

시멘트 工業의 프로세스 計測과 制御 (下)

朴 珍 浩(譯)

〈韓國科學技術情報센터〉

3.2 크링카 燒成系

크링카 燒成系 즉 키른의 프로세스 解析과 모델化는 原料調合系처럼 간단하지 않다. 前述한 바와 같이 키른系는 高溫이며 粉塵과 雜音이 심한데다가 프로세스가 多入力 多出力系이고 裝置가 回轉體이어서 計測이 곤란하다. 따라서 프로세스 解析과 모델化에 필요한 충분한 情報를 얻기 힘들다. 현재로서도 바람직한 計測值를 얻을 수 없는데 가령 얻었다 해도 雜音이 심한 信號인 경우가 많다. 이와 같은 狀況에서 프로세스를 解析하고 모델化하는 데는 計測點의 選擇이나 事前 데이터 處理 즉 prefiltering이 중요하다. 이에 대해서는 다음에 記述하기로 한다.

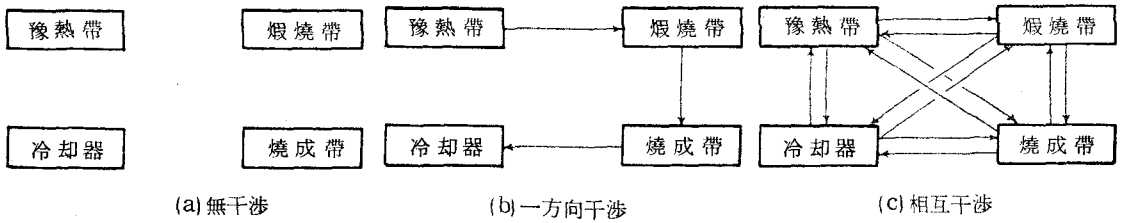
制御立場에서 키른 모델의 開發發展過程을 보면

- ① 熱收支, 物收支에 의한 物理·化學的 數學 모델²⁾
 - ② 傳達函數法과 經驗的 論理와의 組合에 의한 모델¹⁾
 - ③ 統計解析의 手法에 의한 狀態空間法 모델³⁾
- 등이 있다. ①의 모델은 다시 키른을 分布定數系로서 보는 모델과 有限個의 集中定數系의 結合으로 보는 모델로 나누는데 어느 것도 偏微分方程式의 꼴로 표시되며 더욱이 物理·化學的 考察에 근거를 둔 엄밀한 定式化를 요구하기 때문에 많은 前提條件을 가정하지 않으면 안되고 原料의 熱傳導率, 內張耐火벽돌의 熱傳導率, 比熱 등 많은 實測不能한 패러미터를 포함하게 된다. 이와 같은 모델은 키른의 基本的 構造에 대한 靜的, 定性的 特性을 나타내므로 키른의 設

計, 運轉 基準值(平衡點)의 檢討에는 有效하지만 日常의 키른 運轉管理에는 불필요하다. 日常 運轉의 管理는 real-time으로 行하기 때문에 實測可能한 데이터만을 사용한 모델이 아니면 實用性이 없다. 따라서 이와 같은 모델은 物理·化學的 考察로부터는 엄밀한 꼴로 유도해 낼 수 없다.

이제 冷却器를 포함한 키른系를 전체 시스템으로 하면 이것은 豫熱帶, 煨燒帶, 燒成帶 및 冷却器 등 4개의 副시스템으로 나눌 수 있다. 이 副시스템이 각각 독립되어 있으면 단독의 定値制御가 가능하고 각 副시스템間에 干涉이 있어도 이 干涉의 方向이 一方向이면 각 副시스템을 直列로 연결시킨 cascade 定値制御가 가능하다. 그러나 실제로 각 副시스템은 서로 干涉되어 복잡한 關係에 있으므로 이 相互干涉을 補償하기 위해서는 經驗的 論理의 모델이 도입되어야 한다(〈그림-12〉).

이와 같은 經驗的 論理를 포함한 모델은 일반적으로 키른의 樣式이 다르면 바꾸어야 하고 처음부터 모델화를 行하지 않으면 안되며 長時間을 요하는 불편이 있다. 〈그림-12〉(C)와 같이 각 副시스템이 서로 복잡한 關係로 연결된 전체 시스템은 이것을 副시스템으로 分解하여 單獨 또는 cascade로 管理하기는 곤란한 경우가 많다. 따라서 키른 工程을 管理하기 위해서는 어떻게 해서든지 이 전체를 하나의 시스템으로 취급해야 한다. 그러므로 키른 工程의 制御는 키른 工程 전체를 나타내는 모델의 作成이 필요한데 이것이 ③의 統計的 解析手法에 의한 狀

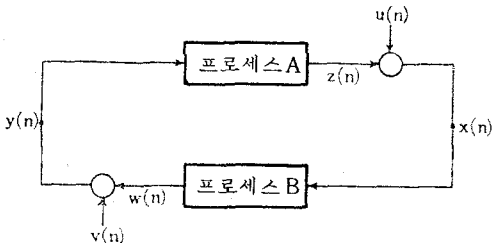


〈그림 - 12〉 키른 工程의 構成

態空間法 모델이다.

거듭 말하거나와 키른 工程은 매우 noisy 하다. 일반적으로 noise가 심하면 본래의 信號의 質을 低下시키므로 filtering이 필요하다. 計測器 등으로부터 들어 오는 測定 noise는 소위 雜音이어서 filtering의 대상이 되지만 工程 자체에서 발생하는 noise(process noise)는 때로는 매우 有用한 情報를 포함하고 있는 경우가 많다. 다음의 工程解析 및 모델 作成도 기본적으로 키른 工程이 스스로 발생하는 process noise를 적극적으로 이용하도록 되어 있다. 狀態空間法에 의한 모델 作成에 대해서는 키른 工程解析의 發展過程과 이에 이르기까지의 必然性도 포함하여 文獻³⁾에 상세하게 종합되어 있으므로 여기서는 그 概略만을 記述하기로 한다.

키른 工程內에 存在하는 여러가지 feed back系(相互干涉系)는 단순화하여 1 入力 1 出力으로 생각하면 〈그림-13〉과 같이 추상화시킬 수 있다. 여기서 $x(n)$ 을 키른 電力의 計測值系列, $y(n)$ 을 冷却室壓力의 計測值系列이라고 하면 이것은 키른 電力과 冷却室壓力으로 구성된 feed back loop이다. 한편 $y(n)$ 을 重油流量이라고 하면 이것은 키른 電力과 重油流量으로 구성된 feed back loop이다. 프로세스 B는 調節計 또는 制御器이다. $u(n)$ 은 $x(n)$ 에 가해진 process noise(프로세스 内部攪亂), $v(n)$



〈그림 - 13〉 키른 内部의 feed back loop

은 $y(n)$ 에 가해진 process noise로서 서로 관계가 없다. 여기서 우리가 觀測할 수 있는 것은 $x(n)$, $y(n)$ 일 뿐 $z(n)$, $u(n)$, $w(n)$, $v(n)$ 은 관측할 수 없다.

이제 간단히 〈그림-13〉에서의 프로세스 A, B를 모델화하기 위해 定數 a , b 를 써서

$$\left. \begin{aligned} x(n) &= ay(n-1) + u(n) \\ y(n) &= bx(n-1) + v(n) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

로 出力을 나타내자. 係數 a , b 는 impulse 應答函數라고 부른다. n 은 時刻를 나타내는 패러미터로서 샘플링 間隔을 Δt 라고 하면 時刻 $n \cdot \Delta t$ 에서의 計測値는 $x(n\Delta t)$, $y(n\Delta t)$ 로 나타내야 하지만 간단히 Δt 를 생략하고 $x(n)$, $y(n)$ 으로 나타낸다. $u(n)$, $v(n)$ 에 대해서도 마찬가지이다. 그런데 본래 모델화는 (14)식의 꼴을 결정하는 것이며 係數 a , b 를 실제 데이터를 써서 구하는 것은 패러미터 推定에 따른 문제이다. 그러나 키른 工程과 같이 多入力, 多出力이고 더구나 内部에 feed back loop를 포함하는 시스템의 모델形은 이론적으로 고찰하기가 곤란하다. 대개는 프로세스의 線形性을 假定하고 프로세스의 出力이 入力의 時間的인 荷重和로 나타내어진다고 假定하여 次數(荷重和의 數)와 荷重和의 係數 즉 impulse 應答函數를 구하는 경우가 많다. (14)식을 이상의 立場에서 일반화하면

$$\left. \begin{aligned} x(n) &= a_0 + \sum_{m=1}^M a_m y(n-m) + u(n) \\ y(n) &= b_0 + \sum_{m=1}^M b_m x(n-m) + v(n) \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

이 되며 여기서 $a_0 = b_0 = 0$, $m=1$ 로 假定하면 (14)식이 된다.

이제 (14)식에서 a , b 를 推定하는 문제로 되돌아 가자. (14)식에서 noise $u(n)$, $v(n)$ 이 각각 $y(n)$, $x(n)$ 과 상관이 없고 더구나 $u(n)$, $v(n)$ 이 서로 독립(無關係)되어 있으면 最小自

乘法에 의해 a, b 를 推定할 수 있지만 <그림-13>에서 보는 바와 같이 $u(n)$ 과 $y(n)$, $v(n)$ 과 $x(n)$ 은 서로 관련되어 있다. 더우기 a, b 의 推定에 사용할 수 있는 데이터는 실제로 有限個이다. 이 때문에 (14)식에 最小自乘法을 적용해도 a, b 값을 合理的으로 推定할 수 없다. 실사 이 a, b 의 推定値를 얻었다 해도 이로부터 만들어진 모델은 物理的으로 實現性이 없다.

결국 ①内部에 feed back loop를 갖고 있으며 ② process noise가 痼疾의인 버릇(peculiar habit)를 갖고 있기 때문에 패러미터 a, b 와 次數 m 의 推定이 곤란하다. ①의 문제는 키 큰 工程을 하나의 시스템으로 보는 입장에서 출발하였기 때문에 解決이 곤란하다. 따라서 ②의 문제를 검토하기로 한다. 만일 $u(n)$ 이 자신의 과거의 경력에 따라 결정되는 noise(이와 같은 프로세스를 自己回歸過程이라고 한다)이고 더구나 1회 샘플링 前의 자신의 경력에 따라 결정된다고 하면

$$u(n) = c \cdot u(n-1) + \epsilon(n) \dots\dots\dots(16)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 $\epsilon(n)$ 는 전혀 痼疾의인 버릇이 없는 noise로서 white noise(白色雜音)라고 부른다. $v(n)$ 의 경우도 마찬가지로

$$v(n) = d \cdot v(n-1) + \eta(n) \dots\dots\dots(17)$$

이며 $\eta(n)$ 도 white noise이다. $\epsilon(n)$ 과 $\eta(n)$ 은 완전히 無關係하다. 그런데 測定할 수 있는 양은 $x(n), y(n)$ 이므로 $x(n), y(n)$ 을 變換하면

$$\left. \begin{aligned} x(n) &= cx(n-1) + ay(n-1) \\ &\quad + acy(n-2) + \epsilon(n) \\ y(n) &= dy(n-1) + bx(n-1) \\ &\quad + bdx(n-2) + \eta(n) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

이다. $\epsilon(n)$ 과 $\eta(n)$ 는 white noise이므로 $x(n), y(n)$ 의 과거의 값과는 관계가 없으며 (18)식에 最小自乘法을 적용하여 a, b, c, d 를 推定할 수 있다.

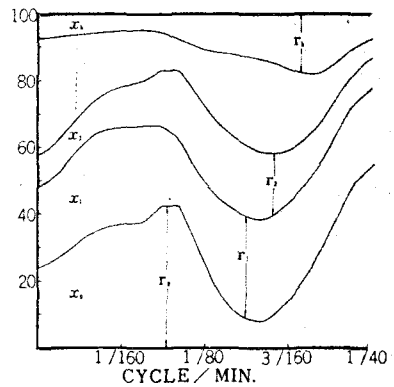
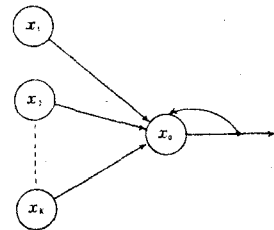
이상을 多變數系로 확장하여 일반적인 경우로서 나타내면 變數를 $x_i(n), i=0, 1, \dots, k$ 로 하고

$$\left. \begin{aligned} x_o(n) &= \sum_{i=1}^K \sum_{m=1}^M a_{oi}(m) x_i(n-m) \\ &\quad + \dots(n) \\ u_o(n) &= \sum_{l=1}^L c_{ol} u_o(n-l) + \epsilon_o(n) \end{aligned} \right\} \dots\dots(19)$$

이므로

$$\begin{aligned} x_o(n) &= \sum_{l=1}^L c_{ol} x_o(n-l) \\ &\quad + \sum_{i=1}^K \sum_{m=1}^{M+L} A_{oi}(m) x_i(n-m) + \epsilon_o(n) \end{aligned} \dots\dots\dots(20)$$

이다. 이에 最小自乘法을 적용하면 $c_{ol}, a_{oi}(m)$ 이 구해져 모델이 確定된다. (20)식으로부터 correlogram을 구하여 Fourier 變換에 의해 振動數 스펙트럼을 구하면 周波數別로 본 寄與率이 구해진다. 즉, x_o 의 全變動中 x_1 로부터는 $r_1\%$, x_2 로부터는 $r_2\%$, ..., x_k 로부터는 $r_k\%$ 만 영향을 받는다고 하면 나머지 $r\%$ 는 자기 자신의 변동에 의한 것임을 알 수 있는데 프로세스의 構造가 밝혀지는 곳에서 <그림-14> 모델의 次數 L, M 은 그 값을 適當히 假定하여 試行錯誤法으로 구할 수 있지만 이것을 自動的으



<그림-14>

로 행하기 위해서는 豫測의 概念이 필요하다. 이것은 시멘트 製造工程을 떠나서 일반적인 모델 推定에 관한 문제이므로 여기서는 그 이상 언급하지 않기로 한다.^{3,5)}

이상에서 記述한 모델 解析法의 利點과 缺點은 다음과 같다.

- ① 특별한 試驗入力を 필요로 하지 않으며 日常運轉의 記錄이 그대로 解析用 데이터가 된다.
- ② Feed back을 포함한 프로세스를 하나의 시스템으로 하고 있다.
- ③ 豫測의 概念이 적용되므로 制御에 직결된 形式으로 모델화시킬 수 있다.
- ④ 解析, 모델화가 組織적이다.
- ⑤ 일단 解析하여 모델을 만들면 프로세스의 構造(특히 裝置)의 變경이 없는 한 有效하다.
- ⑥ 統計의 手法이므로 長時間의 연속된 데이터가 필요하다.
- ⑦ 計算機를 사용하지 않으면 안된다.

時間적으로 連續된 製造工程의 解析에는 時系列解析이 有效한 道具이다. 큰 工程의 경우도 相關函數, 스펙트럼 解析 등이 도움이 된다.^{4,6)} 큰 경우 時系列解析에 필요한 데이터는 비교적 안정된 상태에서 3~4日間 수집해야 한다. 또 샘플링 間隔은 프로세스의 뜻 있는 變動中에서 最小週期를 포함한 정도로서 4~5분이 적당하다고 생각된다.

3.3 計測信號의 前處理(filter)

時系列解析의 原點은 時間적으로 連續된 觀測 데이터이므로 데이터의 취급은 신중히 하지 않으면 안된다. 實測된 데이터는 본래의 信號外에 process noise와 觀測 noise(計測器)를 포함하고 있는데 prefiltering은 이 觀測 noise를 제거하여 解析, 制御에 有效한 意味 있는 정보를 抽出하는 것이 목적이다. prefiltering은 다음과 같은 것이 있다.

- ① Analog filter CR filter, active filter 등
- ② Digital filter 移動平均, 指數平滑, Kalman filter 등

計算機의 有效利用面에서 말하자면 애널로그 段階에서 처리할 수 있는 것은 이 段階에서 처리해야 한다. 位相 늦음이 크게 문제가 되는 경우나 論理的인 filter가 필요할 때 또는 특수한 特性을 갖는 filter가 필요할 때는 計算機에 의하는 수밖이 없다. 여기서는 線形인 digital filter에 대하여 간단히 논한다. digital filter의 일반적인 형은 n 時點의 入力を x_n , 出力을 y_n 이라고 하면

$$y_n = (a_1 y_{n-1} + a_2 y_{n-2} + \dots + a_M y_{n-M}) + (b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + \dots + b_L x_{n-L}) \dots\dots (21)$$

이다. 右邊의 첫째 ()는 自己回歸項, 둘째 ()는 移動平均項이다. 따라서 $a_1 = a_2 = \dots = a_M = 0$ 이라고 하면

$$y_n = b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + \dots + b_L x_{n-L} \dots\dots\dots (22)$$

으로 移動平均型 filter가 되며 반대로 $b_1 = b_2 = \dots = b_L = 0$ 이라고 하면

$$y_n = a_1 y_{n-1} + a_2 y_{n-2} + \dots + a_M y_{n-M} + b_0 x_n \dots (23)$$

으로 自己回歸型 filter가 된다. 移動平均型 filter의 典型的인 例는 移動平均 filter, 自己回歸型 filter의 代表的인 例는 指數平滑

$$y_n = (1 - \alpha) y_{n-1} + \alpha x_n \dots\dots\dots (24)$$

이다. 식 (21)은 패러미터 $a_m (m=1, 2, \dots, M)$, $b_l (l=0, 1, \dots, L)$ 을 임의로 선택할 수가 있으므로 임의의 周波數傳達特性을 갖는 filter라고 말한다. analog filter에서는 각 패러미터가 固定되는데 抵抗이나 콘덴서 등 素子の 交換에 의해서만 變경시킬 수 있다. digital filter는 이론적으로 실현 가능한 特性이면 패러미터를 적절하게 선택함으로써 반드시 실현시킬 수 있다는 利點을 갖고 있다.

일반적으로 觀測 noise는 高周波成分이 많으므로 이의 除去에는 低周波濾波器(low pass filter) 즉 低周波成分을 통과시켜 高周波成分을 停止시키는 filter가 사용되는데 그 周波數特性은 <表-1>의 (1), (2)와 같다. 큰 電力이나 큰 回轉, 冷却器 그레이트의 速度 등의 平滑은 除去된 振動의 周波數가 低周波이기 때문에 보통의 方法으로 하면 位相 늦음이 커서 制御가 불가능할 때가 있다. 이때는 애널로그의 으로는 active filter가 효과적이다. 소프트웨어面에서의 active filter는 결국 豫測의 문제로 귀착된다.

<表-1>

low pass filter의 周波数特性

| filter | | filter의 特性 | |
|-----------|--|--|--|
| (1) 移動平均型 | $y(n) = \frac{1}{2}x(n) + \frac{1}{2}x(n-1)$ | $ A(f) ^2 = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\pi f)$ | $ A(f) ^2$ |
| (2) 指數平滑 | $y(n) = (1-\alpha)y(n-1) + \alpha x(n)$ | $ A(f) = \frac{\alpha}{ 1 - (1-\alpha)\exp(-2\pi if) }$ | $ A(f) $ |
| (3) 自己回歸型 | $y(n) = by(n-1) + x(n)$ | $ A(f) = \frac{1}{ 1 - b\exp(-2\pi if) }$ | $\frac{1}{1-b}$ $ A(f) $ $\frac{1}{1+b}$ $\frac{1}{1+b}$ $ A(f) $ $\frac{1}{1-b}$ |
| (4) 混合型 | $y(n) = \sum_{m=1}^M a_m y(n-m) + \sum_{l=1}^L b_l x(n-l)$ | $A(f) = \frac{\sum_{l=1}^L b_l \exp(-2\pi if_l)}{1 - \sum_{m=1}^M a_m \exp(-2\pi if_m)}$ | |

데이터 前處理의 目的은 觀測 noise 除去外에 解析에 필요한 特殊情報의 抽出에도 있다. 이 경우에는 高周波濾波器 등이 필요한데 高周波濾波器는 일반적으로 微分의인 效果를 導入함으로써 실현시킬 수 있다.

최근 Kalman filter^{7,8)}가 왕성하게 研究되고 있다. Kalman filter는 본래 信號濾波問題에 그 目的을 두고 있는데 狀態空間을 사용하고 있기 때문에 從來의 filter와는 매우 다르고 Wiener의 最適濾波器를 확장한 것이다. 濾波의 目的은 雜音을 陰去하는데 있어 信號를 歪曲해서는 안 되므로 觀測 데이터로부터의 信號를 推定할 때 推定誤差의 自乘平均(分散)이 最小가 되도록 filtering하는 것이 바람직하다. 最適濾波의 最適이란 最小分散을 의미한다. 이점이 從來의 filter와 다른 점으로서 당연히 計算機의 사용을 전제로 한다. Kalman filter는 일종의 豫報器라고 볼 수 있어 應用範圍가 넓고 앞으로 實用

化가 기대된다. 큰 工程에 대한 Kalman filter의 應用은 큰 工程이 noisy하고 狀態空間法에 의한 模型화를 필요로 하기 때문에 특히 有用하다고 생각된다.

그러나 프로세스의 模型은 일반적으로 式(2)의 型이 되므로 프로세스도 일종의 混合型 filter라고 볼 수 있다. 시멘트 攪拌과 같이 容量이 큰 것은 그 積分(蓄積)效果가 크기 때문에 低周波濾波器의 特性을 갖고 있다.

이상 시멘트 製造工程의 解析과 模型화에 대하여 概說하였는데 프로세스 解析의 目的은 프로세스의 構造와 特性을 알기 위한 것이고 模型은 그 결과로서 얻어진 것이다. 模型화가 필요한 것은 制御라고 하는 大前提가 있기 때문인데 最適制御를 위해서는 豫測이 필요하다. 豫測의 原理는 그 프로세스의 스펙트럼 特性을 이용하는 것인데 豫測과 濾波는 결국 表裏一體이어서 매우 흥미 있는 문제이다. 다음에 豫測式을 定

式化하여 이에 의한 豫測制御에 대하여 구체적으로 살펴보기로 한다.

4. 制御問題

製造工程의 制御는 어떤 주어진 의미에서 最適化가 요구된다. 이 最適化의 목적은 궁극적으로 生産性의 向上과 生産費의 低減이다. 이 사실만을 고려하면 프로세스의 制御는 靜的인 最適化 즉 靜的 모델로서 충분하다. 이와 같은 考察은 自己制御性이 강하고 攪亂이 적은 連續 프로세스에서 성립되는데 시멘트 製造工程과 같이 自己制御性이 있어도 計測技術의 不備와 攪亂이 많은 프로세스에서는 靜的인 最適化를 실현하기 위해서는 먼저 動的인 最適化 즉 安定化制御가 必要條件으로서 요구된다. 또 플랜트 MIS의인 考察에 있어서 프로세스의 安定化制御는 그 레벨이 最低의 위치에 오도록 하는 것이다. 이것은 전체로서의 플랜트 MIS에 있어서도 프로세스의 安定化 制御는 充分條件이 아니라 必要條件임을 의미한다. 시멘트 工業에 관한 限 이른바 플랜트 MIS는 앞으로의 問題이고 전체로서의 플랜트 MIS를 參與 의미에서 실현하기 위해서는 副시스템에 대한 安定化制御의 確立이 중요한 문제이다. 그런데 일반적으로 最適制御 시스템을 실현하기 위해서는 다음과 같은 事項을 分明히 해두어야 한다.

- ① 프로세스의 内部狀態를 부분적으로 또는 전체적으로 정확히 나타내는 情報量(狀態量)은 무엇인가, 이것은 실제로 計測可能한가?
- ② 프로세스의 内部狀態를 部分的으로 또는 전체적으로 바꾸는 操作量은 무엇인가, 이것은 裝置的으로 실제 操作可能한가?
- ③ 결정된 情報量, 操作量으로 어떻게 프로세스를 모델化하여 計算機에 넣어지는 形式으로 할 수 있는가?
- ④ 결정된 情報量, 操作量에 의한 모델로서 실제의 프로세스를 어떻게 制御할 수 있는가, 그 方法
- ⑤ Digital Simulation
- ①은 被制御變數 ②는 操作變數의 문제로서

프로세스 解析의 主要目的이다. ③은 ①, ②에서 결정된 變數를 사용하여 모델화하고 패러미터를 推定하는 技術이다. ④는 最適制御技術에 관한 問題이다. ③에는 더욱 중요한 制御와 豫測에 관한 考察問題가 포함되어 있다. 이 考察은 “무엇때문에 豫測하는가”의 豫測面과 “最適한 狀態에서 프로세스를 管理하기 위해서는 어떻게 制御를 하면 좋은가”의 制御面의 두 立場에서의 質問으로부터 출발하는데 시멘트 製造工程의 경우 최종적으로 兩立場이 서로를 필요로 하여 合致된다. 그러나 後述하는 바와 같이 豫測의 目的은 반드시 制御만이 아니다. 또 制御面에서도 프로세스에 따라서는 반드시 豫測을 필요로 하지 않는 경우도 있다. 그러나 이것은 不必要하다는 것이 아니라 豫測이 없더라도 해 나갈 수 있다는 것을 의미한다.

4.1 原料調合工程의 最適制御

前節에서 回分式 原料調合工程의 모델은

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i(n) = & (1 - \frac{1}{n}) \tilde{x}_i(n-1) \\ & + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^4 a_{ij} y_j(n-1) \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

으로 결정하였다. 물론 이 식에서 粉碎 밀의 動特性은 샘플링 間隔을 적절히 선택함으로써 무시할 수 있다. 다음은 이 假定下에서 展開한 것이다.

이 모델의 制御는 回分式이기 때문에 정해진 時刻에 制御가 끝나면 좋다. 즉 정해진 時刻에 $\tilde{x}_i(n)$ 가 미리 주어진 目標值 x_{oi} 에 일치되면 좋다. 이제 (n_0-1) 時點까지 制御가 進行되어 (n_0-1) 時點에서 $y_i(n_0-1)$ 의 制御를 하고 最終時點 N 까지 계속될 때 最終成分 x_{osi} 가 되면 좋으므로 評價函數로서

$$\begin{aligned} J = & \sum_{i=1}^4 q_i \{x_i(u) - x_{oi}\}^2 + \sum_{i=1}^4 r_i y_i(n_0-1)^2 \\ & \dots \dots \dots (26) \end{aligned}$$

을 생각하여 이 J 를 最小로 하는 $y_i(n_0-1)$ 을 결정하면 된다. 最適한 $y_i(n_0-1)$ 은 操作端에서 制約이 없다고 하면

$$\begin{aligned} Y(n_0-1) = & Y_s + G(n_0-1) \\ & [X(n_0-1) - X_s] \dots \dots (27-1) \end{aligned}$$

$$G(n_o-1) = \frac{n_o-1}{N-(n_o-1)} A^{-1} \dots (27-2)$$

이 된다. 단,

$$Y(n_o-1) = \{y_1(n_o-1), y_2(n_o-1), y_3(n_o-1), y_4(n_o-1)\}^T$$

$$X(n_o-1) = \{x_1(n_o-1), x_2(n_o-1), x_3(n_o-1), x_4(n_o-1)\}^T$$

의 벡터에서 A^{-1} 은 (4×4) 정방행렬 A 의 역행렬이다. $()^T$ 는 $()$ 의轉置를 나타낸다. 또 $Y_s = A^{-1} X_s$ 에서 $X_s = (x_{s1}, x_{s2}, x_{s3}, x_{s4})^T$, $Y_s = (y_{s1}, y_{s2}, y_{s3}, y_{s4})^T$ 이다. $G(n_o-1)$ 은最適制御利得(gain)으로서 n_o 가 나아감에 따라 커진다. 즉 batch 終了時刻(N)에 가까와짐에 따라 같은 크기의 外亂에 대하여 batch 始作時刻에서 보다 커지게 制御된다. 실제로 操作端의 可能範圍에는 上限이 있으므로 $r_i \neq 0$ 이고 이때는

$$Y(n_o-1) = -\frac{N-n_o+1}{N} \left[\frac{(N-n_o+1)^2}{N^2} A^T Q A + R \right]^{-1} \cdot A^T Q \left[\frac{n_o-1}{N} X(n_o-1) - X_s \right] \dots (28)$$

이 된다. 단, Q, R 은 (4×4) 의 正定値對稱行列이다. 즉

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 \end{bmatrix} \dots (29)$$

이다. 또, A^T 는 A 의轉置行列이다. 操作端에

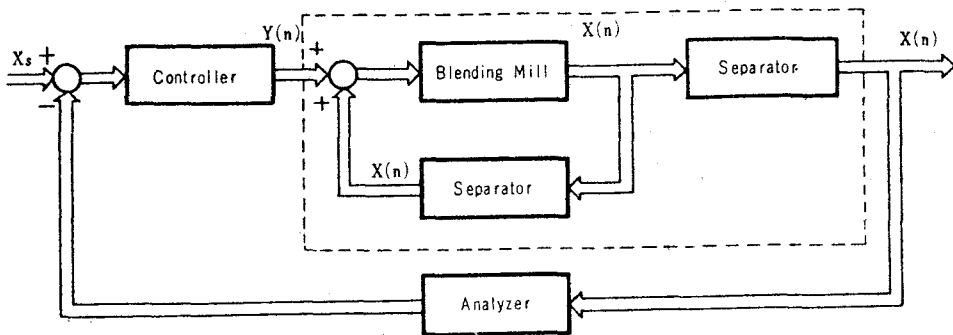
上限이 있으면 外亂(크기와 時刻)에 따라서는 out of control이 될 가능성이 있어 外亂에 관한 정보가 필요하다. 原料調合工程에서 考察되는 外亂은

- ① 4 原料의 成分變動(a_{ij} 의 變動)
- ② 原料의 hanging 現象
- ③ 附着水分의 變動

등인데 이와 같은 外亂에 의해 out of control이 될 뿐만 아니라 原料供給量 $y_i(n)$ 가 負의 값이 되어 制御不能이 되기도 한다. 이와 같은狀況은 특히 矽石의 경우 일어나기 쉬운데 일단 負의 값이 될 때는 이 값을 0으로 하고(feeder 停止) 그 영향을 나머지 3原料에 分配하지 않으면 안되고 이 때는 당연히 out of control이 된다. 이 경우에도 被害를 最小限으로 줄이기 위해 어떻게 分配해야 하는가에 대하여 考察하지 않으면 안된다.

分級器가 없는 粉碎 밑에 의한 回分式 調合 制御는 이상의 방법으로 행할 수 있지만 分級器가 附着된 粉碎 밑에서는 分級器의 分級效果를 고려해야 하기 때문에 어떤 近似와 假定이 필요하다. 이 경우의 block 線圖는 <그림-15>와 같은데 點線으로 둘러싸인 block을 하나의 시스템으로 보면 이 시스템은 내부에 feed back loop를 포함하고 있어 취급이 變잡해진다. 이제 r 을 循環率(%)로 하여 $M=r/100$, 또 α, β_m ($m=1, 2, \dots, M-1$)을 定數로 하면 分析値는

$$X(n) = \alpha A Y(n-1) + \sum_{m=1}^M \beta_m \times (n-m) \dots (30)$$



<그림-15> 分級器附 粉碎 밑의 調合制御系

로 나타낼 수 있다. 따라서 回分方式이라면 n 時點까지 調合한 平均成分은

$$\bar{X}(n) = (1 - \frac{1}{n})\bar{X}(n-1) + \frac{1}{n}\alpha AY(n-1) + \frac{1}{n}\sum_{m=1}^M \beta_m X(n-m) \dots \dots \dots (31)$$

이 된다. α, β_m 은 量과 粒度에 따라 결정되는 定數라고 생각된다. 分級器 없는 粉碎 粉의 調合制御에서는 混合層內的 成分과 原料送入力가 필요하지만 分級器가 附着된 粉碎 粉에서는 그 밖에 分級器出口의 瞬間成分值에 관한 데이터도 필요하다.

4.2 키른 工程의 最適制御

키른 制御 시스템을 실현시키려면 먼저 다음과 같은 몇가지 문제를 해결해야 한다.

- ① 被制御變數 및 操作變數의 選定, 모델의 決定
- ② 評價基準의 設定과 數式化
- ③ 最適制御利得의 決定
- ④ 制御實施結果의 評價

이상에 대해서 차례대로 說明하기로 한다.

4.2.1 被制御變數 및 操作變數의 選定, 모델화

變數의 決定에 있어서는 다음 前提條件을 만족할 필요가 있다.

- ① 精度, 信賴性의 面에서 測定可能할 것. 예를 들어 키른 尾部의 O_2 含有量은 信號로서는 중요하지만 抽出管의 壽命을 단축시키고 閉塞을 일으키므로 除外된다.
- ② 키른의 物理的, 化學的인 考慮로부터 당연히 필요하다고 본 變數
- ③ 經驗적으로 보아 키른의 狀態와 잘 對應하는 變數
- ④ 비슷하게 움직이는 變數는 하나로 취급한다(共線性).

먼저 키른의 狀態는 内部的 溫度分布와 量分布로 정해지므로 燒成帶溫度, 中間 가스 溫度, 尾部 가스 溫度 및 키른 電力 등이 고려된다. 燒成帶溫度는 前述한 바와 같이 雜音(noise)이 많고 精度, 信賴性에 문제가 있으므로 變數로서 採擇할 수 없다. 키른이 安定된 狀態일 때는 中間 가스 溫度는 尾部 가스 溫度와 비슷하게 변

하기 때문에 ②의 條件으로 보아 除外된다. 尾部 가스 溫度는 測定上의 問題는 없으므로 채택이 가능하다. 키른 電力 W 는 키른의 負荷狀態를 나타내고 量的分布, 燒成의 狀態를 나타내므로 중요하고 測定上의 문제도 없어 채택이 가능하다. 冷却器는 키른에 攪亂을 일으키므로 攪亂監視의 의미에서 필요한데 冷却器의 狀態로서는 冷却室壓力을 취한다. 그밖에 冷却器 狀態로서는 2次空氣溫度, 送風機(fan)流量 등이 중요한데 어느 것도 測定上의 문제가 있어 채택이 불가능하다. 다음에 重油燃燒를 감시하기 위해 尾部 O_2 含有量 및 尾部 draft, hood draft 등이 고려되는데 어느 것도 ①의 條件을 만족시키지 못한다. 그 다음 키른·冷却器의 狀態를 변화시키는 操作變數는 熱量供給으로서 重油流量, 燒成帶位置의 調節 및 燃燒用空氣(특히 2次空氣)調節로서 尾部 damper의 열린 정도, 冷却器調節用으로서 그레이트 速度가 필요한데 이것들은 모두 上記의 條件을 만족한다. 또, 키른 回轉數는 키른의 모든 狀態(溫度分布, 量分布, 燃燒狀態)에 복잡한 영향을 주고, 키른의 基準를 정해지므로 필요하다. 이상으로부터 被制御變數는 키른 電力(W), 冷却室壓力(P_c), 尾部 가스 溫度(T_{END})의 3變數이고 操作變數로서는 重油流量(F), 키른 回轉數(K_r), 尾部 damper의 열린 정도(D), 冷却器 그레이트 速度(C_r)의 4變數로 合計 7變數가 있다. 그러나 燒成帶溫度, O_2 含有量 등과 같은 중요한 信號가 ①의 條件을 만족한다면 당연히 채택될 만한 變數이다. 앞으로 이에 대한 새로운 計測器의 開發이 要望된다.

그런데 키른 工程의 時系列解析의 結果 모델로서 $(k+1)$ 變數系, 즉 $(k+1)$ 개의 變數로서 키른 工程을 모델화하면

$$x_0(n) = \sum_{l=1}^k c_l x_0(n-l) + \sum_{j=1}^K \sum_{m=1}^{M+L} A_{0j,m} x_j(n-m) + \epsilon_0(n) \dots \dots (32)$$

가 얻어진다. 그러나 이 모델화는 豫測의 概念에 바탕을 둔 것이 아니라 어디까지나 프로세스 解析用인 것이다. L, M 을 결정하는 基準로서 「豫測誤差(實測值-豫測值)의 分散을 最小로 한다」를 취하면 豫測의 概念이 導入되어 制御에 有效한 모델이 얻어진다. 식 (32)는

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^K \sum_{m=1}^M A_{ij}(m) x_j(n-m) + \varepsilon_i(n) \dots\dots\dots (33)$$

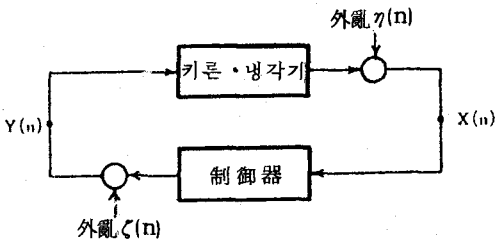
의 특별한 경우로서 식 (33)의 모델의 $M, A_{ij}(m)$ ($m=1, 2, \dots, M$)은 豫測誤差의 分散을 最小로 하도록 결정된다. 단 變數의 數는 다시 K 로 한다. 여기서 이 모델을 앞으로 사용하기로 하고 系의 變數를 被制御變數와 操作變數로 나누어 생각하면 被制御變數를 $\{x_1(n), x_2(n), \dots, x_r(n)\}^T$ 인 r 次의 벡터 $X(n)$ 로서 操作變數를 $\{y_1(n), y_2(n), \dots, y_l(n)\}^T$ 인 l 次의 벡터 $Y(n)$ 으로 나타내고 $A_{ij}(m)$ 中에서 ($i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, r$)로 만들어진 行列을 $A(m)$, ($i=1, 2, \dots, r; j=r+1, r+2, \dots, r+l$)로 만들어진 行列을 $B(m)$, ($i=1, 2, \dots, l; j=1, 2, \dots, l$)로 만들어진 行列을 $C(m)$, ($i=1, 2, \dots, l; j=l+1, l+2, \dots, l+r$)로 만들어진 行列을 $D(m)$ 이라고 하면

$$\begin{pmatrix} X(n) \\ Y(n) \end{pmatrix} = \sum_{m=1}^M \begin{pmatrix} A(m) & B(m) \\ C(m) & D(m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X(n-m) \\ Y(n-m) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \eta(n) \\ \zeta(n) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (34)$$

이 된다. 단, $\eta(n)$ 은 $\{\varepsilon_1(n), \varepsilon_2(n), \dots, \varepsilon_r(n)\}^T$, $\zeta(n)$ 은 $\{\varepsilon_{r+1}(n), \varepsilon_{r+2}(n), \dots, \varepsilon_{r+l}(n)\}^T$ 이다. 식 (34)의 第2行 즉

$$Y(n) = \sum_{m=1}^M C(m) X(n-m) + \sum_{m=1}^M D(m) Y(n-m) + \zeta(n) \dots\dots (35)$$

는 큰 冷却器工程과 관계가 없는 부분으로서 데이터 採取時의 人間的 制御動作 모델이다. 따라서 식 (34)에 의해 얻어진 <그림-16>과 같은 시스템을 simulation 하면 프로세스의 움직



<그림-16> 制御 시스템

임에 대한 人間的 制御特性을 特間の 領域에서 볼 수 있다. 식 (34)의 第1行 즉

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + \sum_{m=1}^M B(m) Y(n-m) + \eta(n) \dots (36)$$

은 프로세스 모델이 된다. 이것은 일종의 豫測表現이 되므로 이 모델을 사용하면 앞으로의 프로세스 움직임을 豫測하고 이로부터 얻어진 豫測值을 이용하여 豫測制御를 할 수 있다. 이를 위해서는 식 (36)을 사용에 편리한 形式으로 變形시킬 필요가 있다. 이제 식 (35)를 써서 S 時點 앞의 時刻 ($n+s$)의 값, $X(n+s)$ 를 豫測하는 경우를 생각하면 이 결과로서 식 (36)은 다음의 식 (37)로 變形된다.³⁾

$$\xi(n) = \Phi \xi(n-1) + \Gamma Y(n-1) + \omega(n) \dots\dots\dots (37)$$

단, $\xi(n)$ 은 $\{X(n), \xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_{M-1}(n)\}^T$ 인 $M_r (=M \times r)$ 次의 列벡터이고 $\omega(n)$ 은 $\{\xi(n), 0, \dots, 0\}$ 인 M_r 次의 列벡터, Γ 는 $\{B^T(1), B^T(2), \dots, B^T(M)\}^T$ 인 $(M_r \times l)$ 의 矩形行列이며 Φ 는 다음 形을 갖는 $(M_r \times M_r)$ 의 遷移行列이다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} A(1) & 1 & 0 & \dots & 0 \\ A(2) & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(M-1) & 0 & 0 & \dots & 1 \\ A(M) & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$\xi(n)$ 의 成分 $X(n), \xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_{M-1}(n)$ 는 각각 n 時點으로부터의 1段階 將來의 豫測值, 2段階 將來의 豫測值 등으로의 現時點으로부터의 影響分이다.

4.2.2 評價基準의 設定과 數式化

人間的 制御動作은 評價基準에 따라서는 반드시 最適하다고 말하기 힘들다. 制御의 目的을 安定化에 두고 評價基準을 「어떤 期間에 걸친 各變數의 設定值에 關係 그 分散의 和를 最小로 하는 것」으로 정했을 경우 어떻게 制御를 하면 이 評價에 合格할 것인가? 計算機에 의한 制御에서는 식 (34)의 第2行 즉 人間的 制御動作 식 (35) 대신에 計算機의 制御가 入力되는데 當

面問題는 評價基準의 數式化이다. 評價基準을 위와 같이 정하면 이 評價基準을 最小로 하는 最適制御則은 一意的으로 결정되며 制御系 設計에 있어서는 自由度가 없어진다. 여기서 $Q(s)$, $R(s)$ 는 각각 $(M_r \times M_r)$, $(l \times l)$ 의 非負行列 특히 $R(s)$ 는 正值行列로서

$$J_I = E \left[\sum_{s=1}^l \{ \xi^T(s) Q(s) \xi(s) + Y^T(s) R(s) Y(s) \} \right] \dots\dots\dots(38)$$

을 評價函數로서 採用하고 있다면 $Q(s)$, $R(s)$ 를 선택하는 自由度가 附加되어 이것을 여러가지로 선택함으로써 그에 대응하는 制御則을 얻을 수 있다. 단 $E[\]$ 는 $[\]$ 의 期待値를 뜻한다. 예를 들어 $Q(s)$ 의 對角要素中에서 최초의 r 個를 同一値로 하고 나머지 對角要素와 非對角要素를 모두 0으로 두면 이것은 制御에 있어서 r 個의 被制御變數(計測點)를 같은 價値로 評價하는 것을 의미한다. 그런데 r 個의 對角要素中에서 예를 들어 첫번째의 값을 크게 하고 다른 것의 값을 작게 하면 制御는 첫번째의 計測點을 특히 重視하게 된다. 이것은 人間の 制御動作에도 볼 수 있는데 예를 들어 W, P_c, T_{END} 의 세 計測値를 보고 制御한다고 하면 運轉員에 따라서는 세 計測値를 동등하게 보는 사람 특히 W 에 注目하는 사람 등등이 있다. 다음에 실제의 경우 W, P_c, T_{END} 이외의 計測値로부터의 정보에 의해 同一運轉員인데도 그 狀況에 따라서 W, P_c, T_{END} 中 重視하는 計測値가 서로 다를 수 있다. 한편 $R(s)$ 는 만일 操作端의 動作可能範圍가 無限하다면 對應하는 對角要素를 0으로 하는 것이 좋다. 그러나 실제로는 動作可

能範圍에 上限이 있을 것이므로 $R(s)$ 의 對角要素를 적당한 크기의 값으로 함으로써 制御의 動作範圍를 事實上 이 上限內에 둘 수가 있다. 이것은 W, P_c, T_{END} 의 定常時의 변동에 어떤 幅을 認定하는 것이다. 결국 $Q(s)$, $R(s)$ 의 選定에 따라 이에 대응하는 制御則이 하나로 정해지므로 어떠한 制御도 simulation 的으로는 실현 가능하다. 그러나 키른은 應答이 늦은 프로세스이므로 프로세스 内部의 feed back이 늦고 極端인 制御는 内部의 攪亂을 유발한다. 따라서 키른 制御의 경우에는 最短時間制御는 반드시 最適制御를 의미하지 않는다.

4.2.3 最適制御利得의 決定

식 (38)의 評價函數에 바탕을 둔 最適制御則은 選定한 $Q(s)$, $R(s)$ 에서 식 (38)을 最小로 하는 操作變數 $Y(s)$ 로 주어지며 最適制御利得을 G_I 라 하면

$$Y(n) = G_I \xi(n-1) \dots\dots\dots(39)$$

로 결정된다. 따라서 最適制御則을 구하는 것은 最適制御利得을 결정하는 것에 귀착되는데 이것은 dynamic programming의 最適性에 관한 原理를 適用함으로써 쉽게 구할 수 있다.^{3,9)} 이와 같이 해서 얻어진 最適制御 시스템은 다음과 같다. 프로세스 모델은;

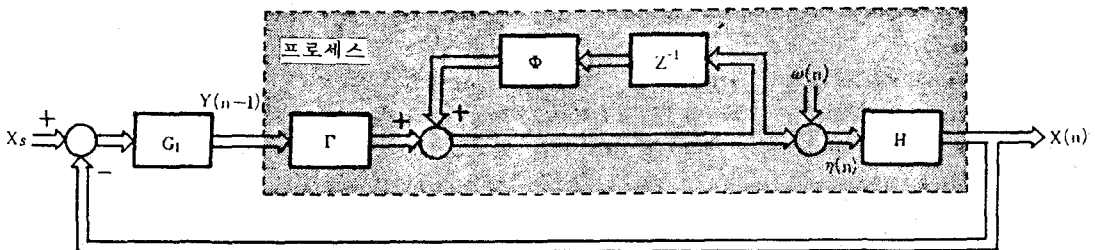
$$\xi(n) = \Phi \xi(n-1) + \Gamma Y(n-1) + \omega(n) \dots\dots\dots(40-1)$$

觀測機構는;

$$X(n) = H \xi(n-1) \dots\dots\dots(40-2)$$

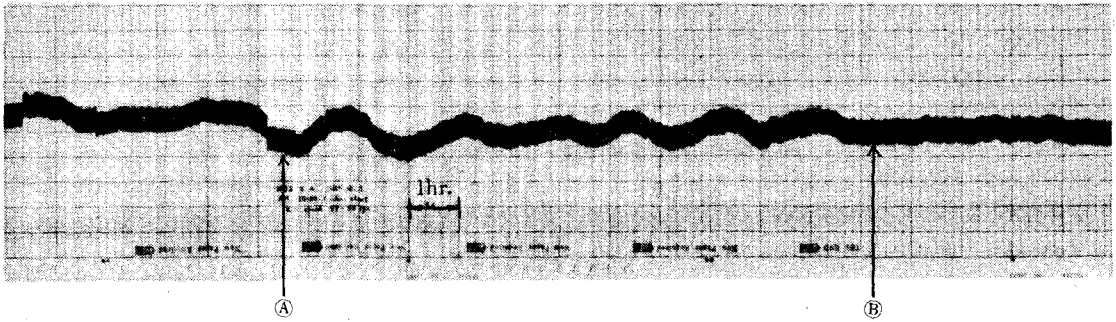
단, $H = [I \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$ 인 $(r \times M_r)$ 行列

最適制御는;



Z^{-1} 는 單位의 遅음이다.

<그림 - 17> 最終制御 시스템의 線圖



〈그림-18〉 制御實施結果의 키 큰 電力記錄

$$Y(n-1) = G_I \xi(n-1) \dots\dots\dots (40-3)$$

이며 〈그림-17〉의 線圖로서 표시된다. 이와 같은 시스템으로 프로그램을 짜면 最適制御 시스템의 simulation이 만들어진다. 이 simulator는 制御系設計 즉 $Q(s)$, $R(s)$ 의 調整에 유효하다. 식 (39)의 制御 시스템은 전체로서

$$\zeta(n) = (\Phi + \Gamma G) \zeta(n-1) + \omega(n) \dots\dots (41)$$

이 된다. 이에 의해 얻어진 豫測值 $\bar{X}(n)$ 과 觀測值 $X(n)$ 과의 差는 豫測誤差인데 만일 正의 모델이 얻어졌다면 豫測誤差는 白色雜音이 되지 않으며 만일 시스템에 변화가 있으면 豫測誤差에 나타나므로 豫測誤差의 偏移를 監視함으로써 프로세스의 異常을 檢出하는데 도움을 주며 앞선 制御를 효과 있게 해준다. 豫測은 어떤 條件下에서 將來의 프로세스의 움직임을 推測하는 것이므로 豫測에 誤差가 생기는 것은 條件이 成立되지 않게 하는 것 즉 프로세스에 異常情報가 포함되어 있기 때문이다. 이와 같은 중요한 정보는 豫測이 행하여짐에 따라 얻어지며 이 豫測은 計算機 없이는 행할 수 없다. 즉 計算機는 豫測誤差라고 하는 중요한 信號를 얻기 위한 일종의 計測器이다.

制御實施結果의 評價에 대해서는 文獻^{3,10)}을 參照하기로 하고 여기서는 생략한다.

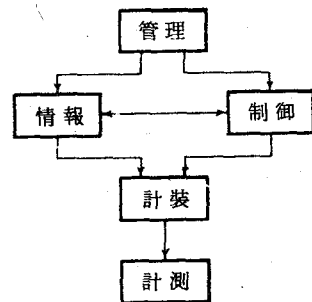
制御實施結果를 키 큰 電力의 記錄으로 나타내면 〈그림-18〉과 같다. 여기서 ①部分에서 on-line을 시작하고 있는데 그 이전에는 키 큰 回轉을 변경하여도 安定된 상태를 얻기 어려웠다. on-line 시작 후에는 잠시 동안 프로세스가 振動的인 상태로 되지만 ②에서부터는 安定

이 유지되어 設定值 부근으로 制御된다.

5. 맺음말

지금까지 시멘트 工業에서의 프로세스 計測과 制御에 대하여 計算機에 의한 “制御”라고 하는 좁은 立場에서 記述하였다. 管理의 構成을 概念的으로 나타내면 〈그림-19〉와 같다. 計裝은 크게 나누어 情報와 制御로 構成되어 있다. 여기서는 특히 制御의 立場에서만 計裝을 보았지만 制御는 당연히 시스템(프로세스)에 관한 情報를 필요로 한다.

制御 또는 豫測을 前提로 한 計裝에 필요한 計測은 시멘트 工業에 관한 限 아직 不充分하다. 이에는 두가지 面이 있는데 하나는 필요한 情報가 얻어지도록 새로운 計測點 또는 計測技術의 開發이며 다른 하나는 計測機器의 精度와 특성이다. 計裝이 時間적으로 변화해 가는 計測值의 有機的 結合化라고 하면 이것이 바로 프로세스가 時時刻刻 변화해 가는 패턴이며 制御의 기



〈그림-19〉 管理의 構成

초가 된다.

따라서 시멘트 製造工程의 거의 완벽한 管理를 위해서는 工程의 올바른 解析뿐만 아니라 計測技術과 計測機器에 관한 꾸준한 開發向上이 필요하다.

[參 考 文 獻]

- 1) 中川：“로타리 키른의 制御에 관한 研究”，東京大學學位論文(1964)
- 2) 中川：“키른의 負荷記錄에 의한 프로세스의 豫知判斷”，計測と 制御 vol. 11, P. 585~590(1970)
- 3) 赤池·中川：“다이 나믹 시스템의 統計的 解析과 制御”，サイエンス社(1972)
- 4) 磯部孝：“相關函數 및 스펙트럼”，東京大出版會(1968)

- 5) H. Akaike：“On a decision procedure for system identification”. Priprints IFAC Kyoto Symposium on System Engineering Approach to Computer Control P. 485~490(1970)
- 6) 古屋茂, 安達彦 譯：“自動制御系の 統計的 解析法”，コロナ社
- 7) 高橋安人：“自動制御計算法”，P. 105~122. 共立出版
- 8) 有本卓：“Kalman filter, 計測과 制御”，P. 590~598 (1970)
- 9) J. T. Tou：“Modern Control theory”Mc Graw-Hill(1964)
- 10) 八木原, 小南：“시멘트 키른의 計算機制御에 대하여”，第28回 日本시멘트製造技術 심포지움報告, P. 46~55 (1971)

