

數學的 모델適用에 의한 프리히타의 熱消費量 考察

鄭 聖 均 (譯)

〈雙龍洋灰에너지企劃研究班 課長〉

1. 序 言

키른 시스템에서 과잉공기와 1차공기에 대한 적정 운전조건, leakage air, 키른 또는 사이크론의 보온과 같은 전반적인 요인들을 개선함으로써 경제성을 증가시킬 수 있다.

여기에서는 4단 사이크론으로 된 키른 시스템에 수학적 모델을 적용하여 열소비량 예측과 프리히타에서의 온도분포 및 계산을 가능토록 하였다.

2. 入力媒介變數 (Input parameter)

키른 열소비량과 프리히타 온도 등을 계산하기 위해서는 우선 일련의 데이터, 즉 수학적 모델을 위한 입력매개변수(input parameter)가 키른 시스템에서 얻어져야 한다.

이 입력매개변수들을 대표치로서 <表-1>에 표기하였으며, 매개변수의 부호는 컴퓨터의 기초 프로그램과 모델 수립과정에서의 사용을 고려하여 설정하였다.

1) Parameters N, U, MK, SK

이 model은 4-stage와 5-stage preheater에 모두 적용될 수 있으며, 이 program은 coal, oil, gas 연소를 위한 특성분석이 포함된다. MK는 dust 순환을 감안하지 않은 크링카 1kg을

생산하기 위한 원료량이다.

bottom cyclone으로 들어가는 dust 중 일부분은 kiln으로부터 발생된 것도 있으나, 대부분은 riser duct의 경사면에서 발생되는 와류에 의한 것이며, 일반적으로 dust 순환량은 크링카량의 7~20%이다.

2) Dust separation in cyclones, Y(J)

실제 preheater의 집진효율 검토는 매우 곤란하다.

보통 optimum efficiency는 top cyclone에서 일어나며, bottom cyclone의 효율은 떨어진다.

bottom cyclone은 central pipe가 없거나 있더라도 매우 짧다. 이는 hot gas에 노출된 metal 부분의 극심한 부식 때문이다. 그리고 cyclone의 heat balance 전에 material과 dust량이 결정되어야 하며, 이는 cyclone 집진효율을 위한 개략치를 의미한다.

여기에서 각 cyclone 집진효율은 top cyclone 0.95, 3단cyclone 0.90, 2단cyclone 0.85, bottom cyclone 0.75로 정하였다.

3) Parameters BY, E, P, L2, LF, HO

이 model은 bypass system도 포함되어 있으며, BY는 kiln gas에 대한 백분율로 나타내어진다.

bypass되는 gas의 온도는 약 1,150°C 정도

Input Parameters

〈表-1〉

Parameter	Unit	Nomenclature	Representative value
number of cyclone stage	-	N	4
designation of fuel (Coal =1, Oil =2, Gas =3)	-	U	2
raw meal / clinker ratio	kg/kg	MK	1,540
dust from kiln to preheater	%	SK	15
loss on ignition for kiln dust	%	GK	5
dust precipitation in cyclone stage 1	-	Y(1)	0.95
dust precipitation in cyclone stage 2	-	Y(2)	0.90
dust precipitation in cyclone stage 3	-	Y(3)	0.85
dust precipitation in cyclone stage 4	-	Y(4)	0.75
bypass	%	BY	0
true degree of calcination of material to kiln	%	E	40
primary air	%	P	10
air excess at kiln inlet	%	L(1)	15
false air at inlet seal and riser duct	kg/kg-cli	L2	0.07
false air entering with kiln feed	kg/kg-cli	LF	0
water (vapour) to kiln system	kg/kg-cli	HO	0
temperature of raw meal	°C	T(0)	65
temperature in bottom stage of cyclone	°C	T5	820
ambient temperature	°C	TS	15
radiation loss + heat of reaction			
in stage 1	kcal/kg	H(1)	12
in stage 2	kcal/kg	H(2)	7
radiation loss in stage 3	kcal/kg	H(3)	5
heat of recarbonation in cyclone 3	kcal/kg	K8	20
standard loss from cooler	kcal/kg	T	140
radiation loss : kiln + preheater	kcal/kg	RA	68
heat of reaction	kcal/kg	RE	415

이고, dust의 현열은 잠열을 수반하며, 이 열량은 420 kcal/kg-clinker 정도이다. 탈탄산물은 kiln feed가 탈탄산된 실제 탈탄산율로 한다. 이것은 kiln으로부터 들어오는 dust량을 알지 못하고는 결정할 수가 없으나 일반적으로 걸보기 분해율보다 3~8% 정도 낮다.

primary air는 kiln outlet seal에서 들어가는 leakage air가 포함되지 않아야 한다.

kiln inlet air seal과 bottom cyclone으로 연결되는 riser duct에서 들어가는 leakage air량(L2)은 보수상태가 불량하거나 manhole이 잘 닫혀 있지 않은 상태를 정확히 알 수 있다. 고려하여야 할 leakage air로는 preheater에 원료를 공급하는 conveying air도 있으며, 이 program에서는 이를 고려하였다. coal mill에서 배출되는 drying air를 통해 kiln으로 들어가는 수분도 포함되며, 이 program에 적용한 coal의 수분함량은 2.8%이다.

4) Temperature in bottom cyclone, T5

bottom cyclone의 온도는 kiln 종류에 관계없이 일정하다고 보는 것이 parameter로서 사용하기에 이상적이며, 이와 같은 가정은 kiln 열 전달에서의 의문사항을 피할 수 있다.

kiln 내부의 온도거동과 gas와 물질간의 열 전달은 여러 가지 변화로 인하여 검토하기가 매우 곤란하다.

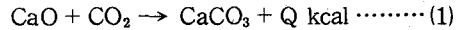
4-stage preheater의 bottom cyclone 온도는 810~820°C이며, riser duct에서 연소하는 kiln에서는 공급되는 연료량에 따라 820~845°C이고, precalciner가 있는 kiln에서는 이온도가 860~875°C 정도가 된다.

5) Radiation losses + heat of reaction in cyclone, H(J) and Recarbonation heat, K8

상부 2개의 cyclone에서 radiation loss는 원료의 부착수분과 결합수분 건조에 사용되는 열소비량과 관련되며, 부착수분은 top cyclone에서 증발되고 그 열소비량은 2~4 kcal/kg-cli이다.

결합수분 건조를 위한 열소비량은 10~30 kcal/kg-cli이고, 이 결합수분은 상부 2cyclone 사이에서 분해, 증발된다.

bottom cyclone으로부터 2번째 cyclone(Dopol type의 vortex)에서 다음식(1)과 같은 과정이 진행되는 동안 recarbonation heat를 발열하게 되므로 이 model에서는 recarbonation heat도 포함하였다.



recarbonation이 되는 CaO는 bottom cyclone으로부터 들어오는 dust에 포함되어 있으며, recarbonation은 bottom cyclone에서 2번째 cyclone의 온도인 720~780°C에서 빈번히 신속하게 일어나고, recarbonation heat는 15~50 kcal/kg-cli이다.

6) Standard cooler losses for grate cooler

cooler loss는 radiation loss, cooler 출구의 clinker 현열, cooler 배기의 현열로 구성된다.

cooler 배기에 의한 heat loss는 킬른 열소비량, 파잉공기량, 1차공기량에 따라 변화하므로 일정하게 정할 수 없고 이 변동요인들과 함수관계가 있다.

그리고 이 계산을 위해 열소비량은 780 kcal/kg-cli, 파잉공기량 15%, 1차공기량 10%로 정하였다.

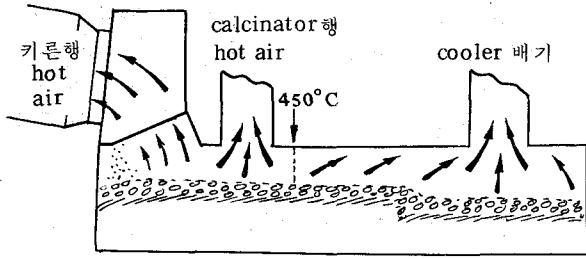
표준 cooler loss를 가지고 model 작업을 함으로써 열소비량, 파잉공기, 1차공기량이 각각 다른 kiln의 cooler 열회수량을 비교하는 것이 가능하다.

표준 cooler loss로부터 실제 cooler loss를 얻기 위해서는 어떤 가정을 만들어야만 한다.

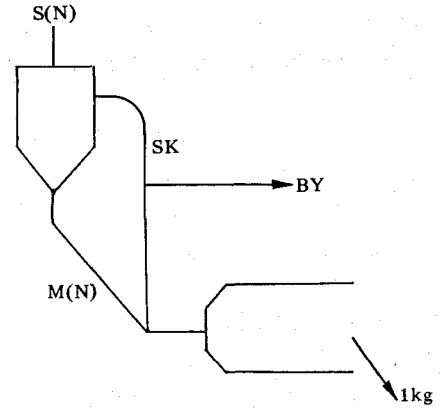
grate의 앞쪽 3個室를 통과한 공기는 kiln과 calciner 용으로 사용되며, grate의 뒷부분 2/3를 통과한 공기는 loss로서 배출되어진다.

kiln과 calciner 행 공기와 배기 duct행 공기가 분리되는 지점의 grate 상부에서 공기온도는 약 450°C로 예상된다(<그림-1> 參照).

이론적 고찰로는 planetary cooler에서 이와 유사한 계산을 하기가 곤란하지만, 앞서 언급



<그림-1> Conducting the cooling air away from the cooling grate



<그림-2> Material and dust balance in preheater

한 수치들이 잘못 적용되어졌다는 것은 아니다.

7) Other assumption

여기에서 cyclone 내의 gas와 material간의 온도 balance 계산은 cyclone 출구 gas 온도와 chute 원료 온도가 동일한 것으로 가정하고 행하여 졌으며 이 가정과 실제와의 차이는 불과 몇 도 차이밖에 되지 않는다.

Program variables

M (0)	kiln feed to preheater	kg/kg-clinker
M (1)	M (N) material from cyclones	kg/kg-clinker
S (1)	S (N) dust from cyclones	kg/kg-clinker
T(1)	T (N) temperature in cyclones	°C
K	kiln system heat consumption	kcal/kg-clinker
KB	heat content of bypass gases	kcal/kg-clinker
K2	sensible heat added with feed, fuel, and air	kcal/kg-clinker
K1	heat in gases after preheater	kcal/kg-clinker
K3	actual cooler losses	
A + Bt	specific heat of combustion products + excess air	kcal/10 ³ kcal × °C

3. 數學的 모델의 設定

여러 가지 물질의 평균비열은 (2)식을 사용하여 계산된다.

$$C_{pm} = a + b \cdot t \text{ (kcal/kg} \cdot \text{°C)} \dots\dots\dots (2)$$

여기에서 a, b는 물질상수이며, 이 식은 광범위한 온도에 대한 좋은 접근수

<表-2>

Constants A and B

	A	B
Coal	$3.83 \times 10^{-4} + L(1) \cdot 3.37 \times 10^{-6}$	$5.63 \times 10^{-8} + L(1) \cdot 3.23 \times 10^{-10}$
Oil	$3.86 \times 10^{-4} + L(1) \cdot 3.35 \times 10^{-6}$	$5.36 \times 10^{-8} + L(1) \cdot 3.55 \times 10^{-10}$
Gas	$4.10 \times 10^{-4} + L(1) \cdot 3.43 \times 10^{-6}$	$5.32 \times 10^{-8} + L(1) \cdot 3.28 \times 10^{-10}$

C + Dt	Specific heat of CO ₂ + H ₂ O from kiln feed C = 0.1173, D = 4.077 × 10 ⁻⁵	kcal/kg-clinker × °C
QR (J)	heat in gases from cyclone No. J	kcal/kg-clinker
QM (J)	heat in material from cyclone No. J	kcal/kg-clinker
QS (J)	heat in dust from cyclone No. J	kcal/kg-clinker
QL (J)	heat in kiln seal and riser duct false air from cyclone No. J	kcal/kg-clinker
QH (J)	heat in water vapour from cyclone No. J	kcal/kg-clinker
QF (1)	heat in false air with feed from cyclone No. 1	kcal/kg-clinker
QF (2)	heat in false air with feed to cyclone No. 1	kcal/kg-clinker

단이다.

1) Formulas for calculations

preheater 에서 material 과 dust 량과의 관계는 <그림-2>로부터 추정할 수 있고, material 과 dust balance 를 위한 식(3)으로 표시할 수 있다.

$$M(N) = \frac{100 + SK(100 - GK)}{100 - GM} \dots\dots\dots (3)$$

그리고 N단에서 1단까지는 다음과 같다.

$$S(N) = M(N) \cdot \left(\frac{1}{Y(N)} - 1 \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$M(N-1) = MK \cdot \left(1 + \frac{BY \cdot SK \cdot (100 - GK)}{1,000,000} \right) + S(N) \dots\dots\dots (5)$$

bypass gas 의 열은 식(6)으로 표시된다.

$$KB = \left[\left(A \cdot K + C \cdot \frac{100 - E}{100} \right) \cdot 1150 + \left(B \cdot K + D \cdot \frac{100 - E}{100} \right) \cdot 1150^2 + 7.44 \cdot SK \right] \cdot \frac{BY}{100} \dots\dots\dots (6)$$

cooler 로부터의 열손실은 식(7)과 같다.

$$K3 = T + 1.23 \cdot (100 + L(1)) + K \cdot 0.00158 \cdot (P - 2 \cdot L(1)) - 0.15 \cdot K \dots\dots\dots (7)$$

각 열량들은 식(8)에서부터 (14)까지로 표시된다.

$$QR(J) = \left[A \cdot K \cdot \left(1 - \frac{BY}{100} \right) + C \cdot \left(1 - \frac{(100 - E) \cdot BY}{10,000} \right) \right] \cdot T(J) + \left[B \cdot K \cdot \left(1 - \frac{BY}{100} \right) + D \cdot \left(1 - \frac{(100 - E) \cdot BY}{10,000} \right) \right] \cdot T(J)^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$QM(J) = M(J) \cdot \{ 0.206 \cdot T(J) + 8.0 \cdot 10^{-5} \cdot T(J)^2 \} \dots\dots\dots (9)$$

$$QS(J) = S(J) \cdot \{ 0.206 \cdot T(J) + 8.0 \cdot 10^{-5} \cdot T(J)^2 \} \dots\dots\dots (10)$$

$$QL(J) = L2 \cdot \{ 0.236 \cdot T(J) + 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot T(J)^2 \} \dots\dots\dots (11)$$

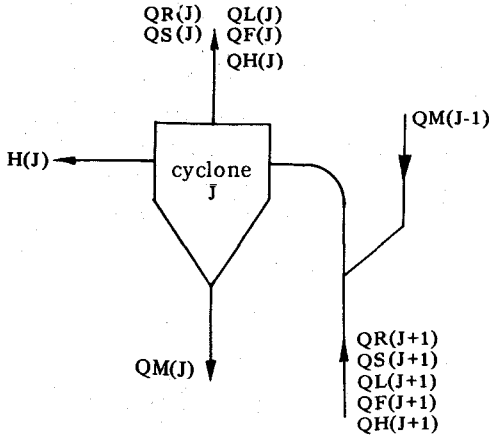
$$QH(J) = HO \cdot \{ 0.444 \cdot T(J) + 6.5 \cdot 10^{-5} \cdot T(J)^2 \} \dots\dots\dots (12)$$

$$QF(1) = LF \cdot \{ 0.236 \cdot T(1) + 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot T(1)^2 \} \dots\dots\dots (13)$$

$$QF(2) = LF \cdot 0.24 \cdot T(0) : QF(3) = QF(4) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

원료, 연료, 공기가 가지고 들어가는 현열은 식(15)이고, preheater 에서 나오는 gas 의 열은 식(16)으로 표시되며, 식(17)은 kiln 의 열소비량을 나타낸다.

$$K2 = K \cdot TS \cdot \left(1 + \frac{L(1)}{100} \right) \cdot 34 \cdot 10^{-5} + 0.24 \cdot LF \cdot TS + 0.234 \cdot M(0) \cdot T(0) + 3 \dots\dots\dots (15)$$



〈그림-3〉 Heat balance in any of the cyclone stages

$$K1 = QR(1) + QS(1) + QL(1) + QF(1) + QH(1) \dots\dots\dots (16)$$

$$K = K1 + KB + K3 + RA + RE - K2 \dots\dots (17)$$

그래서, cyclone stage No. J의 heat balance를 위하여 식(18)이 얻어진다(입열 = 출열).

(〈그림-3〉 참조)

$$\begin{aligned} & QR(J+1) + QS(J+1) + QL(J+1) \\ & + QF(J+1) + QH(J+1) + QM(J-1) \\ & = QR(J) + QS(J) + QL(J) + QF(J) \\ & + QH(J) + QM(J) + H(J) \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

2) Calculation of heat consumption and temperatures

preheater cyclone 내의 온도는 위에서 주어진 식을 이용하여 계산할 수 있으며, kiln system의 heat balance가 다소 단순하게 되었다. 계산은 여러 번 반복되어야 하므로 computer에 의해 계산하는 것이 좋다.

4. 數學的 모델의 適用

이미 언급한 바와 같이 이 model은 input parameter들에 대한 data를 사용하여 cyclone

온도와 kiln 열소비량을 계산할 수 있다. 그러나 그 결과들은 이론가정과 실제공장조건에 차이가 있는 것과 같이, 실제로 얻어지는 결과들과는 다소 차이가 있을 수 있다. 그래서 대부분 model의 function은 상대적인 결과를 산출하는데 사용되어진다. 즉, 그것은 과잉공기, leakage air, cyclone 효율 등과 같은 input parameter들의 하나가 변화할 경우 cyclone 온도와 열소비량이 어떻게 될 것인가를 예측하기 위하여 사용되며, 이런 방법을 사용할 수 있는 model의 예를 다음 항에 언급하였다.

1) Standard values for input parameters

〈表-1〉에 표시된 input parameter의 대표치들은 다음과 같은 계산을 위한 기준으로 사용되며, 이는 한번에 한 parameter가 대표치로부터 변화되어지는 반면에 다른 대표치들은 일정하게 유지되어지는 것을 의미한다.

cyclone 온도와 heat consumption은 〈表-3〉과 〈表-4〉에 표시하였다.

2) Changes in individual parameters

〈表-3〉 Temperature in preheater

cyclone stage	temperature
1	359 °C
2	565 °C
3	721 °C
4	820 °C

〈表-4〉 Heat balance

heat in exit gas after preheater	189 kcal/kg-clinker
radiation losses, kiln + preheater	68 kcal/kg-clinker
reaction heat	415 kcal/kg-clinker
cooler losses	140 kcal/kg-clinker
free heat, (sensible heat)	-32 kcal/kg-clinker
heat consumption	780 kcal/kg-clinker

(1) Excess air

excess air 가 10% 증가하면 preheater 출구 gas 의 O₂ 함량이 1.2% 증가하고, gas 온도가 16°C 증가하며, 열소비량이 6 kcal/kg-clinker 증가한다.

이것은 안정된 화염조건과 kiln shell 의 radiation loss가 일정한 조건하에서의 결과이다.

또한 excess air 증가문제는 cooler로부터 들어오는 2차공기와도 관계가 있다. 만일 kiln outlet seal로부터 들어오는 leakage air로 인하여 excess air가 증가된다면 조건은 달라진다.

(2) Primary air quantity

primary air 량이 증가되면 cooler 에서 kiln 으로 공급되는 secondary air 량이 감소된다.

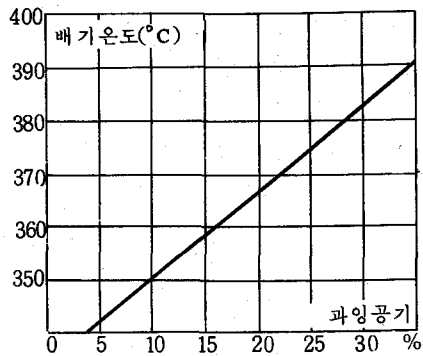
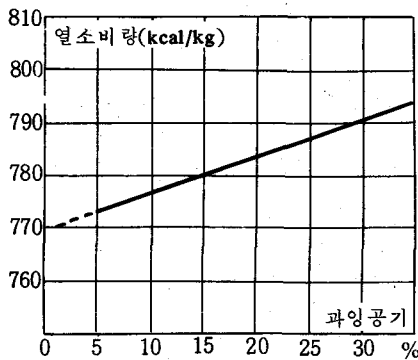
primary air 량이 이론공기량(Lmin)의 10% 까지 증가되면 preheater 출구 gas 온도가 4°C 증가되고, 열소비량이 14 kcal/kg-clinker 증가된다. 이는 동일한 공기량이 kiln door 나 outlet seal로부터 유입되어도 증가되는 것이 동일하다.

(3) False air in inlet seal and riser duct.

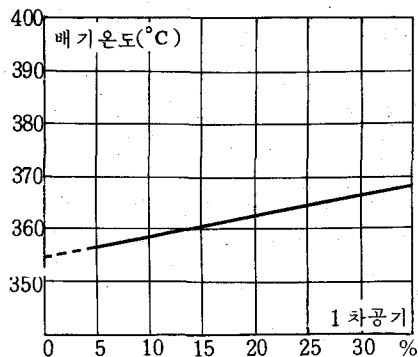
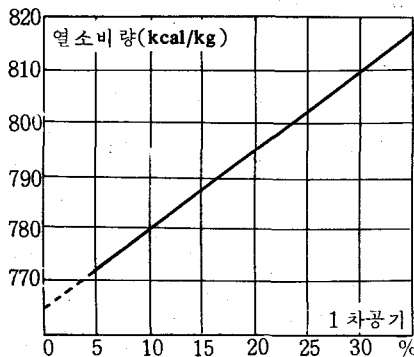
kiln inlet seal이나 riser duct 에서 유입되는 leakage air 0.1 kg 마다 gas 의 O₂ 함량은 1.1% 증가되고, preheater 출구 gas 의 온도는 18°C 상승되며, 열소비량은 18 kcal/kg-clinker 증가된다. 따라서 kiln inlet seal 과 manhole 의 적절한 보수가 매우 중요하다.

(4) False air with kiln feed

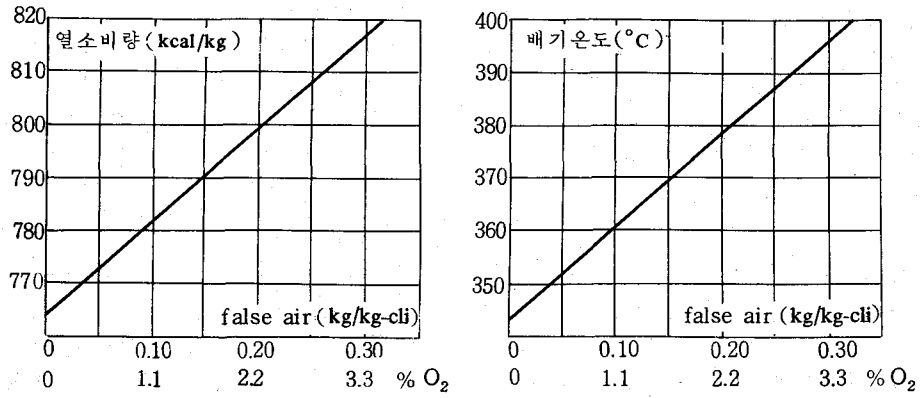
원료 수송용 공기는 gas 온도를 급격히 떨어



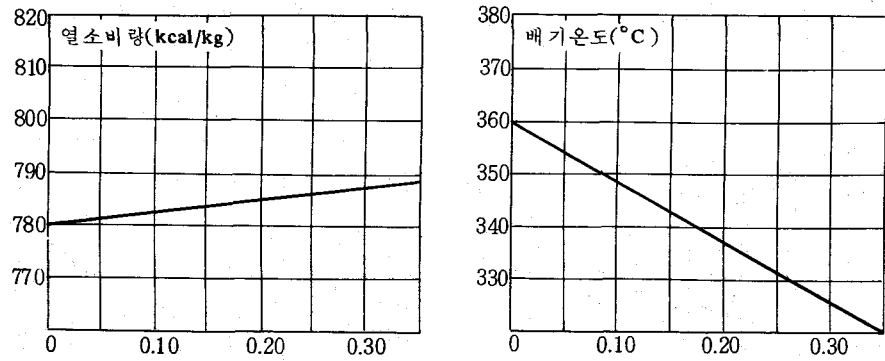
<그림-4> Excess air



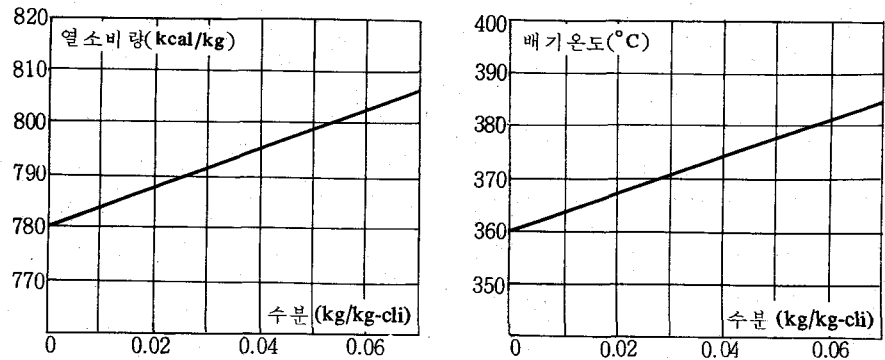
<그림-5> Primary air



〈그림-6〉 False air (kg/kg-cl) and increase in oxygen-content of smoke



〈그림-7〉 Amount of false air intake with feed (kg/kg-clinker)



〈그림-8〉 Applying water vapour from fuel drying process

뜨리는 반면에 열소비량에는 그다지 영향을 미치지 않는다.

원료 수송용 공기는 약 0.065 kg/kg-clinker이며, 이로 인한 gas 온도는 7°C 저하되고, 열

소비량은 2 kcal/kg-clinker 증가된다.

(5) Water vapour from fuel

coal을 연료로 사용하는 direct system에서

coal mill air가 primary air 로써 kiln으로 들어가게 되므로, 이때 coal 건조로 인한 수분이 kiln으로 들어가게 된다.

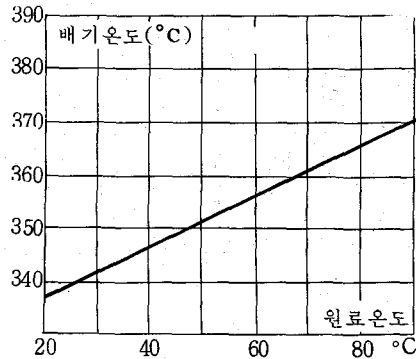
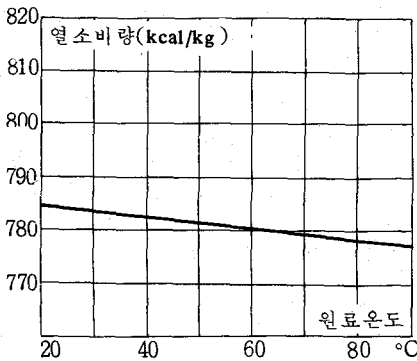
만일 수분 14%의 coal을 사용하여, 수분을 10%로 건조하게 되면 kiln에 들어가는 수분량은 다음과 같다.

$$\frac{0.14 \times 100}{90 \times 100} \times 10 = 0.016 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-clinker}$$

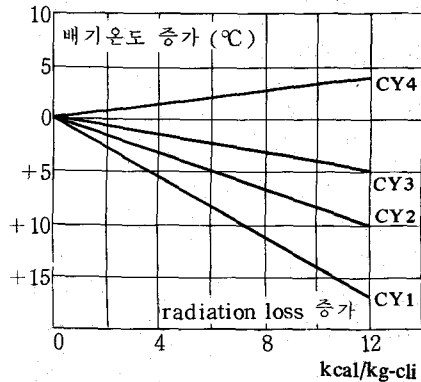
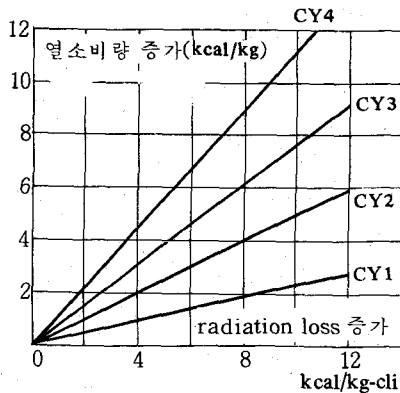
이로 인하여 gas 온도가 6°C 증가되고, 열소비량이 7 kcal/kg-cli 증가되게 된다.

(6) Kiln feed temperature

kiln feed 온도가 50°C 변화되면, 열소비량이 6 kcal/kg-clinker 변화되고, gas 온도는 23°C까지 변화된다.



〈그림-9〉 Kiln feed temperature



〈그림-10〉 Radiation loss in preheater cyclones

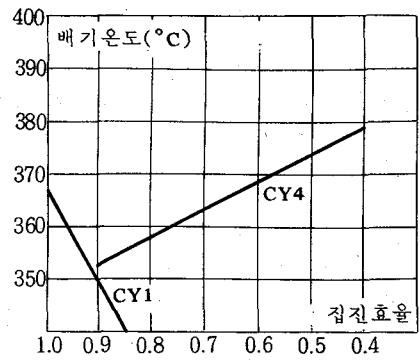
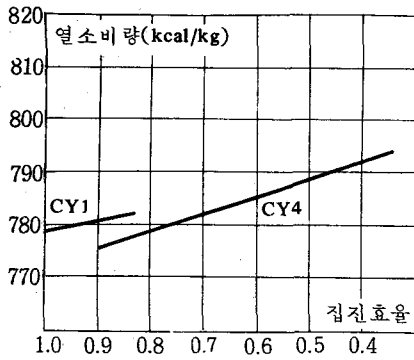
(7) Radiation losses from cyclone preheaters

cyclone stage가 증가되면 radiation loss는 증가되는 반면 gas 온도는 떨어지게 된다.

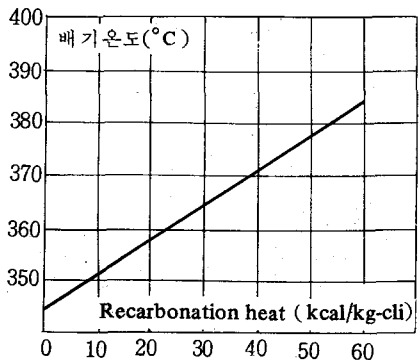
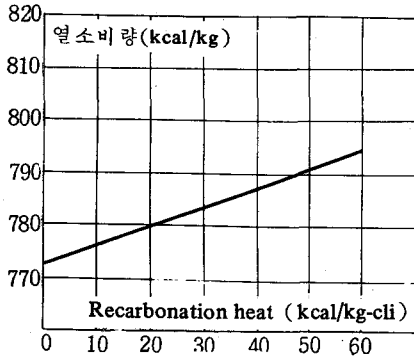
kiln radiation loss 증가는 bottom cyclone 으로부터의 radiation loss와 같은 curve에 따른다.

(8) Dust separation efficiency in preheater cyclones

일반적으로 top cyclone의 효율은 95% 정도이며, top cyclone에서 효율을 증가시키더라도 불과 얼마 되지 않을 뿐 아니라 압손증가로 별로 효과가 없으며, 열소비량 감소도 매우 적다. 그렇지만 cyclone efficiency는 집진계통설계를



<그림 - 11> Degree of precipitation of preheater cyclones



<그림 - 12> Recarbonisation in third stage of cyclone

위해 고려되어야 한다.

그리고 bottom cyclone의 효율은 50~80% 정도이며, 이 원인은 첫째 이 cyclone은 고온 때문에 central pipe가 없고, 둘째 cyclone 효율이 때때로 caking 때문에 저하되기 때문이다.

(9) Recarbonation heat

원료는 bottom cyclone에서 40~50%의 탈탄산이 이루어지며, bottom cyclone으로부터 3단cyclone으로 나가는 dust 중에는 많은 양의 CaO가 포함된다.

3단cyclone에서 이 CaO는 gas 중의 CO₂와 재반응(발열반응)하여 CaCO₃를 형성하게 된다.

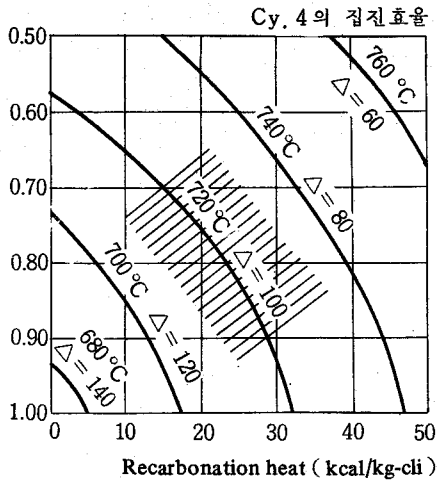
만일 이 dust 중에 CaO가 20% 포함되어 있다면 recarbonation heat는 dust 0.1 kg 당 14 kcal/kg-cli가 생성된다.

만일 bottom cyclone의 효율이 75%라면 3단cyclone으로 들어가는 dust량은 0.473 kg/kg-cli이 되며, 이 dust가 모두 recarbonation되어진다면, maximum 66 kcal/kg-cli의 recarbonation heat가 발생할 것이다.

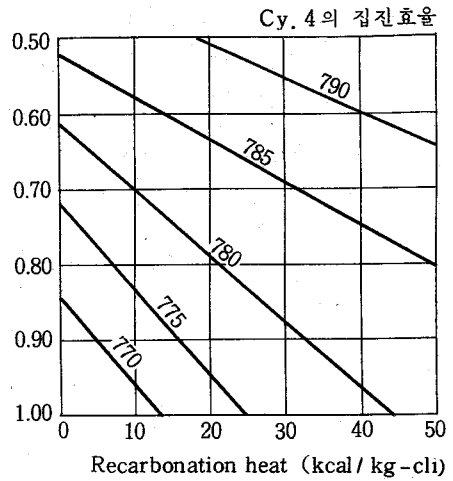
3단cyclone 내의 온도가 720°C 이상에서는 cyclone 내부에 clogging이 빈번하게 되므로, 이 cyclone 내에서는 가능한 한 낮은 온도를 유지하는 것이 중요하다.

4단cyclone 효율과 recarbonation은 3단cyclone 내의 온도에 상당히 큰 영향을 미치지만 이 factor들은 독립적으로 변화되어지는 것은 아니다.

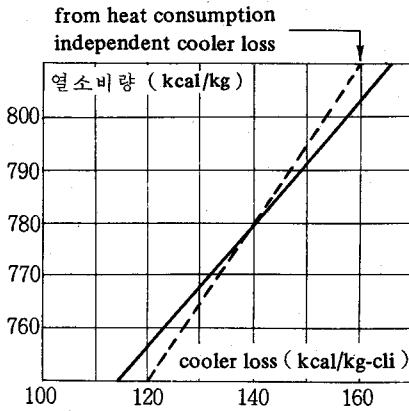
만일 bottom cyclone 효율이 100%라면 3단cyclone으로 들어가는 CaO는 없을 것이다. 그리고 동일 diagram에서 이 factor들의 변화에



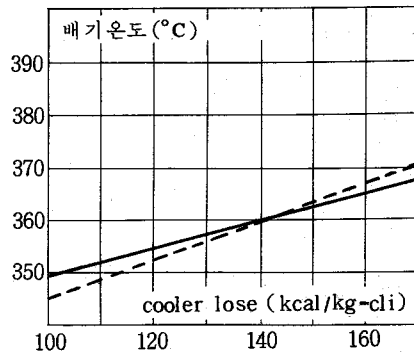
〈그림-13〉 3rd stage temp. and temp-drop from 4th to 3rd stage cyclones



〈그림-14〉 Heat consumption as a function of efficiency and re-carbonation



〈그림-15〉 Standard cooler loss (kcal/kg-cli)



대한 과정을 〈그림-13〉에 표시하였다.

4단과 3단 cyclone의 온도 차이는 실제 90 ~ 110°C이며, 정상조업상태라면 이 온도는 〈그림-13〉의 사선 부위 어느 지점에 위치하게 될 것이다.

bottom cyclone에서의 집진효율과 re-carbonation에 따른 열소비량을 〈그림-14〉에 표시하였으며, 〈그림-14〉에서의 열소비량은 상기 parameter들의 함수로써 나타내어진다.

(10) Standard cooler losses

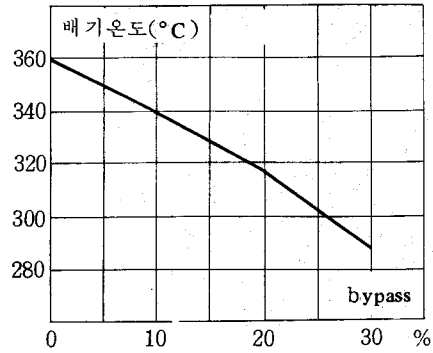
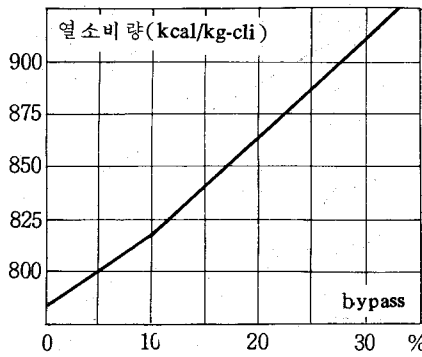
표준쿨러 손실의 변화는 kiln radiation loss

의 변화와 동일한 결과를 갖는다.

heat consumption은 radiation loss나 표준쿨러 손실에서 증가되는 것의 1.16 배로 증가된다.

가끔 문헌에서는 heat consumption의 증가가 radiation loss 또는 cooler loss에서 증가되는 것의 1.5 배라고 말하기도 하나, 이는 실제 쿨러 손실이 열소비량과 별개라고 가정할 경우에만 적용되는 것으로 다소 차이가 있다.

kiln system의 model에서 쿨러 손실이 열소비량과 별개로 되어졌다면 〈그림-15〉에서의 점선으로 표시된다.



〈그림-16〉 Bypass

(11) By pass

kiln에서 preheater로 순환되는 dust가 7%일 경우, by pass 1% 증가마다 열소비량이 4.2 kcal/kg-clinker 증가된다. 만일 이 순환 dust가 15%까지 증가되어지면 by pass 1% 증가마다 열소비량이 4.9 kcal/kg-clinker 증가된다.

(12) 5-stage cyclone preheater

preheater에 5 단을 추가하면 radiation loss

는 5 kcal/kg-cli까지 증가된다.

〈表-5〉에 4 단과 5 단 preheater의 비교결과를 표시하였다. 5 단 preheater가 4 단에 비해 outlet 온도가 49°C 떨어지고 열소비량이 22 kcal/kg-cli 감소되며, 추가효과로는 밑에서 2 번째 cyclone의 온도가 721°C에서 749°C로 증가되는 것이다.

여기에서 우리는 cyclone 내의 clogging 원인에 대한 온도범위를 실제 경험을 통하여 좀더 유사하게 접근시키려는 중이며, system 내에서 휘발성분의 순환율이 높다면 5 단 cyclone은 불리할 것이다.

〈表-5〉 Comparison between 4 and 5 stage preheaters

Item	4-stage	5-stage
temperature, stage 1	359	310
temperature, stage 2	565	494
temperature, stage 3	721	636
temperature, stage 4	820	749
temperature, stage 5	-	820
heat balance (kcal/kg-cli)		
heat in exit gas after preheater	189	158
cooler loss	140	144
radiation loss	68	73
reaction heat	415	415
sensible heat (kiln feed, fuel, air)	-32	-32
heat consumption	780	758

〈原典〉

H.P. Elkjaer : "Determining the heat consumption of a 4-stage cyclone preheater by applying a mathematical model," Z-K-G, No. 2, 1980.

〈參考文獻〉

- 1) Ritzmann, H., : "The effect of dust cycles on the heat consumption of rotary kiln plants with raw meal preheaters," Z-K-G, No. 2, 1971, pp. 576-580.
- 2) Frankenberger, R., : "Effect of dust cycles on the efficiency of raw meal preheaters," Z-K-G, No. 6, 1970, pp. 254-262. ♣