

## 갈탄과 무연탄으로부터의 초청정석탄 제조 및 용융탄산염형 연료전지에서의 산화거동연구

이상우 · 김유정 · 김태균 · 이기정 · 이충곤<sup>†</sup>  
한밭대학교 화학생명공학과

### Oxidation of Ash Free Coal from Lignite and Anthracite Coals in a Molten Carbonate Fuel Cell

SANGWOO LEE, YUJEONG KIM, TAEKYUN KIM, KIJEONG LEE, CHOONGGON LEE<sup>†</sup>

Department of Chemical & Biological Engineering, Hanbat National University  
125 Dongseodaero, Yuseong-gu, Daejeon 305-719, Korea

**Abstract** >> In this study, ash free coals(AFCs) were produced with lignite and anthracite coals in a microwave. The AFCs were analyzed with proximate analysis, fourier transform infrared spectrometry (FTIR), X-ray diffraction analysis, and thermogravimetric analysis (TGA). The extraction yields of the AFCs were 16.4 wt%, 7.6 wt% at lignite and anthracite coal, respectively. The chemical and physical properties of the AFCs were similar regardless of the original coal types. Oxidation behavior of the AFCs was investigated by supplying a mixture of 3g of AFC and 3g of electrolyte into the coin-type molten carbonate fuel cell (MCFC). For the evaluation of AFC fuel performance, electrochemical analysis of the steady-state polarization and step-chronopotentiometry were conducted based on the standard hydrogen fuel (69 mol% H<sub>2</sub>, 17 mol% CO<sub>2</sub>, 14 mol% H<sub>2</sub>O). The AFCs showed similar electrochemical oxidation behaviors regardless of the original coal types. The overvoltage of the AFCs was larger than the hydrogen fuel, although OCV of the AFCs was higher.

**Key words** : Ash free coal(초청정석탄), Solvent extraction(용매 추출), Lignite(갈탄), Anthracite coal(무연탄), Molten carbonate fuel cell(용융탄산염형 연료전지)

#### Nomenclature

P : pressure, atm

E° : standard potential, V

V : voltage, V

T : temperature, °C

F : faraday constant

#### Subscripts

an : anode

ca : cathode

<sup>†</sup>Corresponding author : leecg@hanbat.ac.kr

Received : 2015.11.30 in revised form : 2016.1.11 Accepted : 2016.2.28

Copyright © 2016 KHNES

## 1. 서 론

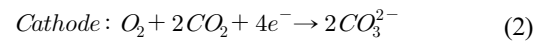
현재 세계적으로 석탄은 에너지원으로 뿐만 아니라 석유화학의 원료로서 다시 관심의 대상이 되고 있다. 국내에서만 보아도 석탄 사용량은 증가하는 추세에 있다. 석탄의 대부분을 수입에 의존하는 상황에서 석탄의 사용량이 급증하면서 고등급 석탄의 수요가 증가하고 있고, 공급 부족으로 저등급 석탄의 고급화에 대한 연구가 활발해지고 있다<sup>1,2)</sup>.

석탄은 미국재료시험협회에 의한 분류방법(ASTM D388-84)에 의해 갈탄, 아역청탄, 역청탄, 무연탄으로 나뉘며<sup>3)</sup>, 이 분류방법에 따르면 탄소에 대한 수소 및 산소의 비가 감소할수록 석탄의 등급(rank)이 낮아지게 된다. 위의 네 가지 석탄의 등급은 갈탄(Lignite), 아역청탄(Sub-bituminous), 역청탄(Bituminous), 무연탄(Anthracite) 순으로 나뉘게 된다<sup>4,5)</sup>. 위에 나열된 등급을 바탕으로 갈탄에서 무연탄으로 갈수록 휘발분의 비율이 감소하며 고정탄소의 양은 증가한다. 역청탄의 탄화도는 갈탄보다 높고 무연탄보다는 낮다. 탄화도가 상승함에 따라 수소가 감소하고 탄소가 증가한다. 아역청탄은 갈탄보다 탄화도가 높고 역청탄보다는 낮은 석탄이다. 갈탄은 태울 때 연기가 많이 발생하며, 유연탄의 일종으로 탄소함유량이 적은 반면 휘발분의 비율이 다른 탄들에 비해 높다<sup>6)</sup>. 그리고 Oxygen functional group을 다량 포함하고 있기 때문에 친수성을 띠고 이로 인해 수분함량이 높다<sup>7)</sup>. 무연탄은 탄화가 잘되어 연기를 내지 않고 연소하는 석탄으로 고정탄소가 다른 탄들에 비해 높지만 그 만큼 휘발분의 비율이 적다. 특히 국내 무연탄에서는 대부분 고회분 및 저열량이라는 특성을 갖고 있어 가정용연탄제조이외의 산업용 및 발전용 연료로서의 사용에 제한이 있다<sup>8)</sup>. 이 중 갈탄은 고등급 석탄과 유사하게 전 세계적으로 고르게 매장되어 있으나 이용은 활발하게 이루어지지 않고 있다. 그리고 무연탄은 고등급 석탄으로 분류가 되지만 국내에서 생산되

는 유일한 무연탄의 경우 발열량이 기준발열량에 미치지 못하여 저등급 석탄으로 분류되어진다. 따라서 저등급 갈탄과 무연탄을 고품위화 할 수 있는 초청정석탄 제조기술 개발 및 이를 활용할 수 있는 기술 개발은 매우 필요하다.

초청정석탄의 제조에는 재인 회분의 제거가 필요하게 되고, 회분 제거 기술로는 UCC (Ultra Clean Coal) 와 AFC (Ash Free Coal) 기술이 있다. UCC의 경우 알칼리 침출법을 이용하여 석탄으로부터 회분을 제거하는 기술이고, AFC는 용매 추출법을 이용하여 석탄으로부터 유효성분만을 추출해 내는 기술로 처리 후 석탄에 잔류하는 회분의 함량은 200 ppm 정도였다<sup>9)</sup>.

용융탄산염형 연료전지(MCFC)에서 수소 대신 석탄을 직접 사용하는 경우에는 석탄의 산화 및 산소의 환원과정을 거쳐 고체 석탄으로부터 전기를 발생하게 된다. 고체 탄소를 연료로 사용하는 경우의 용융탄산염형 연료전지(MCFC)의 연료극(Anode)와 공기극(Cathode)의 반응은 다음과 같다.



고체탄소가 직접적으로 반응에 참여하므로 일반적으로는 기체연료보다 전력밀도가 낮아진다. 따라서 최근 많은 연구자들이 연료전지에 고체 탄소를 가스화하여 가스화된 연료를 사용하는 방안을 연구하고 있다<sup>9,11)</sup>. 그리고 석탄 가스화는 석탄을 고온, 고압 조건에서 수소와 일산화탄소로 변환하는 기술이다. 하지만 석탄 가스화 반응을 용융탄산염형 연료전지(MCFC)에 적용 시 석탄 내 회분들이 연료극에 쌓여 탄소성분의 이동을 막아 효율을 감소시킬 수 있다.

초청정석탄에 대한 용융탄산염형 연료전지(MCFC)의 산화거동 연구는 역청탄과 아역청탄을 이용한 연구가 보고되어있다<sup>12,13)</sup>. 이 연구들에서 역청탄으로

제조된 초청정석탄 연료는 전류-전압거동에서 수소 연료와 유사한 거동을 나타내어 두 연료의 산화거동은 매우 유사하다고 보고되어있고, 아역청탄으로 제조된 초청정석탄 연료는 전류-전압곡선에서 수소 연료를 사용하였을 경우보다 큰 저항을 가지는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 갈탄과 무연탄에 대해 실험을 진행하였으며, 사용된 석탄은 폴란드 갈탄과 무연탄이었다. 초청정석탄 제조는 AFC 용매추출법을 이용하였고, Microwave가 석탄 용매 추출 시 추출률을 증가시켰다는 연구<sup>14)</sup>를 토대로 Microwave를 사용하였다. 그리고 초청정석탄의 산화특성을 검토하기 위해 코인 타입의 용융탄산염형 연료전지(MCFC)를 사용하였다.

## 2. 실험 방법

초청정석탄 제조에는 폴란드 갈탄과 국내 경동탄을 사용하였다. 그리고 원탄을 200  $\mu\text{m}$ 의 입자크기로 분쇄하여 NMP(N-Methyl-2-Pyrrolidone)와 혼합하여 마이크로웨이브 반응기에 대기압과 202°C 조건으로 시간을 5분, 10분, 30분 간격으로 달리하여 추출하였다. 그리고 혼합물을 분리하여 고체형태와 액체형태로 나누고, 여기서 진공오븐을 이용하여 고체는 80°C에서 12시간을 진공건조하고, 액체는 170°C에서 40시간 동안 진공건조시켜 잔탄(Residue coal)과 초청정석탄(Ash free coal)을 제조하였다. 원탄과 제조된 초청정석탄의 수분, 휘발분, 회분 및 고정탄소 등의 공업분석은 LECO사의 TGA-701을 사용하여 분석하였고, 유기물질의 구조 변화의 정성분석을 위하여 퓨리에 변환 적외선 분광기(FTIR)는 Thermal사 Nicolet 6700을 사용하였다. 또한 열 중량 분석(Thermogravimetric Analysis, TGA)을 위하여 Mettler Toledo의 TGA-DSC를 이용하였고, Rigaku사의 D/MAX 2500H X선 회절 분석기(XRD)를 사용하여 결정구조를 분석하였다.

연료전지의 성능평가를 위해 직경 4 cm 크기의 코인타입의 용융탄산염형 연료전지(MCFC)를 사용하였다<sup>15)</sup>. 850°C 대기압 조건에서, 다공성 Ni-Al합금 연료극, 다공성 NiO 공기극, LiAlO<sub>2</sub>의 매트릭스를 사용하였다. 전해질은 62 mol% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 38 mol% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>를 혼합하여 공급하였다. 실험에 사용한 전극, 분리판 및 매트릭스는 한국전력공사 전력연구원(Korean Electric Power Research Institute)에서 제공되었다.

전지 상태를 알아보기 위해 연료극에는 수소연료를 69 mol% H<sub>2</sub>, 17 mol% CO<sub>2</sub>, 14 mol% H<sub>2</sub>O비율의 가스 조성으로 실험을 진행하였고, 고체연료는 초청정석탄 3 g과 전해질 3 g을 혼합한 카트리지 형태였다. 공기극에는 70 mol% Air와 30 mol% CO<sub>2</sub> 혼합가스를 주입하였다. 측정은 시간에 따른 개회로전압(Open Circuit Voltage), 부하 전류를 바꿔가면서 부하 전류와 전지 전압의 관계를 측정하는 정상상태 분극법(Steady State Polarization), 60초마다 전류를 계단형(0, 50, 100, 150 mAcm<sup>-2</sup>)으로 상승시켜 이에 따른 전압완화거동을 측정하는 계단형 전류상승법(Step-Chronopotentiometry)을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

석탄은 매우 복잡한 방향족간의 결합된 구조를 가지고 있다. 온도가 증가하게 되면 석탄이 이루고 있는 결합 구조 중 일부가 용매로 분리되어 추출이 이루어진다.

Fig. 1은 갈탄과 무연탄의 원탄을 NMP와 혼합하여 대기압, 202°C조건에서 초청정석탄을 추출한 결과이다. 갈탄과 무연탄의 평균 추출수율은 각각 16.4 wt%, 7.6 wt%로 얻어졌다. 실험 후 남은 잔탄과 원탄의 무게를 바탕으로 식 (3)을 이용하여 초청정석탄의 추출수율을 구하였다. 초청정석탄의 추출수율은 Dry ash free (daf)를 기준으로 하였다.

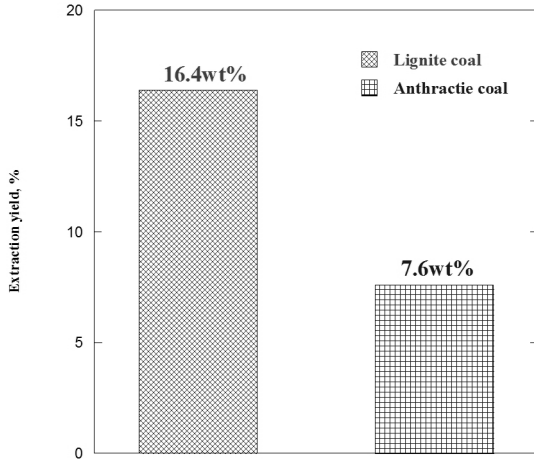


Fig. 1 Extraction yields of AFC from lignite and anthracite coals by using microwave at atmospheric pressure and 202°C

Tab. 1 Proximate analysis of raw coals (lignite, anthracite) and extracted AFCs

Smple	공업분석(wt.%)			
	수분	휘발분	Ash	고정탄소
Raw- 갈탄	14.94	41.92	4.55	38.59
Raw- 무연탄	5.68	5.85	25.40	63.07
AFC- 갈탄	1.56	53.74	0.60	44.10
AFC- 무연탄	1.49	56.96	2.42	39.55

Extraction yield(wt%,daf)

$$= \frac{\text{feed coal (daf)} - \text{residual coal (daf)}}{\text{feed coal (daf)}} \quad (3)$$

또한, 석탄을 용매 추출방법을 이용해 초청정석탄으로 제조하게 되면 원탄에 있던 유기성분이 용해되기 때문에 석탄의 조성이 변화될 것으로 생각된다.

이는 Tab. 1에서의 공업분석의 결과로 증명된다. 무연탄은 다른 탄들에 비해 고정탄소가 많은 것을 알 수 있는데, 이것은 무연탄의 휘발성분이 적어 고정탄소의 비가 높아진 것이다. 즉, 무연탄이 NMP에 녹아나올 수 있는 휘발분이 적다는 것을 의미한다. 따라서 무연탄의 높은 고정탄소 비율이 낮은 추출수율의 원인임을 알 수 있다. Table 1에서 모든 원탄이

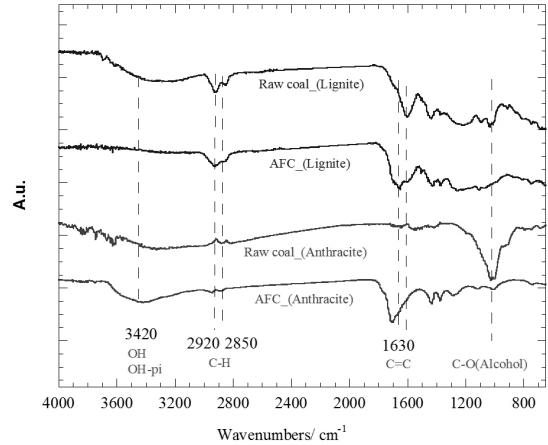


Fig. 2 FT-IR results of raw coals and AFCs

초청정석탄으로 제조되면 수분과 Ash가 줄어들고 휘발분과 고정탄소가 늘어나는 공통점을 확인할 수 있는 반면, 무연탄의 경우 고정탄소가 줄어들고 휘발분이 증가 하는 것이 관찰되었다.

Fig. 2는 원탄과 초청정석탄을 퓨리에 변환 적외선 분광기를 이용하여 분석한 결과이다. 2920  $\text{cm}^{-1}$ 과 2850  $\text{cm}^{-1}$ 의 두 개의 피크는 aliphatic  $\text{CH}_3\text{CH}_2$ 와 CH 그룹을 나타내고, 1600  $\text{cm}^{-1}$  근처에서 나타나는 피크들은 퀴논이나, 에테르, 헤테로사이클족에 있는 산소와 결합된 방향족 고리의 진동에 해당하는 피크이다<sup>7)</sup>. 또한 1000~1300  $\text{cm}^{-1}$  사이를 크게 나누면 1000~1200  $\text{cm}^{-1}$ 은 지방족 에테르 그룹이고, 1200~1300  $\text{cm}^{-1}$  사이는 방향족 에테르를 그룹을 나타내는 구간이고, 900~700  $\text{cm}^{-1}$ 은 방향족과 탄소와 결합된 C-H 그룹을 나타낸다<sup>1)</sup>. 갈탄에서는 원탄과 제조된 초청정석탄의 퓨리에 변환 적외선 분광기 분석결과가 큰 변화를 보이지 않는데 비해 무연탄이 가장 많은 변화를 보였다. 특히, 무연탄의 원탄은 C-O (Alcohol) 피크가 관찰되지만 초청정석탄으로 제조되어지면 C-O (Alcohol) 피크가 사라지는 것을 확인 하였다. 그리고 원탄에서는 C=C 피크가 없지만 초청정석탄에서는 뚜렷하게 나타났다. 이는 탄의 종류와 상관없이 원탄이 초청정석탄으로 제조되어지면 모두 유사한 피크를 가지는 구조로

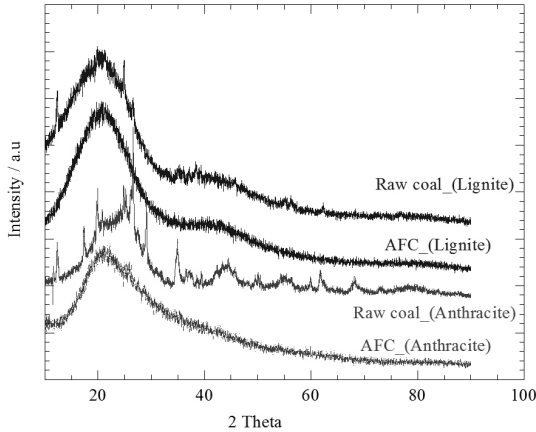


Fig. 3 XRD results of raw coals and AFCs

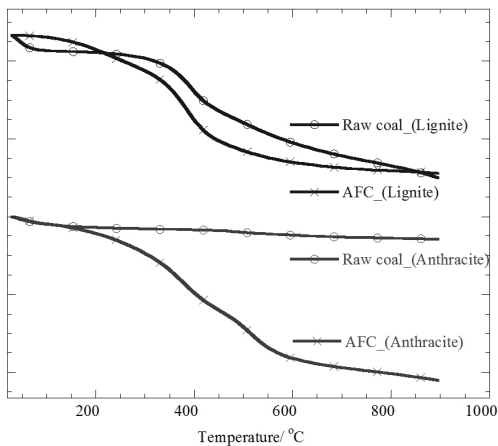


Fig. 4 TGA results of raw coals and AFCs under N<sub>2</sub> environment with a heating rate of 10°C/min

변화하는 것으로 볼 수 있다. 초청정석탄은 1630 cm<sup>-1</sup>에서 C=C 피크가 뚜렷하게 나타나는데 이는 NMP용매가 탄의 구조변화에 관여하여 원탄에서 수소결합 또는 산소결합을 파괴할 수 있다는 것을 의미한다<sup>16)</sup>. 또한 무기물들의 흡수밴드인 1100~900 cm<sup>-1</sup>이 크게 감소한 것으로 초청정석탄에서 Ash가 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 원탄과 초청정석탄을 X선 회절분석기를 이용하여 분석한 결과이다. 갈탄의 원탄은 비정질 구조를 가지며, 초청정석탄과 비교하였을 때, 피크가 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 용매추출 과정을 거

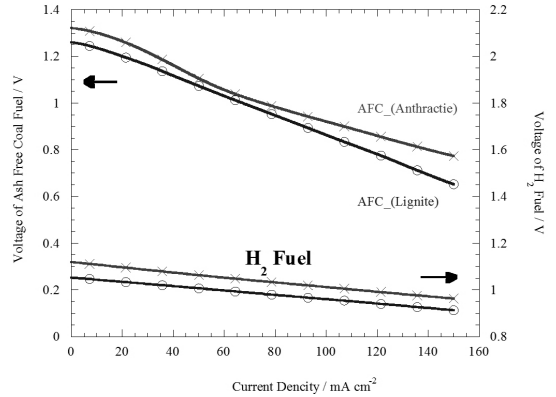


Fig. 5 Current-voltage behaviors of the AFC fuel and H<sub>2</sub> fuel (69mol% H<sub>2</sub>, 17mol% CO<sub>2</sub>, 14mol% H<sub>2</sub>O) at 850°C with a cathode gas of 70mol% Air and 30mol% CO<sub>2</sub>

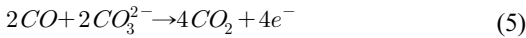
쳐도 석탄의 구조가 큰 영향을 받지 않기 때문이라 생각된다. 무연탄의 경우 결정성 불순물이 많은 구조를 확인하였는데, 이는 무연탄이 초청정석탄으로 제조되어지면 상대적으로 높은 휘발 분을 가지며 원탄보다 Ash의 양이 적기 때문으로 생각된다. 그리고 이 두 가지의 원탄이 초청정석탄으로 제조되어지면 모두 비정질 구조를 가지는 것을 X선 회절분석법으로 확인하였다.

Fig. 4는 25~900°C에서 원탄과 초청정석탄의 열중량 분석(TGA) 결과이다. 분석은 질소분위기에서 수행되었으며, 무연탄의 원탄만 온도에 따른 중량변화가 거의 없는 것을 확인하였다. 갈탄의 원탄과 초청정석탄은 약 200°C의 온도 범위에서 급격한 중량변화가 일어났는데, 이는 H<sub>2</sub>O와 저온의 휘발성 물질에 의한 것으로 생각된다. 그리고 약 400°C에서는 더 큰 중량 변화가 일어났는데, 이는 유기물의 분해에 의한 것으로 생각된다. 갈탄의 원탄과 초청정석탄을 비교하면 중량의 변화는 큰 차이가 없지만, 무연탄의 원탄과 초청정석탄의 경우 중량의 변화에 큰 차이를 보였다. 이렇게 큰 중량 변화를 가지는 것은 초청정석탄이 많은 가벼운 성분들을 가지고 있어 쉽게 휘발되며 분해되기 때문으로 생각된다<sup>17)</sup>.

Fig. 5는 두 개의 전지에 대해 정상 상태 분극법

(Steady-state polarization)으로 측정된 결과이고, 각 전지마다 수소연료(69 mol% H<sub>2</sub>, 17 mol% CO<sub>2</sub>, 14 mol% H<sub>2</sub>O)와 초청정석탄연료(Ash free coal 3 g: Electrolyte 3 g)를 사용하여 평가하였다. 그림에서 윗 부분은 초청정석탄 연료에 대한 결과이고, 아랫부분은 수소연료에 관한 결과이다.

초청정석탄연료의 산화는 석탄의 가스화에 동반하여 발생하는 CO에 의한 것으로 추정하고, 탄소 산화의 중간체로서 CO를 고려하는 경우, 반응은 다음과 같다.



이 경우 용융탄산염형 연료전지(MCFC)의 개회로 전압은 CO농도에 의존하게 되며, 개회로전압은 아래 식 (6)을 통하여 결정된다.

$$E_{OCV} = E^o + \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{p(CO)p(O_2)^{0.5}p(CO_2)_{an}}{p(CO_2)_{an}} \right) \quad (6)$$

따라서 공기극 가스 조건이 일정하면 개회로전압은 연료극의 CO와 CO<sub>2</sub>의 농도비에 의해 결정된다. Fig. 5에서 850°C에서의 초청정석탄 연료의 개회로전압은 약 1.30V이며, 수소연료의 개회로전압은 약 1.10V 이었다. 초청정석탄연료를 사용한 경우의 개회로전압은 수소연료를 사용하였을 경우보다 높지만 전류밀도가 증가할수록 전압이 급격히 감소하는 거동을 보였다. 이는 초청정석탄연료가 산화될 때 수소연료보다 더 큰 물질전달저항을 가지고, 초청정석탄 연료에서 소량의 H<sub>2</sub>와 CO가 생성되었기 때문으로 생각된다<sup>12)</sup>.

Fig. 6은 계단형 전류상승법 (Step-chonopotentiometry)으로 성능을 측정된 결과이다. 수소연료(69 mol% H<sub>2</sub>,

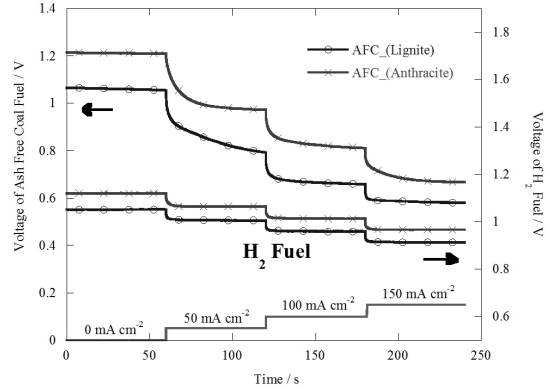


Fig. 6 Step chronopotentiometry behaviors of the AFC fuels and H<sub>2</sub> fuel (69mol% H<sub>2</sub>, 17mol% CO<sub>2</sub>, 14mol% H<sub>2</sub>O) at 850°C with a cathode gas of 70mol% Air and 30mol% CO<sub>2</sub>

17 mol% CO<sub>2</sub>, 14 mol% H<sub>2</sub>O)와 초청정석탄 연료 (Ash free coal 3 g: Electrolyte 3 g)를 사용하여 60초 간격으로 전류밀도를 50 mAcm<sup>-2</sup>씩 증가시키면서 평가하였다. 그림에서 윗부분은 초청정석탄 연료를 사용한 결과이고 아랫부분은 수소연료를 사용한 결과이다. 수소연료를 사용한 경우 전류밀도를 증가시켰을 때 각 구간별 과전압이 큰 차이 없이 일정하게 나타났다. 이는 수소연료가 빠른 반응특성 및 물질전달 특성을 가지기 때문으로 생각할 수 있다. 초청정석탄 연료는 수소연료에 비해서 전압완화속도가 느린 거동을 보이고, 각 구간의 과전압이 크게 나타났다. 특히 저전류밀도 구간(0~50 mAcm<sup>-2</sup>)에서 무연탄의 경우 1.21 V에서 0.99 V로, 갈탄의 경우 1.07 V에서 0.84 V로 큰 폭의 전압감소를 보였다. 이는 초청정석탄 연료의 산화특성을 나타내는 거동으로 생각되며 초청정석탄이 가스화 시 주로 H<sub>2</sub>와 CO가 발생되고 연료극 반응에 필요한 CO<sub>2</sub>의 발생량이 적기 때문으로 생각된다. 즉, 용융탄산염형 연료전지(MCFC)의 연료극은 H<sub>2</sub>나 CO만이 아니라 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 반응에 관여하는 메커니즘을 가지고 있어 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 공급이 필요하다<sup>18)</sup>. 그리고 고 전류밀도 구간(100~150 mAcm<sup>-2</sup>)에서 무연탄의 전압은 0.81 V에서 0.67 V로, 갈탄의 전압은 0.66 V에서 0.58 V로 저 전류밀도에

비해 전압완화가 감소하는 경향을 보였다. 이는 고 전류밀도에서 전극반응을 통한  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 의 생성이 반응물 가스의 분압을 증가시키고 이로 인한 물질전달 저항의 감소와 과전압의 감소 때문으로 생각된다.

#### 4. 결 론

초청정석탄에 대한 연구 중 갈탄과 무연탄의 초청정석탄에 대한 실험을 진행하였다. 또한 수소를 연료를 사용하는 기존의 용융탄산염형연료전지(MCFC)에 제조된 초청정석탄을 연료로 직접 사용하여 탄소산화거동 실험을 진행하였다.

갈탄, 무연탄의 평균 추출수율은 각각 16.4 wt%, 7.6 wt%로 얻어졌다. 원탄은 초청정석탄으로 제조되어지면 공통적으로 수분과 Ash가 줄어 들고 휘발분과 고정탄소가 늘어나는 결과를 확인 할 수 있었다. FTIR을 이용한 분석결과에서 초청정석탄의 경우 C-O 피크가 사라지고, C=C 피크 가 뚜렷하게 나타났다. 이 결과로 석탄의 구조 변화에 NMP가 관여함을 확인하였고, 초청정석탄으로 제조되어지면 Ash가 효과적으로 제거되는 것을 확인하였다. XRD를 이용한 분석에서는 갈탄과 무연탄이 초청정석탄으로 제조되어지면 모두 비정질 구조를 가지게 되는 것을 확인하였다. TGA 결과에서는 무연탄의 원탄에서만 중량 변화가 거의 없었고, 갈탄의 원탄과 초청정석탄에서 온도에 따른 중량 변화가 크게 나타났다. 이러한 중량 변화는  $\text{H}_2\text{O}$ 와 저온의 휘발성 물질, 유기물의 분해에 의한 것으로 생각된다. 따라서 탄의 종류와 상관없이 원탄이 초청정석탄으로 제조되어지면 화학적 물리적 성질이 유사하다는 것을 확인하였다.

용융탄산염형 연료전지(MCFC)의 산화거동을 측정한 결과,  $850^\circ\text{C}$  대기압 조건에서 초청정석탄연료의 개회로전압은 약 1.30 V이며, 초청정석탄연료가 수소연료보다 높은 개회로전압 값을 가지지만 전류밀도가 증가할수록 전압이 급격히 감소하는 거동을

보였다. 이는 초청정석탄연료가 산화될 때 수소연료보다 더 큰 물질전달저항을 가지며 초청정석탄연료에서 적은 양의  $\text{H}_2$ 와  $\text{CO}$ 가 생성되었기 때문으로 생각된다. 그리고 계단형 전류상승법에서 초청정석탄연료의 구간별 과전압은 크게 나타났으며, 전류밀도를 계단형으로 상승 시켰을 때 전압 완화 폭이 고 전류밀도로 갈수록 작아지는 것으로 나타났다. 그 이유는 고 전류밀도에서 전극반응으로부터 발생된  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 가 분압을 증가시키고 이에 따른 물질전달저항의 감소와 과전압의 감소에 의한 것으로 판단된다. 따라서 초청정석탄 연료는 수소연료에 비해 물질전달저항과 과전압이 더 크며, 또한 용융탄산염형 연료전지(MCFC)에서는 제조된 초청정석탄들의 전기화학적 산화거동은 유사하다는 결론을 얻었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년도 한밭대학교 교내학술연구비 및 에너지기술평가원의 에너지기술개발사업 (201403460002)으로 수행되었습니다.

#### References

1. T. Yoshida, T. Takanohashi, K. Sakanishi, I. Saito, M. Fujita, K. Mashimo, "The effect of extraction condition on Hyper Coal production (1) under room temperature filtration", Energy Fuels, Vol. 16, 2002. p. 1463.
2. T. Takanohashi, I. Saito, M. Iino, H. Aoki, K. Mashimo, "Effect of acid treatment on thermal extraction yield in ashless coal production", Energy Fuels, Vol. 18, 2004, p97.
3. S. H. Lee, S. D. Kim, "Technology for the Preparation of Ash-free Coal from Low Rank Coal", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 46, No. 3, 2008, p. 443.
4. P. Chen, "Study on Integrated Classification System

- for Chinese Coal”, *Fuel Proc. Technol.*, Vol. 62, 2000, p. 77.
5. S. Li, D. Tang, H. Xu, and Z. Yang, “Advanced Characterization of Physical Properties of Coals with Different Coal Structures by Nuclear Magnetic Resonance and X-ray Computed Tomography”, *Comput. Geo.*, Vol. 48, 2012, p. 220.
  6. Y. S. Yoon, J. H. Kim, P. Deepak, S. U. Son, G. K. Park, K. I. Park, Y. C. Seo, “Emission Characteristics of PM and PM<sub>2.5</sub> from Bituminous Coal Combustion Power Plants”, *J. KOSAE*, Vol. 26, No. 2, 2010, p. 151.
  7. A. Jorge, R. Orrego-Ruiz, E. Cabanzo, and M. Ospino, “Study of Colombian coals using photo-acoustic Fourier transform infrared spectroscopy”, *Int. J. Coal Geology*, Vol. 85, 2011, p. 307.
  8. S. H. Lee, C. W. Park and E. K. Shon “Relationship between Chemical Properties of Korean Anthracite Coals and Combustion Characteristics”, *Korean Chemical Engineering Research*, Vol 30, 1992, p. 368.
  9. T. M. Gür, M. Homel, and A. V. Virkar, “High Performance Solid Oxide Fuel Cell Operating on Dry Gasified Coal”, *J. Power Sources*, Vol. 195, 2010, p. 1085.
  10. C. Li, Y. Shi, and N. Cai, “Performance Improvement of Direct Carbon Fuel Cell by Introducing Catalytic Gasification Process”, *J. Power Sources*, Vol 195, 2010, p. 4660.
  11. S. H. Clarke, A. Dicks, K. Pointon, T. A. Smith, and A. Swann, “Catalytic Aspects of The Steam Reforming of Hydrocarbons in Internal Reforming Fuel Cells”, *Catal. Today*, Vol 38, 1997, p. 411.
  12. C. G. Lee, W. K. Kim, “Oxidation of ash-free coal in a direct carbon fuel cell”, *International Journal of Hydrogen Energy* 40, 2015, p. 4575.
  13. C. G. Lee, D. L. Vu, “Oxidation of ash-free coal from sub-bituminous and bituminous coals in a direct carbon fuel cell”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, in print.
  14. G. Domazetis, M. Raoarun, B. D. James, J. Liesegang, P. J. Pigram, N. Brack, And R. Glaisher, “Analytical and characterization studies of organic and inorganic species in brown coal”, *Energy & Fuels*, Vol. 20, 2006, p. 1556.
  15. G. Lee, H. Hur, M. B. Song, “Oxidation behavior of carbon in a coin-type Direct Carbon Fuel Cell”, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 158, 2011, p. B410.
  16. D. W. Van Krevelen, “Coal Typology - Chemistry - Physics- Constitution”, 3rd edition, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1993.
  17. N. Okuyama, N. Komatsu, T. Shigehisa, T. Kaneko and S. Tsuruya, “Hyper-coal process to produce the ash-free coal”, *Fuel Processing Technology*, Vol. 86, 2005, p. 947.
  18. P. G. P. Ang and A. F. Sammells, “Influence of electrolyte composition on electrode kinetics in the molten carbonate fuel cell”, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 127, 1980, p. 1289.