

## 로터리킬른 화염 및 열전달 모형 - 연료에 따른 열 성능 분석 사례

최동환\*\* · 최상민\*\*

한국과학기술원 기계공학과

**Rotary Kiln Flame and Heat Transfer Model -  
Analysis of Thermal Performance according to Fuel**

Donghwan Choi\*\* and Sangmin Choi\*\*

\*KAIST, \*\*Department of Mechanical Engineering

(Received 9 September 2016, Received in revised form 25 August 2017, Accepted 13 September 2017)

## ABSTRACT

This paper is to suggest a simple flame model for the analysis of an internal flame of rotary kilns and to present the application cases. Reaction rates in the multi combustion stages of the selected solid fuel were calculated considering the reaction rates with the Arrhenius type equations. In addition, primary and secondary air flow arrangement were considered. As a simple application case, the combustion trends according to the different solid fuels were described. Improved operating conditions as related with the fuel characteristics were shown to be important for the stable combustion characteristics and the performance of the reactors as defined by the exit temperature of the solid materials.

**Key Words** : Rotary kiln, Flame, Combustion pattern, Thermal performance

## 기 호 설 명

 $A$  : area [ $m^2$ ] $c$  : specific heat [ $kJ/kgK$ ] $C$  : concentration [ $kmol/m^3$ ] $E_a$  : activation energy [ $kJ/kmol$ ] $h$  : heat transfer coefficient [ $W/m^2K$ ] $\Delta h_{comb}$  : combustion enthalpy [ $kJ/kg$ ] $k$  : thermal conductivity [ $W/mK$ ] $k_0$  : reaction frequency coefficient [ $1/sec$ ] $m$  : empirical reaction constant (reactant) $\dot{m}$  : mass flow rate [ $kg/s$ ] $M$  : molecular weight [ $kg/kmol$ ] $n$  : empirical reaction constant (oxidant) $\dot{Q}$  : heat flux [ $W$ ] $R$  : ideal gas constant [ $kJ/kmolK$ ] $\dot{S}$  : source term $\Delta t$  : residence time [ $sec$ ] $T$  : temperature [ $K$ ] $u$  : flame mean velocity [ $m/s$ ] $y$  : mass fraction**Subscript** $f$  : fuel $g$  : gas $i$  : control volume number $j$  : species $k$  : phase**Greek** $\rho$  : density [ $kg/m^3$ ]**Abbreviation**

Bit. : Bituminous

Comb : Combustion

† Corresponding Author, smchoi@kaist.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

EAR : Excess air ratio	RDF : Refuse derived fuel
HMB : Heat and mass balance	Sbit. : Sub-bituminous
Reac : Reaction	Trans : Transfer
F.C. : Fixed carbon	V.M. : Volatile material
Pe : Peclet number	W : Water

## 1. 서론

고체 고온공정(solid-pyroprocess)은 열원으로부터 고체의 건조, 소성(calcination) 과정 등을 통해 최종 생산품을 얻는 과정으로 고체 처리량이 매우 크면서도 에너지를 많이 소비하는 공정이다[1,2]. 로터리킬른은 고체 고온공정의 대표적인 반응기로서 대량 공정에 적합하며 다양한 공정, 투입원료에 폭넓게 이용될 수 있지만, 다른 반응기에 비해 낮은 열효율 등 단점도 확인할 수 있다[3-9].

제한된 로터리킬른 길이 내에서 연료의 효율적인 연소와, 이로부터 발생된 고온 기체와 고체 장입물 사이의 열교환 효율으로 로터리킬른의 성능이 결정된다. 이는 연료 종류, 공기 공급 방식, 원료의 투입량과 투입 위치, 로터리킬른의 설치 조건 등 여러 운전변수들에 따라 복합적으로 결정된다. 그러므로 효율적인 에너지 사용과 안정적인 운전을 위해서 운전 변수들의 효과를 반영할 수 있는 해석 모형을 통해 여러 운전 조건에서의 반응기 효율 및 연소 안정성의 예측이 요구된다. 로터리킬른 내부의 복잡한 현상을 수학적 모형으로 분석하기 위해 간단한 모형으로부터 단순화 가정을 줄여나가는 방식으로 모형을 발전시키며 분석할 수 있다[7]. 그러나 실제와 같은 3차원 시스템에서 내부 기체 유동을 분석하기 위해서는 수많은 가정들이 필요하며 이로부터 기인하는 예측하기 힘든 오차들이 존재하기 때문에 직관적으로 모형의 신뢰성을 판단하기 힘들다. 그러므로 실제 산업 적용 목적으로 1차원 로터리킬른 모형에 대한 연구가 많이 진행되었다[5-9]. 특히, 연소 패턴(combustion pattern)에 따른 화염의 길이방향 열 유속은 로터리킬른의 성능을 좌우하는 주요 운전 변수다. 1차원 로터리킬른 모형에 관한 여러 선행연구들에서는 각자 특수한 단순화 가정을 통해 연소 패턴을 고려하였다.

Mujumdar는 특정 반응기 형상 및 운전조건에 대한 3차원 CFD 계산으로 얻은 결과를 통해 화염 길이 및 최고온도 지점을 예측하였고, 배가스(off gas) 조성을 통해 최고 온도를 간접 계산하여 길이 별 열 유속을 계산 후 이를 이용하여 1차원 분석을 진행하였다[3]. Gorog는 1차 공기(primary air)와 2차 공기(secondary air)가 입구에서 동시 투입되는 조건에서

투입 시의 공기 운동량 및 연소 구간 길이에 따른 2차 공기의 1차 공기와 혼합률(entrainment rate)에 관한 경험식을 도출하였다. 이를 이용해 로터리킬른의 각 지점에서 산화제가 공급되는 양에 따라 연료의 즉각적인 연소가 일어난다고 가정하여 연소율을 계산하였다[4].

그러나 1차원 로터리킬른 모형에 관한 이전의 선행연구들에서는 기체의 온도나 농도 등의 내부 상태량을 고려한 연소율을 분석하지는 않았다는 한계점이 있다. 로터리킬른의 경우 주로 사용되는 고체연료는 탈휘발, 휘발분연소, 착-연소(char combustion)의 단위 반응들에 의해 연소되며 연료의 성분(composition)에 따른 연소 특성이 상당히 상이하다. 또한 안정적인 연소를 위해 버너 주변에서 동축류(coflow)로 2차 공기가 스월(swirl)유동으로 투입, 혼합되거나 이산적으로 설치된 공기 포트(air port)를 통해 2차 공기가 1차 공기와 직교류(cross flow)로 투입되는 시스템도 존재한다. 이를 고려하기 위해서는 기체와 연료가 혼합된 유동의 온도, 그리고 반응물과 산화제의 농도에 따른 연속적인 연소율을 계산할 수 있는 모형이 필요하다.

이러한 측면에서 본 연구에서는 선행연구들의 단점을 보완할 수 있는 화염모형을 제시하고자 한다. 고체 연료의 단계별 연소에 대한 개별 아레니우스(Arrhenius)식을 적용하여 기체-연료 혼합 유동의 온도와 농도에 따른 연소율을 분석하였다. 대상 반응기는 고체 연료를 사용하고 내부 화염이 존재하는 대향류(counter current flow) 직접가열식(direct heating) 로터리킬른으로 선정하였다. 버너에서 직접 투입되는 미분(pulverized) 고체연료와 1차 공기의 안정적인 입구 연소 및 높은 열전달 효율을 위해 추가로 여러 지점에서 투입되는 2차 공기 포트가 있는 일반적인 경우를 대상으로 한다. 이를 통해 화염 길이 및 반응기 길이 방향 열 유속뿐만 아니라 고체 연료 성분의 영향, 2차 공기의 영향을 분석할 수 있었다. 분석 사례로서 최근 주목받고 있는 저급(low grade) 연료나 폐기물 연료(refuse derived fuel, RDF)를 사용한 반응기 내부 화염 연소를 모사하였다. 연료 변화에 따른 로터리킬른 내부 연소 패턴을 분석하여 효율적인 연소를 위한 2차 공기 투입조건의 의사결정 과정을 통해 해석모델의 유용성을 보이하고자 한다.

## 2. 해석모형

### 2.1. 해석모형 개발 과정

Fig. 1을 통해 화염 혹은 고온기체와, 장입물 간 단순화된 물질 및 에너지 흐름을 확인할 수 있다. 보존방정식을 통한 미소체적 내 성분 별 물질유량( $m_{k,i}$ ) 및 각 상의 온도( $T_i$ )를 구하는 것이 해석 모형의 주요 관심사항이다. 연소구간에서 기체는 투입공기, 연소기체, 연료로 구성된 일정 부피를 가지는 화염으로, 연소 종료 후에는 킬른 내 부피에 상응하는 연소기체로 가정할 수 있다. 고체 장입물은 반응이 무시된 킬른 내에 반달모양의 일정한 단면적을 차지하는 장입물 층으로 가정되며, 기체 및 벽면으로부터 에너지 전달만이 고려된다. 킬른 벽은 일정한 두께 및 열용량을 가지며 벽면 열전달 효과 및 외부 열손실이 고려되었다. 열, 물질정산은 미소체적 내 유입, 유출량 및 전달량, 생성량의 계산으로 진행된다. Fig. 1의 상단 그림은 단일 미소체적에서의 열, 물질정산을 나타내며, 아래 그림과 같이 여러 미소체적으로 이산화 된 시스템에서  $i$  번째 미소체적에 대한 열, 물질정산은 이전 체적의 성분별 질량유량 및 온도 정보와 이를 바탕으로 계산되는  $i$  번째 체적 내 생성량을 지배방정식에 대입, 계산하여 진행된다. 단일 열, 물질 정산의 반복을 통해 위치에 따른 관심 변수의 구배(gradient) 분석이 가능하며 이는 위치에 따른 온도, 연소 완료 정도의 분석이 필요한 연속반응기(continuous reactor)에서 중요하다.

로터리킬른은 흔히 직경대비 길이가 10배 이상으로 원주방향에 비해 길이방향 구배가 지배적이기

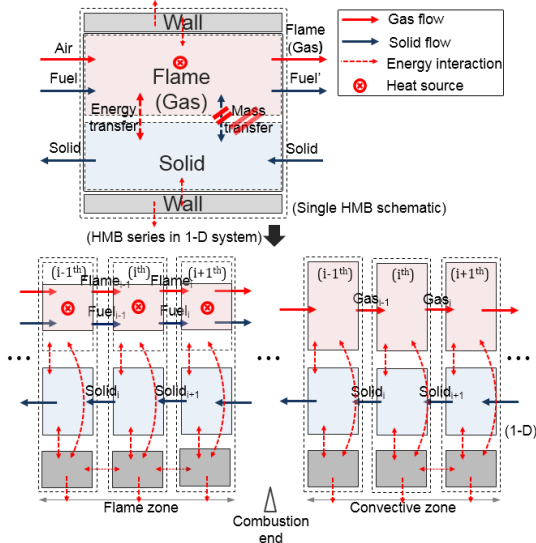


Fig. 1. Schematic of heat and mass balance in the  $i$ -th cell of a 1-D counter flow reactor.

때문에 길이방향 1차원 모형이 적합하다. 물질 보존식에서 확산효과는 무시하였고 에너지 보존식 내 전도항 또한  $Pe$ 수가 큰 기체에서는 무시될 수 있다. 언급된 가정들을 통해 보존식을 단순화 하였으며 단위시간 당 질량 및 에너지를 기준으로 계산이 진행되었으나 정상상태 가정에 따라 식 (1), (2)와 같이 보존식을 시간 독립적으로 표현하였다.  $k$ 는 상(phase)으로 기체, 고체, 연료, 벽면으로 구성되며  $j$ 는 각 상의 구성 성분을 나타낸다. 본 모형에서는 기체상의 구성성분 물질 별 질량 결정이 매우 중요하다.

물질 생성량은 연소( $m_{comb,k,j,i}$ ) 및 고체 반응에 의한 성분별 질량변화( $m_{react,k,j,i}$ )로 구성되나 화염에 의한 연소에너지 공급 및 열전달 분석에 집중하기 위해 고체반응은 고려되지 않았으므로 연소에 의한 기체 성분 변화만 존재한다. 그러므로 식 (1)에서  $k$ 는 오직 기체 및 연료에만 해당되며 연소 종료 후에는 물질 생성량이 영의 값을 가지게 되므로 성분 별 질량이 일정하게 된다.

에너지 생성량은 연소항( $Q_{comb,k,j,i}$ ), 고체 반응항( $Q_{react,k,j,i}$ ), 열전달항( $Q_{trans,k,j,i}$ ), 열손실항( $Q_{loss,k,j,i}$ )으로 구성되나 해석에서 고체의 반응은 무시되었다. 화염 열 공급을 통한 각 상 간의 열전달 및 벽면 열손실을 고려하여 모든 상에 대한 에너지 정산이 진행되어야 한다.

그 결과 물질정산에 대해서는 식 (1), (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\sum_k \sum_j (m_{k,j,i} - m_{k,j,i-1}) = S_{mass,i} \quad (1)$$

$$S_{mass,i} = \sum_k \sum_j (m_{comb,k,j,i}) \quad (2)$$

또한, 에너지 정산에 대해서는 식 (3), (4)와 같이 표시할 수 있다.

$$\sum_k \sum_j ((m_{k,j} c_{k,j} T_k)_i - (m_{k,j} c_{k,j} T_k)_{i-1}) = S_{energy,i} \quad (3)$$

$$S_{energy,i} = \sum_k \sum_j (Q_{comb,k,j} + Q_{trans,k,j} + Q_{loss,k,j})_i \quad (4)$$

### 2.2. 킬른 화염모형

화염의 단순 모사는 화염과 장입물 간의 상호작용을 단순화 하는 것을 목적으로 하며 투입 에너지 대부분이 연소에 의해 발생되므로 중요하다. 화염 분석을 위해 기존 연구에서는 화염길이를 임의로 정의한 후 길이 방향 열유속을 단순 지수관계로 가정하는 방식이 자주 사용되었다[5-9]. 그러나 해당 모형을 통해서서는 연료 조성 및 내부 온도의 영향, 그에

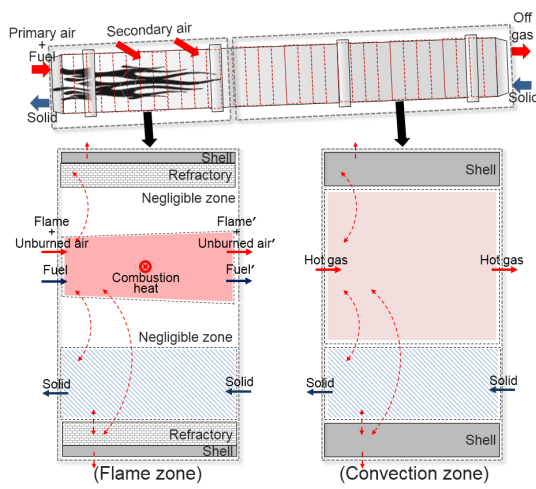


Fig. 2. Flame zone and convection zone of a kiln.

다른 연소안정성을 예측할 수 없다. 이러한 한계를 극복하고자 내부 환경의 영향을 고려한 고체 연료 연소율을 계산하였고 이에 따른 화염온도 및 길이 별 열유속을 계산할 수 있는 화염모형을 제시한다.

로터리킬른 내 화염 유무에 따라 Fig. 2와 같이 화염구간과 대류 열전달구간으로 구분할 수 있다. 화염구간에서는 화염과 장입물, 벽면 간 복사열전달이 지배적이며 화염 생성에 따른 화염길이 및 열유속 분석이 중요하다. 화염 주위 정체된 공기의 영향은 무시할 수 있으므로 화염 영역 내 기체의 열, 물질 정산만 고려되었다. 2차 공기 또한 화염 영역으로 투입된다고 가정하였다. 반면 화염이 없는 대류구간에서는 고온 연소기체와 장입물, 벽면 간 대류열전달이 지배적이며 건조나 고체 승온(temperature rising)이 주로 발생한다.

Table 1에 화염 생성에 영향을 주는 인자로 연료, 공기, 온도 조건 항목들을 정리해 보여주고 있다. 고체 연료는 고정탄소(fixed carbon), 휘발성분(volatile material), 회분(ash), 수분으로 구성되며 성분 간 비율, 단위질량 당 발열량 등은 화염 형성에 많은 영

Table 1. Flame stability factors

Factor	Detail effects
Fuel (solid)	F.C. & V.M. ratio Ash & Water ratio Heating value(HV)
Air	Excessive air ratio(EAR) Primary & Secondary air ratio Secondary air input point
Temp.	Entrance region temperature Peak temperature

\* F.C.: Fixed carbon, V.M: Volatile material

향을 미친다. 휘발분에 비해 고정탄소가 많으면 발열량이 높아 고급 연료로 취급되나 발화되기 어렵다. 또한 회분이나 수분의 비율이 높으면 발열량이 낮아져 동일한 발열량을 위해 더 많은 공기를 투입해야 하므로 고온 달성이 힘들다.

공기 투입 조건에서는 과잉공기 투입률(EAR)과 1차, 2차 공기 투입 효과를 고려한다. 완전 연소를 위해 약 10-20%의 과잉공기가 투입되나 공기 과다투입은 열원의 온도를 낮추어 열전달을 감소시킨다. 직접가열식 로터리킬른에서 버너로부터 직접 투입되는 1차 공기 이외에도 2차 공기 투입구를 설치하여 공급하는 경우에는 연소를 조절하여 열전달률을 개선할 수 있다. 단, 반응기 길이방향 1차원 모형의 한계 상 유동 분석이 힘들기 때문에 투입 공기와 연료 입자는 균일 혼합된다고 가정하였고 2차 공기 또한 투입 직후 균일 혼합된다고 가정하였다.

온도요인 중에서는 초기 화염생성 구간이 중요하다. 충분한 입구 화염온도가 충족되지 않으면 투입 연료의 연소 지연 혹은 실화(misfire)로 인한 연소불안정이 발생할 수도 있기 때문이다. 또한 최고 온도가 적정 수준 이상으로 높으면 연소 발생이 특정 구간에만 집중되어 효과적인 열전달이 불가하므로 운전조건 변경이 필요하다.

고체 연료는 탈휘발(devolatilization)과정 및 휘발성분의 연소가 매우 빠르게 일어난다. 그 결과 투입 공기 온도를 상승시키며 화-연소를 원활히 진행될 수 있도록 한다.

단계별 연소 반응은 아레니우스 기반의 식 (5)를 통해 산소 및 반응물 농도, 내부 온도, 그리고 단계별 반응에 따른 반응상수( $E_a$ ,  $k_0$ )에 따라 연료 성분별 연소율( $\dot{m}_{comb,k,j,i}$ )을 구할 수 있으며 미소체적 내 체류시간( $\Delta t$ )을 곱하여 연소 물질 생성량( $m_{comb,k,j,i}$ )을 구할 수 있다(식 (6)).

$$\dot{m}_{comb,k,j,i} = M_j C_j^m C_{O_2}^n k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (5)$$

$$m_{comb,k,j,i} = \dot{m}_{comb,k,j,i} \times \Delta t_i \quad (6)$$

체류시간은 미소체적 길이( $L_i$ )를 화염영역 내 기체의 평균유속( $u_{g,i}$ )으로 나누어 계산되며(식 (7), (8)), 계산을 위해 성분 별 질량분율( $y_{k,j,i}$ )이 필요하다. 이는 이전 미소체적의 물질 정산을 통해 계산된다.

$$\Delta t_i = \frac{L_i}{u_{g,i}} \quad (7)$$

$$u_{g,i} = \frac{\dot{m}_i}{\rho_i A_i} = \frac{\dot{m}_i}{\sum_k \sum_j (\rho_{k,j} y_{k,j} A)_i} \quad (8)$$

또한 화염 단면적( $A_i$ )이 정의되어야 하는데 이는 체류시간 계산뿐만 아니라 열전달 계산을 위해서도 필요하다.

화염은 활발한 연소 결과, 발광 및 복사열전달이 활발하게 일어나는 고온 영역으로 정의할 수 있다. 로터리킬른 버너는 화염이 벽면에 접촉하지 않도록 빠르고 긴 화염을 생성하여 난류 자유 제트(turbulent free jet) 화염을 형성한다[14]. 화염직경을 정확히 계산하기는 어렵기 때문에 투입 속도, 부피유량, 자유 제트의 일반적 형상을 고려하여 단순화 정의 방법을 사용하였다. 1차 공기 투입 부피유량 및 킬른 종류 별 일반적인 투입 속도를 고려하여 초기 화염 직경을 계산할 수 있으며 이후 자유 제트의 일반적인 확산각도를 고려하여 반응기 길이방향 화염 직경을 정의할 수 있다. 자유 제트 확산각도는 약 12도로서 작기 때문에 직경에 비해 길이가 상당히 긴 원뿔대(truncated circle) 형상의 화염이 예측되었다. 화염을 둘러싼 재순환영역(recirculation zone)의 기체는 멈춰있는 것으로 가정할 수 있으며 화염과의 물질 전달효과는 무시함으로써 화염 내 기체의 열, 물질 정산만 진행하였다. 정의된 화염 단면적 및 성분 별 질량유량을 통해 화염영역 내 기체의 평균유속이 계산되며(식 (8)) 이를 거쳐 계산된 체류시간은 연소속도에 큰 영향을 미친다. 식 (9)와 같이 체적 내 연료 연소량은 연료 감소량과 동일하며 이는 연소 기체 증가량과 같다. 이후 연소엔탈피( $\Delta h_{comb,j}$ )를 곱하여 식 (10)과 같이 연소 에너지 생성량을 구할 수 있다. 단계별 연소반응 세부 반응식은 Yang의 연구 모형을 적용하였으며[10-13], 활성화 에너지( $E_a$ ) 및 빈도상수( $k_0$ )는 Table 2에 제시된 참고문헌의 실험값들을 사용하였다( $m, n$ 은 반응종류에 따른 실험값).

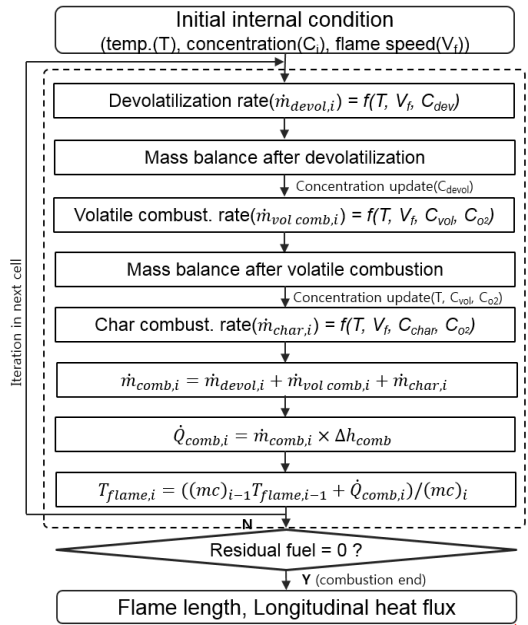
$$\dot{m}_{comb,i} \Delta t_i = - \sum_j \Delta m_{f,j,i} = \sum_j \Delta m_{g,j,i} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{comb,i} = \sum_k \sum_j (m_{comb,k,j,i} \times \Delta h_{comb,j}) \quad (10)$$

고체 연료의 단계별 연소 계산과정을 Fig. 3에 나

**Table 2.** Reference of reaction rate used in the model

Phenomena	Author	Ref
Volatile combustion	Jones & Lindstedt (1988)	[11]
CO combustion	Vandervaart (1988)	[12]
Char combustion	Smith (1975)	[13]
Convection Conduction	Tscheng & Watkinson	[15]



**Fig. 3.** Basic algorithm of the combustion model.

타내었다. 여기에서 화염이라 함은 고온의 기체 및 연료 혼합물이 단위 미소체적 내에서 균일하게 배합된 물질성분의 총합이며 이 온도는 화염온도라 부르기로 한다. 초기 온도, 농도, 화염영역 내 기체의 평균유속을 고려하여 탈휘발, 휘발분 연소, 좌-연소의 단계 별 연소율을 계산할 수 있고 각 성분별로 이를 합하여 검사체적의 연소율( $m_{comb,i}$ )을 계산할 수 있다. 이를 통해 기체 물질 정산이 진행되며 식 (10)을 통해 연소 에너지 생성량( $Q_{comb,i}$ ) 계산 및 화염온도 계산이 가능하다. 이후 모든 연료가 소진되는 지점에서 화염 계산은 종료되며 최종적인 화염길이, 길이 별 열유속 분포를 알 수 있다. 계산된 연소 에너지 생성량과 1차, 2차 공기 투입을 고려한 화염 열유량을 통해 화염 온도를 계산할 수 있다.

### 2.3. 열전달 및 열손실항

열전달항( $\dot{Q}_{trans,i}$ )을 통해 주어진  $i$  미소체적 내의 연소 생성 에너지의 고체 원료층 열전달률, 고체온도 및 벽면온도를 계산할 수 있다. 화염이 있는 고온부에서는 주로 복사열전달이 지배적이며 비 화염구간에서는 대류열전달이 지배적이다. 또한 벽면으로부터 고체로의 에너지 전달은 대부분 전도 열전달을 통해 발생하므로 복사, 대류, 전도에 의한 종합적인 열전달을 고려해야 한다[6]. 대류 및 전도 열전달은 열전달계수( $h$ )를 통해 계산될 수 있고 복사열전달은 각 상 온도, 방사율(emissivity), 흡수율(absorptivity)을 고려한 열전달 네트워크(heat transfer network) 방

법으로 계산할 수 있다. 열전달 모형은 선행연구를 참고하였으며[10,11], 사용한 경험식의 출처는 Table 2에 나타내었다.

열손실항( $\dot{Q}_{loss,i}$ )은 킬른 단면의 내부 기체와 벽면 간 대류열전달계수, 내화벽과 단열재 두께 및 전도 열전달계수 그리고 외부 공기와 외벽 간 대류 열전달계수를 고려한 반경방향으로의 열전달 네트워크 방법으로 계산할 수 있다[5,6]. 일반적으로 킬른 외벽 온도가 300℃ 이하가 되도록 설계되기 때문에 열손실항의 생성항에서 차지하는 비율은 약 1-5% 내외에 불과했다. 기타 로터리킬른 내 고체 장입물의 유동, 및 세부 로터리킬른 기본 동적 모형은 Eom 등의 연구를 참고하였다[6]. 계산된 생성항을 지배방정식(식 (1)-(2))에 대입하여 최종 열·물질 정산이 진행된다.

### 3. 해석결과

#### 3.1. 평가 및 비교방법

연료특성이 연소에 미치는 영향에 대해 분석하였고 연료 조건 변화에 적절히 대응하기 위한 운전 조건 가이드라인을 제시함으로써 해당 모형의 활용 사례를 확인하였다.

로터리킬른 규모 및 입구조건을 Table 3에 요약하였다. 로터리킬른 길이는 킬른 내부 버너 팁으로부터 고체 장입물의 투입 지점까지로 정의할 수 있다. 이는 고체와 투입 열원의 열교환 효율 및 고체 반응에 중요한 영향을 미치며 일반적으로 직경의 10~20 배의 값을 가진다. 해석 대상 로터리킬른은 길이 80 m 직경 5 m의 대형 반응기로 시간 당 162톤의 처리량을 가진다고 가정하였다. 고체 원료는 400℃로 예열 투입되며 1차 공기 또한 폐열 회수를 통해 250℃까지 예열된 상태로 이론공연비의 50%에 해당하는 공기가 입구에서 예열 투입된다. 산화제로서 공기를 적절한 지점에서 공급하여 연소나 고체 반응을 적절하게 제어하기 위해 2차 공기가 투입된다[16].

**Table 3.** Kiln size and basic input condition

Kiln diameter X length	$\phi = 5 \text{ m } L = 80 \text{ m}$	
Fuel input rate	$\frac{5795}{HV}$	kg/s
Solid input temp.	400	℃
Solid input rate	45	kg/s
Primary air temp. (50%, 0 m)	250	℃
Secondary air temp. (30%, 10 m / 20%, 15 m / 15%, 20 m)	25	℃
Excessive air ratio	15	%

\* HV: heating value [kcal/kg]

목적에 따라 1차 공기 유동 주위의 스월(swirl) 동축류로 투입되거나 버너 상류의 별도 공기 포트를 통해 투입하는 것이 일반적인데, 해석 사례에서는 2차 공기 투입 조건이 연소에 미치는 효과가 큰 후자의 경우를 고려하였다. 고체 반응이나 설치비용 등을 고려하여 공기 포트의 개수가 결정되며 일반적으로 1~10개 정도가 동일한 간격으로 설치된다[17]. 일반적인 운전 조건을 고려하여 2차 공기는 3개의 공기 포트에서 버너 하류 10 m, 15 m, 20 m 지점에서 25℃로 투입되며 투입 공기량은 각각 이론공연비의 30%, 20%, 15%로 가정하였다. 총합 공연비는 115%가 되며, 투입 연료량은 단위 질량 당 발열량을 고려하여 모든 사례에서 동일 열량이 투입될 수 있도록 하였다.

투입되는 연료를 다음의 세 가지 사례로 구분하였다. 역청탄의 단일 연소뿐만 아니라 저급 석탄과의 혼소도 고려해볼 수 있었으며 추가적으로 폐기물연료(refuse derived fuel, RDF)와의 혼소를 통한 경제적인 운전에도 대해 고려해보았다.

**Case 1)** 역청탄

**Case 2)** 역청탄 + 아역청탄(5:5) 혼소

**Case 3)** 역청탄 + 폐기물연료(RDF)(5:5) 혼소

역청탄(Bit.), 아역청탄(Sbit.), 폐기물연료 성분은 Table 4에서 확인할 수 있다. 역청탄의 경우 고정탄소의 양이 많아 단위 발열량이 높은 고급 석탄이나 착화성이 낮을 수 있다. 폐기물연료는 탄화수소 기반 폐기물을 펠릿(pellet)화 한 것으로 석탄과 동등 혹은 그 이상의 발열량을 가지고 있다. 폐기물 원료에 따라 성분 차이가 크며 본 연구 대상 폐기물은 플라스틱 기반으로 고정탄소에 비해 휘발분이 상당히 많다. 이러한 성분 차이로 인해 연소 양상이 상이하게 된다.

**Table 4.** Coal specification

	Bit.	Sbit.	RDF	
Ultimate analysis (FC + VM) [%]	C	64.00	58.22	62.31
	H	4.10	4.10	10.22
	O	10.10	15.58	5.10
	N	1.40	0.82	0.36
	S	0.50	0.41	0.00
Proximate analysis [%]	FC	52.50	44.51	10.00
	VM	28.00	34.62	68.00
	Ash	17.00	2.87	12.00
	W	2.50	18.00	10.00
Heating value [kcal/kg]	6818	5263	6849	



### 3.2.1. 평가 결과(화염 연소조건 타당성)

Fig. 4를 통해 버너 상류 40 m 범위에서 휘발성분(CO, CHO) 및 고정탄소(FC)의 연소양상, 연소에 따른 연료 성분과 산소(O<sub>2</sub>)의 몰 유량, 가스 온도 변화를 확인할 수 있다. Table 5를 통해서도 열 성능 지표를 비교할 수 있다.

고정탄소는 탄소 단위자로 가정되었고, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub>로 나타낼 수 있는 휘발성분(CHO)의 분자식은 연료의

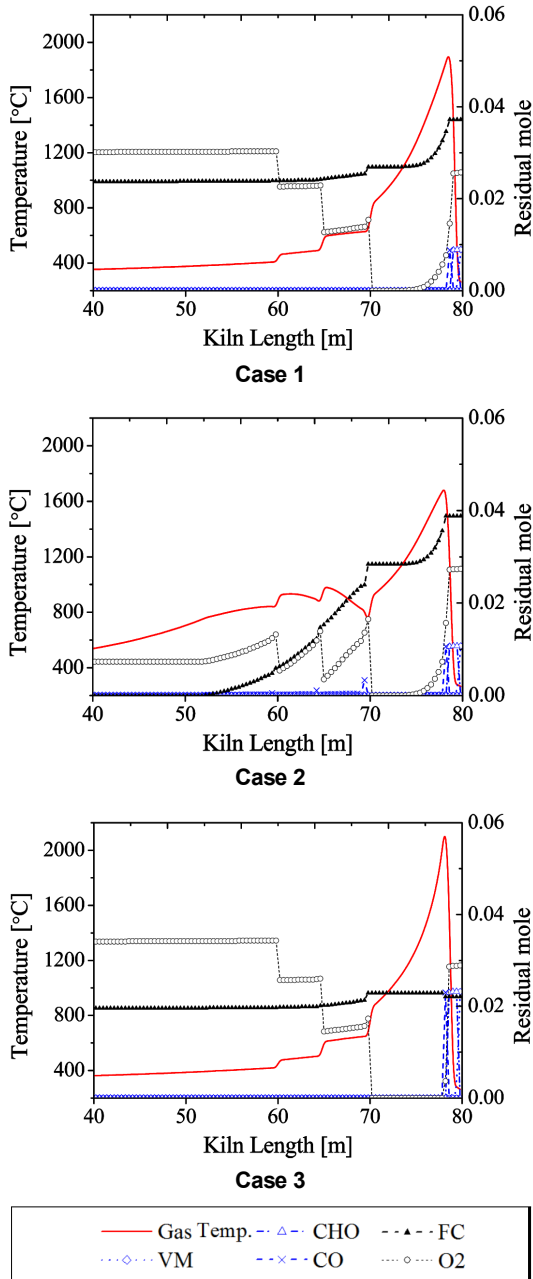


Fig. 4. Combustion trend (composition of species).

Table 5. Performance results

• First trial			
	Case1	Case2	Case3
Solid exit temperature	637.0°C	747.6°C	632.6°C
Unburned carbon	63.7%	0.0%	88.7%
• Improved			
	Case1	Case2	Case3
Solid exit temperature	751.2°C	749.2°C	744.8°C
Unburned carbon	0.0%	0.0%	0.0%

원소분석(ultimate analysis) 및 성분분석(proximate analysis) 결과를 이용한 화학양론적인 계산방식으로 구할 수 있으며 각각의 분자량을 고려하여 몰 유량이 계산되었다.

모든 사례에서 공통인 경향으로 탈휘발 과정은 원료 투입 직후 완료되는 것으로 확인할 수 있었으며 휘발성분 연소 또한 좌-연소에 비해 짧은 시간 내에 완료됨을 알 수 있다. 그에 비해 좌-연소는 고온에서 안정적으로 진행되며 탈휘발 과정 후 잔류 산소 농도에도 많은 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 1차, 2차 공기 분산 투입으로 투입 초기의 기체 열용량이 작기 때문에 빠른 승온이 가능하다. 단, 안정적 후반부 연소를 위해서는 2차 공기 투입 후에도 좌-연소를 위한 충분한 온도를 만족시키는 것이 중요하며 그렇지 않을 경우 불완전연소가 발생할 수 있다.

Case 1의 경우 활발한 휘발성분 연소로 좌-연소에 충분한 화염 온도가 확보되나, 2차 공기 투입 직후의 화염 온도는 좌-연소에 충분치 못하여 미연분이 발생하였다. 초기 급격한 화염온도 상승으로 인해 고체 및 벽면으로 열전달이 많아 화염 온도가 급격하게 낮아지기 때문이다. 이는 Case 1에 사용된 역청탄의 경우 단위 기체 투입량 대비 발열량이 많기 때문이다. 그 결과 수분제거율이 낮고 고체 승온 또한 불량한 것이 확인된다(Table 5).

그에 비해 Case 2는 최고 가스온도가 비교적 낮아 2차 공기 투입 지점까지 고정탄소 연소에 충분한 온도를 유지할 수 있어 완전연소 및 원활한 수분제거, 고체 승온이 가능하였다. 그러나 그림의 70 m 지점과 같은 화염 온도가 급격히 하락하는 불연속 지점이 나타나는데 이는 실화 등의 이유로 연소 불안정을 야기할 수도 있다.

Case 3은 고정탄소 불완전연소 비율이 상당히 높았다. 원인은 Case 1과 마찬가지로 초기 고온으로부터 기인한다. 특히 연소속도가 빠른 휘발성분이 많아 최고온도가 더욱 높았다.

### 3.2.2. 평가 결과(열 이용률)

Fig. 5를 통해서 열전달에 의한 장입물과 벽면의 온도 변화를 확인할 수 있다. Case 1의 경우 30% 이상의 고정탄소가 연소되지 못했기 때문에 고온 구간이 상당히 짧다. 그 결과 고체 승온이 완전연소된 Case 2에 비해 활발하지 못했으며 Case 3 또한

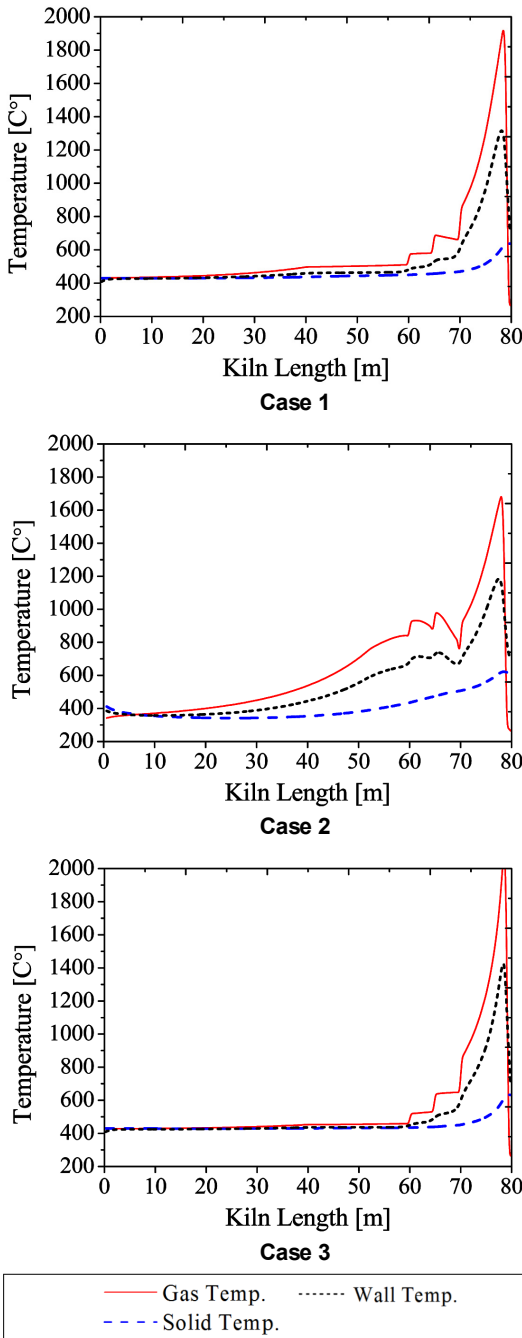


Fig. 5. Temperature profiles of the solid and the wall.

비슷한 경향을 나타내었다. 완전연소가 가능하였던 Case 2의 경우에도 연료 연소 지점이 지연되었기 때문에 열 이용률 측면에서는 최적의 운전조건이 아니다. 즉, 연료에 따라 안정된 연소를 위한 운전 조건이 다르다는 것을 알 수 있으며 구간 내 균일한 연소가 바람직하다는 것을 알 수 있다.

### 3.2.3. 평가 결과(목표성능 달성조건)

반대로, 연료에 따른 적절한 운전조건을 생각해볼 수 있었다. 제어하기 용이한 공기 투입조건의 변화를 통해 가스 상 내 연료 연소의 간접적인 제어 방식을 생각해볼 수 있다. 우선 모든 경우에서 공통적으로 2차 공기가 지나치게 낮은 지점에서 투입된다는 점과, 각각의 2차 공기 포트에서 상대적으로 저온인 2차 공기가 대량으로 투입되어 화염온도의 불연속점이 나타난다는 문제점이 발생하였다. 이를 해결하기 위해 공통적으로 2차 공기 포트를 다섯 개로 증가하여 공기 투입량 집중을 완화하고자 하였다. 설치 위치는 화염 발생 구간에 동일 간격으로 설치한다는 일반적인 설치 가이드라인을 참조하여 버너 상류 4 m, 8 m, 12 m, 16 m, 20 m 지점으로 가정하였다. 개선 운전조건은 1차 공기 및 2차 공기 투입량만을 변수로 가정하여 결정하였다. 3.2.1절의 해석결과에서 원인분석을 통해 각각의 사례에서 운전조건 개선 기본 원칙을 확립한 후, 반복계산을 통한 시행착오법으로 개선된 운전조건을 찾을 수 있었다.

Case 1의 경우 탈휘발 성분의 연소 직후 좌-연소에 필요한 화염 온도가 확보되었으나, 고온 구간에서 제때 2차 공기가 투입되지 않아 불완전 연소가 발생하였다. 그러므로 화염 초기 생성 지점에서부터 충분한 산화제 공급이 필요하다. 1차 공기량을 증가시킬 수도 있지만 고정탄소 함량이 높아 초기 착화성이 상대적으로 불량한 역청탄의 특성 상 이는 연소 불안정을 야기할 수도 있으므로 2차 공기 투입량을 증가시키는 방안이 적절하다. 이론 공연비 대비 20%, 20%, 15%, 5%, 5%에 해당하는 2차 공기를 각각 4 m, 8 m, 12 m, 16 m, 20 m 지점에 설치된 공기 포트에서 투입한다고 가정하였다. 1차 공기 투입량은 기존과 동일한 50%로 가정하였다. 그 결과 Fig. 6의 첫 번째 그림과 같이 안정적인 좌-연소가 실현되어 완전연소가 가능하였으며 연속적인 2차 공기 투입으로 화염 온도 불연속성도 감소하여 전반적인 연소 패턴이 개선되었음을 확인할 수 있다.

Case 2의 경우 3.2.1절의 운전조건에서도 완전연소가 가능하였으나 Fig. 4와 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이, 70 m 지점의 급격한 화염온도 하강으로 인한 연소 불안정성이 크다. 또한 고정탄소의 상당부분이 투입 10 m 이후에서야 가능하였는데 이를 화염 생성



초반부분으로 앞당길 수 있다면 제한된 로터리킬른 길이 내에서 고체와의 열전달 시간을 증가시키는 효과가 있으므로 반응기 효율이 개선된다. Case 1보다 휘발 성분 함량이 높아 착화성이 좋은 연료이므로 1차 공기량을 증가시킴으로써 화염 초기 부분에서 연료의 보다 빠른 연소 효과를 촉진할 수 있다. 그러므로 1차 공기량을 이론공연비의 60%로 증가시키고 2차 공기량은 각 포트에서 15%, 15%, 10%, 5%, 5%로 가정하였다. 해석 결과 Fig. 6의 두 번째 그림과 같이 전반적으로 화염 온도의 불연속성이 감

소하여 실화 등에 의한 연소 불안정성이 감소되었다. 또한 연료의 연소에 의한 열량 공급지점이 더욱 버너 근처로 앞당겨져서 Table 5에서 확인할 수 있듯이 고체 출구 온도가 약 2도 증가하였다.

Case 3은 Case 1과 유사한 이유로 2차 공기 투입 지점이 앞당겨져야 한다. 또한 연료의 휘발성분 비율이 높기 때문에 휘발 성분의 초기 완전연소를 위해서는 초기에 충분한 공기가 투입되어야 하며 착화성이 좋으므로 1차 공기 투입량을 증가시키는 것이 적절하다. 1차 공기 투입량을 이론 공연비의 65%까지 증가시켰으며 2차 공기는 이론 공연비의 15%, 10%, 10%, 10%, 5%에 해당하는 양을 각 포트에서 투입한다고 가정하였다. 1차 공기 투입량을 증가시킴으로써 연료 내 함량이 높은 휘발성분의 완전연소가 가능하였으며, 이로부터 확보된 충분한 화염 온도로 안정적인 연소 패턴이 확인되었다. 또한 기존 결과보다 균일한 열유속이 확인되었다.

공통적으로 연료 별 적절한 운전조건이 상이하였으며 이를 고려한 개선 과정을 통해 연소를 간접 제어함으로써 로터리킬른의 안정적이고 효율적인 운용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 저 등급 연료를 이용한 안정적 로터리킬른 운용에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

로터리킬른 내부 고체 연료의 연소 양상을 분석할 수 있는 화염모형의 구현방법을 설명하였으며, 연료 조성에 따른 연소 특성 및 운전 조건 변경을 통한 운전 안정성 예측을 통해 해당 모형의 공학적 활용성을 확인하였다.

연료 조성에 따라 적절한 운전조건이 상이했다. 연료 발열량이 높을 경우 초기 화염 온도가 높기 때문에 고체 및 벽면으로 열전달이 빠르다. 그러므로 2차 공기 투입 지점을 좀 더 앞당겨 안정적인 후반 고정탄소 연소를 보장해야 하며, 연료 내 휘발성분이 많을 경우 충분한 1차 공기를 투입해야 초기에 휘발성분의 완전 연소가 가능하다. 또한 연료가 변경되더라도 그에 적합한 운전조건 변경을 통해 효과적인 운전이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 사전에 이러한 사항을 고려한 적합한 운전조건을 확인하여야 한다.

하지만 해당 모형의 한계점에 대해 명확히 알고 오차를 감안한 범위 내에서 결과를 활용해야한다. 우선 1차원 해석 모형의 한계 상 유동 현상은 고려할 수 없었기에 난류 혼합 영향, 기체 재순환영역, 공기 중 고체 입자 불균일 혼합 등의 영향을 고려할 수 없었으며 화염영역 내 기체의 평균유속 또한 단순 가정에 근거하여 계산하였으므로 다소 오차가

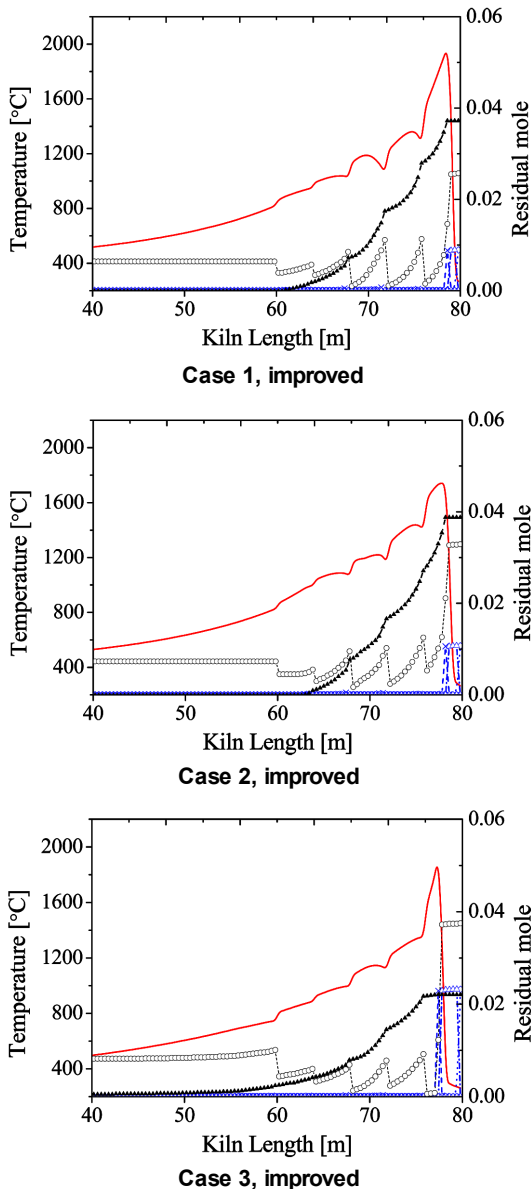


Fig. 6. Combustion trend (improved results, Case 1, Case 3), See Fig. 4 for symbol description.

존재할 수 있다. 또한 사용한 단순화 가정과 달리, 각 2차 공기 투입 포트에서 2차 공기가 투입되더라도 1차 공기와의 즉각적인 완전 혼합이 불가능하다는 점에서 발생하는 오차도 무시할 수 없다.

그러나 해당 모형을 통해서도 예비 설계 단계에서 발생 가능한 문제점을 예측할 수 있으며 근사 설계값을 얻을 수 있다. 또한 기타 고체고온공정 반응기 모형과 연계하여 전체 열 공정에 대한 열 성능 분석을 진행할 수 있다. 그러므로 엔지니어링 측면에서 많은 의의가 있다고 할 수 있으나 모델 예측의 신뢰성을 높이는 방향의 추가 작업이 요구된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 가치제조 기계사업단 (BK21플러스)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## References

- [1] A.S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Taylor & Francis, 2006.
- [2] D.S. Ha, S.M. Choi, Efficient Energy Management for Pyro-processing of Solids - (1) Heat & Mass Balance and Evaluation, J. Korean Soc. Combust., 21(1) (2016) 18-30
- [3] K.S. Mujumdar, V.V. Ranade, Simulation of Rotary Cement Kilns Using a One-dimensional Model, Chem. Eng. Research and Design., 84(A3) (2006) 165-177.
- [4] J.P. Gorog, T.N. Adams, J.K. Brimacombe, Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns, Metallurgical Transactions., 13B (1982) 153-163.
- [5] T.G. Eom, S.M. Choi, Performance Evaluation of a Flash Dryer and a Rotary Kiln Dryer for Upgrading Low Rank Coal, J. Korean Soc. Combust., 20(2) (2015) 1-13.
- [6] M.J. Eom, T.J. Han, H.K. Lee, S.M. Choi, Performance Analysis Modeling for Design of Rotary Kiln Reactors, J. Korean Soc. Combust., 18(3) (2013) 9-23.
- [7] H.K. Lee, S.M. Choi, The Performance Evaluation of The Rotary Kiln: Stepwise Dimensional Model and Case Analysis, The 47th KOSCO symposium, 2013 33-34.
- [8] D.S. Ha, S.M. Choi, The Performance Evaluation of The Rotary Kiln: One-dimensional Model Considering The Heat Transfer Through The Inner Wall, The 47th KOSCO symposium, 2013 89-90.
- [9] T.G. Eom, S.M. Choi, The Performance Evaluation of Staged Cyclones and Rotary Kiln Calciner, The 50th KOSCO symposium, 2015 249-252.
- [10] J.I. Yang, A Dynamic Performance Prediction Model for a Circulating Fluidized Bed Boiler., Master's Dissertation, KAIST, (2013)
- [11] W.P. Jones, R.P. Lindstedt, Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion, Combust. Flame., 73 (1988) 233-249.
- [12] D.R. Vandervaart, The Chemistry of Premixed Hydrocarbon/Air Combustion in a Fluidized Bed, Combust. Flame., 71 (1988) 35-39.
- [13] I.W. Smith, The Combustion Rates of Coal Chars: A Review, The 19th International Symposium on Combustion, The Combust. Inst., Pittsburgh, 1975, 1045-1065.
- [14] A.A. Boateng, Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes, Butterworth-Heinemann, 2008.
- [15] S.H. Tscheng, A.P. Watkinson, Convective Heat Transfer in a Rotary Kiln, Can. J. Chem. Eng., 57 (1979) 433-443.
- [16] H.H. Smith, FURNACE-TYPE LUMBER DRY KILN Operation of an Experimental Unit, Madison, Wis.: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1945.
- [17] G.K. Gaurav, K. Shabina, Analysis of Temperature Profile and % Metallization in Rotary Kiln of Sponge Iron Process through CFD. J. Taiwan Inst. Chem. Eng., 63 (2016) 473-481.