

단면 형상별 Low Profile Barrier에 충돌하는 소형차량의 거동 및 탑승자 안전도 분석

Vehicle Response and Occupant Safety Analysis for a Small Car Impacting Against Low Profile Barrier with Different Cross Sectional Shape

김경주* · 고만기** · 김기동*** · 김동성****

Kim, Gyeong Ju · Ko, Man Gi · Kim, Kee Dong

1. 서론

Low Profile Barrier(LPB)는 운전자 시야를 확보해주면서 공사구간을 보호할 목적으로 개발되어 미국에서 널리 사용되고 있는 도로이다. 주로 공사구간에 사용되거나 교통류가 합류되거나 분리되는 지점 등 차량의 유도가 필요한 구간에서의 활용도가 높다.

현재 국내에는 LPB가 도입되지 않았지만 도심지의 도로 분기점, 불법유턴 금지구역, 공사구간 등에 적용 가능성이 매우 높다. LPB는 차량 방호울타리의 일종으로 일반적인 방호울타리와 마찬가지로 차량충돌에 대한 검토가 필요하며, 특히 도심지의 도로 점유율이 높은 소형차에 대한 충돌 거동을 이해할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 소형차 충돌에 따른 LPB 단면에 대한 차량 충돌 거동을 살펴보기 위하여 LS-DYNA 충돌시뮬레이션을 통한 차량 거동 및 탑승자 안전도를 분석하였다.

2. 해외 적용 사례

그림1은 LPB의 해외 활용사례로 미국에서 공사구간에 사용하고 있음을 보여주고 있다. Texas DOT Type(Guidry, T.R and Beason, W.L., 1992)은 역마름모형 단면으로 전면 경사는 2.86°이고 단면의 높이는 510mm이다. Florida DOT Type(Gary Consolazio, 2003)은 오각형 단면으로 전면 경사는 3.18°이고 단면의 높이는 457mm로 일반 베리어에 비해 낮게 설계되었다. Low Profile Barrier는 일반 차량방호울타리와 마찬가지로 충돌시 차량의 거동 및 탑승자 안전도에 대한 검증이 필요하며 충돌실험 기준인 NCHRP Report 350(TRB, 1993) 기준에 따른 충돌 실험 실시하고 있다.



(a) Texas DOT Type



(b) Florida DOT Type

그림 1. Low Profile 적용 사례

* 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 070-8251-8725(E-mail:civilkkj@kongju.ac.kr)
** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수 · 공학박사 · 041-521-9307(E-mail:mgko@kongju.ac.kr)
*** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수 · 공학박사 · 041-521-9306(E-mail:kkkim@kongju.ac.kr)
**** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 041-521-9306(E-mail:dskim93@kongju.ac.kr)

3. 시뮬레이션을 이용한 단면별 충돌차량의 거동 분석

LPB의 충돌시 차량 거동을 분석하기 위해서는 단면형상 및 제원과 연결부 상세에 따른 차량의 거동, Segment의 변형 특성 등 다양한 변수에 대해 검토가 필요하다. 본 연구에서는 LPB의 단면을 결정하는데 필요한 거동 특성을 파악하기 위한 것으로 단면 영향만을 고려하였다. 검토단면은 그림 2와 같이 정사각형, 마름모형, 역 마름모형의 세 가지 단면이며, 단면의 최외측 치수는 400mm×400mm이다. 마름모형의 전면 경사는 9.2° 수직형 연석과 유사하며, 역 마름모형은 Texas DOT 및 Florida DOT 단면과 유사한 형태로 전면 경사가 4.3°이다.

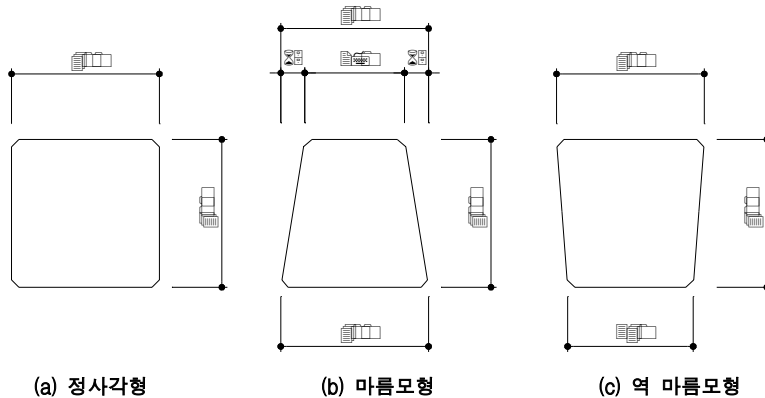


그림 2. Low Profile Barrier 단면

3.1 LS-DYNA 개요

시뮬레이션에 사용된 LS-DYNA는 1976년부터 다양한 충돌하중에 대한 해석을 위해 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)에서 John O. Hallquist 박사에 의해 최초로 개발되기 시작하였으며 다양한 접촉문제의 해결과 충돌해석 등의 분야에 광범위하게 적용되고 있다. 주요 활용 분야로는 비선형 충돌해석, Acoustic 해석, 열해석, 유체해석 등의 분야에서 쓰이고 있으며 특히 도로안전시설분야에서 활용하기 위한 차량 모델의 검증 및 도로안전시설물과의 다양한 충돌 시뮬레이션이 실시되어 높은 신뢰도를 보여주고 있다.

LS-DYNA는 도로안전시설과 차량의 부재를 모델링할 수 있는 다양한 요소들을 갖추고 있으며, 이 요소들의 특성은 부재의 복잡한 비탄성 및 비선형 거동을 정의할 수 있다. 또한 차량과 도로안전시설을 3차원으로 모델링할 수 있기 때문에 도로안전시설의 거동을 면밀하게 조사할 수 있고 차량의 움직임을 세밀히 검토할 수 있어 도로안전시설의 평가 및 주요 부재의 성능 검토에도 폭넓게 활용되고 있는 프로그램이다.

3.2 해석 모델

해석에 사용된 소형차 모델은 그림 3 및 표 1과 같이 NCAC (National Crash Analysis Center at George Washington University)에서 개발한 Dodge Neon 모델(NCAC, 2000)을 사용하였으며 차량의 중량은 1,300kg으로 도로안전시설 설치 및 관리지침(국토해양부, 2009)의 탑승자 보호성능 기준 차량과 동일하다. LPB는 그림 3과 같이 Shell 요소로 모델링 하였고, 단면 형상에 따른 영향을 검토하기 위해 표 2와 같이 강체 재료 모델을 사용하였으며, 지면과의 고정은 SPC(Single Point Constraint)를 사용하였다.

차량의 충돌조건은 도로안전시설 설치 및 관리지침(국토해양부, 2009)의 SB1 등급 탑승자 보호성능 기준으로 충돌속도 60km/h에 충돌각도 20°의 조건으로 수행하였다. 충돌 등급을 SB1 등급으로 선정된 것은 베리어의 설치 위치가 대부분 도심지 교통류의 합류 및 분리부와 공사구간 등으로 저속운행 구간으로 한정되기 때문이다.

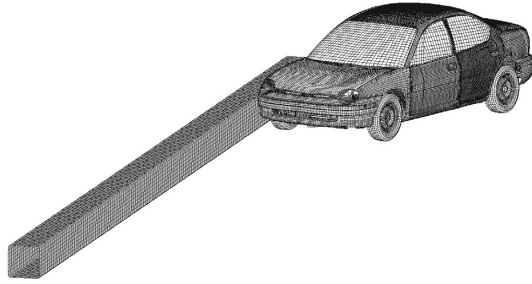


그림 3. 해석 모델

표 1. 차량모델 개요

주요 요소	요소수
Number of Parts	336
Number of Nodes	283859
Number of Solids	2852
Number of Beams	122
Number of Shells	267786
Number of Elements	270768

표 2. 연석 재료적 특성

Mat_Rigid	
Mass density	$2.35 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$
Young's modulus	$2.30 \times 10^4 \text{ MPa}$
Poisson's ratio	0.3

3.3 해석 결과

충돌 시뮬레이션을 이용하여 차량의 거동 및 탑승자 안전도를 분석하기 위해서는 차량 무게 중심점에서의 가속도 및 각속도가 필요하며 이때 차량 좌표계는 그림 4와 같이 차량 진행방향을 X축, 차량진행과 수직인 방향을 Y축, X, Y평면에 수직인 방향을 Z축을 하며, 각 X, Y 및 Z축에 대한 회전을 Roll, Pitch 및 Yaw로 정의한다. 시뮬레이션을 통해 획득한 데이터는 노이즈를 포함하고 있어 경향을 분석하기 어려우며, 데이터 분석을 위해 Post Process를 사용하여 SAE 60Hz 필터링과 50msec 평균데이터를 사용하였다.

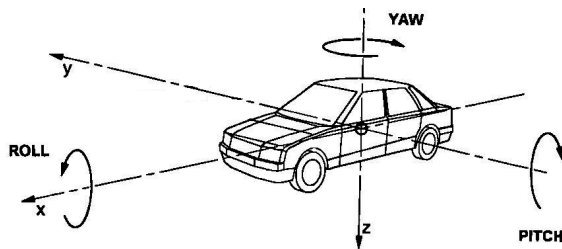


그림 4. 차량좌표계 정의

LPB 단면에 따른 충돌 시뮬레이션 결과는 가속도, 각도 및 속도는 그림 5~그림 11 및 표 3에 나타내었다. 차량 종방향 가속도의 경우 정사각형 단면이 $-19.27g$ 로 가장 크게 나타났으며, 역 마름모형 단면은 $-19.21g$, 마름모형 단면은 $-13.38g$ 의 순으로 나타났다. 차량 횡방향 가속도의 경우 역 마름모형 단면이 $-31.14g$ 로 가장 크게 나타났으며, 정사각형 단면은 $-30.83g$, 마름모형 단면은 $-25.29g$ 의 순으로 나타났다. 차량 수직방향 가속도의 경우 마름모형 단면이 $-6.23g$ 로 가장 크게 나타났고, 정사각형 단면은 $3.75g$, 역 마름모형 단면은 $-3.64g$ 의 순으로 나타났다. 차량 각도의 경우 Roll 각은 직사각형 단면이 4.99° 로 가장 크게 나타났으며, 역 마름모형 단면이 4.63° , 마름모형 단면이 4.58° 의 순으로 나타났다. Pitch 각의 경우 마름모형 단면이 3.23° 로 가장 크게 나타났으며, 정사각형 단면이 -1.60° , 역 마름모형 단면이 -1.29° 의 순으로 나타났다. Yaw 각의 경우 마름모형 단면이 -42.48° 로 가장 크게 나타났으며, 역 마름모형 단면이 -38.43° , 정사각형

단면이 -38.27° 의 순으로 나타났다. 차량의 최대 속도 변화는 역 마름모형 단면이 7.27km/h로 가장 감속이 크며, 마름모형 단면이 7.21km/h, 정사각형 단면이 6.81km/h의 순으로 나타났다.

단면에 따른 거동 특성을 정리하면, 정사각형 단면과 역 마름모형 단면의 거동은 전반적으로 유사하게 나타나며, 마름모형의 경우 가속도는 작게 나타나지만, 각도 변화는 큰 것으로 나타났다.

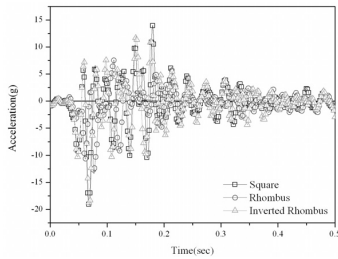


그림 5. 종방향(x) 가속도

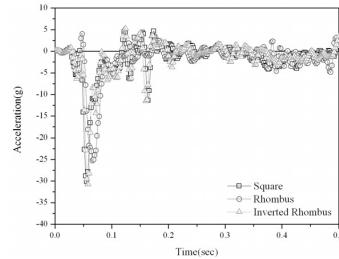


그림 6. 횡방향(y) 가속도

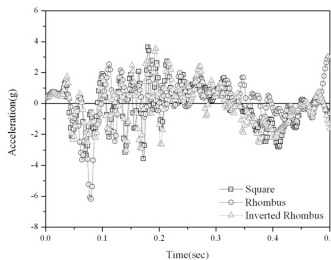


그림 7. 수직방향(z) 가속도

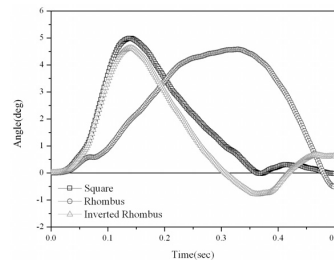


그림 8. Roll 각도

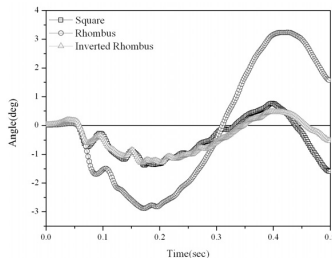


그림 9. Pitch 각도

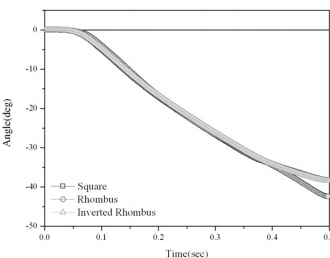


그림 10. Yaw 각도

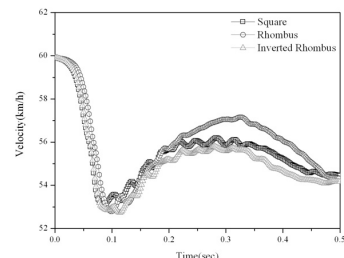


그림 11. 종방향(x) 속도

표 3. 해석 결과 비교

단면형상	해석 결과						
	가속도 최대값(g)			각도 최대값(g)			속도 최대 변화 (km/h)
	x	y	z	Roll	Pitch	Yaw	
정사각형	-19.27	-30.83	-48.71 (3.75)*	4.99	-1.60	-38.27	6.81
마름모형	-13.38	-25.29	-30.60 (-6.23)*	4.58	3.23	-42.48	7.21
역마름모형	-19.21	-31.14	36.36 (3.64)*	4.63	-1.29	-38.43	7.27

* : SAE 5Hz Filtering

탑승자 안전도는 차량 무게 중심점에서 측정된 종방향(x) 및 횡방향(y) 가속도와 Yaw 각속도로부터 계산되며 결과는 표 4에 충돌 후 차량거동과 함께 나타났다. 그림 12는 주요 시간대별 차량의 거동을 보이는 것이다.

탑승자 충돌속도(THIV)의 경우 마름모형 단면 및 역 마름모형 단면은 24.3km/h로 갖게 나타났으며, 정사각형 단면은 23.4km/h로 나타났다. 탑승자 충돌 가속도(PHD)의 경우 역 마름모형이 11.3g로 가장 크게 나타났으며, 정사각형 단면이 11.0g, 마름모형 단면이 7.5g의 순으로 나타나 단면 형상에 따라 큰 변화는 없으므로 나타났다. 충돌중 차량은 그림 12와 같이 모든 단면에 대해 전도 등의 이상거동은 관찰되지 않았으며, 이탈속도는 마름모형 단면이 56.0km/h로 가장 크게 나타났으며, 정사각형 단면이 55.3km/h, 역 마름모형 단면이 54.3km/h의 순으로 나타났다. 이탈각도의 경우 정사각형 단면이 14.06°로 가장 크게 나타났으며, 마름모형 단면이 12.45°, 역 마름모형 단면이 12.26°의 순으로 나타났다. 탑승자 안전도를 비교해볼 때 SB1충돌조건에 대하여 단면에 따른 안전도의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

표 4. 탑승자 보호성능 및 충돌 후 차량 거동

항 목	기 준	해석 결과			비고
		정사각형	마름모형	역 마름모형	
탑승자 보호 성능	THIV 33km/h 이하	23.4km/h	24.3km/h	24.3km/h	
	PHD 20g 이하	11g	7.5g	11.3g	
충돌 후 차량 거동	차량의 전도 등이 없을 것	없음	없음	없음	
	이탈속도는 충돌속도의 60% 이상	55.3km/h 92.2(%)	56.0km/h 93.3(%)	54.3km/h 90.5(%)	
	이탈각도는 충돌각도의 60% 이하	14.06° 70.3(%)	12.45° 62.25(%)	12.26° 61.3(%)	

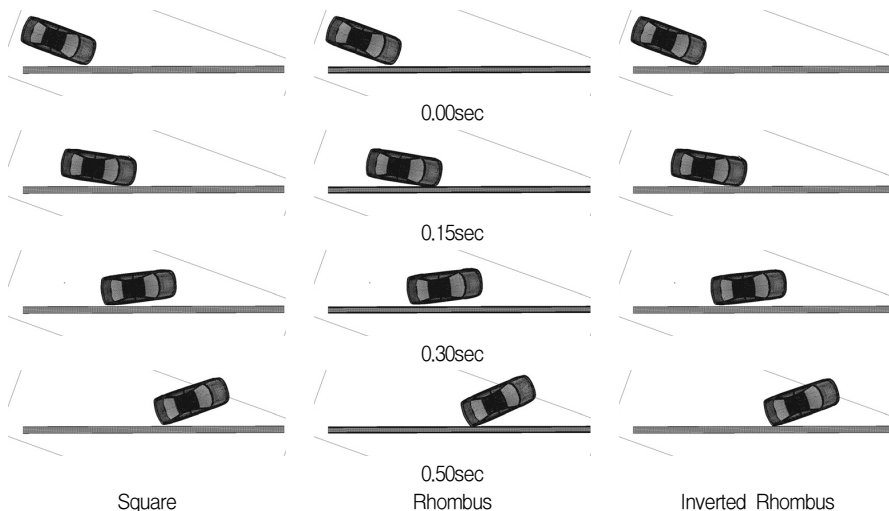


그림 12. 시간대별 차량거동



5. 결 론

본 연구는 Low Profile Barrier 단면에 따른 충돌시 차량거동을 LS-DYNA 프로그램을 활용하여 SB1 충돌 조건에 대해 분석하였으며 결과는 다음과 같다.

- 1) 차량 거동은 정사각형 단면과 역 마름모형 단면이 전반적으로 유사하게 나타났다. 마름모형 단면의 경우 가속도는 작게 나타나고 Roll 변형은 늦게 나타나며 Pitch 변형이 크게 나타나는 특성을 보였다. 이러한 차이는 전면 경사가 급할수록 커질 것으로 예상된다.
- 2) 탑승자 안전도의 경우 탑승자 충돌 속도(THIV)는 정사각형 단면, 탑승자 충돌 가속도의 경우 마름모형이 가장 안전한 것으로 나타났다. 충돌후 차량 거동의 경우 이탈속도는 마름모형 단면, 이탈각도는 역 마름모형 단면이 가장 적합한 것으로 나타났다. 전체적으로 단면에 따른 탑승자 안전도의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Gary Consolazio, 2003, TEMPORARY LOW PROFILE BARRIER FOR ROADSIDE SAFETY : PHASE II
2. Guidry, T.R and Beason, W.L., 1992, Development of a Low-Profile Portable Concrete Barrier, Research Report No. 9901F, Texas Department of Transportation
3. H. E. Ross, et. al., 1993, NCHRP Report 350, Recommend Procedures for the Safety Performance evaluation of Highway Features, , TRB, Washington, D.C.
4. NCAC, 2006, Public Finite Element Model Archive, FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center
5. John O. Hallquist, 2006, LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation.
6. 건설교통부, 2003, 도로안전시설 설치 및 관리지침-차량방호 안전시설