

FLM에 의한 음원의 임피던스 측정

°정갑철* · 윤제원* · 권영필**

(Measurement of the Source Impedance by FLM)

(Gab-Cheol Jeong, Je-Won Youn and Young-Pil Kwon)

1. 서론

소음기의 음향 성능을 평가하기 위해서는 음원의 임피던스를 알아야 한다. 음원의 임피던스를 구하기 위한 많은 연구가 행해졌고 정재파법, 음향전달함수법, Two Load Method (TLM), Four Load Method (FLM) 등의 여러 가지 방법이 개발되었다.^{(1),(2)}

정재파법은 저주파수에서 음원의 출력보다 큰 출력음을 발생시킬 수 있는 스피커가 있어야 하고, 주파수별로 반복 측정해야 하는 번거로움으로 인해 실험에 어려움이 따른다. 전달함수법과 Two Load Method (TLM)는 관내에서 음압을 측정해야 하는데 엔진의 흡배기계와 같이 음압이 높거나 고온의 가스 유동이 있는 경우 측정이 매우 어렵다. 한편 Four Load Method (FLM)는^{(3),(4)} 외부의 방사 음압을 측정하여 음원의 특성을 구하기 때문에 위에서 언급한 문제점들이 없는 반면에 무향실을 이용해야 한다.

본 논문은 음원의 임피던스 측정의 여러 방법 중 FLM에 의하여 스피커 음원의 임피던스를 측정하고 삼입손실을 구하면서 FLM이 가진 문제점을 검토하였다.

여기서 $x = R_s$, $y = X_s$ 이고 각 계수를 정리하면 다음과 같다.

$$a_m = (1 - a_m^2), \quad b_m = 2(R_{L_{m+1}} - a_m^2 R_{L_m})$$

$$d_m = 2(X_{L_{m+1}} - a_m^2 X_{L_m})$$

$$c_m = [a_m^2(R_{L_m}^2 + X_{L_m}^2) - (R_{L_{m+1}}^2 + X_{L_{m+1}}^2)]$$

식 (2)는 $m=1, 2, 3$ 에 대한 3개 원의 관계로 변환할 수 있고 x, y 에 대한 연립방정식을 풀어서 다음과 같은 동차해를 구할 수 있다.

$$x = R_s =$$

$$\frac{(a_2 c_1 - a_1 c_2)(a_3 d_2 - a_2 d_3) - (a_3 c_2 - a_2 c_3)(a_2 d_1 - a_1 d_2)}{(a_2 b_1 - a_1 b_2)(a_3 d_2 - a_2 d_3) - (a_3 c_2 - a_2 c_3)(a_2 d_1 - a_1 d_2)} \quad (3)$$

$$y = X_s =$$

$$\frac{(a_2 c_1 - a_1 c_2)(a_3 b_2 - a_2 b_3) - (a_3 c_2 - a_2 c_3)(a_2 b_1 - a_1 b_2)}{(a_2 d_1 - a_1 d_2)(a_3 b_2 - a_2 b_3) - (a_3 d_2 - a_2 d_3)(a_2 b_1 - a_1 b_2)} \quad (4)$$

2. FLM 이론

Fig. 1과 같이 길이가 서로 다른 4개의 직관에 대해 4단자 정수의 요소와 외부에서 측정된 음압사이의 관계로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$a_m = \frac{|C_{L_m} Z_r + D_{L_m}|}{|C_{L_{m+1}} Z_r + D_{L_{m+1}}|} \times 10^{(L_m - L_{m+1})/20}, \quad m = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기서 L_{Pm} 은 관의 끝단에서부터 r 만큼 떨어진 위치에서 측정된 방사 음압이고 C 와 D 는 직관의 4단자 성분이다. 음원의 임피던스를 $Z_s = (R_s + jX_s)$ 로 나누어서 계산하면 최종적으로 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$a_m(x^2 + y^2) + b_m x + d_m y = c_m, \quad m = 1, 2, 3 \quad (2)$$

이때 식 (3)과 (4)의 x, y 는 Fig. 2의 3개원의 교점 $M(x, y)$ 가 되며 음원의 임피던스에 대한 실수항 및 허수항을 의미한다.

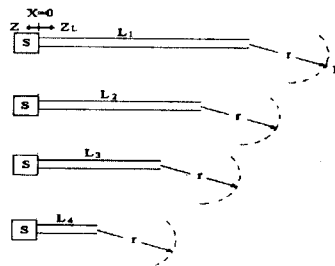


Fig. 1 4-load system by Prasad

* 숭실대학교 대학원, 정희원

** 숭실대학교 기계공학과, 정희원

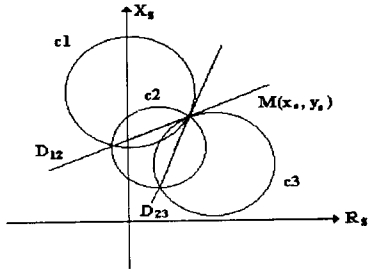


Fig. 2 Evaluation of source impedance by Prasad

Prasad의 FLM 방법과는 달리 Munjal은 Fig. 3과 같은 실험장치를 이용하였다. 이것은 소음기의 외부에서 방사 음압을 측정하여 소음기의 추가 설치에 따른 음압 레벨 차이로부터 Prasad가 구한 것과 유사한 해를 얻을 수 있다.

Fig. 3에서 동일한 위치의 음압을 측정한다면 삽입손실에 대한 음압비에서 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\beta_{o,i} \equiv \left| \frac{P_o}{P_i} \right|^2 = \left| \frac{Z_s}{Z_r + Z_s} VR_i \right|^2 \quad (5)$$

소음기의 음원측과 방사단에서의 입자속도의 비 VR_i 는 4단자 정수의 마지막 항이다. 여기서 Z_s 는 음원의 임피던스, Z_r 은 방사단의 임피던스를 의미한다.

$$R_s^2 + X_s^2 + G_{1,i}R_s + G_{2,i}X_s + G_{3,i} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$G_{1,i} = \frac{2R_{c,0,0} - E_{2,i}/\beta_{0,i}}{1 - E_{1,i}/\beta_{0,i}}$$

$$G_{2,i} = \frac{2R_{c,0,0} - E_{3,i}/\beta_{0,i}}{1 - E_{1,i}/\beta_{0,i}}$$

$$G_{3,i} = \frac{R_{c,0,0}^2 + X_{c,0,0}^2 - E_{4,i}/\beta_{0,i}}{1 - E_{1,i}/\beta_{0,i}}$$

식 (6)에서 $i = 1, 2, 3$ 에 대한 연립방정식을 풀면 원에 대한 방정식으로 바꿀 수 있고, 근사적으로 3개의 중심을 임피던스로 할 수 있다. 따라서 R_s, X_s 는 Fig. 4에서와 같이 3개의 중점 (P_{123}) 즉, 음원의 임피던스에 대한 실수항 및 허수항을 나타낸다.

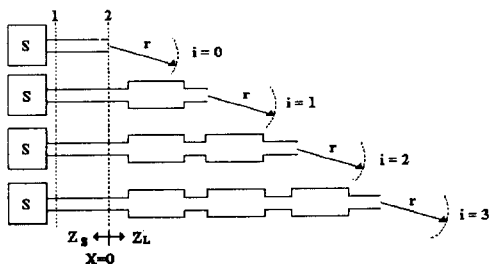


Fig. 3 4-Load system by Munjal

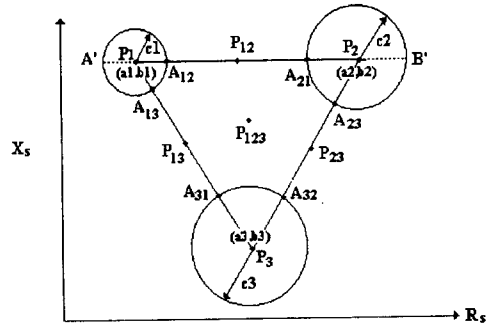


Fig. 4 Evaluation of source impedance by Munjal

3. 실험

실험 장치는 스피커를 음원으로 하여 구성하였다. 스피커의 음원 특성을 실험하기 위한 개략도는 Fig. 5와 같다. 무향실 외부에 스피커를 설치하고, 음원측과 연결된 직관을 무향실 내부로 삽입하였다. 음원으로는 FFT 분석기에서 발생된 pseudo random noise를 이용하고, 음압 신호는 2.5Hz 간격으로 1000Hz까지 측정하여 컴퓨터로 자료를 전송하여 처리하였다.

무향실에서 음압레벨의 측정시 음원과 연결된 4개의 직관과 마이크로폰과의 거리 및 바닥에서의 높이를 항상 일정하게 유지시키기 위하여 마이크로폰 이송장치를 설치하였다.

실험에 사용된 스피커는 직경이 300mm(12")이고 스피커에서 발생된 음을 관으로 잘 전달시키기 위해서 나팔관 형태의 확대부에 스피커를 고정시키고 축소부에 40mm 직경의 관을 연결하여 실험하였다. Fig. 6의 실험장치에서 임피던스 계산 기준점을 3개 지점으로 하여 임피던스와 삽입손실을 비교하였다. 이같은 이유는 흡기계에 적용시 다기관등으로 계산이 복잡한 밸브 주변의 기준점보다 다기관이 합쳐진 임의 지점이 음향 성능 계산에 적합한지를 알고자 하기 때문이다.

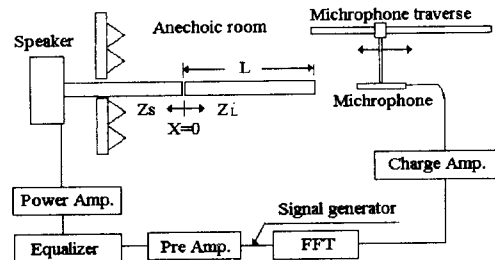


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental apparatus

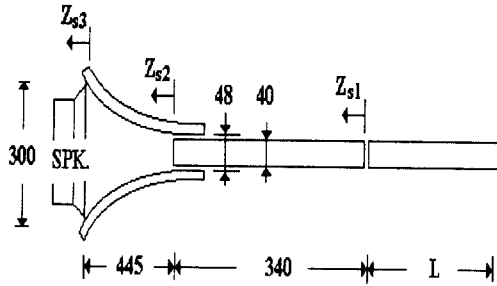


Fig. 6 Geometry of a speaker and pipes

그리고 삽입손실을 구하기 위한 단순 팽창형 소음기의 제원은 Fig. 7과 같다.

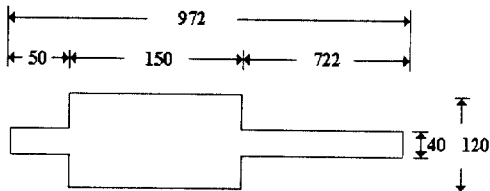


Fig. 7 Geometry of a simple expansion chamber

4. 결과 및 고찰

Fig. 9는 Munjal의 측정방법으로 음압을 측정하는 것이다. 소음기 3개를 직렬로 연결했을 때의 음압을 살펴보면 600Hz 근처에서 평탄하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 원인은 마이크로폰 및 측정 기기의 dynamic range 한계로 인하여 발생된 것이다.

Fig. 10은 Munjal의 실험 방법에 따라 단순 팽창형 소음기를 연결하여 음압을 측정하고 Fig. 9를 이용하여 측정하고 임피던스를 계산한 후 삽입손실을 예측하고 측정으로 구한 삽입손실과 비교한 것이다. 비교 결과 600Hz 골 근처에서 오차가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 9, 10에서 보듯이 Munjal이 제시한 측정방법에 문제가 있음을 알 수 있다.

Prasad의 FLM은 식 (3),(4)의 수식을 이용하여 Fig. 2의 표현과 같이 3개 원 사이의 교점을 구하여 임피던스 값을 구한다. 그러나 3개의 원이 Fig. 2와 같이 될 때는 정확한 임피던스를 구할 수 있으나, 실수항이 허수항에 비해 아주 작을 경우나 실수항이 거의 '0'일 때는 임피던스의 교점이 Fig. 8에서와 같은 전혀 다른 결과를 나타낼 수 있다.

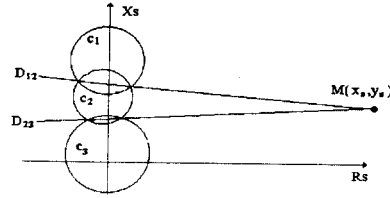


Fig. 8 Errors in evaluation of source impedance by Prasad

Fig. 11은 Prasad의 제안에 따라 임피던스를 계산한 결과이다. 임피던스는 음원의 허수항이 아주 작고 실수항만이 큰 음의 값을 나타내고 있다. 저항값이 음의 값을 가진다는 비현실적인 것으로서 Prasad의 임피던스 계산이 틀리다는 것을 알 수 있다.

Prasad의 문제점을 개선하기 위해 Coulon이 제시한 열점성 감쇄를 고려하여 계산한 임피던스가 Fig. 12이다. 열 점성 저항을 고려했음에도 불구하고 임피던스의 실수항값이 계속 음의 값을 가지고 있다. 따라서 Coulon의 제안만으로는 Prasad의 문제점을 해결할 수 없다.

Fig. 13은 Prasad의 실험 방법과 Munjal의 임피던스를 구하는 방법을 조합하여 삽입 손실을 구한 후 측정으로 구한 결과와 비교한 것이다. 비교 결과 전체 주파수 대역에서 삽입 손실의 값이 비교적 일치하고 있다. 이로부터 실험방법은 Prasad의 직관을 이용하는 방법이 좋고, 측정결과의 처리는 Munjal의 계산법이 바람직한 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 6의 스피커 형상에서 음원에 대한 임피던스의 기준 지점을 1 지점으로 하고 Z_{S1} 을 계산한 후 무차원화하여 나타낸 것이다. 음원은 실수항보다 허수항이 훨씬 크며 특히 주파수가 낮을 경우에는 실수항은 무시할 만큼 작은 음원으로 볼 수 있다.

Fig. 15는 스피커 음원에 대한 임피던스의 기준 지점을 2 지점으로 하여 Z_{S2} 를 구한 후 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림의 결과에서 보듯 Fig. 14보다 스피커에 가까운 위치를 기준점으로 했을 때 임피던스의 실수항 값은 변화가 없으나 허수항의 형태는 음원과의 거리가 가깝게 됨에 따라 평탄화되고 완전 반사 음원에 가까운 모양을 보이고 있다.

Fig. 16은 스피커 음원 자체에 대한 임피던스 Z_{S3} 을 구한 후 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림의 결과에서 보듯 임피던스의 실수항은 변화가 없으나 허수항은 주파수 증가에 따라 미세한 변동이 많음을 볼 수 있다. 이러한 임피던스는 12" 대형 스피커의 음원이 저주파 영역은 완전 반사음원으로서 거동하나 주파수가 높아지면서 스피커 음원 면이 평면파로 거동을 하지 못하

기 때문에 생각된다.

Fig. 17은 임피던스 Z_{S1} 을 이용하여 Fig. 7의 단순평창형 소음기에 대한 삽입손실을 계산한 것과 측정된 삽입손실을 비교한 것이다. 전 주파수 대역에서 예측값과 측정값이 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 18은 임피던스 Z_{S2} 을 이용하여 Fig. 7에 대한 삽입손실을 계산한 것과 측정된 삽입손실을 비교한 것이다. Fig. 17과 같이 예측값과 측정값이 유사한 것을 알 수 있다.

Fig. 17, 18에서 보듯 Fig. 6의 스피커 장치에서 음원의 기준 위치를 스피커면이 아닌 중간의 임의의 위치를 택하여도 삽입손실 계산이 문제가 없음을 알 수 있다. 따라서 이같은 결과는 형상이 복잡한 다기기관의 해석 시 밸브 위치가 아닌 다기기관의 합류된 임의의 지점을 기준으로 하여 계산해도 음향 성능 예측이 가능함을 보여준다.

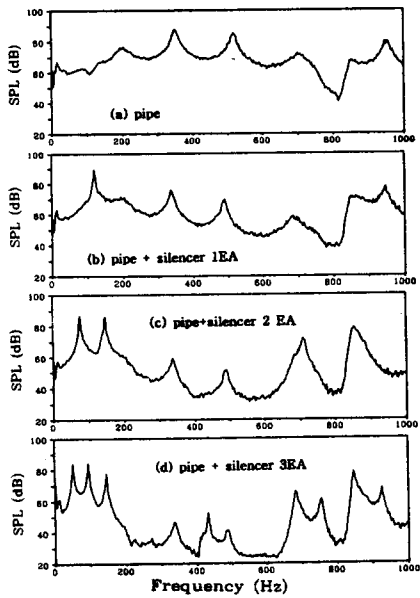


Fig. 9 Sound pressure level spectra by Munjal's method

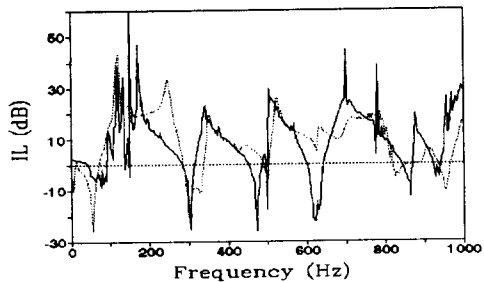
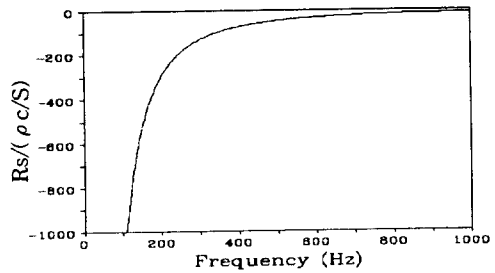
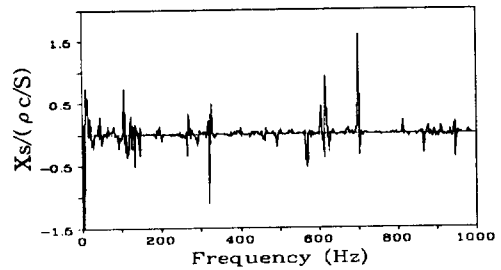


Fig.10 Comparison between the measured and the calculated insertion loss by Munjal's FLM (—:calculation,--:measurement)

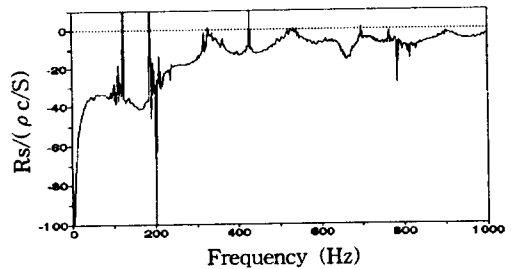


(a) Resistance, R_s

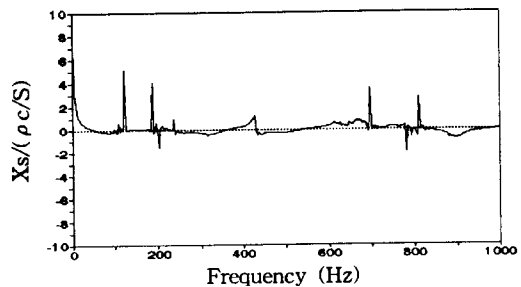


(b) Reactance, X_s

Fig. 11 The normalized source impedance of the speaker by Prasad's FLM



(a) Resistance, R_s



(b) Reactance, X_s

Fig. 12 The normalized source impedance of the speaker with consideration of thermoviscous effect

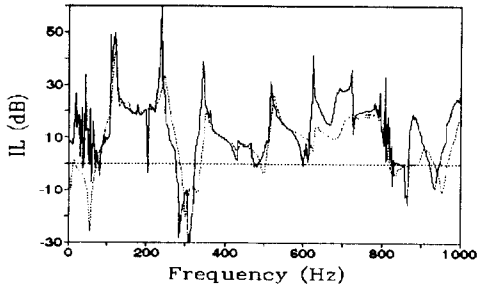
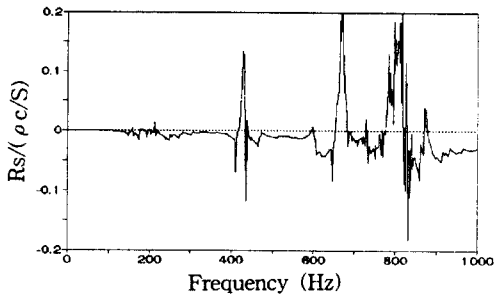
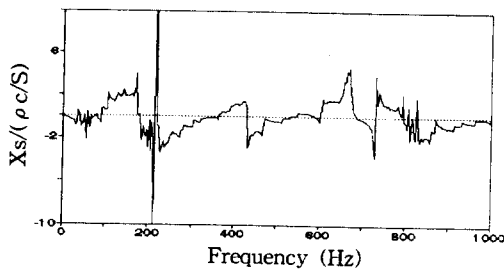


Fig. 13 Comparison between the measured and the calculated insertion loss according to Prasad's measurement and Munjal's evaluation (—: calculation, ...: measured)

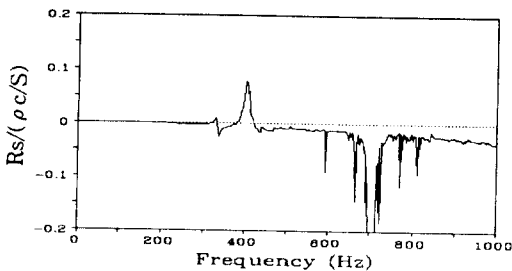


(a) Resistance, R_s

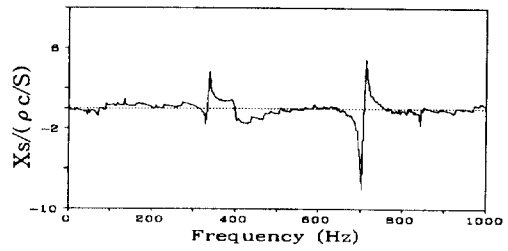


(b) Reactance, X_s

Fig. 14 The normalized source impedance Z_{S1} of the speaker

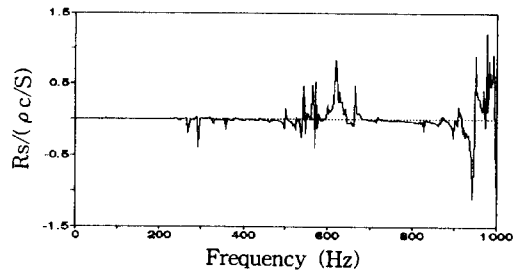


(a) Resistance, R_s

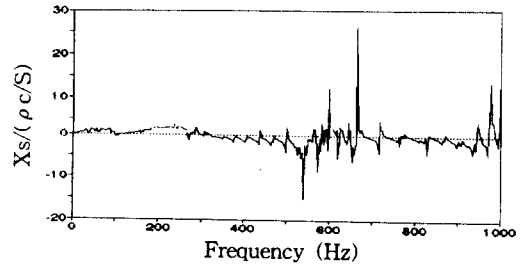


(b) Reactance, X_s

Fig. 15 The normalized source impedance Z_{S2} of the speaker



(a) Resistance, R_s



(b) Reactance, X_s

Fig. 16 The normalized source impedance Z_{S3} of the speaker

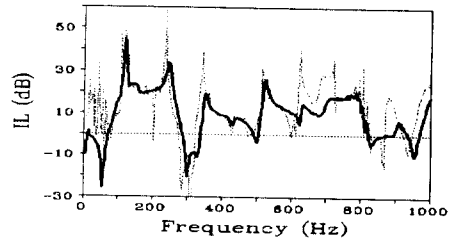


Fig. 17 IL predicted with the source impedance Z_{S1} (—: calculation, ...: measurement)

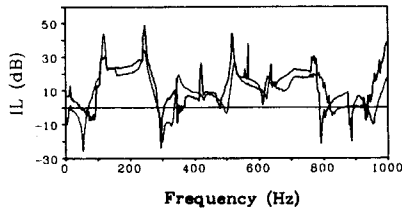


Fig.18 IL predicted with the source impedance Z_{S2} (— : calculation , - - : measurement)

5. 결론

본 연구는 FLM 방법으로 음원의 임피던스 측정에 관하여 연구한 것으로 결과를 요약하면 다음 결론을 얻을 수 있다.

FLM에 의한 Prasad의 측정 방법은 음압 측정상의 dynamic range 문제를 피할 수 있어서 Munjal 방법보다 효과적이다. 한편 임피던스의 계산에 있어서 Prasad의 방법은 $R_s \ll X_s$ 일때 많은 오차가 생기고 Coulon이 제시한 열 점성 감쇠를 감안하여도 비슷한 정도의 오차가 있다. 본 연구 결과 Prasad가 제시한 직관을 이용한 측정 방법과 Munjal이 제시한 임피던스 계산법을 조합한 FLM이 바람직한 임피던스 측정 방법인 것을 확인하였으며 음원의 기준 위치를 음원 가까이 임의의 점으로 설정하여도 삽입손실의 예측이 가능한 것을 알 수 있었다.

REFERENCE

1. M.L. Munjal, "Acoustics of ducts and mufflers", John Wiley & Sons, 1987
2. M.L.Kathuriya and M.L. Munjal, "Accurate method for the experiment evaluation of the acoustical impedance of black box", J. Acous. Soc. Am.,58, pp.451-454 (1975)
3. G. Prasad, "A four-load method for evaluation of acoustical source impedance in a duct", J. Sound and Vibration, pp.111 (1987)
4. J.M. Coulon and A.Garcia, "Some remarks about the four-load method for measuring source impedance", J. Sound and Vibration, 164(2), pp.375-379, 1993