

低等級石炭(인도네시아 IBC)의 固定層 反應器 實驗을 통한 乾燥 反應速度論 研究[†]

姜泰珍 · 全鉞萬 · 全永辛 · 姜錫煥* · 李時薰** · 金相道** · [†]金炯澤

亞洲大學校 에너지시스템學部, *高等技術研究院, **韓國에너지技術研究院

A Study on Drying Kinetics of Low Rank Coal(Indonesia-IBC) through the Fixed-Bed Reactor Experiments[†]

Taejin Kang, Doman Jeon, Youngsin Jeon, Sukhwan Kang*, Sihyun Lee**,
Sangdo Kim** and [†]Hyungtaek Kim

Division of energy System Research, Ajou Univ.

**Institute for Advanced Engineering*

***Korea Institute of Energy Research*

요 약

에너지 위기로 인하여 석탄에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 중에서도 저등급석탄에 대한 관심이 증가하고 있는데, 저등급석탄은 수분함량이 30~60%정도로 수분함량이 높다. 이러한 저등급 석탄을 발전용 연료로 사용하기 위해서는 건조공정이 선행적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 고정층 반응기를 이용하여 저등급석탄의 건조 반응속도론을 도출하였다. 건조반응속도는 입자크기, 주입가스 온도, 가스 유속, L/D의 영향을 변수로 하여 도출하였다. Reynold's number는 가스 유속과 석탄입자의 크기, L/D는 반응기 직경과 대상탄의 충전양을 보정하기 위해 고려하였다. 석탄의 건조 특성에서도 알 수 있듯이, 고정층 반응기를 이용한 저등급석탄의 건조에 있어서도 표면수분의 건조가 원활하며, 상 경계 반응이 적합한 메커니즘임을 확인 할 수 있었다.

주제어 : 저등급석탄, 건조, 고정층반응기, 건조메커니즘, 건조반응속도

Abstract

The crisis of energy gives rise to the growing concerns over continuing uncertainty in the energy market. Under these circumstances, there are also increasing interests on coals. In particular, Low Rank Coal (LRC) is receiving gradual attentions from green industry. But due to is high moisture content range from 30 - 60%, drying process has to be preceded before being utilized as power plant. In this study drying kinetics of LRC is induced by using a fixed-bed reactor. The drying kinetics was evaluated in from of the particle size, the inlet gas temperature, the drying time, the gas velocity, and the L/D ratio. The consideration of the reynold's number was taken for correction of gas velocity, particle size and L/D was taken for correction of reactor diameter, packing height of coal. As being seen as characteristic of drying coal, it can be found that fixed-bed reactor can contributed to active drying of free water. In this sense, it could be considered that phase boundary reaction is appropriate mechanism.

Key words : low rank coal, drying, fixed-bed reactor, drying mechanism, drying kinetics

1. 서 론

최근 석탄화력발전소에서 사용하는 석탄가격이 2007년 3월 \$53/톤이던 것이 2008년 10월에는 \$129/톤까지 치솟았고 열병합발전소에서는 \$200/톤이 넘는 가격으로

[†] 2010년 10월 12일 접수, 2010년 11월 7일 1차수정
2010년 12월 3일 수리

* E-mail: htkim@ajou.ac.kr

수입을 하고 있다.¹⁾ 이와 같이 석탄 가격이 크게 오른 이유는 중국, 인도 등이 석탄 사용량을 늘리면서 지금까지 수출하던 석탄양을 줄이고 오히려 수입을 하는 상태가 되었고 이에 따라 우리나라에 대한 주요 석탄 수출국인 호주의 석탄 가격도 동반 상승하였기 때문이다.²⁾ 이러한 현상은 2007 중국의 폭설과, 호주의 홍수, 2008년 중국의 지진과 같은 자연재난까지 겹치면서 상승폭은 더욱 커지고 있다. 우리나라는 2007년 약 8천만톤의 석탄을 수입하였으며, 일본에 이어 세계 2번째 석탄 수입국이다. 다양한 석탄 종류 중에 사용되지 않고 있는 석탄 등급이 있는데 이것이 바로 수분함량이 25% 이상인 저등급 석탄(Low Rank Coal: LRC)이다. 저등급 석탄의 가격은 현재 수입 표준 석탄 가격의 1/4~1/3수준인데 수분이 많고 불안정하여 사용하기 어렵다.³⁾

이러한 저등급석탄의 활용도를 높이기 위해서는 우선 건조공정을 거쳐 석탄 중의 수분함량을 낮추는 것이 필수적이다. 따라서 저등급석탄의 고품위화의 기술개발들이 현재 세계적으로 많이 진행되고 있다. 대표적으로 호주 White Energy사의 Binderless Coal Briquetting(BCB) 기술,⁴⁾ 일본 Kobe Steel사의 Upgrading Brown Coal(UBC),⁵⁾ 호주 HRL사의 Integrated Drying Gasification Combined Cycle(IDGCC)등의 기술⁶⁾이 개발되어 실증 또는 상용화 단계에 있다.

다양한 종류를 가지고 있는 건조장치는 석탄에 열을 유효하게 전달해야 하는 것으로 석탄의 허용온도, 형태, 물리 및 화학적 성질 등에 의하여 열의 도입방법과 장치의 형을 변화시켜 열이 유효하게 석탄에 전달되며 수분이 증발하도록 하여야 한다.⁷⁾ 따라서, 본 연구에서는 석탄의 입자의 크기와 열풍으로 인한 미분탄의 부유를 방지하기 위하여 고정층 반응기를 이용하여 저등급 석탄의 건조 공정을 수행하였으며, 적합한 건조 메커니즘과 반응속도론을 제안하고자 한다.

2. 이 론

석탄의 열건조 반응을 양론식으로 표현하면 다음과 같다. 즉, A (wet solid) → B (solid) + C (water vapor)로 표시되는 열건조반응론을 메커니즘의 특징을 각기 다른 수식에 고려하여 설명하였다. 식 (1)에 따라 반응율은 다음과 같은 전환율 a 로 나타내었다.

$$\alpha = \frac{W_0 - W_i}{W_0 - W_\infty} \tag{1}$$

즉, W_i 는 i 시간에서의 대상탄의 무게를 나타내며, 0과 ∞ 는 초기무게와 완전건조된 후의 무게를 나타내었다. 수분 감소율은 식 (2)를 통해 나타내었다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \cdot f(N_{Re}, L/D) \tag{2}$$

여기에서 k는 경험적 반응상수(empirical rate constant)를 나타내었으며, 이는 온도의 함수로서 식 (3)과 같이 아레니우스 식(Arrhenius equation)⁸⁾에 의해 정의하였다.

$$k = A \exp(-E/RT) \tag{3}$$

아레니우스 식에서 A는 전지수인자(pre-exponential factor)를 E는 활성화에너지(activation energy), R은 기체상수를 의미한다.

또한, $f(\alpha)$ 의 구체적인 형태는 반응메커니즘을 따른다. 본 연구에서는 $G(\alpha)$ 의 함수는 아래의 식 (4)와 식 (5)에 따라 정의하였다.

$$G(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} \tag{4}$$

$$G(\alpha) = f(kt), N_{Re}, L/D \tag{5}$$

식 (2), (4), (5)를 연립하여 다음과 같은 식 (6)을 도출하여 정의하였다.

$$G(\alpha) \propto kt \tag{6}$$

메커니즘에 따른 서로 다른 반응속도식(kinetics equation)을 Table 1에 나타내었다.

서로 다른 형태의 G(a)를 이에 상응하는 식 (6)에 대입하여 나타내었다.

입자(particle) 단위의 반응속도(kinetics)는 대부분

Table 1. Different integral kinetic equation (G(α)) with different mechanism⁹⁻¹³⁾

Factor	Equation	Factor	Equation
D1	α^2	R2	$1-(1-\alpha)^{1/2}$
D2	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha)+\alpha$	R3	$1-(1-\alpha)^{1/3}$
D3	$(1-2/3\alpha)-(1-\alpha)^{2/3}$	P1	α
D4	$(1-(1-\alpha)^{1/3})^2$	P2	$\alpha^{1/2}$
A1	$-\ln(1-\alpha)$	P3	$\alpha^{1/3}$
A2	$(-\ln(1-\alpha))^{1/2}$	P4	$\alpha^{1/4}$
A3	$(-\ln(1-\alpha))^{1/3}$	C2	$(1-\alpha)^{-\alpha}-1$

$G(\alpha)=kt$ 형태의 수식으로 표현되어진다. 여기에서 $G(\alpha)$ 는 전환율의 함수이다. α 와 k 는 전환율의 변수이며, t 는 시간을 의미한다. 위 식은 고체-고체 반응에 대한 입자 단위의 영향을 받은 모델을 의미하며, 모든 경우에 완벽하게 정의되진 않지만, 종종 실험데이터와 일치함을 보여준다.

Table 1에 제시한 모델은 기하학적인 부분에 관해서 다른 형태를 나타내고, 근본적인 공정과 속도제한 메커니즘(rate controlling mechanism)에 관해 다르다고 가정하였다. 전체적인 반응차수, 확산, 지배적인 화학반응을 상 경계(phase boundary), 결정핵 생성(nucleation), growth control을 기본으로 하여 각각 다르게 표현하였다.

또한, $f(\alpha)$ 에 대한 각 메커니즘은 물리적(physical) 메커니즘의 가정에 따른다.¹⁴⁾ 이들 메커니즘은 입자의 형태와 구동력에 대한 다른 기하학적 가정을 고려하여 제안했다.

하지만, 이들 이상적인 반응속도 모델은 고체반응안의 이질성(heterogeneity) 반응 때문에 고체 상태 공정(solid-state process)에 대하여 완전히 설명할 수 없다. 약간의 편차는 발생하게 되며, 이는 전환 반응속도(conversional kinetics)가 일정하지 않기 때문에 실험데이터와 맞춰봐야 함을 의미한다. 이러한 제한성을 극복하기 위하여, 실험적 반응속도 모델(empirical kinetical model)을 대안으로 사용하였다.¹⁵⁾

D1~D4는 확산(diffusion)메커니즘에 기초를 둔 반응으로써 각각 메커니즘의 정의는 다음과 같다. D1: 1차원 확산, D2: 2차원 확산, D3: 구형 대칭형 3차원 확산, D4: 원통 대칭형 3차원 확산에 따른다. A1~A3는 S자형 속도 반응식(sigmoid rate equations)에 기초를 둔 메커니즘으로 각 메커니즘의 정의는 반응차수가 각각 1, 2, 3인 무작위적 결정핵 생성에 따른다. R2, R3, P1은 상 경계 반응(phase boundary reaction)에 기초를 둔 메커니즘으로 각 메커니즘의 정의는 다음과 같

다. R2: 원통 수축형(원통 대칭형), R3: 구형 수축형(구형 대칭형), P1: 원반 수축형에 의한 메커니즘이다.

P2~P4는 속도 증가 반응식(acceleratory rate equation)에 기초를 둔 메커니즘으로 각 메커니즘의 정의는 결정핵 생성에 따른다. 마지막 C2는 화학반응(chemical process)에 기초를 둔 메커니즘으로 화학반응에 따라 메커니즘이 정의된다.

이들 각각의 메커니즘은 각기 다른 메커니즘에 따라 정의되었으며, 각 메커니즘에 따라 서로 다른 식으로 표현되어진다.

3. 실험방법

본 연구에 사용한 대상탄은 인도네시아 IBC탄으로 수분함량이 34%인 갈탄이다. 대상탄의 특성은 Table 2에 나타내었다.

다음 Fig. 1에는 고정층 반응기를 이용한 전반적인 실험공정을 묘사하여 나타내었다. 고정층 반응기는 유체의 속도를 증가시키면 고체입자는 움직이지 않아 입자 층의 높이는 변하지 않고 압력강하는 조금 더 변하

Table 2. Basic properties of Indonesian lignite coal sample

Item	Unit	Result
Total Moisture	wt.%	34.05
Proximate Analysis(Air Dry Basis)		
Inherent Moisture	wt.%	13.63
Ash	wt.%	3.30
Volatile Matter	wt.%	44.44
Fixed Carbon	wt.%	38.63
Higher Heating Value		
Gross Calorific Value(Air Dry Basis)	kcal/kg	5,370
Gross Calorific Value(Dry Basis)	kcal/kg	6,220

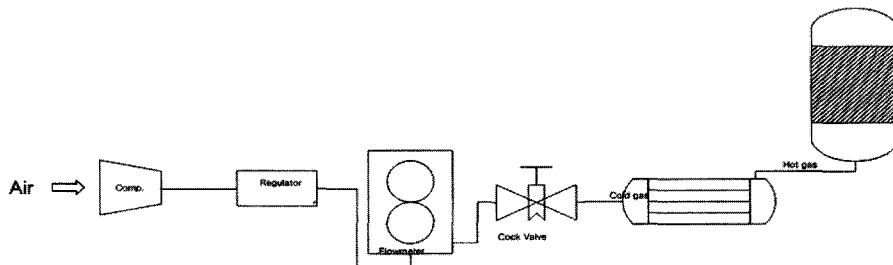


Fig. 1. Basic setup for fixed bed reactor.

는데, 이 상태를 고정층이라 한다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 건조매질로써 공기를 사용하였으며, 이를 예열기를 사용하여 가열된 공기를 반응기 하부로 유입하였다. 가열된 공기가 반응기로 유입될 때, 분산판을 설치하여 반응기로 들어온 공기의 흐름이 일정하도록 하였다. 유속을 일정하게 조절하기 위하여 line regulator 이후에 콕밸브를 설치하였다. 건조 시간은 50분으로 동일하게 진행하였으며, 실험변수로는 석탄의 입자크기, 공기의 유속과 온도, 대상탄의 충전층 높이를 달리하여 진행하였다. 대상탄의 입자크기는 0.3-1 mm, 1.18-2.8 mm, 2.8-4 mm의 3가지 그룹으로 나누어 진행하였으며, 반응기로 유입되는 가열공기의 온도는 373 K, 398 K, 423 K로 고정하였다. 또한, 유입공기의 유속은 각각 2.76 cm/sec, 4.6 cm/sec, 9.2 cm/sec, 11.96 cm/sec로 변화를 주었다.

4. 결과 및 고찰

일정한 입자크기에서 온도별 수분함량의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 T1: 373 K, T2: 398 K, T3: 423 K를 나타내며, 대상탄의 건조에 있어 고온일수록 건조공정이 활발하게 이루어짐을 알 수 있었다. 이는 열풍건조에 있어 고온일수록 열전달이 잘 일어나는 것으로 판단되어지며, 이를 통해 대상탄의 건조에 있어 온도의 영향이 큰 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 3과 Fig. 4, Fig. 5를 통해 대상탄의 입자크기에 따른 영향과 유속에 따른 영향, L/D의 변화에 따른 영향을 나타내었다. Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 대상탄

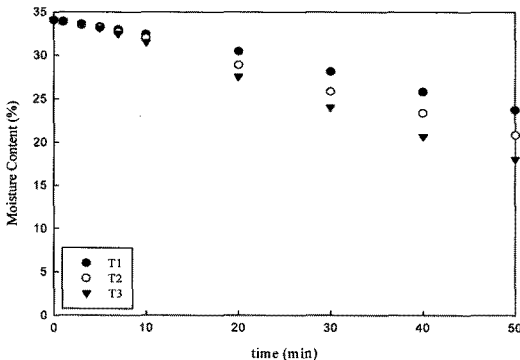


Fig. 2. Moisture content variation with drying time for 1.18-2.8 mm sized sample (T1: 373 K, T2: 398K, T3: 423 K).

의 건조에 있어 입자크기의 영향은 크게 두 그룹으로 나눌 수 있는 것으로 확인되었다. 즉, 입자크기가 가장 작은 0.3-1 mm와 1.18-2.8 mm, 2.8-4 mm로 나누어 수분변화율의 전환율이 차이가 남을 확인 할 수 있었다. 이는 대상탄의 공극률의 차이에 기인한 것으로 판단되어진다.

Fig. 4에서는 동일한 입자크기(1.18-2.8 mm)와 온도(398 K)에서 유속의 영향을 확인하였다. 유속의 경우, Ug1: 2.76 cm/s, Ug2: 4.6 cm/s, Ug3: 9.2 cm/s, Ug4: 11.96 cm/s이다. 동일한 입자크기와 온도에서 유속이 증가할수록 건조가 활발히 진행됨을 확인 할 수 있었다. 동일한 입자의 크기에서 유속이 빠를수록 건조공정이 활발하게 일어나는 것은 건조 기체와 대상탄의 접촉이 원활하여 즉, 기·고 접촉의 원활함으로 인해 보다 많은 수분이 증발한 것으로 판단되어진다.

Fig. 5에는 동일한 입자크기(0.3-1 mm)에서 L/D의 비율을 1과 0.25로 나누어 온도에 따른 대상탄의 수분함

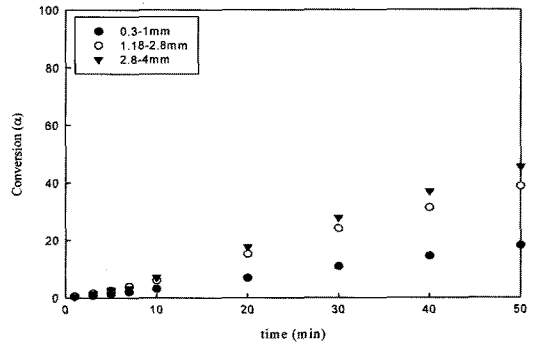


Fig. 3. Drying conversion of moisture with different particle size at 398 K.

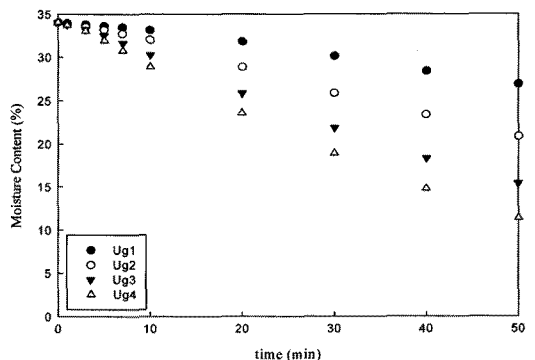


Fig. 4. Moisture content variation particle size 1.18-2.8 mm with different gas velocity at 398 K (Ug1: 2.76cm/s, Ug2: 4.6 cm/s, Ug3: 9.2 cm/s, Ug4: 11.96 cm/s).

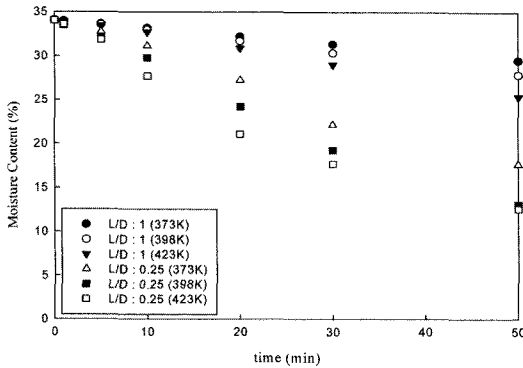


Fig. 5. Moisture content change of 0.3-1 mm sized sample with different L/D ratio and different temperature.

량변화를 조사하였다.

L/D가 1인 경우에 비하여 0.25인 경우에 전수분함량 34.05%에 대하여 약 10%정도 건조가 원활하게 일어남을 알 수 있었다. 이는 가열된 공기의 열 전달이 L/D가 0.25인 것이 L/D가 1인 것에 비하여 좋은 것에서 비롯된 것으로 판단되어진다.

위의 결과를 통해 대상탄의 건조공정에 있어 온도가 높고 유속이 빠르며 L/D가 작을수록 건조공정이 활발하게 진행됨을 알 수 있었다.

Table 1에 제시한 $G(\alpha)$ 의 수식을 이용하여 입자크기와 온도에 따른 아레니우스 식의 k 값을 확인하였으며, 이 중 고정층 반응에 적합하다고 판단되는 5가지 메커니즘을 선정하였다. 이들 메커니즘은 C2, A1, P1, R2, R3이며 C2는 이차화학반응(second order chemical reaction), A1은 S자형 감소반응식(sigmoid rate equation), P1, R2, R3는 상 경계반응(phase boundary equation)을 표현한 메커니즘이다. 고정층 반응에 적합하다고 판단되어지는 5가지 메커니즘을 이용하여 입자크기에 따른 활성화 에너지와 전지수인자를 각각의 입자별로 도출하였으며, 이를 Table 3을 통해 나타내었다.

Table 3에서 활성화 에너지 값과 전지수인자 값이 입자크기에 따라 변화하는 것은 공극률의 크기에 기인한 것으로, 공극률이 클수록 기·고 접촉이 원활해지며, 건조가 활발하게 일어나는데 이는 기공의 크기가 다른 일반적인 고체의 건조 특성과 동일하다. 고체가 여러 크기의 기공을 가지면 모세관 작용으로 작은 기공들은 액체가 꼭 차며 큰 기공들은 건조된다. 그렇게 되면 건조 속도는 젖은 표면의 분율에 의존하며 적어도 초기 건조 속도보다 약간 낮아진다. 이에 대한 영향은 고체 위의 경계층에서 상대적인 열 및 물질전달 저항에 의존하게

Table 3. E,A calculated by $G(\alpha)$ integral kinetics equations for different mechanism

Condition	Factor	E (kJ/mol K)	A (1/min)
0.3-1mm	C2	19.40	1.5360
	A1	18.15	0.9620
	P1	16.12	0.4829
	R2	16.22	0.2597
	R3	18.19	0.3168
1.18-2.8mm	C2	18.36	2.9417
	A1	15.14	0.9014
	P1	12.51	0.3348
	R2	13.24	0.2291
	R3	13.64	0.1788
2.8-4mm	C2	19.04	4.5082
	A1	15.11	1.0607
	P1	11.94	0.3232
	R2	13.18	0.2637
	R3	14.28	0.2538

된다. 경계층에서의 물질전달 저항이 상대적으로 크면 표면의 반이 말랐어도 건조속도는 조금만 줄어든다. 이것은 건조된 면적의 두께나 지름이 기체 경계층의 두께와 비교해서 작으면 수증기가 젖은 면적으로부터 큰 기공 지역까지 확산에 의해 퍼질 수 있기 때문이다.¹⁶⁾

이를 이용하여 고정층반응기를 통한 대상탄의 건조 반응속도를 도출하여 식 (7)에 나타내었다.

$$G(\alpha) = aN_{Re}^b \left(\frac{L}{D}\right)^c kt \quad (7)$$

식 (7)은 실험데이터로 얻은 경험식으로써, a, b, c는 각각 상수를 나타낸다. 각각의 메커니즘에 따른 상수를 Table 4에 나타내었다.

식 (7)은 입자크기, 유입 공기 온도, 건조 시간, 유입 공기 유속, L/D의 영향을 변수로 하여 도출하였다. N_{Re} 는 유입 공기 유속과 대상탄의 입자크기를, L/D는 고정층 반응기의 직경과 대상탄의 충전양을 보정하기 위해 고려하였다.

각각의 메커니즘에 따른 계산값과 실험값을 비교하여 고정층 반응기를 통한 대상탄의 건조에 가장 적합하다고 판단되는 모델을 Fig. 6을 통하여 나타내었다.

각각의 메커니즘을 통한 반응속도를 계산값과 실험값

Table 4. Calculated drying kinetics constant using fixed bed reactor

	a	b	c
C2	0.7460	-0.0139	-0.0343
A1	0.4908	0.0382	-0.1415
P1	0.3335	0.0858	-0.2217
R2	0.3966	0.0640	-0.1865
R3	0.4219	0.0563	-0.1707

을 비교해 본 결과, 표준편차 값이 가장 작은 R3(표준편차 : 0.1971)가 고정층 반응을 통한 건조메커니즘에 가장 적합하다고 판단되어진다. C2에 메커니즘에 따른 표준편차 값은 1.4970이며 이는 화학반응에 의한 메커니즘이다. A1 메커니즘은 S자형 감소 반응식 또는 무작위 결정핵 생성에 의한 메커니즘으로 표준편차 값은 0.7314이다. 즉, P1, R2, R3는 상 경계 반응 메커니즘이며, 이들은 원반수축형, 원통수축형(원통대칭), 구형수축형(구형대칭)에 따른 메커니즘이다. 각각의 표준편차 값

은 0.4239, 0.2689, 0.1971이다. 이들 계산값과 실험값을 비교한 표준편차 값을 통해, 고정층을 이용한 대상탄의 건조공정에 있어 가장 적합한 메커니즘은 상 경계 반응(phase boundary reaction)이라 제시할 수 있다. 이는 이미 알고 있는 석탄 건조 특성에서 표면수분의 경우에는 쉽게 건조가 일어나지만, 고유 수분의 경우 석탄의 기공내에 존재하기 때문에 쉽게 건조가 일어나지 않는 특성¹⁷⁾과 동일함을 의미한다. 이는 다공질고체의 건조 특성인 고 함수율역에서 재료내 공극에 보유된 물은 자유수이어서, 비 친수성 재료의 경우와 같은 행동을 하며, 건조중, 자유수가 없어지고, 다음으로 결합수의 이동, 증발이 일어나는 특성¹⁸⁾과도 동일하다.

5. 결 론

본 연구에서는 고정층 반응기를 통한 저등급 석탄의 건조 특성을 이용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 대상탄의 입자 크기의 영향은 0.3-1 mm와 1.18-2.8 mm, 2.8-4 mm의 두 가지 그룹으로 나뉘어지며, 건

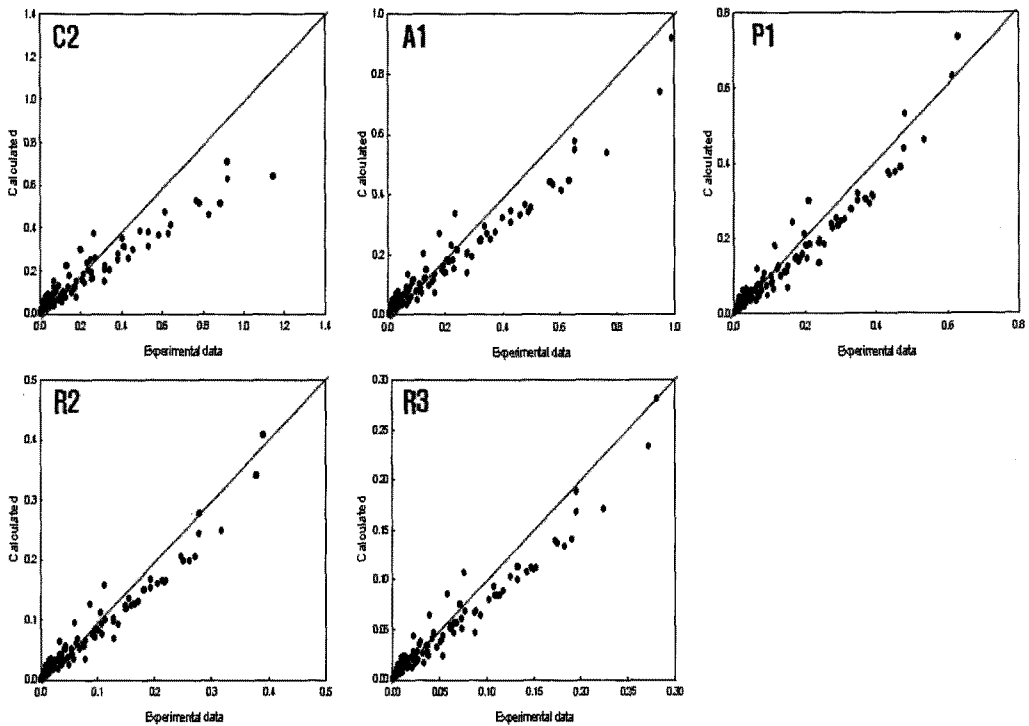


Fig. 6. Comparison between experimental data and calculated values of $G(\alpha)$ (C2, A1, P1, R2, R3 represents different mechanism as in Table 4).

조 기체의 온도가 높을수록 건조가 활발하게 진행되어 지는 것을 확인 할 수 있었다.

2) 대상탄의 건조 공정에 있어 건조 기체의 유속이 증가할수록 건조 공정이 활발하게 이루어지며, 유속이 4.6 cm/sec의 경우에 비하여 11.96 cm/sec의 경우 대상탄의 전수분함량 34.05%에 대하여 입자의 크기가 0.3-1 mm인 경우에는 약 5%, 1.18-2.8 mm의 경우에는 약 10% 정도 건조가 더 일어남을 확인 할 수 있었다. 동일한 온도와 입자크기에서 유속이 빠를수록 건조 공정이 활발하게 일어나는 것은 건조 기체와 대상탄의 접촉이 원활하여 보다 많은 수분이 증발한 것으로 판단되어 진다.

3) 고정층 반응기를 이용한 대상탄의 건조 공정에 있어 대상탄의 충전양은 작을수록 건조 공정은 활발하게 진행되었으며, L/D가 1인 경우에 비하여 0.25인 경우에 전수분함량 34.05%에 대하여 약 10%정도 건조가 원활하게 일어남을 알 수 있었다.

4) 고정층 반응기를 통한 대상탄의 건조 반응속도(Drying kinetics)를 도출하였다.

고정층 반응기를 이용한 대상탄의 건조 공정에 있어 여러 가지 메커니즘 중에 가장 적합한 메커니즘은 상경계 반응(phase boundary reaction)이라 할 수 있다. 이는 석탄 건조 특성에서 표면수분의 경우에는 쉽게 건조가 일어나지만, 고유수분의 경우 석탄의 기공내에 존재하기 때문에 쉽게 건조가 일어나지 않는 특성과 동일함을 의미한다.

사 사

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

사용문자 정의

- E : activation energy (kJ/mol⁻¹)
- A : pre-exponential factor (min⁻¹)
- R : gas constant (8.3136 j mol⁻¹K⁻¹)
- T : absolute temperature (K)
- a : drying conversion degree
- t : drying time (min)
- k : rate constant associated with temperature
- W_i : weight of coal at time i

W₀ : initial coal weight

W_g : weight of completely dried coal

a, b, c : constant

참고문헌

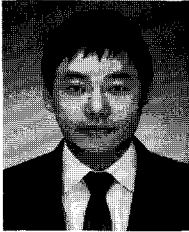
1. 이시훈, 2008: 저등급 석탄의 고품위화 기술 개발, 지식경제부 기획보고서.
2. K. Brendow, 2006: *World and Central European Coal Demand Perspectives to 2030*, Proc. of Int. Conf. Coal and Power Eng., pp13-15, September, 2006.
3. D. F. Umar and U. B. Hiromoto, 2006: *Change of combustion characteristics of Indonesian low rank coal due to upgraded brown coal process*, Fuel Processing Technology, 87, pp1007-1011.
4. White Energy Company, 2008: MITHRA Research.
5. Satoru Sugita, Tetsuya Deguchi and Takuo Shigehisa, 2006: *Demonstration of a UBC process in Indonesia*, 神製鋼技報, 56(2), pp23-26.
6. Anderson, B, 1998: *Development of Integrated drying and gasification of brown coal for Power Generation*, Institute of Chemical Engineers Conference: Gasification - The Gateway to the Future, Dresden, Germany, September.
7. 고완석 등, 2003: 단위조각, pp383-413, 보문당.
8. LI Xianchun, et al., 2009: *Experimental study on drying and moisture re-adsorption kinetics of an Indonesian low rank coal*, Journal of Environmental Sciences Suoolement, S127-S130.
9. Yinghong Chen and Qi Wang, 2007: *Thermal oxidative degradation kinetics of flame-retarded polypropylene with intumescent flame-retardant master batches in situ prepared in twin-screw extruder*, Polymer Degradation and Stability, 92, pp280-291.
10. L. T. Vlaev, V. G. Georgieva, and S. D. Genieva, 2007: *Products and Kinetics of Non-isothermal Decomposition of Vanadium(IV) Oxide Compounds*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 88(3), pp805-812.
11. S.Ch. Turmanova, et al., 2008: *Non-isothermal degradation kinetics of filled with rice husk ash polypropylene composites*, eXPRESS Polymer Letters, 2(2), pp133-146.
12. X. Ramis, et al., 2004: *Thermal degradation of polypropylene/starch-based materials with enhanced biodegradability*, Polymer Degradation and Stability, 86, pp483-491.
13. Sergey Vyazovkin and David Dollimore, 1996: *Linear and Nonlinear Procedures in Isoconversional Computations of the Activation Energy of Nonisothermal Reactions in Solids*, J. Chem. Inf. Comput. Sci., 36, pp42-45.
14. Vyazovkin, S., 2006: *Model-free kinetics: Staying free of multiplying entities without necessity*, J. Therm. Anal.

Calorim., 83(1), pp45-51.

15. Junmeng Cai and Ronghou Liu, 2009: *Kinetics Analysis of Solid-State Reaction: A General Empirical Kinetic Model*, Ind. Eng. Chem. Res., 48, pp3249-3253.
 16. Warren L.McCabe, Julian C.Smith, and Peter Harriott,

2001: *Unit Operation of Chemical Engineering*, McGraw-Hill Korea, 2001, pp. 763-797.

17. A.S. Mujumdar, 2007: *Handbook of Industrial drying*, 3th Edition, CRE Press, pp993-1016.
 18. 화학공학편람 편찬위원회, 1995: *화학공학편람*, pp.654-692, 집문사.



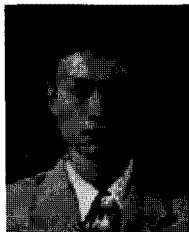
姜泰珍

- 계명대학교 에너지환경공학 학사
- 현재 아주대학교 에너지시스템학부 석사과정



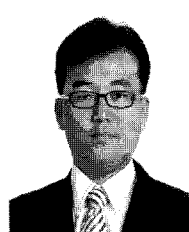
全鍍萬

- 계명대학교 수학과
- 한국해양대학교 에너지자원공학과 심화공학사
- 현재 아주대학교 에너지시스템학부 석사과정



全永辛

- 아주대학교 화학공학 학사
- 아주대학교 에너지시스템학부 석사
- 아주대학교 에너지시스템학부 박사
- 고등기술연구원 연구원
- 현재 아주대학교 에너지기후변화연구소 연구원



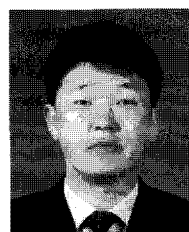
姜錫煥

- 충남대학교 화학공학과 박사
- 현재 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 선임연구원



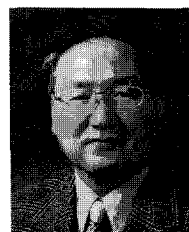
李時薰

- 서강대학교 화학공학 학사
- 서강대학교 반응공학 석사
- 서강대학교 결정공학 박사
- 현재 한국에너지기술연구원 청정화석연료연구센터 센터장



金相道

- 충남대학교 화학공학 학사
- 충남대학교 화학공학 석사
- 충남대학교 화학공학 박사
- 현재 한국에너지기술연구원 청정화석연료연구센터 선임연구원



金炯澤

- 연세대학교 화학공학 학사
- 연세대학교 물리화학 석사
- 펜실베이니아 주립대학교 연료공학 석사
- 펜실베이니아 주립대학교 연료공학 박사
- University of Kentucky 부설 Center for Applied Energy Research
- 한국동력자원연구소 선임연구원
- 현재 아주대학교 에너지시스템학부 교수