

스마트하이웨이 종방향 방호울타리 안전성능 평가를 위한 충돌조건

Impact Condition of Safety Performance Evaluation for Longitudinal Barriers of SMART Highway

김동성* · 김기동** · 고만기*** · 김광주****

Kim, Dong Seong · Kim, Kee Dong · Ko, Man Gi · Kim, Kwang Ju

Abstract

To minimize the degree of damage for the SMART highway's punctuality and safety after car-barrier collisions, the impact condition for longitudinal barriers of SMART highway was determined to be quite larger than the existing maximum impact condition. The impact condition consists of impact vehicles, impact velocities, and impact angles. To consider the occupant safety of passenger cars as much as possible, a small car with high risk during impact was selected as the impact vehicle for the evaluation of occupant risk. The impact velocity was determined to be 20% larger than the existing maximum impact velocity in order to include accident impact velocities as much as possible. The impact angle was determined to include most of expected accident impact angles. Computer simulations using various impact conditions were conducted for the existing domestic highest-performance medium and roadside barrier. How the suggested impact condition has an effect on the occupant safety was investigated. The existing domestic highest-performance medium and roadside barriers could not satisfy the suggested impact condition. New high-performance longitudinal barriers are required to minimize the degree of damage for the SMART highway's punctuality and safety after car-barrier collisions.

key words : Impact Condition, Longitudinal Barrier, Safety Performance Evaluation, Computer Simulation

요 지

충돌사고시 스마트하이웨이의 정시성과 안전성의 손상정도를 최소화 하도록 스마트하이웨이의 종방향 방호울타리 충돌조건으로 기존의 충돌조건보다 상당히 상향된 충돌조건이 결정되었다. 충돌조건은 충돌차량, 충돌속도, 충돌각도로 구성된다. 가능한 많은 승용차의 탑승자 안전을 고려할 수 있도록 충돌시 피해가 크게 나타나는 작은 차량을 충돌차량으로 선정 하였다. 가능한 많은 사고 충돌속도를 포함하도록 기존의 충돌속도보다 20% 큰 충돌속도가 결정되었다. 충돌각도는 예상되는 사고 충돌각도를 거의 모두 포함하도록 결정되었다. 기존의 국내 최고성능등급의 종방향 방호울타리에 대하여 다양한 충돌조건을 적용한 시뮬레이션 실험을 수행하고 그 결과를 분석하여 제시된 스마트하이웨이 충돌조건이 탑승자 안전에 미치는 영향을 파악하였다. 기존의 국내 최고성능등급의 종방향 방호울타리는 제시된 스마트하이웨이 충돌조건을 만족하지 못하였다. 충돌사고시 스마트하이웨이의 정시성과 안전성의 손상정도를 최소화 하기 위해서 새로운 고성능의 종방향 방호울타리가 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 충돌조건, 종방향 방호울타리, 안전성능 평가, 컴퓨터 시뮬레이션

1. 서 론

미래사회의 변화요구에 따른 도로기술의 발전방향으로 제시되고 있는 스마트하이웨이 사업은 안전성 강화, 이동성 강화, 편리성 강화를 목표로 하는 도로기술에 관한 전반적인 연구개발 사업이다. 성공적인 스마트하이웨이의 건설을 위해서는 다양한 분야의 도로기반시설과 관련된 핵심기술의 개발이 뒷받침되어야 한다. 충돌사고시 스마트하이웨이의 안전성

과 정시성의 손상정도를 최소화 하기 위해서는 스마트하이웨이 특성을 고려한 고성능 도로안전시설이 개발되어야하며 이를 위해서는 스마트하이웨이 도로안전시설 성능평가 기준이 정립되어야 한다.

국내에 설치되는 도로 안전시설은 2001년 “도로안전시설 설치 및 관리지침- 방호울타리 편(건설교통부, 2003)”의 제정으로 실물차량 충돌시험을 통해서 성능이 검증된 시설물에 한해서 현장에 설치될 수 있도록 하고 있다. 국내 지침은 승

*정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 (E-mail: dskim93@kongju.ac.kr)

**정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수

***정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수

****대전광역시 주택정책과 도시개발담당 사무관

용차 탑승자 안전 확보를 위한 충돌속도를 도로설계속도와 같도록 하여 사용하고 있고 최고 충돌속도는 100 km/h이다.

1950년대 “Forgiving Road”개념을 처음으로 도입하여 도로 안전시설에 대하여 지속적으로 연구를 해온 미국의 도로안전 시설 성능평가 지침인 “NCHRP Report 350(Ross, 1993)”의 경우도 최고 도로설계속도 110 km/h에 대하여 충돌속도 100 km/h를 제시하고 있다.

유럽의 경우 각국이 다른 설계기준과 평가방법으로 도로 안전시설물을 개발 설치해왔으나 단일 시장을 추구하여 유럽 경제공동체(European Economic Community, EEC) 출범 이후 유럽표준화 위원회(European Committee for Normalization, CEN)에서 1990년부터 도로안전시설에 대한 기준화 작업을 실시하여 “EN-1317(CEN, 1998)”을 작성하게 되었다. 유럽의 최고 도로설계속도는 독일과 이탈리아의 140 km/h이고 “EN-1317”에서 제시하는 최고 충돌속도는 100 km/h이다. 도로설계속도 140 km/h에 대해 충돌속도 100 km/h를 적용하여 사용하고 있는 것은 충돌속도 100 km/h를 이용하여 성능평가 기준에 통과한 시설이 충분한 안전성을 가지고 있다고 판단했다기 보다는 고속주행여건을 고려한 도로안전시설에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 못하여 기존의 기준을 그대로 적용하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

도로설계속도 120 km/h 이상이 적용되는 스마트하이웨이에 설치되는 도로안전시설의 성능평가를 위한 충돌조건이 국내/외 관련 기준에 규정되어 있지 않다. 따라서 스마트하이웨이 도로설계속도와 주행특성을 고려한 새로운 도로안전시설 성능평가 기준이 필요하다.

본 논문에서는 스마트하이웨이 도로안전시설 성능평가를 위한 충돌조건과 충돌조건의 결정방법을 제시한다. 그리고 기존의 국내 최고성능등급의 종방향 방호울타리에 대하여 다양한 충돌조건을 적용한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하여 제시된 스마트하이웨이 충돌조건에 대한 물리적 의미를 파악하고자 한다.

2. 국내/외 도로안전시설 충돌조건

도로안전시설은 소형차에 대한 탑승자 안전성과 대형차에 대한 구조적 적정성을 동시에 만족시켜야 하며 충돌후 차량의 거동이 성능기준에 부합하여야 한다. 국내/외 도로안전 시설 성능평가 지침은 충돌조건과 충돌시험 결과분석을 위한 성능평가 기준으로 구분된다. 충돌조건은 소형차에 대한 탑승자 안전성 평가를 위한 조건과 대형차에 대한 구조적 적정성 평가를 위한 조건으로 구분되어진다.

2.1 도로안전시설 설치 및 관리지침

국내의 도로안전시설 성능평가 기준은 “도로안전시설 설치 및 관리지침(건설교통부, 2003)”에 규정되어 있다. 도로안전 시설 설치 및 관리지침은 방호울타리를 성능수준에 따라 7등급으로 구분하고 등급에 따라 충돌조건을 규정 하고 있다. 표 1에 7등급 중에서 표준, 상위, 특수 등급에 해당하는 충돌조건을 나타내었다. 탑승자의 안전성을 평가하기 위한 최고

표 1. 국내 도로안전시설 충돌조건

성능 등급		충돌조건		
		충돌차량 (kg)	충돌속도 (km/h)	충돌각도 (Deg.)
표준	SB3	1300	100	20
		8000	80	15
상위	SB5	1300	100	20
		14000	80	15
특수	SB6	900	100	20
		25000	80	15
	SB7	900	100	20
		36000	80	15

- 표준 등급: 일반 고속 구간
- 상위 등급: 중앙분리대, 교량구간 및 노측의 위험이 큰 구간
- 특수 등급: 도로가 타도로와 교차되는 등 특수구간

표 2. 미국 도로안전시설 충돌조건

성능 등급		충돌조건			비고
		충돌차량 (kg)	충돌속도 (km/h)	충돌각도 (도)	
표준	TL3	820	100	20	
		2000	100	25	
상위	TL4	820	100	20	
		2000	100	25	Optional
		8000	80	15	
특수	TL5,6	820	100	20	
		2000	100	25	Optional
		36000	80	15	

충돌시험 조건은 충돌차량 1,300 kg, 충돌속도 100 km/h, 충돌각도 20°, 구조적 적정성평가를 위한 최고 충돌시험조건은 충돌차량 36,000 kg, 충돌속도 80 km/h, 충돌각도 15°이다.

2.2 NCHRP Report 350

미국의 도로안전시설 관련 기준은 “NCHRP Report 350, Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluations of Highway Features(Ross, 1993)”에 제시되어 있다. NCHRP Report 350은 도로안전시설의 성능수준을 6 등급으로 구분하고 각 등급별 충돌조건을 제시하고 있다. 표 2에는 6등급 중에서 표준, 상위, 특수 등급에 해당하는 충돌 조건을 나타내었다. NCHRP Report 350에서 제시하는 최고 성능등급의 승용차 탑승자 안전성 평가를 위한 충돌조건은 충돌차량 820 kg, 충돌속도 100 km/h, 충돌각도 15° 구조물 강도 성능평가를 위한 충돌조건은 충돌차량 36,000 kg, 충돌 속도 80 km/h, 충돌각도 15°이다.

2.3 NCHRP Project 22-14

“NCHRP Project 22-14(NCHRP, 2006)”는 NCHRP Report 350을 개정하기 위한 기초연구 결과이다. 중요한 변경사항은

표 3. 미국 개정예정 도로안전시설 충돌조건

성능 등급		충돌조건			비고
		충돌차량(kg)	충돌속도(km/h)	충돌각도(도)	
표준	TL3	1100	100	25	
		2270	100	25	
상위	TL4	1100	100	25	
		2270	100	25	Optional
		8000	80	15	
특수	TL5,6	1100	100	25	
		2270	100	25	Optional
		36000	80	15	

표 4. 유럽 도로안전시설 충돌조건

성능 등급			충돌조건		
			충돌차량(kg)	충돌속도(km/h)	충돌각도(도)
표준	N1	TB31	1,500	80	20
		TB11	900	100	20
	N2	TB32	1,500	110	20
상위	H1	TB11	900	100	20
		TB42	10,000	70	15
	H2	TB11	900	100	20
		TB51	13,000	70	20
	H3	TB11	900	100	20
		TB61	16,000	80	20
특수	H4a	TB11	900	100	20
		TB71	30,000	65	20
	H4b	TB11	900	100	20
		TB81	38,000	65	20

① 도로안전시설의 구조적 적절성을 평가하는 기준차량인 픽업트럭의 무게를 2000 kg에서 2270 kg으로 증가시킨 점과, ② 탑승자 안전 평가를 위한 소형차의 충돌조건을 충돌차량 820 kg, 충돌각도 20° 충돌차량 1100 kg, 충돌각도 25° 상향시킨 점이다. 표 3에는 NCHRP Project 22-14의 6가지 성능 등급 중에서 표준, 상위, 특수 등급에 해당하는 충돌조건을 나타내었다.

2.4 EN-1317

유럽의 경우 1990년부터 도로안전시설에 대한 표준화 작업을 실시하여 “EN-1317 (CEN, 1998)”을 유럽 공통의 기준으로 사용하고 있다. EN-1317에서는 도로안전시설의 성능수준을 4가지 성능등급으로 구분하고 있다. 표 4에는 EN-1317의 표준, 상위, 특수 등급에 해당하는 충돌조건을 나타내었다. EN-1317에서 제시하는 최고 성능등급의 승용차 탑승자 안전성 평가를 위한 충돌조건은 충돌차량 900 kg, 충돌속도 100 km/h, 충돌각도 20°, 구조적 적정성 평가를 위한 충돌

조건은 충돌차량 38,000 kg, 충돌속도 65 km/h, 충돌각도 20°이다.

3. 스마트하이웨이 도로안전시설 충돌조건

실물차량 충돌 시험의 충돌조건은 충돌차량, 충돌속도, 충돌각도로 구성된다. 충돌조건은 도로의 특성을 고려하여 최악의 조건을 반영하도록 결정되어야 한다. 본 논문에서는 충돌사고시 스마트하이웨이의 정시성과 안전성의 손상정도를 최소화 하도록 고속주행환경을 고려한 충돌조건이 선정 되었다.

3.1 충돌차량 선정

가능한 많은 승용차의 탑승자 안전을 고려하기 위해서는 충돌시 피해가 크게 나타나는 작은 질량의 차량을 충돌차량으로 선정 하여야 한다. 미국기준(Ross, 1993)은 소형 충돌차량을 결정하기 위해서 차량 질량순 누적 판매량 5%에 해당하는 차량을 충돌차량으로 선택하여 가능한 많은 승용차의 탑승자 안전을 확보하도록 하고 있다. 차량 질량순 누적 판매량은 차량 질량별 판매량 분포를 질량이 작은 순으로 누적하여 산정된다. 미국기준 개정을 위한 기초 연구(NCHRP, 2006)에서는 소형차에 대해서 차량 질량순 누적 판매량 2%에 해당하는 차량을 충돌차량으로 선정하였다. 국내지침은 소형차량 중 가장 많이 등록된 1,300 kg의 승용차를 충돌차량으로 결정하여 사용하고 있다. 1300 kg은 2008년 국내 승용차 질량순 누적 판매량 42.5%에 해당하는 차량이다(한국자동차 공업협회, 2008). 이는 1300 kg의 소형차를 이용한 충돌시험을 통하여 탑승자 안전성 평가에 합격한 도로안전시설물이라 할지라도 1,300 kg보다 질량이 작은 차량이 충돌하였을 경우에 미국이나 유럽에 비하여 탑승자 안전을 확보하지 못하는 비율이 높을 가능성이 있다.

그림 1에 국내기준과 스마트하이웨이 기준에서 제시하는 각각의 충돌차량 중량보다 가벼운 차량의 최근 4년간 국내 승용차 질량순 누적 판매량(한국자동차 공업협회, 2008)을 나타내었다. 국내기준이 제시하는 충돌차량 질량 1300 kg 보다 가벼운 차량의 질량순 누적 판매량 평균은 36.6%이고 스마트하이웨이 기준에서 제시하는 900 kg 보다 가벼운 차량의 질량순 누적 판매량 평균은 7.5%이다. 미국기준에서 제시하

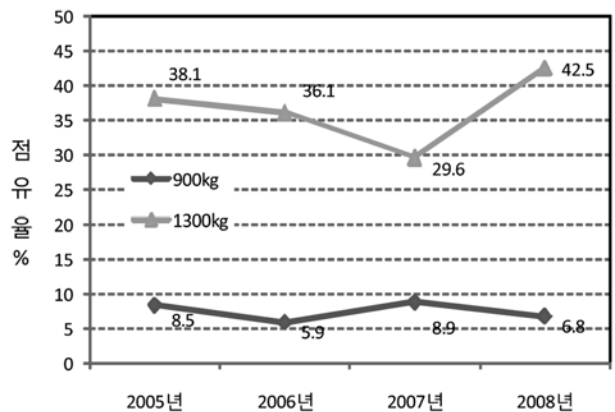


그림 1. 승용차 질량별 국내 판매현황

표 5. 전체 승용차 판매량에 대한 SUV 점유율

구분	2005년	2006년	2007년	2008년
승용차 판매량중 SUV 점유율(%)	27.4	23.6	26.7	18.0

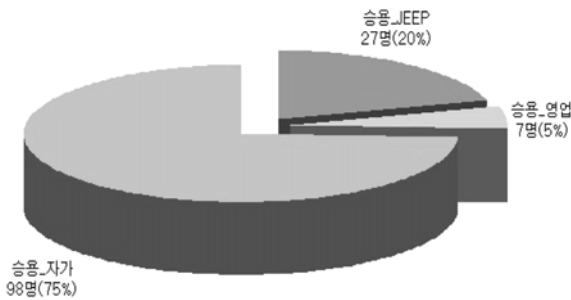


그림 2. 2007년 승용차 세부차종별 사망자 비율

는 차량 질량순 누적 판매량 5% 보다 스마트하이웨이 기준이 제시하는 7.5%가 약간 큰 값이지만 기존 국내기준의 36.6% 보다는 매우 작은 값이다. 또한 국내 고속도로 주행 1종 차량 중 900 kg 이하의 경차 비율이 4.3%(한국도로공사, 2008)로 나타나 국내의 여건을 고려할 때 스마트하이웨이 기준이 제시하는 질량순 누적 판매량 7.5%는 현재 미국기준이 제시하는 5%와 유사하게 탑승자 안전을 보장 할 수 있다고 판단된다.

미국기준 개정을 위한 기초 연구(NCHRP, 2006)에서는 SUV 판매량 증가와 충돌시 SUV의 높은 전복 가능성 때문에 SUV를 충돌차량으로 선정하고 있다. 국내의 경우에도 표 5에 보이는 것처럼 SUV 점유율이 승용차 판매량의 20%를 상회하는 것을 알 수 있다. 2008년의 SUV 점유율 감소는 유류비의 급격한 상승으로 인한 일시적인 현상으로 파악된다. 그림 2에는 2007년 승용차의 세부차종별 사망자 비율이 나타나 있다. 사망자 비율 또한 SUV 차량이 20%를 상회하였다(도로교통공단, 2008). 따라서 위의 사항들을 고려하기 위하여 스마트하이웨이 충돌차량으로 SUV 차량을 선택적으로 적용하도록 하였다.

스마트하이웨이 SUV 충돌차량의 질량은 2,000 kg으로 결정되었다. 이는 SUV 차량의 4년간 평균 누적 판매량 94.6%(한국자동차 공업협회, 2008)에 해당하는 값으로 미국 기준이 제시하는 95%(NCHRP, 2006)와 유사하다.

대형충돌차량 선정을 위해서 중량별 트럭판매 현황(한국자동차 공업협회, 2008)을 조사하였다. 스마트하이웨이 특수등급의 충돌차량으로 트럭 4년간 질량순 누적 판매량 평균 97.8%에 해당하는 총중량 36,000 kg 차량을 선정하였다. 상위등급에는 질량순 누적 판매량 평균 94.6%에 해당하는 총중량 14,000 kg 차량을, 표준 등급에는 질량순 누적 판매량 평균 89.8%에 해당하는 총중량 8,000 kg 차량을 각각 선정하였다. 이러한 대형 충돌차량 질량은 기존 국내지침과 동일한 충돌차량 질량이다.

3.2 충돌속도 결정

도로안전시설 성능평가를 위한 충돌속도는 도로 설계속도

별 사고 충돌속도분포를 조사하고 비용편익 분석을 통하여 적절한 누적 사고 충돌속도를 포함하도록 결정되는 것이 합리적이다. 사고 충돌속도는 사고현장의 바퀴 자국 궤적 분석과, 도로횡단구조, 차량손상, 탑승자 상해, 목격자 증언 등의 사고 현장에서 조사 할 수 있는 여러 가지 증거들을 종합적으로 고려하여 예측할 수 있다. 다양한 차량 단독사고의 사고충돌 조건에 대한 연구(Mak, 1986; NCHRP, 2005; NCHRP, 2006; NCHRP 2007; RISER, 2005)가 진행되었지만 스마트 하이웨이 도로설계속도보다 작은 도로설계속도에 대한 연구이다. 그리고 국내의 경우에는 고속도로 사고 충돌속도에 관한 연구가 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 스마트하이웨이 도로 설계속도 120km/h이상에 대한 사고 충돌속도의 분포를 예측하기 위하여 도로 설계속도 110 km/h에 대한 실제 사고 충돌속도 분포(Fitzpatrick, 2007)를 “Gamma 분포 함수”로 정의 하였다. Gamma 분포 함수의 평균값은 설계속도에 비례한다고 가정하고 분산은 외삽법을 적용하였다. 도로설계속도 110 km/h에 대한 실제 사고 충돌속도 누적분포를 나타낸 그림 3을 살펴보면 누적 사고 충돌속도 60%를 포함하도록 하는 충돌속도는 약 100 km/h이고 누적 사고 충돌속도 70%를 포함하도록 하는 충돌속도는 약 110 km/h임을 알 수 있다. 미국의 도로 안전시설 성능평가를 위한 최고 충돌속도는 누적 사고 충돌

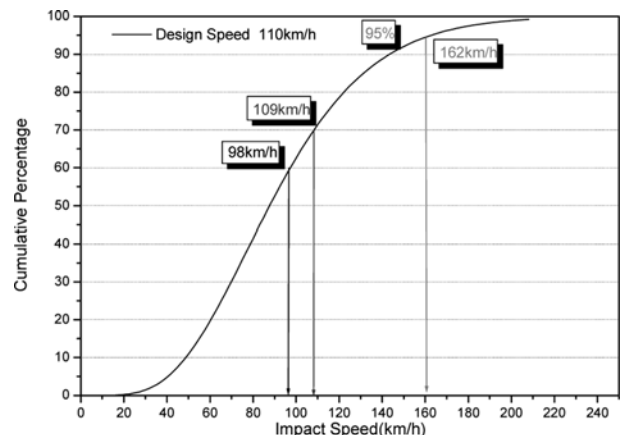


그림 3. 도로설계속도 110 km/h에서 사고 충돌속도 누적분포

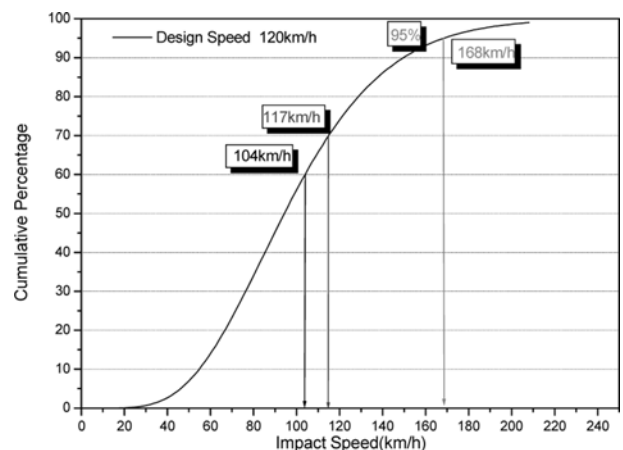


그림 4. 도로설계속도 120 km/h에서 예상 사고 충돌속도 누적 분포

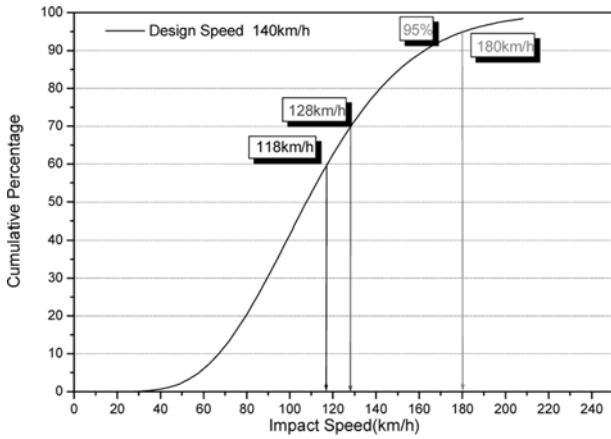


그림 5. 설계속도 140 km/h에서 예상 사고 충돌속도 누적 분포

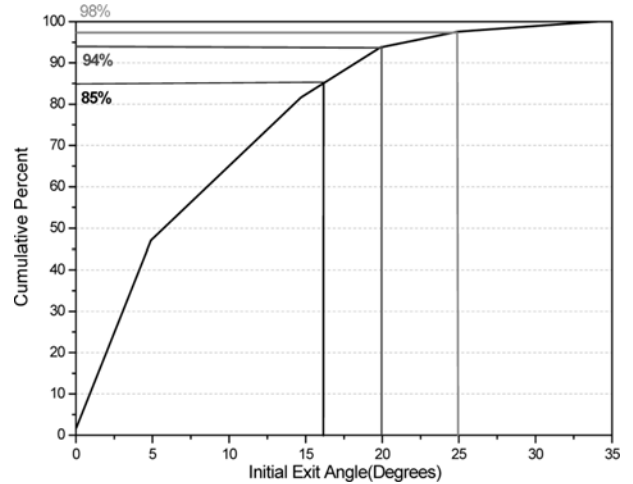


그림 6. 충돌각도 누적분포

표 6. 도로설계속도별 누적사고 충돌속도

도로 설계속도 (km/h)	60%누적 사고 충돌속도 (km/h)	70%누적 사고 충돌속도 (km/h)
113	98	109
120	104	117
140	118	128
160	138	149

표 7. 충돌각도별 누적사고율

누적 사고 (%)	충돌각도 (도)	스마트하이웨이 충돌각도 (안), (도)
83	15	25
94	20	
98	25	

속도 60%를 포함하도록 100 km/h로 결정되었고 이 속도는 도로설계속도의 90%이다(Fitzpatrick, 2007). 국내기준의 최고 충돌속도는 도로설계속도와 같도록 규정하고 있으며 이 값은 100 km/h이다. 도로설계속도 120 km/h, 140 km/h에 대한 예상 사고 충돌속도 누적분포를 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었고 표 6에는 도로설계속도별 누적 사고 충돌속도 적용 비율에 따른 충돌속도를 나타내었다.

본 연구에서는 스마트하이웨이 도로안전시설 탑승자 안전성 평가를 위한 충돌속도를 120 km/h로 제시하였다. 이는 도로설계속도 120 km/h를 적용한 경우 70%의 예상 누적 사고 충돌속도를 포함하며 도로설계속도 140 km/h를 적용한 경우에는 60%의 예상 누적 사고 충돌속도를 포함하는 값이다. 또한 이 값은 스마트하이웨이 도로설계속도가 120 km/h인 경우에 도로설계속도와 탑승자 안전 검토를 위한 충돌속도를 같도록 하는 국내기준과도 부합한다.

스마트하이웨이 도로안전시설의 구조적 적정성 평가를 위한 대형트럭의 충돌속도는 대형트럭의 주행 특성을 고려하여 소형차 충돌속도의 70%에 해당하는 85 km/h로 제시하였다.

3.3 충돌각도 결정

충돌각도의 결정은 충돌속도의 결정과 같이 광범위한 사고 분석을 통하여 이루어지는 것이 합리적이다. 그러나 국내 교통사고 기록에는 충돌각도가 조사되어 있지 않고 사고흔적 조사를 통한 충돌각도에 대한 연구도 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 충돌각도의 결정을 위해서 도로환경이 국내와 유사한 유럽의 연구(RISER, 2005)사례를 분석하여 국내 사고사례에 대한 자료를 대신하였다. "RISER

Project(2005)"에서는 유럽 각국의 사고 자료에서 도로안전시설과 관련한 교통사고를 분류하여 Database를 구축하였다. 그림 6은 RISER Project의 사고 충돌각도 누적 분포를 나타낸다. 표 7에는 그림 6로부터 구한 각도별 누적 사고율을 나타내었다. 충돌각도 25° 98%의 누적 사고 충돌각도를 포함하는 것으로 나타났다. 가능한 많은 사고 충돌각도를 포함하도록 소형차에 대한 충돌각도를 25° 결정하였다. 대형차의 경우에는 대형차의 회전 성능을 고려하여 충돌각도를 15° 결정하였다.

4. 스마트하이웨이 도로안전시설 충돌조건이 탑승자 안전에 미치는 영향

스마트하이웨이 도로안전시설 성능평가를 위한 충돌조건을 표 8에 나타내었다. 스마트하이웨이 충돌조건은 도로의 위험 정도에 따라 표준, 상위, 특수 등급으로 구분된다. 탑승자 안전을 평가하기 위한 최고 충돌시험 조건은 충돌차량 900 kg, 충돌속도 120 km/h, 충돌각도 25°, 구조적 적정성평가를 위한 최고 충돌시험조건은 충돌차량 36,000 kg, 충돌속도 85 km/h, 충돌각도 15°이다.

제시된 스마트하이웨이 중방향 방호울타리의 충돌조건이 탑승자 안전에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다양한 충돌조건을 적용한 시뮬레이션을 수행하였다. 해석대상으로 기존의 국내 최고성능등급(SB5)의 중앙분리대용 방호울타리와 노측용 방호울타리 중에서 가장 성능이 우수한 시설물을 선정하였다. 선정된 중앙분리대용 방호울타리와 노측용 방호울타리가 그림 7과 그림 8에 각각 나타나 있다. 해석대상 중앙분리

표 8. 스마트하이웨이 도로안전시설 충돌조건

성능 등급		충돌조건			비고
		충돌차량 (kg)	충돌속도 (km/h)	충돌각도(도)	
표준	L1	900	120	25	①
		2000	120	25	①, Optional
		8000	85	15	
상위	L2	900	120	25	
		2000	120	25	Optional
		14000	85	15	
특수	L3	900	120	25	
		2000	120	25	Optional
		36000	85	15	

- 표준 등급: 일반 구간, ① 소형차/대형차 분리구간
- 상위 등급: 중앙분리대, 교량난간 및 노측의 위험이 큰 구간
- 특수 등급: 도로가 타도로와 교차되는 등 특수구간

대용 방호울타리는 기존의 F형 콘크리트 중앙분리대의 차광 기능 향상과 대형차의 승월을 방지하기 위해서 높이를 810 cm에서 1270 cm로 증가 시킨 모델이다. 노측용 방호울타리는 강재 Pipe로 보강된 2m간격의 지주와 2단 C형 강재 가로보로 구성되어 기존의 W형과 Thrie형 보를 사용한 노측용 방호울타리에 비하여 개방감을 증진시킨 모델이다.

컴퓨터 시뮬레이션은 도로안전시설물 해석에 광범위하게 쓰이고 있는 3D 비선형 동적 해석프로그램인 LS-DYNA (Hallquist, 1998)를 이용하였다. 충돌차량은 국산 차량에 대



그림 7. New-F형 콘크리트 중분대용 방호울타리



그림 8. 개방형 노측용 방호울타리



그림 9. Dodge NEON 차량모델

해 검증된 FEM 모델이 극히 제한되어 있고 차량모델의 개발에 소요되는 비용이 대단히 크기 때문에 그림 9에 나타나 있는 Dodge NEON의 해석 Model(NCAC, 2006)을 사용하였다. Dodge NEON 차량모델은 실물충돌시험과 Calibration을 통하여 검증된 차량 모델이다. 차량의 가속도와 각속도 데이터를 구하기 위하여 무게중심점에 ACCELERO METER 요소를 모델하였고 데이터는 CFC 180 필터를 적용하여 탑승자 안전지수 산정에 사용하였다. 콘크리트 방호울타리는 Solid 요소를 사용하여 모델하였고 노측용 방호울타리는 Shell 요소를 사용하여 모델하였다. 노측용 방호울타리에 대하여 SS400 강재의 재료적 특성을 적용하였다. 방호울타리 모델과 차량모델 상호간의 충돌거동을 모델하기 위하여 접촉면에 Contact 조건을 적용하였다.

해석모델의 신뢰성을 검토하기 위해서 국내 충돌시험 조건(충돌차량 질량 1,300 kg, 충돌속도 100 km/h, 충돌각도 20°)에 대한 실물 충돌시험결과(한국도로공사, 2006; 한국도로공사, 2008)와 동일조건에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 10과

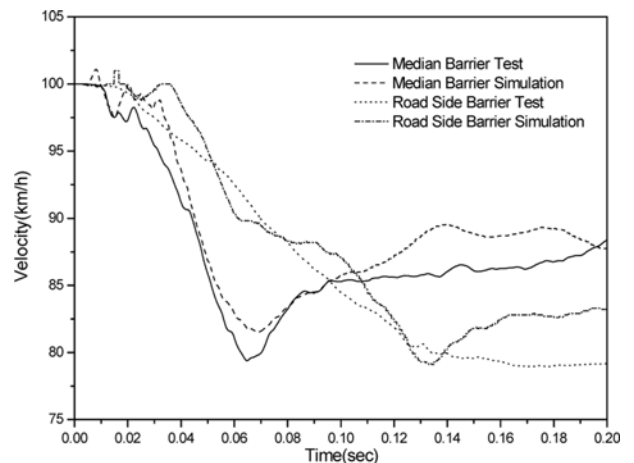


그림 10. 충돌시험과 시뮬레이션의 충돌 후 차량 축방향 감속도 비교

표 9. 충돌시험과 시뮬레이션의 탑승자 안전지수 비교

기준값	중분대용 방호울타리			노측용방호울타리		
	실물차량 충돌시험	시뮬레이션	오차 (%)	실물차량 충돌시험	시뮬레이션	오차 (%)
THIV (km/h)	23.3	23.8	2.0	30.9	30.2	-2.3
PHD (g)	7.9	8.0	1.3	10.5	10.8	3.2

표 9에 나타내었다. 그림 10을 나타내있는 실물 충돌시험과 시뮬레이션에 의해 얻은 충돌 후 차량 측방향 속도 비교를 통하여 실물 충돌시험 결과와 시뮬레이션 결과가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 충돌시험 결과와 시뮬레이션 결과를 이용하여 국내지침(건설교통부, 2003)에 따라 산출된 탑승자 안전지수 THIV(Theoretical Head Impact Velocity)값과 PHD(Post-impact Head Deceleration)값을 표 9에 요약하였다. THIV는 충돌 시 탑승자의 머리를 자유비행하는 물체로 보고 머리가 차량 내부공간의 가상면에 부딪힐 때의 속도이며 PHD는 탑승자 머리가 차량내부공간에 부딪친 후 머리가 받는 가속도중 가장 큰 값이다. 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 탑승자 안전지수 THIV값과 PHD값의 최대 오차가 3.2%이하로 나타나 시뮬레이션 모델이 실물 충돌시험 결과를 적절하게 반영하고 있는 것을 알 수 있다. 실물 충돌시험과 시뮬레이션의 충돌조건(충돌차량 질량, 충돌속도, 충돌각도)은 같지만 충돌차량 종류는 다르다. 2절에서 언급된 국내외 도로안전시설 관련 지침에는 실물 충돌시험시 충돌차량 질량에 대해서만 규정하고 있고 구체적인 차량종류는 규정하고 있지 않고 있으며 실물충돌시험 결과와 시뮬레이션 결과 비교를 통하여 차량 종류의 변화가 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

실물 충돌시험 결과와 시뮬레이션 결과 비교를 통하여 검증된 해석모델을 이용하여 다양한 충돌조건에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 충돌조건을 구성하는 충돌차량 질량, 충돌속도, 충돌각도의 증감이 승용차 탑승자 안전에 주는 영향을 파악할 수 있도록 시뮬레이션 충돌조건을 구성하였다.

표 10에 시뮬레이션 대상 방호울타리에 대하여 충돌차량 질량변화에 따른 시뮬레이션 결과를 정리하였고 그림 11과 그림 12에는 THIV값과 PHD값의 변화를 나타내었다. 중앙분리대용 방호울타리는 충돌차량 질량 감소에 따라 THIV값이 거의 유사하게 나타났고 노측용 방호울타리의 경우 THIV값이 감소하는 경향을 보였다. 중앙분리대용 방호울타리의 경우 충돌차량 질량 감소에 따라 PHD값이 감소하는 경향을 보였으며 노측용 방호울타리는 PHD값 변화가 불규칙하게 나타났다. 일반적으로 승용차가 충격흡수시설에 정면으로 충돌하는 경우 충돌차량의 질량이 감소함에 따라 THIV값이 증가하여

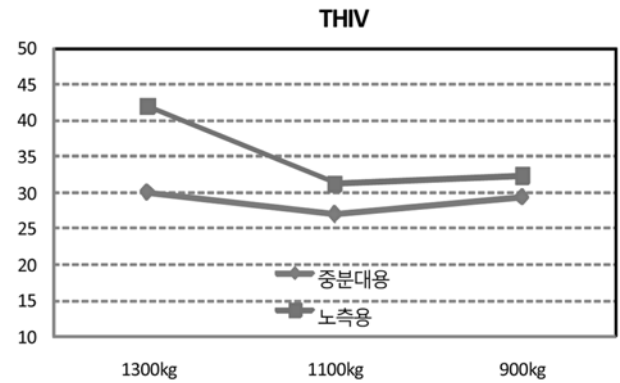


그림 11. 충돌차량 질량변화에 따른 THIV 변화

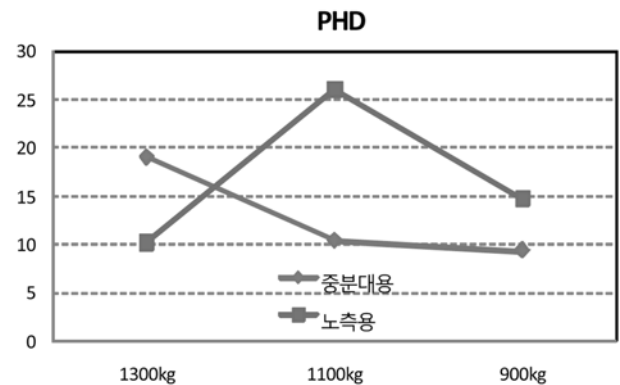


그림 12. 충돌차량 질량변화에 따른 PHD 변화

탑승자 안전 확보에 좋지 않은 영향을 주게 된다. 그러나 중앙방향 방호울타리에 측면으로 충돌하는 경우에는 방호울타리 강성에 따라서 충돌후 Yaw(평면회전) 각도 변화와 연관되어 충돌차량 질량 감소가 THIV값 증가에 직접적인 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 충돌차량 질량변화가 탑승자 안전에 미치는 영향을 정확하게 파악하기 위해서 다양한 충돌각도별 충돌차량 질량변화에 대한 시뮬레이션과 실물차량 충돌시험을 통한 보다 광범위한 연구가 필요하다. 현시점에서는 일반적으로 보다 위험하다고 간주되는 작은 질량의 차량을 충돌차량으로 선정하는 것이 탑승자 안전 확보를 위해 필요하다고 판단된다.

표 10. 충돌차량 질량변화에 따른 시뮬레이션 결과

방호울타리	충돌조건			THIV (km/h)	PHD (g)
	충돌차량 (kg)	충돌속도 (km/h)	충돌각도 (도)		
국내기준				≤33.0	≤20.0
충분대용	1300	120	20	30.0	19.0
노측용				41.9	10.2
충분대용	1100	120	20	27.0	10.4
노측용				31.2	26.0
충분대용	900	120	20	29.3	9.3
노측용				32.3	14.7

표 11. 충돌속도 변화에 따른 시뮬레이션 결과

방호울타리	충돌조건			THIV (km/h)	PHD (g)
	충돌차량 (kg)	충돌속도 (km/h)	충돌각도 (도)		
국내기준				≤33.0	≤20.0
충분대용	1300	100	20	28.1	8.9
노측용				30.2	13.9
충분대용	1300	110	20	27.8	14.7
노측용				31.3	14.3
충분대용	1300	120	20	30.0	19.0
노측용				41.9	10.2

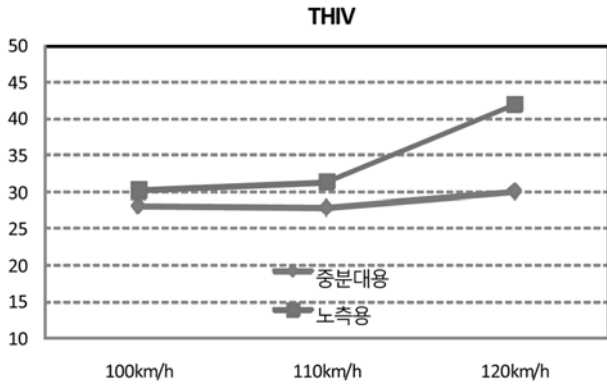


그림 13. 충돌속도 변화에 따른 THIV 변화

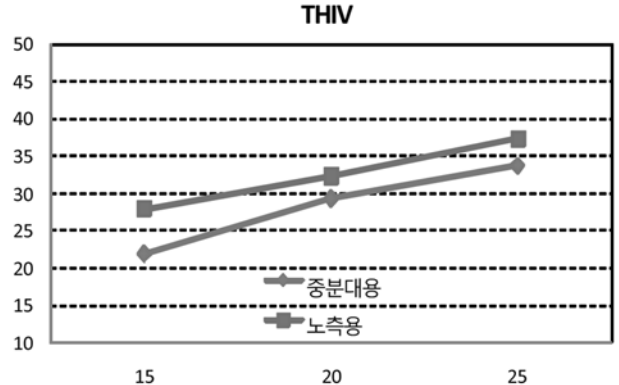


그림 15. 충돌각도 변화에 따른 THIV 변화

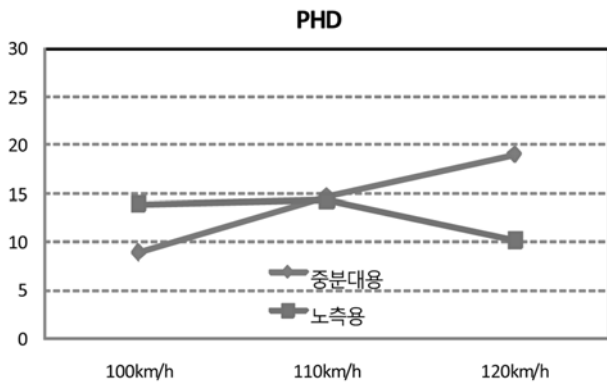


그림 14. 충돌속도 변화에 따른 PHD 변화

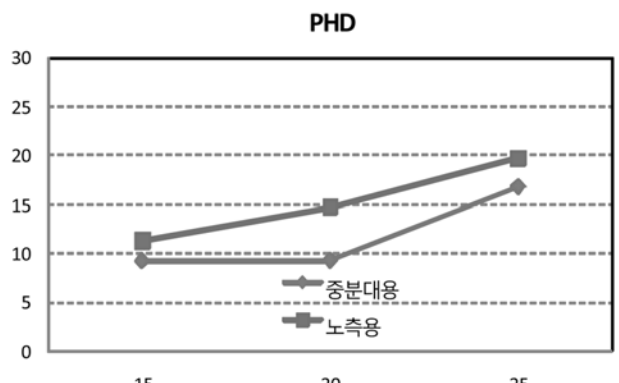


그림 16. 충돌각도 변화에 따른 PHD 변화

표 11에 시뮬레이션 대상 방호울타리에 대해 충돌속도 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 정리하였고 그림 13과 그림 14에는 THIV값과 PHD값의 변화를 나타내었다. 중앙분리대용 방호울타리의 경우 충돌속도 20% 증가에 대하여 THIV값이 6.8% 증가하였고 PHD값은 113% 증가하였다. 노측용 방호울타리의 경우에는 THIV값이 38.7% 증가하였고 PHD값은 27.6% 감소하였다. 이러한 결과는 충돌속도 증가가 강성이 큰 콘크리트 중앙분리대용 방호울타리의 경우 PHD값 증가를 유발하고 연성이 큰 노측용 방호울타리의 경우 THIV값 증가를 유발하기 때문인 것으로 판단된다.

표 12에 충돌각도 변화가 탑승자 안전 확보에 주는 영향을 파악하기 위해서 대상 방호울타리에 대해 충돌각도 변화에

따른 시뮬레이션 결과를 정리하였고 그림 15와 그림 16에는 THIV값과 PHD값의 변화를 나타내었다. 중앙분리대용 방호울타리의 경우 충돌각도 10° 대하여 THIV값이 53.9% 증가하였고 PHD값은 82.6% 증가하였다. 노측용 방호울타리의 경우 THIV값이 33.4% 증가하였고 PHD값은 74.3% 증가하였다.

그림 17과 그림 18에 스마트하이웨이 충돌조건에 대한 시뮬레이션 형상이 나타나 있다. 표 12에 나타나 있는 스마트하이웨이 충돌조건에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보면 기존 국내 최고 성능등급의 중앙분리대용 방호울타리와 노측용 방호울타리의 성능이 국내기준을 만족하지 못한다는 것을 알 수 있다. 그러나 중앙분리대용 방호울타리는 시뮬레이션의 한계를 감안하면 스마트하이웨이 충돌조건을 만족시킬 가능성이 일부 있다고 판단된다. 제시된 스마트하이웨이 충돌조건에 대한 기존 중앙분리대용 방호울타리와 노측용 방호울타리의 최종적인 성능평가는 실물 차량 충돌시험을 통하여 검증되어야 하지만 충돌사고시 스마트하이웨이 안전성과 정시성의 손상정도를 최소화 하기 위해서 충분한 안전율을 갖는 보다 고성능의 종방향 방호울타리의 개발이 필요하다고 판단된다.

표 12. 충돌각도 변화에 따른 시뮬레이션 결과

방호울타리	충돌조건			THIV (km/h)	PHD (g)
	충돌차량 (kg)	충돌속도 (km/h)	충돌각도 (도)		
국내기준				≤33.0	≤20.0
중분대용	900	120	15	21.9	9.2
노측용				27.9	11.3
중분대용	900	120	20	29.3	9.3
노측용				32.3	14.7
중분대용	900	120	25	33.7	16.8
노측용				37.3	19.7

5. 결 론

충돌사고시 스마트하이웨이의 정시성과 안전성의 손상정도를 최소화 하기 위해서 국내/외 관련기준의 충돌조건을 검토한 결과 스마트하이웨이의 주행특성을 고려하지 못하였다. 국

내 승용차 중량별 판매량 조사를 통하여 승용차 92.5%의 안전을 확보하도록 900 kg의 승용차를 스마트하이웨이 충돌차량으로 결정하였다. 기존의 사고 충돌속도 분포를 조사하여 스마트하이웨이 사고 충돌속도 분포를 예측하고 예측된 사고 충돌속도 분포로부터 70%의 누적 사고 충돌속도를 포함하는 120 km/h를 스마트하이웨이 충돌속도로 결정하였다. 누적 사고 충돌각도 98%를 포함하도록 스마트하이웨이 충돌각도를 25° 제시하였다.

제시된 스마트하이웨이 종방향 방호울타리의 충돌조건이 탑승자 안전에 미치는 영향을 파악하기 위해서 기존의 국내 최고 성능등급의 중앙분리대용 방호울타리와 노측용 방호울타리 중에서 가장 성능이 우수한 시설물을 선정하고 충돌차량 질량, 충돌속도, 충돌각도를 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 해석결과 충돌속도 증가에 대하여 중앙분리대용 방호울타리는 THIV값과 PHD값이 모두 증가하였으며 PHD값의 증가가 크게 나타났다. 노측용 방호울타리의 경우에는 THIV값이 크게 증가하였고 PHD값은 약간 감소하였다. 충돌각도 증가에 대하여 중앙분리대용 방호울타리와 노측용 방호울타리 모두 THIV값과 PHD값의 큰 증가를 보였다. 종방향 방호울타리에 대해서 충돌차량 질량감소가 탑승자 안전에 미치는 영향은 정확하게 파악되지 못하였다. 충돌차량 질량변화가 탑승자 안전에 미치는 영향을 정확하게 파악하기 위해서 보다 다양한 충돌각도별 시뮬레이션과 실물차량 충돌시험을 통한 연구가 필요하다고 판단된다. 제시된 스마트하이웨이 충돌조건이 기존 충돌조건에 비하여 상당히 상향된 것임을 알 수 있었고 국내 최고 등급의 종방향 방호울타리는 제시된 스마트하이웨이 충돌조건을 만족하지 못하였다. 충돌사고시 스마트하이웨이 정시성과 안전성의 손상정도를 최소화 하기 위해서 새로운 고성능의 종방향 방호울타리의 개발이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(07-기술혁신-A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부 (2003) 도로안전시설 설치 및 관리지침 -차량방호 안전시설 편-.

도로교통공단 (2008) 2008년판 교통사고 통계.

한국도로공사 (2006) 콘크리트 중분대용 차량방호울타리 성능시험 결과보고서.

한국도로공사 (2008a) 철재 노측용 차량방호울타리 성능시험 결과 보고서.

한국도로공사 (2008b) 업무통계('03~'07실적분).

한국자동차공업협회 (2008) 한국자동차공업협회 2008년보.

European Committee for Standardization (1998) *Road restraint systems(EN 1317-1~3)*, CEN.

European Community R&TD (2005) *D06: European Best practice for Roadside Design: Guidelines for Roadside Infrastructure on New and Existing Roads*. Roadside Infrastructure for Safer European Roads, RISER Project.

Fitzpatrick, K. (2007) *Criteria for High Design Speed Facilities*. TTL.

Hallquist J.O. (1998) *LS-DYNA theoretical manual*, Livermore Software Technology Corporation.

Mak, K.K., D.L. Sicking, and H.E. Ross, Jr. (1986) *Real World Impact Conditions for Ran - Off - the - Road Accidents*. Transportation Research Record 1065, Transportation Research Board.

National Cooperative Highway Research Program (2005) *Determination of Safe/Cost Effective Roadside Slopes and Associated Clear Distances*. NCHRP Project 17-11, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Texas.

National Cooperative Highway Research Program (2006) *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*. NCHRP Project 22-14.

National Cooperative Highway Research Program (2007) *Identification of Vehicular Impact Conditions Associated with Serious Ran-Off-Road Crashes*. NCHRP Project 17-22.

NCAC Public Finite Element Model Archive (2006) *FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center website page(www.ncac.gwu.edu)*. Washington, D.C.

Ross, H.E., Sicking, D.L, and Zimmer, R.A. (1993) *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*. NCHRP Report 350, TRB.

◎ 논문접수일 : 09년 06월 08일
 ◎ 심사의뢰일 : 09년 06월 09일
 ◎ 심사완료일 : 09년 06월 16일