

PEM 연료전지용 터보 블로워의 내구성에 관한 실험적 연구

이용복^{*1)} · 이희섭¹⁾ · 정진택²⁾

¹⁾한국과학기술연구원 에너지메카닉스센터

²⁾고려대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Durability Test for PEM Fuel Cell Turbo-blower

Yongbok Lee^{*1)} · Heesub Lee¹⁾ · Jintaek Chung²⁾

¹⁾Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-dong, Seoungbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received 14 September 2007 / Accepted 11 April 2008)

Abstract : The durability test of turbo-blower for PEM fuel cell is very important process of BOP development. It is a major barrier to the commercialization of these systems for stationary and transportation power applications. Commercial viability depends on improving the durability of the air supply system to increase the reliability and to reduce the lifetime cost. In this study, turbo-blower supported by oil-free bearing is introduced as the air supply system used by 80kW proton exchange membrane fuel systems. The turbo-blower is a turbo machine which operates at high speed, so air foil bearings suit their purpose as bearing elements. The impeller of blower was adopted mixed type of centrifugal and axial. So, it has several advantages for variable operating condition. The turbo-blower test results show maximum parasitic power levels below 1.67kW with the 30,000 rpm rotating speed, the flow rate of air has maximum 163SCFM(@PR1.1). For proper application of FCV, these have to durability test. This paper describes the experiment for confirming endurance and stability of the turbo-blower for 500 hours.

Key words : Turbo-blower(터보 블로워), Oil-free foil bearing(무급유 포일 베어링), PEM fuel cell(고분자 전해질 연료전지), BOP : Balance of plant(주변장치), Parasitic power(소모 동력)

1. 서론

연료 전지 시스템의 스택(stack)으로의 산소 공급과 발열에 대한 냉각을 위하여, 일정한 양과 압력의 특징을 갖는 공기를 공급시켜줘야 한다. 이러한 역할을 담당하는 공기공급기는 터보 블로워, 팬과 압축기 등이 있으며, 연료전지 시스템의 스택(stack)이 원활한 성능을 출력할 수 있도록 보조 장치 역할을 수행한다. 이와 같은 장치는 연료 전지 시스템에서

발전되는 전력을 이용하여 구동이 되며, 고분자 전해질 연료전지의 전체 발전에 대하여 최대 25%의 상당한 비율로 동력을 소모한다. 상기의 특징을 살펴봐왔을 때, 공기공급기의 성능 향상에 대한 연구가 시스템의 전체 효율과 연계되어야 함을 알 수 있다.^{1,2)} 다시 말해서 연료전지의 전기/화학 반응을 원활히 이루어지도록 보조 역할을 하는 주변 장치들이 시스템의 효율을 향상시키기 위하여, 연료전지의 발전량에 대한 전력 소모량을 줄이는 연구가 진행되어야 한다. 또한, 연료전지 시스템의 성능 향상

*Corresponding author, E-mail: lyb@kist.re.kr

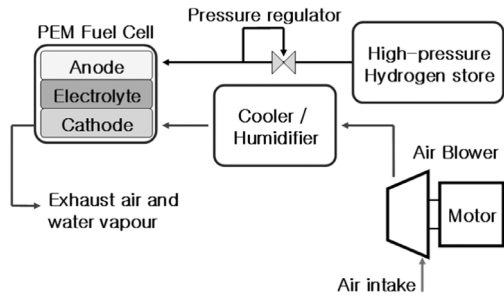


Fig. 1 BLDC Motor driven air blower and FEM Fuel cell

뿐만 아니라, 시스템과 각 요소 장치에 대하여 내구성과 신뢰성이 요구되어지는 실정이다. 이는 제품의 지속적이고 안정적인 성능 구현과 경제적, 환경적인 면에 밀접한 연관성이 있으므로 내구성 향상에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 상기의 요소 장치 중, 공기공급기에 대한 선정 기준 및 고려 사항은 Table 1에 나열되어 있다. 공기 공급 장치를 선정 시에 압력비와 효율, 부피 및 내구성 등의 주요 요소를 고려하여야 한다.³⁾ 상기에서 언급한 사항들을 고려하여 여러 세계적인 기업과 연구 단체에서 연료전지용 공기공급기에 대하여 연구 및 개발을 진행하고 있으며, 상품화에 주력하고 있다.

PADT(Phoenix Analysis and Design Technology) 사에서는 상압형 자동차용 연료 전지 시스템에 적용되는 2kW급 사류형 공기 블로워를 개발하여 상품화하였다. 주요 특징은 BLDC 모터로 구동되며, 일반 볼 베어링이 적용되어 30,000rpm으로 구동된다. 또한, 세계적인 기업 중의 하나인 하니웰(Honeywell)에서는 50kW급 가압형 연료전지 시스템에 적용되는 원심형 콤프레서/익스펜더를 개발하였다.

Table 1 Considering factors of air supply system

Major requirements, targets and boundary conditions
1. Good performance & efficiency (flow rate, pressure ratio, especially in the partial load)
2. Inlet temperature requirement of the fuel stack has to be met (e.g. typical PEM fuel cell: $T_{inlet} < 80 \sim 90^{\circ}C$)
3. Low noise emission
4. Low weight, volume and costs
5. Durability
6. No particles or oil in the stack inlet air mass flow
7. Good transient response

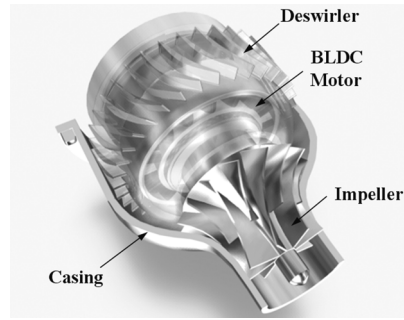


Fig. 2 Configuration of turbo blower for FEM Fuel cell

주요 특징은 공기 베어링으로 회전체가 지지되며, 배기가스를 이용하는 익스펜더를 장착하였기 때문에 효율이 높은 시스템을 구성할 수 있는 특징을 갖는다. 또한, 모터로 최대 110,000rpm의 회전속도로 구동이 된다. 다른 사례로 VAIREX사에서는 왕복형 피스톤 압축기 방식을 단일 축에 콤프레서와 익스펜더를 구현함으로써 공기공급기의 소형화와 고효율의 특징을 갖게 하였다. 연구 단체인 R&D Dynamics에서는 연료전지용 개질기에 공기를 공급하는 140,000rpm으로 구동되는 공기 블로워를 설계하였으며, 공력 손실 감소 및 회전체의 안정성을 향상시킬 수 있는 연구를 진행하고 있다.^{4,5)} 앞에서 나열한 기업과 연구 단체들이 중요시하게 여기는 주요 사항 중의 하나는 공기공급기의 내구성이다.

공기공급기의 내구성을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 친환경적 성격의 무급유 공기 포일 베어링에 대한 연구가 진행되었으며, 이는 회전수가 분당 수 만회의 고속 회전 및 소형의 공기공급기에 적합하다.^{6,7)} 또한, 앞에서 언급한 공기공급기의 전력소모량을 줄이기 위한 방안 즉, 연료 전지 시스템의 발전에 대한 패라시틱 손실(parasitic loss)을 줄이기 위하여 상기의 베어링을 적용하고자 하는 움직임이 활발하다.

본 논문에서는 상압형 고분자 연료전지용 터보 블로워의 내구성에 대하여 실험적으로 연구를 수행하였다. 세부내용으로는 터보 블로워의 정격 구동 상태에서 내구성과 안정성을 확인하고자, 공력 성능 및 베어링 상태 등의 여러 파라미터를 측정하였다. 목표 500시간 동안 구동한 결과를 검토하였으며, 공기공급기의 주요 요소인 베어링의 상태를 확인하여 보았다.

2. 사류형 터보 블로워

연료전지용 공기공급계에는 사류형 터보 블로워가 적용되었으며, 사양은 Table 2에 나타내었다. 사류형 터보 블로워는 축류형의 대유량과 원심형의 고압축비의 중간 성격의 성능을 가지고 있으며, 상압형 PEM FC에 적합하다. 설계사양으로는 터보 블로워가 정격속도 30,000 RPM으로 운전할 때, 압축비가 1.1이며, 유량이 163SCFM이다. 또한, Isentropic Efficiency 부문에서는 62% 이상으로 설계 및 제작이 되었으며, 터보 블로워와 일체형 성격의 모터는 BLDC (Brushless Direct Current) 타입으로써 2kW 급으로 설계 및 제작되었다. 그리고 연료전지 시스템에서 공기공급계가 차지하는 체적을 줄이는 추세에 맞추어 터보 블로워의 체적을 줄이고자 노력하였다.

Table 2 Design specification of mixed type air blower

Parameter	Unit	Value
Gas	-	Air
Pressure ratio (T-T)	-	1.1
Flow rate	scfm	163 (=0.0975kg/s)
Isentropic efficiency (T-T)	-	More than 62%
Rotational speed (Normal speed)	rpm	30,000
Inlet flow conditions	-	Standard atmosphere
Flange exit diameter	mm	147.32

3. 공기 포일 베어링 설계와 회전체 해석

3.1 공기 포일 베어링

포일 저널 베어링의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 베어링의 내면은 상부표면을 고체윤활 코팅한 탑 포일(top foil)과 범프 포일(bump foil)로 이루어져 높은 하중지지 능력을 얻을 수 있으며 탑 포일과 범프 포일 간의 접촉 마찰에 의해 감쇠력을 향상시킨다. 포일은 회전축과의 틈새에서 동압 공기를 형성하여 회전축을 부상시키는데 이 때 탑포일은 컴플라이언스(compliance)의 존재로 변형되는 범프 포일에 의해 지지력을 얻는다. 범프 포일이 스프링처럼 작용하여 회전축을 지지하기 때문에 그 회전축을 둘러싼 탑 포일은 일반적인 공기 베어링보다 넓은 범위에 걸쳐 극소 윤활 틈새를 유지할 수 있게 되고

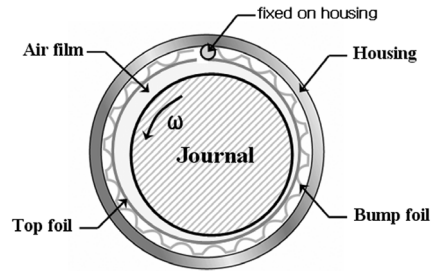


Fig. 3 Configuration of air foil bearing

이에 따라 높은 하중지지 능력과 안정성을 발휘하게 된다. 이러한 특징을 가지는 공기 포일 베어링은, 고속 회전 시 저 마찰과 저 토크의 특성으로 시스템의 효율을 극대화 할 수 있으며, 무급유 시스템의 특징으로 연료전지 시스템에 적합하다고 할 수 있다. 앞에서 언급한 포일 베어링에 대한 특징들이 많은 선행 연구들에 의해 해석 및 실험이 되었다.

Heshmat등은 포일 베어링의 정적 특성에 대한 연구를 진행하였으며,⁸⁾ Peng과 Carpino는 섭동법을 이용한 포일 베어링의 강성과 감쇠에 대한 동적 계수에 대하여 연구한 바가 있다. 그리고 탄성 과응대 이션을 고려한 포일의 굽힘 현상과 축의 오정렬, 쿨롱 마찰력에 대하여 자세하게 연구되었다.^{9,10)} 한편, 이용복 등은 포일 베어링의 감쇠를 증대시키기 위하여 점탄성(viscoelastic) 포일 베어링을 제안 및 연구를 하였으며, 2단 압축기에 적용하여 동기 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 결과를 보여주었다.^{11,12)}

터보 블로워의 로터는 범프 포일 타입으로써, 2개의 공기 포일 저널 베어링(L/D = 1.0)과 1개의 스톱 베어링으로 지지된다. 또한, 공기 포일 베어링의 설계를 위해 KIST에서 자체 개발한 베어링해석 프로그램을 사용하였으며, 해석 결과로 회전 속도에 따른 강성과 감쇠를 얻을 수 있다.

3.2 공기 포일 베어링 이론 및 해석 절차

공기 포일 베어링 해석의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 연립한 형태인 레이놀즈 방정식을 이용하였다. Fig. 4는 공기 포일 베어링에 대한 해석 절차를 나타내고 있다. 저널과 탑 포일 사이의 유막 두께는 저널의 편심과 범프의 변형에 의해서 변화되며, 레이놀즈 방정식을 유한 차분

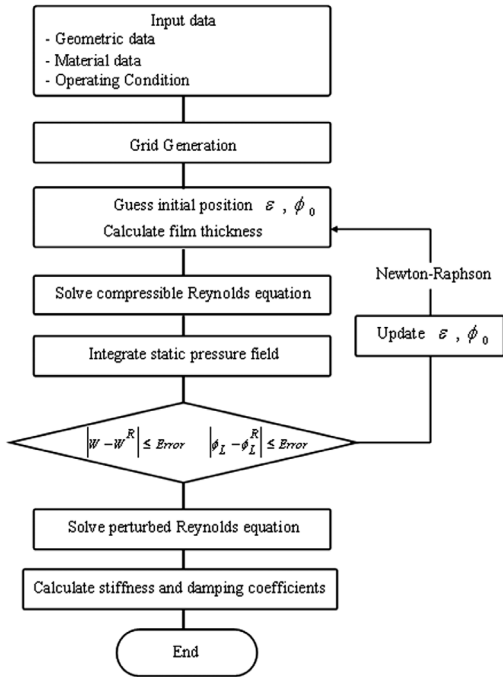


Fig. 4 Flowchart of the air foil bearing analysis

법으로 이산화한 후, 점연속 이완법(point successive relaxation method)을 이용하여 구하였다.

먼저 초기 편심률과 자세각을 가정한 후, 압력 분포를 구하였다. 구한 압력 분포를 이용하여 유막력

과 작용각을 구한 후, 이를 Newton-Raphson 법을 이용하여 정적 평형 위치 즉, 편심율과 자세각을 구하였다.

정적 평형 위치를 구한 후에 접동된 압력 분포를 구하였으며, 이를 이용하여 강성과 감쇠 계수를 계산하였다. 접동된 압력 분포는 압축성 레이놀즈 방정식에 접동 변수를 대입, 이산화한 후 점연속 이완법을 이용하여 구하였다.

3.3 회전체 해석

베어링 해석을 통해 구해진 회전 속도에 따른 강성, 감쇠의 동특성은 터보 블로워의 로터 해석을 위한 중요한 파라미터로서 작동 속도 구간에 서의 안정성 판별에 적용된다. Fig. 5는 회전체 해석을 위해 19개의 요소로 나뉘어진 터보 블로워의 로터를 보여주고 있으며, 상용 프로그램인 RAPPIDTM-RDA를 사용하였다. 좌측 베어링과 우측 베어링의 크기는 같으며, 각각 베어링에 대한 특성 값은 터보 블로워 로터의 중심 부에 위치시킨다. 터보 블로워의 로터는 위치에 따라 비균일한 특성을 갖게 되므로 분할에 의한 유한 요소법을 이용하여 회전체의 강체, 굽힘 모드를 계산하였다. 터보 블로워의 임계속도는 로터의 회전과 베어링의 특성에 의한 각 속도에서의 고유 주파수와 회전 속도가 같아질 때 발생하

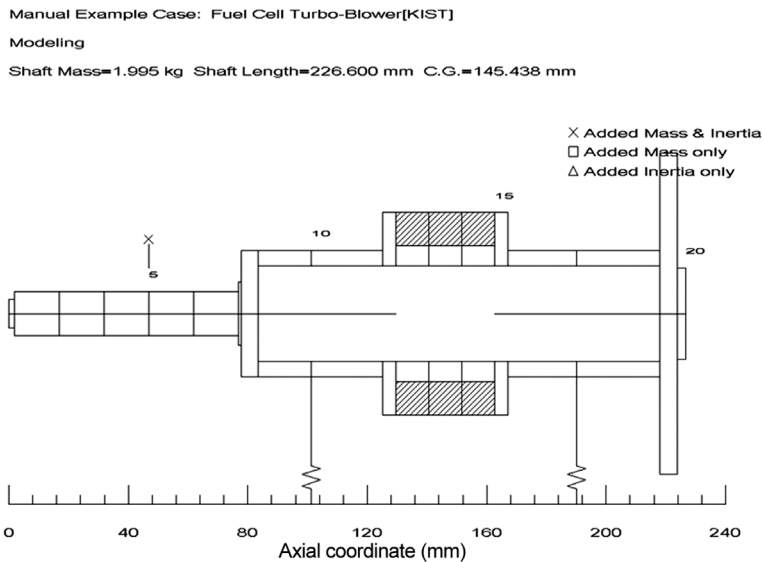


Fig. 5 FEM model of turbo blower

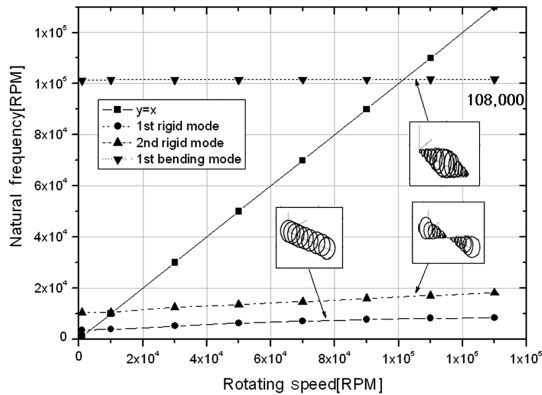


Fig. 6 Critical speed analysis of Rotor

며 로터의 진동 모양에 따라 병진모드(translatory mode), 원뿔형 모드(conical mode)의 강체모드(rigid mode) 그리고 굽힘 모드(bending mode)로 나뉜다. Fig. 6에 구해진 임계속도(critical speed)를 나타내었다. 모드에 따른 각각의 위험속도는 3,500 RPM, 10,500 RPM 그리고 108,000 RPM이며, 이러한 결과는 정격속도 30,000 rpm을 기준으로 20%~30% 마진을 고려하면 안정적인 것으로 판단할 수 있다.

4. 터보 블로워의 내구성 실험

4.1 실험 장치

터보 블로워의 내구성을 평가하기 위한 실험장치가 Fig. 7에 나타나 있으며, KS B6350(터보형 블로워 및 압축기의 시험 및 검사방법)의 시험 규격에 맞추어 실험 장치를 구성하였다.¹³⁾ 실험 장치는 터보 블로워와 대기의 공기를 유도하는 벨마우스, 공기의 이동 통로인 배관 및 유량을 조절하는 유량조절밸브, 그리고 블로워의 성능을 결정하는 파라미터를 측정하는 측정 장치로 구성되어 있다. 내구성 실험 장치와 관련된 주요 측정 장치로는 압력계와 유량계 및 온도계로 구성되었으며, 소모 전력을 측정하기 위한 전력계가 터보 블로워와 전원을 인가하는 모터 드라이버 사이에 장착되었다. 이와 같은 구성을 통하여 터보 블로워의 성능을 파악할 수 있다. 그리고 Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이, 상기의 실험 장치에서 터보 블로워의 내구성을 파악할 수 있도록 장치 내부에 정밀도가 $\pm 1K$ 인 열전대를 공기 포

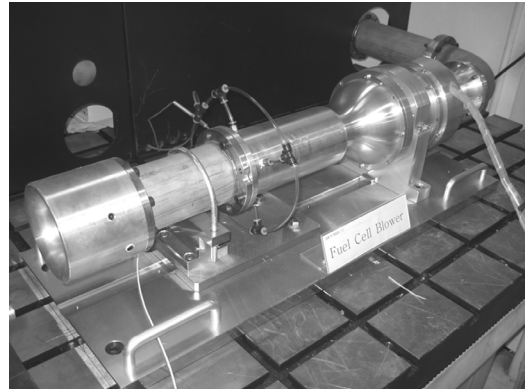


Fig. 7 Test rig for durability test of turbo blower

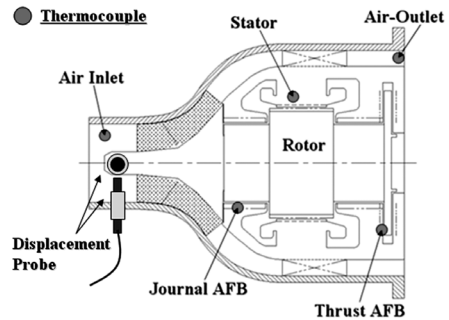


Fig. 8 Location of thermocouples and displacement probe

일 베어링, 스테이터 등의 주요 부위에 장착하여 구동 중의 온도 변화를 살펴보았다. 또한, 변위 센서를 회전체의 X-Y 두 축에 대하여 장착함으로써, 회전체의 거동을 감시하였다. 이러한 측정 장치에서 얻어진 수치들은 데이터 수집 장치를 통하여 수집되며, 모니터링 장치와 연결되어 실시간으로 부속 요소의 내구성 및 터보 블로워의 성능을 파악할 수 있다.

4.2 시험 결과 및 고찰

Fig. 9를 살펴보면 터보 블로워의 성능에 대한 결과가 나타나 있다. 압력비가 1.1일 때, 유량이 160 SCFM을 감안하면 설계 인자와 실험 결과가 매우 유사함을 살펴 볼 수 있다. 또한, 등엔트로피 효율을 살펴보면 대부분의 운전 영역에서 62% 이상을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이는 공력 설계가 잘 이루어졌음을 반영한다. Fig. 10에서는 내구성 시험 동안 정격 운전 상태에서 터보 블로워의 주요 부속에

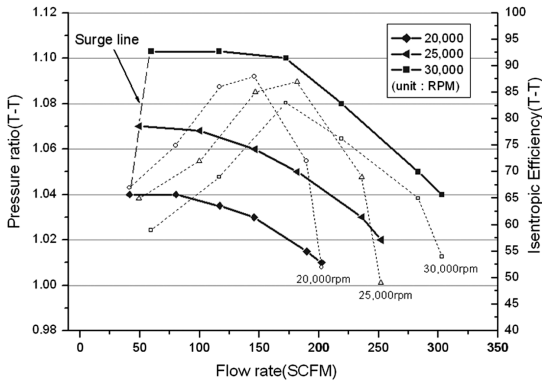


Fig. 9 Performance plot of turbo blower

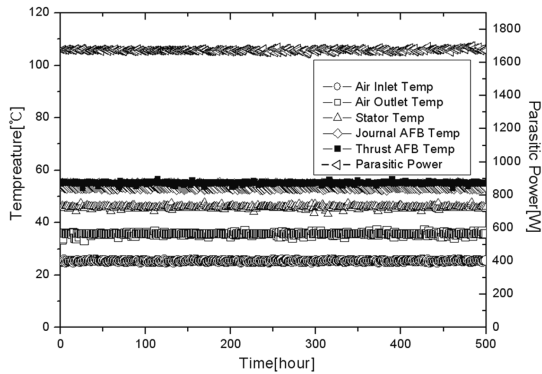
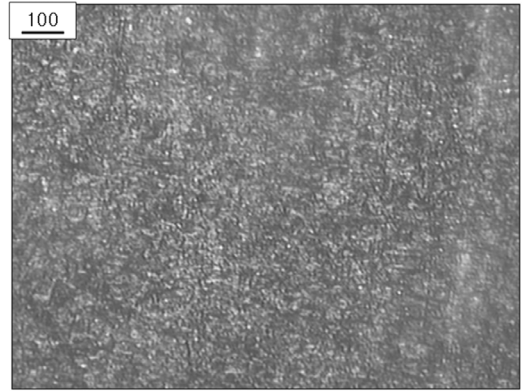


Fig. 10 Performance result of durability test of turbo blower

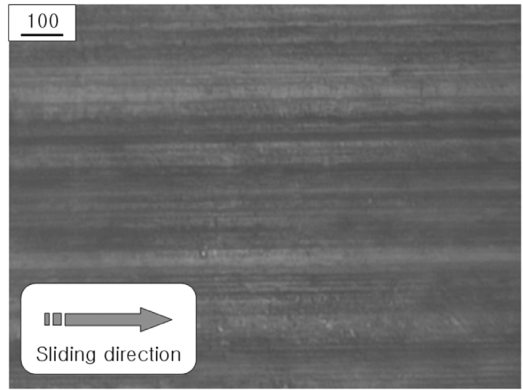
Table 3 Test result of turbo blower versus initial conditions (normal operating speed : 30,000rpm)

Parameter	Unit	Value
Performance of turbo blower		
- Before durability test	-	160SCFM@PR1.1
- After test	-	160SCFM@PR1.1
Thickness of top foil		
- Before durability test	μm	120
- After test	μm	117
Vibration of rotor		
- Before durability test	μm	below 40
- After test	μm	below 40

대한 온도와 소모 동력에 대한 결과를 나타내고 있으며, 결과에서 나타나듯이 일정한 상태로 유지됨을 볼 수 있다. 특히, 공기 포일 저널 베어링과 스트리트 베어링의 온도가 55°C 이하로 유지됨을 볼 수 있으며, 이는 고체 윤활제가 견딜 수 있는 온도가 404°C 이하임을 고려할 때, 공기 포일 베어링의 내



(a) Before durability test



(b) After 500 hours test

Fig. 11 CCD image of rubbing surface in MoS2 coated top foil (Air Foil journal Bearing)

구성을 확인할 수 있다. 이와 더불어 고체 윤활제의 마모량을 확인하였는데, Table 3에서 나타나듯이 초기 상태와 비교하여 약 3μm가 마모되었다. 회전체가 회전 시에 발생하는 초기 러빙(rubbing) 현상을 감안하면 비교적 적은 마모량이며, 이후 운전에서의 마모량은 매우 적을 것이라고 예상된다. 그리고 고체 윤활제의 마모에 대한 CCD 이미지를 Fig. 11에서 확인할 수 있는데, 저널이 회전하는 방향에 따라 단일 방향으로 무늬가 생성됨을 확인하였다. 터보 블로워가 구동함에 따른 회전체의 진동을 모니터링 하였는데, 초기 상태와 비교하여 전체 구간에서의 진동량이 40μm 이하로 동일함을 확인하였다. 이와 더불어 터보 블로워의 공력 성능을 점검하여 초기 운전 결과와 동일한 수치를 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 상압형 고분자 연료전지용 터보 블로워의 내구성에 대하여 실험적으로 연구를 수행하였다. 구체적으로 터보 블로워의 정격 구동 상태에서 내구성과 안정성을 확인하고자, 공력 성능 및 베어링 상태 등의 여러 파라미터를 측정하였다. 고분자 연료전지 자동차의 부속 장치에 대한 기본적인 요구조건으로써 500시간동안 구동한 결과를 검토하였으며, 공기공급기의 주요 요소인 베어링의 상태를 확인하여 보았다. 따라서 결론은 다음과 같이 요약하였다.

- 1) 성능 실험의 결과(약 160SCFM @PR1.1)가 설계 수치와 유사하게 도출되었으며, 내구성 실험 동안의 터보 블로워의 공력 성능과 소모 동력이 일정하게 유지되었다.
- 2) 정격 운전 속도로 500시간의 내구성 실험 기간에, 공기 포일 베어링의 온도는 55°C 이하로 유지됨을 확인하여 내구성을 확인하였다.
- 3) 500시간의 운전 경과 후, 공기 포일 베어링의 상태는 매우 양호하였으며, 고체 윤활제의 마모량은 약 3 μ m로 비교적 적었다.

후 기

본 연구는 한국 과학 기술 연구원의 기관 고유 사업 “고속 회전기의 지능형 센서 및 액추에이터 기술 개발”, 에너지 관리 공단의 에너지 자원 기술 개발 사업 “초고속 모터 시스템 개발”, 산업자원부의 표준화 기술 개발 사업 “무급유 에어포일 베어링 및 터보 블로워 시험평가 기술 표준화” 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) A. Wiartalla, S. Pischinger, W. Bornscheuer, K. Fieweger and J. Ogrz, “Compressor Expander Units for Fuel Cell Systems,” SAE 2000 World Congress, 2000.
- 2) F. Barbir, “PEM Fuel Cells-Theory and Practice,” Chapter. 9 Air Supply, pp.280-288, 2001.
- 3) S. Pischinger and O. Lang, “Handbook of Fuel Cells,” Chapter. 54 Air-supply Components, Vol. 4, pp.728-730, 1983.
- 4) T. Clark and A. John, Hydrogen Fuel Cells, and Infrastructure Technologies, 2003 DOE Progress Report, 2003.
- 5) J. Larminie and A. D. Andrew, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons, 2003.
- 6) T.-H. Kim, Y.-B. Lee, C.-H. Kim, N.-S. Lee and G.-H. Jang, “A Study on the Durability Characteristics of an Air-lubricated Bump Foil Journal Bearing,” KSTLE, Vol.18, No.2, pp. 153-159, 2002.
- 7) K.-C. Lee and T.-W. Lim, “Design of Fuel Cells as Automotive Propulsion Systems,” Transactions of KSAE, Vol.26, No.3, pp.21-25 2004.
- 8) H. Heshmat, J. A. Walowit and O. Pinkus, “Analysis of Gaslubricated Foil Journal Bearings,” ASME J. of Lubrication Technology, Vol.105, pp.647-655, 1983.
- 9) J. Peng and M. Carpino, “Calculation of Stiffness and Damping Coefficients for Elastically Supported Gas Foil Bearings,” ASME J. of Tribology, Vol.115, pp.20-27, 1993.
- 10) M. Carpino, J. Peng and L. Medvetz, “Misalignment in Complete Shell Gas Foil Journal Bearing,” STLE Tribology Transactions, Vol.37, pp.829-835, 1994.
- 11) Y.-B. Lee, T.-H. Kim, C.-H. Kim, N.-S. Lee and G. H. Jang, “Flexible Rotor Supported by Viscoelastic Foil Bearings beyond the Bending Critical Speed,” IFToMM 6th International Conference on Rotordynamics, Australia, Proceedings 2002, Vol.2, pp.994-951, 2002.
- 12) Y. B. Lee, T. H. Kim, C. H. Kim and N. S. Lee, “Suppression of Subsynchronous Vibrations due to Aerodynamic Response to Surge in a Two-stage Centrifugal Compressor with Air Foil Bearing,” STLE Tribology Transactions, Vol.47, pp.428-434, 2003.
- 13) KS B 6350, Testing Methods for Turbo-blowers and Compressor, Korean Standards Association, 1996.