크리트 제조가 가능함을 기술하고 있으며, 실 모형 시공실험과 초고층 주택용 빌딩 기둥 적용을 통하여 구조물에 적용 가능함을 제시하고 있다.

1. 머리말

최근 고층 주택용 빌딩의 하층 기둥을 중심으로 고강도 콘크리트의 사용이 증가하고 있다. 그 이유는 기둥 단면을 작게 할 수 있고 기둥 사이의 공간이 확보할 수 있으며 또한 흔들림이 적게 발생하는 등 쾌적한 주거공간을 확보하기 쉽기 때문이다. 그러나 고강도 콘크리트는 통상의 콘크리트에 비해 밀실하기 때문에 화재 시 표면이 폭열되기 쉽고 부재의 내력 저하가 발생할 위험성이 크다. 이에 대한 대책으로는 폴리프로필렌 등 유기섬유를 콘크리트에 혼입하여 폭열을 억제하는 방법이 있으며 설계기준강도(f_c) 120 ~ 70 MPa 콘크리트에 적용되고 있다. 유기섬유를 혼입하는 방법은 내화피복을 생략할 수 있는 등의 이점이 있으나, 콘크리트 강도가 높게 되면 필요한 섬유 혼입량이 과대하게 되어 콘크리트의 압축강도와 유동성이 저

하되는 경우가 있다. 특히 유동성은 잔골재 형상 등의 영향을 크게 받기 때문에 부순모래의 종류에 따라 슬럼프 플로우가 저하되어 시공이 곤란하게 되는 경우도 있다. 저자들은 이러한 배경 하에 고강도 영역의 콘크리트를 대상으로 유동성 등에 나쁜 영향을 주지 않은 에틸비닐알콜공중합체(이하, EVA)의 섬유(사진 1)를 개발하여 실용화하였다. 본고에서는 EVA 섬유를 혼입한 고강도 RC 기둥의 내화성능, 실 모형 시공실험에서 강도발현성, $f_c = 130$ MPa의 실제 공사에 적용한 때의 품질관리 기록 등을 소개하였다.

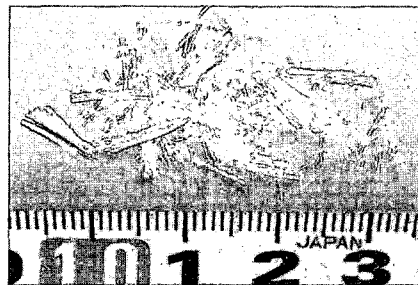


사진 1. EVA 섬유의 외관

2. EVA 섬유혼입 콘크리트의 기초물성

2.1 각종 유기섬유의 비교

유기섬유의 종류와 혼입량이 고강도 콘크리트의 슬럼프 플로우에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 유기섬유는 에틸비닐알콜공중합체(밀도 1.14 g/cm^3), 비닐(밀도 1.30 g/cm^3 , 이하 PVA 섬유), 폴리프로필렌(밀도 0.91 g/cm^3 , 이하 PP 섬유) 3종류이다. <표 1>에 섬유의 종류와 혼입량을 나타내었다.

콘크리트의 사용재료는 결합재를 고강도용 3성분 시멘트, 골재를 안산암 채석과 부순모래, 화학혼화제를 폴리칼본산계 고성능 감수제로 하였고, 콘크리트 배합은 물-결합재비(W/B)를 14.5%, 고성능 감수제의 첨가량을 26 kg/m^3 로 일정하게 하였다. 비빔은 강제 2축 믹서를 이용하여 모르타르를 선비빔방식으로 베이스 콘크리트를 제조하고, 섬유를 추가하여 다시 1분간 믹싱하였다.

<그림 1>에 슬럼프 플로우와 섬유 혼입량의 관계를 나타내었다. 고성능 감수제의 첨가량이 동일한 조건에서는 섬유의 종류에 상관없이 혼입률이 증가할수록 슬럼프 플로우가 작아지는 경향이 있었다. 그

*정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

표 1. 섬유의 종류와 혼입량

섬유의 종류			섬유의 혼입률	
재질	길이(mm)	직경(mm)	kg/m ³	Vol %
EVA	10	0.05	3.0	0.26
			5.0	0.44
PVA	12	0.04	2.8	0.22
			4.3	0.33
PP	10	0.05	3.0	0.33
			4.0	0.44
	20		2.0	0.22
			3.0	0.33

표 2. 굳지 않은 콘크리트의 특성 실험 배합

W/B(%)	단위량(kg/m ³)						
	EVA 섬유	물(W)	결합재(B)	잔골재	굵은골재	고성능 감수제	공기량 조절제
25.0	0	150	600	809	848	7.20	0.12
	2.5						0.48
17.0	0	150	882	585	848	13.23	0.53
	2.5						0.88
	4.0						1.06
14.5	0	145	1000	495	848	22.0	0.60
	2.5						1.20
	4.0						1.60
	6.0						1.60

러나 EVA 섬유는 다른 섬유보다 전반적으로 슬럼프 플로우가 크며, 유동성에 미치는 영향은 비교적 적음을 알 수 있었다.

2.2 굳지 않은 콘크리트 특성

〈표 2〉에 나타난 세 종류의 물-결합재 비에 대해서 EVA 섬유 혼입량을 변동시켜 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트에 대한 슬럼프 저하 정도를 조사하였다. W/B = 17%에 대해서는 120분까지 경시변화도 측정하였다.

〈그림 2〉에 섬유 혼입량과 슬럼프 플로우의 관계를 나타내었다. 고성능 감수제를 추가하지 않고 슬럼프 플로우 60cm 이상을 확보하기 위해서는 W/B = 17%에서는 섬유 혼입량을 2.5kg/m³, W/B = 14.5%에서는 4.0kg/m³으로 제한할 필요가 있음을 알 수 있었다. 〈그림 3〉에 슬럼프 플로우의 경시변화를 나타내었다. 슬럼프 플로우는 섬유를 혼입함에 따라 저하되지만, 섬유를 혼입한 후의 경시변화는 작고, 레미콘 공장에서 섬유를 혼입하여 현장으로 운송하는 것도 가능함을 알 수

있었다.

2.3 압축강도

〈표 2〉의 배합을 따라 제조한 후 표준양생 재령 7, 28, 56, 91일의 압축강도와 초기 가열양생 재령 56, 91, 365일의 압축강도를 조사하였다. 초기 가열양생은 밀봉상태의 공시체에 대해 타설 9~12시간 후부터 주위 온도를 12시간에 걸쳐 80°C까지 상승시켜 12시간 80°C을 유지시킨 후 서냉하여 시험재령까지는 20°C에서 보관하는 것으로 하였다. 〈그림 4〉에 섬유 혼입 전후의 강도를 비교한 결과를 나타내었다. 혼입률이 증가할수록 압축강도는 약간 저하는 경향이 있었지만, 섬유 혼입 전후의 강도비는 섬유 혼입량 4.0kg/m³까지 범위에서 4% 정도 감소함을 알 수 있었다.

2.4 내구성

건조수축에 의한 길이변화율(JIS A 1129-1), 동결융해 저항성(JIS A 6204),

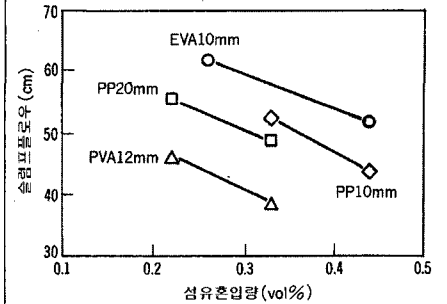


그림 1. 각종 섬유혼입 콘크리트의 슬럼프 플로우

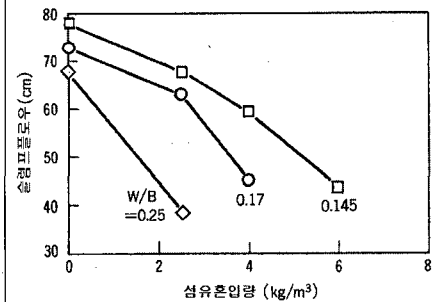


그림 2. EVA 섬유 혼입량과 슬럼프 플로우

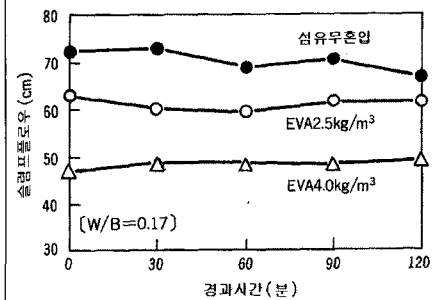


그림 3. 슬럼프 플로우의 경시변화

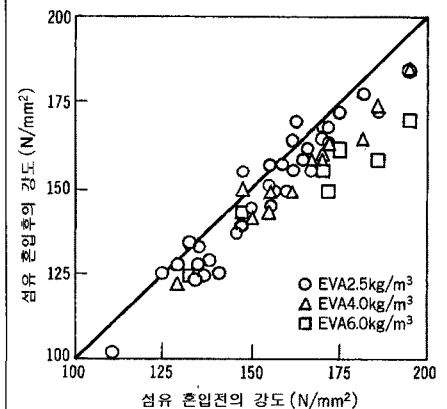


그림 4. 섬유혼입 전후의 압축강도 비교

축진시험에 의한 중성화 깊이(JIS A 1153)에 대해서 〈표 2〉에 나타난 W/B = 17% 조건에서 섬유 혼입량 4.0kg/m³의 콘크리트와 섬유를 혼입하지 않

표 3. 재하가열 실험의 시험체의 변수 및 기초 물성

시험체명	섬유종류		섬유 혼입률		슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	91일 코어강도 (MPa)
	재질	길이-직경(mm)	kg/m ³	Vol %			
E2.5	EVA	10-0.05	2.5	0.22	61.3	1.7	169
E3.5	EVA	10-0.05	3.5	0.31	56.0	1.9	169
P2.0	PP	20-0.05	2.0	0.22	49.5	2.0	162

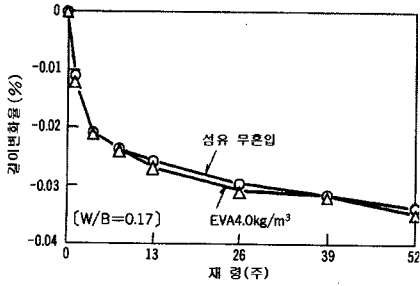


그림 5. 길이변화율

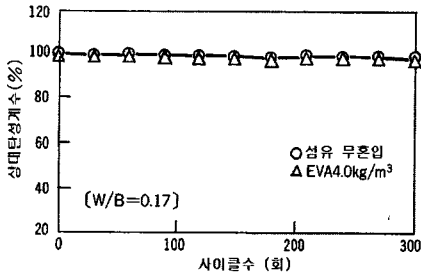


그림 6. 동결융해 저항성

은 콘크리트를 비교하였다. 전자의 공기량은 1.9%, 표준양생 재령 28일의 강도는 141 MPa, 후자의 공기량은 1.1%, 압축강도는 150 MPa이었다. <그림 5>로부터 건조에 의한 길이변화에 섬유혼입의 미치는 영향은 거의 없음을 확인할 수 있었다.

<그림 6>에 동결융해 저항성 시험결과를 나타내었다. 섬유의 유무에 상관없이 300사이클에 있어서도 상대동탄성계수는 거의 100%이었다. 축진 중성화 시험결과는 그림에 나타나지는 않았지만 축진기간 26주까지 섬유 혼입유무에 상관없이 중성화는 발생하지 않았다. 이상의 결과로부터 섬유의 혼입은 4.0 kg/m³까지 범위이면 고강도 콘크리트의 내구성에 나쁜 영향을 미치는 않음을 알 수 있었다.

PP 섬유에 대해서도 실험을 실시하였다. 시험체의 형상은 <그림 7>에 나타난 바와 같이 단면치수는 400 mm이고, 주철근은 VSB685, 콘크리트에 사용된 재료는 2장과 동일하고 W/B = 17%를 사용하였다. 시험체는 타설 후 1주에서 탈형하고 재하가열 실험을 실시할 때까지 3~4개월 동안 실내에서 자연건조 시켰다. 재하 방법은 중심압축으로 하고 재하하중은 시험체와 동일한 단면치수를 가진 무근 콘크리트로부터 채취한 코어의 재령 91일에서 압축강도와 축력비 0.3으로부터 결정하였다. 가열은 수정 하중을 유지한 상태에서 개시하였고 가열온도곡선을 ISO-834, 가열시간을 최장 6시간까지로 하였다. 또한 재하가열 실험시 콘크리트 함수율은 5.0~5.1%이었다.

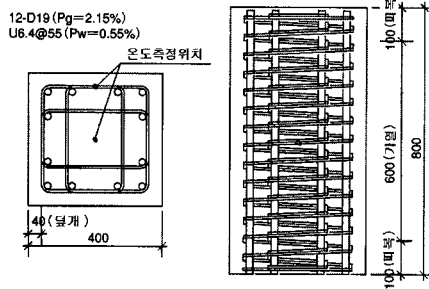


그림 7. 재하가열 시험체

3.2 재하가열 실험의 결과

<그림 8>에 나선루프 및 시험체 중앙의 온도이력, <그림 9>에 시험체의 축방향 변위의 추이를 나타내었다. PP섬유를 2.0 kg/m³ 혼입한 시험체(P2.0) 및 EVA 섬유를 3.5 kg/m³ 혼입한 시험체(E3.5)는 모두 폭열이 발생하지 않았고 6시간까지 소정의 하중을 지지할 수가 있었다. EVA 섬유를 2.5 kg/m³ 혼입한 시험체(E2.5)는 <사진 2>에 나타난 바와 같이 가열 후

1분에서 18분에 걸쳐 부분적으로 폭열이 발생하였으나, 격렬한 폭발은 발생하지 않았고 5시간 37분까지 재하를 지지할 수 있었다. 이상의 결과로부터 금회 실험을 실시한 3개의 유기섬유의 종류 및 혼입량의 조합은 모두 3시간 내화를 크게 상회하는 5시간 이상의 하중지지 능력을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

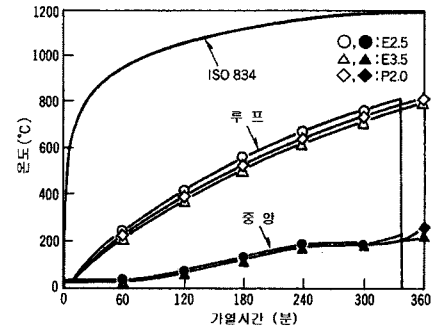


그림 8. 루프 및 시험체 중앙부의 온도이력

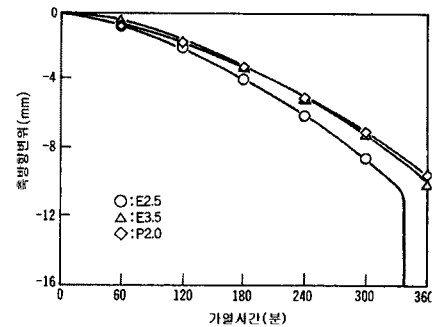


그림 9. 시험체의 축방향 변위 추이

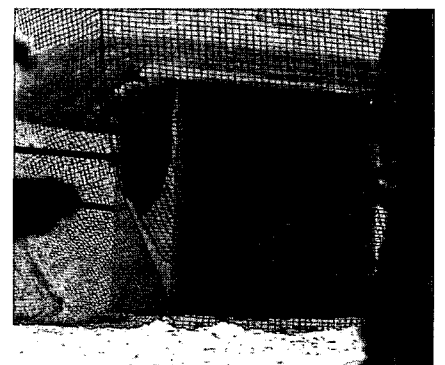


사진 2. 폭열 종료후의 상향(가열 중)

표 4 실모형 시공실험의 콘크리트 배합

시간	섬유종류	W/B (%)	목표 공기량 (%)	단위량(kg/m ³)					섬유
				W	B	S	G	SP	
여름	PP	17.0	1.0	150	883	604	835	15.9	2.0
	EVA	17.0	1.0	150	883	604	835	15.9	2.5
겨울	PP	17.0	1.0	150	883	604	835	17.7	2.0
	EVA	17.0	1.0	150	883	604	835	17.7	2.5

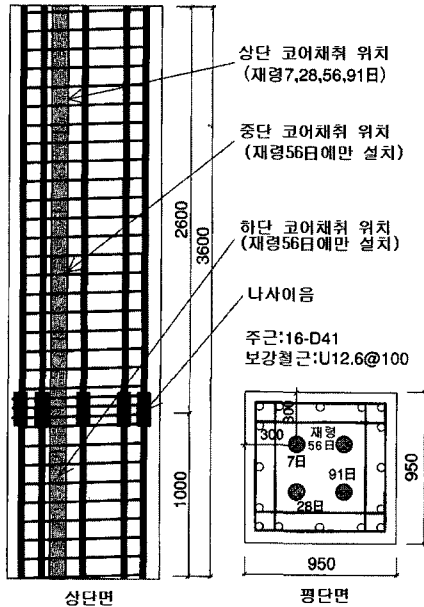


그림 10. 모형기둥(장주)

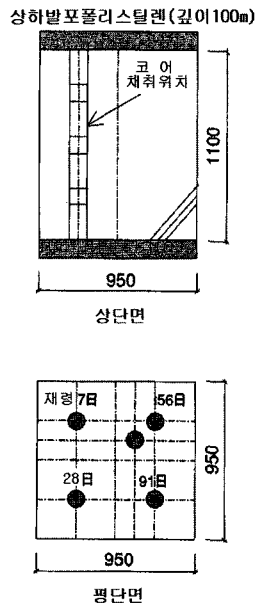


그림 11. 모형기둥(단주)

4. 실제 모형 시공실험

4.1 실험개요

섬유혼입 콘크리트의 시공성과 구조물 콘크리트의 강도발현을 확인하기 위해 여름철과 겨울철에 실제 모형 시공실험을 실시하였다. 콘크리트의 사용재료는 3장과 동일한 것을 사용하였고 배합은 <표 4>에 나타난 것처럼 W/B = 17%를 사용하였다. 혼입한 섬유는 PP 섬유와 EVA 섬유 2종류로 하였고 혼입량은 체적비로 0.22%가 되도록 PP 섬유는 2.0 kg/m³, EVA 섬유는 2.5 kg/m³로 하였다.

콘크리트의 제조 및 조사는 다음과 같이 실시하였다. 먼저 레미콘 공장에서 섬유를 제외한 베이스 콘크리트를 믹싱하고 에지데이터 차량을 이용하여 현장으로 운송하였다. 현장에서는 수입검사로서 베이스 콘크리트의 아직 굳지 않은 특성 시험

과 압축강도용 시험체를 제작하였고, 그 후 섬유를 에지데이터 차에 첨가하여 2분간 고속각반에 의해 혼합시켰다. 혼합 후 섬유혼입 콘크리트의 굳지 않은 특성에 대한 시험을 실시하였고 슬럼프 플로우가 크게 저하하는 경우에는 고성능 감수제를 첨가하였다. 섬유혼입 콘크리트의 압축강도용 시험체를 제작한 후 <그림 10, 11>에 나타난 것처럼 모형 기둥에 타설하였다. 소정의 재령에서 모형 기둥의 시험체에서 코어를 채취하여 구조물 콘크리트의 강도를 확인하였다.

모형 기둥은 높이 3,600 mm의 장주와 상하를 깊이 100 mm의 발포 폴리스티렌으로 단열한 높이 1,100 mm의 단주 2종류이며, 단면치수는 모두 950 mm 사각으로 하였고, 높이 1 m 부분에 기계식 이음을 가지는 철근을 배근하였다. 또한 장주에 타설한 것은 여름철에 PP 섬유 혼입 콘크리트로 하였고 그 외에는 단주에 타설하였다.

4.2 실험결과

<그림 12>에 슬럼프 플로우의 시험결과를 나타내었다. PP 섬유를 2.0 kg/m³ 혼입한 경우의 슬럼프 플로우는 고성능 감수제 1.8 kg/m³를 현장 첨가하더라도 50 cm 이하이었으나 타설하기에는 무리가 없었다. 또한 상당한 타설 시간이 필요하지만 배근한 실모형 기둥에 충전되지 않은 부분은 없는 것으로 확인되었다. 한편 EVA 섬유를 2.5 kg/m³ 혼입한 경우 슬럼프 플로우는 저하는 작았고, 고성능 감수제를 현장에서 첨가하지 않아도 슬럼프 플로우는 60 cm 이상을 확보할 수 있었다. 이에 EVA 섬유를 이용함으로써 양호한 시공성을 가지는 섬유혼입 콘크리트 제조가 가능함을 확인할 수 있었다.

<그림 13>에 압축강도 시험결과를 나타내었다. 표준양생 시험체에서는 섬유혼입 전후에 따라 약간의 강도차이가 있었지만, 물-결합재비 17%, PP 섬유 2 kg/m³ 또는 EVA 섬유 2.5 kg/m³ 조건이라면 구조물 콘크리트 강도로서 150 MPa를 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

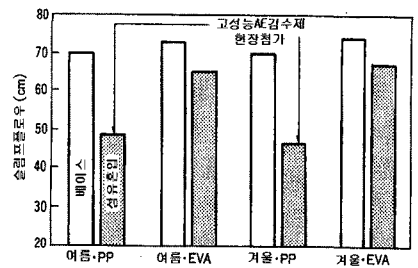


그림 12. 섬유 혼입 전·후의 슬럼프 플로우 비교

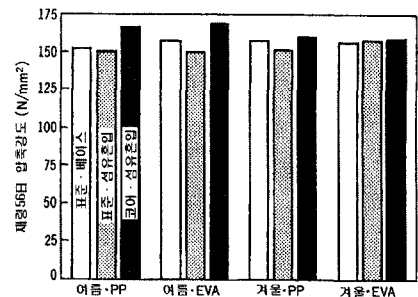


그림 13. 재령 56일의 압축강도

표 5. 콘크리트 배합(실시공)

f _c (MPa)	목표치		보정치 ⁵⁶ S ₅₆ (MPa)	판정강도 (MPa)	W/B (%)	단위량(kg/m ³)					
	슬럼프 플로우(cm)	공기량(%)				물(W)	결합재(B)	잔골재	굵은골재	고성능감수제	EVA 섬유
130	17.0	1.0	0	130	18.0	150	834	647	835	12.9	2.5

5. 실 구조물 적용

5.1 개요

이상의 사전실험을 걸쳐 실 구조물에 EVA 섬유에 의한 화재시 폭열대책을 적용하기 위한 실험을 하였다. 대상은 지상 45층인 초고층 주택용 빌딩의 1층에서 3층의 기둥으로 설계기준강도는 130 MPa, 총 타설량은 약 700 m³, 타설 기간은 1월에서 3월이었다.

5.2 배합

사용재료는 이전 장과 동일한 실리카 폼을 이용한 고강도용 3성분 시멘트, 안산 암 쇄석과 부순모래, 폴리칼본산계 고성능 감수제이다. 콘크리트 배합은 <표 5>에 나타내었으며 배합을 정하는 재령과 구조물 콘크리트 강도관리 재령은 모두 56일이다. 또 이전 장의 실험형 시공실험 및 문헌에 나타난 실험결과로부터 강도 보정치 ⁵⁶S₅₆은 제로, 관리용 시험체의 압축강도 표준 편차 σ은 아직 굳지 않은 콘크리트의 단위 수량을 모든 차량에 대해서 확인하는 조건으로 설계기준강도 f_c와 강도 보정치 ⁵⁶S₅₆와의 합 5%, 물-결합재비는 18%로 하였다. 강도관리용 시험체의 양생은 표준양생으로, 구조물 콘크리트 판정강도는 「일본건축학회 건축공사표준 사양서 JASS

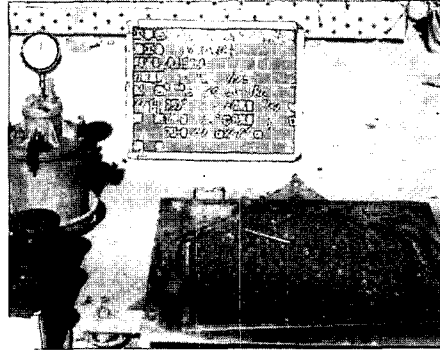


사진 3. 입수 검사

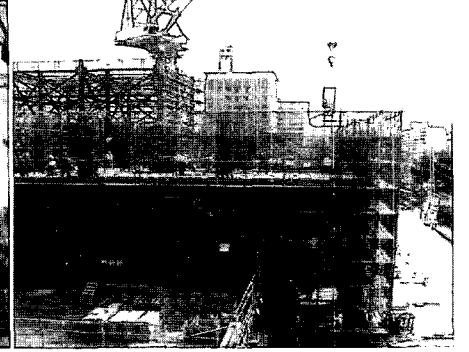


그림 4. 시공 상황

5」(2003년판)에 준하여 f_c + ⁵⁶S₅₆ 이상으로 하였다.

5.3 콘크리트의 제조와 시공

콘크리트의 제조·시공 순서는 다음과 같다. 레미콘 공장에서 섬유를 제외한 베이스 콘크리트를 믹싱하고(믹싱 시간은 3분), 에지테이터 차량으로 베이스 콘크리트를 운반한 후 에지테이터 차량에 섬유와 소포제를 투입하여 고속각반(3분)으로 혼합하였다. 그 후 현장으로 운송, 입수 검사와 강도 관리용 시험체를 채취하고 <사진 3>, 버킷 또는 콘크리트 펌프에 의해 운반하여 기둥에 타설, 다짐을 하였다.<사진 4>

단위수량은 공장에서 시료를 채취하여 현장으로 운송시간을 이용하여 측정하였고, 단위수량이 과대한 콘크리트가 타설되

지 않도록 하는 관리 체제로 하였다.

5.4 굳지 않은 콘크리트의 품질관리 결과

입수검사에서 슬럼프 플로우 관리치는 65(+5 ~ -10) cm, 공기량 관리치는 1(+1.0 ~ -0.5) %로 하였다. <그림 14>에 슬럼프 플로우 품질관리를 나타내었고, <그림 15>에 공기량의 품질관리 결과를 나타내었다. 모두 품질관리 범위에 있었으며 아직 굳지 않은 콘크리트의 특성은 안정된 범위에 있음을 알 수 있었다.

5.5 압축강도의 품질관리 결과

압축강도의 시험결과를 에지테이터 차량 1대로부터 채취한 시험체 3개의 평균 압축강도를 1회로 하여 <그림 16>에 나타

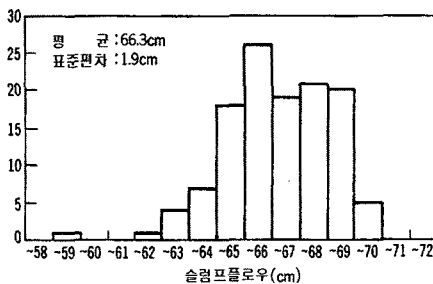


그림 14. 슬럼프 플로우의 품질관리 결과

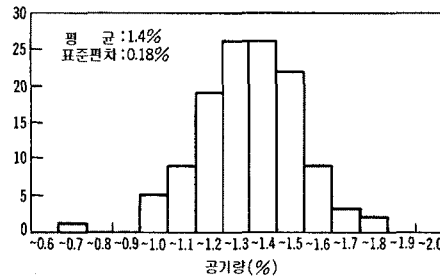


그림 15. 공기량의 품질관리 결과

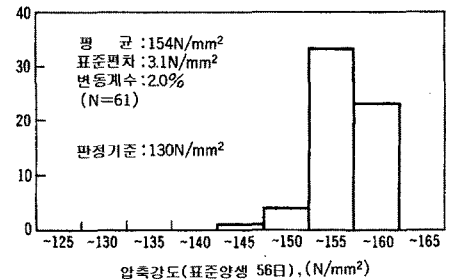


그림 16. 구조물 콘크리트의 품질관리 결과

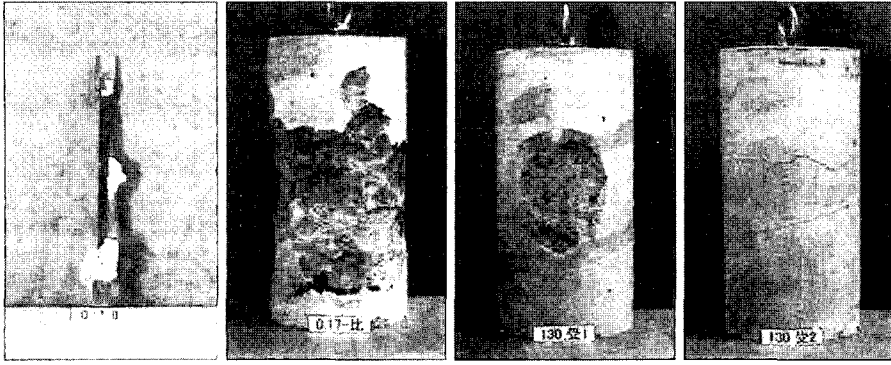


사진 5. 폭열 저감효과의 확인시험

내었다. 모든 시험결과가 판정기준을 만족하였고 단위수량도 모든 차량에 대해서 확인한 결과, 변동계수 2% 범위에서 관리됨을 알 수 있었다.

기둥에 타설하는 날에 동일한 단면의 모형 기둥을 제작하여 코어 시험체의 압축강도를 타설하는 날을 바꾸어 2회 걸쳐 조사하였다. 재령 56일에서 코어 시험체의 강도는 159 MPa과 156 MPa을 나타내 구조물에서도 설계기준강도를 충분히 만족함을 확인 할 수 있었다.

5.6 폭열 대책 효과의 확인

실제에 타설한 콘크리트의 폭열 저감 효과를 확인하기 위해 현장에서 시험체를 2개 채취하여 ISO-834에 준한 가열온도 곡선에 의해 가열시험을 실시하였다. 시험체는 중심축에 $\phi 22$ mm의 나선볼트를 박은 외형 $\phi 250 \times 500$ mm로 하였고 재령 3

개월에서 시험을 실시하였다. 비교용으로 동일 재료를 이용한 물-결합재비 17%인 섬유 무혼입 시험체와 섬유를 2.5 kg/m³ 혼입한 시험체에 대해서도 가열시험을 실시하여 그 결과를 <사진 5>에 나타내었다. 섬유 무혼입 시험체는 연속적으로 폭열이 발생하여 최종적으로 완전히 파괴되었다.

사전의 재하 가열 시험에서 5시간 이상의 하중지지 능력을 가졌던 물-결합재비 17%에 섬유를 2.5 kg/m³ 혼입한 시험체의 폭열은 매우 경미하였고, 1개에서는 전혀 폭열이 일어나지 않았다. 따라서 실 구조물에 적용한 폭열 대책은 타당한 것으로 판단된다.

6. 결 론

유기섬유 혼입 콘크리트를 채택하기 위해서는 내화성 뿐만 아니라 시공성, 강도

발현성 등의 검토가 반드시 필요하다. 이에 에틸렌비닐알콜 공중합체(EVA) 유기 섬유를 이용한 결과, 시공성과 내화성이 우수하고 압축강도 $f_c = 150$ MPa급의 고강도 콘크리트 제조가 가능함을 알 수 있었다. □

이 기사는 **セメント・コンクリート No.691에 실린 大成建設(株) 技術center의 黒岩 秀介의 특집기사를 번역한 것이다.**

참고문헌

1. 森田 武, 山崎庸行, 橋田活, 西田朗, 榮澤敏男, 占平章夫, 三井健郎, “合成纖維を用いた高耐火・高強度コンクリート”, **セメント・コンクリート**, No.648, 2001.2, pp. 24~31.
2. 黒岩秀介, 陣内活, 小林裕, 西用泰弘, 木村雄一, 阿部剛士, “耐火性能向上を目的にポリプロピレン纖維を混入した高強度コンクリートの實用化および適用”, **日本建築學會技術報告集 第16号**, 2002.2, pp.17~22.
3. 陣内活, 並木哲, 後藤和正, “超高強度コンクリートによる柱構造体の強度發現性狀の検討”, **コンクリート工學年次論文報告集, Vol. 16, No.1**, 1991. pp.255~260.
4. 陣内活, 早用光敏, 黒岩秀介, “實用化を迎える設計基準強度150N/mm²級超高強度コンクリートの性能”, **セメント・コンクリート**, No.678, 2003.8, pp.10~16.

신간소개

“철근콘크리트 역학 및 설계”

◆ 소개

: ... “철근콘크리트 역학 및 설계”의 근본적인 목적은 철근콘크리트 부재의 거동을 이해하고 예측하는데 필요한 그리고 철근콘크리트 구조물을 설계하기 위한 기본적인 개념들을 설명하는데 있다. 따라서 이 책을 준비하면서 제한적이며, 복잡하고, 수도 없이 많은 경험식들에 의존하는 것 보다는 기본적인 원리를 잘 이해시킬 수 있도록 하는 것이 더욱 절실하다는 신념을 바탕으로 하였다. ... (머리말 中)

- 저 자 : 윤영수
- 출판사 : 도서출판 세론
- 발행일 : 2005년 1월 9일
- 정 가 : 22,000원
- ISBN : 89-86663-80-5
- 페이지 : 257(B5 판형)

