

음향공명 방음벽 연구

A Study on the Sound Resonating Barrier

이 준 신[†] · 김 태 룡^{*}

Jun-shin Lee and Tae-Ryong Kim

(2001년 10월 8일 접수 : 2002년 4월 17일 심사완료)

Key Words : Noise Barrier(방음벽), Sound Resonator(음향 공명기), Noise Reduction(소음저감), Transformer(변압기)

ABSTRACT

Noise barriers are widely used to reduce the sound level propagating from highways, railways or factories to residential areas. The reduced noise level at a receiver point is then determined by the diffracted waves around the edge of the barrier as well as by the transmitted waves through the barrier. For proper usage, many studies either theoretical or experimental have been made with the objective of precisely predicting the acoustic field and improving the noise attenuating properties of barriers. In this study, a simple scattering model, a line acoustic source scattered by an infinite cylinder, is introduced to simply investigate the sound attenuation efficiency of a sound-resonating barrier. From this model study, it is observed that the sound-resonating barrier can be used as a good sound-shielding element especially for the pure-tone noise generated from the transformer. Large sound-attenuation is achieved by applying the sound-resonating barrier to the large transformers in a substation.

1. 서 론

방음벽은 도로, 고속도로, 철도 및 공장으로부터 발생되어 주거지로 확산되는 소음을 차단하는 수단으로 널리 사용되어지고 있다. 방음벽의 성능은 소음원으로 부터 방음벽을 회절하는 음과 방음벽을 직접 투과하는 음의 합에 의해 설명된다. 일반적으로 방음벽을 투과하는 음은 회절음에 비해 매우 작기 때문에 방음벽의 성능은 회절음의 크기에 의해 좌우되게 된다. 따라서, 방음벽을 소음저감용으로 적절하게 활용하기 위해서는 방음벽의 존재 유무에 따른 음장변화의 예측이 기본이라 할 수 있다.

Maekawa⁽¹⁾ 및 Kurze와 Anderson⁽²⁾은 반무한 스크

린 형상의 방음벽에 대해 음파의 경로차와 파장만을 알면 방음벽의 삽입손실을 계산할 수 있는 도표 및 계산식을 제시하였는데, 이 방법들은 실용적이어서 이후 방음벽 설계에 널리 사용되고 있다. 이들의 단순 형상의 방음벽에 대한 이론을 살펴보면 방음벽의 소음차단 성능은 방음벽의 높이를 높일수록 향상 된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 하지만 단순히 방음벽의 높이를 높여 방음효과를 향상시키는 것은 경제성을 떨어뜨리고 거주자의 일조권을 침해하기 때문에 방음벽 설치시 높이에 제한을 두는 것은 매우 중요한 문제가 된다. 이런 이유로 방음벽의 높이를 한정하면서 차음효과를 증대하기 위해 단순한 사각 형태가 아닌 새로운 형태의 방음벽이 연구되어 왔다. 특히, 상단부에 여러가지 변화를 주는 연구가 활발히 진행되고 있다. Rawlings⁽³⁾은 방음벽 상단에 한 파장 정도의 완전흡음재를 추가하면 이에 상당하는 주파수 영역에서 방음벽 전면을 완전흡음재로 하였을 경우와 같은 효과가 나타남을 보여주었다. Fujiwara와 Furuta⁽⁴⁾는

[†] 책임저자, 정회원, 한국전력 전력연구원

E-mail : ljs@kepri.re.kr

Tel : (042) 865-5524, Fax : (042) 865-5514

^{*} 정회원, 한국전력 전력연구원

방음벽 상단에 완전 흡음체 원통을 설치하여 방음벽의 높이 2m에 해당하는 2~3 dB 정도의 소음저감 효과가 나타남을 실험적으로 확인하였다. May와 Osman⁽⁵⁾은 방음벽 상단에 모자모양 구조를 설계하여 Toronto내의 방음벽에 현장적용 하였으며, 이에 의해 1~2 dB의 추가적인 소음저감을 거둘 수 있었다. 또한 Arenas와 Monslave⁽⁶⁾는 모자모양을 포함한 7가지 형태의 상단변형구조에 대한 모델실험을 수행하였는데 이들의 결과에 의하면 T-형 및 원통형 상단변형 구조가 다른 구조들에 비해 우수한 소음저감 성능을 보여주고 있었다. 방음벽의 소음저감 성능 못지 않게 설치비용과 관리 측면의 실용성도 중요한 설계변수가 되며, 이 등⁽⁷⁾은 방음벽 상단 간섭형 장치에 대해 비용과 관리 측면에서 검토하였다. 이와 같이 다양한 모양 및 벽면 임피던스에 대한 연구가 점차 늘고 있는데 반해 복잡한 형상의 방음벽에 대해서는 Maekawa가 제시한 식이 더 이상 적용되지 못하며 수치해석 방법이나 모형실험을 통해 성능을 확인하고 있다.

본 연구의 목적도 한정된 높이의 방음벽의 방음성능을 개선하는 데 있다. 특히, 펌프, 팬 및 변압기 등과 같은 순음특성의 소음원을 차단하는데 있어 공명형 방음벽의 가능성을 확인하고 이를 현장에 직접 적용하는데 있다. 본 연구에서는 해석해가 존재하는 임의의 임피던스를 가지는 무한원통에 대한 선음원의 산란현상 모델을 이용하여 공명형 방음벽의 가능성을 확인하며, 이 결과를 대형 변압기로부터 발생되어 주거지로 전달되는 소음의 차단에 적용하고자 한다.

2. 방음벽 임피던스에 대한 방음효과

방음벽에 공명기가 있을 때의 효과를 판단하기 위하여 해석해(analytic solution)가 존재하는 무한원통에 의한 선음원의 산란현상을 이용하여 방음벽 효과를 간접적으로 유추한다. Fig. 1은 무한원통에 의한 선음원의 산란 모델로서 각 좌표를 원통 중심을 기준으로 반경방향을 w 로 나타내며, 각도를 ϕ 로 하는 원통 좌표계로 표현한다. 이때, 기호 O 는 원통 중심을 나타내며, 각 위치 벡터 r 에 아래 첨자를 붙여 Fig. 1에 보인 것과 같이 구분한다. 첨자 c 는 원통표면을, 첨자 s 는 음원을 그리고 a 는 계측점을 각각 나타낸다.

무한 공간에 음원과 산란체가 존재하는 경우의 음장해는 산란체가 존재하지 않을 때의 음원에 의한 음장해와 산란체에 의한 산란해의 합으로 표현된다. Fig. 1과 같이 지점에 단위 선음원 만이 존재하게 되면 음장해는 다음과 같은 그린 (Green)의 함수로 표현된다.⁽⁷⁾

$$g(r_a) = \frac{i}{4} H_0(kw_a) \quad (1)$$

여기서 H_0 는 차수가 0인 한켈(Hankel)의 함수를 의미하며, f 는 주파수이며 $k=2\pi f/c$ 는 파수(wave-number)를 나타낸다.

식 (1)의 그린의 함수를 원통중심을 기준으로 하는 원통좌표계로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$g(r|r_s) = \frac{i}{4} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m \cos m(\phi - \phi_s) \begin{cases} J_m(kw) H_m(kw_s), & w < w_s \\ H_m(kw) J_m(kw_s), & w_s < w \end{cases} \quad (2)$$

여기서 J_m 은 차수가 m 인 Bessel 함수를 나타내며

$$\epsilon_m = \begin{cases} 1 & m=0 \\ 2 & m \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

과 같다.

Fig. 1과 같이 음장내에 원통형 산란체가 있을 경우의 일반적인 산란해의 형태는 다음과 같으며

$$p_{scatter}(r|r_s) = \frac{i}{4} \sum_{m=0}^{\infty} a_m \epsilon_m H_m(kw) \cos m(\phi - \phi_s) \quad (4)$$

앞에서 설명한 바와 같이 실제 음장해는 음원에 의한 음장해와 산란체에 의한 산란해의 합으로 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

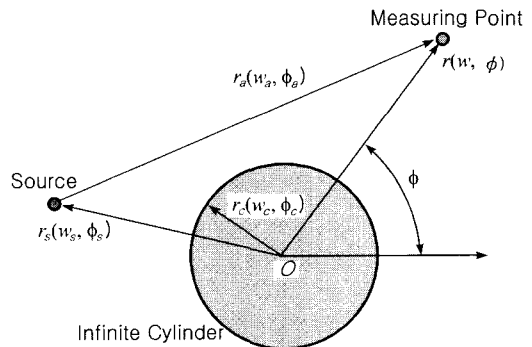


Fig. 1 A line acoustic source scattered by an infinite cylinder

$$\begin{aligned}
 p(r|r_s) &= g(r|r_s) + p_{scatter}(r|r_s) \\
 &= \frac{i}{4} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \cos m(\phi - \phi_s) \\
 &\times \begin{cases} J_m(kw)H_m(kw_s) + a_m H_m(kw) & w < w_s \\ H_m(kw)J_m(kw_s) + a_m H_m(kw) & w_s < w \end{cases} \quad (5)
 \end{aligned}$$

이때, 원통의 경계조건에 따라 식 (5)의 미지수 a_m 을 구하면 산란체가 있을 때의 실질적인 음장해를 구할 수 있다.

원통 표면에서 음압이 p_c 이고 원통중심 방향으로의 입자속도가 u_c 일 때 원통표면의 음향 임피던스를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z = \frac{p_c}{\rho c u_c} \quad (6)$$

또한, 원통 표면의 음향 임피던스가 Z 이면, 식 (5)의 미지수 a_m 을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a_m = -\frac{[ZJ'_m(kw_c) + iJ_m(kw_c)]H_m(kw_s)}{ZH'_m(kw_c) + iH_m(kw_c)} \quad (7)$$

이때, 음향 임피던스 Z 는 여러 종류의 원통 경계조건에 대하여 다음과 같은 값을 가진다.

$$Z=0 : \text{자유단} \quad (8a)$$

$$Z=\infty : \text{강체} \quad (8b)$$

$$Z=1 : \text{완전 흡음체} \quad (8c)$$

Fig. 2는 실제 계산에 사용된 음원, 원통 및 계측점들의 위치를 보여준다. 반지름이 1 m인 원통을 중심

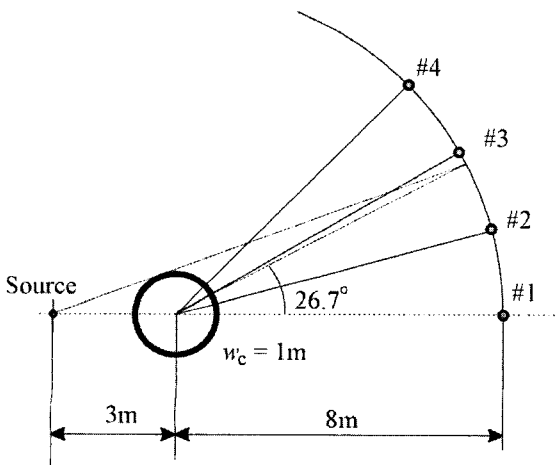


Fig. 2 Computational model

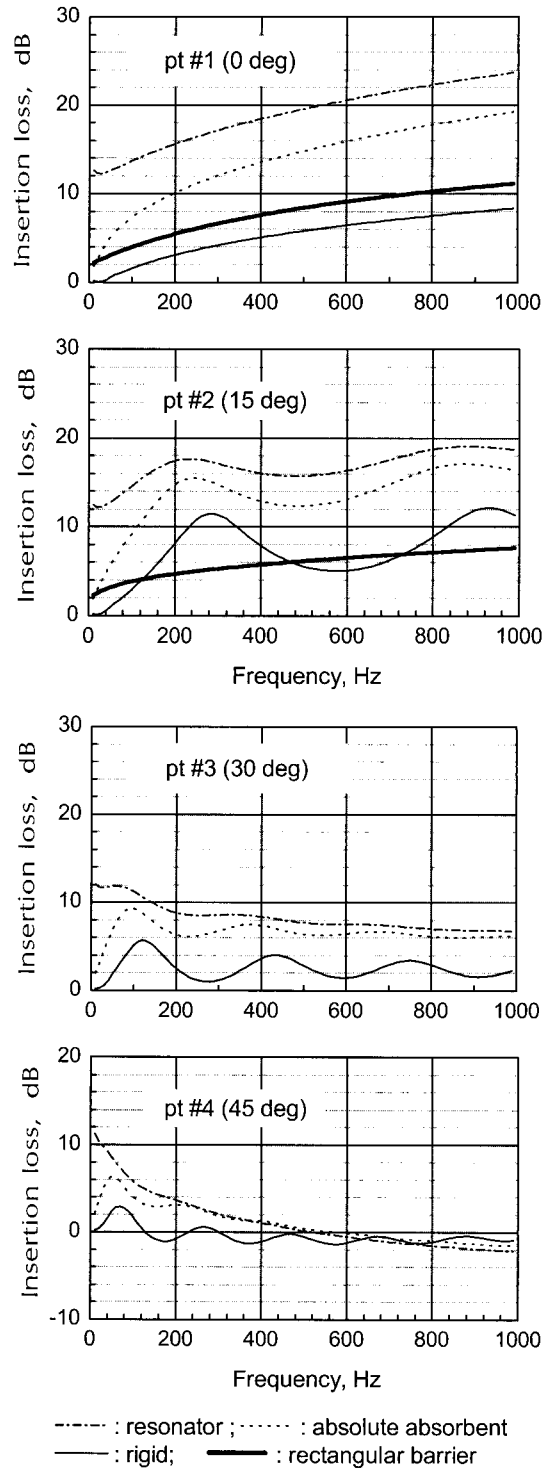


Fig. 3 Comparison of the predicted results for IL with varying measuring angle and acoustic impedance on the cylinder surface

으로 음원은 3 m 왼쪽 편에 위치하며, 계측점들은 반경 8 m를 가지며 15° 간격으로 그림 과 같이 #1에서 #4까지 배치하였다. 이때 음원과 계측점이 최대로 보이는 각도는 26.7° 이므로 각도가 30, 45° 인 #3, 4 지점에서는 음원이 보이게 된다.

Fig. 3은 원통 표면의 각 음향 임피던스에 대한 계산 결과이다. 굵은 실선은 실제 방음벽의 효과와 비교하기 위해 원통 대신 1 m 높이의 방음벽이 있을 때의 방음효과를 그린 것이다. 이 경우 계측점에서 음원이 보이게 되면 방음벽의 IL (삽입손실)값이 존재하지 않기 때문에 계측점 #1, 2에 대해서만 표시하였다. Fig. 3에서 실선, 점선 및 일점쇄선은 원통 표면의 음향 임피던스가 강체, 완전흡음체 및 자유경계인 경우를 각각 나타낸다.

Fig. 3의 결과를 보면 어떤 경계조건 일지라도 음원을 기준으로 계측점이 가시영역으로 이동할수록 방음벽의 방음성능인 IL 이 점점 작아지는 것으로 나타난다. 특히 #3, 4번에서 IL 이 고주파수로 갈수록 점점 작아지는 것은 음파의 직진성에 연관된 것으로 생각할 수 있다. 반면, #1, 2번의 IL 을 보면 비가시 영역에서 IL 이 크며, 고주파수로 갈수록 점점 IL 이 커짐을 보여준다.

Fig. 3은 #1번 결과를 제외한 IL 특성 곡선이 특정 주기로 파동 치는 결과를 보여준다. 이는 음원으로부터 방사되는 음파가 원통 윗부분 및 아랫부분으로 회절되어 계측점에 도달하기 때문으로 이와 같은 경로차이에 의해 특정 주파수에서 산과 골이 생기는 현상이 발생하게 된다. 이때, IL 파동의 DC 성분은 Fig. 3의 #2와 같이 대략적으로 일반방음벽 이론치(굵은선)를 따라가는 것으로 관찰되어 진다.

이상의 결과로부터 무한 원통에 대한 선음원의 산란현상을 이용하면 방음벽의 효과를 상당히 정량적으로 분석할 수 있음을 알 수 있다. 특히, 무한 원통에 대한 선음원 모델은 해석해가 존재하기 때문에 원통 표면의 음향 임피던스에 따라 방음효과와 차이도 쉽게 얻어지게 된다. Fig. 3에서 보면 비가시 영역의 모든 주파수 영역에서 자유경계조건을 가지는 원통이 방음 성능이 가장 우수하며 강체 원통의 성능이 가장 뒤떨어짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 가시 영역 일지라도 저주파수에서는 자유경계조건인 원통은 방음 성능이 우수함을 파악할 수 있다.

원통의 음향 임피던스가 자유경계조건이라는 것은

압력이 0인 진공이라는 의미와 같으며, 이는 원통이 음파를 흡입하는 싱크(sink)와 같이 작용한다고 볼 수 있다. 다시 말해 무한 공간에 이 조건의 방해물이 놓이게 되면 같은 크기의 완전 흡음체보다도 소음저감 능력이 뛰어나게 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 방음벽을 설계하게 되면 매우 우수한 성능의 방음벽을 만들 수 있으며, 이 사항이 본 연구의 요지이기도 하다.

모든 주파수 영역에서 방해물의 음향 임피던스를 자유경계로 만들 수는 없지만 헬름홀쯔 공명현상을 이용하면 특정주파수 영역에서 방음벽을 진공으로 만들 수가 있다. 이 원리는 주파수 영역이 넓은 소음제어에는 부적절하지만 특정 주파수 성분의 소음을 가지는 기기의 소음제어에는 유용하게 사용될 수 있다.

변압기의 소음 주파수는 120 Hz의 배수 성분을 가지며 상대적으로 저주파수인 120 Hz 성분을 완벽히 방음하기 위해서는 매우 높은 높이의 방음벽이 필요하게 된다. 반면 240 Hz 이상의 주파수 성분은 Fig. 3에서도 알 수 있듯이 일반 방음벽을 사용하여도 어느 정도의 방음효과가 기대된다. 따라서 방음벽이 120 Hz에서 공명기로 작용할 수 있도록 설계하면 120 Hz 성분의 소음은 공명기에 의해 흡수하며 120 Hz 이상의 소음성분은 일반 방음벽 효과만큼 방음시켜 매우 좋은 성능의 방음효과를 기대할 수 있다.

3. 현장 적용

변전소의 변압기는 전기를 공급하는 핵심 기기임에도 불구하고 고소음 유발 특성 때문에 변전소 주변 거주자들에 의한 민원제기 대상이 되고 있다. 또한, 도심이 점점 확장되면서 거주지가 변전소 인근까지 접근하는 경우가 생기며, 도심에 새로운 변전소들이 신설되면서 변전소 변압기에 대한 민원이 점점 많아지고 있는 실정이다.

변압기에서 발생되는 소음은 Fig. 4에 예시한 바와 같이 전원 주파수(60 Hz)의 2배 성분을 기저주파수로 하는 하모닉 성분(120 Hz의 배수)을 가진다. 기존의 변압기용 방음벽은 이러한 변압기의 소음특성을 고려하지 않은 채 고속도로 방음벽과 같은 일반 방음벽을 사용하고 있어 소음 대처 효과가 미미한 실정이다. 특히, 야외 변압기에서 가장 문제가 되는 소음주파수 120 Hz에 대해서는 일반 방음벽의 효과가 상당

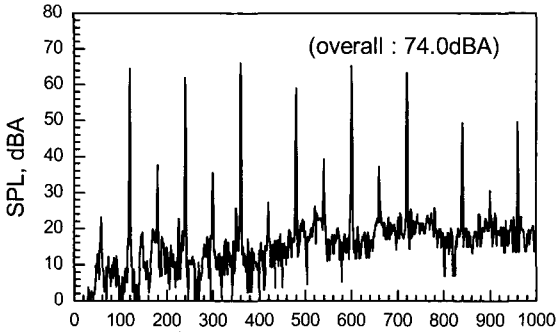


Fig. 4 An example of the noise spectrum generated from a 154-kV transformer (measured at the distance of 1.5 m)

히 떨어져 이에 대한 대처가 요구되는 실정이다.

본 연구의 적용은 야외 변압기에서 방사되는 소음을 효과적으로 차단하는 데 있으며, 특히, 소음주파수 120 Hz에 대해 방음효과가 큰 방음벽을 고안하여 설치하는 데 있다. 고안된 방음벽은 유리섬유나 스폰지와 같은 흡음효과를 이용하는 방법이 아니라 120 Hz와 같이 상대적으로 저주파수이며 순음에서 효과적인 음향 공명기를 이용하였다.

Fig. 5는 변전소의 개략적인 배치도로서 변전소 부지를 산비탈에 조성했기 때문에 변압기 정면과 산비탈이 마주보고 있는 구조를 가져, 정면에 위치한 인가인 가옥 1과 45° 측면인 가옥 2에서 소음 피해가 문제시 되고 있다. Fig. 5에서 표시된 위치 7(변전소 부지경계 담장)과 변전소 부지는 10 m 정도의 높이 차를 가진다. 변압기는 현재 2기가 그림과 같이 설치되어 있으며, 1기가 추가 설치될 예정이다. 변압기를 기준으로 정면, 45°, 90° 측면에 각각 가옥 1, 2, 3이 위치하고 있으며, 변압기 설치 전/후의 소음레벨 비교를 위한 측정 위치는 Fig. 5에 표기된 바와 같다.

Fig. 5에서 보이듯이 방음벽의 높이는 방호벽보다 낮은 4 m 높이를 가지게 하였으며, 부지경계 및 가옥 1에서 변압기 윗면이 보이도록 설계하였다. 방음벽의 두께는 20 cm 정도의 두께로 공명기 역할을 할 수 있도록 설계하였다. 이 경우 변압기 방음벽의 효과는 Fig. 3에서 각 15°와 30° 사이의 II 형태를 가질 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 6은 방음벽에 부착될 공명기를 보여주는 것으로서 직육면체인 공명기 본체 내부는 안내관(guide pipe) 및 팽창실(expansion chamber)로 이루어진다. 공명기의 공명주파수는 공명기 길이, 안내관의 길이

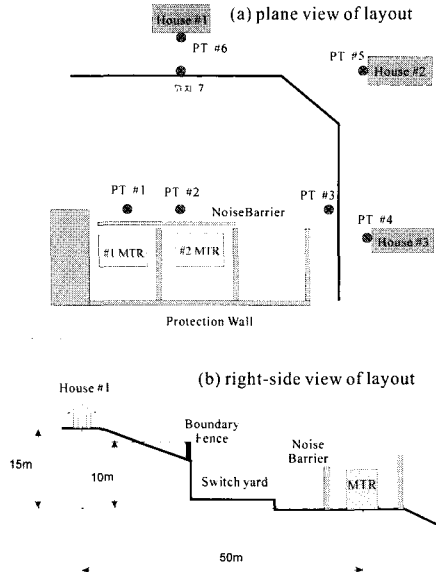


Fig. 5 Layout of H-substation

및 팽창비 등의 기하변수 등에 의해 결정이 된다. 특별한 경우로서 입구단(inlet)과 팽창실의 단면적이 동일한 경우의 공명주파수는 다음과 같은 식에 의해 표현된다.⁽⁹⁾

$$f_n = c / (4l_e) \tag{9}$$

여기서, c 는 음의 전달속도이며, l_e 는 공명기 길이 |에 입구단에서의 질량 효과(mass effect)를 보정한 값이다. 이 경우 120 Hz용 공명기는 약 70 cm의 길이를 가지게 되어 길이에 제약이 없는 경우 손쉽게 사용이 가능하다. 하지만, 길이 제약이 있는 곳에서는 Fig. 6과 같은 공명기 구조를 도입하게 되며 안내관 길이

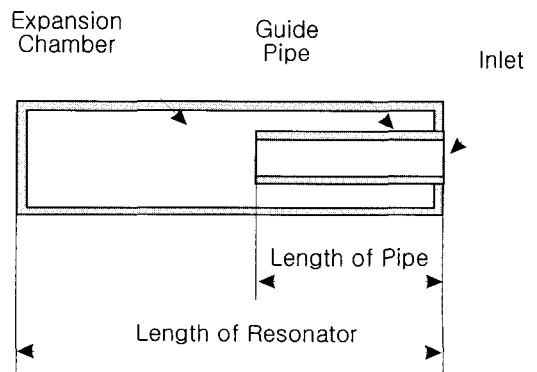


Fig. 6 Schematic diagram of sound resonator

Table 1 Comparison of experimental results between before and after installation of barrier(dBA)

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Before	73.2	71.6	56	41.5	46.5	525.5	54.5
After	59.0	56.5	53.5	41.5	43.5	44.0	46.5

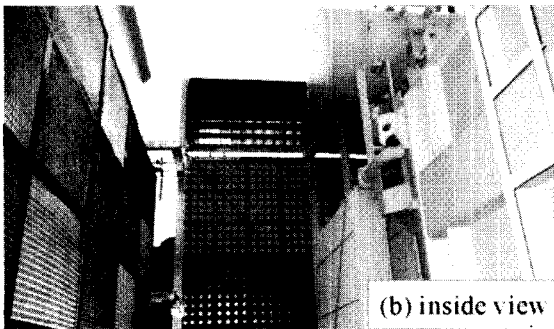
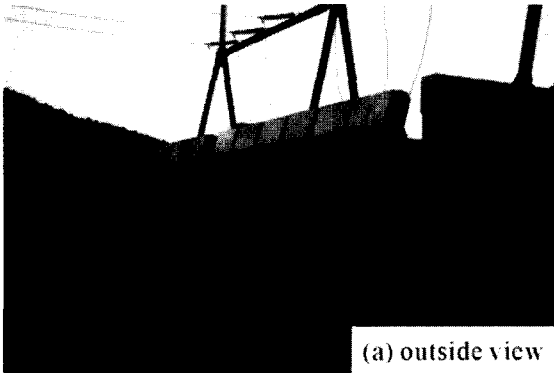


Fig. 7 On-site installation of sound resonating barrier

및 팽창비를 적절히 조화시켜 짧은 길이이면서 공명 주파수가 120 Hz가 되게 만들 수 있다.

Fig. 7은 실제 현장에 설치된 방음벽의 내외부를 보여주고 있다. 이때 상대적으로 두께 제약이 없는 상부에는 길이가 70 cm인 120 Hz용 공명기를 부착하였으며 방음벽 본체는 길이가 20 cm가 되게 공명기를 설계하여 부착하였다.

Table 1은 Fig. 5에 표시된 각 측정 지점에서 방음벽 설치 전후의 소음레벨을 계측한 값으로 변압기 주변인 #1 ~ #3에서는 15 dB 정도의 소음저감을 변압기 정면 #6, #7은 8 dB 정도의 소음저감이 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 대표적인 부지경계인 위치 7번 계측점에

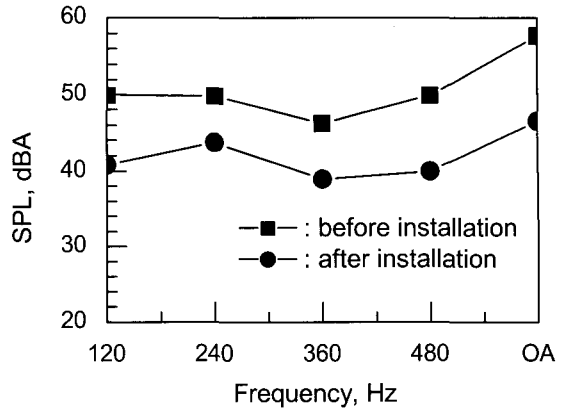


Fig. 8 Comparison of experimental results between before and after installation of barrier (OA : overall level)

서 방음벽 설치 전/후의 소음레벨을 비교한 것으로 주변 구조물로부터 회절되는 음의 영향을 배제하기 위해 담장위 4 m 높이에서 30 cm 간격 6점에서 음압을 공간 평균한 결과이다. 이 지점은 변압기가 보이는 음원 가시영역으로서 일반방음벽 이론에 따르면 5 dB이상의 감음이 이루어질 수 없는 지점이나 공명형 방음벽의 설치에 의해 120 Hz에서 10 dB 정도의 감음을 얻을 수 있었으며 전체적인 감음도 8 dB 정도 이룰 수 있었다.

4. 결 론

저주파수 및 순음에서 효과적인 음향 공명기를 이용하는 방법을 수학적 모델을 이용하여 고찰하였다. 그 결과 음향 공명기가 있는 방음벽이 강체 및 완전 흡음체인 방음벽 보다 방음성능이 매우 우수함을 알 수 있었으며, 저주파수에서 탁월한 성능을 가짐을 볼 수 있었다. 이 결과를 야외 변압기용 방음벽에 적용하고 방음벽의 성능을 확인한 결과, 120 Hz용 공명형 흡음기를 이용한 방음벽의 소음저감성능은 매우 우수한 것으로 확인됐다.

변압기용 방음벽에 공명효과를 적용하게 되면 방음 효과가 상승함은 물론 방음벽 두께를 기존 방음벽 두께 (약 20 cm) 정도로 만들 수 있기 때문에 시공 측면에서도 문제가 없음을 확인할 수 있었다. 또한, 같은 방음 효과일 때 공명형 방음벽의 높이를 기존 방음벽 보다 작게 만들 수 있기 때문에 경제성 측면에서도 상당한 효과가 있음을 알 수 있었다. 본 연구

에서 제시한 방음벽의 공명효과는 변압기 뿐만 아니라 특정주파수 소음성분을 가지는 기기의 소음제어에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Maekawa, Z., 1968, "Noise Reduction by Screens," *Applied Acoustics*, Vol 1, pp. 157~173.
- (2) Kurze, U. J. and Anderson, G. S., 1971, "Sound Attenuation by Barriers," *Applied Acoustics*, Vol 4, pp. 35~53.
- (3) Rawlings, A. D., 1976, "Diffraction of Sound by a Rigid Screen with a Soft or Perfectly Absorbing Edge," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 45(1), pp. 53~67.
- (4) Fujiwara, K. and Furuta, N., 1991, "Sound Shielding Efficiency of a Barrier with a Cylinder at the Edge," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 37(1), pp. 5~11.
- (5) May, D. N. and Osman, M. M., 1980, "The Performance of Sound Absorptive, Reflective and T-profile Noise Barriers in Toronto," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 71(1), pp. 67~71.
- (6) Arenas, J. P. and Monslave, A. M., 2001, "Modification of the Diffracted Sound Field by Some Noise Barrier Edge Designs," *International Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. 6(2), pp. 76~81.
- (7) 이우섭, 정성수, 서상준, 전오성, 2000, "간섭형 방음벽의 음향특성," *한국소음진동공학회지*, Vol. 10(3), pp. 517~522.
- (8) Morse, P. M., and Ingard, K. U., 1968, *Theoretical Acoustics: chapter 7*, McGraw-Hill, New York.
- (9) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. Sanders, J. V., 1980, *Fundamental of Acoustics: chapter 10*, Wiley, New York.