

Micro Structured Fuel Processors for Energy Generation

한국에너지기술연구원

이승재

Chemical Micro Process 한 분야로 폭넓은 연구가 이루어지는 부분이 마이크로 구조의 연료 프로세서의 개발이다. 이 분야에서는 다양한 연료를 수소로 전환시켜 연료전지와 다른 전력 생산 모듈에 적용하고자 한다. 따라서, 다음의 책을 참고하여 관련 분야를 정리 하여 보았다.

V. Hessel, H. Löwe, A. Müller, and G. Kolb, Micro Structured Fuel Processors for Energy Generation, in Chemical Micro Process Engineering, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.

1. 개 요

현재 전세계적으로 연구되고 있는 연료프로세서의 당량적 전기출력은 1 W 미만에서 수 megawatts에 이른다. 그러나 기존의 기술을 이용하여 모든 분야에 적용하기에는 이동형이나 주거형과 같은 경우 공간 제약의 어려움이 있다. 이러한 분야 중 약 100 kW 이하의 전력 생산에 적용을 위한 소형화에 있어서 마이크로구조를 가지는 연료 프로세서의 개발이 경쟁성을 가질 수 있을 것으로 보인다. 2003년 7월판 Fuel Cell Today에 실린 연료전지 시장 연구에 따르면 휴대용 연료전지가 맨 처음 상업화 시장을 형성하는데 유리할 것으로 나타났다. 개발된 prototype의 시스템의 개수는 2003년에 3000개 이상으로 크게 증가하였으며, 이들 대부분의 시스템은 PEM 연료전지를 사용하고 있다. 저출력용 (1-250 W) 연료 프로세서는 배터리와 같은 기존의 저장장치와 액체연료를 직접 사용하는 직접 메탄올 연료전지 (DMFC)와 경쟁하게 된다. Toshiba, NEC, Smart Fuel Cell 등에서 개발한 휴대폰과 랩탑용 시스템들은 DMFC에 기반을 두고 있다. 그러나 Casio와 Motorola와 같은 다른 회사들은 메탄올의 수증기 개질용 마이크로 구조의 연료 프로세서를 개발하고 있다.

같은 예 기반한다.

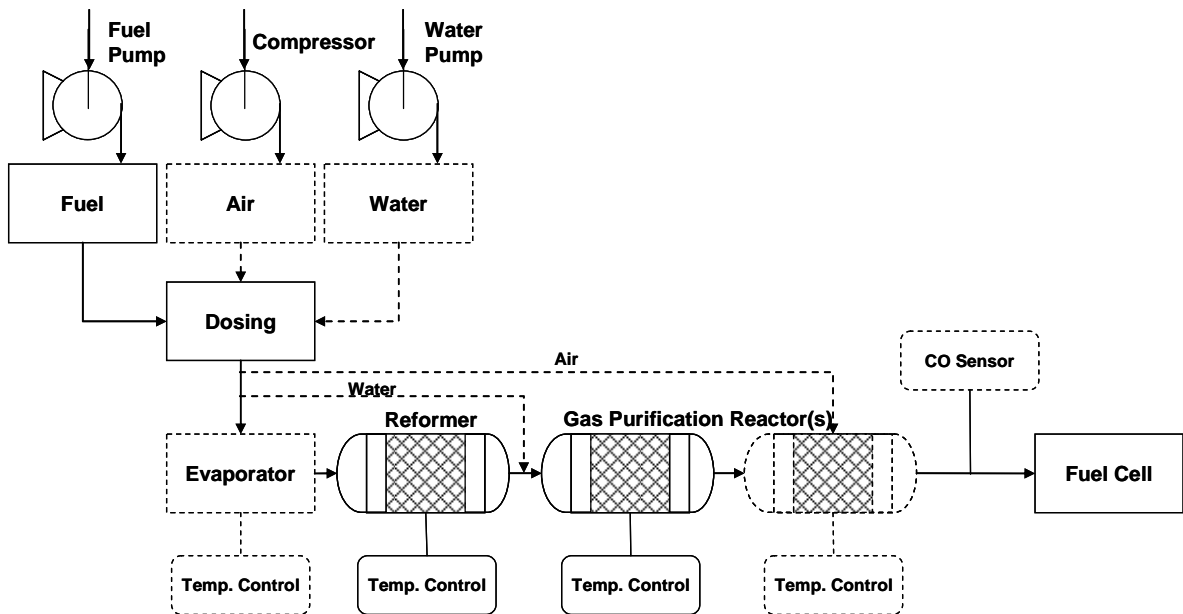
주거용 연료전지는 전력과 열을 생산하기 위해 개발되고 있으며, 이러한 전력과 열의 생산은 시스템 전체의 효율을 상당히 향상시킬 수 있다. 이동형 연료전지의 경우에는 시스템이 동력 전달 계통 (drive train)을 위한 것인지 보조 전력원 (auxiliary power units; APU)을 위한 것인지 구분될 필요가 있다. 즉, 트럭에서 사용되는 공기 냉난방 장치처럼 수송용 부가적 에너지를 생산하는 경우와 전력 공급용 독립형 시스템으로 사용되는 경우가 있다. APU의 응용범위는 다양하여, 교통 신호등이나 독립형 측정장치와 같은 소규모의 형태에서 랩탑과 같은 중간규모의 형태를 거쳐 보트와 대형 운반차와 같은 자동차와 레저산업의 대규모 형태에 이른다. 지난 다년간 전세계 연구 개발은 동력 전달 계통 분야에서 개시 시간과 시스템 동력학에

대한 부담이 적은 APU 분야로 이동되고 있다.

연료 프로세서는 가솔린과 같은 기존의 연료나 에탄올과 같은 신재생 연료를 수소로 전환시키는 복잡한 장치이다. 개질 단계인 전환 공정 중에는 이산화탄소와 다양한 부생물들이 생성되며, 이들 중 가장 중요한 것은 일산화탄소의 농도를 16 vol.% 이하로 만드는 것이다. 수송용으로 많이 응용되고 있는 기존의 PEM 연료전지는 10 ppm을 초과하는 일산화탄소의 농도에서는 장시간 운전이 불가능하다. 그러므로 이 경우에는 개질된 가스를 다음의 세가지 다른 기술을 이용하여 정제하는 장치가 필요하다.

- 수성가스 전환반응, 선택적 산화반응, 메탄화 반응과 같은 일산화탄소 전환반응
- 다른 개질 가스와 수소의 분리를 위한 분리막
- Pressure swing adsorption

지금까지 개발된 마이크로 구조의 연료 프로세서는 처음 두개의 기술로 국한되어 있다. 가스 정제를 위한 불균일계 촉매반응기를 포함하는 연료 프로세서의 개념도는 아래와 같으며, 여기서 점선으로 표시된 장치는 전체 시스템에 반드시 필요한 부분은 아니다.



[그림 1] 가스 정제를 위한 불균일계 촉매반응기를 포함하는 연료 프로세서의 개념도

이 장치 개념도를 살펴보면, 연료 프로세서를 운전하기 위해서는 다음과 같은

주변장치들이 필요하다.

- 연료와 물 탱크
- 펌프와 압축장치와 같은 공급장치
- 유체 제어를 위한 유체 제어장치와 밸브
- 열교환기
- 증발기
- 온도 제어장치
- 센서
- 단열/housing

연료 프로세서의 전체 효율은 일반적으로 소모된 연료의 lower heating value (LHV)에 대해 생성된 수소의 LHV의 비로 나타낸다.

$$\eta = \frac{LHV(H_2)}{LHV(fuel)}$$

연료 프로세서/연료전지 전체의 효율은 일반적으로 연료의 LHV에 대해 연료전지에서 생성된 출력 P의 비로 나타낸다.

$$\eta = \frac{P(fuel\ cell)}{LHV(fuel)}$$

2. 연료 프로세서의 경쟁성에 영향을 미치는 인자들

2.1 비용 Costs

Arthur D. Little Inc.의 연구 보고와 US Partnership of New Generation Vehicles (PNGV)의 목표에 따르면, 동력 전달계에 사용될 연료 프로세서 대한 미래 비용은 US\$ 30 kW-1 정도로 제한될 필요가 있다. 또 다른 연구에서는 동력 전달계의 전체 비용이 디젤 터보 엔진의 현재 값인 US\$ 50 kW-1 이하로 제한되고 있다. 그러나 이러한 목표는 아직 도달하기에는 이르며, 주거용과 APU 시스템에 적용되지는 못한다. 적용 분야에 따라 다르겠지만, 주거용 시스템에 대한 목표 비용은 약 US\$ 1500 정도이다. 그러나 오늘날 실제 투자 비용은 약 15000-20000 US\$ 이다. 연료 프로세서의 비용은 전체 시스템 비용의 약 12-15 % 정도만 차지하여야 하며, 비용에 영향을 미치는 요소들로는 제작기술, 연료의 형태, 촉매 비용, 생산량 등이 있다.

대량 생산이 가능한 값싼 제작 기술이 연료 프로세서에 적용되어야 하며, 이와

관련한 다양한 기술들이 제안되고 있다. 사용되는 연료의 형태 또한 연료 프로세서의 전체 비용에 크게 영향을 미친다. 분배 시스템이 없이 메탄올과 같은 연료를 사용하면 상당한 과잉 비용이 필요하게 된다. 예로서 미국내 가솔린 수요의 10 %를 메탄올로 대체하기 위해서는 1998년 현재 미화 650억 달러의 비용이 더 든다. 이러한 점은 기존에 인프라 구조를 이미 갖추고 있는 연료에 대한 사용의 필요성을 강조 한다. 특히 처음 응용분야를 개척해 나가는 단계에서는 이러한 인프라 구조가 중요한 역할을 하게 된다. 한편 전력 시스템의 환경 친화성은 정치적인 면에서 강조 되고 있으며, 따라서 미래에는 신재생 자원을 이용한 에너지 공급 시스템의 개발로 점차 유도될 것이다. 촉매 비용은 연료 프로세서 전체 비용의 38 % 정도로 상당한 부분을 차지한다. 이 부분에서 마이크로 구조의 반응기는 작은 채널에서 물질 전달을 향상시켜 촉매의 효율을 높임에 따라 비용 절감의 큰 가능성을 지니고 있다. 마지막으로 연료 프로세서의 생산량은 비용에 있어 중요한 부분을 차지한다. 초기 적용 단계에서는 수백-수천의 연료 프로세서가 제작되는 것을 시작으로 최종 목표에서는 수십만의 연료 프로세서가 제작되어야 한다. 장치를 100개에서 10000개로 생산량을 늘리면 제작비용에 있어서 한차수 정도의 절감효과가 있다.

2.2 효율 Efficiency

시스템의 효율은 연료 프로세서의 경쟁성을 결정하는 주요한 요소이다. 이론적으로 가능한 연료 프로세서의 효율은 연료 분자의 탄소수가 증가함에 따라 감소한다. 효율 문제는 시스템이 커짐에 따라 점점 더 중요해지며, 높은 압력에서 사용되는 시스템의 경우에는 압축장치의 사용에 따른 에너지 수요로 기생적인 전력 손실이 있다. ~10 kW의 전기출력 용량을 초과하는 시스템에 대해서는 압축 에너지를 얻기 위해 확장용 터빈의 적용이 가능하다. 결과적으로 특정 연료 프로세서에 요구되는 열교환기의 수는 전체 전력에 해당하는 값에 따라 크게 좌우된다.

소형 마이크로 구조의 열교환기는 전체 크기에 비해 낮은 비용으로 시스템 효율을 개선할 수 있다. 마이크로 구조의 개질기 개념에서는 발열 반응을 하는 유체의 채널들이 열교환용 채널이나 흡열 반응용 채널들과 직접적으로 결합하여 하나의 장치를 이루게 된다. 전체 시스템의 효율을 향상시키는 또 다른 방법은 마이크로 구조의 고분자 열교환기의 사용이다. 여기서는 저온의 출구 가스가 가지고 있는 에너지를 사용하여 에너지 효율을 높이게 된다.

연료 프로세서의 효율이 공식적으로 알려진 데이터는 거의 없지만, 메탄올 공급용 연료전지 추진 시스템에 대해 New European Drive Cycle (NEDC)은 77.3 %로 정하였다. 한편, Johnson-Matthey 가스 정화 시스템이 부착된 HotSpot[®] 모듈에 대해 89 % 값을 보고하였다.

2.3 개시 시간 Start-up time

최종 소비자들에게 수용하는데 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나가 연료 프로세서의 개시 시간이다. 이는 대개 운전 온도까지 가열하는데 걸리는 시간에 영향을 받는다. 연료 프로세서의 각각의 개별 장치를 적절한 온도까지 올리는 데는 다음의 세가지 방법이 있다.

- 전기적 가열
- (개시용) 버너를 이용한 직접적인 가열
- 개시용 버너를 이용한 간접적인 가열

전기적 가열은 배터리와 같은 일시적인 저장장치를 통한 전력 공급이 필요하다. 대부분의 연료전지 개념에서 배터리는 완충적 장치로 존재하고 있지만, 개시 조건을 만족시키기 위해서는 그 크기가 상당히 커져야 할 필요가 있다. 그러므로 탄화수소의 개질 시스템과 같이 600 °C를 넘는 높은 개질기 온도를 얻는데, 배터리 전원을 사용하기에는 비현실적이다.

또 다른 방법은 촉매나 기존의 버너를 이용하여 연료 채널을 직접적으로 가열하는 것이다. 사용된 버너는 연료 프로세서의 전원 공급 장치의 일부나 부가적인 장치로 설치될 수 있다. 연소 배가스를 다른 여러 장치들과 직접적으로 접촉시킴으로써 대용량의 연료 프로세서에서도 개시 속도를 높일 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이러한 방법의 주된 단점은 연소 배가스의 높은 온도에 견딜 수 있는 촉매 시스템이 필요하다는 점이다.

전용으로 흐르는 채널을 통해 개시용 버너로 간접 가열하는 방법은 촉매가 연소 배가스와 직접적으로 접촉하는 것을 피할 수 있다. 여기서 마이크로 구조의 채널 시스템은 개시용 시스템에서의 전체 압력강하가 낮은 상태에서 사용 가능하다. 일반적으로 요구되는 개시 에너지는 고려 대상 장치의 무게와 열용량에 따라 달라진다. 개시를 위한 가열 후, 연료 프로세서의 안정적인 운전이 필요하며, 마이크로 구조의 장치에서는 체류시간이 짧아 동력학적 응답이 빨라져 시스템을 빠르게 안정화시킬 수 있다.

2.4 크기 Size

600 Wdm-3 용 연료 프로세서의 크기에 대한 목표는 US PGNV 그룹에 따르면 2000이다. 연료 프로세서의 소형화는 촉매 전환공정과 열교환기와 같은 주변장치의 효율에 의해 주로 결정된다. 마이크로 구조의 반응기를 사용하여 촉매의 효율을 개선하고 효율/부피의 비가 높은 마이크로 구조의 열교환기를 사용함으로써, 크기를 줄일 수 있는 잠재성이 있다.

2.5 무게 Weight

연료 프로세서의 무게는 크기와 사용되는 재질에 의해 결정된다. 그러므로, 세라믹 하나콤퍼나 기존의 충전층 대신 스테인리스 스틸로 만들어진 금속 박막을 사용하였을 때, 마이크로 구조의 장치 무게가 더 무거워진 것에 비해 어느 만큼 크기 감소가 이루어지는 지에 대해 따져 볼 필요가 있다. PGNV 그룹에 의해 제시된 바에 따르면, 연료 프로세서의 무게 목표는 800 Wkg-1의 2000으로 주어졌다.

2.6 부하 변화에 따른 응답성 *Responsiveness to load changes*

일반적으로 연료 프로세서는 5-100 %의 부하변동에 대해 견딜 수 있어야 한다. 물론 APU 보다는 동력 전달 계통에서 보다 주요한 문제가 되며, 마이크로 구조의 장치에서는 적용되는 유체의 부피가 작아 부하 변화에 대한 이점이 있다.

2.7 수명 *Lifetime*

수송과 휴대용 분야에서 요구되는 수명은 일반적으로 약 5000 h 정도로 되어 있다. 이는 적용분야에 따라 달라 정지형 (주거용) 분야에서 요구되는 수명은 한차수 낮은 수명이 요구된다.

3. 연료 프로세스를 위한 마이크로 구조 반응기의 디자인 개념

마이크로 구조의 반응기는 목적에 따라 마이크로 구조 반응기의 다양한 디자인 개념이 사용되고 있다.

- 시험용 반응기 (Testing reactors): 이들 반응기는 외부나 전기적으로 가열되며, 마이크로 구조의 기관을 단일 기관의 형태나 기관을 포켓 형태, 혹은 여러 개를 쌓아 놓은 형태로 사용된다. 이러한 반응기들은 대개 촉매 개발 목적으로 사용되거나 새로운 디자인의 가능성을 타진하기 위해 사용된다.
- 칩 형태의 반응기 (Chip-like reactors): 이들 장치는 제작 재질로 실리콘을 사용하여 소형화와 값싼 대량 생산을 목적으로 사용된다. 수 와트 이하의 저전력 생산용 시스템에 응용될 것으로 보인다.
- 집적화된 반응기 (Integrated reactors): 집적화된 반응기의 한 형태가 마이크로 구조를 가진 열교환기/반응기 개념이다. 여기에서는 cross-, counter-flow 형태의 반응기로 작동하게 된다. 또 다른 반응기에서는 흡열 반응과 발열 반응이 두 개의 유로로 분리되어 co-current 형태로 운전된다. 양쪽 반응기 모두 이동형 응용을 위한 미래 연료 프로세서의 prototype으로 디자인 되고 있다.