

Zwicker 라우드니스를 고려한 방음벽의 위상 최적 설계

Acoustic Topology Optimization of Noise Barrier by Considering Zwicker's Loudness 국

정환* · 구건모* · 현재엽* · 김상명** · 왕세명†

Junghwan Kook , Kunmo Koo , Jaeyup Hyun , Sang-Myeong Kim and Semyung Wang

1. 서 론

최근 정은한 생활환경을 구현하기 위한 노력의 일환으로 교통 또는 옥외 산업기로부터 유발된 소음을 저감하기 위한 방음시설을 많이 설치하고 있다. 소음의 피해를 줄이기 위한 방법으로는 소음기 자체의 소음저감과 저소음아스팔트 설치 등 소음원 대책이 근본적이지만, 기술적 한계와 비용 대비 효과 측면에서 현재까지 가장 효과적인 대책은 방음벽의 설치이다. 방음벽의 효과를 높이기 위한 여러 방안이 다양하게 시도되고 있는데, 방음벽의 설치효과는 물리적인 음압레벨(Sound Pressure Level), 음향파워 등과 같은 물리량의 전·후 비교를 통해 평가할 수 있다. 하지만, 사람의 청각은 소리의 물리적인 세기가 같더라도, 주파수에 따라 그 감도에 차이가 있으며, 또 그 감도차가 세기에 절대값에 의해서도 변화하는 복잡한 특성을 지니고 있어서, 보편적으로 사용되는 물리량 들은 소음에 대한 사람의 인지를 고려하기에 충분하지가 않다. 라우드니스는 낮은 소리의 물리량이 언제나 좋지 않다는 생각을 근간으로 하고 있다. 즉, 방음벽을 설계하고자 하는 곳은 SPL 보다 인간의 주관적인 소음저감 정도가 더 중요하다 는 것이다.

본 연구에서는 라우드니스를 최소화하는 방음벽의 최적설계를 위해 위상 최적화 기법을 정식화하였다. 지금까지 방음벽의 설계는 경험 또는 몇 개의 매개 변수를 이용한 형상 최적화 기법에 의해 주로 이루어졌다. 방음벽이 설치 될 공간에 존재할 수 있는 강체벽의 분포에 따라 방음벽의 성능이 변화하기 때문에, 이와 같은 전통적인 설계 방법만으로는 라우드니스를 저감하기 위한 최적의 방음벽 형상을 찾기 어렵다. 본 연구에서는 방음벽이 설치 된 음향 공간을 유한 요소모델로 구성한 다음, 각 유한 요소모델에 설계 변수를 한 개씩 부여하는 방법으로 방음벽

의 위상 최적화를 수행하였다. 최적화 과정의 단계에서 유한 요소모델의 각각의 요소가 공기 또는 강체가 될 수 있도록 음향 물성치를 벌칙함수로 보간하였다. 라우드니스는 ISO 532B 에 따라 Zwicker 라우드니스를 수음영역에서 구했으면, 설계변수 개선(update)는 설계민감도 기반의 최적화 기법인 MMA(Method of Moving Asymptotes)를 사용하였다.

2. 본 론

2.1 방음벽 설계를 위한 위상최적화 기법

방음벽 주위의 음압 p 는 식(1)에 나타낸 헬름홀츠 방정식(Helmholtz equation)과 부가된 경계조건을 이용하여 계산할 수 있다. 강체벽과 지면은 강체벽 조건을 부여하였고, 무한 경계조건을 고려하기 위해 Sommerfeld radiation 조건을 식(2)와 식(3)과 같이 각각 부여하였다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla \hat{p} \right) + \frac{\omega^2}{k} \hat{p} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\vec{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla \hat{p} \right) = 0, \quad \frac{\partial \hat{p}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \quad (2)$$

$$\vec{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla \hat{p} \right) + i \frac{\omega}{c} \frac{\hat{p}}{\rho} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \quad (3)$$

소음원은 식 (4)와 같이 속도 U 로 진동하는 물체로부터 방사되는 것으로 표현하였다.

$$\vec{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla \hat{p} \right) = -i\omega U \quad \text{on } \partial\Omega \quad (4)$$

위 식에서 ρ 는 음향 매질의 밀도, ω 는 진동수, k 는 bulk modulus ($k = \rho c^2$)이다.

목적함수인 라우드니스의 계산은 목적 함수 영역 (Ω_{obj}) 에서 식(10)과 같이 main specific loudness 를 계산하였다.

$$NM = \left(0.0635 \cdot 10^{0.025L_{T0}} \right) \cdot \left[\left[0.75 + 0.25 \cdot 10^{0.1(L_E - L_{T0})} \right]^{0.25} - 1 \right] \quad (5)$$

† 교신저자; 광주과학기술원 기전공학과

E-mail : smwang@gist.ac.kr

Tel : (062) 970-2390, Fax : (062) 970-2384

* 광주과학기술원 기전공학과 박사과정

** 광주과학기술원 기전공학과 연구교수

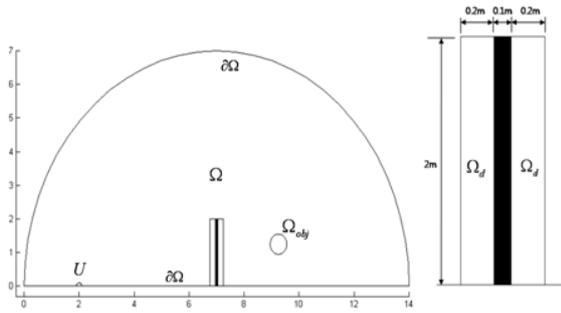


Fig. 1 The geometry for the noise barrier problem in 2D and the design domain Ω_d

물리적으로 의미 없는 최적해를 피하기 위해, Fig. 1 과 같이 설계영역(Ω_d)을 설정하였다. 최적화 과정 동안에, 설계 영역에 속한 유한요소의 음향 물성치는 각 요소에 부여된 설계 변수(γ) 에 따라 변화하게 된다. 각 요소가 공기 또는 강체벽이 되도록 식 (6) 과 같은 보간 함수를 이용하였다. 따라서, $\gamma=0$ 일 때 해당 요소는 공기이고, $\gamma=1$ 일 때, 해당 요소는 강체벽이다.

$$\frac{1}{k(\gamma)} = \frac{1}{k_{air}} + \gamma \left(\frac{1}{k_{rigid}} - \frac{1}{k_{air}} \right), \quad \frac{1}{\rho(\gamma)} = \frac{1}{\rho_{air}} + \gamma \left(\frac{1}{\rho_{rigid}} - \frac{1}{\rho_{air}} \right) \quad (6)$$

주어진 경계조건과 설계변수의 매개화를 유한 요소법을 이용하면, 식(7)과 같이 표현된다.

$$\left[\mathbf{K}(\gamma) + i\omega\mathbf{C}(\gamma) - \omega^2\mathbf{M}(\gamma) \right] \hat{p} = F \quad (7)$$

2.2 라우드니스를 고려한 방음벽 설계

앞서 정의한 위상최적화로 설계된 방음벽의 성능 비교를 위해 초기 방음벽의 디자인인 일자형 방음벽과 T-shape 방음벽의 성능을 살펴보았다. 일자형 방음벽의 경우 3 번째 bark 에서 값이 가장 높았고, T-shape 의 경우는 3 번째 경우는 저감되었다.

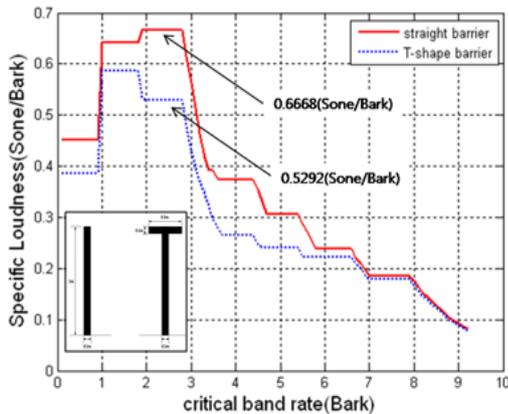


Fig. 2 Initial guess analysis results for straight and T-shape model. Loudness pattern

일자형 방음벽의 3 번째 bark 의 main specific 라

우드니스를 최소화하는 문제를 정의하고, 위상최적화 문제를 정식화 하면, 식(8)과 같고, 사용된 제한 조건에서 β 는 허용된 강체벽의 부피의 비율이다. 최적화 단계에서 사용되어지는 강체벽의 비율을 최종적으로 T-shape 방음벽과 같은 부피를 가질 수 있도록, 본 연구에서 사용된 강체벽의 부피비율을 5%로 하였다($\beta=0.05$).

3 번째 bark 의 경우, 주파수는 176Hz~280Hz 에 해당한다.

$$\min_{\gamma} : Q(\hat{p}, \gamma) = NM \text{ for } 3^{\text{rd}} \text{ Bark band rate (176Hz ~ 280Hz)}$$

$$\text{subject to : } 0 \leq \gamma \leq 1$$

$$: \int_{\Omega_d} \gamma dv \leq \beta Vol_{total}, \beta = 0.05$$

$$: S\hat{p} = F$$

$$\text{where } S, \text{ system matrix; } \left[\mathbf{K}(\gamma) + i\omega\mathbf{C}(\gamma) - \omega^2\mathbf{M}(\gamma) \right]$$

$$k_{rigid} = 6.87 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}, \quad \rho_{rigid} = 2643 \text{ kgm}^{-3}$$

$$k_{air} = 141.921 \times 10^3 \text{ Nm}^{-2}, \quad \rho_{air} = 1.21 \text{ kgm}^{-3}$$

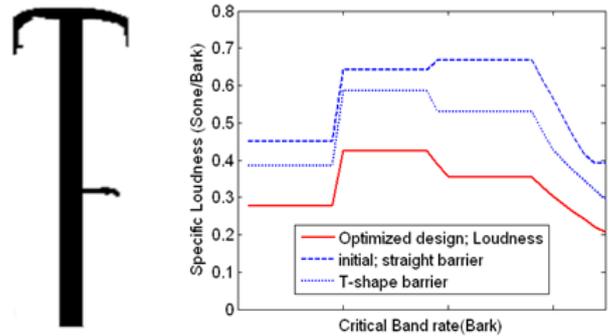


Fig. 3 Left: The optimized design for 3rd Bark band rate with $\beta=0.05$, Right: A comparison of the performance Loudness pattern

위상 최적화에 의한 방음벽의 설계는 그림 3 과 같이 변형된 T-shape 과 같은 형상을 가지고 있다. 설계된 방음벽의 성능을 비교하여 보면, 최적화 설계의 경우 3bark 의 라우드니스가 0.3542(sone/bark)로 초기 일자형 방음벽보다 약 47% 가 저감되었다. 또한, T-shape 방음벽 보다 모든 bark 에서 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

위상 최적화 기법을 이용하여, 라우드니스를 고려한 방음벽을 설계하는 방법론은 제안하였다. 제안된 방법을 이용하여, 라우드니스를 목적함수로 선정하는 경우, 관심 bark 을 선정하고, 일자형 방음벽을 초기 디자인으로 하여, 일자형 방음벽 주변을 설계영역으로 하는 방음벽의 위상 최적설계를 수행하였다. 설계된 방음벽은 관심 bark 에서 라우드니스가 저감됨을 확인하였다.