

# 용융합금도금 강판 적용 노측용 방호울타리 충돌 안전성 평가 해석 사례 연구

노명현<sup>\*</sup>

포스코 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹  
(2016. 2. 5. 접수 / 2016. 3. 17. 수정 / 2016. 4. 13. 채택)

## A Simulation Case Study on Impact Safety Assessment of Roadside Barriers Built with High Anti-corrosion Hot-dip Alloy-coated Steel

Myung-Hyun Noh<sup>\*</sup>

Structure Research Group, Steel Solution Marketing Department, POSCO  
(Received February 5, 2016 / Revised March 17, 2016 / Accepted April 13, 2016)

**Abstract :** As the world's industrial development quickens, the highways and regional expressways have been expanding to serve the logistics and transportation needs of people. The burgeoning road construction has led to a growing interest in roadside installations. These must have reliable performance over long periods, reduced maintenance and high durability. Steel roadside barriers are prone to corrosion and other compromises to their functionality. Therefore, using high anti-corrosion steel material is now seen as a viable solution to this problem. Thus, the objective of this paper is to expand the scope of applications for high anti-corrosion steel material for roadside barriers. This paper assesses the impact safety such as structural performance, occupant protection performance and post-impact vehicular response performance by a simulation review on roadside barriers built with high strength anti-corrosion steel materials named as hot-dip zinc-aluminium-magnesium alloy-coated steel. The simulation test results for the roadside barriers built with high strength anti-corrosion steels with reduced sectional thickness meet the safety evaluation criteria, hence the proposed roadside barrier made by high strength and high anti-corrosion hot-dip zinc-aluminium-magnesium alloy-coated steel will be a good solution to serve safe impact performance as well as save maintenance cost.

**Key Words :** roadside barrier, hot-dip zinc-aluminium-magnesium alloy-coated steel, structural adequacy, passenger protection performance, vehicle trajectory

### 1. 서론

산업화가 가속화됨에 따라 지역간 물류수송과 운송수단을 제공하기 위해 고속도로와 지방국도가 급격히 확충되고 있다. 이러한 도로 확충과 함께 차량방호 안전시설에 대한 관심도 높아지고 있다. 특히, 2010년 7월 발생한 인천대교 버스 추락 사고는 버스가 승용차와 충돌한 후 가드레일 뚫고 추락하여 많은 인명 피해를 야기한 경우로 차량방호 안전시설의 중요성을 인식시켰던 중요한 사고사례가 되었다. 그 여파로 이듬해 2012년 가드레일 충돌안전 성능을 강화하기 위한 국토교통부의 '도로안전시설 설치 및 관리 지침(차량방호 안전시설 편)'이 개정되기도 하였다.

차량방호 안전시설이라 함은 주행 중 방향을 잘못 잡은 차량이 길 밖 또는 대향 차로 등으로 이탈하는 것을 방지하거나 차량이 구조물과의 직접적인 충돌을 방지하여 차량 탑승자 및 차량과 보행자 또는 도로변의 주요 시설을 안전하게 보호하기 위하여 설치하는 시설을 말한다. 이러한 차량방호 안전시설물은 대표적으로 방호울타리가 있으며 설치 위치에 따라 교량용, 중앙분리대용, 노측용으로 구분된다. 이러한 방호울타리 제품들은 국토교통부에서 제시한 9개 등급별 충돌시험조건을 이용해 소형차(승용차) 및 대형차(트럭) 충돌에 대해 탑승자에 대한 보호성능과 방호울타리에 대한 강도성능을 검증하여 충돌안전성을 검증받고 사용하도록 되어 있다<sup>1-2)</sup>.

한편, 유지관리 측면에서 내구성 강한 방호울타리는

<sup>\*</sup> Corresponding Author : Myung-Hyun Noh, Tel : +82-32-200-2460, E-mail : mnoh@posco.com  
POSCO Global R&D Center, 100, Songdogwahak-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21985, Korea

장기간 동안 차량방호라는 본연의 기능을 유지하면서 공용 중 녹발생에 따른 미관저하의 문제를 동시에 해결할 수 있기 때문에 최근 차량방호 안전시설 분야에서 관심이 대두되고 있다. 주로 용융아연도금 처리된 강판으로 제작되는 차량방호 안전시설은 겨울철 염화나트륨과 염화칼슘과 같은 염소계 제설제에 의해 부식이 가속화되는 특징이 있어 설계수명을 다하지 못하고 교체되는 경우가 빈번하다. 특히, 제주도를 비롯한 도서해안 지역은 공기 중 염분농도가 높고 해풍이 잦으며 강우량 또한 많아 차량방호 안전시설의 소재로 용융아연도금 처리된 강판을 적합하지 않을 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 2012년 국토부는 “도로안전시설 설치 및 관리지침(차량방호안전시설 편)”의 방식처리 편을 개정하였고 한국도로공사는 “고속도로 전문시방서”의 방호울타리편 도금관련 기준을 개정함으로써 내식성이 우수한 신강종이나 방식성능을 향상시킬 수 있는 신공법도 과학적으로 입증되면 언제든지 적용이 가능하도록 개정하였다<sup>2,3)</sup>.

우수한 내식성을 보유한 신강종으로는 대표적으로 한국의 P사가 생산하는 PosMAC과 일본의 N사가 생산하는 ZAM 그리고 S사에서 생산하는 Super-dimer를 들 수 있다. 이러한 고내식성 강재는 기존 용융아연도금 처리된 강판 대비 5~10배 이상 내식성능을 확보하기 위해 아연 뿐만 아니라 마그네슘과 알루미늄 등을 용융합금도금 처리하고 있다. 이러한 내식성이 뛰어난 신강종을 차량방호 안전시설에 적용할 경우 앞서 언급한 내구성 향상을 통해 장기간 안전성과 미관성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 용융아연도금 처리한 강판대비 상대적으로 고가인 용융합금도금 강판을 차량방호 안전시설 소재로 널리 활용될 수 있도록 고내식성의 용융합금도금 강판을 적용하면서 제작 원가도 절감하고 동시에 차량방호 안전성능을 유지시킬 수 있는 방안에 대해 검토하여 제시하고자 한다. 특히, 본 논문에서 검토된 고내식성 용융합금도금강판이 적용된 노측용 방호울타리의 충돌안전 성능 평가 자료는 차량방호 안전시설물 신규제품 개발시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 궁극적으로 차량방호 안전시설 제품에 고내식성 용융합금도금 강판이 확대 적용됨으로써 내식성 향상에 따른 유지관리 비용 절감과 안전성 향상에 따른 사회/경제적 손실비용이 절감되기를 기대한다.

## 2. 충돌 안전성과 경제성 확보 방법

기존 일반구조용 강판(KS D 3503 SS400)을 용융아

연도금 처리하여 충돌시험을 합격한 제품들을 동일강도의 고내식성 용융합금도금 강판(KS D 3030 SGMH400) 소재로 변경할 경우 시험성적서에 표기된 재료명이 일치하지 않아 실물 차량 충돌시험 재수행을 요구할 가능성이 있다. 그러나, 용융합금도금 처리한 강재는 충돌시험을 합격한 제품에 적용되는 일반 구조용 강판을 모재(Base metal)로 사용하기 때문에 도금처리 방식만 상이할 뿐 충돌안전 성능에 영향을 미치는 기계적 물성은 동일하다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 가령, 해안가 고염분 농도 지역 도로에 내식성을 향상시킨 차량 방호울타리 제품 설치를 요구할 경우, 충돌성능 인증제품 소재를 동일 강도의 고내식성 강재로 대체함으로써 쉽게 내식성을 강화할 수 있지만, 재료명칭이 상이하기 때문에 실물 충돌시험을 재수행해야 한다고 요구한다면 관련 업계의 시험비 부담만 가중될 수밖에 없다. 따라서, 용융합금도금 품질검사증명서(Mill test certification) 규격에 일반구조용 압연강재의 모재 명칭을 병용표기하여 제공하면 시험성적서 상의 재료명 불일치로 인한 문제점은 없을 것으로 판단된다.

본 논문은 내식성 향상을 목적으로 용융아연도금 처리한 강판을 고내식성의 용융합금도금강판으로 단순히 대체하는 것을 검토한 것은 아니다. 그 이유는 상대적으로 고가인 용융합금도금 강판을 차량방호 안전시설에 널리 확대 적용되기 위해서는 차량방호 성능을 유지하면서도 경제성이 전제가 되어야 하기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 일반강도의 용융아연도금 강판을 고강도의 용융합금도금강판으로 변경하고 단면 두께 저감을 통한 경제성 확보와 고강도에 따른 차량방호 성능을 유지하는 방법을 검토하여 제시하였다. 차량방호 성능 검토는 외연적(Explicit) 범용 유한요소해석 프로그램인 Ls-dyna를 활용한 3차원 충돌 시뮬레이션을 통해 검토하였다.

## 3. 충돌 안전성 평가 기준

차량방호 안전시설 등급은 대형차 충격도(운동에너지)에 따라 구분되며, 시설물의 구조적 적합성과 탑승자의 위험도 여부를 평가하기 위해 각 등급별로 실물 차량을 통한 강도성능 평가시험과 탑승자 보호성능 평가시험을 수행한다. 충돌시험이 종료된 방호울타리는 충돌 안전성을 공인받기 위하여 구조 성능, 탑승자 보호 성능, 충돌 후 차량 거동의 3가지 평가항목에 대해서 충돌 안전성 평가 기준 만족 여부를 검토하게 된다.

본 논문에서 검토된 노측용 방호울타리의 평가항목

별 충돌 안전성 평가 기준이 Table 1에 제시된다. 충돌 안전성 측면에서 구조적 적합성은 매우 중요한 평가 기준을 제공한다. 구조적 적합성을 충족하지 못하면 차량 방호 성능이 제대로 발휘되지 못하고 추락사고로 이어져 치명적인 인명피해를 발생시키기 때문이다.

일반적으로 구조적 적합성이 검증된 후, 탑승자 보호 성능에 관한 평가를 수행하는데, 이때 탑승자의 안전지수로 THIV(Theoretical head impact velocity) 및 PHD(Post-impact head deceleration)가 활용된다. 이러한 안전지수를 산정하기 위해서는 시험차량 무게중심 위치에 센서를 부착하고 계측된 가속도와 각속도 자료를 활용한다. THIV는 탑승자가 자유이동 공간거리(Flail space distance)로 정의되는 종방향과 횡방향으로 각각 0.6 m, 0.3 m에 도달했을 때 시간  $T$ 에서의 탑승자와 차량간의 상대속도를 의미하며 다음 식을 통해 산정한다.

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

여기서,  $v_x$ 와  $v_y$ 는 차량 좌표계에 대한 머리의 상대속도를 의미하며,  $T$ 는 탑승자의 머리의 비행시간으로 머리가 가상의 충돌면 3곳 중 어느 한 지점에 부딪힌 시간으로, 다음 식을 만족하는  $T$ 중 최소값이 된다.

$$x_b(T) = D_x + x_0, y_b(T) = D_y, \text{ 또는 } y_b(T) = -D_y \quad (2)$$

여기서,  $x_b$ 와  $y_b$ 는 차량 좌표계에 대한 머리의 위치 좌표를 의미하며,  $D_x$ 와  $D_y$ 는 최초 머리의 위치로부터 충돌면까지의 종방향과 횡방향 거리를 의미한다.

PHD는 차량이 1차 충돌로 인해 발생하는 2차 충돌 상황( $t > T$ )에서 차량 내부공간의 가상 면에 부딪힐 때 머리가 받게 되는 평균 가속도 중에서 최대값을 의미하며 다음 식을 통해 산정한다.

$$PHD = MAX(\langle \ddot{x}_c \rangle^2 + \langle \ddot{y}_c \rangle^2)^{1/2}, t > T \quad (3)$$

여기서,  $\ddot{x}_c$ 와  $\ddot{y}_c$ 은 충돌 후 ( $t > T$ ) 10 ms 평균 가속도를 의미하며, PHD는 탑승자의 머리가 차량 내부의 벽에 부딪힌 후 차량의 충돌이 끝날 때 까지 벽에 밀착되어  $t > T$  이후 차량 가속도는 탑승자의 머리가 받는 가속도와 동일하다고 가정하여 산정한다. 탑승자의 보호 성능은 탑승자 보호 성능 평가를 위한 시험 조건을 적용하여 Table 1에서 제시한 THIV와 PHD 한계값(33 km/h, 20 g)을 적용하여 평가한다. 또한, 충돌로 발생한 비산물의 차량 안 침범여부와 차량과 시설물의 직접적인 충돌로 인한 차량내부공간의 변형이 한계값을 초과하는지 여부를 계측하여 탑승자 보호 성능을 평가한다.

충돌 후 차량 궤적의 안전성 평가는 충돌 후 차량 거동이 후속차량에 미치는 영향을 평가하는 것으로 충돌 후 차량이 전도되거나 급정지하여 주행 차량에 영향을 미치지 않도록 Fig. 1에 제시된 탈출박스(Exit box)개념을 활용하여 평가한다. 안전한 차량 궤적을 가지는 방호울타리는 충돌 후 차량이 부드럽게 방향을 선회하도록 유도하는데, 전형적으로 탈출박스를 통과할 때 발생한다. 한편, 충돌 후 차량 응답에 대한 안전성 평가는 차종과 무관하게 필요하므로 대형차와 소형차 시험에서 모두 Table 1의 평가기준을 만족해야 한다.

Table 1. Safety evaluation guidelines<sup>1-2,4)</sup>

Evaluation factors	Evaluation criteria	Test vehicle									
Structural adequacy (structural performance)	A. The vehicle should not penetrate the test article by breaking its members or joints	Truck, passenger car									
	B. Maximum measured deflection of the test article after the crash test should be 1.0 m or less	Truck, passenger car									
	C. Other debris of 2 kg or more from an impact with the test article should not be scattered with 2 m or longer in front of that.	Truck, passenger car									
Occupant risk (occupant protection performance)	D. THIV and PHD should satisfy the following limits: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Criteria</th> <th>Unit</th> <th>Limit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>THIV(horizontal/vertical)</td> <td>km/h</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>PHD(horizontal/vertical)</td> <td>g</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table> note) g : 9.8 m/s <sup>2</sup>	Criteria	Unit	Limit	THIV(horizontal/vertical)	km/h	33	PHD(horizontal/vertical)	g	20	Passenger car
	Criteria	Unit	Limit								
THIV(horizontal/vertical)	km/h	33									
PHD(horizontal/vertical)	g	20									
	E. Other debris from the test article should not penetrate or show potential for penetrating the occupant compartment. Deformation of the occupant compartment after collision should not exceed the following limits: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformation of a roof of the vehicle should be 100 mm or less</li> <li>• Deformation of a windshield should be 75 mm or less and no tear should happen by direct contact with the test article</li> <li>• No shattering of a side window should happen by direct contact with the test article</li> <li>• Deformation of interior vehicle at the front door area should be 230 mm or less</li> </ul>	Truck, passenger car									
Vehicle trajectory (post-impact vehicular response Performance)	F. The vehicle should remain upright during after collision. The maximum roll and pitch angles are not to exceed 75 degrees	Truck, passenger car									
	G. All wheel tracks of the vehicle should not cross the parallel line within the distance B.	Truck, passenger car									
	H. The vehicle should not cross the outmost lane if it is stopped in the exit box.	Truck Passenger Car									



Symonds 모델을 적용하였다. 식 4로부터 강재의 동적항복 강도는 변형률 속도 함수로 표현될 수 있다.

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

여기서,  $\sigma_{d-y}$ 와  $\sigma_{s-y}$ 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 고속인장시험 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 2에 강재에 대한 Cowper-Symonds 재료 상수를 제시하였다.

Table 2. Safety evaluation guidelines<sup>5,7)</sup>

Evaluation items	Nominal steel grade	
	SGMH400	SGMH490
Static yield stress, $\sigma_{s-y}$	235 MPa	315 MPa
Material constant, $C$	40	3,200
Material constant, $p$	5	5

#### 4.4 충돌차량 유한요소모델

SB2 및 SB4등급 노측용 방호울타리의 충돌 안전성 평가에 사용된 충돌차량의 유한요소모델이 Fig. 3에 제시되어 있다. 탑승자 보호 성능 평가를 위해 사용되는 승용차의 총 중량은 SB2등급과 SB4등급 모두 1,300 kg이며, 강도 성능 평가에 사용되는 화물차의 총 중량은 SB2등급의 경우 8,000 kg으로 SB4등급은 14,000 kg으로 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

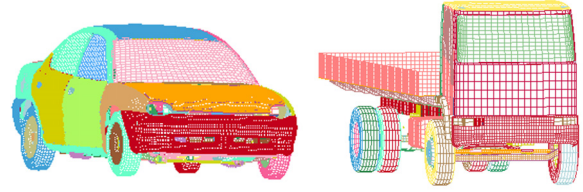


Fig. 3. Vehicle FE models and actual vehicles.

승용차 모델과 HGV-16 대형차 모델을 수정하여 적용하였다<sup>8)</sup>.

### 5. 충돌 안전성 평가 결과

#### 5.1 구조 안전성 평가 결과

일반강도(SGMH400) 및 고강도(SGM490) 용융합금도금강판을 적용하고 단면두께를 기준 단면의 89%범위까지 조정된 SB2및 SB4등급 대형차 충돌 시뮬레이션으로부터 예측된 최대 동적 처짐 결과를 Table 3에 각각 제시하였다. 검토한 모든 케이스들은 Table 1에 제시된 노측용 방호울타리의 허용 처짐 기준인 1.0 m

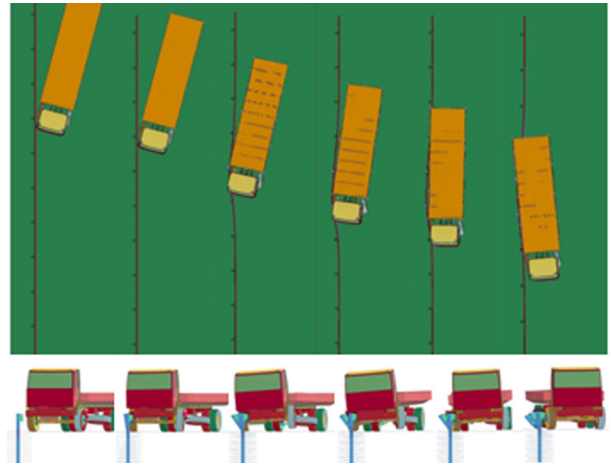


Fig. 4. Sequential simulation results (truck) for the case 8 made with SGMH490 of SB4 level.

Table 3. Results for maximum dynamic deflection of SB2 and SB4 level roadside barriers

Safety barrier level		SB2 level				SB4 level			
Simulation case		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
Test condition		Truck 8,000 kg / 65 km/h / 15°				Truck 14,000 kg / 65 km/h / 15°			
Material		SGMH400	SGMH490			SGMH400	SGMH490		
Thickness of each part (mm)	Post	4.5	4.5	4.275	4	4.5	4.5	4.275	4
	Reinforcing post	4.3	4.3	4.085	3.827	4.5	4.5	4.085	4
	Upper rail	4	4	3.8	3.56	4.8	4.8	4.56	4.272
	Lower rail	-	-	-	-	2.5	2.5	2.375	2.225
	Block-out	4	4	3.8	3.56	4	4	3.8	3.56
Maximum dynamic deflection (mm)		805	756	852	839	558	536	561	589



Table 4. Results for passenger's safety evaluation

Safety barrier level	SB2 level				SB4 level			
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
Simulation case								
Test condition	Passenger car 1,300 kg / 80 km/h / 20°				Passenger car 1,300 kg / 100 km/h / 20°			
THIV (km/h)	15.7	15.4	15.3	14.5	21.3	20.8	21.3	20.1
PHD (g)	17.0	15.3	12.4	18.9	8.8	7.7	10.2	11.6

이하를 만족시켰다. 또한, Fig. 4에서 보이는 바와 같이 모든 케이스에서 충돌 후 화물차가 노측용 방호울타리를 돌파하지 않고 부드럽게 선회하고 있음을 알 수 있다. 또한, 차량충돌 시뮬레이션 과정에서 2 kg 이상의 파편 비산현상이 전혀 관측되지 않아 구조적 안전성 평가 결과는 모든 기준을 통과한 것으로 나타났다.

### 5.2 탑승자 안전성 평가 결과

고강도 및 단면 두께 감소에 따른 탑승자의 충돌 안전성 평가를 위하여 Table 4에 제시된 시험 조건을 통해 Fig 5에서 보이는 바와 같은 SB2등급과 SB4등급 소형차 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 검토한 모든 케이스들은 Table 4에 보이는 바와 같이 Table 1에서 제시한 탑승자 안전성능 평가 기준인 탑승자 충돌속도 (THIV)와 충돌가속도(PHD) 항목을 모두 통과되는 것으로 예측되었다. 특히, 용융합금도금강판을 고강도화하여 단면 두께를 저감할 경우, 탑승자 충돌속도 측면에서 일정 수준의 성능 개선이 예측되는바 충돌 안전성을 보증할 수 있는 최대 단면 두께 감소율을 추가적으로 검토할 필요성이 제기된다. 또한, 충돌로 인한 비산물이 차량 침입은 관측되지 않았고, 차량내부공간의 변형도 Table 1에서 제시한 허용 기준을 모두 만족하여 탑승자 안전성 평가 결과는 모든 기준을 통과한 것으로 나타났다.

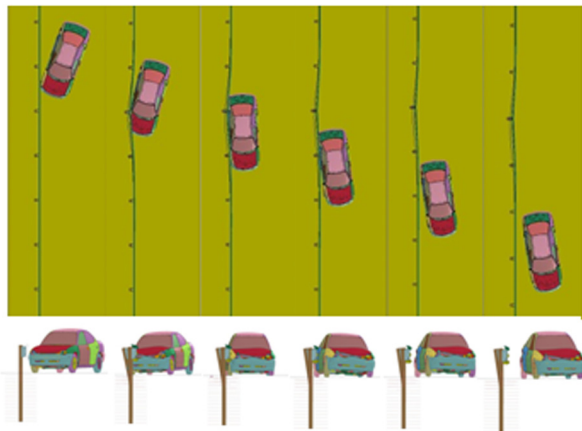


Fig. 5. Sequential simulation results (passenger car) for the case 8 made with SGMH490 of SB4 level.

### 5.3 충돌 궤적 안전성 평가 결과

화물차 및 승용차의 노측용 방호울타리 충돌 전·후 궤적 분석 결과, 모든 케이스에서 대형차 탈출박스 범위(A:8.53 m, B:20 m)와 소형차 탈출박스 범위(A:4.78 m, B:10 m)를 통과되는 것으로 관측되었다. 또한, 충돌 시뮬레이션 수행 후 각 케이스에 대한 차량의 시간대별 Roll과 Pitch 각도 분석 결과 허용치인 75°를 여유있게 통과하여 충돌차량의 전복과 승월 및 인접차선으로의 진입 가능성은 없는 것으로 분석되었다.

## 4. 결론

본 논문에서는 내식성이 기존 용융아연도금강판 대비 우수하여 장기간 뛰어난 내구성 발현으로 차량방호라는 본연의 기능을 유지함과 동시에 공용 중 녹발생으로 인한 미관저하 문제를 해결할 수 있는 노측용 방호울타리 소재로 용융합금도금강판을 제안하였다. 특히, 기존 용융아연도금강판 대비 제작원가를 절감하기 위하여 용융합금도금강판을 고강도화하여 단면 두께를 일정수준 저감시키는 경우 충돌 안전성이 유지되는 것이 확인되어 고내식성 용융합금도금강판 적용 노측용 방호울타리 신규제품 개발시 유용한 참고자료가 될 것으로 판단된다.

## References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "Manual for Full-scale Vehicle Crash Testing of Safety Features", MOLIT, Korea, 2015.
- 2) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "Guideline for Installation and Management of Road Safety Facilities", MOLIT, Korea, 2014.
- 3) Korean Expressway Corporation, "Expressway Construction Guide Specification", EX, Korea, 2012.
- 4) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "Manual for Assessing Safety Hardware", AASHTO, Washington, DC, 2009.
- 5) G. Cowper and P. Symonds, "Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Loading of Cantilever Beams", Brown

- Univ. Applied Mathematics Report, Report No. 28, 1957.
- 6) G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strain, Strain Rates Temperatures and Pressures", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp.31-48, 1985.
  - 7) J. K. Paik and A. K. Thayamballi, "Ultimate Limit State Design of Steel-plated Structures", John Wiley & Sons, Chichester, UK, January, 2003.
  - 8) National Crash Analysis Center (NCAC), Available at <http://www.ncac.gwu.edu>.