

## 경량골재 로타리킬른의 운전최적화를 위한 석탄연소 및 원료입자 승온특성 해석

박종근\* · 류창국\*\* · 김영주\*\*

\*성균관대학교 기계공학부 · \*\*한국전력연구원 발전연구소 연료연소그룹

## Analysis of Coal Combustion and Particle Temperature Profiles in a Rotary Kiln for Production of Light-weight Aggregate

Jong-Keun Park\*, Changkook Ryu\*\* and Young-Ju Kim\*\*

\*Sungkyunkwan University, \*\*Korea Electric Power Research Institute

(Received 30 June 2014, Received in revised form 14 August 2014, Accepted 15 August 2014)

### ABSTRACT

Bottom ash from a coal-fired power plant is usually landfilled to a nearby site, which causes a growing environmental concern and increased operating costs. One way of recycling the bottom ash is to produce light-weight aggregate (LWA) using a rotary kiln. This study investigated the temperature profiles of raw LWA particles in a rotary kiln to identify the range of operating conditions appropriate for ideal bloating. For this purpose, a new simulation method was developed to integrate a 1-dimensional model for the bed of LWA particles and the computational fluid dynamics (CFD) for the fuel combustion and gas flow. The temperature of LWA particles was found very sensitive to the changes in the air preheating temperature and excess air ratio. Therefore, an accurate control of the operation parameters was essential to achieve the bloating of LWA particles without excessive sintering or melting.

**Key Words** : CFD, Coal, Combustion, Light-weight aggregate, Rotary kiln

### 기 호 설 명

$C_p$ : thermal capacity, J/kg·K	$\gamma$ : roughness, m
$D$ : diameter, m	$\varepsilon$ : emissivity
$f$ : void fraction	$\eta$ : packing ratio of solid
$H$ : enthalpy, W	$\rho$ : density, kg/m <sup>3</sup>
$h$ : convection coefficient, W/m <sup>2</sup> ·K	$\varphi$ : modified free path of gas molecule, m
$k$ : thermal conductivity, W/m·K	
$k$ : reaction rate, g/cm <sup>2</sup> ·atm·s	
$M$ : mass flow rate, kg/s	<b>Subscripts</b>
$P$ : partial pressure, atm	<i>char</i> : char reaction
$Q$ : heat flux, W	<i>conv</i> : convection
$T$ : temperature, K	<i>dash</i> : diffusion in the ash layer
$t_c$ : wall-bed contact time, s	<i>diff</i> : diffusion
$Y$ : radius ratio	<i>evap</i> : evaporation

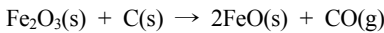
† Corresponding Author, cryu@me.skku.ac.kr

$g$	: gas	$s$	: solid (bed); kinetic rate
$H$	: hydraulic	$sc$	: penetration layer conduction
$p$	: particle	$sx$	: solid mixing
$rad$	: radiation	$w$	: wall; angular direction

### 1. 서론

석탄 화력발전 시 석탄에 포함된 회분은 연소과정에서 바닥재(bottom ash)와 비산재(fly ash)로 나뉘어 배출된다. 회분의 80% 내외를 차지하는 비산재의 경우 시멘트 생산 등에 재활용되나, 바닥재의 경우 대부분 회처리장에 매립되고 있다. 석탄 사용량의 꾸준한 증가로 인해 회처리장의 건설과 관리가 점점 어려워짐에 따라 바닥재를 재활용하기 위한 여러 방안이 연구되고 있다. 그 중 하나로서 바닥재와 준설풀사에서 발생하는 준설토를 혼합하여 고온에서 발포시켜 밀도를 낮춘 경량골재(light-weight aggregate, LWA)를 생산하는 방안이 연구되고 있다. 경량골재는 입자 내부가 다공질로 구성되어 밀도가 1,500 kg/m<sup>3</sup> 이하로 낮으며 단열재나 바닥재, 흡음 및 흡습제로 사용된다[1].

경량골재의 생산은 원료를 배합한 성형입자들의 소성과 발포가 핵심적인 공정으로서, 긴 체류시간 동안 원료입자가 균일하게 혼합되면서 열전달에 의한 승온이 일어날 수 있도록 로타리 킬른(rotary kiln)이 사용된다. 킬른 내 연료 연소에 의한 고온 분위기(1,100-1,200℃)와 원료 입자의 표면이 소결되어 가스의 이동이 제한된 상태에서 원료에 포함된 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 환원과 미연탄소의 산화에 의한 CO 및 CO<sub>2</sub> 생성, CaCO<sub>3</sub>의 하소(calcination)에 의한 CO<sub>2</sub> 생성과 같은 발포로 인해 팽창하면서 밀도가 감소하게 된다[2,3]. 이때의 반응식은 다음과 같다.



이 때 배합된 원료의 조성 및 입자의 온도 이력에 따라 원료 입자의 표면 소결과 내부 발포 특성이 민감하게 변하기 때문에 안정적인 운전조건을 유지하고 제어하는 기술이 핵심적이다.

이 연구는 국내 화력발전소에서 시운전중인 경량골재 생산용 로타리 킬른에 대해 연소 조건 변화에 따른 경량골재 입자들의 온도 이력을 분석함으로써 적정 운전조건을 도출하기 위한 연구이다. 이를 위해 상용 코드 기반의 전산유동해석을 통해 킬른 내 석탄 연소 및 온도 분포를 예측하고, 경량골재 입자층의 온도이력을 Excel VBA를 이용한 별도의 1차

원 열전달 모델을 수립하여 전산유동해석의 경계조건으로서 연계 해석하였다.

### 2. 해석 조건 및 해석 방법

#### 2.1. 기준운전조건 및 해석조건

Fig. 1은 이 연구에서 대상으로 하는 로타리 킬른의 개략도이다. 로타리 킬른은 길이 55 m, 내경 3.2 m, 경사각은 1.7°이고, 정상운전 시 회전속도는 1.5 RPM이다. 한쪽에서 상온의 원료 입자가 투입되어 석탄 버너가 설치된 반대쪽으로 진행한 뒤 킬른 하단에 위치한 냉각기로 진입한다. 석탄 버너는 입자 출구쪽의 킬른 단면 중앙에 수평으로 위치하며 안정적인 착화를 위해 소량의 LPG가 함께 공급된다. 연소용 공기는 골재 입자의 냉각기에서 골재 입자와 열교환을 통해 승온된 공기를 사용하며, 접선방향으로 위치한 덕트를 통해 킬른 내부에 진입한다. 경량골재의 원료는 분단을 원형 입자로 성형하여 투입된다. 이때 원료는 준설토와 잔사회를 50%씩 배합한 것으로 입자 직경은 15 mm, 잔류탄소의 함량은 2 wt.%, 수분은 4 wt.%로 보았다. 킬른 내 입자 체류시간은 약 50분이며, 킬른 단면에서 입자가 차지하는 면적 및 각도는 출구 관측장에서 확인된 약 0.36 m<sup>2</sup>, 70°로 설정하였다.

Table 1은 이 연구에서 고려한 킬른의 운전조건

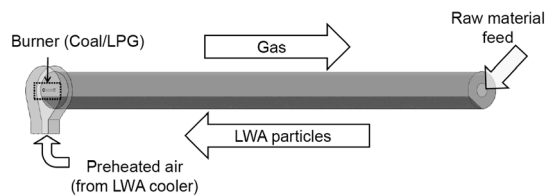


Fig. 1. Schematic of the LWA rotary kiln.

Table 1. Summary of operating conditions

Material	Input conditions
Fuel	Coal 1600, LPG 66 kg/hr
Raw material	20,000 kg/hr
Burner air	8,057 kg/hr at 27℃
Main air	1) Temp.: 150-900℃, Excess air fixed at 150% 2) Excess air: 30%-100%, Temp. fixed at 200℃

범위를 나타낸 것으로서 석탄 및 LPG의 공급량을 고정된 상태에서 연소공기의 온도와 과잉공기비의 두 조건을 변화시켜 해석하였다. 첫 번째로, 연소공기의 온도는 냉각기 출구 온도의 영향과 적정 제어 범위를 파악하기 위한 것으로서 과잉공기비를 150%로 고정된 상태에서 150-900℃의 범위에서 분석하였다. 이와 같이 넓은 온도 범위를 설정한 이유는 연소공기가 킬른 후단의 골재입자 냉각기를 거쳐 공급되므로 냉각기의 운전방식에 따라 온도의 가변 범위가 크기 때문이다. 두 번째로, 과잉공기비에 의한 영향을 파악하기 위해서 연소공기의 온도를 200℃로 고정하였고 과잉공기비를 30%-100%로 변화시켜 가며 해석하였다. 이는 킬른 내 연소조건을 안정적인 제어를 위해 골재입자 냉각기에서의 공기에열을 줄이고 일정한 온도를 유지하는 경우의 운전 범위를 파악하기 위한 것이다.

## 2.2. 수치 해석 모델 및 방법

경량골재 킬른에 대한 수치해석은 가스 유동장에 대한 CFD와 입자층에 대한 별도의 1차원 모델을 연계하여 진행하였다. 석탄 연소 및 입자층과의 열전달을 포함한 킬른 내 가스 유동장은 상용 CFD 코드인 FLUENT ver 6.3[4]를 이용하였다. 이 때 킬른 하부에 형성되는 입자층은 가스 유동장에 대한 경계조건으로 단순화하였다. 입자층의 온도를 결정하기 위해 필요한 해석은 간단한 1차원 수치모델(2.3절 참조)을 구성하여 Excel VBA 프로그램으로 구현하였다. 그리고 열전달을 통한 두 모델의 상호작용이 안정화될 때까지 반복 해석하였다. 이와 같은 연계해석기법은 화력자식 소각로의 연료층 및 가스유동장에 대해 개발된 바 있다[5].

가스 유동장 해석에서 석탄의 휘발분 조성 속 속도상수는 석탄 네트워크 모델에 기반한 예측프로그램인 Flashchain을 이용하여 결정하였다[6]. 석탄 좌의 연소 및 가스화 반응은 unreacted core shrinking model(UCSM)[7]을 적용하였다. 휘발분과 좌 연소생성물의 가스반응은 난류 유동장 내 화학종의 혼합속도를 고려하기 위하여 kinetic rate/eddy-dissipation rate model을 적용하였다. 이 때 난류 유동의 해석은 제트 및 선회 유동에 적합한 realizable k-ε model을 이용하였다. 벽면, 가스 및 입자의 복사열전달은 구분중좌법(discrete ordinate method)을 적용하였다. 이 때 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O를 포함한 가스의 흡수계수는 회색기체가중합법(weighted sum of the gray gases model, WSGGM)[8,9]을 이용하여 계산하였다.

## 2.3. 입자층 해석 모델

Fig. 2는 입자층의 1차원 모델 개념도이다. 킬른의

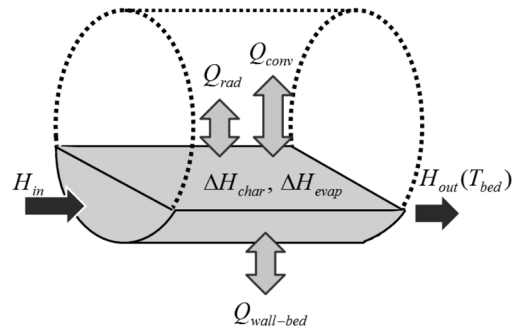


Fig. 2. Conceptual diagram of one-dimensional LWA rotary kiln bed model.

회전에 의한 입자의 혼합이 효율적으로 진행되므로 반경 및 원주방향의 입자 온도 차이는 무시하고 축방향으로의 온도구배만 존재한다고 가정하여 1차원 모델로 구성하였다. 또한 입자 내부의 온도 구배와 고온에서의 표면 소결 및 상변이(phase transformation), 발포 반응에 따른 입자 내 기공 형성 및 크기 변화를 무시하였다. 이는 기존 문헌에서 화학적인 메커니즘에 대한 연구 사례들을 찾을 수 있으나 이를 수식화하여 입자 모델링하는데 참고할 수 있는 정량적인 연구들이 보고되지 않았기 때문이다. 따라서, 주요 열전달 및 수분 증발, 잔류 탄소의 연소만을 고려하여 각 검사체적에서 입자의 출구온도를 결정하는 에너지보존식을 아래와 같이 구성하였다.

$$H_{out} = H_{in} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{wall-bed} + \Delta H_{char} + \Delta H_{evap} \quad (1)$$

$$H_{out} = M \int_{T_{ref}}^{T_{bed}} C_p dT \quad (2)$$

여기에서  $Q_{rad}$ 는 가스유동장과 입자층 사이의 복사에 의한 열전달로서, 전산유동해석을 통해 결정되는 값이다. 입자층과 가스유동간의 대류열전달( $Q_{conv}$ )에 필요한 열전달계수( $h_{conv}$ )[10,11]는 킬른의 회전과 내부 고체층의 층진율을 고려하는 아래의 수식을 적용하였다.

$$h_{conv} = 0.46 \frac{k_g}{D_H} Re_D^{0.533} Re_w^{0.104} \eta^{-0.341} \quad (3)$$

입자와 벽면사이의 열전달계수( $h_{ws,total}$ )를 구하기 위하여 Fig. 3과 같이 입자층을 세 부분(Gas layer, penetration layer, Core area)으로 가정한 후 각각의 열저항을 구하여 계산하는 Heat penetration model[12,13]을 사용하였다.

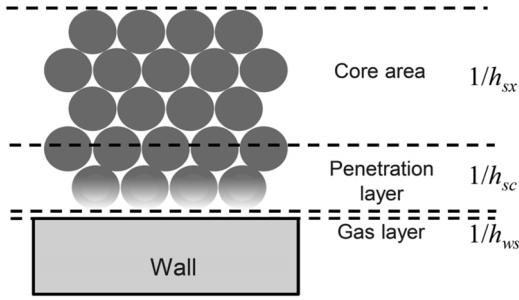


Fig. 3. Heat penetration model.

$$h_{ws,total} = \left( \frac{1}{h_{ws}} + \frac{1}{h_{sc}} + \frac{1}{h_{sx}} \right)^{-1} \quad (4)$$

Core 부분의 열저항( $1/h_{sx}$ )은 킬른의 회전에 따른 혼합으로 균일한 온도를 가지고 있다고 가정하여 0의 값을 가진다. Penetration layer에서의 열전달은 1차원적인 전도로 단순화하고 킬른 내벽과 입자층 사이의 접촉 시간을 고려하여 식 (5)와 같이 열전달 계수( $h_{sc}$ )의 실험식을 사용하였다.

$$h_{sc} = 2\sqrt{k_s \rho_s C_{p,s} / \pi t_c} \quad (5)$$

Gas layer에서의 열저항( $h_{ws}$ )은 Gas layer 내 전도와 입자-벽사이의 전도 및 복사를 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$h_{ws} = (1-f_s)^{2/3} h_{wp} + [1-(1-f_s)^{2/3}] h_{wg} + h_{rad} \quad (6)$$

$$h_{wp} = \frac{4k_g}{D_p} \left[ \left( 1 + \frac{2\psi + 2\gamma}{D_p} \right) \ln \left( 1 + \frac{D_p}{2\psi + 2\gamma} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

$$h_{wg} = \frac{k_g}{\sqrt{2}/2D_p + \psi} \quad (8)$$

$$h_{rad} = \frac{\sigma(T_w^2 + T_s^2)(T_w + T_s)}{1/\epsilon_s + 1/\epsilon_w - 1} \quad (9)$$

입자층 내에서 수분의 증발은 수분 증발에 필요한 잠열과 열전달량을 이용하여 계산하였다. 원료 입자 내 잔류탄소는 반응온도가 높지 않고 산소가 충분하므로 탄소의 산화반응( $C + O_2 \rightarrow CO_2$ )만을 대상으로 UCSM을 적용하여 계산하였다.

$$(rate) = \frac{1}{\frac{1}{k_{diff}} + \frac{1}{k_s Y^2} + \frac{1}{k_{dash} \left( \frac{1}{Y} - 1 \right)}} P_{O_2} \quad (10)$$

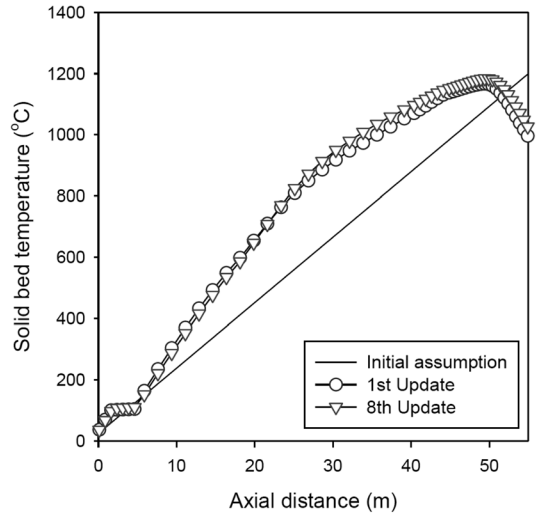


Fig. 4. History of LWA temperature profiles(air temp.: 700 °C, excess air: 150%).

$$k_s = 8710 \exp\left(-\frac{17967}{T_s}\right) \quad (11)$$

$$k_{diff} = 0.292 \left(\frac{4.26}{T_g}\right) \left(\frac{T_g}{1800}\right)^{1.75} / (P_t D_p) \quad (12)$$

$$k_{dash} = k_{diff} f^{2.5} \quad (13)$$

### 2.4. 연계 해석의 수렴성

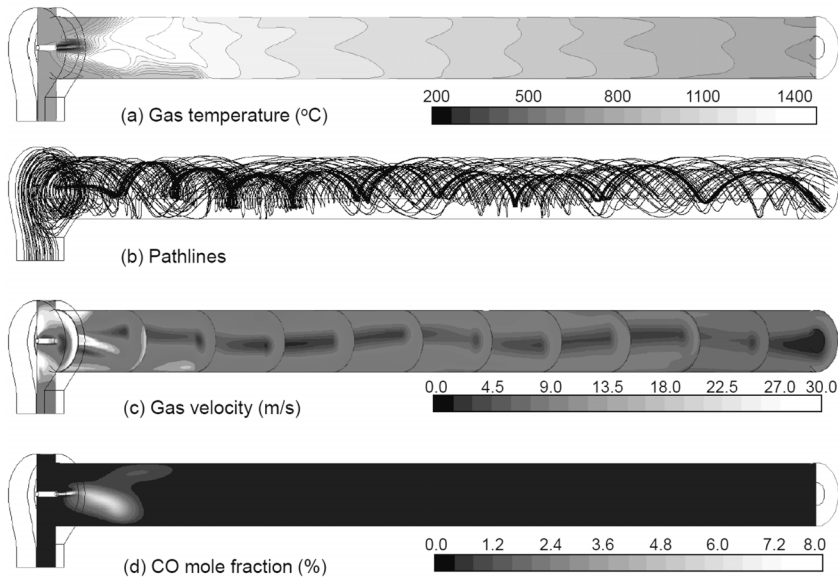
경량골재 입자층의 승온 해석은 Fluent와 별개로 Excel VBA를 이용하여 만든 프로그램을 사용하여 연계하여 수행하므로 두 모델의 상호작용에 대한 수렴 여부를 확인하는 것이 필수적이다.

Fig. 4는 골재입자의 온도이력이 CFD와의 반복계산 과정에서 변화한 결과의 예를 공기온도 700°C 및 과잉공기비 150% 조건에 대해 나타낸 것이다. 가스 유동장 계산 시 입자층의 초기 온도는 입구 30°C에서 출구 1,200°C까지 선형적으로 증가한다고 가정하였다. CFD 결과가 안정화되면  $Q_{rad}$ ,  $Q_{conv}$ ,  $Q_{wall-bed}$  계산에 필요한 복사온도, 가스 온도 및 벽면온도를 출력하여 입자층 온도 이력을 계산하였다. 이를 이용하여 다시 가스 유동장에 대해 재계산을 수행하는 과정을 반복하였다. 화염 온도가 충분한 경우 두 모델의 상호작용은 1, 2회 내에 안정화되며 5-8차례의 반복계산 이후에는 1%의 오차 이내로 수렴하였다.

## 3. 해석 결과

### 3.1. 대표조건인 해석결과

Fig. 5는 공기온도 700°C, 과잉공기비 150%인 조

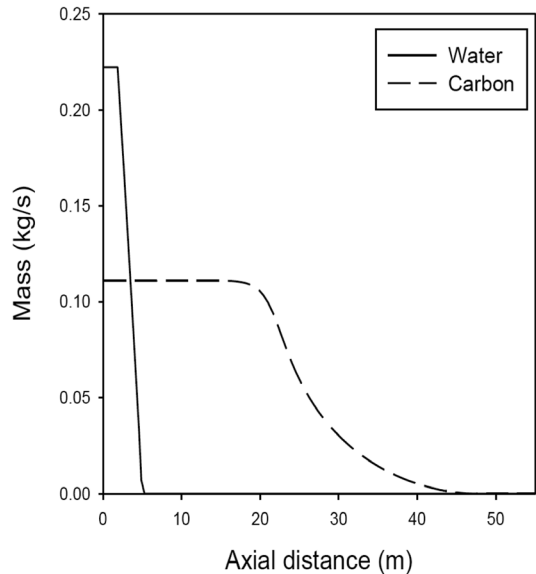


**Fig. 5.** Fuel combustion and gas flow in the rotary kiln (air temp. 700°C, excess air 150%).

건에서 가스 유동장의 온도 및 유선분포를 나타낸 것이다. 연소공기가 접선방향으로 킬른에 진입하면서 강한 선회류가 형성되며 킬른의 회전으로 인해 축 방향 전체에 걸쳐 선회류동이 유지되었다. 버너를 통해 공급된 연료의 연소에 의한 화염부에는 공기의 예열온도가 높기 때문에 1,400°C 이상의 고온 영역이 나타났다. 이 때 고온 영역은 킬른 단면 중앙부에 형성되지 않고 선회류동과 함께 회전하였다. 특히, 버너에서 5-10 m 정도 진입한 시점에서 고온 영역이 입자층에 직접 영향을 주는 것을 확인하였다. 이후 가스 출구로 진행하면서 입자층으로의 열 전달 및 벽면 열손실로 인해 점진적으로 온도가 하락하였다.

Fig. 5(c)의 유속 분포에서 강한 선회류로 인해 축 방향의 중심부 유속은 낮고 벽면에서의 속도가 높은 경향을 보였다. 특히, 버너 근처에서의 선회류가 가장 강하게 나타났다. Fig. 5(d)의 CO 농도를 볼 때 석탄의 연소는 10 m 이내에서 거의 종료되었다. 산소 농도는 과잉공기비가 매우 크기 때문에 농도가 가장 낮은 영역에서도 6% 수준이며 후단으로 갈수록 가스 혼합이 진행되면서 13%의 높은 농도로 균일해진다.

Fig. 6은 골재입자의 1차원 모델에서 위치에 따른 입자층 내의 잔류 탄소와 수분의 잔류량을 나타낸 것이다. 수분은 입자 투입 후 5미터 이내에서 증발이 종료된다. 잔류 탄소는 투입 후 약 20 m 정도부터 산화반응이 시작되는데 입자 표면에서 내부로 반응면(unreacted core)이 이동하면서 산소의 입자내 확산 속도가 저하되므로 반응 속도가 점점 감소하는 경향을 나타냈다.



**Fig. 6.** The weight of water and carbon in LWA particles predicted by the 1-D bed model (air temp. 700°C, excess air 150%).

Fig. 7은 공기온도 200°C, 과잉공기비 50%인 조건에서 가스 유동장의 온도 및 유선분포를 나타낸 것이다. 유입되는 공기의 유량 및 유속이 크게 감소하면서 앞의 경우와 달리 선회류가 형성되지 않았다. 반면 버너에서 시작된 LPG 화염과 고온의 유동이 제트 형태로 일직선에 가깝게 유지되며 킬른 후단으로 갈수록 속도 분포가 균일해진다. 이때 석탄의 연소는 주위의 연소용 공기와 만나면서 넓은 범위에

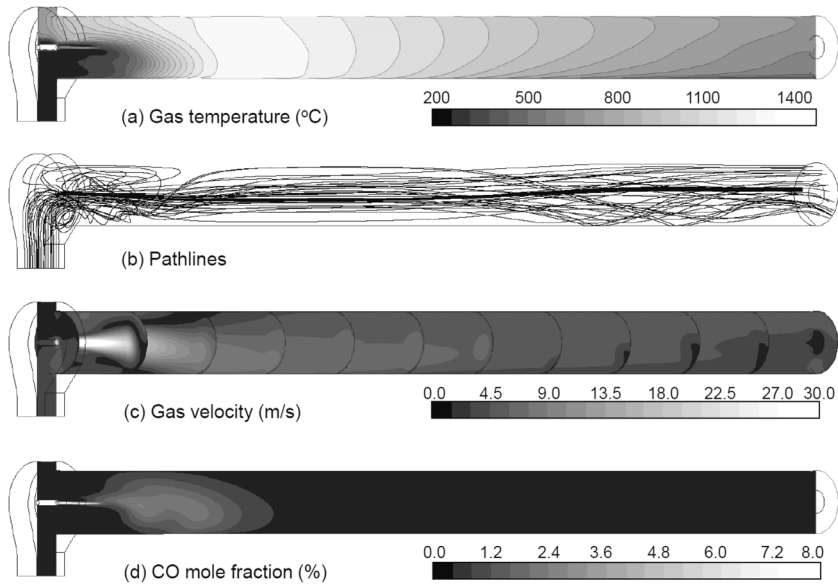


Fig. 7. Fuel combustion and gas flow in the rotary kiln (air temp. 200 °C, excess air 50%).

서 서서히 진행되며 10-15 m 지점에서 약 1,200 °C 내외의 최고온도 영역이 형성된다. 이는 Fig. 5의 경우와 비교할 때 최고온도는 약 250 °C 이상 낮고, 고온부의 위치는 5 m 이상 후단으로 이동한 것이다.

### 3.2. 각 조건별 입자 온도 결과 비교

Fig. 8은 과잉공기비를 150%로 고정한 상태에서 연소공기 온도를 150-900 °C 범위에서 변화시켰을 때 입자층 온도 해석 결과를 나타낸 것이다. 연소공기 온도에 따라 화염온도가 변하므로 입자의 온도 역

시 직접적인 영향을 받게 된다. 이때 공기온도 400 °C 인 경우 입자의 최고 온도는 1,004 °C로서 발포가 충분하지 않을 수 있고, 공기온도 900 °C인 경우 1,308 °C로서 입자 표면에서의 용융이 과도하여 골재입자들의 응집이 일어날 가능성이 매우 높다. 반면 최고온도가 나타나는 위치는 45-50 m 영역으로 크게 변하지 않았다. 여기에서 공기온도 150 °C인 경우 화염온도가 충분하지 못하여 입자층 모델과의 반복계산 과정에서 고온영역의 위치와 온도가 지속적으로 하락하기 때문에 수렴된 결과를 얻을 수 없었다. 이와

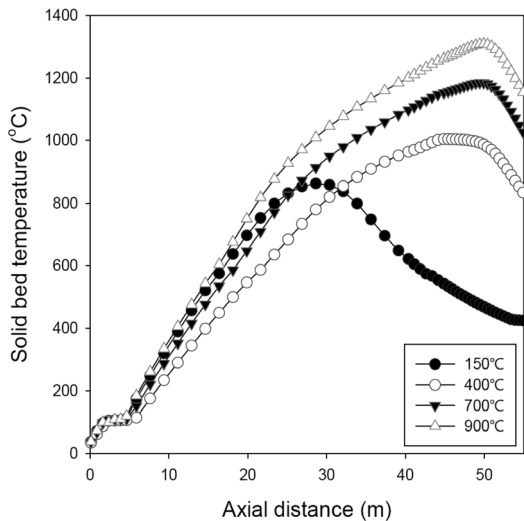


Fig. 8. Profiles of LWA temperature for different air temperatures (excess air: 150%).

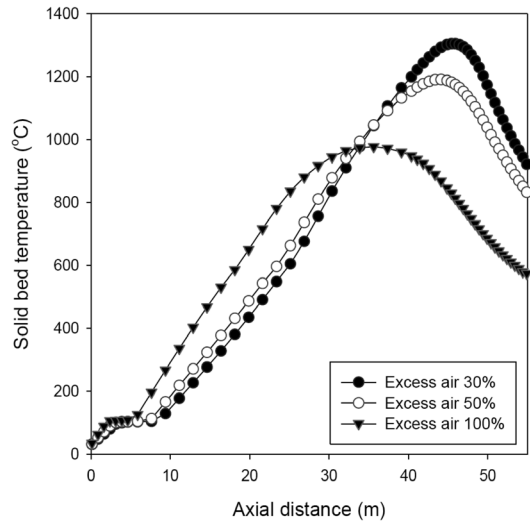


Fig. 9. Profiles of LWA temperature for different excess air ratios (air temp.: 200 °C).

같은 결과로부터 골재입자 최고온도 1,100-1,200°C 범위에서 10분 정도 체류시간을 가지기 위한 연소공기의 적정 온도는 600-700°C 내외인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 연소공기의 온도를 200°C로 고정하고 과잉공기비를 30-100% 범위에서 바꿔가며 해석한 결과이다. 이는 전술한 바와 같이 공정의 단순화와 운전제어의 안정성 향상을 위해 킬른에서 배출된 고온 골재입자의 냉각과정을 거친 공기를 사용하지 않고 별도로 온도가 제어되는 예열공기를 사용하는 조건을 분석하기 위한 것이다. 이 때 과잉공기비 50%인 경우 입자의 최고온도가 1,191°C로 나타났다. 반면, 과잉공기비 30% 조건에서는 1,300°C 이상으로 최고온도가 상승하고, 100% 조건에서는 안정적인 온도유지가 어려울 것으로 분석되었다. 따라서 결과의 경향으로부터 과잉공기비 50-60% 범위가 적정 운전영역인 것으로 판단된다.

위 두 결과를 종합하였을 때, 적절한 수준의 입자 내 발포 및 과도한 소결의 방지를 위한 골재입자의 적정온도 달성을 위해 킬른의 연소조건이 공기 예열 온도 100°C 이내, 공기유량은 과잉공기비 기준으로 10% 이내의 범위에서 제어되어야 함을 확인할 수 있다. 이와 같이 입자 온도가 연소 조건에 따라 민감하게 변하므로, 공기 예열온도 및 킬른 출구 산소 농도 등의 연속적인 계측이 필수적이다. 또한, 킬른 외벽 모니터링 등을 통해 내부 온도 분포에 대한 간접적인 파악이 이루어질 경우 해석 모델의 고도화를 위한 좋은 참고자료가 될 수 있다.

이 연구에서 수립한 해석모델은 입자의 표면 소결이나 내부 발포 등 일부 현상을 무시한 것이다. 소결과 발포 과정의 반응열은 가스와의 열전달에 비해 미미하지만 입자의 크기와 표면적 변화에 따라 킬른 후단에서의 열전달 조건이 크게 영향을 받을 수 있으므로 향후 이를 반영한 입자모델의 개선이 필요하다. 또한, 전산유동해석 기술의 발전에 따라 입자들의 거동 및 반응, 열전달 모델을 포함한 로타리킬른의 해석 기술 개발이 이루어질 경우 골재입자 뿐 아니라 다양한 킬른 이용 분야에서 매우 유용할 것으로 판단된다[14].

#### 4. 결론

석탄 화력의 바닥재로부터 경량골재를 생산하기 위해 이용되는 로타리 킬른의 적정운전조건을 파악하기 위하여 연료의 연소를 포함한 가스 유동장의 해석과 함께 골재 입자의 온도 이력을 예측하는 1차원 모델을 연계 해석하였다. 그 결과 골재 투입량 및 조성에 대한 기준 운전조건에서 과잉공기비를 150%로 고정할 경우 연소공기의 온도를 600-700°C 범위 내에 있어야 하며, 연소공기의 온도를 200°C로 할 경

우 과잉공기비의 범위가 50-60%의 범위 내에서 사용하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 따라서, 적절한 수준의 발포가 이루어지고 지나친 소결을 방지하기 위한 운전조건의 제어는 연소공기의 온도 100°C, 과잉공기비 10%의 매우 좁은 가변 범위에서 이루어져야 할 것으로 분석되었다.

이 연구에서 골재입자 온도의 계산을 위해 수립한 1차원 모델은 주요 열전달과 미연탄소의 연소만을 고려한 단순한 모델이다. 향후 골재입자의 특성에 간여하는 주요 기작인 입자 내부의 온도 분포나 표면의 소결, 입자 내부에서 일어나는 다양한 반응과 발포 현상을 고려하여 보다 세밀한 모델을 개발하는 것이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(과제번호: 20133030100860). 이 논문은 2014년 한국연소학회 춘계학술대회에서 발표한 내용을 보완하여 작성하였습니다.

#### 참고문헌

- [1] S. Chandra, L. Berntsson, "Lightweight Aggregate Concrete", Noyes publications, Norwich (2003) 369-400.
- [2] 강신희, 석탄회 재활용한 인공경량골재의 발포 거동에 관한연구-Fe, C의 역할, 경기대학교 석사학위논문 (2011)
- [3] 전국현, 표면개질 인공경량골재의 발포거동에 대한 연구, 경기대학교 석사학위논문 (2012)
- [4] Fluent Inc. Fluent 6.3 user's guide, Lebanon, New Hampshire, USA (2006)
- [5] C. Ryu, D. Shin, S. Choi, Combined bed combustion and gas flow simulation for a grate type incinerator, J. Air Waste Manag. Assoc., 52 (2002) 189-197.
- [6] S. Niksa, Predicting the devolatilization behavior of any coal from its ultimate analysis, Combustion and Flame, 100 (1995) 384-394.
- [7] C. Y. Wen, T. Z. Chung, Entrainment coal gasification modeling, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 18 (1979) 684-695.
- [8] T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman, Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model, J. Heat Transf., 104 (1982) 602-608.
- [9] A. Coppalle, P. Vervisch, "The total emissivities of high-temperature flames", Combust. Flame, 49

- (1983) 101-108.
- [10] S.H. Tscheng, A.P. Watkinson, Convective heat transfer in rotary kiln, *The Canadian J. Chem. Eng.*, 57 (1979) 433-443.
- [11] K.S. Mujumdar, V.V. Ranade, Simulation of rotary cement kilns using a one-dimensional model, *Chem. Eng. Res. Des.*, 84 (2006) 165-177.
- [12] S.-Q. Li, L.-B. Ma, W. Wan and Q. Yao, A mathematical model of heat transfer in a rotary kiln thermo-reactor, *Chem. Eng. Technol.*, 28 (2005) 1480-1489.
- [13] R. Zhang, H. Yang, J. Lu, Y. Wu, Theoretical and experimental analysis of bed-to-wall heat transfer in heat recovery processing, *Powder Technol.*, 249 (2013) 186-195.
- [14] 엄민재, 한택진, 이후경, 최상민, 로타리킬른 반응기 설계를 위한 성능해석 모형, *한국연소학회지*, 18 (2013) 9-23.