복합소재 방호울타리의 차량 충격 시뮬레이션

Vehicle Impact Simulation of Composite Safety Barriers

김 승 억* • 전 신 열** • 홍 갑 의***
Kim, Seung-Eock • Jeon, Shin-Youl • Hong, Kab-Eui

요 약

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 31.7%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.

keywords :복합소재 교량용 방호울타리, 차량 충돌, 충돌 시뮬레이션, LS-DYNA

1. 서 론

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 차량과 교량용 방호울타리 사이의 마찰계수는 고려되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 컴퓨터 충돌 시뮬레이션을 통해 차량과 교량용 방호울타리 사이에 마찰계수를 적용하여 강재 교량용 방호울타리와 복합소재 방호울타리의 성능을 비교하고자 한다.

2. 차량 충돌 시뮬레이션

2.1 차량 모델링

본 연구에서는 저속 충돌 문제를 해석하기위해 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 개발된 LS-DYNA를 사용하였고, 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 실물충돌시험 업무편람”의 충돌 차량 기준인 14톤에 맞추기 위하여 단위 중량을 증가시켰다.

* 정회원 • 세종대학교 토목공학과 교수 sekim@sejong.ac.kr
** 학생회원 • 세종대학교 토목공학과 석사과정 jsy007jsy007@naver.com
*** 세종대학교 토목공학과 석사과정 hongaby@nate.com

2.2 교량용 방호울타리 모델링

강재 교량용 방호울타리는 현재 일반도로 및 고속도로에서 널리 적용 가능한 SB5등급을 선정하였다. 이 모델은 지주, 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 경우는 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 지주 리브의 볼트연결부위에서 절점을 공유하여 일체화하였다. 3차원 교량용 방호울타리 모델은 그림 1과 같다. 강재 교량용 방호울타리 빔의 물성치는 밀도 7.85t/㎥, 탄성계수 210,000MPa, 포아슨비 0.3, 항복응력 245MPa을 사용하였다. 복합소재 교량용 방호울타리 빔은 LS - DYNA에서 제공하고 있는 Material model 58을 사용하여 Surmat #150, CSM #450, Roving #4400, DBT #600을 6층으로 적층하였다.

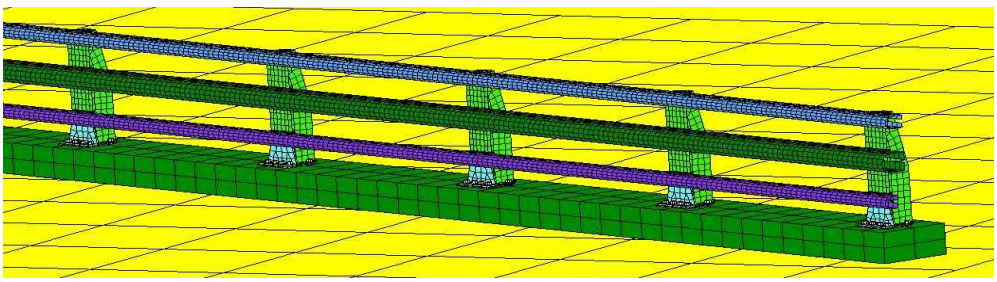

그림 1. 3차원 교량용 방호울타리 모델

2.3 경계 조건 및 접촉 조건

경계 조건으로 콘크리트 연석 바닥과 앵커를 변위 및 회전에 대하여 구속하였다. 도로는 강체로 모델링하였으며, 도로와 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 사용하였다. 차량의 도색에 의한 표면의 미끄러움을 고려하고, 승용차와 트럭 범퍼의 각기 다른 재료의 물성을 고려하여 다음 표 1과 같이 정지마찰계수와 운동마찰계수를 적용하였다 (Marks, Lionel S, 1996).

표 1. 차량과 방호울타리의 마찰계수

구분	승용차		트럭	
	정지마찰계수	운동마찰계수	정지마찰계수	운동마찰계수
강재 방호울타리	0.2	0.16	0.13	0.12
복합소재 방호울타리	0.5	0.4	0.2	0.16

3. 충돌 시뮬레이션 결과

구조적 강도성능은 트럭 충돌 시의 교량용 방호울타리가 강도성능평가에 만족한다면 중량이 작은 승용차 충돌의 경우는 자연히 강도성능평가를 만족하게 되므로 트럭을 대상으로 평가를 실시한다. 강재 교량용 방호울타리는 상단빔이 최대 201.9mm, 중간단빔이 최대 56.7mm, 하단빔이 최대 13.7mm까지 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 31.7%로 감소하므로서 상대적으로 성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

탑승자 보호성능 측면에서는 승용차의 경우 중량이 1.3톤으로 트럭의 중량 14톤보다 현저히 작기 때문에 승용차가 교량용 방호울타리에 충돌 시 운전자에게 미치는 충격이 트럭보다 크다. 따라서 THIV, PHD값은 승용차를 대상으로 구하면 된다. 차량 충돌 시 강재 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 강재 교량용 방호울타리에 대한 THIV보다 47.1%로 낮게 평가되었다. 차량 충돌 시 강재 교량용 방호울타리에 대한 PHD는 19.9g이며 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 PHD는 9.8g로써 성능평가 기준인 20g 이하를 만족한다. 이때 g는 중력가속도 $9.8m/s^2$이다. 복합소재 교량용 방호울타리에 대한 PHD가 강재 교량용 방호울타리에 대한 PHD보다 49.0%로 낮게 나왔다. 따라서 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 탑승자 보호성능이 우수함을 알 수 있다.

충돌 후 차량의 거동은 승용차가 100km/hr로 충돌할 시 강재 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 강재 교량용 방호울타리 보다 이탈 속도가 2.4%큰 것으로 평가되었다. 트럭이 80km/hr로 충돌할 시 강재 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 감소하여 기준치 60%이상을 만족한다. 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리보다 이탈 속도가 6.2%큰 것으로 평가되었다. 이탈 속도가 클수록 뒤따라오는 차량에 의한 2차 충돌 사고가 감소하므로 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 뒤따라오는 차량에 의한 2차 충돌 사고에 대해 안전함을 알 수 있다.

이탈각도는 승용차가 20도로 충돌할 시 강재 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 강재 교량용 방호울타리 보다 이탈 각도가 1.0%작았다. 트럭이 15도로 충돌할 시 강재 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 강재 교량용 방호울타리 보다 이탈 각도가 13.4%작았다. 이탈 각도가 작을수록 옆에서 오는 차량에 의한 2차 충돌 사고가 적어지므로 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 2차 충돌 사고에 대해 안전함을 알 수 있다.

강재 교량용 방호울타리와 복합소재 교량용 방호울타리의 경우 승용차와 트럭은 충돌에 의하여 전도되지 않았고, 교량용 방호울타리를 따라 원활히 이동하였으며, 두 경우 모두 승용차, 트럭 충돌

시 교량용 방호울타리의 구성부재가 비산하지 않았다. 이와 같은 결과치는 표 2에 비교하였다.

표 2. 충돌 후 차량 거동의 결과치 비교

구분	차량	성능 평가 기준	강재 교량용 방호울타리	복합소재 교량용 방호울타리	복합소재/강재
강도 성능	트럭	최대충돌변형거리 0.3m이하	0.2019m	0.0640m	31.7%
		기준 충격도 230kJ 이상	232.9kJ	232.9kJ	-
탑승자보호성능	승용차	THIV 9m/s 이하	5.3m/s	2.5m/s	47.1%
		PHD 20g 이하	19.9g	9.8g	49.0%
충돌 후 차량의 거동	승용차 트럭	이탈 속도가 충돌 속도의 60%이상	승용차: 68.5% 트 럭: 75.6%	승용차: 70.9% 트 럭: 81.8%	승용차: 2.4% 증가 트 럭: 6.2% 증가
		이탈 각도가 충돌 각도의 60%이하	승용차: 20.0% 트 럭: 38.7%	승용차: 19.0% 트 럭: 25.3%	승용차: 1.0% 감소 트 럭: 13.4% 감소
		전도 유무	전도 없음	전도 없음	-
		비산 여부	비산 없음	비산 없음	-

4. 결론

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.

복합소재 교량용 방호울타리는 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람 (2001) 에 따른 교량용 방호울타리의 성능평가 기준을 만족하였다. 또한 충돌 시뮬레이션 결과에서 보는바와 같이 구조적 강도 성능 측면, 탑승자 보호성능 측면, 충돌 후 차량의 거동 측면에서 모두 복합소재 교량용 방호울타리가 강재 교량용 방호울타리 보다 성능이 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.

참고문헌

1. 건설교통부 (2001) 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람
2. Engineering Dynamics Corporation (1994) EDVAP Program Manual
3. Marks, Lionel S. (1996) *Marks' standard handbook for mechanical engineers*, McGrew-Hill, New York
4. LSTC (2006) LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.