Transactions of KSAE, Vol. 24, No. 6, pp.724-729 (2016)

Copyright © 2016 KSAE / 145-14
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.6.724

<기술논문>

자동차 추돌사고 속도분석에 관한 사례 연구

김 대 봉[1] · 윤 대 권[2] · 박 정 호[3] · 하 성 용[4] · 박 제 철[*1]

금오공과대학교 환경공학과[1] · H&T차량기술법인[2] · 인선모터스[3] · 신한대학교 자동차공학과[4]

A Case Study on Speed Analysis of the Rear-end Collision Accident

Daebong Kim[1] • Daekwon Yun[2] • Jeongho Park[3] • Seongyong Ha[4] • Jechul Park[*1]

[1]*Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 39177, Korea*
[2]*H&T Vehicle Engineeings Co., 36, Yangjae-daero 11-gil, Seocho-gu, Seoul 06772, Korea*
[3]*In-sun Motorcop Gotang, 286, Dongguk-ro, llsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi 10317, Korea*
[4]*Department of Automotive Engineering, Shinhan University, Gyeonggi 11644, Korea*
(Received 9 August 2016 / Revised 22 September 2016 / Accepted 5 October 2016)

Abstract : This case study carried out a rear-end collision accident analysis and physical simulation of an SUV and passenger car. The speed of the SUV by physical analysis is 71 ~ 87 km/h, while the speed of the passenger car is 6 ~ 22 km/h. Simulation results showed the optimal speed conditions for the SUV was 71 km/h, and 7 km/h for the passenger car. Simulations can be verified for the collision analysis. The findings of this study are expected to increase the reliability of accident reconstructions.

Key words : Rear-end collision accident(추돌사고), Common speed(공통속도), Relative velocity(상대속도), Effective impact speed(유효충돌속도), Accident reconstuction(사고재현)

1. 서 론

2015년 국내에서 발생된 교통사고 중 차대차 유형의 사고는 162,181건이 발생하였다. 차대차 유형의 사고는 크게 정면충돌, 측면(직각)충돌, 추돌, 기타로 분류되는데 이 중 추돌사고는 43,028건이 발생하여 전체 차대차 사고의 약 26.5 %를 차지하였다. 같은 해 추돌사고로 발생된 사망자수는 504명, 부상자수는 81,110명으로 이는 차대차 사고로 발생한 사망자의 약 26.3 %, 부상자의 약 29.8 %를 차지하는 높은 비율이다.[1)] 특히 보험사고 측면에서는 추돌사고의 부상자가 차대차 사고 부상자의 약 54 %를 차지하고 있으며, 지급되는 보험금 비중도 가장 높은 사고 유형인 것으로 나타나고 있다.[2)] 이와 같이 사고의 높은 발생 빈도와 사상자 수에 비해 추돌사고에 대한 체계적인 조사와 분석기법에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어지고 있다. 특히 추돌사고에서 편타성 상해와 충돌속도에 대한 연관성 연구는 비교적 꾸준히 진행되고 있으나 정작 추돌사고에서 차량의 파손이나 사고현장에서 나타난 각종 물리적 자료를 통한 실무적인 속도 추정에 관한 연구는 거의 미비한 상황이다. 본 사례 연구는 피추돌차의 정차 또는 서행 여부가 쟁점이 된 추돌사고의 속도분석 감정 사례에서 충돌의 물리적인 해석과 시뮬레이션 분석기법을 활용하여 보다 객관적이고 실무적으로 적용 가능한 추돌속도 추정에 대한 분석방법을 고찰하였다.

*Corresponding author, E-mail: pjc1963@kumoh.ac.kr

2. 사고 내용

2.1 사고개요

2013년 10월 20일 ○시 ○분경 충남 당진시 소재

편도 2차로 도로에서 SUV 차량이 앞부분으로 앞서 가던 승용차의 뒷부분을 추돌한 사고이다.

2.2 사고차량 손상 상태

SUV차량은 Fig. 1과 같이 차체 앞부분의 앞범퍼, 후드, 엔진룸이 후방으로 밀려나 파손된 상태이고, 승용차는 후미 뒷범퍼와 트렁크부분이 전방으로 압축되면서 심하게 파손된 상태이다. 승용차의 후미 손상은 우측보다 좌측부분이 좀 더 깊이 압축되었고, 손상 깊이는 약 1.0 m 이상으로 측정되었다.

2.3 사고현장 모습

사고 장소는 Fig. 2와 같이 중앙선이 설치된 편도 2차로의 도로이며, 양차의 진행방향을 기준할 때 완만한 내리막 직선도로이다. 차로 폭은 1·2차로 모두 3.2 m ~ 3.3 m 내외이고, 주변에 특별한 시야 장애물은 없으며, 사고당시 기상은 맑고 노면은 건조한 상태였다.

2.4 사고현장의 물리적 자료

사고현장 사진 Fig. 3을 관찰해 보면, SUV차량의 정지위치 밑부분에 액체잔존물이 낙하되어 있고, 승용차의 정지위치 후방에는 좌측 뒷바퀴 흔적으로 추정되는 타이어자국이 나타나 있다. 또한 양차의 정지위치로부터 약 30 m 떨어진 후방 2차로와 갓길 주변에는 충돌 파편물과 액체잔존물이 낙하된 상태

Fig. 1 Damaged condition of the vehicle

Fig. 2 Road accident site

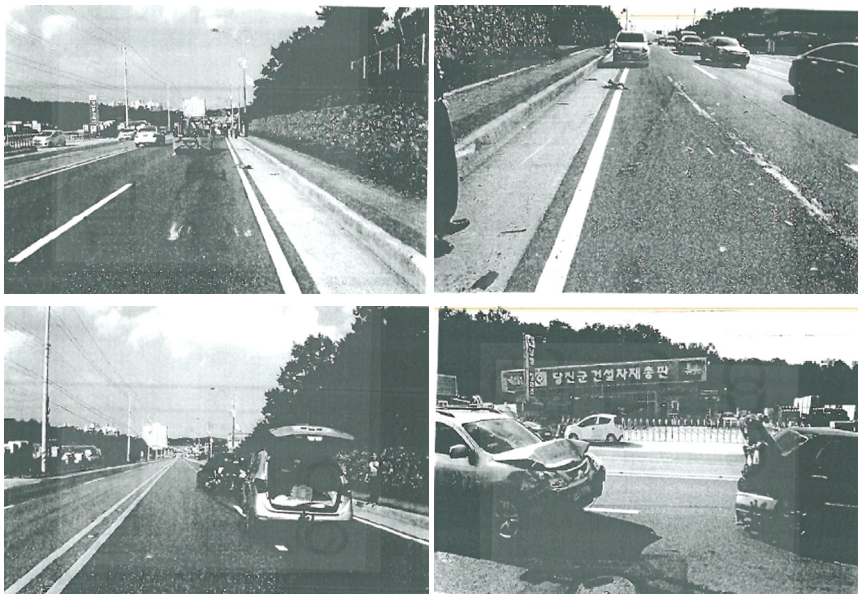


Fig. 3 Scene of a traffic accident

이다. 물적 증거를 감안할 때 양차량은 충돌 파편물 및 액체잔존물이 처음 떨어진 시점 부근 2차로에서 SUV차량이 승용차의 뒷부분을 추돌한 것으로 판단되고, 추돌 후 양차가 전방으로 약 30 m 이동한 다음 최종 정지한 것으로 판단된다.

2.5 양차 상대속도

추돌사고에서 발생하는 대부분의 소성변형은 상대적으로 강성이 낮고 빈 공간 구조로 형성된 피추돌차의 트렁크 및 후미부위에서 발생하는데 본 건 사고에서 피추돌차인 승용차의 후미 최대 변형량은 약 1.0 m로 조사되었다. 추돌사고에서 피추돌차의 파손 정도는 충돌속도(상대속도)에 비례하여 커지는데, Fig. 4는 세단형 승용차의 후방충돌시 충돌속도와 피추돌차의 소성변형량에 관한 실차 실험 결과다.[3] 위 추돌실험의 회귀식으로부터 추정되는 피추돌차의 손상변형량에 따른 상대속도는 식 (1)과 같이 약 65 km/h로 분석되었다.

$$V_R = 2 + 16X(m) = 18m/s\ (\fallingdotseq 65km/h) \quad (1)$$

where, V_R : relative velocity (m/s)

X : damage deformation (m)

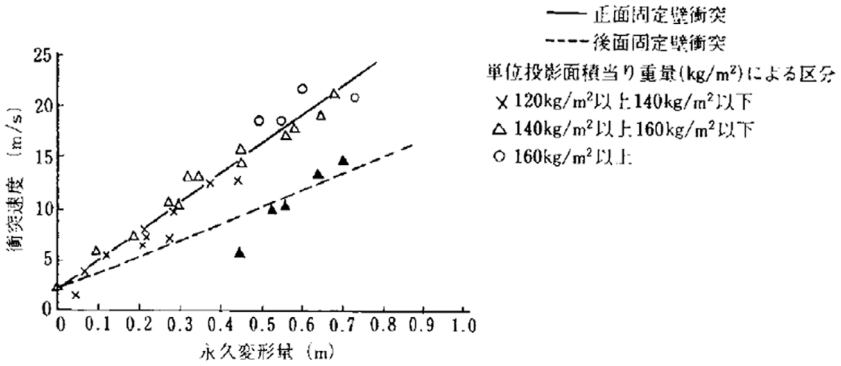


Fig. 4 Effective impact speed and damage deformation[3]

3. 충돌역학에 의한 속도 분석

질량 m_1, 속도 v_1인 A차가 질량 m_2 , 속도 v_2인 B차를 추돌하면, 양차는 운동량의 교환이 이루어지면서 속도가 같아지는 공통속도(v_c)에 도달하게 되는데, 운동량보존법칙에 의해 양차의 충돌 후 공통속도는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.[4)]

$$V_C = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2}{m_1 + m_2} \tag{2}$$

where, V_1 : pre-crash speed of A car
V_2 : pre-crash speed of B car
V_C : common speed of post-crash
m_1 : weight or mass of A car
m_2 : weight or mass of A car

이 사고 현장에 나타난 파편물 및 액체잔존물의 낙하 시점과 양차 정지위치를 감안할 때 추돌 후 양차는 전방으로 약 30m 정도 마찰운동하면서 이동한 것으로 추정되는 바, 에너지보존법칙을 응용한 식 (3)[5)]을 이용하여 양차의 충돌 후 속도(공통속도)를 산출하면 약 39 km/h ~ 55 km/h 내외인 것으로 분석된다. 여기에서 속도산출을 위한 제동 마찰계수는 피추돌차의 정상 제동 가능성이 낮은 상황에서 추돌차가 μ=0.8로 최대 제동한 경우에는 전체 마찰효율의 50 %, 추돌차가 μ=0.4로 보통 제동한 경우에는 전체 마찰효율의 25 % 정도가 되므로, 양차 충돌 후 평균 마찰계수는 μ=0.2 ~ 0.4를 적용하였다.

$$V_C = \sqrt{254\mu d} \quad (km/h) \tag{3}$$

$$V_C = \sqrt{254 \times (0.2 \sim 0.4) \times 30} \fallingdotseq 39\,km/h \sim 55\,km/h$$

where, V_C : common speed of post-crash
μ : coefficient of friction
d : movement distance

양차가 충돌하면, 서로 맞물린 후 동일한 속도(공통속도)로 될 때까지 운동량을 교환하면서 차체의 찌그러짐이 동반되는데 이때 처음속도에서 공통속도에 도달할 때까지의 속도변화를 유효충돌속도라고 하며, 이 유효충돌속도가 클수록 차체의 찌그러짐(소성변형)도 비례하여 증가하게 된다. 추돌차인 SUV차량과 피추돌차인 승용차의 유효충돌속도 (V_{1e}, V_{2e})를 물리적인 관계식으로 표현하면 식 (4), (5)와 같다.

$$V_{1e} = V_1 - V_C = \frac{m_2}{m_1 + m_2}(V_1 - V_2) \tag{4}$$

$$V_{2e} = V_C - V_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}(V_1 - V_2) \tag{5}$$

where, V_{1e} : effective impact speed of SUV
V_{2e} : effective impact speed of p_car
V_1 : pre-crash speed of SUV
V_2 : pre-crash speed of p_car
V_C : common speed of post-crash
m_1 : weight of SUV
m_2 : weight of p_car

식 (4), (5)로부터 SUV와 승용차의 추돌 전 속도를 유도하면 식 (6), (7)과 같다.

$$V_1 = V_C + V_{1e} = \frac{m_2}{m_1 + m_2}(V_1 - V_2) + V_C \tag{6}$$

$$V_2 = V_C - V_{2e} = \frac{m_1}{m_1 + m_2}(V_1 - V_2) - V_C \tag{7}$$

또한 식 (4), (5)로부터 추돌차와 피추돌차의 유효충돌속도는 상대속도를 양차의 질량비로 나눈 값이 된다. 결국 추돌사고에서 양차에 배분되는 유효충돌속도는 식 (8), (9)와 같이 질량의 역비례 관계로써 상대속도를 나눈다고 말할 수 있다.[6)]

$$V_{1e} + V_{2e} = V_1 - V_2 \ (\text{상대속도}) \tag{8}$$

$$\frac{V_{1e}}{V_{2e}} = \frac{m_2}{m_1} \tag{9}$$

따라서 본 건 추돌사고에서 추돌차와 피추돌차의 질량비는 0.51:0.49 이므로, 추돌차인 SUV의 유효충돌속도는 32 km/h, 피추돌차인 승용차의 유효충돌속도는 33 km/h가 되고, 양차의 충돌 후 속도가 약 39 km/h ~ 55 km/h인 점을 감안하면, 식 (10), (11)과 같이 추돌차인 SUV의 추돌속도는 약 71 km/h ~ 87 km/h, 승용차의 피추돌속도는 약 6 km/h ~ 22 km/h로 분석된다.

$$V_1 = V_C + V_{1e} = 71\,km/h \sim 87\,km/h \quad (10)$$

$$V_2 = V_C - V_{2e} = 6\,km/h \sim 22\,km/h \quad (11)$$

4. 차대차 시뮬레이션 분석

4.1 분석방법

본 연구에서는 차량운동 및 사고재현 프로그램인 PC-CRASH를 이용하여 충돌 모의실험(simulation)을 실시하였다. PC-CRASH는 뉴턴의 운동법칙과 운동량(momentum)에 기반을 둔 2D 또는 3D 모델링 방식의 충돌사고 재현 프로그램이다.[7)]

사고차량은 최적화된 세단형 및 SUV 자동차의 기본 강체 모델에 기초 제원을 토대로 차체 형상을 3D 모델링하였다. Fig. 5는 3D로 모델링한 승용차와 SUV 차량의 모습이다.

모의실험은 SUV 차량이 승용차의 후미를 추돌하여 양차 충돌 후 진행궤적과 정지위치가 사고상황과 일치하도록 반복 실험하는 충돌 최적화(collision optimizer)시뮬레이션을 실시하였고, 그 결과를 토대로 사고상황과 부합되는 추돌상황 및 속도조건을 검증하였다.

4.2 분석결과

양차 추돌상황에 대한 충돌 최적화(collision optimizer) 시뮬레이션을 수행한 결과 사고현장 상황과의 궤적 에러율이 3.1 %인 최적 조건에서 추돌차인 SUV 차량의 충돌속도는 71 km/h, 피추돌차인 승용차의 충돌속도는 7 km/h인 것으로 해석되었다. Fig. 6은 시뮬레이션 해석 결과의 주요 이미지 자료이다.

또한 시뮬레이션에서 도출된 양차 상대속도는 64 km/h, 유효충돌속도는 약 32 km/h, 충돌 후 속도는 약 37 km/h ~ 42 km/h로써, 추돌사고의 역학적인 분석내용과 부합되는 것으로 나타났다. Table 1은 추돌사고의 역학적 분석과 시뮬레이션의 결과값을 비교한 것이다.

5. 결 론

본 연구는 추돌사고에서 쟁점이 된 추돌차와 피추돌차의 속도를 역학적 해석에 근거하여 물리적으로 분석하였고, 사고현장 상황과 부합되는 조건으

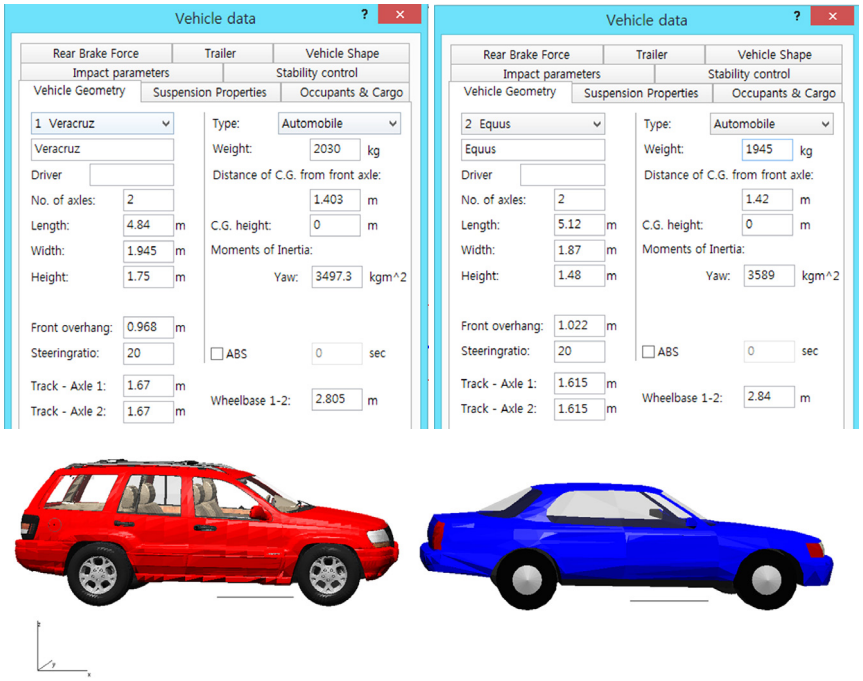
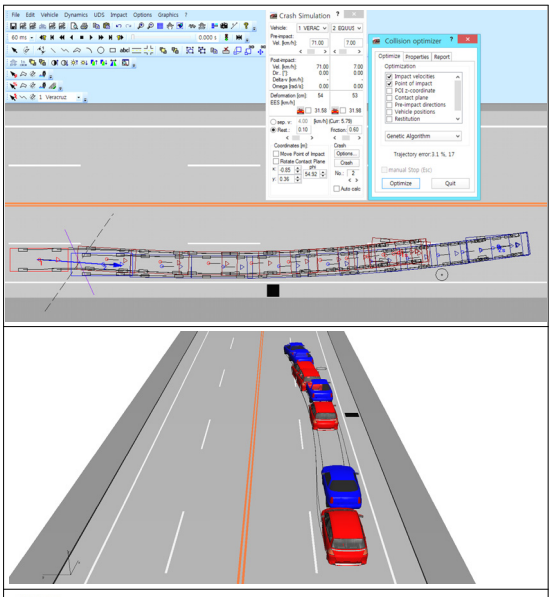


Fig. 5 Modeling of simulation vehicles



Vehicle :	SUV	P CAR
Driver :		
t [s]:	0.07	0.07
Pre Impact vel. [km/h]:	70.56	6.50
Post Impact vel. [km/h]:	36.72	41.99
Velocity change (dV) [km/h] :	34.01	35.50
Deformation depth [m] :	0.54	0.53
EES [km/h] :	31.58	31.98
Stiffness [kN/m]:	533.5	543.1
Coefficient of restitution (e) :	0.10	
Separation speed [km/h]:	5.8	
Friction coefficient (mu) :	0.60	
Point of Impact x [m] :	-0.85	
Point of Impact y [m] :	0.36	
Angle of contact plane (phi) [deg] :	54.92	
Total Deformation Energy [J] :	154856.56	
Impulse [Ns] :	19178.52	
Direction of impulse [deg] :	175.89	
Moment arm about C.G. [m] :	0.08	0.02
PDOF (SAE) [deg] :	4.11	-175.89
dV/EES :	1.08	1.11

Fig. 6 Simulation result

Table 1 Comparison of calculation and simulation result

Section	Calculation	Simulation	Error
V_R	65 km/h	64 km/h	1.53 %
V_{1e}	32 km/h	31.58 km/h	1.31 %
V_{2e}	33 km/h	31.98 km/h	3.09 %
V_c	39 ~ 55 km/h	36.7 ~ 41.9 km/h	-
V_1	71 ~ 87 km/h	71 km/h	-
V_2	6 ~ 22 km/h	7 km/h	-

로 반복 실험하는 충돌 최적화 시뮬레이션을 통해 해석 및 검증하였다. 사례의 추돌사고 분석 모형에서 추돌차인 SUV 차량의 속도는 71 km/h ~ 87 km/h 범위이고, 피추돌차인 승용차의 속도는 6 km/h ~ 22 km/h인 것으로 분석되었으며, 시뮬레이션 해석을 통해 분석모형을 검증하고 최적의 속도 조건을 도출한 결과 추돌차 71 km/h, 피추돌차 7 km/h로 해석되었다. 추돌사고의 실무적인 분석에 있어 시뮬레이션 기법을 이용하면 충돌의 물리적인 해석에 대한 보다 객관적인 검증이 가능하고, 이를 통해 사고재현의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 다양한 사고 유형의 적용과 신뢰성 향상을 위해서는 충돌속도와 차량손상에 대한 실차 실험 자료를 축적하고, 그 기초 위에서 유형에 따른 분석방법을 체계화시키기 위한 후속 연구가 지속되어야할 것으로 판단된다.

References

1) KOROAD, Traffic Accident Statistical Analysis, 2015.
2) J. H. Lim, N. K. Lim, S. W. Shim and J. W. Lee, “A Case Study on Whiplash Injury through Car to Car Rear End Test and WITKit Simulation,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1003-1008, 2013.
3) M. Ueyama, “Empirical Reproduction Method of Traffic Accident,” Technology Shoin (Japan), pp.350-351, 1992.
4) L. B. Fricke, “Traffic Accident Reconstruction,” Northwestern University Traffic Institute, 90-30, 1990.
5) KOROAD, Traffic Accident Reconstruction Manual, p.42, 2002.
6) H. Hayashi, “Minoruyo Car Accident Appraisal Komanabu,” Technology Shoin (Japan), p.28, 1992.
7) Steffan Datentechnik, PC CRASH Technical Manual, 2009.