

차량-보행자 충돌사고 재구성 해석: 차량 속도 계산과 불확실성

한인환*

홍익대학교 기계정보공학과

Reconstruction Analysis of Vehicle-pedestrian Collision Accidents: Calculations and Uncertainties of Vehicle Speed

Inhwan Han *

Department of Mechano-Informatics & Design Engineering, Hongik University, Chungnam 339-701, Korea
(Received 3 January 2011 / Accepted 29 March 2011)

Abstract : In this paper, a planar model for mechanics of a vehicle/pedestrian collision incorporating road gradient is derived to evaluate the pre-collision speed of vehicle. It takes into account a few physical variables and parameters of popular wrap and forward projection collisions, which include horizontal distance traveled between primary and secondary impacts with the vehicle, launch angle, center-of-gravity height at launch, distance from launch to rest, pedestrian-ground drag factor, the pre-collision vehicle speed and road gradient. The model including road gradient is derived analytically for reconstruction of pedestrian collision accidents, and evaluates the vehicle speed from the pedestrian throw distance. The model coefficients have physical interpretations and are determined through direct calculation. This work shows that the road gradient has a significant effect on the evaluation of the vehicle speed and must be considered in accident cases with inclined road. In additions, foreign/domestic empirical cases and multibody dynamic simulation results are used to construct a least-squares fitted model that has the same structure of the analytical one that provides an estimate of the vehicle speed based on the pedestrian throw distance and the band within which the vehicle speed would be expected to be in 95% of cases.

Key words : Vehicle-pedestrian collision(차량-보행자 충돌), Accident reconstruction(사고 재구성), Pedestrian throw distance(보행자 전도거리), Vehicle speed(차량 속도), Prediction interval(예측 구간)

1. 서론

다른 유형의 교통사고보다 사망 및 부상 정도가 훨씬 심각한 보행자 충돌 사고의 전체 교통사고 중 비율은 미국이나 유럽 등 선진국의 경우 10%내외인데 비하여, 아시아나 아프리카 등의 후진국가들에서는 이보다 5배 이상의 비율로 훨씬 더 많이 발생¹⁾하는 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 2009년 기준으로 보행자 교통사고는 전체 교통사고 발생건수의 대략 21%를 차지하였으며, 사망자는 전체 교

통사고 사망자 중 35% 정도를 차지하였다.²⁾

수십년전부터 보행자 충돌사고에 관한 수백편의 연구 논문들이 발표되었다. 이들 중의 상당수는 보행자 사고에 관한 각종 통계, 사고 및 부상의 유형 그리고 차량의 특징적인 형상과 변형 등에 관한 내용들을 담고 있다. 물론, 이러한 논문들 중 일부는 보행자 충돌 사고의 수학적 모델 그리고 과학적 재구성에 관한 연구 결과들을 포함하고 있다. 이들은 단순한 실험식이나 통계적인 회귀분석 모형의 구성³⁻⁶⁾으로부터 아주 복잡한 형태의 물리적 표현식⁷⁻¹⁰⁾까지 다양한 형태로 제시되고 있다. 그러나, 컴퓨터 시

*Corresponding author, E-mail: ihhan@hongik.ac.kr

물레이션 수법을 포함하여 기존의 연구 해석 방법들은 사고 현장에서 측정이나 추정이 용이하지 않은 각종 물성 계수와 변수들을 포함하여 실용성을 제대로 확보할 수 없는 경우가 대부분이다. 혹은 문헌에 소개되는 모형식을 단순 적용하거나 일부 계수만을 적당히 바꾸어서 보행자의 전도거리로부터 차량의 충돌 속도를 대강 추정하는 등 신뢰하기 어려운 분석에 그치고 있는 상황이다. 최근에는 실용성과 신뢰성을 모두 확보하기 위하여 사고 현장에서 수집이 용이한 정보들을 활용하여 보행자와 충돌하는 차량의 충돌 속도를 비교적 정확하게 추정할 수 있는 퍼지 도구를 제시하는 연구 발표도 있었다.^{11,12)} 또한, 이와 유사한 노력의 일환으로 보행자의 부상 정도 및 형태를 추가 정보로 활용하여 보다 신뢰할 수 있는 다중물체 동역학 시물레이션에 기반한 보행자 충돌사고의 재구성에 관한 연구도 있다.¹³⁾ 또한, 차량 저속추돌의 연속 접촉력 모델¹⁴⁾을 적용한 보행자 충돌의 다중물체 동역학 해석에 관한 시도¹⁵⁾도 최근 이루어졌다.

보행자-차량 충돌 사고에서 각종 조사 및 소송 등을 위해서나 혹은 사고 관련 생체역학 연구 부문에서도 가장 중요한 요소는 차량의 충돌 속도이다. 그런데, 현재 대부분 차량이 ABS를 채용하고 있어 노면에 남기는 타이어 흔적을 확보하기 불가능하므로 이러한 충돌 속도를 추정하기 위해서는 보행자의 충돌 후 전도거리가 필수적이다. Limpert¹⁶⁾은 보행자 충돌사고의 진행과정을 충돌, 비행, 그리고 미끄럼/구름의 3단계로 구분하였다. 그런데, 보행자의 비행단계에서 보행자의 선회궤도에 따라 보행자의 충돌 유형은 대략 5가지로 분류¹⁷⁾할 수 있는데 그중에서 wrap과 forward projection 유형이 전체 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 따라서, 본 논문에서는 보행자와 차량 전면부 충돌 사고의 대부분을 차지하고 있는 wrap과 forward projection 유형에 활용할 수 있는 충돌 해석 모델을 제시한다.

최근 수십년 동안에 보행자 전도거리의 보다 정밀한 측정이 가능해짐에 따라 차량의 충돌 속도를 정확하게 추정하는 것이 가능해졌다.⁴⁾ 본 논문은 경사길 위에서 보행자와 차량과의 초기 접촉 위치와 충돌 후 최종 낙하 정지 위치 사이의 거리 즉 전도거

리를 취급하며, 이 전도거리와 차량의 충돌속도 사이의 관계를 모델링한다. 이러한 모델링 작업은 여러 가지 이유로 거의 불가능하게 되거나 혹은 비실용적이 될 수가 있다. 저전면을 가진 차량과의 충돌시에 인체는 차량 전면부와 일차 충돌 후에 인체의 상반부가 후드, 윈드 쉴드 혹은 지붕과의 이차 충돌이 복잡한 형태로 발생하게 된다. 그러나, 저속 충돌이나 보행자 선회 궤도에 따른 특정 유형(forward projection)의 충돌 사고의 경우에는 이차 충돌이 발생하지 않거나 혹은 그 효과가 미미하여 무시할 수도 있다. 인체의 크기, 무게와 형태 그리고 차량의 접촉면 형상 및 차량과 보행자의 접촉 초기조건 등은 충돌 사고에 따라 광범위하게 변화하게 되며, 적절히 모델링하거나 주어진 상황으로부터 재구성하는 작업이 가능하지 않게 된다. 본 연구에서는 지나치게 복잡하지 않고 그러나 사고 현장에서 획득이 용이한 정보들에 근거하는 비교적 정교한 보행자 충돌 모델을 개발하고, 이를 불확실성을 고려하는 사고 재구성 조사와 연구 혹은 관련 소송 등에 효과적으로 활용하고자 하는 것이다.

2. 경사길 보행자 충돌사고 해석 모델

우선, 보행자와 차량 전면부 충돌 사고의 거의 대부분을 차지하고 있는 wrap과 forward projection 유형에 모두 활용할 수 있는 경사길 위에서의 충돌 해석 모델을 구하고, 이 해석 모델을 각 충돌 유형별로 실제 사고 현장에서 적용이 용이한 근사식으로 제시하였다.

2.1 차량 충돌속도 해석

Fig. 1에 보여지는 경사길 보행자-차량 충돌에 대하여 보행자 전도거리 s_p 로부터 충돌 차량의 충돌 직진 속도 v_{c0} 를 구하는 과정을 제시한다. 보행자와 충돌하는 차량은 식 (1)에서처럼 보행자와의 충돌 후에 운동량의 감소가 이루어지게 된다.

$$v'_{c0} = \frac{m_c}{m_c + m_p} v_{c0} \quad (1)$$

식 (1)에서 v_{c0} 는 보행자와의 초기 접촉 순간에서의 차량의 충돌속도, v'_{c0} 는 보행자가 충돌 후 비행

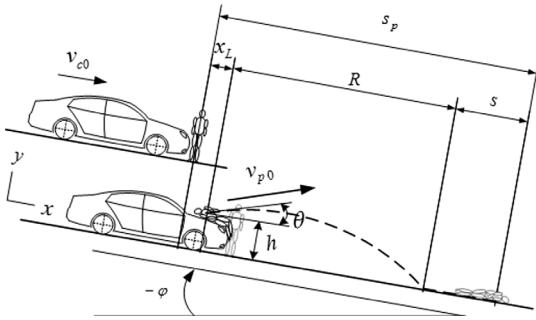


Fig. 1 Vehicle-pedestrian collision on gradient road

을 시작하는 순간의 차량의 충돌후 속도이며, m_c 는 차량의 질량, 그리고 m_p 는 보행자의 질량이다. 그런데, Limpert¹⁶⁾에 따르면, 보행자의 차량과의 충돌 후 보행자의 초기 속도 v_{p0} 는 식 (2)에서 볼 수 있는 것처럼, 충돌후 차량의 진행 속도 v'_{c0} 의 일정 비율로 표현할 수 있다.

$$v_{p0} = \alpha v'_{c0} = \frac{\alpha m_c}{m_c + m_p} v_{c0} \quad (2)$$

식 (2)에서, α 는 보행자 충돌 유형에 따른 상수가 될 것이다. 대개의 경우 wrap 충돌의 경우에는 1.0 그리고 forward projection 유형에 대해서는 1.0보다 큰 값(1.2~1.3)을 사용하게 된다.¹⁰⁾

Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼, 차량과의 충돌 후 보행자의 최종 전도거리 s_p 는 식 (3)으로 간략하게 나타낼 수 있다.

$$s_p = x_L + R + s \quad (3)$$

식 (3)에서 x_L 은 보행자와 차량의 1차 및 2차 충돌 사이 동안 보행자가 움직여진 거리이다. 여기에는 차량 전면부위의 형상 등의 효과가 포함된다. forward projection 유형에서 $x_L = 0$, 그리고 wrap 충돌의 경우에는 대략 $x_L = 1.0m$ 으로 단순하게 고려하거나 쌍일차함수(bilinear function) 형태 등의 보다 복잡한 형태로 나타낼 수도 있다.¹⁰⁾ R 은 차량과 충돌한 보행자의 비행 거리이고, s 는 보행자가 비행후에 지면과 충돌하고 나서 최종 정지시까지 미끄러지거나 굴러서 진행한 거리이다.

보행자의 충돌 후 비행거리 R 은 식 (4)로 표현할 수 있고, t_R 은 보행자의 충격 순간으로부터 지면과

접촉 순간까지의 비행시간이며 식 (5)로 구해진다.

$$R = v_{p0} t_R \cos \theta - \frac{1}{2} g t_R^2 \sin \varphi \quad (4)$$

여기서,

$$t_R = \frac{v_{p0} \sin \theta + \sqrt{v_{p0}^2 \sin^2 \theta + 2gh \cos \varphi}}{g \cos \varphi} \quad (5)$$

보행자가 낙하 비행 중 지면과 충돌하는 순간의 속도 성분들은 간단한 계산을 통해 식 (6), (7)로 보여진다.

$$v_{pRx} = v_{p0} \cos \theta - g t_R \sin \varphi \quad (6)$$

$$v_{pRy} = v_{p0} \sin \theta - g t_R \cos \varphi \quad (7)$$

인체는 지면과의 충돌 후에 수직 반발이나 혹은 반복적인 튀김 현상까지도 가능하다. 그러나, 인체의 수평 이동 거리는 이러한 반복적인 튀김 횟수와 무관하다는 것을 쉽게 보일 수 있다. 따라서, 인체와 지면과의 충돌은 한번인 것으로 간주할 수 있고, 또한 완전 비탄성 충돌로 고려할 수 있다. 보행자가 지면과 충돌한 직후 법선 방향 반발속도는 식 (8)로 표현할 수 있고,

$$v'_{pRy} = 0 \quad (8)$$

보행자의 지면과 충돌 과정 중 마찰이 작용한다고 가정하면, 마찰력이 개재된 충돌 해석¹⁸⁾을 통해 충돌 직후 접선방향 속도는 식 (9)로 계산할 수 있다.

$$v'_{pRx} = v_{pRx} + f_p v_{pRy} \quad (9)$$

여기서, f_p 는 충돌 동안 법선 충격량에 대한 접선 충격량의 비(충격량비, impulse ratio) 혹은 마찰계수이다. 본 논문에서는 보행자의 미끄럼 견인지수(sliding drag factor) 혹은 마찰계수로 f_p 를 사용할 것이다. 식 (9)에서 v_{pRy} 는 음수이고 결국 $v'_{pRx} < v_{pRx}$ 가 됨을 유의해야 한다. 차량과의 충돌 후 보행자의 낙하거리의 마지막 부분은 미끄럼 거리 s 이다. 이는 마찰계수 f_p 를 사용해서 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{(v'_{pRx})^2}{2g(f_p \cos \varphi + \sin \varphi)} = \frac{(v_{pRx} + f_p v_{pRy})^2}{2g(f_p \cos \varphi + \sin \varphi)} \quad (10)$$

식 (6)과 (7)에 나타나는 v_{pRx} 와 v_{pRy} 의 값을 식 (10)에 적용하고, 식 (4)와 함께 식 (3)으로 정리하고 식 (5)에 있는 t_R 을 대입하면 식 (11)에 보여지는 것처럼 s_p 를 구할 수 있다.

$$s_p = x_L + f_p h + \frac{v_{p0}^2 (\cos \theta + f_p \sin \theta)^2}{2g (\sin \varphi + f_p \cos \varphi)} \quad (11)$$

이와 같이 유도된 보행자 충돌 모델 식 (11)은 차량의 진행 속도를 산출하기 위한 사고 재구성 작업에 효과적으로 활용할 수 있게 된다. 우선 차량과의 충돌 직후 보행자의 속도 v_{p0} 는 식 (12)로 구할 수 있게 된다.

$$v_{p0} = \frac{\sqrt{2g (\sin \varphi + f_p \cos \varphi) (s_p - x_L - f_p h)}}{(\cos \theta + f_p \sin \theta)} \quad (12)$$

식 (12)에 식 (2)를 적용하면, 보행자와의 충돌 직전 차량의 속도 v_{c0} 는 식 (13)으로 결과된다.

$$v_{c0} = A \sqrt{s_p - B} \quad (13)$$

여기서,

$$A = \frac{m_c + m_p}{\alpha m_c} \cdot \frac{\sqrt{2g (\sin \varphi + f_p \cos \varphi)}}{\cos \theta + f_p \sin \theta}, \quad B = x_L + f_p h \quad (14)$$

식 (14)에서 충돌 후 보행자의 투사각 θ 는 본 논문 저자가 동일한 외국 충돌데이터를 가지고 추정된 결과¹⁰⁾에 따르면 wrap 충돌의 경우에는 대략 5°에서 10° 사이의 값으로 한정되어 나타나고 forward projection 유형에서는 대개 $\theta=0^\circ$ 로 고려할 수 있다. 보행자의 전도거리와 부가적인 몇가지 기본 정보를 알게되면 식 (13)을 직접 활용하여, 보행자 충돌 사고 재구성 작업으로 차량의 충돌 속도를 계산할 수 있게 된다. 식 (13)이 유효하기 위해서는 보행자의 전도거리 s_p 는 최소한 $B = x_L + f_p h$ 의 값보다 커야 한다는 것에 주의하여야 한다.

2.2 충돌 유형별 근사식

식 (14)에 보여지는 계수값들을 가지는 차량 충돌 속도에 관한 식 (13)을 사고 현장에서의 직접적인 적용이 가능하도록, 보행자 충돌 사고의 거의 대부분을 차지하고 있는 wrap과 forward projection 유형

에 대하여 각각 적절한 근사식을 제시한다. 우선, 충돌 후 차량의 속도에 대한 보행자 속도의 비율 α 의 값이 1.0이거나 이보다 근소하게 큰 값이고 또한 당연히 $m_c \gg m_p$ 이므로, 식 (14)에 보여지는 계수들은 식 (15)로 근사하게 쓸 수 있다.

$$A = \frac{\sqrt{2g (\sin \varphi + f_p \cos \varphi)}}{\cos \theta + f_p \sin \theta}, \quad B = x_L + f_p h \quad (15)$$

식 (15)에서 h 는 보행자 무게중심의 높이로 성인의 경우에는 대략 1.0m 어린이의 경우에는 0.4m내외로 고려한다. 그리고, forward projection 유형에서 $x_L = 0$, 그리고 wrap 충돌의 경우에는 대략 $x_L = 1.0m$ 로 설정할 수 있다.

○ Wrap 충돌 유형

식 (16)에 보여지는 관계를 이용하면, 차량의 충돌속도는 식 (17)로 쓸 수 있다.

$$\sin \theta = \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}, \quad \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \quad (16)$$

$$v_{c0} = \frac{\sqrt{2g (\sin \varphi + f_p \cos \varphi) (s_p - x_L - f_p h) (1 + \tan^2 \theta)}}{(1 + f_p \tan \theta)} \quad (17)$$

전술한 바와 같이 이 충돌 유형에서는 사고 현장에서 보행자의 충돌 후 투사각 θ 의 추정이 대단히 모호하게 된다. 따라서, θ 의 변화에 따른 차량 충돌 속도 v_{c0} 의 최소값을 수학적으로 구하면 $\theta = \tan^{-1} f_p$ 에서 식 (18)과 같이 나타난다.

$$v_{c0} = A \sqrt{s_p - B} \quad (18)$$

여기서,

$$A = \sqrt{\frac{2g (\sin \varphi + f_p \cos \varphi)}{1 + f_p^2}}, \quad B = x_L + f_p h \quad (19)$$

그런데, 보행자의 노면 마찰계수 f_p 의 값이 대략 0.7 근방인 점을 감안하면 투사각 θ 는 35°에 이르게 되어 통상적으로 wrap 충돌에 알려져 있는 값보다 과도하게 평가되고 결국 차량의 충돌 속도가 지나치게 과소평가될 여지가 있다. 예컨대, forward projection 유형에 근접하여 $\theta = 0$ 일 경우와 비교하면 20%까지 더 적게 속도가 추정될 수 있다. 이러한

경우에는 5~10° 사이에서 적절하게 추정된 투사각 θ 와 함께 식 (15)를 직접 활용할 수 있다.

○ Forward Projection 유형

이 충돌 유형에서는 투사각 $\theta=0$ 으로 고려하므로, 식 (15)는 다음과 같이 식 (20)으로 간단하게 정리된다.

$$A = \sqrt{2g(\sin \varphi + f_p \cos \varphi)}, \quad B = x_L + f_p h \quad (20)$$

식 (20)에 따르면, 가령 $f_p = 0.7$ 인 내리막 경사 $\varphi = -10^\circ$ 에서는 차량의 충돌 속도가 평지에서 보다 15%까지 적게 추정된다. 특히 내리막 경사길의 보행자 충돌 사고 해석에서는 도로 구배에 대한 적극적인 고려가 차량 운전자 입장에서는 매우 중요함을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션 자료 구축과 충돌모델 검증

2장에서 제시한 보행자 충돌 모델의 검증을 위한 실제 경사길 사고나 실험 데이터의 확보가 가능하지 않았으므로, 국내 상황에 유사한 다양한 계수들과 조건하에서 다중물체 동역학 시뮬레이션을 신중하게 수행한 해석 결과들을 활용하였다. PC-Crash는 뉴턴 운동법칙에 기반한 충돌 모델을 적용하는 프로그램으로 차량 특성, 속도, 보행자 더미를 사용하여 다양한 시뮬레이션이 가능하다.¹⁹⁾

본 연구에서는 차량 전면 범퍼와 보행자의 좌측 면과의 충돌로 한정하여 시뮬레이션을 반복 수행하였다. 차량의 충돌 속도는 10~70km/h 범위내에서 변화를 주었는데, 평지에서의 국내외 실제 보행자 사고 데이터^{6,10)}를 참고하여 비교적 적은 발생률을 보이는 10~30km/h 구간에서는 5km/h 간격으로, 사고 건수의 거의 70%정도가 발생하는 30~70km/h 구간은 2.5km/h 간격으로 시뮬레이션을 수행하였다. 보행자와 노면의 미끄럼 마찰력은 특히 높은 속도의 충돌에서 보행자의 전도거리에 비교적 큰 영향을 미치게 된다. 보행자 충돌에 관한 국내외 기존의 연구들을 참조하여 보행자 미끄럼 마찰계수를 0.6, 0.7, 0.8로 한정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 도로 구배는 국내 일반 도로의 한계가 6.4° 정도이며, 산지가 9.6°이다. 국내에 산간지역이 많고, 급경사 구간이 많음을 고려하여 최대 10°(17.6%)로 도로

구배를 설정하였다. 한편, 보행자-차량 충돌 사고는 20~60세 연령층에서 가장 많이 발생하며, 승용차가 다른 차종에 비해 사고 발생률이 높다.²⁾ 또한, 국내 실제사고 데이터^{6,20)}를 참고하였을 때 대부분 세단형 차량임을 고려하여, 성인(남)과 세단형 차량 충돌 형태로 시뮬레이션을 구성하였다. 보행자 모델에 대해서는 최근에 발표된 국내 20~60세 성인 남자의 평균 신체 정보²¹⁾를 사용하여 성인(남)의 더미를 설정하였다. 차량은 2001년식 현대 소나타 차량의 정보를 이용하였다.

Table 1에 요약되어 있는 것처럼 도로 구배와 보행자-노면 마찰계수 값은 변화를 주며, 나머지 다른 계수들에 관해서는 일정한 기본값을 설정하고 시뮬레이션을 수행한 결과들에서 부적절한 것들을 제외하고 모두 179건의 시뮬레이션 자료를 구축하였다. Table 1의 입력 계수들로 내리막 경사길(도로구배

Table 1 Simulation input parameters

User input parameters
<ul style="list-style-type: none"> • Road gradient : 10°, 0°, -10° • Pedestrian-road friction : 0.6, 0.7, 0.8
Default parameters
<ul style="list-style-type: none"> • Pedestrian dummy data : Adult(male) : Height 1.72m, Weight 72.2kg • Vehicle data : Sedan type(Hyundai Sonata) • Road-tire friction : 0.8(Dryness) • Vehicle deceleration : 7.85m/s² • Pedestrian-vehicle friction : 0.2 • Pedestrian restitution : 0.3 • Pedestrian velocity : 0m/s

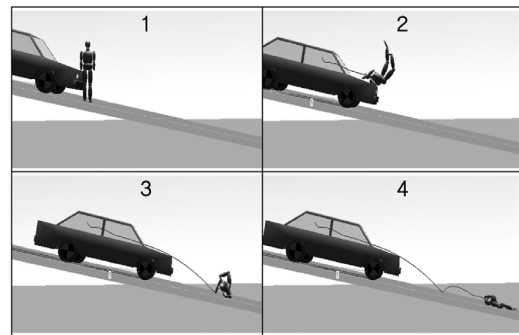


Fig. 2 PC-crash simulation view of pedestrian collision

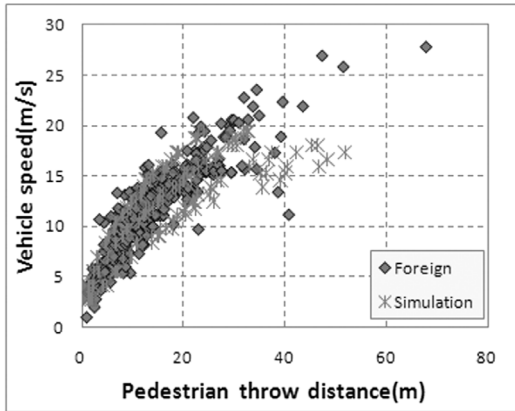


Fig. 3 Foreign empirical data

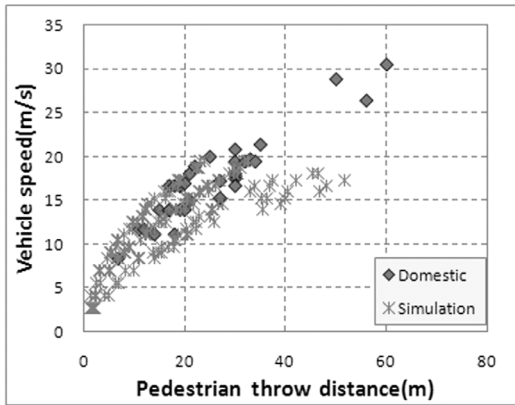


Fig. 4 Domestic empirical data

-10°)에서 차량 충돌속도가 7.0m/s인 보행자 충돌 사고에 대하여 PC-crash 시뮬레이션 해석을 수행한 결과가 Fig. 2에 그래픽으로 보여지고 있다.

본 연구를 통하여 구축한 시뮬레이션 해석 자료들의 신뢰도를 확인하기 위하여 모든 구배에서의 경사길 PC-crash 시뮬레이션 해석 결과와 국내외 실제 사고 및 실험 자료를 각각 비교한 것을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 시뮬레이션에서 보행자 전도 거리에 따른 차량의 충돌 속도가 실제사고 자료에서의 차량 충돌 속도보다 국내외 모두 약간 아래에 분포하지만 20m/s(72km/h)의 고속을 제외하고는 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 국외 자료는 Han 등¹⁰⁾이 제시된 실제사고 및 더미 실험 자료를 포함하여 다양하게 총 418건으로 구성되어 있으며, 국내 자료는 확보하기가 어려워 Lee 등⁶⁾이 발표한 34건의 실

제사고 자료만을 활용하였다. 그런데, 이 해외자료는 시기, 장소 및 책임자 등이 상이한 발표 그룹만 각각 11개에 이르고 각각의 그룹에도 다양한 자료가 혼재되어 있을 뿐만 아니라 보행자 전도 거리와 차량의 충돌 속도 이외의 다른 사고 정보는 대개 부족하여 다루는 데 어려움이 따랐다.

이와 같이 실제 사고 자료들과의 비교를 통하여 신뢰성이 확인된 경사길 보행자 충돌 사고에 관한 시뮬레이션 결과 자료들은 2장에서 제시한 충돌 모델 근사식 (15)를 검증하기 위하여 활용되었다. 보행자의 투사각 θ 값으로 $\tan^{-1}f_p$ 과, Han 등¹⁰⁾이 제시한 5~10° 사이의 값들로 시뮬레이션 결과 자료들과 비교하면 5°일 때가 비교적 좋은 일치를 보여주었다. Fig. 5와 Fig. 6은 평균적인 보행자 마찰계수 $f_p = 0.7$ 일 때 Wrap과 Forward projection 충돌 유형별로 각각 경사길 충돌사고 재구성 모델을 표현하는 곡선과 시뮬레이션 자료들을 비교한 것이다. Fig. 5의 Wrap유형에서는 매우 좋은 일치를 보여주는 데, Fig. 6의 Forward projection 유형에서는 특히 내리막 경사길(-10°)에서 차량의 충돌 속도가 대개 2m/s(7.2km/h) 정도의 차이로 비교적 높게 나타나고 있다. 세단형 차량과 성인(남)의 충돌 사고 시뮬레이션에서 Forward projection 유형은 주로 저속 충돌일 때 발생하는데, 이러한 저속 충돌에서는 통상 보행자의 미끄럼 단계가 짧아 마찰계수의 영향을 상대적으로 적게 받게 되고 마찰계수에 따라서 계수 A와 B값이 변화하는 충돌 모델 근사식과의 차이가 더 커진 것으로 판단된다. Van형 차량이나 어린이 보행자의 충돌과 같이 고속 충돌에서의 Forward projection 자료들을 포함한다면 이 차이는 감소할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시하는 보행자 충돌사고 재구성 모델은 도로 구배나 마찰 계수 등 사고 현장에서 최소한의 부가적인 정보의 추가 획득을 통하여 기존의 경험적인 분석 모형들보다 편리하고 훨씬 정확한 분석을 가능하게 할 수 있을 것으로 여겨진다.

4. 불확실성을 고려한 사고재구성 모델

사고 현장에서 보행자 전도거리 이외에 충돌 사고에 관한 정보의 확보가 어려운 상황을 위해서 최

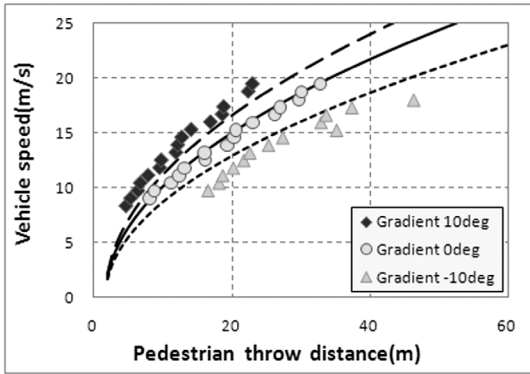


Fig. 5 Pedestrian impact model (Wrap, $f_p=0.7$)

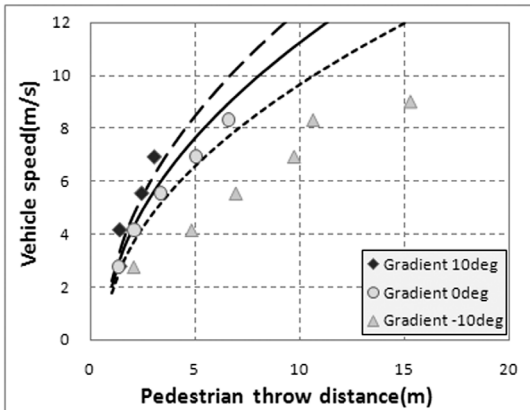


Fig. 6 Pedestrian impact model (Forward proj., $f_p=0.7$)

소자승법을 활용한 곡선적합 모델과 소송 등에서 신뢰도를 높이기 위하여 추정 속도의 불확실성에 대한 평가 방안도 함께 제시한다. 본 연구에서는 충분한 그리고 적절한 실제 보행자 충돌사고 혹은 주의 깊게 정리된 실험 데이터 집합을 활용하여 식 (21)에 기반한 실용적인 재구성 모델을 구하였다.

$$v_{om} = A\sqrt{s_p - B} \quad (21)$$

본 연구에서 확보한 보행자 충돌 사고 데이터 집합은 해외 418건의 사고 및 실험 데이터, 국내 34건의 사고 데이터 그리고 PC-Crash 시뮬레이션을 통하여 구축한 179건의 시뮬레이션 데이터들이 있다. 그런데, 2장에서의 결과에 따르면, 식 (18)에 보여지는 보행자 충돌해석 결과를 사용할 때 사고 형태나 노면건인계수 혹은 도로구배 등에 따라 A 와 B 의 값이 변화하게 된다. 따라서, 이에 상응하게 데이터

집합을 구분하여 재구성 모델을 작성하는 것이 정확도를 높이는 방안이 될 것이다.

식 (21)에 보여지는 계수 A 와 B 의 값을 그에 상응하는 보행자 충돌사고 데이터 집합에 대하여 구하기 위해서 최소자승법을 채용하였다. 식 (22)에서 볼 수 있는 것처럼, 실제 충돌 속도와 최소자승 적합에 의해 결정되는 값과의 차이인 잔차(residual) ϵ 의 제곱평균(root mean square, rms)인 σ 값을 최소로 하는 음수가 아닌 A 와 B 를 계산하도록 하였다.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_n \epsilon^2 \quad (22)$$

여기서,

$$\epsilon = v_{c0e} - v_{c0m}(A, B) \quad (23)$$

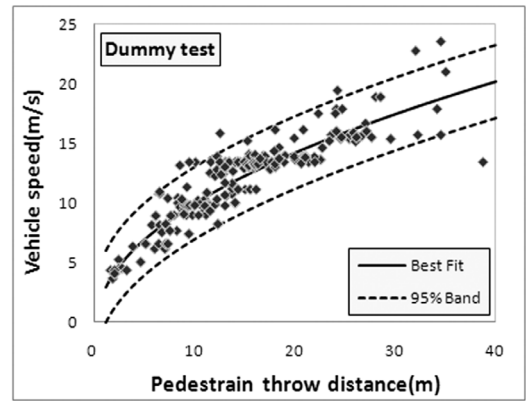
식 (22)와 (23)에서 n 은 특정 데이터 집합에서 사건 데이터의 개수이며 ‘ m ’은 v_{c0} 의 최소자승 적합 모델 값 그리고 ‘ e ’는 실험값을 의미한다.

본 연구에서는 개별 사건의 재구성과 관련하여 추정된 차량 충돌 속도의 불확실성에 대한 고려를 포함하였다. 일반인들의 법정 소송에서는 통상 95%의 범위가 적정한 것으로 알려져 있다. 이는 실제 충돌사고 20건 중에서 1건만이 예측구간을 벗어난다는 것을 의미한다. 충분한 크기의 데이터 집합에 대하여 충돌 속도 잔차의 정규분포를 가정하면, 상응하는 모든 사고데이터의 95%가 적합 모델값 v_{c0m} 으로부터 $\pm 1.96\sigma$ 의 잔차를 벗어나지 않는다고 예측할 수 있다. 여기서 95% 예측 구간(prediction interval)은 이보다 훨씬 좁은 폭을 가지게 되는 95% 신뢰 구간(confidence interval)과는 명확하게 구분되어야 한다. 신뢰구간은 상응하는 신뢰도로 적합곡선이 존재하는 범위를 의미할 뿐이며 재구성 모델식에 의해 추정된 차량의 충돌 속도값의 정확도와는 직접적인 관련이 없게 된다. 즉, 대다수의 데이터 사건에 있어 각각의 잔차가 매우 크더라도 신뢰 구간은 좁게 나타날 수가 있다.⁴⁾ 따라서, 지정된 사고데이터 집합에 대하여 최소자승 적합에 의해 계산된 계수 A 와 B 의 값을 가지고 사건 데이터 건수의 95%의 범위 이내로 추정되는 차량의 충돌 속도 v_{c0} 는 식 (24)에 보여지는 것처럼 나타낼 수 있다.

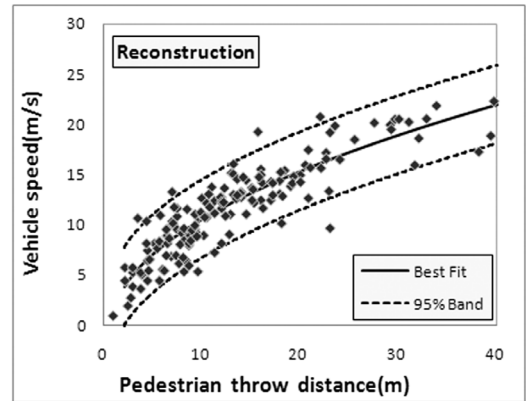
$$A\sqrt{s_p - B} - 1.96\sigma \leq v_{d0} \leq A\sqrt{s_p - B} + 1.96\sigma \quad (24)$$

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 해외와 국내 데이터 집합들에 대하여 보행자 전도거리-자동차 충돌 속도 최소자승적합 곡선, 95% 예측구간과 실제 사고 데이터들을 보여주고 있다. 해외 더미 테스트의 95% 반폭대역(band-half width)이 시속 10km 정도이고 국내외 실제 사고 데이터들은 서로 비슷한 정도이며 다소 더 넓게 나타남을 볼 수 있다. 이 데이터들은 관련된 세부 정보가 부족할 뿐만 아니라 다양한 그룹들이 혼재되어 있는 실제 보행자 충돌사고들이므로 예측구간이 상당히 넓은 것으로 보인다. Fig. 9는 도로구배에 추가해서 마찰계수나 충돌 유형 등에 관한 정보를 소상히 알 수 있는 시뮬레이션 데이터들에 관한 최적 적합 곡선과 데이터들을 보여주고 있는데, 95% 대역은 고려할 필요가 없을 정도로 도로구배별로 대단히 훌륭한 적합을 보여주고 있다.

Table 2는 국내외 실제 사고 및 시뮬레이션 데이터 집합들에 대하여 그룹별로 해석을 수행한 결과가 요약되어 있다. 전반적으로 시뮬레이션에서 모든 데이터가 혼재(total)되어 있는 경우를 제외하고는 도로구배 등의 사고 현장에 관한 정보가 알려져(구분되어) 있는 그룹의 시뮬레이션 데이터들에 대한 95% 반폭 대역이 실제 사고 데이터들에 비해서 훨씬 좁게 나타남을 볼 수 있다. 또한, 도로구배에



(a) Dummy test



(b) Real accident data (reconstructed)

Fig. 7 Best fit for foreign empirical data

Table 2 Least-squares fitted models and 95% band

Data set		A	B	n	95% band half (km/h)
Foreign	Accid	3.52	0.94	163	13.98
	Dummy	3.20	0.25	255	10.87
Domes	Accid	3.69	2.15	34	12.38
Simul	Total	3.10	0	179	16.25
Simul	$\varphi = 0^\circ$	3.36	0.70	63	2.24
	$\varphi = -10^\circ$	2.61	1.21	56	5.77
	$\varphi = 10^\circ$	4.05	0.53	60	2.74
Simul-wrap $f_p=0.7$	$\varphi = 0^\circ$	3.41	1.34	16	2.29
	$\varphi = -10^\circ$	2.92	4.09	13	4.08
	$\varphi = 10^\circ$	4.00	0.24	16	2.06
Simul-forw $f_p=0.7$	$\varphi = 0^\circ$	3.39	0.64	5	0.67
	$\varphi = -10^\circ$	2.42	1.00	6	3.22
	$\varphi = 10^\circ$	4.51	0.80	4	3.67

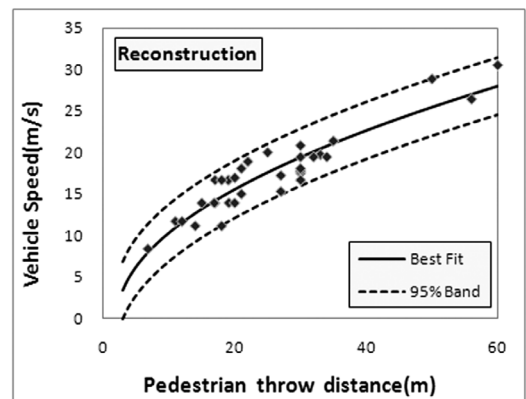


Fig. 8 Best fit for domestic empirical data

추가해서 마찰계수나 충돌 유형 등에 관한 정보가 추가적으로 알려지는 경우에도 95% 대역은 더욱 감소함을 확인할 수 있다.

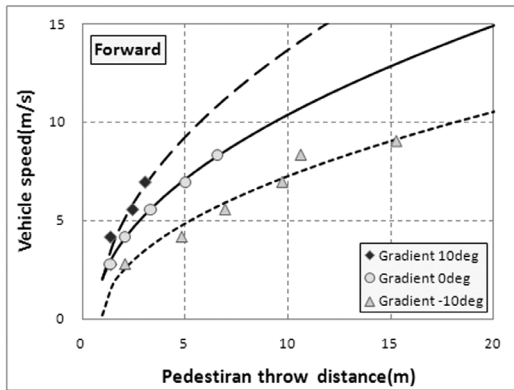
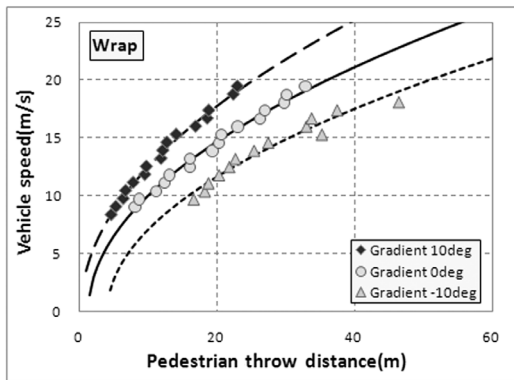
(a) Forward projection, $f_p=0.7$ (b) Wrap, $f_p=0.7$

Fig. 9 Best fit for specific simulation data group

5. 결론

본 연구에서는 역학적인 해석에 근거하여 경사길에서 발생하는 보행자 충돌 사고에서 차량의 충돌 속도를 정확하게 추정할 수 있는 지나치게 복잡하지 않은 충돌사고 해석 모델을 제시하였다. 과거 수십년동안에 보행자 전도거리의 정밀한 측정이 가능해짐에 따라 차량의 충돌 속도를 상당히 정확하게 추정하는 것이 가능하게 되었다. 그런데, 기존 연구들에서처럼 도로 구배를 고려하지 않는 경우 추정되는 차량 속도의 오차가 15%에 이르는 것으로 나타났다. 경사길에 관한 실제 사고나 실험 데이터의 확보가 가능하지 않았으므로, 신중하게 검증된 다중물체동역학 시뮬레이션을 국내 상황과 유사한 여러 가지 다양한 계수들과 조건하에서 반복적으로 수행한 결과들을 대상으로 경사길 사고에 대한 충

돌 사고 모델의 유효성을 입증하였다. 이와 같이 개발한 보행자 충돌사고 해석 모델은 사고 현장에서 최소한의 부가적인 정보의 추가 획득을 통하여 기존의 경험적인 분석 모형들보다 편리하고 훨씬 정확한 분석을 가능하게 할 수 있을 것으로 여겨진다. 그리고, 경사길 보행자 충돌사고현장에서 측정이 비교적 용이한 몇 개의 단순한 계수 값들에 근거하여 차량의 충돌속도를 추정할 수 있는 간단한 근사식들을, 보행자와 차량 전면부 충돌 사고의 거의 대부분을 차지하고 있는 wrap과 forward projection 충돌을 대상으로 각각의 유형별로 구하였다.

사고 현장에서 충돌 사고에 관한 정보의 확보가 어려운 상황을 위해서는 최소자승법을 활용한 곡선적합 모델과 아울러 실제 관련 수사 및 소송 등에서 신뢰도를 높이기 위하여 불확실성에 대한 추정도 함께 제시하였다. 보행자 전도 거리에 따른 차량의 충돌속도에 대한 최소자승 적합 곡선은 수백건의 국내외 사고 및 실험 데이터 그리고 신중하게 구축된 다중물체 동역학 시뮬레이션 결과들을 대상으로 그 유효성을 입증하였다. 또한, 불확실성에 대한 평가지표로 본 연구에서 채용한 95% 대역은 통상의 신뢰구간보다 그 폭이 다소 넓게 나타나긴 하지만 충돌 속도에 대한 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 좋은 지표로 기능함을 보여주었다. 사고 재구성 모델로 제시한 보행자 전도 거리에 따른 충돌 속도에 대한 최소자승 적합곡선과 예측 구간은 각종 연구나 조사 및 소송 업무 등에서 당장의 간편한 활용이 가능할 것이다. 또한, 국내에서 보행자 충돌 사고에 대한 제반 정보들이 체계적으로 수집되어 방대한 규모의 DB가 구축된다면, 이에 근거하여 지역이나 계절 혹은 특정 그룹 별로 효과적이고 정확한 사고 재구성 모델의 맞춤형 제작이 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0015985)이며, 시뮬레이션 수행과 도표 작성에 홍익대학교 기계정보공학과 박태영 학생이 도움을 주었습니다.

References

- 1) C. Simms and D. Wood, Pedestrian and Cyclist Impact, Springer, Heidelberg, 2009.
- 2) Korean National Police Agency, Road Traffic Accidents in Korea 2009, Korean National Police Agency, 2010.
- 3) R. Limpert, Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, 4th Edn., The Michie Company, Charlottesville, Va., 1994.
- 4) A. K. Evans and R. Smith, "Vehicle Speed Calculation from Pedestrian Throw Distance," Journal of Automobile Engineering (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D), Vol.213, No.5, pp.441-448, 1999.
- 5) A. Happer, M. Araszewski, A. Toor, R. Overgaard and R. Johal, "Comprehensive Analysis Method for Vehicle/Pedestrian Collisions," SAE 2000-01-0846, 2000.
- 6) S. Lee and T. Lui, "Development of Korean Pedestrian Accident Reconstruction Model," Journal of Korea Society of Transportation, Vol.23, No.6, pp.103-113, 2005.
- 7) J. Van. Wijk, J. Wismans, J. Maltha and L. Wittebrood, "MADYMO Pedestrian Simulations," SAE 830060, 1983.
- 8) D. P. Wood, "Impact and Movement of Pedestrians in Frontal Collisions with Vehicles," Journal of Automobile Engineering (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D), Vol.202, pp.101-110, 1988.
- 9) A. Moser, H. Steffan, H. Hoschopf and G. Kasanicky, "Validation of the PC-crash Pedestrian Model," SAE 2000-01-0847, 2000.
- 10) I. Han and R. M. Brach, "Impact Throw Model for Vehicle-pedestrian Collision Reconstruction," Journal of Automobile Engineering (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D), Vol.216, No.6, pp.443-453, 2002.
- 11) D. Vangi, "A Fuzzy Approach to Reconstructing Vehicle-pedestrian Collisions," Vehicle System Dynamics, Vol.47, No.9, pp.1117-1121, 2009.
- 12) T. Park and I. Han, "Reconstruction Analysis of Pedestrian Collision Accidents Using Fuzzy Methods," Journal of Korea Society of Transportation, Vol.29, No.1, pp.125-134, 2011.
- 13) Y. Wenga, X. Jin, Z. Zhaoa and X. Zhanga, "Car-to-Pedestrian Collision Reconstruction with Injury as an Evaluation Index," Accident Analysis and Prevention, Vol.42, pp.1320-1325, 2010.
- 14) I. Han, "Continuous Contact Force Model for Low-speed Rear-end Vehicle Impacts," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.181-191, 2006.
- 15) R. W. G. Anderson, A. D. Long and T. Serre, "Phenomenological Continuous Contact-impact Modelling for Multibody Simulations of Pedestrian-vehicle Contact Interactions Based on Experimental Data," Nonlinear Dynamics, Vol.58, pp.199-208, 2009.
- 16) R. Limpert, Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, 4th Edn., The Michie Company, Suppl., 1998.
- 17) B. Ravani, D. Brougham and R. T. Mason, "Pedestrian Post-impact Kinematics and Injury Patterns," SAE 811024, 1981.
- 18) I. Han and B. J. Gilmore, "Multi-body Impact Motion with Friction-analysis, Simulation, and Experimental Validation," ASME Trans. Journal of Mechanical Design, Vol.115, No.3, pp.412-422, 1993.
- 19) D. Steffan, PC-crash Operating Manual, Austria, 2005.
- 20) J. Jo, C. Oh, N. Kim and M. Jang, "A Study on Pedestrian Accident Reconstruction Models : Comparison and Improvement," Journal of Korea Society of Transportation, Vol.25, No.4, pp.69-77, 2007.
- 21) Minister of Culture, Sports and Tourism, 2009 Survey Report of National Physical Fitness, 2009.