

굴곡형 흡입관에서 소음 방사 해석

Numerical Study of Sound Radiation from curved intake

*심인보¹⁾, 이덕주¹⁾, 안창수²⁾

I. B. Shim, D. J. Lee and C. S. Ahn

Curved intakes are commonly used from commercial aircraft to military missile. Sound radiation from the intake of air vehicle affects cabin noise, community noise and military detection. In this paper, Sound radiation from curved intake is computed using the high order, high resolution scheme. The generalized characteristic boundary conditions, adaptive nonlinear artificial dissipation model and conformal mapping for high order, high resolution scheme are used. The geometric change of curved intake and the frequency of acoustic source are considered. Two dimensional Euler equations are solved for these analyses.

1. 서론

비행체에 있어 소음은 객실내로 투과되거나 주변 주거지에 환경 공해를 일으키게 되며, 군사적으로는 원거리로 방사하여 적에게 탐지가 되는 요인이 되기도 한다. 공기 흡입형 엔진 (air breathing engine)을 탑재한 경우 주된 소음원은 엔진 흡입관에서부터 전방으로 방사하는 팬/압축기 소음과 노즐 후방으로 방사하는 제트소음이 다. 한편 최근 군용기 및 민항기뿐만 아니라, 순항 미사일 등에도 다양한 목적으로 굴곡형 흡입관이 사용된다. 본 논문에서는 이러한 굴곡형 흡입관에서 방사되는 소음장에 대하여 해석해 보기로 한다.

2. 지배방정식 및 수치기법

본 논문에서는 사용한 지배방정식은 비정상, 압축성 2차원 Euler 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} = 0 \quad (1)$$

본 연구에서는 차후에 음향장과 유동장의 상

호작용에 의한 효과를 정확하게 포착하기 위하여 비선형 Euler방정식을 해석하며 고차, 고해상도 수치기법을 사용하였다.

공간 차분을 위해서 파수(wave number)에 대한 해상도가 매우 우수한 Optimized Compact scheme을 사용하였다.[1] 이 기법은 Fourier analysis를 통해 위상 오차와, 확산 오차를 최소화 할 수 있도록 계수들을 최적화한 방법이다. 본 연구에서는 OFOP (Optimized Forth-Order Pentadiagonal) scheme을 사용하였다. 시간 적분을 위해서는 4차의 Runge-Kutta 방법을 이용하였다.

물리적이고 안정적인 경계조건을 위해 특성치 경계조건(Characteristic Boundary Condition)을 사용하였다. 이 기법은 계산영역 외부에서 내부로 들어오는 특성치에 대하여 물리적으로 타당한 정보를 직접 대입하여 내부의 수치해가 정확성을 유지하도록 하는 방법이다. 본 연구에서는 특히 기존의 특성치 경계조건을 일반좌표계로 확장시켜 그 정확도를 향상시킨 일반화된 특성치 경계 조건(Generalized Characteristic Boundary Condition)을 사용하였다.[2] 또한, 원거리 경계면에서의 수치적 반사를 더욱 억제하고 해의 발산을 막기 위하여 Freund[3]가 사용한 absorbing layer technique을 적용하였다.

한편, 중심차분법을 이용하면 충격파와 같은 불연속면에서 비물리적인 수치적진동이 일어나게

1) 한국과학기술원 항공우주공학과
2) 국방과학연구소



되는데 이를 억제하기 위해서는 인공감쇄항 (Artificial Dissipation)이 필요하다. 기존의 CFD 에서 발전된 인공감쇄항의 경우 충격파주변에서의 수치적진동은 잘 억제하지만, 선형파에 대한 과도한 감쇄로 인해 음향장을 해석할 수 없게 된다. 본 논문에서는 최근 전산공력음향학에서 많이 사용하는 Tam의 ASD(Artificial Selective Damping)와 Jameson의 인공감쇄항의 장점을 취하며, 주어진 문제 조건에 적합하도록 자동적으로 계수가 결정되는 ANAD(Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation) model을 사용하였다.[4]

3. 계산 결과

3.1 코드 검증

위에서 언급한 수치기법들을 검증하기 위해서 2차원 곧은 덕트내에서의 음향 방사문제를 해석하여 보았다. 이 문제는 원거리에서의 소음의 방향성(directionality)이 엄밀해(Mani[5])로 존재하여 수치기법의 검증으로 적합하다. 128x176 개의 격자를 사용하였으며 $u(t) = 10^{-4}c\sin(\omega t)$ 의 음향가진을 주었다. 덕트의 지름과 음속으로 무차원화된 가진 주파수는 $\omega = 15$ 이다.

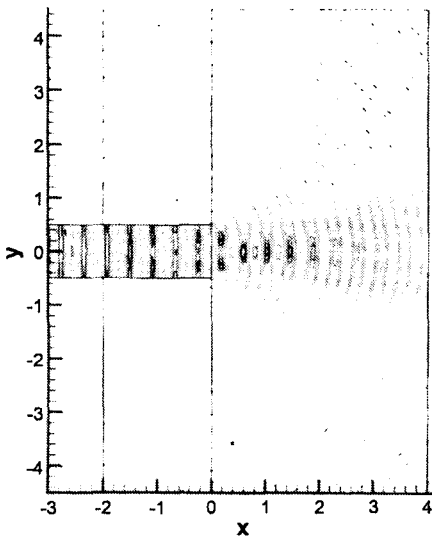


Fig. 1 Acoustic radiation from straight duct

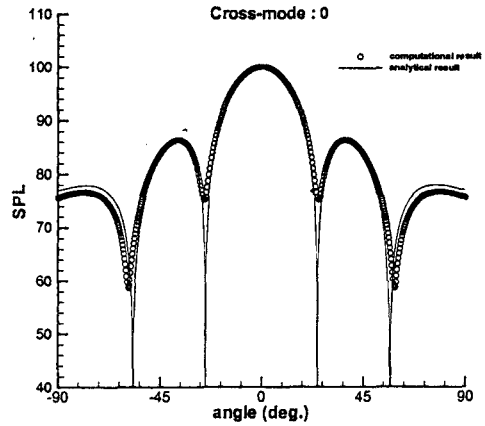


Fig. 2 Far-field directivity (comparison with analytic solution)

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 원거리 경계면에서 음파의 반사없이 덕트에서의 음향방사가 잘 계산되는 것을 볼 수 있으며, Fig. 2의 원거리 방향성의 그림에서 나타나듯이 Mani의 엄밀해와 거의 일치하는 경향을 보여주고 있다.

3.2 문제 정의 및 격자형성

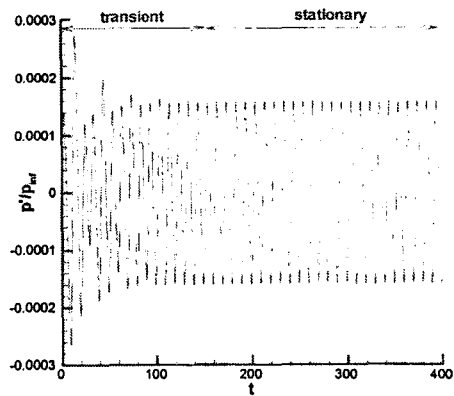


Fig. 3 Typical time history of acoustic pressure in a duct

일반적으로 덕트내의 음파의 거동은 Fig. 3과 같다. 덕트내의 덕트내의 음원인 피스톤이나 팬에 의해 발생된 음파(incident wave)는 덕트를 따

라 전파하며 열린 끝단(open end)에서 일부는 방사하고(radiated wave) 일부는 반사되어(reflected wave) 덕트내부에서 간섭하게 된다. 결국 이러한 transient 과정을 거쳐 어느 정도 시간이 지나면 incident wave와 reflected wave는 평형을 이루게 되어 stationary waveform을 이룬다. 따라서 덕트에서의 음향 특성 해석은 이러한 stationary한 과정까지 수치모사를 해야 하기 때문에 계산 시간이 많이 걸리게 된다. 한편, 덕트의 형상 및 가진 주파수에 따라 덕트내에서는 incident wave와 reflected wave의 보강간섭이 일어날 경우에는 공명(resonance) 현상이 발생하고, 상쇄간섭이 일어날 경우에는 반공명(anti-resonance) 현상이 발생한다. 공명이 일어난 경우에는 그렇지 않은 경우에 비해 덕트내의 음향세기가 매우 크고 따라서 외부로 방사하는 소음의 세기 또한 크게 된다.

한편, 전산공력음향학에서는 공간차분내에 $J, \xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$ 등 격자에 의한 영향이 들어있어 이러한 metric값의 분포는 해의 정확도에 큰 영향을 주게 된다. 본 논문에서는 S 덕트의 격자를 conformal mapping을 이용하여 부드러운 metric값의 분포를 갖게 하였다.[6]

S-덕트의 형상은 삼각함수를 이용하여 Fig. 4와 같이 $\Delta h/D=0, 0.5, 1.0, 1.5$ 의 경우에 대하여 85×81 로 격자를 구성하였다. 한편, 팬에 의한 소음의 주 주파수인 BPF(blade passage frequency)는 팬의 RPM과 깃의 개수에 의하여 결정되어지며 원주 및 반경 방향으로 (m, μ) 의 모드를 가지게 되지만, 본 논문에서는 우선 $(0,0)$ 모드인 평면파 가진에 대하여 계산해 보았다. 덕트의 지름과 음속으로 무차원화된 가진 주파수는 $f=1/4, 1/2, 1$ 이며, $D=15cm, L=60cm$ 인 덕트 형상에서는 각각 567Hz, 1134Hz, 2267Hz에 해당된다.

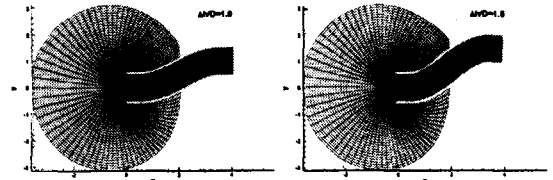


Fig. 4 Grid generation of 2D S-duct

3.3 주파수별 소음 방사 해석

덕트내에서 가진되는 음원은 항상 $u(t) = 10^{-5}c \sin(2\pi ft)$ 의 속도로 주어지는 moving piston이다. 저주파인 $f=1/4$ 의 경우에는 Fig. 5와 같이 굴곡형상에 관계없이 덕트내에서 평면파의 거동을 보이고 있다.

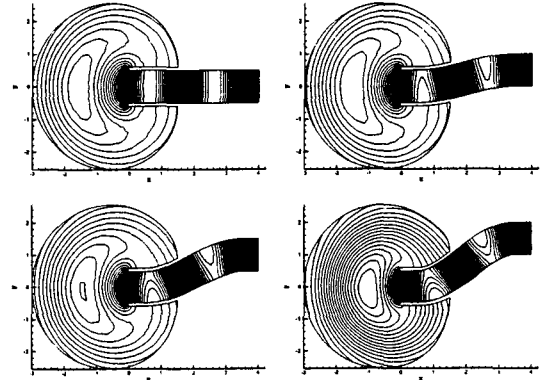
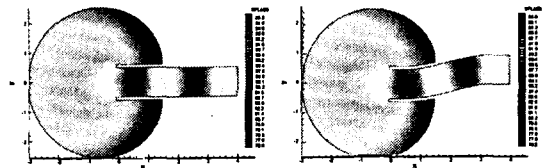
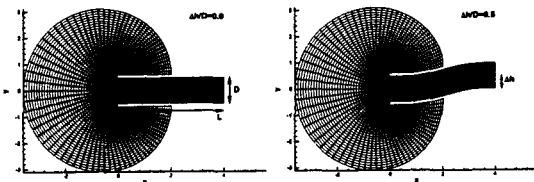


Fig. 5 Contours of acoustic pressure ($f=1/4$)

Fig. 6에는 덕트 내, 외부에서의 평균적인 음파의 세기를 나타내는 SPL(sound pressure level)의 분포가 나타나 있다. SPL의 분포는 각 형상에서 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있지만, 그 크기가 차이가 남을 알 수 있다. Fig. 7에는 원거리에서의 소음의 방향성(directionality)이 나타나 있다. 각 형상에 대하여 비슷한 경향을 보이고 있으나 크기가 최대 6dB정도 나타남을 알 수 있다.



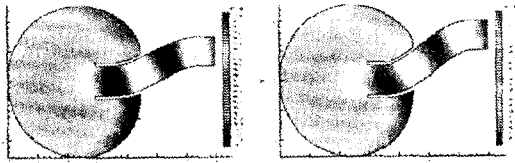


Fig. 6 Contours of sound pressure level ($f=1/4$)

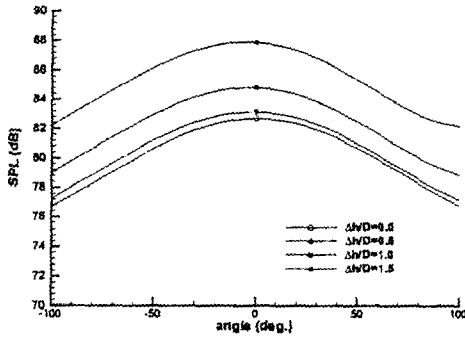


Fig. 7 Contours of sound pressure level ($f=1/4$)

Fig. 8~10에는 $f=1/2$ 인 경우에 대한 음향장 해석이 나타나 있다. 굴곡이 없는 경우에는 덕트내에서 평면파가 유지되고 있으나 굴곡이 있는 경우에는 평면파 가정이 더 이상 성립하지 않음을 알 수 있다. 또한 방향성을 보면 크기는 거의 비슷하나 주된 전파 방향이 굴곡의 정도에 따라 변화함을 알 수 있다.

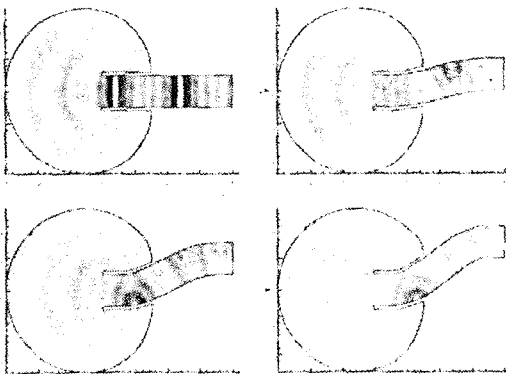


Fig. 8 Contours of acoustic pressure ($f=1/2$)

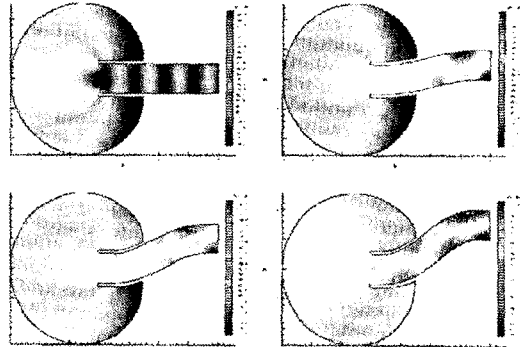


Fig. 9 Contours of sound pressure level ($f=1/2$)

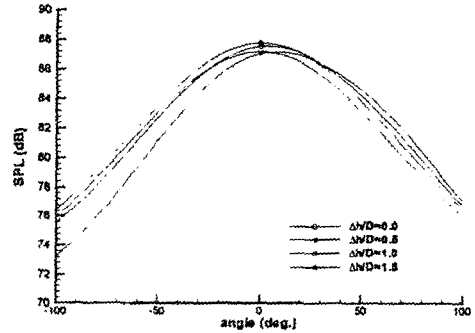
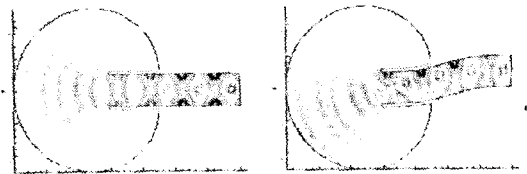


Fig. 10 Contours of sound pressure level($f=1/2$)

한편, 고주파 영역인 $f=1$ 에 대한 음향장 해석이 Fig. 11~13에 나타나 있다. 고주파 영역에서는 곧은 덕트에서도 평면파가 유지되지 않으며 y방향으로 모드가 발생함을 알 수 있다. 또한 저주파에 비해 음파의 직진성이 심해져 음파가 거의 축방향으로 전파하는 것을 볼 수 있다. Fig. 12의 SPL 분포에서 나타나듯이 굴곡 정도에 따라 주된 소음 방사 방향이 바뀌게 됨을 알 수 있었다. 이는 원거리 방향성에서 더욱 잘 나타나고 있다.



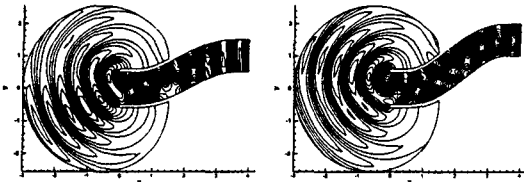


Fig. 11 Contours of acoustic pressure ($f=1$)

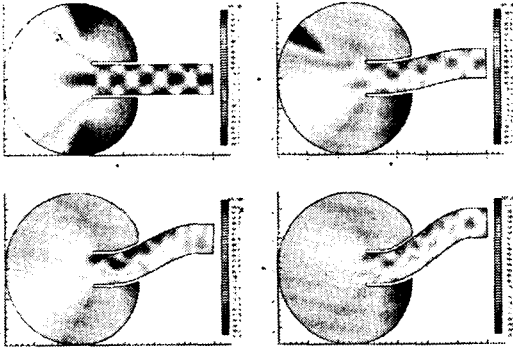


Fig. 12 Contours of sound pressure level ($f=1$)

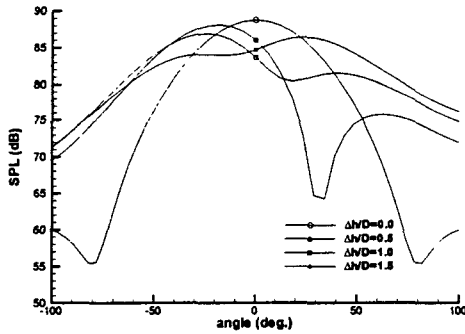


Fig. 13 Contours of sound pressure level ($f=1$)

이상의 형상에 따른 특정 주파수의 해석을 통하여, 형상 변화가 덕트 내/외부의 전체 음장에 큰 영향을 줄 수 있다. 저주파 영역에서는 굴곡의 증감에 따라 덕트의 음향특성에 중요한 영향을 주는 중심선의 길이가 변화하여 평면파로 모사될 수 있는 덕트내의 음향장이 크게 바뀌게 된다. 즉, 저주파의 경우는 원거리로 방사해나가는 경향성은 형상변화의 영향을 받지 않지만, 같은 주파수로 가진을 하더라도 굴곡에 따라 덕트의 특성길이가 각각 달라 공명특성이 바뀌어 덕트 내/외부의 음압의 크기가 달라지게 된다. 한편, 고주파 영역에서는 덕트내에서 평면파가 유

지되지 않아 공명현상으로 인한 음압크기의 증감은 없지만, 형상 변화에 따라 방향성이 크게 바뀌고 있음을 알 수 있다.

3.4 형상 변화에 따른 공명 특성 해석

앞서 해석한 바와 같이, 저주파의 경우 굴곡이 있어도 덕트내에서 평면파가 유지되고, 따라서 공명이 소음방사에 큰 영향을 줄 수 있었다. 본 절에서는 많은 주파수에 대한 수치해석을 통하여 굴곡형 덕트에서의 공명특성을 해석하여 이러한 설명이 타당함을 보일 것이다.

덕트내에서의 공명현상을 정확히 계산하기 위해서는 가진 주파수를 미소간격으로 변화시켜가면서 이에 대한 음압 응답의 경향성을 파악하여야 한다. 그러나 앞절에서와 같이 단일 주파수에 대한 음향해석을 하는 방법으로는 많은 계산 시간을 필요로 하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 시간영역 해석기법의 장점을 이용하여 여러개의 주파수 성분을 같은 음향 가진을 한번에 수행하기로 한다.

$$u(t) = 10^{-5}c \sum_{m=1}^{200} \sin(2\pi f_0 m t) \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{1}{200}$$

무차원화 된 기본 주파수 f_0 는 $D=15cm$, $L=60cm$ 의 경우에는 11.3Hz에 해당되며 본 해석을 통해 2267Hz까지의 200개의 주파수에 대한 동시해석을 수행하게 된다. 식 (2)를 통하여 가진되는 피스톤의 속도는 Fig. 14처럼 주어진다.

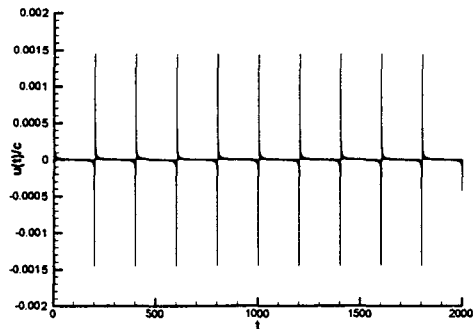


Fig. 14 Time history of velocity of moving piston



먼저 $\Delta h/D=0$ 인 끝은 덕트에 대하여 해석하였다. 피스톤 중심에서의 음압 신호를 FFT를 해보면 Fig. 15와 같은 특성을 얻을 수 있다. 그림에서 같이 비교된 1차원 이론해는 open-end에서의 음압을 0으로 했을 때의 근사해이며, 식 (3)과 같이 나타난다. [7]

$$p'_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \rho c \tan\left(\frac{2\pi fL}{c}\right) \right| \quad (3)$$

$$f_n = \frac{2n-1}{4L} c : \text{resonance frequency}$$

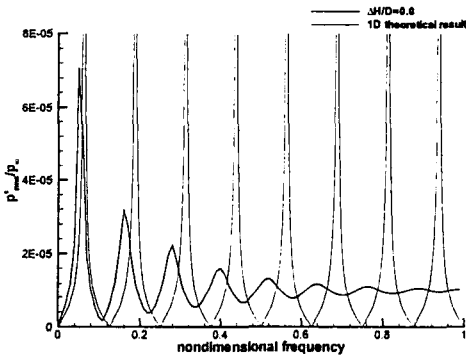


Fig. 15 Resonance characteristics of 2D straight duct

위 그림에서 볼 수 있듯이, 공명 부근의 압력 증감 경향이나 공명주파수의 위치가 비슷한 경향을 보여 계산결과가 타당함을 알 수 있다. 한편, $\Delta h/D=0.5, 1.0, 1.5$ 에 대한 수치 해석 결과가 $\Delta h/D=0$ 의 결과와 비교되어 Fig. 16~18에

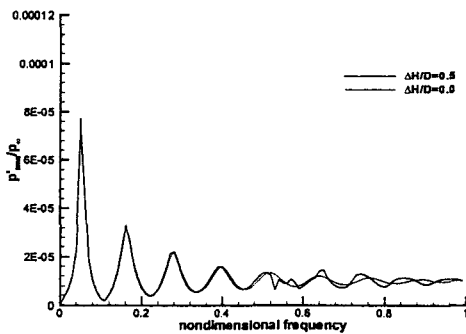


Fig. 16 Resonance characteristics of 2D duct ($\Delta h/D=0.5$)

나타나있다. 각 경우에서 첫째 공명주파수의 위치는 거의 같지만, 이후 공명주파수는 조금씩 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한 굴곡의 정도가 심해질수록 첫째 공명이 일어났을 때의 음압의 크기가 커짐을 알 수 있다.

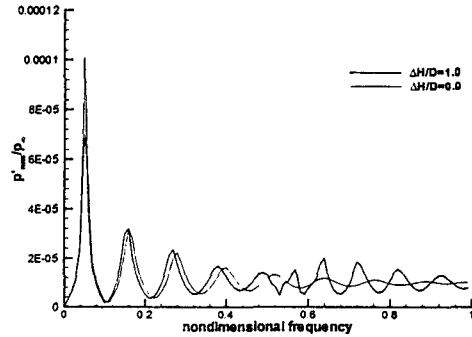


Fig. 17 Resonance characteristics of 2D duct ($\Delta h/D=1.0$)

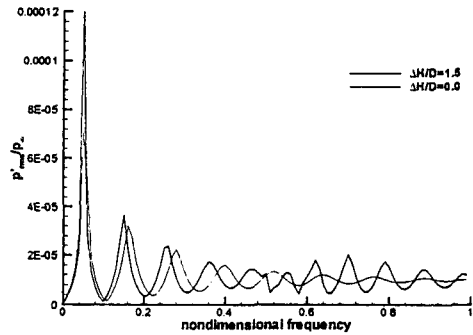


Fig. 18 Resonance characteristics of 2D duct ($\Delta h/D=1.5$)

한편, 저주파의 경우 덕트의 중심축의 길이가 중요한 인자임을 보이기 위하여 $\Delta h/D=1.5$ 의 경우와 같은 중심길이를 갖는 끝은 덕트에 대하여 수치해석을 해보았다. (Fig. 19)

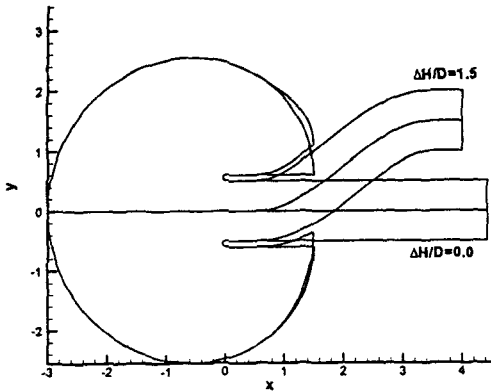


Fig. 19 Resonance characteristics of 2D duct
($\Delta h/D=0$)

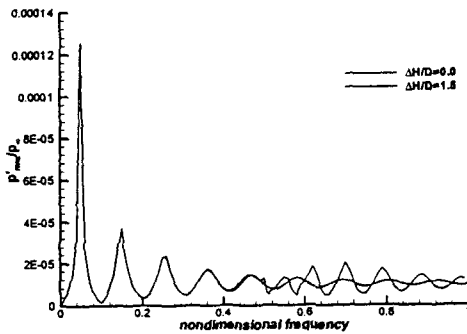


Fig. 20 Resonance characteristics of 2D duct
($\Delta h/D=0$)

Fig. 20에서 나타나듯이 저주파 영역에서, 같은 특성길이를 갖게 되면 굴곡 정도에 상관없이 거의 같은 공명 특성을 띄게 됨을 알 수 있었다.

4. 결론

지금까지 고차, 고해상도 수치기법을 이용하여 굴곡형 흡입관에서 방사하는 소음에 대한 연구를 수행하였다. 전산공력음향학 기법으로 음향장을 해석하기 위하여 여러 가지 수치기법이 도입되었으며, 검증문제를 통하여 덕트에서의 음향 방사 문제를 잘 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

저주파 영역의 음파의 경우 소음방사의 방향성은 굴곡의 정도에 상관없이 거의 비슷하게 나타나지만, 그 크기는 형상에 따라 변화함을 알

수 있었다. 또한, 넓은 주파수영역에 대한 음향 해석을 통해 이러한 저주파 영역에서의 소음 레벨의 차이가 덕트의 공명현상에 의해 나타남을 알 수 있었다.

고주파 영역에서의 전반적인 소음의 크기는 형상 변화에 따라 큰 변화는 나타나지 않지만, 소음 방사의 방향성은 매우 상이하게 나타난다. 이는 고주파 영역에서는 덕트내에서 평면파가 유지되지 않아 공명현상이 발생하지 않고 음파의 직진성이 강하게 나타나 덕트 형상이 소음방사에 큰 영향을 주기 때문이다.

참고문헌

- [1] Kim, J. W., and Lee, D. J., "Optimized Compact Finite Difference Schemes with Maximun Resolution," AIAA Journal, Vol. 34, No. 5, (1996), pp. 887-893
- [2] J. W. Kim, and D. J. Lee, "Generalized Characteristic Boundary Conditions for Computational Aeroacoustics," AIAA Journal, Vol. 38, No. 11, November (2000), pp. 2040-2049.
- [3] Freund, J.B., "Proposed Inflow/Outflow Boundary Condition for Direct Computation of Aerodynamic Sound", AIAA Journal, Vol 35, No. 4, (1997), pp. 740-742.
- [4] J. W. Kim, and D. J. Lee, "Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation Model for Computational Aeroacoustics," AIAA Journal, Vol. 39, No. 5, May (2001), pp. 810-818.
- [5] Mani, R., "Refraction of Acoustic Duct Waveguide Modes by Exhaust Jets", Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 30, (1973), pp. 501-520.
- [6] 심인보, "최적화된 집적유한차분법을 이용한 항공기 팬 소음의 근거리 방사 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원, (1998)
- [7] Munjal, M. L., Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, (1986)