



마이크로 필러 혼화재를 이용한 조강콘크리트 현장적용

Field Application of Early Strength Concrete Using Micro Filler Mineral Admixture

소광호
Kwang-Ho Sho
원광대학교 건축공학과 교수

김경민
Kyoung-Min Kim
(주)대우건설 기술연구원 건축연구팀 선임연구원

1. 머리말

최근 건설구조물의 품질에 대한 요구수준이 높아짐에 따라 여러 신기술이 개발되고 있다. 특히, 동절기 공사 중 콘크리트의 조기강도 발현은 대부분의 현장에서 시급히 해결해야 할 화두로 자리 잡고 있다.

현재까지의 조기강도 발현 기술들은 요구수준의 성능을 발휘하는데 한계가 있거나 공사비가 증가하는 등의 문제로 시공자 입장에서 바람직하지 못한 방법으로 인식되고 있다. 따라서 본 고에서는 궁극적인 콘크리트의 조기 강도를 발현시키기 위해 현재 주로 사용 중인 1종 시멘트의 품질을 더욱 개선하여 조강성을 향상시키는 방안을 검토하였다.

즉, 시멘트 생산 공정 중 부수적으로 발생하는 미립자 시멘트와 석회석고미분말(이하 마이크로 필러 혼화재; MFA)을 이용한 조기강도 발현 기술의 현장 적용을 통하여 실무현장에서의 활용성을 확인하고자 하였다.

2. 마이크로 필러 혼화재의 구성

2.1 미립자 시멘트

시멘트 분쇄기에 클링커 및 기타 원료가 투입된 후 분쇄된 원료는 사이클론 집진 장치(cyclone separator)로 이동된다. 제품수준으로 분쇄된 미분은 사이클론에서 집진되어 시멘트 사일로에 투입되고, 과 분쇄된 미분은 공기와 함께 세퍼레이터 백 필터(separator bag filter)로 유입되어 집진된다. 이와 함께 시멘트 분쇄기에서 공기와 함께 이동한 시멘트는 메인 백 필터(main bag filter)에서 집진되어 이동, 최종적으로 라인에서 집결하여 보통 포틀랜드 시멘트 제품이 생산된다. 본 기술에서는 세퍼레이터 백 필터로 유입되어 집진된 시멘트를 바이패스 웨이(bypass way)하여 조강콘크리트 재료로 활용하고자 하였다.

2.2 석회석고미분말

석회석고미분말은 시멘트 제조 원료인 조합원료 제조 시 발생하는 미분말을 전기집진기로 집진한 미세한 입자(electrostatic precipitated dust)이다. 주성분은 석회석(CaCO₃), SiO₂, KCl, 점토질 광물 등으로 구성되어 있다. 최근에는 대부분이 시멘트 원료로 재투입되면서 일정량이 순환하는 시스템으로 구성되어 있으며, 그 순환율은 약 7~15% 수준으로

표 1. OPC 및 마이크로 필러 혼화재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
				초결	종결	3일	7일	28일
OPC	3.15	3 302	0.08	208	351	20.4	29.4	38.7
MFA	3.12	4 640	0.04	190	310	22.2	33.6	49.2

로 제조설비에 따라 다소 차이가 있다. 특히, 석회석고미분말은 시멘트 수화물에 피해가 없고, 분말이 매우 미세하므로 굳지 않은 상태에서는 점성증진에 의한 재료분리 방지, 응결축진 및 수화열 저감과 경화상태에서는 공극 충전에 의한 압축강도 증진 및 수밀성 향상에 효과가 있다. OPC와 MFA의 물리적 성질은 <표 1>과 같다.

3. 현장적용

3.1 공사개요

당 현장의 경우, MFA를 이용하여 동절기 조기강도 발현 방안으로 활용하고자 하였다. <표 2> 및 <그림 1>은 현장개요 및 조감도를 나타낸 것이다.

3.2 적용계획

적용계획은 <표 3>과 같고, 콘크리트의 배합은 <표 4>와 같다. 동절기 배합으로 사용하고 있는 기존 콘크리트와 MFA를 OPC에 치환한 조강콘크리트 2 종류를 적용하는 것으로 계획하였다. 적용부위는 <그림 2>와 같이 지하 4층 합벽이며, 기존 콘크리트와 조강콘크리트는 메탈라스로 구분하여 타설하였다.

표 2. 현장개요

구분	내용
공사명	대덕비즈니스 허브센터현장
공사위치	대전광역시 유성구 도룡동
대지면적	4,557.5m ²
규모	지하 4층, 지상 11층
시공사	(주)대우건설



그림 1. 현장 조감도

표 3. 적용계획

실험요인	실험수준	
배합 조건	규격	1 25-24-150
	목표 슬럼프(mm)	1 150
	목표 공기량(%)	1 4.5±1.5
실험 사항	배합종류	2 · 기존 콘크리트 · 조강콘크리트
	굳지않은 콘크리트	4 · 슬럼프 · 공기량 · 염화물량 · 콘크리트 온도
	경화 콘크리트	3 · 압축강도(구조체관리용, 표준양생) · P형 슈미트 햄머(1~3일) · 구조체 온도이력

* 경시변화 : 직후, 40분

표 4. 콘크리트 배합표

구분	W/B (%)	S/a (%)	AD/C (%)	단위질량(kg/m ³)						
				W	C	MFA*	FA	S1	S2	G
기존 콘크리트	48.0	50.3	0.5	169	317	-	35	616	264	882
조강 콘크리트	48.0	47.3	0.6	169	246	70	35	578	248	934

* MFA : 마이크로 필러 혼화재

3.3 적용방법

압축강도 공시체는 표준양생과 구조체 관리용으로 구분하여 관리하였는데, 표준양생은 1일 양생 후 탈형하여 20±3℃의 항온수조에서 계획된 재령까지 양생하였고, 구조체 관리용 공시체는 구조체 옆에서 봉합양생 후 3일

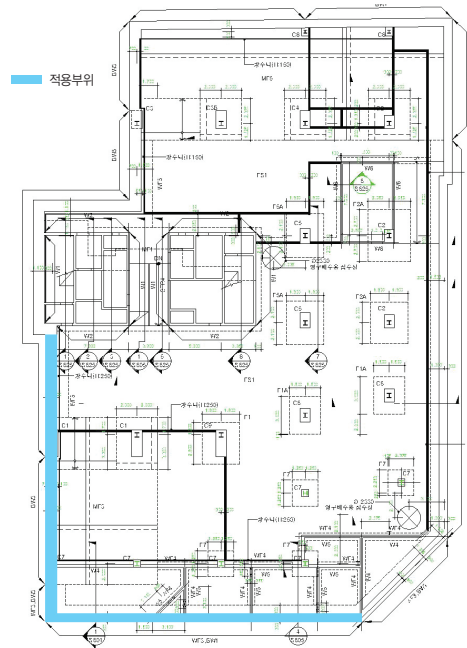


그림 2. 지하 4층 구조평면도

재령까지 양생하였다.

구조체 콘크리트의 온도이력은 열전대(T-Type)를 매입한 후 데이터 로거로 측정하였다.

〈사진 1〉은 콘크리트 타설, 양생 및 실험모습을 나타낸 것이다. P형슈미트햄머 반발도 측정은 스위스 Proceq사 제품을 사용하였고, 반발도는 기존 콘크리트 및 조강콘크리트의 열전대 매입 위치에서 1일 양생 후 타격위치의 거푸집을 탈형하여 20회 수직 타격한 후 평균값을 사용하였다.

4. 적용결과

4.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

〈표 5〉 및 〈사진 2〉는 기존 및 조강콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 실험결과를 나타낸 것이다. 평가결과, 유동성 및 공기량의 경우 다소의 차이는 있었으나 모두 목표로 하였던 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 염화물량 및 콘크리트 온도도 KS 및 시방서 규준에 만족하는 범위로 나타나 현장적용 시 기존 콘크리트와 조강콘크리트의 물성차이는 없는 것으로 평가되었다.



(a) 현장 적용 전경



(b) 콘크리트 타설

(c) 구조체 온도측정



(d) 양생

(e) P형 슈미트햄머 측정

사진 1. 현장 적용 모습

표 5. 굳지 않은 콘크리트 실험결과

구분	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	염화물량 (kg/m ³)	콘크리트 온도(°C)
기존 콘크리트	160	4.5	0.029	14.3
조강콘크리트	155	3.6	0.028	13.4



(a) 기존 콘크리트

(b) 조강콘크리트

사진 2. 굳지 않은 콘크리트 실험

4.2 압축강도 특성

4.2.1 구조체관리용 공시체

〈표 6〉 및 〈그림 3〉은 기존 및 조강콘크리트의 구조체 관리용 공시체 압축강도를 나타낸 것이다. 압축강도 측정은 거푸집 제거 가능시기인 5MPa이 발현되는 재령까지로 하였다. 압축강도 평가재령인 3일까지의 평균 보양 온도는 7.6°C인 것으로 기록되었다.

평가결과, 모든 재령에서 기존 콘크리트 대비 조강콘크리트의 경우 압축강도는 증진되었는데, 1일 재령에서 164%, 2일 재령에서 203%, 3일 재령에서 178% 수준인 것으로 평가되었다. 이는 MFA 중 미립자 시멘트의 분말도가 일반 시멘트의 1/2 수준이기 때문에 물과 접하는 비표면적이 넓어져 수화반응이 활발히 진행되었기 때문인 것으로 분석된다. 특히, 거푸집 제거 가능 시기인 5MPa 도달 시기는 기존 콘크리트의 경우 약 3.1일, 조강콘크리트의 경우 약 1.8일로 추정되어 약 1.3일 가량 단축 되는 것으로 평가되었다. 즉, 동절기 콘크리트 골조공사 시 조강콘크리트를 사용한다면 후속공정을 진행할 수 있는 거푸집 제거시기를 1일 이상 단축시킬 수 있을 것으로 예상된다.

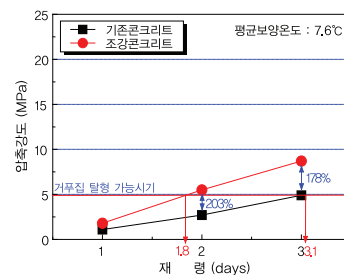


그림 3. 구조체관리용 공시체 압축강도 특성

표 6. 압축강도 및 P형 슈미트햄머 반발도 실험 결과

구분	구조체관리용 공시체 압축강도 (MPa)			표준양생 공시체 압축강도 (MPa)				P형 슈미트햄머 반발도		
	1일	2일	3일	1일	3일	7일	28일	1일	2일	3일
기준 콘크리트	1.1	2.7	4.9	1.3	5.4	20.4	25.9	25.1	36.7	39.0
조강콘크리트	1.8	5.5	8.7	1.9	9.2	21.0	27.9	28.8	40.1	45.1
기준대비 증가율 (%)	164	203	178	146	170	103	108	115	115	116

4.2.2 표준양생 공시체

〈표 6〉 및 〈그림 4〉는 기준 및 조강콘크리트의 표준양생 공시체 압축강도를 나타낸 것이다. 전반적으로 구조체 관리용 공시체의 경우와 유사한 경향을 나타내었는데, 모든 재령에서 기준 콘크리트 대비 조강콘크리트의 경우 압축강도가 증진되는 것으로 평가되었다. 즉, 1일 재령에 146%, 3일 재령에 170%, 7일 재령에 103%, 28일 재령에 108% 수준인 것으로 나타났다.

단, 7일 및 28일의 경우 초기재령 대비 압축강도 증진율이 작아지며 기준 콘크리트와 유사해지는 경향이었는데, 이는 초기재령에서 미립자 시멘트의 비표면적 증가에 기인한 수화반응이 촉진되었고 시간이 경과하며 미립자 시멘트가 소진됨에 따라 수화반응이 둔화되었기 때문인 것으로 판단된다.

4.2.3 P형 슈미트햄머 반발도 특성

〈표 6〉 및 〈그림 5〉는 기준 및 조강콘크리트의 재령 1~3일에 대한 P형 슈미트햄머 반발도를 나타낸 것이다. 평가결과, 전반적으로 압축강도 결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 조강콘크리트의 경우 더 큰 반발도값을

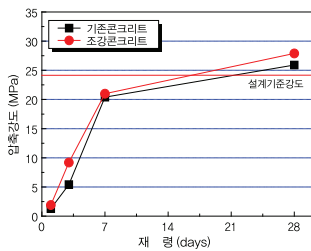


그림 4. 표준양생 공시체 압축강도 특성

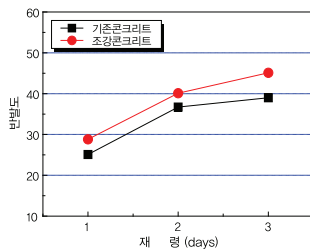


그림 5. P형 슈미트햄머 반발도

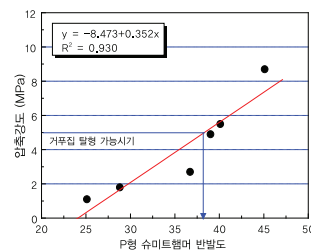


그림 6. P형 슈미트햄머 반발도(구조체 관리용 공시체)

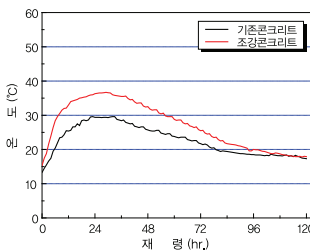


그림 7. 구조체 온도이력

나타내었다. 즉, 1일 재령에 115 %, 2일 재령에 115 %, 3일 재령에 116% 수준인 것으로 평가되었다.

〈그림 6〉은 P형 슈미트햄머 반발도와 구조체 관리용 공시체의 압축강도 결과를 상호 비교한 것이다.

전반적으로 반발도와 압축강도는 상관계수 0.930 이상의 양호한 상관성을 나타내었고, 거푸집 제거 가능시기인 5MPa를 추정하는 반발도값은 약 38인 것으로 나타났다. 즉, P형 슈미트햄머의 반발도값은 여러 가지 요인에 의해 구조체 관리용 공시체 대비 신뢰성은 다소 낮지만, 이와 같은 상관성 검토를 통해 구하여진 반발도값을 이용한다면 현장에서의 거푸집 제거시기 결정 확인 시 5MPa 도달 시기를 쉽게 예측할 수 있어 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.4 구조체 온도이력

〈그림 7〉은 기준 및 조강콘크리트의 구조체 온도이력을 나타낸 것이다. 평가결과, 먼저 기준 콘크리트의 경우 시간이 경과함에 따라 온도는 상승하기 시작하여 약 33시간 후 29.6°C의 최고온도를 기록한 후 저하하였으며, 한편 조강콘크리트의 경우도 유사한 경향을 나타내었는데 약 30시간 후 36.7°C의 최고온도를 기록한 후 저하하였다. 즉, 조강콘크리트는 기준 콘크리트 대비 최고온도가 약 6°C 가량 높게 평가되었는데, 이는 초기 재령에서의 미립자 시멘트 수화반응 촉진에 기인한 것으로 판단되며, 이에 따른 수화열에 의한 온도균열 발생 확률은 미미할 것으로 사료된다.

5. 공기단축 효과 및 경제성

5.1 공기단축 효과

동절기 골조공사 시 조강콘크리트를 사용하였을 때, 후속공정을 진행할 수 있는 거푸집 제거시기를 1일 이상 단축시킬 수 있었다. 이러한 특성은 당 현장에서 합벽구간 및 코어 선시공

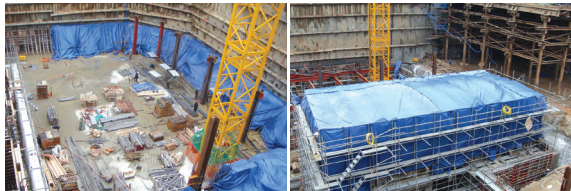
(VH 분리타설 적용)을 진행할 경우 합벽구간 거푸집 작업에 적용된 솔져(합벽 지지대)와 거푸집을 조기에 해체할 수 있어 거푸집 전용, 형틀목공 및 철근공의 자원배당에 매우 효과적인 것으로 분석되었다(사진 3).

5.2 경제성 분석

당 현장에서 수행했던 방법을 기준으로 경제성 분석을 실시하였다. 콘크리트 타설 후 내·외부 온도를 차단하기 위하여 단관 파이프, 로프 및 천막지를 이용하여 공간을 형성하였으며, 열풍기(model : DS-100)를 가동하여 보양 온도를 유지하였다. 조강콘크리트의 경우 수직 거푸집 제거 가능시기인 5MPa 도달 시기가 기존 배합 보다 약 1일 가량 단축 가능하였기 때문에 열풍기 가동에 따른 1일 비용을 산정하였다. 즉, 동절기 공사 시설비, 열풍기 임대료, 현장내 소운반 등은 고려하지 않았으며, 지하 4층(바닥면적 : 약 1,430m²)을 기준으로 분석하였다.



(a) 합벽구간 V/H 분리타설 (b) 코어 선시공 작업



(c) 합벽구간 보양작업 (d) Core Zone 양생작업

사진 3. 보양 공사 모습

표 7. 열풍기 가동 비용산정(1일 기준)

항목	규격	단가 (원)	수량	금액(원)	비고
백등유	리터				• 1,124원/ℓ • 연료소모량 : 9ℓ/hr
- Core	대	242,784	6	1,456,704	
- 합벽	대	242,784	30	7,283,520	
인건비					
- 주간	인	63,530	2	127,060	
- 야간	인	127,060	2	254,120	• 주간 2배
식대 외	일	15,000	4	60,000	• 4명 기준
전기소모량	대	31,980	26	831,480	• 260W/hr
합계				10,012,884	

* 코어 보양면적: 약 800m² 기준, 합벽 보양면적: 약 2,250m² 기준

분석결과 <표 7>과 같이 동절기 공사시 1일의 공사기간이 단축될 때, 약 1천만원의 보양비 절감 효과가 있는 것으로 평가되었고 또한, MFA 혼입 콘크리트에 대한 추가 비용이 발생되지 않기 때문에 경제성 측면에서 더욱 효과적인 것으로 분석되었다.

6. 맺음말

당 현장에 적용한 MFA를 이용한 조강콘크리트는 굳지 않은 콘크리트의 물성에서 시방서 및 KS에 모두 만족하는 것으로 평가되었다. 특히, 조기강도 발현으로 거푸집 탈형시기를 단축시킬 수 있었고, 양생기간 단축에 의한 간접비 절감 등 경제성 측면에서도 우수한 것으로 평가되었다.

향후 본 기술은 동절기 콘크리트의 조기강도 발현 기술로 널리 활용 가능 할 것으로 기대된다. □

담당 편집위원 : 이재삼(주)렉스콘 jslee62@doosan.com



소광호 박사는 원광대학교에서 초고층 건축공사의 기동축소량 보정 방법에 대한 연구로 박사학위를 취득한 이후 대우건설 기술연구원에서 약 5년을 포함하여 대우건설에 20년 이상을 근무하였으며, 현재 원광대학교 건축공학과에 재직 중이다. 주 관심사는 구법개발, 친환경콘크리트 그리고 고성능콘크리트 개발이다.

ar2000@wonkwang.ac.kr



김경민 박사는 청주대학교에서 고강도콘크리트의 내화성능 향상에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 대우건설 기술연구원에서 근무하고 있다. 주 관심연구분야는 친환경 콘크리트, 해양 콘크리트이며, 우리학회 레미콘품질관리위원회, 고성능콘크리트위원회 등에서 활동하고 있다.

kyoungmin.kim@daewooenc.com