

KILN INLET ZONE

二重耐火煉瓦에 관한 檢討

金 宗 洽

<雙龍洋灰工業株式會社 雙龍工場 工場長>

1. Abstract

Rotary kiln의 원만한 열평형과 경제적 운전을 목적으로 kiln inlet zone의 내화연외를 二重으로 築爐하기도 하는데 當工場에서 실시한 one-layer lining과 two-layer lining과의 理論的 熱損失量 比較 및 실제 측정 결과에 對해 기술하고자 한다.

2. Theory

kiln shell에서는 熱損失을 大別하면 다음의 두가지로 나누어진다.

1) Radiation heat loss

$$Q_R = \sigma A (eT_1^4 - aT_0^4)$$

2) Free convection heat loss

$$Q_C = hmA(T_1 - T_0)$$

前記 式에서와 같이 kiln shell의 外部表面·溫度가 높을수록 熱損失이 증가하게 되는데 이 外部表面 溫度를 낮추기 위해 kiln inlet zone에 熱切緣物質인 斷熱耐火煉瓦를 使用한다. (T_1 : 表面溫度 T_0 : 大氣溫度).

3. Result

3-1. One-layer lining 일 경우의 heat loss.

3-1-1 熱傳達 mechanism

Rohary Kiln shell에서의 heat loss에 對한 熱傳達 mechanism은 「그림 1」에 表示되어 있다.

3-1-2 Heat loss의 計算

그림 1에서 表示된 temperature gradient에 對

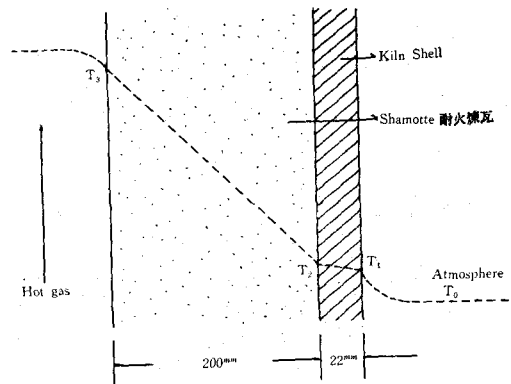


그림 1. 熱傳達 mechanism

한 heat loss는 trial and error method로 求할수 있으며 計算순서는 아래와 같다.

i) Assume $T_3 = 1100^\circ\text{C}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$

ii) 임의의 heat loss를 設定하여 T_3 로부터 T_1 을 求한다.

iii) T_1 과 T_0 와의 temperature gradient로부터 heat loss를 求한다.

iv) 設定된 heat loss와 iii)에서의 計算値가

Table 1. One-layer lining의 경우 heat loss의 計算

Heat loss 設定 値	shell表面溫度	Heat loss 計算 値	비 고
1.13×10^6 Kcal/hr	243°C	1.094×10^6 Kcal/hr	-3.0%
1.11×10^6 Kcal/hr	248°C	1.134×10^6 Kcal/hr	+2.0%
1.12×10^6 Kcal/hr	245°C	1.122×10^6 Kcal/hr	+0.0%

할 때까지 前記方法을 되풀이 하여 Table 1을 얻는다.

shamotte 耐火煉瓦로 one-layer lining의 경우 inlet zone에 있어서의 heat loss는 1.12×10^6 Kcal/hr이며 이 때의 shell 表面溫度는 平均 245 °C이다.

3-1-3 Sample calculation

- Basis 1) Inlet zone length: 28m
- 2) Kiln outside diameter: 3.5m
- 3) Heat loss: 1.13×10^6 Kcal/hr

i) T_2 의 計算

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{Q \cdot L}{K \cdot A} \\ &= \frac{1.13 \times 10^6 \times 0.2}{0.9 \times 3.14 \times 3.3 \times 2.8} \\ &= 855 \text{ (}^\circ\text{C)} \\ \therefore T_2 &= T_3 - 855 \\ &= 1100 - 855 \\ &= 245 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

ii) T_1 의 計算

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{Q \cdot L}{K \cdot A} \\ &= \frac{1.13 \times 10^6 \times 0.022}{37.2 \times 3.14 \times 3.5 \times 2.8} \\ &= 2 \text{ (}^\circ\text{C)} \\ \therefore T_1 &= T_2 - 2 \\ &= 245 - 2 \\ &= 243 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

iii) T_1 과 T_0 사이의 heat loss.

a) Radiation heat loss. Q_R

$$\begin{aligned} Q_R &= \sigma A (eT_1^4 - aT_0^4) \\ &= 1.355 \times 10^{-12} \times 3.6 \times 10^4 \times 3.14 \times 3.5 \times 28 \\ &\quad \times (0.93 \times 516^4 - 0.93 \times 293^4) \\ &= 8.9 \times 10^5 \text{ (Kcal/hr)} \end{aligned}$$

여기서 $e=0.93$ $a=0.93$ 일

b) Free Convection heat loss. Q_C properties

of air at latm, 131°C

$$\begin{aligned} \rho &= 0.0546 \text{ lb/ft}^3 \\ \mu &= 0.0506, \text{ lb/(hr)(ft)} \\ \bar{C}_p &= 0.242 \text{ Btu/(lb)(}^\circ\text{F)} \\ k &= 0.196 \text{ Btu/(ft)(hr)(}^\circ\text{F)} \\ \beta &= 1.37 \times 10^{-3} \text{ / (}^\circ\text{R)} \\ g &= 4.17 \times 18^8 \text{ ff/hr}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta T = 401 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$\begin{aligned} (Gr)(Pr) &= \left(\frac{D^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^3} \right) \left(\frac{\mu \bar{C}_p}{k} \right) \\ &= \left(\frac{11.48^3 \times 0.0546^2 \times 4.17 \times 10^8 \times 1.37 \times 10^{-3} \times 401}{0.0560^3} \right) \\ &\quad \left(\frac{0.560 \times 0.242}{0.0196} \right) \\ &= 2.28 \times 10^{11} \end{aligned}$$

$(Gr)(Pr) > 10^4$ 일 경우에

$$(Nu)m = 0.525 \{ (Gr)(Pr) \}^{\frac{1}{4}}$$

$$\begin{aligned} \therefore (Nu)m &= 0.525 \times (2.28 \times 10^{11})^{\frac{1}{4}} \\ &= 3.57 \times 10^2 \end{aligned}$$

$$hm = (Nu)m \times \left(\frac{k}{D} \right)$$

$$= 3.57 \times 10^2 \times \left(\frac{0.0196}{11.48} \right)$$

$$= 0.61$$

$\therefore Q_C = hm A \Delta T$

$$= 0.61 \times 3.14 \times 11.48 \times 91.8 \times 401$$

$$= 8.1 \times 10^5 \text{ Btu/hr or } 2.04 \times 10^5 \text{ Kcal/hr}$$

그러므로 total heat loss Q_T 는

$$Q_T = Q_R + Q_C$$

$$= 8.9 \times 10^5 + 2.04 \times 10^5$$

$$= 1.094 \times 10^6 \text{ Kcal/hr}$$

3-2 Two-layer lining 일 경우의 heat loss

3-2-1 熱傳達 mechanism

熱傳達 mechanism 은 「그림 2」에 表示한다.

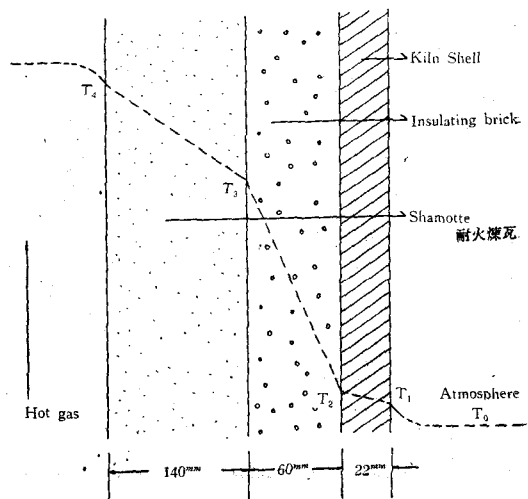


그림 2. 熱傳達 mechanism

3-2-2 Heat loss의 計算

one-layer lining과 같은 方法으로 하여 Table 2를 얻을 수 있다.

Table 2. Two-layer lining의 경우 heat loss의 計算

Heat loss 設定値	shell 表面溫度	Heat loss 計算値	비 고
$5.7 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$	158°C	$5.55 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$	-2.5%
$5.65 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$	166°C	$6.02 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$	+6.5%
$5.68 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$	161°C	$5.69 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$	+0.2%

shamotte 耐火煉瓦 및 insulation brick으로써 two layer lining을 할 경우 inlet zone에서의 heat loss는 $5.68 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$ 이며 이때의 shell 表面溫度는 平均 161°C이다.

3-2-3 sample calculation

- Basis: 1) Inlet zone length: 28m
 2) kiln outside diameter: 3.5m
 3) Heat loss : $5.7 \times 10^5 \text{Kcal/hr}$

i) T_3 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q \cdot L}{k \cdot A}$$

$$= \frac{5.7 \times 10^5 \times 0.14}{0.9 \times 3.14 \times 3.3 \times 28}$$

$$= 306 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_3 = T_4 - 306$$

$$= 1100 - 306$$

$$= 794 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

ii) T_2 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q \cdot L}{k \cdot A}$$

$$= \frac{5.7 \times 10^5 \times 0.06}{0.18 \times 3.14 \times 3.3 \times 28}$$

$$= 635 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\therefore T_2 = T_3 - 635$$

$$= 794 - 635$$

$$= 159 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

iii) T_1 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q \cdot L}{K \cdot A}$$

$$= \frac{5.7 \times 10^5 \times 0.022}{37.2 \times 3.14 \times 3.4 \times 28}$$

$$\approx 1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_1 = T_2 - 1$$

$$= 159 - 1$$

$$= 158 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

iv) T_1 과 T_0 사이의 heat loss

a) Radiation heat loss

$$Q_R = \sigma A (eT_1^4 - aT_0^4)$$

$$= 1.355 \times 10^{-12} \times 3.6 \times 10^4 \times 3.14 \times 3.5$$

$$\times 28 (0.93 \times 431^4 - 0.93 \times 293^4)$$

$$= 4.38 \times 10^5 \text{ Kcal/hr}$$

b) Free convection heat loss

Properties of air at 1atm 89°C

$$\rho = 0.0613 \text{ lb/ft}^3$$

$$\mu = 0.0513 \text{ lb/(hr)(ft)}$$

$$\bar{C}_p = 0.241 \text{ Btu/(lb)(}^\circ\text{F)}$$

$$k = 0.0178 \text{ Btu/(ft)(hr)(}^\circ\text{F)}$$

$$\beta = 1.54 \times 10^{-3} \text{ /}^\circ\text{R}$$

$$g = 4.17 \times 10^8 \text{ ft/hr}^2$$

$$\Delta T = 248 \text{ }^\circ\text{R}$$

one-layer lining과 같은 方法으로 하여

$$(Gr)(Pr) = 2.37 \times 10^7 (> 10^4)$$

$$(Nu)_m = 0.525 \{(Gr)(Pr)\}^{\frac{1}{4}}$$

$$= 3.65 \times 10^2$$

$$hm = (Nu)_m \left(\frac{k}{D} \right)$$

$$= 3.65 \times \left(\frac{0.0178}{11.48} \right)$$

$$= 0.566$$

$$\therefore Q_C = hmA \cdot \Delta T$$

$$= 0.566 \times 3.14 \times 11.48 \times 91.8 \times 248$$

$$= 4.64 \times 10^5 \text{ Btu/hr or } 1.17 \times 10^5 \text{ Kcal/hr}$$

/hr 그러므로 total heat loss Q_T 는

$$Q_T = Q_R + Q_C$$

$$= 4.38 \times 10^5 + 1.17 \times 10^5$$

$$= 5.55 \times 10^5 \text{ Kcal/hr}$$

4. 實測結果

前記 理論値의 正確性을 確認하기 위해 當工場 3號 kiln에서의 inlet zone과 calcining zone과의 境界點에서 shell 表面溫度를 實測하고 이로써 內部溫度와의 一致 여부를 檢討했다.

境界點에서의 熱傳達 mechanism은 「그림 3」에 表示되어 있다. 實測을 동절기에 했으며 이때 大氣溫度는 5°C였다.

Basis: 實測 Data

外氣溫度 $T_0 = 5^\circ\text{C}$

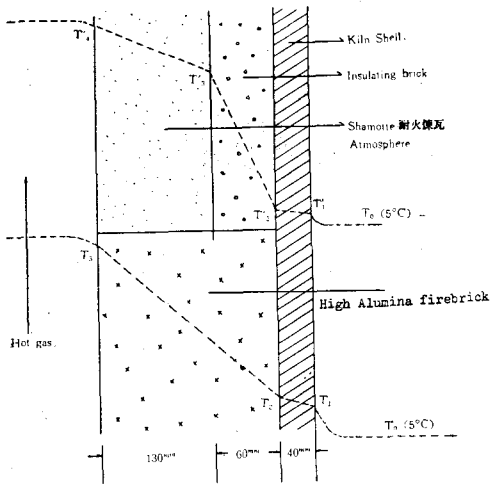


그림 3. 熱傳達

Shell 表面溫度

Two-layer zone $T_1' = 195^\circ\text{C}$

One-layer zone $T_1 = 280^\circ\text{C}$

4-1 Two-layer zone의 heat loss 및 內部溫度

4-1-1 Heat loss.

i) Radiation heat loss

$$Q_R' = 1,355 \times 10^{-12} \times 3.6 \times 10^4 \times 0.93(468^4 - 278^4)$$

$$= 1.9 \times 10^3 \text{ kcal}/(\text{m}^2)(\text{hr})$$

ii) Free convection heat loss

$$Q_C' = hm \Delta T$$

$$= 0.61 \times 342 \times 3.28^2 \times 0.252$$

$$= 5.65 \times 10^2 (\text{kcal}/\text{hr})$$

iii) Total heat loss

$$Q_T' = Q_R + Q_C$$

$$= 1.82 \times 10^3 + 5.65 \times 10^2$$

$$= 2,465 \times 10^3 (\text{kcal}/\text{hr})$$

4-1-2 kiln 內部溫度(T_4')의 計算

i) T_2' 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q' L}{K}$$

$$= \frac{2,465 \times 10^3 \times 0.04}{37.2}$$

$$= 2.65^\circ\text{C}$$

$$\therefore T_2' = T_1 + 2.65^\circ\text{C}$$

$$= 195 + 3$$

$$= 198^\circ\text{C}$$

iii) T_3' 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q' L}{K}$$

$$= \frac{2,465 \times 10^3 \times 0.06}{0.18}$$

$$= 821^\circ\text{C}$$

$$\therefore T_3' = T_2' + 821$$

$$= 198 + 821$$

$$= 1,019^\circ\text{C}$$

iii) T_4' 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q' L}{K}$$

$$= \frac{2,465 \times 10^3 \times 0.06}{1.15}$$

$$= 278^\circ\text{C}$$

$$T_4' = T_3' + 278$$

$$= 1,019 + 278$$

$$= 1,297^\circ\text{C}$$

4-2 One-layer zone의 Heat loss 및 內部溫度

4-2-1 Heat loss

i) Radiation heat loss

$$Q_R = 1,355 \times 10^{-12} \times 3.6 \times 10^4 \times 0.93(553^4 - 278^4)$$

$$= 3.96 \times 10^3 \text{ kcal}/(\text{m}^2) (\text{hr})$$

ii) Free convection heat loss

$$Q_C = 0.63 \times 495 \times 3.28^2 \times 0.252$$

$$= 8.45 \times 10^2 \text{ kcal}/(\text{m}^2)(\text{hr})$$

iii) Total heat loss

$$Q_T = Q_R + Q_C$$

$$= 3.96 \times 10^3 + 8.45 \times 10^2$$

$$= 4.80 \times 10^3 \text{ kcal}/(\text{m}^2) (\text{hr})$$

4-2-2 kiln 內部溫度의 計算(T_3)

i) T_2 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q \cdot L}{K}$$

$$= \frac{4.8 \times 10^3 \times 0.04}{37.2}$$

$$= 5.16^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_1 + 5.16$$

$$= 280 + 5$$

$$= 285^\circ\text{C}$$

ii) T_3 의 計算

$$\Delta T = \frac{Q \cdot L}{K}$$

$$= \frac{4.8 \times 10^3 \times 0.19}{0.9}$$

$$= 1,015 (C^\circ)$$

$$\therefore T_3 = T_2 + 1,015$$

$$= 285 + 1,015$$

$$= 1,300 (C^\circ)$$

4-3 Result

前記 計算의 結果, T_4' 와 T_3 가 비교적 일치하는 것으로 보아 Heat loss의 計算方法이 正確하다 할 수 있겠다.

5. Conclusion

5-1 Heat loss의 比較檢討

Table 3 Heat Loss의 比較

項目	分區		
	One-layer	Two-layer	
Shell表面溫度°C	245	161	
Heat loss	kcal/hr	11.2×10^6	5.68×10^6
	kcal/kg-cl.	39.6	20.1

※ kiln 生産量 670 T/D時

Inlet zone에 Two-layer lining을 함으로써 one-layer lining에 비해 19.5 kcal-kg-cl 열절감이 가능함을 Table 3에서 볼 수 있다.

5-2 Cost의 比較檢討

Two-layer lining으로 절감되는 熱은 cost의 差異를 가져오는 것으로 이를 計算하기 위해 下記의 假定이 필요하다.

假定 1. kiln 生産量 670 T/D

2. 熱消耗量 one-layer 900 kcal/kg-cl.
two-layer(900-19.5) kcal/kg-cl

3. 耐火煉瓦의 單價
shamotte 質 16,400원/ton
규조토 質 57,000원/Ton

4. B.C. oil 單價 3.88원/l (15°C)

5. 耐火煉瓦 수명
one-layer 3年
two-layer $\frac{3}{4} \times (3年)$

6. 조업일수 330 days/year

7. 築爐作業時의 조업중지로 인한 損失은 고려하지 않는다.

위의 假定으로부터 Table 4를 얻으며 two-layer lining은 one-layer lining에 비해 최소시설비를 감안하더라도 38일 가동후에는 clinker 吨當 7원의 순이익을 초래함을 알 수 있다.

Table 4 Cost의 比較檢討

項目	區分		
	One-layer	Two-layer	
clinker吨當 cost	B.C oil	375원	367원
	耐火煉瓦	3¢	4¢
	計	378¢	371¢
耐火煉瓦一切交換時 cost	1,902,000¢	2,033,000¢	

5-3 築爐 및 耐火煉瓦 材質의 問題點

Two layer lining은 one-layer lining보다 상당한 열절감을 기할 수 있고, 이에 따른 원가절감을 초래하나 築爐時 견고히 築爐하기가 힘들며 低質의 斷熱耐火煉瓦를 使用할 경우, 內部 斷熱耐火煉瓦의 破損으로 表面의 shamotte 耐火煉瓦가 붕괴되는 것등을 신중히 檢討한 後 시공해야 한다

5-4 Insulation에 關한 세계적 동향.

Refractory lining으로 우수한 熱切緣 效果와 經濟的 合理性을 얻기 위해 two-component firebrick, light-weight firebrick 및 diatomaceous earth backed fireclay 등을 使用하고 있다.

Two-component firebrick이나 light-weight firebrick은 物理的 化學的 저항력이 크고 열충격에도 견디며 우수한 熱切緣 效果를 가짐으로써 熱損失을 방지하고 築爐上의 問題點들을 제거한다.

熱切緣 效果를 위한 耐火煉瓦의 선택 및 築爐의 問題는 經濟的 綜合檢討를 거친 後 결정해야 할 것이며 耐火煉瓦의 수명이 길고 切緣效果가 좋은 煉瓦를 선택해야 됨은 두말할 것도 없다.

Nomenclature

a: absorptivity, dimensionless

\bar{c}_p : specific heat, Btu/(lb)(°F)

D: out side diameter, m or ft

e: emissivity, dimensionless

(Gr): Grashof number, dimensionless

g: gravity accelation, ft/hr²

hm: heat transfer wefficient, Btu/(ft²) (hr) (°F)

k : thermal conductivity, kcal/(hr) (m) ($^{\circ}$ k)
 or Btu/(hr) (ft) ($^{\circ}$ F)
 L : thickness, m or ft
 $(N_u)_m$: Nusselt number, dimensionless
 (P_r) : Prandtl number, dimensionless
 Q : heat, kcal/hr or Btu/hr
 Q_C : free convection heat, kcal/hr a Btu/hr
 Q_R : radiation heat, kcal/hr or Btu/hr
 T : temperature, $^{\circ}$ C or $^{\circ}$ F
 β : volume coefficient, / $^{\circ}$ k or / $^{\circ}$ R
 σ : Stefan-Voltzmann constant, cal/(sec)(cm^2)
 ($^{\circ}$ k 4)
 ρ : density, lb/ft 3
 μ : viscosity, lb/(hr) (ft)

8. Reference

- 1) W.L. McCabe and J.C. Smith: "Unitr Operations of Chemical Engineering," 2nd ed., p. 466-471 and p 507-521, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1956.
- 2) R.B. Bird, W.E. STEWART and E.N. Lightfool: "Transport Phenomena," p. 297-300 and p. 448-449, John Willey & Sons, Inc., New York, 1960
- 3) Perry, J.H.: Chemical Engineers Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.
- 4) 日本耐火物技術協會: "最新版 耐火物手帖" p. 27, 東京 1966.

<外誌에서>

英國의 시멘트 規格

Cement and Lime Manufacture 1968 41

最近 發行된 새로운 規格을 알아보면 高硫酸鹽시멘트 (Super-Sulphate Cement) 規格 低熱高爐시멘트 (Low-heat Blast-furnace Cement) 規格 등을 포함하여 各種 시멘트에 對한 規格을 一覽表로 하여 表示하였는데,

高硫酸鹽시멘트 (Super-Sulphate Cement)는 特히 硫酸鹽에 依한 侵食에 抵抗力이 强하다. 이 시멘트는 高爐 slag (Blast-furance slag) 或은 石膏를 普通시멘트나 시멘트크링카 또는 其他 石灰物質과 混合한 것으로서 高爐 slag (Blast-furnace slag)의 量은 總重量의 75% 以上이다. 比表面積은 4,000 cm^2/g 이상 不溶殘分 (Insoluble residue)은 30% 以下로 되어 있는 外에 化學成分의 面으로 볼때 NgO. 9.0% 以下 SO $_3$ 4.5% 以下 SO $_3$ 이외의 硫黃 (sulphur) 1.5%로 되어 있다.

Mortar 強度는 3日로 2,000psi 이상 7日로 2,400psi 이상 28日로 3,700psi 이상으로 되어 있음.

低熱高爐시멘트 (Low-heat Blast-furnace Cement)는 普通의 低熱시멘트 (Low-heat Cement)와 같은 用途로 使用되며 強度의 發現의 狀況도 같고 있으나 高爐시멘트에 比하면 大 單히 낮다.

또한 低熱高爐시멘트는 高爐 slag와 普通 Cement clinker를 混合 粉碎한 것으로 slag는 總重量의 50%~90%로 포함되며 比表面積은 2,750 cm^2/g 이 되지 않으면 안된다.

Mortar 強度는 3日로 1,100psi 이상 7日로 2,000psi 이상 28日로 4,000psi 이상이 必要로 되고 있다.

또한 水和熱 (heat of hydration)은 7日로 60cal/g 이하 28日로 70cal/g 이하로 規定되어 있음.