

활성화제를 사용한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구

박 정 순* · 변 형 만

〈한일시멘트 중앙연구소〉

1. 서 론

최근 토목·건축 기술의 발달로 구조물이 고층화, 대형화되면서 콘크리트의 성능도 고품질, 고기능, 온도균열 최소화 등 다양한 성능을 요구하는 추세로 발전하고 있다.

고객의 다양한 요구성능을 만족시키기 위한 여러가지 방법 중에서 콘크리트의 재료적 측면에서 가장 영향이 큰 시멘트의 일부를 다른 기능성 혼합재료(슬래그 미분말, 플라이애쉬, Silia fume, Meta kaolin 등)로 대체 사용하는 것이 가장 효과적이라 할 수 있다.

기능성 혼합제를 사용한 콘크리트는 수밀성 향상, 내구성 증진, 장기강도의 향상, 수화발열속도 저감 및 콘크리트 단열온도 상승에 의한 균열 방지 등의 제품품질 향상 뿐만 아니라 부수적인 효과도 크다.

즉 자원을 효율적으로 재활용함으로써 CO₂ 가스 발생 억제와 에너지 절감 및 지구 환경보호 등의 부파적인 효과와 제조원가를 절감할 수 있는 장점이 있다.

따라서 상기에서 언급한 장점으로 인해 콘크리트 제조시 시멘트 대체용으로 기능성 혼합제 사용량 증대에 대한 많은 노력이 있었으나, 혼합제(슬래그 미분말, 플라이애쉬)의 사용량 증대시 발생하는 콘크리트 초기강도가 하락하는 문제점으로 인해 사용량 증대에는 한계성을 나타내고 있다. 따라서 단순방법으로 사용량을 증대하는 것은 제품에 대한 신뢰도 뿐만 아니라 경제적 손실을 초래할 수 있다.

따라서 본 연구는 혼합제 사용량 증가에 따른 콘크리트 초기강도 하락을 방지하는 방안으로 시

멘트와 혼합제의 반응성 조절과 미분말에 의한 촉진효과를 극대화 할 수 있는 활성화제를 사용함으로써 시공상의 문제점 해결과 상기에서 언급한 콘크리트의 제품특성 향상에 따른 장기적인 안정성을 증진시킬 목적으로 진행하였다.

2. 연구 목표

- 혼합제 사용량 증대에 따른 콘크리트 특성 개선
 - 작업성 향상(Workability)
 - 콘크리트의 단열 상승온도 억제로 인한 균열 저감
 - 장기강도의 향상
 - 콘크리트의 품질 안정화
- 사용량 증대에 따른 초기강도(재령 7일 기준) 개선
- 산업폐기물의 효율적 재활용으로 환경친화적인 콘크리트 제조

3. 실험

3-1 개요

본 실험은 콘크리트 특성을 향상시키는 방법으로, 활성화제를 사용하여 시멘트 및 혼합제의 초기 반응성을 활성화시켜 반응속도 조절과 무기물계 활성화제 자체 미분말 촉진효과를 극대화하는 상호 복합적인 작용을 통해 혼합제의 사용량을 증대하면서 초기강도 하락을 방지하고 장기적으로는 콘크리트 품질 안정화를 도모하는 새로운 배합비로 콘크리트의 특성을 개선하였다.

3-2 원재료

시멘트는 당사에서 생산된 40kg 지대포장 시멘트를 사용하였으며, 골재는 대전지역에서 레미콘 제조용으로 사용중인 25mm 쇄석골재와 금강에서

채취한 자연사를 사용하였다. 활성화제는 당사에서 제조, 판매하는 고성능 혼합제(Ω2000)를 사용하였으며, 혼화제는 국내 K사의 고성능 AE감수제(EZCON)를 사용하였다. 아래 <표1~6>은 원재료에 대한 물리·화학적 성질을 나타낸 것이다.

<표1> 시멘트의 물리적 성질

비 중	Blaine (cm/g)	응 결 시 간		압 축 강 도 (kgf/cm ²)			안 정 도 (%)
		초 결 (min)	종 결 (hr:m)	3 d	7 d	28 d	
3.15	3,428	210	5 : 30	230	304	390	0.12

<표2> 시멘트의 화학적 성질

(단위 : %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig-loss
21.4	3.19	5.70	61.7	2.6	2.3	1.5

<표3> 골재에 대한 물리적 성질

구 분	조립율	비 중	흡수율 (%)	씻기손수량 (%)	단위용중 (kg/m ³)	실적율 (%)	안정성 (%)	비 고
굵은골재	6.9	2.74	0.4	0.6	1,609	59.0	2.8	25mm
잔 골 재	2.8	2.58	1.0	1.1	1,603	-	-	금강사

<표4> 혼화제의 물리적 성질

구 분	색 상	비 중	pH	고형분(%)	감수율(%)	비 고
국내 K사	암갈색	1.22	7.08	40.5	18.0	고성능 AE감수제

<표5> 분슬래그의 물리·화학적 성질

(단위 : %)

비 중	Blaine (cm/g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig-loss
2.9	4,385	33.02	13.85	0.31	43.46	5.64	1.54	0.97

<표6> 활성화제(Ω2000)의 물리·화학적 성질

(단위 : %)

비 중	Blaine (cm/g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig-loss
2.9	7,850	26.25	12.66	0.69	41.64	5.24	11.23	0.28

<표7> 혼합제 사용량에 따른 실험배합비

W/B (%)	S/a (%)	B총량 (kg/m ³)	혼 합 비 율		단 위 재 료 량 (kg/m ³)						비 고
			시멘트	혼합제	W	C	혼합제	S	G	AD	
55	49.5	331	100	0	182	331	0	865	914	1.99	
"	"	"	90	10	"	328	33	"	"	"	
"	"	"	80	20	"	265	66	"	"	"	
"	"	"	70	30	"	232	99	"	"	"	
"	"	"	60	40	"	199	132	"	"	"	

<표 8> 활성화제 사용에 따른 실험배합비(배합규격 : 25-210-15)

W/B (%)	혼 합 비 율 (%)			단 위 재 료 량 (kg/m ³)							비 고
	시멘트	슬래그	활성화제	W	C	슬래그	활성화제	S	G	AD	
55.0	80	20	-	182	265	66	-	865	914	1.99	PLAIN 콘크리트
"	60	36 (9)	4 (1)	"	199	119	13	"	"	"	활성화제 사용한 콘크리트
"	"	34 (8.5)	6 (1.5)	"	"	112	20	"	"	"	
"	"	32 (8)	8 (2)	"	"	106	26	"	"	"	
"	"	30 (7.5)	10 (2.5)	"	"	99	33	"	"	"	

<표 9> W/B에 따른 실험배합비(배합규격 : 25-[210, 240, 270]-15)

W/B (%)	S/a (%)	B 총량 (kg/m ³)	단 위 재 료 량 (kg/m ³)							비 고
			W	C	슬래그 (B×%)	활성화제 (B×%)	S	G	AD	
55	49.5	331	182	265	66 (20)	-	865	914	1.99	PLAIN 콘크리트
"	"	"	"	199	119 (36)	13 (4)	"	"	"	활성화 콘크리트
50	48.5	364	182	291	73 (20)	-	835	917	2.18	PLAIN 콘크리트
"	"	"	"	218	131 (36)	15 (4)	"	"	"	활성화 콘크리트
45	47.5	404	182	323	81 (20)	-	802	917	2.42	PLAIN 콘크리트
"	"	"	"	242	146 (36)	16 (4)	"	"	"	활성화 콘크리트

<표 10> 대기온도 변화에 따른 실험배합비

W/B (%)	S/a (%)	B 총량 (kg/m ³)	단 위 재 료 량 (kg/m ³)							비 고
			W	C	슬래그	활성화제	S	G	AD	
55.0	49.5	331	182	265	66	-	865	914	1.99	PLAIN 콘크리트
"	"	"	"	199	119	13	"	"	"	활성화 콘크리트

주) 콘크리트 온도가 10℃가 되도록 배합한 후 대기온도 10℃에서 48시간 동안 양생한 후 탈형하여 수중에서 양생함.

3-3 실험배합비

본 실험에서는 당사에서 제조 판매하고 있는 고강도 혼합재 Ω2000를 활성화제로 사용하는 방안을 도입하여 혼합재의 사용량을 증대하기 위

한 실험배합비이다.

위 <표 7~10>은 각각의 특성 변동에 따른 콘크리트 물성을 파악하기 위한 실험배합비를 나타낸 것이다.

〈표 11〉 혼합재 사용에 따른 실험 결과 (배합규격 : 25-210-15)

W / B (%)	혼합비율 (%)		슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)					비고
	시멘트	슬래그			3 d	7 d (강도비(%))	14 d	21 d	28 d (강도비(%))	
55.0	100	0	11.5	5.0	120	237/100	272	293	302/100	
"	90	10	12.5	5.2	103	215/91	256	294	310/103	
"	80	20	13.0	5.0	94	202/85	248	291	328/109	
"	70	30	14.0	5.0	85	182/77	246	296	325/108	
"	60	40	14.8	4.9	76	164/69	241	296	315/104	

주) 강도비 (%) = $\frac{\text{혼합제를 사용한 콘크리트}}{\text{OPC만 사용한 콘크리트}} \times 100$

5. 실험 결과 및 고찰

5-1 혼합재 사용에 따른 콘크리트의 실험 결과 (〈표 11〉)

〈그림 1〉에서 알 수 있듯이 혼합재 사용량이 증대될 경우에는 콘크리트의 장기강도 향상을 예상할 수 있으나 초기강도 하락으로 거푸집 탈형시기 연장이 발생할 수 있다. 따라서 단순치환 방법으로 혼합재 사용량을 증대하는 것은 한계가 있다.

5-2 활성화제 사용량에 따른 콘크리트의 실험 결과 (〈표 12〉)

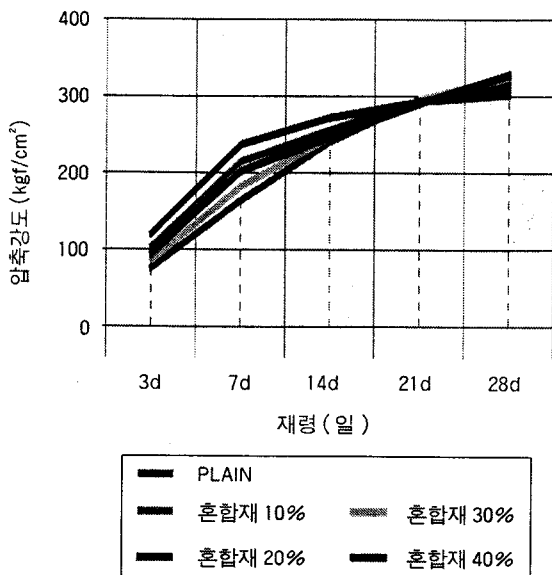
〈그림 2〉에서 알 수 있듯이 활성화제 사용량이

증가할수록 공기량은 0.3~0.7% 정도 감소하고, 압축강도는 28일 압축강도비를 기준으로 17.6~23.8% 정도 상승하며, 슬럼프는 활성화제 사용량이 증가하여도 비슷한 경향을 보인다.

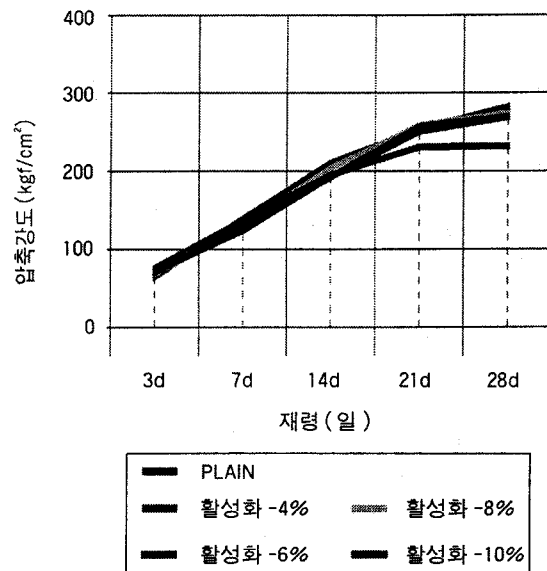
따라서 활성화제의 사용량은 거푸집 탈형시기를 고려하여 재령 7일에서 PLAIN 콘크리트와 동일강도 발현을 기준 할 때 활성화제 사용량은 10%가 적정하다.

5-3 W/B에 따른 실험 결과 (〈표 13〉)

〈그림 3〉의 결과에서 알 수 있듯이 활성화제 사용한 콘크리트는 PLAIN 콘크리트에 비해 재령 7일에서 96.6% 이상, 28일에서 104.9% 이상 강도발현율을 나타내므로 콘크리트의 품질 안정성이



〈그림 1〉 혼합재 사용량에 따른 압축강도



〈그림 2〉 활성화제 사용량에 따른 압축강도

〈표 12〉 활성화제 사용량에 따른 실험 결과 (배합규격 : 25-210-15)

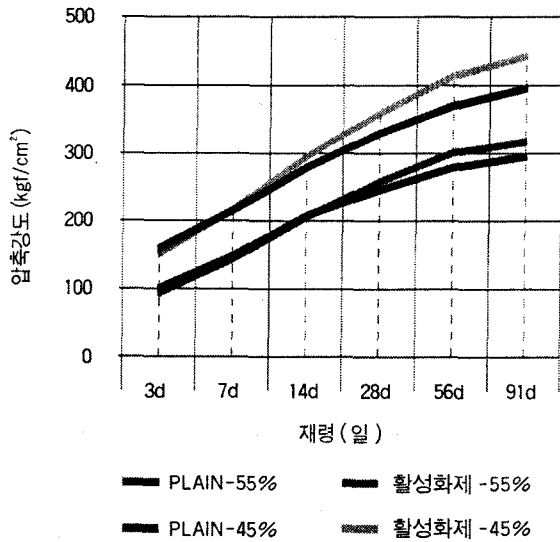
W/B (%)	혼 합 비 율 (%)			슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압 축 강 도 (kgf/cm ²)					비 고
	시멘트	슬래그	활성화제			3 d	7 d	14 d	21 d	28d (강도비(%))	
55.0	80	20	-	19.5	5.8	76	137	195	231	232 (110.5%)	PLAIN 콘크리트
"	60	36 (9)	4 (1)	19.5	5.4	71	131	192	257	269 (128.1%)	활성화제 사용한 콘크리트
"	"	34 (8.5)	6 (1.5)	20.0	5.5	73	124	193	251	269 (128.1%)	
"	"	32 (8)	8 (2)	19.5	5.2	68	130	204	258	274 (130.5%)	
"	"	30 (7.5)	10 (2.5)	19.5	5.1	65	139	210	253	282 (134.3%)	

$$\text{주) 강도비 (\%)} = \frac{\text{재령 28일 압축강도}}{\text{설계기준강도 (210kgf/cm}^2\text{)}} \times 100$$

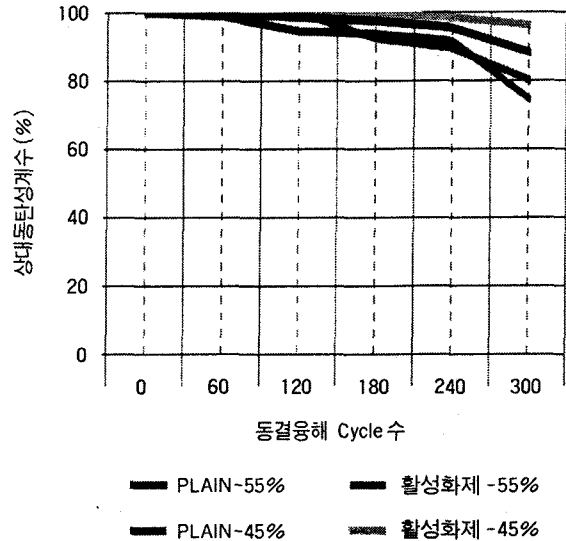
〈표 13〉 W/B에 따른 실험 결과

항 목	단 위	25-210-15		25-240-15		25-270-15		비 고	
		PLAIN 콘크리트	활성화 콘크리트	PLAIN 콘크리트	활성화 콘크리트	PLAIN 콘크리트	활성화 콘크리트		
W / B	%	55	55	50	50	45	45		
슬 럽 프	cm	20.0	20.0	20.0	20.5	20.0	20.0		
공 기 량	%	6.1	5.4	5.9	5.6	5.7	5.1		
응결 시간	초 결	hr : min	8 : 26	9 : 35	8 : 12	9 : 14	7 : 36	8 : 33	
	중 결	"	12 : 20	13 : 50	12 : 14	13 : 17	11 : 32	13 : 00	
블리딩	량	cc/cm ³	0.47	0.47	0.47	0.44	0.39	0.29	
	율	%	10.2	10.2	10.3	9.6	8.5	6.2	
압축 강도 / 강도 비	3 d	kg/cm ²	101	강도/강도비 94/93.1	132	강도/강도비 118/89.4	160	강도/강도비 151/94.4	
	7 d	"	149	144/96.6	187	181/96.8	216	217/100.5	
	14 d	"	208	206/99.0	241	243/100.8	279	295/105.7	
	28 d	"	246	258/104.9	289	306/105.9	330	359/108.9	
	56 d	"	279	301/107.9	325	341/104.9	370	414/111.9	
	91 d	"	295	317/107.5	354	370/104.5	396	443/111.9	
상대동탄성계수	수중양생 14일	%	100	100	100	100	100	100	
	60 Cycle	"	99.0	100	98.3	100	100	100	
	120 Cycle	"	94.6	100	95.8	95.0	98.7	99.6	
	180 Cycle	"	93.8	92.5	92.3	93.0	97.5	99.6	
	240 Cycle	"	91.6	89.5	91.0	91.1	95.5	98.5	
	300 Cycle	"	74.6	80.1	84.6	85.7	88.3	96.2	
	D.F 내구성지수	-	74.6	80.1	84.6	85.7	88.3	96.2	

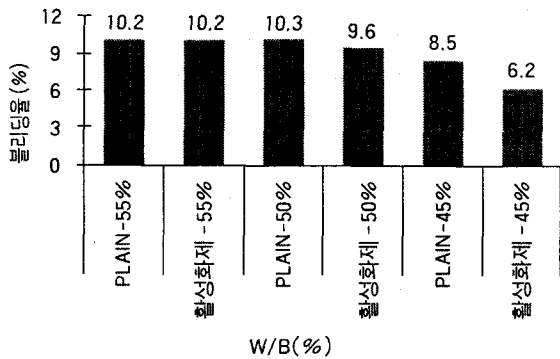
$$\text{주) 강도비 (\%)} = \frac{\text{활성화 콘크리트}}{\text{PLAIN 콘크리트}} \times 100$$



〈그림 3〉 W/B비에 따른 압축강도 비교



〈그림 5〉 동결융해에 대한 내구성 비교



〈그림 4〉 W/B비에 따른 블리딩 비교

높아졌다. 또한 활성화제를 사용한 콘크리트는 W/B가 낮아질수록 활성도가 높아지는 경향을 보인다. 이는 W/B가 낮아질수록 활성화제의 C-S-H 수화물의 증가로 인해 초기 반응성이 높아졌기 때문이다.

〈그림 4〉에서 알 수 있듯이 활성화제를 사용한 콘크리트가 PLAIN 콘크리트보다 블리딩율이 감소한다. 즉, 이는 재료분리 현상이 줄어들기 때

문에 콘크리트 타설 후 발생하는 블리딩에 의한 공극의 최소화, 균열의 최소화, 콘크리트의 표면 마무리 등의 품질향상으로 고객불만을 최소화하는데 기여할 것이며 또한 W/B가 낮아질수록 그 효과는 클 것으로 사료된다.

〈그림 5〉의 결과에서 알 수 있듯이 동결에 대한 내구성은 각각의 W/B에서 상대동탄성계수가 300Cycle 완료시 PLAIN 콘크리트와 활성화제 콘크리트가 60% 이상을 나타내고 있으므로 동결에 대한 내구성에는 안전할 것으로 사료된다.

5-4 대기온도에 따른 활성화도 실험 결과

〈표 14〉의 결과에서 알 수 있듯이 콘크리트 온도와 대기 양생온도가 낮을 경우 활성화 콘크리트의 초기 활성도가 떨어져 PLAIN 콘크리트와 강도가 비슷하게 발현되는 시점이 늦어지는 경향을 보이므로, 동절기에 활성화제를 사용할 경우 콘크리트 온도와 대기 양생온도를 관리하거나,

〈표 14〉 실험 결과

구분	W/B (%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm²)					콘크리트 온도 (°C)
				3 d	7 d	14 d	28 d	56 d	
PLAIN 콘크리트	55	20.5	5.9	85	148	191	237	283	11
활성화 콘크리트	"	21.0	6.4	74	130	182	257	301	11

이에 따른 대책, 즉 혼합재의 사용량을 줄이거나, 활성화제의 사용량을 증대하는 등의 조치가 필요하다.

6. 결론 및 기대효과

본 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 혼합재 사용량이 증대될 경우에는 콘크리트의 장기강도 향상 및 제조원가 절감을 예상할 수 있으나 초기강도 하락으로 거푸집 탈형시기가 연장될 수 있으므로 혼합재 사용량 증대는 한계가 있다.
- 2) 활성화제 사용량이 증가할수록 공기량은 0.3~0.7% 정도 감소하고, 압축강도는 28일 압축강도비를 기준으로 17.6~23.8% 정도 상승하며, 슬럼프는 활성화제 사용량이 증가하여도 비슷한 경향을 보인다. 따라서 활성화제의 사용량은 거푸집 탈형시기를 고려하여 재령 7일에서 PLAIN 콘크리트와 동일 수준의 강도발현을 기준할 때 활성화제 사용량은 약 10%가 적정하다.
- 3) W/B비에 따른 콘크리트의 제반 물성은 다음과 같은 경향을 보인다.
 - 활성화제 사용한 콘크리트는 슬럼프가 PLAIN 콘크리트와 유사한 경향을 보이나, 공기량은 0.3~0.7% 정도 감소한다.
 - 활성화제 사용한 콘크리트는 PLAIN 콘크리트에 비해 재령 7일에서 96.6% 이상, 28일

에서 104.9% 이상 강도발현율을 나타내므로 콘크리트의 품질 안정성이 높아졌다. 또한 활성화제를 사용한 콘크리트는 W/B가 낮아질수록 활성도가 높아지는 경향을 보인다. 이는 W/B가 낮아질수록 활성화제의 C-S-H 수화물의 증가로 인해 초기 반응성이 높아졌기 때문이다.

- 활성화를 사용한 콘크리트가 PLAIN 콘크리트보다 블리딩율이 감소한다. 즉, 이는 재료분리 현상이 줄어들기 때문에 콘크리트 타설 후 발생하는 블리딩에 의한 공극의 최소화, 균열의 최소화, 콘크리트의 표면마무리 등의 품질향상으로 고객불만을 최소화하는데 기여할 것이며 또한 W/B가 낮아질수록 그 효과는 클 것으로 사료된다.
 - 동결에 대한 내구성은 각각의 W/B에서 상대동탄성계수가 300Cycle 완료시 PLAIN 콘크리트와 활성화제 콘크리트가 60% 이상을 나타내고 있으므로 동결에 대한 내구성은 안전할 것으로 사료된다.
- 4) 콘크리트 온도와 대기 양생온도가 낮을 경우 활성화 콘크리트의 초기 활성도가 떨어져 PLAIN 콘크리트와 강도가 비슷하게 발현되는 시점이 늦어지는 경향을 보이므로, 동결기에 활성화제를 사용할 경우 콘크리트 온도와 대기 양생온도를 관리하거나, 이에 따른 대책, 즉 혼합재의 사용량을 줄이거나, 활성화제의 사용량을 증대하는 등의 조치가 필요하다.