

# 스테이터-로터 상호간섭 효과를 고려한 3차원 터빈 블레이드의 유체/구조 연계해석

## Fluid/Structure Coupled Analysis of 3D Turbine Blade Considering Stator-Rotor Interaction

김유성\* · 김동현† · 김요한\* · 박웅\*\*

Yu-Sung Kim, Dong-Hyun Kim, Yo-Han Kim and Oung Park

Key Words : Fluid/Structure coupled analysis (유체/구조 통합해석), CFD (전산유체역학), CSD (전산구조동역학)

### ABSTRACT

In this study, fluid/structure coupled analyses have been conducted for 3-D stator and rotor configuration. Advanced computational analysis system based on computational fluid dynamics (CFD) and computational structural dynamics (CSD) has been developed in order to investigate fluid/structure responses of general stator-rotor configurations. To solve the fluid/structure coupled problems, fluid domains are modeled using the structural grid system with dynamic moving and local deforming techniques. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with Spalart-Allmaras (S-A) and SST  $k-\omega$  turbulence models are solved for unsteady flow problems. A fully implicit time marching scheme based on the Newmark direct integration method is used for computing the coupled aeroelastic governing equations of the 3-D turbine blades for fluid-structure interaction (FSI) problems. Detailed fluid/structure analysis responses for stator-rotor interaction flow conditions are presented to show the physical performance and flow characteristics.

### 1. 서론

일반적인 터빈의 목적은 보일러에서 공급되는 고온, 고압의 증기를 저압으로 팽창시킬 때 발생하는 증기의 운동에너지를 기계적인 일로 변형시켜 터빈 로터를 구동하는데 있다. 터빈은 여러 개의 스테이터(stator or nozzle)과 로터(rotor or bucket)이 1단을 이루는 다단식으로 구성되어 있다. 크게 고압, 중압, 저압단으로 나누어지는 각 단에서의 압력, 증기의 부피 및 유동속도는 상이하다. 대기압 이하의 저압의 증기가 통과하는 저압단에서는 증기의 부피량이 크고, 터빈 블레이드(blade)의 길이 또한 상대적으로 다른 단의 블레이드보다 길기 때문에 고유진동수가 낮고, 충격과 및 유동박리 현상 등으로 인하여 블레이드 구조변형이 크게 발생하여 터빈 효율이 설계단계와 상당히 달라질 수 있다. 스팀터빈 발전기의 운용도중 발생하는 구조변형은 스팀터빈 발전기의 설계변경 및 경제적인 손실, 신뢰성 하락 등의 문제를 야기시

킬 수 있다. 터빈 내부의 유동특성 파악 및 터빈 성능 예측을 위해 실험에 의존할 경우 블레이드의 가공, 복잡한 실험 장치의 구성 등으로 많은 경비와 시간이 소요되므로 고성능 수치해석 기술을 활용한 유동 해석 및 가상 정적 공탄성 해석(flow-induced vibration analysis) 시스템이 필요하다.

터빈 블레이드의 정적 공탄성 해석을 위해서는 시간영역에서의 유체와 구조간의 연계 기법이 가장 정확한 방법이다. 이 방법은 전산유체역학 (computational fluid dynamics, CFD)기법과 전산구조동역학(computational structural dynamics, CSD)을 도입하여 유체와 구조간의 상호작용 효과를 고려하여 해석을 수행하게 된다. 또한 유동의 점성효과를 고려한 가장 상위 단계의 유체역학적 모델인 Navier-Stokes 방정식은 실제 유동의 거동을 거의 정확히 반영할 수 있고, 최근 고속 네트워크 기반의 분산메모리 (shared memory) 개념 병렬컴퓨터의 활용으로 인하여 Navier-Stokes 방정식을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1-14)</sup>

본 연구에서는 해석기법상 정확한 결과를 제시할 수 있는 Navier-Stokes 방정식을 이용한 전산유체역학 기법과 전산구조동역학 기법을 활용하여 3차원 정적 공탄성 해석을 수행하였다. 본 해석시스템은 유동의 압축성 효과 및 점성효과를 고려할 수 있으며, 구조의 탄성 진동해석 프로그램과의 상호

† 교신저자; 경상대학교 기계항공공학부  
E-mail : dhk@gnu.ac.kr  
Tel : (055) 755-6125, Fax : (055) 755-2081

\* 경상대학교

\*\* 두산중공업

작용 효과까지 동시에 고려하여 연계해석을 수행하는 고 난이도 기술을 포함하고 있다. 특히, 블레이드 구조의 매단계에 따른 변형 정도가 반영되면서 스테이터와 로터의 상호 간섭을 고려한 비정상 유동해석이 수행되어야 하기 때문에 동적 격자계(dynamic grid system)를 포함한 유동해석 프로그램의 수치 강건성과 유체-구조 연계해석 알고리즘의 정확성 등이 해석시스템 개발에 가장 중요한 요소로 작용하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 일반화 공탄성 방정식

물리영역에서 구조 비선형성 및 감쇠를 고려한 탄성체의 운동방정식은 다음과 같이 전형적인 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t, u, \dot{u})\} \quad (1)$$

여기서, [M]은 질량행렬, [C]는 감쇠행렬, [K(u)]는 일반화된 좌표계에서의 구조변위 {u}의 함수인 비선형 강성행렬이며, {F}는 외력 벡터로 유동박리 등이 연계된 고받음과 유동의 경우나 충격과와 연계된 천음속 흐름의 경우 일반적으로 비선형 외력 항이 된다. 공탄성 해석에서의 구조적 비선형성의 예는 조종면 연결부의 유격(freeplay)이나 히스테리시스(hysteresis) 등과 같이 특정부위에 집중된 비선형성과 헬리콥터 회전익의 대변형 효과에 의한 기하학적 비선형 문제가 있다. 구조적 비선형성을 무시할 수 있는 경우는 전형적인 모드 접근법(modal approach)을 사용하여 자유도를 획기적으로 줄여 효율적인 계산을 수행할 수 있다. Hamilton의 정리를 이용하여 구조비선형성을 무시한 선형 탄성체에 대한 운동방정식을 유도하면 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t, u, \dot{u})\} \quad (2)$$

위 식에서 총 n-자유도의 변위계  $u_i(t)$  ( $i=1,2,\dots,n$ )에 대하여, 고유모드 벡터들로 이루어진 상수 변환행렬(transformation matrix)을  $[\phi]$ 로 정의하면, 일반화된 좌표계(generalized coordinate)  $q_i(t)$  ( $i=1,2,\dots,m$ )에 대하여 다음과 같은 선형변환을 정의할 수 있다.

$$\{u(t)\} = [\phi]\{q(t)\} \quad (3)$$

본 연구에서는 유체유발 진동해석을 위한 비정상 공력해석에 일반적인 3차원 CFD 해석기법을 적용하였다. 따라서 흐름에 수직인 변위뿐만 아니라 흐름방향과 횡방향의 모든 고유모드 형상들이 해석에 적용되게 된다. 또한 고유모드 벡터로 이루어진 변환행렬  $[\phi]$ 는 상수이므로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\{\dot{u}(t)\} = [\phi]\{\dot{q}(t)\} \quad \{\ddot{u}(t)\} = [\phi]\{\ddot{q}(t)\} \quad (4)$$

따라서, m-자유도계로 감축된 시스템의 운동방정식은 일반화된 좌표계(generalized coordinate)에 대하여 다음과 같이 행렬형태로 표현될 수 있다.

$$[M_g]\{\ddot{q}(t)\} + [C_g]\{\dot{q}(t)\} + [K_g]\{q(t)\} = \{Q(t, q, \dot{q})\} \quad (5)$$

여기서,  $\{q(t)\}$ 는 일반화된 변위벡터(generalized displacement vector), t는 물리영역에서의 실제 시간을 의미하며, 연계해석에 적용된 비정상 CFD코드에서의 무차원화 시간과는 근본적으로 차이가 있음에 유의해야 한다.  $[M_g]$ 는 일반화된 질량행렬,  $[C_g]$ 는 일반화된 감쇠행렬,  $[K_g]$ 는 일반화된 강성행렬을 의미하며,  $\{Q(t)\}$ 는 시간영역에서의 일반화된 공기력(generalized aerodynamic force, GAF) 벡터를 나타내며 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\{q(t)\}^T = [q(t)_1, q(t)_2, q(t)_3, \dots, q(t)_m]$$

$$[M_g] = [\phi]^T [M] [\phi]$$

$$[C_g] = [\phi]^T [C] [\phi]$$

$$[K_g] = [\phi]^T [K] [\phi]$$

$$\{Q(t)\} = [\phi]^T \{F(t)\}$$

### 2.2 비정상 점성 유동해석

비정상 압축성 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 유동해석 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \tilde{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\tau_{ij} + R_{ij}] \quad (7)$$

여기서, 전단응력 텐서, 변형 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu \left[ S_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

또한

$$\tilde{u} = u_j - u_{g,j}$$

여기서,  $u_{g,j}$ 는 격자속도를 의미한다.

또한 레이놀즈 응력 텐서  $R_{ij}$ 는 Boussinesq 가설에 따라 다음과 같이 가정된다.

$$R_{ij} \cong \mu \left[ S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} (\rho k) \delta_{ij} \quad (8)$$

식(6)~(8)은 제어체적(control volume)을 근간으로 하는 상용 전산유체해석 코드인 Fluent Ver. 6.2를 이용하여 계산된다. 본 연구에서는 Navier-Stokes (N/S) 해석을 위해 1차방정식 난류모델인 Spalart-Allmaras (S-A)와 2차방정식 난류모델인 SST  $k-\omega$  모델이 적용되었고, RANS 방정식의 이산화를 위해서 2차 풍상기법(2nd upwind scheme)을 적용하였다.

### 3. 해석결과 및 검토

#### 3.1 3차원 Stator-Rotor 유동해석

Fig.1은 3차원 N/S 유동해석에 사용된 격자계를 보여주고 있다. 3차원 형상에서는 Y+가 100인 경우와 10인 경우에 대해 각각 비정상 공력해석을 수행하였다. Y+가 100인 경우는 총 볼륨 격자수가 765,905개, Y+가 10인 경우에는 총 볼륨 격자수가 1,121,297개이다. Fig.1(b)(c)는 Y+가 10인 경우의 스테이터와 로터의 앞전과 뒷전에서 경계층 영역의 격자를 보여주고 있다.

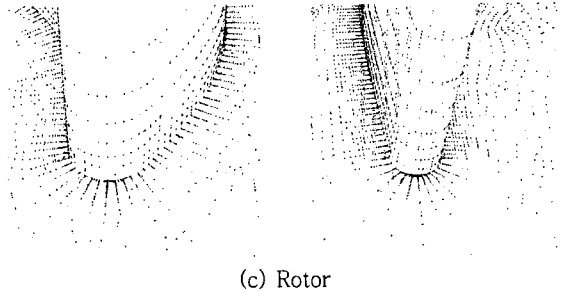
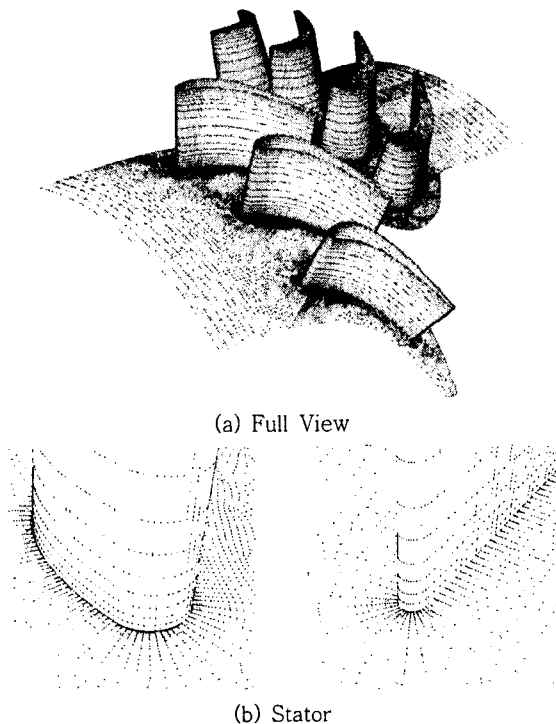


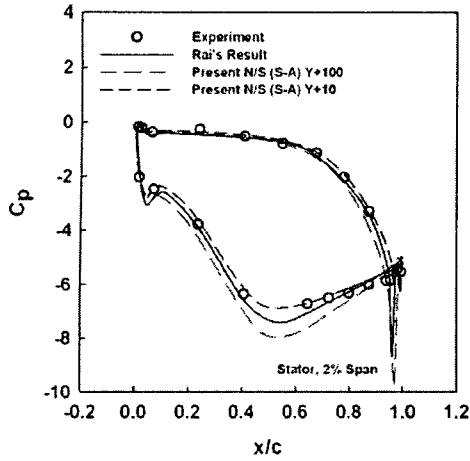
Fig.1 Computational N/S grid for 3-D LSRR-I stator-rotor.

Fig.2는 Spalart-Allmaras 난류모델이 적용된 N/S 해석을 통해 계산된 2%, 50% 및 98% 스펠 위치에서 스테이터의 시간평균 압력계수 분포를 실험결과 및 Rai<sup>(15)</sup>에 의해 계산된 결과와 비교한 것이다. 이때의 시간평균 압력계수의 정의는 식(9)와 동일하다. Y+가 100인 경우에는 실험결과 및 선행 연구결과와 많은 차이를 보이지만, Y+가 10인 경우에는 실험결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이로부터 스테이터와 로터의 상호간섭효과가 있고 로터가 스테이터에 대해 상대운동을 하는 경우에는 Y+의 값이 해석의 정확도에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

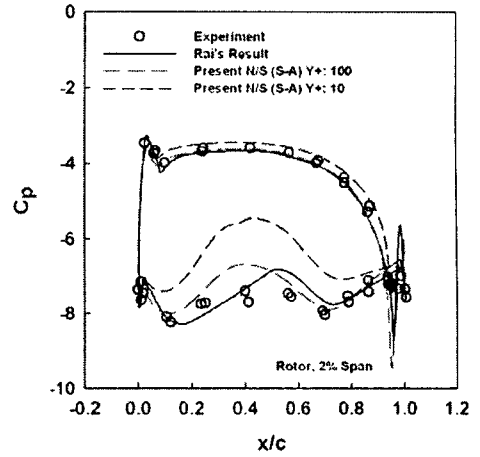
$$\eta_t = \frac{1 - T_{t3}/T_{t1}}{1 - (P_{t3}/P_{t1})^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad (9)$$

Fig.3은 Spalart-Allmaras 난류모델이 적용된 N/S 해석을 통해 계산된 2%, 50% 및 98% 스펠 위치에서 로터의 시간평균 압력계수 분포를 실험결과 및 선행 연구결과와 비교한 것이다. Y+가 10인 경우, 50% 및 98% 스펠 위치에서는 본 연구 결과와 실험결과가 매우 잘 일치하지만, 로터 허브(hub)에 인접한, 2% 스펠 위치에서는 실험결과 및 선행연구결과와 차이를 보임을 확인할 수 있다. 이는 스펠방향으로의 격자개수와 블레이드의 허브부분에서 격자의 밀집도 및 정확하지 않은 3차원 로터 블레이드 형상 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용된 3차원 스테이터와 로터 형상은 2차원 형상의 좌표점을 토대로 생성되었다. Intel(R) Pentium(R) 3.2GHz, 2GB RAM사양의 컴퓨터 5대를 사용하여 병렬처리하여 계산한 경우 Y+가 100인 경우는 시간스텝당 약 196초가 소요되었고, Y+가 10인 경우는 시간 스텝당 약 226초가 소요되었다.

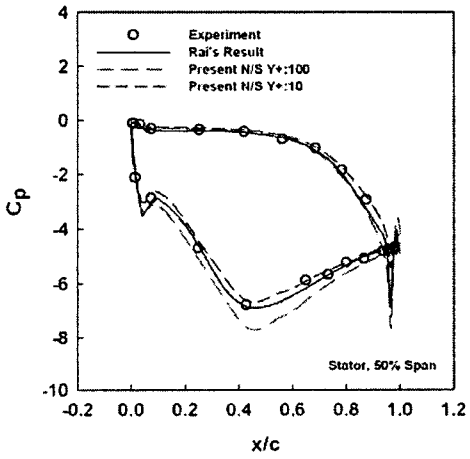




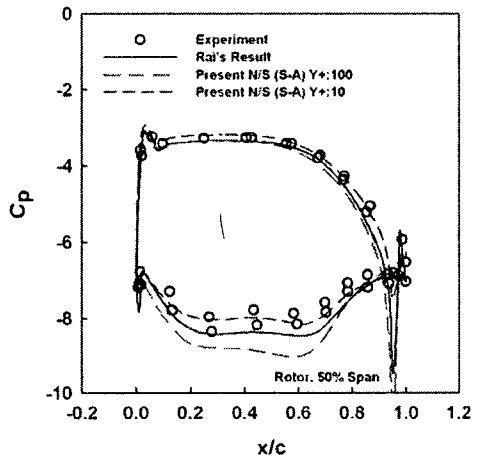
(a) 2% Span



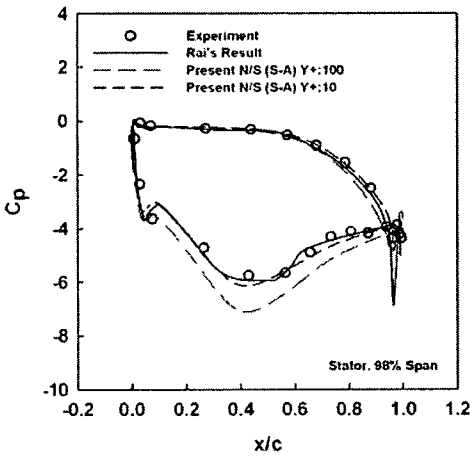
(a) 2% Span



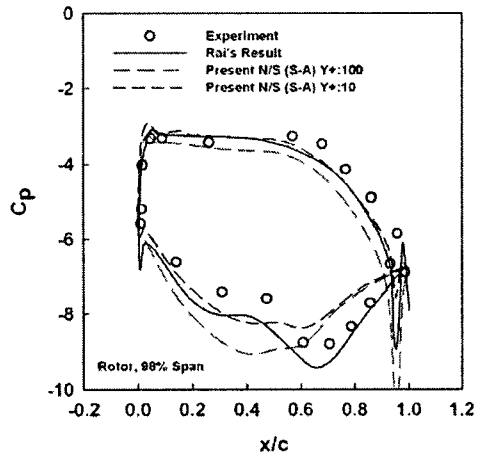
(b) 50% Span



(b) 50% Span



(c) 98% Span



(c) 98% Span

Fig.2 Comparison of time-averaged pressure distributions for LSRR-I stator.

Fig.3 Comparison of time-averaged pressure distributions for LSRR-I rotor.

### 3.2 3차원 Stator-Rotor 정적 유체/구조 연계해석

본 연구에서 적용한 모델은 터빈 시스템에서 상대적으로 블레이드 길이가 긴 축류식 단일단 블레이드 모델이다. Fig.4와 같은 모델을 이용하여 터빈 시스템에서 저압단에 위치하는 3차원 블레이드 형상에 대하여 유동해석을 수행하였다. 스테이터와 로터의 기하학적 형상 및 유동조건은 블레이드 길이가 약 0.9 m에 달하며, 3,600 RPM으로 로터가 회전한다. 비정상 유동해석 조건에 대한 스테이터 입구에서의 마하수는 0.254, 전압(total pressure)은 29,123.5 Pa, 정압(gauge pressure)은 28,061.7 Pa이다. 출구에서의 정압은 6,674.1 Pa이고 전온도(total temperature)는 314.4 K로 설정하였다. 3차원 터빈 블레이드 모델의 정상 유동해석을 수행하기 위하여 CFL 수는 2로 설정하였다. Fig.5(a)와 (b)는 N/S 유동해석을 수행하기 위한 격자계이다. 스테이터 표면에서의 격자수는 4,736개, 로터 표면에서의 격자수는 2,728개이고, 총 셀 수는 136,524개 이다.

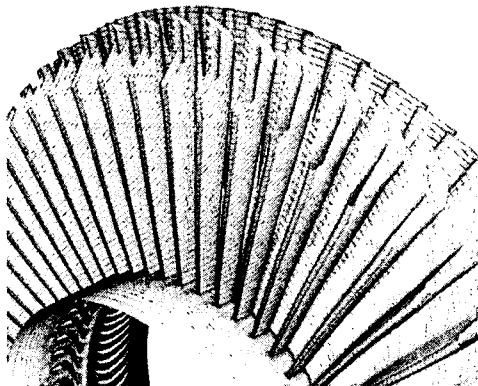
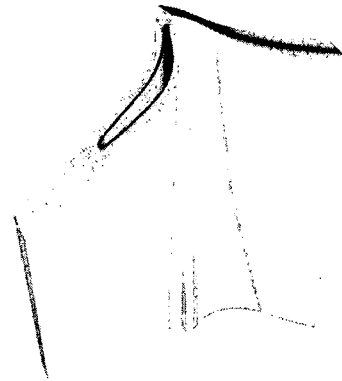


Fig.4 Configuration of LP (Low Pressure) stage turbine model.

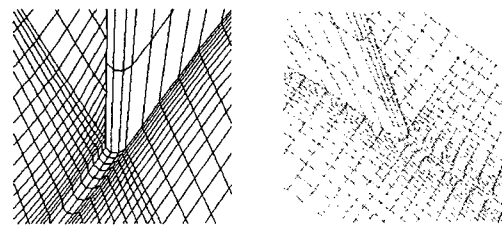
강체로 가정하여 변형효과가 고려되지 않은 로터 형상과 유체와 구조간의 상호작용으로 발생하는 로터의 변형효과를 고려한 형상에 대하여 유체/구조 연계해석을 수행하였다. Fig.6은 초기 강체 블레이드 로터 형상과 유체/구조 연계해석을 통해 구한 구조 변형된 로터의 형상에 대하여 나타내었다. 로터 hub와 shroud 부분이 구속되어 있어 변형이 발생하지 않는 반면, 상대적으로 블레이드의 두께가 얇은 부분에서 구조변위가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 3차원 터빈 블레이드가 내부에 흐르는 유동효과에 의하여 굽힘 및 비틀림 변형이 동시에 복합적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 블레이드의 변형형상은 3차원 내부 유동특성에도 영향을 미치게 된다.



(a) Stator-Rotor



(b) Stator



(c) Rotor

Fig.5 Computational N/S grid for stator-rotor model.

Fig.7은 강체로 가정한 터빈 로터의 모델과 유체/구조 연계해석을 통한 로터의 변형형상 모델의 span별 마하수를 나타내었다. 변형이 적은 hub와 shroud 부분에서는 마하수의 변화가 거의 없지만, 변형이 크게 발생하는 허브로부터 약 70%의 위치에서는 마하수가 눈에 띄게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. Fig.8은 강체 형상과 유체/구조 변형형상 모델의 relative mach number contour를 나타내었다. 유체/구조 연계해석을 통한 구조변형이 발생함에 따라 충격파의 위치 및 세기가 변한 것을 확인할 수 있다. 참고로 본 연구에서와 같이 동적효과를 무시하고 정적 변형효과만을 고려하여 해석을 수행하는 경우에는 인공적으로 감쇠비를 매우 크게 설정하여 계산을 수행할 수 있다. 이 경우는 일반적으로 감쇠비를 0.95로 설정하여 계산을 수행하면 된다.

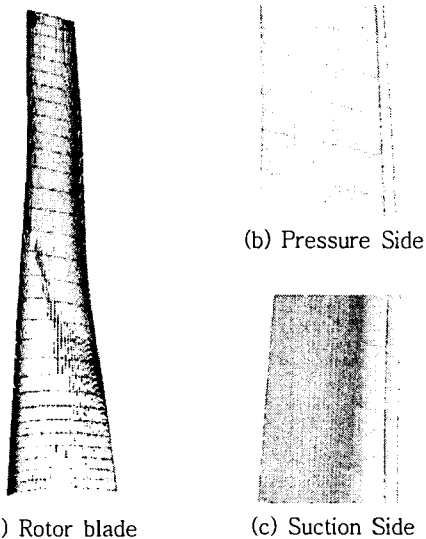
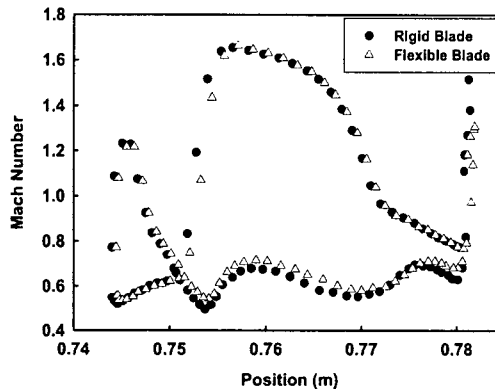
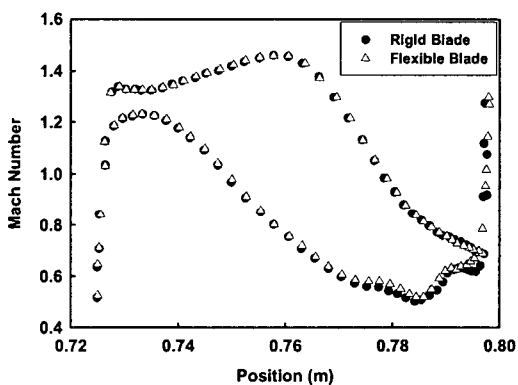


Fig.6 Comparison of structural deformation (rigid and flexible blade).

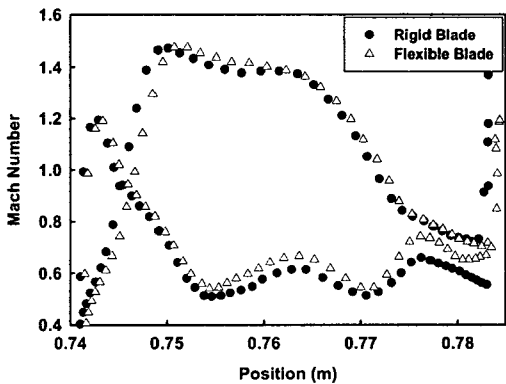


(b) 90% span from hub

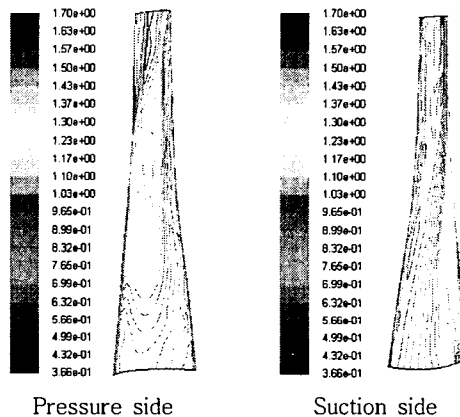
Fig.7 Comparison of Mach number on rotor blade (rigid and flexible blade).



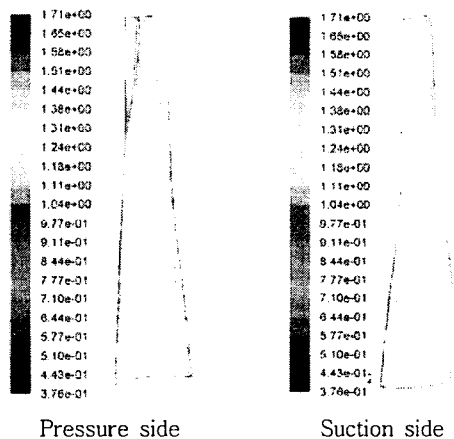
(a) 50% span from hub



(b) 75% span from hub



(a) Rigid blade



(b) Flexible blade

Fig.8 Comparison of relative Mach number contour on rotor blade (rigid and flexible blade).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자체 구축한 3차원 유체/구조 연계해석 시스템을 활용하여 터빈 시스템에서 고정되어 있는 스테이터와 이에 대해 상대운동하는 로터의 상호간섭 및 유동의 점성효과를 고려한 유체/구조 연계해석 시스템을 성공적으로 구축하였다. 개발 및 구축된 해석 시스템을 활용하여 3차원 블레이드 형상에 대한 정상 및 비정상 유동해석 기법과 유체/구조 연계해석 시스템을 검증하였다. 또한, 케스케이드 형상에 대한 정적 공탄성 해석을 수행하였으며, 결과를 비교하고 특성을 고찰하였다. 구축된 3차원 유체/구조 연계해석 기법은 전산유체 해석을 통해 케스케이드 내부 유동장을 가상으로 모니터링 할 수 있으며, 유체/구조 연계해석 단계별로 변화하는 내부의 유동 특성을 회전익의 진동특성을 반영하여 가시화할 수 있었다.

3차원 터빈 블레이드 모델에 대하여 스테이터와 회전 로터의 상호간섭, 압축성 및 유동점성효과를 고려하여 정적 공탄성 해석을 수행하였다. 정적 공탄성 해석을 통한 구조변형 발생으로 블레이드의 충격과 위치 및 강도가 변하는 것을 확인하였고, 구조변형이 크게 발생하는 곳에서 마하수의 변화폭도 크게 나타날 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통하여 개발된 해석 시스템을 활용하면 일반적인 강체 블레이드에 대한 유동해석에 비해 실제 터보기계의 운용조건에 보다 근사한 해석이 가능한 장점이 있다. 향후 이러한 해석적 기법은 중대형의 고효율 블레이드 설계 시 보다 정확한 성능해석 및 데이터 확보를 가능하게 해 줄 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 두산중공업(株)의 연구과제 및 국립경상대학교 기계항공공학부 2단계 BK21 사업의 일환으로 수행되었다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Chen, X., Zha, G. C., and Hu, Z., 2004, "Numerical Simulation of Flow Induced Vibration Based on Fully Coupled Fluid-Structural Interactions," AIAA-2004-2240.
- (2) Bohbot, J., Darracq, D., 2001, "Time Domain Analysis of Two D.O.F. Airfoil Flutter Using an Euler/Turbulent Navier-Stokes Implicit Solver," International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Madrid, Spain, June 5-7.
- (3) Kirshman, D. J., and Liu, F., 2006, "Flutter Prediction by an Euler Method on Non-Moving Cartesian Grids with Gridless Boundary Condition," Computer &

Fluids, 35, pp. 571-586.

- (4) Gnesin, V., Rzadkowski, R., Kolodyazhnaya, L., "A Coupled Fluid-Structure Analysis for 3D Flutter in Turbomachines," Proceedings of ASME TurboExpo 2000, Munich, Germany, May, 8-11, 2000.

- (5) Doi, Hirofumi and Alonso, J., "Fluid/Structure Coupled Aeroelastic Computations for Transonic Flows in Turbomachinery," Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6, 2002.

- (6) Cinnella, P., De Palma, P., Pascazio, C. and Napolitano, M., "A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity," Journal of Turbomachinery, Vol. 126, pp. 310-316, 2004.

- (7) Sanders, A. J., Hassan, K. K. and Rabe, D. C., "Experimental and Numerical Study of Stall Flutter in a Transonic Low-Aspect Ratio Fan Blisk," Journal of Turbomachinery, Vol.126, pp. 166-174, Jan. 2004.

- (8) Sadeghi, M. and Liu, F., "Coupled Fluid-Structure Simulation for Turbomachinery Blade Rows," AIAA 2005-0018, 2005.

- (9) Kim, D. H., Park, Y. M., Lee I. and Kwon, O. J., 2005, "Nonlinear Aeroelastic Computation of a Wing/Pylon/Finned-Store Using Parallel Computing," AIAA Journal, Vol. 43, No. 1, pp.53-62.

- (10) 오세원, 김동현, 박용, 2006. "점성 및 충격과 효과를 고려한 초음속 터빈 케스케이드의 유체유발 진동해석", 한국소음진동공학회지, 제16권, 제9호, pp. 1082-1088.

- (11) 김동현, 오세원, 박용, 2006. "스테이터-로터 상호간섭 및 점성효과를 고려한 케스케이드의 유체유발 진동해석", 한국소음진동공학회지, 제16권, 제10호, pp. 1082-1088.

- (12) 김동현, 김유성, 김요한, 2008, "유도무기 날개 단면형상에 따른 초음속 및 극초음속 필터 특성", 한국소음진동공학회지, 제18권, 제5호, PP.496-502.

- (13) 김동현, 김유성, 박용, 2008, "유동점성 및 공탄성 변형효과를 고려한 스테이터-로터 케스케이드 시스템의 성능평가", 한국항공우주학회지, 제36권, 제1호, pp.72-78.

- (14) 김유성, 김동현, 윤명훈, 2007, "반음각 효과를 고려한 발사체 날개단면의 초음속/극초음속 비선형 유체유발진동해석", 한국군사과학기술학회지, 제10권, 제4호, pp.24-32.

- (15) Madavan, N. K., Rai, M. M. and Gavali, S., 1993, "Multipassage Three-Dimensional Navier-Stokes Simulation of Turbine Rotor-Stator Interaction," Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 3, pp. 389-396.