

# 직접탄소 연료전지에서 RDF 및 RPF의 전기화학반응 특성에 관한 실험적 연구

안성율<sup>1</sup> · 이영훈<sup>1</sup> · 엄성용<sup>1</sup> · 성연모<sup>1</sup> · 문철언<sup>1</sup> · 강기중<sup>1</sup> · 최경민<sup>2†</sup> · 김덕줄<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>부산대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup>부산대학교 기계공학부

## An Experimental Study on the Characteristics of Electrochemical Reactions of RDF/RPF in the Direct Carbon Fuel Cell

SEONG YOOL AHN<sup>1</sup>, YOUNG HOON RHIE<sup>1</sup>, SEONG YONG EOM<sup>1</sup>, YEON MO SUNG<sup>1</sup>,  
CHEOR EON MOON<sup>1</sup>, KI JOONG KANG<sup>1</sup>, GYUNG MIN CHOI<sup>2†</sup>, DUCK JOOL KIM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grad. School of Pusan National Univ., San 300, Jang jeon-dong Geum jeong-gu, Busan, 609-735, Korea

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., San 300, Jang jeon-dong Geum jeong-gu, Busan, 609-735, Korea

**Abstract** >> The electrochemical reaction of refuse derived fuel (RDF) and refuse plastic/paper fuel (RPF) was investigated in the direct carbon fuel cell (DCFC) system. The open circuit voltage (OCV) of RPF was higher than RDF and other coals because of its thermal reactive characteristic under carbon dioxide. The thermal reactivity of fuels was investigated by thermogravimetric analysis method. and the reaction rate of RPF was higher than other fuels. The behavior of all sample's potential was analogous in the beginning region of electrochemical reactions due to similar functional groups on the surface of fuels analyzed by X-ray Photoelectron Spectroscopy experiments. The potential level of RDF and RPF decreased rapidly comparing to coals in the next of the electrochemical reaction because the surface area and pore volume investigated by nitrogen gas adsorption tests were smaller than coals. This characteristic signifies the contact surface between electrolyte and fuel is restricted. The potential of fuels was maintained to the high current density region over 40 mA/cm<sup>2</sup> by total carbon component. The maximum power density of RDF and RPF reached up to 45~70% comparing to coal. The obvious improvement of maximum power density by increasing operating temperature was observed in both refuse fuels.

**Key words** : Direct carbon fuel cell(직접탄소 연료전지), Electrochemical reaction(전기화학 반응), Refuse fuel(폐기물 고형연료), Fuel property(연료 물성)

## 1. 서 론

연료전지는 연료의 화학에너지를 전기에너지로

직접 전환하는 시스템이며<sup>1)</sup> 그 중, 직접탄소 연료전지(DCFC)는 친환경적이며, 매우 높은 효율의 발전 시스템으로 많은 관심을 받고 연구되고 있다<sup>2,4)</sup>. 직접탄소 연료전지의 생성물이 이론적으로 순수한 이산화탄소이기 때문에 적절한 후처리 기술(carbon capture & storage, CCS)과 연결하여 현재 전 세계적으로 많은 관심을 받고 집중적으로 연구되고 있는 문제 중 하

<sup>†</sup> Corresponding author : choigm@pusan.ac.kr

[ 접수일 : 2012.9.26 수정일 : 2012.10.23 게재확정일 : 2012.10.26 ]

Copyright © 2012 KHNES

**Table 1** The proximate and ultimate analysis of fuels

Fuel	Proximate analysis (wt.%)				Ultimate analysis (wt.%)				
	Moi.	VM	FC	Ash	C	H	O	N	S
Adaro coal <sup>4)</sup>	14.23	40.95	42.01	2.82	71.20	5.27	18.93	1.28	0.03
Openblue coal <sup>4)</sup>	25.9	44.57	27.37	2.17	53.4	4.78	26.92	0.62	0.23
RDF	4.29	61.94	7.49	26.29	28.04	3.68	21.51	0.78	0.12
RPF	2.62	81.08	7.87	8.44	43.51	6.18	28.91	0.15	0.01

Moi.: moisture; VM: volatile matter; FC: fixed carbon

나인 이산화탄소 배출에 하나의 해결 방안을 제시할 수 있다<sup>2,3)</sup>. 또한, 직접탄소 연료전지의 가장 큰 장점 중 하나는 다양한 종류의 탄소 고체를 연료로 사용 가능하다는 것이다<sup>2-9)</sup>. 그러므로 자원 고갈 문제에 직면한 석탄을 대신하여 바이오매스, 폐기물 고형연료, 슬러지 등 다양한 탄소계열 연료의 적용이 가능하다.

현재 산업의 발전 및 인류의 생활수준이 상승하면서 사람들의 생산 및 소비 활동이 활발해졌으며, 이러한 변화는 도시를 중심으로 급격한 폐기물의 증가를 초래하였다. 현재 국내에서도 이러한 폐기물들을 기존의 방법으로 처리할 경우, 생산되는 양에 비해 그 속도가 늦어 많은 문제를 유발하고 있다<sup>10,11)</sup>. 이러한 폐기물의 가장 이상적인 처리 방법은 이들을 재활용하여 다시 연료로 소비하는 것이다<sup>11)</sup>. 이를 위하여 연구 및 개발된 재료가 도시 및 산업 폐기물을 성형하여 생산된 RDF 및 RPF이다.

그러므로 본 연구에서는 직접탄소 연료전지의 에너지원으로서 refuse derived fuel(RDF) 및 refuse plastic/paper fuel(RPF)를 적용하여 성능을 분석하였으며, 기존 석탄 반응과의 비교를 통하여 전기화학 반응 특성에 대하여 논의하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 연료의 선정

본 연구에서는 다양한 종류의 폐기물 고형연료 중에서 현재 국내 폐기물 발전에 사용되고 있는 RDF와 RPF를 각 한 종류씩 선정하였다. 직접탄소 연료전지에

서 주로 사용되는 석탄의 성능 및 전기화학 반응 특성과 비교하기 위하여 기존 연구에서 발표된 저등급 석탄 2종(adaro coal, openblue coal)의 결과를 참고하였다<sup>5)</sup>.

폐기물 고형연료 (RDF)는 도시 폐기물을 고형연료화 한 것으로 발열량을 조절하기 위하여 플라스틱 계열의 고분자 물질을 일부 첨가하여 성형한 성형연료이다. 본 연구에 사용된 폐기물 고형연료는 원주시 RDF 사업부에서 현재 생산 및 판매되고 있는 제품이며, 원주 시청의 협조를 얻어 연구를 진행하였다.

일반적으로 RDF 보다는 상위 등급의 연료로 인식되는 폐플라스틱 고형연료(RPF)는 중량기준으로 폐플라스틱을 60% 이상 첨가하여 만든 고형연료로서, 우리나라에서는 환경부 고시 제 2003-127호에 품질과 사용처에 대한 기준이 정해져 있다. 본 연구에 사용된 RPF는 국내 기업에서 현재 생산 및 판매하고 있는 제품으로서 가공 시 첨가된 원료의 성질에 따라 연료의 성분 및 특징이 일정부분 변화하는 특성이 있다. RPF는 플라스틱과 고분자 계열의 연료를 많이 함유하고 있으므로 연료 내부의 탄소 함량이 매우 높고 발열량 또한 매우 높다<sup>10)</sup>.

각 연료들의 공업분석은 ASTM(stands for American Society for Testing and Materials) 방법에 따라 TGA 701(LECO, USA) 장비를 사용하여 수행되었으며, 원소분석은 Elementar Analysen Systeme(KBSI Busan Center, Korea)에 의해 수행되었다. 각 연료의 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. RDF 및 RPF는 연료의 구성 성분에 따라 결과 값이 달라질 수 있으므로 각각 10회 이상의 실험을 수행하고 가장 타당한 값을 선정하였다. 연료에 포함된 다량의 휘발분에 의해

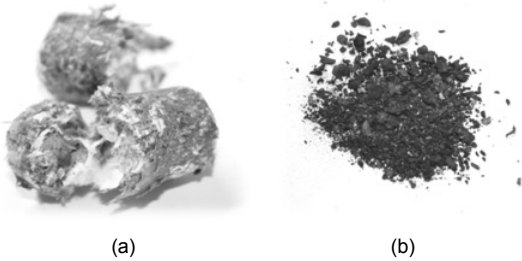


Fig. 1 Photograph of (a) raw RDF/RPF and (b) their char

여 장비 및 전극의 오염 가능성이 존재하기 때문에 실험을 위한 모든 연료는 탄화과정을 거쳐 휘발분을 제거하였다. 모든 연료는 질소 분위기에서 1173K까지 온도를 5K/min의 속도로 탄화시켰으며 200mesh와 300mesh sieve를 사용하여 그 사이 크기의 연료를 사용하였다. 탄화 전후의 RDF 및 RPF 직접사진을 Fig. 1에 나타내었다.

## 2.2 직접탄소 연료전지 시스템 구성 및 실험 방법

직접탄소 연료전지의 성능과 전기화학 반응 특성을 분석하기 위하여 기존의 연구들을 바탕으로 제작한 측정 시스템을 Fig. 2에 간략히 나타내었다<sup>5,9)</sup>. 본 연구에서는 3 종류의 은 전극을 사용하여 전기화학 반응의 특성을 측정하였다. 작업전극의 크기는 3.6mm × 37.2mm이며, 유효 면적은 1.34cm<sup>2</sup>으로 산술적으로 계산하였다. 직접탄소 연료전지에 관한 자세한 설명은

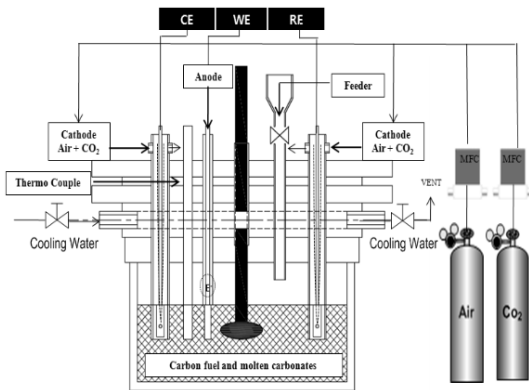


Fig. 2 Schematic diagram of the DCFC system

이전 연구에 언급하였다<sup>5)</sup>. 시스템의 전기화학 신호를 측정하기 위한 장비로는 KST-P1 potentio/galvaon stat (Physio Lab, Korea)를 사용하였으며, chrono-potentiometry 방법을 사용하여 1mA/s의 속도로 신호를 측정하였다.

## 2.3 연료 특성 분석 방법

### 2.3.1 열반응 특성

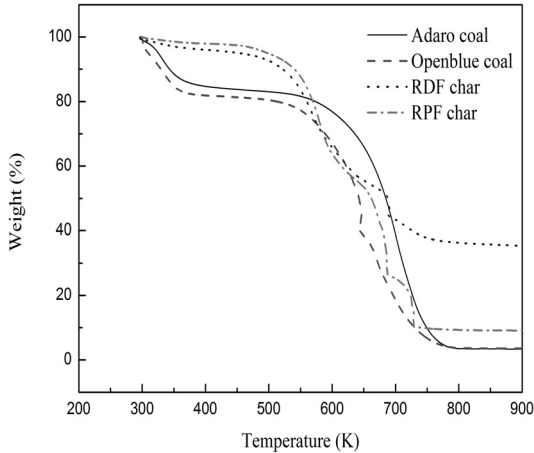
직접탄소 연료전지(DCFC)의 작동 온도는 700K 이상의 고온이기 때문에, 대부분의 연료는 열에 의한 반응을 하게 된다. 그러므로 선정된 연료의 열 반응을 분석하기 위해 열중량 분석장비인 Q-50(TA instrument, USA)을 이용하여 열반응 특성 분석 실험을 수행하였다. 각 실험에서는 20mg의 샘플을 사용하였으며, 100ml/min의 산화제를 공급하였다. 주위 분위기 온도는 상온에서 303K까지 가열한 후 5분 동안 등온 상태를 유지한 후, 10K/min의 승온 속도로 1173K까지 가열하였다.

### 2.3.2 가스 흡착 특성

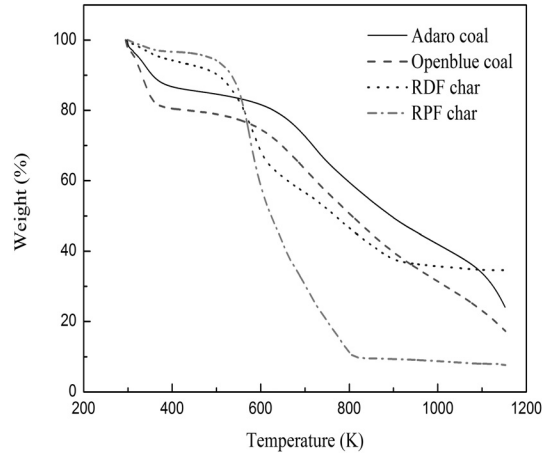
질소 가스의 흡착 특성을 이용하여 연료의 기공 및 표면적의 크기를 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 분석을 위하여 Brunauer Emmett Teller(BET) 방정식을 적용한 기체흡착장치인 ASAP 2020(Micromeritics Co., USA)를 사용하였다. 흡착제로는 77.15K의 질소 가스를 사용하였다. 흡착 실험의 압력 범위는 P/Po = 0.05~0.95로 설정하였으며, 탈착실험을 위한 압력의 범위는 P/Po = 0.95~0.1로 설정하였다. 연료의 비표면적은 BET흡착 등온식을 이용하여 P/Po = 0.05에서 0.2 사이의 값을 활용하여 계산하였다.

### 2.3.3 표면 작용기

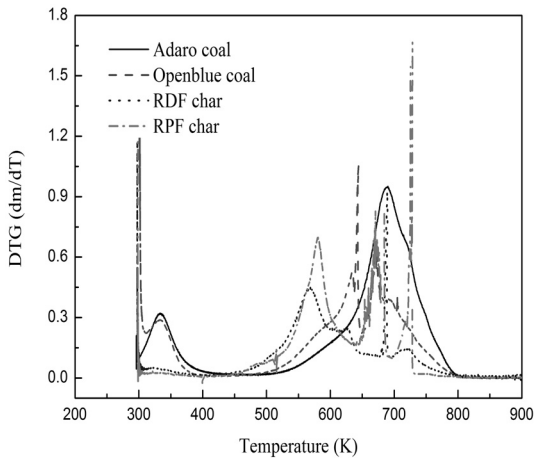
연료 표면의 작용기를 분석하기 위하여 X-ray Photoelectron Spectroscopy(XPS) 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 Theta Probe AR-XPS System(Thermo Fisher Scientific, U.K) 분석기를 활용하여 ESCALAB250 XPS system을 구축하였다. 표면 작용기 분석을 위하여 15kV,



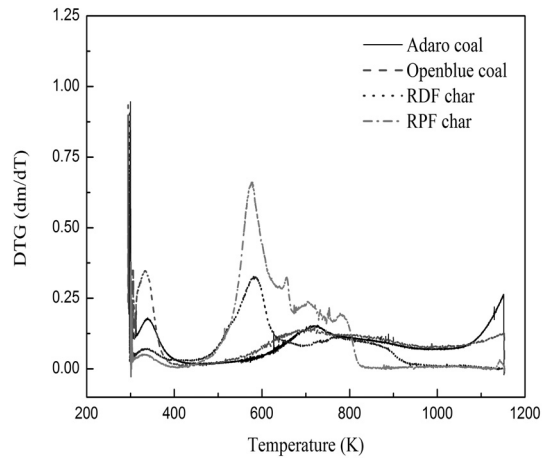
(a)



(a)



(b)



(b)

**Fig. 3** Thermal reactivity of fuels under air, (a) TGA results, (b) DTG profiles

**Fig. 4** Thermal reactivity of fuels under CO<sub>2</sub> gas, (a) TGA results, (b) DTG profiles

150W의 전원을 이용한 단색의 Al K $\alpha$ ( $h\nu=1486.6\text{eV}$ ) 선을 조사하였으며 Spot size는 400 $\mu\text{m}$ 로 설정되었다. Pass energy는 50eV로 일정하게 유지하였으며, 데이터는 0.1eV 단위로 획득하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 연료특성 분석

각 연료의 열 반응 특성을 알아보기 위하여 열 중

량 분석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 공기 분위기에서의 실험 결과에서 RDF 및 RPF는 거의 수분을 보유하고 있지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한, 다량의 휘발분으로 인하여 석탄보다는 낮은 온도에서 중량이 감소하기 시작한다. Fig. 3(b)에 나타난 DTG 그래프에서 400K 이상의 온도, 즉 수분이 증발하고 난 뒤에 나타나는 첫 피크에서는 RPF가 RDF보다 높은 피크 값을 나타낸다. 이는 RPF의 초기 반응률이 RDF보다 높다는 것을 의미한다. Openblue 탄은 500K 부근에서 질

**Table 2** Gas adsorption characteristics of fuels

Fuel	S <sub>BET</sub>	V <sub>total</sub>	D <sub>pore</sub>
Adaro coal <sup>4)</sup>	0.7968	0.002409	159.327
Openblue coal <sup>4)</sup>	0.3227	0.001260	21.7568
Adaro char <sup>4)</sup>	212.2973	0.118518	42.899
Openblue char <sup>4)</sup>	280.4394	0.133381	2.7169
RDF char	2.7105	0.004538	195.083
RPF char	6.2919	0.006966	170.956

S<sub>BET</sub> : surface area of sample (m<sup>2</sup>/g)

V<sub>total</sub> : pore volume of sample (cm<sup>3</sup>/g)

D<sub>pore</sub> : mean diameter of pores calculated by BJH adsorption test (Å)

량이 감소하여 800K 부근까지 여러 개의 피크를 생성하며 연속적으로 반응한다. Adaro 탄은 휘발분 영역과 char 반응 영역이 뚜렷하게 구분되지 않으며, 대부분의 반응은 600K 이상의 고온 영역에 집중되어 있다. Adaro 탄의 주반응 영역인 고온 영역은 주로 char가 반응하는 영역이며, RPF는 구성 물질의 반응 특성으로 인하여 높은 반응성을 보이지만, 반응 종료 온도는 상대적으로 낮다. 반면, RDF는 RPF보다 낮은 반응속도를 보이지만, 800K까지 연속적으로 반응한다.

각 연료들의 이산화탄소 분위기에서의 열중량 분석(가스화 반응특성) 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 직접탄소 연료전지 내부는 대부분이 이산화탄소로 구성되므로, 가스화 반응에 의한 열 반응 특성을 분석하는 것은 매우 중요하다. 가스화 반응에서는 전체적으로 피크의 높이(반응 속도)가 공기 조건에 비하여 낮았으나, RPF는 공기 조건과 비슷한 값을 나타내었다. 또한, RPF는 탄소와 연관된 고온 반응이 이산화탄소 조건임에도 불구하고 800K 부근에서 그 반응이 종료되었다. RDF의 경우 950K 이상의 영역까지 반응이 유지되었다. 이러한 열 반응 특성의 차이는 직접탄소 연료전지 내부에서의 전기화학 반응이 온도에 따라 서로 다른 경향을 보여줄 것으로 예상된다.

질소 가스를 이용한 연료의 가스 흡착 특성 실험 결과를 Table 2에 나타내었다. 석탄의 경우 탄화과정

**Table 3** Functional groups on the surface of fuels

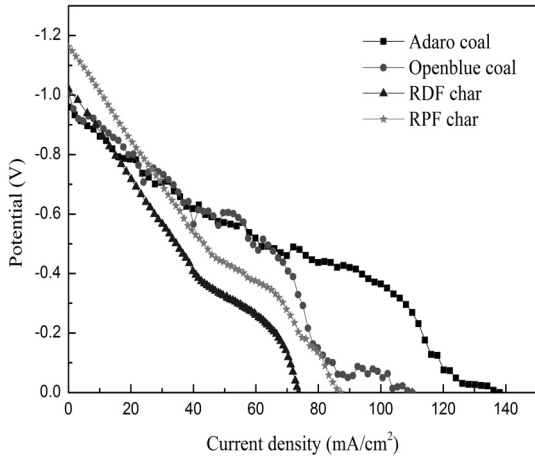
Fuel	C 1s (at. %)	O 1s (at. %)	O/C (%)
Adaro coal <sup>4)</sup>	71.76	22.64	31.55
Openblue coal <sup>4)</sup>	76.34	19.65	25.74
RDF char	77.55	13.33	17.2
RPF char	72.51	17.2	23.7

을 거치면서 표면적과 기공 체적 모두 증가하였다. 하지만, RDF 및 RPF의 경우 탄화과정을 거쳤음에도 불구하고 표면적과 기공체적은 석탄에 비하여 상대적으로 매우 낮은 결과로 원탄과 비슷한 수치를 나타내었다. 석탄 char에 비하여 상대적으로 적은 표면적과 낮은 기공 체적은 전해질과의 접촉 가능성을 줄여 전기화학 반응 전반에 걸쳐 성능의 저하를 초래할 것으로 예상된다.

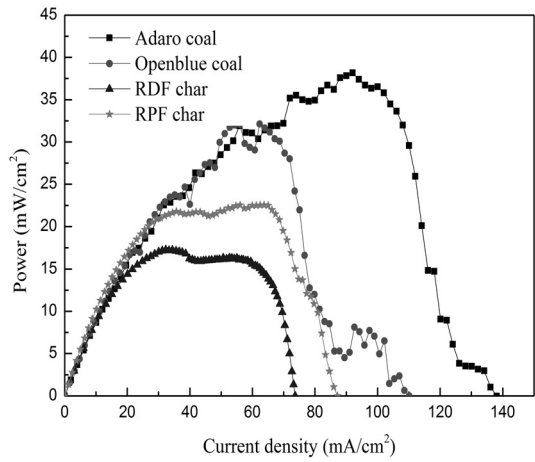
연료 표면에 존재하는 작용기의 구성을 분석하기 위하여 XPS 실험을 수행하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 분석 결과, 석탄, RDF 및 RPF의 표면에 존재하는 탄소 작용기의 분포는 유사하였다. 그 밖으로 석탄과 RDF 및 RPF에 의한 전기화학 반응의 초반부(표면 반응에 의한 영역)에서는 석탄과 유사한 경향을 나타낼 것으로 사료된다. 기존의 연구<sup>5,8,9)</sup>에 의하면 표면에 존재하는 산소 작용기는 전기화학 반응을 촉진시키는 중요한 역할을 수행한다. RDF 및 RPF의 표면에 존재하는 산소 작용기의 양은 석탄에 비하여 그 차이가 크지 않으므로 전기화학 반응은 유사한 경향을 보일 것으로 예상된다.

### 3.2 전기화학 반응 특성

직접탄소 연료전지 반응 시스템에서 각 연료의 전기화학 반응 실험을 작동 온도 973K에서 실험을 수행하였다. 각 연료의 전기화학 반응 측정 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었다. RPF를 제외한 연료들의 open circuit voltage(OCV)는 1.0V 정도로 나타났으나, RPF는 1.2V에 가까운 값을 나타내었다. RPF의 경우, Fig. 4에서 확인 할 수 있듯이 가스화 반응에서 다른 연료에 비



(a)



(b)

Fig. 5 Electrochemical reactions of fuels (a) i-V curves and (b) i-p curves

하여 매우 높은 반응성을 나타낸다. 이로 인하여 전기화학 반응에 의한 포텐셜 이외에 열반응에 의한 추가 포텐셜을 함유하게 된다<sup>12)</sup>.

OCV부터 20mA/cm<sup>2</sup>까지는 모든 연료가 유사한 경향으로 포텐셜이 감소한다. 이는 연료의 표면에 존재하는 탄소 및 산소 작용기의 분포가 유사하기 때문이다. 20mA/cm<sup>2</sup> 이후 석탄은 동일한 기울기로 포텐셜이 감소하는 반면, RDF 및 RPF는 급격하게 포텐셜이 감소하게 된다. 이는 RDF 및 RPF의 표면적 및 기공체적이 석탄에 비하여 매우 작으므로 전해질

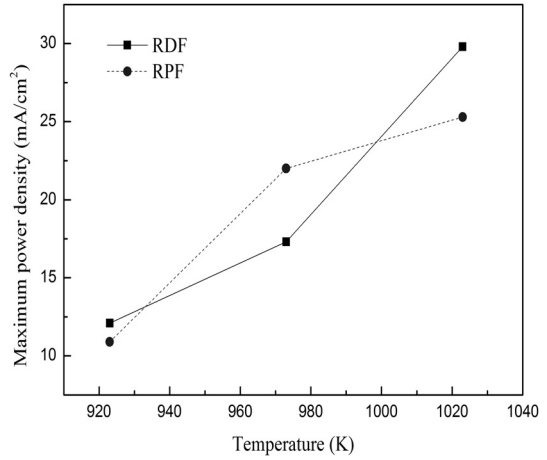


Fig. 6 Effect of operating temperature on the maximum power density of RDF and RPF

과 연료의 탄소 성분의 접촉 기회가 줄어들어 포텐셜을 급격하게 감소하기 때문이다.

모든 연료는 40mA/cm<sup>2</sup> 부근에서 기울기가 변화하게 되는데, RPF 및 Openblue 탄은 유사한 경향을 보이는 반면, RDF는 가장 낮은 70mA/cm<sup>2</sup> 부근에서 급격하게 포텐셜이 감소하게 된다. Adaro coal의 경우 120mA/cm<sup>2</sup> 영역을 넘어서 매우 높은 전류밀도 영역까지 포텐셜을 유지하게 된다. 이는 높은 전류 밀도 영역에서의 전기화학 반응은 연료에 함유된 전체 탄소의 양과 밀접한 연관이 있기 때문이다. 연료의 전체 탄소의 양은 Table 1에 나타나 있듯이 Adaro >> Openblue ≥ RPF > RDF의 순서이며 포텐셜을 유지할 수 있는 한계 전류밀도와 유사한 경향을 보인다.

각 연료의 전력 곡선을 Fig. 5(b)에 나타내었다. RDF와 RPF의 최대 전력 밀도는 각각 17.26, 22.54 mW/cm<sup>2</sup>으로 나타났으며, 이는 Adaro 탄 및 Openblue 탄의 최대 전력 밀도인 38.17, 32.13mW/cm<sup>2</sup>에 비하여 45~70% 수준을 나타내어 직접탄소 연료전지에서 활용 가능성을 보여주었다.

### 3.3 작동온도 변화에 따른 전기화학 반응 특성 변화

작동온도의 변화가 RDF와 RPF의 최대 전력밀도

에 미치는 영향을 분석하기 위하여 923, 973, 1023K 세 조건의 온도에서 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. RDF 및 RPF 두 연료 모두 주위 온도가 상승함에 따라 최대 전력 밀도는 상승하였다. 하지만, 작동 온도 상승에 의한 최대 전력 밀도의 변화가 두드러지게 나타나는 구간은 다르게 나타났다. RDF의 경우는 973K에서 1023K으로 상승하는 조건, RPF의 경우는 923K에서 973K으로 상승하는 조건에서 최대 전력 밀도가 크게 증가하게 되었다. 이러한 경향은 가스화 조건의 열 반응 결과에 나타난 연료의 활성화 특성에 많은 영향을 받게 된다. Fig. 4에 나타나듯이 RPF가 RDF에 비하여 낮은 온도에서 빠른 속도로 반응하며, 상대적으로 낮은 온도에서 반응이 종료된다. 그럼으로 RPF는 RDF 보다 상대적으로 낮은 온도 영역(920~970K)에서 주위 온도의 영향이 크게 나타나게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도시 환경문제 해결 및 신재생 에너지의 한 종류로서 많은 관심을 받고 있는 폐기물 고형연료를 연료전지에 활용하였다. 연료전지의 종류로는 직접탄소 연료전지(DCFC)를 활용하였다. 기존 연구에서 발표된 석탄과의 비교 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) RDF 및 RPF의 전기화학 반응의 초반부는 기존 석탄과 유사한 경향을 보였다. 이는 연료의 표면에 존재하는 탄소 및 산소 작용기가 유사하게 분포하기 때문이다.
- 2) 이후 영역에서 RDF 및 RPF의 포텐셜은 석탄보다 빠르게 감소하였으며, 이는 RDF와 RPF의 표면적 및 기공 체적이 작으므로 전해질과의 유효 접촉 면적이 작기 때문이다.
- 3)  $40\text{mW}/\text{cm}^2$  이후의 고 전류 밀도 영역 및 최대 전류 밀도는 연료에 포함된 전체 탄소의 양과 밀접한 관련이 있으며, 연료에 포함된 탄소의 양과 동일한 경향을 보였다.
- 4) 전체 탄소 함량이 석탄에 비하여 39~81% 수준인 폐기물 고형연료의 최대 전력 밀도는 석탄에 비하여 45~70%에 이르렀다.
- 5) RDF와 RPF 모두 특정한 온도 영역에서 온도 상승에 의한 최대 전력밀도의 개선이 두드러졌다. 이는 연료의 가스화 반응 특성과 연관성을 가진다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행된 연구결과임.

#### 참 고 문 헌

1. D. Shin, H. Seo, H. Lim, S. Lee, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Plate Type Reformer for MCFC", Tans. of the Korean Hydrogen and New Energy Soci., Vol. 17, 2006, p. 403.
2. S. Giddey, S.P.S. Badwal, A. Kulkarni, and C. Munnings, "A comprehensive review of direct carbon fuel cell technology", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 38, 2012, p. 360.
3. D. Cao, Y. Sun, and G. Wang, "Direct carbon fuel cell: Fundamentals and recent developments", Journal of Power Source, Vol. 167, 2007, p. 250.
4. A. Elleuch, A. Boussetta, and K. Halouani, "Analytical modeling of electrochemical mechanisms in CO<sub>2</sub> and CO/CO<sub>2</sub> producing Direct Carbon Fuel Cell", Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol. 668, 2012, p. 99.
5. S. Y. Ahn, S. Y. Eom, Y. H. Rhie, C. E. Moon, Y. M. Sung, G. M. Choi, and D. J. Kim, "A study on the effect of coal properties on the electrochemical reactions in the direct carbon fuel cell system", Journal of KSME B, Vol. 36, No. 10, p. 1033.
6. D. G. Vutetakis, D. R. Skidmore, and H. J. Byker, "Electrochemical Oxidation of Molten Carbonate-Coal Slurries", Journal of the electrochemical society, Vol. 34, 1987, p. 3027.

7. X. Li, Z. Zhu, R. D. Marco, J. Bradley, and A. Dicks, "Carbon Nanofibers Synthesized by Catalytic Decomposition of Methane and Their Electrochemical Performance in a Direct Carbon Fuel Cell", *Energy & Fuels*, Vol. 23, 2009, p. 3721.
8. X. Li, Z. Zhu, R. D. Marco, A. Dicks, J. Bradley, S. Liu, and G. Lu, "Factors that determine the performance of carbon fuels in the direct carbon fuel cell", *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 47, 2008, p. 9670.
9. X. Li, Z. Zhu, R. D. Marco, J. Bradley, and A. Dicks, "Evaluation of raw coals as fuels for direct carbon fuel cells", *Journal of Power Source*, Vol. 195, 2010, p. 4051.
10. D. S. Jeong, H. B. Lee, and Y. S. Choi, "Status of Technology development of RDF for municipal wastes in Korea", *Symposium of KOSECC*, 2007.
11. M. W. Seo, S. D. Kim, S. H. Lee, and J. G. Lee, "Pyrolysis characteristics of coal and RDF blends in non-isothermal and isothermal conditions", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* Vol. 88, 2010, p. 160.
12. T. Siengchum, F. Guzman, S. S. C. Chuang, "Analysis of gas products from direct utilization of carbon in a solid oxide fuel cell", *Journal of Power Source*, Vol. 213, 2012, p. 375.