

공동을 지나는 비정상 유동에 대한 LES 해석

임종수*, 신동신**

LES for unsteady flow past a cavity

Jongsoo Lim*, Dongshin shin**

Key Words : Large-eddy simulation(큰에디모사), Cavity(공동), Near-filed noise(근접장소음)

Abstract

Cavity is inevitably included in automobile vehicle configuration. The complex unsteady flow and sound waves generated by the cavity are very important issues because of the involved fluid dynamics and the practical importance in the field of aerodynamics. The LES method used is a conventional one with Smagorinsky eddy-viscosity model and the computational grid is small enough to be handled by workstation-level computers. LES can successfully simulate of cavity noise analysis.

1. 서론

자동차 및 기타 수송기계의 형상에는 불가피하게 공동이 포함되어 있으며 이러한 공동은 유동과 소음의 공진에 의해 강한 압력교란을 발생한다. 유동에 의해 유발되는 복잡한 비정상유동과 그에 따른 소음의 발생은 유체역학적인 관심 및 항공 분야에서의 실용성 때문에 매우 중요한 문제이다. 그레이놀즈 수 유동의 경우에 공동내부 유동은 주로 난류 전단 층에 의한 압력진동 현상 및 공동의 기하학적 형상과 외부 유동조건에 의해 결정되는 불연속적인 공진 현상으로 특정 지워진다. 공동의 앞전에서 전단층의 불안정성이 발생하여 와동을 생성하고, 이 와동들은 유동을 따라 전파되어 공동의 downstream edge와 부딪히거나 공동을 빠져나가 소음원으로 작용하게 되고, 공동내부에 장착된 센서의 파손이나 심한 경우 구조물의 피로파괴를 유발한다[1].

이러한 이유로 공동의 유동 및 소음특성에 관한 많은 연구가 이루어져 왔는데 주로 공동내부에서 발생하는 압력진동에 영향을 미치는 여러 변수들을 실험이나 수치적 모사를 통해서 밝혀내었고, 공동에서 발생하는 소음의 예측 및 감소에 대한 여러 가지 방법이 시도되었다[2-6].

지금까지의 연구에 의하면 공동은 크게 개방형, 폐쇄형, 천이형의 세 가지로 나눌 수 있다[7]. 개방형 공동은 길이 대 깊이 비(L/D)가 10보다 작은 경우로서, 자유 전단층이 공동을 완전히 연결하여 주며 전단층이 뒷전 부근에 재부착된다. 폐쇄형 공동의 경우에는 길이 대 깊이 비가 13보다 큰 경우로서 앞전과 뒷전에 두 개의 분리된 박리 영역이 생기게 되어 폐쇄형이라고 부른다. 길이 대 깊이 비가 10과 13사이인 공동은 천이형 공동이라고 부르는데, 이 영역에서는 외부유동조건에 따라 둘 중 하나의 유동이 형성될 수 없다. 이러한 구분은 공동 유동장을 구분하는데 있어서 기준이 될 뿐이다.

* 홍익대학교 기계공학과, slimjong@wow1.hongik.ac.kr

** 홍익대학교 기계공학과, dsshin@wow.hongik.ac.kr

본 연구에서는 자동차 타이어의 장착으로 생기는 공동으로 인한 소음을 해석하기 위해 공동의 크기는 타이어의 크기로 가정하였고, 유입속도는 자동차의 정속 주행속도와 고속 주행속도로 가정하였다. 실제로 자동차에서 타이어의 장착으로 인해 생기는 소음은 엔진소음 다음으로 전체 소음의 30%를 차지할 정도로 소음정도가 심하다. 이중 타이어에 의한 공기역학적 소음은 고속에서 상당히 증가하는 것으로 연구된 바 있다[8].

공동의 강한 난류 유동장을 연구하기 위해서 비정상해석의 시간평균을 취하는 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) 해석이 아닌 LES(Large eddy simulation)를 이용하여 해석하였다[9][10]. LES는 CFD의 최신 방법중의 하나로서 상대적으로 Universal한 작은 스케일의 운동은 Subgrid-Scale model로 모사하고 큰 스케일의 운동은 경계조건을 만족하도록 직접 계산하는 개념에 기초하는 방법이다.

근본적으로 소음해석은 정확한 유동현상을 규명하는 게 우선으로 강한 난류에 의한 압력진동현상으로 생기는 공동의 소음을 해석하기 위해 무엇보다도 정확한 난류해석이 요구된다. 많은 계산시간과 노력이 필요한 DNS(Direct numerical simulation)와 해석은 간단하지만 정확성이 떨어지는 RANS의 장점만을 가진 LES를 사용하여 개방형 공동의 유동해석을 수행하였다. 또한 이러한 유동해석의 결과로 얻은 시간에 따른 압력변동 데이터를 FFT(Fast fourier transform)를 이용하여 근접장 소음해석을 하였다.

2. 수치해석기법

2.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 LES 해석을 위해 상용 열 유동해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하였고[11], 소음해석에 대해서는 FFT를 이용

하여 주파수 스펙트럼으로 변환하였다. 공동내부의 유동 및 소음해석을 위한 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식은 다음 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, subgrid scale tensor는 $T_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}$ 와 같고 eddy-viscosity 가정을 사용하여 다시 표현하면 식(3)과 같다.

$$T_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} T_{kk} \delta_{ij} \quad (3)$$

본 연구에서는 eddy viscosity(ν_t)를 Smagorinsky models(SM)을 사용하여 구하였다. Smagorinsky model은 damping function을 사용하는 것으로 damping function은 식(5)와 같고, 식(6)은 strain rate, Δ_c 는 평균격자크기를 나타낸다.

$$\nu_t(x, \Delta_c, t) = (0.13 D \Delta_c)^2 (2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}})^{1/2} \quad (4)$$

$$D = 1 - e^{-y^*/A} \quad (5)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

또한 비정상해석에는 시간간격을 0.001sec로 하였고, 고차의 Crank Nicholson scheme을 사용하였다. 속도 항에 대해서는 Central differencing scheme을 사용하였다.

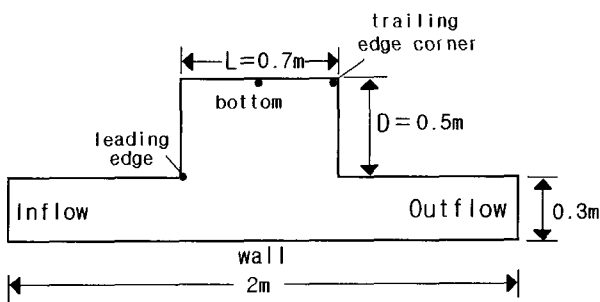


Fig. 1 Schematic diagram of cavity configuration and observing point

공동의 형상을 결정하는 요소는 Fig. 1과 같이 공동의 깊이(D), 공동의 길이(L), 유입구의 속도 등이다. 본 연구에서는 공동의 형태를 자동차 하부의 타이어가 위치하여 생기는 공동으로 가정하여 공동의 길이 비(L/D)가 1.4, 유입속도 20m/s(72km/h), 40m/s(144km/h)의 두 가지의 경우에 대해 leading edge, bottom, trailing edge corner의 압력변동 항으로부터 FFT를 이용하여 근접소음해석을 하였다. 또한 아래 면은 지면이라고 생

각하여 벽(no slip)조건을 주었다. 격자의 모양은 Fig. 2와 같이 계산에 사용된 격자의 수는 공동부분이 100×60이고, 벽 쪽으로 밀집격자를 주어서 y^+ 가 5보다 작게 하였다. 격자의 생성은 해의 정확성과 수렴성에 상당한 영향을 미치므로 세심한 주의가 필요하다.

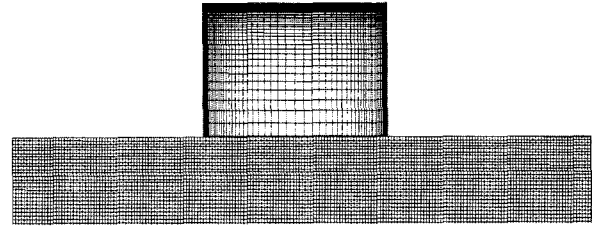


Fig. 2 Computational grid system for two dimensional cavity L/D=1.4

2.2 소음해석

본 계산에서는 LES유동해석으로부터 얻은 세 점의 압력변동 데이터를 Fourier 변환시켜 주파수 스펙트럼으로 나타내었다. 시간 T=7.53sec에서 T=10sec 까지 샘플링한 데이터 2048개에 대하여 FFT(Fast Fourier Transformation)로 Fourier 변환을 하였다.

음압 수준(dB)은 압력 변동의 root mean square 값으로부터 다음과 같이 구할 수 있다[12].

$$SPL = 20 \log \left(\frac{p'_{rms}}{2 \times 10^{-5} N/m^2} \right) [dB] \quad (7)$$

3. 계산결과

본 계산에서는 L/D=1.4이고 입구 유속이 20m/s, 40m/s의 두 가지 경우에 대하여 유동 및 소음해석을 하였다. 속도 40m/s, 공동 깊이를 기준으로 한 레이놀즈 수는 1.35×10^6 이다. 공동 주위를 흐르는 압력장은 Fig. 3의 등 압력 분포도에서와 같이 앞전에서 낮은 압력을 갖는 와류의 중심이 뒷전으로 접근해가면서 뒷전 벽에 부딪혀 강한 압력변동을 발생하는 것을 보여준다. 또한 먼저 발생한 와류와 앞전에서 새로 발생하기 시작한 와류와의 상호작용에 의해 두 와류 사이에도 압력증가 현상이 발생하고, 처음에 뒷전 모서리에 생긴 와류는 시간이 갈수록 크게 발달하면서 출구 쪽으로 움직이는 것을 보여준다. 열린 공동이 아닌 아래가 지면으로 막혀 있는 공동이므로 뒷전에 발생한 와류에 의한 커다란 압력 변동 항은 더 이상 원음장으로 뺄어나가지 못하고 벽에 부딪혀 돌아오는 것을 알 수 있다.



T=0.01sec

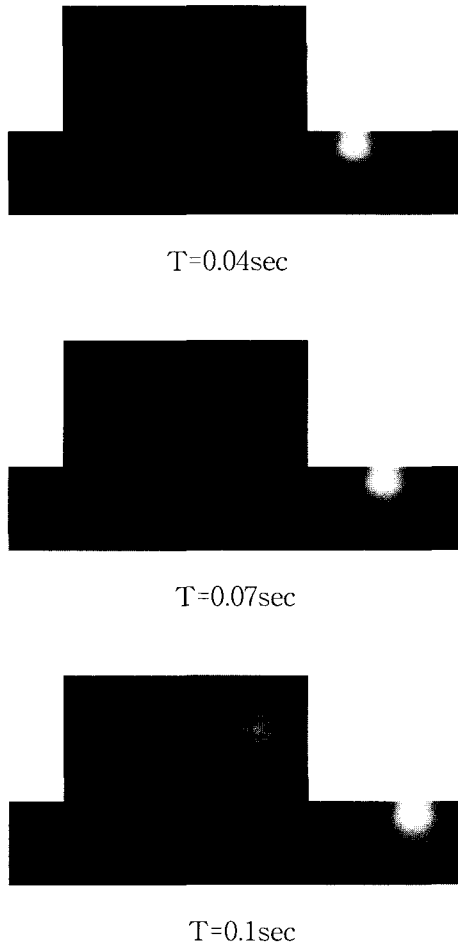


Fig. 3 Pressure oscillation contours at inlet velocity=40m/s

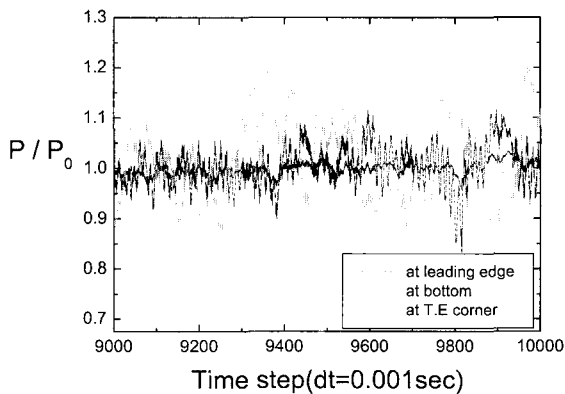


Fig. 4 Pressure histories for three points(at inlet velocity=20m/s)

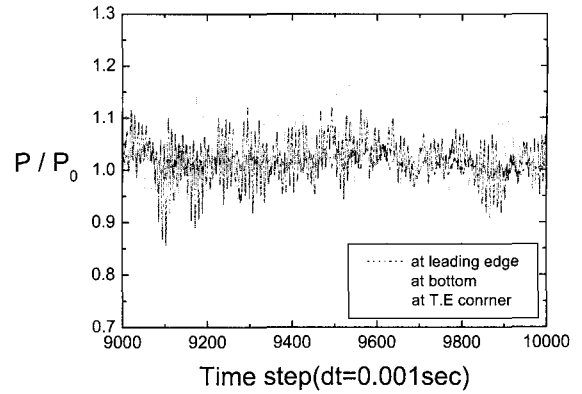
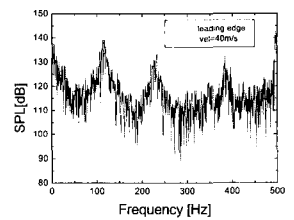
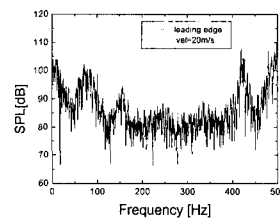


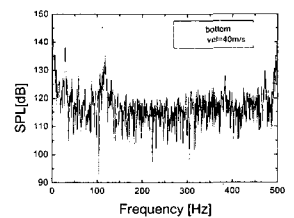
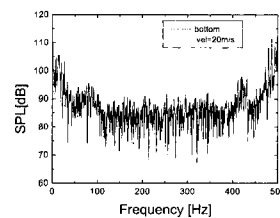
Fig. 5 Pressure histories for three points(at inlet velocity=40m/s)

Fig. 4, 5는 속도변화에 따른 공동 내부 벽의 세 점에서 시간 9sec-10sec사이의 압력변동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 상대적으로 trailing edge corner, leading edge, bottom 순으로 압력변동이 크다. bottom에서는 앞전과 뒷전에서 발생하는 와류의 영향을 거의 받지 않아서 압력변동 값이 가장 작은 것을 알 수 있다. 또한 입구 유속이 20m/s 보다는 40m/s의 속도에서 압력변동 주기가 0.18sec 정도로 더 일정하게 나오는 것을 보여준다.



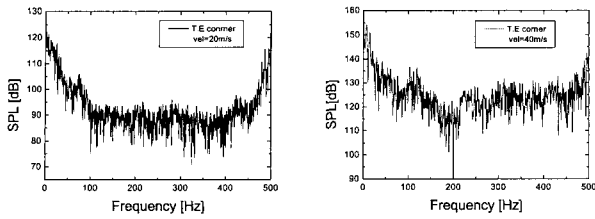
(a) inlet velocity=20m/s (b) inlet velocity=40m/s

Fig. 6 Cavity nearfield acoustic spectra at leading edge



(a) inlet velocity=20m/s (b) inlet velocity=40m/s

Fig. 7 Cavity nearfield acoustic spectra at bottom



(a) inlet velocity=20m/s (b) inlet velocity=40m/s

Fig. 8 Cavity nearfield acoustic spectra at trailing edge corner

Fig. 6, 7, 8은 LES를 이용한 2차원 공동 유동장의 수치계산으로 공동표면의 세 점 leading edge, bottom, trailing edge corner에서 얻은 시간에 대한 압력변동의 데이터를 Fourier 변환시켜 주파수 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 입구유속이 작고 공동의 크기가 커서 500Hz미만의 저 주파수 영역이 대부분을 이루는 것을 알 수 있으며, 같은 속도의 경우 trailing edge corner에서 다른 두 점에 비해 음압 수준이 10dB 정도 높게 나타난다. 이것은 Fig. 3과 같이 앞전에서 발달한 와류가 뒷전에서 강하게 부딪히는 현상으로 설명할 수 있다. 세 점에서 속도변화에 따른 500Hz에서 음압 수준의 차이를 보면 leading edge, bottom, trailing edge corner에서 각각 30dB, 25dB, 15dB로 속도 변화에 따라서는 뒷전으로 갈수록 소음차이가 줄어드는 경향을 보여준다. 또한 유입속도 40m/s는 20m/s에 비해 같은 점에서 음압 수준이 30dB 정도 상승함을 알 수 있으며, 차량의 속도와 관련지어 볼 때 고속 주행(40m/s=144km/h)에서는 저속주행(20m/s=72km/h)보다 차량하부의 공동으로 인해 생기는 소음이 상당히 많이 증가한다고 생각할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 2차원 직사각형 공동에서 발생하는 비정상 와류 유동의 해석을 Smagorinsky 모델을 이용한 LES를 사용하여 비압축성 수치계산 하였으며, Fast Fourier Transform으로 공동 표면 세 점에서 속도변화에 따른 소음해석을 하였다.

유동해석 결과 앞전에서 낮은 압력을 갖는 와류의 중심이 뒷전으로 접근해가면서 뒷전 벽에 부딪혀 강한 압력변동을 발생하는 것을 잘 모사 할 수 있었다.

또한 trailing edge corner에서는 다른 두 점에 비해 압력변동 폭이 컸으며, 이것은 뒷전에서 소음을 증가시키는 이유가 되었다.

FFT를 이용한 근접 소음장 해석의 결과 속도의 증가에 따른 음압 수준의 차이는 뒷전으로 갈수록 상대적으로 줄어드는 것을

알 수 있었다. 또한 차량의 고속 주행 시는 저속주행에 비해 소음정도가 차량하부의 공동으로 인해 상당히 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

앞으로는 차량의 실제 모델과 같이 이중공동을 가진 곡선형 태의 모델을 3차원으로 확장하여 해석을 수행할 예정이며, 타이어의 회전에 따른 변화를 관찰하기 위해 이동격자를 사용해 실제에 가까운 조건으로 연구를 진행할 예정이다.

후기

이 연구는 과학재단 특정기초연구(과제번호[2001-401]) 연구비에 의해 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] X, Zhang and J. A. Edwards, "An Experimental Investigation of Supersonic Flow over Two Cavities in Tandem," AIAA Journal, Vol. 30, No 5, May 1992, pp.1182-1190.
- [2] Komerath, N.M., Ahuja, K.K., and F.W. Chambers, "Prediction and Measurement of Flows over Cavities - a Survey", AIAA 25th Aerospace Sciences Meeting, #87-0166, 1987
- [3] 황성욱, "이중 공동을 지나는 비정상 초음속 유동 수치해석", 서울대학교 대학원 공학박사 논문, 1966
- [4] J.S. Hsu and K. K. Ahuja, "Cavity Noise Control Using Helmholtz Resonators", 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference May 6-8, 1966/State College, PA AIAA 96-1675
- [5] 허대녕, 이덕주, "공동을 지나는 비정상 유동에 의한 소음 방사 해석", 한국소음진동공학회 창립10주년 기념 소음진동학술대회 논문집, pp.104-109.
- [6] W.L Hankey and J.S. Shang, "Analysis of Pressure Oscillations in an Open Cavity", AIAA Journal, Vol. 26, No. 7, July, 1988, pp. 799-807.
- [7] Paul K. Chang, Separation of Flow, KIST, 1979
- [8] 김병삼, "타이어 소음에 대한 연구동향", 한국소음진동공학회지 제2권 제4호, pp.259-263, 1992
- [9] A. Suksangpanomrung, N.Djilali, P.Moinat, "Large-eddy simulation of separated flow over a bluff rectangular plate", Journal of Heat and Fluid Flow 21 (2000) 655-663
- [10] A.Nakayama, H. Noda, "LES simulation of flow around a bluff body fitted with a splitter plate", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 85 (2000) 85-96
- [11] STAR-CD Version 3.1 manual, CD-adapco
- [12] A.P.DOWLING, B.A., Ph.D, J.E.FOWCS WILLIAMS, B.Sc.,Ph.d., M.A. , "Sound and Sources of sound"