

## 특집

# 수소에너지를 기반으로 하는 연료전지와 소재기술 (Materials/Components for H<sub>2</sub>-based Fuel Cells)

이창래, 양철남, 문성모, 정용수(재료연구소)

## 1. 서론

유용한 에너지 자원과 청정 환경은 인류 문명을 보존하고 유지하고 기본 생명줄이다. 산업발전과 더불어 에너지의 수요는 급격히 증대되고 있는 반면에 지구에서 인간이 손쉽게 이용할 수 있는 화석연료는 고갈되고 있고 그와 더불어 지구환경 파괴라는 새로운 문제가 대두되고 있다. 화석연료의 광범위한 이용으로 인한 에너지자원의 고갈과 온실가스 배출에 따른 지구환경 파괴문제를 해결할 수 있는 새로운 청정 에너지 자원 확보 방안은 전 인류의 핫 이슈가 된지 오래다.

유용한 에너지 자원개발과 지구환경 파괴를 방지하기 위한 다양한 시나리오들이 제안되고 있으며 그중 하나가 신재생에너지 자원의 이용이다. 신재생에너지는 태양광(열), 풍력, 바이오매스, 수력, 지열, 해양에너지(조력)와 같이 자연 상태에서 계속 제공되어 자원의 고갈을 걱정할 필요가 없이 재생 가능한 에너지와 기존 에너지 자원을 신기술을 이용하여 수소와 같이 청정한 에너지 자원으로 전환하여 이용하는 수소연료전지 등을 포함하고 있다.

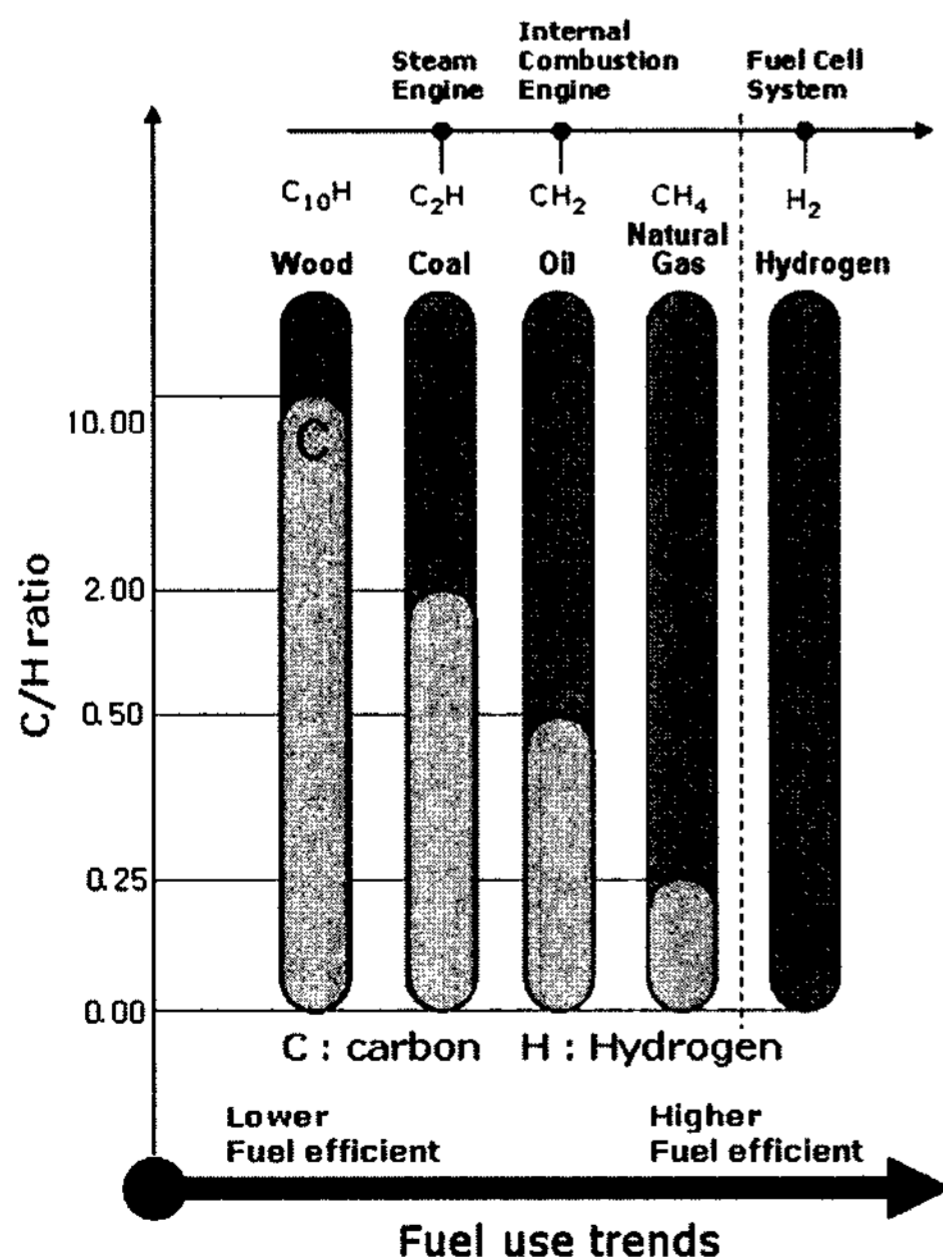
연료전지는 수소와 산소를 이용하여 전기화학 반응으로 전기에너지를 생산하는 발전 시스템으로 신에너지기술을 대표한다.

이동용 모바일 기기나 전기자동차용 전원, 가정용 및 분산발전용 전원 등에 다양한 응용 분야에 적용하기 위하여 연구 개발되고 있는 연료전지는 기술특성상 재료, 화학, 전기/전자, 기계, 가공, 시스템, 제어 등 다양한 산업기술이 융합된 복합 산업기술이다. 또한 이용 측면에서는 전력, 발전, 가스, 가전/정보통신, 자동차, 기타 수송 분야 등의 다양한 산업들이 관련된 인프라산업이다. 따라서 연료전지가 실용화되기 위해서는 다양한 산업군의 전문가 및 관련 기술의 융합과 상호 협력이 요구되고 있다. 본고에서는 먼저 연료전지 기술과 직접적인 연관성이 낮아 사전 전문지식이 없다는 전제하에 다양한 타 산업 분야의 종사자들을 대상으로 연료전지 기술에 대하여 간략히 소개하고 현재 연구 개발되고 있는 다양한 연료전지 시스템에서 핵심 부품소재들의 기능적 역할 및 중요성 등을 포함하여 부품소재들의 문제점 및 개선 방향에 대하여 간략히 살펴보고자 한다.

## II. 본 론

### 1. 에너지와 수소

현재 산업경제사회를 지탱하는 주요 에너지의 형태는 석탄, 석유, 천연가스와 같은 화석연료이다. 인류가 이용한 에너지자원의 변천을 역사적으로 살펴보면 단위 중량당 에너지 밀도가 큰 연료를 이용하는 방향으로 발전하였다. 연료의 변천사를 탄소에 대한 수소의 비(H/C)로 표현하면 그림 1에 나타낸 것처럼 연료를 구성하는 성분 중 H/C비가 높은 연료를 이용하는 방향으로 발전하였다<sup>[1]</sup>. 처음에는 주변에서 손쉽게 확보할 수 있는 나무나 석탄과 같이 H/C비가 낮은 고체 형태의 화석연료를 주로 이용하였지만 산업기술의 발전과 더불어 에너지 수요가 더욱 증대됨에 따라 에너지밀도가 높은 석유와 같은 액체 형태의 화석



〈그림 1〉 인류의 연료이용 변천과정.

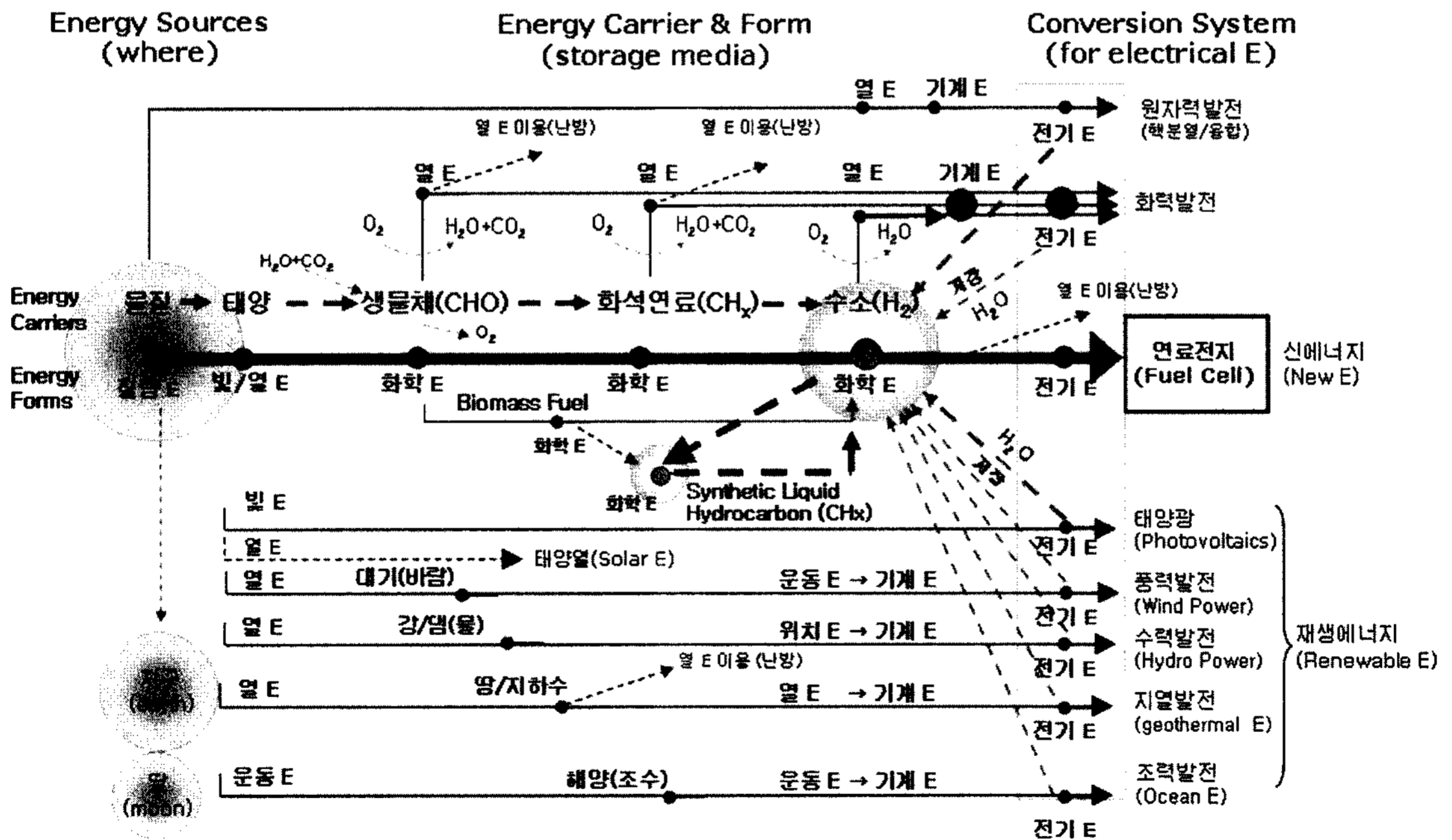
연료를 이용하는 것이 보편화 되었다. 현재는 천연가스나 수소와 같은 기체 형태의 연료까지 이용영역이 확대되었다.

최근 심화되고 있는 에너지 위기 및 심각한 환경오염문제로 인하여 신재생에너지에 대한 관심이 고조되면서 수소를 기반으로 하여 에너지를 저장, 운반, 분배 및 이용하는 수소경제의 도래에 대하여 수소관련 전문가 또는 비전문가들 사이에서 뜨거운 논쟁이 벌어지고 있다. 이러한 논쟁은 수소가 지구상에 존재하는 무궁무진한 에너지원인가? 아니면 단지 에너지를 저장/운반하는 하나의 매체인가? 하는 인식의 차이에서 시작되고 있다. 또한 수소는 자연 상태에서 H<sub>2</sub> 상태로 존재하지 않고 H<sub>2</sub>O와 같이 다른 원소와 결합된 화합물 상태로 존재하기 때문에 이러한 수소원(hydrogen source)에서 에너지를 소모하여 H<sub>2</sub>를 생산해야하는 문제가 있다. 그리고 수소는 가스라는 물질적 특성으로 인해 저장이나 운송/분배가 어렵기 때문에 더 많은 추가적인 에너지를 소모해야 문제점에 기인하여 논쟁이 벌어지고 있다. 따라서 수소를 기반으로 하는 에너지 이용체계는 생산, 저장, 운송/분배 등의 과정에서 에너지의 손실을 초래하므로 전체적인 에너지 이용 효율 체계상 바람직하지 않다는 의견이 제시되고 있다<sup>[2]</sup>. 연료로서 수소가스를 이용할 때 생기는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 기본 수소경제(elemental hydrogen economy, H-Economy) 대신에 메탄올이나 에탄올, DME(dimethylether)와 같은 액체 상태인 합성 탄화수소 연료를 기반으로 하는 합성액체 탄화수소 경제(synthetic liquid hydrogen economy, SLH-Economy)의 시나리오도 제안되고 있다<sup>[2-3]</sup>. 수소경제에 대한 다양한 논쟁은 본고에서 다루

고자하는 내용 범위를 넘어서는 것으로 여기서는 구체적으로 다루지 못하므로 상세한 내용은 참고문헌<sup>[2-5)]</sup>을 보기 바란다.

먼저 본고에서 논의를 명확히 하기 위하여 에너지(energy), 에너지원(energy source), 에너지 형태(energy form), 에너지 저장/전송 매체(energy carrier)에 대한 개념을 명확히 하고 논의를 전개 하고자 한다. 에너지란 교과서적으로 어떤 유용한 일을 할 수 있는 힘 또는 능력으로 정의된다. 열역학 제1법칙, 즉 에너지 보존의 법칙에 따라 질량이 일정한 계의 내부 에너지는 새롭게 생성되거나 소모되지 않고 한 형태의 에너지에서 여러 가지의 다른 형태로 전환된다. 그림2는 에너지의 변환과정과 에너지의 저장 형태를 에너지 이용체계상에 도식적으로 나타낸 것이다. 에너지는 한 원자 물질이 핵융합반응으로 다른 원자물질로 변환될

때 에너지 보존의 법칙에 따라 감소한 질량만큼의 열이나 빛과 같은 에너지 형태로 방출하게 된다. 태양이나 원자력이 대표적인 물질의 핵융합 또는 핵분열 반응으로 에너지 발생하는 한 일례이다. 현재 지구상에서 우리가 유용하게 이용하고 있는 바이오 연료나 석탄, 석유, 천연가스와 같은 화석원료들의 1차적인 에너지 원천은 수소의 핵융합반응으로 생기는 태양에너지의 일부가 지구상에 도달한 것이다. 지구상의 곡물이나 나무와 같은 유기생물체는 태양에너지를 이용하여 생육하고 이러한 유기체들이 과거 오래기간 지각변동 과정에서 석탄, 석유, 천연가스와 같은 화석원료 형태로 전환되었다. 이것은 과거에 지구 표면에 도달한 낮은 밀도의 태양에너지가 고밀도의 에너지로 저장된 것으로 유용한 2차 에너지원이다.



<그림 2> 에너지이용 체계상의 에너지원, 에너지저장 매체 및 에너지 변환형태의 개략도.

에너지원(energy source)이란 엄밀한 의미에서 에너지가 나오는 장소적(where) 개념이므로 존재하고 있어야 한다. 이것은 우리 주변에서 손쉽게 구할 수 있을 정도로 풍부하게 존재할 때 유용한 에너지원으로 의미를 가진다. 인간이 이용할 수 있는 유용한 에너지는 어떤 것이 있고 이러한 것들은 어디서 오는 것인가? 우리 인류가 지구상에서 이용할 수 있는 1차 에너지원(primary energy source)은 대부분 태양에서 온 것이고 일부는 지구 내부나 달의 공전운동으로부터 온 것들이다. 에너지는 태양열이나 지열과 같은 열에너지, 태양광과 같은 빛에너지, 바람이나 해양의 조수와 같은 운동에너지, 화석연료, 바이오매스, 수소와 같은 화학적 에너지 형태(form)로 어떤 매체를 통하여 저장 또는 변환된다. 이때 에너지의 저장/전송 매체를 에너지 캐리어(carrier)라고 한다.

어떤 물질이 인간에게 유용한 연료로서 의미를 가지려면 에너지의 밀도, 에너지의 저장성, 획득 및 취급의 용이성, 안전성 및 환경친화성 등의 관점에서 살펴볼 필요가 있다. 연료로서 수소는 자연 상태에서 수소분자(H<sub>2</sub>) 형태로 존재하지 않고 물(H<sub>2</sub>O)이나 천연가스(CH<sub>4</sub>)와 같이 다른 물질과 결합하여 화합물로 존재하고 있다. 수소가 물과 같이 산소와 결합되어 있을 때는 유용한 연료로서 의미가 없다. 수소를 연료로 사용하기 위해서는 천연가스나 물과 같은 수소원(hydrogen source)에서 다른 에너지를 이용하여 수소분자(H<sub>2</sub>) 형태로 변환시켜야 한다. 따라서 수소는 에너지원이 아니다. 수소연료전지 관련 일부 문헌이나 자료 등에서 수소를 새로운 에너지원이라고 언급하는 하는 것은 잘못된 것이다. 수소는 에너지 캐리어로 표현되어야 한다. 그럼에도

불구하고 우리가 수소 연료에 주목하는 이유는 수소는 화석연료와 같이 특정지역에 존재하는 것이 아니라 이용할 에너지만 있다면 언제 어디서나 수소를 만들 수 있다. 따라서 생산이나 그 사용에 있어 시공간적 제약이 적을 뿐만 아니라 여분의 에너지를 다시 수소연료로 변환한 후 언제든지 다시 사용할 수 있는 에너지의 저장성과 이용과정에서 CO<sub>2</sub>를 배출하지 않는 친환경성 때문이다.

인간에게 편리한 에너지 형태인 전기에너지를 화학에너지 형태로 저장할 수 있는 매체로는 배터리와 수소가 있다. 배터리가 에너지원이 아니고 단지 전기에너지를 저장하는 매체인 것과 같은 개념으로 수소도 에너지원이 아니라 에너지를 저장할 수 있는 매체이다. 전기에너지를 저장하는 방식에서 배터리는 그 자체가 전기화학적 셀의 일종이므로 바로 전기에너지로 뽑아 낼 수 있지만 수소는 연료가스 형태로 저장하기 때문에 전기를 뽑아내기 위해서는 연료전지라는 별도의 발전용 전기화학 셀이 필요하다. 전기에너지를 배터리와 수소에 저장하여 다시 전기에너지로 뽑아서 사용하는 경우에 전체적인 에너지 효율을 비교해보면 배터리는 60~70% 정도이지만 연료전지는 그 자체의 효율이 50~60%로 높음에도 불구하고 수소의 생산/저장/운송에 많은 에너지가 소모되므로 전체적으로는 약 20~25% 정도인 것으로 알려져 있다. 따라서 수소를 적은 에너지로 값싸게 생산할 수 있는 방법을 확보하지 못할 경우 에너지를 수소에 저장하여 사용하는 에너지 체계는 비효율적이고 수소를 기반으로 하는 연료전지는 일부 제한된 응용영역에서만 이용될 것이다<sup>3)</sup>.

재생에너지로부터 얻어진 전기에너지를 이용

하여 수분해 반응으로 수소를 생산한다면 이때 사용된 전기에너지는 화학에너지 형태로 수소에 저장되는 것이다. 우리는 시공간적인 제약 없이 화학적 에너지 형태로 저장된 수소에서 다른 에너지 형태로 변환하여 사용하는 것이다. 수소를 생산하기 위해서는 반드시 에너지원(energy source)과 수소원(H<sub>2</sub> source)이 동시에 필요하다. 일반적으로 손쉬운 수소 생산은 천연가스(CH<sub>4</sub>)와 같이 그 자체로서 2차 에너지원이면서 수소 성분이 포함되어 있는 탄화수소계 화석연료로부터 개질공정(reforming process)을 이용하여 얻는 것이다. 그러나 태양이나 석탄은 에너지원이지만 수소를 가지고 있지 않기 때문에 수소 성분을 가지고 있는 물을 매개로 전기분해나 석탄 가스화 공정으로 얻을 수 있다. 표 1은

수소생산에 이용될 수 있는 에너지원/에너지 캐리어를 정리 한 것이다.

지구상에 존재하는 다양한 에너지 자원 중에서 우리가 관심을 가지고 의미를 부여할 수 있는 에너지는 인간이 얼마나 효율적으로 이용할 수 있는 안전한 에너지 형태인가 하는 것이다. 인간이 편리하게 사용할 수 있는 에너지 형태인 전기에너지는 재생에너지 자원(renewable energy resource)을 이용하여 얻는 것보다 화석연료와 같은 2차적 에너지 자원으로부터 얻는 것이 현재까지는 이용 효율이나 다양한 산업적 유용성 면에서 유리했다. 그러나 화석연료의 지속적인 사용은 지구환경의 파괴와 한정된 에너지 자원의 고갈로 인한 미래 에너지 자원 안보에 불안감을 증대시키는 원인이 되고 있다. 수소를 이

〈표 1〉 수소 생산을 위한 에너지원(energy source) 및 수소원(H<sub>2</sub> source).

		에너지원 (energy source)	에너지 캐리어 (Energy Carrier)	수소원 (H <sub>2</sub> Source)	수소제조공정 (H <sub>2</sub> Process)
현재 태양에너지	수력(hydro) 풍력(wind) 태양광/열(solar)	○	×	×	
과거 태양에너지 (화석연료로 저장)	천연가스(CH <sub>4</sub> ) 오일(Oil) 석탄(Coal) 바이오매스	○	○	◎	· 수증기 개질 · 석탄 가스화
원자력에너지	핵융합(fusion) 핵분열(fission)	○	×	×	
	물(H <sub>2</sub> O)	×	○	◎	· 수분해 공정
	수소(H <sub>2</sub> )	×	○	×	

\* 천연가스 증기개질공정 : CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O (+ heat) → 4H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> (오늘날 수소 생산의 95% 차지)  
 \* 석탄가스화 공정 : Coal + H<sub>2</sub>O (+ heat) → H<sub>2</sub> + CO  
 \* 수분해 공정 : H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub> + 1/2O<sub>2</sub>

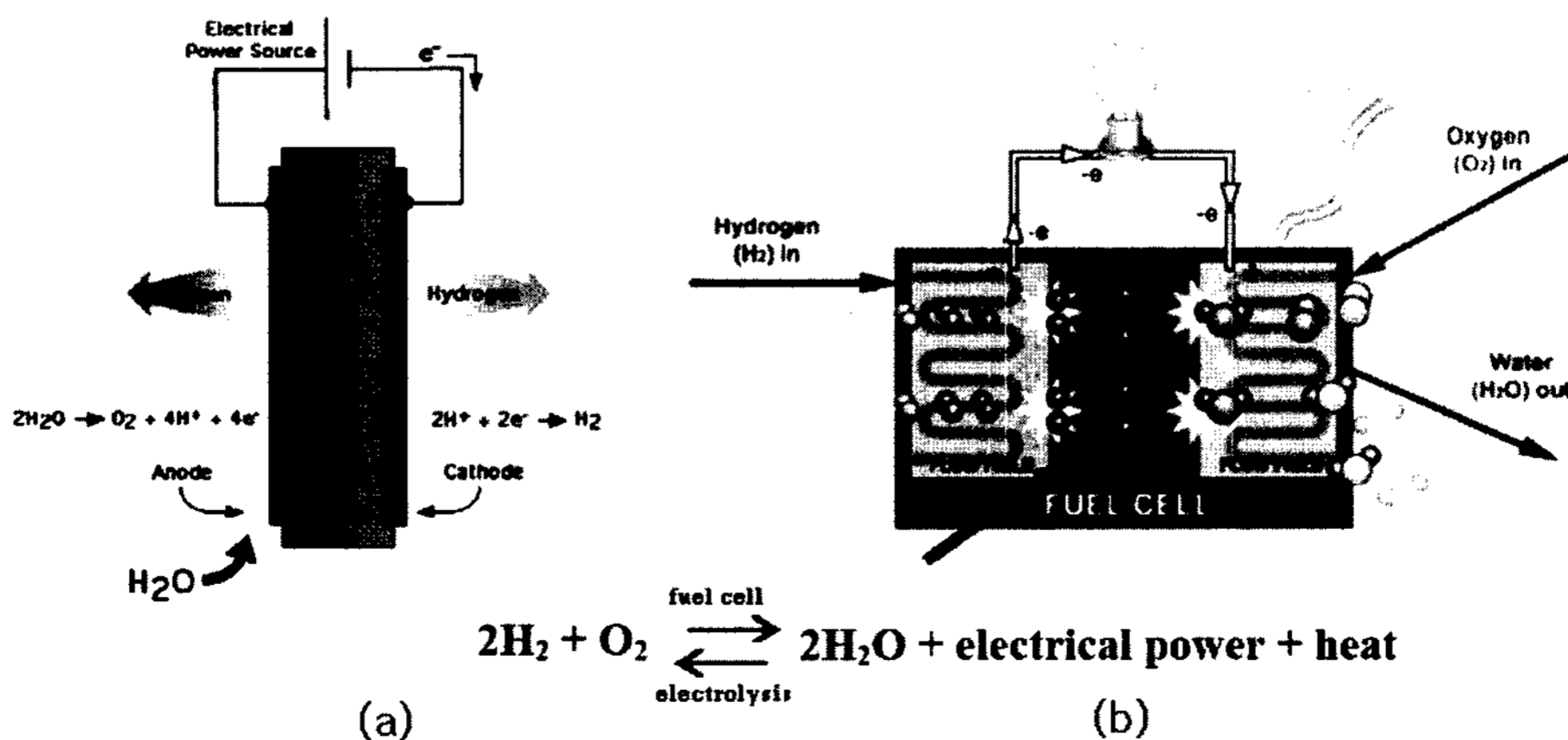
용할 경우 다른 화석연료와 비교하여 탄소를 가지고 있지 않기 때문에 지구온난화의 원인으로 지목되고 있는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 배출이 없는 청정한 에너지 형태이다. 또한 기존 화석연료를 이용하는 산업 인프라 및 관련 기술을 이용하기 용이하고 다른 신재생에너지 자원에 비하여 에너지를 화학에너지 형태로 저장한 후 다시 전기 에너지로 변환하여 사용할 수 있기 때문에 시간적, 공간적인 제약이 적은 편이다. 이러한 장점을 가진 수소에너지를 사용이 편리한 전기에너지 형태로 변환하여 사용하기 위해서는 연료전지라는 발전시스템이 필요하다.

## 2. 연료전지

### 가. 연료전지의 기본개념

1839년에 영국의 Sir William Grove경이 연료전지 발전시스템을 처음으로 구현하였지만 이것이 실용화 되지 못하다가 1950년대 후반 미국 NASA에서 우주개발 프로그램의 일환으로 연구개발 되어 1965년 제미니 우주선에 처음으로 탑재되어 사용되었다. 연료전지는 우

리가 잘 알고 있는 물의 전기분해반응으로 수소와 산소를 만들어 내는 원리와 반대 개념으로 수소 또는 수소를 포함하는 연료와 산소를 공급하여 전기화학 반응으로 전기를 생산하는 시스템이다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 연료전지는 연료에 저장되어 있는 화학에너지를 바로 전기에너지로 변환하기 때문에 카르노 사이클을 통한 발전시스템(화학에너지→열에너지→전기에너지)과 달리 에너지효율이 높다. 연료전지 작동의 구동력은 수소와 산소의 전기화학적 전극전위차이다. 전기화학적으로 보면 백금 전극표면에서 수소가스와 산소가스의 평형 반응에 대한 두 전극의 전위차는 1.23V 이다. 서로 다른 전위(에너지 상태)에 있는 전극이 외부회로 상으로 연결되면 두 개의 전극전위가 같아지는 새로운 평형상태로 이동하기 때문에 평형전위가 낮은 수소가스전극(이하 수소극)에서는 수소의 산화반응이 일어나면서 전자를 내어 놓고 생성된 전자는 외부회로를 통하여 전위가 높은 산소가스전극(이하 산소극)으로 이동하여 산소의 환원반응에 참여하게 된다.



〈그림 3〉 전기화학적 반응으로 작동하는 물전기분해(a) 및 연료전지(b) 개략도<sup>[6]</sup>.

연료전지는 그림 3에 나타낸 것처럼 원리적으로 전기화학 반응이 일어나는 셀(Cell)이다. 연료전지 셀은 두 개의 전극 (수소극과 산소극)

이 이온 전도성 매질(전해질)을 사이에 두고 분리되어 있다. 두 전극이 전해질막 양면에 샌드위치처럼 붙어 일체화된 구조를 고분자 전해질

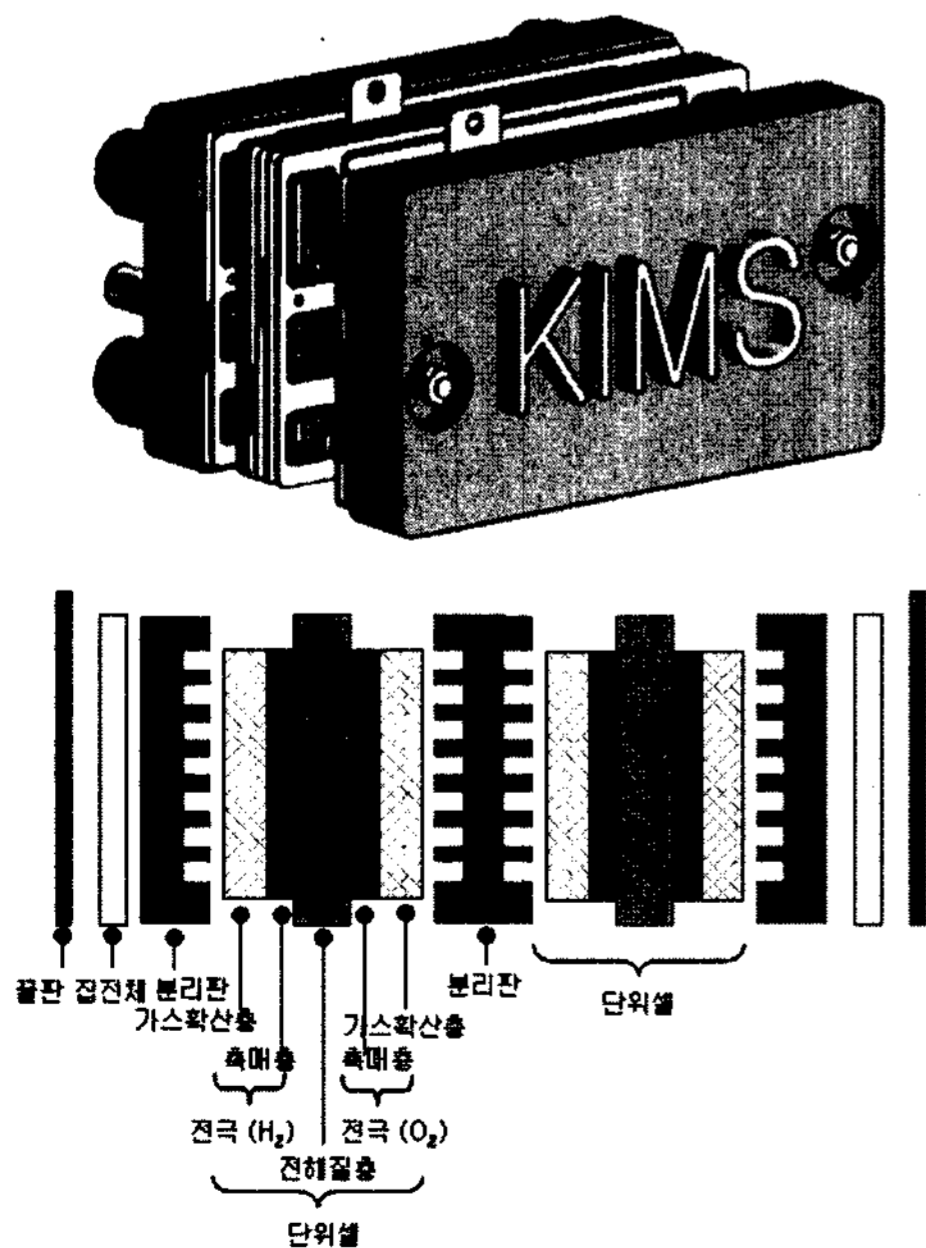
<표 2> 전해질 및 작동온도에 따른 연료전지의 종류, 특성 및 전극반응.

연료전지 유형	전해질/전극반응	전도 이온	작동온도(°C)	공급 연료	발전효율(%)	적용분야
알칼리형 Alkaline Fuel Cell(AFC)	KOH (liquid) 산화반응(Anode) : $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ 환원반응(Cathode) : $1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ 전체반응(Overall) : $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$OH^-$	80	고순도 수소( $H_2$ ) @ Raney Ni anode @ Ag/C cathode	~60	· 우주/군사 분야 특수용 · 미국 우주선용 (60년대) · 독일잠수함 탑재 (초기)
고분자전해질형 Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)	이온교환 고분자막 Nafion membrane ( $CF(CF_2)_nOCF_2SO_3^-$ ) 산화반응(Anode) : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ 환원반응(Cathode) : $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ 전체반응(Overall) : $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$H^+$ ( $H_2O$ )	상온~100	수소( $H_2$ ) 개질가스 @ Pt/C, PtRu/C anode @ Pt/C cathode	40-50	· 가정용 온/난방 겸용 전원 · 빌딩 등 업무용 전원 · 자동차용 전원 · 독일 잠수함 탑재(현재)
직접메탄올형 Direct Methanol Fuel Cell(DMFC)	이온교환 고분자막 Nafion membrane ( $CF(CF_2)_nOCF_2SO_3^-$ ) 산화반응(Anode) : $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ 환원반응(Cathode) : $1/2O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$ 전체반응(Overall) : $CH_3OH + 1/2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$H^+$ ( $H_2O, CH_3OH$ )	상온~80	메탄올( $CH_3OH$ ) @ PtRu/C anode @ Pt/C cathode	20~30	· 휴대용 기기 전원 · 2차 전지 대체 전원
인산형 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	$H_3PO_4$ (molten) 산화반응(Anode) : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ 환원반응(Cathode) : $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ 전체반응(Overall) : $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$H^+$	170~210	수소( $H_2$ ) 개질가스 @ Pt/C anode @ Pt/C cathode	35-45	· 분산발전용 전원 · 빌딩 등 업무용 전원
용융탄산염형 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	$Li_2CO_3/K_2CO_3$ (molten salt) 산화반응(Anode) : $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 2e^-$ ( $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$ ) 환원반응(Cathode) : $1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ 전체반응(Overall) : $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$CO_3^{2-}$	600~700	수소( $H_2$ ) 개질가스 일산화탄소(CO) @ Pours Ni anode @ Porous NiO cathode	50-65	· 분산발전 플랜트 · 빌딩 등 업무용 전원
고체산화물형 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	$O^{2-}$ 전도성 세라믹 YSZ : $ZrO_2(Y_2O_3)$ (solid oxide) 산화반응(Anode) : $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ ( $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ ) ( $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO + 8e^-$ ) 환원반응 (Cathode) : $1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ 전체반응 (Overall) : $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$O^{2-}$	800~1000	수소( $H_2$ ) 개질가스 일산화탄소(CO) 천연가스( $CH_4$ ) @ Ni/YSZ cermet anode @ Porous LSM cathode (LSM : $Sr_xLa_{1-x}MnO_{3-\delta}$ )	50~65	· 분산발전 플랜트 · 빌딩 등 업무용 전원

연료전지에서는 막전극접합체(membrane electrode assembly, MEA)라 한다. 연료전지에서 전해질로는 산( $H^+$ ), 염기( $OH^-$ ), 염(salt) 등의 액체 또는 용융염 형태의 전해질이나 이온 전도성 고분자막이나 고체산화물 세라믹 등이 사용될 수 있다. 사용되는 전해질에 따라서 작동온도나 사용가스, 연료전지 적용기술이 달라진다. 표2는 사용되는 전해질의 종류 및 작동온도에 따라 분류되는 다양한 연료전지를 나타낸 것이다.

#### 나. 연료전지의 기본구성

연료전지는 근본적으로 전기화학 반응이 일어나는 셀(cell)이기 때문에 단위 셀당 산화반응과 환원반응이 일어나는 두 개의 전극과 전해질이 반드시 필요하다. 기본적으로 단위전지는 전해질층을 중심으로 양면에 수소가스 산화반응의 전극과 산소가스 환원반응의 전극이 위치하여 샌드위치 형태의 구조로 되어 있다. 단위



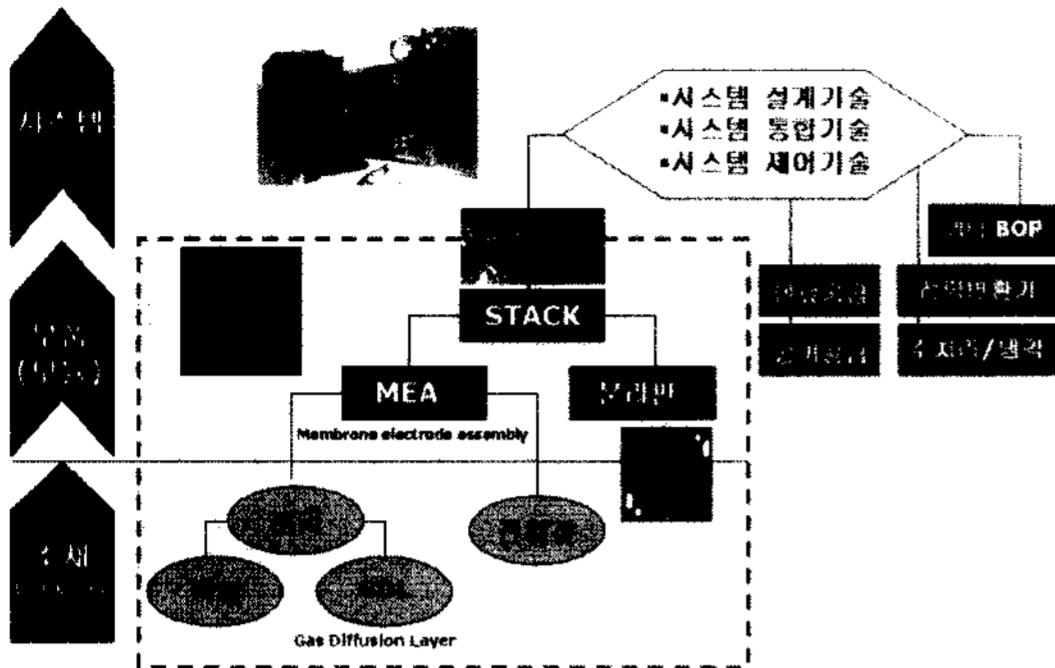
〈그림 4〉 연료전지 스택 기본구조

전지에서 얻을 수 있는 실제 전압은 약 1V 정도이지만 실질적으로 연료전지는 다양한 용도의 발전용 전원에 적합하도록 수십에서 수백 개의 단위전지 셀들이 그림4에 간략히 도식한 것처럼 적층되어 전기적으로 연결되어 있는 스택(stack) 모듈로 되어 있다. 각 셀들은 수소 및 공기(산소) 가스의 원활한 공급과 혼합을 방지하기 위하여 유로 및 밀봉재를 구비한 분리막(separator 또는 bipolar plate)으로 분리되어 있다.

연료전지 시스템은 크게 (1) 연료전지 본체인 스택, (2) 스택의 작동을 위한 주변장치 (Balance of Plant, BOP), (3) 시스템을 제어하기 위한 제어장치로 구성되어 있다. BOP는 연료공급관련 장치, 물 및 열관리 시스템과 같은 기계적 주변장치(Mechanical BOP, M-BOP)와 전력변환 시스템과 같은 전기적 주변장치(Electrical BOP, E-BOP)로 구분된다<sup>7)</sup>. 연료전지 시스템의 구성 부품을 기능별로 모듈화할 수 있는 기술영역으로 분류하면 다음과 같다. 그림5는 연료전지를 구성하는 부품소재들의 시스템 구성 기술체계를 나타낸 것이다.

- 연료전지 본체 (Stack) : 전극(촉매/GDL), 전해질, 단위전지, 분리판 등
- 연료 공급 장치 : 수소 공급 장치 (수소탱크, 개질기 등), 수소가스 가습장치
- 공기 공급 장치 : 송풍기, 밸브, 압력계, 공기 가습장치, 등
- 수처리/냉각 시스템 : 생성된 물 회수 및 처리, 스택 열관리 등
- 전력변환 장치 : 인버터, 컨버터 등
- 시스템 제어장치: 스택 및 주변장치의 감시 및 진단, 제어





〈그림 5〉 연료전지 구성 부품소재의 기술체계.

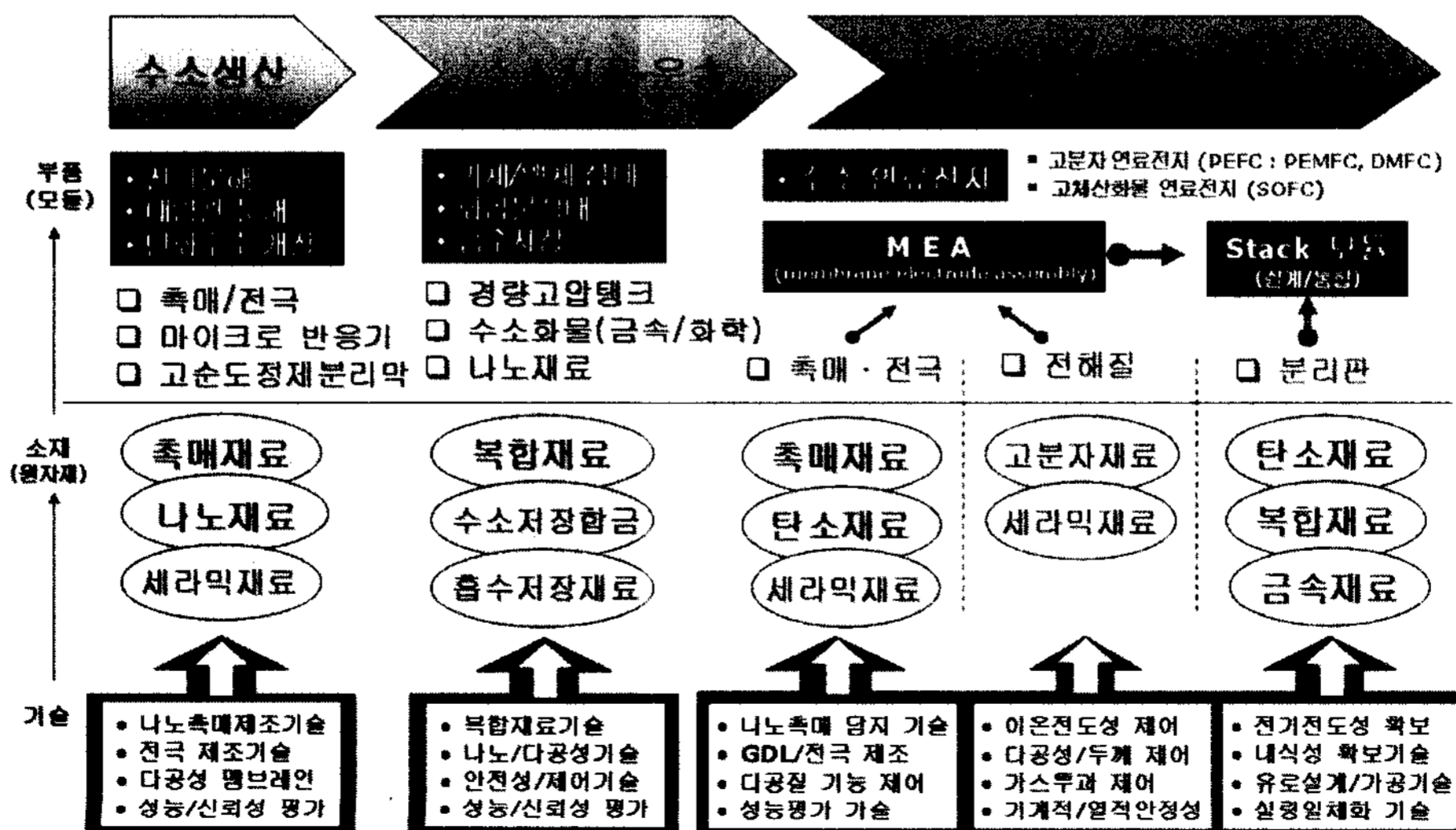
### 3. 연료전지에서 재료혁신

연료전지의 실용화에서 가장 큰 장벽이 되고 있는 기술적 이슈는 연료전지를 구성하는 핵심 부품의 소재 및 공정 단가가 높다는 것과 현재보다 높은 수준의 성능향상 및 내구성을 확보하는 것이다. 그림 6은 수소에너지를 기반으로 하는 연료전지 발전체계에서 수소의 생산, 저장 및 운송, 이용분야의 핵심부품(모듈)과 이들 부품의 원천소재 및 관련 핵심기술

을 정리한 것이다.

수소의 생산은 물 전기분해, 태양광 분해, 탄화수소의 개질을 통해 이루어질 것이다. 이 분야에서 연구 개발이 진행되어야 할 핵심부품으로는 전기분해 또는 태양광 분해 장치의 전극 및 촉매 개발과 탄화수소 개질기용 촉매 및 반응기 등이 있다. 이러한 부품의 원천소재로 나노소재, 촉매소재, 세라믹소재 등이 사용되고 있고 나노촉매 제조기술, 전극제조기술, 고순도 수소정제 분리막 기술, 다공성 메브레인 기술, 성능 및 신뢰성 평가 기술 등이 요구된다.

생산된 수소의 저장은 기체 또는 액체상태, 수소화합물, 수소흡장 형태로 이루어진다. 이와 관련된 연구개발이 필요한 핵심부품으로는 경량고압탱크, 금속수소화물 ( $MgH_2$ ,  $Mg_2NiH_4$ ,  $LaNi_5H_{6.7}$  등), 수소화합물( $NaBH_4$ ,  $LiH$ ,  $SiH_4$ ,  $NaAlH_4$  등), 수소저장 나노소재 (CNT, Zeolite 등) 등이 있다. 수소의 저장은 수소저장합금이나 흡수저장재료, 수소의 운송에 필요한 경량 고압탱크는 복합소재를 이용한



〈그림 6〉 수소에너지를 기반으로 하는 연료전지에서 핵심 부품소재의 기술체계.

연구개발이 진행되고 있다. 이 분야에서는 복합재료기술, 나노/다공성기술, 안정성/제어기술, 성능/신뢰성 평가 기술 등이 요구된다.

수소를 이용하는 연료전지 분야에서는 전지를 구성하는 주요 핵심부품으로는 촉매/전극/MEA, 전해질, 분리판 및 스택 모듈이 있다. 고분자전해질 연료전지(PEFC, DMFC)와 같이 100°C이하의 낮은 온도에서 작동되는 연료전지에서는 전극촉매로 표면적이 넓은 다공성 카본소재에 2~3nm 크기의 백금(Pt) 나노입자가 균일하게 분산되어 있는 Pt/C(carbon supported Pt)촉매를 사용하고 있다. 지금까지는 고가의 Pt와 같은 귀속금속이 사용되고 있지만 가격 저감을 위하여 비백금 금속촉매에 대한 연구가 시작되고 있지만 아직은 만족할 만한 성과를 얻지 못하고 있다. 또한 기존에 사용하고 있는 Pt 사용량을 낮추고도 고성능을 얻을 수 있는 전극 또는 촉매에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 고분자전해질 연료전지 및 직접메탄올연료전지, 인산형 연료전지에서 탄소는 촉매 담지체 뿐만 아니라 전극을 구성하는 주요 부품소재인 가스확산층(gas diffusion layer, GDL)이나 분리판 소재로 이용되고 있다.

고체산화물연료전지(SOFC)와 같은 고온형 연료전지에서는 전극 및 전해질 소재로 세라믹 소재가 이용되고 있다. 전극은 가스의 원활한 공급을 위하여 다공성이 요구되지만 전해질은 가스가 투과할 수 없는 치밀한 세라믹 막이 요구된다. 이러한 부품소재 개발에는 나노 촉매 담지기술 GDL/전극제조기술, 다공질 기능제어기술, 이온 전도성 제어기술, 다공성/두께제어기술, 가스투과성 제어기술, 기계적 열적 안정성 확보기술 등이 용구된다.

연료전지에서 분리판은 스택 내부로 반응가

스의 공급과 열관리를 위한 냉각수나 공기의 유로를 제공함과 동시에 전극에 공급되는 반응가스의 혼입을 방지하고 전극반응으로 생성된 전기를 외부로 뽑아내는 통로 역할을 한다. 따라서 분리판은 운전환경에서 고내식성, 우수한 전기 전도성 및 스택체결 압력이나 외부 충격에 충분히 견딜 수 있는 기계적 강도가 요구된다. 연료전지 스택에서 가장 많은 부분을 차지하는 부품중 하나가 분리판이기 때문에 그 제조단가, 중량, 소재의 내구성에 따라 연료전지 스택의 출력 밀도, 내구성 및 가격에 큰 영향을 미친다. 특히 연료전지 자동차용 분리판은 충격이나 진동에 대한 기계적 강도 확보와 경량/박형화가 가능한 소재가 요구되므로 주로 스테인레스계 금속소재를 사용하여 제조하고 있다. 그러나 금속 분리판은 연료전지 작동조건에서 표면산화물 형성으로 접촉저항이 증가하여 전지의 성능을 저하시키는 원인이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 새로운 금속소재 및 표면처리 기술이 적용되고 있고 새로운 금속재료 개발이나 표면처리, 유로가공 등에서 혁신적인 소재 및 표면처리나 공정 기술이 요구된다<sup>7)</sup>.

SOFC와 같이 800°C이상의 고온에서 운전하는 연료전지에 사용되는 대부분의 부품은 세라믹 소재로 열충격에 아주 취약하다. 전극 및 전해질에 이용되는 세라믹 소재는 열충격으로 미세균열, 다층구조의 계면 및 재료 자체 특성의 퇴화가 발생한다. 이러한 고온에서는 안정하게 사용할 수 있는 금속소재가 없기 때문에 고온에서 전기전도성을 갖는 LaCrO<sub>3</sub>-YCrO<sub>3</sub> 세라믹 소재가 SOFC 연결재(interconnect)로 사용되어 왔다. 낮은 온도에서도 이온 전도성이 우수한 새로운 전해질 소재를 이용할 경우 사용되는 부

폼소재의 내구성을 향상 시킬 수 있고 또한 사용되는 재료의 선택폭을 금속까지 확대할 수 있기 때문에 800°C이하의 높은 이온 전도성을 나타내는 중저온형 전해질<sup>[6,8]</sup> 개발이 진행되고 있다. 800°C이하의 중온에서는 연결재의 소재로 세라믹 대신 금속을 이용 할 수 있다. 금속소재를 연결재로 적용할 경우 중요한 사항은 열팽창계수이다. 선정된 금속소재는 가능한 세라믹 전해질소재와 열팽창계수가 유사해야 한다. 페라이트계 스테인리스강은 ZrO<sub>2</sub> 전해질과 유사한 열팽창계수를 가지므로 매력적인 소재이다. 그러나 금속소재를 사용할 경우 가장 큰 문제가 고온의 산화분위기에서 금속재료의 열화이다. 고온의 산화가스 분위기에 사용되므로 SOFC용 금속연결재는 특히 산화부식에 취약할 뿐만 아니라 고온에서 Cr의 증발로 주변의 전극이나 전해질을 오염시키는 문제가 발생되고 있다. 따라서 고온의 산화 분위기 조건에서 사용할 수 있는 새로운 SOFC용 금속 분리판 개발 및 표면처리 기술 개발이 절실하다. 또한 실용화를 대비하여 제조단가의 저하 및 대량생산이 가능한 공정의 개발 등을 여러 가지 사항을 염두에 두고 진행되어야 할 것이다.

#### IV. 결 론

연료전지가 상용화되기 위해서는 연료전지 발전체계의 근간이 되는 수소의 생산, 저장 및 운송 분야에서 사용되는 부품소재 및 시스템의 혁신적인 기술개발이 필요하다. 또한 연료전지도 그 구성 부품소재 및 시스템의 가격과 성능 및 내구성이 소비자의 요구에 부응해야 할 것이다. 이러한 것은 혁신적인 소재기술을

바탕으로 부품소재의 성능향상, 비용저감 및 제조공정의 최적화를 통해서 가능하다. 현재 연료전지의 핵심 부품소재에 대한 근본적인 문제점 등을 소재 및 공정 관점에서 각 부품별 기능과 기술적 요구사항을 면밀히 검토하고 그에 부합되는 소재/공정기술을 적용하여 가격 및 성능 개선을 도모하고 그에 따른 원천기술을 개발하는 것이 중요하다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Thomas and M. Zalbowitz, "Fuel Cells-Green Power", LANL, pp.24, 2000.
- [2] U. Bossel and B. Eliasson, "Energy and the Hydrogen Economy", Report, 08 Jan. 2003
- [3] U. Bossel, B. Eliasson and Gordon Taylor, "The Future of Hydrogen Economy : Bright or Bleak?", Final Report, 26 Feb. 2006
- [4] U. Bossel, "Does a Hydrogen Economy Make Sense?", Proceedings of the IEEE, Vol. 94, no.10, pp. 1826-1837, October, 2006
- [5] 박상욱, "수소경제의 의미, 그리고 그 실현을 위하여", 신재생에너지, p.20, 2007년 3월.
- [6] F. DiSalvo and T. Zawodzinski, "Basic Research Challenges for Fuel Cells and Novel Fuel Cell Materials" in Basic Research Needs for the Hydrogen Economy, The report of Basic Energy Sciences Workshop on Hydrogen Production, Storage, and Use, DOE, May 13-15, 2003
- [7] 이창래, 양철남, 문성모, 정용수, "수소경제 시대 실현을 위한 고분자 연료전지용 부품소재기술", 전기전자재료, 제20권, 제4호, pp. 26-38, 2007년 4월
- [8] S. M. Haile, "Fuel Cell materials and Components", Acta Materialia, Vol. 51, pp. 5981-6000, 2003

## 저자소개



이 창 래

1992년 2월 한양대 재료공학과 학사  
 1994년 2월 한양대 재료공학과 석사  
 2000년 2월 한양대 재료공학과 박사  
 2000년 7월-2002년 2월 Lawrence Berkeley  
 National Lab.(US)  
 Postdoc.  
 2002년 3월-현재 재료연구소(KIMS) 선임연구원  
 주관심 분야 : 전지 및 연료전지 부품소재 기술  
 에어로젤 다공성 재료  
 에너지 변환용 전도성고분자 및 탄소재료



양 철 남

1994년 2월 한양대 재료공학과 학사  
 1996년 2월 한양대 재료공학과 석사  
 1996년 2월-1998년 1월 대우자동차 연구원  
 1998년 2월-2001년 10월 대우고등기술연구원  
 주임연구원  
 2001년 10월-2005년 5월 (주)퓨얼셀파워  
 선임연구원  
 2006년 8월-현재 재료연구소(KIMS) 선임연  
 구원  
 주관심 분야 : 연료전지 스택 및 제조공정  
 연료전지 시스템  
 전기자동차용 배터리  
 전해연마

## 저자소개



문 성 모

1991년 2월 한국과학기술원 재료공학과 학사  
 1993년 2월 한국과학기술원 재료공학과 석사  
 1997년 7월 한국과학기술원 재료공학과 공학  
 박사  
 1998년 10월-1999년 10월 UMIST (UK)  
 Postdoc.  
 1999년 11월-2001년 11월 Hokkaido Univ.  
 JSPS 특별연구원  
 2001년 11월-2003년 12월 NRC(Canada) 방  
 문연구원  
 2003년 12월-현재 재료연구소(KIMS) 선임연  
 구원  
 주관심 분야 : 양극산화  
 에칭 및 전해연마  
 부식 및 방식  
 수소연료전지



정 용 수

1980년 2월 경북대학교 금속공학과 학사  
 1982년 2월 경북대학교 금속공학과 석사  
 1994년 2월 UMIST (UK) 공학박사  
 1982년-현재 재료연구소(KIMS) 책임연구원  
 1992년-1993년 Univ. Salford, 전기전자  
 공학과 객원연구원  
 주관심 분야 : 양극산화  
 생체소재 표면기술  
 연료전지