

2차원 원심식 터보기계의 성능특성에 관한 연구

최민선* · 김춘식** · 이영호***

A Study on the Performance Characteristics of the 2 - D Centrifugal Turbomachinery

M. S. Choi · C. S. Kim · Y. H. Lee

Key words : Centrifugal pump(원심펌프), Impeller design(임펠러설계), Logarithmic blade (나선형익), Head coefficient(양정계수), Flow coefficient (유량계수)

Abstract

The design technique of turbo pumps has been developed due to an increasing demand from related industrial fields. But infant stage of turbomachinery in the domestic industry needs more fundamental design method. Among various types of pumps, centrifugal pump was chosen because of its wide industrial application.

It is difficult to decide the correct specification of centrifugal impeller, because of its complex flow analysis at the inlet, passage and outlet. This study is limited on the impeller blade design and its related performance analysis.

Flow fields in a centrifugal impeller of logarithmic blades with a sharp leading edge are analysed by adopting a 2nd - order accuracy vortex panel method assuming that the flow is two dimensional, steady, incompressible, inviscid and irrotational. The velocity field and the pressure distributions are examined for various flow rates, outlet angles and blade numbers. The head coefficient and the flow coefficient characteristics are also discussed.

기호설명

b_2 : 임펠러출구에서 익 두께

H_{th} : 이론양정

\mathbf{n} : 법선방향 단위벡터

Q : 유량

r_1 : 임펠러 입구반경

r_2 : 임펠러 출구반경

u_2 : 임펠러출구에서 접선방향속도

z : 임펠러 익수

* 정회원, 목포해양대학교

** 정회원, 한국해양대학교 해사대학

*** 정회원, 한국해양대학교 이공대학

- β_1 : 익 입구각
- β_2 : 익 출구각
- Γ : 익 주위 순환(circulation per blade)
- Ψ : 양정계수(head coefficient)
- φ : 유량계수(flow coefficient)
- ϕ : 속도포텐셜

1. 서 론

터보기계의 설계에는 유체공학에 관련된 광범위한 지식¹⁾²⁾을 요구하며, 이에 관한 국산화설계기술은 아직 미약한 실정이다. 지금까지는 주로 선진국으로부터의 기술이전에 의존하고 있으나, 기술보호장벽으로 인하여 자체개발의 필요성이 증가하고 있는 추세이다. 국내에서 소수의 기업이 터보기계를 생산하고 있으나, 거의 외제품을 모방하는 단계이며, 순수기술개발에 의한 제품설계는 초보적인 수준으로 보고되어 있다. 특히, 설계의 초기 단계에서, 다양한 유동조건에 대응하여 터보기계의 성능평가를 간편하게 수행할 수 있는 방법을 확보하는 것은 관련 설계기술에 반드시 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 관점에서 2차원의 원심터보기계의 유동특성을 용이하게 평가할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

터보기계의 성능평가를 위한 수치해석기법은 유동장의 종류에 따라 다양한 방법이 제시되고 있다. 여기에서는 원심펌프의 임펠러의 성능평가를 위한 유동해석수법으로 비압축성, 비점성유체를 대상으로 한다. 대상물체를 미소직선패널로 근사시켜 2차정도를 갖는 와류를 분포시키고 경계조건을 만족하는 무차원 와류 강도를 구하는 와류패널법(vortex panel method)³⁾을 적용한다. 또한, 익형상 결정에 있어서 종래에 제시되어 온 1원호익과 2원호익의 기법⁴⁾을 검토하였으며, 본 연구에서는 임의의 두께 및 입출구각도를 갖는 나선형임펠러의 익형상결정에 관한 방법 및 와류패널법을 이용하여 임의의 익수 및 익각을 가진 나선형 임펠러의 양정과 유량을 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 적용예로서 익각도, 익수 및 유량계수의 변화에 의한 압력분포 및 속도분포를 비교하고, 또한 유량계수 및 양정계수를 구하여 임펠러의 성능특

성을 검토하였다.

2. 이론해석

2. 1 지배방정식

2차원 익에서 비압축성 포텐셜유동⁵⁾의 비회전 조건과 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

여기서 u, v 는 x, y 방향의 속도성분이다. 식(1)과 식(2)의 해는 다음과 같은 Laplace방정식을 만족시킨다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \tag{3}$$

임펠러익의 경계조건은 익면에서의 속도방향이 접선방향이며, 법선방향 속도성분은 0으로 취하는 방법을 택하며 다음식으로 표현된다.

$$\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{4}$$

2. 2 양정계산^{6) 11)}

터보기계는 유체에 에너지를 주는 기계로 터보기계가 유체에 해준 일을 예측하는 것은 매우 중요하며 이것은 보통 양정으로 표시한다. 익주위의 순환(circulation) Γ 를 구할 수 있으므로, 익수 유한의 흐름에서 임펠러에 의해 유체에 공급한 이론양정(theoretical head) H_{th} 는 다음과 같다.

$$H_{th} = \frac{Z \cdot \Gamma \cdot \omega}{2\pi g} \tag{5}$$

터보기계의 성능은 보통 양정계수(head coefficient) Ψ 와 유량계수(flow coefficient) φ 로 나타낸다.

$$\Psi = \frac{H_{th}}{u_2^2 / g} = \frac{Z}{2\pi} \left(\frac{\Gamma}{u_2 r_2} \right) \tag{6}$$

$$\varphi = \frac{Q}{2\pi r_2 \cdot b_2 \cdot u_2} \tag{7}$$

여기서, u_2 는 임펠러출구에서 접선방향속도, b_2 는 임펠러출구에서 익 두께이다.

3. 임펠러 익형상 설계

터보기계의 임펠러에는 여러 가지의 익형이 사용되고 있으나 이를 설계하는데 필요한 해석적인 접근이 어렵다. 기본적으로는 익사이의 흐름이 가장 자연스럽게 흘러가도록 하여 유체에너지의 변환에 수반하는 손실을 극소화하는데 요점을 두고 있다. 일반적으로 원심형 임펠러의 설계^{12) 14)}에는 원호법과 나선형법이 있다.

3.1 원호법

가. 1원호법

$d_1, d_2, \beta_1, \beta_2$ 의 입출구제원을 만족하는 익의 1원호의 반경은 다음과 같다.

$$R = \frac{d_2^2 - d_1^2}{4(d_2 \cos \beta_2 - d_1 \cos \beta_1)} \quad (8)$$

단, d_1 는 임펠러 입구직경, d_2 는 임펠러 출구직경, $\beta_1 = \angle OAP, \beta_2 = \angle OBP$ 이다.

Fig.1과 같이 익선단 B부터 작도한다. 이와 같은 방법은 간단하고, 양호한 특성을 나타내지만, 임펠러 입출구의 조건만으로 결정하므로 익전체에 걸친 최적형상을 얻는 것이 곤란한 점이 있다.

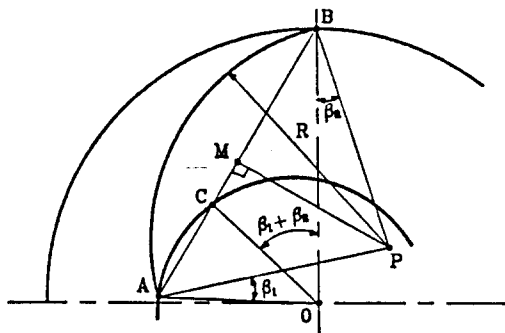


Fig. 1 One - Circular Arc Blade

나. 2원호법

익길이를 조정할 수 있는 방법으로 2원호법이 있다.

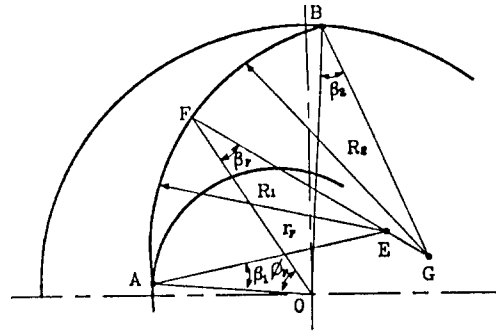


Fig. 2 Two - Circular Arc Blade

$$R_1 \geq \frac{d_1 \sin \beta_1}{2} \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2(r_2 \cos \beta_2 - r_1 \cos \beta_1)} \quad (10)$$

단, $R_1 = \overline{AE}, R_2 = \overline{EG}, r_2 = \overline{OB}, r_1 = \overline{OF}, \beta_1 = \angle OAE, \beta_2 = \angle OBG, \beta_F = \angle OFE$ 이다.

Fig. 2와 같이 익입구단 A부터 작도한다. 일반적으로 동일한 임펠러 출구조건에 대해서 2원호익의 경우가 1원호익보다 최적형상결정에 유리하다.

3.2 나선형법

본 연구에서 제시한 익형상 결정방법으로, Fig. 3의 임펠러축을 원점으로 하는 원주좌표계(r, φ)에서 익곡선AB를 나타내는 식은 다음과 같다.

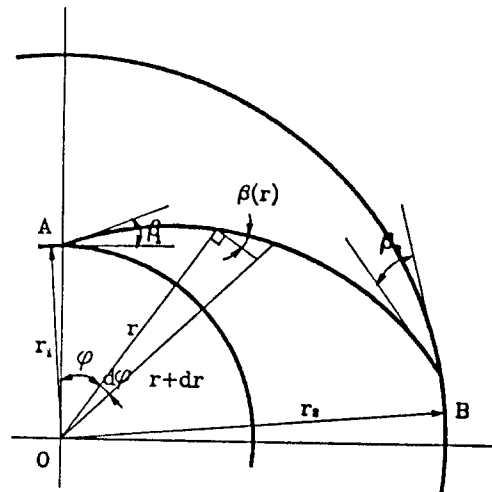


Fig. 3 Logarithmic Blade

$$\varphi = \frac{\pi}{180} f(r) \tag{11}$$

식(11)과 β 사이에는 기하학적으로 다음과 같은 관계가 있다.

$$\tan \beta = \frac{dr}{rd\varphi} \tag{12}$$

식(12)를 정리하면 다음과 같이 표현된다

$$d\varphi = \frac{dr}{r \tan \beta} = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}}{\sin \beta} \frac{dr}{r} \tag{13}$$

따라서, β 와 r 의 관계, 즉, $\beta(r) = \beta$ 가 주어지면 익곡선의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varphi - \varphi_1 &= \frac{\pi}{180} \int_{r_1}^r f(r) dr \\ &= \frac{\pi}{180} \int_{r_1}^r \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}}{r \sin \beta} dr \end{aligned} \tag{14}$$

점(r_1, β_1)과 점(r_2, β_2)을 연결하는 적당한 곡선을 가정하여 식(14)의 적분을 행하면 익곡선 $\varphi = \frac{\pi}{180} f(r)$ 을 구할 수 있다. 익곡선 $\varphi = \frac{\pi}{180} f(r)$ 상에서 미소거리를 갖는 두점(x_1, y_1), (x_2, y_2)을 생각한다. 이 때, 점(x_1, y_1)에서 두께 $2c$ 를 갖는 원의 방정식 및 이 점에서의 법선방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = c^2 \tag{15}$$

$$y - y_1 = -\frac{(x_2 - x_1)}{(y_2 - y_1)}(x - x_1) \tag{16}$$

단, $x_1 = r_1 \cos(\tau - \varphi_1)$, $y_1 = r_1 \sin(\tau - \varphi_1)$, $x_2 = r_2 \cos(\tau - \varphi_2)$, $y_2 = r_2 \sin(\tau - \varphi_2)$ 이다.

식(15)와 식(16)을 연립방정식으로 풀면 압력면 및 흡입면상에서 익두께 $2c$ 에 해당하는 두점의 좌표를 구할 수 있다. 따라서 반경 r 에 따르는 익각 $\beta(r)$ 을 일정한 각도간격으로 증가 또는 감소시켜 임의의 두께를 갖는 나선형익의 형상을 결정할 수 있다.

4. 수치해석결과 및 고찰

Table 1과 같은 조건하에서 1원호법에 의해 설계한 원호익 및 본 연구에서 제시한 나선형익에 와

류패널법을 적용시켜 임펠러의 성능평가를 행하였다. 즉, 2차원 나선형익에 대해서 익의 입출구각도 변화, 익수변화 및 유량계수변화에 따른 속도 및

Table 1 Calculation Condition

Impeller inlet radius	$r_1 = 60mm$
Impeller outlet radius	$r_2 = 100mm$
Blade inlet angle	$\beta_1 = 21^\circ$
Blade outlet angle	$\beta_2 = 35^\circ$
Blade number	$Z = 6$
Blade thickness	$3mm$
Blade breadth	$15mm$
Flow rate at max. efficiency	$Q = 0.256m^3/min$
Dimensionless flow coefficient	$\varphi = 0.216$
Speed	$N = 200rpm$

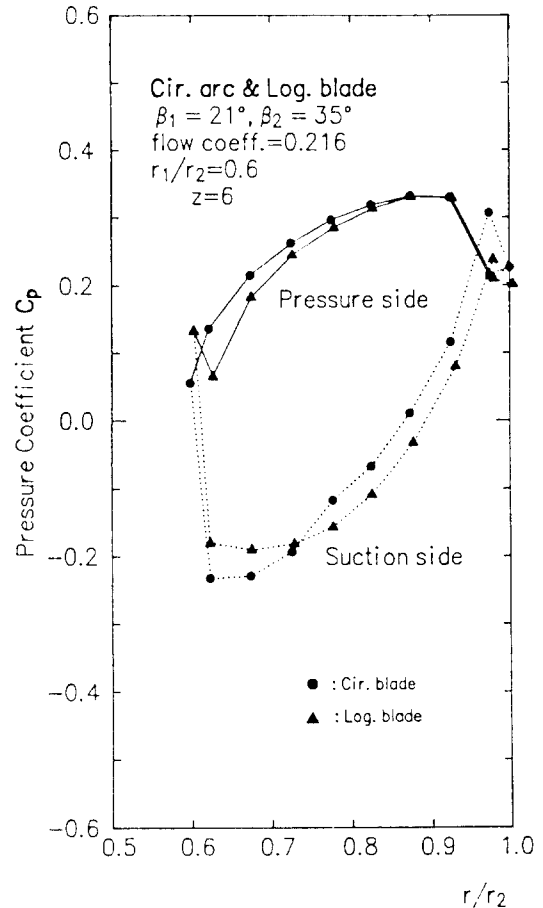


Fig. 4 Cp Comparison

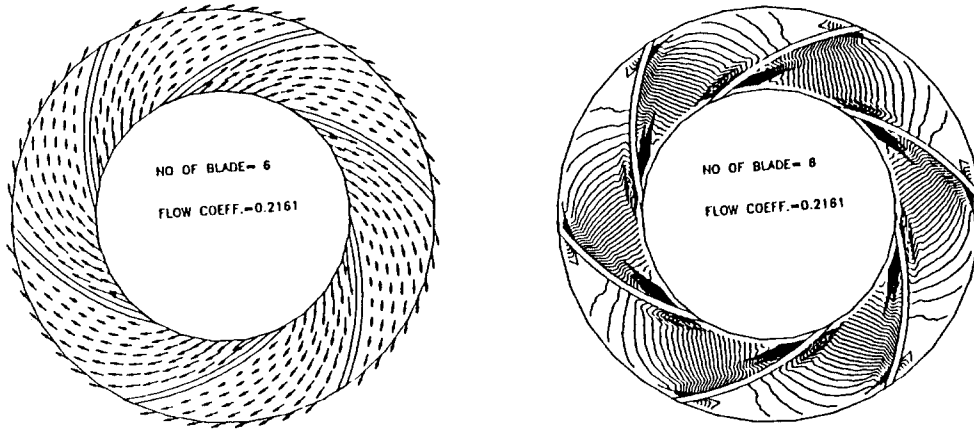


Fig. 5 Flow Pattern of Circular Blade

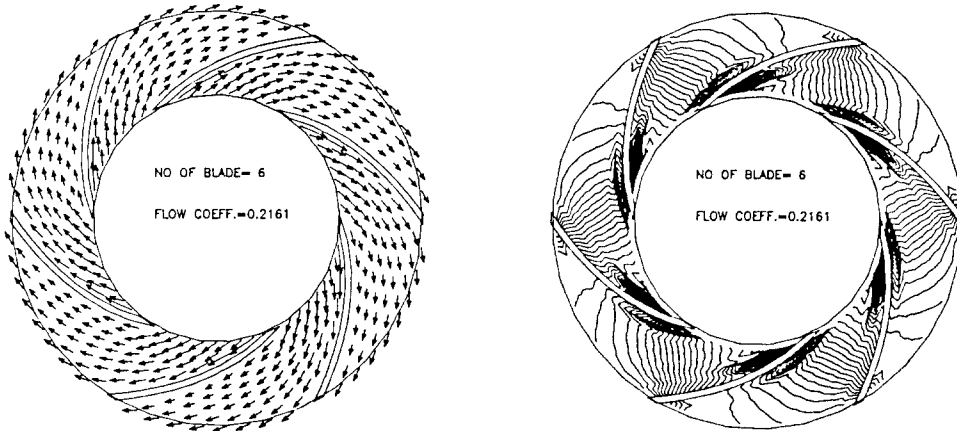


Fig. 6 Flow Pattern of Logarithmic Blade(Z=6)

압력변화를 고찰하였다. 여기에서는 볼류트케이싱의 영향 및 임펠러의 예회전(pre-rotation)은 무시하였다. 또한, 익폭 방향의 입구속도는 일정하다고 가정하였다. 본 연구에서 채택한 미소패널수는 익당 18개이며 최대익수는 6개이다. 퍼스널컴퓨터(386DX2)를 이용하여 약 3분 정도의 계산시간을 요하였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 설계기법은 와류패널법과 연계하여 임의 형상에 대하여 간편하게 성능특성을 구할 수 있다.

Fig.4는 $z=6$, $\beta_1=21^\circ$, $\beta_2=35^\circ$, $\varphi=0.216$ 의 조건하에서 1원호익과 본 연구에서 제시한 나선형익의 익면에서 압력계수분포를 나타낸다. 1원호익에 관한 유동해석결과는 다른 문헌^{15),16)}을 참고하기로 한다. 그림에서 나선형익의 경우, 압력면 입구를

제외하고는 전반적으로 비슷한 경향을 보이고 있다. 또한, 흡입면에서의 압력증가가 보다 완만하게 나타난다. 한편, 전연부 흡입면에서 1원호익에 비하여 나선형익의 압력계수가 약간 크게 나타남으로서 캐비테이션대책에는 유리할 것으로 예상된다.

Fig. 5는 동일한 조건하에서 익사이의 속도분포 및 압력분포를 보이고 있으나 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8은 $\beta_1=21^\circ$, $\beta_2=35^\circ$ 에서 익수변화에 따른 유동특성을 보이고 있으나 유사한 모양을 보이고 있다. 그러나, 압력구배는 익의 수가 적을수록 약간 크게 나타나고 있음을 알 수가 있다. Fig.9는 이 경우에 있어서 익면상의 압력분포를 보이고 있다. 전체적으로 유동장

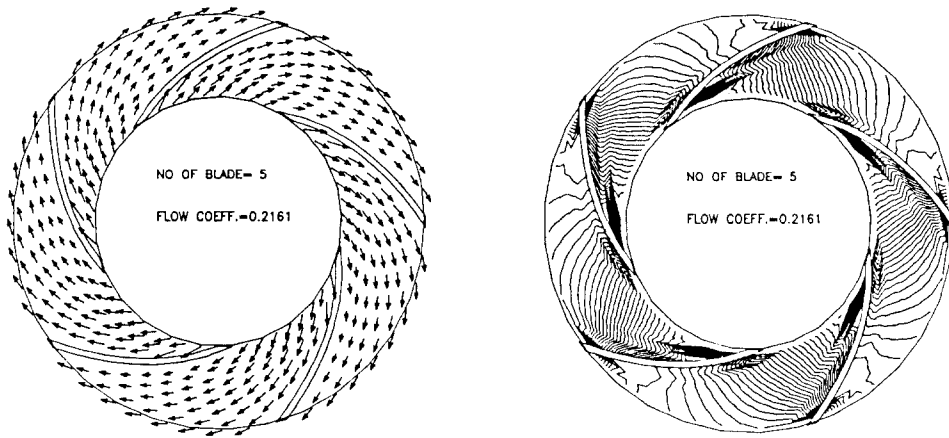


Fig. 7 Flow Pattern of Logarithmic Blade(Z=5)

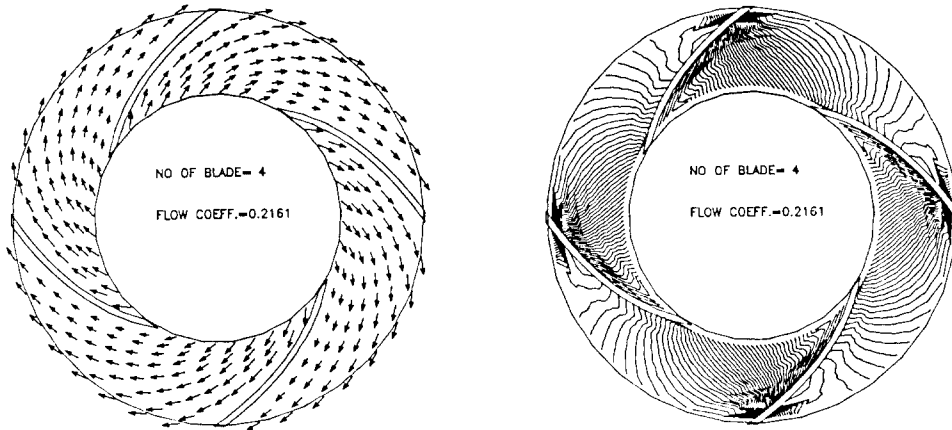


Fig. 8 Flow Pattern of Logarithmic Blade(Z=4)

은 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 그러나, 익사이의 통로는 곡선디퓨저의 역할을 수행하므로 익수가 증가할 수록 유입유체의 안내 및 압력회복에 유리할 것으로 보여진다.

Fig. 10은 $z=6$, $\beta_1=21^\circ$, $\beta_2=35^\circ$ 인 조건하에서 유량계수변화에 의한 압력계수분포를 나타낸다. 저유량일수록 유속이 감소하며, 임펠러익의 압력면 및 흡입면의 압력계수가 전반적으로 크게 나타난다. 대유량인 경우에는 압력계수가 감소하며, 특히, 압력면의 전면부에서 급격한 압력강하가 나타나고 있다. 실제의 점성유체에서는 최대효율점에서의 유량보다 적거나 많은 경우에는 유체의 충돌 또는 박리현상에 의해 손실이 급격히 증가하고 있다. 따라서, 압력분포는 다르게 나타날 것으로 예

상한다.

Fig. 11은 $z=6$, $\beta_1=30^\circ$ 에서 나선형익의 출구각의 변화에 따른 압력계수분포를 보이고 있다. 일반적으로 원심형 터보기계의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 익의 출구각도이며, 본 연구에서도 이에 관한 영향이 잘 나타나고 있다. 즉, 출구각도가 적을수록 압력면과 흡입면사이의 압력차가 작아짐으로서 얻을 수 있는 전양정이 감소한다. 그러나, 각도가 클 경우에는 전양정의 값을 크게 얻을 수 있으나, 이 경우에는 흡입면에서의 급격한 압력강하로 인하여 캐비테이션발생이 문제가 된다.

Fig.12에서 실험⁶⁾에 의한 임펠러의 양정및 유량 곡선 즉, 양정계수와 유량계수의 관계를 Δ 으로, 등각사상법에 의한 두께가 없는 나선형익에 대한

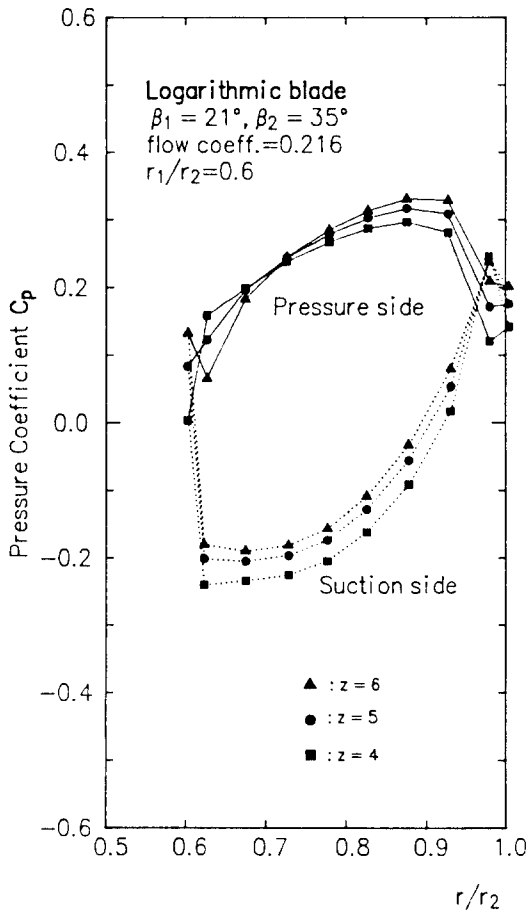


Fig. 9 C_p with Different Blade Numbers

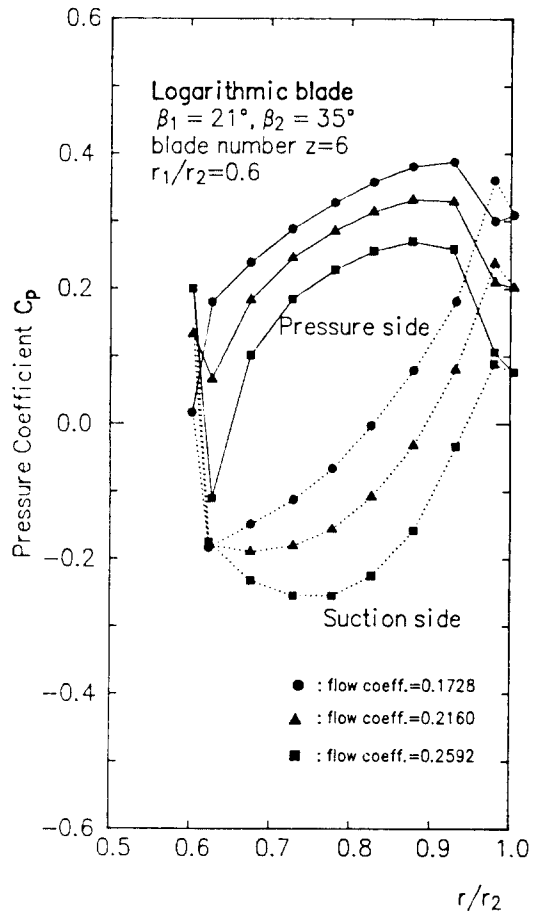


Fig. 10 C_p with Different Flow Coefficients

Kamimoto에 의한 Busemann의 2차원 이론계산 결과를 \circ 로, 본 연구에서는 임의의 두께를 갖는 나선형익에 2차 정도의 와류패널법을 이용하여 구한 익주위의 순환을 식(6)에 적용한 양정계산결과를 \square 로 나타내고 있다. 본 연구로부터 구한 계산치는 실험결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 유량이 증가할 수록 양정은 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

Fig.13은 회전수가 일정한 경우 임펠러의 양정계수와 유량계수의 관계를 나타내고 있다. $Z=\infty$ 즉, 익수 무한인 경우 Euler의 일차원이론에 의한 계산값을 \circ 로, 본 연구는 익수 유한인 경우로 2차 정도의 와류분포로부터 구한 임펠러의 순환으로부터 양정계산결과를 표시하고 있다. 익수무한에 비하여 익수가 유한인 경우 이론양정은 감소하는

데 익수 유한인 경우 유체는 익곡선을 따르지 않고, 익출구에서 익양면의 압력차의 영향으로 익출구각도 β_2 보다 작은 각도로 유출하기 때문인 것으로 보여진다. 또한, 그림에서 익수 유한인 경우에는 익수가 증가 할 수록 양정 및 유량곡선은 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

이상의 연구결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 2차원 터보기계 임펠러의 익 형상의 결정에 임의의 입출구각도 및 익두께에 의한 나선형익의 수치설계방법을 제시하였다.
- 2) 2차원 나선형익에 와류패널법을 적용하여 익

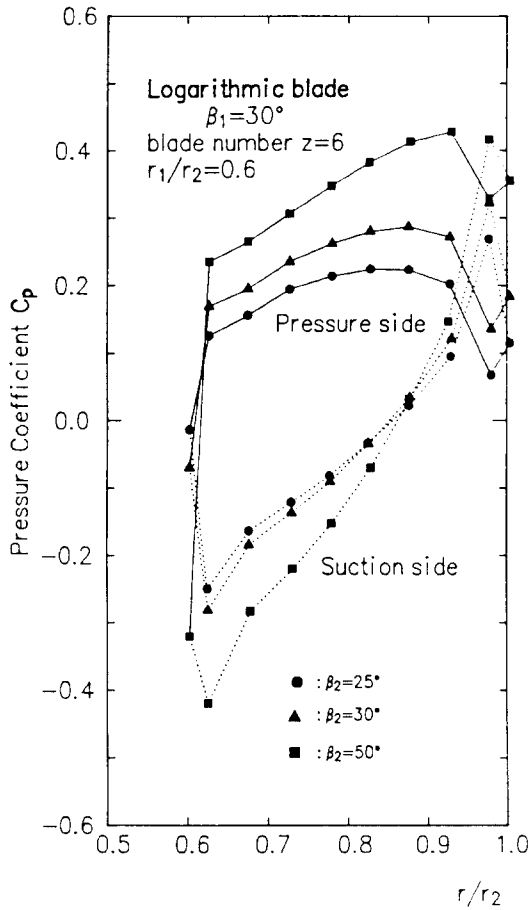


Fig. 11 C_p by Outlet Angles

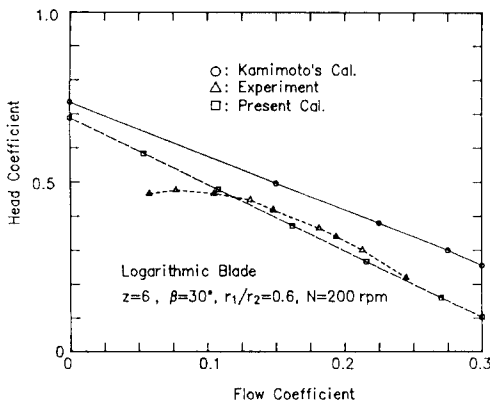


Fig. 12 Experimental and Theoretical Head versus Flow Characteristics

각도, 익수, 유량계수에 의한 임펠러의 유동해석을 행하였다.

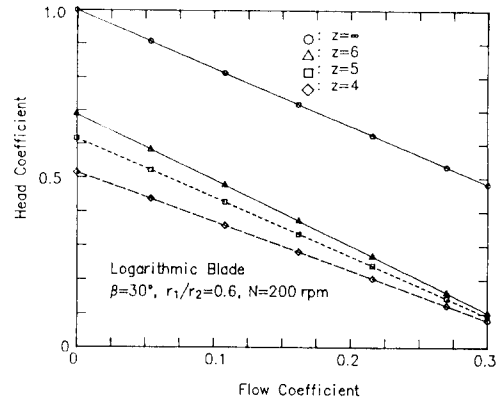


Fig.13 Theoretical Head versus Flow Characteristics

3) 이론양정은 유량증가에 따라 거의 선형적으로 감소하고, 익수 증가에 따라 양정도 증가함을 알 수 있다.

4) 터보기계 성능평가를 위해 와류패널법을 이용하여 임의의 익수 및 익각을 가진 나선형 임펠러의 양정과 유량관계를 용이하게 구할 수 있다.

5) 본 연구에서 제시한 나선형 익설계방법은 와류패널법과 연계하여 원심펌프, 압축기, 송풍기 등의 터보기계 기초설계에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- 1) 김춘식 외 2인, 유체기계, 대학도서, pp. 1 - 83 (1981).
- 2) 日本機械學會編, 機械工學便覽(流體機械), pp. 69 - 77(1986).
- 3) 최민선, 김춘식, 2차원 터보기계의 성능평가를 위한 Vortex Panel법에 관한 연구, 한국해양대학교대학원 논문집, Vol. 12, pp. 257 - 271(1990).
- 4) 최민선, 김춘식, 이영호, 2차원 터보기계의 임펠러익 형상에 따른 성능특성에 관한 연구, 한국박용기관학회, 춘계공동학술강연회 초록집, pp. 1 - 8(1994).
- 5) 이봉준, 날개(에어포일)이론, 한국항공대학교출판부, pp. 136 - 170(1986).
- 6) 神元五朗, 流羽根車内の流れ, 日本機械學會誌 第62卷 第45號, pp. 84 - 92(1959).
- 7) ターボ機械協會編, ターボポンプ, 日本工業出版,

- pp. 22 - 25(1991).
- 8) 大坂英雄, 林 農 外2人, 流體機械, 朝倉書店, pp. 15 - 18(1990).
 - 9) 藤本武助, 流體の力學と流體機械, 養賢堂, pp. 260 - 306(1968).
 - 10) 조강래, 유체기계, 보성문화사, pp. 36 - 74(1992)
 - 11) 廣津萬里, 水流工學, 實教出版株式會社, pp. 124 - 165(1973).
 - 12) 令市憲作 外 2人, パソコンによるポンプ 設計の基礎, pp. 9 - 91(1985).
 - 13) 鹽見春雄 外 2人, 機械設計製圖演習1(第3版), オーム社, pp. 34 - 40(1979).
 - 14) Igor J. Karassik et.al., Pump Handbook, McGraw - Hill, pp. 2.2 - 2.15(1976).
 - 15) 최민선, 김춘식, 이영호, 2차원 터보기계에서의 와류 패널법 적용, 대한기계학회 92년도 추계학술대회 논문집(Ⅱ), pp. 208 - 211(1992).
 - 16) 최민선, 김춘식, 이영호, 2차원 터보기계에서의 와류 패널법 적용에 관한 연구, 한국박용기관학회지, Vol. 17 No. 2, pp. 44 - 51(1993).