

비 구성격자계를 이용한 실린더 주위의 유동 특성에 관한
수치해석적 연구

**A Numerical Study of the Flow Characteristic around the cylinder
using Unstructured Mesh**

정연태*, 유홍선*, 채영무**, 홍기배**

* 중앙대학교, **충주대학교

1. 서론

비정상, 층류 유동으로 실린더와 같은 블러프(Bluff)물체 주위를 흐르는 유동에서 발생하는 Von Karman 와동은 외부 유체로부터 전달된 힘이 물체 표면에 분포되어 양력이나 항력등에 많은 영향을 주기 때문에 유체역학 분야에 있어서 매우 중요한 분야라 할수 있다. 이러한 유동은 벽으로부터 점진적으로 전달되고 확산되는 큰 와류에 의해서 특징 지워진다. 와류의 특성은 레이놀즈수에 좌우되며, 레이놀즈수가 40 보다 작은 경우에는 시간이 경과하여도 유동은 실린더의 하류영역에서 서로 대칭인 두개의 와류를 형성하지만 레이놀즈수가 40 보다 커지면 유체에 불안정성이 발생하여 일정한 주기를 가지고 실린더 주위로부터 Von Karman 와동이 박리되기 시작한다. 이러한 유동은 시간에 따라서 물체표면에 힘의 불균형을 일으켜 조종성을 저해하는 요인으로 작용되기 때문에 연구가들에 의해서 많은 연구가 진행되고 있다. Engelman 등[1]은 유한요소법을 사용하는 상용프로그램인 FIDAP 을 이용하여 레이놀즈수 100 에서 격자 수를 아주 세분한 미세격자, 출구쪽으로 영역이 짧은 short mesh, 성긴격자 그리고 미세격자와 성긴격자의 중간 형태인 중간격자(medium mesh)를 이용하여 수치해석 하였다. Kim 등[2]은 레이놀즈 수가 100 에서 실린더 주위에 위치한 control wire 에 의해서 영향을 받는 원형 실린더로부터 와동이 떨어져 나가는 매커니즘을 FEM 과 FDM 이 혼합된 기법을 이용하여 연구하여 주 실린더에 대한 유체의 힘과 와동 상호작용형태가 크기 및 소음과 진동 주기가 모두 감소함을 보여 주었다.

비정상 상태에서 실린더 주위를 흐르는 유동에서 발생하는 Von Karman 와동을 확인하기 위하여 수행된 대부분의 연구들은 격자를 국부적으로 밀집 시킬 수 있는 유한 요소법을 사용한 경우를 제외하고는 유동의 변화가 심한 실린더 후류 영역에 격자를 밀집 시킴으로써 전체적인 격자수의 증가를 유발시키는 IJK 형태

의 구성격자계를 사용함으로써 전산시간 및 계산용량의 손실을 초래 하였다.

실린더 주위를 흐르는 대부분의 연구들은 원시변수의 Navier-Stokes 방정식을 직접 풀지 않고 와동-유선 방정식으로 변환하여 문제를 해결 하였으며 주로 구성 격자계의 IJK 격자계를 사용 하였다. 이러한 문제 해결 방법은 수치해석 기법에 있어서는 속도와 압력간의 연결(Coupling)문제가 발생하지 않기 때문에 해의 정확성이나 전산시간 측면에서는 장점이 있으나 경계면에서 경계조건을 부여하기가 어렵고 압축성 유동에는 적용하지 못한다는 단점이 있다. 또한 IJK 격자계를 사용하기 때문에 유동의 변화가 심한 부분에서 국부적으로 격자를 밀집 시키지 못하기 때문에 전체적인 격자수의 증가를 가져 오며 이로 인하여 계산시간 및 계산용량의 증가를 초래하였다. 그러나 비구성 격자계를 도입하고 원시변수를 사용하는 경우에는 속도와 압력의 연결 문제로 인하여 해의 정확성 및 전산시간의 측면에서는 위에서 기술한 전산해석 방법보다는 단점을 가질 수 있지만 기하학적인 형상 및 유동의 형태에 제한을 받지 않기 때문에 더 효율적인 방법이 될 수 있다[3].

본 연구의 주 목적은 비구성 격자계를 이용한 유동 해석 프로그램을 개발하고 실린더 주위의 유동특성을 해석함으로써 프로그램의 타당성을 입증하는데 있다. 또한 실린더 주위의 유동특성에 관한 물리적 이해의 증진과 이론적 자료를 정성적으로 제공하고자 한다.

2. 지배 방정식

기본적인 종속 변수들에 대하여 기술될 수 있는 일반적인 보존 방정식은 다음과 같고 이식을 질량 및 운동량 방정식에 대하여 적용한다.

$$\int_V \frac{\partial f}{\partial t} dV + \int_S (f \underline{v} - Q_S) \cdot d\underline{S} = \int_V Q_V dV$$

비정상, 비압축성 3 차원 유동에 대한 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_S \rho \underline{v} \cdot d\underline{S} = 0$$

$$\int_V \frac{\partial(\rho \underline{v})}{\partial t} dV + \int_S (\rho \underline{v} \otimes \underline{v} - \underline{T}) \cdot d\underline{S} = \int_V \rho \underline{b} dV$$

여기서, \underline{T} 는 국부적인 열역학적 평형상태에 있는 Newtonian 유체에 대한 응력텐서를 나타낸다.

3. 수치해석 방법

각 보존 방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서는 전체 계산영역에서의 편미분 방정식을 유한차분의 형태로 나타내어 모든 계산 격자점에서 연립해를 구해야 하는데 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식을 채택하고 비직교 좌표계로 구성된 3차원 제어체적을 정의하여 각 보존방정식을 이 제어체적내에서 체적적으로 차분화시키는 유한체적법[4]을 이용한다. 일반적으로 알려진바와 같이 2차 정확도를 갖는 중심차분법을 이용하는 것이 해의 정확성을 높일 수 있지만 레이놀즈 수가 큰 경우에는 중심 차분법을 이용하여 대류항을 처리하게 되면 불안정한 해를 얻게 될 수 있는 단점이 있다[5]. 따라서 레이놀즈 수가 큰 경우에는 1차 정확도를 갖지만 안정된 해를 얻을 수 있는 상류차분법을 이용하고 레이놀즈 수가 작은 경우에는 중심차분법을 사용하는 하이브리드 방법을 이용한다. 이때 중심 차분법과 상류 차분법을 사용하는 판정은 대류항에 대한 확산항의 바로 표시되는 Peclet 수를 기준으로 한다. 일반적으로 음함수법에 의해 차분화된 비정상유동에서는 유동 방정식들의 압력-속도 연결문제를 해결하기 위해서 반복계산에 의존하지 않는 시간 진행(Time marching)방법인 PISO 알고리즘을 사용하였다[6]. 또한 벽 조건으로부터 비 미끄럼 경계조건을 부여하고 입구에서 레이놀즈 수 10,000의 일정한 속도가 유입되며 출구에서는 구배가 영인 출구경계조건을 설정한 후 시간간격을 0.1초로 하여 수치해석을 수행 하였다(Fig 1). 레이놀즈수는 입구속도와 실린더 직경으로 계산되며 실린더의 직경은 200mm이다. 그리고 상용 열유동 해석 프로그램인 STAR-CD[7]로 동일한 격자계와 경계 조건들을 적용하여 해석을 수행한 후 본 연구 결과와 비교하였다. 비정상 유동의 보존 방정식이 제어체적 V_p 에 적용될 때 최종적인 이산화 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{(\rho\phi V)_p^o}{\delta t} + ((\rho v)_j \cdot S_j \cdot \phi_j - \Gamma_{\phi_j} \cdot \nabla \phi_j \cdot S_j) = Q_{\phi}^p V_p$$

본계산에 사용된 컴퓨터는 Silicon Graphics의 INDIGO 2 기종으로 CPU는 200MHz이며 시간간격을 0.1초로 설정하여 40초까지 실행하는데 약 6시간이 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

Fig 2.는 각각 시간이 7초, 10초, 15초에서의 유선함수를 보여주며 시간이 7초까지는 유동이 실린더를 지나면서 박리하여 실린더의 후류부분에서 서로 반대로 회전하는 두개의 대칭인 와류를 형성함을 알 수 있다. 그러나 시간이 경과하면서

유동의 불안정성으로 인하여 10 초 무렵부터 미약하지만 실린더 후류부분에서 비대칭성이 발생하여 실린더의 바로 후면에서 실린더의 중심축을 기준으로 위쪽의 와류크기가 아래쪽의 와류크기보다 더 커지고 실린더 직경의 약 2 배지점에서 아래방향의 유동이 위쪽으로 향하면서 비대칭성이 더 발달함을 알 수 있다. Fig 3 은 상용 열·유동 해석프로그램인 STAR-CD 를 본연구와 동일한 격자계와 조건을 사용하여 수행한 결과를 같은 시간에 대하여 도시하였다. 결과에서 보여주는 것과 같이 속도 분포에서 모든 시간에서 에디가 실린더의 중심축을 기준으로 하류 영역에서 상하 대칭을 이루고 있다. 이는 본 연구 및 Nair[8]의 연구와 비교하여 비대칭성이 시작되는 시간 예측에 있어서는 다른 결과를 나타내고 있다. 그러나 10 초까지의 시간에 대하여 속도 분 연구와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig 4. 는 시간이 각각 7 초, 10 초, 15 초에서 C_p 값을 본 연구의 계산결과와 STAR-CD 의 계산결과를 비교한 것이다. 결과에서 보여주는 바와 같이 시간이 7 초와 10 초에서는 두 결과가 정량적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나 시간이 15 초일 경우에는 실린더의 후류 영역에서 약간의 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 비대칭이 시작되는 시간 예측에서 약간의 시간적 차이가 있기 때문으로 판단된다. Fig 6. 은 시간이 각각 7 초, 10 초, 15 초에서 주 유동방향 속도 성분을 본 연구의 계산결과와 STAR-CD 의 계산 결과를 비교한 것이다. 결과에서 보여주는 바와 같이 7 초, 10 초에서는 유사한 경향을 보이고 있지만 본 연구 결과가 STAR-CD 보다는 상향 예측함을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 수행한 결과를 상용 후처리 프로그램에서 확인하기 위하여 각 격자의 값들을 격자점으로 분배하는 과정에서 보간 방법의 차이 때문에 발생한 것으로 보인다. 이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 수행한 비구성격자계를 이용한 수치해석 프로그램은 상용 프로그램 및 다른 연구결과와 비교하여 정량적 및 정성적으로 신뢰할 수 있는 결과를 얻었으며 본 프로그램을 일반적인 수치연구에 적용할 수 있다는 결론을 얻었다.

5. 결론

1. 해석코드의 검증을 위하여 수행한 실린더 주위의 유동장 해석을 통하여 실린더 후류영역에서 유동이 비대칭이 되는 시간이 약 10 초로 다른 수치해석 결과의 약 9.64 초와 잘 일치하고 있으며, 압력계수가 양의 값에서 음의 값으로 변하는 각도가 약 45 도로 다른 수치해석 결과와 정량적으로 잘 일치함을 볼 수 있었다.
2. 동일한 격자계 및 경계 조건들을 사용하여 본 프로그램의 결과와 상용 열 유

동해석 프로그램인 STAR-CD 의 결과를 비교한 결과 실린더 후류 영역에서 비대칭성이 시작되는 시간은 약 5 초의 시간 차이가 있었으나 압력 계수 및 속도값은 비대칭이 발생되기 전까지는 정량적으로 잘 일치하고 있었다. 그리고 구성 격자계의 IJK 격자계를 사용한 경우와 비구성 격자계를 사용한 경우 모두 결과의 차이는 보이지 않았으나 IJK 격자계의 경우가 비구성 격자계를 사용한 경우에 비하여 격자수의 증가를 가져왔다.

Reference

- [1] A. Borthwick, "Comparision Between Two Finite-Difference Scheme for Computing the Flow Around a Cylinder", Int. J. for Numerical Method in Fluids, Vol.6,p.275,1986.
- [2] K. B.Kim and K. S. Chang, "Numerical study on Vortex Shedding from a Circular Cyliner Influenced by a Nearby Control Wire", J.of Computational Fluid Dynamics, Vol.4, No.2, p.151.1995.
- [3] S. Muzaferija, "Adaptive Finite Volume Method for Flow Prediction Using Unstructured Meshes and Multigrid Approach", PhD Thesis, Univ. of London, 1994.
- [4] M.Peric, "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts", PhD. Thesis, Univ. of London, 1985.
- [5] S.V. Pantankar, Numerical Heat transfer and Fluid Flow, McGrow-Hill, 1980
- [6] R. I. Issa, "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting", J. of Computational Physics,62,40-65,1985
- [7] STAR-CD Manual (Version 3.05)
- [8] M. T. Nair and T. K. Sengupta, "Onset of Asymmetry Flow Past Circular and Elliptic cyllinders", Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol.23 , p.1327, 1996

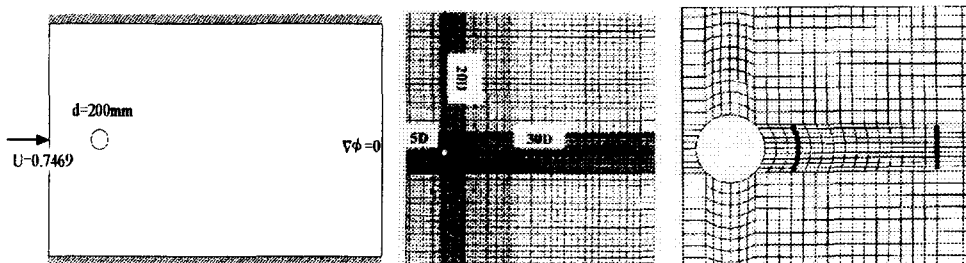


Fig 1. Grid system and sampling location.



Fig 2. Velocity vector at time=7sec , 10sec , 15sec

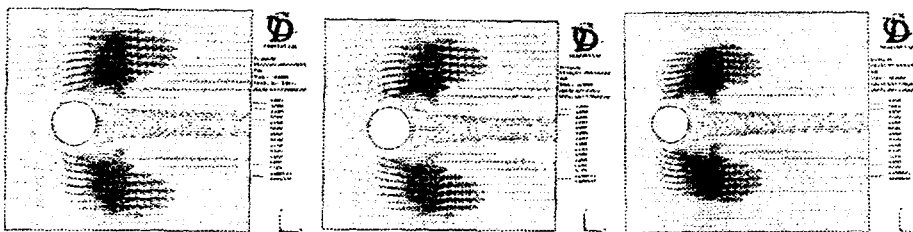


Fig 3. Velocity vector at time=7sec, 10sec, 15sec [STAR-CD]

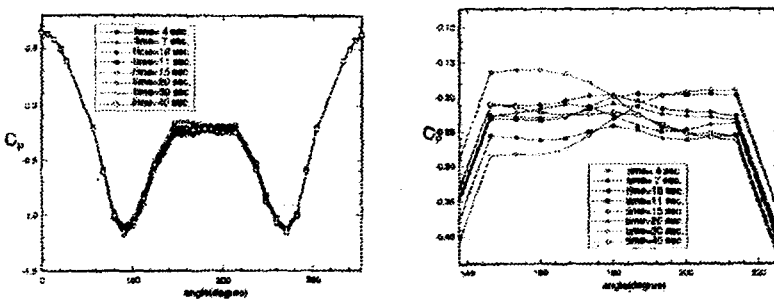


Fig 4. Pressure coefficient at $Re=10,000$.

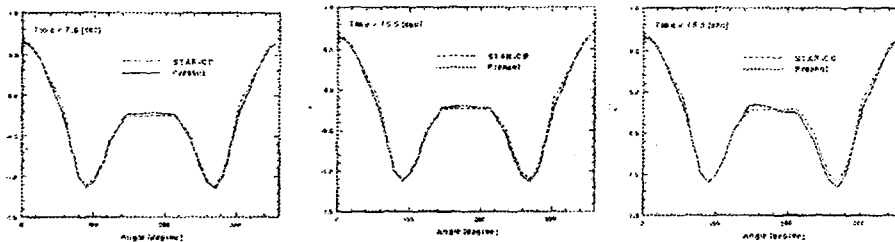


Fig 5. Pressure coefficient at $Re=10,000$ (time=7, 10 , 15 sec)

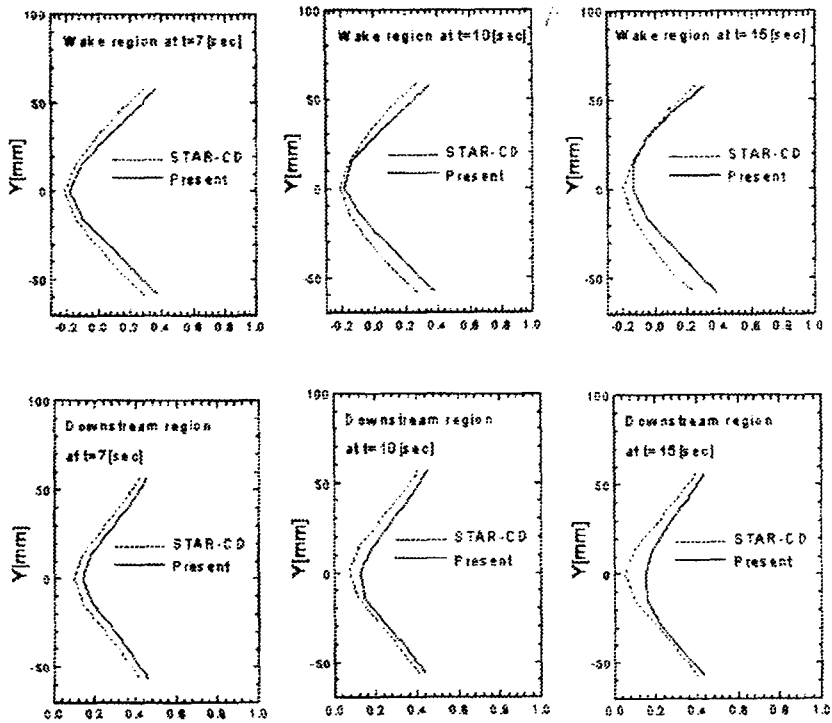


Fig 7. U velocity profiles at $Re=10,000$ (time=7,10,15 sec)