



고해상도 수치기법에 의한 B-Mode 영역에서 원형실린더 주위의 3차원 후류 유동특성 연구

김 태 수,¹ 이 상 수,² 김 재 수^{*3}

THREE DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF WAKES OVER A CIRCULAR CYLINDER IN THE B-MODE USING HIGH ORDER SCHEME

T.S. Kim,¹ S.S. Lee² and J.S Kim ^{*3}

본 논문에서는 실린더 주위유동의 B-mode에 해당하는 레이놀즈 수 300~1000 범위에서 고차·고해상도 기법(OHOC Scheme)을 이용하여 원형 실린더 주위의 유동장 및 음향장 특성에 대해서 연구하였다. B-mode 레 이놀즈 수 범위에서 스펙트럼 방향 길이에 따른 3차원 원형실린더의 스트로울 수, 양·항력계수의 상관관계에 대해 수치계산 및 실험 결과와 비교 분석한 결과 매우 잘 일치하는 것을 보였다. 그리고 이 결과를 토대로 하여 B-mode 불안정성 영역에서 보다 정확한 2차 와류 모사를 위한 적절한 스펙트럼 방향을 찾고, 3차원 후류유동의 불안정성이 음향장의 변화에 미치는 영향을 정성적으로 고찰하여, 3차원 원형실린더의 공력소음 대한 기초적인 연구를 수행하였다.

Key Words : Circular Cylinder, Aero-Acoustics, Optimized High-Order Compact Scheme, Vortex Shedding, Second Vortex, B-mode

1. 서 론

몽툑한 물체 주위의 유동에 대한 연구는 항공기, 자동차, 선박 등의 실제 운송체 주위 유동을 이해하는데 가장 기본이 되는 연구로서 오래전부터 많은 연구가 이루어 졌다. 특히 원형 실린더 주위 유동에서는 실린더 벽면의 경계층 유동, 경계 층 유동박리, 층류와 난류유동, 전단층과 전단층의 박리유동, 와류와 와류 웨이딩 등, 다양한 유동형태가 존재 한다[1]. 또한 원형실린더 주위의 유동이 레이놀즈 수(Reynolds number)와 스트로울 수(Strouhal number)라는 2개의 파라미터로 특성화 되어있다.

레이놀즈 수에 따라서 원형실린더 후류의 웨이딩은 Karman 와류가 형성되기 시작하는 임계 레이놀즈 수($Re \approx 47$)로부터 약 180 이하의 레이놀즈 수에 범위에서 2차원적인 유

동구조를 보인다. 레이놀즈 수가 약 180 이상이 됨에 따라 Karman 와류는 3차원적인 유동구조로 변하게 된다. 실린더 주위의 유동에서의 3차원 천이영역 대한 연구로는 Roshko[2]가 속도섭동(velocity fluctuations), 분광(spectra), 그리고 주파수 측정결과를 토대로 $150 \leq Re \leq 300$ 일때, $Re > 300$ 이상일 때 레이놀즈와 스트로울 수의 관계가 불규칙성이 나타나는 것을 언급한 이래로 3차원 원형실린더 후류에 관한 많은 연구가 이루어 졌다.

근래에 Williamson 등은 3차원 천이과정은 $Re=178$ 일 때와 $230 < Re < 260$ 일 때 스트로울 수와 레이놀즈 수 관계가 불연속적인 특성을 갖는다는 것을 확인하였다[3~6]. 실린더 후류의 3차원 와류의 구조는 $180 < Re < 230$ 근처에서 2차 와류의 스펙트럼 방향 파장이 실린더 직경의 약 4배에 해당하는 크기로 형성되는 A-mode 불안정성이 나타난다. 또한 $230 < Re < 260$ 이상에서 2차 와류의 파장의 길이가 실린더 직경에 해당하는 B-mode 불안정성이 나타난다.

3차원 불안정성을 갖는 A-mode와 B-mode에서는 레이놀즈와 스트로울 수 관계는 뚜렷한 차이를 찾아볼 수 있다. A-mode에서 스트로울 수는 2차원적인 유동구조의 스트로울 수에서 레이

1 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과

2 비회원, 한국항공우주산업주식회사

3 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

* Corresponding author, E-mail: jsckim@mail.chosun.ac.kr



놀즈 수가 커짐에 따라 불연속적인 감소를 나타내고, B-mode 영역에서는 A-mode 영역의 스트롤 수로 부터 B-mode에 해당하는 스트롤 수로 불연속적인 증가를 보인다[7]. Noack & Eckelmann[8]은 이 두 가지불안정성에 대하여 임계 레이놀즈 수와 스펠 방향 파장에 대하여 안정성 해석을 도입하였고, 이후 Barkley & Henderson[9]의 Floquet 안정성 해석에 의해 각각의 mode가 발생하기 시작하는 임계 레이놀즈 수와 최대 성장률을 보이는 스펠 방향 파장을 구하고 실험치와 잘 일치함을 보였다.

최근에는 3차원 천이 영역에 대해 Zhang[10], Thompson[11] 등이 3차원 수치해석을 시작하였으며, Braza[12], Labbe[13] 등에 의해 연구가 진행되어, 실험에서 발견되었던 A-mode, B-mode 및 와류 전위 등이 수치적으로도 확인되었다. Norberg[14]는 현재까지의 원형실린더 유동에 대한 이론적, 실험적 및 수치적 연구결과를 종합하여 레이놀즈수 영역에 따른 유동특성을 분석하였는데, 3차원 mode에 의한 레이놀즈 수와 스트롤 수의 관계, 임계 레이놀즈 수 및 축방향의 파장 등 많은 부분이 밝혀졌지만 각 모드에의 정확한 발생 메커니즘, 이 영역에서의 레이놀즈 수에 따른 양력 및 항력의 변화 등 아직까지 실험과 수치해석 결과 사이에 다양한 부분에서 상이한 결과가 얻어지고 있음을 보여주었다.

저마하수 유동이 원형 실린더를 지날 때 레이놀즈 수의 변화에 따른 유동 특성의 변화는 소음 특성의 변화에도 영향을 보이게 된다[15]. 유체 소음의 음파에 의한 압력변동은 유체의 압력변동에 비해서 미약할 정도로 매우 작으며, 이 때문에 고정도의 계산 기법이 필요하다. 또한 음파는 음속에서 전파하기 때문에 이러한 현상을 해석하기 위해서는 매우 큰 계산 영역이 필요할 뿐만 아니라, 실험결과나 원거리 흐름에 대한 이론과 비교하기 위해서도 넓은 계산영역이 요구된다. 때문에 이러한 흐름 현상을 해석하기 위한 계산기기에 요구되는 부하도 매우 크게 증가한다. 최근에 들어서 Kim & Lee[16]는 OHOC 기법과 4th-order Runge-Kutta 기법, 특성치 경계조건을 이용하여 2차원 원형 실린더 해석을 통해서 와류 생성 매커니즘과 소음 방사를 계산하고, 시간에 따른 양력, 항력계수와 원음장에서의 공력소음을 분석하였다.

본 논문에서는 공간 차분법과 시간차분법으로 OHOC 기법[17], 4th-order Runge-Kutta법을 이용하여 원형실린더에서 발생하는 2가지의 3차원 불안정성 mode 중 B-mode에 해당하는 레이놀즈 수 300~1000범위에서 해석하고 수행하였다. 고차, 고해상도 기법은 비선형 불 연속파를 계산 할 경우 수치적으로 불안정을 발생하게 되는데 이를 해결하기 위하여 Kim&Lee[18]가 제안한 인공감쇄모형을 사용하여 수치적 불안정성을 제거하였다. 또한 입류 경계조건으로는 자유유동 조건과 음파의 반사를 제거하기 위해 압력에 대한 외삽조건을 사

용하고, 출류조건으로는 대류 경계조건을 사용하였고, 특히 벽면에서 반사파를 억제하기 위해서 넓은 수치계산영역을 설정하고 원방 경계영역에서 성근격자(coarse grid)를 사용하였다. 또한 장시간의 계산 시간과 대용량의 메모리를 요구하는 고해상도 수치기법의 계산을 위하여 OpenMP방법을 이용하여 병렬처리를 수행하였다.

이와 같은 수치 해석 조건에서 스펠 방향 길이를 $\pi d/2, \pi d, 2\pi d$ 로 각각 계산하여 3차원 원형실린더의 레이놀즈 수에 따른 스트롤 수와 양·항력계수의 상관관계에 대해 Williamson[19], Henderson[9]의 연구 결과와의 비교를 유동특성을 검증하고 와류의 생성 매커니즘 및 3차원 와류의 구조의 변화를 고찰하였다, 또한 3차원 원형실린더의 B-mode 불안정성 영역에서 보다 정확한 2차 와류 모사를 위한 최적의 스펠방향 길이를 찾고, 소음 특성의 변화를 실시간으로 계산하여 원음장에서 소음특성을 정성적으로 분석하였다.

2. 지배방정식과 수치기법

2.1 지배방정식과 수치기법

본 연구에서는 일반 좌표계로 변환된 3차원 비정상 압축성 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 이 때 지배방정식은 아래와 같다.

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

\hat{Q} 는 무차원 보존형의 유량함수 벡터(Conservative Flow Variable Vector)를 나타내며, $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ 는 각 방향의 비점성 유량벡터(Inviscid Flux Vector)이고, $\hat{E}_V, \hat{F}_V, \hat{G}_V$ 는 각각의 점성유량벡터(Viscid Flux Vector)를 나타내며, 세부적인 표현은 참고문헌[20]과 같다.

공간 이산화 기법으로는 Kim& Lee[17]가 2차원 전산공력음향 해석에 사용한 고차, 고해상도 수치기법인 OHOC(Optimized High-Order Compact)을 3차원 유동에 적용하였다. 수치 미분을 구하기 위한 방법은 다음과 같은 7격자점을 이용한 내재적 방법에 의해 구한다. 각각에 사용되는 계수는 참고문헌[17]과 같다.

$$\begin{aligned} & \beta f'_{i-2} + \alpha f'_{i-1} + f'_i + \alpha f'_{i+1} + \beta f'_{i+2} \\ & = \frac{1}{h} \sum_{m=1}^3 a_m (f_{i+m} - f_{i-m}) \end{aligned} \quad (2)$$

고차, 고해상도의 높은 정확도를 유지하기 위해서 시간 차

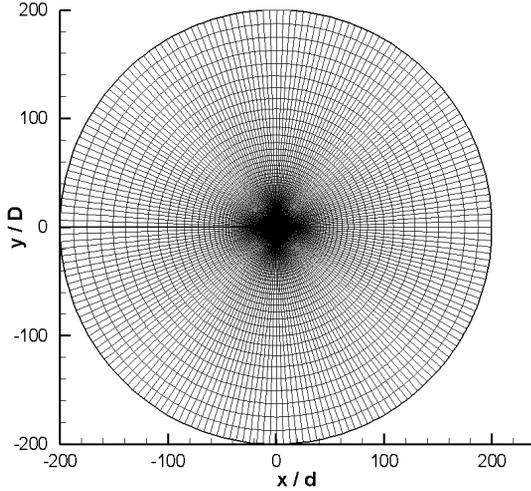


Fig. 1 Grid mesh system for computation of circular cylinder flow

분법도 4차 정밀도의 Runge-Kutta Explicit Method을 사용하였다[21].

OHOC 기법이 공간에 대해서 높은 차수로 높은 해상도를 얻을 수 있는 반면, 중앙차분의 특성을 가짐으로 인하여, 전방차분법(upwind Scheme)처럼 파의 전파특성을 정확히 모사하지 못함으로 인해 소산오차와 확산오차가 발생하고 이는 수치 안정성에 크게 영향을 준다. 이 오차를 줄여 해의 안정성을 높이기 위하여 Kim&Lee[18]가 제안한 적응 비선형 가상소산모델(Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation model)을 3차원 유동에 적용하였다. 그러나 인공감쇄항에 의한 수치안정성 조정은 수치시험에 의해 감쇄항의 크기를 조정해 주어야 하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 사용된 격자계는 후류유동 뿐만 아니라 원음장으로 방사되는 음향장의 계산을 위하여 Fig. 1과 같은 O-type 격자를 사용하였다. 계산 영역은 실린더 중심을 원점으로 하여 전체영역을 직경 d의 200배로 하였으며, 스펜방향 길이는 $\pi d/2, \pi d, 2\pi d$ 로 하고 격자계수는 x, y, z 방향으로 각각 $201 \times 141 \times (20, 40, 60)$ 등으로 하여 최대 170만개의 격자계를 사용하였다.

대부분의 압축성 유동 연구에서는 경계조건으로 특성치를 이용한 비 반사조건을 사용하여 경계에서 파의 반사를 억제한다. 그러나 고해상도 기법에서는 비 반사조건을 사용함에도 불구하고, 파의 반사를 충분히 억제하지 못함으로 인하여, 경계부근의 넓은 영역을 완충영역(buffer zone)으로 처리하여 수치적 소산에 의해 파의 반사를 억제하는 기법을 사용하였다. 본 논문에서는 완충영역을 사용하는 특성치를 이용한 비 반사조건을 사용하는 비효율적인 방법을 사용하지 않고, 넓은 수치계산영역을 설정하고, 원방 경계영역에서 성긴 격자계

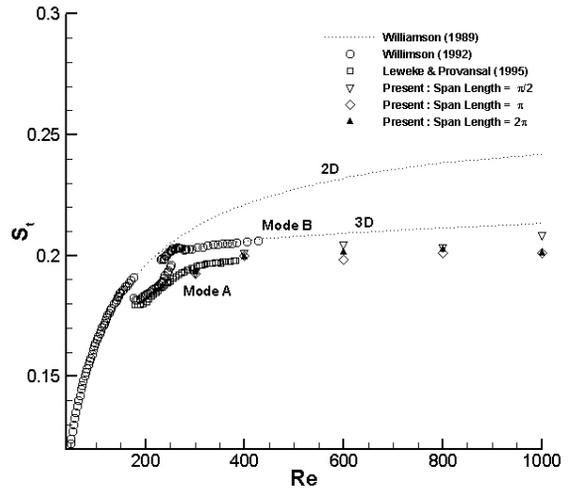


Fig. 2 Relationship between St and Re

(coarse grid)를 사용하여 수치적 소산에 의해 파의 반사를 억제하는 방법을 사용하였다. 구체적 경계조건은 유동장의 출구에는 대류경계조건을 사용하였고, 실린더의 입류 조건으로는 자유유동 조건과 파의 반사를 막기 위하여 압력에 대한 외삽조건을 사용하였다. 벽면 경계조건은 점착조건을 사용하고, 실린더의 축 방향으로는 주기조건을 적용하였다.

고차 및 고해상도 기법을 이용한 3차원 유동계산은 많은 격자계와 장시간이 요구된다. 따라서 코드의 병렬화가 필요하다. 병렬처리기법으로는 공유메모리를 이용함으로써 Penta-diagonal matrix가 각 노드간의 통신함으로써 생기는 통신지연을 해결하고, 상대적으로 쉽게 프로그램을 작성 할 수 있는 OpenMp 방법 사용하였다. OpenMP 방법은 스레드(thread)를 기반으로 하는 공유메모리 프로그래밍 모델이며, 기존의 코드에 간단한 지시어만으로 병렬처리 프로그램을 작성할 수 있다.

3. 유동 해석 결과 및 고찰

3.1 레이놀즈 수와 스트롤 수, 양력 항력계수의 특성

본 연구에 사용된 고해상도 수치기법을 검증하기 위하여 자연 웨이딩 상태의 결과를 이전 연구 결과들과 비교하였다. Fig. 2 는 원형 실린더의 와류 웨이딩 정도를 나타내는 스트롤 수와 유동의 특성을 정의하는 레이놀즈 수의 상관관계에 대해 본 연구 결과인, 스펜방향 길이의 변화에 관한 수치해석 결과와 Williamson[19]등의 실험에서의 스트롤 수를 비교한 것이다. 양력계수(CL)의 정점들의 간격을 평균하여 웨딩 주기를 구한다.

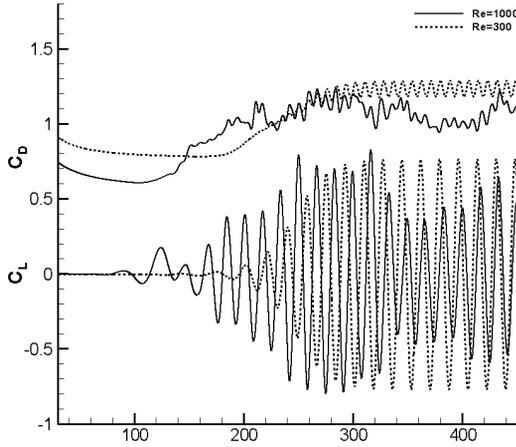


Fig. 3 Time histories of the lift and drag coefficient at Re=1000, 300

수치해석을 수행한 B-mode에서의 레이놀즈수와 스트로울수의 관계는 Williamson[19]의 실험결과와는 약간의 차이를 보여주고 있으나, Leweke[22]의 결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 스펀 방향의 길이의 변화가 두 계수의 상관관계에 미치는 영향은 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 Re=300, 1000일 때 시간의 변화에 따른 양력계수와 항력계수의 변화를 보여주고 있다. 주기적으로 변화하는 양력과 항력계수의 섭동은 Re=300일 때 시간에 따른 양력과 항력계수의 변동강도는 일정한 강도를 갖으나, Re=1000일 때는 시간에 따라서 변동강도가 매우 불균일해지는 것을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 이러한 불균일한 변동강도는 레이놀즈수가 증가함에 따라서 더욱 뚜렷하게 을 확인할 수 있으며 이것을 3차원 불안정성의 영향으로 사료된다. 또한 양력의 섭동량은 항력에 비해 주기가 2배가 됨을 볼 수 있다. 이것은 전후방의 압력 변화가 상하면의 압력 주기 변화의 절반이기 때문이다.

Fig. 4의 레이놀즈 수에 따른 양력섭동 제곱 평균근(CLRMS)을 나타내고, 이전의 연구결과들과 비교하였다. 레이놀즈 수에 따라서 Norberg[14]등의 3차원 실험 결과와 잘 일치함을 보여주고 있으며, 스펀 방향의 길이가 $2\pi d$ 일 때 기존의 연구 결과들과 가장 잘 일치하고 있다. 따라서 스펀길이의 증가가 레이놀즈수와 CLRMS의 관계에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 레이놀즈 수에 따른 시간당 항력계수(C_D)의 평균량을 나타내고 있다. 이는 유동이 완전히 발달하여 정상상태에 도달한 후 평균값을 구한 것이다. 항력 계수에 대한 실험 결과를 살펴보면, $300 < Re < 1000$ 영역에서의 2차원 실험결과를 살펴보면 약 1.3에서 1.2로 서서히 감소하는 결과를 제시하고, Henderson의 3차원 수치해석 결과에서는 2차원 해석 결과에 비

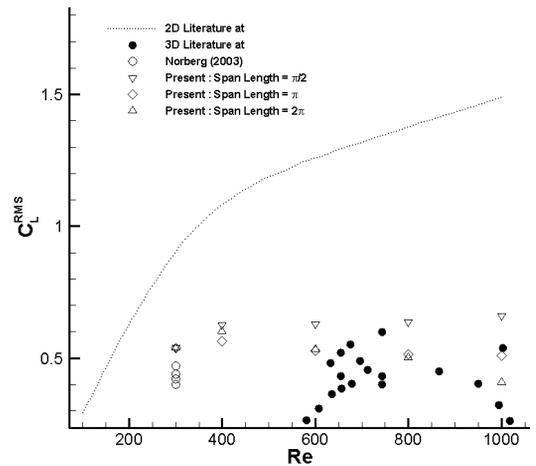


Fig. 4 Relationship between CLRMS and Re

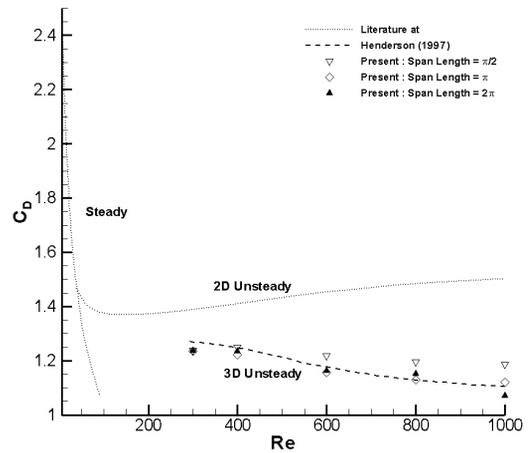


Fig. 5 Relationship between C_D and Re

하여 더 적은 값에서 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 연구 결과에서는 레이놀즈 수의 증가함에 따라 C_D 는 감소하였으며, Re=600이후에는 현저하게 그 감소율이 낮아졌다. 스펀 방향 길이의 증가에 따라 항력계수는 Henderson의 수치해석 결과와 보다 일치해져 가는 것을 볼 수 있다.

3.2 와류 웨이딩

Fig 6, 7은 Re=300 일때 z-축의 중심단면에서 한 주기를 4개의 간격으로 샘플링 하여 공동 내부의 등 와선도와 스트림 라인을 통해 와류 웨이딩의 발생 과정과 하류로의 거동을 보여준다. 한 주기 동안 2개의 와류가 형성되며, A시점에서 원형 실린더 벽면에서의 와류 발생 형태를 보면, +y 방향에서 음의 와류 웨이딩이 최초로 일어나고 이 와류 웨이딩의 선단 부분이 -y방향으로 이동하게 되는 것을 볼 수 있다.

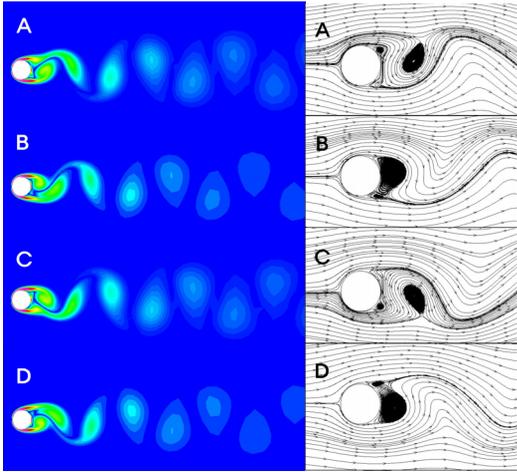


Fig. 6 Vorticity and streamline Patterns from 1 period at $Re=300$

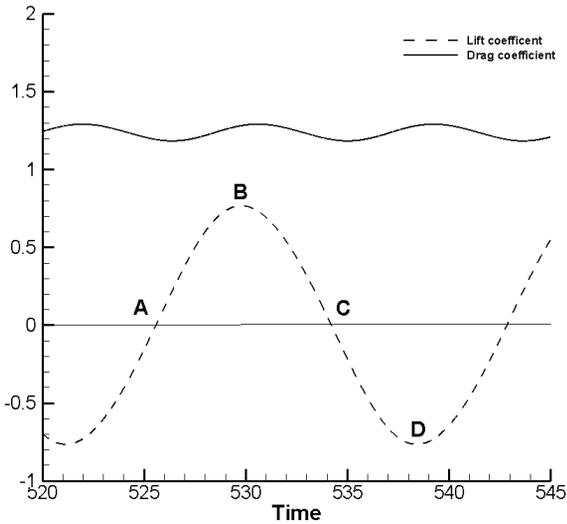


Fig. 7 A bottom shed to top shed cycle

이때 동일한 시간에서 스트림라인을 살펴보면 동일한 위치에서 이전의 웨이딩 순간에 발생된 와류의 영향으로 선단 부분의 속도가 낮아지게 되어 후단과의 속도 차이가 줄어들어 와류의 형태가 둥글게 된다. 이때의 양력계수는 0이고 항력계수는 최소가 되어 가는 것을 볼 수 있다. B시점에서는 와류 웨이딩의 선단 부분이 $-y$ 방향으로 이동하여 둥글게 되고 벽면의 하에서 와류가 떨어져 가면서 최대 항력계수 값과 양력계수 값이 나타나고 있고, C에서는 최초의 와류는 하류로 이동하면서 타원형으로 바뀌며, 양의 와류가 발생하고, 파가 밀집되어 $-y$ 방향에서 양의 와류가 발생하게 되고 이 와류의 선단 부분이 $+y$ 방향으로 이동하게 된다.



Fig. 8 B-mode vortex shedding: comparison of streamwise components of vorticity for $\pi d/2$ (top), πd (middle), $2\pi d$ (bottom) at $Re=1000$

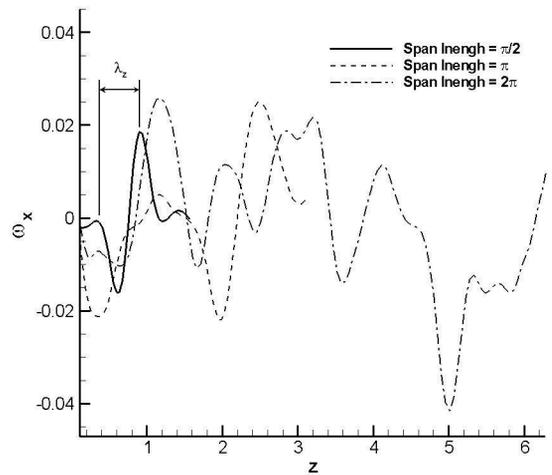


Fig. 9 Streamwise vorticity distributions in the base line located $3d$ downstream of cylinder : $Re=1000$

따라서 선단 부분의 속도가 후단 부분보다 더욱 빨라지기 때문에 와류의 형태가 길게 늘어지게 된다. 그러나 먼 하류로 가게 되면 양과 음의 와류들은 모양이 타원형으로 바뀐다. D에서는 두 번째 와류가 최초의 와류와 마찬가지로 둥글게 되어 하류로 이동되고 항력계수와 양력계수는 최소가 된다.

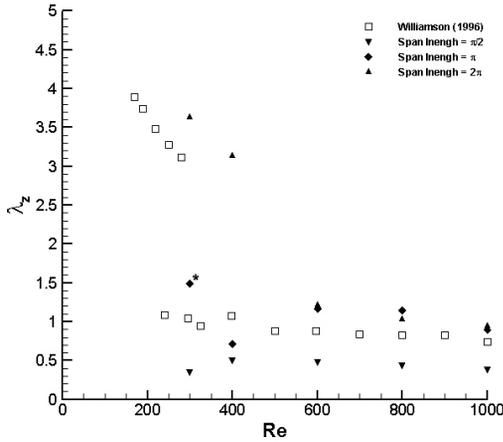


Fig. 10 Spanwise wavelengths of the 3-D instabilities

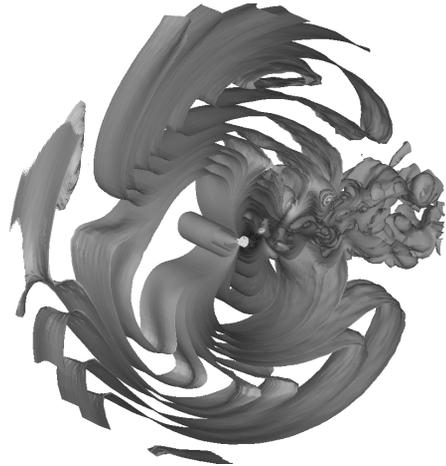


Fig. 12 Dipole Sound Field - pressure contour

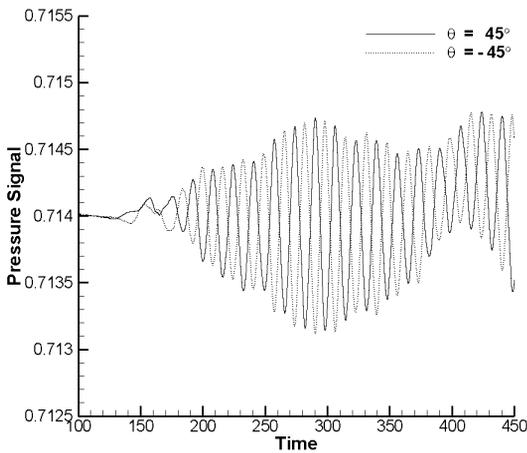


Fig. 11 time histories of the acoustic pressure at Re=1000

3.3 횡 방향 길이의 변화에 따른 2차 와류의 파장

본 연구에서는 수치 계산영역 중 스펠방향의 길이를 변화시켜 2차 와류의 파장(λ_z)을 살펴보고자 한다. Fig. 8은 B-mode 천이영역인 $Re=1000$ 에서 스펠방향 길이의 변화에 따라 활발히 존재하는 2차 와류의 성분을 볼 수 있다. Fig. 9에서는 스펠방향 길이의 변화로 인한 2차 와류 크기 변화를 보다 정량적으로 살펴보기 위하여 실린더 후면의 약 3D 지점의 y-z 평면상의 주 유동 방향 와도의 분포와 그 평면상에서 실린더 축과 평행하게 분포하는 주 유동 방향의 2차 와류의 분포를 나타내었다. Williamson[19]은 활발한 3차원적인 와구조가 관찰되는 $Re=260\sim 1200$ 의 영역에서 주 유동방향을 축으로 서로 반대방향으로 회전하는 2차 와류가 활발히 존재하며, 실린더 후면에서의 2차 와류의 파장이 실린더 직경에 해당하는

길이를 가진다고 하였다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 레이놀즈 수가 $\pi/2$ 일 경우에는 2차 와류 파장 길이가 실험에서 측정된 값의 약 1/2의 크기를 갖게 되는 것을 볼 수 있다. 레이놀즈 수가 600이상이고, 스펠방향의 길이가 π 이상 일 때, 2차 와류의 파장 길이가 약 1d로 Williamson[19]의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 B-mode의 특성을 연구하기 위한 최소의 스펠방향의 길이는 직경의 약 π 배 정도인 것을 알 수 있다. 그러나 스펠방향의 길이가 2π 이면서 레이놀즈수가 400이하인 경우에는 2차 와류의 파장 길이가 A-mode에 가까운 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 실린더로부터 방사되는 소음의 원거리 특성을 알아보기 위해서 $Re=1000$ 일때, 원주중심으로부터 20D인 지점에서 각각의 방향으로 $\theta = 45^\circ, -45^\circ$ 에서 시간에 따른 압력 변동을 보여준다. 압력은 주기적으로 변동하고 있음을 알 수 있으며, 압력이 원주의 상하로부터 교대로 방출되고 있음을 확인 할 수 있다. 이것은 Fig. 2의 압력변동 및 스트롤 수와 같다. 따라서 음파의 발생 주파수와 양력의 변동 주파수는 같으며, 동시에 Karman 와류의 발생 주파수와 같다는 것을 알 수 있다. 이것은 계산 영역 전체의 압력에 비해서 매우 작은 0.0001범위에서 이루어지는 것을 확인할 수가 있다. 이것은 음파에 의한 압력변동을 의미한다.

Fig. 12은 $Re=1000$ 에서의 3차원 원형 실린더 주위의 음향장을 보여주고 있다. 원형 실린더의 벽면으로부터 발생된 후류가 주기적 유출되면서 형성된 Karman 와류의 영향과 3차원 원형실린더의 불안정 영역인 B-mode에 해당하는 2차 와류의 영향을 받은 3차원 음향장을 보여주고 있다. 2차 와류는 Karman 와류에 비교하여 상대적으로 약하지만, 이로부터 야기된 불안정성은 원음장에도 영향을 미치는 것을 보여주고 있다.

4. 결 론

고차, 고해상도 수치기법인 OHOC 기법을 3차원 압축성 Reynold Averaged Navier Stokes 식에 적용하여 3차원 원형실린더 주위의 흐름장으로 부터 발생하는 유동장과 음향장을 수치해석을 통해서 조사하였다. 또한 대량의 수치계산에 따른 계산속도 증가를 위하여 OpenMP를 이용한 병렬처리 방법을 사용하였다. 넓은 완충영역과 원방 격자계를 성근격자계로 사용하여 수치적 소산에 의한 파의 반사를 억제하고자 하였다.

그 결과 원주 주위의 Karman와류에 의해 발생하는 양력과 항력계수의 섭동과 주파수 특성인 스트롤 수가 다른 수치계산결과 및 실험치와 잘 일치함으로써 원형실린더 유동장이 잘 묘사되었음을 확인하였다. 또한 3차원 원형실린더의 B-mode 불안정성 영역에서 보다 정확한 2차 와류 묘사를 위한 최적의 스펜방향의 길이를 찾고, 소음 특성의 변화를 실시간으로 계산하여 Karman와류와 2차 와류에서 야기되는 원음장을 정성적으로 분석하였다.

참고문헌

- [1] 2000, Dalton, C., "Calculation of flow past a circular cylinder using LES," *WVIVOS-Workshop on Vortex-Induced Vibrations of Offshore Structures*, Vol.1.
- [2] 1954, Roshko, A., "On the development of turbulent wakes from vortex streets," *NACA Rep.*, p.1191.
- [3] 1988, Williamson, C.H.K., "The existence of two stages in the transition to three-dimensionality of a cylinder wake. Phys," *Physics of Fluids*, Vol.31, pp.3165-3168.
- [4] 1996, Barkley, D. and Henderson, R.D., "Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder," *J. Fluid Mech.*, p.322.
- [5] 1996, Williamson, C.H.K., "Three-dimensional wake transition behind a cylinder," *J. Fluid Mech*, pp.328-345.
- [6] 1992, Williamson, C.H.K., "The natural and forced formation of spot-like "vortex dislocations" in the transition of a wake," *J. Fluid Mech*, pp.243-393.
- [7] 1996, Williamson, C.H.K., "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, Vol.28, pp.477-539.
- [8] 1994, Noack, B.R. and Eckelmann, H., "A global stability analysis of the steady and periodic cylinder wake," *J. Fluid Mech.*, pp.270-297.
- [9] 1996, Barkley, D. and Henderson, R.D., "Threedimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol.322, p.215.
- [10] 1995, Zhang, H., Fey, U., Noack, B.R., Koenig, M. and Eckelmann, H., "On the transition of the cylinder wake," *Phys. Fluids*, Vol.7.
- [11] 1996, Thompson, M., Hourigan, K. and Sheridan, J., "Three-dimensional instabilities in the wake of a circular cylinder," *Exp. Thermal Fluid Sci*, Vol.12, p.190.
- [12] 1998, Persillon, H. and Braza, M., "Physical analysis of the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder by three-dimensional Navier-Stokes simulation," *J. Fluid Mech*. Vol.365, p.23.
- [13] 2007, Labbe, D.F.L. and Wilson, P.A., "A numerical investigation of the effects of the spanwise length on the 3-D wake of a circular cylinder," *J. Fluid & Structures.*, Vol.23 pp.1168-1188.
- [14] 2003, Norberg, C., "Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and new Measurements," *J. of Fluids and Structures*, Vol.17, pp.57-96.
- [15] 1986, William, K. Blake, "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration," ACADEMIC PRESS. INC. Vol.1.
- [16] 1999, Kim, J.W., Jeong, C.M., Heo, D.N. and Lee, D.J., "Direct Computation of Sound Generation and Radiation from a Singing Wire," *137th Regular Meeting of Acoustical Society of America*.
- [17] 1996, Kim, J.W. and Lee, D.J., "Optimizd Compact Finite Difference Schemes with maximum Resolution," *AIAA Journal*, Vol.34, No.5, pp.887-893.
- [18] 1999, Kim, J.W. and Lee, D.J., "Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation Model for Computational Aeroacoustics," *3rd CAA Workshop on Benchmark Problems*.
- [19] 1998, Williamson, C.H.K. and Brown, G.L., "A series in $1/\sqrt{Re}$ to represent the Strouhal-eynolds number relationship of the cylinder wake," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.12, pp.1073-1085.
- [20] 2006, Woo, C.H, Kim, J.S. and Lee, K.H., "Analysis of Two- and three-Dimensional Supersonic Turbulence Flow around Tandem cavities," *Journal of Mechanicals Science and Technology(KSME Int.J.)*, Vol.20, No.8, pp.1256-1265
- [21] 1993, Hoffmann, K.C. and Chiang S.T., "Computational Fluid Dynamics for Engineers," Engineering Education System USA.
- [22] 1995, Leweke, T. and Provansal, M., "The flow behind rings : bluff body wake without end effects," *J. Fluid Mesh*. pp.288-265.