

## 비정상 후류를 지나는 터빈 동익 주위의 유동장 수치해석

이 은 석\*

### Numerical Analysis of a Turbine Rotor Cascade with Unsteady Passing Wakes

Eun Seok Lee\*

**Keywords :** Turbine Stage(터빈 단), Unsteady Wakes(비정상 후류), Gap between Stator /Rotor(정익 /동익 간격)

#### Abstract

A turbine stage consists of a stator and rotor. A stator provides the required inlet flow conditions so that a rotor can produce the necessary power. Passing wakes generated at the trailing edge of a stator make an interaction with a rotor. In the present study, this interaction flow mechanism is investigated using the numerical analysis. In case of the large gap distance between the stator and rotor, the stator and rotor flow analysis can be separated. First, only the stator flow field is solved. Second, the rotor flow field is solved including the passing wake information from the stator analysis. The passing wake experiences the shearing as it approaches to the rotor leading edge. And it is chopped when it strikes the rotor body. After that, the chopped wakes becomes the prolongation as it goes downstream. Also, the aerodynamic characteristics with the variation of the gap distance between a stator and rotor was investigated. Pressure jumps due to the passing wakes result in the pressure and lift loss and it gets stronger with the closer gap distance. This unsteady effect proves to be directly related to the fatigue and noise in turbomachinery and this study would be helpful to investigate such fields.

#### 1. 서 론

수치해석을 이용한 터보기계분야의 복잡하고 흥미로운 분야로는 익렬(cascade)내 열진달, 이차 유동해석, 익단 간극에 의한 누설해석, 정익/동익의 간섭해석 등이 있으며 최근 발달한 CFD 영향으로 여러 가지의 모델링을 통한 해석이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 그 중에 정익에서 발생하는 후류의 영향에 의한 동익의 유동특성을 수치적으로 해석하고자 한다. 터빈이나 압축기의 유동특성은 본질적으로 비정상(unsteady)이다. 비정상 유동은 정익에 대한 동익의 상대위치 변화에서 기인되고 정익과 동익 간의 상호간섭은 다음의 네 가지로 분류될 수 있다.[1]

첫째는 비점성 특성인 포텐셜 상호간섭(potential interaction)이다. 동익이 정익을 향해 접근함에 따라 정익의 뒷전 부근에서 동익의 압력 포텐셜에 의해 유동간섭이 생성되며 이 간섭은 다시 동익의 앞전에 영향을 미친다. 이 영향은 정익과 동익의 간격이 넓어짐에 따라 지수함수적으로 감소된다. 둘째는 압축성 영향으로 인해 충격파 충돌현상이다. 초음속 영역에서 정익 뒷전에 생기는 물고기 지느러미 모양의 충격파(fish tail shock)는 정익을 향해 접근하는 동익의 앞전에 충돌한다. 이러한 충돌현상은 가스터빈 엔진의 소음에 매우 밀접한 연관을 가지고 있다. 셋째는 점성영향으로 정익에서 형성된 이차유동이 하류(downstream)로 전파되면서 동익에 영향을 주는 것이다. 회전유동은 본질적으로 반경방향의 압력구배를 가지고 있고 물체표면에서는 이 압력구배를 따라 유동이 흐른다. 이것이 이차유동의

근본개념이다. 이러한 이차유동은 축방향 흐름에 공간적인 변화를 주어 동익의 입구유동을 시간에 따라 변화시키게 한다. 넷째는 점성영향으로 발생한 정익 후류가 동익에 미치는 비정상 특성이다. 정익의 뒷전에서 발생한 후류는 그대로 하류방향으로 전파되어 동익의 유동장에 변화를 일으킨다.

본 논문에서는 위의 정익/동익의 비정상 특성 중 네 번째인 정익 후류에 의한 동익의 비정상 유동 특성을 수치적으로 해석하였다. 이를 위해 이중시간 전진기법을 이용한 2차원 비정상 Navier-Stokes 코드를 개발하였고 이를 적용하여 정익/동익의 유동장을 수치해석하였다.

#### 2. 비정상 Navier-Stokes 코드개발

##### 2.1 이중시간 전진기법(Dual time stepping)

정상상태의 2차원 Navier-Stokes 방정식에 가상시간  $\tau$ 를 도입한 식을 다음으로 나타내어 보자.

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = -\frac{\partial Q}{\partial t} + RHS = RHS^* \quad (1)$$

이 경우, 가상시간  $\tau$ 에 대해 우변의 새로운 잔류항(residual)  $RHS^*$ 를 영(Zero)으로 수렴시키면 실시간  $t$ 에 대한 정확한 비정상 해를 얻을 수 있다는 것이 이중시간기법의 이론적 배경이다. 위의 방정식에 근사인자분해 AF(Approximate Factorization)기법을 도입한 ADI(Alternative Directional Implicit) 형태로 다시 쓰면 식 (2)와 같다. 여기서  $A, B$  행렬은 비점성항에 대한 플릭스 Jacobian을 나타내고  $R$ 은 잔류항으로  $\xi, \eta$  방향에 대한 비점성항, 점성항, 인공점성항을 포함한다.  $A, B$  행렬은 4차의 인공점

\* 한국항공우주연구원 엔진그룹, ESL@kari.ac.kr

성향 계수의 내재적 처리로 인해 블록 5대각 행렬을 이룬다.

$$(I + \frac{2}{3} \Delta \tau \frac{\partial}{\partial \xi} A) (I + \frac{2}{3} \Delta \tau \frac{\partial}{\partial \eta} B) \\ \Delta Q^{n+1, m+1} = \frac{2}{3} \Delta \tau (R^{n+1, m} - \frac{\partial Q^n}{\partial t}) \quad (2) \\ + \frac{1}{3} \Delta Q^{n+1, m}$$

행렬의 고유값(Eigenvalue)을 이용하여 대각화된 형태의 5대각 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$T_\xi \{ I + \frac{2}{3} \Delta \tau \frac{\partial}{\partial \xi} (A_\xi + D_\xi) \} T_\xi^{-1} T_\eta \{ I + \\ \frac{2}{3} \Delta \tau \frac{\partial}{\partial \eta} (A_\eta + D_\eta) \} T_\eta^{-1} \Delta Q^{n+1, m+1} = \quad (3) \\ \frac{2}{3} \Delta \tau (R^{n+1, m} - \frac{\partial Q^n}{\partial t}) + \frac{1}{3} \Delta Q^{n+1, m}$$

이와 같이 본 연구에서는 DADI (Diagonalized Alternative Directional Implicit) 기법과 이중시간 전진기법을 동시 적용하여 비정상 Navier-Stokes 방정식을 수치해석 하였다. 난류모델링으로 k-ε 방정식을 채택하였으며 Navier-Stokes 방정식과는 시간지체 (Time lagged)하여 상호연계 해석하였다.[2]

## 2.2 코드검증

코드검증을 위해 원기둥을 지나는 유동을 수치해석 하였다. Schlichting [3]에 의하면 레이놀즈수 60에서 5000 사이에서 원기둥 후방 유동에 규칙적인 Karman 와류가 관찰된다. 무차원화된 주파수(S: Strouhal 수)는 다음으로 정의된다.

$$S = \frac{fD}{V} \quad (4)$$

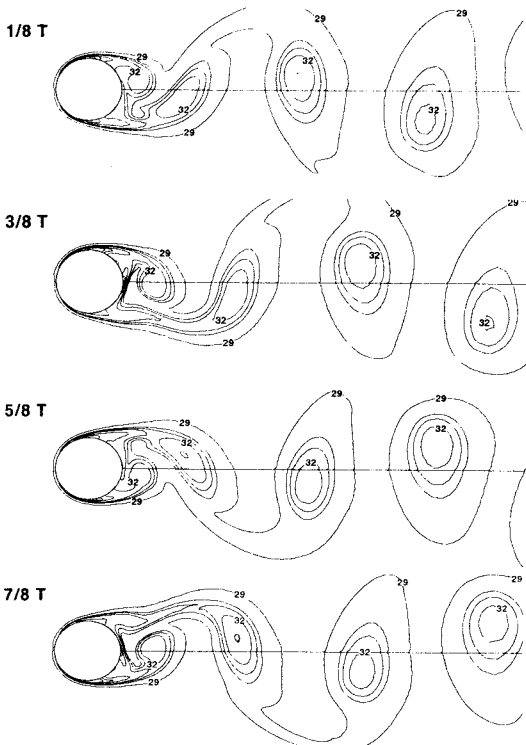


Figure 1 Entropy contours for a circular cylinder at times

여기서  $f$ 는 Karman 와류의 주파수,  $D$ 는 원의 직경,  $V$ 는 자유류의 속도에 해당된다. 그림 6에서는 시간에 따른 등엔트로피 선도를 나타낸 것으로 와류생성 구조를 관찰할 수 있다. 벽면 후방에서 생성된 와류는 후방으로 갈수록 점차 확산되어 이동해 나가는 것을 볼 수 있다. 실험에 의하면 레이놀즈수 500~5000 사이에서 Strouhal 수는 약 0.21이고 본 연구를 통해 계산된 값은 0.206이다.

## 3. 정익 후류에 의한 동익의 유동해석

### 3.1 정익해석

그림 2에서는 정익과 동익의 상대위치를 나타내었다. 정익은 동익에서 생성되는 파위를 극대화하기 위해 축방향 흐름성분을 회전방향의 흐름성분으로 바꾸어 주는 역할을 한다. 정익을 지나는 흐름은 유효 통과면적의 감소로 회전방향의 흐름이 가속되고 정압이 작아진다. 점성으로 인해 전압력은 감소된다.

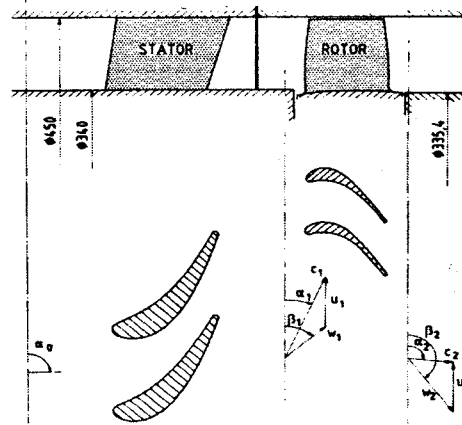


Figure 2 Schematic view of stator and rotor (reference [4])

이러한 큰 회전방향의 흐름성분은 동익을 지나면서 감소되고 동익 전후방의 회전모멘트의 차이가 곧 동익 생성하는 파워에 밀접한 연관이 있다. 정익과 동익의 개수는 각각 20개이고 익근과 익단에서의 지름은 각각 340, 450mm이다. 정익의 끝단에서의 마하수는 0.76으로 팽창되며 동익입구에서는 상대마하수가 0.406이다. 본 연구에서는 정익과 동익간의 간격이 54mm, 동익 코드길이는 60.8mm이고 수평에 대해 약 31.4deg(stagger angle) 기울어져 있다. 간격이 축방향 코드길이 정도로 동익에 의한 정익의 포텐셜 간섭은 배제할 수 있다.[1] 따라서 이 경우, 정익만의 유동해석이 정익과 동익의 상호 유동해석과 크게 다르지 않다. (그림 3참조)

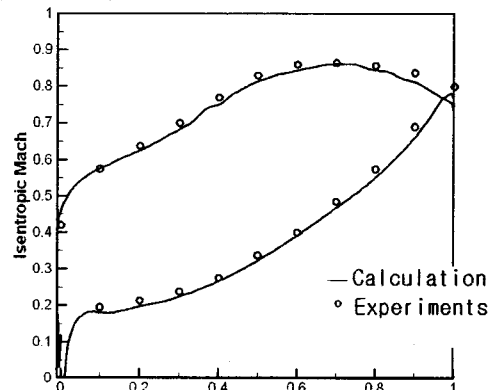


Figure 3 Surface isentropic Mach numbers

\* 한국항공우주연구원 엔진그룹, ESL@kari.re.kr

따라서 정익만을 먼저 해석하여 유동장, 즉, 후류의 강도 및 모양을 계산하고 이 후류를 동익의 입구경계조건에 분포시켜 시간에 따라 후류가 동익을 공간적으로 지나가는 형태의 유동장을 해석하였다. 그림 3에서는 계산결과와 검증용 실험치와 계산치를 비교하였다.[4] 비교적 잘 일치됨을 볼 수 있고 그림 4에서는 정익에서의 마하수 분포를 보여주고 있다, 입구에서는 마하수 0.18 속도를 가지고 축방향으로 입사되나 흡입면을 따라 흐름이 지속적으로 팽창되어 끝단에서는 0.76으로 가속된다.

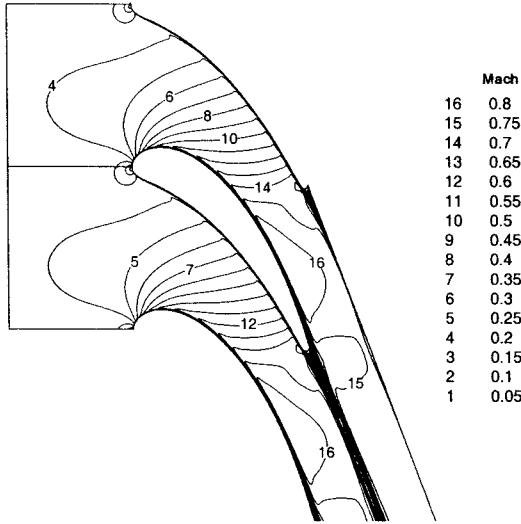


Figure 4 Mach contours around a stator

### 3.2 동익해석

그림 4에서 계산된 유동장으로부터 후류의 강도를 계산할 수 있다. 동익의 입구영역에 해당되는 위치에서의 유동값을 그림 4 으로부터 산출하여 동익의 유동장 계산의 입구 경계조건으로 적용하였다. 그림 5에서는 동익 주위에서의 교란속도벡터와 엔트로피 분포를 나타내었다. 여기서 교란속도성분은 입구에서의 평균 마하수 0.406에 해당되는 속도를 각 지점에서의 속도에서 뺀 값이다. 후류근방에서는 속도가 작기 때문에 동익의 입구경계, 후류의 가운데지점(centerline)에서 “negative jet” 현상이 나타난다. 후류영역에서의 교란속도성분은 흐름선 방향과 반대방향의 크기를 갖는 것이다.

후류는 동익의 입구에서 “띠(band)”의 형태로 동익에 접근하는 것을 볼 수 있다. 띠 형태로 접근되는 후류는 4가지 유동현상을 경험하면서 동익을 지난다. 첫 번째는 “bowing” 현상이다. 동익의 앞전에 접근하면서 양력으로 인한 circulation 영향으로 동익 앞전에 근접한 후류부분이 잘록해지면서 구부러진다. 구부러진 부분의 윗부분이 흡입에 의한 가속으로 불룩해진다. 두 번째는 “chopping” 현상이다. “bowing” 현상에 의한 구부러진 후류는 그대로 동익의 앞전에 충돌하여 위, 아래의 두 부분으로 절단된다. 세 번째는 “shearing” 현상이다. “chopping”에 의해 절단된 후류는 동익의 압력면보다 흡입면에서 보다 강하게 가속되어 전단변형의 형태로 찌그러진다. 찌그러진 후류는 “negative jet” 이 영역에서 두개의 와류(vortices)로 전이됨을 보여준다. 네 번째는 “prolongation” 현상이다. 압력면보다 흡입면에서 강하게 가속된 흐름은 downstream 방향으로 가면서 후류 띠(band)를 공간적으로 더욱 늘여지게 만든다. 따라서 절단되어 찌그러진 후류의 형태는 길이방향으로 연장되면서 팽창한다.

위의 네 가지 현상은 정익에서 발생한 후류가 동익에 미치는

비정상적인 특성으로 동익의 비정상특성의 가장 큰 요인이 된다.

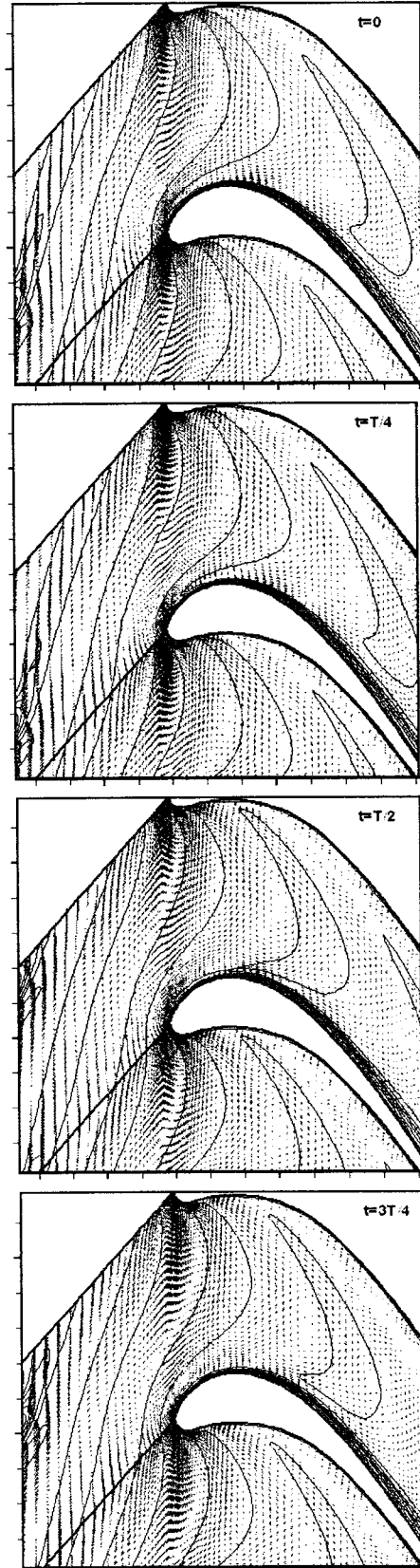


Figure 5 Perturbation velocity vectors and entropy contours

### 3.3 정익과 동익의 간격 변화에 의한 간섭특성

전산유체역학을 이용한 수치해석의 경우, 격자의 밀집성에 대한 계산결과와 변화를 예측하는 것이 매우 중요하다. 특히 터빈과 같이 유동이 복잡한 경우는 계산결과와 격자 의존성이

매우 높다. 본 연구에 사용한 격자 밀집성의 정당성을 검증하기 위해 피치방향의 격자를 2배로 확대하여 유동을 해석하였고 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 하나의 후류가 동익의 피치를 지나는데 (1주기) 10개의 시간간격을 설정하였고 약 15주기 (150회 iterations)가 지난 후에야 반복적인 형태의 해를 얻을 수 있었다. 양력과 전압손실의 계산치가 초기격자(125x65)와 밀집격자(125x69)의 경우, 그 차이가 0.5%내로 근접하였으며 이로서 본 연구에 사용된 격자의 밀집도의 정당성을 확보할 수 있었다.

정익과 동익의 간격변화에 따른 유동변화를 고찰하기 위해 간격을 54mm에서 각각 27, 15mm로 좁히면서 유동특성을 고찰하여 보았다. 일반적으로 후류의 가운데 속도(centerline velocity)는 정익을 이탈하면서 거리의 0.5 제곱으로 감소된다. 따라서 동익에 미치는 “negative jet”의 centerline 속도는 간격이 54mm에서 15mm로 줄어들어 따라 약 1.9배 증가하게 된다. 결국 간격이 약 1/4로 줄면 2배정도 강한 후류가 동익을 간섭하게 된다.

그림 7에서 간격이 15mm일 때의 양력과 전압손실의 시간에 따른 변화를 나타내었다. 그림 6에 비해 교란의 강도증가로 해의 불안정이 증가되었으며 양력과 전압손실의 시간에 따른 진동(fluctuation)이 크게 증폭되었음을 알 수 있다. 표 1에서는 정익과 동익의 간격변화에 따른 유동특성계수들의 변화를 나타내었다. 간격이 동익 축방향 코드길이의 50% 이내로 좁혀졌을 때, 양력 및 전압손실의 시간에 따른 진동이 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

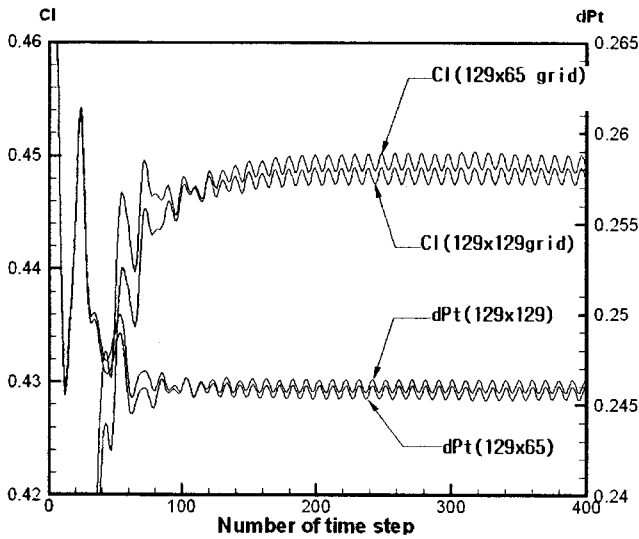


Figure 6 Convergence history of Cl and dPt (Gap=54mm)

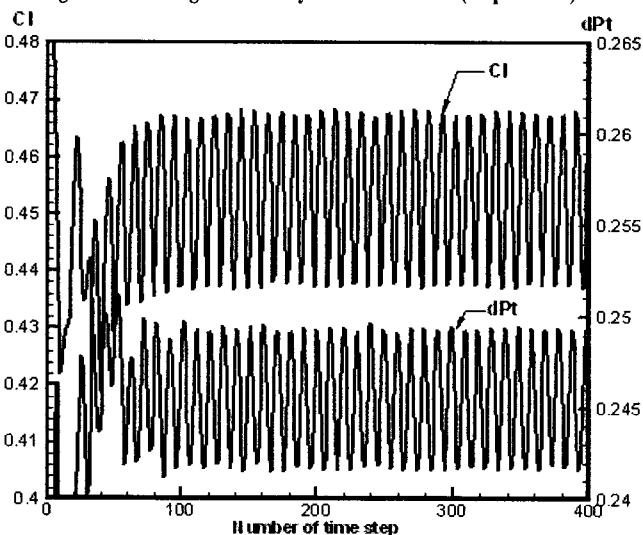


Figure 7 Convergence history of Cl and dPt (Gap=15mm)

	Gap = 54 mm	Gap = 27 mm	Gap = 15 mm
Gap/Chord <sub>x</sub>	104 %	52 %	28.8 %
$Cl_{ave}$	0.4494	0.4476	0.4525
$\Delta Cl$	0.002	0.008	0.032
$\Delta Cl / Cl_{ave}$	0.4 %	1.8 %	7.1 %
$p_{t,ave}$	0.2457	0.2458	0.2456
$\Delta p_{t,ave}$	0.001	0.0025	0.0077
$\Delta p_{t,ave} / p_{t,ave}$	0.4 %	1.0 %	3.1 %

Table 1 Aerodynamic characteristics with the variation of gap between stator and rotor

#### 4. 결론

본 연구에서는 터보기계의 비정상 특성 중에 하나인 정익과 동익의 상호작용에 대해 고찰하였다. 일반적으로 동익의 축 방향 코드길이 정도의 정익/동익 간의 간격이 있는 경우, 동익에 의한 정익의 포텐셜 간섭은 아주 작다. 따라서 본 연구에서는 정익만의 유동장을 해석하여 정익에서 발생하는 후류의 강도와 분포를 계산하고 이를 동익의 입구경계에 분포시켜 시간에 따라 주기적으로 공간 이동(passing)시키면서 정익의 후류에 의한 동익의 유동간섭을 고찰하였다. 유동간섭현상을 엔트로피 분포와 교란속도성분으로 정성적으로 해석하였다. 정익에서 발생하는 후류는 엔트로피 분포도에서 띠(band)의 형태를 가지고 동익으로 입사하여 네 가지의 독특한 비정상 유동특성현상 (bowing, chopping, shearing, prolongation)을 경험하면서 동익을 빠져나간다. 유동해석에 사용된 격자밀집도에 대한 검증을 위해 밀집격자를 이용하여 해의 변화를 관측하였다. 또한 정익과 동익간의 간격을 변화시키면서 동익의 유동특성을 살펴보았으며 특히, 50% 코드길이 이내로 간격을 좁혔을 때 양력 및 전압손실의 진동 폭이 극심해지는 경향을 있음을 알 수 있었다. 이러한 비정상 유동현상 해석기법은 향후, 로터 블레이드 소음문제, 피로해석, 공탄성 등의 분야에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] Hodson, H.P., 1998, “Blade Row Interference Effects in Axial Turbomachinery Stages,” Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1998-02, February.
- [2] 이 은 석, 2005, “내재적 이중시간 전진기법과 DADI 기법을 이용한 비정상 Navier-Stokes 코드개발,” 한국항공우주학회지, 제33권 제9호, pp.34-40.
- [3] Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill, 1978
- [4] Binder, A., Forster, W., Kruse, H., and Rogge, H., 1984, “An Experimental Investigation into the Effect of Wakes on the Unsteady Turbine Rotor Flow,” ASME Paper, 84-GT-178