

Simulated Annealing 알고리즘을 이용한 방음벽의 최적 설계 Optimal Design of Noise Barrier Using Simulated Annealing Algorithm

김병희* · 김진형* · 조대승** · 박일권***

Byung-Hee Kim, Jin-Hyung Kim, Dae-Seung Cho and Il-Kwon Park

Key Words : Noise barrier(방음벽), Optimal design(최적 설계), Simulated annealing algorithm(모의 풀림 기법), Diffraction(회절)

ABSTRACT

A successful design approach for noise barriers should be multidisciplinary because noise reduction goals influence both acoustical and non-acoustical considerations, such as maintenance, safety, physical construction, cost, and visual impact. These various barrier design options are closely related with barrier dimensions. In this study, we have proposed an optimal design method of noise barriers using simulated annealing algorithm, providing a barrier having the smallest dimension and achieving the specified noise reduction at a receiver region exposed to the industry and infrastructures, to help a successful barrier design.

1. 서 론

최근 정온한 생활환경을 구현하기 위한 노력의 일환으로 교통 또는 옥외 산업기기로부터 유발된 소음을 저감하기 위한 방음시설을 많이 설치하고 있다. 국내 고속도로의 경우에 있어서도 1999년도 기준 1,000여 지점에 총 연장길이 249,013 m, 총면적 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 소음레벨 저감량이 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 회절 효과만을 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 본 연구에서는 한 개의 점 소음원은 물론 도로, 철

도와 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)⁽²⁾ 알고리즘을 이용한 방음벽 최적 설계 방법을 제시하였다. 이때, 방음벽의 차음성능은 방음벽의 높이 및 폭 방향 회절경로를 고려하여 ISO 9613-2⁽³⁾에 규정된 방법으로 평가하였다. 제시된 방법으로 최적 설계한 방음벽의 차음 성능에 대한 타당성은 환경소음예측프로그램 ENPro⁽⁴⁾를 이용한 계산 결과와 비교·검토하여 수행하였다.

2. 방음벽 최적 설계

2.1 정식화

방음벽 설계시 목표 소음저감량은 소음저감 대상지역에 대한 소음 측정 또는 예측에 의해 결정할 수 있다. 방음벽 설치 및 유지 비용은 방음벽 설치면적 $F(X)$ 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 Fig. 1에 보인 바와 같이 소음원과 수음점을 잇는 직선에 수직인 구조물의 길이가 음파의 파장 λ 보다 커야 하며, 방음벽과 같이 단일 회절을 유발하는 구조물의 차음성능 A_b 의 최대치는 20 dB로 제한된다고 규정하고 있다.

이에 본 연구에서는 방음벽 최적 설계를 위한 목적함수

* 정회원, 부산대학교 대학원 조선해양공학과

E-mail : vs19in@intizen.com

Tel : (051) 510-3466, Fax : (051) 512-8836

** 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

*** 국방과학연구소 제2체제 개발본부

와 구속조건을 Fig. 2에 보인 바와 같이 높이 변화 기준 폭에 해당하는 임의의 방음벽 요소의 길이 r_j 와 해당 방음벽 요소의 높이 H_j 를 이용해서 다음과 같이 설정하였다.

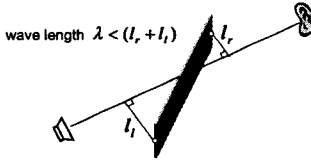


Fig. 1 Barrier having screening effect

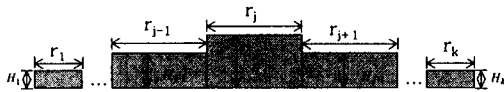


Fig. 2 Variables to design an optimal barrier

목적함수

$$\text{Minimize } F(X) = \sum_{i=1}^k H_i r_i \quad (1)$$

여기서,

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

구속조건

- 1) 사용자 지정 소음 저감량
 $\cdot g_1(X) = L_o - A_b - L_d \leq 0$ (2)
- 2) 단일 회절 효과 최대치
 $\cdot g_2(X) = A_b - 20 \leq 0$ (3)
- 3) 파장 효과
 $\cdot g_3(X) = \lambda - l_l - l_r < 0$ (4)
- 4) 방음벽 최대 설치 높이
 $\cdot g_4(X) = H_i - H_{\max} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k$ (5)
- 5) 방음벽 최대 설치 길이
 $\cdot g_5(X) = \sum_{i=1}^k r_i - L_{\max} \leq 0$ (6)

여기서, l_b , l_r 의 정의는 각각 Fig. 1에 보인 바와 같고, L_o 는 방음벽이 설치되기 전의 수음점 소음레벨, L_d 는 수음점의 목표 소음레벨을 나타낸다. A_b 는 중심주파수 63 Hz부터 8 kHz까지의 옥타브밴드별로 산정되는 방음벽 설치로 인한 소음저감량(dB)으로서 방음벽 높이 방향 회절감쇠량 A_H 와 좌·우 길이방향 회절 감쇠량 A_L , A_R 에 의해 다음과 같이 결정된다.

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

본 연구에서는 방음벽으로 인한 개별 회절경로에서의 차음효과 A_s 를 ISO 9613-2에 규정된 방법을 적용하여 중심주파수 기준 63 Hz부터 8 kHz까지의 옥타브밴드별로 다음

과 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 경로 상에서의 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

본 연구에서는 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 i 에서 다음 상태 j 로 넘어갈 때의 에너지 차이 ΔE 를

$$\Delta E = E_j - E_i \quad (9)$$

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 $F(x)$ 가 에너지에 해당되며 상태 i 에서 다음 상태 j 로 변환되는 과정은 설계변수인 방음벽의 높이나 길이를 변화시키는 것에 해당한다. 따라서, 방음벽의 각 설계변수를 변화시켜 방음벽 설치면적을 계산하되 초기에 최대값으로 설정한 온도 T 를 점진적으로 낮추어 목적함수 $F(x)$ 가 증가될 확률을 점점 감소시키면서 T 가 지정된 최소온도에 도달했을 때의 설계변수 값이 설치면적이 최소인 방음벽에 해당한다고 할 수 있다.

2.3 방음벽 최적 설계 프로그램

본 연구에서는 전술한 방법을 토대로 방음벽 설계를 위한 최적화 프로그램을 개발하고, 저자들이 기 개발한 환경 소음예측 프로그램 ENPro와 연동하여 실행할 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램을 이용한 방음벽 최적 설계 순서는 Fig. 3에 보인 바와 같다. 개발된 프로그램은 Fig. 4에 나타낸 대화상자를 이용해서 방음벽 최적설계에 필요한 입력자료를 설정하도록 하였다. 또한, 최적화 과정중의 방음벽 형상과 면적은 Fig. 5에 나타낸 대화상자로부터 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다.

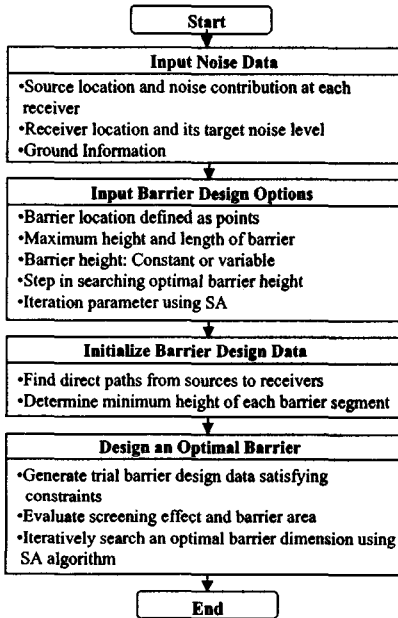


Fig. 3 Flow charts to design the optimal barrier

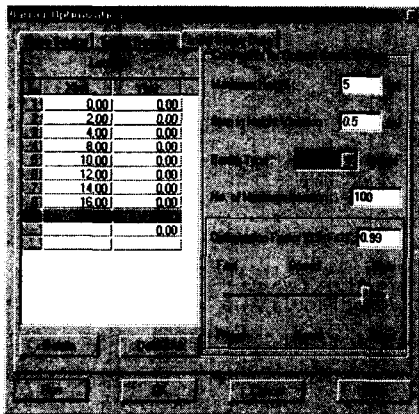


Fig. 4 Dialog box to specify barrier design options

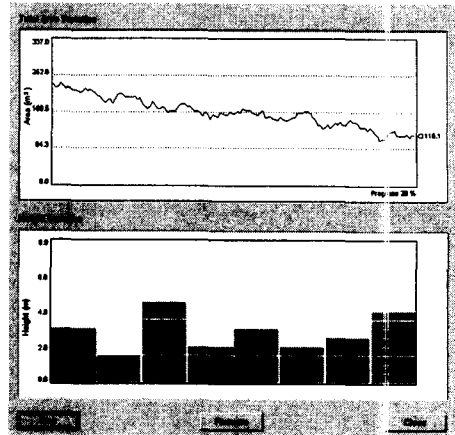


Fig. 5 Dialog box to show the optimizing process

3. 수치계산에 및 고찰

본 연구에서 제시한 방음벽 최적설계 방법의 타당성과 효율성을 검토하기 위한 일련의 수치계산을 수행하였다. 이때, 도로나 철도와 같은 선 소음원은 다수의 분할된 점 소음원으로 고려하였다. 수치계산에 있어서 점 소음원 한 개의 음향파위레벨은 도로교통소음의 음향파위 스펙트럼⁽⁵⁾을 적용하여 Table 1에 나타낸 값을 이용하였다. 또한, 모든 소음원과 수음점의 높이는 각각 0.1 m, 1.5 m로 하였으며, 방음벽 설치 전·후의 수음점 소음레벨은 본 연구에서와 동일한 방법으로 방음벽의 차음효과를 평가하는 환경소음예측프로그램 ENPro⁽³⁾를 이용해서 산정하였다. 한편, 수치계산에 있어서 수음점의 목표소음레벨은 65 cBA로 설정하였다.

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

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

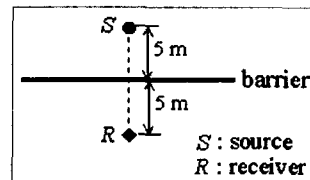


Fig. 6 A barrier optimization problem: Single source, single receiver

3.1 단일 소음원과 단일 수음점

본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 확인하고자 Fig. 6에 보인 바와 같이 1개의 점 소음원으로부터 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: $H_{max}=1.5\text{ m}$, $L_{max}=40\text{ m}$

상기 2가지 경우에 대해 방음벽의 높이 방향 치수 증분을 0.1 m, 길이방향 치수 증분을 1 m로 설정하고 최적화한 결과는 Table 2에 나타내었으며, 최적 설계된 방음벽 설치 전·후의 수음점 음압레벨을 환경소음예측프로그램 ENPro를 이용해서 계산한 결과는 Table 3에 나타내었다. 이로부터 Case A와 Case B 모두 목표 소음레벨 65 dB(A)를 만족시키나 최대 높이 제한 조건이 3 m인 Case A가 1.5 m로 제한한 Case B보다 방음벽 설치 면적이 적음을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 높이 방향 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 소음레벨을 ENPro를 이용해서 평가한 결과 상기 최적설계된 방음벽보다 작은 면적을 가지면서 수음점의 목표소음레벨을 만족하는 방음벽은 찾지 못하였다.

Table 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

Table 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

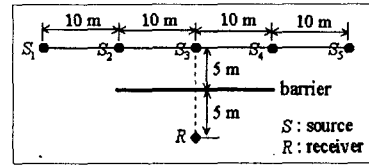


Fig. 7 A barrier optimization problem: Multi-sources, single receiver

3.2 복수 소음원과 단일 수음점

본 연구에서 제시한 방법을 교통 소음원과 같이 선 소음원에 대해 적용할 경우의 타당성을 확인하고자 Fig. 7에 보인 바와 같이 분할된 선 소음원을 나타내는 S₁부터 S₅까지의 5개의 동일 점 소음원이 일직선상에 위치한 경우에만 한 개의 수음점에 대한 높이가 균일한 방음벽의 최적설계를 수행하였다. 이때, 방음벽 설치 전의 각 점 소음원이 수음점에 기여하는 소음레벨은 S₁부터 차례대로 69.2, 73.3, 76.3, 73.3, 69.2 dBA로서 수음점의 총합 음압레벨은 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 0.1 m로 설정하였다.

상기의 구속조건에 대해 최적설계를 수행한 결과는 Table 4에 나타내었는데 두 경우 모두 수음점과 중앙에 위치한 점 소음원을 잇는 직선을 기준으로 방음벽의 좌·우측 길이가 동일하였다. 아울러, 최적 설계 결과에 해당하는 방음벽 설치시 수음점의 음압레벨을 ENPro를 이용해서 평가한 결과 두 가지 경우 모두 목표 소음레벨 65dB(A)를 만족함을 확인하였다.

Table 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

본 연구에서 제시한 방음벽 최적 설계방법의 응용성을 검토하고자 Fig. 8에 보인 바와 같이 곡선 형태로 배치된 5개의 점 소음원과 사각 수음영역의 모서리부에 위치한 4개의 수음점에 대해서 직선방음벽인 Case A와 곡선방음벽인 Case B에 대한 최적 설계를 수행하였다.

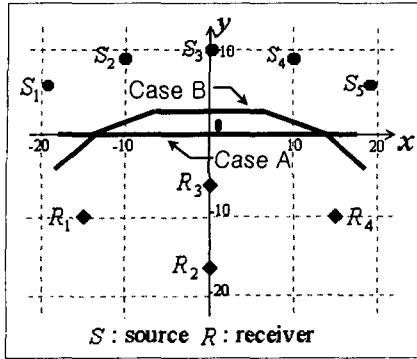
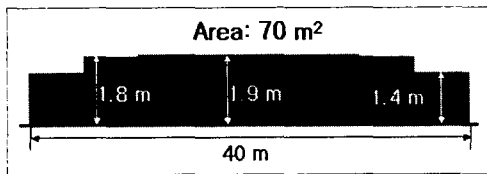


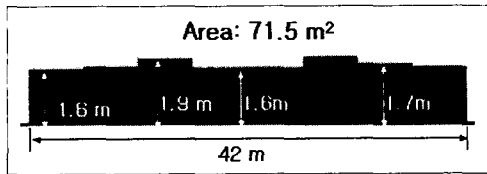
Fig. 8 A barrier optimization problem: Multi-sources, multi-receivers

Table 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



(a) Case A: Straight barrier



(b) Case B: Curved barrier

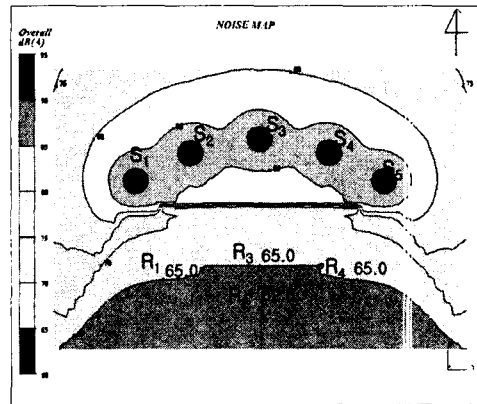
Fig. 9 Optimized barrier shape: Multi-sources, multi-receivers

방음벽 설치 전에 각 소음원이 수음점에 기여하는 소음 레벨과 각 수음점에서의 총합 음압레벨은 Table 5에 나타내었으며, 최적설계에 있어서 방음벽의 최대 길이와 높이는 각각 50 m, 8 m로 설정하였다.

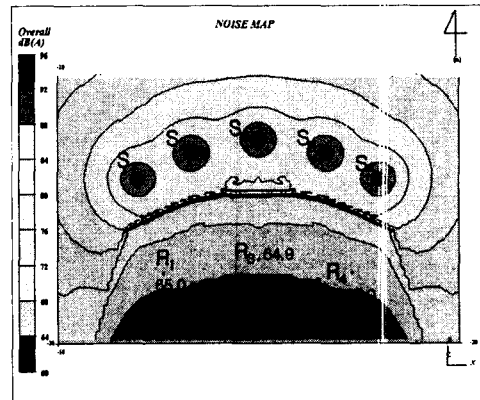
직선 방음벽인 Case A인 경우 높이가 균일한 조건에서 각각의 수음점에 대한 최적화 결과와 4개의 수음점을 동시에 고려하여 수행한 결과를 Table 6에 나타내었다.

Table 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

Fig. 10 Noise map after building the optimally designed barriers with variable heights

한편, 이로부터 방음벽 높이를 일정하게 설계한 경우 4개의 수음점을 동시에 고려하여 최적 설계한 방음벽의 설치면적 72.2 m²은 개별 수음점에 대한 최적 설계치들의 최대 값에 해당하는 높이 2.1 m, 좌·우측 길이 20 m로 할 경우의 설치면적 84.0 m²보다 적게 산정됨을 확인할 수 있었다. 이는 개별 수음점에 대한 최적설계 결과는 복수 수음점에

더한 최적설계와 비교하여 높이 또는 길이 방향의 최적 효과가 적게 평가되기 때문이다. 높이가 변화하는 방음벽 설계시 본 연구에서 제시한 방법의 유용성을 검증하기 위해 Case A와 Case B에 대해서 x 축을 따라서 5m간격으로 높이가 변화할 수 있도록 한 경우에 최적설계된 방음벽 형상을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 10에는 상기 설계된 방음벽 설치후의 수음점 소음레벨을 ENPro를 이용해서 계산한 결과를 나타내었는데 모든 수음점에서의 소음레벨이 목표치인 65 dBA와 같거나 그 이하로서 방음벽 최적 설계 결과가 지정된 설계조건을 만족함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 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 산업기기와 같은 점 소음원은 물론 도로, 철도와 같이 다수의 점소음원으로 모델링 가능한 선 또는 면 소음원에 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. 671~780.
- (3) ISO 9613-2, 1996, "Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part 2: General method of calculation", International Standard Organization, Geneva.
- (4) Dae-Seung Cho, 2001, ENPro 3.0 User Manual, Createch.
- (5) 조대승 외 7인, 2002, "고속도로 교통소음 예측 - 자동차 주행소음의 음향파위레벨 평가", 한국소음진동공학회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 581~588.
- (6) 하지형, 최태묵, 조대승, 2001, "유전자 알고리즘을 이용한 직선방음벽의 최적 설계", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 127~132.
- (7) S. A. Tenkolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, 1992, Numerical Recipes in C, Cambridge.
- (8) B. Stroustrup, 1997, The C++ Programming Language Third Edition, Addison-Wesley.
- (9) Beranek, L. L., and Ver, I. L., 1992, Noise and Vibration Control Engineering - Principles and Applications, John Wiley & Sons, New York, Chap. 5.