천음속 터빈 익렬유동의 수치해석에서의 계산격자점 영향

정 희 택[1*], 정 향 님[2]

EFFECTS OF COMPUTATIONAL GRIDS ON NUMERICAL SIMULATION OF TRANSONIC TURBINE CASCADE FLOWFIELDS

H.T. Chung and H.N. Jung

Numerical investigations have been performed to examine the effects of the computational grids on the prediction of the flow characteristics inside the turbine cascades. Three kinds of grid system based on H-type grid are applied to the high-turning transonic turbine rotor blades and comparisons with the experimental data and the numerical results of each grid structure have been done. In addition, the grid sensitivity on the estimation of the blade performances has been investigated.

Key Words: 익렬(Cascade), 천음속 유동(Transonic Flow), 계산격자점(Computational Grids), 축류 터빈(Axial-Flow Turbine), 블레이드 성능(Blade performance)

1. 서 론

터보기계 익렬 내부의 압축성 점성 유동 해석은 블레이드 성능과 효율을 예측하고 향상시키는데 중요한 수단이 되고 있다.

블레이드의 기하학적 형상이 복잡해지고 입·출구의 유동 조건이 까다롭게 됨에 따라 2차원의 경우에도 복잡한 유동특성을 나타낸다. 천음속 터빈 동익 블레이드의 경우, 끝단은 형상이 둥글고, 후류가 발생하며 유동의 굴절이 심하며 고속의 내부 유동이 형성된다. 이러한 유동장 특성을 수치적으로 예측하기 위해서는 압축성과 난류 모델을 고려한 유동 방정식을 사용해야 하며, 계산격자점은 익렬 형상과 내부 유동 특성을 모두 만족하도록 형성하여야 한다[1].

익렬 유동의 수치해석에 사용되는 격자계는 기본적으로 O-형, H-형 및 C-형의 3가지 형태가 적용되고 있다[2,3]. 이 중, H-형은 주유동을 따라 격자가 형성되고 주기경계 영역이 다른 격자계보다 짧으므로 경계조건의 처리가 용이하여 익렬 내부의 점성 유동에 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 터빈 동익과 같이 선단이 둥글고 유동굴절각이 큰 경우에는 선단과 끝단 부근의 격자가 심하게 비틀리고 branch-cut 처리 등이 어렵다. 기본 격자계의 단점을 보완하기 위해서 수정된 격자 시스템이 제안되고 있다. 익렬 내부의 격자 수직성을 개선하거나[4], C-H형 또는 C-O 형, H-O 형 등의 복합 격자계가 사용되고 있다[5,6]. 천음속이나 초음속 유동장의 충격파 현상을 잘 묘사하기 위해서 적응 격자법을 적용하기도 한다[7].

본 연구에서는 계산격자점이 익렬 유동장 해석에 미치는 영향을 검토하고자 한다. H-형을 기본으로 한 3가지 격자구조에 대해 2차원 압축성 Navier-Stokes방정식을 적용한 상용해석코드(FLUENT)에 의한 수치결과를 비교하여 각각의 특성을 분석하고자 한다.

2. 수치기법

2.1 격자구조의 선정

본 연구의 적용대상은 유동굴절각이 크고 압축성과 점성 영향이 있는 축류형 터빈의 동익 익렬 유동장이다. 격

접수일: 2004년 6월25일, 심사완료일: 2004년12월17일.

1 정회원, 경상대학교 기계항공공학부
2 경상대학교 대학원 기계공학과
* Corresponding author E-mail: htchung@gsnu.ac.kr

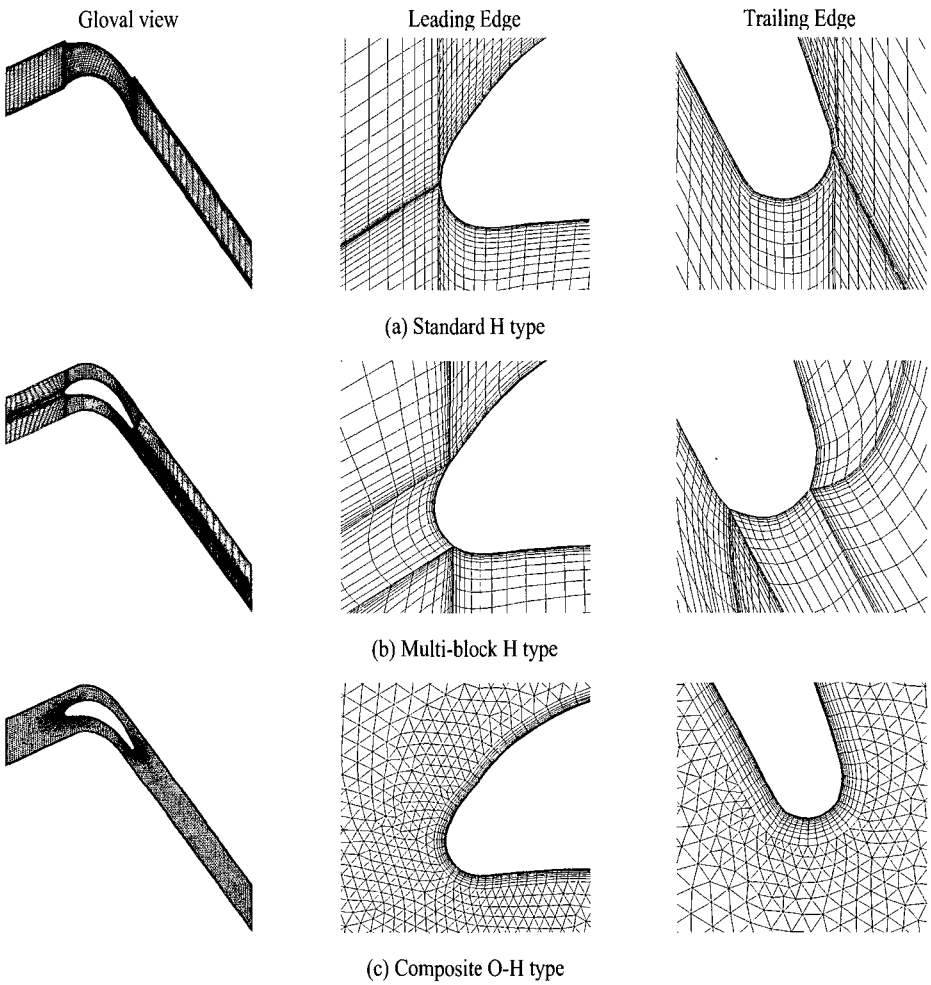


Fig. 1 Computational grids for VKI transonic turbine cascade flow

자구조의 영향을 검토하기 위해서 Fig. 1과 같이 H-형을 기본으로 한 세 가지 격자계를 선정하였다.

Fig. 1(a)의 표준 H형 격자는 익렬 내부의 압축성 점성 유동 해석에 가장 보편적으로 사용되는 형태이다. 서론에서 언급했듯이 격자 생성법이 쉽고 경계조건의 처리도 단순하다. 그러나 선단과 끝단 부근의 무딘 형상 주위의 유동 해석에는 수치해의 불안정이 예상된다.

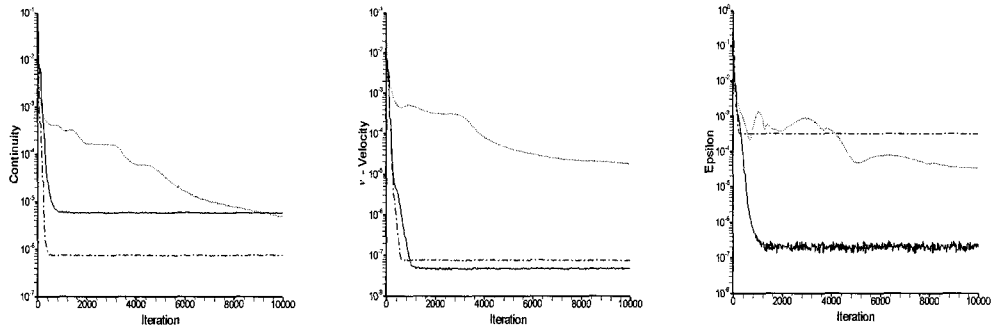
Fig. 1(b)는 표준 H형 격자의 단점을 보완하기 위해 블레이드 선단과 끝단에 별도의 계산 영역을 둔 다중블록 구조이다. 이 부근의 인위적인 branch-cut을 없앰으로써 격자 분포를 개선하고 수치해의 불안정을 감소시킬 수 있다. 격자점 생성은 여러 블록으로 나누어서 진행되나 유동해석 상에는 단일 계산영역이 된다.

Fig. 1(c)는 블레이드 표면 주위는 O-형으로 사각형의 정렬형 격자점을 형성시키고 그 외의 내부 유동은 삼각형의 비정렬형 격자점을 주유동 방향으로(H-형) 생성한다. 계산영역이 2개로 복합구조이므로 수렴성이 떨어지나 격자구조상 정확한 해석결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 1(a)의 격자계를 표준 H형(standard H type)이라 명명하고, Fig. 1(b)의 격자계를 다중블록 H형(multi-block H type)으로, Fig. 1(c)의 격자계를 복합 O-H형(composite O-H type)이라 정의하였다.

2.2 유동해석 기법

적용대상이 천음속 동익 익렬이므로 2차원 압축성 점성 유동 방정식이 적용된다. 본 연구에서는 내부 유동장 해석



(a) continuity (b) v-velociy (c) turbulent energy dissipation (ϵ)

Fig. 2 Convergency history(... standard H type, — multi-block H type, -- composite O-H type)

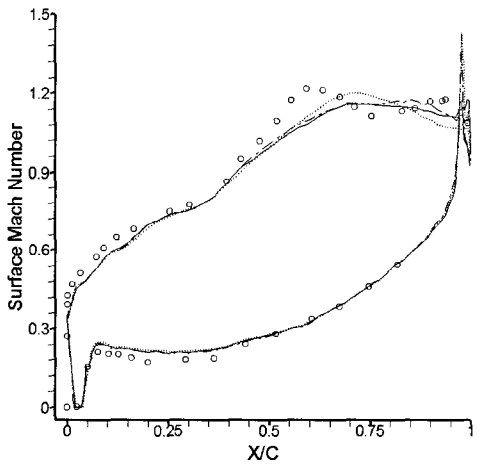


Fig. 3 Surface mach number distributions(M2, is=1.0) (○ experiment(GO), ...standard H type, — multi-block H type, -- composite O-H type)

을 위해서 상용 유동해석코드인 FLUENT를 사용하였다[8]. 난류 유동 해석에는 표준 k-ϵ 모델을 채택하였다.

3. 결과 및 검토

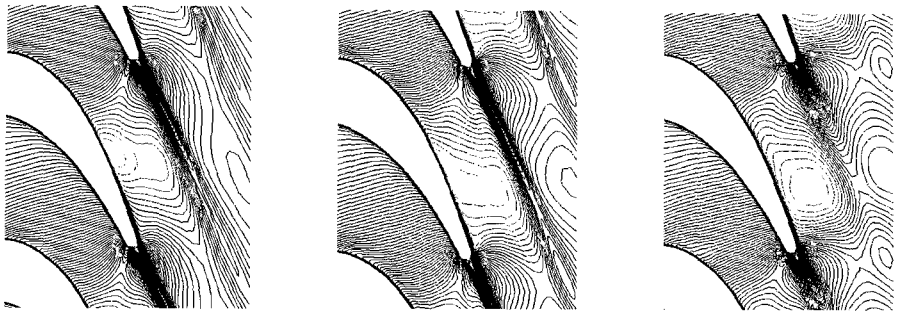
본 연구에서 적용한 모델은 캠버각이 큰 VKI 선형 익렬이다[9]. 설계점의 유동 조건은 입·출구 유동각이 30°, 67.8° 로 예상 유동굴절각이 97.8° 이며 출구에서의 등엔트로피 마하수가 1.0 인 천음속 동익 블레이드이다. 참고문헌[9]의 실험은 4개의 풍동에서 진행되었으며, 블레이드 성능 실험 결과는 풍동에 따라 약간의 차이를 보였다[9]. 실험영역은 출구마하수가 0.4에서 1.2까지 아음속에서 초음속의 전 영역에서 진행되었다. 본 연구에서는 계산 격자점이 익렬 유동에 미치는 영향을 내부 유동 특성뿐만 아니라 출구유동각 등 블레이드의 주요 성능 변수 관점에서도 비교하였다.

3.1 격자구조의 영향

2.1절에서 선정된 세 가지 격자계의 계산격자점은 Fig. 1과 같다. 표준형의 경우, Fig. 1(a)와 같이 110(주유동방향)×45(피치방향)로 총 4950 점의 격자점이 분포되었다. 다중블록형의 경우에는 125(주유동방향)×50(피치방향)으로 총 5600 점의 격자점으로 선단 및 끝단 영역에 격자점이 약 15% 정도 추가되었다. O-H의 복합형인 경우 총 7900 점의 격자점이 블레이드 표면(O형)과 주유동 방향(H-형, 삼각형 비정렬 격자)에 형성되었다. 기본적으로 블레이드 표면, 입구와 출구, 주기 경계에서의 격자점 수는 거의 같다.

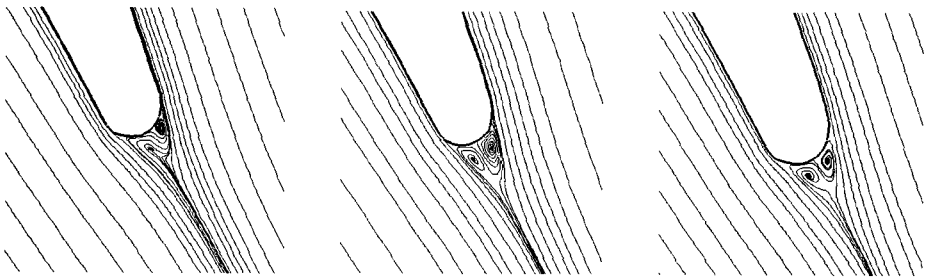
각 격자계에 따른 수치해의 수렴성은 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)에서와 같이 질량보존방정식의 수렴성은 표준형과 다중블록형보다 O-H 복합형이 10배 정도 우수하다. Fig. 2(b)의 운동량방정식은 다중블록과 복합형이 비슷하나, 난류방정식의 수렴성은 Fig. 2(c)의 결과에서 보듯이 다중블록형이 복합형이나 표준형보다 우수하다. 따라서 수치해의 수렴성은 표준형이 가장 떨어지고 다른 두 개의 격자계는 만족할 만하다.

적용 대상인 블레이드의 설계조건은 이상 출구 마하수가 1.0인 천음속 영역이다. 이 조건에서 블레이드에 걸리는 하중을 표면 마하수로 표현하여 실험결과와 비교하면 Fig. 3과 같다. 부압면 후반부를 제외하면 전반적으로 격자계에 의한 차이가 나타나지 않는다. 천음속 터빈 블레이드의 경우 부압면 중간과 끝단에서 압력이 가장 낮고 충격



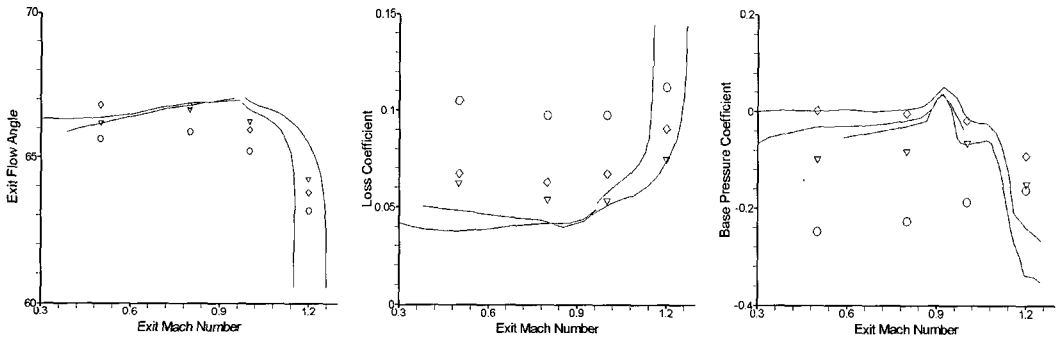
(a) Standard H type (b) Multi-block H type (c) Composite O-H type

Fig. 4 Mach number contours (M2,is = 1.0)



(a) Standard H type (b) Multi-block H type (c) Composite O-H type

Fig. 5 Instantaneous streamline near the blade trailing edge



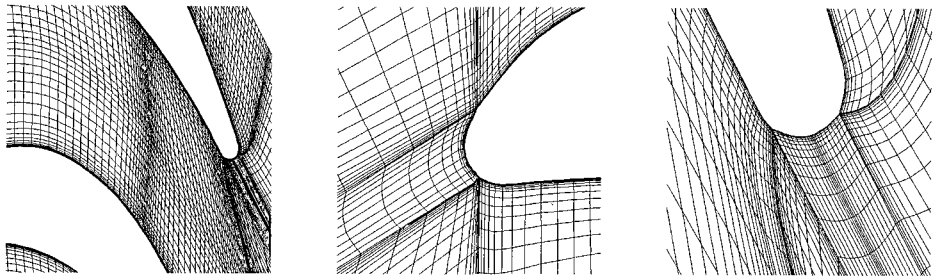
(a) Exit flow angle (b) Loss coefficient (c) Base pressure coefficient

Fig. 6 Variation of blade performances with exit mach number
(= *experiment*(GO), ○ standard H type, ◇ multi-block H type, ▽ composite O-H type)

파가 예상된다. Fig. 3의 수치 결과에서는 부압면 중간에서 이 현상이 잘 나타나지 않고 충격파 예상지점이 뒤로 밀렸다. 이 현상은 Fig. 4의 익렬 내부의 마하 분포에서도 알 수 있다.

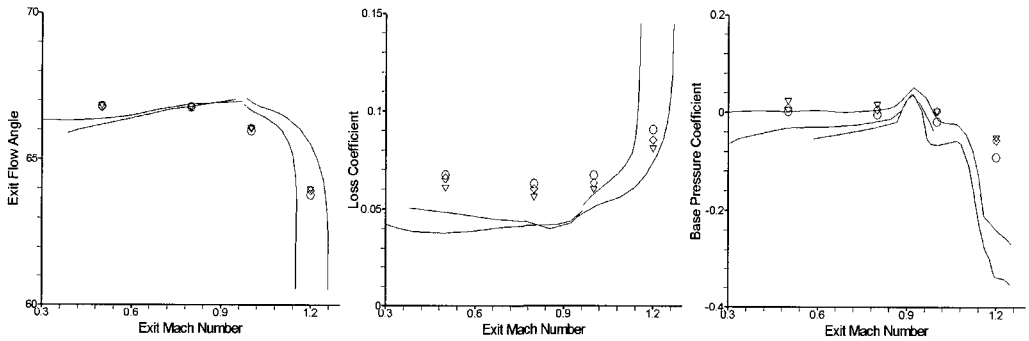
천음속 익렬 내부의 유동 특성은 목 부근의 충격파 현상과 후류의 점성 유동장 특성이다. 또한 선단에서는 유동의 정체성이 나타나고 끝단 부근에서는 이차 순환 유동 등을 보인다.

Fig. 4 의 등마하수 곡선은 대체적으로 이러한 현상을 보여준다. 후류의 점성 유동 특성은 그 부근의 격자 밀도와 연관됨을 알 수 있다. 목 부근의 격자 분포에 따라 충격파와 경계층 점성 유동의 상호작용 형태가 차이를 보인다. 축류 터보기계의 경우 끝단이 무디고 후류의 시작점으로 유동장이 복잡하다. Fig. 5에는 이러한 유선 형태를 표



(a) Around the blade passage (b) Leading edge (c) Trailing edge

Fig.7 Improved computational grids based on the multi-block H type



(a) Exit flow angle (b) Loss coefficient (c) Base pressure coefficient

Fig. 8 Variation of blade performances (by multi-block H type)
(= experiment(GO), ○ coarse grids, ◇ fine grids, ▽ improved-coarse grids)

시한 것이다. 격자에 따라 끝단의 이중 와류 모양에 차이를 보인다. 끝단에서의 유동은 압력분포, 손실 및 충격파의 발생 등의 예측에 중요하다.

블레이드 표면에서의 하중분포와 더불어 출구에서의 유동각, 손실계수, 끝단 압력계수는 블레이드의 공력 성능을 나타내는 주요 변수이다. CFD 기법이 설계의 유용한 도구로 활용되기 위해서는 이 값을 잘 예측하여야 한다. 본 수치결과를 실험결과와 비교하면 Fig. 6과 같다. 출구 유동각과 손실계수의 경우, 복합 O-H형의 격자가 실험결과와 가장 근접한 결과를 보인다. 끝단 압력계수의 경우, 다중블록 H형이 전영역에서 정량적으로 실험값과 근접한 결과를 보이나 천음속 영역 부근에서 국부적으로 실험값과 같이 증가하는 경향은 복합 O-H형 격자에서만 예측되었다. 표준 H형은, 전반적으로 블레이드 성능 예측에 가장 불리한 결과를 보여준다.

3.2 격자점의 조밀성 효과

동일한 격자계라도 격자의 밀도, 경계격자점의 분포 형태에 따라 수치해는 영향을 받을 수 있다. 본 연구 대상과 같이 축류형 천음속 터빈 블레이드의 경우 부압면과 끝단에서의 충격파 발생, 후류의 점성 유동장 전개 등을 고려하여 계산 격자점을 재구성하였다. 이를 위해 기본형의 수치결과가 비교적 우수하고 격자점의 재구성이 용이하며 격자점의 수도 세 격자계 중 중간값을 가지는 다중블록 H형을 선택하였다. Fig. 1(b)의 다중블록 H형을 이 관점에서 개선하면 Fig. 7과 같다.

본 절에서는, 편의상 Fig. 1의 격자를 기본으로 성김형(coarse grids)이라 명명한다. 유동 특성에 관계없이 고르게 격자 밀도를 2배 증가한 것을 조밀형(fine grids)라 하고, Fig. 7과 같이 성김형을 유동특성을 고려하여 재구성한 것을 개선형(improved-coarse grids)이라 하였다. 총 격자수는, 성김형을 100 %로 기준으로 두면 조밀형은 200 %, 개선형은 약 140 % 이다.

수치해석 결과에 의하면, Fig. 2와 같은 블레이드 표면의 하중분포나 Fig. 4와 같은 익렬 내부의 압축성 점성유동장 형태 등에는 별다른 차이를 보이지 않았다.

Fig. 8은 다중블록 H형의 격자 조밀성이 블레이드 성능에 미치는 영향을 출구 마하수에 따라 표시한 것이다. 출구 유동각에는 큰 차이가 없으나, 손실계수나 끝단 압력계수에는 약간의 차이를 보인다. 끝단 압력계수의 경우 성김형이 오히려 다른 두 경우보다 실험치에 근접한 결과를 보이는데, 이는 끝단 부근의 격자 밀집이 오히려 수치해석에 나쁜 영향을 줄 수도 있다는 점을 보여준다. 이 결과를 종합해 보면, 격자수를 늘이거나 유동 특성을 고려하여 격자점을 개선하여도 블레이드 공력 성능 예측에 유리하다고 단정할 수 없다.

4. 결 론

터빈 블레이드 내부의 천음속 점성 유동장 해석에 있어서 계산격자점이 수치해석 결과에 미치는 영향을 연구하였다. H-형을 기본으로 한 세 가지 격자구조에 대해 2차원 압축성 Navier-Stokes방정식을 적용한 FLUENT에 의한 수치해를 실험결과와 비교하여 각각의 특성을 분석하고 블레이드 성능 예측의 유용성을 검토하였다.

블레이드의 기하학적 형상과 내부 유동장 특성을 고려한 복합격자계가 일반적으로 표준형 및 다중블록형 격자계보다 나은 결과를 보였다. 그러나 동일한 격자계에 대해서는 격자점의 밀도 증가에 따른 블레이드 성능예측의 정확성이 비례하여 증가하지 않았다. 따라서 격자점을 늘이거나 경계면에서의 격자점을 유동 특성을 고려하여 개선하였다 하더라도 블레이드의 공력성능 예측에 유리하다고 단정할 수 없다.

후 기

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

참고문헌

[1] 정희택, 1996, "터보기계 익렬유동해석을 위한 다중블록 격자형성법," *한국전산유체공학회지*, 제1권, 제1호, pp.19-25.

[2] 정희택, 백제현, 1992, "2차원 익렬유동의Navier-Stokes 해석," *대한기계학회논문집*, 제16권, 제2호, pp.313-324.

[3] 최창호, 유정열, 1996, "$k-w$ 난류모델을 채택한 2차원 천음속 익렬유동의 수치해석," *한국항공우주학회지*, 제24권, 제3호, pp.37-46.

[4] Chung, H.T. and Baek, J.H., 1992, "Influence of Trailing-Edge Grid Structure on Navier-Stokes Computation of Turbomachinery Cascade Flow," *Int. J. Numer. Methods in Fluids*, Vol.15, pp.883-894.

[5] Davis, R., 1989, "Adaptive Grid Embedding Navier-Stokes Technique for Cascade Flows," *AIAA Paper 89-0204.*

[6] Ghia, U. et al., 1983, "Hybrid C-H Grids for Turbomachinery Cascades," *Advanced in Grid Generation,* pp.143-161.

[7] Choo, Y. et al,, 1987, "Composite Grid and Finite-Volume LU Implicit Scheme for Turbine Flow Analysis," *AIAA Paper 87-1129.*

[8] FLUENT Inc., 2001, *Fluent 6 Users's Guide*, Fluent Inc., Lebanon.

[9] Kiock, R.J. 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.