2000 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 169~175
부경대학교 용당캠퍼스 종합복지관, 2000. 12. 1~2.

Navier-Stokes방정식에 의한 축류터빈 블레이드의 공력학적 설계변수 특성 연구

정기섭* · 정희택** · 박준영*** · 백제현**** · 장범익* · 조수용**

Parametric Study on the Aerodynamic Design of Axial-Flow Turbine Blades Using Two-Dimensional Navier-Stokes Equations

Ki-Seob Chung*, Hee-Taeg Chung**, Jun-Young Park***, Je-Hyun Baek****, Beom-Ik Chang*, Soo-Yong Cho**

Key Words: *Navier-Stokes Equation (Navier-Stokes 방정식), Axial-Flow Turbine(축류터빈), Aerodynamic Performance (공력성능), Blades(블레이드), Design Parameter(설계변수)*

ABSTRACT

A design method for transonic turbine blades is developed based on Navier-Stokes equations. The present computing process is done on the four separate steps, i.e., determination of the blade profile, generation of the computational grids, cascade flow simulation and analysis of the computed results in the sense of the aerodynamic performance. The blade shapes are designed using the cubic polynomials under the control of the design parameters. Numerical methods for the flow equations are based on Van-Leer's FVS with an upwind TVD scheme on the finite volume. Applications are made to the VKI transonic rotor blades. Computed results are analyzed with respect to the aerodynamic performance and are compared with the experimental data.

1. 서 론

터보기계 블레이드의 공력설계에서 최종 목표는, 주어진 제약조건 및 운전 요구사항에서 최적의 형상을 결정하는 것이다. 현재 제작사에서 사용하는 설계 방법은, 자체에서 보유한 데이터 베이스를 이영하여 초기설계를 하고, 풍동 등의 실험을 통하여 최종 형상을 결정한다. 이러한 방법은 고가의 성능 설비가 필요하고 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다.

최근에는 전산기의 계산 능력이 급속히 향상되고, 수치기법이 고도화됨에 따라, 예전에 실험과 경험에 의존했던 터보기계 내부의 복잡한 유동장 해석과 성능 검정이 전산기를 이용한 수치적 예측이 가능하게 되었다. 블레이드의 재설계와 공력학적 성능 해석에 Navier-Stokes 방정식 기법을 적용하는 연구가 활발히

* 경상대학교 대학원
** 경상대학교 수송기계공학부
*** 포항공과대학교 대학원
****포항공과대학교 기계공학과
E-mail: htchung@nongae.gsnu.ac.kr

진행되고 있다. Rhie[1]는 자체개발한 다단축류터보기계 유동장 해석코드(NASATAR code)를 이용하여 항공기용 가스터빈 엔진의 팬의 재설계에 적용하였고, Korakiantis[2]는 천음속 축류터빈의 블레이드 형상 재설계의 검정에 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. Chung과 Lee[3]는 NASA에서 개발된 준3차원 Navier-Stokes 코드와 상용 최적화 프로그램을 사용하여 기존에 제작된 천음속 축류압축기의 동익 형상을 재설계하였다.

본 연구의 최종 목적은, Navier-Stokes방정식 기법을 이용하여 축류터빈 블레이드의 형상설계를 하는 전산시스템을 개발하는 것이다. 연구의 1차 단계로, 자체 개발한 2차원 압축성 Navier-Stokes 코드를 이용하여 블레이드 설계 변수에 의한 공력학적 성능 특성을 분석하고 설계 적용의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 수치기법

2.1 설계 변수 및 형상 결정

축류터빈 블레이드의 형상을 결정하는 방법으로는, 1)블레이드의 캠버에 두께를 분포하는법, 2)Joukowski transformation, 3)속도분포를 만족하는 형상 도출법, 4)다중 다항식법 등이 주로 사용된다. 본 연구에서는, 불필요한 입력 데이터를 줄이고, 일반적으로 적용할 수 있는 충분한 형상 결정 자유도를 갖는 방법을 기본 법칙으로 채택하였다.[4]

일정 반경으로 이루어진 원통상의 블레이드 익렬을 정의하기 위해서는 Fig. 1 과 같이 11개의 형상변수가 요구된다. 형상을 결정하기 위한 기본적인 설계변수는, Table 1 과 같이, 입출구의 유동각, 블레이드 개수, 반경, 축방향 및 접선 방향의 코드 길이, 엇갈림각 등이다. 선단 및 끝당의 반경, 입출구의 웨지각, unguided turning 각 등에 의해 블레이드 표면의 형상이 변한다.

이러한 11개의 독립된 형상변수는 5점의 위치와 기울기로 대치된다. 이 정보를 이용하여, 블래이드의 형상화 구간을 선단 및 끝단 부근의 2개의 원, 가압면 및 부압면의 3차 다항식으로 구성할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 형상변수와 곡선식을 프로그램화하여, 설계조건과 기존의 형상데이터를 이용하여 블레이드의 최종 형상을 결정하였다.

2.2 익렬 유동장 해석

2차원 직교좌표계에서 기술되는 압축성 Navier-Stokes 방정식을 기준길이와 동익 입구에서의 자유류 값으로 무차원화 하여 일반좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{J}\frac{\partial Q}{\partial \tau}+\frac{\partial (F-F_V)}{\partial \xi}+\frac{\partial (F-F_V)}{\partial \xi}=0 \qquad (1)$$

여기서, Q는 보존변수의 벡터, F와 G는 비점성 플럭스이며, Fv와 Gv 는 점성 플럭스이다.

층류의 점성계수는 Sutherland의 식에서 구해지고, 난류에 의한 점성계수는 Balwin-Lomax의 대수모델을 적용하였다.

본 연구에서는 Fig. 2과 같은 표준형 H격자형을 선택하였다. 이러한 익렬 유동장에 적용되는 경계조건으로는, 입구조건, 출구조건, 블레이드 표면, 주기조건으로 나누어진다.

유입류인 경우 3개의 특성값이 결정되고 나머지는 내부로 외삽된다. 유출류의 경우 내부로부터 3개의 특성값이 외삽되고, 나머지는 출구정압으로 주어진다.

블레이드 표면에서는 속도에 대해 점착조건이 사용된다. 표면에서는 플럭스 흐름이 없으므로, 압력보정식에 점착조건을 더해서 내부값으로부터 표면의 압력을 외삽하여 구한다.

식(1)의 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식의 차분화에는 유한체적법에 적용하였다.[5] 비점성의 플럭스에 대해 풍상차분적 TVD기법인 Van Leer의 FVS기법을 사용하고, 고차의 공간정확도를 위해 MUSCL 기법을 적용하였다. 점성 플럭스에 대해 점성의 확산이나 소멸현상에 적절한 일반적인 중심차분법을 사용하였다. 시간차분법으로는 비정상 형상에 적합하도록 세 점 내재적 Euler 기법을 사용하였다.

2.3 수치해석 절차

Navier-Stokes방정식을 이용하여 축류터빈의 불레이드를 설계하는 과정은 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 1)기본설계와 준3차원 해석결과로부터 공력설계조건을 선정, 2)설계변수를 이용하여 블레이드의 형상 결정, 3)Navier-Stokes 코드에 의한 익렬 유동장 해석 및 4) 결과의 공력 특성 분석으로 이루어진다. 출구유동각

및 손실 등이 설계요구조건을 만족하면, 탈설계점에서의 공력특성을 분석하여 블레이드의 운전가용범위를 결정하고, 정·동적 특성 분석에 의한 기계구조 설계 과정으로 진행된다.

블레이드의 형상은 2.1절의 기법으로 진행되고, 익렬유동장 해석은 2.3절의 기법에 의한 수치코드로 수행된다. 블레이드의 형상과 설계조건을 이용하여 유동장 해석을 위한 계산격자점이 생성된다. Fig. 2와 같은 H-형의 계산격자점 생성 과정은, 블레이드 형상 모델링, 경계격자점 분포, 내부격자점 생성의 3단계로 구성된다. 본 연구에서는 자체 개발한 축류터보기계 전공계산격자점 생성 코드(TGrid-AX)를 사용하였다.[6] 유동장의 수치해는, 블레이드 표면압력 분포, 출구손실 등의 공력특성치 별로 후처리된다.

3. 적 용

3.1 적용 대상

본 연구에서 개발된 전산시스템의 유용성을 검정하기 위하여 천음속영역에서 운전되는 동익 블레이드인 VKI 선형익렬에 적용하였다. 이 모델은 Kiock 등이 유럼의 4개 풍동에서 각각 실험하여 그 결과를 공동으로 발표하였다.[7] 각 풍동에 사용된 블레이드 형상과 실험 조건에 따라 그 결과에 약간의 차이를 보인다. 익렬수치해석 코드의 검정용으로 이 모델은 널리 사용되었다. 국내의 경우, 정희택 등[8]은 내재적 차분화 기법과 대수적 난류 모델을 C-형의 격자계에 적용하였고, 최창호 등[9]은 외재적 차분화 기법과 2방정식 난류 모델을 O-형의 격자계에 적용하여 실험 결과와 비교하였다.

익렬의 기하학적인 형상조건은, 피치-코드비가 0.71, 엇갈림각이 33.3° , 목-피치비가 67.8° 이고, Dej 의 방법으로 형상을 결정하였다고 보고되었다. 본 연구에서는 설계조건과 같이, 입구 유동각 30° , 입구 마하수 0.282, 이상 출구 마하수 1.00을 유동조건으로 하였다. 피치-코드비, 엇갈림각, 목-피치 비, 끝단 반경 등 4가지 설계변수의 관점에서 검토하였다.

3.2 수치기법의 검정

2.1절의 역설계 방법으로 모델 익형에 대하여 계산한 설계변수 값은 Table 2와 같다. 이 값을 사용하여 형상설계한 결과를 모델의 원래 데이터와 비교하면 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 선단부근의 부압면 쪽을 제외하면 원래의 형상과 그의 같은 결과를 얻었다.

Fig. 5는 유동해석에 사용된 계산격자점의 상태를 보여주고 있다. 유동 입구는 x/c = -1.0(선단점 기준)에, 출구는 x/c = -1.5(끝단점 기준)에 위치하도록 경계영역을 설정하였다. 블레이드 표면에는 가압면과 부압면에 각각 140개의 격자점을 두었고, 유입류와 후류에는 유동방향으로 96개의 격자점을 분포하였다. 피치방향으로는 48개의 격자점을 경계층을 고려하여 표면밀집형으로 분포함수를 사용하였다. 전체 계산 격자점의 규모는 NI×NJ = 333×49 이고, 경계층 표면의 첫 번째 격자점 간격은 약 0.2×10^{-3} 이다. 유동해석 코드의 수렴성을 밀도와 출구각의 평균값으로 표현하면 Fig. 6 과 같다. 20,000 번 반복 후의 평균 오차는 10^{-4} 정도이고, 출구의 유량 보존성은 0.1 % 이내였다.

Table 2의 형상변수에 의한 블레이드의 공력 특성을 블레이드 표면 하중 분포, 익렬 유동장 특성, 출구의 유동각 및 손실의 관점에서 실험 결과와 비교하면 다음과 같다.

블레이드의 압력 하중 특성은 표면 Mach수 분포로 분석할 수 있다. 실험결과에 의하면, 부압면의 유동은 익면의 60 %까지 가속되고, 이후 약간 감소하여 70 % 부근에서 재가속된다. Fig. 7 의 결과에 의하면 원형 블레이드(original shape)나 역설계된 블레이드(reversed shape)의 수치결과는 부압면 끝단 부근을 제외하면 실험결과와 잘 일치한다. 실험과 상이한 부분은 계산격자점의 구조 뿐만 아니라, 유동장 특성에도 기인한다. 익렬 내부 유동장 변화를 실험과 비교하면 Fig. 8 과 같다. Fig. 7에서 예상된 바와 같이 전반적인 천음속 점성 유동 현상이 실험 결과와 유사하다.

블레이드 표면의 하중 분포와 더불어, 출구에서의 유동 수치, 즉 유동각 및 손실계수는 블레이드의 주요한 공력 특성값이다. 이 두 수치는 실험에 따라서 오차가 약간 있다. Fig. 9 에는 출구에서의 평균 유동각을 출구위치에 따라 분석한 것이다. 본 수치해석 결과는 실험값 보다 약간 낮은 값을 보여준다. 손실계수의 경우 실험에 따라 더 큰 오차를 나타내지만, 본 수치결과는 평균적으로 실험값보다 약간 낮게 예측되었다. 출구유동각은 손실계수와 밀접한 관계가 있다. 후류 등에 의한 경계층 유동 영향이 클수록 손실이 커지고, 유동의 굴절도 작다. 따라서, 본 유동해석코드는 실제

보다 손실을 약간 낮게 예측하는 경향을 보여준다. 난류모델 등의 개선이 요구된다.

이상의 결과에서, 약간의 오차를 보여주지만, 전반적으로 블레이드의 공력특성을 잘 예측하므로, 본 연구에서 사용한 수치기법-블레이드 형상(2.1절), 유동장 해석(2.2절)-은 정확성을 보장할 수 있다.

3.3 설계변수의 공력학적 특성

피치-코드비는 블레이드의 길이를 결정하는 주요변수로 터빈의 크기를 결정 할 뿐만 아니라, 유동의 굴절, 손실 등에 직접적인 주요한 변수 중 하나이다. 원형 블레이드의 피치-코드비인 s/c= 0.71을 기준으로 변화 폭을 ±20 % 로 주어 유동장을 해석하였다.

익렬 내부 유동장-Fig. 11, 등밀도 분포, 표면 Mach 수-Fig. 12 에 나타난 바와 같이 피치-코드비가 줄어들수록 부압면의 속도가 증가하고 따라서 실제 압력변화도 증가한다. 블레이드의 하중이 증가하므로 유동굴절이 많이 되어 블레이드의 공력학적 성능이 향상됨을 예측할 수 있다. 이러한 결과는 출구에서의 유동각-Fig. 13, 손실계수-Fig. 14-의 결과에서 나타난다. 즉, 피치-코드비가 감소할수록 출구유동각은 증가하고, 손실도 감소한다. 블레이드의 개수가 주어진 경우, 피치-코드비의 감소는 블레이드의 코드길이가 증가하여 총 크기가 커지므로 구조적으로는 불리하다. 공력학적 성능 향상과 구조적 단점을 절충하는 관점에서 적절한 피치-코드비를 선정하여야 한다.

블레이드 형상 변수 중 공력학적으로 주요한 엇갈림각, 목-피치비, 끝단 반경 등을 Table 2의 원형 역설계치를 기준으로 ±10 % 범위에서의 블레이드의 형상변화를 도시하면 Fig. 15와 같다. 이에 대한 유동 해석은 현재 진행 중이다. 그 결과는 다음의 기회에 정리할 예정이다.

4. 결 론

축류터빈 블레이드의 형상설계 과정에 Navier-Stokes 방정식을 적용하는 전산시스템을 구축하고, 기존에 설계된 천음속 동익 익렬에 적용하였다. 수치코드는 1)형상 결정, 2)계산격자점 생성, 3)유동장 해석, 4)공력 특성 분석 등 4과정으로 구성된다. 각 과정별로는 기존에 개발된 자체코드를 사용하였다. 연구의 1차 단계로, 자체 개발한 전산시스템의 적용 타당성을 검토하기 위해, VKI 동익 블레이드에 적용하여, 기법의 검정과 설계 적용의 타당성을 검토하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 경상대학교 항공기부품기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

(1) *Rhie, C., et. al.*, 1993, "Advanced Transonic Fan Design Procedure Based On a Navier-Stokes Method", ASME Paper 93-GT-323

(2) Korakianits, T., 1993, "Prescribed-Curvature Distribution Airfoils for the Preliminary Geometric Design of Axial Turbomachinery Cascades", J. Turbomachinery, Vol. 115, No. 2, pp. 325~333

(3) Chung, J. and Lee, K., 2000, "Shape Optimization of Transonic Compressor Blades Using Quasi-3D Flow Physics", ASME Paper 2000-GT-489

(4) 조수용, 오군섭, 최범석, 2000, "축류형 터빈 익형의 역설계 및 형상설계를 위한 설계변수에 관한 연구", 유체기계저널, 3권, 2호, pp. 7~14

(5) 박준영, 엄인식, 백제현, 1999, "1단 축류터빈의 비정상 내부유동특성에 관한 2차원 해석(I)", 대한기계학회 논문집 B권, 23권, 11호, pp. 1371~1378

(6) 정희택, 1998, "축류압축기의 공력설계를 위한 대화형 계산격자점 생성 프로그램 개발", 유체기계저널, 1권, 1호, pp. 7~16

(7) Kiock, et. al., 1986, "The Transonic Flow Through a Plane Turbine Cascade as Measured in Four European Wind Tunnels", J. Eng. Gas Turb. Power, Vol. 108, pp. 277~284

(8) 정희택, 백제현, 1992, "2차원 익렬유동의 Navier-Stokes 해석", 대한기계학회 논문집, 16권, pp. 313~324

(9) 최창호, 유정열, 1996, "k-ω 난류모델을 채택한 2차원 천음속 익렬유동의 수치해석", 한국항공우주공학회지, 24권, pp. 37~46

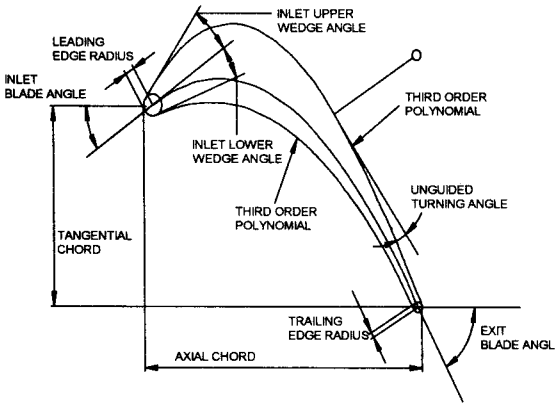


Fig. 1 Independent design parameters for blade profile

Table 1 Summary of design parameters for blade profile

No	Description	Symbol
01	Airfoil Radius	R
02	Axial chord	C_x
03	Tangential chord	C_t
04	Unguided turning angle	η
05	Inlet Blade Angle	β_{in}
06	Exit Blade Angle	β_{out}
07	Number of Blade	N
08	Inlet upper wedge angle	ε_{uin}
09	Inlet lower wedge angle	ε_{lin}
10	Exit wedge angle	ε_{out}
11	Leading edge radius	r_{le}
12	Trailing edge radius	r_{te}
13	Throat	o

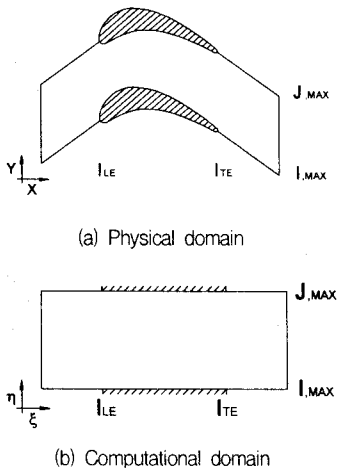


Fig. 2 Definition of flow fields for axial turbomachines

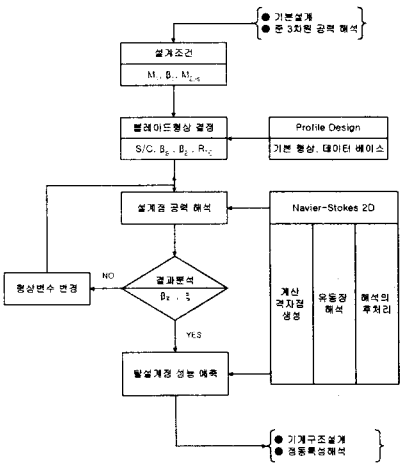


Fig. 3 Computing system for aerodynamic design of blades

Table 2 Values of design parameters by reverse design for VKI blades

Design parameters	Input values	Unit
C_x	55.	mm
C_t	30.04	mm
ε_{uin}	17.45	dig
ε_{lin}	16.5	dig
R_{le}	2.9	mm
β_{in}	30.65	dig
β_{out}	61	dig
η	2.92	dig
R_{te}	1.5	mm
pitch	40.28	mm

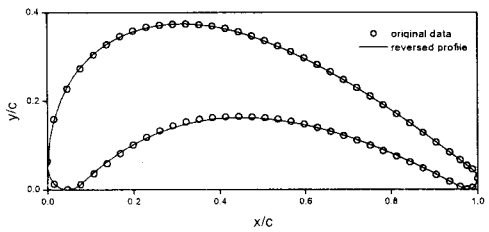


Fig. 4 Comparison of reverse designed profiles to original ones

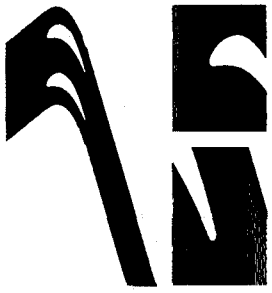


Fig. 5 Computational grids for Navier-Stokes simulations

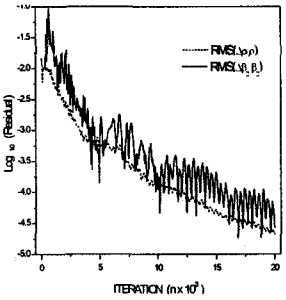


Fig. 6 Convergence histories

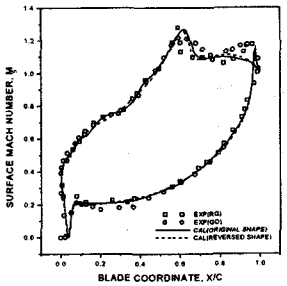
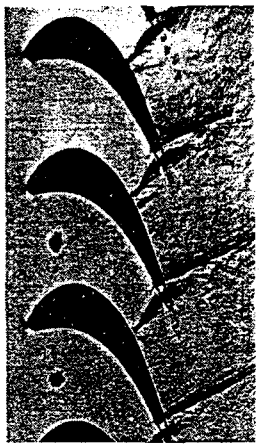
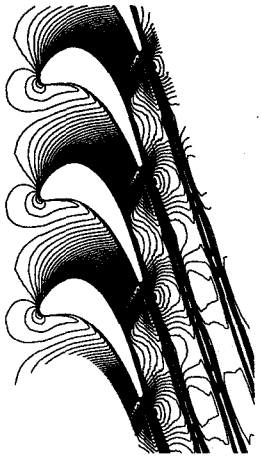


Fig. 7 Surface mach number on the reference conditions



(a) Experimental schlieren picture



(b) Numerical density contours by original shape

(c) Numerical density contours by reversed shape

Fig. 8 Flow-field characteristics on the reference conditions

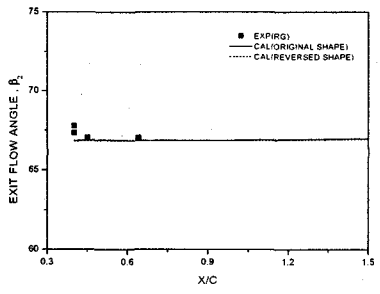


Fig. 9 Exit flow angles on the reference conditions

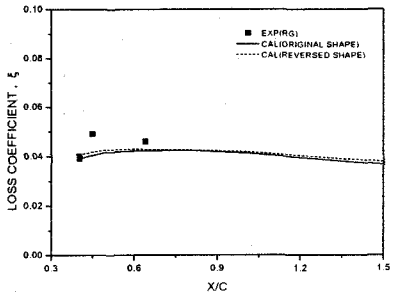
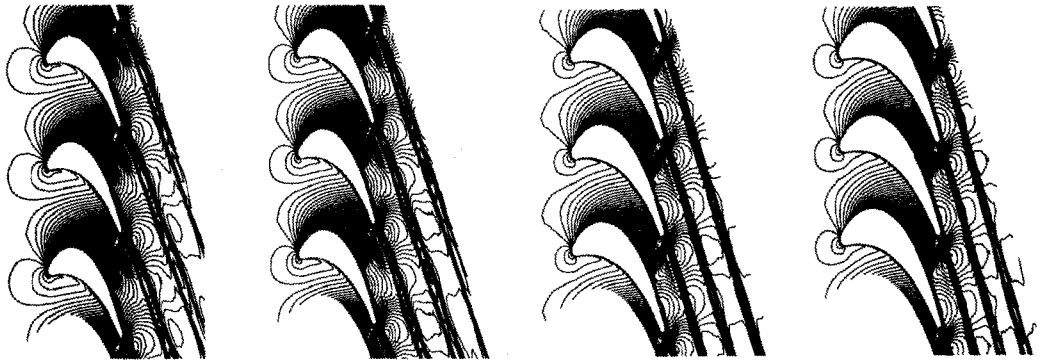


Fig. 10 Loss coefficients on the reference conditions



(a) s/c +20 %　　(b) s/c +10 %　　(c) s/c −10 %　　(d) s/c −20 %

Fig. 11 Numerical density number contours

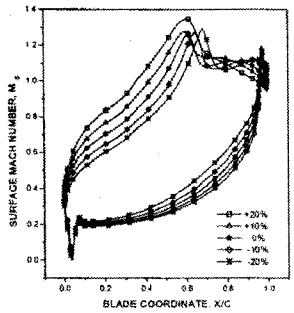


Fig. 12 Influence of pitch-chord ratio on the surface mach number

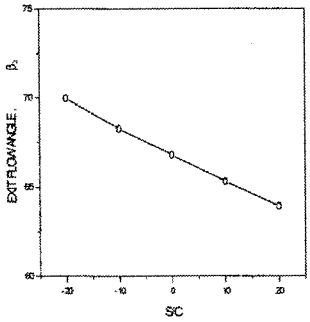


Fig. 13 Exit flow angles vs. pitch-chord ratio

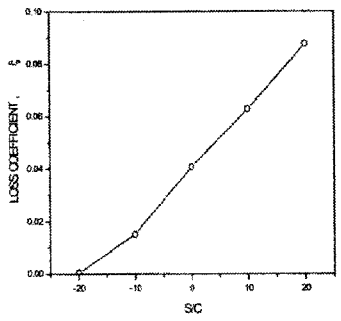
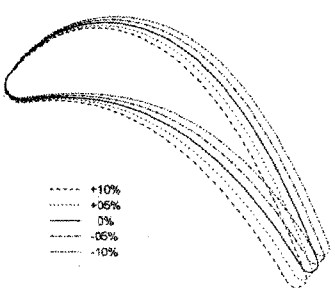
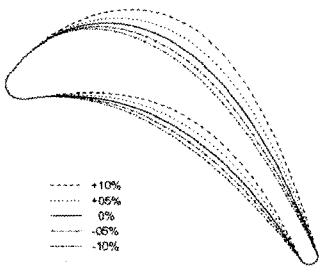


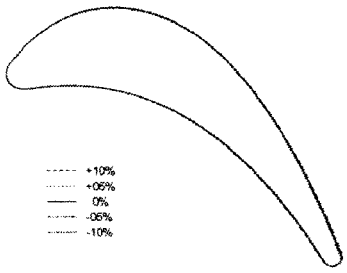
Fig. 14 Loss coefficients vs. pitch- chord ratio



(a) Axial chord for β_S



(b) Throat length for $\beta_{2,design}$



(c) Radius of trailing edge

Fig. 15 Variation of blade profiles by controlling design parameters