

# 분쇄공정 자동제어시스템의 개발 및 적용

장두희\*·정민수·최충근

〈쌍용양회 공업주식회사〉

## 1. 서 언

시멘트 분쇄공정에서의 자동운전은 밀의 생산성 향상, 품질안정 뿐만 아니라 성력화 측면에서도 매우 중요하다. 분쇄공정에서의 자동제어 시스템은 밀 내부의 부하량을 최적상태로 자동 제어하는 최적 부하량 제어시스템과 각종 운전 데이터를 감시·경보 및 모니터링 하는 감시 제어 시스템으로 구성되며 특히 자동운전에서는 현장공정의 운전경험을 바탕으로 시스템을 구성하는 것이 중요하다.

본고에서는 당사에서 개발한 분쇄공정 자동제어 시스템의 구성과 기능에 대하여 논의하고 실험실적 모사실험, 현장실험 및 현장적용 결과를 간략히 소개하고자 한다.

## 2. Cement 분쇄공정 특성

시멘트 밀의 성능을 판단하는 2 가지 기준은 생산성(생산량과 전력원단위) 및 품질(입도분포 또는 분말도)이며 따라서 운전시 최대목적은 이들을 관리하는데 있다. 한편 볼 밀의 분쇄조건에 영향을 주는 요인들은

- Clinker의 입도분포, 피분쇄성 및 온도
- 석고의 화학성분 및 수분
- 밀의 통풍량, 살수량, ball배열 및 liner의 형상, 마모 정도
- Separator의 분급 특성

등이며 상기 요인의 변동이 분쇄조건외란이 되어 볼 밀의 운전상태에 영향을 미치며 운전

중 이들 외란을 관리하기 위하여 원료투입량을 조정하여 밀의 부하량을 일정하게 유지하며 밀을 안정화시킨다.

한편 밀 부하량이 상승함에 따라 밀 배출량은 비례적으로 증가하지만 Sep. 조분비율 증가 및 정분비율 감소 등으로 인하여 생산량을 최대로 하는 밀의 최적부하량이 존재하며 최적부하량 부근에서는 밀 부하량의 비정상적인 증가(밀의 막힘)가 발생할 위험이 있으므로 운전원에 의한 밀 부하량의 지속적인 감시가 필요하다.

밀 부하량 검출방법은 밀의 음향 level, 밀 출구압력 draft, main motor 전력, B/E 전력 및 밀진동 등이 있으며 이 중 볼 밀에서는 음향 level이 가장 민감하다.

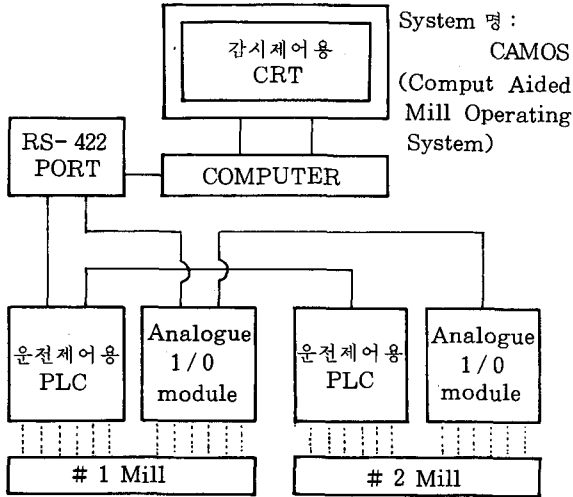
음향 level은 밀 1실 ball의 낙하점 부근이 가장 민감한 것으로 알려져 있으며 밀 부하량에 비례관계가 있으나 원료의 피분쇄성 변동, ball 및 liner의 마모에 따라 상관관계가 변하며 또한 인근 밀 음향의 영향도 크게 받으므로 장기적인 운전변수로 취할 때는 주의가 요구된다.

B/E 전력은 밀 부하량에 비교적 정확한 대응관계가 있으나 밀 부하량 변화에 대한 응답시간이 길며 특히 B/E 전력 단독제어시 밀 부하량의 비정상적인 증가(밀의 막힘)를 유발할 수 있으므로 여타 부하량 측정 변수에 의한 감시가 필요하다.

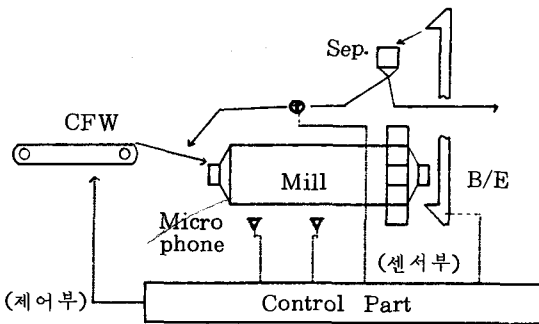
## 3. 제어시스템 구성 및 기능

### 3.1 제어시스템 layout

제어시스템은 <그림-1>과 같이 운전제어시



<그림-1> 제어시스템 구성



<그림-2> 센서부 및 제어부

스텝과 감시제어시스템의 2가지 부분으로 나누어져 서로 수직적 계층구조를 갖도록 구성하였으며 이 중 운전제어시스템은 밀의 자동운전 기능을, 감시제어시스템은 운전제어시스템 및 밀의 운전상태를 감시하는 기능을 수행하고 있다. <그림-1>에서 보는 바와 같이 밀 1기당 운전제어시스템 설비를 1기씩 설치하여 신뢰성을 높이고 있으며 감시제어설비는 밀 2기당 1기씩 설치하여 설비운용 효율을 높이고 있다.

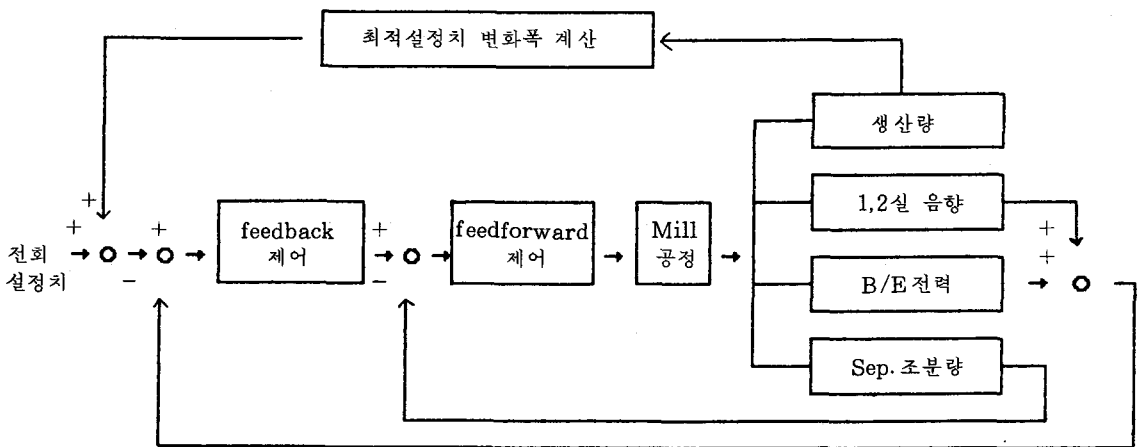
3.2 운전제어시스템

밀 운전제어시스템은 <그림-2>와 같이 센서부와 제어부를 선정하여 <그림-3>과 같은 제어 loop로 구성하였다. 그림에서 공정변수는 밀 부하량을 간접적으로 측정하는 1,2실 음향 level 및 B/E load 등과 밀 부하량을 예측하는 Separator 조분량 등이 되며, 조절변수는 원료 투입량이 된다.

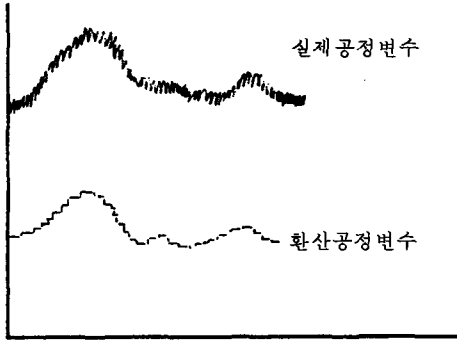
한편 밀의 제어 loop는 feedback 및 feed forward 제어를 하는 기본적인 2차 loop와 기본적인 2차 loop의 최적설정치를 제어하는 1차 제어 loop으로 구성하였으며 그 제어 기능은 정상상태제어, 비정상상태제어 및 최적설정치제어를 포함하도록 하였다.

- 정상상태 제어

밀의 상태를 나타내는 공정변수(1,2실 음향



<그림-3> 제어 loop 구성



<그림-4> Sample 치 제어

및 B/E load)가 주기적인 진동을 하고 있기 때문에 공정변수의 값을 그대로 제어에 이용할 경우 출력변수가 크게 흔들린다. 따라서 각 공정변수 취득방법은 sample치 PID제어 logic에 따라 <그림-4>와 같이 data를 취하여 제어에 이용한다.

한편 separator 조분량을 감안하는 경우의 조절변수는 PID 및 feed forward 제어 logic에 의해  $(R - E \cdot K)$ 치를 미리 원료투입량에 보상하여 제어한다.

(단, R: 조분량 적정치, E: 현재의 조분량, K: 조분량 감안 factor)

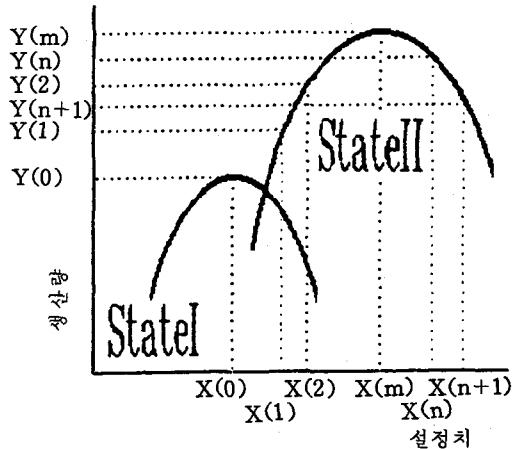
— 비정상상태 제어

밀의 막힘현상이 발생하여 B/E 부하는 감소하는데 1실음향이 비정상적으로 증가하는 경우에는 PID 및 feed forward 제어에 의해 안정화시키는데 시간이 많이 걸린다. 따라서 이때에는 원료투입량을 급격히 떨어뜨려 밀을 어느 정도 안정화시킨 후 다시 정상상태 제어를 수행한다.

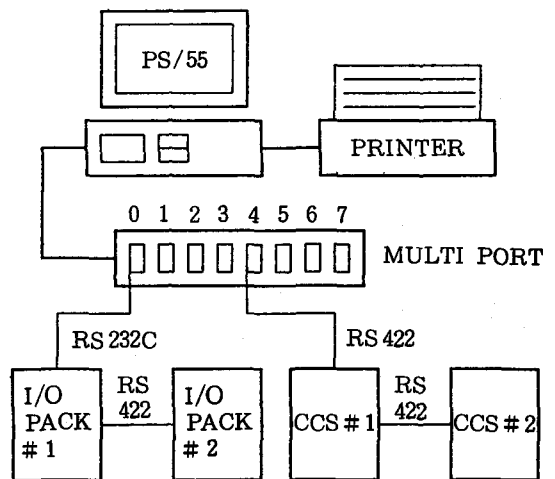
— 최적설정치 제어

최적설정치 탐색방법은 크게 두 부류로 나뉘어진다. 하나는 수학적 model에 의한 탐색이고 다른 하나는 system 내의 목적함수 이외는 제어 system에 관한 다른 정보를 알지 못할 때 사용하는 pattern 탐색이다. 실제공정에서는 정확한 model 및 공정조건을 예측할 수 없기 때문에 pattern 탐색법이 유용하며 본 시스템에서는 pattern 탐색법을 선정하였다.

<그림-5>에서 보여진 바와 같이 stateI에서



<그림-5> 설정치에 따른 생산량 변화



Computer : IBM 5500 (32bit)  
 I/O Pack : A/D Converter  
 CCS : Programmable Controller

<그림-6> Hardware 구성

최대생산량은  $Y(0)$ 이고 밀 부하량의 최적 설정치는  $X(0)$ 이다. 그러나 이들의 관계는 분쇄물질의 피분쇄성, 입자크기 분포, 수분함수량 등의 변동에 따라 변화한다. 만일 공정이 state I에서 state II로 바뀌면 최적설정치 역시  $X(m)$ 으로 변화한다. 최적설정치제어의 목적은  $X(m)$ 을 자동적으로 찾는 데 있다. 그림에서  $Y(1)$ 이  $Y(0)$ 보다 크므로 설정치는  $X(1)$ 에서  $X(2)$ 로 증가되며 설정치의 증가가 더 좋은 것으로 판명되

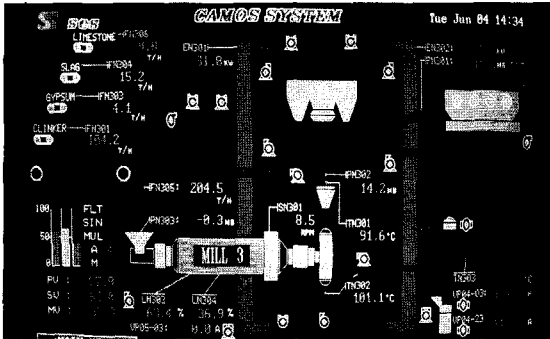
었다. 그러나 설정치가  $X(n)$ 에서  $X(n+1)$ 로 변하면 분쇄효율은 나빠지게 되며 따라서 설정치를 계속적으로 탐색하며 최적인제어를 수행한다.

### 3.3 감시제어시스템

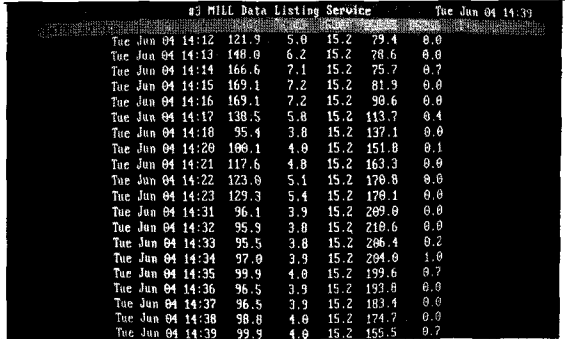
앞의 <그림-1>에서 보는 바와 같이 감시제어시스템은 밀의 운전상태 뿐만 아니라 운전제어시스템 설비의 상태도 감시한다. 감시제어시스템의 Hardware 구성 및 사양은 <그림-6>과 같으며 1단계로 밀 1기당 16개의 공정변수를 감시할 수 있게 구성하였으며 이는 필요시 확장가능토록 하였다.

한편 감시제어시스템은

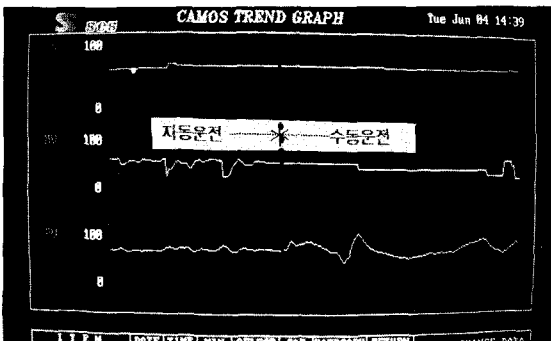
- 운전상태 감시 및 data monitoring(main mimic 화면, <그림-7>)
- Controller 감시 및 제어 <그림-7>
- trend graph <그림-8>
- 과거 운전 data listing <그림-9>



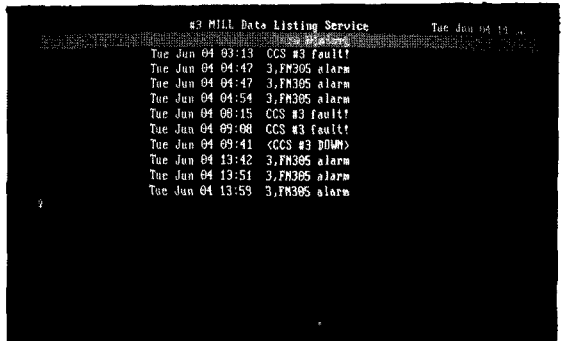
<그림-7> Main Mimic 화면



<그림-9> 운전 data listing 화면



<그림-8> Trend Graph 화면

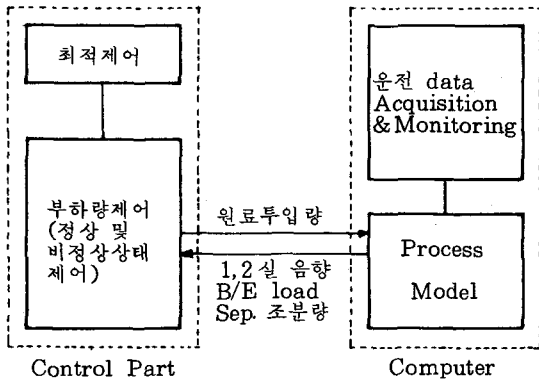


<그림-10> Alarm listing 화면

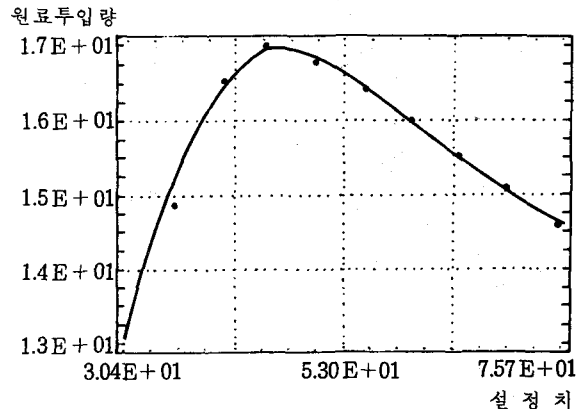
CEMENT 분쇄기 4호 운전일지

| 6월 02일 일요일 |     | 운전일지   |         |        |       |     |        |            |            |                  |                  |                  |         | 일      | 계     | 당       | 차           | 공                 | 정          |       |       |       |      |      |      |
|------------|-----|--------|---------|--------|-------|-----|--------|------------|------------|------------------|------------------|------------------|---------|--------|-------|---------|-------------|-------------------|------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 시          | 분   | 시멘트    | 부 입 량   |        |       |     | R P H  |            |            | 전 류              |                  |                  | 압 력     |        |       | 온도(°C)  |             |                   | CONTROLLER |       |       |       |      | 비 고  |      |
| 간          | 시   | 생산량    | ELIM-EX | GYPSUM | SLAG  | 기타  | RETURN | RING MOTOR | SEP. MOTOR | #1 ROTARY BLOWER | #2 ROTARY BLOWER | #3 ROTARY BLOWER | KILL 압구 | B/E 1압 | IDE 압 | KILL 가스 | KILL CEMENT | SELO TRAIL CEMENT | B/E 1      | B/E 2 | 1실 출량 | 2실 출량 | PV   |      | W    |
| 1          | 30  | 160.3  | 137.7   | 4.6    | 17.4  | .6  | 124.1  | 9.4        | .0         | 120.7            | 109.5            | .0               | 27.4    | 22.4   | -1.0  | 109.7   | 119.4       | -55.0             | 22.7       | 20.6  | 67.9  | 53.5  | 67.9 | 47.8 | 68.0 |
| 2          | 30  | 158.5  | 135.7   | 4.0    | 17.4  | .8  | 125.4  | 9.3        | .0         | 122.4            | 111.7            | .0               | 26.7    | 22.6   | -1.0  | 106.8   | 116.4       | -55.0             | 22.7       | 20.6  | 66.1  | 54.2  | 66.1 | 47.1 | 68.0 |
| 3          | 30  | 181.1  | 157.5   | 4.5    | 17.4  | .9  | 135.4  | 9.4        | .0         | 127.9            | 117.9            | .0               | 26.7    | 22.6   | -1.0  | 106.8   | 116.4       | -55.0             | 22.7       | 20.6  | 66.9  | 53.5  | 66.9 | 46.9 | 68.0 |
| 4          | 30  | 179.9  | 156.4   | 4.9    | 17.4  | 1.2 | 129.2  | 9.3        | .0         | 126.4            | 116.6            | .0               | 26.3    | 22.6   | -1.0  | 107.4   | 117.8       | -55.0             | 22.7       | 20.6  | 65.9  | 54.2  | 65.9 | 46.9 | 68.0 |
| 5          | 30  | 157.1  | 137.9   | 4.5    | 17.4  | .4  | 131.9  | 9.4        | .0         | 127.4            | 117.6            | .0               | 27.2    | 22.7   | -1.0  | 106.8   | 116.4       | -55.0             | 22.7       | 20.6  | 67.4  | 54.2  | 67.4 | 47.9 | 68.0 |
| 6          | 30  | 160.2  | 142.4   | 4.8    | 17.4  | .5  | 131.9  | 9.4        | .0         | 124.0            | 112.5            | .0               | 26.6    | 23.1   | -1.0  | 105.9   | 113.1       | -55.0             | 22.7       | 23.4  | 69.9  | 55.0  | 69.9 | 49.5 | 68.0 |
| 소계         | 473 | 1300.1 | 1120.0  | 37.3   | 137.1 | 5.6 | 180.5  | 9.4        | .0         | 123.3            | 111.9            | .0               | 26.5    | 23.1   | -1.0  | 106.8   | 116.3       | -55.0             | 22.7       | 23.5  | 67.4  | 56.1  | 67.4 | 49.7 | 68.5 |
| 8          | 30  | 168.1  | 146.1   | 6.8    | 17.4  | 1.7 | 139.6  | 9.4        | .0         | 124.7            | 113.0            | .0               | 26.7    | 23.7   | -1.0  | 103.9   | 112.9       | -55.0             | 22.7       | 23.5  | 70.1  | 54.5  | 70.1 | 50.2 | 70.1 |
| 9          | 30  | 171.3  | 148.1   | 5.0    | 17.4  | .7  | 149.9  | 9.4        | .0         | 125.8            | 115.6            | .0               | 27.4    | 23.6   | -1.0  | 105.4   | 115.2       | -55.0             | 22.7       | 23.5  | 70.9  | 54.8  | 70.9 | 51.4 | 70.1 |
| 10         | 30  | 179.3  | 155.5   | 2.3    | 17.4  | 1.2 | 157.1  | 9.3        | .0         | 129.9            | 117.0            | .0               | 27.8    | 23.6   | -1.0  | 106.7   | 115.2       | -55.0             | 22.7       | 23.2  | 70.7  | 54.8  | 70.7 | 51.2 | 70.1 |
| 11         | 30  | 170.3  | 141.2   | 4.9    | 17.4  | .8  | 139.7  | 9.3        | .0         | 129.4            | 117.0            | .0               | 27.8    | 23.6   | -1.0  | 106.7   | 115.2       | -55.0             | 22.7       | 23.4  | 70.4  | 54.8  | 70.4 | 50.4 | 70.1 |
| 12         | 30  | 177.8  | 148.7   | 5.6    | 17.4  | .7  | 139.7  | 9.3        | .0         | 131.1            | 119.0            | .0               | 27.9    | 23.7   | -1.0  | 107.2   | 115.4       | -55.0             | 22.7       | 23.2  | 69.5  | 54.4  | 69.5 | 49.4 | 70.1 |
| 13         | 30  | 168.0  | 146.9   | 4.9    | 17.4  | 1.2 | 146.0  | 9.4        | .0         | 124.0            | 111.3            | .0               | 26.9    | 23.7   | -1.0  | 107.5   | 117.1       | -55.0             | 22.7       | 22.9  | 70.2  | 54.4  | 70.2 | 50.2 | 70.1 |
| 14         | 30  | 167.2  | 144.4   | 4.9    | 17.4  | .5  | 150.8  | 9.3        | .0         | 121.7            | 108.6            | .0               | 28.8    | 21.6   | -1.0  | 105.4   | 115.2       | -55.0             | 22.7       | 22.3  | 70.8  | 59.5  | 70.8 | 50.2 | 70.1 |
| 소계         | 480 | 1394.1 | 1207.5  | 40.3   | 139.2 | 7.2 | 170.2  | 9.3        | .0         | 127.2            | 114.9            | .0               | 27.8    | 22.4   | -1.0  | 106.0   | 115.6       | -55.0             | 22.7       | 23.4  | 69.8  | 55.9  | 69.8 | 53.0 | 70.1 |
| 17         | 30  | 170.4  | 146.9   | 6.8    | 17.4  | 1.2 | 147.5  | 9.3        | .0         | 127.3            | 109.1            | .0               | 28.2    | 21.6   | -1.0  | 106.2   | 114.5       | -55.0             | 22.7       | 21.7  | 71.3  | 59.6  | 71.3 | 51.1 | 71.3 |
| 18         | 30  | 165.5  | 142.4   | 4.8    | 17.4  | 1.1 | 138.0  | 9.2        | .0         | 126.0            | 115.0            | .0               | 27.1    | 22.1   | -1.0  | 104.4   | 113.5       | -55.0             | 22.7       | 21.6  | 71.9  | 59.9  | 71.9 | 49.2 | 72.0 |
| 19         | 30  | 183.4  | 159.2   | 2.1    | 17.4  | .7  | 158.8  | 9.3        | .0         | 130.9            | 117.8            | .0               | 28.1    | 22.1   | -1.0  | 107.4   | 117.9       | -55.0             | 22.7       | 21.8  | 70.8  | 54.5  | 70.8 | 50.4 | 72.0 |
| 20         | 30  | 177.8  | 152.7   | 5.1    | 17.4  | 1.0 | 150.4  | 9.3        | .0         | 135.3            | 119.6            | .0               | 28.1    | 22.2   | -1.0  | 107.2   | 117.9       | -55.0             | 22.7       | 22.8  | 69.4  | 55.0  | 69.4 | 49.7 | 72.0 |
| 21         | 30  | 182.5  | 156.7   | 2.1    | 17.4  | .7  | 157.2  | 9.3        | .0         | 132.5            | 115.9            | .0               | 27.9    | 22.2   | -1.0  | 106.5   | 117.4       | -55.0             | 22.7       | 22.3  | 68.7  | 54.1  | 68.7 | 49.7 | 72.0 |
| 22         | 30  | 171.4  | 148.2   | 4.7    | 17.4  | .7  | 143.3  | 9.3        | .0         | 129.5            | 115.9            | .0               | 27.9    | 22.9   | -1.0  | 106.5   | 116.6       | -55.0             | 22.7       | 22.3  | 68.7  | 54.1  | 68.7 | 49.7 | 72.0 |
| 23         | 30  | 177.7  | 154.4   | 4.5    | 17.4  | .9  | 147.2  | 9.3        | .0         | 132.5            | 117.8            | .0               | 27.9    | 22.2   | -1.0  | 106.5   | 117.2       | -55.0             | 22.7       | 21.5  | 70.1  | 54.1  | 70.1 | 49.8 | 72.0 |
| 24         | 30  | 166.3  | 143.4   | 4.2    | 17.4  | .7  | 142.2  | 9.3        | .0         | 127.5            | 116.9            | .0               | 28.2    | 22.2   | -1.0  | 107.5   | 117.4       | -55.0             | 22.7       | 22.7  | 70.4  | 54.1  | 70.4 | 49.8 | 72.0 |
| 소계         | 480 | 1397.4 | 1209.8  | 39.3   | 141.1 | 7.1 | 152.4  | 9.3        | .0         | 130.4            | 117.2            | .0               | 27.7    | 22.7   | -1.0  | 105.8   | 114.1       | -55.0             | 22.7       | 22.7  | 69.6  | 56.4  | 69.6 | 53.1 | 69.9 |

<그림-11> 밀 운전일지



<그림-12> Simulation test 장치 구성



<그림-13> 설정치변화에 따른 원료투입량 변화

였으며 자동운전시 <그림-14>와 같이 밀을 안정하게 운전하며 최적부하량을 자동으로 찾아 이 조건에서 자동운전하였다.

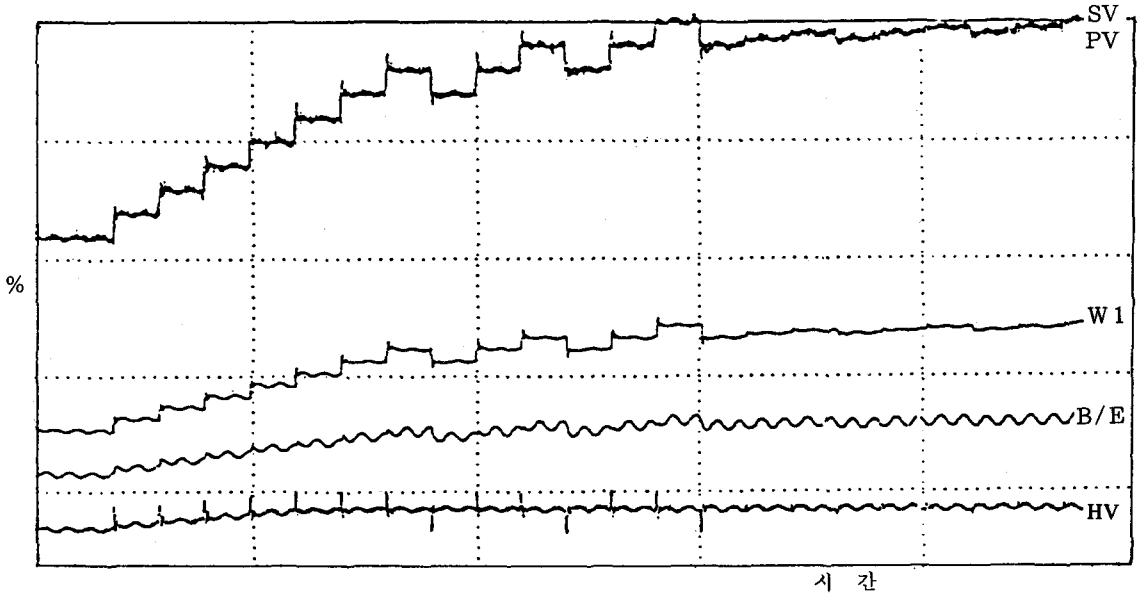
5. 현장실험

개발시스템의 성능 test를 위하여 시멘트 밀

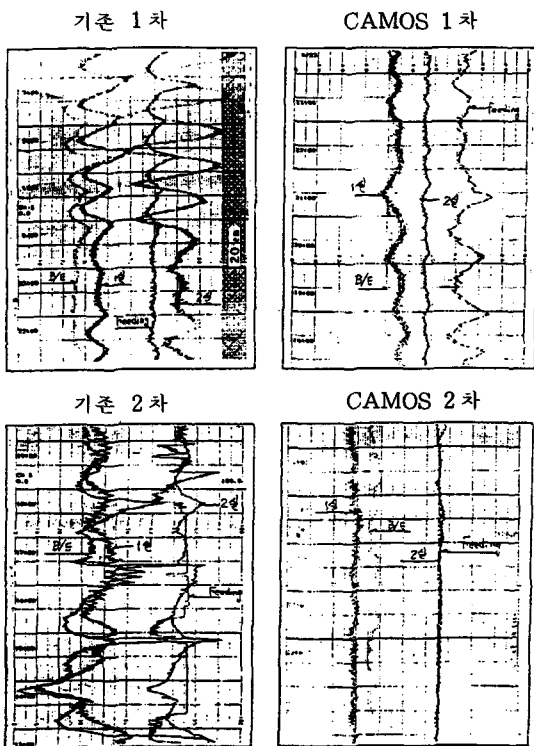
및 원료밀 4기 <표-1>에 대하여 현장적용 실험을 실시하였으며 실험결과는 다음과 같다.

1) 수동운전, 자동운전 및 최적설정치운전을 비교하면 <표-2>에서 최적설정치운전시가 생산량 및 품질산포 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났다.

2) 기존제어방식과 개발시스템의 제어상태를



<그림-14> 최적설정치 제어



<그림-15> 기존 및 개발시스템(CAMOS) 운전상태 비교

적용대상 밀 설비 현황

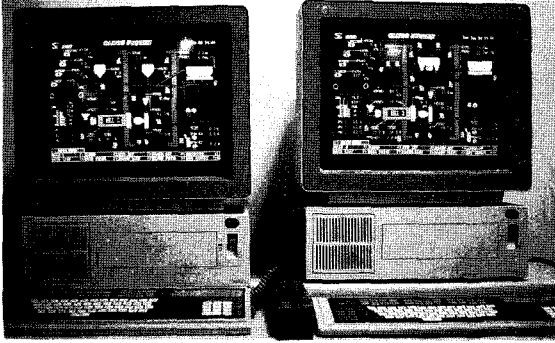
<표-1>

| 적용대상 밀        | 단위생산량(T/H) | Separator type | 운 전 방 식            |
|---------------|------------|----------------|--------------------|
| D plant A C/M | 100        | Cyclone        | Total load control |
| D plant B C/M | 105        | Cyclone        | 1실 음향 제어           |
| Y plant C C/M | 56         | Cyclone        | Total load control |
| Y plant D R/M | 114        | Turbo          | Total load control |

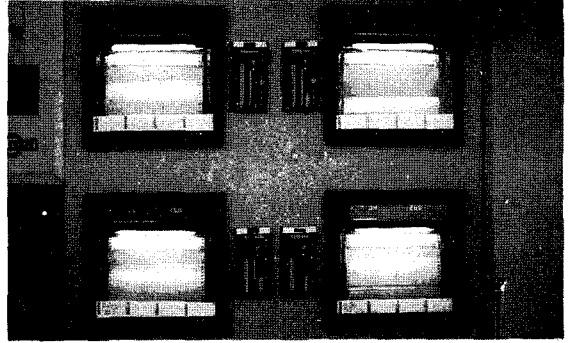
비교한 결과 <그림-15>에서와 같이 기존제어 시스템은 원료변동에 따라 상태변동이 심한데 비하여 개발시스템은 매우 안정된 공정상태를 보이고 있다. 한편 원료투입량은 제어 logic상 순시치제어를 하는 기존제어방식측의 변동이 매우 불안정한데 비하여 개발시스템은 sample치제어를 함으로써 안정된 상태를 보이고 있다.

### 6. 현장적용

Simulation test 및 현장적용 실험을 통하여 개발된 시스템을 현장에 적용함으로써 생산성 향상 및 품질안정을 도모하고자 하였다. 다음 <표



<그림-16> CAMOS 감시제어시스템 설치 사진



<그림-17> CAMOS 운전제어시스템 설치 사진

각 운전방법별 상태 비교

<표-2>

| 구 분          | 운전 시간 (hr) | Counter (T/H) |          | Blaine (cm <sup>2</sup> /g) |          | 44 μR (%) |
|--------------|------------|---------------|----------|-----------------------------|----------|-----------|
|              |            | $\bar{x}$     | $\sigma$ | $\bar{x}$                   | $\sigma$ |           |
| 수동운전         | 24         | 59.5          | 2.01     | 3,232                       | 55       | 8.0       |
| 자동운전         | 24         | 61.0          | 1.19     | 3,248                       | 45       | 7.6       |
| 최적설정<br>치 운전 | 24         | 61.1          | 0.69     | 3,238                       | 26       | 8.0       |

적용대상 밀 설비 현황

<표-3>

| 적용 대상 밀                | 단위 생산량 (T/H) | Separator type | 기 존 운전 방식                    |
|------------------------|--------------|----------------|------------------------------|
| P plant A, B, C, D C/M | 150          | Cyclone        | Total flow 제어+1실음향 interlock |
| D plant A C/M          | 105          | Cyclone        | 1실 음향 제어                     |
| D plant B C/M          | 95           | Turbo          | B/E load 제어                  |

-3>과 같이 총 6기의 현장 밀에 설치하였으며 <그림-16, 17>은 설치시스템의 운전모습을 보여주고 있다.

한편 상기 밀에 대하여 적용한 결과는 다음과 같다.

1) 적용대상 밀의 단위 생산량이 <표-4>와 같이 증대되었으며 이로 인한 전력원단위 절감이 이루어졌다.

2) 운전상태가 안정화 되었으며 이로 인한 품질의 산포가 감소하였다.

3) 각 부위별 alarm 및 data list를 통하여

30일간의 단위생산량 비교(T/H)

<표-4>

| 구 분           | 개조전   | 개조후   | 대 비         |
|---------------|-------|-------|-------------|
| D plant B C/M | 106.1 | 108.3 | +2.2 (2.1%) |
| D plant B C/M | 97.8  | 100.2 | +2.4 (2.5%) |
| P plant A C/M | 153.0 | 157.0 | +4.0 (2.6%) |

Blaine 비교 (D plant)

<표-5>

(단위 : cm<sup>2</sup>/g)

| 구분<br>호기 | 기 존   |          |     | 개발시스템 |          |     | 대 비 |          |     |
|----------|-------|----------|-----|-------|----------|-----|-----|----------|-----|
|          | X     | $\sigma$ | R   | X     | $\sigma$ | R   | X   | $\sigma$ | R   |
| AC/M     | 3,101 | 53.33    | 180 | 3,079 | 42.66    | 124 | -22 | -10.67   | -56 |
| BC/M     | 3,179 | 77.39    | 269 | 3,110 | 57.93    | 204 | -69 | -19.46   | -65 |
| 평균       | 3,140 | 65.39    | 225 | 3,095 | 50.30    | 164 | -45 | -15.09   | -61 |

운전정보탐색이 용이하며 또한 daily report에 의한 공정변화의 감시와 분석이 정기적으로 이루어져 밀공정 개선에 기여하였다.

7. 결 언

지금까지 분쇄공정 자동제어시스템의 구성과 기능에 대하여 논의하고 당사에서 개발한 시스템(CAMOS)의 simulation test와 총 10기의 현장 밀에 적용 또는 실험한 결과에 대하여 간략히 소개하였다. 분쇄공정 자동제어시스템을 도입함으로써 생산성 향상, 품질안정 등의 직접적 효과를 얻었으며 이와 더불어 공정기술자의 노력에 의하여 공정개선에 기여할 수 있으리라 판단된다.