

연석이 설치된 도심부 도로의 방호울타리 설치를 위한 임계 속도

A Warranty Speed for Installing Safety-Barrier on the Road Curbs in Urban Area

홍성욱* · 고만기** · 김기동*** · 김경주****

Hong, Seong Uk · Ko, Man Gi · Kim, Kee Dong · Kim, Kyoung Ju

1. 서 론

높은 경제성장과 국민소득 증가로 국민생활수준이 크게 향상됨에 따라 자동차 수요가 급격하게 증가했고 이에 따라 교통사고 역시 증가하고 있는 실정이다. 2009년 교통사고 통계(경찰청, 2009)에 따르면 차대사람의 교통사고 발생 중 보도통행중 사고 발생건수가 2007년 2,916명에서 2008년 3,518명으로 20.6% 증가함에 따라 보도통행자의 안전 확보를 위한 안전시설 설치 및 기준 마련이 시급하다.

도로안전시설 설치 및 관리지침(건설교통부, 2003)에서는 보행자의 안전을 확보하기 위하여 보도에 방호울타리를 설치할 수 있는 규정이 제시되어 있다. 그러나 방호울타리를 보도에 설치할 경우 도로 및 교통 상황에 따라 보행자용(웬스) 또는 보도용 방호울타리를 설치하도록 일반적인 언급만 있을 뿐 구체적인 규정은 제시되어 있지 않다.

본 연구는 연석이 설치된 도심부 도로에 방호울타리 설치가 필요한 충돌속도에 관한 기준을 제시하기 위한 것이다. 이를 위하여 3차원 비선형 충돌 해석 프로그램인 LS-DYNA(LSTC, 2006)를 활용하여 도로안전 시설 설치 및 관리지침(건설교통부, 2003)에서 제시한 SB1급(1.3ton-60km/h-20°)의 충돌조건으로부터 충돌각도 고정하고 충돌속도 50km/h, 45km/h, 40km/h, 35km/h, 및 30km/h의 6가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하여 충돌 후 차량이 보도에 진입하여 보행자의 안전을 위협하는 최소의 충돌조건을 구하였다.

2. 연석 및 방호울타리 형식

연석은 보차도의 경계부나 교량의 폭 방향 끝단에 설치하는 구조물로, 그 형식과 위치에 따라 운전자 및 보행자 안전에 영향을 미친다. 보도설치 및 관리지침(건설교통부, 2007)에 따르면 '보도와 차도가 인접하여 설치되는 경우에는 연석 등을 이용하여 차도와 보도의 경계를 명확하게 구분한다.'라고 규정되어 있다.

보도설치 및 관리지침(건설교통부, 2007)에 제시된 연석의 형식에는 수직형 연석과 경사형 연석으로 규격은 그림 1과 같다. 경사형 연석과 수직형 연석이 사용되는 위치는 일반적으로 도심부에서 차량속도가 저속이고 보도로 구분될 경우 자동차가 연석을 타고 올라갈 수 없는 형태인 수직형을 사용하고, 설계속도 80km/h 이상인 도로에서는 경사형의 연석을 사용하는 것이 바람직하다고 제시되어 있다. 본 연구에 사용한 연석의 형상은 도심지 저속구간에 많이 사용하는 형태인 높이 200mm 수직형 연석으로 결정하였다.

* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 토목환경공학과 · 석사과정(E-mail : seonguk@kongju.ac.kr) -발표자

** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사(E-mail : mgko@kongju.ac.kr)

*** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사(E-mail : kkkim@kongju.ac.kr)

**** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 토목환경공학과 · 박사과정(E-mail : civilkkj@kongju.ac.kr)

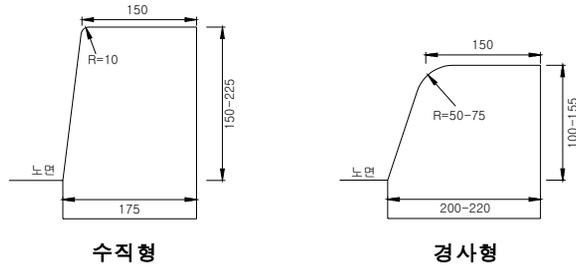


그림 1. 연석 형식

도로안전시설 설치 및 관리지침(건설교통부, 2003)에 따르면 보도에 방호울타리를 설치할 경우 연석의 전면으로부터 250mm 범위 내에서 설치하며 도로 및 교통 상황에 따라 보행자용(웍스) 또는 보도용 방호울타리로 구분하여 설치한다고 규정되어 있다. 보행자용 방호울타리는 차량이 충돌할 경우 차량의 충돌에 견딜 수 있는 구조가 아니며, 보행자의 무단 도로횡단을 방지하거나 보행자, 자전거 등이 길 밖으로 추락하는 것을 방지하기 위하여 설치하는 Design Fence 같은 방호울타리를 말한다. 보도용 방호울타리는 차량이 길 밖으로 벗어나 보도로 침범하여 일어나는 교통사고로부터 보행자 등을 보호하기 위하여 설치하는 것으로서 차량이 충돌할 경우 충분한 강성을 갖는 방호울타리를 말한다. 그러나 규정에 제시된 보도용 방호울타리의 설치 위치는 '선형상으로 시거가 나쁜 곡선부 또는 긴 직선부 뒤에 연결되는 곡선부의 외측 등 차량이 길 밖으로 벗어나기 쉬운 장소로써, 진행 방향을 잘못 잡은 차량이 보행자, 자전거 및 민가에 피해를 줄 위험이 있는 구간, 지방 지역의 도로나 도시부에서 야간에 자동차의 주행 속도가 커지는 간선가로 등에 있어서 보행자나 자전거의 통행에 위험을 주는 구간에는 차량으로부터 보호할 수 있는 보도용 방호울타리를 설치한다.'라는 일반적인 언급만 있을 뿐 구체적인 충돌 규정은 제시되어 있지 않다.

3. 시뮬레이션을 이용한 충돌 거동 분석

3.1 LS-DYNA 시뮬레이션

차량-연석 충돌 시뮬레이션의 기본 충돌 조건은 표 1에서 보는 바와 같이 도로안전시설 설치 및 관리지침(건설교통부, 2003)의 도심 구간 충돌 등급인 SB1급(1.3ton-60km/h-20°)의 충돌조건을 기준으로 차량의 속도를 감소시켜가며 6가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통하여 충돌 후 차량이 보도에 진입하여 보행자의 안전을 위협하는 최소의 충돌 조건을 구하고자 한다.

표 1. 차량-연석 충돌조건

구분	차량중량(ton)	속도(km/h)	각도(Degree)	비고
Case1	1.3	60	20	SB1
Case2		50		
Case3		45		
Case4		40		
Case5		35		
Case6		30		

3.2 차량 및 연석 모델링

차량-연석 충돌 시뮬레이션에 사용된 차량모델은 그림 2와 같이 NCAC(National Crash Analysis Center)

에서 개발한 Neon 차량 모델(NCAC, 2000)을 사용하였고 차량의 중량은 1.3ton이며 차량제원은 표 2와 같다.

표 2. Neon 차량의 요소별 개수

주요 요소	요소 수
Parts	336
Nodes	283,859
Solids	2,852
Beams	122
Shells	267,786
Elements	270,768

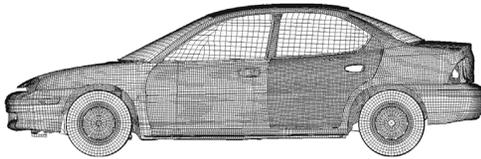


그림 2. 승용차 모델(Neon)

연석과 충돌하는 차량 부위인 Tire는 Shell 요소 및 Elastic 재료모델을 사용하여 모델링 하였고 AIRBAG_SIMPLE_AIRBAG_MODEL을 사용하여 연석과 충돌 시 타이어 내부의 공기압을 모사하였으며 재료모델의 특성은 표 3과 같다.

표 3. Neon 차량 Tire의 Material Property

Node 수	Element수	Material	Property	Contact
910	845	Elastic Mass density - 8.06×10^{-9} t/mm ³ Young's modulus - 2.461×10^4 MPa Poisson's ratio - 0.323	Shell (Belytschko-Tsay) - t=3.0	Automatic surface to surface

연석 모델은 그림 3과 같으며, 연석의 높이는 200mm이며 연석 상단은 전면에서 25mm 안쪽으로 기울어져 있다. 연석 모델링은 Solid 요소로 사용하였고 강체 재료모델을 사용하였으며 그 특성은 표 4와 같다.

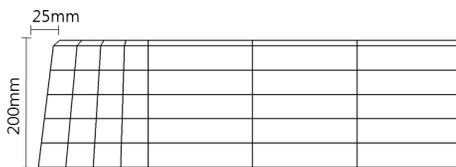


그림 3. 수직형 연석 FE Model

표 4. 연석 재료적 특성

Mat_Rigid	
Mass density	2.35×10^{-9} t/mm ³
Young's modulus	2.30×10^4 MPa
Poisson's ratio	0.3

차량의 거동을 충분히 확인할 수 있도록 그림 4와 같이 연석과 폭 5m, 길이 20m의 보도를 모델링 하였다.

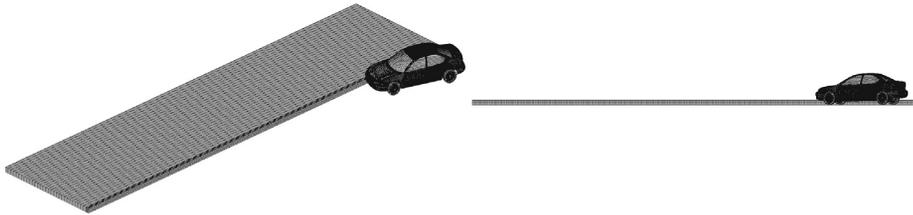


그림 4. 연석 시뮬레이션 Full Model

3.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 이용하여 충돌 속도별 차량 속도, 회전값 및 궤적을 비교 분석하였다. 차량 좌표는 그림 5와 같이 차량 진행방향을 X축, 차량진행과 수직인 방향을 Y축, X, Y면에 수직인 방향을 Z축을 한다. 각 X, Y 및 Z축에 대한 회전을 Roll, Pitch 및 Yaw로 정의한다.

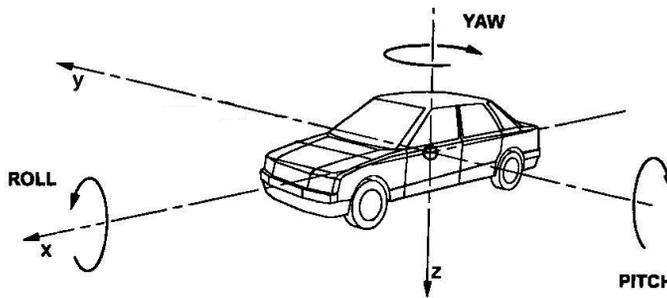


그림 5. 차량좌표계 및 Roll, Pitch, Yaw

그림 6은 시간에 따른 Roll 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 차량 Roll 값의 경우 0.2sec 부근에서 최대 Roll 회전각이 $10.5^{\circ} \sim 12.4^{\circ}$ 의 범위이며 Roll 회전각은 충돌 속도에 큰 영향을 받지 않는다. 30km/h~45km/h까지는 도약 후 차량의 오른쪽 앞바퀴가 0.4sec에 보도에 먼저 닿으며 0.4sec 이후에 차량의 Roll은 반대 방향으로 회전한다. 50km/h와 60km/h는 도약 후 차량의 오른쪽 뒷바퀴가 0.4sec에 보도에 먼저 닿으며 차량 바닥이 연석 모서리에 걸리면서 큰 회전각을 보인다.

그림 7은 시간에 따른 Pitch 값의 변화를 나타낸 그래프이다. Pitch 값의 경우 역시 0.2sec 부근에서 최대 Pitch 회전각이 $4.2^{\circ} \sim 6.3^{\circ}$ 의 범위이며 Pitch 회전각 역시 충돌 속도에 큰 영향을 받지 않는다. 도약 후 차량이 보도에 착지하는 순간인 0.4sec 이후에 Pitch 값은 큰 변화를 보인다. Pitch 값의 Noise가 심한 것은 차량이 연석에 부딪친 후 차량 자체에서 일어나는 진동 때문이다.

그림 8은 시간에 따른 Yaw 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 차량의 속도가 느릴수록 시간이 지남에 따라 Yaw 값이 크게 변하는 것을 볼 수 있는데 이는 차량이 연석에 부딪친 후 도로 방향으로 선회하는 정도가 크다는 것을 의미하는 것으로 속도가 낮을수록 보도로 진입하여 보행자에게 피해를 줄 가능성이 적음을 말한다. 차량이 보도에 착지하는 순간인 0.4sec 이후에 30km/h~45km/h까지는 Yaw 값이 감소함을 볼 수 있지만 50km/h와 60km/h의 경우 도약 후 차량이 보도에 착지하는 순간인 0.4sec에 바닥이 연석 모서리에 걸리면서 Yaw 값은 급격한 변화를 보인다. 충돌각도 20° 에 대하여 차량이 보도에 착지하는 순간까지 Yaw 최대 값을 살펴보면 30km/h의 경우 최대 8.3° 로 41.5%의 선회능력(차량이 보도에 착지하는 순간까지의 Yaw 최대 값/충돌각도)을 보였고, 60km/h는 최대 2.9° 로 14.5%의 선회능력을 보였다. 표 5는 속도별 차량 선회능력을 정리한 것이다.

차량이 연석에 충돌하였을 경우 Roll 및 Pitch 값은 충돌 속도에 큰 영향을 받지 않고 Yaw의 경우 충돌 속도가 낮을수록 차량 선회능력이 증가하여 보행자에게 피해를 줄 가능성이 적음을 알 수 있다.

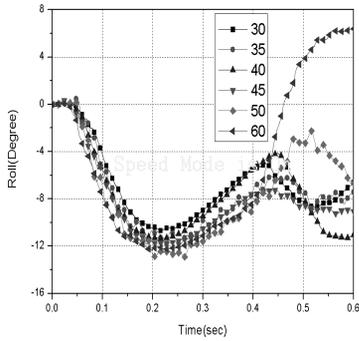


그림 6. Rolling

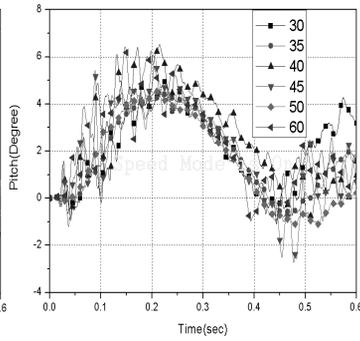


그림 7. Pitching

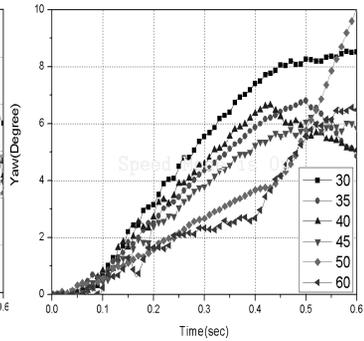


그림 8. Yawing

표 5. 속도별 차량 선회능력 (Yaw 최대값 / 충돌각도)

속도	60km/h	50km/h	45km/h	40km/h	35km/h	30km/h
Yawing Max.(°)	2.9	3.7	5.3	6.3	6.8	8.3
선회능력(%)	14.5	18.5	26.5	31.5	34	41.5

그림 9는 차량 앞 범퍼 오른쪽 끝의 궤적을 살펴본 그래프이다. 일반적으로 방호울타리는 연석 전면부로부터 250mm 위치에 설치되며, 연석의 시점을 0으로 할 경우 모든 충돌조건에서 차량이 연석을 넘어 보도를 침범하며 보행자용 방호울타리까지 도달하는 것을 관찰할 수 있다. 설계속도 30km/h 이상 도로에 방호울타리를 설치하지 않거나 강도가 확보되지 않은 Design Fence 같은 보행자용 방호울타리를 설치하였을 경우 차량이 보도로 진행한다면 보행자와 차량의 충돌이 발생할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

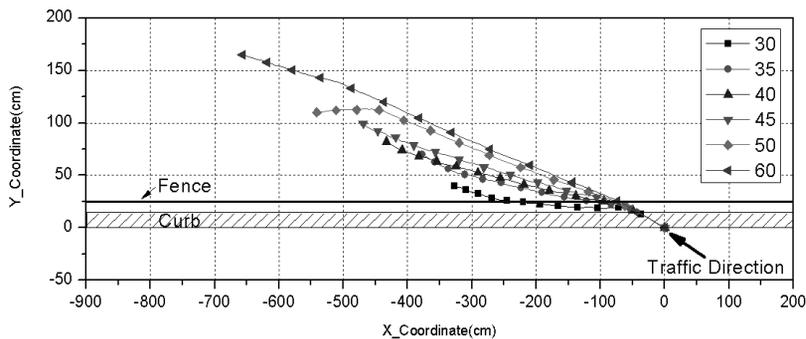


그림 9. 충돌 속도별 차량 거동

그림 10은 차량이 연석과 충돌 후 보도로 진행함에 따른 속도변화를 나타낸 것이며 연석으로부터 250mm 뒤에 방호울타리가 설치되어 있으며 차량이 보도로 진행함에 따라 속도는 감소한다. 영국 교통부 산하 교통연구소(Transport Research Laboratory, TRL)의 분석에 의하면 승용차 속도에 따른 보행자 사망률은 20mph(32km/h)일 경우 5%, 30mph(48km/h)일 경우 45%, 40mph(64km/h)일 경우 85%가 사망한 것으로 분석되었다. 이 연구를 바탕으로 차량이 보행자에게 피해를 가할 수 있는 최소 속도를 30km/h로 볼 수 있다. 그림 10의 상자 안에 있는 영역은 차량이 연석에 충돌 후 방호울타리 설치 지점인 연석으로부터 250mm 이

후로 차량 속도가 30km/h 이하로 나타나는 영역으로써 차량이 보행자에게 피해를 가하지 않는 Safety Zone 으로 볼 수 있다. 방호울타리 위치인 Safety Zone 시작면에서 보행자에게 피해를 줄 수 있는 최소속도(30km/h) 이하로 감속되는 초기 충돌속도는 40km/h로 나타났다. 이는 1.3ton 차량이 20°각도로 충돌하였을 때 설계속도 40km/h 이하에서는 보행자용 방호울타리를 설치하고 40km/h를 초과한 설계속도에서는 보도용 방호울타리를 설치하는 것이 타당함을 나타낸다.

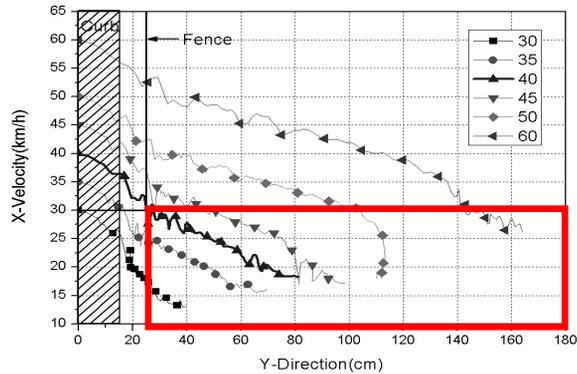


그림 10. 차량이 보도 진입에 따른 X-Direction 속도

4. 결 론

본 연구에서는 연석이 설치된 도심부 도로에 방호울타리가 설치될 경우 보행자용 혹은 보도용 방호울타리를 설치할 것인지에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션을 통한 충돌 후 차량의 거동 분석 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 차량이 연석에 20°각도로 충돌하였을 경우 Roll 및 Pitch 값은 충돌 속도에 큰 영향을 받지 않으며 Yaw 값의 경우 충돌 속도가 낮을수록 Yaw 값이 커지며 이는 차량 선회능력이 크다는 것을 의미하는 것으로 속도가 낮을수록 보도로 진입하여 보행자에게 피해를 줄 가능성이 적음을 나타낸다.

2) 모든 충돌속도(30km/h~60km/h)에서 차량이 연석을 넘어 보도를 침범하여 방호울타리까지 거리인 250mm를 도달하였다. 설계속도 30km/h 이상 도로에 방호울타리를 설치하지 않거나 강도가 확보되지 않은 보행자용 방호울타리를 설치하였을 경우 차량이 보도로 진행한다면 보행자와 차량의 충돌이 발생할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

3) TRL의 분석에 의한 승용차 속도에 따른 보행자 사망률을 토대로 차량이 보행자에게 피해를 가할 수 있는 최소 속도를 30km/h로 보았을 경우 차량이 연석에 충돌 후 보행자용 방호울타리까지의 거리인 250mm에 도달 시 속도가 30km/h 이하인 최대충돌속도는 40km/h로 나타난다.

4) 보행자용 방호울타리 설치의 임계속도는 40km/h이며 설계속도 40km/h 이하의 도로에서는 보행자용 방호울타리를 설치하고 40km/h를 초과한 설계속도에서는 보도용 방호울타리를 설치하는 것이 보행자 안전을 확보하는데 있어 타당하다고 볼 수 있다.

참고 문헌

1. 설재훈, 박진호, 1994, 대형차량의 과속방지 대책, 교통개발연구원
2. 경찰청, 2009, 2009년도 교통사고통계, 경찰청
3. 건설교통부, 2003, 도로안전시설 설치 및 관리지침-차량방호 안전시설, 건설교통부
4. 건설교통부, 2007, 보도설치 및 관리지침, 건설교통부
5. NCAC, 2006, Public Finite Element Model Archive, FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center
6. John O. Hallquist, 2006, LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation.