

고내식성 용융합금도금강판 적용 교량난간의 충돌성능 평가

노명현*

¹포스코 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹

Crashworthiness Evaluation of Bridge Barriers Built with Hot-dip Zinc-aluminium-magnesium Alloy-coated Steel

Myung-Hyun Noh*

¹Structure Research Group, Steel Solution Marketing Dept., POSCO

요약 본 논문은 도로안전시설물의 공용중 부식 발생으로 인한 기능 손실을 줄일 수 있는 방안으로 고내식성 용융합금도금 강판을 적용한 도로안전시설물을 제안한다. 고내식성 용융합금도금강판을 적용한 도로안전시설물 제품에 대한 신뢰성 있는 충돌성능 평가 기초자료를 제공할 목적으로 고내식강이 적용된 교량난간 제품에 대한 충돌 시뮬레이션 및 실물 차량 충돌시험 연구를 수행한다. 시뮬레이션 및 실차충돌 시험 결과, 변형률 속도 의존성을 고려할 수 있는 정교한 동특성 재료모델을 도입한 충돌 시뮬레이션을 통해 얻어지는 충돌 거동과 실물 차량 충돌 시험 결과가 매우 유사한 것으로 도출되었다. 본 논문에서 제안된 고내식성 용융합금도금 강판을 적용한 교량난간은 실물 차량 충돌 시험의 충돌성능 평가 기준을 모두 충족시켜 현장 적용을 앞두고 있다.

Abstract This paper proposes road safety facilities applying Hot-dip zinc-aluminum-magnesium alloy-coated steel sheets and coils to reduce the loss of function caused by the corrosion of steel in the service state. Vehicle crash simulations and full-scale crash tests were carried out to provide reliable information on evaluating the crash performance with the products of road safety facilities built with hot-dip zinc-aluminum-magnesium alloy-coated steel. From the results of the simulations and full-scale crash tests, the impact behaviors evaluated by the three-dimensional crash simulations considering the strain-rate dependency in a constitutive model were similar to those obtained from the full-scale crash test results. The full-scale crash test results met the crashworthiness evaluation criteria; hence, the proposed bridge barrier in this paper is ready for field applications.

Keywords : Bridge barrier, Crash simulation, Hot-dip zinc-aluminium-magnesium alloy-coated steel, Passenger protection performance, Structural adequacy

1. 서론

70년대 산업화 이후 유동인구와 지역 간 물류 수요를 충족시키기 위해 고속도로 및 지방도로가 급격하게 확충되어져 왔다. 또한 국민들의 소득수준이 높아짐에 따라 자가용 소유가 늘어나고 기존 도로의 확장이나 새로운 도로가 확충되고 있다. 이러한 도로 건설이 늘어남에 따라 도로시설물들에 대한 관심이 높아지고 유지관리 측면에서 장기간에도 기능저하가 없는 내구성 강한

시설물들이 요구되고 있다. 특히, 방호울타리와 같은 도로안전시설물들은 강재로 구성되어 있고 공용중 부식에 따른 기능 손실이 발생 할 수 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 최근 국토부는 “도로안전시설 설치 및 관리 지침(차량방호안전시설 편)”의 방식처리 편을 개정하였고 한국도로공사는 “고속도로 전문시방서”의 방호울타리편 도금관련 기준을 개정함으로써 내식성이 우수한 신소재나 방식성능을 향상시킬 수 있는 신공법도 과학적인 입증되면 언제든지 적용이 가능하도록 하였다 [1, 2].

*Corresponding Author : Myung-Hyun Noh(POSCO)

Tel: +82-32-200-2460 email: mnoh@posco.com

Received February 11, 2016

Revised March 2, 2016

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

내식성이 우수한 신소재로 기존 용융아연도금강판 대비 5~10배 이상의 내식성을 보유한 고내식성 용융합금도금강판은 한국의 P사에서 생산하는 PosMAC과 일본 N사와 S사에 생산하는 ZAM과 SD 등이 대표적이다. 일본은 이러한 신강종을 전자재 분야에 널리 보급하여 최근 고내식 용융합금도금강판의 수요가 가파르게 성장하고 있는 추세에 있다. 반면, 국내는 국토부 기준 개정에 따른 고내식성 용융합금도금강판을 적용할 수 있는 기회요인이 지속적으로 증가하고 있음에도 불구하고, 아직까지 도로안전시설물에 이러한 고내식강을 적용한 사례는 극히 드물다. 이는 신강종이 아직 널리 알려지지 않아 충돌이나 부식성능에 대한 확신이 부족하기 때문이다. 그러나 고내식성 용융합금도금강판을 적용한 도로안전시설물 제품에 대한 신뢰성 있는 근거자료를 지속적으로 제공할 경우 이러한 인식은 불식될 것으로 판단하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 도로안전시설물에 고내식성 용융합금도금강판이 널리 적용될 수 있도록 고내식성 용융합금도금강판이 적용된 교량난간에 대한 신뢰성 있는 충돌성능 평가 기초자료를 제공하고자 한다. 궁극적으로 내식성능이 향상된 신강종의 수요확대를 통해 국가차원의 유지관리 비용이 절감되기를 기대한다.

2. 고내식강 적용 교량난간 개요

2.1 고내식성 용융합금도금강판의 특징

국내 P사의 고유기술로 개발된 고내식성 용융합금도금강판인 PosMAC은 Zn-3% Mg-2.5% Al 3원계 고내식 용융합금도금강판으로, 일반 용융아연도금(GI) 대비 10배 수준의 고내식 특성을 보유한 KS에 등재된 신제품이며, 특히 절단면 내식성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다 [3]. Table 1은 PosMAC 강판과 기존 용융아연도금 및 갈바륨도금 강판의 특성을 비교한 것이다.

Table 1. Product characteristics comparison

Quality items	POSMAC	GI	Galvalume	
Hardness of Coating Layer (kg/mm ²)	110~130	60~80	80~100	
Friction characteristics	◎	X	△	
Corrosion Resistance	Flat board	◎	△	◎
	Bending	◎	△	△
	Cup	◎	△	◎
	Cross section	◎	△	X

2.2 고내식강 적용 교량난간 특징

본 논문에서는 고내식성 용융합금도금강판이 적용된 교량난간에 대한 신뢰성 있는 충돌성능 평가 기초자료를 제공하기 위해 교량난간의 가로보를 고내식성 합금도금강판으로 적용한 교량난간 구조시스템을 상, 하단의 2단 가로보로 Fig.1과 같이 구성하였다. 하단 보의 위치에 따른 충돌 성능을 평가하기 위해 두 가지 모델을 구성하였으며, 상단 보와 하단 보의 중심간 간격에 따라 475 model과 410 model로 구분하였다. 지주는 400MPa 인장강도를 갖는 6mm 두께의 SM400 강판을 적용하였고, 상, 하단 가로보는 490MPa의 인장강도를 갖는 고강도의 고내식성 용융합금도금강판인 3.2mm 두께의 SGMH490 강판을 적용하였다.

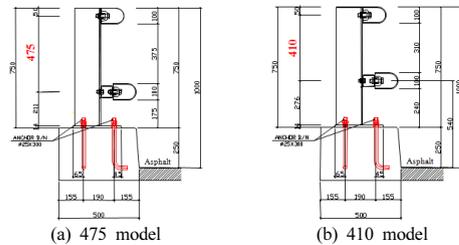


Fig. 1. Specifications of the bridge rail models

3. 충돌 시뮬레이션 평가

3.1 충돌 시험 조건 및 성능평가 기준

고내식강 적용 교량난간 실물차량 충돌시뮬레이션 평가는 2014년 2월 국토해양부 개정된 “도로안전시설 설치 및 관리지침”에 의해 수행되며, SB4등급 교량난간의 경우는 화물차를 사용한 강도 성능 평가 및 승용차를 사용한 탑승자 보호 성능 평가의 두 부분으로 이루어진다. Table 2에 강도 성능 평가 및 탑승자 보호 성능 평가 시험조건이 나타나 있다. Table 2에 제시된 충격도는 다음의 식으로 산정된다 [4].

$$IS = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3.6} \cdot \sin\theta \right)^2 \quad (1)$$

Table 2. Test conditions for simulation (SB4 level)

Test items	Impact speed, V (km/h)	vehicle mass, m (ton)	Impact angel, θ (degree)	Impact severity, IS (kJ)
Passenger Car Test	80	1.3	20	38
Truck Test	65	14.0	15	153

교량 난간의 성능은 강도 성능과 탑승자 보호 성능으로 나누어 평가하며, 강도 성능을 만족하기 위해서는 대형차량 충돌시 교량난간 부재나 결합부위의 파손 등으로 차량이 방호울타리를 돌파하지 않아야 하며, 최대 변형 거리가 0.3m 이하이어야 한다. 탑승자 보호 성능은 THIV 및 PHD를 사용하여 평가하며 다음 식을 통해 각각 계산된다 [4].

$$THIV = [v_x^2(T) + v_y^2(T)]^{1/2} \quad (2)$$

$$PHD = MAX(<\ddot{x}_c>^2 + <\ddot{y}_c>^2)^{1/2} \quad (3)$$

여기서, v_x , v_y 는 차량 좌표계에 대한 머리의 상대속도를 의미하며, T 는 탑승자의 머리의 비행시간으로 머리가 가상의 충돌면 3곳 중 어느 한 지점에 부딪힌 시간 중 최소값으로 계산되며, \ddot{x}_c 와 \ddot{y}_c 은 충돌 후 ($t > T$) 10ms 동안 측정된 가속도 평균 중 최대값을 의미한다. 식 2와 3을 통해 계산된 탑승자보호 성능 평가기준은 Table 3 같다.

Table 3. The standards for occupant protection performance

Criteria	Unit	Limit
Theoretical Head Impact velocity, THIV (Longitudinal and Lateral)	m/s (km/h)	9 (33)
Post-impact Head Deceleration, PHD (Longitudinal and Lateral)	g	20

3.2 차량 유한요소해석 모델

고내식강 적용 SB4등급 교량난간의 탑승자 보호 성능 평가를 위해 사용되는 승용차의 총 중량은 1,300kg이며, 강도 성능 평가에 사용되는 대형차의 총 중량은 14,000kg으로 규정되어 있다. 본 논문에서는 미국 NCAC(National crash analysis center)에 공개되어 있는 차량 모델 중 실차 충돌시험 차량과 가장 유사한 형태를 갖는 Dodge-Neon 승용차 모델과 HGV-16 대형차 모델을 수정하여 적용하였다 [5]. Fig. 2에 차량 모델의 전체 형상과 실물차량의 형상을 나타내었다.

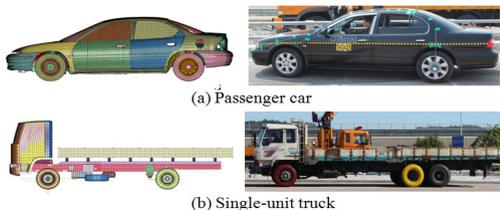


Fig. 2. Vehicle FE models and actual vehicles

3.3 교량난간 유한요소해석 모델

탑승자 보호성능 및 강도성능 평가를 위한 충돌 시뮬레이션은 외연적(explicit) 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA(version 971)를 이용하였다. 이 때, 고내식강 적용 교량난간의 유한요소 해석모델은 총 8개의 part로 구성하였으며, Table 4에 나타낸 바와 같다. 철근 및 앵커볼트는 보 요소로 모델링하였고, 연석 콘크리트와 *constrained_lagrange_in_solid 명령어를 사용하여 커풀링 하였다. 보와 지주, 전면판, 충격흡수부재의 연결은 *constrained_nodal_rigid_body 명령어를 사용하였다. Fig. 3은 각 부분의 유한요소해석 모델 형상 및 전체 형상을 나타내었다.

Table 4. Part composition for finite element analysis model

Part number	Part name	Element type	Material
101	Post(SS400-6T)	Shell	SM400
102	Front PL(2T)	Shell	SM400
103	BPL(14T)	Shell	SM400
104	Rail(3.2T)	Shell	SGMH490
105	anchor_bolt(M24)	Beam	F8T
106	Absorber(3.2T)	Shell	SM400
107	Concrete(35MPa)	Solid	CSCM
108	rebar(D16)	Beam	SD400

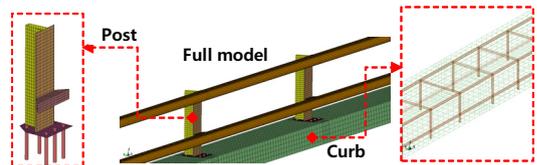


Fig. 3. Finite element analysis model for the bridge barrier

3.4 충돌해석을 위한 동적 구성모델

충돌해석에서는 준정적해석과 다르게 관성력이 존재하는데 이는 충돌체에 추가적인 하중으로 작용한다. 동적 충돌 시뮬레이션에서는 동적마찰계수 및 동적 재료물성 변화 등이 함께 고려되어야 한다. 이 중 동적 재료물성 변화는 동해석 결과에 있어서 가장 큰 영향을 미치는데 Fig. 4와 같이 재료 변형률 속도에 따른 경화능에 차이가 발생하기 때문이다. 변형률 속도에 따른 강재의 동특성 변화는 Cowper-Symonds 구성 모델이 대표적으로 사용된다. 차량 충돌의 경우 통상적으로 중저속 충돌이며, 충돌 시 열 발생으로 인한 연화를 고려할 필요가 없

기 때문에 본 논문에서는 중저속 충돌해석에 적합한 Cowper-Symonds 구성 모델을 적용한다. 식 4는 강재의 변형률 속도 의존성을 고려하기 위해 본 논문에서 사용한 Cowper-Symonds 구성방정식이다.

$$\sigma_{d-Y} = \sigma_{s-Y} \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right) \quad (4)$$

여기서, σ_{d-Y} 와 σ_{s-Y} 는 각각 동적 및 정적 유동응력을 의미하고, $\dot{\epsilon}$ 은 소성변형률 속도를 C 와 p 는 Cowper-Symonds 동적 경화 상수를 의미한다. 변형률 속도에 따른 강재의 동적 경화 상수를 도출하기 위해서는 일반적으로 변형률 속도에 따른 고속인장실험 수행한 후, 데이터 회귀분석을 통해 얻게 된다. 본 논문에서는 기존 문헌에서 보고하고 있는 강재의 항복강도별 Cowper-Symonds 구성 모델의 동적 경화 상수를 도입하여 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. Table 5에 강재에 대한 Cowper-Symonds 재료 상수가 제시된다.

Table 5. Cowper-Symonds materials constant values used for steel materials [6, 7]

Evaluation items	Nominal steel grade	
	SM400	SGMH490
Static yield stress, σ_{s-Y}	235MPa	315MPa
Material constant, C	40	3,200
Material constant, p	5	5

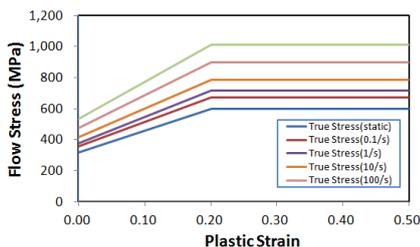


Fig. 4. Bilinear hardening curve of SGMH490

3.5 충돌 시뮬레이션 성능평가 결과

앞 절에서 언급한 해석모델과 시뮬레이션 조건에 하단 보 최적 위치 선정과 레일 소재 강도의 효과를 검증하기 위해 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 충돌 시뮬레이션에 사용된 기본 모델의 주요 변수는 상/하단 보의 간격(410mm, 475mm)과 가로보의 소재 강도(400MPa, 490MPa)로 선택하였다.

3.5.1 기본 모델의 탑승자 보호성능 평가 결과

보 부재의 강도가 490MPa, 400MPa이고 상단 보와 하단 보의 중심간 간격이 410mm, 475mm인 경우에 대한 소형차의 충돌 시뮬레이션 결과에 따른 탑승자 보호성능 평가 결과가 Table 6에 제시된다. Table에 나타난 바와 같이 THIV와 PHD는 모두 기준치인 33km/h값과 20g를 만족하고 있다. 탑승자 안정성 측면에서 THIV의 경우 400MPa이 유리하고, PHD의 경우 490MPa이 유리한 것으로 분석되지만, 결과 차이가 미미하여 최종 모델을 도출하기 위해서는 대형차의 강도성능 평가 결과를 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Table 6. Evaluation results of passenger safety

Rail strength	Model	THIV(km/h)	PHD(g)	Remark
490MPa	410 model	30.0	8.9	PASS
	475 model	29.1	7.9	PASS
400MPa	410 model	29.8	7.5	PASS
	475 model	28.3	8.3	PASS

3.5.2 기본 모델의 강도성능 결과

대형차 충돌 시뮬레이션을 통해 얻어진 교량난간의 동적 최대변위를 계측한 결과 Table 7에 제시된 바와 같이 모두 기준치인 300mm의 범위를 충족하고 있다. 상단 보와 하단보의 중심간격이 410mm인 경우가 475mm인 경우에 비해 최대 변위가 작게 도출되었으며, 가로보의 인장강도가 490MPa인 경우가 400MPa에 비해 최대 변위가 작게 평가되었다. 이 결과로부터 교량난간의 강도성능 측면에서 상/하단보의 간격은 410mm로 가로보의 인장강도는 490MPa를 최종 선택하는 것이 합리적이라고 판단된다.

Table 7. Evaluation results of structural strength

Rail strength	Model	Max. Displ.(mm)	Remark
490MPa	410 model	52.2	PASS
	475 model	53.3	PASS
400MPa	410 model	55.2	PASS
	475 model	67.1	PASS

3.5.3 수정 모델의 충돌 성능 평가 결과

총 4가지 충돌 시뮬레이션 성능 평가 결과로 선정된 490MPa-410 model에 대해서 시공성을 고려하기 위하여 Fig. 5와 같이 하단 가로보와 지주 사이의 충격흡수 부재를 생략한 수정 모델을 고려하였다.

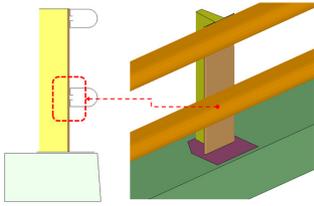


Fig. 5. Modified model

충격흡수부재를 생략한 수정모델의 탑승자 보호성능 평가 결과 충격흡수부재 생략에 따라 THIV는 변동이 거의 없으나 1차 충돌 후, PHD 값이 약간 증가하는 효과가 발생하였다. 그러나, THIV와 PHD가 30km/h와 11.6g로 도출되어 모두 탑승자 보호 성능 기준을 모두 만족하는 것으로 도출되었기 때문에 충격흡수부재 제거로 인한 탑승자 안정성 문제는 미미할 것으로 판단된다. 또한, 대형차 충돌시 교량난간의 강도성능 평가 결과, Fig. 6과 같이 최대 동적 변가 약 127mm로 예측되고, 잔류 변위가 약 60mm로 산출되어 변위 허용 기준인 300mm를 여유있게 만족한 것으로 나타났다. 따라서, 교량난간의 제작비와 시공성을 고려할 때 충격흡수부재를 제거할 필요성이 제기된다.

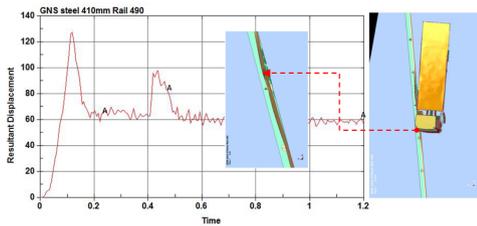


Fig. 6. Deformation of the modified model

4. 실물 차량 충돌시험

본 절에서 최종 도출된 수정모델 해석결과와 실물 차량 충돌시험 결과를 비교하여 제시한다. 최종 수정 모델은 가로보의 인장강도가 490MPa이며, 상/하단 가로보의 간격이 410mm이고, 하단보와 지주 사이의 충격흡수부재가 제거되었다. Fig. 7은 최종 수정모델을 충돌시험장에 설치한 전경을 나타낸다. 실물 차량 충돌 시험은 2014년 4월에 경기도 화성소재의 교통안전공단 자동차 안전연구원 방호울타리 시험장에서 수행되었다.



Fig. 7. Installation view of final modified bridge barrier for the actual crash test

4.1 탑승자 보호성능 평가 결과

최종 수정모델의 소형차 충돌시험 결과, THIV와 PHD가 31km/h와 5g로 각각 도출되어 최종적으로 탑승자 보호성능 평가 기준을 만족하였다. 충돌 시험 결과 THIV는 해석값인 30km/h와 큰 차이가 없었으나, PHD 값은 해석에 비해 시험결과가 상대적 낮게 계산되어, 실물 차량 충돌시험에서 소형차 1차 충돌 후 차량의 방향 선회가 해석 결과에 비해 잘 이루어지고 있는 것으로 추정할 수 있다. Fig. 8에 소형차 충돌시험과 시뮬레이션 결과가 비교 제시된다.

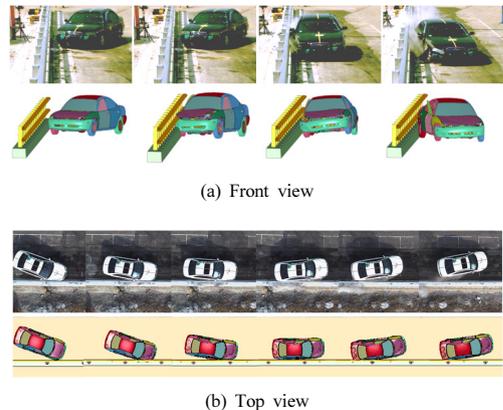


Fig. 8. Comparison of actual crash tests and simulation results for passenger car

4.2 강도성능 평가 결과

최종 수정모델에 대한 대형차 충돌시험 결과는 해석값인 127mm에 비해 다소 큰 값인 220mm로 예측되었지만, 교량난간 변형성능 기준인 300mm를 만족하였다. 충돌시 차량은 교량난간을 돌파하지 않고 부드럽게 방향이 선회되었으며, 충돌시 구성 부재의 비산이나 충돌 후 가로보 이음부 등의 파손은 발생하지 않아 구조적 강도성능 기준을 최종적으로 만족하였다. Fig. 9에 대형차 충돌시험과 시뮬레이션 결과가 비교 제시된다.

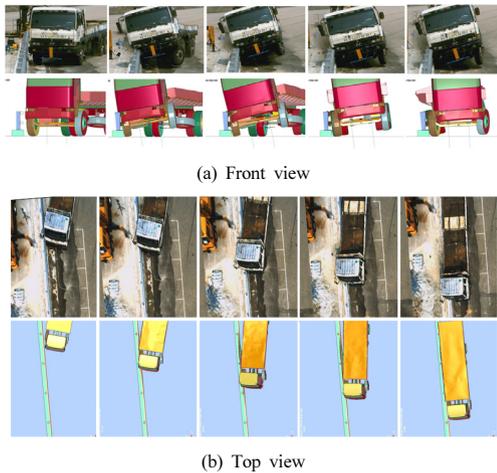


Fig. 9. Comparison of actual crash tests and simulation results for single-unit truck

4.3 충돌시험 결과 종합

490MPa급 고내식성 3성분계 용융합금도금강재를 적용한 SB4등급 실물 차량 충돌시험 결과, 탑승자 보호성과 강도성능 모두 허용 기준에 만족하였다. 특히, 사용강재의 동특성 구성모델을 도입한 충돌 시뮬레이션 결과, 시뮬레이션으로 얻어진 거동이 실물 차량 충돌시험으로 얻어진 거동과 매우 유사한 것으로 도출되었다. 따라서 신규 제품 개발 시, 고가의 시험료가 요구되는 실물 차량 충돌시험 수행에 앞서, 잘 정립된 해석모델을 활용하여 개발 제품의 탑승자 보호성과 강도 성능을 평가하는 것은 시험 실패 요인을 줄일 수 있는 방안이 될 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 도로안전시설물의 공용중 부식 발생으로 인한 기능 손실을 줄일 수 있는 방안으로 고내식성 용융합금도금강판을 적용한 도로안전시설물을 제안하고, 고내식성 용융합금도금강판을 적용한 도로안전시설물 제품에 대한 신뢰성 있는 충돌성능 평가 기초자료를 제공할 목적으로 고내식강이 적용된 교량난간 제품에 대한 충돌 시뮬레이션 및 실물 차량 충돌시험 연구를 수행하였다. 실물 차량 충돌 시험 결과, 제안된 고내식성 용융합금도금 강판 적용 교량난간은 충돌성능 평가 기준을 모두 충족시켜 현장 적용을 앞두고 있다. 또한, 시뮬레이션 및 실차충돌 시험 비교 결과, 변형률 속도 의존성을

고려할 수 있는 정교한 동특성 재료모델을 도입할 경우, 충돌 시뮬레이션을 통해 얻어지는 충돌 거동과 실물 차량 충돌 시험 결과가 매우 유사한 것으로 도출되었다. 이는 충돌 시험에 앞서 잘 정립된 충돌 시뮬레이션 모델을 활용하면 이는 고가의 시험료를 반복적으로 지출하지 않고서도 신강종 적용 신제품의 사전 거동예측이 가능함을 의미하므로, 향후 시뮬레이션을 통한 신강종 검토가 확대되기를 기대한다. 궁극적으로는 고내식성 용융합금도금강판의 수요가 확대되어 도로시설물의 유지관리 비용이 크게 절감되기를 기대해본다.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), *Guideline for Installation and Management of Road Safety Facilities*, MOLIT, Korea, 2014.
- [2] Korean Expressway Corporation, *Expressway Construction Guide Specification*, EX, Korea, 2012.
- [3] Korean Agency for Technology and Standards, *Hot-dip zinc-aluminium-magnesium alloy-coated steel sheets and coils (KS D 3030)*, KATS, Korea, 2013.
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), *Manual for Full-scale Vehicle Crash Testing of Safety Features*, MOLIT, Korea, 2015.
- [5] National Crash Analysis Center (NCAC). Available at <http://www.ncac.gwu.edu>.
- [6] G. Cowper, P. Symonds, Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Loading of Cantilever Beams, *Brown Univ. Applied Mathematics Report*, Report No. 28, 1957.
- [7] J. K. Paik, A. K. Thayamballi, *Ultimate limit state design of steel-plated structures*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, January, 2003.

노 명 현(Myung-Hyun Noh)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (구조공학 석사)
- 2010년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (구조공학 박사)
- 2009년 11월 ~ 2014년 5월 : (재)포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원

- 2014년 5월 ~ 현재 : 포스코 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹 책임연구원

<관심분야>

구조공학, 폭파/충돌/연성 해석