

GFRP를 활용한 도로 방음벽 구조물의 구조성능 및 단면형상 개선에 관한 연구

Improvement of Flexural Structural Performance and Applied Section Shape for Sound Proof Wall Structures Using Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP)

정우영 Jung, Woo Young
최현규 Choi, Hyun Kyu

정회원 · 강릉대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : woojung@kangnung.ac.kr)
비회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail :scorpion02@naver.com)

ABSTRACT

This research presents the structural performance and an improving technique for flexural capacity of road safety facilities based on the damage cases by wind pressure. Among road safety facilities, a support frame of soundproofing walls is considered as a prototype structure and its corresponding structural behaviors and section design are performed mainly by analytical and experimental studies. On the basis of analytical results, glass fiber reinforced polymer(GFRP) with an epoxy matrix which is high stiffness-to-weight ratio was used for applied one of strengthening techniques and their results shows that support frame strengthened by GFRP is the most effective compared to other cases proposed in this research for advancing its flexural improvement, Finally, optimum section design was performed analytically to evaluate wind-resistance capacity and its result would be very useful for developing a practical design guideline for Road safety facilities under strong wind.

KEYWORDS

flexural stiffness, soundproofing walls, optimum section design, section shape, Fiber Reinforced Polymer(FRP)

요지

본 연구는 도로안전 시설물의 풍하중에 의한 손상발생 사례를 토대로 현행 도로안전 시설물의 구조적 휨 성능을 평가하고 이에 대한 부재별 휨 성능개선을 위한 연구이다. 본 연구의 대상구조물로는 대표적인 도로안전시설물이며 풍하중에 대한 선형 피해사례가 밝혀진 방음벽 지주프레임을 대상으로 고려하였으며 이들 지주프레임의 휨 구조성능 및 형상설계에 대한 평가를 우선적으로 수행하였다. 본 연구평가 결과에서 나타난 현행 보강재의 구조적 성능을 토대로 중량 대비 구조적 강성이 우수한 유리섬유 강화플라스틱(GFRP)을 활용하여 다양한 보강 형태에 따른 성능개선방법을 해석 및 실험적 연구를 통하여 수행하였다. 그 결과 효율적 성능개선을 위한 GFRP 적용방법의 경우 구조적, 시공적 측면에서 효율적인 것으로 평가되었고 자체적인 형상단면 최적설계를 통한 개선방법도 성능보강에 효과적인 것으로 해석적으로 평가되었다. 본 연구에서 적용된 GFRP 단면보강 및 최적형상설계 연구는 향후 노후 도로안전 시설물의 풍하중 또는 태풍으로 인한 피해예방을 위한 기초자료로서 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어

강성 개선, 방음벽프레임, 단면보강, 형상보강, FRP보강

1. 서론

최근 태풍에 의한 도로안전 시설물의 피해가 급증하고 있으며, 특히 산간도로의 방음벽과 같은 시설물은 바람의 영향을 많이 받게 됨으로써 그 피해가 더욱 심각하여 보강 대책

이 시급하다. 그러나 이들 도로안전 시설물에 대한 정부기관 및 관련 업체의 관심은 높아지고는 있으나 아직 이들 시설물의 시공에 대한 적절한 안전기준이나 풍하중 설계에 대한 명확한 기준은 미흡한 형편이다. 최근 강풍에 의한 방음벽의

구조적 문제가 대중매체에 의하여 보고되었다(YTN 기사, 2006. 10. 23일자). 이들 관련내용에 따르면 실제 현장에서 설치되고 있는 방음벽의 구조적 성능조사를 한 결과 한국도로공사의 기준에 미치지 못하고 있으며 그 기준 또한 미비한 것으로 보도되었다. 실제 현행 도로안전 시설물의 경우, 방음벽의 높이가 낮기 때문에 방음벽 위쪽으로는 방음이 이루어지지 않아 방음효과가 떨어지고, 태풍과 같은 강한 바람에는 방음벽이 파손되어 기능을 발휘하지 못하고 있다. 따라서 시공된 방음벽과 같은 도로안전 시설물의 경우, 향후 지속적인 기능발휘를 위해서는 구조물의 강성을 증대 시킬 필요가 있으며 새로운 형태의 시공과 추가적인 보강이 필요하다고 보여진다.

도로안전 시설물의 강성 개선을 위한 선행연구의 경우, 국외에서는 새로운 신소재를 활용한 도로안전 시설물의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 국내의 경우 충진에 의한 강성보강에 대한 연구가 보고되고 있으나 상대적으로 부족한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 국내의 연구동향을 토대로 실제 도로안전 시설물의 휨 강성 개선에 중점을 두어 도로안전 시설물의 내구성 확대와 더불어 시공성, 경제성 등의 누적효과를 고려한 보강대책에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 최근 기반시설물의 보수 및 보강재로 많은 활용되고 있는 섬유강화 복합재료(FRP)를 이용하여 이들 도로안전 시설물의 성능보강에 대한 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 또한 부가적으로 안전하고 경제적인 도로안전 방음벽 지주 구조재 개발을 위하여 기존 방음벽 구조재 보강방법 이외에 새로운 지주프레임의 설계 시 구조성, 경제성, 활용성을 고려한 지주프레임의 최적단면형상에 대한 연구도 병행하여 수행하였다.

2. 현행 방음벽 지주 프레임의 성능평가

실제 시공된 도로안전 시설 방음벽의 경우, 풍하중에 의한 충분한 성능확보가 미흡한 것으로 과거 대중매체에 의하여 보고된 사례가 있는바 실제적으로 도로안전 시설물로 현재 시공되고 있는 방음벽 지주프레임을 대상으로 정확한 성능검증을 위하여 현행 방음벽에 대한 전체구조물 해석과 3점 휨 시험을 통한 강성평가를 수행하였다. 실험대상 샘플로는 (주)명성산업개발에서 서울-광명 고속도로 현장에 실제 적용되고 있는 알루미늄(강재재원) 지주를 대상으로 실험하였다. 그림 1, 2는 본 연구에서 활용된 실제 적용 방음벽 지주프레임을 나타낸다.

본 연구에서는 보다 정확한 데이터 수집과 휨 성능평가를 위하여 재하능력 10톤의 구조시험기를 사용하였으며 LVDT를 통하여 정확한 변위를 측정하였다. 대상 샘플의 지간은

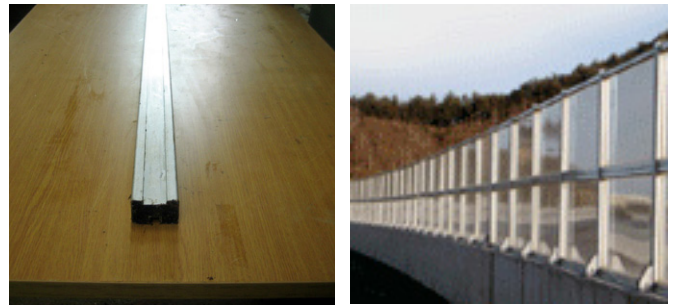


그림 1. 방음벽 지주프레임 형상과 현장적용 사진

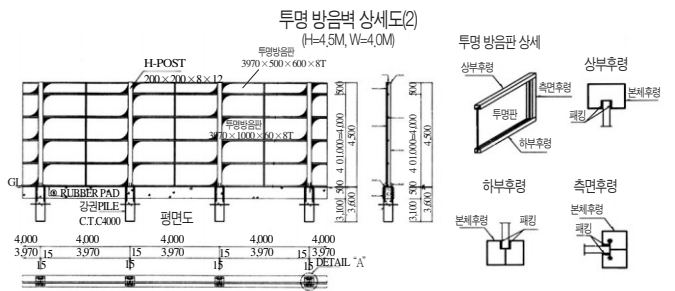
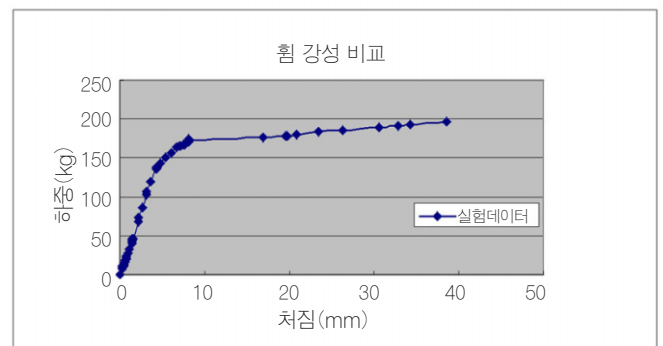


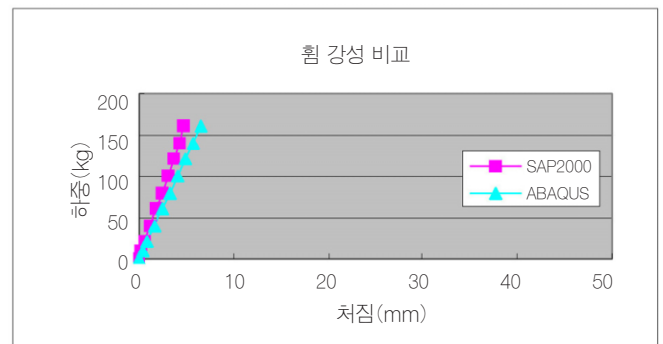
그림 2. 투명방음벽 설계 도면

1.0m로 각각 동일하였으며 3개의 샘플에 대하여 적용된 결과를 평균하여 평가하였다. 대상 샘플에 대한 휨 실험과 그 결과는 그림 3(a)와 같다.

부가적으로 샘플 프레임의 휨 실험을 통해 얻어진 데이터의 신뢰성을 검증하기 위하여 상용유한요소해석 프로그램인



(a) 실험결과



(b) 해석결과

그림 3. 현행 방음벽 지주프레임의 하중-변위 관계

ABAQUS와 SAP2000을 이용하여 각각 실험데이터의 휨 강성과 비교, 평가하였다. 표 1은 ABAQUS와 SAP2000에서 사용한 지주프레임의 재원과 물성치를 나타내고, 해석결과는 그림3(b)와 같이 나타났다.

표 1. 해석 프로그램에서 사용된 프레임의 재원과 물성치

재원 및 물성치	내 용
규격	3970×40×60×1T
강도	175 MPa
탄성계수	70000 MPa
포아송비	0.33
밀도	2.7g/cm ³

그림 4는 유한요소해석을 통한 산출된 해석결과와 실험과 해석결과의 휨 강성 비교를 보여주고 있다. SAP2000의 경우에는 단면 형상을 CAD파일로 작업하여 모델링에 적용하였고, ABAQUS에서는 복잡한 단면 형상을 단순화시켜 모델링하였다. 모델링의 약간의 차이로 인하여 두 프로그램간의 강성 값이 차이가 있으나, 그림 3(b)와 그림 4에서 나타나듯 본 연구에서 수행된 실험과 선형해석을 통한 휨 강성 값들은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 수행된 유한요소해석의 경우 항복 후 실험체의 소성구간까지 해석적 표현이 가능하나 본 연구의 목적이 보강설계에 그 목적이 있으므로 실제 해석 시 선형해석으로 수행하였다.

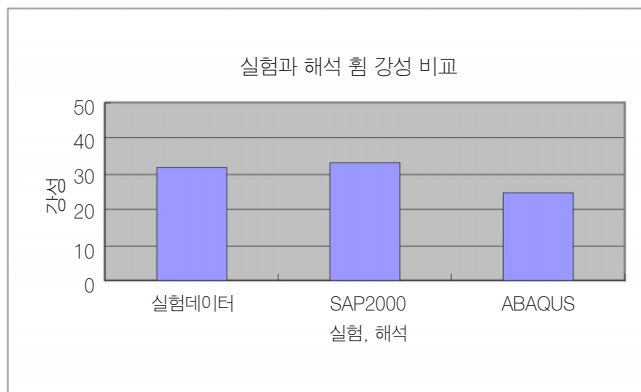


그림 4. 현행 방음벽 지주프레임의 휨 강성에 대한 해석과 실험결과 비교

3. GFRP를 활용한 방음벽 지주프레임의 휨 성능 최적보강

본 연구에서 검토된 두 가지 방법의 휨 보강의 경우 속채움에 의한 성능개선과 저중량 고강성 재료를 활용하는 방법으로 크게 분류할 수 있다. 고강성 재료를 활용하는 보강방법

연구에서는 현장적용에 있어 시공성과 경제성이 뛰어난 유리섬유 강화플라스틱(GFRP)을 사용하여 지주프레임에 보강을 하여 강성을 비교하였다. 두 번째로 속채움에 의한 성능개선 연구에서는 FRP 보강 프레임과 페타이어, 건축용 황토벽돌 모르타르를 이용한 속채움 보강 프레임을 휨시험을 통해 강성을 비교하였다.

3.1. GFRP Plate 적용에 따른 보강방법 선정

실제적으로 방음벽 지주프레임의 강성보강을 위한 방법은 매우 다양하다. 따라서 이들 방음벽 지주프레임의 단면보강에 대한 효과적인 실험연구를 수행하기 위하여 실험에 앞서 지주프레임의 단면보강에 대한 다양한 방법들을 간단한 해석을 통하여 예상되는 보강효과를 예측하였다. 이는 실험적 연구에서 고려되는 경우의 수와 불필요한 시간을 줄이고 최적의 보강단면을 결정하기 위한 효과적인 방안을 찾고자 해석적 연구를 우선적으로 수행하였다.

고려된 지주프레임의 해석모델링의 경우 가로 40mm, 높이 60mm, 길이 1000mm로 모델링되었으며 단면보강에 대한 가능한 다양한 경우의 방법들이 유한요소해석 프로그램을 이용하여 보강효과를 각각 평가하였다. 해석한 보강의 각각의 모델링은 그림 5와 같다. 해석 시 고려된 하중조건 및 목표변위로는 실제 한국도로공사에서 규정하고 있는 풍하중 강도 3.0KN/m²를 고려하여 해석적 연구를 수행하였다.

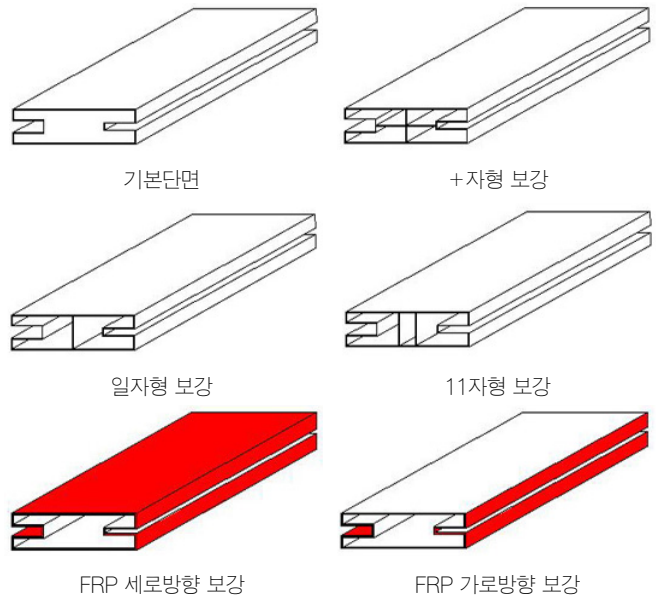


그림 5. GFRP를 적용하여 보강한 지주프레임 모델링

해석적 사전연구를 통하여 얻어진 효율적 휨 강성결과는 그림 6에 나타내었다. 프레임의 내부에 보강하는 방법의 강성효과는 +자형이 28%, 일자형 보강이 85%, 11자형 보강이 166%로 기본단면의 보강효과를 보였으며, 외부에 보강하

는 FRP 세로방향 보강과 FRP 가로방향 보강효과는 각각 119%, 98%의 보강효과를 볼 수 있다. GFRP를 적용한 지주프레임의 보강에서 11자형의 보강효과가 166%로 가장 높은 값을 보였다.

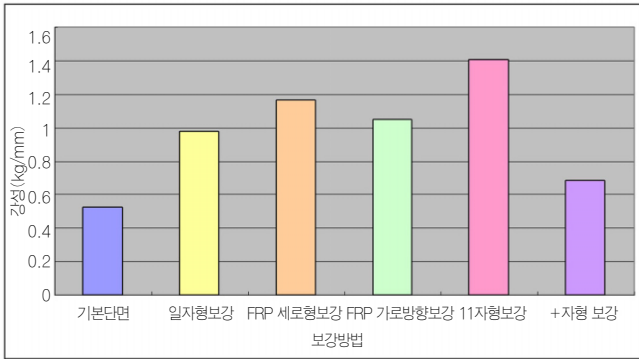


그림 6. 다양한 보강방법에 따른 휨 강성결과

해석결과를 토대로 FRP를 이용한 보강의 경우 다른 보강에 비하여 전체적으로 높은 강성을 나타냄을 알 수 있는데 이는 FRP를 활용한 부분적 보강이 경제적, 구조적 측면에서 고려된 다른 방법에 비하여 우수하다는 것을 의미한다. 따라서 이들 해석적 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 FRP를 활용한 경우와 폐기물재활용을 통한 충전방법 등 다양한 방법들을 제시하여 휨 강성 보강실험을 수행하였다.

3.2. 단면 보강방법에 따른 휨 성능 평가

해석적 선행연구에 의하여 본 연구에서 고려된 보강방법은 표 2와 같으며 동일한 알루미늄 지주프레임을 대상으로 다양한 보강방법 적용을 위한 실험체 제작은 폭 40mm, 높이 60mm, 길이 1000mm로 제작하였다. 그림 7은 다양한 보강방법에 의하여 제작된 보강실험 샘플링 시편을 나타낸다.

표 2. 지주프레임 보강 방법

구분	내용	비고
N	기존 프레임	AI
A	FRP 보강 합판 프레임	FRP+Plywood
B	FRP 보강 프레임	FRP+AI
C	속채움 보강 프레임	페타이어칩+AI
D	FRP & 속채움 보강 프레임	페타이어칩+FRP+AI
E	건축용 황토벽돌 모르타르 보강 프레임	건축용 황토벽돌 모르타르+AI
F	FRP 형상 보강 프레임	FRP+AI

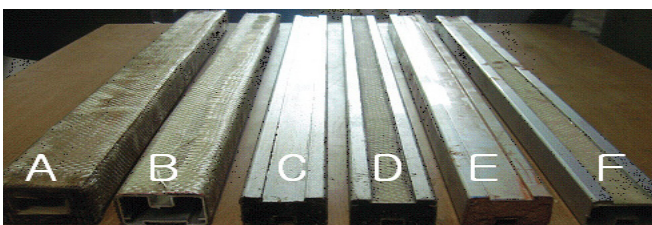


그림 7. 지주프레임 보강 형태에 따른 제작 실험시편

방음벽 지주프레임의 단면 보강형태에 따른 휨 성능 평가 실험에서는 그림 9에서 보여지듯 보강방법에 따라 분명한 휨 성능 차이를 보이고 있다. 총 6가지 보강시험체 중 본 실험에서는 건축용 황토벽돌을 이용한 황토반죽 모르타르가 가장 큰 강성 값을 보였는데 이는 상대적으로 큰 충전재료의 탄성계수 영향에 기인한다고 보여진다. 건축용 황토벽돌을 이용한 황토반죽 모르타르 보강은 건설폐자재를 활용한 친환경적 보강방법이라는 장점은 있지만 건설폐자재의 무거운 자중에 의하여 상당히 낮은 강성/무게비를 보임으로써 비효율적인 적용으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 황토의 단위중량은 1.960g/cm³이다. 반면 FRP를 이용한 보강 방법은 FRP재료의 취성거동의 단점을 알루미늄과의 융합으로 초기 휨 강성개선과 초기파괴 후의 연성거동에 있어 긍정적인 거동을 보임으로써 FRP의 저중량이라는 장점과 더불어 다른 보강방법들에 비하여 높은 강성/무게비를 제공한다는 것을 본 실험을 통하여 알 수 있었다. FRP를 이용한 보강 방법 중에서도 FRP 활용비율에 따라 비례적으로 높은 강성 값을 나타내었지만 FRP 재료의 비용을 고려할 때 이는 경제적으로 비효율적이라 판단되어, 본 연구에서는 최적보강 방법을 도출하기 위하여 다양한 방법을 적용한 결과, 알루미늄 지주프레임 보강단면의 축 방향 보강이 가장 효율적으로 평가되었다.

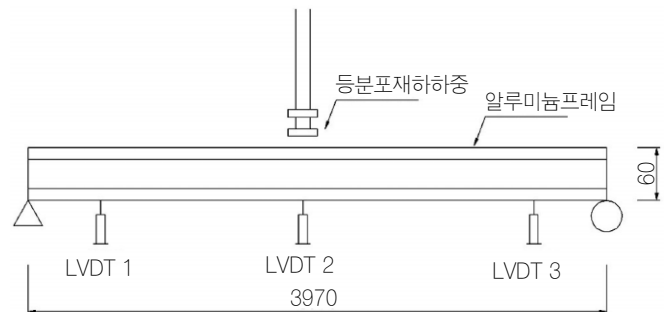
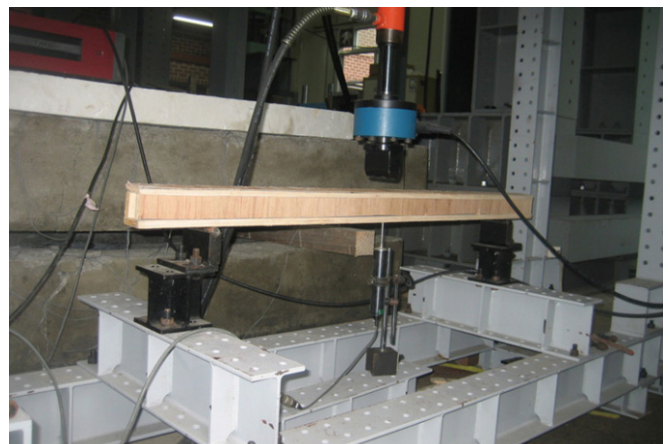


그림 8. 보강지주 프레임의 휨 실험과 실험체 제원(단위:mm)

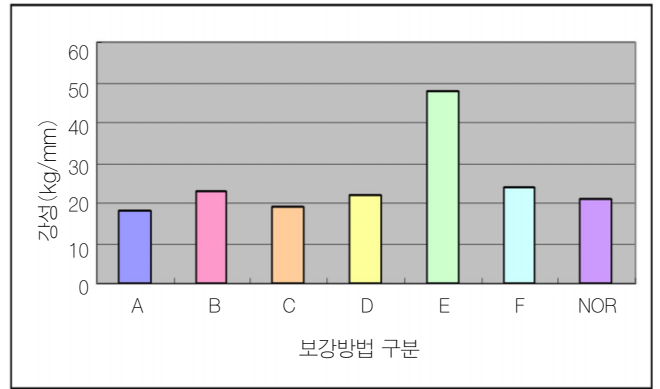
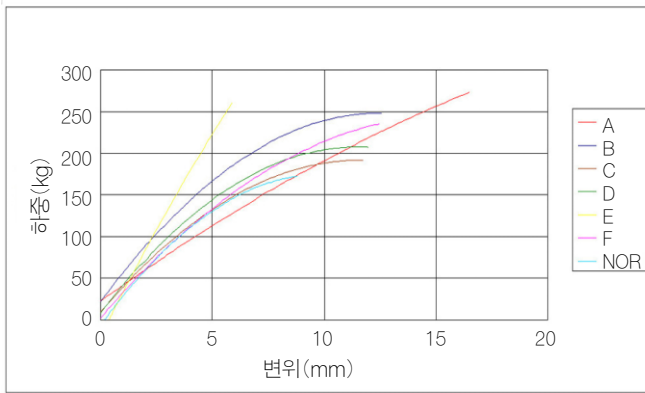
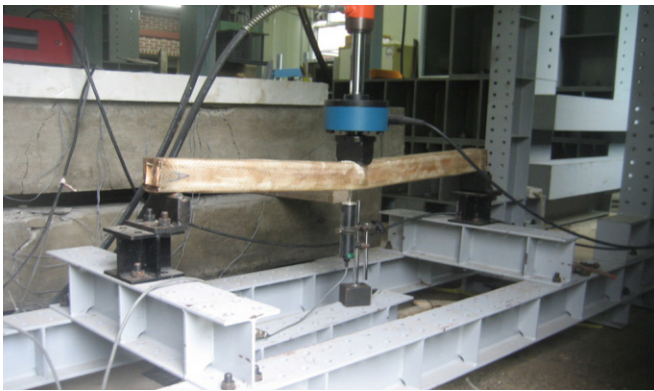


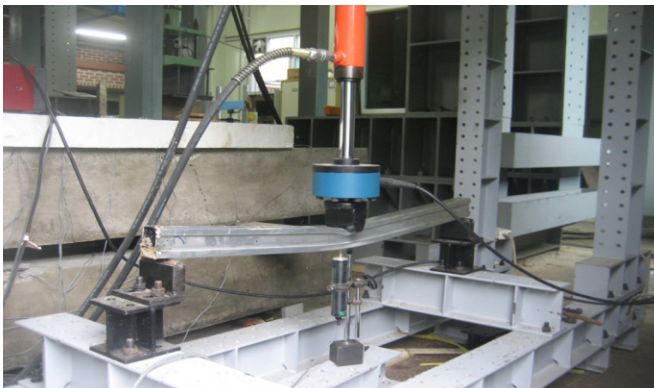
그림 9. 휨 실험 결과 하중 - 변위 곡선, 보강방법에 따른 강성 비교



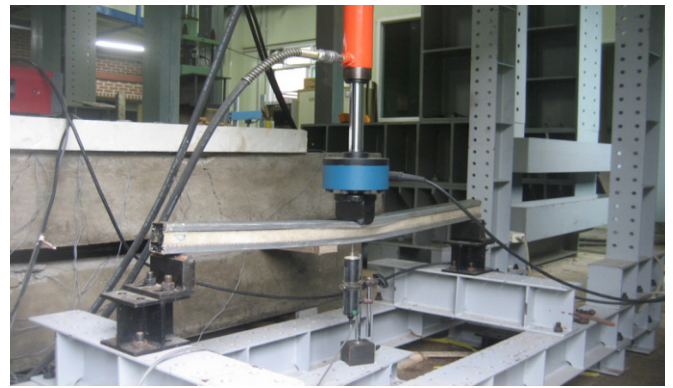
A 시험체



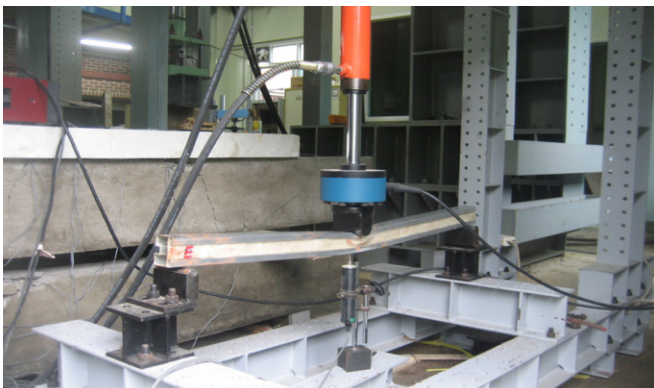
B 시험체



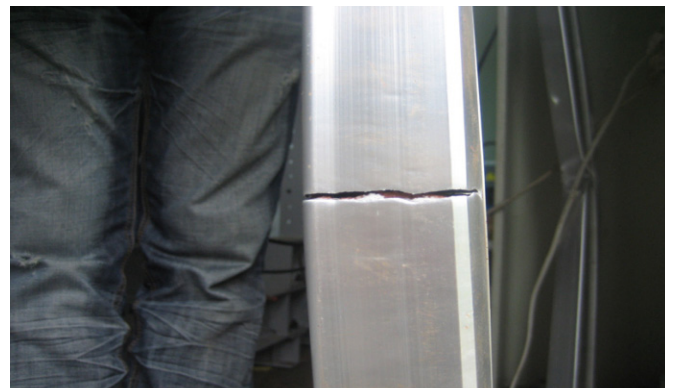
C 시험체



D 시험체



E 시험체



F 시험체

그림 10. 각 시험체별 파괴양상

4. 강풍 대비 방음벽 최적단면 형상설계

지금까지 기존 지주프레임의 단면형상을 토대로 단면보강에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 그 결과 상대적으로 기본적인 틀 내에서의 제한적인 결과만을 획득함으로써 실질적인 방음벽 전체보강에 따른 연구결과를 나타내기가 다소 미흡하다고 판단하여 본 연구에서는 기본단면 이외에 삼각형, 원형단면 등 다양한 단면형상을 지주프레임 형상단면으로 고려, 전체구조물에 미치는 영향을 살펴보았다. 각 단면형상에 따른 전체구조물의 강성평가를 위하여 실제 발생이 가능한 풍하중을 횡방향 하중으로 치환, 적용하였으며 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 활용, 해석을 수행하였다.

4.1. 사각형, 삼각형단면 형상설계

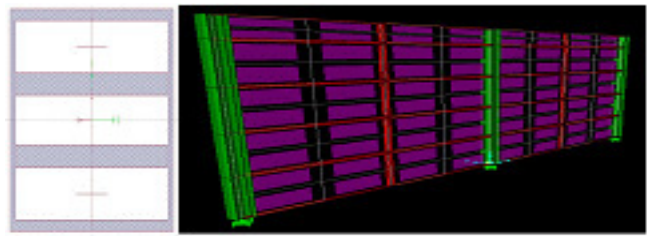
지주프레임 형상변화에 따른 방음벽 전체구조물의 거동평가를 위하여 사각형, 삼각형, 원형 등 총 3 가지 단면형상의 지주프레임이 설계되었다. 각 단면형상의 탄성계수와 단면 2차모멘트는 동일한 것으로 가정하였으며 각 단면의 설계재원은 표 3과 같고, 각 단면형상에 따른 방음구조물의 해석모델은 그림 11과 같다.

표 3. 지주프레임의 단면별 설계재원

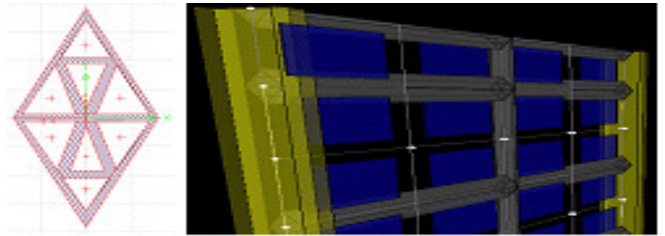
단면	폭	높이	두께	보강두께
사각형 단면	40mm	60mm	5mm	5mm
삼각형 단면	100mm	120mm	2mm	2mm 4mm
원형 단면	변단면	변단면	3mm	.

다양한 단면형상의 지주프레임 방음벽 구조물에 대한 해석 결과 기존 방음벽 지주프레임 단면과 비교할 때 상대적으로 전체구조물의 거동에 있어 작은 값을 나타냄으로써 기존 단면에 대한 개선이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 제안된 단면에 대하여 보다 효율적인지 성능을 판단하기 위하여 각 단면에 대하여 강성/무게비를 평가 기준으로 그 결과들을 비교하였다. 보강 단면별로 치짐값을 보면 삼각형 보강, 원형보강, 사각형보강 순서로 작은 치짐을 나타냈다.

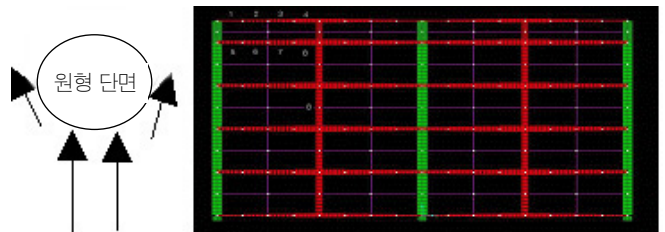
그러나 그림 13(a)에서 보여지듯 각 단면 형상에 따른 강성/무게비 분석 결과, 삼각형보강에서 사용된 프레임의 중량이 다른 보강단면에 비해 크므로, 원형단면이 강성/무게비가 다른 단면들에 비해 월등히 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 원형단면의 프레임이 다른 형상의 프레임에 비해 뛰어난 이유는 프레임에서 가장 취약한 프레임의 중앙부(그림 12.(a)부재별 위치 Part2)의 단면을 크게하고 그렇지 않은 부분의 단면을 줄여 나감으로써 다른 형상의 프레임에 비해 강성/무게비가 높게 나온 것으로 생각된다. 또한 원형단면으로 실제 현장작



(a) 사각형단면 지주프레임 해석모델

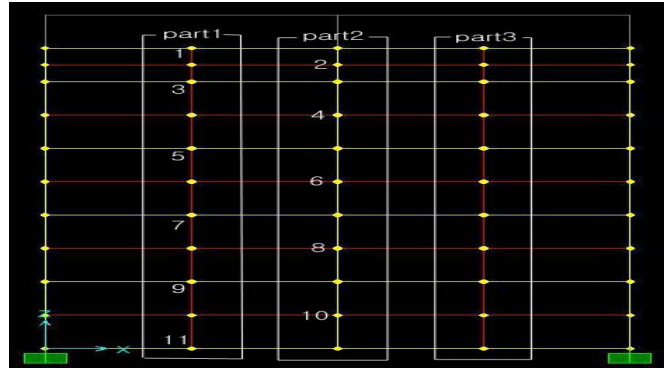


(b) 삼각형단면 지주프레임 해석모델

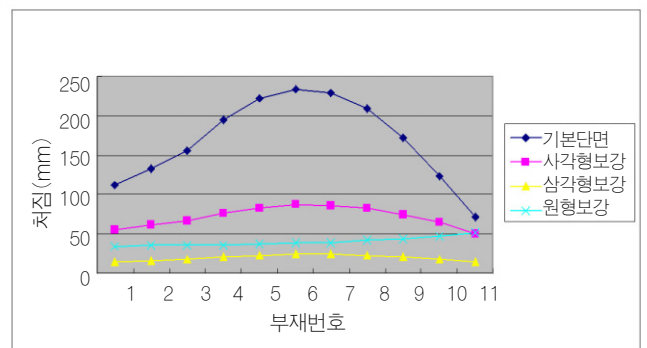


(c) 원형단면 지주프레임 해석모델

그림 11. 각 단면형상에 따른 전체 방음구조물 해석 모델링



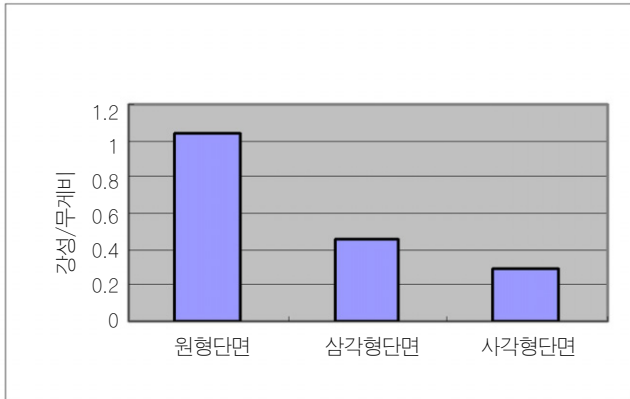
(a) 부재별 위치



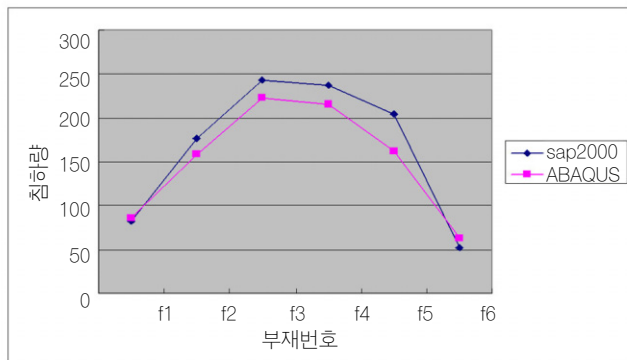
(b) 치짐 비교

그림 12. 보강단면 별 치짐 비교

용을 할 경우, 유선형의 특징으로 인하여 바람의 저항성이 타 단면에 비해 보다 유리할 것으로 기대된다. 이러한 기능적 장점 이외에 시공적인 면에서도 원형단면은 그림 13(a)에서 보여지듯 지간에 따른 응력변화를 고려한 변 단면 제작을 통한 재료절감과 방음벽체와의 조립 용이성 등 다양한 면에서 보다 편리하게 고려되어질 수 있을 것으로 생각된다. 그림 13(b)는 해석 처짐 값들의 신뢰성을 확보하기 위해 SAP2000과 ABAQUS 두 개의 유한요소해석 프로그램의 처짐값을 비교하였다. 처짐값이 부재별로 큰 차이를 보이지 않아 신뢰할 수 있는 결과라고 생각된다.



(a) 단면 별 강성/무게비 비교



(b) 전체구조물 해석 처짐 값 비교

그림 13. 방음구조물의 해석 결과

5. 결론

본 연구는 최근 강풍에 의하여 발생된 도로안전시설물의 피해 중 방음벽 시설물에 대한 지주프레임 보강에 관한 연구로서 본 연구를 통하여 얻어진 실험적, 해석적 연구결과는 다음과 같다.

(1) 방음판 파괴모드 해석결과 방음벽 구조물의 파괴는 지주프레임의 항복에 의하여 발생하는 것으로 판명되었다. 따라서 방음벽 지주프레임 휨 보강을 위하여 다양한 보강방법

에 대한 해석적, 실험적 연구가 진행되었으며 그 결과 성능면에서는 건축용 황토벽돌 모르타르를 속채움 보강에 의한 방법이 가장 우수한 것으로 나타났으나, 강성/무게비를 고려한 경우에는 FRP를 11자형으로 보강한 지주프레임이 우수한 것으로 나타났다. 시공적, 경제적 가치를 고려한 실용성 측면에서는 FRP를 활용한 부분단면보강이 가장 효과적인 것으로 생각된다.

(2) 선행해석 결과를 토대로 수행된 FRP 부분단면보강 실험결과, FRP는 적은 보강으로도 보강 효과가 뛰어나며, 보강 방법이 간단하여 어느 단면에도 적용 가능하나 경제성을 고려한 부분단면보강의 경우 지주프레임 단면에 대하여 축방향 보강이 가장 효율적인 방법으로 판단된다.

(3) 지주프레임 단면형상 변화에 따른 전체구조물 해석거동 평가 결과, 원형단면 형상이 강성/무게비를 기준으로 다른 단면들에 비해 월등히 우수함을 확인할 수 있었고 실제 경제적, 시공적 측면에서도 많은 장점을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

(4) 본 연구는 실험적 결과 보다 해석적 연구에 중점적으로 이루어졌으므로 본 연구 결과에 대한 큰 신뢰를 하기는 어렵지만 해석적 연구를 기초 자료로 활용하여 추후 지주프레임 보강에 대한 보다 다양하고 체계적인 연구가 필요하리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 # '08지역기술혁신 B-01)에 의해 수행된 연구로 이에 감사를 드리며 아울러 본 연구의 시험체 제작에 도움을 주신 (주)명성산업개발에도 감사를 드립니다.

참고 문헌

국토해양부, 2009, "도로공사표준시방서", pp. 14-6
 김재복, 2008, "방음벽 풍하중 평가를 위한 고속열차 유발 열차풍의 실험적 및 수치적 분석" 서울산업대 철도전문대학원, 석사논문, pp 16-26.
 나희승, 1999, "고속열차 주행 시 연변에서의 소음예측 및 방음시설 설계", 한국소음진동공학회지, 제9권, 제6호, pp. 1106-1115.
 은희준, 1995, "고효율 방음벽의 설계기술 개발 및 성능평가", 한국과학기술원
 준파학연구원
 황철호, 2002, "방음벽의 기술", 한국소음진동공학회지, 제12권, 제6호, pp. 395-422.

접 수 일 : 2009. 3. 19
 심 사 일 : 2009. 3. 20
 심사완료일 : 2009. 9. 22