

축류터빈 내부의 3차원 압축성 점성 유동특성에 관한 수치 시뮬레이션

정희택*1, 정향남*2

Numerical Simulation of Three-Dimensional Compressible Viscous Flow Characteristics in Axial-Flow Turbines

H. T. Chung and H. N. Jung

Numerical simulation of viscous compressible flow in turbomachinery cascade involves many problems due to the complex geometry of blade but also flow phenomena. In the present study, numerical investigations have been performed to examine the three-dimensional flow characteristics inside the transonic linear turbine cascades using a commercial code, FLUENT. Multi-block H-type grids are applied to the high-turning turbine rotor blades and comparisons with the experimental data and the numerical results have been done. In addition, the effects of turbulence models on the prediction of the endwall flows are analyzed in the sense of the flow compressibility.

Key Words: 익렬(Cascade), 천음속 유동(Transonic Flow), 축류 터빈(Axial-Flow Turbine), 블레이드 성능(Blade performance), 끝벽효과(Endwall Effect), 이차유동(Secondary Flow), 압축성(Compressibility)

1. 서론

항공기의 추진시스템에 사용되는 가스터어빈 엔진은 점점 고속화되고 경량화 됨에 따라 단당 걸리는 하중이 커지고, 터어빈 익렬 내부는 높은 마하수의 유동장이 형성된다. 최적화의 결과로 터어빈 날개의 형상은 복잡해지고 허어브 등이 작아지며, 유속이 커지므로 점성효과를 고려한 3차원 압축성 유동해석이 필요하다. 즉, 공기역학적인 제반손실들은 날개표면, 허어브 및 케이싱 벽면의 점성 경계층, 익

렬 후위의 이차유동, 충격파와 경계층의 상호작용, 익렬 끝간격에서 발생하는 누설유동 등과 같은 3차원 점성유동 현상과 밀접한 관련이 있으므로, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용한 3차원 유동해석이 터보기계 블레이드의 공력설계에 요구되고 있다.

전산기의 하드웨어 성능의 향상과 CFD기법이 발달함에 따라 터보기계 익렬 내부의 복잡한 3차원 점성 유동장 해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Hah[1]는 보존체적기법과 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 저음속 익렬내부의 3차원 점성 유동장을 해석하였고, Chima와 Yokota[2]는 다단계 시간적분법을 이용하여 압축성 내부유동 해석 코드를 개발하여 아음속 정의 내부 유동에 적용하였다.

*1 정희원, 경상대학교 기계항공공학부

*2 경상대학교 대학원 기계공학과

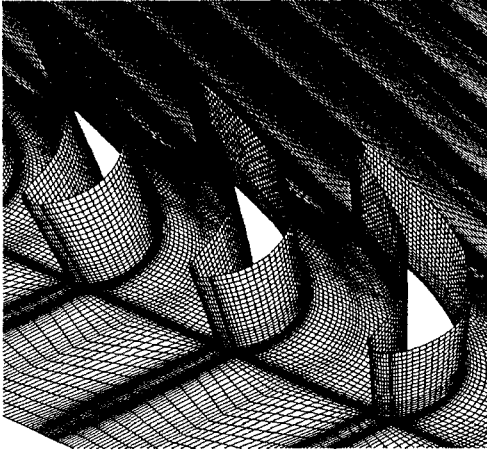


Fig. 1 Computational grids

Denton[3]은 비점성 해석기법에 단순화된 점성항을 첨가하였고, Knight와 Choi[4]는 $q-w$ 난류모델을 3차원 익렬 유동 코드에 적용하였다. 정희택 등[5]은 기존의 LU-ADI 코드를 수정하여 천음속 설계 조건의 동익 블레이드 내부의 끝면 유동장 특성을 해석하였다. 이 등[6]은 저음속 익렬 유동에서 표준 $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델의 영향을 조사하였다. 명현국[7]은 난류모델 및 대류항 차분도식이 끝벽유동 특성에 미치는 영향을 계통적으로 비교분석하였으며, 이 결과를 이용하여 익단 간극이 있는 누설유동장에 적용하였다.[8] Tallma 등[9]은 끝벽의 간극과 케이싱의 상대운동이 동익 내부 유동 특성에 미치는 효과를 수치해석하였다. 강영석 등[10]은 상용코드인 CFX-TascFlow의 고속 익렬 내부의 적용가능성을 검토하였다.

익렬유동 해석 기술의 궁극적인 목표는 터보기계 블레이드의 공력설계 과정에 적용하는 것이다. 설계 도구로서 유용성을 검토하기 위해서는, 다양한 유동장-2차원, 끝벽유동, 누설유동, 간섭 유동 등-에 적용하여 기법의 포용성을 확보해야 할 뿐 아니라, 수치기법 상의 특성-방정식의 수치화 특성, 사용된 난류모델과 계산격자점의 정확성 등-을 성능 예측의 관점에서 분석하여야 한다. 본 저자는 상용코드인 FLUENT를 2차원 천음속 터빈 익렬 유동장에 적용하여 계산격자점이 블레이드의 공력 성능 특성에 미치는 영향을 검토하였다.[11] 본 연구에서는 끝벽이 있는 3차원 유동장으로 확대하여 난류 모델과 유동

의 압축성 관점에서 분석하고자 한다.

2. 적용 대상과 수치기법

2.1 해석 모델 및 계산격자점

본 연구에서 적용한 모델은 캠버각이 큰 VKI 선형 익렬이다.[12] 설계점의 유동 조건은 입·출구 유동각이 300, 67.80 로 예상 유동굴절각이 97.80 이며 출구에서의 등엔트로피 마하수가 1.0 인 천음속 동익 블레이드이다. 실험은 4개의 풍동에서 진행되어 결과는 약간의 차이를 보인다.

이와 같이 유동굴절각이 크고 압축성과 점성 영향이 있는 축류형 터빈의 동익 익렬 유동장 해석에는, 블레이드 선단과 끝단에 별도의 계산 영역을 둔 다중블록 구조가 유리하다.[13] 본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 표준형 H 격자의 단점을 개선한 것으로 선단과 끝단 부근의 인위적인 branch-cut을 없앴으로써 격자 분포를 개선하고 수치해의 불안정을 감소시킬 수 있다. 격자점 생성은 여러 블록으로 나누어서 진행되나 유동해석 상에는 단일 계산영역이 된다. 계산격자점은 125개(주유동)×50개(회차방향)×25개(스팬방향) 등 총 156250 개이다. 입구는 $X/Cax = -1.0$, 출구는 $X/Cax = 2.0$ 에 위치하고, 스펠의 높이-중형비-는 $H/C = 2.0$ 으로 가정하였다.

2.2 유동해석 기법 및 수치해석 조건

적용대상이 끝벽이 있는 천음속 동익 익렬 유동장이므로 3차원 압축성 점성 유동 방정식을 적용하였다. 본 연구에서는 상용 유동해석코드인 FLUENT를 사용하였다.[14] 난류 유동 해석을 위해서 표준 $k-\epsilon$ 모델과 RNG $k-\epsilon$ 모델을 채택하여 비교하였다. 출구마하수 0.5, 0.8, 1.0, 1.2의 4가지 유동조건에서 계산하여 압축성이 내부 유동 및 블레이드 공력 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

출구마하수 1.0인 경우 난류모델에 관계없이 수치해는 약 1,000번의 반복 계산 후 정상해로 수렴하였다. 유동의 보존성과 운동량방정식은 비슷하나, 난류방정식의 수렴성은 RNG형이 표준형보다 우수하였다. 국부적인 유동의 정상성을 확보하기 위해 5,000번 반복계산 후의 수치해를 최종 정상상태의 결과로 사용하였다.

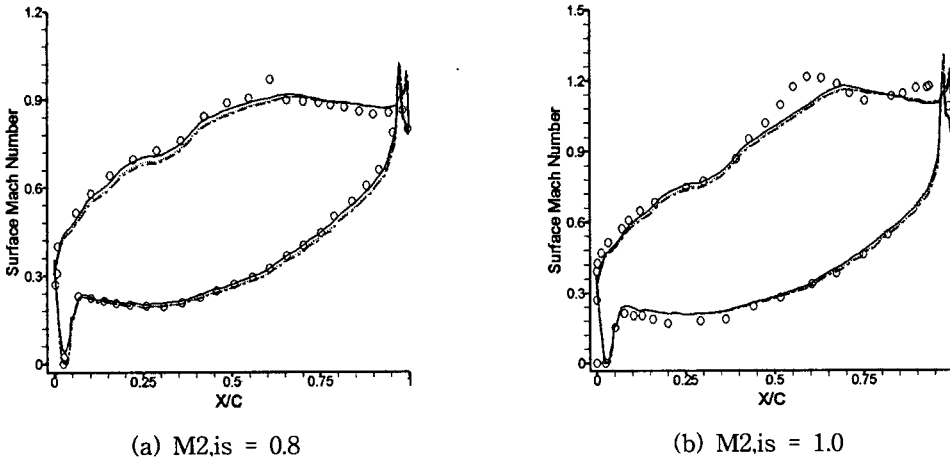


Fig. 2 Surface mach number distributions on the midspan
 (○ experiment(GO), ... 2D, - - - 3D(Std. k-ε), — 3D(RNG k-ε))

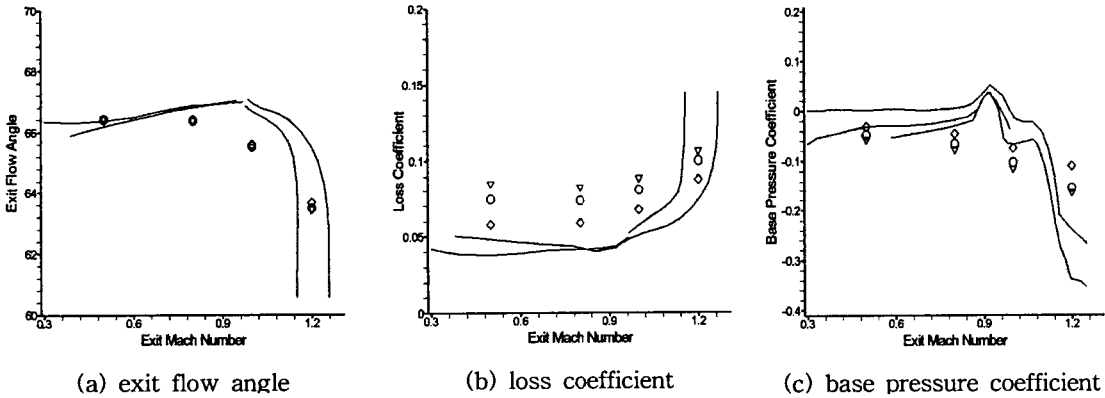


Fig. 3 Variations of blade performance with exit mach number on the midspan
 (= experiment(GO), ○ 2D, ▽ 3D(Std. k-ε), ◇ 3D(RNG k-ε))

3. 결과 및 검토

본 연구의 수치 해석결과는 다음과 같이 3가지 관점에서 검토하였다. 먼저, 중간면(midspan)에서의 3차원 해석결과를 2차원 해석결과와 실험치를 비교하여 기법의 타당성을 검증하고, 두 번째로 설계조건인 천음속 유동조건에서 3차원 유동 해석 결과를 분석하여 표준 k-ε 난류모델과 RNG 난류모델의 적용 유용성을 살펴보았다. 마지막으로, 출구 마하수 0.5-1.2 영역에서 압축성이 블레이드 공력 특성에 미치는 영향을 예측하였다.

3.1 중간면에서의 2차원 유동장 비교

축류 터빈의 경우 익렬의 중간면(50 % span)은 끝벽 영향이 미치지 않으므로 2차원 유동 특성을 보인다. Fig. 2는 블레이드 표면에서의 마하수 분포를 실험치 및 2차원 해석 결과와 비교한 것이다. 전반적으로 3차원 해석결과는 2차원 결과와 동일하고 난류 모델의 영향에 의한 차이가 나타나지 않는다. 천음속 터빈 블레이드의 경우 부압면 중간과 끝단에서 압력이 가장 낮고 충격파가 예상된다. 본 수치 결과에서는 부압면 중간에서 이 현상이 잘 나타나지 않고 부압면의 충격파 예상지점이 뒤로 밀렸다. 이는 상용코드에서 채택한 인공 점성항이 과도한 것으로

사료된다.

블레이드 표면에서의 하중분포와 더불어 출구에서의 유동각, 손실계수 및 끝단 압력계수는 블레이드의 공력 성능을 나타내는 주요 변수이다. CFD 기법이 설계의 유용한 도구로 활용되기 위해서는 이 값을 잘 예측하여야 한다. 수치결과를 실험결과와 비교하면 Fig. 3과 같다. 출구 유동각의 예측-Fig. 3.a-은 난류모델이나 유동방정식과 무관한 결과를 나타내지만, 손실계수-Fig. 3.b-와 끝단 압력계수-Fig. 3.b-는 RNG 모델이 다른 두 경우보다 실험결과와 잘 일치한다. 난류 모델에서 RNG형이 표준형보다 유리한 점은 다음의 결과-3.2절-에서도 나타난다.

3.2 설계점에서의 3차원 끝벽유동 특성

축류 터빈에서 끝벽(endwall)의 존재로 야기되는 유동장 특성으로는, 입구 경계층 유동이 익형 선단과 부딪혀서 발생하는 말굽와류(horseshoe vortex)와 익형 사이의 통로를 따라 유선이 휘어져 생성되는 이차 순환류인 통로와류(passage vortex)가 있다. 그리고, 천음속 유동 조건인 경우 블레이드에 부하가 많이 걸리고, 유동각이 크므로 끝벽과 블레이드 부압면 구석에서 통로와류와 반대 방향으로 크기가 작은 구석 와류(corner vortex)가 발생하며, 이에 따라서 끝벽면의 경계층이 뒤집히며 (overturning), 블레이드 부압면에 저속의 점성 유동이 밀집되는 현상이 나타난다. 블레이드 끝단 이후에는 익형 내부의 와류와 후류가 혼합되어 복잡한 3차원 점성 유동장을 형성한다.

Fig. 4는 설계점인 출구마하수가 1.0에서의 블레이드 표면의 하중 분포를 정압으로 표시한 것이다. 10 % span의 결과는 중간면과 거의 같지만, 0.1 % span에서는 끝벽에 의한 통로와류의 영향을 보여준다. RNG모델의 결과는 표준형보다 그 차이가 크다. 출구에서의 피치-평균 유동각분포는 Fig. 5와 같다. 끝벽에 의한 익형 내부의 이차 유동과 후류의 혼합에 의한 유동 변화가 15 % span까지 확산되었음을 알 수 있다. RNG 모델의 이 현상을 더 크게 예측하였다. 유체 입자 추적법(Fluid particle traces)[9]으로 끝벽 유

동 특성을 묘사하면 Fig. 6-표준형 모델, Fig. 7-RNG형과 같다. 압력면에서 형성된 통로와류가 부압면에 부착되어 전개되는 끝벽 유동 특성이 RNG형이 보다 명확히 보여주고 있다.

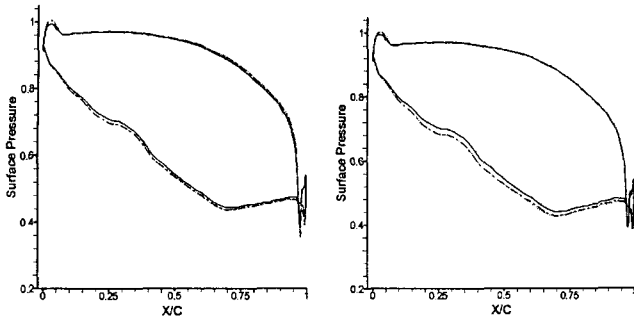
비압축성 유동해석 코드에 의한 저속 터빈의 익형 유동 해석결과에서 변형을 효과를 고려한 RNG k- ϵ 난류모델이 표준형 k- ϵ 난류모델보다 익형 유동 예측이 우수하다고 보고되었다.[6,7] 본 연구의 결과, 압축성 영향이 있는 경우에도 유효함을 알 수 있다.

3.3 공력특성에서의 압축성 영향

일반적으로 유속이 증가할수록 벽면에 의한 경계층 영역이 넓어진다. 본 절에서는 출구속도를 기준으로 유속에 의한 익형 유동 특성을 RNG형 모델의 결과를 이용하여 분석하였다.

블레이드 부압면에서는 압력의 변화가 있고 끝벽의 통로와류가 부딪히는 부분으로 유동 박리 등 복잡한 이차유동이 형성된다. Fig. 8은 부압면 부근의 유선을 묘사한 것이다. 유속이 증가할수록 통로와류가 부착되는 지점이 뒤로 밀리고, 유선이 박리되는 크기도 줄어든다. 끝단 직후는 압력면과 부압면의 경계층이 만나는 곳이고, 끝단의 둥근 형상으로 이차 순환류도 발생하여 후류의 혼합과 더불어 복잡한 양상이 된다. 이차유동(secondary flow)은 공력 손실과 밀접한 관계가 있다. 부압면 부근에는 통로와류의 박리에 의한 이차유동과 구석와류에 의한 이차유동이 존재한다. Fig. 9는 출구 유속이 증가함에 따라 이차유동의 크기가 줄어들음을 알 수 있다.

끝벽 부근은 유동의 변화가 심하고 손실도 크다. 출구에서의 유동각과 손실 분포를 피치-평균값으로 나타내면 Fig. 10과 같다. 익형 내부의 유동 특성과 같이, 유속이 증가할수록 끝벽 효과의 범위가 줄어든다.



(a) Standard $k-\epsilon$ model (b) RNG $k-\epsilon$ model

Fig. 4 Comparison of surface pressure distributions at $M_{2, is} = 1.0$
 (··· 50% span, - - - 10 % span, — 0.5% span)

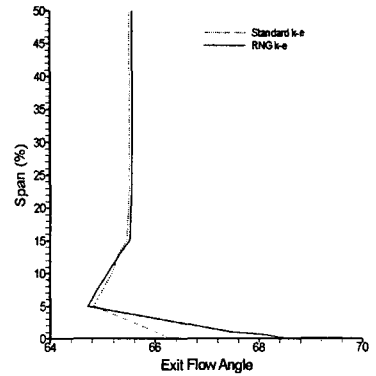


Fig. 5 Distribution of pitchwise-averaged flow angles along the span at $X/C_{ax}=1.5$

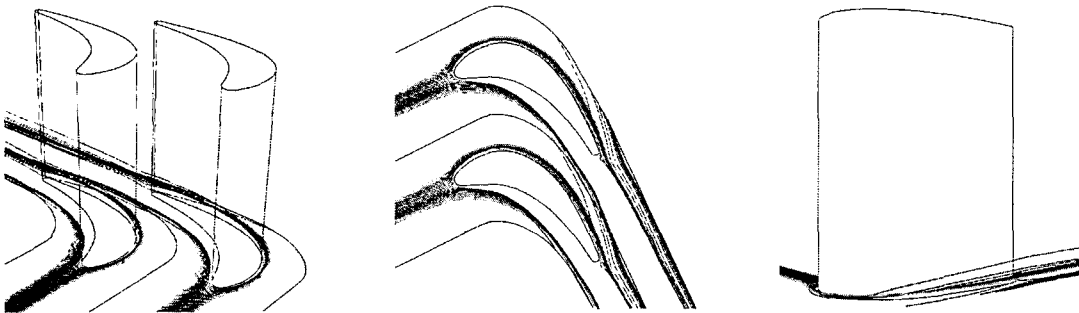


Fig. 6 Fluid pathlines through the blade passages (Standard $k-\epsilon$ model)

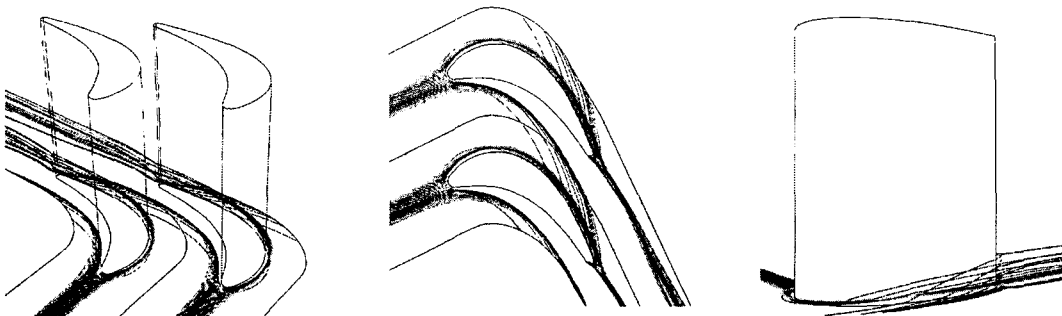


Fig. 7 Fluid pathlines through the blade passages (RNG $k-\epsilon$ model)

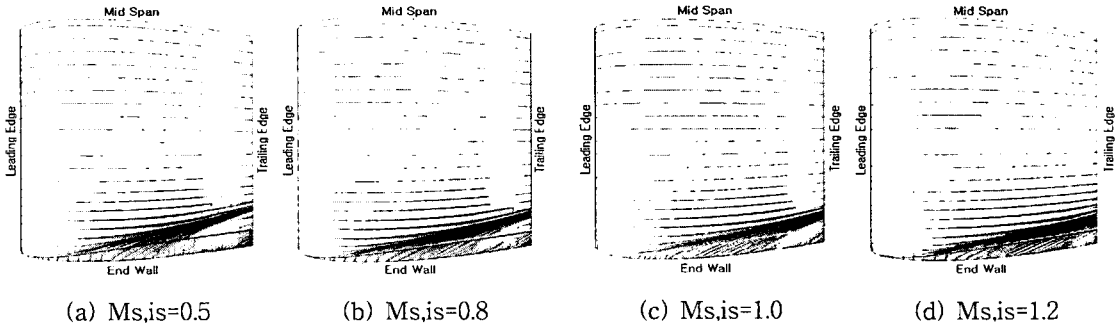


Fig. 8 Fluid pathlines along the blade suction surfaces

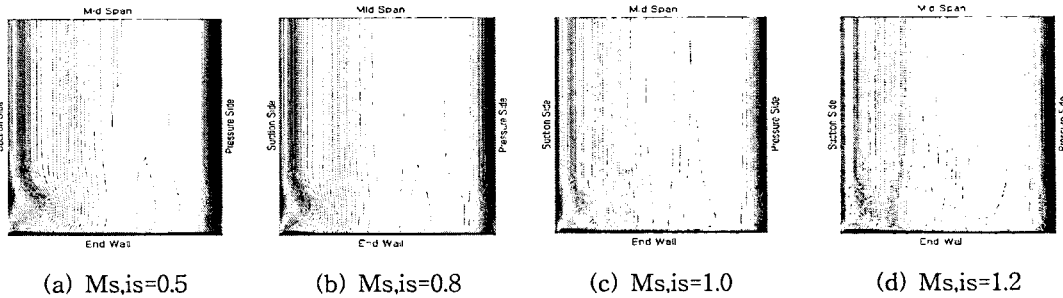


Fig. 9 Contours of loss coefficients at the cross-sectional plane, $X/C_{ax}=1.1$

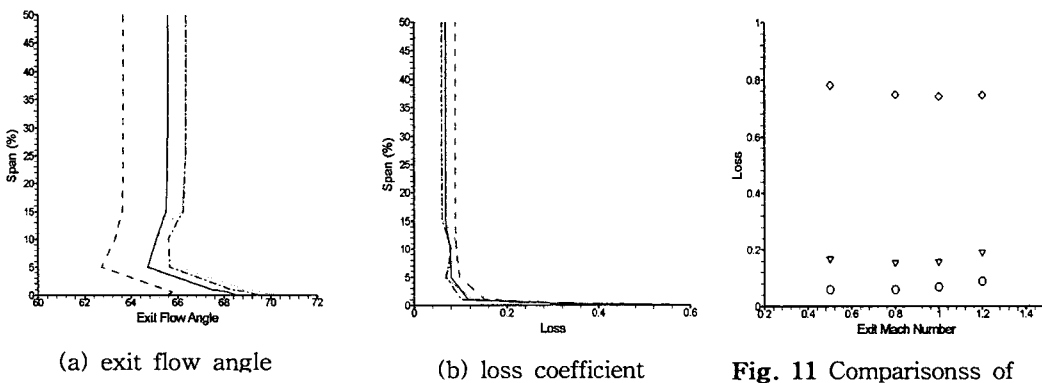
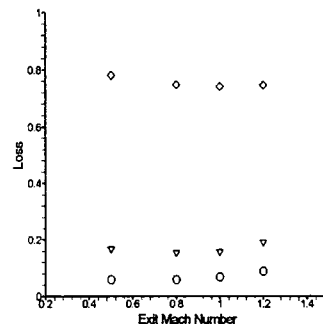


Fig. 10 Fluid pathlines through the blade passages (Standard $k-\epsilon$ model)

Fig. 11 Comparisons of averaged loss coefficients with exit mach number (\circ midspan based, ∇ full-plane based, \diamond boundary-layer based)



손실계수를 중간면 평균(\circ), 전 단면 평균(∇), 1 % span 이내의 경계층 평균(\diamond)으로 각각 나타내면 Fig. 11과 같다. 전단면 손실(∇)과 블레이드에 의한 2차원 손실(\circ)의 차는 끝벽에 의한 벽면 손실이 된다. 본 수치결과에 의하면 끝벽에 의한 손실은 블레이드 손실의 약 2배로, 출구유속에 관계없이 거의 일정함을 보여준다.

4. 결 론

축류터빈 익렬 내부의 3차원 압축성 점성 유동장 특성을 상용코드인 FLUENT를 이용하여 해석하였다. 다중블록 H-형 격자계를 채택하였고, 표준 k- ϵ 난류모델과 RNG k- ϵ 난류모델을 비교하였다. 출구마하수 0.5-1.2로 수치시뮬레이션하여 압축성 영향을 검토하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 중간면에서의 해석결과는, 유동의 2차원성이 보존되었고, RNG 난류모델이 2차원 수치해나 표준 k- ϵ 난류모델보다 실험결과와 근접하였다.

(2) 끝벽 효과에 의한 유동특성은 RNG 모델이 표준형 모델보다 잘 묘사하였다.

(3) 유동의 압축성이 클수록 끝벽에 의한 이차 유동장 영역이 줄어드는 경향을 보인다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 지역 협력연구센터인 항공기부품기술연구센터의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Hah, C., "A Navier-Stokes Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows Inside Turbine Blade Rows at Design and Off-Design Conditions", J. Eng. for Gas Turbines and Power (Trans. ASME), Vol. 106, (1984), pp.421-429

[2] Chima, R.V. and Yokota, J.W., "Numerical Analysis of Three-Dimensional Viscous Internal Flows", AIAA J., Vol.28, No.5, (1990), pp. 798-806

[3] Denton, J.D., "The Use of a Distributed Body

Force to Simulate Viscous Effects in Three-Dimensional Flow Calculations", ASME Paper 86-GT-144, (1986)

- [4] Knight, C.J. and Choi, D., "Development of a Viscous Cascade Code Based on Scalar Implicit Factorization", AIAA J., Vol. 27, No.5, (1989), pp. 581-594
- [5] 정희택, 백제현, "터빈 익렬내부의 3차원 압축성 점성유동장의 수치해석", 대한기계학회논문집, 제16권, 제10호, (1992), pp.1915-1927
- [6] 이훈구, 유정열, 윤준원, "전향각이 큰 선형 익렬을 통하는 난류유동의 수치해석", 대한기계학회 논문집(B)', 제20권, 제12호, (1996), pp. 3917-3925
- [7] 명현국, "터빈익렬내의 3차원 끝벽유동 특성에 대한 수치해석적 연구", 한국전산유체공학회지, 제8권, 제1호, (2003), pp.8-15
- [8] Myong, M.K. and Yang, S.Y., "Numerical Study on Flow Characteristics at Blade Passage and Tip Clearance in a Linear Cascade of High Performance Turbine Blade", KSME Int. J., Vol.17, No.4, (2003), pp.606-616
- [9] Tallman, J., and Lakshminarayana, B., "Numerical Simulation of Tip Leakage Flows in Axial Flow Turbines, With Emphasis on Flow Physics: Part I-Effect of Tip Clearance Height", J. Turbomachinery (Trans. ASME), Vol. 123, (2001), pp.314-323
- [10] 강영석, 강신형, 조희화, "터빈 로터의 익단 간극이 성능에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구", 유체기계저널, 제5권, 제2호, (2002), pp.7-14
- [11] 정희택, 정향남, 서영수, "천음속 터빈 익렬의 수치해석에서의 계산격자점 영향", 대한기계학회 2003년 추계학술대회 논문집, (2003), pp.857-862
- [12] Kiock, R.J., et. al., "The Transonic Flow Through a Plane Turbine Cascade as Measured in Four European Wind Tunnels", J. Eng. Gas Turb. Power, Vol. 108, (1986), pp.277-284
- [13] 정희택, "터보기계 익렬유동해석을 위한 다중블록 격자형성법", 한국전산유체공학회지, 제1권, 제1호, (1996), pp.19-25
- [14] FLUENT User's manual