

원심펌프 회전차 형상 설계에 대한 연구

김 진 환*
(97년 6월 7일 접수)

A Study on a Design for a Centrifugal Pump Impeller Shape

Jin-Whan Kim*

Key Words : Flow Rate, Total Head, Theoretical Head, Specific Speed, Windows, Bezier Cubic Curve, Visual Basic.

Abstract

In this study, a design for a shape of centrifugal pump impeller has been performed using a p.c. under a Windows environment. Interaction between a user and a computer has been easily established using the Visual Basic. In determining an outer diameter of an impeller, steps are divided into two, a basic computational step and a refinement step. In this way user can enter his/her experience at the refinement step and hence can expect to lessen the nonlinear nature inherent to the design. In determining a shape of a side view of an impeller, the Bezier cubic curve has been used, and it can be seen that the Bezier cubic curves are well suited in the shape design under a Windows environment. By simply manipulating the four control points, one can generate various cubic curves among which one is selected. Also, a simple method, which can determine the curved position of an impeller vane, has been developed. These data can be used for final CAD drawings.

1. 서 론

원심펌프란, 이를 간단히 정의하자면, 액체에 고속의 회전력을 가하여 생긴 운동에너지를 원심형 실 및 송출 관로를 통과하는 동안 압력에너지를 회수하는 장치라 할 수 있으며, 가장 일반적인 반경류형 터보 기계중의 하나이다. 산업용 및 주거용에 이용되는 여러 기계류 중에서도 원심 펌프는

그 이용도가 가장 높은 기계류인 것으로서, 고속회전을 요하는 원심펌프의 시작은 증기터빈의 개발과 시기를 같이하며 1875년 Osborne Reynolds에 의하여 처음 시도되었다.

이러한 관계로 원심펌프에 대한 이해는 널리 알려져 있으며 이의 유량, 양정, 및 비회전도에 대한 높은 효율을 제시하는 오랜 운전 경험을 토대로 한 설계자료들은 여러 곳에서 나타나 있다. 그러나

* 동의대학교 기계공학과

최적의 설계 조건을 찾기 위한 전산화 작업은 기존의 자료들이 제시하는 복잡성 즉 것의 크기, 출구 각, 양정 등의 비선형적인 관계 등으로 인하여 효율적이 되지 못하였으며 근본적으로는 설계자의 직접 경험이 수반되어야 한다.

최근의 PC분야 H/W 및 S/W의 급속한 발전으로 모든 Code개발은 사용자와의 대화 위주의 형식으로 바뀌어져 가고 있으며 이는 기계설계 분야에서 예외가 아니다. 이러한 대화 형식의 설계는 사용자의 경험을 입력함으로써 설계자들이 가지는 비선형적인 관계들을 상당부분 완화시킬 수 있으리라 기대되며, 보다 정밀한 설계는 기계의 효율을 향상시키며 설계시간의 단축을 통하여 원가절감의 효과가 생김은 주지의 사실이다.

본 연구에서는 Visual Basic 언어를 사용하여 Windows 환경에서 설계가 될 수 있도록 하였다. 전산설계를 통하여 것의 형상이 계산될 수 있음과 Bezier 3차 곡선을 통한 회전차 측면도 형상도 쉽게 구할 수 있음을 보여주며, 이러한 설계 수치들은 CAD에서 사용되어 도면작성이 용이해짐을 보여준다.

2. 입력자료의 구성

기본적인 입력 자료는 유량(Q), 양정(H), 전동기 RPM, 수송유체의 비중량(γ), 축의 비틀림 응력(τ)으로써 Fig.1 및 Fig.2 에 자료 입력 실행 화면의 일부를 보여준다. 수송유체는 Fig.1의 Combo Box에서 Mouse로 선택하면 관련 비중량, 점도 및 온도가 표시되며, Fig.2 에서 원동기 관련 자료를 입력하면 비교회전도(n_s)가 아래와 같이 계산된다.

$$n_s = N Q^{\frac{1}{2}} / H^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

여기서 N은 펌프 회전수으로써 전동기 RPM에서 미끄럼틀을 고려한 회전수이다. 그리고, 일반용 펌프의 표준효율 곡선($\eta - Q$)로부터 관계식을 구하면 다음과 같다.

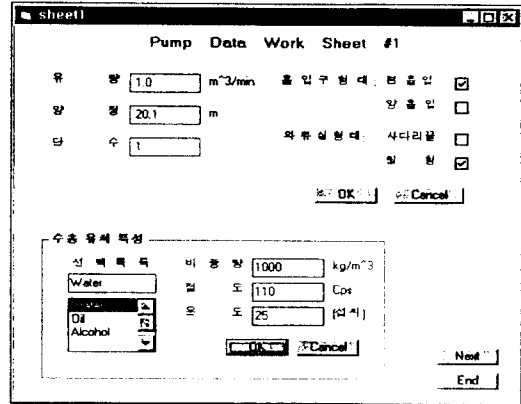


Fig. 1 A view of an input data for flow rate, total head and fluid properties.

$$\begin{aligned} \eta &= 0.67 + (0.2412) \log Q - (0.0288) (\log Q)^2, & Q \leq 2.0 \\ &= 0.6892 + (0.1764) \log Q - (0.0256) (\log Q)^2, & 2.0 < Q \leq 10.0 \\ &= 0.85, & Q > 10.0 \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)의 효율로부터 원동기의 출력을 계산할 수 있으며 실제 설치할 원동기는 Fig.2의 선택목록을 참조하여 선택한다. 비슷한 형식으로 사용 재질의 강도가 입력되며, 흡입 및 송출구경의 최대 및 최소 값이 계산되며 사용자는 구경 목록으로부터 구경을 선택하면 유속이 계산된다. 흡입 및 송출구경의 계산은 흡입 및 송출구경의 유속계수(K_s, K_a)와 비교회전도(n_s)의 곡선⁶⁾으로부터 다음과 같이 구했다.

$$K_{smax} = 1.1774 - (1.0505) \log n_s + (0.2544)(\log n_s)^2 \quad (3)$$

$$K_{smin} = 0.3015 - (0.2890) \log n_s + (0.0851)(\log n_s)^2, \quad n_s \leq 500$$

$$\begin{aligned}
 &= -194.705 + (208.9172)(\log n_s) \\
 &- (74.6511)(\log n_s)^2 \\
 &+ (8.8897)(\log n_s)^3, \quad 500 < n_s \leq 800 \\
 &= 0.0722 + (0.0523) \log n_s \\
 &- (0.0088)(\log n_s)^3, \quad n_s > 800 \quad (4)
 \end{aligned}$$

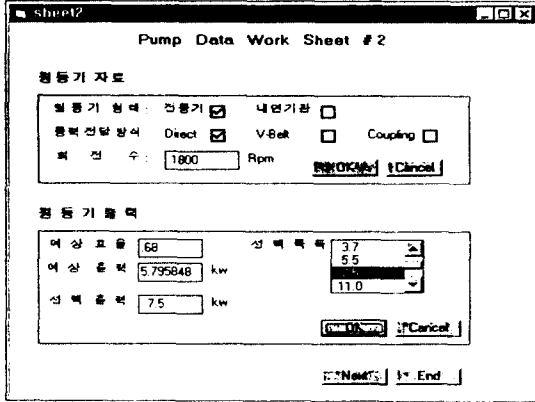


Fig. 2 A view of an input data for a motor power.

$$\begin{aligned}
 K_{dmax} &= 1.3725 - (0.6732)(\log n_s) \\
 &+ (0.0935)(\log n_s)^2, \quad n_s \leq 600 \\
 &= 1.0921 - (0.5808)(\log n_s) \\
 &+ (0.0967)(\log n_s)^2, \quad 600 < n_s \leq 1100 \\
 &= 0.2, \quad n_s > 1100 \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{dmin} &= 0.6562 - (0.2194)(\log n_s) \\
 &+ (0.0132)(\log n_s)^2 \quad (6)
 \end{aligned}$$

최대 및 최소 흡입구경의 결정에는 유속 v_s 는 $v_s = K_s \sqrt{2gH}$ 인관계로부터 식(3)과 식(4)를 이용하여 최대 및 최소 흡입 유속을 구한 다음 흡입구경 D_s 는

$$D_s = \sqrt{4Q/\pi v_s} \quad (7)$$

의 관계를 이용하여 계산하였으며 송출구경의 결

정에도 동일한 방법을 사용하였다.

3. 회전차 설계

3.1 회전차 안지름 결정

회전차 안지름을 계산하기 위하여 아래의 관계식을 사용한다.

$$D = \sqrt{4Q/\pi v_e + d_b^2} \quad (m) \quad (8)$$

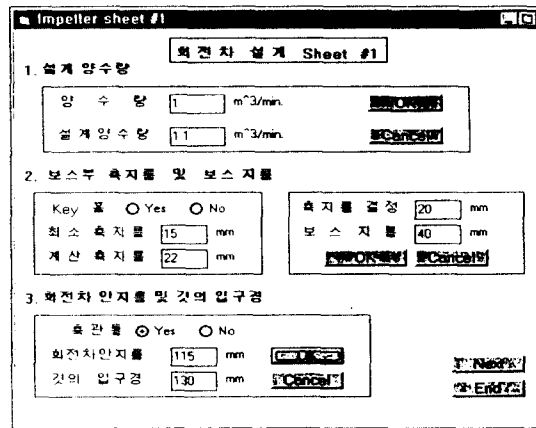


Fig. 3 A view of an input data for impeller design

여기서 v_e 는 깃 입구에서의 평균유속으로서 흡입구 유속을 10% 증가시킨 값으로 정하였으며 d_b 는 보스부 지름으로써 계산축지름의 1.8배로 한 값이며⁴⁾, 깃 입구의 지름(D_1)은 회전차 안지름(D)보다 10% 증가시킨 값으로 하였다. 이들의 실행화면은 Fig.3에서 보여주고 있으며 사용자의 필요에 따라 값들은 수정될 수 있다.

3.2 회전차 바깥지름의 결정

회전차 바깥지름(D_2)의 결정에는 깃의 출구각(β_2), 유체입자의 출구각(α_2), 깃의 매수(Z), 및 이론 양정(H_{th}) 혹은 깃수 무한의 이론양정(H_{th})들이 다음의 관계식들에 의하여 서로 관련되어 있다.

$$D_2 = \frac{60u_2}{\pi N} \quad (9)$$

$$u_2 = \sqrt{gH_{th_s} \left(1 + \frac{\tan \alpha_2}{\tan \beta_2}\right)} \quad (10)$$

$$H_{th_s} = H_{th} \left[1 + \frac{2\phi}{Z(1 - (D_1/D_2)^2)}\right] \quad (11)$$

여기서 u_2 는 회전차 원주의 속도, N 은 펌프의 RPM 및 g 는 중력 가속도이며, 식(11)은 Pfleiderer의 실험식으로 알려져 있으며, $\phi = 0.6 + 0.6 \sin \beta_2$ 로 하였다. 식(9)와 식(10)으로부터

$$D_2 = D_2(H_{th_s}, \alpha_2, \beta_2)$$

이며, 식(11)로부터

$$H_{th_s} = H_{th_{inf}}(H_{th}, Z, \alpha_2, \beta_2)$$

이다.

따라서 $D_2 = D_2(H_{th}, Z, \alpha_2, \beta_2)$ 이며 D_2 를 포함한 5개의 독립적인 식이 주어져야 $D_2, \alpha_2, \beta_2, Z$ 및 H_{th} 를 구할 수 있으나 사실은 2개의 식 (식(9)와 식(11))으로부터 5개의 미지수 ($D_2, H_{th}, Z, \alpha_2, \beta_2$)를 구해야 한다.

본 연구에서는 기초계산과 수정계산이라는 두 개의 과정으로 나누어서 수행하여 보았다. 기초계산에서는 깃수 Z 에 의하여 구하며, 유체입자의 출구각 α_2 와 깃의 출구각 β_2 는 각각 10도와 22.5도로 하였으며, 양정계수 $\phi = H/H_{th_s}$ 는 0.6으로 하여 식(9)와 (10)에 의하여 D_2 를 결정한 후 식(11)을 통하여 수력효율 $\eta_h = H/H_{th}$ 를 계산하였다. 수정계산에 있어서는, 최고 효율점의 D_2, β_2 및 Z 는 기초계산에서 구한 값의 근방에 있으리라는 기대아래, D_2, β_2 및 Z 를 변화시켜 계산된 수력효율 η_h 를 통하여 사용자가 선택하게 하였다. 계산과정은 아래와 같이 하였다.

- D_2 를 변화시켜 식(9)로부터 u_2 를 구한다.
- β_2 를 변화시켜 식(10)으로부터 H_{th_s} 를 구한다.
- Z 를 변화시켜 식(11)로부터 H_{th} 를 구한다.
- η_h 를 계산한다.

e) 사용자는 계산된 치수와 수력효율을 참조하여 선택 혹은 취소하여 다시 반복한다.

이에 대한 실행화면은 Fig. 4에 보이고 있으며, 회전차 바깥지름 (D_2)를 증가시키면 수력효율은 감소하며 출구각도 (β_2)를 증가시키면 수력효율은 증가하게 됨을 볼 수 있다.

3.3 깃의 입구각도 결정

깃 입구의 원주 pitch를 t_1 이라 하면 $t_1 = \pi D_1 / Z$ 이다. 깃 입구의 살 두께를 S_1 이라 하면 τ_1 과 σ_1 의 새로운 변수를 $\tau_1 = t_1 / (t_1 - \sigma_1)$ 및 $\sigma_1 = S_1 / \sin \beta_1$ 과 같이 도입함으로써 깃의 입구각도 (β_1), τ_1 및 σ_1 에 대한 3개의 함수를 아래와 같이 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} f_1 &= \tau_1 (t_1 - \sigma_1) - t_1 \\ f_2 &= \pi D_1 N \tan \beta_1 - (60) \tau_1 \\ f_3 &= \sigma_1 \sin \beta_1 - S_1 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 v_e 는 회전차 입구의 평균 유속으로써 입구경 유속 v_1 의 1.1배로 취한다. 식(12)는 비선형 연립 방정식이므로 Newton 반복법에 의하여 풀 수 있으며, 이의 함수 행렬은 다음과 같다.

$$J = \begin{bmatrix} t_1 - \sigma_1 & 0 & -\tau_1 \\ -60v_e & \frac{\pi D_1 N}{(\cos \beta_1)^2} & 0 \\ 0 & \sigma_1 \cos \beta_1 & \sin \beta_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.4 회전차 측단면 형상 결정

Fig.5에는 지금까지의 계산 결과 값들을 보여주며, 이들을 토대로 한 측면도 형상은 Fig.6에 보여준다. 이 형상은 유동에 적합하지 않으므로 Hub와 Shroud를 유동손실이 적은 부드러운 형상으로 변경시켜야 한다.

곡선의 양 끝단의 접선은 Hub와 Shroud에 접해야 함으로 최소 3차 곡선이어야 하며 본 연구에서는 Bezier 3차 곡선을 선택하였다. Bezier 3차 곡선의 식은 다음과 같다.

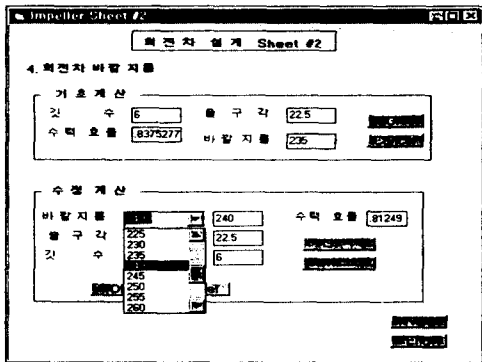


Fig. 4 view of an impeller outer diameter design.

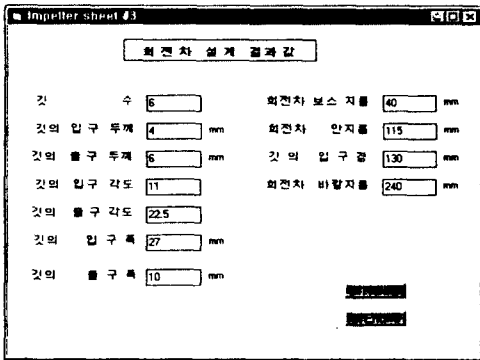


Fig. 5 A view of intermediate values for an impeller design.

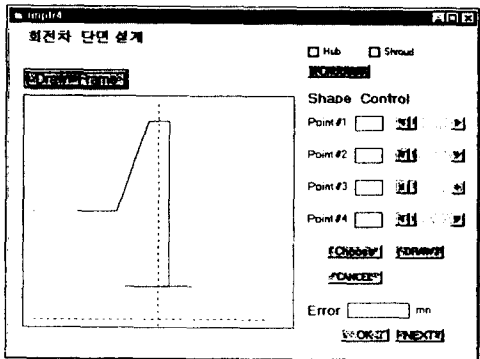


Fig. 6 A view of an initial side shape of an impeller.

$$x(u) = (1-u)^3 x_0 + 3(1-u)^2 u x_1 + 3(1-u)u^2 x_2 + u^3$$

$$y(u) = (1-u)^3 y_0 + 3(1-u)^2 u y_1 + 3(1-u)u^2 y_2 + u^3$$

여기서 u 는 0과 1사이의 값이며, $(x_0, y_0), \dots, (x_3, y_3)$ 의 4개점의 제어점들을 통하여 다양한 형상을 제공할 수 있으므로 사용자는 적당한 형상을 선택하면 된다.

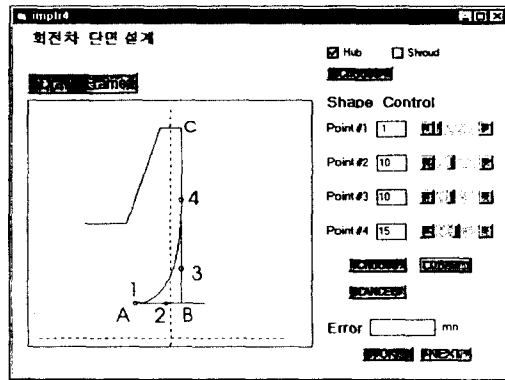


Fig. 7 A view of determining a hub shape.

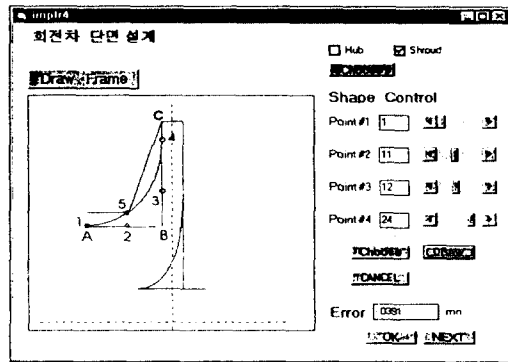


Fig. 8 A view of an impeller shape with negligible error.

이 과정은 Fig.7에 나타내었으며, Hub(내측 Shroud)의 한 형상을 보여준다. 제어점 1은 A와 B 사이의 한 점이며, 제어점 4는 B와 C사이에 있으며, 제어점 2는 제어점 1과 B 사이의 한 점이며, 제어점 3은 B와 제어점 4사이에 놓이게 하였으며, 이

들은 우측에 있는 4개의 수평 Bar를 통해 제어된다. 내측 Hub side가 정해지면 사용자는 우측 상단의 "Shape Control" 아래의 Shroud의 Check box를 선택하면 먼저 Fig.8에 보인 점 5가 표시된다. 이 점은 Shroud가 곡선형으로 바뀌면서 깃 입구 폭의 변경점이며 Shroud의 곡선은 점 5를 지나야 한다.

따라서 이 경우 Bezier제어점들의 선택에 의한 곡선과 점 5와의 수평거리를 우측하단에 표시된 "Error" Box에 표시하게 하였으며, 제어점의 수정에 의하여 화면에 보여주는 곡선을 검토하여 Error Box의 값을 무시할 수 있을 때 "OK" Box를 선택하면 Fig.9과 같은 회전차 측면 형상을 결정할 수 있다.

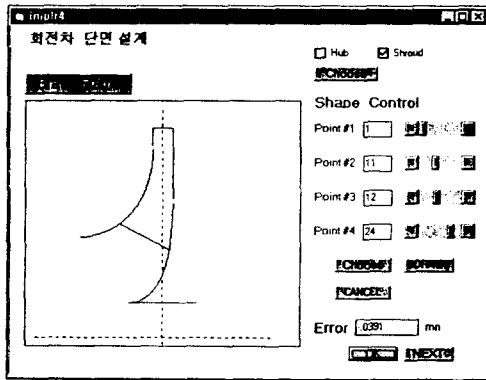


Fig. 9 A view of a final side shape of an impeller.

3.5 깃 원호곡선의 결정

회전차 측면도가 결정됨에 따라 Hub 측 깃과 Shroud측 깃 각각에 대하여 전술한 3.3절의 방법을 통하여 깃의 입구각도(β_1)를 구할 수 있다. 깃 원호 곡선을 정하기 위하여 깃의 각도는 반경방향에 따라 입구각도에서 출구각도까지 균일하게 변한다고 가정하고 다음과 같이 한다. Fig.10을 참조하면 점1과 2는 각각 깃의 입구와 출구이며 A와 B는 그 사이의 임의의 점들이며 r_A 및 r_B 는 점 A와 점 B의 반경들이다. r_B 가 r_A 보다 Δr 만큼 크며 Δr 이 전체 반경에 비하여 상당히 작다고 하면 A점과 B점의 원호는 직선으로 근사시킬 수 있다.

따라서 삼각형 OAB에 대하여 아래와 같은 Sine의 법칙이 성립한다.

$$\frac{r_B}{\sin(\frac{\pi}{2} + \beta_A)} = \frac{r_A}{\sin(\frac{\pi}{2} - \beta_A - \Delta\theta)} \quad (14)$$

$$= \frac{\Delta h}{\sin\Delta\theta}$$

식(14)의 왼쪽 두항을 정리하면 다음과 같다.

$$f(\Delta\theta) = \cos\beta_A \cos\Delta\theta - \sin\beta_A \sin\Delta\theta$$

$$-\frac{r_A}{r_B} \cos\beta_A = 0 \quad (15)$$

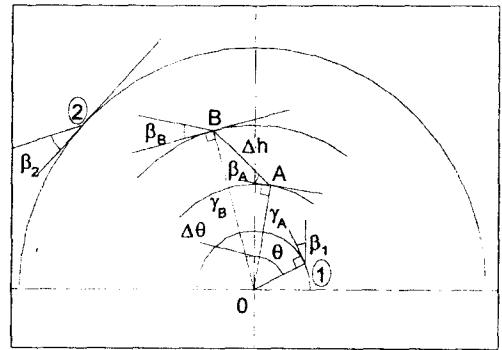


Fig. 10 A schematic view of determining a vane curve.

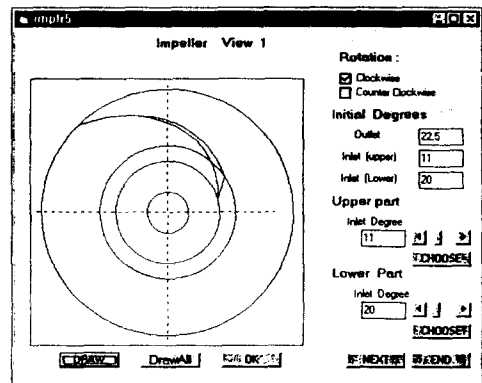


Fig. 11 A top view of a vane curve for an impeller front

Newton법 혹은 시행착오법을 이용하여 식(15)에서 $\Delta\theta$ 를 구할 수 있으며 따라서 점B의 위치는 $(r_A + \Delta r, \theta + \Delta\theta)$ 로 결정된다. 따라서 잇의 입구에서 출구까지 적당한 반경으로 분할하여 입구점에서 시작하면 원호상의 점들을 결정할 수 있으며, 또 임의의 출구 점에서 시작하여도 된다. 이와같이 하여 결정된 잇의 원호 곡선에 대한 전면 평면도를 Fig.11에 도시하였다. Fig.11에는 잇의 출구 각이 22.5° , 상측 입구각 11° , 하측 입구각 20° 일 경우의 잇 전면의 원호 곡선을 보여주며, 상측 입구 각을 변경시킬 경우의 잇의 형상도 관찰할 수 있다. 잇의 입구폭 (b_1)과 출구폭(b_2)의 계산 값으로써 잇 후면의 형상도 동일한 방법으로 결정할 수 있다.

이상과 같이 회전차 형상이 정하여졌으므로, 구하여진 계산결과들을 CAD프로그램을 불러 도면을 작성하게 한다. AutoLisp 언어를 사용하여 화면의 우측 상단에 Impeller 항목을 첨가하여 Pop_up Menu를 통하여 사용자가 필요한 사항들을 입력할

수 있도록 하였으며, Fig.12에 CAD도면 결과를 나타내었다.

4. 결 론

Windows 환경 하에서의 설계 전산화는 사용자와의 대화를 통해 비선형적으로 복합된 설계자료들을 보다 더 효율적으로 활용할 수 있음을 보이며, 본 연구를 통해 다음과 같은 3가지 사항을 알 수 있었다.

- (1). Windows환경의 적절한 이용은 회전차 바깥지름(D_2)의 결정에 관련된 변수들의 비선형적 관계를 어느정도 완화시켜 더 효율적인 값들을 찾는 데 도움이 되리라 보이며, 잇의 입구 각도(β_1)의 결정에 있어서 계산치와 그에 따른 형상을 비교하여 더 나은 값을 선택할 수 있게 한다.
- (2). Bezier 3차 곡선의 사용은 Windows 환경에서의 회전차 측단면 형상 결정에 매우 적절한 방법으로 보인다.
- (3). 전산설계를 통하여 잇의 원호 곡선을 쉽게

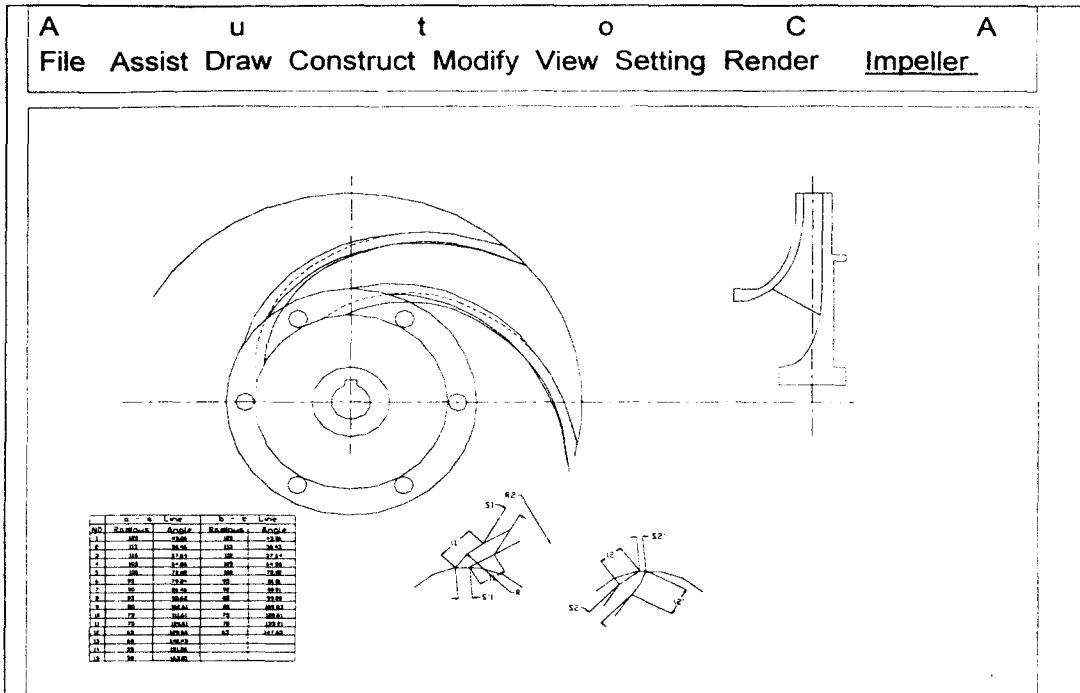


Fig. 12 An example of an AutoCad drawing for an impeller.

구할 수 있다.

회전차와 더불어 원심형실(Spiral Casing)의 형상 결정도 원심펌프 설계의 중요한 부분으로서, 원심형실의 형상이 결정되면 이에 대한 유동해석이 수행되어 설계 값들에 대한 검증이 뒤따라야 한다. 원심형실의 격자형성은 아직 문제점으로 남아있는 듯 하지만 최근 전산 유체역학 분야의 발전으로 이 부분에 대해 연구가 수행되고 있으며, 이를 위해서는 형상을 자유롭게 구현할 수 있어야 함은 필수적이다.

감사의 글

본 연구는 1997년 동의대학교 산업기술개발연구소 학술 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표한다.

5. 참고 문헌

1) C.F.Gerald and P.O.Wheatley, "Applied Numerical Analysis" Addison -Wesley Pub.

Co., pp. 244-248, 1994

2) T.C. Dickenson, "Pumping Manual", 9th ed., Elsevier Sci. Ltd. , pp. 83-92, 1995

3) 이택식, "원심펌프 및 축류펌프의 설계", 동명사, pp. 61-68, 1984

4) 하재현, 손정진, "유체기계", 보문당, pp. 84-85, 1993

5) 응용기계설계연구회, "응용기계설계2 (펌프, 송풍기)", 동명사, pp. 24-27, 1970

6) 기술편집부, "기계설계 11 (펌프의 설계제도)", 도서출판 기술, pp. 43-54, 1993

7) 이형배, "비주얼 베이직", 성안당, 1994

8) 김성원, 조강래, "개방형 원심 회전차의 내부 유동장에 관한 실험적 연구(2)", 대한기계학회 논문집 제36권 제11호, pp. 3251-3261, 1996

9) 김성원, 조강래, "원심회전차 내부 유동장에 관한 수치 해석적 연구", 대한기계학회논문집 제 36권 제11호, pp. 3272-3281, 1996

10) J.A.Schetz and A.E.Fuhs, "Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery", Vol.3, John Wiley & Sons, Inc., pp. 2356-2365, 1996