

다른 크기의 피치를 가진 후류장에 놓인 익렬의 비정상 공기역학적 특성에 관한 수치해석적 연구

전 현 주* · 강 동 진*

The Unsteady Aerodynamic Characteristics of a Cascade subjected to a upstream wake with different pitch

H. J. Jeon and D. J. Kang

Abstract

Effects of rotor-stator blade count ratio on the unsteady aerodynamic characteristics of a cascade was studied by using a Navier-Stokes code. Present Navier-Stokes code is a parallel code and works on a multi-cpu machine. It is based on the SIMPLE algorithm and uses QUICK scheme for convection terms and second order back difference for all temporal derivatives. Computations were carried out for two cases : case 1 is for 3 stator cascade passages subjected to two upstream wakes while case 2 is for 2 stator cascade passages subjected to three upstream wakes. Numerical solutions show that rotor-stator blade count ratio plays a significant role in the unsteady aerodynamic characteristics of the stator cascade. Case 2 shows smaller unsteady fluctuation than case 1, even if they show the same time averaged value. The smaller fluctuation of case 2 is believed due to strong interaction between unsteady vortices. The unsteady lift variation of case 2 is shown to have many high frequency fluctuations as more unsteady vortices travel around the cascade. The unsteady turbulent kinetic energy due to the upstream wake is also shown to decay faster through the cascade passage than in the free stream.

1. 서 론

최근의 터보기계 설계는 익렬 사이의 축방향을 간격을 줄이고, 블레이드 부하(blade loading)는 늘려 단(stage) 수를 줄이는 경향이 있다. 이러한 설계는 결국 터보기계 내의 동익과 정익의 상호작용을 증가시키게 되어 비정상성이 확대됨으로, 비정상 요인과 터보기계 성능에 미치는 영향 등에 자세한 이해를 요구하고 있다. 따라서, 터보기계 내의 비정상 유동 특성에 영향을 미치는 인자

에 대한 세밀한 연구가 요구되며, 많은 연구자들이 다양한 인자에 대한 연구를 수행해오고 있다. 터보기계 내의 비정상 유동 특성에 영향을 미치는 인자로는 상류 후류의 형상(upstream wake profile), 블레이드 부하(blade loading), 익렬 간의 축방향 간격, 동익과 정익 블레이드 개수 비, 블레이드 형상, 레이놀즈 수, 자유 유동 난류 강도 등 다양하다. 특히, 블레이드 형상이나 레이놀즈 수, 자유 유동 난류 강도 등에 대해서는 많은 수의 논문이 발표된 바 있으며, 최근 들어서는 CFD의 급속한 발전에 힘입어 동익과 정익 사이의 축방향 간격이 익렬의 공기역학적 특성에 미치는 연구 등도 활발히 진행되고 있다[1,2].

상대적으로 연구가 미진한 인자가 동익과 정익의 블레이드 개수 비(rotor-stator blade count ratio)가 익렬의 공기역학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구인데, 이는 이 문제가 지닌 기하학적 복

† 영남대학교 대학원

E-mail : hjjun02@hanmail.net

TEL : (053)815-1887 FAX : (053)813-3703

* 정회원, 영남대학교 기계공학부

잡성이 주요한 이유 중 하나인 것으로 판단된다. 최근에 Gallus 등[2]은 실험적 연구를 통하여, 동익 블레이드 수가 증가할수록 하류 정익 표면에서의 압력 변동은 오히려 줄어드는 것을 보인바 있다. 수치해석적으로는 Yu 등[3]이 Navier-Stokes 코드를 이용하여 연구를 시도한 바 있다. 그러나, Yu 등[3]은 수치해석의 간편성을 위해 동익과 정익의 블레이드 개수 비가 정수배인 경우만을 고려하여, 현실성이 크게 결여되어 있다. 이에 비해, 본 연구에서는 동익과 정익의 블레이드 수 비가 1.5 혹은 2/3 등으로 보다 현실적인 경우에 대하여 연구를 수행하였다.

기존의 대부분의 수치해석이 동익과 정익의 수가 동일하다고 가정하거나 혹은 blockage effect를 고려하여 동일한 피치를 가진다고 가정하여 연구를 수행해 왔지만, 실제 축류 압축기에 장착되는 동익과 정익의 블레이드 수는 서로 다른 것이 일반적이다. 따라서, 이들이 서로 다른 블레이드 수를 가지고 작동할 경우 비정상 경계층 유동 특성을 살펴보는 것은 대단히 흥미로운 연구과제라 여겨진다. 본 논문에서는 이러한 관점에서 동익과 정익의 블레이드 수 비가 비정상 경계층 유동 특성에 미치는 영향을 수치적으로 연구하였다.

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.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} Ju_i + \frac{\partial}{\partial \xi} (JUu_i + Jp \frac{\partial \xi}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (JVu_i + Jp \frac{\partial \eta}{\partial x_i}) \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} (JG^{11} \frac{\partial u_i}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \xi} (JG^{12} \frac{\partial u_i}{\partial \eta}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \eta} (JG^{21} \frac{\partial u_i}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (JG^{22} \frac{\partial u_i}{\partial \eta}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial JU}{\partial \xi} + \frac{\partial JV}{\partial \eta} = 0 \quad (2)$$

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 함수들이다.

난류 와점성계수는 Chien[4]이 제안한 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 구하였다.

3. 수치해석적 방법

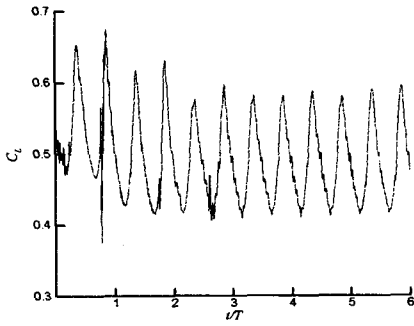
본 논문에서는 저자가 선행 연구[5]에서 개발한 Navier-Stokes 코드를 본 논문의 목적에 적합하게 수정하여 수치해석을 수행하였다. 따라서, 기본적인 수치해석 과정은 선행 연구 논문[5]에 자세히 정리되어 있다.

4. 결과 및 토의

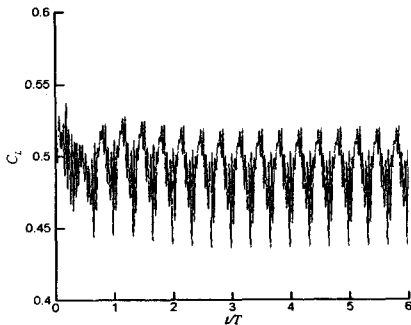
동익과 정익의 블레이드 수가 서로 다른 경우를 모사하기 위해 동익과 정익이 각각 2개와 3개의 통로를 가지는 경우(case 1)과 동익과 정익이 각각 3개와 2개의 통로를 가지는 경우(case 2) 두 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용한 익렬은 코드 검증에 사용한 UTRC의 압축기의 2 번째 단의 정익이다.

Fig. 1은 case 1과 case 2의 첫 번째 블레이드의 양력 수렴과정을 도시한 그림이다. 그림을 살펴보면, 두 경우 모두 약 6주기부터 완전한 주기 유동이 형성됨을 알 수 있다. 따라서, 이후의 모든 데이터는 6주기 이후에 얻은 데이터이고, 모든 비정상 물리량은 순간치(instantaneous value)에서 시간 평균치를 뺀 값을 의미한다.

Fig. 2-(a)와 (b)는 각각 case 1과 case 2에서 얻은 블레이드 흡입면과 압력면에서의 압력계수 C_p 분포를 도시한 그림이다. 그림에서 min/max는 비정상 변동폭을 가리킨다. 그림을 살펴보면 블레이드 위치와 상류 동익의 후류 수에 관계없이 시간 평균치 압력계수 분포는 완전히 일치함을 알 수 있다. 이에 비해, 비정상 압력계수 변동(fluctuation)은 상류 동익의 후류 수(블레이드 수)와 블레이드 위치에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 먼저, Fig. 2-(a)와 (b)를 비교해보면 case 1이



(a) case 1



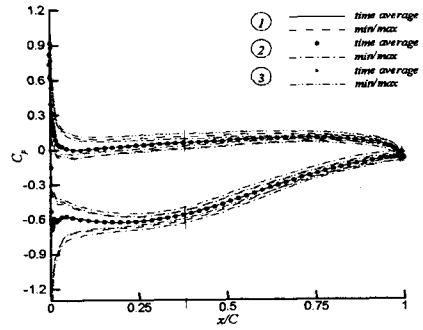
(b) case 2

Fig. 1 Convergence history of lift coefficient

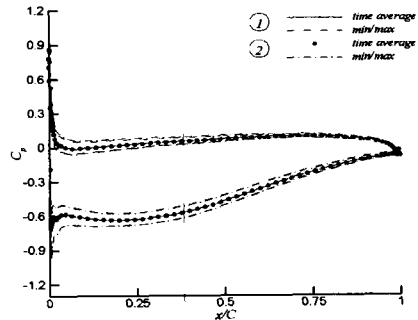
case2에 비해 큰 압력변동을 보여주고 있다. 이러한 거동은 단일 익렬에 유입되는 후류의 주파수가 증가하면 후류 사이의 상호작용에 의해 압력 변동이 감소한다는 기존의 연구 결과[3]와 Gallus 등[2]의 실험적 연구 결과와도 일치하는 것이다. 즉, 단위 블레이드 통로에 한 주기당 유입되는 후류의 수가 증가할수록 비정상 변동은 오히려 감소한다. 또 하나 흥미로운 관찰은 각 블레이드가 위치에 따라 다소 다른 비정상 압력 변동을 보인다는 것이다.

예를 들면, case 1의 경우 흡입면 압력 변동은 중앙 블레이드에서 가장 크게 보이지만, 압력면 변동에서는 세 번째 블레이드가 가장 큰 변동을 보여주고 있다는 것이다. 또한, case 1의 경우는 블레이드의 후단 부근에서도 작지 않은 압력 변동을 보여주고 있다. 이는 상류 동익에서 유입된 후류가 충분히 소산되지 못하고 정익의 후류 영역까지 대류됨을 의미한다.

Fig. 3은 $x/C=0.25$ 에서 비정상 압력 변동을



(a) case 1

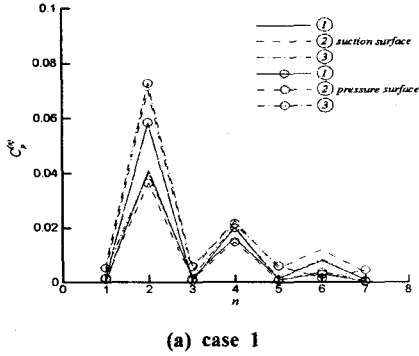


(b) case 2

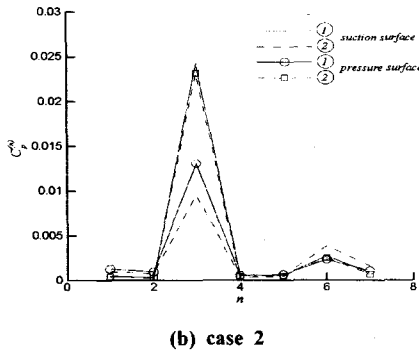
Fig. 2 Time averaged and unsteady pressure coefficient distributions

Fourier series 분해하여 그 크기를 도시한 그림이다. Case 1은 두 번째와 네 번째 성분 등 2의 배수 성분이 피크치를 보이고 있고, case 2에서는 세 번째와 여섯 번째 등 3의 배수 성분이 피크치를 보이고 있다. 먼저, case 1에서 두 번째와 네 번째 성분 등이 피크치를 가지는 이유는 Fourier series 분해시 사용한 주기는 동익의 각 후류가 3개의 정익 통로를 모두 통과하는 주기이어서 정익 블레이드 입장에서는 한 주기 동안 2개의 동익 후류가 통과하기 때문이며, case 2의 경우에도 동일한 설명이 가능하다.

Fig. 4는 case 1과 case 2의 각 블레이드의 비정상 양력 분포를 도시한 그림이다. 두 그림은 모두 6번 주기의 비정상 계산 후에 얻은 것이다. 그림을 살펴보면, case 1과 case 2의 모든 블레이드가 동일한 위치차를 가지고 거의 같은 양력 응답을 보이고 있다. 그러나, 비정상 양력의 폭은 case 1이 case 2의 약 2배에 이른다. Case 2의 경우에는 동익 후류의 수 혹은 그의 배수에 해당하



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 3 Magnitude of the harmonics of surface pressure coefficient

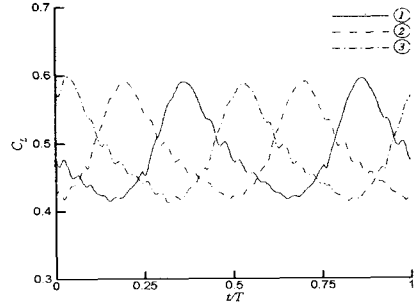
는 기본적인 주파수 외에도 고 주파수 양력 응답이 작지 않다는 것도 특징이며, 이는 정익 블레이드 통로에 많은 수의 비정상 와류 유동이 존재하기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 블레이드의 작용을 보다 자세히 살펴보기 위해 도시한 그림으로, 유량으로 평균한

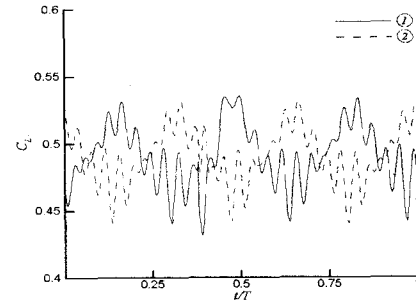
운동에너지($K = \frac{\int \frac{u^2 + v^2}{2} dm}{\int dm}$)와 정압력 상승

($P = \frac{\int p dm}{\int dm}$)을 보여주고 있다. Fig. 5-(a)와 (b)

는 case 1의 경우이고 Fig. 5-(c)와 (d)는 case 2의 경우에 얻은 그림이다. 그림을 살펴보면 블레이드 선단(leading edge) 전에서는 운동에너지 변화가 거의 없어 정압력 변화도 미미하지만, 블레이드 통로로 유동이 유입됨에 따라 운동에너지는 급격히 감소하고 정압력은 급격히 증가한다. 이들 두 가지의 감소 및 증가 기울기의 크기가 거의 일치하여 운동에너지의 대부분이 정압력



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 4 Comparison of unsteady lift variation

상승으로 변환됨을 알 수 있다. 특기할 사항은 case 1의 경우 동익의 후류에 의한 정압력 변동이 완전히 소산되지 못하고 정익 블레이드 통로를 빠져나간다는 것이다. 이러한 거동은 case 2와는 크게 다른 점이다. Case 2의 경우 한 주기당 3개의 동익 후류가 유입됨에 따라 후류 사이의 상호작용이 증가하여 운동에너지 및 정압력의 비정상 압력 변동이 재빨리 소산되는 것으로 판단된다.

6. 결론

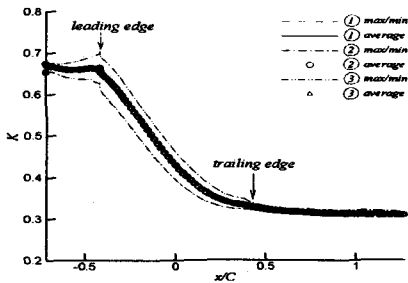
본 논문에서는 동익과 정익의 블레이드 수가 서로 다른 경우 익렬의 비정상 공기역학적 특성을 연구하였다. 수치해석은 동익과 정익의 블레이드를 연구하였다. 수치해석은 동익과 정익의 블레이드가 각각 2개와 3개인 case 1과 동익과 정익의 블레이드가 각각 3개와 2개인 case 2의 두 경우에 대하여 수행하여 본 결과 다음과 같은 결론

을 얻을 수 있었다.

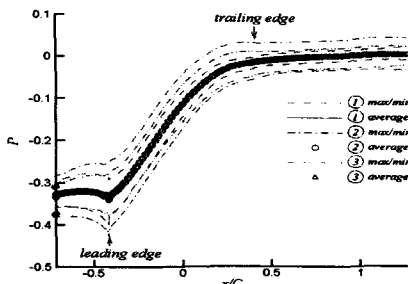
정익 블레이드 수와는 다른 수의 동익 후류는 정익 익렬의 비정상 공기역학적 특성에 큰 영향을 미쳤다. 특히, 각 정익 블레이드 통로에 유입되는 동익 후류 수가 한 주기당 1보다 큰 case 2는 1보다 작은 case 1에 비해 운동에너지와 정압력 등의 비정상 변동을 오히려 약하게와 정압력 등의 비정상 변동을 오히려 약하게 보였다. 그러나, 비정상 공기역학적 특성의 차이에도 불구하고 시간 평균치는 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 정익의 블레이드가 받는 양력의 시간 평균치는 case 1과 case 2가 동일하지만, 정익 블레이드 위를 통과하는 동익 후류의 수가 많은 case 2가 case 1에 비해 고 주파수 변동을 심하게 보였다. 동익 후류에 의한 비정상 난류 운동에너지도 정익 블레이드 통로에 유입되면서 소산이 가속되며, case 2가 case 1에 비해 빠른 소산을 보여주었다.

후 기

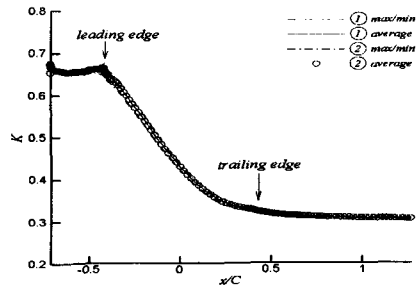
본 연구는 한국과학기술원 지정 선문대학교 공조 기술 연구센터의 지원에 의한 것입니다.



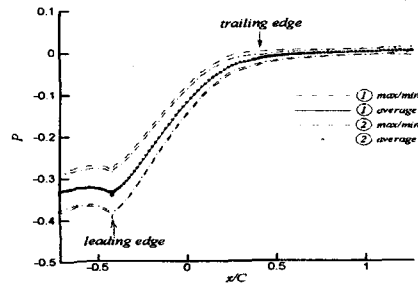
(a) kinetic energy decay of case 1



(b) static pressure rise of case 1



(c) decay of kinetic energy of case 2



(d) static pressure rise of case 2

Fig. 5 Decay rate of kinetic energy and static pressure rise rate

참고문헌

- [1] Chung, M. H., and Wo, A. M., 1997, "Navier-Stokes and Potential Calculations of Axial Spacing Effect on Vortical and Potential Disturbances and Gust Response in an Axial Compressor," J. of Turbomachinery, Vol. 119, pp. 472-481.
- [2] Gallus, H. E., Grollius, H., and Lambertz, J., 1982, "The influence of blade number ratio and blade row spacing on axial flow compressor stator blade dynamic load and stage sound pressure level," ASME J. of Engineering for power, Vol. 104, pp. 633-641.
- [3] Yu, W. S., and Lakshminaraya, B., 1994, "Numerical Simulation of the Effects of Rotor-Stator Spacing and Wake/Blade Count

- ratio on Turbomachinery Unsteady Flows," ASME Paper Winter Annual Meeting, Symposium on Unsteady Flow in Aerospace Propulsion.
- [4] Chien, K. Y., 1982, "Prediction of Channel and Boundary Layer Flows with a Low Reynolds Number Turbulence Model," AIAA J., Vol. 20, pp. 33-38.
- [5] 강 동진, 배 상수, 1996, "일반 비직교 표면좌 표계에서의 비압축성 점성유동의 수치해석," 대한기계학회 논문집, 제 20권 제 3호, pp. 1015-1027.
- [6] Ohio Supercomputer Center, "MPI Primer /Developing with LAM," 1995.
- [7] 강 동진, 전 현주, 1999, "설계점 및 탈설계점에서 rotor-stator 상호작용에 의한 비정상 천이 경계층의 수치해석적 해석" 한국전산유체공학회지 제 4권 제2호, pp. 17-30.
- [8] Dring, R. P., and Joslyn, H. D., 1985, "An Assessment of Single and Multi-Stage Compressor Flow Modeling," Final Report for Naval Air Systems Command Contact No. N00014-84-C-0354, AD-B102101.
- [9] Stauter, R. C., Dring, R. P., and Carta, F. O., 1990, "Temporally and Spatially Resolved Flow in a Two-Stage Axial Compressor, part 1 : Experiment," ASME IGTI Paper No. 90-GT-259.
- [10] Kang, D. J., and Lakshminarayana, B., 1997, "Numerical Prediction of Unsteady Transitional Boundary Layer Flow due to Rotor-Stator Interaction," AIAA J. of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 6, pp. 916-924.
- [11] Gundy-Burlet, K. L., Rai, M. M., Stauter, R. C., and Dring, R. P., 1991, "Temporally and Spatially Resolved Flow in a Two Stage Axial Compressor : Paer 2 - Computational Assessment," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 227-232.