시뮬레이션을 활용한 반강성-강성 차량방호울타리 전이구간의 충돌 거동 분석

Impact Analysis of Transition between Semi-Rigid and Rigid Barriers Using Simulations

김경주* · 배현웅** · 김종민***

Kim, Kyoungju*, Bae, Hyunung**, and Kim, Jongmin***

Abstract

Transition is a type of barrier that connects other barriers with different grades and shapes. Even if each barrier satisfies the performance, it may not be satisfied in transition. Therefore, collision safety requires a special design and examination. In this study, we investigated national and foreign standards and situations for the proper configuration of the transition and analyzed the impact behavior of the general transition using impact simulations. We developed a transition system that could ensure the stable performance of various grades by analyzing the behavior and confirmed based on the full-scale crash test (SB2 level).

Key words : Barrier Transition, Impact Simulation, Crash Test, Guardrail, Bridge Rail

요 지

전이구간은 등급과 형상이 다른 차량방호울타리를 연결하는 차량방호울타리의 한 종류이다. 연결되는 각각의 차량방호울타리가 성능을 만족하였다 할지라도 전이구간에서의 성능을 보증하지 않는다. 따라서, 전이구간에서의 차량 충돌시 안전성은 별도의 검토와 설계가 필요하다. 본 논문에서는 적절한 전이구간의 구성을 위하여 국내·외 관련기준 및 현황 분석을 수행하였으며, 충돌 시뮬레이션을 활용하여 일반적인 전이구간에 대해 충돌 거동을 분석하였다. 거동 분석으로부터 여러 등급에서 안정적인 성능확보가 가능한 전이구간 시스템을 제안하였으며, 실물차량 충돌시험(SB2 등급)을 통해 최종적인 성능을 확인하였다.

핵심용어 : 전이구간, 충돌 시뮬레이션, 충돌시험, 반강성 방호울타리, 강성 방호울타리

1. 서 론

차량방호울타리는 도로안전시설 설치 및 관리지침(MOCT, 2001)의 제정으로 성능기반의 제품개발이 이루어졌다. 이로 인하여 다양한 안전시설의 개발 유도 및 보급으로 교통사고로 인한 피해 저감에 기여 해왔다. 하지만, 차량방호울타리는 일반구간(Length of Need)에 편향되어, 단부·전이구간 등과 같이 상대적 우선순위가 낮은 구간은 사고에

대한 안전이 확보되지 않았다.

2012년 개정된 도로안전시설 설치 및 관리지침(MOLTMA, 2012)에서는 이러한 취약구간을 보완하기 위하여 차량방호울타리의 단부·전이구간 등 기존 지침에 미비했던 부분에 대한 성능평가 기준을 추가하였다.

하지만, 국내에서는 관련 연구가 매우 제한적이었던 관계로 국내 기준을 만족하는 단부 및 전이구간을 개발하기 위한 연구(KICT, 2013)를 수행하였으며, 실물차량 충돌시험

*교신저자, 정회원, (주)로드키네마틱스 대표이사(Tel: +82-41-414-7130, Fax: +82-41-522-8725, E-mail: civilkjkj@gmail.com)

Corresponding Author, Member, President, Road Kinematics co., Ltd.

**정회원, (주)로드키네마틱스 기업부설연구소장(E-mail: bbnine85@gmail.com)

Member, Director, Research Institute, Road Kinematics co., Ltd.

***전남대학교 토목공학과 연구교수(E-mail: kimbellsky@gmail.com)

Research Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University

(KATRI, 2014)을 통하여 SB2 등급 전이구간의 성능을 검증하였다. 한국도로공사에서는 기존 SB3 등급 표준도 단면(KEC, 2011)에 대해 충돌 시물레이션을 통하여 성능검토(KECRI, 2015)를 수행하였고, 이후 연구(Lee et al., 2017)를 통해 개발된 고속국도용 전이구간의 성능을 확인하였다.

전이구간의 개발 과정에서 대부분의 기업 소속의 연구·개발자들은 반복적인 충돌시험을 통해 성능을 만족시키는 구조형식 및 사양을 찾아가는 방법을 사용하였으며, 기관의 연구·개발자들의 경우 시물레이션을 통하여 시설의 성능검토를 수행하기도 하였다. 하지만, 이전의 연구와 개발은 목표 성능 등급을 만족하는 제품개발에 치중되어 차량 충돌시 발생하는 문제점과 원인에 대한 근본적인 현상을 이해하는 연구는 미미하였다. 이처럼 근본적 현상의 이해 부족으로 발생하는 문제점은 연구·개발의 기간 및 비용이 증가 및 관련 기준의 개정에서 반영되는 충돌 차량의 제원의 현실화 및 충돌조건의 변화 등에 따라 발생하는 성능 변화에 대응하기 어렵다.

따라서, 본 논문은 전이구간의 충돌에 대한 일반적인 거동 분석으로부터 성능확보에 요구되는 기본적인 구조 형상과 지향 방향을 제공하고자 한다. 전이구간의 형태는 방호울타리의 조합에 따라 다양하지만, 본 논문에서는 일반적인 형태의 노측용 반강성 방호울타리와 교량용 강성 방호울타리가 연결되는 구간에 대해 검토하였다. 이러한 전이구간은 큰 강성 차이에서 나타나는 포켓팅(Pocketing), 스내깅(Snagging) 및 부재 파단의 발생 위험이 높은 구간이므로 전이구간의 위험요소를 뚜렷하게 관찰할 수 있다.

전이구간 연구를 위하여 국내·외 기준을 분석하였고, 설치현황 검토로부터 기본적인 형태를 살펴보았다. 전이구간의 성능 검토는 충돌 시물레이션을 활용하였으며, 대표적인 성능 저해 요인을 확인하고 이에 대한 대응 방안을 검토하여 다양한 등급에 적용 가능한 전이구간 시스템을 제안하였다. 최종적으로는 실험차량 충돌시험을 통해 거동을 확인하였다.

2. 국내·외 관련 기준 및 현황

차량방호울타리 전이구간에 대한 국내·외 관련기준 및 설치현황을 비교하여 주요 차이점과 기본적인 형태와 설계개념을 살펴본다.

2.1 관련기준

차량 방호를 목적으로 하는 도로안전시설은 각 국가나 지역별 교통 및 차량 특성에 맞도록 성능평가기준을 선정하며, 전이구간에 대한 국내·외 기준은 다음과 같다.

국내에는 도로안전시설 설치 및 관리 지침(MOLIT, 2014)과 차량방호 안전시설 실험충돌시험 업무편람(MOLIT, 2016)에 전이구간의 설계/설치 및 성능평가를 위한 기준이 제시되

어 있다. 충돌조건은 종방향 차량방호울타리와 동일하다. 충돌지점(Critical Impact Point, CIP)은 유럽기준을 준용하여 소형차(승용차)는 전이구간 길이의 3/4지점, 대형차(트럭)는 중간지점으로 한다. 도로안전시설 설치 및 관리지침(MOLIT, 2014)에 제시된 설치 방법을 살펴보면, 전이구간은 점진적으로 강성을 증가시키면서 강성 방호울타리와 연결하도록 한다. 스내깅 방지를 위한 강성 방호울타리 하단부 처리 및 1.0 m 이상의 강성 방호울타리에 대해서는 대형차 충돌시 파손을 최소화하기 위해 1:1.5 (H:V) 기울기의 경사면으로 설계하도록 하고 있다. 또한, 교량용 방호울타리 전이구간의 경우 방호울타리 상호간에 강결 연결하도록 강조하고 있다. 전이구간의 길이 규정은 도로안전시설 설치 및 관리 지침(MOLIT, 2012)에서는 연결하고자 하는 두 방호울타리의 최대 충돌 변형 거리의 10~12배가 되어야 한다고 규정하였으나, 2014년 개정판에서는 삭제되었다.

미국은 MASH (AASHTO, 2016)에 따라 평가하며, 시험 방법과 충돌조건은 일반구간(Length of Need, LON)과 동일하다. 충돌지점(Critical Impact Point, CIP)은 스내깅(Snagging)이나 포켓팅(Pocketing) 가능성이 가장 큰 지점과 취약부위(연결부)를 고려하여 결정하며 지주의 항복강도와 레일의 항복모멘트로 정의된 그래프로부터 결정한다. 충돌지점의 범위는 차량방호울타리의 등급 및 충돌차량에 따라 강성 방호울타리와의 연결지점으로부터 1.06~3.35 m 전방에 충돌하도록 하고 있어 국내 및 유럽기준에 비해 연결부에 가깝게 충돌한다. 또한, 지주나 레일에 대한 자료가 없거나 일반적이지 않을 경우는 시물레이션을 통하여 CIP를 결정한다. 전이구간의 길이는 ROADSIDE DESIGN GUIDE (AASHTO, 2011)에 최대변형의 10~12배 이상으로 하고 있다. 이는 도로 안전시설 설치 및 관리 지침(MOLIT, 2012)에 준용되었다.

유럽은 ENV 1317-4 (CEN, 2001)에 따라 평가하며, 종방향 방호울타리 기준인 EN 1317-2 (CEN, 2010)의 충돌조건과 동일하다. 유럽기준에서는 연결되는 방호울타리의 단면이 같고 점유폭(Working Width) 차이가 1등급인 경우 전이구간으로 취급하지 않는다. 충돌지점은 소형차는 전이구간 길이의 3/4지점, 대형차는 중간지점을 선택하며, 다른 지점을 CIP로 적용하는 경우 시험보고서에 근거를 명시한다.

위의 기준에서 주요 성능평가 항목은 구조성능(차량방호 및 변형)과 탑승자 보호성능 및 차량 거동을 공통적으로 평가한다.

2.2 국내·외 시설 현황

국내의 경우 전이구간에 대한 성능기준 도입이전에 일반적으로 사용된 노측용 방호울타리와 교량용 강성 방호울타리의 전이구간은 대표적으로 Fig. 1과 같은 형태이다. 전이구간은 일반구간에서부터 지주간격을 점차적으로 감소시켜가며 교량용 강성 방호울타리와 연결하였다. 가드레일과 교량용 강성 방호울타리의 연결은 대부분 가드레일 본체를 강성

미국의 경우 대표적인 전이구간은 Table 1과 같다. TL3는 국내 기준의 SB3 등급과 유사한 등급으로 Thrie-Beam을 사용하거나 W-beam과 하단에 추가 보를 설치하여 강성을 증가시켰다. TL2는 국내 기준의 SB2 등급과 유사한 등급으로 W-beam을 주로 사용한다. 또한, 교량용 강성 방호울타리(콘크리트)의 경우 충돌시 차량의 부드러운 진행을 위해 하부 돌출부와 상단부를 경사지게 처리하거나 단부에 퍼짐을 두며, 강재 교량용 방호울타리에도 별도의 연결부재를 사용하여 하중 전달 및 차량의 선회를 원활하게 한다.

System (Test Level)	Transitions
W-Beam to Concrete Bridge Rail (TL4) (Jewell et al., 2002)
Thrie-Beam to Steel Bridge Rail (TL4) (AASHTO, 2002)
W-Beam to Concrete Bridge Rail (TL3) (Buth et al., 1999)
W-Beam to Concrete Bridge Rail (TL2) (Bligh, et al., 2003)

국외 사례의 전이구간은 기본적으로 차량의 진행을 방해 할만한 부재나 단면 형상을 배제하고, 점진적 강성 증가와 견고한 접합부로 구성된다.

충돌 시뮬레이션은 LS-DYNA (LSTC, 2012)를 활용하였다. 전이구간의 거동 분석에 앞서 충돌시뮬레이션의 신뢰성 검토(KICT, 2013)를 수행하였으며, Fig. 2의 노측용 반강성 차량방호울타리(KECRI, 2006)와 교량용 강성 방호울타리

System (Test Level)	Transitions
<p>DB SafeLink® SuperRail® (H2) (DELTABLOC, 2016)</p>
<p>DB SafeLink® 4Safe® (H2) (DELTABLOC, 2014)</p>

Fig. 2. Barriers for V&V Simulation

(KECRI, 2005)에 대한 충돌시험 및 시뮬레이션 결과를 비교하여 신뢰성 확인과 경향을 분석하였다.

3.1 충돌 시뮬레이션 모델

일반적인 전이구간의 모델은 한국도로공사 표준도(KEC, 2011)에 제시된 Fig. 2(a)의 노측용 차량방호울타리(SB3)와 Fig. 2(b)의 교량용 강성 방호울타리(SB5) 사이에 설치된다. 시뮬레이션에 사용한 차량은 Figs 3 및 4와 같이 TC226/CME Work Group에서 개발한 heavy goods vehicle (HGV) 모델과 National Crash Analysis Center at George Washington University (NCAC)에서 개발한 Dodge Neon 모델(NCAC, 2000)을 사용하였다.

시뮬레이션에 사용된 강재 및 지반 모델은 충돌하중을 받는 도로안전시설의 특성상 주요 부재는 재료의 탄성영역을 넘어 소성 거동을 보이며 대변위가 발생한다. 충돌 시뮬레이션을 통해 차량방호울타리의 거동을 근사적으로 모사하기 위해서는 재료적 특성을 적절히 입력해야 유사한 결과를 기대할 수 있다.

본 시뮬레이션에서 강재는 비교적 간단한 입력 변수로 재료의 비선형, 대변위 및 파괴를 고려할 수 있는 PLASTIC_KINEMATIC 모델을 사용하였다. 재료 모델의 적정성은 차량방호울타리의 지주 부재로 사용되는 SS275 재질의 원형

Fig. 3. FE Truck Model (HGV)

Fig. 4. FE Car Model (Dodge Neon)

강관($\varnothing = 139.8 \text{ mm}$, $t = 4.5 \text{ mm}$)에 대한 정적 휨 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하여 유사한 결과를 보이도록 Fig. 5로 정의되는 재료 모델을 사용하면 Fig. 6과 같이 유사한 거동을 보인다. 또한, 강재의 변형률 속도효과를 고려하여야 하는데, LS-DYNA에서는 Cowper-Symonds와 Simplified Johnson-Cook의 식으로 적용할 수 있다. 하지만, SS275 강재에 대해 연구 결과가 없고, 기존 연구(Dietenburger et al., 2005)에 의하면 강종별 차이 및 변형률 속도 구간에 따른 신뢰성 차이 때문에 직접적으로 적용하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서 사용되는 강재는 미국 가드레일 재료인 AASHTO M-180 강재에 대한 연구(Wright and Ray, 1996) 결과를 참고하고, 변형률 속도 효과를 고려하기 위해 강도를 증가시킨 강재 모델을 이용한 시뮬레이션과 충돌시험 결과와의 비교(KICT, 2013)로 부터 Fig. 5와 같이 강재 모델을 결정하였다.

또한, 노측용 차량방호울타리는 지주가 매입되는 지반을

Fig. 5. Stress-Strain Relation for Steel

Fig. 6. Results of Post Bending Test and Simulation

적절히 고려해야 한다. 본 연구에서는 지주-지반의 상호작용을 고려하기 위하여 지반의 수평 반력의 영향을 스프링으로 고려하였으며, 지주의 횡방향 재하 시험 결과(MOLIT, 2013)

Fig. 7. Results of Guardrail Post Lateral Loading Test and Simulation

를 비교하면 Fig. 7과 같이 힘-변위 관계를 모사할 수 있다.

3.2 전이구간 충돌에 대한 일반적인 거동 분석

도로안전시설 설치 및 관리 지침(MOLIT, 2014)에 따라 충돌시험을 통한 성능검증이 이루어진 시설도 있으나, 본 연구에서는 전이구간에 대한 일반적인 충돌 거동을 분석하기 위하여 고속도로 표준도(KEC, 2011)의 전이구간을 대상으로 하였다. 이 전이구간의 단면은 Fig. 2(a)와 같이 Thrie-Beam과 원형 지주로 구성되고, Fig. 8과 같이 지주가 배치되며 총 8.5 m를 전이구간으로 하고, 이 후 일반구간의 방호울타리가 연결된다. 교량용 강성 방호울타리의 경우 충분한 강성을 갖는 것으로 가정하여 탄성체로 모델하였다. 시뮬레이션 모델은 Fig 9와 같으며, SB3 및 SB2 등급에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2.1 충돌 거동

전이구간의 일반적인 충돌 거동 분석을 위한 시뮬레이션은 국내 및 유럽 기준과 미국 기준에 제시된 충돌 위치를

Fig. 8. In Service Transition (KEC, 2011)

Fig. 9. FE Model for In Service Transition (KEC, 2011)

Table 3. Simulation Results for In Service Transition (KEC, 2011)

Clause	Eval. Criteria	C.I.P of CEN/KR		C.I.P of MASH	
		SB3	SB2	SB3	SB2
Structural Adequacy	Max. Deflection (≤ 1.0 m)	0.27 m	0.18 m	0.21 m	0.18 m
	Contain and Redirect	Yes	Yes	Yes	Yes
	Exit Box	Acceptable		Acceptable	Unacceptable
Occupant Risk	THIV (≤ 33 km/h)	36.4 km/h	39.4 km/h	40.9 km/h	35.2 km/h
	PHD (≤ 20 g)	Snagging	55.5 g	50.3 g	35.7 g
	ASI	-	2.8	2.2	1.8
	Contain and Redirect	-	Yes	Yes	Yes
	Exit Box	-	Acceptable	Turn to Barrier	Acceptable

Fig. 10. Truck Collision at the End of the Bridge Rail

Fig. 11. Car Collision at the End of the Bridge Rail

함께 검토하였다. 검토 결과 강도성능의 경우 Table 3과 같이 SB2 등급 충돌조건에서는 미국 기준 위치에 충돌하는 경우 탈출박스를 만족하지 못하지만 다른 조건에서는 구조성능을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 10과 같이 강성 방호울타리 단부와 차량 전면 충돌로 인한 급격한 감속이 모든 경우에 발생하였다. 강성 방호울타리의 파괴를 고려할 경우 단부의 파손이 발생할 우려가 높고 이러한 현상은 2010년 인천대교 접속교량의 전이구간에서 발생한 버스추락사고의 주요 원인이기도 하다.

탑승자 보호성능은 탑승자 충돌속도(Theoretical Head Impact Velocity, THIV)와 탑승자 충돌 가속도(Post-impact Head Deceleration, PHD)로 평가하며, 해외 기준과의 비교를 위해 Acceleration Severity Index (ASI)도 함께 산정한다. 여기서 탑승자 충돌속도는 차량이 충돌할 때 탑승자의 머리가 차량의 충돌속도로 자유 비행한다고 보고, 차량이 감속되는 동안 머리가 차량 내부공간의 가상 면과 충돌 순간의 차량과 이상화된 탑승자 머리의 상대속도를 말한다. 탑승자 충돌 가속도는 탑승자의 머리가 차량 내부공간의 가상 면과 충돌 후 접촉이 유지(완전 소성충돌)되는 것으로 간주하고 차량의 가속도가 탑승자의 머리에 그대로 전달된다고 가정할 때, 탑승자 충돌속도가 발생한 이후의 시간에서 차량 가속도에 대한 10 msec 평균의 최대값을 말한다. ASI는 차량 x, y, z 각 방향 50 msec 평균 가속도에 대한 각 방향

한계 가속도에 대한 비의 합을 나타내는 수치로 무차원의 스칼라로 표현된다. ASI는 항상 양의 값을 가지며, 1 보다 클수록 탑승자의 위험도는 커진다.

탑승자 보호성능 검토를 위한 안전지수는 Table 3과 같이 모든 조건에서 허용 기준을 크게 초과하였다. 특히, Fig. 11과 같이 강성 방호울타리 단부와 차량이 충돌하는 스네깅 발생이 차량의 이탈을 방해하였다. 충돌 위치에 따른 차이는 충돌 조건(등급)에 따라 지배되는 것으로 판단되나, 자세한 영향은 추가적인 연구가 필요하다.

전이구간에 대한 일반적인 거동 분석을 위한 시뮬레이션 결과 강도성능의 경우 강성 방호울타리의 강도가 충분한 경우에는 성능기준을 대체로 만족하는 것으로 나타나지만, 본 시뮬레이션에서 교량용 강성방호울타리의 파괴를 고려하지 않은 것을 고려하는 경우 강성 방호울타리에 대한 안전성 검토가 필요하다. 탑승자 보호성능의 경우 기준을 크게 초과하며, 이탈거동 또한 원활하지 못하였다.

3.2.2 원인 분석

앞에서의 시뮬레이션 결과 차량의 불안정한 이탈거동 및 탑승자 안전지수가 기준을 크게 초과하는 현상에 대한 원인을 분석해보면, 강도성능의 경우 충돌과정에서 대형차가 강성 방호울타리의 단부와 충돌하는 거동을 보였다. 이러한 현상은 강성 방호울타리와 반강성 방호울타리의 변형성

Fig. 12. Relative Velocity

Fig. 13. Relative Acceleration

능 차이와 강성 방호울타리의 기하 형상이 차량의 부드러운 선회에 부적합하여 나타나는 현상이다.

탑승자 보호 성능 중 탑승자 충돌속도(THIV)는 Flail Space Approach (Michie, 1981)로 계산되며 차량 충돌시 탑승자의 머리가 자유 비행하면서 일정 거리(종방향 0.6 m, 횡방향 0.3 m) 이동시 차량 내부와 충돌하는 상대속도를 나타내는 것이다. 일반적인 전이구간의 경우 시간에 따른 상대속도는 Fig. 12와 같이 충돌 초반은 반강성 방호울타리와 유사한 기울기를 보이며, 0.05초 이후부터는 강성 방호울타리와 유사한 기울기로 전환되는 거동이 나타난다. 이러한 거동은 탑승자의 머리가 동일한 거리를 이동했을 때 상대속도가 커지게 되므로 탑승자 충돌속도를 증가시킨다. 강성 방호울타리의 경우 상대속도는 초기 감속이 크지만 충돌 지속시간이 짧아 상대 충돌속도가 낮아지며, 반강성 방호울타리는 변형에 의해 차량의 감속을 완만하게 유도하여 상대 충돌속도를 낮춘다. 그러나, 전이구간의 경우 강성 방호울타리와

Fig. 14. End Shapes of the Bridge Railing

반강성 방호울타리가 연결되면서 탑승자와 차량 내부의 상대속도가 시간에 따라 급격히 증가하는 경향으로 변하여 탑승자 충돌속도가 성능기준 값을 초과하게 된다. 따라서 탑승자 충돌속도를 성능기준 값 이내로 확보하기 위해서는 감속 곡선이 반강성 또는 강성 방호울타리와 유사한 기울기가 나타나도록 해야 한다.

탑승자 충돌 가속도는 일반적인 전이구간의 경우 Fig. 13과 같이 강성 방호울타리나 반강성 방호울타리에 비해 매우 크게 나타난다. 이러한 현상은 Fig. 14(a)와 같은 단면을 갖는 강성 방호울타리의 단부는 충돌거동 중 차량과의 간섭에 취약하기 때문이다.

3.3 전이구간 개선 방안 시뮬레이션 검토

앞서 살펴본 원인으로부터 개선방안 도출을 위한 검토를 수행하였다. 국내 기준을 만족시키기 위한 적절한 전이구간 형태를 제시해보면, 우선적으로 원활한 차량 거동을 위해서는 강성 방호울타리 단부 형상이 중요한 요소로 해외 사례에서는 강성 방호울타리 단부에 퍼짐을 두기도 하지만, 본 연구에서는 Fig. 14(b)와 같이 강성 방호울타리 단부와 차량이 간섭되는 구간을 경사 처리하여 원활한 차량 진행을 유도한다. 다음으로는 반강성 방호울타리의 강성 증대로 방호울타리 상호간의 변위 차이를 감소시켜 국부적인 변형을 방지함으로써 차량의 이탈을 원활하게 한다. 강성 증대를 위한 일반적인 방안으로는 전이구간의 지주 간격을 더욱더 촘촘히 하거나 종방향 부재를 추가한다. 추가되는 종방향 부재는 방호울타리 면의 연속성 유지를 위하여 후면이나 하단에 추가하며, 경우에 따라 레일을 다중(겹침)으로 배치하기도 한다.

본 연구에서는 충돌 성능을 확보를 위한 방법으로 Fig. 14(b)와 같이 강성 방호울타리 단부를 경사면으로 개량하고, 반강성 방호울타리의 강성 증가를 위해 하단레일 추가 방안(Case 1, Fig. 15) 및 접속연석을 추가하는 방안(Case 2, Fig. 16)에 대하여 검토하였다.

(a) Case 1

(b) Case 2

Fig. 15. Modified Transitions

Fig. 16. Relative Velocity

개선방안 검토에 앞서 도로안전시설 설치 및 관리 지침 (MOLIT, 2014)에서는 전이구간 길이에 대한 기준이 삭제되었다. 이는 전이구간의 길이를 조절하여 충돌 과정에서 차량과 강성 방호울타리 단부와와의 간섭을 회피하거나 영향이 미미하도록 충돌 위치를 의도적으로 조절할 수 있으므로 강성 방호울타리의 단부와 충돌이 원인인 대부분의 문제가 해결된다. 하지만, 간섭 발생이 시작되는 지점과 강성 방호울타리 단부 사이에서 발생하는 차량 충돌에 대한 안전성은 보장하기 어렵다. 참고로 미국 기준인 MASH에서는 전이구간에 대한 충돌 위치를 방호울타리 강성에 따라 결정하므로 전이구간 길이와 무관하게 충돌 위치가 결정된다. 이러한 문제는 추후 연구과제로 하고, 본 논문에서는 전이구간의 길이 변화에 따라 충돌 위치가 함께 변화하면서 발생하는 영향에 대해서는 고려하지 않는다.

전이구간의 충돌 안전성 개선방안으로 두 가지 방안에 대해 검토하였으며, 첫 번째로는 강성 방호울타리 단부의 경사처리 및 하단 레일 추가 방안(Case 1)은 Fig. 15(a)와 같이 Thrie-Beam 하단에 각형 빔($100 \times 50 \times 4.5$ t)을 추가한 것이다. 전이구간의 길이는 총 12.5 m이고 지주 간격($6@0.5$ m + $9@1.0$ m)을 변화시켰다. 본 전이구간은 기존 보다 강성이 증가하였으며, 강성 방호울타리는 개량 단면 사용으

로 오히려 더 안전한 방향으로 개량되었기 때문에 강도성능 검토는 생략하였다. 성능 검토는 SB3 및 SB2 등급에 대해 수행하였다.

두 번째로는 강성 방호울타리의 단부 개량 및 접속연석 추가 방안(Case 2)은 Fig. 15(b)와 같이 전이구간 하부에 강성 방호울타리 하부 단면과 동일한 콘크리트 연석을 추가하여 강성 방호울타리의 탑승자 안전도가 하단부 형상에 지배되는 것을 이용하였으며 충돌지점에 따른 성능 변동의 최소화를 기대할 수 있다. 전이구간의 길이 및 구성은 하단 빔 추가 방안(Case 1)과 동일하다. 강도성능 및 탑승자 보호 성능을 모두 검토하였으며, SB2 등급과 소형차 충돌조건이 동일한 SB4 등급에 대한 강도성능을 추가 검토하였다.

시뮬레이션 결과 Case 1의 탑승자 보호성능은 Table 4와 같이 SB3 및 SB2 등급 모두 탑승자 충돌속도는 기준값을 초과하지만 SB2 등급의 경우 기준값에 근접하였다. 충돌 후 차량 거동은 모두 만족하였다. 탑승자 안전도 중 탑승자 충돌속도는 Fig. 16과 같이 SB3 등급의 경우 충돌 초반에는 반강성 방호울타리와 유사하게 진행하다가 강성 방호울타리에 근접할수록 기울기가 급격히 증가한다. SB2 등급의 경우도 유사한 거동을 보이지만 SB3 등급에 비해 기울기가 완만하다. Case 2의 경우 탑승자 보호성능은 Table 4와 같이 모든 등급에서 일반적인 전이구간에 비해 안전 지수의 뚜렷한 감소를 보이며 기준을 만족하였고 충돌 후 차량 거동 또한 모두 만족하는 것으로 나타났다. 탑승자 보호성능 중 탑승자 충돌속도의 특성은 Fig. 16과 같이 강성 방호울타리와 유사한 감속 거동이 나타났다.

탑승자 충돌 가속도는 Case 1과 Case 2의 모든 경우 Fig. 17과 같이 강성 방호울타리와 유사하게 충돌초기에 크게 나타나며, 일반적인 전이구간에 비해 크게 낮아진 것을 확인할 수 있다. 전반적인 상대 가속도는 초반에 Case 1이 Case 2에 비해 크게 나타나지만 후반부(0.1 sec 이후)는 유사한 수준으로 나타난다.

탑승자 보호성능 검토에서의 소형차량의 이탈 거동은 모든 경우에서 강성 방호울타리와의 간섭 없이 원활하게 진행하였다.

강도성능 검토 결과(Case 2)는 Table 4와 같이 일반적인 전이구간에 비해 변형이 감소하고 대형차 충돌시 차량의

Table 4. Simulation Results for Modified Transitions

Clause		Eval. criteria	In Service (KEC, 2011)	Case 1	Case 2
Structural Adequacy	SB3	Max. Deflection (≤ 1.0 m)	0.21 m	N/A	0.10 m
		Contain and Redirect	Yes		Yes
		Exit Box	Acceptable		
	SB2	Max. Deflection (≤ 1.0 m)	0.15 m		0.07 m
		Contain and Redirect	Yes		Yes
		Exit Box	Acceptable		
	SB4	Max. Deflection (≤ 1.0 m)	0.21 m		0.20 m
		Contain and Redirect	Yes		Yes
		Exit Box	Acceptable		
Occupant Risk	SB3	THIV(≤ 33 km/h)	36.4 km/h	36.7 km/h	29.4 km/h
		PHD(≤ 20 g)	Snagging	10.2 g	10.3 g
		ASI	-	2.0	1.5
		Contain and Redirect	-	Yes	Yes
		Exit box	-	Acceptable	Acceptable
	SB2 and SB4	THIV(≤ 33 km/h)	39.4 km/h	33.2 km/h	31.9 km/h
		PHD(≤ 20 g)	55.5 g	9.9 g	9.3 g
		ASI	2.8	1.6	1.8
		Contain and Redirect	Yes	Yes	Yes
		Exit box	Acceptable	Acceptable	Acceptable

Fig. 17. Relative Acceleration

거동이 양호하여 모든 등급에서 성능을 만족하였다.

4. 충돌시험을 통한 성능 확인

충돌 시뮬레이션으로부터 강성 방호울타리 단부 개량과 접속연석을 설치한 경우(Case 2) 강도성능 및 탑승자 보호성능을 모두 만족하였다. 시뮬레이션으로부터 검토된 전이구간에 대하여 SB2 등급 충돌조건에 대해 실차충돌시험

Fig. 18. Before the Test

(KATRI, 2014) 결과와 비교하였다.

시험 대상 전이구간은 Fig. 18과 같고 일반구간의 노측용 방호울타리는 W-beam과 원형지주가 4 m 간격으로 구성되며 SB2 등급 충돌시험을 통해 성능이 검증된 제품이다. 전이구간과 본체 가드레일의 연결은 Fig. 18과 같이 전이레일(W-beam → Thrie-beam)을 사용하였다. 이는 시뮬레이션에서는 Thrie-beam을 사용한 가드레일이 일반구간으로 사용된 것과 차이가 있다.

충돌시험 결과는 Table 5와 같이 강도성능은 기준을 만족하였으며, 최대변형의 경우 충돌시험에서 0.07 m 크게 나타났다. 탑승자 보호성능 또한 성능기준을 모두 만족하였다. THIV, PHD 및 유럽기준의 ASI 모두 시뮬레이션과 비교하여

Table 5. Test Results (SB2)

Clause	Eval. criteria	Simulation	Test
Structural Adequacy	Max. Deflection (≤ 1.0 m)	0.07 m	0.14 m
	Contain and Redirect	Yes	Yes
	Exit Box	Acceptable	
Occupant Risk	THIV (≤ 33 km/h)	31.9 km/h	29 km/h
	PHD (≤ 20 g)	9.3 g	7 g
	ASI	1.8	1.1
	Contain and Redirect	Yes	Yes
	Exit Box	Acceptable

Fig. 19. After the Test (Truck)

Fig. 20. Sequential Photographs (Truck)

Fig. 21. Sequential Photographs (Car)

충돌시험에서 낮은 값을 보여 시뮬레이션 신뢰성 검토 (KICT, 2013)에서 보여준 경향과 같다. 대형차 충돌 후 전이 구간은 Fig. 19와 같이 변형되었고 접촉연석은 파괴되지 않았으며, 방호울타리 부재의 비산 등 이상 거동은 관찰되지 않았다. 차량 거동은 Figs. 20 및 21과 같이 시뮬레이션과 유사하게 나타났다.

5. 결 론

2012년에 개정된 도로안전시설 설치 및 관리 지침(MOLTA, 2012)에 따라 차량방호울타리의 전이구간 또한 충돌시험을 통한 성능검증이 필수적이다. 하지만 국내에서는 이와 관련된 기초연구가 미미한 관계로 후속 개발 및 연구를 위해 전이구간의 충돌 특성을 분석하였다.

일반적인 전이구간에 대한 충돌 시뮬레이션으로부터 차량 충돌시 발생할 수 있는 문제점들을 확인하였고 개선방안 검토를 통해 다양한 등급에 적용 가능한 전이구간 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 충돌 시뮬레이션으로 성능 만족을 확인하고, 실물차량 충돌시험을 통해 최종적으로 성능을 입증하였다.

References

American Association of State Highway and Transportation

- Officials (AASHTO). (2002). *Roadside design guide*. Washington, DC 20001.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2011). *Roadside design guide*. Washington, DC 20001.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2016). *Manual for Assessing Safety Hardware*.
- Bligh, R.P., Menges, W.L., and Haug, R.R. (2003). *Evaluation of guardrail to concrete bridge rail transitions*. FHWA/TX-04/4564-1, Texas Transportation Institute The Texas A&M University System, Texas.
- Buth, C.E., Menges, W.L., and Butler, B.G. (1999). *Nchrp report 350 test 3-21 of the vertical flared back transition*. FHWA-RD-99-062. Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas.
- DELTABLOC. (2014). *DELTABLOC® Temporary & Permanent Concrete Vehicle Restraint Systems, Edition 2014*.
- DELTABLOC. (2016). *DELTABLOC® SAFELINK® DB 80F - SUPERRAIL®, Technical Product Data Sheet*.
- Dietenberger, M., Buyuk, M., and Kan, C.D. (2005). *Development of a High Strain-Rate Dependent Vehicle Model*. LS-DYNA Anwenderforum.
- European Committee for Standardization (CEN). (2001). *Road restraint systems - Part 4 : Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for terminals and transitions of safety barriers*. ENV 1317-4.
- European Committee for Standardization (CEN). (2010). *Road restraint systems - Part 2 : Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets*. EN 1317-2.
- Jewell, J., Clark, N., and Peter, R. (2002). *Compliance Crash Testing of a Nested Thrie Beam Transition Barrier*. FHWA/CA/TL-2001/09. Material Engineering and Testing Services California Department of Transportation, CA.
- Korea Automobile Testing & Research Institute (KATRI). (2014). *Test Evaluation Report of the Roadside Barrier*. KICT, Registration Number : SB240.
- Korea Expressway Corporation (KEC). (2011). *Highway Standard Drawing*.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI). (2005). *Report on the performance test results of concrete bridge rail*.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI). (2006). *Report on the performance test results of roadside steel barrier*.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI). (2015). *Computer Simulation of Bridge Rail-to-Guardrail Transition (SB3 Level)*. Road Kinematics co., Ltd.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2013). *Study on Standard Drawing of End Treatment & Transition for Roadside Barrier*. Road Kinematics co., Ltd.
- Lee, J.H., Cho, J.S., and Lee, J.H. (2017). Development and performance evaluation of SB3-level roadside barrier for highway transition zone *Int. J. Highw. Eng.*, Vol. 19, No. 6, pp. 13-21.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC). (2012). *LS-DYNA Keyword User's Manual*. California.
- Michie, J.D. (1981). *Recommended Procedures for The Safety Performance Evaluation of Highway Appurtenances*. NCHRP Report 230, Transportation Research Board (TRB), Washington, DC, p. 12.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2001). *The guidelines for the installation and management of roadside safety features*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2013). *Development of Road Safety Technologies for SMART Highway*. Land Transport R&D Report 07TI-A01. Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Korea, p. 66.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2014). *The guidelines for the installation and management of roadway safety features*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016). *A Handbook for Full-Scale Vehicle Crash Test of Roadside Safety Features*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLITMA). (2012). *The guidelines for the installation and management of roadside safety features*.
- National Crash Analysis Center (NCAC). (2000). *Public finite element model archive*. FHWA/NHTSA, National Crash Analysis Center website page (www.ncac.gwu.edu), George Washington University.
- Wright, A.E., and Ray, M.H. (1996). Characterizing guardrail steel for LS-DYNA3D simulations. *TRR*, Vol. 1528, pp. 138-145.

Received	August 11, 2021
Revised	August 12, 2021
Accepted	September 1, 2021