

# 시멘트 킬른 더스트(CKD)의 유효이용에 대한 고찰

차완호·연영훈·김성수\*

〈아세아시멘트 제철공장〉

## I. 서론

시멘트 제조공정에서 발생하는 시멘트 킬른 더스트(이하 CKD)는 배출가스에 포함된 비산분진을 집진한 것으로서, 오늘날 현대의 설비에서는 대부분 시멘트 원료로 재투입되면서 일정량이 순환하는 시스템으로 구성되어 있으며, 그 순환율은 공장에 따라 7~15%에 이르는 것으로 알려져 있다.

이러한 CKD는 시멘트 원료의 성분분리에 의한 저급의 석회석 분말로 시멘트보다도 미세한 입도를 갖고, 휘발성분인 알카리나 SO<sub>3</sub> 함량이 높은 것이 특징이며, 그 물리화학적 특성 역시 설비조건이나 구성원료 등에 따라서도 크게 다르다고 할 수 있다.<sup>1)</sup>

이러한 CKD를 시멘트 혼화재로 이용하려는 시도는 비교적 품질관리가 엄격한 일본보다 필라시멘트를 규격화 하고 있는 유럽에서 석회석 미분말 대체 목적으로 적극 이루어졌으며, 80년대 이후 관련문헌이 다수 발표되기도 하였다.

이미 몇몇 국가에서는 자국의 시멘트 규격이 허용하는 한도내에서 경제성 및 환경측면에서 시멘트 혼화재로 이용하고 있는 것이 현실이다.

또한 일부에서는 CKD의 조성 변동을 감안 하더라도 경험적으로 4%까지는 시멘트 품질 영향없이 안정적으로 사용이 가능하다고 하였다.<sup>1, 2)</sup>

본 실험에서는 이러한 CKD가 갖는 특성에 착안하여, 당사 CKD의 물리화학적 특성을 평가하고, 원가절감 및 시멘트·콘크리트 성능 개선을 위한 혼화재로서의 활용 가능성을 검토 하였다.

## II. 실험방법

### 1. 실험 개요

CKD의 활용 검토를 위해 각각 실험(I)(II)(III)으로 구분하여 실시하였다.

실험(I)은 시멘트 혼화재로서의 검토시험으로 시멘트의 단순치환, 혼합 분쇄시험, 석고치환의 경우에 대해 물성을 비교하였다.

실험(II)는 콘크리트 혼화재로서의 성능시험으로 물성 비교를 위하여 동일 첨가량의 플라이애시 첨가 경우와 비교하였다.

또한 실험(III)에서는 슬래그 미분말을 다량 첨가한 혼합시멘트계에서의 CKD의 첨가 결과 및 초기강도 촉진 효과를 파악하고자 하였다.

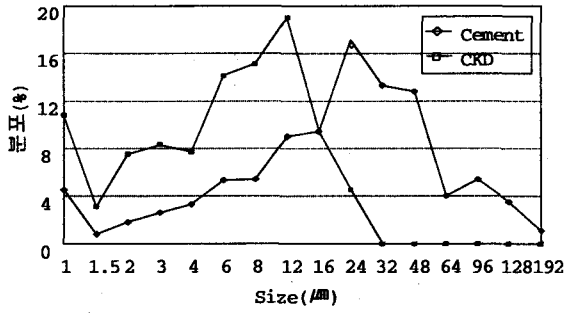
### 2. 실험 재료

본 실험에 사용한 시멘트 및 클링커는 당사 1종 보통의 공정체취 시료를 이용하였으며, 실험(III)에서 사용한 슬래그 미분말은 Blaine 4,200 cm<sup>2</sup>/g의 표준 시판품을 이용하였다.

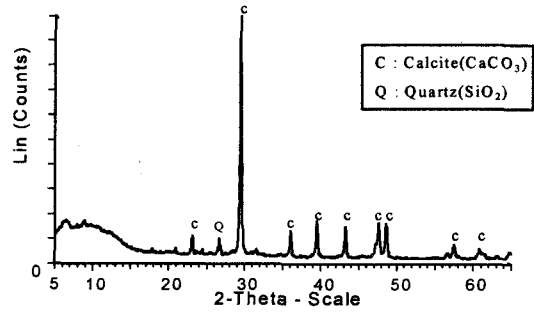
한편 각 실험에 사용한 CKD의 화학성분 및 분말도를 <표 1>에, 입도분포도를 <그림 1>에, XRD 분석결과를 <그림 2>에 각각 나타냈다.

〈표 1〉 CKD의 화학성분 및 분말도

| 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> | K <sub>2</sub> O |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----|-----------------|------------------|
| 37.1     | 12.8             | 3.9                            | 1.4                            | 42.4                       | 1.2 | 0.7             | 0.9              |
| 평균입경(μm) |                  | 10μm 이하                        |                                | Blaine(cm <sup>2</sup> /g) |     |                 |                  |
| 5.4      |                  | 70%                            |                                | 8,200                      |     |                 |                  |



<그림 1> CKD의 입도분포도



<그림 2> CKD의 XRD 분석결과

### III. 실험 (I)

#### 1. 배합비

- 단순혼합 (Series 1) : 시멘트에 CKD의 단순치환
- 혼합분쇄, 클링커치환 (Series 2) : 배합수준별로 시험용 Ball Mill에서 혼합분쇄
- 혼합분쇄, 석고치환 (Series 3) : 배합수준별로 시험용 Ball Mill에서 혼합분쇄

Series별 배합비를 <표 2>에 나타냈으며, KS 방법에 준하여 몰탈의 물리성능을 측정하였다.

<표 2> 배 합 비

| 구 분      | CKD (%) | 시멘트 | 클링커  | 석 고  | CKD  |
|----------|---------|-----|------|------|------|
| Series 1 | 0       | 100 | -    | -    | -    |
|          | 3       |     |      |      | 3    |
|          | 5       |     |      |      | 5    |
|          | 7       |     |      |      | 7    |
|          | 9       |     |      |      | 9    |
| Series 2 | 0       | -   | 95.5 | 4.5  | -    |
|          | 3       |     | 92.5 |      | 3    |
|          | 5       |     | 90.5 |      | 5    |
|          | 7       |     | 88.5 |      | 7    |
|          | 9       |     | 86.5 |      | 9    |
| Series 3 | 10      | -   | 95.5 | 4.05 | 0.45 |
|          | 20      |     |      | 3.60 | 0.90 |
|          | 30      |     |      | 3.15 | 1.35 |
|          | 50      |     |      | 2.25 | 2.25 |
|          | 100     |     |      | 0    | 4.5  |

#### 2. 결과 및 고찰

##### 2.1 응결시간

응결시간은 CKD의 첨가방법에 따라 단축 또는 지연되었으며, CKD의 첨가량이 응결시간에 영향을 미치고 있으나 그 정도는 미미한 것으로 나타났다.

특히 석고를 치환한 Series 3의 경우 50% 치환까지도 완전한 응결 단축현상을 나타내 문헌<sup>3,4)</sup>에서 제시하는 바와 같이 CaCO<sub>3</sub>가 칼슘카보알루미네이트(CCA)를 형성하여 응결지연에 기여하고 있는 것으로 추측된다. (<그림 3> 참조)

##### 2.2 압축강도

압축강도는 첨가방법에 관계없이 기준과 유사하거나 상회하는 것으로 나타나 강도하락 현상은 보이지 않았다. 특히 혼합분쇄한 Series 2의 경우 전재령에서의 강도증진이 두드러졌으며, 그 임계점은 약 5% 전후로 나타났다.

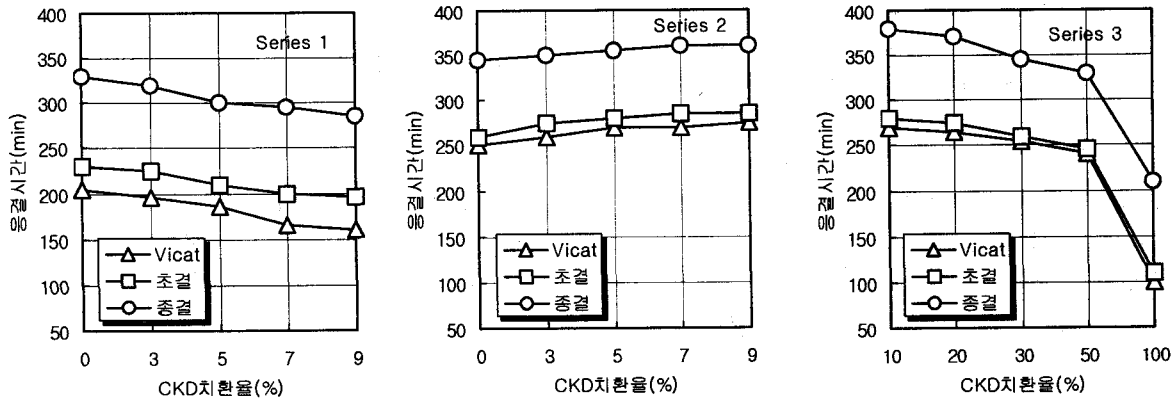
따라서 CKD 치환에 의한 품질하락은 미분말 충전이나 "Filler effect"<sup>5)</sup> 등에 의해 보상됨을 알 수 있다. 석고를 치환한 Series 3의 경우에도 30%까지는 기준과 유사한 정도의 강도발현을 나타냈다. (<그림 4> 참조)

##### 2.3 기타 물성

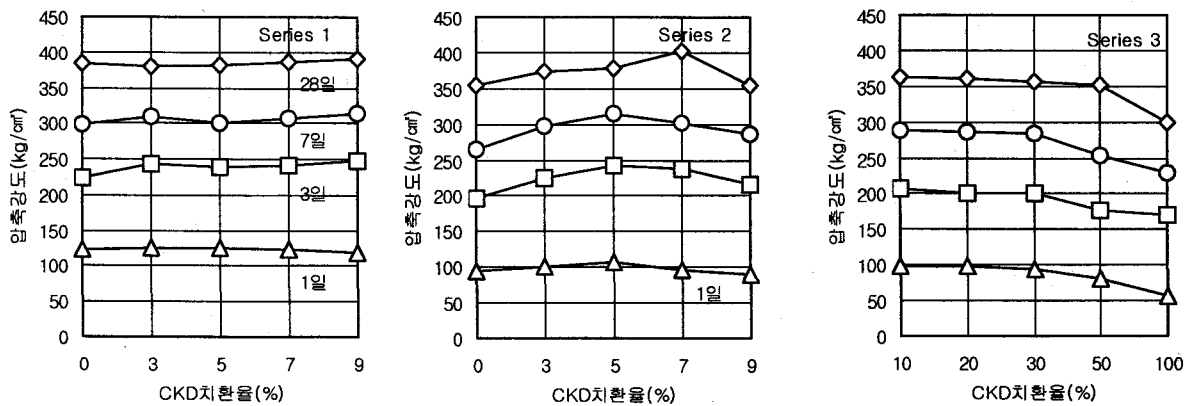
기타 물성에의 영향은 없었으나, 동일 물량에서의 Flow값이 다소 감소하였으며, 이는 비표면적 증가 및 입형의 영향으로서 콘크리트 작업성 측면에서는 다소 불리할 것으로 판단된다.

<표 3> 실험 결과

| 구분       | CKD (%) | 표준주도 (%) | Flow (mm) | Vicat (분) | Gillmore |     | 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> ) |     |     |     |
|----------|---------|----------|-----------|-----------|----------|-----|----------------------------|-----|-----|-----|
|          |         |          |           |           | 초결       | 종결  | 1일                         | 3일  | 7일  | 28일 |
| Series 1 | 0       | 26.8     | 169       | 205       | 230      | 330 | 123                        | 223 | 298 | 385 |
|          | 3       | 26.8     | 169       | 195       | 225      | 320 | 126                        | 244 | 310 | 380 |
|          | 5       | 26.8     | 164       | 185       | 210      | 300 | 125                        | 240 | 300 | 382 |
|          | 7       | 26.4     | 161       | 165       | 200      | 295 | 122                        | 242 | 308 | 386 |
|          | 9       | 26.2     | 161       | 160       | 195      | 285 | 119                        | 248 | 315 | 390 |
| Series 2 | 0       | 23.4     | 176       | 250       | 260      | 345 | 93                         | 196 | 264 | 354 |
|          | 3       | 23.0     | 164       | 260       | 275      | 350 | 100                        | 224 | 298 | 374 |
|          | 5       | 22.6     | 159       | 270       | 280      | 355 | 106                        | 242 | 315 | 379 |
|          | 7       | 22.4     | 156       | 270       | 285      | 360 | 97                         | 238 | 301 | 393 |
|          | 9       | 22.2     | 154       | 275       | 285      | 360 | 90                         | 217 | 289 | 354 |
| Series 3 | 10      | 22.4     | 160       | 270       | 280      | 380 | 98                         | 208 | 288 | 362 |
|          | 20      | 22.4     | 164       | 265       | 275      | 370 | 98                         | 202 | 286 | 360 |
|          | 30      | 22.6     | 164       | 255       | 260      | 345 | 94                         | 200 | 283 | 356 |
|          | 50      | 22.8     | 159       | 240       | 245      | 330 | 81                         | 176 | 254 | 351 |
|          | 100     | 32.4     | 107       | 100       | 110      | 210 | 57                         | 171 | 230 | 300 |



<그림 3> 몰 탈 응 결 시 간



<그림 4> 몰 탈 압 축 강 도

〈표 4〉 배 합 비

| 규 격       | CKD (%) | W/B (%) | S/A (%) | 단 위 량 | 배 합 (kg/m <sup>3</sup> ) |          |     |     |      |
|-----------|---------|---------|---------|-------|--------------------------|----------|-----|-----|------|
|           |         |         |         |       | C 1                      | C2 (CKD) | S   | G   | AD   |
| 25-210-15 | 0       | 56.4    | 49.5    | 180   | 319                      | -        | 861 | 882 | 0.95 |
|           | 5       |         |         |       | 303                      | 16       |     |     |      |
|           | 7       |         |         |       | 297                      | 22       |     |     |      |
|           | 10      |         |         |       | 287                      | 32       |     |     |      |
| 25-270-15 | 0       | 47.5    | 47.5    | 183   | 385                      | -        | 798 | 882 | 1.35 |
|           | 5       |         |         |       | 366                      | 19       |     |     |      |
|           | 7       |         |         |       | 358                      | 27       |     |     |      |
|           | 10      |         |         |       | 346                      | 39       |     |     |      |

IV. 실 험 (II)

1. 배합비

CKD의 콘크리트 혼화재로서의 적용시험은 배합규격 25-210-15와 25-270-15에 대하여 실시하였으며, 동일 치환량의 플라이애시의 경우와 성능을 비교하였다. 배합비는 〈표 4〉에 나타났다.

2. 결과 및 고찰

CKD의 치환량이 증가할수록 공기량이 낮아지는 경향을 나타냈으며, 압축강도는 몰탈이 3일 이후부터 증가한 반면 콘크리트에서는 C-S-H 수화물이 활발하게 형성되는 7일 이후 재령에서 강

도발현이 두드러졌다.

강도 증가폭은 시멘트 부배합인 배합규격 270에서 높게 나타났으며, 한계 첨가량은 5~7%인 것으로 나타났다. 〈표 5〉 및 〈그림 5〉에 시험결과 나타났다.

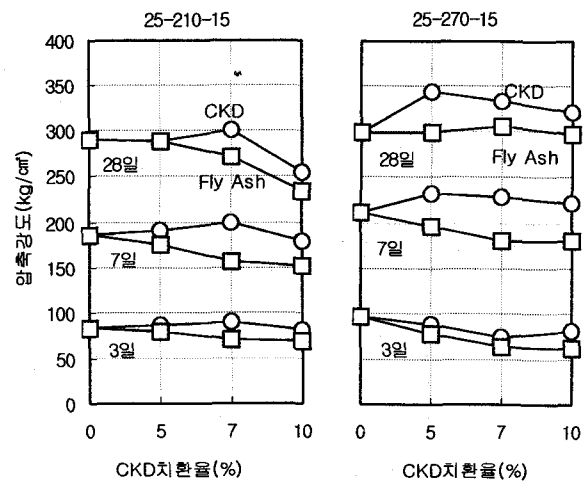
V. 실 험 (III)

1. 배합계획

본 실험에서는 슬래그 미분말을 사용한 혼합시멘트계에서 초기강도 촉진효과<sup>6-9)</sup>를 파악하고자 하였으며, CKD만을 사용한 단일계와 석고와 병행한 혼합계로 구분하여 실험을 실시하였으며,

〈표 5〉 시 험 결 과

| 규 격       | CKD (%) | 슬럼프 (cm) | 공기량 (%) | 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|-----------|---------|----------|---------|----------------------------|-----|-----|
|           |         |          |         | 3일                         | 7일  | 28일 |
| 25-210-15 | 0       | 15.5     | 6.0     | 83                         | 185 | 290 |
|           | 5       | 15.0     | 4.4     | 86                         | 190 | 288 |
|           | 7       | 14.0     | 4.0     | 90                         | 200 | 300 |
|           | 10      | 16.0     | 3.9     | 80                         | 178 | 254 |
| 25-270-15 | 0       | 15.5     | 5.5     | 96                         | 211 | 298 |
|           | 5       | 15.5     | 4.5     | 88                         | 232 | 343 |
|           | 7       | 14.5     | 4.2     | 73                         | 229 | 333 |
|           | 10      | 16.0     | 4.3     | 80                         | 221 | 321 |



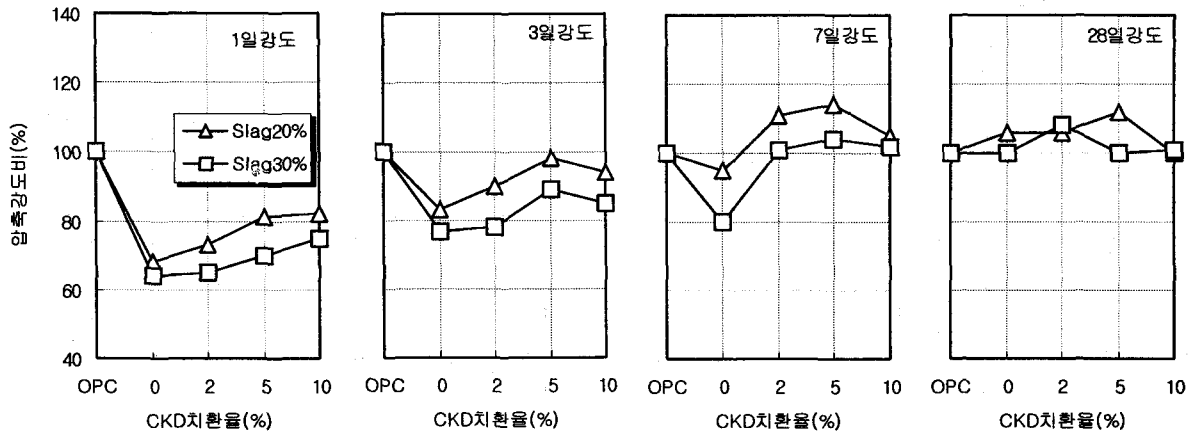
〈그림 5〉 콘크리트 압축강도

〈표 6〉 실험 계획

| 구분   | 배합 계획 · 수준 |                    | 실험 항목                                |                                    |
|------|------------|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 물 탈  | 배합비        | C/S=1 : 2.45 (표준사) | - Flow<br>- 압축강도 (1, 3, 7, 28일)      |                                    |
|      | W/C        | 48.5%              |                                      |                                    |
|      | 혼화재        | 슬래그미분말             |                                      | C×20, 30%                          |
|      |            | 석고                 |                                      | SO <sub>3</sub> 30% 기준             |
|      | CKD        | C×2, 4, 6%         |                                      |                                    |
| 콘크리트 | 배합규격       | 25-240-15          | - 슬럼프<br>- 공기량<br>- 압축강도 (3, 7, 28일) |                                    |
|      | W/C        | 50%                |                                      |                                    |
|      | 혼화재        | 슬래그미분말             |                                      | C×20, 30%                          |
|      |            | CKD                |                                      | C×2, 5% (석고 SO <sub>3</sub> 2% 고정) |

〈표 7〉 CKD 단일계의 몰탈 시험결과

| 슬래그미분말 | CKD | 기호명   | Flow비 (%) | 압축강도비 (%) |     |     |     |
|--------|-----|-------|-----------|-----------|-----|-----|-----|
|        |     |       |           | 1일        | 3일  | 7일  | 28일 |
| -      | -   | PL    | 100       | 100       | 100 | 100 | 100 |
| 20%    | -   | S2PL  | 99        | 68        | 83  | 95  | 106 |
|        | 2%  | S2K2  | 97        | 73        | 90  | 111 | 106 |
|        | 5%  | S2K5  | 94        | 81        | 98  | 114 | 112 |
|        | 10% | S2K10 | 94        | 82        | 94  | 105 | 100 |
| 30%    | -   | S3PL  | 101       | 64        | 77  | 80  | 100 |
|        | 2%  | S3K2  | 102       | 65        | 78  | 101 | 108 |
|        | 5%  | S3K5  | 99        | 70        | 89  | 104 | 100 |
|        | 10% | S3K10 | 99        | 75        | 85  | 102 | 101 |



〈그림 6〉 CKD 단일계의 몰탈 압축강도비

콘크리트 시험은 혼합계에 대해서만 실시하였다.  
〈표 6〉에 실험계획을 나타냈다.

2. 결과 및 고찰

2.1 CKD 단일계의 몰탈특성

CKD만을 단독첨가한 경우의 몰탈 Flow비 및 압축강도비를 〈표 7〉 및 〈그림 6〉에 나타냈다.

〈표 8〉 CKD-석고 혼합계의 몰탈 실험결과

| 슬래그 미분말 | CKD | 기호명  | Flow비 (%) | 압축강도비 (%) |     |     |     |
|---------|-----|------|-----------|-----------|-----|-----|-----|
|         |     |      |           | 1일        | 3일  | 7일  | 28일 |
| -       | -   | PL   | 100       | 100       | 100 | 100 | 100 |
| 20%     | -   | S2PL | 101       | 68        | 83  | 95  | 106 |
|         | 2%  | S2M2 | 99        | 118       | 105 | 98  | 100 |
|         | 4%  | S2M4 | 102       | 117       | 108 | 98  | 107 |
|         | 6%  | S2M6 | 98        | 123       | 110 | 98  | 97  |
| 30%     | -   | S3PL | 99        | 64        | 77  | 80  | 100 |
|         | 2%  | S3M2 | 99        | 104       | 100 | 97  | 100 |
|         | 4%  | S3M4 | 101       | 104       | 100 | 99  | 99  |
|         | 6%  | S3M6 | 101       | 110       | 101 | 97  | 96  |

CKD의 치환량이 증가할수록 전재령에서 강도가 증진되었으며, 한계 첨가량은 5% 전후로 나타났다.

한편 초기강도 보상효과는 1, 3일 재령에서 OPC보다 낮은 수준으로 기대치에 미치지 못하였으나 7일에서의 강도증진이 양호한 것으로 나타나, 실험 I, II의 결과와 유사하였으며, 역시 C-S-H 수화물 형성시기와 밀접한 관계가 있는 것으로 추측된다.

2.2 CKD-석고 혼합계의 몰탈특성

CKD와 석고를 혼합첨가한 경우의 몰탈 Flow비 및 압축강도비를 〈표 8〉와 〈그림 7〉에 나타냈다. CKD만을 치환한 경우와 매우 상이한 강도발현 패턴을 보였으며, 특히 1, 3일 압축강도가

OPC의 수준을 상회하여 뚜렷한 초기강도 보상효과가 나타났으나, 오히려 7일 강도에서는 저조하여 OPC의 수준을 유지한 것이 특징이었다.

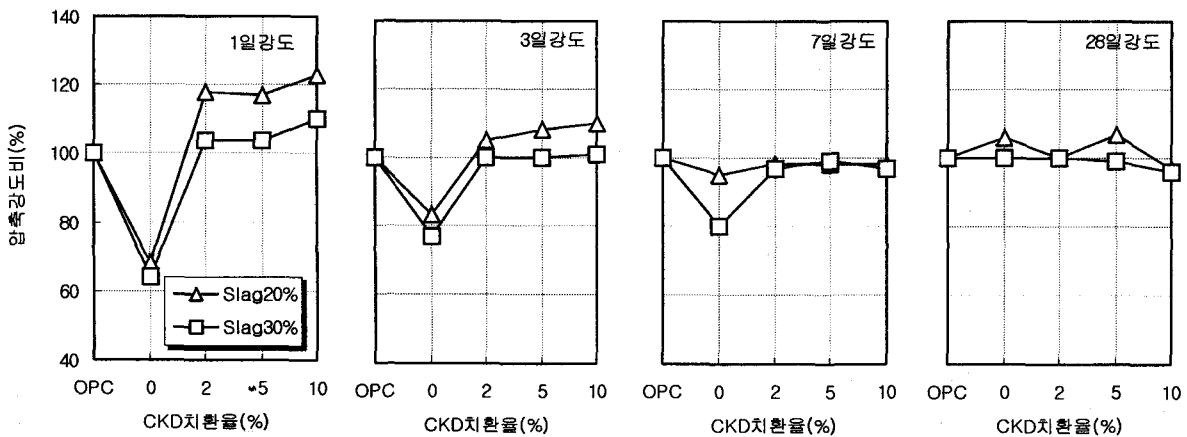
2.3 CKD-석고 혼합계의 콘크리트 특성

CKD와 석고를 혼합첨가한 경우의 콘크리트 시험결과를 〈표 9〉와 〈그림 8〉에 나타냈다.

몰탈의 경우와 달리 CKD 치환량이 증가할수록 3, 7, 28일 전재령에서 고르게 OPC의 강도를 상회하는 것으로 나타났으며, 특히 28일 재령에서도 강도증진이 큰 것으로 나타났다.

VI. 결 론

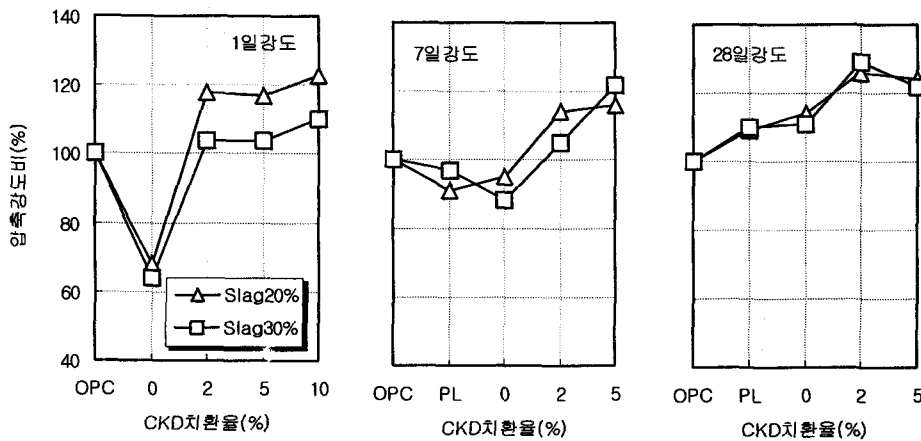
시멘트 제조공정에서 발생하는 CKD를 시멘트



〈그림 7〉 CKD-석고 혼합계의 몰탈 압축강도비

<표 9> CKD-석고 혼합계의 콘크리트 실험결과

| 슬래그 미분말 | 석고형태 | CKD | 기호명  | 슬럼프 (cm) | 공기량 (%) | 압축강도비 (%) |     |     |
|---------|------|-----|------|----------|---------|-----------|-----|-----|
|         |      |     |      |          |         | 3일        | 7일  | 28일 |
| -       | -    | -   | PL   | 15.0     | 5.0     | 100       | 100 | 100 |
| 20%     | 이수석고 | -   | S2PL | 15.5     | 4.8     | 92        | 91  | 109 |
|         |      | 0%  | S2GY | 15.0     | 4.2     | 92        | 95  | 114 |
|         |      | 2%  | S2M2 | 14.0     | 4.1     | 113       | 114 | 126 |
|         |      | 5%  | S2M5 | 14.5     | 3.8     | 115       | 116 | 124 |
| 30%     | 이수석고 | -   | S3PL | 15.0     | 4.7     | 87        | 97  | 110 |
|         |      | 0%  | S3GY | 14.5     | 4.7     | 98        | 88  | 111 |
|         |      | 2%  | S3M2 | 14.0     | 4.4     | 106       | 105 | 129 |
|         |      | 5%  | S3M5 | 15.0     | 2.9     | 122       | 122 | 122 |



<그림 8> CKD-석고 혼합계의 콘크리트 압축강도비

및 콘크리트 혼화재로서의 검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 시멘트 혼화재로서 CKD는 치환량 증가에 따라 3일 이후의 압축강도가 상승하였으며, 한계 첨가량은 5% 전후로 나타났다. 한편 석고를 치환한 실험 결과는 치환량 30%까지 큰 물성 저하가 나타나지 않아 CaCO<sub>3</sub>의 응결지연 효과를 확인할 수 있었다.
2. 콘크리트 혼화재로서 CKD는 치환량 증가에 따라 7일 이후의 압축강도가 상승하였으며, 한계 첨가량은 5~7%로 나타났다. 한편 강도증진 효과는 시멘트 부배합에서 크게 나타났으며, 분체량이 적은 시멘트 빈배합에서는 작업성 및 재료분리 측면에서 오히려 유리하게 작용하였다.
3. 슬래그 미분말 첨가계에서 초기강도 증진재로서

의 CKD는 단독 또는 석고와의 적정비 첨가에 의해 초기강도 증진효과가 나타났으며, 이는 CKD의 미분말 증진효과 외에 일부 화학조성에 의한 자극재로서의 상승작용으로 추측된다.

CKD의 시멘트·콘크리트 혼화재로서의 활용은 상기 결론사항 외에 비표면적 증가에 의한 유동성 저하에 유의해야 하며, 콘크리트 부문에서는 장기재령의 강도 및 내구성 영향에 대해서는 추가적인 검증이 요구된다.

<참고 문헌>

1. Holderbank, Cement seminar, Materials Technology, No. 12.
2. S. K. Mohanty, G. Goswami & J. D. Panda, All India Seminar on Cement Manu-

- facture, 1981, p.537.
3. Kevin D.Ingram & Kenneth E.Daughetry, Cement & Concrete Composites, 13, 1991, p.165.
  4. Kevin D.Ingram & Kenneth E.Daughetry, 9th International Congress On The Chemistry Of Cement, 1992, p.180.
  5. 坂井悦郷 外, フィラーセメント, セメント・コンクリート, No.546, 1992, p.129.
  6. 岳上廣光 外, 高爐セメントコンクリートの強度と耐久性におよぼす石灰石粉末の影響, セメント技術年報, 32, 1978.
  7. Muhammad S.Y.Bhatty, Use of Cement-kiln Dust in Blended Cements, World Cement, May 1984.
  8. S.P.Ghosh 外, Study on Effects of Kiln Dust Addition to Portland and Blended Cements, 9th ICCC, 1992.
  9. 한국콘크리트학회(편), 고로슬래그 콘크리트, Posco Forum 발표집, 한국콘크리트학회, 1999. 11.