

Rotary Kiln의 熱收支의 計算과 工程管理面의 應用

雙龍洋灰工業株式會社
東海工場 生産課

朴 炳 哲
梁 在 均

Rotary kiln의 燒成工程에 수반되는 燃燒에 있어서는, 燃料의 保有熱量을 充分히 利用하여 損失熱을 최소로 함으로써 熱效率을 向上시키 근본적인 燃料의 절약이 문제시 되고 있다.

이는 設計에서 고려되어야 하겠고 燃燒工程의 管理를 통해 달성되어야 한다. 燃料의 合理的 절약은 단순히 工業的인 利益을 초래할 뿐만 아니라 大部分의 燃料을 外國에 의존하고 있고 원가의 15%前後가 연료비인 사정을 참작해서라도 지극히 중요하고 당연한 일이라 하겠다.

Rotary kiln 및 그 부대시설(clinker cooler 및 preheater)에 對한 熱收支는 工程 전반의 열흐름(heat flow)을 이해하여 근본적인 熱管理를 목적으로 하며 경우에 따라서는 工程 자체의 生産性과도 깊은 관련이 있다.

이러한 heat flow를 測定 檢討함으로써 工程上의 管理項目 및 問題點을 발견할 수가 있다. 따라서 本稿에서는 heat balance의 測定方法, 計算, 檢討等을 참고문헌 및 heat balance 관계 프린트를 통해 발췌하고자 한다. 더우기 rotary kiln의 熱收支에 관한 國內規格이 없음은 제반 사정으로 보아 자못 유감스러운 일이며 社內 혹은 國內 규격제정에 片鱗이나마 도움이 되었으면 다행한 일이라 하겠고 本稿의 전개 방향도 이를 위해 JIS나 DIN같은 國외의 규격도 비교 검토한 것이다. 더우기 Cement 工業에 종사하는 engineer들에게 커다란 도움이 된다면 극히 만족스럽다 하겠다.

熱收支의 총괄

(General Aspects of Heat Balance)

Rotary kiln의 熱收支는 아래의 項目을 포함시켜야 한다. 각 項目에 對한 구체적 설명과 이론적 배경 근거 등은 차차 記述해 갈 것이다.

- (1) 設備概要
- (2) 測定日時 및 測定者
- (3) 測定項目 및 測定方法
- (4) 測定結果
- (5) 豫備計算
- (6) 熱收支 計算
- (7) 檢討 및 結論

1. 設備概要(Equipment)

工場設備에 관한 사항은 포괄적이고 간략해야 하며 명료하게 記述해야 한다. 熱管理에 관한 문헌 및 外國의 規格에서 나타난 바를 종합하면 아래와 같다.

1-1 Rotary kiln

- (1) 工場名과 所在地
- (2) 제조방법
- (3) 제작자
- (4) 건설년도
- (5) 크기(內徑과 全長)
- (6) 경사

- (7) 유효 內容積
- (8) 회전수
- (9) 燃料
- (10) 一次空氣에 관한 事項(空氣源및先端徑)
- (11) 집진기
- (12) 굴뚝의 크기

1.2 Preheater

- (1) 型式
- (2) 제작자
- (3) 건설년도
- (4) 크기

1.3 Clinker Cooler

- (1) 구조(外部) 및 형식
- (2) 제작자
- (3) 건설년도
- (4) 크기
- (5) 경사
- (6) 내부구조
- (7) clinker breaker 에 관한 事項

1.4 송풍기(fan 혹은 blower)

System의 제반 송풍기에 對해
(특히 Kiln I.D.F., Pti. air Fan, Cottrell
I.D.F. Cooling Fan Cooler IDF 等)

- (1) 구조
- (2) 제작자
- (3) 壓力(press)
- (4) delivering volume
- (5) 회전수
- (6) 모터

1.5 폐열이용

Waste heat boiler 가 있을 경우에나 dryer等이 있을 경우에는 이에 관해 記述한다(乾式原料 mill 포함)

2. 測定日時 測定者

測定日時は 後에 참고가 될 수 있도록 정확히 기록하며 測定時의 燒式狀態에 對해서도 언급해야 한다.

- (1) 天候
 - (2) 氣溫
 - (3) 氣壓
 - (4) 濕度
 - (5) 風向·風速
- 等을 明記한다.

3. 測定項目 및 測定方法

3.1 測定項目

測定項目은 가능한 많이 하여 비교 확인할 수 있도록 한다.

3.1.1 供給原料

- (1) 供給原料量
- (2) 供給原料의 溫度
- (3) 供給原料의 組成, 附着水分

3.1.2 Clinker

- (1) Clinker 燒出量
- (2) Clinker의 溫度(Cooler 入口 및 出口)
- (3) Clinker의 組成

3.1.3 燃料

- (1) 燃料의 種類와 그 使用比率
- (2) 燃料의 使用溫度
- (3) 燃料의 組成및 發熱量

3.1.4 各 gas 및 air의 流量 溫度 壓力 組成
(Primary air, H.P. air, L.P. air, Cooler waste gas, preheater waste gas inlet chamber gas 組成)

3.1.5 Preheater 및 cooler waste gas의 dust load

3.1.6 設備의 外壁溫度

3.2 測定方法

各 測定項目에 對한 測定方法은 이미 잘 알려져 있으며 더우기 測定機器 구입시에 메이카로부터 충분한 설명서가 동봉되는 것이므로 여기서는 測定에 必要한 機器만 소개한다.

- (1) 組成分析에 必要한 실험실 설비
- (2) material flow에 관한 현장설비(weigher 및 flowmeter)
- (3) 棒狀溫度計
- (4) pitot tube
- (5) manometer
- (6) 水分分析장치
- (7) dust sampler
- (8) 특수온도 측정장치(pyrometer, contact thermometer)
- (9) orsat 분석기

附記할 것은,

시멘트 工場은 대체적으로 clinker 燒出量의 平均 설비가 없으며 차후 여기에 관해 記述하기로 한다.

4. 測定給果

5. 豫備計算

5-1 Clinker 燒出量

大部分의 Cement 工場에서는 秤量設備가 없기 때문에 다음과 같은 방법으로 燒出量을 算出한다 즉

$$G_{KI} = \frac{G_R}{f} \dots\dots\dots(5.1)$$

여기서 G_{KI} : clinker 燒出量, 톤/시간
 G_R : 原料供給量, 톤/시간
 f : clinker factor

이다.

그런데 ignition loss 를 제외해 버릴 경우 (clinker) + (dust) - (coal ash) = (raw meal) 이므로 原料供給秤量장치의 오차를 고려하면 clinker factor f 는 다음 두 式으로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{1}{100 - g_R} \left\{ (100 - g_{KI}) + \sum \frac{S_i}{100} (100 - g_{Sti}) - \frac{A \cdot K}{100} \right\} \times \frac{1}{1 - \frac{E_R}{100}} \dots\dots\dots(5.2)$$

혹은

$$f = \frac{\sum O_{KI} + \sum \left(\frac{S_i}{100} \sum O_{Sti} \right) - \frac{A \cdot K}{10000} \sum O_A}{\sum O_R} \times \frac{1}{1 - \frac{E_R}{100}} \dots\dots\dots(5.3)$$

이다.

여기에서
 g_R : 原料의 ignition loss, %
 g_{KI} : clinker의 ignition loss, %
 S_i : 流失혹은 recycle 하는 dust 의 clinker 에 대한 比, %
 g_{Sti} : dust의 ignition loss, %
 A : coal 中の ash, %
 K : coal 使用量의 clinker에 對한比, %
 E_R : 原料供給秤量장치의 오차, %
 O_{KI} : clinker 中の 금속산화물. %
 O_{Sti} : 各 dust 中の 금속산화물. %
 O_A : coal ash 中の 금속산화물. %
 O_R : 原料中の 금속산화물. %

이다.

크링카 팩터 f 에 관한 계산에는 아래와 같다. 물론 熱收支 및 工程管理을 위해 다음과 같은 測定結果를 얻고 난후라야 計算이 可能하다.

計算例 5-1

(1) Clinker의 組成
 S_2O_2 22.3%

Al_2O_3	5.3	
Fe_2O_3	3.2	$g_{KI}=0.5\%$
CaO	65.0	$\sum O_{KI}=22.3+5.3+3.2+$
MgO	2.0	$65.0+2.0=97.8\%$
Ig. Loss	0.5	
SO_3	0.9	
計	99.2%	

(2) 供給原料의 組成

S_2O_2	14.6%	
Al_2O_3	3.4	
Fe_2O_3	2.2	$g_R=34.7\%$
CaO	42.4	$\sum O_R=64.0\%$
MgO	1.4	
Ig. Loss	34.7	
計	98.7%	

(3) 各 dust量 및 組成

各 dust의 量은 dust sampler로써 測定해야되며 경우에 따라서는 preheat 첫 cyclone의 집진효률로써 計算될 수 있다.

더욱 Cooler의 waste gas 및 Clinker 수송계통의 dust 測定은 곤란함으로 이는 고려에 넣지 않고 다음과 같이 마지막에 계산한다.

(i) preheater dust量

dust sampler에 依해 1.426 T/H
 (단약 cyclone 효률에 依한 다면
 供給原料 45.0 T/hr
 cyclone 효률 96.0%

∴ dust 量 = 45.0 × (1 - 0.96) = 1.8 T/H 이다.)

(ii) dust 組成

S_2O_2	10.8%	
Al_2O_3	3.7	
Fe_2O_3	2.1	$g_{St}=35.4\%$
CaO	43.9	$\sum O_{St}=62.1\%$
MgO	1.6	
Ig. Loss	35.4	
計	97.7%	

(4) Coal ash

本 計算에서는 燃料는 B.C. oil 뿐이므로 고려하지 않는다.

(5) clinker factor의 計算

(5.2) 式에서

$$f = \frac{1}{100 - g_R} \left\{ (100 - g_{KI}) + \sum \frac{S_i}{100} (100 - g_{Sti}) - \frac{A \cdot K}{100} \right\} \times \frac{1}{1 - \frac{E_R}{100}}$$

$$A \cdot K = 0 \frac{1}{1 - \frac{E_R}{100}} = 1 \text{ 이고 preheater 에서}$$

의 dust loss 만 고려하고 기타의 dust loss 를 마지막에 계산할 경우

$$f' = \frac{1}{100 - g_R} \left\{ (100 - g_{Kl}) + \frac{S}{100} (100 - g_{St}) \right\}$$

그런데 f' 와 S 는 둘다 미지이므로 trial and error method 로 計算해야 한다.

대체로 $f = 1.54 \sim 1.70$ 이므로

$f' = 1.58$ 로 가정하면

$$\text{크링카 燒出量} = \frac{45.0}{1.58} = 28.5 \text{ T/H}$$

$$\therefore S = \frac{1.462}{28.5} \times 100 = 5.12\%$$

따라서 좌변 = 1.58

$$\begin{aligned} \text{우변} &= \frac{1}{100 - 34.7} \left\{ (100 - 0.5) + \frac{5.12}{100} (100 - 35.4) \right\} \\ &= 1.575 \end{aligned}$$

좌변 \approx 우변

이제 cooler 및 수송계통, 평량기의 오차를 감안하여 (이는 2~3%이나 2%로 잡으면)

$$\begin{aligned} f &= f' \times \frac{1}{1 - 0.02} \\ &= 1.58 \times \frac{1}{0.98} \\ &= 1.61 \end{aligned}$$

따라서 크링카 燒出量 = $\frac{45}{1.61} = 28.0 \text{ T/hr}$ 이다

(5.3)식에 依하면 마찬가지로 하여

$$f' = \frac{\Sigma O_{Kl} + \frac{S}{100} \Sigma O_{St}}{\Sigma O_R}$$

trial and error method에 의해

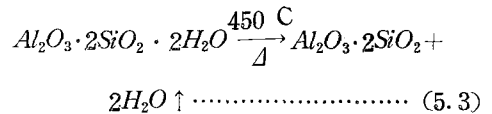
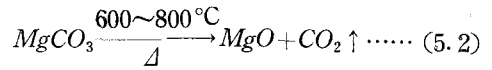
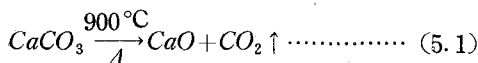
$f' = 1.58$ 이하 위와 같다.

5.2 Preheater 排gas量. 成分

5.2.1 供給原料에서 發生하는 排gas量

供給되는 原料에서 發生하는 排gas는 原料中の $CaCO_3$ 및 $MgCO_3$ 의 分解에 依한 CO_2 와 附着水分 및 粘土의 結合水分에 依한 H_2O 를 생각할 수 있다

附着水分 이외의 諸分解 gas는 아래의 方程式에 따라 分解되어 排gas 中에 含有된다.



따라서 定量的인 解析에 依해 附着水分의 증발 및 分解gas의 量은 아래 式으로 求해진다.

(1) 炭酸gas量

(5.1) (5.2)식에 依해

$$\begin{aligned} VCO_{2R} &= \frac{1}{100 \times 1.977} (0.7848 CaO_{Kl} + 1.092 MgO_{Kl}) \\ &= \frac{22.4}{56} \times \frac{CaO_{Kl}}{100} + \frac{22.4}{40} \times \frac{MgO_{Kl}}{100} \quad (5.4) \end{aligned}$$

여기서 VCO_{2R} : 供給原料에서 發生하는 CO_2 $N_m^3/Kg-cl$

CaO_{Kl} : clinker 中の CaO %

MgO_{Kl} : clinker 中の MgO %

이다.

이 밖에도 原料分析으로 부터 VCO_{2R} 을 計算할 수 있고 preheater waste gas 中の dust를 고려한 VCO_{2R} 을 計算하는 方法이 있으나 어느 것이나 定量的인 解析法이므로 생략하기로 하겠다.

(2) 水分

앞서에도 記述했듯이 原料로부터 發生하는 水分에는 附着水分과 結合水分이 있는데 특히 附着水分은 습식 및 반건식제조방법에서는 重要한 管理項目이고 건식에서도 blending 및 原料 mill의 能力等を 고려할 때 무시할 수 없다.

(i) 附着水分

$$VH_{2O_R} = \frac{1}{0.8038} \times \frac{d \cdot f'}{100 - O} \dots \dots \dots (5.5)$$

(ii) 結合水分

$$\begin{aligned} V_{Hydr} &= \frac{44.8}{102} \times \frac{Al_2O_{3Kl}}{100} \\ &= 0.439 \times \frac{Al_2O_{3Kl}}{100} \dots \dots \dots (5.6) \end{aligned}$$

(5.6) 式은 물론 粘土의 大部分이 kaolin일 경우 사용되고 이런 가정이 필요하다.

여기서

VH_{2O_R} : 附着水分에 依한 排gas量, $Nm^3/kg-cl$

d : 原料中の 附着水分의 重量, %

f' : clinker factor에서 preheater 排 gas 中の dust이외의 dust loss를 무시할

경우임.

V_{Hydr} : 原料에서 發生하는 結合水分, $Nm^3/kg\text{-Cl}$

Al_2O_{3Cl} : clinker 中の Al_2O_3 成分, %

5.2.2 重油의 燃燒에 依한 排gas量

시멘트 工業에서 使用되는 燃料은 대개 B.C oil 을 使用하지만 石炭과 混燒하거나 fuel gas를 使用하기도 한다.

(1) 重油의 原素分析

重油의 原素分析은 實驗室의 方法으로 알 수 있으나 工場의 제반설비로 因해 불가능할 경우는 炭素 86% 水素 12%로 하여 諸計算을 할 수 있고 좀더 確實하게 하기 위해서는 아래의 관계식을 使用한다.

$$H = 25 - 15d \dots\dots\dots (5.7)$$

重油 中の 硫黃은 간단한 方法으로 分析되므로 炭素는 差로써 계산된다.

여기서

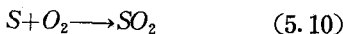
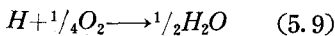
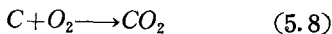
H : 重油 中の 水素

d = 重油의 比重($15^\circ C$)

이다.

(2) 重油의 燃燒에 必要한 理論空氣量

重油의 原素分析이 얻어지면 重油 中の 原素들은 아래의 式과같이 空氣 中の 酸素가 燃燒反應을 일으킨다.



따라서 燃燒에 必要한 重油 1kg當의 理論的인 酸素는,

$$O_{min}' = 1.864 \times \frac{C}{100} + 5.533 \times \frac{H}{100} + 0.698 \times \frac{S}{100} - 0.700 \times \frac{O}{100} \quad (5.11)$$

또한 clinker 1kg 當의 理論的 酸素量은

$$O_{min} = \frac{K}{100} \cdot O_{min}' \quad (5.12)$$

따라서 clinker 1kg當의 理論的인 空氣量은

$$L_{min} = 4.762 \times O_{min} \quad (5.13)$$

이다.

여기서

O_{min}' : 重油 1kg 燃燒에 必要한 理論酸素量 $Nm^3/kg\text{-oil}$

C : 重油 中の 炭素成分, %

H : 重油 中の 水素成分, %

S : 重油 中の 硫黃成分, %

O : // 酸素成分, %

O_{min} : clinker 1kg當의 理論酸素量, $Nm^3/kg\text{-cl}$

K : // 重油使用量比, %

L_{min} // 理論空氣量, $Nm^3/kg\text{-cl}$

重油使用量 k 에 對한 計算은 약간의 주의가 必要하다 왜냐하면 重油使用量은 現場의 flow meter 에 依해 測定되는 것이므로 重油의 比重을 表示할 경우의 基準溫度인 $15^\circ C$ 보다 훨씬 높은 $110 \sim 120^\circ C$ 에서 測定되기 때문에 이를 換算해야만한다 이 경우에는 容積換算係數를 求하여 重油使用量에다 곱하고 다시 重油의 比重을 곱하면 重油使用량을 알 수 있다(JIS K 2251 부록참조)

(3) 과잉공기량의 계산

과잉공기량을 計算하기 위해서는 必히 Waste gas의 分析을 行해야 하며 Orsat analyzer로 쉽게 測定할 수 있다.

重油의 理論空氣量에 對해 실제로 供給되는 空氣는 燃燒效率을 增加시키기 위하여 항상 과잉으로 供給되며 이를 理論空氣量으로 나눈 것을 空氣比라 하며 燃燒의 定量的 計算에 依해 Orsat分析 結果로써 計算된다.

즉 空氣比, m 은

$$m = \frac{\text{실제供給空氣量}}{\text{理論空氣量}} = \frac{N_2}{N_2 - 3,762 \left(O_2 - \frac{CO}{2} \right)} \quad (5.14)$$

空氣比의 定義에 依해 과잉공기량, Lu 는

$$Lu = L_{min} \cdot (m - 1) \quad (5.15)$$

供給空氣量 L_{Tot} 는

$$L_{Tot} = L_{min} \times m \quad (5.16)$$

과잉공기량 酸素는

$$VO_2 = 0.21 Lu \quad (5.17)$$

이다.

여기서

N_2 : Orsat 分析에 依한 질소成分, %

O_2 : Orsat分析이 依한 산소성분, %

CO : // 일산화탄소, %

Lu : 과잉공기량, $Nm^3/kg\text{-cl}$

m : 공기비

L_{Tot} : 供給空氣量 $Nm^3/kg\text{-cl}$

VO_2 : 과잉공기 中の 酸素量, $Nm^3/kg\text{-cl}$

(4) 重油燃焼에 의한 排gas量

(5.8) (5.9) (5.10) 式 및 重油附着水分에 의한 理論的인 排gas量(最少의 排gas量)은 아래와 같다.

$$(i) V_{CO_2} = 1.855 \times \frac{C}{100} \times \frac{K}{100}$$

$$(ii) V_{SO_2} = 0.6841 \times \frac{S}{100} \times \frac{K}{100}$$

$$(iii) V_{H_2O} = 11.21 \times \frac{H}{100} \times \frac{K}{100}$$

$$(iv) V_{H_2O} = 1.2441 \times \frac{H_2O}{100} \times \frac{K}{100}$$

$$(v) V_{N_2} = 0.800 \times \frac{N}{100} \times \frac{K}{100}$$

$$(vi) V_{N_2 \text{ min}} = 0.79 \times L_{m \text{ in}}$$

$$V_{m \text{ in}} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{N_2 \text{ min}} \quad (5.18)$$

실제 生成되는 排gas 量은

CO發生이 없을 경우

$$V_{Tat} = V_{m \text{ in}} + L_U \quad (5.19)$$

CO發生의 경우

$$(i) V_{CO} = \frac{(V_{CO_2} + V_{CO_2R}) \cdot CO}{CO_2 + CO}$$

$$(ii) V_{CO_2Tat} = V_{CO_2} - V_{CO}$$

$$(iii) V_{N_2Tat} = 0.79 \times L_{Tat}$$

$$(iv) V_{O_2} = 0.21 \times L_U + 0.5 V_{CO}$$

이므로

$$V_{Tat} = V_{CO} + V_{CO_2Tat} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{H_2O'} + V_{N_2Tat} + V_{O_2} \quad (5.20)$$

이다.

여기서

V_{CO_2} : 重油燃焼로 發生하는 CO_2 量 $Nm^3/kg-cl$

V_{SO_2} : // SO_2 量, //

V_{HO_2} : // H_2O 量, //

$V_{H_2O'}$: 重油附着水分에 의한 H_2O 量, //

V_{N_2} : 重油中の 질소에 의한 N_2 量, //

$V_{N_2m \text{ in}}$: 理論燃焼空氣中の 질소량 $Nm^3/kg-cl$

H_2O : 重油附着水分比, %

N : 重油中の 질소분, %

$V_{m \text{ in}}$: 重油燃焼로 發生하는 最小排gas量

$Nm^3/kg-cl$

V_{Tat} : 重油燃焼로 發生하는 排gas量, $Nm^3/kg-cl$

V_{CO} : 重油燃焼時 發生하는 CO gas, $Nm^3/kg-cl$

V_{CO_2Tat} : CO gas 發生時的 CO_2 gas量, $Nm^3/kg-cl$ 이다.

이와 같이 重油燃焼時의 $V_{m \text{ in}}$ 및 V_{Tat} 를 구하여 비교해 보는 것은 工程管理上 매우 重要的 것이다.

石炭 및 fuel gas의 경우에도 위와 같으므로 생략하기로 한다. 더욱이 重油-石炭의 混用을 기피하는 요즈음인지라 케이스 바이 케이스로 활용함이 좋겠다.

그런데 kiln I.D.F.의 용량관계를 검토해 보기 위해서는 위와같은 복잡한 式을 사용할 것이 아니라 실험적으로 얻어진 式들이 있으므로 이러한 式을 使用하는 편이 훨씬 간이하다.

즉 燃料의 低發熱量을 利用하여 아래와 같은 실험식이 나와있다(JIS R 0303 부록)

石炭의 경우

$$V'_{m \text{ in}} = \frac{1.17 \times H_i}{1000} + 0.05 \quad (5.21)$$

$$L'_{m \text{ in}} = \frac{1.09 \times H_i}{1000} - 0.09 \quad (5.22)$$

重油의 경우

$$V'_{m \text{ in}} = \frac{1.11 \times H_i}{1000} + 0.04 \quad (5.23)$$

$$L'_{m \text{ in}} = \frac{1.04 \times H_i}{1000} + 0.02 \quad (5.24)$$

여기서

H_i : 重油 또는 石炭의 低發熱量 $kcal/kg-fuel$

$V'_{m \text{ in}}$: 理論燃焼 排gas量 $Nm^3/kg-fuel$

$L'_{m \text{ in}}$: 理論燃焼 空氣量 $Nm^3/kg-fuel$

(5) 燃焼時의 空氣中 濕分

空氣中에 含有되어 있는 수증기는 적은 양이나 마 排gas의 일부분을 차지하게 되는데 이는 濕度(humidity)를 測定함으로써 計算할 수 있다.

즉 상대습도(relative saturation) Y_r 일 경우 공기 $1Nm^3$ 中の 수증기량은

$$H_m = H_{ms} \times \frac{Y_r}{100} \quad (5.25)$$

따라서

$$V_{H_2O} = \frac{H_m \times L_{Tat}}{803.8} \quad (5.26)$$

이다.

여기서

H_m : 공기 $1Nm^3$ 中の 수증기량 g/Nm^3

H_{ms} : 포화증기압의 경우 수증기량 g/Nm^3

Y_r : 상대습도, %

V_{H_2O} : 크링카 1kg에 對한 수증기량 $Nm^3/kg-cl$ 또는 건습온도계의 건구나 습구온도를 알면 humi

idity chart에서 계산이 가능하다.

이상과 같이 preheater 排gas의 計算이 끝나면 이로서 preheater 排gas量을 알 수 있게 되며 pitot tube에 의한 測定値와 비교 검토하거나 preheater 排gas의 成分比 table을 만들어 Orsat 分析 結果에 비교 검토하여 測定 및 分析의 精確성을 재확인한다.

이를 다음과 같은 表를 만든다.

Preheat waste gas 量 및 組成

gas 成分	gas量, Nm ³ /kg-cl	組 成 %
CO ₂		
H ₂ O		
N ₂		
O ₂		
SO ₂		
CO		

5.3 重油의 發熱量

重油의 發熱量은 原素分析에 의한 熱力學的 方法으로도 구할 수 있으나 여기서는 實驗室에서 測定하는 方法이 간이하므로 후자만 다루기로 하겠다. 重油(燃料)의 發熱量(heating value)는 高發熱量(total heating value)과 低發熱量(net heating value)이 있다. 熱力學的으로 양쪽다 25°C를 기준으로 하고 있으나 燃燒 結果의 水分狀態가 前者는 액 態 상태이며 後者는 기체 상태일 경우의 發熱量으로 定義된다.

그런데 實驗室에서 測定되는 것은 isothermal bath이므로 아래와 같이 低發熱量을 求할 수 있다. 工學에서 보편적으로 使用되는 燃效率은 低發熱量을 기초로 해서 計算된다.

$$H_h = \frac{100 - H_2O}{100} \times H_0 \quad (5.27)$$

$$H_l = H_h - 6(9H + H_2O')$$

여기에서

H₀: 實驗室 恒溫 bath에서의 高發熱量, kcal/kg-fuel

H_h: 高發熱量, kcal/kg-fuel

H_l: 低發熱量, "

H₂O': 附着水分 + 結合水分

H₂O: 附着水分

이다.

6. 熱收支 計算

燒成工程中 임의의 工程을 system으로 하여 heat flow의 input과 output을 計算할 수 있으나 本稿에서는 工程 전반과 燃回收의 重要한 役割을 하는 clinker cooler의 熱收支 計算方法을 記述하고자 한다.

6.1 燒成工程 전반의 熱收支

燒成工程 전반에 관한 열흐름(heat flow)을 도해하면 그림 6.1과 같다.

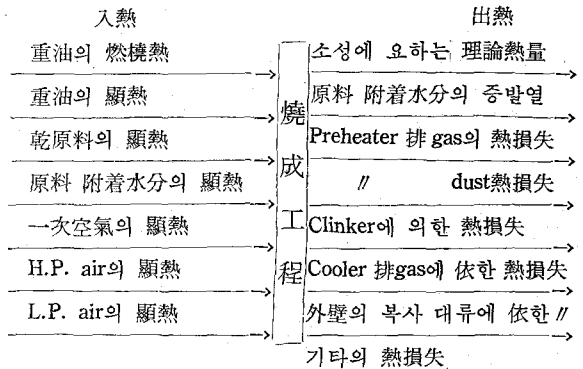


그림 6.1 燒成工程 전반의 열흐름 (dry process, 重油專燒)

(6.1.1) 入熱, $Q_1 = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13}$

(1) 燃料에서의 入熱 $Q_{11} = Q_{111} + Q_{112}$

(i) 燃料의 燃燒熱, Q_{111}

$$Q_{111} = H_l \times \frac{K}{100} \quad \text{kcal/kg-cl} \quad (6.1)$$

(ii) 燃料의 顯熱(sensible heat), Q_{112}

$$Q_{112} = C p_{mf} \times (\theta_{112} - 20) \times \frac{K}{100}, \quad \text{kcal/kg-cl} \quad (6.2)$$

여기서

H_l: 燃料의 低發熱量, kcal/kg-fuel

K: clinker 1kg에 對한 燃料使用比, %

C p_{mf}: 燃料의 平均比熱 kcal/(kg)(°C)

θ₁₁₂: // 使用溫度, °C

H_l 및 K을 求하는 方法은 豫備計算에서 설명했으므로 생략하기로 하고 간혹 혼동을 일으키는 平均比熱에 관해 說明하고자 한다.

溫度 t₁에서의 比熱을 C p₁

溫度 t₂에서의 比熱을 C p₂

할 경우

t₁과 t₂ 사이의 平均比熱 C p_m은

$$C p_m = \frac{C p_1 \times t_1 - C p_2 \times t_2}{t_2 - t_1} \quad (6.3)$$

이다.

重油와 石炭의 Cp_m 은 各各 0.45kcal/(kg)(°C) 0.25kcal/(kg)(°C) 이다.

그리고 熱收支 計算을 위해 20°C에서 임의 온도까지의 平均比熱表나 graph를 利用하면 便利하다.

(2) 原料에서의 入熱 $Q_{12} = Q_{121} + Q_{122}$

(i) 乾原料의 顯熱 Q_{121}

$$Q_{121} = R \times Cp_{mR} \times (\theta_{121} - 20) \text{kcal/kg-cl} \quad (6.4)$$

여기서

R : clinker 1kg當의 乾原料量(예비계산 참조)

Cp_{mR} : 原料의 平均比率 kcal/(kg)(°C)

θ_{121} : 原料의 供給溫度, °C

이다.

原料의 平均比熱은 原料자체가 단지 여러 成分이 物理적으로 混合되어 있는데 불과하므로 이는 各成分은 平均比熱을 求하여 計算한다.

예로써 $CaCO_3$ 80%

SiO_2 20% 20~100°C에서의

混合되어 있는 物質의 平均比熱은

$CaCO_3$ 의 平均比熱 = 0.223 kcal/(kg)(°C)

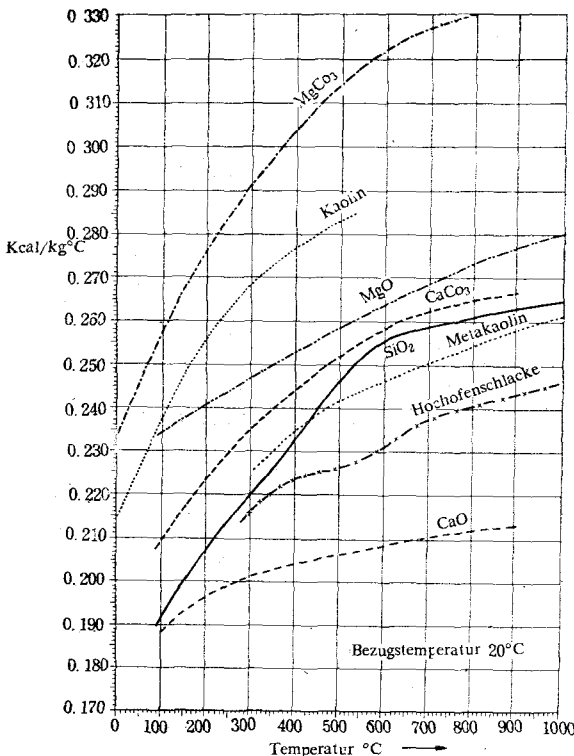


그림 2. 原料成分의 平均比熱

$$\begin{aligned} SiO_2 &= 0.192 \text{ kcal/(kg)(°C)} \\ \text{混合物의} &= 0.223 \times 0.8 + 0.192 \times 0.2 \\ &= 0.217 \text{ kcal/(kg)(°C)} \end{aligned}$$

이다.

原料 成分의 平均比熱은 그림(6.2)와 같다.

그러나 原料의 組成은 比較的 일정하게 유지되며 平均比熱으로써 0.20 kcal/(kg)(°C)를 使用할 수도 있다.

(ii) 原料 附着水分의 증발열 Q_{122}

$$Q_{122} = G_{H_2O R} \times (\theta_{121} - 20) \text{kcal/kg-cl} \quad (6.5)$$

(단 $Cp_{m H_2O} = 1.0$)

여기서

$G_{H_2O R}$: 原料 附着水分量 kg/kg-cl

$$G_{H_2O R} = V_{H_2O R} \times (<110^\circ\text{C}) \times \frac{18}{22.4} \quad (6.6)$$

(예비 계산 참조)

(3) 空氣에서의 入熱 $Q_{13} = Q_{131} + Q_{132} + Q_{133}$

(i) 一次空氣의 顯熱 Q_{131}

$$Q_{131} = L_P \times Cp_{mP} \times (\theta_{131} - 20) \text{kcal/kg-cl} \quad (6.7)$$

여기서

L_P : clinker 1kg當의 一次空氣量 $Nm^3/kg-cl$

Cp_{mP} : 一次空氣의 平均比熱 kcal/(Nm^3)(°C)

θ_{131} : 一次空氣 溫度 °C

이다.

(ii) High press cooling air의 顯熱 Q_{132}

grate cooler의 特徵은 kiln hood에 가까운 쪽에는 高壓 fan으로 clinker을 냉각시키고 cooler outlet에는 低壓 fan으로 clinker는 냉각시킨다.

우선 H.P. air의 顯熱에

$$Q_{132} = L_{HP} \times Cp_{mHP} \times (\theta_{132} - 20) \text{kcal/kg-cl} \quad (6.8)$$

여기서

L_{HP} : H.P. air量 $Nm^3/kg-cl$

Cp_{mHP} : H.P. air의 平均比熱 kcal/(Nm^3)(°C)

θ_{132} : H.P. air의 溫度

(iii) Low press cooling air의 顯熱, Q_{133}

$$Q_{133} = L_{LP} \times Cp_{mLP} \times (\theta_{133} - 20) \text{kcal/kg-cl} \quad (6.9)$$

여기서

L_{LP} : L.P. air量 $Nm^3/kg-cl$

Cp_{mLP} : L.P. air의 平均比熱 kcal/(Nm^3)(°C)

θ_{133} : L.P. air의 溫度

이다.

空氣의 顯熱計算은 下記 方法이 간편하다. 즉

溫度에 따른 空氣顯熱曲線을 利用하면 된다. 그림 (6.3)이 溫度에 따른 空氣 1Nm³의 顯熱 graph 이다.

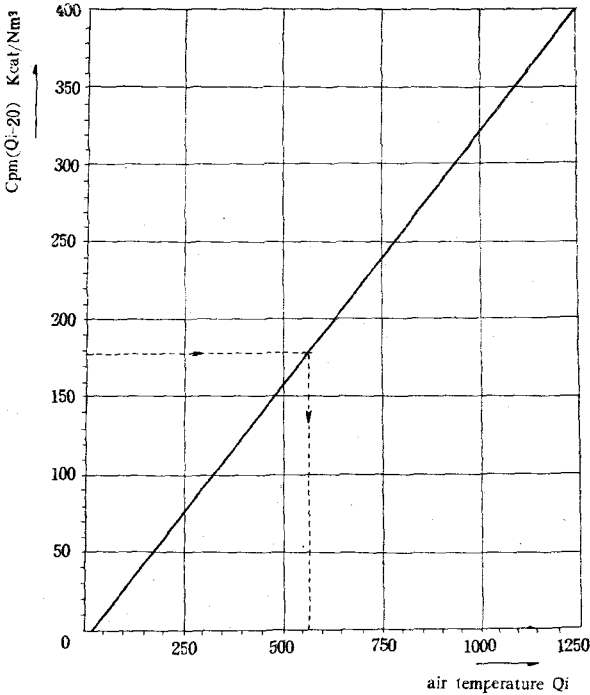


그림 6.3 air 1Nm³의 sensible heat

(6.1.2) 出熱 $Q_2 = Q_{21} + Q_{22} + Q_{23} + Q_{24} + Q_{25} + Q_{26} + Q_{27} + Q_{28}$

(1) 燒成(clinking)에 要하는 理論熱量, Q_{21} kcal/kg-cl

Clinker의 燒成用 熱은 乾原料를 900°C까지 加熱에 要하는 熱 CaCO₃, MgCO₃, 粘土의 分解熱 및 分解된 原料를 900°C → 1450°C로 加熱에 要하는 熱을 合하여 clinker의 生成熱 및 分解gas의 顯熱, 1450°C의 clinker顯熱을 總計 결과와 마찬가지로 計算해 갈 수 있지만 많은 文헌에 간단한 計算式이 나와있다. (熱力學的 計算 結果)

Clinker 鑛物中の alkali鑛物의 存在를 무시할 경우에는 조건에 따라 다음의 公式을 적용한다.

(i) 粘土鑛物 구조가 未知이며 그 結晶水 또한 未知일 경우(보편적으로 자주 사용된다)

$$Q_{21} = 4.11A_T + 6.48M_C + 7.646C_C - 5116 \cdot S - 0.59F \quad (6.10)$$

(ii) 粘土鑛物은 未知이나 그 結晶水가 既知일 경우

$$Q_{21} = 2.22A_T + 5.86H_H + 6.48M_C + 7.646C_C -$$

$$5.116S - 0.59F \quad (6.11)$$

(iii) 粘土鑛物이 既知이고 結晶水 未知일 경우

$$Q_{21} = 5.30A_K + 3.12A_M + 3.92A_I + 6.48M_C + 7.646C_C - 5.116S - 0.59F \quad (6.12)$$

(iv) 粘土鑛物이 既知이고 結晶水 既知일 경우

$$Q_{21} = 3.34A_K + 1.49A_M + 1.82A_I + 5.86H_H + 6.48M_C + 7.646C_C - 5.116S - 0.59F \quad (6.13)$$

여기서

A_T : clinker中の Al₂O₃ 成分, %

A_K : Kaolinit로부터의 Al₂O₃, %

A_M : Montmorillonit로부터의 Al₂O₃, %

A_I : Illit로부터의 Al₂O₃, %

H_H : clinker 100g에 對한 粘土로부터의 結晶水%

M_C : MgCO₃로부터 크링카中の MgO, %

C_C : CaCO₃ " " CaO, %

S : clinker中の SiO₂ %

F : " Fe₂O₃, %

이다.

그러나 大部分 黃酸鹽의 形態로 clinker中の 存在하는 alkali의 生成熱을 고려할 경우 아래의 (6.14) 나 (6.15)式을 윗式에 加算해야 한다.

SO₃를 基準으로 計算

$$Q_S = -20.0(S_{K_I} + S_{S_I} - S_R) \text{ kcal/kg-cl} \quad (6.14)$$

Alkali

$$Q_S = -25.8(N_R - N_{K_I}) - 17.0(K_R - K_{K_I}) + 20.0(S_R - S_{K_I}) \text{ kcal/kg-cl} \quad (6.15)$$

여기서

S_{K_I} : clinker中の SO₃ 成分, %

S_{S_I} : preheater dust 中の SO₃의 clinker에 對한 比, %

S_R : 原料中の SO₃의 clinker에 對한比, %

Q_S : alkali sulfate의 生成熱, Kcal/kg-cl

N_R : 原料中の Na₂O의 clinker에 對한比, %

N_{K_I} : clinker中の Na₂O 成分, %

K_R : 原料中の K₂O의 clinker에 對한比, %

K_{K_I} : clinker中の K₂O 成分, %

이다.

(2) 原料 附着水分의 증발열 Q_{22}

$$Q_{22} = G_{H_2O R} \times 586 \text{ kcal/kg-cl} \quad (6.16)$$

$G_{H_2O R}$ 은 入熱編에 소개했다.

(3) Preheater 排gas의 熱損失, Q_{23}

$$Q_{23} = V_P \cdot C_{pMP} (\theta_{23} - 20) \quad (6.17)$$

여기서

V_P : Preheater 排gas量, Nm³/kg-cl

C_{pmp} : // 排gas의 平均比熱, kcal/(Nm³)(°C)

θ_{23} : // 溫度, °C

V_p 의 計算方法은 예비계산에서 說明했다.

C_{pmp} 의 計算은 그림 (6.4)을 利用하여 原料 平均比熱 計算과 마찬가지로 한다.

즉 preheater 排gas의 組成이 下記와 같다면

CO ₂	20%
O ₂	3
N ₂	65
H ₂ O	12
	100%

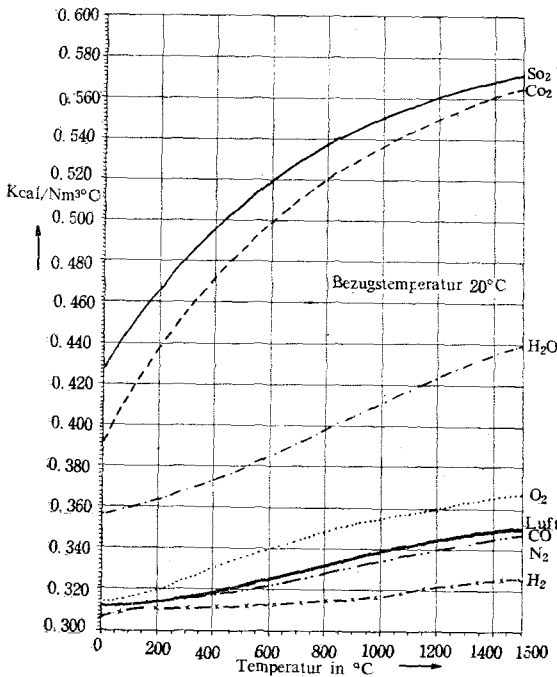


그림 6.4 排gas成分의 平均比熱

그림 (6.4)로부터 20~350°C의 平均比熱은

$$C_{pmp} = 0.20 \times 0.463 + 0.03 \times 0.327 + 0.65 \times 0.311 + 0.12 \times 0.371 = 0.349 \text{ kcal/(Nm}^3\text{)(kg-cl)}$$

이다.

만약 preheater 排gas 中 CO 가 存在하면 不完全燃焼에 依한 損失로 加算한다.

$$Q_{co} = \frac{CO}{100} \cdot V_p \cdot HICO$$

kcal/kg-cl (6.18)

여기서

Q_{co} : CO gas에 依한 損失熱, kcal/kg-cl

CO : preheater 排gas 中 CO 成分, %

HICO : CO gas의 低發熱量(=3020 kcal/Nm³)

이다.

(4) Preheater 排gas 中 dust에 依한 熱損失, Q_{24}

Dry process의 경우 preheater cyclone 효율로 因한 dust loss量은 相當하기 때문에 出熱計算에서 제외하지 못한다.

$$Q_{24} = \frac{S}{100} \cdot C_{pm} \cdot (\theta_{24} - 20) \quad (6.19)$$

S : preheater dust loss의 Clinker에 對한比, %

C_{pm} : dust의 平均比熱

(成分에 依해서도 計算되며, 대개)

0.20~0.25 kcal/(kg)(°C)이다.

θ_{24} : preheater dust 溫度 (排gas 溫度와 同一)

(5) Clinker에 依한 熱損失, Q_{25}

Clinker cooler 出口에서 clinker의 顯熱은

$$Q_{25} = C_{pm} \text{ kl} \cdot (\theta_{25} - 20) \quad (6.20)$$

여기서

$C_{pm} \text{ kl}$: clinker의 平均比熱, kcal/(kg)(°C)

θ_{25} : Clinker의 溫度, °C

이다.

Clinker의 平均比熱(20°C~ θ_{25})은 그림 (6.5)에 表示되어 있다.

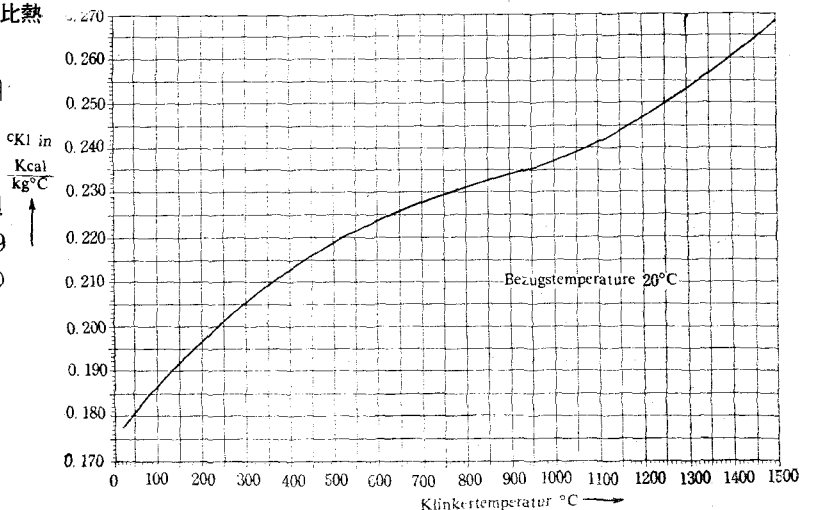


그림 6.5 Clinkercooler의 平均比熱

(6) Clinker cooler 排gas에 의한 熱損失, Q_{26}
Cooler 排gas의 顯熱은

$$Q_{26} = LAI \cdot CpmL(\theta_{26} - 20) \text{ kcal/kg-cl (6.21)}$$

L_{AI} : Cooler 排gas量 $Nm^3/kg-cl$

$CpmL$: Cooler 排gas의 平均比熱,
 $\text{kcal}/(Nm^3)(^{\circ}C)$

θ_{26} : Cooler 排gas 溫度, $^{\circ}C$

또한 θ 에 따른 $CpmL(\theta - 20)$ 의 graph가 있다면 바로 計算되어진다.

排gas 中の clinker dust 顯熱로 計算함이 좋으며 前述한 바와 같다.

(7) 外壁의 輻射 對流損失, Q_{27}

外壁은 항상, 주위보다 溫度가 높기 때문에 이러한 temperature gradient에 의해 熱傳達이發生하며 接觸面은 空氣와 接觸 있기 때문에 주된 熱傳達은 輻射와 對流이다(Radiation heat transfer, convection heat transfer).

輻射와 對流가 同時일 경우 그 熱損失은

$$Q_{27} = Q_r + Q_c \text{ kcal/kg-cl (6.22)}$$

$$Q_r = \frac{1}{Gkl} \cdot 0.1713 \epsilon_m A \left\{ \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right\} \times 0.252 \text{ (6.23)}$$

$$Q_c = \frac{1}{Gkl} \cdot hc \cdot A \cdot (T_w - T) \times 0.252 \text{ (6.24)}$$

이다.

여기서

Q_r : 輻射熱損失 kcal/k-gcl

Q_c : 對流 // kcal/kg-cl

Gkl : Clinker 燒出量 kg/hr

ϵ_w : 輻射面의 emissivity

A : 熱傳達 面積 ft^2

T_w : 外壁의 溫度. $^{\circ}R$

T : 주위 溫度. $^{\circ}R$

hc : 對流熱傳達係數 $\text{Btu}/(\text{hr})(ft^2)(^{\circ}F)$

이다.

단위환산에 관한 문제는 아래와 같다.

$$^{\circ}R = \frac{9}{5} \text{ } ^{\circ}K$$

$$^{\circ}R = 492 + ^{\circ}F$$

$$^{\circ}K = 273 + ^{\circ}C$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5} \text{ } ^{\circ}C + 32$$

(i) 輻射 熱損失의 計算, Q_r

$$Q_r = \frac{1}{Gkl} \cdot 0.1713 \epsilon_w \cdot A \left\{ \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right\} \times$$

0.252 kcal/kg-cl

(a) ϵ_w (emissivity)

emissivity는 物體에 따라 달라지면 같은 物體라도 溫度가 다르면 emissivity도 달라진다.

Iron과 steel에 對한 emissivity는 아래와 같다.

(表 6.1)

表 6-1 Iron과 steel의 emissivity

surface	Temp $^{\circ}F$	Emissivity
Metallic surface (very thin oxide layer) polished iron	800-1880	0.144~0.377
cast iron, polished	392	0.21
wrought iron, highly polized	100~480	0.28
steel casting, polished	1720~2010	0.55~0.60
Oxidized surfaces		
Oxidized iron	212	0.736
cast iron, oxidized at 1100 $^{\circ}F$	390~1110	0.64~0.78
steel, oxidzed at 1100 $^{\circ}F$	390~1110	0.79
iron oxide	930~2190	0.85~0.89
cast plate, smooth	73	0.80
rough	73	0.82
cast iron, rough, strongly oxidized	100~480	0.95
wrought iron, dull oxidized	70~680	0.94
steel plate, rough	100~700	0.94~0.97

(b) A (熱傳達面積)

輻射를 通해 放熱體가 熱을 발산할 경우 熱傳達 面積에 세밀한 주의를 해야 한다.

예를들면 kiln이 인접해 있을 경우, kiln 상호간의 輻射熱 傳達은 없으므로 그림에서 보는 바와 같이 실제 熱傳達面積은

$$A = \pi D_o L \left(1 - \frac{\phi}{360} \right) \text{ } ft^2 \text{ (6.25)}$$

이다.

D_o : kiln outside diameter, ft

L : kiln, 길이, ft

ϕ : kiln 상호간의 view angle,

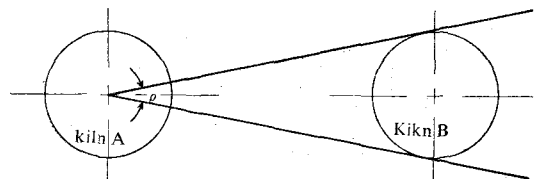


그림 6.6 kiln 상호간의 view angle

(c) Tw(外壁의 溫度+492)

外壁의 溫度는 대개 contact thermometer로 測定하며 式의 要求條件에 따라 °R 이나 °K로 變換한다(本稿에서는 °R).

(ii) 對流에 의한 熱損失(convection) Qc

$$Q_c = \frac{1}{Gkl} \cdot hc \cdot A \cdot (T_w - T) \times 0.252 \text{ kcal/kg-cl}$$

對流에 의한 熱傳達은 自然對流(natural convection or free convection) 및 強制對流(forced convection)로 나누어지며 自然對流은 뜨거워진 空氣가 부력(buoyant force)에 의해 상승하여 열전달이 발생하는 것이고 強制對流은 外力(external force)에 의한 熱傳達現象이다. 外力은 cooling fan 이나 바람에 의한 것이다.

Rotary kiln system은 強制對流은 드문 現象이므로 이의 記述은 後 미루고 自然對流에 관해서만 설명하고자 한다.

自然對流에 관한 研究는 (Colburn, Nusselt, Mc Adams等에 의해 기록되었다.

초기에 Nusselt에 의해 유도된 heat transfer equation은 지금도 自然對流 理論의 기초가 된다.

Nusselt type equation은

$$\frac{hcL}{Kf} = a \left\{ \frac{L^3 \rho_f^2 g \beta f \Delta t}{\mu_f^2} \left(\frac{Cp \mu}{K} \right) f \right\}^m = a [X]^m \quad (6.26)$$

이다.

여기서

hc : 外壁의 對流熱傳達係數 Btu/(ft²)(hr)(°F)

L : " 길이, ft

kf : $\frac{T_w + T}{2}$ 에서 air의 thermal conductivity, Btu/(hr)(ft)(°F)

am : constant

pf : $\frac{T_w + T}{2}$ 에서 air density, lb/ft³

g : gravity acceleration, 4.18×10⁸ ft/hr²

βf : 熱팽창의 體積係數, /°F

Δt : Tw-T 즉 溫度差

cpf : $\frac{T_w + T}{2}$ 에서 air의 平均比熱 Btu/(lb)(°F)

이다.

a 및 m은 shafe에 따라 定해지는 常數이며 실험에 의해 다음과 같이 알려졌다.

(a) vertical surfaces의 경우

x	a	m
10 ⁹ <x<10 ¹²	a=0.13	m=1/3

10 ⁴ <x<10 ⁹	a=0.59	m=1/4
x<10 ⁴	a=1.36	m=1/6

따라서 空氣에 의한 free convection이면 간단하게 hc를 구할 수 있다. 즉

$$10^9 < x < 10^{12} \text{이면 } hc = 0.19(\Delta t)^{1/3} \quad (6.27)$$

$$10^4 < x < 10^9 \text{이면 } hc = 0.29(\Delta t/L)^{1/4} \quad (6.28)$$

이다. cylinder의 경우는 D.를 L대신 使用한다 (D.: outside diameter, ft).

(b) horizontal cylinder의 경우

x	a	m
10 ⁹ <x	a=0.13	m=1/3
10 ³ <x<10 ⁹	a=0.53	m=1/4
x<10 ³	a=1.09	m=1/6

空氣에 對한 dimensional equation은

$$10^9 < x \quad hc = 0.18(\Delta t)^{1/3} \quad (6.29)$$

$$10^3 < x < 10^9 \quad hc = 0.27(\Delta t/D_o)^{1/4} \quad (6.30)$$

이다.

(c) horizontal plates의 경우

x	a	m
2×10 ⁷ <x<3×10 ¹⁰	a=0.14	m=1/3
10 ⁵ <x<2×10 ⁷	a=0.54	m=1/4

空氣에 對한 dimensional equation은

$$2 \times 10^7 < x < 3 \times 10^{10} \quad hc = 0.22 (\Delta t)^{1/3} \quad (6.31)$$

$$10^5 < x < 2 \times 10^7 \quad hc = 0.27 (\Delta t/L)^{1/4} \quad (6.32)$$

이다.

또 10⁵<x<10⁷이면

heated horizontal plates facing upward

$$hc = 0.38(\Delta t)^{1/4} \quad (6.33)$$

$$\text{downward } hc = 0.20(\Delta t)^{1/4} \quad (6.34)$$

이러한 外壁熱損失 計算 結果는 表로 정리해둬야 한다.

(8) 기타의 熱損失 Q₂₈

化工計算의 基礎는

Input-Output = Accumulation

이므로 heat balance에서는

Accumulation = 0

Input = Output

이 된다.

그러나 計算이나 測定에서의 오차, preheater의 leak air의 顯熱等은 기타의 熱損失로 남게 된다.

따라서

$$Q_{28} = Q_1 - (Q_{21} + Q_{22} + Q_{23} + Q_{24} + Q_{25} + Q_{26} + Q_{27})$$

이다.

heat flow의 input과 output의 計算이 끝나면 이를 다음과 같은 表로 정리하여 일목요연하도록 한다.

Heat balance of rotary Kiln system

項	目	kcal/kg-cl	%
1.	入熱(input), Q_1		
	重油로부터 入熱 Q_{11}		
	重油의 發熱量, Q_{111}		
	重油의 顯熱 Q_{112}		
	{ 石炭으로부터 入熱		
	石炭의 發熱量		
	石炭의 顯熱		
	原料로부터의 入熱, Q_{12}		
	原料의 顯熱 Q_{121}		
	原料附着水分의 顯熱 Q_{122}		
	空氣로부터의 入熱, Q_{13}		
	一次空氣의 顯熱 Q_{131}		
	H.P. air의 顯熱 Q_{132}		
	L.P. air의 顯熱 Q_{133}		
	入熱 合計		100.0
2.	出熱 (output) Q_2		
	燒成에 要하는 理論熱 Q_{21}		
	原料附着水分의 蒸發열 Q_{22}		
	Preheater 排gas의 熱損失 Q_{23}		
	// dust熱損失 Q_{24}		
	Clinker에 依한 熱損失 Q_{25}		
	Cooler 排gas에 依한 熱損失 Q_{26}		
	外壁의 輻射 對流 損失 Q_{27}		
	기타의 熱損失 Q_{28}		
	出熱 合計		100.0

6.2 Clinker cooler의 熱收支(heat balance)

燒成工程에 있어 clinker cooler의 重要性은 이 루 말할 수 없다. 熱回收에 關連된 것은 말할 것 도 없거니와, cooling 과 clinker 品質特性, 나아 가서는 preheater 排gas量라도 關係 깊은 것이다 따라서 heat balance도 重要하지만 거기에 附加되는 air balance도 자체만으로 完전히 工程管理에 도움이 될 수 있다.

Fuller cooler의 구조는 대개 그림(6.7)과 같으며 이 system을 보므로써 論하기로 하겠다.

6.2.1 Cooler의 air balance

pitot tube와 manometer, thermometer로써 L_P , L_{HP} , L_{LP} , L_{AI} 을 測定하여 아래의 表로 정리하면 工程管理의 有用한 資料가 된다.

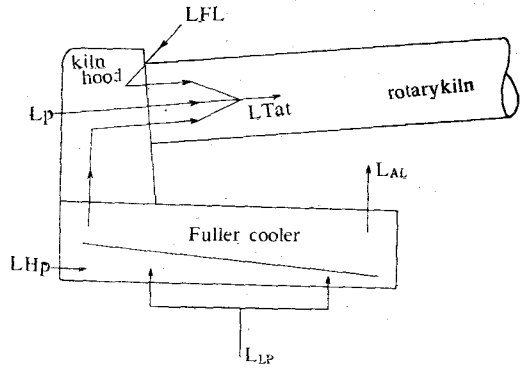


그림 6.7 Grate cooler의 구조와 airflow

(Cooler의 air balance 단위 $Nm^3/kg-cl$)

項	目	input	output
1.	input		
	H.P air		
	L.P air		
	Primary air		
	Kiln hood leak air		
2.	output		
	排gas量		
	Secondary air(2次空氣)量		
	合計		

kiln hood leak air는 理論燃燒空氣의 2~5% 程度로 가정해도 좋고 아래 式을 利用해도 좋다.

$$L_{FI} = 14,000 \times \frac{A}{G_{KL}} \cdot \sqrt{\Delta P} \quad Nm^3/kg-cl \quad (6.35)$$

여기서

A : leak air되는 단면적, m^2

ΔP : hood pressure, mmH₂O

Secondary air量을 差호써 計算한다.

air balance의 상호관계는

$$L_{sec} + L_{AI} = L_{HP} + L_{LP} \quad (6.36)$$

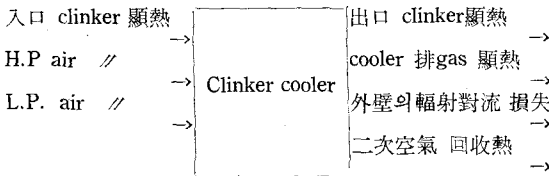
$$L_{sec} + L_{FI} + L_P = L_{TAI} \quad (65.37)$$

이다.

결국 air balance로부터 供給空氣의 적정량을 결정하게 되는 것이고(inlet chamber에서의 空氣化 $m=1.05\sim1.10$ 적합) 다음 heat balalance에서 冷却空氣量을 決定한다.

6.22 Clinker cooler의 熱收支

Heat flow에 對한 diagram은 그림 6.8과 같다.



Rotary kiln 工程 전반의 熱收支 計算에서 이미 설명된 것이 대부분이며 단지 cooler 入口의 clinker 顯熱은 빠졌고 다음에 記述한다.

또한 waterjacket의 설비가 있을 경우 냉각수에 의한 열손실로 계산한다.

(1) cooler 入口 clinker 顯熱

그림 (6.5)을 使用하여

$$Q_{K11} = C_{pm} \times (\theta_{K11} - 20) \text{ kcal/kg-cl (6.38)}$$

(2) secondary air 回收熱

Secondary air temperature 測定用 溫度計는 여하한 경우라도 kiln 入口 clinker 및 coating의 高溫 輻射熱을 받기 때문에 溫度의 가리킴이 不正確하다. (이의 溫度는 實驗式으로 計算되나 생략하기로 한다).

따라서 secondary air의 回收熱은 入熱과 出熱의 差로써 기록한다.

cooler의 heat balance도 다음과 같은 表에다 정리해 둔다.

cooler의 heat balance		단위 kcal/kg-cl	
項	目	kcal/kg-cl	%
1.	入熱		
	cooler 入口 clinker 顯熱		
	H.P air 顯熱		
	L. P air 顯熱		
	合 計		100.0
2.	出熱		
	出口 Clinker 顯熱		
	Cooler 排gas의 顯熱		
	外壁의 輻射 對流 損失		
	Secondary air 回收熱		
	合 計		100.0

7. 檢討 및 結論

上記한 heat balance 및 air balance가 얻어지면 이를 기초로 하여 工程管理 項目에 對한 檢討計算을 하여 他 plant와 比較하고 취해야 할 行動을 구체적으로 提示해야 된다.

7.1 檢討項目

(1) clinker factor

(2) 單位生産量

Kiln의 單位 生産量은 t/m³. 24h로 나타내는 것으로 表(7.1)을 기초로 검토하고 他 plant와 比較한다. (m³은 Riln의 有效내용적)

表 7.1 Kiln의 單位生産量

項	目	單位生産 t/m ³ . 24h
dry kiln		
	Lepol kiln	1.5~2.0
	Preheater 附 kiln	1.4~1.8
	dry Calcinator 附 kiln	0.8~1.2
	waste heat boiler 附 kiln	0.65~1.0
wet kiln		
	long wet kiln	0.45~0.8
	wet calcinator 附 kiln	0.7~1.0
	噴射式 wet kiln	0.85~1.0

또한 metric tons/hour의 output은 다음 式으로 計算된다.

$$\text{metric tons/hour} = 0.04552kVe^{-0.00045V}$$

여기서

V : kiln의 有效內容積, m³

k : constant k=1.00 for dry process kilns

k=0.96 for wet //

e : 자연대수(Napierian logarithms)의 base

이다.

(3) Cooler air balance

이는 電力費, 熱回收, 單位生産量과 밀접한 관계가 있다.

(4) Secondary air temprature 및 回收熱

cooler의 heat balance에서

$$\text{回收熱} = \text{入熱} - \text{出熱} (\text{二次空氣 回收熱 제외함})$$

回收熱比率

$$\gamma_s = \frac{\text{回收熱}}{\text{入熱}} \times 100$$

$$\text{二次空氣 溫度} = \frac{\text{回收熱}}{\text{平均比熱} \times \text{二次空氣量}} + 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

로 求하거나

$$L_{Sec} \cdot \int_{273+20}^{273+t} C_p dT = \text{回收熱}$$

에서 trial and error method로 計算하여 回收熱 檢討의 바로메터로 使用한다. (= 二次空氣 溫度와 回收熱 및 그比率은 높을수록 좋다)

(5) Primary air量

burner는 대개 高壓噴霧式中 內部混合式이므로 一空氣量이 理論燃燒空氣量의 10% 程度 되어야 한다.

(6) kiln inlet(inlet chamber)에서의 空氣比 空氣比 및 O₂%(dry base)가 적합하도록 연소공기량을 조절함이 重要하다.

(7) kiln 外壁熱損失

內部 firebrick에 對한 檢討가 될 것이며 inlet zone의 insulating brick, light-weight brick使用 여부를 검토한다.

(8) 熱效率의 檢討

燒成效率 η_b

$$= \frac{\text{clinker 燒成用熱} - \text{原料의 顯熱}}{\text{燃料의 燃燒熱}} \times 100$$

$$\text{kiln 效率 } \eta_k = \frac{\text{Clinker의 燒成用熱} + \text{原料中の 水分증발열} - \text{原料의 顯熱}}{\text{燃料의 燃燒熱}} \times 100$$

(9) Preheater 利用度

기회로 보아 後述하고자 한다.

(10) Preheater의 leak air

preheater에서의 leak air는 preheater에서의 熱交換 및 kiln IDF 용량 등과 관련되어 有害무익한 것이다.

inlet chamber와 IDF에서의 空氣比를 알면(Orsat 分析 利用) 計算할 수 있다.

$$L_{FI} = (m_2 - m_1) \cdot L_{min}$$

여기서

L_{FI} : leak air量 Nm³/kg-cl

m_2, m_1 : IDF 및 inlet chamber의 공기비

L_{min} : 燃燒에 必要한 理論空氣量 이다

(11) Preheater의 外壁損失

內部の firebrick 및 外部 insulating의 수명이 다했을 경우 外壁損失은 多大하다.

(12) kiln IDF gas量 및 그 용량 검토

preheater 排 gas의 量으로써 IDF의 용량을 characteristic curve와 함께 검토한다.

왜냐하면 生産量 增大의 경우 大部分의 工場이 IDF 용량으로 머리를 쥐어짜게 되기 때문이다.

따라서 앞서 정리한 preheater 排 gas 成分中 감소 가능성 여부를 결정하고 行動에 옮긴다.

(13) 폐열의 利用

preheater의 排gas를 粘土 dryer에 利用하거나 原料 mill 粉碎에 利用할 경우에는 必히 計算 檢

討하여 진정한 熱의 損失을 名記한다.

(14) 電力 使用量

kiln process의 電力使用량을 장비별로 測定하여 表를 만든다.

fan이나 blower의 경우 電力은 壓力과 gas 量에 比例하는 것이므로 훌륭한 管理項目이 될 수 있다.

7.2 結論

檢討에서 發生되는 非合理的 要素에 對한 대책이나 방안. 또는 새로운 아이디어 등을 제안해야 된다.

또는 heat balance 測定 目的에 얼마나 충실되었나 하는 程度나 과거 測定한 heat balance와도 比較한다.

Experimental Engineering의 目的은 아래로써할 수 있다.

1. Control of operation
2. Efficiency
3. Quality of products
4. Improvement in equipment
5. Choice of new equipment
6. Design
7. Research

heat balance 自體의 목적도 위의 大部分을 包含 있게 포함하며 heat balance 測定을 통해 engineering의 목적을 달성할 수 있겠다.

本稿의 내용은 지금까지 발표되어온 資料를 당 公場에서 1채택해본 結果를 비교 분석한 것임으로 熱管理에 상당한 도움이 되리라 믿는다.

사실 化學工學 分野는 甚한 감이있으며 더욱이 cement 工業과 化學工學의 연관관계는 쉽게 단언 하지 못할만큼 그 응용은 지지부진하다.

이것은 결코 시멘트工業이 쉬운 것이아니고 난해한 것이 대부분이기 때문이며 이것을 규명할때 야 비로서 工學과의 연관성을 자신있게 表現할수 있으리라 믿는다.

本稿의 計算方式에 依한 熱收支 計算例는 다음의 紙面을 빌려 소개하겠다.

참고문헌

1. JIS R 0303
2. VDZ E. V., Düsseldorf; "Berechnung sunterlagen für Ofen versuche"
3. VDZ E.V., Düsseldorf; "Wärmetechnische Berechnungen"
4. J.H. Perry: "Chemical Engineer Handbook," 4th ed., Mc Graw-Hill Book Co., Ltd.
5. W.H McAdams: "Heat Transmission", 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., Ltd.
6. 矢木, 國井: "工業窯爐", 共立(日本)
7. Bird, Stewart and Light foot: "Transfer Phenomena" John Wiley & Sons Inc.
8. J.C. Witt: "Portland Cement Technology", 2nd ed., Chem. Pub. Co., Inc.
9. 기타 熱管理 보고서 및 문헌