

콘크리트의 특성에 미치는 시멘트 중 C_3A 함량의 영향

강석화·김원기*·손명수·강창협·임경연 허흥기·유영호
 <동양중앙연구소> <동양페이저 삼척공장>

1. 서 론

1999년 미국에 수출한 시멘트에서 C급 플라이 애쉬와 지연제를 혼용할 때 응결시간이 지연되고 초기강도 발현이 지체되는 현상이 관찰되었다.

이러한 현상의 원인을 분석한 결과 C급 플라이 애쉬를 25~30% 치환하여 시멘트량이 희석되어 초기 응결에 중요한 역할을 하며 화학 혼화제의 대부분을 흡착하는 특성을 갖는 시멘트 중 $3CaO \cdot Al_2O_3$ (이하 C_3A)의 함량이 감소되어 나타난 것으로 생각되었다.

특히 C급 플라이 애쉬는 국내에서 사용되는 F급 플라이 애쉬와는 달리 강열감량이 0.5% 이하로 혼화제를 흡착하는 특성이 없어서 C_3A 부족에 의한 혼화제 흡착량의 감소와 더불어 지연제를 과량 첨가한 효과를 부여한 것으로 생각되었다.

한편으로 국내에서도 최근 들어 레디믹스트 콘크리트의 운반시간이 길어짐에 따라 시간에 따른 콘크리트의 작업성 손실을 억제하기 위하여 지연성 혼화제를 널리 사용하고 있다.

또한 콘크리트의 내구성 향상과 폐자원의 유효 활용 및 레디믹스트 콘크리트에서 제조원가의 절감을 위하여 고로 슬래그 미분말의 활용이 점차 증가하고 있는 추세이다.

일반적으로 슬래그 미분말을 콘크리트에 첨가하는 경우 응결이 지연되고 초기 강도발현이 지체되는 경향이 있다.

또한 고로슬래그 미분말은 앞에서 언급한 C급 플라이 애쉬와 마찬가지로 화학 혼화제를 흡착하는 특성이 적으므로 시간에 따른 작업성의 손실을 억제하기 위하여 지연성 혼화제를 함께 사용

하는 경우 이러한 경향은 더욱 심화될 것으로 예측된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 시멘트 제조 측면의 접근으로 시멘트 중 C_3A 의 함량이 다른 시멘트를 사용하여 지연성 혼화제와 고로슬래그 미분말을 사용하는 콘크리트의 초기 유동성 및 강도발현 특성에 미치는 시멘트의 영향을 고찰하였다.

또한, 이 결과를 혼합재를 사용하는 시멘트의 적합한 특성 확립을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

사용한 시멘트는 실공정에서 제조된 클링커를 선별하여 C_3A 의 함량이 4~8% 사이에서 변화하는 5가지를 선정하였다.

<Table 1>은 본 실험에 사용한 시멘트의 화학 분석 결과를 나타낸 것이다.

<Table 2>는 시멘트의 화학분석 결과를 토대로 역추정한 클링커의 계수와 수정 Bogue식을 사용하여 계산한 광물조성, Blaine 비표면적을 나타낸 것이다. 클링커 광물조성이 변화함에 따라 SM과 IM이 변동하였다.

<Table 3>은 사용한 고로 슬래그 미분말의 비중, 비표면적과 화학분석 결과를 나타낸 것이다. 혼화제로는 W.R.Grace의 지연형 감수제인 Daratard 17을 사용하였다.

<Table 4>는 콘크리트 실험에 사용한 골재의 특성을 나타낸 것이다.

〈Table 1〉 시멘트의 화학분석 결과

No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Ig. loss	F-CaO
1	20.80	4.10	3.57	61.98	3.76	2.54	1.07	0.79	0.35	0.20	0.16	0.96	1.13
2	20.74	4.24	3.56	62.11	3.76	2.39	0.97	0.08	0.35	0.19	0.15	1.14	1.11
3	20.66	4.34	3.43	62.12	3.77	2.43	1.07	0.08	0.36	0.21	0.15	1.16	1.08
4	20.65	4.64	3.26	61.91	3.72	2.35	1.10	0.08	0.36	0.19	0.15	1.14	1.11
5	20.47	5.34	3.26	61.74	3.65	2.28	1.02	0.11	0.36	0.19	0.14	1.07	1.09

〈Table 2〉 화학분석 결과로 추정된 클링커의 계수치와 광물조성

No.	LSF	HM	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Blaine 비표면적 (m ² /kg)
1	91.95	2.12	2.71	1.15	49.73	22.11	4.83	10.85	329
2	92.31	2.12	2.66	1.19	50.27	21.54	5.22	10.83	335
3	92.56	2.13	2.66	1.27	50.47	21.15	5.70	10.44	340
4	91.99	2.11	2.61	1.42	47.98	23.01	6.77	9.93	344
5	91.35	2.07	2.38	1.64	44.27	25.29	8.64	9.94	344

〈Table 3〉 고로 슬래그 미분말의 특성

비 중	Blaine (cm ² /g)	화 학 성 분 (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss
2.92	4,810	32.4	13.6	0.40	43.0	5.38	3.17	-0.05

〈Table 4〉 사용한 골재의 특성

구 분	조 립 율	비 중	흡수율(%)	잔입자(%)	마모율(%)	단위용적중량(kg/m ³)
간 골재	2.90	2.59	1.3	1.34	-	1,500
굵은 골재	6.63	2.60	0.70	-	20.43	1,460

2.2 실험 내용

C₃A의 함량이 변화할 때, 시멘트의 특성변화를 알아보기 위하여 각 시멘트의 물성을 측정하였다.

측정한 물성으로는 표준주도, 압축강도, 미소수화열이었다.

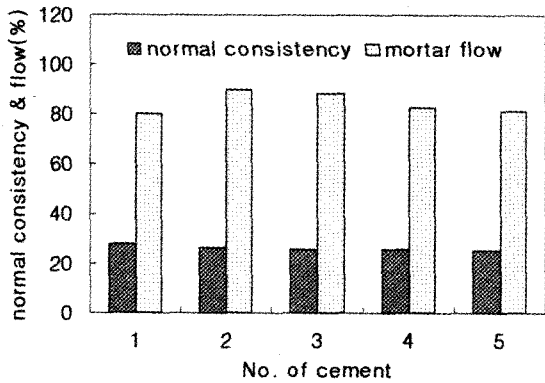
콘크리트는 시멘트만을 사용하는 경우와 고로 슬래그 미분말을 시멘트에 대하여 30% 치환하는 경우로 대별하여 동일 배합에서 각 콘크리트의 유동성을 측정하였으며, 슬럼프를 일정하게 조정 한 배합을 사용하여 슬럼프 손실, 응결시간, 3, 7, 28일 재령에서의 압축강도 발현추이를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시멘트의 특성 변화

시멘트 중 C₃A 함량의 변화에 따른 표준 주도와 몰탈 플로우(W/C=0.485)의 변화를 〈Fig. 1〉에 나타내었다. 표준 주도는 C₃A 함량 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었는데 이것은 석고의 함량이 유사하므로 C₃A 함량이 낮을수록 위응결의 경향을 나타낼 수 있기 때문으로 생각되었다. 반면, 몰탈의 플로우는 C₃A 함량이 5% 부근에서 가장 높은 것으로 나타났다.

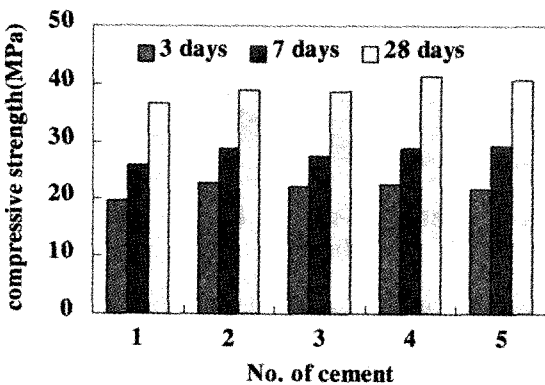
〈Fig. 2〉는 각 시멘트의 압축강도 발현 특성을 나타낸 것으로 C₃A 함량이 증가할수록 전재령에



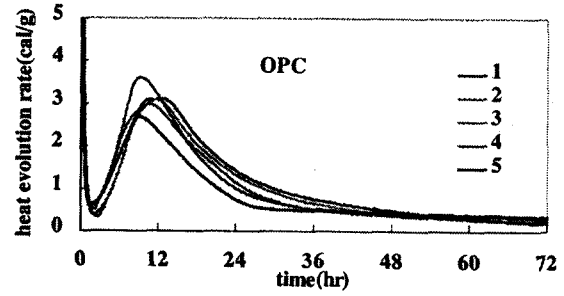
〈Fig. 1〉 각 시멘트의 표준 주도와 몰탈(KS L 5105)의 플로우

서 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 초기 재령에서는 C₃A 함량이 증가하면서 초기 강도발현이 촉진된 것으로 생각되며, 28일 강도도 높은 것은 C₃A 함량이 변하면서 시멘트 클링커의 계수치 중 SM이 증가한 결과로 생각된다.

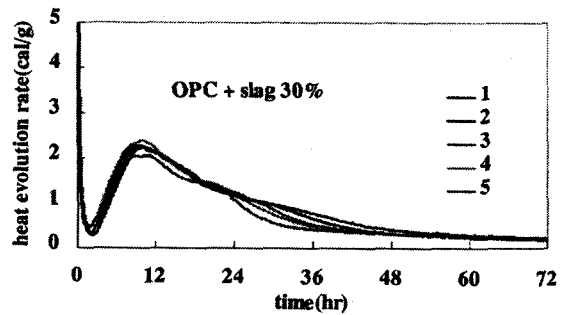
〈Fig. 3~5〉는 각각 시멘트 단독, 고로 슬래그 미분말 30% 치환, 고로 슬래그 미분말 30% 치환 및 지연제 0.4% 첨가시 수화발열 곡선을 나타낸 것이다. 시멘트 단독의 경우(〈Fig. 3〉), C₃A 함량 증가에 따라 유도기가 감소하며 2차발열 피크의 정점이 빨라지는 경향을 나타내었다. 여기에 슬래그 미분말을 30% 치환한 경우(〈Fig. 4〉), 이러한 경향은 다소 완화되는 결과를 나타내었다. 그러나, 슬래그 미분말과 지연제를 동시 첨가한 경우(〈Fig. 5〉), C₃A 함량 변화에 따라 다른 경향을 나타내었는데 C₃A 함량이 낮을수록 유도기가 증가하고 2차 피크의 정점이 출현하는 시기가 크게 지연되었다. 이것은 C₃A의 함량이 감소할수



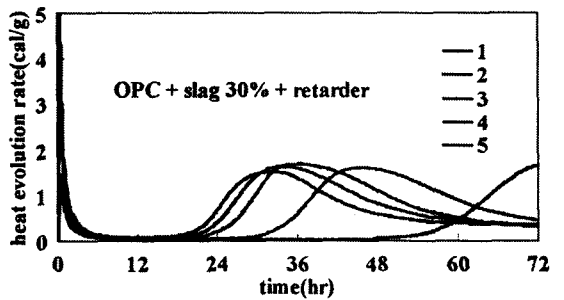
〈Fig. 2〉 각 시멘트의 압축강도



〈Fig. 3〉 각 시멘트의 수화발열 특성 (OPC 단독, W/C = 0.5)



〈Fig. 4〉 슬래그 미분말 30% 치환 시멘트의 수화발열 특성 (W/B=0.5)



〈Fig. 5〉 슬래그 미분말 30% 및 지연제 0.4% 첨가시 수화발열 특성 (W/B=0.5)

록 화학혼화제의 흡착량이 감소하여 실질적인 혼화제의 첨가량이 증가하는 효과가 나타나기 때문으로 생각된다.

3.2 동일 배합 콘크리트의 유동 특성

〈Table 5〉는 콘크리트의 유동성 발현 특성을 알아보기 위한 배합으로 시멘트만을 단독으로 사용하는 경우의 배합과 슬래그 미분말을 30% 치환한 경우의 배합을 나타낸 것이다. 슬래그 미분말은 시멘트보다 비중이 낮으므로 단위수량을 감소시켜서 시멘트 페이스트의 용적과 골재의 용적을

〈Table 5〉 동일배합 콘크리트의 배합표

배합	단위량 (kg/m ³)					혼화제 (B×%)	W/C (%)	S/A (%)
	물	시멘트	슬래그	잔골재	굵은골재			
OPC	171	305	0	840	976	0.4	58.3	46.9
슬래그 30%	169	214	92	840	976	0.4	55.4	46.9

일정하게 유지하였다. 〈Fig. 6〉은 각각 동일배합 콘크리트의 시멘트 중 C₃A의 함량 변화에 따른 슬럼프의 변화를 나타낸 것이다. 시멘트 단독배합에서 슬럼프는 C₃A의 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

3.3 유동성이 일정한 콘크리트에서 특성 변화

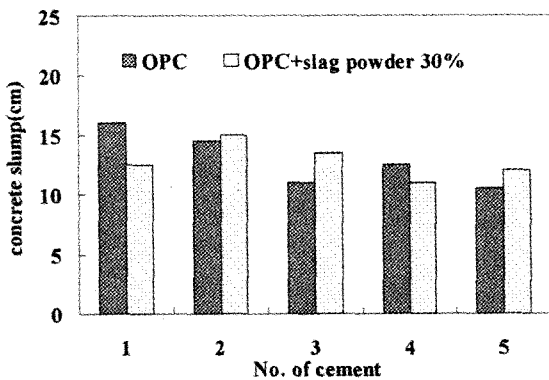
〈Table 6〉은 콘크리트의 슬럼프가 15±1cm 사이 값을 발현하도록 단위수량을 조정한 배합 결과를 나타낸 것이다. 이 배합에서 콘크리트의 시간에 따른 슬럼프의 손실과 응결시간, 압축강도 발현 특성을 조사하였다.

〈Fig. 7〉은 슬래그 미분말을 시멘트에 대하여 30%를 치환하고 지연형 감수제를 사용한 콘크리

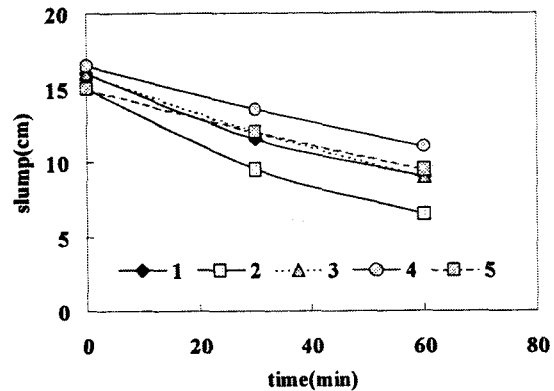
트에서 시간에 따른 슬럼프의 변화를 나타낸 것으로 시멘트 중의 C₃A 함량 변화에 따른 특별한 경향은 발견할 수 없었다. 이것은 특성에 따른 콘크리트의 슬럼프 손실은 시멘트 중의 C₃A 함량 변화보다는 혼합재나 혼화제의 영향을 더욱 크게 받는다는 것을 시사한다.

〈Fig. 8〉은 각 콘크리트의 관입저항에 의한 응결시간을 측정된 결과이다. 콘크리트의 응결시간은 슬래그 미분말을 치환한 경우, 시멘트 단독 사용시보다 지연이 되며 이러한 경향은 시멘트 중의 C₃A 함량이 낮을수록 심화되는 것으로 나타났다.

특히 No. 1, 2 시멘트의 경우 응결시간이 크게 지연되는 결과를 나타내었다. 이것은 앞의 시멘



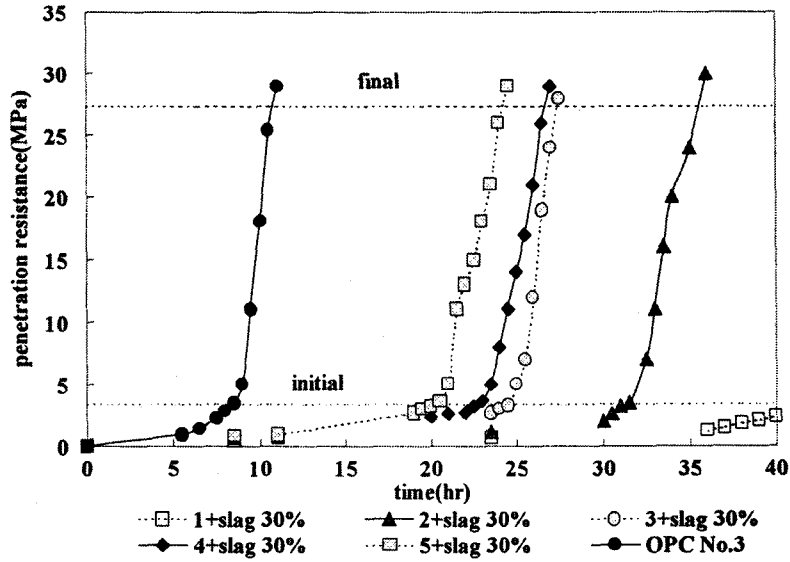
〈Fig. 6〉 동일배합 콘크리트에서 슬럼프의 발현 특성



〈Fig. 7〉 슬래그 30% 및 지연제를 첨가한 콘크리트의 시간에 따른 슬럼프 손실

〈Table 6〉 동일 슬럼프(15±1cm)를 발현하는 콘크리트의 배합 결과

No.	단위량 (kg/m ³)					혼화제 (B×%)	W/C (%)	S/A (%)
	물	시멘트	슬래그	잔골재	굵은골재			
1	166	210	90	845	982	0.4	55.4	46.9
2	169	214	92	840	976	0.4	55.4	46.9
3	172	217	93	834	969	0.4	55.4	46.9
4	174	220	94	830	965	0.4	55.4	46.9
5	174	220	94	830	965	0.4	55.4	46.9

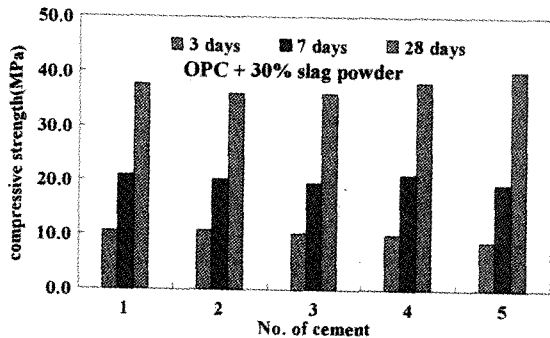


〈Fig. 8〉 콘크리트의 관입 저항에 의한 응결 시간 측정 결과

트 수화열 시험 결과와 일치하는 것으로 슬래그 미분말과 지연형 감수제를 동시에 사용하는 경우 시멘트 중의 C₃A 함량이 일정량 이상이어야 한다는 것을 시사하고 있다. 특히 이러한 경향은 온도가 낮을수록 심화되어 실제 시공 현장에서 주의가 필요하다고 생각된다.

〈Fig. 9〉는 각 콘크리트의 3, 7, 28일 재령에서의 압축강도를 나타낸 것으로 3일 재령에서는 응결시간이 크게 차이가 나더라도 시멘트 중의 C₃A 함량 변화에 따라 유사한 값을 발현하는 것으로 나타났다. 이것은 사용한 지연형 감수제가 응결 시간만을 지연시키는 초지연제로 생각된다. 7일 강도도 3일 강도와 유사한 경향을 나타내었다.

한편으로 28일 강도는 시멘트 중의 C₃A 함량



〈Fig. 9〉 동일 슬럼프의 콘크리트에서 압축강도 발현 특성

이 증가할수록 오히려 증가하는 경향을 나타내었는데 이것은 시멘트 클링커의 광물조성이 변하면서 계수 중 SM이 증가한 영향으로 생각된다.

4. 결 론

이상 매우 한정된 범위내에서 시멘트 중의 C₃A 함량 변화가 콘크리트의 물성에 미치는 영향을 검토한 결과 본 실험 결과내에서 결론은 다음과 같다.

- 1) 시멘트 중의 C₃A 함량 변화에 따라 클링커 구성 광물 상호간의 비율이나 계수치도 변하므로 시멘트 특성의 변화가 예측된다.
- 2) 압축강도는 초기 재령에서는 큰 차이가 없었으며 28일 재령에서는 C₃A 함량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었는데 클링커 계수치인 SM 증가에 기인하는 것으로 생각된다.
- 3) 슬래그 미분말만을 치환한 경우, C₃A 함량에 따른 시멘트-혼합재계의 수화반응은 큰 차이가 나타나지 않았다.
- 4) 슬래그 미분말과 지연제를 혼용한 경우 C₃A 함량이 낮은 시멘트는 수화 및 응결 지연을 나타내었으나 콘크리트의 3일 강도는 차이가 없어서 일단 응결이 되면 정상적인 수화경로를 거치는 것으로 생각된다.