

지정된 차음 성능을 갖는 방음벽의 최적 설계

조 대 승*

(부산대학교 조선해양공학과)



1. 머리말

최근 정은한 생활환경을 구현하기 위한 노력의 일환으로 교통 또는 육외 산업기기로부터 유발된 소음을 저감하기 위한 방음시설을 많이 설치하고 있다. 국내 고속도로의 경우에 있어서도 1999년도 기준 1,000여 지점에 총 연장길이 249,013 m, 총 면적 954,044 m²의 방음시설이 설치⁽¹⁾되어 있어 국가적으로 방음시설 구축에 막대한 비용이 소요되고 있다.

방음시설의 대부분을 차지하는 방음벽에 의한 차음 성능은 회절 효과에 의해 좌우된다. 따라서, 소음저감 대상 지역의 목표 소음레벨이 결정되면 소음원과 수음점 사이에 위치할 방음벽의 높이 및 측면 방향 회절 경로로 전달되는 소음량을 고려해야만 최적의 방음벽 설계가 가능하다. 그러나, 기존의 방음벽 설계는 높이 방향으로의 회절효과만을 고려하거나 시행 착오 방법으로 방음벽의 높이 및 폭을 결정하는 경우가 많다. 이로 인해 방음벽 과잉 설치로 인한 비용 증가와 조망권 저해 또는 방음벽 시공후 소음 저감 효과 미달로 인한 민원이 제기되는 등의 문제점이 발생하고 있다.

이에 이 글에서는 한 개의 점 소음원은 물론 도

로, 철도와 같은 선 소음원을 나타내는 다수의 점 소음원에 노출된 지역에 방음벽을 설치할 경우 최소의 비용으로 지정된 소음저감 효과를 갖는 방음벽의 효율적 설계를 위해 simulated annealing (SA) 알고리즘⁽²⁾을 이용한 방음벽 최적 설계 방법을 소개한다. 이때, 방음벽의 차음성능은 방음벽의 높이 및 폭 방향 회절경로를 고려하여 ISO 9613-2⁽³⁾에 규정된 방법으로 평가한다. 제시된 방법으로 최적 설계한 방음벽의 차음 성능에 대한 타당성은 환경소음예측프로그램 ENPro^(4~6)를 이용한 계산 결과와 비교·검토하여 수행하였다.

2. 방음벽 최적 설계

2.1 정식화

방음벽 설계시 소음저감 목표량은 소음저감 대상지역에 대한 소음 측정 또는 예측에 의해 결정할 수 있다. 방음벽 설치 및 유지 비용은 방음벽 설치 면적 $E(X)$ 에 비례한다. 또한, 방음벽에 작용하는 환경 하중과 설치 지역의 용도에 따라 소음저감효과에 상관없이 설치 가능한 방음벽의 최대 높이 H_{max} 및 최대 길이 L_{max} 가 제한된다. 한편, ISO 9613-2에서는 특정 구조물이 회절 효과를 유발하기 위해서는 그림 1에 보인 바와 같이 소음원과 수음점을 잇는 직선에 수직한 구조물의 길이가 음파의 파장 λ 보다 커야 하며, 방음벽과 같이 단일 회

* 우리 학회 평의원

E-mail : daecho@pusan.ac.kr

특집 교통소음 저감대책

절을 유발하는 구조물의 차음능능 A_b 의 최대치는 20 dB로 제한된다고 규정하고 있다.

이에 방음벽 최적 설계를 위한 목적함수와 구속조건을 그림 2에 보인 바와 같이 높이 변화 기준 폭에 해당하는 임의 방음벽 요소의 길이 r_j 와 해당 방음벽 요소의 높이 H_j 를 이용해서 다음과 같이 설정할 수 있다.

목적함수

$$\text{Minimize } E(X) = \sum_{j=1}^k H_j r_j \quad (1)$$

여기서,

$$X = \{H_1, \dots, H_k, r_1, \dots, r_k\}$$

구속조건

1) 사용자 지정 소음 저감량

$$\cdot g_1(X) = L_o - A_b - L_d \leq 0 \quad (2)$$

2) 단일 회절 효과 최대치

$$\cdot g_2(X) = A_b - 20 \leq 0 \quad (3)$$

3) 파장 효과

$$\cdot g_3(X) = \lambda - l_l - l_r < 0 \quad (4)$$

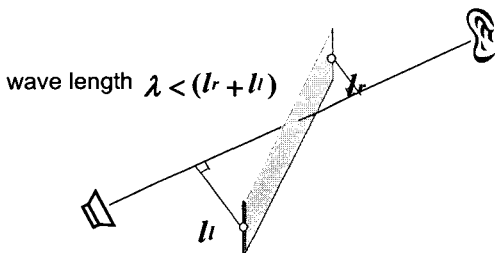


그림 1 Barrier having screening effect

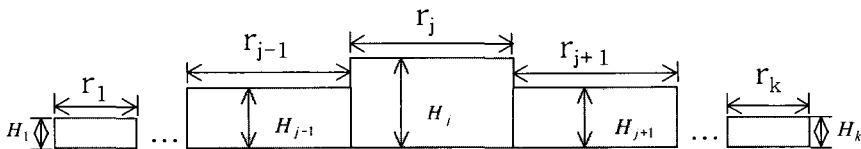


그림 2 Variables to design an optimal barrier

4) 방음벽 최대 설치 높이

$$\cdot g_4(X) = H_j - H_{\max} \leq 0, j=1, 2, \dots, k \quad (5)$$

5) 방음벽 최대 설치 길이

$$\cdot g_5(X) = \sum_{j=1}^k r_j - L_{\max} \leq 0 \quad (6)$$

여기서, l_l , l_r 의 정의는 각각 그림 1에 보인 바와 같고, L_o 는 방음벽이 설치되기 전의 수음점 소음도, L_d 는 수음점의 목표 소음도를 나타낸다. A_b 는 중심주파수 63 Hz부터 8 kHz까지의 옥타브 밴드별로 산정되는 방음벽 설치로 인한 소음저감량(dB)으로서 방음벽 높이방향 회절감쇠량 A_H 와 좌·우 길이방향 회절 감쇠량 A_L , A_R 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$A_b = 10 \log (10^{-0.1A_H} + 10^{-0.1A_L} + 10^{-0.1A_R}) \quad (7)$$

이 글에서는 방음벽으로 인한 개별 회절경로에서의 차음효과 A_s ($s=H, L, R$)를 ISO 9613-2에 규정된 방법을 적용하여 중심주파수 기준 63 Hz부터 8 kHz까지의 옥타브밴드별로 다음과 같이 산정하였다.

$$A_s = 10 \log [3 + (20/\lambda)z K_{met}] - C_0 \text{ dB} \quad (8)$$

여기서,

$$C_0 = \begin{cases} \text{높이 회절: } A_{gr} \\ \text{측면 회절: } 0 \end{cases}$$

λ : 옥타브밴드 중심주파수에서의 파장(m)

z : 회절경로와 직접경로의 거리 차(m)

$$K_{met} = \begin{cases} z > 0 : \exp\left(\frac{-1}{2000} \sqrt{\frac{d_{ss}d_{sr}d}{2z}}\right) \\ z < 0, \text{ 측면회절} : 1 \end{cases}$$

상기 식에서 A_{gr} 은 ISO 9613-2에 규정된 소음 전달 경로상에서의 지면감쇠효과를 나타낸다. 또한, d_{ss} , d_{sr} , d 는 각각 소음원에서 방음벽 회절점, 수음점에서 방음벽 회절점, 소음원에서 수음점까지의 거리(m)를 나타낸다.

2.2 SA알고리즘을 이용한 방음벽 설계 최적화

이 글에서는 2.1절에 정식화한 방음벽 최적설계 문제의 해법으로 SA 알고리즘⁽²⁾을 적용하였다. SA는 금속의 풀림(annealing)과정에 기초한 방법으로서 탐색 과정에서 확률적으로 목적함수가 증가되는 설계변수값을 허용하여 국소 최적점을 이탈하여 전체 최적점(global optimization)으로 수렴해 가는 특징이 있다.

금속의 풀림 과정을 살펴보면 용융 상태의 금속을 서서히 온도를 낮추면 최종적으로 전체 에너지가 최소인 상태에 도달하게 된다. 이때 중간 상태 p 에서 다음 상태 q 로 넘어갈 때의 에너지 차이 ΔE 를

$$\Delta E = E_q - E_p \quad (9)$$

와 같이 산정하고, ΔE 가 음수일 때는 상태 변화를 무조건 허용하고, ΔE 가 양수일 때는 metropolis criterion으로 정의되는 확률 P_{accept}

$$P_{accept} = \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right) \quad (10)$$

만큼 조건적으로 상태 변화를 허용한다. 여기서, T 는 온도, k_B 는 Boltzman 상수이다.

SA 알고리즘은 상기 상태 변화 허용 조건을 일반적인 최적화 문제에 적용한 방법이다. 본 연구의 경우 방음벽의 설치 면적인 목적함수 $E(X)$ 가

에너지에 해당되며 상태 p 에서 다음 상태 q 로 변환되는 과정은 설계변수인 방음벽의 높이나 길이를 변화시키는 것에 해당한다. 따라서, 방음벽의 각 설계변수를 변화시켜 방음벽 설치면적을 계산 하되 초기에 최대값으로 설정한 온도 T 를 점진적으로 낮추어 목적함수 $E(X)$ 가 증가될 확률을 점진적으로 감소시키면서 T 가 지정된 최소온도에 도달하거나 $E(X)$ 가 더 이상 감소하지 않을 경우의 설계변수 값이 설치면적이 최소인 방음벽에 해당한다고 할 수 있다.

상기 SA알고리즘을 이용한 방음벽 최적설계 계산 과정은 그림 3에 나타내었다.

2.3 방음벽 최적 설계 프로그램

이 글에서는 전술한 방법을 토대로 방음벽 설계를 위한 최적화 프로그램을 Visual C++⁽⁷⁾을 이용해서 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용한 방음벽 최적 설계 순서는 그림 4에 보인 바와 같다. 개발된 프로그램은 그림 5에 나타낸 대화상자를 이용해서 방음벽 최적설계에 필요한 입력자료

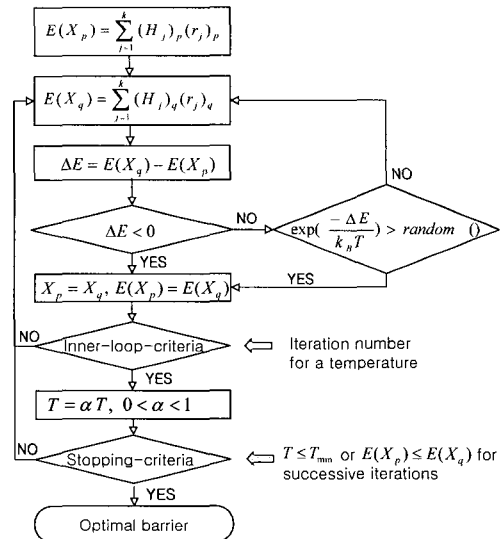


그림 3 Application procedure of SA algorithm for the optimal barrier design

특집 교통소음 저감대책

를 설정하도록 하였다. 또한, 최적화 과정중의 방음벽 형상과 면적은 그림 6에 나타낸 대화상자로

부터 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다.

3. 수치계산 에 및 고찰

이 글에서 제시한 방음벽 최적설계 방법의 타당성과 효율성을 검토하기 위한 일련의 수치계산을 수행하였다. 이때, 도로나 철도와 같은 선음원은 다수의 분할된 점음원으로 고려하였다. 수치계산에 있어서 점음원 한 개의 음향파워레벨은 도로교통소음의 음향파워 스펙트럼⁽⁸⁾을 적용하여 표 1에 나타낸 값을 이용하였다.

또한, 모든 소음원과 수음점의 높이는 각각 0.1 m, 1.5 m로 하였으며, 방음벽 설치 전·후의 수음점 소음도는 본 연구에서와 동일한 방법으로 방음벽의 차음효과를 평가하는 환경소음예측프로그램 ENPro⁽⁴⁻⁶⁾를 이용해서 산정하였다. 한편, 수치계

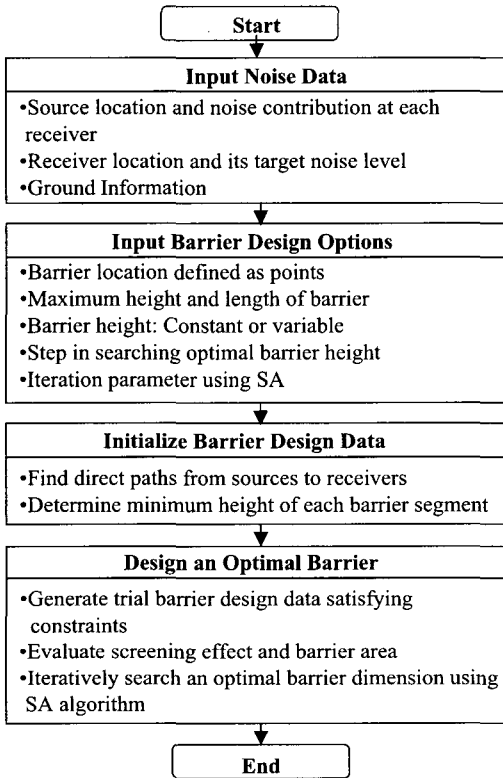


그림 4 Flow charts to design the optimal barrier

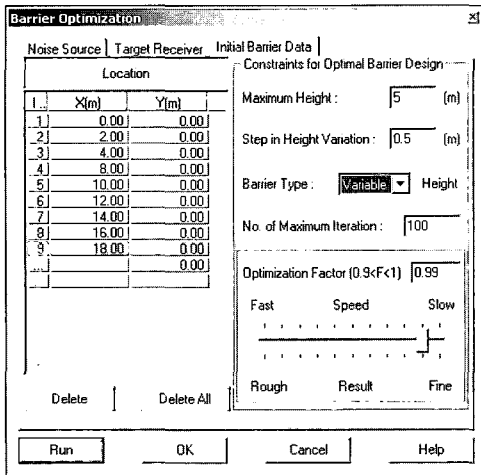


그림 5 Dialog box to specify barrier design options

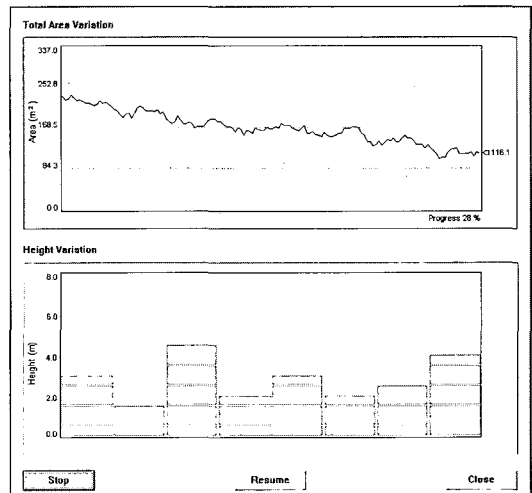


그림 6 Dialog box to show the optimizing process

표 1 Sound power level L_w of a point source (unit: dBA)

Hz	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k	Overall
L_w	74	84	93	98	100	98	94	87	104

산에 있어서 수음점의 목표소음도는 65 dBA로 설정하였다.

3.1 단일 소음원과 단일 수음점

이 글에서 제시한 방법의 타당성을 확인하고자 그림 7에 보인 바와 같이 1개의 점음원으로부터 10 m 떨어진 수음점의 소음저감을 위한 단일 높이를 갖는 방음벽을 소음원으로부터 5 m 떨어진 위치에서 소음원과 수음점을 잇는 직선에 수직인 방향으로 설치할 경우에 대한 방음벽 최적설계를 수행하였다. 이때, 설치 가능한 방음벽의 최대 높이 H_{max} 와 최대 길이 L_{max} 에 대한 구속조건은 다음과 같이 최대설치 면적이 동일한 2가지 경우로 설정하였다.

- ▣ Case A : $H_{max} = 3\text{ m}$, $L_{max} = 20\text{ m}$
- ▣ Case B : $H_{max} = 1.5\text{ m}$, $L_{max} = 40\text{ m}$

위의 2가지 경우에 대해 방음벽의 높이 방향 치수 증분을 0.1 m, 길이방향 치수 증분을 1 m로 설정하여 최적화한 결과를 표 2에 나타내고, 최적설계된 방음벽 설치 전·후의 수음점 음압도를 환경소음예측프로그램 ENPro를 이용해서 계산한 결과를 표 3에 나타내었다. 이로부터 Case A와 Case B 모두 목표 소음도 65 dB(A)를 충족시키나 최대 높이 제한 조건이 3 m인 Case A가 1.5 m로 제한한 Case B보다 방음벽 설치 면적이 적음을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 높이방향

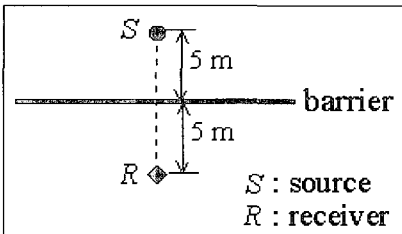


그림 7 A barrier optimization problem : Single source, single receiver

회절 효과가 좌·우측 길이방향 회절효과보다 크기 때문이다. 또한, Case A의 경우 63 Hz 대역에서 소음저감효과가 없는 것은 소음원과 수음점을 잇는 직선에 수직인 방음벽의 길이가 63 Hz에서의 음파의 파장보다 작기 때문이다.

한편, 최적설계된 방음벽 치수를 기준으로 방음벽의 길이와 높이를 증감시키면서 수음점의 소음도를 ENPro를 이용해서 평가한 결과 상기 최적설계된 방음벽보다 작은 면적을 가지면서 수음점의 목표소음도를 충족시키는 방음벽을 찾지 못하였다.

3.2 복수 소음원과 단일 수음점

이 글에서 제시한 방법을 교통 소음원과 같이 선음원에 대해 적용할 경우의 타당성을 확인하고자 그림 8에 보인 바와 같이 분할된 선음원을 나타내는 S_1 부터 S_5 까지의 5개의 동일 점음원이

표 2 Optimized barrier size : Single source, single receiver

	Length(m)	Height(m)	Area(m ²)
Case A	4.0	2.4	9.6
Case B	11.0	1.5	16.5

표 3 A-weighted SPL at the receiver with and without the optimal barrier

(unit : dBA)

Freq. (Hz)	Without barrier	Optimally designed barrier	
		Case A	Case B
63	45.9	45.9	39.9
125	55.9	50.9	48.8
250	64.9	57.9	56.6
500	69.9	60.4	60.2
1000	71.9	59.7	60.4
2000	69.8	54.8	56.2
4000	65.7	47.7	49.5
8000	58.0	38.0	39.1
Overall	76.3	65.0	65.0

일직선상에 위치한 경우에 한 개의 수음점에 대한 높이가 균일한 방음벽의 최적설계를 수행하였다. 이때, 방음벽 설치 전의 각 점음원이 수음점에 기여하는 소음도는 S_1 부터 차례대로 69.2, 73.3, 76.3, 73.3, 69.2 dBA로써 수음점의 총합 음압도는 80.1 dBA이다.

최적 설계에 있어서 방음벽의 최대 높이 및 최대 길이에 대한 구속조건은

- Case A: $H_{max} = 5\text{ m}$, $L_{max} = 50\text{ m}$
- Case B: $H_{max} = 2.3\text{ m}$, $L_{max} = 60\text{ m}$

와 같은 두 경우로 설정하였으며, 방음벽의 높이 및 길이방향 치수 증분은 0.1m로 설정하였다.

상기의 구속조건에 대해 최적설계를 수행한 결과를 표 4에 나타내었는데 두 경우 모두 수음점과 중앙에 위치한 점음원을 잇는 직선을 기준으로 방음벽의 좌·우측 길이가 동일하다. 아울러, 최적 설계 결과에 해당하는 방음벽 설치시 수음점의 음압레벨을 ENPro를 이용해서 평가한 결과 두 가지 경우 모두 목표 소음도 65 dB(A)를 충족시킴을 확인하였다.

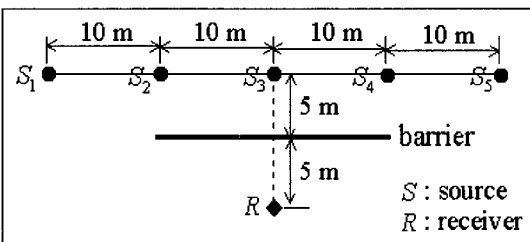


그림 8 A barrier optimization problem : Multi-sources, single receiver

표 4 Optimized barrier size : Multi-sources, single receiver

	Length(m)	Height(m)	Area(m ²)
Case A	34.0	2.4	81.6
Case B	42.0	2.3	96.6

3.3 복수 소음원과 복수 수음점

이 글에서 제시한 방음벽 최적 설계방법의 응용성을 검토하고자 그림 9에 보인 바와 같이 곡선 형태로 배치된 5개의 점음원과 사각 수음영역의 모서리부에 위치한 4개의 수음점에 대해서 직선방음벽인 Case A와 곡선방음벽인 Case B에 대한 최적 설계를 수행하였다.

방음벽 설치 전에 각 소음원이 수음점에 기여하는 소음도와 각 수음점에서의 총합 음압도는 표 5에 나타내었으며, 최적설계가 있어서 방음벽의 최대 길이와 높이는 각각 50 m, 8 m로 설정하였다.

직선 방음벽인 Case A의 경우 높이가 균일한

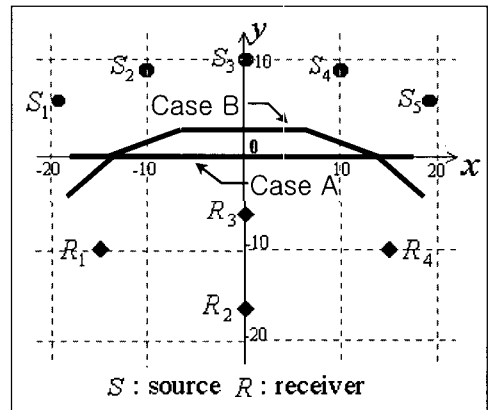


그림 9 A barrier optimization problem : Multi-sources, multi-receivers

표 5 Receiver noise levels propagated from the sources before barrier construction

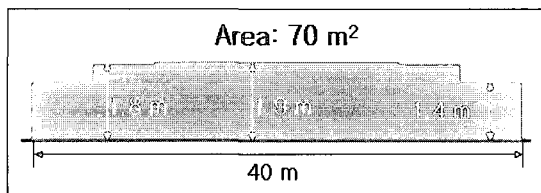
(unit : dBA)

	R_1	R_2	R_3	R_4
S_1	73.0	68.1	69.6	65.3
S_2	71.0	68.6	70.8	66.7
S_3	68.5	68.7	71.2	68.5
S_4	66.7	68.6	70.8	71.0
S_5	65.3	68.1	69.6	73.0
Overall	76.8	75.4	77.4	76.8

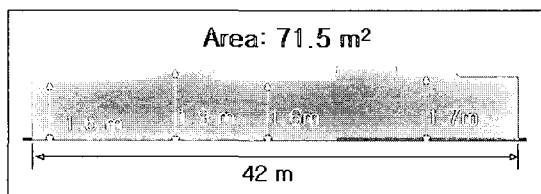
조건에서 각각의 수음점에 대한 최적화 결과와 4개의 수음점을 동시에 고려하여 수행한 결과를 표 6에 나타내었다. 이로부터 방음벽 높이를 일정하게 설계한 경우 4개의 수음점을 동시에 고려하여 최적 설계한 방음벽의 설치 면적 72.2m^2 은 개별 수음점에 대한 최적 설계치들의 최대값에 해당하는 높이 2.1m, 좌·우측 길이 20m로 할 경우의 설치면적 84.0m^2 보다 적게 산정됨을 확인할 수 있었다. 이는 개별 수음점에 대한 최적설계 결과는 복수 수음점에 대한 최적설계와 비교하여 높이 또는 길이 방향의 회절 효과가 적게 평가되기 때문이다.

표 6 Optimized barrier size: Multi-sources, multi receiver

Receiver	Length(m)	Height(m)	Area(m ²)
R ₁	32.0	1.8	57.6
R ₂	35.0	1.4	49.0
R ₃	31.0	2.1	65.1
R ₄	32.0	1.8	57.6
R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄	38.0	1.9	72.2



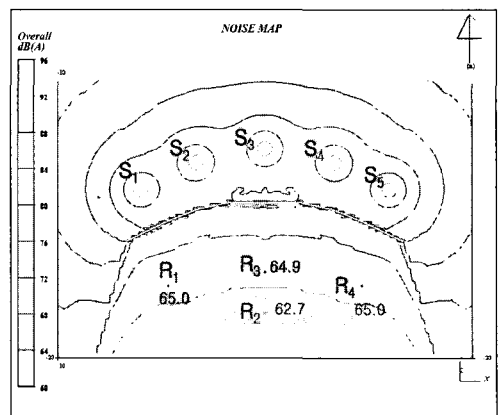
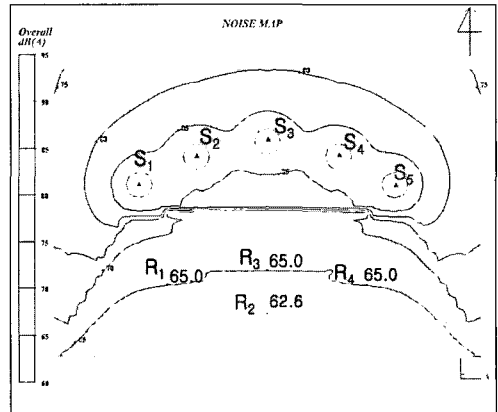
(a) Case A: Straight barrier



(b) Case B: Curved barrier

그림 10 Optimized barrier shape : Multi-sources, multi-receivers

한편, 높이가 변화하는 방음벽 설계시 본 연구에서 제시한 방법의 유용성을 검증하기 위해 Case A와 Case B에 대해서 x축을 따라서 5m 간격으로 높이가 변화할 수 있도록 한 경우에 최적설계된 방음벽 형상을 그림 10에 나타내었다. 그림 11에는 위와 같이 설계된 방음벽 설치후의 수음점 소음도를 ENPro를 이용해서 계산한 결과를 나타내었는데 모든 수음점에서의 소음도가 목표치인 65 dBA와 같거나 그 이하로써 방음벽 최적 설계 결과가 지정된 설계조건을 충족시킴을 확인할 수 있다.



(a) Case A: Straight barrier (b) Case B: Curved barrier

그림 11 Noise map after building the optimally designed barriers with variable heights

4. 맺음 말

이 글에서는 지정된 소음저감 효과를 갖는 방음벽의 효율적 설계를 위하여 방음벽 설계 문제를 정식화하고 SA 알고리즘을 이용한 최적화 방법을 제시하였으며, 일련의 수치계산을 통해 제시된 방법의 타당성과 유용성을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 방음벽 최적 설계 방법은 산업기와 같은 점음원은 물론 도로, 철로와 같이 다수의 점음원으로 모델링 가능한 선 또는 면 음원에 노출된 수음 영역의 소음 저감을 위한 방음벽의 최적 설계에 유용하게 활용될 수 있다고 판단한다.

참고 문헌

- (1) 한국도로공사, 1999, 방음시설 설치 현황.
- (2) Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., 1983, "Optimization by Simulated Annealing," Science, Vol. 220, pp. 671~680.
- (3) ISO 9613-2, 1996, "Acoustics-attenuation of Sound During Propagation Outdoors-part 2:General method of calculation," International Standard Organization, Geneva.
- (4) Cho, Dae-Seung, 2001, ENPro 3.0 User Manual, Createch.
- (5) 조대승 외 4인, 2002, "고속도로 교통소음 예측-전달감쇠 산정," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 3 호, pp. 236~242.
- (6) 김진형, 조대승, 김사수, 1999, "ISO 9613 방법에 의거한 환경소음 예측프로그램 ENPro 개발," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 624~629.
- (7) B. Stroustrup, 1997, The C⁺⁺ Programming Language Third Edition, Addison-Wesley.
- (8) 조대승 외 7인, 2002, "고속도로 교통소음 예측-자동차 주행소음의 음향파위레벨 평가," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 3 호, pp. 581~588.