

축류 송풍기의 공력학적 설계

손상범* · 주원구** · 조강래** · 남형백*** · 윤인규*** · 남임우***

Aerodynamic Design of the Axial Fan

Sang-Bum Sohn*, Won-Gu Joo**, Kang-Rae Cho**,
Hyung-Baik Nam***, In-Kyu Yoon***, Leem-Woo Nam***

Key Words: Axial Fan(축류 송풍기), Preliminary Design(초기 설계), Cascade Theory(익렬 이론)

ABSTRACT

In this study, a preliminary design method of the axial fan was systematically established based on the two-dimensional cascade theory. Flow deviation, lift coefficient, distribution of velocity and pressure coefficient on blade surfaces were predicted by an inviscid theory of *Martensen method*, which was also applied to select an airfoil of required performance in the present design process. The aerodynamic performance of designed blades can be predicted quickly and reasonably by using the through-flow calculation method in the preliminary design process. It would be recommendable to adopt three-dimensional viscous flow calculation at the final design refinement stage.

1. 서론

일반적으로 많이 쓰이는 축류 송풍기의 형상은 Fig.1.1과 같이 송풍기 내부로 유동을 안내하는 송풍기의 입구부분과 유체에 에너지를 전달하는 동익 부분, 회전 방향의 속도 성분을 정압으로 바꾸어 주는 정익 부분 그리고, 사용 목적에 맞도록 유동을 유출시키는 송풍기 출구 부분으로 나누어진 다.

본 연구에서는 축류 송풍기의 설계 과정에 대한 체계적인 이론을 정립하고자 한다. 초기 설계 단계에서는 이차원 익렬 이론을 기본으로 다양한 실험치와의 상관관계를 이용하여 동익과 정익을 설계하고 허브 형상을 결정한다. 동익과 정익의 설계에는 날개에 의한 유동의 전향과 양력 계수를 예측

하는 비점성 방법인 *Martensen* 방법⁽¹⁾을 도입한다. 초기 설계된 송풍기에 통과유동 계산방법(through-flow calculation)⁽²⁾, 또는 삼차원 난류 점성 수치해석⁽³⁾을 각각 적용하여 성능과 유동상태를 확인하고 보완할 수 있게 한다. 예측된 성능이 설계 사양과 차이가 생겼을 경우에는 여러 가지 설계인자를 변화시키며 초기 설계와 성능예측 과정을 반복 수행하여 최적화된 송풍기를 설계한다. Fig.1.2는 초기 설계와 성능 예측에 대한 개략적 순서도이다.

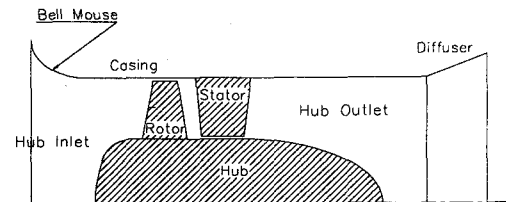


Fig.1.1 Configuration of axial fan

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계·전자 공학부

*** (주) 센추리

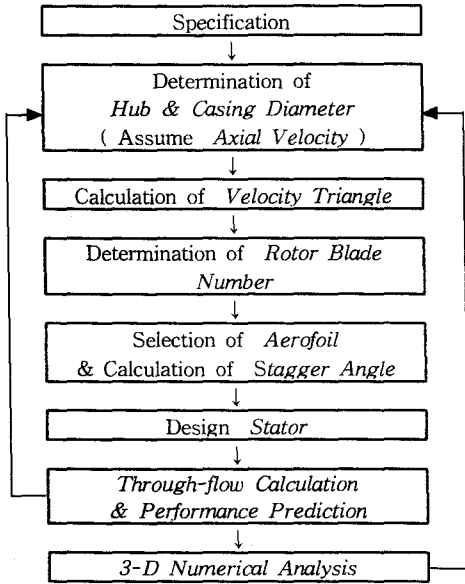


Fig.1.2 Design routine of axial fan

2. 설계 과정

2.1 설계 사양

축류 송풍기의 설계 사양은 사용 용도에 따라 다르지만, 기본적으로 유량, 회전수, 총압 상승량이 주어진다. 이 중 유량과 총압 상승량은 축류 송풍기의 설계에 반드시 필요한 설계 조건이고, 회전수는 설계 시방으로 주어지기도 하며 전동기의 용량에 맞추어 결정되어지기도 한다. 총압 상승량은 축류 송풍기 입구와 출구 사이의 총압 상승량을 의미하며 설계시에는 정익과 허브 등의 손실을 고려하여 이에 준하는 총압을 더하여 동익 설계에 필요한 설계 시방으로 주어져야 한다. 이를 이른 총압 상승량이라 하고, 축류 송풍기의 총압 효율(η)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$H_{th} = H / \eta$$

또는, $\Delta P_t = \rho g H_{th}$ (2.1)

2.2 내경 및 외경의 결정

외경을 결정할 때에는 동익과 정익에 의한 손실은 손실모델을 사용하고 허브와 케이싱 통로에서의 손실은 점성 난류 모델로 수치계산을 행하여 효율을 최대화하는 최적의 유량 계수

$$\phi_{opt} = \frac{V_x}{r_{tip} \Omega} \quad (2.2)$$

를 계산하고 이로부터 축 방향 속도를 결정하여야 한다.⁽⁴⁾ 그러나 외경이 결정되지 않은 상태에서는 적당한 축 방향 속도를 결정하기가 어려우므로 우선 축 방향속도를 가정한 후 외경을 결정하고 허브비를 이용하여 내경을 구한다. 계산된 외경과 내경으로부터 유량계수를 계산하고 이 값이 적당한 범위 내에 존재하는가를 검토하여야 한다.

또한 축류 송풍기의 내경은 일반적으로 전동기의 외경보다 커야하고 다음의 내경 제한조건을 만족하여야 한다.

$$r_h > \frac{30}{n\pi} \sqrt{gH_{th}} \quad (2.3)$$

이는 허브에서의 속도 삼각형이 물리적인 의미를 갖기 위한 조건이다.

2.3 동익 설계

2.3.1 속도 삼각형 결정⁽⁵⁾⁽⁶⁾

동익 및 정익 익렬에 대한 속도 삼각형은 Fig.2.1과 같다. 축 방향으로 들어온 유동은 오일러 방정식(Euler equation)에 의해 동익으로부터 $U(C_{\theta 2} - C_{\theta 1})$ 만큼의 일을 받고 $C_{\theta 2}$ 의 회전 방향 속도 성분으로 유출된다. 이 유동은 안내익에 의해 다시 축 방향으로 바뀌면서 정압이 상승된다. 이와 같은 속도 삼각형은 반경이 커짐에 따라 익렬의 원주 방향 속도 U 가 커지므로 Fig.2.2와 같이 유동각은 날개의 팁(tip)부분과 허브(hub)부분에서 큰 차이가 생긴다. 따라서 반경 방향으로 영각의 증대를 막기 위해 날개는 반경에 따라 날개 각을 변화시켜 주어야 하므로 날개는 비틀린 형태를 취하게 된다.

입구 안내깃이 없는 경우에는 대부분 동익전방에서의 원주방향 속도는 0이다. 평균 반경에서의 $C_{\theta 2}$ 는 설계 시방의 총압 상승량과 오일러 방정식을 이용하여 아래의 식으로부터 구해진다.

$$gH_{TH} = U(C_{\theta 2} - C_{\theta 1}) \quad (2.4)$$

평균 반경 이외의 반경에서의 회전 방향 속도 성분은 와류 설계법(vortex design)을 이용하여 구한

다. 와류 설계법에는 자유와류강도 설계법등 여러 가지가 있으나 현재의 설계에서는 혼합 와류 설계법을 사용하였다.

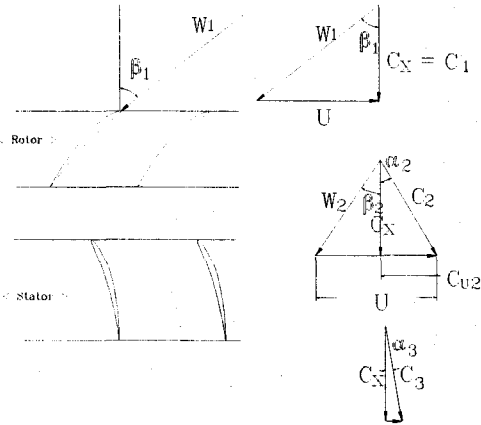


Fig.2.1 Velocity triangles

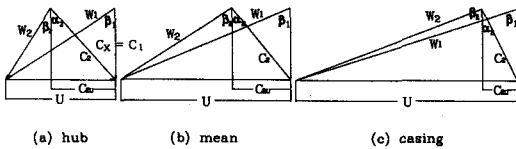


Fig.2.2 Velocity triangles at each radial position

이 와류 설계법은 아래와 같이 출구에서의 원주 방향 속도를 자유와류와 강제와류의 혼합된 형태 로 표현한다.

$$C_{\theta 2} = A \cdot r + \frac{B}{r} \quad (A, B \text{ 는 상수}) \quad (2.5)$$

이 와류식을 이용하여 설계하면 반경 평형 조건 은 만족되지는 못하나 허브에서의 부하를 줄일 수 있기 때문에 이를 사용하기로 한다. 일반적으로 동 의 허브에서 유동 박리에 의하여 손실이 커지면 서 이와 함께 이 부분에서 최대의 확산 계수 (diffusion factor)나타나게 된다. 따라서, 식(2.5)에 서 상수 A, B 는 평균 반경에서의 오일러 방정 식과 다음절에서 설명되는 허브에서 주어지는 최 대 확산 계수(DF)를 이용하여 구한다.

2.3.2 날개수 결정⁽⁷⁾⁽⁸⁾

날개의 개수를 결정하는 있어서는 송풍기 설계 시 중요한 파라미터인 확산 계수(diffusion factor)

를 이용한다. 확산계수는 Lieblein(1958)에 의해 제 안된 파라미터로서 형상손실(profile loss)을 계산 할 수 있는 운동량 두께(momentum thickness)의 크기와 관련이 있다. Fig.2.3 에서 익형의 종류에 무관하게 운동량 두께와 확산계수 사이에 상관관 계가 있음을 볼 수 있다. 확산계수가 0.6이상일 때 유동 박리에 의해 운동량 두께 즉 손실이 급격히 증가하기 때문에 일반적으로 설계시에는 확산계수 가 0.45정도 되도록 한다.

Lieblien이 제시한 확산 계수(DF)는 다음과 같 이 정의된다.

$$DF = \left[1 - \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} \right] + \frac{(\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \cos \beta_1}{2\sigma} \quad (2.6)$$

DF 가 주어지면 이 식으로부터 현절비(σ =익현 장/피치)를 계산할 수 있다.

여기서 익현장(chord)은 아래와 같이 가정된 종 횡비(aspect ratio)로부터 구해진다.

$$AR = (r_t - r_h) / c = 1.0 \sim 2.5 \quad (2.7)$$

따라서 날개수는 기하학적 관계식인 아래 식에 서 구해진다.

$$Z = (2\pi r \sigma) / c \quad (2.8)$$

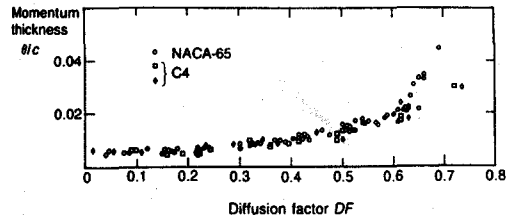


Fig.2.3 Wake momentum thickness versus overall diffusion factor for NACA65 and C4 aerofoil

평균 반경에서의 확산 계수를 작게 설정할수록 날개수는 늘어난다. 하지만, 날개수가 늘어남에 따 라 저유량에서의 실속 여유폭(stall margin)이 매 우 커져서 실속에 대한 가능성이 적어지므로 넓은 유량 범위에서 작동하는 축류 송풍기를 설계 할 경우에는 작은 확산 계수로 설계하는 것이 바람직 하다. 하지만, 사용 유량 범위가 좁은 경우에는 제 작비를 감안하여 적당한 개수의 날개가 설계되도 록 0.45 정도에서 확산 계수를 설정한다.

2.3.3 익형 설정⁽⁹⁾ 및 설치각 결정

익의 형상은 속도 삼각형 결정법으로부터 계산된 속도 삼각형의 전향각에 맞추어 결정할 수도 있고 성능이 입증된 기존의 익형을 선택하여 설계할 수도 있다. 설치각은 *Martensen* 방법을 이용하여 설치각을 반복 계산하여 결정할 수가 있다. 이 *Martensen* 방법은 이차원 익형상을 와류의 분포로 바꾸고 이로부터 익 주위의 속도 분포나 압력 분포 그리고 날개에 의한 유동의 전향각을 예측하는 비점성 이론으로, 비교적 정확한 유동의 전향각과 양력 계수값을 제시해 준다.

2.4 정익 설계⁽⁸⁾

정익의 개수는 보통 회전차와의 간섭을 줄이기 위해서 동익의 수보다 하나가 많거나 적도록 한다. 또한 정익의 길이는 동익과 같도록 가정하여 이로부터 정익의 현실비가 계산된다.

정익에 대한 유동의 유입각은 동익의 절대 유출각과 같고, 평균 반경에서의 정익의 속도삼각형은 정익의 유출각을 0° 이 되도록 선정한다. 다른 반경 위치에서의 속도삼각형은 와류 설계 방법에 따라 여러 가지가 있겠지만, 본 설계에서는 모든 반경 위치에서의 유출각이 0° 가 되도록 정익을 설계한다. 유입각과 유출각이 정해지면, 이에 맞는 정익을 설계할 수 있게 된다. 본 설계 방법에서는 C1익의 10%두께를 가진 *NGTE*익형으로 설계하는데, 이 익형은 캠버라인으로 원호익을 사용하고 *Lieblein chart*를 이용하여 형상을 설계 할 수 있다. 초기 가정된 캠버각과 *Lieblein chart*로부터 계산된 최소손실 입사각, 편차각 리고, 유동각으로부터 정익의 유출각은 다음식으로 계산된다.

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \theta_c - i^* + \delta^* \quad (2.9)$$

정익의 유출각이 0° 에 가깝게 되도록 즉, 유동이 축방향으로 흐르도록 캠버각을 반복 계산하여 구한후 다음식으로 설치각을 구함으로서 정익의 설계가 끝나게 된다.

$$\zeta = \alpha_1 - i^* - \frac{\theta_c}{2} \quad (2.10)$$

2.5 허브의 형상설계

축류 송풍기에 있어서 허브의 형상과 치수는 손실과 크게 관련되어 있기 때문에 송풍기 성능에

중대한 영향을 미친다. 설계에 있어서는 익렬 전방에서의 축방향 속도 분포가 반경 방향으로 균일하게 되도록 허브 형상을 선정하고, 허브 저항에 의한 손실이 가급적 작게 되도록 한다. 허브의 형상은 일반적으로 아래 Fig.2.4의 4가지를 생각할 수 있는데, 원통형의 형상(a)에서 유선형의 형상(d)로 갈수록 허브의 성능이 개선되고 총압 손실량이 줄어든다. 일정한 축 방향 속도 분포를 얻기 위해서는 허브 머리 부분의 형상을 가급적 유동을 교란하지 않는 유선형의 모양으로 하고, 또한 회전차 출구에서의 확대 손실이 성능에 상당한 영향을 끼치므로 형상(d)와 같이 급격한 유로 면적의 확대를 피하는 형상으로 설계해야 한다. 그러나, 실제 축류 송풍기에서 허브의 확산 손실이 작은 (d)의 형상을 사용하는 경우 모터가 허브 안에 있어야 하고 이럴 경우 모터의 냉각을 위해 냉각 팬을 설치해야 하므로 이에 따른 동력손실 및 제조 단가가 증가하게 된다. 따라서, 일반적으로 축류 송풍기에서는 (b)의 형상의 허브 후방에 모터를 설치하고 송풍기 내를 흘러가는 유동에 의해 모터가 냉각될 수 있도록 한다. 이럴 경우, 허브 확산 손실은 증가하지만 냉각 팬을 사용할 필요가 없으므로 더 경제적일 수 있다.

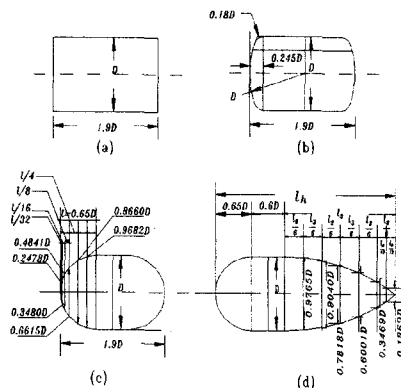


Fig.2.4 Configuration of hub shape

2.6 통과유동 계산(throughflow calculation) 방법을 이용한 성능예측

기본 설계가 끝나면 설계된 송풍기가 요구하는 유량과 압력상승을 만족시키는지 확인하여야 한다. 이것은 실험을 통해서 해야 하지만 초기 설계 단계에서는 비용과 시간을 줄이기 위해 계산을 통하여 성능을 예측한다.

송풍기에서의 유동은 매우 복잡한 3차원 유동이므로 3차원 난류 점성 유동계산을 통해서만이 비교적 정확하게 성능과 유동장의 구조를 계산할 수 있지만, 3차원 수치계산은 많은 계산시간과 고성능의 컴퓨터를 요구한다. 따라서, 초기 설계 단계에서는 매우 빠르게 성능을 예측할 수 있는 방법이 필요하며 손실을 고려하는 비점성 2차원 유동계산 방법인 통과유동 계산 방법이 주로 사용된다.

본 연구에서는 회전방향으로의 변화가 없는 축대칭($\partial/\partial\theta$)면으로 가정 한 자오면에서 유동의 물리적 의미를 강조하고 어느 형상에서나 적용 가능한 Denton(1978)의 유선 곡률법(streamline curvature method)⁽²⁾을 이용하였다. 또한 손실은 동익과 정익에서만 발생한다고 가정하였고, 익형상 손실과 이차유동 손실 모델을 적용하여 성능을 예측하였다.

2.7 완전 3차원 난류 점성 유동 계산 방법을 이용한 성능예측

초기 설계를 마친 송풍기는 제작하여 성능을 측정하기 이전에 설계가 제대로 되었는지를 좀 더 정확하게 검사하기 위하여 완전 3차원 난류 점성 유동 수치계산 방법을 사용하여 성능계산을 수행한다. 만약 예측된 성능이 실제 사양과 차이가 생겼을 경우에는 허브비, 유량계수, 총횡비 등의 설계인자를 변화시키며 초기 설계와 성능예측 과정을 반복 수행하여 최적화된 송풍기를 설계한다.

3. 적용 사례

3.1 설계 사양

지금까지의 설계법을 사용하여 Table.3.1의 설계 사양을 만족하는 축류 송풍기를 설계하였다.

Table.3.1 Specification of Axial Fan

Flow Rate (m ³)	5.663
Total Pressure Rise (Pa)	510
Rotation Speed (rpm)	1770
Hub Radius (m)	0.178

Table.3.1의 총압 상승량은 송풍기 입구와 출구 사이의 값으로서 동익 설계시에는 허브와 정익의 손실을 고려하여 다음의 이론 수두를 이용하였다.

$$H_{th} = H / (\eta_r \eta_a) = 800 Pa$$

여기서, η_a 는 축류 송풍기의 입구와 출구, 정익

의 손실을 고려하여 70%로 가정하였고 η_r 는 동익의 손실을 고려하여 90%로 가정하였다.

3.2 외경의 결정

설계 시방에는 송풍기의 전동기 크기를 고려하여 내경이 주어져 있다. 따라서 이 과정에서 외경만을 결정하면 된다. 우선 동익 전방에서의 유동이 회전 방향의 속도 없이 축 방향만으로 유입되고 동익 익렬의 효율을 90%로 가정하였을 때, 내경의 제한조건을 만족하고 있었다. 그리고 축방향 속도를 20.46m/s로 가정하여 축류 송풍기의 외경(0.346m)을 구하였다.

3.3 동익 설계

먼저 허브에서의 부하를 줄이기 위하여 와류설계법으로 일정 반동도 와류 설계법을 적용하여 속도 삼각형을 결정하였다.

날개의 개수는 확산 계수를 이용하여 정해지게 되는데, 본 설계에서는 축류 송풍기의 제작비용을 고려하여 날개의 개수를 10개로 고정하였고, 각 반경위치에서의 확산 계수가 0.45보다 작을지 확인하였다. 본 설계에서는 허브에서 설치각에 의한 영각이 13°가 넘지 않도록 확산계수를 0.385로 가정하였다. 또한 총횡비는 각 반경위치에서 일정하게 1.3으로 가정함으로써 익현장은 0.13m로 일정하게 결정되었다.

동익 익형은 축류 송풍기의 성능 범위에서 가장 적합한 NACA 4 Digit 익형 중 최대 캠버의 크기가 익현장의 2%이고 최대 캠버의 위치가 익현장의 40%에 위치한 NACA 24 익형으로 설계하였다.

설치각은 먼저 주어진 익형에 대해서 비교적 정확한 유동의 전향을 제시해 주는 Martensen 방법을 이용하여 반복 계산하여 결정하였다. 여기서 결정된 설치각이 설계 결과를 만족하는지 확인하기 위하여 3차원 점성 수치계산을 행하여 보았다. 수치계산 결과 동익 익렬의 상대 출구각이 설계와는 약간 다르게 나타나고 있었다. 이는 앞에서 비점성 이론인 Martensen 방법으로 설치각을 결정하였는데 실제의 유동은 점성 유동이기 때문이다. 따라서 설치각을 약간씩 변화시키면서 반복적으로 3차원 점성 수치계산을 수행하여 설계된 동익 익렬의 출구각이 되는 점을 찾아내었다.

3.4 정익 설계

정익은 축류 송풍기의 제작 비용을 고려하여 앞에서 개발한 NGTE익을 사용하지 않고 두께가 얇고 일정한 원호 캠버를 사용하여 설계하였다. 정익의 개수는 동익과의 간섭을 줄이기 위하여 동익의 개수보다 하나가 많도록 하였으며 익현장은 동익의 1.5배로 가정하여 설계하였다.

3.5 설계 결과 및 성능곡선

Table.3.2, 3.3는 각각 설계된 동익과 정익의 형상 치수와 유동 변수를 제시하였다.

설계된 축류 송풍기를 제작하여 성능시험을 수행하였다. Fig.3.1을 보면 설계된 송풍기가 설계 사양과 일치함을 알 수 있다. 따라서 개발된 설계 방법이 타당함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 이차원 익렬 이론을 이용한 축류 송풍기 설계 방법을 체계적으로 확립하였다. 최종적으로 개발된 설계 방법으로 실제 축류 송풍기를 설계하였고, 이를 제작하여 성능 시험을 수행하였다. 측정된 성능을 설계 사양과 비교하여 개발된 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

Table.3.2 Result of rotor blade design

Blade Number	10				
Chord(m)	0.13				
Radius(m)	0.178	0.227	0.275	0.311	0.346
Blade(NACA)	2409	2408	2408	2407	2407
Stagger(°)	44.7	55.0	61.4	64.9	67.1
Attack(°)	12.837	8.868	7.016	6.349	6.177
Pitch(m)	0.112	0.142	0.173	0.195	0.217
Solidity	1.156	0.908	0.748	0.662	0.595
Lift Coefficient	0.632	0.656	0.689	0.727	0.767
DF	0.385	0.371	0.366	0.366	0.369
C_{2d} (m/s)	12.508	12.420	12.877	13.407	14.045
Rel. flow inlet angle(°)	57.133	63.091	67.320	69.685	71.619
Rel. flow outlet angle(°)	43.860	54.222	60.794	64.240	66.953
Deflection(°)	13.273	8.868	6.526	5.445	4.665

Table.3.3 Result of stator blade design

Blade Number	11				
Chord (m)	0.195				
Radius (m)	0.178	0.227	0.275	0.311	0.346
곡률반경 (m)	0.353	0.316	0.277	0.249	0.224
Stagger (°)	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45

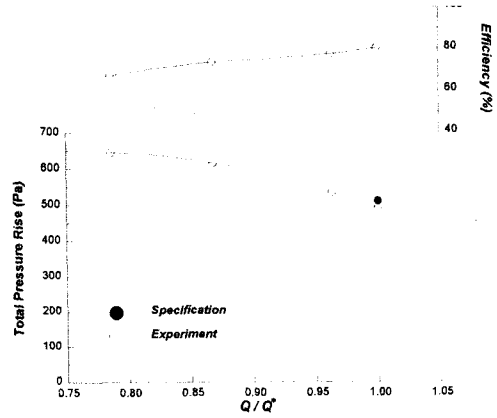


Fig.3.1 Performance Curve

참고문헌

- (1) Lewis,R.I., Turbomachinery Performance Analysis,1996, John wiley & Sons Inc.
- (2) Denton, J.D., Throughflow calculations for transonic axial flow turbines, ASME Journal of Engineering for Power, vol 100, p212-218, 1978
- (3) Patankar, S.V., Numerical heat transfer and fluid flow,Hemisphere, Washington, DC.,1980.
- (4) 안광협, 주원구, 조강래, 축류 송풍기의 유입속도 허브비의 선정, 유체기계공업학회 '98 강연회 및 연구개발 발표회 논문집
- (5) Dixon,S.L., Fluid mechanics, Thermodynamics of turbomachinery, 3rd edition, Pergamon Press, London, 1978.
- (6) Horlock,J.H., Axial flow compressors-Fluid mechanics and Thermo- dynamics, Krieger Publishing Co., INC. Huntington, Newyork,1973.
- (7) Wallis,R.Allan, Axial flow fans and ducts, Krieger Publishing Co., Malabar, florida, 1993.
- (8) Cumsty,N.A, Compressor Aerodynamics, Copulished in the United States with John Wiley &Sons, Inc., Newyork,1989.
- (9) Abbott, Ira H., Theory of Wing Sections, Dover Publication, INC.1959.