수소 이용 기술의 이해

수소 이용 기술의 올바른 이해를 돕기 위해서 수소의 기본적 특성에 대해서 서술하였으며, 수소를 에너지 자원으로 이용하기 위해서 선행되어야 할 기술들을 정리하였다. 그리고, 수소를 이용한 에너지 변환 기술의 각종 사례에 대해서 분석하였다.

손 정 락
서울대학교 기계항공공학부(jlsohn@snu.ac.kr)

최근 들어 지구 온난화(global warming) 현상은 더 이상 학술적 이론이 아니라 인류의 삶에 직접적으로 영향을 미치는 자연 현상으로 받아 들여 지고 있다. 지구 온도의 상승은 남북극의 빙하를 녹게 하고, 히말라야 설산을 녹게 할 뿐만 이니라 사하라 사막의 급속한 확장, 중국의 서북부 지역을 황폐화시키고 있다. 이러한 현상들은 우리나라의 경우에도 사과 산지의 북상, 냉 어류의 소멸 등 각종 생태계의 변화를 가져 오고 있으며, 이러한 현상들은 우리 삶의 형태에 지대한 영향을 미치고 있다. 지구 온난화 현상의 원인에 대해서는 아직도 여러 가지 학설들이 있지만, 보편적으로 이산화탄소의 과다한 배출이 가장 큰 원인으로 받아들여 지고 있다.

이산화 탄소의 과다한 배출의 원인으로는 인구의 폭발적인 증가 및 그에 따른 산림 지역의 황폐화, 화석연료(fossil fuel)의 과다 사용 등이 있을 수 있다. 그 중에서도 특히, 화석연료는 인류가 불을 생활도구로 사용하기 시작한 이후 목재, 석탄, 석유, 천연가스 등 우리 생활의 중요한 에너지 자원으로 자리 잡아 왔으므로 이와 관련된 이산화탄소의 배출은 오랜 세월에 걸쳐 진행되어 왔다고 볼 수 있다. 즉, 화석연료의 주 성분인 탄화수소(hyrdocarbon)에 포함된 탄소(carbon)는 연소과정에서 공기내의 산소와 결합하여 이산화탄소를 배출하게 된다. 이산화탄소는 자연계의 원활한 신진대사를 위해서 필수적인 물질이므로 어떤 형태로든 적정량의 생성은 반드시 필요하지만, 이러한 균형을 파괴시키는 수준의 과다한 생성이 문제가 되는 것이다. 이산화탄소 등 지구 온난화와 관련된 온실가스(greenhouse gases)물질들은 대기권 내에서의 열을 흡수하여 대기권 바깥으로의 방출을 막기 때문에 대기(atmosphere)를 거대한 온실로 만들게 된다.

이산화탄소의 배출량을 줄이기 위해서는 궁극적으로 탄소가 포함되지 않는 연료를 에너지 자원으로 사용하여야 하는데, 이와 관련된 가장 유력한 연료로 수소(hydrogen)를 생각할 수 있다. 즉, 수소는 연소반응을 통하여 물(water)만 생성하므로 이산화탄소의 배출과는 관련이 없다.

수소를 에너지 자원으로 이용하고자 하는 또 다른 동기는 화석연료의 고갈에 대한 우려와 관련이 있다. 특히, 1970년대의 오일쇼크와 최근의 급격한 유가 상승 등은 인류가 새로운 에너지 자원의 발굴 필요성을 인식하는 계기가 되었다. 뿐만 아니라, 아직도 논란의 여지는 있지만 현재 인류가 크게 의존하고 있는 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료의 매장량이 언젠가는 고갈 될 가능성이 있으며, 이를 대비한 새로운 에너지 자원의 발굴이 필수적이다.

수소의 특성

수소는 16세기경 연금술사인 스위스의 파라켈수스(Paracelsus)가 금속이 산(acid)에 녹는 과정에서 발생하는 기체의 형태로 처음으로 발견되었으며, 1766년 영국의 캐빈디쉬(H.Cavendish)에 의해서 산화반

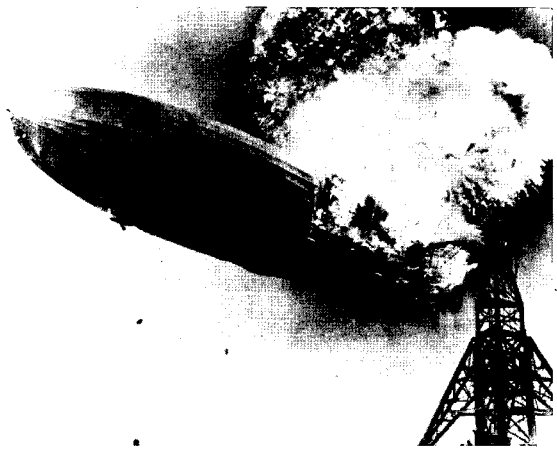
응을 통하여 물을 만들 수 있는 물질임을 알게 되었다. 그 후 1783년 프랑스의 라부아지에(A. Lavoisier)에 의해서 물(hydro)을 만드는(gen) 물질이라는 의미로 수소(hydrogen)라 불리게 되었다.

수소는 우주에 존재하는 가장 풍부한 화학 원소(질량 기준 75%)이며 무색 무취한 가연성 비금속 성 물질이다. 수소 원자(H)는 하나의 양성자(proton)와 하나의 전자(electron)로 구성된 가장 단순한 구조를 갖고 있으며, 수소 분자는 분자량이 2.01588 g/mol로서 모든 물질 중 가장 가볍다. **표 1**과 같이 수소 분자(H_2)는 밀도가 매우 낮고 비등점이 매우 낮기 때문에 일반적으로 기체의 상태로 존재한다. 수소는 매우 풍부한 물질임에도 불구하고 그 자체로서는 존재하지 않으며, 물 혹은 탄화수소계열의 물질 내에서 다른 원자들과 결합되어 존재하기 때문에 수소를 이용하기 위해서는 전기분해(electrolysis), 개질(reforming) 반응 등 다른 물질들로부터 수소를 분리해내는 기술이 반드시 필요하다.

수소 이용 기술

수소이용 기술은 새로운 에너지 자원으로서의 이용 가능성과 연료 전지의 연료로의 사용 가능성, 그리고, 이를 종합한 수소경제(hydrogen economy)의 도래를 예측하는 에너지 경제학적 이론들의 부상에 따라 전세계적으로 최근 들어 많은 관심을 끌고 있다. 그러나, 수소를 이용하는 기술에 대해서는 수소가 발견된 18세기 이후부터 이미 유럽 지역을 중심으로 많은 투자가 진행되었다. 특히, 20세기에 들어와서는 수소의 가벼운 성질(공기 밀도의 약 1/15)을 이용하여 비행선의 부양 가스로 사용되기도 하였으나, 공기 중에서 농도가 4%만 되어도 폭발하는 가연 특성으로 인한 사고(**그림 1**참조)때문에 비가연성 물질인 헬륨(helium)으로 대체되기도 하였다. 그럼에도 불구하고 1930 ~ 1940년대 기간 동안에는 독일을 중심으로 승용차, 트럭, 기관차, 심지어 잠수함 및 어뢰에 이르기 까지 다양한 기관의 연료로 사용 가능성이 검토되기도 하였는데, 이는 아마도 전쟁 기간 동안의 독일의 에너지 사정과도 깊은 관련이 있었던 것으로 보인다. 그 이후에도 수소이용 기술은 기존 화석연료 대체 에너지로서의 가능성 때문에 지속적으로 관심의 대상이었으며, 1970년대 오일쇼크 이후에는 수소연료 내연기관 엔진 개발이 활발한 적도 있었다.

수소는 에너지 자원으로서의 응용 이외에도 우리의 생활과 밀접한 여러 분야에 이미 널리 응용되고 있다. 그 중에서도 수소를 가장 많이 사용하는 분야는 원유(crude oil)를 정유 시키는 각종 정유공정(petrochemical process)과 비료를 만드는데 필요한 암모니아 생성공정이다. 그 외에도 메탄올, 염산 등 각종 화학 물질의 생성 공정에도 널리 활용되고 있으며, 심지어 마가린 등 식품 제조 공정에서도 사용되고 있다. 2004년 현재 전세계적으로 수소 생산량



[그림 1] Hindenburg 참사(1937년 5월 6일)

<표 1> 수소 분자(H_2)의 주요 성질

분자량	밀도	비등점	점화온도	발열량	
				저위발열량	고위발열량
2.01588 kg/kmol	0.08988 kg/m^3	20.28 K	858.15 K	241,827 kJ/kmol	285,839 kJ/kmol

은 50 MMT(million metric tons)에 이르고 있으며 년간 10%수준으로 지속적으로 증가하고 있다. 이와 관련된 경제적 규모는 2005년 기준 전 세계적으로 1,350억불 규모에 이르고 있다.

이와 같이 수소가 우리 생활과 매우 밀접한 친숙한 물질임에도 불구하고 지금까지 에너지 자원으로는 널리 사용하지 못했던 이유들로는 수소의 가연 특성에 따른 위험성에 대한 부담, 수소가 자연계에서 직접 구할 수 없기 때문에 다른 물질들로부터 강제적으로 만들어야 하는데 필요한 투자에 대한 경제적 부담 등이었을 것으로 추정된다. 그러나 최근의 전 세계적인 에너지 수급 상황 및 지구 온난화 현상과 관련된 사회적 관심은 이러한 부담을 극복하기 위한 투자의 필요성을 강력히 요구하고 있으며, 그러한 이유로 인하여 가까운 미래에 수소는 에너지 자원으로서 과거와는 전혀 다른 가치가 부여될 것으로 전망된다.

수소 경제의 의미

수소 경제란 용어는 그 동안 여러 문헌에서 여러 사람들에 의해서 주창되었지만 2003년도 발간된 리프킨(J. Rifkin)의 "수소경제(The Hyrdogen Economy)"에 의해서 그 개념이 정립되었다고 볼 수 있다. 물론 이 책에서는 수소가 인류의 에너지 문제를 해결하기 위한 유일한 대책으로 서술되어 있는 등 부자연스러운 면이 없지는 않지만 수소경제와 관련된 많은 이슈들을 비교적 상세하게 서술하고 있다.

인류가 사용하는 주요 에너지 자원은 17~8세기경 목재로부터 석탄으로 전환되었다. 이러한 에너지 자원의 전환은 엄청난 사회적 변화를 가져왔으며, 18세기 영국을 중심으로 한 산업혁명과 이어지게 되었다. 석탄 자원 중심의 산업혁명은 인간, 동물 중심의 노동력을 기계 중심의 노동력으로 전환시켰으며, 그 결과 인류의 삶의 형태, 산업 구조 등을 혁신적으로 변화시켰다. 그 후 21세기 초입의 정보혁명이 인류의 삶에 큰 영향을 미친 또 다른 전환점으로 볼 수 있겠지만 에너지 자원의 측면에서는 18세기 산업혁명이 지금까지 화석연료 시대로 이어지고 있다.

리프킨과 같은 사회학자들은 화석연료 시대의 종말과 함께 수소연료를 중심으로 한 수소경제의 시대가 조만간 도래할 것이며, 이는 산업혁명과 버금가는 형태로 인류의 삶에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문에 이와 관련된 사전 대비가 시급하다고 역설하고 있다. 여기서, 수소경제란 수소를 에너지 자원으로 사용하는 경제형태로 정의할 수 있으며 수소의 생산, 보급 및 이용과 관련된 전반적인 과정을 포함하고 있다. 따라서, 만약, 수소경제가 실재로 실현될 경우에는 수소와 관련된 일부 에너지 산업에만 영향을 미치는 것이 아니라 모든 산업 구조와 인류의 삶에 큰 변혁이 일어날 것으로 전망할 수 있다. 그러나, 아직도 전세계적인 화석연료 매장량의 정확한 예측의 부재, 화석연료 이용과 관련된 새로운 고효율, 친환경 기술들의 출현 등으로 모든 에너지 자원이 수소로 전환되는 형태의 수소 경제는 가까운 시기에 도래하기는 힘들 것으로 예상할 수 있다. 다만, 화석연료 대체 에너지의 필요성과 지구 온난화 현상에 따른 이산화탄소 저감 등의 이유로 수소라는 연료를 에너지 자원으로 사용하고자 하는 시도가 과거 보다는 급격히 증가할 것으로 예상되므로, 현재로서는 수소 이용 기술에 대한 보다 적극적인 관심이 요구되는 상황이다.

수소 생산 기술

수소는 우주 상에서 가장 풍부한 물질임에도 불구하고 물(H_2O) 혹은 탄화수소(C_nH_m)계열의 화석연료 내에 포함되어 있기 때문에 이들로부터 수소를 분리해 내기 위해서는 별도의 수소 생산 기술이 필요하다. 주요 수소 생산 기술로는 크게 물로부터 수소를 분리하는 전기분해(electrolysis) 기술과 화석연료로부터 수소를 생산하는 개질(reforming)기술이 있다. 전기분해 기술이란 널리 알려진 바와 같이 전기를 이용하여 물을 수소와 산소로 분해하는 기술을 의미한다. 개질 기술이란 메탄(CH_4)과 같은 탄화수소 계열의 연료를 수증기와 반응시켜 수소를 생산하는 수증기 개질 반응(steam reforming reaction)이나 연료를 부분 산화(partial oxidation)시켜 수소를 생산하는 기술을 의미하는데 일반적으로 수증기 개질 반응이 널리 사용된다.

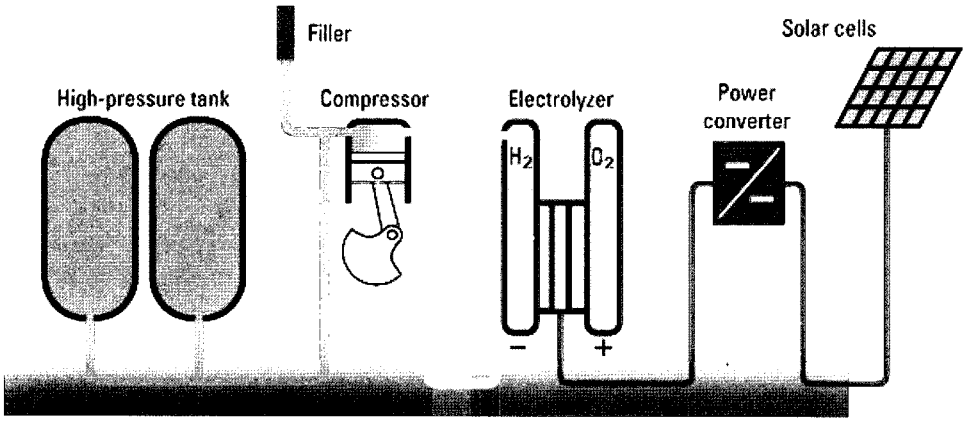
전기분해 기술의 경우에는 물로부터 수소를 분리하기 위해서는 외부로부터의 전력공급이 필요하다.

이는 연료전지 등을 이용하여 수소가 갖고 있는 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환시켜 전력을 생산하더라도 생산된 전력의 상당량 혹은 전부를 수소 생산 소요 전력으로 소모시켜야 함을 의미한다. 그럼에도 불구하고 물로부터 수소를 생산하는 기술에 대해서 관심을 가져야 하는 이유는 물이란 물질의 풍부함에 대한 매력과 함께 재생에너지(renewable energy)의 활용 측면에서의 가치 때문이기도 하다.

이산화탄소를 전혀 생성하지 않기 위해서는 수소 이외에도 수력, 풍력, 태양광과 같은 재생 에너지의 사용을 생각해 볼 수 있다. 그러나, 수력의 경우 댐이 있는 곳, 풍력의 경우에는 바람의 강도가 강한 곳, 태양광의 경우에는 넓은 평지 등과 같이 재생 에너지를 생산할 수 있는 지리적 위치는 매우 제한적이다. 뿐만 아니라, 풍력, 태양광 등의 경우에는 아직도 효율이 매우 낮기 때문에 생산된 전력의 원거리 송전이 거의 불가능하다. 그 대안으로 재생 에너지로부터 생산된 전력을 이용하여 물을 전기 분해시켜 수소를 생산하게 되면 재생 에너지 자원을 수소로 변환시킬 수 있게 된다. 이렇게 변환된 수소를 적절한 이송 시설을 통하여 에너지 수요 지역으로 공급하여 활용하게 되면 재생 에너지의 간접적 활용 효과를 도모할 수 있다. **그림 2**는 태양광으로부터 얻어진 전력을 활용하여 전기분해 기술에 의한 수소 생성과정의 개략도이다.

이와 유사한 개념으로 원자력 에너지로부터의 수소 생산도 고려해 볼 수 있다. 원자력 에너지를 재생 에너지로 분류하기에는 논란의 여지가 있지만 비 탄화수소 계열로 이산화탄소를 생성하지 않는 에너지 자원으로는 분류가 가능할 것이다. 원자력 에너지를 자동차 등과 같이 에너지 수요처에서 직접 사용하기에는 여러 가지 문제가 있을 수 있지만 원자력 에너지를 이용하여 수소를 생산하고 이를 에너지 수요 지역에 공급하여 간접적으로 활용할 수는 있다. 이러한 상황을 대비하여 최근 원자력 에너지 분야에서는 고온 가스냉각 원자로(HTGR: High Temperature Gas-cooled Reactor)를 이용한 열화학(thermochemical reaction)분해반응을 통하여 수소를 생산하는 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

탄산수소 계열의 화석연료로부터 수소를 생산하는 개질 기술에서 적용되는 개질 반응은 대부분 흡열(endothermic) 반응이므로 외부로부터 열의 공급이 필요하다. 따라서, 개질 기술의 경우에도 전기분해와 마찬가지로 수소를 생산하기 위해서는 외부로부터의 에너지 공급이 필수적이다. 개질 기술의 또 다른 문제점은 화석연료로부터 수소를 분리하는 과정 중 일산화탄소 혹은 이산화탄소가 생성되므로 궁극적으로 이산화탄소 저감효과를 볼 수 없다는 점이다. 따라서, 개질 기술을 이용하여 수소를 생산할 경우에는 이산화탄소를 분리하여 처리하기 위한 추가적인 기술의 적용이 요구된다. 이러한 심각한 문제점에도 불구하고 개질 기술의 활용이 필요한 이유는 상대적으로 전세계적 매장량이 상대적으로 풍부한 저급의 화석연료인 석탄을 직접 에너지 자원으로 사



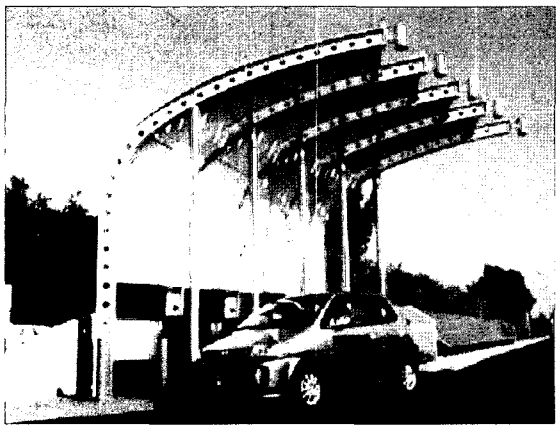
[그림 2] 태양광 기반 수소생산 시스템의 개략도

용하는데 따른 문제점을 보완하기 위해서이다. 즉, 석탄을 물과 산소를 이용하여 개질(혹은 가스화(gasificaion))시킬 경우 수소의 생성이 가능하며, 생성된 수소를 적절한 수단을 활용하여 운송한 후 수요처에서 사용할 경우 석탄을 직접 사용할 경우에 발생하는 각종 환경문제 해결에 크게 도움을 줄 수 있다.

수소 이송 및 저장 기술

앞서 서술한 바와 같이 재생 에너지로부터 생산된 전력을 이용한 전기분해 기술을 활용하여 물로부터 수소를 생산하거나, 탄화수소 계열의 화석연료의 개질 반응으로부터 수소를 생산하거나 수소를 생산한 장소로부터 수소 에너지의 활용이 필요한 수요처까지의 이송이 필요하다. 수소의 이송은 천연가스 등과 같은 관로 이송이나 수송 수단을 이용한 이송을 고려할 수 있다. 이송된 수소를 수요자에게 공급하기 위해서는 수소 공급 수단이 필요한데 이를 위해서는 기존의 자동차 주유소와 유사한 개념의 수소 스테이션(hydrogen station)의 보급과 같은 사회적 인프라 구축이 필요하다(그림 3 참조).

수소는 높은 발열량으로 인하여 단위 질량 당 에너지(specific energy)가 매우 큼에도 불구하고 낮은 밀도로 단위 부피당 에너지(specific energy density)가 매우 낮다. 그 결과 수소를 상압에서 저장하기 위해서는 매우 큰 저장 용기가 필요하며, 보다 많은 수소를 저장하기 위해서는 가압 상태에서 저장하여야 한다. 즉, 수소 1 g을 상압 상태에서 저장하기 위해서는 11 리터의 저장 용기가 필요하며, 이를 가용한 수준의 용기 규모로 저장하기 위해서는 수백 기압 이상의 가압이 필요하다. 수소 저장 기술로는 복합(composite)소재를 기반으로 한 수소저장 고압용기가 일반적이지만, 장기적으로는 금속 수소화물(metal hydride), 탄소 나노튜브(carbon nanotube) 등을 이용한 획기적인 기술 개발도 검토되고 있다.



[그림 3] Honda사가 개발한 수소 스테이션 전경

에너지 변환 기술

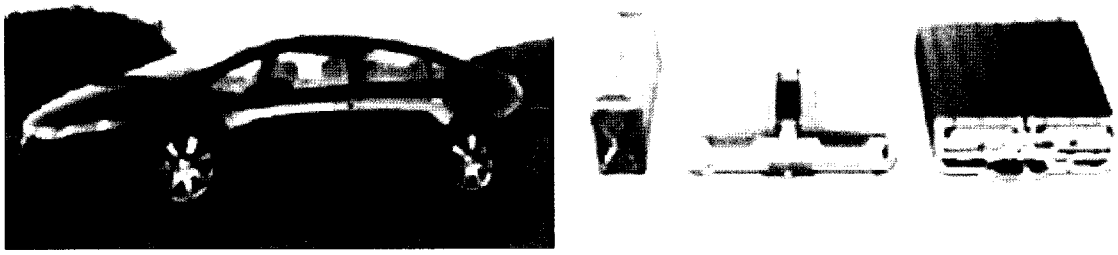
적절한 기술을 활용하여 생성된 수소를 이용하여 수요자가 필요로 하는 형태의 동력(power) 혹은 열(heat)을 생성시키기 위해서는 수소의 화학적 에너지를 동력 혹은 열로 변환시키는 기술이 필요하다. 이러한 에너지 변환 기술에는 연료의 화학적 에너지를 열에너지로 변환시켜 이로부터 동력(축동력 혹은 전력)을 생성시키는 간접 에너지 변환(indirect energy conversion) 기술과 연료의 화학적 에너지를 직접 동력(전력)으로 변환시키는 직접 에너지 변환(direct energy conversion) 기술이 있다. 간접 에너지 변환 기술과 관련된 장치로는 내연기관, 가스터빈 등 열기관 계열의 장치들이 있으며, 직접 에너지 변환과 관련된 장치로는 연료전지(fuel cell)가 대표적이다.

연료전지

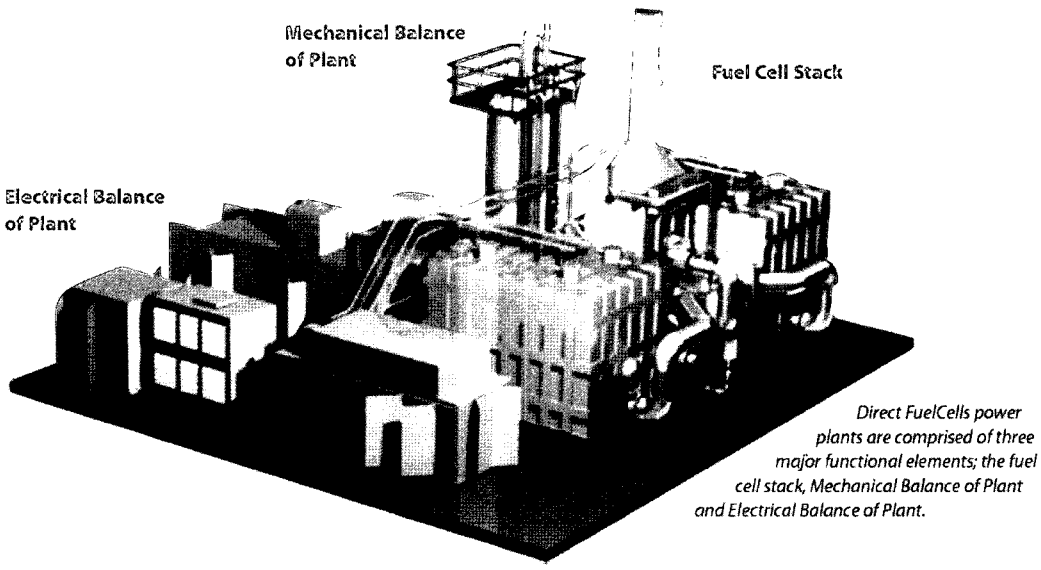
연료전지는 연료의 화학적 에너지로부터 직접 전력을 생성하는 직접 에너지 변환 장치이다. 수소 이용 기술과 관련하여 연료전지를 가장 우선적으로 떠올리는 이유는 연료전지의 기본이론인 전기화학반응(electrochemical reaction)이 일반적으로 전기분해의 역방향인 수소와 산소가 결합하여 물을 생성하면서 전력이 만들어지는 과정으로 설명되기 때문이다. 가장 쉬운 전기화학 반응으로는 양극(anode)으로 공급된 수소가 양극과 전해질(electrolyte)의 경계면에서 수소이온(proton)과 전자(electron)로 분리되어 수소이온만 선택적으로 통과시키는 전해질을 통하여 전달된 수소이온과 전해질을 우회하여 음극으

로 전달된 전자가 음극(cathode)으로 공급된 산소와 결합하여 물을 생성하는 과정으로 설명할 수 있다. 이때, 양극간의 전압 차와 전해질을 우회해서 전달되는 전자의 흐름을 통하여 발생하는 전류에 의해 전력이 생성되게 된다.

연료전지의 종류는 전해질의 종류 및 전해질을 통과하는 이온의 특성, 그리고 작동온도에 따라 여러 가지로 분류되는데, 가장 단순하게는 100℃ 이하에서 작동하는 저온형 연료전지(PEMFC, DMFC)와 400 ~ 1000℃ 정도에서 작동하는 고온형 연료전지(MCFC, SOFC)로 구분할 수 있다. 이상적인 과정인 가역(reversible)과정에서 연료전지가 작동할 경우에는 작동온도가 높을수록 출력이 감소하지만, 실제 상황에서는 고온형 연료전지가 저온형보다 출력(혹은 효율)이 높다. 저온형의 경우에는 낮은 작동온도로 인하여 시동 특성이 상대적으로 우수한 장점이 있어 자동차 동력원으로의 적용을 목적으로 개발되고 있다(**그림 4** 참조). 반면에, 고온형의 경우에는 주로 열효율이 중요한 발전(power generation)용으로 개발되고 있으며, 고온 작동 연료전지 배기가스로부터의 열 회수에 의한 열 생산 능력도 또 다른 장점이다. **그림 5**의 발전용 연료전지 시스템으로부터



[그림 4] Honda사가 2005년도 개발 발표한 연료전지 자동차(FCX)과 연료전지 스택



[그림 5] Fuel Cell Energy사가 개발한 250 kW급 발전용 연료전지 시스템(DFC300A)

알 수 있듯이 연료전지를 이용해서 동력 및 열을 생산하는 연료전지 시스템에는 핵심부위에 해당하는 연료전지 스택(stack) 이외에도 연료전지 가동에 필요한 각종 시설 및 장비에 해당하는 BOP(Balance Of Plant)가 함께 구성되어야 한다. 주요 BOP로는 기계적 BOP(M-BOP)와 전기적 BOP(E-BOP)로 구분된다. M-BOP에는 연료전지에 공급되는 공기 및 연료를 공급하기 위한 각종 공급 장치 등이 포함되어 있으며, 천연가스를 자체적으로 개질하여 수소를 생성하는 경우에는 개질 장치도 여기에 포함된다. E-BOP는 연료전지에서 만들어지는 직류를 교류로 변환시키는 변환기(converter)를 포함한 각종 전기적 설비들로 구성되어 있다.

연료전지에 작동에 필요한 연료인 수소를 조달하는 방법으로 자동차용 연료전지의 경우에는 수소 스테이션으로부터 충전 받아 자동차 자체의 수소 저장용기에 싣고 다니면서 사용하는 방법을 채택하고 있다. 수년 전에는 수소 조달 방법에 대한 여러 가지 문제점들을 고려하여 자동차 내부에 연료전지와 함께 개질기(on-board reformer)를 장착하여 천연가스로부터 수소를 생산하여 사용하는 방법도 고려하였다. 그러나, 이 경우 개질기 설치에 따른 공간적 한계 문제와 관련된 어려움이 있을 뿐만 아니라, 무엇보다도 자동차에서 연료를 개질을 할 경우 이산화탄소 저감에는 도움이 되지 않는다는 이유 때문에 현재로서는 적극적으로 고려되고 있지 않는 것으로 보인다. 반면에, 현재 개발 중이거나 출시되고 있는 모든 발전용 연료전지의 경우에는 수소를 연료로 직접 사용하지 않고, 자체적인 개질 장치를 이용하여 천연가스로부터 수소를 생성하여 사용하고 있다. 이는 기존의 천연가스 공급 인프라를 최대한 활용하되 연료전지의 고효율 특성을 활용하여 연료 사용량을 줄임으로써 이산화탄소 배출량을 줄이는 전략으로의 접근이라고 판단된다.

내연기관 엔진

수소를 이용하여 동력 혹은 열을 생산하는 에너지 변환 기술과 관련된 대표적인 장치는 수소 기반 전기화학반응을 이용한 연료전지이다. 그러나, 연료전지는 직접 에너지 변환에 따른 고효율 특성에도 불구하고 아직도 다른 에너지 변환 장치들에 비하여 기술적 성숙도가 떨어지기 때문에 이론적 고효율성을 충분히 실현하지 못하고 있을 뿐만 아니라 경제적 타당성 측면에서도 경쟁력 확보가 힘든 상황이다. 예를 들어 자동차용 연료전지로 주로 사용되는 저온형 연료전지의 경우에는 저온 반응에 필요한 고가의 촉매(백금)량을 획기적으로 줄이면서도 활성화 손실(activation loss)을 감소시키기 위한 지속적인 기술 투자가 필요하다. 뿐만 아니라 기존의 내연기관의 기동성 및 내구성 수준을 확보하기 위해서는 아직도 많은 기술 개발이 요구되고 있다. 이와 유사한 상황은 발전용 연료전지의 경우도 마찬가지 이다.

이러한 문제점과 관련하여 수소를 연료로 사용하면서도 기술적 성숙도가 높은 에너지 변환 장치들을 고려해 볼 수 있는데 그 중의 하나가 내연기관 엔진(internal combustion engine)이다. 실재로 1807년 스위스 발명가인 리바즈(Rivaz)가 세계 최초로 내연기관 엔진을 발명했을 당시에 사용한 연료는 수소이었다. 다만, 그 후 수소 연료의 여러 가지 문제점을 기술적으로 해결하지 못하여 다른 연료 사용을 고려하게 되었으며 1870년에 가서야 가솔린을 내연기관 연료로 사용하게 되었다.

수소를 내연기관 엔진의 연료로 사용할 경우 연료전지의 전기화학반응과 동일한 형태의 화학반응이 연소반응이 되어 생성물(배기가스)로는 물을 배출하기 때문에 연료전지의 장점을 그대로 유지할 수 있다. 그리고, 내연기관 엔진의 이론적 효율은 연료전지 보다 낮지만, 내연기관 엔진 기술의 성숙성과 현 상태에서의 연료전지의 기술적 한계 등을 고려하면 효율 측면에서도 내연기관 엔진은 충분한 경쟁력 확보가 가능한 상태이다. 뿐만 아니라, 수소 연료의 수급을 위한 가스 스테이션의 확보, 수소 저장 장치관련 기술 등은 내연기관 엔진이나 연료전지 모두 풀어야 할 동일한 기술적 과제이다.

실재로 독일은 세계 제 2차 대전 이전에 이미 수천대의 수소 내연기관 자동차를 개발하였다는 설도 있으며, 국내에도 1970년대의 두 차례 오일쇼크 이후 수소 연료 내연기관 엔진에 대한 연구가 활발한 적도 있었다. 최근에는 BMW사가 수소 내연기관 자동차인 CleanEnergy 모델(**그림 6**) 개발을 발표하였으며, 이 모델에 장착된 수소 내연기관 엔진의 목표 효

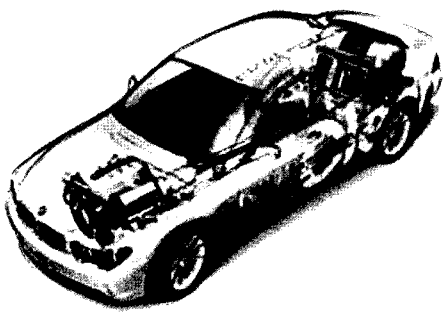
율 50%는 현재 개발 중인 여러 종류의 연료전지 자동차와 비교해서 충분한 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

가스터빈

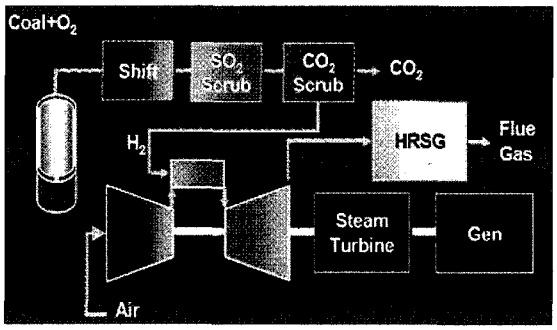
수소를 이용한 에너지 변환 장치의 또 다른 가능성으로 가스터빈도 함께 고려할 수 있다. 브레이튼(Brayton) 사이클을 이론적 기반으로 하는 가스터빈은 높은 비출력 특성으로 인하여 항공기 추진기관으로 널리 적용되고 있다. 그러나, 1980년대 이후 복합화력발전의 보급이 활성화되면서 전세계적으로 발전설비의 25% 이상을 가스터빈을 기반으로 한 복합화력발전 설비가 차지하고 있다. 발전용 가스터빈은 주로 천연가스를 연료로 사용하고 있으며, 하부 사이클에 해당하는 증기터빈과의 연계에 의한 복합 사이클을 구성할 경우 60% 수준의 열효율을 실현하고 있으며, 이는 현존하는 전세계 에너지 변환 장치 중에서 가장 높은 수준에 해당한다. 가스터빈 기반 복합화력발전 설비는 천연가스를 연료로 사용함으로써 기존의 석탄화력발전 등에 비하여 환경 친화성이 우수하다. 그러나, 천연가스의 가격이 다른 연료에 비하여 고가이기 때문에 높은 열효율에도 불구하고 복합화력발전 설비는 높은 전기생산가(COE: Cost Of Electricity)로 인하여 기저 부하(base load)용보다는 첨두 부하(peak load)용으로 주로 사용한다.

전 세계적으로 화석연료 중 매장량이 가장 풍부한 연료는 석탄이며 특히 미국과 중국이 석탄 매장량이 가장 많은 것으로 알려지고 있다. 석탄의 경우 지금까지 랭킨(Rankine) 사이클을 이론적 기반으로 하는 석탄화력발전 설비의 연료로 주로 많이 사용되고 있는데, 이 경우, 다른 화석연료들에 비해 탄소를 가장 많이 함유하고 있는 석탄 연소에 따른 이산화탄소 배출문제를 비롯한 각종 환경 문제들을 궁극적으로 해결할 수가 없다. 특히, 미국과 중국 등 석탄 매장량이 풍부한 국가들로서는 보다 친환경적으로 석탄을 소비할 수 있는 기술 개발이 필요한 상황이며, 그 일환으로 최근 들어 석탄가스화 복합발전(Coal-IGCC: Coal-Integrated Gasification Combined Cycle) 기술 개발을 서두르고 있다.

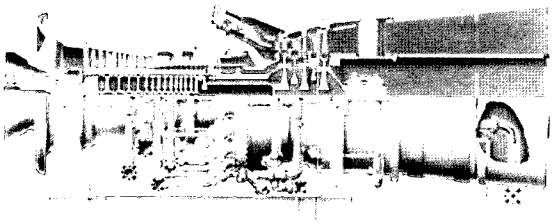
석탄가스화 복합발전이란 가스화기(gasifier)에서 석탄을 물과 산소(혹은 공기)와 반응시켜 수소와 일산화탄소로 구성된 합성가스(synthetic gas)를 생성하여 이를 가스터빈 기반 복합발전 설비의 연료로 사용하여 전력을 생산하는 시스템으로 정의된다. 최근 들어 미국은 에너지성 지원의 FutureGen사업을 통하여 가스화기에서 생성된 합성가스 중 일산화탄소를 반응시켜 이산화탄소를 만들어 분리(sequestration)시키고 가스터빈 연료로는 수소만을 공급하는 시스템을 개발하고 있다. 이 경우 가스터빈은 수소만 연소시키기 때문에 이산화탄소 배출과는 무관하게 된다. FutureGen사업(**그림 7** 참조)은 2010년까지 목표효율이 45 ~ 50%(고위발열량 기준), 총출력이 275 MW 규모인 석탄 IGCC 발전설비 개발을 1차 목표로 설정하고 있다. 여기서, 목표효율 45 ~ 50%는 천연가스 복합화력발전 설비의 현 수준 효율인 60%%(저위발



[그림 6] BMW사가 개발한 수소연료 내연기관 자동차 (CleanEnergy)



[그림 7] FutureGen 석탄가스화 복합발전 시스템의 기본 개념



[그림 8] GE사가 합성가스용으로 개조 개발한 7FB모델의 개략도

열량 기준)에 크게 못 미치는데 이는 석탄으로부터 합성가스를 생성하는데 소요되는 에너지 때문이다. 이 사업은 2단계로 2020년까지 열효율 60%%(고위발열량 기준)를 구현할 수 있는 새로운 개념의 석탄 IGCC 발전 설비 개발을 목표로 하고 있다. 국내에서도 최근 들어 산업자원부 지원 석탄 IGCC사업단이 발족되어 2012년까지 열효율 42%%(고위발열량 기준)인 300 MW급 한국형 석탄 IGCC 실증플랜트 개발 사업이 착수되었다.

가스터빈은 천연가스, 합성가스 혹은 수소를 비롯한 다양한 종류의 연료의 사용이 가능하다. 다만, 개발비 부담 등의 이유로 수소 연료 가스터빈은 새로운 모델을 개발하기 보다는 천연가스 연료 가스터빈을 개조 개발하는 것이 일반적이다. 이 경우, 지금까지 천연가스를 사용하면서 NOx량을 줄이기 위해 주로 적용되었던 예혼합 건식 저NOx 연소기 (premixed dry low NOx combustor)를 수소 연료 사용에 따른 화염 불안정 현상을 해결하기 위하여 확산 화염 연소기(diffusion flame combustor)로의 개조가 필요하고, 연료 종류의 변환에 따른 연소가스 유량의 변화에 따른 터빈 1단 블레이드 형상 개조 등이 필요하다. **그림 8**은 GE사가 천연가스용 가스터빈인 7FA모델을 합성가스 용으로 개조 개발한 7FB모델의 개략도인데 외형상으로는 7FA와는 큰 차이가 없다.

맺음말

최근 들어 지구 온난화에 따른 환경문제에 대한 사회적 관심과 화석연료의 고갈에 대한 우려의 영향으로 수소 이용 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 향후 인류의 산업구조가 화석연료가 아닌 수소 연료를 기반으로 하는 수소경제 형태로 변환될 것이라는 전망이 언제 구현될 것인지에 대해서는 여러 가지 불확실성이 많지만, 시간이 갈수록 수소가 중요한 미래 에너지 자원 중의 하나로 부상할 것임에는 의심의 여지가 없다. 다만, 수소를 에너지 자원으로 하는 수소 이용 기술을 고려할 때 수소의 기본적 특성에 따른 수소의 생산, 이송, 저장에 필요한 선행 기술들의 개발이 필수적이며, 그에 따른 사회적 인프라 변환의 문제도 반드시 함께 고려하여야 한다. 또한, 수소 이용 기술로는 연료전지와 같은 새로운 개념의 에너지 변환 기술과 함께 내연기관 엔진, 가스터빈 등과 같은 기존 에너지 변환 기술을 수소에 접목시키는 것도 충분히 가치가 있을 것으로 전망된다.