

## 2차원 증기터어빈 익렬유동의 수치적 해석 A Numerical Analysis on Two-Dimensional Viscous Flowfield around a Steam Turbine Cascade

김유일<sup>\*1</sup>, 김귀순<sup>1</sup>, 김경천<sup>2</sup>, 하만영<sup>2</sup>, 박호동<sup>3</sup>  
Y. I. Kim, K. S. Kim, K. C. Kim, M. Y. Ha and H. D. Park

A computer code for solving the Reynolds averaged full Navier-Stokes equations has been developed for analysis of gas and steam turbine cascade flows with the option of using one of two types of turbulence model. One is the Baldwin-Lomax model and the other is standard  $k-\epsilon$  model. The numerical integration is based on the explicit four stage Runge-Kutta scheme and finite volume method. To be verified, the resulting code is applied to VKI turbine cascade and compared with the previous experimental results. Finally, the flowfield around a steam turbine cascade is analyzed. Comparisons with experimental data show that present numerical scheme is an accurate Navier-Stokes solver and can give very good predictions for both gas and steam turbine cascade flow.

### 1. 서론

터어빈 깃 통로 내의 흐름은 다양한 유동특성을 보인다. 먼저 깃 사이의 유로가 아주 심하게 뒤틀림으로 인하여 심한 2차유동을 유도한다. 그리고 점성효과에 의해 깃과 끝벽(end wall) 등에서 경계층을 형성하며, 이들은 통로와류(passage vortex), 말굽와류(horseshoe vortex), 모서리와류(corner vortex) 등을 야기시킨다. 이러한 와류는 깃 후반부의 wake와 혼합하여 복잡한 3차원 난류 유동장을 형성한다[1]. 더우기 tip clearance leakage와 경계층들간의 상호간섭 등이 유동을 더욱 복잡하게 하여 터어빈 내에서의 유동현상은 아직도 완전히 규명되어 있지 않은 상태에 있다. 따라서 이러한 유동현상들을 정확하게 해석하는 것은 성능예측이나 성능향상 및 설계 등의 관점에서 아주 중요하다.

이러한 복잡한 유동현상을 규명하기 위해 많은 실험적 연구[2]가 수행되었으며, 이와 더불어 수치적인 연구 또한 활발히 진행되고 있다. Denton[3]은 비점성모델에 단순화한 점성효과를 첨가하여 3차원 점성유동을 해석하였으며, Hah[4]는 유한체적법과  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 박리유동 영역이 존재하는 저속 익렬유동장에서의 3차원 난류유동을 해석하였다. Turner & Jennions[5]는 두가지 형태의 난류모델을 적용하여 비교하였으며, Kunz & Lakshminarayana[6]는 Runge-Kutta 방법[7]에  $k-\epsilon$  모델을 적용하여 익렬유동을 해석하였는데, 이 외에도 익렬유동을 보다 정확하게 예측하고자 하는 연구는 많이 수행되었다. 그러나 이제까지의 터어빈 유동장 해석에 관한 대부분의 연구들은 가스터어빈에 국한되었다.

이에 따라 본 연구에서는 증기터어빈의 유동특성을 살피기 위해 증기를 이상기체로 가정하여 증기터어빈 내에서의 유동장을 수치적으로 해석하였다. 압축성 Navier-Stokes 방정식의 적분방법으로서 공간상에서는 유한체적법을 그리고 시간상에서는 4차 Runge-Kutta 방법[7]을 사용하였다. 수렴속도의 증대를 위하여 국소시간 간격법[8]과 residual smoothing 방법[9]을 적용하였다. 근본적으로 난류유동인 터어빈 기계 내의 유동을 보다 정확하게 예측하기 위해 Baldwin-Lomax 모델[10]과 Launder & Spalding[11]의  $k-\epsilon$  모델을 적용하여 그 결과를 비교하였다. 계산방법의 타당성을 살펴보기 위해 VKI 선형 터어빈 익렬에 대한 계산을 수행하여 Kiock 등[2]의 실험결과와 비교하였다. 아울러 증기터어빈에의 적용성을 보기 위해 한국중공업의 증기터어빈 노즐에 대한 유동장 해석을 수행하였으며 그 결과는 한국중공업 설계 데이터[12]와 비교분석 하였다.

- 
1. 부산대학교 항공우주공학과(609-735, 부산시 금정구 장전동 산30, Tel: 051-510-2436)
  2. 부산대학교 기계공학과(609-735, 부산시 금정구 장전동 산30, Tel: 051-510-2324)
  3. 한국중공업 기술연구소(641-792, 경남 창원시 귀곡동 555, Tel:0551-69-9851)

## 2. 지배방정식 및 수치적기법

### 2.1 지배방정식

$k-\varepsilon$  모델을 위한 보존방정식을 포함한 무차원화된 2차원 비정상, 압축성, Navier-Stokes 방정식을 직교좌표계에서의 보존형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + S \quad (1)$$

여기서

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_0 \\ \rho k \\ \rho \varepsilon \end{pmatrix} \quad E = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (\rho e_0 + p)u \\ \rho uk \\ \rho u \varepsilon \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vw \\ \rho v^2 + p \\ (\rho e_0 + p)v \\ \rho vk \\ \rho v \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$E_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} - q_x \\ (\frac{\mu_l}{Re_0} + \frac{\mu_t}{Pr_k})k_x \\ (\frac{\mu_l}{Re_0} + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon})\varepsilon_x \end{pmatrix} \quad F_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} - q_y \\ (\frac{\mu_l}{Re_0} + \frac{\mu_t}{Pr_k})k_y \\ (\frac{\mu_l}{Re_0} + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon})\varepsilon_y \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_{en} - \rho \varepsilon \\ c_1 \frac{\varepsilon}{k} G_{en} - c_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \left( \frac{\mu_l}{Re_0} + \mu_t \right) \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{xx} = 2 \frac{\partial u}{\partial x} \left( \frac{\mu_l}{Re_0} + \mu_t \right) - \frac{2}{3} \left( \frac{\mu_l}{Re_0} + \mu_t \right) \left( -\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{yy} = 2 \frac{\partial v}{\partial y} \left( \frac{\mu_l}{Re_0} + \mu_t \right) - \frac{2}{3} \left( \frac{\mu_l}{Re_0} + \mu_t \right) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$q_x = -\frac{\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{\mu_l}{Re_0 \cdot Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -\frac{\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{\mu_l}{Re_0 \cdot Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y}$$

여기서  $\rho, u, v, p, T, k$  및  $\varepsilon$  은 주요 유동변수들로서 각각 무차원화된 밀도,  $x$ 와  $y$ 방향의 속도성분, 압력, 온도, 난류운동에너지 및 난류에너지 소산율을 나타낸다. 이상기체인 경우 상태방정식과 전에너지의 정의식으로부터 온도와 압력은 다음과 같이 계산된다.

$$p = (\gamma - 1) \rho \left\{ e_0 - \frac{1}{2} (u^2 + v^2) + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right\}, \quad T = \frac{p}{\rho} \quad (5)$$

점성계수 ( $\mu_l$ )는 Sutherland의 식을 통해 구한다[13].

$$\mu_l = \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_{ol} T_{ref} + S_\mu}{T_{ol} T + S_\mu} \quad (6)$$

상수  $S_\mu$ 는 공기인 경우 110.4K이고 증기인 경우는 861.1°K이다. 그리고 프란틀 수( $Pr$ )는 온도에 따라 약간의 변화를 보이나, 공기인 경우 0.72를 증기인 경우는 1.0을 사용하여도 무방하다[13].

그리고  $k-\varepsilon$  난류모델에 관한 식들과 상수들은 다음과 같다[11].

$$\mu_t = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$G_{en} = \mu_t \{ 2(u_x^2 + v_y^2) + (u_y + v_x)^2 \} \quad (8)$$

$$c_\mu = 0.09, \quad c_1 = 1.44, \quad c_2 = 1.92, \quad Pr_t = 0.9, \quad Pr_k = 1.0, \quad Pr_\varepsilon = 1.3$$

Baldwin-Lomax 난류모델[10]을 사용하는 경우에는 난류운동에너지 ( $k$ )와 난류운동에너지 소산율 ( $\epsilon$ )에 관한 보존방정식에서 해를 구하여 난류점성계수( $\mu_t$ )를 구하는  $k-\epsilon$  모델과는 달리 대수적인 방법으로 난류점성계수를 구한다.

## 2.2 경계조건

터빈 익렬 계산영역에서는 크게 입구, 출구, 벽면 및 주기경계로 구분된다. 입구와 출구에서는 쌍곡선형 지배방정식의 수학적 이론에 기초한 특성경계조건을 부과한다. 입구유동이 아음속인 경우에는 경계면을 따라 전온도, 전압력, 입구 유동각( $\alpha$ ), 난류강도 및 난류 length scale이 주어진다. 그리고 나머지 하나의 조건은 Riemann invariant  $R$ 를 내부로부터 외삽하여 주변수들을 결정한다[14]. 입구유동이 초음속인 경우에는 모든 변수들은 정해진 입구조건으로부터 결정되어진다. 아음속 출구면에서는 정압 만이 지정되고, 다른 모든 값들은 내부유동장에서부터 외삽하여 구한다. 이 때 Riemann invariant  $R'$ , 전엔탈피, 경계면에 대한 접선속도 성분,  $k$ ,  $\epsilon$ 이 외삽되어 각 변수값들이 정해진다[14]. 출구면의 속도가 초음속이면, 모든 유동변수들은 내부유동장에서 외삽하여 계산한다. 벽면에서는 no slip 조건을 적용하여 속도를 0으로 결정하고 압력은 내부격자점으로부터 외삽하여 결정한다. 그리고 단열조건에 의하여 벽면으로부터 수직 방향의 전에너지의 기울기가 없다고 할 수 있으므로 전에너지도 내부격자점으로부터 외삽하여 결정한다. 밀도는 먼저 결정된 압력과 전에너지로부터 계산된다. 그러나 유동변수와 난류항들은 벽 근처에서 아주 급격하게 변화하므로 정확한 유동장 예측을 위하여 많은 수의 격자가 필요하다. 격자수의 증가는 계산시간의 증가를 의미하므로 상대적으로 작은 격자수를 가지고 비교적 정확한 해를 구하기 위해 Launder & Spalding[11]에 의해 제시된 벽합수 방법을 사용한다.

## 2.3 수치적 기법

지배 방정식 (1)은 유한체적법을 통해 1계 상미분 방정식으로 전환되어 4단계 Runge-Kutta적분법으로 해를 구한다[7]. 흔히 충격파나 벽면경계 주위에서처럼 유동의 급격한 변화를 수반하는 경우에 발생하는 교란을 감쇄시켜서 수치적 방법의 안정성을 확보하기 위해 인공점성항을 사용하는데, 본 연구에서는 2차와 4차의 점성항을 선택적으로 결합한 Jameson 등[7]의 인공점성항을 보완한 Swanson & Turkel[15]의 비등방성 인공점성 모델을 사용한다.

그리고 정상상태로의 빠른 수렴을 위해서 국소시간 간격법을 사용한다. 여기서는 Amone & Swanson[8]이 제안한 방법을 따른다. 이 때  $k$ ,  $\epsilon$  방정식은 모두 source 항을 가지는데 이들은 벽면 근처에서 큰 값을 갖게 된다. 안정성해석에 따르면 이 값들은 수치해의 안정성에 크게 영향을 미치게 되어 허용되는 국소 시간간격을 아주 작게 만든다. 이에 따라 Kunz & Lakshminarayana[6]와 같이  $k$ ,  $\epsilon$  방정식에 대한 시간간격과 나머지 보존방정식에 사용되는 시간 간격을 달리하는 이중 시간간격법을 사용하였다.  $k$ ,  $\epsilon$  방정식에 대한 시간간격은 나머지 보존방정식에 사용되는 시간 간격의 1/4에 해당되는 값을 사용하였다. 시간 전진법의 안정성 범위는 내재적 residual smoothing을 이용하므로써 확장되어 질 수 있는데, 본 연구에서는 Jameson[9]의 방법을 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 VKI 선형 터빈 익렬

본 연구에서 개발된 수치해석법의 타당성을 확인하기 위하여 VKI 선형 터빈 익렬에 대하여 계산을 수행하였다. 이 익렬은 천음속 영역의 대표적인 익렬로서 유동은 익렬에 대해 30도 각도로 유입되어 깃 통로를 지나서 동안 96도 정도 방향을 전환하여 유출된다. 깃 통로는 수축되다가 뒷전 부근에서 최소의 면적을 가지면서 뒷전 부근에서 음속을 얻도록 설계되었다. 입구 마하수는 약 0.27이고 출구에서는 0.8에서 1.2에 이르는 아음속과 초음속영역 모두에서 작동된다. 익렬 흡입면은 면적이 가장 작은 목 뒤에서도 확산되는 곡선형태를 가지고 있어서 계속 가속되어 강한 뒷전 충격파를 수반하기도 한다. 깃의 대표적인 형상으로 코드에 대한 피치의 비는 0.71, 익렬의 각도는 33.3도이다. 격자계는 111×51 H-형 격자계를 사용하였으며, 벽면에 위치한 첫 검사체적의 중심점은 벽면으로부터  $2.0 \times 10^{-3}$  코드만큼의 거리에 위치해 있다. 입구경계면은 익렬의 영향이 미치지 않는 익렬 앞전으로부터 80% 코드 떨어져 위치 시켰으며, 출구 경계면은 익렬 뒷전으로부터 90% 코드 떨어져 위치 시켰다. 그리고 주기적인 경계는 격자의 찌그러짐을 최소화시키기 위해 포물선 형태로 하였다.

계산은 입구 마하수 0.268, 출구의 등엔트로피 마하수가 0.81인 경우에 대해 수행하였다. 계산에서 사용된 CFL 수는 3.5였다. 이 경우는 초음속영역이 나타나지 않는 순수 아음속 작동조건이다. Fig. 1은 Baldwin-Lomax 모델

과  $k-\epsilon$  모델을 사용한 계산결과로서 익렬 표면을 따라 등엔트로피 마하수를 코드방향으로 나타낸 것으로 두 모델 모두 실험결과와 대체적으로 잘 일치하고 있다. 이 결과에서 보면 익렬 흡입면에서는 앞전에서부터 가속되기 시작하여 50%코드 이후에는 균일한 등엔트로피 마하수 분포를 보인다. 이와는 대조적으로 익렬 압력면에서는 앞전의 정체상태에서 코드방향을 따라 약간의 가속 후에 평탄한 등엔트로피 마하수 분포를 보이다가 40% 코드 이후에야 뚜렷하게 가속된다. 익렬의 흡입면과 압력면 모두에서 보이는 뒷전 부근에서의 급격한 가속 후의 급격한 감속은 원호형태의 뒷전에서 곡률이 아주 크기 때문에 발생하는 현상이나, 실험결과에서는 이러한 현상이 잘 나타나 있지 않다. 이는 뒷전에서 유동의 박리가 발생하여 뒷전 후방에 재순환 유동을 형성하기 때문에 실제 유동은 곡률의 변화를 감지하지 못한다. 그러나 계산에서는 격자수가 충분하지 못하여 이 재순환 유동을 포착해 내지 못하여 유동이 박리되지 않고 곡면을 따라 흐르면서 가속되기 때문에 등엔트로피 마하수의 갑작스런 피크를 보인다.

Fig. 2는 Baldwin-Lomax 모델과  $k-\epsilon$  모델을 사용한 계산결과를 비교해 보기 위해 등마하수 선도를 나타내었다. 이와 같이 순수 아음속 유동인 경우에는 익렬의 앞전에서부터 익렬 압력면의 뒷전 부근까지 유동은 가속되면서 방향을 전환하고, 그 이후에는 부분적으로 가속되거나 감속이 되기도 한다. 최고의 마하수는 목을 지난 유동이 곡률을 가진 익렬 흡입면을 따라 흐르면서 발생하는데, 이 때의 마하수는 0.9보다 큰 값을 가진다. 익렬의 뒷전을 지난 유동은 wake 형태의 유동특성을 보인다. 이와 같은 모든 유동특성들은 두 결과에서 모두 잘 나타나 있으며, 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 최고 마하수가 나타나는 익렬 흡입면의 후반부 유동에서는 약간의 차이를 보이고 있다. 두 난류모델을 통한 결과를 비교해 보면 익렬 흡입면의 뒷 부분인 최대 마하수 영역과 깃 후류 영역에서  $k-\epsilon$  모델이 비교적 완만한 마하수 변화를 보인다. 이는  $k-\epsilon$  모델에서는 벽합수 방법을 이용하여 벽면에서의 전단응력을 보다 크게 예측하기 때문이다. 그러나 두 난류모델을 이용한 결과들 사이에서는 벽면근처에서 약간의 차이를 보일 뿐 전체 유동장에서는 큰 차이가 없다.

### 3.2 증기터어빈 노즐 익렬

이제까지는 공기가 매질인 경우에 대한 유동계산을 수행하였는데 그 결과는 비교적 실험결과 혹은 다른 연구자들의 결과와 거의 일치하고 있다. 여기서는 매질이 증기인 경우에 대해 본 수치해석법을 적용해 보기 위해 증기를 이상기체로 가정하여 계산을 수행하였다. 증기를 이상기체로 가정할 경우 공기와 다른

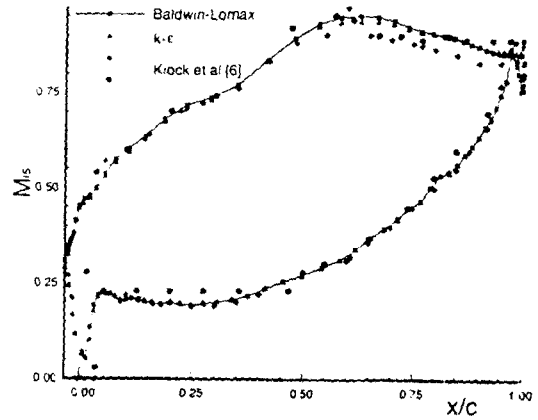


Fig. 1. Isentropic Mach Number Distribution on VKI Turbine Cascade ( $Re_{2,u} = 8.22E5$ ,  $M_{2,u} = 0.81$ )

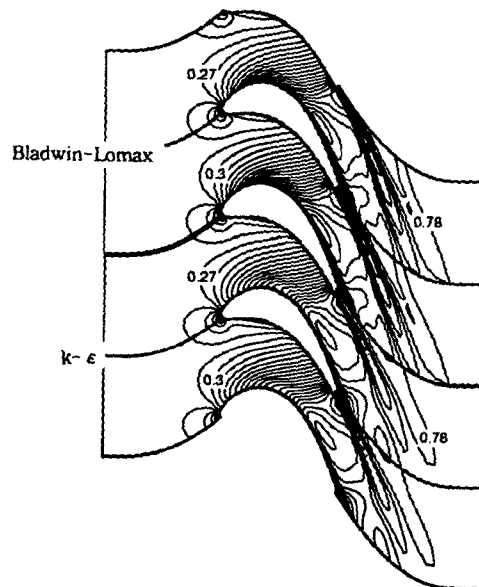


Fig. 2. Predicted Isomach Contour of VKI Turbine Cascade ( $Re_{2,u} = 8.22E5$ ,  $M_{2,u} = 0.81$ )

성질은 비열비, 프란틀 수 및 점성계수이다. 한국중공업 증기터어빈 IP 1단 노즐의 경우 작동온도가  $800^{\circ}K$  부근이므로 이 영역에서의 증기의 성질들 ( $\gamma = 1.172$ ,  $Pr = 1.0$ )을 이용하고 점성계수는 Sutherland의 식(8)을 통해 계산한다. 여기서 상수  $S_{\mu}$ 는  $861.1^{\circ}K$ 이다. 그리고 계산에 필요한 작동 조건으로는 입구 전압력( $3966.3KPa$ ), 입구 전온도 ( $809.7^{\circ}K$ ), 입구 유동각( $0^{\circ}$ ) 및 출구 정압력 ( $3214.45KPa$ )을 사용하였다. 이 조건으로 동엔트로피 출구마하수( $M_{2,i}$ )를 계산하면 0.579이다. 이 조건들이 계산에 사용된 조건이며 나머지 유동변수들은 모두 미지수로 두고 증기터어빈 노즐에 대한 계산을 수행한다.

격자계는  $131 \times 81$  H-형 격자계를 사용하였으며, 벽면에 위치한 첫 검사체적의 중심점은 벽면으로부터  $2.50 \times 10^{-4}$  코드만큼의 거리에 위치해 있다. 두 격자계 모두 입구경계면은 익렬의 영향이 미치지 않는 익렬 앞전으로부터 80% 코드 떨어져 위치 시켰으며, 출구 경계면은 익렬 뒷전으로부터 90% 코드 떨어져 위치 시켰다. 그리고 주기적인 경계는 격자의 찌그러짐을 최소화시키기 위해 포물선 형태로 하였다. 깃의 대표적인 형상으로 코드에 대한 피치의 비는 0.33, 익렬의 stagger 각도는  $27^{\circ}$ 이다.

계산은  $k-\epsilon$  모델과 Baldwin-Lomax 모델을 적용하여 수행하였으며, CFL 수로 3.5를 사용하였다. 입구 전압력, 입구 전온도, 입구 유동각 및 출구 정압력을 지정하여 계산을 수행한 결과로서 나머지 입출구 유동조건을 비교해 보면 Table 1과 같다. 이 결과에서 보면 대체적으로 큰 오차는 생기지 않는 것으로 볼 수 있다. 출구마하수와 출구전압력 면에서 보면 Baldwin-Lomax 모델을 적용하는 것이 보다 정확한 결과를 나타내고, 출구유동각과 입구마하수는  $k-\epsilon$  모델을 적용하는 것이 더 정확한 결과를 나타낸다. 그러나 이것만으로는 어느 것이 전체유동장을 보다 정확하게 예측한다고 단정짓기는 쉽지 않다.

Fig. 3는 노즐 익렬유동의 등마하수 선도로서 두 난류모델을 이용한 결과가 나타나 있다. 여기에서 보면 유동은 익렬 전방에서 일정한 속도를 유지하다가 깃에 의한 blocking 효과로 유동면적이 줄어들면서 어느 정도 가속이 되고 깃이 방향을 전환하는 부분에 가서야 급격히 가속되어 출구에서 0.57 정도의 마하수로 유출되는 것을 알 수 있다. 두 난류모델사이에서 큰 차이는 없으나 벽면근처나 깃 후류 영역에서 약간 다른 마하수 분포를 보인다. Fig. 4는 각각 전압력분포에 대한 난류모델의 영향을 살펴보았는데  $k-\epsilon$  모델이 뒷전 부위에서 전압력 손실을 약간 크게 예측하고 있다

Table 1. Predicted and Measured Operating conditions of a Steam turbine

	Korea Heavy Industry' Design Data	Baldwin-Lomax Model	$k-\epsilon$ Model
Inlet Mach No.	0.12	0.1034	0.107
Outlet Mach No.	0.57	0.5677	0.5633
Outlet Total Pressure	3936.37	3935.75	3921.07
Inlet Static Pressure	3930.15	3938.53	3937.34
Outlet Flow Angle	13.10	13.75	13.1

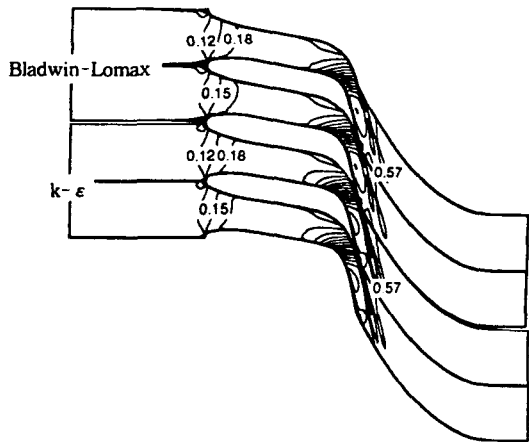


Fig 3. Predicted Isomach Contour of a Steam Turbine Cascade ( $Re_{2,i} = 1.47E7$ ,  $M_{2,i} = 0.579$ )

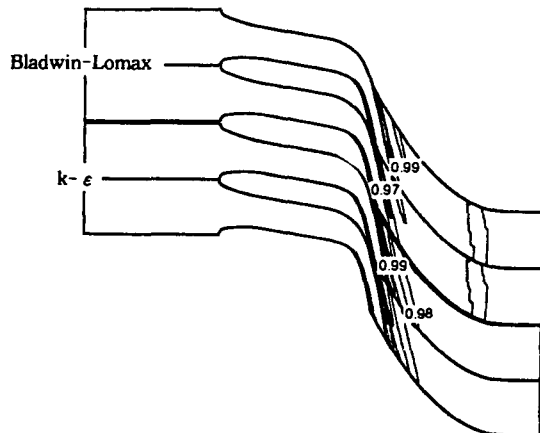


Fig 4. Predicted Total Pressure Distribution of a Steam Turbine Cascade ( $Re_{2,i} = 1.47E7$ ,  $M_{2,i} = 0.579$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 증기터어빈 익렬 내의 압축성 점성유동 현상을 정확하게 예측하기 위한 수치해석적 연구를 수행하였다. 이를 위해 2차원 비정상 Navier-Stokes 방정식에 근거한 유동해석 프로그램을 개발하였는데, 시간에 대해서는 Runge-Kutta 방법을 공간에 대해서는 유한체적법을 적용하였다. 난류모델로는 널리 사용되고 있는 Baldwin-Lomax 모델과  $k-\epsilon$  모델 두가지를 적용하여 비교해 보았다.

본 수치해석법의 타당성 확인을 위해 VKI 선형터어빈 익렬에 대하여 계산을 수행하고 그 결과를 기존의 실험 결과와 비교하였으며, 증기터어빈 익렬에 대한 유동해석을 수행하였는데 그 결과는 다음과 같다.

(1) 본 수치방법은 마하수, 압력, 속도 등이 합리적으로 예측되어 비교적 정확하게 가스나 증기터어빈의 유동을 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 전반적인 평균 유동변수들은 비교적 작은 격자계로도 정확하게 예측된다.

(2) 벽면근처에서는 난류모델에 따라 유동특성 예측에 약간의 차이를 보이고 있으나, 평균 유동변수들은 난류 모델에 관계없이 실험결과와 잘 일치하고 있다.

(3) 유동손실값은 익렬통로 내에서는 완만한 증가를 보이고 익렬 끝단 부근 특히 후류영역에서 크게 증가한다. 이상의 결과로서 본 수치해석법은 증기나 가스터어빈의 유동해석 혹은 성능예측에 적합함이 판명되었다.

#### 참고문헌

- [1] Sieverding, C.H., (1985) "Recent Progress in the Understanding of Basic Aspect of Secondary Flows in Turbine Blade Passages," Trans. of the ASME, J. of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp. 248-57.
- [2] Kiock, A., Lehthaus, F., Baines, N.C. and Sieverding, C.H., (1986) "The Transonic Flow through a Plane Turbine Cascade as Measured in Four European Wind Tunnels," Trans. of the ASME, J. of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 108, pp. 277-85.
- [3] Denton, J.D., (1986) "The Use of a Distributed Body Force to Simulate Viscous Effects in Three-Dimensional Flow Calculations," ASME Paper 86-GT-144.
- [4] Hah, C., (1984) "A Navier-Stokes Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows Inside Turbine Blade Rows at Design and Off-Design Conditions," ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 106, pp. 421-29.
- [5] Turner, M.G. and Jennions, I.K., (1993) "An Investigation of Turbulence Modeling in Transonic Fans Including a Novel Implementation of an Implicit  $k-\epsilon$  Turbulence Model," Trans. of the ASME, J. of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 249-61.
- [6] Kunz, R.F. and Lakshminarayana, B., (1992) "Explicit Navier-Stokes Computation of Cascade Flows Using the  $k-\epsilon$  Turbulence Model," AIAA J., Vol. 30, No. 1, pp. 13-22.
- [7] Jameson, A., Schmidt, W. and Turkel, E., (1981) "Numerical Solutions of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time Stepping Schemes," AIAA Paper 81-1259.
- [8] Arnone, A. and Swanson, R.C., (1993) "A Navier-Stokes Solver for Turbomachinery Applications," Trans. of the ASME, J. of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 305-13.
- [9] Jameson, A., (1983) "The Evolution of Computational Methods in Aerodynamics," Trans. of the ASME, J. of Applied Mechanics, Vol. 50, pp. 1052-70.
- [10] Baldwin, B.S. and Lomax, H., (1978) "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-275.
- [11] Launder, B.E. and Spalding, D.B., (1974) "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-89.
- [12] 박호동, (1994), 한국중공업 설계 데이터.
- [13] White, F.M., (1974) *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, Inc.
- [14] Chakravarthy, S.R., (1983) "Euler Equations - Implicit Schemes and Boundary Conditions," AIAA J., Vol. 21, No. 5, pp. 699-706.
- [15] Swanson, R.C. and Turkel, E., (1987) "Artificial Dissipation and Central Difference Schemes for Euler and Navier-Stokes Equations," AIAA Paper 87-1107.