

# primary air에 대한 小考

梁 在 均  
 <雙龍洋灰 東海工場 生産課>

rotary kiln에서의 燃料燃焼에 필요한 combustion air는 primary air, secondary air 및 leak air로 구분되는 周知하는 바이다.

일반적으로 primary air는 flame의 형태를 결정하여 kiln内部에 일정한 溫度分布(temperature gradient)를 형성하게 되고 또한 傳熱現象과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 이의 합리적 관리는 대단히 중요하여 燒成工程管理의 한 部門으로 되어 있다.

本稿에서는 primary air control의 방향을 모색하기 위하여 문헌에 소개된 理論的 바탕과 아울러 現場實驗에서 얻은 經驗을 정리하여 아래의 관점에서 몇가지로 나누어 記述하고자 한다.

1. primary air와 熱節減
2. flame의 형태와 傳熱
3. primary air와 flame의 형태
4. 工程管理에의 應用

이러한 問題點에 관하여 工程管理에 직접적 관련이 있는 사항을 상세하게 記術하겠다.

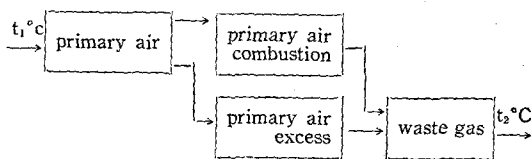
## 1. primary air와 熱節減

대개의 cement 製造裝置에서 선택하고 있는 primary air의 供給源은 별다른 豫熱 없이 大氣를 그대로 사용하게 된다. primary air가 過多하게 供給되면 餘분의 primary air는 加熱되어 waste gas와 함께 放出되므로 大氣와 waste gas의 溫度差에 의한 熱損失이 발생하게 되며 이러한 熱損失은 다음과 같다.

### 1) primary air의 flow diagram

<그림-1>에 표시된 바와 같이  $t_1^{\circ}\text{C}$ 의 大氣로부터 供給된 primary air는 一部 餘分으로 남

게 되어  $t_2^{\circ}\text{C}$ 의 waste gas와 함께 放出된다. 일반적으로  $t_1=20^{\circ}\text{C}$ 이며  $t_2=350^{\circ}\text{C}$  정도이다.



<그림-1> primary air의 flow diagram

### 2) 熱損失의 計算

일반적인 熱力學의 方法에 의하면 餘分の primary air에 의한 熱損失의 計算方法은 다음과 같다.<sup>1)</sup>

$$Q = \Delta V \int_{T_1=273+t_1}^{T_2=273+t_2} C_p dT \dots\dots\dots ①$$

혹은

$$Q = \Delta V \cdot \bar{C}_p \cdot \Delta t \dots\dots\dots ②$$

여기에서

Q : 熱損失(kcal/kg-cl)

$\Delta V$  : 餘分の primary air量(Nm<sup>3</sup>/kg-cl)

$T_1=273+t_1$  primary air 溫度(°C)

$T_2=273+t_2$  waste gas 溫度(°C)

$C_p$  : primary air의 比熱(kcal/(Nm<sup>3</sup>)(°C))

$\bar{C}_p$  :  $t_1, t_2$ 사이에서의 primary air 平均比熱(kcal/(Nm<sup>3</sup>)(°C))

$\Delta t$  :  $t_1, t_2$ 의 온도 차

이다.

### 3) 現場에서의 計算例

primary air量이 <表-1>과 같이 감소되었을 경우 熱節減을 計算하면 다음과 같다.

<表-1> 실험 전후의 비교

	실험 전	실험 후	비 고
primary air 量	330 m <sup>3</sup> /min	190 m <sup>3</sup> /min	burner 先端改造
" 壓力	1,300mmH <sub>2</sub> O	1,300mmH <sub>2</sub> O	
" 溫度	56°C	56°C	
waste gas 溫度	350°C	350°C	

단 原料 投入量 : 200 t/h  
clinker factor : 1.65

① ΔV의 計算

실험전 V<sub>1</sub>: 표준 상태로의 환산

$$330 \times \frac{273}{273+56} \times \frac{10,330+1,300}{10,330} = 308 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

$$V_1 = \frac{308 \times 60 \times 1.65}{200 \times 10^3} = 0.1523 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$$

실험후 V<sub>2</sub>: 표준 상태로의 환산

$$190 \times \frac{273}{273+56} \times \frac{10,330+1,300}{10,330} = 177.4 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$$

$$V_2 = \frac{177.4 \times 60 \times 1.65}{200 \times 10^3} = 0.878 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$$

따라서

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_1 - V_2 \\ &= 0.1523 - 0.878 \\ &= 0.645 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl} \end{aligned}$$

② 熱節減의 計算

$$\begin{aligned} Q &= \Delta V \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \\ &= \Delta V \bar{C}_p \Delta t \end{aligned}$$

T에 따른 ∫C<sub>p</sub>dT의 관계 graph가 준비되어 있으면 上式을 사용하는 것이 편리하나 그렇지 않을 경우에는  $\bar{C}_p$ 를 사용한 下式을 사용함이 간편하다.

위의 計算으로부터

$$\begin{aligned} \Delta V &= 0.645 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl} \\ \bar{C}_p &= 0.315 \text{ kcal}/(\text{Nm}^3) (\text{°C}) \\ \Delta t &= t_1 - t_2 \\ &= 350 - 56 = 294 \text{ °C} \end{aligned}$$

따라서

$$\begin{aligned} Q &= 0.645 \times 0.315 \times 294 \\ &= 5.97 \text{ kcal}/\text{kg-cl} \end{aligned}$$

즉 이 plant에서는 burner先端을 改造하여 primary air를 감소시켰을 경우 理論的으로 6 kcal/kg-cl 상당의 熱節減을 달성했다고 보겠다.

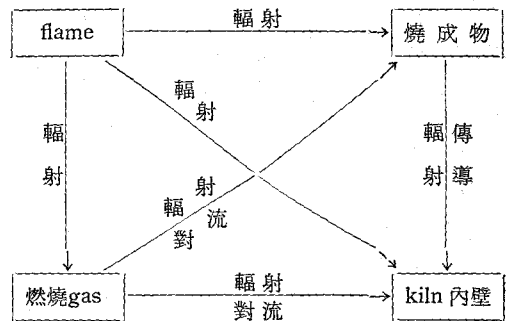
4) primary air 감소의 問題點

前述한 바와 같이 熱節減을 위해서는 가능한 한 小量의 primary air를 사용해야 되는 것이나 이 경우 ① flame이 길어져 kiln의 유효 길이가 짧아지며 ② burning zone의 溫度가 떨어지고 ③ 燃燒速度가 늦어 불완전 연소를 유발하게 된다.

따라서 소성 상태의 관찰 및 inlet chamber에서의 gas分析을 기초로 하여 primary air 감소 실험을 시행할 것이며 대부분의 경우 burner改造가 불가피하게 되리라 본다.

2. flame의 형태와 傳熱

kiln 내부의 傳熱機構는 <그림-2>와 같다. flame의 형태에 따라 傳熱係數가 변하고 傳達熱의 크기가 달라진다. flame에 傳한 熱傳達 방법은 輻射가 대부분이며 여러 문헌에 이러한 輻射熱 計算方法이 나와 있다. 本稿에서는 일반적인 기초 방정식을 이용하여 flame의 형태에 따른 傳熱의 변화를 記述한다.



<그림-2> kiln 내부의 傳熱機構

1) flame의 길이와 傳熱

flame이 길어지면 kiln의 有效長이 감소하고 kiln 내부의 coating도 軸方向으로 증가되기 때문에 kiln 熱效率이 저하되어 inlet chamber 쪽으로 과다한 熱이 흐르게 되어 이의 回收率이 불량하면 熱損失이 커진다.

또한 燃料의 燃燒速度도 늦기 때문에 flame의 溫度도 낮아지고 따라서 輻射熱도 적어지며

burning zone의 溫度가 떨어질 우려가 있고 flame의 形態變動도 걱정하다.

2) flame의 두께와 傳熱

flame이 두꺼워지면 flame 자체의 emissivity가 增加될 뿐만 아니라 熱傳達面積도 增加되기 때문에 輻射熱은 이에 비례하여 增加된다. flame의 두께와 emissivity의 관계는 다음의 式으로 주어진다.<sup>2)</sup>

$$E_F = 1 - e^{-kL} \dots\dots\dots ③$$

여기에서

$E_F$  : flame의 emissivity

$e$  : 자연 대수의 base

$k$  : 常數(1/m)

$L$  : flame의 두께(m)

이다.

그러나 flame의 두께가 너무 增加하면 kiln內壁의 coating을 용융시켜 연와 수명에 치명적일 수도 있다. flame이 길거나 얇은 것은 輻射熱의 감소로 인하여 燒成에 不利함을 알 수 있다. 그러나 지나치게 두꺼운 것도 좋지 않으므로 수차례의 실험을 통하여 결정함이 좋다.

3. primary air와 flame의 형태

flame의 형태는 burner type에 의하여 결정된다. 1차 및 2차 oil의 壓力差로 flame의 형태를 변경시킬 수도 있으나 이보다 훨씬 민감한 것은 역시 primary air의 供給量, 速度, 供給方法 등이다.

flame의 길이와 두께에 영향을 주는 要因을 문헌으로 소개한 후 실제 현장에서 얻은 경험을 소개하도록 한다.

1) flame의 길이와 primary air

Cude에 의하면<sup>3)</sup> flame의 길이는 다음과 같은 실험식으로 표시된다고 했다.

$$L = k \cdot \frac{w}{\sqrt{G}} \dots\dots\dots ④$$

$$G = mv \dots\dots\dots ⑤$$

여기에서

$L$  : flame의 길이(ft)

$k$  : burner type에 따른 constant

$w$  : oil의 mass flowrate(lb/sec)

$G$  : primary air의 momentum(lb·ft/sec<sup>2</sup>)

$m$  : primary air의 mass flowrate(lb/sec)

$v$  : primary air의 velocity(ft/sec)

이다.

oil量이 增加되면 flame의 길이는 길어지며 primary air가 증가할수록 flame이 짧아지고 速度가 커질수록 flame이 짧아진다. 따라서 짧은 flame을 얻기 위해서는 fuel(oil)의 감소는 생각 밖이므로 primary air量을 증가시키거나 速度를 增加시켜야 한다.

primary air의 增加는 前述한 熱損失을 초래할 것이며 따라서 primary air 速度를 增加시켜야 하고 burner先端의 改造가 불가피하다.

2) flame의 두께

flame의 두께는 flame의 길이 및 burner先端의 구조에 좌우된다. flame이 길어지면 그 두께는 얇어지고 flame이 짧으면 그 두께가 커진다. 또한 burner先端의 spiral vane의 각도에 따라 flame이 크게 변화한다. 당공장의 기술보고서에 의하면 vane 각도가 25°일 경우에 가장 양호한 flame의 두께를 얻을 수 있었다.

4. primary air에 대한 現場管理

다년간의 現場經驗을 통하여 이해하게 된 사항에 대하여 별도 項目別로 정리하여 primary air에 대한 工程管理를 합리적으로 수행할 수 있는 기본 자료를 다음에 記述한다.

1) 現場에서의 着眼點

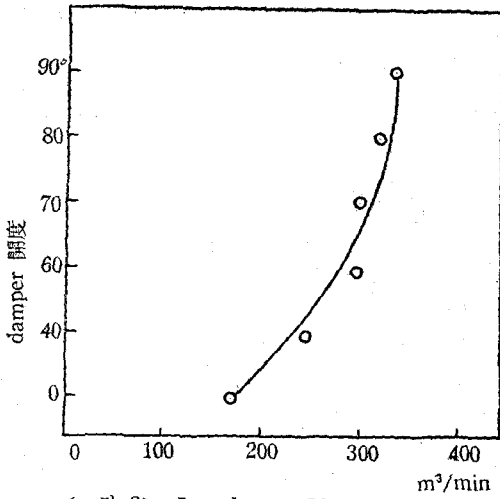
primary air에 대하여 fan入口의 suction damper로써 primary air 供給量을 조절하게 되며 fan出口의 press gauge 혹은 전력 사용량으로써 primary air 供給量을 알 수가 있다. 물론 orifice meter나 pitot tube 등의 flow meter가 있으면 더욱 좋다.

① damper 개도와 primary air 량

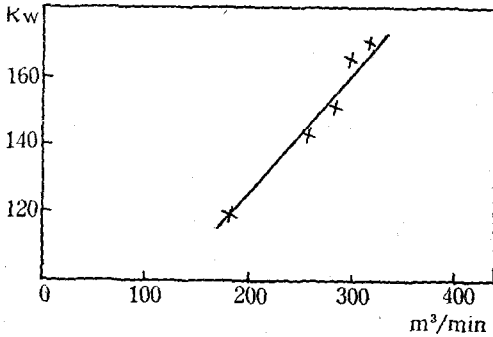
damper 開度에 따른 primary air 량의 변화는 <그림-3>과 같다. 入口 damper의 開度가 40~50°를 넘어서면 primary air의 증가는 지극히 적음을 알 수 있다.

② 전력 사용량에 따른 primary air 량

전력에 따른 primary air 량의 변동은 <그림-4>와 같으며 대략 직선적 형태로 그 curve가 나타났다.



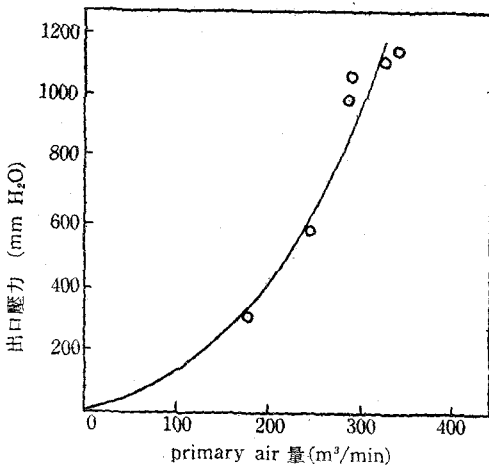
<그림-3> 入口 damper 開度에 따른 primary air 量



<그림-4> 전력에 따른 primary air 量

### ③ 出口壓力과 primary air 量

出口 조절 damper 를 고정시켜 두고(정상 운전시 damper 開度 일정함) 出口 air 壓力에 따른 primary air 量은 다음 式으로 표시할 수 있고<sup>4)</sup> 測定結果를 graph로 표시하면<그림-5>와 같다.



<그림-5> 出口壓力과 primary air 量

$$p = k \cdot \frac{\gamma v^2}{2g} \dots\dots\dots ⑥$$

여기에서

$p$  : 出口 air 壓力(mmH<sub>2</sub>O)

$k$  : air duct 구조에 따른 常數

$\gamma$  : air density(kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : air velocity(m/sec)

$g$  : 중력가속도(9.8 m/sec<sup>2</sup>)

이다.

graph에서 끝부분이 理論式에 부합되지 않은 것은 測定 오차로 생각된다.

### 2) primary air 量의 測定方法

damper 開度, 전력, 出口壓力에 따른 primary air의 변화를 표시하는 graph를 얻기 위해서는 직접 primary air 量을 측정해야 한다. 本稿에서는 pitot tube에 의한 測定方法을 소개하고자 한다.<sup>5)</sup>

#### ① 測定項目

air 溫度

air 壓力

動壓

duct의 斷面積

#### ② 計算方法

$$Q = S \cdot v \times 60 \dots\dots\dots ⑦$$

$$v = C \cdot \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}} \dots\dots\dots ⑧$$

$$\gamma = \gamma_0 \times \frac{273}{273+t} \times \frac{10,330+p}{10,330} \dots\dots\dots ⑨$$

여기에서

$Q$  : primary air 流量(m<sup>3</sup>/min)

$S$  : duct 斷面積(m<sup>2</sup>)

$v$  : primary air velocity(m/sec)

$C$  : pitot tube의 co-eff

$g$  : 重力의 加速度(9.8 m/sec<sup>2</sup>)

$h$  : pitot tube로 測定한 動壓(mmH<sub>2</sub>O)

$\gamma$  : 測定 air density(kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma_0$  : 0°C, 1 atm時의 air density(1.293 kg/m<sup>3</sup>)

$t$  : primary air 溫度(°C)

$p$  : primary air 壓力(mmH<sub>2</sub>O)

이다.

③ 計算例

pitot tube 로써 다음의 測定 data 를 얻었을 경우 primary air 流量을 구해 보자.

primary air 溫度 : 56°C  
 primary air 壓力 : 300 mm H<sub>2</sub>O  
 pitot tube 動壓 : 8.0 mm H<sub>2</sub>O  
 duct 斷面積 :  $S = \frac{\pi}{4} \times 0.6^2 = 0.283 \text{ m}^2$

$$\gamma = \gamma_0 \times \frac{273}{273+t} \times \frac{10,330+p}{10,330}$$

$$= 1.293 \times \frac{273}{273+56} \times \frac{10,330+300}{10,330}$$

$$= 1.104 (\text{kg/m}^3)$$

$$v = C \cdot \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}} \quad (C=0.876 (\text{pitot tube maker 추천}))$$

$$= 0.876 \sqrt{\frac{2 \times 9.8 \times 8.0}{1.104}}$$

$$= 10.32 (\text{m/sec})$$

$$Q = S \cdot v \times 60$$

$$= 0.283 \times 10.32 \times 60$$

$$= 175 (\text{m}^3/\text{min})$$

표준상태 (0°C 1 atm) 로 환산하면

$$Q_N = Q \times \frac{273}{273+t} \times \frac{10,330+p}{10,330}$$

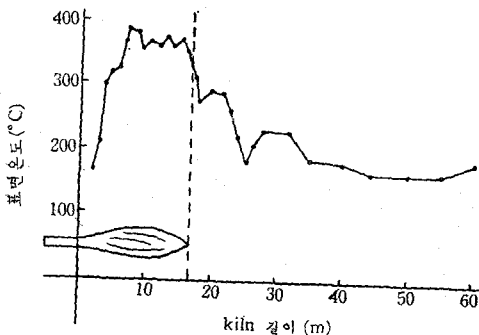
$$= 175 \times \frac{273}{273+56} \times \frac{10,330+300}{10,330}$$

$$= 150 (\text{Nm}^3/\text{min})$$

로 된다.

3) flame 길이의 測定

flame 의 길이는 shell 表面溫度를 측정함으로써 간접적으로 알 수 있다. <그림-6>에서와 같이 shell 表面溫度가 급격한 差를 나타낸 부분까



<그림-6> flame 길이의 추정

지가 flame 의 길이라고 생각할 수 있다.

4) primary air ratio

燃料의 연소에 필요한 이론적 공기량에 대한 primary air 의 비를 primary air ratio 라 定義하며 工程管理를 위해 편리한 표시 방법이다.

① primary air ratio

$$\text{primary air ratio} = \frac{\text{primary air 量}}{\text{theoretical combustion air 量}} \times 100$$

여기에서 primary air 의 clinker 에 대한 原單位를 구하고 이어서 primary air ratio 를 구하는 방법을 기술하면 다음과 같다.

<primary air ratio 計算例>

i) 必要한 data

熱 消耗 量 : 770 kcal/kg-cl  
 原料 供給 量 : 200 t/h  
 clinker factor : 1.65  
 B.C.oil 低發熱量 : 9,700 kcal/kg-oil  
 primary air 量 : 280 m<sup>3</sup>/min  
 primary air 壓力 : 1,300 mm H<sub>2</sub>O  
 primary air 溫度 : 60°C

ii) primary air 原單位의 計算

primary air 供給量을 표준 상태로 환산하면

$$Q_N = Q \times \frac{273}{273+t} \times \frac{10,330+p}{10,330}$$

$$= 280 \times \frac{273}{273+60} \times \frac{10,330+1,300}{10,330}$$

$$= 254 (\text{Nm}^3/\text{min})$$

따라서 primary air 原單位 V<sub>p</sub> 는 다음과 같다.

$$V_p = \frac{254 \times 60 \times 1.65}{200 \times 10^3}$$

$$= 0.1256 (\text{Nm}^3/\text{kg-cl})$$

iii) 理論燃燒空氣量의 計算

燃料 1 kg에 대한 이론 연소 공기량 A<sub>0</sub> 는<sup>6)</sup>

$$A_0 = \frac{1.04 H_i}{1,000} - 0.02$$

$$= \frac{1.04 \times 9,700}{1,000} - 0.02$$

$$= 10.068 (\text{Nm}^3/\text{kg-oil})$$

clinker base 로 환산하면 V<sub>A</sub> 는

$$V_A = 10.068 \times \frac{770}{9,700}$$

$$= 0.799 (\text{Nm}^3/\text{kg-cl})$$

iv) primary air ratio의 計算

따라서 primary air ratio는

$$\text{PAR} = \frac{0.1256}{0.799} \times 100$$

$$= 15.72\%$$

## ② primary air ratio의 實例

대부분의 plant에서는 primary air ratio가 10~20%이던 것을 5~10%로 감소하여 운전하고 있으며 5% 이하로 감소시킨 plant도 있다. 그러나 5% 이하에서는 flame 조정이 곤란한 것으로 알려져 있다.

primary air ratio의 감소는 現場實驗 및 burner先端의 改造로써 가능하다.

### 5) burner先端에서의 primary air speed

熱節減의 목적으로 primary 감소 실험을 실시할 경우, 혹은 burner先端改造의 경우 중요한 것은先端에서의 primary air speed이다. 일반적으로先端에서의 primary air speed는 70~90 m/sec로 設計되고 있다. primary air fan의 용량이나 압력이 충분할 경우에는先端을 縮小하면 자연히 speed-up 된다.

primary air speed의 計算은 간단하다. Humboldt kiln이 사용된 burner type은 primary air가 하나의 duct로 供給되기 때문에 primary air量을先端斷面積으로 나누어 주면 된다.

primary air가 두 종류 이상의 flow로 區分되어 供給될 경우 각 flow에 대하여先端의 air speed는 同一하지 않다. 이러한 경우 流體力學的 計算式을 사용할 수도 있으나, 대체적으로 각 duct의 斷面積 比率로 區分 供給된다고 가정해도 좋으며 이러한 가정은 실험식과 어느 정도 일치하고 있다.

前述한 바와 같이先端의 primary air speed가 增加하면 flame은 짧아지고 安定化한다.

### 6) burner先端의 改造

#### ① 改造의 必要性

다음의 경우 burner先端改造의 必要를 檢討함이 좋다.

i) 熱節減을 위해 primary air를 감소시켰을

경우 不完全燃焼나 不安한 flame—— flame 끝부분이 흔들리거나 갈라지는——이 發生했을 경우

ii) flame의 형태가 만족스럽지 못할 경우 (flame의 길이와 두께)

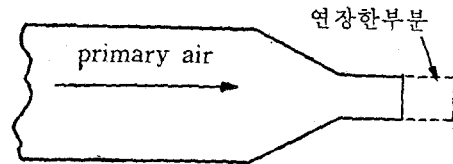
#### ② 先端改造의 方法

##### i) 先端斷面積의 縮小

primary air ratio를 감소하기 위해서는 대부분의 plant에서 시행하며先端의 air velocity를 計算하여 이를 일정하게——primary air 감소에도 불구하고——유지하기 위함이다. 혹은 flame의 길이를 짧게하기 위해서先端의 air speed를 增加시킬 경우에도 效果가 크다.

##### ii) burner先端 길이의 연장

<그림-7>과 같이先端部에서의 primary air flow를 安定시켜 flame의 安定을 도모할 경우이다.



<그림-7> 先端 길이의 연장

##### iii) spiral vane 각도의 변경

burner先端에 취부된 spiral vane은 fuel과 primary air의 양호한 혼합을 위함과 동시에 flame의 두께와도 관련이 있다. vane 각도가 커지면 flame은 넓게 퍼지고 작아지면 flame은 얇아지며 대체로 25~30°가 양호하다는 실험 결과가 있다.

## 5. 結論

1) primary air 감소로써 熱節減을 達成할 수 있으며 (5~10 kcal/kg-cl) 生産能力向上에 도움이 된다.

2) 짧은 flame은 kiln의 有效 길이를 增加시켜 能率을 높여주고 두터운 flame은 輻射에 의한 熱傳達量을 增加시킨다.

3) primary air量이 감소하면 flame은 길어지고先端速度가 增加하면 flame은 짧아진다. 따라서 primary air 감소의 경우先端改造의 필

요가 있다.

4) 現場運轉時의 primary air 量의 변화는 damper 開度, 電力, 壓力 등으로 판단 가능하며 이로써 primary air ratio 를 수시 측정 검토해야 한다.

5) 安定된 flame 은 소성 상태를 安定케 하며 不完全燃焼, flame 형태의 不良 등은 先端의 改造로써 安定化가 가능하다.

6) 先端의 改造는 先端斷面積의 縮小, 先端部의 연장, spiral vane 의 각도 변경 등이며 先端

改造로써도 flame control 이 不良하면 보다 高壓의 fan 으로 primary air fan 을 改造해야 한다.

#### 參考文獻

- 1) 朴炳哲 : 工場實驗研究 p. 479~480, 1970. 4.
- 2) 國井大藏, 矢木 榮 : 工業窯爐 p. 37.
- 3) A. L. Cude : J. Iron & Steel Inst. p. 175. Nov. 304 (1953)
- 4) 國井大藏, 矢木 榮 : 工業窯爐
- 5) TIS Z 8808 (1957)
- 6) TIS R 0303 (1963)

### 近 着 外 國 圖 書

#### ◎ THE INDIAN CONCRETE JOURNAL,

August 1971

- \* Editorial: Concrete for shipbuilding
- \* Letters to the Editor: Ultimate strength of reinforced concrete columns under axial load and biaxial bending
- \* Ferrocement fishing trawlers; N.S. Koder
- \* Ferrocement boats; George Thomas
- \* The chicken mesh boat of the South Pacific
- \* The Petralis-a ferrocement yacht; Chris Cairncross
- \* Load distribution in mass concrete of hydroelectric power-stations; Prem Saran Nigam
- \* Concrete Motorways of Britain
- \* Build your new home in concrete
- \* The nature of the bond between different types of aggregates and Portland cement; S. Chatterji and F.W. Feffery
- \* Computers in reinforced concrete building design; K.M. Kripanarayanan and M.L. Epperson

#### ◎ THE INDIAN CONCRETE JOURNAL,

September 1971

- \* Editorial: The weathering of concrete
- \* Planning concreting operations; K.C. Goel and S.P. Singh
- \* Concreting sand and how to make it: 2; N. S. Gill

- \* IRC seminar on strengthening of existing road pavements
- \* Concrete roads in Switzerland
- \* Build your new home in concrete
- \* Optimised strip method for the design of freely supported slabs; N.K. Raju
- \* Moment and shear redistribution in continuous reinforced concrete model beams, Gajanan M. Sabnis

#### ◎ THE INDIAN CONCRETE JOURNAL,

October 1971

- \* Editorial: Precast prestressed concrete piles
- \* Letters to the Editor: Design of prestressed concrete beams subjected to combined bending and torsion
- \* Batching plant for the strengthening work in Koyna; S.M. Bhalerao and B.P. Patil
- \* Dynamic pressures of powdery materials in silos with particular reference to cement: 1; R.M. Garg
- \* A latex-cement coating for the protection of reinforcement in cellular concrete; S. K. Chopra, C. A. Taneja and M. Khalid
- \* Fibre reinforced concrete; S. Sridhara, S. Kumar and M.A. Sinare
- \* Build your new home in concrete
- \* A general method of iteration for analysis of indeterminate structures:7; N.M. Thadani