Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 23, No. 6 pp. 538-544, 2022

https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.6.538
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

실차 충돌시험을 통한 기존 노측용 가드레일 강도 성능 개선 연구

주재웅[1*], 안성기[2], 장대영[1]
[1]한국도로공사 도로교통연구원, [2](주)한국배리어

A Study on The Strength Performance Improvement of The Existing Roadside Guardrail by Full-scale Vehicle Crash Test

Jae-Woong Joo[1*], Seong-Kee An[2], Dae-Young Chang[1]
[1]Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation, [2]Korea Barrier

요 약 과거에는 노측용 가드레일의 설치 기준을 규격 기준으로 사용하였으나, 2001년 도로안전시설 설치 및 관리지침(차량방호안전시설편, 국토부)이 개정된 이후부터는 실물 차량 충돌시험을 통해 성능에 합격한 제품만을 도로 현장에 설치하는 성능기준으로 변경되었다. 현재 고속도로에는 개정 이전의 노측용 가드레일이 성능 미달된 채로 총 연장 2,067km가 설치되어 있고 이는 사회적인 문제점으로 대두되고 있다. 본 연구에서는 기존 가드레일에 대해 도로현장에서 해체 또는 천공없이 추가 보강 재료를 통해 가드레일 성능을 보강할 수 있는 공법을 국토부 "도로안전시설 설치 및 관리지침"에 따라 개발하였다. 개발된 노측용 가드레일 개선기술이 적용된 시제품으로 수치 해석 및 실물 차량 충돌시험을 수행하여 그 성능을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 노측용 가드레일 개선 기술 사양은 SB3등급 가드레일 신규 교체 비용보다 30% 정도 저렴해 예산 절감 및 공기 단축이 가능하고 기존 노측용 가드레일을 천공이나 해체없이 개선 및 보강이 가능해 현장 적용이 매우 간편하고 편리해 널리 폭 넓게 적용될 것으로 기대된다.

Abstract In the past, the standard criteria had been applied to the installation standard of roadside guardrails. But, according to the revision of the Installation and Management Guide for Roadside Safety Features (by the Vehicle Protection Safety Facilities, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, South Korea) in 2001, the standard criteria have been changed to performance criteria to verify the performance of roadside guardrails through real vehicle crash tests. So far, 2,067 km of roadside guardrail has been installed on the highways after the revision. However, this installation and the guardrail installed before the revision (that still exists) are still insufficient. Consequently, this insufficiency is emerging as a social problem. So, this study developed a method of reinforcing the performance of the roadside guardrail installed before the revision, in accordance with the Installation and Management Guide for Roadside Safety Features, through additional reinforcing materials without dismantling or drilling the guardrail. In addition, numerical analysis and vehicle crash tests were performed on prototypes to which the developed technology was applied, and the performance of each prototype was verified. The technical specifications for the roadside guardrail improvement by this study resulted in a 30% cheaper cost than the replacement cost of SB3 guardrails, so it was possible to reduce the budget and time in achieving necessary guardrail performance. In effect, it is expected that the improvement method developed by this study for some of the existing roadside guardrails will be widely used as it is convenient to apply to road sites.

Keywords : Roadside Guardrail, Vehicle Crash Test, Simulation, LS-DYNA, Performance Criteria

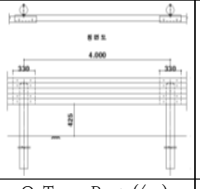
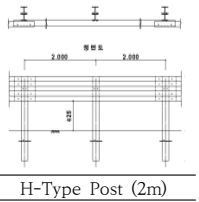
본 논문은 국토교통기술사업화지원사업(과제번호:21TBIP-C164690-01, 과제명: 노측용 가드레일 개선 기술 개발)로 수행되었음.
*Corresponding Author : Jae-Woong Joo(Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation)
email: jjw123@ex.co.kr
Received February 23, 2022 Revised April 26, 2022
Accepted June 3, 2022 Published June 30, 2022

1. 서론

노측용 가드레일은 노측용 연성 방호울타리의 한 종류로 주행차량이 길 밖으로 이탈하는 것을 방지하기 위하여 도로의 길어깨측에 설치하는 안전시설물이다. 연성 방호울타리 중 국내에서 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 방호울타리는 철재 노측용 가드레일이며 연결된 파형 단면의 보를 지주로 받치는 구조로 되어 있다. 이러한 형태의 노측용 가드레일은 국내 고속도로가 건설되면서 설치되기 시작하였고 이때 가드레일의 설치기준은 규격기준을 적용하였으나, 2001년 도로안전시설 설치 및 관리지침(차량방호안전시설편, 국토부)이 개정된 이후부터는 실차 충돌시험을 통해 성능을 검증하는 성능기준으로 변경되었다. 개정 이전의 노측용 가드레일은 규격기준으로 적용된 방호울타리들로서 개정된 성능기준이 적용됨에 따라 구조적 강도성능 부족 및 탑승자의 안전성능 미달로 인한 사회적인 문제점으로 대두되었다.

현재 고속도로에는 국내 성능기준이 미달된 기존 노측용 가드레일이 2020년 기준 총 연장 2,067km가 설치되어 있고 고속도로 전구간 신규교체 시 약 30년, 약 3000억원의 막대한 예산이 소요된다. 본 연구의 목적은 한국도로공사에서 소요되는 막대한 예산과 장시간을 줄이고자 Table 1의 기존 가드레일(형식-1, 2)에 대해 신규교체가 아니면서 도로현장에서 해체 또는 천공 없이 간단한 조립으로 추가 보강 재료를 통해 가드레일 성능을 보강할 수 있는 공법을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 현 국토부 지침에 따라 SB3등급 노측용 가드레일 개선기술을 개발하였으며, 수치해석 및 실물차량 충돌시험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

Table 1. Existing roadside guardrail present condition

Sort	Existing Roadside Guardrail(Type-1)	Existing Roadside Guardrail(Type-2)
Installation Time	2001. 3. before	2001. 3 ~ 2007. 6
Extension(km) (2020 Year)	1,166	861
Drawing		
Post Type	O-Type Post (4m)	H-Type Post (2m)
Rail Type	2W-Beam (35cm)	2W-Beam (35cm)
SB3 Level & Performance	N.G	N.G

수치해석은 다양한 충돌해석에 널리 이용되고 있는 상용 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용하여 수행하였다. 본 연구의 충돌해석을 위하여 SB3등급 노측용 가드레일 개선 제품에 대해 3차원 수치해석모델을 작성하였으며, 승용차 및 화물차 수치모델은 해외의 기관에서 개발하여 공개한 모델을 활용하였다. 수치해석을 통하여 사전 성능확인을 수행한 후 실물차량 충돌시험을 실시하였으며, 충돌시험은 국토부 공인성능시험기관인 한국도로공사 도로교통연구원 도로안전시설 성능시험장에서 수행하였다.

1.1 기존 연구 및 문헌 고찰

차량 방호울타리의 설계 및 성능시험, 개발 등과 연관된 연구는 선진 외국에서도 연구사례가 많지 않아 찾아보기 어려우며, 국내에서는 공주대학교, 포스코, 한국건설기술연구원, 한국도로공사 등 몇몇 기관을 위주로 연구가 수행되었다. 해외에서는 미국의 TTI(Texas Transportation Institute) 등에 의해 발표된 논문을 찾아볼 수 있다.

지금까지 수행된 차량 방호울타리 개발 연구는 대부분 수치시뮬레이션 결과와 실물차량 충돌시험 결과의 비교를 통하여 수치시뮬레이션의 결과가 타당하며, 향후 관련 연구에 수치시뮬레이션의 활용이 가능할 것이라는 결론을 도출하고 있다. 또한 차량 충돌 후 탑승자 안전지수의 계산방법에 따른 결과의 차이에 관한 연구[1], 기존 차량 방호울타리의 성능 개선에 관한 연구[2], 단부처리 시설에 관한 연구[3], MASH 등 새로운 평가기준을 적용한 연구[4] 등에 관한 연구 사례가 발표된 바 있다.

1.2 성능평가 기준

노측용 가드레일의 설계 및 성능조건은 방호울타리의 경우와 동일하며, 국토부 “차량방호안전시설 실물충돌시험 업무편람”[5]에 의해 승용차와 화물차를 이용한 두 종류의 실물차량 충돌시험을 통하여 그 성능이 검증되어야 한다.

본 연구에 적용된 SB3등급 노측용 가드레일 대한 성능평가 조건, 성능기준은 다음 Table 2, Table 3과 같다[6].

Table 2. Impact condition for SB3 level roadside barrier performance evaluation

Evaluation Item	ImpactSpeed (km/h)	Vehicle Weight(kg)	Impact(Angle(°)	Impact Energy(kJ)
Structural Adequacy	80	8,000	15	130
Occupant Risk	100	1,300	20	-

Table 3. SB3 level roadside barrier performance criteria

Evaluation Item	Measurement Item	Criteria
Structural Adequacy	Strength of Barrier	Strength of Barrier must keep
	Deformation of Barrier	Maximum Deformation Distance 1.0m Under
	Components Scattering Prevention	Through Components Scattering, Don't damage
	After Impact, Test vehicle behaviour	The vehicle must not roll over during or after impact. During and after the impact The vehicle must not invade A & B line (A: 8.64m, B:20m)*
Occupant Risk	THIV	33km/h Under
	PHD	20g Under
	Components Scattering Prevention	Through Components Scattering, Don't damage
	Vehicle Inside Space Deformation	Roof 100mm, Front 75mm, Door 230mm Under Impact side window nonruin
	After Impact, Test vehicle behavior	The vehicle must not roll over during or after impact. Roll, Pitch 75° under During and after the impact The vehicle must not invade A & B line (A: 4.77m, B:10m)*

* Calculated results using the dimensions of the test vehicles

2. 본론

2.1 SB3등급 기존 노측용 가드레일 개선사양

지금까지 사용되어 온 SB3등급 기존 노측용 가드레일은 원형지주(D=140㎜, t=4.5㎜)를 적용한 형식-1과 H형 지주(100*100㎜)를 적용한 형식-2의 가드레일로 빔과 지주는 철재로 제작되었다.

공용중인 기존 노측용 가드레일에 대한 충돌 성능평가를 수행한 결과, 형식-1 가드레일은 강도성능이, 형식-2 가드레일은 탑승자 보호성능이 불만족하였다. 국내 성능기준을 모두 만족하는 개선사양을 제시하는 것은 물론이고 현장 설치를 편리하게 하기 위해 기존 가드레일에 천공 및 해체없이 개선하기 위하여 추가의 부재를 볼팅하여 적용한 개선 사양을 제안하였다.

본 연구개발 제품은 '기존 노측용 가드레일'에 하단 보강레일을 첨가하여 구조적 강도 성능을 증가시켰고 충격흡수재와 블록아웃을 삽입하여 탑승자의 안전성을 향상시키는 구조로 설계되었다.

기존 노측용 가드레일에 추가부착된 하단 보강레일은 기존 가드레일과 아랫 부분이 겹쳐지면서 강도성능이 증가되어 구조성능이 향상되었다.

기존의 가드레일은 W레일의 하단이 충돌 승용차의 범퍼 높이에 맞춰 설치되었으므로 승용차는 W레일의 하단과 지면사이를 파고들어 지주에 충돌하는 취약점을 갖고 있으나 본 개선제품은 기존 W레일을 교체하지 않고 그 하부에 하단 보강레일을 끼움 결합하여 레일의 높이와 강도를 개선하고 기존 가드레일을 보강함에 따라 승용차는 물론 승합차 및 화물차 등 대형차량의 승월이나 전복을 미연에 방호할 수 있었다.

기존 가드레일 형식-1, 형식-2 모두 하단 보강레일을 첨가하여 개선안을 도출하였으나 본 연구에서는 형식-2 개선안에 대해서만 성능 검증을 수행하여 정리하였다.

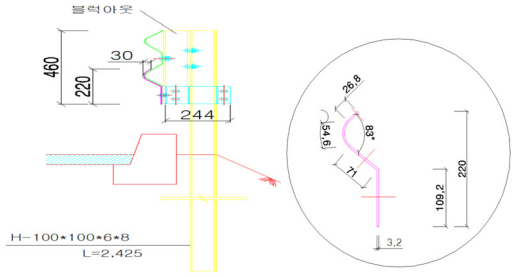


Fig. 1. Existing roadside guardrail improvement method

2.2 수치해석을 통한 성능평가

수치해석을 통한 충돌 시뮬레이션은 실제 현상을 그대로 재현하는 것이 아니라 모사한다는 점이 실물시험과 가장 큰 차이점으로, 실제 현상을 완벽하게 표현할 수 없지만 실제 현상에 영향을 미치는 요소들을 분석하고 그 개선점을 찾는 가장 효과적인 도구가 된다. 따라서, 시뮬레이션은 실제 현상에 가장 영향을 많이 미치는 인자들의 조합으로 이상화하고 이 이상화된 모델을 적절한 방법을 이용하여 해석한 후 그 결과를 검토하는 일련의 과정으로 구성된다. 본 연구에서는 국내외적으로 차량방호안전시설물 개발에 가장 널리 사용되고 있는 LS-Dyna를 이용하여 3차원 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 미국의 NCAC (National Crash Analysis Center)에서 제공한 모델을 근간으로 우리나라에서 현재 사용되고 있는 소형차량의 제원을 최대한 반영하여 수정한 모델을 사용하였다. 다음 Fig. 2에 Dodge-Neon 모델의 형상을 나타내었다.

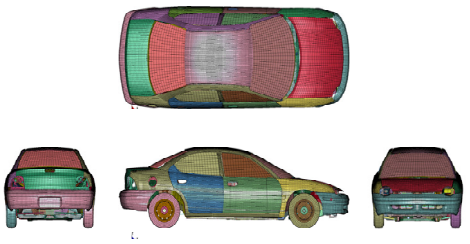


Fig. 2. FE Model of passenger vehicle

SB3등급 철재 노측용 가드레일의 수치모델을 Fig. 3에 나타내었다. 그림과 같이 가드레일의 빔, 지주 및 블록아웃 부재는 4절점 Shell 요소를 사용하여 모델링 하였으며, 강재는 SS400의 재료물성을 적용하였다.

충돌 시 발생하는 강재의 강도 증가효과 (strain rate 효과)를 고려하였으며, 부재의 연결은 CONSTRAINED _SPOTWELD 기능을 사용하여 모델링하였다. 지반은 8절점 Solid 요소를 사용하여 모델링하였으며, MAT_SOIL_AND_FOAM 재료모델을 사용하였다. 실물차량 충돌시험 조건을 고려하여 승용차의 충돌해석에는 30m, 대형차의 충돌해석에는 50m 길이의 형식-2 기존 노측용 가드레일 개선안 모델을 사용하였으며, 충돌 각도, 속도 및 충돌위치는 충돌시험의 조건과 같게 하였다.

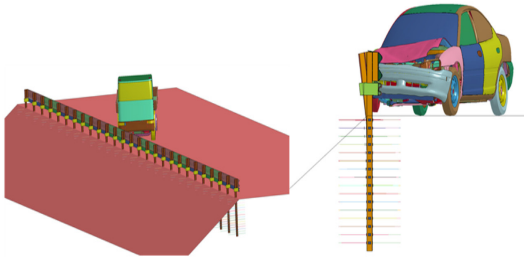


Fig. 3. FE Model of roadside barrier

승용차 충돌 시뮬레이션 결과를 사용하여 탑승자 안전지수 (THIV 및 PHD)를 산출하였으며, 그 결과를 다음 Table 4에 나타내었다.

표에 나타난 바와 같이 THIV 및 PHD 모두 국내 성능평가 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 화물차의 충돌 해석을 통하여 기존 노측용 가드레일에서와 같이 차량의 전복이나 승월은 발생하지 않으며, 안정적인 차량의 유도가 이루어지는 것을 확인하였다. 수치해석의 결과로 얻어진 승용차와 화물차의 충돌 거동은 충돌결과와 비교하여 다음 2.4절에 수록하였다.

Table 4. Occupant rick evaluation result of SB3 level

Item	Criteria	Simulation Result	Judgement
THIV	33 km/h Under	31.5 km/h	Good
PHD	20 g Under	11.0 g	Good

2.3 실물차량 충돌시험을 통한 성능평가

대형차량 충돌 후 차량의 거동에서는 차량이 전복·급정지하지 않고 원활하게 유도되었고 무게중심이 방호울타리 중심선을 넘지 않았으며, 궤적은 탈출박스의 B선을 침범하지 않음으로써 기준에 만족하는 결과를 보였다. 고속카메라로 촬영한 영상을 Fig. 4에 나타내었다.

구조성능의 경우 대형 시험차의 충돌에 충분히 견딜 수 있는 강도를 유지하였으며, 최대 충돌 변형거리의 경우 0.59m로, 기준치 1.0m 이내로 측정되어 만족스러운 결과를 나타내었다. 또한 차량 충돌 시에 파편이 비산하여 탑승자나 제 3자에게 피해를 주는 시험부재가 없었다.

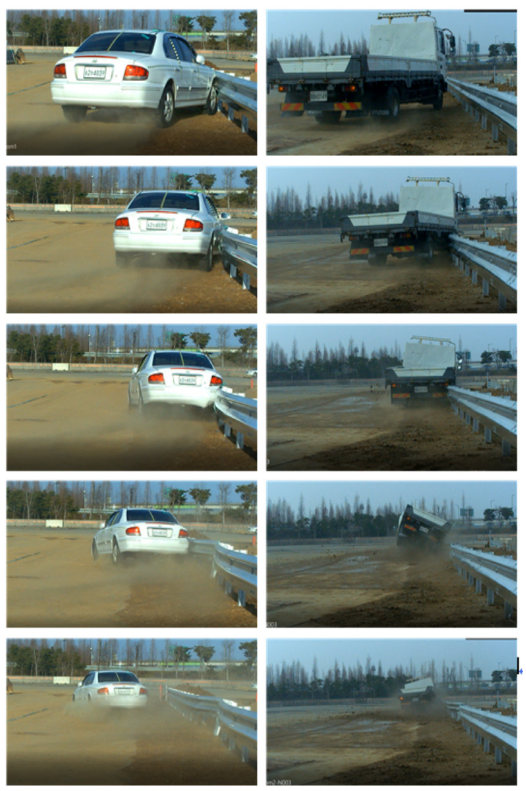


Fig. 4. Sequential photographs of car & truck impact test

소형차 충돌시험에서 측정된 탑승자 충돌속도(Theoretical Head Impact Velocity, 이하 THIV)는 24.0km/hr로서 기준치인 33.0km/hr 이하였으며, 탑승자 가속도(Post-impact Head Deceleration, 이하 PHD)는 12.0g로서 기준치 20g 이하로 측정되어 모두 기준에 만족하는 결과로 나타났다. 방호울타리의 구성요소가 탈락되어 차량 컴파트먼트를 뚫고 들어가지 않았으며, 차량 충돌 시에 파편이 비산하여 탑승자나 제 3자에게 피해를 주는 시험부재가 없었다.

또한 충돌 후 차량의 거동에서는 차량이 방호울타리에 충돌하여 전복되거나 급정지하지 않고 원활히 유도되는 충돌거동을 보였다. 충돌차량의 궤적은 탈출박스 B선을 침범하지 않았고 Roll, Pitch의 회전각은 기준치 75° 이하인 2.0°, 1.8°으로 측정됨으로써 기준에 만족하는 결과를 보였다.

2.4 수치해석과 충돌시험 결과 비교, 분석

소형차 충돌에 대한 수치해석 및 충돌시험 결과를 Table 5와 Fig. 5에 나타내었으며, 두 경우 모두 국토부 방호울타리 성능평가 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 다만, THIV의 경우는 수치해석 결과가 더 크게 나타난 반면, PHD는 실차 충돌시험의 경우가 더 크게 나타났다. 따라서, 수치해석에서 실제에 비해 감속이 더 작게 발생한 것으로 이해할 수 있다.

Table 5. Comparison of occupant rick

Item	Crash Test (1)	Numerical Analysis (2)	Ratio (2)/(1)	Commentary
THIV (km/h)	24.0	31.5	131%	THIV〈 Numerical PHD〈 Crash
PHD (g)	12.0	11.0	91%	

본 논문에서 충돌시험한 소, 대형차량은 국토부 성능기준에서 제시한 차량에 한해서 충돌시험을 수행하였다. 비용 등 여러가지 제약 때문에 다양한 차량에 대해 검증하지 못한 한계점을 가지고 있다.

대형차 충돌의 경우에도 Table 6과 같이 수치해석 및 충돌시험 결과가 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 최대 변형량은 수치해석 결과가 충돌시험 결과의 약 93%로 더 작게 나타났다. 소형, 대형차량의 수치해석 결과와 실차 시험 결과가 약간의 차이가 있는 것은 여러가지 요인이 있으나 가장 큰 원인으로는 시뮬레이션의 입력데이타로 현실에 맞는 정확한 마찰력에 대한 데이타의 부재로 인해 발생한 것으로 보고 있다.

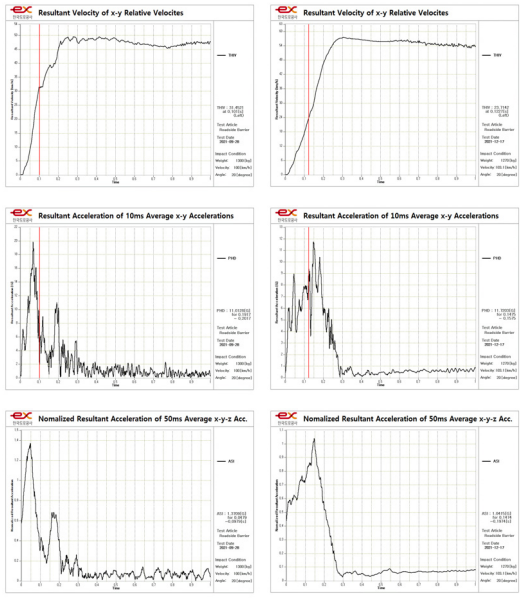


Fig. 5. Simulation Result & Crash Test Result Comparison

Table 6. Comparison of structural adequacy

Item	Crash Test (1)	Numerical Analysis (2)	Ratio (2)/(1)	Commentary
Deformation (0.8 m under)	0.59 m	0.55 m	93.2%	Numerical result〈 Crash result
Vehicle Behavior	not roll over	not roll over	-	

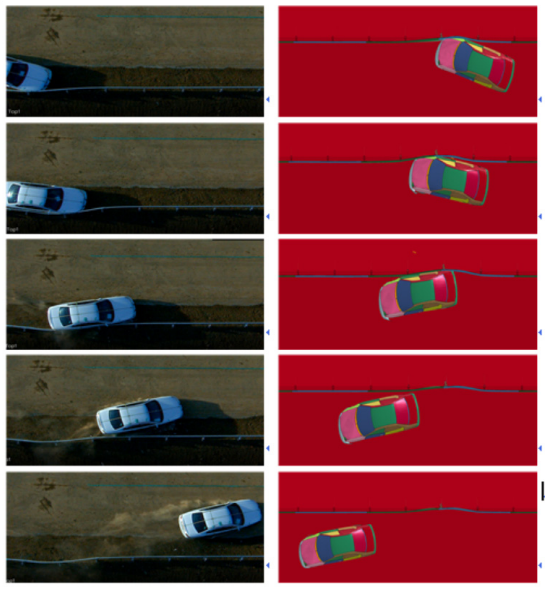


Fig. 6. Comparison sequential photographs for car impact test

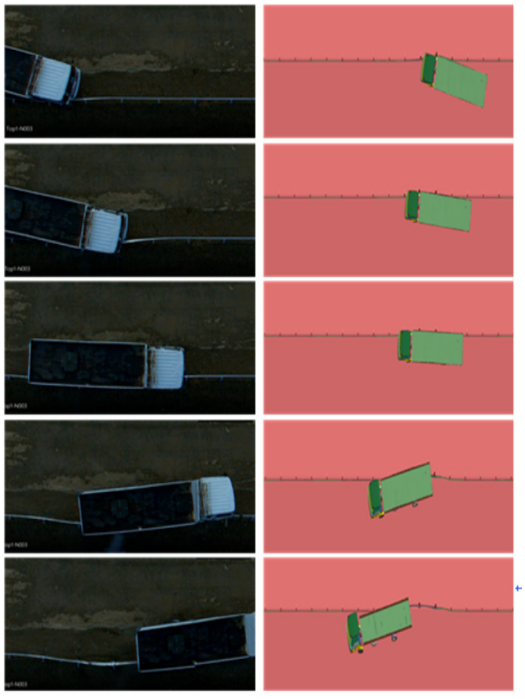


Fig. 7. Comparison sequential photographs for truck impact test

위 Fig. 6와 Fig. 7에 충돌시험 및 수치해석에서 얻어진 차량의 거동을 비교하여 나타내었으며, 수치해석의 결과가 충돌시험의 결과와 매우 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로부터 수치해석이 충돌시험의 결과를 적절히 모사하고 있는 것으로 판단되었다.

3. 결론

본 연구에서는 개정된 "도로안전시설 설치 및 관리지침"에 따라 기존 노측용 가드레일 개선기술을 개발하였으며, 그 기술을 적용한 시제품으로 수치해석 및 실물차량 충돌시험을 수행하였고 그 성능을 검증하였다.

수치해석은 충돌해석에 가장 널리 이용되고 있는 상용 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용하였다. 수치해석을 통하여 사전 성능확인을 수행한 후 실물차량 충돌시험을 실시하였으며, 충돌시험은 한국도로공사 도로교통연구원 도로안전시설 성능시험장에서 수행되었다.

본 연구를 통하여 개발된 기존 노측용 가드레일 개선기술이 적용된 제품은 기존에 사용되어 온 가드레일의 문제점을 해소하기 위해 하부의 보강판이 추가로 적용되었으며, 수치해석 및 실차 충돌시험을 통하여 그 성능이 기준을 만족함을 확인하였다.

또한, 한국도로공사의 방침을 근거로 자재비, 공사비, 설치비 등을 비교해 본 결과, 본 연구에서 제안한 개선기술 사양은 SB3등급 가드레일 신규 교체비용보다 30% 정도 저렴해 예산절감 및 공기단축이 가능하고 기존 노측용 가드레일을 천공이나 해체없이 개선 및 보강이 가능해 도로현장적용에서 널리 폭 넓게 적용될 것으로 기대된다.

References

[1] K. D. Kim, M. G. Ko, M. K. Nam, "Data Processing and Numerical Procedures Influencing on Occupant Risk Indices", *Int. J. Highw. Eng.* Vol. 9 No. 4, pp.215-226, 2007

[2] J. W. Joo, D. Y. Jang, J. M. Ha, J. J. Park, "Study on Improvement Method and Performance Analysis About Occupied Existing Roadside Barriers in Expressway", *Int. J. Highw. Eng.* Vol. 13, No. 4, pp.9-17, 2011

[3] J. W. Joo, K. J. Kum, J. J. Park, D. Y. Jang, "A Study on Development & Establishment of Performance Evaluation Criteria for Guardrail End Treatments", *Int. J. Highw. Eng.* Vol. 10, No. 1, pp.123-134, 2008

[4] K. S. Park, M. H. Noh, J. W. Lee, "Impact performance evaluation of MASH TL4 bridge barrier", *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 19, No. 6, pp.624-638, 2014
DOI: https://dx.doi.org/10.1080/13588265.2014.937558

[5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Handbook of Real-Scale Structure Impact Test for Roadside Safety Features. p.110, MLIT, 2015

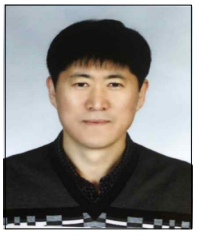
[6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Installation and Management Guide for Roadside Safety Features, p.101, MLIT, 2021

주 재 웅(Jae-Woong Joo) [정회원]

- 2009년 8월 : 명지대학교 일반대학원 교통공학과 (공학박사)
- 2000년 10월 ~ 2013년 2월 : 한국도로공사 책임연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국도로공사 수석연구원

〈관심분야〉
도로, 교통안전, 차량방호안전시설

안 성 기(Seong-Kee An) [정회원]



- 2004년 2월 : 영남대학교 일반대학원 경영학과 (경역학석사)
- 1991년 10월 ~ 2020년 12월 : 한국도로공사 과장
- 2021년 1월 ~ 현재 : (주)한국배리어 대표이사

〈관심분야〉
도로, 도로안전시설, 차량방호안전시설

장 대 영(Dae-Young Chang) [정회원]

- 2012년 2월 : 공주대학교 일반대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 2020년 9월 : (주)로드키네마틱스 연구실장
- 2020년 10월 ~ 현재 : 한국도로공사 책임연구원

〈관심분야〉
도로, 도로안전시설, 실물차량 충돌시험