

熱精算 및 熱效率에 對하여

(湿式 Rotary Kiln 에 있어서)

大韓洋灰工業株式会社 開慶工場 實驗室

文 定 淵

1. 머릿말

Cement 製造過程에 있어서 燒成作業에 依해서 製品의 量과 質이 決定되므로 무엇보다 이 燒成工程을 重要視하고 있다는 것은 周知의 事實이다. Cement 燒成用 Rotary Kiln 은 莫大한 燃料을 所要하는데다 Heat loss 가 相當히 큰 便이기 때문에 철저한 熱管理로서 損失熱을 줄여, 投入된 熱량을 最大限度로 活用하는 熱經濟가 今後 燒成作業의 重要な 課題로 되어 있는 것이다.

熱經濟를 遂行하자면 먼저 熱의 支出과 分布狀態를 正確히 把握해야만 되며 이 熱이 어떻게 얻어지서 如何히 活用되는가 그리고 各 裝置에서 어떠한 損失이 생기는가 등 熱의 出入關係를 熱力學的으로 檢討해본것이 Heat Balance (熱精算)이며 Heat Balance 에 依한 結果에서 한 工程의 熱入量中 希望대로 有効하게 利用된 熱량이 몇 %나 되는가를 數字로 나타낸 것을 Thermal Efficiency (熱效率)라고 한다.

先進國家에선 오래 前부터 Heat Balance 에 對해서 非常한 關心을 기울이고 있고 1%의 熱效率 上昇은 1%의 熱經濟를 뜻하므로 實際로 原料製品의 原價計算과 品質管理 못지 않게

Heat Balance 와 Thermal Efficiency 가 必須條件으로 台頭 되어 있는 것이다. 또 Heat Balance 를 隨時로 測定해 봄으로서 Kiln Operation의 合理化 故障 有無等도 推定할수 있고 Product 의 單位量에 對한 最低의 所要熱量이 여기에서 決定되므로 燃料의 節約을 가져와 生産 Cost 를 낮출수 있음은 勿論 技術向上에도 도움이 크다 보겠다.

2. 測定結果

Heat Balance 算出에 基礎가 되는 各 裝置의 構造 性能 및 各 物質의 組成은 다음과 같다.

Kiln 의 構造

Type Wet - Process 의 Rotary Kiln

Size 3.15 × 2.15m

Cooler Unax Cooler

1.2 × 7.2m (11ea)

Slurry 의 組成

Co₃ CaCO₃ 77.0%

MgCO₃ 1.5%

H₂O 33.0%

Ignition Loss 35.0% (CO₂ 로서)

Clinker 의 生産費 14.5ts/hr

Coal Dust

Net Calorie 6,407 Kcal/kg

H₂O 2.0%

Consumption 0.23 kg/kg Clinker

Exit Gas 의 組成

CO ₂	O ₂	CO	N ₂
28.5%	1.5%	0%	69.0%

各 部分의 温度

Ambient	20°
Slurry	20°
Coal Dust	65°
Clinker after cooler	260°
Primary air	65°
Secondary air	250°
Exit Gas	180°
Clinker before cooler	1,100°

Carbonate 의 Dissociation Heat

CaCO ₃	420 Kcal/kg Clinker
MgCO ₃	275 Kcal/kg Clinker
Water Evaporation	619 Kcal/kg at 20°

各種 物質의 kg 當 比熱

CO ₂	0.19 + 0.00011 × t°
Clinker	0.181 + 0.000071 × t°
Water	0.42 + 0.000185 × t°
Exit Gas	0.23 + 0.00005 × t°
Slurry	0.21 + 0.00007 × t°

3 . Heat Balance

A . 收入熱

內
—
0

① Coal Dust 의 燃烧熱

$$6,407 \times 0.23 = 1,454 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

② Coal Dust 의 顯熱

$$0.23 \times 0.24 \times (65-20) = 2.5 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

(Coal Dust 의 比熱: $0.24 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$)

③ Cooler 로 부터의 一次 空氣 回收熱

먼저 Orifice Gauge 로서 空氣量을 測定한다.

$$\text{即 } Q = K \cdot \sqrt{\frac{h}{\gamma}}, \text{ (m}^3/\text{min)} \text{ ----- ①}$$

Where Q : Air Quantities, m^3/min

K : Kbrit Constant

h : Differential Pressure, mm H_2O

γ : Gas 의 unit Weight, kg/m^3

① eq 에 $K=28.9$, $h=10.0$, $\gamma=1.293$ 을 代入하면

$$Q = 80.34 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$= 4,820 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Standard state 로 改치면 ($\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}$) 에서

$$Q = 3,892 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

$$= 0.27 \text{ Nm}^3/\text{kg Clinker}$$

故로 回收熱은

$$0.27 \times 0.312 \times (65-20) = 3.8 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

(air 의 比熱: $0.312 \text{ Kcal}/\text{Nm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$)

④ Cooler 로 부터 二次 空氣 回收熱

理論燃烧用 空氣量을 먼저 算出하면 Rosin 의 方程式에서

$$L_0 = \frac{a}{1.000} \times H_1 + b \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \quad \text{①}$$

Where L_0 : 理論燃燒空氣量, Nm^3/kg

H_1 : 燃料의 眞發熱量, Kcal/kg

a, b: Rosin 의 Constant

(Coal 에 있어선 $a = 1.01, b = 0.5$)

$$\therefore L_0 = 6.97 \text{ Nm}^3/\text{kg Coal}$$

$$= 1.60 \text{ Nm}^3/\text{kg Clinker}$$

또 空氣比 (空氣過剩係數) m 는

$$m = \frac{21 \cdot (N_2)}{21(N_2) - 79 \cdot \{(O_2) - (CO)\}} = 1.09$$

(N_2, O_2 는 燃燒 Gas 中の 各成分%)

故로 實際空氣量 L 은

$$L = m \cdot L_0$$

$$= 1.74 \text{ Nm}^3/\text{kg Clinker}$$

故로 二次空氣 回收熱은

$$(1.74 - 0.27) \times 0.314 \times (250 - 20)$$

$$= 106.2 \text{ Kcal}/\text{kg Clinker}$$

(air 의 比熱: $0.314 \text{ Kcal}/\text{Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$)

⑤ Clinker 形成時의 發熱反應

Nacken 氏說에 依하면 1 kg Clinker 가 形成될때

100Kcal 의 發熱反應이 일어 난다고 함.

⑥ 原料인 Slurry 와 一, 二次空氣의 최초의 溫度는

Ambient temp. 와 같으므로 이들 顯熱은 0 Kcal 임.

B. 支出熱

⑦ Slurry 中 Carbonate 의 分解熱

$$420 \times 0.77 + 275 \times 0.015 = 327.5 \text{ Kcal/kg Dry Slurry}$$

$$1.54 \times 327.5 = 504.4 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

$$(1\text{kg Clinker} \approx 1.54 \text{ Dry Slurry kg})$$

⑧ Slurry 에 含有된 水分의 蒸發熱

$$\text{Dry Slurry } 1\text{kg 에 對한水分量} = \frac{33}{67} = 0.493\text{kg}$$

$$0.493 \times 1.54 \times 619 = 470.0 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

⑨ 水蒸氣의 過熱 (Super heat)

$$0.493 \times 1.54 \times \{0.42 + 0.000185 \times (180-100)\} (180-100)$$

$$= 26.4 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

⑩ Kiln 으로 부터 Clinker 가 持出하는 熱

$$1 \times (1,100-20) \cdot \{0.181 + 0.00007 \times (1,100-20)\}$$

$$= 276.5 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

⑪ Unax Cooler 通過後의 Clinker 가 持出하는 熱

$$1 \times (260-20) \cdot \{0.181 + 0.00007 \times (260-20)\}$$

$$= 47.5 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

⑫ Unax Cooler 에서 放散하는 損失熱

$$276.5 - 47.5 - 110.0 = 119.0 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

(110.0 Kcal/kg : 1, 2次空氣의回收熱)

⑬ Slurry 에서 나오는 CO₂ 의 損失熱

$$\text{CaCO}_3 : 1.54 \times 0.77 \times \frac{44}{100.1} = 0.522 \text{ CO}_2 \text{ kg/kg Clinker}$$

$$+ \text{MgCO}_3 : 1.54 \times 0.015 \times \frac{44}{84.3} = 0.012$$

$$0.534 \text{ CO}_2 \text{ kg/kg Clinker}$$

$$\therefore 0.534 \times (180-20) \cdot \{0.19 + 0.00011 \times (180-20)\}$$

$$= 17.8 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

⑭ 石炭에서 나오는 燃燒Gas 의 損失熱

燃燒Gas 量을 求하자면

$$G = G_0 + (m-1) \cdot L_0 \quad \text{①}$$

Where G : 燃燒Gas 量, Nm³/kg Coal

G₀ : 理論燃燒Gas 量, Nm³/kg Coal

L₀ : 理論空氣量, Nm³/kg Coal

Rosin 의 方程式에서

$$G_0 = \frac{0.89}{1,000} \times H_1 + 1.65 \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{ 이므로}$$

$$G_0 = 7.35 \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{ Coal}$$

$$= 1.69 \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{ Clinker}$$

①에 G = 1.69, L₀ = 1.60, m = 1.09 를 代入하면

$$G = 1.83 \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{ Clinker}$$

故로 熱損失은

$$1.83 \times (180-20) \times 0.343 = 100.4 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

(Exit Gas 의 平均比熱: 0.343 Kcal/Nm³°C)

⑮ Coal Dust 의 水分 蒸發熱

水分의 蒸發熱

$$0.23 \times 0.02 \times 619 = 2.9 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

水蒸氣의 過熱

$$0.23 \times 0.02 \times \{0.42 + 0.000185 \cdot (180-100)\} \cdot (180-100)$$

$$= 0.1 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

$$\text{計} \quad 3.0 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

⑯ 對流熱(Convection), 幅射熱(Radiation)

Convection, Radiation 은 Kiln Shell 의 平均 溫

度를 測定하든지 또는 Kiln 의 膨脹率(mm)을 實測해

서 平均溫度를 算出하여 求할수 있지만 細心한 注意를 기울이지 않으면 큰 錯誤를 일으키기 쉽다.

여기선 總 入熱量에서 總出량을 minus 한것을 Convection 및 Radiation 으로 看做 하였다.

即 $\sum(\text{入熱}) - \sum(\text{出熱})$

$$= 1,666.5 - 1,398.5 = 268.0 \text{ Kcal/kg Clinker}$$

⑰ 其他에 依한 損失熱

Clinker Dust 의 潛熱, Coal Dust 中の H 및 S 等の 燃燒後 潛熱等이 있으나 이들 損失熱은 僅少하므로 여기서 따로 取扱하지 않고 Convection, Radiation 損失熱로 取扱 하였다.

上記 17項의 出入熱을 要約하면 다음과 같다.

項 目	收 入 熱		支 出 熱	
	Kcal/kg	%	Kcal/kg	%
1. Coal Dust 의 燃燒熱	1,454.0	87.2		
2. Coal Dust 의 顯 熱	2.5	0.2		
3. 一次空氣의 回收熱	3.8	0.2		
4. 二次空氣의 回收熱	106.2	6.4		
5. Clinker 形成時發熱反應	100.0	6.0		
6. Slurry 와 一, 二次空氣의 顯熱	0	0		
7. Slurry 中 Carbonat 의 分解熱			504.4	30.3
8. Slurry 中 水分의 蒸發熱			470.0	28.2
9. 水蒸氣의 過熱			26.4	1.6
10. Kiln 으로부터 Clinker 가 持出하 는熱			(276.5)	(16.6)
11. Cooler 通過後의 Clinker 持出熱			47.5	2.9
12. Cooler 에서 放散하는 損失熱			119.0	7.1
13. Slurry 에서 나오는 CO ₂ 의 損失熱			17.8	1.0
14. 石炭에서 나오는 燃燒 Gas 損失熱			100.4	6.0
15. Coal Dust 부작水分의 蒸發熱			3.0	0.2
16. 對流, 復射熱 其他에依한 損失熱			238.0	16.1
17. Cooler 의 回收熱(一, 二次空氣 로서)			110.0	6.6
計	1,666.5	100.0	1,666.5	100.0

4. Thermal Efficiency

前述한바와 같이 Heat Balance 算出로서 Kiln 内の 熱量 分
布狀態를 把握하는데는 뜻이 있겠지만 熱損失을 줄이도록 設計
를 다시 한다던지 또는 燒成方法等의 改良을 하는데 있어선

熱効率에 關해서 解析的으로 考察할 必要가 있다.

熱効率에 對하여 多角度로 檢討해 볼수 있지만 여기에선 燃料을 基準으로 해서 Clinker에 對한 有效傳熱効率 即 순수한 Clinker 燒成에만 直接 所要된 効率만을 算出해 보기로 한다.

이는 Clinker 燒成에만 有效하게 利用된 熱量 Q를 燃料의 眞發熱量 H_g로서 Divide 해주면 된다.

$$\text{即 } E = \frac{Q}{H_g} \times 100$$

여기서

Q_p = (Carbonate 의 分解熱 + Slurry 中の 水分 蒸發熱 -
clinker 發熱反應)

$$= 874.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$H_g = 1,450 \text{ Kcal/kg}$$

$$\therefore E = 60.3\%$$

$$E = \frac{Q}{H} \times 100$$

參 考 文 獻

- (1) 黒川眞武 : 熱精質
- (2) Q. L. Craddock : Cement Chemists' And Works
Managers' Handbook.
- (3) Otto Labahn : Cement Engineers' Handbook

(試 驗 係 長)