

정지형 고체산화물 연료전지 발전시스템

(SOFC Power Generation System for Stationary Application)

이종호, 김주선, 이해원
한국과학기술연구원

1. 서론

연료전지는 연료의 산화반응을 전기 화학적으로 일으켜 그 산화반응에 따른 반응의 자유에너지 변화를 전기에너지로 직접 변환시키는 장치이다. 연료전지는 열기관이 아니기 때문에 에너지 변환과정에 있어서 카르노 사이클의 제약을 받지 않는다. 따라서 통상적인 열변환 기관에 비해 매우 높은 에너지 변환효율의 달성이 가능하다. 연료전지는 작동 온도 영역에 따라 저온형, 중온형, 고온형 연료전지로 나눌 수 있으며 사용 전해질의 종류에 따라 알카리 연료전지(AFC), 고분자 연료전지(PEMFC), 인산형 연료전지(PAFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC)로 나눌 수 있다. AFC 나 PEMFC 는 작동 온도 영역이 100 도 이하인 저온형 연료전지에 해당하며 작동 영역이 200 도 부근인 PAFC는 중온형, 600 도 이상인 MCFC(620-660 도)나 SOFC(800-1000 도)의 경우는 고온형에 해당한다.

이 중 제 3 세대 연료전지라 일컬어지고 있는 고체산화물 연료전지(SOFC)는 여러 가지 형태의 연료전지 중 가장 높은 에너지 효율을 가지는 것으로 알려져 있는데, 가스터빈에 의한 기존 발전방식의 에너지 효율이 현재 40% 이하인 반면 SOFC는 자체적으로도 에너지 효율이 60% 이상이며 가스터빈과의 병합이나

폐가스를 이용한 열교환기를 부착하면 에너지 효율을 90% 까지 높일 수 있다고 알려져 있다. 또한 SOFC는 높은 운전온도로 인해 고가의 외부개질 장치 없이 다양한 연료를 이용하여 전기를 발생시킬 수 있어 시스템 구성이 간단하고 경제적이며 운전 시 공해물질의 함량이 대단히 낮은 양질의 폐가스를 발생시킴은 물론 부수적으로 생기는 물과 열도 실생활에 응용할 수 있어 열병합 발전에 가장 유리하다고 알려져 있다. 또한 SOFC는 부식성이 강한 액상의 전해질이 필요한 다른 형태의 연료전지에 비하여 구조적인 안정성을 가진 세라믹 전해질을 사용하기에 시스템의 간편성과 안정성 면에서도 많은 장점을 가지고 있다.

SOFC 가 가지는 이러한 많은 장점 중에서도 현재 가장 크게 부각될 수 있는 장점은 미래의 수소에너지 인프라가 도래하기 전 기존의 화석연료 인프라에서도 활용될 수 있는 청정 발전 시스템으로서 현재 전 세계적으로 추진되고 있는 GR(green round)나 각종 까다로운 환경정책에 효과적으로 대처할 수 있는 최적의 발전 시스템이라는 점이다. 이러한 이유로 현재 차세대 에너지원으로서의 고체산화물 연료전지에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으며 이러한 세계적인 추세에 맞추어 본 고에서는 고체산화물 연료전지의 정지형 발전시스템으로의 응용이라는 주제에 초점을 두어 관련 기술개발 현황 및 시장현황에 대

해 분석해 보고자 한다.

2. 고체산화물 연료전지 (SOFC)의 개요

현재 고체산화물 연료전지는 단전지, 스택 및 운전 온도에 따라 다양한 종류가 개발되고 있다. 단전지는 구조적 지지체에 따라 전해질 지지형 및 전극지지형이 있으며, 전극 지지형에는 다시 양극지지형 및 음극 지지형이 있다. 스택은 원통형 및 평판형으로 구분되며, 평판형은 다시 제조공정에 따라 평판일체형 및 평판분리형으로 나누어진다. 고체산화물 연료전지는 또한 응용분야에 따라 800-1000°C 부근에서 작동하는 고온형, 650-800°C에서 작동하는 중온형 그리고 650°C 이하에서 작동하는 저온형으로 나뉘어 개발되고 있다.

일반적으로 고체산화물 연료전지를 구분하는 가장 일반적인 방법은 스택에 의한 것으로 원통형 스택은 원통형의 단전지를 연결한 것이며 평판형은 평판형의 단전지를 적층하여 스택을 제조한다. 현재 상용화에 가장 근접한 형태는 원통형으로 1997년에 이미 100 kW급이 제작되어 시운전된바 있다. 원통형은 평판형에 비해 구조적으로 안정성을 가지며, 가스 밀봉이 요구되지 않는 장점이 있다. 그러나 원통형은 평판형에 비해 전력밀도가 낮고 제조단가가 비싸며 확장성이 떨어지는 단점이 있다. 평판일체형은 단전지 구성층을 형성한 후 한번 소결하여 제조하는 공정을 사용하는 것으로 가장 큰 장점은 공정의 단순성이다. 그러나 서로 특성이 다른 재료를 동시소결하는 기술적 한계에 부딪혀 현재는 매우 제한적으로 연구 개발되고 있다. 연료전지 중에서 현재 가장 활발하게 연구되고 있는 형태는 구성층을 순차적으로 소결하는 평판분리형

으로 성능과 제조의 어려움이 모두 중간수준인 스택이다. 평판분리형 연료전지는 현재 수 kW급의 스택을 제조할 수 있는 기술이 확립되어 상용화를 위한 기술 개발이 이루어지고 있는 수준이다. 평판분리형 SOFC 연구개발의 관건은 최적 시스템 설계기술의 확립과 함께 스택의 장기 신뢰성 및 경제성 제고에 있다.

3. 고체산화물 연료전지 (SOFC)의 작동 원리

고체산화물 연료전지의 작동원리는 그림 1과 같다. 고체산화물 연료전지는 기존의 고분자전해질 연료전지가 수소 이온 전도체를 사용하는 것과 달리 산소이온만을 전도하는 산소이온전도체를 사용하고 있다. 고체산화물 연료전지는 산소이온전해질을 격막으로 한 쪽에는 탄소나 수소를 포함하는 연료를 흘리고 다른 한 쪽으로는 공기를 흘리게 되는데 이때 공기중의 산소가 전해질막을 통해 음극으로 이동해 가서 연료와 반응하며 이산화탄소 또는 물을 생성하게 된다. 고체산화물 연료전지는 이러한 연료의 산화반응시 발생하는 화학반응에너지를 바로 전기에너지로 변환시키며 전기를 발생시키게 된다. 이러한 SOFC의 특징은 기존의 PEMFC와 달리 탄소나 수소 혹은 하이드로카본계의 어떤 연료이든 모두 활용가능하기 때문에

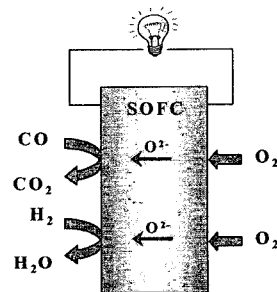


Fig 1. 고체산화물 연료전지의 동작원리

연료 선택의 자유도가 높다는 장점을 가지고 있다.

그림 2에는 기존의 PEMFC와 차세대 연료전지로 주목받고 있는 SOFC의 에너지 변환과정을 서로 비교해 놓았다. 그림에서 보듯이 기존의 PEMFC와 SOFC는 사용연료의 형태와 연료변환과정상 많은 차이를 보이고 있는데 연료의 선택성이나 시스템의 효율성 측면에서 SOFC가 훨씬 우수한 특징을 보이고 있다.

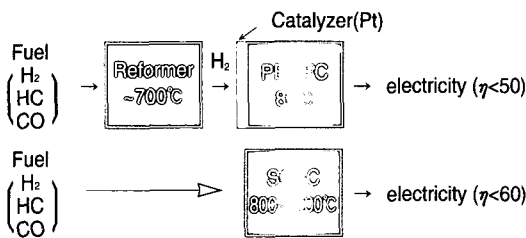


Fig 2 PEMFC와 SOFC의 에너지 변환과정 비교. η 는 변환효율.

4. 정치형 발전시스템으로서의 SOFC

지금까지 정치형 발전시스템으로는 주로 저온형이나 중온형 연료전지가 많이 연구돼왔으며 현재는 PAFC가 가장 실용화에 앞장서 있는 상태이다. 그러나 저온형이나 중온형 연료전지는 효율이나 비용면에서 고온형에 비해 상대적으로 불리하다고 알려져 있다. 즉 고온형 연료전지는 작동 온도가 고온인 관계로 화학적 물리적 반응이 원활해 작동 효율이 높으며 따로 연료를 처리한다거나 고가의 촉매를 사용할 필요가 없어 주변 개질 장치나 고가 촉매 등이 필요한 저온형, 중온형에 비해 상대적으로 저렴하다는 장점을 가진다. 이로 인해 정치형 발전시스템으로는 주로 고온형인 MCFC나 SOFC를 실용화하려는 연구가 주를 이루고 있다.

세계적으로 환경 및 에너지 관련 규약이 가장 까다

롭다고 알려진 미국 california주의 CEO (California Energy Commission) 분석에 따르면 미래형 에너지 보급 시스템으로 예상되는 분산형 에너지원, DER (Distributed Energy Resources)으로 다음과 같은 시스템들이 제시되고 있다.

Table 1. Distributed Energy Resource guide

DER Technology	Commercially available	Emerging Technology
Microturbines	⊙	⊙
Combustion Turbines	⊙	
Reciprocating Engines	⊙	
Stirling Engine		⊙
Fuel Cells	⊙	⊙
Energy Storage/UPS system	⊙	⊙
Photovoltaic System	⊙	
Wind System	⊙	
Hybrid System		⊙

위의 분류표에서 보면 현재 분산형 발전용으로 가용한 에너지원론 turbine 기술과 내연, 외연 엔진기술, 그리고 연료전지기술, 태양열, 풍력발전 기술 등이 제시되고 있는데 CEO가 예상하기로 미래형 분산 발전시스템으로 가장 적합한 기술은 micro-turbine 과 연료전지(fuel cell)기술 또는 두 발전방식의 hybrid 형태가 될 것으로 예측하고 있다.

일반적으로 정치형 발전 시장은 3kW-50MW 규모의 발전용량을 대상으로 하는데 수요용량에 따라 각 발전시스템이 목표로 하고 있는 발전규모는 다음과 같이 분류될 수 있다.

표에서 보듯이 각 발전시스템이 목표로 하는 발전용량은 다양한 영역을 가져 용량에 따라 추구하는 시장목표도 각기 다르게 설정되게 된다. 현재 연료전지

Table 2. 정치형 발전시스템 기술 분류표 (Rastler et al., Rep. EPRI TR-106620, Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, USA, 1996)

	Types	Size	Efficiency
Fuel Cells	PEMFC	1-500kW	40%
	PAFC	0.5-1.2MW	40%
	MCFC	1-20MW	55%
	SOFC	1kW-25MW	65%
Engines	Diesel	50kW-6MW	33-36%
	Internal Combustion	5kW-2MW	33-35%
	Stirling	1-25kW	20%
Turbines	Micro-Turbine	25-500kW	26-30%
	Small Turbine	1-100MW	33-45%
Renewable	Solar (Photo Voltaic)		
	Wind	1-1000kW	10-20%
	Biomass		

발전시스템 및 이와 경쟁관계에 있는 기타 분산형 발전시스템이 목표로 하는 시장은 다음과 같이 분류될 수 있다.

Table 3. 연료전지와 기타 경쟁관계에 있는 발전시스템들의 target시장 (Report: Fuel cells for distributed generation, Energy center of Wisconsin, 2000)

Residential (1-15kW)	Light commercial (25-250kW)	Commercial with cogeneration (50kW-3MW)	Industrial & distributed (3-50MW)
SOFC	SOFC		
PEMFC	PEMFC	SOFC	SOFC
Solar PVs	PAFC	PAFC	MCFC
Stirling	Solar PVs	MCFC	Gas turbines
Engines	IC engines	IC engines	Wind turbines
	Micro-turbines	Micro-turbines	
	Stirling engines		

표 2, 3의 분류에서 보듯이 단독 또는 다가구 주택 규모의 residential application 시장을 보면 현재론 연료전지와 태양에너지가 경합을 벌이고 있으나 발전 효율이나 시스템 신뢰성 면에서 연료전지가 유망하다. 연료전지 중에서는 현재 residential 규모의 소규모 발전에는 PEMFC와 SOFC 기술이 적합하다고 알

려져 있으나 최근 들어 가격이나 발전효율, 설치의 용이성 등 여러 면에서 장점을 가지고 있는 SOFC가 더 주목받고 있다. 호텔이나 학교, 중소형 병원이나 쇼핑 몰 등을 대상으로하는 light commercial 시장 쪽은 현재 가장 많은 경합이 벌어지는 시장이나 앞서 표 3에서 보듯이 연료전지와 마이크로터빈 기술이 가장 유력한 후보이다. 연료전지 중에서는 현재 상용화 단계에 와있는 PAFC가 PEMFC와 SOFC를 앞서고 있으나 시스템 가격면에서의 단점과 기술적 한계 때문에 현재는 PEMFC와 SOFC 기술에 뒤쳐지고 있는 추세이다. 한편 열병합 발전까지 고려한 commercial application 시장은 대형빌딩이나 백화점, 대형 쇼핑몰 등을 대상으로 하는데 이 시장 역시 연료전지와 마이크로터빈 기술이 경쟁관계에 있다. 연료전지 중에서는 고온 작동으로 인해 열병합 발전이 가능한 MCFC 기술과 SOFC 기술이 경합을 벌이는데 현재는 기술의 성숙도면에서 앞선 MCFC기술이 선도하고 있으나 머지 않아 발전효율이나 시스템의 안정성 면에서 앞서는 SOFC 기술이 가장 경제적이며 신뢰성 있는 기술로 부상할 것으로 예상하고 있다. (Report: Fuel cells for distributed generation, Energy center of Wisconsin, 2000) 한편 화학, 제지, 금속, 플라스틱 공장등을 대상으로한 industrial application 시장(1-25MW급)이나 분산형발전소 시장(3-100MW)에는 현재 MCFC, SOFC 등의 고온형 연료전지와 가스터빈 기술이 주목을 받고 있으나 그중에서도 가스터빈과의 병합발전이 유일하게 가능한 SOFC 기술이 가장 큰 주목을 받고 있다. 특히 10MW 이상의 대형 발전시스템에는 현재 SOFC-가스터빈 병합기술이 유일한 대안으로 받아들여지고 있다. (Rastler et al., Rep. EPRI TR-106620, Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, USA, 1996)

현재 가장 시장진입이 빠를것으로 예상되는 residential application용 연료전지 시장에 대해 분석해 놓은 2002년 2월자 fuel cell today 의 기사내용을 보면, 현재 residential application용 연료전지 시장은 가장 기술적으로 완성도가 높은 PEMFC를 위주로 약 550기의 시스템이 전 세계적으로 시범 설치되어 운용되고 있다. 그러나 현재 대부분의 시장수요는 일반 가정용이 아닌, 가격이나 경제성 보다는 연료전지의 특수성 때문에 기존 발전시스템들과 경쟁이 심하지 않은 특수 목적으로 형성되어있다. 그러나 Residential application용 연료전지 시장은 최근 2년 동안의 prototype type 시스템 보급율이 90%이상 성장할 정도로 여타 연료전지 응용분야보다 급속히 발전하고 있다. 이러한 residential application용 연료전지 시장은 최근까진 미국이나 캐나다등 북미지역을 중심으로 확장되어 왔으나 최근 들어 일본시장이 급속도로 성장하고 있다.

지금까지 residential application용 연료전지 시장은 이미 기술적 포화기에 접어든 PEMFC 기술을 적용하여 발전시스템을 개발하는 회사들이 주도적으로 이끌어 왔으며 현재 대부분의 prototype system 들은 PEMFC 기술이 적용된 시스템들이다. 그러나 residential application용 시장을 주도해오던 PEMFC 기술을 적용한 시스템들이 여러 경제적, 기술적 요인들에 의해 한계를 보이면서 최근 들어 SOFC 기술을 적용한 시스템이 급부상하고 있다. 현재 주목받고 있는 SOFC 기술은 PEMFC기술의 한계로 지적되고 있는 경제성이나 에너지 효율, 연료선택의 자유도 면에서 현격한 우월성을 보이며 전기뿐만 아니라 열병합 발전으로 인한 난방, 온수공급등도 가능하다는 장점을 가지고 있어 차세대 residential application용 연료전지 시장을 주도할것으로 예상되

고 있다.

현재 SOFC 기술을 적용한 발전시스템 개발의 선두 주자는 스위스의 Sulzer Hexis 사이다 (www.hexis.ch/eprise/sulzerhexis/sites/main.htm). Sulzer Hexis사는 2010년 미국과 유럽의 분산형 발전시스템의 시장규모를 약 12 billion USD로 예상하며 이중 약 4% 점유를 목표로 지난 90년대 초부터 개발을 시작하였다. Sulzer Hexis사는 기존의 천연가스 인프라를 그대로 사용할 수 있으며 여타 발전시스템보다 공간이나 무게점유율에서 훨씬 앞서는 SOFC 기술이 분산형 발전시스템에 가장 적합한 기술이라 여기고 미국과 유럽시장을 타깃으로 하여 2004년 시장진입을 목표로 시스템 개발 중에 있다.

이상의 분석에서도 보듯이 PEMFC의 경우 대형 발전용에 적합하지 않거나 MCFC, PAFC등이 소형 발전용으로 적합하지 않은 한계를 가지고 있는 반면 SOFC 기술은 소형발전 시스템으로부터 가장 규모가 큰 분산형 발전시스템까지 모든 영역에 걸쳐 유망한 기술임을 확인할 수 있다. 아직 field test의 경험이 많지 않고 기술적 완성도가 떨어지며 기존의 발전기술에 비해 아직 가격경쟁력이 뒤지는 단점은 있으나 현재 추진되고 있는 각종 환경규제 및 에너지 효율증가 대책 등 정책적인 면과 이에 따른 시장상황을 고려하면 고체산화물 연료전지 발전시장의 잠재수요는 예측할 수 없는 정도이다. 또한 기존의 연료전지 기술들이 작동원리 상이나 기본구조상의 근본적인 한계로 상업화에 어려움을 겪고 있는데 비해 SOFC기술은 재료 및 제조공정상의 한계에 기인한 것이기에 그 기술적 완성도만 높아지면 머지않은 장래 경제성이나 신뢰성면에서도 여타 발전기술들에 비해 우위를 차지할 것으로 예상되어진다. 이러한 가능성 때문에 현재 미국에

서는 미국 DOE 주관으로 정부-연구소-기업-대학 간의 연합프로그램 (SECA: Solid state Energy Convergion Alliance, www.seca.doe.gov)을 통해 2010-2012년 상용화를 목표로 발전용, 수송용, 이동 전원용 SOFC 시스템을 개발하기 위한 투자를 연간 700억원 규모로 진행시키고 있다.

5. 결론

현재 진행되고 있는 발전사업의 민영화로 지금까지 정부규제로 제한되어오던 전력사용료에 대한 한계가 없어져 앞으로는 전기료가 크게 상승할 것으로 예상되며 이로 인해 값싼 전력에 대한 수요가 증가해 기존 전력체계에 대한 개편이 불가피해 질 것이다. 전력사업에 대한 민영화를 일찍부터 시작한 선진국들에서는

이미 grid형의 전국적인 네트워크 발전체계에서 벗어나 분산형 발전시스템에 대한 시장이 활발히 열리고 있는 것이 대세이다. 특히 낙도와 산간오지가 많고 높은 인구밀도에 따른 화력, 수력, 원자력 발전에 필요한 입지선정의 어려움과 환경오염 문제로 인해 나날이 증가하고 있는 전력수요에 맞추어 기존 발전체계를 증설하는데 한계가 있는 우리나라에서는 미래의 에너지 수요에 대비할 미래형 발전사업의 기반을 하루 속히 구축할 필요가 있다. 다행히 국내에는 천연가스 보급망이 비교적 잘 구축되어있어 각 가정까지 연료공급이 가능한 체계가 갖춰져 있기에 천연가스를 바로 연료로 사용할 수 있는 고체산화물 연료전지를 활용한 열병합형 중소형 발전시스템의 보급은 미래의 환경/에너지 문제 해결 및 미래형 발전체계 구축을 위한 유일한 해답이라 할 수 있다.