

격자 볼츠만 방법을 이용한 덕트 내 사각 실린더에 의한 Aeolian 순음소음 분석

Investigation on Aeolian tone nose by a square cylinder in duct using Lattice Boltzmann Method

이송준* · 정철웅†
Songjune Lee, Cheolung Cheong

1. 서 론

과학 기술의 발전으로 생활이 풍요로워짐에 따라 환경문제에 대한 관심이 증대되었다. 그 중 자동차, 항공기, 기차, 선박 등의 수송기계와 냉각용 팬, 냉동공조 기기 등으로부터 발생하는 유동소음(flow noise)은 최근 중요한 문제로 대두되고 있다. 유동소음의 발생원인이나 그 메커니즘을 밝히기 위한 노력으로 이론 및 실험뿐만 아니라 계산기 성능의 비약적인 발달과 더불어 수치해석을 통한 연구(computational aero-acoustics)들도 활발하게 이루어지고 있다. 본 논문에서는 Navier-Stokes 식을 지배방정식으로 하는 전통적인 수치 기법이 아닌 볼츠만식을 지배방정식으로 확률적 분포함수를 이용하여 유동해석을 수행하는 격자 볼츠만법(Lattice Boltzmann Method, 이하 LBM)⁽¹⁾을 이용하여 덕트 내 사각 실린더에 의한 Aeolian 순음소음을 수치적으로 분석하였다. 2 차원 유체 모델을 적용하고 이론 식과 비교하여 유동장 해석 결과의 정확성을 검증한 후, 덕트 내 tandem-twin 실린더를 지나는 유동에 대한 aerolian 순음소음을 예측하고 분석하였다.

2. 이론

볼츠만식을 지배방정식으로 하여 이산화된 격자내의 입자의 거동을 확률적으로 나타낸 분포함수를 이용해 유동을 해석하는 LBM 은 볼츠만 방정식의 충돌 항을 시간에 대하여 1 차로 완화시켜 단일완화시간(Single Relaxation Time, 이하 SRT)을 갖는

BGK⁽²⁾ (Bhatnagar Goss Krook) 모델과 2 차원 해석에서 정사각형 격자를 이용하는 2D9Q 모델이 흔히 사용되고 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$f_i(\vec{r} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\vec{r}, t) - \frac{\Delta t}{\tau} [f_i(\vec{r}, t) - f_i^{(eq)}(\vec{r}, t)] \quad (2.1)$$

$$f_i^{(eq)} = w_i \rho_f [1 - 2B(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u}) + 2B^2(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2 + B(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})] \quad (2.2)$$

여기서, $f_i^{(eq)}$ 는 국소평형분포함수(local equilibrium distribution function)를 나타내며 유동특성을 결정짓는 점성계수는 τ 와 관련되며 이는 충돌 후 입자가 평형상태에 도달할 때까지 걸리는 시간으로 단일시간완화계수라 불린다. 그리고, D2Q9 모델의 각 격자 점에서 유체의 밀도와 운동량은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i \quad (2.3)$$

$$\rho \mathbf{u} = \sum_{i=0}^8 \vec{c}_i f_i \quad (2.4)$$

BGK 완화법을 적용한 LBM은 각 방향의 입자분포함수값을 이동시키는 streaming 과정과 점성계수에 의해 결정된 완화시간에 의한 collision 과정으로 나뉘며 적절한 경계조건의 적용으로 각 격자점에서의 입자분포함수 값이 계산된다.

3. 수치해석 방법 및 결과

덕트 내 유동을 해석하기 위한 LBM 기반 프로그램을 개발하고, 해석 코드의 신뢰도 및 경계조건의 적합성을 판단하기 위하여 두 평판 사이를 흐르는 비압축성 Poiseuille 유동의 엄밀해와 해석 결과를 비교하였다. Poiseuille 유동의 엄밀해는 다음과 같다.

$$U(y) = \frac{4U_{\max}}{(y_{\text{top}} - y_{\text{bottom}})^2} \times (y - y_{\text{bottom}})(y_{\text{top}} - y) \quad (3.1)$$

† 교신저자; 정철웅, 부산대학교 응용음향연구실

E-mail : ccheong@pusan.ac.kr

Tel : +82-51-510-2311, Fax : +82-51-514-7640

* 부산대학교 응용음향연구실

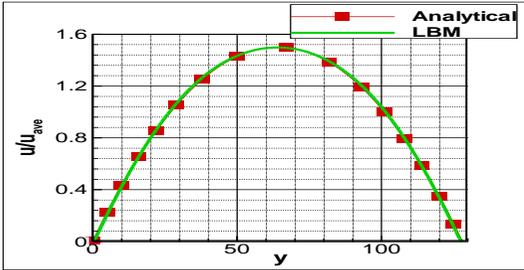


Figure 1 Comparison between the analytical and numerical solutions

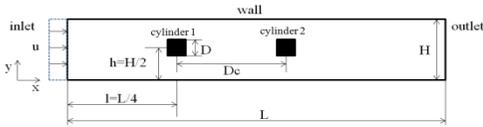


Figure 2 Configuration of computation domain with applied boundary conditions

Fig. 1은 Poiseuille 유동의 엄밀해와 LBM 해석 결과를 비교한 것이다. 익히 알려진 바와 같이 평균 유속으로 무차원화한 유속의 최대속도는 평균속도의 1.5배이며 해석 결과와 잘 일치한다.

사각 실린더를 지나는 덕트 내부 유동의 압력섭동과 이에 따른 유동소음을 예측하기 위하여 Fig. 2에서 나타낸 계산영역에 사각실린더를 덕트 중앙에 삽입하고 계산을 수행하였다. 격자의 수는 800×128 , 차단율($B=H/D$)은 8이며 일정 유속에 기초한 레이놀즈 수는 100으로 서 층류유동에 해당한다. Fig. 3은 단일 실린더에 대하여 계산한 항력계수(C_D)와 양력계수(C_L)를 시간에 대해 나타낸 것이며 Table 1은 레이놀드 수에 대한 항력계수와 양력계수의 평균값을 보여준다. Breuer et al.⁽³⁾의 결과값과 LBM 해석 결과가 매우 근접함을 알 수 있다.

Fig. 4는 유동방향에 대하여 일렬로 배치되어 있는 쌍둥이 실린더 사이의 간격에 따른 압력 섭동을

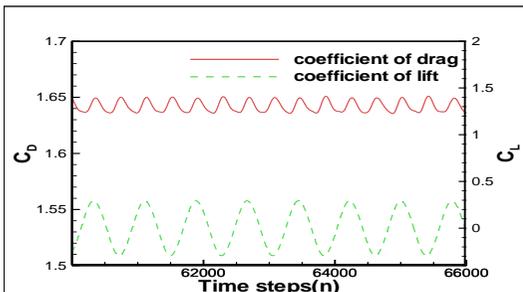


Figure 3 Flow over a square cylinder. Time-dependent lift and drag coefficient at Re=100

Table 1 Mean drag coefficient for the flow past a square cylinder at different Reynolds number

Authors	Re=50	Re=60	Re=100
Breuer et al.	1.48	1.42	1.37
Present LBM	1.77	1.72	1.64

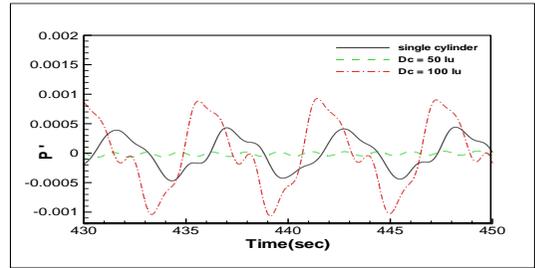


Figure 4 Time history of the sound pressure

나타내었다. 두 실린더 사이의 거리에 따라 압력섭동의 변화가 큼을 확인할 수 있으며, 소음측면에서 최적의 실린더 배치가 가능함을 확인할 수 있다.

3. 결 론

LBM을 이용하여 덕트 내 사각 실린더를 지나는 유동장과 그에 따른 압력섭동을 확인하였다. $D_c=50$ 만큼 떨어진 쌍둥이 실린더에서 발생하는 음압의 크기가 단일 실린더보다 작아지는 것을 확인 하였으며 이것은 일정 간격 이하에서는 덕트 길이방향으로 실린더의 폭이 길어지는 효과로 인한 후류 와 흐름이 형성되지 않는 것에 기인한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Frisch, U., Hassacher, B. and Pmeau Y., 1986, Lattice-gas automata for the Navier-Stokes equations, Phys. Rev. Lett, Vol.56, pp.1505~1508.
- (2) Bhatnagar, P.L., Gross, E.P. and Krook, M., 1954, A model for collision process in gases. I: small amplitude processes in charge and neutral one-component system, Phys. Rev., Vol.94, pp.511~525.
- (3) M. Breuer, J. Bernsdorf, T. Zeiser, and F. Durst, 2000, Accurate computations of the laminar flow past a square cylinder based on two different methods: lattice Boltzmann and finite-volume, International Journal of Numerical Method for Heat & Fluid, Vol. 21, no. 2, pp. 186~196.