

◎ 논문

2-D URANS에 의한 원형 실린더 주위의 와류유출 유동 수치해석

명 현 국*

Flow Simulation past a Circular Cylinder by 2-D URANS

Myong, Hyon Kook

Vortex-shedding flows past a circular cylinder for $200 \leq Re \leq 5000$ are numerically simulated with the PowerCFD code, using a finite volume method and an unstructured grid system, developed by the author. The simulation is performed by solving the unsteady 2-D Navier-Stokes equations with both no model and turbulence model. The resulting Reynolds number dependence of the Strouhal number and of the drag and lift coefficients is compared with both experiments and previous numerical results. It is found that, in the range of $200 \leq Re \leq 5000$ the calculation method with a turbulence model is capable of producing reasonably more accurate results than that with no model for the main practically relevant parameters such as Strouhal number, drag and lift coefficients.

Key Words : 비정상 RANS(URANS), 와류유출(Vortex Shedding), 원형 실린더(Circular Cylinder), 항력 및 양력 계수(Drag and Lift Coefficients), 수치해석(Simulation)

1. 서 론

매끈한 원형 실린더 주위의 유동은 기하학적인 단순성은 물론 실제적인 응용에 따른 공학적 중요성 때문에 유체역학에서 주된 연구토픽으로 되어 있다. 또한, 이러한 구조물에 대한 유동관련 비정상 부하에 대한 지식은 수력 및 공기역학적 설계 및 제어에 절대적으로 필요하다[1].

원형실린더 주위의 유동은 정상상태의 경계조건 하에서 레이놀즈수, $Re > 45$ 로 되면 비정상적인 유동상태가 자발적으로 생기고, 실린더 뒤쪽에 규칙적인 모습으로 번갈아 일어나는 와류유출(vortex shedding) 또는 와류발산이 생긴다. 이 와류유출은 유동으로 야기되는 진동 및 소음의 주된 요인으로 알려져 있으며, Karman 와열(vortex street)이라 부르는 와류꼬리(항적)는 흐름방향에 수직하게 원통에

주기적으로 변동되는 양력을 유발시키고, 실린더에 대한 항력도 증가시킨다. 따라서 실린더 표면에서의 유동량 및 유동상태는 레이놀즈수가 증가함에 따라 상당히 변하게 된다.

최근 Norberg[2]는 원형 실린더 주위 유동에 대한 현재까지의 이론적, 실험적 및 수치해석적 연구결과[2-11]를 정리하여 유동특성을 Re 수 영역별로 나타내었으나, 실험 및 수치해석적 연구결과에는 아직 상당부분 일치된 견해가 얻어져 있지 않다. 특히, 박리점 하류의 전단혼합층(shear mixing layer)의 불안정성에 기인한 층류-난류 천이의 시작 및 3차원성 유동특성 때문에 다양한 유동현상이 나타나는 것으로 알려져 있는 $200 < Re < 6000$ 인 영역에서는 r.m.s. 양력계수에 대한 수치해석적 연구결과는 상당히 분산된 값을 제시하고 있으며, 실험결과와도 아직 상당한 차이를 나타내고 있다[2]. 또한, 이 Re 영역에 대해서 기존의 수치해석적 연구는 대

* 2004년 8월 25일 접수

* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

부분 유동현상을 규명하는데 초점을 맞추어 난류로 바뀌는 와류영역내 격자를 매우 조밀하게 하여 3차원적으로 직접 해석하는 직접수치해석(DNS) 방법을 사용하고 있으며, 공학적인 관점에서 레이놀즈 평균화된 N-S 방정식(RANS)에 난류모델을 도입하여 해석한 연구는 저자가 아는 한 거의 보고되어 있지 않다.

본 연구에서는 원형 실린더 후류에 생기는 와류내의 유동이 층류에서 난류로 바뀌는 $200 \leq Re \leq 5000$ 범위에서 비정상 RANS (URANS)에 난류모델을 도입하여 비정상 와류유출 유동을 이차원적으로 해석하고, 공학적으로 중요한 Strouhal 수, 항력계수 및 양력계수에 대한 레이놀즈수의 의존성에 대해 기존의 실험결과 및 난류모델을 사용하지 않은 이차원 계산결과와 비교분석하며 2-D URANS 계산 가능성 및 와류유출 현상을 파악하고자 한다.

2. 수치해석 방법

전술한 바와 같이 $Re > 200$ 에서는 원형 실린더 후류에 생기는 와류내의 유동은 층류에서 난류로 바뀐다. 이와 같이 층류박리(laminar separation)인 경우, 이 와류내의 난류유동을 고려하기 위해 일반적으로 두 가지 방법을 선택할 수 있다. 첫 번째 방법은 난류로 바뀌는 와류영역내 격자를 매우 조밀하게 하여 직접 해석하는 직접수치해석(DNS) 방법 또는 격자보다 작은 스케일에 대해 Subgrid Scale 모델을 도입하는 LES(Large Eddy Simulation) 방법 등이 있으며, 물리적인 유동현상을 규명하는데 적합하다. 그러나 많은 격자점이 요구되고 3차원적으로 계산해야하므로 계산 시간 및 메모리 용량을 고려할 때 공학적인 관점에서는 아직 채용하기 어렵다. 다른 방법은 와류영역내 난류유동을 고려하기 위해서 URANS에 난류모델을 사용하는 것으로, 상대적으로 적은 격자점을 사용할 수 있고, 2차원적 해석도 가능하므로, 계산 시간 및 메모리 용량을 고려할 때 공학적인 관점에서 적절하다. 그러나 사용하는 난류모델은 실린더 후류에 생기는 와류영역을 제외한 층류영역에서는 작용하지 않고, 박리 후에만 자발적

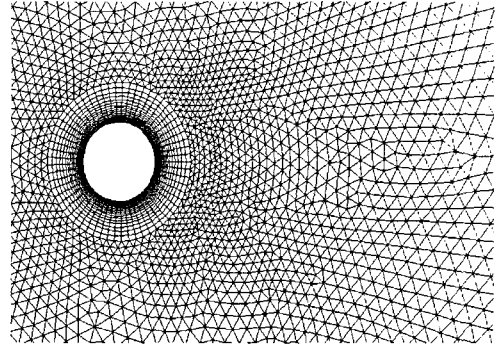


Fig. 1 Unstructured hybrid mesh around a circular cylinder.

으로 작용해야한다. 본 연구에서는 기존의 여러 가지 난류모델 중 단순하고, 위의 특성을 잘 재현시키고 있는 것으로 알려진 Spalart-Allmaras[12]의 1-방정식 모델(이하 S-A 모델)을 사용하여 난류모델의 도입에 따른 영향을 평가한다.

원형 실린더 주위의 유동을 2차원적으로 해석하기 위해 본 연구에서는 자체 개발한 코드(PowerCFD)를 사용하였다. 이 PowerCFD 코드는 비정렬격자체를 사용하고 유한체적법에 기초하여 열/유체 유동 문제를 해석할 수 있는 3차원 해석 알고리즘을 사용하고 있다. 즉, 기본적으로 열/유체 유동 현상을 지배하는 지배방정식을 풀기 위해 현재 대부분의 상용 CFD 해석 소프트웨어에서 채택하고 있는 일반 좌표계를 사용하고 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라 값을 모두 제어체적의 중심점에 위치시키는 집중격자체를 사용하며, 미소체적 중심에서의 직교 좌표 성분의 속도, 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속 변수로 채택한다. 또한, 운동량 방정식의 압력 항 처리를 위하여 연속방정식의 속도와 연관시킨 SIMPLE 알고리즘을 비정렬격자체에 적용시켜 압력 수정방정식을 얻는 방법을 확립시켰다. 이 코드에 대한 보다 자세한 사항 및 비교적 작은 레이놀즈수에서의 원형실린더 주위 비정상 2차원 유동에 대한 결과는 참고문헌[13]에 기술되어 있다.

계산에 사용된 지배방정식은 난류모델 없는 2차원 계산인 경우 비정상 N-S 방정식이고, 난류모델

을 사용한 2차원 계산인 경우 2-D URANS에 S-A 모델의 와점성 전달방정식이다. 본 연구에서는 이 식들을 풀기 위해 기존의 연구[13]에서와 같이 시간 차분으로 2차 정확도를 가지는 후방차분법을, 대류 항에 대해서는 2차의 상류차분도식을 사용하였으며, 무차원 시간간격은 0.05로 하였다.

계산영역으로는 기존의 수치해석적 연구결과[2]를 토대로 실린더 직경 D 을 기준으로 유동방향으로는 $30D$ (실린더 상류 및 하류방향으로 각각 10배 및 20배), 유동에 수직인 방향으로 $20D$ (실린더 위아래로 각각 10배씩)의 직사각형으로 하였다. 특히, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실린더 주위에 사각형 셀을 조밀하게 배치하고 그 이외의 영역에는 삼각형 셀을 혼합적으로 배치함으로써 전체적으로 기존 연구에 비해 상당히 적은 셀 및 격자점(5671개의 격자점, 7639개의 삼각형 셀과 1769개의 사각형 셀)을 사용하여 계산영역을 구성하였다. 참고로 본 연구에 사용된 격자는 완전 층류유동인 $Re < 200$ 에서 공학적으로 중요한 Strouhal 수, 항력계수 및 양력계수에 대한 레이놀즈수의 의존성을 정확하게 예측하고 있으며, 격자 의존성도 없음이 확인되었다[13].

경계조건으로는 사각형 경계영역의 상류측(왼쪽면)에 균일유동의 입구경계조건을, 하류측(오른쪽면)에는 압력경계를 사용하였으며, 위아래면에 대해서는 슬립경계를 사용하였다.

한편, 난류모델을 적용할 때에는 Shur et.al.[14]이 사용한 방법을 채택하였다. 즉, 입구의 난류점성계수를 제로 또는 분자점성에 비해 매우 작은 값으로 설정하면, 원형 실린더 주위 경계층의 전방 상류영역도 매우 작은 난류점성계수를 가진다. 그러나 후방 하류의 재순환 영역은 영이 아닌 난류점성계수 값을 가지며, 이 유한한 값이 박리영역에서 상류쪽으로 전파될 것이다. 그곳에서 난류점성계수는 박리되는 전단층 내로 확산되고, 그 영역에서의 와도는 그 영역에서의 빠른 생성을 야기시키고 이것이 다시 재순환 영역으로 들어간다. 이 결과로 자발적으로 유지되는 점성유동장이 형성된다. 이것은 초기

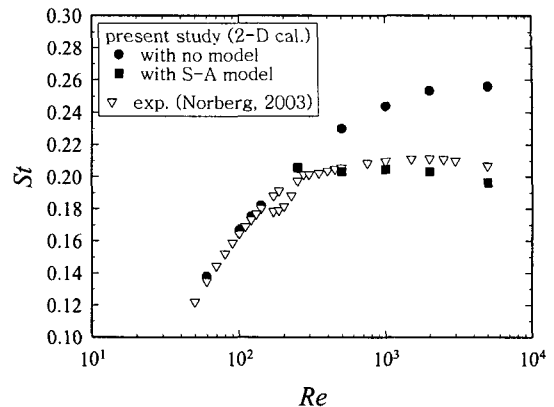


Fig. 2 Strouhal number vs. Reynolds number.

조건으로 영이 아닌 값을 주면 일어나며, 결과적으로 얻어지는 해는 난류모델에만 의존한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 레이놀즈수에 따른 Strouhal수 $St = fD/U_{\infty}$ 의 예측결과를 기존의 실험결과[2]와 함께 나타낸다. 참고로 본 연구에서는 비교를 위해 $Re = 60, 100, 120, 140, 250, 500, 1000, 2000, 5000$ 에 대해 계산하였다. 예측결과를 보면 난류모델을 사용하지 않은 2차원 계산 및 난류모델을 사용하여 계산한 경우, 기존의 실험 및 수치해석 결과로부터 구한 경험적 함수 값 [2]과 $Re < 250$ 에서 두 경우가 상당히 잘 일치하고 있다. 이것은 예상된 결과로 이 Re 영역에서는 유동이 층류유동이기 때문에 난류모델의 영향이 거의 없기 때문이다. 그러나 난류의 영향이 있는 $Re > 250$ 에서는 난류모델 없는 2차원 계산은 점진적으로 증가하는 경향을 나타내며 기존의 실험결과와 상당한 차이를 나타내는 데 비해, S-A 난류모델을 사용한 계산은 약간 감소하는 경향을 나타내나 실험결과와 유사한 예측결과를 나타내고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 난류모델을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우의 $Re = 2000$ 에서 시간에 따른 전체항력계수 C_D 및 전체양력계수 C_L 의 예측결과를 나타낸다. 두 경우 모두 시간이 지남에 따

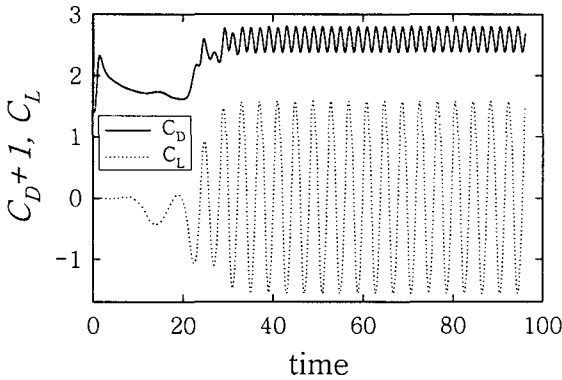


Fig. 3 Time behavior of drag and lift coefficients at $Re=2000$ (2-D calculation with no model).

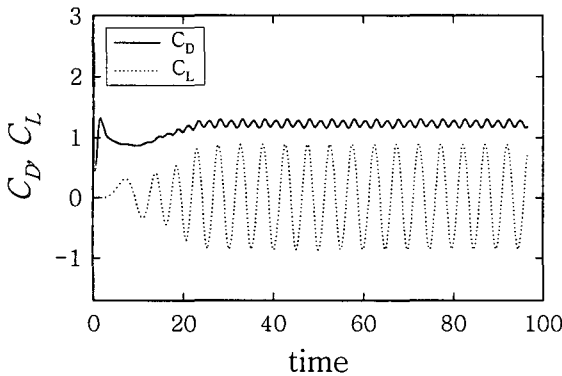


Fig. 4 Time behavior of drag and lift coefficients at $Re=2000$ (2-D calculation with S-A model).

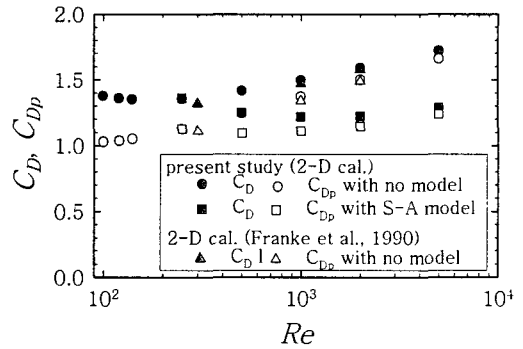


Fig. 5 Total drag coefficient C_D and pressure drag coefficient C_{Dp} .

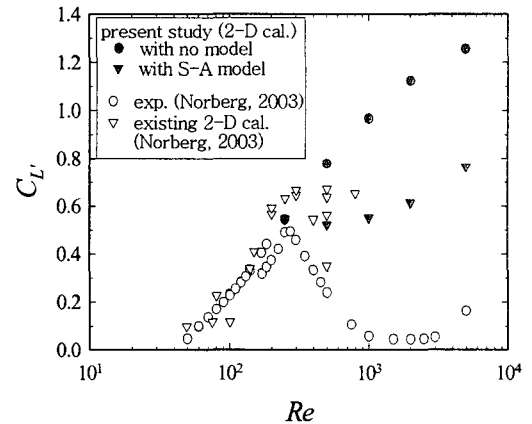


Fig. 6 R.m.s. lift coefficient vs. Reynolds number.

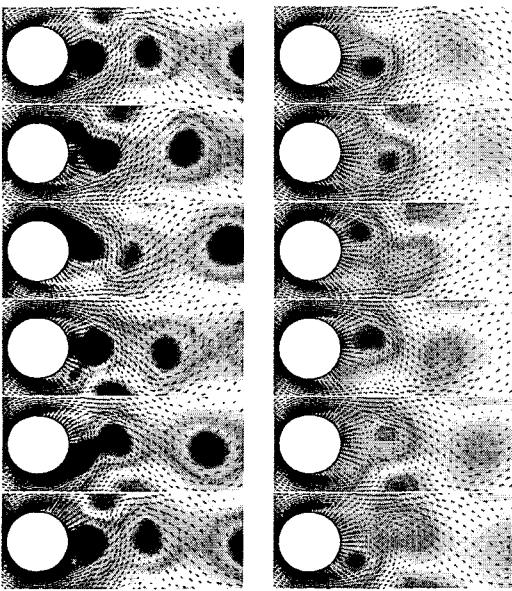
라 이 계수 값들이 주기적으로 변하며, 양력에 대한 변동강도가 항력에 대한 변동강도보다 10배 이상으로 큰 것을 알 수 있다. 또한 난류모델이 없는 2차원 계산인 경우가 난류모델을 사용한 경우에 비해 항력 및 양력계수에 대한 변동 폭(또는 강도)이 상당히 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Re 수에 따른 전체항력계수 C_D 및 압력항력계수 C_{Dp} 의 예측결과를 나타낸다. 전체항력계수에 대한 실험결과를 살펴보면 Jordan and Fromm[4]은 $100 < Re < 1000$ 영역에서 약 1.3에서 1.2로 서서히 감소하는 결과를 제시하고,

Wieselsberger[5]은 $Re \approx 200$ 에서 약 1.35 값으로부터 $Re \approx 1000$ 에서 약 1.0까지 감소한다고 보고하고 있다. 본 예측결과는 난류모델을 사용하지 않은 경우 항력계수 값이 기존의 난류모델을 사용하지 않고 2-D로 계산한 수치해석적 연구결과[11]와는 상당히 잘 일치하고 있으나, $Re > 200$ 에서 실험적 사실과는 달리 증가하고 있다. 반면 S-A 난류모델을 사용한 경우는 $Re < 2000$ 에서는 실험적 사실과 같이 레이놀즈수가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내고, 예측 값도 실험결과와 비슷하다. 다만, 예측결과는 $Re > 2000$ 에서는 다소 상승하는

Table 1 R.m.s. drag and lift coefficients at $Re=2000$: Case A, 2-D calculation with no model; Case B, 2-D URANS calculation with S-A model.

| Case | C_D | C_{Dp} | C_{Df} | C_L | C_{Lp} | C_{Lf} |
|------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|
| A | 0.148 | 0.144 | 0.004 | 1.125 | 1.093 | 0.034 |
| B | 0.046 | 0.045 | 0.001 | 0.615 | 0.600 | 0.021 |

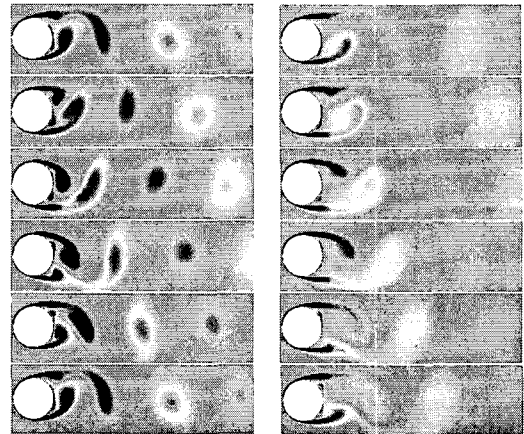


(a) with no model (b) with S-A model

Fig. 7 Instantaneous velocity fields and pressure contours at $Re=2000$ (time interval = 0.8).

경향을 나타내고 있다. 또한 계산결과는 레이놀즈수가 증가할수록 전체항력에 대한 압력항력의 영향이 마찰항력의 영향에 비해 상대적으로 점차 커지고 있음을 보여주고 있으며, 이것은 기존의 연구결과[3, 9-11]와 일치한다.

Fig. 6은 레이놀즈수에 따른 r.m.s. 양력계수 C_L 의 예측값을 나타낸다. 본 예측결과는 난류모델을 사용하지 않은 2차원 계산인 경우 기존의 실험결과[2]와 $Re < 250$ 에서는 상당히 잘 일치하고 있는



(a) with no model (b) with S-A model

Fig. 8 Instantaneous vorticity contours at $Re=2000$ (time interval = 0.8).

나, 그 이상에서는 실험결과와 달리 단조 증가하면서 상당한 차이를 나타내고 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 난류모델 없이 2-D로 계산한 기존의 수치해석 결과[2]와 비교할 때는 유사한 결과를 보여주고 있다. 반면, S-A 난류모델을 사용하여 계산한 경우에는 $Re \approx 500$ 까지 다소 감소하다 다시 완만하게 상승하는 경향을 보이고 있다. 그러나 난류모델을 사용한 경우에도 난류모델이 없는 2차원 계산에 비해 상당히 개선된 예측결과를 나타내고는 있으나, 아직 실험결과와는 현격한 차이를 보이고 있다. 이것은 이 레이놀즈수 영역에서 유동의 3차원적 성향에 기인한 것으로 이 영향이 난류의 영향보다도 크며, 2차원 계산으로는 한계가 있음을 시사해 주고 있다고 사료된다.

Table 1은 $Re=2000$ 에서의 r.m.s. 변동항력 및 변동양력계수에 대한 예측값을 나타낸다. C_D , C_{Dp} 및 C_{Df} 는 각각 전체변동항력계수, 변동압력항력계수 및 변동마찰항력계수 값을 나타내고, C_L , C_{Lp} 및 C_{Lf} 는 각각 전체변동양력계수, 변동압력양력계수 및 변동마찰양력계수 값을 나타낸다. 결과를 보면 항력 및 양력변동은 주로 압력변동으로부터 생기며, 전술한 바와 같이 양력에 대한 변동강도가 항

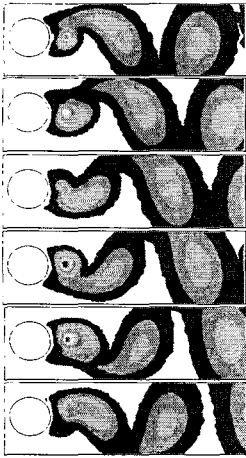


Fig. 9 Instantaneous turbulent eddy viscosity contours at $Re=2000$ (time interval = 0.8).

력에 대한 변동강도보다 10배 이상으로 큰 것을 알 수 있다. 또한, 난류모델 없는 2차원 계산에 비해 난류모델을 사용하였을 경우가 변동계수값을 양력에 대해서는 약 50% 정도, 항력에 대해서는 약 65% 정도 작게 예측하고 있다 (Fig. 3 및 4 참조).

Fig. 7 에는 $Re = 2000$ 에서의 원형 실린더 주위 유동장 및 압력 등고선 예측결과를, 그림 8에는 와도 w_z 의 등고선 예측결과를 약 한 주기에 걸쳐 보여주고 있다. 참고로, Fig. 7(b) 및 Fig. 8(b)에서 한 주기가 되기 위해서는 가장 위에 있는 결과 그림이 가장 아래쪽 밑으로 다시 놓여야 한다. 결과를 보면 두 경우 모두 유동은 대칭성을 완전히 잃고 규칙적인 와류유출이 시작되고 있음을 알 수 있다. 또한 와류유출이 시작되는 위치는 실린더 벽면 근방의 최소압력(Fig. 7에서 진한 색 영역) 위치와 다소 위상차이는 있으나 같고, Karman 와열은 압력장과 함께 와동의 대류 및 확산이 교대로 형성되며 하류로 진행되어 나감을 명확하게 알 수 있다. 그러나 난류모델을 사용하지 않고 2차원으로 계산한 경우(Fig. 7(a))는 난류모델을 사용하여 계산한 경우(Fig. 7(b))보다 실린더 뒤쪽에서 유출된 와류유출이 박리점 근처에서 생성된 2차와동과 상대적으로 약한 확산 및 강한 압력구배로 인해 실린더 뒤쪽 근방에서

결합되어 더욱 강해진 상태로 하류로 진행하고 있음을 알 수 있다. 이것은 난류모델을 사용한 경우 와류영역은 난류모델을 사용하지 않은 계산에서와는 달리 영이 아닌 난류점성계수 값을 가지며, 이 유한한 값이 박리영역에서 상류쪽으로 전파되고, 그곳에서 난류점성계수는 박리되는 전단층 내로 확산되고, 그 영역에서의 와도는 빠른 생성을 야기시키고 이것이 다시 와류 영역으로 들어가는 순환시스템을 구성하기 때문에 사료된다. 이것을 확인하기 위해 S-A 난류모델을 사용하였을 경우 $Re = 2000$ 에서의 원형 실린더 주위 난류점성계수 등고선 예측결과를 약 한 주기에 걸쳐 Fig. 9에 나타낸다. 결과를 보면 난류점성계수는 실린더 후류에 생기는 와류영역을 제외한 층류영역에서는 거의 0의 값을 가지나, 와류영역에서는 Karman 와열과 유사하게 와열의 중심근방에서 최대 값을 가지며 비정상적인 거동을 보여 주고 있다. 이 난류점성계수에 의해 난류모델을 사용하여 계산한 경우는 난류모델을 사용하지 않은 경우보다 Fig. 7 및 Fig. 8에서 보는 바와 같이 실린더 뒤쪽에서 유출된 와류유출이 박리점 근처에서 생성된 2차와동과 상대적으로 강한 확산 및 약한 압력구배로 인해 실린더 뒤쪽 근방에서 결합되어 더욱 약해진 상태로 하류로 진행하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비정상격자계를 사용하고 유한체적법에 기초하여 열/유체 유동문제를 해석할 수 있도록 자체 개발한 코드(PowerCFD)를 사용하여, 원형 실린더 후류에 생기는 와류내의 유동이 층류에서 난류로 바뀌는 $200 \leq Re \leq 5000$ 범위에서 비정상 2-D URANS에 난류모델을 도입하여 비정상 와류유출 유동을 이차원적으로 해석하고, 공학적으로 중요한 Strouhal 수, 항력계수 및 양력계수에 대한 레이놀즈수의 의존성에 대해 기존의 실험결과 및 난류모델을 사용하지 않은 이차원 계산결과와 비교 분석하며 2-D URANS 계산 가능성 및 와류유출 현상을 파악하였다.

연구결과, 본 연구에서 사용한 수치해석방법은 선

택된 Re 범위에서 와류유출 현상을 적절하게 예측할 수 있음이 확인되었다.

또한 난류모델을 사용하여 계산하는 방법이 난류모델을 사용하지 않은 기존의 계산 방법보다 공학적으로 중요한 Strouhal 수, 항력계수 및 양력계수와 같은 물리량에 대해 보다 개선된 예측성능을 나타내고 있으나, 아직 공학적으로 충분한 정도의 예측성능을 가지지 못함이 확인되었다. 따라서 본 연구결과는 이 레이놀즈수 영역에서 유동의 3차원적 영향이 난류의 영향과 마찬가지로 크며, 2차원 계산으로는 한계가 있음을 시사해 주고 있다고 사료된다.

향후, 보다 신뢰성 있는 결론을 얻기 위해 본 연구에서 고려하지 못한 3차원성 효과를 반영시키고, 보다 넓은 Re 범위에 걸쳐 수치해석을 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] Blevins, R.D., Flow-Induced Vibration, 2nd edition, Van Nostrand Reinhold, New York (1990).
- [2] Norberg, C., "Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and New Measurements." J. of Fluids and Structures, Vol.17, (2003), pp.57-96.
- [3] Roshko, A., "On the Wake and Drag of Bluff Bodies," J. Aeronaut. Sci., Vol.22, (1955), pp.124-132.
- [4] Jordan, S.K. and Fromm, J.E., "Oscillatory Drag, Lift, and Torque on a Cylinder in a Uniform Flow," Physics of Fluids, Vol.15, (1972), pp.371-376.
- [5] Wieselseberger, E., "Neuere Feststellungen uber die Gesetze des Flussigkeits und Luftwiderstand," Physik Z., Vol.22, (1921), pp.321.
- [6] Nishioka, M. and Sato, H., "Mechanism of Determination of the Shedding Frequency of Vortices behind a Cylinder at Low Reynolds Numbers," J. Fluid Mech., Vol.89, (1978), pp.49-60.
- [7] Williamson, C. H. K. and Roshko, A., "Measurement of Base Pressure in the Wake of a Cylinder at Low Reynolds Numbers," Z. Flugwiss. Weltraumforsch., Vol.14, (1990), pp.38-46.
- [8] Norberg, C., "An Experimental Investigation of the Flow around a Circular Cylinder: Influence of Aspect Ratio." J. Fluid Mech., Vol.258, pp.287-316 (1994).
- [9] Park, J., Kwon, K. and Choi, H., "Numerical Solutions of Flow past a Circular Cylinder at Reynolds Numbers up to 160," KSME Int. J., Vol.12, (1998), pp.1200-1205.
- [10] Braza, M., Chassaing, P. and H. Ha Minh, "Numerical Study and Physical Analysis of the Pressure and Velocity Fields in the Near Wake of a Circular Cylinder," J. Fluid Mech., Vol. 165, (1986), pp.79-130.
- [11] Franke, R., Rodi, W. and Schonung, B., "Numerical Calculation of Laminar Vortex Shedding Flow past Cylinders," J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.35, (1990), pp.237-257.
- [12] Spalart, P.R. and Allmaras, S.R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows," AIAA Paper 92-439, Reno, NV (1992).
- [13] 명현국, "원형 실린더 주위의 비정상 이차원 층류유동 수치해석," 한국전산유체공학회지, Vol.9, No.4 (2004), pp.41-47.
- [14] Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M. and Travin, A., "Detached-eddy Simulation of an Airfoil at High Angle of Attack," In: Rodi, W. and Laurence, D. (eds), 4th Int. Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Corsica, May 24-26, Elsevier, Amsterdam, (1999), pp.669-678.