

유체유동을 포함한 소음기의 음향 특성 해석

Analysis of Acoustic Characteristics of Muffler including Flow effects

김형태† · 정의봉* · 김희원**

Hyung-Tae Kim, Weu-Bong Jeong, Heui-Won Kim

Key Words : Transmission Loss(투과손실), Quadrupole Source, CAA(Computational Aeroacoustic Analogy), Fluent, Sysnoise

ABSTRACT

In general, 4-pole parameter and three-point method are used for predicting transmission loss which is one of characteristics of Muffler using CAE tools. However, these methods show different results from experiment when the flow effects are presented in practical model. In this paper, to overcome these problems, both Fluent and Sysnoise are used to analyze the performance of extended inlet/outlet muffler including flow effects with varying flow velocity at inlet of duct. Flow fields and quadrupole source is calculated by Fluent. And Sysnoise is used to analyze acoustic performances of muffler with quadrupole source data extracted from Fluent. Finally, the variation of transmission loss is estimated according to various inlet flow velocity.

1. 서론

자동차나 건설장비, 냉장고, 에어컨 등의 산업용/생활용 기계류의 소음기나 공기조화 시스템, 대형 전동기의 흡음커버 등은 각 시스템의 성능과 효율적인 운전을 유지하면서 발생하고 있는 소음을 저감시키기 위한 최적의 설계안을 필요로 하고 있다. 소음기 설계를 위한 음향해석은 간단한 형상의 소음기는 수식을 이용한 해석이 가능하지만 일반적으로 복잡한 형상의 소음기는 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM)을 이용해 음향특성을 해석하고 있다 [1, 2].

소음기의 성능지표로는 삽입손실(IL, Insertion Loss), 투과손실(TL, Transmission Loss), 소음저감량(NR, Noise Reduction) 등이 있으며 TL을 가장 많이 사용하고 있다. TL 계산을 위한 방법으로는 Decomposition Method, Two-Source Method, Two-Load Method, 4-Pole Parameter Method 등이 있다 [3, 4, 5]. 앞서 열거한 기존의 이러한 방법들에 의한 TL 계산시에는 각 시스템에 존재하는 유체에 의한 유동의 효과는 고려하지 않고 있다. 하지만 대부분의 실제 시스템에서는 유체의 유동속도에 따라 유동이 복잡하게 발생되고 있으며, 이는 각 시스템의 음향 특성에 영향을 미치게 된다 [6, 7].

† 부산대학교 대학원 기계설계공학과

* 부산대학교 기계공학부

** 현대중공업

이러한 유체유발 소음의 예측을 위한 많은 연구들이 수행되어 왔으며 [8, 9, 10], 최근에는 컴퓨터 자원의 발달과 함께 CFD(Computational Fluid Dynamics), CA(Computational Acoustics) 등도 함께 발달하여, 이를 이용한 유체유발 소음 예측에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [11]. Ayhan Ayar 등은 그 연구 [11]에서 CFD와 CAA(Computational Aeroacoustic Analogy)를 접목한 방법으로 Dipole Source 및 Quadrupole Source에 의한 유체유발소음 예측의 가능성을 보고하고 있다.

본 연구에서는 이를 바탕으로 소음기를 포함한 덕트시스템의 입구에 노즐을 모델링하고, 이 때 발생하는 Quadrupole Source에 의한 영향력을 고려하여 소음기의 음향특성을 해석하고자 한다. 유동장 해석과 Quadrupole Source의 획득을 위해 Fluent 6.2 [12]를 사용했으며, 이를 이용한 음향특성 해석에는 Sysnoise 5.6 [13]을 사용했다.

2. 유동 해석

2.1 유동 해석모델 및 과정

덕트 시스템 내의 유동장 해석과 유동소음 소스 데이터 획득을 위해서 상용 CFD 프로그램인 Fluent를 사용했다. 입출구 확장형 소음기를 포함한 덕트 시스템의 3차원 해석모델 및 치수를 Fig.1에 나타내었다.

해석시간의 단축을 위해서 Steady 해석 후의 결과값을 초기 조건으로 0.0001s의 time-step으로 3000회, 0.3초간 Unsteady 계산을 하였으며, Unsteady 계산 중 2000회

계산 후 0.2~0.3s 간의 데이터를 유동소음 소스테이터로 획득하였다. 덕트의 입구부분은 압축공기의 토출 노즐로 Fig.2와 같이 모델링 하였다.

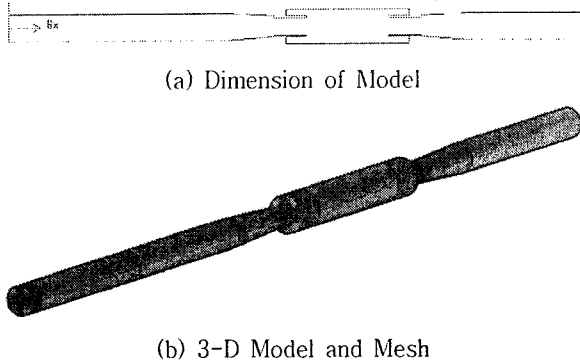


Fig. 1 CFD Model and Mesh of Extended Inlet-Outlet Muffler

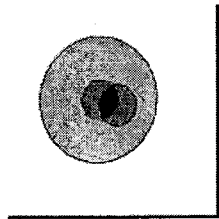


Fig. 2 : Model of Nozzle at Inlet of Duct

해석은 덕트의 출구측 유속 10, 30, 50m/s, 총 세가지 경우에 대해 수행했으며, 이때의 입구측 속도 경계조건은 40, 80, 200m/s로 유동에 의한 소음이 충분히 발생할 것으로 예측할 수 있다. 난류 모델과 경계조건 등은 Table.1에 나타내었다.

Table 1. Solver setting and information of mesh

	Steady 해석	Unsteady 해석
난류모델	$k-\epsilon$	LES
경계조건	Velocity Inlet Pressure Outlet	
격자수	Node : 722449개, Element : 70560개	

2.2 유동 해석 결과

Unsteady 해석완료 후 유동장의 덕트 축방향 속도 분포와 Vorticity Magnitude를 각각 Fig. 3와 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 노즐 입구의 토출 부분과 머플러 내부에서 공력소음을 야기하는 와류 생성을 확인할 수 있으며, 유속의 증가에 의한 그 발생정도와 크기 변화를 확인할 수 있다. 입구측의 노즐 부분과 머플러 내부의 와류 생성을 비교했을 때, 노즐 부의 와류가 소음발생 영향에 있어 지배적

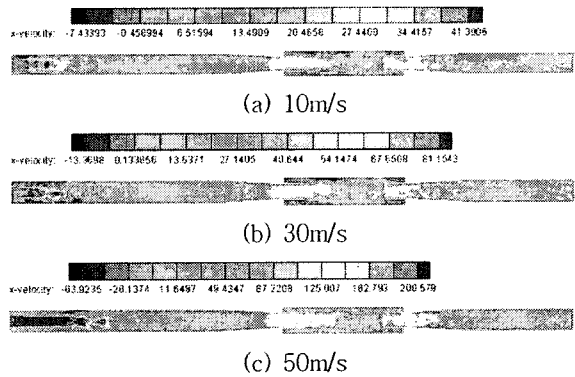


Fig. 3 : Velocity Contour of X-direction

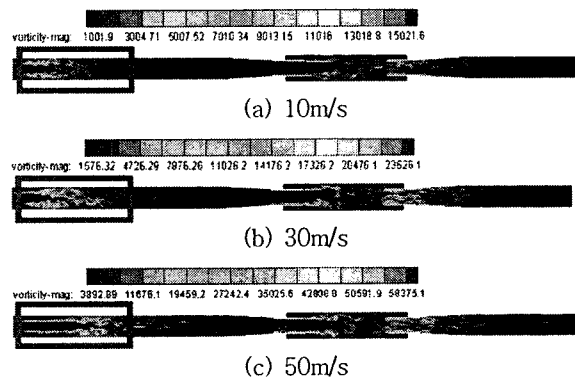


Fig. 4 : Vorticity Magnitude

일 것이라 판단하고 Fig.4의 사각형 영역을 Sysnoise를 이용한 음향해석을 해석을 위한 Quadrupole Source data로 설정했다.

노즐부의 한점 (0.25m,0,0)의 압력변동 스펙트럼 Fig.5를 통해 와류발생에 의한 소음이 유속 증가에 의해 커지며 그 주파수 특성은 Tonal noise가 아닌 Broad-band noise임을 예측할 수 있다.

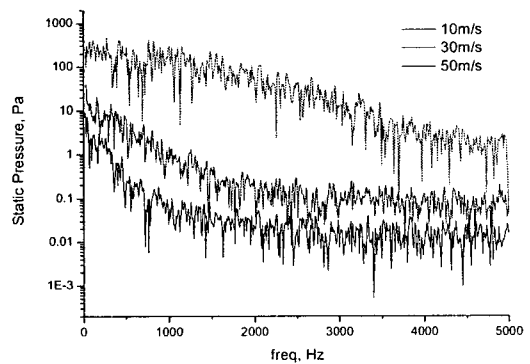


Fig. 5 : Static Pressure at (0.25m,0,0)

3. 음향 해석

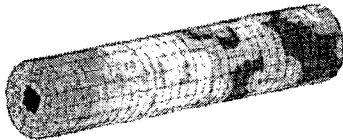
3.1 음향 특성 해석 과정

(1) 음향 모델 및 Quadrupole Source

Fluent를 이용한 유동장 해석에서 얻어진 Source Data를 Importing 하여 Sysnoise에서 머플러를 포함한 덕트시스템의 음향특성을 해석하였다. BEM-Direct Method로 해석시, 머플러의 Extended Inlet/Outlet 부분에서의 Singular Point 발생으로 인한 문제점을 피하기 위해서 BEM-Indirect Method를 사용했다. 관심 주파수는 2000Hz까지 설정하였고 그에 대응하여 $\lambda/6$ 에 적합하도록 모델링작업을 하였다.

음향해석을 위한 모델 및 Fluent에서 해석한 Source Data를 Sysnoise에서 Field-Point에 Importing한 그림을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (b)는 유속 50m/s일때, Quadrupole Source의 500Hz 성분이며, x-x 방향(축방향)의 크기를 나타낸다.

(a) Acoustic Model and Field-Point with Quadrupole Source



(b) Quadrupole Source Strength at 500Hz in x-x direction
Fig. 6 : Acoustic Mesh and Quadrupole Source Strength

(2) Transmission Loss (투과손실)

일반적으로 4-Pole, Three-Point Method 등을 이용해 소음기의 투과손실을 계산할 수 있으며 본 연구에서는 Three-Point Method를 이용했다. Three-Point Method는 다음 식으로 표현된다.

$$P_{in} = \frac{P_1 - P_2 e^{-ikx_{12}}}{1 - e^{-i2/kx_{12}}} \quad (1)$$

식(1)에서 P_{in} : 입구측 진행파, P_1 : 첫 번째 수음점에서의 음압, P_2 : 두 번째 수음점에서의 음압, k : wave number, x_{12} : 두 수음점 간의 거리를 의미한다. 식(1)에서 얻어진 입구측 진행파와 함께, 출구측은 무반사라는 가정 하에 세 번째 수음점으로부터 출구측 진행파, P_{tr} 을 얻고 다음의 식으로 투과손실을 계산하게 된다.

$$TL = 10 \log \frac{|P_{in}|^2}{|P_{tr}|^2} \quad (2)$$

Sysnoise에서 4-Pole, Three-Point Method를 이용해 머플러의 투과손실 계산시 입구면 경계조건으로 Particle Velocity를 설정하게 된다. 이때 Particle Velocity의 크기와 관계없이 Sysnoise를 이용한 투과손실의 결과값은 동일하게 되며, 가진 크기의 가감에 비례해서 입사파와 투과파의 크기가 함께 비례해서 가감하기 때문이다. 이는 근본적으로 Sysnoise가 선형 wave equation의 해석을 기반으로 하기 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 실험을 통해 Quadrupole Source와 상대적인 비교가 가능한 Particle Velocity 경계조건을 얻었다. 또한 같은 이유로 인해, Quadrupole Source와 Particle Velocity 경계조건을 동시에 설정하고 투과손실의 정의인 식(1)의 방법으로 투과손실 계산시에는 Particle Velocity만을 설정했을 때와 동일한 결과가 얻어지는 문제점이 있다.

본 연구에서는 앞서 설명한 문제점 해결을 위한 방안으로 Quadrupole Source와 Particle Velocity 경계조건을 각각 설정하고 2회 해석한 결과를 이용해 다음 식과 같이 투과손실을 계산했다.

$$TL = 10 \log \frac{|P_{in-v}|^2}{|P_{tr-v}|^2 + |P_{tr-Q}|^2} \quad (3)$$

식(3)에서 P_{in-v} 와 P_{tr-v} 는 Particle Velocity만을 가진 했을 때의 입사측 입사파, 출구측 투과파이고 P_{tr-Q} 는 Quadrupole Source만을 설정했을 때의 출구측 투과파이다.

입구측 wave-decomposition을 위해 (0.63, 0, 0m), (0.67, 0, 0m) 두 점을 수음점으로 설정하였다. 출구측은 (2.46, 0, 0m) 한 점을 수음점으로 지정하였고, Anechoic Terminal을 만족하도록 Impedance 경계조건을 설정했다.

3.2 음향 특성 해석 결과

Particle Velocity B.C만을 설정하고 식(1)에 의하여 투과손실을 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

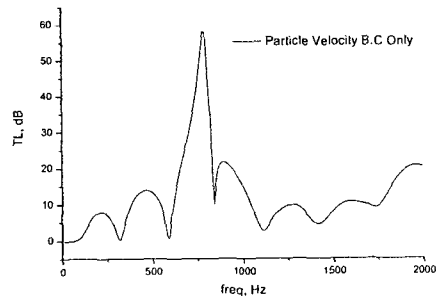


Fig. 7 : Transmission Loss with Flow

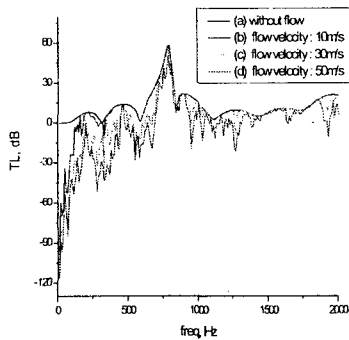


Fig. 8 : Transmission Loss with Flow varying velocity

Fig. 8 의 (b), (c), (d) 는 식(3) 에 의한 계산방법으로 덕트의 출구측 유속이 각각 10, 30, 50m/s 일 때를 나타내며, Particle Velocity B.C 만을 설정한 결과인 (a) 와 상대적인 비교가 가능하다. Fig. 8 (b) 는 200Hz 이하를 제외하고는 (a) 와 큰 차이가 없으며, 이는 유동해석시 노즐 입구의 유속이 빠르지 않은 경우로 Quadrupole Source 의 영향이 크지 않음을 의미한다. Fig. 8 (c), (d) 는 (b) 와 비교했을 때 유속에 비례해서 전체적으로 투과손실의 크기가 작아졌으며 이는 Quadrupole Source 의 영향이 커짐을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 유체유동에 의해 발생하는 유동소음을 고려한 입/출구 확장형 소음기의 음향특성을 해석하였다. 유동장의 정확한 해석과 유동소음의 소스 영역 데이터 (Quadrupole Source Data) 를 획득하기 위하여 CFD 프로그램인 Fluent 를 사용했다. 이후 얻어진 데이터를 이용해 Sysnoise 로 소음기의 음향특성을 해석했다. 출구단의 무반사 조건을 만족시키기 위해, 임피던스 경계 조건을 사용했으며, 음파분리를 통해 Three-Point 로 투과손실을 계산했다.

유체유동이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우의 투과손실을 비교했다. 유체유동이 존재하는 경우, 유동소음 발생으로 인한 소음기의 성능 저하를 의미하는 투과손실 값의 하락을 확인했다. 또한 본 연구에서 사용한 모델에 있어서는 유속 10m/s 는 200Hz 이상에서는 유동에 의한 효과가 나타나지 않았으며, 30m/s 에서는 600Hz 이상에서, 50m/s 인 경우는 관심주파수 영역 전체에서 투과손실 하락을 확인했다.

참 고 문 헌

- (1) T. W. Wu , G. C. Wan, 1996, Muffler Performance Studies Using a Direct Mixed-Body Boundary Element Method and a Three-Point Method for Evaluating Transmission Loss, *J. Vibration and Acoustics*, Vol. 118, pp. 479-484.
- (2) S. Bilawchuk, K. R. Fyfe, 2003, Comparison and implementation of the various numerical methods used for calculating transmission loss in silencer systems, *Applied Acoustics*, Vol. 64, pp. 903-916.
- (3) Z. Tao, A. F. Seyber, 2003, A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss, 2003, SAE paper, 2003-01-1653.
- (4) A. F. Seyber, D. F. Ross, 1997, Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, No. 5, pp. 1362-1370.
- (5) A. F. Seybery, 1976, Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, No. 5, pp. 1362-1370.
- (6) P. O. A. L. Davies, K.R. Holland, 2004, The measurement and prediction of sound waves of arbitrary amplitude in practical flow ducts, *J. S. V.*, Vol. 271, pp. 849-861.
- (7) W. Neise, F. Arnold, 2001, On Sound Power Determination in Flow Ducts, *J. S. V.*, Vol. 244, pp. 481-503.
- (8) Lighthill, M.J., 1952, On sound generated aerodynamically : Part I : Genrral Theroy, *Proc. Roy. Soc.*, A231, pp. 564-587.
- (9) Curle, N., 1955, The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound, *Proc. Roy. Soc.*, A231, pp. 505-514.
- (10) Fowcs Williams, J.E., Hawkings, D.L., 1969, Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A264, pp. 321-342.
- (11) Ayhan Ayar, Raymond Ambs, Christoph capellmann, Balthasar Schillemeit, Marcus Matthes, Prediction of Flow-Induced Noise in Automotive HVAC Systems Using a Combined CFD/CA Approach, 2005, SAE Paper, 2005-01-0509.
- (12) Fluent 6.2 Users Manual, Fluent Inc.
- (13) LMS Sysnoise 5.6 Users Manual, LMS International