

고해상도 수치 기법에 의한 원형 실린더 주위의 3차원 후류 유동 특성 연구

이상수*, 김재수**, 김태수*

High order computation on the three dimensional wakes past a circular cylinder

Sang Soo Lee*, Jae Soo Kim* and Tae Su Kim*

Key Words : Aero-Acoustics, Optimized High-Order Compact Scheme, Circular Cylinder, Vortex Shedding, OpenMP parallelized code, Drag and Lift Coefficients

Abstract

While the research for flow over a circular cylinder has been actively carried out up to the present, it has been known that the flow has not been clarified even now. Various complex flow and aero-acoustic characteristics exist around a circular cylinder such as flow separation, wake and pressure wave propagation. In this paper, research was carried out for wake flow and aero-acoustics over a circular cylinders by using high order, high resolution techniques that are used in two dimensional aero-acoustic analysis. OpenMP parallel processing method was used. For the numerical result, the periodic characteristic of Strouhal Number due to vortex shedding was comparatively analyzed with other experiment values and two dimensional numerical results.

1. 서론

현대에 이르기까지 원형 실린더에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 반면에 2차원 유동에 대해서도 명확히 규명되지 못한 부분이 있다. 이는 원형 실린더 주위에는 유동 박리, 후류 등의 복잡한 유동 현상과 공력음향 특성이 동시에 존재하기 때문이다.

원형 실린더 주위의 유동에 대한 이론과 실험 및 수치적 연구 결과들을 Norberg[1] 레이놀즈수 영역에 따른 유동 특성을 종합하여 분석하였는데, 실험과 수치 해석 결과 사이에는 현재에 이르러서도 그 특성차가 상당함을 보여주었다.

레이놀즈수가 증가함에 따라 원형 실린더 후류 유동은 3차원적인 불안정성이 증가한다. Williamson[2]는 실린더 주위의 유동은 레이놀즈수가 180 이하에서는 2차원적인 와류 유출이 발생하며, 그 이상에서는 레이놀즈수에 따라 불안정한 3차원 와류 유출이 모드 A와 모드 B의 형태로 나타남을 보였다.

본 논문에서는 2차원 공력음향 해석에 사용된 고차, 고해상도 기법[3]을 3차원 유동에 적용하여 원형

실린더에서 발생하는 유동 및 공력음향에 대한 연구를 수행하였다. 고차, 고해상도 기법은 비선형 불안속도를 계산할 경우 수치적 불안정을 발생하게 되는데, 이를 해결하기 위하여 Kim&Lee [4]가 제안한 인공감쇠모형을 사용하여 수치적 불안정성을 제거하였다. 계산 속도를 향상시키기 위해서 OpenMP 방법을 이용한 병렬 처리 기법을 사용하였다. 수치 결과로는 3차원 실린더의 와류 유출에 따른 Strouhal 수, 양력 계수 및 항력 계수의 주기적 특성을 기존의 실험값 및 2차원 수치 계산 결과와 비교 분석하였다. 후류의 3차원 유동 특성으로 2차 와류 발생에 대한 특성을 분석하였다. 또한, 고해상도 수치 기법을 사용함으로써 실린더 주위의 공력소음의 기초자료인 압력 변화 특성을 분석하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 해석 방법

일반 좌표계로 변환된 3차원 비정상 압축성 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 이 때 지배 방정식은 아래와 같다. 세부적인 표현은 참고 문헌[8] 과 같다.

* 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과

** 정회원, 교신저자, 조선대학교 항공우주공학과

* E-mail : jsckim@chosun.ac.kr

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \hat{E}_V}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_V}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_V}{\partial \zeta} \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 고차, 고해상도 수치기법은 Kim& Lee[3]가 2차원 전산공력음향 해석에 사용한 OHOC(Optimized High-Order Compact) 수치기법을 3차원 유동에 적용한 것이다. 수치 미분을 구하기 위한 방법은 7 격자점을 이용한 내재적 방법에 의해 구한다. 각각에 사용되는 계수는 참고문헌[3]과 같다. 고차, 고해상도의 높은 정확도를 유지하기 위해서 시간 차분법도 4차 정확도를 갖는 Runge-Kutta Explicit Method를 사용하였다[6]. 수치 안정성을 높이기 위하여 Kim&Lee[4]가 제안한 적응 비선형 가상소산모델(Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation Model)을 3차원 유동에 적용하였다

계산 영역은 실린더 중심으로부터 전체 영역을 직경 D의 120배로 설정하였고 격자계수는 $201 \times 141 \times 61$ 인 O-형 격자계를 사용하였다. 대부분의 압축성 유동 연구에서 특성치를 이용한 비 반사경계조건을 사용하여 경계에서 파의 반사를 억제한다. 그러나, 고해상도 기법에서는 특성치 비반사조건을 사용함에도 불구하고, 파의 반사를 충분히 억제하지 못함으로 인하여, 경계부근의 넓은 영역을 완충영역(buffer zone)으로 처리하여 수치적 소산에 의해 파의 반사를 억제하는 기법을 사용한다. 본 논문에서는 완충영역과 특성치를 이용한 비 반사조건을 대신에, 단순한 비반사조건을 주는 대신에, 더 넓은 수치계산 영역 설정과 원방 경계영역에 성긴 격자계 (Coarse grid)를 사용하여 수치적 소산에 의해 파의 반사를 억제하는 방법을 사용하여, 특성치경계조건을 위한 복잡한 계산과정과 계산시간을 단축하였다.

고차 및 고해상도 기법을 이용한 3차원 유동해석은 많은 격자계와 장시간 계산이 요구된다. 따라서, 코드의 병렬화가 필요하다. 본 연구에서는 스레드(Thread)를 기반으로 하는 공유메모리 프로그래밍 방법인 OpenMP를 주로 사용하였다. OpenMP의 성능을 시험하기 위하여 스레드(Threads) 수 별로 계산을 해 보았다. 순차 코드에 비해서 2개의 스레드를 사용할 경우 계산시간이 1.6배 정도 향상됨을 Fig. 2를 통해서 확인 할 수 있었다. 그러나, 그 이상에서는 스레드 수가 증가함에도 불구하고 계산 속도가 빨라지지 않는다. 그 이유는 고차 차분화를 하기 위해서 7개 격자점을 이용한 차분식을 사용함으로써 각 계산영역간의 데이터 전송량이 많아짐에 따라 전체적인 성능이 향상 되지 않는 것으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 레이놀즈수 2000에 대한 수치계산을 하였다. Fig.1은 양력계수의 Strouhal수 ($St = fD/U_\infty$) 0.2121을 타 논문의 수치해석결과 및 실험치와 비교하였다. 난류 모델을 사용하지 않는 Myung[7]의 2차원 유동분석 값과는 차이를 보이고, Norberg[1]의 실험값 및 Roshko[8], Feyet[9]의 실험식과 Myung[7]의 S-A 난류모델을 사용한 값과는 매우 일치하는 값을 보여주고 있다.

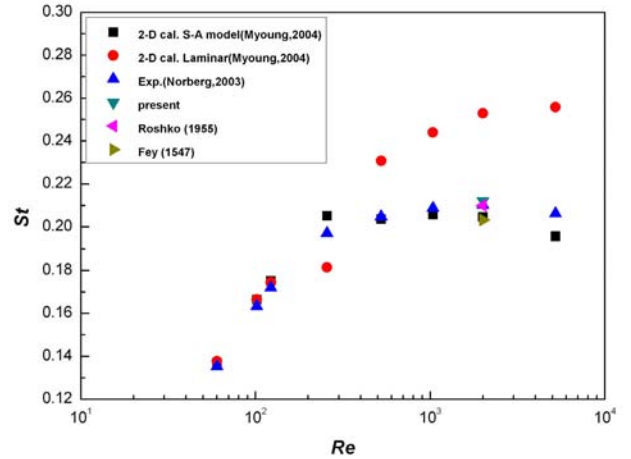


Fig.1 Strouhal number versus Reynolds number

Fig.2 에는 실린더 전방, 후방, 상방의 1D 거리 지점에서 압력변화의 주기적 특성을 보여 주고 있다. 수치 계산이 주기적 수렴상태를 보여 주고 있으며, 양력과 항력의 주기적 변화에서와 같이 상면에서의 주기가 전후방에서 주기의 2배가 되는 것을 볼 수 있다. 그러나, 후류 부분에서의 주기적 압력변화의 평균치가 약간씩 감소해가는 문제점이 있는데, 이는 과도한 수치 소산항에 의한 영향으로 보인다.

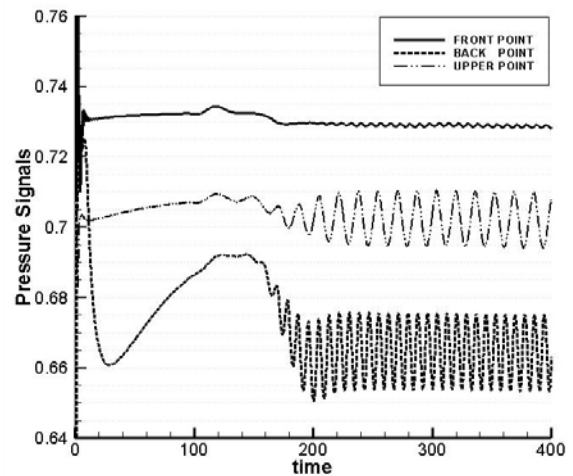


Fig.2 Acoustic signals at front, back, upper point

Fig.3 와 Fig.4은 한 주기 동안에 실린더 후류에서 발생하는 와류가 상하면에서 교대하면서 떨어질 때의 양력 계수와 항력 계수의 상관관계를 보여주고 있다. A는 실린더 하면에서 와류가 떨어질 때 최대항력계수와 최대양력계수가 발생하는 순간을 보여주고 있다. 이때의 압력분포도를 보면 와류가 떨어져 나가는 방향으로 음향파가 밀집되면서 진파됨을 볼 수 있다. B에서는 와류가 떨어지고 일정시간이 지나면서 최소항력값이 나타나는 순간이다. C는 벽면 상면에서 와류가 떨어져 가면서 최대항력계수가 발생하고, 양력계수는 A와 반대로 최소값이 발생하는 순간이다. D에서는 다시 최소 항력계수가 발생한다. 이런 주기적인 압력진동이 공력소음을 유발시키는 주요 이극자(di-pole) 소음원인 것을 볼 수 있다.

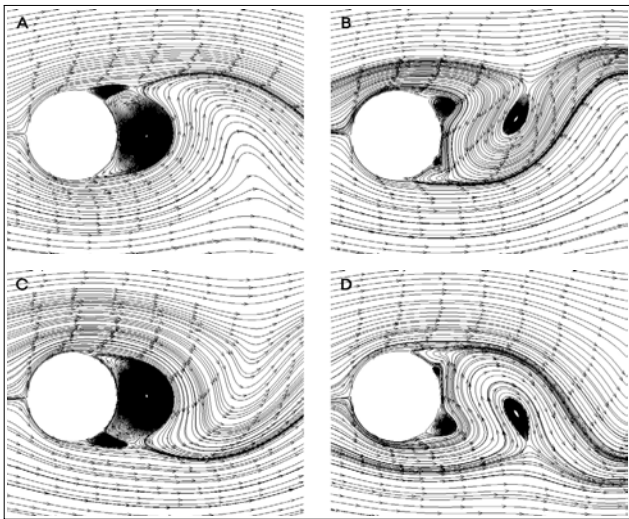


Fig.3 Stream line patterns form 1 period

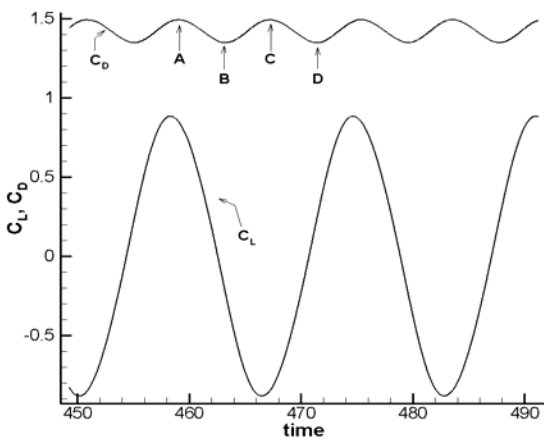


Fig.4 A bottom shed to top shed cycle

Fig.5은 3차원 유동의 와류 유출모습을 보기 위하

여 등와면을 보여주고 있다. x-축방향의 와류 w_x 의 강도가 z-축방향의 와류 w_z 의 강도에 비교하여 상대적으로 약하여, z-축 방향의 와류강도의 변화특성을 확실히 보여주고 있지는 못하다. 그러나, 2차 와류 w_x 의 등강도면을 보면 z-축 방향으로 2차 와류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 2차 와류가 발생하는 정성적인 특성은 참고문헌 [10]등과 유사하지만, 레이놀즈수에 따른 정량적인 분석이 더 필요하다.

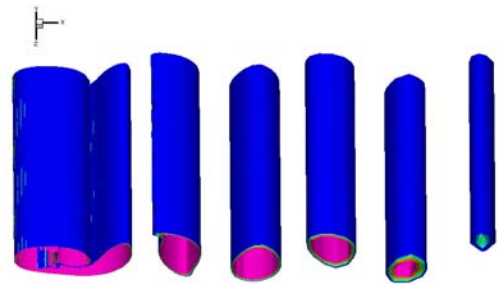


Fig.5 Karman vortex street behind cylinder at Re=2000

5. 결론

고차, 고해상도 수치기법인 OHOC 기법을 3차원 압축성 Reynolds Averaged Navier Stokes 식에 적용하여 원형 실린더 주위 유동을 수치 계산하였다. 병렬처리 방법을 사용하였는데, 수치영역간의 대량의 데이터 교환이 필요한 MPI 방법보다, 공유메모리를 이용하는 OpenMP를 이용한 병렬처리 방법을 사용하였다. 그러나 요구되는 대량의 데이터교환으로 CPU 증가에 따른 효율은 크지 못했다. 압축성 유동에 많이 사용하는 특성치 비반사조건이 고해상도기법 수치계산에서는 파의 반사를 충분히 억제하지 못하여, 넓은 영역의 완충영역을 사용해야 함으로 인해, 특성치를 이용한 비 반사조건이 크게 유익하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 수치계산영역을 원방에서 성긴 격자계를 사용하여 더 넓게 설정하고, 대신 경계조건은 매우 단순한 비반사조건을 주어 넓은 영역의 수치소산에 의해 파가 내부영역까지 영향을 주지 못하도록 하였다. 계산결과로는 양력 및 항력계수변화와 이들의 주파수 특성인 스트로울수를 타 2차원 수치계산결과 및 실험치와 비교하였다. 또한 압력파의 진파 특성과 Karman 와류 유출 특성을 분석하였고, 3차원 와류 유출과 2차와류 특성을 분석하였다. 전체적으로 수치계산결과는 타 2차

원 수치계산과 정성적인 특성은 매우 유사하나, 3차원 유동에 대한 정량적인 분석은 좀 더 이루어져야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] Norberg, C., Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and new Measurements, J. Fluids and Structures, Vol.17 (2003), pp. 57-96.
- [2] Williamson, C.H.K., Three Dimensional wake transition, J. Fluid Mech. pp. 328, 345.
- [3] Kim, J.W. and Lee D.J., Optimizd Compact Finite Difference Schemes with maximum Resolution, AIAA Journal, Vol.34 No.5, 3 (1996), pp. 887-89.
- [4] Kim J.W. and Lee D.J., Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation Model for Computational Aeroacoustics, 3rd CAA Workshop on Benchmark Problems, USA, November (1999).
- [5] C.H. Woo, J.S. Kim, and K.H. Lee, Analysis of Two- and three-Dimensional Supersonic Turbulence Flow around Tandem cavities, J. Mechanicals Science and Technology(KSME Int.J.), Vol.20 No.8 (2006), pp 1256-1265.
- [6] Hoffmann, K.C. and Chiang S.T., Computational Fluid Dynamics for Engineers, Engineering Education System USA, (1993).
- [7] H, K, Myong, Flow Simulaton past a Circular Cylinder by 2-D URANS, J. Korean Society of Computational Fluids Engineering, Vol9 No4 (2004), pp 48-54.
- [8] A. Roshko, On the wake and drag if bluff bodies, J. Aeronaut. Sci. 22 (1955), pp. 124.
- [9] U. Fey, M. Koenig and H. Eckelmann, A new Strouhal-Reynolds number relationship for the circular cylinder in the range $47 < Re < 2 \times 10^5$, Phys. Fluids, 10 (1998), pp. 1547.
- [10] Jung Yul Yoo, Direct Numerical Simulation of the Locj-on Phenomenal in the Wake behind a Circular Cylinder in a Perturbed Flow at $Re=360$, J. Mechanicals Science and Technology(KSME), Vol.31 No.9 (2007) pp. 780-789.