

시뮬레이션을 통한 교차로 충돌 속도 추정

한창평¹, 천정환², 최홍주^{3*}

¹상지대학교 스마트자동차공학과, ²도로교통공단, ³상지대학교 전자공학과

The Estimation of Collision Speed at the Intersection using Simulation

Chang-Pyoung Han¹, Jeong-Hwan Cheon², Hong Ju Choi^{3*}

¹Department of Smart Automobile Engineering, Sangji University

²Korea Road Traffic Authority

³Department of Electronic Engineering, Sangji University

요약 수식적 해법을 이용하여 교차로 교통사고 충돌 속도를 산정을 위해서는 충돌 전 차량 진입각 및 충돌 후 차량 이탈각 추정은 비교적 쉽지만, 충돌 후 차량의 감속을 분석하기는 매우 어렵다. 충돌 지점부터 최종 위치까지 이동하는 과정에서 노면 흔적이 발생하지 않으면, 충돌 후 차량의 감속을 분석하기 어렵다. 차량의 주행 특성에 따른 관성력과 충돌 부위 및 충돌 속도에 따른 편심력 등의 작용으로 충돌 후 차량 운동 궤적은 불규칙한 곡선 궤적을 보인다. 그러므로, 정확한 충돌 속도 분석을 위해서는 충돌 후 적절한 이탈각을 설정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션(PC-Crash)을 이용한 모의 충돌 실험 자료에 근거하여 충돌 후 적절한 차량 이탈각과 충돌 속도와의 상관관계를 분석하여 회귀 분석 모형을 제안하고, 교차로 충돌사고에 차량 이탈각만을 적용한 충돌 속도 산출 방법을 제시하였다. 본 연구의 회귀 분석 모형에서 결정 계수는 0.864이므로 제시한 회귀 분석 모형이 매우 적합하다는 것을 알 수 있다.

Abstract When calculating an intersection collision speed using a formula, it is very difficult to grasp the degree of deceleration of a vehicle after the collision unless there is road surface trace in the entire section where each vehicle moved from the point of collision to their final positions after the collision. A vehicle's motion trajectory shows an irregular curve after a collision due to the effects of inertia based on the driving characteristics of the vehicle, the eccentric force according to the collision site, and the collision speed. Therefore, it is very important to set the appropriate departure angle after a collision for accurate collision speed analysis. In this study, based on experimental collision data using a computer simulation (PC-Crash), the correlation between an appropriate vehicle departure angle and the post-collision speed was analyzed, and then, a regression analysis model was derived. Through this, we propose a method to calculate collision speed by applying only the vehicle departure angle in some types of collisions for traffic accidents at intersections.

Keywords : Intersection traffic accidents, Collision speed, Departure angle, Computer simulation, Regression analysis model formula

*Corresponding Author : Hong-Ju Choi(Sangji Univ.)

email: choifeilong@daum.net

Received September 24, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised October 14, 2020

Published February 28, 2021

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

교차로 교통사고에서 신호 위반 등 사고원인을 분석하기 위해서는 진입 차량의 속도가 꼭 필요한 요소이다. 교차로 교통사고를 분석할 때 사고 재현이 필요하지만, 운동량 보존의 법칙을 이용한 이론적 계산 방법을 통해 교통사고를 직접 재현하지 않고도 충돌 전 차량 속도를 쉽게 추론할 수 있다.

교차로에서 각기 다른 방향의 차량 충돌(직각 및 경사 충돌)은 2차원 충돌이다. 충돌 후 각 차량의 견인 계수(drag factor), 이동 거리, 접근각, 이탈각, 충돌 형태 및 충돌 속도가 충돌 후 궤적에 영향을 미치므로, 이동 궤적의 선형에 따라 충돌 이탈각을 다르게 적용해서 충돌 속도를 분석할 수 있지만, 충돌 후 차량은 최종 위치에 도달하기까지 지속적인 각도 변화를 보이는 곡선 궤적을 나타내므로 이탈각 설정이 매우 어려운 실정이다.

1.2 연구 범위 및 방법

교차로 교통사고는 충돌각, 충돌 속도, 충돌 전후 운전자 조향 상태 등에 따라 많은 충돌 상황이 발생한다. 본 연구에서는 실차 충돌 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 기존 연구자료에 부합하는 충돌 형태만을 연구 대상으로 하였다. 교차로의 직각 충돌을 토대로 차량의 속도와 충돌 후 이탈각의 상관관계 분석을 통해 속도를 추정한다. 즉, Fig. 1처럼 차량 1의 우측면을 차량 2의 전면으로 충돌할 때만을 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션(PC-Crash)을 이용하여 모의 충돌 실험을 하였다.

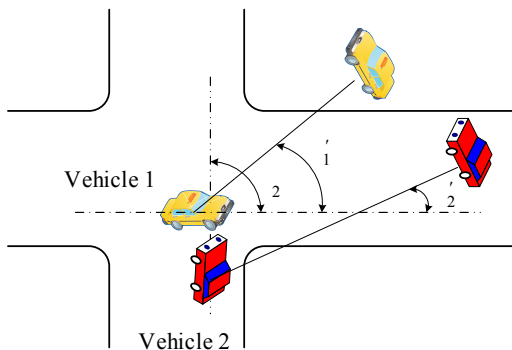


Fig. 1. Right angle collision at intersection

두 차량의 속도는 각각 20 km/h부터 90 km/h까지 10 km/h 단위로 속도를 가변하였고, 충돌 후 차량의 이

동 경로는 초기 분리 과정에서 최초 이탈각과 최종 위치에 도달한 지점에서 최종 이탈각으로 구분하였다. 운동량 보존의 법칙을 이용한 이론적 계산 분석 방법에 따른 산출 수치와 모의 충돌 실험 입력 수치를 비교하여 속도 편차가 작은 이탈각을 실제 교통사고에 적용하여 충돌 속도 산정을 위한 모형을 개발하였다.

2. 본론

2.1 기존 교차로 교통사고 분석 이론

교통사고 충돌 분석을 위한 방법으로는 벡터적 덧셈을 이용한 도식적인 해법과 수식을 유도하여 분석하는 수식적 해법이 있는데 오차가 적고, 정확한 값을 구할 수 있는 수식적 해법을 사용한다.

교통사고 분석에서 운동량(Momentum)을 적용하는 주된 이유는 차량 충돌 속도를 분석하기 위함이고, 속도 분석은 차량이 최초 접촉에서부터 최종 정지 위치까지 어떻게 운동하는가를 파악하기 위함이다. [1-7]

$$m_1v_1 \cos\theta_1 + m_2v_2 \cos\theta_2 = m_1v'_1 \cos\theta'_1 + m_2v'_2 \cos\theta'_2 \quad (1)$$

Eq. (1)처럼 운동량 보존 법칙을 이용한 충돌 분석을 위해서는 충돌 지점까지 각 차량 접근 경로, 충돌로부터 각 차량 이탈 경로, 각 차량의 적체 하중을 포함한 총 무게 및 각 차량의 충돌 후 속도가 필요하다.

운동량 보존의 법칙을 이용한 이론적 분석 방법을 사고분석에 적용할 때 매개변수 파악이 어렵다. 차량의 충돌 전 속도를 알기 위해서는 노면 흔적 중 스키드 마크, 요 마크 등을 이용해 다른 차량의 충돌 전 속도와 충돌 후 각 차량의 속도(감속분), 접근 경로 및 이탈각을 알아야 한다. ABS 브레이크 장착으로 인한 스킵 제동 흔적의 특성으로 충돌 후 현장에 노말 제동 흔적을 생성시키지 않으므로, 충돌 후 차량의 감속 정도 분석은 현실적으로 어렵지만, 충돌 지점과 최종 위치, 충돌 부위 및 충돌 자세 등으로 이탈 경로를 파악할 수 있어, 충돌 후 차량 이탈각 파악은 상대적으로 쉽다.

운동량 보존 법칙이 성립하기 위해서는 외력이 존재하지 않아야 한다. 실제 차량의 충돌에서 두 차량 간의 1차 충돌 이후 다른 물체와 2차, 3차 충돌이 발생할 수 있다. 외력의 작용으로 총운동량은 보존되지만, 최초 충돌 차량 사이에서 운동량이 보존되지 않아 2차, 3차 충돌의 운동량을 구해야 운동량 보존 법칙을 이용할 수 있지만, 충돌 운동량을 구하기는 쉽지 않다.

또한, 2차원 충돌에서는 두 차량의 무게중심이 엇갈리게 충돌하면 무게중심 이동 궤적은 1차원 충돌처럼 일정한 각도를 유지하지 못하므로, 충돌 후 이탈각을 어떻게 설정하고 적용할 것인가를 선택해야 한다. 그러므로 교차로 교통사고에서 차량 충돌 속도를 산정하기 위해서는 충돌 후 차량의 감속 정도와 상관없이 차량 이탈각만으로 속도를 측정하는 방법의 연구가 필요하다.

2.2 충돌 속도 산정을 위한 모의 충돌 실험

본 연구는 교차로 충돌사고 유형 중에서 한 대의 차량 전면과 다른 차량의 측면이 90°로 충돌하는 사고유형을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션(PC-crash)으로 모의 충돌 실험을 하였다. 모의 충돌 실험에는 ABS가 장착된 중량 1,300 kg의 차량 2대를 설정하여 충돌 차량(차량1)은 서쪽에서 동쪽으로 주행하고, 피충돌 차량(차량2)은 남쪽에서 북쪽으로 주행 방향을 설정한 후 두 차량의 속도를 20~90 km/h 범위 내에서 각각 10 km/h 단위로 증속하여 충돌 상황을 구성하였다. 두 차량은 충돌 이후 감속도 값으로 $2m/s^2$ 를 적용하였고, 충돌 전후 핸들 조작을 하지 않은 것으로 설정하였다.

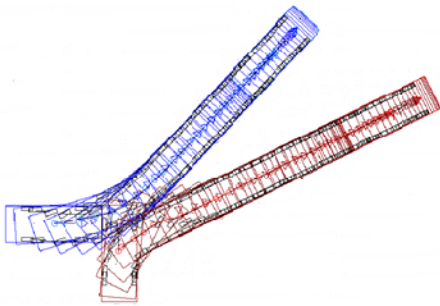
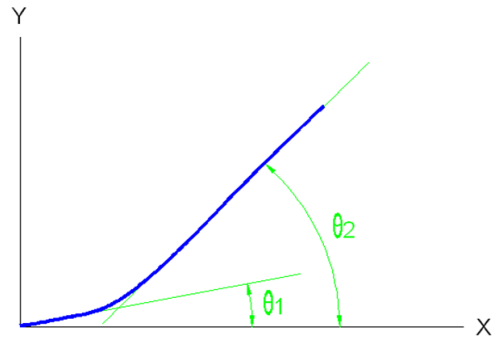
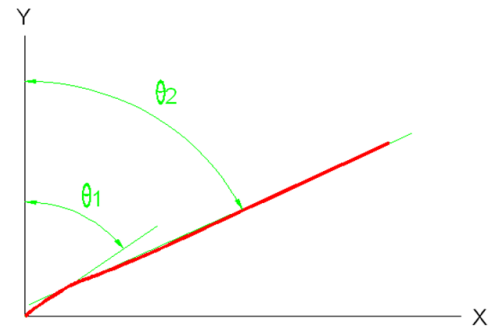


Fig. 2. The form of two vehicles moving after a collision

Fig. 2와 Fig. 3에서 충돌 차량(차량1)의 진행 방향을 X축, 피충돌 차량(차량2)의 진행 방향을 Y축으로 설정하고, 충돌 후 각 차량의 무게중심 이동 경로를 측정하였다. 각 차량의 이탈 궤적은 곡선 구간과 직선 구간이 혼재되어 나타났다. 이탈 궤적의 특징을 고려하여 궤적 변화가 큰 지점을 기준으로 초기 구간과 나중 구간으로 구분하여 이탈각을 측정하였다. 초기 구간을 지나면서 일부 불규칙한 곡선 궤적을 나타내는 경우도 있지만 대부분 일정한 직선궤적을 나타내고 있다.



(a)



(b)

Fig. 3. The trajectory of the center of gravity movement of two vehicles after a collision
(a) Impact Vehicle (b) Impacted Vehicle

차량1의 이탈 경로는 초기 구간에서는 자신의 속도 변화에 거의 영향을 받지 않고 일정한 각도 범위 내에서 수렴하다가 나중 구간에서는 급격하게 꺾인 후 다시 직선 궤적을 보인다. 이탈 경로의 초기 구간 이탈각은 상대방의 속도가 높아질수록 일정하게 커진다. 차량2의 이탈 경로는 분리되기 전 약간 꺾인 후 초기 구간에서부터 거의 직선에 가까운 궤적을 보이고, 차량1의 속도뿐만 아니라 차량2의 속도가 높아질수록 차량 이탈각 역시 커지는 것을 알 수 있다.

수식적 해법과 컴퓨터 시뮬레이션에 Fig. 2와 Fig. 3에서 측정한 이탈각을 적용하여 구한 충격 속도 편차를 Table 1 ~ Table 8에 보인다. 속도 단위는 km/h이고, 거리 단위는 m이다. Table 1 ~ Table 10에서 V_1 은 피충돌 차량의 충돌 속도 입력값, V_2 는 충돌 차량의 충돌 속도 입력값, v_1 은 피충돌 차량의 충돌 속도 계산값, v_2 는 충돌 차량의 충돌 속도 계산값, v_1' 은 피충돌 차량의 이탈 속도, v_2' 는 충돌 차량의 이탈 속도, θ_1 은 피충돌 차량의 초기 구간 이탈각, θ_2 와 $\sin\theta_2$ 은 충돌 차량의 초기 구간 이탈각, d_1 은 피충돌 차

량의 이탈 거리, d_2 는 충돌 차량의 이탈 거리, $|V_1 - v_1|$ 은 피충돌 차량의 충돌 속도 편차 및 $|V_2 - v_2|$ 는 충돌 차량의 충돌 속도 편차이다.

Table 1과 2는 충돌 차량과 피충돌 차량의 초기 구간 이탈각을 적용한 결과이다.

Table 1. Impact speed deviation of impact vehicle with initial section departure angle of the impacted vehicle and the impacted vehicle

V_2	v_2	v_1'	$\cos\theta_1$	v_2'	$\cos\theta_2$	d_1	d_2	V_1	$ V_2 - v_2 $
10.00	9.39	16.35	0.24	5.43	0.99	5.16	0.57	20.00	0.61
20.00	18.85	14.23	0.44	12.67	0.99	3.91	3.10	20.00	1.15
30.00	29.98	18.18	0.67	17.84	0.99	6.38	6.14	20.00	0.02
40.00	39.75	23.60	0.76	21.92	0.99	10.75	9.27	20.00	0.25
50.00	50.61	27.95	0.84	27.12	0.99	15.08	14.19	20.00	0.61
60.00	60.22	31.66	0.88	32.21	0.99	19.35	20.02	20.00	0.22
70.00	70.94	35.72	0.92	37.98	0.99	24.63	27.84	20.00	0.94
80.00	81.33	40.61	0.93	43.62	0.99	31.82	36.72	20.00	1.33
90.00	91.27	44.75	0.94	49.14	0.99	38.65	46.60	20.00	1.27
Average value of collision speed deviation									0.23

Table 2. Impact speed deviation of impacted vehicle with initial section departure angle of the impacted vehicle and the impacted vehicle

V_1	v_1	v_1'	$\sin\theta_1$	v_2'	$\sin\theta_2$	d_1	d_2	V_2	$ V_1 - v_1 $
20.00	16.70	16.35	0.97	5.43	0.16	5.16	0.57	10.00	3.30
20.00	14.74	14.23	0.90	12.67	0.16	3.91	3.10	20.00	5.26
20.00	16.25	18.18	0.74	17.84	0.16	6.38	6.14	30.00	3.75
20.00	18.85	23.60	0.66	21.92	0.16	10.75	9.27	40.00	1.15
20.00	19.40	27.95	0.55	27.12	0.16	15.08	14.19	50.00	0.60
20.00	19.80	31.66	0.47	32.21	0.16	19.35	20.02	60.00	0.20
20.00	19.80	35.72	0.39	37.98	0.16	24.63	27.84	70.00	0.20
20.00	21.93	40.61	0.38	43.62	0.16	31.82	36.72	80.00	1.93
20.00	22.85	44.75	0.34	49.14	0.16	38.65	46.60	90.00	2.85
Average value of collision speed deviation									0.97

Table 3. Impact speed deviation of the impact vehicle with the initial section departure angle of the impact vehicle and the later section departure angle of the impacted vehicle

V_2	v_2	v_1'	$\cos\theta_1$	v_2'	$\cos\theta_2$	d_1	d_2	V_2	$ V_2 - v_2 $
10.00	6.81	16.35	0.09	5.43	0.99	5.16	0.57	20.00	3.19
20.00	17.47	14.23	0.34	12.67	0.99	3.91	3.10	20.00	2.53
30.00	28.74	18.18	0.60	17.84	0.99	6.38	6.14	20.00	1.26
40.00	40.01	23.60	0.77	21.92	0.99	10.75	9.27	20.00	0.01
50.00	52.31	27.95	0.90	27.12	0.99	15.08	14.19	20.00	2.31
60.00	61.44	31.66	0.92	32.21	0.99	19.35	20.02	20.00	1.44
70.00	72.03	35.72	0.95	37.98	0.99	24.63	27.84	20.00	2.03
80.00	84.17	40.61	1.00	43.62	0.99	31.82	36.72	20.00	4.17
90.00	93.95	44.75	1.00	49.14	0.99	38.65	46.60	20.00	3.95
Average value of collision speed deviation									0.69

Table 3과 4는 충돌 차량의 초기 구간 이탈각과 피충돌 차량의 나중 구간 이탈각을 적용한 결과이다.

Table 4. Impact speed deviation of the impacted vehicle with the initial section departure angle of the impact vehicle and the later section departure angle of the impacted vehicle

V_1	v_1	v_1'	$\sin\theta_1$	v_2'	$\sin\theta_2$	d_1	d_2	V_2	$ V_1 - v_1 $
20.00	17.12	16.35	1.00	5.43	0.16	5.16	0.57	10.00	2.88
20.00	15.33	14.23	0.94	12.67	0.16	3.91	3.10	20.00	4.67
20.00	17.27	18.18	0.80	17.84	0.16	6.38	6.14	30.00	2.73
20.00	18.54	23.60	0.64	21.92	0.16	10.75	9.27	40.00	1.46
20.00	16.41	27.95	0.44	27.12	0.16	15.08	14.19	50.00	3.59
20.00	17.33	31.66	0.39	32.21	0.16	19.35	20.02	60.00	2.67
20.00	16.87	35.72	0.31	37.98	0.16	24.63	27.84	70.00	3.13
20.00	10.23	40.61	0.09	43.62	0.16	31.82	36.72	80.00	9.77
20.00	9.87	44.75	0.05	49.14	0.16	38.65	46.60	90.00	10.13
Average value of collision speed deviation									4.10

Table 5와 6은 충돌 차량의 나중 구간 이탈각과 피충돌 차량의 초기 구간 이탈각을 적용한 결과이다.

Table 5. Impact speed deviation of the impact vehicle with the later section departure angle of the impact vehicle and the initial section departure angle of the impacted vehicle

V_2	v_2	v_1'	$\cos\theta_1$	v_2'	$\cos\theta_2$	d_1	d_2	V_2	$ V_2 - v_2 $
10.00	7.99	16.35	0.24	5.43	0.73	5.16	0.57	20.00	2.01
20.00	14.14	14.23	0.44	12.67	0.62	3.91	3.10	20.00	5.86
30.00	23.82	18.18	0.67	17.84	0.64	6.38	6.14	20.00	6.18
40.00	30.98	23.60	0.76	21.92	0.59	10.75	9.27	20.00	9.02
50.00	42.31	27.95	0.84	27.12	0.68	15.08	14.19	20.00	7.69
60.00	54.77	31.66	0.88	32.21	0.82	19.35	20.02	20.00	5.23
70.00	66.31	35.72	0.92	37.98	0.87	24.63	27.84	20.00	3.69
80.00	77.09	40.61	0.93	43.62	0.89	31.82	36.72	20.00	2.91
90.00	88.91	44.75	0.94	49.14	0.94	38.65	46.60	20.00	1.09
Average value of collision speed deviation									4.37

Table 6. Impact speed deviation of the impacted vehicle with the later section departure angle of the impact vehicle and the initial section departure angle of the impacted vehicle

V_1	v_1	v_1'	$\sin\theta_1$	v_2'	$\sin\theta_2$	d_1	d_2	V_2	$ V_1 - v_1 $
20.00	19.51	16.35	0.97	5.43	0.68	5.16	0.57	10.00	0.49
20.00	22.63	14.23	0.90	12.67	0.79	3.91	3.10	20.00	2.63
20.00	26.96	18.18	0.74	17.84	0.77	6.38	6.14	30.00	6.96
20.00	32.94	23.60	0.66	21.92	0.81	10.75	9.27	40.00	12.94
20.00	34.75	27.95	0.55	27.12	0.73	15.08	14.19	50.00	14.75
20.00	33.05	31.66	0.47	32.21	0.57	19.35	20.02	60.00	13.05
20.00	32.67	35.72	0.39	37.98	0.50	24.63	27.84	70.00	12.67
20.00	34.73	40.61	0.38	43.62	0.45	31.82	36.72	80.00	14.73
20.00	31.85	44.75	0.34	49.14	0.34	38.65	46.60	90.00	11.85
Average value of collision speed deviation									8.91

Table 7과 8은 충돌 차량과 피충돌 차량의 나중 구간 이탈각을 적용한 결과이다.

Table 7. Impact speed deviation of impact vehicle with later section departure angle of the impacted vehicle and the impacted vehicle

V_2	v_2	v_1'	$\cos\theta_1$	v_2'	$\cos\theta_2$	d_1	d_2	V_2	$\frac{V_2}{-v_2}$
10.00	5.42	16.35	0.09	5.43	0.73	5.16	0.57	20.00	4.58
20.00	12.75	14.23	0.34	12.67	0.62	3.91	3.10	20.00	7.25
30.00	22.59	18.18	0.60	17.84	0.64	6.38	6.14	20.00	7.41
40.00	31.25	23.60	0.77	21.92	0.59	10.75	9.27	20.00	8.75
50.00	44.02	27.95	0.90	27.12	0.68	15.08	14.19	20.00	5.98
60.00	56.00	31.66	0.92	32.21	0.82	19.35	20.02	20.00	4.00
70.00	67.40	35.72	0.95	37.98	0.87	24.63	27.84	20.00	2.60
80.00	79.94	40.61	1.00	43.62	0.89	31.82	36.72	20.00	0.06
90.00	91.60	44.75	1.00	49.14	0.94	38.65	46.60	20.00	1.60
Average value of collision speed deviation									3.91

Table 8. Impact speed deviation of impacted vehicle with later section departure angle of the impacted vehicle and the impacted vehicle

V_1	v_1	v_1'	$\sin\theta_1$	v_2'	$\sin\theta_2$	d_1	d_2	V_2	$\frac{V_1}{-v_1}$
20.00	19.94	16.35	1.00	5.43	0.68	5.16	0.57	10.00	0.06
20.00	23.21	14.23	0.94	12.67	0.79	3.91	3.10	20.00	3.21
20.00	27.98	18.18	0.80	17.84	0.77	6.38	6.14	30.00	7.98
20.00	32.63	23.60	0.64	21.92	0.81	10.75	9.27	40.00	12.63
20.00	31.76	27.95	0.44	27.12	0.73	15.08	14.19	50.00	11.76
20.00	30.58	31.66	0.39	32.21	0.57	19.35	20.02	60.00	10.58
20.00	29.74	35.72	0.31	37.98	0.50	24.63	27.84	70.00	9.74
20.00	23.03	40.61	0.09	43.62	0.45	31.82	36.72	80.00	3.03
20.00	18.87	44.75	0.05	49.14	0.34	38.65	46.60	90.00	1.13
Average value of collision speed deviation									5.77

충돌 차량과 피충돌 차량의 초기 구간 이탈각을 적용하였을 때 충격 속도 편차가 가장 작았다. 그러므로 충돌 유형에서 운동량 보존 법칙을 이용한 수식적 해법을 통한 속도 산출은 충돌 차량과 피충돌 차량 모두 충돌 후 이탈 경로의 초기 구간 이탈각을 적용하는 것이 속도 산출 값의 정확성을 높일 수 있다.

충돌 차량의 이탈각은 Table 9에서 보인 바와 같이 자기 차량 속도에 별다른 영향을 받지 않고 상대 차량 속도에 크게 영향을 받아 일정 비율로 커지는 것을 알 수 있다.

Table 9. Relationship between the speed of the impact vehicle and the angle of departure of the impacted vehicle

V_1	20	30	40	50	60	70	80	90
θ_1	9	12	14	17	19	21	24	26

Table 10에서 피충돌 차량의 속도 V_1 은 충돌 차량의 속도 V_2 및 이탈각 θ_2 와 상관관계를 갖는 것으로 보인다.

Table 10. Relationship between the speed of the impact vehicle and the speed and angle of departure of the impacted vehicle

km/h	V_2								
	20	30	40	50	60	70	80	90	
V_1	20	26°	42°	49°	64°	67°	73°	80°	84°
	30	18°	27°	37°	48°	61°	65°	74°	77°
	40	15°	23°	30°	37°	48°	55°	62°	71°
	50	12°	20°	27°	37°	44°	51°	55°	56°
	60	11°	17°	21°	29°	36°	43°	48°	54°
	70	10°	16°	21°	27°	33°	41°	45°	48°
	80	9°	13°	17°	21°	28°	31°	40°	46°
	90	7°	12°	16°	19°	23°	29°	33°	36°

2.3 이탈각에 따른 충돌 속도 산정 모형

피충돌 차량 속도 V_1 과 충돌 차량의 이탈각 θ_2 의 관계는 Eq. (2)와 같다.

$$V_1 = 4.148 \times \theta_2 - 18.624 \quad (2)$$

Table 11에서 보인 바와 같이 회귀분석에서 결정계수는 $R^2 = 0.997$ 이므로 회귀모형이 매우 적합하다는 것을 알 수 있다.

Table 11. Model summary of the speed of the impacted vehicle and the angle of departure of the impact vehicle

Model	R	R^2	modified R^2	Standard error of estimated value
1	0.999 ^a	0.997	0.997	1.33402

a. estimated value : constant, θ_1

b. dependent variable : V_1

피충돌 차량의 이탈각은 자신의 속도뿐만 아니라 상대방 속도에도 큰 영향을 받으며, 자신의 속도가 높을수록 작아지고, 상대방의 속도가 높을수록 커진다. 충돌 차량 속도 V_2 와 피충돌 차량의 이탈각 θ_1 의 관계는 Eq. (3)과 같다.

$$V_2 = 1.092 \times V_1 - 1.649 \times \theta_1 + 57.152 \quad (3)$$

Table 12에서 보인 바와 같이 회귀분석에서 결정계수는 $R^2 = 0.864$ 이므로 회귀모형이 매우 적합하다는 것을 알 수 있다.

Table 12. Model summary of the speed of the impact vehicle and the speed and the angle of departure of the impacted vehicle

Model	R	R^2	modified R^2	Standard error of estimated value
1	.930a	.864	.860	8.64347

2.4 충돌 속도 산정 모형 검증

PC-Rect 프로그램을 사용하면 원근법으로 투영된 평면을 사진 측량법의 변형을 통해 병렬 투영으로 바꿀 수 있어, 눈에 보이는 브레이크 자국, 스키드 마크, 유리 조각 등 도로 일부 사진을 가로세로 수치를 유지한 채로 공중에 뜬 도면으로 볼 수 있다.

PC-Rect 프로그램을 사용하여 도면화 작업을 하기 위해서는 사진의 동일 직선에 위치하지 않은 지점이 최소한 4개 있어야 하고, 지점 사이의 거리가 실제 상황에서 정확히 측정되어야 하며, 이 지점들은 변형된 평면에 위치해야 한다.

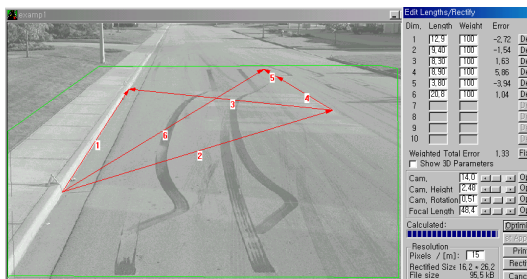


Fig. 4. Photo correction of accident site (using PC-Rect program)

4개 지점을 연결한 직선 길이를 실측한 값을 Fig. 4에서 보이는 우측 프로그램에 입력(Edit Length)한 후 최적화 과정(Optimize)을 거쳐 교정 작업을 수행하면 마치 항공사진을 보는 것과 같은 Fig. 5를 얻을 수 있다.

서울 시내에 설치한 교통사고 자동 기록장치에서 촬영한 사고 영상 중에서 충돌 차량의 전면과 피충돌 차량의 측면 앞부분이 충돌한 사례를 모형 검증에 사용하였다.

사고 영상에는 시간의 경과에 따라 차량의 주행상황이 녹화되어 있다. 사고 영상에 나타난 특정 지점을 실제 사고 현장에서 실측한 후 PC-Rect 프로그램을 이용하여 항공사진처럼 도면화 작업을 하면 교정된 사진에서 위치 측정을 할 수 있다. 영상의 프레임마다 차량의 위치를 측정할 후 이들을 하나의 도면으로 작성하여 시간의 경과



Fig. 5. Photo after correction

에 따른 차량의 주행 거리 및 주행 경로를 얻었다. 이때 얻어진 차량의 주행 경로에서 충돌 후 차량의 이탈각을 측정할 수 있다.

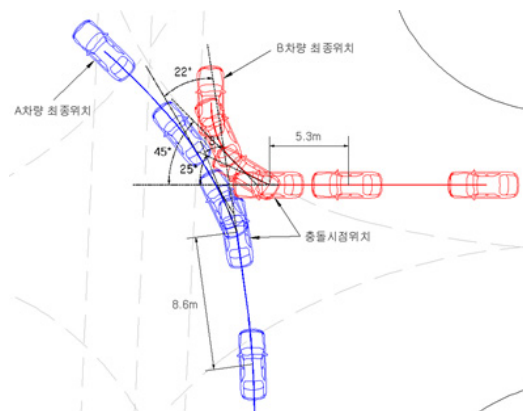


Fig. 6. Reproducibility of the collision process between vehicle A and vehicle B extracted from the accident image (from 0.6 seconds before the collision)

모형 검증에 사용된 사고는 Fig. 6.처럼 각각 직진하는 A차량(충돌 차량)과 B차량(피충돌 차량)이 충돌한 것이다. 교차로 내에서 A차량의 우측면 앞부분과 B차량의 전면 좌측 부분이 거의 직각으로 충돌하였다.

영상의 프레임마다 기록된 시간과 변환된 사진에서 측정된 주행 거리를 통해 충돌 전 각 차량의 속도를 산출하였고, 차량의 충돌로 인해 주행 궤적이 크게 변하는 지점을 기준으로 충돌 후 각 차량의 초기 구간 이탈각과 나중 구간 이탈각을 각각 측정하였다.

두 차량의 이탈 궤적을 토대로 각 차량의 초기 구간 및 나중 구간의 이탈각을 충돌 속도 산정 모형에 적용하여 검증한 결과는 다음과 같다.

A차량과 B차량이 교차로 내 임의 지점에서 충돌 지점에 도달하기까지 0.6초가 소요되었고, 이때 A차량은 8.6 m, B차량은 5.3 m를 각각 주행하였다. 이 구간 동안 두 차량 모두 충돌 전 등속 주행을 하였다고 가정하고 각 차량의 충돌 속도를 산출한 결과 A차량은 51.6 km/h, B차량은 31.8 km/h로 산출되었다. 충돌 후 A차량은 충돌 전 진행 방향 기준 좌측으로 완만하게 휘어지며 이동하다 최종 정지하였고, B차량은 충돌 전 진행 방향 기준 우측으로 급격하게 휘어지며 이동하다 최종 정지하였다. A차량의 이탈각은 초기 구간이 13°, 나중 구간이 22°로 측정되었고, B차량의 이탈각은 초기 구간이 25°, 나중 구간이 45°로 측정되었다. 충돌 속도 산정 모형에 두 차량의 초기 구간과 나중 구간 이탈각을 각각 적용하여 계산한 결과, 두 차량의 초기 구간 이탈각을 적용했을 때 A차량의 충돌 속도는 54.5 km/h, B차량의 충돌 속도는 35.3 km/h로 산출되었으며, 두 차량의 나중 구간 이탈각을 적용했을 때 A차량의 충돌 속도는 62.2 km/h, B차량의 충돌 속도는 72.6 km/h로 산출되었다.

☞ 두 차량의 초기 구간 이탈각 적용

$$V_1 = 4.148 \times \theta_2 - 18.624 = 4.148 \times 13 - 18.624 = 35.3 \text{ km/h}$$

$$V_2 = 1.092 \times V_1 - 1.649 \times \theta_1 + 57.152 = 1.092 \times 35.3 - 1.649 \times 25 + 57.152 \approx 54.5 \text{ km/h}$$

☞ 두 차량의 나중 구간 이탈각 적용

$$V_1 = 4.148 \times \theta_2 - 18.624 = 4.148 \times 22 - 18.624 \approx 72.6 \text{ km/h}$$

$$V_2 = 1.092 \times V_1 - 1.649 \times \theta_1 + 57.152 = 1.092 \times 72.6 - 1.649 \times 45 + 57.152 \approx 62.2 \text{ km/h}$$

산출된 속도 값을 사고 영상에 의한 속도와 비교한 결과, 두 차량의 초기 구간 이탈각을 적용하여 산출된 속도

가 매우 근접한 것으로 나타났다. 이는 충돌 후 각 차량의 최종 위치에 근거한 방향성보다 초기 이탈하는 방향성이 충돌과정에서 작용한 운동량의 방향성을 잘 나타내는 것으로 판단된다.

3. 결론

교차로 교통사고의 대부분을 차지하는 직각 충돌 형태의 사고에 있어서 충돌 후 차량의 운동 궤적은 불규칙한 곡선 궤적을 보이므로 이탈각을 설정하기 어려울 뿐만 아니라 충돌 후 차량 속도(감속 정도) 분석이 어려워, 수식적 해법을 통하여 산출된 충돌 속도의 정확성 및 신뢰성에 의문이 제기되고 있다.

본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션(PC-Crash)을 이용한 모의 충돌 실험을 통해 충돌 속도와 이탈각의 상관관계를 분석하여 적절한 차량 이탈각 선정 기준을 제시하고, 차량 이탈각에 따른 충돌 속도 산정 모형을 개발하였다. 모의 충돌 실험은 중량이 같은 두 차량의 전면과 측면 앞부분이 90°로 충돌하는 사고유형을 대상으로 하였다. 두 차량의 속도를 20 ~ 90 km/h 범위 내에서 각각 10 km/h 단위로 변화시켜 충돌시킨 후 차량 이동 경로를 측정하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통한 모의 충돌 실험 결과 충돌 차량의 이탈각은 자기 차량의 속도에 별다른 영향을 받지 않고 상대 차량의 속도에 크게 영향을 받아 일정한 비율로 커진다. 피충돌 차량의 이탈각은 자기 차량의 속도 뿐만 아니라 상대 차량의 속도에도 영향을 크게 받을 뿐만 아니라 자기 차량의 속도가 높을수록 작아지고 상대 차량의 속도가 높을수록 커지는 경향을 보였다.

충돌 속도와 차량 이탈각의 상관관계를 분석하여 회귀 분석을 통한 모형식을 유도하고 실제 사고사례를 이용하여 검증한 결과 두 차량의 초기 구간 이탈각을 적용한 산출 속도가 실제 사고 사례의 속도와 매우 근접한 것으로 도출되었다. 충돌 후 각 차량의 최종 위치에 근거한 방향성보다 초기 이탈하는 방향성이 충돌과정에서 작용한 운동량의 방향성과 부합되므로 교차로 교통사고의 충돌유형에 있어서 차량 이탈각만을 적용하여 충돌 속도를 산출할 방법을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 충돌 속도 산정 모형이 실제 사고가 아닌 컴퓨터 시뮬레이션(PC-Crash)을 이용한 모의 충돌 실험을 통해 모형식을 유도하고, 충돌 속도 산정기준을 제안하였으나 사례 1건으로 모형 검증을 하여 실증

적인 검증이 부족하다고 할 수 있다. 본 연구에서 제시한 충돌 속도 산정 모형을 실제 교차로 교통사고에 적용하기는 한계가 있어, 이를 보완하기 위해 다양한 사고 사례를 적용한 실증적인 검증이 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] Lynn B. Fricke, The Traffic Accident Investigation Manual, 1990, Northwestern University Traffic Institute.
- [2] Albert G. Fonda, Nonconservation of momentum during impact, 1995, SAE Technical Papers
- [3] Jeffrey L. Micky C. Marine and Terry M. Thomas, An Analysis of a Staged Two-Vehicle Impact, 2000, SAE Technical Papers
- [4] Mark N. Bailey, Jonathan M. Lawrence, Stuart J. Fowler, Peter B. Williamson, William E. Cliff and Jeff S. Nickel, Data from Five Staged Car to Car Collisions and Comparison with Simulations, 2000, SAE Technical Papers
- [5] Changpyoung Han, A case of traffic accident reconstruction based on vehicle dynamics of computer simulation, The Transactions of the Korean Society Automotive Engineers, pp. 1,029-1,034, 2008.04
- [6] Hyungchul Noh, Kyoungsuk Park, Myungjin Choi, Changpyoung Han, Youngho Byun, A study on the road traction coefficient for automobile driving condition, pp. 1,867-1,873, 2005.11
- [7] Changpyoung Han, Automobile accident investigation theory, Gihanjae, 2000

한 창 평(Chang-Pyoung Han) [정회원]



- 1994년 2월 : 한양대학교 교통공학 (공학석사)
- 2007년 8월 : 경희대학교 기계공학 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2019년 2월 : 상지영서대학교 자동차과 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 상지대학교 스마트자동차공학과 교수

〈관심분야〉

교통사고 분석 및 재현, 자동차 설계 및 안전

천 정 환(Jeong-Hwan Cheon) [정회원]



- 2011년 8월 : 서울시립대학교 교통공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 아주대학교 건설교통공학과 (공학박사 수료)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 도로교통공단 사고조사팀장
- 2019년 9월 ~ 현재 : 행정안전부 국가재난원인조사위원

〈관심분야〉

교통사고 분석 및 재현, 지능형 자동차

최 흥 주(Hong-Ju Choi) [정회원]



- 1995년 8월 : 건국대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 건국대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2019년 2월 : 상지영서대학교 국방정보통신과 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 상지대학교 전자공학과 교수

〈관심분야〉

안테나 설계, RF 회로 설계 등