

## 2차원 축류압축기 블레이드의 공력설계를 위한 Navier-Stokes방정식 적용 연구

### Application of Navier-Stokes Equations to Aerodynamic Design of Two-Dimensional Axial-Flow Compressor Blades

정 희 택 · 김 주 섭

H. T. Chung and J. S. Kim

**Key Words** : Axial-flow Compressor(축류압축기), Navier-Stokes Design(나비에 스톱스 설계법), Aerodynamic Performance(공력특성), Cascade(익렬)

**Abstract** : An integrated computing system has been developed for a Navier-Stokes design procedure of an axial-flow compressor blades. The process is done on the four separate steps, i.e., determination of the basic profiles, generation of computational grids, cascade flow simulation and analysis of the computed results in design sense. Applications are made to the blade design of the LP compressor. Computational results are analyzed with respect to the flow-field characteristics and are compared with the expected design requirements. The present system are coupled with the design procedure of the turbomachinery blades using the Navier-Stokes technique.

#### 1. 서 론

압축기의 블레이드 기본 형상은 항공기 날개에서 유래하였다. 1950년대의 초보설계에서는 요구 조건-입출구 유동각, 압력비 등에 맞게 형상을 변화시켜 풍동실험을 통하여 설계 데이터를 축적하였다. 따라서, 설계의 대부분은 설계자의 경험과 실험데이터에 의존하였다. 경험과 시행착오에 의한 데이터가 축적되고, 전산기법이 설계에 도입됨에 따라 설계의 많은 부분이 전산기 활용으로 간편하게 규정화되어 오고 있다.

최근의 전산기 계산 능력-기억용량과 처리 속도가 급속히 향상되고, 수치기법이 고도화됨에 따라, 예전에 실험과 경험에 의존했던 가스터빈 엔진 내부의 복잡한 유동장 해석은 전산기를 통한 이론적 예측이 어느정도 가능하게 되었다. 유선면상의 익렬 내부의 2차원 압축성 점성유동장을 정확히 예측함으로써 기존의 익렬 풍동 실험을 대치할 수 있고<sup>1)</sup>, 비정상 3차원 Navier-Stokes방정식의 수치해를 구하는 기법이 발달함에 따라 실제 rig-test 전에 엔

진의 공력 성능 예측을 할 수 있어서 시험에 의한 시행착오의 회수를 줄이고, 비용과 시간면에서 설계의 효율을 급격히 증가할 수 있다<sup>2,3)</sup>.

본 연구의 목적은 Navier-Stokes방정식 기법을 이용하여 축류압축기 블레이드의 형상설계를 하는 전산시스템을 개발하는 것이다. 이를 위하여 기존의 기능별 전산기법인 블레이드 형상 결정 과정, 계산격자점 생성 과정, 익렬유동장 해석 과정 및 결과 분석 과정을 통합하여, 이를 설계시스템에 연결할 수 있도록 전산체계를 구축하였다. 기존의 가스터빈 엔진의 압축기부 설계 과정에 적용하여 시스템의 타당성과 효용성을 검증하였다.

#### 2. 수치기법

Navier-Stokes방정식을 이용하여 축류압축기의 블레이드를 설계하는 과정은 Fig. 1에 나타나 바와 같이 1) 기본설계와 준3차원 해석 결과로부터 설계조건을 선정, 2) 데이터베이스 등을 이용한 초기 블레이드 형상 결정, 3) Navier-Stokes방정식에 의한 익렬 유동장 해석 및 4) 결과의 공력 특성 분석으로 이루어진다. 출구유동각 및 손실 등이 설계요구조건을 만족하면 탈설계점의 공력특성을 분석하여 블레

접수일 : 1998년 12월 30일  
정희택 : 경상대학교 기계공학과  
김주섭 : 경상대학교 대학원

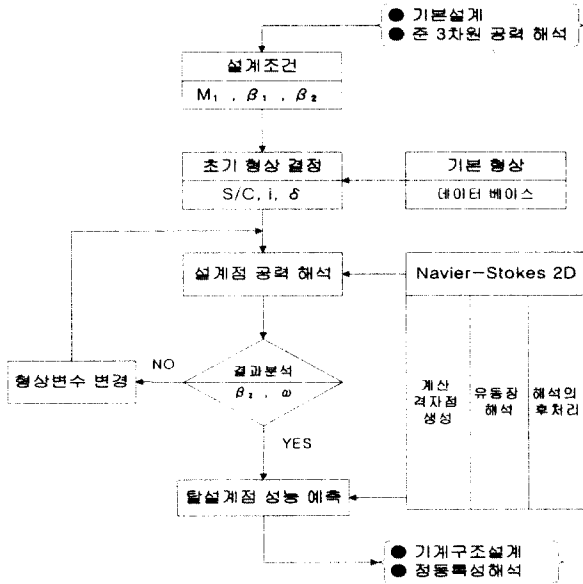


Fig. 1 Navier-Stokes design procedure for 2D axial-flow compressor blades

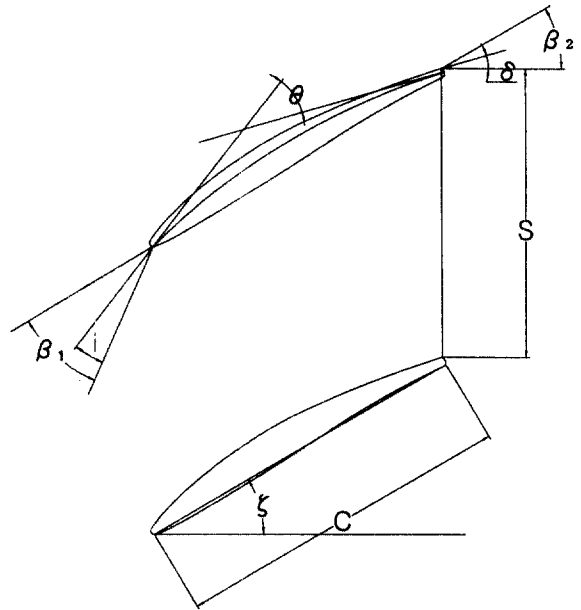


Fig. 2 Cascade notation

이드의 운전 가용 범위를 결정하고, 정·동적 특성 분석에 의한 기계구조 설계 과정으로 진행된다. 본 시스템에 사용된 주요 기법을 기술하면 다음과 같다.

2.1 블레이드 형상 결정법

평균반경에서의 기본설계와 익렬유선면에서의 준 3차원 유동해석 결과로부터 블레이드의 설계조건인 입구유동각, 출구예상 유동각, 입구 마하수 등이 결정된다. 블레이드의 주요 공력형상변수는 익렬충실도, 최소 손실 입사각과 최소손실 편향각이다. 여기에 기본익형을 선정하면 블레이드의 형상 설계가 완료된다. Fig. 2에는 축류압축기 블레이드 및 익렬의 기하학적인 정의가 도식화되어 있다.

유동굴절각은 익렬충실도와 출구유동각 및 익렬 내부의 평균 레이놀즈 수에 영향을 받는다. 따라서, 익렬충실도는 이러한 관계를 고려하여 설계요구의 유동각이 형성되도록 선정하면 된다.

블레이드의 입·출구의 각도는 입사각과 편차각이 정해지면 결정된다. 초기값으로는 다음과 같은 준경험식을 사용하였다<sup>4)</sup>. 즉, 입사각  $i$ , 편차각  $\delta$ 은,

$$i = K_i + i_0 + n\theta \quad (1)$$

$$\delta = [ 0.23(a/c)^2 + 0.1(\beta_2/50) ] \sqrt{s/c} \quad (2)$$

축류압축기 기본익형에는 미국의 NACA-65와 영국의 C-계열이 아음속에 쓰이고, 그 외에 천음속용

으로 DCA (double circular arc), 확산제어익형 (control diffusion airfoil ; CDA) 등이 사용되고 있다. NACA-65 계열에 관한 실험 데이터와 경험식이 널리 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 Kovach<sup>5)</sup>이 제안한 변형된 NACA-65계열의 익형을 기본형상으로 채택하였다.

2.2 계산격자 생성법

본 연구에서는 Fig. 3와 같이 블레이드의 기하학적인 형상과 내부유동장 특성에 적합한 다단블록 H-형 격자구조를 채택하였다.<sup>6)</sup> 계산격자 생성과정은, 블레이드의 형상 모델링, 기본 익렬 형상과 공력 조건을 이용한 경계 격자점 분포, 내부격자점 생성 등 3단계로 구성된다.

내부 격자점은 대수기법과 미분방정식법을 병행하면 빠른시간에 효율적으로 생성할 수 있다. 본 연구에서는, 단위블록내에는 Transfinite법을 사용하여 격자점을 형성하고, Poisson방정식법을 이용하여 블록간의 격자점간의 완만성을 개선하였다.

다단블록 격자계 내부의 각각의 블록은 형상이 단순하므로, 간단한 대수식으로도 완만성과 수직성, 격자 조밀성 등을 만족하는 격자를 생성할 수 있다. 경계면의 격자점을 이용하여, 선형 Transfinite 내삽법으로 각 블록의 내부 격자점을 손쉽게, 빠른 시간에 구할 수 있다.

각 블록 간에는 상관관계가 없으므로, 블록경계면의 격자의 완만성이 보장되지 않는다. GRAPE 알고

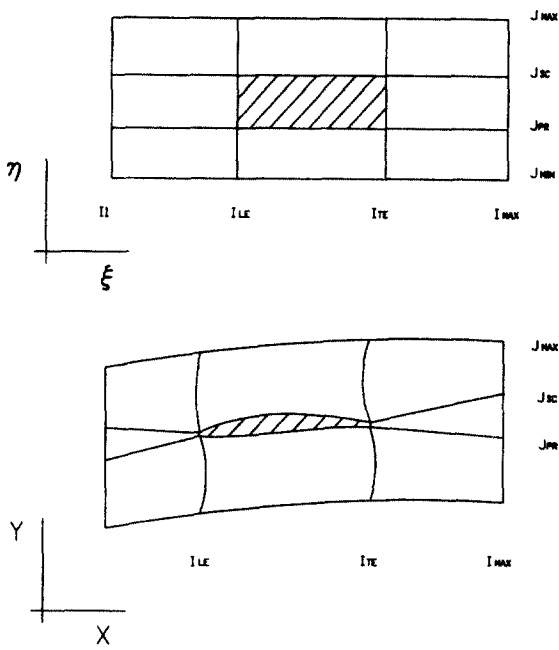


Fig. 3 Multi-block grid topology

리즘과 같은 미분방정식 기법을 적용하면 이 문제를 해결 할 수 있다.

난류유동장의 경우 표면격자가 더욱 밀집되어야 한다. 이러한 경우에는 대수식을 이용한 grid-embedding 기법을 이용하여 경계층 격자를 재구성 하면 격자형성 시간을 줄이고, 안정된 격자계를 구할 수 있다.

### 2.3 공력성능 해석법

축류압축기 블레이드의 공력성능 특성을 분석하기 위해서는 익렬 내부의 2차원 압축성 점성유동장 시뮬레이션을 하여야 한다. 본 연구에서는 열유동해석 범용·상용코드인 FLUENT (version 4.2)를 사용하였다<sup>7)</sup>. 이에 사용된 유동방정식의 형태, 난류모델, 경계조건 처리 및 방정식의 차분화기법 등을 요약하면 다음과 같다.

압축기 익렬내부의 2차원 압축성 점성유동장 방정식을 일반좌표계로 표시하면 다음과 같은 보존식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho \phi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \rho U \phi - \frac{\Gamma}{J} D_{\xi\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} - \frac{\Gamma}{J} D_{\xi\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \rho V \phi - \frac{\Gamma}{J} D_{\eta\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] = S_\phi \quad (3)$$

여기서,  $\phi = \{ 1, u, v, w, e, k, \epsilon \}^T$ , 이며  $S_\phi$ 는 body force와 압력항을 포함한다.

난류유동 해석을 위해서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 경계조건으로는 유동의 입구에서 일정한 속도분포를 가지는 것으로 가정하였고, 정압은 내부 유동영역으로부터 외삽하여 구한다. 고체표면에서는 운동량 방정식에 대하여 no-slip 조건을 주었고, 출구에서는 입구에서의 질량유량이 보존 되도록 하였고, 주기경계면에서는 주기조건을 부여하였다.

식(3)의 각 항을 차분화하여 제어체적 주위의 격자점에 따르는 항들을 모아 정리하게 되면 다음과 같은 형태로 변환된다.

$$A_p \phi_p = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + A_T \phi_T + A_B \phi_B + S_i \quad (4)$$

유동방정식(3)해는 비엇갈림 격자계(non-staggered grid system)에서 전달 방정식들을 차분화시키기 위해서 유한체적법을 SIMPLE형의 해법으로 반복 계산을 수행하였다.

## 3. 적용

### 3.1 설계조건 및 블레이드 형상 설계

본 연구에서 개발된 정상시스템의 효율성을 검증하기 위해서 산업용 가스터빈엔진의 다단축류압축기의 공력설계 과정에 적용하였다<sup>8)</sup>. 적용 부분은 저단압축부의 1단 정익의 평균반경으로, 준3차원 해석에 의한 설계점 조건은, Table 1에 나타난 바와 같이 입구 유동조건이 유동각 45.77°, Mach수 0.572이고, 유동굴절각이 23.56°이다. NACA-65계열을 기본 익형으로 하여 2.1질의 형상결정법으로 설계한 결과 익렬충실도 0.956, 캠버 굽힘각 16.83°, 엇갈림각 17.69°의 결과를 얻었다. 기존의 실험결과와 경험식을 이용하면 블레이드의 손실을 예상할 수 있다. Liebrein이 제시한 식<sup>9)</sup>을 이용하면 예상손실이 0.035로 예측된다. 주요 형상 설계변수와 형상 설계 결과는 Table 1과 Fig. 4에 도시하였다.

Table 1 Design conditions and parameters

design conditions	inlet flow mach no.	$M_1$	0.572
	inlet flow angle	$\beta_1$	45.77°
	outlet flow angle	$\beta_2$	22.21°
blading parameters	solidity	$S/C$	0.956
	incidence angle	$i$	2.22°
	deviation angle	$\delta$	4.52°
estimation	loss coefficient	$\omega$	0.035

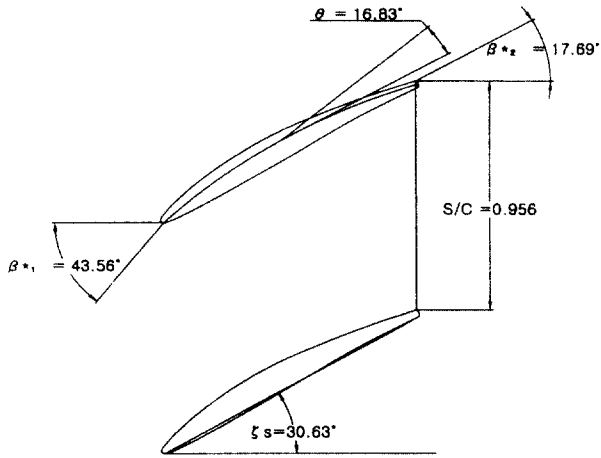


Fig. 4 Blade configuration for LPC #1 stator

### 3.2 설계점 분석

설계조건에서의 블레이드 공력특성을 분석하기 위해서는, 블레이드 형상과 공력설계 조건을 이용하여 2차원 압축성 점성 익렬 유동장 해석을 위한 계산격자점을 생성하여야 한다. Fig. 5는 2.2절의 다중블록 H-구조의 수치기법으로 생성된 익렬 내부 격자점 분포를 나타낸 것이다. 블레이드 표면에 96개, 주유동방향( $\xi$ )으로 257개, 피치방향( $\eta$ )으로 81개 등 총 20,817 개의 계산격자점을 사용하였다. 블레이드 표면 격자의 수직성이 양호하고, 주기경계면 부근에서 격자의 완만하고 연속적으로 생성되었다. 블레이드 선단 및 끝단 부근은, 주기경계선과 익형 표면이 교차하는 곳으로, 유동 현상이 복잡하고, 기하학적인 변화가 심하다. 격자의 상태에 따라 수치해의 결과에 영향을 받는다. 계산격자가 완만하지 않거나, 격자의 미분변화율이 연속적이지 못하면 수치해가 발산하는 경우도 있다. 계산격자점 생성 결과는 블레이드 선단이나 끝단의 격자 상태가 모두 만족할 만하다. 블레이드 표면 등 경계층면의 격자 조밀성은  $\Delta S_y = 1.0 \times 10^{-4}$ 으로 난류 유동장에 적합하다.

내부의 유동장은 2.3절에서 언급한 바와 같이 열 유동해석 범용 전산프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 유동장의 수치 계산은 워크스테이션(IBM R/S 6000모델, 128MB급)에서 수행되었다. 유동변수의 평균 변화, 즉 상대오차가 0.1%에서 정상상태로 가정하였는데, 3,000번의 반복계산으로 4시간의 계산시간(CPU time)이 소요되었다.

설계된 블레이드의 주요 공력 특성치는 출구 유동각, 평균 손실 등이지만, 익렬 내부의 유동장 특성 해석도 중요하다. Fig. 6의 순간 유선 형상과

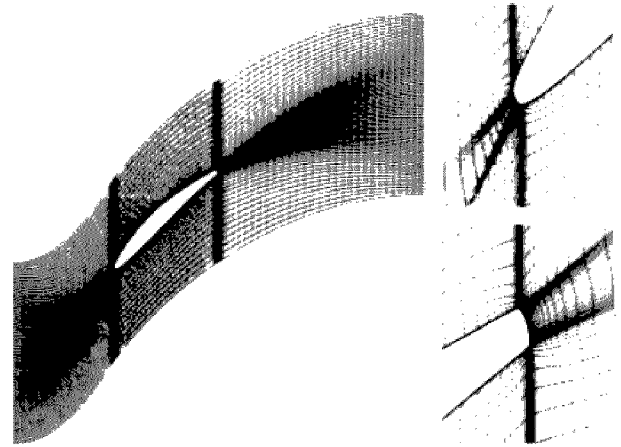


Fig. 5 Computational grids for 2D cascade flow-field simulation

Fig. 7의 마하수 분포는 블레이드 선단의 정체성 위치, 후류의 압축성 점성 유동장 특성 등에 관한 정보를 보여 준다. Fig. 6의 선단부근의 유선 형태를 보면 정체성이 블레이드의 선단 하반부에서 형성됨을 알 수 있다. 이 결과는, 설계된 입사각이 너무 커서 양실속 현상이 나타났음을 예측할 수 있다. Fig. 6의 끝단 부근의 유동 형태와 Fig. 7의 후류에서의 마하수 분포를 보면 출구유동각이 예상보다 큼을 알 수 있다. 이 결과로부터 유동의 굴절 정도가 설계조건보다 적다. 따라서, 출구의 편차각과 익렬층실도를 조정할 필요가 있다.

블레이드 표면의 압력분포를 보면 블레이드의 하중 분포에 관한 정보와 익렬 내부의 유동 및 압력 변화 등 블레이드의 제반 공력학적 특성을 알 수 있다. Fig. 8에는 블레이드 표면의 정압 분포가 압력계수의 형태로 도시되어 있다. 전술에서 본바와 같이 선단의 가압면쪽에서  $C_p = 1.0$ 인 정체점이 발견된다. 선단면 부근에서 압력의 변화가 급격함을 알 수 있다. 이 후에는 가압면에서는 압력은 거의 일정하나, 부압면에서는 완만히 증가함을 알 수 있다. 이러한 블레이드 표면의 압력분포는 축류압축기에서 나타나는 설계점의 전형적인 공력 특성과 일치한다.

익렬 출구에서의 유동 정보는 출구각과 압력 손실 분포 등 블레이드의 주요 공력 특성을 준다.

출구의 주유동장 위치를, 축방향 블레이드 길이  $Cax$ 로 무차원화하면  $X/Cax$ 로 표현할 수 있다.

$X/Cax = 1.0$ 에서의 출구 유동각과 손실계수의 형태가 Fig. 9에 나타나 있다. 출구 유동각의 평균치는  $27.77^\circ$ 로 설계요구 출구각- $22.21^\circ$ 보다 다소 크다. 이 결과는 초기에 설계된 블레이드로는 설계조건에서 요구하는 출구 유동을 만족하지 못한다. 또한 설계점의 평균 손실계수는 0.072로 예상보다 높고, 후

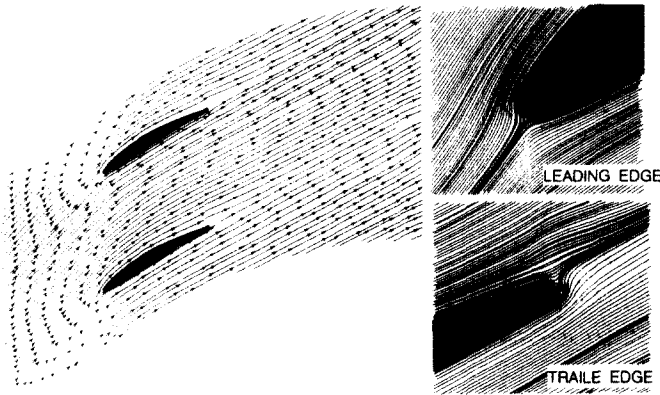


Fig. 6 Instantaneous streamline inside cascade fields

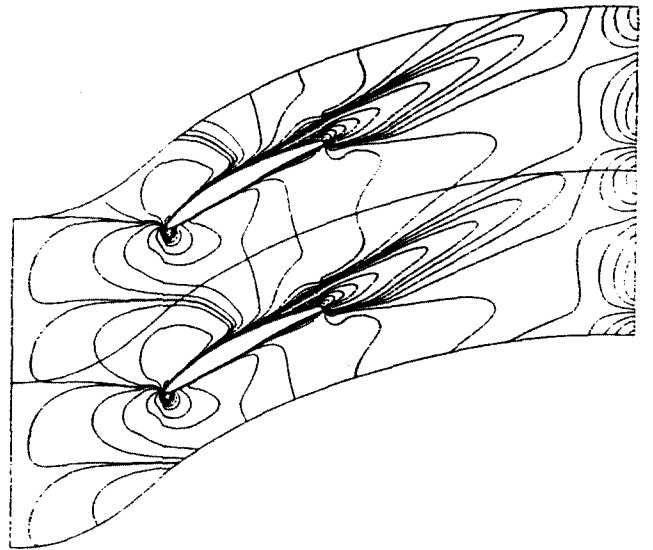


Fig. 7 Mach number distribution inside cascade fields

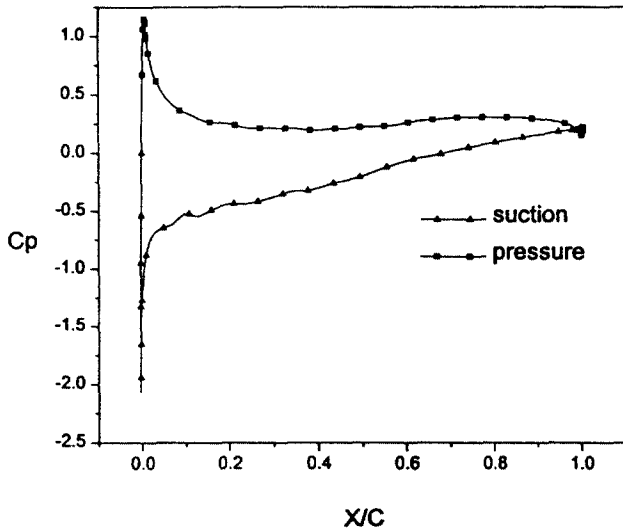


Fig. 8 Pressure coefficient distribution on the blade surface

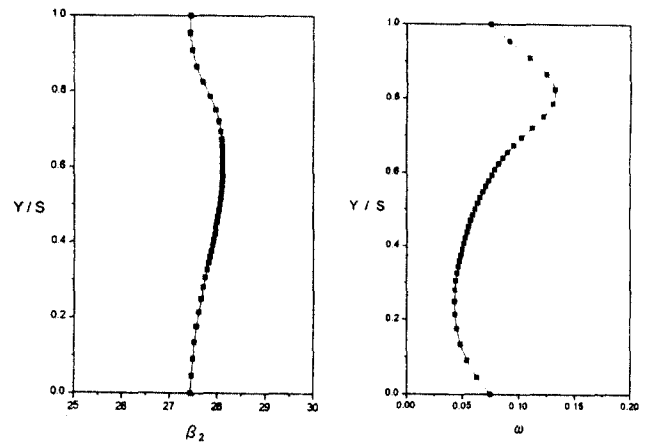


Fig. 9 Profiles of outlet flow angles and loss coefficients at X/C = 1.0

류의 일부 구간에서 음수의 값을 보여 준다. 유동출구각 및 손실계수의 분포로 보면 정상적인 익렬 후류 특성을 보여준다.

설계점에서 해석한 유동해석 결과를 종합하면, 1) 설계점의 유동굴절각이 설계요구조건보다 작고, 2) 손실은 경험식에 의한 예상치보다 다소 높다. 또한, 3) 블레이드 선단의 정체점이 압력면에 치우쳐져 있다. 따라서, 블레이드 형상변수인 입사각, 편차각 및 익렬 충실도를 수정할 필요가 있다.

#### 4. 결론

축류압축기 블레이드의 Navier-Stokes 설계를 위한 전산시스템 체계를 구축하고, 이를 공력설계 과정에 적용하였다. 본 연구에서 개발된 시스템은 설계조건에 의한 블레이드 형상 결정, 블레이드형상

모델링 및 내부계산격자점 생성, 익렬 유동장 해석 및 결과의 분석 등 기능별로 독립된 4개의 모듈로 운영된다. NACA-65계열의 익형을 기본으로 하여, 다단축류압축기의 정의 블레이드 형상을 결정하였고, 2차원 압축성 점성 유동해석에 의해 설계점에서의 제반 공력 특성을 분석하고 설계조건과 예상결과와 비교하였다. 본 연구의 결과는 터빈, 송풍기 등 제반 축류형 터보기계의 블레이드 형상 설계 및 공력 특성 분석으로도 활용될 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 경상대학교 항공기 부품기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. 정희택, 백제현, “2차원 익렬유동의 Navier-Stokes 해석”, 대한기계학회 논문집, 16권, 2호, pp. 313~324, 1992
2. Sanger, N.L., “Design of a Low Aspect Ratio Transonic Compressor Stage Using CFD Technique”, ASME Paper 94-GT-236, 1994
3. Rhie, C., et. al., “Advanced Transonic Fan Design Procedure Based On a Navier-Stokes Method”, ASME Paper 93-GT-323, 1993
4. Lieblein, S., “Incidence and Deviation Angle Correlations for Compressor Cascades”, J. Basic Eng. (trans. ASME), Vol. 72, pp. 575~587, 1960
5. Kovach, K. and Sandercock, D., “Aerodynamic Design and Performance of Five Stage Transonic Axial Flow Compressor”, J. Eng. Power (trans. ASME), Vol. 83, pp. 303~321, 1961
6. 정희택, “터보기계 익렬유동해석을 위한 다중블록 격자 형성법”, 한국전산유체공학회지, 1권, 1호, pp.19~25, 1996
7. Fluent Inc., “Fluent4.2 User Manual”, 1997
8. 오군섭 외 42인, “복합 열병합 발전플랜트의 국산화 설계 및 제작 기술 개발 (I)”, 과기처 특정연구, 한국기계연구원, UCN019-127.M, 1994
9. Lieblein, S., “Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades”, J. Basic Eng. (trans. ASME), Vol. 71, pp. 387~400, 1959