

방파제의 효율적 배치를 알아보기 위한 실린더의 2차원 유동분석

Numerical analysis of the cross-flow past circular cylinders at low Reynolds number for effective breakwater arrangement

천수민^{1*}, 최윤영²

연세대학교 토목환경공학과¹, 연세대학교 대기과학과²

초 록

본 연구에서는 원형으로 모델링 된 실린더들에 균일한 유동이 흐를 때, 실린더들의 배치에 따른 이차원 층류 유동을 분석하였다. EDISON_CFD를 이용해서 실린더간의 거리와 주기적 배열에 따라 개별 실린더들의 항력계수와 평균 항력계수의 분석을 통해 항력계수가 최대가 되는 실린더 배열을 확인하였다. 이를 위해 계산영역과 최대격자수에 따른 정확도를 분석하였다. 가로 배열(tandem position)에서의 효율적 항력 거리를 확인하였다. 세로 배열(side-by-side position)에서의 효율적 항력 거리를 확인하였다. 위의 결과들로 9개의 실린더를 3개씩 3열로 배치하고, 주기적 배열과 엇갈림 배열로 나누어 효율적 항력 배치를 확인하였다.

Key Words : 원형 실린더(Circular cylinder), 층류 유동(Laminar flow), 항력계수(Drag coefficient), 방파제(Breakwater), 실린더 배열(Cylinder array)

1. 서 론

방파제는 외해로부터 밀려오는 파랑을 막아 유속을 감소시켜 안정성을 확보해 선박의 출입, 정박 및 하역작업을 용이하게 하는 시설물이다. 많은 수량의 방파 구조물을 사용할 수 있으면 좋으나 한계가 있기 마련이다. 같은 수량의 재료를 사용한 구조물들이라도 배치에 따라 총 항력에 차이가 생기기 때문에 구조물의 효율적인 배치가 필요하다. 본 연구에서는 방파제 관련 유동은 난류이지만 방파제 요소간의 상호작용을 알아보기 위해서 층류로 한정하였고, 다양한 형태의 방파 구조물이 존재하지만 가장 단순화시킨 원형실린더라 가정하고 조사하고자 한다. Sumner¹⁾에서는 주로 높은 레이놀즈 수에 있는 두 개의 실린더에 대해서 레이놀즈 수, 거리에 따른 분석이 진행되었다. Sharman et al.²⁾에서는 Re=100에서 2개의 원형실린더의 가로배열에서 거리를 조절 했을 때 항력과 유동특성을 연구하였다. Kang³⁾에서는 세로 배열에서 Re=100일 때 거리를 조절 했을 때 항력과 유동특성을 연구하였다. 하지만 다중배열에 대한 논문은 부족하다. 그래서 본 논문에서는 가로 및 세로 배열을 바탕으로 주기적 배열과 엇갈림 배열의 항력과 유동특성을 알아보려고 한다.

2. 수치해석 대상 및 검증

2.1 수치해석 대상

본 논문에서는 원형 실린더의 배치에 따른 결과를 항력계수를 중점으로 관찰하였다. 경계조건은 입구에서 $u=1$, $v=0$ 으로 "Subsonic Inlet Condition"을 주었고, 출구에도 같은 조건을 주었다. 계산영역의

Table 10. 격자수에 따른 데이터 비교

	Re=20			Re=40			Re=100		
	L/D	θ	Cd	L/D	θ	Cd	Cd	C_L	St
Calhoun ⁴⁾	0.94	45.5	2.19	2.18	54.2	1.62	1.35±0.014	±0.300	0.175
Russel and Wang ⁵⁾	0.91	43.3	2.13	2.29	53.1	1.60	1.38±0.007	±0.322	0.169
Choi et al. ⁶⁾	0.90	40.8	2.02	2.24	45.1	1.49	1.34±0.011	±0.315	0.164
Present (10×10)	1.11	47.0	2.20	2.54	53.4	1.65	1.48±0.012	±0.434	0.167
Present (20×20)	1.00	45.2	2.15	2.41	52.7	1.61	1.41±0.010	±0.342	0.142
Present (40×40)	0.97	44.1	2.13	2.34	51.5	1.61	1.30±0.010	±0.340	0.166
Present (80×80)	0.95	43.3	2.12	2.31	52.7	1.58	-	-	-

위, 아래에는 “Far-Field Condition”을 주었고 가장 바깥쪽 실린더의 전방, 위, 아래에는 격자 분해능의 조사를 통해 구해진 값인 15D, 후방은 “Neumann Boundary Condition”으로 생기는 역압력 구배의 영향을 피하기 위해 25D를 적용하였다.

2.2 수치해석 검증

Posdziech et al.⁷⁾에 따르면 후방을 50D로 충분히 하였을 때 전방과 상하의 계산영역이 10D, 20D인 경우, 계산 영역이 무한대일 때의 항력계수를 기준으로 한 오차율은 각각 5.43%, 2.73%이다. 5%이내의 오차를 허용가능하다고 보면, 전방과 상하의 계산영역은 10D와 20D 사이에서 결정 할 수 있다. 그리하여 Re=200일 때, 1D당 최대격자수를 40으로, 후방의 계산영역은 25D로 고정시킨 채로 전방과 상하의 계산영역을 10D, 15D, 20D로 변화시켜 가면서 항력계수를 비교하였다. 그 결과 항력계수는 순서대로 1.40, 1.37, 1.36가 되며 최대 계산영역인 20D를 기준으로 하였을 때 10D, 15D의 상대오차는 2.9353%, 0.8828%이다. 15D일 때 상대오차는 그리 크지 않으므로 효율적인 계산수행을 위하여 이후로는 전방과 상하의 계산영역은 15D로 고정시키고 진행하였다.

결정된 계산영역으로 Re=20, 40, 100에 대하여 1D당 최대격자수를 10, 20, 40, 80으로 변화시키면서 수행하였다. 가장 바깥쪽 실린더 중심으로부터 1D내의 범위는 최대격자수를 등 간격으로 배치하고, 1D를 넘어가는 영역에 대하여는 1.05의 등비로 점점 넓어지는 비 균일 직교 격자를 사용하였다. 선행연구의 데이터는 연구별로 차이가 있는데 평균적으로 40일 때의 값이 더 유사하고 80일 때보다 시간 측면에서 효율적이다. 그리하여 1D당 최대격자수는 40으로 결정하였다. 다만 실린더 3열의 주기적 배열의 경우 2D_YUIBM_1에서는 한 블록 당 최대격자수 500의 제한조건이 존재하여 488×418의 격자를 사용하였는데 가로 방향에서 가장 바깥쪽에 있는 실린더의 중앙에서 약간 바깥쪽 부분에서부터 간격이 넓어지게 된다. 이 때 최대격자수 검증 결과를 참고하면 항력계수가 커지는 오차가 생길 수 있으며 이를 유념하여 실험결과를 해석하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 가로배열에서 실린더의 중심간 거리(S)에 따른 전방 실린더의 항력계수(Cd1)과 후방 실린더의 항력계수(Cd2)의 변화

Sharman et al.²⁾에 따르면 Re=100인 경우 항력계수가 급격히 증가하게 되는 임계거리(Sc)가 존재하고 이것은 $3.75D \leq Sc < 4D$ 의 범위이다. 이를 참고하여 두 실린더 중심사이 거리 S가 1D, 2D, 3D, 4D, 6D 일 때 항력계수의 변화를 알아보았다.

Re=1인 경우 후류에 박리기포나 카르만 볼텍스가 생기는 것이 아닌, 넓은 영역에서 점성효과를 받기 때문에 대칭인 유동 특성을 가진다. S가 커질수록 전방의 실린더는 후방실린더로 인한 효과가 작아져

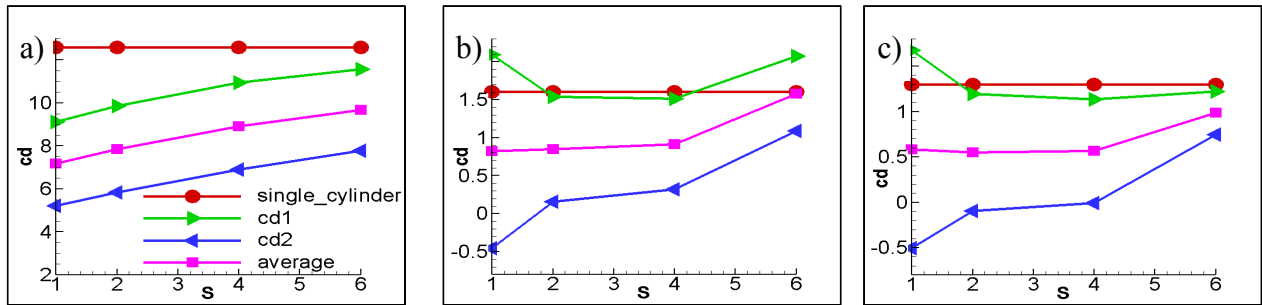


Fig. 1. 가로배열 실린더의 항력계수 그래프 a) $Re=1$ b) $Re=40$ c) $Re=100$

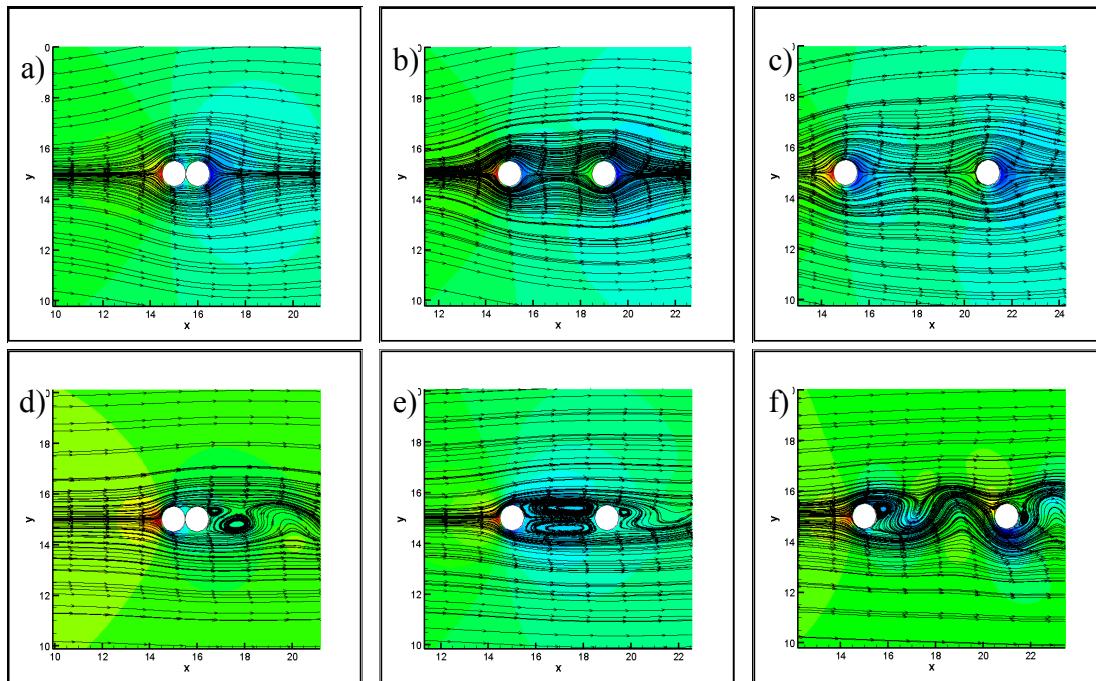


Fig. 2. 가로배열 실린더의 압력 컨투어와 유선 a) $Re=1, S=1D$ b) $Re=1, S=4D$ c) $Re=1, S=6D$ d) $Re=100, S=1D$ e) $Re=100, S=4D$ f) $Re=100, S=6D$

Cd_1 이 커져 1개 실린더만 존재했을 때의 값에 가까워지고 후방실린더도 회복된 유속을 받기 때문에 Cd_2 가 증가하게 된다.

$Re=100$ 인 경우 거리에 따라 유동 특성이 바뀌어 항력계수의 경향도 바뀌게 된다. Fig. 2에서 S 가 1D 일 때는 하나의 커다란 실린더처럼 작용한다. 전방과 후방실린더 사이에서 S 가 4D에서는 박리기포가, 6D에서는 카르만 볼텍스가 생긴다. 이는 Sharman et al.²⁾의 논문에서의 Sc 가 이 구간 안에 존재한다는 결과와 일치한다. S 가 4D에서 6D으로 멀어질 때 Cd_2 가 음에서 양으로 증가함을 Fig. 1에서 확인할 수 있는데 박리기포보다 카르만 볼텍스가 생길 때 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 압력이 회복되어 후방실린더의 압력차가 커짐이 주된 이유가 될 것이다. 그 결과 평균 항력계수는 상대적으로 급증한다.

$Re=40$ 인 경우에는 $Re=100$ 인 경우와 비슷한 형태의 그래프를 가진다. 두 개의 차이는 S 가 2D일 때부터 후방실린더가 양의 항력계수를 가져, 항력계수의 합이 증가하기 시작하는 중심거리가 짧아졌다는 것이다. Fig. 2를 보면 두 실린더 사이에는 $Re=100$ 인 경우와 같이 박리기포가 생기지만 후방실린더 뒤에도 카르만 볼텍스가 아닌 박리기포가 생기는데 이것이 원인이다. 그 결과 $S=4D$ 에서 6D가 됨에 따라

항력계수가 급변하는데 이로 비추어 보아 Sc와 같은 임계거리가 존재할 것임을 예측할 수 있다.

3.2 세로배열(side-by-side)에서 원형 실린더의 중심거리(l)에 따른 상단실린더(Cd1) 하단실린더(Cd2) 항력계수의 변화

Kang³⁾에 따르면 세로배열의 경우도 레이놀즈 수와 실린더 사이의 거리에 따라 유동특성과 항력계수가 달라지는데, Re=100인 경우 주로 중심거리가 좁을 때 큰 변화가 있었다. 그래서 l이 1D, 1.5D, 2D인 경우에 대하여 분석하였다.

Re=1인 경우 가로배열일 때처럼 거리에 따라 항력계수가 증가한다. 거리가 멀어질수록 각각의 실린더 간의 점성 영역이 차지하는 넓이가 하나의 실린더가 있는 넓이와 비슷하게 넓어져 하나의 실린더가 있는 항력계수의 값과 가깝게 커지기 때문이다. 가로배열일 때는 두 실린더의 항력계수 차가 분명한 반면 세로배열은 대칭인 형태이므로 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 Cd1과 Cd2가 거의 동일한 값을 지닌다.

Re=100인 경우 l=1.5D일 때 실험을 수행하지 못하여 추세를 예상하기 위해 Kang³⁾의 결과를 그래프에 함께 표시하였다. 이를 참고하면 l=1.5D일 때 항력계수가 낮아졌다가 증가함을 알 수 있다. 이는 유동 특성이 거리에 따라 달라지기 때문에 나타나는 현상이다. Fig. 4의 유선을 보면 실린더 하나일 때 보다 더 강한 비정상 유동 형태를 보인다. l=1D일 때는 새로운 모양의 실린더 하나와 같기 때문에 실린더 하나일 때와 유동 형태가 유사하다. l=2D일 때는 실린더 바로 뒤쪽에서는 대칭인 형태의 유동이 각각 나타나 어느 지점 이후부터 접하면서 합쳐져 한쪽으로 휘어진 유동이 된다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 가로배열일 때와는 달리 실린더 하나일 때 보다 평균 항력계수가 높다.

Re=40인 경우 실린더 중심거리가 멀어짐에 따라 항력계수가 증가하는 경향을 보이며 변화 폭은 l이 1D에서 1.5D가 될 때가 그 이후 보다 더 크게 됨을 알 수 있다. Fig. 4의 유선을 보면 두 실린더 뒤의 박리기포는 거리에 따라 각기 다른 모양으로 생긴다. 항력계수의 경우 l이 1D일 때는 각각의 항력계수가 하나의 실린더일 때보다 낮고 1.5D, 2D일 때는 크므로 1D와 1.5D사이에서 하나인 실린더일 때 항력계수와 동일해지는 l이 존재할 것이고 항력계수를 크게 하는 효과를 증대시키기 위해서는 이보다 큰 l을 갖게 하는 것이 효율적인 배치 방법이 될 것이다.

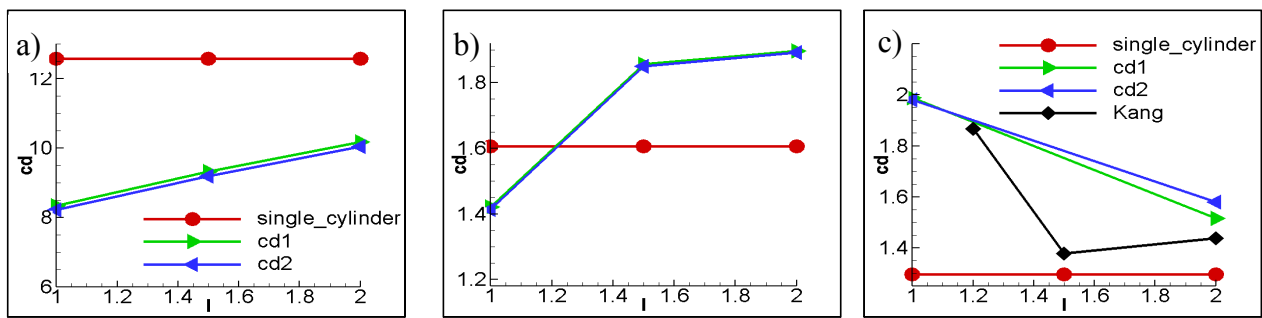


Fig. 3. 세로배열 항력계수 그래프 a) Re=1 b) Re=40 c) Re=100

3.3 Re=40 일 때 원형 실린더 그룹의 엇갈림 여부에 따른 항력계수 변화 관찰

Re=40 일 때, 실린더 3열을 주기적으로 배열할 때 엇갈림 여부에 따른 항력계수의 변화를 관찰하였다. 이때 가로배열과 세로배열일 때 결과를 참고하여 최대 항력을 가지는 최적 배열의 목적에 부합하도록 실린더 중심의 가로거리(S)는 4.5D 세로거리(l)는 1.5D로 정하였다.

주기적 배열과 엇갈림배열의 사이에 있는 3개의 실린더를 중심으로 (Cd1-1열 2행, Cd2-2열 2행-정중앙, Cd3-3열 2행) 비교하였다. Cd1은 비슷하고 Cd2와 Cd3의 값에서 차이를 보인다. Cd1은 2.55, 2.56으로 엇갈림이 약간 더 높다. 전방과 좌우에 배열된 실린더의 위치가 비슷하기 때문에 큰 차이를

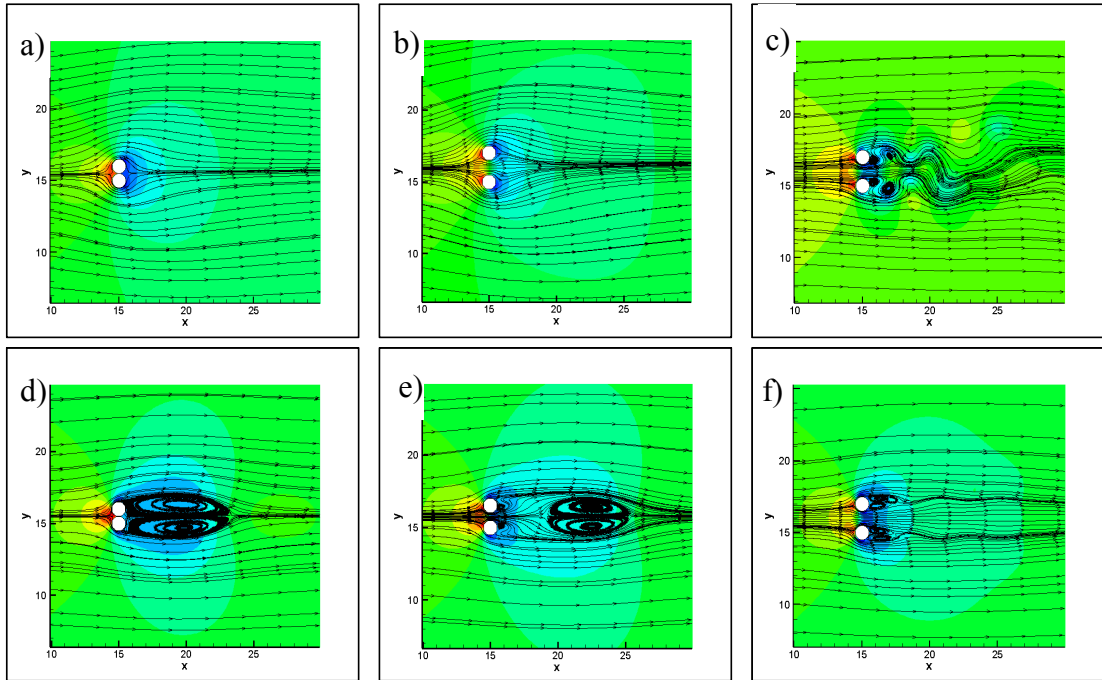


Fig. 4. 세로배열 실린더의 압력 컨투어와 유선 a) $Re=1, l=1D$ b) $Re=1, l=2D$ c) $Re=100, l=2D$ d) $Re=40, l=1D$ e) $Re=40, l=1.5D$ f) $Re=40, l=2D$

보이지 않는다. $Cd2$ 는 주기 배열은 0.22, 엇갈림 배열은 0.31로 엇갈림 배열일 때 더 큰 항력계수를 지닌다. 엇갈림 배열보다 주기적 배열이 실린더의 정면에서 유속을 감소시켜 주는 것이 차이의 원인이 된다. $Cd3$ 은 주기 배열은 -0.45, 엇갈림 배열은 -0.33으로 주기적 배열일 때 더 큰 음의 값을 가진다. 이는 엇갈림 배열은 사실상 전방실린더와 사실상 9D의 거리를 가지기 때문에 앞에서의 결과와 같이 $Re=40$ 에서 거리가 멀어질수록 항력 계수가 커지는 경향과 일치함을 볼 수 있다. 세 실린더의 항력의 평균은 주기적 배열일 때 0.78, 엇갈림일 때 0.85로 엇갈림배열일 때가 주기적 배열보다 약 9% 더 큰 항력계수를 보인다. 이는 엇갈림배열이 더 효과적이라는 의미이다.

Table 2. 주기적 배열과 엇갈림 배열 실린더의 항력계수 변화

	$Cd1$	$Cd2$	$Cd3$	\overline{Cd}
주기적 배열	2.55	0.22	-0.45	0.78
엇갈림 배열	2.56	0.31	-0.33	0.85

4. 결론

본 논문에서는 EDISON_CFD를 이용하여 다중 원형실린더의 항력계수를 최대화 하는 배치에 대해 알아보았다. 해석결과의 신뢰성을 알아보기 위해 격자 분해능 선택시 단일 실린더에서 $Cd, Cl, St, L/D, \theta$ 를 구하여 기존 연구결과와 비교했고 시간사용도 고려하여 효율적인 선택을 했다. 이 값을 바탕으로 다중 실린더로 확장시켜 실험을 진행하였다. 최종 배열을 실험하기 위해 먼저 가로배열과 세로배열을 조사하였다. 가로배열시 항력계수가 급격하게 커지기 시작한 뒤의 거리(4.5D)를, 세로배열시 항력계수가 급격하게 커지기 시작한 뒤의 거리(1.5D)를 선택하여 9개의 실린더를 주기적 배열, 엇갈림 배열로 배치하였다. 그리고 엇갈림 배열이 더 큰 항력계수를 가져 방과제의 목적에 부합하는 효율적 배치가 됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 지원 사업인 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) D. Sumner, 2010, Two circular cylinders in cross-flow : A review ,Journal of Fluids and Structures, 26, 849~899
- (2) B. Sharman, F. S. Lien, L. Davidson, C. Norberg. 2004, Numerical predictions of low reynolds number flows over two tandem circular cylinders, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 47, 423~447
- (3) Sangmo Kang, 2003, characteristics of flow over two cylinders in a side-by-side arrangement at low reynolds numbers, Physics of Fluids, 9, 2486~2498
- (4) D. Calhoun, 2002, A Cartesian grid method for solving the two-dimensional stream function-vorticity equations in irregular region, Journal of Computational Physics, 176, 231~275
- (5) D. Russell, Z.J. Wang, 2003, A Cartesian grid method for modeling multiple moving objects in 2D incompressible viscous flow, Journal of Computational Physics, 191, 177~205
- (6) J. I. Choi, R. C. Edwards, J. R. and J. A. Rosati, 2007, An immersed boundary method for complex incompressible flows, Journal of Computational Physics, 224, 757~784
- (7) Oliver Posdziech, Roger Grundmann, 2001 ,Numerical Simulation of the Flow Around an Infinitely Long Circular Cylinder in the Transition Regime, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2, 121~141