

# 다양한 환경에 적용 가능한 충격흡수시설의 시뮬레이션 분석 및 실물충돌시험 결과 분석

노민형\* · 박재홍\*\* · 서창원\*\*\* · 성정곤\*\*\*\* · 윤덕근\*\*\*\*\*

No, Min Hyung\*, Park, Jea Hong\*\*, Seo, Chang Won\*\*\*, Sung, Jung Gon\*\*\*\*, Yun, Duk Geun\*\*\*\*\*

## Analysis between Computer Simulation and Real-car Crash Test of Energy Absorption Facilities for Various Road Environments

### ABSTRACT

Energy absorption facilities installed on roads should follow the performance standards of the real-car crash test of 'Installation and Maintenance Guidelines for Roadside Safety Facilities'. However, due to different installation conditions, such as differing structure widths on roads, some energy absorption facilities do not provide adequate performance. In order to apply varied environments on roads, an energy absorption structure was designed in this study with 150 mm height and four layers of W-shape guardrail at 200 mm intervals, and the performance was verified using LS-DYNA computer simulation. Through a real-car crash test, the performance of the facility designed by LS-DYNA was tested and was found to meet the performance of the CC2 category for crash cushions. The conclusion of the comparison demonstrates that the simulation and the real-car crash tests are both significant.

**Key words** : Energy absorption facility, Real-car crash test, Roadside safety facility, LS-DYNA

### 초록

도로안전시설 설치 및 관리 지침 차량방호 안전시설 편에서 충격흡수시설은 실물충돌시험을 통해 성능 기준을 만족하는 제품만을 현장에 설치하도록 하고 있다. 그러나 기존의 설치된 충격흡수시설의 경우 설치 환경에 따라 방호해야할 구조물과의 폭 차이로 인하여 방호성능을 발휘하지 못하는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 다양한 환경에 적용하기 위하여 높이 150 mm의 W형 가드레일을 200 mm 간격으로 4단 배치하는 충격흡수시설을 LS-DYNA 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 개발하고 실물충돌시험을 통하여 성능 기준을 검증하였다. 시뮬레이션을 통해 개발한 충격흡수시설이 CC2등급의 성능 기준을 만족한다는 것을 실물충돌시험으로 확인하였고 시뮬레이션 결과와 실물충돌시험 결과를 비교 분석하여 충돌 시뮬레이션의 결과가 유의미하다는 것을 확인하였다.

**검색어** : 충격흡수시설, 실물충돌시험, 도로안전시설, LS-DYNA

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 박사후연구원, 공학박사

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · [nominhyung@kict.re.kr](mailto:nominhyung@kict.re.kr))

\*\* 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 수석연구원, 공학박사

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · [jhpark@kict.re.kr](mailto:jhpark@kict.re.kr))

\*\*\* 세라코(주) 기업부설연구소 상무이사, 공학석사

(Ceramic Eco-Business Road Safety Architecture Company, Technical Research Center · [qmseo@ceraco.kr](mailto:qmseo@ceraco.kr))

\*\*\*\* 종신회원 · 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 선임연구위원, 공학박사

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · [jgsung@kict.re.kr](mailto:jgsung@kict.re.kr))

\*\*\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원, 공학박사

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · [dkyun@kict.re.kr](mailto:dkyun@kict.re.kr))

Received December 8, 2021/ revised January 6, 2022/ accepted February 14, 2022

## 1. 서론

2020년 기준 교통사고 통계를 보면, 전체사고는 209,654건이고 사망자수는 3,081명으로 치사율이 1.5 %로 조사되었고, 도로 공작물에 충돌에 의한 교통사고는 3,233건, 사망자수는 340명으로 치사율이 10.5 %로 조사되었다. 이는 전체 교통사고 치사율에 비하여 7배 높은 수치로 공작물 충돌에 의한 교통사고의 위험성을 알 수 있는 수치이다(KoROAD, 2021). 공작물 충돌사고는 도로변에 설치된 인공적인 구조물에 충돌하는 사고를 말하며 대표적인 공작물로는 고가도로 밑의 교각, 연결로 출구 분기점에 설치 되어있는 표지판 지주 등이 있다. 국내에서는 공작물 충돌사고를 예방하는 방법으로 충격흡수시설을 설치하고 있다. 충격흡수시설이란 도로를 주행하는 차량이 차로를 벗어나 도로의 구조물 등과 직접 충돌하기 전에 차량의 충격에너지를 흡수하여 정지토록 하거나, 차량의 방향을 유도하여 본래의 주행차로로 복원시켜주는 도로안전시설물이다.

도로안전시설 설치 및 관리 지침 차량방호 안전시설 편에서는 현장에 설치되는 충격흡수시설의 경우 실물충돌시험을 통해 성능 평가 기준에 만족하는 제품만을 현장에 설치하도록 규정하고 있다(MOLIT, 2014). 지침에서 충격흡수시설의 설치 위치는 ‘운전자의 과실 등에 의해 차량이 주행 차로를 벗어나 도로상의 구조물과 충돌할 위험이 있는 곳에 설치한다.’ 라고 명시 되어있으며 현재 국내에는 여러 종류의 다양한 충격흡수시설이 개발되어 차량의 충돌이 예상되는 교각 및 교대 앞, 연결로 출구 분기점의 강성구조물 앞, 강성 방호울타리 혹은 방음벽 기초의 단부, 요금소 전면, 터널 및 지하차도 입구 등 다양한 환경에 설치되고 있다. 충격흡수시설은 탑승자와 충돌 차량을 보호할 수 있는 방호성능을 확보해야하며 차량의 충격에너지를 흡수하여 차량을 정지토록 하거나, 방향을 교정하여 안전하게 주행차로로 복귀시켜주는 기능을 가져야 한다. 그러나 기존의 설치된 충격흡수시설의 경우 설치 환경에 따라 방호해야할 구조물과의 폭 차이로 인하여 방호성능을 발휘하지 못하는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 공작물 충돌사고로 인한 피해를 줄이기 위해 충돌 시뮬레이션을 이용하여 다양한 환경에 적용 가능한 충격흡수시설을 개발하고 실물충돌시험을 통하여 성능 기준을 검증하였으며 시뮬레이션 결과와 실물충돌시험 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 기존 연구 고찰

국내 충격흡수시설은 1995년에 한국도로공사에서 최초로 개발 되었으며, 1998년에 충격흡수시설의 실물차량 충돌시험 기준 및 평가기준이 개정되어 현재까지 충격흡수시설 설계법 및 개발 관련

연구가 활발히 이루어지고 있다.

관련 연구로, Ko et al.(2004)은 LS-DYNA를 이용하여 차량이 충격흡수시설에 정면 충돌하는 상황을 2-자유도로 모델하고 충격흡수시설의 항복하중, 초기강성, 항복 후 강성을 설계변수로 하여 정면 충돌에 대한 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 설계변수들이 차량 거동에 미치는 영향 및 탑승자 안전지수를 분석하여 안전시설물로서 갖추어야할 충격흡수시설의 구조적 특성을 설명하였고, 충돌차량 탑승자의 안전을 확보하기 위한 합리적인 설계방법을 제시하였다(Ko et al., 2004).

Joo et al.(2007)은 개발 완료된 CC1등급 충격흡수시설의 실물충돌시험 데이터 중 정면 충돌시험의 데이터를 이용하여 단자유도계를 이용한 충격흡수시설 설계법을 제시하였으며, 단자유도계 충격흡수시설 설계법으로 CC2등급 충격흡수시설을 제작하여 실물충돌시험을 통한 성능평가를 수행하였다(Joo et al., 2007).

Jang et al.(2009)은 10회의 충격흡수시설 정면 충돌 실물충돌시험 계측기 데이터와 실물충돌시험 고속카메라 영상 분석을 통해 추출된 데이터를 비교하여 고속카메라 영상 분석에 의한 데이터의 적합성을 판단하고 고속카메라 영상 분석 결과를 탑승자 안전지수 분석에 적용할 수 있는 활용 방안을 모색하였다. 비교 결과 영상 분석에 의한 데이터가 계측기 데이터와 유사한 결과를 보였으며, 탑승자 안전지수 또한 평균 오차율 4.2 %로 나타나 충격흡수시설 설계 단계에서 고속카메라 영상 분석을 활용할 수 있음을 확인하였다(Jang et al., 2009).

기존의 연구는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 설계법을 개발하거나 실물충돌시험에 합격한 충격흡수시설의 데이터를 이용하여 충격흡수시설을 개발하였으나, 본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 충격흡수시설을 설계하고 제작하였으며, 실물충돌시험을 통해 개발한 충격흡수시설의 성능을 검증하고 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실물충돌시험 결과를 비교 분석한 것으로 개발된 충격흡수시설에 대한 충돌 매커니즘과 구조적 해석이 가능할 뿐 아니라 실질적인 모형에 대한 검증이 이루어졌다는 점에서 기존 연구와 차이점이 있다.

## 3. LS-DYNA 충돌 시뮬레이션

### 3.1 시뮬레이션 모델 및 충돌 시험 조건

본 연구에서는 3D 비선형 동적 해석이 가능하여 충돌해석에 광범위하게 쓰이는 LS-DYNA (LSTC, 2007) 해석프로그램을 사용하여 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 기존의 충격흡수시설은 폭이 넓은 공작물의 경우 차량의 다양한 충돌방향에 대하여 방호성능을 발휘하지 못하는 한계가 존재하여 곡형 가드레일을 적용하여 충격흡수시설을 개발하였다. Fig. 1에 충격흡수시설을 구성하고

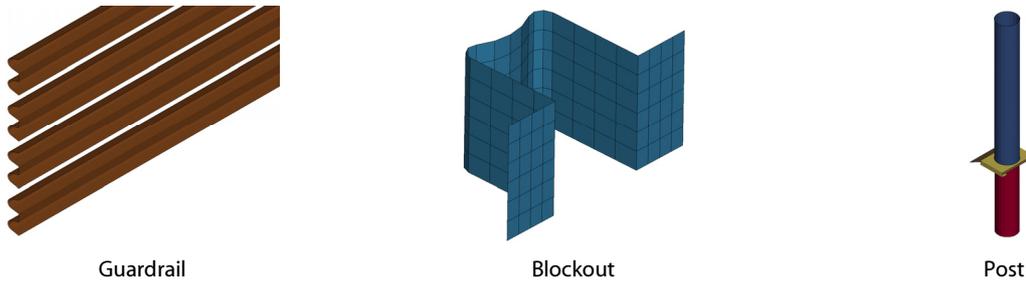


Fig. 1. Simulation Modeling Elements of the Safety Structure



Fig. 2. Simulation Vehicles

있는 부재들의 모델링 형상을 나타내었다. 다양한 환경에 적용 가능한 충격흡수시설은 곡형 가드레일, 블록아웃, 분리형 지주, 일반지주로 구성되어있으며, 전체 형상은 원호형태로 직경은 5 m, 길이는 4.67 m이다. 반지름 2.5 m의 반원에 45°간격으로 분리형 지주를 5개 설치하고, 단부에 일반지주 2개를 설치하였다. 곡형 가드레일은 높이 150 mm의 W형 가드레일을 200 mm 간격으로 4단 배치하였으며 설치높이는 지면에서 레일 상부까지 91 cm로 모델링 하였다. 지주는 차량 충돌 시 충격량을 점진적으로 감소시킬 수 있는 분리형 지주를 적용하였다. 분리형 지주는 Fig. 1과 같이 상부지주와 하부지주로 구성되어있으며, 상부 지주와 하부지주는 각각 두께 14 mm의 베이스플레이트에 용접되어져 있다. 각각의 베이스플레이트를 볼트가 연결하고 있으며 차량의 충돌에 의해 연결 볼트가 분리되는 방식이다. 볼트는 Beam요소를 사용하여 모델링하였으며, W형 가드레일과 블록아웃의 연결 볼트는 직경 19 mm, 분리형 지주의 상부지주와 하부지주의 연결 볼트는 직경 16 mm를 사용하였다. 다양한 환경에 적용 가능한 충격흡수시설의 모든 부재를 shell요소를 사용하여 모델링 하였으며, 곡형 가드레일의 두께는 4 mm, 블록아웃의 두께는 3 mm, 분리형 지주의 두께는 4.5 mm를 사용하였다. 충격흡수시설 구성 부재의 Material은 재료의 비선형 및 대변위를 고려할 수 있는 PLASTIC\_KINEMATIC 을 사용하여 재료적 특성을 고려하였으며 항복강도는 YS275 강재의 최소항복강도 275 MPa 보다 조금 큰 280 MPa를 적용하였다. 시뮬레이션에서 사용한 충돌 차량모델은 Fig. 2와 같이 NCAC

Table 1. Simulation Vehicle Model Data

Dimension	Geo Metro	Dodge Neon
Length (mm)	3,750	4,356
Width (mm)	1,586	1,721
Height (mm)	1,427	1,269
Weight (tonf)	0.89	1.32

(National Crash Analysis Center at George Washington University)에서 개발한 0.9 ton의 Geo Metro 모델과 1.3 ton의 Dodge Neon 모델(NCAC, 2011)을 사용하였으며 차량의 제원은 Table 1에 나타내었다.

충격흡수시설의 등급은 도로안전시설 설치 및 관리 지침 차량번호 안전시설 편에서 Table 2와 같이 충돌 속도에 따라 4개의 등급으로 구분하고 있다. 충돌 속도는 탑승자의 안전을 중요시하여 설계속도를 그대로 적용하며, 차량은 중량 900 kg과 1300 kg을 사용한다. Table 2는 주행 복귀형 충격흡수시설에 적용되며 주행 비복귀형 충격흡수시설은 시험 ④, ⑤를 생략한다. 본 연구에서는 주간선도로의 설계속도 80 km/h를 고려하여 충격흡수시설 주행 복귀형 CC2등급의 충돌시험 조건에 대하여 성능 기준을 검토하였다. 충격흡수시설의 성능 기준은 탑승자 보호성능, 충격흡수시설의 거동, 충돌 후 차량의 거동으로 크게 구분된다. 탑승자 보호성능은 탑승자 안전지수인 THIV (Theoretical Head Impact Velocity)와 PHD (Post-impact Head Deceleration) 값이 한계 값 이하인지

여부로 판단한다. THIV는 탑승자의 머리가 차량의 충돌속도로 자유 비행한다고 보고, 차량이 시설물과 충돌하여 감속되는 동안 머리가 자유 비행하여 차량 내부공간의 가상 면에 부딪힐 때의 순간 상대속도로 계산되며, PHD는 탑승자가 차량 내부공간의 가상 면에 부딪힌 후 접촉을 유지하여 차량의 가속도를 그대로 받게 된다고 보아 THIV가 계산된 이후 계산된 차량의 10msec 평균 가속도의 최대치로 계산된다. THIV 한계 값의 경우 충돌

Table 2. Crash Cushion Impact Conditions

Grade	Impact speed (km/h)	Vehicle (kg)	Impact method
CC1	60	900	Test ①
		1,300	Test ④
CC2	80	900	Test ①
		1,300	Test ①
		900	Test ②
		1,300	Test ③
		1,300	Test ⑤
CC3	100	900	Test ①
		1,300	Test ①
		900	Test ②
		1,300	Test ③
		1,300	Test ⑤
CC4	120	900	Test ①
		1,300	Test ①
		900	Test ②
		1,300	Test ③
		1,300	Test ⑤

시험 방법에 따라 시험 ①, ②, ③은 44 km/h 이하의 값을 만족해야 하고 시험 ④, ⑤는 33 km/h 이하의 값을 만족하여야 한다. PHD 한계 값은 모든 시험방법에서 20 g 이하의 값을 만족하여야 한다. 충격흡수시설의 거동은 충돌 시 충격흡수시설 부재의 비산이 탑승자 및 도로 이용자들에게 위험을 초래하는지 검토하는 것으로 다음과 같은 사항을 만족하여야 한다. 차량 충돌 시 충격흡수시설의 어느 부분도 차량의 내부공간을 관통하지 말아야 하며, 탑승자에게 큰 부상을 줄 수 있는 차량 내부공간의 변위도 없어야 한다. 그리고 기능상 요구되는 경우를 제외하고는, 시설물의 주요 부분이 분리되거나, 인접 차로를 침범해서는 안되며, 차량 충돌 시에 구성 부재가 도로 상이나 도로 밖으로 비산하여, 탑승자나 제 3자에게 피해를 주는 일이 없도록 해야 한다. 충돌 후 차량의 거동은 차량이 2차 충돌의 위험 없이 안전하게 거동하는지를 보는 것으로 Roll, Pitch의 회전각이 75°이하를 만족하여야 한다. 주행 복귀형 CC2등급 충돌 조건의 경우 차량의 충돌속도는 80 km/h로 동일하며, 충돌 시험 방법은 Fig. 3과 같다. 시험 ①, ②는 각각 충격흡수시설 정면의 중앙지점과 충돌 차량 폭의 1/4 만큼 이격된 지점에 충돌시키는 방법이며, 시험 ③은 충격흡수시설 정면에 차량이 15°각도로 충돌하는 방법이다. 그리고 시험 ④, ⑤는 충격흡수시설의 측면에 각각 15°와 165°로 충돌시키는 방법이다.

3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 분석 결과 Table 3과 같이 6가지 충돌 조건에 대하여 탑승자 보호성능을 만족하는 것을 확인하였다. 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에서 차량 폭의 1/4 만큼 이격된 지점에 충돌하는 조건에서 가장 높은 THIV와 PHD값이 계산되었고 1.3

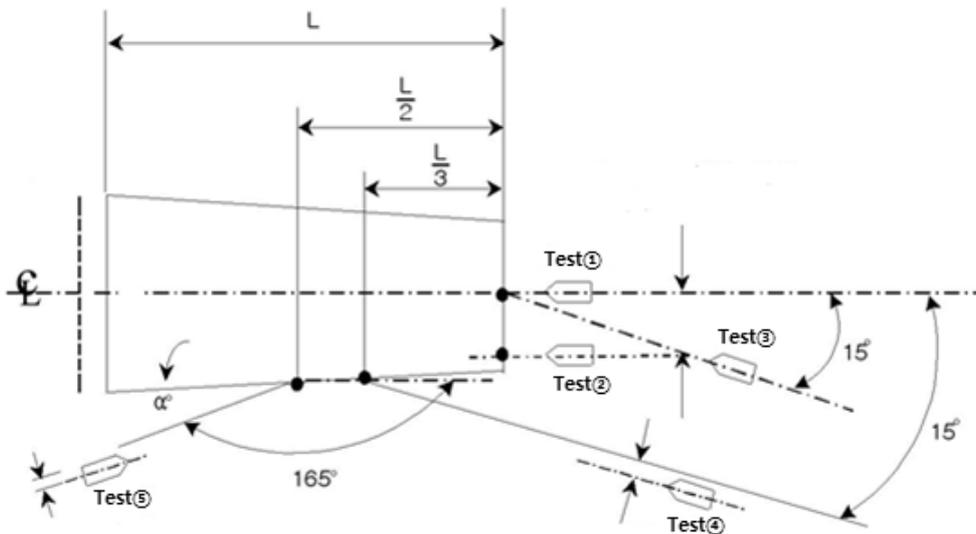


Fig. 3. Type of Crash Cushion Test

Table 3. Simulation Results

No.	Impact condition	Direction	THIV (km/h)	PHD (g)	Roll (Deg)	Pitch (Deg)
1	0.9 ton-80 km/h	Head-on	39.82	12.75	3.25	3.72
2	1.3 ton-80 km/h	Head-on	38.40	12.70	2.65	4.64
3	0.9 ton-80 km/h	Head-on 1/4 offset	40.97	14.64	-11.45	-5.62
4	1.3 ton-80 km/h	Head-on 15°	32.50	13.78	-3.10	-2.59
5	1.3 ton-80 km/h	Side 15°	19.01	12.11	2.38	-1.90
6	1.3 ton-80 km/h	Side 165°	10.01	4.49	1.83	-2.07

Notes: THIV: theoretical head impact velocity; PHD: post-impact head deceleration

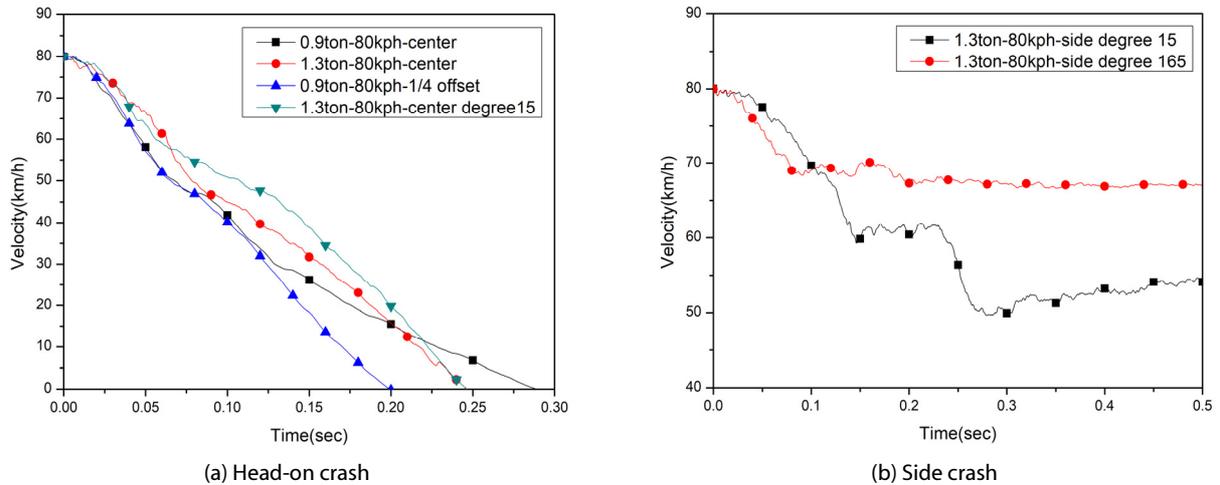


Fig. 4. Velocity Graphs

ton 차량이 충격흡수시설 측면에 165°로 충돌하는 조건에서 가장 작은 THIV와 PHD값이 계산되었다. 충돌 후 차량의 거동을 평가하는 항목인 차량의 Roll, Pitch 방향 최대 회전각도도 탑승자 안전지수와 같이 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에서 차량 폭의 1/4 만큼 이격된 지점에 충돌하는 조건에서 가장 높게 나타났으며 6가지 충돌 조건 모두 75°이하로 발생하여 평가기준을 만족하였다.

Fig. 4(a)와 같이 차량이 충격흡수시설의 정면으로 충돌하는 경우 차량 속도의 감속은 0.3 sec 이전에 모두 완료되었으며 0.9 ton 차량이 80 km/h의 속도로 충격흡수시설의 정면에 충돌 하는 경우가 감속시간이 가장 길게 나타났다. Fig. 4(b)에는 차량이 충격흡수시설의 측면으로 충돌하는 경우 감속 그래프를 나타냈으며 15°각도로 충돌하는 경우 충격흡수시설과의 충돌 이후 차량의 속도가 25.9 km/h 감소되어 32.38 %의 감속율을 보였고, 165°각도 충돌의 경우 13.0 km/h 감소되어 16.24 %의 감속율을 보였다. 측면으로 충돌하는 경우 모두 차량은 정상적으로 선회하였으며 충격흡수시설의 거동과 충돌 후 차량의 거동 또한 평가기준을 만족하였다.

Fig. 5에는 차량이 충격흡수시설의 정면에 충돌하는 경우에 대하여 충돌 차량의 거동 및 충격흡수시설의 거동을 충돌 전 THIV 발생 시점, 감속 종료 시점, Roll, Pitch 최대회전각 발생 시점

등으로 구분하여 정리하였다. Fig. 5(a)는 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에 80 km/h의 속도로 충돌한 시뮬레이션으로 0.15 sec에 Roll 방향 최대 회전각이 발생하였으며, 0.25 sec에 Pitch 방향 최대 회전각이 발생하였다. 0.29 sec에 충돌 차량의 속도가 0 km/h로 감속된 이후 차량이 충돌 방향의 반대 방향으로 이동하여 충격흡수시설과의 접촉이 종료 되었다. 충격흡수시설의 최대 충돌 변형거리는 차량의 속도가 0 km/h로 감속되는 시점에서 발생하며 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에 80 km/h의 속도로 충돌하는 경우 개발한 충격흡수시설은 2222 mm 변형하였다. 여기서 최대 충돌 변형거리는 차량이 충격흡수시설의 정면에 충돌할 때 차량의 충돌로 인해 충격흡수시설이 설치위치로부터 변형된 거리 중 최댓값을 의미하며 최대 충돌 변형거리에 따라 방호해야할 구조물에서 이격하여 설치하여야할 거리가 결정된다. Fig. 5(b)는 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에 80 km/h의 속도로 충돌한 것으로 0.25 sec에 충돌 차량의 속도가 0 km/h로 감속되었고 이때 최대 충돌 변형거리 2400 mm 발생하였다. 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에 80 km/h의 속도로 충돌하는 경우 차량이 충돌방향의 반대 방향으로 이동하는 과정에서 Roll, Pitch 방향의 최대 회전각이 발생하였다. Roll 방향 최대

회전각은 0.27 sec에서 발생하였으며, Pitch 방향의 최대 회전각은 0.695 sec에서 발생하였다. Fig. 5(c)는 0.9 ton 차량이 80 km/h의 속도로 충격흡수시설의 중앙지점에서 차량 폭의 1/4 만큼 이격된 지점에 충돌하는 조건에 대한 시뮬레이션으로 0.11 sec에 THIV가 40.97 km/h로 발생하였으며, 0.2 sec 충돌 차량의 속도가 0km/h로 감속되었다. 충격흡수시설의 최대 충돌 변형거리는 0 km/h로 감속된 0.2 sec에서 1636 mm로 발생하였다. Roll, Pitch 방향의 최대 회전각은 시뮬레이션 종료 시간인 2.0 sec에서 발생하였다. Fig.

5(d)는 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점을 15°각도로 충돌하는 조건에 대한 시뮬레이션으로 0.185 sec에 Pitch 방향 최대 회전각이 발생하였으며, 0.25 sec에 충돌 차량의 속도가 0 km/h로 감속되었다. Roll 방향 최대 회전각 발생시간은 0.41 sec로 차량이 충돌방향의 반대 방향으로 이동하면서 발생하였다. 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점을 15°각도로 충돌하는 경우의 최대 충돌 변형거리는 2403 mm이다.

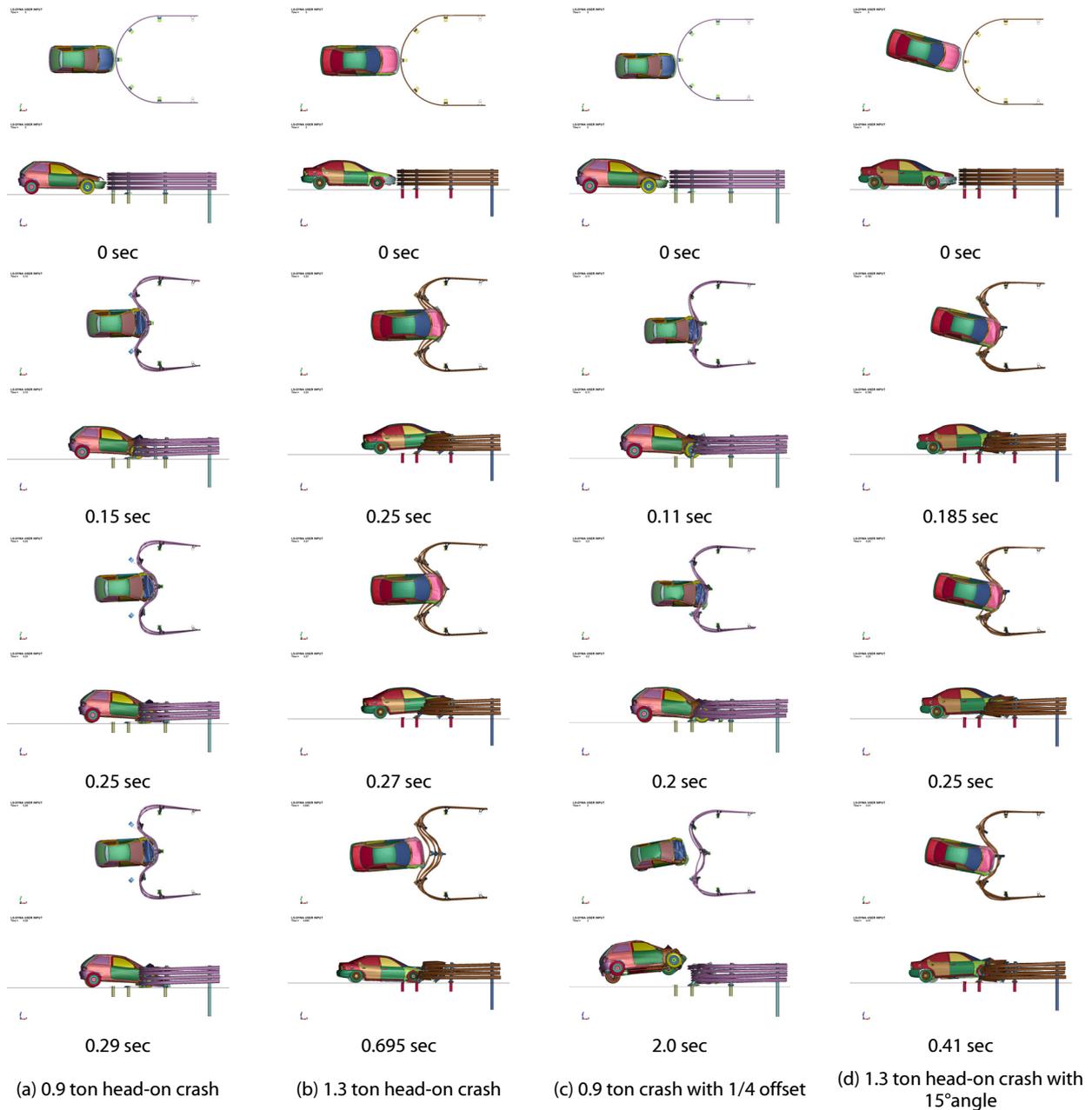


Fig. 5. Vehicle Motion in Time Step for Simulation Results

#### 4. 실물충돌시험

한국도로공사 도로교통연구원의 도로안전시설 성능 시험장에서 시뮬레이션과 동일하게 CC2등급(주행 복귀형)의 충돌시험 조건으로 성능 기준 검증을 위한 실물충돌시험을 진행하였다. Fig. 6과 같이 성능 시험장에 시뮬레이션을 이용하여 개발한 다양한 환경에 적용 가능한 충격흡수시설을 설치하였다. 설치 방법은 다음과 같다. 지주 설치는 먼저 콘크리트 포장면을 코어를 사용하여 천공하며, 분리형 지주는 하부지주를 설치한 후 하부지주와 상부지주를 볼트



Fig. 6. Energy Absorption Structure for Various Road Environments

로 조립하여 연결한다. 단부에 설치되는 일반 지주는 분리형 지주와 동일하게 천공하여 설치하나 천공 깊이를 더 깊게 한다. 분리형지주와 일반 지주의 설치를 완료한 후 지주에 볼록아웃을 볼트로 연결한다. 최종적으로 곡형 가드레일과 볼록아웃을 볼트로 연결하면 설치가 완료된다.

실물충돌시험의 결과로 Fig. 7에는 실물충돌시험에 따른 충격흡수시설의 충돌 후 변형 형상을 나타내었다. Table 4에는 탑승자 보호성능 평가지표인 탑승자 안전지수와 충돌 후 차량의 거동을 확인할 수 있는 Roll, Pitch 최대 회전 각도를 제시하였다. 실물충돌 시험 결과는 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에서 차량 폭의 1/4 만큼 이격된 지점에 충돌하는 조건에서 가장 높은 THIV와 PHD값이 계산되었고 1.3 ton 차량이 충격흡수시설 측면에 165°로 충돌하는 조건에서 가장 작은 THIV와 PHD값이 계산되었다. 충돌 후 차량의 거동을 평가하는 항목인 차량의 Roll, Pitch 방향 최대 회전각도도 시뮬레이션 결과와 같이 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에서 차량 폭의 1/4 만큼 이격된 지점에 충돌하는 조건에서 가장 높게 나타났다. 실물충돌 시험의 결과도 6가지의 충돌 조건에 대하여 탑승자 안전지수를 만족하는 것으로 나타났으며 충돌 후 차량의 거동을 평가하는 Roll, Pitch 회전각도도 한계 값 75°이하로 나타나 성능 기준을 만족하였다.

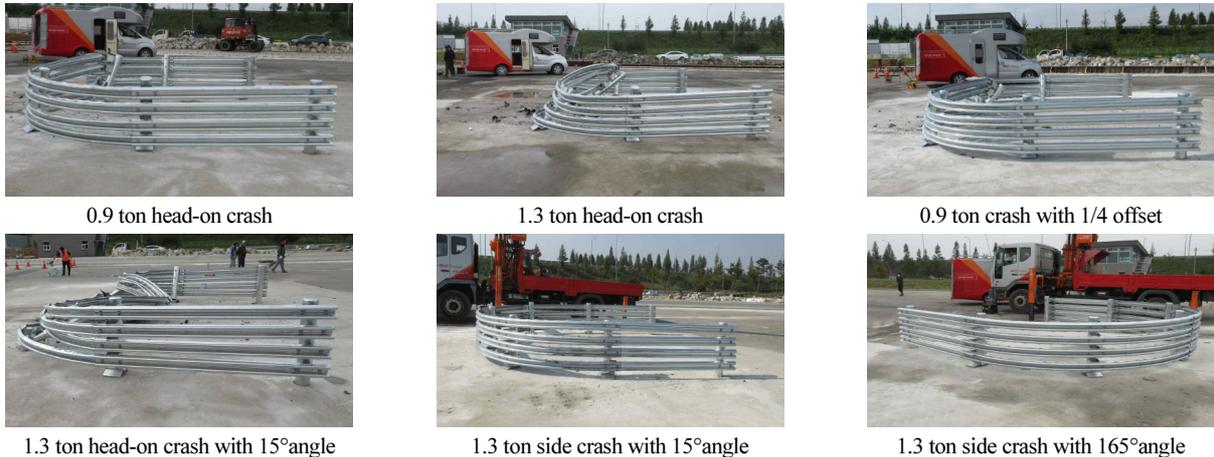


Fig. 7. Crash Tests with Different Vehicles and Impact Angles

Table 4. Test Results

No.	Impact condition	Direction	THIV (km/h)	PHD (g)	Roll (Deg)	Pitch (Deg)
1	0.9 ton-80 km/h	Head-on	37	12	6.16	10.06
2	1.3 ton-80 km/h	Head-on	32	9	2.47	6.65
3	0.9 ton-80 km/h	Head-on 1/4 offset	39	13	8.56	12.78
4	1.3 ton-80 km/h	Head-on 15°	33	9	7.64	11.51
5	1.3 ton-80 km/h	Side 15°	22	4	3.86	2.04
6	1.3 ton-80 km/h	Side 165°	4	1	3.84	1.83

### 5. 시뮬레이션과 실물충돌시험 비교 분석

시뮬레이션 결과와 실물충돌시험 결과를 비교 분석한 결과 탑승자 안전지수는 Table 5와 같이 시뮬레이션에서 계산된 탑승자 안전지수보다 실물충돌시험으로 계산된 탑승자 안전지수가 전반적으로 낮게 계산되는 경향을 확인하였다. THIV의 경우 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙에 정면으로 충돌하는 조건에서 6.4 km/h로 가장 큰 차이를 보이며, 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙에 15°각도로 충돌하는 조건에서 0.5 km/h로 가장 작은 차이를 보였다. PHD의 경우 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 측면에 15°각도로 충돌하는 조건에서 8.11 g로 가장 큰 차이를 보이며, 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙에 정면으로 충돌하는 조건에서 0.75 g로 가장 작은 차이를 보였다. 충돌 후 차량의 거동은 Table 6과 같이 시뮬레이션에서 발생한 Roll, Pitch 방향 최대 회전각도보다 실물충돌시험에서 발생한 Roll, Pitch 방향 최대 회전각도가 전반적으로 높게 계산되는 경향을 확인하였다. 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙지점에서 차량 폭의 1/4 만큼 이격된 지점에 충돌하는 조건과 1.3 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙에 15°각도로 충돌하는 조건의 경우 최대 회전각도의 방향이 반대로 발생하였다. 두 조건을 제외한 다른 충돌 조건에서는 동일한 방향으로 발생하였으며 Roll과 Pitch 모두 0.9 ton 차량이 충격흡수시설의 중앙에 정면으로 충돌하는 조건에서 2.91°와 6.34°로 가장 큰 차이를 보였다. 시뮬레이션 결과와 실물충돌시험 결과가 차이가 나는 이유

는 시뮬레이션에서 사용한 차량모델과 실물충돌시험에서 사용된 차량의 형상 및 제원이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 THIV와 PHD의 한계 값으로 보면 차이가 크지 않으며 시뮬레이션 결과와 실물충돌시험 결과 모두 한계 값 이하를 만족하였기에 성능 기준은 만족하는 것으로 판단되며, 충돌 후 차량의 거동 또한 Roll, Pitch의 최대 회전각도가 한계 값 75°이하로 나타나 성능 기준을 만족하는 것으로 판단된다.

### 6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 다양한 환경에 적용 가능한 충격흡수시설을 개발하기 위해 3차원 비선형 충돌해석 프로그램인 LS-DYNA 충돌 시뮬레이션을 이용하여 충격흡수시설 주행 복귀형 CC2등급 충돌 시험 조건에 대한 충돌 시뮬레이션 연구를 수행하였으며, 한국도로공사 도로교통연구원의 도로안전시설 성능 시험장에서 실물충돌시험을 통해 성능 기준을 검증 하였다. 충돌 시뮬레이션으로 개발한 다양한 환경에 적용 가능한 충격흡수시설은 곡형 가드레일, 블록아웃, 분리형 지주, 일반지주로 구성되어있으며, 전체 형상은 원호형태로 직경은 5 m, 길이는 4.67 m이다. 곡형 가드레일은 높이 150 mm의 W형 가드레일을 200 mm 간격으로 4단 배치하였으며 지면에서 레일 상부까지 91 cm 높이로 설치된다. 분리형 지주는 차량 충돌 시 충격량을 점진적으로 감소시킬 수 있도록 하부지주와 상부지주로 구성되어있으며 차량의 충돌에 의해 하부지주와 상부

Table 5. Simulation vs. Test (THIV, PHD)

No.	Impact condition	Direction	THIV (km/h)		PHD (g)	
			Simulation	Test	Simulation	Test
1	0.9 ton-80 km/h	Head-on	39.82	37	12.75	12
2	1.3 ton-80 km/h	Head-on	38.40	32	12.70	9
3	0.9 ton-80 km/h	Head-on 1/4 offset	40.97	39	14.64	13
4	1.3 ton-80 km/h	Head-on 15°	32.50	33	13.78	9
5	1.3 ton-80 km/h	Side 15°	19.01	22	12.11	4
6	1.3 ton-80 km/h	Side 165°	10.01	4	4.49	1

Table 6. Simulation vs. Test (Roll, Pitch)

No.	Impact condition	Direction	Roll (Deg)		Pitch (Deg)	
			Simulation	Test	Simulation	Test
1	0.9 ton-80 km/h	Head-on	3.25	6.16	3.72	10.06
2	1.3 ton-80 km/h	Head-on	2.65	2.47	4.64	6.65
3	0.9 ton-80 km/h	Head-on 1/4 offset	-11.45	8.56	-5.62	12.78
4	1.3 ton-80 km/h	Head-on 15°	-3.10	7.64	-2.59	11.51
5	1.3 ton-80 km/h	Side 15°	2.38	3.86	-1.90	2.04
6	1.3 ton-80 km/h	Side 165°	1.83	3.84	-2.07	1.83

지주를 연결하고 있는 볼트가 분리되는 방식이다. 시뮬레이션 분석 결과 개발한 충격흡수시설의 경우 주행 복귀형 CC2등급의 성능 기준을 만족하였으며, 6가지 충돌조건 중 1.3 ton 차량이 충격흡수 시설의 중앙지점을 15°각도로 충돌하는 경우에서 최대 충돌 변형거리가 2403 mm로 가장 크게 발생한다는 것을 확인하였다. 최종적으로 실물충돌시험을 통해 시뮬레이션으로 개발한 충격흡수시설이 주행 복귀형 CC2등급의 성능 기준을 만족한다는 것을 확인하였으며, 시뮬레이션 결과와 실물충돌시험 결과를 비교 분석한 결과 시뮬레이션에서 계산된 탑승자 안전지수가 실물충돌시험으로 계산된 탑승자 안전지수보다 전반적으로 크게 계산되는 경향을 확인하였다. 따라서 시뮬레이션에서 탑승자 안전지수가 한계값 이하로 계산되어 탑승자 보호성능을 만족한다면 실물충돌시험에서도 탑승자 보호성능을 만족할 수 있을 것으로 판단되며, 충돌 시뮬레이션의 결과가 유의미하다는 것을 확인하였다. 본 연구는 직경 5 m의 충격흡수시설에 한정하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실물충돌시험이 수행되어 방호해야할 구조물 인근의 설치 환경이 5 m 이상인 경우에는 적용이 가능할 것으로 판단되나 방호해야할 구조물 인근의 설치 환경이 5 m 이하인 경우에는 적용이 불가능 하다는 한계가 있다. 따라서 본 연구의 결과를 발전시키기 위하여 향후에는 다양한 직경에 따른 검토가 필요할 것으로 판단되며, 곡형 가드레일의 직경을 5 m 이하로 제작하는 경우 재질이나 구조의 변경이 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 충격흡수시설이 단독으로 설치되는 경우에 대한 차량 충돌만을 검토하여 가드레일 단부와 연결되는 경우에 대해서는 검토하지 못하였으므로 향후 연구를 통해 개발된 충격흡수시설의 단부와 기존의 설치된 가드레일의 단부의 연결 방법 및 연결 부위에 차량이 충돌하는 경우에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)의 지원을 통해 수행되었음을 알려 드립니다(과제번호 21TBIP-C158651-02).

본 논문은 2021 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

## References

- Jang, D. Y., Ko, M. G., Lee, Y. K. and Joo, J. W. (2009). "Study on behavior analysis of crash cushion using analysis data of high-speed camera." *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 11, No. 2, pp. 75-83 (in Korean).
- Joo, J. W., Kum, K. J., Jang, D. Y. and Son, S. N. (2007). "Study on the design method development of crash cushion using single degree of freedom." *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 9, No. 3, pp. 91-100 (in Korean).
- Ko, M. G., Kim, K. D., Kim, K. J. and Sung, J. G. (2004). "Design method of energy absorbing device (EAD) considering occupant safety of impact vehicle." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No. 5A, pp. 1031-1041 (in Korean).
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC) (2007). *LS-DYNA keyword user's manual*, California, USA.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014). *Installation and Maintenance Guidelines for Roadside Safety Facilities* (in Korean).
- National Crash Analysis Center (NCAC) (2011). *Public finite element model archive*, Washington, D.C. Available at: [www.ncac.gwu.edu](http://www.ncac.gwu.edu) (Accessed: July 15, 2021).
- Road Traffic Authority Driver's License Examination Office (KoROAD) (2021). *TAAS: Traffic accident analysis system*, Available at: <http://taas.koroad.or.kr/> (Accessed: July 15, 2021).