

## 시멘트 공장의 부유원석분 예열장치와 유동화 하소로의 모델링에 관한 연구

최홍영 · 이재성

서울대학교 공과대학 화학공학과  
(1987년 1월 10일 접수, 1987년 5월 29일 채택)

### Modeling of a Combined Suspension Preheater and the Fluidized Calciner of a Cement Plant

Hong Young Choi and Chal-sung Lee

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received 10 January 1987; accepted 29 May 1987)

#### 요 약

시멘트 제조용 원석 분말의 예열은 회전로로부터의 열가스를 다단 사이클론 예열기 내에서 열교환시킴으로서 크게 개선된다. 근자에는 유동화 하소로 등의 새로운 열원을 예열기 계통 내에 병합 가동시킴으로서 하소반응의 반 이상을 예열기 내에서 이루어지게 하여 회전로의 열부하를 감소시키는 효과를 얻게 되었다. 본 연구에서는 22종의 프로그램 변수를 포함한 51개의 입력변수를 선정하고 계의 각 구성요소에 대한 정상가동상태에 있어서의 물질 및 에너지 수지식을 세워 전산모사를 실시하였다. 이와 함께 원석송입속도, 유동화 하소로의 석탄공급속도, 사이클론의 집진효율, 열손실 및 미분진 재순환속도 등의 변수를 각각 변화시켜 그것이 예열기의 거동에 미치는 영향을 알아보았다. 그 결과 계산으로 예측되는 계의 거동이 실제의 공장조업상의 경향과 일치됨을 알았고 따라서 이로부터 더 나은 에너지 효율로 운전하는데 대한 지침을 찾을 수가 있었다.

**Abstract**—The preheating of cement raw meals is drastically improved by suspending them with the hot kiln gas in a multistage cyclone preheater. Furthermore, the heat load of a rotary kiln is cut down to such an extent that more than a half of the calcination is achieved in the preheater by employing a newly devised equipment, known as the Mitsubishi fluidized calciner, which works as a part of the preheater proper. In this work a total of 51 input parameters including 22 program variables are scrupulously chosen to describe the system by setting up complete material and energy balance equations for each system component in operation under steady state conditions. Five important variables, such as raw meal feed rate, coal feed rate to the fluidized calciner, cyclone efficiencies, radiation losses, and dust circulation rate from the riser duct are chosen to check the impacts of their variations upon the preheater performance. It is found that the calculated results explain reasonably well of the actually observed preheater behaviors. It is also possible that the predicted results can be used as the guide for more energy efficient preheater operations.

#### 1. 서 론

에너지 다소비형 산업의 하나인 시멘트공업은 1824

년 포틀랜드시멘트(Portland cement)의 발명으로 시작되었다. 시멘트 제조시 핵심공정인 소성공정은 shaft kiln 으로부터 시작하여 1877년경 Ronson에 의하여

회전로(rotary kiln)가 발명된 후 습식, 반건식 공정을 거쳐 건식공정인 SP(suspension preheater)방식, NSP(new suspension preheater)방식 등으로 발전되어 왔다. 한편 kilnless kiln, plasma furnace 등도 검토되고 있다[1].

시멘트 공업의 주된 과제는 소성공정의 생산성을 향상시키고 에너지 비용을 절감하는 것으로 요약될 수 있다. 소성공정은 크게 하소(calcination)와 크링크(clinker)반응으로 나눌 수 있는데 열소모의 대부분은 하소에 소요된다. 그러므로 예열 및 하소가 일어나는 예열기(preheater)에 대한 해석은 에너지 절약에 매우 중요하다.

본 연구에서는 NSP 방식의 하나인 국내의 한 시멘트공장의 제 X호 건식공정 중 MFC(Mitsubishi fluidized calciner)를 포함한 예열기의 각 단 및 전체에 대한 정상상태의 모델을 세우고 이를 해석하여 각각의 인자들이 공정에 미치는 영향을 파악하는 것을 목표로 하고 있다.

## 2. 이 론

### 2-1. 이론적 배경

Deussner[2]는 사이클론을 일종의 열교환기로 생각하고 열효율을 계산했다. 그 후 Vogel[3], Frankenberg[4], Vosteen[5] 등이 SP에서의 전열에 대한 이론을 세웠다. 원료와 가스 사이에 일어나는 열전달을 다룬 Vosteen의 이론으로부터 사이클론에서 분리된 원료와 가스의 온도 차는 무시될 수 있음을 알게 되었다. SP에 대한 이론화는 1960년대 중반부터 1970년대 중반까지 대부분 독일에서 이루어졌으며 그 후 1980년대에 들어와 Elikjaer[6], Rosemann[7] 등이 NSP 방식의 소성공정에 대한 연구를 시작하였다.

Satterfield[8], Narsimhan[9] 등의 연구보고로 부터,  $\text{CaCO}_3$ 의 하소반응은 그 반응속도가 온도에 매우 민감하며 이에따라 미세입자의 경우에 입자의 온도는 하소반응 중에 일정한 하소온도로 유지됨을 알 수 있다.  $\text{CaCO}_3$ 의 하소온도는 압력에 따라 변화하며 순수한  $\text{CaCO}_3$ 의 하소온도는 1기압 하에서 약  $890^\circ\text{C}$ 이다[10]. 능면체 구조인  $\text{CaCO}_3$ 는 하소될 때 입방격자 구조인  $\text{CaO}$ 로 변화하며 이와같은 결정구조의 변화는 하소온도를 감소시키게 되며[11], 일반적으로 석회석에서의  $\text{CaCO}_3$  하소온도는 약  $850^\circ\text{C}$ 이다.  $\text{MgCO}_3$ 는 하소반응시 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 여러개의 하소온도가 존재할 수 있는 단계적인 반응이 일어나는 것이 Brill[8]

에 의하여 알려졌다.

### 2-2. 예열기

예열기는 원료를 예열시키고 하소반응의 일부를 일으키는 역할을 한다. 예열기를 포함한 전체 소성공정에 대한 개략적인 공정도는 Fig. 1과 같다. 4단의 사이클론과 MFC로 구성되어 있는 예열기에서 각 단 및 MFC에서는 다음과 같은 반응이 일어난다.

가. 1단: 부착수분의 증발 및  $\text{MgCO}_3$ 의 일부 하소  
나. 2단: 결합수분의 증발 및  $\text{MgCO}_3$ 의 하소 완결  
다. 3단: 4단에서 유입되는 분진(dust)의 재탄산염화(recarbonation)

다. 4단 및 MFC:  $\text{CaCO}_3$ 의 하소 및 석탄의 연소

## 3. 예열공정의 모델링

### 3-1. 반 응

원료는 석회석이 주가 되어 shale, 해사, 철광석 등을 혼합 분쇄한 것이며  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  등의 성분으로 이루어져 있다. 이들 성분중  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ 는 각각  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ 로 존재한다. 또한 원료중에는 부착수분, 결합수분이 포함되어 있으며, 결합수분은 점토 광물의 구조 및 결정수를 알아야 그 양을 알 수 있으나 보편적으로  $\text{Al}_2\text{O}_3$  한 분

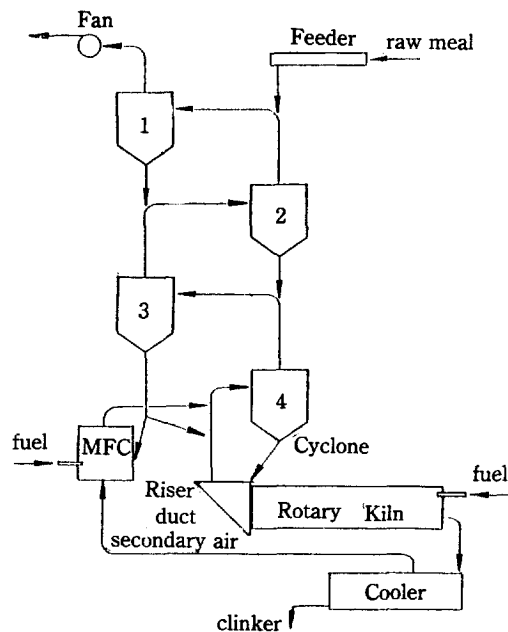


Fig. 1. Schematic diagram of the cement plant.

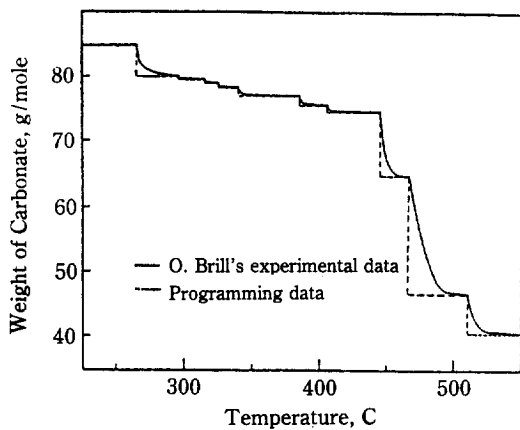
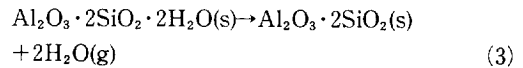
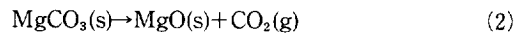
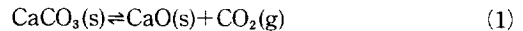


Fig. 2. The weight loss of  $\text{MgCO}_3$  during calcination.

자당 2분자에 해당하는 양만큼 존재한다[12]. 원료가 예열기를 거치는 동안에 다음과 같은 반응이 일어난다.



미세입자일 때 이들 반응에서는 열전달속도에 비해 반응속도 및 물질전달속도가 매우 빠르므로 전체 반응속도는 단지 열전달속도에 의해 결정된다[8]. 그러므로 이들 반응은 입자의 온도가 반응온도일 때를 기준으로 하여 순간적으로 반응이 완결된다고 고려할 수 있다.  $\text{CaCO}_3$ 의 반응온도는  $850^\circ\text{C}$ , 결합수분 및 부착수분의 반응온도는 각각  $450^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ 로 고려되었으며,

Table 1. Calcination temperature of  $\text{MgCO}_3$ .

Temp.(°C)	265		295	315	325	340	380	405	445	468	510
Formula	MgCO <sub>3</sub>	10MgO 9CO <sub>2</sub>	9MgO 8CO <sub>2</sub>	8MgO 7CO <sub>2</sub>	7MgO 6CO <sub>2</sub>	6MgO 5CO <sub>2</sub>	5MgO 4CO <sub>2</sub>	9MgO 7CO <sub>2</sub>	9MgO 5CO <sub>2</sub>	7MgO CO <sub>2</sub>	MgO

Table 2. Input parameters with the nomenclatures.

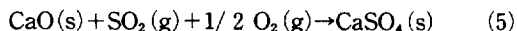
Parameter	Unit	Nomenclature	Remark
feed rate of raw meal	ton/hr	RAWMEAL	150
contents in raw meal except ignition loss			
$\text{SiO}_2$ content	%	SIR	21.08
$\text{Al}_2\text{O}_3$ content	%	AIR	5.44
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ content	%	FIR	3.62
CaO content	%	CIR	65.80
MgO content	%	RMIR	2.74
contact-water in raw meal (wet base)	%	WB	0.172
temperature of raw meal	$^\circ\text{C}$	$T_\phi$	82
feed rate of coal to MFC	ton/day	COALMFC	87
feed rate of coal to kiln	ton/day	COALKIL	192
secondary air from cooler to MFC	$\text{Nm}^3/\text{min}$	SECAIR	250
coal feeding air to MFC	$\text{Nm}^3/\text{min}$	COALAIR	20
fluidization air to MFC	$\text{Nm}^3/\text{min}$	FLUAIR	180
contents in coal (wet base)			
ash content	%	ASH	13.69
C content	%	CIC	70.72
H content	%	HIC	4.60
O content	%	OIC	7.06
N content	%	RNIC	1.23
S content	%	SIC	0.61
$\text{H}_2\text{O}$ content	%	HOH	2.09
contact water in coal (wet base)	%	HHO	0.64
high calorific value of coal	kcal/kg	HHH	6604
specific heat of coal	kcal/kg	CP	0.28

Table 2. continued

Parameter	Unit	Nomenclature	Remark
temperatures of air to MFC			
secondary air	°C	TZFC	600
coal feeding air	°C	TC	50
fluidization air	°C	TF	35
contents in coal ash			
SiO <sub>2</sub> content	%	SIA	42.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content	%	AIA	29.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content	%	FIA	6.22
CaO content	%	CIA	12.61
MgO content	%	RMIA	2.27
humidity of air (dry-air base)	kg/kg-air	HUA	0.004
false air intake with feed	kg/sec	ACFGWR	1.50
leakage air at stage number J	kg/sec	ACBLJ	1.15, 1.20, 1.00 1.50, 1.00
radiation loss at stage number J	kcal/sec	ACRAJ	28.81, 2.87.6 125.14, 64.16 48.38
dust from kiln to preheater	kg/sec	ACBDFK	0
temperature of kiln outlet gas	°C	TZFK	1500
cyclone efficiency at stage number J		Y (J)	0.95, 0.77 0.79, 0.79
dust formed at riser duct	kg/kg-clinker	BDFR	0.65

MgCO<sub>3</sub>는 Fig. 2와 같은 단계적인 분해반응으로 여러 개의 반응온도가 존재한다. MgCO<sub>3</sub>의 반응온도는 Table 1에 나타났다.

원료의 강열감량(ignition loss)을 일으키는 이들 반응 외에 예열기에서는 MFC에 공급되는 연료의 연소반응이 있다. 연료는 MFC 및 최하단 사이클론을 거치는 동안 대부분이 연소하게 되며 여기서는 MFC 및 최하단 사이클론에서 완전연소한다고 가정했다. 또한 연료 연소시 발생하는 SO<sub>2</sub>(g)는 대부분이 산소의 존재하에 CaO(s)와 반응하여 CaSO<sub>4</sub>(s)로 된다[14].



예열기로 유입되는 회전로 배가스 중에는 SO<sub>2</sub>(g)가 존재하지 않으며, MFC내에서 발생하는 SO<sub>2</sub>(g)는 상기반응에 의해 모두 CaSO<sub>4</sub>(g)로 된다고 가정한다. 또한 연소시 NO<sub>x</sub>가 발생되지만 하소로는 저온연소이며 그 발생량이 매우 적으므로 무시된다.

### 3-2. 물성치 및 입력변수

본 연구에서는 25°C를 기준으로 각 물질의 물성치를 구하였다. 열역학 테이블로부터 각 물질의 비열, 표준 생성열 등의 값을 얻고, 여기에서 현열, 반응열 등을 계산했다.

예열공정을 모사하기 위해 필요한 입력변수로는 원료 및 석탄 공급량과 각각의 조성 및 온도 크링카 냉각기(cooler)로 부터 MFC로 공급되는 2차공기량 및 그 온도, 회전로에서 예열기로 유입되는 가스량과 그 온도 및 조성, 사이클론의 방열손실, 누입공기량 등이 있으며 Table 2에 종합하여 표시했다. 각각의 값은 공장에서 서의 조업데이터를 기준으로 하였으며, 방열손실, 누입공기량 등의 부족한 데이터는 열전달 계산식과 공기비에 의한 계산 및 문헌을 참고하여 대략적인 값을 사용했다. 또한 모델식에 사용된 프로그램변수는 Table 3에 표시했으며 단위 크링카 생산에 소요되는 양으로 나타내었다.

### 3-3. 물질수지

예열공정에 있어서 각 구성 단과 하소로로 유입, 유출하는 물질의 흐름을 도식화한 것이 Fig. 3이며 최상단 사이클론을 1단, 최하단을 4단으로 정하였으며 편의상 상승덕트(riser duct)부를 5단, MFC를 6단으로 고려하였다.

고체물질로는 원료, 연료중의 석탄재, CaSO<sub>4</sub>(s) 등이 있으며 Fig. 4에서 보는 바와 같이 원료 중 강열감량과 무관한 것들을 합하여 성분 A, 석탄재를 성분 X,

Table 3. Program variables.

Variable	Unit	Nomenclature	Remark
material from stage number J	kg/kg-clinker	BM(J)	
content K in material from stage number J	"	BMK(J)	K = A, B, O, D, E, X, F
exit gas from stage number J	"	BG(J)	
content L in gas from stage number J	"	BGL(J)	L = N, Z, CO, H
dust from stage number J	"	BD(J)	
content K in dust from stage number J	"	BDK(J)	
false air intake with raw meal	"	BF(0)	
leakage air at stage number J	"	BL(J)	
radiation loss at stage number J	kcal/kg-clinker	RA(J)	
heat loss due to reaction at stage number J	"	RE(J)	
coal to MFC	kg/kg-clinker	BMC	
secondary air from cooler to MFC	"	BGFC	
coal feeding air to MFC	"	BGC	
fluidization air to MFC	"	BGF	
gas from kiln to preheater	"	BGFK	
content L in gas from kiln to preheater	"	BGLFK	
temperature of stage number J	°C	TZ(J)	
degree of calcination at preheater	%	XA	
degree of calcination at stage number 4	"	XA4	
degree of calcination at MFC	"	XAM	
dust formed at riser duct	kg/kg-clinker	BDFR	
cyclone efficiency at stage number J		Y(J)	

\* If prefix B is interchanged with Q the nomenclature with prefix Q represents the sensible heat (K cal/kg-clinker) of the nomenclature with prefix B.

CaSO<sub>4</sub>(s) 중의 SO<sub>3</sub>를 성분 F로 표기하며, 강열감량의 원인이 되는 CaCO<sub>3</sub>(s) 중의 CO<sub>2</sub> 및 MgCO<sub>3</sub>(s) 중의 CO<sub>2</sub>를 각각 성분 B 및 C로 표기하였다. 결합수분 및 부착수분도 각각 성분 D 및 E로 표기한다. 기체인 N<sub>2</sub>(g), O<sub>2</sub>(g), CO<sub>2</sub>(g), H<sub>2</sub>O(g)도 Fig. 4에서 보듯이 각각 N, Z, CO, H로 표기하며 공기는 79몰%의 N<sub>2</sub>(g)와 21몰%의 O<sub>2</sub>(g)로 된 혼합기체 R로 표기한다.

고체물질에 대하여 1단부터 3단까지는 다음식이 성립한다.

$$BM(J-1) + BD(J+1) = BM(J) + BD(J) + BR(J) \quad (6)$$

$$BD(J) = BM(J) (1/Y(J) - 1), \quad J=1, 2, 3 \quad (7)$$

여기서, J는 단수를 표시하며 BM(J)는 J단에서 배출되는 원료량을, BD(J)는 J단에서 배출되는 분진의 양을 나타낸다. Y(J)는 J단에서의 사이클론의 집진효율을, BR(J)는 J단에서 반응에 의한 질량감소량을 나타낸다. 이 양은 기체로 변하여 기체량의 증가를 가져온다. 한편 4단과 하소로에 대하여는 다음 식이 성립한다.

$$4\text{단} : (1 - \text{DRAT}) \cdot BM(3) + BD(5) + BD(6)$$

$$= BM(4) + BD(4) + BR(4) \quad (8)$$

$$BD(4) = BM(4) \cdot (1/Y(4) - 1) \quad (9)$$

$$\text{하소로} : \text{DRAT} \cdot BM(3) + \text{BDFC} + \text{BMCX} \\ + \text{BMCF} = BD(6) + BR(6) \quad (10)$$

여기서, BDFC는 냉각기로 부터 하소로로 유입되는 2차공기 중의 분자량을, BMCX는 연료중의 석탄재를, BMCF는 연료 연소시 형성되는 CaSO<sub>4</sub>(s) 중의 SO<sub>3</sub>를 나타낸다. 또한 DRAT는 3단 배출원료량인 BM(3)중 하소로로 유입되는 분율이다.

상승다트부에서는 재순환분진의 미하소된 CaCO<sub>3</sub>가 고온의 회전로 배가스와 접촉하여 하소되며, 이로 인하여 가스의 온도가 급격히 감소한다. 상승다트부에서의 물질수지는 다음과 같다.

$$BM(4) + \text{BDFK} = BM(5) + BD(5) + BR(5) \quad (11)$$

여기서, BDFK는 회전로에서 상승다트로 유입되는 기체 중의 분진량을 나타낸다. 가스량에 대한 물질수지는 J=1, 2, 3일 때 다음 식으로 표시된다.

$$\text{BG}(J) = \text{BG}(J+1) + \text{BL}(J) + \text{BR}(J) \quad (12)$$

여기서, BL(J)는 J단에서의 누입공기량을 나타낸다.

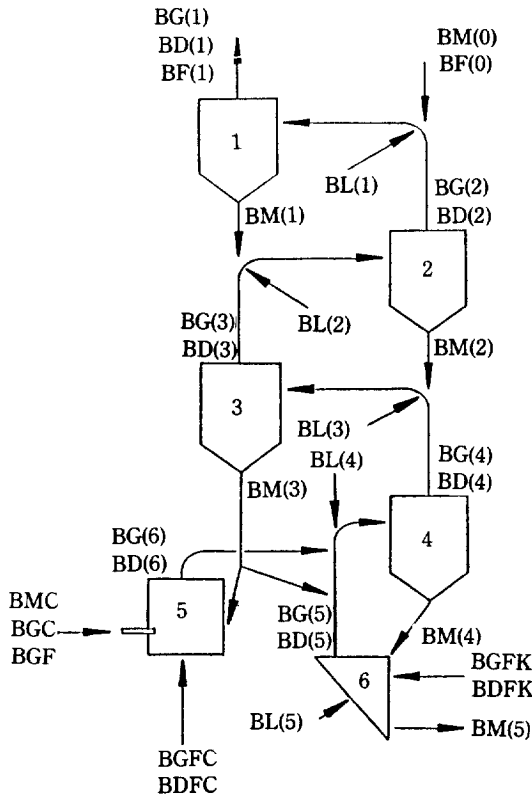


Fig. 3. Flow chart of materials in preheater.

4단, 상승다트 및 하소로에 대하여는 다음 식이 성립한다.

$$4\text{단} : BG(4) = BG(5) + BG(6) + BL(4) + BR(4) \quad (13)$$

$$\text{상승다트} : BG(5) = BGFK + BL(5) + BR(5) \quad (14)$$

$$\text{하소로} : BG(6) = BGFC + BGC + BGF + BR(6) + FGM \cdot BMC \quad (15)$$

여기서, BGFK는 회전로 배출 가스량을 나타내며 BGFC는 2차공기량을, BGC는 연료송입용 공기량을, BGr는 유동화 공기량을 나타낸다. 또한 BMC는 하소로에 공급되는 연료량을 나타내며 FGM은 단위 연료당 발생하는 연소 가스량(+) 및 소모되는 산소량(-)의 합을 나타낸다.

원료수반공기(false air intake with raw meal feed)는 BF(0)로 표시하며 다른 가스량과 별도로 고려했다. BF(1)은 BF(0)가 1단을 거쳐 배출될 때의 양을 뜻하며, 그 값은 BF(0)와 같다. 물질의 각 성분에 대하여 앞에서와 같이 각 단계에 대한 수지식을 세울 수 있다. 3단에서의 재탄산염화는  $\text{CaO(s)}$ 가  $\text{CO}_2(\text{g})$ 와 반응

하여  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 를 형성하는 반응으로 하소반응의 역반응이다. 이 반응은  $\text{CaO(s)}$ 가  $\text{CaO} \cdot \frac{32}{44} \text{CO}_2$  상태가 될 때까지 매우 빠른 표면반응으로 진행되며 그 후  $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2$ 를 향한 매우 느린 반응이 계속된다. 재순환에 의하여 재탄산염화가 반복될 때 세공(細孔)의 부피감소, 탄산염의 소결 등의 이유에 의해 역반응은 작게 일어나며, 여기서는 재순환을 고려하여 재탄산염화는  $\text{CaO} \cdot \frac{7}{10} \text{CO}_2$  상태로 반응이 완결된다고 고려할 수 있다. 또한 그 후의  $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2$ 를 향한 매우 느린 반응은 무시되었다[15].

회전로로 공급되는 성분 A, X, F의 원료량과 회전로에서 예열기로 유입되는 분진량인 BDFK의 치를 한 단위의 크링카로 하여 모든 물질의 양은 단위 크링카 생산에 대한 양으로 나타내었다.

$$\text{BMA}(5) + \text{BMX}(5) + \text{BMF}(5) - \text{BDFK} = 1 \quad (16)$$

### 3-4. 에너지수지

에너지수지를 도식화한 것이 Fig. 5이며 1단 및 2, 3단에 대하여 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} 1\text{단} : & QG(2) + QD(2) + QM(0) + QL(1) + QF(0) \\ & = QM(1) + QD(1) + QG(1) + R(1) + QF(1) \end{aligned} \quad (17)$$

$$2, 3\text{단} : QG(J+1) + QD(J+1) + QM(J-1) + QL(J)$$

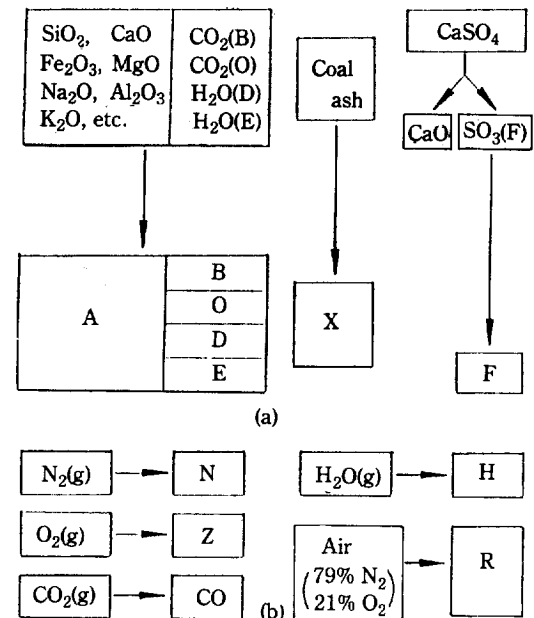


Fig. 4. Nomenclature symbols for the components.

(a) of solid material, (b) of gas

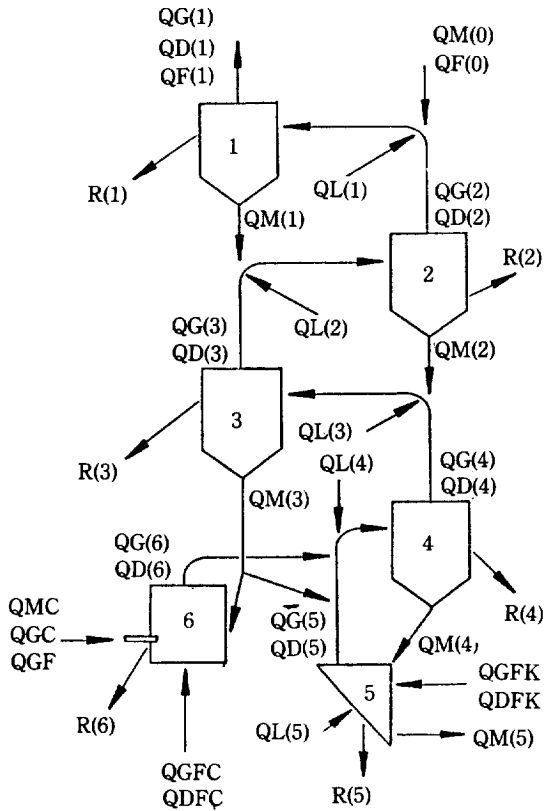


Fig. 5. Flow chart of energy in preheater.

$$=QM(J)+QD(J)+QG(J)+R(J) \quad (18)$$

여기서,  $J=2, 3$ 이며  $QF(0)$ 는 BF(0)가 지닌 현열을,  $QF(1)$ 은 BF(1)이 지닌 현열을 나타낸다.  $R(J)$ 는 RA(J)와 RE(J)의 합을 나타내며, RA(J)와 RE(J)는 각각 J단에서의 방열손실량과 반응열을 나타낸다. 한편 4단 및 5, 6단에 대하여 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} 4\text{단} : & QM(4)+QD(4)+QG(4)+R(4)=QG(5) \\ & +QD(5)+(1-DRAT) \cdot QM(3)+QL(4) \\ & +QG(6)+QD(6) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{상승덕트} : QM(5)+QD(5)+QG(5)+R(5)$$

Table 4. Total heat supplied.

Total heat supplied	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• sensible heat of gas and dust supplied from kiln to preheater</li> <li>• heat of fuel and air supplied to MFC</li> </ul>	
Used heat	Wasted heat
<ul style="list-style-type: none"> <li>• heat of reaction</li> <li>• sensible heat of material supplied from preheater to kiln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• radiation loss</li> <li>• sensible heat of preheater exit gas and dust</li> <li>• (-) sensible heat of raw meal and leakage air</li> </ul>

$$=QGFK+QDFK+QM(4)+QL(5) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{하소로} : & QG(6)+QD(6)+R(6) \\ & =QGFC+QDFC+QMC+QGF \\ & +QGC+DRAT \cdot QM(3) \end{aligned} \quad (21)$$

각 기체, 원료물질 및 분진이 지닌 현열은 성분별 물질수지식으로부터 구한 성분별 물질량과 각 성분별 현열로부터 구해진다.

### 3-5. 모델의 적용 및 계산

주어진 입력변수로부터 각 단의 온도 및 각 물질의 양이 계산되며 이로부터 주어진 기준 조업조건에 대한 각종 값이 계산된다. 각종 입력변수는 각각 독립적인 값으로 고려되며 입력변수의 변화에 따르는 각 단의 온도 변화 등의 값을 계산할 수 있다. Table 4에 표시한 것과 같이 총공급량은 이용열과 폐열량으로 나누어 생각할 수 있으며 여기서는 각종 변수의 변화에 대한 영향을 파악할 때 예열기 배출가스 온도 및 폐열량의 변화로 그 영향을 파악하였다. 사이클론의 집진효율은 원료입자의 크기, 밀도 및 유속 등에 의하여 변화한다. 각종 입력변수의 변화가 집진효율에 미치는 영향을 구체적으로 따지지않고 각 단의 집진효율로 대체한다.

Table 5. Temperature of stage and wasted heat.

Stage number	1	2	3	4	5(riser duct)	6(MFC)	Wasted heat
Temperature (°C)	370	552	747	850	979	850	(kcal/kg- clinker)
Cyclone efficiency	0.95	0.77	0.79	0.79	.	.	198.1

\* Temperature of stage means the temperature of outlet gas and dust at each stage.

## 4. 계산결과 및 검토

### 4-1. 기준 조업조건에서의 계산결과

입력변수에 대한 각종 데이터로부터 계산된 기준상태에서의 각 단의 온도 및 폐열량은 Table 5에 표시되었고, 공급열량 중 하소반응과 원석분말의 예열에 쓰인 단별 배분 백분율은 Table 6에 나타내었다.

### 4-2. 누입공기와 원료수반공기의 영향

Fig. 6에서 보듯이 1, 2, 3단에서의 누입공기는 증가시 예열기 배가스 온도를 감소시키고 폐열량을 증가시킨다. 이때 상단에서의 누입공기가 배가스 온도에 직접 작용하므로 하단의 경우보다 온도를 크게 떨어뜨린다. 그러나 하소반응에 미치는 영향은 상단일수록 작으므로 폐열량에 미치는 영향은 하단의 누입공기의 경우가 크다. 4단 및 상승다트부에서의 누입공기는 1, 2, 3단의 경우와는 달리 그 양이 증가할 때 폐열량과 더불어 예열기 배가스의 온도도 증가시키게 된다. 이 까닭은 하단부에서의 누입공기는 하소반응을 직접적으로 억제하는데 작용하며 4단 배출가스의 온도변화를 일으키지 않기 때문이다. 폐열량을 감소시키기 위해서는 하단에서의 누입공기를 방지하는 것이 중요하며 원료수반공기는 1단에서의 누입공기가 미치는 영향과 거의 같은 영향을 미친다.

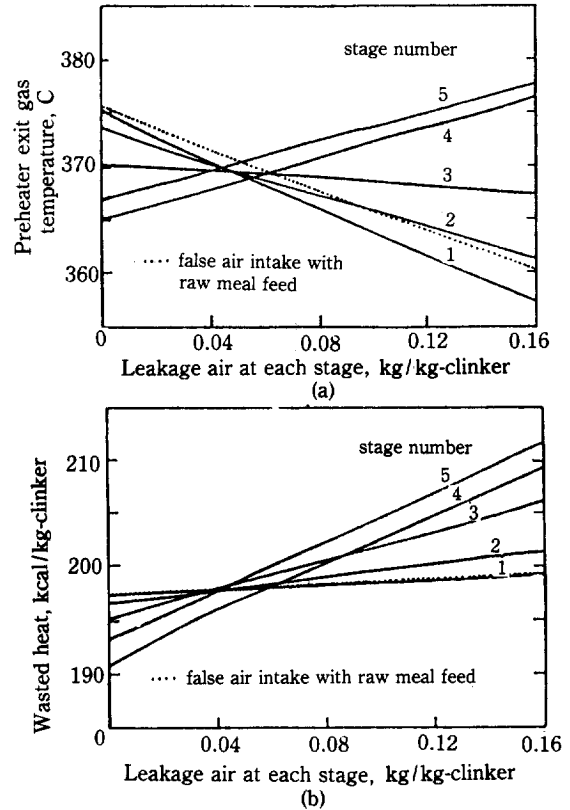


Fig. 6. Effect of leakage air at each stage.

(a) on preheater exit gas temperature  
(b) on wasted heat

Table 6. Heat of reaction and calorific value used for preheating.

(a) at preheater including riser duct

Stage number	1	2	3	4	5(riser duct)	6 (MFC)	pre-heater
reaction heat	4.6	25.0	-56.0	45.2	149.0	142.5	310.3
(kcal/kg-clinker)	(1.5%)	(8%)	(-18%)	(14.6%)	(48%)	(45.9%)	(100%)
preheating value	160.0	90.1	124.2	16.7	-168.8	16.8	239.0
(kcal/kg-clinker)	(66.9%)	(37.3%)	(52%)	(7%)	(-70.6%)	(7%)	(100%)
total	164.6	115.1	68.2	61.9	-19.8	159.3	549.3
(kcal/kg-clinker)	(30.0)	(20.9)	(12.4)	(11.3)	(-3.6)	(29.0)	(100)

(b) at preheater except riser duct

Stage number	1	2	3	4	6 (MFC)	preheater
reaction heat	4.6	25.0	-56.0	45.2	142.5	161.3
(kcal/kg-clinker)	(2.8%)	(15.5%)	(-34.7%)	(28%)	(88.4%)	(100%)
preheating value	160.0	90.1	124.2	16.7	16.8	407.8
(kcal/kg-clinker)	(39.2%)	(22.1%)	(30.5%)	(4.1%)	(4.1%)	(100%)
total	164.6	115.1	68.2	61.9	159.3	569.1
(kcal/kg-clinker)	(28.9)	(20.2)	(12.0)	(10.9)	(28.0)	(100)



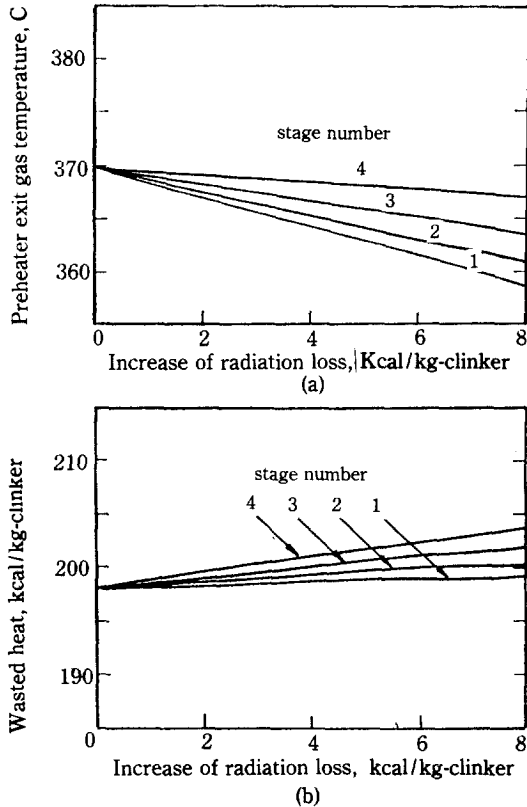


Fig. 7. Effect of radiation losses.

(a) on preheater exit gas temperature  
(b) on wasted heat

#### 4-3. 방열손실의 영향

각 단별 방열손실량의 증가에 따르는 예열기 배가스 온도 및 폐열량의 변화는 Fig. 7에 나타냈으며 이것은 Fig. 6의 누입공기의 영향과 유사하다. 그러나 4단의 방열손실이 커지면 4단에서의 반응이 감소하며 이로 인하여 4단 배출 기체량이 감소하므로 예열기 배가스 온도를 증가시키는 누입공기와 같은 효과는 발생하지 않는다.

#### 4-4. 공급원료량 및 온도의 영향

공급원료량이 10 ton/hr 증가할 때 회전로에 공급되는 크링카 원료량은 약 6 ton/hr 증가하게 된다. 원료의 온도는 집진기에서 포집된 분진과 섞이고, 또 가열된 원료급송기를 거쳐 1단으로 송열되므로 약 80°C가량으로 가온된 상태에 있다. 이로 인한 원료가 지닌 현열은 총공급량의 약 3%가량에 해당된다. Fig. 8에서 보듯이 원료의 온도가 증가하면 예열기 배가스의 온도도 증가하게 된다. 그러나 폐열량에 미치는 원료온도의 영

향은 작다. 공급원료량이 증가하면 예열기 배가스의 온도 및 폐열량은 모두 감소하지만 원료의 예열기내에서의 하소율이 작아지며 이에 따른 회전로내의 열부하의 증가가 필요하게 된다.

#### 4-5. 사이클론의 집진효율의 영향

기준 조업조건에서 1단부터 4단까지 각 단의 사이클론 효율은 각각 0.95, 0.77, 0.79, 0.79의 값을 가지며 각각 독립적인 변수로 취급하여 크링카 원료물질의 각 집진효율의 변화에 따르는 양의 변화를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 여기서 1단의 효율이 크링카 형성물질의 생산량에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 Fig. 10에서 보듯이 집진효율이 클수록 예열기 배가스의 온도 및 폐열량이 작아진다. 1단 효율의 영향이 큰 까닭은 크링카량에 큰 영향을 미치기 때문이며 4단 효율의 영향이 큰 까닭은 재탄산연화에 직접적인 영향을 미치는 4단에서 3단으로 비산되는 분진량을 4단 효율이 좌우하기 때문이다.

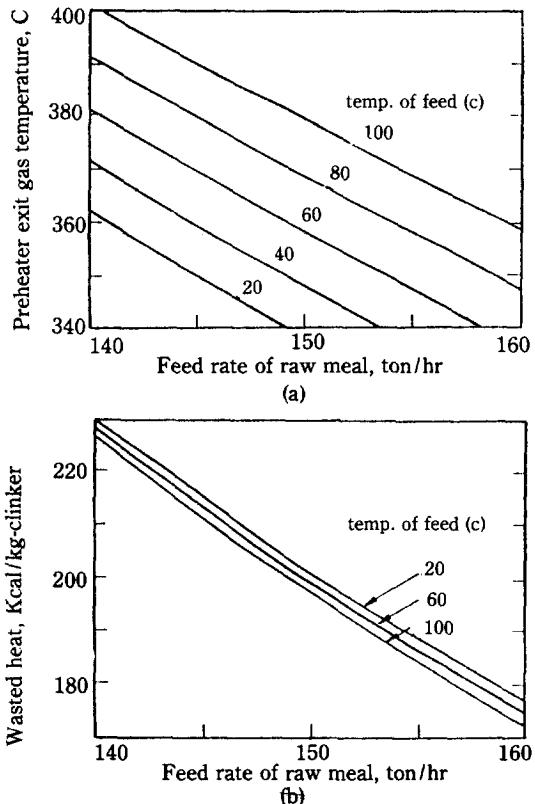


Fig. 8. Effect of the feed rate of raw meal.

(a) on preheater exit gas temperature  
(b) on wasted heat

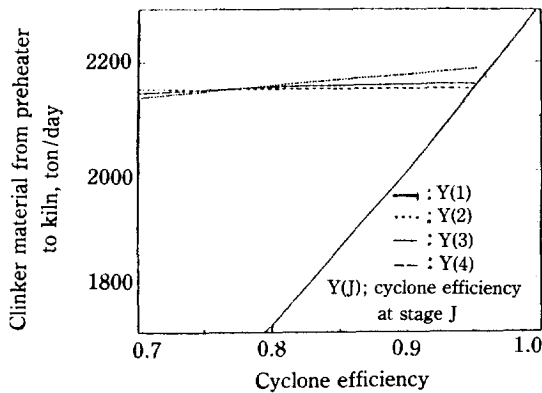


Fig. 9. Clinker material from preheater to kiln.

#### 4-6. 재순환 분진의 영향

상승다트부에서 발생되어 4단으로 유입되는 재순환 분진은 크링카 생산량에는 변화를 일으키지 않는다. 그러나, 4단 배출원료 및 분진의 양에 영향을 미치며 특히 4단 배출분진의 증가는 재탄산염화의 증가를 가져오

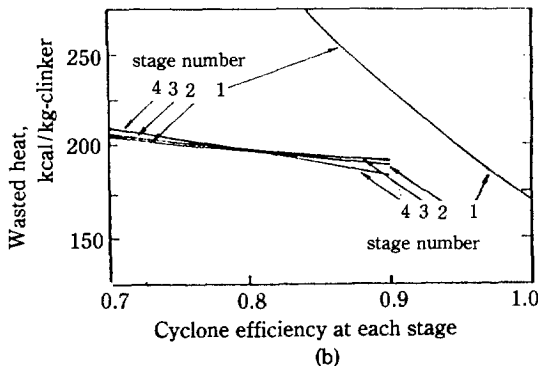
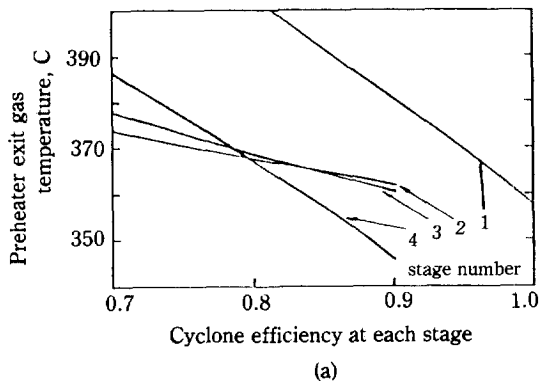


Fig. 10. Effect of cyclone efficiency at each stage.

(a) on preheater exit gas temperature  
(b) on wasted heat

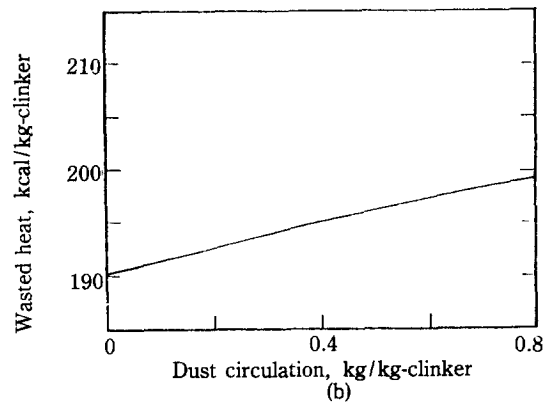
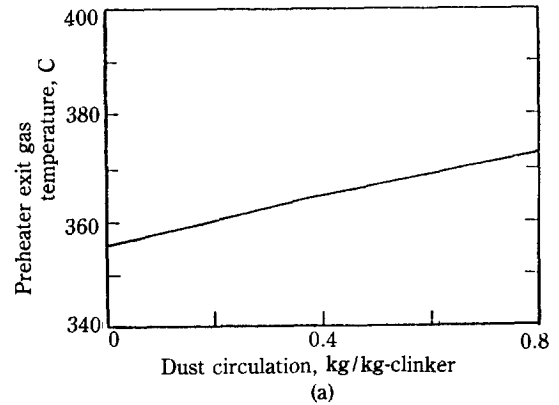


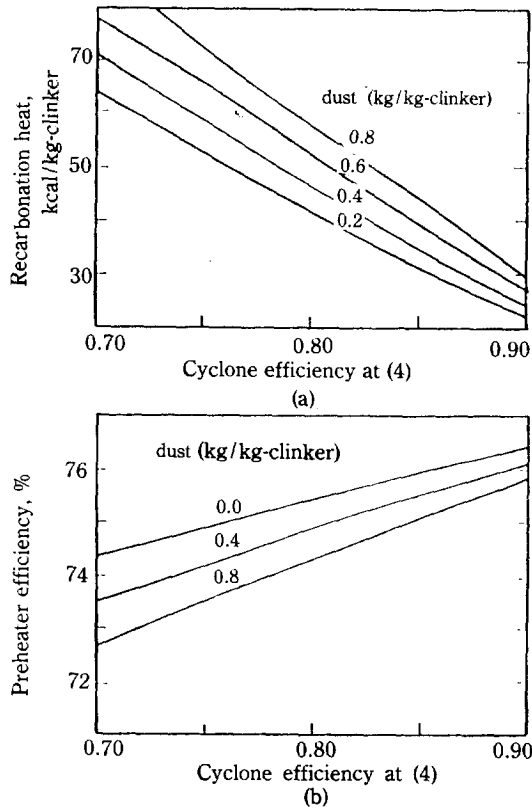
Fig. 11. Effect of dust circulation.

(a) on preheater exit gas temperature  
(b) on wasted heat

므로 Fig. 11에 나타난 것과 같이 배가스의 온도 및 폐열량을 모두 증가시키게 된다. 만약 4단의 집진효율이 1이면 재순환 분진이 변화하여도 재탄산염화가 없게 되므로 재순환 분진의 변화는 공정에 어떤 영향도 미치지 않으며 Fig. 12에서 보듯이 재순환 분진은 4단의 집진효율이 커지면 공정에 미치는 영향이 작아진다.

#### 4-7. 하소로에의 석탄 공급량의 영향

하소로에의 석탄 공급량이 10ton/day 증가하면 석탄재의 증가에 의하여 크링카량이 약 1.5ton/day 증가한다. Fig. 13에서 실선은 회전로 배출가스의 온도가 일정하고 석탄 공급량이 변화할 때의 예열기 배가스의 온도 및 폐열량의 변화를 나타낸 것이며, 점선으로 표시한 것은 석탄 공급량과 더불어 회전로 배출가스의 온도도 변화시켜 Table 4에 표시된 총공급열량을 일정하게 했을 때의 예열기 배가스의 온도 및 폐열량의 변화를 나타낸 것이다. 점선은 약간의 증가하는 기울기를

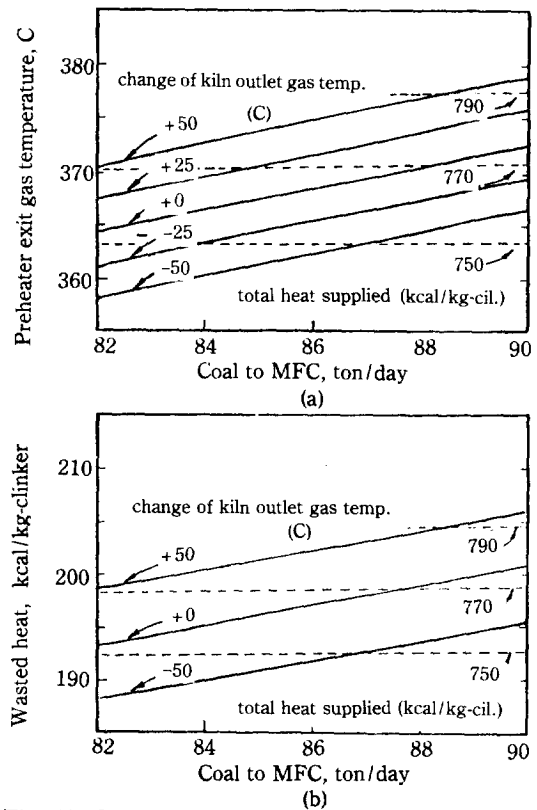


**Fig. 12. Effect of circulating dust and efficiency at stage 4.**  
(a) on recarbonation heat  
(b) on preheater efficiency

가지므로 회전로의 열부하가 커지는 단점을 극복할 수 있다면 하소로의 석탄 공급량이 작은 경우가 다소 유리함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

예열기에 공급되는 열량은 주어진 기준상태일 때 회전로 배출가스에 의한 공급열량(63%), 하소로에 공급되는 연료(33%) 및 공기(4%)에 의한 공급열량이 있으며, 원료의 하소반응은 약 60%가 예열기내에서 이루어지게 된다. 예열기에서 이루어지는 하소반응은 그 반응의 약 60%가 회전로 배출가스에 의하여, 나머지 약 40%는 하소로에 공급되는 연료에 의해 이루어진다. 또한 총공급열량은 하소반응이 추가 되는 반응열(41%) 및 예열기를 거쳐 회전로로 유입되는 원료의 현열(34%)로 바뀌며, 나머지 열량은 폐열량이라 하며 방열손실(2%), 예열기 배가스 및 분진의 현열(26%)



**Fig. 13. Effect of the feed rate of coal to MFC.**  
(a) on preheater exit gas temperature  
(b) on wasted heat

로 배출되며 이 중 일부는 공급원료를 통하여 공급원료의 현열(-3%)로 회수된다.

상승닥트부에서 발생하는 재순환 분진은 하소반응에 의하여 회전로 배출가스의 온도를 떨어뜨리며, 누입공기 및 방열손실의 변화는 하단이 상단의 경우보다 폐열량에 큰 영향을 미친다. 사이클론효율은 최상단이 크링카 생산량에 큰 영향을 미치며, 재순환 분진량이 많을 경우 최하단의 집진효율이 중요시 된다. 본 연구에서는 회전로 배출가스의 온도 및 그 가스량이 일정할 때의 예열기의 효율을 계산했으며 회전로에 공급되는 원료의 하소율이 변화했을 경우의 회전로 내부 기체의 온도 변화가 어떻게 되었는가까지는 추적하지 않았다.

## REFERENCES

1. 大西利夫: 小野田研究報告, **2**, 121-127 (1976).
2. Deussner, H.: Z-K-G, **12**, 560-563 (1964).
3. Vogel, R. and Schwerdtfeger, I.: Z-K-G, **3**, 120-123 (1968).

4. Frankenberger, R.: Z-K-G, **6**, 254-262 (1970).
5. Vosteen, B.: Z-K-G, **7**, 301-311 (1971).
6. Elikjaer, H.P.: Z-K-G, **2**, 63-68 (1980).
7. Rosemann, H. and Gardeik, H.O.: Z-K-G, **9**, 465-473 (1984).
8. Satterfield, C.N. and Feakes, F.: *AIChE J.*, **5**, 115-122 (1959).
9. Narsimhan, G.: *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 7-20 (1961).
10. Mellor, J.W.: A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, **3**, 652-660, 814-824 (1963), **4**, 349-354 (1961).
11. Freeman, E.S.: Univ. Microfilms, Ann Arbor, Mich., L.C. Card No. Mic 61-2.85, Dissertation Abstr. **22**, 92 (1961).
12. 박병철, 양재균 : 시멘트, **8**, 25-39 (1970).
13. 박병철, 양재균 : 시멘트, **2**, 32-38 (1971).
14. Goldmann, W., Kraft, W. and Schütte, R.: World Cement Technology, 424-430 (Nov., 1981).
15. Barker, R.: *J. Appl. Chem. Biotech.*, **23**, 733-742 (1973).
16. Ghosh, S.N.: Advances in Cement Technology, Pergamon Press, Oxford (1983).