

고온, 고압조건에서의 인도네시아 석탄좌의 CO₂ 가스화 반응[§]

리산디케빈요하네스* · 김량균* · 황찬원* · 전충환*[†]

* 부산대학교 기계공학부

Reaction Rate Analysis of CO₂ Gasification for Indonesian Coal Char at High Temperature and Elevated Pressure

Kevin Yohanes Lisandy*, Ryang-Gyoon Kim*, Chan-Won Hwang* and Chung-Hwan Jeon*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received June 13, 2014 ; Revised July 16, 2014 ; Accepted July 16, 2014)

Key Words: Coal Char(석탄좌), CO₂ Gasification(가스화), Kinetics(반응속도론), Reaction Rate(반응률), Pressurized Wire Mesh Heating Reactor(PWMR)

초록: PWMR(Pressurized wire mesh heating reactor)는 Intrinsic CO₂ 가스화 반응속도 해석에 필요한 활성화에너지와 빈도상수를 도출하기 위해서 고안되었으며, 고압 및 고온(50atm, 1750K)조건 하에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 고온조건에서의 실험을 위해 백금(Pt) 메쉬를 가열체로 사용하였고 직류전원공급기를 통해 백금메쉬로 전류를 인가하여 석탄 입자를 가열시킨다. 가열시 정확한 온도제어 및 반응시간 조절을 위해 직류전원공급기는 컴퓨터로 제어된다. 본 연구에서는, 인도네시아 아역청탄인 BERAU 를 사용하였으며 입자크기는 90-150 μm, 압력과 온도조건은 각각 1-40atm 및 1373-1673K 에서 실험을 진행하였다. 고압에서의 압력의 영향을 구분하기 위해 Internal/external effectiveness factor 를 고려하였다. 최종적으로 BERAU 좌의 Intrinsic 가스화 반응속도론 을 n^{th} order 반응식을 통해 도출하였으며 그 값은 203.8kJ/mol 의 값을 가졌다.

Abstract: A pressurized wire mesh heating reactor (PWMR) can provide high pressure and temperature experimental conditions up to 50 atm and 1750 K, respectively. This equipment was developed to evaluate the intrinsic reaction kinetics of CO₂ gasification. A PWMR utilizes a platinum (Pt) wire mesh resistance to generate heat with a direct current (DC) electricity supply. This DC power supply can then be controlled by computer software to reach the exact expected terminal temperature and heating period. In this study, BERAU (sub-bituminous Indonesian coal) was pulverized then converted into char with a particle size of 90-150 μm. This was used in experiments with various pressures (1-40 atm) and temperatures (1373-1673 K) under atmospheric conditions. The internal and external effectiveness factor was analyzed to determine the effects of high pressure. The intrinsic reaction kinetics of BERAU char was obtained using n^{th} order reaction rate equations. The value was determined to be 203.8kJ/mol.

- 기호설명 -

A_{int} : 고유빈도함수 [g/cm².sec]
 C : 상수 [1/sec]
 D : 확산율 [cm²/sec]
 D_{AB} : 이성분 확산율[cm²/sec]

D_{eff,CO_2} : CO₂ 유효 확산계수 [cm²/sec]
 D_{eff,O_2} : O₂ 유효 확산계수 [cm²/sec]
 D_k : 크누센 확산율 [cm²/sec]
 d_p : 입경 [cm]
 d_{pore} : 기공직경 [cm]
 E_{int} : 고유활성화에너지 [kJ/mol]
 k_{app} : Apparent 반응속도론 [1/sec]
 k_{int} : Intrinsic 반응속도론 [g/cm².sec.atm]
 m : 질량 [g]

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 부산지회 춘계학술대회 (2014. 5. 16., 농심호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, chjeon@pusan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

m_{ash}	: 연소후 질량 [g]
m_o	: 반응전 질량 [g]
m_t	: 반응후 질량 [g]
M	: 물질량 [g/mol]
M_{AB}	: 이성분 물질량 [g/mol]
n	: Reaction order
P	: 압력 [atm]
$P_{CO_2,s}$: 표면 CO ₂ 분압 [atm]
$P_{CO_2,\infty}$: 분위기 CO ₂ 분압 [atm]
R_{app}	: Apparent 반응률 [1/sec]
R_{ex}	: 외부확산이 반영된 반응률 [1/sec]
R_{int}	: 내부확산이 반영된 반응률 [1/sec]
R_u	: 가스상수 [kJ/mol.K]
S_g	: 비표면적 [cm ² /g]
T_p	: 입자 온도 [K]
T_{ref}	: 기준 온도 [K]
x	: 탄소변환율 [g/g]

그리스문자

ε	: 기공률
ϕ	: 틸 계수
η_{ex}	: 외부 확산계수
η_{in}	: 내부 확산계수
ν	: 화학량론 계수
σ_{AB}	: 충돌직경 [\AA]
τ	: 비틀림계수
ρ_p	: 겉보기 밀도 [g/cm ³]
Ω_{AB}	: 충돌적분

1. 서론

최근 국내에는 석탄가스화기술을 적용한 두 가지 플랜트 프로젝트가 진행중이며, 2006년부터 개발이 시작된 가스화복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)과 2009년부터 시작된 SNG 플랜트(Synthetic Natural Gas)가 대표적이다. 국내 발전 5개사 중 하나인 한국서부발전은 2015년 가동을 목표로 Shell 가스화기(entrained type) 기반의 300MW 급 가스화기 건설계획을 가지고 현재 공정이 진행되고 있으며, 국내 최대 제철회사인 포스코(Posco)는 연간 500 kilotons 급의 Conoco Philips

가스화기(entrained type) 기반 SNG 플랜트를 건설할 계획이다.^(1,2) 분류층 타입의 가스화기는 일반적으로 10-50atm 와 2273K 이상의 조건에서 운전되며, 전체 이론 반응비(Stoichiometric Ratio, SR)가 약 0.8로서 CO₂ sequestration 기술위해 고려 되어진다.⁽¹⁾

국내에서 건설되는 Shell 가스화기 및 Conoco Philips 가스화기 는 석탄 연료를 기반으로 설계되었다. 석탄은 탈휘발화, 휘발분 연소, 좌연소 및 가스화 반응을 통해 합성가스(syngas)를 생산한다. 특히 석탄화 가스화 반응 중 Boudouard reaction ($C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$)의 반응률이 가장 낮기 때문에 분류층 석탄가스화 반응기의 탄소전환율을 결정한다.⁽³⁾ 비균질 반응(heterogeneous reaction)인 Boudouard reaction 은 온도가 증가함에 따라 반응 속도론 지배에서 확산 의 지배를 영역으로 전환이 된다. 즉, 온도가 증가함에 따라 석탄화의 반응률이 지속적으로 증가하지만 이산화탄소의 확산속도는 충분한 이산화탄소를 석탄화 입자 주변에 공급하지 못하게 됨에 따라 점차적으로 확산의 지배를 받게 되는 것이다. 따라서, 고온에서 운전되어지는 분류층 석탄가스화기는 확산의 영향을 고려한 석탄화 모델을 통한 분석이 필요하다.⁽⁴⁾ 또한 고압에서 운전이 되는 분류층 가스화기에 석탄화 반응률을 적용하기 위해서는 압력의 증가에 따른 반응속도론 및 확산 의 메커니즘 또한 분석이 필요하지만 이에 대한 연구결과를 희박하다. 특히, 인도네시아에서 수입되는 저급탄에 관해 분류층 가스화기 운전 조건인 고온, 고압하에서의 Boudouard reaction 반응률에 관한 실험적 결과값은 제한적으로 얻을 수 있다.⁽³⁾

따라서 국내에 대표적으로 수입되는 인도네시아 BERAU 석탄을 선정하였다. 분류층 가스화기에 적용할 수 있는 Boudouard reaction 의 반응률을 고온, 고압에서 실험할 수 있도록 PWMR(Pressurized wire mesh heating reactor)를 설계 및 제작을 하였다. Intrinsic 반응속도론 는 n^{th} order 반응식을 통해 분석되었으며, 온도 및 압력이 증가함에 변화되는 반응속도론/확산 영향을 정량적으로 평가를 위해 external/internal effectiveness factors 를 고려하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장비

Pressurized Wire Mesh Reactor(PWMR)는 석탄 좌연소 및 가스화 반응률 실험을 위해 Pusan Clean Coal 에서 설계 및 제작되었다. 본 장비는 50atm

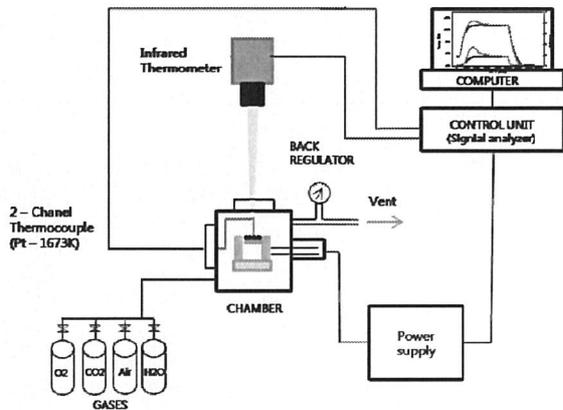


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

이상의 고압 및 평균 1440K/s 의 승온율로 1750K 의 고온조건을 모사할 수 있으며 PWMR 장비의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. PWMR 은 크게 3 부분으로 나눌 수 있는데, 백금메쉬 및 직류전원 공급장치를 이용한 가열체와 적외선 온도 측정장치 및 R-type 열전대를 사용한 온도측정부 그리고 Quartz 창이 위치해 적외선 온도 측정장치를 통해 가열체 평면의 온도분포를 측정할 수 있도록 고안된 스테인리스 강재 반응기로 이루어 진다. 직류전원공급장치 및 온도측정부는 컴퓨터를 통해 제어 및 데이터 수집을 하도록 고안되었다. 직류전원공급장치(ODA technologies, OPE-18100S, 18V-105A)는 백금메쉬 가열면을 1750K 으로 가열시키기 위해 충분한 전류를 공급할 수 있도록 제작되었다. 백금메쉬에 전류 인가시, 메쉬의 전기저항에 따라 표면의 온도가 상승하게 되고 메쉬의 색깔이 밝게 변하게 된다. Compact DAQ model(National Instruments, cDAQ-9171)을 통해 열전대의 온도를 측정하였다. 석탄화 입자온도는 R-type 의 열전대로 측정하였고, 메쉬의 온도는 적외선 온도계(Raytek, MR1S)를 사용하였다. 스테인리스 강으로 제작한(stainless steel) 반응기는 지름 100mm, 높이 70mm 이며, 직경 20mm 의 가시화창으로 설계하였다.

2.2 실험조건

실험조건은 등온조건에서 압력변화 또는 등압조건에서 온도변화에서의 nth order 도출 및 반응성을 알아보기 위해 설정하였다. 구체적인 실험조건은 Table 1 에 나타내었다.

2.3 실험방법

직류전원공급기의 출력제어를 위해 가열체 표면의 온도를 적외선 온도계를 사용하여 측정하였다. 가열시 가열체로부터 전도, 대류, 복사 열손실이

Table 1 Chosen experimental condition

		Temperature(K)			
		1373	1473	1573	1673
Pressure (atm)	1	O	O	O	O
	10	X	X	O	X
	20	X	X	O	X
	30	X	X	O	X
	40	X	X	O	X

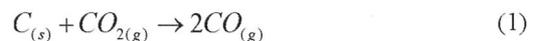
Table 2 Temperature calibration

Pressure (atm)	Gas	1	10	20	30	40
		CO ₂ 20% + N ₂ 80% (mass%)				
Temp. (Kelvin)	1373	1.9V	2.3V	2.6V	2.8V	3.0V
	1473	2.3V	2.6V	2.9V	3.1V	3.3V
	1573	2.6V	3.0V	3.2V	3.4V	3.6V
	1673	3.0V	3.4V	3.6V	3.8V	4.0V

발생하며 이는 메쉬의 특성에 따라 다르게 나타나게 된다. 따라서 각각의 압력하에서 기준온도를 얻기 위한 전류와 전압의 공급량을 예비실험을 통해 도출하였고 그 값을 Table 2 에 나타내었다.

석탄입자의 경우, 탈휘발 과정을 거치며 입자크기의 변화가 일어나게 된다. 따라서, 실험에 필요한 입도를 얻기 위해 먼저, 150-200 μm 로 미분시킨 BERAU 탄을 1073K, inert 상태에서 탈휘발 과정을 통해 화를 생성하였고, 최종적으로 90-150 μm 화를 한번 더 걸러내었다.

화 샘플은 입자의 균집이 확산에 미치는 영향을 없애기 위해 백금메쉬 가열체 위에 monolayer 로 배열하였다. 반응기 내부의 가스상태는 check valve 가 장착된 고압 regulator 를 이용하여 공급하며 반응기 내부에 장착된 압력지시계를 통해 내부 압력을 측정하였다. 반응가스 주입전 반응기 내부의 잔여공기를 배출하기 위해 10 초간 de-gas 과정을 거쳐서 잔여공기로 인해 발생할 수 있는 오류를 줄였다. 백금메쉬로 전원이 공급되면 CO₂ 분위기에서 화가 반응을 시작하며 화 내부의 고정탄소는 아래와 같이 반응하게 된다.^(5,6)



부분적으로 반응된 화 입자의 질량을 회질량분석 방법으로 탄소전환률(x)이 아래와 같이 도출되었다.

$$x = \frac{m_o - m_t}{m_o - m_{ash}} \tag{2}$$

Table 3 Raw coal characteristic and coal char characteristic

Coal name	BERAU	
Proximate Analysis (weight %, raw coal)	Moisture	15.0
	Volatile Matter	39.0
	Fixed Carbon	40.3
	Ash	5.7
Ultimate Analysis (weight %, raw coal)	C	74.62
	H	5.22
	N	1.19
	S	1.64
	O	17.33
HHV (Cal/g)	6400	
BET ($d_p=90-150$ μm , char)	S_g (cm^2/g)	657691
	d_{pore} (m)	3.35×10^{-7}

여기서, m_0 는 초기 좌 질량이며, m_t 는 반응후 좌 질량, m_{ash} 는 회분의 질량이다. 반응 후 좌질량을 측정하여 m_t 를 구하여 반응 전·후의 질량을 측정하고 반응 후 좌를 전기로에서 연소시켜 회분량을 측정하였다.

Apparent reaction rate(R_{app})는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{\text{app}} = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

Apparent reaction rate은 PWMR을 사용하여 각각의 조건에서 4 번씩 반복실험을 통해 도출하였다.

2.4 석탄 물성치

일반적인 석탄 물성치 분석에는 공업분석, 원소 분석, 비표면적분석이 있으며, 각각 열중량 분석기 (TGA)와 원소분석기, BET를 사용하였고 결과를 Table 3에 나타내었다.

3. 석탄좌 반응률 이론

석탄 좌의 CO_2 가스화 반응시 Intrinsic reaction rate, $R_{\text{int}}(\text{g}/\text{cm}^2\text{s})$ 을 도출하기 위해 n^{th} order rate 반응식을 적용하였다. n^{th} order rate을 Arrhenius form 표현한 전체 반응식은 다음과 같다.

$$R_{\text{int}} = A_{\text{int}} \exp(-E_{\text{int}} / R_u T_p) P_{\text{CO}_2, \infty}^n \quad (4)$$

여기서 A_{int} 은 intrinsic pre-exponential factor(고유 빈도함수), E_{int} 은 intrinsic activation energy(고유활성 에너지값), R_u 는 가스상수, T_p 는 입자온도, $P_{\text{CO}_2, \infty}$ 는 분위기 기체내부의 CO_2 분압을 나타내며, n 은 reaction order이다. n^{th} order 반응식은 reaction order와 2개의 반응속도론 값(E_{int} , A_{int})으로 구성되어 수학적으로 매우 간편하다는 장점이 있다.

기공에서의 확산에 지배되는 좌- CO_2 가스화 반응은 internal/external effectiveness factor를 사용함으로써 분석이 가능하다. 따라서 apparent reaction rate은 다음과 같이 계산되어진다.⁽⁷⁾

$$R_{\text{app}} = \eta_{\text{in}} \eta_{\text{ex}} S_g R_{\text{int}} \quad (5)$$

입자의 온도와 크기에 의해 정의되는 internal effectiveness factor⁽⁸⁾는 기공에서의 확산을 방해하는 요소가 없다는 가정하에 단위 내부비표면적값에 대한 실제 반응률과 이론적반응률의 비로 결정될 수 있다. 본 인자는 Thiele modulus(Φ)를 사용함으로써 다음과 같이 나타낸다.

$$\eta_{\text{in}} = \frac{1}{\phi} \left(\frac{1}{\tanh(3\phi)} - \frac{1}{3\phi} \right) \quad (6)$$

$$\phi = \frac{d_p}{2} \sqrt{\frac{(n+1)\nu S_g \rho_p k_{\text{int}} R_u T_p P_{\text{CO}_2, s}^{n-1}}{2D_{\text{eff}, \text{CO}_2}}} \quad (7)$$

여기서 d_p 는 좌 입자 직경, ν 는 화학량론 계수 (Stoichiometric coefficient)이며, 단위 질량의 탄소가 반응하는데 소비되는 이산화탄소의 몰수를 나타낸다(0.0833 moles). ρ_p 는 겉보기 밀도이며 $D_{\text{eff}, \text{CO}_2}$ 는 이산화탄소의 유효확산계수(effectiveness diffusivity coefficient)로서 석탄좌 입자로의 확산에 관여하며 다음과 같이 나타낸다.⁽⁹⁾

$$D_{\text{eff}, \text{CO}_2} = \frac{\varepsilon}{\tau} D \quad (8)$$

여기서 ε 는 기공도, D 는 확산율, τ 는 비틀림계수이다.

$$D = \frac{1}{\frac{1}{D_{AB}} + \frac{1}{D_k}} \quad (9)$$

여기서 D_k 크누센 확산율로서 기공 내부에서의 확산정도를 나타내고 D_{AB} 이성분 확산율을 나타낸다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

$$D_k = 4580 d_{\text{pore}} \sqrt{\frac{T_p}{M_A}} \quad (10)$$

$$D_{AB} = \frac{0.02628 T^{3/2}}{M_{AB}^{1/2} \sigma_{AB}^2 \Omega_{AB} P} \quad (11)$$

여기서, M_A 는 물질량, d_{pore} 는 기공의 직경, M_{AB} 각각 성분의 물질량의 합이고, σ_{AB} 는 두 분자의 충돌직경, Ω_{AB} 는 충돌적분값이고 P 는 전체압력을 의미한다.

경계층 내로의 가스 이동을 고려하기 위해 external effectiveness factor(η_{ex})는 입자주위의 분위기 조건에서 분압과 입자표면에서의 분압의 비로 설명할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{ex} = \frac{P_{CO_2,s}}{P_{CO_2,\infty}} \quad (12)$$

따라서 최종적으로 얻은 반응률을 사용하여 반응속도론 값을 도출하기 위해 linear regression 방법을 사용하였고 아래와 같이 정리하였다.

$$R_{app} = \eta_{in} \eta_{ex}^n S_g A_{int} \exp(-E_{int} / R_u T_p) P_{CO_2,\infty}^n \quad (13)$$

$$\ln\left(\frac{R_{app}}{\eta_{in} \eta_{ex}^n P_{CO_2,\infty}^n}\right) = \ln A_{int} S_g - \frac{E_{int}}{RT} \quad (14)$$

n^{th} order 는 아래 식에 대하여 선형회귀법을 통해 도출할 수 있다.⁽¹³⁾

$$\ln(R_{app}) = n \left[\ln(\eta_{ex} P_{CO_2,\infty}) \right] + C \quad (15)$$

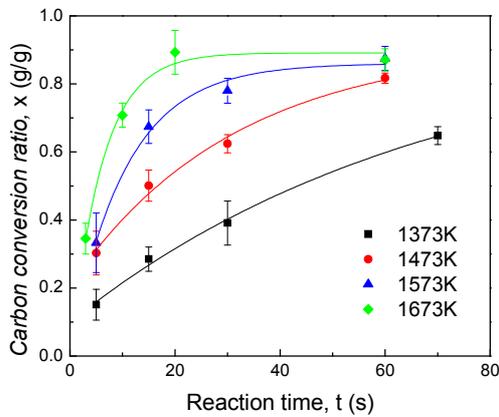


Fig. 2 Raw experimental data of variable temperature at 1atm pressure condition

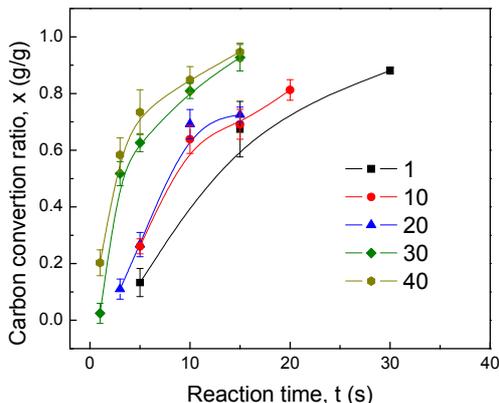


Fig. 3 Raw experimental data of elevating pressure condition at 1573 K

4. 실험결과

Fig. 2,3 은 BERAU 탄의 PWMR 초기실험 결과로서, Fig. 2 에는 1atm 하에서 1373-1673K 으로 승온하며 도출한 반응시간에 대한 탄소전환율을 나타내고있다. 동일한 반응시간에서 온도가 증가할수록 탄소전환율이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 특히, 온도가 증가할수록 탄소전환율의 증가폭이 감소되는 결과를 보여주고있다. Fig. 3 에서는 1573K 에서 1-40atm 로 승압하며 도출한 결과 값이다. 동일한 반응시간에서 압력이 증가할수록 탄소전환율이 높아지는 결과를 보여주고 있다. 이는 온도 및 압력이 증가함에 따라 반응률이 증가한다는 것을 의미한다.

Fig. 4 는 식 (14)를 기반으로 반응속도론 을 도출하기 위한 선형회귀분석을 적용한 결과이다. 온도 증가에 따른 확산의 영향을 없애기 위해 internal/external effectiveness factor 를 고려한 k_{int} 와 확산의 영향을 받는 k_{app} 의 결과를 보여주고 있다. 저온영역에서는 k_{app} 과 k_{int} 의 값의 차이가 거의 없지만 고온으로 갈수록 k_{int} 과 k_{app} 의 값의 차이가

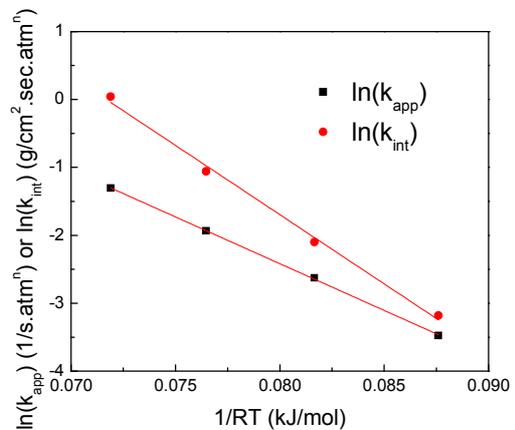


Fig. 4 Analyzed activation energy using linear fitting method

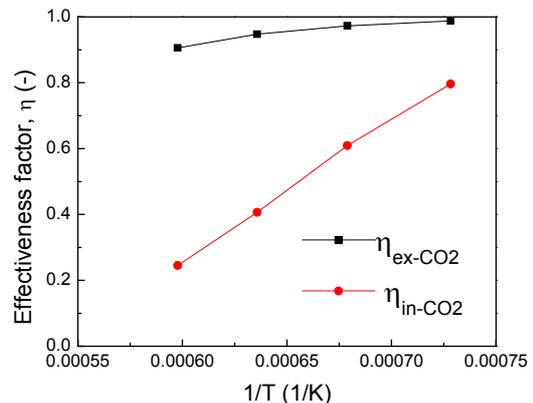


Fig. 5 Analyzed effectiveness factor with variable temperature

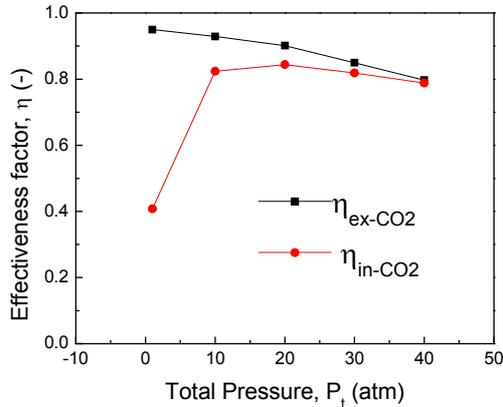


Fig. 6 Analyzed effectiveness factor with increasing pressure

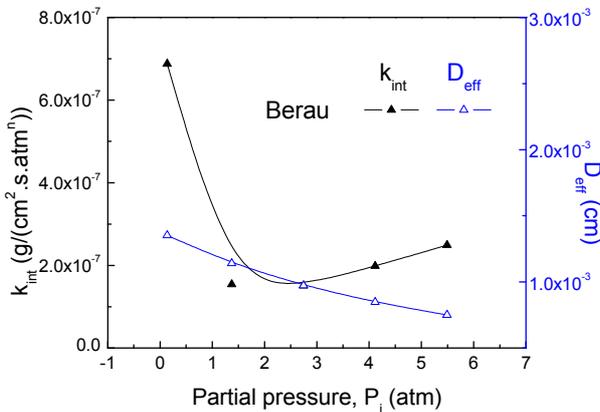


Fig. 7 k_{int} and D_{eff} value with increasing partial pressure as well as total pressure

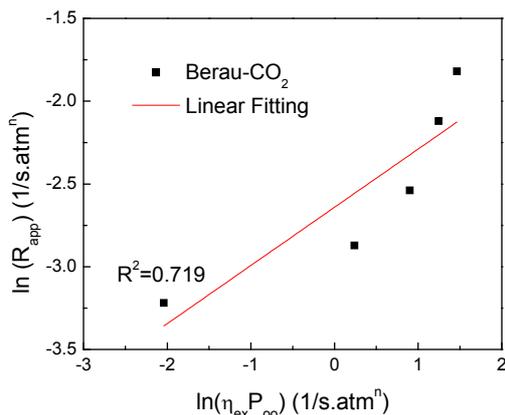


Fig. 8 Linear regression method for getting n^{th} order

커지는 결과를 보여주고 있다. 즉, 온도가 높아짐에 따라 확산의 영향이 커지는 것을 의미하며, Fig. 5의 internal/external effectiveness factor가 이를 증명하고 있다. 최종적으로 반응속도론 인자인 활성화에너지와 빈도인자는 확산의 영향을 없앤 k_{int} 가 확산의 영향을 받는 k_{app} 보다 더 큰 결과를 보여

Table 4 Kinetics results

BERAU Char	Apparent	Intrinsic
E (kJ/mol)	137.703	203.885
A (g/cm ² ·s)	5.4 x 10 ⁻³	2230 x 10 ⁻³
R ²	0.999	0.993

Table 5 Previous Investigations⁽¹⁾

Coal Char	E_{int} (kJ/mol)	Reaction order, n (-)
Berau	152.0	0.5
SB	148.6	-
Taiheiyu	165	-
Yallourn	170	-

주고 있다(Table 4).

Fig. 7의 결과와 같이 압력이 증가함에 따라 k_{int} (intrinsic 반응속도론)가 감소했다가 증가하는 경향을 보이고 있다. D_{eff} 는 압력이 증가함에 따라 감소를 하는 경향을 보이고 있다. 이는 식 (11)의 D_{AB} (이성분 확산율)이 압력에 대해 반비례이기 때문이다. 물리적으로 압력이 증가함에 따라 이산화탄소의 확산은 감소되는 것을 의미한다. Fig. 6에서 압력이 증가함에 따라 internal effectiveness factor가 증가했다가 감소하는 이유는 k_{int} 가 압력이 증가함에 따라 감소했다가 증가했기 때문이다. 즉, 20atm에서 k_{int} 가 작아짐에 따라(반응물이 작음) 상대적으로 이산화탄소의 확산속도가 높아져서 반응할 수 있는 충분한 이산화탄소가 석탄화에 공급됨에 따라 확산의 지배가 약해진 것이다. 최종적으로 선형회귀 분석법을 통해 n^{th} order를 도출하였다(Fig. 8).

선형회귀법을 통해 도출한 n^{th} order를 Fig. 8에 나타내었다. 본 선형회귀적 분석결과에 따르면, n^{th} order 값은 0.351로 도출되었다. 낮은 n^{th} order는 반응에 있어서 압력이 intrinsic reaction rate에 미치는 영향이 작다는 의미이다.

Table 5는 선행연구 결과를 나타낸 것으로, 고유 활성화에너지의 범위는 148.6 kJ/mol ~ 170 kJ/mol이다. BERAU 탄의 고유활성화에너지는 150 kJ/mol이다. 이런 차이는 n^{th} order 추정에 기인한다. 이 연구에서 n^{th} order를 압력이 증가함에 따라 선형회귀법으로 분석했다.

5. 결론

본 논문을 통해 인도네시아 BERAU 석탄화의 CO₂ 가스화 반응속도론 및 n^{th} order를 PWMR를

제작하여 고온, 고압조건에서 도출하였으며, 확산에 대한 영향을 분석하였다.

(1) BERAU 석탄화의 intrinsic 활성화 에너지 및 빈도인자는 203 kJ/mol, $223 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2\text{s}$ 이고, apparent 활성화 에너지 및 빈도인자는 137.7 kJ/mol, $5.4 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2\text{s}$ 이다.

(2) 온도가 증가할수록 확산지배에 영향을 받으며, 외부보다 내부가 확산지배의 영향이 더 크다.

(3) 압력이 증가할수록 확산지배의 영향을 받는다. 외부확산지배 영향은 40atm 까지 지속적으로 증가하지만, 내부확산지배의 영향의 경우 1~20atm 까지 감소하지만 20~40atm 는 다시 증가한다.

참고문헌

(References)

- (1) Kim, R.G., Hwang, C.W. and Jeon, C.H., 2014, "Kinetics of Coal Char Gasification CO₂ : Impact of Internal/External Diffusion at High Temperature and Elevated Pressure," *Applied Energy*, Vol. 129, pp. 299~307.
- (2) Smoot, L.D. and Pratt, D.T., 1994, "Pulverized Coal Combustion and Gasification," New York: *Plenum Press*.
- (3) Kajitani, S., Suzuki, N., Ashizawa, M. and Hara, S., 2006, "CO₂ Gasification Rate Analysis of Coal Char in Entrained Flow Coal Gasifier," *Fuel*, Vol.85, pp. 163~172.
- (4) Tobias, M. and Reinhard, M., 2012, "Economic Evaluation of IGCC Plants with Hot Gas Cleaning," *Applied Energy*, Vol. 97, pp. 170~254.
- (5) Liu, G.S. and Niksa, S., 2004, "Coal Conversion Submodels for Design Applications at Elevated Pressure," Part II. Char Gasification. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 30, pp. 679~717.
- (6) Walker, P.L., Rusinko, J.F. and Austin, L.G., 1959, "Gas Reactions of Carbon," *Adv Catal* Vol.11, pp. 133~221.
- (7) Kim, R.G. and Jeon, C.H., 2014, "Intrinsic Reaction Kinetics of Coal Char Combustion by Direct Measurement of Ignition Temperature," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, No. 2, pp. 565~576.
- (8) Liu, G., Wu, H., Gupta, R.P., Lucas, J.A., Tate, A.G. and Wall, T.F., 2000, "Mathematical Modeling of Coal Char Reactivity with CO₂ at High Pressures and Temperatures," *Fuel* Vol. 79, pp. 627~633.
- (9) Kajitani, S., Hara, S. and Matsuda, H., 2002, "Gasification Rate Analysis of Coal Char with a Pressurized Drop Tube Furnace," *Fuel* Vol.81, pp. 539~546.
- (10) Kim, R.G., Lee, B.H. Jeon, C.H. Chang, Y.J. and Song, J.H., 2009, "A Theoretical Analysis on Volatile Matter Release from Different Coals Using CPD Model During a Coal Gasification," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 12, pp. 1000~1006.
- (11) Hwang, C.W., Kim, R.G., Ryu, K.I., Wu, Z..L. and Jeon, C.H., 2014, "Reaction Rate Analysis of Combustion for Indonesian Coal Char Applied by External/Internal Diffusion," *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 52, No. 1, pp. 133~140.
- (12) Alexander, T., Thomas, H., Christian, K. and Hartmut, S. 2012, "Experimental Investigation of High Temperature and High Pressure Coal Gasification," *Appl Energy* Vol. 92, pp. 279~285.
- (13) Wall T.F., Liu G.S., Wu H.W., Roberts D.G., Benfell K.E., Gupta S., Lucas J.A. and Harris J.D., 2002, "The Effects of Pressure on Coal Reactions During Pulverised Coal Combustion and Gasification," *Prog Energy Combust* Vol. 28, pp. 405~433.