



산간도로 안전시설물의 강성 개선을 위한 보강단면 최적 설계

Optimal Design about The Reinforced Frame Shapes for Increasing Stiffness of Infrastructure Safety

정우영* 강지훈** 심영환*** 김남정****
 Jung, Woo Young Kang, Ji Hoon Shim, Young Hwan Kim, Nam Jung

1. 서론

최근 태풍에 의한 산간도로 안전시설물의 피해가 급증하고 있으며, 특히 산간도로의 방음벽, 방풍벽과 같은 시설물은 바람의 영향을 많이 받게 됨으로써 그 피해가 더욱 심각하여 보강 대책이 시급하다. 안전시설물에 대한 정부기관 및 관련 업체의 관심이 높아지고는 있으나 아직 산간도로 안전시설물의 시공에 대한 안전 기준이나 설계, 시공 지침서가 이루어지지 않은 상태이다. 또한 현재 시공되어지는 방음벽, 방풍벽으로는 방음 효과 및 풍력 저항 기능을 제대로 실현할 수 없다는 연구결과가 보고되고 있다. 이들 연구결과에 따르면, 방음벽의 높이가 낮기 때문에 방음벽 위쪽으로는 방음이 이루어지지 않아 방음효과가 떨어지는 것으로 보고하고 있으며 현재 시공되어지는 방풍벽으로는 강성이 부족하여 태풍과 같은 강한 바람에는 저항할 수 없다고 보고하고 있다. 따라서 방음벽, 방풍벽과 같은 산간도로 안전시설물의 제기능 발휘를 위해서는 구조물의 강성을 증대 시킬 필요가 있으며 아무런 시공지침서 없이 시공되어진 기존의 안전시설물에 대한 새로운 형태의 시공과 추가적인 보강이 필요하다. 산간도로 안전시설물의 강성 개선에 대한 연구의 한 예로서 본 연구에서는 방음벽에 대한 강성 개선을 위하여 지주프레임의 보강에 중점을 두어 방음벽의 내구성 확대와 더불어 시공성, 경제성, 생태계복원 등의 누적효과를 고려한 방음벽프레임 보강에 대한 연구를 수행하였으며 신소재 복합재료(FRP)를 이용한 실험적, 해석적 연구를 통하여 안전하고 경제적인 친환경 방음벽 개발에 따른 구조적 평가, 경제성, 활용성 등을 고려한 지주프레임의 최적단면형상 개발을 통한 시공성의 향상과 방음벽 강도 증진을 가질 수 있는 방음프레임을 개발 하고자 하였으며 향후 비슷한 구조형식을 가진 방풍벽과 다른 안전시설물의 강성 개선을 위한 연구의 기초자료로의 활용으로 대략적인 강성 개선 방안에 대한 방법을 제시하고자 하였다.

2. 방음벽 지주프레임의 최적 보강 방법 결정

2.1 강성의 정의

강성(stiffness)이란 재료에 변형을 가할 때 재료가 그 변형에 저항하는 정도를 말한다. 탄성체에 외부의 힘이 가해졌을 때의 변형은 힘이나 모멘트의 크기 외에 탄성체의 형상, 지지방법, 재료의 탄성계수 등에 따라서 달라진다. 일반적으로 재료의 강성은 단위변화량에 대한 외력의 값으로 나타낸다. 본 연구에서는 $k=P/\delta$ 의 식에 근거하여

* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · (E-mail : woojung@kangnung.ac.kr)
 ** 학생회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · (E-mail : kangjh82@hanmail.net)
 *** 학생회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · (E-mail : prosim21@naver.com)
 **** 학생회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · (E-mail : knj3762@nate.com)



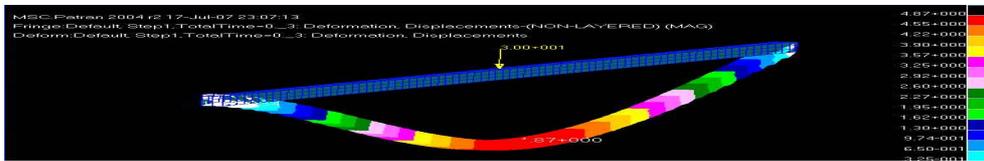
P, δ 그래프에서 기울기를 이용한 강성 k값을 계산하였으며, $k=EI/L$ 의 식에 근거하여 단면보강에 의한 단면적의 증가를 통한 I값을 증가시키는 방법과 프레임의 재료를 교체하여 탄성계수 E를 증가시키는 두 가지 방법으로 강성 k의 증가를 수행하였다.

2.2 단면 보강에 대한 해석적 연구

방음벽 지주프레임의 단면보강에 대한 실험적 연구를 수행하기에 앞서 지주프레임의 단면보강에 대한 다양한 방법들에 대하여 유한요소해석 프로그램을 이용한 간단한 해석을 통하여 대략적인 보강효과를 알아봄으로써 실험적 연구에서 발생할 수 있는 시행오차에 대한 불필요한 시간을 줄이고 최적의 보강단면결정을 위한 효과적인 방안을 찾는 데 그 목적이 있다.

2.2.1 해석방법 및 설계

해석에 사용된 지주프레임은 가로40mm, 높이60mm, 길이 1000mm로 설계하였으며 단면보강에 대한 여러 가지 방안에 대하여 <그림 1>과 같이 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Case별 강성비교를 통한 보강효과에 대한 효율성을 평가하였으며 보강방법에 대한 내용은 <표 1>로 확인할 수 있다. 한국도로공사에서는 풍하중 $3.0KN/m^2$ 의 재하 시 기준 변위를 50mm로 제한하였으며 본 논문에서는 도로공사의 실험 기준에 근거하여 연구를 수행하였다.



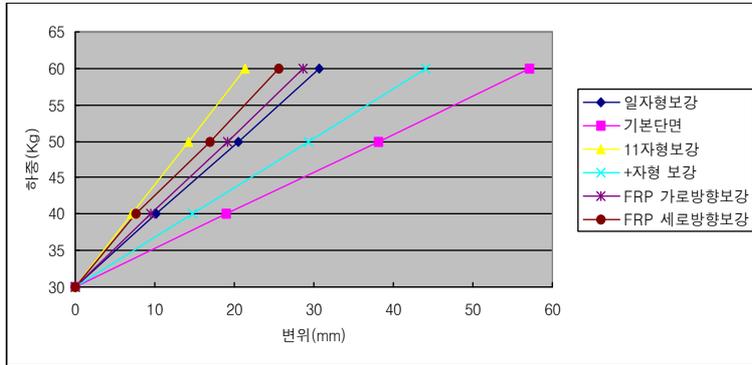
<그림 1> ABAQUS를 이용한 지주프레임 해석

<표 1> Case별 보강 방법

종류		보강방법
Case1	1	기존 알루미늄 프레임
Case2	2	보강 Bar 중앙 보강
Case3	3	페타이어 속채움 보강
Case4	4-1	FRP 세로방향 보강
	4-2	FRP 가로방향 보강
	4-3	FRP 전체 보강
Case5	5	"11"자형 보강 Bar 보강
Case6	6	"+" 자형 보강

2.2.2 해석 결과 및 고찰

지주프레임의 단면보강에 대한 해석적 연구를 통한 강성 비교 결과 FRP를 이용한 보강이 다른 보강에 비해 전체적으로 강성이 높음을 나타내었다. 이는 FRP를 활용한 부분적 보강이 경제적, 구조적 측면에서 기타 다른 방법에 비하여 우수하다는 것을 의미한다. 따라서 해석적 연구의 결과를 바탕으로 다음 실험적 연구에서는 FRP보강 방법에 대하여 좀 더 중점적으로 연구되어 질 것이며 실험적 연구와의 강성 결과 비교를 통하여 방음벽 지주프레임의 보강단면 최적 설계에 대한 신뢰성 있는 연구를 수행하고자 하였다.



〈그림 2〉 강성 비교 그래프

2.3 단면 보강에 따른 휨 성능 평가 실험

2.3.1 실험방법 및 계획

지주프레임의 단면보강에 대한 해석적 연구를 바탕으로 보강의 효과가 뛰어난 몇 가지 보강 방법에 대하여 실제 단면 보강 지주프레임 제작을 통한 실험적 연구로서 방음벽 지주프레임의 단면 보강에 따른 실제 휨 성능 평가에 관한 연구이다. 실험체 제작은 폭 40mm, 높이 60mm, 길이 1000mm로 제작하였으며 동일한 알루미늄 프레임틀을 바탕으로 여러 가지 형태의 보강이 추가적으로 이루어졌다. 지주프레임의 보강 방법에 대한 내용은 〈표 2〉로 확인할 수 있다.



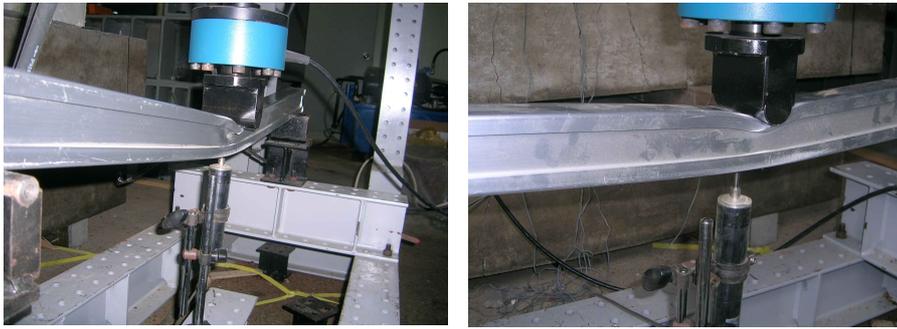
〈그림 3〉 지주프레임 보강 형태에 따른 실험 시편

〈표 2〉 지주프레임 보강 방법

구분	내용	비고
Normal	기존 사용했던 프레임	Al
A	FRP를 보강한 합판 프레임	FRP+Plywood
B	FRP를 보강한 프레임	FRP+Al
C	속채움한 프레임	페타이어+Al
D	FRP와 속채움한 프레임	페타이어+FRP+Al
E	건설폐자재 속채움한 프레임	건설폐자재+Al
F	FRP형상보강한 프레임	FRP+Al

3.2 실험체 설치 및 구성

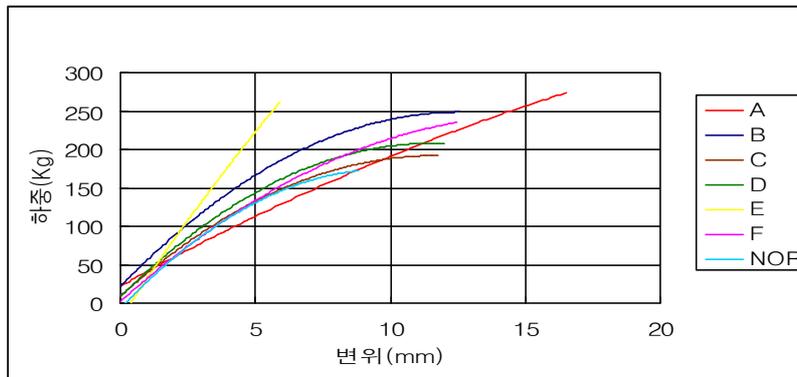
방음벽 지주프레임의 보강 단면에 따른 휨 실험은 최대 10ton의 하중이 재하 가능한 구조시험기를 통하여 실시되었으며 변위 측정을 위해 지주프레임의 중앙부에 LVDT를 설치하여 처짐값을 측정하였다. 실험 시 하중재하는 하중 제어법을 이용하여 천천히 가력 하였으며 하중 및 처짐에 대한 데이터 수집은 Data-Logger를 사용하였다. 〈그림 4〉에서 정적하중 재하실험에 관한 사항들을 자세히 나타내고 있다.



<그림 4> 지주프레임의 휨 실험

3.3 휨 실험 결과 및 고찰

방음벽 지주프레임의 단면 보강 형태에 따른 휨 성능 평가 실험에서는 <그림 5>의 하중-변위 결과에서와 같이 보강 형태에 따라 분명한 휨 성능 차이를 보이고 있다. 그 중에서 건설폐자재 속채움 보강이 강성도 가장 크며 건설폐자재를 활용하여 친환경적이라는 장점은 있지만 강성/무게비를 평가 기준으로 볼 때 상당히 낮은 값으로써 시공적, 경제적 측면에서 비효율적이라 볼 수 있다. 반면 FRP를 이용한 보강 방법은 FRP가 취성재료라는 단점은 알루미늄과의 융합으로 연성 파괴의 형태를 보임으로써 보완되었으며 FRP는 가볍다는 장점으로 강성/무게비 또한 다른 보강 방법들에 비해 우수함을 확인할 수 있었다. FRP를 이용한 보강 방법 중에서도 전체적인 보강이 높은 강성 값을 나타내었지만 전체적인 보강은 고가의 FRP를 많이 사용하게 되므로 경제적으로 부적합하다. 따라서 본 논문에서는 적은 보강으로도 큰 강성을 보이는 FRP의 축방향 보강이 가장 효율적이라 사료된다.



<그림 5> 휨 실험 결과 그래프

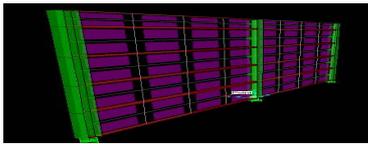
4. 방음벽의 최적 설계를 위한 단면 형상 연구

4.1 방음벽 전체구조물 해석에 대한 신뢰성 확보

방음벽 지주프레임 보강에 대한 해석적, 실험적 연구의 신뢰성 확보와 더불어 개발된 지주프레임을 실제 방음벽에 적용 시 전체적인 구조물의 거동 및 특성을 살펴봄으로써 사용 적용성에 대한 평가를 위하여 유한요소 해석프로그램인

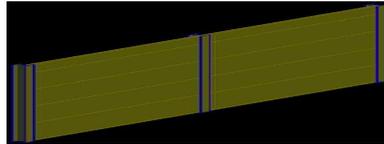


ABAQUS, SAP2000을 이용한 전산구조해석을 수행하였다. 기본 지주프레임의 해석을 통해 얻은 데이터를 이용하여 3차원 방음벽 전체 모델링 해석을 통한 전체구조물 거동을 살펴보았다. 전체적인 구조물 해석에 앞서 대상 구조물의 해석 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 SAP2000과 ABAQUS의 상용해석 프로그램을 이용하여 처짐 값 비교를 통한 해석적 연구를 수행하였다. 실제 풍동 실험을 통한 실험적 연구 또한 같이 이루어졌었다면 좀 더 신뢰성 높은 연구가 되었을 것이라 사료되지만 본 연구에서는 경제적, 실험적 여건이 부족하여 실제적인 풍동실험은 수행하지 못하였다. 하지만 <그림 8>과 같은 해석 결과를 나타냄으로써 해석만으로도 충분한 신뢰성 확보가 된 것으로 판단되어 진다.

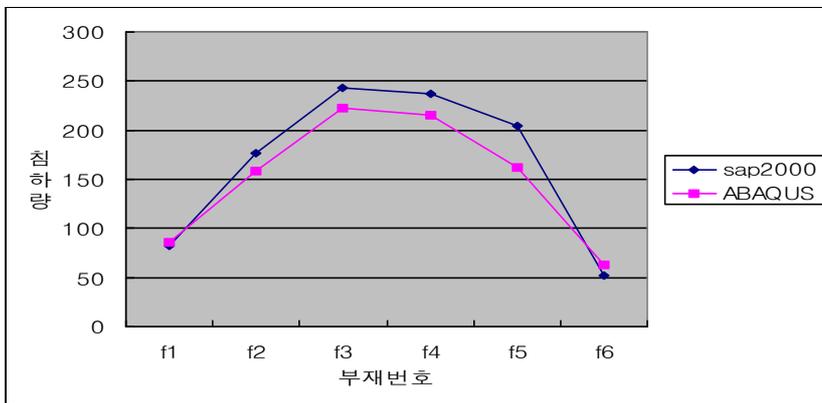


해석

<그림 6> SAP2000 방음벽



<그림 7> ABAQUS 방음벽 해석



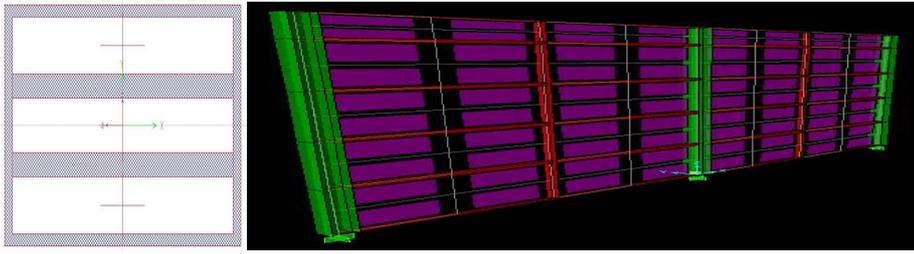
<그림 8> 전체구조물 해석 처짐 값 비교

4.2 단면 변화에 따른 구조물 거동 평가

지금까지 지주프레임의 기본 사각형 단면의 보강에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 상대적으로 기본적인 틀 내에서의 제한적인 결과만을 획득함으로써 실질적인 방음벽의 전체적인 보강에 대한 연구결과를 나타내기가 다소 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 기본 사각형 단면 이외에 삼각형, 원형 단면의 지주프레임 적용 시 전체구조물에 미치는 영향을 살펴봄으로써 각 단면마다 가지는 보강 효과에 대한 평가뿐만 아니라 시공 후에 얻을 수 있는 부가적인 효과에 대하여 알아보하고자 SAP2000을 이용한 전체적인 구조물의 거동 평가 해석을 수행하였다.

4.2.1 사각형 단면 프레임 설계

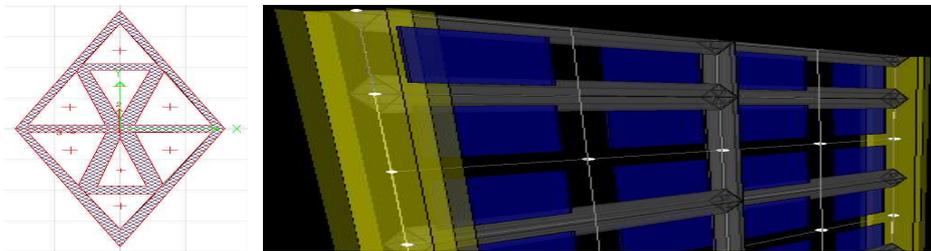
방음벽 전체구조물의 거동 평가 해석을 위한 사각형 단면 지주프레임의 설계는 <그림 9>와 같이 폭 40mm, 높이 60mm, 두께 5mm의 기본단면에 5mm보강 Bar가 설치된 사각형 보강 단면으로 전체 길이 8m의 방음벽을 대상 구조물로 고려하였다.



〈그림 9〉 사각형 단면 설계도

4.2.2 삼각형 단면 프레임 설계

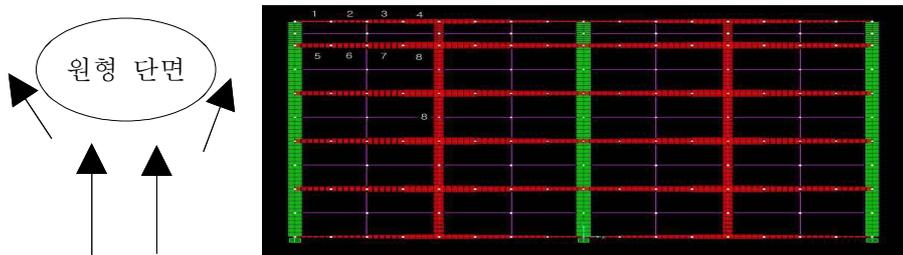
삼각형 보강 단면의 좀 더 세밀한 보강효과를 알아보려고 삼각형 단면에 대한 설계는 〈그림 10〉과 같이 2mm의 기본 두께에 2mm, 4mm의 보강 Bar를 이용하여 폭 100mm, 높이 120mm의 역삼각형의 보강 형태로 설계 하였으며 이는 기존 사각형 단면의 불필요한 부분을 보완하고 좀 더 역학적인 형상으로써 설치 모습이 모래시계 꼴의 형태로 서로간의 상호작용으로 최대한의 보강 효과를 보고자 하였다.



〈그림 10〉 삼각형 단면 설계도

4.2.3 원형 단면 프레임 설계

원형 단면의 방음벽 지주프레임은 〈그림 11〉의 풍하중 작용 모식도와 같이 풍하중을 받게 되면 바람이 닿는 면적이 줄어들기 때문에 다른 단면에 비해 좀 더 풍하중에 대한 저항성이 클 것으로 판단되어 좀 더 효율적인 원형 단면 설계를 위하여 원형 변 단면에 대하여 고려하였으며 기본 두께 3mm로 변 단면에 대한 자세한 내용은 〈표 3〉으로 확인할 수 있다.



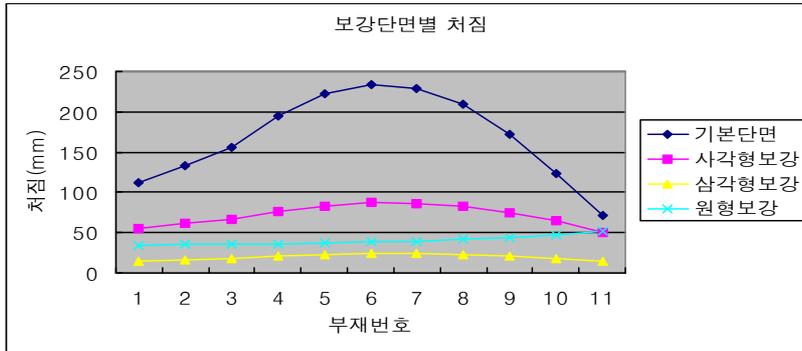
〈그림 11〉 풍하중 작용 모식도 및 설치도



〈표 3〉 원형 변 단면 치수

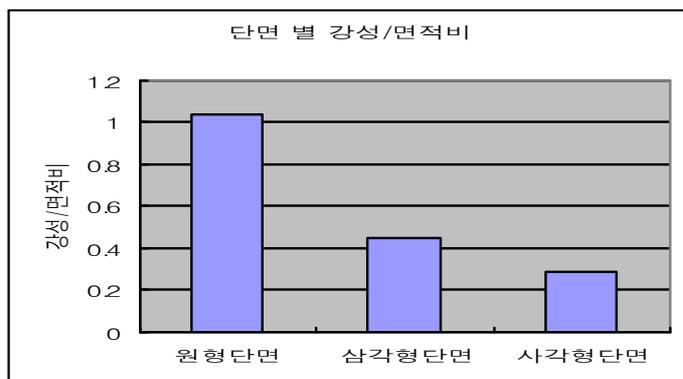
부재 번호	지름	부재 번호	지름
1	30mm	5	80mm
2	50mm	6	100mm
3	70mm	7	120mm
4	100mm	8	140mm

4.3 단면 형상에 대한 결론 및 고찰



〈그림 12〉 보강단면 별 처짐 비교

다양한 지주프레임 단면 형상에 대한 전체적인 구조물 해석 결과 기본 단면과 비교하여 볼 때 모든 단면 형상들이 작은 처짐값을 나타냄으로써 풍하중 저항성이 크다는 것을 알 수 있었다. 하지만 원형 및 삼각형의 경우 처짐 비교만으로는 어떤 단면 형상이 좀 더 효율적인지 판단하기 어려워 본 연구에서는 각 단면에 대하여 강성/무게비를 평가 기준으로 하여 풍하중 저항성 대한 객관적인 판단의 지표로 사용하고자 하였다.



〈그림 13〉 단면 별 강성/무게비 비교 그래프

각 단면 형상에 따른 강성/무게비에 대한 분석 결과 〈그림 13〉의 그래프와 같이 원형단면의 경우 강성/무게비가 다른 단면들에 비해 월등히 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 이는 〈그림 11〉의 풍하중 모식도에서와 같이 유선형의 모양으로



바람의 저항을 적게 받아서 발생되는 효과라고 판단되어 진다. 또한 원형단면은 변 단면의 활용으로 단면을 좀 더 줄여서 설치할 수 있다는 것과 필요시 외부의 추가보강이 쉽게 이루어 질 수 있다는 장점도 기대되어진다. 원형단면 보강에 대한 추가적인 연구가 이루어진다면 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

방음프레임 보강에 관한 해석적 연구 결과와 그에 따른 실험적 연구 결과는 다음과 같다.

1. 한국도로공사의 방음판 실험의 사전 조사에 근거를 두고 실시한 방음판 파괴모드 분석 실험 결과 방음판의 파괴는 지주프레임의 항복에 의하여 발생하는 것으로 판명되었다. 이에 지주프레임 보강에 중점을 둔 지주프레임 보강 단면에 대한 해석적 연구 결과 속채움 보강, 단면형상 보강, FRP보강 등이 좋은 보강효과를 보였다.
2. 해석적 연구에서 얻어진 대상 모델을 바탕으로 실험적 연구를 실시한 결과 FRP는 적은 보강으로도 보강 효과가 뛰어나며, 보강 방법이 간단하여 어느 단면에도 적용 가능하므로 우수한 보강방법 중 하나이며 FRP의 전체적인 보강이 가장 큰 효과를 나타내었지만, 보강효과에 비해 경제성이 떨어지는 단점을 보이므로 FRP의 축방향 보강이 구조적, 경제적으로 가장 효율적이라 판단된다.
3. 방음벽 전체구조물의 거동 평가에 대한 해석을 SAP2000 및 ABAQUS를 통하여 실시한 결과 같은 부재에 대한 비슷한 처짐값을 보이므로 결과 값에 대한 신뢰성을 확보하였다.
4. 단면 형상에 따른 전체구조물 거동 평가에 대한 해석 결과 원형단면의 경우 강성/무게비가 다른 단면들에 비해 월등히 뛰어난 것을 확인할 수 있었으며 이는 유선형의 모양으로 바람의 저항을 적게 받아서 발생되는 효과라고 판단되어 진다. 또한 원형단면은 변 단면으로 단면을 좀 더 효율적으로 활용할 수 있으며 필요시 외부의 추가보강이 쉽게 이루어 질 수 있다는 장점도 기대되어진다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호# '08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되어진 것으로 본 연구를 가능케 한 국토해양부에 감사드립니다. 또한 도로안전시설물 설계자문 및 재료제공을 해주신 (주)명성산업개발에도 감사드립니다.

참고문헌

1. 나희승 (1999) “고속열차 주행 시 연변에서의 소음예측 및 방음시설 설계” , 한국소음진동공학회지, 제9권, 제6호, pp. 1106-1115.
2. 은희준 (1995) “고효율 방음벽의 설계기술 개발 및 성능평가” , 한국과학표준과학연구원
3. 황철호 (2002) “방음벽의 기술” , 한국소음진동공학회지, 제12권, 제6호, pp. 395-422.