트럭의 속도 및 범퍼높이가 보행자 전도거리에 미치는 영향 분석

Analysis of Pedestrian Throw Distance from Truck Speed and Bumper Height

심 재 귀* · 이 상 수** · 백 세 룡*** · 최 정 우****

* 주저자 : 도로교통공단 경기지부 사고조사연구원
** 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수
*** 공저자 : 가천 · 삼송 자동차연구센터
**** 공저자 : 도로교통공단 경기지부 사고조사연구원

Jaekwi Shim* · Sangsoo Lee** · Seryong Baek*** · Jungwoo Choi****

* Korea Road Traffic Authority
** Dept. of Transportation Eng, Ajou University
*** Gachon · Samsong Automotive Research Center
**** Korea Road Traffic Authority

† Corresponding author : Sangsoo Lee, sslee@ajou.ac.kr

Vol.16 No.5(2017)
October, 2017
pp.85~95

ISSN 1738-0774(Print)
ISSN 2384-1729(On-line)
https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.5.85

Received 7 September 2017
Revised 14 September 2017
Accepted 26 September 2017

ⓒ 2017. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

본 논문의 목적은 트럭과 보행자의 충돌사고에서 트럭의 중량, 속도와 범퍼 높이가 보행자 전도거리에 미치는 영향을 분석하고, 나아가 이를 이용한 보행자 전도거리에 대한 모형식을 제시하는 데 있다. 이를 위해 교통사고 재현 프로그램인 PC-crash를 이용하여 트럭의 중량을 5t, 15t, 25t으로 적용하고, 각 트럭의 앞 범퍼 하단 높이를 0.3m부터 0.6m까지 0.1m씩 높여감과 동시에 트럭의 속도를 10km/h부터 100km/h까지 10km/h씩 높여가며 실험하였다. 트럭의 속도와 범퍼 높이는 보행자 전도거리에 유의한 변수로 확인되었고, 트럭 중량은 보행자 전도거리에 유의하지 않은 변수로 나타났다. 또한 다중회귀분석을 이용하여 제시한 모형식은 조정된 R^2 값이 93.3%로 매우 우수한 설명력을 가지는 것으로 나타났다.

핵심어 : 사고분석, 보행자 사고, PC-crash, 보행자 전도거리, 충돌속도

ABSTRACT

This study aims to identify the throw distance in terms of truck weight, bumper height, and speed in a truck and pedestrian collision, and to propose a model for throw distance estimates. For this purpose, a simulation analysis is performed using the PC-crash program with the following experiment conditions: Truck weight of 5t, 15t, and 25t, Bumper height from 0.3m to 0.6m by 0.1m, and speed from 10km/h to 100km/h by 10 km/h.

Experimental results show that the truck speed and bumper height are found to be significant factors for pedestrian throw distance, but truck weight is not a significant factor. Also, a regression model is developed for pedestrian throw distance estimate from the multiple regression analysis. The adjusted R^2 value of the model is 93.3%, which is very good explanatory power.

Key words : Traffic Accident Analysis, Pedestrian Accident, PC-crash, Pedestrian Throw Distance, Vehicle Collision Speed

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

차량과 보행자의 충돌사고 발생 시 차량의 속도와 함께 차량의 크기, 범퍼의 높이, 중량 등의 물리적인 특성에 따라 사고의 결과는 큰 차이점이 발생한다. 국내에서 운영되는 트럭의 앞 범퍼 높이는 일정하지 않고, 매우 다양한 특성을 갖는다. 이는 현재 국내법에서 제시하는 내용에 따라 발생한 현상으로 볼 수 있다.『자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙』제2조에 의하면 “공차상태란 자동차에 사람이 승차하지 아니하고 물품(예비 부분품 및 공구 기타 휴대물품을 포함한다)을 적재하지 아니한 상태로서 연료·냉각수 및 윤활유를 만재하고 예비타이어(예비타이어를 장착한 자동차만 해당한다)를 설치하여 운행할 수 있는 상태를 말한다.”고 정의하고 있고, 제5조(최저지상고)는 “공차상태의 자동차에 있어서 접지부분외의 부분은 지면과의 사이에 12센티미터 이상의 간격이 있어야 한다. 다만, 특수작업용자동차, 경주용자동차등 국토교통부장관이 당해 자동차의 제작목적상 필요하다고 인정하는 자동차의 경우에는 그러하지 아니하다.”라고 규정하고 있다. 이와 같은 법령에 따라 국내에서 운행하는 트럭의 앞 범퍼 높이는 공차상태에서 지면과의 사이에 12센티미터 이상의 간격만 있으면 적법한 것으로 판단된다. 따라서 실제 트럭의 앞 범퍼의 하단 높이는 0.35m, 0.6m 등 매우 다양하다. 그러나 이러한 범퍼의 높이의 차이에 따른 사고의 영향은 큰 차이를 보일 것으로 예상되지만, 이러한 차이에 관한 관련 연구는 없는 실정이다.

차대사람 교통사고 중 트럭 또는 버스와 같이 차량 전면이 수직방향으로 평평한 차량과 보행자가 충돌하는 사고에서 차량 속도와 보행자 전도거리에 관한 상관관계를 분석한 외국의 연구는 일부 존재한다. 이러한 연구는 보행자 전도거리를 통해 차량의 충돌속도를 분석하여 과속 여부 및 사고원인을 규명하고, 또한 운전자의 진술 속도와 보행자 최종위치를 토대로 충돌지점을 추정하여 운전자가 진술하는 충돌지점 등에 관한 진위 여부 등을 판단하고자 하였다. 그러나 기존 연구는 고정된 범퍼 높이와 중량을 고정값으로 가정하여 연구가 진행되었고, 다양한 트럭의 중량과 앞 범퍼 높이에 따라 보행자의 전도거리에 차이가 있는지에 관한 세부적인 결과는 확인 할 수 없다. 따라서 차대사람 교통사고 분석 결과의 신뢰도를 높이기 위해 트럭의 중량 및 범퍼 높이와 보행자 전도거리에 유의한 차이가 있는지에 관한 연구가 필요하다. 이러한 결과는 실제 교통사고에서 수집된 CCTV 또는 블랙박스 영상 자료를 통하여 분석이 가능하나, 이러한 통계적인 접근 방법은 자료 수집의 한계로 실제 진행에 많은 어려움이 존재한다.

본 연구의 목적은 교통사고 재현에 가장 많이 사용되는 시뮬레이션 프로그램(simulation program)인 PC-crash를 활용하여 트럭과 보행자의 교통사고에서 트럭 중량과 앞 범퍼의 높이에 따라 보행자 전도거리에 유의한 차이가 있는지 파악하여 제시하는 것이다. 그리고 유의한 관계가 존재한다면, 이러한 관계를 쉽게 추정할 수 있도록 모형으로 구성하여 차대사람 사고 분석 시 가장 중요한 변수인 보행자 전도거리를 신뢰성 있게 추정할 수 있도록 하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 내용

본 연구에서는 사고재현 프로그램인 PC-crash 프로그램을 활용하여 보행자의 신장은 170cm, 몸무게는 65kg의 단일 값으로 적용하였다. 하지만 트럭의 중량은 5t(ton), 15t, 25t 3가지로 구분하였고, 각 트럭의 앞 범퍼 하단 높이를 0.3m부터 최대 0.6m까지 0.1m 간격으로 적용하였다. 이러한 값들은 현재 국내에서 운행되는 트럭의 특성을 반영하여 결정되었다. 그리고 동시에 트럭의 속도를 10km/h부터 100km/h까지 10km/h씩 높여가며 보행자 전도거리를 측정하였다.

수집된 결과를 활용하여 트럭의 중량과 범퍼 높이에 따라 보행자 전도거리에 차이가 있는지 t-test를 실시하였고, 보행자 전도거리와 트럭의 속도, 중량, 범퍼 높이와의 상관성을 분석하였으며, 다중회귀분석을 이용하여 보행자 전도거리에 관한 모형 식을 유도하였다.

Ⅱ. 문헌 고찰

1. 트럭과 보행자 충돌현상의 이해

트럭의 전면과 보행자 사고 시 보행자는 충돌단계, 비행단계, 미끄러지고 구르는 3가지 단계를 거치게 된다. 첫 번째 충돌단계(Contact phase)에서 보행자는 차의 속도와 거의 가깝게 가속된다. 보행자 신체가 범퍼, 전면부, 전면유리와 충돌하는데, 이로 인해 보행자는 1차 충격손상(Primary Impact Injury)을 입는다. 두 번째는 비행단계(flight phase)로서, 트럭과 충돌한 보행자 신체는 트럭의 진행방향으로 급격히 회전하게 되고, 이때 보행자가 튕겨 날아간 직후의 속도는 차량의 충돌속도와 같다고 생각해도 된다. 세 번째는 미끄러지고 구르는 단계(Sliding phase)로서, 지상에 떨어진 보행자는 노상을 미끄러지거나 구른 후 정지할 수 있고, 미끄러지는 도중에 가로수, 연석, 기타 구조물 등에 충돌될 수 있으며, 충격을 가한 차량에 역과 될 수도 있다.

트럭과 보행자 사고에서 충돌 후에 발생하는 보행자 운동유형은 다음과 같이 5가지로 분류할 수 있다. 첫째는 Wrap Trajectory 유형으로서, 승용차 전면 범퍼와 보행자 신체 경골부와의 접촉으로 보행자 신체는 후드 위로 들려져 차량을 감싸는 형태를 취하는데, 대부분 성인에서 많이 발생한다. 둘째는 Forward Projection 유형으로서, 보행자와 트럭, 버스와 같이 차량의 전면이 평평한 차량과 보행자 충돌 시 또는 무게 중심이 낮은 어린이에 주로 발생되는 유형이다. 차량 전면과 보행자 충돌 시 충격력은 보행자의 무게중심이나 그 보다 높은 위치에 작용되고, 그로인해 보행자의 상체가 차량의 진행방향으로 급격히 회전하게 되지만 다리 부위는 노면에서 미처 떨어지지 못해 신체의 상반신이 먼저 차량 앞쪽으로 방출되게 되며, 보행자는 대게 전도된다. 셋째는 Fender Vault 유형으로서, 차량의 제동여부와는 관계없이 발생되며, 보행자가 차량 가장자리 모서리 등에 충돌될 때 발생한다. 보행자는 차량의 모서리에 충격 당한 후 후드나 휀더 위에 올라타게 되고 전면 유리나 A필라에 충격 후 낙하하게 된다. 넷째는 Roof Vault 유형으로서, 충돌 시 차량이 제동하지 않거나 무게중심이 높은 보행자와 충돌 시 주로 발생하며, 보행자는 차량의 지붕 위로 넘어가 차량의 뒤에서 최종위치하게 된다. 32km/h 이하의 속도에서는 잘 발생되지 않고, 보통 60km/h 이상에서 발생된다. 마지막으로 Somer Vault 유형으로서 차량의 속도가 높은 상태에서 충격력이 보행자의 무게중심 높이 보다 밑으로 작용하고 충격으로 인해 보행자 신체가 차량 위에서 회전하게 된다. 이는 충돌 시 차량의 속도가 대략 60km/h 이상에서 발생되나, 실제 발생빈도는 매우 낮다.

2. 기존문헌 고찰

Stcherbatchef(1975)는 성인 및 어린이 보행자 더미를 이용하여 6~24m/h(10~40km/h)의 충돌 속도로 더미를 충돌하여 보행자 충돌 속도와 전도거리에 관한 연구를 수행하였다. Stcherbatchef의 연구는 보행자 전도거리가 2가지의 요소로 인해 결정된다고 결론지었다. 하나는 차량의 충격 속도이며, 다른 하나는 충돌 순간 차량의 제동조치 정도와 제동 시간이다. Stcherbatchef 분석 모형은 보행자와 차량 간의 충돌 시간이 충분히 길고 충돌 시간 동안 에너지를 수치 적분 가능하다는 전제조건 하에서 적절할 수 있으나 실체 충돌 순간은 0.1초 정도로 짧아 충돌은 순간적으로 일어나며 충돌 순간 압축 충돌과 반발 충돌 간의 에너지 교환을 전제로 한

충돌 모델에서는 그 순간의 차량의 제동 감가속도는 고려되지 않는다.

Collins and Morris(1979)는 차량의 보행자 충돌속도와 보행자 무게중심의 높이를 변수로 하여 전도거리를 구하는 모형을 발표하였다. 이 실험식의 특이점은 보행자의 신장이 보행자의 전도거리에 영향을 준다는 전제하에 전도거리 고려 인자 중에서 보행자 신장에 관한 인자를 중심으로 모형이 제시되었다. 보행자의 노면 마찰계수와 보행자의 무게중심의 높이, 그리고 충돌속도를 변수로 사용하여 전도거리를 추정할 수 있도록 하였다.

Limpert(1989)는 충돌 후 보행자의 이동거리를 근거로 보행자 충돌속도를 분석할 수 있는 모형을 제시하였다. 이 모델은 충돌 전 운전자가 제동조치를 취하며 보행자를 충돌한다는 전제 하에 ±2.5mph의 속도 오차범위를 두고 있으며, 보행자의 노면 활주 시 마찰계수는 0.7~1.2로 지정하고 있다. Limpert의 모형은 보행자 전도거리에 속도가 가장 직접적인 요인이 될 것이라는 가정 하에 수행되었지만, 차량의 중량이나 크기 등과 같이 2차적으로 중요한 요인을 고려하지 않은 단순한 형태의 모형이라고 평가될 수 있다.

Ryu and Jung(2010)은 연구를 통하여 외국 자동차와 외국 보행자를 기준으로 유도된 차량 속도와 보행자 전도거리 모형의 적용으로 큰 오차가 발생할 수 있는 가능성을 지적하였다. 나아가 국내에서 발생된 보행자 사고를 대상으로 하여 자동차 파손상태 및 보행자 상해도를 근거로 충돌속도를 산정하고, 충돌속도와 전도거리간의 회귀 식을 통해 충돌지점을 규명할 수 있는 한국형 분석모형을 소개하고, 이러한 모형의 실제 사고 분석 시 적용방법에 관한 내용을 제시하였다. 이 연구의 결과에서 충돌속도가 높아질수록 자동차 파손단계, 보행자 상해도 등도 규칙적으로 변화되고 있는 것으로 나타내었고, 실제 사고사례에 적용해 본 결과 사고지점 부근과 일치된 결과가 나타남을 보였다. 이러한 내용들은 사고 부근의 목격자들이 진술하는 충돌지점과 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 통하여 확인되었다.

Lee and Ryu(2005)는 그 동안 국내에서 수집된 보행자 사고 자료를 이용하여 국내 환경에 사용될 수 있는 차대보행자 충돌모형을 개발하였다. 모형은 사고 자료에서 수집된 보행자 전도거리를 종속변수로 하고, 보행자 충돌속도를 독립변수로 하여 일차원 회귀 식 형태로 구성되었고, 이 모형의 적합도는 매우 높은 것으로 파악되었다. 모형을 이용하여 실제 사고 자료에 적용한 결과, 현장에서 측정된 실제 값과 매우 유사한 결과를 나타냄을 확인하였다. 그리고 이 연구에서 개발된 모형의 결과는 차량의 속도에 따라 외국의 모형과는 다소 상이한 결과를 보이는 것을 나타내었다.

Jung(2015)은 국산 차량 전면부를 7가지로 세분화하여 충돌속도, 충돌옵셋, 성인 남성 표준 신체 등의 인자를 고려해 MADYMO 프로그램으로 126회 시뮬레이션을 수행한 후 다중 회귀분석을 수행하였다. 자료 분석 결과, 범퍼의 높이가 낮고 보닛이 긴 세단형 차량은 보행자 전도거리가 제일 짧은 것으로 나타났고 경차형 차량도 이와 유사한 패턴을 보였다. SUV형 차량은 경차형과 세단형 보다 보행자 전도거리가 길며, 밴형 차량은 SUV형과 유사하나 보행자 전도거리가 SUV형 보다 약간 긴 것으로 나타났다. 반면에 트럭이나 버스형 차량은 전 속도 구간에 걸쳐 다른 차종보다 보행자 전도거리가 긴 것으로 분석되었다.

Korea Road Traffic Authority(2001)은 차대 보행자 사고 시, 옷을 입은 보행자(인체)의 미끄럼 마찰계수는 아스팔트 노면에서 0.45~0.60의 값을 사용하는 것을 권장하고 있다. 이러한 계수 값들은 노면의 조건이나 환경에 따라 차이를 나타낼 수 있으나, 이에 관한 구체적인 기준을 제시하고 있지 못한 상태이다. 마찰계수는 사고 분석 시 결과에 큰 영향을 미치는 변수이므로 향후 광범위한 실험을 통하여 보다 세분화된 기준을 제시하는 노력이 요구되었다.

Kim(2009)는 다양한 환경 하에서 인체와 노면 간의 마찰계수에 대한 실험적 검증을 실시하여 결과를 제시하였다. 건조한 아스팔트 도로에서의 인체노면 마찰계수의 값은 0.59~0.62, 건조한 콘크리트 도로에서는 0.59~0.61, 젖은 아스팔트 도로에서의 인체노면 마찰계수는 0.56~0.59, 젖은 콘크리트 도로에서는 0.51~0.54를

제시하였다. 그러나 이런 실험결과는 제한된 실험 조건하에 실시된 결과이고, 이를 보다 구체화하는 노력이 필요함을 언급하였다.

Shim and Lee(2016)는 MADYMO 프로그램을 활용하여 차대 보행자 사고 시 보행자의 두부가 승용차의 전면유리에 닿는 최저속도를 규정하는 연구를 수행하였다. 실험 결과, 보행자의 두부가 NF쏘나타의 전면유리에 닿는 최저속도는 보행자의 신장이 160cm일 경우 약 49km/h, 보행자의 신장이 170cm일 경우 약 41km/h, 그리고 보행자의 신장이 180km/h일 경우 약 29km/h임을 제시하여, 보행자의 두부가 전면유리에 닿을 수 있는 속도는 보행자의 신장에 따라 상이함을 확인하였다.

Ⅲ. 충돌실험 구성 및 분석 결과

PC-crash는 오스트리아의 DSD 社에서 교통사고에서 차량의 운동과 충돌, 생체 역학적 물체의 운동과 충돌 상황을 시뮬레이션 할 수 있도록 개발된 프로그램이다. PC-Crash는 운동량 및 에너지 보존법칙을 이용한 차대차 충돌해석, Multi-body시스템을 이용한 보행자 및 탑승자 거동해석, FEA(Finite Element Analysis)를 이용한 차량 및 구조물의 변형 및 응력 등을 해석할 수 있는 기능을 갖고 있다. 현재 국내에서는 도로교통공단, 국립과학수사연구원, 경찰청 등 교통사고 분석을 전문적으로 하는 기관에서 주로 사용하고 있으며, 그 외 자동차 및 교통안전 분야에서 교통사고분석 및 연구목적으로 사용되고 있는 프로그램이다. 최근 자동차 안전장치는 에어백과 안전벨트 같은 수동형 안전장치에서 ABS(Anti Lock Brake System), ESP(Electronic Stability Program) 등과 같은 능동형 안전장치로 발전하는 추세이므로 차량의 충돌 전 거동을 분석해 새로운 능동형 안전장치의 개발 및 연구에도 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 PC-crash 프로그램 상에서 트럭과 보행자의 충돌시험을 재현하기 위하여 아래와 같은 실험 조건을 설정하였다.

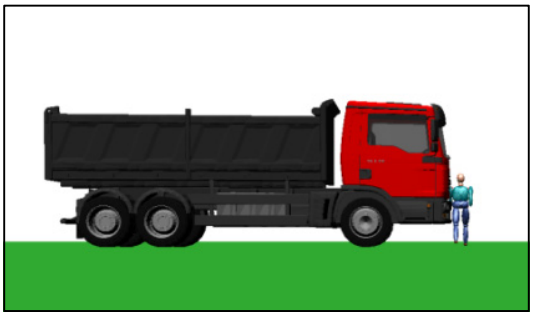
1. 트럭 및 보행자 모델

현재 운영되는 트럭은 차체의 구조나 모양 등에 따라 다양한 종류가 존재하지만, 본 연구에서는 트럭의 전면이 수직방향으로 평평한 캡 오버 트럭(Cab-over-engine truck) 형태의 모델을 채택하였다. 트럭의 중량은 5t, 15t, 25t으로 구분하여 적용하였으며, 각 트럭의 앞 범퍼 하단의 높이를 0.3m부터 0.6m까지 0.1m씩 높여가며 구성하였다.

보행자모델은 문화체육관광부의 2004년~2011년도 우리나라 성인 남녀의 평균 체중 자료를 고려하여, 보행자 신장은 170cm, 몸무게는 65kg으로 적용하였다. 그리고 옷을 입은 보행자 인체와 노면 간의 마찰계수는 선행 연구결과를 참고하여 0.55값을 적용하였다.

2. 시뮬레이션 조건

보행자는 걷다가 차량과 충돌하는 경우가 대부분이므로 트럭의 진행방향 우측에서 좌측으로 진행하는 보행자의 좌측과 트럭의 전면부가 충돌하는 상황을 다음 <Fig. 1>과 같이 구성하였다. 보행자 충돌 직후 트럭의 제동이 시작되는 것으로 적용한 상태에서 시뮬레이션을 수행하여 충돌지점부터 보행자의 최종위치까지 전도거리를 각 실험별로 측정하였다.



〈Fig. 1〉 Position of truck and pedestrian in PC-crash program

3. 시뮬레이션 결과

PC-crash 프로그램으로 앞 절에서 제시된 차량과 보행자 모델 값을 적용하여, 트럭의 속도를 10km/h부터 100km/h까지 10km/h씩 높여가며 보행자 전도거리를 실험한 결과는 다음 <Table 1>과 같다.

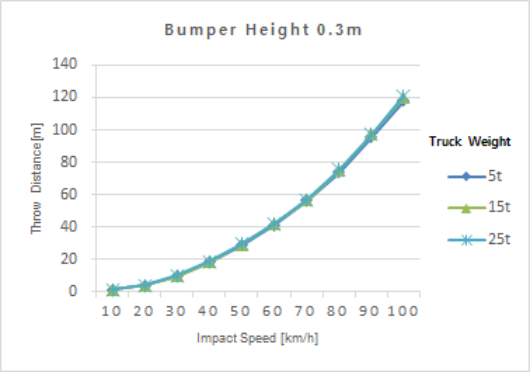
규정된 범퍼 높이에서 트럭의 속도가 증가함에 따라 보행자 전도거리는 증가하는 결과를 나타낸다. 이는 보행자 전도거리를 추정시 속도가 가장 중요한 변수로 사용되어야 하는 당위성을 보여주며 기존의 연구결과와도 일치되는 내용이다. 그러나 규정된 범퍼 높이에서 트럭의 무게 증가에 따라 보행자 전도거리는 약간씩 증가하는 경향을 나타내었으나, 실제적인 차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 또한 동일한 속도에서 전도거리는 범퍼의 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향으로 나타났다.

〈Table 1〉 Simulation Results of Pedestrian Throw Distance (unit: m)

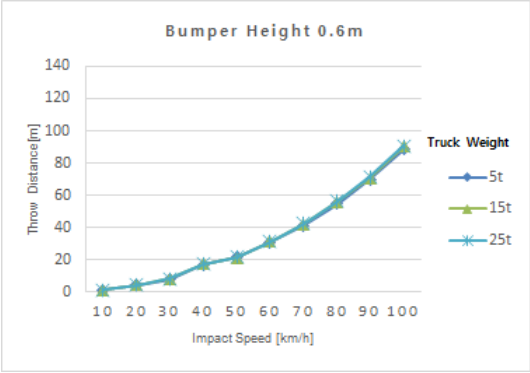
Speed (km/h)	Bumper Height											
	0.3m			0.4m			0.5m			0.6m		
	Truck Weight											
	5t	15t	25t	5t	15t	25t	5t	15t	25t	5t	15t	25t
10	1.29	1.30	1.30	1.42	1.42	1.42	1.44	1.43	1.43	1.44	1.44	1.44
20	4.17	4.25	4.26	3.72	3.79	3.75	4.16	4.26	4.29	4.39	4.45	4.47
30	9.74	9.90	9.96	8.65	8.82	8.88	8.30	8.55	8.60	8.18	8.36	8.39
40	18.59	18.56	18.84	16.16	16.63	16.65	16.61	16.69	16.96	17.06	17.47	17.51
50	28.70	29.40	29.60	25.95	26.49	26.66	24.81	25.34	25.35	21.75	21.51	21.78
60	41.36	42.07	42.22	37.21	37.83	38.03	35.28	36.27	36.13	30.77	31.27	31.41
70	56.52	56.60	56.92	50.95	52.07	52.08	48.05	48.91	48.98	41.42	42.26	42.81
80	73.65	74.96	75.34	67.13	68.39	68.61	62.39	63.30	63.61	54.63	56.23	56.39
90	95.41	97.05	97.36	85.95	87.67	87.34	79.87	79.96	80.20	69.95	70.95	71.65
100	117.96	120.27	120.76	100.42	102.19	102.56	100.98	102.41	102.92	88.58	90.32	90.66

본 연구의 실험결과를 활용하여 트럭의 범퍼 높이 0.3m와 0.6m의 보행자 전도거리를 그래프로 나타내면 다음 <Fig. 2>, <Fig. 3>과 같다. 그림에서 트럭의 속도가 증가할수록 보행자 전도거리가 증가하는 우상향의 포물선 형태를 나타내는 점은 두 그래프가 유사하다. 그리고 각 그래프에서 3가지 트럭 중량에 관한 보행자

전도거리 그래프가 거의 겹쳐지게 파악되어, 보행자 전도거리는 트럭 중량과 큰 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다.

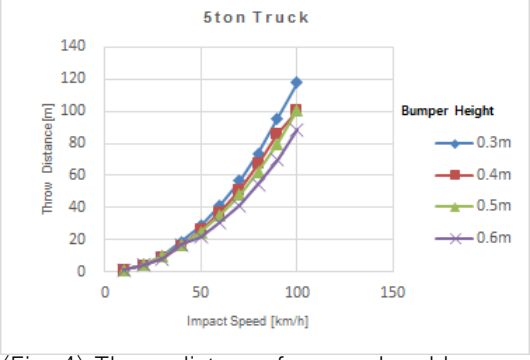


〈Fig. 2〉 Throw distance at 0.3m bumper height

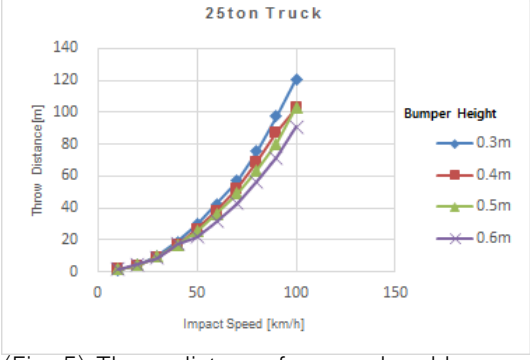


〈Fig. 3〉 Throw distance at 0.6m bumper height

트럭의 충돌속도와 범퍼 높이에 따른 보행자 전도거리를 그래프로 나타낸 결과는 다음 <Fig. 4>, <Fig. 5>와 같다. 아래의 그림으로부터 그래프의 모양이 우상향의 포물선 형태로 거의 유사함을 알 수 있고, 트럭의 속도가 증가할수록 보행자 전도거리가 증가하는 패턴을 확인할 수 있다. 또한 약 30km/h 이상의 속도에서 트럭의 앞 범퍼 하단 높이가 높을수록 보행자의 전도거리가 상대적으로 적은 것을 알 수 있는데, 이는 범퍼 높이가 높을수록 충돌 후 보행자의 비행시간이 짧고 보행자 신체가 노면과 급속히 접촉되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 속도가 20km/h 이하인 경우에는 시뮬레이션 프로그램이 해당 속도에 민감하게 반영하지 않는 것을 확인하였고, 이로 인하여 일정한 패턴이 발견되지 않았다.



〈Fig. 4〉 Throw distance for speed and bumper height (5t truck)



〈Fig. 5〉 Throw distance for speed and bumper height (25t truck)

Ⅳ. 통계적 분석 및 예측 모형 개발

1. 보행자 전도거리와 트럭의 속도, 중량, 범퍼 높이와의 상관성 분석

본 연구에서는 보행자 전도거리와 트럭의 속도, 중량, 범퍼높이 간의 상관성을 분석하기 위해 pearson 상관계

수로 분석을 실시하였고 결과는 <Table 2>와 같다. 보행자 전도거리와 속도는 유의확률 0.000으로 매우 높은 상관관계를 보이며, 정(+)의 상관계수 0.960으로 속도가 증가할수록 전도거리 또한 증가하는 것으로 분석되었다. 그리고 보행자 전도거리와 차량 중량의 경우 유의확률 0.916으로 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다. 범퍼 높이와 전도거리의 경우 저속(20km/h 이하)에서의 결과가 함께 반영되어 상관계수가 낮은 값으로 나타났다.

〈Table 2〉 Correlation Analysis Results

		Speed	Throw distance	Bumper height	Truck Weight
Speed	Pearson Correlation Coefficient	1	.960**	0.000	0.000
	Significance Probability (Both Sides)		.000	1.000	1.000
	N	120	120	120	120
Throw distance	Pearson Correlation Coefficient	.960**	1	-.113	.010
	Significance Probability (Both Sides)	.000		.220	.916
	N	120	120	120	120
Bumper height	Pearson Correlation Coefficient	0.000	-.113	1	0.000
	Significance Probability (Both Sides)	1.000	.220		1.000
	N	120	120	120	120
Truck Weight	Pearson Correlation Coefficient	0.000	.010	0.000	1
	Significance Probability (Both Sides)	1.000	.916	1.000	
	N	120	120	120	120

2. 트럭의 중량 및 범퍼 높이에 따른 집단 간 평균차이 여부 검정

트럭의 중량에 차이를 다른 상태에서 집단 간에 보행자 전도거리에 차이가 있는지 t-test를 실시한 결과는 다음 <Table 3>과 같다.

〈Table 3〉 T-test Results for Weight Factor

Independent sample T-test			Levene's Test for Equality of variance		t-test for Equality of Means						
			F	*P*-value	*t*	DF	P-value (BothSides)	Mdiff	SDdiff	confidence Interval (95%)	
										Lower limit	Upper limit
5t vs 15t	Throw distance	equal variance assumed	.014	.905	-.084	78	.933	-.64150	7.62039	-15.81253	14.52953
5t vs 25t			.021	.885	-.105	78	.917	-.80125	7.63342	-15.99823	14.39573
15t vs 25t			.001	.979	-.021	78	.983	-.15975	7.69710	-15.48350	15.16400

Levene의 등분산 결과 유의확률(*P*) 0.885 이상으로 유의수준 0.05에서 집단 간의 등분산이 입증되었고, 유의확률(양쪽)이 0.917 이상으로 유의수준 0.05 보다 크므로 트럭중량이 다른 집단 간에 보행자 전도거리에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

3. 보행자 전도거리와 트럭의 속도, 중량, 범퍼 높이 간의 다중회귀분석

다중 회귀분석을 실시하기 전 종속변수인 보행자 전도거리와 독립 변수인 트럭 중량, 범퍼 높이 간의 공선성통계량을 살펴본 결과, 변수들 모두 VIF값이 10이하, 공차 값이 0.1이상으로 다중공선성문제가 없는 것으로 파악되었다. 다중회귀분석을 실시한 결과는 다음 <Table 4>, <Table 5>와 같다.

〈Table 4〉 Multiple Regression Analysis Results

Model	Non-Standardized Coefficients		Standardized Path Coefficients	*t*	Significance probability	Collinearity Judgement	
	B	Standard error	Beta			Tolerance	VIF
(Constant)	-7.205	3.658		-1.969	.051		
Speed(X1)	1.130	.028	.960	40.535	.000	1.000	1.000
Bumper Height(X2)	-.341	.072	-.113	-4.762	.000	1.000	1.000

〈Table 5〉 A Model from Multiple Regression Analysis

Goodness of fit(R^2)				
Model	R	R square	Adjusted R square	The standard error of estimate
1	.967	.934	.933	8.77335

독립변수의 채택에 있어 중량 변수의 경우 앞의 통계적 결과를 적용하여 모형 구축에서 제거되었다. 차량 속도와 범퍼높이 변수의 경우 모두 유의한 값(p=0.000)을 나타내었으며, 위 결과를 바탕으로 보행자 전도거리(Y, m)를 종속변수로 하고, 보행자 충돌속도(X1, km/h), 범퍼 하단 높이(X2, cm)를 독립변수로 하여 다음과 같은 모형 식을 유도하였다.

$$Y = -7.205 + 1.130(X1) - 0.341(X2) \quad (1)$$
$$(\text{단}, X1\text{은} 10 \sim 100km/h,\ X2\text{는}\ 30 \sim 60cm)$$

구축된 모형식의 설명력은 <Table 5>에 제시된 결과와 같이 수정된 R^2값이 93.3%로 나타나 매우 우수한 설명력을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 모형식은 트럭과 보행자 사고에서 속도와 범퍼의 높이에 따른 전도거리를 설명하므로, 수집되는 자료에 따라 속도나 전도거리의 값들을 정확하게 추정할 수 있다.

Ⅴ. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 사고재현 프로그램(simulation program)인 PC-crash 프로그램에서 보행자의 신장을 170cm, 몸무게를 65kg으로 로 적용하고, 트럭의 중량을 5t, 15t, 25t으로 적용한 상태에서, 각 트럭의 앞 범퍼 하단 높이를 0.3m부터 0.6m까지 0.1m씩 높여감과 동시에 트럭의 속도를 10km/h부터 100km/h까지 10km/h씩 높여가며 보행자 전도거리를 측정하였다.

분석 결과, 규정된 범퍼 높이에서 트럭의 속도가 증가함에 따라 보행자 전도거리는 증가하는 결과를 나타

났다. 그러나 규정된 범퍼 높이에서 트럭의 무게 증가에 따른 보행자 전도거리는 큰 차이가 거의 없는 것으로 판단된다. 또한 동일한 속도에서 전도거리는 범퍼의 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향으로 나타났다. *t*-test 결과, 트럭중량이 다른 집단 간에 보행자 전도거리에 차이가 없는 것으로 나타났으며, 보행자 전도거리와 트럭의 속도, 중량, 범퍼높이 간의 상관성을 분석하기 위해 pearson 상관계수로 분석한 결과, 보행자 전도거리와 속도는 매우 높은 상관관계를 보였다. 보행자 전도거리와 차량 중량의 경우 유의확률 0.916으로 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다.

다중회귀 분석 모형을 구축하는 과정 중 독립변수의 채택에 있어 차량 속도와 범퍼높이 변수의 경우 모두 유의한 값(p=0.000)을 나타내었다. 위 결과를 바탕으로 보행자 전도거리(Y, m)를 종속변수로 하고, 보행자 충돌속도(X1, km/h), 앞 범퍼 하단 높이(X2, cm)를 독립변수로 하는 모형 식을 구축하여 제시하였고, 이 모형식의 설명력은 수정된 R^2값이 93.3%로 나타나 매우 우수한 설명력을 가지는 것으로 나타났다.

본 연구는 트럭의 속도, 중량 및 앞 범퍼 높이가 충돌 후 보행자의 전도거리에 미치는 영향을 파악하고, 이를 바탕으로 트럭과 보행자 사고에서 보행자 전도거리를 추정할 수 있는 모형 식을 제시하였다는데 의미가 있다. 이 모형은 향후 트럭과 보행자 교통사고에서 트럭의 속도 및 보행자 전도거리를 분석하고 판단하는데 유용한 자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 이번 연구는 트럭의 무게를 5t, 15t, 25t으로, 보행자의 신장을 170cm, 몸무게를 65kg으로, 트럭의 앞 범퍼 높이를 0.3m, 0.4m, 0.5m, 0.6m로 한정한 상태에서 실험한 결과이므로 향후 이와 같은 실험조건을 확장하여 보다 폭넓은 조건에서의 실험 결과를 제시하는 노력이 필요하다. 이를 위하여 트럭의 종류, 트럭의 전면 형태, 속도, 충돌자세, 보행자 신장 등을 다양화하고, 보행자 전도거리에 영향을 미치는 인자를 다양하게 평가한다면 보다 정교한 모형식을 개발할 수 있다고 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 2017년 추계학술대회 발표 논문을 수정 및 보완하여 작성하였습니다.

REFERENCES

Collins J. C. and Morries J. L.(1979), *Highway Collision Analysis*, Thomas Publishing.

Jung W. T.(2015), *The Development of Pedestrian-Vehicle Accident Analysis Models for Vehicles with Diverse Frontal Shapes*, Master's Thesis, University of Seoul.

Kim M. T.(2009), *An Experimental Study of Drag Factors between the Roadway Surface and the Human Body*, Master's Thesis, Ajou University, p.33.

Korea Road Traffic Authority(2001), *Traffic Accident Investigation Manual*, Saeil Publishing, p.573.

Lee S. B. and Ryu T. S.(2005), "Development of Korean Pedestrian Accident Reconstruction Model," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 23, no. 6, pp103-113.

Limpert R.(1989), *Motor Vehicle Accident Reconstruction And Cause Analysis*, 4th Edition, The Michie Company, p.663.

Ryu T. S. and Jung W. T.(2010), "Application of Korean Pedestrian Accident Reconstruction Model

in Real Accident," *Journal of Traffic Safety Research*, vol. 29, pp.33-46.

Shim J. K. and Lee S. S.(2016), "A Study on Minimum Speed of Vehicle in Collision between Pedestrian Head and Windshield," *Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 5, pp.54-61.

Stcherbatchef G.(1975), *Simulation of Collisions Between Pedestrian and Vehicle Using Adult and Child Dummies*, SAE #751167.