

BLDC 전동기와 공기포일베어링을 이용한 고효율 터보블로워

오종식*, 이헌석**

High-Efficiency TurboBlowers using High-Speed BLDC Motors and Foil Air Bearings

JongSik Oh*, HeonSeok Lee**

Key Words : BLDC(브러쉬가 없는 직류), Foil Air Bearings(공기포일베어링)

ABSTRACT

High-efficiency turboblowers in the next generation have been successfully developed and commercialized first in the world, using the high-speed BLDC motors and the foil air bearings. About 20-35% savings in electricity consumption in the field are found in comparison with the conventional roots rotary blowers and the integral gear-driven turboblowers. Current TB75 and TB150 products are replacing the existing blowers in the worldwide market.

1. 서론

산업용 터보기계의 효율을 높이고 제품의 크기와 발생하는 소음을 줄이기 위해서는 회전속도를 최적 수준으로 높여야 한다. 그러나 지금까지 중대형 산업기계에서는 유도(induction) 전동기와 증속기어 그리고 오일베어링 조합의 형태로 거의 모든 제품이 구성되었고 여기에 아무도 이의를 제기하지 않았다. 따라서 신제품을 개발할 경우에도 유도전동기와 증속기어 그리고 오일베어링 조합이 기본적으로 소모하는 동력손실을 당연히 받아들이고는 압축기나 블로워의 공력설계를 향상시켜 전체 시스템 효율을 높이려는 방향으로 연구개발이 대부분 진행해온 것이 사실이다.

현재 폐수처리장 폭기용이나 시멘트/석탄/석유와 같은 분체이송용으로 주로 쓰이고 있는 산업용 터보블로워(TurboBlower)도 일반 유도전동기와 증속기어 그리고 오일베어링의 조합으로 이루어진 국내외 제품들이 나름대로는 과거 시장을 장악하였던 루츠(roots) 블로워를 대체하는 제품으로 자리잡고 있다. 최근에는 자기(magnetic) 베어링과 고속 유도전동기를 채택한 해외 제품이 시장에 등장한 적이 있다. 그러나 이들은 각각

성능과 품질에 있어서 뚜렷한 한계를 가지고 있었으며, 이를 해결할 수 있는 유일한 대안으로는 고속 BLDC (Brushless DC) 전동기와 공기 포일 베어링(Foil Air Bearing)을 채택한 당사의 차세대 터보블로워 제품(TB75, TB150)이라고 할 수 있다(Fig.1 참조). Table 1은 토출압이 0.6~1.0 bar(G)에 해당하는 현재의 산업용 고압블로워 상용제품들의 성능과 품질을 서로 비교해 보여주고 있다. 소비전력을 평가하는 가장 중요한 지표인 시스템 효율은 동일한 풍량과 풍압을 기준으로 하였으며, 경쟁 제품의 수치는 해당제품 소개자료에서 인용하여 비교한 것이다. 당사 제품이 모든 면에서 월등히 우월한 성능을 보여주고 있으며, 특히 소비전력 면에서는 실제로 국내 여러 현장에서 직접 소비자가 비교하여 확인하였듯이 약 20~35% 이상 소비전력이 절감되는 것으로 나타났다.

고속 전동기의 개념이 갑자기 나타난 새로운 것이 아니라 이미 오래전부터 있어 왔지만 과거에는 이를 구동하는 데에 필요한 전력전자(power electronics)기술이 발달하지 못하여 관련 소재의 원가(cost)가 매우 높아 상품성이 떨어졌기 때문이다. 그러나 최근에 들어서 전력전자 관련기술의 큰 발전과 아울러 영구자석(permanent magnet) 관련 산업의 급격한 성장과 함께

** 한국터보기계(주) 대표이사

Table 1 산업용 고압블로워 제품의 성능비교 (2003년 기준)

	H사 제품(덴마크)	H사 제품(핀란드)	K사 제품(일본)	Roots Blower	KTURBO TB75/150
중속 구동 방식	유도전동기 + 증속기어	고속 유도전동기 + 상용 인버터	유도전동기 + 증속기어	유도전동기 + V-belt	고속 BLDC 전동기 + 센서리스 인버터
베어링 종류	Tilting-Pad Oil Bearing	Magnetic Bearing	Tilting-Pad Oil Bearing	Needle Oil Bearing	Foil Air Bearing
소음 (@1m)	90dB	85dB	90dB	100dB	75dB
유지보수 품목	Bearing/ Seal/ Filter	X	Bearing /Seal/ Filter	Bearing/Seal/Filter	X
부분부하 용량제어	IGV/ VD 조절	가변 회전수	IGV 조절	불가능	가변 회전수
방진 기초공사	O	X	O	O	X
제품가격	100	85	70	30	50
시스템 효율	54%	62%	52%	40%	73%
효율 손실 내역	- Subsystem 3% - Motor 10% - Gear 5% - Blower 28%	- Bearing 1% - Inverter 4% - Motor 11% - Blower 22%	- Subsystem 3% - Motor 11% - Gear 6% - Blower 28%	- Subsystem 5% - Motor 12% - Gear 6% - Blower 37%	- Inverter 4% - Motor 5% - Blower 18%

※ IGV : Inlet Guide Vane
VD : Vaned Diffuser

마이크로터빈(microturbine)과 같이 초소형 직결식 고속 발전기의 수요가 급증한 관계로 고속 전동/발전기와 관련 구동장비의 원가하락이 가능해졌다.

공기포일베어링도 역시 1970년대에 처음으로 도입되어 군수용과 민수용 터보기계에서 다양하게 적용되었으며 현재도 항공용 공조분야에 사용되고 있는 기술이지만, 그동안 해외 특정업체가 기술을 독점해온 관계로 활발한 응용이 어려웠다. 지금까지는 주로 초소형 터보기계에 사용하는 leaf foil형이 대부분이었지만, 점차로 중대형 산업기계로의 응용 기회가 열리면서 축하중이 증가함에 따라 bump foil형으로 다양하게 발전해가고 있는 실정이다.

당사에서는 이러한 세계적 기술의 추세를 미리 인지하고서 1998년부터 고속 BLDC(Brushless DC) 전동기와 공기포일베어링을 적용한 산업용 터보블로워 독자 개발에 착수하였으며, 2001년에는 25마력급 소형 터보블로워의 독자적인 시제개발에 성공함으로써 당해년도 대한민국 기술대전에서 영예의 대통령상을 수상한 바 있다. 그러나 국내의 시장에서 상품성을 갖기 위해서는 최소 75마력급 이상이 되어야 하기 때문에 다시 약 1년뒤인 2002년말경 75마력급 터보블로워의 독자적인 시제개발에 성공하게 되었다. 다양한 현장 운전시험 기간을 거쳐 상품화 개발을 완료하고 2003년 6월부터 본격적인 양산체제를 갖추어 제품명 TB75의 내수판매를 시작하게 되었다.

고속 BLDC 전동기와 센서리스(sensorless) 인버터,

정밀주조 임펠러, 그리고 고효율 임펠러 설계기술 등의 4가지 핵심 선진기술을 해외에 의존하지 않고 독자적인 요소기술 개발과정을 거쳐 자체 확보함으로써 제품의 상용화 개발을 세계에서는 최초로 성공하였다는 점이 해외 전시회(ASME IGTI TurboExpo 2003)에서도 당사가 세계적인 관심과 이목을 받고 있는 이유이기도 하다.

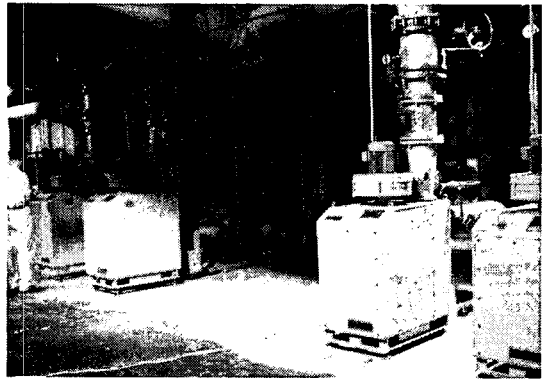


Fig.1 차세대 터보블로워 TB75 (폐수처리장 폭기용)

2. 고속 BLDC 전동기와 인버터

회전속도와 발생 토크(torque)의 크기를 다양하게 변화시키기 위해서는 직류(DC)모터를 사용해야 하지만, 이 경우에는 브러쉬(brush)와 기계적 정류자(commutator)와 같은 소모용 부품이 있어 정기적인 유

지보수가 필요했다. 따라서 유지보수를 최소화하기 위해서는 브러쉬가 없는 교류(AC)모터를 사용해야 하는데, 여기에는 유도(induction) 전동기와 영구자석 전동기 (brushless permanent magnet motor)가 있다. 그러나 유도 전동기는 일반적인 정격 효율이 낮을 뿐만 아니라(통상 80~85%), 고속으로 갈수록 효율과 역률이 급격하게 감소하기 때문에, 이러한 고속형 터보기계 분야에는 적당하지 않다. 반면에 영구자석 전동기는 유도전동기에 비하여 원천적으로 회전자의 동손(copper losses)이 없기 때문에 효율이 매우 높고(통상 95% 이상), power density가 커서 고속 대용량 분야에 유리하며, 소음이 거의 없고 전동기의 수명 또한 매우 길다. 또한 초기 기동 토크가 작기 때문에 대용량 유도전동기의 경우와 같이 별도의 기동반이 필요하지 않다.

영구자석 전동기의 한 종류인 BLDC 전동기는 일반적인 직류 전동기와는 반대되는 개념으로서, 회전자(rotor) 표면에 영구자석을 심고 외곽 고정자(stator)에 권선(coil)을 감아 회전하는 교류 동기(synchronous)전동기를 말한다. 고정자 권선에 전류가 흐르면서 생성된 자기장(magnetic field)과 회전자 자석에서 발생하는 자기플럭스(magnet flux) 사이에 존재하는 자기작용(magnetic interaction)에 의해 토크가 발생하여 회전자가 회전하게 된다. 그러나 최대의 토크를 유지하면서 연속적으로 회전하기 위해서는 둘의 위치가 일정한 각도를 이루어야 하기 때문에, 회전자 자석의 N-S 위치를 항상 감지해서 전류가 흐르는 고정자 권선의 위치를 적절히 스위칭하여 이동해주어야 한다. 따라서 BLDC 전동기를 구동하기 위해서는 다음과 같은 주요 3가지의 전력전자 기술이 외부에서 지원되어야 하며, 이를 인버터(inverter)라고 부른다.

- ▶ 회전자의 위치 감지기술 (rotor position sensing)
- ▶ 스위칭 기술 (switching device : IGBT)
- ▶ 제어 기술 (control unit)

넓은 의미에서의 인버터는 입력 교류(AC)전원을 직류(DC)로 전환하는 정류기(Rectifier)와 입력 직류를 IGBT와 같은 스위칭 소자를 이용하여 원하는 교류 주파수와 전압으로 변조하여 BLDC 전동기에 내보내어 적절히 스위칭해주는 인버터를 모두 포함한다.

과거에는 회전자 자석의 위치를 감지하기 위해 여러개의 홀센서(hall sensor)를 설치하였으나 가격적인 측면과 제품의 크기, 그리고 고속 회전수의 제한 등으

로 인하여 사용하는 데에 불편이 많았다. 최근에는 이러한 물리적인 센서없이 전동기에서 발생하는 역기전력(Back EMF)을 이용하여 자석의 위치를 스스로 감지해내는 센서리스(sensorless) 제어기술이 가능해졌고 당사도 이를 개발하여 제품에 적용하고 있다.

고속 BLDC 전동기와 센서리스 인버터 모두는 제품의 내구성을 확보하기 위해서는 내부에서 발생하는 열을 적절한 방법으로 강제 냉각해주어야 한다. 초기 제품은 수냉식을 이용하였으나 현재는 공랭식으로 모두 변경되었다.

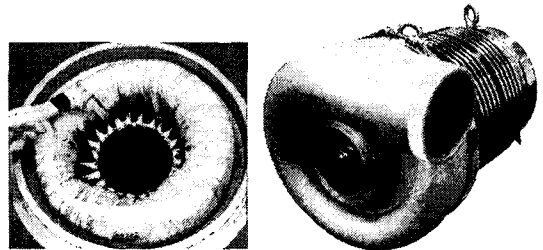


Fig.2 BLDC 전동기의 stator와 Blower Core의 모습

최근들어 냉동공조 분야에서 영구자석을 이용한 고속 전동기가 등장하기 시작하였고 국내에서도 개발에 성공한 것으로 알려지고 있다. 그러나 이들은 모두가 전동기 용량이 약 10kW 미만의 초소형이고 정격 회전수도 약 20,000 rpm 미만에 해당하는 저속이기에, 당사의 제품과 같이 56kW급 이상의 대용량에 회전수가 38,000rpm 이상이 되는 고효율 고속 전동기와는 핵심 관련기술의 성격이 많이 다르다. 또한 현재 세계적으로는 최근 수년간 마이크로터빈 산업의 발달로 인하여 영구자석식 고속 발전기가 개발되어 용량으로는 최대 100kW 출력급까지 상용화가 완료되었다. 그러나 이들 모두는 초기 기동시에만 정격의 약 50% 부하이내에서만 전동기의 역할을 잠깐 수행할 뿐, 나머지 대부분의 운전시간을 발전 모드로 보내기 때문에 역시 개발관련 기술의 성격이 많이 다르다. 즉, 초기 기동부터 수명이 다할 때까지 전동기로서만 운전해야 하는 대용량 영구자석식 고속 전동기의 상용화 개발은 이번 TB75와 TB150 제품이 최초로 해당한다.

3. 공기 포일 베어링

Foil Air Bearing에 대한 연구는 1970년대 중반 미국의 군용 및 민간항공기용 공기조화 시스템에 쓰이는 ACM(Air Cycle Machine)의 성능을 향상시키고자 하는

목적에서 탄생되었다. 기존의 Rolling Element Bearing은 공기 포일 베어링에 비해 회전체를 지지하기 위해 더 많은 부속품과 복잡한 오일 윤활시스템 등으로 동력이 소모되고 유지보수가 자주 필요한 등 불리한 점이 많았다. 따라서 고속 터보기계의 효율 증가와 신뢰성 증대를 위하여 공기포일베어링이 탄생하게 된 것이다. 이는 흔히 볼 수 있는 공작기계 스피들에서와 같이 외부에서 가압공기를 강제로 주입하여 축을 부양시키는 정압(hydrostatic) 베어링이 아니라 축과 베어링 주위에 존재하는 공기 자체가 축을 부양해주는 동압(hydrodynamic) 베어링을 뜻한다. 최근에는 비로소 관련 기술이 민간으로 넘어오게 되면서 현재 국내에서도 업체와 연구소를 중심으로 많은 관심을 보이고 있는 실정이다.

기동전에는 축과 베어링이 물리적으로 접촉하지만, 기동시에는 축과 베어링간의 상대 운동에 의해 축하중을 받치는 동압력이 발생되게 된다. Journal 베어링의 경우 이 힘에 의해 축이 부상하게 되고, 이러한 힘은 축의 중심과 베어링의 중심간의 불일치에 기인한다. 원리는 단순하지만 아주 까다로운 설계와 제작방법에 의해 지금까지 기술개발에 성공한 곳으로는 세계적으로 NASA와 MITI, Capstone, Honeywell (구 AlliedSignal) 그리고 러시아 업체 등에 국한되는 것으로 알려져 있다. 최대 축하중의 크기에 따라 기술의 차이가 있기는 하지만, 국내에서도 당사를 포함하여 2-3개 업체가 나름대로 독자기술을 보유하고 있는 것으로 보인다.

설계단계에서 수행해야 하는 공기포일베어링에 대한 해석은 단순히 공력문제만이 아니라 구조와 열, 그리고 시간에 따라 경계조건이 변하는 매우 복잡한 문제이기에 수치해석적인 접근은 사실상 불가능하다. 따라서 당사에서는 간단한 1차원적인 설계를 통하여 결정된 포일의 형상에 대하여 수없이 많은 반복적인 제작과 시험을 통해 최종 형상을 확정할 수 있었다. 우선 loading capacity에 따르는 변위를 측정하여 damping에 대한 튜닝을 수행하고, 인위적인 imbalance response를 이용하여 stiffness에 대한 튜닝을 수행하며, 그리고 약 2만회 이상의 on/off 동작을 통하여 표면코팅재의 수명을 평가하는 기본적인 성능시험을 수행한다. 이는 air turbine으로 구동되는 전용시험리그에서 진행된다. 다음 단계에서 확인해야 하는 시험은 주로 안정성 튜닝으로서 이는 터보블로워 구성품 시험리그에서 수행한다(Fig.3 참조). 정격 회전수에서 인위적으로 완전한 surge 상태까지 운전하여 임펠러가 파손된 상황에서도

베어링은 정상 동작하도록 하였으며, 외부의 강한 충격과 진동에서도 견딜 수 있도록 설계수정을 반복한다.

TB75의 경우에는 축 직경이 60mm이고 축의 무게가 15kg이며, TB150의 경우에는 축의 무게가 30kg에 달한다. 모두 multi-layer bump foil을 적용하였으며 축이 부양되는 회전수는 대략 3,000 rpm 부근이다. Fig.4는 사용된 thrust 공기 포일 베어링의 모습을 보여준다.

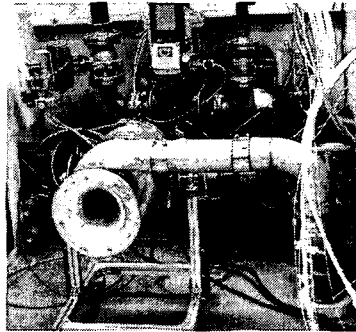


Fig.3 터보블로워 구성품 시험리그

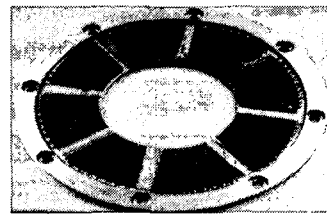


Fig.4 Thrust Foil Air Bearing

4. 터보블로워와 정밀주조 임펠러

또 다른 터보블로워의 핵심 구성품으로서 임펠러와 디퓨저 그리고 볼류트(volute)가 있다. 이들에 대한 공력설계는 현재 해외 선진수준에 해당하는 최신 설계기법^{(1),(2)}을 이용하여 수행되었다. 구체적으로는 평균유선을 따르는 1차원 설계와 성능해석, 임펠러의 3차원 형상설계와 준3차원 유동해석, 그리고 3차원 압축성 난류 유동해석(Fig.5 참조) 등을 거쳐 최종적으로 형상설계가 확정되었다. 이러한 공력설계기술은 이제 국내에서도 당사뿐만 아니라 타 업체에서도 독립적인 기술을 보유하고 있을 정도로 보급되고 있는 실정이다.

임펠러의 장수명과 FOD(Foreign Object Damage) 내성을 위해 재료는 SUS630을 채택하였고, COSMOS 상용 프로그램을 사용하여 120% 회전수에서의 응력해석을 수행하여 최대 응력분포를 계산함으로써 재료의 적합성을 확인하였다.

임펠러와 공기베어링 그리고 축의 결합체인 회전체에 대한 진동해석을 수행하여 기동시부터 정격 회전수까지 굽절모드(bending mode)가 발생하지 않도록 축의 길이와 베어링의 특성 등을 조절하는 설계가 수행되어 동적 안정성을 확보하였다.

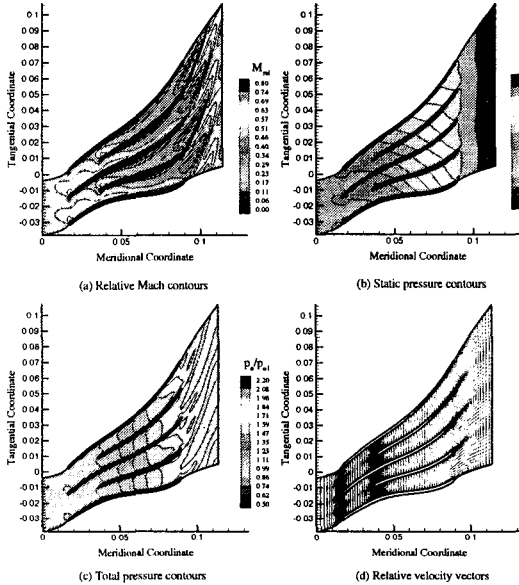


Fig.5 Blade-to-blade CFD on midspan surface

임펠러는 제품원가 정책에 따라 제조단가가 매우 낮은 정밀주조법을 적용하여 제작하였는데, 특히 당사가 설비와 기술을 모두 보유하고 있는 고무주형(rubber mold)을 사용한 Lost-Wax 정밀주조법을 사용하였다. 일반적인 금속 금형이나 세라믹 금형 대신에 고무주형을 사용함으로써 제작기간과 비용을 절약하면서도 동일한 품질을 얻을 수 있다는 장점이 많다.

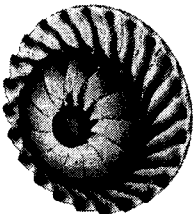


Fig.6 임펠러 동력해석



Fig.7 제작된 임펠러와 디퓨저

5. TB75/150 제품

현재 국내외 시장에서 모델명 TB75와 TB150으로

판매되고 있는 당사의 차세대 터보블로워 제품에 대한 상세한 기술적 사양과 내용을 요약하면 다음의 Table 2와 같다. Fig.8은 TB75 패키지에 대한 surge 방지제어 기능시험에 대한 결과를 설계시 예측하였던 성능곡선도와 함께 보여주고 있다. Fig.9는 판매되어 현재까지 안정적으로 운전중인 제품(TB75)중의 하나를 보여주고 있다.

Table 2 Specifications of TB75/150

	TB75	TB150
Pressure Delivery	0.6 bar(G)	0.8 bar(G)
Air Flow Delivery	50 m ³ /min	82 m ³ /min
Shaft Power	75 hp	150 hp
Input Power	60 kW	120 kW
Input Voltage	380/440V(3PH)	
Exhaust Pipe	200/250A	250A
Cooling Type	Air-Cooled	
Overall Dimension	560x1443x1420	700x1571x1711

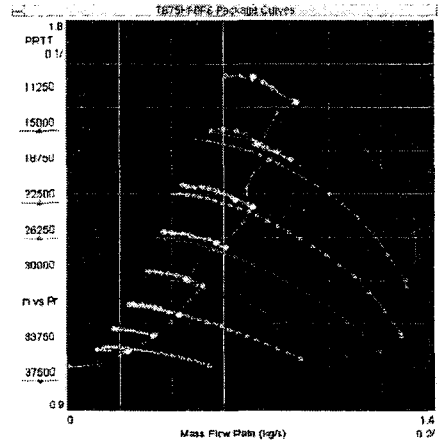


Fig.8 Performance Curves (Surge Tests)

6. 맺음말

고속 BLDC 전동기와 공기포일베어링을 적용한 차세대 고효율 산업용 터보블로워가 국내뿐이 아니라 세계에서 처음으로 당사에 의해 성공적으로 개발되었다. 3년 가까이 고통스러운 독자개발 기간과 1년 정도의 상품화 및 필드검증 시험기간을 거쳐 현재 양산

판매되어 시장을 형성하고 있으며 국내외 소비자들로부터 놀라운 호응을 받고 있다. 시스템 효율이 높아 기존의 루츠블로워나 증속기어/오일베어링식 터보블로워 대비 약 20~35% 정도의 소비전력 절감효과를 보이고 있으며, 정기적인 유지보수가 필요없는 등 산업용 터보기계 분야에서의 기존 고정관념을 깨뜨리는 혁신적인 제품이라는 평가를 받고 있다. 곧 추가적인 출시를 앞두고 있는 TB300 제품과 함께 다양한 제품군을 이루어 국내뿐만 아니라 세계시장에서도 확고한 시장 점유율을 늘려갈 계획이다.

참고문헌

- (1) 오종식, 2003, 원심/사류압축기의 공력설계 프로그램 개발 - 제1부 : 평균유선 설계/성능해석, 유체기계연구발표회
- (2) 오종식, 2003, 원심/사류압축기의 공력설계 프로그램 개발 - 제2부 : 임펠러의 3차원 형상설계, 유체기계연구발표회

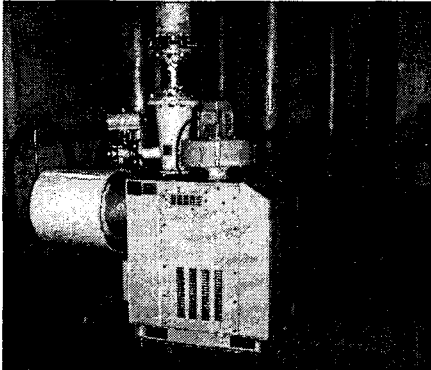


Fig.9 차세대 터보블로워 TB75 (분체이송용)