



직접탄소 연료전지 기술의 현황 및 전망



황 준 영
jyhwang@kitech.re.kr

서울대학교 기계공학과 학사
서울대학교 기계공학과 공학박사
한국생산기술연구원 융복합기술연구본부 수석연구원

1. DCFC 기술의 특징점

1.1 기술적 측면

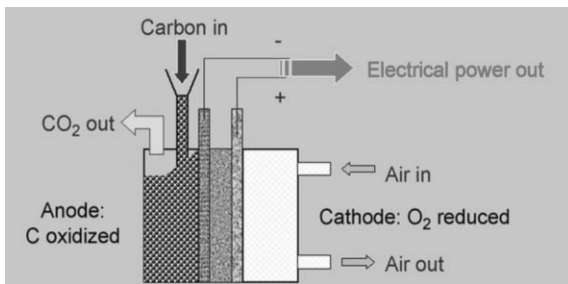
직접탄소 연료전지(Direct Carbon Fuel Cell, DCFC)는 탄소를 연료로 하는 전기화학 반응을 이용하는 연료전지이다(그림 1). 앞에 직접(Direct)이란 단어를 굳이 사용한 이유는 기존에 탄소를 개질하여 발생시킨 기체 상태의 2차 연료를 사용하지 않고 원래의 탄소를 바로 전지 연료극에 투입한다는 의미를 강조하기 위함이다.

DCFC의 초기 개념은 1896년도 미국에서 제안되었으나 상용화 기술의 어려움으로 인하여 큰 관심을 받지 못하고 있었다^[1, 2]. 21세기에 들어서면서 미국 DOE의 지원하에 미국 기업과 연구기

관을 중심으로 DCFC에 대한 본격적인 연구가 다시 시작되었으며, 최근에는 중국에서도 커다란 관심을 보이고 있다. 그러나 세계 어디에서도 아직까지 완성된 제품을 공개하지 않고 있으며, 선진 기술 보유기업 및 연구소의 기술 보호로 인하여 상세한 기술 정보 입수가 어려운 상황이다^[3].

표 1에서 보는 바와 같이 고체 연료를 사용하는 DCFC는 연료 사용률이 높고 생성물인 이산화탄소로 인한 연료 희석 효과가 작용하지 않으므로 이론적으로는 70% 이상의 높은 에너지 변환효율이 가능하다^[3]. 그러나 아직까지는 상대적으로 낮은 출력 밀도, 낮은 신뢰성 및 기초 연구결과의 부족으로 인하여 산업계의 본격적인 관심을 끌지는 못하고 있다.

이번에 주로 소개하고자 하는 DCFC는 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)와 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel



[그림 1] 직접 탄소 연료전지 개념도^[3]

<표 1> 수소, 메탄, 탄소의 연료전지 이론 효율 비교 (LLNL, 2003)

Fuel	Theoretical limit = $\Delta G^\circ(T)/\Delta H^\circ_{std}$	Utilization efficiency, μ	$V(i)/V(i=0) = \epsilon_v$	Actual efficiency = $(\Delta G/\Delta H^\circ_{std})(\mu)(\epsilon_v)$
C	1.003	1.0	0.80	0.80
CH ₄ ^a	0.895	0.80	0.80	0.57
H ₂	0.70	0.80	0.80	0.45

Cell, MCFC)의 기술이 접목된 신개념의 연료전지로서, 전해질은 고체산화물을 사용하고 전극은 용융탄산염과 탄소의 혼합물을 사용한다. 이는 해당기술이 고체 연료인 탄소를 용융탄산염에 용해시킴으로써 연료극에서의 반응율을 높이는 장점이 있기 때문이고, 향후 SOFC 기술의 발전이 기대됨에 따라 SOFC와 전해질을 공유함으로써 산업 파급 효과를 극대화하는데 유리할 것이라는 판단 때문이다.

1.2 경제·사회적 측면

DCFC는 석탄을 연료로 사용하고 생성물로서 이산화탄소를 배출한다는 측면에서는 탈탄소 청정에너지라 볼 수 없다. 그러나 배출가스가 순수한 이산화탄소이므로 현재 정부 지원하에 개발 추진 중인 CCS(Carbon Capture and Storage) 사업과 이상적으로 결합할 수 있는 기술이며, 이처럼 CCS 기술과 연계할 경우 궁극적으로 Zero Emission을 구현할 수 있다.

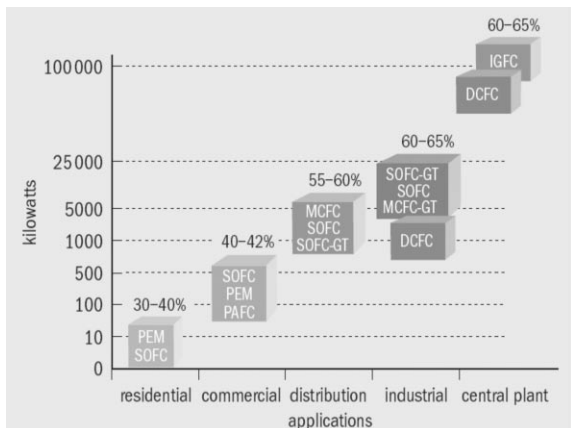
DCFC는 상대적으로 매장량이 풍부한 석탄을 최소한의 연료 처리 비용으로 사용할 수 있으므로 완전한 신재생에너지 시대가 도래하기까지의 과도기적 시기에 가장 경제적인 발전시스템으로

자리매김할 수 있을 것으로 기대된다.

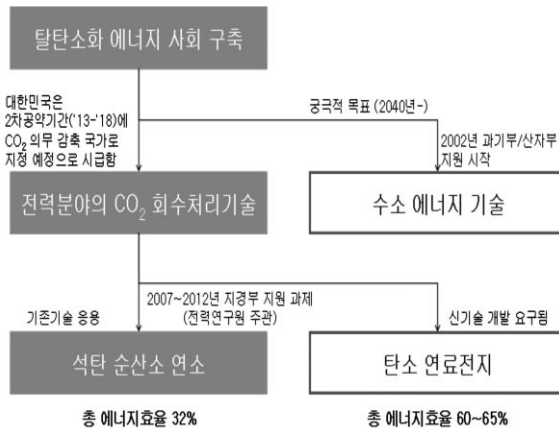
앞서 기술적인 측면에서 살펴보았듯이, DCFC의 이론 최고 효율은 타 연료전지보다 높은 유망한 기술이다. 그러나 DCFC가 고온에서 작동하며 타연료전지에 비하여 상대적으로 복잡한 연료공급장치가 요구되는 점을 고려할 때, 중대형 발전시스템용 연료전지에 보다 적합할 것이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 MW 급 이상 중대형 규모에서는 타 연료전지보다 우수한 발전 효율을 갖는 시스템을 구성할 수 있을 것으로 예상된다.

또한 이렇게 될 경우 이미 기존 화력 발전기에 적용되고 있는 미분탄 버너 기술과 공유되는 기술이 많으므로 해당 기술을 보유하고 있는 국내 발전 업체 및 대형 설비 업체의 적극적인 관심이 예상되며, 나아가서 국제 경쟁력 확보에 유리할 것으로 기대된다.

정책적인 측면에서도, DCFC는 기존 화력 발전기의 미분탄 공급 시스템과 CO₂ 회수 시스템을 이용할 수 있으므로 기존 장비 및 기술 활용이 가능하고 기존 노후 발전 설비의 리모델링에 유리하다. 나아가서 정부에서 추진중인 대형 개발 프로젝트인 IGCC 및 CCS 사업의 후속 연계사업으로서도 적합한 요건을 갖추고 있다.



[그림 2] 연료전지의 규모 별 에너지 효율과 경쟁력 보유 기술 (EPRI)



[그림 3] 국가 에너지 비전과 탄소연료전지



2. DCFC 기술 개발 현황

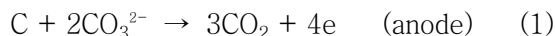
앞서 언급하였듯이 DCFC는 탄소를 연료로 하는 연료전지를 총칭하며, 표 2에서 볼 수 있듯이 다양한 전해질과 전극을 소재로 한 연료전지가 개발 중이다. 현재 개발되고 있는 DCFC는 사용되는 전해질의 종류에 따라 대별할 수 있으며 현재까지 용융탄산염, 용융수산화물 및 고체산화물 전해질을 사용하는 DCFC가 연구되었다. 지금까지 주로 미국의 연구기관 및 기업에 의하여 DCFC 연구가 주도되어 왔으며, 최근에는 중국이 활발하게 DCFC 기술 개발에 참여하고 있는 실정이다.

2.1 용융탄산염 전해질 DCFC

(1) 이론적 배경

DCFC의 한 종류로서 MCFC에 널리 이용되는

혼합 용융탄산염을 전해질로 사용하는 용융탄산염 전해질 DCFC가 있다. 용융탄산염 전해질 DCFC는 기존 MCFC와 마찬가지로 높은 이온전도성을 갖는 장점이 있을 뿐만 아니라 생성물이 CO₂이므로 전해질의 안정성을 위해 필수적인 CO₂를 별도로 공급할 필요가 없다는 매력 있다^[4, 5]. 용융탄산염 전해질 DCFC의 연료극과 공기극의 전기화학 반응식 및 셀 전압은 아래의 식과 같다^[4].



$$E_{\text{cell}} = E^0 - (RT/4F) \ln [CO_2]_{\text{anode}}^3 + (RT/4F) \ln ([O_2] [CO_2]_{\text{cathode}}^2) \quad (3)$$

위 식에서 보는 바와 같이 셀 전압이 연료극에서 생성되고 산소극에서 일부 소모되는 이산화탄소

<표 2> 해외 DCFC 기술 개발 현황

Vendor	Contained Energy	SRI	SARA	CellTech Power	Direct Carbon Technologies	Akron University	University of Hawaii
Fuel	De-ashed and devolatilized coal	Raw coal	Devolatilized coal	Raw or gasified coal	Raw coal	Raw coal	Biomass char
Anode	Solid fuel particles coated with molten carbonate	Raw coal in flowing molten carbonate (currently carbonate)	Metal basket containing raw coal particles suspended in molten carbonate bath	Sn/SnO ₂ melt	Currently Pt for experimental convenience	Ni or Cu	Compressed charcoal
Electrolyte	Molten carbonate	Yttria-stabilized Zirconia (YSZ)	Ni with 2% Ti cathode melt container	YSZ	YSZ	YSZ	Aqueous KOH
Cathode	Lithiated NiO	LSM* or other SOFC type	Metal vessel containing molten alkali	LSM*	LSM* or other SOFC type	LSM* / YSZ	Silver for experimental convenience
Current R&D Status	Assembling 5 cell stack at 100 watts	Unit with six cathode tubes in molten carbonate	Single 2-chamber cell with different electrolytes	Concepts for coal use	Single tubular cell with fluid bed of carbon	Single button anode in tube	Single KOH cell operating at ~220 °C

* strontium-doped lanthanum manganite

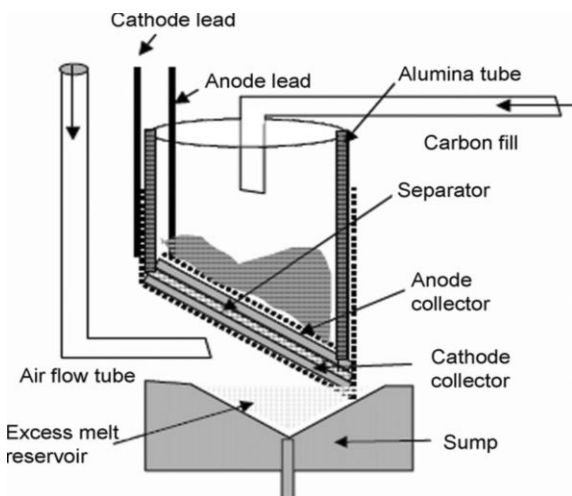


농도의 함수이므로, 이산화탄소의 분압 또는 부하 변동이 성능에 영향을 미치는 특성이 있다.

(2) 기술 개발 현황

용융탄산염 전해질 DCFC 기술 분야의 선두 그룹은 미국 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)의 Cooper 그룹이다^[6-10]. LLNL에서는 2005년에 전해질로 사용한 32Li₂CO₃-68K₂CO₃ 혼합 탄산염의 양을 안정적으로 관리하기 위하여 그림 4에서 보인 바와 같이 기울어진 판형 셀을 이용한 시스템을 제안하였다. 이때 연료극이자 연료로서 100 mm 이하의 탄소 입자 페이스트를 사용하였으며, 공기극 및 집전부로서 니켈 foam을 사용하였다. 이로부터 800°C 운전 시 약 150 mA/cm²의 전류밀도에서 최대 약 100 mW/cm²의 출력밀도를 얻을 수 있었다 (그림 5).

현재는 연료/연료극 소재와 공기극 소재 최적화에 대한 연구가 중점적으로 이루어지고 있으며 연료 중 불순물인 황과 회성분이 용융탄산염 전해질 DCFC 성능 약화에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되고 있다.



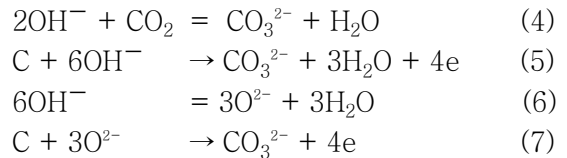
[그림 4] LLNL에서 개발한 기울어진 형상의 용융탄산염 전해질 DCFC^[7]

2.2 용융수산화물 전해질 DCFC

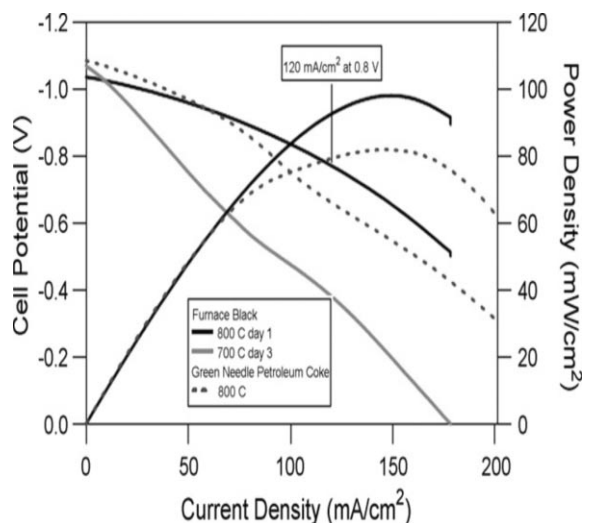
(1) 이론적 배경

최초로 고안된 직접탄소 연료전지에서는 수산화물(hydroxide)을 전해질로 사용하였다^[1, 2]. 액상의 수산화물을 전해질로 사용할 경우 600°C 이하의 저온에서 운전이 가능하며, 따라서 재료 선택의 범위가 넓어지고 CO₂ 발생 문제에 대한 걱정을 줄일 수 있다.

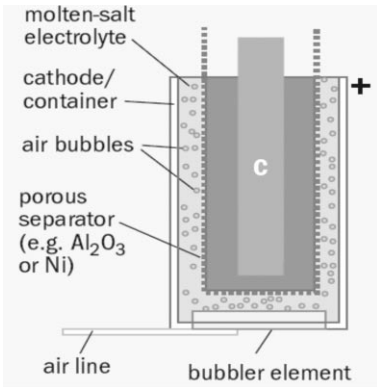
액상의 수산화물 전해질 및 연료극에서 발생하는 주요 전기화학 및 화학 반응은 다음과 같다^[12, 13].



위 반응식에서 알 수 있듯이 탄소의 전기화학 반응 과정에서 탄산 이온이 발생하게 되는데 탄산 이온의 농도를 일정 수준 이하로 유지하여 연료 전지의 성능을 유지하기 위해서는 반응 (4)가 중요하다.



[그림 5] LLNL DCFC의 성능 곡선^[7]



[그림 6] SARA에서 개발한 수산화염 전해질 DCFC^[14]

(2) 기술 개발 현황

미국의 민간 기업인 SARA(Scientific Application & Research Associates)는 전통적인 수산화물을 전해질로 사용하는 일종의 1차 전기 개념이 접목된 소형 직접탄소연료 전지를 개발하였다^[11].

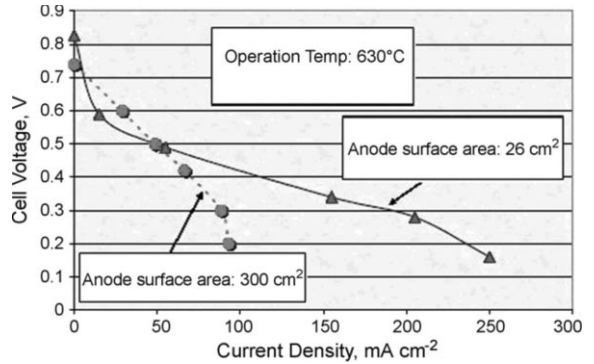
SARA의 Zecevic 그룹은 탄소봉을 소모성 연료이자 연료극으로 사용하고, 용융 NaOH 를 전해질로 사용하고, Ni foam을 덴 강이나 Fe₂Ti 강을 공기극으로 사용한 시스템을 개발하였으며 (그림 6), 반응 (4)를 활성화하기 위하여 가습된 공기를 산화제로 사용함으로써, 운전 온도 630°C에서 약 180 mW/cm²의 최대 출력을 얻었다(그림 7).

최근에는 West Virginia Univ. 와의 공동 연구를 통하여 탄소봉 대신에 실제 석탄에 가까운 연료를 적용하는 실험을 수행하고 있다.

2.3 고체산화물 전해질 DCFC

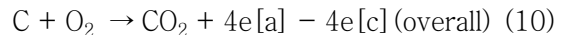
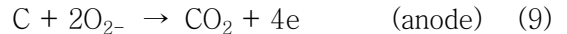
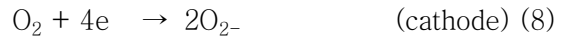
(1) 이론적 배경

고체산화물 전해질 연료전지(Solid Oxide Electrolyte Direct Carbon Fuel Cell, SO-DCFC)는 기존의 SOFC 기술과 소재를 활용한다는 점에서 큰 장점이 있다. 상대적으로 높은 운전 온도는 해결해야 할 과제일 것이다.



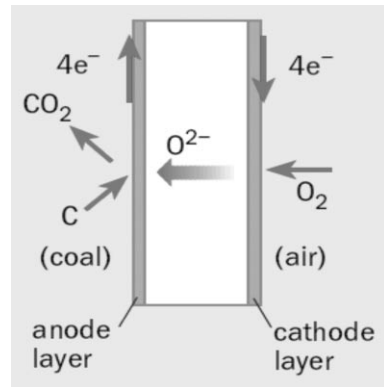
[그림 7] SARA에서 개발한 수산화염 전해질 DCFC의 성능 곡선^[14]

그림 8에 SO-DCFC의 기본 원리를 도시하였다. 공기극(Cathode)에서 생성된 산소 이온(O²⁻)은 고체산화물 전해질을 통하여 연료극(Anode)으로 이동한 후 탄소 원자와 반응하여 이산화탄소를 생성시킨다. 이 과정에서 4개의 자유전자를 내놓는다.

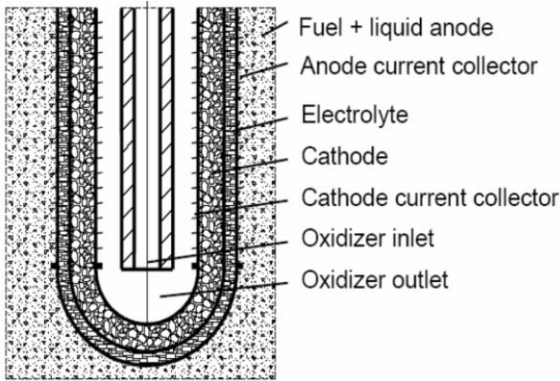


(2) 용융탄산염 연료극 DCFC

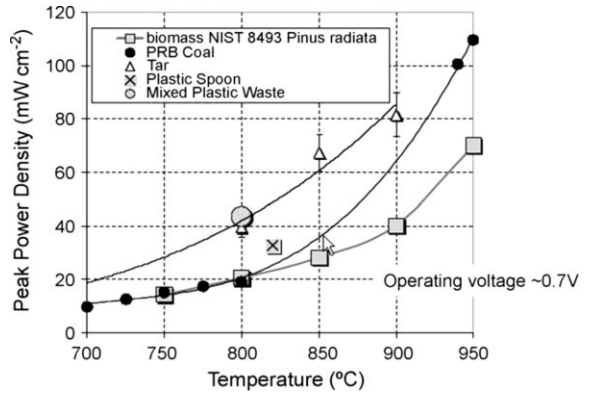
미국의 민간 연구기관인 SRI International의



[그림 8] 직접탄소 연료전지의 원리^[15]



[그림 9] SRI에서 개발한 용융탄산염 전극 직접탄소 구조^[16]



[그림 10] SRI에서 개발한 용융탄산염 전극 직접탄소 연료전지 성능^[16]

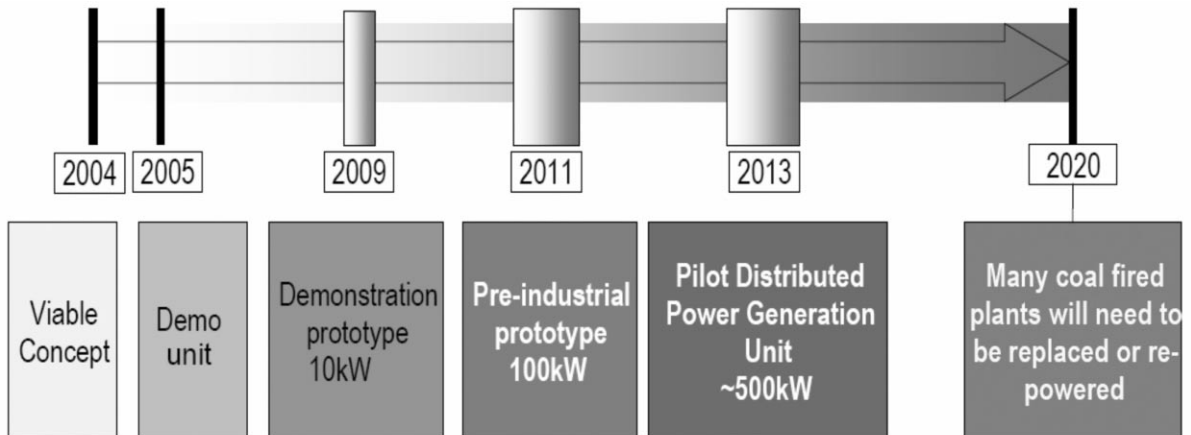
Balachov 그룹은 고체산화물을 전해질로 사용하고 용융탄산염과 탄소의 혼합물을 연료극으로 사용하는 일종의 융합 개념의 DCFC 데모 시스템을 개발하였다^[16, 17]. 그림 9에서 보이는 바와 같이 이미 널리 사용되고 있는 튜브 형태의 YSZ 전해질과 LSM 공기극을 사용하였으며, 연료극으로는 Li_2CO_3 , K_2CO_3 및 Na_2CO_3 을 적절히 혼합한 후에 탄소 가루를 첨가한 탄산염 혼합물을 사용하였다. 집전부로는 니켈 망을 사용하였다.

실험 결과, 카본 블랙부터 고형 유기물까지 다양한 연료를 사용하여 거의 유사한 출력 성능이 나타남을 확인하였으며, 약 950°C 운전 하에서 출력

밀도 100 mW/cm²의 성능을 얻을 수 있었다^[16]. SRI에서는 2009년까지 100 kW급 프로토타입을 완성하고, 2020년까지는 상용화 준비를 완료하여 노후 석탄화력발전소 장비의 대체 장비로 활용하는 사업 모델을 제시하고 준비 중이다 (그림 10, 11).

(3) 탄소 연료극 DCFC

미국의 민간 기업인 CellTech Power LLC에서는 고체 탄소를 직접연료로 사용하는 고체산화물 전해질 DCFC 기술을 연구 중이다^[18, 19]. YSZ 전해질과 LSM 공기극을 사용하였으며, 연료극 집



[그림 11] SRI의 상용화 전략^[16]



전부로 백금 망을 사용하였다. 용융탄산염을 사용하지 않고 탄소 입자를 직접연료로 사용함으로써 시스템의 구조와 신뢰성을 개선시킬 수 있었으나 성능은 다소 떨어지는 결과를 보였다. 이들은 1,002°C 운전을 통하여 50 mW/cm²의 출력을 얻었다.

또 다른 미국 민간 기업인 CCE(Clean Coal Energy)는 그림 12에서와 같이 SOFC와 유동층 기술을 융합한 DCFC 개념을 고안하였다. 그러나 아직까지 이 아이디어는 구체적인 시스템으로 실현되지는 못하고 있다.

2.4 국내 DCFC 관련 기술 현황

(1) 발전용 연료전지 기술 현황

기존의 연료전지 분야 중에서 DCFC와 기술적으로 밀접한 연관성이 있는 대표적인 분야는 MCFC와 SOFC이다. 이 두 가지 연료전지 분야는 국내에서 중대형 연료전지 시장을 대표하는 기술 분야로서 우리나라가 폭넓은 전문가 풀을 보유하고 있을 뿐만 아니라 다수의 국내 전문기업이 관

심을 갖고 상용화 기술 개발을 추진 중이다. 즉 우리나라는 DCFC 기술이 상대적으로 빠르게 성장할 수 있는 토대를 갖추고 있다고 볼 수 있다.

특히 국내의 MCFC 기술은 세계 최고의 수준을 자랑한다. KIST와 한국전력을 중심으로 기초 연구개발이 이루어져 왔고 포스코파워, 두산중공업 등의 국내 기업이 발전용 MCFC 국산화 및 상용화 사업을 진행 중이다.

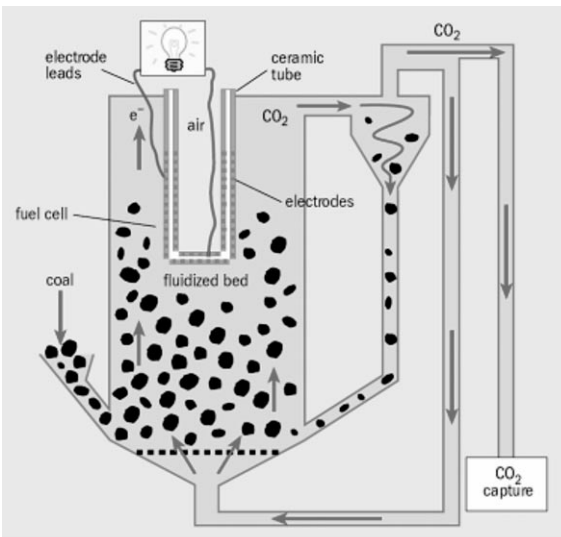
최근 진행된 연구개발 산업으로는 두산중공업의 “고효율 300 kW급 내부개질형 MCFC 스택 및 시스템 국산화 기술 개발” 사업과 “플랜트 연계형 MW급 내부개질형 MCFC 시스템 국산화 개발” 등이 있다.

SOFC는 최근 전세계에서 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 연료전지로서 국내에서도 대학과 에너지기술연구원 등을 중심으로 기초 연구개발이 활발히 이루어져 왔다. 국내 기업으로는 포스코파워, 삼성SDI, 삼성전기 등이 상용화 개발에 박차를 가하고 있다

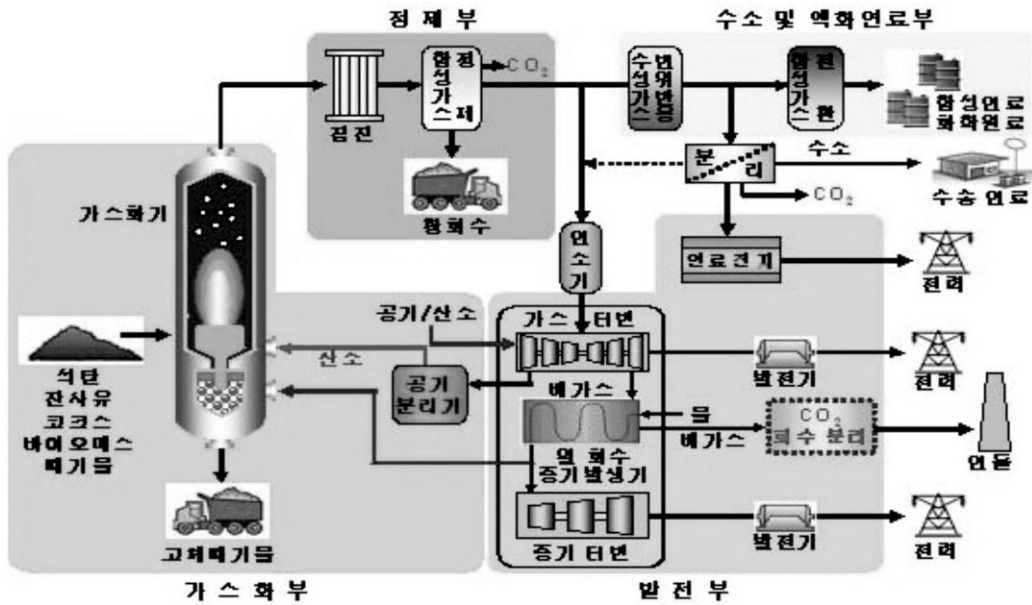
최근에 진행된 중대형 개발사업으로는 핵심 기술 개발 사업으로서 에너지기술연구원의 “저온 고출력 연료극 지지 평판형 SOFC 셀의 산업화 원천 기술 개발” 사업과 포항공과대학교의 “저온 구동을 위한 고출력 대용량 금속지지체형 고체산화물연료전지 기술 개발” 사업이 있으며, 상용화 기술 개발 사업으로서 한국전력의 “5 kW급 열병합 고체산화물 연료전지 발전시스템 개발” 사업, 삼성SDI/삼성전기의 “친환경 발전용 100 kW급 고체산화물 연료전지 발전 시스템 개발” 및 (주)코미코의 “상용화를 위한 SOFC용 핵심 소재 및 고성능 단전지 양산 기술 개발” 등이 있다.

(2) 석탄이용 기술 현황

현재 국내에서 추진되고 있는 석탄이용 기술 중에는 DCFC의 경쟁기술이라고도 볼 수 있는 석탄가스화 복합발전(IGCC) 기술과 DCFC와 시너지 효과가 큰 이산화탄소의 포집/저장(CCS) 기술이



[그림 12] CCE에서 제안한 유동층 기술이 접목된 DCFC 시스템



[그림 13] IGCC 발전 시스템

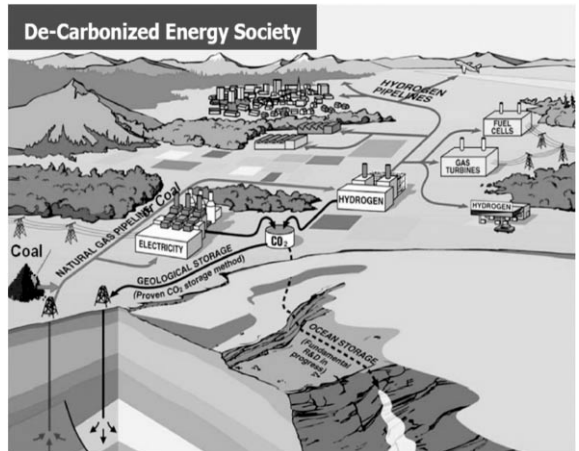
있다.

석탄가스화 복합발전(IGCC) 시스템을 그림 13에 나타내었다. 이 시스템은 에너지기술연구원, 한국전력 등에서 개발을 추진 중이다. 최근 두산중공업, 한국서부발전, 한국전력 등이 참여하는 “300 MW급 IGCC 실증플랜트” 개발 사업이 수행되었으며, 장기적으로 연료전지 및 CCS와 상용 플랜트를 개발하려는 계획이 수립되어 있다.

이산화탄소의 포집/저장(CCS) 기술은 크게 이산화탄소 포집 기술과 이산화탄소 저장 기술로 나눌 수 있다. 이산화탄소 포집 기술은 다시 사전에 공기 대신 순산소를 이용하여 배기ガ스를 순수한 이산화탄소에 가깝도록 하는 사전 처리 방식과 질소 등 배기ガ스 중의 불순물을 제거하고 이산화탄소를 분리하는 사후 처리 방식으로 나눌 수 있다. KIST의 기획사업을 통한 경제성 평가에 의하면 사전 처리 방식이 보다 유리한 것으로 조사되었다.

CCS 사업을 염두에 둔 순산소 화력 발전 기술은

한국전력, 한국생산기술연구원, 한국기계연구원 등에서 개발 중이며, 이산화탄소 저장 기술은 한국지질자원연구원에서 개발 중이다. 현재 한국전력을 중심으로 발전회사 및 연구기관이 참여하여 “청정화력발전 기술과 연계한 CCS 시스템 구축 과제”를 진행 중이다(그림 14).



[그림 14] 탈탄소 사회와 CCS



3. 발전용 DCFC 기술의 전망

3.1 발전용 DCFC 시스템의 경제성

고체산화물 전해질 직접탄소 연료전지는 석탄을 이용한다는 점과 고체산화물 전해질을 사용한다는 점에서 기존의 화력발전소와 고온연료전지의 특징을 모두 갖고 있다. 따라서 개발 중인 발전용 SOFC 기술과 기존 화력 발전기의 미분탄 버너 기술을 활용할 수 있다.

앞서 기술적인 측면에서 살펴보았듯이, DCFC는 타 연료전지를 비롯한 다른 어떤 발전 기법보다 에너지 변환 효율이 높은 유망한 기술이다. 또한 연료로서 사실상 모든 종류의 고형 유기 연료의 사용이 가능하다는 장점까지 더해진다.

또한 DCFC의 경우에는 별도의 순산소 발생이나 배기가스 분리 기술을 적용하지 않아도 배출 가스가 순수한 이산화탄소이므로 손쉽게 CCS 기술과 연계할 수 있으며, 이로부터 궁극적으로 Zero Emission을 구현할 수 있다.

이러한 모든 점을 고려할 때, 고체산화물 전해질 직접탄소 연료전지는 최종적인 수소 시대에 이르기까지의 과도기적 시기의 중대형 발전 시스템에 최적화된 연료전지 기술이라고 볼 수 있다.

그림 15와 그림 16은 각각 기존의 미분탄 화력 발전 시스템과 DCFC 시스템을 비교하여 보여주고 있다. 기존의 미분탄 화력 발전소의 경우, 발전

효율은 약 40% 이하이다. 뿐만 아니라 정화된 배기가스는 단지 14%의 이산화탄소를 포함하고 있다. 이산화탄소를 포집하기 위해서는 막대한 에너지 비용을 투입하여 배기가스 중의 이산화탄소를 액화시키거나 가압 분리를 하여야 한다(그림 15).

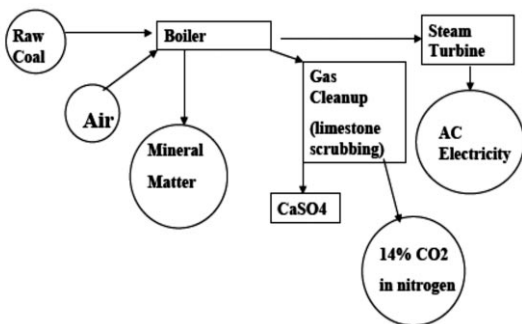
반면에 DCFC 시스템은 발전 효율이 60%를 넘는다(그림 2). 뿐만 아니라 그림 16에서 볼 수 있듯이, DCFC 시스템의 배기가스는 거의 순수한 이산화탄소이다. 따라서 이산화탄소를 포집하기 위한 별도의 시설이나 비용이 최소화된다.

비록 발전 시스템 설치비는 아직 연료전지 시스템이 기존 화력 발전소에 비하여 크게 소요되지만 이산화탄소 포집 시스템(CCS)의 적용까지 염두에 둔다면 운영비와 최종 에너지 효율 측면에서 매우 경제성이 있는 기술이 될 것이다(표 3, 4).

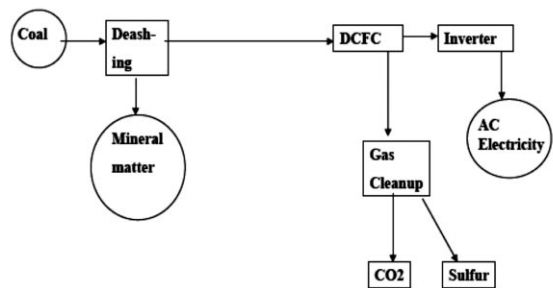
3.2 중대형 DCFC 개발을 위한 기술적 과제

지금까지 살펴 본 DCFC 기술의 특징과 관련 연료전지 및 석탄이용 기술의 현황으로부터 향후 중대형 고체산화물 전해질 DCFC의 상용화 개발을 위하여 요구되는 기술을 다음과 같이 정리하여 보았다.

첫째, 전해질의 기밀성을 개선하기 위한 연구가 필요하다. 탄소가 용해되어 있는 액체 전극은 전기적 전도성이 높으므로 전해질의 기밀성이 떨어



[그림 15] 기존 미분탄 화력 발전 시스템 구성도



[그림 16] DCFC 발전 시스템 구성도



<표 3> 발전기술 별 경제성 비교^[20]

발전 기술	발전 효율 (HHV)	설치비 (\$/kW)	연료비 (\$/kWh)	운영비 (\$/kWh)	CO ₂ 포집 (\$/kWh)
미분탄 화력발전	40	1,280	0.021	0.0099	0.033
가스터빈 복합발전	55	550	0.047	0.0026	0.023
석탄가스화 복합발전 (IGCC)	45	1,420	0.019	0.0082	0.013
직접탄소 연료전지 (DCFC)	65	400 ~ 4,000	0.013	~ 0.01	0.007

지면 액체 전극이 전해질에 스며들어 발생하는 전기적 단락 문제가 보다 심각해진다. 셀 단락 방지를 위하여 셀과 연료 공급부 사이의 전기적 및 물리적 기밀성이 매우 중요하다. 또한 용융 전극의 상변화를 감당할 수 있는 물리적 강도가 요구된다.

둘째, 액체 전극의 지속성(sustainability) 확보를 위한 연구가 필요하다. 용융 탄산염 전극의 경우 600 ~ 650°C 를 초과하면 해리와 증발 등으로 심각한 질량 손실이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 저온에서 성능을 발휘할 수 있는 고체산화물 전해질 개발이 매우 중요하다. 다른 방법으로서 탄산염 대신 주석 등 고온에서 보다 안정적인 액체 전극을 사용하는 기술을 개발하는 것도 중요할 것이다.

셋째, 연속적인 연료 공급 기술 개발이 요구된다. 미분탄을 효과적으로 액체 연료극에 투입하는 기술 및 액체 연료극 내의 탄소의 확산 특성에 대한 연구가 필요하다. 또한 연료 중에 허용되는 불순물의 농도에 대한 연구와 액체 전극에 유입된 연료 중의 불순물을 주기적 또는 연속적으로 제거해 주는 기술 개발이 필요하다.

넷째, 열 사이클 특성에 대한 연구가 요구된다.

<표 4> 발전기술 별 20년 작동시 총 환산 비용 비교

발전 기술	설치비 (\$/kW)	연료비 (\$/kW)	운영비 (\$/kW)	CO ₂ 포집 (\$/kWh)	총비용 (\$/kW)
미분탄 화력발전	1,280	3,679	1,734	5,782	12,475
가스터빈 복합발전	550	8,234	455	4,030	13,269
석탄가스화 복합발전 (IGCC)	1,420	3,329	1,437	2,278	8,464
직접탄소 연료전지 (DCFC)	400 ~ 4,000	2,278	~ 1,752	1,226	3,904 ~ 9,256

시동과 종료 시 연료극의 상변화에 의한 응력 발생에 대한 내구 특성을 분석하고 이에 따른 설계 및 운전 알고리즘을 확보할 수 있는 연구가 필요하다.

참고문헌

1. T. A. Edison, US Patent No. 460,122 (1891).
2. W. W. Jacques, US Patent No. 555,511 (1896).
3. Cao, D., Sun, Y., and Wang, G., "Direct carbon fuel cell: Fundamentals and recent developments," J. of Power Source, Vol 167(2007) pp. 250-257.
4. N.J. Cherepy, R. Krueger, K.J. Fiet, A.F. Jankowski, J.F. Cooper, J. Electrochem. Soc. 152 (2005) pp. 80-87.
5. W.H.A. Peelen, M. Olivry, S.F. Au, J.D. Fehribach, K. Hemmes, J. Appl. Electrochem. 30 (2000) pp. 1389-1395.
6. J.F. Cooper, Proceeding of the 2nd



- International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, Rochester, NY, USA, June 14.16 (2004) pp. 375–385.
7. J.F. Cooper, K. Berner, Presented in Fuel Cell Seminar, Direct Carbon Fuel Cell Workshop, Palm Springs, CA, USA, 14th November (2005), Proceedings online: http://www.fuelcellseminar.com/pdf/Direct_Carbon_Fuel_Cell_Workshop/Cooper_John.pdf.
 8. J.F. Cooper, Presented in Direct Carbon Fuel Cell Workshop, NETL, Pittsburg, PA, USA, 30th July (2003), Proceedings online: <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/dcfcw/Cooper%202.pdf>.
 9. J.F. Cooper, N. Cherepy, R.L. Krueger, US Patent No. 6,878,479 (2005).
 10. J.F. Cooper, R.L. Krueger, N. Cherepy, US Patent No. 6,815,105 (2004).
 11. P.V. Pesavento, US Patent No. 6,200,697 (2001).
 12. J. Goret, B. Tremillon, *Electrochim. Acta* 12 (1967) pp. 1065.
 13. J. Goret, B. Tremillon, *Bull. Soc. Chim. Fr.* 67 (1966) pp. 2827.
 14. S. Zacevic, Presented in Direct Carbon Fuel Cell Workshop, NETL, Pittsburg, PA, USA, 30th July (2003), Proceedings online: <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/dcfcw/Zecevic.pdf>.
 15. A. Duskin, Presented in Fuel Cell Seminar, Direct Carbon Fuel Cell Workshop, Palm Springs, CA, USA, 14th November (2005), Proceedings online: http://www.fuelcellseminar.com/pdf/Direct_Carbon_Fuel_Cell_Workshop/duskin_alvin.pdf.
 16. I.I. Balachov, L.H. Dubois, M.D. Hornbostel, A.S. Lipilin, Presented in Fuel Cell Seminar, Direct Carbon Fuel Cell Workshop, Palm Springs, CA, USA, 14th November (2005), Proceedings online: http://www.fuelcellseminar.com/pdf/Direct_Carbon_Fuel_Cell_Workshop/Balachov_Iouri.pdf.
 17. A.S. Lipilin, I.I. Balachov, L.H. Dubois, A. Sanjurjo, M.C. McKubre, S. Crouch–Baker, M.D. Hornbostel, F.L. Tanzella, US Pat. Appl. No. 20060019132 (2006).
 18. T. Tao, US Patent No. 6,692,861 (2004).
 19. T. Tao, Presented in Fuel Cell Seminar, Direct Carbon Fuel Cell Workshop, Palm Springs, CA, USA, 14th November (2005), Proceedings online: http://www.fuelcellseminar.com/pdf/Direct_Carbon_Fuel_Cell_Workshop/Tao_Tom.pdf.
 20. Direct Carbon Fuel Cells: Assessment of their Potential as Solid Carbon Fuel Based Power Generation Systems, (Report UCRL–SR–203880) (2004). (KRIPECO)