

덕트 소음기의 실험적 연구 I (ISO 7235)

°남경훈*, 박희주**

An Experimental Study on Ducted Silencers I (ISO 7235)

Kyoung-Hun Nam and Heui-Joo Park

ABSTRACT

The test facility has been manufactured to predict the dynamic insertion loss and the pressure drop for ducted silencers based on ISO 7235. The qualification test of the test facility is necessary for determining the dynamic insertion loss and the pressure drop of the test silencer, and is surveyed the reflection coefficient for an anechoic termination, the velocity profile near the upstream connection to the test silencer, the reduction of the system silencer and the limiting insertion loss due to the flanking sound transmission along the duct walls.

1. 서론

최근의 발전소 시장에서는 경제적인 면과 환경 문제를 동시에 만족하는 복합화력발전의 수요 증가에 비례하여, 배열회수보일러(HRSG, Heat Recovery Steam Generator) 소음에 대한 주문주(owner)의 요구조건도 점점 까다로워지고 있다. 특히, 연돌 소음기(stack silencer)의 동적 삽입손실(DIL, Dynamic Insertion Loss)과 압력손실(pressure drop)에 관한 의견차가 자주 문제시 되어 왔다. 연돌 소음기는 다수의 스플리터(splitter)로 구성된 흡음형 소음기로서, 공조용 소음기 및 팬(Fan) 소음기 등과 같은 전형적인 덕트 소음기이다. 덕트 소음기 성능의 주요소인 동적삽입손실과 압력손실을 예측하기 위해서는 실험장치가 필요하다.

본 연구에서는 ISO 7235 에서 제시한 방법을 근거로 하여, 덕트 소음기의 성능을 예측할 수

있는 실험장치를 제작하였다⁽¹⁻⁷⁾. 설계 및 제작된 실험장치의 특성 인자인 무반사단(anechoic termination)의 반사계수(reflection coefficient), 시험용 소음기 전단의 속도 분포(velocity profile), 플랭킹 소음(flanking transmission noise)의 차단 정도를 나타내는 한계삽입손실(limiting insertion loss) 및 팬 소음을 줄이기 위한 시스템 소음기(systemic silencer)의 감음 특성 등을 조사하여, 본 시험설비가 덕트 소음기의 성능 예측에 적합한지를 검토하였다.

2. 본론

2.1 유동이 없을 때의 시험장비 성능 시험

2.1.1 시험장비 모형 및 구성

실험장치는 Fig. 1 과 같이 스피커(speaker), 시험용 소음기가 설치되는 덕트, 삽입손실을 측

* 정회원, 두산중공업 기술연구원

** 두산중공업 기술연구원

3하기 위해 마이크로폰이 설치될 덕트 및 무반사단으로 구성되어 있다. 각각의 덕트는 상호 플랜지 이음으로 되어 있으며, 스피커 덕트에서 무반사단까지의 내경 치수는 폭 1m, 높이 0.5m인 단면이 변화하지 않는 직선 배열로 설치되어 있다. 스피커는 중저음역 특성이 좋은 것으로 선택하였으며, 플랜지 이음 부위는 가스켓(gasket)을 삽입하여 기밀이 유지되도록 하였다. 그리고 무반사단은 Fig. 2와 같이 양면이 경사면이 되도록 ISO 7235에서 제시하고 있으나, 제작성 및 설치 현장의 상황을 고려하여 Fig. 1과 같이 길이가 5m인 계단식 형태로 제작하였고, 타공판(perforated sheet)의 개구율(open ratio)은 약 32% 정도이다.

2.1.2 무반사단의 반사 계수

수음부에서 정재파(standing wave)가 형성되는 것을 피하기 위해서 설치된 무반사단은 덕트 내부의 음압을 측정하기 위해서 필요하다. 무반사단의 성능인 반사계수를 구하기 위해서는 수음부측에 이동용 음압 측정장치가 필요하다. 이때 측정되는 반사계수(γ_a)는 Table 1에서 제시하는 값을 만족해야 하고, 반사계수의 상한 주파수는 덕트의 차단주파수(cut-off frequency) 이하까지를 구하여야 한다. 덕트의 차단주파수와 반사계수는 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 각각 계산할 수 있다.

$$f_o = \frac{c}{2w} \quad (1)$$

f_o : cut-off frequency(Hz)

c : sound velocity(m/s)

w : width(m)

$$\gamma_a = \frac{10^{\Delta L/20} + 1}{10^{\Delta L/20} - 1} \quad (2)$$

$$\Delta L = L_{p(max)} - L_{p(min)}$$

시험장치의 반사계수를 구하기 위해서, 본 연구에서는 덕트 내의 암소음(back-ground noise)보다 10dB 큰 순음(pure tone)을 스피커에서 발생시켰다. 그리고 Fig. 3과 Fig. 4와 같은 이동용 음압 측정장치로 덕트의 중심 축을 따라 이동하면서, 덕트 내부에서 최대음압레벨($L_{p(max)}$)과 최소음압레벨($L_{p(min)}$)의 크기를 측정하였다.

본 시험장치의 덕트 차단주파수는 약 170Hz 정도이며, 측정한 반사계수 값과 ISO 7235에서 제시한 반사계수 기준치 값을 Table 1에 나타내었다. 측정한 반사계수 값이 ISO 7235에서 제시하는 기준치 이하가 됨을 확인할 수 있었다.

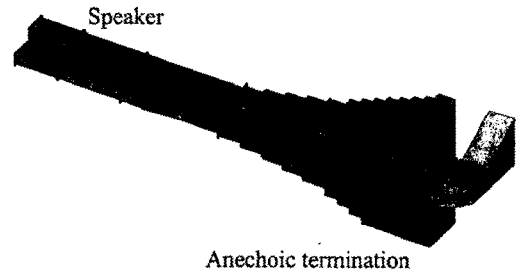


Fig. 1 The test facility for ducted silencers without air flow

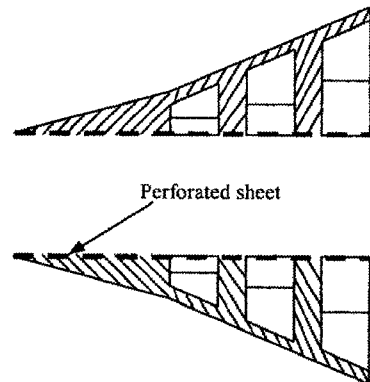


Fig. 2 Two-sided anechoic termination

Table 1 Maximum reflection coefficients for an anechoic termination without air flow

Center frequency of the frequency band, (Hz)	Reflection coefficient, max	Reflection coefficient, measurement
50	0.4	0.270
63	0.35	0.348
80	0.3	0.160
100	0.25	0.188
>125	0.15	0.132
>160	0.15	0.080

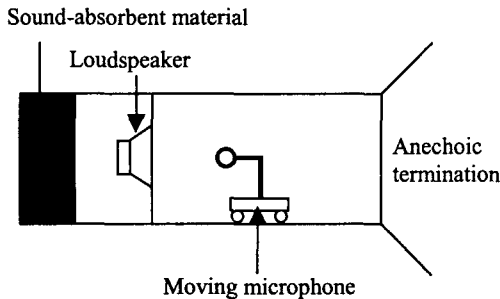


Fig. 3 Schematic presentation for measuring the reflection coefficients



Fig. 4 Experimental apparatus for measuring the reflection coefficients

2.2 유동이 있을 때의 시험장비 성능 시험

2.2.1 시험장비 모형 및 구성

시험장치는 Fig. 5 와 같이 팬, 시스템 소음기 (systemic silencer), 시험용 소음기 덕트, 스피커 (speaker), 무반사단으로 구성되어 있다. Fan 은 회전수 1760 rpm, 풍량 330 m³/min, 익형 9 개인 원심팬을 사용하였다. 팬의 공기 출구와 덕트

입구부가 90°로 연결되어 꺾이는 부분에 유동을 원활하게 하기 위해 유동 안내판을 설치하였다. 덕트 단면의 형상은 사각형으로서 높이가 0.5m 이고, 전체 길이는 25m 정도가 된다. 시스템 소음기가 설치되는 덕트의 폭은 1.5m, 시험용 소음기가 설치되는 덕트의 폭은 1m 이며, 두 부분을 연결하기 위한 단면 변화 덕트는 최대 밀폐각(maximum enclosed angle)이 15° 이내가 되도록 하며, 최저길이(l_{min})는 식 (3)을 이용하여 설계하였다.

$$l_{min} = \frac{\text{larger area}}{\text{small area}} - 1 \quad (3)$$

팬 소음을 감소시키기 위한 시스템 소음기는 두께 100mm 와 300mm, 유효길이가 1m 인 두 종류의 스플리터를 설계하여 유체흐름 방향으로 2 단이 되도록 설치하였다. 스피커 및 무반사단은 2.1.1 절에서 언급한 것을 이용하였다.

2.2.2 시스템 소음기의 삽입손실

시험용 소음기의 삽입손실을 측정하기 위해서는 팬소음을 감소시켜야 한다. 팬소음을 감소시키기 위한 시스템 소음기는 팬과 스피커 사이에 설치한다. 유동이 있을 때, 소음기의 삽입손실을 측정하기 위해서는 덕트 내에 노우즈콘(nose cone)이 부착되어 있는 마이크로폰(microphone)이 필요하다. 덕트 내에서 음압레벨을 측정할 때, 최대 최소 값의 음압레벨 차가 Table 2 를 만족하게 되면, 마이크로폰을 3 개 설치하면 된다. 본 연구에서도 마이크로폰을 3 개 설치하여 유속별(5m/s, 7.5m/s, 10m/s)로 1/3 옥타브밴드별의 음압레벨을 측정 한 결과, Table 3 과 같이 1000Hz ~ 3150Hz 에서 Table 2 를 만족하지 못하여 마이크로폰을 5 개 설치하였다. 마이크로폰 배열 방법은 Fig. 6 과 같다.

본 연구에서는 유속변화에 따른 팬의 음향과

위레벨의 측정은 Fig. 6 과 같이 덕트 내의 3 차원 대각선 방향으로 마이크로폰을 설치하고, 유속변화에 대한 음압레벨을 측정하여 식(4)를 이용하여 음향과위레벨로 환산하였다.

$$PWL = SPL + 10 \log \frac{S_t}{S_0} \quad (4)$$

PWL : Sound Power Level (dB)

SPL : Sound Pressure Level (dB)

S_t : Cross-ception area (m²)

S₀ : Unit area (1m²)

유속별(5m/s, 7.5m/s, 10m/s)로 시스템소음기의 삽입손실을 측정하기 위해서, 시스템소음기가 설치되어 있을 때와 없을 때의 음압차를 비교하였다. 유속별 삽입손실 특성을 Fig.7 에 나타내었다.

Table 2 Maximum level differences for three Microphone positions in the test duct

Center frequency of the frequency band, (Hz)	Maximum level difference, dB
50	10
63	10
80	8
100	8
>125	7
>160	6

2.2.3 덕트 내부의 속도 분포 및 온도

시험용 소음기 전단의 속도 분포는 시험용 소음기로부터 1.5d_e(d_e:equivalent diameter) 떨어진 지점에서 측정하도록 한다. 덕트 내부 벽면에서 15mm 떨어진 지점으로부터 덕트 내부를 상호 축방향으로 10 등분하고, 평균 유속에 대해 속도 편차는 ±10%, 온도 편차는 3K 이내가 되도록 한다.

본 연구에서는 덕트 내에서의 속도 분포를 측정하기 위해서, 시험용 소음기가 설치될 지점으로부터 2d_e 떨어진 지점에 피토투브(pitot tube)와 마이크로 마노미터를 이용하여 속도를 측정하였다. ISO 7235 에서는 1.5d_e 떨어진 지점에서 속도분포를 측정하라고 권장하나, 압력측정을 위한 구멍(hole)과 겹치게 되어 2d_e 지점에서 속도 분포를 측정하였다. 속도 분포 편차의 결과를 Fig. 8 에 나타내었고, 본 시험장비의 속도 분포 편차는 -6% ~ 3.5% 이내임을 알 수 있었다. 그러므로 시험용 소음기 전단부에서의 덕트 내부의 유동은 균일하다고 할 수 있다. 덕트 내부의 온도 측정은 눈금 간격이 0.5°인 수은주를 이용하였고, 측정의 반복 시 온도가 3K 이내가 되도록 하였다.

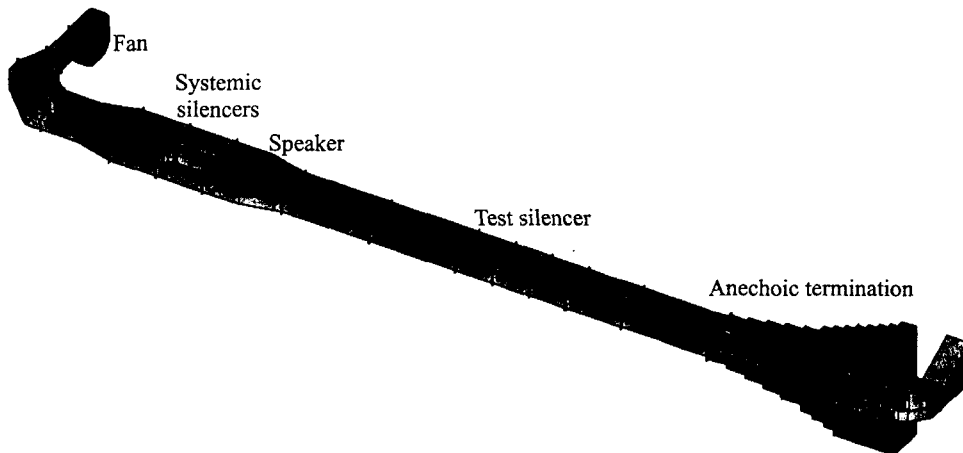


Fig. 5 The test facility for ducted silencers

Table 3 Maximum level differences for varying flow rate in the test duct

Center frequency of the frequency band, (Hz)	Maximum level difference, (dB)		
	5.0 (m/s)	7.5 (m/s)	10.0 (m/s)
50	1.1	1.3	1.2
63	1.3	1.7	0.5
80	1.4	1.7	2.1
100	2.1	2.0	2.2
125	1.5	1.6	1.6
160	0.6	0.7	0.8
200	1.3	1.1	1.3
250	2.6	2.5	2.4
315	1.1	0.9	1.0
400	2.9	2.9	2.8
500	3.2	2.9	2.9
630	3.7	3.7	3.6
800	4.2	4.1	3.9
1000	7.8	7.4	7.0
1250	4.0	3.7	3.5
1600	6.7	6.3	6.1
2000	8.3	8.1	8.3
2500	5.4	5.3	4.8
3150	6.4	6.2	5.6
4000	3.5	3.7	3.6
5000	2.8	3.1	2.2
6300	3.1	3.4	2.2
8000	5.4	4.3	3.6
10000	4.8	4.4	4.0

2.2.4 압력손실

시험용 소음기의 압력손실(pressure drop)은 시험용 소음기의 입구단으로부터 1.5de 떨어진 곳의 덕트 벽면의 각면에 구멍을 뚫어 입구단의 압력을 측정하고, 시험용 소음기의 출구단으로부터 5de 또는 최소 2m 떨어진 지점에서 출구단의 압력을 측정해야 한다. 본 연구에서는 시험용 소음기로부터 입구단은 1.5de 지점, 출구단은 4.2de 지점에 구멍을 뚫어 압력을 측정하도록 하였다. 우레판 튜브를 이용하여 각 면에서 측정할 수 있는 압력을 하나로 모아 마이크로 마모미터를 이용하여 시험용 소음기의 차압이 측정되도록 하였다.

2.2.5 한계삽입손실

시험용 소음기의 최대 삽입손실은 유동이 없을 때 결정되나, 유동이 있을 때는 플랭킹 소

음(flanking noise)의 차단 정도를 나타내는 한계 삽입손실(limiting insertion loss)이 시험용 소음기의 삽입손실보다 1/3 옥타브밴드별(one-third octave band)로 최소한 10dB 이상이 되어야 한다. 그렇지 않을 경우, Table 4 를 이용하여 보정해 주어야 한다. 본 시험장비로 유속의 변화(5m/s, 7.5m/s, 10m/s)에 따른 시험용 소음기를 시험해본 결과, 125Hz 이상의 1/3 옥타브밴드별 주파수 영역에서 삽입손실이 10dB 이상이 됨을 확인하였다. 그리고 125Hz 이하의 주파수 영역별로는 Table 4 와 같은 보정치를 이용하였다. 이때 시험용 소음기의 폭은 0.1m, 높이 0.5m, 길이 1m 인 것을 5 개 삽입하였을 때이다.

X : Key positions, O : Additional positions

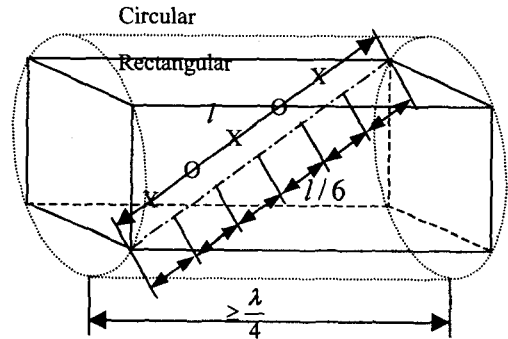


Fig. 6 Microphone positions.

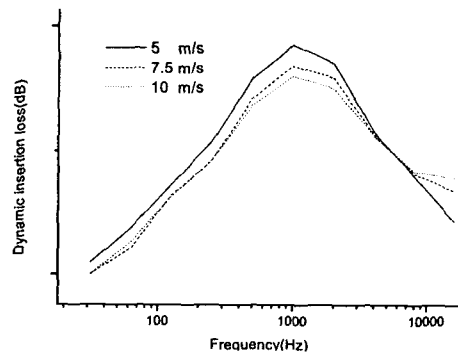


Fig. 7 Insertion loss for the system silencer

Table 4 Corrections for insufficient limiting insertion loss

Difference between Limiting IL and measured IL of the test silencer, (dB)	Correction to be added to the measured IL of the test silencer, (dB)
4 or 5	2
6 to 9	1
10 or more	0

■ -6 ~ -3.5 ■ -3.5 ~ -1 □ -1 ~ -1.5 □ -1.5 ~ -4

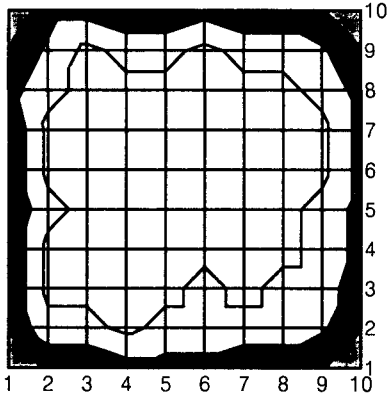


Fig. 8 Velocity profile near the upstream

3. 결론

본 연구에서는 덕트 소음기의 성능 예측 실험을 위해 ISO 7235 에서 권장하는 조건을 기준으로 하여 시험장치를 제작하고, 덕트 내부유동의 유무에 따른 시험장치의 성능이 ISO 7235 에서 규정하는 조건을 만족하는 거의 검토 결과는 다음과 같다.

- 1) 무반사단의 성능인 반사계수가 수음부 측 덕트의 차단 주파수 이하에서, ISO 7235 에서 제시하는 반사계수 이하가 됨을 알 수 있었다.
- 2) 최대 유속시의 한계삽입손실을 측정하였을 때, 중심주파수 125Hz 이하에서는 보정이

필요하고, 그 이상의 주파수 범위에 대해서는 보정이 필요 없음을 확인하였다.

- 3) 덕트 내의 속도 분포가 평균 유속 대비 -6 ~ 3.5% 범위를 가지므로, 속도 분포 기준인 $\pm 10\%$ 편차를 만족함을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제작된 시험장치를 이용하여, 덕트 내부유동의 유무에 따른 시험용 소음기의 삽입손실을 측정할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. ISO 7235, "Acoustic - Measurement procedures for ducted silencers - Insertion loss, flow noise and total pressure loss", 1991.
2. ISO 5136, "Acoustics - Determination of sound power radiated into a duct by fans - In-duct method", 1990.
3. ISO 11691, "Acoustics - Measurement of insertion loss of ducted silencers without flow - Laboratory survey method", 1995.
4. ISO 11820, "Acoustics - Measurements on silencers in situ", 1996.
5. ISO/FDIS 14163, "Acoustics - Guidelines for noise control by silencers", 1998.
6. M.L.Munjal, Acoustics of Ducts and Mufflers (with Application to Exhaust and Ventilation System Design), Wiley-Interscience, 1987.
7. Leo L. Beranek, Istvan L. Ver, Noise and Vibration Control Engineering (Principles and Applications), Wiley-Interscience, 1992.