

가정용 산소발생기를 위한 스윙링 유동을 이용한 고성능 흡기 소음기 개발

Development of High Performance Intake Silencer Using Swirling Flow for Household Oxygen Generators

김 성 훈*. 이 광 세*. 최 용 복**. 정 철 응†

Seong-hun Kim, Gwang-se Lee, Yong-bok Choi and Cheolung Cheong

(Received August 26, 2014 ; Revised October 6, 2014 ; Accepted October 6, 2014)

Key Words : Intake Silencer(흡기소음기), Noise(소음), Transmission Loss(투과손실), Pressure Drop(압력강하)

ABSTRACT

High performance intake silencer with low pressure drop are developed for a household oxygen generator. First, the acoustic power of the target oxygen generator are experimentally evaluated according to ISO code. Then, the transmission loss of and the flow characteristics inside the existing intake silencer are predicted and analyzed. On a basis of these results, two intake silencers are proposed, which are designed to induce the swirling flow inside the intake silencer and thus to reduce the flow loss. The predicted TL and the pressure drop for these two new silencers are compared to the existing one, which shows that the proposed ones have higher TL as well as low pressure drop. The reason for these improvements are explained by investigating the flow characteristics of the new silencers in detail.

c : 음속
TL : 투과손실

기 호 설 명

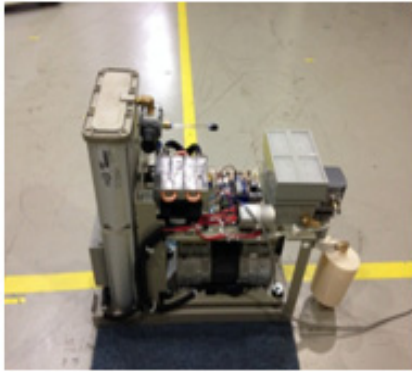
SPL : 음압레벨
PWL : 음향파워레벨
 θ : 입구단의 각도
P : 음압
v : 매질의 속도
W : 음향파워
I : 음의 세기
S : 단면적
 ρ_0 : 밀도

1. 서 론

산소발생기는 온도유지나 환기를 위한 공조시스템의 한 종류로 용도에 따라 크게 산업용, 수산용, 의료용, 가정용으로 분류할 수 있다. 기존에 생산되는 제품의 대부분은 수산용, 의료용 그리고 산업용으로 사용되며, 최근 새로운 시장 개척을 위하여 가정용 산소발생기 보급을 시도하고 있다. 가정용의 경우 특히 사용자들에게 직접 노출되기 때문에 소음 성능이 중요한 지표 중 하나가 된다. 또한 산소발생

† Corresponding Author ; Member, Pusan National University
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel : +82-51-510-2311, Fax : +82-51-514-7640
* Pusan National University
** Inc. NFeco

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering



(a) Module of oxygen generator



(b) Silencer

Fig. 1 Module of an oxygen generator and the existing silencer

기는 에어컨이나 공기정화기와 같은 공조시스템과 달리 압축기를 내부에 포함하고 있기 때문에 소음 면에서 다른 공조기와 비교할 때 보다 약조건을 가지고 있다. 따라서 성공적인 가정용 산소발생기 보급을 위해서는 저소음화가 선행되어야 한다.

이 논문에서는 산소발생기의 저소음화 기술개발의 일환으로 기존 흡입 소음기를 개선하였다. 대상 산소발생기는 압축기를 비롯한 내부 유동 소음원이 흡입로를 통해 소음이 외부로 전파하고, 소음기를 통해 이를 저감하고 있다. 산소발생기 내 모듈과 흡입구에 부착한 기존 소음기는 Fig. 1과 같다. 이 원형 소음기 내부에는 흡입 공기 정화를 위한 헤파필터(hepa filter)가 설치되어 있다.

소음기의 범용성으로 인해 소음기 성능 향상을 위한 많은 연구가 진행되었다. 정경훈 등은⁽¹⁾ 소음기 최적화 설계를 통한 각 설계요소들의 성능에 대한 영향을 분석하였다. 주재만은⁽²⁾ 소음기의 방사특

성을 예측하고 실험으로 분석하였으며, 소음기 내 유동특성이 소음기의 성능에 관여한다는 것을 실험과 해석으로 확인하였다. 서영수는⁽³⁾ 유속을 고려한 소음기의 음향해석프로그램을 개발하고 유속에 대한 소음기의 공진주파수와 투과손실의 변화를 연구하였다.

이 연구에서는 산소발생기에 설치된 기존 소음기 내부의 유동 특성을 분석하고 이를 개선하여, 기존의 유동손실을 저감하는 동시에 소음기의 성능을 향상하였다. 세부적인 방사소음 분석은 2.1절에서 확인할 수 있고, 기존 소음기 유동 분석은 2.2절에 설명하였다. 각 분석에 근거하여 기존 소음기의 흡입 유로를 개선하였고, 그에 관련된 특성은 3절에서 실험과 수치해석을 통하여 분석하였다. 끝으로 4절에서, 시제품을 만들어 흡입유로 개선에 따른 소음기의 성능 향상을 실험적으로 확인하였다.

2. 기존 소음기 분석

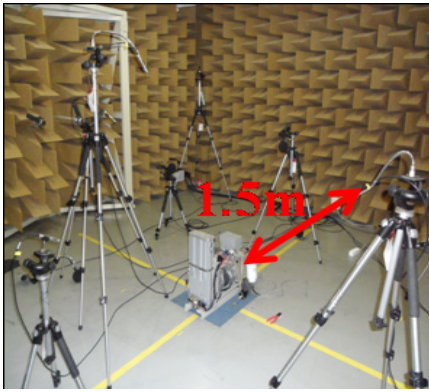
2.1 소음 특성 분석

흡입기 시스템에 적용한 기존 소음기는 팽창형 소음기(expansion silencer)이고 내부에 공기 정화를 위한 원형 헤파필터가 장착되어 있다.

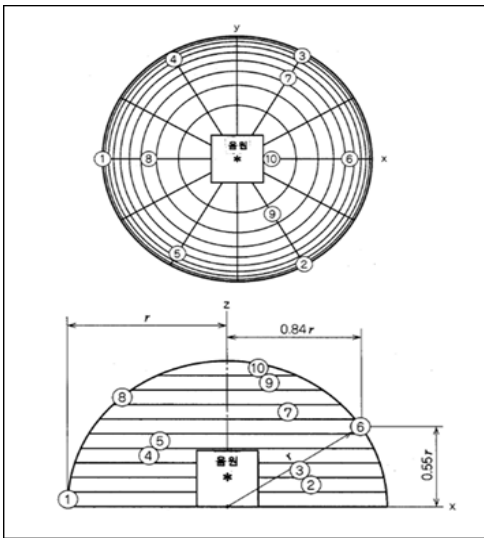
연구 대상 흡입기 시스템의 방사소음 특성과 소음기의 삽입손실 특성 분석을 위해 Fig. 2와 같이 반무향실에서 방사소음을 측정하였다. 방사소음 측정은 KS A ISO 3744에 의거하여 물체로부터 1.5 m 거리에서 10개의 microphone으로 측정하였다.

Fig. 2의 (a)는 측정 시 거리를 나타내며, (b)는 KS A ISO 3744에 따른 10개의 microphone 위치를 나타내고 있다.

측정 시 주파수 해상도(Δf)는 1Hz이며, 관심 주파수는 20~6400 Hz이다. 실험조건은 기존 소음기 탈부착 조건과 소음기 부착 시 내부 헤파필터의 설치 유무이다. Fig. 3은 기존 소음기 탈부착 시 방사소음의 스펙트럼 특성을 비교하였다. 전 관심 주파수 영역에서, 소음기를 부착하였을 때 방사소음을 저감시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 28 Hz를 기본주파수로 하는 순음소음이 방사소음에 주요한 성분으로 작용함을 확인할 수 있다. Fig. 4는 소음기 내 헤파필터 유무에 따른 방사소음의 스펙트럼 특성이다. 헤파필터는 3 kHz 이상 영역에서의 소음저감에 주로

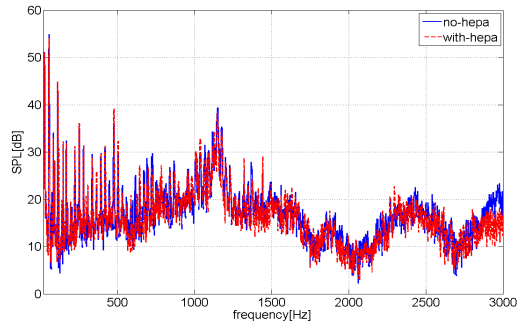


(a) Distance between oxygen generators and microphone

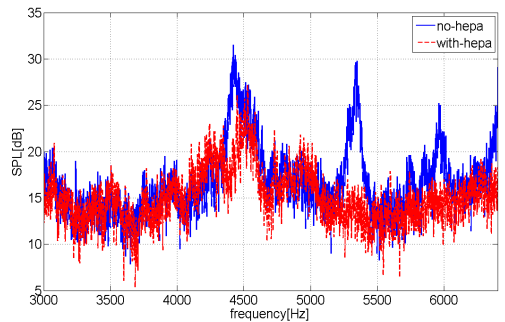


(b) Placement of microphone at KS A ISO 3744

Fig. 2 Schematic description of measurement in hemi-anechoic room



(a) 20~3000 Hz



(b) 3000~6400 Hz

Fig. 4 Comparison of measurements with and without hepa-filter

상관한다는 것을 확인할 수 있다.

이에 근거하여 소음기 형상에 따른 직접적인 소음저감은 3 kHz이하의 영역대에서 주요함을 추측할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 헤파필터를 제외한 소음기 성능개선에 초점을 두고, 3 kHz 이하 영역에서의 삽입 또는 투과 손실 개선을 목표로 하였다.

2.2 유동 특성 분석

기존 소음기 내부 유동의 특성을 분석하기 위하여 상용 CFD 해석프로그램인 ‘Fluent’를 이용하였다. 3차원 비압축성 정상상태 유동을 가정하였고 난류모델은 $k-\omega SST$ 를 사용하였다. 압축기의 흡입 시 소음기 출구단의 유량조건은 산소발생기의 산소 방출유량(oxygen flow)인 7 lpm으로 고정하였다. 그리고 흡입유로 입구부는 압력조건으로 대기압으로 설정하였다.

Fig. 5에서 소음기의 내부구조와 대략적으로 예측되는 유로, 수치해석 시 경계조건을 도식적으로 나타내고 있다. 소음기 내 유동은 압축기 가동 시 열린

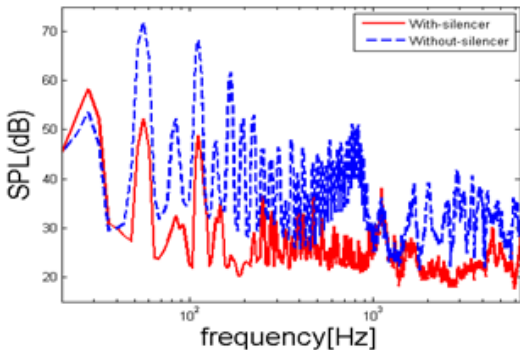


Fig. 3 Comparison of measurements according to with and without the silencer

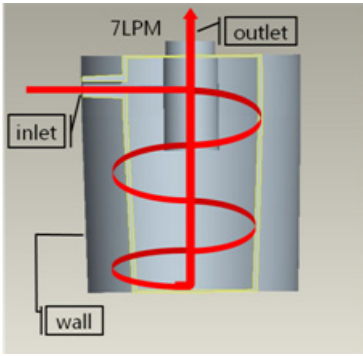


Fig. 5 Boundary conditions in numerical simulation

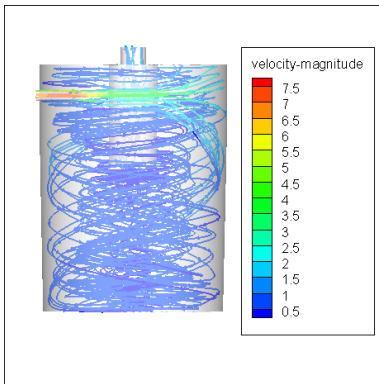


Fig. 6 Path-line from inlet to outlet in original silencer

공간의 입구로부터 흡입되어, 소음기 바닥을 지나고, 압축기와 연결된 출구로 진행된다.

내부 유동 분석은 정상상태(steady state) 해석을 바탕으로 수행하였다. Fig. 6은 기존 소음기 내 유동의 유적선(path-line)을 나타내고 있다. 유적선이 규칙적인 모양을 보이지 않고 입구 유로로 들어온 다음 랜덤하게 퍼지면서 다양한 각을 가진 유적선으로 분리되고 다시 소음기 바닥면으로 진행 한 후 소음기 출구 쪽으로 배출되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 여러 유적선 중 일부가 소음기 바닥이 아닌 위쪽으로 향하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기준 경로인 ‘흡입구-소음기 바닥-출구’ 경로와 상관없는 2차 흐름(secondary flow)로 고려할 수 있다.

다음으로, Fig. 7에서 소음기 내부 표면상 압력 분포를 나타내었다. 흡입구를 지난 유동이 내부 표면과 부딪히는 지점에 상대적으로 큰 압력장이 형성되고, 이 압력장은 주로 상부구조로 분산하는 것이 확

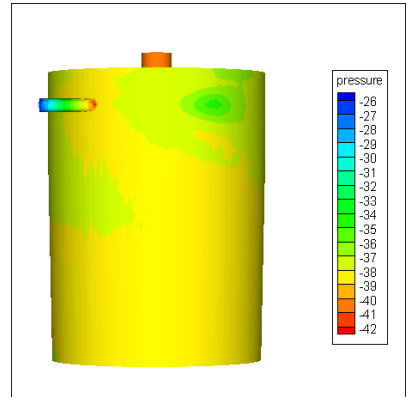


Fig. 7 Distribution of static pressure on surface of original silencer

인된다. 유동 해석을 통해 유동흐름 개선을 위한 방법을 세 가지로 분류하여 아래에서 정리하였다.

- (1) 흡입구 각도 조절을 통한 유적선 제어에 근거한 2차 흐름 최소화
- (2) 입구 덕트의 소음기 단면형상의 접선방향 이동을 통해 내부 집중 표면 압력장을 분산시켜 유동 에너지 손실 최소화.
- (3) 사이클로이드(cycloid) 곡선을 접목한 흡입 유로 개선

위 세 가지 개선 목적을 고려하여, 기존 소음기의 형상을 수정한 새로운 설계안을 제시하고 그에 따른 유동 특성과 소음 성능을 다음의 3절에서 기술한다.

3. 개선 소음기 분석

3.1 개선 소음기 내 유동 특성 분석

기존 소음기의 경우 Fig. 6과 같이 2차 흐름을 야기하는 유적선이 형성된다. 이를 최소화하기 위해, Fig. 8과 같이 흡입 유로의 각도를 조절하였다. 이를 통해, 입구단에서 시작하는 유적선이 내부의 스월링(swirl)유동을 형성 할 때, 2차 흐름을 감소시켜 유동이 보다 원활 하도록 하였다. 입구는 두 각도 ($\theta = 30^\circ, 45^\circ$)로 설정 하였다. 30° 는 유동이 벽에 충돌하는 지점과 2차 흐름의 방향을 고려한 값이며 45° 는 1.5배를 하여 각도 변화에 대한 경향성을 알아보기 위한 값이다.

흡입유로의 방향을 소음기원형단면의 접선방향으로 이동하였다. 흡입유로의 각도 조절과 접선방향

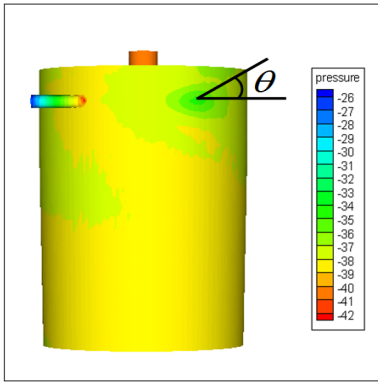
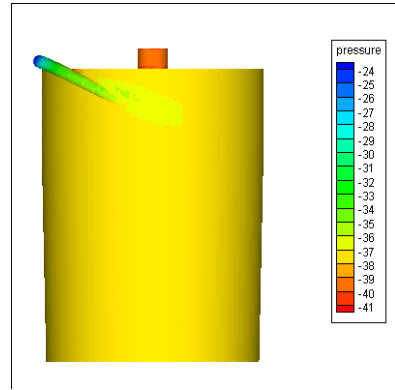
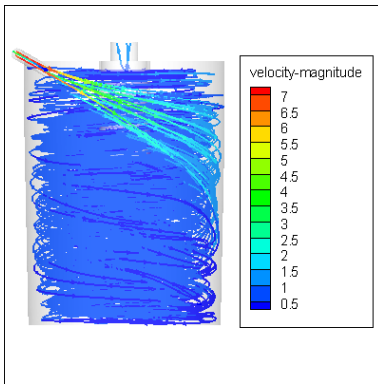


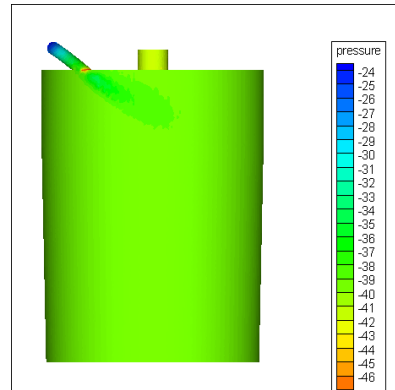
Fig. 8 Schematic description of angle



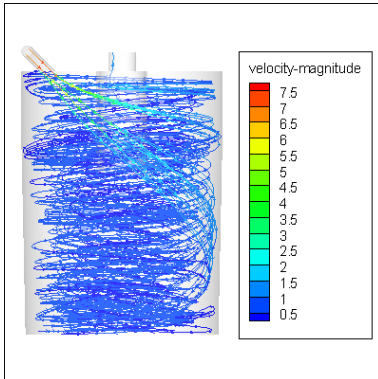
(a) $\theta = 30\text{deg}$



(a) $\theta = 30\text{deg}$



(b) $\theta = 45\text{deg}$



(b) $\theta = 45\text{deg}$

Fig. 10 Distribution of static pressure on surface of developed silencers

해석한 결과를 제시하고 있다. 두 유로 각도에 대응하는 유적선이 유동 주방향으로 형성되었고, 흡입구 단 위에 형성된 2차 흐름이 감소하였다는 것을 확인할 수 있다. 이 두 가지 모델은 흡입유로를 보다 소음기 접선 방향에 위치 시켜, 흡입유로를 떠난 유동과 소음기 내부벽면 사이의 충돌을 완화 하였다. Fig. 10에서 예측한 압력분포를 도시하였는데, Fig. 7과 Fig. 10을 비교하면, 흡입유로 수정에 따라 기존 소음기 내부의 집중압력장이 보다 완만한 분포로 변한 것을 확인할 수 있다. 이는 내부 유동이 전체 구조에 맞는 유로를 형성하여 보다 자연스러운 유적선을 이루기 때문인 것으로 추측한다.

Fig. 11은 기존 그리고 흡입유로 수정 모델에 대한 내부 유동 내 난류에너지 분포를 나타내고 있는데, 보다 완만한 유동장을 형성시키는 수정 모델들이 보다 낮은 난류에너지 분포를 가지는 것을 확인

Fig. 9 Pathline from inlet to outlet in developed silencers

으로의 이동 시 유로 형상은 사이클로이드 형상을 기본으로 하였다. 각 경우는 아래에서 'case30'과 'case45'로 명명하였다.

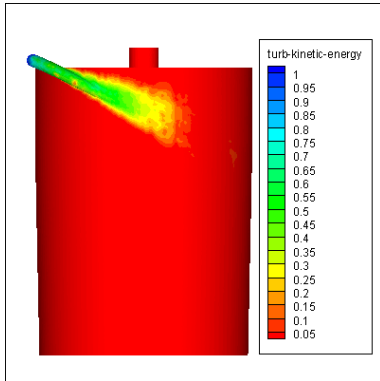
Fig. 9에서 두 가지 제시한 모델에 대하여 유동

Table 1 Comparison of mean turbulent kinetic energy

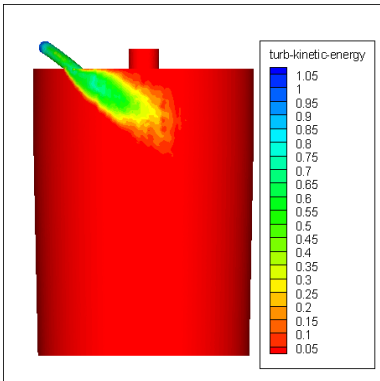
	Original	Case30	Case45
Turbulent kinetic energy (m^2/s^2)	0.0162328	0.007807	0.007581

Table 2 Comparison of pressure drop

	Original	Case30	Case45
Pressure drop (Pa)	29.89	29.37	31.68



(a) $\theta = 30\text{deg}$



(b) $\theta = 45\text{deg}$

Fig. 11 Distribution turbulent kinetic energy in silencer for each design

할 수 있다. 소음기의 평균난류에너지를 비교해 보면 기존의 소음기보다 절반으로 감소한 것을 Table 1을 통해 알 수 있다. 난류에너지는 정성적으로 유동내 사극자 소음원을 대변하는데 이를 바탕으로 제시한 새로운 소음기 내 유동 소음원이 정량적으로 감소할 것으로 예상할 수 있다.

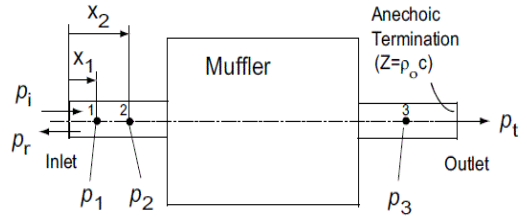


Fig. 12 Schematic description to compute TL using three point method

흡입유로의 각도 제어와 접선 방향의 이동 그리고 사이클로이드 유로 설계를 통하여 소음기 내 유동 개선을 정량적으로 평가하기 위하여 압력 강하를 계산하였고⁽⁴⁾ 그 결과를 Table 2에서 제시하였다. 미세하지만 ‘case30’ 모델이 기존 모델에 비해 1.7% 정도의 낮은 압력강하를 나타냄을 확인할 수 있다.

3.2 소음기 투과손실 분석

이 연구에서 소음해석을 위해 음향해석 상용프로그램인 LMS Virtual lab.을 이용하여 흡기소음기의 투과손실(transmission loss, 이하 TL)을 예측하였다. TL을 해석함에 있어 유동장은 고려하지 않고 해석을 진행하였다. TL은 식 (1)과 같이 소음기의 공동부를 투과한 음향파위에 대한 공동부에 입사된 음향파위의 비로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 TL &= 10\log(W_t/W_i) \\
 &= 10\log(I_t S_t / I_i S_i) \\
 &= 10\log(|p_t|^2 S_t / |p_i|^2 S_i) \text{ dB}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

i, t 는 각각 입사파와 반사파를 뜻하며 그에 따른 p 는 음압, W 는 음향파위, I 는 음의 세기, S 는 단면적을 나타낸다. TL은 ‘Three point method(이하 TPM)’를⁽⁵⁾ 이용하여 계산하였다. Fig. 12는 단순 확장 관(simple-expansion)에서 TPM을 이용한 TL을 계산시 각 변수를 도식적으로 설명하고 있다. P_i 는 P_1, P_2 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$P_i = -\frac{1}{2isink(x_2 - x_1)} [P_1 e^{ikx_2} - P_2 e^{iks_1}]
 \tag{2}$$

이를 식 (1)에 대입하여 TL을 계산할 수 있다. 식 (1)을 이용 하여 기존모델과 개선된 모델들의 TL을 예측 비교해 보았다. Fig. 13은 TL 해석 결과를

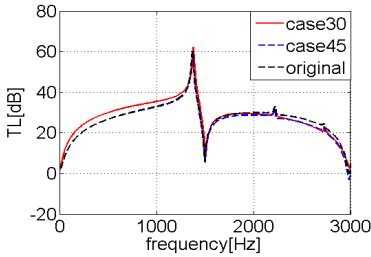


Fig. 13 Comparison of predicted TL for each silencer design

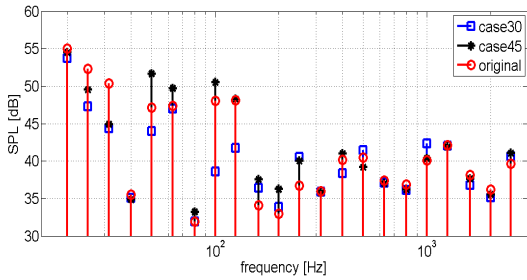


Fig. 14 Experimental comparison of 1/3 octave band levels for each silencer

Table 3 Overall sound pressure level

Model name	OASPL(dB)
Case30	58.8
Case45	60.3
Original	60.5

나타내 주고 있다. ‘case45’는 1.5 kHz 이후의 영역에서 ‘original’에 비해 소량의 TL 향상을 보이며 ‘case30’은 1.5 kHz 이하에서는 더 나은 소음저감을 보인다. 이는 흡입유로 각도에 따라 silencer의 소음저감 성능에 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며 각도에 따라 영향을 미치는 주파수 영역이 달라진다는 것을 알 수 있다.

4. 시제품 성능 시험

새롭게 제시한 소음기의 성능을 실험적으로 확인하기 위하여 3D프린터를 이용하여 시제품을 제작하였다. 2.1절에서 기술한 실험방법을 통하여 시제품의 소음 특성을 평가하였다. Fig. 14는 3 kHz이하의

영역에서의 측정된 1/3옥타브밴드이다. 기존 소음기 대비 ‘case30’의 경우, 100 Hz 이하에서 큰 소음저감이 확인된다. 소음기를 부착하고 산소발생기의 소음을 측정할 결과를 Table 3에서 제시하고 있다. 그 결과 ‘case30’의 경우 기존 모델 대비 약 1.7 dB 소음저감을 확인 할 수 있다. 또한 ‘case45’의 경우, 거의 기존 모델과 소음저감 특성이 유사하다. 이러한 실험결과는 3.2절의 수치해석을 이용한 계산한 TL 결과와 유사한 경향성을 보여준다.

5. 결론

산소발생기 흡기시스템 소음기 내부의 유동해석을 바탕으로 소음기 성능향상을 위한 흡입유로 개선을 수행하였다. 최단강하곡선인 사이클로이드 형태의 흡입유로 적용, 2차 흐름 개선을 위한 흡입유로 각도 변경 그리고 내부 유동 충돌 저감을 위한 접선 방향으로의 흡입유로 이동을 통해 흡입유로를 설계하였다. 유동해석을 통하여 개발한 흡입유로는 기존 형상이 가지는 내부 스윙링 유동을 개선하고, 그 결과로 압력손실 뿐만 아니라 사극자 소음원에 대응하는 난류에너지를 저감시킴을 확인하였다. 음향해석을 통해서도 흡입유로 각도변화를 통해 투과손실 성능도 향상됨을 확인하였다. 시제품을 만들어 수행한 실험을 통해서 흡입유로의 각도를 30° 기울인 경우, 1.7 dB의 소음저감 성능 향상을 확인하였다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구 결과입니다(연구과제번호 201407740001).

References

(1) Jung, K.-H., Lee, E.-Y., Kim, W.-Y., Lee, Y.-Y., Hwang, W.-G. and Kim, B.-H., 2002, A Study on Improvement of Efficiency of Suction Muffler for Compressor, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 000~000.
 (2) Joo, J.-M., Lee, H.-J. and Oh, S.-K., 2001, Acoustic and Flow-field Analysis of Suction Muffler in

Compressor, Journal of the KSNVE, Vol. 11, No. 3, pp. 1162~1167.

(3) Seo, Y.-S., Jeong, W.-B. and Yoon, S.-D., 2002, Acoustic Analysis of a Duct with Mean Flow by Use of FEM, Journal of the KSNVE, Vol. 12, No. 3, pp. 1026~1031.

(4) Lee, S.-W., Choi, D.-S. and Park, S.-Y., 2009, Study on the Performance Improvement of the Aftermarket Automotive Muffler, Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, pp. 2602~2608.

(5) Bilawchuk, S. and Fyfe, K. R., 2003, Comparison and Implementation of the Various Numerical Methods used for Calculating Transmission Loss in Silencer Systems, Acoustics, Vol. 64, pp. 903~916.



Seong-hun Kim received his B.S. degree in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University in 2013. He is now a M. S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His current research is on fan noise and muffler.



Gwang-Se Lee received his B.S. and M.S. degrees in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University in 2009 and 2011, respectively. He is now a Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His current research interest is on broadband noise from open rotor system including time-averaged and cyclic components.



Cheolung Cheong received his B.S. degree in Aerospace Engineering from Seoul National University in 1997. He received his M.S. and Ph.D. degrees in the Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in 1999 and 2003, respectively. He is now an associate professor at the School of Mechanical Engineering, Pusan National University in Busan, Rep. of Korea. His current research interests include compressor noise, fan broadband noise, wind turbine noise, and computational aeroacoustics.