

300마력 Oil-Free 고속 터보 블로워 개발

김경수* · 윤주식* · 박기철* · 김승우*

1. 서 론

공기 또는 가스를 압축하여 공급하는 산업용 유체 기계는 압축비에 따라서 크게 팬(Fan, 압축비 1.1 이하), 블로워(Blower, 압축비 1.1 ~ 2.0), 그리고 압축기(Compressor, 압축비 2.0 이상)로 구분될 수 있으며, 유체를 압축하는 압축부와 이를 구동하는 전동기로 구성되어 있다. 이 중에서 블로워는 하폐수 처리장의 포기조, 화학 및 시멘트 산업의 분체 원료 이송, 발전소 탈황설비 및 냉각장치, 반도체/LCD 제조 공정 및 이송라인 등에 광범위하게 사용되는 공정용 유체기계이다.

블로워는 작동방식에 따라서 용적형과 회전형으로 대별할 수 있는데, 전통적으로 오랫동안 사용되어 온 형식은 구조가 간단하고 제작이 쉬운 용적형 블로워이며, 미국의 대표적인 제조업체의 이름을 따라 일반적으로 루츠 블로워라고 불리 운다(그림1. 참조). 그러나, 상시 운전이 필수적인 공정용 유체기계의 운전특성 측면에서 볼 때, 루츠 블로워는 낮은 에너지 효율과 잦은 유지보수, 그리고 소음 및 진동 등의 환경 문제를 갖고 있기 때문에, 기술적인 난이도가 높지만 에너지 효율이 상대적으로 높은 회전형 블로워가 등장하게 되었고, 대표적인 예로 원심압축기를 사용하는 터보 블로워이다. 초기에 개발된 터보 블로워는 그림2에서 볼 수 있듯이 단단 원심압축기를 유도전동기 및 기어박스를 이용하여 구동하는 방식이 주를 이루었으며, 국내에서도 이에 대한 표준화 작업이 진행되기도 하였다.⁽¹⁾

고속모터, VFD(Variable Frequency Drive) 및 비접촉식 베어링 등의 고속회전체 관련 기술이 발전하면서, 효율의 극대화 뿐만 아니라 소형화 및 친환경성이 가미된 첨단 터보 블로워 제품이 국내업체를 중심으로 활발하게 개발되어 세계에서 처음으로 제품 상용화에 성공하였다.⁽²⁻⁴⁾ 그림 3에는 (주)뉴로스에서 생산 판매

하고 있는 공기 베어링을 적용한 고속 터보 블로워 제품의 형상을 나타내었다. 이러한 성과는 첨단 정밀 산업기계 분야에서 선진국의 자기 베어링 형식의 터보 블로워와 국제적으로 경쟁할 수 있는 기술적 기반을 마련하는 계기가 되었으며, 이를 바탕으로 최근에는 300마력급의 대형 Oil-Free 터보 블로워 상품화 개발이 완료되어 관련 분야에서 세계 시장을 선도하기에 이르렀다.⁽⁵⁾ 그리고, 미래형 에너지원이라 할 수 있는 연료전지에 사용될 소형 터보 블로워 시제품 개발과 같은 선행기술 개발에도 적극적으로 참여하고 있다.⁽⁶⁾

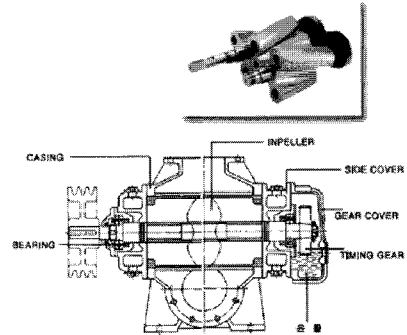


그림 1. 루츠 블로워 구조

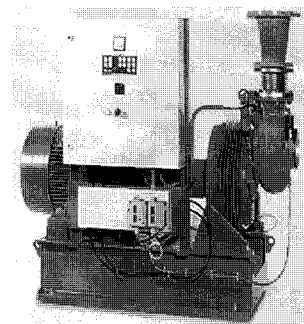


그림 2. 기어증속형 터보 블로워

* (주) 뉴로스, 터보에너지 연구소
E-mail : mcpie@neuros.co.kr

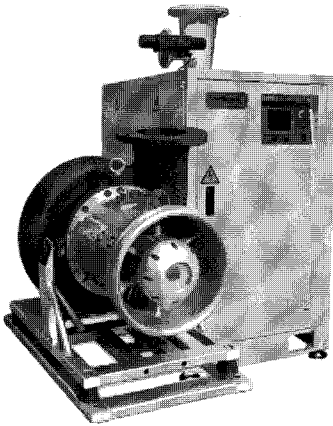


그림 3. 공기베어링 형식의 고속 터보 블로워

본 논문에서는 전 세계적으로 공기베어링을 적용하여 개발된 터보기기 중에서 가장 대형이라고 할 수 있는 300마력급 Oil-Free 고속 터보 블로워에 대한 설계 및 시험평가 결과에 대해서 간단하게 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 공력 설계

개발된 터보 블로워는 그림 4와 같이 300마력 출력의 고속모터를 사용하여 단단 원심 압축기를 직결형으로 구동하는 방식이며, 압축비 1.6에서 213 m³/min 이상의 공기를 공급할 수 있도록 설계되었다.

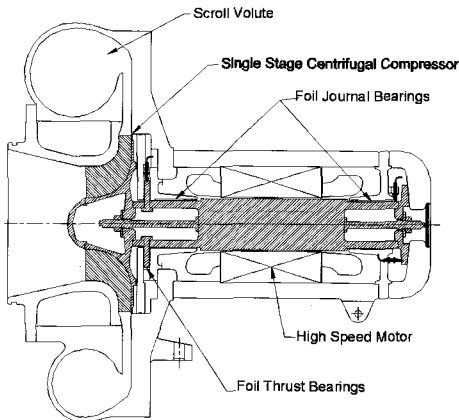


그림 4. 터보 블로워 Layout

터보블로워에 적용되는 원심 압축기의 효율 수준을 결정하는 인자는 비속으로 그 정의는 다음과 같다.

$$\omega_s = \frac{\omega \sqrt{Q_v}}{\Delta h_i^{0.75}} \quad (1)$$

여기서 ω_s 는 비속, ω 는 회전속도(rad/s), Q_v 는 흡입 체적유량(m³/s), h_i 는 Isentropic Enthalpy Rise(J/kg)이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 적정 비속의 Back swept 임펠러를 적용할 경우 원심 압축기는 대략 86 ~ 87% 수준의 높은 Polytropic Efficiency를 낼 수 있으며 상대적으로 설계 의존도보다는 비속의존도가 더 높은 것이 특징이다. 터보 블로워는 공정용이기 때문에 연속운전 개념을 적용하여 설계를 하여야 하는데, 이때 설계속도의 95% 부근에서 최고의 효율을 가질 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 따라서, 설계속도를 최적의 비속 보다 다소 높게 설정하는 것이 운전측면에서는 더 유리하다고 볼 수 있으며, 이 개념을 적용하여 회전속도를 17,000 rpm으로 설정하였다.

Chart 5.3 Centrifugal compressor: polytropic efficiency versus specific speed.

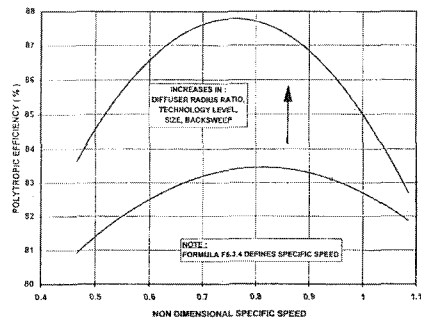


그림 5. 원심 압축기의 비속 대비 효율 특성

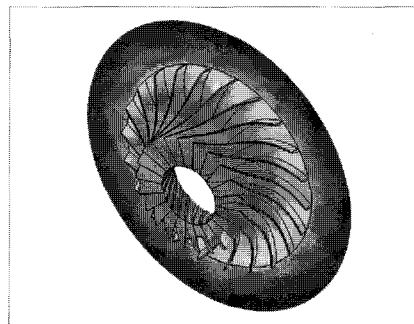


그림 6. 임펠러 주변의 정압 분포 해석 결과

이와 더불어 넓은 운전영역 확보하기 위하여 Vaneless Diffuser를 적용하였고, 압력손실 최소화를 위하여 3차원 형상의 Scroll Volute를 채택하였다. 그림 6은 임펠러 주변의 압력분포를 보여주고 있다.

2.2 모터 설계

공력설계 측면에서 최고의 효율을 가질 수 있도록 회전속도 및 압축기 형상이 결정이 되면, 이를 구동할 수 있는 구동부 설계가 필요하다. 17,000 rpm으로 압축기를 회전시키는 방법은 저속 모터에 기어박스를 사용하는 방식과 고속 모터로 직결하는 방식이 있는데, 효율 및 크기 면에서 고속 모터가 더 유리하다. 본 블로워 개발에는 전기적인 효율특성이 가장 좋은 것으로 평가받고 있는 영구자석형 동기모터(PMSM, Permanent Magnet Synchronous Motor)를 적용하였다. 그 구조 및 특성은 그림 6과 <표 1>에 나타내었다.

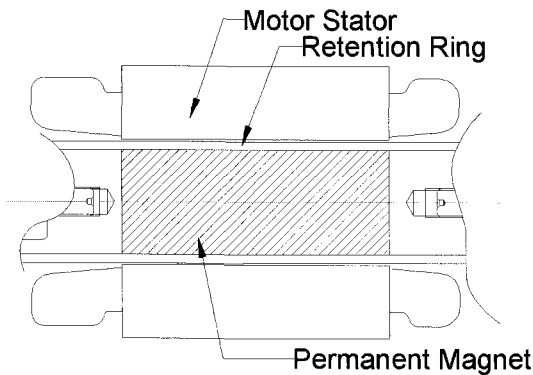


그림 6. 모터의 구조

표 1 모터 특성

Type	PMSM
Output Power (kW)	224
Phases	3
Insulation Class	H
Design Speed (rpm)	17,000
Torque (Nm)	124.7
Power Factor (%)	94.1
Efficiency (%)	95.5
Cooling	Water & Air
Length (mm)	196
Diameter (mm)	226

모터의 속도제어는 사다리꼴 형태의 전류파형을 사용하는 BLDC 모터와는 달리 완벽한 사인형태의 전류파형을 사용하는 PWM 방식의 Sensorless algorithm을 적용하였고, 모터의 발열을 최소화하기 위하여 전기필터를 장착하였다.

2.3 구조/진동 설계

압축기와 모터에 대한 기본설계가 완료 되면, 이를 바탕으로 그림 4와 같은 Layout 설계를 진행하게 된다. 터보기기는 최적의 효율을 유지하기 위해서 용량이 증가할수록 회전속도를 감소시켜야 하는 특징을 가지고 있다. 결과적으로, 기계가 대형화될수록 로터의 중량도 함께 증가하게 되고, 베어링으로 전달되는 하중도 커지게 된다. 따라서, 터보 블로워의 안정적인 운전을 가능하게 하기 위해서는 로터의 중량을 최소화하면서도 구조 및 진동 안정성을 고려하여 최종적인 형상과 구성품 배치를 결정하게 된다.

고속으로 회전하는 임펠러는 매우 높은 회전에너지를 갖고 있기 때문에, 파손이 발생하는 경우에는 큰 사고로 이어질 가능성이 있다. 따라서, 구조적으로 충분한 안전성이 확보될 수 있도록 설계를 하고, 또 스펀시함을 통하여 이를 검증하여야 한다. 먼저, 임펠러는 무게 감량을 위해서 임펠러 디스크에서 필요 없는 부분을 제거하는 형상 최적화 설계과정을 통하여 최종 형상이 결정된다. 그림 7은 설계속도로 회전할 때의 응력분포를 보이고 있다. 이때에는 최대 응력을 소재의 강도와 비교하여 구조적 안정성을 확인하게 되는데, <표 2>에 나타난 바와 같이 임펠러는 120% over speed 조건인 20,400rpm에서 Von Mises 등가 응력을 기준으로 안전 계수가 1.79로 설계되었으므로, 충분한 구조적 안전성을 갖고 있다고 할 수 있다.

응력설계가 완료가 되면, 로터와 베어링의 회전진동 특성인 위험속도(Critical speed) 해석을 수행하여 운전 범위 근처에서 공진 현상이 발생할 가능성이 있는 지 여부를 확인한다. <표 3>은 공기 베어링의 특성을 고

표 2 디스크 응력 안전계수

속도(rpm)	Radial Stress	Hoop Stress	Von Mises Stress
17,000	2.11	2.96	2.10
20,400	1.53	2.23	1.79

표 3 위험속도 계산 결과

1 st	2 nd	3 rd
3,300 ~ 5,200 rpm	5,300 ~ 8,300 rpm	76,600 ~ 77,000 rpm

* Bearing Stiffness $k = 0.1e7 \sim 0.3e7$ N/m

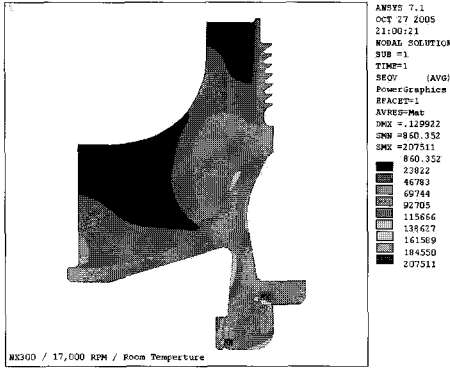


그림 7. 임펠러 응력 분포

려하여 수행한 위험속도 계산결과를 보이고 있는데, 터보 블로워의 운전속도 근처에는 공진 가능성이 없음을 알 수 있다. 이러한 과정을 통하여 최종적으로 확정된 로터의 전체 중량은 26kg인데, 이는 현재까지 전세계적으로 알려진 공기 베어링을 장착한 터보기기 중에서 최대의 중량을 가지는 것이다.(그림 8 참조)

2.4 베어링 설계

로터 조립체는 범프형의 공기 베어링으로 지지되는데, 2개의 저널 베어링과 2개의 추력 베어링으로 구성되어 있다. 그림 9는 추력 베어링과 전방 저널 베어링이 조립되어 있는 모습을 보이고 있으며, 그림 10에는 하중지지력과 발열량을 각 회전속도 별로 나타내

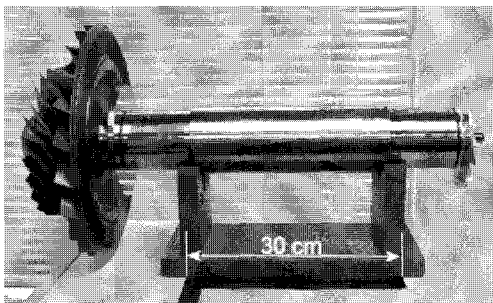


그림 8. 로터 조립체

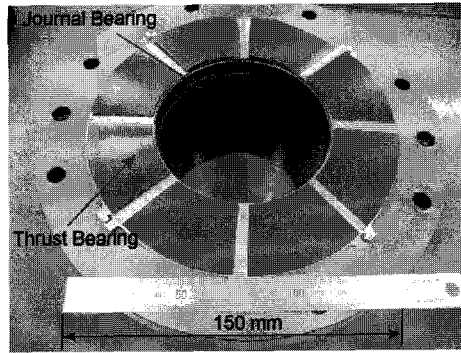
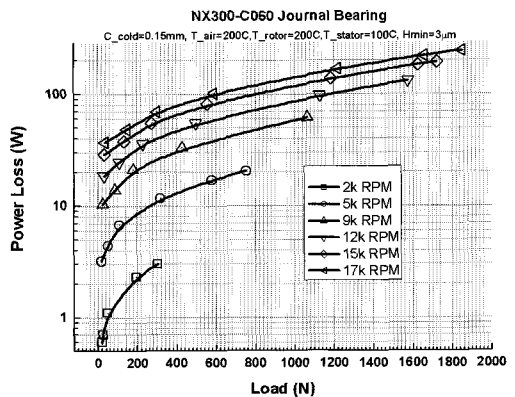
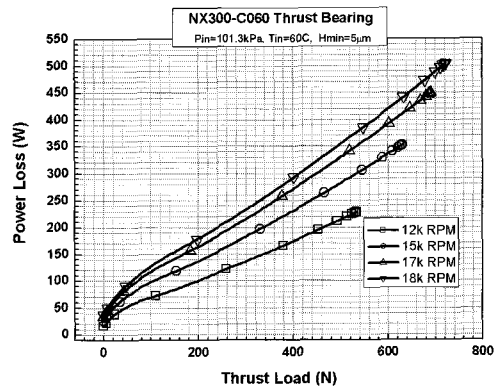


그림 9. 범프형 공기 베어링



(a) Journal bearing



(b) Thrust bearing

그림 10. 공기 베어링 성능

었다. 터보 블로워 설계 회전속도에서 저널베어링은 1900N, 추력베어링은 700N의 하중 지지력을 갖도록 설계되었으며, 베어링의 총 발열량은 1kW 미만이다.

2.5 성능 평가

유체기계의 성능평가 방법은 ISO, ASME, KS 등의 표준규격에 상세하게 명시가 되어 있으며, 성능 확인에 필요한 측정 항목은 흡입 공기의 온도와 압력, 토출 공기의 온도와 압력, 그리고 흡입 풍량과 소모 동력이다. 이 중에서도 흡입 풍량 측정이 매우 중요한데, 여기에서는 ASME PTC-10 규격을 따른다. 터보 블로워의 에너지 효율은 아래의 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기에서 소모 동력 W_m 의 기준은 VFD의 입력 동력이다.

$$\eta_o = Q_m C_p T_i \left[\left(\frac{P_d}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] / W_m \quad (2)$$

그림 11.은 성능시험 장면을 보이고 있는데, 회전속도 및 토출압력을 변경시키면서 정상상태의 유량 및 소모 동력을 측정하였다. 유량은 노즐을 사용하여 흡입구에서 측정되었으며, 소모 동력은 전원 공급부에서 파워메타로 정확하게 측정되었다.

그림12에는 성능시험을 통하여 측정된 압축기 성능을 나타내었는데, 여기서 압력은 전압기준이며 성능맵은 표준 조건(20C, 1기압, 65%RH)으로 보정한 것이다. 100% 회전속도, 압축비 1.6에서 측정된 유량은 213 m³/min으로서 100마력 압축기 Prototype을 바탕으로 설정된 설계목표 값인 180 m³/min 보다 약 18% 더 높았다. 이는 터보기기가 대형화 될수록 임펠러 날개의 Tip clearance 손실, 표면 조도 영향, 제작/조립 공차 민감도 등이 개선되면서 효율이 좋아진다는 사실을

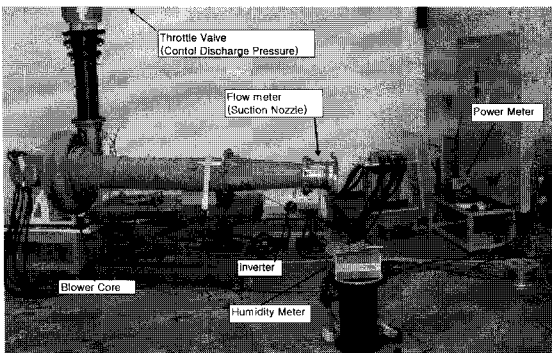


그림 11. 성능시험 리그

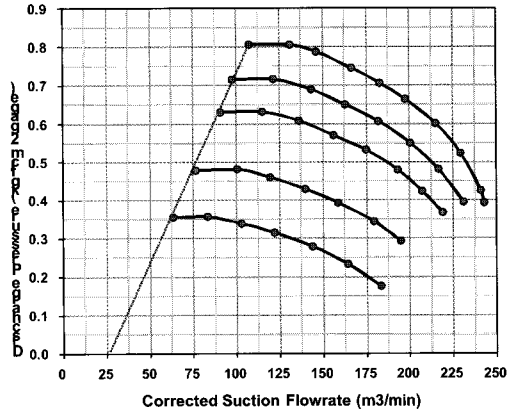


그림 12. 측정된 압축기 성능

뒷받침해준다고 볼 수 있다. 소모 동력 기준으로 평가된 설계 운전점에서의 시스템 효율은 73.0%이고, 최대 효율은 90% 회전속도에서 74.5%의 값을 가진다.

개발된 터보 블로워는 1년 이상 국내 하수처리장에서 현장시운전을 통하여 내구성 및 신뢰성을 입증하였으며, 현재 미국 등 해외에도 설치 및 운전 중에 있다. 이러한 실적을 바탕으로 현재는 국, 내외의 다양한 블로워 공정에 적용이 되고 있다.

3. 인증

향후 블로워 시장은 국내보다는 해외에 주력해야 될 것으로 보이며, 이를 위해 선결될 과제는 북미 및 유럽 등의 엄격한 품질 및 안전 기준을 만족시키는 일이다. 국내에서는 특별히 인증에 대한 문제가 제기되는 경우가 거의 없으나, 북미의 경우 CSA 또는 UL 인증이 없는 경우 원칙적으로 제품의 수입 또는 설치 및 운용을 금지하고 있다. 그러나 그동안 고속 터보블로워에 대해서는 국제적인 규격조차 존재하지 않아 인증 신청조차도 어려운 상황이었으나, (주)뉴로스에서는 지난 2006년 1월 부터 캐나다의 CSA 본부와 협력하여 인증을 위한 시험 규격 및 조건 등을 완성하였고 지난 2007년 10월에는 50~300마력 범위의 생산되는 전 모델에 대하여 캐나다와 미국 등 북미 전역에서 인정받는 CSA/US 규격을 취득하였다. 이를 통해 향후 고속기계의 국제 규격 정립 및 인증과정에 국내업체들이 보다 적극적으로 참여할 수 있는 기회가 있을 것으로 기대하고 있다.

4. 결 론

1) 공기 베어링을 사용하는 300마력급 Oil-Free 고속 터보 블로워가 개발되었다. 효율 극대화를 위해서 최적의 비속에서 압축기가 설계되었으며, 구동부의 손실 최소화 및 소형화를 위해서 고속 동기모터를 직결 방식으로 적용하였다. 고성능의 공기 베어링을 채택함으로써 완전한 Oil-Free 환경을 구현하였고, 저 소음 및 저 진동의 친환경성을 확보하였다.

2) 성능시험을 통하여 압축비 1.6에서 213 m³/min의 흡입풍량이 측정되었으며, 최대 시스템 효율은 74.5%로 평가되었다. 이 결과는 터보 블로워에 적용된 주요 구성품들이 개별적으로 우수한 성능을 가짐과 동시에 최적화 통합설계가 이루어졌기 때문에 가능한 것으로서, 동급의 터보 블로워 중에서 세계 최고의 성능을 가지는 것으로 평가받고 있다.

3) 본 개발 과정을 통하여 확보된 각 요소기술들은 향후 미래형 터보기기 개발에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 송귀은, 김광호, 강신형, 김회룡, 2000, “터보블로워 표준화 제품 개발 사례,” 2000 유체기계 연구개발 발표회, pp. 99~103.
- (2) 오종식, 이현식, 2002, “차세대 신개념 터보블로워의 세계 최초 상품화 개발,” 2002 유체기계 연구개발 발표회, pp. 99~103.
- (3) 박기철, 윤주식, 이기호, 김경수, 김동권, 김승우, 2003, “비동기형 고속모터를 사용한 공기 부양식 터보블로워의 개발,” 2003 유체기계 연구개발 발표회, pp. 324~329.
- (4) Kyeong-su Kim, In Lee, “Vibration characteristics of a 75kW turbo machine with air foil bearings,” Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(3), pp. 843~849.
- (5) 김경수, 이기호, 박기철, 이시우, 김승우, 2006, “공기 포일 베어링을 사용하는 300마력급 터보 송풍기 개발,” 제4회 한국유체공학학술대회 논문집 제1권, pp. 331~334.
- (6) 이희섭, 김창호, 이용복, 2006, “80kW급 고분자 전해질 연료전지의 공기공급계(터보 블로워) 개발,” 한국 신재생 에너지 학회 2006 춘계학술대회, pp. 67~72.