

진동하는 원통 비정상 공력해석을 위한 OpenFoam OverSet 격자 활용

김 군 흥 · 한 철 희*

한국교통대학교 항공·기계설계학과

Application of an Opensource OpenFoam for Unsteady Aerodynamics Analysis of an Oscillating Cylinder

GunHong Kim · Cheolhwei Han*

Department of Aeronautical Mechanical Design and Engineering, Korea National University of Transportation

50 Daejal-Ro, Chungju-si, Chungbuk-Do 27469, Korea

(Received 2021. 11. 01. / Accepted 2021. 11. 22.)

Abstract : 2차원 유동장내 수직 진동하는 원통의 Von Karman 와열 유동 현상에 대한 진동 주파수 계산 문제는 진동하는 물체의 비정상 공력 해석 연구 검증에 많이 사용하는 고전적 방법이다. 본 연구에서는 오픈소스 OpenFoam 기반의 중첩격자 기법을 사용하여 층류 유동장내의 수직방향 진동하는 원통 주변의 비정상 유동 현상과 원통 벽면에서의 공력 특성 변화를 해석하기 위한 일련의 해석 단계들과 결과를 타 연구그룹과 비교하였다. 원통 형상과 진동에 의한 와열 유동의 주기적 유동 특성과 복잡성 해석의 건전성을 확보하기 위하여 격자와 시간제어에 대한 해의 정확도에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에서 수행한 해석 방법은 일관성과 신뢰성 있는 해석 결과들 보여주었으며, 향후 보다 실제적인 진동하는 에어 포일의 비정상 공력 해석 연구에 적용 가능함을 확인하였다.

Key words : OpenFoam, Oscillating Cylinder, overSet Grid(중첩격자), Unsteady Aerodynamics(비정상 공력)

1. 서 론

저 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)의 층류 유동장에서 원형관에 의해 발생하는 비정상 유동 현상은 공학적 응용적 측면과 더불어 해석 기법 개발에 여전히 관심있는 문제로 연구되어 오고 있다^{1,2,3}. 특히 주기적 상하 운동하는 원형관 형상 주변의 와 형상과 공력특성 변화에 관한 연구를 위해 유체-구조물 간의 연성 해석을 위한 다양한 수치 기법들이 개발되고 있다^{2,3,4,5}.

유체에 대해 상대 속도로 움직이는 구조물의 유동 및 공력특성을 해석하기 위해서는 이동 격자에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서 사용한 오픈소스 OpenFoam은 동적 격자 문제 해석을 위한 다양한 동

적 격자 모델들을 보유하고 있어 선택 적용이 가능하다^{5,6}. 이들 방법들 중에는 구조물의 이동에 따른 구조물 표면의 이동 속도를 고려하여 격자를 변형시키는 모핑(morphing) 기법, 정해진 구조물의 이동 영역내에 격자 제거 및 생성이 가능한 슬라이딩(sliding) 기법^{4,5}, 배경 격자에 대한 이동 형상을 별도로 고려하여 벽면과 격자 간의 상호 영향을 수치적으로 고려하는 Immersed boundary 기법 (IBM), 그리고 구조물 영역에 대한 별도의 격자모델을 추가로 적용한 중첩 격자(OverSet)^{2,3,4,7}이 있다. 본 연구에서는 복잡한 형상을 가진 구조물 주변의 유동특성을 비교적 정확히 계산할 수 있는 격자 구성하고, 배경에는 전체 유동장 특성을 파악가능한 격자하여 두 격자간의 정보를 내삽하여 전체 유동장을 계산할 수 있는 이동 중첩 격자 기법을 사용했다^{4,7}.

*Corresponding author, E-mail: chhan@ut.ac.kr

2. 중첩격자 동적 거동 해석 모델

유체 유동장에 대해 상대적 이동 형상에 대한 동적 격자 기법들은 OpenFoam내에 상용 소프트웨어들과 같이 다양하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 원통 진동을 모사하기 위하여 중첩격자(overSet) 모델을 적용하였으며 이는 타 동적 격자 모델들과 비교하여 복잡한 거동 모사에 개념적 적합성을 가지고 있기 때문이다.

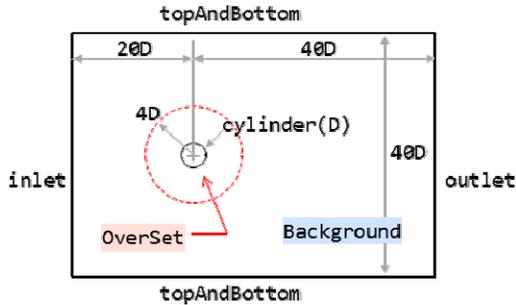


Fig. 1 OverSet Grid Assembly (OGA) for oscillating cylinder

중첩 격자 기법은 고정 또는 이동 형상들을 포함한 전체 해석 영역인 배경 격자(background region)와 이동 형상에 대한 중첩격자 영역(overeset region)으로 구성된다. 이동 형상 벽면 변형이 없는 일반 문제에서는 중첩 격자변형이 없으며 해석적으로 매우 유리한 특성을 가지고 있다.

Figure 1에는 현재 해석 대상인 원통 형상에 대한 중첩 격자 영역과 층류 유동장 영역인 배경 격자 영역을 경계면과 함께 격자 체계를 도시적으로 나타내었다. 별도의 격자영역들 간의 유동 정보 전달은 중첩 격자 영역의 벽면 경계면에 해당하는 배경 격자 셀들과 중첩경계면 영역의 중첩 격자 셀들 간의 내삽법(interpolation)을 적용하게 된다. 또한 중첩 격자 영역에서 형상에 해당하는 배경 격자 셀들은 비활성화되어 실제 유동 해석 결과에서는 배제되게 된다. 유동 정보 내삽 격자 셀과 비활성화 격자 셀들과 유동 해석 격자 셀들에 대한 구분을 위하여 모든 격자 셀들에 대한 기본적인 3가지 격자 셀 타입 변수인 cellType 필드가 정의되며 이는 형상 이동에 따라서 격자셀들에 대한 셀 타입 값들의 변화를 해석한다.

유동 정보 내삽을 위한 OpenFoam의 표준 수치 기법들은 inverseDistance, trackingInverseDistance, cell

VolumeWeight와 leastSquare의 4가지 기법이 있다. 고차 정도의 내삽 기법 (leasetSquare or polynomial)은 차수가 증가할 수록 격자 밀집도(또는 격자 수)도 급격하게 증가해야 한다. 또한, 보간 격자위치 정보 증가로 해석 시간(부하)이 필연적으로 증가하며 병렬 수치해석에 있어서는 해석적 부하가 1차 정도기법인 inverse Distance에 비하여 수배 수준으로 증가하게 됩니다. 따라서, 본 해석에서는 고차 정도 기법인 leastSquare보다는 1차 정도 inverseDistance 기법을 적용하였다. 이는 중첩 격자 밀집과 큰 영역 설정에 따른 오차 최소화와 무엇보다 고차 내삽 기법의 해석 부하 증가를 고려한 수치 효율을 높이기 위함이다⁸⁾.

수직방향 주기 왕복 원통 거동을 위한 중첩 격자 적용 해석을 위하여 Re=185 유동장 내의 원통(D)의 주기적 상하 이동 조건으로 최대 이동 거리(0.2D)인 2차원 비정상 유동 현상을 해석대상 문제로 선정하였다. Figure 1의 OGA 격자 체계는 본 해석 대상인 단일 원통형상 상하 주기 운동에 따른 2차원 비정상 유동 현상을 해석하기 위하여 OpenFoam내의 정렬 격자 생성기(blockMesh)와 비정상 비압축성 중첩 격자(OverSet) 해석 솔버인 overPimpleFoam을 적용하였다⁶⁾. 유동 영역 격자는 직교 격자(208(유동방향)x152(상하방향))로, 원통을 둘러싼 유동장은 O-형 정렬 격자(120(원주)×50(반경))를 이용하여 OverSet 격자 체계 (OverSet Grid Assembly, OGA)를 구성하였다^{4,7)}.

원통은 상하 수직방향으로 식 (1)과 같이 진동한다. 이때 최대 높이(진폭,)는 원통 직경의 20%이다^{1,2,3)}. 진동 주파수는 고정 원통에서의 유동 주파수와 비로 5가지(0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2)를 계산했다.

$$y = A_c \sin(\omega_c t) \tag{1}$$

3. 결과 및 분석

3.1 시간 제어 방법 비교

비정상 해석에서 솔버의 시간 제어 방식은 다양한 격자 모델에서 수치 해석의 예측성과 효율성측면에서 중요하며, 본 연구에서는 1)고정 시간 간격과 2)고정 최대 Courant수에 따라 계산된 시간 간격 적용의 두 가지 방식에 대한 평가를 수행하였다. Courant수 영향 평가하기 위하여 snappyHexMesh 다면체 격자생성기를 적용하고 격자수렴성 평가를 수행한 후 최종 격자를

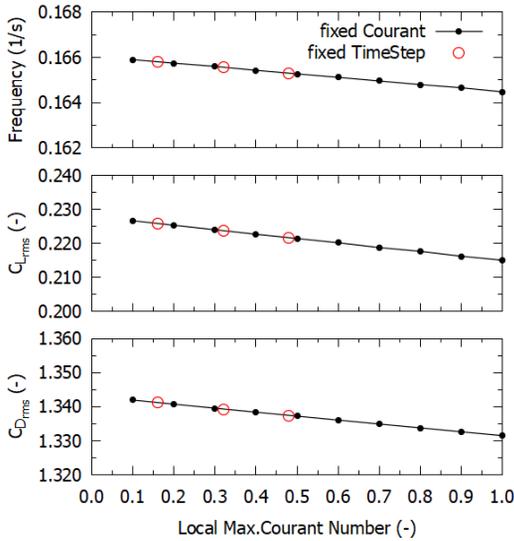


Fig. 2 Comparison of performances with respect to different time controls

선정하였다⁶⁾. 시간 제어 기법에 따른 해석결과 평가를 위해 속도 잔차는 1.0E-6으로 설정하였다.

Figure 2는 층류(Re=100) 유동장내 고정 원통에 대한 값을 나타낸 그림이다. Courant수의 최소(0.1)과 최대(1.0)에 대한 예측치 차이는 5.12% 차이를 보였다. 본 논문에 나타내지는 않았지만, 항력계수는 0.78%, 자연 주파수는 0.86%의 차이를 보였다. Courant 수를 고정시킨 결과와 시간간격을 고정시킨 결과 모두 동일한 경향성을 보여줌을 확인할 수 있다. 다양한 격자 모델들에 대하여 Courant 수 고정 제어방식을 적용함으로써 해석 안정성과 결과 일관성을 유지에 시간 고정 제어 방식보다 유리하게 된다. 동적 거동이 있는 경우에도 형상 이동에 따른 격자 Courant수 제어를 추가로 수행하게 된다.

3.2 수직 왕복 원통 유동 해석

원통 주기 운동에 대한 가진 주파수는 고정 원통에 대한 자연 주파수(f_o) 또는 스트로홀수(St)에 대한 비율로 정의하는 것이 일반적이다. 먼저 고정 원통에 대한 유동 주파수 해석을 위하여 Fig. 1에 제시한 중첩 격자 모델에서 회전 각속도(ω)를 0으로 설정한 고정 원통에 대한 자연 주파수를 해석하였다. 계산 결과를 Table 1에 비교하여 나타내었으며, 타 연구자들의 해석값들과 유사한 결과를 얻었음을 알 수 있다.

Table 1 Numerical values of St , $\overline{C_D}$ and C_{Lrms} at Re=185 (fixed cylinder)

Reference	$\overline{C_D}$	C_{Lrms}	St
Present	1.332	0.446	0.193
D.S. Lee et al (2006)	1.31	0.44	0.191
Guilmineau&Queutey (2002)	1.29	0.44	0.195

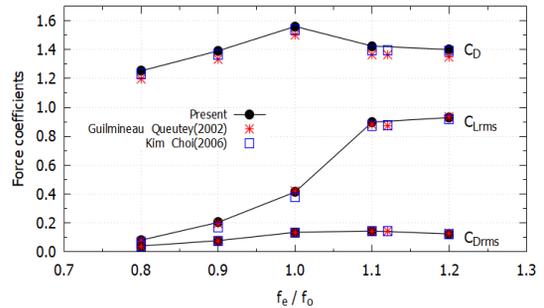


Fig. 3 Force coefficients w.r.t f_e/f_o

현재 해석적 접근에서는 중첩 격자 적용하여 가진 주파수 비율에 따른 원통 가진 영향을 해석하였으며 기존 해석적 연구 결과들과 비교를 Fig. 3에 나타내었다^{1,2)}. 기준 조건 ($f_e/f_o = 1$)에 대하여 낮은 가진 조건 2개와 높은 가진 조건 2개인 총 5개 가진 조건들을 해석하였으며 정성적과 정량적 예측도를 충분히 확인할 수 있다.

낮은 가진 주파수 영역($f_e/f_o < 1$)에서는 항력 계수(C_D) 평균과 RMS값은 감소하는 반면에 높은 가진 경우에는 평균값의 감소 경향과 RMS값의 완화 경향과 함께 일정 수준의 값으로 수렴해 가는 특성을 분명하게 확인할 수 있다. 양력계수 RMS(C_{Lrms})에 대해서는 가진 주파수가 증가에 비례적 증가 경향을 보이지만 높은 가진 영역($f_e/f_o > 1$)에서는 일정 수준으로 수렴해 가는 경향도 확인하였다.

가진 주파수가 증가함에 따라서 항력과 양력 계수들의 주기적 유동 특성 변화가 관찰되었으며 이에 대하여 Fig. 4에 시간별 변화량을 나타내었다. Figure 3 결과에서 가진 주파수 증가에도 힘 계수값이 지속적 증가하지 않음에 대한 원인으로 2차 낮은 주파수의 가진 유동 영향을 확인할 필요가 있다. 가진 주파수에 따른 원통 변위에 대하여 힘 계수들은 2개 이상의 주파수가 중첩되어 나타남을 Fig. 5에서 분명하게 확인할 수 있다. Figure 6에는 최대 힘 계수값이 존재하는 시

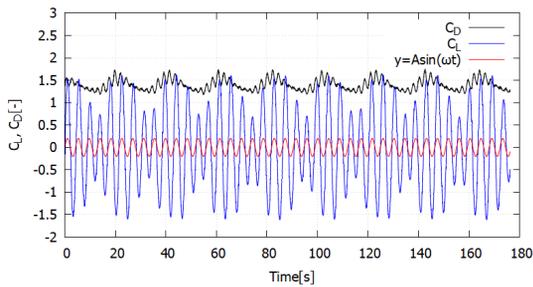


Fig. 4 Temporal force coefficients for $f_e/f_o = 1.2$

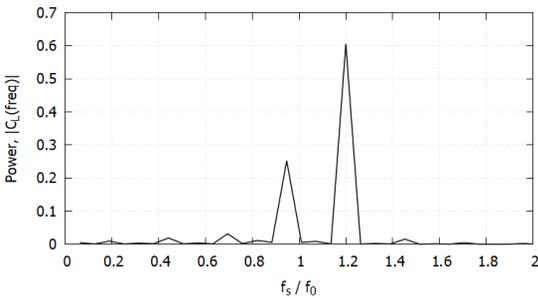


Fig. 5 Power spectrum for $f_e/f_o = 1.2$

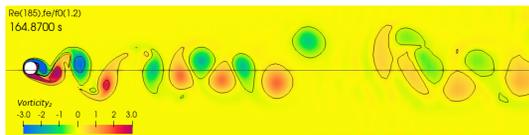


Fig. 6 Instantaneous vorticity for $f_e/f_o = 1.2$

간에서의 와열 분포를 나타내고 있다. 와열 분포가 일부 그룹화되어 서로 구분되는 현상을 가지적으로 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 오픈 소스 OpenFoam의 OverSet 이 동 격자기법을 적용하여 원통 거동을 고려한 비정상 유동 현상에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 비정상 해석에서 시간 제어 방식에 대한 적절성 선정은 예측 신뢰성과 더불어 해석 부하적 측면에서도 중요하며, 연구결과 Courant수 제어 방식이 유리하다. Vortex shedding 유동해석에서 시간 제어방식의 선정은 양력 계수가 가장 민감하게 나타났으며, Courant수 0.3을 적용하였을 때 0.1대비 1%수준이었다. 수직 왕복운동하는 원통에 대한 해석 결과가 타 이동 격자 기법 적용

결과들과 유사 수준의 결과를 얻었다. 향후 OpenFoam의 OverSet 격자 모델 설정에 대한 지속적 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2018R1D1A3B07050384)으로 관계자 여러분께 감사드립니다. 그리고 본 논문 내용에는 2021년도 항공우주시스템공학회 추계학술대회 발표 논문에 대하여 추가 연구결과들이 수록되었습니다⁹⁾.

References

- 1) E. Guilmineau & P. Queutey, “A numerical simulation of vortex shedding from an oscillating circular cylinder”, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 16, no. 6, pp. 773-794, 2002.
- 2) D.K. Kim & H.C. Choi, “Immersed boundary method for flow around an arbitrarily moving body”, *Journal of Computational Physics*, vol. 212, pp. 662-680, 2006.
- 3) D.S. Lee, M.Y. Ha, S.J. Kim & H.S. Yoon, “Application of Immersed Boundary Method for Flow Over Stationary and Oscillating Cylinders”, *KSME Int. J.*, vol. 20, no. 6, pp. 849-863, 2006.
- 4) A. Y. Christensen, “Analysis of Vortex Induced Motions for Floating Wind Turbines”, Master Thesis in Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Spring 2019.
- 5) H. Jasak. “Dynamic Mesh Handling in OpenFOAM”, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 5-8 January 2009, Orlando, Florida.
- 6) <https://www.openfoam.com/>
- 7) D.D.J. Chandar & V.B.L. Boppana, “A Comparative Study of Different Overset Grid Solvers Between OpenFOAM, STAR-CCM+ and ANSYS-Fluent”, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 8-12 January 2018, Kissimmee, Florida.
- 8) D. Chandar. “On overset interpolation strategies and conservation on unstructured grids in OpenFOAM”, *Computer Physics Communications*, vol. 239, pp. 72-83, June 2019.
- 9) 김군홍, 한철희, “OpenFoam의 OverSet 격자를 사용한 진동하는 실린더 비정상 공력해석”, 항공우주시스템공학회 2021년 추계학술대회