

RSP 프로세스의 研究開發

福 田 良 治

金 昌 峰 譯

<韓國科學技術情報센터>

◆.....譯者註：本稿는 最近에 開發되어 널리 普及되고 있는 NSP.....◆
◆.....키른중 日本의 小野田시멘트社가 開發한 RSP 키른의 研究開發.....◆
◆.....狀況을 報告한 것으로 國內技術의 發展뿐만 아니라 키른의 新.....◆
◆.....設時에도 도움이 될 것 같아 掲載한다.....◆

I. 緒 言

시멘트 製造技術에 있어서 改良燒成法은 이미 十數年의 實績을 가지고 있거니와 高能率의 키른 運轉을 連續적으로 행하게 하고 동시에 우수한 品質의 시멘트를 대량으로 안정되게 供給하고 있다. 이 方式은 原料인 石灰石을 별도의 工程에 의해 生石灰로 한 다음 生石灰와 粘土로 구성된 原料粉末을 燒成시켜 比燒成能力을 乾式 보일러附 키른의 4~5 倍로 增加시키는 方式이다.

RSP(Reinforced Suspension Preheater)프로세스의 研究開發은 SP 키른의 大型化에 따라 發生하는 煉瓦閉塞의 增加 등의 問題를 해결하고 SP 프로세스의 效率化를 도모하기 위하여 改良燒成法의 우수한 特性을 살리고 그 위에 4,000t/d의 大型 SP 키른의 運轉實績 및 經驗을 토대로 하여 開發한 것이므로 比燒成能力의 增大와 良好한 制御 및 安定運轉을 目標로 하고 있다.

數回の 스케일-업 테스트後에 試驗키른을 設置하여 그 機能 및 스케일-업·데이터를 확인하는 最終의 實驗을 행하여 만족할 만한 結果를 얻었다. 또한 RSP 프로세스의 研究開發의 經緯와 그 內容 및 實績 등은 다음과 같다.

II. RSC 프로세스의 概要

크링카 燒成熱量의 대부분을 消費하는 原料의 煨燒工程을 preheater 內에서 거의 終了시키면 既存의 키른에서도 크링카 燒出量을 飛躍적으로 增大시킬 수 있다. NSP(New Suspension Preheater) 프로세스는 이 技術과 SP 키른의 特徵을 연결시켜 原料가 浮遊懸濁된 狀態에서 效率적으로 煨燒工程을 終了시키기 위해 考案된 것으로 preheater 部에서 燃料의 燃燒과 原料의 煨燒를 동시에 행하는 方式이다.

즉 從來의 SP 키른에서는 preheater 出口에 있어서의 原料의 眞脫炭率은 30% 以下이다. 이 脫炭酸率을 85~95%로 높이기 위해서는 操業上的 安定性을 고려하여 다음 세 方式이 가장 적합하다.

① 外部燃燒方式.....從來의 suspension preheater와는 별도로 外部에 燃燒爐를 설치하여 이 燃燒가스를 preheater 內에 導入하는 方式이다.

② 內部燃燒方式.....suspension preheater 內에서 燃燒시켜 原料에 의한 效果的, 瞬間的인 溫度降下를 示圖하는 方式이다.

③ 兩者의 折衷方式.....燃燒爐에서 熱量發生과 原料煨燒를 동시에 행하여 preheater 內로 導

入하는 方式이다.

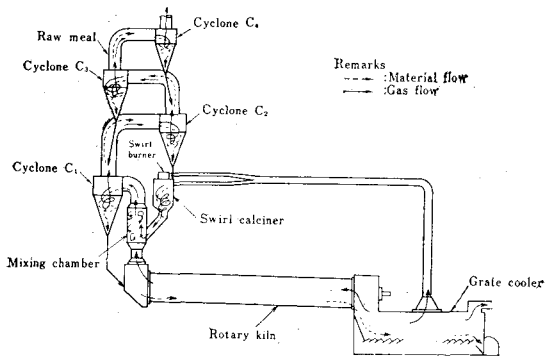
RSP 프로세스에 있어서는 上記 方式中 ③의 方式을 採用한 것이다. 이것은 preheater 部에 설치한 swirl burner 및 swirl calciner 에 의한 旋回式 煨燒爐이다. RSP 프로세스의 概要는 다음 <그림-1>과 같다.

1) Swirl burner (SB)

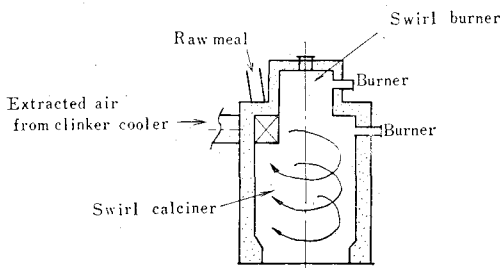
渦卷燃燒器는 高負荷燃燒器로서 burner maker 등에서 널리 사용되고 있다. swirl burner 는 swirl calciner 에 있어서 高濃度粉體中에서의 燃料의 燃燒를 원활하게 하는 역할을 한다(<그림-2> 參照).

2) Swirl calciner (SC)

高濃度の 原料中에서 燃料를 速히 燃燒시켜 瞬間的인 多量의 發生熱量에 의해 原料를 效果的으로 煨燒시키기 위하여 原料粉體를 燃燒用 空氣에 浮遊懸濁시켜 爐內에서 旋回流로서 爐壁部에 高濃度原料移動層을 형성시키고 동시에 燃料



<그림-1> RSP 플랜트의 概略圖



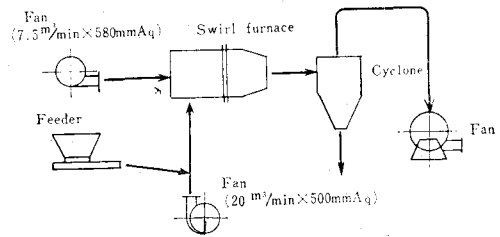
<그림-2> Swirl furnace(渦卷室)

의 效果的인 燃燒를 돕는 역할을 한다(<그림-2> 參照).

3) 混合室(Mixing Chamber)

키른으로부터 高溫 排氣ガス과 swirl calciner로부터의 原料를 浮遊懸濁시킨 가스가 合流, 混合攪拌되어 效果的인 熱交換이 行하여진다.

이상과 같이 RSP 프로세스의 開發에서는 먼저 이 SB/SC 爐에 있어서의 燃燒의 安定性, 즉 效率的인 傳熱에 重點을 두었고 다음에 混合室을 포함한 全體的인 lay-out 과 적합한 運轉 및 制御方式의 확립에 努力을 경주하여 프로세스 전체의 高效率化와 安定화를 도모하였다. 다음에 研究開發의 經緯를 차례로 記載한다.



<그림-3> Cold model 實驗裝置의 概略圖

III. RSP 프로세스 研究開發의 經緯

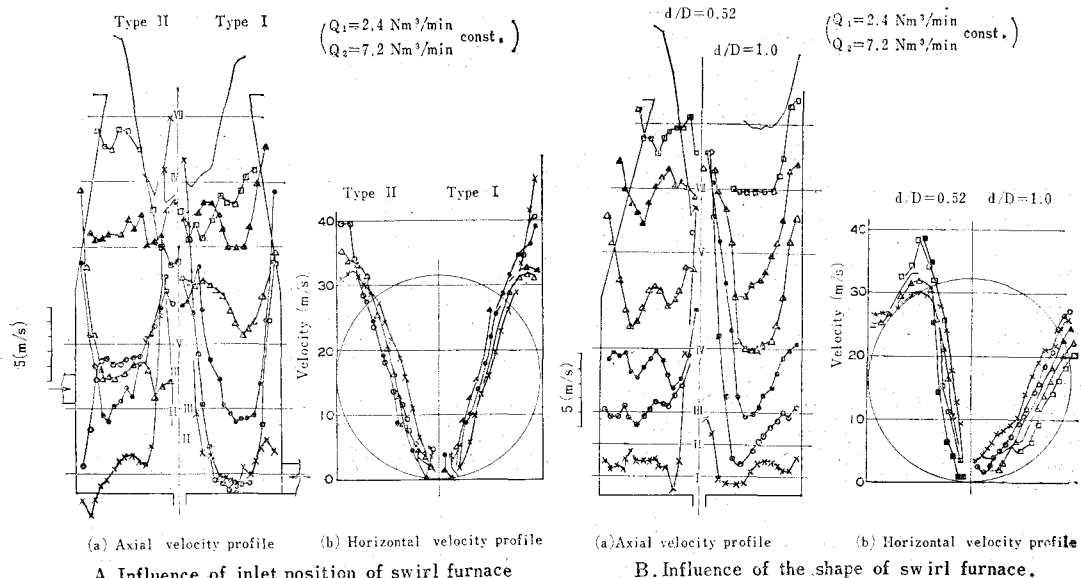
1. Cold model 實驗

渦卷室內에 있어서의 速度分布, 原料粉體의 流動상태를 살피기 위하여 <그림-3>과 같은 裝置로서 cold model 實驗을 行하였다. 이 모델實驗에서 얻어진 結果는 다음과 같다.

① 渦卷室의 流體力學的特性, 특히 粉體(시멘트 原料)의 流動상태에 影響을 주는 要因은 渦卷室本體의 形狀, 渦卷室의 入口形狀, 入口位置 혹은 入口風速, 傾斜角度, 粉體濃度 등이다. 즉

i) 渦卷室本體의 形狀에 대해서는 渦卷室直徑 D와 出口直徑 d의 比, 즉 $d/D=1.0$ 에서 0.52로 出口直徑을 작게 하는 것이 粉體의 流動을 좋게 한다. 단, 渦卷室內에 있어서의 壓力損失은 增大한다.

ii) 渦卷室 入口形狀에 대해서는 風量이 일정한 경우 높이 方向보다 幅方向을 變化시키는 것이 粉體의 流動을 좋게 한다. 또 渦卷室에 있



<그림-4> 渦卷室 入口形狀 및 入口位置의 영향에 따르는 軸方向 및 半徑方向 速度 프로파일

에서의 壓力損失도 작다.

iii) 渦卷室 入門位置에 대해서는 I型 보다 II型이 渦卷室에 있어서 壓力損이 적어 바람직하다. 그러나 粉體의 流動을 고려하는 경우에는 I型이 바람직하다.

② 粉體의 渦卷室 通過時間, hold-up 量은 渦卷室 本體의 形狀, 渦卷室 入口位置 入口風速, 粉體濃度에 따라 다르다. 實驗結果에서는 粉體物性에 의한 영향, 靜電氣에 의한 粉體의 壁面에의 附着現象, 粉體의 堆積現象, 不均一混合에 의한 영향 등에 의해 상당히 오차가 커서 計算值와는 差異가 있었다.

③ 渦卷室에 있어서의 壓力損失은 渦卷室 本

<表-1> 渦卷室 入口形狀 및 入口位置에 따른 壓力損失(Q=constant)

Inlet position of swirl furnace. (d/D=0.75)	Inlet shapes of swirl furnace.						
	H-2	H-3	H-6	H-21	B-4	B-8	(H, B)
Type I	179 (148) 267 (236)	192 (200) 288 (276)	323 (350) 428 (432)	62 (52) 149 (128)	189 (190) 277 (268)	318 (345) 399 (415)	
Type II	169 (139) 262 (237)			59 (50) 144 (135)	170 (171) 271 (257)		

註: 1) 위 數字는 渦卷室의 壓力強下
 2) 아래 數字는 試驗裝置의 全體壓力強下
 3) 괄호안의 數字는 粉塵을 包含하는 경우의 값]

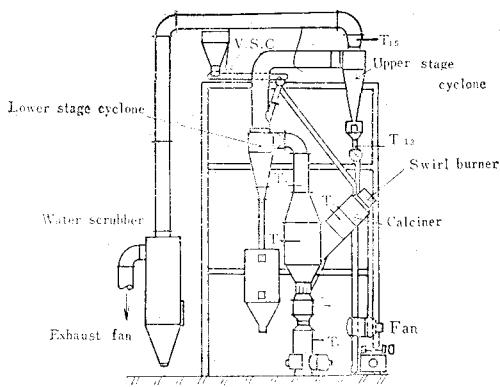
體의 形狀, 渦卷室 入口形狀, 位置 혹은 入口風速, 粉體濃度 등에 따라 뚜렷이 다르다. 특히 粉體에 의한 영향은 入口形狀에 따라서는 從來 사이크론集塵器 등에서 보고된 결과와는 반대로 純空氣의 경우보다 含塵空氣의 경우가 渦卷室에 있어서의 壓力損失을 크게 한다(<表-1> 參照).

④ 渦卷室內 速度分布 測定結果는 다음과 같다

- i) 1次空氣의 영향은 <그림-4>의 (a) (b)에 보인 바와 같이 圓周方向 速度分布에서는 그다지 뚜렷하지 않으나 軸方向 速度分布에서는 뚜렷하다. 특히 中心部에 있어서는 보다 뚜렷하다.
- ii) 渦卷室 入口風速의 영향은 軸方向, 半徑方向, 速度分布 모두에 뚜렷하다.
- iii) 渦卷室 本體의 形狀(d/D)에 의한 영향은 軸方向, 半徑方向, 速度分布 모두 <그림-4(b)>에 보인 바와 같이 뚜렷이 다르다.
- iv) 渦卷室 入口位置에 의한 영향은 <그림-4(a)>에 보인 바와 같이 軸方向 速度分布에서는 상당한 差異가 확인되었다.

2. 燒成實驗(I)—Midget-Plant 에 의한 實驗

모델實驗結果를 바탕으로 設計된 燃燒爐를 사용하여 燒成實驗을 행하였다. <그림-5>가 이 燒



<그림-5> RSP midget-plant 의 概略圖

成實驗에 사용한 裝置의 概略圖를 나타낸다.

midget-plant 에 의한 實驗結果의 要點은 다음과 같다.

① 原料의 加熱脫炭酸은 순간적으로 일어남이 판명되었고 加熱條件을 변화시킴으로서 脫炭酸도 사이크론 出口에 있어서 50~90%로 변화됨을 알았다.

② 爐壁에서의 코우팅附着은 발견되지 않았다.

③ 原料分解도와 溫度는 良好한 相關關係를 나타내었다(<그림-9> 參照).

④ swirl calciner 内部에 있어서의 燃燒는 粉體濃度가 높아도 별로 큰 影響을 받지 않았다.

⑤ 高溫狀態에서의 脫炭酸原料의 物性, 특히 流動特性, 安息角 등에 대한 知識을 얻었다.

이상 本 燒成實驗에 의해 얻어진 結果로부터 다음 結論을 얻었다.

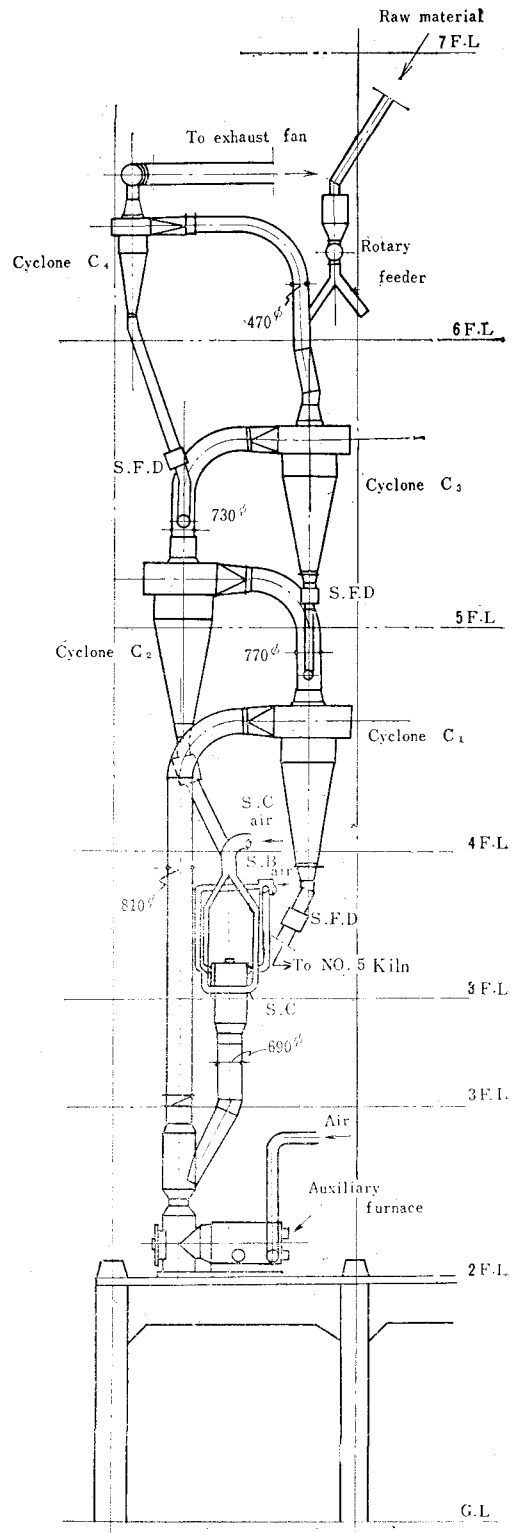
① preheater 部에 補助燃燒裝置를 붙임으로서 原料의 煨燒가 가능하다.

② 裝置의으로는 SB/SC 爐가 垂直構造로 되어 있는 것이 運轉에 용이하고 lay-out 이 양호하다.

③ SB/SC 爐를 組合하고, SB 爐에 pilot 的 役割을 맡기는 것이 系全體를 안정시킨다.

3. 燒成實驗(II)—mini-plant 에 의한 實驗

上記 結論에서 스케일 업하여 連續運轉을 행할 경우의 問題點 등을 檢討하기 위하여 5t(原料)/h 의 mini-plant 를 建設하였다. 즉 既設 SP 키른(약 4,000t/d 의 能力을 가짐) 架構內에 本 實驗裝置를 建設하였다. 이 SP 키른系에서 原料



<그림-6> RSP mini-plant 의 概略圖

를 供給, 煨燒된 原料를 다시 이 키른系에 送入하는 工程으로서 連續運轉하면서 實驗을 행하였다. <그림-6>은 實驗裝置의 全體圖를 나타낸 것이다. mini-plant 에 의해 얻은 結論은 다음과 같으며 本 實驗에 의해 RSP 프로세스의 性能에 대한 명확한 見解가 얻어진다.

① 原料分解度 特性

I 段 사이크론出口 原料溫度一分解度 特性을 <그림-9>에 나타낸다. 本 實驗에서 窯入原料分解度는 80~90%로 連續으로 얻어졌다. 또 窯入原料 溫度는 稼動中の SP 키른보다 약간 높다는 結果를 얻었다.

② SB/SC 爐에 있어서의 燃燒

燃料의 燃燒와 原料의 煨燒를 동시에 행하는 SB/SC 爐에서의 熱負荷는 $2.5 \sim 3.0 \times 10^6$ Kcal/ $m^3 \cdot h$ 로서 運轉에 問題를 일으키지 않으며 CO

發生量도 적다는 것이 判明되었다. 또 SC 爐內에서의 原料 코우팅附着 등의 現象도 확인되지 않았다.

③ RSP 키른 燃料分配

키른系와 preheater 系의 燃料分配는 RSP 프로세스에 있어서는 가장 중요한 문제이다. 本 實驗에서는 <그림-7>에 보인 바와 같이 RSP 키른 =55/45~65/35의 範圍가 最適範圍라는 結果를 얻었다.

④ 本 實驗에 의해 RSP 플랜트의 스케일-업에 관한 여러가지 데이터가 얻어졌고 또 preheater 部에 있어서 粉粒體의 傳熱에 관한 귀중한 데이터가 얻어졌다.

IV. RSP 키른에 의한 實驗

上述한 midget-plant 및 mini-plant 實驗에서 얻어진 데이터, know-how 및 當改良燒成法의 實績을 기초로 키른內에서의 傳熱, 燒成倍率 및 不確定한 諸問題 등을 高찰하는 동시에 RSP 프로세스로서의 技術確立을 目的으로 半實用的인 RSP 設備(設計能力 200t/d)를 建設하였다.

1. cold model 實驗

本 플랜트의 設計段階에서 다음과 같은 諸問題點을 究明하기 위해 本 플랜트의 1/10 規模의, 幾何學的으로 相似形인 모델(透明 鹽化비닐製)을 製作하여 實驗을 행하였다.

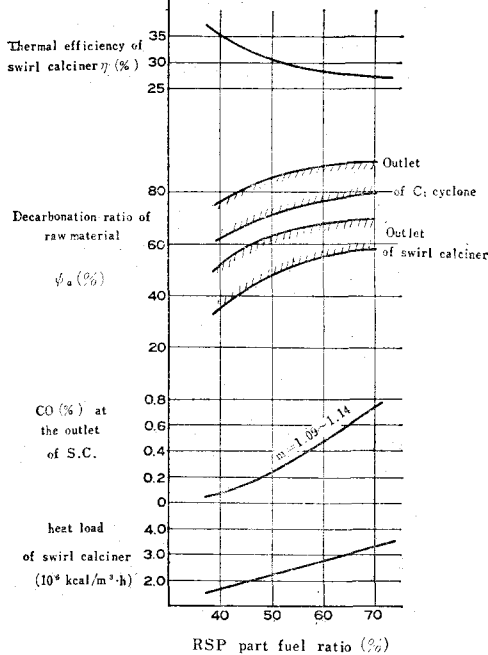
① 플랜트全體, 특히 preheater 架構內 機器의 配置決定

② 窯尻煙道部의 形狀, 조임부의 形狀 등의 決定

③ swirl burner, swirl calciner 部の 파이프 決定

④ 窯尻煙道部, 조임부, swirl burner, swirl calciner 및 SB/SC 爐로부터의 燃燒 排氣가스와 키른 排氣가스가 合流混合하는 混合室(mixing chamber)에 있어서의 粉粒體의 流動特性, 舉動의 調査.

이를 위하여 窯尻煙道部, 混合室에 대해서는 形狀이 다른 모델을 여러가지로 作成하였다. 이 모델實驗을 행할 경우 相似條件이 問題가 된다.



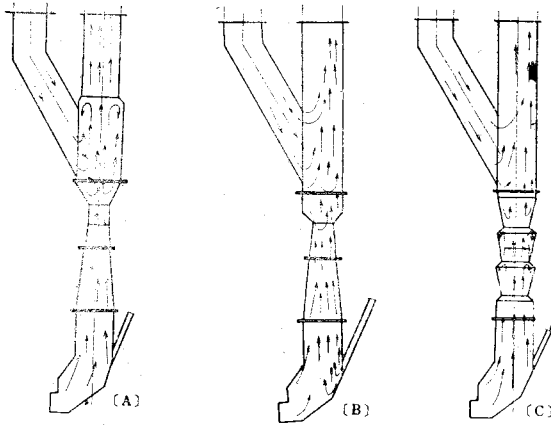
<그림-7> RSP 키른 燃料分配의 영향

註: $\eta(\%) = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_3} \times 100$

- Q₁: 原料를 加熱시키는 데 要하는 熱量
- Q₂: 原料를 脫炭酸시키는 데 要하는 熱量
- Q₃: Swirl calciner 에 供給된 熱量

$$\phi_a = \frac{\frac{1}{1-i_1} - \frac{1}{1-i_2}}{\frac{1}{1-i_1}} \times 100(\%)$$

- i₁: 供給原料의 Ignition loss
- i₂: 試料物質의 Ignition loss



〈그림-8〉 窯灰煙道부와 立上管의 形狀에
따르는 flow pattern (cold model 實驗).

相似條件은 다음과 같이 決定된다.

- i) 形狀……幾何學的相似
- ii) 流體 흐름의 相似條件으로서
定量的把握 Re 數=const

$$Fr \text{ 數} = V^2/g = \text{const}$$

또 tracer 로서 여러가지 粉體를 選定한 結果 鹽化비닐粉末(平均粒徑: 100μ , 比重: 1.5)을 채택하였다.

〈그림-8〉에 있어서 [A]는 混合室 上下에 分散部, 縮流部를 설치하여 混合室에 있어서의 混合效果를 충분히 살린 것이다. [B], [C]는 混合室 出口에 縮流部가 없어 흐름에 偏流가 생기기 쉽다. 또 [B]는 조임部에 있어서의 平行部 거리가 짧기 때문에 일부의 粉體가 下部로 落下하는 現象이 일어난다. 이와같은 cold model 에 의한 諸調査結果로부터 最終的인 設計를 행하였다.

2. 主要設備

設備로서는 各種의 테스트를 행할 것을 전제로 하여 이에 對應할 餘裕度를 갖도록 하였다. 로타리 키른의 크기는 W. Anselm¹⁾의 次元解析에 의한 檢討結果에 小型小徑의 키른에 있어서의 特長을 고려하여 $1.8m^{\phi} \times 28m^l$, 勾配 3.5%로 하였다. 冷却機 및 固冷却팬은 遊休品을 轉用하였으므로 能力으로서는 적합하지 않았지만 알리스型 AQC 3ft \times 32ft(길이를 짧게 改造하여 사용), 同冷却팬 $1,000m^3/min \times 150mmAg.$ at $30^{\circ}C$ 를

사용하였다. 또, preheater 排氣가스 팬 $700m^3/min \times 900mmAg.$ at $350^{\circ}C$ 는 最大產量 달성을 고려하여 風量風壓에 여유를 두었다.

사이크론 豫熱機 및 SB/SC 燃燒爐는 $6.5m \times 8.0m \times 29.4mH$ 의 架構內에 有機的으로 配置하였다.

또 燃燒裝置의 키른 버너로서는 空氣噴霧式 버너를 채택하고 SB/SC 用 버너로서는 앞의 實驗에서 사용되어 왔던 油壓噴霧노즐을 사용하였다.

3. RSP 키른의 運轉實績

運轉 개시이래 豫想되는 여러가지 要因을 變化시켜 性能 및 스케일-업의 檢討에 필요하고도 충분한 데이터를 얻고 동시에 그 解析을 행하였다. 그 結果 프로세스로서의 計劃에 알맞은 性能을 달성할 수 있었다. 使用熱量은 小用量 設備이기 때문에 放散熱量이 많았다. 또한 設備能力 이상으로 큰 冷却機를 사용하였기 때문에 冷却機效率이 나쁘다. 이 때문에 使用熱量은 絶對值로서는 높은 값을 나타내지만 스케일-업에 의 해 보통의 SP 키른과 같은 정도 혹은 이보다는 약간 낮은 값을 나타낸다고 예상된다.

또 키른內 容積當 燒出量도 NCB(改良燒成法) 과 같은 정도 혹은 그 이상의 좋은 결과를 얻었

〈表-2〉 RSP 플랜트의 操業 데이터

		設計值	*註
供給物質量	(t/h)	15	16.2
生産量	(t/h)	最大 9.3 正常 8.0	10.1
키른內積當 比生産量(kg/m ³ h)		131	142
키른 라이닝 內積當 比生産量(kg/m ³ h)		188	204
크림카의品質	겔보기 比重 (kg/l)	—	5次 15次 1.19 1.21
	CaO의 比率 (%)	—	0.3 0.6
	壓縮強度 (kg/cm ²)	3日 7日 28日	— 152 138 230 221 429 415

* 30次 操業 데이터의 平均値

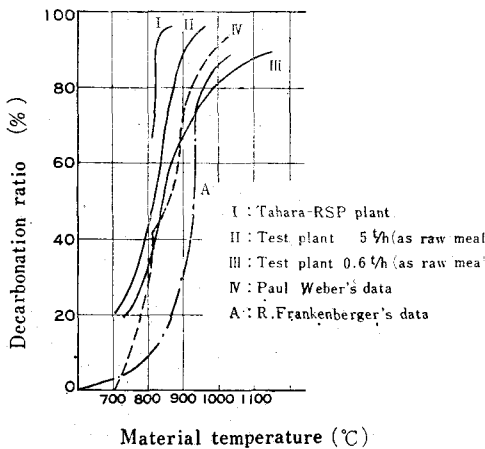
다. <表-2>에 RSP 實驗키른에 있어서 代表的인 實績值를 나타낸다.

4. RSP 키른의 運轉特性

1) 原料分解度 特性

<그림-9> (A)線은 原料의 加熱速度를 5.8°C/min로 하였을 때의(이것은 乾式 磨·키른에 相當)分解曲線이다. Frankenberger²²에 의하면 suspension preheater 에서는 加熱速度가 1,000°C/min 以上 까지도 되지만 原料溫度 800°C에 對應하는 分解度는 10~14% 정도이다. suspension preheater 에서는 傳熱速度가 極히 빠르고 또한 키른 排氣가스의 엔탈피가 變動함에도 불구하고 키른 送入原料의 溫度는 800~820°C로서 거의 變化가 없다. 이것은 800°C 근방에서는 石灰石의 分解反應이 급격히 進行되기 때문이다. 또 P. Weber³²는 3.2m²×40m², 生産量 17.3t/h의 suspension preheater 키른에 관하여 상세한 調査를 행하여 分解度—溫度特性을 얻었다. 이것은 <그림-9> (IV)線으로 나타낸다.

RSP의 研究開發에 있어서도 이러한 關係를 상세히 把握, 檢討하였는데(<그림-9> (I)(II)(III))線裝置의 스케일—兪에 따라서 swirl calciner가 있는 部位에서의 傳熱이 改善되었고 傳熱效率이 향상되었음을 알 수 있다. <그림-9>의 曲線 I에 보인 바와같이 本 RSP 키른에 있어서의 原料分解度—溫度特性은 현저히 改善되어



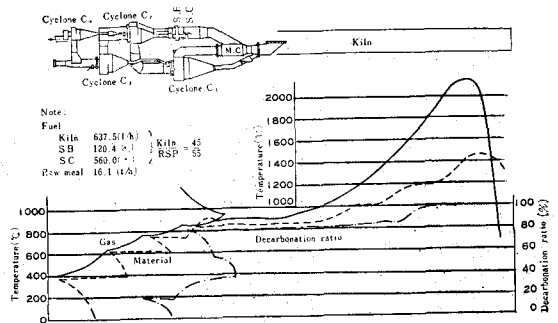
<그림-9> 原料溫度와 分解度와의 관계

原料溫度 820°C 근방에서의 分解度는 85~90%이다.

原料溫度와 分解度の 關係는 窯入原料의 分解度上昇에 따른 效果를 바탕으로 하는 새로운 燒成方式으로의 燃燒 및 傳熱特性을 判定하는 尺度가 된다.

2) 溫度—分解度 프로파일

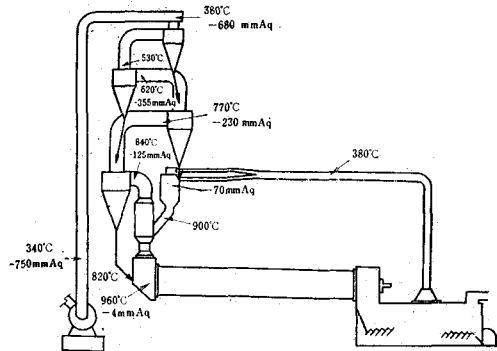
preheater 部 및 키른에 있어서의 溫度, 分解度 프로파일의 예를 <그림-10>에 보인다. 단, 窯內原料의 溫度는 현미경에 의해 관찰된 推定值이다.



<그림-10> 키른 및 preheater 에 있어서 原料 및 가스溫度와 分解度の 프로파일

3) 各部의 溫度와 壓力

RSP 프로세스에 있어서 代表的인 壓力, 溫度를 <그림-11>에 보인다. 키른系와 preheater 系의 通風바란스를 유지하기 위해 窯灰가 있는 部位를 조인다. 이 때문에 窯灰 draft는 -4mm Ag로서 종래의 SP 키른의 값과는 크게 다르다. 그래서 키른 通過量의 制御는 종래의 SP 키른에



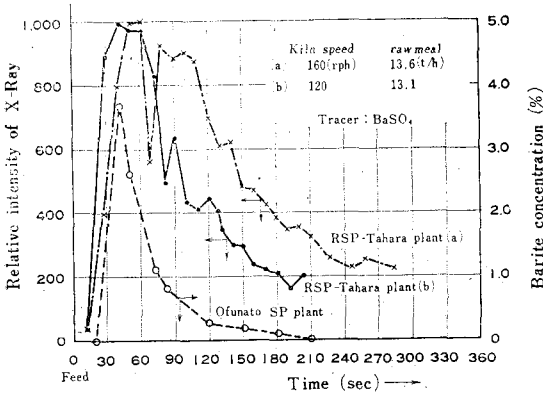
<그림-11> RSP 플랜트의 操業 데이터

서와 같이 窯尻 draft로 행하는 것은 不合理하고 RSP 프로세스에 있어서는 窯尻에서의 O₂%를 檢出하여 運轉操作을 행하여야 한다.

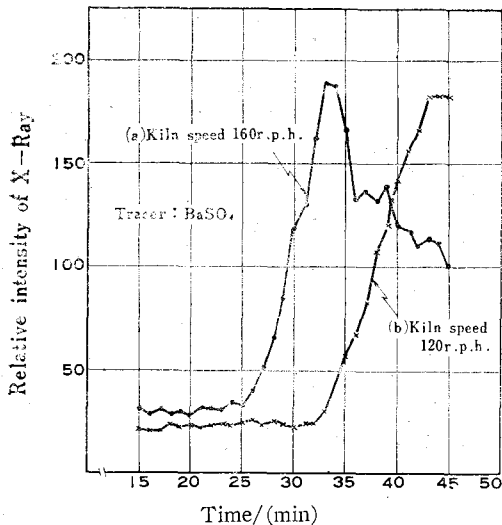
4) RSP의 滯留時間

重晶石粉末을 tracer로 하여 tracer投入과 同時に 1段 사이클론 原料 chute部에서 10秒間隔으로 試料를 採取하여 螢光X線으로 試料中の tracer濃度를 구해 그 피이크時를 滯留時間으로 하였다.

結果는 <그림-12>에 보인 바와 같이 대체로 50~60秒로서 4,000t/d SP 窯內에서의 測定結果와 거의 같거나 약간 길다. 이로부터 同一容量의 경우는 RSP 窯內가 preheater部에 있어서의 滯留時間을 길게 함을 다시 확인할 수 있다.



<그림-12> preheater 內에서 原料의 滯留時間



<그림-13> 窯內에서 原料의 滯留時間

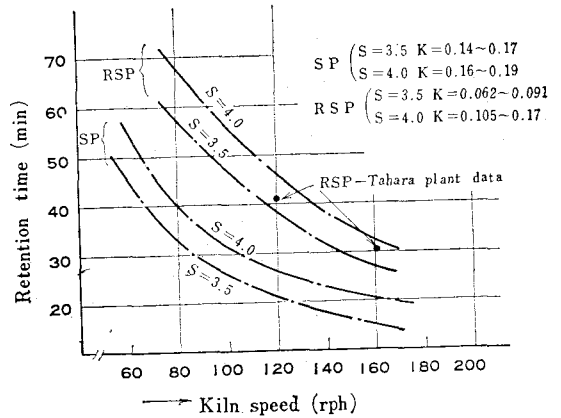
5) 窯內 原料의 通過時間

<그림-13>에 tracer로서 重晶石을 사용하여 窯內 原料의 通過時間을 測定한 結果를 나타낸다.

窯內 原料의 通過時間은 일반적으로 다음과 같다.

$$\theta = K \frac{L}{NDS} \dots\dots\dots (1)$$

- θ: 原料 滯留時間(分)
- L: 窯 有效길이(m)
- N: 窯 回轉數(rpm)
- D: 窯 內徑(m)
- S: 窯 傾斜
- K: 定數



<그림-14> 窯內에서의 原料의 滯留時間과 回轉數

(1)式에서 값을 假定하여 回轉數와 原料 滯留時間의 關係를 RSP 플랜트의 實測値와 함께 <그림-14>에 나타낸다.

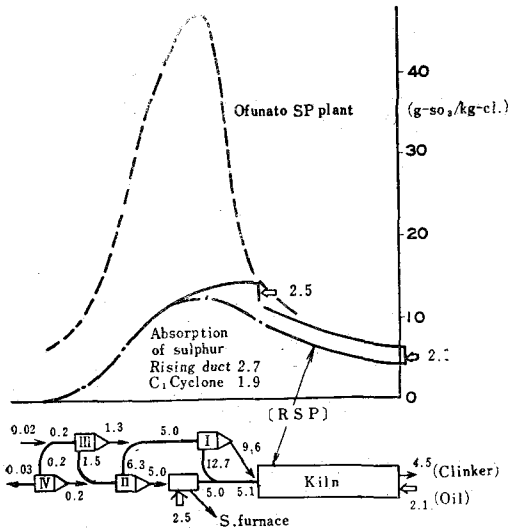
이로부터 RSP 窯內에서는 flashing 現象이 일어나지 않으며 原料 滯留時間은 計算値와 거의 일치함을 알 수 있다.

6) 硫黃의 循環과 吸收

RSP에서는 全入量의 대부분이 原料에 吸收되

<表-3> 硫黃의 吸收率

Type	absorption of S(%)
SP	95~100
Lepol	95~100
Wet	75~85
Dry	65~85

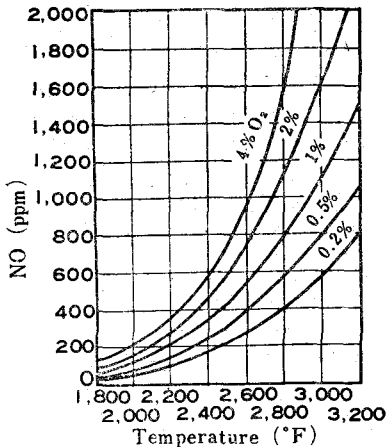


<그림-15> RSP 플랜트에서의 硫黃의 濃度와 循環

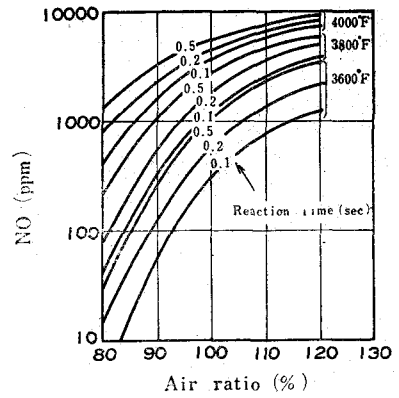
이 크링카에 포함되어 系外로 나간다. <그림-15>에 보인 바와 같이 立上管에서 58.7%, 1段 사이클론에서 나머지 41.3%가 吸收되는 것이 特徵이며, SO_x의 内部循環은 SP 키른에 비하여 아주 적다. 또 preheater 排氣가스中에는 0.03 8g-SO₃/kg-cl.로서 全入量의 0.65% (10ppm)를 넘지 않는다. 일반적으로 SP 키른에서는 硫黃吸收率이 높지만 RSP 키른에서는 硫黃吸收帶에서의 傳熱強化, 反應促進의 效果로 인하여 더 높다. <表-3>에 키른 類型別 硫黃吸收率을 나타낸다.

7) NO_x의 發生

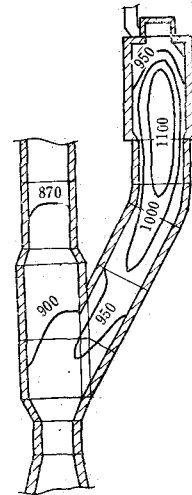
NO_x는 燃燒溫度 및 酸素濃度가 높을수록 또



<그림-16> N²+O²⇌2NO의 平衡



<그림-17> 反應溫度와 反應時間에 대한 NO_x 濃度와 空氣比 사이의 관계



<그림-18> SB/SC 爐에 있어서의 溫度프로파일

時間이 길수록 많이 生成된다. 高溫이 되면 酸素의 영향도 크게 作用하지만 1,100°C 以下에서는 酸素濃度가 높아도 NO_x 發生量은 적다. 이 관계는 <그림-16> 및 <그림-17>에 나타난 바와 같다.^{4),5)}

SB/SC 爐에 있어서 代表的인 溫度 프로파일은 <그림-18>과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 SB/SC 爐內에서의 燃燒溫度는 原料의 吸熱反應 때문에 急速히 떨어지므로 NO_x의 發生은 적어진다. 또 空氣比가 증가하여도 NO_x 發生量은 매우 적으므로 測定結果는 SC 出口에 있어서 100 ppm 以下로 나타났다.

따라서 RSP 프로세스에 있어서의 NO_x 發生은 주로 로타리 키른에서의 NO_x 發生量에 의해 支配된다. 키른에 있어서 크링카의 生成反應을 원

활하게 진행시키기 위해서는 燒成溫度를 1,450°C 以上으로 해주어야 하는데 이 때문에 燃燒가스溫度가 높아져 NO_x 發生량이 커지기 쉽다. 이것을 낮게 抑制하려면 낮은 過剩空氣率로서 충분한 燃燒을 하는 燃燒裝置 및 運轉과 制御上的 技術을 필요로 한다. 그러나 어느 경우에도 燃料의 반 이상을 燃燒溫度가 낮은 SB/SC 爐內에서 燃燒시키기 때문에 프로세스 全體로부터의 NO_x 發生량은 보통 키른에 비하여 상당히 낮다.

8) 알카리의 循環과 吸收

알카리의 循環은 窯尻 및 立上管에서 코우팅 부착과의 관계상 중요한 問題이다. 調査結果에 의하면 原料中の 알카리가 거의 全量 크링카에 포함되어 나가는 것은 보통의 SP 키른의 경우와 마찬가지로 이지만 内部循環은 SP 키른의 경우보다 적다 그 理由로서 RSP 방식은 SP 방식보다 滯留時間이 짧기 때문인 것 같다.

9) 窯尻 및 立上管에서의 코우팅 부착

종래 SP 키른에서는 窯尻 및 立上管에서의 코우팅 부착이 運轉의 안정화를 방해하였다. 研究 초기에 행한 키른內에서의 傳熱에 관한, 電算機 시뮬레이션 計算結果¹²⁾에서는 RSP 키른에 있어서도 窯尻가스 溫度上昇에 따라 코우팅 부착이 증가되지만 실제 運轉에 있어서는 RSP와 키른의 燃料比率를 여러 가지로 바꾸어도 窯尻가스 溫度 950~980°C 정도로서는 豫想 이상으로 낮은 코우팅 부착 現象은 별로 염려할바가 안된다.

V. RSP 키른의 制御와 安定性

RSP 키른의 熱工程은 다음 4要素로 되어 있다

- ① suspension preheater
- ② S 爐(SB, SC, MC)
- ③ 로타리 키른
- ④ 冷却機

從來의 SP 프로세스에서는 上記 ②의 裝置가 없으므로, suspension preheater는 變動을 吸收하는 自己制御性을 갖고 있으므로 이 경우의 키른安定性은 주로 로타리 키른內의 링(ring) 脫着에 의한 攪亂 및 이에 따른 循環 또는 증폭에 지

배된다. 여기서 키른에 裝入되는 原料의 分解度는 보통 30% 以下이고 나머지 대부분을 키른內에서 煨燒시켜야 하므로 이것이 安定性을 阻害하는 요인이 된다.

한편 RSP에 있어서는 分解도가 85% 前後이므로 키른內에 있어서의 原料의 거동은 매우 安定되어 있다. 따라서 全系는 制御性 및 安定性이 높다. 또 suspension preheater의 效果는 거의 없지만 冷却機에 있어서는 키른燃燒에 쓰일 2次空氣량이 보통의 SP 키른보다 적기 때문에 약간이나마 安定化에 기여한다.

따라서 RSP 키른에 있어서의 動的安定性은 S 爐에서의 燃燒와 煨燒의 高效率, 安定化에 따른다.

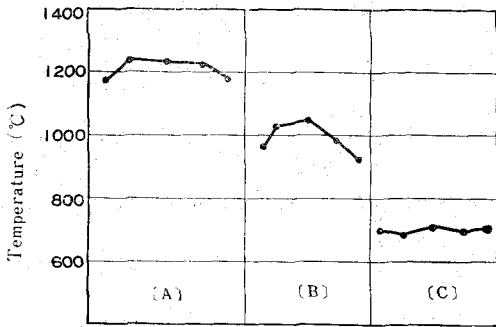
1. S 爐의 燃燒와 制御

Core frame을 形成하여 燃燒의 安定性을 유지 하는 SB 爐와 이로부터의 高溫 燃燒가스의 도움으로 濃厚한 粉體移動層中에서 燃料의 安定된 燃燒와 原料의 煨燒를 동시에 행하는 SC 爐로 나누기로 하자.

重油는 SB/SC 爐 모두에 그 溫度와 吹入量을 定値로 制御되고 燃燒用 空氣는 damper에 의해 空氣燃燒比로 制御된다. 運轉實績에 의하면 키른 및 preheater系의 壓力이 變動하여도 SB/SC 爐의 燃燒에 충분한 風量이 안정되게 供給되면 最良의 燃燒狀態가 유지된다. 또, SB 爐는 燃燒用空氣量(空氣比)을 크게 변경시켜도 燃燒가 안정되므로 半固定 damper의 간단한 調整으로서도 충분하다.

以上과 같이 SB/SC 爐 出口의 가스溫度, 原料溫度는 간단한 空氣燃燒比制御에 의해 완전히 制御된다. 또, SC 爐內에서는 原料 및 高溫空氣가 接線方向으로 吹入되고 旋回燃燒되기 때문에 高負荷燃燒(熱負荷 1.5~3.0×10⁶Kcal/m³h)가 행하여진다. 原料粉體에 의한 吸熱反應 때문에 이러한 高負荷燃燒에도 불구하고 爐內 溫度는 올라가지 않으며(<그림-18> 參照) 이 때문에 爐壁에서의 코우팅도 없으므로 매우 反應速度가 빠르고 安定되어 있다.

燃燒와 煨燒에 관하여서는 S 爐에 裝入되는 原



<그림-19> 各部位에서의 온도 프로파일

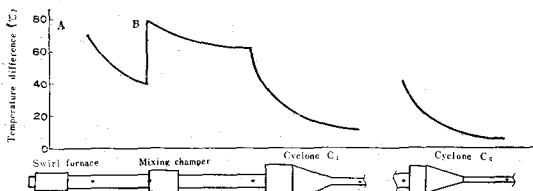
料량의不均一性 및 分散성이 問題가 되므로 效果의인 flap damper 에 의해 均일하고 分散성이 좋게 해야 한다.

<그림-19>에 있어서 A는 S 爐 出口 B는 混合室 入口, C는 混合室 出口의 各斷面에서의 溫度分布를 나타낸 것이다. 따라서 S 爐에 있어서 core frame, 原料裝入과 燃燒와 같은 복잡한 構成에도 불구하고 그 出口에서는 상당히 均一化되어 있음을 알 수 있다. 또 混合室을 통과하게 되면 가스 및 原料의 溫度는 거의 平衡에 도달하여 완전히 均일화된다.

理論空氣量에 가까움에도 불구하고($m=1.04$) 燃燒가 매우 效率的으로 행하여져서 混合室 入口에 있어서의 CO는 0.1~0.3%로 낮아지는 것이 特徵이다.

2. Preheater 系의 安定性

上述한 바와 같이 S 爐와 混合室의 效果가 현저하여 假燒가 촉진된다. suspension preheater의 並流傳熱方式 및 가스와 原料를 분리하는 사이클론內에서의 混合效果가 系의 安定性에 기여하는 自己制御性을 갖는다. 溫度變動의 收斂狀況은 <그림-20>에 보인것과 같다.



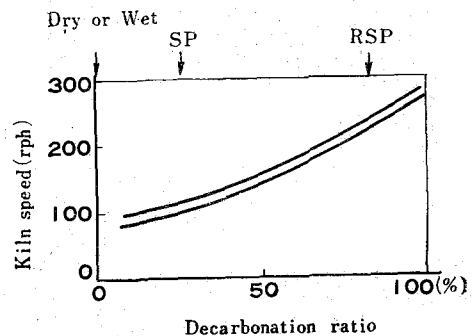
<그림-20> 溫度變動과 그 收斂性

溫度變動이 생기는 곳은 당연히 不變數要素合成點이다. <그림-20>에서 A에서는 SB/SC 爐의 2개의 燃燒 및 2段 사이클론으로부터의 原料이며 B에서는 S 爐와 로타리 키투에 2개의 燃燒가스, C에서는 3段 사이클론으로부터 原料와 1段 사이클론으로부터의 가스이다. 前述한 바와 같이 S 爐의 높은 混合效果와 高效率燃燒에 의해 잘 收斂되므로 RSP 프로세스의 安定性을 높인다 preheater 系의 가스와 原料가 흐르는 平衡狀態 및 가스로부터 原料에 이르는 傳熱狀態는 各部의 壓力 및 溫度를 測定함으로써 監示되어 마지막으로 키투 送入原料의 分解度가 安定되게 維持되도록 한다.

preheater의 傳熱은 原料溫度, 가스溫度 및 通風量 등에 영향을 받지만 RSP 키투에서는 SB/SC 爐에서의 安定된 燃燒에 의하며 原料溫度, 가스溫度變動의 영향은 매우 적다. SB/SC 爐에서의 燃燒用 空氣는 冷却機 排氣가스를 SP 팬으로 誘引하지만 키투 窯尻部에 조임機構가 있기 때문에 키투 通風系와 均형된다. 또 preheater 系에 대한 키투 攪亂의 영향은 적다. 따라서 가스 溫度의 異常上昇으로 인한 各部의 코우팅 부착은 일어나지 않으며 通風系도 교란되지 않으므로 安定操業이 가능하다.

3. 로우터리 키투의 安定性

로타리 키투의 최고 許用回轉數는 原料의 flashing에 의해 정해지며 原料에 流動性의 指標가 되는데 이것이 높을수록 燒成能力에 향상된다. 이것은 原料의 分解度에 의해 영향을 받고 이 分解度는 燒成樣式에 따라 다르다(<그림-21



<그림-21> 原料分解度 特性

> 參照).

이 최고 許用回轉數는 동시에 키른의 安定制御性에도 관계된다. RSP 키른에서는 內容積當 燒出量이 SP 키른에 비하여 2~3배 높고 키른에 있어서 熱負荷는 반대로 낮다($SP/RSP=1/0.65 \sim 0.70$). 다시 말하면 同一容量의 경우 SP 키른에 비하여 키른 直徑을 작게 할 수 있고, 煉瓦 閉塞가 적으며 煉瓦의 壽命이 길어 長期安定操業이 가능하다. 즉 SB/SC 爐의 運轉狀態가 安定되어 preheater 에서의 코우팅 부착이 적고 preheater 內에서 85~90% 분해된 原料가 키른에 送入되기 때문에 原料가 키른으로 통과하는 거리가 다른 樣式의 키른에 비하여 작아 運轉操作이 쉽다.

4. 制御와 計裝

일반적으로 SP 프로세스의 制御目的은 다음과 같다.

① 定常時制御로서 所定品質의 크링카를 所定量만큼 所定熱量으로 燒成시키거나 이것을 가급적 유지시킨다.

② 最適制御로서 安全 또는 安定領域의 범위 내에서 所定量을 增加하는 동시에 所定熱量을 低減한다.

③ 不安定制御로서 될 수 있는 대로 所定品質을 유지하면서 회복을 위한 制御를 한다.

④ 異常時는 신속히 安全을 확보하고 가급적 빨리 不安定領域制御에 도입시킨다.

⑤ 키른의 起動 및 停止

특히 RSP 프로세스의 경우에 限하는 制御目的은 다음과 같다.

- i) 키른과 S 爐에서의 燃料分配
- ii) 最適燃燒을 유지하기 위한 風量制御
- iii) S 爐에 있어서의 燃燒, 煨燒의 效率化
- iv) RSP 키른 시스템으로서의 最適制御

이 중에서 i)은 보통 예정된 燃料分配의 범위 내에서 定値制御를 하고 iv)에 의해 시스템화한다. ii)는 原料送入 등에 의한 短時間變動 및 키른·S 爐 通風系의 抵抗係數變化에 의한 長時間變動을 各各의 制御裝置로 制御하여 iv)에 의해 시스템화한다. iii)은 주로 hard ware 에 의해 보완

한다. iv)는 주로 計算機制御와 같은 高度의 制御시스템이다. 計裝으로서는 보통의 SP 키른의 경우와 비슷하다. RSP 프로세스에 특히 採用된 計裝의 일부를 略述하면 다음과 같다¹⁰⁾.

① 高溫含塵管에 있어서의 風量測定과 管內 venturi 를 開發하여 試用하였다. 그 결과 精度·壓損·保全 등에서 좋은 性能을 보였다¹¹⁾

② 가스 分析計

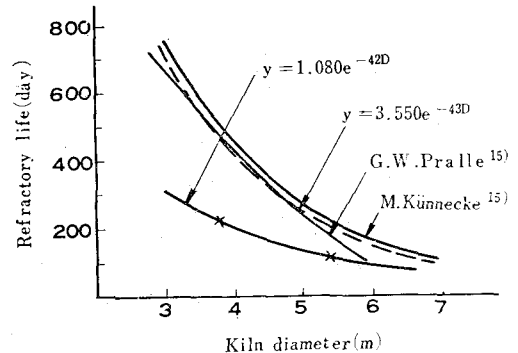
連續計測이 어려운 것이지만 특수한 probe 에 의해 效果인 解決을 보고 있다. 計器도 특수한 것을 試用中에 있다.

③ 多點壓力 檢出裝置

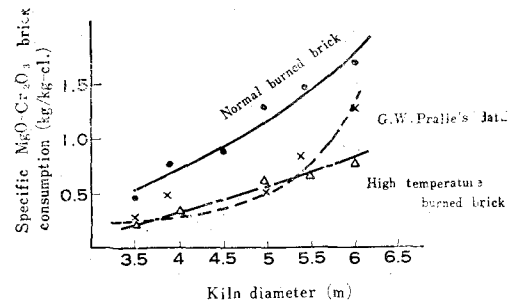
다수의 檢出點을 空氣스위치에 의해 簡略化하였다.

VI. RSP 키른에 있어서의 煉瓦問題

SP 키른의 大型化에 따라 증가하는 煉瓦閉塞는 SP 키른의 連續長期安定을 방해하므로 이의 解決과 함께 더 先進의 大型化를 위해 키른의 比燒成能力을 높일 필요가 있다. RSP 는 이 點에 착안하여 研究開發한 것으로서 보통의 키른에 비



<그림-22> 키른 直徑과 燒成帶의 耐火物壽命



<그림-23> 키른 直徑과 Mg-Cr 煉瓦의 原單位

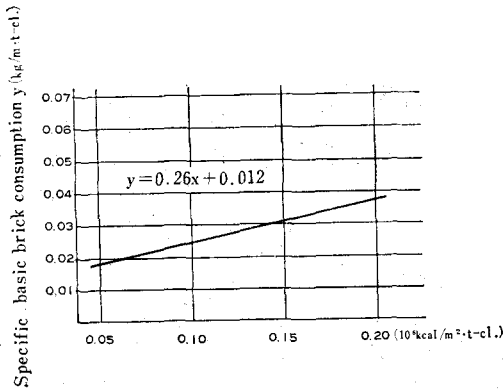
하여 키른내 容積當 燒成能力은 2~3배 높고 同一容量의 플랜트에 있어서는 키른 크기(특히 키른直徑)를 작게 할 수 있으므로 煉瓦閉塞의 發生도 적다.

키른 直徑과 Mg-Cr 煉瓦의 耐用日數에 關係서는 G. W. Pralle 과 M. Künnecke 가 제안한 다음 式이 있다.

$$Y=3550 \cdot e^{-0.53D}$$

이러한 關係에 따라 煉瓦의 原單位를 보면 <그림-22> 및 <그림-23> 과 같다. 이와 같이 키른 煉瓦의 壽命은 키른 直徑에 큰 影響을 받지만 큰 直徑의 키른에서는 ① 煉瓦의 自重과 熱膨張應力에 의한 壓縮疲勞 ② 크링카에 의한 摩耗 ③ 키른 回轉에 의한 機械的應力の 增大, ④ 大型化에 의한 코우팅 脫着 增加 ⑤ 煉瓦施工技術의 良否에 의해서도 影響을 받는다. 그 밖에도 키른 燒成帶部에 있어서의 熱負荷, 原料 flashing 등에 의한 溫度變化 등에도 影響을 받는다. <그림-24> 에 키른 燒成帶 熱負荷와 鹽基性煉瓦의 原單位와의 關係를 보인다. 또 <表-4> 에 키른 樣式別 鹽基性煉瓦 原單位를 보인다.⁸⁾

以上으로부터 RSP 키른은 煉瓦閉塞를 減少시키는 데에도 有利함을 알 수 있다.



<그림-24> 燒成帶 熱負荷와 鹽基性煉瓦의 原單位

<表-4> 鹽基性煉瓦의 原單位(kg/m·t·cl.)⁸⁾

DB	RSP	SP	L	WL	WFB	WF	W
0.034	0.011	0.029	0.022	0.020	0.049	0.050	0.037

VII. 結 言

以上에서 記述한 RSP 프로세스의 特徵을 정리하면 다음과 같다.

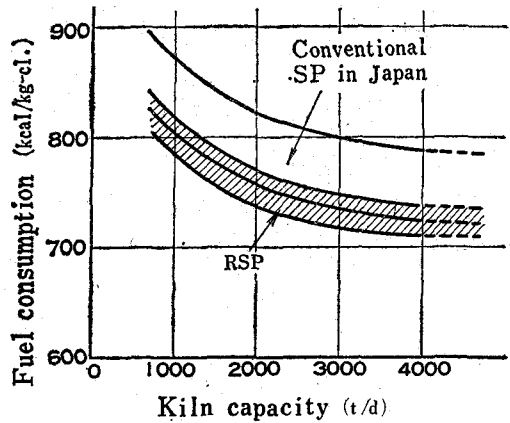
① 키른 크기를 작게 할 수 있다(同一能力의 경우).

② 키른내 容積當 燒出量이 크기 때문에 같은 크기의 키른에서는 다른 樣式에 비하여 能力이 크다.

③ 使用熱量이 적게 든다(보통의 SP 키른보다 약간 낮다 <그림-25> 參照).

④ 運轉動力費가 보통의 SP 키른보다 약간 적게 든다.

⑤ 키른에서의 熱負荷가 작다. 또 키른에 送入되는 原料分解度가 85~95%로 높기 때문에 키른내에서 原料가 flashing 되는 현상은 일어나지 않는다. 그래서 프로세스 전체의 運轉이 安定된다.



<그림-25> 燃料消費量의 比較

⑥ ⑤의 理由로 키른 煉瓦가 閉塞되는 일이 적다. 따라서 煉瓦의 壽命이 길고 煉瓦의 原單位가 작다.

⑦ SO_x의 排出量이 적으면서 NO_x의 發生量도 적다.

⑧ 運轉操作이 쉽게 制御된다.

⑨ ①, ②의 理由로 大型化가 가능하며 同一能力의 設備投資額이 적게 든다.

[參 考 文 獻]

- 1) Anselm W., Tagungsberichte der Zement-Industrie Heft 5, Seite 1 bis 13 (1955)
- 2) Frankenberger R., Zem-Kalk-Gips Nr.2, 89~97 (1969)
- 3) P.Weber, Zem-Kalk-Gips Sonderausgabe Nr.9 (1959)
- 4) 諏訪, PPM No.9 80~85 (1971)
- 5) 石原, 燃料協會誌, 51 [537] 3-10 (1972)
- 6) M. Künnecke, Zem-Kalk-Gips Nr.6 271-275 (1969)
- 7) 日本시멘트協會, 第27回 시멘트製造 심포지움報告 p.48~55
- 8) 日本시멘트協會, 로타리 키른用 耐火物에 관한 調査, 燃料專門委員會報告 T-10 (1972)
- 9) Itoh,T,et al : Process Analysis Techniques for Cement Kilns IEEE Trans. on Ind. & Gem. Appl. Jul/Aug. 470~479 (1971)
- 10) 伊藤, 시스템·엔지니어링의 一環으로서 플랜트·엔지니어링, No.4, 85~92 (1971)
- 11) 大西, 三浦, 管内 Venturi 型 流量計에 대하여 計裝 17 [7] (1974)