

보행자의 충돌 사고에서 보행자 전도거리에 영향을 주는 인자에 관한 연구

A Study on the Factors that Influence the Throw Distance of Pedestrian on the Vehicle-Pedestrian Accident

강대민 · 안승모

D. M. Kang and S. M. Ahn

(접수일 : 2007년 7월 18일, 수정일 : 2009년 1월 12일, 채택확정 : 2009년 2월 27일)

Key Words : Pedestrian(보행자), Throw Distance(전도 거리), Traffic Accident (교통사고), Offset(편심), Impact Speed(충격 속도)

Abstract : The fatalities of pedestrian account for about 40.0% of all fatalities in Korea 2005. Vehicle -Pedestrian accident generates trajectory of pedestrian. In pedestrian involved accident, the most important data to inspect accident is throw distance of pedestrian. The throw distance of pedestrian can be influenced by many variables. But existing studies have been done for simple factors. The variables that influence trajectory of pedestrian can be classified into vehicular factors, pedestrian factors, and road factors. The trajectory of pedestrian, dynamic characteristics of multi-body were analyzed by PC-CRASH, a kinetic analysis program for a traffic accident. PC-CRASH enables an analyst to investigate the effect of many variables. The influence of the offset of impact point was analyzed by Working Model. Based on the results, the variables that influence trajectory of pedestrian were vehicular frontal shape, vehicular impact speed, the offset of impact point, the height of pedestrian, friction coefficients of pedestrian. However the weight of pedestrian did not affect trajectory of pedestrian considerably.

기호 설명

$\overline{\omega}_i, \dot{\omega}_i$: 각 속도(rad/s), 각 가속도(rad/s²)

- a : 차량 감속도(m/s²)
- d : 보행자의 전도 거리(m)
- e : 반발계수
- g : 중력가속도(9.8 m/s²)
- h : 보행자의 무게 중심고(m)
- m_{1,2} : 질량(kg)
- \overline{M}_j : 외력에 의한 모멘트(kg-m)
- S : 강성계수
- V : 차량의 충돌 속도(m/s)
- e : 복원계수
- θ_i : 로컬 좌표계에서 타원체의 질량 텐서
- λ : 압축량(m)
- μ : 역적비

1. 서론

국내의 사고 통계에 의하면, 2005년 한 해 동안 전체 214,171건의 교통사고가 발생하였으며 이중 보행자 사고는 46,594건이 발생하여 보행자 사고의 발생 건수는 전체 발생 건수 중에서 21.8%로 상당히 많은 빈도수를 차지하며, 전체 교통사고 사망자수는 6,376명 중 보행자 사고로 인한 사망자는 전체의 40.0%인 2,548명으로 보행자 사고의 치명도는 타 사고에 비해 상당히 높으며 보행자 사고로 인한 사회적 손실이 심각한 것이 현실이다¹⁾. 보행자 사고의 심각성에 비해 보행자 교통사고에 관한 조사 및 충돌 순간 차량 속도 분석 기법에 대한 연구는 단순 인자만 고려하여 분석하는 방법에 의존하는 아직 초보적인 단계에 머물러 있다.

차 대 보행자 사고의 분석 자료는 보행자의 부상

안승모(책임저자) : 도로교통공단 연구원
E-mail : car0749@rtsa.or.kr, Tel : 051-629-9127
강대민 : 부경대학교 기계공학부

정도, 사고 차량의 변형 정도 등 충돌 대상물의 변형 정도에 관한 자료와 사고 현장 노면에 발생한 충돌 대상물의 위치에 관한 자료로 분별할 수 있다. 충돌 대상물의 변형 정도에 관하여 한계적인 수치분석 예는 제시된 바가 있으나²⁾, 충돌 대상물의 포괄적인 변형 정도와 상관되는 수치 분석 방법은 현재 제시된 바 없으므로 충돌 대상물의 위치 자료를 근거로 한 분석 방법만이 보행자 사고 분석에 관한 유일한 포괄적 분석 방법이다. 충돌 대상물의 위치적 자료는 보행자의 최종 전도 지점과 사고 차량의 최종 정지 지점, 충돌로 인하여 발생한 차량 파편물의 낙하지점에 관한 자료이다. 사고 차량의 최종 정지 지점의 경우 운전자의 의도 및 사고 순간적 상황에 의해 가변될 수 있으므로 사고 분석에 있어 절대적인 증거 자료로 채택하기는 어려우나, 차량 파편물의 낙하지점과 보행자의 최종 전도 지점은 차량 대 보행자간의 운동학적 및 운동역학적인 상호 관계에 의해 결정되므로 보행자 사고 분석에 있어 가장 핵심적인 증거 자료이다. 차량 파편물의 낙하지점과 보행자의 최종 전도 지점으로 도출되는 분석 자료는 보행자가 충돌 후 날아간 거리, 즉 보행자의 전도 거리이다. 보행자의 전도 거리는 충돌 순간 속도, 충돌 지점 예측 등 보행자 사고 분석에 있어 가장 중요한 핵심 자료이다. 보행자의 전도 거리는 차량의 충격 속도에만 상관하는 단순 상관관계를 가지지 않고 다중 인자에 영향을 받는 복합적인 상관관계를 나타내며, 본 연구에서는 사고와 관련된 전반적인 인자 중에서 어떤 인자가 연관적으로 작용하는지에 관하여 연구하였다.

2. 이론 해석

2.1 해석방법

보행자의 운동 거동 및 보행자의 충격 시 인체의 안전도를 분석하기 위한 역학적 방법으로 보행자 신체 및 보행자 더미를 이용한 풀 스케일 테스트, 보행자 신체의 일부분을 개발하여 충돌 실험을 수행하는 컴포넌트 테스트가 있다³⁾. 보행자 전도 거리의 상관 인자 연구를 위해선 보행자 신체 일부분만 충돌하는 컴포넌트 테스트는 다물체 운동을 하는 보행자의 운동 역학적 거동을 분석하기는 부적합하고, 보행자 전도 거리에 관한 연구는 다양한 스케일의 보행자 더미가 구비되어야 하고 많은 충돌 대상 차량이 요구되므로, 보행자 더미와 차량을 이용한 실험은 충돌 장비에 의한 경제적인 제약, 충돌 실험 장소의 제약

등 많은 제약 요소로 인해 실행되기 어렵다. 이에 반해 컴퓨터 시뮬레이션 테스트는 자동차와 보행자를 3차원으로 모델링하여 다양한 충돌 변수를 고려하여 모의 충돌 실험을 수행할 수 있고, 실제 보행자를 대상으로 한 실험 및 풀 스케일 테스트, 컴포넌트 테스트에서 해석이 곤란한 여러 상황적 조건을 가변적으로 분석할 수 있다. 보행자 전도 거리 등 보행자 거동 해석 시뮬레이션 프로그램에 관하여 PC-CRASH 시뮬레이션 프로그램은 동역학 관련 상용 프로그램에 비해 실제 사고 도로 환경과 유사하게 도로의 경사, 노면 건조, 습윤 정도 등의 가상의 도로 환경 구현이 가능하고 보행자 모델의 크기 및 중량 등 스케일을 임의적으로 변경 가능하며, 차량을 보행자 충돌로 인해 손상 변형이 없는 강체 모델을 전제로 다양한 차량 모델이 제시되어져 있으므로⁴⁾, 본 연구에서는 PC-CRASH 교통사고 해석 전용 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다.

2.2 해석 조건

강성 체와 연성 체간의 충돌인 차 대 보행자 사고에 있어 실제 차량의 변형 정도는 강체로 취급되어도 무방할 만큼 미진한 상태이므로, PC-CRASH 컴퓨터 시뮬레이션에서 차량 모델은 강체로 모델링되어져 있다. 보행자 사고에서 보행자의 전도 거리는 차량의 전면 구조 형상에 상관적으로 가변되며 차량의 전면 구조 형상 등 차량 외형에 관한 모델은 실제 차량의 전면 구조 형상과 거의 일치되는 3D-DXF Drawing을 강체 모델에 적용하여 차량을 실제 차량과 근사적으로 모델링하였다. Van 모델은 Astro Van, Bus 모델은 Scania Eurostar, SUV 모델은 Nissan Pathfinder, Sedan형은 BMW535 모델을 기본 모델로 하였다.

보행자 모델링은 개별 질량과 독립적인 복원력 및 강도, 마찰력을 가지는 20개의 관절체가 내부 마찰이 있는 19개의 운동학적 접합 조인트에 의해 연결되어 다물체 운동을 하는 구조이다. 연결 관절체에 관해 기하 특성은 식(1), Fig. 1과 같고, 보행자 모델을 구성하는 타원 관절체는 타원 관절체 별로 각각의 기하구조와 질량, 관성 모멘트, 강성계수, 마찰계수를 가진다.

$$\left(\frac{|x|}{a}\right)^n + \left(\frac{|y|}{b}\right)^n + \left(\frac{|z|}{c}\right)^n = 1 \quad (1)$$

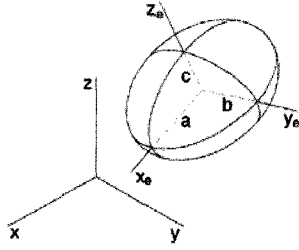


Fig. 1 Ellipsoid model of pedestrian

연결 관절체의 결합 모델은 Fig. 2와 같으며 연결 조인트는 X,Y,Z축 방향으로 자유 회전을 하고 무한 강성을 가지며, 특정 방향으로 회전 구속을 나타내는 인체 특성을 고려하여 특정 방향으로 회전 저항을 부가하여 인체의 관절 특성을 나타내었다.

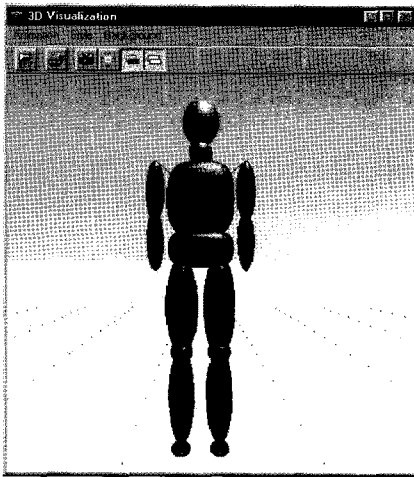


Fig. 2 Modeling of pedestrian

다물체 시스템의 시뮬레이션에 대해 개별 관절체에 작용하는 중력, 충격력, 마찰력, 구속력 등 외력은 연산 단계 별로 계산되고, 외력이 먼저 결정되면 관절체의 개별 운동은 운동 방정식의 산술적 연산에 의해 도출된다.

보행자 관절을 구성하는 타원 관절체의 외력의 영향에 의한 운동은 힘과 모멘트의 평형운동방정식에 의해 식(2), (3), (4)와 같이 기술된다⁵⁾.

$$m_i \cdot a = \sum_j \vec{F}_j \quad (2)$$

$$\theta_i \cdot \vec{\omega}_i + \vec{\omega}_i \times \theta_i \cdot \vec{\omega}_i = \sum_j \vec{M}_j \quad (3)$$

$$\theta_i = \begin{pmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix} \quad (4)$$

해석 시 고려해야할 사항은 차량의 표면은 몇 개의 평면으로 구성되어 있고, 충돌에 관한 가정은 충돌은 차량 외부 평면의 표면에서 발생하고 차량의 강성은 보행자의 강성에 비해 월등히 강하며 차량의 변형은 무시될 만큼 작다고 가정한다. 차량 모델과 보행자 모델간의 접촉 상태는 내부적으로 접촉 다각형 평면을 결정하는 3개의 점을 포함하고 있는 접촉 평면에 의해 결정되며 차량 충돌에 의한 보행자 모델 타원체의 변형 깊이는 접촉 다각형에 의해 결정되는 접촉 평면과 보행자 바디 타원체의 표면상에 존재하는 접촉 평면과 나란한 접선 평면간의 거리로 나타낼 수 있다. 접촉 평면의 접선 성분은 타원체와 차량 및 노면 표면간의 개별 마찰계수로 역산되고, 보행자 충격에 의한 반발력은 차량에 의한 충격력에 기인하므로 보행자 충격에 의한 충돌 후 차량의 영향은 보행자가 받는 충격력에 상대적인 상태로 해석된다.

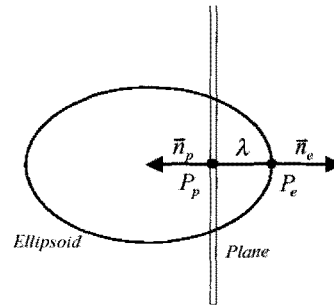


Fig. 3 Ellipsoid to plane contact model

보행자 충돌 모델은 Fig. 3과 같은 상태로 선형적인 강성 함수를 기본 해석 함수로 활용되며 보행자 바디 간의 충돌 및 타 물체 간의 충돌에도 적용된다. 복원 계수(ϵ)는 식 (5), (6)에서 충돌 순간 동안 충돌 물체의 탄성에너지 량을 결정한다.

$$\vec{F}_{napp} = \lambda \cdot S \quad (5)$$

$$\vec{F}_{nsep} = \epsilon \lambda \cdot S \quad (6)$$

여기서 아래첨자 $napp$ 는 압축 상태, $nsep$ 는 분리 상태를 의미한다.

3. 해석 결과

다중 관절체로 구성된 보행자 인체 모델의 전도 거리를 결정하는 인자를 차량 관련 인자와 보행자

관련 인자, 노면 관련 인자를 구분하여 각 절에서 관련 인자 별 보행자 전도 거리의 변화를 고찰하였다.

3.1 차량 관련 인자의 변화에 따른 고찰

3.1.1 차량 속도 변화

차량의 속도 변화와 관련하여 속도가 증가할수록 보행자의 전도 거리는 충돌 속도에 비례적인 관계로 증가하는 상태로 나타났다. 하야시 히로시 보행자 충돌 모형에 의하면 전도 거리는 식(7)과 같이 충돌 속도의 제곱에 비례적인 함수 관계를 나타낸다고 하며,⁶⁾ 차량 속도 변화에 따른 전도 거리는 Fig 4에서 하야시 히로시 보행자 충돌 모형과 같이 속도의 제곱에 비례하는 관계를 나타내었다.

$$d = 0.285 V + 0.0636 V^2 \quad (7)$$

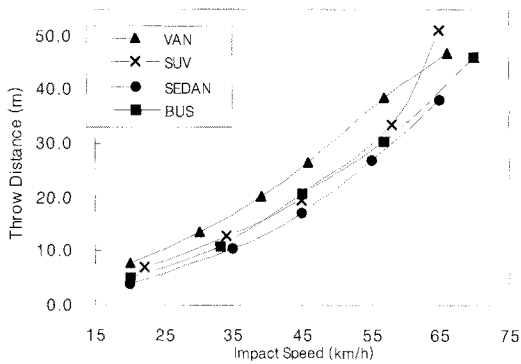


Fig. 4 Relationship between impact speed and throw distance

3.1.2 차량의 전면 형상

차량 전면 구조 형상에 따른 보행자의 전도 거리의 변화를 고찰한 바, Fig 2와 같이 보행자 충돌 후 튕겨져 날아가는 포물선 운동에서 이탈 각이 차량의 전면 구조 모형에 따라 영향을 받으므로 모델별로 상이한 결과를 나타내었다.

3.1.3 충돌 순간 차량 제동 상태

1975년 Stcherbatcheff 보행자 충돌 모형에 의하면 보행자의 충돌 후 이동 거리는 식(8)과 같이 차량의 충돌 속도와 차량의 감속도에 상관한다고 하나,⁷⁾ 충돌 순간 제동 중인 상황(Lag time : 0.0)과 충돌 0.2 초 후에 제동하는 상황(Lag time : 0.2)을 비교 분석한 결과 보행자의 전도 거리는 주기적으로 바뀌는 형상으로 도출되었지만 보행자 전도 거리는 식(8)과 같이 충돌 후 차량의 감속도에는 상관하지 않고 Fig. 5와 같이 충돌 순간 차량의 충격 속도와 상관하는

결과로 나타났다. 충돌 후 보행자는 차량과 이탈이 발생하여 개별 운동하는 독립된 물체이므로 충돌 후 전도 거리는 충돌 후 차량 운동 상태에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

$$d = \frac{V^2}{2a} + 0.03 Va \quad (8)$$

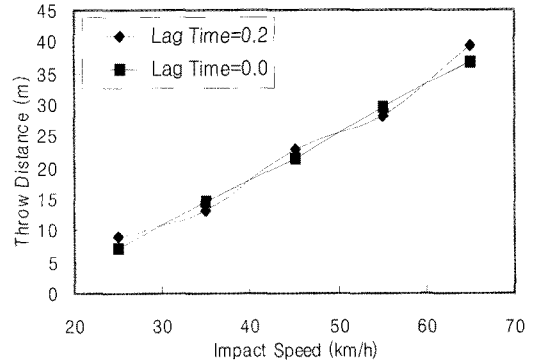


Fig. 5 Variation of braking status

3.1.4 충돌 지점의 차량 전면부 편심 충돌

차량의 전면 형상은 직선형의 박스 구조가 아니라 라운드 구조이며 충돌 순간 마찰을 고려한다면 충돌 순간 차체 라운드 형상에 상관되게 미끄럼에 의한 접선력이 발생하고 접선력은 보행자를 전방으로 이동케 하는 충격에너지를 분산시키는 역할을 한다⁸⁾. 그 결과 차량 전면 구조가 라운드 형상인 승용 차, SUV, VAN형 차량은 Fig. 6과 같이 읍셋이 증대될수록 전도거리는 감소되는 상태를 나타내었으나, Fig. 7과 같이 전면 구조가 직선형의 박스 구조인 버스는 읍셋에 따른 전도 거리는 큰 영향이 없었다. 0% 읍셋 상태와 40% 읍셋 상태의 전도 거리 차이에 비해 40% 읍셋 상태와 80% 읍셋 상태의 전도 거리 차이가 더 큰 차이를 나타내었으며, 읍셋이 증대될수록 완만히 감소하다 읍셋이 60%이상 증대되며 급격히 감소하는 상태를 나타내었다.

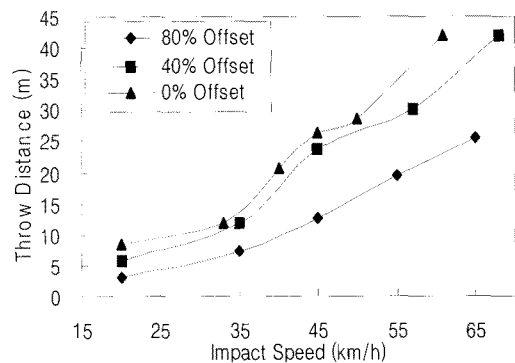


Fig. 6 Variation of offset point

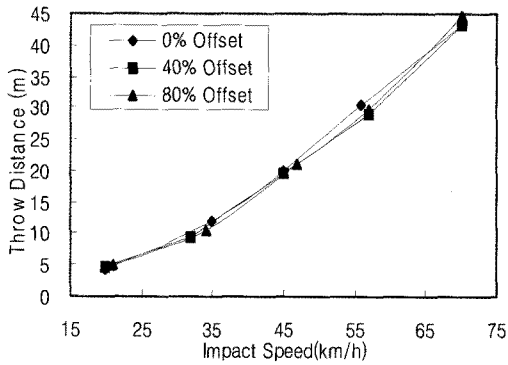


Fig. 7 Variation of offset point, bus

Fig. 6에서 충격 점의 오프셋이 증가함에 따라 전달 속도가 감소하는 이유에 관하여, 강체의 충돌에 관한 에너지 보존 식은 식(9)와 같이 쓸 수 있다⁹⁾.

$$m_1(V_{1n}^2 + V_{1t}^2)/2 + m_2(V_{2n}^2 + V_{2t}^2)/2 + T_L = m_1(v_{1n}^2 + v_{1t}^2)/2 + m_2(v_{2n}^2 + v_{2t}^2)/2 \quad (9)$$

여기서 대문자는 최종 속도, 소문자는 최초 속도를 의미하며, V_{in} 는 법선방향 속도 성분, V_{it} 접선 방향의 속도성분을 의미한다. T_L 은 에너지 손실로 충돌 순간에 소성 변형 등으로 변화된 운동에너지로 식(10)과 같다.

$$T_L = m(v_{2n} - v_{1n})^2(1 + e) \times [(1 - e) + 2\mu\gamma - (1 - e)\mu^2]/2 \quad (10)$$

여기서 m 은 $\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$, γ 는 $\frac{v_{2t} - v_{1t}}{v_{2n} - v_{1n}}$ 이다. 식(10)에 의하면 역적 비 μ 값이 증가할수록 T_L 이 증가하는 상태를 나타내며 μ 값의 증가는 접선 성분 (P_t)가 증가를 의미하고, 미끄럼에 의한 접선 성분 (P_n)이 증가를 하면 T_L 이 증가하는 상태를 나타낸다.

차 대 보행자 충돌에서 차량과 보행자를 강체로 취급한다면 접선력이 많이 작용하는 라운드 부분에서 충돌은 T_L 이 증대하여 운동에너지 전달이 감소하므로 결과적으로 보행자의 전도 거리 감소로 나타난다.

3.1.5 기타 차량 관련 상관인자

차량의 전면 구조의 재질 및 보강재의 두께 변화에 따라 보행자의 감속도가 낮은 형상으로 도출되므로¹⁰⁾, 차량의 전면 구조 재질과 보강재에 다소 영향을 받으나 시판 차량의 전면 구조 재질 및 보강재는 거의 유사한 상태이다. 그리고 차량의 후드가 보행자

충돌 시 보행자의 상해를 줄이기 위해 능동적으로 움기하는 차량의 경우 보행자 두부 상해치 값이 감소하는 상태로 나타났으므로¹¹⁾, 능동형 액티브 후드 장착 차량은 보행자 전도 거리에 영향을 미치나, 현재 시판 차량은 거의 없는 상태이므로, 위 인자에 관한 영향은 무시한다.

3.2 보행자 관련 인자의 변화에 따른 고찰

3.2.1 보행자의 신장 변화

보행자는 차량에 충격된 후 차체 후방으로 젖혀진 후 전방으로 날아가는 포물선 운동을 하므로 보행자의 포물선 운동은 보행자의 신체 중심 높이와 충격 지점 높이에 상관된다.

$$d = \frac{\sqrt{Vh}}{2.21} + \frac{V^2}{2gf_p} \quad (11)$$

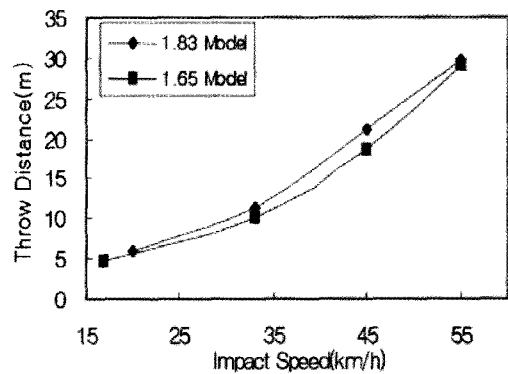


Fig. 8 Variation of pedestrians' height

1979년 Collins 보행자 충돌 모형에 의하면 보행자 전도 거리는 식(11)과 같이 신장의 제곱근에 비례적인 관계를 나타내며¹²⁾ 보행자 신장의 변화에 따른 보행자 전도 거리를 고찰한 바, Fig. 8에서와 같이 보행자의 전도 거리가 키가 클수록 증가하는 관계를 나타내었다.

3.2.2 보행자의 체중 변화

차 대 보행자의 충돌 순간에 있어 충돌 대상물 간의 운동량을 비교하면, 차량의 중량이 보행자의 중량에 비해 최소 10배 이상 큰 상태이다. 그리고 중량과 상관되는 운동량 역시 보행자의 운동량에 비해 월등히 큰 상태이다. Fig. 9는 PC-CRASH 프로그램을 활용하여 체중이 16kg에서 100kg까지 다양한 중량을 가진 보행자 모델을 버스 모델 차량이 30km/h의 속도로 충돌 시 보행자의 전도 거리를 나타낸 것으

로 보행자의 전도 거리는 보행자의 중량에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 충돌 물체 간의 과대 중량 차이로 인해 차량에 비해 과소한 중량을 가지는 보행자 중량은 전도 거리에 큰 영향을 나타내지 않는 것으로 나타났다.

3.3 노면 관련 인자의 변화에 따른 고찰

사고 순간의 기상 상태가 습윤 상태인지 건조 상태인지 여부에 따라 보행자 전도 거리가 어떤 관계를 나타내는지에 관해 고찰한 바, 습윤 상태의 전도 거리가 건조 상태에 비해 길게 나타나는 경향을 나타내었다. 보행자는 차량에 충돌된 후 포물선을 그리면서 튕겨나간 후 노면에 착지한지 후 노면을 활주하면서 이동하는데 노면 활주 구간에서 습윤 상태의 마찰 계수가 낮은 상태이므로 Fig. 10과 같이 습윤 상태의 전도 거리가 긴 상태로 도출되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 보행자의 전도 거리가 사고와 관련된 전반적인 인자 중에서 어떤 인자가 연관적으로 작용하는지에 관하여 분석 연구하였다.

1. 차량 관련 인자 중에서 보행자 전도 거리는 차량의 충돌 속도에 가장 큰 영향을 받았으며, 보행자 이탈 각이 차량의 전면 구조 형상에 따라 영향을 받으므로, 차량의 전면 구조 형상이 전도 거리에 영향을 주는 것으로 나타났다.
2. 보행자 충격 지점의 차체 전면부 움푹이 증대될수록 전도 거리는 감소하는 상태로 나타났으며, 충돌 순간 차량의 제동 상태에는 큰 영향을 받지 않았다.
3. 보행자의 신장은 보행자의 충돌 후 포물선 운동에 영향을 나타내므로, 보행자의 전도 거리에 영향을

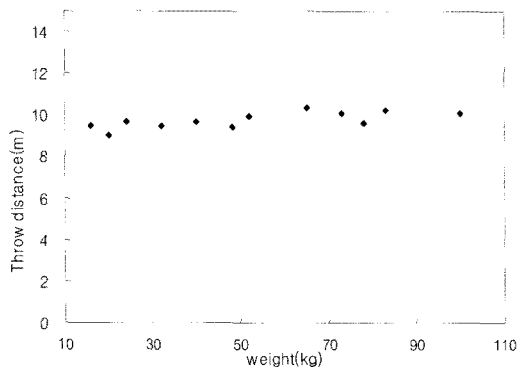


Fig. 9 Variation of pedestrians' weight

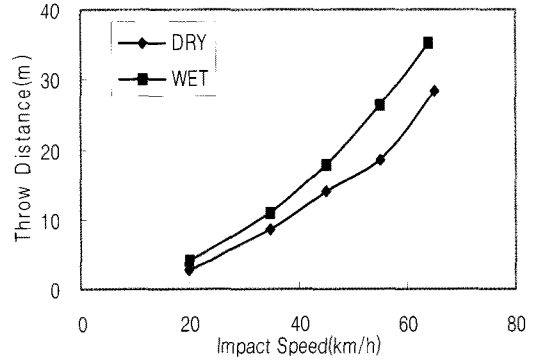


Fig. 10 Variation of road status

주는 인자로 나타났지만, 보행자의 체중은 충돌 순간 충돌체간의 운동량 차이로 인해 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

4. 노면 상태는 보행자의 노면 활주 이동 구간에서 습윤 상태의 마찰 계수가 낮은 상태이므로 습윤 상태의 전도 거리가 다소 긴 상태로 도출되었다.

참고 문헌

1. 교통사고분석센터, 2006, "교통사고통계분석", 도로교통안전관리공단, p. 266.
2. 林洋, 山上勝, 大慈彌 雅弘, 1992, "自動車事故鑑定技法", 法律新聞社, p. 108.
3. 日本自動車技術會, 1996, "自動車工學技術大辭典基礎理論編". 科學技術, p. 349.
4. A. Moser, H. Steffan, G. Kasanicky, 1996, "The Pedestrian Model in PC-CRASH- The Introduction of a Multi Body System and its Validation" SAE International, 1999-01-0445
5. A. Steffan Datentechnik, 2001, "PC-CRASH Technical Manual", Macinnis Engineering Associates., p. 58.
6. 林洋, 1992, "實用自動車事故鑑定工學", 技術書院, pp. 188~194.
7. Jerry J. Eubanks, 1992, "Pedestrian Involved Traffic collision Reconstruction Methodology", SAE921591. 1992.
8. 한인환, 조정호, 1996, "마찰력이 개재된 3차원 강체충돌 해석 -타원체간 충돌-", 대한기계학회 논문집(A) 제20권 5호, pp. 1486~14976.
9. 이상길, 1990, "자동차 충돌 시 충격 모델에 관한 고찰", 한국자동차공학회 1990년도 생산기술 및 관리, 전기 및 전자, 안전부분위원회 학술강연초

록.

10. 김재현, 권성은, 2006, "보행자 보호를 위한 범퍼 보강재 형상 및 두께 변화에 따른 다리모형 데이터의 연구", 한국자동차공학회 2006년도 춘계학술대회논문집, pp. 1175~1180.
11. 이근배, 배한일, 정한조, 2006, "보행자 머리 상해 저감용 액티브 후드 리프트 시스템 개발 연구", 한국자동차공학회 2006년도 학술대회논문집, pp. 1218~1223.
12. 유장석, 박경진, 장명순, 2005, "차량 충돌 형상과 충돌 형태에 따른 보행자 거동 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제13권 4호, pp. 8~18.