

고분자 전해질 연료전지 연료공급모듈용 Air Blower 개발

논문
58-9-13

Development of Air Blower for Air Management Module of PEMFC System

허진* · 정인성*
(Jin Hur · In-Soung Jung)

Abstract - This study presents a brushless DC (BLDC) motor for air management system of fuel cell modules. Magnetic equivalent circuit model and finite element analysis are used to design the motor, and an improved structure is considered to reduce a mechanical loss induced from bearing units. Finally, air blower system combined with the motor and an impeller is manufactured and output properties, such as an air pressure and an amount of flowing air, are measured. Through the experimental results, a validity of the simulated one is confirmed.

Key Words : PEMFC, Air management module, Air blower, Brushless dc motor, Impeller, Pressure

1. 서론

연료전지 발전시스템은 다른 신재생에너지원에 비해 상대적으로 높은 효율과 안정적인 발전의 장점을 가지고 있어, 단독발전시스템 뿐만 아니라, 대용량 발전에서부터 수송 및 휴대용 시스템에 걸쳐 많은 응용분야에서 적용연구가 진행되고 있다.

특히, 연료전지(Fuel Cell)는 기존의 화학에너지로부터 전기 에너지를 얻기 위해서 필요한 다단계의 변환과정을 거치지 않고 화학에너지로부터 직접 전기에너지를 얻을 수 있는 특성에 의해 기존의 발전방식에서 발생하는 손실을 제거할 수가 있다는 장점을 갖는다. 또한 화학반응과정에서 발생하는 폐열을 이용하여 열병합발전(Combined Heat Power: CHP)을 부수적으로 할 수 있기 때문에 80%이상의 고효율 출력을 발생하는 시스템으로 인식이 되고 있다. 이러한 연료전지 발전시스템은 그림 1에서 보듯이 크게 연료전지 Stack 부분과 연료전지에 수소 및 산소를 공급하는 연료공급모듈(Air Management System) 및 연료전지에서 발생된 저전압의 DC전압을 수요자가 필요한 형태의 다양한 크기와 주파수를 갖는 DC 및 AC전원으로 변환시키는 전력변환장치 시스템 (Power Conditioning System: PCS)으로 구성이 된다[1],[2].

산소 및 수소를 연료전지에 공급하는 연료공급모듈은 주로 Pump, Fan, Compressor 및 Blower등으로 구성되는데, 연료전지의 출력특성을 일차적으로 결정하는 역할을 하는 중요한 부분으로 전체 연료전지 시스템을 위해서는 우선적으로 고성능 개발 되어야만 하는 중요성을 가진다. 이러한 Pump, Fan,

Compressor 및 Blower 등은 그동안 다양한 산업체 응용분야에서 꾸준히 개발 되어 왔으며 적용되는 응용분야에서 요구되는 속도 및 토크 특성에 따라 다양하게 개발되어 왔다.

하지만 연료전지를 부하로 사용하는 경우에는 연료전지의 화학적 동특성과 운전조건을 반드시 설계 부하변수로 고려해야만 하고 Pump, Fan, Compressor 및 Blower의 전기적, 기계적 출력 동특성과 연료전지의 화학적 동특성이 잘 부합되도록 설계, 제작되어 연료전지 시스템에 적용되어야 한다.

특히, 연료공급모듈 중 Air blower는 전체 시스템의 효율을 좌우할 뿐만 아니라 그림 2에서 보는 바와 같이 연료전지 Stack발생전력의 20~30%를 소비하는 주변장치(Balance of Plants, BOP)의 큰 전력을 소비하는 부분으로 고효율화가 매우 중요한 핵심부품이다[3].

따라서 본 연구에서는 고효율 연료공급모듈을 위한 연료전지 Stack과 연계된 동특성을 고려한 구동모터 및 임펠러의 최적설계를 수행하였다. 고효율의 연료공급을 위한 유량/유압으로부터 최적의 구동토크 및 속도를 결정하고, 이로부터 구동모터의 자기회로 및 구동제어기를 구성하였다. 또한, 연료전지의 기생전

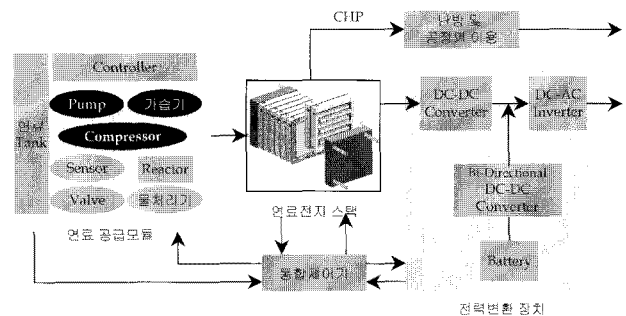


그림 1 연료전지 발전시스템용 PCS 구성도
Fig. 1 The schematic diagram of Fuel Cell generation system

* 시니어회원 : 전자부품연구원, 지능메카트로닉스연구센터, 센터장
† 교신저자, 시니어회원 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부, 조교수

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 23일

최종완료 : 2009년 8월 12일

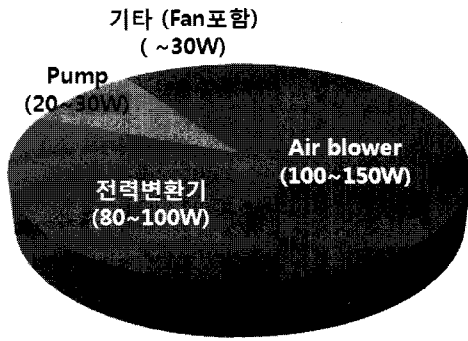


그림 2 1kW 연료전지시스템 소비전력(합계 220~300W)
Fig. 2 Power consumption of 1kW Fuel Cell System

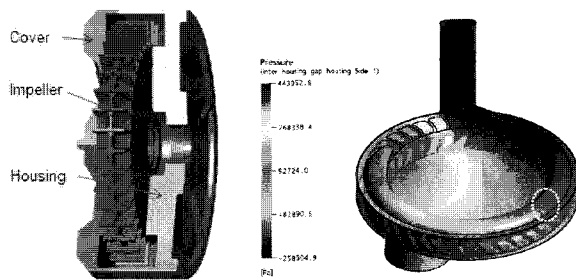
력의 최소화 및 소음의 주 원인중의 하나인 Blower의 소음 저감을 위한 구조설계 및 시스템 매칭에 대한 연구를 수행하였다.

2. 연료공급모듈용 Air blower 구동모터설계

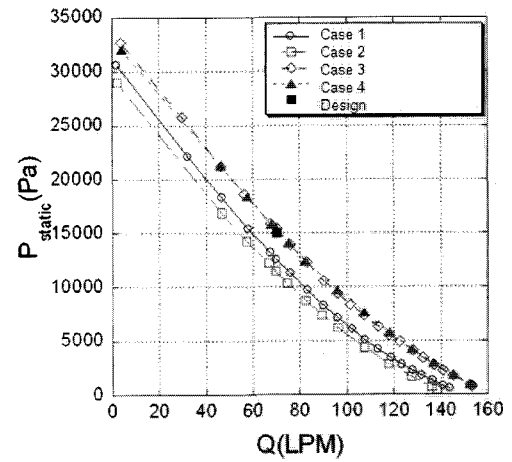
연료전지시스템에서 고효율의 발전을 위해 요구되는 Stack의 특성에 따라 결정되는 요구 유량과 유압을 위해서 임펠러와 이를 구동하기 위한 구동모터의 세부사양을 결정하게 된다.

본 연구에서 사용된 Air blower는 작은 유량에서 큰 양정을 낼 수 있는 유체기계로서 고압을 필요로 하는 연료펌프에 널리 사용되는 재생형 유체기계(regenerative type turbo-machinery)인 재생블로워를 적용하였다. 그림 3(a)는 재생블로워의 구조 및 압력분포를 나타내고 있다. 아래쪽의 입구단에서 낮은 압력분포가 출구단에 가까울수록 점차 압력분포가 높아지는 구조를 가짐으로서 요구되는 유압을 결정할 수 있음을 알 수 있다[4].

그림 3(b)는 개발된 재생블로워가 연료전지시스템에서 요구되는 유량 및 유압을 발생하기 위한 요구되는 모터의 출력특성을 결정하기 위한 재생블로워의 모터적용시험 결과이다. 다양한 모터의 토크 및 속도조건으로부터, 고속 및 정속의 운전특성을 갖는 재생블로워 구동용 모터를 설계하기 위한 기본사양을 도출하였다. 표 1은 개발된 Air blower용 BLDC모터의 기본 설계사양을 나타내고 있다.



(a) Structure and Pressure distribution



(b) Experimental results for required performance

그림 3 재생블로워의 구조 및 유량유압측정 실험결과
Fig. 3 Regenerative blower and Experimental results

표 1 Air blower용 모터의 설계요구사항

Table 1 The required specification of motor for air blower

Items	Specifications	
Motor	Input voltage	24 [V]
	Rated load	45 [mNm]
	Rated speed	11,000 [rpm]
	Maximum load (duty 100%)	65 [mNm]
	Maximum speed(duty 100%)	14,500 [rpm]
	Outer diameter	≤ 60 [mm]
	Efficiency	≥ 70 [%]
Blower system	Rated air pressure	15 [kPa]
	Rated air flow	70 [LPM]
	Maximum air pressure	25 [kPa]
	Maximum air flow	100 [LPM]

표 1에서와 같은 설계요구사항에 대하여 기본설계를 시행하였다. 본 연구에서는 고속 및 정속의 운전뿐만 아니라 장시간 사용성격의 특성을 고려하여 외전형 타입(Outer rotor type)의 모터를 설계하였다. 표 2는 설계된 모터의 사양을 나타내고 있다.

표 2 기본 설계된 모터사양

Table 2 The initial design parameters of the motor

Items	Design variables
Motor type	6 pole / 9 slot outer rotor BLDC
Driving type	3 Phase 2 excited
Magnet	ND-Bonded (Br=0.6T)
Magnet thickness	2 [mm]
Outer diameter of rotor	54 [mm]
Laminated stator height	12 [mm]
Air gap	0.5 [mm]

FEM을 이용하여 기본 설계된 모터의 세부 형상설계를 수행하였다. 그림 4는 설계된 모터의 구조 및 설계모형을 나타내고 있다. 두 개의 볼베어링이 축계를 구성하고 있으며, 회전위치를 검출하기 위한 홀 PCB가 회전자 마그네트의 밑면에 위치되어 있다. 그림 5는 자속분포를 나타내고 있다. 회전자 요크의 경우 실제 마그네트를 Polar 방향으로 착자시에는 포화될 염려가 없음을 확인하였다.

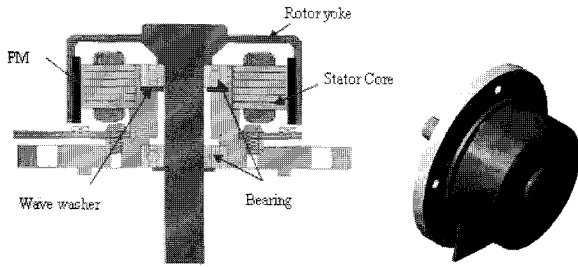
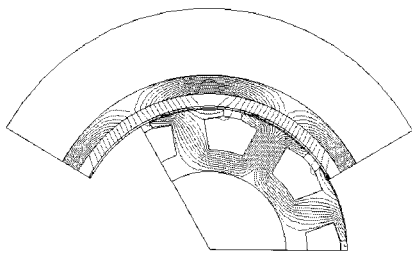
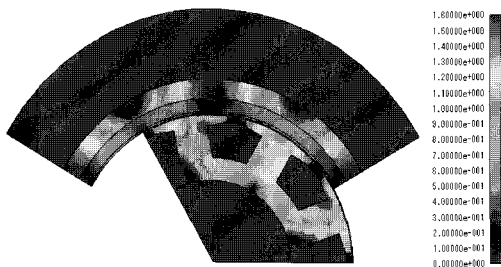


그림 4 설계된 모터의 구조 및 설계모형도
Fig. 4 Structure of designed motor



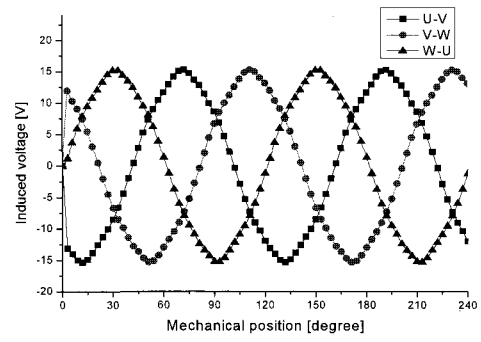
(a) Equip-potential line



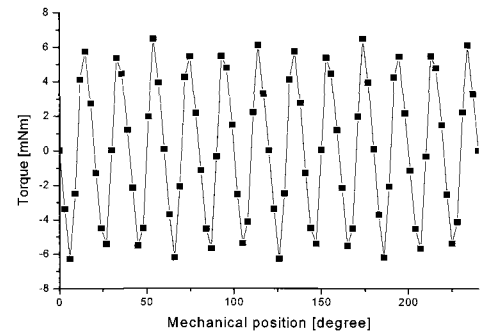
(b) Distribution of magnetic flux density

그림 5 자속선도 및 자속밀도분포도
Fig. 5 Flux line and density distribution

그림 6은 설계된 모터의 역기전압과 코깅토크에 대한 해석결과이다. 정격회전수인 10,000[rpm]에서 15.5V_{0-peak}의 역기전압을 가지며, 이것으로부터 4 [A]의 정격속도에서 55 [mNm]의 토크를 발생시킬 수 있는 14 [mNm/A]의 토크상수를 확인할 수 있었다. 또한, 발생 코깅토크도 정격토크의 약 10%인 6 [mNm_{0-peak}]를 가짐을 확인하였다. 이상의 해석결과로부터 설계된 모터는 연료전지용 재생블로워의 고효율 구동을 위한 유량 및 유압을 발생시키기 위한 모터의 요구 성능을 충분히 만족함을 확인할 수 있었다.



(a) Back EMF linetline@10,000rpm



(b) cogging torque

그림 6 선간 역기전압 및 코깅토크 해석결과
Fig. 6 Calculated back EMF waveform and cogging torque

3. 연료공급모듈용 Air blower 구동드라이버 설계

3상 외전형 BLDC모터의 구조를 살펴보면 회전자의 위치를 검출하기 위한 홀센서는 120도 간격으로 부착을 하고 그 신호를 로직회로의 입력으로 받아들인다. 그리고 그 신호에 동기 맞추어서 드라이브 회로에 있는 6개의 스위칭 소자에 입력신호로 주어 모터의 U, V, W상에 전류를 흘림으로서 모터를 회전시키게 된다. 로직회로에서는 3개의 홀센서 신호를 받아서 6개의 구동신호를 주는 역할을 하게 되는데 제어 신호 (정, 역회전, 속도)에 따른 구동로직을 가지게 된다.

구동 드라이버의 주요 구성도를 그림 7에 나타내었다. 본 연구에서는 3상 BLDC모터의 구동을 위해서 전용 IC를 사용하였다. 최근에는 BLDC모터의 수요가 증가되면서 많은 전용 IC가 출시되고 있는데 목적 및 가격에 맞는 칩을 선택하여 사용하면 이상적이다. 본 연구에서는 구동로직을 발생 시켜주는 컨트롤칩으로 Allegro사의 A3938을 사용하였고, 스위칭 소자는 IR사의 IRFR024N을 사용하였다. 본 소자들은 50V까지 이용할 수 있도록 설계되었으며, 전압의 스파크 등을 고려할 때 24V급까지 안전하게 이용할 수 있다. 또한, 전류를 최대 14[A]까지 흘릴 수 있기 때문에 본 연구에서 목표로 하는 정격 전류치 및 기동/과부하시의 전류에서도 안전한 작동을 할 수 있다. A3938은 외부의 PWM을 이용하여 속도제어가 가능하며, 과전류 방지회로도 내장되어 있어 간단한 외부회로를 이용하여 과전류 방지기능을 구현하였다.

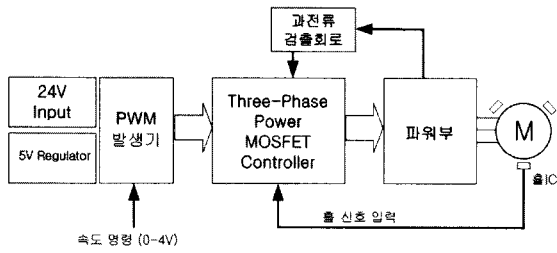


그림 7 구동드라이버의 구성
Fig. 7 Structure of motor driver

5. 제작 및 실험 결과

그림 8은 제작된 모터 및 구동드라이버의 사진을 나타내고 있다. 그림 9는 1,000 [rpm]에서 측정된 역기전압 및 10,000 [rpm]으로 회전시의 상전류 측정파형을 도시하고 있다. 측정된 역기전압의 경우 그림 6에 도시한 시뮬레이션 결과치와 매우 유사함을 알 수 있으며, 그림 9(b)의 전류파형을 통하여 120도 통전이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

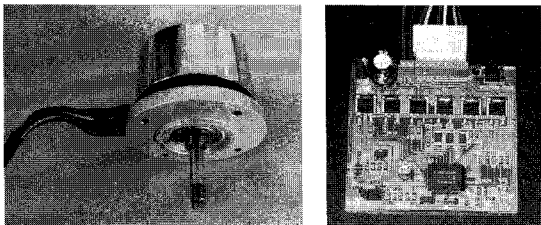
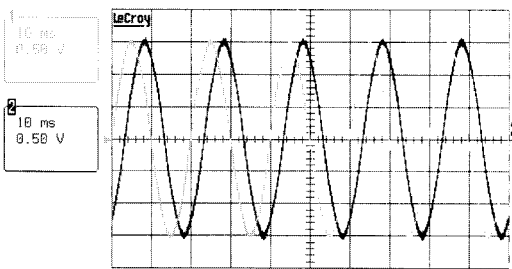
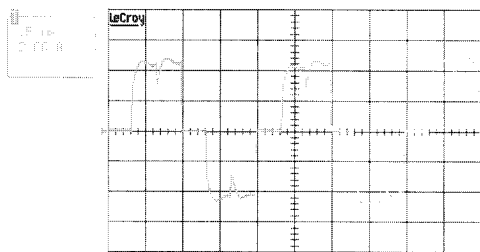


그림 8 제작된 모터 및 구동드라이버
Fig. 8 Manufactured motor and driver



(a) Back EMF_{inertoline}@1,000rpm



(b) Current waveform @ 10,000rpm

그림 9 측정된 역기전력 및 전류파형
Fig. 9 EMF and current measurement

설계된 모터의 성능평가 결과, 시뮬레이션 결과와 비교하여 모터의 회전속도는 목표치보다 다소 낮고, 입력전류는 다소 증가되어 나타났다. 이는 모터 조립시의 제한된 공차조건에 따른 기구부의 기계적 마찰 등의 손실에 따른 것으로 이를 저감하기 위하여 기구부의 설계개선을 진행하였다.

구동모터가 Air blower의 임펠러와 연결되었을 때, 회전축방향으로의 진동을 피하기 위하여 임펠러의 중심과 연결된 구동모터의 샤프트의 축 방향으로의 움직임이 제한되어야만 한다. 특히, Air blower의 효율향상을 위하여 하우징과 임펠러 사이에 매우 작은 공극으로 구성되어 있어, 미세한 축 방향으로의 움직임은 치명적인 기계적 문제를 발생시킨다. 본 연구에서 임펠러의 공극은 80[μm]으로 설계되었으며, 따라서 웨이브와셔의 탄성력이 축 방향 진동을 방지하는 역할을 하게 하였다. 이러한 조건하에서 기계적 손실을 증가시키는 원인이 되며 고속회전 시 베어링이 받는 충격을 완화하기 위하여 베어링의 내륜을 고정 링에 밀착 제작되었으며, 그 외에 모터와 임펠러의 안정된 결합 및 고속에서의 변형을 막기 위하여 모터 샤프트의 두께를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 설정하였다. 또한, 샤프트와 회전자 요크사이의 꼭 맞춤조립에 따른 편심 등의 기계적 문제를 해결하기 위하여, 베어링과 샤프트 사이에 마찰손실의 저감 및 축 방향 진동의 저감을 위해 샤프트 상단에 테프론(Teflon) 재질의 평 와셔를 삽입하였으며 샤프트의 정밀가공을 위해 회전자 요크와 샤프트의 분리구조를 채택하였다.

그림 10은 모터의 내부와 조립공정을 나타내고 있다. 개선된 모터의 입출력 특성평가 결과를 그림 11에 나타내었다. 정격부하에서 회전속도 10,800[rpm], 52[W]의 출력 및 73%의 효율을 가짐을 측정을 통해 확인하였다. 또한 최대부하에서 14,800[rpm], 102[W]출력 및 75%의 효율을 가짐을 확인하였다. 이러한 결과로부터 Air blower의 임펠러 구동을 위하여 설계된 BLDC모터의 타당성을 검증하였다.

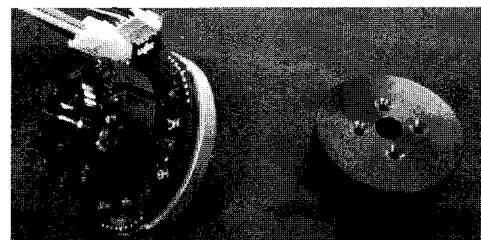
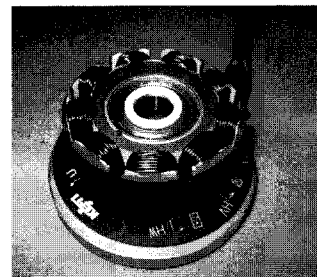
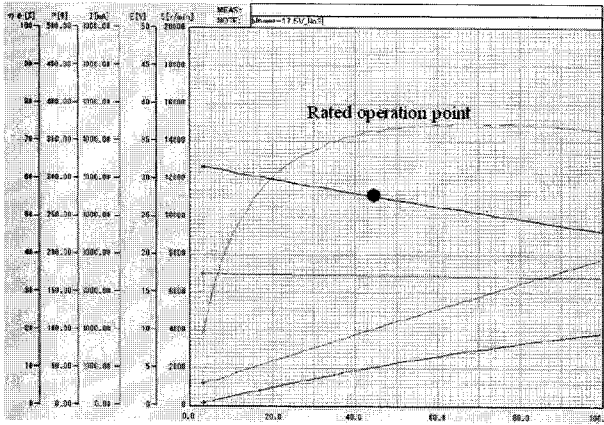
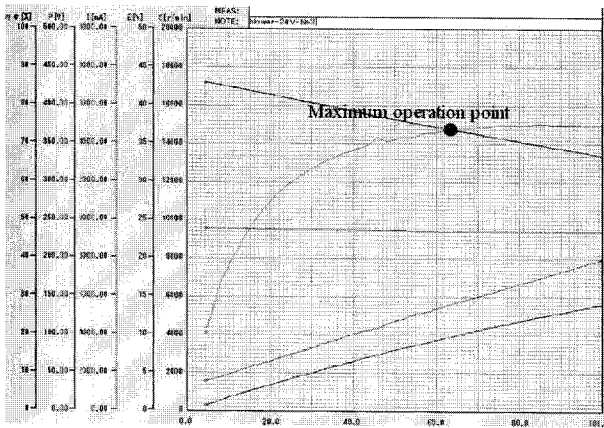


그림 10 고효율화를 위해 수정된 모터구조
Fig. 10 Revised structure for high efficiency



(a) 16V (rated operation condition)

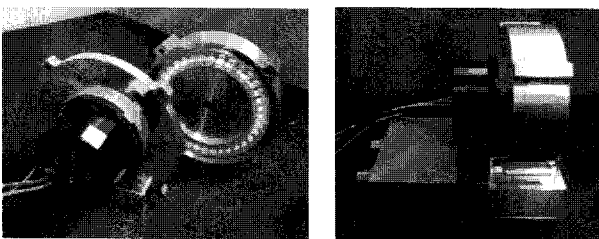


(b) 24V (maximum operation condition)

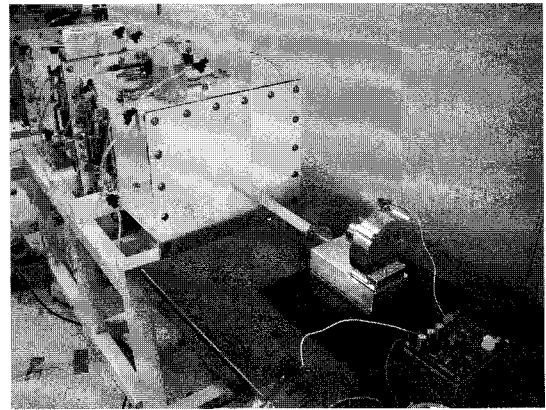
그림 11 모터 시작품의 특성시험 결과
Fig. 11 Experiment result of the motor

설계된 모터가 임펠러와 연결되어 연료전지의 Stack에서 요구하는 유량 및 유압의 출력특성을 만족하는지를 검증하기 위하여 그림 12와 같이 재생블로워의 임펠러와 연결하여 전체 블로워 모듈을 제작하였으며, 그림 12와 같이 블로워 모듈의 특성시험을 진행하였다.

그림 13에 도시한 실험결과와 같이 시스템에서 요구되는 15[kPa]의 유압과 70[lpm]의 유량을 입력 16V에서 얻을 수 있음을 확인하였으며, 24V가 구동모터에 입력되었을 때, 시스템의 출력특성이 25[kPa], 100[lpm]의 최대요구특성을 잘 만족하고 있음을 확인하였다.

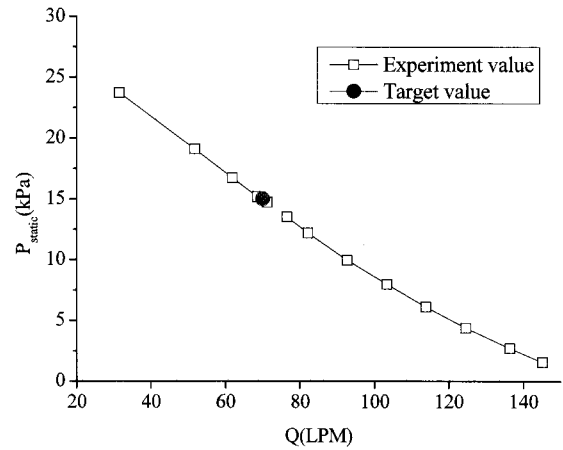


(a) Assembly of the blower module

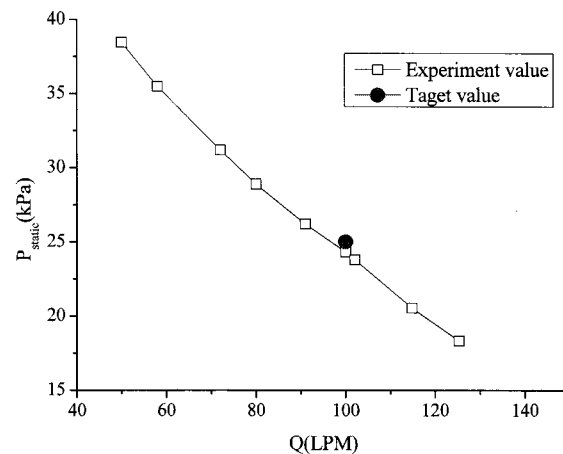


(b) Output characteristics measurement.

그림 12 재생블로워 모듈 및 출력특성 실험장치
Fig. 12 Assembly of the blower module and output characteristics measurement.



(a) 16V (rated operation condition)



(b) 24V (maximum operation condition)

그림 13 입력전압에 따른 블로워의 유량유압 평가결과
Fig. 13 Air pressure and flow value of the blower system in the cases of the input voltage of 16V and 24V are applied to the motor, respectively.

6. 결 론

본 연구에서는 1kW급 연료전지시스템의 연료공급모듈용 재생형 블로워의 임펠러 구동용 brushless DC motor 및 구동드라이버를 설계하였다. 고속 회전시에 발생하는 축방향의 샤프트의 진동에 따른 기계적 손실을 최소화하기 위하여 기구부의 강건 설계를 시행하였으며, 블로워 시스템의 출력 특성 평가를 통하여 설계된 모터의 타당성을 검증하였다.

설계결과로부터 Blower 설계시에 주로 고려되는 설계변수는 출력, 입력전압 및 출력전류, 최대속도, 속도 가변속 범위, 최대 출력토크 및 토크리플 등이 있으나, 이러한 설계변수들이 연료전지 연료공급용 블로워의 설계시에도 기본적으로 고려되어야 하지만 이들 설계변수들 역시 연료전지의 화학전 동특성과 운전조건에 의해 종속되기 때문에 이를 고려한 정략적 설계변수 선정에 대한 시스템 결합특성차원에서 많은 연구가 요구됨을 확인하였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 울산대학교의 지원 및 에너지 자원기술개발사업의 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Hoogers, Fuel Cell Technology Handbook, CRC Press, 2002.
- [2] J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd., 2003
- [3] T. W. Lee, Jin Hur, B. K. Lee, and C. Y. Won, "Design of fuel cell generation system using a PEMFC simulator," *Journal of Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 10, pp. 1257-1264, August 2007
- [4] 이 경용, 최 영석, "사이드채널형 재생블로워의 성능평가," 유체기계공업학회 연구개발발표회 논문집 pp. 378 - 383, 2006.
- [5] 허 진 외 5인, "소형/고효율 고분자전해질 연료공급모듈용 Air Blower 개발에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 212-214, 2006.
- [6] Jin Hur, In-Soung Jung, Ha-Gyeong Sung and Soon-Sup Park, "Performance analysis of a brushless dc motor due to magnetization distribution in a continuous ring magnet," *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, No. 10, pp. 8778-8780, May 2003

저 자 소 개



허 진 (許 眞)

1999년 공학박사, 한양대(전기공학), 1999년~2000년 Texas A&M Univ. Post-doctoral Research Associate, 2000년~2001년 한양대 연구교수, 2002년~2008년 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터장/책임연구원, 2008년~현재 울산대 전기전자정보시스템 공학부 조교수, 2004년~현재 IEEE Senior Member, 2006년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Power Elec., 2008년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Vehicular Technology. 2008년~현재, IEEE Intelec 2009 Conference, Publication Chair. 2009년~현재, KIEE Senior Member 및 B부문 편집이사.
Tel : 052-259-1282
E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr



정 인 성 (鄭 因 城)

1971년 3월 10일생, 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사), 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 동 대학원 졸업(박사), 2000년~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 책임연구원/센터장, 2007년~현재 IEEE Senior Member, 2009년~현재 KIEE Senior Member, 학술위원회 위원, 전기기기 및 에너지변환시스템분부회 협동이사.
Tel : 032-621-2845
E-mail : isjung@keti.re.kr