

## 원심/사류압축기의 공력설계 프로그램 개발 - 제2부 : 임펠러의 3차원 형상설계 -

오종식\*

### Aerodynamic Design Program for Centrifugal/Mixed-flow Compressors - Part II : Three Dimensional Profile Design of Impellers -

Jong-Sik Oh\*

*Key Words* : Centrifugal/Mixed-flow compressor(원심/사류압축기), Profile Design(형상설계)

#### ABSTRACT

A general program of three dimensional profile design of impellers for centrifugal/mixed-flow compressors is successfully commercialized using Bezier curves and quasi-3D flow analysis methods. Control points for meridional hub and shroud contours and blade camberline angles are arbitrarily changed to give smooth Bezier curves. With specified blade normal thicknesses, constructed geometry is instantly analyzed using flow analysis methods to be checked.

#### 1. 서론

압축기의 평균유선 설계와 탈설계점 성능예측 과정이 완료되면 다음 단계가 바로 임펠러의 3차원 형상설계 과정이다. 신속하고 효과적인 설계 과정을 위하여 블레이드 표면위의 점들을 직접 이용하는 것이 아니라 캠버선(camberline)과 그에 대응하는 수직두께, 그리고 자오면(meridional plane)상의 hub/shroud 곡선의 분포를 이용한다. 과거에는 이들의 분포를 수학적 함수의 특정 관계식으로 정의하여 3차원 형상을 구성한 후에 적절한 유동해석법(유선곡률법:streamline curvature methods, 이나 유한차분법: finite difference methods)을 적용하여 적합성을 판단하였었다.

그러나 최근에는 visual 컴퓨터 언어의 발달에 힘입어 Bezier 곡선이나 Spline 곡선 등을 이용하여 화면상에서 자유자재로 임의의 원하는 곡선을 구성할 수 있게 되었으며, 다양한 유동해석법을 이용한 여러 상용 프로그램들이 개발되어 국내에서도 사용자가 늘고 있

는 것으로 보인다. 대표적인 상용 프로그램으로는 미국 Concepts NREC사의 CCAD<sup>TM</sup>와 COMIG<sup>TM</sup>, 영국 PCA Engineers사의 KATRINA<sup>TM</sup>, 러시아 CIAM 연구소의 CADSCI<sup>TM</sup>, 일본 ADT사의 TurboDesign<sup>1</sup> <sup>TM</sup>, 벨기에에 NUMECA사의 Fine/Design3D<sup>TM</sup>, 그리고 캐나다 AEA사의 CFX-BladeGen<sup>TM</sup> 등 다수가 있다. 이처럼 종류가 많은 것은 형상설계 과정이 단순히 CAD와 CFD의 결합이기 때문에 적절한 CFD 코드만 있다면 형상설계 과정을 구성하기에 어렵지 않다는 사실을 의미한다. 따라서 핵심이 되는 부분은 CAD가 아니라 CFD의 신뢰성이며, 수없이 많은 반복적인 형상설계 과정이 단시간내에 이루어져야 하기 때문에 사용되는 CFD는 가장 간단하고 신속하면서도 동시에 보다 실제에 가까운 해석결과를 보여주어야 하는 어려움이 있다. 위에 열거한 상용 프로그램중에서는 한번의 유동해석을 수행하는 데에 많은 시간이 소요되는 것도 있는 것으로 알고 있다.

본 연구에서는 저자의 경험상 현재 국내외에서 가장 많이 알려져 있는 CCAD<sup>TM</sup> <sup>(1)</sup>의 여러 부족한 점을 보완하려는 의도에서 독자적인 설계 프로그램을 개발하게 되었으며, 평균유선 설계/성능해석 프로그램과 3

E-mail : ojs@kturbo.com

차원 압축성 난류 유동해석 프로그램과 함께 독자적인 압축기 공력설계 전체 시스템을 이루게 된다.

## 2. 임펠러의 3차원 형상설계

### 2.1. Flow Chart

전체적으로 볼때 다음과 같이 임펠러의 3차원 형상 설계 단계와 준3차원 유동해석의 두가지 모듈로 구성 되어 있다.

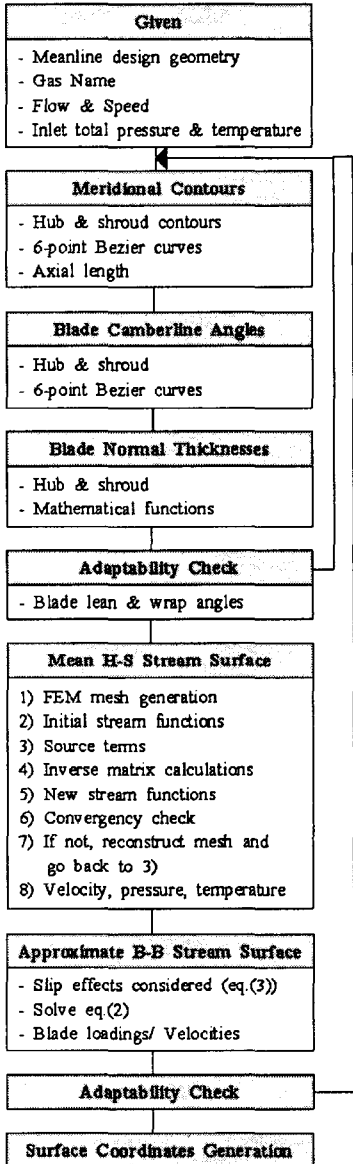


Fig.1 Flow chart of impeller 3D profile design

본 연구에서 개발된 임펠러의 3차원 형상설계 프로그램은 RCOM3DR™ (Radial COMPRESSOR 3D Real gas)로 명명되었는데, 취급하는 모든 영역을 나타내면 다음과 같다.

1)	Centrifugal Compressor Mixed-flow Compressor	4)	Unshrouded Impeller Shrouded Impeller
----	---	----	--

2)	Ideal Gas Real Gas	5)	Full-bladed Impeller Splitter-bladed Impeller
----	-----------------------	----	--

3)	Profile Design Mode Profile Analysis Mode	6)	Radial L.E. Impeller Slanted L.E. Impeller
----	--	----	---

### 2.2 3D Blade Geometry

임펠러 블레이드의 3차원 형상은 다음과 같은 요소들을 사용하여 구성된다. 날개두께의 분포를 제외하고

- ▶ Hub/Shroud Meridional Contours
- ▶ Hub/Shroud Blade Camberline Angles
- ▶ Hub/Shroud Blade Normal Thicknesses

는 모두 6-point Bezier 곡선을 이용하여 사용자가 컴퓨터 화면상에서 자유자재로 원하는 곡선의 형상을 얻도록 한다. 날개두께의 변화 자체는 공력설계에 있어서 관여하는 부분이 거의 없기 때문에 입/출구 두께와 최대두께 입력치를 이용하여 적절한 분포식을 지정하여 결정하도록 하였다.

### 2.3 Quasi-3D Flow Analysis

임의로 구성한 임펠러의 3차원 형상이 적절한가를 판단하기 위하여 내부 유동해석을 수행하여 속도나 압력분포 등을 확인하여야 하지만, 반복적인 형상설계 작업이 단시간내에 완료하기 위해서는 유동해석에 소요되는 시간이 짧을수록 좋다. 따라서 완전 3차원 유동해석 보다는 준3차원(quasi-3D) 유동해석법을 이용하는 비점성 해석이 일반적이다. 상용 프로그램인 CCAD™는 준3차원 유동해석법의 개념을 따르기는 하지만 Hub와 Shroud의 2개 유선만이 이루는 Single Stream Tube의 개념으로 매우 단순화하여 유선곡률법으로 해석함으로써 계산시간은 거의 순간에 해당할 정도로 짧으나 해의 정확성에 있어서는 상당히 뒤떨어진다. 이를 보완하기 위하여 별도로 Multi Stream Tube 계산이 가능하도록 배려하였으나 수렴에 실패하는 경우가 대부분이기에 활용도가 낮은 등 부족한 점이 많

이 있다.

본 연구에서는 해의 수렴성이 매우 뛰어난 유한요소법(Finite Element Methods)을 이용한 준3차원 유동 해석법<sup>(2)</sup>을 적용하고 더불어 점성에 의한 경험적 손실 모델들을 간접적으로 반영함으로써 해의 정확성을 향상시키고자 하였다.

### 2.3.1 Mean H-S Stream Surface

준3차원 유동이란 3차원 내부공간을 2개의 서로 교차하는 유면들의 조합으로 모델화함으로써 복잡한 3차원 유동방정식을 비교적 간단한 2차원 방정식으로 변환하여 해석하는 개념이다. 대표적인 2개의 유면으로는 H-S(Hub-to-Shroud)유면과 B-B(Blade-to-Blade)유면이 있다. 3차원압축성 비점성 유동방정식을 2차원 유동함수(stream function)와 점성에 의한 간접손실항 등을 사용하여 H-S 유면에 적용하면 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho br} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -\frac{1}{\rho br} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \rho br \frac{dl}{d\psi} - \frac{TD}{W^2} \quad (1)$$

$$\text{where } D = \frac{\partial s}{\partial r} (C_z - W_u \tan \delta_2) - \frac{\partial s}{\partial z} (C_r - W_u \tan \delta_1)$$

여기서의 D항은 경험적으로 얻은 점성에 의한 손실효과를 유선을 따라 분포시키는 의미이며, 상첨자가 있는 편미분항은 유선을 따르는 미분이라는 뜻이다. 자세한 사항들은 해당 참고문헌을 참조하길 바란다.

본 프로그램은 단순히 설계용도이기에 블레이드의 압력면과 부압면 사이의 중앙에 위치하는 평균 H-S 유면에 대해서만 방정식 (1)을 해석하게 되며, 해의 정확도를 위해 span 방향으로 총 15개의 유선을, 그리고 주유동방향으로 총 60개의 직교선을 두어 유한요소 격자를 구성한다. 통상적으로 해가 수렴하는 데에 소요되는 반복계산 회수는 7-8회 이내이며, PC상에서 이상기체인 경우에는 보통 2-3초이내에, 그리고 실제기체인 경우에는 10-15초 이내에 계산을 완료한다.

### 2.3.2 Blade Loadings

형상설계의 적합성을 판단하는 중요한 기준중의 하나인 블레이드 하중은 날개의 압력면과 부압면 상의 속도나 압력의 차이를 나타내는 인자로서 원래에는 B-B유면의 계산결과로부터 얻어야 한다. 가장 흔히 알려져 있는 준3차원 유동해석법으로서 유선곡률법이 있는데 이는 속도구배 방정식과 연속방정식을 임펠러의 전연(leading-edge)에서부터 후연(trailing-edge)까지만 준직교선들을 따라 순차적으로 해석해 나가는 방

법이다. 그러나 B-B유면 해석에 있어서는 기본적으로 비점성 유동이기 때문에 후연에서의 Kutta 조건을 만족시킬 수가 없는 한계가 있다. 따라서 굳이 해석하고 싶다면 유동의 유출각을 입력값으로 주어야 하는 모순이 있어 왔다. 본 저자는 이를 해결하기 위하여 유한요소법을 이용하여 두개의 pitch 영역을 한번에 해석하고 서로 다른 circulation을 줌으로써 자연스럽게 Kutta 조건을 만족하는 B-B유면 해석법<sup>(2)</sup>을 개발하였으나 두개의 pitch 영역을 계산하기에 계산시간이 상대적으로 더 오래 걸리는 단점이 있어서 본 프로그램과 같이 형상설계용으로는 적합하지 않다.

따라서 B-B유면을 직접 해석하기보다는 다음과 같은 가정을 통하여 간단한 블레이드 하중 계산식을 도출하여 사용하도록 한다<sup>(3)</sup>.

▶ Linear variations of velocity

▶ Inviscid flow

$$W_s - W_b = \sin \beta \left( \frac{2\pi}{Z} - \frac{t}{r} \right) \frac{\partial}{\partial m} (r C_u) \quad (2)$$

### 2.3.3 Slip Effects

블레이드 하중 계산식은 기본적으로 비점성 유동이라는 가정을 갖고 있기 때문에, 실제로 발생하는 임펠러 출구에서의 slip 현상을 반영할 수 없다. 따라서 별도로 다음과 같이 slip에 의한 유동각의 보정이 필요하다. 후연에서의 유출각은 경험적인 slip factor로 결정하

$$\tan \beta_2 = \frac{\tan \beta_{2b}}{1 - \frac{U_2}{C_{m2}} (1 - \zeta) \tan \beta_{2b}} \quad (3)$$

$$\beta = c_1 + c_2 m + c_3 m^2$$

고, 유동각을 slip이 발생하기 시작하는 지점에서부터 후연까지 적절한 포물선으로 가정하여 분포시킨다.

### 2.4 Real Gas Option

상용 프로그램인 CCAD<sup>TM</sup>는 이상기체인 경우에만 적용이 가능하기 때문에, 냉동기용 압축기와 같이 실제기체이어야만 하는 경우에는 다른 편법을 적용할 수 밖에 없었다. 본 프로그램에서는 평균유선 설계/성능해석 경우와 마찬가지로 방법으로 실제기체 계산법을 준3차원 유동해석법에 접목시켜 이를 가능하게 하였다.

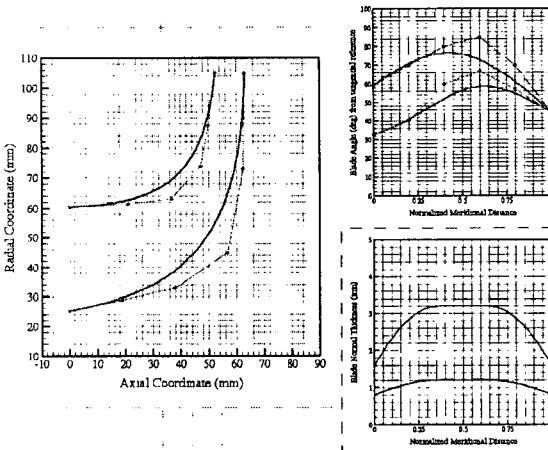
공기와 같은 이상기체가 아닌 경우 (예 : 냉매, 수소화합물)에는 실제기체의 물성치를 적용해야 한다. 보통 Martin-Hou 방정식을 이용하거나 Mollier Table을

읽어들이는 방법이 있는데, 본 연구에서는 기체의 종류에 제약없이 사용자가 원하는 기체에 대해 물성치 데이터베이스 파일을 마련할 수 있는 Mollier Table 방법을 적용하였다. 특정기체에 대해 다음과 같은 내용의 물성치들을 미리 정해진 양식에 따라 준비하게 되며, 이러한 방법은 혼합냉매와 같이 여러 종류의 기체가 혼합되어 있는 경우에도 효과적이다.

p = p <sub>1</sub>					
T = T <sub>1</sub>	density	enthalpy	entropy	sound speed	dynamic viscosity
ooo					
T = T <sub>n</sub>					
p = p <sub>m</sub>					
T = T <sub>1</sub>					
ooo					
T = T <sub>n</sub>					

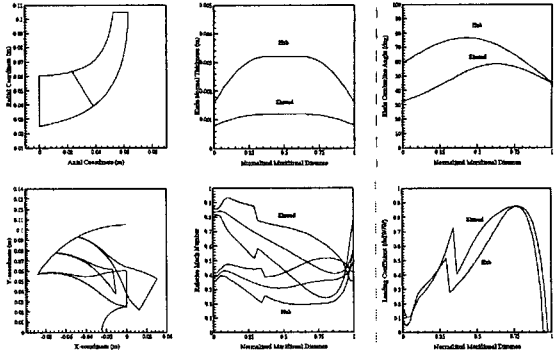
이러한 데이터파일을 읽어들이는 후에 임의의 2개 물성치를 알고 있을 때 나머지를 구하게 되며 적절한 보간법을 사용한다. 실제기체 계산이 필요한 경우는 예를 들면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Static Properties} &= \text{STATIC}(p_o, T_o, C) \\
 p_o &= \text{RealGas}(h_o, s_o) \\
 T_o &= \text{RealGas}(h_o, p_o)
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

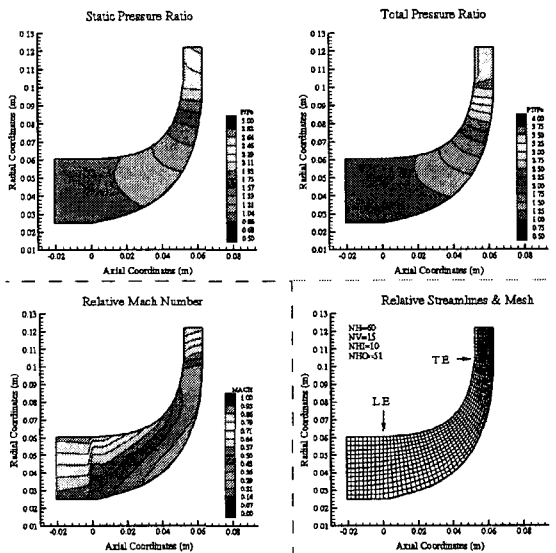


(a) 3D profile design screen

Fig.2 Example #1 of impeller 3D profile design results  
 - Centrifugal water chiller using HFC-134a  
 - Real gas calculation



(b) Blade loadings



(c) Quasi-3D flow analysis results

Fig.2 Continued

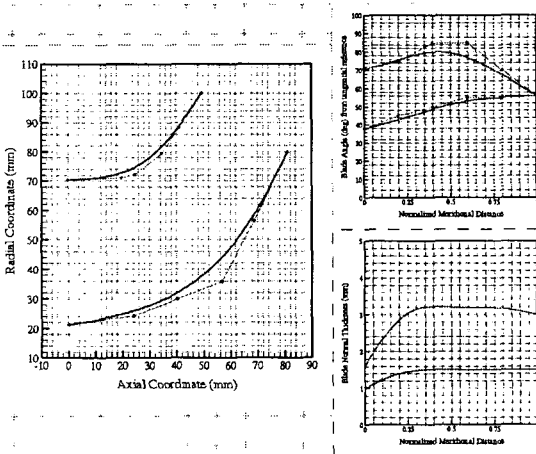
### 3. 예제 적용결과

Fig.2는 HFC-134a 냉매를 사용하는 터보냉동기용 원심압축기 임펠러에 대하여 3차원 형상설계를 수행한 예를 보여주고 있다. 실제기체의 상태로 준3차원 유동해석을 수행하였으며, 6-point Bezier 곡선을 이용하여 세밀한 형상설계가 이루어져 적절한 공력하중의 분포를 얻도록 설계되었음을 알 수 있다. 만일 이상기체로 해석한다면 엉뚱한 공력하중의 분포를 얻게 된다.

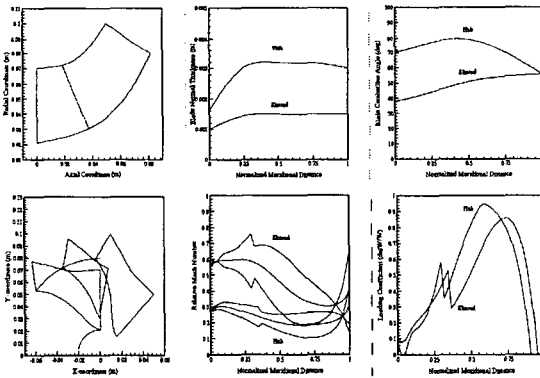
Fig.3은 사류형(mixed-flow) 압축기의 한 예로서 공기싸이클을 이용한 저온냉동기용 압축기 임펠러에 대하여 3차원 형상설계를 수행하였다. 사류형 임펠러인

경우에도 무리없이 설계가 가능함을 보여주고 있으며 준3차원 유동해석 또한 사류형 뿐만 아니라 펌프 임펠러와 같이 2차원에 가까운 형상일 경우에도 문제없이 설계가 가능하다.

본 프로그램은 RCOMIDR™로부터 입력파일을 자동으로 받거나 혹은 사용자에게 의해 별도로 입력파일을 구성할 수 있도록 되어 있다.



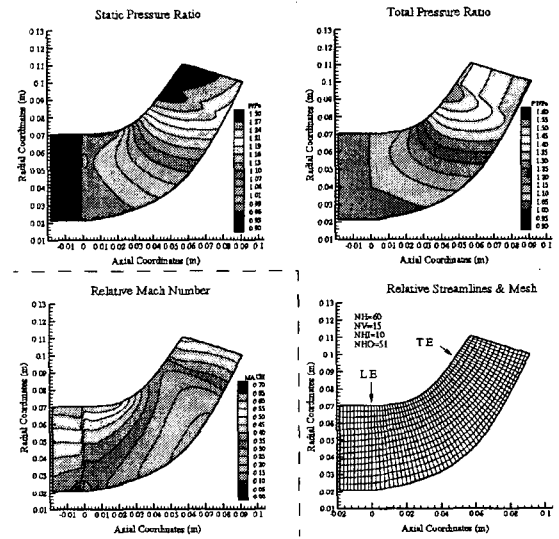
(a) 3D profile design screen



(b) Blade loadings

#### 4. 결론

본 연구에서는 원심/사류형 압축기용 임펠러의 3차원 형상을 설계하고, 유한요소법을 이용하면서 점성에 의한 손실효과를 간접적으로 고려하는 개선된 준3차원 유동해석법으로 공력하중을 판별하는 범용 프로그램을 성공적으로 개발하였다. 실제기체인 경우를 포함하여 거의 모든 사용자의 요구사항을 반영할 수 있도록 개발되었으며, 현재 구매 가능한 해외 상용 프로그램보다도 더 우수한 성능을 확보하고 있다고 판단된다.



(c) Quasi-3D flow analysis results

Fig.3 Continued

#### 참고문헌

- (1) Howard, J., et al., 1994, A Designer's Guide to CCAD and Advanced Radial Turbomachinery Three Dimensional Design, Concepts NREC
- (2) 오종식, 1992, '터보기계 회전차내부 준3차원 아음속유동과 천이음속유동의 수치해석에 관한 연구,' 연세대학교 대학원 기계공학과 박사학위 논문
- (3) Dallenbach, F., 1961, "The Aerodynamic Design and Performance of Centrifugal and Mixed-flow Compressors," SAE Tech. Prog. Series

Fig.3 Example #2 of impeller 3D profile design results  
- Mixed-flow compressor impeller  
- Air cycle refrigerators