

CFD를 이용한 단순확장관의 음향특성 해석

Acoustical Performance Analysis of the Simple Expansion Chamber by using CFD

김대환† · 정철웅* · 정의봉* · 김형태**

Daehwan Kim, Cheong Cheolung, Weui Bong Jeong, Hyung Tae Kim

Key Words : Transmission Loss (투과 손실), Computational Fluid Dynamics(전산 유체 역학), Simple expansion chamber (단순 확장관)

ABSTRACT

This paper discusses the acoustic performance of simple expansion chamber using computational fluid dynamics(CFD). The CFD model consists of an axisymmetric grid with a single period sinusoid of acceptable amplitude and duration imposed at the inlet boundary condition. The time history of the static pressure is recorded at two points, one in the inlet pipe and one point in outlet pipe. The time history of the static pressure is converted to the frequency domain using Fourier Transform and the transmission loss (TL) of the muffler is obtained from the ratio of the static pressure at the inlet and outlet pipe. The transmission loss of CFD result is compared with that of the computational acoustic analysis using the boundary element method (BEM). There are some differences in two results due to the pressure drop according to the inlet and outlet pipe length. Therefore, the effects of the pressure drop to the transmission loss have to be considered.

기 호 설 명

| | |
|----------|----------|
| l_c | 확장관의 길이 |
| d_c | 확장관의 지름 |
| d_i | 입구 관의 지름 |
| d_o | 출구 관의 지름 |
| l_i | 입구 관의 길이 |
| l_o | 출구 관의 길이 |
| ρ | 밀도 |
| c | 음속 |
| ω | 각 주파수 |
| P | 음압 |
| W | 음향 파워 |

1. 서 론

산업용과 생활용 기계류에 사용되는 소음기는 시스템의 성능과 효율성을 유지하면서 기계에서 발생하는 소음을 저감시키기 위한 최적의 설계안을 필요로 한다. 소음기의 설계를 위한 음향해석은 단순확장관과 같은 단순한 형상의 소음기는 수식을 이용하여 해석이 가능하고 일반적으로 복잡한 형상의 소음기는 유한요소법(FEM)과 경계요소법(BEM)을 이용하여 음향특성을 해석하고 있다[1]. 소음기의 성능은 삽입손실(Insertion Loss), 투과손실(Transmission Loss), 소음저감량(NR, Noise Reduction)으로 평가되며 투과손실을 소음기의 음향특성의 지표로 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 유한요소법과 경계요소법을 이용한 투과손실해석에는 소음기의 입구 관과 출구 관의 길이의 영향은 존재하지 않는다. 즉, 실제 관에서는 길이가 길어질수록 압력손실이 존재하지만 유한요소법과 경계요소법을 이용한 음향특성해석에서는 압력손실이 투과손실에 영향을 미치지 않고 단면적의 변화나 소음기의 시스템 특성으로 인한 압력손실만이 투과손실에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 CFD를 이용한 단순확장관의 음향특성을 해

† 교신저자; 부산대학교 대학원 기계공학부
E-mail : dh.kim@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-3088, Fax : (051) 517-3805

* 부산대학교 기계공학부

** LG 전자

석하였다. 거리에 따른 압력손실의 영향으로 인해 투과손실은 일반적인 음향해석 방법에서의 결과와 다른 경향을 보이며 단면적의 변화가 없는 관의 투과손실을 해석하여 거리에 따른 압력손실의 정도를 평가하였다.

2. 기초 이론

단순확장관의 간략한 모델은 그림 1과 같다. 이러한 모델의 음향특성은 이론적으로 해석가능하다. P_{inc} 는 입구 관에서 확장면을 향해 진행되고 각주파수 ω 을 가지는 평면파의 크기이다.

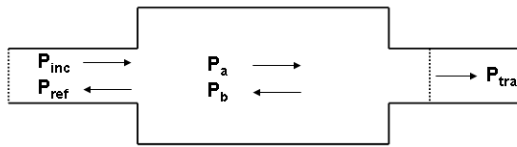


Figure 1 Simple expansion chamber

입구 관을 통해 진행되는 입사파는 확장면을 지나면서 반사파 P_{ref} 가 생성된다. P_{tra} 는 출구 관으로 통과 되는 평면파의 크기이다. 입사파의 음향파위 W_{inc} 와 투과파의 음향파위 W_{tra} 의 비로 단순확장관의 투과손실(transmission loss)는 다음 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$TL = 10 \log \frac{W_{inc}}{W_{tra}} \quad (1)$$

입구 관과 출구 관의 단면적이 동일하다면 식 (1)에서 음향파위의 비는 입사파와 투과파의 인텐시티의 비와 동일하게 된다. 그러므로 식 1은 식 2와 같이 나타낸다.

$$TL = 10 \log \frac{I_{inc}}{I_{tra}} = 10 \log \frac{P_{inc}^2 / \rho c}{P_{tra}^2 / \rho c} = 20 \log_{10} \frac{P_{inc}}{P_{tra}} \quad (2)$$

I_{inc} 는 입사파의 인텐시티를 나타내며 I_{tra} 는 투과파의 인텐시티를 나타낸다. 본 논문에서는 식 2에서 보는 바와 같이 입사파와 투과파의 비를 계산하여 단순확장관의 투과손실을 해석하였다.

3. CFD 해석

3.1 CFD Solver 및 경계조건

CFD해석을 위해 범용 소프트웨어인 Fluent 6.1을 사용하

였다. 해석을 위한 solver는 다음 표 1과 같이 unsteady, axisymmetric, segregated implicit solver를 사용하였다.

Table 1 CFD Solver

| | |
|----------------------|--------------------------------|
| solver | segregated implicit |
| space | axisymmetric |
| time | unsteady |
| unsteady formulation | 2 nd order implicit |

또한, 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였으며 적용 유체의 density, momentum, energy, turbulence kinetic energy에 대하여 3차의 monotone upstream centered scheme (MUSCL) 이산화방법을 사용하였다. 유체의 속도와 압력에는 PISO 알고리즘을 적용하였다[3]. CFD 해석에 사용된 유체는 이상기체로 공기를 사용하였고 그 물성치는 표 2와 같다. 입구와 출구단의 경계조건은 각각 mass flow와 pressure outlet으로 적용하였다.

Table 2 properties of the working fluid

| Variable | Value |
|------------------|-----------------|
| Working fluid | Air (ideal gas) |
| Mean pressure | 101325 pa |
| Mean temperature | 300 K |
| Viscosity | 1.794e-5 Kg/ms |

입구 단에 초기에 임펄스를 적용하였고, 출구 단에 대기압과 같은 압력을 적용하였다.

3.2 해석 모델 및 방법

입구 단에서의 유동의 변동은 단순확장관을 통과하면서 단순확장관의 음향특성에 따라 다른 변동으로 나타나게 된다. 이를 CFD를 이용하여 단순확장관의 음향특성을 해석한다. 입구의 관과 출구의 관에서의 시간에 대한 압력변동을 CFD를 이용하여 계산하고 Fourier 변환을 통해 단순확장관의 투과 손실을 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 투과 손실을 계산하기 위해 압력의 시간 신호를 사용할 때 주의해야 할 사항이 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 단순확장관으로 유동이 유입 될 때 단면적의 변화(region A)로 발생하는 반사파와 출구 단(region B)에서의 반사파가 압력의 시간신호에 포함되지 않아야한다[2]. 이는 식 (1)에서 보는 바와 같이 P_{inc} 에 P_{ref} 의 불필요한 성분이 포함되어 단순확장관의 투과손실에 영향을 미치기 때문이다.

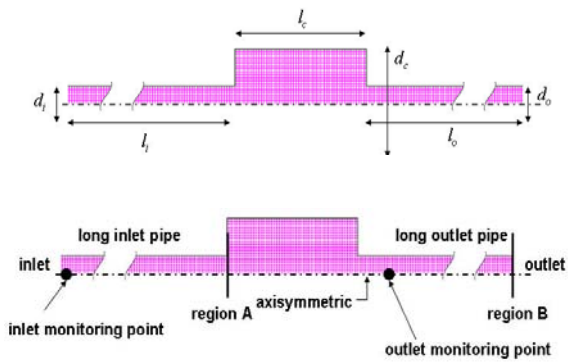


Figure 2 CFD model of the simple expansion chamber

단순확장관의 CFD 모델은 그림 2와 같으며 압력신호 획득점에서 반사파가 도달하기 전까지의 충분한 압력의 시간 신호를 획득하기 위해서 단순확장관의 길이보다 매우 긴 입구관과 출구관의 길이가 요구된다. 모델의 크기는 $l_c = 540\text{mm}$ 이고 $d_i = d_o = 48.59\text{mm}$, $d_c = 153.18\text{mm}$ 와 같다. 출구관에서 압력 측정 점은 단순확장관이 끝나는 지점에서 200mm 떨어진 위치이다.

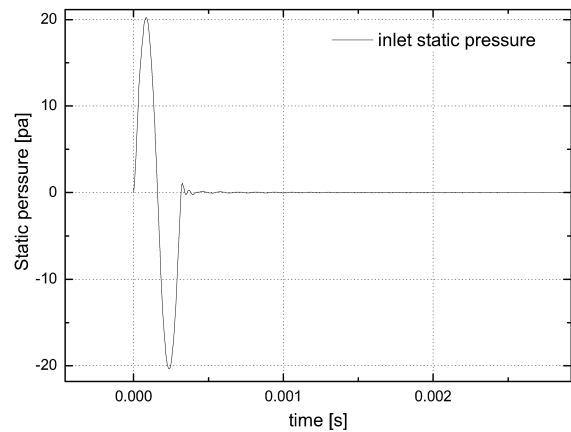
입구단의 임펄스 신호를 Fourier 변환을 하면 넓은 범위의 주파수 영역의 분포를 가진다. 0~5kHz까지의 주파수 영역에 대해서 단순확장관의 투과손실을 해석하였다. 따라서 합당한 투과 손실의 결과와 정확한 CFD의 해를 얻기 위해서 time step을 $5\mu\text{s}$ 로 설정하였다. 이 경우 sampling frequency는 200kHz이고 nyquist frequency는 100kHz이다. Nyquist frequency인 100kHz의 파장 3.4mm는 CFD 해석모델의 요소의 길이 4mm 보다 짧으므로 CFD 해석을 통해 100kHz이상의 주파수 영역에 대한 투과 손실을 계산할 수 없다. 그러므로 본 논문에서 해석하고자 하는 주파수 영역에서는 aliasing은 발생하지 않는다[2]. 또한 시간신호에 uniform window를 사용하였다.

4. CFD를 이용한 단순 확장관의 투과손실 해석

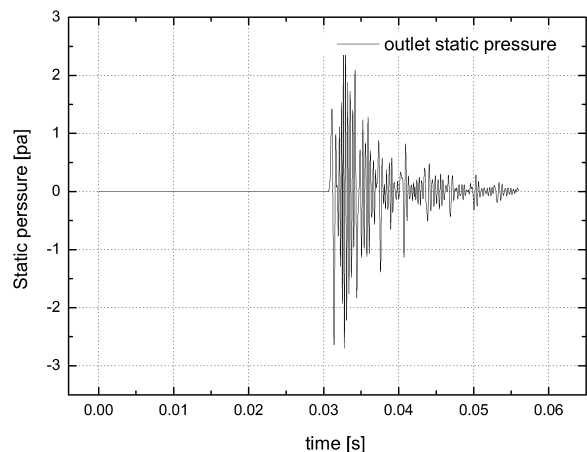
입구의 관과 출구관의 길이에 따라 단순확장관의 투과손실을 해석하였다. l_i, l_o 가 10m인 경우와 20m인 두 가지 경우를 고려하였다. 입구 단에 적용한 초기 임펄스 신호는 3200Hz의 주파수를 가지는 사인파 한 주기의 유량을 적용하였고 그 크기는 유속이 0.05m/s이다. 유속이 0.05m/s인 크기의 임펄스 신호는 약 120dB (ref. $20\mu\text{Pa}$)의 음압 수준과 비슷한 크기이다.

3.2절에서 언급한 바와 같이 투과손실을 구하기 위해 입출

구 관의 측정 점에서 얻은 정압의 시간신호에는 반사파가 포함되지 않아야한다. 임펄스의 크기 0.05m/s인 경우에 대해서 적용한 임펄스 신호는 그림 3(a)과 같고 반사파가 포함되지 않은 출구 관에서 측정된 정압의 시간 신호는 그림 3(b)과 같다. 그림 3에서 입구 관과 출구 관에서의 정압 시간신호를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역의 값으로 나타낸 후 두 신호의 비로 단순확장관의 투과 손실이 계산된다.



(a) inlet monitoring point



(b) outlet monitoring point

Figure 3 Static pressure at inlet and outlet monitoring point

4.1 입·출구 관의 길이에 따른 영향

입구 관과 출구관의 길이에 따라 단순확장관의 투과 손실은 영향을 받게 된다. 입출구 관의 길이가 10m인 경우와 20m인 경우에 대한 단순확장관의 투과 손실은 그림 4와 같다.

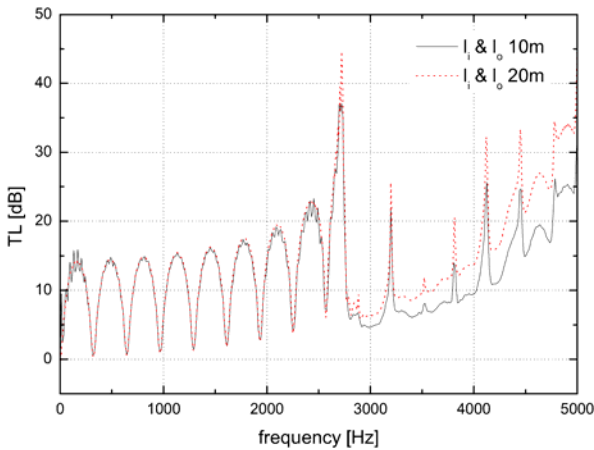


Figure 4 TL of the simple expansion chamber calculated from numerical results of different length of inlet and outlet pipe (— $l_i, l_o=10\text{m}$... $l_i, l_o=20\text{m}$)

2.5kHz 이하의 주파수 영역에서는 두 경우의 투과 손실이 비슷한 수준을 보인다. 하지만 2.5kHz 이상의 주파수 영역에서는 다른 수준의 투과손실을 보인다. 입출구 관의 길이에 따라 2.5kHz 이상의 주파수 영역에서의 투과손실의 수준은 10m인 경우보다 높고 고주파 영역으로 갈수록 투과 손실의 수준 차이가 커지는 것을 볼 수 있다.

4.2 입·출구단의 길이에 따른 압력손실 고려

그림 3에서 보듯이 2kHz 이상의 주파수 영역에서 길이가 20m인 경우 10m의 경우보다 더욱 큰 투과손실의 증가량의 보인다. 이는 입구 관의 길이가 길어지면서 2kHz 이상의 고주파 영역에서의 압력 손실이 단순확장관의 투과손실에 영향을 미치기 때문이다. 즉, 입구 단에 가해진 임펄스의 크기가 입구 단에서 출구관의 정압 측정 점 까지 단순확장관의 길이 방향으로 전파되면서 감소되기 때문이다. 임펄스 크기의 감소는 2kHz 이상의 고주파 대역에서 더욱 크다. 따라서 입구관의 길이가 20m인 단순확장관의 투과손실의 크기가 10m인 경우 투과손실의 크기보다 2kHz 이상의 주파수 대역에서 더욱 크다.

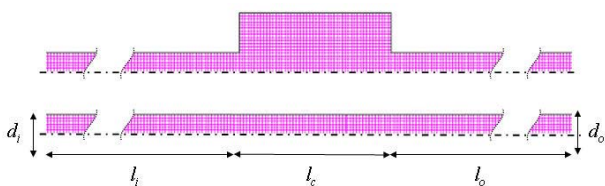


Figure 5 Uniform duct model

입출구 관의 길이에 따른 압력손실이 단순확장관의 투과손실에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 5와 같이 관의 단면적의 변화가 없는 관을 고려하였다. 음향학적 해석을 통해 단면 변화가 없는 관의 투과 손실은 0의 값을 가진다. 하지만 CFD를 이용한 관의 투과손실은 다른 결과를 보인다. 즉 길이 방향으로 입사파가 전파되면서 압력 손실의 영향으로 인해 투과손실이 달라진다. 단순확장관의 경우와 동일한 조건에서 관의 투과손실을 해석하였다. 정압측정 점 또한 단순확장관 해석 모델에서의 위치와 동일한 위치이다. l_i 와 l_o 의 길이가 각각10m, 20m인 경우의 관의 투과손실은 그림 6과 같다.

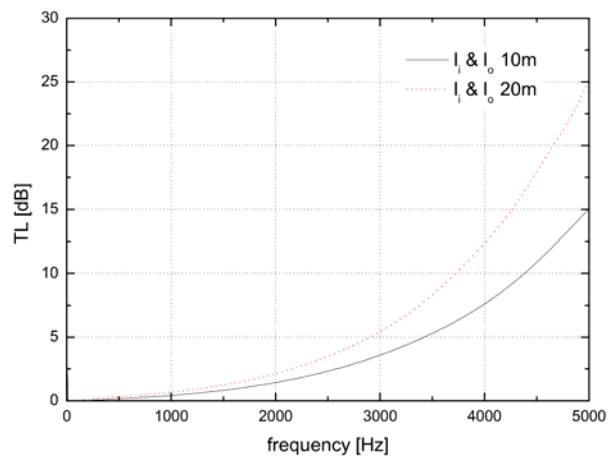


Figure 6 TL of uniform duct calculated from different length of inlet and outlet pipe (— $l_i, l_o=10\text{m}$... $l_i, l_o=20\text{m}$)

그림 6에서 보는 바와 같이 두 경우 모두에서 주파수가 증가할수록 관의 투과손실이 증가한다. 투과손실의 증가는 관의 길이가 긴 20m인 경우에 더욱 크다. 이는 관의 길이가 길어지면서 손실되는 압력의 정도가 증가하기 때문이다. 또한, 그림 6에서 보는 바와 같이 1kHz이하의 주파수 대역에서는 두 경우에서 비슷한 크기의 투과손실을 보이나 주파수가 증가하면서 투과손실의 크기 차이는 더욱 커지게 된다.

단순확장관 모델의 투과손실에서 압력손실의 영향을 제거한 단순확장관의 투과손실은 그림 7과 같다. 그림 7로부터 압력 손실의 영향이 고려된 단순확장관의 투과손실과 단면 변화가 없는 관의 투과손실의 차는 압력 손실의 영향이 고려되지 않은 단순확장관의 투과손실과 같아짐을 확인할 수 있다.

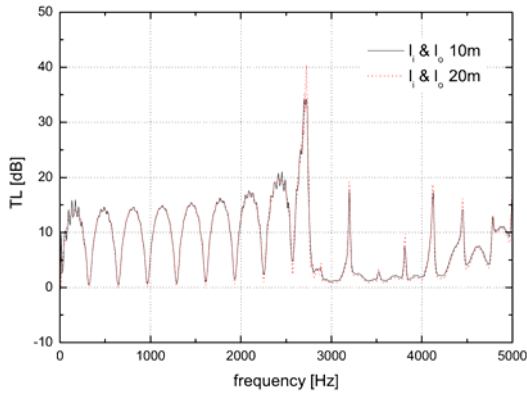


Figure 7 TL obtained by removing pressure drop effect (Fig. 6) from CFD results (Fig. 4)
 (— $l_i, l_o=10m$ and ... $l_i, l_o=20m$)

길이에 따른 압력손실이 고려되지 않은 단순확장관의 투과손실은 그림 7에서 보는 바와 같이 동일한 수준의 투과손실을 보인다. 즉, 압력손실의 영향을 고려하지 않으면 해석에 사용된 단순확장관의 투과손실은 입출구 관의 길이에 영향을 받지 않는다. 또한 압력손실의 영향을 고려하지 않은 단순확장관의 투과손실 해석 결과는 그림 8에서 보는 바와 같이 LMS/SYSNOISE의 경계요소법을 이용한 음향해석을 통해 해석된 동일한 단면 비를 가지는 단순확장관의 투과손실의 결과와 매우 근접한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

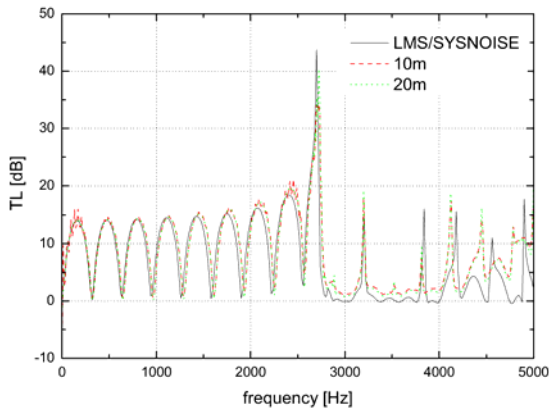


Figure 8 Comparison of TL between the results of SYSNOISE and Fig. 7
 (— SYSNOISE ... $l_i, l_o=10m$... $l_i, l_o=20m$)

음향 해석을 통한 단순확장관의 투과손실은 입구 관과 출구 관의 길이에 영향을 받지 않는다. 하지만 관에서는 압력손실이 존재하는 것이 명백하므로 단순확장관의 입출구관의 길이 변화로 인한 압력손실의 영향이 투과손실에 반영되어

야한다.

관에서 거리에 따른 압력손실의 정도를 알아보기 위해 그림 9와 같은 관 모델을 고려하였다.

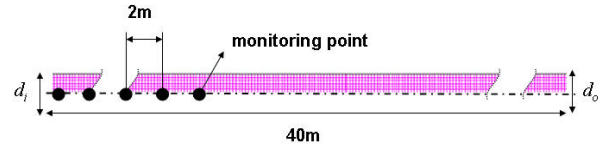
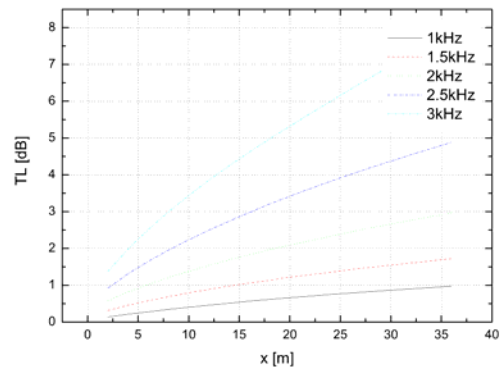
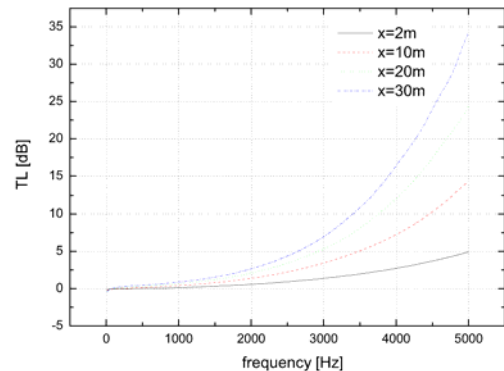


Figure 9 Duct model for a analysis of the pressure drop

관의 직경과 임펄스의 크기 등 모든 조건은 단순확장관의 경우와 동일하다. 관의 길이는 40m이고 입구 단에서 2m 간격으로 정압을 측정하여 각 위치에서의 투과손실을 해석하여 압력 손실의 영향을 해석하였다. 거리에 따른 관의 투과손실은 그림 10과 같다.



(a) TL according to the monitoring point



(b) TL according to frequency

Figure 10 Transmission loss of uniform duct according to the location of the monitoring points

그림 10(a)에서 보는 바와 같이 입구 관에서의 거리가 멀어짐에 따라 관의 투과손실은 증가하고 또한 고주파수일수록 투과손실의 증가율은 커진다. 또한, 그림 10(b)에서 보는 바

와 같이 입구 단에서의 거리가 증가할수록 주파수에 대한 투과 손실의 증가량은 커진다. 따라서 단순확장관의 투과손실 해석 시 입·출구 관의 길이로 인한 압력 손실의 영향을 그림 10에서 보이는 투과손실만큼 고려해야한다.

5. 결론

CFD를 이용하여 통해 단순확장관의 음향특성을 해석하였다. 단순확장관에서 실제 입구 관과 출구 관의 길이에 따른 압력손실이 존재하며 압력손실의 증가율은 입구 단에서 거리가 멀수록 주파수가 높을수록 크다. 따라서 음향이론을 통해 해석된 단순확장관의 음향특성에 거리 그리고 주파수에 따른 압력손실을 고려해야한다.

참 고 문 헌

- (1) T. W. Wu, G. C. Wan, 1996, Muffler Performance Studies Using a Direct Mixed-Body Element Method and Three-Point Method for Evaluating Transmission Loss, J. Vibration and Acoustics, Vol.118, pp.903-916
- (2) Middelberg, J. M., Barber, T. J., Leong, S. S., Byrne, K.P and Leonardi, E., 2003, Computational Fluid Dynamics Analysis of the Acoustic Performance of Various Expansion Chamber Mufflers, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Australia.
- (3) Fluent Inc, 2003, Fluent 6.1 Users Guide