

## 터보 압축기 전산수치해석 최신기술 동향

강영석\* · 양수석\*

### 1. 서 론

최근 20년 동안 급속한 컴퓨터의 성능향상과 다양한 전산유체해석 프로그램의 발달로 인해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)을 이용한 설계검증 및 유동장 해석은 각종 유체공학 분야에서 널리 쓰이고 있다. 초기 CFD 관련 연구는 코드개발 및 검증 그리고 이를 응용하는 과정이 보통 하나의 연구실 혹은 회사 등에서 총괄적으로 이루어진 인하우스 코드 중심으로 발전되었다. 최근 CFD에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있어 신뢰성 있는 인하우스 코드들은 상용화 및 상용 CFD코드에 대한 투자가 계속 이루어져 현재는 높은 신뢰성의 상용코드들이 다수 출시되었다. 이렇게 다양하고 강력한 상용 CFD 코드들이 다수 출시되어 최근 CFD에 대한 연구는 코드 개발 및 업데이트를 위한 이론적인 기초연구와 CFD를 이용하여 물리적 현상을 찾는 응용연구로 뚜렷하게 구분이 되고 있다. 컴퓨터의 발달 및 부품가격의 하락, 그리고 CFD 코드의 병렬화 등은 과거는 불가능했던 여러 가지 현상들을 가상세계에서 구현할 수 있게 되었다. 이 글에서는 그 중 필자가 관심을 두고 있는 압축기/팬 등에서 비정상 유동해석과 구조-유동 해석의 상호 작용(Fluid-Structure Interaction, 이하 FSI)에 대한 최근 동향을 소개하고자 한다.

### 2. 압축기의 비정상 유동해석

현재까지는 계산 비용 및 시간의 제한으로 인해 압축기의 성능을 예측하기 위해서 일반적으로 정상 상태 수치해석을 많이 수행하는데 반해, 비정상 수치해석은 제한적인 경우에만 사용되어지곤 했다. 비정상 유동해석을 통해 공력성능을 평가하기 보다는 압축기의 동익

-정익의 상호작용, 유동의 불안정성, 소음 등의 비정상 특성이 뚜렷하게 드러나는 유동장 해석에 많이 사용된다. 특히 최근에 들어서는 압축기 내부에서 발생하는 소음에 대한 관심이 높아져서 Vortex shedding과 동익-정익 혹은 임펠러-디퓨저 간의 거리에 따른 소음에 대한 정밀한 분석을 위하여 비정상 유동해석을 수행하기도 한다.

일반적으로 동익과 정익의 상호작용 등을 CFD에서 모사하기 위해서는 비정상 유동해석 방법이 물리적으로 가장 근접한 방법이지만, 실제로 시간/비용 문제로 인해 일반적으로 정상상태 계산으로 Mixing plane 혹은 Frozen rotor와 같은 인터페이스 처리 방법을 사용한다. 초기연구들은 전체단 압축기를 구현하지 못하여 2차원 Cascade로 동익-정익간의 상호작용을 모사하여 후류(wake), 경계층 천이(transition), 박리(separation), 재부착(reattachment) 등과 같은 유동현상을 고찰하고자 종류 비정상 유동계산에 적용해 후류 Vortex 생성 및 소멸 과정, 비정상 박리 현상 등을 비정상 유동현상을 모사하기 위한 다양한 테크닉이 제시되었다.

한편 일반적으로 형상을 단순화하는 방법을 사용할 때에는 실제 동익-정익 등에서 발생하는 후류 등의 주파수를 파악하여 Strouhal 수를 상사시켜 Vortex shedding의 주파수를 결정하여 동익-정익단 전체를 격자계로 구성하지 않고 동익단은 간단한 봉으로 모사하고 Strouhal 수를 상사시켜 회전수 등을 결정하여 정익단에 비정상 후류가 미치는 영향 등을 살펴보는 등의 연구 등도 소개되었다.

최근에는 3차원 모델링을 모두 포함하는 격자계를 구성하여 동익-정익의 비정상 CFD 연구 논문이 다수 발표되고 있다. 최근에는 단순히 비정상 특성만을 파악하는 것이 아닌 실제 압축기 성능을 비정상 해석을 통해 시간평균법 (Time-Averaged Method) 등을 통해 평가한다. Tarr 등(2007)은 MSU Turbo라는 CFD 코드를 이용해 원심압축기 및 베인 디퓨저 간의 비정상

\* 한국항공우주연구원 첨단추진기관팀  
E-mail : electra@kari.re.kr

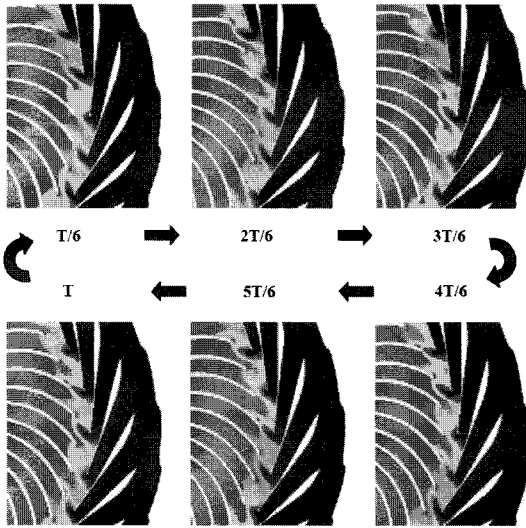


그림 1. 임펠러의 회전에 따른 베인리스 영역에서의 시간에 따른 충격파의 비정상 주기적 거동 (Srivastava et al. 2007)

수치해석을 통해 비정상 성능 평가에 관한 연구를 수행 중이며 이러한 결과를 설계 결과에도 반영하여 원심압축기의 불안정 거동을 예측하고 이를 압축기 설계 자료로 활용할 수 있도록 하고 있다.

Pavel 등(2007)도 원심압축기와 디퓨저 간의 거리를 변화시키면서 정상-비정상 수치해석을 수행하였으며 디퓨저 출구에서의 마하수 분포를 시험 결과와 비교하였다. 논문에서는 실제 압축기 성능을 평가함에 있어서 정상상태 해석과 비정상 시간 평균값과의 차이가 다르지 않았으며, 특히 360도 압축기 전체단을 포함하여 비정상 수치해석을 수행하였을 때와 주기조건을 주어 일부 날개만 비정상 수치해석을 수행한 결과가 그리 차이를 보이지 않음을 보여주어 성능 평가를 위해 비정상 계산을 수행할 때에 계산 영역 결정을 위한 가이드라인을 제시하였다.

Srivastava 등(2007)은 원심압축기의 임펠러-디퓨저의 상호작용을 CFD를 통해 비정상 정도가 어느 정도 발생하는지 평가하였다. 특히 임펠러 내부에서 발생하는 비정상 충격파의 거동과 같은 비정상 거동을 보이는 등, 정상 상태에서 보지 못한 현상들을 비정상 수치해석을 통해 확인할 수 있었으며 또한 압축기 내부에서 비정상 거동을 보이는 영역이 임펠러 출구의 25% 정도로 한정되어 있다는 것을 확인하는 등 압축기 내부에서의 비정상 거동 형태 및 발생 영역 등을

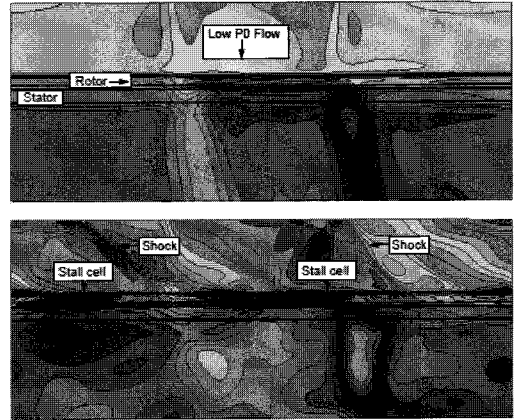


그림 2. (위) 120도에 걸친 입구 교란 (아래) 스톨이 발생 시 유동장 분포 (Chima et al. 2006)

확인할 수 있었다.

이상과 같은 비정상 해석은 대부분 난류모델 및 RANS solver를 이용한 결과들이며 유체기계의 해석에 있어서는 가장 효율적인 해석 방법이라고 생각되어져 왔다. 최근에 들어서는 컴퓨터 성능의 발달로 LES 기법을 터보기계 해석에 도입하여 좀더 정밀한 비정상 유동을 해석할 수 있게 되었다.

You 등(2007)은 2차원 Endwall이 움직이는 Cascade 등을 이용하여 동익 하류에서 떨어져 나오는 압력 섭동량을 LES를 이용하여 계산하였으며 RANS에서 나타나는 후류 구조보다 좀 더 실제에 가까운 현상을 모사하였다. 이렇게 LES로 해석된 자세한 후류 구조는 하류와의 상호 작용으로 인해 발생하는 소음의 발생원인 등을 규명하고 소음 제어를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

한편 최근 스톨/서지와 같은 압축기의 불안정성과 같은 비정상 유동특성에 대한 관심이 높아지면서 이를 수치해석을 통해 모사하기 위한 시도가 계속되어 왔다.

일반적으로 압축기 스톨이 발생하면 스톨 셀이 압축기 원주방향으로 회전을 하기 때문에 압축기 전체를 계산 영역으로 잡아야 하므로 계산 격자수 증가하고 시간 및 비용이 크게 증가하게 된다. 특히 압축기 스톨 현상을 CFD로 구현하기 위해 시험에서처럼 출구 압력을 상승시키거나 유량을 줄이는 것만으로는 스톨 현상이 CFD로 잘 구현되지 않기 때문에 입구에 불균일한 유동을 주어 입구 교란으로 인해 강제로 스톨을 발생하게 하는 등 특별한 기술을 접목시켜 수치해석으

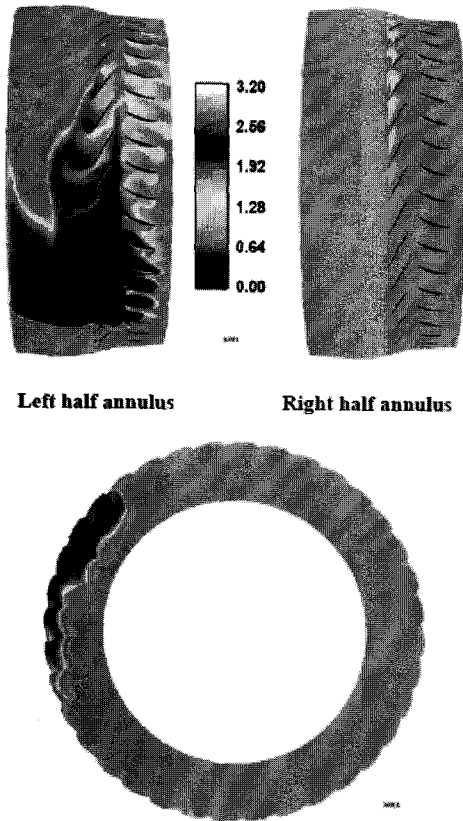


그림 3. 스톨 발달 시 Stage 35에서의 엔트로피 분포 (Chen et al. 2007)

로 구현하기도 하였다. Chima 등(2006)은 NASA의 CStall이라는 코드를 이용해 입구에 반경방향 교란을 주었을 때에 스톨 셀이 발생하는 것을 비정상 수치해석을 통해 구현하였다. 이후 Chen 등(2007)은 유동에 어떠한 교란도 주지 않고 실제 시험에서와 같이 스톨 벨브를 서서히 잡듯듯이 출구 유량을 감소시키도록 수치해석을 수행하여 NASA의 Stage 35 축류압축기에서 스톨 현상을 잡아내는데 성공하였다. 작동유량에서 주기성이 확보될 수 있도록 4회전을 시키고 최종 time step에서의 결과를 초기조건으로 입력하여 출구 유량을 줄이고 다시 주기성을 확보하는 방법을 반복하여 마치 실험 시 유량 스톨 벨브를 잡는 방법을 모사하여 스톨 현상이 발생하는 유량에서 스톨 선구 신호 및 회전 스톨현상을 예측하기도 하였다. 한편 Vahdati 등(2006)은 압축기 및 압축기 후류의 Plenum까지 포함해야 하는 서지 현상을 CFD 해석기법으로 를 이용하여 유동각 등의 경계조건을 적절히 모사하는 방법을

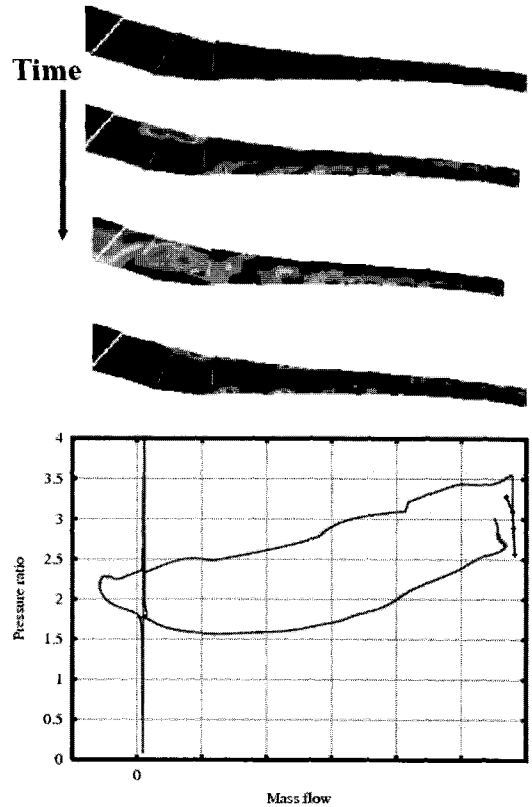


그림 4. 서지현상 모사에 따른 시간에 따른 압축기 내부 축방향 속도 변화 및 서지현상 발생에 따른 유량-압력비의 Hysteresis (Vahdati et al. 2006)

이용하여 구현하였다. 수치해석에서는 서지 현상으로 인해 발생하는 시간에 따른 축방향의 순방향 흐름-역류의 주기적인 현상을 계산해 낼 수 있었으며, 이로 인해 서지 현상에서 흔히 발생하는 비정상 Hysteresis 경로를 예측할 수 있었다.

### 3. 압축기의 Fluid Structure Interaction 해석

일반적으로 압축기의 공력적 성능 평가를 하기 위해서는 CFD 기법만을 이용하였으나 최근에 들어서 압축기/팬의 단수는 적어지면서 한 단당 길리는 부하는 지속적으로 높아진 고부하 압축기 등으로 설계 경향이 바뀌어가고 있어 설계 평가 시 구조해석에 대한 필요성이 대두되고 있다. 공력해석 결과 날개에 대한 부하가 예전 설계보다 높아지는 추세에 있어 이전에는 관심도가 낮았던 구조 설계 및 구조 해석에 대한 수요가 높아지고 있으며, 최근에는 공력 설계와 구조 해석 등을 융합

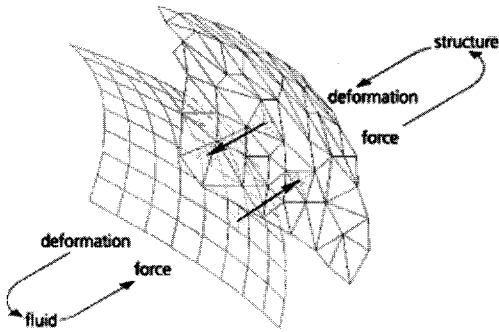


그림 5. FSI의 전산유체해석 및 구조해석의 Coupling 개념도 (MpCCI 3.0, 2007)

한 MDO(Multidisciplinary Design Optimization) 최적 설계 개념 등이 제시되고 있다.

수치해석에 있어서도 기존의 공력해석과 함께 구조 해석도 동시에 수행해 날개에 걸리는 부하에 따른 날개 형상의 변형, 그리고 이에 따른 유동장의 재분포 등을 동시에 해석하는 FSI(Fluid Structure Interaction) 해석이 등장하기 시작하였다. 국내에서는 의학, 건설, 토목분야에서 사용되기 시작하여 최근에는 유체 및 구조체의 상호작용이 큰 교반기, 펌프 그리고 팬의 진동 해석 등과 같은 유체기계의 해석에도 이용되기 시작하여 구조적 안전성을 평가할 수 있을 뿐 아니라 구조해석 단독수행 시 나타나지 않은, 실제 운전 시 구조적인 간섭 현상 등도 예측할 수 있다. 특히 압축기/팬 등의 반복적인 구조적인 변위 혹은 진동 현상을 해석함으로써 유체기계의 피로 파괴 등을 예상할 수 있기 때문에, 설계 단계에서 제품의 수명을 예측할 수 있는 등 FSI의 가용성은 매우 높다.

FSI 수치해석은 일반적으로 구조해석과 수치해석 코드의 Coupling 방법이 가장 중요하다. Giles는 다양한 구조-유동 해석 Coupling 방법에 따른 수치해석 시 안정성 및 정확도 등을 제시하였다. Guruswamy (1989), Piperno 등(1995), Schulze 등(1997)도 Coupling 알고리즘을 제시하였으며 He, Vahdati, Imregun (1994) 등은 실제로 이러한 Coupling 방법을 이용하여 Cascade에서 구조해석과 유동해석을 수행하여 FSI를 구현하였다.

Cartens 등(2001)도 구조해석 및 수치해석을 Coupling 하는 알고리즘을 제시하였고 이를 이용하여 시간에 따른 압축기 날개를 FSI 해석하였다. 이들은 자동 격자 생성 프로그램을 이용하여 구조해석으로 변형된 날개 형상을 반영하여 새 격자계를 구성하고 이를 다시 유동해석에

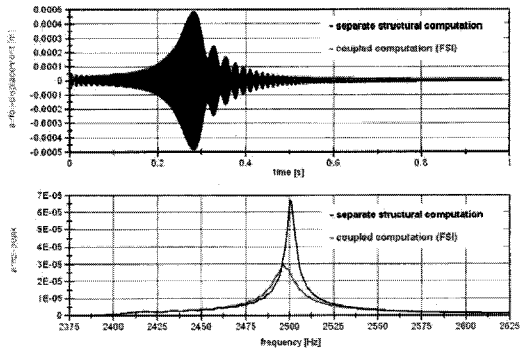
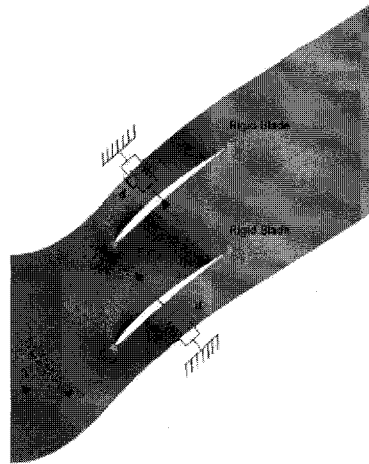
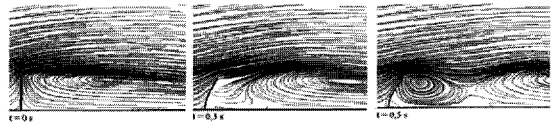


그림 6. (위) 측면 유동에 따른 탄성 평판의 시간에 따른 형상 변화 및 그에 따른 유동장의 변화 (중간) 압축기 익렬의 FSI모델링 (아래) FEA의 개별 수행 및 FSI와의 결과 비교 (Sven Schrape et al. 2006)

반영하여 날개에 걸리는 부하를 예측하는 방법을 반복하여 날개의 Fluttering 현상을 예측하였다. 이후 Coupling 알고리즘을 개량하여 Staggered time integration 알고리즘 등을 제안하는 등 Fluid-Structure의 Coupling에 대한 연구 결과를 지속적으로 발표하였다.

최근에는 각종 상용프로그램끼리 Couple하기 위한 신뢰성 높은 MpCCI 등과 같은 상용 라이브러리가 속속 등장하고 있다. 이러한 Coupling 코드는 대부분의 구조해석, 유동해석용 상용코드를 지원하여 다양한 Message passing 기법을 이용하여 데이터를 교환할 수 있는 인터페이스 환경을 지원한다. Coupling 프로그램은 각 time step에서 구조해석 코드에서부터 변위,

온도, 경계면에서의 속도 등을 전달하고, CFD 코드에서는 압력, 힘, 열전달율 등을 데이터를 전달할 수 있으며, 별도의 자동 격자 생성계 등을 접목시켜 구조해석에 따라 격자계를 이동 혹은 변형하여 다음 time step에서의 구조해석과 CFD 해석을 통해 FSI 해석을 수행한다. 하지만 아직까지 블레이드 면에서의 격자계 그리고 유동장에서의 격자 topology 등에 의해 해석 결과가 상당한 영향을 받는 등 몇 가지 극복해야 할 문제점을 가지고 있다고 알려져 있다.

Schrape 등(2006)은 MpCCI를 이용해 상용 CFD 및 FEA 프로그램인 Fluent와 Abaqus를 Coupling하여 압축기 날개의 FSI 해석을 수행하였다. 이들은 먼저 간단한 탄성 plate를 이용하여 FSI 코드 검증 이후 간단한 압축기 Casacde의 FSI 해석을 수행하였다. 특히 이들은 FEA 단독 수행한 결과와 FSI 해석을 통해 FEA 및 CFD를 Coupling하여 계산을 수행하였을 때의 결과를 비교하였는데, 전체적인 경향은 비슷하나 FSI 해석에서는 유동의 주기성에 따라 감쇄계수가 좀더 커지고 따라서 날개의 진폭 등이 구조해석 단독 수행 결과에 비해 작아진다는 것을 밝혀냄으로써 공탄성 문제에 있어서는 FSI를 이용할 경우 좀 더 물리적으로 타당한 해를 도출할 수 있다는 것을 밝혀내었다.

#### 4. 맺음말

차세대 압축기/팬은 친음속이나 초음속 상태에서 운전되고 비용의 감소를 위해 소형화를 요구하고 있어 단별 고성능/고부하를 요구하고 있어 비정상 유동 현상이 심해지고 공력-구조간의 상호 작용에 대한 중요성이 커지고 있다. 기존의 순차적인 압축기 설계 및 해석 방식은 많은 시간 및 비용이 소요되므로 다분야 통합 해석이 가능한 비정상 FSI 해석 등을 도입하여 개발비를 절감할 수 있다. 최근 관련 연구 논문의 수도 꾸준히 증가하고 있고 관련 코드의 개발도 빠르게 진행되고 있는 만큼 국내에서도 압축기/팬 개발에 있어 이러한 최신 수치해석 기법을 도입하여 차세대 압축기 설계 및 해석의 핵심 기술로 활용할 수 있을 것이라 생각한다.

#### 참고문헌

- (1) Chima, Rodrick V., "A Three-Dimensional Unsteady CFD Model of Compressor Stability," ASME TurboEXPO 2006, GT2006-90040.
- (2) Donghyun You, Meng Wang, Parviz Moin, Rajat Mittal, "Study of Low Pressure Fluctuations Downstream of a Stator-Rotor using Large-Eddy Simulation," 2007 <http://www.stanford.edu/group/fpc/ResearchGroups/Cavitation.html>
- (3) Giles, M., "Stability and Accuracy of Numerical Boundary Conditions in Aeroelastic Analysis," COSMASE, Short Course on Fluid-Structure-Interaction, May 2-5, 1995, KTH, Stockholm, Sweden.
- (4) Guruswamy, G. P., "Integrated Approach for Active Coupling of Structures and Fluids," AIAA J., 27, 1989, pp. 788~793.
- (5) He, L., "Unsteady Flows in Turbomachines, Part 3," VKI Lectures 1996-05, Mar. 11-15.
- (6) Jen-Ping Chen, Michael D. Hathaway, and Gregory P. Herrick, "Pre-Stall Behavior of a Transonic Axial Compressor Stage via Time-Accurate Numerical Simulation," ASME TurboEXPO 2007, GT2007-27926.
- (7) M. Vahdati, G. Simpson and M. Imregun, "Unsteady Flow and Aeroelasticity Behaviour of Aero-Engine Core Compressors during Stall and Surge," ASME TurboEXPO 2006, GT2006-90308.
- (8) Ning, W., and He, L., "Computation of Unsteady Flows Around Oscillating Blades Using Linear and Nonlinear Harmonic Euler Methods," ASME Paper No. 97-GT-229, 1997.
- (9) Pavel E. Smirnov, Thorsten Hansen, Florian R. Menter, "Numerical Simulation of Turbulent Flows in Centrifugal Compressor Stages with Different Radial Gaps," ASME TurboEXPO 2007, GT2007-27376.
- (10) Piperno, S., Farhat, C., and Larrourou, B., "Partitioned Procedures for the Transient Solution of Coupled Aeroelastic Problems, Part I: Model Problem, Theory and Two-Dimensional Applications," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., No. 124, 1995, pp. 79~112.
- (11) Srivastava, J. Lentz, J. S. Liu, J. Panovsky, "Computation of Unsteady Flowfield and Blade Response due to Impeller-Diffuser Interaction," ASME TurboEXPO 2007, GT2007-28235.

- (12) Schulze, S., "Transonic Aeroelastic Simulation of a Flexible Wing Section," AGARD-R-822, Numerical Unsteady Aerodynamics and Aeroelastic Simulation, AGARD Structures and Materials Panel, Aalborg, Denmark, 1997, pp. 10,1~10,20.
- (13) Sven Schrape, Arnold Kühhorn, Mark Golze, "FSI of a Simplified Aero Engine Compressor Cascade Configuration," PAMM Journal, Vol. 6, Issue 1, 2007, pp. 457~458.
- (14) Sven Schrape, Arnold Kühhorn, Mark Golze, "Simulation of Fluid Damped Structural Vibrations," 7th MpCCI Userforum, 2006, pp. 122~131.
- (15) Vahdati, M., and Imregun, M., "Non-linear Aeroelasticity Analyses Using Unstructured Dynamic Meshes," Symposium on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines, Sept. 1994, Fukuoka, Japan.
- (16) Tarr David, C. Tan and E.M. Greitzer, "Effects of Impeller-Diffuser Interaction on Aerodynamic Performance of Centrifugal Compressors," [http://web.mit.edu/aeroastro/labs/gtl/MIT\\_GTL\\_curr\\_research.html](http://web.mit.edu/aeroastro/labs/gtl/MIT_GTL_curr_research.html)
- (17) Volker Carstens and Joachim Belz, "Numerical Investigation of Nonlinear Fluid-Structure Interaction in Vibrating Compressor Blades," Journal of Turbomachinery, Vol. 123, 2001, pp. 402~408.
- (18) Volker Carstens, Ralf Kemme and Stefan Schmitt, "Coupled simulation of flow-structure interaction in turbomachinery," Aerospace Science and Technology, Vol 7, pp. 298~306.