

초기수화 및 유동성에 미치는 시멘트 재료적 영향인자 검토

서신석* · 나상철 · 윤용식 · 김정환

〈한일시멘트공업(주) 단양공장〉

1. 서 론

시멘트 콘크리트의 초기수화 및 유동성에 미치는 영향인자는 매우 다양하며, 이중 시멘트 재료적 영향인자만을 고려해 볼 경우, 화학적 특성으로는 클링커 광물조성 및 반응성, 미량성분(알칼리 황산염 등), 석고종류 및 첨가량 등을 들 수 있으며, 물리적 특성으로는 분말도, 입도분포, 잔사 및 입형 등의 입도특성 등을 들 수 있다.^{1~6)} 이러한 영향인자는 시멘트 콘크리트의 초기수화 및 유동성 뿐만이 아닌, 압축강도에도 매우 큰 영향을 미치게 되므로 상호 절충 보완이 필요한 인자들이라 할 수 있다.

근래까지 국내 시멘트 제조업계에서는 시멘트 품질향상의 지표로, 압축강도를 중심으로 관리해 온 것이 사실이며, 이에 따라 각 업체간의 압축강도 향상을 위한 꾸준한 노력으로 현재에는 각 사 모두가 KS 기준치를 훨씬 상회하는 매우 우수한 K강도를 유지시키고 있다.

그러나, 이러한 초기수화 활성이 높은 시멘트는 K강도가 높은 시멘트라 할지라도 2차제품(모탈, 콘크리트) 적용시 유동성의 저하를 가져올 수 있으며, 이는 결국 작업성 및 유동성을 기준으로 배합설계 되는 2차제품의 설계기준 강도에 못미치는 결과를 가져오게 된다. 즉, 2차제품의 유동성 확보 및 압축강도 증진을 위한 시멘트 재료적 측면에서의 검토 초점은 시멘트의 K강도를 과도하게 높이기 보다는 유동성 확보에 비중을 두는 것이 보다 현실적이며, 현재 시멘트 제조업계의 세계적인 추세라 할 수 있다.

최근 건설의 대형화 및 고층화에 따라 콘크리트 재료로서 시멘트의 고유동, 저열, 고강도화는

전세계적인 연구 추세이며, 이런 연구는 적은 혼합수로 고유동성을 가지며 재료 분리현상이 작고, 시공후에는 고강도와 내구성 확보가 가능한 시멘트의 개발 연구에 집중되고 있으며, 이들 모두는 유동성을 기본으로 하고 있다. 따라서 현재 소비자 중심의 시멘트 제조를 위해선, 필연적으로 양호한 유동성 확보가 기본이 되어야 하며, 이에 따른 2차제품의 압축강도 향상 역시 기대될 수 있다.

일반적으로 시멘트 단미의 재료적 특성을 제외하고라도 콘크리트의 강도 향상 및 유동성 확보에 대한 방법은 기존 문헌⁷⁾에 많이 발표되었으나, 2차제품의 바인더로 작용하는 시멘트 재료적 특성 역시 2차제품의 물성에 상당한 영향을 미치므로 이들 시멘트에 대한 물성개선이 우선되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 보통 포틀랜드 시멘트의 초기수화 및 유동성에 영향을 미칠 수 있는 인자로 클링커 광물조성, 석고첨가량, 분말도 및 입도분포 등의 시멘트 재료적 영향인자들에 대해 종합적으로 검토해 보고자 하였으며, 이에 대한 유동성 및 기타 물성 변화에 대해 살펴보고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 출발 물질

시멘트의 광물조성 변화에 따른 초기수화 및 유동성 변화를 살펴보기 위해, 당사 원부재료를 이용, 실험실 로에서 1,450°C, 30min 소성하여 <표1> 및 <표2>에 보이는 바와 같이 클링커를

〈표 1〉 C₃A 함량별 소성 클링커 광물조성

(단위 : wt. %)

구 분	광 물 조 성				Clinker IM	Clinker 고용 SO ₃	f-CaO
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
C-1	55.14	21.82	5.84	12.42	1.10	0.23	0.45
C-2	53.98	22.04	8.30	10.95	1.38	0.49	0.48
C-3	53.25	22.73	9.16	9.98	1.51	0.17	0.51

〈표 2〉 C₃S/C₂S비 및 C₃A 함량별 소성 클링커 광물조성

(단위 : wt. %)

구 분	광 물 조 성				Clinker IM	Clinker 고용 SO ₃	f-CaO
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
A	52.40	23.92	6.56	11.93	1.27	0.37	0.30
B	53.29	22.84	7.23	11.44	1.36	0.40	0.32
C	55.03	20.93	7.67	11.08	1.43	0.43	0.32

〈표 3〉 실험에 사용된 공정 clinker 및 석고 화학분석 결과

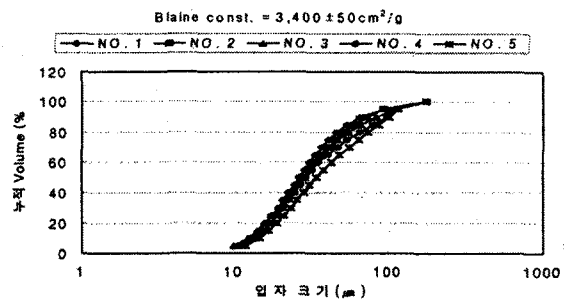
(단위 : wt. %)

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss	f-CaO	SUM
공정 Clinker	21.98	5.66	2.72	64.21	2.82	0.83	0.21	1.07	0.25	0.51	99.75
인산정제석고	1.63	2.24	0.06	33.06	—	41.30	—	—	20.56	—	98.85

합성하였다.

한편, 석고 첨가량별, 분말도별 및 입도분포별 물성변화를 살펴보기 위해, 당공장 #3K/L 클링커 및 화학석고를 각각 채취하여 사용하였으며, 그 화학조성을 〈표 3〉에 나타내었다.

특히, 입도분포별 시멘트 물성 검토를 위해, 석고 첨가량을 동일화 하고(Total SO₃=2.4%), 〈그림 1〉 및 〈표 4〉에 보이는 바와 같이 실험실 밀을 이용하여 동일 분말도(3,400±50cm²/g)의 다양한 입도분포의 시료를 조제하였다. 제조된 이들 시멘트의 입도분포 확인은 NICOMP사 Model 770을 이용하여 분석하였다.

〈그림 1〉 실험실 mill로 제조된 동일 분말도(Blaine 3,400±50cm²/g)의 입도 분포별 시멘트〈표 4〉 입도분포별 시멘트의 입도 특성분석 결과(Blaine 3,400±50cm²/g)

구 분	평균 입경 (μm)	30μm 이하 통과분 (%)	90μm 잔분 (%)	Position Parameter d' (μm)	Inclination Parameter (n)
NO. 1	36.03	57.26	5.81	32.83	1.189
NO. 2	38.10	52.33	5.57	35.75	1.147
NO. 3	40.38	52.44	8.70	36.59	0.927
NO. 4	43.40	50.84	12.15	39.18	0.863
NO. 5	50.22	42.68	14.25	47.15	0.847

2.2 실험 방법

본 실험에서 검토할 실험범위를 <표 5>에 간략히 요약하여 나타내었다. 광물조성비별 물성 검토를 위해 제조된 클링커(<표 1, 2>)와 석고(<표 3>)를 혼합분쇄하여 기타 조건(Blaine $3,400 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$, Total $\text{SO}_3 = 2.4\%$)을 동일화하고 광물조성비별 검토를 행하였으며, 석고첨가량별 시험은 Total SO_3 2.0~2.8% 범위, 분말도별 시험은 3,000, 3,200, $3,400 \text{ cm}^2/\text{g}$ 범위, 입도분포별은 동일 분말도($3,400 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$)로 <그림 1> 및 <표 4>와 같은 입도분포 및 특성을 갖는 시료를 이용하여 각각 시행하였다.

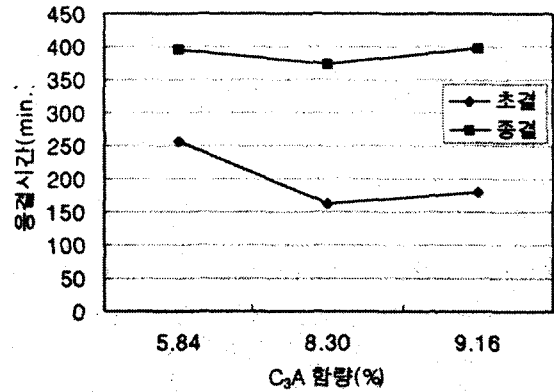
2.2.1 분석 및 물성 검토

제조된 시멘트의 물성검토로 응결시험(KS L 5103), 몰탈 Flow 및 압축강도(KS L 5105)를 검토하였으며, 시멘트 초기수화 특성을 살펴보기 위해 미소수화 열량측정, 페이스트 Mini Slump 경시변화 및 수화시험 등을 각각 행하였다. 혼화제는 H사 고성능 감수제(HS-3000)를 사용하였으며, 첨가량은 시멘트 대비 1.2%로 고정 첨가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 클링커 광물조성비의 영향

시멘트 클링커 광물 중 시멘트 페이스트의 초기 유동성에 많은 영향을 미칠 수 있는 C_3A 함량변화에 따른 물성변화를 살펴보고자 <표 1>의



<그림 2> 시멘트 C_3A 함량에 따른 응결시간 변화

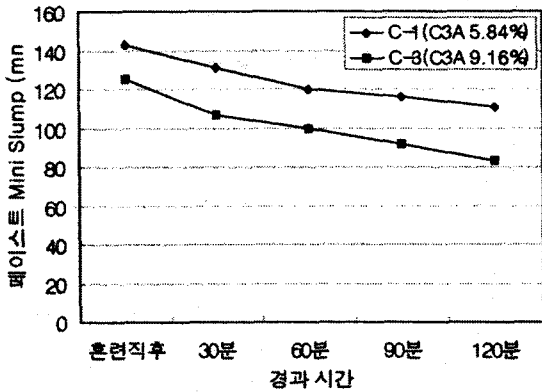
시료를 이용하여 응결시험을 행하였으며, 그 결과를 <그림 2>에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 C_3A 함량이 증가될수록 초결은 빠르게 진행되는 경향을 보였으며, 종결에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 초결의 경우, C-2 시멘트(C_3A 8.30%)가 C-3 시멘트(C_3A 9.16%)보다 C_3A 함량이 적는데도 불구하고 초결이 다소 빠르게 진행된 것은 <표 1>에서 보는 바와 같이 C-2 시멘트내의 고용 SO_3 함량이 상대적으로 많음으로 인해 Total SO_3 기준으로 첨가되어지는 석고 첨가량이 C-3 시멘트에 첨가되어지는 석고 첨가량보다 적게 첨가되었기 때문으로 판단된다.

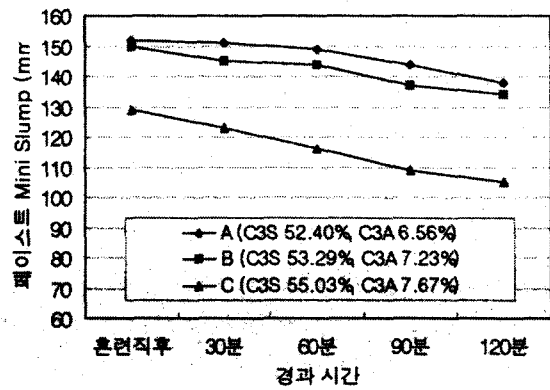
따라서 클링커에 고용된 SO_3 함량이 증가될 경우, 실공정에서는 Total SO_3 를 기준으로 석고 첨가량을 결정하기 때문에, 상대적으로 석고 첨가량은 적게 되며, 이로 인한 빠른 응결시간 및 유동성 저하의 원인이 된다. 따라서 클링커내의

<표 5> 실험 범위

구분	Blaine (cm^2/g)	Total SO_3 (%)	비고
광물조성비별	$3,400 \pm 50$	2.4	C_3A 함량비별(<표 1> 참조) $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ 및 C_3A 함량비별(<표 2> 참조)
석고첨가량별	$3,400 \pm 50$	2.0 2.2 2.4 2.6 2.8	공정 클링커 및 석고(<표 3> 참조)
분말도별	3,000 3,200 3,400	2.4	실험실 Mill 분쇄
입도분포별	$3,400 \pm 50$	2.4	공정 클링커 및 석고(<표 3> 참조) <그림 1> 및 <표 4> 시료



〈그림 3〉 C₃A 함량변화에 따른 시멘트 페이스트의 유동성 경시변화(w/c=0.3, A/c=1.2%)



〈그림 4〉 C₃S 및 C₃A 함량에 따른 시멘트 페이스트의 유동성 경시변화(w/c=0.3, A/c=1.2%)

C₃A 함량 증가 및 클링커 고용 SO₃ 함량이 증가 될 경우에는 석고첨가량 역시 함께 증가시켜야만 할 것으로 판단된다.^{2,7)}

〈그림 3〉은 클링커 고용 SO₃ 함량 변화에 따른 석고 첨가량 변화의 영향을 배제하기 위해, 클링커 고용 SO₃가 유사한 〈표 1〉의 C-1과 C-3 시료만을 선택하여 시멘트 페이스트 유동성 경시변화를 살펴본 결과로, C₃A 함량이 낮은 C-1 시멘트가 유동성이 양호한 것으로 나타났다.

한편, C₃A 함량 및 초기수화에 영향을 미칠 수 있는 C₃S 함량 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 〈표 2〉의 시료를 이용하여 페이스트 유동성 경시변화를 살펴보았으며, 그 결과를 〈그림 4〉에 나타내었다.

〈그림 4〉에서 보는 바와 같이 C₃S 및 C₃A 광물조성상이 상대적으로 적은 시멘트 A가 유동성이 상대적으로 우수함을 보였으며, 직선의 기울기로 볼 때 미소하지만, 초기수화 반응성이 높은 C₃A 및 C₃S의 함량이 낮은 시멘트 A가 Slump loss가 다소 낮음을 알 수 있었다. 따라서 고유동 콘크리트 제조를 위한 시멘트 재료적 특성 개선을 위해선 시멘트 조성광물 중 C₃S/C₂S비 및 C₃A의 성분을 다소 낮추는 것이 보다 유리하다 하겠다.

그러나, 한편으로 modulus 변화(IM, LSF 하향조정)에 따른 클링커내 C₃S/C₂S비 및 C₃A 조성비를 줄여간다는 것은 사실상 kiln 소성공정에서는 다소 위험한 일로 preheater 및 kiln의 과도한 코팅을 유발할 수 있으며, kiln내 휘발 알칼리 순환에 문제를 일으킬 소지가 있다. 따라서

광물조성비의 변화를 통한 물성개선을 위해선 kiln 소성공정과 병행하여 세심한 주의가 요구되며, 지속적인 관찰을 통해 점차적으로 변화시키는 것이 바람직하다.

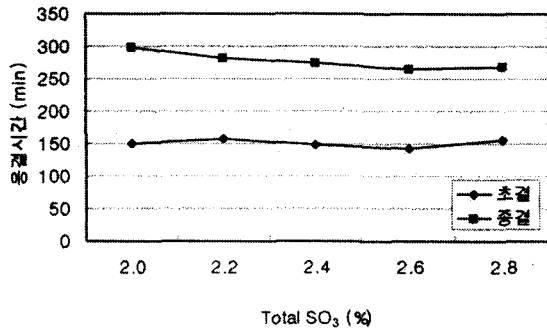
3.2 석고 첨가량별 물성 검토

시멘트 중의 석고는 C₃A의 급격한 초기 수화 반응에 의한 급결을 방지하기 위해 첨가되어지는데, 이외에 초기강도 개선, 작업성 확보, 건조수축방지 및 화학적 저항성 등을 높이는 데에도 효과가 있기 때문에 응결지연에 필요한 석고 첨가량(SO₃ 1.5% 정도)보다는 다소 높은 석고 첨가량이 실공정에서는 적용된다. 그러나, 과잉의 석고첨가량은 오히려 시멘트 물성에 악영향(압축강도 하락, 유동성 저하, lump 현상 등)을 미칠 수 있으므로 이 또한 적정 첨가량이 요구된다.²⁾

한편, 이들 첨가량은 각 공정 클링커의 화학조성(C₃A 함량, 가용성 알칼리 등) 및 특성(분말도) 등에 따라 달라질 수 있기 때문에^{2,7)} 각 공정별 실험을 통해 밝혀내는 것이 가장 타당하다.

따라서 본 실험에서는 〈표 3〉에서 보인 바와 같이 당공장에서 실사용중인 클링커와 석고를 이용하여 분말도 3,400±50 μ m/g의 석고 첨가량별 시멘트를 제조하였으며, 이들 석고 첨가량별 물성의 검토 결과를 〈그림 5~10〉에 각각 나타내었다.

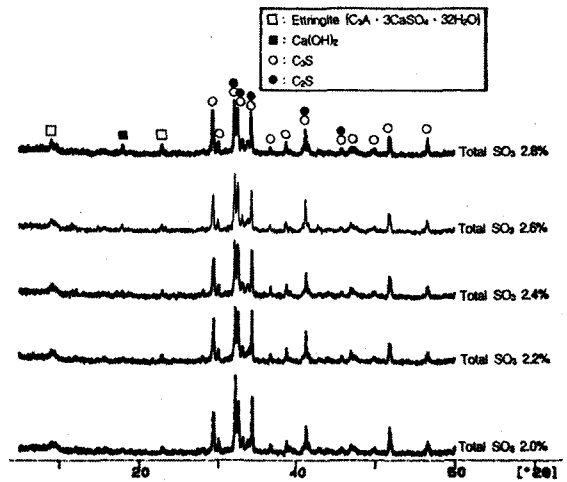
〈그림 5〉에 석고 첨가량에 따른 시멘트의 응결 시험 결과를 나타내었다. 초결의 경우, 석고 첨가량(Total SO₃%)이 증가됨에도 불구하고 큰 영향이 없는 것으로 나타났으며, 종결에 있어서는 석고 첨가량이 증가될수록 오히려 응결시간이 감



〈그림 5〉 석고 첨가량별 시멘트 응결시간 변화

소되는 경향을 나타냈다. 초결의 경우, 응결지연 목적에 사용되는 SO₃가 1.5% 정도면 충분하다는 보고²⁾와 일치하는 결과로, SO₃가 상당히 적을 경우를 제외하고는 2.0% 이상에서는 초결에 대해 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

한편, 종결에 있어서는 석고 첨가량이 증가될수록 응결지연 목적 외에 잔여 SO₃량은 증가하게 되며, 증가된 잔여 SO₃량이 C₃S의 수화를 촉진시켜 종결시간이 오히려 감소된 것으로 판단된다.²⁾ 또한, 수화초기 과잉의 석고 첨가는 ettringite [C₃A · 3CaSO₄ · 32H₂O]의 생성량을 빠르게 증가시키며, 혼련수의 상당량이 ettringite의 결

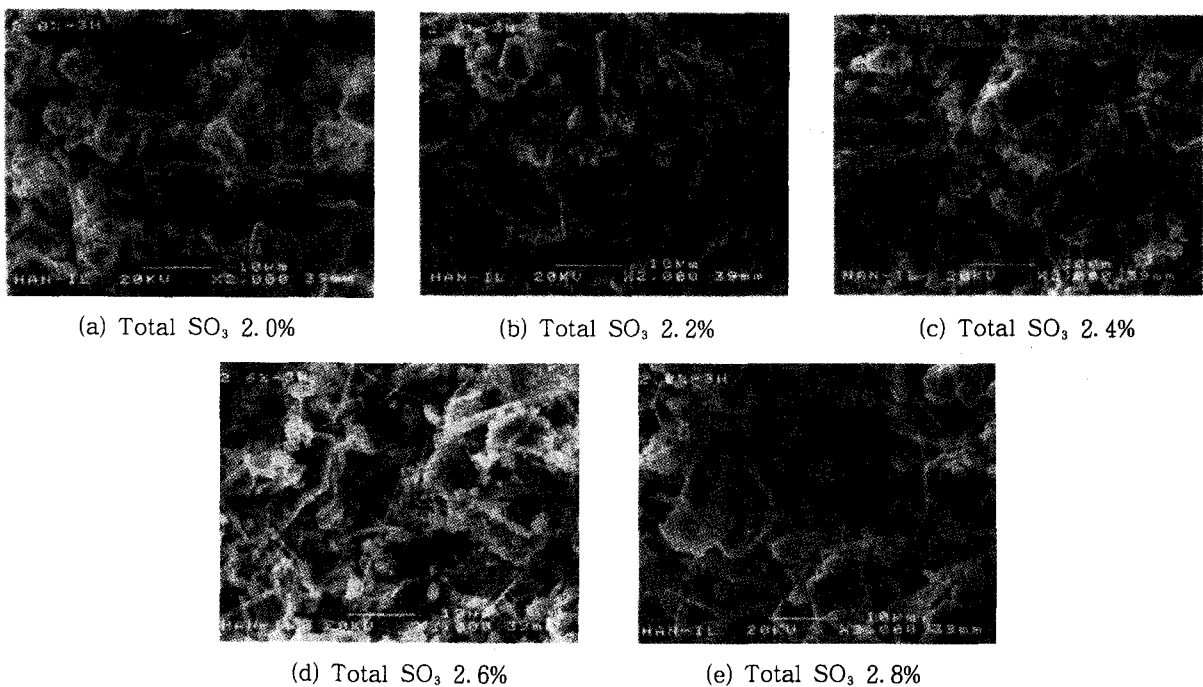


〈그림 6〉 석고 첨가량별 시멘트 페이스트의 수화생성물 XRD 분석 결과(w/c=0.4, 수화시간 : 3hrs)

정수로 소모됨으로써 상대적인 자유수의 감소가 응결시간에 다소의 영향을 미친 것으로 판단된다.

이에 대한 확인 실험으로, 석고 첨가량별 시멘트 페이스트의 수화생성물을 관찰하였으며, 그 결과를 〈그림 6〉 및 〈그림 7〉에 각각 나타내었다.

〈그림 6〉의 XRD 분석을 통한 석고 첨가량별 수화생성물(수화 3시간) 관찰 결과, 석고 첨가량이 증가함에 따라 시멘트 수화생성물인 Ca(OH)₂



(a) Total SO₃ 2.0%

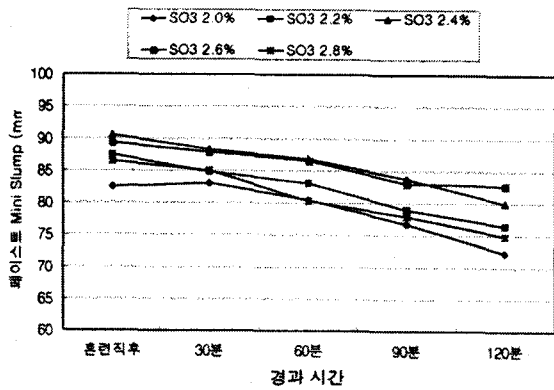
(b) Total SO₃ 2.2%

(c) Total SO₃ 2.4%

(d) Total SO₃ 2.6%

(e) Total SO₃ 2.8%

〈그림 7〉 석고 첨가량별 시멘트 페이스트 수화생성물 전자현미경 사진(w/c=0.4, 수화시간 : 3hrs)

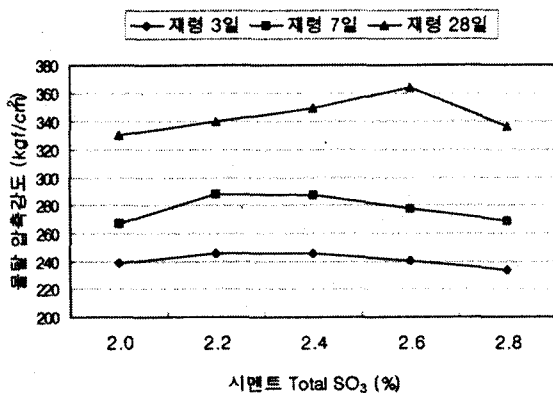


〈그림 8〉 석고 첨가량별 시멘트 페이스트 유동성 경시 변화(w/c=0.47)

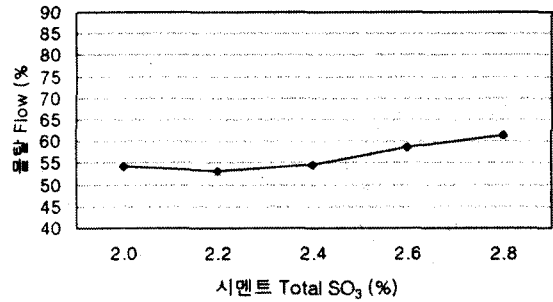
peak intensity가 점차 증가되는 것을 확인할 수 있었으며, 시멘트 주광물상인 C₃S 피크 역시 수화 촉진으로 인한 peak 감소를 확인할 수 있었다.

한편, 석고 첨가량이 증가함에 따라 ettringite의 생성 증가로 인한 ettringite peak intensity 역시 증가함을 알 수 있으며, 〈그림 7〉의 전자현미경 사진을 통해서도 석고 첨가량이 증가함에 따라 침상 및 각주상의 ettringite 수화물 생성량이 증가됨을 확인하였다. 즉 이는 앞의 실험 결과와 일치하는 결과로, 과잉의 석고 첨가는 응결 지연 목적 외에 초기수화를 촉진시키는 결과를 가져오기 때문에 유동성에 있어서도 다소의 영향이 있을 것으로 판단된다.

따라서, 석고 첨가량에 따른 시멘트 페이스트의 유동성 경시변화를 살펴보고자 하였으며, 그 결과 〈그림 8〉에서 보는 바와 같이 석고 첨가량이 가장 적은 Total SO₃ 2.0%일 때가 유동성이 가장 낮게 나타났으며, slump loss 역시 다소 높



〈그림 9〉 석고 첨가량별 몰탈 압축당도 변화



〈그림 10〉 석고 첨가량별 몰탈 Flow 변화

게 나타났다. 한편, 석고 첨가량을 다량 증가시킨 Total SO₃ 2.8%의 경우에 있어서는 SO₃ 2.2%시 보다도 유동성이 낮게 나타났으며, Total SO₃ 2.4%~2.6%의 범위에서 가장 우수한 페이스트 유동성을 보였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 과잉의 석고 첨가는 잉여 SO₃에 의한 수화 촉진을 유발하며, 이로 인해 유동성이 감소된 것으로 판단된다.

한편, 석고 첨가량별 몰탈 물성 변화를 살펴보기 위해 KS L 5105에 의한 몰탈 압축강도 및 몰탈 flow를 측정하였다. 그 결과를 〈그림 9〉 및 〈그림 10〉에 각각 나타내었다. 〈그림 9〉의 몰탈 압축강도 변화를 살펴볼 경우, 초기강도에 있어서는 2.0→2.4%까지 석고 첨가량이 증가될수록 강도향상을 보이고 있으며, 이후 첨가량이 증가될수록 압축강도는 하락하는 경향을 보이고 있다. 한편, 28일 강도에 있어서는 2.6%까지 강도향상을 보이다가 이후 강도가 하락하는 경향을 보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 적정 석고 첨가량은 강도향상에 도움이 되지만, 과잉의 석고 첨가량은 팽창성이 매우 높은 ettringite의 과다 생성 및 경화 이후 지속적인 생성에 의한 경화체 구조내에 과도한 팽창압을 일으킴으로써 미세균열을 발생시켜 강도발현을 저해시킨 것²⁾으로 판단된다.

한편, 〈그림 10〉의 몰탈 Flow에 있어서는 석고 첨가량이 증가될수록 시멘트 페이스트의 유동성 경향과는 다른 SO₃ 2.8%까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 이 이상의 과잉의 석고 첨가량은 몰탈 Flow 및 압축강도에 악영향을 미칠 수 있으므로 주의할 필요가 있다.²⁾

석고 첨가량별 몰탈 Flow와 시멘트 페이스트의 유동성이 다소 다른 경향을 보이고 있는 것은

아마도 혼합계의 차이에서 오는 결과로 판단되며, Uchikawa의 보고³⁾에서 처럼 시멘트 페이스트의 물성 경향이 바로 2차제품의 물성과 반드시 동일하게는 나타나지 않는다는 것으로 해석될 수 있다. 즉, 2차제품의 경우에 있어서는 계 전체의 입도특성 및 골재(세골재)의 변화에 따라서도 이들 물성 역시 변하게 된다.

본 실험 결과, 당공장 현 클링커 특성에 맞는 적정 석고 첨가량에 있어서는, Total SO₃로 2.4~2.6%의 범위가 시멘트 페이스트 및 2차제품 물성(압축강도, 유동성)에 가장 적절할 것으로 판단된다.

그러나, 적정 석고 첨가량은 앞서 언급한 바와 같이 C₃A 함량 변화 및 분말도의 변화에 따라 탄력적인 조정이 필요하므로 공정상의 이들 조건이 변하게 될 경우에는 적정 석고 첨가량 역시 조정되어야 함을 유의해야 하겠다(분말도가 상승할 경우 및 C₃A 함량이 증가될 경우 적정 석고 첨가량 상향 조정).

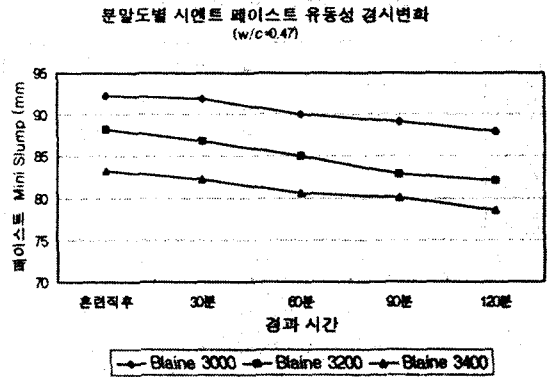
3.4 분말도별 물성 검토

시멘트 콘크리트의 물성(강도, 유동성)은 앞 절에서 서술한 시멘트의 화학적인 요인(광물조성, 석고 첨가량 등)에 의해서도 영향을 받지만, 물리적인 요인(분말도, 입도분포, 입형 및 충전율 등) 역시 시멘트 콘크리트의 물성에 매우 중요한 영향인자로 작용한다.³⁾ 따라서 본고에서는 이들 물리적 특성 중 분말도 및 입도분포에 따른 영향을 살펴보고자 하였다.

분말도별 물성 검토를 위해 <표 6>의 입도특성을 갖는 분말도별 시멘트를 제조하였으며, 제조된 분말도별 시멘트의 입도특성을 살펴보면, Blaine이 증가될수록 강도에 영향을 줄 수 있는 3~30 μ m의 미분량이 증가됨을 알 수 있으며, 평균입경 및 position parameter d' (위치상수: d'

<표 6> 분말도별 제조시멘트 입도특성

시료명	Blaine (cm ² /g)	30 μ m 통과분 (%)	평균입경 (μ m)	Position Parameter d' (μ m)
3000	2,970	52	42.49	37.35
3200	3,210	54	35.23	34.74
3400	3,370	73	24.86	24.89

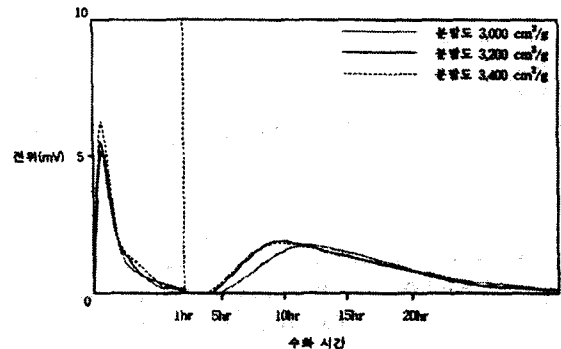


<그림 11> 분말도별 시멘트 페이스트 유동성 경시변화

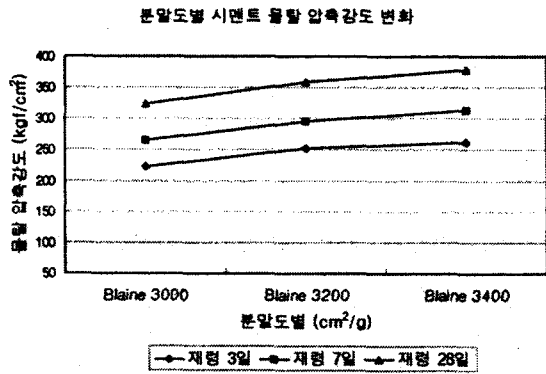
보다 작은 입도가 전체의 63.2%가 되는 입자크기)가 감소되어짐을 볼 때 입도 전체가 미분쪽으로 이동된 형태의 입도특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

<그림 11>에 이러한 입도특성을 갖는 분말도별 시멘트 페이스트의 유동성 경시변화 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 분말도가 증가함에 따라 유동성은 저하되는 경향을 나타내고 있다. 이는 <표 6>에서 보는 바와 같이 30 μ m 이하의 미분량의 증대(position parameter d' 감소)에 따른 영향이 크다고 판단된다. 다시말해, 시멘트 분말도의 증가는 물과의 접촉면적이 증가됨을 의미하며, 이로 인해 클링커 광물 중 반응성이 높은 C₃A 및 C₃S의 수화가 촉진되게 되며, 따라서 유동성 역시 저하될 수 있다.⁸⁾ 이에 대한 확인 실험으로 분말도별 시멘트의 초기 미소수화열 변화를 살펴보았으며, 그 결과를 <그림 12>에 나타내었다.

미소수화열 변화곡선에서 보는 바와 같이, 加水 직후 1차 발열피크로 나타나는 ettringite 생



<그림 12> 분말도별 시멘트 미소수화열량 변화 곡선

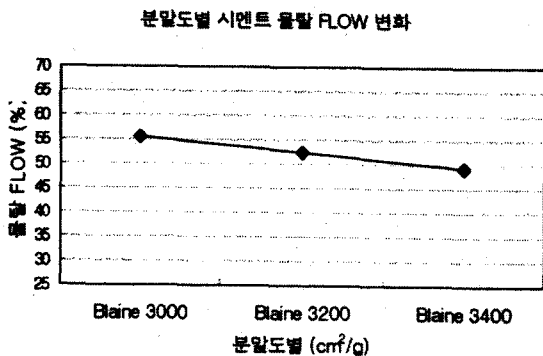


〈그림 13〉 분말도별 시멘트 물탈 압축강도 변화

성열 및 C₃S 표면용해열의 발열피크를 살펴볼 때, 분말도가 증가함에 따라 수화축진으로 인한 발열량이 상대적으로 증가됨을 볼 수 있으며, 유도기를 거쳐 2차수화 발열피크 역시 분말도가 높은 3400 시멘트가 수화축진으로 인해 빠르게 발열됨을 확인할 수 있었다.

〈그림 13〉 및 〈그림 14〉는 시멘트 분말도별 물탈 물성시험 결과로, 분말도 3,000에서 3,400cm²/g으로 증가될수록 재령 28일까지 전재령에서 수화축진으로 인해 물탈 압축강도는 증가되었으며, 물탈 Flow는 시멘트 페이스트의 유동성과 동일한 경향으로 분말도가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다.

따라서 유동성 향상을 위해선 분말도의 하향조정이 매우 효과적이라 할 수 있으나, 너무 낮은 분말도는 분말 응집력이 저하되어 블리딩 및 재료분리를 일으킬 우려가 있으며, 강도저하의 원인이 될 수 있으므로 세심한 조정이 필요하다고 판단된다.



〈그림 14〉 분말도별 시멘트 물탈 Flow 변화

3.5 입도분포별 물성 검토

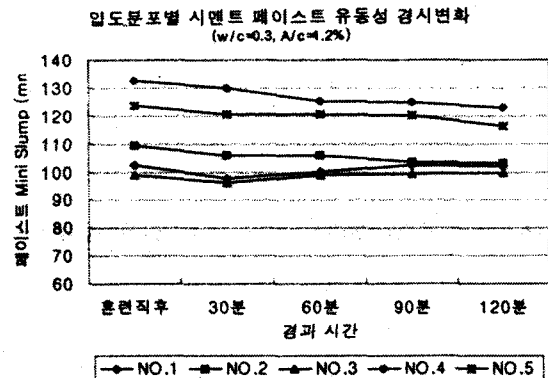
일반적으로 시멘트의 분말도를 표시하는 값으로 Blaine 방법(공기투과장치)이 주로 사용되고 있지만, 동일한 Blaine에서도 그의 입도분포는 밀 특성 및 운전조건 등에 따라 다소 차이가 있으며, 이로 인한 시멘트 콘크리트 물성변화 역시 배제할 수 없다.^{8,9)}

따라서 본 실험에서의 입도분포별 시멘트 물성 검토를 위해, 〈표 4〉의 동일 분말도(Blaine 3,400 ± 50cm²/g)의 다양한 입도분포를 가진 5종류의 시료(입도분포가 좁은 순으로 NO. 1, NO. 2, NO. 3, NO. 4, NO. 5)를 이용하여 물성을 검토하고자 하였다.

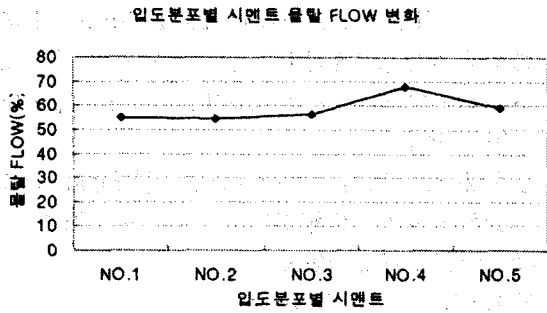
〈그림 15〉는 이들 입도분포별 시멘트의 페이스트 유동성 경시변화 결과로, 입도분포가 넓은 NO. 4 및 NO. 5 시멘트가 유동성이 양호한 것으로 나타났으며, 입도분포가 좁은 NO. 1, 2, 3 시멘트는 유동성이 상대적으로 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다.

입도분포가 가장 넓은 NO. 5의 경우, NO. 4 시멘트보다 유동성이 낮게 나타난 것은 〈표 4〉에서 보는 바와 같이 조분량이 다소 많이 존재하기 때문에 반죽질기는 크게 되어도 재료분리가 쉽게 되어 workability가 나빠진 것으로 판단된다. 따라서 입도분포가 넓어도 조분량이 많게 되면, 오히려 유동성에 악영향을 미칠 수 있어, 90μm 잔사관리 역시 중요하다 하겠다.

본 페이스트 유동성 시험결과, 대체로 입도분포가 좁고, 강도발현에 유리한 30μm 통과분이 많은 경우 유동성은 저하되는 경향을 나타내고



〈그림 15〉 입도분포별 시멘트 페이스트 유동성 경시 변화

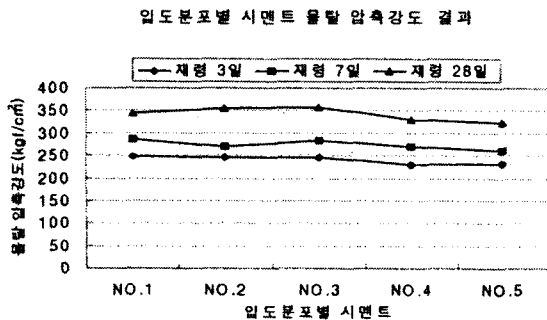


〈그림 16〉 입도분포별 시멘트 물탈 Flow 변화

있다. 이는 입도분포가 좁을 경우, 입자사이 공극률은 상대적으로 커지게 되며, 혼련수는 입자사이의 공극을 우선 채우게 됨으로써 이로 인해 유동성에 필요한 자유수의 감소를 가져오기 때문으로 판단된다. 한편 미분량의 증가는 입자 표면적의 증가로 그 입자의 표면을 덮는데 필요한 수량은 많아지기 때문으로 판단된다.

한편, 입도분포별 시멘트의 물탈 물성검토 결과를 〈그림 16〉 및 〈그림 17〉에 각각 나타내었다. 〈그림 16〉의 입도분포별 시멘트의 물탈 Flow 시험 결과, 대체로 입도분포가 넓은 시멘트인 NO. 4와 NO.5 시멘트가 양호한 유동성을 나타내었다. 〈그림 17〉의 물탈 압축강도 시험에 있어서는 뚜렷한 경향은 나타나고 있지 않지만, 대체로 평균 입경이 크고 조분량이 많은 NO.4와 NO.5 시멘트가 압축강도에 있어서는 다소 저하되는 경향을 나타내고 있다.

결론적으로, 유동성의 증가를 위해선, 비표면적이 동일할 경우, 넓은 입도분포(Inclination Parameter 값이 작을 것)를 갖고, 앞서 언급한 바와 같이 90 μ m 잔사관리하에 위치상수 d' 값이 클수록(미분량이 적을 것) 유리함을 알 수 있다.



〈그림 17〉 입도분포별 시멘트의 물탈 압축강도 변화

4. 결 론

최근 관심의 대상이 되고 있는 시멘트·콘크리트의 유동성에 대한 문제를 시멘트 재료학적 관점(클링커 광물조성비, 석고첨가량, 분말도별 및 입도분포 등)에서 종합 검토하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 클링커 광물중 시멘트 초기수화시 반응성이 높은 C₃A 및 C₃S/C₂S의 높은 함량비는 시멘트·콘크리트의 유동성을 저하시키며, 특히 C₃A의 경우, 2차제품 적용시 혼화제의 다량 흡착으로 인해, slump loss를 심화시킬 수 있으므로, 킬른 소성공정에 영향을 미치지 않는 범위내에서 점차적인 혼분 modulus 조정(LSF 및 IM 하향조정)에 따라 이를 가능한 줄여나가는 것이 고유동, 고강도 콘크리트 제조에 있어서 유리하다.
- 2) 석고 첨가량에 있어서는, 과잉의 석고 첨가는 오히려 수화촉진으로 인한 유동성 감소 및 팽창압에 의한 압축강도 저하를 야기시킬 수 있으므로 적정의 석고 첨가량이 요구된다. 현재 당공장 클링커 특성에 적합한 적정 석고 첨가비로는 Total SO₃ 2.4~2.6%의 범위내에서 가장 양호한 유동성 및 압축강도를 보였으며, C₃A 함량비 및 분말도가 증가될 경우에는 적정 석고 첨가량 역시 상향 조정되어야 한다.
- 3) Blaine 3,000~3,400cm³/g 범위내의 시멘트 분말도별 물성 검토 결과, 분말도가 낮아질수록 유동성은 향상되었으나, 물탈 압축강도는 재령 28일까지 하락하는 경향을 보였다. 분말도 하향조정에 따른 유동성 향상 효과는 기타 요소에 비해 매우 컸으나, 90 μ m 이상의 조분량의 과도한 증대는 오히려 유동성에 악영향을 미치므로 이의 제어 역시 중요하다.
- 4) 동일 분말도 시멘트에서의 입도분포별 물성에 있어서는 넓은 입도분포를 형성한 시멘트가 양호한 유동성을 보였다. 그러나, 넓은 입도분포를 형성하였다 하더라도 90 μ m 이상의 조분분이 많은 경우에는, 재료분리가 쉽게 되어 유동성은 하락하게 된다. 한편, 입도분포가 넓은 시멘트 일수록 입도분포가 좁은 동일 분말도의 시멘트보다 강도발현에 주로 기여하는 30 μ m

이하의 미분량이 적게 되고, 조분량은 상대적으로 많아 압축강도는 하락하게 된다.

결론적으로, 유동성과 압축강도는 서로 상반된 관계를 가지고 있으나, 최근 고유동, 고강도, 저발열 콘크리트 등은 필히 높은 유동성을 수반하여야 하기 때문에, 시멘트 재료학적 측면에서 페이스트의 유동성 확보는 매우 중요하며, 이들 유동성 확보는 결국, 2차제품의 강도 향상에도 연결될 수 있으므로, 앞으로도 이에 대한 꾸준하고 계속적인 관심이 요구된다.

〈참 고 문 헌〉

- 1) 最近のコンクリート製造技術, 콘크리트工學, Vol. 31, No. 3, 1993.
- 2) S. N. GHOSH, ADVANCES IN CEMENT TECHNOLOGY, PERGAMON PRESS, pp. 485~535, 1981.
- 3) H. UCHIKAWA, S. UCHIDA, and T. OKAMURA, “まだ固まらないセメントペースト, 몰탈及び콘크리트의流動性に及ぼすセメント의粉末度及び粒子組成の影響”, 세멘트·콘크리트論文集, No. 43, pp. 42~47, 1989.
- 4) K. YOSHIDA, S. OKABAYASHI, “セメントの粒度分布と充てん性およびペースト強さ”, 세멘트·콘크리트論文集, No. 45, pp. 86~91, 1991.
- 5) 名和豊春, 江口仁, “セメントの流動性に及ぼす硫酸アルカリの影響”, 세멘트技術年報, 42, pp. 52~55, 1988.
- 6) H. Reid, “Anhydrite as a substitute for gypsum in Portland cement”, WORLD CEMENT APRIL, pp. 104~107, 1997.
- 7) W. Lerch, “The Influence of Gypsum on the Hydration and Properties of Portland Cement Pastes”, Proc. Am. Soc. Test. Mater., 46, pp. 1252~1292, 1946.
- 8) S. Sprung, K. Kuhlmann and H. G. Ellerbrock, “Particle size distribution and properties of cement : part I. Strength of portland cement”, ZKG No. 4/85, pp. 169~178, 1985.
- 9) S. Sprung, K. Kuhlmann and H. G. Ellerbrock, “Particle size distribution and properties of cement : part II. Water demand of portland cement”, ZKG No. 9/85, pp. 528~534, 1985.