

■ 論 文 ■

자전거 전도거리를 이용한 충돌속도 예측 모형 개발에 관한 연구
Development of an Impact Speed Estimation Model using Bicycle Throw Distances

조 용 직
(도로교통공단 경기지부)

이 상 수
(아주대학교 환경건설교통공학부 교수)

목 차

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>I. 서론</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 연구의 배경 및 목적 2. 연구의 범위 및 방법 <p>II. 자전거사고의 분석이론 고찰</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 자전거사고의 개요 2. 자전거사고의 기존 분석모형 3. 관련 연구결과 고찰 | <p>III. 충돌속도 예측 모형 개발</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 사고 자료의 수집 및 분류방법 2. 모형의 개발 3. 모형의 검증 <p>IV. 결론
참고문헌</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Key Words : 교통사고, 자전거, 전도거리, 충돌 속도, 교통안전
Traffic accident, Bicycle, Throw distance, Impact speed, Traffic safety

요 약

국내에서 차대 자전거사고 분석시 사용되는 충돌속도 예측모형은 외국의 연구결과를 그대로 인용하여 사용하고 있다. 그러나 이러한 결과는 제한된 실험조건하에서 인체모형을 이용하여 도출되었고, 국내 도로 환경 및 자동차의 특성을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 국내사고 자료를 이용하여 차대자전거 사고시 충돌속도를 예측하는 모형을 개발하였다. 이를 위하여 충돌속도와 자전거 전도거리가 정확하게 확인된 23건의 사고 자료를 수집하여 자전거 전도거리와 충돌속도의 상관관계를 선형 회귀모형으로 도출하고 모형의 변수들에 대한 통계적인 검증을 실시하였다. 그리고 개발된 모형의 실제적인 검증을 위하여 2건의 실제 사고 자료와 비교 분석한 결과, 제시된 모형이 실제 충돌속도와 약 3%이내의 오차를 갖는 매우 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제시된 모형은 향후 국내 차대자전거사고를 재현 및 분석하는 과정에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

The impact speed estimation practice used in the car-bicycle accident analysis practice in Korea was mainly dependent on foreign study results which were tested with limited speed ranges and vehicle types, but the characteristics of roadway, human body, and vehicle performance were quite different. This study developed an impact speed estimation model using the car-bicycle accident field data. For this, a regression analysis was performed using the impact speed and bicycle throw distance collected from 23 real accident data, and statistical test was also conducted. For the verification of the induced model, the impact speeds derived from the model were compared with the true impact speeds estimated from skid marks of two accident cases. The result showed that the two speeds were very close to each other. It is believed that the model could be included in the car-bicycle accident analysis practice.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

2007년 발생한 211,662건의 전체 교통사고 중, 자전거관련 사고는 8,721건으로 전체 사고에서 차지하는 비율은 4.1%에 불과하나, 이로 인해 2007년 한 해 동안 304명이 사망하고, 8,963명이 부상을 입었다(도로교통공단, 2008). 이는 2006년의 7,922건에 비해 약 10%가 증가한 것이고(도로교통공단, 2007), 현재 정부에서 추진하고 있는 녹색교통 정책 기조에 따라 향후 자전거의 이용이 증가할 것으로 예상되어 이와 관련된 사고 역시 큰 폭으로 증가할 것으로 예상된다.

자전거 승차자는 보행자와 마찬가지로 대부분 안전장구를 착용하지 않은 상태에서 주행을 하는 이유로 치사율이 3.5%에 이르고 있어 차대보행자 사고처럼 인적 피해가 차대차, 차량 단독 등 다른 유형의 사고에 비해 큰 특성을 갖는다.

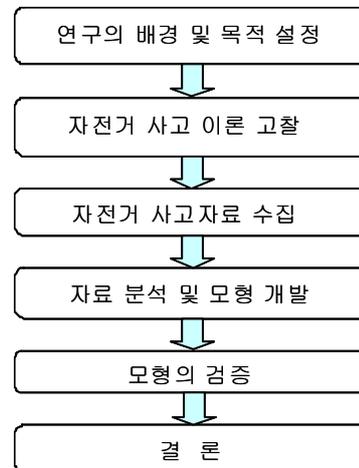
차대자전거 사고 발생시 부각되는 쟁점 사항으로는 자동차의 충돌 속도와 충돌 형태 그리고 자전거 승차자가 자전거를 끌고 보행하였는지 여부 등을 들 수 있다. 이 중 충돌 형태와 자전거 승차자의 보행 여부는 차량과 자전거의 파손 상태 그리고 자전거 승차자의 상해 부위 등을 정밀 조사하면 객관적으로 밝힐 수 있지만, 자동차의 충돌 속도는 차량과 자전거의 파손 상태 그리고 승차자의 상해 정도 등에 대한 정밀 조사만으로는 정확하게 규명하기 어려운 것이 현실이다. 더욱이 자전거사고 분석을 위해 실차실험을 하고 있는 외국에 비해 국내 차대자전거 사고 분석은 외국의 연구결과를 사고 조사과정에 그대로 적용하고 있는 실정이다. 따라서 사고 원인을 보다 정확하게 규명하기 위해서는 우리나라 사람들의 신체 조건과 국내 자동차 특성이 반영된 자료를 이용한 관련 연구가 필요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 차대자전거 사고에 있어서 자동차의 충돌 속도를 예측할 수 있는 모형을 개발하여 제시하는데 있다. 이를 위하여 도로교통공단에 사고 분석 의뢰된 차대자전거 사고 중 충돌지점과 자동차 충돌 속도 그리고 자전거 전도거리가 명확하게 드러난 사고 사례를 수집하였다. 그리고 수집된 자료를 차종별로 분류하여 충돌 속도와 자전거 전도거리의 상관관계를 분석하여 차대자전거 사고에 있어서 자동차의 충돌속도 예측 모형을 구축하고 이를 실제 사고 사례에 적용하여 모형의 적합성을 평가하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

차대자전거 사고를 공학적으로 분석하기 위한 최선의 방법은 자전거 사고의 충돌특성에 대한 실험적 연구이다. 이는 자전거에 운전자를 승차시키고 실제 충돌 실험을 하거나, 더미를 자전거에 승차시키고 충돌 실험을 하는 두 가지 방법이 가능하다. 그러나 실제 승차자를 실험 대상으로 하는 것은 생명과 직결되므로 불가능하고, 더미를 이용한 테스트는 충돌장비와 더미의 비용 문제 그리고 실험장소의 제약 등 많은 어려움이 뒤따르고 있다. 또한 이러한 실험을 하더라도 승차자의 운동은 보행자 사고와 마찬가지로 역학적으로 매우 복잡한 현상을 수반하는 경우가 많아 이를 명확하게 규명하기는 어렵다.

본 연구에서는 실험적 평가보다는 실제 조사된 차대자전거 사고 자료를 기반으로 충돌속도와 자전거 전도거리의 상관관계를 파악하고 이를 모형으로 구축하였다. <그림 1>은 본 연구의 수행과정을 나타낸 것이다.



<그림 1> 연구 수행도

II. 자전거사고의 분석이론 고찰

1. 자전거사고의 개요

자전거사고의 원인 및 결과를 분석하는 과정은 크게 사고조사(accident investigation) 과정과 사고재현(accident reconstruction) 과정으로 나눌 수 있다. 사고 조사는 충돌 후 발생된 결과물인 도로상의 흔적, 차량의 파손 상태, 탑승자의 부상 등을 토대로 충돌 현상에

대한 역학적인 법칙과 차량의 운동 및 구조 특성, 인간공학 등을 함께 고려하여 사고를 분석하고, 이로부터 사고의 원인이 되는 “충돌전 차량의 운동과 탑승자의 행동”을 역으로 추정할 수 있다(교통안전학교, 2002).

사고 재현이란 사고 관련 자료를 이용하여 사고가 어떻게 일어났는가를 결정하고 판단하는 것이라고 정의된다. 이러한 사고 재현을 통하여 차량의 속도, 사고 전 진행방향 및 각각의 위치, 운전자의 운전행위, 탑승자 위치, 사고 원인, 충돌 후 이동방향 및 충돌 위치, 최종 정지 위치 등의 사고 전반에 관한 상황을 추정할 수 있다.

1) 자전거사고의 일반적인 특성

자전거 사고는 일반적인 교통사고에서와 마찬가지로 자동차와 자전거 그리고 도로에 대한 현장 조사를 통해 사고 자료를 수집하고, 주요 정보는 사진 촬영을 통해 기록으로 남기고 특히 충돌 지점을 발견하는데 주의를 기울여야 한다. 그리고 자전거 승차자의 신체 상해에 대한 정보는 사고의 상황을 설명하는데 도움이 되며, 현장 조사를 통해 수집한 각 흔적을 사고 상황도 상에 표기하는 것도 중요하다. 차대현장의 각종 차륜 흔적, 사고차량과 자전거의 파손 부위사진 및 최종 위치, 자전거 승차자 최종 위치 및 유류품 낙하 위치 그리고 자전거 승차자 상해 부위 등이다(교통안전학교, 2002).

차대자전거 사고의 충돌 지점에서 발생하는 대표적인 노면 흔적으로는 자전거 타이어에 의해 발생된 충돌 스크립(Collision Scrub)과 자동차 차륜에 의해 발생된 스키드 마크의 굴절(Crook) 등이 있다. <그림 2>는 자전거 타이어에 의해 발생된 충돌 스크립이고, 이는 충돌 과정에서 자전거의 차체 또는 차륜 휠이 변형되면서 지면 방향으로 강한 압력이 발생하였을 때 자전거의 타이어가 노면에 문질러져 발생된다.



<그림 2> 자전거 타이어의 충돌 스크립

일반적으로 자전거 승차자에 의한 자동차의 손상은 주로 본넷트와 전면유리에서 관찰되며, 높은 속도로 주행하던 자동차 운전자가 제동 조치를 행하지 않았을 경우에는 간혹 보행자 사고와 마찬가지로 자동차의 지붕과 뒤쪽의 트렁크 부분에서도 손상 흔적이 관찰된다.

자전거 승차자가 사망한 경우에는 부검 또는 사체 검안 등의 인체 손상 부위에 대한 정밀 조사를 하지 않아 사고 해석의 증거자료가 소멸되는 수가 많고, 자전거 승차자는 보행자와 마찬가지로 차량과의 1차 충돌 후에 도로지면과의 2차 충돌로 인해 상해를 입게 된다.

2) 충돌 형태에 따른 운동 특성

모든 물체는 무게중심을 갖고 있고 자전거와 자전거 승차자도 무게중심이 있다. 어떤 물체에 무게중심을 벗어난 충격힘이 가해지면 그 물체는 무게중심에 따라 회전하게 된다. 만약 자전거와 자전거 승차자의 무게중심보다 높은 위치에 충격이 가해지면 자전거와 자전거 승차자는 차량 진행방향으로 회전하게 되고 그 반대로 무게중심보다 낮은 위치에 충격이 가해지면 차량진행반대 방향으로 회전하게 된다.

성인용 자전거의 경우, 타이어의 지름이 약 60cm 정도이고, 무게 중심은 약 40cm 정도이므로 대형차량을 제외하고는 자동차의 전면 범퍼 높이와 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 자전거는 대부분 자동차의 전방으로 포물선 운동을 한 후 노면에 낙하되어 미끄러지는 충돌 후의 운동을 하게 된다.

반면, 자전거 승차자는 안장의 높이에 따라 무게 중심 높이가 달라질 수 있다. 차량과 자전거 승차자의 충격점이 승차자의 무게중심보다 낮을 경우 자전거 승차자는 차체 쪽으로 회전하고 차량의 속도, 디자인에 따라 전면 유리창에 접촉하지 않거나 또는 차량의 지붕을 넘어가기도 한다. 그리고 자전거의 측면에 자동차가 충돌시 자전거의 거동은 자동차 밑에서 위로 들려지는 경우와 곧바로 넘어지는 두 가지 경우로 나타난다.

2. 자전거사고의 기존 분석모형

기존의 자전거사고 분석 모형은 크게 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 첫째는 운동방정식 즉, 물리식에 의한 충돌 속도 및 전도거리의 계산방법과 둘째, 인체모형(dummy)을 태운 자전거와 실차를 이용한 실험데이터를 가지고 유도된 실험식이다

1) 물리식에 의한 분석모형

자전거와 자전거 승차자는 차량의 충돌속도까지 순간적으로 가속되고, 차량의 제동에 의해 거의 수평방향으로 이동되어 포물선운동을 하며 노면에 떨어져 활주하다가 마찰에 의해 정지하게 된다는 가정에 따라 포물선 운동 및 운동에너지 방정식으로 사고차량의 최초 충돌속도를 추정할 수 있다.(Eubanks and Haight, 1990)

수평방향의 운동은 등속도운동이며 수직방향의 운동은 중력에 의한 자유낙하운동이므로 수평방향의 이동거리를 X_1 이라 하면,

$$X_1 = v \times t, h = \frac{gt^2}{2} = v \times t \quad (1)$$

여기서 v : 속도(m/s)

t : 시간(sec)

h : 낙하 높이(m)

g : 중력가속도(9.8m/s²)

위 식을 X_1 에 관해 정리하면,

$$X_1 = v \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2)$$

자동차의 전방으로 낙하되어 전도된 자전거 또는 자전거 승차자의 운동에너지는 노면과의 마찰에 의해 소실되고 최종적으로 정지하게 된다. 따라서 운동에너지 방정식을 적용한 전도된 거리 X_2 는

$$\frac{1}{2}mv^2 = m \cdot g \cdot \mu \cdot X_2, X_2 = \frac{v^2}{2g\mu} \quad (3)$$

여기서 m : 질량(kg)

μ : 자전거 또는 자전거 승차자 노면 마찰 계수

자동차의 전방으로 낙하되어 미끄러진 자전거 또는 자전거 승차자의 전체 이동거리 X는 식(4)와 같다.

$$X = X_1 + X_2 = v \times \sqrt{\frac{2h}{g}} + \frac{v^2}{2g\mu} \quad (4)$$

사고차량의 최초 속도 v에 관해 위 식을 다시 정리하면 식(5)로 표현할 수 있다.

$$V = \sqrt{2g \mu \left(\sqrt{h + \frac{x}{\mu}} - \sqrt{h} \right)} \quad (5)$$

2) 실험자료에 의한 분석모형

일본에서는 승용차와 자전거의 충돌 실험을 인체모형을 이용하여 다음과 같은 조건에서 수행하여 자료를 수집하였다(林洋, 1992).

- 가정용 자전거로 타이어 크기가 66.04cm
- 차량은 4륜으로 중량 1,050kg(본넷형 경차 650kg, cab over형 1,350kg)
- 2차적 현상은 배제하고 차량은 충돌직후 브레이크를 작동
- 자전거는 정지 상태(1~5회), 자전거 주행 상태(6~9회)에서 실험
- 노면은 아스팔트 포장상태
- 사람의 모형은 더미(Dummy) 사용(어른 : 175cm, 75kg, 어린이 117cm, 21.5kg)

자료들을 이용하여 자전거 전도거리를 속도로부터 추정한 결과는 다음과 같고, 이를 속도가 40km/h 이하 조건에서의 사고 분석에 적용하고 있다.

$$\text{자전거전도거리(m)} = 0.0077 V^2 + 0.1433 V \quad (6)$$

여기서 V : 속도(km/h)

3) 기존 자전거사고 분석모형의 한계

물리식에 의한 방법은 기본적인 운동방정식으로도 유도가 가능하고 실제 사고적용에 있어서 쉽게 적용이 가능하나 자동차 범퍼의 높이와 자전거 및 자전거 승차자의 무게 중심 높이에 따른 충돌 후의 운동 특성과 자전거 및 승차자의 사출각(仰角) 그리고 노면 활주 과정에서의 마찰 계수 적용상의 문제로 인해 신중한 적용이 필요하다. 인체모형을 태운 자전거와 실차를 이용한 실험식은 인위적으로 조성된 환경에서 20~40km/h라는 한정된 속도와 2~3종의 차량 및 인체모형이라는 조건 하에서 이루어진 실험이므로 실제 상황을 적절히 반영할 수 있는지가 의문시된다.

3. 관련 연구결과 고찰

국내에서 자전거의 운영이나 설치기준, 그리고 사고

와 관련되어 연구된 자료는 현재까지 매우 제한적이다. 손영태(2002) 등은 자전거를 위한 교통시설 설계 및 운영을 위하여 자전거 교통류 특성에 관한 연구를 현장조사를 통하여 수행하였다. 연구결과로 교통시설별 용량값을 제시하였고, 안전한 주행에 필요한 주행 점유면적값을 평가하여 제시하였다.

황정훈(2005) 등은 자전거 이용을 활성화하기 위한 주행 환경을 개선하는 방안을 제시하였다. 그리고 AHP 기법을 이용한 개선효과에 대한 평가를 실시하여 자동차와 자전거가 분리된 도로망을 구성하는 것을 권장하였다.

한원섭(2008) 등은 자전거가 운영되는 신호교차로에서 자전거에 대한 전용신호를 도입하는 방안을 연구하여 제시하였다. 횡단도로의 유무와 자전거 전용도로의 설치여부에 따라 신호등 형태와 보행신호등과의 연계성을 검토하여 국내 적용방안을 검토하였다. 그리고 류태선(2004)은 실제 보행자 사고 자료를 이용하여 보행자사고를 보다 정확하게 해석하는 방법을 연구하여 제시하였다.

Motte(2008) 등은 회전교차로(roundabout)에서 발생하는 차와 자전거의 충돌사고를 분석하고 자전거 운전자가 갖는 위험에 대한 평가를 실시하였다. 조사결과 자전거 운전자는 차량통행 원칙에 대한 인지가 부족하여 위험도를 낮게 생각하고 운행하여 사고로 연관되는 경향이 파악되었다.

Delmelle(2008) 등은 미국내 자전거 사고자료를 이용하여 자전거 사고와 연령, 그리고 공간적인 특성을 연관하여 분석하였다. 분석결과 자전거사고 위험이 높게 나타나는 지역은 자전거 운전자의 거주지 근처로 파악되었고, 연령별로 차이가 있는 것으로 나타났다.

Carter(2007) 등은 거시적 측면에서 자전거 운영 계획에 사용할 수 있는 자전거 안전지수를 개발하여 제시하였다. 안전지수 산정에 필요한 자료는 교통량, 차선수, 제한속도, 자전거도로의 유무, 주차장 유무등을 포함하고, 이를 이용하여 자전거 이용자가 경험하는 위험정도의 확률값을 계산하여 평가하게 된다.

Zolnik(2007) 등은 도시부 도로의 자전거 서비스 수준을 결정할 수 있는 방법을 개발하였다. 이 논문에서는 육체적인 피로와 자전거와 차량의 사고건수와 상해정도를 함께 반영하여 서비스 수준을 결정하는 방법을 제안하였다. 이와 같이 자전거 사고와 관련된 다양한 연구가 진행되었으나, 충돌속도를 예측하는 모형에 대한 연구는 없는 것으로 파악되었다.

III. 충돌속도 예측 모형 개발

1. 사고 자료의 수집 및 분류방법

본 연구에서는 정확한 충돌속도 자료를 얻기 위하여 다음 두 가지 조건에 해당하는 자전거 사고 자료를 수집하였다.

- 운전자 급제동에 의한 스키드 마크가 충돌지점 전후에 발생한 사고
- 영업용차량에 장착된 타코미터에 의해 속도가 산출된 사고

첫 번째의 경우는 운동방정식에 의해서 충돌속도를 계산할 수 있다. 스키드 마크(Skid mark)를 발생시킨 자동차의 제동 전 속도를 v_i 라 하고, 제동 후 속도를 v_e 라 하면,

$$v_e = v_i + at \tag{7}$$

$$d = v_i t + \frac{1}{2}at^2 \tag{8}$$

여기서 a : 가속도(m/s^2)
t : 시간(sec)

급제동 후 자동차는 정지하게 되므로 $v_e = 0$ 가 되므로, (7)식은 다음과 같이 정리된다.

$$0 = v_i + at, \quad v_i = -at, \quad t = -\frac{v_i}{a} \tag{9}$$

(9)식을 (8)식에 대입하면, $v_i^2 = 2ad$, $a = \mu g$ 이므로,

$$v_i (m/sec) = \sqrt{2 \mu g d} \tag{10}$$

$$v_i (km/h) = \sqrt{254 \mu d} \tag{11}$$

여기서 μ : 제동된 타이어의 마찰계수
d : 스키드 마크의 길이(m)

식(10), 식(11)에서 스키드 마크의 길이 d 값은 사고현장에서 측정하여 얻을 수 있는 자료이고, μ 값은 노면의 종류와 상태, 제동 정도, 차종 등에 따라 다양하게 적용되는데 일반적으로 승용차량의 μ 값은 건조한 아스팔트 노면에서 0.8을 적용하고 있다.

두 번째의 경우는 기계적 방법에 의해 속도를 감지하는 것이며, 이와 같은 방법은 영업용 차량에 장착된 타코미터(tachometer)를 이용하는 것이다.

이와 같이 충돌 지점을 육안 확인할 수 있고, 자동차의 타이어 흔적 또는 운행기록계에 의해 충돌 속도를 확인할 수 있는 사고 자료는 총 25건이다. 수집된 25건 중에서 2건의 사고는 충돌 속도 예측 모형의 검증에 위해 제외시켰다. 예측 모형 개발을 위해 사용된 23건의 사고 자료는 <표 1>과 같다.

자전거는 성인용 자전거이고, 충돌 유형은 자전거 차체의 1/2이 자동차 전면부에 충돌한 유형으로 한정시켰다. 자동차와 자전거의 측면이 충돌한 경우는 자동차와 자전거의 충돌형태에 따라 충돌 후에 다양한 운동이 전개되고 또한 자전거가 자동차의 충돌속도까지 가속되었다고 보기 어렵기 때문에 이를 토대로 충돌 속도를 추정하는 것은 무리가 있다고 판단된다.

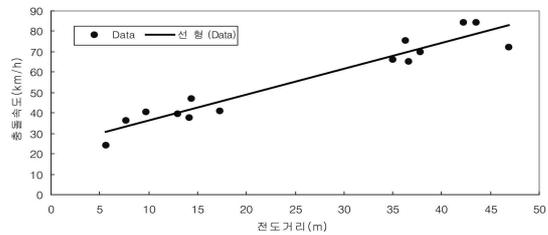
<표 1>의 실제 사고 자료에서 자동차의 차종을 살펴보면, 본넷트형 승용차량과 RV형 차량 그리고 소형승합차량으로 구분할 수 있다. 전면 구조를 보면 본넷트형 승용차량과 RV형 차량은 유사하다고 볼 수 있지만, 전면 범퍼의 높이를 고려해 보면, 오히려 RV형 차량과 소형승합차량이 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서

차종 구분은 본넷트형 승용차량과 RV형 및 소형승합차량으로 구분하였다. <표 1>에 나타나 있는 23건의 실제 사고 자료를 위와 같이 구분하면 본넷트형 승용차에 의한 사고는 14건, RV형 및 소형승합차량에 의한 사고는 빗금격자모양으로 표기된 9건이다.

2. 모형의 개발

1) 충돌속도와 자전거 전도거리의 관계

<표 1>에서 본넷트형 승용차에 의한 사고 14건 자료를 이용하여 자전거 전도거리별 충돌속도를 2차원 그래프에 나타내면 <그림 3>과 같다. 그림에서 보면 전도거리가 증가할수록 충돌속도가 비례하여 증가하며, 두 변수



<그림 3> 자전거 전도거리와 충돌속도(본넷트형 승용차)

<표 1> 수집된 자전거사고 자료

연번	차종	충돌속도 (km/h)	자전거 전도거리 (m)	자전거 승차자	자전거 충돌 형태
1	카니발	58.4	28.2	남, 73세	좌측면 직각 충돌
2	카니발	41.6	18	남, 55세	좌후면 대각선 충돌
3	다이너스티	70	37.8	남, 14세	우측면 직각 충돌
4	프라이드	84.6	42.2	남, 42세	좌측면 직각 충돌
5	로제	47	14.4	남, 46세	정면 충돌
6	아반테	72.4	46.9	남, 50세	좌측면 직각 충돌
7	아반테	66	35	남, 26세	좌측면 직각 충돌
8	레조	24.1	5.6	여, 23세	좌측면 직각 충돌
9	프라이드	41	17.3	남, 67세	좌전면 대각선 충돌
10	EF 소나타	38	14.1	남, 72세	좌후면 대각선 충돌
11	소렌토	39.3	10.1	남, 65세	우측면 직각 충돌
12	프레지오	42.7	13	남, 68세	좌측면 중심 대각선 충돌
13	산타페	50	24	남, 46세	우후면 대각선 충돌
14	EF 소나타	40.8	9.7	남, 74세	우후면 대각선 충돌
15	그레이스	43.9	13	남, 75세	우측면 직각 충돌
16	아반테	75.6	36.3	남, 70세	후면 충돌
17	세피아	36.4	7.7	남, 58세	좌측면 직각 충돌
18	스타렉스	46.7	18.3	남, 83세	좌측면 직각 충돌
19	스타렉스	74.6	40.9	남, 81세	좌측면 직각 충돌
20	소렌토	76	34.7	남, 36세	우측면 직각 충돌
21	그랜저	84.4	43.5	남, 60세	좌후면 대각선 충돌
22	아벨라	39.6	13	남, 54세	우후면 대각선 충돌
23	아벨라	65.4	36.6	남, 70세	좌후면 대각선 충돌

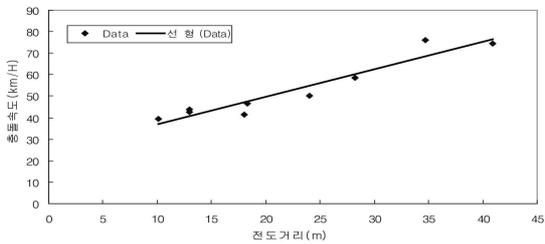
의 관계를 선형으로 나타낼 수 있다고 판단하였다. 따라서 이와 같은 결과를 선형회귀 모형식으로 구축하였다.

자전거 전도거리(X, m)를 독립변수로 하고, 자동차 충돌속도(Y, km/h)를 종속변수로 하는 선형 회귀식으로 나타내면 식(12)와 같다.

$$Y=1.2682X+23.477(\text{단, } X\text{는 } 5\sim 47\text{m}) \quad (12)$$

RV형 및 소형승합차량에 의한 사고는 9건이며, 이 자료를 이용하여 자전거 전도거리별 충돌속도를 그래프로 나타내면 <그림 4>와 같다. 이러한 결과는 <그림 3>과 유사한 경향을 보이며, 자전거 전도거리(X, m)를 독립변수로 하고, 자동차 충돌속도(Y, km/h)를 종속변수로 하는 선형회귀식으로 나타내면 식(13)과 같다.

$$Y=1.2703X+24.32(\text{단, } X\text{는 } 10\sim 41\text{m}) \quad (13)$$



<그림 4> 자전거 전도거리와 충돌속도 (RV형 승용차)

2) 차종별 충돌속도 모형 결과 비교

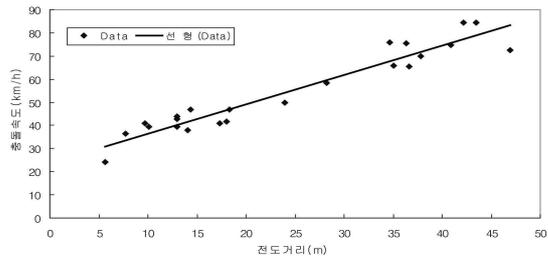
위에 제시된 두 회귀식 모형은 기울기와 절편 값의 크기와 부호가 매우 유사함을 알 수 있다. 두 가지 모형식을 사용하여 독립변수인 자전거 전도거리를 10~40m까지 적용하여 계산된 결과는 <표 2>와 같다. 차종별로 구분된 두 모형으로부터 추정된 충돌 속도값을 비교하면, 최소 0.8에서 최대 1.0 km/h 범위의 매우 적은 차이로 나타나 두 모형이 거의 동일한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

<표 2> 차종별 충돌속도 비교 결과

차종 구분	자전거 전도거리(m)						
	10	15	20	25	30	35	40
본넷트형 승용차량 충돌 속도(km/h)	36.2	42.5	48.8	55.2	61.5	67.8	74.2
RV형 차량 충돌 속도(km/h)	37.0	43.4	49.7	56.1	62.4	68.8	75.1

3) 충돌속도 예측 통합 모형 구축

<표 2>의 결과에서 보듯이, 차종별로 구분하여 추정된 두 모형은 자전거 전도거리별 충돌 속도를 추정하는데 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 전면 범퍼의 높이 차이가 현저하게 다른 대형차량에 의한 자전거사고 자료가 없었던 때문으로 판단된다. 따라서 수집된 사고 자료 23건을 전제로 하여 자전거 전도거리별 충돌 속도를 그래프로 나타내면 <그림 5>와 같다.

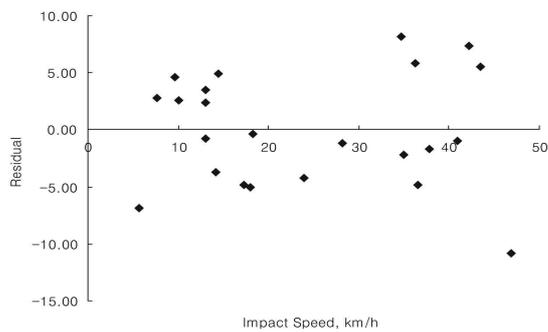


<그림 5> 자전거 전도거리와 충돌속도(모든 차량)

<그림 5>에서 자전거 전도거리(X, m)를 독립변수로 하고, 자동차 충돌속도(Y, km/h)를 종속변수로 하면 다음의 선형회귀식을 얻는다.

$$Y=1.2642X+23.919(\text{단, } X\text{는 } 5\sim 47\text{m}) \quad (14)$$

선형회귀 모형의 경우, 모형의 오차(error)는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포의 확률변수를 가정하고 있다(Neter등, 1990). 식(14)에서 제시된 모형의 오차에 대한 정규성을 검정하기 위하여 잔차(residual) 분석을 실시하였고 결과는 <그림 6>에 제시되었다. 잔차의 기대값(expected value)은 0.03으로 계산되었고, 잔차의 분포도 매우 적합한 것으로 파악되었다.



<그림 6> 잔차(Residual) 분석 결과

<표 3> 회귀분석 결과

회귀분석 통계량 (Regression Statistics)	
다중 상관계수 (Multiple R)	0.9596
결정계수 (R Square)	0.9208
조정된 결정계수 (Adjusted R)	0.9171
표준오차 (Standard Error)	5.0774
관측수	23

<표 4> 분산분석 결과

구분	자유도	제곱합	제곱평균	F 비	유의한 F
회귀	1	6298.3213	6298.3213	244.3141	4.85E-13
잔차	21	541.3718	25.7796		
계	22	6839.6930			

구분	계수	표준 오차	t 통계량	P-값
Y 절편	23.9194	2.2368	10.6937	5.912E-10
X 1	1.2642	0.0809	15.6305	4.85E-13

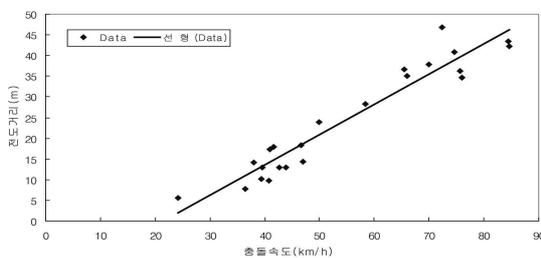
그리고 box plot과 Normal probability plot 등의 분석 결과도 식(14) 모형의 적합성이 큰 것으로 파악되었다. 본 연구에서 제안된 식(14) 모형에 대한 추가적인 통계분석 결과는 <표 3>, <표 4>와 같다.

<표 3>의 회귀분석에서 결정계수 R^2 는 0.92로 매우 높게 나타났고, <표 4>의 분산분석 결과와 같이 회귀식에 대한 유의한 F값(회귀관계에 대한 P-값)과 회귀식의 각 절편의 P-값은 .001보다 이하이므로 식(14)는 통계적으로 매우 유의하다고 판단된다.

4) 자전거 전도거리 예측 모형 개발

식(14)를 이용하면, 자전거 전도거리를 통해 충돌 속도를 추정할 수 있다. 반대로, 자동차의 충돌속도를 확인할 수 있다면, 자전거 최종 위치로부터 전도거리를 추정할 수 있고, 이를 토대로 충돌 지점을 추정할 수 있을 것이다. <그림 7>은 <표 1>의 사고 자료 23건을 이용하여 충돌속도별 자전거 전도거리를 나타낸 것이다.

충돌속도(X_a , km/h)를 독립변수로 하고, 자전거 전



<그림 7> 충돌속도별 자전거 전도거리

<표 5> 분산분석 결과

구분	자유도	제곱합	제곱평균	F 비	유의한 F
회귀	1	3628.7277	3628.7277	244.3141	4.85E-13
잔차	21	311.9070	14.8527		
계	22	3940.6348			

구분	계수	표준 오차	t 통계량	P-값
Y 절편	-15.4943	2.6735	-5.7956	9.41E-06
X 1	0.7284	0.0466	15.6305	4.85E-13

도거리(Y_a , m)를 종속변수로 하여 다음과 같은 회귀식을 유도 할 수 있다.

$$Y_a = 0.7284X_a - 15.494 \quad (15)$$

(단, X_a 는 25~85km/h)

식(15)는 식(14)와는 반대로 자동차 충돌속도를 통해 자전거 전도거리 즉, 충돌 지점을 예측할 수 있는 모형식이다. 통계적 분석 결과, 모형 식(15)의 결정계수는 R^2 는 약 0.92로 높게 나타났고, <표 5>의 분산분석 결과를 보면 통계량에 대한 P-값이 .001 이하로 나타나 매우 유의한 결과를 얻었다.

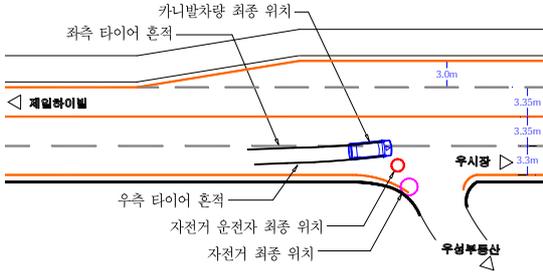
3. 모형의 검증

본 연구에서는 제시된 모형에 대한 평가를 위하여 2건의 실제 사고 자료를 이용하여 비교하였다. 2건의 사고사례는 사고차량에 의해 발생한 타이어 흔적을 토대로 충돌 속도를 추정할 수 있는 사고이다.

1) 사례 1

사고는 2007년 5월 00일, 20시 20분경, 오산시 쉼동에서 발생하였고, 카니발 차량 운전자(남, 51세)와 자전거 운전자(여, 57세)가 사고 당사자이다. 사고도로 우측의 내리막 접속도로를 이용하여 본선도로로 진입하던 자전거와 자전거 진행 방향 좌측에서 우측으로 2차로를 진행하던 카니발차량이 충돌한 사고이고, 자전거 운전자는 사망하였다. 사고 상황을 요약한 도면은 <그림 8>에 제시되어 있다.

현장에 발생한 타이어 흔적은 운전자의 급제동에 의해 발생한 스키드 마크(Skid mark)로 추정되며, 좌측으로 굽은 곡선 형태로 발생한 것은 좌측으로 조향하면서 제동을 행한 결과로 추정된다. 현장 조사결과, 카니발 차량은 좌측 전륜으로 약 9.8m의 스키드 마크를 발생시



<그림 8> 사례 1의 사고 상황동

키고, 충돌 후에 계속해서 약 5.3m의 스키드 마크를 발생시킨 상태이며, 자전거는 충돌 지점으로부터 우측 전방 약 8.0m 지점에 최종 위치하였다.

충돌 후에 발생한 5.3m의 스키드 마크의 길이를 식(11)에 대입하여 충돌 속도를 추정하면 다음과 같다.

$$V_c = \sqrt{254 \times \mu \times d}$$

여기서 V_c : 충돌 속도(km/h)

μ : 노면 마찰 계수(건조한 노면 : 0.8)

d : 스키드 마크의 길이(5.3m)

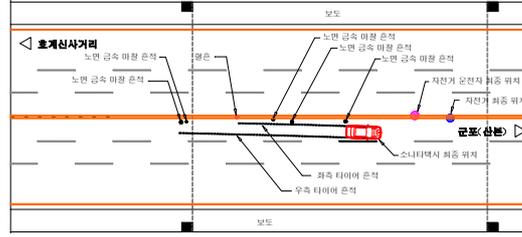
$$V_c = \sqrt{254 \times 0.8 \times 5.3} \approx 33\text{km/h}$$

본 연구에서 제시된 충돌 속도 예측 모형인 식(14)에 자전거 전도거리 약 8.0m를 적용하여 계산하면 34.0 km/h의 값을 얻는다. 그리고 식(6)에 제시된 모형을 적용하여 추정한 속도값의 결과는 24.4 km/h이다. 그러므로 본 연구에서 제시된 모형의 정확도가 높다는 것을 확인할 수 있다.

2) 사례 2

사고는 2006년 8월 00일, 23시 10분경, 안양시 호계동에서 발생하였고, 소나타택시 운전자(남, 42세)와 자전거 운전자(남, 66세)가 사고의 당사자이다. 소나타택시가 호계신사거리방면에서 군포방향으로 1차로를 직진하던 중, 전방 같은 차로를 진행하던 자전거의 뒷부분을 충격한 사고이고, 자전거 운전자는 사망하였다.

사고 상황의 도면은 <그림 9>에 나타나 있다. 현장에 발생한 타이어 흔적은 운전자의 급제동에 의해 발생한 스키드 마크로 추정되며, 소나타택시는 최종 정지 위치까지 변형되지 않은 직선 형태의 스키드 마크를 발생시



<그림 9> 사례 2의 사고 상황도

킨 상태이다.

또한 사고는 최초 노면 금속 마찰 흔적과 소나타택시 우측 전륜에 의한 스키드 마크의 시작 지점 부근에서 발생하여 충돌 후 자전거는 약 36.5m를 이동하여 최종 정지하였다.

소나타택시의 스키드 마크길이 26.2m를 이용하여 충돌속도를 산출하면 약 73 km/h이고, 본 연구에서 제시된 모형 식에 자전거 전도거리 약 36.5m를 대입하면 약 70 km/h의 충돌속도 추정 값을 얻는다.

이상과 같이 두 가지 실제 사고사례에 대하여 본 연구에서 제시한 충돌속도 예측 모형을 이용하여 평가한 결과, 속도의 차이가 3 km/h 이내로 나타남을 알 수 있다. 이는 실제속도 대비 약 3% 정도의 오차를 나타내는 것으로 두 값이 매우 유사함을 나타낸다. 따라서 본 연구에서 제시된 모형의 신뢰성이 검증되었고, 이를 실제 상황에 적용할 수 있다고 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 차대자전거 사고에 있어서 주요 쟁점 사항이 되고 있는 자동차의 충돌속도를 예측할 수 있는 모형을 실제 사고 자료를 이용하여 개발하였다.

본 연구를 수행하기 위해 충돌속도와 충돌 지점이 명확한 23건의 실제 자전거사고를 수집하여 승용차량과 RV차량으로 차종을 구분하여 각각의 모형을 구축하였으나, 두 모형의 결과 값 차이가 크지 않아 모든 차량을 통합한 모형을 다시 구축하였다. 즉, 자전거 전도거리를 독립변수로 하고 충돌속도를 종속변수로 하는 선형회귀식 모형을 도출하여 제시하였고, 이 모형식에 대한 정규성 및 적합성에 관한 통계적인 검증을 실시하였다. 본 연구에서 개발된 모형의 실제적인 검증을 위하여 충돌속도를 확인할 수 있는 2건의 실제 사고 자료와 비교 분석한 결과, 제시된 모형이 실제 조사된 충돌속도와 약 3%이내의 오차를 갖는 매우 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

본 연구는 실차실험에 소요되는 비용과 안전의 문제를 해결하면서 국내에서의 실제 사고 자료를 바탕으로 자전거 사고의 주 쟁점사항인 충돌 속도를 추정할 수 있는 모형을 제시했다는 데 큰 의미가 크다. 본 연구에서 제안된 모형은 향후 국내 차대자전거사고를 재현 및 분석하는 과정에 매우 유용하게 사용될 수 있으리라고 판단된다.

그러나 본 연구에서는 자전거사고라는 특수성 때문에 수집된 표본수가 적고 대형차량은 포함되지 않아 모든 차량에 대한 분석 모형을 개발하지 못한 아쉬움이 남는다. 향후 대형차량을 포함한 사고 자료를 더욱 광범위하게 수집하여 본 연구결과의 신뢰성을 확인하고, 보다 넓은 범위의 속도 예측이 가능한 모형을 개발하는 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 교통사고종합분석센터(2008), “교통사고 통계분석”, 도로교통공단.
2. 교통사고 종합분석센터(2007), “교통사고 통계분석”, 도로교통공단.
3. 교통안전학교(2002), “교통사고 재현매뉴얼”, 도로교통공단.
4. 교통안전학교(2002), “교통사고 조사매뉴얼”, 도로교통공단.
5. Eubanks, J. and W. R. Haight(1990), “Trajectory Analysis for Collision Bicycles and Automobiles”, SAE Paper No. 900368.
6. 林佯(1992), “自動車事故鑑定工學”.
7. 손영태 · 김정현 · 오영태 · 김홍상 · 박우신(2002), “자전거 교통류의 기본 특성에 관한 실험 연구”, 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.19~26.
8. 황정훈 · 김갑수(2005), “자전거 주행환경 개선방안의 평가에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제23권 제8호, 대한교통학회, pp.203~213.
9. 한원섭 · 황상호 · 현철승 · 이호원 · 오영태 · 이철기(2008), “국내 교통여건을 고려한 자전거 전용신호 도입 방안 연구”, 한국ITS학회지 제7권 제5호, pp.77~89.
10. 류태선(2004), “사고자료를 이용한 보행자사고의 재현 및 분석에 관한 연구”, 서울시립대 석사학위 논문.
11. Motte, M and H. Tove(2008), “Cyclists’ Perception of Risk in Roundabout”, Accident Analysis & Prevention, Vol. 40 No. 3, pp.1055~1062.
12. Delmelle, E. and J. Thill (2008), “Urban Bicyclists : Spatial Analysis of Adult and Youth Traffic Hazard Intensity”, TRB, TRR 2074, pp.31~39.
13. Carter, D., W. Hunter, C. Zegeer, R. Stewart, and H. Huang (2007), “Bicyclist Intersection Safety Index”, TRB, TRR 2031, pp.18~24.
14. Zolnik, E., and E. Cromley(2007), “Poisson Multilevel Methodology of Bicycle Levels of Service for Road Networks”, TRB, TRR 2031, pp.1~8.
15. Neter, J., W. Wasserman, and M. Kutner (1990), “Applied Linear Statistical Models, 3rd edition, Irwin.

✉ 주 작 성 자 : 조용직

✉ 교 신 저 자 : 이상수

✉ 논문투고일 : 2009. 6. 12

✉ 논문심사일 : 2009. 7. 8 (1차)

2009. 12. 17 (2차)

2010. 1. 25 (3차)

2010. 2. 7 (4차)

✉ 심사판정일 : 2010. 2. 7

✉ 반론접수기한 : 2010. 6. 30

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필