

SMART 냉각재순환펌프의 임펠러 설계 Design of Impeller for SMART Main Coolant Pump

김민환, 김종인, 박진석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

송재욱, 정명균
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

본 연구에서는 유체역학적인 이론과 실험식들을 이용하여 축류펌프의 임펠러 설계절차를 개발하고 그 결과를 CAD 소프트웨어인 I-DEAS의 프로그램 파일을 이용하여 3차원 형상을 구현하는 모델링 절차를 개발하였다. 개발된 모델링 방법을 SMART 냉각재순환펌프의 임펠러 설계에 적용하여 이론적으로 설계된 임펠러를 빠르게 형상화함으로써 이론적 설계모델을 개선하고 설계의 최적화 및 설계시간의 단축을 꾀할 수 있었다.

Abstract

A design procedure for axial pump impeller was developed, based on traditional hydrodynamics theory and experimental correlations. A geometrical modeling procedure of impeller was also developed using I-DEAS program files. It was possible to reduce the time required for design and achieve design optimization by applying the procedure to the design of SMART MCP.

1. 서론

일체형원자로 SMART에 사용될 냉각재순환펌프(MCP)는 축류형 펌프(axial type pump)로서 원자로집합체의 상단에 수직으로 설치된다[1]. 냉각재순환펌프는 노심에서 가열된 물을 증기발생기로 순환시켜주는 역할을 수행하기 때문에 필요한 수두와 유량을 생성하는 임펠러의 설계는 중요하다. 예전엔 소프트웨어적인 3차원 모델링이 불가능하였기 때문에 유체역학적인 설계의 결과로 생성되는 임펠러 블레이드의 2차원 단면만을 토대로 하여 수작업에 의해 목형을 제작하여 개념의 타당성을 일차적으로 확인하였다. 이러한 방법으로는 목형의 가공이 작업자의 숙련도에 많이 의존하게 되며 유체역학적인 설계의 의도와는 다른 임펠러가 제작되기도 하고 시간과 비용이 많이 들기 때문에 설계의 최적화도 어렵고 유체역학 설계의 오류도 조기에 발견하기가 어려웠다.

본 연구에서는 종래의 임펠러 개발과정을 탈피하여 컴퓨터 산업의 발전과 더불어 그 활용이 보편화된 CAD/CAM/CAE를 사용한 임펠러 설계절차를 개발하고 이를 일체형원자로 냉각재순환펌프 설계에 적용하였다. MCP 임펠러의 유체역학적 설계[2][3] 절차를 개발하고 설계결과를 3차원 형상화하는 기법을 개발하였다. 특히 임펠러의 3차원 형상은 매우 복잡하기 때문에 CAD 소프트웨어로도 간단하게 모델링이 불가능하고 그 절차가 번거롭고 복잡하다. 여기서는 I-DEAS의 프로그래밍 언어[4]로 실행파일을 작성하여 개념 설계 단계에서 빈번히 수반되는 설계의 변경사항을 최대한 빠르게 반영 할 수 있도록 하였다.

2. 임펠러의 설계

펌프의 형태(type)는 다음과 같이 정의되는 비속도(specific speed)에 따라 구분되어진다..

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

여기서 $Q(\text{m}^3/\text{min})$, $H(\text{m})$, $n(\text{rpm})$ 은 펌프의 성능을 나타내는 임펠러의 설계입력값으로 유량(flow rate), 양정(head) 및 회전수를 나타낸다. SMART 냉각재순환펌프에서 요구되는 값은 유량 $33.03 \text{ m}^3/\text{min}$, 양정 13.5 m , 회전수 3600 rpm 으로 n_s 는 약 2940의 값을 갖는다.

일반적으로 n_s 의 값이 1500 이상이면 축류형 펌프가 사용된다.

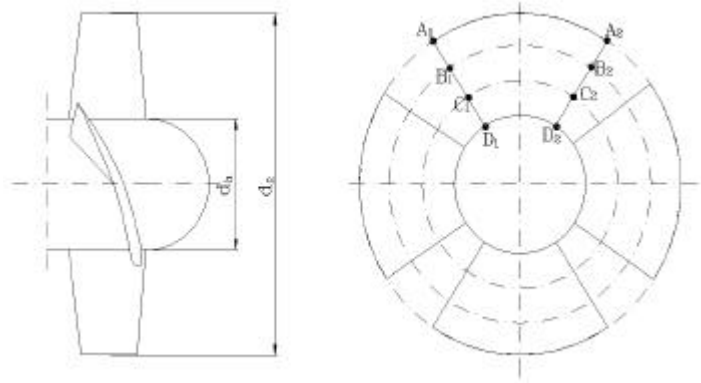


그림 1 펌프 임펠러의 개략도

2-1 임펠러의 속도삼각형 및 날개각도

임펠러의 설계 후 3차원 모형화를 위해 제공되어야 할 값은 그림 1의 반경방향의 위치에 따른 단면의 형상들 그리고 각 형상에 대한 코드의 길이(l)와 설치각(ξ)이다. 그림 1에서 원주방향으로 배열된 임펠러를 2차원 평면에 펼친 임펠러 캐스캐이드(cascade)와 단면의 형상에 대한 표기방법을 그림 2에 나타내었다. 그림에서 t 는 임펠러 사이의 거리이며 피치(pitch)라 한다. 피치는 임펠러의 블레이드 수를 Z 라 하면 $2\pi r/Z$ 가 된다. β_1 , β_2 , θ 는 입구각, 출구각 및 챔버(chamber)이다.

임펠러의 유체역학적 설계에서는 그림 1의 3차원 실린더 면을 N 등분한 A_1-A_2 , B_1-B_2 , C_1-C_2 , D_1-D_2 와 같은 각 단면을 그림 2와 같이 2차원으로 펼친 캐스캐이드로 가정하여 설계한다. 그림 3은 임펠러의 입구와 출구에서의 속도 삼각형을 나타낸 것이다. C 는 절대속도(absolute velocity), W 는 상대속도(relative velocity)를 나타낸다.

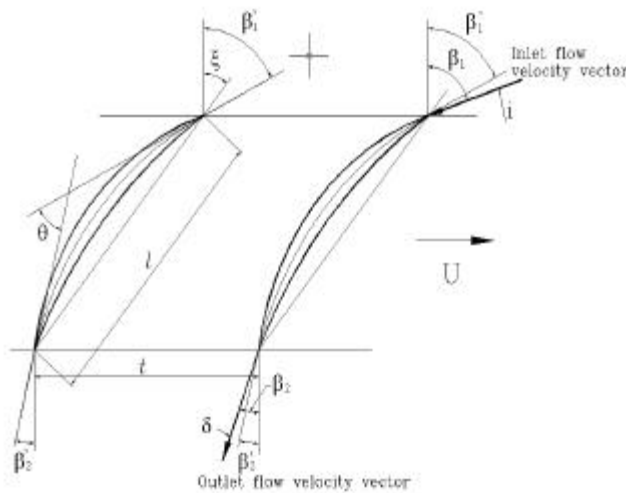


그림 2 임펠러 캐스캐이드 및 블레이드 형상

먼저 임펠러 입구에서 절대속도는 축 방향과 평행하고 크기는 C_m 으로 일정하다고 가정하면

$$C_m = \frac{4Q}{\pi(D_2^2 - D_i^2)} \quad (2)$$

이고 임펠러의 회전속도 U 는 회전수와 직경으로부터 결정된다.

$$U = \frac{\pi n D}{60} \quad (3)$$

임펠러 입구각 β_1 은 그림 3의 속도 삼각형으로부터 다음과 같다.

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{U}{C_m}\right) \quad (4)$$

임펠러 출구 측 날개 각도는 먼저 수력학적 펌프 효율 η_h 를 가정한 후 오일러 공식과 속도 삼각형으로부터

계산한다.

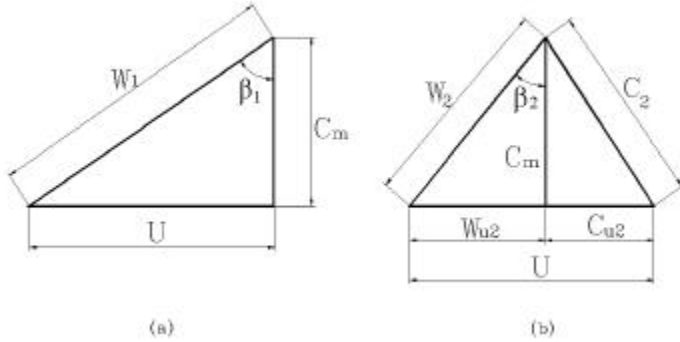


그림 3 임펠러 입구와 출구에서 속도 삼각형

$$gH_{Euler} = U(C_{u2} - C_{u1}) \quad (5)$$

$$\eta_h = H/H_{Euler} \quad (6)$$

$$C_{u2} = \frac{gH}{\eta_h U} \quad (7)$$

$$\beta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{U - C_{u2}}{C_m} \right) \quad (8)$$

임펠러 출구에서 흐름방향은 축 방향과 엇갈리게 되므로 유동이 축 방향으로 흐르도록 디퓨저(diffuser)를 부착하여 손실을 줄인다. 디퓨저의 경우는 입구에서 임펠러의 출구의 속도와 방향이 변하지 않는다고 가정하고 디퓨저의 출구의 속도방향을 축 방향으로

향하게 설계한다. 따라서 디퓨저의 입구각 α_3 는 임펠러 출구에서 절대속도와 회전축이 이루는 각 α_2 와 같으며 디퓨저 출구각 α_4 는 영이 된다.

$$\alpha_3 = \tan^{-1} \left(\frac{C_2}{V_{u2}} \right) \quad (9)$$

2-2 전압력 손실 모델

축류 펌프 내에서의 전압력 손실(total pressure loss)은 형상 손실(profile loss), 환형 손실(annulus loss), 2차 손실(secondary loss) 및 팁 간격 손실(tip leakage loss)이 있다. 본 연구에서는 2차원 캐스케이드 실험에 얻은 실험식을 이용하였다.

형상 손실(profile loss)은 익렬의 후류(wake)에 의한 운동량 손실을 나타내며 Lieblein model[2]를 사용하였다.

$$C_{D,p} = 2 \frac{\theta_2}{l} \left(\cos \frac{\beta_\infty}{\cos \beta_2} \right)^3 \quad (10)$$

여기서 θ_2 는 후류의 운동량 두께(momentum thickness)이며 Lieblein의 circular arc 블레이드의 실험 값을 이용하였다. 그리고, $\tan \beta_\infty = (\tan \beta_1 + \tan \beta_2)/2$ 이다.

환형 손실은 익렬을 환형으로 둘러싸고 있는 벽면에서의 경계층에 의한 마찰 손실을 의미하는 것으로 Howell이 터빈의 압축기의 로터(rotor)에 대하여 제안한 $C_{d,a} = 0.02t/h$ 를 많이 사용한다. 그러나, 임펠러의 경우는 블레이드 수가 압축기의 경우보다 상당히 작다. 따라서 블레이드 간격과 높이의 비인 t/h 가 상당히 커져서 가장 큰 손실인 형상손실 보다 커질 수 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 다음 식을 사용하였다 [6].

$$\frac{H_{loss}}{H_{Euler}} = 0.02 \sim 0.04 \quad (11)$$

2차 손실은 익렬을 따라 흐르는 주 유동이 압력면(pressure surface)과 흡입면(suction surface) 사이의 압력차이와 익렬의 곡률에 의해 2차의 회전 유동이 생성되면서 발생하는 손실이며 Howell이 제안한 식[2]을 사용한다.

$$C_{D,s} = 0.018 C_L^2 \quad (12)$$

여기서 C_L 은 양력계수이다. 끝 간격 손실은 Vavra의 모델을 사용하였다[7].

$$C_{D,t} = 0.29 \frac{\delta_t}{h} C_L^{3/2} \quad (13)$$

2-3 수두 및 효율의 계산

축류펌프 내에서의 전압력 손실을 임펠러와 디퓨저의 각 반경방향의 위치에서 익형에 앞서 소개한 손실 모델을 적용하여 수두 및 효율을 계산한다.

임펠러 손실 :

$$C_{D,i} = C_{D,b} + C_{D,a} + C_{D_s} + C_{D_t} \quad (14)$$

$$\omega_i = \left(\frac{l}{t}\right) \frac{\cos^2 \beta_1}{\cos^3 \beta_\infty} C_{D,i} \quad (15)$$

$$\Delta h_i = \omega_i \frac{W_1^2}{2g} \quad (16)$$

디퓨저 손실 :

$$C_{D,d} = C_{D,b} + C_{D,a} + C_{D_s} \quad (14)$$

$$\omega_d = \left(\frac{l}{t}\right) \frac{\cos^2 \alpha_3}{\cos^3 \alpha_\infty} C_{D,d} \quad (15)$$

$$\Delta h_d = \omega_d \frac{W_1^2}{2g} \quad (16)$$

축류펌프의 수두는 다음과 같이 계산되며 효율은 (6)식에서 구할 수 있다.

$$H = H_{Euler} - \sum(\Delta h_i + \Delta h_d) \quad (17)$$

2-4 익형, 날개각 및 솔리디티(solidity) 결정

펌프나 압축기에서 사용되는 익형은 NACA65, C-4, DCA 등이 있는데 이 중에서 본 설계에서는 DCA(double-circular-arc)로 결정하였다. 그 이유는 DCA가 최대 캠버의 위치가 가운데 존재하기 때문에 최대 캠버가 앞에 존재하는 일반 익형에 비하여 블레이드의 표면에서 압력 변화를 완만하게 하여 캐비테이션(cavitation)을 최소화 할 수 있다. 또한 SMART의 냉각재순환펌프와 같은 팁과 허브의 직경비가 큰 경우 허브부분의 설치각이 크게 되는데 이 경우에 DCA가 일반 익형보다 효율 면에서 유리하기 때문이다[8].

날개각은 그림 2에 나타난 바와 같이 입구각의 incidence i 와 출구각의 deviation δ 를 고려하면

$$\beta'_1 = \beta_1 - i, \quad \beta'_2 = \beta_2 - \delta \quad (18)$$

여기서 i 와 δ 는 기존의 DCA에 대한 실험 값으로부터 익형의 형상 손실이 최소가 되는 값으로 결정된다 [9]. 코드의 길이를 결정하기 위해서는 솔리디티를 결정해야 되는데 양력계수(C_L)와 솔리디티(l/t)의 관계식은 다음과 같다.

$$C_L \cdot \frac{l}{t} = 2(\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \cdot \cos \beta_\infty \quad (19)$$

(19)식에서 보면 솔리디티를 결정하기 위해서는 양력계수를 가정해야 한다. 양력계수는 임펠러의 경우는 허브에서 0.9의 값을 갖게 하고 팁으로 가면서 점차 작아지게 하도록 하며 디퓨저는 전체에 걸쳐 0.5~0.6의 값이 추천된다[6].

3. I-DEAS를 이용한 임펠러의 3차원 모델링

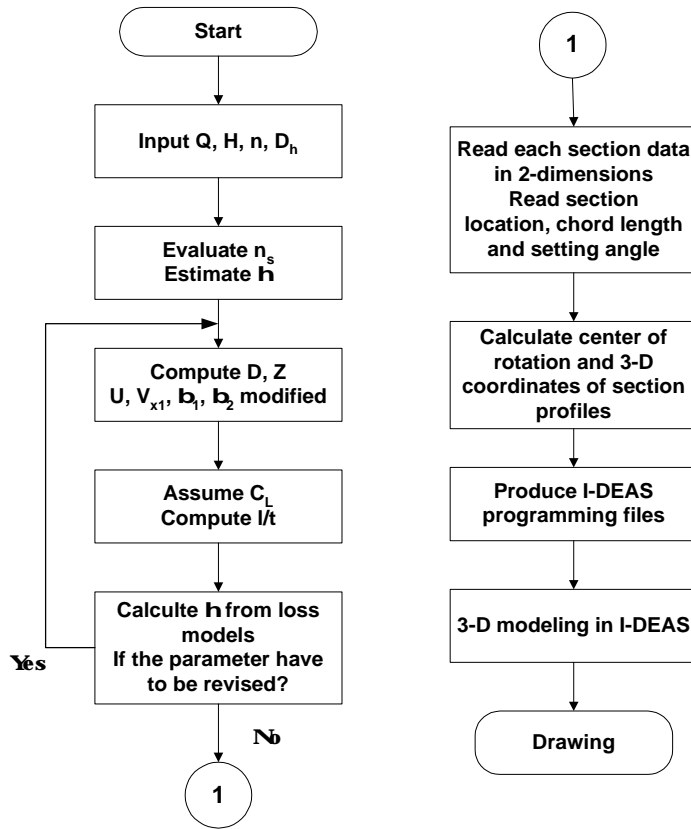


그림 4 임펠러 설계 및 3차원 모델링 절차

을 차지하므로 각 단면을 3차원으로 연결할 경우, 무게중심을 따라 연결하는 것이 구조적인 측면에서 안전하다[5]. 따라서 먼저 반경방향의 각 단면에서 면적중심을 구하고 2차원 단면 데이터를 3차원 원통에 투영된 데이터 값으로 변환하는 작업을 수행한다. 다음으로 변환된 익형의 데이터 및 형상 값을 FORTRAN 언어를 이용하여 I-DEAS에서 실행 가능한 명령어로 구성된 프로그램 파일을 생성한다. 이렇게 하면 설계변경으로 임펠러가 새로 설계될 때마다 수행해야하는 I-DEAS 모델링 작업을 한번의 프로그램 파일을 수행함으로써 간단히 끝나게 된다. 끝으로 I-DEAS에서 프로그램 파일을 이용하여 3차원 모형을 생성시키고 수정을 가하여 모형을 완성시킨다.

설계에서 얻어진 각 반경위치에서 단면은 실제로는 원통면(cylindrical surface) 위에 존재하는 3차원 단면이어야 하지만 축류펌프의 경우는 그림 2와 같은 캐스케이드 형태로 가정하여 설계하기 때문에 2차원 데이터가 얻어진다. 따라서 I-DEAS에서 입력으로 사용하기 위해서는 3차원 데이터로 바꾸어야 한다. 그림 5에 3차원 데이터를 얻기 위한 투영방법이 나타나 있다. 그림 5-(a)는 x-y 평면에서의 임의의 r 위치에서 단면의 2차원 형상을 나타낸 것이다. 이 단면은 y-z 평면에서 보면 그림 5-(b)와 같이 AB와 같은 선분으로 나타난다. 원래의 단면은 가상의 실린더에 부착된 단면이므로 실린더 위에서의 데이터가 필요하다. 따라서 먼저 x-y 평면에서 설치각 ξ 만큼 회전시킨다. 원래의 좌표 값을 (x_0, y_0, z_0) 라고 두면 회전된 값 (x_1, y_1, z_1) 은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi & 0 \\ \sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

임펠러의 열수력 설계 절차와 3차원 모델링의 순서를 그림. 3의 흐름도(flow chart)에 나타내었다. 앞부분의 이론적 설계과정을 간략히 설명하면 설계자는 설계입력인 유량, 양정과 회전수로부터 비속도를 구한다. 그리고 펌프의 효율(η)을 가정한다. 가정된 효율에서 수력학적 양정을 결정하고 반경방향의 위치에서 속도와 입구각 및 출구각을 결정한다. 입구각과 출구각이 결정되면 C_L 을 가정한다면 (19)식에서 솔리디티를 구할 수 있으며 결국 코드 길이 l 이 주어진다. 최종적으로 임펠러에 유체가 지나갈 때 발생하는 손실을 실험식으로부터 구하여 효율을 계산해보고 새로운 효율과 가정된 효율이 변화가 없을 때까지 설계과정을 반복한다.

이론적 설계에서 출력되는 최종 값은 반경방향의 위치에 따른 2차원 단면형상, 코드길이 및 설치각이다. 실제 임펠러의 형상은 3차원이기 때문에 설계에서 나온 결과를 직접 I-DEAS에서 3차원 모델링 하는 것은 상당히 어려운 일이다. 따라서 2차원 데이터를 모델링하기 적합한 3차원 데이터로 변환하는 것이 필요하다. 임펠러에 작용하는 힘은 고속회전에 의한 원심력이 거의 대부분

그림 5-(a)를 y-z 평면에서 보면 단면은 선분 AB로 나타난다. 임펠러 형상의 단면 위의 한 점 C의 값은 원래 반경 r의 실린더 곡면을 따르는 길이 s의 값을 갖는다. 따라서, 실린더 좌표계로 다시 쓸 수 있다.

$$(x_1, y_1, z_1) \rightarrow (r, \theta, z) \quad (21)$$

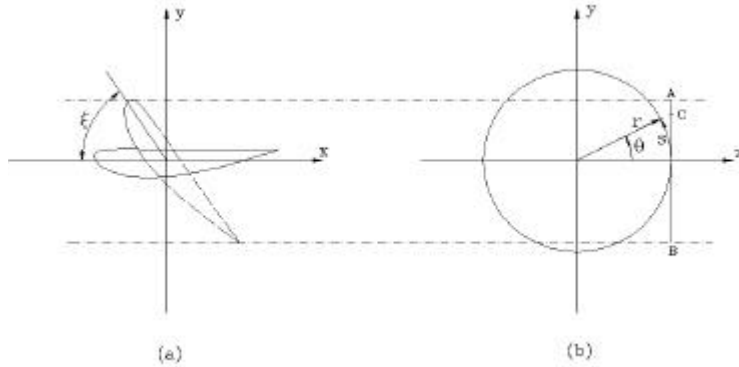


그림 5 2차원 단면의 원통면 투영

앞서 밝힌 바와 같이 임펠러 단면은 면적중심을 기준으로 회전되고 배열되었다. 이 면적중심을 구하기 위해 그림 6과 같이 임펠러 단면의 데이터를 이용하여 삼각형 격자로 나눌 수 있다. 임펠러 단면의 점 O를 기준으로 한 면적중심 위치벡터 x_c 는 다음과 같이 구해진다.

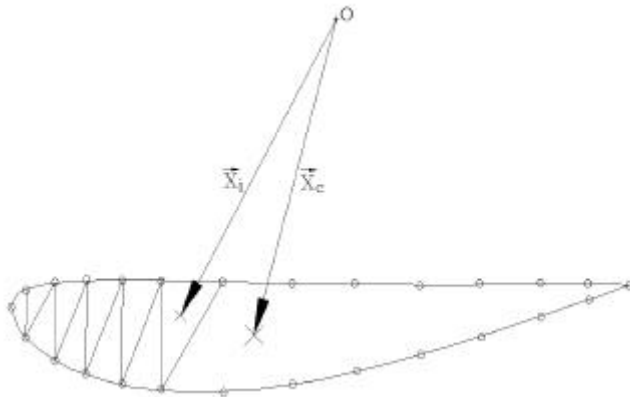


그림 6 임펠러 단면의 중심 구하기

여기서

r : 임펠러 단면의 반경방향 위치

θ : s/r (radian)

z : x_1

이다. 식. (21)에서 구한 좌표 값을 다시 직교 좌표계로 나타내면 얻고자하는 3차원 단면의 데이터 값 (x_2, y_2, z_2) 이다.

$$x_2 = z, \quad y_2 = r \sin \theta,$$

$$z_2 = r \cos \theta \quad (22)$$

앞서 밝힌 바와 같이 임펠러 단면은 면적중심을 기준으로 회전되고 배열되었다. 이 면적중심을 구하기 위해 그림 6과 같이 임펠러 단면의 데이터를 이용하여 삼각형 격자로 나눌 수 있다. 임펠러 단면의 점 O를 기준으로 한 면적중심 위치벡터 x_c 는 다음과 같이 구해진다.

$$\vec{x}_c = \frac{\sum A_i \vec{x}_i}{\sum A_i} \quad (23)$$

여기서 A_i 와 벡터 x_i 는 i 번째 삼각형의 면적과 무게중심이다. 위와 같이 임펠러 단면의 3차원 데이터가 얻어지면 I-DEAS 프로그램 파일을 생성시킨다. 따라서 이 프로그램 파일을 I-DEAS에서 수행함으로써 매 번 새로운 설계 값이 주어질 때마다 단면의 데이터를 일일이 입력하는 번거로움 없이 설계결과를 3차원 모델링 할 수 있다.

FORTAN 프로그램을 실행하여 얻어진 프로그램 파일이 I-DEAS에서 수행되는 과정을 그림

7에 보여주고 있다. 그림 7은 3D spline을 사용하여 임펠러 단면을 생성하는 모습이다. 그림 7-1은 lofting을 이용하여 블레이드 파트(part)를 생성하고 있는 중이다. 생성된 블레이드를 임펠러 허브에 부착하고(그림 7-2) 마지막으로 join과 fillet 과정을 마치면 그림 7-3의 임펠러가 완성된다. 그림 7-2까지가 새로운 임펠러가 설계될 때마다 하나의 프로그램 파일의 수행으로 이루어지기 때문에 설계결과를 빨리 모델링 하여 검토할 수 있게 된다. 그림 8은 완성된 펌프 임펠러의 형태를 보여준다. 임펠러 뒤에 설치된 디퓨저도 임펠러와 같은 방법으로 생성할 수 있다.

4 결론

SMART 냉각재순환펌프의 임펠러를 이론적 설계하고 이를 CAD 소프트웨어를 이용하여 3차원 형상을 구현할 수 있는 절차를 개발하였다. 설계된 임펠러를 빠르게 모델링 하기 위하여 I-DEAS의 프로그램 파일을 개발하였다. 임펠러의 3차원 모델링 절차를 간단히 함으로써 이론적인 설계에 피드백(feedback)을 빨리

줄 수 있어 설계시간을 단축시킬 수 있었다. 또한 설계가 변경되더라도 본 연구에서 개발된 기법을 적용하면 적은 노력으로 최적화 된 설계결과를 얻을 수 있다.

추후계획으로는 설계된 임펠러를 전산유체코드를 이용한 유동장 해석을 수행하여 수력학적 성능을 평가하고 결과에 따라 임펠러 형상을 개선할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5 참고문헌

- [1] 박진석, 허형, 김종인, 구대현, "SMART 냉각재순환펌프 개념설계," '98 춘계학술발표회 논문집(II), 한국 원자력학회, pp. 995-890, 1998
- [2] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*, Pergamon Press, U.K. 1978.
- [3] 문인선, *유체기계*, 성민사, 1977.
- [4] *I-DEAS Master series*, Version 5.0, SDRC Korea
- [5] R. A. Wallis, *Axial Flow Fans and Ducts*, John Wiley & Sons, USA, 1983.
- [6] A. Kovats, "Design and Performance of Centerifugal and Axial Flow Pumps and Compressors, Pergamon Press, U.K, 1964
- [7] W. C. Osborne, *Fans*, 2nd Ed, Pergamon Press, U.K., pp. 150.
- [8] A. D. S. Carter, "Blade Profiles for Axial-Flow Fans, Pumps, Compressors, ETC.," Proc. Instn mech. Engrs, London, Vol. 175, No. 15, pp. 775-806, 1961
- [9] S. Lieblein, "Incidence and Deviation-Angle Correlations for Compressor Cascades," Journal of Basic Engineering; Transactions of the ASME, pp. 575-587, Sep. 1960.

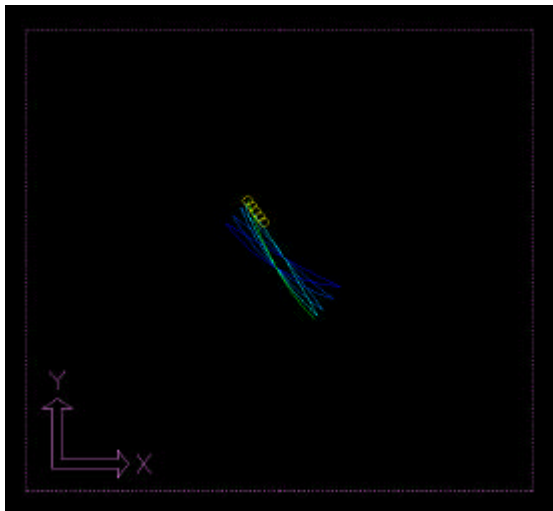


그림 7 3D-spline을 이용하여 section 생성

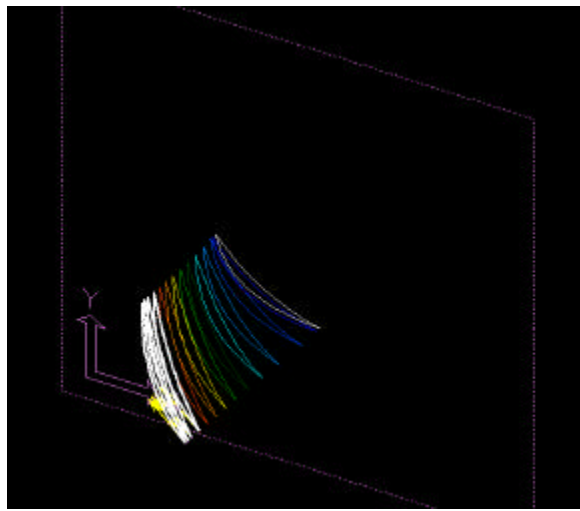


그림 7-1 Lofting을 이용하여 블레이드 part 생성

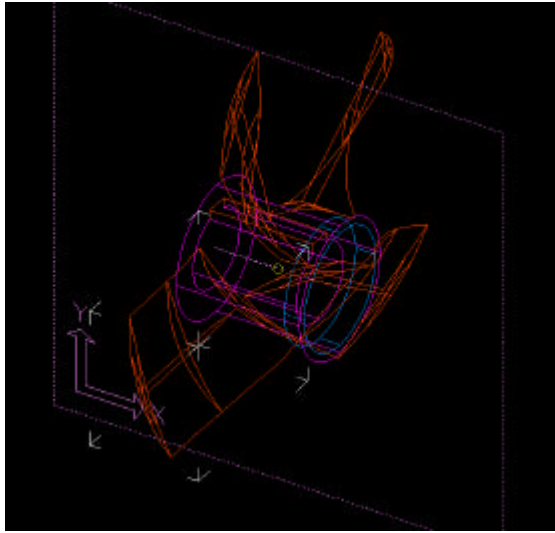


그림 7-2 블레이드를 개수만큼 복사하여 허브(hub)에 부착

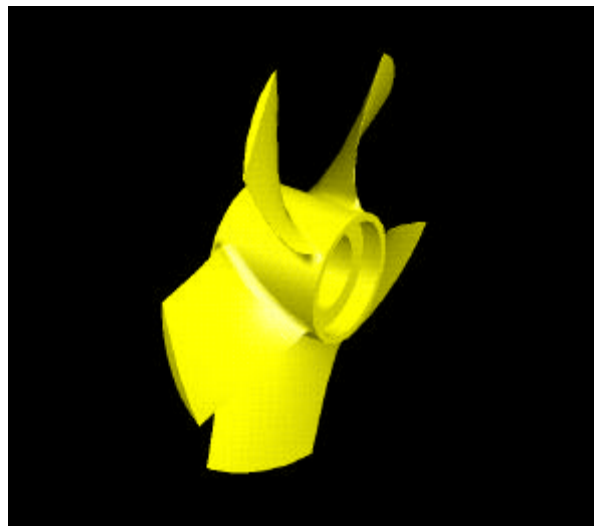


그림 7-3 생성된 임펠러 형상

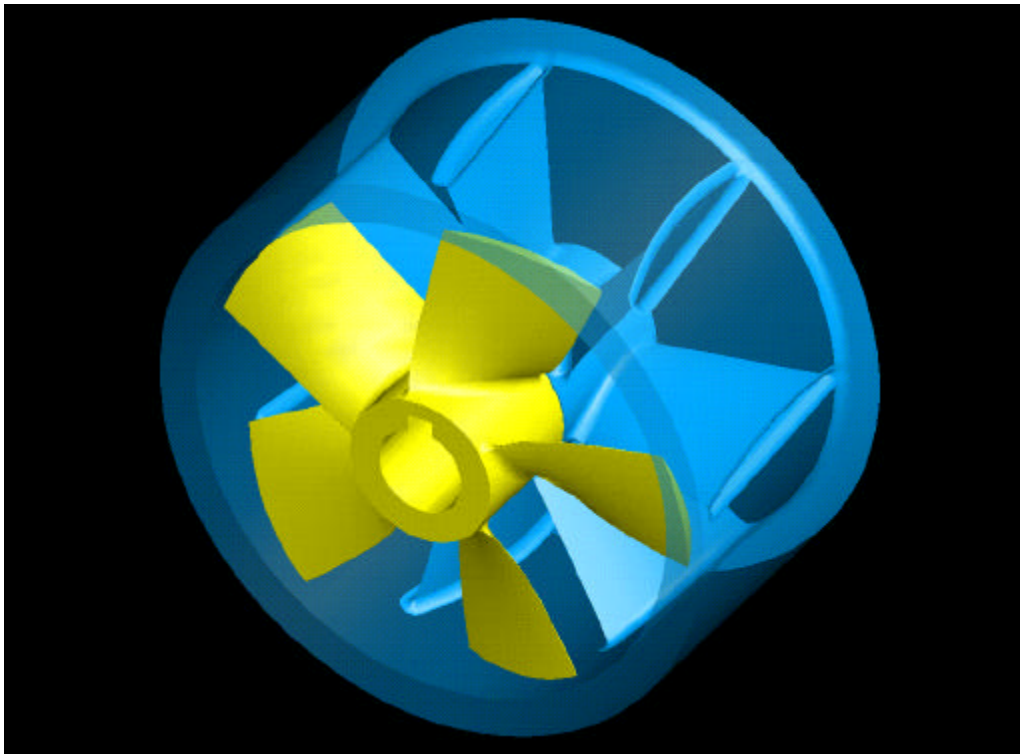


그림 8 완성된 펌프 임펠러 및 디퓨저