

교통소음저감을 위한 음향간섭모델의 최적화설계에 관한 연구

The Study on the Optimum Design of Acoustic Interference Model for Traffic Noise Reduction

장강석* · 김영찬** · 김두훈** · 이재환***

Kang-Seok Jang, Young-Chan Kim, Doo-Hoon Kim, Jae-Hwan Lee

Key Words : SSA(단순유전자 알고리즘), SSGA(중복유전자 알고리즘), Interface Model (간섭모델), Prototype Test(모형시험), Line-of-Sight(가시선)

ABSTRACT

An experimental method to investigate the dynamic characteristics of buoys in extreme environmental condition is established. Because the buoy model requires a reasonable size for accurate experiment, the test condition in model basin that satisfies the similarity law is hardly compatible with capability of test facilities. It is suggested that the linear wave component that is unable to satisfy similarity is separated with others. (중략)

1. 서 론

본 연구의 목적은 교통소음저감을 위한 음 간섭모델의 형상 최적화를 하는 것으로, 유전자 알고리즘의 다양한 기법들을 적용하여 수렴성 및 전역 탐색에 대한 신뢰성을 확인하였다. 또한 유전자 알고리즘의 메커니즘을 규정하는 지놈의 유형, 선택 방법, 스케일링 방법, 교배 방법 등을 서로 다르게 적용하여 그 결과를 비교 검토함으로써 수렴에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 형상 최적화를 수행하기 위한 프로그램을 개발하였으며, 프로그램에 고려된 사항은 다음과 같다.^{(1)~(3)}

첫째, 본 연구에는 단순 유전자 알고리즘(simple genetic algorithm, SGA)과 정해진 중복 조건에 의해 집단 크기를 유지하며 일정 부분 새로 도입되는 인자 수만큼 열성인자를 제거하는 중복 유전자 알고리즘(steady state genetic algorithm, SSGA) 등을 이용하여 형상 최적화를 수행하였다.

둘째, SGA의 최적화에 있어서 전 세대의 최대 적합도와 현 세대의 최대 적합도를 비교하여 더 좋은 적합성을 가지는 염색체를 현세대에 남겨 두는 엘리티즘을 적용하였다.

셋째, SGA보다 더 많은 세대를 요구하고는 있으나 최적 해에 수렴하기까지 목적함수를 호출하는 횟수는 적은 SSGA를 병행 사용하여 수렴 및 적합성을 평가하였다.

넷째, 음 간섭모델의 형상 최적화는 소멸 간섭 효과와 크기 최소화를 목적으로 하고 있으나, 음향 성능 최적화에 더 큰 비중을 두고 목적함수를 설정하였으며 크기 최적화는 가중치(weighting) 함수를 구현하여 최종 적합도 계산 시 고려하도록 프로그래밍 하였다.

다섯째, 음 간섭모델의 형상 개발은 실제 응용 및 실용화를 대상으로 하고 있으므로 방음 시설물의 설계 법과 표준 등을 고려하여 제한조건을 설정하였다.

일반적으로 유전자 알고리즘은 최적점 부근에서 수렴이 늦고 국부 탐색 능력이 낮은 단점을 갖고 있기 때문에 유전자 알고리즘만으로는 효과적인 방법이 되기 어려우므로, 우수한 국부 최적화 방법을 이용 유전자 알고리즘에 국부 탐색 능력을 부여하여 좀더 효율적이고 신뢰성 높은 해를 찾는 것도 필요하다. 한편 위와 같은 요소들을 고려하여 계산된 결과는 음 파동이론에 기초한 경계요소법 (boundary element method, BEM)을 이용하여 검증하였으며^{(4)~(5)}, 설계된 형상

* 유니슨(주) 기술연구소
E-mail : jks@unison.co.kr
Tel : (041) 620-3411, Fax : (041) 622-7416
** 유니슨(주) 기술연구소
*** 충남대학교 선박해양공학과

에 대해 일정 범위 내에서의 BEM 음향해석을 수행하여 Line-of-Sight 상부의 교통소음을 저감하기 위한 음 간섭모델의 형상을 결정하였다.⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾

2. 음 간섭모델의 정식화

본 연구에서는 새로 고안된 음 간섭모델(경로 1, 경로 2, 그리고 경로 3의 위치 및 내부 격자의 길이, 폭, 위치 등을 조절하여 소음 발생 환경에 따른 특정 주파수의 소음 제어 영역을 변경하는 것이 가능)에 대해 기존의 단순격자에 대한 연구 결과와 광 대역 소음의 주파수특성⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾ 등을 설계 제한조건으로 하여 Fig. 1과 같은 수치 모델을 완성하였다. Fig. 1의 수치 모델에서 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 위치는 단순격자에 대한 간섭 연구 결과에서 10cm 정도가 대상 주파수 범위에서 가장 최적의 폭임을 알 수 있었으며, b_1, b_2 위치는 방음 시설 규정 및 규격에 따라 자동 결정 되는 위치이다. 따라서 가변 되는 위치는 내부 격자 r_1, r_2, r_3 위치이며, 이에 따라 간섭모델의 형상 및 크기가 결정된다. 본 연구에는 여러 가지 설계 변수, 목적함수, 제한조건 등이 도입되었으며, 중요한 제한조건 및 가중함수는 2.1~2.4절에 나타내었다.

2.1 제한조건(constrain condition)

Direct path(Dir_i)는 1차 제어 주파수 $\frac{3\lambda}{4}$ 과 유사해야 한다. 즉 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$Dir_i \approx \lambda_{1st} \quad (\text{Above } 0.8\text{m at } 250\text{Hz}) \quad (1)$$

이 조건에 의해 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 가 결정되며, b_1, b_2 위치도 정의 할 수 있다. 또한 Fig. 1에서 d_{11}, d_{12}, d_{13} 도 계산할 수 있으며 직접 전달 경로 길이(direct path) Dir_i 는 간섭모델을 내부를 통과하는 전달 경로 길이(induced path) Ind_i 보다는 항상 작아야 한다. ($Dir_i < Ind_i$).

2.2 설계변수(design variable)

설계 변수는 폭(a_i)과 길이(r_i) 등이 주요 인자이나, 실험과 경험 치에 미루어 a_i 는 계산할 수 있으므로, 주요 설계 변수는 r_1, r_2, r_3 이며 이 길이들에 의해 형상과 크기를 결정할 수 있다.

2.3 목적함수(object function)

격자내부를 통과하는 induced path의 길이 Ind_1, Ind_2, Ind_3 는 식 (2)과 같이 계산할 수 있으며,

$$Ind_i = \sum_{i=1}^3 (d_i + d_{ri}) \quad (2)$$

이때 d_1, d_2, d_3 는

$$d_1 = (a_2 - a_1) + \frac{(a_3 - a_2)}{2} + (2 * r_1 - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2})$$

$$d_2 = (a_3 - a_1) + \frac{(a_4 - a_3)}{2} + (2 * r_2 - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2})$$

$$d_3 = (a_4 - a_1) + \frac{(a_5 - a_4)}{2} + (2 * r_3 - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2})$$

와 같이 나타낼 수 있다.

한편 내부 경로를 거치지 않고 간섭모델 위로 지나가는 direct path Dir_1, Dir_2, Dir_3 는 주어진 조건에서 산정이 가능하다. 따라서 간섭모델 설치 전/후의 음 간섭 위상차는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Diff_i = \sum_{i=1}^3 (Ind_i - Dir_i) \quad (3)$$

따라서, 유전자 알고리즘의 목적함수는 경로 차가 파장의 한배가 넘지 않는 주파수 범위와 파장의 배수가 되는 길이를 구분하여 식 (4)~(5)와 같이 설정할 수 있다.

$$\text{만일, } Diff_{ij} < \lambda_j \quad (j \text{ is } 250 \text{ to } 4000 \text{ step } 10) \\ Obj_{ij} = \sum_{j=250}^{4000} (\sum_{i=1}^3 Diff_i) \quad \text{if } \frac{\lambda}{4} < Obj_{ij} \frac{3\lambda}{4} \quad (4)$$

만일, $Diff_{ij} > \lambda_j$ (q_n 는 $Diff_{ij}/\lambda_j$ 의 정수 부분)

$$Obj_{ij} = \sum_{j=250}^{4000} (\sum_{i=1}^3 Diff_i) - q_n \cdot \lambda_j \quad \text{if } \frac{\lambda}{4} < Obj_{ij} \frac{3\lambda}{4} \quad (5)$$

2.4 가중함수(weighting function)

목적함수는 교통 주파수의 주요 주파수대역에서 보강 간섭보다 상쇄 간섭이 발생하는 영역이 크도록 설계되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 각 경로 길이에 따른 주파수대역별 가중치 함수들(weighting functions)을 구현하여 최적화 설계를 수행하였다. 사용된 가중치 함수는 특정 주파수 영역에서 상쇄 간섭이 일어날 경우 Obj_{ij} 값을 증가 시키는 $w(f_i)$ 와 경로 1에서 상쇄 간섭이 일어날 경우 경로 2와 경

로 3에서의 간섭 효과는 적게 발생하도록 하는 가중 함수 $W(f_i)$ 를 사용하였다. 위와 같은 가중 함수를 사용할 경우 유전자 알고리즘의 최종 평가 함수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{total} = \sum_{j=20}^{inf} \sum_{i=1}^3 (Q_{ij} * W(f_i)) \quad (6)$$

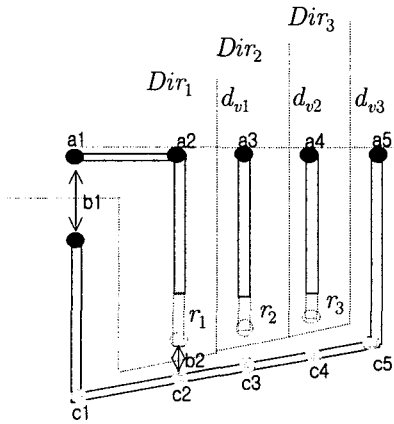


Fig. 1. the numerical model of the interference model.

3. 최적화 형상설계

본 연구에서는 유전자 알고리즘 중 교배, 선택, 돌연변이 등을 이용하여 항상 새로운 개체를 생성하는 단순 유전자 알고리즘(SGA)과 정해진 중복 조건에 의해 집단의 크기를 유지하며 일정 부분 새로 도입되는 인자 수만큼 열성인자를 제거하는 중복 유전자 알고리즘(SSGA) 등을 이용하여 최적화 형상 설계에 관한 연구를 하였다. 한편 음향이론에 바탕을 둔 BEM 해석을 각각의 최적 값들에 대해 수행하여 최적화된 형상 및 크기에 대한 적합성을 검토하였다.

3.1 SGA와 SSGA의 비교

초기의 집단세대수와 전달자손 횟수에 대한 GA의 전달방식에 따른 수렴성과 적합성을 SGA와 SSGA에 대해 검토하였다. 검토방법은 아무런 가중치함수도 부여하지 않고 식 (1)~(5)과 같은 제한함수와 목적함수만을 이용한 전역최적화 프로그램을 이용하였다. 먼저 SGA를 이용하여 초기의 집단세대수를 500세대로 고정하고 새로운 자손의 집단세대를

구성하는 전달 자손 횟수를 100~10000회까지 일정 간격으로 변화시켜가며 수렴성 및 최적 해에 미치는 영향을 검토하였다. 이때 전달자손 수가 300회 이상이 되면 적합도 값이 특정값으로 수렴하는 알 수 있었으며 자세한 것은 Fig. 2 (전달자손 수 500회까지만 표현)에 나타내었다. 또한, 전달자손 횟수를 500회로 고정하고 초기 집단세대를 100~1000회 까지 늘어가며 최적화를 수행하는 과정을 30번 반복 계산하여 경로 1에 대한 최적값의 산포도를 살펴보았다. 그 결과 SGA는 다음자손의 집단세대를 구성 할 때 모든 세대를 다시 재구성하기 때문에 위와 같이 단순한 SGA를 사용한 경우 수렴속도가 상당히 느릴 뿐만 아니라, 반복 계산에 따라 최적값이 넓은 범위에 분포되어 최적값을 유추하기가 어렵다. 그러므로 이와 같은 SGA의 단점을 보완하기 위해 전 집단세대에서 가장 우수한 세대는 그대로 남겨두고 새로운 자손의 집단세대를 구성하는 엘리트즘(elitism) 이론을 프로그램에 적용하였다. 그 결과 경로 1, 경로 2, 경로 3의 70번 반복 계산에 따른 최적 값의 산포도가 일정한 경향을 가지고 나타나는 것을 알 수 있었다.

한편 SSGA의 경우 초기 집단세대에서 어느 정도의 세대를 교체하여 다음 세대로 진화를 진행할지가 가장 중요한 요소로 작용하게 된다. 그러므로 다음 자손의 집단세대 구성 시 현재세대의 집단 중 다른 새로운 세대로 대체하는 비율을 10%~90% 까지 증가 시키며 최적화를 한 결과, SSGA에서는 새로운 세대 구성 시 기존 세대를 90% 이상 교체 하면 상당 부분 발산하였으며 수렴범위 또한 상당히 넓어 아무런 가중치를 주지 않은 SGA 보다도 좋지 않은 결과를 보였다. 이러한 발산은 대체비율이 30% 이내로 되어야 발생하지 않으며, 반복계산에 따른 최적값의 산포범위도 대체비율이 낮을수록 일정범위로 수렴되는 것을 알 수 있었다. 계속해서 대체비율을 10%로 고정하고 교배비율은 변경해 가면서 최적화를 수행한 결과 교배비율이 가장 낮은 0.3이 가장 좋은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 SSGA의 경우 교체비율과 교배비율이 낮으면 낮을수록 SGA에 비해 훨씬 많은 시간이 요구되며, 무엇보다도 교배비율이 낮아지면 가중치 함수를 부여해도 넓은 범위의 국부탐색 능력이 부족해 빈도수가 높은 전역 해의 값을 제대로 발견하지 못한다. 그러므로 본 연구 대상의 경우 SGA가 보다 더 수렴성 및 설계 적합성이 있는 것으로 판단되어 SGA에 가중치함수를 부여해가며 보다 적합한 최적화 값을 얻기 위한 연구를 수행하였다.

3.2 SGA를 이용한 최적화 형상설계

SGA의 최적 값이 넓은 산포도를 갖는 단점을 보완하고 음향학적으로 유리한 조건에 보다 큰 적합도 값을 가지도록

하기 위해 특정주파수 가중함수 $W(f_1)$, 경로 차 가중함수 $W(f_2)$, 중량 최소화 가중함수 $W(f_3)$ 등을 도입하여 적용하였다. 이와 같은 가중치 함수들을 모두 적용하고 교배비율을 30%~70%까지 변경해가면서 수렴성 및 적합도를 검토한 결과, 교배비율 70%에서 경로 1의 설계 범위가 22cm~43cm로 가장 좋은 산포도를 나타내었다. 기타 초기 집단세대수 및 전달자손 횟수 등을 다양하게 변경 해가며 검토를 수행한 결과, 초기 집단세대는 500세대 그리고 전달자손 횟수는 1000회 이상이 되면 가장 좋은 수렴성, 적합성, 그리고 최적값의 산포도를 보였다. 이와 같은 과정을 100회 이상 반복하여 최적화 설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 경로 1의 경우 22.6cm, 29.4, 36.2cm, 43.0cm 등의 최적점으로 수렴하는 것을 알 수 있었다.
2. 경로 2와 경로 3은 Table 1에서와 같이 22.6cm, 43.0cm 등은 국부 최적 점으로 수렴했으나 36.2cm인 경우는 국부 최적 점으로 수렴하지 않고 다소 넓은 범위를 갖는 것으로 평가되었다. 반면 경로 1이 36.2cm 일 때 적합도 값은 가장 높게 나타나 이 부근에서의 국부 최적화를 수행할 필요가 있는 것으로 평가되었다.

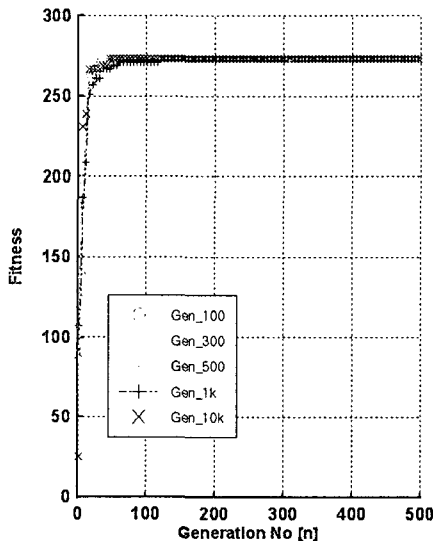


Fig. 2. Comparison of the convergence at initial optimization using SGA with 500 population.

Table 1. Values of design variables at opt. points.

Item	1'st	2'nd	3'rd	Fitness
Local 1	22.6cm	21.0cm	24.0cm	498.1
Local 2	29.4cm	33.7cm	38.0cm	504.5
		33.8cm	31.2cm	512.7
		27.1cm	31.2cm	520.7
		27.1cm	24.4cm	548.0
		20.1cm	24.4cm	518.2
Local 3	36.2cm	40.5cm	40.1cm	434.0
		40.5cm	38.0cm	451.2
		40.6cm	31.2cm	480.4
		33.7cm	38.0cm	496.4
		33.7cm	31.2cm	550.0
		26.9cm	31.2cm	512.0
Local 4	43.0cm	40.5cm	38.0cm	491.1
		33.7cm	38.0cm	488.2

3.3 경계요소법을 이용한 성능평가

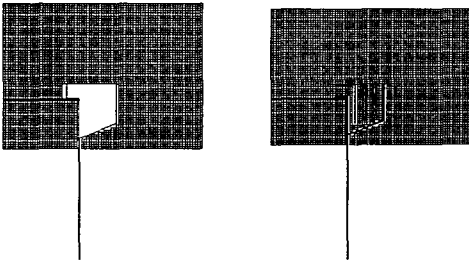
초기 해 집단 수를 3000세대까지 늘여 가며 SGA를 이용하여 최적화를 수행한 결과; 1'st~3'rd 경로 길이에 대한 설계 값은 Table 2의 Case 2, 4, 6과 같으나, 최적화된 간섭모델의 설계 값에 대한 적합성 및 음향 성능을 검증하기 위해, Table 2과 같이 최적화 범위에서 벗어난 크기의 모델을 포함하여 BEM 음향 해석을 수행하고 그 결과를 비교 분석하였다.

Table 2. The design dim. of acoustic performance test.

Item	1'st	2'nd	3'rd
Case 1	20cm	15cm	10cm
Case 2	29cm	23cm	18cm
Case 3	33cm	28cm	23cm
Case 4	36cm	29cm	29cm
Case 5	38cm	33cm	28cm
Case 6	43cm	38cm	33cm
Case 7	43cm	38cm	38cm
Case 8	55cm	50cm	45cm
Case 9	55cm	50cm	50cm

음향 성능의 비교 평가는 Fig. 3와 같이 내부 격자를 갖는 간섭모델과 내부 격자를 갖지 않는 단순 형상의 모델에 대해 각각 음향 해석을 수행한 후 이 두 모델의 음압레벨 차를 이용 간섭에 대한 효과를 파악하였다. Fig. 3과 같은 음향 해석 모델을 이용하여 음향 성능 평가를 수행한 결과; 주파수대역이 200Hz~1500Hz까지 범위에서는 Case 4의 경

우가 가장 음향 성능이 우수한 것으로 나타났으며, 500Hz~1500Hz 경우는 Case 6이 음향 성능이 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 설계 범위에서 벗어난 Case 8~9의 경우 Case 4나 Case 6에 비해 성능이 현저히 떨어지는 것으로 평가되었다. 따라서 음향 해석 결과 SGA를 이용한 형상 최적화의 적합성을 검증할 수 있었으며, 자세한 분석 결과는 Fig. 4~5에 나타내었다.



(a) without inner split (b) with inner split
Fig. 3. The acoustic models for performance test.

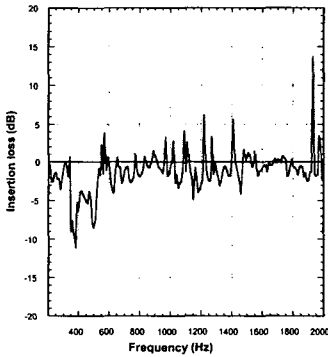


Fig. 4. IL of inner split by Case 4 at upper split.

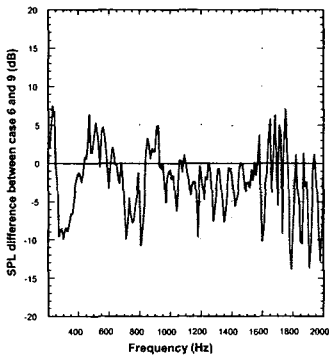


Fig. 5. Comparison of IL bet. Case 4 & Case 9.

4. 음향실험을 통한 성능평가

앞 절의 간섭모델이 실제 현장에 적용될 경우에는 외부 형상 및 끝단 효과 등으로 인해 해석적인 결과와는 다소 다른 경향을 보일 수 있다. 따라서 격자 내부의 배치 및 길이 조절에 따른 주파수의 변동 특성 등을 규명하는 것도 향후의 연구를 위해서는 중요한 일이며, 회절 부에 삽입한 흡음재료 또한 배후 공기층 및 전면 다공판 설치로 인한 영향 등은 이론적으로 검증하기가 힘든 부분이다. 본 연구에서는 무향실에서 prototype 모델이 설치된 noise barrier와 같은 높이를 갖는 단순한 noise barrier에 대해 성능 평가를 수행하였으며, 이 결과를 상호 비교하여 간섭모델에 대한 음향 특성 및 성능을 평가하였다. 성능 시험 자료를 분석한 결과; 단순 noise barrier로는 저감이 어려운 300~500Hz 주파수대역에서 15dB의 큰 소음 저감 효과가 600~800Hz 주파수 대역에서는 평균적으로 3dB 내외의 저감 효과를 확인하였다. 한편 보강 영역인 500~600Hz에서는 다소 증가하는 경향을 보여 BEM 해석 결과와 거의 일치됨을 보였다. 반면, 상쇄 간섭에 의한 소음 증가 효과는 상대적으로 작게 나타나 유전자 알고리즘에 의해 최적화된 간섭모델이 광 대역 소음 제어에 효과적임이 입증되었으며, BEM 음향 해석과의 비교 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

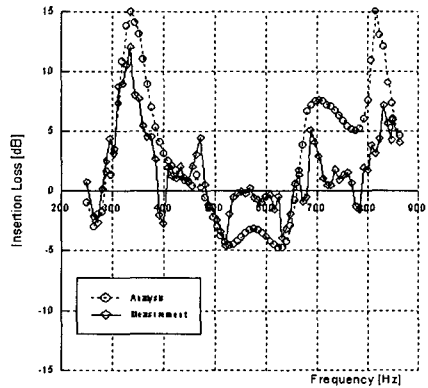


Fig. 6. Anechoic chamber test of new inter. model.

5. 결 론

본 연구는 최근 급격한 환경 소음 문제로 대두되고 있는 Line-of-Sight 소음 저감 문제를 해결하기 위한 노력의 하나로 SGA를 이용하여 새로운 소음 저감 기법인 간섭모델의 형상 및 크기 최적화를 시도하였다. 위와 같은 연구를 통해

Line-of-Sight 상부의 소음을 줄일 수 있는 음 간섭모델의 최적화 형상을 개발하였으며, 음향 시뮬레이션 및 성능시험을 수행하여 그 타당성을 입증하였다. 이로서 Line-of-Sight 상부의 교통소음을 줄일 수 있는 새로운 소음저감기법을 확보하였으며, 기존 문제를 극복할 수 있는 방안 제시하였다.

참 고 문 헌

- (1) Malanie Mitchell, 1996, An Introduction to Genetic Algorithms, MIT.
- (2) Zbigniew Michalewicz, 1996, Genetic Algorithms Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag.
- (3) Mitsuo Gen and Runwei Cheng, 1997, Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (4) 정성수 외, "BEM에 의한 방음벽의 삽입손실 예측", 한국소음진동공학회 춘계학술대회, pp. 685-690, 1999
- (5) 이우섭 외, "BEM에 의한 고속전철용 방음벽의 설치효과 예측", 한국소음진동공학회 창립10주년 논문집, pp 1355-1359, 2000.
- (6) 장강석 외, "교통소음제어를 위한 간섭형 방음장치 형상 개발에 관한 연구", 대한전문건설협회 철물공사 기술자료집, pp 108-121, 2000.
- (7) 장강석 외, "철도소음저감을 위한 방음벽상단 간섭효과에 관한 연구", 한국철도학회, 춘계학술대회 논문집, 2002.
- (8) 황선근 외, "철도 소음·진동의 효율적 저감방안 연구", 한국철도기술연구원 보고서, 1997-2000.
- (9) 최강윤 외, "고속철도 소음원 특성과 환경소음 대책에 관한 조사", 한국고속철도건설공단 보고서, 1996.
- (10) 윤서성 외, "단지내 도로교통소음예측 및 개선에 관한 연구", 한국토지공사 보고서, 2002.