

마이크로 반응기를 이용한 휴대용 수소 생산 개발에 관한 요약과 전망

한국에너지기술연구원

이승재

J.D. Holladay, Y. Wang, E. Jones는 Chemical Reviews 104 (2004)에 “Review of Developments in Portable Hydrogen Production Using Microreactor Technology”의 제목으로 마이크로 반응기를 이용한 수소생산에 관한 전반적인 기술을 정리하였으며, 또한 디자인, 제작방법, 제작된 반응기의 예 등을 보여주고 있다. 다음과 같은 논문의 내용 중 요약과 전망 부분을 발췌하여 정리하여 보았다.

1. Introduction
2. Reactor Development and Performance Overview
 - 2.1. Fabrication and Design
 - 2.1.1. Materials
 - 2.1.2. Fabrication Techniques
 - 2.1.3. Design Strategies
 - 2.2. Hydrogen Production
 - 2.2.1. Hydrocarbon Reforming
 - 2.2.2. Ammonia Cracking
 - 2.2.3. Other Hydrogen Production Techniques
3. Hydrogen Production from Microreactors
 - 3.1. Subwatt Power
 - 3.1.1. Microreformers (0.01-0.1 W) Developed at Battelle, Pacific Northwest Division
 - 3.1.2. Packed-Bed Microreactor in the Subwatt Power Range
 - 3.1.3. Microscale Preferential Oxidation Reactor
 - 3.2. Power Supplies in the 1-10 W Range
 - 3.2.1. MIT Suspended-Tube Reactor for 1-2 W Power Generation
 - 3.2.2. Lehigh University Methanol Reforming Reactor
 - 3.3. Reactors in the 15-100 W Range
 - 3.3.1. Korea Institute of Energy Research 15 W Power Generation
 - 3.3.2. Battelle, Pacific Northwest Division, 15-100 W Power Generation
 - 3.3.3. MiRTH-e 20-100 W Reactor
 - 3.3.4. Motorola Methanol Fuel Processor
 - 3.3.5. MesoSystems Technology in the 50-100 W Range
 - 3.4. Reactors E 500 W
 - 3.4.1. Scalable Methanol Autothermal Reforming Reactor
 - 3.4.2. Portable Power Using a Propane Cracking Reactor System
 - 3.4.3. Methanol Reforming Reactors for a 200 W Fuel Cell Power System
 - 3.4.4. Royal Military College of Canada 200-300 W System
 - 3.4.5. Emission-Free Reformer Concept for Portable Power Applications
4. Summary and Outlook
5. Acronyms
6. References

소형의 휴대용 연료전지를 위한 마이크로 반응기 기술을 이용한 수소 생산 기술의 발전은 매우 빠르게 이루어지고 있다. 이러한 소형 반응기들을 이용하여, subwatt에서 수백 watt의 전력을 공급할 수 있는 수소 생산이 가능하다. 기존의 연료전지 시스템에서는 전체 시스템의 부피 중 연료전지와 개질기가 각각 1/3을 차지하고 있으며, 나머지 1/3은 주변장치 (balance of plant; BOP)에 해당하였으나, 마이크로 반응기의 개발에 따라 개질기 부분이 상당히 작아지고 있다.

메탄올은 휴대용 전원장치에서 주된 연료로 사용되고 있지만, 200 W 이상의 높은 전력이 필요한 곳에는 에탄올과 가솔린과 같은 탄화수소 연료가 더 많이 개발되고 있다. 상업적으로 유용한 천연가스, 프로판, 가솔린, 디젤이나 군사용 장치에 사용되는 JP8 등은 높은 황 함유량과 그밖의 불순물로 인하여 연료로서 사용되지 못하고 있는 실정이다. 암모니아는 많은 매력적인 특성을 가지고는 있으나, 아직 탄화수소 만큼의 주목을 받지 못하고 있다.

이러한 마이크로 반응시스템의 개발이 보다 활발히 이루어지기 위해서는 processing system integration, sulfur removal, BOP integration, system durability, fuel cell integration 등 개발되어야 할 여러 분야가 있다. 지금까지 리뷰된 대부분의 마이크로 반응기들은 연료 개질기 위주이며, 전체 마이크로 연료 프로세서 시스템의 구성요소인 recuperative heat exchanger, vaporizer, 전기 히터나 촉매 연소기와 같은 heat source, two-stage WGS 반응기와 같은 부차적 전환 반응시스템, two-stage PrOx나 selective methanation 반응기와 같은 일산화탄소 제거/저감 시스템 등에 관한 부분이 부족하였다. 또한 시스템이 부분별로 개발됨에 따라 전체적인 효율이 보고되지 못하고 있으며, 보고된 효율은 다른 구성 요소들의 효율을 가정하여 추측한 값들이다. 분리막 반응기를 사용하여 부차적인 전환 반응기나 일산화탄소 제거/저감 시스템이 필요하지 않더라도, 그밖의 다른 구성 요소들은 필요하게 되며, 따라서 이들 요소들을 개발하고 연료 개질기와 함께 집적화하는 기술이 필요하다. 시스템의 상업적 측면에서 각 구성요소들과 전체 시스템의 내구성과 성능에 대해서 평가되고 증명되어야 할 필요가 있으므로, 작동 시간 테스트, 실제 상황에서의 시험, 마이크로 반응기에서 수행된 다른 내구성 시험 등의 연구들이 수행되어야 할 것이다.

수 watt나 그보다 낮은 전력을 위한 수소 생산을 위해 개발된 저전력용 반응기에서는 열적 손실에 따른 효율의 저하가 나타난다. 대부분의 경우에 반응기의 크기는

작아졌지만, 반응기를 다른 장비나 구성 요소들과 연결하는 파이프에서는 그만큼 작아지지 못하여, 상대적으로 큰 배관을 통한 전도에 의해 상대적으로 큰 열손실을 보게 되는 것이다. 몇몇 경우에 이러한 열손실을 줄이기 위하여, 배관 파이프의 크기를 줄인다고, 단열의 개선 혹은 vacuum packaging을 이용하고 있다. 따라서, 효율을 개선하기 위해서는 열손실을 줄이고 열을 회수할 수 있는 새롭고 혁신적인 방법들의 개발과 함께, 기존에 사용되고 있는 방법들의 개발이 계속 이루어져야 할 것이다.

메탄올은 프로세스 온도가 낮고 황과 같은 오염물질의 함유량이 적어 소형 시스템에 연료로 사용되고 있다. 그러나, 더욱 쉽고 유용한 프로판, 천연가스, 가솔린, 디젤, JP8과 같은 탄화수소의 에너지 밀도가 높음에 따라 탄화수소가 휴대용 전원의 연료로 많은 관심을 끌고 있다. 개발된 개질기 중에는 황이 함유되지 않은 탄화수소 연료들이 연료로 사용 가능하다는 것을 보이고 있다. 따라서, 소형 탈황 시스템의 개발이 큰 관심을 끌게 되었다. 대형 탈황 시스템들은 흡수제나 황화물의 선택적 산화를 이용하여 개발되었으나, 이 시스템들은 대체로 부피가 크거나 다른 한계성을 가진다. 그러므로 상업적으로 유용한 연료로 사용하기 위해서는 소형, 경량의 탈황 시스템을 개발하는 것이 우선적으로 필요하다.

연료전지 시스템의 BOP 요소들은 종종 무시되는 경향이 있다. 이들 BOP 요소들에는 액체 펌프, 공기 송풍기나 펌프, controls strategy, 밸브, 연료전지 내 생성된 물 처리 장치, 단열, power conditioning 등이 포함된다. 특히 저가의 고효율, 소형 송풍기나 액체 펌프의 개발은 분리막 반응기와 같이 압력을 필요로 하는 장치에 필수적이다. Controls strategy와 power conditioning은 시스템의 안전성을 확보하는 데 중요하다. 연료전지의 생성물인 물은 연료 프로세서와 연료전지가 전기장치와 근접하여 운전될 때 특히 문제가 되며, 따라서 생성된 물의 적절한 처리 시스템이 필요하다.

가장 높은 효율을 얻기 위해서는 연료전지와 연료 프로세서를 밀접하게 결합시킬 필요가 있으며, 그러기 위해서는 해결해야 할 여러가지 문제점들이 있다. 가령, anode의 off-gas가 열 생성을 위해 연소기에서 사용될 수 있을 것인가, 이러한 가스의 사용으로 충분히 열을 공급할 수 있는가, cathode의 공기를 연소기에 사용함으로써 공기 송풍기를 하나 줄일 수 있을 것인가 등의 문제가 있다. 그밖에 유체를 먼저 연소기로 흐르도록 할 것인지 아니면 연료전지 쪽으로 먼저 흐르게 할 것인지

등이 고려되어야 한다. 이러한 것들이 고려되었을 때, 시스템이 최적으로 integration 되고 packaging 될 것이다.

비용과 규제들은 관련 기술들의 상업화에 또 다른 중요한 역할을 하는 비기술적 요소들이다. 마이크로 전력 시스템은 적절한 크기의 대체 전원으로 경쟁적인 가격을 가져야 할 것이다. 소비자들이 비록 더 나은 생산품에 대해 더 많은 돈을 지불할 수 있다고 하더라도 과연 그 한계 가격에 대해서는 의문시 된다. Darnell Group, Inc.에서 U.S. Fuel Cell Council을 위해 준비한 보고서 내용을 살펴 보면, 이와 관련하여 흥미있는 점을 발견하게 된다. 여기에는 비교 시나리오로 리튬 이온 전지에 대한 대체 전지인 리튬 고분자 전지를 소개하고 있다. 리튬 이온 전지는 120-150 Wh/kg의 에너지를 가지지만 리튬 고분자 전지는 145-190 Wh/kg의 높은 에너지를 가진다. 반면, 비용면에서 리튬 고분자 전지가 리튬 이온 전지에 비해 높게 나타난다. 1999년 평균 OEM 가격을 비교하여 보았을 때, 휴대 전화용과 노트북용에 대해 리튬 고분자 전지가 리튬 이온 전지 보다 각각 21%와 32% 더 비싼 것으로 나타났다. 1999년에 리튬 고분자 전지의 가격이 연간 약 14% 정도 감소할 것으로 예측하였으나, 이러한 가격 감소는 실제 일어나지 않았고, 그 결과 리튬 고분자 전지는 리튬 이온 전지를 경쟁상대로 시장을 점유하는데 실패하였다. 또한 Darnell Group의 보고서에는 리튬 고분자 전지에 대한 삼성, SDI, LG 화학, SKC 등 주요 전지 제조업체들의 대량 투자에 대해 언급하였다. 이러한 투자 발표는 리튬 고분자 전지의 가격을 낮출 수 있을 것으로 해석되지만, 그 결과 리튬 이온 전지의 가격이 낮아 질것으로 보인다. 그러므로 연료전지가 성능이 우수하더라도 가격면에서도 경쟁성을 가져야 하며, 연료전지의 목표 가격은 현재의 전지 가격이 아닌 미래의 전지 가격에 대해 경쟁성을 가져야 할 것이다. 그리고, 연료전지 시스템이 시장에 나오게 되면, 전지 가격은 급격하게 떨어질 것으로 예측된다.

정부의 규제는 연료전지 자체와, fuel packaging, fuel distribution, 연료전지를 소지한 채 비행기 탑승, 비행기에서 인화성 연료의 사용 및 수송, 휴대용 장치를 위한 연료 프로세스 등 광범위하게 관련되어 있다. 이들 규제들은 정부 웹사이트에서 볼 수 있으며, ANSI, CFR, ICC, National Hydrogen Association, ISO 등 정부 관련 기관에서 얻을 수 있다. 연료전지 생산품의 사용 범위를 넓히는데 이들 규제들이 많은 영향을 미칠 것으로 보인다.