

슬러리내 석탄입자의 광산란 특성 평가

황문경¹ · 남현수¹ · 김규보² · 송주현³

¹부산대학교 기계공학부 대학원, ²부산대학교 화력발전에너지 분석기술센터, ³부산대학교 기계공학부

Evaluation on Light Scattering Behavior of a Pulverized Coal Suspension

MUNKYEONG HWANG¹, HYUNSOO NAM¹, KYUBO KIM², JUHUN SONG³

¹Graduate School of Mechanical Engineering Pusan Nat'l Univ. ²Pusan Clean Coal Center.

³School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ, 30, Jangjun-dong, Kumjeong-ku, Busan 609-735, Korea

Abstract >> In a direct coal fuel cell (DCFC) system, it is essential to identify volume fraction of coal suspended in electrolyte melt in order to control its dispersion and fluidity. This requirement is compelling especially at anode channel where hot slurry is likely to flow at low velocity. In this study, light scattering techniques were employed to measure the volume fraction for a pulverized coal suspension with relatively high absorption coefficient. The particle size, scattering angle, and volume fraction were varied to evaluate their effects on the scattering behavior as well as scattering regime. The larger coal size and smaller forward scattering angle could provide a shift to more favorable scattering regime, i.e., independent scattering, where interferences of light scattering from one particle with others are suppressed.

Key words : DCFC(석탄 연료전지), Coal suspension(석탄 분산도), Fluidity(유동성), Volume fraction(체적 분율), Light scattering(광산란), Scattering regime(산란 영역)

Nomenclature

B : boundary reflection factor for sample tube
d : particle size, μm
g : asymmetry factor
h : detector slit height, mm
I : light scattering intensity
Q : light scattering intensity
R : scattering intensity at 45° backward
T : transmissivity

λ^* : photon mean free path, nm
 Λ : laser wavelength, nm
 ϕ : particle volume fraction
 f_v : particle volume fraction
 ζ : particle size parameter
 θ : angle from incident light

Subscripts

e : extinction
a : absorption
s : scattering
c : critical

[†] Corresponding author : jxs704@pusan.ac.kr

[접수일 : 2013.9.23 수정일 : 2013.10.24 게재확정일 : 2013.10.31]

Copyright © 2013 KHNES

o : incident condition
v : volume



1. 서 론

현재 대부분의 연료전지는 천연가스 및 수소를 연료로 사용하여 전기를 생산하고 있으나 이들 연료 또한 매장량의 한계가 있으며 제조에 많은 비용이 든다는 단점을 가지고 있어 연료의 다변화를 위한 노력이 필요하다. 현재까지 다른 에너지원과 비교해 볼 때, 가장 값싸고, 국내외에서 매장량이 풍부한 에너지 자원은 석탄으로 알려져 있다. 이를 직접 연료전지의 주 연료원으로 사용할 경우 석탄자원의 청정 사용 및 고효율 발전을 모두 만족시킬 수 있다는 점에서 잠재성과 개발할 가치가 아주 크다고 할 수 있다. 국내 석탄 화력발전소의 경우 발전효율이 35~40% 정도인 것에 비해, 석탄 연료전지(DCFC) 기술을 이용한 발전은 이론 발전효율 80%, 실제 발전효율 60%로 기존의 석탄 화력발전소에 비해 1.5배 이상 높은 것으로 알려져 있다^{1,2)}. 이를 통해 기존 석탄 화력 발전에 비해 탄소소비량을 50%이상 저감할 수 있을 것이다. 또한 배출 가스는 1/10수준으로 CO₂만을 배출하게 되므로 기존의 CCS (CO₂ Capture & Storage) 기술과 결합이 용이하다는 점에서 적극적인 기후변화 대응기술이라 볼 수 있다.

DCFC (Direct Coal Fuel Cell)내의 양극에 공급된 산소나 이산화탄소가 음이온(O²⁻ 또는 CO₃²⁻)의 형태로 고체 전해질 또는 액상 전해질을 통하여 음극으로 이동한 후 전극과 접촉한 석탄표면에서 전기화학 반응을 거치게 된다. 이 반응은 탄소입자가 기공채널을 가지는 음극에서 직접 산화반응을 일으키고 이때 생성된 전자들은 양극에서 공기 중 산소나 이산화탄소의 환원반응에 의해 소모되는 전지반응으로 구성된다. 상기 단위반응을 다음과 같은 총괄 반응식(1)으로 나타낼 수 있다.

이중 600°C이상의 고온조건에서 작동하는DCFC 시스템이 탄산염이나 수산화물 등의 액상전해질을 사용하는 경우, 연속운전을 위해서는 기공채널을 가지는 전지음극까지 미분탄-전해질 슬러리의 정량공급이 필수적이다¹⁾. 이를 위해서는 음극 기공채널에 도달하기 전이나 채널내부에서 액상 전해질과 석탄 슬러리의 유동성과 열안정성을 확보해야 하며 특히 고온 전해질 내 미분탄 입자의 불균일한 분포를 방지해야 할 것이다. Fig. 1에 보듯이 석탄연료의 안정적인 공급 및 분산도 유지는 전해질 이온전도도 향상으로 이어져 DCFC의 전기 화학성능 및 발전효율을 높이고 그로 인한 운용비용을 절감 할 수 있을 것이다^{2,3)}.

또한 DCFC 운전조건중의 하나인 석탄 혼합도 및 석탄 물성변화에 따른 슬러리 유동시 분산도의 변화와 분산도 유지에 필요한 최소 유동화속도도 중요한 운전변수로 고려될 수 있을 것이다. 보통의 기상조건에서의 석탄입자 최소 유동화 속도는 압력 차이를 통해 구하는 반면, 액상 슬러리내의 석탄입자 최소 유동화속도는 유동속도에 따른 석탄입자의 체적분율 변화를 통해 구할 수 있을 것이다⁴⁾. 이 같은 석탄입자의 체적분율(volume fraction) 정보는 슬러리 유효점성과 유동성에 영향을 주는 중요한 인자로 알려져 있다^{5,6)}.

또한 동일한 체적분율 정보가 미분탄-물슬러리 또

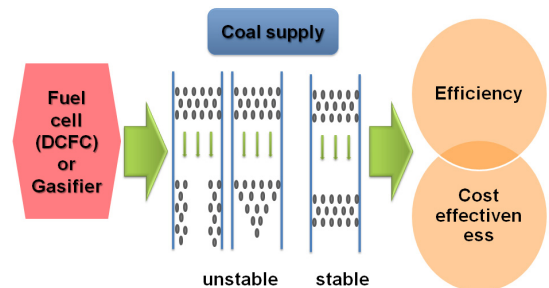


Fig. 1 Stable dispersion behavior of coal in hot electrolyte mixture used in an anode of DCFC system

는 미분탄-액상 이산화탄소 슬러리를 연료로 사용하는 습식 석탄 가스화기내 연료공급 시스템을 운전하고 해석하고자 할 때 필요할 것으로 예상된다⁷⁻⁹⁾. 따라서 각종 미분탄 슬러리의 분산도 및 유동성 확보를 위해서는 체적 분율의 정확한 측정이 선행되어야 한다. 따라서 침강지수¹⁰⁻¹¹⁾, electric zeta potential¹²⁻¹³⁾, 초음파측정¹⁴⁾ 등 여러 방법들 중에서 비접촉 방식이며 고온 유동환경에 적합한 레이저 흡수 및 산란 기법의 적용가능성을 확인해 볼 필요가 있다¹⁵⁻¹⁸⁾.

본 연구에서는 레이저 흡수 및 산란기법을 동시에 적용하여 비흡수성 입자인 라텍스를 가지고 산란결과와 이론치를 비교하여 실험장비의 신뢰성을 먼저 확인하고자 하였다. 그리고 석탄과 같은 흡수성 입자의 경우 투과와 산란결과를 분석함으로써 슬러리내 석탄입자의 분산도 측정을 위한 광 산란기법의 적용가능성 및 한계를 확인하고자 하였다. 특히, 산란각도, 입자크기, 슬러리내의 석탄입자 체적 분율이 광산란 특성 그리고 산란영역에 미치는 영향을 구체적으로 분석할 수 있었다.

2. 광산란이론 및 실험방법

2.1 광산란이론

Lorenz-Mie (LM) 이론으로부터 비흡수 광학특성을 가지는 라텍스입자의 경우 다음의 이론관계식 (2)을 유도할 수 있다¹⁹⁻²⁰⁾. 이를 사용하여 45도 후방 산란(back scattering)일때의 산란강도(R)을 이론적으로 예측할 수 있고 이를 다음에 나오는 실험치와 비교할 수 있었다¹⁵⁾.

$$R \approx \frac{1-B}{3} \cdot \left(\frac{h}{\lambda^*} \right)^{1/2} = \frac{1-B}{3} \cdot \left(\frac{3\Phi h(1-g)Q_s}{2d} \right)^{1/2} \quad (2)$$

이때, B는 경계 반사상수로서 원통형 튜브 구조에서 0.2로 가정할 수 있다. 그리고 h는 감지기(detector) 슬릿높이(0.5mm)를 사용하였고, g는 산란각도의 영향을 나타내는 산란위상 함수(phase function)와 비슷한 개념인 비대칭인자로서 0.5로 가정하였다. 그런데 이때 산란 광계수(Qs)가 필요한데, 이는 체적분율 변화에 따른 투과강도 곡선으로부터 임계 체적분율을 알면 실험적으로 구할 수 있다²¹⁻²²⁾. 물론 라텍스와 같은 비흡수 물질인 경우 흡수의 영향이 거의 없으므로 빛의 감소는 산란에 의해서만 영향을 받게 되어 투과계수와 산란계수가 같다는 가정을 이용할 수 있다.

2.2 실험조건 및 방법

본 실험에서는 흡수성인 석탄의 체적 분율에 따른 광학 특성을 비흡수성인 라텍스 슬러리와 비교·평가하기 위해 레이저 투과 및 산란 광학기법을 적용하였다. 샘플준비는 라텍스의 경우 미리 일정 체적 분율의 슬러리를 만든 후 실린더 형태의 유리관에서 일정비율로 물과 혼합하여 체적 분율을 변화 시켰다. 이에 비해 석탄의 경우 미리 슬러리를 만들 경우 밀도차와 입자가 커서 분리나 침강으로 인해 100% 주입이 되지 않는 경우가 발생하였다. 따라서 원하는 체적 분율을 만들기 위해 유리관에서 직접 질량기준으로 물에 석탄 입자 자체를 바로 주입하는 방식을 채택하였다. 본 실험에는 10mm직경, 200mm길이를 가지는 일반 유리관을 사용하였다. 석탄 주입 후부터 광산란 실험을 시작하기 전까지 고르게 분포하도록 섞기 위해 초음파 수조(sonication bath)를 이용하여 유리관 아랫부분에서 강제적으로 혼합(mixing)을 유발하는 동시에 윗부분은 스포이드를 이용하여 유동을 줌으로써 고르게 mixing을 유발하였다. 샘플 준비와 혼합이 끝나면 실험을 진행하게 되는데 먼저 비흡수성 인자인 라텍스 슬러리의 경우 체적분율에 따라 감쇄(extinction)와 산란(scattering) 신호가 어떻게

Table 1 Experimental conditions of latex slurry

fv[%]	0-1
Latex size[μ m]	11
Mesh size	1200
Photo Detector Angle[$^{\circ}$]	45o (backward)

Table 2 Experimental conditions of coal slurry

fv[%]	0.01	0.05	0.1	1
Coal size[μ m]	45-75	75-90	90-150	
Mesh size	200	170	100	
Photo Detector Angle[$^{\circ}$]	0-90o (forward)			

변하는지 측정해 보았다. Table 1은 라텍스 슬러리의 실험조건을 나타내고 있으며, 수용액 안에 평균 11 μ m의 라텍스입자를 최대 1%까지 혼합시켰음을 볼 수 있다.

Table 2는 석탄 슬러리의 실험조건을 나타낸 표이다. 초기 체적분율이 고정된 상태에서 3가지 석탄입자 크기와 90도까지 변하는 산란각에서 산란강도를 측정하였음을 알 수 있다. 물론 체적분율도 4가지 경우로 변화시켜 가면서 상기 인자들의 변화를 살펴보았다.

본 실험에는 최대 5W출력을 발산하는 532nm 가시광 영역의 연속 레이저(continuous laser), PD(photo detector), 디지털 오실로스코프, 기타 부수 광학장비가 사용되었다. 레이저는 PD의 손상을 방지하기 위해 먼저 90/10 광분리기(bean splitter)를 통해 전체 레이저의 세기에서 10%를 통과시킨 후 다시 50/50 beam splitter을 이용하여 레이저의 50%는 입사광 강도를 재는 reference PD로 보내고 나머지 50%는 샘플이 차여져 있는 유리관을 통과하여 산란광 및 투과광 PD로 들어가게 하였다. 입사되는 레이저광의 두께는 2.5mm정도이며, 각 PD앞에는 0.8mm직경을 가지는 광학구멍(aperture)을 설치하여 특정 각도(solid angle)내에서 산란되는 광만을 받을 수 있도록 하였다.

각 PD로 들어간 산란광과 투과광의 강도는 디지털 오실로스코프의 전압값을 이용하여 측정한다. 그

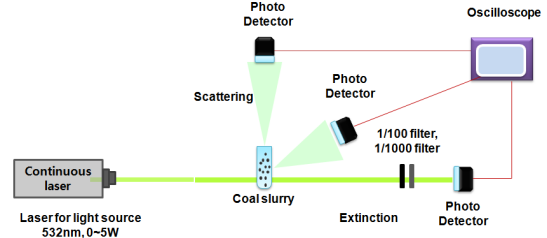


Fig. 2 Schematic of laser diagnostic system for a coal slurry using light extinction and scattering characteristics

리고 산란광PD의 각도를 변경할 수 있도록 회전형 테이블을 설치하여 산란각도의 영향을 살펴 볼 수 있도록 하였다. 석탄슬러리 실험에 사용한 실험장비 구성은 Fig. 2에 잘 나타나 있다. 마지막으로 산란 각도뿐만 아니라 석탄 슬러리 내 석탄입자의 크기를 변화시키면서 실험을 진행하여 체적분율 증가에 따른 dependent scattering영역으로의 천이를 지원시킬 수 있는지 여부를 확인하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 라텍스 슬러리의 광산란 특성

석탄 슬러리 체적분율 측정에 관한 산란기법 적용의 타당성 확인을 위해 먼저 슬러리 내 라텍스 입자의 체적 분율을 변화시키며 광학 특성을 측정하였다. 앞서 언급했듯이 11 μ m의 평균 입자크기를 가지는 라텍스는 비흡수성의 절연(dielectric) 물질로 볼 수 있으며, Fig. 3에서는 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 라텍스 입자의 체적분율이 증가함에 따라 extinction 강도는 지수적으로 감소하고 scattering 강도는 대략 0.5-0.6승에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 그리고 측정한 산란강도가 2장에서 설명한 수식 (2)를 이용하여 예측한 이론값과 비교해 볼 때 대체적으로 비슷한 증가경향이 나타남을 볼 수 있다. 따라서 이 측정 장비 및 시스템이 신뢰성이 있다고 판단할 수 있다.

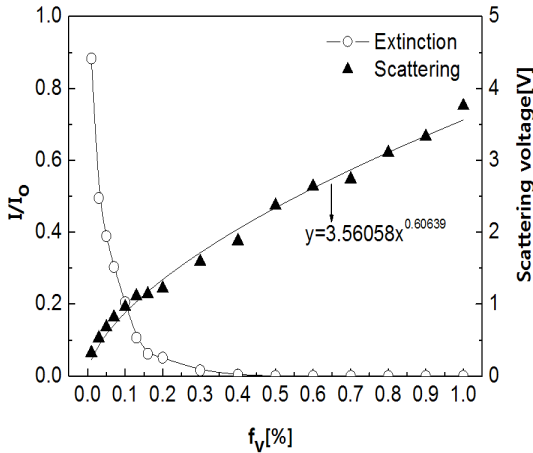


Fig. 3 Measured extinction intensity and scattering voltage for latex slurry with average diameter of 11µm

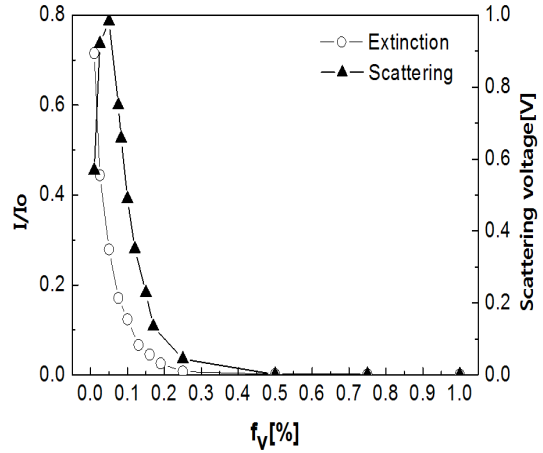


Fig. 5 Measured extinction intensity and scattering voltage at 7° forward condition for coal slurry with average diameter of 75 µm

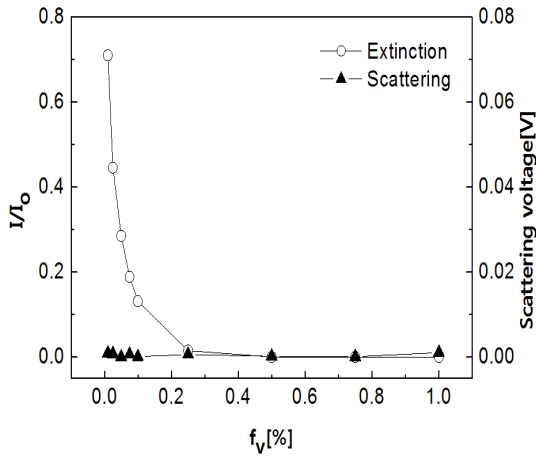


Fig. 4 Measured extinction intensity and scattering voltage at 45° backward condition for coal slurry with average diameter of 75µm

3.2 석탄 슬러리의 광산란 특성

평균 75µm의 입자크기를 가지는 흡수성이며 전도성 입자인 석탄을 물과 함께 혼합하여 저온슬러리로 만들어 체적 분율을 변화시켜 가면서 광산란 특성을 측정하였다. 이때 석탄은 수분과 휘발분이 비교적 많은 아역청탄 계열의 Adaro탄을 사용하였다. Fig. 4는 라텍스 슬러리와 같은 45도 후방산란(back scattering) 위치에서 측정한 결과를 보여주고 있다. 비흡수성 입

자와 마찬가지로 extinction 신호는 지수적으로 감소하는 경향이 나타났지만 이 각도에서 산란신호는 체적분율에 따라 거의 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 이같은 신호감소의 원인은 주위 잡광의 영향, 샘플준비과정 동안의 체적분율 변화, 각도의 영향, 마지막으로 의존산란(dependent scattering)영역으로의 전환 등을 들 수 있다. 이같은 각각의 영향을 다음의 별도 실험을 통해 확인해 보고자 하였다.

3.2.1 산란각

앞서 기술했듯이 45° backward scattering 시스템을 적용시켰을 때 extinction 신호는 비슷한 결과를 얻었으나, 산란강도의 변화를 알 수 없었다. 이는 여러 인자 중에서 석탄의 표면 광학특성, 즉 흡수계수와 산란 위상함수가 라텍스와 다르기 때문일 것으로 판단하였다. 그래서 산란 신호를 받는 각도를 달리하여 받아보았다. 예상한 바와 같이 석탄은 backward scattering 신호가 주를 이루는 라텍스와는 다르게 전방산란(forward scattering)이 주를 이루고 그 중에서도 전방 산란각도가 작을수록 산란 신호 강도가 커짐을 알 수 있었다. 결국 석탄의 경우 산란강도가 등방성이 아니라 비등방성(anisotropic effect)을 가지는

것을 보여주고 있다^{21,23}). 따라서 가장 강도가 세계 나온 전방7도에서 다시 실험하였고 Fig. 5는 그 결과를 보여주고 있다. 석탄의 체적 분율을 증가시키면서 extinction과 scattering 신호를 측정된 결과 extinction은 지속적으로 감소하는 동일한 결과를 얻었고, scattering 신호는 증가하다가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 라텍스의 결과와는 달리 초반에 증가하다가 어느 임계 체적 분율 이상에서 급감하고 최종적으로는 신호가 나타나지 않았다. 따라서 임계 체적분율 이상의 dependent 산란영역에서는 산란강도가 약해지고 따라서 분산도 측정에 사용하기는 어려울 것으로 판단된다.

3.2.2 입자크기

상기 그림에서 보듯이 석탄 슬러리의 경우 체적분율에 따른 산란신호를 분산도 측정에 적용시키기 위해 사용할 수 있는 범위(0.3% 미만, Fig. 5참조)가 라텍스(1%, Fig. 3참조)에 비해 매우 좁음을 알 수 있다. 따라서 최대한 독립산란(independent scattering)이 일어나고 의존산란(dependent scattering)을 줄여 신뢰성 있는 범위를 확대하기 위한 방안으로 입자크기를 증가시키는 것을 생각하였고, 입자크기에 따라 신호가 어떻게 바뀌는지, 어떤 경향이 나타나는지를

알아보았다. 또한 각각의 입자 크기에서 각도에 따른 영향도 함께 살펴보았다.

Fig. 6, 7, 8, 9는 체적분율이 고정되었을 때 각도 및 입자 크기에 따른 산란강도의 변화를 측정된 결과이다. 각각의 경우에 각도가 작을수록 산란강도가 가장 크게 나타났다. 그리고 산란각도가 작은 범위에서 입자크기의 영향이 뚜렷하게 나타나는데, 이때 입자 크기가 클수록 전방 산란강도가 커짐을 확인할 수 있다. 그리고 산란 각도가 큰 범위에서는 비교적 입자크기의 영향이 적었는데, 특히 Fig. 9에서 결과

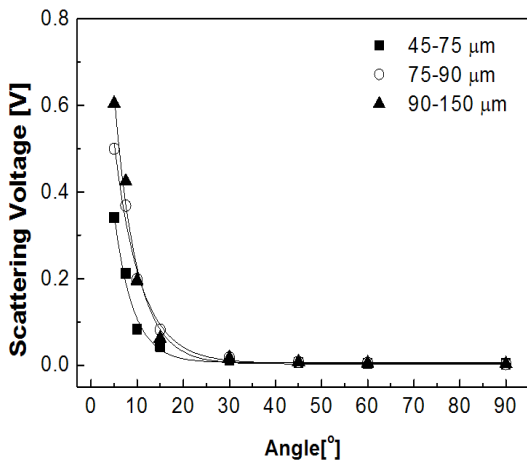


Fig. 6 Effect of angle and size on scattering intensity at the volume fraction of 0.01%

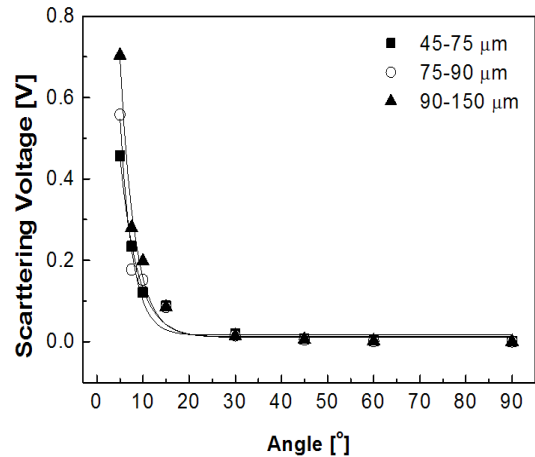


Fig. 7 Effect of angle and size on scattering intensity at the volume fraction of 0.05%

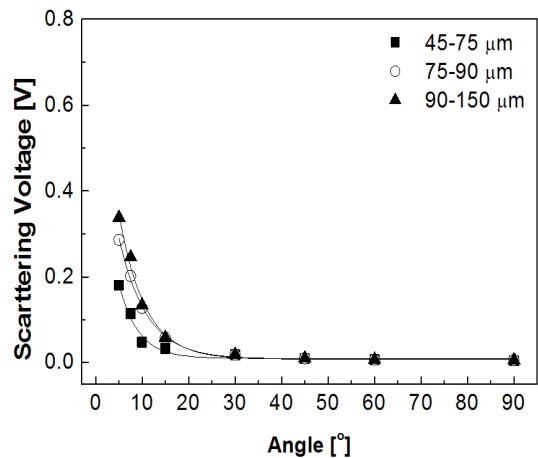


Fig. 8 Effect of angle and size on scattering intensity at the volume fraction of 0.1%

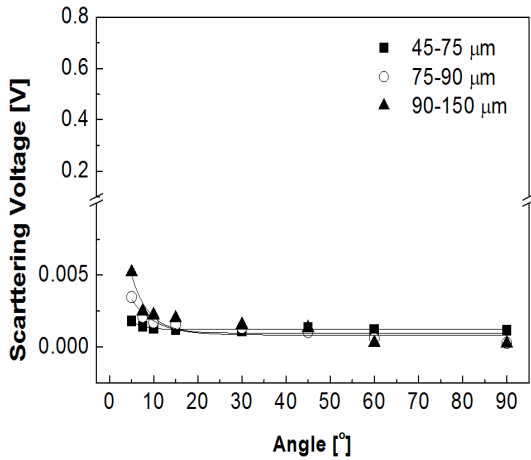


Fig. 9 Effect of angle and size on scattering intensity at the volume fraction of 1%

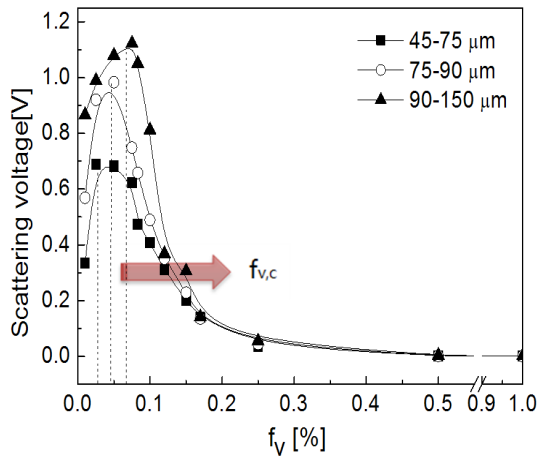


Fig. 10 Effect of volume fraction on scattering intensity at 7° forward condition

를 보았을 때 산란각도가 큰 범위에서는 입자가 클수록 미약하지만 오히려 산란강도가 작아짐도 확인해 볼 수 있었다.

이는 Lorenz-Mie theory로 부터 예측가능한 것으로 미분탄 입자크기가 증가할수록 회절은 늘고 외부 전반사는 줄어들어 전방 산란은 증가하고 측면산란은 줄어드는 경향과 일치한다¹⁹⁾. 그리고 0.1% volume fraction까지 입자크기에 의한 영향이 어느 정도 크고 1%에서는 크기영향은 줄어들음을 볼 수 있는데, 이는

나중에 논의 되듯이 산란영역이 dependent scattering 영역으로 변화되기 때문이다.

상기 실험결과를 참고하여 산란각도를 전방 7도로 고정시킨 상태에서 석탄의 체적분율에 따른 extinction 및 scattering 신호변화를 살펴보았다. 그 중 scattering 신호를 표시한 결과인 Fig. 10을 살펴보면 입자크기가 증가할수록 산란강도가 감소하는 임계 체적분율 값($f_{v,c}$)이 비교적 증가하는 것을 볼 수 있다.

3.2.3 산란영역

앞서의 결과로 판단해 볼 때 석탄 슬러리의 경우 independent scattering이 시작되는 영역이 라텍스에 비해 매우 좁아져서 한계 체적분율이 줄어들음을 알 수 있었다. 따라서 체적분율과 입자크기에 따라 independent 및 dependent scattering 영역이 어떻게 달라지는지를 앞선 결과를 토대로 mapping을 시도하였다²⁴⁾.

Fig. 11은 그 결과를 보여주고 있는데, 일반적으로 슬러리 내 입자의 체적 분율이 증가할수록 dependent scattering으로 천이가 일어나게 된다. 그러나 입자크기 인자(ζ)가 증가할수록, 즉 입자크기가 클수록 비교적 임계 체적 분율이 증가하여 independent scattering 영역이 증가함을 알 수 있다^{19,25-26)}. 이는 입자크기가 작아지면 등방 산란(isotropic diffuse scattering)이 되면서 서로 입자간 산란광 상호영향이 증가할 가능성이 크다. 그리고 입자크기가 작아지면 같은 체적분율 이라면 입자갯수가 많아져서 상호영향이 증가하여 dependent scattering이 잘 일어날 수 있을 것이다.

따라서 입자크기는 크게, 각도는 최대한 전방각도 7도에서 전방 산란법을 이용하면 scattering 강도가 체적분율과 비례하는 independent scattering 영역부분을 증가시킬 수 있을 것이다. 달리 얘기하면, 최적의 전방 산란각도에서 산란강도를 측정시 입자크기를 변화시켜 independent scattering영역을 넓혀 줌으로써 보다 신뢰성 있는 체적분율을 얻을 수 있을 것이다.

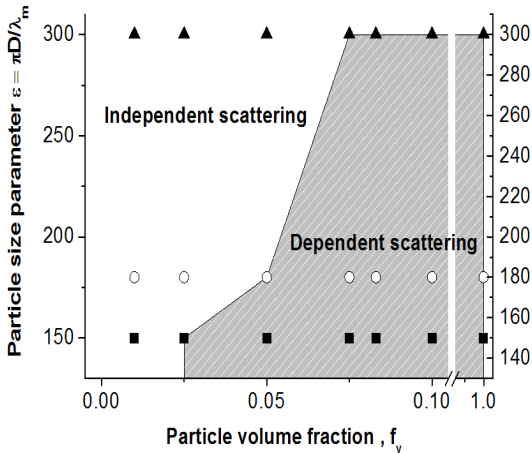


Fig. 11 Regimes of dependent and independent scattering over various volume fractions for a pulverized coal suspension

일반적으로 기상에서 운전되는 DCFC에 비해 액상 전해질을 사용하는 DCFC의 경우에는 비교적 큰 석탄 체적분율이 사용될 것으로 예상된다. 그러나 현재 액상전해질을 유동화시켜 작동하는 DCFC는 실용화된 것은 없고, 결과적으로 최적 체적분율과 같은 운전정보는 없는 상태이다. 다만 연구용으로 진행된 실험결과에서는 슬러리 점성과 분산도 등을 고려하여 10% 미만의 체적분율을 사용한 것을 알 수 있다²⁷⁾. 따라서 본 실험에서 살펴본 최대 한계 체적분율이 연구용 DCFC시스템에서 사용되는 체적분율 영역에 비해 적다는 한계를 가지고 있다. 물론 긴 파장을 가지는 적외선 영역의 레이저를 가지고 실험을 할 경우 한계 체적분율, 즉 independent scattering 영역을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 슬러리내 석탄입자의 분산도를 측정하기 위해 레이저 광산란기법을 적용하였다. 특히 입자 체적분율, 산란각도, 입자크기 변화에 따른 광산란 특성 및 산란영역을 평가할 수 있는 광학시스템을 구축하였다. 주요한 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 비흡수성 입자인 라텍스 슬러리는 후방산란이 지배적인 반면, 흡수성 입자인 석탄 슬러리는 전방산란함을 확인할 수 있다.
- 2) 따라서 석탄입자의 산란각도는 입사광 전방각도에서 강하게 나타나므로 산란각도를 받는 detector의 전방각도가 작을수록 체적분율 측정에 있어서 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다.
- 3) 석탄입자 크기가 증가할수록 회절에 의한 전방산란이 증가하고 측면 및 후방산란은 감소함을 확인할 수 있다.
- 4) 석탄 슬러리내 입자크기가 클수록, 산란각도는 최대한 전방각도에서 측정해야 입자 상호간의 광간섭이 줄어들어 입체 체적분율이 증가하고 independent 산란영역이 증가함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. G.A. Hackett, J.W. Zondlo, R. Svensson, "Evaluation of carbon materials for use in a direct carbon fuel cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 168, 2007, p. 111-118.
2. D. Cao, Y. Sun, G. Wang, "Direct Carbon Fuel Cell: Fundamentals and Recent Developments," *Journal of Power Sources*, Vol. 167, 2007, p. 250-257.
3. S.C. Lee, M.S. Kim, M.K. Hwang, K.B. Kim, C.H. Jeon, and J.H. Song, "Thermal stability and viscosity behaviors of hot molten carbonate mixtures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 49, 2013, p. 94-100.
4. F. Wang, K. F. Cen, N. Li, Q. X. Huang, X. Chao, J. H. Yan, Y. Chi, "Simultaneous measurement

- on gas concentration and particle mass concentration by tunable diode laser,” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 21, 2010, p. 382-387.
5. N. A. Frankel and A. Acrivos, “The constitutive equation for a dilute emulsion,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 44, 1970, p. 65-78.
 6. N. Masoumi, N. Sohrabi, and A. Behzamehr, “A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 42, 2009, p. 1-6.
 7. T. Y. Yun, “Analysis of radiative heat transfer in the entrained flow coal gasifier,” Dissertation, Sogang Univ. Seoul, 1999.
 8. G. A. Nunez, M. I. Briceño, D. D. Joseph, T. Asa, “Colloidal coal in water suspensions,” *Nano Dispersions Technology Inc.*, Clayton, Panama, 2000.
 9. G.S. Khodakov, “Coal-water suspensions in power engineering,” *Thermal Engineering*, Vol. 54, 2007, p. 36-47.
 10. H. Dincer, F. Boylu, A.A. Sirkeci, and G. Atesok, “The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal water slurries,” *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 70, 2003, p. 41-51.
 11. F. Boylu, and G. Atesok, “Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries,” *Fuel Processing Technology*, Vol. 85, 2004, p. 241-250.
 12. P.R. Tudor, D. Atkinson, R.J. Crawford and D.E. Mainwaring, “The effect of adsorbed and non-adsorbed coal-water suspensions,” *Fuel*, Vol. 75, 1996, p. 443-452.
 13. <http://snowxtal.egloos.com/38446/>
 14. M. Xue, M Su, L. Dong, Z. Shang, and X. Cai, “An investigation on characterizing dense coal-water slurry with ultrasound: theoretical and experimental method,” *Chem. Eng. Comm.*, Vol. 197, 2010, p. 169-179.
 15. O. Mengual, G. Meunier, I. Cayre, K. Puech, P. Snabre, “Characterization of instability of concentrated dispersions by a new optical analyser: the TURBISCAN MA 1000,” *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 152, 1999, p. 111-123.
 16. O. Mengual, G. Meunier, I. Cayre, K. Puech, P. Snabre, “TURBISCAN MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis,” *Talanta*, Vol. 50, 1999, p. 445-456.
 17. C. Bordes, P. Snabre, C. Frances, B. Biscans, “Optical investigation of shear- and time-dependent micro-structural changes to stabilized and depletion-flocculated concentrated latex sphere suspensions,” *Powder Technology*, Vol. 130, 2003, p. 331-337.
 18. P.W. Li, D.J. Yang, L. H.M. Lou, X.Q. Qiu, “Study on the stability of coal water slurry using dispersion-stability analyzer,” *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, Vol. 36, No. 5, 2008, p. 524-529.
 19. J.R. Howell, R. Siegel, M.P. Menguc, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Chap. 15, CRC press (2011)
 20. S. Prahl, “Mie scattering calculator,” available online, http://omlc.ogi.edu/calc/mie_calc.html, oregon medical Laser Center, 2009.
 21. M. P. Menguc, S. Manickavasagam, D. A. D’Sa “Determination of radiative properties of pulverized coal particles from experiments,” *Fuel*, Vol. 73, No. 4, 1994, p. 613-625.
 22. M. P. Menguc and R. Viskanta, “On the radiative properties of polydispersions: a simplified approach,” *Combust, Sci. and Tech.*, Vol. 44, 1985, p. 143-159.
 23. M. Michael, M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Academic Press, 2003.
 24. C. L. Tien and B. L. Drolen, “Thermal radiation in particulate media with dependent and independent scattering,” *Annual Review of Numerical Fluid*

- Mechanics and Heat Transfer, Vol. 1, 1987, p. 1-32.
25. D. L. Black, M. Q. Mcquay, M. P. Bonin, "Laser-based techniques for particle size measurement: a review of sizing methods and their industrial applications" Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 22, 1996, p. 267-306.
26. I. Gianinoni, E. Golinelli, G. Melzi, S. Musazzi, U. Perini, F. Trespi, "Optical particle sizers for on-line applications in industrial plants," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 39, 2003, p. 141-154.
27. X. Li, Z. Zhu, R. Marco, A. Dicks, J. Bradley, S. Liu, and G. Lu, "Factors That Determine the Performance of Carbon Fuels in the Direct Carbon Fuel Cell," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 47, 2008, p. 9670-9677.