

80kW급 고분자 전해질 연료전지의 공기공급계(터보 블로워) 개발

이 희섭¹⁾, 김 창호²⁾, 이 용복³⁾

Development of air supply system(Turbo blower) for 80kW PEM fuel cell

Heesub Lee, Changho Kim, Yongbok Lee

Key words : Blower(송풍기), PEM FC(Proton exchange membrane fuel cell:고분자 전해질형 연료전지), Air foil bearing(공기 포일 베어링)

Abstract : Blower as an air supply system is one of the most important BOP (Balance of Plant) system for FCV (Fuel Cell Vehicle). For generating and blowing compressed air, the motor of air blower consumes maximum 25% of net power and fuel cell demands a clean air. Considering the efficiency of whole FCV, low friction lubrication of high speed rotor is needed. For the purpose of reducing electrical power and supplying clean air to Fuel cell, oil-free air foil bearings are applied at the each side of brushless motor (BLDC) as journal bearings which diameter is 50mm. The normal power of driving motor has 1.7 kW with the 30,000 rpm operating range and the flow rate of air has maximum 160 SCFM. The impeller of blower was adopted a mixed type of centrifugal and axial which has several advantages for variable operating condition. The performance of turbo-blower and parameters of air foil bearings was investigated analytically and experimentally. From this study, the performance of the blower was confirmed to be suitable for 80kw PEM FC.

1. 서 론

송풍기(블로워) 및 압축기와 같은 공기공급기는 연료전지의 BOP(Balance of Plant)를 구성하는 중요한 장치 중에 하나이다. PEM FC에서는 내연기관과 같이 피스톤의 행정 운동에 의해 공기를 흡입하는 기능이 없기 때문에 스택(stack)의 공기극(cathode)에 공기를 강제로 공급하는 장치가 필요하다. 이렇게 공기극에 공급된 공기와 연료극(anode)에 공급된 수소가 반응하여 전기를 발생하게 된다. 공기공급기의 전력 소모량이 PEM FC의 전체 발전에 대하여 5% ~ 25%를 차지하는 것을 비추어 볼 때, PEM FC의 공기공급기에 대한 연구가 시스템의 전체효율과 연계되어야 한다.⁽¹⁾

공기공급기의 전력소모량을 줄이는 방안 즉, PEM FC의 발전에 대한 Parasitic loss를 줄이기 위하여 여러 연구가 진행되고 있다. 이러한 방안 중의 하나가 베어링에 관한 연구이다. 회전체의 회전에 따른 하중을 지지하기 위해 베어링의 요소가 절대적으로 필요한데, 주로 하중 지지력이 큰 구름 베어링이나 미끄럼 베어링을 사용한다. 하지만 구름 베어링의 경우 윤활유 중의 이물질에 의

하여 스택(stack)의 공기극(cathode)에 오염을 발생 시킴으로써 연료전지의 성능저하 및 수명의 단축을 야기하며, 미끄럼 베어링의 경우 감쇠력(damping)은 크지만 윤활유의 점성에 의한 기계적 손실이 크다는 문제점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 시스템에 대한 Parasitic loss를 줄이기 위하여, 윤활 시스템을 별도로 필요로 하지 않고 마찰 손실이 적은 공기 베어링을 공기공급기에 적용하고자 하는 노력이 꾸준히 연구되어지고 있다.

Fig.1은 가압형 PEM FC에 적용된 공기공급계의 구성도를 보여주고 있으며, Fig.2는 상압형 PEM FC의 공기공급계에 대한 구성도를 보여주고 있다. PEM FC에 적합한 공기공급기를 선정할 때는 요구되는 유량과 압축비, 작동온도 등을 고려

-
- 1) 한국과학기술연구원
E-mail :metalstoner@kist.re.kr
 - 2) 한국과학기술연구원
E-mail :kimch@kist.re.kr
 - 3) 한국과학기술연구원
E-mail :lyb@kist.re.kr

해야 하며, 공급되는 공기의 청정성과 운전시의 효율 등을 살펴봐야 한다. 이와 더불어 작동 소음과 무게, 비용 등을 고려해야 하며 장치의 내구성(>6,000시간)을 따져야 한다. 앞에서 언급한 사항들을 고려한 송풍기와 압축기에 관한 연구들이 많은 연구 단체와 기업에서 진행되고 있다.^(2,3)

하니웰에서는 50kW급 PEM FC용으로써 회전체가 공기 베어링에 의해 지지되며, 모터에 의해 구동되는 콤프레서/익스펜더(compressor/expander)가 개발되었다. 이러한 공기공급기는 스택에서 배출된 공기가 익스펜더(expander)를 구동하여 시스템의 효율을 향상시키는 장점이 있으며, 회전체의 회전 속도가 110,000rpm의 특징을 가진다.

R&D Dynamics에서는 PEM FC의 개질기에 공기를 공급하는 송풍기를 설계하였으며, 특징으로는 공기 베어링으로 지지되며 회전체의 최대속도가 140,000rpm으로 구동된다. 이러한 고속의 회전체는 발열과 소음, 공력 손실을 발생시키기 때문에, 이러한 문제점을 해결하는 것이 관건이다.

위의 공기공급기들과는 다르게 PADT(Phoenix Analysis and Design Technologies)에서는 볼 베어링이 적용된 사류형 송풍기를 개발하였다. 회전체가 30,000rpm으로 BLDC 모터에 의해 구동되며, 저압축비와 대유량의 특징을 가진다. 이러한 송풍기는 볼 베어링의 운전속도와 수명의 한계를 통하여 내구성에 직접적인 영향을 미친다. 물론, 일반적인 공기 베어링은 PEM FC에 적용하기에는 강성과 하중지지력이 충분하지 않다는 단점을 가지고 있지만, 앞으로는 충분한 강성과 하중지지력을 가질 스마트 베어링으로서의 공기 베어링이 PEM FC용 공기공급기에 적용될 것이다.^(4,5)

본 연구에서는 80kW급 상압형 PEM FC의 공기공급기에 대한 조건을 만족시키기 위하여 공기공급계(터보 블로워)를 개발한 사항이다. 공기공급기에는 원심형과 축류형의 중간 형태인 사류형

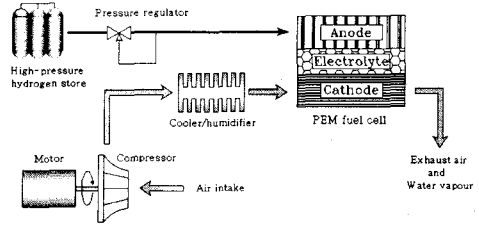


Fig. 2 BLDC Motor driven air blower and PEM Fuel cell

의 터보 블로워를 적용하여 운전 성능의 향상을 도모하였으며, 고속 운전을 위한 회전체의 안정성 해석과 설계 및 제작을 하였다. 특히, 모터에 의해 구동되는 회전체를 공기 베어링으로 지지하여 시스템의 발전에 대한 전력소모를 줄이고자 하였다. 또한, 실제 성능 시험을 통하여 80kW급 상압형 PEM FC에 대한 적합성을 확인하였다.

2. 사류형 터보 블로워

연료전지용 공기공급계에는 사류형 터보 블로워가 적용되었으며, 사양은 Table 1에 나타내었다. 사류형 터보 블로워는 축류형의 대유량과 원심형의 고압축비의 중간 성격의 성능을 가지고 있으며, 상압형 PEM FC에 적합하다. 사류형 터보 블로워의 외형을 Picture. 1에 나타내었으며, 유동을 발생시키는 임펠러(Impeller)와 흡입된 유동의 압력을 상승시키는 베인리스 디퓨저(Vaneless Diffuser), 와류를 억제하여 손실을 저감시켜주는 디스윙러(Deswirl)로 구성되어있다. 설계사양으로는 터보 블로워가 정격속도 30,000 RPM으로 운전할 때, 압축비가 1.1이며, 유량이 163 SCFM이다. 또한, Isentropic Efficiency 부문에서는 62% 이상으로 설계 및 제작이 되었으며, 터보 블로워와 일체형 성격의 모터는 BLDC (Brushless Direct

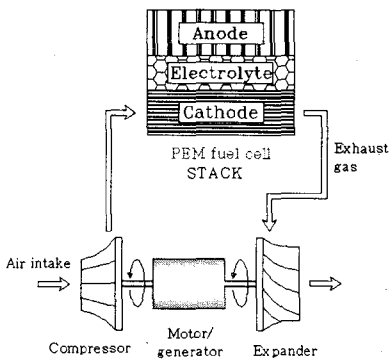
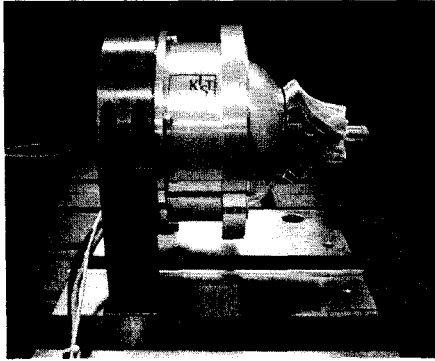


Fig. 1 Turbo-Expander of PEM Fuel cell system

Table 1 Design specification of Mixed Type Turbo Blower

| Parameter | Unit | Value |
|-----------------------------|------|---------------------|
| Gas | - | Air |
| Pressure Ratio (T-T) | - | 1.1 |
| Flow Rate | SCFM | 163 |
| Isentropic Efficiency (T-T) | - | More than 62% |
| Inlet flow conditions | - | Standard atmosphere |
| Rotational Speed | rpm | 30,000 |
| Inlet flow conditions | - | Standard |
| Flange exit diameter | mm | 147.32 |
| Motor power | kW | 2 |



Picture. 1 Mixed type turbo blower

Current)타입으로써 2kW급으로 설계 및 제작되었다. 그리고 연료전지 시스템에서 공기공급계가 차지하는 체적을 줄이는 추세에 맞추어 터보 블로워의 체적을 줄이고자 노력하였다.

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 이에 따라 높은 하중지지 능력과 안정성을 발휘하게 된다. 이러한 특징을 가지는 공기 포일 베어링은, 고속 회전 시 저 마찰과 저 토크의 특성으로 시스템의 효율을

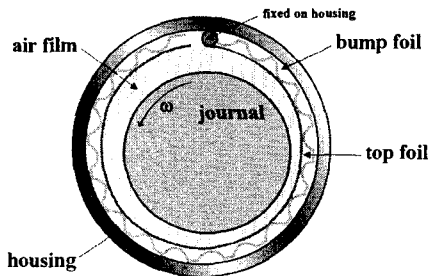


Fig. 3 An air-lubricated bump foil bearings

Table 2 Specification of air foil bearing for Turbo Blower

| Parameter | Unit | Value |
|-----------------------|------|--------|
| Radius of shaft | mm | 20.00 |
| Radius of sleeve | mm | 20.70 |
| Thickness of top foil | mm | 0.12 |
| Coating of top foil | - | MoS2 |
| Thick of bump foil | mm | 0.10 |
| Height of bump foil | mm | 0.52 |
| Width of foils | mm | 40.00 |
| Material of foils | - | SUS301 |

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⁽⁶⁾, Peng과 Carpino는 섭동법을 이용한 포일 베어링의 강성과 감쇠에 대한 동적 계수에 대하여 연구한 바가 있다. 그리고 탄성 파운데이션을 고려한 포일의 굽힘 현상과 축의 오정렬, 쿨롱 마찰력에 대하여 자세하게 연구되었다.^(7,8) 한편, 이용복 등은 포일 베어링의 감쇠를 증대시키기 위하여 점탄성(viscoelastic) 포일 베어링을 제안 및 연구를 하였으며, 이단 압축기에 적용하여 동기 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 결과를 보여주었다.^(9,10)

터보 블로워의 로터는 범프 포일 타입의 2개의 공기 포일 저널 베어링과 1개의 슬러스트 베어링으로 지지되며, 베어링의 설계 사양은 Table 2에 나타내었다. 또한, 공기 포일 베어링의 설계를 위해 KIST에서 자체 개발한 베어링 해석 프로그램 (SPAB)을 사용하였으며, 해석 결과로 회전 속도에 따른 강성과 감쇠를 얻을 수 있다.

3.2 회전체 해석

베어링 해석을 통해 구해진 회전 속도에 따른 강성, 감쇠의 동특성은 터보 블로워의 로터 해석을 위한 중요한 파라미터로서 작동 속도 구간에

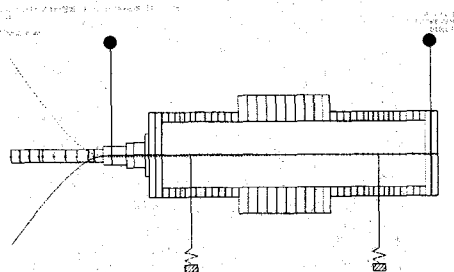


Fig. 4 FEM model and bending mode of Rotor

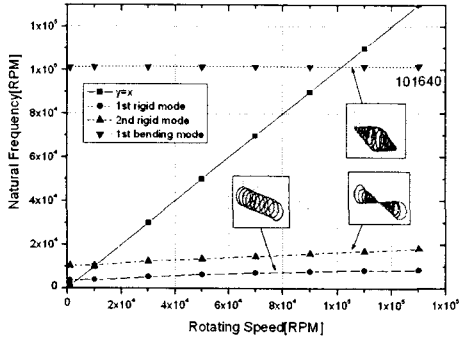


Fig. 5 Critical speed analysis of Rotor

서의 안정성 판별에 적용된다. Fig.4는 회전체 해석을 위해 58개의 요소로 나뉘어진 터보 블로워의 로터를 보여주고 있다. 좌측 베어링(L/D=1)과 우측 베어링(L/D=1)의 크기는 같으며, 각각 베어링에 대한 특성 값은 터보 블로워 로터의 중심부에 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 발생하며 로터의 진동 모양에 따라 병진모드(translatory mode), 원뿔형 모드(conical mode)의 강체모드(rigid mode) 그리고 굽힘 모드(bending mode)로 나뉜다. Fig.5에 구해진 임계속도(critical speed)를 나타내었다. 모드에 따른 각각의 위험속도는 3,500 RPM, 10,500 RPM 그리고 101,640 RPM이며, 정격속도 30,000 RPM에서 안정적인 것으로 판단할 수 있다.

4. 터보 블로워의 성능 시험

4.1 시험 장치

터보 블로워의 성능을 평가하기 위한 시험

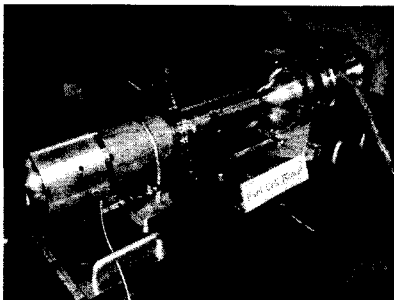


Figure. 2 Test rig for performance test of Turbo Blower

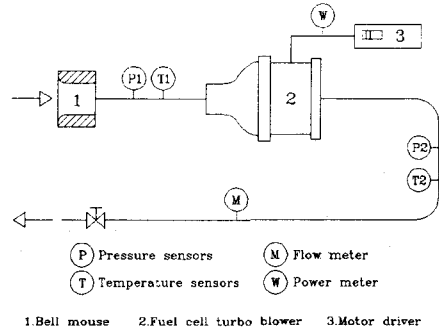


Fig. 6 Diagram for performance test of Turbo Blower

장치가 Picture. 2에 나타나 있으며, KS B6350(터보형 블로워 및 압축기의 시험 및 검사방법)의 시험 규격에 맞추어 시험 장치를 구성하였다.⁽¹¹⁾ 시험 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. 성능 시험 장치와 관련된 주요 측정 장치로는 압력계와 유량계 및 온도계로 구성되었으며, 소모 전력을 측정하기 위한 전력계가 터보 블로워와 전원을 인가하는 모터 드라이버 사이에 장착되었다. 이와 관련된 장치 구성도는 Fig.6에 나타나 있다. 이러한 측정 장치에서 얻어진 수치들은 데이터 수집 장치를 통하여 수집되며, 모니터링 장치와 연결되어 실시간으로 성능을 파악할 수 있다.

4.2 시험 결과 및 고찰

Fig.7은 터보 블로워의 성능을 나타내는 선도로써 회전체가 20,000 RPM, 25,000 RPM 그리고 30,000 RPM 에서의 유량 대 압축비(실선)를 나타내며, 각각의 회전 구간에서 등엔트로피 효율(점선)을 나타내었다. 선도의 변화는 유량조절밸브에 의해 좌우되며, 이러한 선도는 터보 블로워의

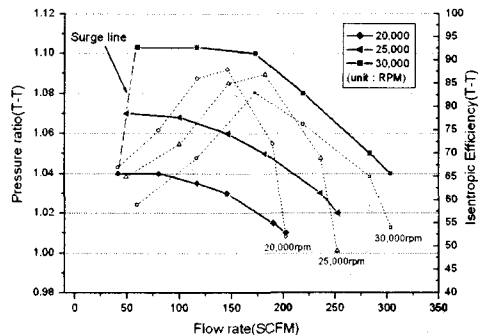


Fig. 7 Performance plot of Turbo Blower

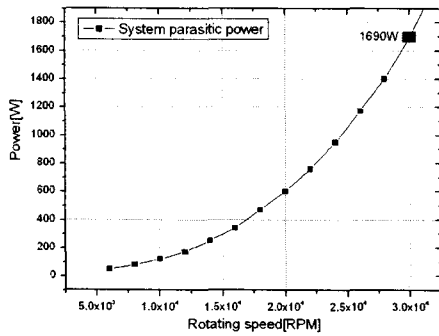


Fig. 8 System parasitic power of Turbo Blower

특성을 나타낸다. 성능 곡선은 대체적으로 유량이 감소함에 따라 압력이 상승하다가 일정하게 유지함을 볼 수 있으며, 반대로 압력이 강하되면서 유량이 많아짐을 볼 수 있다. 정격 운전 속도인 30,000 RPM에서 설계 사양으로의 압력비가 1.1일 때, 약 160 SCFM의 유량이 토출되는 결과를 확인하였다. 이러한 결과를 초기 설계 사양과 비교해 볼 때, PEM FC용 터보 블로워가 비교적 정확하게 설계 및 제작이 되었다는 것을 알 수 있다. 좌측의 서지(surge)라인은 주어진 유량 조건에서 너무 높은 압축비 영역으로 이동될 때, 발생하여 터보 블로워의 불안정성과 소음을 야기한다. 또한, 등엔트로피 효율은 정격 운전 속도인 30,000 RPM에서 압력비가 1.1이며 유량이 160 SCFM일 때, 80% 이상의 수치를 확인하였다. 또한, 터보 블로워에 대해 운전 전영역의 대부분이 등엔트로피 효율 부문에서 설계 사양의 62% 이상에 대하여 만족함을 확인하였다.

Fig.8에서는 터보 블로워의 회전 속도별 전력 소모량을 나타내었다. 정격 운전 속도 30,000 RPM에서 1690W의 전력 소모를 확인하였으며, 이러한 결과는 80kW급의 상압형 PEM FC가 발전하는 전력 중에 2.1%의 시스템 패라시틱 파워(system parasitic power)로써, 기존의 연료전지용 공기공급계에 대한 연구 및 개발과 비교해 볼 때, 우수한 성능임을 알 수 있다. 이와 같은 사항은 공기 포일 베어링을 적용함으로써, 구동 시에 저마찰과 저 토크의 효과와 블로워의 공력학적인 설계가 잘 이루어 졌음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 공기 포일 베어링으로 지지되는 80kW급 PEM FC용 터보 블로워 개발을 필두로 하여, 사류형 터보 블로워의 적용 및 회전체 설계와 베어링 해석, 그리고 제작된 터보 블로워의 성능 시험 및 결과에 대하여 서술하였다. 먼저

축류형과 원심형의 중간 형태인 사류형의 터보 블로워를 채택함으로써 성능을 가변적으로 조절하고자 하였으며, 범프 타입의 공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 블로워의 회전체를 설계하기 위하여 베어링 해석 프로그램과 유한 요소법을 이용하여 해석하였다. 설계 및 해석 결과를 이용하여 터보 블로워를 제작한 후, 80kW급 PEM FC의 초기 설계요구사항에 대해 검토하기 위하여 그 성능을 입증할 수 있는 압력비와 유량을 측정하였으며, 터보 블로워의 등엔트로피 효율과 전력 소모량을 확인하였다. 내용으로는 정격속도 30,000 RPM일 때, 압력비 1.1, 유량은 약 160 SCFM이며, 등엔트로피 효율은 80% 이상이었다. 또한, 패라시틱 손실(parasitic loss)이 시스템 발전의 전체 대비 2.1%로써 시스템 효율을 증대시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이후 연구로는 터보 블로워의 신뢰성 평가를 위하여 내구성 실험을 진행할 것이다.

후기

본 연구는 한국 과학 기술 연구원 기관 고위 사업 "지능형 트리보 센서/액추에이터 기술 개발" 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] A. Wiertalla, S. Pischinger, W. Bornscheuer, K. Fieweger and J. Ogrz. "Compressor Expander Units for Fuel Cell Systems," SAE 2000 World Congress, 2000.
- [2] S. Pischinger and O. Lang, "Handbook of Fuel Cells" - Chapter. 54 Air-supply components, 1983, Vol. 4, pp. 728-730.
- [3] F. Barbir, "PEM Fuel Cells - Theory and Practice," Elsevier.
- [4] T. Clark and A. John, "Hydrogen Fuel Cells, and Infrastructure Technologies," 2003 DOE Progress Report
- [5] J. Larminie and A. D. Andrew, "Fuel Cell Systems Explained," John Wiley & Sons.
- [6] Heshmat, H., Walowitz, J. A., and Pinkus, O., "Analysis of Gas-L lubricated Foil Journal Bearings," ASME Journal of lubrication Technology, 1983, Vol. 105, pp. 647-655.
- [7] Peng, J., and Carpino, M., "Calculation of Stiffness and Damping Coefficients for Elastically Supported Gas Foil Bearings," ASME Journal of Tribology, 1993, Vol. 115, pp. 20-27.

- [8] Carpino, M., Peng, J., and Medvetz, L., "Misalignment in a Complete Shell Gas Foil Journal Bearing," STLE Tribology Transactions, 1994, Vol. 37, pp. 829-835.
- [9] Lee, Yong-Bok Lee, Kim, Tae-Ho Kim, Kim, Chang-Ho Kim, Lee, Nam-Soo Lee, and Jang, Gun-Hee J, "Flexible Rotor Supported by Viscoelastic Foil Bearings beyond the Bending Critical Speed," IFToMM 6th International Conference on Rotor Dynamics, Australia, Proceedings-: 2002, Volume. 2, pp. 994-951.
- [10] Lee, Y. B. Lee, Kim, T. H. Kim, Kim, C. H. Kim, and Lee, N. S. Le, "Suppression of Subsynchronous Vibrations due to an Aerodynamic Response to Surges in a Two-stage Centrifugal Compressor with an Air Foil Bearing," 2003, Vol. 47 STLE Tribology Transactions, pp.428-434.
- [11] KS B 6350, "터보형 블로워 및 압축기의 시험 및 검사방법,"1978.12.29.