

연료전지 BOP: 공기 공급시스템

연료전지에 있어 BOP(Balance of Plant)란 연료전지의 코어인 스택(stack) (electrode, electrolyte, bipolar plate 등으로 구성) 이외에 열관리시스템(열교환기), 물관리 시스템(펌프, 콘덴서, 가습기), 공기 공급장치(송풍기, 압축기, 필터), 유체 제거기 등을 일컫는다. 본 고에서는 이 가운데 캐소우드에 공기(산소)를 공급하는 공기 공급 장치에 대하여 소개 하고자한다.

이 용 복

한국과학기술연구원 시스템연구부 (lyb@kist.re.kr)

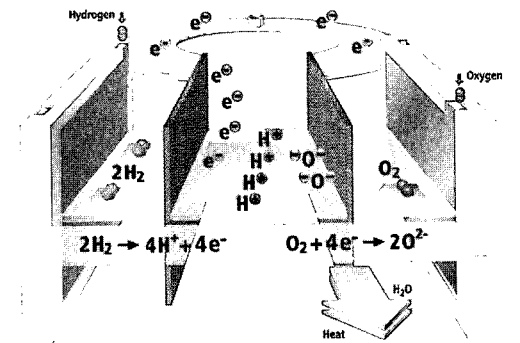
서론

연료 전지는 그림 1과 같이 스택이라는 연료전지의 코어를 중심으로 전극인 애노드(anode)에서 수소와 캐소우드(cathode)에서의 산소가 화학적으로 반응하여 총체적으로 전기적 에너지를 만들게 되며 그때 물과 열이 부산물로 만들어진다. 이때 캐소우드에 공급되는 산소는 주로 공기 중의 산소를 사용하므로 공급되는 공기의 압력 및 유량에 따라 그 반응 정도가 달라지고, 이는 시스템의 효율과 직결되므로 연료전지 BOP 가운데 중요한 부분을 차지하고 있다.

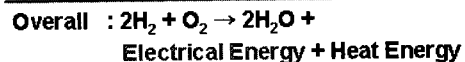
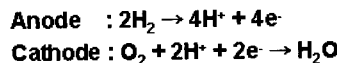
공기 공급 장치 역시 스택에서 전력을 만들기 위한 도구로 고효율·저에너지소비 기술을 필요로 한다. 특히 수송용 연료 전지의 경우 중량 및 크기의 제한 또한 매우 중요한 요소로서 이를 감안한 신뢰성 설계가 매우 중요하다. 아울러 공기 공급 장치의 효율 향상 측면에서 회전체 구동을 위한 고속·고출력 모터 기술과 이를 운전 지지하기 위한 베어링의 윤활 기술(tribology) 역시 매우 중요하다.

연료전지에 사용되는 공기 공급 장치는 그림 2와 같이 송출 압력에 따라 크게 팬(fan), 송풍기(blower) 및 압축기(compressor)로 대별되는 데 일반적으로 팬 및 송풍기는 비교적 낮은 압력에 적용되는 반면 압축기(compressor)는 상대적으로 높은 압력(1.0 gauge pressure 이상) 범위에 적용된다. 또한 압축기의 경우 운전 방식에 따라 용적형과 터보

형으로 대별되는 데 용적형의 경우 왕복동식과 회전식으로 나뉘며 터보형에 비하여 고출력의 압력비 (pressure ratio)를 갖는다. 반면 대 유량의 경우 터보형 압축기를 사용하는 데 압력에 대한 연속성이 유지되어 비교적 압력 변동이 적고 유량이 상대적으로 많은 것이 장점으로 회전에 따른 터보의 방식은 크게 원심형과 축류형 압축기로 나뉘며 이를 조합한



Bipolar-Plate (Anode) Gas Diffusion Layer with Catalyst Membrane Gas Diffusion Layer with Catalyst Bipolar-Plate (Cathode)



[그림 1] 연료전지의 일반적인 개념도(ref. UTC)

혼합형 압축기도 사용된다.

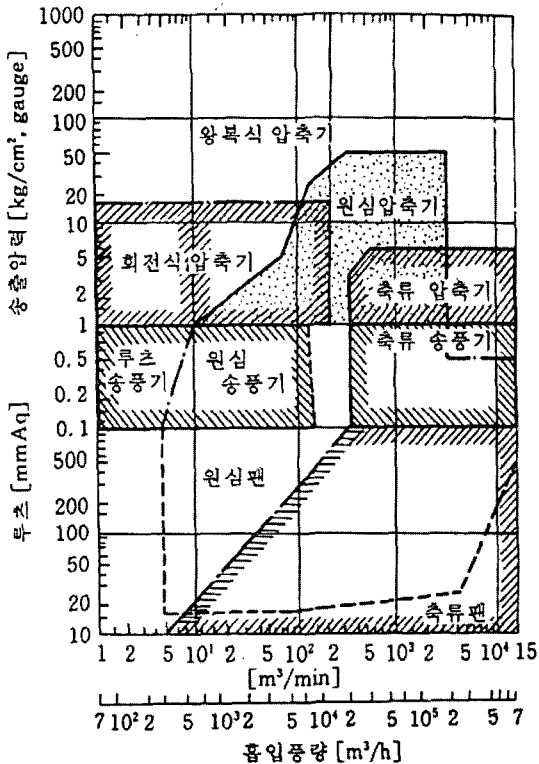
연료전지에서의 공기 공급기를 선택할 때 대개는 기존의 송풍기나 압축기 시장의 제품을 고려하는 데 일반적으로는 연료전지 스택에서 요구하는 압력 및 유량에 따른 범위를 맞추기 쉽지 않아 전체적으로 볼 때 효율이 매우 낮아진다. 따라서 개발 초기 단계에서는 과도한 용량의 공기 공급기를 적용하여 연료전지의 총체적 효율을 파악하지만 최종적으로는 압력, 유량은 물론 전체적인 중량 및 크기를 최소화한 최적 설계 개념이 적용된 신뢰성 있는 공기 공급시스템에 대한 연구가 별도로 필요하게 된다. 이는 결국 연료 전지의 공기 공급 시스템이 연료전지의 시스템에 맞게 별도로 설계 검증되어야 한다는 것을 시사한다.

연료전지의 공기 공급 시스템에 있어 송풍기나 압축기의 선택은 스택이 요구하는 압력 및 운전 조건

에 따라 많이 좌우된다. 표 1은 수송용 연료전지의 경우 스택이 요구하는 운전 압력 범위에 따른 시스템의 특성을 나타낸 것이다. 대체로 가압형의 시스템은 고압의 공기 공급 장치가 필요하므로 송풍기보다는 압축기 혹은 압축기-익스펜더 형태의 공기 공급 장치가 쓰이며, 상압형의 경우는 송풍기의 형태로 쓰임새를 규정 지을 수 있다.

국내·외 기술 개발 현황

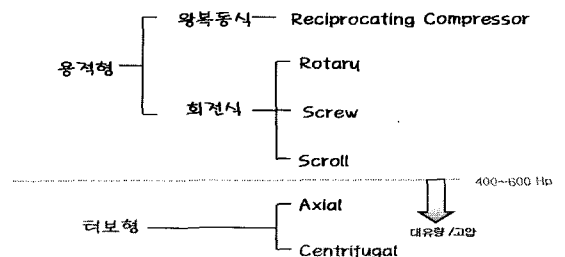
연료전지 시스템의 공기공급 장치는 해외의 여러 기업과 연구 단체에서 개발 및 실용화가 활발히 이루어지고 있다. 그림 4는 연료전지 시스템용 공기 공급 장치의 연구, 개발 추이를 보여주고 있다. 하니웰(Honeywell)은 기존의 터보 과급기의 기술을 기반으로 50 kW급의 고분자 전해질 연료전지 자동차



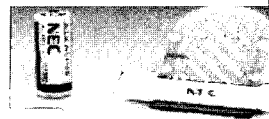
[그림 2] 송출 압력에 따른 분류

<표 1> 스택의 압력 범위에 따른 특성

	스택의 압력범위	특징
가압형 시스템	2~3 bara	- 스택의 효율 우수 - 물 관리에 유리 - 시스템의 Parastic loss 과다: 고효율의 compressor 및 Expander이 필요. - 현재 기술은 스택 출력의 15~20% 소비
중압형 시스템	1.3~2.0 bara	- 차량의 요구 특성에 따라 전력의 일부를 손해 보더라도 물 관리에 중점을 둔 설계 가능 - 고지 운전 시 적용 유리
상압형 시스템	1.2 bara 이하	- 시스템의 Parastic loss 최소화 - Air Blower 적용시 스택 출력의 5% 미만 소모 가능 - 물 관리에 불리



[그림 3] 압축기의 운전 방식 및 용량에 따른 분류



에 적용되는 원심형 콤프레셔/익스펜더를 개발하였으며, 특징으로는 공기 포일 베어링의 장착과 모터 드라이버 운전, 스택에서의 배기가스를 이용한 전력 소모로서의 효율증대 구조로 PR=1.1 110,000 rpm의 운전속도를 갖는다.

PADT(phoenix analysis and design technologies)

<표 2> 국내 연료 전지 관련 연구 현황

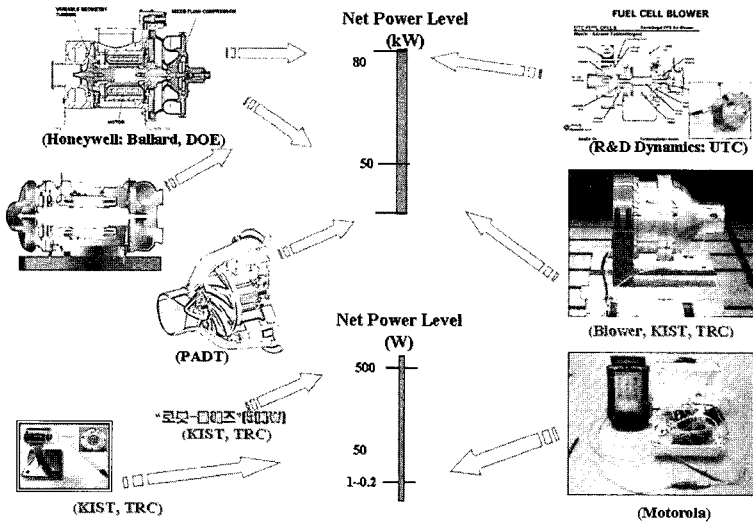
주관기관	관련사업명/사업내용	기간	비교·분석(기술수준 등)
자동차 부품 연구원	미래형 자동차 (산자부)	2004~2009년	BOP 포함
현대자동차	버스용(200 kW급) 고분자 연료전지 시스템 개발 (산자부, 신재생 에너지)	2005.~	
KIST	미래형 로봇 구동용 연료전지 시스템 실증 연구 (산자부, 신재생 에너지)	2005.~	500 Watt 급 FC용 BOP 개발
KIST	연료전지 자동차용 공기 공급 시스템 연구	2004.11~2005.10	Oil free FC Compressor 개발
LG 전자	가전용 FC 개발 (산자부)	2004.12 ~	

사는 볼 베어링으로 지지되는 터보 블로워를 개발 및 공급 하고 있다. 특징으로는 30,000 rpm의 운전속도와 낮은 압력비(PR=1.1), 그리고 BLDC 모터로 구성되어 있는 구조이며, 이 제품의 수명과 운전속도의 한계는 볼베어링에 영향을 받는다.

또한, R&D Dynamics에서는 공기포일 베어링을 사용하여 140,000 rpm까지 구동하는 공기 블로워가 설계되었다. 그러나 공기 블러워에 사용되는 고속 회전체는 마찰 손실, 고속 모터의 최적설계, 자석과 코일에서 발산하는 열 등의 여러 문제를 해결해야 할 것이다. 그리고 기타의 연구 단계에서는 기존의 콤프레셔/익스펜더에 스크롤 압축기를 적용한 CEM(combined compressor/expander machine)의 연구, 개발을 진행하고 있다. 한편 국내에서는 연료전지 BOP의 과제보다는 시스템적 접근을 주로 시도하였고 그 가운데 최근 연구하고 있는 주요 연구 동향을 표 2에 나타내었다.

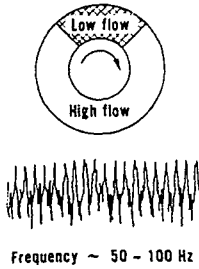
고속 터보 기기의 공력학적 안정성

연료전지 공기 공급시스템은 고속에서의 운전과 부하 변동에 따른 공력학적 불안정성(instability) 요인을 파악할 필요가 있다. 터보 기기의 불안정성은 실속(stall)과 서지(surge)로 대별할 수 있는 데(그림



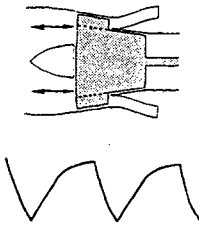
[그림 4] 연료전지 시스템용 공기 공급 장치의 연구 개발 추이

Rotating stall
circumferentially nonuniform flow



Frequency ~ 50 - 100 Hz

Surge
Axially oscillating flow



Frequency ~ 3 - 10 Hz

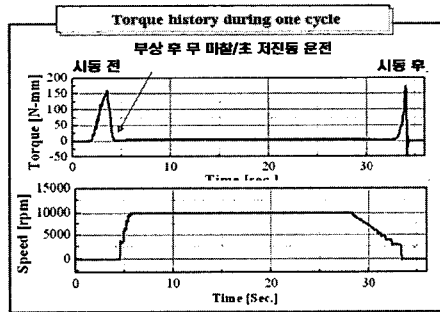
[그림 5] 공력 기기의 회전에 따른 불안정성 : 스톨/서지



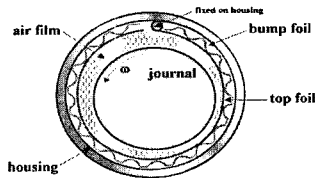
[그림 6] 서지에 압축기 임펠러의 손상 예

연료 전지의 공기 공급 장치인 압축기(블로워)에서 소비되는 전정적인 전력은 연료전지에 총 발전 전력의 약 20% (100kW급)

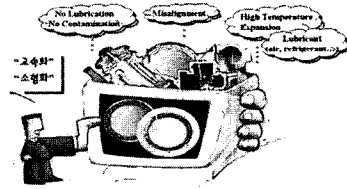
- 마찰 손실을 최소화 할 수 있는 윤활 시스템이 필요.



Durability Test - Solid Lubricant Coating (10,000cycles/10년)



- 100% Oil free 전 환경 시스템 (소형 경량화)
- 무 진동/소음 저감
- 에너지 효율 극대화 (Low Contact)
- 높은 내강 및 마찰 저지력



[그림 7] 공기 포일 베어링의 특징 및 부상 특성

5), 실속은 근본적으로 유동의 박리에 의해 발생한다. 터보 압축기에서의 실속은 일반적으로 선회 실속(rotating stall)을 말하며, 이는 임펠러 또는 디퓨저(diffuser)에서 발생한 국부적인 실속이 임펠러의 회전방향과 같은 방향 또는 반대 방향으로 회전을 하는 것을 뜻한다. 선회 실속은 임펠러, 디퓨저 등에서 발생하며, 그 형태 및 특성에 따라 다양하게 나뉘어지고, 또한 터보 기기에 미치는 영향도 다양하다. 선회실속이 국부적인 불안정성을 나타내는 것이라면 서지는 전체 압축 시스템의 불안정성을 말하는 것으로 전 압축시스템에 걸쳐 평균 유동이 전진, 후퇴를 반복하는 요동을 뜻한다. 서지는 전 시스템에

있어서 주기적인 유동 및 압력의 변동으로 나타나며 압축기(compressor)와 덕트(duct)에서의 기계적인 진동과 함께 소음을 동반한다. 이러한 주기적인 요동은 터보 기기에 주기적인 부하를 수반하여 압축기 성능은 물론이고 베어링, 회전축(rotor) 등에 과부하가 걸리므로 압축기 시스템에 치명적이 될 수 있으며 특히 유량 및 압력비가 높을수록 그 영향은 크다. 따라서 운전 시 실속 및 서지에 의한 불안정성을 제어를 통해 안정화시키는 기술이 핵심이다.

저마찰/고속 안정성을 위한 무 급유 포일 베어링 기술



공기극인 캐소우드에 가압 공기를 공급하는 압축기는 연료 전지 BOP의 핵심 부품으로 시스템 효율과 직결된다. 따라서 에너지 효율이 우수한 소형 경량화되고, 고속에서의 안정성이 우수한 공기 공급 시스템의 개발이 필요하다. 기존의 연료전지 자동차에 사용되던 압축기나 블로워는 소비 전력이 연료전지의 최대 약 20%에 달할 정도로 에너지 소비가 컸으나, 공기 포일 베어링이 적용된 터보 공급 시스템을 사용할 경우, 별도의 윤활 시스템이 필요 없고 고속 시 응답 특성이 획기적으로 개선이 되며, 저에너지 소비의 환경친화적으로 구현할 수 있다.

특히 그림 7과 같은 공기 포일 베어링(air foil bearing)은 고속 회전하는 회전축과 탑 포일(top foil) 사이 틈새(clearance)의 동압 효과에 의해 윤활 특성을 얻어내는 베어링으로서 100% 무급유하여 친환경적이며, 고속에서의 저 마찰, 저 토크의 성격을 가지고 있어 동력 손실이 가장 적은 베어링 시스템 중의 하나이다. 또한 고온, 극저온 및 초고속에서의

윤전 제한성을 극복할 수 있어 최근 산업 기기용 터보 기기는 물론 우주항공 등에 적용되는 터보 기기의 스마트 베어링으로서의 가능성을 주목받고 많은 해외 연구 기관에서 연구, 개발 중에 있다.

참고문헌

1. Howard, S. A., 1999, "Rotordynamics and Design Methods of an Oil-Free Turbocharger," NASA/CR-1999-208689.
2. 이두열, 강창식, 신유환, 김광호, 2001, "원심압축기 베인 디퓨저에서의 선회실속 특성", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 99~105
3. 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, 2001, "공기윤활 다엽포일 저어널 베어링의 회전축 부상 특성에 관한 연구", 윤활학회지 Vol. 17, No 4, pp. 290~296