

suspension preheater thermal efficiency에 대한 綜合

金 勇 瑞 譯

<雙龍洋灰東海工場生產課>

abstract

- ◆.....본 論文은 Frankenberger 씨의 論文을 번역한 것이다. preheater의 열적 성능.....◆
- ◆.....평가를 위해선 calcining degree, thermal efficiency 및 calorific efficiency를 이.....◆
- ◆.....용하고 있으며 1kg의 dust circulation으로 30 kcal/kg·cli의 연료 소모량을.....◆
- ◆.....증가시키고 있어 4단 이상으로 증가시키는 문제도 대두 연구하고 있다.....◆

I. 서 언

rotary kiln의 여러 가지 형태의 preheater에 대한 효과를 비교하기 위한 적당한 標準이 문제이나 대개 다음과 같은 數値를 사용하고 있다.

- e : calcining degree (Entsäuerungsgrad)
- η : thermal efficiency (thermischen Wirkungsgrad)
- ϕ : calorific efficiency (kalorischen Gütegrad)

Vogel과 Schwerdtfeger는 kiln inlet raw meal의 sample에서 측정된 e 는 kiln의 froude number의 함수이지 preheater의 효과에 대한 것이 아니라고 이야기하고 있다. 上記 3가지 評價値는 kiln 全 system의 물리적 혹은 열적인 input quantity로 주어진다.

다음에 calcining degree e 와 dust 순환 관계 즉 thermal eff. η 와 preheater의 input 매개체 사이의 관련성에 대해 연구하였다.

II. calcining degree (e)

1. 分析値에 의한 e 의 계산

kiln inlet raw meal을 sampling 分析하여 0.3~0.55 사이의 calcining degree(e)를 얻을 수

있다. e 는 preheater 입구 raw meal 중에 존재 하던 CO_2 에 대한 kiln 운전 조건 중에 있는 raw meal의 CO_2 비이다.

$$e'' = \frac{m'_{CO_2} - m''_{CO_2}}{m'_{CO_2}} \dots\dots\dots ①$$

여기서 e'' 는 calcining degree이고 m_{CO_2} 는 kg-clinker 당 raw meal 중의 CO_2 질량이다. 「'」는 preheater 入口, 「''」는 preheater 出口(kiln inlet)의 物質에 대한 값을 나타낸다.

計算上의 설명을 위해 <그림-1>에 kiln의 mass flow diagram을 나타내었다. preheater 중의 raw meal을 sampling 分析하여 탄산 gas 량 m'_{CO_2} 를 중량비로서 계산할 수 있고 1kg의 clinker 生産을 위한 raw meal의 양(raw meal 대 clinker의 5 t. R.)을 구할 수 있다.

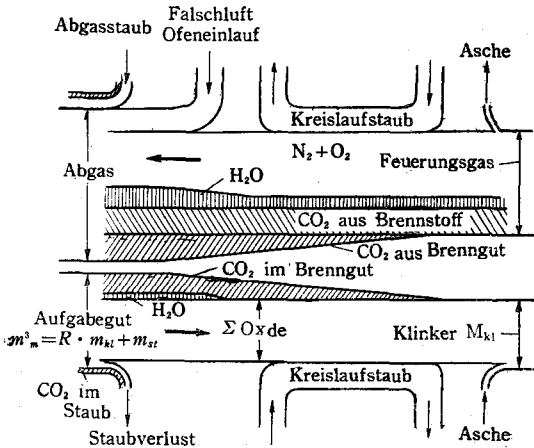
$$m'_{CO_2} = 10 \cdot R \cdot CO_2' \text{ (g/kg·cli)} \dots\dots\dots ②$$

산소량 m'_{Ox} 는 同一 sample에서 ig. loss (G')를 測定함으로써 얻어진다.

$$m'_{Ox} = 10 \cdot R(100 - G') \text{ (g/kg·cli)} \dots\dots\dots ③$$

gas가 kiln 중의 dust를 preheater로 흡입하느냐 않느냐를 규명하기 위해선 산소량 m'_{Ox} 에 대한 kiln inlet raw meal 중의 탄산가스량 m''_{CO_2} 의 비를 알면 효과적이다.

$$\frac{m''_{CO_2}}{m'_{Ox}} = \frac{CO_2''}{100 - G''} \dots\dots\dots ④$$



<그림-1> Mengenstrombild von Brenngut und Gas in einem Zementdrehofen längs Ofenachse und Vorwärmer

④ 식에 ③ 식을 대입하여 m''_{CO_2} 로 풀면 kiln inlet raw meal 중의 탄산가스량은

$$m''_{CO_2} = \frac{CO_2'' \cdot 10 \cdot R \cdot (100 - G'')}{100 - G''} \quad (\text{g/kg} \cdot \text{cli}) \quad \text{.....⑤}$$

② 식과 ⑤ 식을 ① 식에 대입하면 Weber 가 제시한 다음 식이 된다.

$$e'' = 1 - \frac{CO_2'' (100 - G'')}{CO_2' (100 - G'')} \quad \text{.....⑥}$$

kiln inlet raw meal 중에 함유되어 있던 수분량이 증발되었으므로 ⑤ 식 중의 CO_2'' 는 측정된 ig. loss (G'') 로 대치할 수 있으나 ig. loss (G') 로 CO_2' 를 대치할 수는 없다. 왜냐하면 e'' 가 커지기 때문이다. kiln waste gas 에 함유되어 preheater 로 들어 오는 이미 calcining 된 dust 는 preheater 마지막 stage 에서 raw meal 과 혼합되어 다시 kiln 으로 되돌아 온다. kiln inlet 에서 raw meal 의 분석치로서 ④ 식과 같은 효과를 나타낸다.

$$\frac{m''_{CO_2}}{m''_{O_2} + m''_{st}} = \frac{CO_2''}{100 - G''} \quad \text{.....⑦}$$

여기서 m''_{st} 는 dust 량 ($\text{g/kg} \cdot \text{cli}$) 이다.

②, ③, ⑤ 및 ⑥ 식을 ① 식에 대입하여 변형하면 kiln inlet 에서 raw meal 의 실제적인 calcining degree (e'') 를 얻을 수 있다.

$$e'' = e' - \frac{m''_{st} \cdot CO_2''}{10 \cdot R \cdot CO_2' (100 - G'')} \quad \text{.....⑧}$$

실제의 calcining degree (C.D 로 약함) 는 apparent C.D e'' 보다 항상 작고 순환 dust 량 m''_{st} 만 알면 계산이 가능하다. Weber 는 suspension preheater 에서 약 7% 를 by-pass 시켜 dust 량을 측정하곤 하였으나 이 양은 아주 무시될 정도로라고 이야기하고 있다.

Engel 이 지적한 바와 같이 kiln inlet 의 gas 를 분석하여 실제의 C.D 를 결정할 수 있다. 다음에 그 결정 방법을 기록해 보자.

V.D.Z 의 kiln 조사 보고서에서 실시하고 있는 방법과 같이 연소 계산으로 연료의 탄소에서 발생하는 탄산 gas 량 V_{CO_2} 는 계산 가능하며 preheater 입구의 gas 를 Orsatz 分析으로 함유하고 있는 탄산가스량 (CO_2) $\cdot V_{CO_2}$ 를 얻을 수 있다.

④, ⑤ 식과 유사하게 하여

$$V_{CO_2} = \frac{(V_{N_2} + V_{O_2} + V_{CO} + V_{SO_2}) CO_2'}{100 - CO_2'} \quad (\text{Nm}^3/\text{kg} \cdot \text{cli}) \quad \text{.....⑨}$$

연소에 의하여 생성된 V_{CO_2} 에서 ⑨ 식으로 계산된 V_{CO_2} 를 빼면 kiln inlet raw meal 이 kiln 으로 갖고 들어 오는 탄산가스량을 알 수 있다.

① 식과 유사하게 생각하여 C.D 는

$$e'' = \frac{V_{CO_2m} - V_{CO_2g} + V_{CO_2f}}{V_{CO_2m}} \quad \text{.....⑩}$$

V_{CO_2m} 은 input raw meal 중의 탄산 gas 량 ($\text{Nm}^3/\text{kg} \cdot \text{cli}$) 이다.

⑩ 식으로 계산된 수개의 preheater 에 대한

<表-1> cyclone preheater 付 kiln 의 C.D

kiln	gas 分析에 의한 C.D (⑩식)	raw meal 分析에 의한 C.D (⑥식)	kiln specific capacity ($\text{t/m}^3 \cdot \text{D}$)
WMK	0.368	0.297	1.70
SSH	0.267	0.329	1.54
WWT	0.226	0.332	1.90
WGR	0.379	0.340	1.69
WMR	0.183	0.350	1.31
AKT	0.390	0.378	1.63
NHN	0.001	0.386	1.92
NHN	0.000	0.387	1.88
WAN	0.278	0.423	1.81
WMR	0.328	0.425	1.82
WES	0.400	0.446	1.90
WGE	0.439	0.522	2.28

C.D 를 <表-1>에 나타내어 raw meal 분석으로 계산한 C.D와 비교할 수 있도록 하였다.

이는 gas 分析에 의해서는 실제적인 C.D를 결정할 수 없음을 뜻한다. 왜냐하면 gas 分析으로 計算한 값은 널리 산포하기 때문에 apparent C.D나 kiln specific capacity와 상관 관계가 없기 때문이다.

2. C.D e와 온도와의 관계

Zementindustrie Forschungsinstitut에서 heat balance를 측정하여 어떤 raw meal의 sample에 대한 C.D를 결정하여 온도와의 관계를 얻었다.

이에 의하면 C.D는

- ① heating up speed
- ② kiln atmosphere
- ③ 化學—光物學的인 composition
- ④ raw meal의 분말도 및 이의 균일성에 관계된다.

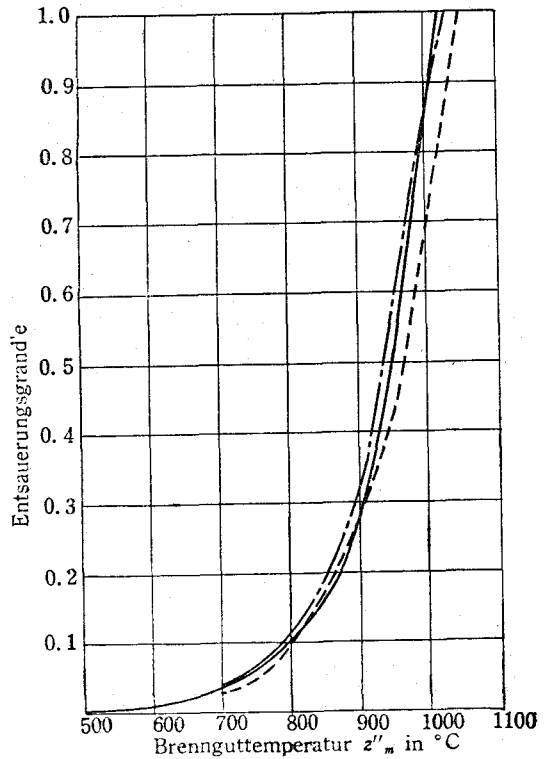
이 영향에 대한 양적인 실험은 아직 행해지지 않았다.

<그림-2>는 3가지 raw meal에 대해 5.8°C/min의 heating up 속도로 소성한 curve이다. 이 heating up speed는 1,400°C/min의 속도로 생각될 수 있는 preheater kiln의 cyclone에서 실제 무시될 수 있는 긴 건조로에서의 속도이다.

27.6% CO₂, 4.8% CO, 2.0% O₂ 및 65.6% N₂의 연도 gas가 시험 조건으로 취급되어 (20°C 수증기로 포화된) 온도는 sample 1 gr의 중앙에서 측정되었다. C.D는 heating up speed의 영향을 받으나 raw meal의 온도가 급격히 상승하면 그 영향은 아주 작다. heating up speed를 5.8에서 2.9°C/min로 줄이면 calcining은 이미 약 980°C에서 종료되고 (<그림-2>에서는 1,025°C 임에 반하여) 800°C에서의 C.D는 <그림-2>에 의하면 0.1에서 0.125에 이른다.

gas 중의 CO₂ 용적이 줄어들면 C.D는 상승된다. kiln inlet에서 calcining을 전연 기대치 못할 때도 있다. 왜냐하면 preheater의 raw meal이 gas와 약 20 sec만 접촉하기 때문이다.

raw meal 미립자의 온도가 700°C부터 900°C 사이의 영역에서 Gaussian bell형의 curve로 평균 800°C 온도로 분포한다면 평균 C.D는 0.12가



<그림-2> Calcining degree as function of temperature

된다. 따라서 각 미립자의 C.D는 계산상 주어진 curve <그림-2>에서 얻을 수 있다. raw meal의 실제적인 C.D는 kiln inlet 800°C보다 높은 온도에서 0.10부터 0.14까지 얻을 수 있다.

3. preheater heat balance에 의한 C.D e의 계산
preheater의 입열과 출열의 합은 0(zero)이다. 1 kg의 clinker를 기준하면

$$i'_g + i'_{st} - i''_g - i''_{st} + (i'_m + i'_{stm}) - (i''_m + i''_{stm}) - \Delta i'_m - \Delta i''_{H_2O} - q_w = 0 \quad \text{.....①}$$

①식에서 index g로서 gas의 enthalpy i 를, index st로서 dust를, index m로서 material을 각각 나타내었다.

i_{stm} 은 dust와 혼합된 raw meal의 enthalpy이다. $\Delta i'_m$ 은 raw meal과 반응한 enthalpy, $\Delta i''_{H_2O}$ 는 raw meal과 같이 유입된 수분에 의한 증기 enthalpy이고 q_w 는 preheater 벽면에 의한 損失熱이다.

dust enthalpy를 소홀히 하기 쉽다. 이 열량은

kiln inlet 에서 dust 의 양, 비열 및 gas 와 raw meal 온도 차로써 얻어진다. kiln inlet 에서 온도가 일정하면 waste gas 온도가 15°C 상승하거나 kiln inlet 에서의 raw meal temp 가 20°C 상승함에 따라 500 g/kg·cli 의 dust 량을 수반한다.

raw meal 의 enthalpy 와 온도 함수를 비교해 보면 raw meal 의 enthalpy 증가는 온도 t 에 대해 거의 직선 관계로 나타낼 수 있다.

kiln inlet 에서의 raw meal 의 열량은

$$\Delta i_m = 0.45t''_m - 0.36t'_m - 28 \quad (\text{kcal/kg} \cdot \text{cli}) \dots\dots\dots ⑫$$

유효 범위 : 700°C < t''_m < 900°C

온도의 영향을 받는 반응열 Δi_m 은 C.D 의 함수이다. 즉 반응 온도에 따라 달라진다. calcining 되는 동일한 energy 가 소요된다고 하면

$$\Delta i_m = (421 - 0.21t''_m) e''_i \quad (\text{kcal/kg} \cdot \text{cli}) \dots\dots ⑬$$

⑬ 식에서 raw meal 중의 연소성 물질의 반응열도 고려되었다.

gas enthalpy 도 waste gas 의 경우 -0°C 기준, 온도 t_g , 연료 원단위 q_{sp} 및 excess air $l''_u = \lambda - 1$ 과는 근사적인 직선 방정식으로 나타난다.

$$i''_g = \{ (0.416 + 0.36l''_u) q_{sp} \cdot 10^{-3} + 0.144 \} \times t''_g - 6 \quad (\text{kcal/kg} \cdot \text{cli}) \dots\dots\dots ⑭$$

⑭ 식은 fuel oil 연소에 의한 연도 gas 250°C < t''_g < 500°C 사이에 적용되며 일산화탄소도 고려되었다.

preheater 入口의 연도 gas enthalpy 는 C.D 등 에 달려 있다.

$$i'_g = \{ (0.492 + 0.48l''_u) q_{sp} \cdot 10^{-3} + 0.168(1 - e) \} t'_g - (52 + 100l''_u) \times q_{sp} \cdot 10^{-3} - 18 \quad (\text{kcal/kg} \cdot \text{cli}) \dots\dots ⑮$$

유효 범위 : 900°C < t'_g < 1,200°C

⑫, ⑮ 식을 ⑪ 식에 대입하여 C.D 를 계산할 수 있다

$$e''_i = \{ q_{sp} \{ (0.492 + 0.48l''_u) t'_g - (0.416 + 0.36l''_u) t''_g - (52 + 100l''_u) \} \div \{ 1,000(0.168t'_g - 0.21t''_m + 421) \} + (0.168t'_g - 0.144t''_m + 0.36t'_m - 0.45t''_m + 16 - q_w - \Delta i_{H_2O}) \div (0.168t'_g - 0.21t''_m + 421) \} \dots\dots ⑯$$

<表-2> 에 ⑯ 식으로 계산한 C.D 예를 나타내었다.

III. 測定된 C.D 와 실제적인 C.D 에 의한 순환 dust 量의 추측

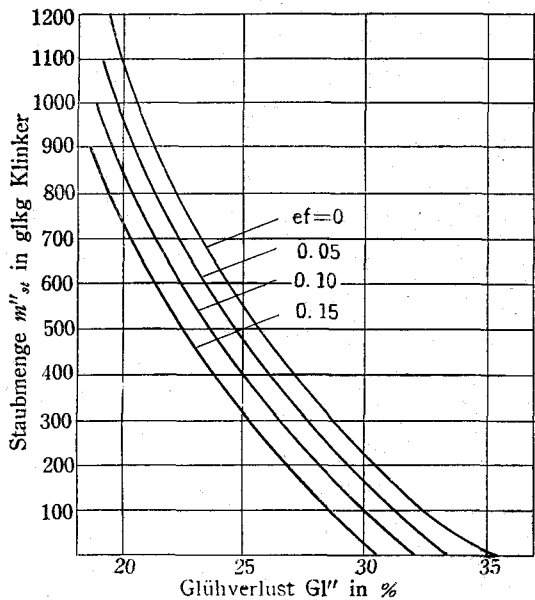
실제적인 C.D 의 계산으로는 순환 dust 량 m''_{st} 를 알 수 없으나 ⑧ 식을 m''_{st} 로 풀고 <그림-2> 의 e''_i 를 대입하면 개략적인 양은 추측할 수 있다.

<그림-3> 은 raw meal 과 clinker 비 1.55, CO₂ 33.5%, ig. loss 3.48% 의 특정 raw meal 에 대해 계산한 결과를 나타낸 것이다.

순환량 (g/kg·cli) 은 kiln inlet raw meal 의 ig. loss Gl'' 에 대한 관계로 나타나 있다. parameter 로 실제적인 C.D 를 적용하였다.

kiln inlet raw meal 의 ig. loss 와 실제적인 C.D 가 어느 정도 되느냐에 따라 kiln 과 preheater 사이의 dust 순환은 50% 부터 75% 까지 변화될 수 있다. 이는 완전히 calcining 된 dust 의 경우를 의미한다. 물론 dust 는 CO₂ gas 를 함유하고 있어 <그림-3> 에서보다 더 많은 CO₂ gas 함량을 나타낸다.

어떤 dust 량 m''_{st} (CO₂ gas 를 더 함유한) 가 CO₂ 로 ig. loss (Gl''_{st}) 를 알 수 있는 dust 이면 즉각 그 량을 계산할 수 있다.



<그림-3> Dust circulation as function of ig. loss Gl'' at kiln inlet raw meal, Parameter: actual calcining degree, e''_t

⑦식에서와 같이 $100-GI''$ 에 대한 산소와 ig. loss 를 함유하는 dust 량 m^*_{st} 습과의 관계를 알 수 있어 $GI''=CO_2''$ 로 가정할 수 있다.

$$\frac{100-GI''}{m'_{ox} + \frac{m^*_{st}}{100}(100-GI_{st})} = \frac{GI''}{m'_{CO_2} + \frac{m^*_{st} \cdot GI_{st}}{100}} \dots\dots\dots ⑰$$

⑰ 에 대입 변형하면 간단한 식이 된다.

$$m^*_{st} = m'_{st} \cdot \frac{GI''}{GI'' - GI_{st}} \text{ (g/kg·cli)} \dots\dots ⑱$$

ig. loss 가 없는 dust 량 m'_{st} 를 <그림-3> 으로부터 알 수 있다. 어떤 dust 量이 500g/kg·cli 라면 이는 상당히 높은 수치이며 이는 80g/m³ 의 dust load 를 의미한다.

N. 4 단 (four stage) cyclone preheater 예측을 위한 特性值 ϕ 와 η

multistage cyclone preheater 에서는 gas 및 raw meal 의 inlet 및 outlet 온도 사이에 명확한 관계가 있기 때문에 capacity flow ratio x 와 열전달 특성이 주어진다. capacity flow ratio x 는 비열 및 질량에 의하여 결정된다.

$$x = \frac{m_m \cdot C_{pm}}{m_g \cdot C_{pg}} = \frac{\Delta t_g}{\Delta t_m} \dots\dots\dots ⑲$$

목적에 따라 enthalpy 변화를 $m \cdot C_p$ 項 결정에 이용하기도 하는데 이는 capacity flow ratio 중의 벽손실열과 반응열도 고려된 것이다.

$$m_m \cdot C_{pm} = \frac{\Delta i_m + \Delta i^o_m + q_w}{\Delta t_m} \text{ (kcal/kg·cli)} \dots\dots\dots ⑳$$

dust 순환은 경우에 따라 capacity flow ratio 에 포함될 수도 있다.

<그림-4>는 raw meal 의 표준 계산에 의한 enthalpy 에 따른 gas 및 raw meal 의 온도 변화 과정을 나타낸 것으로 gas 량 및 gas 온도를 임의로 결정할 수 있다.

raw meal enthalpy 의 사선 부분은 calcining 반응에 의하여 raw meal 의 enthalpy 증가가 가능함을 의미한다.

i_m 에 평행하여 진행되는 gas 온도는 다음 stage 로의 이동을 의미한다.

capacity flow ratio x 는 각 stage 에 주어진다. waste gas 온도 t''_g 와 raw meal 의 온도

t'_m 은 알려져 있어서 1 단 capacity flow ratio 로서 1 stage 입구의 gas 온도 t_{g1} 과 1 stage 출구의 t_{m1} 계산이 가능하다.

raw meal temp t_{m1} (total Δt_{gm} 에서의) 은 waste gas temp t''_g 보다 낮다.

$$t_{m1} = t''_g - \Delta t_{gm} \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots ㉑$$

⑱ 와 같이 하여

$$t_{g1} - t''_g = x_1 (t''_g - \Delta t_{gm} - t'_m) \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots ㉒$$

⑳ 식의 t_{g1} 과 t_{m1} 으로 다음 stage 의 gas 온도 및 meal 온도를 계산할 수 있다.

일반 방정식 중의 온도는 계산할 수 있어 capacity flow ratio 와 관련 있는 preheater 출구의 raw meal 의 온도 t''_m 및 waste gas 온도, kiln inlet meal 온도를 구할 수 있다.

각 stage 를 나가는 gas 와 raw meal 사이의 온도 차 Δt_{gm} 은 각 stage 에서 전부 동일하다.

$$t''_m (t''_g - t'_m - \Delta t_{gm}) (1 + x_1 + x_1 x_2 + x_1 x_2 x_3) + t'_m \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots ㉓$$

capacity flow ratio 項인 () 안을 간단히 하기 위하여 $\Sigma K3$ 을 도입한다.

kiln inlet meal 온도가 높으면 $t''_g - t'_m$ 과 capacity flow ratio 도 커지며 preheater 의 열전달 특성의 出口 온도 차 Δt_{gm} 에 의하여 결정되고 $t''_g - t'_m$ 와 capacity flow ratio 로부터 preheater 입구 온도 t'_g 가 계산된다.

$$t'_g = (t''_g - t'_m - \Delta t_{gm}) (\Sigma K3 + x_1 x_2 x_3 x_4) + t'_m + \Delta t_{gm} \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots ㉔$$

간단히 하기 위하여 $\Sigma K4$ 를 도입하면

$$t''_m = (t'_g - t'_m - \Delta t_{gm}) \frac{\Sigma K3}{\Sigma K4} + t'_m \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots ㉕$$

preheater 를 평가하기 위하여 thermal eff. η 와 calorific eff. ϕ 가 도입된다. calorific eff. ϕ 는 raw meal 의 가능한 최고 온도 변화에 대한 실온도 변화 비로서 정의된다.

$$\phi = \frac{t''_m - t'_m}{t'_g - t'_m} \dots\dots\dots ㉖$$

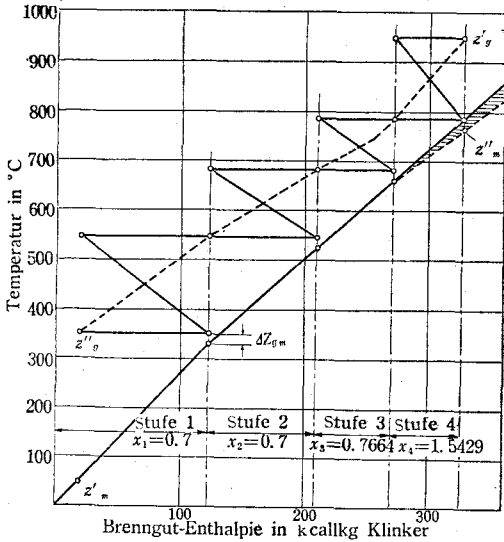
㉕ 식중의 kiln inlet raw meal 의 온도 t''_m 를 ㉓ 식으로 대입하면

$$\phi = \frac{\Sigma K3}{\Sigma K4} \left(1 - \frac{\Delta t_{gm}}{t'_g - t'_m} \right) \dots\dots\dots ㉗$$

$\Delta t_{gm} / (t'_g - t'_m)$ 는 작기 때문에 (최고 0.06) ϕ 는 근본적으로 capacity flow ratio 에 의하여 결정되

고 kiln 입구 size 나 kiln inlet 부분에서 들어 오
는 fresh air 량에 달려 있다.

ϕ 는 Δt_{gm} 에 의하여 열 전달 특성으로 되고
<그림-4>에서 $\Sigma K3$ 의 값은 2.5655, $\Sigma K4$ 는
3.1449 이다.



<그림-4> Temperature change of gas and raw meal in preheater about enthalpy of raw meal

<그림-4>에서와 같이 Δt_{gm} 은 0 부터 시작
되고(현장 측정 기구로는 gas 의 출구 온도와
cyclone stage 끝의 raw meal 의 온도 사이에는
차가 없다) kiln inlet meal temp 는 <그림-4>
에서의 768°C 장소에서 784°C, waste gas temp
는 350°C 대신 336°C 이다. thermal eff. 는 pre-
heater 입구의 gas enthalpy 에 대한 raw meal
의 enthalpy 변화비로서 raw meal 이 가지고 들
어온 enthalpy 로 정의된다.

$$\eta = \frac{\Delta i_m}{i_g} = \frac{m''_m \cdot C''_{pm} (t'_m - t''_m)}{m'_g \cdot C'_{pg} \cdot t'_g} \dots\dots 28$$

28 식에 26 식의 $t''_m - t'_m$ 를 대입하면 η 는 ϕ 의
함수로 나타난다.

$$\eta = x'' \phi \left(1 - \frac{t'_m}{t'_g} \right) \dots\dots 29$$

x'' 는 4 stage 全 preheater 의 overall capacity
flow ratio 이다. capacity flow ratio, calorific
efficiency 및 thermal efficiency 는 연료 원단위,
벽손실열 및 kiln inlet 에서의 fresh air 유입 정

도에 따른 함수이기 때문에 calorific eff. 및
thermal eff. 로서 어떤 preheater 의 성능을 예
측할 수 있다.

<表-2>는 計算結果例를 나타낸 것이다. 연료
원단위, 벽손실열은 변화하며 kiln inlet gas 온
도는 주로 kiln 내에서의 전열에 의하나 950°C
정도로 일정하다.

raw meal 에 대한 $\Sigma K3$ 과 $\Sigma K4$ 의 값은 Hütte
의 data 로 gas 의 비열 및 원단위로 <그림-4>
의 $i-t$ 곡선에 의하여 구하여진다.

<表-2>에 의하면 calorific eff. 는 연료 원단
위에 따라 증가하나 벽손실이 커지면 감소한다.
 ϕ 가 상승하면 kiln inlet raw meal 온도가 높아
지는 것이 아니고 waste gas 온도가 높아져서
thermal eff. 는 나빠진다.

열 소모량과 공기비가 일정하다면 $C.D$ 가 증
가하며 ϕ 는 감소한다. capacity flow ratio $\Sigma K3$
과 $\Sigma K4$ 를 서로 곱한 총합은 x_1, x_2, x_3, x_4 에
따라 달라진다. 열 소모량과 과잉 공기가 일정하
면 $\Sigma K3$ 과 x_1, x_2, x_3 도 일정하게 되고 $C.D$ 가
상승되면 4 stage capacity flow ratio x_4 도 상승
되며 27 식의 분모 $\Sigma K4$ 도 상승된다.

<表-2> 4 stage preheater 의 ϕ 와 e
($\lambda_2=1.25, t'_g=950^\circ\text{C}, t'_m=50^\circ\text{C}$
 $\Delta i^\circ_{H_2O}=4\text{kcal/kg}\cdot\text{cli}$)

열 소모량 (kcal/kg·cli)	740	860	740	860
벽 손 실 열 (%)	4	4	14	14
$\Sigma K3$	2.75913	2.43734	2.88450	2.53572
$\Sigma K4$	3.27240	2.80519	3.45887	2.94737
calorific eff. ϕ	0.84315	0.86890	0.83394	0.86033
kiln inlet raw meal 온도 t''_m (°C)	809	832	800	824
waste gas 온도 t''_g (°C)	325	371	310	355
kiln inlet gas enthalpy i'_g (kcal/kg·cli)	505	564	504	562
waste gas enthalpy i''_g (%)	162	209	155	200
thermal efficiency	0.663	0.615	0.657	0.612
calcining degree e (%)	6.4	7.4	6.8	8.1

<表-2>의 thermal eff. (η) 는 28 식으로 계산

한 값이나 주어진 조건에서 가끔 最高의 thermal eff. 이기도 하다. 또한 이것은 preheater 각 stage에서의 온도 평균이 같다는 것을 가정했기 때문이다.

열 소모량과 벽손실열이 증가하면 이론적인 thermal eff. 는 감소된다.

preheater 구조를 평가하기 위해서는 실제적인 thermal eff. 가 가능해야 하나 실제적으로 그것은 어렵다. 왜냐하면 23 식부터 29 식까지의 식중에 필요한 capacity flow ratio의 개략치만 조사할 수 있기 때문이다. <그림-4>에 나타난 바와 같이 gas와 raw meal 온도는 곡선으로 나타나기 때문이다.

<表-2>에 18 식으로 계산한 C.D가 주어졌다. 그것은 가능한 calcining의 수치일 뿐이다. 왜냐하면 4단의 capacity flow ratio에 C.D가 포함되어 있기 때문이다.

x_4 의 값이 크면 클수록 calcining도 높다. 따라서 입열과 출열의 습이 0(zero)이 되려면 gas 온도가 높아야 한다.

kiln inlet raw meal의 온도 t''_m 는 온도 차와 capacity flow ratio로 23 식에 의하여 계산 가능하며 24 식에 의한 gas 온도 t'_g 의 계산은 부정확하다.

V. dust circulation의 영향

1. kiln에서의 열 전달

kiln에서 전달되는 열 Q 는 열 전달 면적 F 와 gas와 raw meal의 평균 온도 차($t_g - t_m$)의 함수이다.

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_g - t_m) \dots\dots\dots 30$$

α : 열 전달 면적 F 에 대한 convection heat transfer coefficient이다.

Q 는 raw meal의 enthalpy i_A 를 kiln inlet에서의 enthalpy i'_A 로부터 kiln outlet에서의 enthalpy i''_A 만큼 올려 준다. 이러한 전달 열 Q 는 kiln에서의 외벽 손실 열을 보상에 준다. 따라서 clinker의 생산량을 곱하여 다음 31 식을 얻는다.

$$Q = m_k (i''_A - i'_A + q_w) \dots\dots\dots 31$$

30, 31 식으로부터

$$\frac{m_k}{\alpha F} = \frac{(t_g - t_m)}{i''_A - i'_A + q_w} \dots\dots\dots 32$$

가 된다.

gas와 raw meal의 평균 온도 차는 對數를 사용하여

$$(t_g - t_m) = \frac{(t'_g - t''_m) - (t''_g - t'_m)}{l_n(t'_g - t''_m) - l_n(t''_g - t'_m)} \dots\dots 33$$

이다.

어떤 주어진 kiln에 있어서 32 식의 왼편 항은 온도에 따른 α 의 값을 알 수 있다면 $\frac{m_k}{\alpha F}$ 는 상수로 된다. 따라서 gas와 raw meal의 온도 차 $t_g - t_m$ 가 증가하면 32 식의 분모도 증가한다. 외벽 손실 열 q_w 및 kiln outlet에서의 raw meal의 enthalpy i''_A 가 일정하다면 kiln inlet에서의 raw meal enthalpy i'_A 가 감소하게 된다. 그 때문에 kiln inlet에서의 gas 온도 t'_g 는 다시 변화하게 된다. 변화된 t'_g 는 연소 배 gas V , 및 kiln inlet raw meal 온도 t'_m 만 알면 34 식에 의하여 계산이 가능하다.

$$t'_g = \frac{1}{V} (0.92t'_m + 40.62m_{st} - 548.6) + 1.1t'_m - 123 \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots 34$$

연소 배 gas의 계산은 1kg의 clinker 생성에 필요한 연료 소모량의 함수이다. 연료 소모량은 kiln의 heat balance로부터 구할 수가 있다.

2. kiln inlet에서의 온도 함수로서의 연료 소모량 clinker 1kg에 대한 rotary kiln의 heat input는 다음과 같다.

- ① 연료의 연소열 (H_u)
- ② 연소에 필요한 공기의 enthalpy (i'_L)
- ③ kiln inlet에서의 raw meal의 enthalpy (i'_m)
- ④ kiln inlet raw meal중의 dust enthalpy (i'_{st})

heat output는 다음과 같다.

- ① kiln outlet에서의 소성물의 enthalpy (i''_m)
- ② kiln inlet의 연소 배 gas enthalpy (i''_g)
- ③ 원료 분해에 의한 kiln inlet의 CO₂ enthalpy (i''_{CA})
- ④ kiln inlet gas중의 dust enthalpy (i''_{st})
- ⑤ kiln의 외벽 손실 열 (q_w)

위의 heat input 및 output로부터 balance 를 취해 연료의 연소 열을 구하면

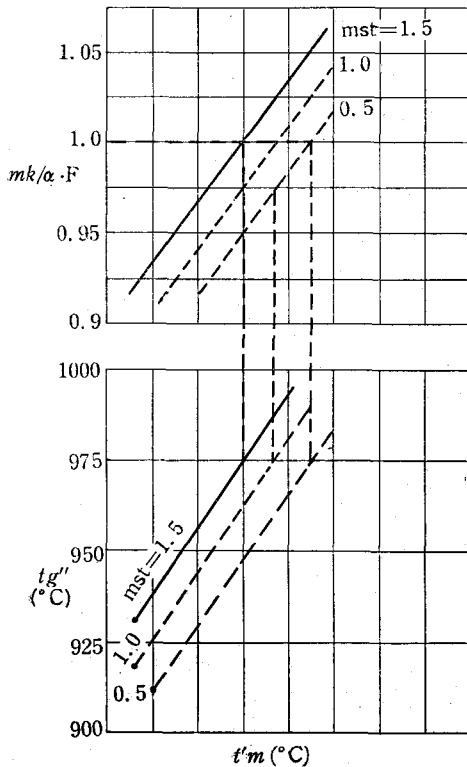
$$Hu = i''_m - i'_m - i''_{st} + i''_g + i_{c4} + i''_{st} + q_w - i'_L$$

(kcal/kg·cli)㉔

이다.

kiln inlet 에서의 온도는 계산 및 graphic method 에 의하여 쉽게 결정된다. graphic method 는 <그림-5>와 같이 inlet chamber 에서의 gas 및 raw meal 의 온도를 상호 계산할 수 있도록 되어 있다. parameter 로서는 preheater 에서의 dust 순환량 m_{st} 이다. kiln inlet 에서의 gas 와 raw meal 의 온도 차 $t_g - t_m$ 는 t_m 에 따라 ㉔ 식 을 이용하여 평균 온도 차를 구하거나 ㉔ 식의 $m_k/\alpha \cdot F$ 로부터 구할 수 있으며 <그림-5>에서 도 구할 수 있다.

따라서 $m_k/\alpha \cdot F$ 의 임의의 값에 대하여 parameter m_{st} 에 의하여 raw meal 의 온도를 읽을 수 있다. <그림-5>로부터 일정한 $m_k/\alpha \cdot F$ 에서 clinker 1 kg 에 대한 preheater 의 dust circula-



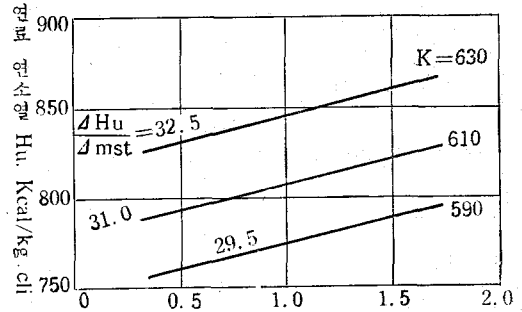
<그림-5> m_{st} 및 $m_k/\alpha \cdot F$ 에 따른 kiln inlet 의 gas 및 raw meal 의 온도 관계

tion 에 따라 kiln inlet 에서 raw meal 온도는 15°C 떨어지고 gas 온도는 3°C 내려 간다는 사실을 알 수 있다.

소성에 필요한 연료의 연소 열 Hu 는 kiln inlet gas 및 raw meal 의 온도, preheater dust circulation 의 벽 손실 열, 연소에 필요한 공기의 enthalpy 등의 함수이다.

<그림-6>은 k 를 parameter 로 하여 preheater 의 dust circulation 에 따른 연료의 연소 열 을 표시했다. clinker 1 kg 당 필요한 연료의 연소 열은 preheater dust circulation 이 1 kg/kg·cli 일 경우 30 kcal/kg·cli 만큼 상승한다.

이러한 결과는 단지 4 stage 로 구성된 preheater 에서 나왔으므로 stage 수를 5 로 증가시켜 분리율을 높여 dust circulation 을 제거한다면 위 의 열 손실을 방지할 수 있겠다.



<그림-6> Dust circulation m_{st} kg/kg·cli dust circulation 과 연소 열과의 관계

<기호 설명>

- C_p : 비열
- e : calcining degree (C.D)
- e_i : 실제적인 C.D
- i : enthalpy
- Δi : enthalpy 差
- Δi° : 반응 enthalpy
- l_u'' : excess air
- m : weight
- q_{sp} : kiln 연료 원단위
- q_w : 표면(벽) 損失 열
- R : raw meal 크링카 비
- V : volume
- t : 온도

Δt_{gm} : cyclone 출구의 gas와 raw meal 사이의 온도 차

η : thermal efficiency

ϕ : calorific efficiency

x : capacity flow ratio

x'' : overall flow ratio

λ : 공기비

<index>

' : 입구

'' : 출구

g : gas

m : raw meal

V. 결 론

preheater raw meal의 C. D는 meal sampling으로서 뿐만 아니라 kiln inlet gas 분석으로 계산 가능하다. preheater enthalpy balance로는 개략치밖에 얻을 수 없다. enthalpy balance로 C. D는 체류 시간의 함수로 확인되었다. 즉 5.8°C/min의 heating up 속도의 경우 gas 온도

800°C에서 약 10% 정도이나 heating up 속도가 빨라지면 이는 무시할 정도이다.

calorific eff. 및 thermal eff.는 preheater 구조 평가 뿐 아니라 운전 조건 및 kiln system을 통과하는 양을 특정짓게 한다. preheater의 평가는 각 cyclone stage 출구에서의 gas와 raw meal의 온도 차로 나타낸다. 이 온도 차를 결정하는 것은 대단히 어려운 특수한 측정 기술이 필요하다. 왜냐하면 표면적이 커서 sampling할 때 냉각 공기 유입으로 온도가 하강하기 때문이다.

clinker 1 kg에 대한 preheater dust circulation, preheater의 온도, 연소 배 gas량에 따른 kiln inlet에서의 gas 및 raw meal 온도는 graph로 표시되었다.

preheater에 인접한 stage에서의 dust circulation의 결과로 kiln inlet gas 및 raw meal의 온도가 낮아지고 그 결과 dust circulation 1 kg/kg·cli 당 30 kcal/kg·cli의 열량 소모가 증가된다.

》 近 着 外 國 圖 書 《

● MODERN ASIA, May 1972

* NATION BY NATION

Japan : Trade-Japanese Style

Hong Kong : High Island

Singapore : Gold Divers

Australia : Steel Growth

* FEATURES

Trade With China?

An evaluation of trading potential

Asia's Rising Star

ECAFE Survey of the Region

Marco Polo's Successors Changing pattern of Asian tourism

● MODERN ASIA, June/July 1972

* NATION BY NATION

Fiji : Wealth of Islands

Singapore : Helicopter Links

Malaysia : Not So Smooth

Thailand : Firm Help

Indonesia : Petroleum Bases

Solomon Islands : Cement Boats

* FEATURES

China First

Danish industrial fair in Peking

Going Big

Containerization—a new element

Decade of Development

U.N. sponsored regional plans

Food For Thought

Advice for budding restaurateurs