

연료전지용 팽창기-압축기 개념설계

안 중 민*, 권 태 훈*, 김 현 진[†], 양 시 원**

*인천대학교 대학원, [†]인천대학교 기계공학과, ** (주)효성 중공업연구소

Conceptual design of expander-compressor unit for fuel cell systems

Jong Min Ahn*, Tae Hun Kwon*, Hyun Jin Kim[†], Si Won Yang**

ABSTRACT: This paper introduces conceptual design of scroll expander-compressor unit for fuel cell. Since air discharged out of the fuel cell stack after reaction has still high pressure energy, some power can be extracted out of it by directing it to pass through an expanding device so that the extracted power can be used to drive an auxiliary compressor. For this purpose, a scroll type expander coupled to a scroll type compressor was designed: orbiting scroll of the expander and that of the compressor were made to share three of common drive pins installed in the mid frame plate, and central cavity in the mid-plate was used as a back pressure chamber to provide axial compliance for both orbiting scrolls. Performance analysis for the expander showed that the shaft power of the expander could reduce the auxiliary power consumption in the fuel cell by about one third at the scroll clearance of 10 μ m.

Key words: 연료전지(fuel cell), 팽창기-압축기(expander-compressor), 축출력(shaft power) PEM(polymer electrolyte membrane)

1. 서 론

화석연료를 이용한 에너지기기를 사용할 경우 발생하는 이산화탄소는 지구온난화와 직결되므로 이산화탄소의 저감은 최근 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 현재 활발히 연구 개발되고 있는 대체에너지 중 수소에너지의 경우 물의 전기분해 등으로 제조가 가능하고 연소 생성물이 없어 인류가 직면하고 있는 에너지난과 환경오염을 동시에 해결할 수 있다. 수소에너지를 사용한 연료전지의 기본원리는 수소와 산소의 반응을 이용하고

있으며 연료극에서 발생한 전자를 전기에너지로 이용하고 이때 수소이온은 전해질을 통해 공기극으로 이동하여 고온의 물을 생성하게 되며 이 물을 이용하여 난방용으로 사용하기도 한다.

이러한 연료전지 열병합 시스템은 화학에너지를 전기에너지로 변환함으로써 시스템 전체 효율을 80%이상 얻을 수 있고, 폐열을 이용하여 가정용, 소규모 발전용으로 적용할 수 있다. 하지만 연료전지 열병합 시스템의 경우 에너지변환을 하는 스택을 제외한 BOP(Balance of Plant)의 최적화, 고효율화가 상용화에 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 특히 스택에 압축 공기를 공급하는 압축기는 시스템에서 가장 큰 기생전력을 요구하는 구성 요소로서 효율성 및 내구성을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 또한 시스템의 효율을 높일 수 있는 방안으로써 스택의 출구에서 나오는 고압의 공기를 대기중으로 버리는 대신에 팽창기

[†]Corresponding author

Tel.: +82-32-770-8419; fax: +82-32-770-8410

E-mail address: kimhj@incheon.ac.kr

Table 1 Application area for various fuel cell systems

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Typical operating pressure range (bar)	1 ~ 3	1 ~ 4	1 ~ 10	1 ~ 10	1 ~ 15
Typical operating temperature (°C)	40 ~ 90	60 ~ 260	180 ~ 250	550 ~ 700	800 ~ 1000
Typical application area	Transport, Space, Stationary, Portable	Transport, Space, Portable	Stationary	Stationary	Stationary

Table 2 Operating conditions for side of air flow

Points	Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m ³)	Flowrate (L/min)	Enthalpy (kJ/kg)
1	15.0	0.101325	1.2252	100	288.38
2	47.96	1.6056	100	321.48	
3	50 ~ 60	0.23	2.1994	100	364.79
4	70	0.21	2.1051	89.5	347.70
5	5.42	0.101325	1.2519	89.5	282.11

를 사용하여 출력을 얻음으로써 시스템의 기생전력을 줄이는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{(1),(2),(3)}

용적형과 터보형 타입의 팽창기 적용에 대해서 용량이 크지 않을 경우 용적형 타입이 우수함을 Driver Technology Ltd사의 기술 보고서에서 보고되었고⁽¹⁾, Nikola et al.은 연료전지용 스크류 팽창기-압축기를 소개하였으며 시스템 적용 가능성에 대해서 연구하였다.⁽²⁾

본 연구에서는 스크롤 타입의 연료전지용 팽

창기-압축기 일체형 구조를 가진 유닛을 개념 설계하고 이를 시스템에 적용할 경우 얻을 수 있는 효과를 해석적으로 검토하고자 한다.

2. 연료전지 시스템

2.1 PEM Fuel Cell

연료전지의 여러 가지 종류 가운데 PEM (polymer electrolyte membrane) 타입이 낮은 작동 온도, 고체 전해질, 디자인이 간단하고 제작이 용이, 짧은 시동시간 및 우수한 부하 추종성, 그리고 높은 전류밀도 및 출력밀도 등의 장점을 지니고 있어 가장 다양하게 적용되고 있다. 각 타입별 압력범위, 작동 온도, 적용 범위를 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서는 1kW급 가정용/정치용 연료전지를 대상으로 하였으며, 각종 기생전력을 고려하여 스택의 출력은 1.5kW으로 설정하였다. PEM의 연료인 수소는 21.62 L/min가 공급되고 공급 압축 공기량은 100 L/min이다.

2.2 공기 공급 시스템

Fig. 1은 연료전지 시스템에서 공기급을 중심으로 일체형 팽창기-압축기 유닛을 적용하였을 경우의 개략도를 보여준다. 스택 출구에서 배출

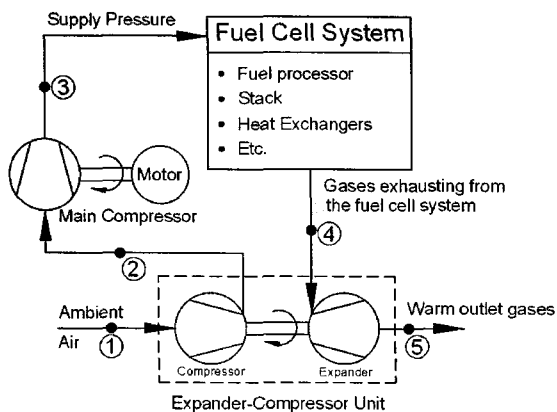


Fig. 1 Application of expander-compressor unit in fuel cell systems

Table 3 Change of mole fraction in air on inlet and outlet of the stack

	Air (Mole fraction)		
	N ₂	O ₂	Ar
Before reaction	0.7812	0.2096	0.0092
After reaction	0.7812	0.1048	0.0092

Table 4 Main specifications of scroll expander and compressor unit

Notation	Expander	Compressor
a (mm)	1.592	2.069
t (mm)	3.0	3.5
α(deg.)	54	48.5
φ _c (deg.)	1066	1038
φ _a (deg.)	383	496
h (mm)	22	28
r _s (mm)	2.0	3.0
V _{th} (cc)	14.53	27.8
V.R	1.683	1.310

되는 고압의 공기를 이용하여 팽창기에서 출력을 만들어 동일축으로 연결된 보조압축기에서 대기 중에서 흡입된 공기를 압축하는데 사용하게 된다. 이 압축된 공기는 메인 압축기에서 최종 토출 압력에 이르게 된다. Table 2에는 각 점에서의 공기 흐름속의 상태를 나타내었다. 또한 공기 극에서 공급된 공기의 조성이 스택 입·출구에서 변하게 되는데 반응전·후의 조성을 Table 3에 정리하였다. 이 조성의 변화를 Reprop ver. 7.0을 이용하여 팽창기 해석 모델에 반영하였다.

3. 스크롤 팽창기-압축기 개념 설계

3.1 팽창기

팽창기 입구에서의 공기의 질량유량은 스택에 유입된 공기량 $2.05 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 에서 앞서 언급한 Table 3의 반응 후 조성을 반영하였을 경우 $1.84 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 가 된다. 따라서 팽창기의 행정체적은 식(1)에서 결정된다.

$$\dot{m}_{out} = \rho_{s,c} V_{th,c} \frac{N}{60} \quad (1)$$

여기서 \dot{m}_{out} 은 스택출구에서의 공기량, $\rho_{s,c}$ 는 흡입밀도, $V_{th,c}$ 는 행정체적, N 은 rpm이다.

한편 스크롤 팽창기는 스크롤 압축기를 역회전시켜 작동되므로 스크롤 압축기 때의 토출체적이 팽창기에서는 흡입체적이 된다. 식(2)에 팽창기의 행정체적을 스크롤 랩 형상 인자들로 나타내었다.

$$V_{th,e} = 2\pi a h r_s (2\phi_a + \pi) \quad (2)$$

여기서 a 는 기초원 반경, h 는 랩 높이, r_s 는 선회반경, ϕ_a 는 커터각이다.

설계 체적비 $V.R$ 는 팽창기 입·출구의 압력비에 따라 식(3)과 같이 표현된다.

$$V.R = \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/n} \quad (3)$$

여기서 하첨자 1 및 2는 각각 입·출구를 나타낸다.

팽창기를 통과하는 공기의 엔탈피 감소를 Δh 라고 하고, 팽창기의 효율을 η_e 라고 하면 팽창기 출력은 식(4)와 같다.

$$L_s = \eta_e \dot{m}_{th} \Delta h \quad (4)$$

3.2 압축기

팽창기 출력으로만 보조 압축기가 구동되기 위한 압축기의 토출압 P_2 는 식(5)에서 결정된다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \eta_{i,c} \dot{m}_{m,c} L_s \\ &= n / (n - 1) P_s Q_s [(P_2 / P_s)^{(n-1)/n} - 1] \end{aligned} \quad (5)$$

설계 기준 조건에서 식(1)로부터 $V_{th,c}$ 는 14.53cc가 되고 팽창기의 전효율을 72.9%라 가정하면 식(4)와 Table 2의 값들을 이용하여 팽창기 출력은 87.75W이 되고, 보조 압축기의 지시효율과 기계효율을 각각 90%라 가정하면 토출

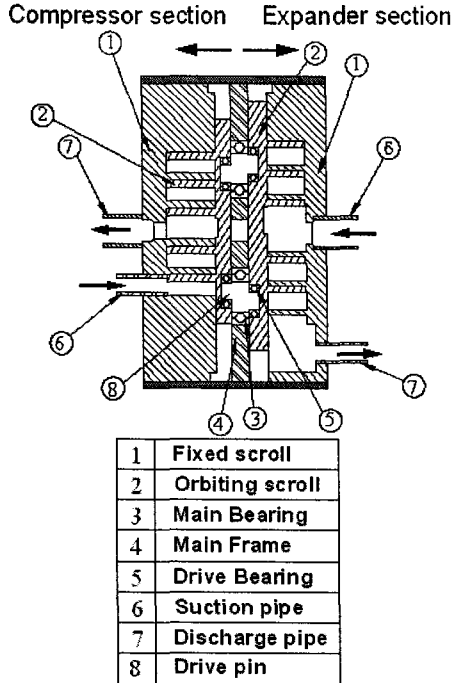


Fig. 2 Expander-compressor assembly

압은 0.148MPa이 된다. 또한 스크롤 형상 관계식을 이용하여 팽창기와 압축기를 형상을 결정하였으며 이를 Table 4에 정리하였다.

Fig. 2은 이같이 설계한 스크롤 팽창기-압축기 유닛의 개념도를 보여준다. 팽창기와 압축기의 선회 스크롤은 메인 프레임에 기준으로 서로 대치하고 있으며 선회 스크롤의 경판 후면에 구동 베어링이 삽입된 구조를 갖는다. 선회 스크롤의 자전을 방지하기 위해 기존의 올담링을 사용하는 대신에 3개의 구동 핀을 사용하였다. 이 3개의 구동 핀을 통해 팽창기 출력이 압축기 쪽으로 전달된다. 또한 팽창기와 압축기의 각각 흡입구와 토출구가 마련되어 있으며 축방향 순송기구로서 메인 프레임의 중앙부 공간에 배압을 형성하여 양쪽의 선회 스크롤을 밀어주는 구조이다.

4. 해석 모델

4.1 팽창기 압력 계산

팽창기에서의 팽창을 등엔트로피 과정으로 간주하면 팽창 압력은 팽창기 입구에서의 엔트로피 값에서 밀도 ρ 를 가지고 식(6)과 (7)에서 구할 수 있다.

$$\rho(\theta) = \rho_4 \left(\frac{V(\theta)}{V_{th,e}} \right) \quad (6)$$

$$P = P(\rho; s_4) \text{ with } s_4 = (P_4; t_4) \quad (7)$$

또한 인접한 검사체적간의 유로에서 또는 누설 간극에서 일어나는 질량유량 \dot{m} 는 식(8)로 표현된다.

$$\dot{m} = c_v A P_{up} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_{up}}} \sqrt{\left(\frac{P_{dn}}{P_{up}} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_{dn}}{P_{up}} \right)^{(k-1)/k}} \quad (8)$$

여기서 하첨자 up 와 dn 은 각각 누설 경로의 상류측 및 하류 측을 나타낸다. 유량계수 c_v 는 미리 일정한 압력 범위와 누설 간극 치수에 대해 계산하였고 이를 데이터 베이스화하여 팽창기 성능해석을 위한 본 프로그램을 계산할 때는 압력비와 간극비만을 가지고 불러와 사용하도록 하였다.⁽⁴⁾

4.2 팽창기 출력 과 효율 정의

팽창기에서 공기가 팽창함에 따라 선회 스크롤을 구동시키는 팽창력이 발생하는데 이는 팽창압력 선도로부터 식(9)와 같이, 그리고 선회 스크롤 구동 토크 T 및 출력 L는 각각 식(10) 및 (11)와 같이 구한다.

$$F_{tg} = \frac{1}{2\pi} \int_{vol} P dV \quad (9)$$

$$T = r_s F_{tg} \quad (10)$$

$$L = \omega T \quad (11)$$

팽창기의 체적효율과 등엔트로피 팽창효율, 그리고 기계효율은 각각 식 (12), (13), 및 (14)과 같이 정의한다.

$$\eta_{v,e} = \dot{m}_{th} / \dot{m} \quad (12)$$

$$\eta_{i,e} = L / L_{th} \quad (13)$$

$$\eta_{m,c} = L_s / L \quad (14)$$

여기서 이론 출력 L_{th} 은 $L_{th} = \dot{m}_{th} \Delta h$ 과 같이 정의되며 L_s 는 축출력을 나타낸다. 팽창기 전효

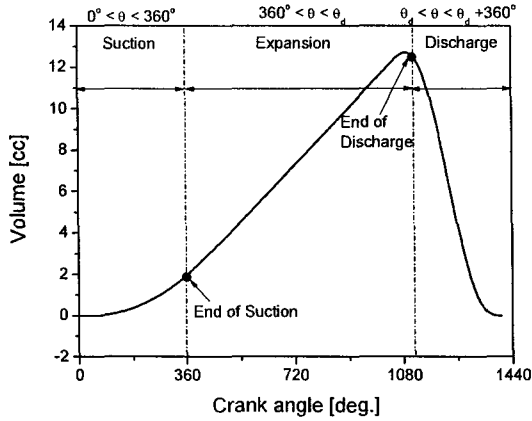


Fig. 3 Volume diagram

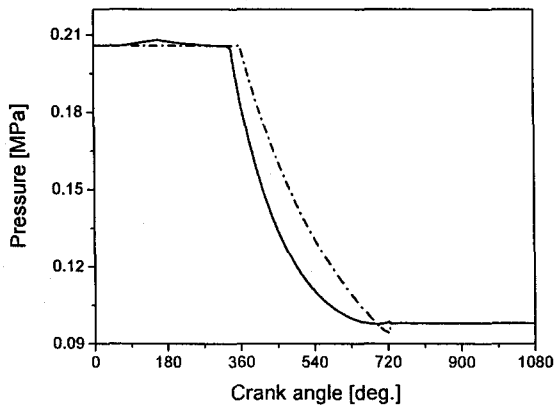


Fig. 4 P-θ diagram for scroll expander

을 η_e 은 식 (15)로 주어진다.

$$\eta_e = \frac{L_s}{m_{th} \Delta h_s} \eta_{i,e} \eta_{m,e} \quad (15)$$

5. 계산 결과 및 고찰

새롭게 제안된 일체형 팽창기-압축기 유닛의 팽창기 부분만의 성능해석을 실시하였다.

Fig. 3은 팽창기의 체적선도를 보여준다. 고압의 공기는 크랭크각이 360°까지 흡입과정, 토출개시각까지 팽창과정을 거친 후 최종 대기압으로 토출되게 된다.

Fig. 4는 팽창기에서 P-θ 선도를 보여준다. 가스 누설의 영향으로 흡입이 완료되기 전부터 압력이 떨어지는 경향을 보이며, 팽창 완료 시점에 이를수록 기울기가 완만해진다.

Fig. 5는 팽창기에서 크랭크각에 따른 가스력

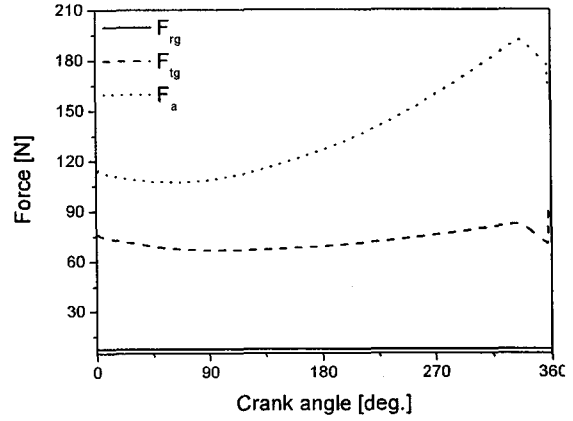


Fig. 5 Expansion gas forces

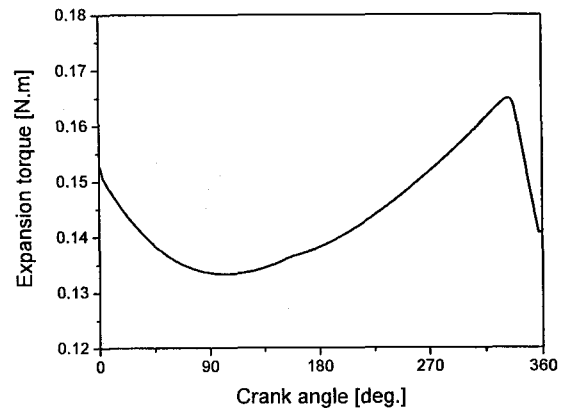


Fig. 6 Expansion torque vs. crank angle

을 보여준다. F_{rg}, F_{tg}, F_a 는 각각 반경방향 가스력, 접선방향 가스력, 축방향 가스력을 나타낸다.

Fig. 6은 팽창기에서 팽창 토크의 변동을 보여준다. 1회전당 토크변동 폭이 22.5%로 작게 변화한다.

팽창기에서 누설 간극 ϵ_r, ϵ_z 를 $10\mu m$ 로 하였을 때, 팽창기 체적효율은 $\eta_{v,e}=81.49\%$, 등엔트로피 효율은 $\eta_{i,e}=72.85\%$ 로 각각 계산되었다. 팽창기 기계효율을 90%라 가정하면 팽창기 전효율은 65.6%로 계산되고, 이 때 얻을 수 있는 축출력 $L_s=49W$ 이다.

Fig. 7은 누설 간극의 변화에 따른 팽창기 체적효율, 등엔트로피 효율 및 축출력의 변화를 보여준다. 간극이 $5\mu m \sim 20\mu m$ 을 변화할 경우 체적효율은 96.3%에서 55.6%로 급격하게 감소하는 경향을 보이지만 등엔트로피 효율은 91.5%에서 87.5%까지 완만하게 감소한다. 또한 축출력

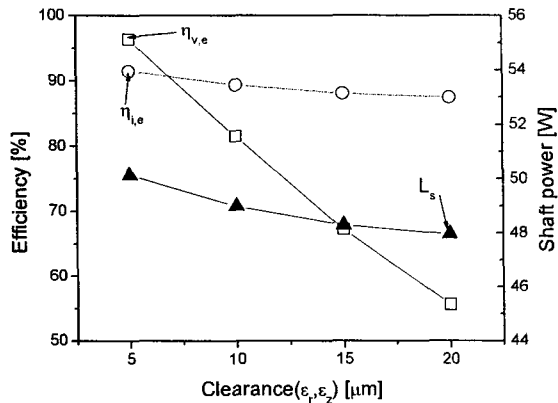


Fig. 7 Effect of clearance on the expander efficiency and shaft power

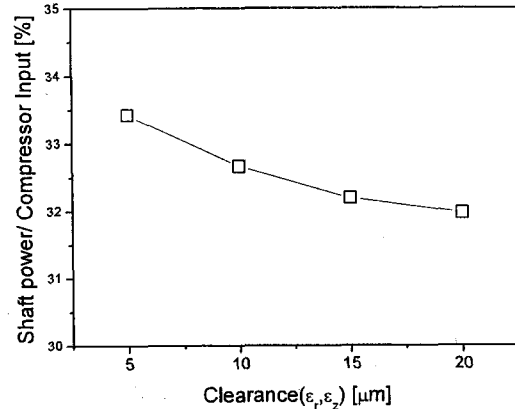


Fig. 8 Energy saving effect by using expander-compressor unit

의 변화는 누설 간극 변화에 따라 50.2W에서 47.9W까지 변하는데 이는 등엔트로피 효율의 변화에 기인한다.

Fig. 8은 1kW급 PEMFC 시스템에서 공기 공급 장치가 소모하는 압축기 소요동력을 기준으로 팽창기 축출력의 비율을 나타내었다. 팽창기를 적용하게 되면 공기 공급 장치의 소요동력의 최대 33.5%까지에 해당하는 에너지를 얻을 수 있다.

6. 결론

1kW급 PEMFC 시스템에 일체형 팽창기-압축기 유닛을 적용하기 위한 해석적 연구에서,

(1) 연료전지용 팽창기-압축기 일체형 개념을 소개하였고

(2) 주어진 설계 조건에서 팽창기 부분만의 성능해석을 수행하였다.

(3) 누설 간극이 10μm일 때, 팽창기 체적효율은 $\eta_{v,e}=81.49\%$, 팽창기 등엔트로피 효율은 $\eta_{i,e}=72.85\%$ 로 계산되었다. 또한 팽창기의 기계효율을 90%라 가정하면 팽창기 전효율은 65.6%로 계산되고, 이 때 얻을 수 있는 축출력은 49W이다.

(4) 팽창기의 체적효율은 누설 간극의 변화에

따라 매우 민감하게 변화하지만 등엔트로피 효율은 완만하게 변하며, 또한 축출력의 변화도 완만하다.

(5) 1kW급 PEMFC 시스템의 공기 공급 장치의 소요동력을 기준으로 팽창기에서 최대 33.5%의 부가적인 동력을 얻을 수 있다.

(6) 향후 일체형 팽창기-압축기 유닛의 압축기 해석과 운동부재의 해석을 통한 전반적인 해석이 필요하다.

참고문헌

1. Driver Technology Ltd, 2000, Review of the potential application of positive displacement compressor-expanders in advanced fuel cell cycles, ETSU F/03/00184/REF
2. Nikola Stosic, Ian K. Smith, Ahmed Kovacevic, 2003, Combined compressor-expander in fuel cell application, IMECHE Conference Transactions, No. 4, pp. 369 ~ 380.
3. Frano Barbir, 2005, PEM Fuel Cells Theory and Practice
4. Hyun Jin Kim, 2004, Development of computer simulation program for performance analysis of a scroll compressor, Technical Report, Univ. of Incheon