

# 시멘트 입도분포에 따른 물리특성 변화

남기웅\* · 김남중 · 민경소 · 정호수

〈라파즈한라시멘트(주) 기술연구소〉

## 1. 서 론

시멘트공정에서 분쇄는 품질관리의 마지막 단계이며 이 공정을 거치면서 제품으로서 시멘트의 최종성능이 결정된다.

석고와 함께 mill로 투입된 clinker는 수  $\mu\text{m}$ 에서부터 수 mm 이상의 폭넓은 입도분포를 갖게 되는데 일반적으로  $3\mu\text{m}$  이하의 입자 size를 갖는 시멘트는 초기강도 발현에 영향을 미치나 높은 비표면적 증가로 인한 작업성의 저하를 가져오고  $30\mu\text{m}$  이상의 입자 size를 갖는 시멘트는 28일까지의 강도발현에 거의 기여하지 못한다고 알려져 있다.

현재 당사에는 두가지 type의 분급기가 있는데 근래에 항만에 설치된 O-sepa는 고성능 분급기로서 기존의 분급기를 개량하여, 생산된 시멘트가 보다 좁은 입도분포 폭을 갖게 되었다.

Weiss와 Tresouthick<sup>1)</sup>은 고성능 분급기를 사용함으로써 나타나는 가장 큰 영향은 시멘트의 입자크기 분포 폭이 좁아지고 이와 동시에 불필요한 미분쇄를 피함으로써 mill의 생산량을 증가시키는데, 낮은 비표면적을 갖는 시멘트는 mill circuit의 나머지 특성 때문에 제품의 품질이 분급기의 작용에 크게 영향을 받지 않으나 높은 비표면적을 갖는 시멘트에서는 고성능 분급기의 설치에 의해 물성이 향상되었다고 주장하였다.

Tsivilis 등<sup>2)</sup>은 시멘트의 강도에 가장 중요한 영향을 미치는 변수가 입자크기 분포를 나타내는 기울기 n값과 3에서  $32\mu\text{m}$  사이에 있는 입자의 양이라는 것을 주장하였고, Sumner 등<sup>3)</sup>에 따르면, 보통 포틀랜드 시멘트에서 전체 비표면적의 약 49%가 단지 전체 질량의 7~9%인  $2\mu\text{m}$  이하

의 입자범위에 의해 결정되고, 반면에 전체 질량의 10~20%를 차지하는  $45\mu\text{m}$  이상의 입자들은 전체 비표면적에서 차지하는 비율이 2%보다도 작다고 한다.

Kuhlmann 등<sup>4)</sup>은 일정한 비표면적에서 입자크기 분포 폭이 좁아질수록 기준 반죽질기를 얻기 위한 소요수량은 증가한다고 보고하였는데 이것은 다음의 두가지 원인에 의한 것이라고 주장하였다.

- 입도분포 폭이 좁아짐에 따라 석고량이 최적으로 첨가되었음에도 불구하고  $C_3A$ 의 전환율이 증가한다. (소요수량이 증가)
- 입도분포 폭이 좁아짐에 따라 혼합물의 공극부피는 커지고 이 공극을 메우기 위한 소요수량은 증가한다.

본 연구는 다양한 입자크기 분포 및 입자크기 분포 폭을 갖는 시멘트의 물리성능을 분석하여 최적의 물성을 갖는 입도분포 조건을 도출하고자 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 Sampling

실험실용 분급기에서 입도분포 및 비표면적 변화에 따른 시멘트를 제조하기 위해 1차로 1999년 5월 19일 본공장 C/M #1과 항만 C/M #3에서 mill 출분을 각각 100kg씩 sampling하였다. 이때 본공장 C/M 출분의 비표면적은 약  $2,089\text{cm}^2/\text{g}$ 이었고 항만공장 C/M 출분은 약  $1,493\text{cm}^2/\text{g}$ 이었다.

〈표 1〉 입도분포 실험용 시료 sampling

구분	날 짜	위 치		비 고
		본공장	항 만	
1 차	1999.5.19	C/M #2	C/M #4	각 100kg
2 차	1999.6.21	C/M #1	C/M #4	이상

또한 2차로 1999년 6월 21일 본공장 C/M #2와 항만 C/M #4에서 mill 출분을 각각 100kg씩 sampling하였으며 이때 본공장 C/M 출분의 비표면적은 약 2,396cm<sup>2</sup>/g이었고 항만공장 C/M 출분은 약 1,528cm<sup>2</sup>/g이었다.

## 2.2 시멘트 제조

1차 sampling한 mill 출분을 실험실용 분급기를 사용하여 시멘트를 제조하였으며 feeding rate와 rotor speed를 변화시켜 제조 시멘트의 비표면적, n값 및 X<sub>0</sub>값의 변화를 주었다. 2차 sampling한 mill 출분은 실험실용 분급기에서 입분으로 시멘트를 제조하기 전에 실험실용 ball mill에서 400회와 800회 분쇄하여 mill 출분과 함께 사용하였다.

1차 sampling한 mill 출분을 실험실용 separator를 사용하여 입도분포 및 비표면적 변화에 따른 시멘트를 제조하였으며, 〈표 2~5〉에 separator의 rotor speed 및 mill 출분의 feeding 속도에 따른 제조시멘트의 비표면적, n값, X<sub>36.8</sub> 및 X<sub>50</sub>의 값 그리고 잔사 특성을 나타내었다.

아래 식은 제조시멘트의 입도분포, 비표면적 및 위치상수에 대한 분급기의 rotor speed와 feeding rate의 영향을 나타낸 것이다.

1차 sample의 n값과 rotor speed 및 feeding 속도와의 관계는 rotor speed가 증가할수록 n값은 증가하며 feeding 속도가 증가할수록

n값은 감소하는 경향을 나타내었다.

또한 rotor speed 및 feeding 속도가 증가함에 따라 d<sub>36.8</sub>과 d<sub>50</sub>의 값은 미분쪽으로 이동하고 비표면적은 증가하는 경향을 보였으나 이것은 주로 rotor speed의 영향을 받는 것으로 나타났다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 제조시멘트의 화학특성

제조한 시멘트의 화학분석을 실시하여 〈표 6〉에 나타내었다.

표에 나타난 바와 같이 같은 mill 출분을 실험실용 분급기를 이용하여 비표면적 및 입자크기 분포 등을 변화시켜 제조한 시멘트의 화학성분은 변화하는데, 이 결과로부터 시멘트는 분쇄된 입자의 입도에 따라 화학성분의 차이가 발생함을 확인할 수 있고, 이것은 시멘트 클린커 광물 및 클린커와 석고 등의 분쇄성 차이에 의한 것으로 판단된다.

〈그림 1~3〉은 제조시멘트의 비표면적에 따른 화학성분의 함량변화이다.

1차 sample로 제조된 시멘트는 mill 출분을 실험실용 separator를 사용하여 입자크기가 큰 부분을 cut함으로써 만들어졌는데, 이로 인해 화학성분의 차이가 발생되고 있으며 비표면적이 커질수록 mill 출분에서 굵은 입자부분이 제거된 시멘트이다.

그림에서 보면 비표면적이 증가할수록 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량은 감소하나 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량은 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며 SO<sub>3</sub>함량은 비표면적이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.

이 결과 같은 비표면적에서 시멘트의 입도분포 폭이 좁을수록 C<sub>3</sub>A의 반응성은 증가하고 석고의

$$\begin{aligned}
 \text{1차 sample : n Value} &= 0.00484\text{RS} - 0.000534\text{FR} + 0.9114 & R : 0.79 \\
 \text{Blaine} &= 48.7659\text{RS} + 9.79841\text{FR} + 241.802 & R : 0.94 \\
 d_{36.8} &= -0.56173\text{RS} - 0.01533\text{FR} + 48.9121 & R : 0.96 \\
 d_{50} &= -0.3769\text{RS} - 0.01481\text{FR} + 34.0889 & R : 0.96
 \end{aligned}$$

여기서, RS : rotor speed, FR : feeding rate

<표 2> 시멘트 제조조건(본공장-1차 sample)

구분	R/S	F/R	In	Out	B	n값	d <sub>36.8</sub>	d <sub>50</sub>
출분	-	-	-	-	2089	-	-	-
정분	-	-	-	-	3330	0.98	22.3	15.3
본 1	30	50	10	5.85	2167	1.04	33.4	23.5
본 2	40	50	10	4.80	2491	1.10	26.6	19.1
본 3	50	50	14	5.35	3036	1.11	20.7	14.9
본 4	60	50	14	4.55	3489	1.26	14.6	11.0
본 5	50	30	14	3.60	2783	1.12	21.8	15.8
본 6	50	40	14	5.45	2944	1.13	19.5	14.2
본 7	50	60	14	3.45	3036	1.16	18.1	13.3
본 8	55	50	14	4.45	3408	1.15	17.9	13.1
본 9	55	70	14	4.00	3644	1.11	18.1	13.1

<표 3> 시멘트 제조조건(항만공장-1차 sample)

구분	R/S	F/R	In	Out	B	n값	d <sub>36.8</sub>	d <sub>50</sub>
출분	-	-	-	-	1493	-	-	-
정분	-	-	-	-	3500	1.02	19.7	13.8
항 1	30	50	7	3.80	2237	1.02	31.5	22.0
항 2	40	50	14	4.65	2787	1.10	22.9	16.5
항 3	50	50	14	3.29	3223	1.09	20.6	14.7
항 4	60	50	14	3.30	3588	1.19	15.6	11.5
항 5	50	30	14	2.78	3067	1.13	19.6	14.3
항 6	50	40	14	3.53	3378	1.12	19.1	13.8
항 7	50	60	14	3.76	3465	1.14	17.0	12.4
항 8	55	50	7	1.63	3763	1.10	17.4	12.5
항 9	55	70	-	2.05	3587	1.11	17.9	12.9

\* 여기서, RS : rotor speed (RPM), FR : feeding rate, In : Input (kg), Out : Output (kg), B : Blaine (㎎/g)

반응성은 감소할 것으로 판단되며 이로 인해 응결시간의 단축과 같은 물리특성 변화가 예상된다.

그러므로 같은 응결특성을 얻기 위해서는 그밖의 제조조건이 같은 시멘트에서 입도분포 폭이 좁을수록 입도분포가 넓은 시멘트에 비해 석고 첨가량이 증가해야 할 것으로 판단된다.

<그림 4>는 제조된 시멘트의 비표면적에 따른 f-CaO 함량 변화이다.

그림에 따르면 비표면적이 증가할수록 f-CaO 함량은 증가하는 경향을 나타내고 있는데 이 결

과 제조된 시멘트에서 f-CaO는 주로 미분쪽에 분포되어 있음을 알 수 있다.

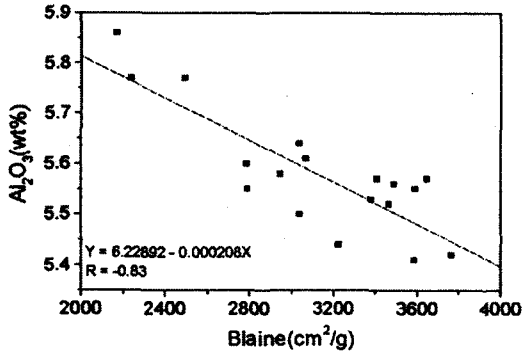
<표 4> 시멘트 제조조건(본공장-2차 sample)

구분	R/S	F/R	C	d <sub>36.8</sub>	d <sub>50</sub>	n값	잔사(μm)		B
							45	90	
본 1	30	30	0	36.2	25.4	1.02	25.96	1.779	2247
본 2	30	50	0	31.9	22.4	1.03	20.57	0.821	2566
본 3	30	70	0	31.5	21.9	1.01	20.25	0.946	2645
본 4	40	30	0	26.7	19.2	1.10	3.49	0.074	2618
본 5	40	50	400	23.1	16.1	1.00	4.81	0.072	3386
본 6	40	70	400	21.7	15.2	1.03	4.48	0.054	3443
본 7	50	40	400	17.9	12.6	1.04	0.55	0.056	4160
본 8	50	60	400	18.5	13.0	1.03	0.29	0.058	4152
본 9	50	80	400	15.2	11.1	1.16	0.27	0.066	4126
본 10	60	40	800	16.1	11.3	1.02	0.21	0.054	4687
본 11	60	60	800	13.0	9.5	1.15	0.22	0.054	4783
본 12	60	80	800	15.0	10.6	1.03	0.18	0.032	4932
본 13	70	40	800	13.3	9.4	1.02	0.19	0.042	5416
본 14	70	80	800	12.8	9.0	1.03	0.18	0.046	5357

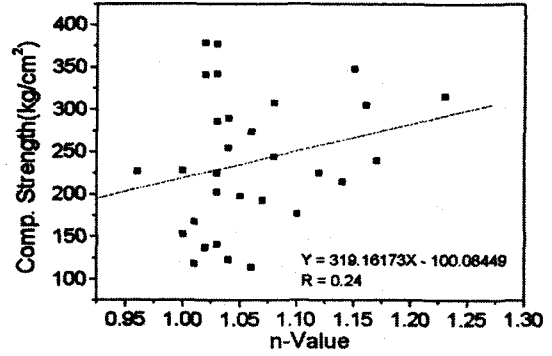
<표 5> 시멘트 제조조건(항만공장-2차 sample)

구분	R/S	F/R	C	d <sub>36.8</sub>	d <sub>50</sub>	n값	잔사(μm)		B
							45	90	
항 1	40	40	400	24.9	17.0	0.96	7.47	0.190	3434
항 2	50	40	400	20.6	14.6	1.04	0.70	0.050	3568
항 3	40	60	400	24.1	16.9	1.03	4.08	0.118	3012
항 4	40	80	400	23.8	16.8	1.05	2.86	0.080	2982
항 5	50	80	400	18.6	13.2	1.06	0.59	0.046	3698
항 6	40	60	800	20.4	14.5	1.07	4.04	0.052	3135
항 7	50	60	800	17.9	12.8	1.08	0.64	0.044	3586
항 8	60	60	800	15.0	10.7	1.08	0.35	0.070	4368
항 9	30	60	800	27.8	19.3	1.00	15.38	0.398	2605
항 10	30	40	0	35.6	24.3	1.01	23.27	1.610	2068
항 11	30	50	0	33.7	23.9	1.06	24.43	0.882	2069
항 12	30	60	0	33.9	23.9	1.04	20.00	0.622	2168
항 13	50	40	150	21.5	15.6	1.14	0.42	0.056	2985
항 14	50	60	150	20.3	14.7	1.12	0.39	0.060	3150
항 15	50	40	400	17.8	13.0	1.17	0.40	0.060	3445
항 16	70	60	150	12.8	9.5	1.23	0.31	0.098	4725

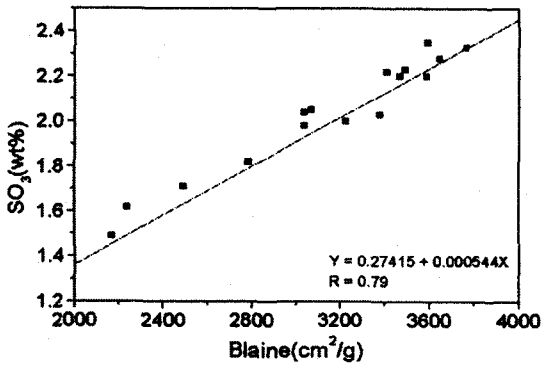
\* 여기서 C : Ball mill 분쇄 회전수, B : Blaine (㎎/g)



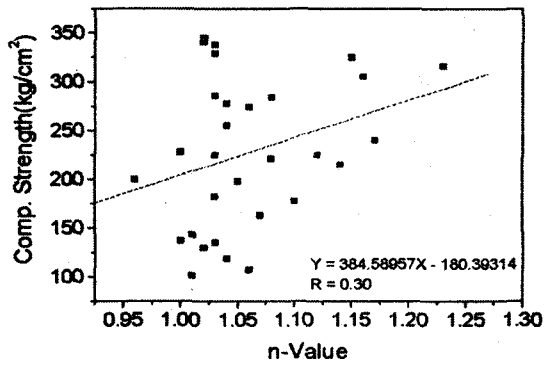
〈그림 1〉 제조시멘트의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량 변화 (1차 sample)



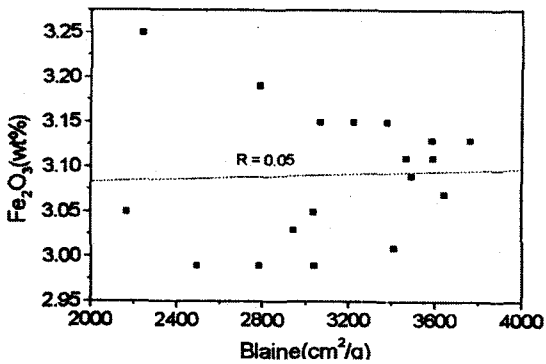
〈그림 5〉 n-값에 따른 3일 압축강도 (물량 고정)



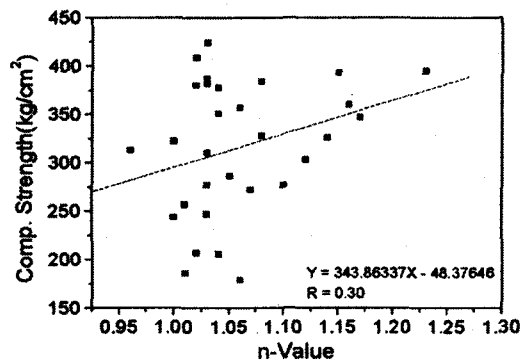
〈그림 2〉 제조시멘트의 SO<sub>3</sub> 함량 변화 (1차 sample)



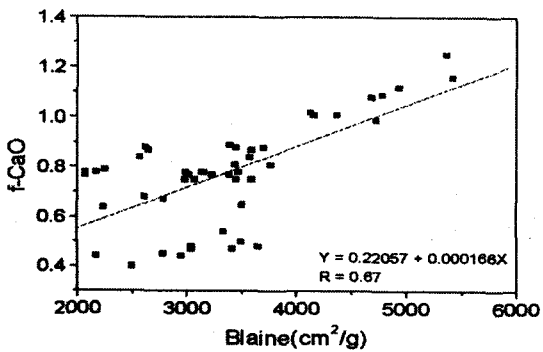
〈그림 6〉 n-값에 따른 3일 압축강도 (작업성 고정)



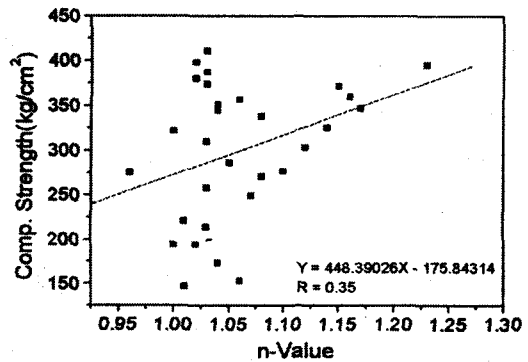
〈그림 3〉 제조시멘트의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량 변화 (1차 sample)



〈그림 7〉 n-값에 따른 7일 압축강도 (물량 고정)



〈그림 4〉 제조시멘트의 f-CaO 함량 변화 (종합)



〈그림 8〉 n-값에 따른 7일 압축강도 (작업성 고정)

<표 6> 제조시멘트의 화학분석 결과(1차 sample)

구분	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total	F-CaO
본R	1.80	21.01	5.83	3.11	61.61	3.23	2.06	98.65	0.54
본1	2.01	21.35	5.86	3.05	61.20	3.71	1.49	98.67	0.44
본2	2.31	21.33	5.77	2.99	61.74	3.13	1.71	98.80	0.40
본3	2.46	21.14	5.64	2.99	61.06	3.32	2.04	98.65	0.47
본4	2.59	21.06	5.56	3.09	60.93	3.32	2.23	98.78	0.50
본5	2.37	21.21	5.60	2.99	61.74	3.03	1.82	98.76	0.45
본6	2.43	21.07	5.58	3.03	61.06	3.42	1.09	98.49	0.44
본7	2.50	21.13	5.50	3.05	61.47	3.13	1.98	98.76	0.48
본8	2.71	20.99	5.57	3.01	61.47	2.93	2.22	98.90	0.47
본9	2.80	20.83	5.57	3.07	60.93	3.32	2.28	98.80	0.48
항R	2.60	20.89	5.52	3.19	61.06	3.13	2.09	98.48	0.65
항1	2.67	20.98	5.77	3.25	61.06	3.23	1.62	98.65	0.64
항2	2.98	20.82	5.55	3.19	60.93	3.32	1.82	98.61	0.67
항3	3.09	20.76	5.44	3.15	60.93	3.23	2.00	98.60	0.77
항4	3.42	20.49	5.55	3.11	60.66	3.13	2.35	98.71	0.75
항5	2.84	20.80	5.61	3.15	60.93	3.32	2.05	98.70	0.75
항6	3.26	20.71	5.53	3.15	61.06	3.03	2.03	98.77	0.77
항7	3.16	20.69	5.52	3.11	60.93	3.13	2.20	98.74	0.78
항8	3.53	20.48	5.42	3.13	60.52	3.23	2.33	98.64	0.81
항9	3.49	20.54	5.41	3.13	60.38	3.23	2.20	98.38	0.75

3.2 제조시멘트의 물리특성

<표 7~10>은 1차 및 2차 sample을 사용하여 제조한 시멘트의 물리특성을 나타낸 것이다. 압축강도 실험은 KS L 5105의 w/c : 0.485와 작업성 고정(flow : 205±10mm)으로 실험을 실시하였는데, 1차 sample로 제조한 시멘트는 비표면적 및 입도분포에 따라 화학성분의 차이가 발생하므로, 2차 sample을 이용하여 실험한 결과를 <그림 5~28>에 각각의 변수에 따라 재령별 압축강도를 나타내었다.

압축강도에 대한 입도특성의 영향을 분석한 결과, 물량을 고정하여 실험한 결과와 작업성을 고정하여 얻은 결과와는 차이를 나타냈는데, 입자 크기 분포를 나타내는 n값의 경우, 일정한 작업성을 유지하여 압축강도를 실험하면 입도분포 폭이 좁을수록 모든 재령에서 강도가 증가하였으나, 물량을 고정하여 실험을 실시하면 재령 3일에서는 오히려 n값이 작은 시멘트의 강도가 우

수하였으며 재령 7일과 28일에서도 작업성을 일정하게 유지하여 실험한 결과보다는 영향이 적었다.

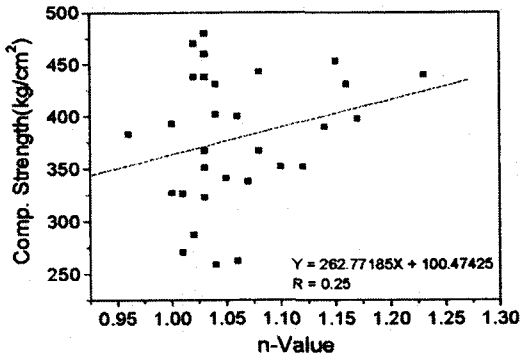
또한 물량고정 및 작업성을 일정하게 유지하여 압축강도를 실험한 경우, 모두 비표면적이 증가할수록 모든 재령에서의 압축강도가 증가하였는데, 재령이 지남에 따라 비표면적에 의한 강도 상승 효과는 감소하는 경향을 나타내었고, 특히 초기 재령에서 물량을 고정하여 실험한 경우 비표면적에 의한 압축강도 상승효과가 컸다.

<그림 5~10>까지는 입도분포 폭의 변화에 따른 2차 sample로 제조한 시멘트의 재령에 따른 압축강도 특성이다. 물량을 고정하여 실험한 경우와 작업성을 일정하게 유지하여 실험한 경우 모두 n값이 증가할수록 강도가 향상되는 경향을 나타내나 작업성을 일정하게 유지하는 경우가 n

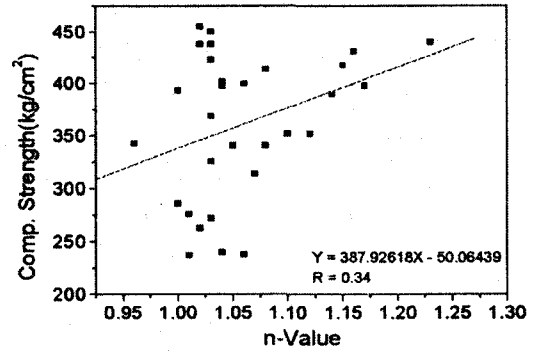
<표 7> 제조시멘트의 물리특성(본공장-1차 sample)

구분	B	C	응 결		잔 사		FL	W	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		
			I	F	45μm	90μm			3일	7일	28일
정분	3330	26.0	230	6:15	11.01	1.41	176	274	233	307	390
							265	202	219	284	361
본1	2167	23.8	285	7:55	22.12	1.44	167	247	147	196	281
							205	265	125	181	276
본2	2491	25.1	285	7:40	5.48	0.12	183	247	187	256	359
							204	256	175	248	326
본3	3036	27.0	235	6:50	0.54	0.28	183	247	240	316	428
							205	256	229	300	410
본4	3489	28.0	210	6:30	0.54	0.05	185	247	259	326	417
							205	255	245	317	410
본5	2783	26.3	255	7:15	0.38	0.01	190	247	234	337	432
							202	252	204	308	397
본6	2944	26.4	275	7:45	0.44	0.03	183	247	226	309	404
							203	255	202	290	378
본7	3036	26.5	260	7:30	0.29	0.09	183	247	219	308	386
							200	255	208	296	376
본8	3408	27.1	250	7:15	0.18	0.07	182	247	276	351	438
							200	256	271	334	423
본9	3644	27.5	240	7:05	0.15	0.09	178	247	290	342	435
							206	260	275	335	420

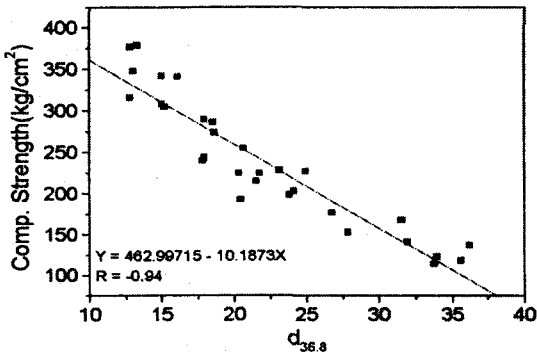
\* I : 초결 (min), F : 종결 (hr : min), C : 주도 (%)  
W : 혼합수량 (ml), FL : flow (mm)



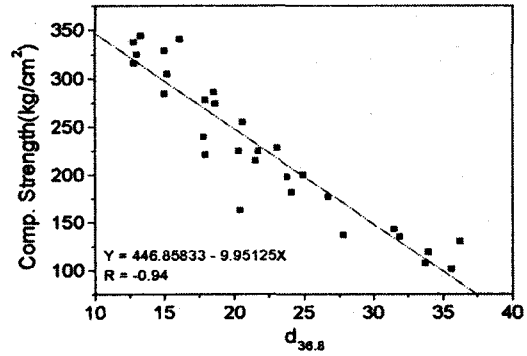
〈그림 9〉 n-값에 따른 28일 압축강도(물량 고정)



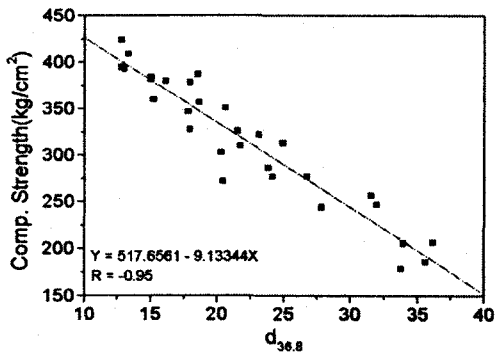
〈그림 13〉 위치상수에 따른 7일 압축강도(물량 고정)



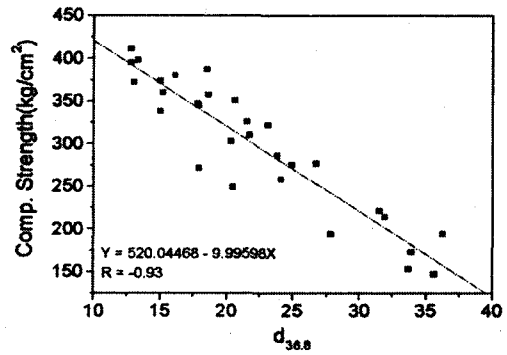
〈그림 10〉 n-값에 따른 28일 압축강도(작업성 고정)



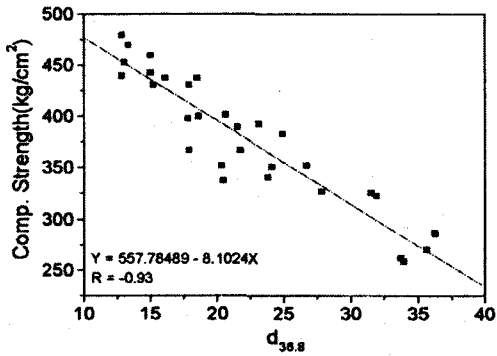
〈그림 14〉 위치상수에 따른 7일 압축강도(작업성 고정)



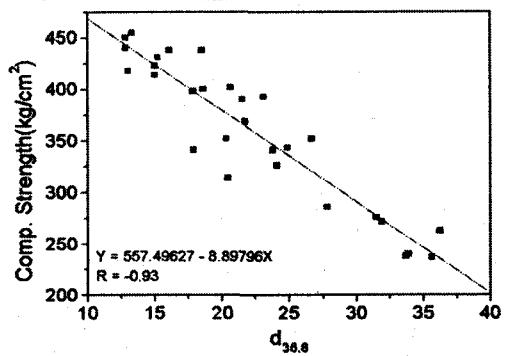
〈그림 11〉 위치상수에 따른 3일 압축강도(물량 고정)



〈그림 15〉 위치상수에 따른 28일 압축강도(물량 고정)



〈그림 12〉 위치상수에 따른 3일 압축강도(작업성 고정)



〈그림 16〉 위치상수에 따른 28일 압축강도(작업성 고정)

<표 8> 제조시멘트의 물리특성 (항만공장-1차 sample)

구분	B	C	응 결		잔 사		FL	W	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		
			I	F	45 $\mu$ m	90 $\mu$ m			3일	7일	28일
정분	3500	26.0	250	6:40	5.64	0.44	175	247	247	309	380
							200	265	230	296	360
항1	2237	23.6	280	7:55	22.21	2.14	180	247	132	179	257
							205	262	104	155	227
항2	2787	24.0	260	7:40	5.66	0.31	190	247	173	228	310
							206	257	146	214	292
항3	3223	25.3	250	7:25	1.40	0.15	194	247	213	256	362
							210	253	174	243	338
항4	3588	26.5	245	7:15	0.79	0.19	199	247	252	314	399
항5	3067	25.5	255	7:25	0.94	0.61	200	247	205	280	353
항6	3378	26.0	255	7:15	0.69	0.27	201	247	221	282	379
항7	3465	25.8	250	7:00	0.49	0.25	202	247	223	281	367
항8	3763	26.1	265	7:00	0.45	0.13	203	247	251	297	385
항9	3584	25.7	280	7:10	0.47	0.13	200	247	228	283	385

<표 9> 제조시멘트의 물리특성 (본공장-2차 sample)

구분	응결(hr:min)		C	FL	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		
	I	F			3일	7일	29일
본 1	400	11:10	23.6	175	137	207	287
				205	130	194	263
본 2	360	10:15	24.4	185	141	247	323
				206	135	214	272
본 3	355	9:50	24.6	184	168	257	326
				208	143	221	276
본 4	340	9:10	25.0	205	177	277	352
본 5	300	8:40	25.5	200	228	322	393
본 6	295	8:05	25.5	200	225	310	367
본 7	280	8:10	26.6	195	290	378	431
				209	278	345	398
본 8	270	8:00	27.6	200	286	387	438
본 9	310	9:20	27.5	201	305	360	431
본 10	300	8:40	27.7	200	341	380	438
본 11	290	8:15	28.5	192	348	393	453
				204	325	372	418
본 12	285	8:20	28.6	195	342	382	460
				205	329	374	423
본 13	280	8:10	29.3	190	379	409	470
				205	345	398	455
본 14	270	8:05	30.2	188	377	424	480
				210	338	411	450

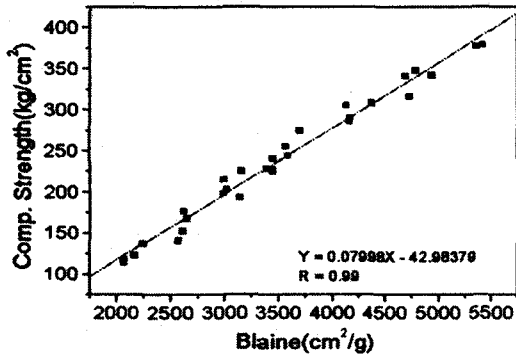
<표 10> 제조시멘트의 물리특성 (항만공장-2차 sample)

구분	응결(hr:min)		C	FL	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		
	I	F			3일	7일	29일
항 1	305	8:25	23.6	193	227	313	383
				210	200	275	343
항 2	280	8:00	25.4	200	255	351	402
항 3	300	8:40	24.0	195	203	277	351
				210	182	258	326
항 4	295	8:45	24.0	200	198	286	341
항 5	240	6:40	25.4	201	274	357	400
항 6	275	7:10	24.2	195	193	272	338
				212	163	249	314
항 7	230	6:40	24.6	195	244	328	367
				209	221	271	341
항 8	210	6:00	26.0	197	308	384	443
				208	284	338	414
항 9	300	8:30	23.6	194	153	244	327
				210	137	194	286
항 10	320	9:00	23.0	185	118	186	271
				210	101	147	237
항 11	370	10:30	22.8	185	114	179	262
				210	107	153	238
항 12	360	10:20	23.2	190	123	206	259
				209	119	173	240
항 13	310	9:50	24.6	206	215	326	390
항 14	285	8:00	25.0	208	225	303	352
항 15	280	7:50	24.9	207	240	347	398
항 16	260	7:30	29.0	205	316	395	440

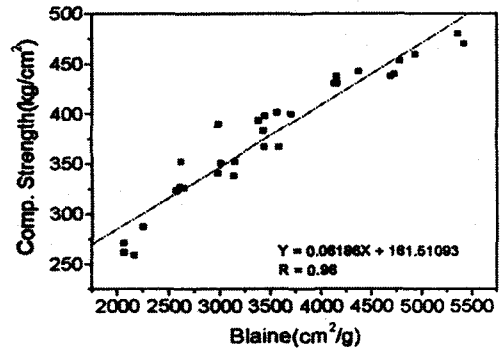
※ I : 초결(min), F : 종결(hr:min), C : 주도(%)  
W : 혼합수량(ml), FL : flow(mm)

값에 의한 강도향상 효과가 컸으며 이 결과로부터 일정한 작업성을 요구하는 콘크리트에서는 입도분포 폭이 좁게 제조된 시멘트가 강도발현 면에서 유리할 것으로 판단된다.

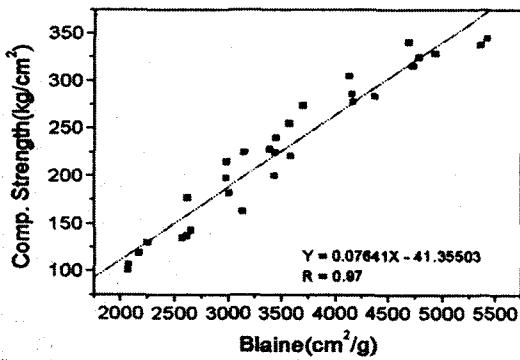
<그림 11~16>까지는 X<sub>0</sub>값의 변화에 따라 2차 sample을 이용하여 제조한 시멘트의 각 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. X<sub>0</sub>값이 증가할수록 물량고정을 고정하여 실험한 경우와 작업성을 일정수준 유지하여 실험한 경우 모두 강도가 감소하는 경향을 나타냈으며 초기 재령에서는 물량을 고정하여 실험한 경우가 그리고 후기 재령으로 갈수록 작업성을 유지하여 실험한 경우의 강도가 저하하는 폭이 컸다.



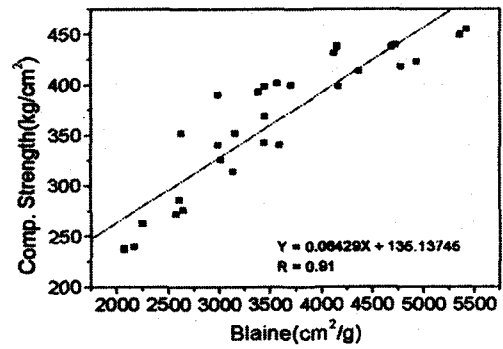
〈그림 17〉 비표면적에 따른 3일 압축강도(물량 고정)



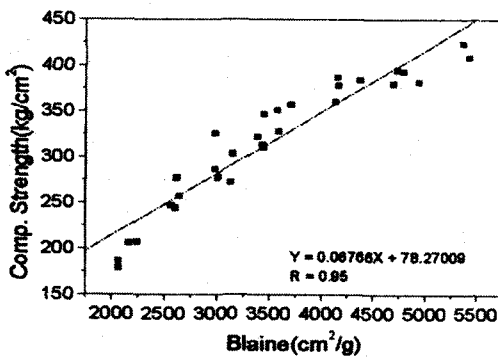
〈그림 21〉 비표면적에 따른 28일 압축강도(물량 고정)



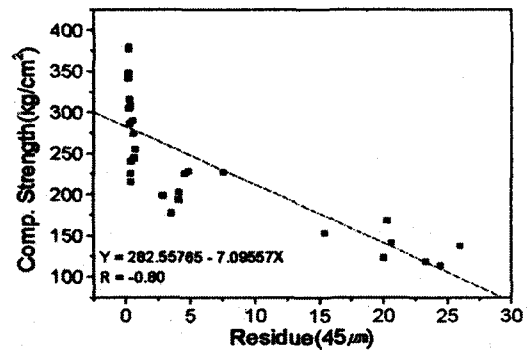
〈그림 18〉 비표면적에 따른 3일 압축강도(작업성 고정)



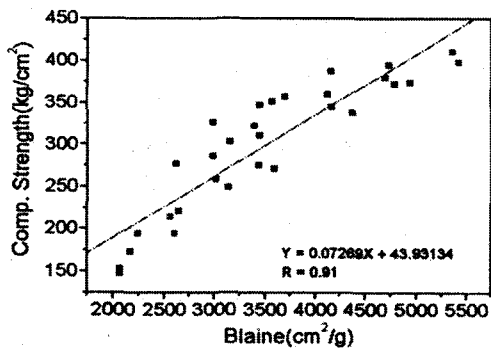
〈그림 22〉 비표면적에 따른 28일 압축강도(작업성 고정)



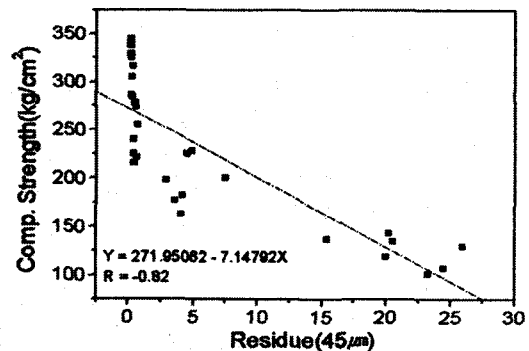
〈그림 19〉 비표면적에 따른 7일 압축강도(물량 고정)



〈그림 23〉 잔사에 따른 3일 압축강도(물량 고정)

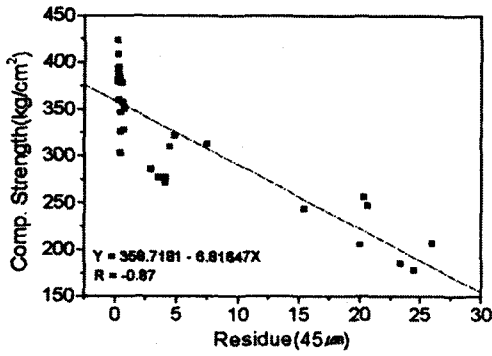


〈그림 20〉 비표면적에 따른 7일 압축강도(작업성 고정)

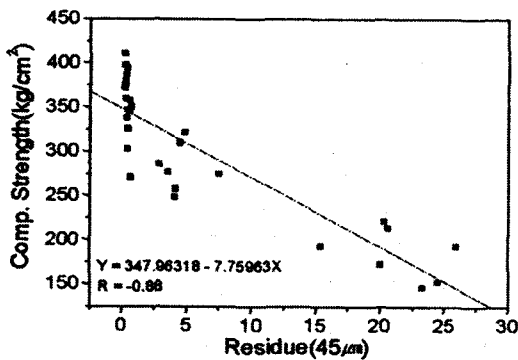


〈그림 24〉 잔사에 따른 3일 압축강도(작업성 고정)

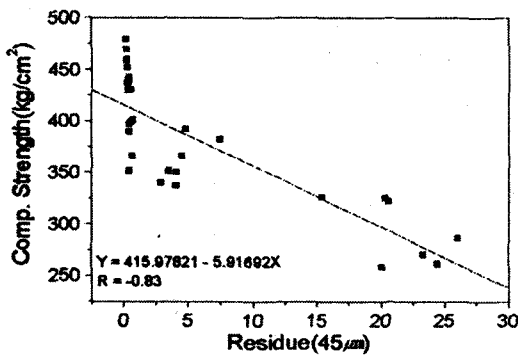




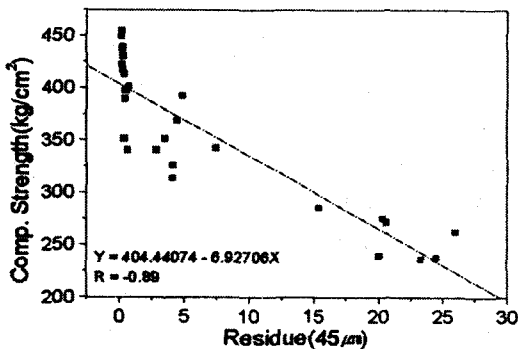
〈그림 25〉 잔사에 따른 7일 압축강도(물량 고정)



〈그림 26〉 잔사에 따른 7일 압축강도(작업성 고정)



〈그림 27〉 잔사에 따른 28일 압축강도(물량 고정)



〈그림 28〉 잔사에 따른 28일 압축강도(작업성 고정)

〈그림 17~22〉까지는 혼합수량 및 작업성을 각각 일정하게 하여 비표면적 변화에 따라 제조한 시멘트의 재령에 따른 압축강도 변화를 실험한 것이다.

혼합수량 고정 및 작업성 유지 모두 비표면적 증가에 따라 수화초기부터 후기까지 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 초기 재령에서는 혼합수량을 일정하게 유지하여 실험한 경우가 비표면적의 영향을 크게 받았고 재령이 지남에 따라서는 작업성을 일정하게 유지하여 실험한 경우가 비표면적의 영향을 크게 받았다.

따라서 비표면적이 증가할수록 혼합수량을 고정하여 실험하는 KS mortar 실험 및 작업성을 일정하게 유지하는 concrete 실험 모두 압축강도 증가가 예상되며, 오히려 후기 재령에서는 일정수량을 사용하는 mortar 실험 결과보다 slump를 동일하게 했을 때 concrete의 강도 향상 효과가 더 클 것으로 예상된다.

〈그림 23~28〉까지는 45µm 잔사량 변화에 따른 물량고정 및 작업성 유지실험에서 재령에 따른 제조시멘트의 압축강도 측정 결과이다. 45µm 잔사가 증가함에 따라 물량고정 및 작업성 유지 실험 모두에서 강도저하가 나타났으나 앞의 비표면적 및 X0 변화에 따른 압축강도의 영향과는 달리 잔사가 증가함에 따라서는 초기 재령부터 후기 재령까지 모든 재령에서 작업성 고정에 다른 압축강도 저하가 물량고정 실험 결과보다 영향이 크게 나타났으며, 이 결과로부터 시멘트의 잔사가 증가하게 되면 KS mortar보다 concrete에서의 강도저하가 두드러질 것으로 판단된다

아래 식은 제조시멘트의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량 및 SO<sub>3</sub> 함량 그리고 n값과 비표면적에 따른 응결특성을 회귀분석한 것이다.

$$Y = 21.75411A - 154.94023B - 197.67651C - 0.04028D$$

$$R : 0.7$$

- 여기서, A : SO<sub>3</sub> (wt%)
- B : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (wt%)
- C : n-Value
- D : Blaine (cm<sup>2</sup>/g)

제조시멘트의 응결특성은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 많을수록 짧아지며, SO<sub>3</sub> 함량이 높을수록 길어지는 특성을 나

타내고 입도분포 폭인  $n$ 값이 증가할수록 즉, 입도분포 폭이 좁을수록 비표면적이 증가할수록 짧아지는 경향을 나타낸다.

입도분포 폭이 좁다는 것은 다른 조건이 일정할 때 주로 시멘트의 미분쪽에 분포하는 석고의 비표면적은 감소하고 입자크기가 큰쪽에 분포하는 aluminat의 비표면적은 상대적으로 증가하는 결과를 가져오게 되므로 비표면적 변화에 따른 석고의 반응성 저하와 aluminat의 반응성 증가로 응결이 짧아지는 결과를 가져오게 된다.

더욱이 기존의 분급기에 비해 입도분포 폭을 좁게 관리할 수 있는 고성능 분급기는 뜨거운 내부순환 공기를 분급에 사용하지 않고 외부에서 유입하는 차가운 공기를 사용하기 때문에 석고의 탈수 정도에 기인하여 석고의 반응성이 상대적으로 작게 되므로, 입도분포 폭이 좁은 시멘트는 입도분포 폭이 넓은 시멘트와 같은 응결특성을 얻기 위해서는 석고의 첨가량이 증가되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

2회에 걸쳐 당사 분공장 및 항만공장 mill 출분을 sampling 하고 실험실용 lab separator를 이용하여 입도분포 및 비표면적 변화에 따른 시멘트를 제조하였다.

물리실험은 압축강도, 응결 및 주도 등을 실시하였으며 압축강도는 혼합수량을 일정하게 한 KS mortar 실험 및 작업성을 일정하게 유지한 concrete 모사시험 두가지 방법으로 실시하였다.

실험 결과는 다음과 같다.

1. 일정한 조건을 갖는 mill 출분은 분급기의 rotor speed 및 feeding rate가 증가함에 따라 비표면적이 증가하고 입도분포 폭이 좁아졌으며  $d_{36.8}$ 과  $d_{50}$ 이 미분쪽으로 이동했는데 특히 rotor speed의 영향이 컸다.
2. 분급기의 입분을 일정하게 하였을 때, 비표면적이 증가할수록  $Al_2O_3$ 함량은 감소하나  $Fe_2O_3$ 함량은 변화가 없었으며  $SO_3$ 함량은 증가하는 경향을 나타냈는데, 이 결과로부터 분쇄성이 우수한 석고는 시멘트의 주로 미분쪽에 분포하고 ferrite는 입도 전반에 걸쳐 존재하며 aluminat은 주로 조분쪽에 치우쳐 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.
3. 입도분포 폭을 변화시켜 시멘트를 제조한 후, 혼합수량 및 일정 작업성을 유지하여 실험한 결과 모든 재령에서 시멘트의 입도분포 폭이 좁을수록 강도가 향상되었는데, 초기 재령에서는 물량을 일정하게 고정한 경우가, 후기 재령으로 갈수록 작업성을 일정하게 유지하여 실험한 경우가  $n$ 값에 의한 강도 향상 효과가 크게 나타났다.
4. 위치상수 값을 변화시켜 시멘트를 제조한 후, 혼합수량 및 일정 작업성을 유지하여 실험한 결과 모든 재령에서  $d_{36.8}$  및  $d_{50}$ 의 값이 증가함에 따라 강도가 저하하였으며 초기 재령에서는 물량을 고정하여 실험한 경우의 강도저하가 컸고 후기 재령으로 갈수록 작업성을 유지하여 실험한 경우의 압축강도 저하폭이 크게 나타났다.
5. 잔사에 의한 압축강도의 영향을 분석한 결과 혼합수량 및 일정 작업성을 유지하여 실험한 경우 모두 잔사가 증가할수록 모든 재령에서 강도의 저하가 나타났는데, 특히 초기 재령에서 후기 재령까지 작업성을 일정하게 유지하여 실험한 경우의 강도 저하폭이 크게 나타났다.
6. 잔사에 의한 압축강도의 영향을 분석한 결과  $45\mu m$  잔사는 약 7.5wt% 이내에서  $90\mu m$  잔사는 약 0.2wt% 이내에서 제조시멘트가 우수한 강도특성을 보였으며 특히 이 범위 밖에서는 작업성을 고정하여 실험한 경우의 압축강도 저하폭이 특히 크게 나타났다.
7. 비표면적 변화에 따른 압축강도의 영향을 분석한 결과 혼합수량 고정 및 작업성을 일정하게 유지하여 실험한 경우 모두 비표면적이 증가할수록, 모든 재령에서 강도가 향상되었으며 초기 재령에서는 혼합수량을 고정하여 실험한 경우가, 후기 재령으로 갈수록 작업성을 일정하게 유지하여 실험한 경우의 강도 향상 폭이 크게 나타났다.
8. 비표면적 변화에 따른 응결특성 분석결과 비표면적이 증가할수록, 입도분포 폭이 좁아질수록 제조시멘트의 초결은 짧아지는 경향을 나타냈

으며 이는 입도분포 폭이 좁아질수록, 주로 시멘트의 미분쪽에 존재하는 석고의 비표면적은 상대적으로 감소하고 조분쪽에 분포하는 aluminate의 비표면적은 증가하는 상대적인 반응성 변화에 의한 것으로 판단되며, 더욱이 기존 분급기에 비해 고성능 분급기를 사용한 경우 석고의 탈수정도 차이에 의해 다른 조건이 일정하다고 가정하면 고성능 분급기를 사용하여 제조된 입도분포 폭이 좁은 시멘트는 일정한 응결특성을 얻기 위해 기존 분급기를 사용하여 제조된 시멘트에 보다 석고 첨가량이 증가하여야 할 것으로 판단된다.

#### 〈참 고 문 헌〉

1. Weiss, Stuart J., and Tresouthick, Stewart W., Energy Savings by Improved Control of the Finish Grinding Process in Cement Manufacture, DOE/CS/40419-T1, March 1987.
2. Tsivilis S., Tsimas S., Benetatou A., and Haniotakis E., "Study on the contribution of the fineness on cement strength", Zement-Kalk-Gips, vol. 43, no. 1, January 1990, pp. 26~29.
3. Sumner M. S., Hephher N. M., and Moir G. K., "The Influence of a Narrow Cement Particle Size Distribution on Cement Paste and Concrete Water Demand", 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, September 22-27, 1986, vol. II, pp. 310~315.
4. Kuhlmann K., Ellerbrock H. G., and Sprung S., "Korngrobenverteilung und Eigenschaften von Zement", "Teil III : Einfluss des Mahlprozessen", Zement-Kalk-Gips, vol. 43, no. 1, January 1990, pp. 13~19. (English translation in vol. 40, no. 3.)