

압축기 방사 소음 저감을 위한 머플러의 경계요소 해석

Boundary element analysis of the muffler for the noise reduction of the compressors

왕 세명* · ⁰박 종찬** · 강 정환***
S. Wang*, ⁰J. Park and J. Kang

ABSTRACT

Mufflers have been important elements in engineering practice, which reduce various kinds of noises because of its general capability of application. Many kinds of methods are applied to analyze their characteristics and to expect their performances. Some of the methods, conventionally, are based on the plane wave assumption for its simplicity. The shortcoming of this approach is its limitation of analysis ranges and parameters related with analysis and response. This research employs the boundary element method for the analysis of mufflers, which considers 3 dimensional scattering effects. This method can be used more appropriately for the analysis of mufflers because its analysis ability for higher frequency range which can be decided by the element size of the model. And, experimental analysis using a reciprocity theorem is conducted to verify the analysis results.

1. 서론

냉장고 개발에 있어서 지난 10 여년 동안의 대부분의 연구는 효율 등의 전기적 성능향상에 집중되어 왔다. 하지만 최근 소비자들의 기호가 다양화 고급화 되어지면서 디자인, 편의성, 소음 문제 등이 더욱 중요한 개발의 고려사항이 되었다.

이러한 냉장고의 가장 주요한 소음원은 압축기로서 냉매를 고압으로 압축하는 과정에서 다양한 소음들을 발생시키게 된다.

소음의 발생원인에 따른 일반적인 분류는 구조물의 진동 즉, 떨림에 의해서 발생하는 structure-borne noise, 그리고 밀폐된 음장의 공진 현상이나 유체의 유동 등으로부터 야기되는 air-borne noise 로 나뉘게 된다.

압축기내부의 소음 발생원인은 밸브계의 impact, 고압 유체의 유동, 단속적인 압축행정에 따른 맥동, 기구적 공진 현상 그리고 전기적인 가진 등으로 방사 소음에 따른 정확한 원인의 분류가 난해하다. 그러나 가정용 냉장고에 쓰이는 압축기는 hermetic type 이기 때문에 내부 소음원의 복잡 다양함에도 불구하고 내부의 진동/소음 source 들이 소음 방사의 최종 인자인 쉘을 가진 하지 않고는 소음이 방사될 수가 없다. 이러한

쉘을 가진 시키는 주요한 원인 중에 하나가 바로 냉매의 흡입과 관련된 소음원의 발생이다⁽¹⁾. 압축 행정이라는 특성상 실린더 내부는 기밀을 유지하지만 고속의 압축에 따른 흡입 밸브의 타격음은 쉘 내부의 냉매 공간으로 형성되는 밀폐된 cavity 를 가진 하여 쉘을 떨게 하는 것이다.

따라서, 이러한 소음 source 를 저감 시키기 위해서 흡입 muffler 의 설치는 압축기 방사 소음 저감에 필수적인 요소이다. 그런데 이러한 muffler 의 설계는 소음 저감 뿐만 아니라 가능한 많은 냉매가 흡입될 수 있어야 하는 효율과도 깊은 관계가 있기 때문에 보다 systematic 한 설계가 이루어져야 한다.

이제까지 대부분의 muffler 설계는 plane wave sound propagation 이론에 기초한 transfer matrix 방법이 주류를 이루었으나 복잡한 형상의 실제 문제를 풀기위해서 최근에는 유한요소 해석과 경계요소 해석^(2~4) 등이 시도되고있다.

Transfer matrix approach 는 다양한 분야의 대상에 대해 가장 널리 이용되어온 방법이기도 하지만 plane wave 를 가정하고 있기 때문에 해석 주파수 영역과 복잡한 geometry 에 대한 해석에 한계를 가지고 있다. 또한 유한 요소 해석의 경우 형상이 복잡해 짐에 따라 유한 요소 모델의 형상에 의한 제한이 따르게 된다.

따라서, 본 연구에서는 제품 개발 단계에서 개발된 흡입 muffler 의 3 차원 geometry 를 이용하여 3D 경계 요소 모델을 구성하고 이를 이용한 해석을 수행하였다.

* 광주 과학기술원 교수

smwang@kjist.ac.kr

Tel: (062) 970-2390

Fax: (062) 970-2429

** 광주과학기술원 박사 과정

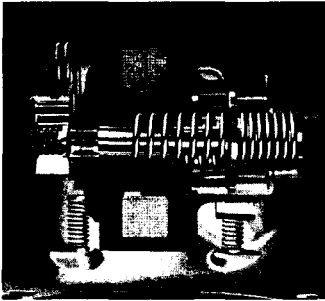
*** 광주과학기술원 석사 과정

또한 기존의 연구들에서는 대형 duct 등이 아닌 소형의 구조물에서는 소음 실험의 특성상 실험을 통한 검증이 어려운 점이 있었으나 본 연구에서는 acoustic reciprocity 이론을 이용한 소음 실험을 통하여 해석결과를 검증하였다.

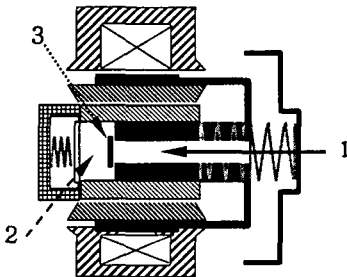
2. 머플러 방사소음에 대한 연구

머플러에 대한 연구는 자동차 배기 시스템 등이나 고압의 압축과정 이후에 발생하는 소음원을 줄이기 위한 연구인 exhaust type 에 대한 연구가 대부분이었으나 이론적인 배경이 동일한 intake type 에 대해서도 적용될 수 있다⁽⁵⁾.

Fig.1 은 linear compressor 내부를 단순화한 것으로 압축기 내부의 저압축 냉매가 흡입 머플러를 통하여 압축실 즉, 실린더 내부로 유입되는 과정을 나타낸다.



a. A linear compressor



1.Flow direction 2.Cylinder 3. Suction valve
b. Compression part

Fig. 1 Schematic diagram of the compressor

이러한 흡입과정에서의 타격 음이 머플러를 통해서 셀 내부의 cavity 로 전달될 때, plane wave approach 는 다음과 같이 머플러의 단순한 geometry 의 함수로 머플러의 Transmission loss 에 대한 이론 해를 제공한다.

$$TL = 10 \log [1 + 1/4(M - 1/M)^2 \sin^2(kl)] \quad (1)$$

where M; 단면적 비, l; 요소 길이

Eq.(1)에 대한 TL 선도가 fig.2 에 나타나 있다.

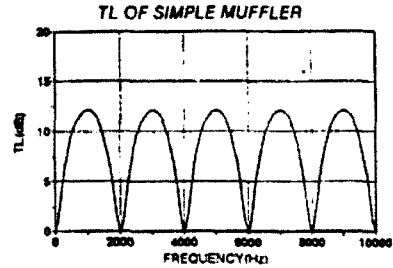


Fig.2 Calculation of TL by plane wave theory

Plane wave 가정에 의한 머플러의 해석이 이론적인 명료함과 적용하기에 간편하기는 하지만 확장관과 축소관에 대한 단면적 비와 요소의 길이에 대한 parameter 밖에는 가지지 못하기 때문에 실제로 개발 적용되고 있는 형상이 복잡한 3 차원의 복잡 system 의 해석에는 한계를 가진다.

또한 유한요소 해석법(FEM)이 Transfer matrix 의 복잡한 구조에 대한 해결책으로 많은 연구가 진행되었다. 그러나 유한요소의 경우 geometry 가 간단한 내부 음장문제에 경우에 대해서는 정확한 해를 제공하지만 내부 음장문제가 opening 을 통하여 free field 의 실험결과와 비교 될 때 opening 에서의 경계조건의 문제와 두개의 복잡한 음장이 연성 된 문제를 풀기에는 많은 어려움이 따르게 된다.

3. Boundary element analysis

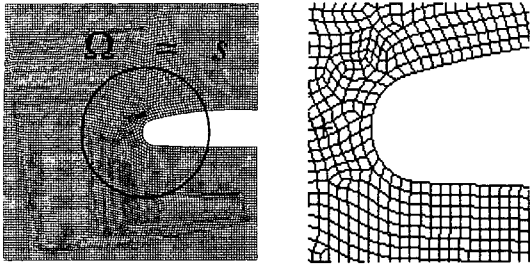
경계 요소 해석은 control volume 내의 물리량에 대한 체적 적분 값들을 다음 Eq.2 에서처럼 경계에서의 면적 적분 값들로 구하게 된다.

$$\int_S (\varphi \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}} - \psi \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}}) dS = \int_V (\varphi \nabla^2 \psi - \psi \nabla^2 \varphi) dV \quad (2)$$

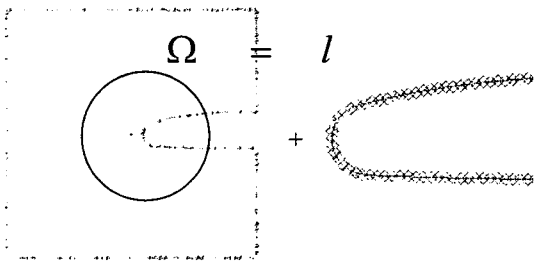
where ∇^2 : laplacian operator, \mathbf{n} : normal vector

이러한 계산 영역의 변환은 문제의 차수를 하나 내림과 동시에 해석의 양을 결정하는 element 수를 상당히 줄이게 된다.

Fig.3 은 간단한 2 차원 모델에 대한 유한요소 모델링과 경계요소 모델링의 보기이다.



a. Finite element modeling



b. Boundary element modeling

Fig. 3 Finite and boundary element modeling

Table 1 은 모델링에 따른 요소 수를 비하여 나타내었다.

Table 1 Number of the nodes and elements

Method	Element	Node
BEM	481	487
FEM	9484	9725

4. Acoustic reciprocity

머플러 또는 덕트 구조에서의 음압 정보의 실험적인 측정법 들은 국제적으로 규격화⁽⁵⁾ 되어 있다. 이들 중 가장 일반적인 방법 중 하나가 two microphone method 이다. 머플러요소에 대한 Insertion loss(IL) 또는 transmission loss(TL)등의 측정법으로 가장 일반적인 이 방법을 위해서는 외부에서 acoustic 가진을 하고 fig.4^(7,8)와 같이 머플러 요소의 입구단과 출구 단에서 측정하게 된다.

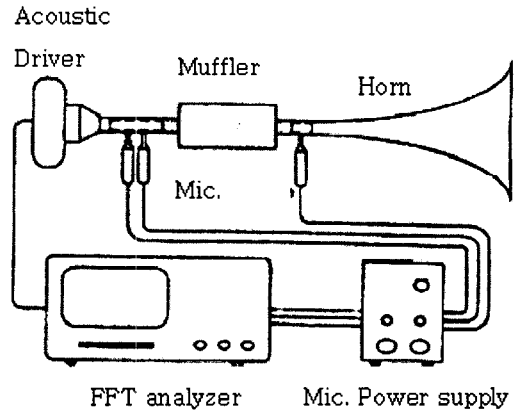


Fig. 4 Experimental setup

머플러의 특성을 파악하는 가장 좋은 방법은 직접 작동 상태에서 방사 소음의 음압을 측정하는 것이 될 수도 있지만, 내압상태의 좁은 공간이라는 점과 muffler 의 특성과 더불어 source 의 특성이 강하기 때문에 측정된 소음 값으로부터 머플러의 특성만을 분리해 내기가 힘들다. 이러한 이유로 대부분의 실험법들은 머플러 외부에서 white noise 를 가진 원으로 사용하고 있다.

그러나, 가정용 냉장고 등에 사용되는 압축기의 경우 흡입 머플러는 압축기 내부의 협소한 공간에 장치 되어야 하기 때문에 compact 한 구조가 되고 실제 acoustic 가진 원이 되는 밸브가 머플러의 가장 안 쪽에 위치하게 된다. 이러한 경우 머플러의 내부에서 white noise 를 발생 시키거나, 일반적인 머플러 성능 test 와 같이 머플러 요소에 대하여 입구단과 출구 단의 측정 음압을 통한 머플러의 특성 파악은 실제 구조와 많은 차이를 가지며 또한 일반적인 혼 구조를 이용한 anechoic termination 조건은 구현상의 문제 뿐만 아니라 실제 머플러가 작동되는 geometry 와 도 일치하지 않는다.

이러한 어려움을 극복하기 위해서 본 연구에서는 acoustic reciprocity 를 이용한 소음 실험을 통해서 머플러의 음향 특성을 파악하였다.

음압, $p = -j\omega\rho_0\Phi$, 입자 속력, $\vec{u} = \nabla\Phi$ 관계인 두개의 velocity potential, Φ_1 과 Φ_2 에 대해 Eq.2 를 다시 정리 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁹⁾.

$$\int_S (\Phi_1 \nabla \Phi_2 - \Phi_2 \nabla \Phi_1) \cdot \hat{n} dS = \int_V (\Phi_1 \nabla^2 \Phi_2 - \Phi_2 \nabla^2 \Phi_1) dV \quad (3)$$

where \hat{n} : unit outward normal to S .

위의 식으로부터 Eq. 4와 같이 음원과 수음점에 대한 관계를 유도 할 수 있다.

$$\int_S (p_1 \bar{u}_2 \cdot \hat{n} - p_2 \bar{u}_1 \cdot \hat{n}) dS = 0 \quad (4)$$

위식은 동일한 환경 하에서 음원과 수음점의 위치를 바꾸어도 수음점에서의 음압은 변함이 없다는 것을 보여준다. Fig.5는 하나의 opening을 갖는 박스의 내부에서 스피커 가진을 하고 외부에서 음압을 측정할 경우와 동일한 환경에서 수음 점과 스피커의 위치를 바꾸어 음압 값을 비교한 것이다.

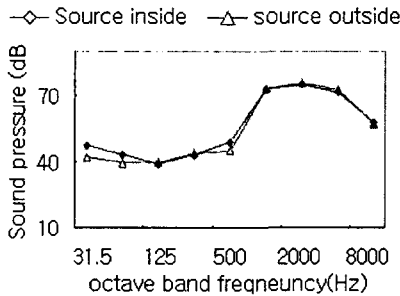


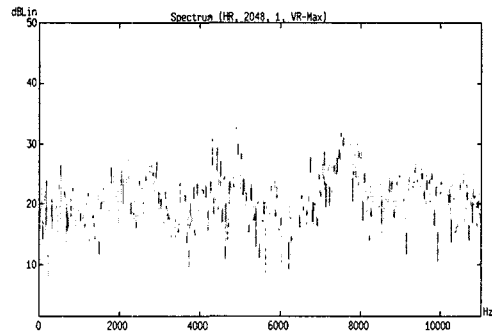
Fig. 5 Acoustical reciprocity test

5. Validation with Experiment

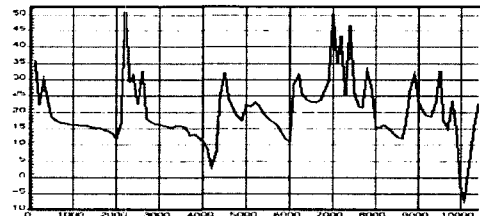
앞서 기술한 transfer matrix 방법 등의 머플러 해석법과 two microphone method는 실험 조건하의 system에 대하여 Insertion loss(IL) 또는 transmission loss(TL) 등의 측정에는 유용한 방법이다. 하지만 복잡한 형상의 머플러 요소가 또 다른 음장을 가진 하게 되는 경우, 더욱이 입구단과 출구단의 형태가 아닌 경우, 즉 밸브 등의 작동으로 한쪽 끝이 acoustic 가진 원이 되고 opening이 한쪽인 경우에는 적합하지가 않다. 더욱이 압축기에 사용되는 머플러의 경우는 dimension이 매우 작기 때문에 실험을 위해서 밸브의 위치에 음원 source를

장치한다는 것이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 특정 조건 하에서 머플러의 Insertion loss(IL) 또는 transmission loss(TL)등을 측정하는 것이 아니라 머플러의 음향 특성파악을 위해서 외부에 white noise 가진을 하고 밸브 즉 실제 가진 점의 위치에서 음압을 측정하는 실험을 수행하였다. 또한 협소한 공간에서 음압 측정을 위해서 probe microphone을 사용하였다.

Fig.6은 유한요소 해석 결과와 음압 측정을 이용한 머플러 특성을 나타낸 것이다.



a. Experimental result



b. Boundary element analysis result

Fig. 6 Experimental result and BEA

5. 결론

가정용 냉장고 압축기 흡입 머플러의 acoustic 특성 파악을 위하여 경계요소 해석을 수행하였다. 머플러 내부에 위치한 밸브 등의 특수성을 고려하여 머플러 출구 단의 외부에서 white noise 가진을 하고 소음 source의 위치에서 음압을 측정하는 실험을 통하여 유한요소 해석 결과를 검증하였다. 형상이 복잡한 머플러 구조물에 대하여 유한 요소 해석결과를 acoustic 특성 파악을 위하여 신뢰성 있는 해를 제공하며 일반적인 실험이 어려운 구조에 대하여 acoustic reciprocity를 이용한 실험은 좋은 대체

방법임을 보여 주었다.

후 기

이 연구는 LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 주재만, 이학준, 오상경, 2001, “ 압축기용 흡입머플러의 음향 및 유동해석”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.181~192.
- (2) 권영필, 임정빈, 정갑철 1995, “경계요소법을 이용한 축 대칭 소음기의 성능해석”, 한국소음진동공학회지 제 5 권 제 3 호, pp. 337~344.
- (3) 정지훈, 이정권, 1999, “ 경계 요소법을 이용한 소음기의 전달 손실 예측시의 실제 문제점 및 해결 방안”, 한국소음진동공학회, 추계학술대회 논문집, PP.660~666.
- (4) 오상경 등, 1996, “ 복잡한 형상의 머플러 음향특성 해석 및 개선에 관한 연구”, 한국소음

진동 공학회지 제 6 권 제 6 호, pp.755~762.

(5) Leo, L. B., and istvan L. Ver, 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(6) ASTM E1050-90, 1990, “ standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis method”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA

(7) 오상경 등, 1996, “ 복잡한 형상의 머플러 음향특성 해석 및 개선에 관한 연구”, 한국소음진동 공학회지 제 6 권 제 6 호, pp.755~762

(8) 강성우, 김양한, 1992, “ 두개의 음향탐촉자를 이용한 소음기의 투과손실 측정과 오차 해석”, 한국소음진동공학회지 제 2 권 제 3 호, pp.181~192.

(9) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens and James V. Sanders, 2000, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., New York.