

차 대 보행자 충돌 시 사고해석 모델 개발 Development of Accident Analysis Model in Car to Pedestrian Accident

강대민 · 안승모
D. M. Kang and S. M. Ahn

(접수일 : 2009년 8월 11일, 수정일 : 2009년 9월 10일, 채택확정 : 2009년 9월 11일)

Key Words : Throw Distance(전도 거리), Factors of Pedestrian and Vehicle(보행자와 차량조건), Road Condition(노면 상태), Regression Analysis Model(회귀분석모델)

Abstract : The fatalities of pedestrian account for about 21.2% of all fatalities at 2007 year in Korea. To reconstruct exactly the accident, it is important to calculate the throw distance of pedestrian in car to pedestrian accident. The frontal shape of SUV vehicle is dissimilar to passenger car and bus, so the trajectory and throw distance of pedestrian by SUV vehicle is not the same of passenger car and bus. The influencing on it can be classified into the factors of vehicle and pedestrian, and road factor. It was analyzed by PC-CRASH for simulation, and SPSS s/w was used for regression analysis. From the simulation results, the maximum impact energy of multi-body of pedestrian was occurred to that of torso body at the same time. And the throw distance increased with the increasing of impact velocity, and decreased with the increasing of impact offset. Also it decreased with the increasing of velocity of pedestrian at accident, and the throw distance of wet road was longer than that of dry road. Finally, the regression analysis model of SUV(Nissan Pathfinder type)vehicle in car to pedestrian accident was as follows;

$$dist_i = -0.87 - 0.11offset_i + 0.69speed_i - 4.27height_i + 0.004walk_i + 0.63wet_i + \epsilon_i$$

1. 서 론

최근 국내의 교통사고분석에 따르면 1980년 이후 발생한 전체교통사고 총 6,111,025건(2007년:211,662건) 중 차 대 보행자 사고가 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 심각할 뿐만 아니라 보행자 사고로 인한 법적 분쟁이 증가하는 추세이다¹⁾. 차량사고 중 차 대 차 사고는 스키드 마크(Skid mark), 요 마크(Yaw mark), 크룩(Crook) 등을 파악하여 충돌 지점과 충돌 속도 등 사고 상황 분석이 가능하고 충돌 후 차량의 궤적 해석 기법과 유한요소 모델링기법에 의

해 상당한 진보를 이루었다. 그러나 차 대 보행자 사고에 대한 연구는 주로 기초적 물리이론을 근거로 차량의 속도와 보행자의 전도 거리가 어떠한 수치적 상관관계를 가지는지 여부에 집중되고 있다. 하지만 보행자의 전도 거리는 단순히 차량의 충돌 속도뿐만 아니라 차량의 전면 구조 형상 등 차량 관련 인자, 보행자의 신장 등 보행자 관련인자, 노면 상태 등 다양한 인자가 영향을 준다.

이러한 차 대 보행자 사고에 관한 연구로는 J. J. Eubanks 등²⁾에 의하여 기존 이론식의 분석과 보행자의 교통사고 재현에 대해 유형별로 자세히 언급하였고 A. Moser 등³⁾은 PC-CRASH 프로그램 내 차량을 한 개의 강체로 해서 보행자를 다물체계로 확장 취급하여 실제사고와 비교하였다. 국내에서는 J. H. Hong등⁴⁾은 기존의 평가자세 이외에 다양한 보행자세와 보행자의 운동성을 고려하여 사고재현을 행하는 등 최근 국내에서도 연구가 다소 진행되고 있으나 사고의 심각정도에 비해 이에 대한 연구

강대민 : 부경대학교 기계공학부
E-mail : dmkang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6134
안승모 : 도로교통공단

는 대단히 미흡하다.

본 연구에서는 현재 사용이 증가하고 있는 SUV 차량의 보행자 충돌 사고 시 정확한 사고재현을 위해 PC-CRASH s/w를 이용하여 충돌시 차량과 보행자의 조건, 그리고 노면조건 등 각종 다중인자가 충돌 후 보행자의 전도거리에 미치는 영향을 파악하여 보다 정확한 사고해석모델을 개발하고자 한다.

2. 보행자 사고유형 및 해석방법

2.1 보행자 사고유형

충돌 후 보행자 거동특성에 따라 랩 트레젝트리, 포워드 프로젝션, 웬더볼트, 루프볼트, 소머숏 등으로 구분된다.

랩 트레젝트리 충돌유형은 충돌 후 보행자의 신체가 차량후드를 감싸며 선회운동을 한 후 노면에 낙하하여 활주하는 특성이고 포워드 프로젝션 운동 특성은 대형 트럭 및 버스차량과 같이 차량전면이 박스형태로 이루어져 보행자의 무게중심 위쪽부분을 충격하여 보행자가 차량 바로 앞 지면에 낙하하여 활주하는 특성이다. 그리고 웬더볼트 유형은 보행자가 사고차량의 전면부에 충격되지 않고 측면부에 충격되는 상황으로 사고차량의 충격력이 직접적으로 전달되지 않고 보행자 신체에는 충돌각도에 따른 법선방향의 충격력과 접선방향의 측면 마찰력의 상호 작용에 의해 보행자가 밀려나는 충돌유형이다. 또한 루프볼트는 랩 트레젝트리의 고속 충돌 형태로서 차체의 루프부에 손상 흔을 나타내는 유형이며 소머숏 충돌유형은 고속의 충돌상황에서 보행자가 선회, 비행단계에서 보행자 신체가 회전하는 충돌유형으로 루프볼트와 소머숏유형은 랩 트레젝트리의 고속충돌유형으로 분류된다.

SUV형 차량은 보행자사고 유형구분에서 승용차 보다는 차체가 크고 전면범퍼의 높이와 후드패널의 높이가 본넷 형상의 승용차량보다 높아 충돌 후 보행자를 완전히 감싸는 충돌유형으로 보기 어려운 차량으로 구분되어 세단형 충돌사고와는 구별되는 특징이 있다.

2.2 해석 방법

보행자 거동해석에 관하여 인체거동 및 상해도 해석에 관련 전문 프로그램중 MADYMO (Mathematical Dynamical Models)과 PC-CRASH s/w를 이용한 해석결과의 비교에 의하면 거의 일치하고 해석시간

은 PC-CRASH를 이용한 해석이 MADYMO를 이용한 해석에 비해 상당히 단축되었다. 그리고 PC-CRASH는 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 모델로 전제로 다양한 차량 모델이 제시되어 있으므로 본 연구에서는 이러한 프로그램을 사용하였다. 여기서 적용된 차량유형은 프로그램에서 제공되는 닛산 패스파인더이고 차량모델을 강체로 하여 실제 차량의 전면 구조 형상과 거의 일치되는 3D-DXF Drawing을 강체 모델에 적용하여 차량을 실제 차량과 근사적으로 모델링하였다.

Fig. 1은 해석에 적용된 닛산 패스파인더 차량의 외형도를 나타낸 것이다.

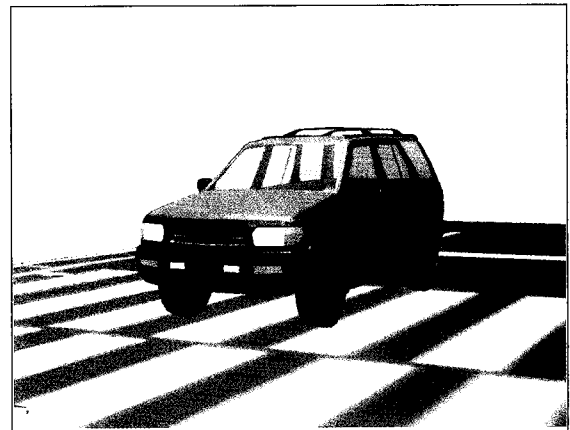


Fig. 1 Vehicle type for simulation (Nissan Pathfinder)

해석에 사용되는 보행자 모델은 개별 질량과 독립적인 복원력 및 강도, 마찰력을 가지는 20개의 관절체가 내부 마찰이 있는 운동학적 접합점에 의해 연결되어있는 다물체 운동을 하는 구조이다. 그리고 보행자 신장을 소아인 1.20m 모델에서 1.40m 모델, 표준키인 1.65m, 키가 큰 모델인 1.83m까지 4가지의 단계적인 모델을 활용하였다. 해석시 필요한 반발계수는 쿠드리흐 · 슬리마 충돌 모델에서 식 (1)과 근사한 값을 가진다고 제시하고 있다.

$$k = e^{-0.5862v + 0.07309v^2 - 0.00348v^3} \quad (1)$$

여기서 v 는 차량의 속도를 나타낸다.

이러한 반발계수 값은 실제 발생한 보행자 사고

중에서 보행자의 전도 거리에 상관하는 인자들을 파악 가능한 선별된 사고 자료를 근거로 보행자 전도 거리에 상관하는 인자를 고려한 시뮬레이션을 실행하여 실제 사고 결과와 동일한 결과 값을 도출하는 반발계수를 산출한 결과 0.1로 수렴되었다.

3. 해석결과

3.1 보행자 충돌시 충격에너지 해석결과

Fig. 2는 SUV형의 낫산 패스파인더 3D-DXF 모델로서 건조노면에서 보행자의 신장이 1.65m 모델을 0%옵셋 상태에서 45km/h의 충돌속도로 충돌 해석한 결과 보행자 충격에너지의 전달과정을 나타낸 것이다.

결과에서 그래프 상의 상단곡선은 보행자 구성 다물체의 전체 에너지 감쇠를 나타내고, 하단곡선은 보행자 인체 구성 다물체의 중심파트인 토르소 관절체의 에너지 감쇠를 나타낸다. 여기서 보면 인체 구성 다물체의 전달 에너지는 충돌과 동시에 급격히 증가하나 토르소 관절체의 전달에너지의 발생은 약 0.03 sec 지연되었다. 충돌 후 0.06sec순간에 2차 충돌이 시작되어 0.14sec 순간까지 2차 충돌이 지속되어 0.14sec에서 인체구성에서 가장 큰 질량특성을 가진 토르소 관절체가 2차 충돌이 연속되어 인체 구성 다물체의 전체 전달 에너지가 최대가 되었다. 즉, 보행자 인체 구성 다물체의 전체 전달 에너지 최대값 발생 순간과 토르소 관절체의 전달 에너지 최대값 발생 순간이 0.14sec로 거의 동시에 발생하여 이것은 보행자 인체 상부를 충격하고 보행자 인체가 완전히 차체 전면부를 감싸는 형상이 아니므로 보행자 하체부의 선회에 의한 하중 지지로 접촉 저항이 완화되기 때문으로 사료된다.

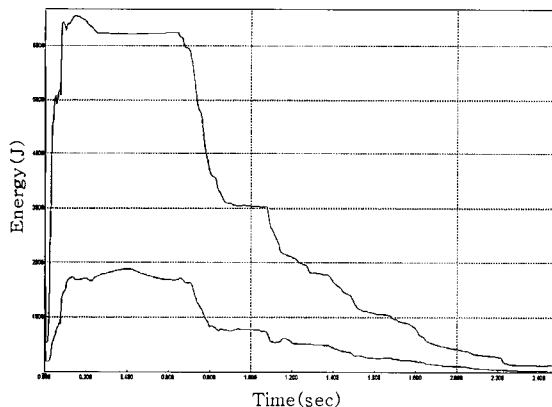


Fig. 2 Diagram of energy variation(SUV type)

3.2 차량속도에 따른 해석결과

차 대 보행자 충돌 사고 시 차량속도가 보행자의 전도 거리에 미치는 영향을 구하기 위하여 다양한 차량속도조건에서 보행자의 전도거리를 구하였다. 적용된 보행자 신장은 Fig. 3에서 표시한 바와 같이 1.85, 1.65, 1.4, 1.2m이다. 여기서 보면 차량의 속도 변화와 관련하여 속도가 증가할수록 보행자의 전도 거리는 증가하는 것으로 나타나 이것은 Stcherbatcheff, 히야시 히로시, 그리고 Barzeley의 연구결과에서 설명된다⁵⁾.

즉, Stcherbatcheff의 연구에서 보행자 전도거리는 다음 식(2)과 같이 차량 충돌속도로써 표현하였다.

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

여기서 d_t 는 보행자 전도거리(m), V 는 차량충돌 속도(m/s), 그리고 a 는 가속도(m/s^2)를 나타낸다.

그리고 히야시 히로시는 충돌속도와 보행자 전도거리의 관계를 다음 (3)식으로 제시하였다.

$$d_t = 0.285 V + 0.0636 V^2 \quad (3)$$

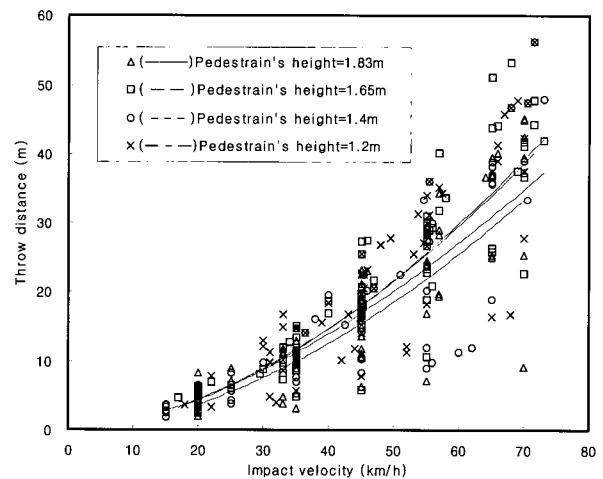


Fig. 3 Impact speed vs. throw distance

또한 Barzeley는 차량의 충돌속도에 관여하는 인자를 보행자 이동거리만을 고려하여 식 (4)와 같은 충돌모델식을 개발하였다.

$$V = \sqrt{150 + 204d_t} - 12.2 \quad (4)$$

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

3.3 충돌지점의 읍셋량에 따른 해석결과

충돌지점의 읍셋량에 대한 보행자의 전도거리의 영향을 구하기 위하여 차량의 중심선으로부터 끝부분을 100%로 하여 읍셋량을 0%, 40%, 80%로 설정하였다. Figs. 4-5 등은 SUV(Nissan Pathfinder형)의 경우 보행자의 신장이 각각 1.83m, 1.4m인 경우의 전도거리결과이다.

이 결과에서 충돌지점의 읍셋량이 증가할수록 전도거리는 감소하고 충돌속도가 높을수록 읍셋량의 감소율이 높은 경향이 나타났다. 이것은 SUV의 전면 형상에 따른 충돌 순간 마찰을 고려한다면 충돌력은 충돌 순간 미끌림에 의한 접선력이 발생하고 접선력은 보행자를 전방으로 이동케 하는 충격에너지 분산시키는 역할을 하기 때문으로 생각된다⁽⁶⁾.

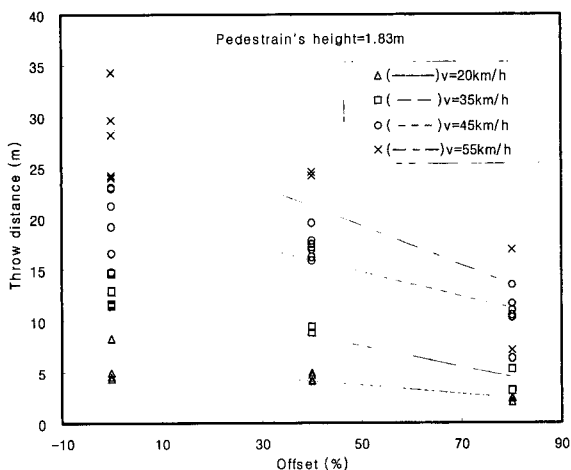


Fig. 4 Offset vs. throw distance for 1.83m of pedestrian height

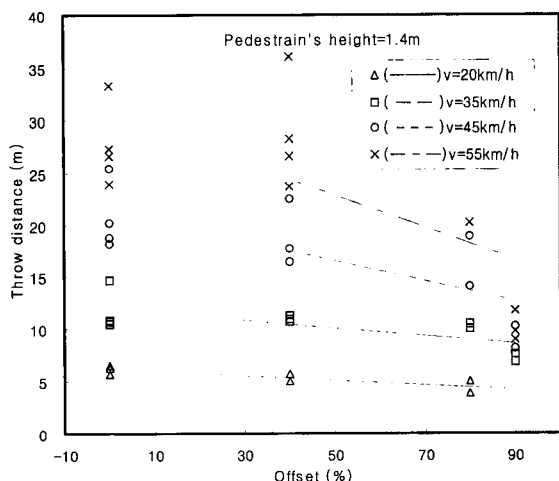


Fig. 5 Offset vs. throw distance for 1.4m of pedestrian height

3.4 보행자의 속도에 따른 해석결과

보행자 속도가 충돌 후 전도거리에 미치는 영향을 알아보기 위하여 보행자속도를 정지, 걷는 경우, 그리고 뛰는 경우로 하여 각각 0, 3.5, 그리고 12km/h에 대해 해석하였다. Figs. 6-7 등은 보행자의 키가 각각 1.83m, 1.65m인 경우에 대해 충돌당시 보행자의 속도에 따른 전도거리 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보행자 전도거리는 보행자가 정지인 경우, 걷는 경우, 그리고 뛰는 경우 순으로 전도거리가 크게 나타났다.

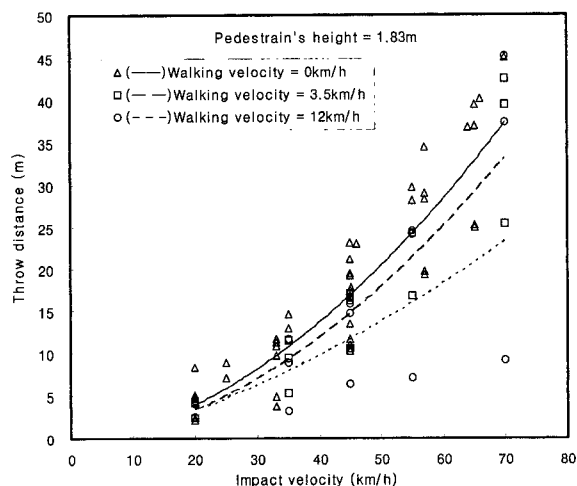


Fig. 6 Offset vs. throw distance for 1.83m of pedestrian height

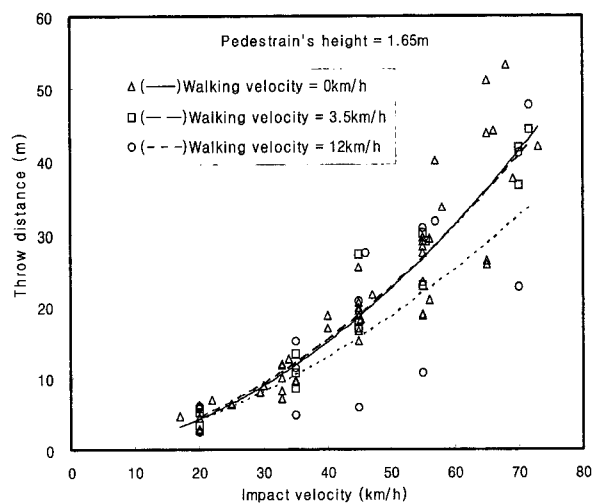


Fig. 7 Offset vs. throw distance for 1.65m of pedestrian height

3.4 노면상태에 따른 해석결과

보행자의 차량충돌 시 노면상태가 보행자의 전도거리에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 노면상태를

습윤상태(wet), 건조상태(dry)로 구분하여 마찰계수로서 노면상태를 나타내었다. 보행자의 차량표면에 대한 마찰계수와 노면에 대한 마찰계수는 드래그 계이지를 이용하여 아래 식(5)을 이용하여 구하였다.

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (5)$$

여기서 μ 는 마찰계수, F 는 드래그 힘, 그리고 W 는 보행자의 무게이다.

측정결과 비가 내린 상태(습윤 상태)에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.6, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.3으로 나타났으며, 비가 내리지 않은 상태(건조 상태)에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.65, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.4로 나타났다. 여기서 비가 내린 정도에 따라 차량표면 및 노면의 마찰계수가 다소 오차가 발생할 수 있으나 습윤 정도에 따른 미소한 오차는 무시하였다.

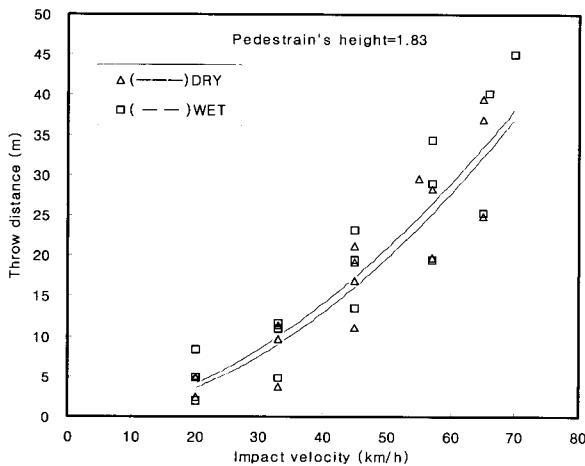


Fig. 8 Impact velocity vs. throw distance for road condition(pedestrian's height; 1.83m)

Fig. 8은 보행자가 1.85모델인 경우 보행자의 차량에 대한 충돌속도에 따라 보행자의 전도거리를 노면상태를 습윤 상태와 건조 상태로 구분지어 나타내었다. 여기서 보면 습윤 상태의 전도거리가 건조 상태에 비해 길게 나타났는데 이것은 보행자가 차량에 충돌된 후 포물선을 그리면서 튕겨나간 후 노면에 착지한지 후 노면을 활주하면서 이동하는 중 노면활주 구간에서 습윤 상태의 마찰 계수가 낮은 상태인 것으로 생각된다.

3.5 회귀분석결과

회귀분석법을 이용하여 본 해석에서는 차량 관련

인자와 보행자 관련인자, 노면 조건 등을 다중인자 변수로 하여 보행자 전도거리는 다음 식(6)으로 표현된다.

$$dist_i = \alpha + \beta_1 offset_i + \beta_2 speed_i + \beta_3 height_i + \beta_4 walk_i + \beta_5 wet_i + \epsilon_i \quad (6)$$

여기서 α, β 는 상수이고 ϵ, i, n 는 각각 오차, 관측치, 그리고 표본의 수로서 나타낸다. 그리고 <dist>는 보행자 전도거리, <offset>는 충돌지점의 오프셋량, <speed>는 충돌 시 차량의 속도, <height>는 보행자의 키, <walk>는 충돌 시 보행자의 보행속도, 그리고 <wet>는 도로의 노면상태, 즉 젖은 상태는 1, 젖지 않은 상태는 0로 구분하였다. 회귀모델 식에서 모델의 적합성을 보여주는 Adj R² 값은 0.86900로 나타나 주어진 모델이 추정에 적합하다고 생각되고 F값은 347.3616로 나타나 귀무가설이 기각되어 이들 변수들을 이용한 모형설정도 양호한 것으로 나타났다. 결과에서 <offset>의 추정계수는 -0.11299이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 보여주고 있다.

즉 <off et>이 증가함에 따라 <dist>는 감소한다는 것을 알 수 있고 차량의 속도는 거리에 정(+)의 효과를 미치고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 추정계수가 0.69102를 나타내고 있으며, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하다는 것을 알 수 있다. 보행자의 키는 거리에 음(-)의 효과를 미치고 있으며 키의 추정계수는 -4.27639이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하다. 보행속도의 경우 거리에 음(-)의 관계가 있는 것으로 추정된다. 보행속도의 추정계수는 -0.00449이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하다. 도로의 젖은 상태는 더미변수로 젖은 상태는 1, 젖지 않은 상태는 0으로 구분하여 추정하였다. 그 결과 추정계수는 2.78285이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하고 도로가 젖은 상태는 충돌 시 거리는 0.63228로 나타났다.

이렇게 하여 SUV(닛산 패스파인더형)차량인 경우의 시뮬레이션 결과를 근거로 하여 보행자의 차량과의 충돌사고 시 다중변수 인자를 고려한 보행자 전도거리의 회귀모델 식은 다음 식 (7)과 같다.

$$dist_i = -0.87 - 0.11 offset_i + 0.69 speed_i - 4.27 height_i + 0.004 walk_i + 0.63 wet_i + \epsilon_i \quad (7)$$

4. 결 론

SUV(닛산 패스파인더형)차량에 대한 차 대 보행자 충돌사고 시 보행자의 전도거리에 영향을 미치는 인자를 고찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 보행자 인체 구성 다물체의 전체 전달 에너지 최대값 발생 순간과 토르소 관절체의 전달 에너지 최대값 발생 순간이 거의 동시에 발생하여 이것은 보행자 하체부의 선회에 의한 하중 지지로 접촉 저항이 완화되기 때문으로 추측된다.

2) 차량의 속도가 증가할수록 보행자의 전도거리가 증가하였고 충돌 시 충돌 읍셋량이 증가함에 따라 전도거리는 감소하였다.

3) 충돌 시 보행자의 속도의 영향으로 정지인 경우, 걷는 경우, 그리고 뛰는 경우 순으로 전도거리가 크게 나타났다.

4) 습윤 상태에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.6, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.3으로 나타났으며, 건조 상태에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.65, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.4로 나타났다. 그리고 노면상태에 대한 전도거리에의 영향은 습윤상태가 건조 상태보다 크게 나타났다.

5) 다중 회귀분석모델의 적합성을 보여주는 Adj R² 값은 0.86900로 나타났으며, SUV형의 보행자 전도거리에 대한 회귀 모델식은 아래와 같이 표현되었다.

$$dist_i = -0.87 - 0.11offset_i + 0.69speed_i - 4.27height_i + 0.004walk_i + 0.63wet_i + \epsilon_i$$

후 기

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

참고 문헌

1. 도로교통공단 교통사고종합분석센터, 2008, "교통사고통계분석", p. 42.
2. Jerry J. Eubanks, 1992. Pedestrian Involved, JSAE, 921591.
3. A. Moser, H. Steffan and G. Kasanicky, 1999, "The Pedestrian Model in PC-CRASH-The

Introduction of a Multi Body System and its Validation", SAE International, 1999-01-0445.

4. T. H. Lee, E M. Ahn and J. H. Hong, 한국자동차공학회 2005년도 추계학술대회논문집. "Study of Reconstruction and Injury in several Car-Pedestrian Accidents". pp. 1707~1712.
5. J. S. Yoo, G. J. Park and M. S. Chang, 2005, "Pedestrians Trajectory Characteristic for Vehicle Configuration and Pedetrian Postures", Trans. of KSAE, Vol. 13, No. 4, pp. 8~18.
6. 한인환, 조정호, 1996, "마찰력이 개재된 3차원 강체 충돌 해석 -타원체간 충돌-", 대한기계학회논문집(A) 제20권 5호, pp. 1486~1497.