

## 시멘트 燒成爐의 熱管理와 모델링 및 制御

朴 元 勳

韓國科學技術研究所

## Heat Management, Modeling, and Control of Cement Rotary Kiln

Won-Hoon Park

Korea Institute of Science and Technology  
Seoul 132, Korea

### 1. 熱管理의 重要性

시멘트 공업은 비료 및 도자기 공업과 같이 熱原單位가 높은 산업으로서, 그 에너지 購入費 비중은 燃料費가 13.7%, 電力費 19.6%, 합하여 33.3%라는 높은 값을 보이고 있다<sup>1)</sup>. 그러므로 시멘트 산업에서의 熱管理는 기업 자체의 成敗를 좌우하는 要因이며, 특히 燒成爐의 熱管理가 중요하게 된다. 가까운 日本의 시멘트 熱原單位와 韓國의 것을 비교하면 韓國(A)이 1,252 Kcal/ton, 日本(B)이 1,173 Kcal/ton으로서 (A/B)比는 107%에 상당하다<sup>2)</sup>. 안타까운 일은 최근 日本은 에너지 價를 전후하여 熱管理技術의 확립과 새로운 製造技術의 개발로 熱原單位를 1,100 Kcal/ton 으로 개선했으나<sup>3)</sup>, 우리나라는 增設에 따른 技術消化의 여유가 적어 아직 뚜렷한 성과를 얻지 못하고 있다는 사실이다. 이제 우리나라의 시멘트 總生産能力이 千萬 ton 을 상회하는 時點에서, 시멘트 산업의 熱管理는 나라 전체의 經濟成長에도 直結되는 중요한 뜻을 갖고 있다.

### 2. 熱管理 事例와 對策

日本의 住友 시멘트의 熱管理를 한 例로 들어보면<sup>4)</sup>

① 施設의 改善(single pass를 double pass 로), ② 操業條件의 變更(燒成爐회전수의 증가), ③ 연소 바나의 代替, ④ 冷却機에서 二次空氣의 回收增加 등의 複合的인 對策으로 7%의 熱原單位를 저하시켰다고 한다. 위의 事例에서 볼 수 있는 바와 같이 熱管理對策은 첫째 既存 設備에 대한 現狀把握이 가장 중요하며 整備의 철저로 熱損失을 방지하고 廢熱을 回收하는 것이 必금간다. 두째는 위의 現狀把握 資料를 근거로 하여 필요한 設備을 改善하는 것이며, 세째는 新規設備은 事前에 철저한 熱管理 計劃을 세우는 것이다. 무엇보다도 熱現狀把握이 우선하는데, 이에 兪필한 熱工學 測定이 필요하며 이에 사용되는 機器와 용도별 重要度는 表 1 을 참고하기 바란다.

### 3. 國內 熱管理技術

韓國洋灰工業協會에서 발행하는 「시멘트」誌에 게재된 기사를 중심으로 국내 시멘트 산업에서의 熱管理技術의 進척 및 관심도를 구분하면 다음과 같다.

- ① Rotary Kiln 의 熱收支計算<sup>5)</sup>
- ② Clinker 冷却工程<sup>6)</sup>
- ③ 一次空氣(Primary Air)<sup>7)</sup>
- ④ 燒成燃料<sup>8)</sup>

표 1. 열공학 측정 구분표

(화학경제, 1974. 9)

| 대 별         | 소 별        | 해 당 계 기            | 생 산 관 리 | 보 전 감 시 | 안 전 관 리 | 열 감 정  | 열 분 석  |
|-------------|------------|--------------------|---------|---------|---------|--------|--------|
| 온 도 측 정     |            | 온 도 계              | ⊗       | ⊗       | ⊗       | 0      | 0      |
| 열 측 정       | 열 량<br>열 류 | 칼 로 리 메 타<br>열 류 계 | 0<br>0  | —<br>0  | —<br>⊗  | 0<br>⊗ | 0<br>— |
| 열 물 성 측 정   | 열 전 도 율    | 열 전 도 율 계          | 0       | 0       | —       | ⊗      | —      |
|             | 내 화 내 열 도  |                    | —       | 0       | 0       | 0      | —      |
|             | 표 면 방 사 율  |                    | —       | —       | —       | 0      | —      |
|             | 열 팽 창 율    | 팽 창 계              | —       | —       | 0       | —      | 0      |
|             | 비 열 용 열    | 비 열 측 정 기          | —       | —       | —       | 0      | 0      |
|             | 변태 · 반응 온도 | 시 차 열 분석 계         | —       | —       | —       | —      | ⊗      |
|             | 열 중 량 변 화  | 열 천 평              | —       | —       | —       | —      | ⊗      |
| 온도 · 열 표준점정 |            | 각 종 표 준 기          | 0       | —       | —       | 0      | 0      |

⑤ Suspension Preheater<sup>9)</sup>⑥ 原料配合<sup>10)</sup>

이상에서 곧 알 수 있는 것은 시멘트 공장에서의 熱管理, 더 나아가서는 넓은 의미의 熱管理인 品質管理는 다음의 네 분야로 크게 나뉘어진다는 것이다. (가) 原料의 處理 및 配合, (나) 시멘트 燒成爐에서의 熱傳達, (다) 燒成爐 燃燒系의 流體力學, (라) 冷却機에서의 熱回收.

이중에서 시멘트 燒成爐를 중심으로 하여 熱管理와 品質管理를 동시에 염두에 둔 기초적인 研究動向 및 方法을 소개하여 시멘트 산업의 巨視眼의인 技術의 土着化와 發展에 작은 도움이 되기를 바란다.

## 1. 燒成爐 燃燒系의 模型試驗(Model Test)

爐의 설계는 과학이 아니고 예술이라는 말이 있을 정도로 爐內的 현상, 특히 燃燒現象은 복잡한 것으로 이의 완전한 규명은 아직 요원하다. 燒成爐를 理想化한 軸對稱의 亂流젯트理論(axisymmetric turbulent jet theory)은 이미 오래 전에 정립되어 있으나 실제의 燒成爐에 이 이론을 그대로 적용할 수 없음을 물론이다. 대개는 燒成爐 原型(prototype)과 dynamic similarity를 가진 縮小模型을 제작하여 실험하고 이 실험결과를 근거로 실제 燒成爐內的 현상을 예측하고 있다. 이같은 模型試驗의 결과는 數式모델(mathematical modeling)의 타당성을 점검하는데 사용되고, 다시 이 數式모델은 工程制御(process control)에 活用되는 장점을 갖고 있다.

대개 물(water model) 또는 공기(air model)로 模型試驗을 행하는데 이같은 시험결과와 한 예를 소개하면 燒成爐內的 기체의 재순환은 一次空氣와 二次空氣의 速度化와 비-너 노즐 환경에 대한 爐의 너비의 比에 비례하며 재순환의 위치는 화염의 위치 파악에 매우 중요하다는 것이다<sup>11)</sup>. 參考文獻 (11)에는 燒成爐 縮小模型을 제작하는데 기준이 되는 세가지의 다른 이론 즉 (가) Thring-Newby의 研究, (나) Craya-Curtet의 研究, (다) Becker의 研究도 소개되어 있다.

## 5. 熱傳達의 數式모델

燒成爐內的 熱傳達 및 物質移動의 現象은 복잡한 것으로 이를 정확히 현상 그대로 파악하는 것은 어려운 일이므로 理想的인 단순한 경우의 數式 모델을 開發하여 실제 현상을 가름하는 척도로 사용하고 있다. 생각할 수 있는 두 極端의 境遇를 理想化하면 實際操業은 그 어느 중간에서 이루어지고 있을 것이다. 시멘트 燒成爐에 이 방법을 이용한 것이 Imber와 Paschkis의 研究로서<sup>12)</sup> 爐內的 原料物質의 運動狀態에 따라 “完全混合條件(well-mixed condition)”과 “非混合條件(non-mixed condition)”으로 두 極端을 設定했다. 完全混合의 경우는 爐內 充塡物의 온도가 균일하며 非混合의 경우는 plug flow 이므로 充塡物의 溫度分布와 熱傳導를 고려해야 한다.

간단한 非混合條件의 경우를 수학적으로 풀이하는 한 방법은 다음과 같다. 燒成爐 軸方向(Z方向)의 熱傳導를 무시하고 충전물의 斷面이 그림 1 및 그림 2와

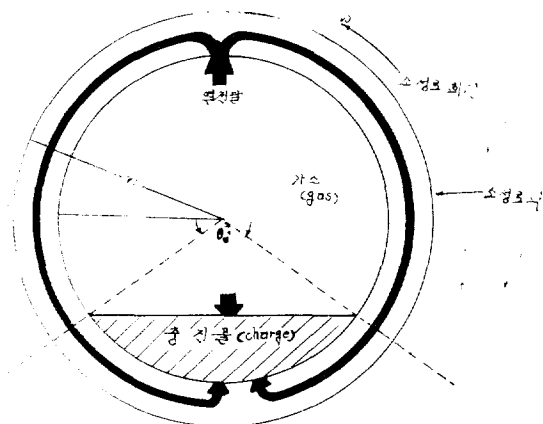


그림 1. 소성로내의 간이 열전달도

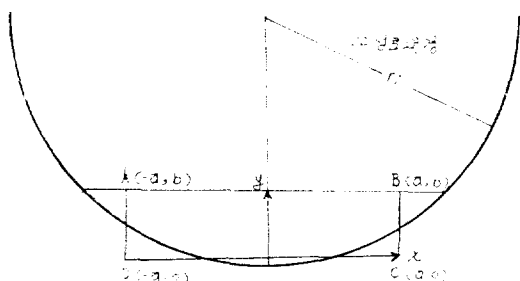


그림 2. 직사각형 시스템

간이 직사각형이라고 한다면, 에너지方程式은 定常狀態에서

$$\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} = \frac{\rho_c C_{p,c} v}{k_c} \frac{\partial T_c}{\partial z}$$

가 되고 境界條件은

$$\begin{aligned} T_c(x, y, 0) &= T_c(0) && \text{初期溫度分布} \\ T_c(a, y, z) &= T_c(-a, y, z) = T_c(x, 0, z) = T_{wc}(z) \\ T_c(x, b, z) &= T_g(z) \end{aligned}$$

이다. 위에서  $T_c$ 는 충전물의 온도,  $T_{wc}(z)$ 는 충전물과 접하고 있는 소성로벽의 온도를  $\theta_0$ 에 걸쳐서 平均한 값,  $T_g(z)$ 는 충전물과 가스와의 접촉면 온도,  $\rho_c C_{p,c}$ ,  $k_c$ 는 충전물의 밀도, 비열, 열전도도,  $v$ 는 충전물이 소성로를 흘러내리는 속도이다. 위 문제를  $T$ 를  $Z$ 의 함수로 수치해를 구하면 충전물의 요구하는 출구온도에 대한 燒成爐의 길이를 알 수 있다.

최근 Pearce<sup>13)</sup>는 좀 더 實際現象에 가깝게 爐內의 氣體側 熱傳達와 固體側 熱傳達로 구분했다. 氣體側은

輻射·對流·傳導에 의하며 이에 관한 이론은 완성되어 있으나, 固體側은 固體粒子的 燒成爐 廻轉에 의한 混合效果<sup>14)</sup>와 관련하여 앞으로 더 많은 연구가 필요하다.

## 6. Minicomputer에 의한 工程制御

거듭 강조하지만 高度의 熱管理는 工程制御를 거쳐야 하고 工程制御는 品質管理에는 必要不可缺하다. 電算機에 의한 自動化가 現代産業의 특징으로 되어가고, 국내 시멘트 산업도 容量으로 보아 이의 導入의 經濟性이 있으므로 값이 싼 minicomputer에 의한 工程制御를 소개한다. 종래의 일반적인 시멘트 공업의 工程制御는 文獻(15)와 같은 자료에 잘 요약되어 있다.

電算機 利用은 ① 資料蒐集(data logging), ② operator guidance, ③ dynamic control의 순서로 진척되며 두번째 단계부터는 數式모델의 開發이 필요하다. 시멘트 製造 工程에서는 原料의 混合調製, 燒成爐 制御, 冷却機 制御가 가장 電算機 應用이 가능한 분야이다. 電算機에 의한 工程制御의 效果를 美國의 예로 보면 다음 表 2와 같다.

表 2. Computer Control의 應用例

(Pit &amp; Quarry지에서)

| 會社名    | Dundee Cement | North Western States Portland Cement Co. | Huron Cement Co. |
|--------|---------------|--|------------------|
| 設置日字   | 1967. 11      | 1966. 6                                  | 1967. 10         |
| 應用된 工程 | 濕式 燒成爐        | 燒成爐 및 冷却機                                | 燒成爐              |
| 燃料費 節減 | 4%            | 5%                                       | not available    |
| 生産量 增加 | 5%            | 10%                                      | 6%               |
| 稼動率 增加 | 3.5%          | not available                            | not available    |

앞으로 電算機 應用이 실시될 경우를 고려하여 電算機 制御에 필요한 燒成爐의 操業資料를 참고로 열거하면 다음과 같다<sup>16)</sup>.

- ① main burner fuel rate set point
- ② pilot burner fuel rate set point
- ③ kiln speed set point
- ④ ratio feeder to kiln speed set point
- ⑤ load temperature
- ⑥ load temperature desired set point
- ⑦ lining temperature
- ⑧ cooler air temperature
- ⑨ desired cooler air temperature set point
- ⑩ cooler undergrate pressure

- ⑪ cooler speed set point
- ⑫ excess oxygen
- ⑬ excess oxygen set point
- ⑭ exit gas temperature
- ⑮ main ID damper position set point
- ⑯ hood draft
- ⑰ kiln drive armature current
- ⑱ miscellaneous amperes, temperatures, and pressures for alarm purposes

## 7. 맺 는 말

이 글은 지난 5월 30일 韓國洋灰工業協會 主管下에 現代시멘트株式會社 丹陽工場에서 있던 “第1回 시멘트 工業의 熱管理 세미나”에서 발표된 것을 기초로 하였다.

시멘트 工業에의 computer control 응용자료들 주신 韓國科學技術研究所 具志會博士께 감사를 드린다.

## 參考文獻

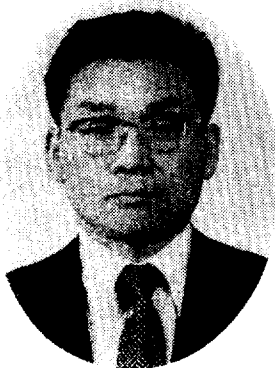
- 1) 熱管理要覽, 商工部(1974).
- 2) 長期에너지綜合對策, 韓國産業開發研究所(1974).
- 3) 熱管理會報 第9號(1975. 6. 1), 韓國熱管理協會.
- 4) 熱管理事例集, 韓國熱管理協會(1975).
- 5) 朴炳哲, 梁在均, 시멘트(1971. 2); 시멘트(1970. 8).
- 6) 金勇瑞, 시멘트(1971. 8).
- 7) 梁在均, 시멘트(1972. 3).
- 8) 朴魯鉉, 시멘트(1972. 8).
- 9) 金勇瑞譯, 시멘트(1972. 9).
- 10) 金元鍾, 시멘트(1972. 12).
- 11) F. D. Moles, D. Watson, and P. B. Lain, *J. Inst. Fuel* (1973), 353—362.
- 12) M. Imber and V. Paschkis, *Int. J. Heat Mass Transfer* 5 (1962), 623—638.
- 13) K. W. Pearce, *J. Inst. Fuel* (1973), 363—371.
- 14) 森山 昭, 菅 哲男, 鉄と鋼(1974. 9), 1283—1288.
- 15) K. E. Peray and J. J. Waddell, “The Rotary Cement Kiln,” Chemical Publishing Co., Inc., New York, 1972.
- 16) J. R. Romig and W. R. Morton, *IEEE Transactions IECI-13* (1966), 2—9.

## 受 賞 會 員 프 로 필

### 李 源 國 (75年度本會學術賞)

현 주 소 : 서울 동대문구 회기동 4-51

생년월일 : 1929년 2월 28일



1955년 서울대학교 공과대학 화학공학과 졸업한후 1962년 육군 사관학교 조교수, 1968년 미국 Idaho 대학교 대학원 석사과정 및 실험조교(공학석사), 1971년 미국 Missouri 대학교 대학원 박사과정 및 실험조교(공학박사, 1972년 미국 Missouri 대학교 부설 공업연구소 연구관, 1975년 부터 현재 한국과학원 부교수로 현직에 있으며 많은 연구 업적을 남기고 있다. 주요 연구 논문으로는 "Diffusion Kinetics in Combustion of Anthracite Coal" ("화학공학", 4 (1966), 129), "Mixing Behavior of Solid Particles in Fluidized Beds" ("화학공학", 13 (1975, 111) 등 여러편이 발표된바 있으며 특히 "화학공학" 제13권에 게재된 두편의 보물은 그 우수성이 널리 인정되어 본 학회 추계 총회에서 學術賞을 수상하였다.

### 朴 榮 桓 (75年度本會技術賞)

현 주 소 : 충북 청원군 부용면 부강리 505-1

생년월일 : 1923년 3월 7일



1949년 서울대학교공과대학 전문부 화공과 졸업한후 1958년 대전주정공업주식회사 생산부장, 1966년 충주비료 주식회사 생산부장, 1972년 대한플라스틱공업주식회사 상무이사겸 공장장, 1973년부터 현재까지 한국플라스틱 공업주식회사 부강공장 공장장으로 현직에 있으며 국내 P.V.C 공장에 일본 CHISSON의 기술을 도입하여 국내 부존원료만을 써서 P.V.C를 생산하는 국내유일 공장이 되었다. 공정사항중 건식법에 의한 아세틸렌가스 발생장치 설계 및 Slurry 이용에 관한 기술 개선으로 한국의화학공업기술발전에 공헌한 바있으므로 본학회 추계총회에서 기술상을 수상하였다.

### 文 麟 一 (75年度本會技術賞)

현 주 소 : 서울 영등포구 화곡동 29-101

생년월일 : 1932년 3월 7일



1955년 3월 서울대학교 공과대학 화학공학과 졸업한후 1963년 1월 기술요원으로 미국에 파견 약 10개월 근무하였으며, 1964년 1월 울산정유공장 증유과장, 1969년 5월 대한석유공사 기술부장, 1971년 2월 한국중합기술 개발공사이사겸임 1973년 5월부터 현재 대한 석유공사 기술본부 부장으로 현직에 있으며 제 1차 경제개발 5개년 계획의 핵심사업으로서 정유공장 창설이 추진되기 이전에 오늘의 석유산업수준으로 성장되기까지 끊임없는 시설의 확장 및 새로운 공정개발을 하였으며 그 공적사항으로는 1969년에 대한석유공사에 아스팔트제조시설을 신설하고 1971년 제 3 상압증류장치 신설사업 수행시 미국 UOP 사 기본설계증 폐열회수공정을 개량하여 열량소비를 대폭절감하였으며 1971년과 1972년에 걸쳐 Naphtha Cracking Center 지원용 Utility 공장을 계획 설계하여 불포화가스의 연소 공정을 개발하였다. 이와같이 한국의 화학공업기술발전에 공헌한 바 있으므로 본학회 추계총회에서 기술상을 수상하였다.