

차세대 신개념 터보블로워의 세계최초 상품화 개발

오종식[†], 이헌석*

Development of Advanced TurboBlowers Using High-Speed BLDC Motors and Foil Air Bearings

JongSik Oh[†], HeonSeok Lee*

Key Words : TurboBlower, High-Speed BLDC Motor, Foil Air Bearing

Abstract

In the paper, the development of high-speed industrial turbo blowers with foil air bearings is presented as a first successful commercialization in the world. Their target market is various from wastewater treatment to cement factory processes which require compressed air ranging between 0.6 and 0.8 bar gauge. Employing the state-of-the-art technology of the high-speed BLDC motors, the bump-type foil air bearings and the high-efficient turbo impellers/diffusers, so much compact, efficient and silent blower machines of a single stage are now available in the market, aiming to replace the existing inefficient, bulky and noisy ones, such as roots blowers. The first production lines are established for 25, 75 and 150 hp class blowers. Rotational speeds from about 20,000 to 80,000 rpm are realized directly from the high-speed BLDC motors without any gear boxes, and no lubrication oil is required. A brief introduction of design, manufacture and test results is presented for mechanical, electrical and aerodynamic performance.

1. 서 론

산업용 유체기계 용어로서 흔히 일컫는 팬(fan)과 블로워(blower) 그리고 압축기(compressor)라는 단어는 우리의 귀에 익숙하지만 일반적으로 서로간의 정확한 분류가 되는 경계압력을 정의하기는 쉽지 않다. 대부분의 교과서에서는 팬의 상한 압력을 2 psig (0.14 barG)로 하고, 블로워는 2 psig 와 10 psig (0.7 barG) 사이의 압력으로 하며, 그 이상을 압축기로 제시하고 있다. 그러나 실제 현장에서 이용하고 있는 산업용 블로워의 제품 카다로그를 본다면 통상 가용(available) 압력범위가 약 0.1 barG 에서 1.5 barG 를 넘고 있다. 반면에, 실제

터보압축기의 제품은 주로 약 7 barG 에서 9 barG 수준의 토출압을 주고 있기에, 약 3 barG 에서 6 barG 수준의 중간압력 범위의 시장에서는 고압 블로워 혹은 저압 압축기라고 부르기도 한다.

본 연구에서는 일반적인 산업용 블로워가 필수적으로 사용되는 오페수 처리장의 폭기용이나 섬유/시멘트 공장등에서 사용하는 분체 이송용, 소각로 급기용 등의 시장을 위해 터보블로워를 개발 하되 기존과는 다른 신개념을 도입하고자 하였다.

현재 위에서 언급한 시장을 대부분 점유하고 있는 블로워는 루츠블로워(roots rotary blower)인데, 이는 Fig.1 에 나타난 바와 같이 특이한 형상의 2 개의 로터가 서로 맞물려서 회전하여 가압하는 구조를 갖고 있으며, 주로 약 10 마력부터 200 마력 이상급까지 사용되고 있다. 이보다 작은 마력급인 약 0.5 마력에서 30 마력 이상급까지는 주로 링블

[†] 한국터보기계(주) 연구소장

* 한국터보기계(주) 대표이사

E-mail : ojs@kturbo.com

로워(ring blower)가 사용되는데, 이는 Fig.2 에서 보는 바와 같이 매우 단순화된 임펠러와 그리스(grease) 베어링을 채택하고 있다.

루츠블로워는 견고한 제품이지만, 기본적으로 제품의 크기가 무척 크고 소음이 심하며 효율이 낮다는 단점이 있다. 일반적으로 110 dB 을 넘는 수준의 소음을 유발하고 있고 효율 또한 약 65% 이하의 낮은 수준이며, 더욱 중요한 것은 정속운전으로 부분부하 운전하는 일이 거의 불가능하다는 점이다. 즉, 성능특성곡선이 수직선에 가까워서 토출압을 변화시켜도 거의 같은 수준의 공기량이 나오기 때문에, 많은 비용을 들여서 회전수를 변화시키지 않는 한, 같은 토출압을 유지하면서 공기유량을 조절하는 일이 불가능하다.

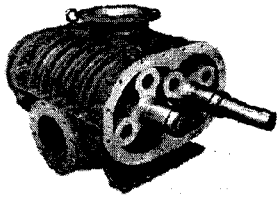


Fig.1 Roots rotary blower

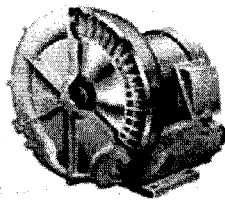


Fig.2 Ring blower

루츠블로워가 갖고 있는 이러한 단점을 해결할 수 있는 대안으로서 Fig.3 에 나타난 바와 같이 터보블로워가 점차적으로 시장에 출현하기 시작하였다. 이는 기존의 증속기어를 채택한 터보압축기와 같은 개념으로서 단단(single stage)이며 원심형(centrifugal) 혹은 사류형(mixed-flow) 임펠러를 적용하고 있다. 터보형 기계에서는 일정 수준 이상의 효율을 유지하기 위해서는 높은 회전수가 요구되며 이를 실현하기 위해서 증속기어(bull and pinion gear trains)를 이용한다. 기어가 고회전수에서 진동없이 작동하기 위해서는 초정밀가공의 수준(AGMA 12-13)으로 제작해야 하며, 회전축의 동특성 안정성을 위해서는 tilting pad 베어링과 같은 고가의 오일베어링을 적용해야 한다. 효율은 78%-80% 수준까지 향상되었으나 증속기어와 유도전동기로 인해 소음 수준은 크게 줄어들지 못했으며, 제품의 크기도 큰 변화가 없었다. 반면에, 터보형이 갖는 성능특성곡선으로 인해 효율의 큰 감소없이 동일한 토출압을 유지하면서 약 45%-100% 범위에서 유량조절이 가능해졌다. 이 경우 회전속도가 고정되기 때문에 입구에 설치된 안내깃(Inlet Guide Vane)을 사용하여 공기유량을 조절한다.

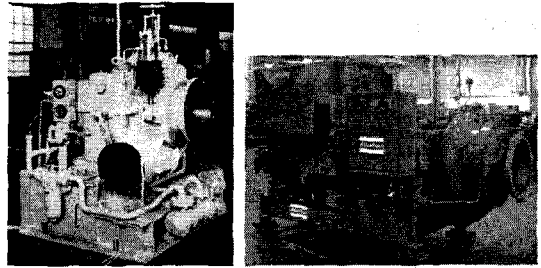


Fig.3 Integral gear-driven turbo blowers

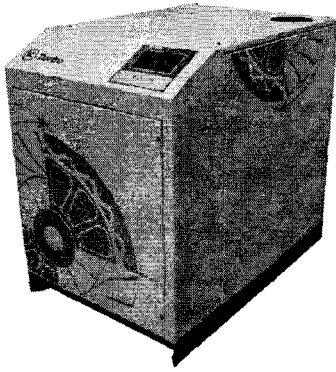
현재의 증속기어식 터보블로워가 효율이 좋고 신뢰도가 높은 기계임에는 틀림없지만, 여전히 제품의 크기가 크고 소음이 심하며, 오일이 섞이지 않은 청정한 토출공기를 공급하기 위해 고가의 오일 베어링과 공기/오일 실(seal)이 결합된 매우 복잡한 기술을 적용해야 한다. 이러한 문제들을 근본적으로 제거하기 위해 당사에서는 증속기어 자체가 필요없이 곧바로 원하는 회전수까지 올려 줄 수 있는 고속모터와 오일 윤활유 자체를 사용하지 않는 공기베어링을 채택한 터보블로워를 약 4 년여 동안 독자개발을 통해 개발하여 왔으며 최근에 세계최초로 상품화에 성공하게 되었다. 여기서는 이러한 개발내용에 대한 간략한 개요를 소개하고자 한다.

2. 새로운 개념의 터보블로워

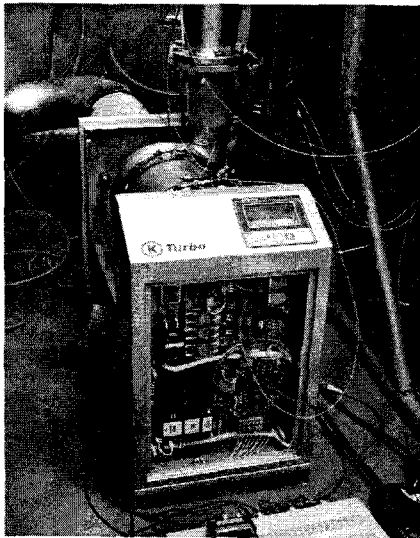
최근에 당사에서는 25 마력, 75 마력 그리고 150 마력급의 터보블로워가 첫 양산체제에 들어갔으며, 여기서는 75 마력급 제품의 개발내용에 대해서만 소개하도록 한다. 설계점에서의 공기 흡입유량은 54 m³/min 이고 이때의 토출압은 0.6 barG 그리고 회전수는 38,000 rpm 이다. Fig.4(a)는 최종 상품화 패키지가 완료된 제품의 외관을 보여주고 있으며 내부에는 고속모터와 인버터, 제어시스템 그리고 터보블로워가 위치한다. 80 dB 의 소음 수준을 유지하기 위해 입구측에 소음기/필터를 장착하며, 서지(surge) 조건을 피하기 위해 출구측에 Blow-off 밸브가 위치하고 있다. Fig.4(b)는 시스템 성능시험중인 모습이며, 공기베어링을 사용하기 때문에 윤활시스템이 존재하지 않음을 알 수 있다.

3. 임펠러와 디퓨저

임펠러와 디퓨저에 대한 공력설계는 원심압축기에 적용하는 해외 최신의 설계기술을 이용하여 수행되었고, 3 차원 CFD 를 통하여 설계의 타당성을 확인하였다. 공력설계의 첫 단계로서 평균유



(a) Exterior view of main package



(b) Package under performance tests

Fig.4 New turbo blower products

선을 따르는 기본설계와 성능해석을 수행하였고 이로부터 Fig.12 에서와 같은 터보블로워의 성능곡선도를 예측하였다. 사용한 설계법은 저자의 경험에 바탕을 둔 다양한 손실모델들의 조합으로 이루어진 In-house 설계코드이며, 임펠러 뿐만 아니라 디퓨저와 볼류트까지 계산에 포함한다. 임펠러의 3 차원 형상을 결정하기 위해서는 Japikse D.(1996)가 제시한 바와 같이 Bezier 곡선의 조합으로 곡면을 생성한 후 유선곡률법을 사용하여 블레이드의 공력하중을 계산한 뒤 설계된 형상의 타당성을 반복적으로 확인하여 결정한다. 임펠러는 Fig.5에서 보는 바와 같이 *backswpt* 출구각도와 *splitter* 블레이드를 채택하였으며, 당사가 보유하고 있는 정밀주조설비를 이용하여 로스트왁스 공법으로 제

작되었다. 임펠러 공력설계의 마지막 단계로서 저자에 의해 개발된 3 차원 압축성 난류 CFD 방법, Oh J.S.(1998),을 이용해 내부 유동해석을 수행하였다. Fig.6 은 유동해석 결과중의 일부로서 평균유면에서의 상대마하수 분포와 압력분포, 그리고 이차 유동장을 나타내는데, 만족스러운 설계임을 확인하였다.

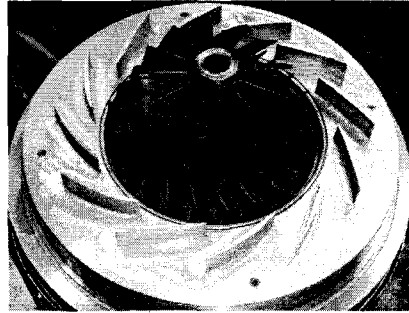
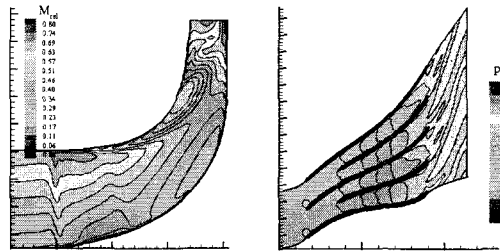


Fig.5 Fabricated impeller and vaned diffuser



(a) Relative Mach contours in the mid-pitch section

(b) Total pressure contours in the mid-pitch section

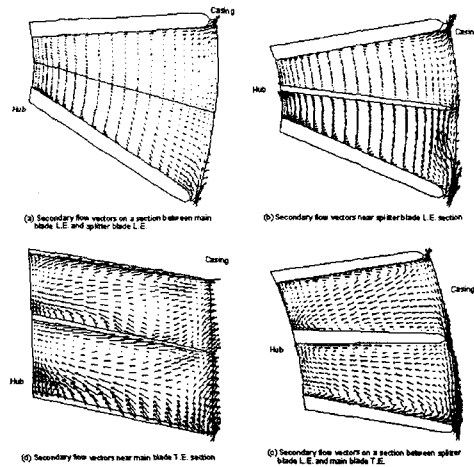


Fig.6 Some results from the impeller CFD work

디퓨저 베인은 Hayami(2000)가 제시한 방법과

같이 solidity 가 작은 익뿔디퓨저로 설계하였으며 사용한 익형은 NACA65 시리즈에 해당한다. 기계 가공으로 제작된 디퓨저 베인의 모습이 Fig.5 에서 볼 수 있다.

임펠러의 재료는 여러 점을 고려하여 SUS630 으로 선정하였으며, 응력강도의 여유분을 확인하기 위해 Fig.7 에 나타난 바와 같이 정상 응력해석을 수행하였다. 이때의 회전수는 설계 회전수보다 약 20% 더 높은 45,000rpm 이며 최대 응력은 재료의 항복응력(yield strength)의 약 57%에 해당하는 것으로 확인되었다.

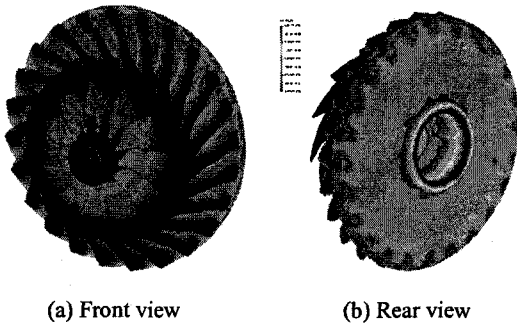


Fig.7 Stress distributions of the impeller

회전체의 임계속도(critical speed) 분포를 알기 위하여 로터와 임펠러, 그리고 공기베어링의 조합체에 대하여 회전체 진동해석을 수행하였다. 첫번째 임계속도가 약 48,780rpm 근처에 존재하는 것으로 해석되었는데, 이는 설계 회전수에 비하여 약 28% 높은 회전수이기에 안전한 여유를 가지는 것으로 보인다.

4. 고속 BLDC 모터와 인버터

고속 BLDC(BrushLess Direct Current) 모터란 유도전동기(induction motor)와는 달리 회전자(rotor)에 영구자석을, 그리고 고정자(stator)에 권선을 감은 동기(synchronous)모터를 뜻한다. 일반적인 직류모터는 고정자의 전극을 음극과 양극으로 바꾸어 주기 위해 보통 카본으로 만들어진 정류자(brush)가 필요한데, 이로 인해 소음이 발생하고 수명이 저하되며 또한 환경에 해로운 점이 있어왔다. 한편, 교류모터(농형)는 브러쉬(정류자)가 필요없으나 교류의 타이밍을 모터로 얻고 싶은 토오크나 회전수에 맞추어 조정하는 일이 어려워 일반적으로 효율이 낮은 수준이며, 고속 소형화가 어렵다. 따라서 회전자와 고정자의 위치를 정확히 알아서

교류전류를 흘리는 방식이 가능하다면 마치 브러쉬가 없는 직류모터와 같은 성능을 낼 수 있게 된다. 즉, 기계적 접촉요인이었던 브러쉬를 제거하여 고속회전이 가능함과 동시에, 기동 토오크를 크게 가질 수 있고 입력되는 전압의 변화에 대해 회전특성이 선형적으로 변하게 되며 모터의 출력효율이 높게 되는 직류모터의 장점을 갖게 되기 때문에, 고출력 고속모터에 가장 적합한 형태가 된다. 대신에 회전자의 위치센서와 파워 스위칭 소자가 기존의 브러쉬의 역할을 한다. 원하는 토오크를 발생시키기 위해서는 고정자 전류가 회전자 주위에서 적절히 동기화 되어야 하며, 자기장 에너지가 토오크 발생에 있어서 중요한 역할을 하기 때문에 Fig.8 과 같이 자기장 플럭스 해석이 반드시 필요하다.

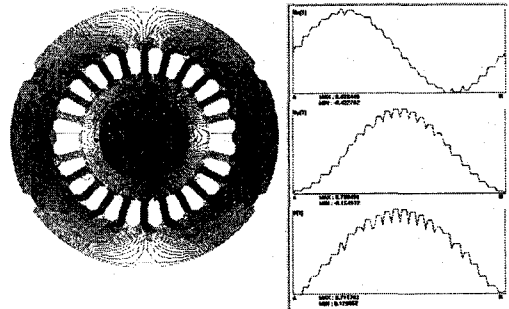


Fig.8 Magnetic field distribution by FEM analysis

고속 BLDC 모터를 구동하기 위해서는 직류 버스 전압을 모터 구동에 필요한 전류의 파동형태로 변환해주는 인버터(inverter)가 필요하다. 광범위한 의미에서는 고정된 주파수를 갖는 상용전원 교류를 우선 직류로 변환하는 정류기(rectifier)와 이를 다시 고속 모터의 특성에 맞는 특정 주파수와 전압으로 변환해주는 인버터를 포함한다. 모터와 인버터 모두 외부의 냉각수를 이용해 냉각해줄 수도 되어 있다.

5. 포일 공기 베어링

포일 공기 베어링(foil air bearing)은 공작기계의 스피들용으로 흔히 이용되고 있는 외부에서 가압공기를 주입하여 강제적으로 축을 부양시키는 hydrostatic 베어링이 아니라, 베어링 주위에 있는 상압의 공기가 축이 회전함에 따라 형성되는 공기의 압력 구배에 의해 스스로 축을 부양시키는 hydrodynamic 베어링을 뜻한다. 이러한 포일 공기 베어링은 우선 오일을 원천적으로 사용하지 않기

때문에 토출되어 공급되는 공기속에 오일이 함유되어 있지 않아 청정하다는 큰 장점이 있다. 이외에도 제작단가가 낮고 이론적으로는 회전수의 한계가 없으며 시스템의 무게를 줄일 수 있다. 또한 축의 비틀림이나 비정렬성(misalignment)에 대해서도 적용할 수 있는 정도가 다른 오일 베어링에 비해 우수하다. 충분한 댐핑(damping)을 주기 위해 스프링의 역할을 수행하는 범프(bump) 포일을 개발하여 journal 과 thrust 베어링에 적용하였다. Fig.9는 리프(leaf) 포일과 범프 포일 저널베어링의 기본적인 개념을 보여주고 있다. 당사의 범프 포일은 해외에서 현재 분류하고 있는 가장 진보된 제3세대 범프 포일 계열에 속하며 당사만의 고유한 설계로 국내외 특허로 출원중이다. 시동과 정지시에 발생하는 불가피한 마찰을 위해 포일면에 적절한 코팅을 해야 한다.

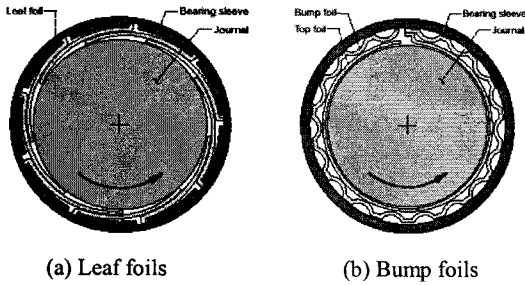
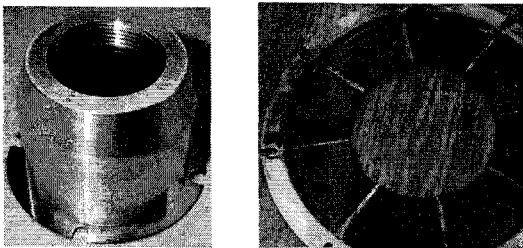


Fig.9 Foil air bearings

포일 공기 베어링에 대한 이론적인 해석을 위해서는 포일의 탄성방정식과 유체의 지배방정식이 결합된 비선형 레이놀즈 방정식을 풀어야 하며 더욱이 어려운 점은 경계조건이 계속 시간에 따라 바뀐다는 점이다. 따라서 이를 해석적으로 풀어서 설계에 이용한다는 것은 거의 불가능에 가깝기 때문에, 일반적으로는 성능시험에 의존한다. Fig.10은 본 제품에 장착된 journal 과 thrust 범프 포일 베어링의 모습이다.



(a) Journal bearing (b) Thrust bearing
Fig.10 KTURBO foil air bearings

6. 성능시험

단순 주물품인 볼류트를 제외하고는 터보블로워 시제 시스템의 전체를 당사의 설계실과 생산설비에서 설계하고 제작하였으며, 블로워 성능시험을 위해 Fig.11에 나타난 바와 같이 전용 시험리그를 DAS와 함께 구성하였다. 대기 온도와 블로워 토출온도를 열전대(thermocouple)를 사용하여 측정 후 엔탈피의 증가량을 얻었으며, 볼류트 출구에서 전압(total pressure) 프로브를 사용하여 얻은 전압을 이용하여 전압력비를 계산하였다. 공기의 유량은 입구에 설치된 bellmouth의 차압을 이용하여 얻었으며, 이는 사전에 별도로 음속 노즐을 이용하여 보정과정(calibration process)을 거쳤다.

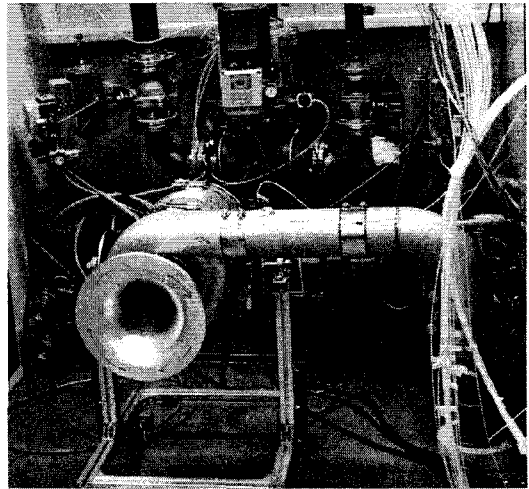


Fig.11 Turbo blower under performance tests

Fig.11에서 볼 수 있듯이 2개의 서로 다른 크기의 유량밸브를 출구 관로에 장착하여 운전점이 초크점에서부터 설계점을 지나 서지점까지 움직일 수 있도록 조절하였으며, 이러한 밸브는 공압으로 자동조절된다. 성능시험으로 얻은 압력비와 단열효율의 곡선이 Fig.12에 나타나 있다. 여기서 곡선은 회전수별로 설계단계에서 예측하였던 이론 곡선이며 원형 기호는 실험으로 측정된 값이다. 정지 상태에서부터 회전수가 증가함에 따라 일정한 회전수 곡선들을 가로질러 운전점이 이동하게 되며 출구에 위치한 유량밸브를 서서히 닫으면서 운전점은 설계회전수의 설계유량쪽으로 이동하게 된다. 전압력비는 예측한 곡선과 매우 유사한 실험결과를 얻었다. 단열효율의 경우 전압력비와 온도를 이용해 등엔트로피 관계식으로 계산하여 얻은 값이며, 전반적으로 예측한 값보다 더 높

게 나타났다. 이는 실제로 시험리그에 단열장치를 취하지 않아 토출온도가 약간 감소하였기 때문으로 판단된다. 전체 시스템의 효율은 이보다 더 감소하게 되는데, 여기에 기계적 효율과 모터의 효율, 그리고 인버터의 효율이 감안되기 때문이다. 설계점 뿐만 아니라 저유량 영역에서도 예측치와 거의 같은 성능을 얻었으며, 부분 부하(part load) 운전시에 중요시되는 서지여유(surge margin) 또한 만족할 만한 수준임을 확인하였다. 0.6 barG의 압력을 제공하는 설계점에서의 유량 54 m³/min은 동급 마력수의 루츠 블로워가 제공하는 유량보다도 2배 이상 많은 양에 해당한다.

7. 맺음말

고속 BLDC 모터와 인버터, 포일 공기 베어링 그리고 고효율 임펠러와 디퓨저를 채용한 75 마력급 터보블로워의 상품화 개발이 세계 최초로 성공적으로 이루어졌다. 이는 오폐수 처리장이나 분체이송용 블로워 국내의 시장을 현재 차지하고 있는 루츠 블로워나 링블로워 혹은 증속기어식 터보블로워를 대체할 차세대 신개념의 제품이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

- Hayami, H., 2000, "Improvement of the flow range of transonic centrifugal compressors with a low-solidity cascade diffuser," ASME Paper 2000-GT-0465
- Japikse, D., 1996, *Centrifugal compressor design and performance*, published by Concepts ETI
- Oh J.S., 1998, "Numerical Investigation of Internal Flow Field for Modified Design of Eckardt Backswept Impeller", ASME Paper 98-GT-296

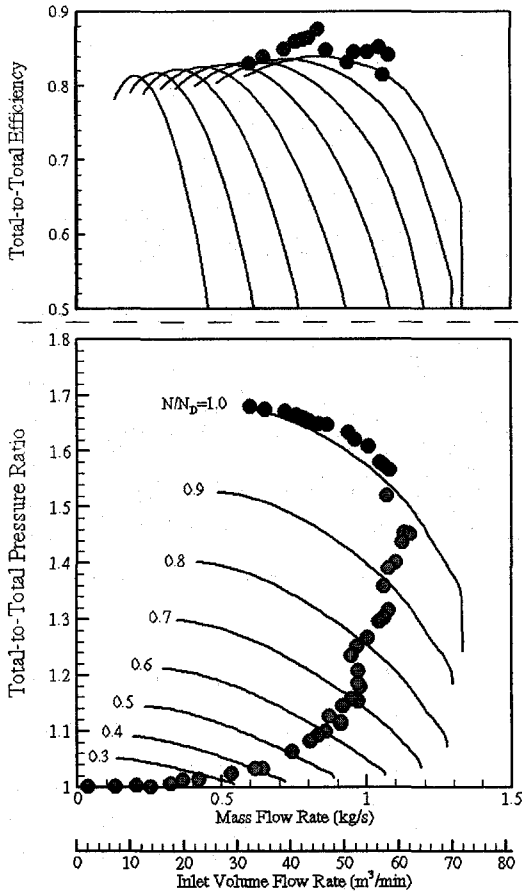


Fig.12 Turbo blower performance