

경계층 내에 위치한 각진 물체 주위의 와류 전산 해석

Computational Analysis of Vortex Structures around Wall-Mounted Bluff Body in Boundary Layer

이주용^{1*}, 김현우¹, 이승수¹
충북대학교 토목공학부¹

초 록

일반적으로 건축물의 설계시 풍동 실험을 통한 풍환경의 평가를 수행하고 있으며, 이는 환경 영향 평가법에서 정한 건축 사업 시행 시 수반되어야 할 자연환경, 생활환경 그리고 사회경제환경의 영향 평가의 일환으로 실시되고 있다. 그러나, 풍동 실험의 경우 여러 가지 현실적 제약조건으로 설계와 실험의 피드백 (Feedback)이 원활하지 못하며, 특히 대상 건축물이 공장과 같이 대기 오염원이 되는 경우 실험은 더욱 어려운 형편이다. 이에 대한 보완책으로 전산 유체 역학을 이용한 건축물의 풍압 해석에 의한 풍하중 추정이나 인접 지형-지물의 영향을 고려한 건축물 주위의 풍환경 평가가 있다. 전산 모사에 의해 풍동 실험의 미비점을 보완하고, 보다 상세한 정보를 확보함으로써 건축물의 구조적 안전성의 증대와 환경 피해 감소를 기할 수 있다. 그러나 복잡한 지형-지물이나 건축물 주위의 풍환경에 대한 전산 모사는 주로 두 가지의 기술적 어려움을 수반하게 된다. 그 중 하나는 고정 경계면을 이루는 형상의 복잡성으로 인해 기준에 많이 이용하고 있는 Body-fitted 격자계를 이용하는 경우, 격자 생성 과정이 매우 복잡하고 어려울 뿐 만 아니라 생성된 격자가 주로 비정렬 (unstructured) 특성을 갖게 되어 수치 해석 과정의 효율을 저하시키는 요인이 되며, 격자의 형상도 수치해석의 수렴성을 저하시키는 예가 많다. 다른 어려움으로 풍환경은 전형적인 난류 유동장으로서 난류의 전산 해석은 아직도 해결하지 못한 부분이 많다는 점이다. 이에 본 논문에서는 복잡한 지형-지물이나 건축물의 풍하중과 풍환경의 전산 모사 기술 확보를 위하여 수행중인 연구의 일환으로 물체 형상의 기하학적 복잡성의 극복을 위한 가상경계법 (Immersed Boundary Method)과 난류 유동장의 물리적 엄밀성을 높이기 위한 다와동 모사 (Large Eddy Simulation)을 이용한 물체 형상과 무관한 유동장 해석 기술 개발에 대하여 다루고자 한다. 먼저 최근에 유동 해석에 이용되는 방법인 가상경계법(IBM)은 물체를 포함한 전체 전산 영역을 직교 좌표계에 의해 이산화하고, 유동장내 존재하는 물체의 표면에서의 점착 조건을 만족시키기 위하여 지배 방정식에 적절한 외력을 추가로 고려하는 방법이다.

본 연구에서는 가상경계법을 이용하여 경계층에 위치한 건물 형상의 각진 물체 주위 사이에 형성되는 공동 내부의 비정상 유속 및 압력에 대한 전산 해석을 수행하고, 풍상측 전면에 형성되는 경계층에 의한 영향을 분석하였다.

Key Words : 풍환경 (Wind Environment), 경계층 (Boundary Layer), 가상경계법 (IBM), 도시 협곡 (Urban Canyon)

1. 서론

최근 친환경 도시에 대한 관심의 증대로 도시 지역의 풍환경 분석에 대한 관심이 증가하고 있다. Bluff Body 주위의 유동장 해석을 다루는 많은 전산 해석 기술이 연구되어 왔지만, 복잡한 구조물 주위 유동장 해석이 야기하는 어려움으로 주로 실험에 의한 연구가 진행되어 왔다. 건물들 주위의 풍환경 전산해석은 먼저 격자 생성 이후에 유한체적법, 유한요소법 또는 유한차분법과 같은 방법에 의한 지배방정식의 이산화가 이뤄지고 이후 적절한 수치해법을 이용하여 유속 및 압력을 구하는 순서로 진행된다. 만일 유동장의 기하학적 경계가 관유동이나 채널과 같이 상대적으로 단순한 경우에는 격자들의 직교성

을 유지하는 것이 어렵지 않으나, 통상의 풍환경 분석이 요구되는 건물이나 고저 변화가 있는 지형을 고려한 유동장의 경우 매우 복잡하여 격자 생성 자체가 큰 주제를 차지하기도 한다. 이런 이유로 일반적인 범용 전산 해석 프로그램들이 솔버와 별도로 전처리기를 활용하고 있다.

유동장의 이산화를 위하여 이용되는 방법은 우선 첫 번째로 전통적으로 지금까지 사용되어 오고 있는 경계사상접근방법 (boundary conforming approach)으로 물체-맞춤격자(body-fitted grid)가 있는데, 격자 생성의 전처리 프로그램의 발달로 이전보다 물체-맞춤 격자를 생성하는데 편리해졌지만, 물체와 현상이 복잡해질수록 수치 해석의 난이도와 오차가 증가한다. 두 번째로는 비용과 효율 측면에 있어 효과적인 경계비사상접근방법(non-boundary conforming approach)으로 구조 격자를 사용하는데 일반적으로 격자와 경계가 일치하지 않아, 경계효과를 위해서 셀-절단방법(cut-cell method)⁽¹⁾과 가상경계법 (immersed boundary method)^(2,3)이 있다. 가상경계법에서는 유동장 내의 물체를 실제 물체라기보다는 유체 운동 방정식에 운동량 보정(momentum forcing)을 추가하여 물체면 경계조건을 만족하도록 함으로써 물체의 경계를 구분한다. 따라서 복잡한 형상에 대한 유동을 직교격자로 쉽게 처리할 수 있어 메모리와 연산 시간을 절약할 수 있고 경계사상접근방법에 비해 격자 생성이 매우 편리하다는 강점을 갖는다.

본 연구에서는 이러한 가상경계법을 이용하여 다수의 각진 물체가 경계층 유동에 위치할 때 교란되는 유동장을 해석하고 와류 및 상호작용 등에 대한 전산해석을 수행하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 Kim등⁽³⁾이 제안한 방법으로 물체의 경계를 forcing을 이용하여 점착조건을 만족하도록 하였으며, 질량 보존이 성립되도록 mass source/sink를 도입하여 다음과 같은 지배방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (2)$$

이때 f_i 는 momentum forcing을 나타내고, q 는 mass source/sink를 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 전산해석하기 위하여 대류항에 3차 정확도의 Runge-Kutta method를 사용하고, 확산항에 대하여 2차 정확도의 Crank-Nicolson method를 각각 사용한 semi-implicit fractional-step method를 사용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\hat{u}_i^k - u_i^{k-1}}{\Delta t} = \alpha_k L(u_i^{k-1}) + \alpha_k L(\hat{u}_i^k) - \gamma_k N(u_i^{k-1}) - \xi_k N(u_i^{k-2}) - 2\alpha_k \frac{\partial p^{k-1}}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \phi^k}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{1}{2\alpha_k \Delta t} \left(\frac{\partial \hat{u}_i^k}{\partial x_i} - q \right) \quad (4)$$

$$\frac{u_i^k - \hat{u}_i^k}{\Delta t} = -2\alpha_k \frac{\partial \phi^k}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$p^k = p^{k-1} + \phi^k - \frac{\alpha_k \Delta t}{Re} \frac{\partial^2 \phi^k}{\partial x_i \partial x_i} \quad (6)$$

여기서 $L(u_i) = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$, $N(u_i) = \frac{\partial u_i \partial u_j}{\partial x_j}$ 이며, \hat{u}_i 와 ϕ 는 각각 중간 속도와 pseudo-pressure이다. Δt 와 k 는 각각 시간 간격과 substep의 index이고 α_k , γ_k , ξ_k 는 RK3의 계수로 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \frac{4}{15}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{15}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{6}$$

$$\gamma_1 = \frac{8}{15}, \quad \gamma_2 = \frac{5}{12}, \quad \gamma_3 = \frac{3}{4}$$

$$\xi_1 = 0, \quad \xi_2 = -\frac{17}{60}, \quad \xi_3 = -\frac{5}{12}$$

2.2 Momentum forcing

식 (3)에서 f_i^k 를 미리 알아야 하며, momentum forcing을 주는 점의 f_i^k 를 정리하면 다음과 같다.

$$f_i^k = \frac{U_i^k - u_i^{k-1}}{\Delta t} - 2\alpha_k L(u_i^{k-1}) + 2\alpha_k \frac{\partial p^{k-1}}{\partial x_i} + \gamma_k N(u_i^{k-1}) + \xi_k N(u_i^{k-2}) \quad (7)$$

여기서 U_i^k 는 momentum forcing을 가하여 forcing point에서 얻고자하는 속도이다. U_i^k 는 Fig. 1에서와 같이 물체 경계에서 속도가 '0'이 되도록 하기 위한 내삽의 과정이 필요하다. Fig. 1에서는 2차정확도의 linear와 bilinear interpolation을 보여주고 있다. Fig. 1에서 P_1 은 점착조건을 주는 점이고, U_1 , \tilde{u}_2 , \tilde{u}_3 , \tilde{u}_4 는 P_1 을 둘러싸는 속도 성분이다.

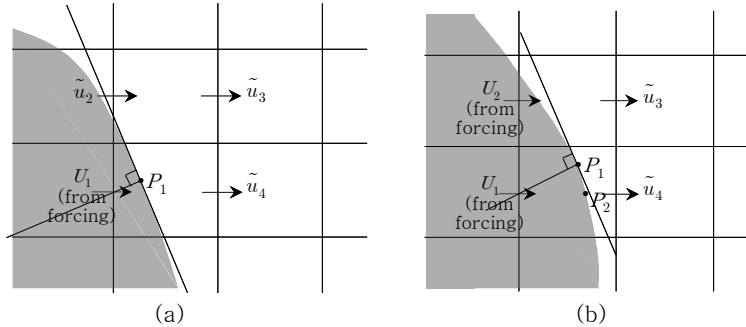


Fig. 1. Schematic diagram for the interpolation scheme (a)bilinear interpolation
(b) linear interpolation

2.3 mass source and continuity equation

식(4)의 q^k 는 Fig. 2에서와 같이 u_1^k 와 v_1^k 는 물체 내부에 위치하고, u_2^k 와 v_2^k 는 물체 외부에 위치하고 있다. 유체만을 포함하는 격자에 대한 연속방정식과 전체 격자에 대한 연속방정식으로부터

$$q^k = -\frac{u_1^k}{\Delta x} - \frac{v_1^k}{\Delta y} \quad (8)$$

와 같이 된다. 그러나 u_1^k 와 v_1^k 는 식(4)와 식(5)를 풀기 전에는 알 수 없으므로 2차의 시간 정확도에 영향을 주지 않으면서 \hat{u}_1^k 와 \hat{v}_1^k 를 대신 사용하여 정의하면 다음과 같이 된다.

$$q^k = -\frac{\hat{u}_1^k}{\Delta x} - \frac{\hat{v}_1^k}{\Delta y} \quad (9)$$

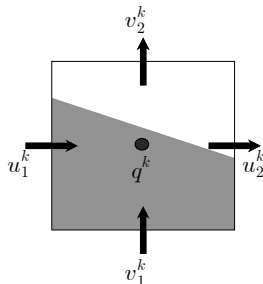


Fig. 2. mass conservation for a cell containing the immersed boundary

3. 전산 해석 및 결과

3.1 전산 모델링 및 경계조건

본 연구에 이용된 전산 영역과 경계조건은 Fig. 3에 보는 바와 같다. 점착조건이 부여되는 바닥면에 부착된 직사각형 물체는 높이 H로서 주변의 상세한 격자계는 Fig. 4에 보는 바와 같이 된다. 세 개의 물체를 간격 B를 두고 배치함으로써 형성된 공동 (Cavity)을 이용하여 도시 협곡 (Urban Canyon)을 나타내었다. 물체의 길이는 L로서 3.45H의 길이로 설정하였다. 이러한 길이의 설정은 같은 길이비를 갖는 3차원 물체들에 대해 수행된 바 있는 실험 연구⁽⁸⁾와의 비교를 위해 결정되었다. 유입유동은 경계층으로 가정하였으며 연직방향을 y 좌표라고 할 때 다음과 같은 먹급수를 갖는다.

$$u(y) = \frac{U_o}{0.7} y^{0.14} \tag{9}$$

이때 U_o 는 H 높이의 유입유속을 나타낸다. 또한 상부 경계층은 미끄러짐 조건을 부여하였으며 출구 조건은 대류경계조건을 설정하였다. 유동 조건으로 Reynolds수는 $Re = \frac{U_o H}{\nu}$ 로 정의되며 100이 되도록 설정하였다.

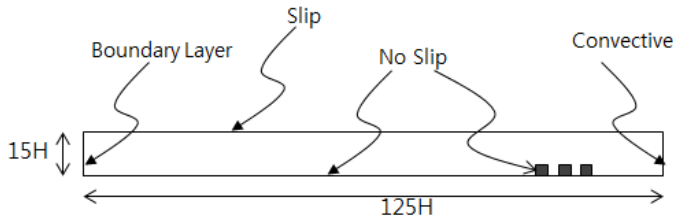


Fig. 3. Computational domain and boundary condition

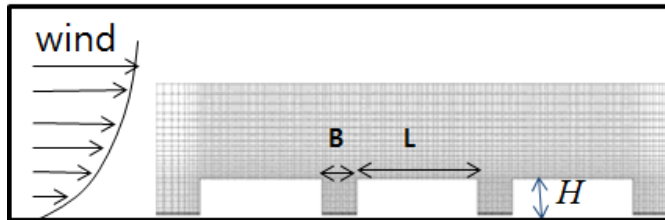


Fig. 4. Details around blocks

3.2 공동내 유동장 비교

Fig. 5는 Chang & Meroney⁽⁸⁾의 연구 결과로 나타낸 B/H=1의 경우에 공동 내부의 유동장과 본 연구의 결과를 비교한 것으로 매우 유사함을 알 수 있다. 내부의 순환 유동은 물론 공동 바로 외부에 나타나는 가속 영역이 잘 나타나고 있다.

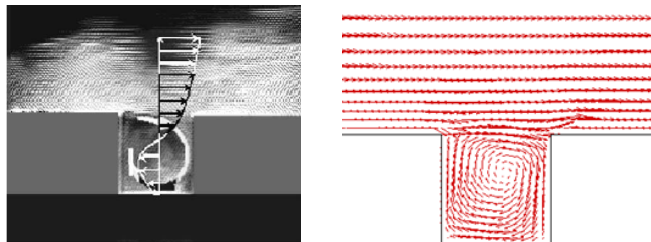


Fig. 5. 공동 내부 유동장에 대한 실험⁽⁸⁾과 본 연구 결과의 비교

Fig. 6은 공동 내부에서 U_0 로 무차원한 유속의 수직 분포를 Chang & Meroney⁽⁸⁾의 연구 결과와 본 연구 결과를 비교하고 있다. 그림에서 나타나는 바와 같이 무차원화 높이 1에 해당하는 높이 H에서 갑작스러운 가속이 발생하는 것은 앞에 있는 물체의 지붕에서 형성된 경계층의 영향으로 판단된다.

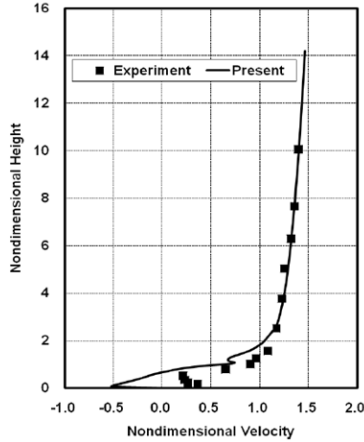


Fig. 6. 공동 내부 유동장에 대한 실험⁽⁸⁾과 본 연구 결과의 비교 (B/H=1)

3.3 B/H 변화가 미치는 영향

물체의 간격이 미치는 영향을 비교하기 위하여 B/H=0.5, 1 및 2인 경우에 대한 해석을 수행하였으며 Fig. 7은 공동 내부의 유속 비교를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 B/H가 감소함에 따라, 즉 물체의 간격이 감소하면 공동 내부에 형성되는 순환의 강도가 감소하며 B/H=1까지는 앞 물체의 지붕에서 형성되는 경계층의 효과로 나타난 감속효과가 H 높이에서 갑작스럽게 사라져 가속됨을 알 수 있다. B/H의 증가에 따라 예상되는 바와 같이 앞 물체 지붕의 경계층 효과가 감소하는 것을 알 수 있다.

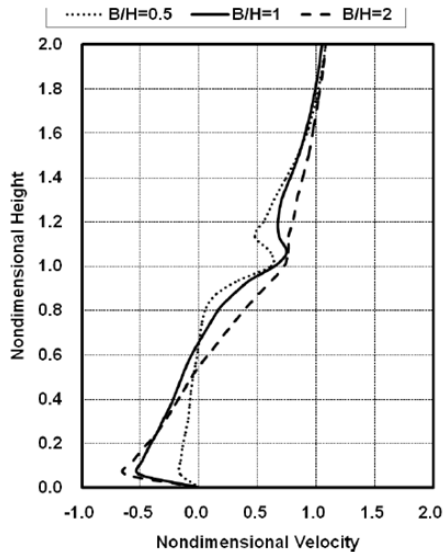


Fig. 7. B/H 변화가 공동 내부 유동장에 미치는 영향

4. 결론

본 연구에서는 도시의 풍환경 전산 해석과 같이 복잡한 유동장 경계를 갖는 경우에 2차원 층류유동에 서 가상경계법을 이용한 해석을 수행하였다. 유한 체적법의 엇갈림 격자 상에 semi-implicit fractional step 방법을 적용하여 유동장에서의 압력과 속도를 결정 하였다. 대류항에 대해서는 외재적 Runge-Kutta 방법을, 확산항에는 내재적 Crank-Nicolson 방법을 적용하였다. 해석 대상으로는 경계층 에 위치한 세 개의 직사각형 물체 주위의 유동장으로 물체 사이에 형성된 공동 내부는 도시 협곡 (urban canyon)을 나타낸다. 해석 결과는 이전의 실험 결과와 비교하여 좋은 일치율을 나타내었으며, 물 체의 간격 변화에 따라 앞에 위치한 물체의 지붕에서 발달한 경계층의 효과가 후면에 형성된 공동 내부 유동장에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구는 3차원 유동 및 난류 유동을 포함하여 확장될 예정이며 도시 건물 주위의 풍환경 해석 기술 개발에 적용될 예정이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업(과제 No. 2011-0020564) 지원으로 수 행되었습니다.

참고 문헌

- (1) M. F. Barad, P. Colella and S. G. Schladow, 2008, "An adaptive cut-cell method for environmental fluid mechanics," *J. Numer. Meth. Fluids.* 60, pp.473-514.
- (2) Mohd-Yusof, J., 1997, "Combined Immersed-Boundary / B-Spline Methods for Simulations of Flow in Complex Geometries," *Annual Research Briefs (Center for Turbulence Research, NASA Ames and Stanford University)*, pp.317.
- (3) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *J. Comput. Phys.*, 171, pp.132.
- (4) Liao, 2010, "Simulating flows with moving rigid boundary using immersed-boundary method," *J. Comp Fluids.*, 39, pp.152-167.
- (5) 최춘범, 이승수, 양경수, 윤동혁, 2006, "가상경계법에 의한 3차원 지형 주위의 성층 유동 해석," *한국풍공학회지*, 제10권 1호, pp.91-99.
- (6) 최춘범, 양경수, 이승수, 함희정, 2007, "강풍피해 위험성 평가를 위한 건물군 주위 유동해석," *한국 풍공학회지*, 제11권 1호, pp.67-77.
- (7) 이승수, 양경수, 황종연, 2004, "임의 형상 구조물 주위 유동의 직교 격자계 기반 해석 기술 개발," *한국풍공학회지*, 제8권 1호, pp.103-111.
- (8) C.H. Chang and R.N. Meroney, 2003, "Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data," *J. Wind Engrg. & Ind. Aerodyn.*, Vol. 91, pp.1141-1154.