

# 차량 충돌 시뮬레이션에 의한 강재 및 복합소재 교량용 방호울타리 성능 비교

## Performance Evaluation of Steel and Composite Safety Barrier for Bridge by Vehicle Crash Simulation

김 승 익\*                      조 판 규\*                      홍 갑 의\*                      전 신 열\*  
Kim, Seung-Eock              Cho, Pan-Kyu                  Hong, Kab-Eui                  Jeon, Shin-Youl

### 요 지

본 연구에서는 복합소재 교량용 방호울타리를 개발하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 강재 교량용 방호울타리와 복합소재 교량용 방호울타리의 성능을 비교하였다. 구조적 강도 성능 측면에서, 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 교량용 방호울타리의 변형이 17%로 감소하여 강재 교량용 방호울타리 보다 강도 성능이 우수하였다. 탑승자 보호 성능 측면에서, 복합소재 교량용 방호울타리는 THIV 47.1%, PHD 49.0%로 감소하여 강재 교량용 방호울타리 보다 탑승자 보호성능이 우수하였다. 충돌 후 차량의 거동 측면에서, 복합소재 교량용 방호울타리는 이탈속도가 증가하고 이탈각도가 감소하여 강재 교량용 방호울타리 보다 충돌 후 차량의 거동이 우수하였다. 교량용 방호울타리의 비산 측면에서, 강재 및 복합소재 교량용 방호울타리는 비산이 발생하지 않았다.

**핵심용어** : 복합소재 교량용 방호울타리, 차량 충돌, 충돌 시뮬레이션, LS-DYNA

### Abstract

A composite safety barrier for bridge has been developed and the performance of the composite safety barrier for bridge has been compared with the steel safety barrier for bridge through computer simulation. As the structural strength performance, the composite safety barrier for bridge is superior to the steel safety barrier for bridge according that the deformation of the composite safety barrier for bridge is 17.0% of that of the steel safety barrier for bridge. As the passenger protection performance, the composite safety barrier for bridge is superior to the steel safety barrier for bridge according that THIV and PHD of the composite safety barrier for bridge are 47.1% and 49.0% respectively of those of the steel safety barrier for bridge. As the behavior of the vehicle after crash, the composite safety barrier for bridge is superior to the steel safety barrier for bridge showing the increased exit velocity and the reduced exit angle. Both of the steel and composite safety barrier for bridge are not scattered in the analysis.

**Keywords** : composite safety barrier for bridge, vehicle crash, crash simulation, LS-DYNA

### 1. 서 론

교량용 방호울타리는 대형 차량 충돌 시 추락을 방지할 수 있는 강도와 소형차량 충돌 시 충격흡수 능력을 모두 갖추어야 한다. 알루미늄 교량용 방호울타리는 충격 흡수 능력이 뛰어나지만 추락방지 성능이 떨어지고 콘크리트 교량용 방호울타리는 추락방지 성능은 뛰어나지만 충격 흡수 능력은 떨어진다. 최근 충격 흡수 능력과 추락방지 성능을 만족하는

강재 교량용 방호울타리와 고강도 알루미늄 교량용 방호울타리가 개발되어 사용되고 있다. 본 연구에서는 충격 흡수 능력과 추락방지 성능이 우수한 복합소재 교량용 방호울타리를 개발하고 강재 교량용 방호울타리와 그 성능을 비교하고자 한다.

Reid와 Sicking(1998) 및 Coon과 Reid(2006)는 차량 충돌 시험과 유한요소해석을 통해 박판이 부착된 충격 흡수용 가드레일을 연구하였다. 차량 충돌 시 가드레일에 부착된

† 책임저자, 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 교수  
Tel: 02-3408-3291 ; Fax: 02-3408-3607  
E-mail: sekim@sejong.ac.kr

\* 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

박판이 심하게 변형되면서 에너지를 급속히 소산시키므로 인명 피해가 감소할 수 있으며, 가드레일의 변형도 줄어들음을 확인하였다. Atahan과 Cansiz(2005)는 차량 충돌 시험 및 충돌 시뮬레이션을 통해 W-beam 가드레일과 Thrie-beam 가드레일을 비교 연구하였다. 기존 W-beam 가드레일은 폭이 좁아 승용차에만 적용이 가능하고 차량이 전복될 위험이 크기 때문에 폭이 넓은 Thrie-beam 가드레일을 제안하였다. Thrie-beam 가드레일은 W-beam 가드레일에 비해 폭이 넓어 다양한 차량에 대응가능하고 차량의 전복도 적으며 충격에너지 흡수능력이 뛰어나다는 장점이 있다. 그러나 Thrie-beam 가드레일은 폭이 넓어 경제성이 떨어진다. Davids 등(2006)은 휨-인장 실험과 충돌 시뮬레이션을 통해 강재 가드레일 및 FRP보강목재 가드레일을 비교 연구하였다. 나무 가드레일은 환경 친화적이며 미관이 뛰어나지만 철재 가드레일에 비해 단면이 커지므로 무겁고 경제성이 떨어지게 된다. 따라서 FRP로 보강하여 단면을 감소시켜 경제성을 향상시킨 FRP보강목재 가드레일을 제안하였다. FRP보강목재 가드레일은 기존의 강재 가드레일에 비해 강도성능이 뛰어나고 환경 친화적이며 미관이 우수하지만 목재 연결 부위가 쉽게 쪼개지고 목재의 단면이 커서 경제성이 떨어지는 단점이 있다.

윤태양 등(2002)은 실물 차량 충돌 시험과 유한요소해석을 통해 강재 교량용 방호울타리의 성능을 평가하였다. 알루미늄 보다 강도가 높은 강재를 사용하여 교량용 방호울타리의 추락방지 성능을 높였고 충격완화장치를 사용하여 충격 흡수 능력을 향상시켰다. 고만기와 김기동(2001)은 정적 실내 실험, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실물 충돌 시험을 통해 W-beam 가드레일 시스템과 충격 흡수재를 이용한 Thrie-beam 가드레일 시스템을 비교 연구하였다. 기존의 W형 보에 비하여 보의 높이가 증가된 트라이 빔 가드레일 시스템은 범퍼 높이가 다른 다양한 차종에 보다 좋은 수용능력을 보였고 강성과 충격 흡수 능력 또한 W형 보 가드레일 시스템에 비하여 크게 향상되었다.

본 연구의 목적은 복합소재 교량용 방호울타리를 개발하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 강재 교량용 방호울타리와 복합소재 교량용 방호울타리의 성능을 비교하는 것이다. 복합소재란 재료의 성질이 서로 다른 두 종류 이상의 재료가 서로 일체화되어서 하나의 재료로 거동하도록 구조적 성능을 크게 향상 시킨 새로운 재료를 지칭하며 일반적으로 섬유보강플라스틱(Fiber-reinforced Plastics, FRP)을 의미한다. 섬유보강 플라스틱은 크게 강화섬유와 섬유사이의 응력전달 및 섬유의 손상을 보호해 주는 역할을 하는 수지로 구성된다. 복합재료에 많이 사용되고 있는 섬유로는 유리섬유, 탄소섬

유, 아라미드 섬유가 있으며 수지에는 에폭시, 비닐에스테르, 폴리에스테르, 폴리우레탄이 있다. 본 연구에 적용된 복합소재의 구성요소는 현재 건설 분야에서 가장 많이 사용되는 유리섬유와 폴리우레탄 수지이다. 유리섬유는 강도가 우수하고 탄성계수는 낮아 충격 흡수 능력이 우수한 소재이며 폴리우레탄 수지는 강도 및 충격성능이 우수하고 가벼운 소재이다. 복합소재의 강도는 강재와 비슷하여 대형차량의 추락을 방지할 수 있고 강성은 강재보다 훨씬 작아 소형차량 충돌 시 충격 흡수 능력이 뛰어나다. 복합소재 단위중량은  $2.62\text{t/m}^3$ 로서 강재의 단위중량인  $7.8\text{t/m}^3$ 에 비하여 매우 작은 경량 구조이므로 별도의 장비 없이 인력으로 시공 및 유지보수를 신속히 할 수 있어 교통 혼잡 비용 발생을 최소화 할 수 있다. 강재 교량용 방호울타리의 경우 내구성 및 내부식성이 약하여 수명이 약 25년 정도이나 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 내구성 및 내부식성이 매우 우수하여 수명이 반영구적이다.

국내에서 교량용 방호울타리를 도로에 설치하기 위해서는 실물 충돌 성능평가를 실시하여 안전성을 검증해야 한다. 그런데 실물 충돌 시험에 소요되는 비용과 시간이 과대하므로 유한요소 기법을 활용한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하면 비용과 시간을 극소화할 수 있어 매우 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 강재 교량용 방호울타리와 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 충돌 시뮬레이션을 실시하여 성능을 비교 평가하였다.

## 2. 차량 충돌 시뮬레이션

### 2.1 개요

교량용 방호울타리의 성능을 평가하는 방법은 실물 차량 충돌 시험이 가장 확실하나 비용과 시간이 많이 소요된다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 교량용 방호울타리의 성능을 평가하는 것이 효과적이다. 종래의 연구에서는 지주 형상, 충돌 각도, 충돌 속도, 차량 중량은 고려되었지만, 차량과 교량용 방호울타리 사이의 마찰계수는 고려되지 않았다. 차량과 교량용 방호울타리 사이의 마찰계수 크기에 따라, 차량 충돌 후 교량용 방호울타리의 거동이 달라진다.

따라서 본 논문에서는 차량과 교량용 방호울타리 사이에 마찰계수를 적용하여 충돌해석을 수행하였다.

### 2.2 해석 프로그램

본 연구에서 사용한 LS-DYNA는 1970년대 저속 충돌 문

제를 해석하기 위해 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 개발된 것이다. 1980년 후반 LSTC사의 설립과 함께 다양한 접촉 문제와 충돌 해석 분야의 광범위한 적용 등을 통해 안정성이 입증된 프로그램이며, 특히 교량용 방호울타리와 차량 부재 모델링에 유용한 요소들을 가지고 있다.

### 2.3 모델링

#### 2.3.1 차량 모델링

미국의 NCAC(National Crash Analysis Center)가 제공하는 1.3톤의 승용차(Ford Taurus)모델과 8톤 트럭(Ford single unit truck)모델을 사용하였다. 승용차는 28,578개의 요소로 이루어졌고, 트럭은 20,727개의 요소로 이루어졌다. 트럭의 경우 제공된 모델의 중량이 8톤으로써 “차량방호 안전시설 실험충돌시험 업무편람”의 충돌 차량 기준인 14톤에 맞추기 위하여 단위 중량을 증가시켰다. 3차원 차량 모델은 그림 1과 같고, 차량과 방호울타리의 충돌에 가장 많이 관여하는 차량의 범퍼에 대한 물성치는 표 1과 같다.

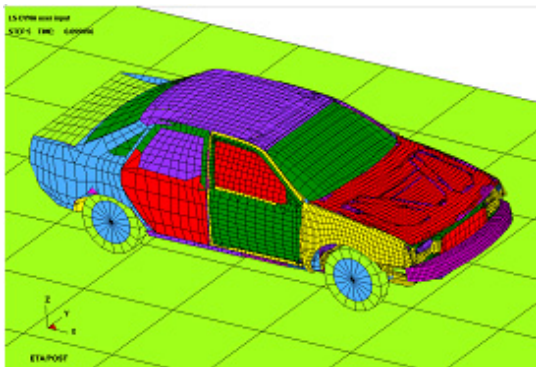
#### 2.3.2 교량용 방호울타리 모델링

강재 교량용 방호울타리는 현재 일반도로 및 고속도로에서 널리 적용 가능한 SB5등급을 선정하였다. 이 모델은 지주,

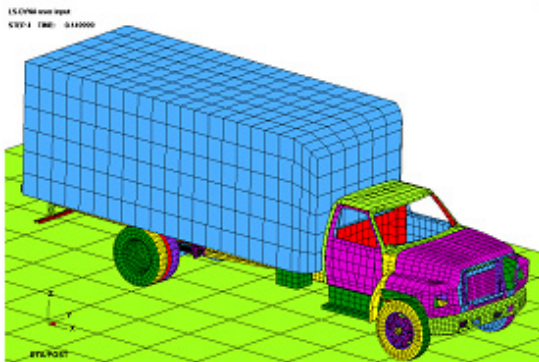
표 1 승용차와 트럭 범퍼의 물성치

| 물성치                   | 승용차 범퍼                                   | 트럭 범퍼   |
|-----------------------|--|---------|
| 밀도(t/m <sup>3</sup> ) | 2.0                                      | 7.85    |
| 탄성계수(MPa)             | 20,400( $E_1$ )<br>20,400( $E_2$ )       | 205,000 |
| 포아손 비                 | 0.27( $\nu_{12}$ )<br>0.27( $\nu_{21}$ ) | 0.30    |
| 항복 응력(MPa)            | 240                                      | 270     |

리브, 앵커, 콘크리트 연석, 상단빔, 중간단빔, 하단빔 및 충격완화부재로 구성되어 있다. 지주, 리브는 SM400, 상단빔, 중간단빔 및 하단빔은 SS400, 충격완화부재는 SPSR400이 사용되었다. 각 부재의 두께로써 지주는 8mm, 리브는 12mm, 상단빔, 하단빔은 4mm, 중간단빔은 8mm, 충격완화부재는 3.2mm가 사용되었다. 복합소재 교량용 방호울타리의 형상 및 두께는 복합소재로 제작된 상단빔, 하단빔은 8mm, 중간단빔은 16mm를 제외하고, 강재 교량용 방호울타리와 동일하게 계획하였다. 충돌 후 차량의 진행을 고려하여 교량용 방호울타리의 길이 30m를 모델링하였으며, 이는 실제 충돌 시험시 교량용 방호울타리 설치 길이와 동일하다. 사용된 지주, 리브, 상단빔, 중간단빔, 하단빔 및 충격완화부재는 쉘 요소로 Belythchko-Tsay 요소모델을 사용하였고, 앵커, 콘크리트 연석은 솔리드 요소로 Constant stress solid element를 사용하여 모델링하였으며, 총 34,492개의 요소를 사용하였다. 빔과 지주리브의 볼트연결부위에서 절점을 공유하여 일체화하였다. 구조단면의 모양과 크기 및 구조형상은 그림 2와 같고, 3차원 교량용 방호울타리 모델은 그림 3과 같다. 강재 교량용 방호울타리 빔의 물성치는 밀도 7.85t/m<sup>3</sup>, 탄성계수 210,000MPa, 포아손비 0.3, 항복응력 245MPa를 사용하였다. 복합소재 교량용 방호울타리 빔은 LS - DYNA에서 제공하고 있는 Material model 58을 사용하여 8층으로 적층하였으며 사용된 적층재료의 물성치는 표 2와 같고, 적층설계는 표 3에 나타내었다. 승용차 충돌시 강재 교량용 방호울타리의 경우와 복합소재 교량용 방호울타리의 경우에서 파단변형률은 나타나지 않았다. 트럭 충돌시 강재 교량용 방호울타리의 경우 파단변형률이 1.878로 나타났고 복합소재 교량용 방호울타리의 경우는 나타나지 않았다. 따라서 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리에 비하여 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다.



(a) 승용차

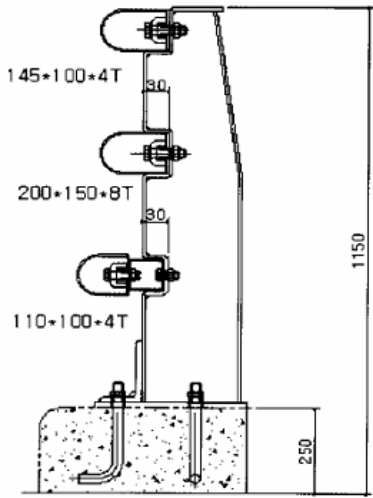


(b) 트럭

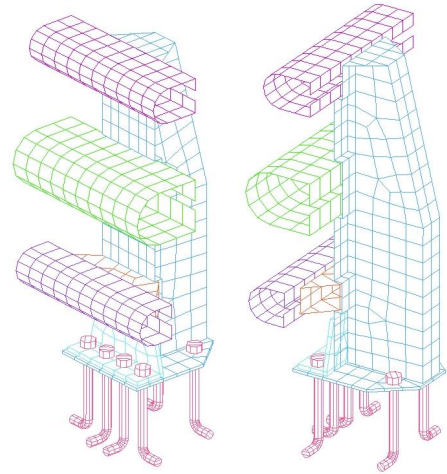
그림 1 3차원 차량 모델

#### 2.3.3 경계 조건 및 접촉 조건

경계 조건으로 콘크리트 연석 바닥과 앵커를 변위 및 회전에 대하여 구속하였다. 도로는 강체로 모델링하였으며, 도로와



(a) 강제 교량용 방호울타리 구조단면의 모양과 크기



(b) 구조형상

그림 2 구조단면의 모양과 크기 및 구조형상

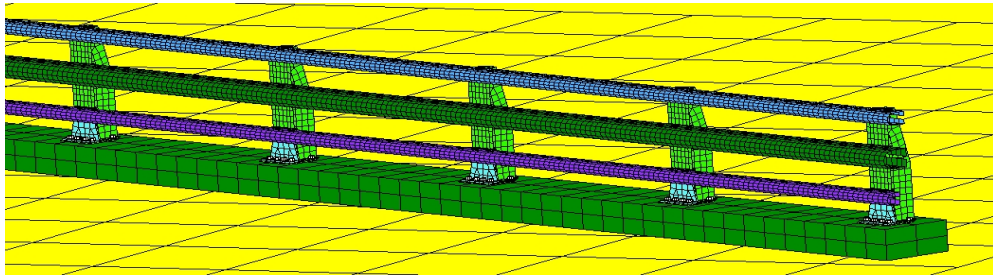


그림 3 3차원 교량용 방호울타리 모델

표 2 복합소재 교량용 방호울타리 빔의 적층 종류 물성치

| 물성치                   | 적층 종류               |                     |                     |                     |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                       | Surmat #150         | CSM #450            | Roving #4400        | DBT #600            |
| 밀도(t/m <sup>3</sup> ) | 2.62                | 2.62                | 2.62                | 2.62                |
| 탄성계수 (MPa)            | 28,619( $E_1$ )     | 28,619( $E_1$ )     | 53,400( $E_1$ )     | 53,400( $E_1$ )     |
|                       | 28,619( $E_2$ )     | 28,619( $E_2$ )     | 14,100( $E_2$ )     | 14,100( $E_2$ )     |
| 포아송 비                 | 0.275( $\nu_{12}$ ) | 0.275( $\nu_{12}$ ) | 0.264( $\nu_{12}$ ) | 0.264( $\nu_{12}$ ) |
|                       | 0.275( $\nu_{21}$ ) | 0.275( $\nu_{21}$ ) | 0.070( $\nu_{21}$ ) | 0.070( $\nu_{21}$ ) |
| 항복 응력 (MPa)           | 314.1(xc)           | 314.1(xc)           | 586.0(xc)           | 586.0(xc)           |
|                       | 621.7(xt)           | 621.7(xt)           | 1160(xt)            | 1160(xt)            |
|                       | 314.1(yc)           | 314.1(yc)           | 106.0(yc)           | 106.0(yc)           |
|                       | 621.7(yt)           | 621.7(yt)           | 37.30(yt)           | 37.30(yt)           |

표 3 복합소재 교량용 방호울타리 적층 설계

| 순번 | 종류(규격)       | 형태         | 두께(mm) |
|----|--------------|------------|--------|
| 1  | Surmat #150  | —————      | 0.1402 |
| 2  | CSM #450     | ▨▨▨▨▨▨▨▨▨▨ | 0.4207 |
| 3  | Roving #4400 | ●●●●●●●●   | 1.9654 |
| 4  | DBT #600     | —————      | 0.5611 |
| 5  | Roving #4400 | ●●●●●●●●   | 1.9654 |
| 6  | DBT #600     | —————      | 0.5611 |
| 7  | Roving #4400 | ●●●●●●●●   | 1.9654 |
| 8  | CSM #450     | ▨▨▨▨▨▨▨▨▨▨ | 0.4207 |

표 4 차량과 방호울타리의 마찰계수

| 구분         | 승용차    |        | 트럭     |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|
|            | 정지마찰계수 | 운동마찰계수 | 정지마찰계수 | 운동마찰계수 |
| 강제 방호울타리   | 0.2    | 0.16   | 0.13   | 0.12   |
| 복합소재 방호울타리 | 0.5    | 0.4    | 0.2    | 0.16   |

차량 바퀴는 LS-DYNA의 라이브러리에서 제공하고 있는 RIGIDWALL-PLANAR를 사용하여 접촉조건을 부여하였다. 도로에 대한 바퀴의 마찰계수는 주행 중 마찰계수인 0.01을 적용하였다(EDVAP Program Manual, 1994). 차량과 교량용 방호울타리의 접촉 조건은 AUTO-SURFACE-TO-SURFACE를 사용하여 부여하였다. 차량의 도색에 의한 표면의 미끄러움을 고려하고, 승용차와 트럭 범퍼의 각기 다른 재료의 물성을 고려하여 표 4와 같이 정지마찰계수와 운동마찰계수를 적용하였다(Eugene A. Avallone, 2006).

## 2.4 충돌 조건

건설교통부의 차량방호 안전시설 실험충돌시험 업무편람에

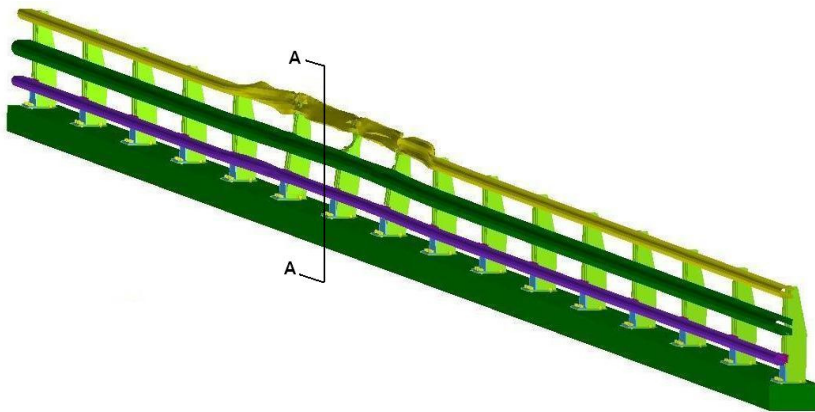


(a) 강재 교량용 방호울타리

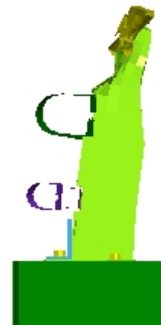


(b) 복합소재 교량용 방호울타리

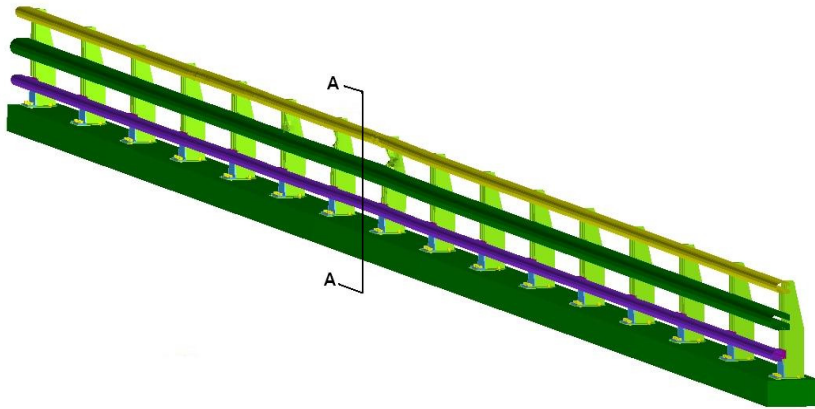
그림 4 교량용 방호울타리에 대한 차량의 변형 비교



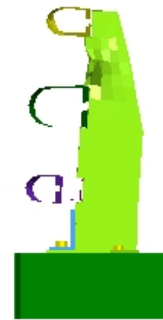
(a) 강재 교량용 방호울타리의 변형



단면 A



(b) 복합소재 교량용 방호울타리의 변형



단면 A

그림 5 교량용 방호울타리의 변형 비교

근거한 차량 충돌 시험 조건에 따라 승용차의 충돌 속도는 100km/hr를 적용하였으며, 교량용 방호울타리에 대한 충돌 각도는 20도를 적용하였다. 트럭의 충돌 속도는 80km/hr를 적용하였으며, 충돌 각도는 15도를 적용하였다. 충돌지점은 취약점인 지주와 지주사이의 정중앙에 위치한 빔으로 적용하였다.

## 2.5 충돌 시뮬레이션 결과

### 2.5.1 구조적 강도성능

트럭 충돌 시의 교량용 방호울타리가 강도성능평가에 만족한다면 중량이 작은 승용차 충돌의 경우는 자연스럽게 강도성능 평가를 만족하게 되므로 트럭을 대상으로 강도 성능 평가를 실시한다. 강재 교량용 방호울타리의 경우 트럭은 주로 앞

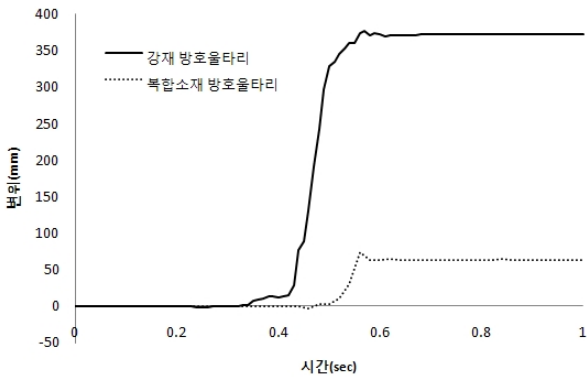


그림 6 시간별 방호울타리의 변위

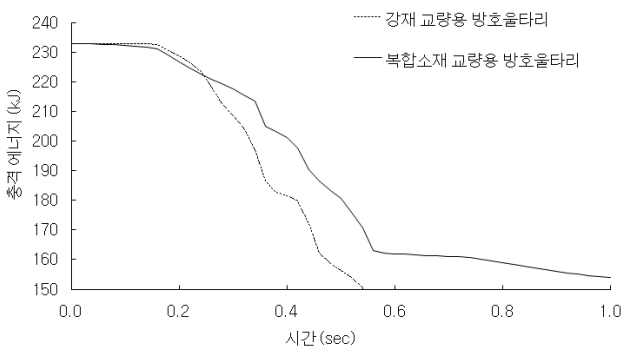


그림 7 차량의 충격 에너지 비교

표 5 강도 성능 비교

| 구분    | 차량 | 성능 평가 기준           | 강재 교량용 방호울타리 | 복합소재 교량용 방호울타리 | 복합소재 / 강재 |
|-------|----|--------------------|--------------|----------------|-----------|
| 강도 성능 | 트럭 | 최대충돌변형거리<br>0.3m이하 | 0.3764m      | 0.0640m        | 17.0%     |
|       |    | 기준 충격도<br>230kJ 이상 | 232.9kJ      | 232.9kJ        | -         |

범퍼에 최대 25.9cm의 변형이 발생하였으며 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 트럭은 주로 앞 범퍼에 최대 21.4cm의 변형이 발생하였다. 복합소재 교량용 방호울타리의 경우가 강재 교량용 방호울타리의 경우 보다 트럭의 변형이 83%로 감소하므로써 상대적으로 성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다. 교량용 방호울타리에 대한 차량의 변형을 그림성능에서 비교하였다.

트럭 충돌 시 강재 교량용 방호울타리는 상단빔이 최대 376.4mm, 중간단빔이 최대 56.2mm, 하단빔이 최대 16.5mm까지 변형하였으며, 충돌 위치의 지주가 161.0mm 뒤로 밀리면서 변위가 발생되었다. 복합소재 교량용 방호울타리는 상단빔이 최대 64.0mm, 중간단빔이 최대 31.3mm, 하단빔이 최대 8.14mm까지 변형하였으며, 충돌 위치의 지주가 63.4mm 뒤로 밀리면서 변위가 발생되었다. 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 강재 교량용 방호울타리 보다 교량용 방호울타리의 변형이 17.0%로 감소하므로써 상대적으로 성능이

우수한 것을 확인할 수 있었다. 교량용 방호울타리의 변형을 그림 5에 비교하였다. 강재 교량용 방호울타리의 경우 376.4mm로 강도성능 기준인 최대충돌변형거리 300mm이하에 만족하지 못하였다. 그림 6은 트럭이 방호울타리와 충돌했을 때 시간별 방호울타리의 변위이다. 강재 방호울타리의 경우에는 국부적으로 항복응력에 도달함에 따라 단면 성능이 급속하게 저하되어 큰 영구변형을 보인다. 반면 복합소재 방호울타리는 항복응력에 도달하지 않으므로 충돌시 단면 성능을 100% 발휘하여 강재 교량용 방호울타리보다 더 작은 변형을 나타내며 탄성회복하는 거동을 보인다. 복합소재 방호울타리의 경우 약 64.0mm의 잔류변형을 보이는데, 이는 강재 지주의 변형 때문이다.

트럭의 충격 에너지를 그림 7에 비교하였으며 최대 충격 에너지는 232.9kJ이었다. 강재 및 복합소재의 강도 성능을 표 5에 비교하였다. 향후 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 실물충돌시험이 필요하다. 시뮬레이션 결과값의 정확도가 검증된다면 향후 다양한 종류의 복합소재 교량용 방호울타리의 개발시 실물충돌시험에 소요되는 과도한 비용과 시간을 절감할 수 있다.

### 2.5.2 탑승자 보호성능

승용차의 경우 중량이 1.3톤으로 트럭의 중량 14톤보다 현저히 작기 때문에 승용차가 교량용 방호울타리에 충돌 시 운전자에게 미치는 충격이 트럭보다 크다. 따라서 탑승자 보호성능을 평가하는 THIV, PHD값은 승용차를 대상으로 구하면 된다. THIV는 차량이 차량방호 안전시설에 충돌할 때 탑승자의 충격 위험도를 평가하는 지수로서 운전자나 탑승자의 머리가 충돌시 속도와 각도로 등속운동을 한다고 할때 차량의 좌,우 공간에 부딪힐 때까지 이동하는 속도를 말한다. PHD는 탑승자가 1차 충돌로 인해 발생하는 2차 충돌로 탑승자가 차량 내부에 부딪힐 때 머리가 받게 되는 순간 가속도 값을 의미한다. THIV와 PHD는 건설 교통부의 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무 편람(2001)에 따라 아래 식 (1) 및 (2)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$THIV = [v_x^2 + v_y^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$PHD = MAX(\langle \ddot{x}_c \rangle^2 + \langle \ddot{y}_c \rangle^2)^{1/2} \quad (2)$$

여기서,  $v_x, v_y$ 는 차량 좌표계에 대한 머리의 상대속도이며  $\langle \ddot{x}_c \rangle, \langle \ddot{y}_c \rangle$ 는 10msec 평균 가속도이다. 적분에 사용한 시간간격은 0.002초이며 필터는 LS-DYNA에서 제공하는 SAE필터를 사용하였다. 강재 교량용 방호울타리의 THIV가 계산된 시점은 0.074초이며 PHD가 계산된 시점은 0.078

표 6 탑승자 보호 성능 비교

| 구분       | 차량  | 성능 평가 기준     | 강제 교량용 방호울타리 | 복합소재 교량용 방호울타리 | 복합소재/강제 |
|----------|-----|--------------|--------------|----------------|---------|
| 탑승자 보호성능 | 승용차 | THIV 9m/s 이하 | 5.3m/s       | 2.5m/s         | 47.1%   |
|          |     | PHD 20g 이하   | 19.9g        | 9.8g           | 49.0%   |

g : 9.8m/s<sup>2</sup>

초이고, 복합소재 교량용 방호울타리의 THIV가 계산된 시점은 0.072초이며 PHD가 계산된 시점은 0.074초이다. 차량이 전복되지 않으므로 yawing effect는 고려하지 않았다. 차량 충돌 시 강제 교량용 방호울타리에 대한 THIV는 5.3m/s이며 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 THIV는 2.5m/s로써 성능평가 기준인 9m/s이하를 만족한다. 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 THIV가 강제 교량용 방호울타리에 대한 THIV보다 47.1%로 낮게 평가되었다. 차량 충돌 시 강제 교량용 방호울타리에 대한 PHD는 19.9g이며, 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 PHD는 9.8g로써 성능평가 기준인 20g 이하를 만족한다. 이 때 g는 중력가속도 9.8m/s<sup>2</sup>이다. 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 PHD가 강제 교량용 방호울타리에 대한 PHD보다 49.0%로 낮게 나왔다. 따라서 복합소재 교량용 방호울타리가 강제 교량용 방호울타리보다 탑승자 보호성능이 우수함을 알 수 있다. 강제 교량용 방호울타리 및 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 탑승자 보호성능을 표 6에 요약하였다.

2.5.3 충돌 후 차량의 거동

승용차가 100km/hr로 충돌할 시 강제 교량용 방호울타리의 경우 이탈 속도는 68.5km/hr로써 충돌속도대비 68.5%로 감소하였고 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 이탈 속도는 70.9km/hr로써 충돌속도대비 70.9%로 감소하여 기준치 60%이상을 만족한다. 복합소재 교량용 방호울타리가 강제 교량용 방호울타리 보다 이탈 속도가 2.4% 큰것으로 평가되었다. 트럭이 80km/hr로 충돌할 시 강제 교량용 방호울타리의 경우 이탈 속도는 60.5km/hr로써 충돌속도대비 75.6%로 감소하였고 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 이탈 속도는 65.4km/hr로써 충돌속도대비 81.8%로 감소하

여 기준치 60%이상을 만족한다. 복합소재 교량용 방호울타리가 강제 교량용 방호울타리보다 이탈 속도가 6.2%큰 것으로 평가되었다. 이탈 속도가 클수록 뒤따라오는 차량에 의한 2차 충돌 사고가 감소하므로 복합소재 교량용 방호울타리가 강제 교량용 방호울타리 보다 뒤따라오는 차량에 의한 2차 충돌 사고에 대해 안전함을 알 수 있다.

승용차가 20도로 충돌할 시 강제 교량용 방호울타리의 경우 이탈 각도는 4.0도로써 충돌각도대비 20.0%로 감소하였고, 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 이탈 각도는 3.8도로써 충돌각도대비 19.0%로 감소하여 기준치 60%이하를 만족한다. 복합소재 교량용 방호울타리가 강제 교량용 방호울타리 보다 이탈 각도가 1.0%작았다. 트럭이 15도로 충돌할 시 강제 교량용 방호울타리의 경우 이탈 각도는 5.8도로써 충돌각도대비 38.7%로 감소하였고 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 이탈 각도는 3.8도로써 충돌각도대비 25.3%로 감소하여 기준치 60%이하를 만족한다. 복합소재 교량용 방호울타리가 강제 교량용 방호울타리 보다 이탈 각도가 13.4% 작았다. 이탈 각도가 작을수록 옆에서 오는 차량에 의한 2차 충돌 사고가 적어지므로 복합소재 교량용 방호울타리가 강제 교량용 방호울타리 보다 2차 충돌 사고에 대해 안전함을 알 수 있다.

강제 교량용 방호울타리와 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 승용차와 트럭은 충돌에 의하여 전도되지 않았고, 교량용 방호울타리를 따라 원활히 이동하였다. 충돌 후 차량 거동의 결과치는 표 7에 비교하였다.

2.5.4 교량용 방호울타리의 비산

차량이 교량용 방호울타리와 충돌 후 교량용 방호울타리의 파편이 비산할 경우에 탑승자가 파편에 맞아 부상을 당하거나 사망할 위험이 있다. 또한 파편이 주변차량에 맞아서 차량의 시야를 막거나 흐름을 방해하여 2차적인 사고를 발생시킬 수 있다. 따라서 교량용 방호울타리의 비산 여부는 2차적인 사고를 고려하여 충돌 후 차량의 거동만큼이나 중요하다. 해석 결과 강제 교량용 방호울타리의 경우와 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 모두 승용차, 트럭 충돌 시 교량용 방호울타리의 구성부재가 비산하지 않았다.

표 7 충돌 후 차량 거동의 결과치 비교

| 구분          | 차량    | 성능 평가 기준            | 강제 교량용 방호울타리            | 복합소재 교량용 방호울타리          | 복합소재/강제                      |
|-------------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 충돌 후 차량의 거동 | 승용차   | 이탈 속도가 충돌 속도의 60%이상 | 승용차: 68.5%<br>트럭: 75.6% | 승용차: 70.9%<br>트럭: 81.8% | 승용차: 2.4% 증가<br>트럭: 6.2% 증가  |
|             |       | 이탈 각도가 충돌 각도의 60%이하 | 승용차: 20.0%<br>트럭: 38.7% | 승용차: 19.0%<br>트럭: 25.3% | 승용차: 1.0% 감소<br>트럭: 13.4% 감소 |
|             | 전도 유무 | 전도 없음               | 전도 없음                   | -                       |                              |

### 3. 결 론

본 논문에서는 복합소재 교량용 방호울타리를 개발하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 강재 교량용 방호울타리와 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 차량 충돌 시뮬레이션을 수행하여 교량용 방호울타리의 성능을 비교 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 복합소재 교량용 방호울타리는 차량방호 안전시설 실험충돌 시험 업무 편람에 따른 교량용 방호울타리의 성능 평가 기준을 만족하였다. 강재 교량용 방호울타리는 강도성능을 만족하지 못하였다.

둘째, 구조적 강도 성능 측면에서, 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 강재 교량용 방호울타리 보다 교량용 방호울타리의 변형이 트럭 충돌 시 17.0%로 감소하였다. 따라서 복합소재 교량용 방호울타리가 강재교량용 방호울타리 보다 강도 성능이 우수하였다.

셋째, 탑승자 보호 성능 측면에서, 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 THIV 47.1%, PHD 49.0%로 감소하였다. 따라서 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 탑승자 보호성능이 우수하였다.

넷째, 충돌 후 차량의 거동 측면에서, 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 이탈속도가 승용차, 트럭 충돌 시 각각 2.4% 증가, 6.2% 증가하고 이탈각도가 각각 1.0%, 13.4% 감소하였다. 이탈 속도가 증가하고 이탈각도가 감소할수록 충돌 후 차량의 거동에 의한 2차 충돌 사고 위험이 줄어든다. 따라서 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 충돌 후 차량의 거동이 우수하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 국토해양기술연구개발사업(한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업)의 연구비지원(과제번호 기술혁신B01)에 의해 수행되었습니다. 연구비를 지원해 준 한국건설교통기술평가원과 참여기업 동아에스텍(주), 한국피앤피(주)에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

건설교통부 (2001) 차량방호 안전시설 실험충돌시험 업무편람  
**고만기, 김기동** (2001) 에너지 흡수 장치를 부착한 트라이빔 가드레일 시스템의 거동, 한국강구조학회논문집, 13(4), pp.381~393.  
**윤태양, 이재혁, 김성태** (2002) 고성능 철재 난간 기술개발, RIST 연구논문, 16(1), pp.38~46.  
**Atahan, A.O., Cansiz, O.A** (2005) Impact Analysis of a Vertical Flared Back Bridge Rail-To-Guardrail Transition Structure using Simulation, *Finite Elements in Analysis and Design*, 41, pp.371~396.  
**Coon, B.A., Reid, J.D** (2006) Reconstruction Techniques for Energy-Absorbing Guardrail end Terminals, *Accident Analysis & Prevention*, 38, pp.1~13.  
**Dauids, W.G., Botting, J.K., Peterson, M** (2006) Development and Structural Testing of a Composite-Reinforced Timber Highway Guardrail, *Construction and Building Materials*, 20, pp.733~743.  
**Engineering Dynamics Corporation** (1994) EDVAP Program Manual  
**Eugene A. Avallone** (2006) *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, McGraw-Hill, New York  
**LSTC** (2006) LS-DYNA Keyword User's Manual, *Livermore Software Technology Corporation*, Livermore, CA.  
**Reid, J.D., Sickling, D.L.** (1998) Design and Simulation of a Sequential Kinking Guardrail Terminal, *Impact Engineering*, 21, pp.761~772.

- 논문접수일 2009년11월15일
- 논문심사일  
 1차 2009년12월 3일  
 2차 2010년 3월24일
- 게재확정일 2010년 3월29일