

# 분쇄조업에 있어서 시멘트 품질 개선에 관한 연구

박문철\* · 방성호 · 김기범 · 이형두 · 홍창식  
 (동양 중앙연구소 공정연구실)

## 1. 서론

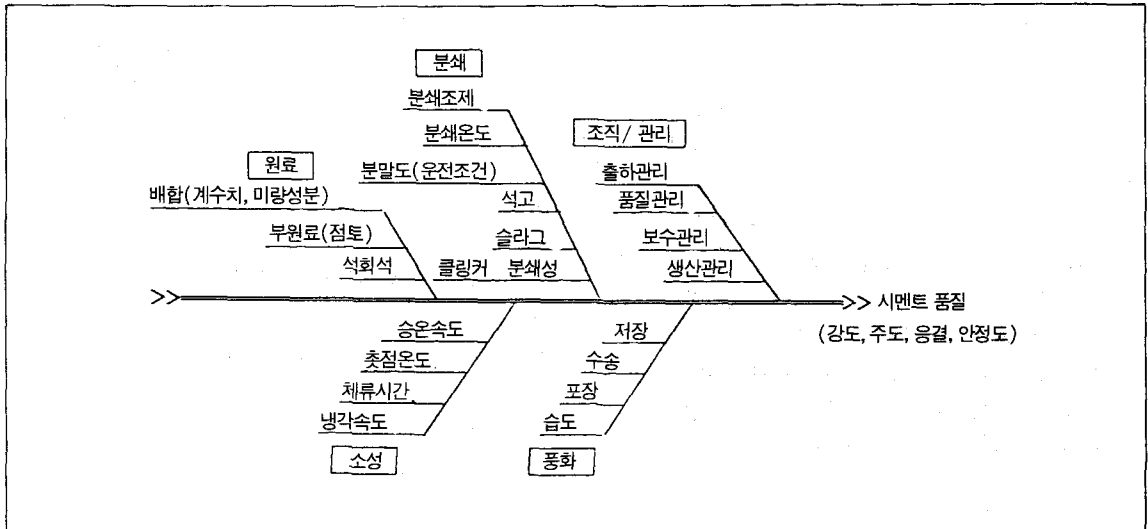
국내의 각사의 시멘트 생산용량의 급격한 증대와 UR(시장개방) 등의 영향으로 시장경쟁이 치열해질 것으로 예측됨에 따라 시멘트 품질에 대한 관심이 고조되고 있다. 본 연구는 시멘트 분쇄에서는 품질제어 인자들을 파악하고 각 인자들에 대한 시멘트 품질과의 관계를 도출하여 품질관리 기준 및 조업 표준을 설정하고자 하였다.

시멘트의 품질은 사용자의 요구가 다양하여 품질을 구체적으로 정의할 수 없을 뿐만 아니라 제조공정, 원료, 조업 특성에 따라 품질에 영향을 주는 무수한 인자들을 파악하기도 곤란하다. 시멘트 품질관리의 대상항목으로 구분해 보면 보통 각 재령에서의 압축강도, 주도, 응결, 수화열, 안정도 및 산이나 염기에 대한 화학적 저항성 등으로 나눌 수 있다. 시멘트의 품질 특성들은 시멘트의 화학적·광물학적 조성 및 분말도에 영향을 받는다. 일반적으로 시멘트 품질에 영향을 주는 인자들은 Fig. 1과 같이 분류할 수 있다.

시멘트 분말도는 분쇄 공정조업에 의해 결정되는 비표면적과 입도분포로 설명된다. 시멘트 분말도는 비표면적(Blaine)과 잔사율(44 $\mu$ mR, 88 $\mu$ mR)로 설명될 수도 있으나, 이들 각각으로 분말도의 완전한 평가가 곤란하므로 전체 입도분포를 나타낼 수 있는 Rosin-Rammler식의 균일계수 N과 대표입경  $X_o$ 를 관리기준에 적용할 필요가 있다. 또한 시멘트 입도분포가 시멘트 품질에 미치는 영향을 파악하여 요구되는 시멘트 품질수준에 적합한 시멘트 입도분포를 도출하고, 이러한 시멘트를 생산하기 위한 분쇄 조업 조건을 설정할 필요가 있다.

시멘트 분쇄시 주원료인 클링커 이외에 석고와 슬라그가 첨가된다. 석고는 약 5% 정도 클링커와 함께 투입되어 시멘트의 응결지연제 역할을 한다.  $SO_3$  함량이 증가함에 따라 alite의 수화에 촉진작용을 하여 강도발현을 크게하지만 과다할 경우 강도발현을 억제시킨다. 따라서 최대의 강도발현 및 최소의 수축 효과를 보이며 응결 지연 역할을 할 수 있는 최적의  $SO_3$  함량이 존재한다. 또한 천연석고와 화학석고의 혼합

Fig. 1. 시멘트 품질에 영향을 미치는 인자



비 및 슬래그는 시멘트 품질에 영향을 주므로 이들 인자들에 대한 시멘트 품질과의 관계를 도출할 필요가 있다.

## 2. 실험 및 분석

### 2-1. 석고와 슬래그에 따른 시멘트 품질

시멘트밀에 투입되는 부원료(석고, 슬래그)가 시멘트 품질에 미치는 영향을 파악하여, 석고 및 슬래그의 특성을 규명하고 최적 사용량 및 사용 조건을 설정하고자 하였다. 본 실험은 POLYCOM+볼밀 공정과 볼밀 단독 공정을 대상공정으로 동시에 실시하였다. Fig. 2에 POLYCOM+볼밀공정과 볼밀 단독 공정을 나타내었다.

본 실험에서는 화학석고, 천연석고, 슬래그, 클링커의 혼합비가 시멘트 품질에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. <표-1>는 실험인자들과 각 인자의 SO<sub>3</sub> 함량 및 실험에서의 제약조건들을 나타낸다. 정의에 따라 4성분의 혼합물에 관한 실험계획은 3차원 심플렉스(simplex)이며, 심플렉스의 모든 영역에 실험점을 균일하게 배치하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

### 2-2. 분말도에 따른 시멘트 품질

시멘트 분쇄에서 분말도는 품질변동에 주 요인으로 작용한다. 본 실험은 시멘트 분말도와 품질의 관계를 정량화하고, 석고 및 슬래그 변경시험에서의 분말도 편차를 보정해 주고자 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 주도

주도는 <표-2>에서 나타난 바와 같이 최적회귀식의 정도가 결정계수  $r^2=0.505$ 로 낮아서 품질 제어인자를 평가하기 어렵다. 주도가 다른 물성들에 비하여 회귀식의 정도가 크게 낮은 것은 주도의 변화폭이 작고, 최소 측정단위가 0.5%로 크기 때문이라 생각된다. 따라서 주도를 제어하기 위해서는 보다 정밀한 측정법을 적용해서 관련인자를 파악해야 할 필요가 있다. 본 실험결과 주도에 영향을 주는 인자는 분말도, 석고의 탈수율과 슬래그로서 3개가 파악되었다. <표-2>에서 품질제어인자들은 본실험의 흥미영역 값은 -1에서 +1 사이의 값으로 정회귀화하였다.

Fig. 2. 대상 공정

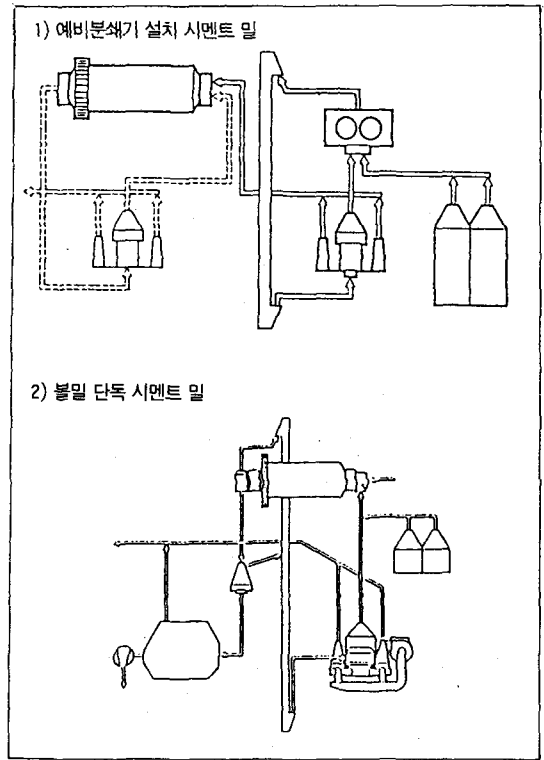
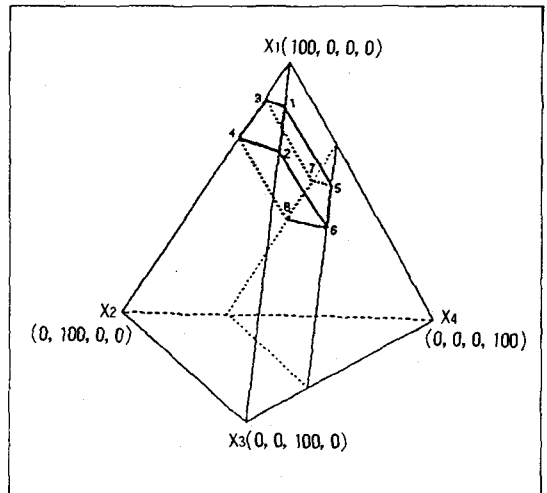


Fig. 3. 공정실험을 위한 심플렉스 격자 혼합물 구조



<표-1> 실험의 주요인자와 제한조건

실험 인자	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
	화학석고	천연석고	슬래그	클링커
SO <sub>3</sub> 함량 [%]	41.3	45.6	0	0
제약조건				
슬래그첨가량 [%]	$0 \leq X_3 \leq 8$			
SO <sub>3</sub> 함량 [%]	$2.0 \leq 0.413X_1 + 0.456X_2 \leq 2.5$			

〈표-2〉 반응표면분석으로 추정된 각인자가 시멘트 품질에 미치는 영향

회귀계수	압축강도			응 결		주도	수 화 열			탈수
	3일	7일	28일	초기	최종		1시간	24시간	48시간	
constant	182.53	245.09	347.26	216.28	350.57	25.21	3.99	42.51	53.78	52.96
T-P	0.00	0.00	11.85	19.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-7.07
$1/(N \times X_o)^2$	-20.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61	0.00	0.00	9.67
$1/(N \times X_o)$	0.00	-23.94	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.65	0.00	0.00	0.00
$N^2$	0.00	0.00	35.08	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.89	0.00	14.99
N	0.00	0.00	34.19	0.00	-21.68	0.00	0.00	0.00	4.55	-13.98
$N \times X_o$	0.00	0.00	57.33	0.00	0.00	-1.04	0.00	-9.00	0.00	0.00
$X_o^2$	0.00	0.00	0.00	-33.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$X_o$	-75.96	-95.94	-28.62	0.00	0.00	-0.68	0.00	-7.90	-8.47	0.00
SLAG <sup>2</sup>	7.37	0.00	6.45	0.00	-23.52	-0.32	0.00	1.55	2.41	-5.51
SLAG	-10.68	-17.01		-4.76	0.00	0.07	-0.46	-1.49	-2.71	0.00
C-GYP <sup>2</sup>	-7.04	0.00	0.00	11.38	27.35	0.00	0.00	0.00	0.00	4.02
C-GYP	-4.69	-6.11	0.00	27.15	18.08	0.00	0.00	0.00	0.00	-10.48
C-GYP × SO <sub>3</sub>	-12.44	-13.04	0.00	-16.51	-20.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.07	-2.78	0.00
SO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	20.28	24.99	0.00	0.00	2.51	1.59	0.00
DH-GYP <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
DH-GYP	0.00	0.00	0.00	0.00	-22.36	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
R <sup>2</sup>	0.888	0.891	0.875	0.723	0.682	0.505	0.518	0.801	0.823	0.702
Std err	9.483	10.697	10.506	10.027	17.300	0.292	0.429	1.826	2.291	6.580

### 3-2. 응결, 수화열

시멘트의 초기수화 결과는 응결과 초기수화열로서 나타난다. 석고의 탈수에서와 같이 공정특성의 차이에 따라 POLYCOM 부설 공정이 tube mill 단독 공정에 비하여 7% 정도 탈수가 적게 일어나고 20분 정도 초결이 지연되지만, 종결이나 24, 48시간의 수화열에는 공정특성에 따른 차이가 발생하지 않았다. 〈표-2〉에서 응결에는 분말도, 슬라그, 화학석고비, SO<sub>3</sub> 함량 및 석고탈수율이 모두 영향을 주지만 응결 이후의 수화진척이라고 할 수 있는 24, 48시간의 수화열에는 화학석고비와 석고 탈수율의 영향을 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 4에서 N, 슬라그, 석고탈수율 모두 초결에 미치는 영향은 작으나, N과 석고탈수율이 커질수록 종결이 빨라지며 슬라그는 4% 일때 최대로 지연됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서 화학석고비가 커질수록 응결시간이 지연되며, SO<sub>3</sub> 함량의 증가에 대해서는 특히 화학석고비가 작을 때 응결시간의 지연효과가 커짐을 관찰할 수 있다. 따라서 응결특성의 관리를 위

Fig. 4. 응결시간-석고탈수율, 슬라그량, N%의 영향

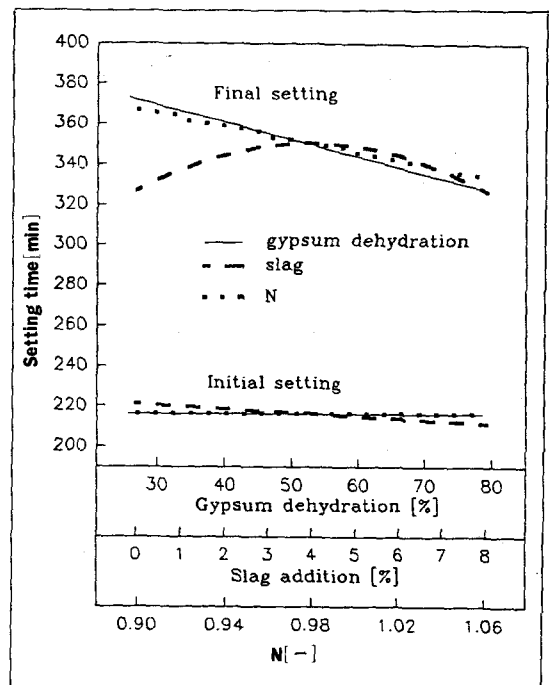


Fig. 5 응결시간-화학/천연석고비, SO<sub>3</sub>의 영향

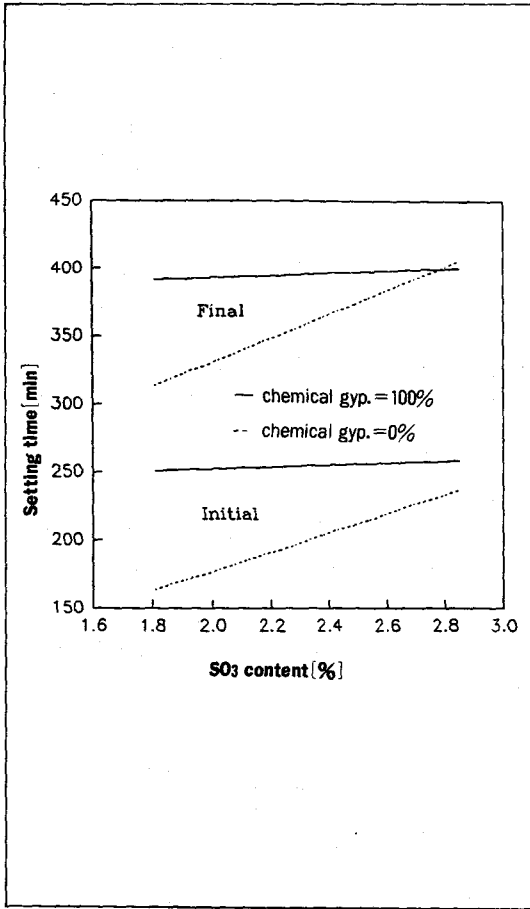
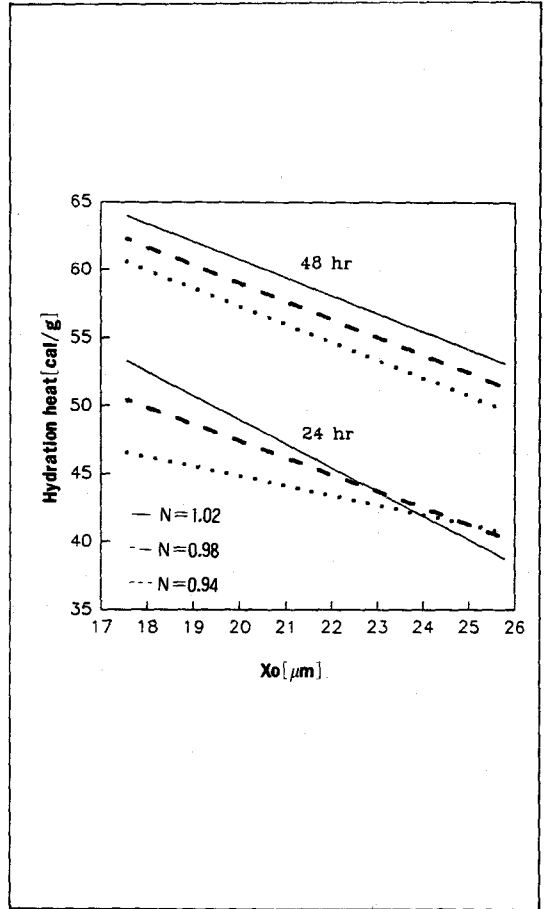


Fig. 6 수화열-분말도 : N, X<sub>0</sub>의 영향



하여 화학석고비와 SO<sub>3</sub> 함량 조절에 대한 주의가 요구된다.

분말도, SO<sub>3</sub> 및 슬라그가 24, 48시간의 수화열에 미치는 영향을 Fig. 6, 7에 나타내었다. 입도와 입자의 반응성 때문에 X<sub>0</sub>와 슬라그량이 클수록 수화열이 감소하고, N과 SO<sub>3</sub> 함량의 증가에 대해서는 수화열이 증가함을 알 수 있다. 따라서 수화열이 문제시되는 하절기에는 SO<sub>3</sub>를 적정량으로 조절하고, 압축강도의 특성을 고려하면 X<sub>0</sub>와 N 값을 동시에 증가시킬 필요가 있다.

### 3-3. 시멘트의 압축강도

시멘트 장기 수화반응의 결과는 물리적으로 3, 7, 28일 압축강도로서 설명할 수 있다. 석고의 탈수 및 초결특성에서와 같이 POLYCOM 부설 공정이 tube mill 단독 공정에 비하여 28일 압축강도가 12정도 높게 나타났다. <표-2>로부터 압축강도에 영향을 주는 주요 인자는 분말도와 슬라그이며, 초기강도

Fig. 7 수화열-슬라그량, SO<sub>3</sub> 함량의 영향

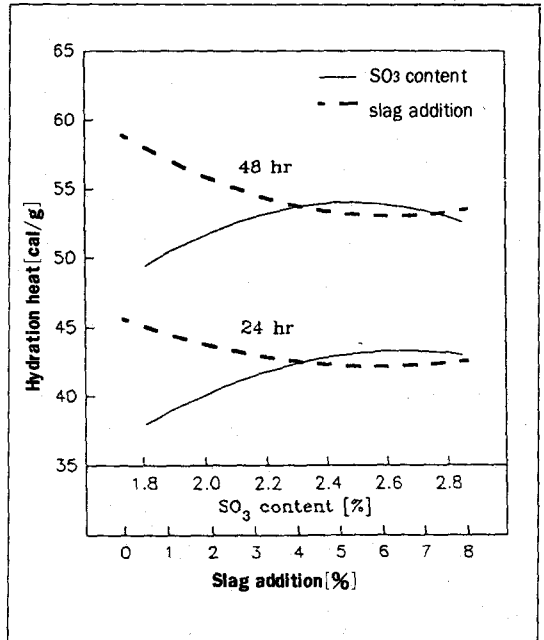
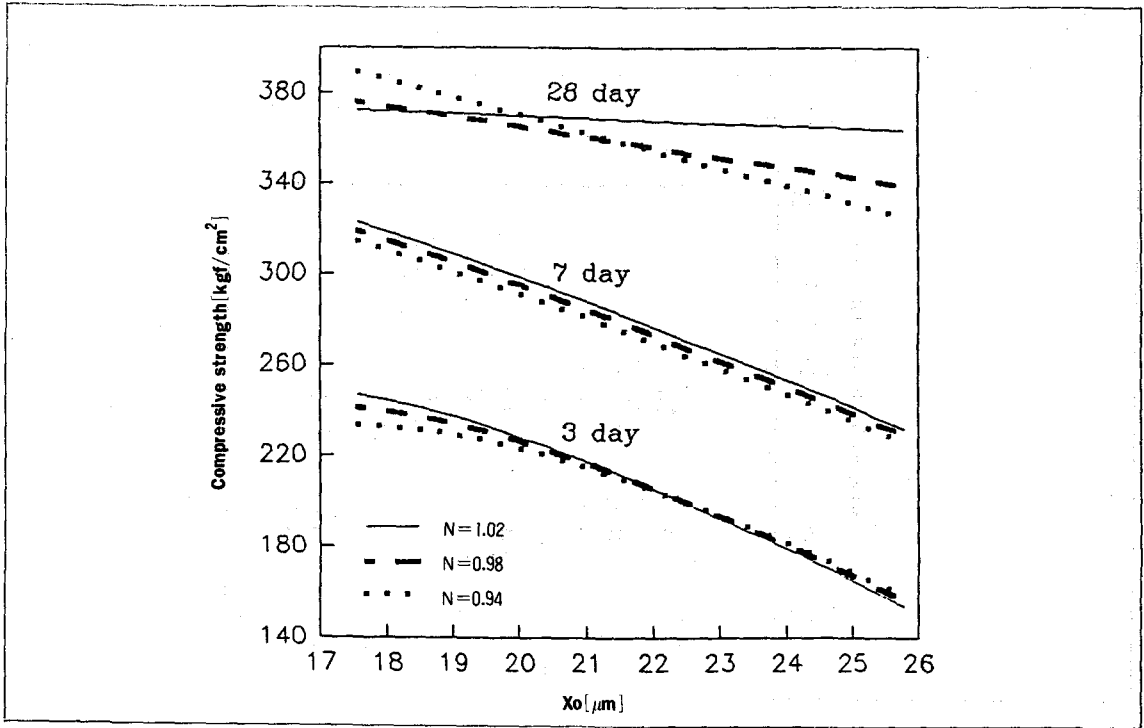


Fig. 8. 압축강도 - SO<sub>3</sub> 함량의 영향



에는 석고(화학적석고비, SO<sub>3</sub>)의 영향도 무시할 수 없는 것으로 나타났다.

분말도가 압축강도에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 각 재령에서 N이 커지고 X<sub>0</sub>가 작아질수록 압축강도가 증가하며, N에 대한 영향은 재령이 길수록 커지고 X<sub>0</sub>에 대한 영향은 재령이 짧을수록 커짐을 알 수 있다. 따라서 강도를 높이기 위해서 X<sub>0</sub>를 작게 하는 것은 분쇄공정의 생산성 저하 뿐만 아니라 주도, 수화열 등 다른 품질특성에 악영향을 주므로 N값을 가능한한 높게 관리하는 것이 바람직하다.

Fig. 9에서와 같이 슬라그는 모든 재령에서의 강도를 선형적으로 저하시키므로 슬라그를 사용할 때에는 주의가 필요하다. 또한 Fig. 10에서와 같이 화학석고비와 SO<sub>3</sub>는 초기강도에 영향을 주지만 28일에는 영향이 없으므로 초기수화 물성(주도, 응결, 수화열)에 맞추어 관리하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 시멘트분쇄조업에서의 품질제어인자들을 파악하고 각 인자들과 시멘트 품질과의 정량적인 관계를 도출하여, 품질관리기준 및 조업표준을

Fig. 9. 압축강도 - 슬라그량의 영향

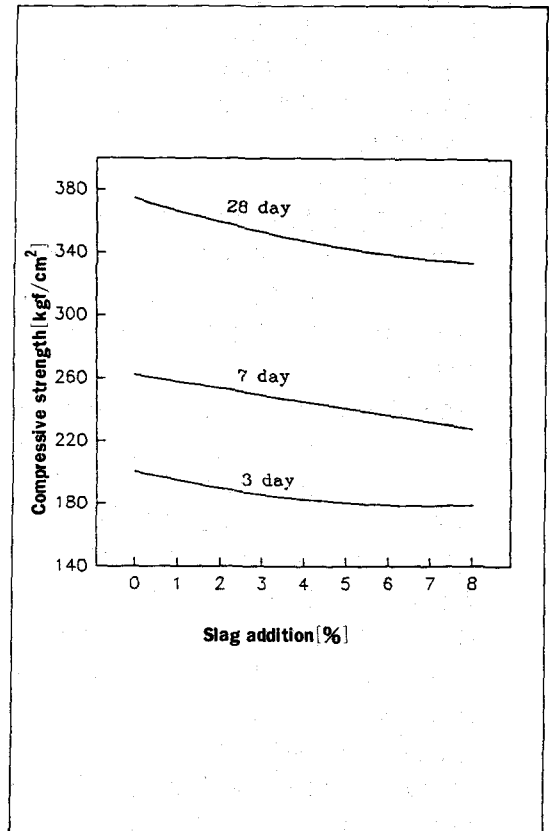
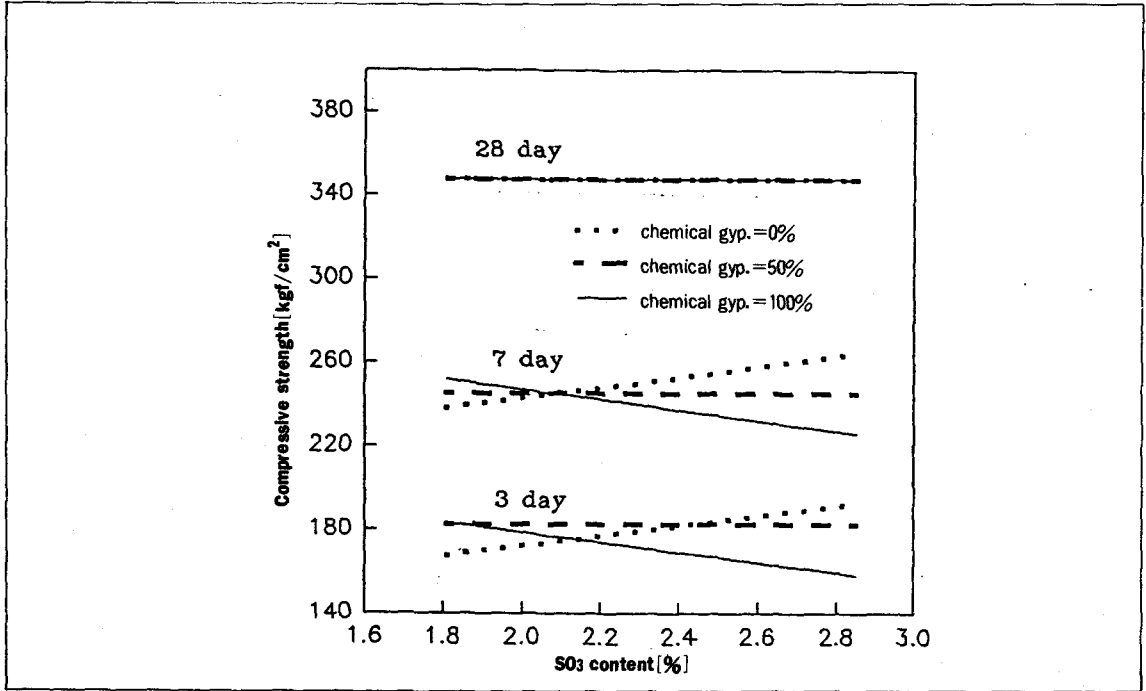


Fig. 10. 압축강도 - SO<sub>3</sub> 함량의 영향



설정하였다.

- 1) 분쇄조업에서 시멘트 품질(주도, 응결, 수화열, 압축강도)에 영향을 주는 인자들은 석고(천연/화학석고비, SO<sub>3</sub>, 석고탈수율), 슬라그양 및 분말도(X<sub>0</sub>, N)이며, 이들 사이에 교호작용은 무시할 수 있다.
- 2) 주도는 변화폭이 작고, 최소 측정단위가 0.5%로 크기 때문에 주도를 제어하기 위해서는 보다 정밀한 측정법을 적용해서 관련인자를 파악해야 할 필요가 있으며 주도에 영향을 주는 인자는 분말도, 석고의 탈수율과 슬라그로서 3개가 파악되었다.
- 3) 응결은 POLYCOM 부설 공정이 tube mill 단독 공정에 비하여 20분 정도 초결이 지연되었고, N과 석고탈수율이 커질수록 종결이 빨라지며 슬라그는 4% 일때 최대로 지연되었다. 화학석고비가 커질수록 응결시간이 지연되며, SO<sub>3</sub> 함량의 증가에 대해서는 특히 화학석고비가 작을때 응결시간의 지연효과가 크다. 따라서 응결 특성의 관리를 위하여 화학석고비와 SO<sub>3</sub> 함량 조절에 대한 주의가 요구된다.
- 4) 24, 48시간의 수화열은 X<sub>0</sub>와 슬라그량이 클수록 수화열이 감소하고, N과 SO<sub>3</sub> 함량의 증가에 대해서는 수화열이 증가하므로 수화열이 문제시

되는 하절기에는 SO<sub>3</sub>를 적정량으로 조절하고, X<sub>0</sub>와 N 값을 동시에 증가시킬 필요가 있다.

- 5) 클링커 또는 공정특성 차이로 POLYCOM 부설 공정이 tube mill 단독 공정에 비하여 28일 압축강도가 12정도 높게 나타났으며, 압축강도에 영향을 주는 주요 인자는 분말도와 슬라그이고, 초기강도에는 석고(화학석고비, SO<sub>3</sub>)의 영향도 무시할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 강도를 높이기 위해서 X<sub>0</sub>를 작게하는 것은 분쇄공정의 생산성 저하 뿐만 아니라 주도, 수화열 등 다른 품질특성에 악영향을 주므로 N값을 가능한한 높게 관리하는 것이 바람직하며, 슬라그는 모든 재령에서의 강도를 선형적으로 저하시키므로 슬라그를 사용할 때에는 주의가 필요하다. 또한 화학석고비와 SO<sub>3</sub>는 초기강도에 영향을 주므로 초기수화 물성(주도, 응결, 수화열)에 맞추어 관리하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.
- 6) 본 실험에서 확보된 자료로부터 압축강도에 미치는 품질제어인자의 영향 정도를 분석한 결과 조업범위내에서 분말도의 영향이 50% 내외로 가장 크고 석고의 영향은 재령이 길어질수록 감소하지만, 슬라그의 영향은 증가하여 28일 강도에서는 약 30%를 차지하였다.