

설계점 및 탈설계점에서의 rotor-stator 상호작용에 의한 비정상 천이 경계층의 수치해석적 연구

강 동 진*, 전 현 주**

Unsteady Transitional Boundary Layer due to Rotor Stator Interaction at Design and Off Design Operations

Dong Jin Kang and Hyun Joo Jun

The unsteady transitional boundary layer due to rotor-stator interaction was studied at two operation points, the design and one off design points. The off design point leads to lower blade loading and lower Reynolds number. A Navier-Stokes code developed in the previous study was parallelized to expedite computations. A low Reynolds number turbulence model was used to close the momentum equations. All computations show good agreement with experimental data. The wake induced transitional strip on the suction side of the stator is clearly captured at design point operation. There is no noticeable change in shape and phase angle of the wake induced strip even in the laminar sublayer. The wake induced transitional strip at off design point shows more complex structure. The wake induced transitional strip is observed only in the turbulent layer, and becomes obscure in the laminar sublayer and buffer layer. This behavior is probably consequent upon that the transition is governed by both wake induced strip and natural transition mechanism by Tollmien-Schlichting wave.

Key Words : 비정상 천이 경계층(unsteady transitional boundary layer), 설계점(design point), 탈설계점(off design point), 후류 유기 천이 띠(wake induced transitional strip)

1. 서론

천이 경계층(transitional boundary layer flow)은 고전적인 문제이면서도 다양한 산업현장에서 부닥치게 되는 유동현상으로, 대표적인 예

가 터보기계의 핵심부품인 블레이드의 표면을 따른 천이 경계층 유동이다. 예를 들면 터빈 내의 유동은 레이놀즈 수로 $Re=10^5 \sim 10^6$ 범위에 들고, 터빈 블레이드를 따른 경계층은 약 $Re \approx 3.5 \times 10^5$ 에서 천이가 일어난다.⁽¹⁾ 따라서, 천이 경계층은 블레이드의 열전달 특성을 좌우하는 주요한 인자로 오래전부터 관련 연구가 활발하게 수행되어 오고 있으며, 현재에도 주요 연구

-
- 1) 정회원, 영남대학교 기계공학부
 - 2) 영남대학교 대학원

과제 중 하나로 다루어지고 있다.⁽²⁾

천이 경계층 유동에 대한 국내의 연구는 크게 천이 유동 구조, 천이 모델링, 천이 예측 등으로 나눌 수가 있겠다. 천이 유동 구조에 대한 가장 기본적인 연구는 평판 위 층류 경계층의 천이로 국내외 연구자들에 의해 많은 연구가 이루어진 바 있다. 평판 위의 층류 경계층 천이는 선형 안정성 이론(linear stability theory)을 연구하는 연구자들이 흔히 인용하는 유동 문제로 현재에도 널리 다루어지고 있다.⁽³⁾ 국내에서도 전 우평 등⁽⁴⁾은 평판 위의 천이 경계층을 따른 벽면 전단 응력(wall shear stress)을 계측한 바 있다. 천이 과정을 수치적으로 예측하기 위한 연구도 활발하여 기존의 난류모델을 수정⁽⁵⁾하거나 별도의 천이 모델을 제시하는 연구⁽⁶⁾도 활발히 수행되고 있다. 천이 유동 예측에 대한 조직적인 연구는 유럽에서 활발히 진행되어 왔다. 유럽에서는 ERCOFTAC(European Research Community of Flow Turbulence and Combustion)을 조직하여 천이 유동을 조직적이고도 체계적으로 연구를 수행하고 있다.⁽⁷⁾ 예를 들면, Savill⁽⁸⁾은 다양한 와점성 난류모델(eddy viscosity turbulence model)을 이용하여 천이 유동장을 연구한 바 있다. 이들의 연구에 따르면, Launder and Sharma 등⁽⁹⁾의 난류모델과 같이 국부 난류 레이놀즈 수(local turbulent Reynolds number), 예를 들면 $R_t = \frac{k^2}{\epsilon\nu}$, 를 매개 변수로 사용하는 난류모델이 벽면으로부터의 무차원 거리 y^+ 혹은 $R_y (= \frac{\sqrt{ky}}{\nu})$ 를 매개 변수 사용하는 난류모델에 비해 정상 천이 경계층 유동을 잘 예측한다. 그러나, 이 경우에도 ϵ 에 대한 상류 경계조건이나 자유 유동 경계 조건(free stream boundary condition)에 민감한 변화를 보이는 문제가 해결되지 않고 있다.

해외의 활발한 연구에 비해 국내연구는 미약한 실정이지만 연구문헌에 나타나 있는 연구를 살펴보면 다음과 같다. 강 신행 등⁽¹¹⁾은 NACA 0012 익형위에 전개된 천이 경계층의 벽면 전단 응력을 계측한 바 있다. 또한 수치적으로는 직접 수치 모사 방법(direct numerical simulation)을 이용한 양 경수⁽¹²⁾의 연구와 부분 포물형 N-S방

정식(partially parabolized Navier-Stokes equations)을 이용한 강 동진⁽¹³⁾의 연구를 예로 들 수 있다. 또 조 지룡 등⁽⁶⁾은 T-S파(Tollmien-Schlichting wave) 천이를 수반하는 난류 유동장을 해석할 수 있는 $k-\epsilon-\gamma$ 난류모델을 제시하기도 하였다. 현재까지의 많은 연구에도 불구하고 T-S파 천이와 같은 비교적 단순한 천이는 안정성 이론에 기초한 포물형 방정식(예를 들면 e^N 방법) 등을 이용하여 예측할 수 있지만, 그 외의 천이양식에 대한 예측능력은 미흡하여 여러 가지 형태의 실험 데이터에 의존하고 있다⁽³⁾. Abu-Ghannam & Shaw 실험식⁽¹⁴⁾이 대표적인 예이다.

그런데 이상에서 살펴본 연구들은 정상 흐름에 대한 연구이거나 T-S파 천이(Tollmien-Schlichting wave transition) 혹은 자연 부착 천이(naturally attached flow transition)로 불리는 천이 형태로 터보기계 블레이드에서의 천이와는 본질적으로 다른 천이 구조를 가지고 있다.⁽¹⁰⁾ 블레이드나 익형을 따른 층류 경계층의 천이 즉 층류 경계층이 박리(separation)되어 일어나는 박리 유동 천이(separated flow transition)나 T-S파의 발생이나 성장과정 없이 일어나는 통과 천이(bypass transition)에 대한 연구도 국내외에서 활발히 수행되고 있지만, 천이 예측 능력 등에서 아직도 초보적인 수준에 머물러 있다. 특히, 본 논문에서 관심을 두고 있는 동익과 정익의 상호작용(rotor stator interaction)에 의한 비정상 천이 경계층 유동(unsteady transitional boundary layer flow)은 1980년대 후반부터 외국에서 본격적으로 연구되기 시작하였으며, 국내 연구는 거의 전무한 상태이어서 동익과 정익의 상호작용에 의한 비정상 천이 특성에 대한 다양한 데이터 축적이 요구되고 있는 상황이다. 다만, 저자가 최근에 Halstead 등⁽⁷⁾이 계측한 다단 압축기에서의 동익과 정익의 상호작용에 의한 비정상 천이 경계층 유동의 특성을 수치적으로 연구한 바 있다.^{(15),(16)}

이러한 관점에서 본 논문에서는 선행연구에서 살펴본 동익과 정익의 상호작용에 의한 비정상 천이 경계층 유동장의 기본적인 특성이 탈설계점에서는 어떻게 변화하는지를 살펴보는데 그 목적을 두고 있다. 따라서, 연구에 사용된

Navier-Stokes 코드와 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 난류모델 등은 선행 연구에서와 동일하다. 다만, 엄청난 CPU 시간에 따른 벽계 시간(wall clock time)을 줄이기 위해 저자가 선행 연구에서 개발한 프로그램⁽¹⁷⁾을 병렬화하여 계산을 수행하였다. 병렬화 환경은 가장 널리 사용되고 있는 MPI(Message Passing Interface)⁽¹⁸⁾로 설정하였으며, 모든 수치해석은 시스템 공학 연구소의 CRAY T3E를 사용하여 수행하였다.

2. 지배 방정식

본 논문에서는 이차원 직교 좌표계에서의 비압축성 비정상 Navier-Stokes 방정식을 일반 비직교 표면 좌표계(generalized nonorthogonal body fitted coordinate system)로 좌표변환하여 얻은 다음과 같은 비압축성 비정상 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 이용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} J u_i + \frac{\partial}{\partial \xi} (J U u_i + J p \frac{\partial \xi}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J V u_i \\ + J p \frac{\partial \eta}{\partial x_i}) = \frac{\partial}{\partial \xi} (J \Gamma_g^{11} \frac{\partial u_i}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \xi} (J \Gamma_g^{12} \frac{\partial u_i}{\partial \eta}) \\ + \frac{\partial}{\partial \eta} (J \Gamma_g^{21} \frac{\partial u_i}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J \Gamma_g^{22} \frac{\partial u_i}{\partial \eta}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 하첨자 i 는 1 혹은 2로 각각 x -방향과 y -방향을 가리킨다. 또 Γ 는 유체의 동점성 계수(kinematic viscosity) ν 와 와점성 계수(eddy viscosity) ν_t 에 의해 $\Gamma = \nu + \nu_t$ 로 정의되며, (ξ, η) 는 일반 비직교 표면 좌표계의 축이며 나머지 좌표변환 함수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} J = x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta, \quad g^{ij} = (\xi_i)_x (\xi_j)_x + (\xi_i)_y (\xi_j)_y, \\ \xi_x = \frac{y_\eta}{J}, \quad \xi_y = -\frac{x_\eta}{J}, \quad \eta_x = -\frac{y_\xi}{J}, \quad \eta_y = \frac{x_\xi}{J} \end{aligned} \quad (2)$$

또 U 와 V 는 각각 $\frac{y_\eta u - x_\eta v}{J}$ 와

$\frac{-y_\xi u + x_\xi v}{J}$ 로 정의되는 반변 속도 성분(contravariant velocity component)이다.

연속 방정식은 다음의 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial J U}{\partial \xi} + \frac{\partial J V}{\partial \eta} = 0 \quad (3)$$

비정상 유동과 천이 경계층 유동에 탁월한 예측성을 보인다고 인정받고 있는 난류모델은 아직까지 없으며, 본 논문에서는 선행 연구에서와 마찬가지로 Fan - Lakshminarayana - Barnett⁽¹⁹⁾이 제안한 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 난류모델을 선택하였다. 이 난류모델은 비정상 난류 경계층 유동(unsteady turbulent boundary layer flows)예측을 위해 개발된 것으로, 비정상 천이 및 난류모델에 성공적으로 사용된 바 있다. 다음의 식(4)와 (5)는 Fan 등⁽¹⁹⁾이 제안한 난류 모델에서 사용하는 난류 운동에너지 방정식과 소산을 방정식이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] \\ + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \right] \\ + f_1 C_{e1} \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{e2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 u_j 는 $x_j(j=1,2)$ 방향의 평균유속을 k 는 운동에너지를 ϵ 은 소산율(dissipation rate)을 가리킨다. 난류 와점성(turbulent eddy viscosity)은 $\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 로 구하며, 기타 여러 가지 모델상수와 함수는 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{e1} = 1.4, \quad C_{e2} = 1.8, \quad \sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3, f_1 = 1.0$$

$$f_\mu = 0.4 \frac{f_w}{\sqrt{R_t}} + (1 - 0.4 \frac{f_w}{\sqrt{R_t}}) [1 - e^{-\frac{R_y}{42.63}}]^3$$

$$f_w = 1 - \exp\left[-\frac{\sqrt{R_y}}{2.3} + \left(\frac{\sqrt{R_y}}{2.3} - \frac{R_y}{8.89}\right)\right]$$

$$(1 - e^{-\frac{R_y}{20}})^3, f_2 = \left[1 - \frac{0.4}{1.8} e^{-\left(\frac{R_t}{6}\right)^2}\right] f_w^2 \quad (6)$$

위의 난류 모델 함수와 상수에서 짐작할 수 있는 바와 같이, Fan 등⁽¹⁹⁾의 난류모델은 벽면소산효과(wall damping effect)를 일반적으로 고려하기 위해 f_w 라는 새로운 함수를 도입하고 있다. 이 함수는 Speziale 등⁽²⁰⁾이 도입한 함수 $f_w = 1 - e^{-y^+/4.9}$ 를 매개변수 R_y 를 사용하여 다시 표현하였고, 같은 방법으로 f_μ 도 R_t 와 R_y 를 이용하여 표현하였다. 난류모델에 사용된 계수는 Patel의 실험 데이터⁽²¹⁾로부터 구하였다. 특히 본 모델은 비정상 경계층 유동에서 Chien 등⁽²²⁾과 같은 고전적인 모델에 비해 예측성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 보다 자세한 내용은 참고문헌 [17]에 잘 정리되어 있다.

그런데, 식 (4)-(6)에 서술한 난류모델은 선행 연구에서 자세히 다룬 바와 같이 블레이드 선단 부근에서 난류 운동 에너지를 과도하게 생성시켜 난류 경계층이 블레이드의 선단에서부터 형성되는 오류를 보인다. 따라서, 본 논문에서는 선행 연구에서와 동일한 방법으로 Launder 등⁽²³⁾의 수정방법에 따라 식 (4)와 (5)를 수정하여 계산을 수행하였다. Launder 등⁽²³⁾의 수정방법은 난류 운동 에너지 수송 방정식에서 생성항

$$\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

로, 평균 전단율(mean shear rate)

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}$$

을 일종의 와도변수

$$\text{(vorticity parameter)} \quad \Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}$$

$$\text{로 교체하여 } \mu_t \sqrt{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}$$

수정하는 방법이다. 이러한 수정 방정식이 설득력있는 것은 벽면 경계층 유동에서는 와도변수 Ω 와 평균 전단율 S 가 같은 크기의 값을 가지며, 정체점 유동에서는 난류생성이 거의 비정상 유동에 의해 이루어지기 때문에 와도변수 Ω 가 평균 전단율 S 보다 좋은 변수가 될 것이기 때문이다.⁽²²⁾ 저자⁽¹⁵⁾는 선행 연구에서 이와 같은 수정 저 레이놀즈수 난류모델이 후류 유기 천이 경계층 해석에 성공적으로 사용할 수 있음을 보인바 있다.

3. 병렬 프로그래밍 및 수치해석 방법

본 논문에서는 저자가 선행 연구⁽¹⁷⁾에서 개발한 Navier-Stokes 코드를 본 논문의 목적에 적합하게 수정하여 수치해석을 수행하였다. 따라서, 기본적인 수치해석 과정은 선행 연구 논문⁽¹⁷⁾에 자세히 정리되어 있으며, 여기서는 병렬화에 대한 내용을 중심으로 간략하게 정리하면 다음과 같다. Navier-Stokes 코드의 병렬화는 Ohio 주립대학교에서 개발한 MPI protocol⁽¹⁸⁾ 환경 하에서 수행하였다. 본 병렬 프로그램에서는 블레이드 통로 즉 계산영역을 다수의 하부 계산영역으로 영역분할(domain decomposition)하고 각 영역은 서로 다른 cpu가 계산을 수행하게 된다. 이 때 각 cpu는 수시로 계산영역의 경계에서 정보를 교환하게 된다. Fig. 1은 4개의 cpu로 계산영역을 분할한 예를 보여준다.

본 논문은 비정상 유동장을 다루고 있으며, 각 시간증분마다 동일한 계산과정을 수행한다. 임의의 시간증분에서 각 cpu에서 수행하는 계산과정과 cpu 간의 정보교환등 수치해석 과정을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

- 각 cpu 계산영역의 경계치를 정리한다.
- 각 cpu가 고유의 계산영역에서 다음의 과정 b)-

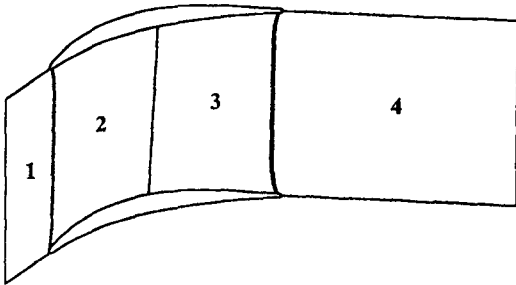


Fig. 1 Domain decomposition

e)를 수행한다.

b) 주어진 경계조건과 압력장에 따라 속도장을 수정한다.

c) 연속 방정식으로부터 얻은 압력 방정식을 풀어서 압력장을 수정한다.

d) 난류 와점성계수를 수정한다. (난류 운동 에너지 및 운동량 소산을 방정식을 해석한다)

e) 모든 cpu가 수렴조건을 만족하면 다음 시간 증분으로 이동하고, 그렇지 않을 경우에는 각 cpu는 영역분할에 따른 내부 경계면에서의 속도, 압력 등 모든 물리량을 교환하고 과정 a)로 되돌아간다.

4. 결과 및 토의

최근에 GE(General Electric Co.)연구소의 Halstead 등⁽¹⁰⁾은 그들의 저속 다단 압축기와 터빈 실험장치를 이용하여 비정상 천이 경계층 유동장을 자세히 계측한 바 있다. 그 중에서 다단 압축기 실험장치는 대형 저속 압축기의 중간 단이나 후단에서의 유동특성을 연구하기 위해 고안한 것으로, Fig. 2-(a)에 도시한 바와 같이 3단 압축기이며 주요 제원은 Table. 1과 같다. Fig. 2-(a)에 도시되어 있는 개략도에서 Plane 3.5는 3번째 단 동익의 후류 지점으로 Halstead등⁽¹⁰⁾은 열선으로 유속을 계측하였으며, 본 수치해석에서는 이 지점을 상류 경계면으로 사용하였다(정익의 16.5% 상류지점). 또한 정익의 표면에는 열필름(hot film)을 설치하여 정상 및 비정상 경계층 유동특성을 자세히 계측하였다. 따라서 본 논문에서는 3번째 단의 정익 주위를 계산영역으로 잡아 동익과 정익의 상호작용에 의한 비정상 천

이 경계층 유동을 수치해석하였다.

Halstead 등⁽¹⁰⁾이 계측한 설계점 및 여러 가지 탈설계점 작동조건 중에서 다음의 두 가지 작동조건에 대하여 계산을 수행하여 그 결과를 비교하여 보았다. 먼저, 설계점 작동조건(case 2b)에서는 동익이 840(rpm)으로 회전하고, 유량계수는 0.576이다. 이 때 정익에 대한 레이놀즈 수는 2.33×10^5 이다. 두 번째 작동조건(case 2d)은 동익이 236(rpm)으로 회전하는 경우에 해당하며, 정익에 대한 레이놀즈 수는 0.64×10^5 이다.

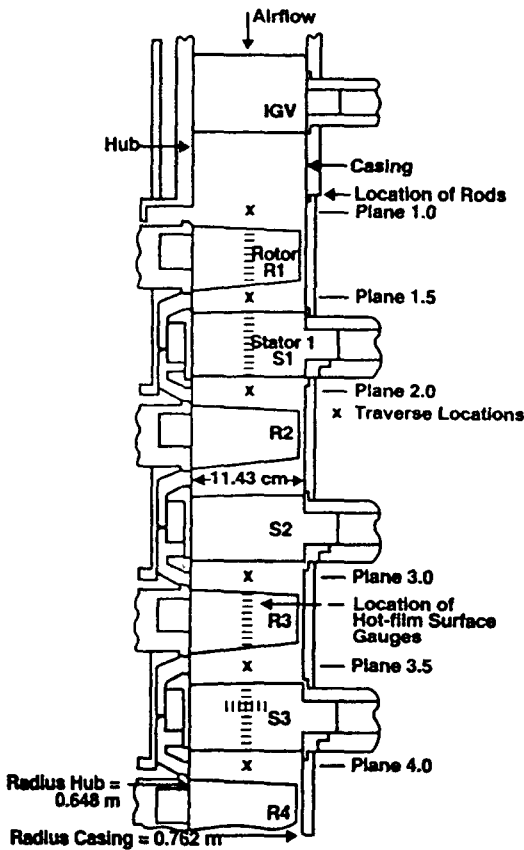
계산에 사용된 격자수는 252×202 이며 Fig. 2-(b)에 개략적인 분포를 도시하였다. 하류 경계면은 정익의 후단으로부터 현(chord)길이 만큼 하류에 두었다. 유동방향의 252개의 격자수 중에서 52는 블레이드의 상류 150개는 블레이드 표면 그리고 나머지 50개는 하류에 두었다. 또한 202개의 반 유동 방향 격자수 중에서 35개 정도는 경계층 내부에 놓이도록 벽면에 밀집하여, $y^+ < 1$ 영역에 2-5개의 격자점이 놓이게 된다. 경계조건으로는 상류 경계면에서는 실험치를, 하류에서는 유동방향의 변화가 없다고 가정하였다. 그리고 블레이드의 표면에서는 점착조건(no-slip condition)과 Neumann 조건을 속도와 압력조건으로 대입하였다. 또 자유 유동 경계면에서는 주기조건을 대입하였다. Case 2b인 경우 상류 경계조건으로 사용된 실험치 즉 속도 및 난류 강도 분포는 Fig. 2-(c)에 정리되어 있다. Case 2d 작동조건에 대한 실험치는 연구 문헌에 보고되어 있지 않아서, 두 작동조건의 유량계수가 동일함으로 동일한 분포 특성을 가진다고 가정하였다. 상류 경계에서의 난류 운동에너지 소산율은 $C_\mu k^{1.5} / (0.1s)$ 로 가정하였다. 여기서 s는 익렬의 피치를 가리킨다.

본 격자계와 프로그램에 대한 검증은 이미 선행 연구에서 자세히 수행한 바 있으므로 본 논문에서는 검증과정을 생략하였다. 시간증분의 크기는 선행 연구^{(15),(16)}에서와 동일하게 동익 회전 주기의 1/600로 설정하였다.

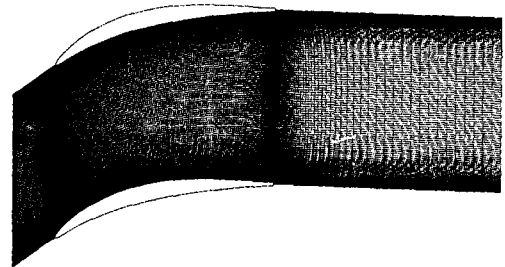
Fig. 3은 case 2b와 case 2d에서의 블레이드 부하 특성을 블레이드 표면을 따른 경계층 가장

	IGV	rotor	stator
solidity	1.0	1.11	1.32
aspect ratio	1.36	1.25	1.44
chord (mm)	83.8	91.2	79.1
stagger angle (deg)	19.6	46.9	13.9
chamber angle (deg)	3.0	22.0	44.4
no. of blades	53	54	74
axial gaps (mm)	98		25.4
rotational speed (rpm)	840		
flow coefficient	0.576		
Reynolds number		4.24×10^9	3.47×10^9

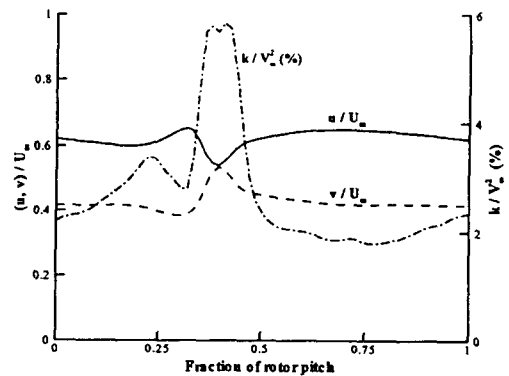
Table 1 Compressor blading parameters at midspan



(a) sketch of GE compressor



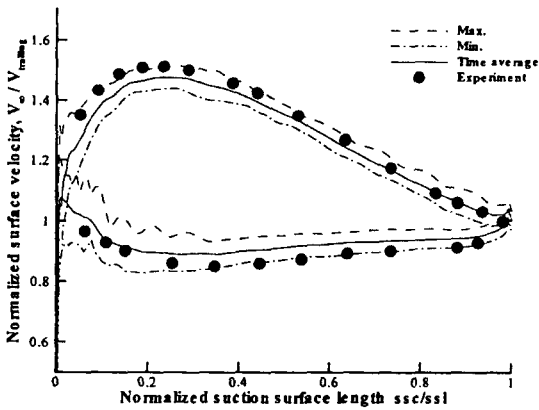
(b) grid



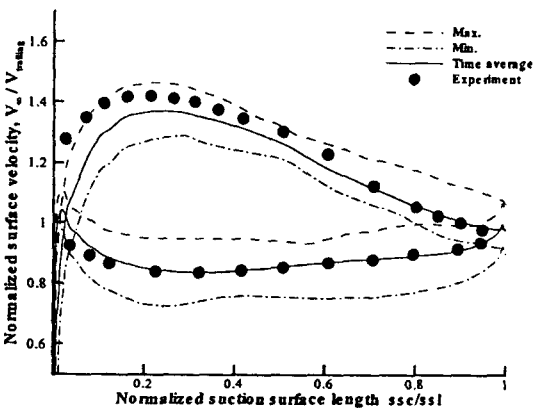
(c) inlet profiles

Fig. 2 GE compressor, grid generation and inlet profiles

자리에서의 유속비로 비교 도시하고 있다. 그림에서 하첨자 trailing은 블레이드 후단을 가리킨다. 그림을 살펴보면 알 수 있듯이, 설계점 작동 조건 case 2b에 비해 case 2d에서 블레이드에 걸리는 공기역학적 부하는 다소 작지만, 분포 특성은 대단히 유사함을 알 수 있다. 실험치와의 비교에서 본 수치해는 대체로 좋은 일치를 보이고 있다. 다만, 블레이드의 선단에서 다소 차이가 보이는데 이는 경계층 가장자리에서의 유속이라는 정의가 불분명하기 때문으로 판단된다. 본 수치해는 블레이드 표면의 압력으로부터 Bernoulli 방정식을 이용하여 경계층 가장자리 유속을 구하였는데, 본 유동이 비정상 흐름임



(a) case 2b



(b) case 2d

Fig. 3 Comparison of free stream velocities

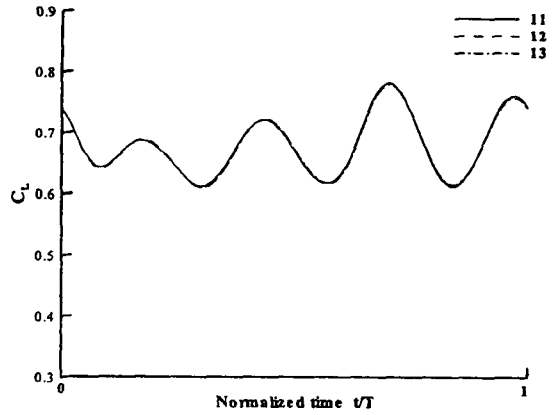
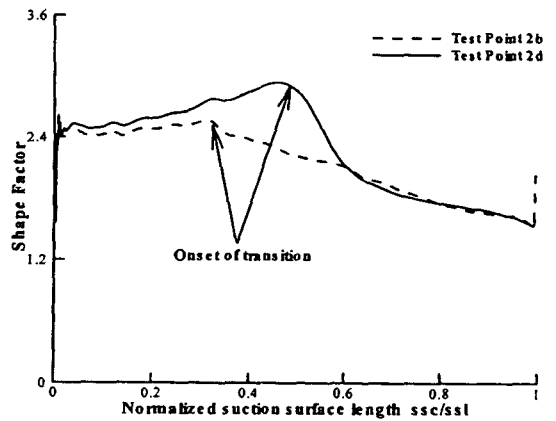
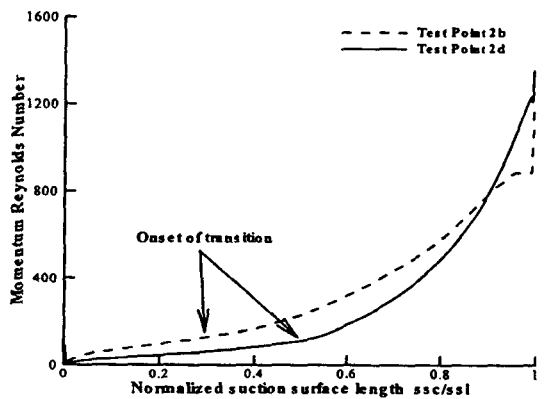


Fig. 4 Convergence of unsteady lift



(a) shape factor



(b) momentum Reynolds number

Fig. 5 Time averaged characteristics

로 Bernoulli상수가 일정하지 않고 모든 경계층 가장자리를 지나는 유선이 동일하지도 않아서 다소 오차를 포함하고 있다고 판단된다. 그림에서 점선과 일점쇄선은 비정상 유동장의 진폭을 도시한 것으로, case 2d의 경우 다소 큰 비정상성을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 case 2d의 경우에 얻은 비정상 양력 계수 분포로 11-13번째 주기 동안의 변화를 보여주고 있다. 그림을 살펴보면 알 수 있듯이 본 수치해는 완벽한 주기성을 보이고 있다.

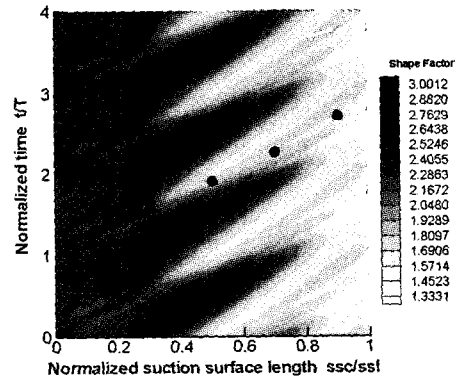
Fig. 5는 블레이드 흡입면을 따른 형상계수 (shape factor) 분포와 모멘텀 레이놀즈 수 (momentum Reynolds number) 분포의 시간 평균 특성을 비교 도시한 그림이다. 그림을 살펴보면, case 2b는 약 0.3부근에서 case 2d는 약 0.5 부근에서 천이가 일어남을 추정할 수 있다. 또 case 2d에서 모멘텀 레이놀즈 수가 훨씬 급격히 발전하고 있어 천이가 재빨리 일어남을 예측할 수 있다.

형상계수의 비정상 분포 특성을 보다 자세히 살펴보기 위해 Fig. 6에 4주기 동안의 비정상 형상계수 분포를 비교 도시하였다. 그림에서 난류 유동 형상계수 값을 가지는 띠를 살펴볼 수 있는데, 이는 후류 유기 천이 띠(wake induced transitional strip)로 불리운다. 또 후류 유기 천이 띠 사이에 강한 층류 유동영역(calmed laminar flow region)으로 불리운다. 그림을 살펴보면, 두 가지 작동조건 모두 위의 두 가지 유동 특성 모두를 잘 보이고 있지만, case 2d에서는 case 2b에 비해 정속 층류 유동 영역은 강하게 후류 유기 천이 띠를 짧게 예측하고 있다. 또 정속 층류 유동도 재빨리 난류로 천이함을 알 수 있다.

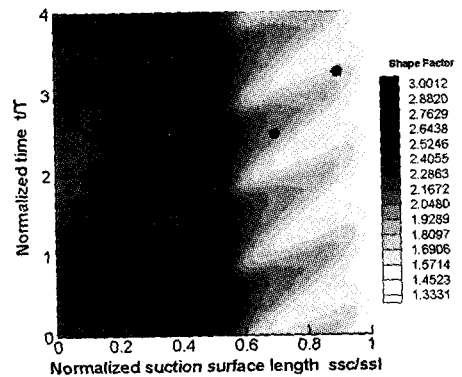
Fig. 7은 case 2b에서의 $y^+ = 1, 5, 10, 50, 100$ 등 5군데 위치에서의 난류 운동 에너지 분포를 도시한 그림이다. 그림을 살펴보면, 위치에 관계없이 동일한 형태의 파(wave)가 통과하고 있음을 확인할 수 있다. 다시 말하면 층류 저층에서도($y^+ = 1$) 후류 유기 천이 띠를 뚜렷이 관찰할 수 있다. 또한, 후류 유기 천이 띠의 궤적도 위치에 관계없이 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서, 경계층의 천이가 상류에서 유입되는 후

류에 의해 거의 완전히 지배됨을 짐작할 수 있다. 그림에서 두 개의 파가 존재하는 것은 블레이드 표면에 두 개의 후류가 동시에 통과하기 때문이다.

이와는 달리 case 2d에서는 Fig. 8에 도시한 바와 같이 크게 다른 천이 특성을 살펴볼 수 있다. 그림을 살펴보면, 층류 저층과 완충층(buffer layer)에서는 case 2b에서 관찰된 형태의 후류 유기 천이 띠를 관찰하기가 어렵다. 다만, 난류 영역에 접근함에 따라 ($y^+ \geq 100$) 후류 유기 띠의 궤적이 미미하지만 관찰되어 진다. 이러한 거동은 비정상 경계층의 천이가 case 2b와는 크게 다름을 반증하는 것이다. 이러한 사실을 보다 자세히 살펴보기 위해 블레이드 표면을 따라 4군데 위치에서의 난류 운동 에너지 분포를 Fig. 9와 10에 도시하였다. Fig. 9는 case 2b에서의 난

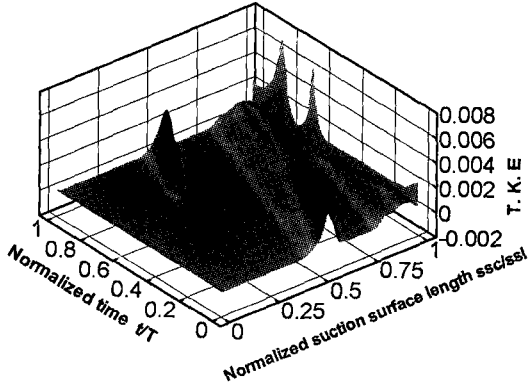


(a) case 2b

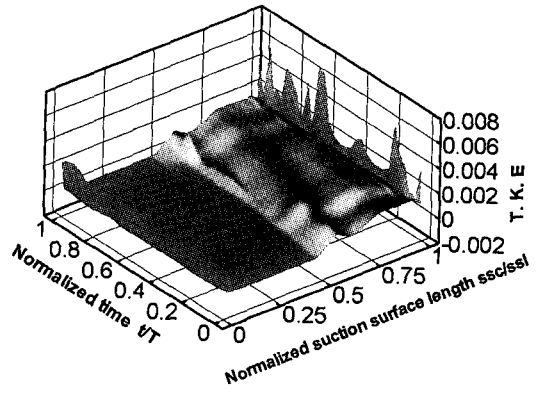


(b) case 2d

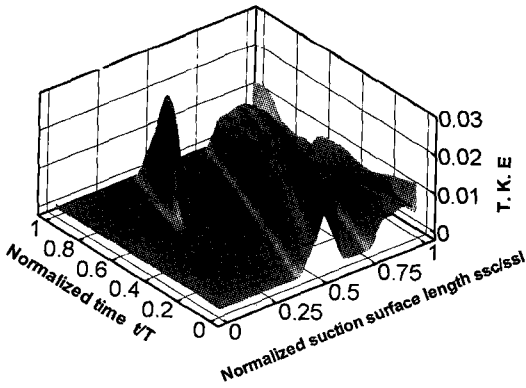
Fig. 6 Time history of shape factor



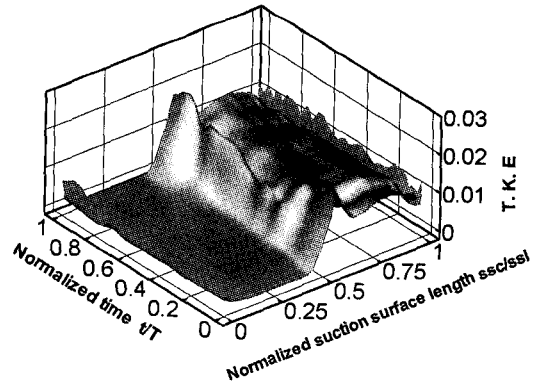
(a) at $y^*=1$



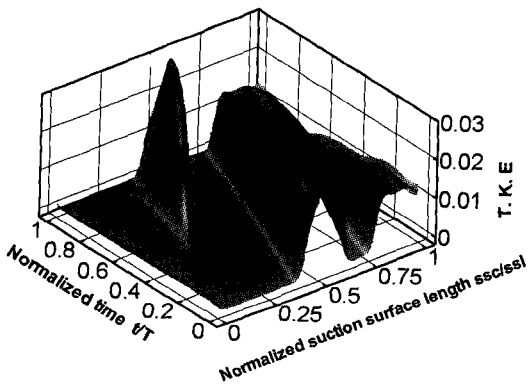
(a) at $y^*=1$



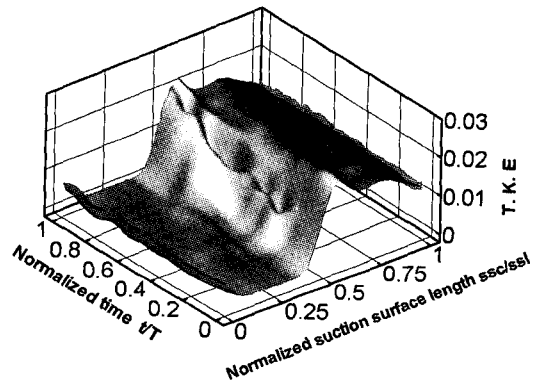
(b) at $y^*=5$



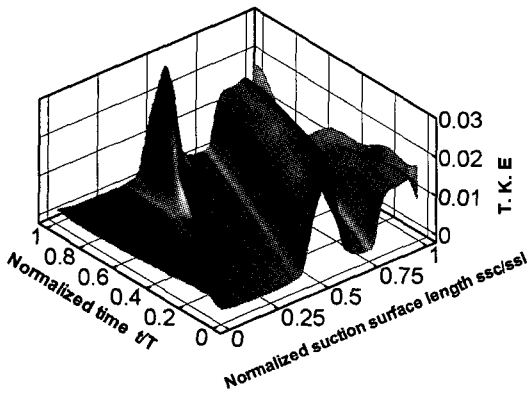
(b) at $y^*=5$



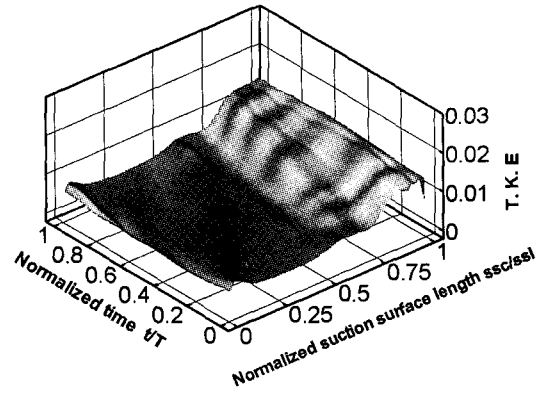
(c) at $y^*=10$



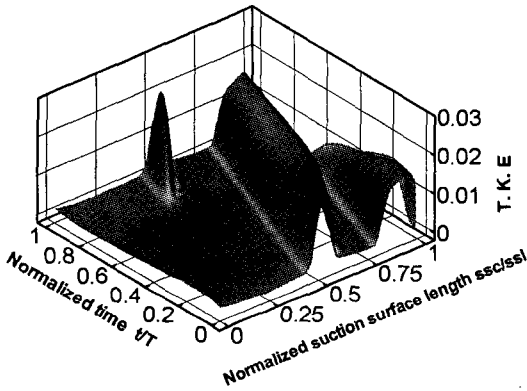
(c) at $y^*=10$



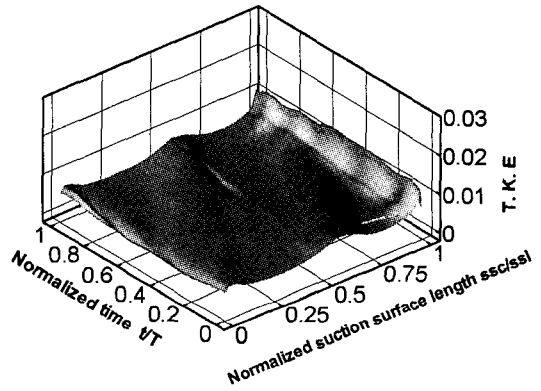
(d) at $y^+ = 50$



(d) at $y^+ = 50$



(e) at $y^+ = 100$



(e) at $y^+ = 100$

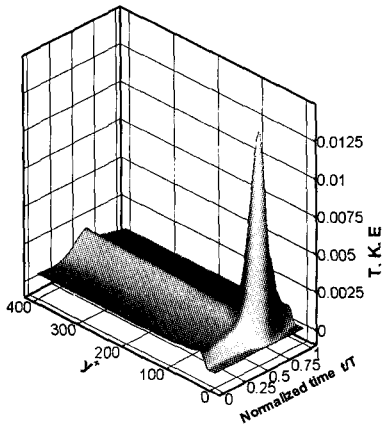
Fig. 7 Time history of turbulent kinetic energy for case 2b

Fig. 8 Time history of turbulent kinetic energy : case 2d

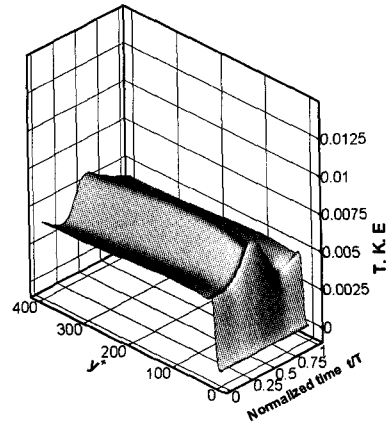
류 운동 에너지 분포를 도시한 그림으로, 후류가 통과하는 시간대에서 난류 운동 에너지가 뚜렷한 증가를 보이고 있다. 예를 들면 $ssc/ssl = 0.3$ 에서는 약 $0.6T$ 에서, $ssc/ssl = 0.5, 0.7$ 에서는 각각 $0.9T$ 와 $0.25T$ 에서 난류 운동 에너지가 뚜렷한 증가를 보인다. 이에 비해 case 2d에서는 $ssc/ssl \geq 0.5$ 부터 후류 유기 천이 특성이 거의 사라짐을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 case 2d에서의 천이 특성이 case 2b와는 크게 다른데, 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있겠다. 블레이드 표면을 따른 경계층의 천이는 두 가지 서로 다른 기구 (mechanism)에 의해 이루어질 수 있다. 하나는

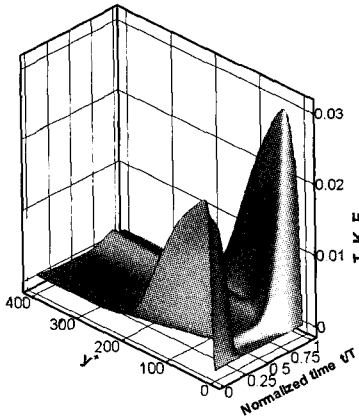
평판위 경계층 천이와 같은 T-S파 (Tollmien-Schlichting wave) 혹은 층류 박리에 의한 천이로 자연 천이 (natural transition)이다. 또 다른 하나는 후류와 같은 외부 요인에 의해 천이가 촉진되는 기구로 후류 유기 천이 때가 떠가 한 예이다. 설계점 작동조건인 case 2b에서는 동익으로부터 유입되는 후류에 의한 후류 유기 천이 때가 재빨리 형성되어 천이 특성을 결정하지만, 저부하 저 레이놀즈 수 경우인 case 2d에서는 후류에 의한 천이가 자연 천이점까지 지체되어 나타나는 경우이다. 이에 따라 최대 난류 운동 에너지 위치가 후류 띠와 완전히 일치하지 않고 다소의 위상차를 보이게 되고, 천이 특성도



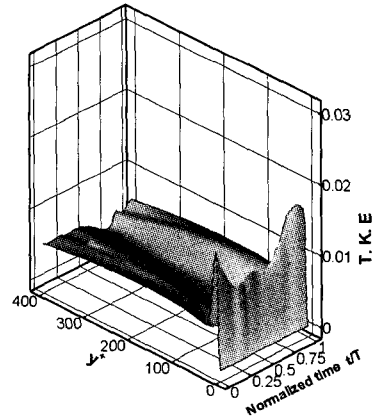
(a) at $ssc/ssl=0.3$



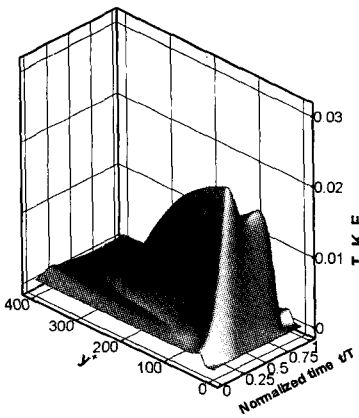
(a) at $ssc/ssl=0.3$



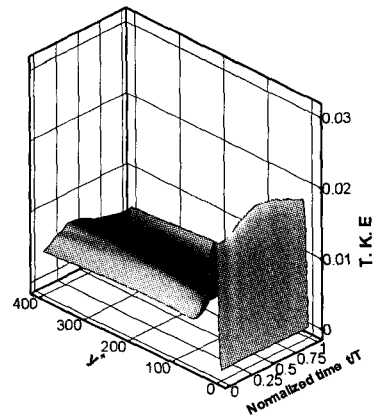
(b) at $ssc/ssl=0.5$



(b) at $ssc/ssl=0.5$



(c) at $ssc/ssl=0.7$



(c) at $ssc/ssl=0.7$

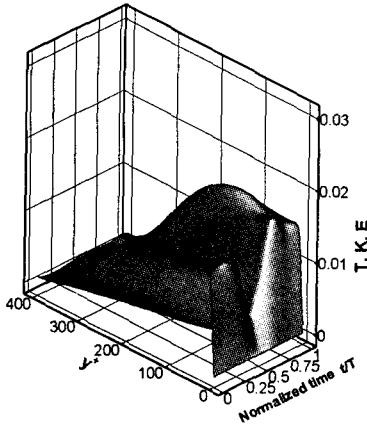
(d) at $ssc/ssl=0.9$

Fig. 9 Time history of turbulent kinetic energy at 4 chordwise locations : case 2b

후류 유기 천이 띠가 형성되는 경우 case 2b와는 달라지게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 동익과 정익의 상호작용에 의한 비정상 경계층의 천이 특성을 자세히 연구하기 위해 두 가지 작동조건에서 유동 특성을 수치적으로 살펴보았다. 본 연구에서는 수치해석을 효율적으로 수행하기 위해 Navier-Stokes 코드를 병렬화하였고, 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

설계점 작동조건에서는 상류 블레이드의 후류가 하류 블레이드 표면을 따른 경계층의 천이 특성을 결정하였고, 이 경우에는 층류 저층에서도 후류 유기 천이 띠를 확인할 수 있었다. 이에 비해 저부하 저 레이놀즈 수 경우인 case 2d에서는 후류에 의한 천이가 상당한 하류까지 지체되고, case 2b의 후류 유기 천이 특성과는 크게 구분되는 천이 특성을 보였다. 층류 저층과 완충층에서는 후류 유기 천이 띠 특성을 거의 찾을 수가 없었고, 난류 영역에 접근함에 따라 후류 유기 천이 띠의 특성이 보이기 시작하였다. 이러한 특성은 case 2d에서의 천이가 후류 유기 천

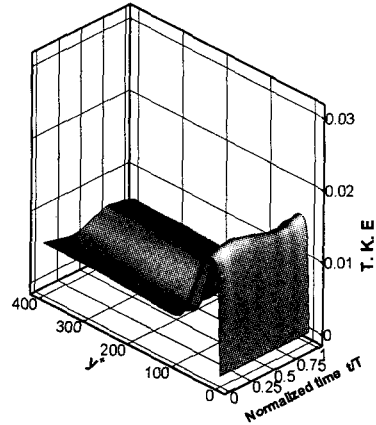
(d) at $ssc/ssl=0.9$

Fig. 10 Time history of turbulent kinetic energy at 4 chordwise locations : case 2d

이특성과 동시에 Tollmien-Schlichting wave에 의한 자연 천이 특성을 동시에 지니고 있기 때문으로 판단된다.

후 기

이 논문은 1997년 교육부 기계공학 연구 분야 지원과제 연구비 (과제번호 ME97-F-10)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Mayle, R. E., "The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines - 1991 IGTI Scholar Lecture," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 113, (1991), pp. 509-537.
- [2] Lakshminarayana, B., "An Assessment of Computational Fluid Dynamics Techniques in the Analysis and Design of Turbomachinery - The 1990 Freeman Scholar Lecture," ASME J. of Fluids Engineering, Vol. 113, (1991), pp.315-352.
- [3] Henningson, D. S. and Alfredsson, P. H., "Stability and Transition," Turbulence and Transition Modelling edit by Hallback, M., Henningson, D. S., Jahansson, A. V., and

- Alfredsson, P. H., (1995), pp. 13-80.
- [4] 전 우평, 강 신형, "CPM을 이용한 평판 위 천이 경계층에서 벽마찰응력의 예측," 대한기계학회 논문집, 제19권 제1호, (1995), pp. 240-250.
- [5] Schmidt, R. C. and Patankar, S. V., "Simulating Boundary Layer Transition with Low Reynolds Number $k-\epsilon$ Turbulence Models : Part I - An Evaluation of prediction Characteristics," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 113, (1991), pp. 10-17.
- [6] Cho, J. R. and Chung, M.K., "A $k-\epsilon-\gamma$ Equation Turbulence Model," JFM, Vol. 237, (1992), pp.301-322.
- [7] Savill, A.M., "Transition Modeling for Turbomachinery III," A Final Summary of ERCOFTAC Transition SIG Progress for the 3rd workshop. (1995).
- [8] Savill, A. M., "Project on Transition Prediction with Turbulence Models in Assessment of Turbulence Models for Engineering Applications," J.M. Burgers Center, Delft University of Technology, Netherlands. (1992).
- [9] Launder, B. E., and Sharma, B. I., "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spining Disc," Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, (1974), p.131.
- [10] Halstead, D.E., Wisler, D.C., Okiishi, T.H., Walker, G.J., Hodson, H.P., and Shin, H.W., "Boundary Layer Development in Axial Compressors and Turbines Part 1 : Composite picture, Part 2 :Compressors, Part 3: LP Turbine, Part 4: Computations and Analysis," ASME, IGTI, Paper No. 95-GT-(461-464). (1995).
- [11] 강 신형, 신 상철, 이 현구, "NACA0012 날개 위의 천이 경계층에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집, 제 20권 제5호. (1996), pp. 1689-1699.
- [12] 양 경수, "천이박리유동의 직접수치모사 part I : 주 불안정성, part II : 이차적 불안정성," 대한기계학회 논문집, 제20권 제9호, (1996), pp. 2965-2980.
- [13] 강 동진, "부분 포물형 Navier-Stokes 방정식을 이용한 천이박리기포의 수치적 해석," 박사학위논문, 한국과학기술원. (1991).
- [14] Abu-Ghannam, B. J., and Shaw, R., "Natural Transition of Boundary Layers-The Effects of Turbulence, Pressure Gradient and Flow History," J. Mech. Eng. Sci., Vol. 22, (1980), pp. 213-228.
- [15] Kang, D. J. and Lakshminarayana, B., "Numerical Prediction of Unsteady Transitional Boundary Layer caused by Rotor-Stator Interaction," J. of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 6, pp. 916-924..
- [16] 강 동진, Lakshminarayana, B., "정의과 동역의 상호작용에 의한 비정상 천이 경계층 유동의 수치해석적 연구," 대한기계학회 논문집, 제 22권 제6호, (1998), pp. 771-787.
- [17] 강 동진, 배 상수, "일반 비직교 표면 좌표계에서의 비압축성 Navier-Stokes 방정식의 수치해석," 대한기계학회논문집 제 20권 제 3호, (1996), pp. 1015-1027.
- [18] Ohio Supercomputer Center, "MPI Primer/Developing with LAM," 1995.
- [19] Fan, S. and Lakshminarayana, B., and Barnett, M., "A Low Reynolds Number $k-\epsilon$ model for Unsteady Turbulent Boundary Layer Flows," AIAA Journal, Vol. 31, No. 10, (1993), pp. 1777-1784.
- [20] Speziale, C. G., and Anderson, E. C., "A Critical Evaluation of Two-Equation Models for Near Wall Turbulence," AIAA J., Vol. 30, No. 2, pp. (1992), 324-331.
- [21] Patel, C. V., Rodi, W., and Scheurer, G., "Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows : A Review," AIAA J., Vol. 23, No.9, (1985), pp. 1308-1319.
- [22] Chien, K. Y., "Prediction of Channel and Boundary Layer Flows with a Low Reynolds Number Turbulence Model," AIAA J., Vol. 20, (1982), pp. 33-38.
- [23] Launder, R.E., "Modelling Convective Heat Transfer in Complex Turbulent Flows,"

Engineering Turbulence Modelling and
Experiments II, (1993), pp. 3-22.