

시멘트 工業의 프로세스 計測과 制御 (上)

朴 珍 浩
〈韓國科學技術情報센터〉

1. 머리말

프로세스를 管理하기 위한 計裝은 그 프로세스의 特性을 파악하고 이 特性을 이용하여 프로세스를 最適인 상태에서 運轉함으로써 品質을 確保함과 동시에 生産性의 向上이나 生産費의 節減을 도모하고 나아가서는 裝置保全, 危險防止의 역할도 한다. 하나의 프로세스로부터 많은 物理量을 測定하는 計測의 段階에서 얻어진 多種多様な 計算値는 단순히 數値의 羅列에 불과하고 아직 데이터 相互間의 유기적인 結合은 이루어져 있지 않다. 時間적으로 변동하는 이와 같은 산만한 데이터를 體系化하고 유기적으로 結合하여 이로부터 有效한 情報를 얻어 프로세스 管理에 어떤 역할을 하도록 하는 것을 計裝이라고 한다. 이때는 프로세스 管理의 입장에서 計裝을 이해하고 따라서 計裝이라는 말보다 計裝의 目的의 하나인 「制御」에 重點을 두고 말하게 된다. 물론 보다 效果的인 制御를 위해서는 보다 깊게 프로세스의 特性을 알지 않으면 안되므로 당연히 프로세스 解析에 대해서도 언급하게 된다. 프로세스 解析, 制御라고 하는 目的에 대하여 計裝을 어차피 해야 하지만 여기서는 특히 중요한 項目에 대해서만 언급하기로 한다.

그런데 시멘트 製造 프로세스의 計裝化를 本格的으로 또 組織적으로 행하게 된 것은 1955년 경이었다. 이 시기는 시멘트 公業뿐만 아니라 어떤 企業에서도 소위 自動化를 부르짚던 때로서 애널로그 調節計에 의한 국부적인 定値制御가

행하여졌다. 그 후 잠깐 사이에 시멘트 工業에서는 傳達函數法(스칼라 制御理論)에 의한 局部定値制御가 開發되어 計裝面에서도 각종 計測器가 改良, 開發되어 왔는데 시멘트 工業의 프로세스 制御라는 입장에서 보면 計測器의 開發, 發展은 어떤 면에서는 한층 더 計裝을 복잡하게 했을 뿐이다. 1962년에는 프로세스 制御(큰 制御와 原料調合制御)를 目的으로 電子計算機가 導入되어 實用的인 制御 시스템이 開發되었는데 이 段階에서는 스칼라 制御理論에 계속 基礎를 두고 PID 調節計에 의한 定値制御의 延長線에 까지 이끌었다. 즉 이 段階에서의 시멘트 製造 프로세스用 計算機는 먼저 프로세스 解析부터 시작하였다. 그 후 制御理論의 進歩와 함께 많이 研究, 改良되었는데 오늘날과 같은 時系列的 및 統計的手法에 의한 프로세스 解析과 狀態空間法에 의한 프로세스의 모델化와 制御 시스템의 出現에는 상당한 세월이 걸려 今日的 體系화된 모습으로 定着하게 되었다. 즉 計算的 導入에 의하여 이와 같은 모델과 制御 시스템의 開發過程으로부터 얻어진 시멘트 製造 프로세스에 關하여 보다 깊은 知識과 制御技術이 向上되었음에 비하여 새로운 計測器의 開發實用化는 그 속도가 늦어 앞으로 期待되는 바가 크다.

시멘트 製造 프로세스에서 計測上 일반적으로 問題되는 것은 다음과 같다.

- ① 프로세스가 高温이다.
- ② 프로세스가 dusty 하다.
- ③ 프로세스가 noisy 하다.
- ④ 對象이 粉體, 粒體, 슬러리이다.

⑤ 裝置가 巨大하기 때문에 制御應答이 늦다.

이와 같은 制約 때문에 理論的으로는 이 點의 溫度가 필요해도 事實상 測定할 수 없고 가령 測定할 수 있어도 信賴(計測值의 精度, 計測端의 壽命 등)할 수 없기 때문에 다만 監視 정도 밖에 사용할 수 없는 경우도 있다. 이와 같은 要 條件을 극복하여 필요한 곳의 計測을 가능토록 하기 위해서는 지금까지의 延長線上에서 고려하는 것만으로는 불가능하며 전혀 다른 새로운 原理에 의한 溫度計測이나 流量測定의 技術이 開發되어야 한다.

이제 시멘트 製造 프로세스의 計裝도 計算機를 떠나서 생각하는 것은 불가능하게 되었다. 앞으로 計算機 사용을 前提로 하여 시멘트 製造 工程과 特質, 프로세스 解析, 모델化, 각 單位 프로세스의 制御의 순서로 解説하고 마지막으로 플랜트 MIS에 대해서도 얼마간 概說하고자 한다.

2. 시멘트 製造工程과 特質

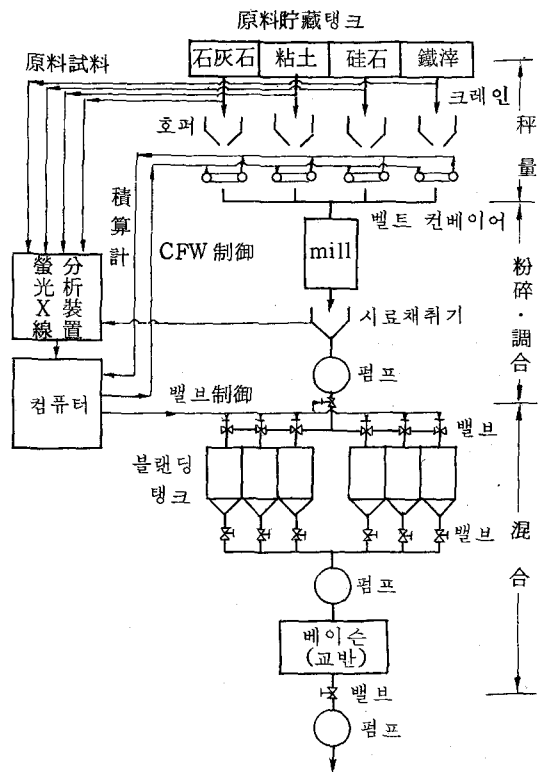
시멘트 製造 프로세스는 사용하는 原料의 상태에 따라 乾式과 濕式으로 나눈다. 어느 경우에도 製造 프로세스는 크게 原料調合系, 크링카 燒成系, 시멘트 粉碎系의 세 부분으로 나눈다. 乾式의 경우에는 크링카 燒成系의 裝置에 따라 보통의 보일러附 乾式 키른, Lepol 키른, SP키른, NSP 키른 등으로 나눈다. 또 크링카 燒成系의 最終端에 있는 크링카 冷却裝置에도 여러 가지 樣式이 있다. 裝置全體로서 어떤 樣式으로 組合할 것인가 하는 문제는 熱消費, 生産容量, 長期安定運轉, 시멘트의 品質, 裝置의 耐久性 등에 따라 결정된다.

어떻든 어느 樣式에 있어서도 製造工程은 앞서 말한 세 부분으로 나눌 수 있으므로 여기서는 樣式에 관계 없이 세 區分에 따라 그 工程과 이를 管理하는 경우 計裝의 問題點에 대하여 記述하기로 한다.

2.1 原料調合系

시멘트는 일반적으로 石灰石, 粘土, 矽石, 鐵滓 등 4種類의 原料로부터 만들어지는데 原料 調合系의 主目的은 이와 같은 4種類의 粗粒原

料(原石)를 粉碎, 調合하여 미리 정한 目標의 成分에 일치하는 均一한 調合原料를 얻는 것이다. 따라서 主工程은 秤量, 粉碎, 調合, 均一混合 등 4개의 副工程으로 나눈다.<그림-1>에서 보는 바와 같이 먼저 工場에 보내져 온 4種의 原石은 잠시 原料貯藏탱크로 각각 貯藏된다. 이 4種의 原石을 각각 따로 引出하여 調合計算에 의해 미리 算出된 所定量을 Constant feed ware (CFW)로 각각 따로 定量供給하여 粉碎 밀로 投入한다. 粉碎 밀에서는 이 4種의 原料를 微粉碎함과 동시에 混合하게 되는데 濕式의 경우에는 이때 30~40%의 水分을 살포하여 슬

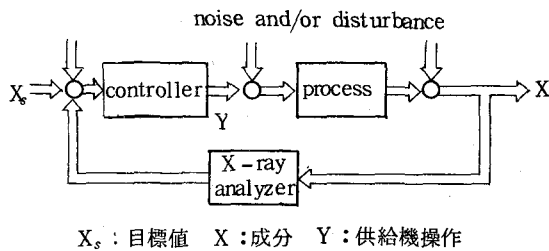


<그림-1> 原料調合系 工程圖

러리로 만든다. 乾式의 경우 粉碎混合된 시멘트 原料는 블렌딩 탱크로 보내져 에어 블렌딩에 의해 均一한 成分의 키른 投入原料로 만든다. 濕式의 경우는 슬러리 탱크로 보내어 여기서 數時間 동안 에어 블로우에 의해 均一化시키고 슬

러리 베이슨(basin)에 보내어 키 큰 投入原料로 만든다. 여기서 原料調合系는 끝나게 되는데 原料調合系는 극히 간단 명료한 프로세스로서 入口, 出口 사이의 物質收支만을 고려하면 되고 熱收支인 프로세스는 存在하지 않는다.

<그림-2>와 같이 프로세스의 出力(調合原料成分)을 目標値로 유지하기 위해 밀로 送入되는 原料量을 操作하는 制御의 立場에서 計裝을 해보면 필요한 計測點은 4種 原料의 送入量 및 調合原料 4成分(CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)이다. 그밖의 送入된 4種 原料의 成分도 필요하지만 그 測定은 長時間을 要하기 때문에 on-



<그림-2> 原料調合制御系 線圖

line 的인 制御로의 利用은 곤란하므로 체크 正 도의 目的으로 한다. 濕式의 경우는 슬러리 水分, 슬러리 粘度, 水流量이 필요하다. 粉砕 밀의 保全面에서는 밀 軸受溫度計, 潤滑油의 水準計, 슬러리 펌프 警報 등도 필요하다. 粉砕 밀 送入 原料의 定量供給은 현재는 CFW에 의해 상당히 精確하게 測定, 操作되고 있다. 乾式에서는 原料를 미리 乾燥시켜 밀에 보내는 경우가 많으므로 別문제 가 없지만 濕式에서는 이 乾燥가 省略 되므로 특히 粘土 등에서는 소위 hang 現象이 일어나기 쉽고 hang 상태의 檢出, 警報는 중요한 것이다. 調合原料의 4成分測定은 乾式에 대해서는 요즘 3~4년 사이에 on-line 的으로 사용 가능한 連續式 X線分析裝置가 실용화되어 최근 이를 採用하는 工場이 늘어나고 있다. 이 連續式 螢光X線分析裝置의 實用化에 따라 原料 調合制御는 연속적으로 行할 수가 있게 되었다. 그러나 濕式의 경우는 아직 on-line 的으로 사용 가능하고 實用的으로 精度가 큰 것이 開發

되어 있지 않기 때문에 그리고 off-line 的으로 螢光X線分析裝置에 의한 成分測定에는 시간이 걸리기 때문에 대개의 工場에서는 batch식의 制御方式을 채택하고 있다. 調合原料 成分測定에서 문제가 되는 것은 試料採取로서 이것은 다음 두가지 事項 즉 sampler에 특히 주의하지 않으면 안된다. 그 하나는 一定量의 試料를 채취하는 것과 다른 하나는 試料가 전체를 대표하도록 採取場所, 方法, 縮分을 선정하는 것인데 採取物質이 粉體 또는 슬러리이기 때문에 실제로는 여러 가지 트러블(閉塞)이 발생하기 쉽다. 또 分析裝置의 設置場所는 試料採取場所로부터 멀리 떨어져 있으면 試料의 輸送에 시간이 걸리기 때문에 制御面에서 보아 좋지 않다. 앞서 말한 바와 같이 粉砕 밀內의 調合 프로세스는 物質收支만이기 때문에 定常的 모델(靜的모델)은 비교적 간단히 만들 수 있다. 또 粉砕 밀의 動的인 過渡特性도 거의 <1次遲延+不感時間>系로서 近似시킬 수 있지만 最近의 乾式 프로세스와 같이 分級機가 附着되어 있는 경우에는 分級機를 포함한 調合系 전체의 動的特性은 반드시 1次遲延系로 近似시킬 수 만은 없다. 이에 대해서는 다음 節에서 論한다.

이상에서는 秤量과 調合에 대해서만 논했는데 그밖에 均一化의 문제가 남아 있다. 連續式일 때는 블렌딩 탱크에 의해 상당히 均一化된다. 그러나 濕式의 batch식에서는 均一化의 精度가 문제된다. Batch식에서는 하나의 탱크가 채워지면 이 탱크로 調合原料가 供給되는 것을 막아 에어 블로우되므로 計測點으로서 탱크內 原料의 水準計(level gauge)가 필요하다. 그러나 슬러리 탱크의 水準(level)을 計測하기는 보통의 方法으로서 매우 곤란하다. 슬러리 탱크의 數가 많으면 탱크가 채워져 밸브를 關閉하는 操作은 상당한 일거리이므로 일의 運轉狀況과 탱크의 使用狀況에 따르는 밸브 制御가 필요하다.

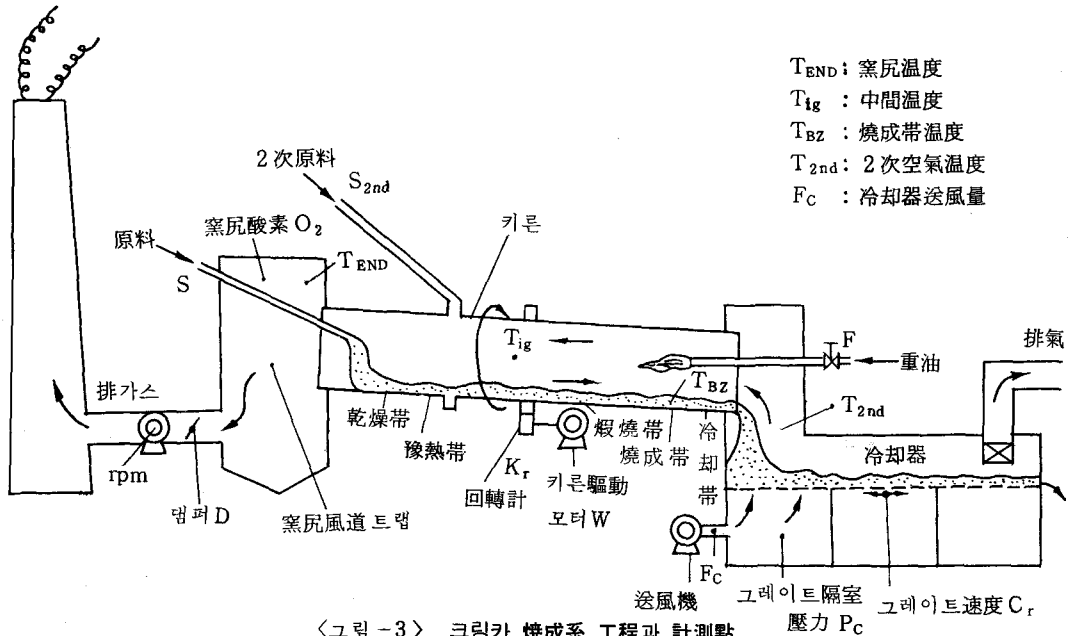
2.2 크링카 燒成系

原料系에서 均一成分으로 調合된 原料는 貯藏 탱크(乾式) 또는 슬러리 베이슨(濕式)으로부터 引出되어 Constant feed ware (CFW)에 의해 로우터리 키 큰으로 定量供給된다. 키 큰의 主要

목적은 原料를 1,400~1,500°C의 高温으로 加熱하여 原料成分의 化學反應에 의해 시멘트의 半製品인 크링카를 만드는 것으로 시멘트 製造 프로세스의 중심이 되는 부분이다. 原料를 1,400~1,500°C로 加熱하여 化學反應을 일으키면 되므로 制御上 별문제가 없을 것 같지만 실상 問題는 크링카 燒成裝置인 로우터리 키른의 構造로부터 생긴다. 키른은 길이가 數 10 m로부터 濕式의 경우 180 m까지 이르는 圓筒으로서 一定

速度로 回轉한다.

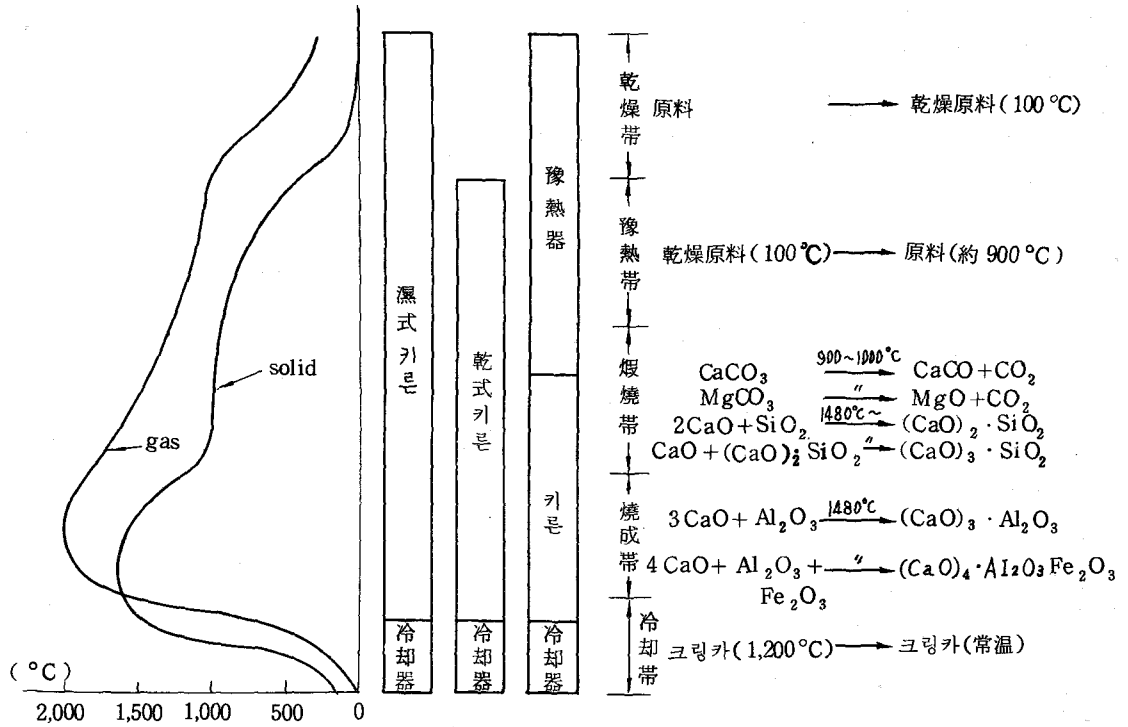
<그림-3>은 濕式의 경우를 예로 든 것인데 原料는 窯灰라고 부르는 키른의 一端으로부터 投入되어 反對端에서 燃燒되어 오는 重油燃燒 가스流과 熱交換을 하면서 이 圓筒中을 1~3 時間에 걸쳐 통과한다. 로우터리 키른은 일종의 向流型 熱交換器로서 키른內의 溫度分布에 따라 溫度가 낮은 쪽으로부터 乾燥帶(濕式의 경우만), 豫熱帶, 煨燒帶, 燒成帶, 冷却帶 등 4 部分 또는



<그림-3> 크링카 燒成系 工程과 計測點

5 部分으로 나눈다(<그림-4>). 各帶에서는 각각 固有한 化學反應이 일어나고 燒成帶에서 최종적으로 크링카가 생성된다. SP 키른 또는 Lepol 키른에서는 豫熱帶와 煨燒帶의 일부는 로우터리 키른의 前段인 豫熱器에 속하고 原料는 이 豫熱器에서 키른 排氣熱을 이용하여 약 800°C로 豫熱되어 키른에 投入된다. Lepol 키른의 豫熱器는 펠릿狀의 原料를 그레이트 위에서 乾燥豫熱시킨다. SP 키른의 경우는 乾燥原料를 豫熱器內의 가스流에 浮遊시켜 熱交換을 행한다. 키른內 原料는 燒成帶에 이르기까지 所定의 豫熱過程을 거치게 되어 있으므로 이 豫熱過程의

차는 최종의 燒成帶에 영향을 주며 크링카의 品質을 결정해 준다. 問題는 各帶가 하나의 裝置中에 直列로 結合되어 있으므로 서로 干涉되어 합하는 feed back system으로 할 수 있다. 이것이 종래 스칼라 制御理論에 의한 局部 制御에서는 성공하지 못하였던 第1의 理由이다. 결국 키른內는 冷却帶를 제외하고 3 部分 또는 4 部分으로 나누어지므로 計測點으로서 各帶를 대표하는 溫度가 바람직한데 현재 計測되고 있는 溫度는 키른 出口 가스 溫度, 中間 가스 溫度(煨燒帶), 中間原料 溫度, 燒成帶 溫度 등이다. 이 중 가장 중요한 信號는 燒成帶 溫度로서 이 信



• <그림-4> 키른內 溫度分布와 化學反應

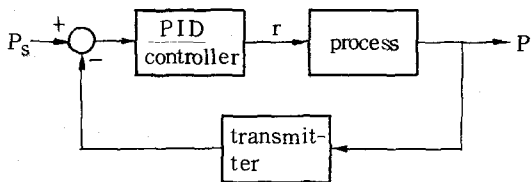
號에는 直流的 負性 noise 가 포함되어 있기 때문에 SN比가 나쁘고 制御 시스템에 넣기가 어렵다. 그러나 負性 noise라고 하는 특성에 着案 하면 測定信號를 적당히 處理함으로써 安定된 信號로 바꿀 수 있다.」 이와 같은 處理裝置를 사용자 자신이 開發한 例는 실로 많다.

키른이 熱交換器인 이상 重油의 燃燒는 靜的인 의미에서나 動的인 의미에서나 중요한 것이므로 完全燃燒의 監視는 키른을 定常的으로 安定시키기 위해 반드시 필요한 것이며 完全燃燒의 바로미터의 하나인 窯尻 O₂ 含有量은 이런 의미에서 매우 중요한 信號이다. 그러나 키른에서는 粉塵이 많이 발생하고 또한 乾式의 경우 가스 溫度가 950~1,050°C의 高溫이므로 抽出管의 壽命과 閉塞으로 인해 문제가 생겨 制御信號로서는 채택하기가 어렵다.

키른의 重油燃燒用 空氣로서 이용되고 있는 크링카 冷却器로부터의 2次空氣는 크링카와의 熱交換에 의해 약 600~700°C의 溫度가 되고 燃燒必要空氣量의 약 75%에 이르므로 이 熱量

은 重油消費를 節約하는 역할을 한다. 그러나 2次空氣流量 및 溫度는 키른의 상태와 크링카 冷却器 狀態에 따라 상당히 변동하므로 어떤 의미에서는 키른에 攪亂을 일으키는 하나의 요인이 되어 制御上 중요한 의미를 갖는다. 보통의 熱電對에 의한 2次空氣溫度의 測定에서는 가스 溫度 외에 크링카 및 冷却器壁으로부터의 熱輻射가 있기 때문에 參된 溫度가 되지 못한다. 따라서 2次空氣溫度는 熱電對에 의해 測定하는 限 定量的이라기보다는 오히려 定性的으로 사용할 수밖에 없다. 이 때문에 熱精算에는 사용할 수 없지만 大量의 크링카 流入時의 信號로서 制御的으로 利用할 수 있는 가능성은 있다. 이意味에서는 suction pyrometer에 의해서 보다 熱電對에 의하는 것이 유리하다. 2次空氣溫度 및 流量의 변동이 키른에 攪亂을 일으키므로 이것을 一定하게 抑制해 놓고 制御를 행하는 것은 당연하다. 그러나 이제 보는 바와 같이 2次空氣溫度의 測定은 여러 가지 문제를 포함하고 있으므로 이것을 직접 制御信號로서 채택하기는

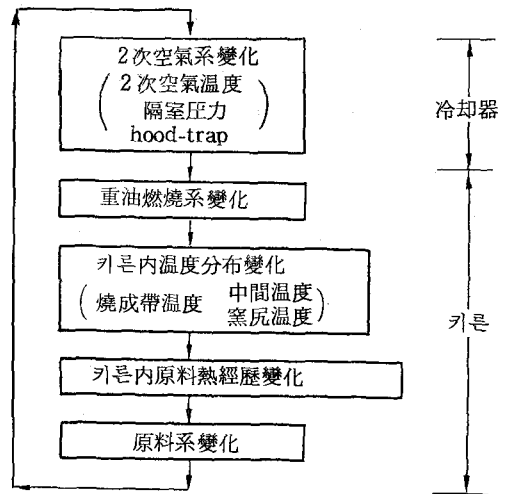
어렵다. 2次空氣溫度 및 流量의 變動原因을 살펴보면 冷却器 그레이트 위에서의 크링카량의 변화를 들 수 있는데 이 변화는 그레이트 아래 있는 隔室의 壓力變化로 간접적으로 알 수 있다. 따라서 2次空氣溫度 및 流量의 변화는 어느정도 이 隔室의 壓力變化로서 간접적으로 測定할 수 있으므로 이 隔室의 壓力을 일정하게 유지시키고 그레이트 速度를 操作하는 定値制御가 가능하다. 冷却器 隔室壓力/그레이트 速度의 定値制御는 키른에 攪亂을 주지 않는다는 의미에서 이와 같은 單獨實施로서도 상당한 效果가 있으며 대개의 工場에서 보통 실시하고 있는 制御系이다. 이 制御系는 <그림-5>와 같이 構成할 수 있는데 여기서 문제되는 것은 冷却器 隔室壓力에 포함된 高周波脈動이다. 이 脈動을 제거하기 위해서는 CR 필터가 필요하지만 高周波帶에서 壓力發信器(transmitter)의 感度가 낮으면 CR 필터가 不必要하며 計測器의 正確한 選擇이 計裝의 簡素化와 機能面에서 필요하다. 이와 같이 크링카 冷却器는 그 역할로 보아 키른과는 별개의 것이지만 현재와 같은 構造(키른과의 連結部分)에서는 制御上 키른과 독립시켜 생각하기는 불가능하다. 예를 들어 <그림-6>에 보인 바와 같이 어떤 이유로 2次空氣系에 변화가 일어나면 그 영향은 키른의 重油燃燒系에 전달된다. 重油가 不完全燃燒되면 熱量不足으로 인해 키른內的 溫度分布가 변화하고 그 결과 原料의 進行速度가 변화하거나 耐火벽들이 떨어져 나간다.



P : 隔室壓力, Ps : 隔室壓力의 設定値(目標値)
r : 크레이트速度

<그림-5> 冷却器 隔室壓力/그레이트速度制御系

耐火벽들이 落下하여 原料의 量이 일시적으로 增大하게 되면 그 영향은 시간을 두고 冷却器로 전해져 2次空氣系의 變化를 초래한다. 결국



2次空氣系 : 2次空氣溫度 및 流量 etc
重油燃燒系 : (不)完全燃燒, 燃燒速度 etc
原料系 : 原料進行速度, 原料量
易燒性

<그림-6> 키른과 冷却器의 feed back loop

冷却器와 키른이 結合되어 하나의 feed back system을 構成한다고 할 수 있다. 이것은 制御의 立場에서 보면 가장 귀찮은 문제이며 局部的인 制御系의 合成에서도 처리하기 어려운 문제이다. 어떤 이와 같은 현상이 일어나면 그 因果關係를 <그림-6>의 루우프중 어디에서 檢出하고 어디에서 抑制해야 하는가 하는 문제가 해결되어야 하는데 이 目的을 달성하려면 計裝設계가 필요하다.

이상과 같은 키른과 冷却器의 feed back loop를 무시하고 따로따로 定値制御를 행하여 온 것이 종래의 스칼라 制御가 성공하지 못했던 第2의 理由이다. 그밖에 키른, 冷却器의 局部的인 상태를 나타내는 計測點 중에서 制御上 중요한 것은 中間溫度, hood-trap, 窯灰-trap, 冷却器의 크링카 팬 流量 등인데 이에 대해서는 紙面上 省略하기로 한다.

이상에서는 키른(冷却器를 포함하여)을 工程에 따라 局部的으로 보고 설명하였지만 이와는 다르게 키른 全體를 대표하는 計測信號에 대해

여 고찰할 필요가 있다. 이와 같은 計測値로서
 大きな 驅動 모터의 電力値(이하 大きな 電力이라 부
 른다)가 있다. 본래 電力은 負荷의 狀態를 나타
 내는 양이므로 大きな 內容(狀態)
 이 時時각각 變化하는 負荷에 대해서는 電力値
 도 이에 對應하여 變動된다. 따라서 大きな 電力
 의 變動은 大きな 內 狀態의 變動을 나타내므로 制
 御에 效果的으로 사용할 수 있다.²⁾

大きな 內의 狀態에는 두가지 要素가 있는데 그
 하나는 大きな 原料의 量的分布이며 다른 하나
 는 原料의 燒結狀態(溫度分布)이다. 大きな 電力
 에는 이 두가지 情報 외에 bias로서 裝置(大きな)
 자신을 回轉시키기 위한 部分이 포함된다. 大きな
 電力을 制御에 적용하려면 이 세가지 情報를 어
 떻게 해야 分離할 수 있는가에 달려 있다. 大きな
 은 一定速度로 回轉하기 때문에 大きな 原料狀
 態에 따라 大きな 電力에는 大きな 回轉과 일치하
 는 비교적 낮은 周波數成分이 강하게 나타난다.
 이 周波數成分은 大きな 內의 狀態 變動으로부터 오
 는 것이 아니라 大きな 回轉으로부터 오는 것이
 므로 制御面에서는 해로운 變動이며 이것을 제
 거하는 前處理(filtering)이 필요하다. 이것은 大
 回轉數에 대해서도 마찬가지이며 冷却器 그
 레이트 速度에 대해서도 같다. 이 filtering을 보
 통의 애널로그 CR 필터로 행하면 位相이 상당
 히 늦은 情報가 時間的으로 늦어진다. 이와 같이
 位相이 늦은 信號에 대해서는 능동적인 필터가
 效果的이다.

大きな 安定된 狀態로 管理하는 것은 安定된
 溫度分布을 유지하는 것이다. 溫度分布을 혼란시
 키는 攪亂이 발생하면 大きな 不安定하게 되며
 品質을 유지하기 위해서는 부득이 低速運轉(生
 産量減少)을 할 수밖에 없으므로 生産性은 낮
 아지고 生産費用은 높아지는 나쁜 結果를 초來
 한다. 그러나 大きな 內에는 制限된 領域內에서 自己
 制御性이 있으므로 어떻게 해서든지 大きな 內의 狀
 態를 自己制御性이 유지되는 領域內에 두는 것
 이 가장 좋다. 발생하는 攪亂의 종류는 다음과
 같다.

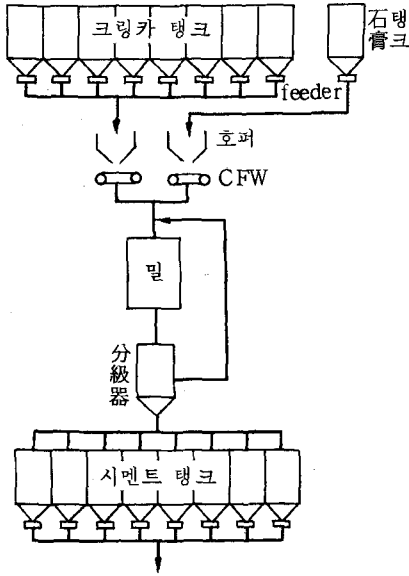
- ① 大きな 內 原料進行速度의 돌변
- ② 耐火벽들의 落下
- ③ 原料成分의 變動

- ④ 2次原料送込量의 變動(濕式의 경우)
- ⑤ 슬러리 水分의 變動(濕式의 경우)
- ⑥ 2次空氣持込熱量의 변화

이 중에서 ③, ⑤는 原料調合系에서 管理되므
 로 특히 고려할 필요가 없다. 특히 중요하고 항
 상 볼 수 있는 것은 ①, ②, ④, ⑥인데 그중
 에서 ④는 거의 裝置로 인한 것으로서 定量供
 給裝置를 사용한다면 문제가 되지 않지만 때로
 는 故意的인 變更이 있기 때문에 전혀 무시할
 수는 없다. 이와 같은 攪亂은 서로 관련하여 正
 의 feed back loop를 形成하는 경우도 있으므
 로 상당히 심각한 문제이다. 大きな 安定化制御의
 基本은 大きな 內 原料進行速度의 定常化와 溫度
 分布의 安定化이므로 위와 같은 攪亂의 발생은
 미연에 방지할 필요가 있다. 반대로 大きな 內이 安
 定되어 있으면 위와 같은 攪亂은 발생되지 않
 는다. 大きな 安定化制御와 이에 필요한 프로세
 스 解析에 대해서는 다음에 記述하기로 한다.

2.3 시멘트 粉碎系

시멘트 粉碎系는 燒成系에서 만들어진 半製品,
 즉 크링카를 石膏와 함께 粉碎하여 시멘트製品
 을 만드는 部門으로서 管理對象은 주로 粉末度,
 SO₃含量 및 시멘트 溫度이다. 이 系의 subpro-
 cess는 秤量과 粉碎, 混合이다. 먼저 크링카 貯
 藏 탱크에 저장되어 있는 크링카를 引出하여 co-
 nstant feed ware (CFW)로서 시멘트 밀에 定
 量供給하고 동시에 石膏를 CFW로서 定量供給
 하면 시멘트 밀에서는 이를 混合粉碎한다 (<그
 림-7>). 製品인 시멘트 粉末의 粒度를 일정하
 게 유지시키고 過粉碎를 막아 시멘트 밀의 效率
 을 높이기 위해서 보통 分級器(separator)를 사
 용한다. 粉碎된 시멘트는 分級器에서 分級되어
 굵은 것은 다시 밀로 循環되어 粉碎된다. 分級
 器에서 分級된 微分 시멘트는 보통 110~140
 °C의 溫度가 되므로 이것을 시멘트 冷却器에
 서 약 50~60°까지 冷却시켜 시멘트 貯藏 탱크
 에 저장한다. 이 部門에서의 주요 計測點은 밀
 出口(分級器出口)에서의 시멘트 溫度, 크링카 供
 給量, 石膏供給量, 밀로부터 分級器까지의 循
 環 엘리베이터의 負荷電力(또는 電流値) 등이며
 그밖에 밀의 保全面에서 軸受溫度計가 있다.



〈그림-7〉 시멘트粉砕系 工程圖

시멘트工場은 裝置가 거대하기 때문에 넓은 地域을 차지하고 있다. 더우기 최근에는 거의 中央集中管理方式을 채택하고 있기 때문에 현장에서 中央管理室까지의 距離가 길고 信號 케이블이 動力線과 같은 管內을 지나는 부분도 있어 애널로그 信號에서는 誘導障害를 받기 쉬우므로 이에 대한 적절한 對策과 處理가 필요하다.

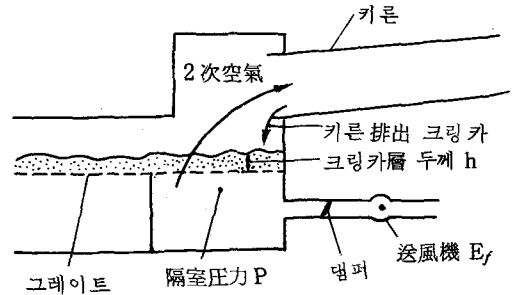
3. 프로세스 解析과 모델化

프로세스의 特性을 확실히 아는 일은 管理 또는 制御가 計裝이라는 根元的인 基礎에 서있는 限 매우 중요한 것이며 管理를 충분히 效果的으로 할 수 있는가, 할 수 없는가를 결정해 준다. 반대로 프로세스의 理論的인 구조가 충분히 파악되면 어느 곳을 計測하고 어떻게 計裝化 해야 하는가를 알 수 있다.

시멘트 프로세스뿐만 아니라 일반적인 모든 프로세스에는 靜的인 특성과 動的인 특성이 있다. 靜的인 특성 외에 動的인 특성이 있는 것은 프로세스에 容量的인 특성 외에 慣性的인 특성이 존재하기 때문이다. 예를 들어 電氣回路에 있어서 抵抗 R만으로 이루어진 回路에는 動的(過渡的)인 특성은 없다. 그러나 콘덴서 C나 인덕

탄스 L이 回路內에 포함되어 있으면 어떤 時間 過渡的인 狀態變化가 있다. 시멘트 프로세스의 경우 이와 같은 전형적인 예는 冷却器 隔室 壓力에서 볼 수 있다. 〈그림-8〉과 같이 冷却器 隔室壓力은 五面이 壁으로 둘러싸여 있고 위쪽만 網狀의 그레이트로 되어 있는 隔室에 送風되어 온 空氣壓力에 의해 발생한다.

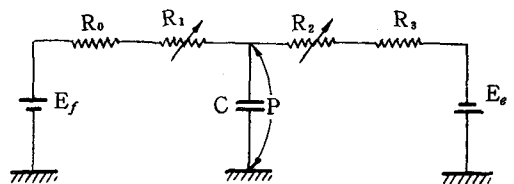
그레이트 위에는 크링카가 어떤 層 두께 h로 存在하는데 이 크링카는 그레이트의 往復運動



〈그림-8〉 冷却器 隔室力

에 따라 冷却되면서 서서히 冷却器 끝으로 보내어진다. 送風機에 의해 一定速度로 送風된 공기는 크링카層의 空隙를 통해 나가기 때문에 크링카層의 두께 h가 크면 空氣抵抗이 增大하여 隔室壓力이 增大한다. 이와 같은 프로세스는 送風機를 電源 E_f (直流), 隔室壓力을 포텐셜 (電位差) E_s , 크링카層에 의한 空氣抵抗을 電氣抵抗 R로 대응시키면 〈그림-9〉와 같이 電氣回路로 代置시킬 수 있다. R_0 는 風管의 抵抗, R_1 은 멤퍼의 抵抗(可變), C는 隔室의 容量, R_2 는 그레이트 위의 크링카層에 의한 抵抗, R_3 는 키른 및 그밖의 抵抗, E_s 는 窯尻의 排風機이며 ground는 大氣이다. 결국 隔室壓力은 콘덴서 C 兩端의 電壓 P로 대응된다. 이에 따르면 다음 近似式이 成立된다.

$$\frac{CR_1R_2}{R_1+R_2} \frac{dP}{dt} + P = \frac{R_2}{R_1+R_2} E_f \dots\dots(1)$$



〈그림-9〉 隔室壓力의 類推

따라서 冷却器 隔室壓力의 프로세스는 1次容
 量늦음계로 나타낼 수 있다. 단, R_0 는 R_1 에,
 R_3 는 R_2 에 포함시키고 E_e 는 고려하지 않았다.
 그러나 이 계는 物理的인 實在로서 定式化(물
 론 어느 정도의 近似는 필요하다)시킬 수 있다.
 즉 이제 冷却器를 하나의 輸送機械처럼 취급하
 면 크링카의 物質收支로부터 다음의 연속 방정
 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial h(x,t)}{\partial t} = -V_c \frac{\partial h(x,t)}{\partial x} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 $t \geq 0$ 로서 時間, x 는 冷却器 軸方向
 으로의 座標로서 原點은 隔室의 入口端(L 을 隔
 室 위의 그레이트 길이라고 할 때 x 의 領域은
 $0 \leq x \leq L$)으로 한다. 또, $h(x,t)$ 는 그레이트
 上的 크링카層 두께로서 時間과 位置의 函數이
 다. 冷却器 橫方向의 層두께는 일정하다고 가
 정한다. V_c 는 크링카의 移動速度이다. 만일 여기서
 耐火벽들의 落下 등에 의해 投入되는 크링카 더
 미가 그레이트 위를 통과함에 따라 時間적으로
 무너져 내리는 현상을 고려하면 이것은 하나의
 擴散現象으로 볼 수 있다. 이것은 문제의 전망
 을 좋게 하기 때문에 고려하지 않는다. 식(2)의
 解는 x 와 t 가 분리된다고 가정하여

$$h(x,t) = ce^{-V_c(t-x)/\sigma L} + h_0 \dots\dots\dots(3)$$

단, σ 는 實驗的으로 구한 定數이고 C 는 初
 期條件으로부터 결정되는 積分定數이다. 이 식의
 第1項은 過渡應答成分, 第2項은 定常應答成分
 이다. 定常狀態에서는 冷却器로 들어가는 크링카
 의 容積을 $F_c(t)$, 冷却器의 橫幅을 W , 層內의
 空隙을 補正해주는 定數를 r 라고 하면

$$h_0 = \frac{rF_c(t)}{WV_c} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 실제로 計測할 수 있는 것은 $h(x,t)$
 가 아니라 隔室壓力이므로 $h(x,t)$ 의 隔室壓力
 $P(t)$ 로의 代替는 다음과 같이 하여 구한다. 즉
 隔室壓力은 空間變數를 갖지 않는 物理量이므로
 $h(x,t)$ 를 x 에 대한 平均値 $\bar{h}(t)$ 로 대표하는
 것이 좋다. 따라서

$$\bar{h}(t) = \frac{rF_c(t)}{WV_c} \left[1 - e^{-(t-XL/V_c)/\sigma L/V_c} \right] \dots\dots(5)$$

이고(단, x 는 擴散現象을 늦음時間으로 補正한
 時定數이다) 이와 같은 解를 갖는 方程式은

$$\frac{\sigma L}{V_c} \frac{d\bar{h}(t)}{dt} + \bar{h}(t) = \frac{r}{WV_c} F_c(t - \frac{KL}{V_c}) \dots\dots\dots(6)$$

이다. 隔室壓力 $P(t)$ 와 $\bar{h}(t)$ 사이에는 線形的인
 關係가 있다고 하면 식(6)은

$$\frac{\sigma L}{V_c} \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = \frac{\beta r}{WV_c} F_c(t - \frac{KL}{V_c}) + P_0 \dots\dots\dots(7)$$

制御面에서 볼 때 이 식에서 操作可能한 것은
 V_c 만이므로 V_c 를 변화시키는 그레이트 速度를
 制御操作의 入力으로서 선정한다. V_c 는 $\bar{h}(t)$ 에
 대해 일정한 것 같지만 크링카가 剛體와 현저
 히 다른 粒體임을 생각하면 그레이트로부터 주
 어진 에너지가 그레이트 위의 크링카에 100%
 주어진다고는 할 수 없으므로 V_c 는 $\bar{h}(t)$ 에 의
 존하는 量이다. 즉 一定速度로 그레이트가 回轉
 하고 있을 때 크링카層이 매우 두꺼우면 이 크
 링카層 上部에 있는 크링카의 速度는 거의 0
 에 가까우며 $\bar{h}(t)$ 는 發散한다. 결국 冷却器 프
 로세스는 $\bar{h}(t)$ 와 $V_c(t)$ 사이에 正의 feed back
 이 생겨 冷却器 輸送能力의 限界가 된다.

이상은 冷却器 隔室壓力을 예로 들어 類推(an-
 analogy)와, 實在系의 動的 모델을 近似的으로 定
 式化한 것이다. 다른 프로세스도 이 정도로 간
 단히 할 수는 없지만 마찬가지로 類推와 定式
 化가 가능하다. 다음에 原料調合系, 크링카 燒成
 系에 대하여 動的定式化와 靜的定式化로 나누어
 설명하기로 한다.

3.1 原料調合系

前述한 바와 같이 原料調合系는 石灰石, 粘土
 硅石, 鐵滓의 4가지 原料를 調合하여 調合原料
 의 4가지 成分($CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3$)이
 각각 所定の 目標値가 되도록 4가지 原料를 制
 御하는 것이다. 原料調合系는 batch 방식과 連續
 방식에 따라 그 制御方法이 다르겠지만 調合原
 料의 成分이 一定値가 되도록 制御하는 것은 두
 방식에 있어서 모두 같다. 各原料의 4成分比가
 일정한 경우에는 靜的인 모델로서 다음과 같이
 定式化할 수 있다. 4가지 原料에 차례로 1, 2,
 3, 4의 번호를 붙여 $y_j (j=1, 2, 3, 4)$ 를 各原料
 의 供給量이라고 하자. 단 y_j 는 全供給量으로

正規化한 것이다. 또 4 가지 成分에 차례로 1, 2, 3, 4 의 번호를 붙여 $x_i (i=1, 2, 3, 4)$ 를 各成分의 量이라고 하자. P_{ij} 를 j 原料中の i 成分의 含有率이라고 하면 靜的인 物質收支는 다음과 같은 代數的인 連立方程式으로 定式化된다.

$$\left. \begin{aligned} P_{11} y_1 + P_{12} y_2 + P_{13} y_3 + P_{14} y_4 &= x_1 \\ P_{21} y_1 + P_{22} y_2 + P_{23} y_3 + P_{24} y_4 &= x_2 \\ P_{31} y_1 + P_{32} y_2 + P_{33} y_3 + P_{34} y_4 &= x_3 \\ P_{41} y_1 + P_{42} y_2 + P_{43} y_3 + P_{44} y_4 &= x_4 \end{aligned} \right\} \dots(8)$$

여기서 주어진 데이터는 係數 $P_{ij} (i, j = 1, 2, 3, 4)$ 및 目標值 $x_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 이며 $y_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 가 결정되어야 할 量이다. 目標值 x_i 를 어떻게 設定해야 하는가는 크링카 生成에 필요한 原料成分으로부터 결정되는데 이 目標值를 x_{0i} 로 나타내자. P_{ij} 는 사용할 天然의 原料에 따라 다른데 미리 測定할 필요가 있지만 오랜 시간이 걸리므로 制御上 外部攪亂으로 한다. 결국 식(8)은 目標值 $x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{04}$ 가 주어졌을 때 4 가지 原料의 成分含有率이 일정하다는 條件下에서 操作端의 動作基準를 나타낸 것이므로 制御의 基準 레벨을 設定한다. 그런데 실제로는 4 가지 原料의 成分含有率 P_{ij} 은 시간적으로 일정치 않고 시간 t 의 函數이다. 따라서 4 가지 原料의 成分含有率이 $P_{ij}(t)$ 임에도 불구하고 이것을 일정하다고 보아 $y_j(t)$ 를 결정하면 調合된 原料의 成分은 반드시 目標值 x_{0i} 에 일치하지 않고 $x_i(t)$ 가 된다. 즉, 식(8)은 더욱 일반적인 形으로서

$$\left. \begin{aligned} P_{11} y_1(t) + P_{12} y_2(t) + P_{13} y_3(t) + P_{14} y_4(t) &= x_1(t) \\ P_{21} y_1(t) + P_{22} y_2(t) + P_{23} y_3(t) + P_{24} y_4(t) &= x_2(t) \\ P_{31} y_1(t) + P_{32} y_2(t) + P_{33} y_3(t) + P_{34} y_4(t) &= x_3(t) \\ P_{41} y_1(t) + P_{42} y_2(t) + P_{43} y_3(t) + P_{44} y_4(t) &= x_4(t) \end{aligned} \right\} \dots(9)$$

가 된다. Batch 방식의 경우 블렌딩 탱크 또는 슬러리 탱크에서의 混合이 完全混合이라고 하면 그때까지 만들어진 調合原料는 平均值가 되므로 이것을 $\bar{x}_i(t)$ 라고 하면

$$\bar{x}_i(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{j=1}^4 a_{ij} y_j(t) dt \dots(10)$$

이다. 단 a_{ij} 는 原料의 附着水分을 고려한 量으로서 規格化되어 있고 P_{ij} 에 대응하는 量이다.

離散的인 경우 單位時間內에서 $y_j(t)$ 가 일정하다고 하면

$$\bar{x}_i(n) = \frac{1}{n} \sum_{\ell=0}^{n-1} \sum_{j=1}^4 a_{ij} y_j(\ell) \dots(11)$$

이 되어 다음과 같은 動的인 모델이 얻어진다.

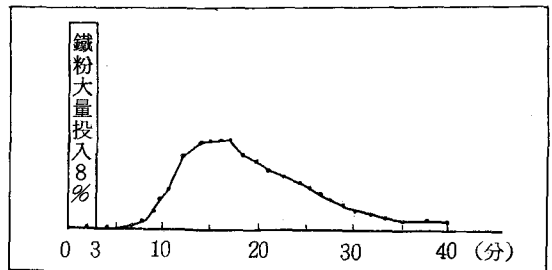
$$\begin{aligned} \bar{x}_i(n) &= \frac{n-1}{n} \bar{x}_i(n-1) \\ &+ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^4 a_{ij} y_j(n-1) \dots(12) \end{aligned}$$

Batch 방식일 때는 處理時間 n 에 있어서 $\bar{x}_i(n)$ 가 目標值 x_{0i} 와 일치하면 좋다. 물론 식(12)의 모델은 batch 방식으로부터 얻어진 것이므로 粉碎 粒의 動特性은 그 時定數가 충분히 작고 試料間隔內에서 충분히 定常狀態를 유지한다고 가정할 수 있다. 반대로 만일 a_{ij} 의 변화가 충분히 느리다고 인정되면 試料 間隔은 粒의 動特性이 무시될 정도로 취하면 좋다.

粒의 動特性은 일반적으로 $\langle i$ 次遲延 + 不感時間 \rangle 系로 近似시킬 수 있다. 動特性도 고려하는 경우 식(11)에 대응하는 식은 試料採取 間隔을 T_s , 時定數로서 時間遲延을 $L \cdot T_s$ 라고 하면

$$\begin{aligned} \bar{x}_i(n) &= \left(1 - \frac{1}{n}\right) \bar{x}_i(n-1) + \frac{1}{n} \cdot \\ &\left[e^{-T_s/L} x_i(n-1) + \frac{1}{c} \sum_{j=1}^4 a_{ij} y_j(n-L) \right] \dots(13) \end{aligned}$$

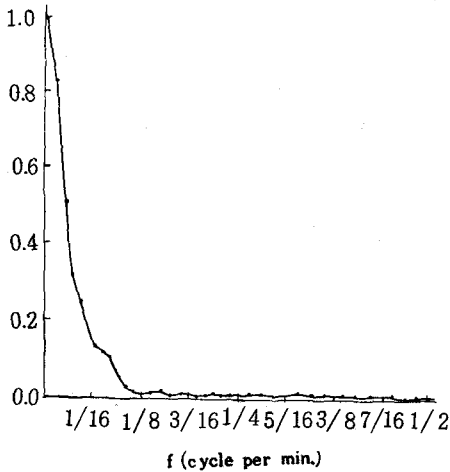
이 된다. <그림-10>은 鐵滓에 의한 粒의 impulse 應答이다. 이에 따라 이 粒은 不感時間 10分, 時定數, 17分의 1次遲延系로서 近似시킬 수 있다. 또 이 粒의 利得(gain) 特性은 <그림-11>과 같다. 따라서 粒은 일종의 低周波濾波器(low pass filter)이므로 高周波의 샘플링



<그림-10> 粉碎粒의 impulse 應答(鐵滓)

은 필요 없다. 그러나 CFW에 의한 入力로부터 調合原料成分分析에 의한 出力에 이르기까지 on-line의으로는 상당한 遲延이 있어 이것을 補償하는 것이 原料調合制御의 포인트이다.

앞에서 調合制御의 計裝에서 특히 주의해야



〈그림-11〉 利得 (Gain) 特性

할 것은 試料採取方法이라고 지적하였다. 原料粉碎調合系에서는 每時 300 톤 가량의 原料를 粉碎하기 때문에 이 전부의 成分을 조사하기는 불가능하고 數%의 少量을 採取하여 이 試料分析值로서 전체를 대표해야 하므로 소위 縮分의 問題가 생긴다. 한편 프로세스가 時間에 따라 변동하기 때문에 試料採取의 時間間隔도 문제가 된다. 즉 일정한 時間間隔 Δt 로 採取된 離散的인 試料系로부터 본래의 連續系列의 變동을 再生시키려면 試料採取의 定理로부터 이 連續系列

에 포함된 最小周期 $1/f_m$ (f_m 은 周波數)에 대하여 試料採取 間隔 Δt 를 $\Delta t \leq 1/2 f_m$ 으로 할 필요가 있다. 이것은 만일 Δt 를 5分으로 할 때 프로세스에 10分 이하의 周期變動이 있어도 檢出되지 않음을 나타낸다. 10分 이하의 變動成分이 檢出되지 않을 뿐이라면 경우에 따라서는 效果的인 필터를 사용하여 이를 解決할 수 있겠지만 試料採取의 定理가 만족되지 못할 때는 그 밖에 더 중요한 현상이 발생하여 $0 \leq f \leq 1/2 \Delta t$ 의 周波數領域內에서 데이터의 power spectrum이 비틀어진다. Power spectrum은 가장 중요한 프로세스 動特性 解析法으로서 이 현상의 발생으로 인해 프로세스의 動特性을 잘못 解釋할 위험성이 있다. 하물며 이와 같은 데이터를 사용하여 制御用的 프로세스 모델을 만들면 그 결과는 自明하다.

試料採取 間隔은 原料調合系에서 뿐만 아니라 크링카 燒成系에서도 위와 같은 의미에서 매우 중요한 것이다.

〔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(1971)
- 3) 赤池·中川: "다이내믹 시스템의 統計的 解析과 制御", 사이エンス社(1972)
- 4) 磯部孝: "相關函數 및 스펙트럼", 東京大出版會(1968)

〈다음 號에 계속〉

舊時代의 그릇된 기풍을 과감하게 清算하고 깨끗하고 서로 믿는 正義로운 새 사회와 부강한 福祉國家를 건설하는 것이 오늘을 사는 우리의 時代的 使命이다.

1980年 9月 1日

全斗煥 大統領 就任辭에서