

재생형 송풍기를 위한 소음기 개발

전관호* · 이 찬**† · 길현권**

Development of a Muffler Attached to a Regenerative Blower

Kwan Ho Jeon*, Chan Lee**†, Hyun Gwon Kil**

Key Words : *Broadband Noise*(광대역 주파수 소음), *Discrete Frequency Noise*(이산 주파수 소음), *Noise Reduction*(소음저감), *Regenerative Blower*(재생형 송풍기), *Muffler*(소음기), *Sound Absorbing Material*(흡음재)

ABSTRACT

Regenerative blowers are recently used in various applications because of their simple structures, easy manufacturing and operation. But those generate high noise level due to their air processing unit operating with high pressure rise at low flow capacity. The noise consists of two components such as discrete frequency noise component at blade passing frequency due to rotating impellers and broadband noise component due to turbulence produced in blower. Main contribution into the high noise level is due to the discrete frequency noise component. In order to effectively reduce the noise level of regenerative blowers, a perforated dissipative tube mufflers have been designed and manufactured in this paper. Its experimental test showed that 23 dB of noise reduction has been achieved by attaching the muffler to the regenerative blower. Noise level of 85 dBA generated by the regenerative blower was reduced to noise level of 62 dBA.

1. 서 론

재생형 송풍기는 작은 유량에서 높은 압력을 나타내는 성능특성을 갖고 있으므로 연료전지, 공기순환장치 등의 산업 현장에서 전반에 걸쳐 폭 넓게 사용되고 있다. 재생형 송풍기는 회전하는 원판의 양쪽에 다수의 임펠러(Impeller)와 임펠러를 감싸고 있는 고정된 사이드 채널(Fixed side channel) 사이를 통과하는 유체 운동량교환(Momentum exchange)에 의해 압력이 상승한다. 그러나 이때 임펠러와 채널 사이에 형성되는 난류 유동에 의해 주로 압력손실이 생기고 간극(Clearance)을 통한 누설유동이 발생하며, 이러한 현상들로 인해 재생형 송풍기의 단점인 성능저하와 낮은 효율이 야기 되는 단점이 있다.⁽¹⁾

재생형 송풍기의 또 다른 단점으로는 상대적으로 높은 소음 발생이다. 이러한 소음은 높은 압력과 고속의 회전수에 의하여 특정 주파수에 집중되는 이산주파수 소음(Discrete frequency noise)과 재생형 송풍기의 내부에 발

생되는 난류에 의하여 넓은 주파수 대역에 분포하는 광대역 주파수 소음(Broadband frequency noise)의 형태로 방사 된다.

본 연구에서는 연료전지에 사용되어질 송풍기에 적합한 소음기 개발 연구를 수행하였다. 설계개념으로서 요구되는 송풍기의 압력손실 저하 성능을 만족하면서 송풍기 소음 특성인 이산주파수 소음과 광대역주파수 소음을 최소화하기 위해, 다공 흡음형 소음기를 설계 및 제작하였다. 실험 결과로부터 다공 흡음형 소음기가 재생형 송풍기의 소음을 효과적으로 저감할 수 있음을 보였다.

2. 재생형 송풍기 모델 및 소음특성

본 연구에서 채택한 재생형 송풍기는 연료전지용 송풍기로서, 설계는 FANDAS-Regen코드를 사용하여 이루어졌다. 또한 설계된 재생형 송풍기에 저소음화 설계개념을 추가적으로 고려하였으며 대략적인 설명은 다음과 같다.^(2,3)

* 수원대학교 대학원(Graduate school, the University of Suwon)

** 수원대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, the University of Suwon)

† 교신저자, E-mail : clees@suwon.ac.kr

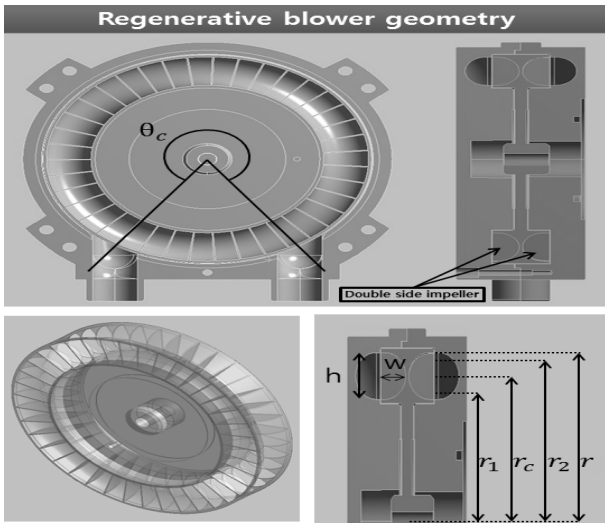


Fig. 1 Regenerative blower geometry

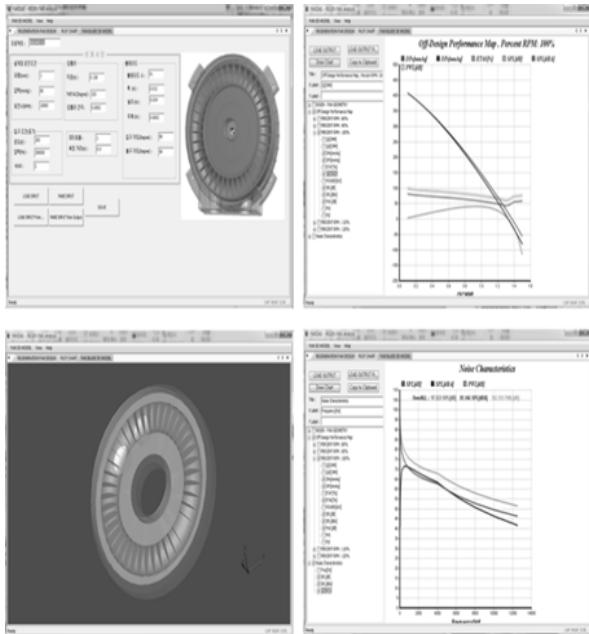


Fig. 2 FANDAS design and analysis results

2.1 재생형 송풍기 모델

재생형 송풍기 모델은 FANDAS-Regen 프로그램을 이용하여 Fig. 1과 같은 설계변수를 결정하였고, 그에 상응하는 송풍기의 3차원 형상은 Fig. 2와 같다.

2.2 재생형 송풍기의 소음저감 개념

2.1절에서 구해낸 송풍기 형상을 토대로 임펠러와 임펠러 사이에서 발생하는 압력차에 의한 소음인 이산주파수 소음을 저감시키기 위하여 위상차 원리를 이용한 저소음 설계 개념을 임펠러에 적용하여 제작하였다. 임펠러의 형상은 Fig.

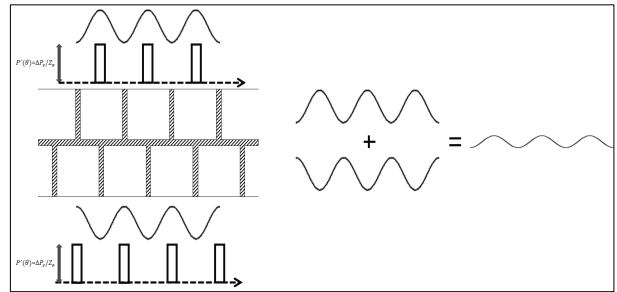


Fig. 3 Low-noise design concept

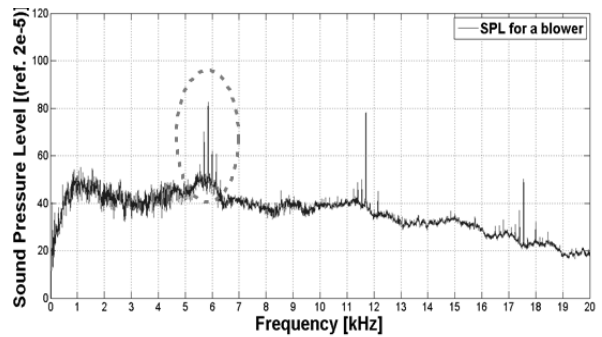


Fig. 4 Noise spectrum of the present regenerative blower

3의 개략도에 도시되어 있는 것처럼 임펠러 블레이드가 양쪽에 제작된 더블사이드형이다. 저소음 설계 개념은 앞면의 임펠러 블레이드 사이 중앙에 뒷면의 임펠러 블레이드를 위치하게 하여 양쪽의 임펠러 블레이드 사이에서 발생하는 압력차에 의한 소음의 위상차가 180° 차이 나게 제작을 하여 서로 소음이 상쇄되어 이산주파수 소음을 저감시키는 저소음 설계 개념이다.⁽³⁾

2.3 재생형 송풍기 소음특성

재생형 송풍기의 소음은 회전하고 있는 임펠러 블레이드 사이의 압력 차이에 의해 발생하고 회전수와 임펠러의 개수의 곱에 비례하는 킷 통과 주파수(BPF: Blade Passing Frequency)에서 관찰되는 이산주파수소음(discrete frequency noise)과 임펠러와 사이드채널 내부에서 발생하는 난류에 의해 야기되는 광대역주파수소음(broadband frequency noise)로 구분된다.

Fig. 4는 본 연구에서 설계된 재생형 송풍기의 소음주파수스펙트럼을 보여주고 있으며, 전체 소음이 이산주파수 소음(점선부분)과 광대역주파수 소음 성분에 의해 구성됨을 알 수 있다. 전체소음레벨은 85 dB로 나타나고 있으며, 저소음 설계 개념을 적용함으로써, 22 dB 저감된 결과이다. 그러나 재생형 송풍기의 전체소음레벨 85dB도 작업환경 면에서 상당히 높은 소음이므로, 소음을 부차적으로 추가적인 소음 저감이 매우 필요한 것으로 판단된다. 소음 측정을 위하여서

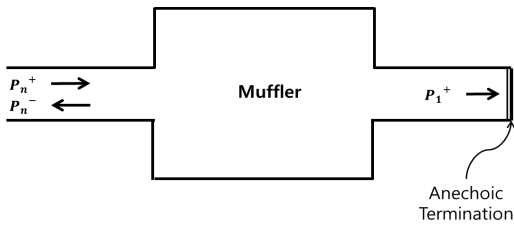


Fig. 5 Transmission loss

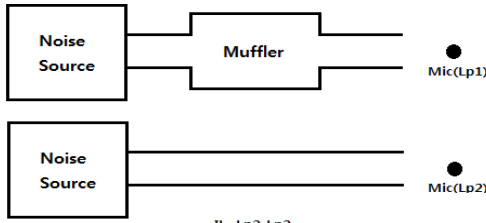


Fig. 6 Insertion loss

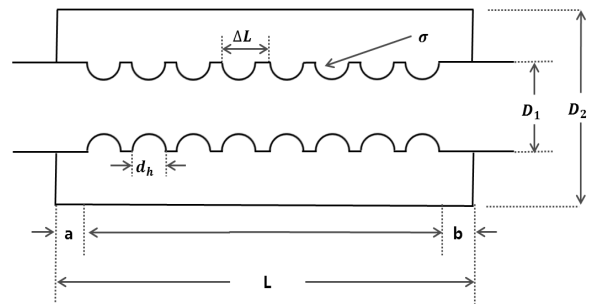


Fig. 7 Perforated muffler

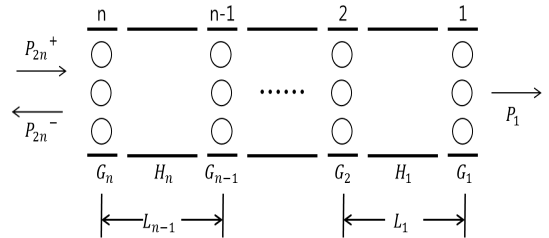


Fig. 8 Perforated muffler schematic diagram

는 G.R.A.S. 46AE 마이크로폰과 B&K Pulse 신호분석기 그리고 동시에 RION NA-27 정밀소음계를 사용하였으며, 측정 오차는 ±1 dB이다.

3. 다공형 소음기 설계

3.1 소음기 이론

3.1.1 투과손실 및 삽입손실

투과손실은 음향 에너지 손실을 표현하는 것으로서 소음기로 입사하는 음의 파워레벨(L_{wi})과 투과음의 파워레벨(L_{wt})의 차로써 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$TL = L_{wi} - L_{wt} = 10 \log \left| \frac{W_i}{W_t} \right| \quad (1)$$

이때 W_i 는 입구 측 음향파워, W_t 는 출구 측 음향파워를 의미한다.

Fig. 5와 같이 입구 측 단면적 s_n 과 출구 측 단면적 s_1 이 같을 경우 투과손실은 입사되는 음압의 복소진폭 P_n^+ 과 투과된 음압의 복소진폭 P_1^+ 만으로 다음 식 (2)로 표현된다.

$$TL = 10 \log \frac{|P_n^+|^2}{|P_1^+|^2} = 20 \log \left| \frac{P_n^+}{P_1^+} \right| \quad (2)$$

삽입손실은 Fig. 6과 같이 음향파워가 일정한 경우 소음기가 있을 때와 없을 때에 대해서 방사되는 음의 파워레벨(PWL)의 비를 데시벨(dB)로 나타낸 것이다. 삽입손실의 경우 무반사단을 설치할 필요가 없고, 실제 설치된 연결 관이

모두 고려되기 때문에 실제적인 값에 가깝다고 할 수 있다.

입·출구의 단면적이 같고 무반사단일 경우 투과손실과 삽입손실은 같아지게 된다. 소음기의 해석을 위해서 이 조건을 가정하고 투과손실을 고려하여 설계를 진행하였다.

3.1.2 전달행렬법(Transfer Matrix Method)

전달행렬법(Transfer matrix method) 또는 4단자 정수법(Four-pole parameter method)은 소음기의 성능을 구하는데 유용하게 사용할 수 있다.

본 소음기 모델은 다공형 소음기로서 Fig. 7과 같다.

여기서 D_1 , D_2 는 다공관, 확장관의 직경을 나타내고, σ 는 공극률을, L 은 다공관 길이, d_n 는 공극의 직경을 의미한다.

소음기의 입구에서부터 출구까지 소음기내부의 각 요소들 사이에서 임피던스 부정합이 일어나는 곳을 경계로 구간을 나누고 각 구간은 선형으로 전달행렬을 나타낼 수 있다. 최종적으로는 음장의 연속조건을 이용하여 소음기 요소의 전체전달행렬을 나타낼 수 있으며, 이를 통해 소음기의 감음특성을 나타낼 수 있다. 소음기에서의 다공 및 직관 부분을 Fig. 8과 같이 모형화 할 수 있다.

본 논문에서 고려하는 다공형 소음기(Fig. 7)에서 평면파 전파를 가정하여, Fig. 8의 소음기의 음원단과 출구단의 압력($P_{1,2n}, P_{1,1}$)과 체적속도($U_{1,2n}, U_{1,1}$)와의 관계는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{1,2n} \\ U_{1,2n} \end{bmatrix} = [G_n] \prod_{j=1}^{n-1} [H_j] [G_j] \begin{bmatrix} P_{1,1} \\ U_{1,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{1,1} \\ U_{1,1} \\ P_{2,1} \\ U_{2,1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $(P_{2,2n}, U_{2,2n})$ 과 $(P_{2,1}, U_{2,1})$ 은 확장관 양 끝단에서의 압력과 체적속도를 나타내며 $[G_j]$ 와 $[H_j]$ 는 공극부분과 직관부분의 전달행렬을 각각 나타낸다. 이때 행렬요소 $[T_{ij}]$ 는 문헌^(5, 6, 7)을 참고할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{1,2n} \\ U_{1,2n} \end{bmatrix} = [F] \begin{bmatrix} P_{1,1} \\ U_{1,1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (3)을 소음기 입구와 출구의 압력과 체적속도 관계로 정리하면 식 (4)와 같다. 여기서 행렬 $[F]$ 는 전달행렬, 즉 4 단자 행렬을 나타낸다. 그러므로 전달행렬 $[F]$ 는 다공형 원통의 직관, 공극부분의 영향, 확장관의 영향을 포함하며, 투과손실 값은 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$TL = 20 \log \left(\frac{1}{2} |F_{11} + Z_2^{-1} F_{12} + Z_1 F_{21} + F_{22}| \right) \quad (5)$$

3.1.3 유한요소법(Finite Element Method)

소음기 유체 영역에서의 파동방정식은 주어진 주파수에서 헬름홀츠 방정식으로 나타내어진다.⁽⁸⁾ 주어진 소음기 내부 유체 영역을 유한요소로 나누어 고려할 때, 해당 방정식은 다음과 같은 선형 방정식으로 고려된다.

$$[A]\{P\} = \{f\} \quad (6)$$

여기서 $\{f\}$ 는 가진 압력조건으로 입력단에서의 단위압력 분포를 나타낸다. 투과손실은 식 (5)를 적용하여 구할 수 있다. 유한요소법에서는 평면파 전파뿐만 아니라 고차모드를 모두 고려할 수 있다.

3.2 다공형 소음기 분석

소음기 투과손실 해석은 전달행렬법과 유한요소법을 적용하였다. 소음기 모델로는 $D_1=0.019$ m, $D_2=0.06$ m, $L=0.083$ m을 고려하였다. 이 경우 평면파를 가정할 수 있는 차단주파수는 식 (7)과 같다.⁽⁵⁾

$$f_c = 1.22 \ c/D_2 = 6913\text{Hz} \quad (7)$$

이때 c 는 상온에서의 음속을 나타낸다.

Fig. 9는 전달행렬법과 유한요소법을 이용하여 얻은 TL의 비교 결과이며, 두 결과의 차이는 고차모드의 영향을 나타낸다. 유한요소법은 상용코드 ACTRAN⁽⁹⁾을 활용하였다.

Fig. 9에서 보듯 고차모드 영향이 공극률이 증가하고 주파수가 증가할수록 무시할 수 없음을 알 수 있다.

소음기 설계시 일반적으로 전달행렬법을 이용하지만, 송

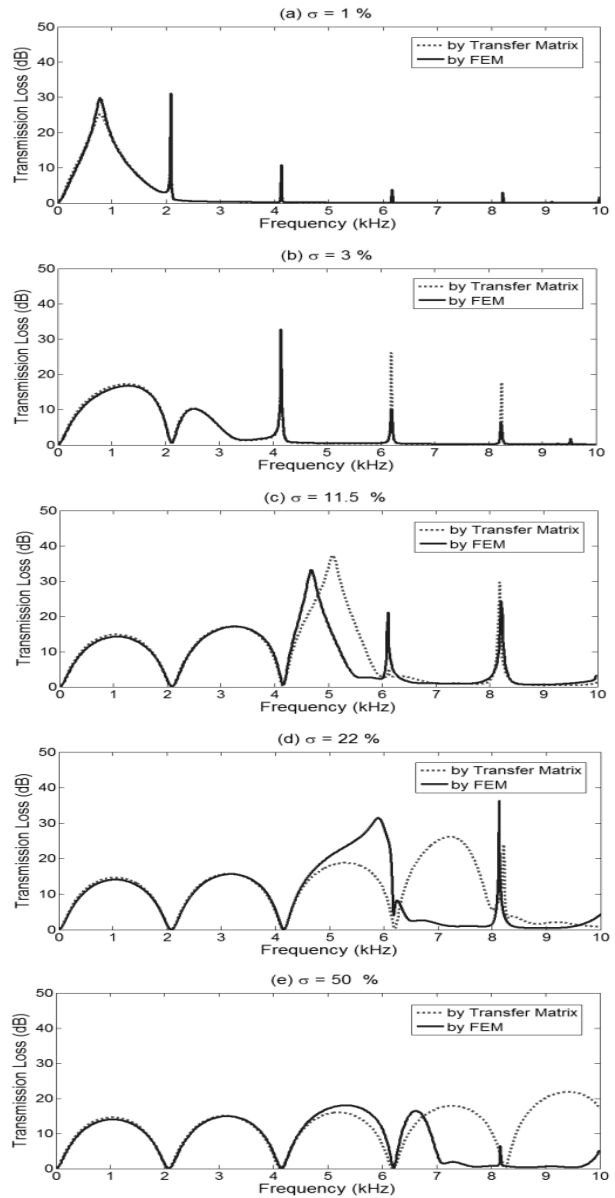


Fig. 9 Transmission loss obtained by FEM (—) and transfer matrix method (···) with dependence on the porosity

풍기 소음특성처럼 주요이산주파수 소음이 고주파인 경우는, 고차모드를 고려한 유한요소법을 적용할 필요가 있다.

3.3 다공형 소음기 설계개념

다공형 소음기의 투과손실 특성은 관의 음향모드 및 공극에 의한 공명현상과 확장관에 의한 영향이 복합된 현상으로 나타나게 되며, 설계시 이러한 점을 고려할 수 있다.

Fig. 9 (a)와 같이 다공률이 낮을 때는 음향모드에 의한 영향과 중·고주파수에서의 공극률에 의한 영향을 명확히 구분할 수 있다. 그러나 다공률을 높이면, Fig. 9 (b)(c)(d)에 보여지는 것과 같이, 주파수 대역에서 두 영향의 복합된 형

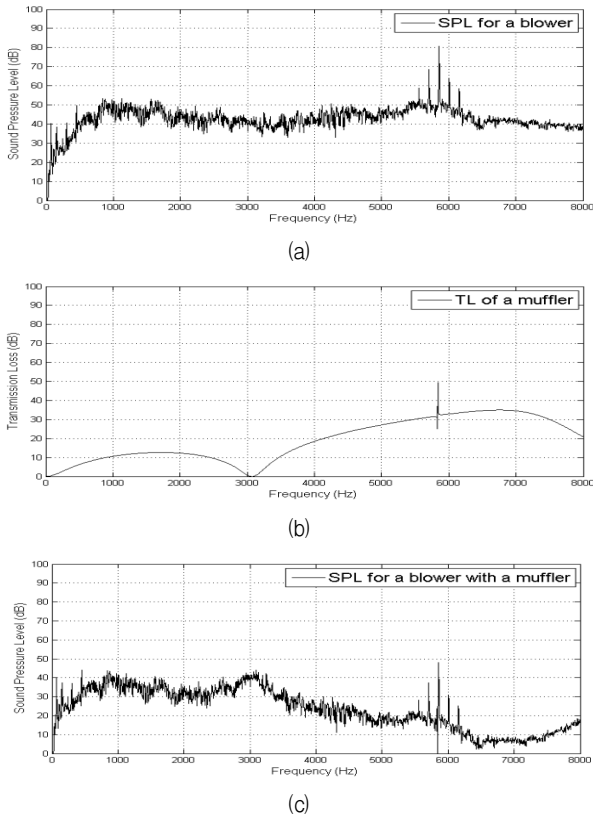


Fig. 10 Performance of regenerative blower and muffler system
(a) SPL for a blower, (b) TL of a muffler, (c) SPL for a blower with a muffler

태로 상대적으로 높은 TL값이 형성된다. 그리고 다공률이 보다 커질수록 이러한 높은 TL값을 나타내는 현상은 고주파수로 이동하게 되면 해당 주파수 이하 영역에서는 단순 확장관의 TL특성을 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 9 (e)). 이런 특성을 이용하여 원하는 주파수 대역에서 큰 TL값이 형성 되도록 관의 길이와 다공률을 구할 수 있다.

4. 다공형 소음기 설계 및 성능예측

본 연구에서 고려하는 재생형 송풍기용 소음기는 다공형 소음기로서, 설계변수 결정은 다음과 같다. 입 출구관 및 다공관 직경은 송풍기의 입 출구 직경으로 고정되고, 확장관 직경은 차단주파수 $f_c=8000 \text{ Hz}$ 를 고려하여 $D_2=0.052 \text{ m}$ 로 설계된다. 그리고 다공관의 공극률은 3.3절의 설계개념을 적용하여, 이산주파수 소음을 효과적으로 저감할 수 있도록 결정하였다. 이러한 제약을 갖는 소음기의 소음저감 특성은 다음 Fig. 10과 같이 분석된다.

주된 소음원인 5.8 kHz 부근의 이산주파수 소음을 효과적으로 저감하고 있음을 알 수 있다. 저감 결과로 소음기 부착 전 전체소음레벨 85 dB(A)에서 66 dB(A)로 약 19 dB(A)의 소음저감 효과가 예측된다.

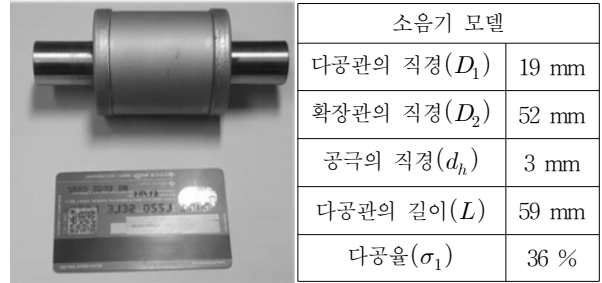


Fig. 11 Perforated muffler

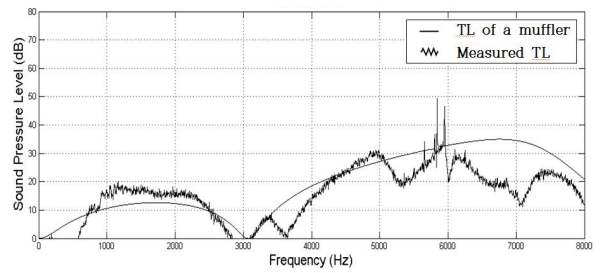


Fig. 12 Transmission loss muffler

5. 소음기 실험 및 결과분석

5.1 다공형 소음기 효과

설계안대로 소음기를 제작하였으며(Fig. 11), 크기 면에서도 비교적 소형(신용카드 크기)화를 이루었다.

실제 제작된 소음기(흡음재 무)를 송풍기에 부착하여 성능평가를 진행한 결과 Fig. 12와 같은 TL특성, 즉 소음기를 장착함으로써 줄어들게 되는 소음 레벨 차이에 대한 특성을 확인하였다. Fig. 12에서 보여지듯이, 투과손실의 예측과 실험값이 비교적 잘 일치함을 확인 할 수 있다. 다공형 소음기가 5.8 kHz 부근 이산주파수 소음성분을 현저히 저감시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

5.2 흡음재 효과

Fig. 12에서 보여지듯이, 다공형 소음기의 TL값이 적은 3kHz에서의 흡음성능을 고려한 3가지 소재(PU foam 32 k, Melamine foam G, Websuler 300 G)를 흡음재로 선택하였다.⁽¹⁰⁾ 흡음재의 성능평가 실험을 수행하였으며, 흡음재 자체만의 TL값은 Fig. 13과 같다.

흡음재 3종류 모두 3 kHz와 약 8 kHz 이상의 고주파수 영역의 광대역주파수 소음 저감에도 효과가 있음을 알 수 있다.

5.3 다공 흡음형 소음기 효과

앞서 5.1.과 5.2.절에서 언급한 소음기와 흡음재를 결합한

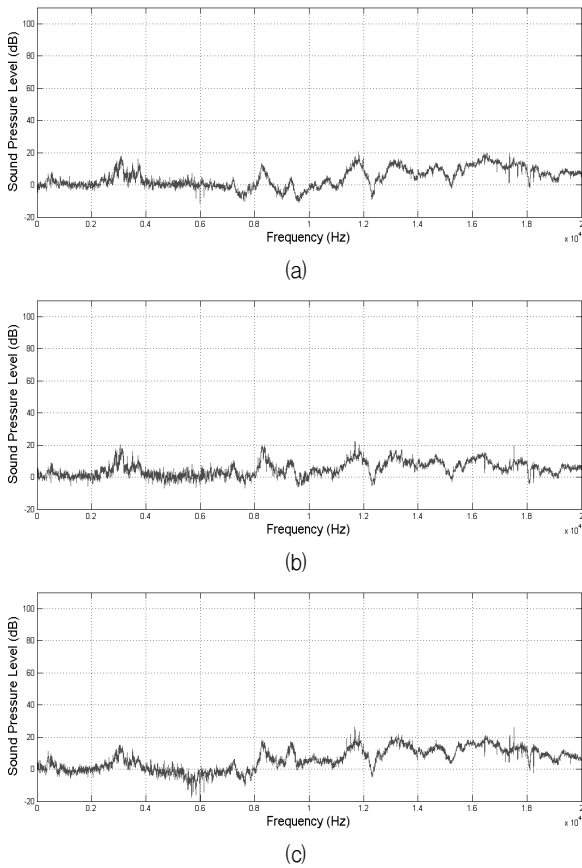


Fig. 13 Sound absorbing performance

(a) PU foam 32 k, (b) Melamine foam G, (c) Websuler 300 G

다공 흡음형 소음기를 송풍기에 부착하여 소음을 측정하였다. PU foam 32 k, Melamine foam G, Websuler 300 G 흡음재의 경우 각각 전체소음레벨 65 dB, 62 dB, 70 dB로 소음측정 결과를 얻었다. 가장 소음저감이 좋은 Melamine foam G 적용 다공 흡음형 소음기를 부착한 송풍기의 소음특성은 Fig. 14와 같다.

6. 결론

본 논문에서는 재생형 송풍기에 적합한 소음기 개발 연구를 수행하였다. 재생형 송풍기의 소음특성인 이산주파수 소음과 광대역주파수 소음을 저감하고자, 다공 흡음형 소음기를 설계 제작하였다. 다공형 소음기 설계로 이산주파수 소음 성분을 현저히 저감시켰고, 동시에 흡음재를 통하여 고주파수영역의 광대역 소음 성분을 추가적으로 저감시킬 수 있었다. 제작된 소음기를 재생형 송풍기에 부착하여 소음 성능을 평가한 결과로 23 dB의 송풍기 소음을 저감하였다.

이러한 연구결과로서, 재생형 송풍기의 소음을 저감시키기 위하여 다공 흡음형 소음기가 매우 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

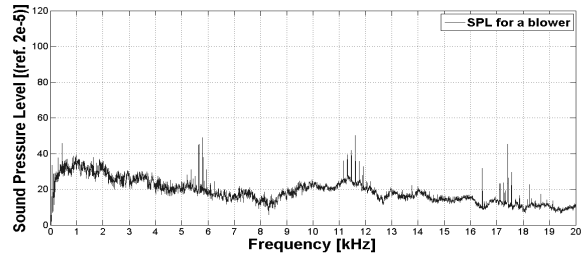


Fig. 14 Experiment result of regenerative blower and muffler system

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KEPTEP)의 지원을 받아 수행한 한국형 300 MW급 IGCC 실증플랜트기술개발사업 연구 과제입니다(No. 2011951010001B).

References

- (1) Mura, M. and Badami, M., 2012, "Leakage Effects on the Performance Characteristics of a Regenerative Blower for the Hydrogen Recirculation of a PEM Fuel Cell," Energy Conversion and Management, Vol. 55, pp. 20~25.
- (2) 이찬, 길현권, 김강천, 김준곤, 마재현, 정경호, 2013, "재생형 송풍기의 공력음향학적 성능 해석 방법," 한국유체기계학회논문집, Vol. 16, No. 2, pp. 15~20.
- (3) 김준곤, 이광영, 이찬, 길현권, 정경호, 황상문, 2014, "연료전지용 저소음 재생형 송풍기의 개발," 한국유체기계학회 Vol. 17, No. 2.
- (4) M. L. Munjal, 1987, "Acoustics of Ducts and Mufflers," John Wiley & Sons.
- (5) 방국호, "다공관 소음기의 투과손실에 관한 실험적 연구," 국민대학교 박사학위 논문.
- (6) Sullivan, J. W., 1979, "A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Components. I, Theory," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 66, No. 3, pp. 772~778.
- (7) Sullivan, J. W., 1979, "A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Components. II, Applications," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 66, No. 3, pp.779~788.
- (8) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, 1982, "Fundamentals of acoustics," John Wiley & Sons.
- (9) ACTRAN User Manual, Version 13.0, Msc Software Company.
- (10) NYCO, Nam. Yang Novitech CO.,LTD. Catalog.