

상반성 기법과 p-p method를 이용한 구조물 방사소음 유한요소해석 기법 연구

Study on sound radiation estimation using a reciprocity technique and p-p method by finite element simulation

유지우,^{1†} 박헌,¹ 이지운¹

(Ji Woo Yoo,^{1†} Hun Park,¹ and Ji Un Lee¹)

¹현대자동차 연구개발본부

(Received December 27, 2022; revised January 16, 2023; accepted January 20, 2023)

초 록: 구조진동 소음 문제의 평가에 있어 방사소음은 중요한 물리적 특성으로 음향 인텐시티 측정으로 확인이 가능하지만, 시간이 오래 걸리고 까다로운 측정 조건 때문에 시험을 꺼리는 경향이 많다. 그 대안으로 시뮬레이션이 사용되고 있으며, 그 정확도도 높다. 문제는 방사소음 파워와 방사효율 같은 중요한 물리량을 얻기 위해서는 이를 계산해 주는 특정한 소프트웨어가 필요하다는 점이다. 본 연구에서는 이런 관점에서 일반적인 유한요소 해석 소프트웨어를 사용하여 방사소음 파워와 방사 효율을 계산하는 후처리 기법을 제안한다. 제안된 두가지 방법은 기본적으로 시험에서 사용하는 방법을 시뮬레이션에 활용하는 것이다. 첫번째 방법은 상반성 기법을 이용하는 것이며, 두번째 방법은 인접한 2개의 위치에서 계산된 음압을 이용하는 방법이다. 두가지 방법이 모두 효과적으로 방사소음 파워를 예측할 수 있음을 보였으며, 그 한계도 설명하였다.

핵심용어: 방사소음 파워, 방사 효율, 구조진동 소음, 상반성 기법, 인텐시티, p-p method, Finite Element Method (FEM)

ABSTRACT: Sound radiated from a structure in vibration is an important physical characteristic to evaluate vibro-acoustic problem. Although sound radiation power can be typically obtained by intensity measurement, long measuring time and strict measuring condition remain difficult. As an alternative method, simulation-based estimation can be taken into account and its accuracy is known to be acceptable. However, difficulty still lies in that specialized softwares may be necessary to obtain sound radiation power and radiation efficiency. In this context, this study suggests two methods using an ordinary FE method to calculate sound radiation power. They are well-known reciprocity technique and p-p method, which are basically test methods. It is shown that either method can practically estimate sound radiation in the frame of conventional Finite Element Method (FEM). The methods and their corresponding limit are discussed with some results.

Keywords: Sound radiation power, Radiation efficiency, Vibro-acoustics, Reciprocity, Intensity, p-p method, Finite Element Method (FEM)

PACS numbers: 43.20.Tb, 43.40.Rj, 43.58.Ta

1. 서 론

자동차 소음진동 성능개발에 있어 구조진동 소음

문제의 정확히 규명은 매우 중요하다. 특히, 중주파수 대역에서 그 중요성이 더 크며, 박판류의 방사소음 크기를 확인하고 성능을 개선하는 업무들은 이미

†Corresponding author: Ji Woo Yoo (j.w.yoo@hyundai.com)

R&D, Hyundai Motor Company, 150 HyundaiYeonguso-ro, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 18280, Republic of Korea

(Tel: 82-31-5172-5262)



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

많은 사례가 있다. 차량 대시 시스템의 구조방사소음을 음향 인텐시티로 측정하여 시뮬레이션의 정확도를 검토한 바가 있으며,^[1] 차량 바닥면에서의 구조기인 소음을 최소화하기 위해 방사소음을 계산하고 최적화 결과를 적용한 바 있다.^[2] 관련하여 노면소음을 개선하여 차량 개발에 적용한 사례도 있다.^[2]

구조물의 방사소음은 전통적으로 시험에서 인텐시티를 측정하면 확인이 가능하지만, 까다로운 시험 조건과 시험시간이 오래 걸리는 단점이 있다.^[3] 대신, 성능이 향상된 컴퓨터와 전문 소프트웨어가 개발된 덕분에 시뮬레이션이 대안으로 사용되고 있으며, 그 정확도도 매우 높다.^[1] 이러한 전문적인 소프트웨어는 일반적으로 모드 도메인에서의 복소 음압과 복소 진동 속도를 계산하고 이의 중첩으로부터 중요한 물리량인 방사소음 파워와 방사 효율을 바로 계산해주는 것으로 알려져 있어서^[4] 별도의 후처리 없이 바로 결과를 얻을 수 있으나, 일반적인 유한요소 해석 소프트웨어, 예를 들면 NASTRAN에서는 이러한 물리량 계산 기능을 제공하지 않는다. 따라서 이를 위한 전문 소프트웨어를 구입하거나, 별도의 라이선스를 구입해야 하는 어려움이 있다.

본 연구에서는 이런 관점에서 방사소음-특히 방사소음 파워와 방사효율-을 계산하기 위해 별도의 소프트웨어를 사용하지 않고, 기존에 많이 사용되는 유한요소 해석 소프트웨어를 이용하여 방사소음을 계산하는 후처리 방법을 제안한다.

방사소음 계산을 위해 기존에 시험에서 사용하는 방식을 원용하였다. 첫번째 방법은 상반성 기법(reciprocity technique)^[5]을 이용하는 것이며, 두번째 방법은 인접한 2점의 음압으로부터 계산된 인텐시티를 이용하는 방법이다. 2개의 pressure를 이용하므로 간단히 p-p method 라고 한다(이와 다른 방식은 음압과 공기의 Particle velocity를 직접 측정하는 p-u method 가 있다).^[6] 본 연구에서는 두가지 방법에 대해 방사소음 파워를 계산하였으며, 전문 소프트웨어 VA One에서 계산된 방사소음 파워와 비교하였다.

II. 본 론

본 연구는 시뮬레이션으로 방사소음을 계산하는

것이 목적이므로 합리적인 시뮬레이션 모델을 구성하는 것이 중요하다. 모델은 구조 모델과 음장 모델로 구성된다.

구조 모델은 얇은 평판과 보(Euler beam)로 연결되어 있으며, 단위 하중을 구조물의 보 혹은 평판에 직접 가진하여, 다양한 상황을 모사하였다. 음향 에너지는 음장과 연결된 평판의 한쪽 면으로만 방사된다고 가정하였다(baffled condition).

음장은 반구형 또는 육면체형 유한요소 음장을 적용하였다. 음장 감쇠 요소를 이용하여, 적용된 감쇠 계수(Damping loss factor 0.02)만큼 경계면에서 에너지가 소산하도록 음장 경계면을 감쇠처리 하였다.

2.1 상반성 기법

2.1.1 이론

본 논문에서는 구조물을 직접 가진하고 음압을 측정하는 Fig. 1 왼쪽의 측정 방식 대신, 그림 오른쪽에 나타낸 것과 같이 잔향 음장 내에 설치된 스피커에 의해 가진된 구조물의 가속도 응답을 이용하는 상반성 기법을 이용한다(상반성 기법 자체는 음장 조건과 무관하나, 본 연구에서는 잔향 음장 조건이 중요한 가정이라고 할 수 있다).

잔향 음장 조건에서 상반성 기법을 이용한 방사소음의 계산은 Reference [5]에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 중요 부분만을 서술한다. 박판 가진에 의한 방사소음 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{W_{rad}}{F_A^2} = \frac{S\bar{\alpha}}{4\rho c} \frac{\langle p^2 \rangle}{F_A^2}, \quad (1)$$

여기서 가진힘은 A점에 적용되고, $\langle p^2 \rangle$ 는 음장 내에서 구해진 평균 음압이다. 일반적으로 시험에서는 소수의 측정점에 대한 음압 평균을 사용하지만, 시

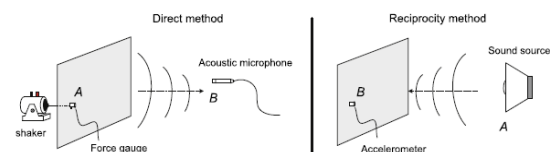


Fig. 1. Concept for direct method and reciprocity method.^[5] A, exciter location; B, response location.

물레이션에서는 모든 응답점을 계산하는 것이 가능하므로, 본 연구에서는 주어진 음장에서의 모든 응답점(node)의 평균값을 사용하였다.

상반성 관계식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{p(\mathbf{r}_B)}{F(\mathbf{r}_A)} = -\frac{v(\mathbf{r}_A)}{Q(\mathbf{r}_B)}, \quad (2)$$

여기서 p, F, v, Q 는 각각 음압, 가진 힘, 구조물의 속도, 음장가진 시의 Volume velocity이다.

잔향음장 내에서 음장가진을 하는 경우, 상반성 관계식에 의해 방사파워와 Volume velocity와의 관계식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{W_{rad}}{F_A^2} = \frac{S\bar{a}}{4\rho c} \left[\frac{v_Q^2}{Q^2} \right]. \quad (3)$$

음원 Q 에 의한 잔향음장에서의 시간-공간 평균 음압 $\langle \overline{p_Q^2} \rangle$ 을 계산할 수 있으므로, 최종적으로 박판의 방사소음 파워는 다음과 같다.

$$\frac{W_{rad}}{F_A^2} = \frac{\bar{a}_Q^2}{\langle \overline{p_Q^2} \rangle} \frac{\rho}{4\pi c}, \quad (4)$$

여기서 a_Q 는 음장 내 Q 점에서 가진하는 경우 박판 A 점에서의 가속도이다. 따라서, 가속도와 음장 평균값만 알면, 동일한 조건의 박판 A 점 가진 시의 음장 방사파워를 계산할 수 있다.

방사효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{W_{rad}}{F_A^2} \frac{1}{\rho c S \langle \overline{|Y|^2} \rangle}, \quad (5)$$

여기서 전달함수 $\langle \overline{|Y|^2} \rangle = \langle \overline{v^2} \rangle / \overline{F_A^2}$ 이다. 즉, 음장 가진 조건에서의 $W_{rad} / \overline{F_A^2}$ 을 구한 후, 박판 가진 조건의 $\langle \overline{|Y|^2} \rangle$ 를 구하면 방사효율을 계산할 수 있다.

2.1.2 시뮬레이션 모델 및 방사소음 계산법

상반성 기법 적용을 위해 반구형 음장을 고려하였

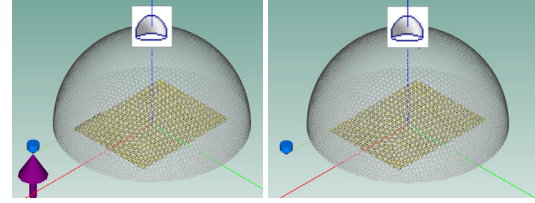


Fig. 2. (Color available online) FE simulation models with a hemisphere cavity. Arrow means excitation, \bullet is response, and \square indicates damping treatment at the cavity boundary. Left, excitation at structure; right, excitation at acoustic cavity.

고, 구조물의 보를 가진하였다(Fig. 2 왼쪽). 보는 음장 외부로 나와 있어 음장을 직접 가진하지 못하고, 보의 가진 에너지가 박판을 통해 음장을 가진하는 조건이며, 이는 차량의 가진 상황(차체 입력점-차체 패널-음장가진)을 모사한다.

음장가진 조건의 모델은 Fig. 2의 오른쪽에 나와있다. 음장은 Volume velocity가 $1 \text{ mm}^3/\text{s}$ 가 되도록 다음 식을 이용하여 power(mW)를 계산하여 적용하였다.

$$W_Q(f) = \frac{\rho}{c8\pi} (2\pi f)^2, \quad (6)$$

여기서 W_Q 는 음장가진 점에서의 입력파워이고, f 는 주파수(Hz)이다.

Eqs. (1), (4)의 음압과 가속도는 유한 요소 시뮬레이션에서 쉽게 계산이 되므로, 이 수식들로부터 방사소음 파워를 계산할 수 있다.

2.1.3 시뮬레이션 결과

다음 Fig. 3은 앞에서 설명한 방법으로 계산한 Fig. 2 모델의 방사소음 파워를 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 150 Hz 이상 대역에서는 구조가진과 음장가진의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 하지만, 150 Hz 이하 대역에서는 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서 사용한 상반성 기법의 중요한 가정은 잔향음장 조건이었다. 그러나, 저주파수에서는 이 조건이 일반적으로 만족되지 않는다. 저주파에서의 차이는 잔향음장 가정이 타당하지 않음을 보여주는데, 이는 합리적인 결과라고 할 수 있다.

Eq. (5)로부터 계산된 방사효율 역시 비교하였다 (Fig. 4). 앞의 결과와 마찬가지로 저주파 대역에서 레

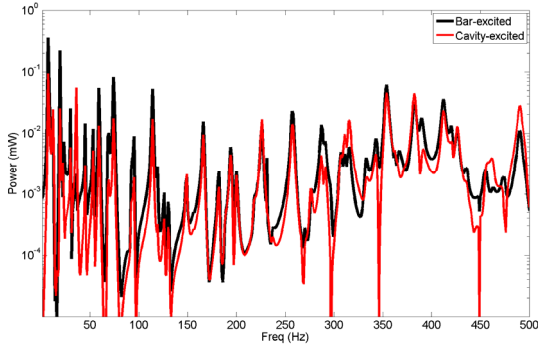


Fig. 3. (Color available online) Sound radiation power from the panel with a hemisphere acoustic cavity (as in Fig. 2). Excitation at structure (black line) and excitation at cavity (red line).

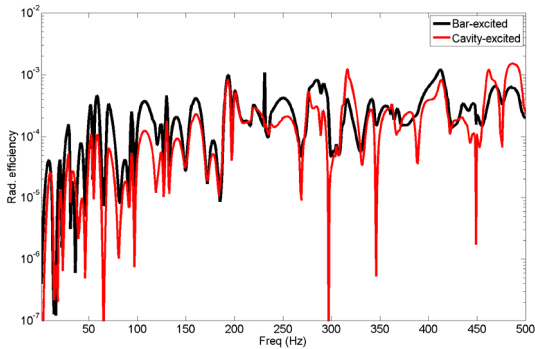


Fig. 4. (Color available online) Radiation efficiency of the panel with hemisphere acoustic cavity (as in Fig. 2). Excitation at structure (black line) and excitation at cavity (red line).

벨 차가 발생하며, 약 150 Hz 이상 대역에서 전반적으로 일치하는 것을 알 수 있다.

2.2 p-p method

2.2.1 인텐시티 계산 방법

두번째 방법은 p-p method를 이용하는 것이다. 두 위치에서의 음압 위상 차로부터 particle velocity를 계산하는 것으로 다음과 같은 식으로부터 인텐시티를 계산하는 것이 가능하다.^[6]

$$I_n = \frac{nP_1P_2}{2\rho\omega\Delta} \sin(\theta_1 - \theta_2), \quad (7)$$

여기서 두 위치의 음압은 $p_1 = P_1e^{i(\omega t + \theta_1)}$ 과 $p_2 =$

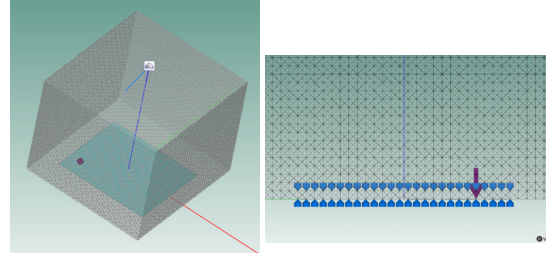


Fig. 5. (Color available online) An FE simulation model with a rectangular acoustic cavity. Arrow means excitation, \bullet is response, and \odot indicates damping treatment at the cavity boundary. Left shows the simulation model and right shows excitation and responses from the side view.

$P_2e^{i(\omega t + \theta_2)}$ 로 정의되어, θ 는 각 위치에서의 음압 위상을 의미하며, Δ 는 음압을 측정하는 두 위치의 간격을 의미한다. ρ, ω, n 는 각각 공기밀도, 각 주파수, 그리고 normal vector이다. 만약 음압을 계산하는 두 위치의 간격이 일정하다면, 위 수식을 이용하여 간단하게 인텐시티를 계산할 수 있다.

방사소음 파워는 인텐시티에 소음 방사 면적 S 를 곱하면 구할 수 있다.

$$W = I_n \times S. \quad (8)$$

2.2.2 시뮬레이션 모델 구성

이를 위해 아래 Fig. 5와 같은 모델을 구성하였다. 구조 부분 모델은 위와 유사하지만, 가진점은 박판을 직접 가진하는 조건으로 하였다(가진 위치가 문제가 되지 않는다).

음장은 직육면체 형태로 구성하였는데, 음압 응답점을 정의하기 편리하기 때문이다. 음압 응답점은 박판 해당면 바로 위의 응답점 전체를 취하였다(832 개/면 \times 2면). 각 응답점 면은 거리 19.77 mm를 가지게 된다. 해당 면에서 구해진 모든 음압을 이용하여 Eq. (7)로 인텐시티를 계산하고, 면적을 곱하면, 방사 파워를 계산할 수 있다.

2.2.3 시뮬레이션 결과

위에서 설명한 방식으로 구한방사파워와 소프트웨어에서 직접 계산된 방사파워를 Fig. 6에 비교하였다.

두 결과가 약 50 Hz 이상에서 잘 일치하는 것을 알

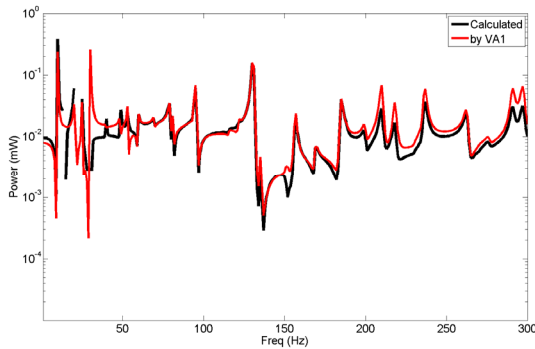


Fig. 6. (Color available online) Sound radiation power from the panel with rectangular acoustic cavity (as in Fig. 5). Calculated by Eq. (7) (black line) and by commercial software VA One (red line).

수 있다. 이 방식은 두 위치의 음압 차와 음압 위상차를 계산하는 방식이므로, 파장이 매우 길어서 구해진 위치의 위상 차와 음압 차가 거의 없어지는 50 Hz 이하 저주파 대역에서 계산이 되지 않거나 실제와 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 관심주파수 대역에 해당하는 적절한 간격을 알아야 하는 문제점이 있는 것을 확인하였다. 또한 응답면의 음압을 모두 계산하여야만 최종 방사파워를 얻을 수 있으므로 다소 계산시간이 소요된다.

III. 결 론

본 연구에서는 방사소음 파워와 방사효율을 계산하기 위해 전문적으로 만들어진 상용 소프트웨어를 사용하지 않고, 이런 기능이 없는 일반적인 유한요소 해석 소프트웨어의 계산결과를 이용하여 방사소음 파워와 방사 효율을 계산할 수 있는 후처리 방법을 제안하였으며, 그 한계에 대해서도 검토하였다.

- (1) 잘 알려진 상반성 기법을 이용하여, 음장 가진 조건을 이용하면 구조물에서의 방사소음 파워를 계산할 수 있음을 보였다. 잔향음장 조건을 만족하는 조건인 중주파수 대역에서 방사소음 예측에 효과적으로 사용할 수 있다.
- (2) 인텐시티 측정에 사용하는 p-p method를 이용하여, 방사소음 파워를 계산할 수 있음을 보였다. 구조의 방사면 전체의 음압을 계산해야 하고, 방사면 p-p 측정 간격에 영향을 받는 것을 확인하였다.

- (3) 본 연구에서 제안된 방법은 전문적인 소프트웨어의 사용이 어려울 때, 대안적인 방법으로 구조 방사소음 계산에 활용할 수 있다.

본 연구에서 검토된 한계는 차량에서 통상 사용하는 조건을 반영한 시뮬레이션에서 추가로 확인이 되어야 한다.

References

1. J. W. Yoo, K. S. Chae, and J. H. Cho, "Experimental study and numerical simulation on a dash system for noise reduction of a sedan vehicle" (in Korean), Proc. KSNVE Autumn Conference, 667-671 (2012).
2. J. W. Yoo, F. Ronzio, and T. Courtois, "Road noise reduction of a sport utility vehicle via panel shape and damper optimization on the floor using genetic algorithm," Int. J. Automot. Technol. **20**, 1043-1050 (2019).
3. J. Mørkholt, J. Hald, P. Hardy, D. Trentin, M. Bach-Andersen, and G. Keith, "Measurement of absorption coefficient, surface admittance, radiated intensity and absorbed intensity on the panels of a vehicle cabin using a dual layer array with integrated position measurement," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. **2**, 1449-1457 (2009).
4. J. W. Yoo, "Modelling of sound radiation from a beam-stiffened plate and a clamped rectangular plate based on a modal method," Proc. IMechE Part C: J. Mech. Eng. Sci. **228**, 2900-2914 (2014).
5. G. Squicciarini, A. Putra, D. J. Thompson, X. Zhang, and M. A. Salim, "Use of a reciprocity technique to measure the radiation efficiency of a vibrating structure," Appl. Acoust. **89**, 107-121 (2015).
6. D. A. Bies and C. H. Hansen, *Engineering Noise Control* (E&FN SPON, London, 1996), pp. 90.

저자 약력

▶ 유 지 우 (Ji Woo Yoo)



1993년 2월: 한양대학교 정밀기계공학과 학사

2005년 10월: Southampton University ISVR 박사

1995년 2월~현재: 현대자동차 책임연구원

▶ 박 현 (Hun Park)



1990년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 학사
2003년 8월 : Univ. of Maryland Aerospace Eng. 박사
2003년 9월~현재 : 현대자동차 책임연구원

▶ 이지운 (Ji Un Lee)



1991년 2월 : 고려대학교 기계공학과 학사
1993년 8월 : 고려대학교 기계공학과 석사
1993년 9월~현재 : 현대자동차 책임연구원·팀장