

차 대 보행자 충돌시 사고해석 모델개발

강 대 민^{*1)} · 안 승 모²⁾ · 안 정 오³⁾부경대학교 기계공학부¹⁾ · 도로교통공단²⁾ · 부경대학교 대학원³⁾

Development of Accident Analysis Model in Car to Pedestrian Accident

DaeMin Kang^{*1)} · SeungMo Ahn²⁾ · JungO An³⁾¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea²⁾Road Traffic Safety Cooperater, Reseacher, 580-8 Dae Yeon 3-dong, Nam-gu, Busan 608-810, Korea³⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 12 August 2009 / Accepted 14 November 2009)

Abstract : The fatality of pedestrian accounts for about 21.2% of all fatality at 2007 year in Korea. In car to pedestrian accident it is very important to inspect the throw distance of pedestrian after collision for exact reconstructing of the accident . The variables that influence on the throw distance of pedestrian can be classified into the factors of vehicle and pedestrian, and road condition. It was simulated by PC-CRASH, a kinetic analysis program for a traffic accident in sedan type vehicle and SPSS program was used for regression analysis. From the results, the throw distance of pedestrian increased with the increasing of vehicle velocity, and decreased with the increasing of impact offset. Also it decreased with the increasing of velocity of pedestrian at accident, and throw distance at the road condition of wet was longer than that at dry condition. Finally, the regression model of sedan type vehicle on the throw distance of pedestrian was as follows;

$$dist_i = 2.39 - 0.11offset_i + 0.59speed_i - 5.45height_i - 0.25walk_i + 2.78wet_i + \epsilon_i$$

Key words : Throw distance(전도 거리), Factors of pedestrian & vehicle(보행자와 차량조건), Road condition(노면 상태), Regression analysis(회귀분석), Impact velocity & offset(충돌속도 및 오프셋)

1. 서 론

최근 국내의 교통사고분석에 따르면 1980년 이후 발생한 전체교통사고 총 6,111,025건(2007년; 211,662건) 중 차 대 보행자사고가 36.2%(2007년; 44,857건, 21.2%)로서 상당히 많은 빈도수를 차지하며, 같은 기간에 보행자 사고로 인한 사망자수도 전체 교통사고 사망자수 247,491명(2007년; 6,166명)중 113,251명(2007년; 2,237명)으로 보행자 사고로 인한 사회적 손실이 심각하다.¹⁾ 이러한 보행자의 차량 사고 시 사고분석을 위한 자료는 보행자의 부상 정도, 사

고 차량의 변형 정도 등 충돌 대상물의 변형 정도에 관한 자료와 사고 현장 노면에 발생된 충돌 대상물의 위치에 관한 자료로 분별할 수 있다. 그러나 가장 핵심적인 증거자료는 보행자가 충돌후 날아간 거리 즉, 보행자의 전도거리가 보행자 사고 분석에 있어 가장 중요한 자료가 되고 이것은 차량과 보행자의 조건, 그리고 노면상황에 따라 다르게 나타난다.

한편 차 대 보행자 사고에 관한 연구로는 J. J. Eubanks등²⁾에 의하여 기존 이론식의 분석과 보행자의 교통사고재현에 대해 유형별로 자세히 언급하였고 A. Moser등³⁾은 PC-Crash 프로그램 내 차량을 한 개의 강체로 하고 보행자를 다물체 계로 확장 취급

*Corresponding author, E-mail: dmkang@pknu.ac.kr

하여 실제사고와 비교하였다. 국내에서는 M.S. Chang등⁴⁾에 의해 승객거동해석 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 MADYMO (Mathematical DYnamical MOdels)를 이용하여 충돌차량형상, 보행자 충돌형태 및 충돌속도에 따라 충돌 후 보행자 선회 및 운동 특성을 분석하였다. 또한 J. H. Hong 등⁵⁾은 기존의 평가자세 이외에 다양한 보행 자세와 보행자의 운동성을 고려하여 사고재현을 행하는 등 최근 국내에서도 차 대 보행자사고에 대한 연구가 다소 진행되고 있으나 사고의 심각정도에 비해 충돌지점 및 사고차량의 속도분석 등 사고분석에 대해 연구는 대단히 미흡하다.

본 연구에서는 승용차형 차량의 보행자 충돌사고 시 정확한 사고재현을 위해 차량과 보행자의 조건, 그리고 노면조건 등 각종 인자가 충돌 후 보행자의 전도거리에 미치는 영향을 파악하여 적합한 사고해석모델을 개발하고자 한다.

2. 해석 방법 및 조건

2.1 해석 방법

차 대 보행자 사고 시 보행자 거동을 분석하는 방법에는 실제 보행자를 충돌 실험하는 방법, 보행자 더미를 이용한 풀 스케일 테스트, 보행자 신체일부분을 더미를 개발하여 충돌실험을 행하는 컴포넌트 테스터가 있으나 이러한 방법에는 윤리적 문제, 보행자 더미제작 및 충돌장비구비를 위한 경제적인 문제 등으로 실행되기 어렵다. 이에 반해 컴퓨터 시뮬레이션 테스트는 차량과 보행자를 3차원으로 모델링하여 다양한 충돌 변수를 고려하여 모의 충돌 실험을 수행할 수 있고, 실제 보행자와 더미를 대상으로 행하기 곤란한 여러 상황적 조건을 가변적으로 분석할 수 있다. 보행자 거동 해석 프로그램 중 PC-CRASHTM 는 타 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 할 수 있다. 또한 차량모델을 보행자 충돌로 인해 손상 변형이 없는 강체 모델을 전제로 다양한 차량 모델이 제시되어져 있으므로 본 연구에서는 이러한 프로그램을 사용하였다.

2.2 해석 조건

본 연구에서 사용된 차량유형은 PC-CRASH™ 에서 제공되는 승용차인 세단형(BMW535모델)을 적용하였고 차 대 보행자 사고에 있어 실제 차량의 변형 정도는 강체로 취급되어도 무방할 만큼 미진한 상태이므로 PC-CRASH™에서는 차량모델을 강체로 하여 실제 차량의 전면 구조 형상과 거의 일치되는 3D-DXF Drawing을 강체 모델에 적용하여 차량을 실제 차량과 근사적으로 모델링하였다.

Fig. 1은 세단형 차량의 외형도를 나타낸 것이고 Fig. 2는 보행자 모델로서 개별 질량과 독립적인 복원력 및 강도, 마찰력을 가지는 20개의 관절체가 내부 마찰이 있는 19개의 운동학적 접합 조인트에 의해 연결되어 다물체 운동을 하는 구조이다.⁵⁾

차량 모델과 보행자 모델간의 접촉 상태는 내부적으로 접촉 다각형 평면을 결정하는 3개의 점을 포함하고 있는 접촉 평면에 의해 결정된다. 그리고 차량 충돌에 의한 보행자 모델 타원체의 변형 깊이는 접촉 다각형에 결정되는 접촉 평면과 보행자 바디 타원체의 표면상에 존재하는 접촉 평면과 나란한 접선 평면의 거리로 나타낼 수 있으며 접촉 평면의 접선 성분은 타원체와 차량 및 노면 표면간의 개별 마찰계수로 역산될수 있으나 본 연구에서는 비가 내린상태(습윤상태) 및 비가 내리지 않는 상태(건조상태)인 경우에 대해 실험을 통하여 마찰계수를 구하였다. 또한 해석에 필요한 보행자의 반발계수는 실제 보행자를 차량에 충격시켜 구하는 것이 현실적으로 어려워 몇몇의 보행자 사고사례를 활용하여

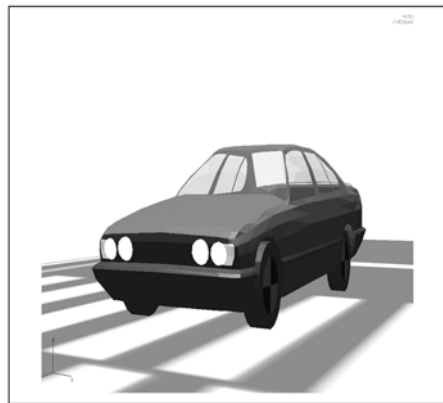


Fig. 1 Vehicle type for simulation (Sedan)

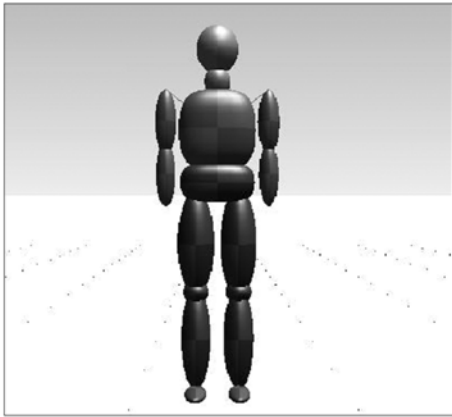


Fig. 2 The modeling of pedestrian

구한결과 반발계수는 사고차량의 형태별 특성 및 충돌속도에 영향을 거의 받지 않고 인체의 고유 특성에 의해 0.1로 수렴되었다.

3. 해석 결과

3.1 차량속도에 따른 해석결과

차 대 보행자 충돌사고 시 차량속도가 보행자의 전도거리에 미치는 영향을 구하기 위하여 차량속도를 20, 35, 45, 55, 그리고 65(km/h)조건에서 보행자의 전도거리를 구하였다. 해석을 위한 속도조건은 Fig. 3에서 표시한 바와 같이 보행자신장이 1.85, 1.65, 1.4, 1.2m인 경우에 대해서 차량의 충돌속도와 보행자의 전도거리의 관계를 나타내었다.

여기서 보면 차량의 속도 변화와 관련하여 속도가 증가할수록 보행자의 전도 거리는 증가하는 것으로 나타나 이것은 G. Stcherbatcheff 및 H. Hayashi의 연구결과에서 설명된다.

즉, G. Stcherbatcheff⁶⁾는 6-24mph의 충돌속도로 성인 및 어린이 보행자 더미를 충돌하여 보행자 충돌속도와 전도거리에 대한 관계를 다음 식 (1)로 표현하였다.

$$d_t = \frac{V^2}{2a} + 0.03 Va \quad (1)$$

여기서 d_t 는 보행자 전도거리(m), V 는 차량충돌속도(m/s), 그리고 a 는 가속도(m/s^2)를 나타낸다. 또한 H. Hayashi⁷⁾는 다양한 유형의 차량을 충돌시켜

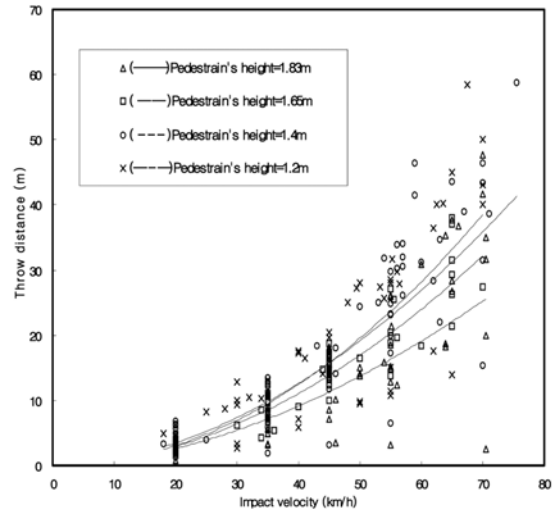


Fig. 3 Impact speed vs. throw distance

충돌속도와 보행자 전도거리의 관계를 다음 식 (2)로 제시하였다.

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

결국 충돌 후 보행자 전도거리는 충돌속도의 제곱에 증가하는 형태가 되어 이것은 해석결과와 잘 일치한다.

3.2 충돌지점의 읍셋량에 따른 해석결과

차량전면부와 보행자간의 충돌지점에 대한 보행자의 전도거리를 구하기 위하여 충돌지점을 차량의 중심선으로부터 끝부분을 100%로 하여 읍셋량을 0%, 40%, 80%로 설정하였다. Figs. 4, 5 등은 승용차 (Sedan형)의 경우 보행자의 신장이 각각 1.85m, 1.4m인 경우 충돌지점의 읍셋량에 대한 보행자의 전도거리결과이다.

이 결과에서 읍셋량이 증가할수록 전도거리는 감소하고 충돌속도가 높을수록 읍셋량의 감소율이 높은 경향이 나타났다. 이것은 승용차의 전면 형상은 라운드 구조로서 충돌 순간 마찰을 고려한다면 충돌력은 충돌 순간 차체 라운드 형상에 상관되게 미끄럼에 의한 접선력이 발생하고 접선력은 보행자를 전방으로 이동케 하는 충격에너지를 분산시키는 역할을 하기 때문으로 생각된다.⁸⁾

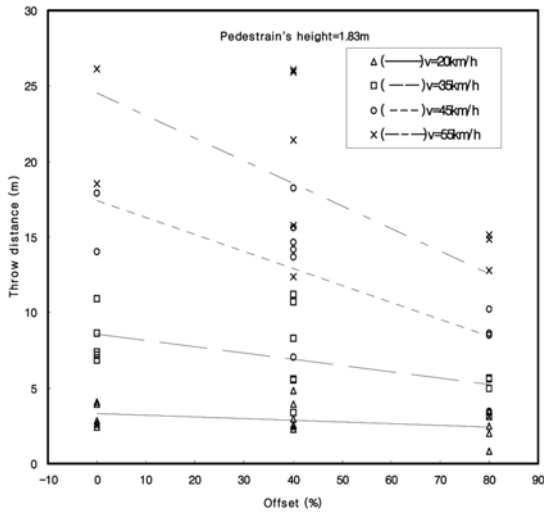


Fig. 4 Offset vs. throw distance for 1.85m of pedestrian height

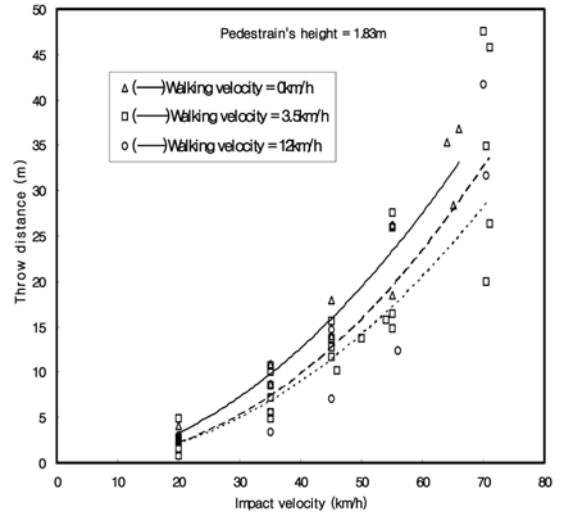


Fig. 6 Offset vs. throw distance for 1.85m of pedestrian height

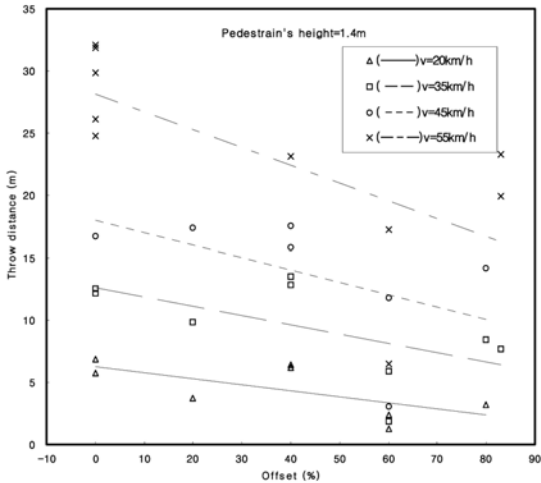


Fig. 5 Offset vs. throw distance for 1.4m of pedestrian height

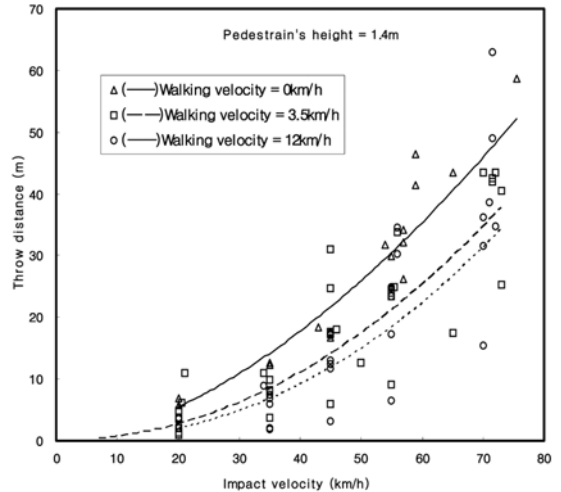


Fig. 7 Offset vs. throw distance for 1.40m of pedestrian height

3.3 보행자의 속도에 따른 해석결과

보행자 속도가 충돌 후 전도거리에 미치는 영향을 알아보기 위하여 보행자속도를 0(정지), 3.5(걷는 경우), 12km/h(뛰는 경우)로 하여 해석하였다. Figs. 6, 7 등은 보행자의 키가 각각 1.83m, 1.4m인 경우에 대해 보행자의 속도에 따른 전도거리 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보행자 전도거리는 보행자가 정지인 경우, 걷는 경우, 그리고 뛰는 경우 순으로 전도거리가 크게 나타났다.

3.4 노면상태에 따른 해석결과

보행자의 차량충돌 시 노면상태가 보행자의 전도 거리에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 노면상태를 습윤상태, 건조상태로 구분하여 마찰계수로서 노면 상태를 나타내었다. 보행자의 차량표면에 대한 마찰계수와 노면에 대한 마찰계수는 드래그 계지를 이용하여 아래 식 (3)을 이용하여 구하였다.

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (3)$$

여기서 μ 는 마찰계수, F 는 드래그 힘, 그리고 W

는 보행자의 무게이다. 측정결과 비가 내린 상태(습윤상태)에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.6, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.3으로 나타났으며, 비가 내리지 않은 상태(건조상태)에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.65, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.4로 나타났다.

Figs. 8, 9 등은 각각 보행자가 1.85모델, 1.4모델인 경우 보행자의 차량에 대한 충돌속도에 따라 보행자의 전도거리를 노면상태를 습윤상태와 건조상태로 구분지어 나타내었다.

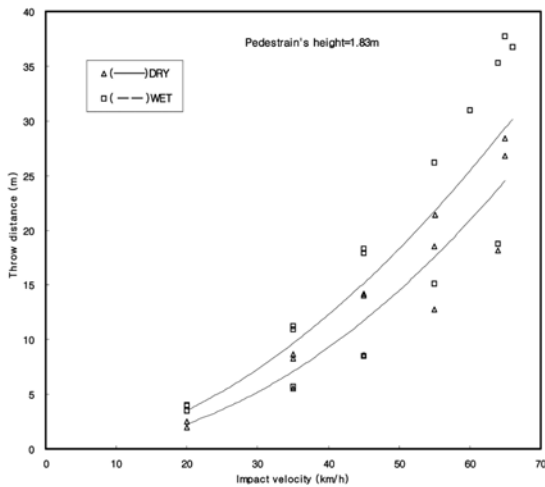


Fig. 8 Impact velocity vs. throw distance for road condition (pedestrian's height; 1.83m)

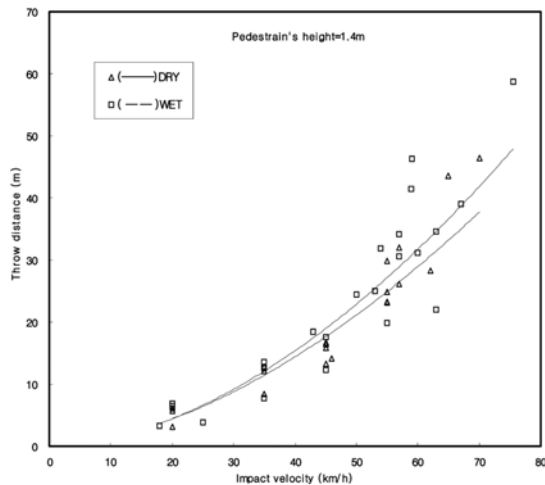


Fig. 9 Impact velocity vs. throw distance for road condition (pedestrian's height; 1.4m)

여기서 보면 습윤상태의 전도거리가 건조상태에 비해 길게 나타났는데 이것은 보행자가 차량에 충돌된 후 포물선을 그리면서 튕겨나간 후 노면에 착지한 후 노면을 활주하면서 이동하는 중 노면활주 구간에서 습윤 상태의 마찰 계수가 낮은 상태인 것으로 생각된다.

3.5 회귀분석결과

회귀분석법은 한 종속변수(Y)가 여러 독립변수(X)에 의해 받는 영향을 분석하는 방법으로 선형회귀분석이라고도 하고 일반적으로 다음과 같이 표현된다.⁹⁾

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

여기서 α, β 는 상수이고 ϵ, i, n 는 각각 오차, 관측치, 그리고 표본의 수로서 나타낸다. 본 해석에서는 차량 관련인자와 보행자 관련인자, 노면 조건 등을 다중인자변수로 하여 보행자 전도거리는 다음 식(5)로 표현된다.

$$dist_i = \alpha + \beta_1 offset_i + \beta_2 speed_i + \beta_3 height_i + \beta_4 walk_i + \beta_5 wet_i + \epsilon_i \quad (5)$$

여기서 <dist>는 보행자 전도거리, <offset>는 충돌지점의 오프셋량, <speed>는 충돌 시 차량의 속도, <height>는 보행자의 키, <walk>는 충돌시 보행자의 보행속도, 그리고 <wet>는 도로의 노면상태, 즉 젖은 상태는 1, 젖지 않는 상태는 0로 구분하였다. 회귀 모델 식에서 모델의 적합성을 보여주는 Adj R2 값은 0.6771로 나타나 주어진 모델이 추정에 적합하다고 생각되고 F값은 159.5477로 나타나 귀무가설이 기각되어 이들 변수들을 이용한 모형 설정도가 양호한 것으로 나타났다. 결과에서 <offset>의 추정계수는 -0.11554이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 보여주고 있어 <offset>이 증가함에 따라 <dist>는 감소한다는 것을 알 수 있다. 차량의 속도는 선형적으로 전도거리에 정(+의 효과를 미치는 것은 전도거리계산에 다중인자를 변수로 하여 선형회귀모델에 의해 적용되었기 때문으로 사료된다. 그리고 이에 대한 추정계수가 0.59679를 나타내고 있으며, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하다는

것을 알 수 있다. 보행자의 키는 거리에 음(-)의 효과를 미치고 있으며 키의 추정계수는 -5.45529이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하다. 보행속도의 경우 거리에 음(-)의 관계가 있는 것으로 추정된다. 보행속도의 추정계수는 -0.25752이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하다. 도로의 젖은 상태는 dummy 변수로 젖은 상태는 1, 젖지 않은 상태는 0으로 구분하여 추정하였다. 그 결과 추정계수는 2.78285이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하고 도로가 젖은 상태는 충돌 시 거리는 2.78285 증가하는 것으로 나타났다.

이렇게 하여 세단형인 경우의 시뮬레이션 결과를 근거로 하여 보행자의 차량과의 충돌사고 시 다중변수 인자를 고려한 보행자 전도거리의 회귀모델 식은 다음 식 (6)과 같다.

$$dist_i = 2.39 - 0.11offset_i + 0.59speed_i - 5.45height_i - 0.25walk_i + 2.78wet_i + \epsilon_i \quad (6)$$

4. 결론

승용차형 차량에 대한 차 대 보행자 충돌사고 시 보행자의 전도거리에 영향을 미치는 인자를 고찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 차량의 속도가 증가할수록 보행자의 전도거리가 증가하였고 충돌 시 충돌 읍셋량이 증가함에 따라 전도거리는 감소하였다.
- 2) 충돌 시 보행자의 속도의 영향으로 정지인 경우, 걷는 경우, 그리고 뛰는 경우 순으로 전도거리가 크게 나타났다.
- 3) 노면상태에 대한 전도거리에의 영향은 습윤상태가 건조상태 보다 크게 나타났다.
- 4) 세단형의 보행자 전도거리에 대한 회귀모델 식은 아래와 같이 표현되었다.

$$dist_i = 2.39 - 0.11offset_i + 0.59speed_i - 5.45height_i - 0.25walk_i + 2.78wet_i + \epsilon_i$$

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00161).

References

- 1) 교통사고종합분석센터, 교통사고통계분석, p.42, 도로교통공단, 2008.
- 2) J. J. Eubanks, "Pedestrian Involved Traffic collision Reconstruction Methodology," SAE 921591. 1992.
- 3) A. Moser, H. Steffan G. Kasanicky, "The Pedestrian Model in PC-CRASH- The Introduction of a Multi Body System and its Validation," SAE 1999-01-0445, 1999.
- 4) J. S. Yoo, G. J. Park and M. S. Chang, "Pedestrians Trajectory Characteristic for Vehicle Configuration and Pedestrian Postures," Transactions of KSAE, Vol.13, No.4, pp.8-18, 2005.
- 5) T. H. Lee, E M. Ahn and J. H. Hong, "Study of Reconstruction and Injury in Several Car-Pedestrian Accidents," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.1707-1712, 2005.
- 6) G. Stcherbatcheff, "Simulation of Collisions between Pedestrians and Vehicles using Adult and Child Dummies," SAE 751167, 1975.
- 7) H. Hayashi, Traffic Accident Investigation Engineering, Technique Auditorium, pp.188-194, 1992.
- 8) I. H. Han and J. H. Cho, "Analysis of Three-Dimensional Rigid-Body Collisions with Friction-Collisions between Ellipsoids," Transactions of KSME(A), Vol.20, No.5, pp.1486-1497, 1996.
- 9) J. K. Kim, J. H. Park, H. J. Park, J. J. Lee, H. S. Cheon and J. S. Hwang, Statistics, Freedom Academy, p.391, 2008.