

■ 論 文 ■

활주흔과 정지지점으로부터 수학적방법과 최적화방법에 의한 교통사고 재현기법에 관한 연구

Accident Reconstruction Analysis by Mathematical and Optimization Method from Skid Mark and Stopped Position

유 장 석

(한양대학교 교통공학과 박사과정)

장 명 순

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

목 차

- I. 서론
- II. 도로요인
 - 1. 도로기하구조특징
 - 2. 노면마찰계수
 - 3. 타이어흔적의 특징
- III. 차량요인
 - 1. 차량손상이론
 - 2. 차량손상특징
- IV. 사고상황분석
 - 1. 충격력 및 회진방향
 - 2. 최종정지위치
 - 3. 최초접촉 및 최대접촉
- V. 수학적방법을 이용한 충돌위치 분석
 - 1. 승용차량 충돌위치
 - 2. 싼형승용차량충돌위치
- VI. 최적화방법을 이용한 충돌속도분석
 - 1. 차량모델링
 - 2. 최적화기법 도입
 - 3. 최적화결과분석
- VII. 결론
- 참고문헌

Key Words : 스킨마크(Skid Mark), 최적화(Optimization), 충돌속도, 모의충돌실험, 최종정지위치

요 약

본 연구는 차대차 충돌사고시 차량충돌위치와 충돌속도 분석기법을 사고사례를 통해 연구하였다. 차량충돌위치는 사고현장 노면에 생성된 타이어 마크를 이용하여 수학적방법으로, 충돌속도는 실제 사고차량 최종정지위치와 모의충돌실험을 통해 분석된 차량 최종정지위치와의 차를 목적함수로 하여 이를 최소로 수렴하는 최적화기법을 이용하였다. 연구결과, 승용차량 오른쪽 앞바퀴 위치는 중앙선으로부터 좌측으로 0.45m 떨어진 진행방향 1차로 상이고, 왼쪽 앞바퀴는 중앙으로부터 좌측으로 0.345m 떨어진 지점에 위치한 상태이다. 최적화기법을 이용하여 사고차량의 충돌속도를 분석한 결과, 최적화의 오차율이 0.8%인 경우 충돌속도는 승용차량 67.75Km/h, 싼형 승용차량 29.67Km/h로 분석되었으며, 충돌 후 x축에 대한 속도는 승용차량 20.0Km/h, 싼형승용차량 15.69Km/h 이고, y축에 대한 속도는 승용차량 15.68Km/h, 싼형 승용차량 7.66Km/h로 분석되었다. 반면, 기존 충돌속도 분석모형식을 이용하여 사고차량의 충돌속도를 분석한 결과, 승용차량 64.97Km/h, 싼형승용차량 31.27Km/h로 도출되었다. 따라서, 최적화기법을 통해 분석한 충돌속도와 기존 분석모형식을 이용하여 분석한 충돌속도와 오차가 승용차량 2.78Km/h, 싼형승용차량 1.6Km/h로 최적화기법을 이용하여 분석한 결과에 대한 신뢰성이 높은 것으로 연구결과 도출되었다. 따라서, 추후 차 대 차 충돌사고를 분석함에 있어 타이어 흔적을 이용한 수학적방법과 모의충돌실험을 통한 최적화기법을 이용하면 충돌속도는 물론 충돌전·후 차량의 운동특성에 대한 정확한 분석이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문은 과학기술부 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다.

I. 서론

교통사고라 함은 도로상에서 차의 교통으로 인하여 사람을 사상하거나 물건을 손괴하는 것을 말한다.¹⁾ 이와 같은 교통사고는 지난 5년간(1995년~1999년) 연평균 275,205건이 발생하여 10,598명의 사망자와 286,835명의 부상자가 발생하였다. 교통사고 사망자 중 승용차 교통사고로 인한 사망자는 49.0%로 전체교통사고 사망자중 가장 높고, 도로형태별로는 곡선구간에서 발생하는 교통사고는 전체교통사고의 5.4%에 불과하지만 사망률은 13.2%로 교통사고 발생률에 비해 치사율이 높아 심각한 인명피해를 수반하고있다.

한편, 교통사고 사망자 중 41.6%는 차 대 차 충돌사고로 인해 사망하였고, 이중 17.0%에 해당하는 연평균 1,801명은 중앙선침범사고로 인해 사망하였다.²⁾

중앙선이란 차마의 통행을 방향별로 명확하게 구분하기 위하여 도로에 황색실선이나 황색점선 등의 노면표시로 표시한 선 또는 중앙분리대·철책·울타리 등으로 설치한 시설물 그리고 가변차로가 설치된 경우에는 신호기가 지시하는 진행방향의 제일 왼쪽 황색점선을 말한다.³⁾ 따라서, 도로를 주행하는 모든 차마는 특별한 경우가 아니고는 반드시 도로에 설치된 중앙선의 우측부분으로 통행하도록 규정하여 원활한 소통이 이루어지도록 하고 있으나, 이를 준수하지 못하고 중앙선을 넘어 주행하다 사고가 발생하여 귀중한 인명과 재산상의 피해는 물론 사고 주체자들 간에 중앙선침범 여부에 대한 논란이 끊임 없이 발생하고 있어 시간적·경제적·정신적 폐해가 심각한 실정이다.

따라서, 본 연구는 차 대 차 충돌사고 중 승용차량 간에 발생한 정면충돌사고에 대하여 사고당시 사고현장노면에 나타난 타이어마크, 차량손상상태, 최종정지위치 등 사고관련 물리적 흔적을 이용하여 사고차량 충돌위치를 수학적방법으로 분석하는 방법과 충돌 후 사고차량의 실제 최종정지위치와 사고분석 전문 컴퓨터시뮬레이션 프로그램인 PC-CRASH를 이용한 모의충돌실험을 통해 분석된 최종정지위치와의 차를 최소로 수렴하는 최적화기법을 이용하여 차량충돌속도를 분석하는 교통사고재현기법을 사고사례를 통해 연구하였다.

II. 도로요인

1. 도로기하구조특징

사고현장 도로기하구조는 편도 2차로로써 각 방향 차로폭은 6.7m(1차로:3.2m, 2차로:3.5m)이다.

도로의 중단구배는 0.4%, 횡단면경사는 승용차량 진행방향 2.2%, 직형 승용차량 진행방향 3.0%이다. 도로의 평면선형은 사고지점은 직선구간이나 직형 승용차량 진행방향은 우로 굽은 곡선구간이 지나 직선구간으로 연결되는 구간이다. 사고현장도로의 제한속도는 70Km/h, 사고지점은 신호등이 있는 횡단보도 상이고 사고당일 비가 내려 노면이 미끄러운 상태이다.

2. 노면마찰계수

사고현장 도로의 노면마찰계수를 측정하기 위하여 사고현장 부근 노면을 임의로 3군데 지점을 선정, Pendulum 노면마찰계수 측정기를 이용하여 지점당 5회씩 측정한 결과 <표 1>에서와 같이 습윤시 사고현장노면의 마찰계수 값은 전체평균 0.35이다.

<표 1> 노면마찰계수(Skid Resistance Test)

구분	A지점	B지점	C지점	전체평균
1회	0.38	.042	0.40	0.4
2회	0.31	0.29	0.40	0.33
3회	0.31	0.29	0.40	0.33
4회	0.31	0.29	0.35	0.32
5회	0.31	0.42	0.35	0.36
지점평균	0.32	0.34	0.38	0.35

주) $SN = 0.884 \times BPN + 5.16 \times MTD - 17.8$

SN : 노면마찰계수

BPN : 현장 실험치

MTD : $\frac{4V}{3.14D^2}$ (D:원지름, V:25ml(모래체적))

노면마찰계수 f : $\frac{SN}{100}$

3. 타이어 흔적의 특징

승용차량 진행방향 차로 횡단보도 상에 왼쪽으로 굽은 곡선형태의 스키드마크(Skid Mark)가 생성되어 있다. 스키드마크는 일반적으로 직선형태로 나타나지만 곡선형태를 이룬 스키드마크는 다음과 같은 상황에서 생성된다.⁶⁾

첫째, 회전하려고 하거나 위험상황을 회피하기 위하여 이미 핸들을 조작한 상태에서 급브레이크를 작동하였을 때

둘째, 자동차가 미끄러지는 과정에서 노면에 대한 견인력 차이가 발생하였을 때, 도로의 횡단구배, 편구배 등에 의해 미끄러지던 자동차가 노면이 낮은 방향(중앙선, 도로 가장자리, 언덕쪽으로)으로 회전할 때

셋째, 곡선반경이 짧은 구간에서는 곡선 안쪽의 바퀴가 곡선바깥쪽 바퀴보다 회전수가 적어 마찰이 많아지기 때문에 곡선 안쪽의 바퀴만 자국을 남기거나 더 진하게 나타나며 곡선형태를 이룬다.

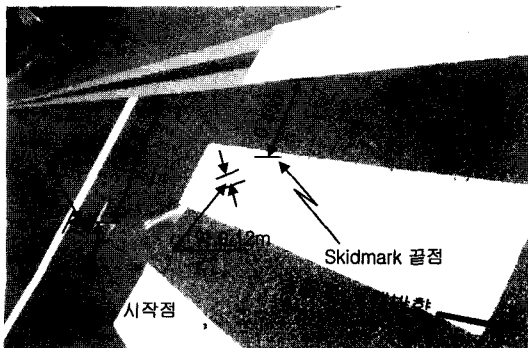
넷째, 노면 마찰력에 차이가 생길 경우, 즉, 한쪽 바퀴는 마찰력이 높은 노면에 위치하고, 다른 한쪽 바퀴는 모래나 자갈 혹은 눈이나 빙판 등으로 마찰력이 낮은 노면에 위치할 경우 곡선형태를 이룬 스키드마크가 생성된다.

다섯째, 자동차의 브레이크가 편 제동되었을 때 등이다.

이 중 사고현장에 생성된 곡선형태의 스키드마크가 생성된 원리는 운전자가 위험을 발견하고 이를 회피하려 핸들을 왼쪽으로 급조향한 상태에서 브레이크를 작동하여 차량무게중심이 원심력방향인 오른쪽 앞바퀴 쪽으로 이동하여 오른쪽 앞바퀴에 의해 <그림 1>에서와 같이 곡선형태를 이룬 스키드마크가 생성되었는데, 그 특징은 다음과 같다.

첫째, 스키드마크의 시작부분은 횡단보도 정지선에서부터 전방 1.13m, 중앙선으로부터 우측으로 1.17m 떨어진 지점에서부터 중앙선을 향해 비스듬히 3.4m를 생성한 후 끝부분이 중앙선으로부터 0.45m 떨어진 지점에 정지하였다.

둘째, 스키드마크의 넓이는 약 0.13m~0.15m이고 형태는 진행방향으로 4개의 줄무늬가 생성되었다.



<그림 1> 스키드마크의 특징

III. 차량요인

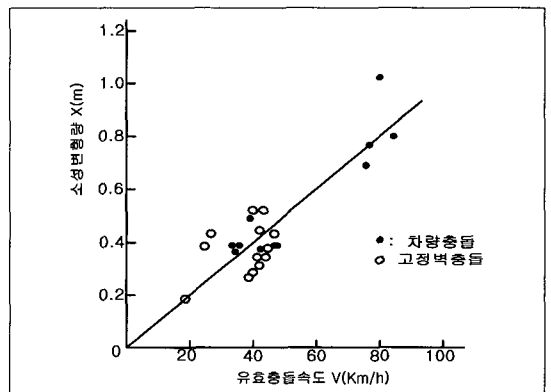
1. 차량손상이론

자동차는 대단히 큰 운동에너지를 가지고 주행하는데, 이와 같은 운동에너지는 충돌과정에서 대부분 차체변형에 의해 흡수된다. 즉, 자동차의 질량을 m , 속도를 V , 변형량을 δ 로 하면, 충격력 F 는 변형량 δ 와 함께 직선적으로 증대할 경우($F=K \cdot \delta$, K : 비례상수) 식(1)과 같이 표현할 수 있다.⁴⁾

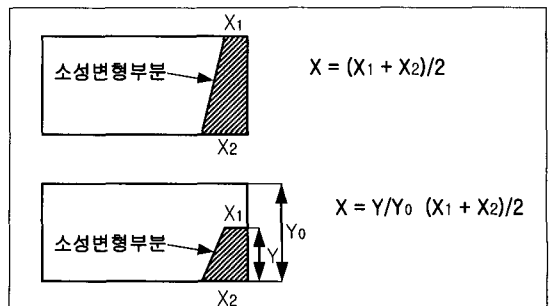
$$\frac{1}{2} mV^2 = \int Fd\delta = \int K\delta d\delta = \frac{1}{2} K\delta^2$$

$$\delta = \sqrt{\frac{m}{K}}$$
(1)

승용차와 승용차가 정면으로 충돌할 때 충돌속도와 소성변형량과의 관계에 대해서 일본 교통사고공학자인 하야시 히로시는 <그림 2>와 같이 그래프와 실험식으로 나타내어 설명하고 있고 또한, 차량 소성변형량 측정방법을 <그림 3>과 같이 그리고 충돌속도와 소성변형량의 관계를 다음과 같이 설명하고 있다.⁵⁾



<그림 2> 충돌속도와 소성변형량과의 관계



<그림 3> 평균 소성변형량 측정방법

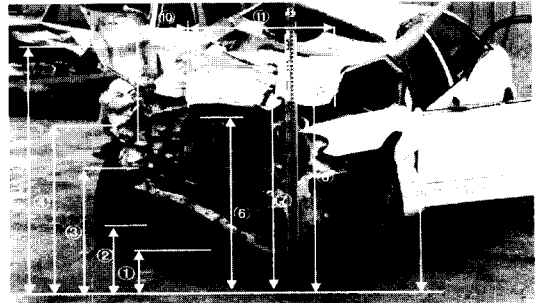
이와 같이 측정된 소성변형량을 이용하여 충돌속도를 분석하는 모형식을 차량충돌실험을 통해 다음과 같이 개발하였다.

$$X = 0.0095 V_e \quad (2)$$

$$V_e = 105.3X \quad (3)$$

V_e : 충돌속도(Km/h)

X : 소성변형량(m)



〈그림 4〉 승용차량 전면손상위치 특징

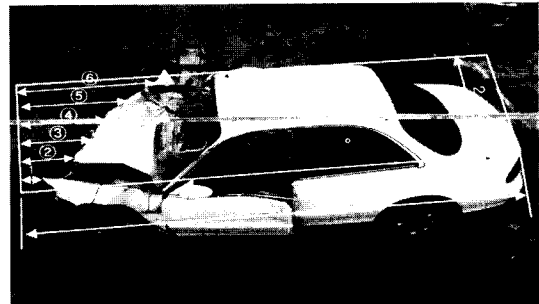
2. 차량손상특징

1) 승용차량

(1) 전면

승용차량 전면손상은 〈그림 4〉에서와 같이 ①부분은 지상으로부터 0.24m, ②부분 0.36m, ③부분 0.7m, ④부분 0.92m, ⑤부분 1.34m, ⑥부분 0.94m, ⑦부분 1.08m이고 ⑧·⑨부분은 각각 1.24m, 0.96m이다. 또한, 쉐형 승용차량 앞 범퍼부분에 부착되었던 그릴 가드의 왼쪽부분이 승용차량 우측전면에 충격한 위치는 오른쪽 웬더로부터 왼쪽으로 약 0.26m 떨어진 ⑩부분이고, 쉐형 승용차량의 그릴가드(Grill Guard)의 폭인 ⑩부분은 0.62m이다.

승용차량 전면 손상깊이는 〈그림 5〉에서와 같이 ①부분 0.17m, ②부분 0.52m, ③부분 0.53m, ④부분 0.79m, ⑤부분 0.8m, ⑥부분 0.89m이다.



〈그림 5〉 승용차량 전면 손상깊이 특징

(2) 좌·우측 및 후면

승용차량 우측면 손상은 〈그림 6〉에서와 같이 우측 앞 웬더부분이 강한 충격력을 받아 0.95m의 앞 오버항(Front Overhang) 차체부분이 앞 바퀴부분까지 압괴되며 손상되었다. 반면, 좌측면 손상은 좌측 앞 웬더부분 및 운전석 문쪽에 충격력이 작용하여 약간의 소성변형이 발생하였을 뿐 비교적 양호한 상태이다.

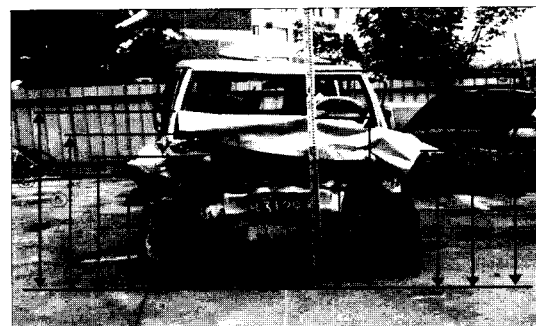


〈그림 6〉 승용차 우측면 손상특징

2) 쉐형 승용차량

(1) 전면

쉐형 승용차량 전면 손상은 〈그림 7〉에서와 같이 전면 ①부분은 지상으로부터 0.3m, ②부분 0.54m, ③부분 0.7m, ④부분 0.96m, ⑤부분 1.1m, ⑥부분



〈그림 7〉 쉐형승용차량 전면손상위치특징

1.24m, ⑦부분 0.9m, ⑧부분 1.2m, ⑨부분 0.8m, ⑩부분 0.96m, ⑪부분 1.5m이다. 반면, 전면손상깊



〈그림 8〉 전면손상깊이특징

이는 〈그림 8〉에서와 같이 전면을 6등분하여 측정 한 결과 ①, ② 부분 0.33m, ③부분 0.3m, ④부분 0.15m, ⑤부분 0.33m, ⑥부분 0.34m이다.

(2) 좌·우측 및 후면

짚형 승용차량 우측면 및 좌측면 손상은 충돌과정에서 우측 앞 힌더 판넬에 충격력이 전달되어 차체가 소성변형을 일으키며 손상되었다. 이와 같은 충격력이 전달되어 손상되는 부분을 간접손상(Induce Damage) 부분이라 한다. 후면 손상은 지상으로부터 약 1.4m 높이에 설치된 후면 유리부분과 0.8m~1.3m 높이의 뒷문짝, 뒤 범퍼 왼쪽 모서리 부분(0.7m~0.8m)이 충돌과정에서 지붕 위에 적재하였던 자전거가 낙하하는 과정에서 손상되었다.

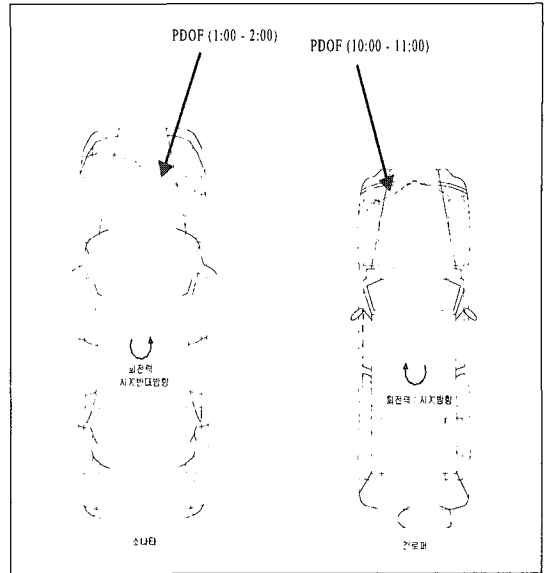
Ⅳ. 사고상황분석

1. 충격력 및 회전방향

승용차량과 짚형 승용차량이 충돌하는 과정에서 작용한 충격력방향(PDOF, Principle Direction Objective Force)을 차체 소성변형형태 및 소성변형방향을 토대로 분석한 결과 〈그림 9〉에서와 같이 승용차량은 1시~2시 사이의 방향으로, 짚형 승용차량은 10시~11시 사이의 방향으로 작용한 것으로 분석되었다. 따라서, 충돌 후 승용차량은 시계반대방향으로, 짚형 승용차량은 시계방향으로 회전하며 추진력과 회전력이 "0"이 되는 지점에 최종정지하였던 것이다.

2. 최종정지위치

충돌 후 사고차량의 최종정지형태는 〈그림 10〉에서와



〈그림 9〉 충격력(PDOF) 및 회전방향

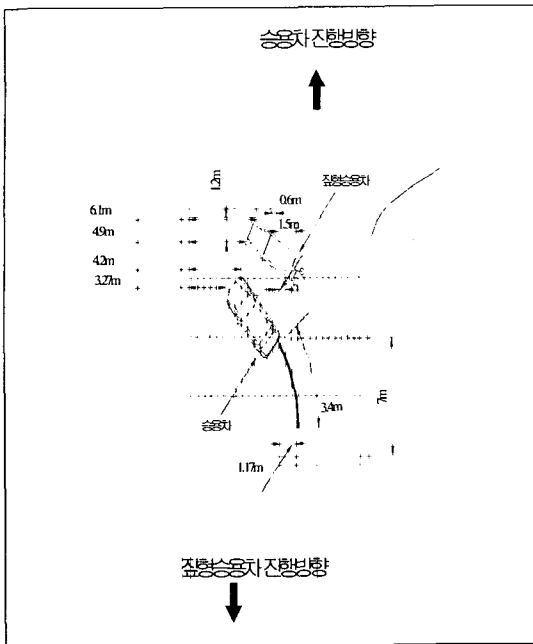


〈그림 10〉 충돌 후 최종정지형태

같이 양 차량 모두 짚형승용차량 진행방향 1차로인 횡단보도 중간에 승용차량은 시계반대방향으로 약 40°~50°, 짚형승용차량은 시계방향으로 약 130°~140° 정도 회전한 후 비스듬히 최종정지하였다.

한편, 충돌 후 최종정지위치는 〈그림 11〉에서와 같이 승용차량은 오른쪽 뒤 모서리부분이 정지선으로부터 전방 7m 횡단보도 상에 위치하였고, 왼쪽 앞 모서리부분은 연석으로부터 3.27m, 오른쪽 앞 모서리 부분은 4.2m지점에 최종 정지하였다.

짚형 승용차량의 최종정지위치는 충돌 후 시계방향으로 약 130~140° 회전하여 앞바퀴는 진행방향 1차로에, 뒷바퀴는 승용차량 진행방향 1차로 위치하며 비스듬히 최종 정지하였다. 충돌 후 짚형 승용차량의 최종정지위치는 진행방향 노측연석을 기준으로 전면



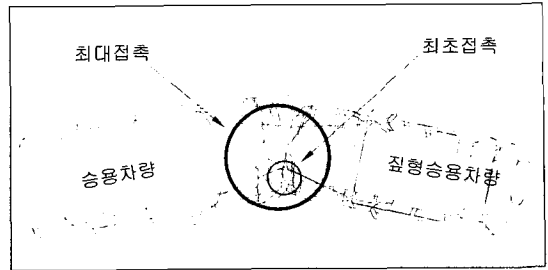
<그림 11> 사고차량 최종정지위치 특성

좌측모서리 부분은 4.9m, 전면 우측모서리 부분은 6.1m이고, 오른쪽 뒤 모서리 부분이 중앙선으로부터 오른쪽으로 1.5m 넘어가 승용차량 진행방향 1차로에 최종 정지하였다.

3. 최초접촉(First Contact) 및 최대접촉 (Maximum Engagement)

사고 양 차량이 충돌하는 과정에서 발생한 최초접촉은 승용차량 우측 앞 범퍼 및 오른쪽 앞 헨더 모서리부분(지상으로부터 약 0.24m~1.34m)과 중형 승용차량 앞범퍼 왼쪽부분 및 후드 전면 좌측부분(지상으로부터 0.3m~1.24m)에서 발생한 것으로 분석되었다.

최대접촉은 최초접촉 후 추진력에 의해 계속해서 앞으로 진행해 나가며 승용차량 전면 우측부분과 중형 승용차량 전면 좌측부분이 <그림 12>에서와 같이 발생하였던 것으로 분석되었다. 최대접촉 후 무게중심은 관성력과 충격력의 합벡터방향으로 이동하며 최대접촉점을 축으로 사고차량 뒷부분이 위로 올라가는 노즈 업(Nose-Up)현상이 발생하는 피칭(Pitching)운동을 하며 충돌 후 차체 탄성력으로 인한 스프링 백(Spring Back)현상이 발생하며 분리(Separation)



<그림 12>최초접촉 및 최대접촉 특징

되는 과정에서 승용차량은 좌측 뒷바퀴를 축으로 시계반대방향으로, 중형승용차량은 오른쪽 뒷바퀴를 축으로 시계방향으로 각각 회전하며 최종정지한 것으로 연구결과 분석되었다.

V. 수학적방법을 이용한 충돌위치분석

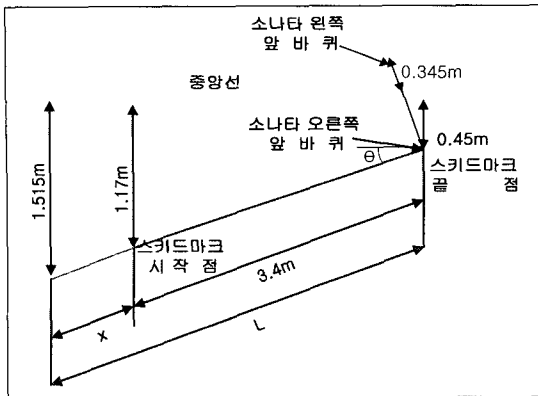
1. 승용차량 충돌위치

승용차량 진행방향에 생성된 곡선형태의 스키드마크가 끝나는 지점이 충돌순간 승용차량 오른쪽 앞바퀴의 위치이다. 즉, 충돌순간 승용차량 오른쪽 앞바퀴의 위치는 중앙선으로부터 0.45m 떨어진 진행방향 1차로 상이다. 따라서, 충돌순간 승용차량 왼쪽 앞바퀴의 위치는 1.515m(앞바퀴윤거) - 0.45m(오른쪽 앞바퀴위치, 진행방향 1차로) × 1/cos 50° - 0.30m(중앙선 폭) × 1/cos 50° = 0.345m이다. 즉, 충돌순간 승용차 왼쪽앞바퀴는 중앙선의 중심으로부터 좌측으로 0.345m 떨어진 중형승용차량 진행방향 1차로 상에 위치하였다.

한편, 스키드마크 생성시점에서 승용차량 오른쪽 앞바퀴 위치는 중앙선으로부터 오른쪽으로 1.17m 떨어진 지점에 위치하였으므로 왼쪽 앞바퀴 위치는 중앙선으로부터 좌측으로 0.045m(1.515m - 1.17m - 0.30m = 0.045m) 떨어진 지점인 중앙선 상이다.

이와 같이 스키드마크가 생성되기 시작한 시점에서 나 끝나는 지점에서 승용차의 좌측 앞바퀴는 중앙선 중심으로부터 좌측에 위치하였던 것으로 분석되었다.

그러나, 스키드마크가 진행방향으로 진행해 나아갈수록 중앙선을 향해 접근해가며 비스듬히 생성되었다. 따라서, 승용차량 좌측 앞바퀴가 중앙선을 넘지 않고 정상적으로 자기차로를 주행한 지점을 분석하면 다음과 같다.



〈그림 13〉 충돌당시 사고차량 충돌위치 특성

우선, 스키드마크와 중앙선이 이루는 각(θ)은

$$\sin \theta = (1.17 - 0.45) / 3.4 = 0.2118$$

$$\theta = \sin^{-1} 0.2118$$

$\therefore \theta = 12.23^\circ$ 이다. 즉, 승용차량 운전자가 위험을 발견하고 급브레이크를 작동하여 생성된 스키드마크는 중앙선과 이루는 각이 12.23° 이다. 따라서, 승용차량 좌측바퀴가 중앙선을 넘지 않고 정상적으로 운행한 위치(X)는

$$\sin 12.23^\circ = 1.065(1.515 - 0.45) / (3.4 + X)$$

$$X = (1.065 / \sin 12.23^\circ) - 3.4$$

$$= 5.028 - 3.4$$

$$= 1.63(\text{m})$$

즉, 스키드마크 생성시점에서부터 후방 1.63m 이전에는 승용차량 좌측바퀴도 중앙선을 넘지 않고 정상적인 운행을 하였던 것이다.

2. 짙형 승용차량 충돌위치

승용차량과 충돌할 당시 짙형 승용차량의 충돌위치를 충돌 후 짙형 승용차량 최종정지위치 특성과 회전 운동특성을 이용하여 분석하면 다음과 같다.

충돌 후 짙형 승용차량이 시계방향으로 회전할 때 주 회전축은 사고특성상 우측 뒷바퀴이다. 따라서, 충돌 전 짙형 승용차량 좌측 앞바퀴가 중앙선에 접하며 주행하였을 경우, 우측뒷바퀴의 위치는 뒷바퀴 윤거(1.375m) + 앞바퀴 윤거와 뒷바퀴 윤거의 차(0.025m) = 1.4m이다.

즉, 충돌 당시 짙형 승용차량 오른쪽 뒷바퀴는 중

양선으로부터 최소 1.4m가 떨어진 지점에 위치한 상태에서 충돌하였던 것이다. 따라서, 충돌 후 오른쪽 뒷바퀴의 최종정지위치도 중앙선으로부터 최소 1.4m 떨어진 지점에 위치하여야 하나 실제 오른쪽 뒷바퀴의 최종정지위치는 이와는 반대로 중앙선으로부터 1.5m을 넘는 승용차량 진행방향 1차로상에 최종정지하였다. 즉, 충돌 전 짙형 승용차량은 미상의 원인으로 중앙선을 넘어 승용차량 진행방향 차로를 역주행하는 과정에서 위험을 발견하고 자기 차로로 복귀하는 순간 승용차량과 충돌한 것으로 분석되었다.

VI. 최적화기법을 이용한 충돌속도분석

일반적으로 차량 충돌해석 시뮬레이션 프로그램은 실험충돌실험을 통해 수집한 충돌실험 결과자료를 이용하여 모의충돌실험을 위한 기본조건으로 설정한 후 연구목적에 부응하는 상황별 모의충돌실험을 수행함으로써 실험 충돌실험에 의한 경제적, 시간적 제약을 극복함과 동시에 실험충돌실험과 같은 결과를 도출할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 사용된 자동차사고분석 전문 시뮬레이션 프로그램인 PC-CRASH는 사고관련 물리적 흔적을 기초로 하여 사고상황을 재현하는 전문가를 돕기 위해 개발된 전문 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램이다.⁷⁾ 따라서, 사고차량의 충돌속도를 분석하기 위하여 실제 사고차량 최종정지위치와 모의충돌실험을 통해 분석한 최종정지위치와 차가 최소로 수렴하는 최적화기법을 이용하여 분석하였다.

1. 차량모델링

모의충돌실험용 차량은 사고차량 제원을 이용하여 3차원으로 모델링하였다.

승용차량과 짙형승용차량의 충돌은 서로 다른 방향으로 진행되는 과정에서 전면과 전면이 충돌하여 최대접촉이 발생하는 순간 차량속도가 "0"이 되어 상대적인 운동이 없는 완전충돌(Full Impact) 사고이다.⁸⁾ 이와 같이 차량과 차량이 정면으로 충돌 할 경우 충돌과정에서 발생하는 소성변형량에 영향을 미치는 차량강성계수(Stiffness Coefficients) 또는 힘-변형량곡선(F-D곡선, Force-Deflection)에 대한 자료는 프로그램 제작사에서 프로그램 개발시 연구하여

입력해놓은 승용차량 강성계수 값을 사용하였다.

충돌후 소성변형된 차체에 대한 복원계수(Coefficient of Restitution)는 실제 차량이 충돌 때 복원계수 값인 0.1~0.3을 사용하였으며, 승용차량이 스키드마크를 생성하며 활주할 때 발생한 노면마찰계수는 0.35를 사용하였다.

2. 최적화기법 도입

모의충돌실험을 통해 사고차량 충돌속도 및 충돌상황을 분석하기 위하여 충돌 후 사고 양 차량의 최종 정지위치특성과 노면에 생성된 타이어흔적의 위치를 기본조건으로 설정하여 차량충돌속도를 최적화기법으로 분석하였다. 최적화기법이란 목적함수(cost function)를 최소화(minimization)또는 최대화(maximization)로 하는 설계변수를 찾아내는 기법이다. PC-CRASH 시뮬레이션 프로그램에서 사용하는 최적화방법에는 Linear Algorithm과 Genetic Algorithm있다. 이 중 충돌속도와 충돌위치를 설계변수로 하고, 충돌 후 실제 최종정지위치와 모의충돌실험을 통해 분석된 사고차량 최종정지위치와의 차를 목적함수로 하여 목적함수가 최소로 수렴하도록 하는 선형최적화알고리즘을 이용하여 충돌속도를 분석하였다.

3. 최적화결과분석

충돌 후 실제최종정지위치와 모의충돌실험을 수행하여 분석된 차량최종정지위치와의 차가 최소로 수렴하는 최적화를 218회 수행하였다. 최적화를 수행한 결과, 최적화의 오차율이 0.8%인 경우 <표 2>, <그림 14>에서와 같이 충돌 전 승용차량은 90.59Km/h, 싼형 승용차량 41.80 Km/h 속도로 주행하였고, 충돌속도는 승용차량 67.75Km/h, 싼형 승용차량 29.67Km/h로 분석되었다. 또한, 충돌 후 사고차량의 x축에 대한 속도는 승용차량 20.0Km/h, 싼형승용차량 15.69Km/h 이고 y축 대한 속도는 승용차량 15.68Km/h, 싼형 승용차량 7.66Km/h로 분석되었다.

이와 같이 최적화를 통해 분석된 충돌속도와 차량 소성변형량을 이용하여 분석한 충돌속도를 비교·분석하면 다음과 같다.

우선, 충돌차량의 평균소성변형량을 구하면, 승용차량 평균소성변형량($X_{승용차}$)은

$$X_{승용차} = \frac{0.17 + 0.52 + 0.53 + 0.79 + 0.8 + 0.89}{6} = 0.617m$$

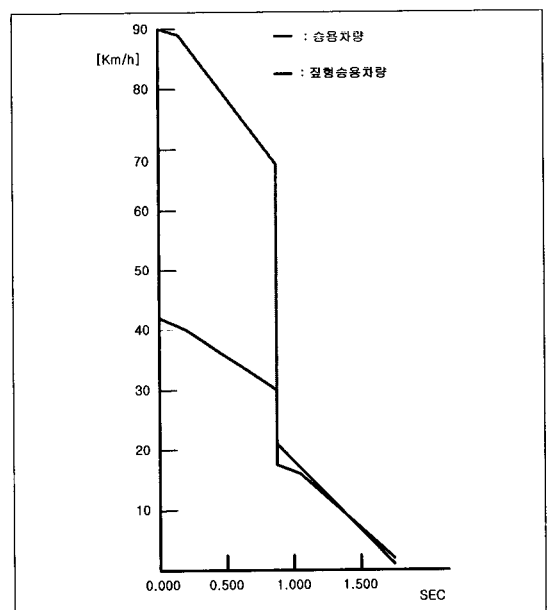
싼형승용차량 평균소성변형량($X_{싼형승용차}$)은

$$X_{싼형승용차} = \frac{0.33 + 0.33 + 0.3 + 0.15 + 0.33 + 0.34}{6} = 0.297m이다.$$

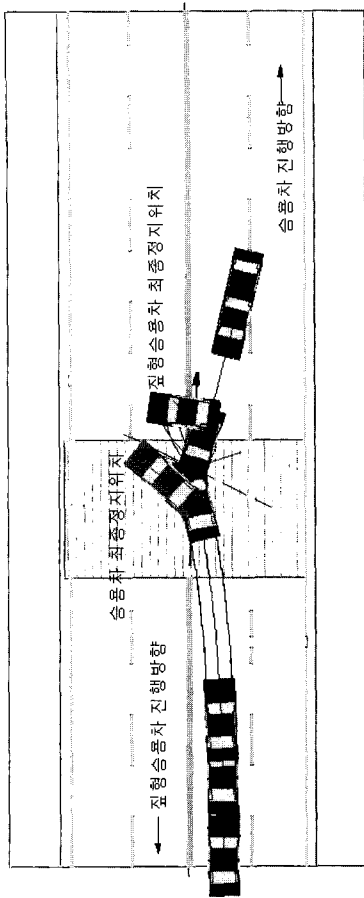
따라서, 충돌속도를 식(3)을 이용하여 분석한 결과, 승용차량은 64.97km/h, 싼형승용차량 31.27Km/h로 최적화를 통해 분석한 충돌속도와의 오차가 승용차량 2.78Km/h, 싼형승용차량 1.6Km/h로 매우 유사하게 분석됨에 따라 최적화를 통해 분석한 충돌속도에 대한 결과가 신뢰성이 매우 높은 것으로 연구결과 도출되었다.

<표 2> 충돌 전·후 속도변화특성

구분	승용차량	싼형승용차량	
최적화	제동전 주행속도	90.50(Km/h)	41.80(Km/h)
	충돌속도	67.75(Km/h)	29.67(Km/h)
	충돌 후 x축 속도	20.0(Km/h)	15.69(Km/h)
	충돌 후 y축 속도	15.68(Km/h)	7.66(Km/h)
모형식	소성변형량	0.617m	0.297m
	충돌속도	64.97Km/h	31.27Km/h



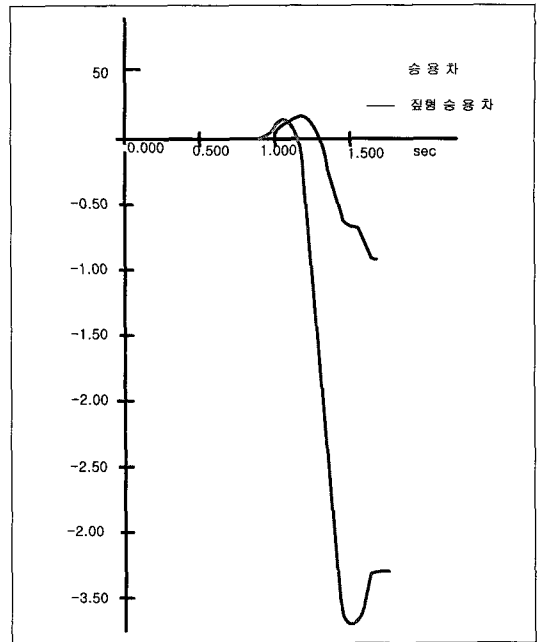
<그림 14> 충돌 전·후 속도변화특성



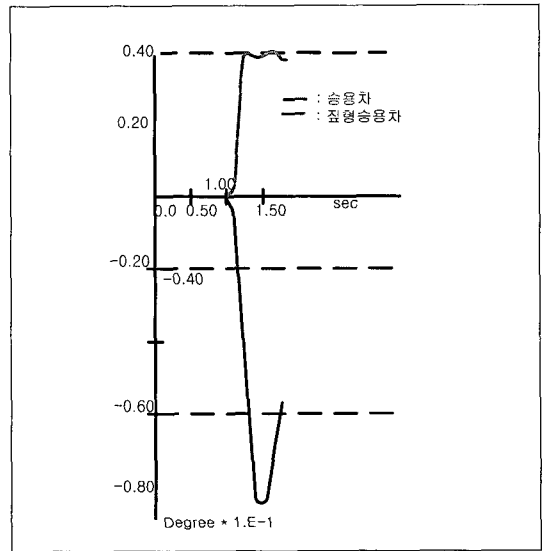
〈그림 15〉 충돌 전·후 사고차량운동특성

반면, 충돌 전·후 사고차량의 운동특성을 최적화를 통해 분석한 결과 〈그림 15〉에서와 같이 승용차량은 충돌 전 1차로를 정상적으로 주행하는 과정에서 위험을 발견하고 핸들을 시계반대방향으로 약 20° 정도 급핸들 조작하였으며, 반대방향에서 주행하던 짚형승용차량은 미상의 원인으로 중앙선을 넘어 승용차량 진행방향 차로를 역주행하는 과정에서 핸들을 시계방향으로 약 10° 정도 회전하며 자기차로로 복귀하는 과정에서 승용차량과 충돌하였던 것으로 분석되었다.

한편, 충돌과정에서 작용한 차량운동은 피칭운동, 롤링운동, 요잉운동이 동시에 작용하였던 것으로 분석되었다. 피칭운동은 〈그림 16〉에서와 같이 승용차량은 약 35°~36°, 짚형승용차량은 약 9°~10°의 피칭운동하였던 것으로 분석되었다. 로링운동은 〈그림 17〉에서와 같이 승용차량은 왼쪽으로 4°, 짚형승용차량은



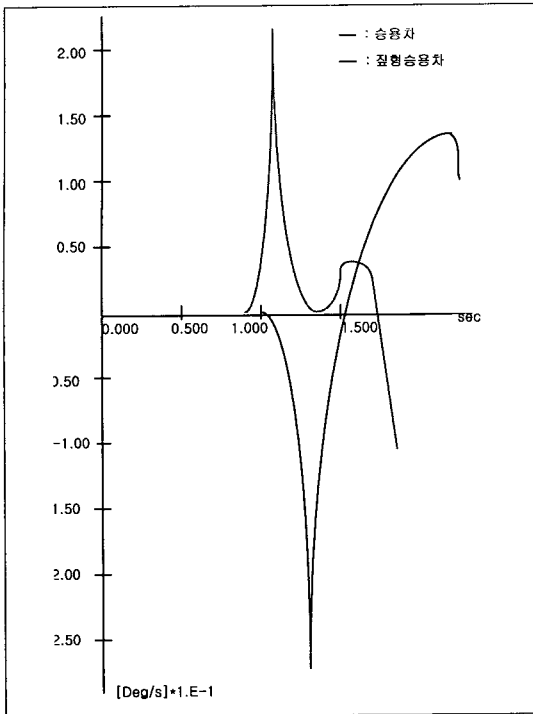
〈그림 16〉 피칭각 변화 특성



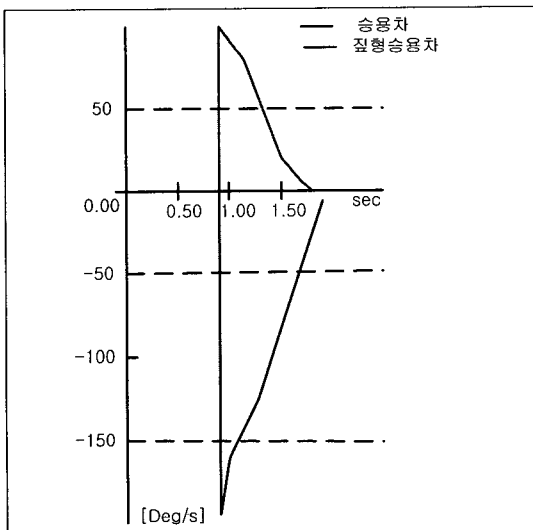
〈그림 17〉 로링각 변화특징

오른쪽 8°~9° 운동을 하였고, 롤링운동의 최대 각속도는 〈그림 18〉에서와 같이 승용차량 20 Deg/sec~25Deg/sec, 짚형승용차량 25Deg/sec~30Deg/sec 이다.

요잉운동의 최대각속도는 승용차량 약 100Deg/sec, 짚형승용차량 약 200Deg/sec로 분석되었다.



〈그림 18〉 로링 각속도 변화특징



〈그림 19〉 요잉 각속도 변화특징

Ⅶ. 결론

본 연구는 승용차량과 깊형승용차량이 정면으로 충돌한 사고사례를 통해 충돌당시 차량충돌위치와 충돌속도를 분석하는기법에 대하여 연구하였다. 차량충돌

위치는 사고현장 노면에 생성된 타이어 마크를 이용하여 수학적방법으로, 충돌속도는 실제 충돌 후 사고차량 최종정지위치와 모의충돌실험을 통해 분석된 차량최종정지위치와의 차를 목적함수로하여 이를 최소로 수렴하는 최적화를 수행하여 분석한 결과를 정리하여 요약하면 다음과 같다.

- (1) 충돌당시 승용차량 오른쪽 앞바퀴 위치는 중앙선으로부터 좌측으로 0.45m 떨어진 진행방향 1차로 상이고, 왼쪽 앞바퀴의 위치는 중앙선 중앙으로부터 좌측으로 0.345m 떨어진 위치이다.
- (2) 충돌당시 인지반응시간 동안 주행한 거리(공주거리)를 고려하면 승용차량은 스키드마크 생성지점에서부터 후방 약 1.63m 지점 이전에는 자기차로로 정상적인 주행을 하였다.
- (3) 충돌 후 깊형 승용차량이 시계방향으로 회전할 때 주 회전축은 사고특성상 우측 뒷바퀴이다. 따라서, 충돌 전 깊형 승용차량 좌측 앞바퀴가 중앙선에 접하며 주행하였을 경우, 우측뒷바퀴의 위치는 중앙선으로부터 최소 1.4m가 떨어진 지점에 위치한 상태에서 충돌하게 된다. 따라서, 충돌 후 오른쪽 뒷바퀴의 최종정지위치도 중앙선으로부터 최소 1.4m 떨어진 지점에 위치하여야 하나 실제 오른쪽 뒷바퀴의 최종정지위치는 이와는 반대로 중앙선으로부터 1.5m을 넘은 승용차량 진행방향 1차로상에 최종정지하였으므로 충돌 전 깊형 승용차량위치는 진행방향 1차로상이 아닌 승용차량 진행방향 1차로이다.
- (4) 최적화기법을 이용하여 충돌속도를 분석한 결과, 최적화의 오차율이 0.8%인 경우 충돌 전 주행속도는 승용차량 90.59Km/h, 깊형 승용차량 41.80Km/h이고, 충돌속도는 승용차량 67.75Km/h, 깊형 승용차량 29.67Km/h로 분석되었다. 또한, 충돌 후 x축에 대한 속도는 승용차량 20.0Km/h, 깊형승용차량 15.69Km/h이고 y축에 대한 속도는 승용차량 15.68Km/h, 깊형 승용차량 7.66Km/h이다.

반면, 충돌속도를 기존분석모형식을 이용하여 분석한 결과 승용차량은 64.97km/h, 깊형승용차량 31.27Km/h로 최적화를 통해 분석한 충돌속도와 의 오차가 승용차량 2.78Km/h, 깊형승용차량 1.6Km/h로 유사하게 분석됨에 따라 최적화기법

을 통해 분석한 결과의 신뢰성이 매우 높은 것으로 연구결과 도출되었다.

이상과 같이 차대차 충돌사고를 분석함에 있어 충돌위치에 대해서는 사고현장 노면에 생성된 타이어 흔적을 이용한 수학적방법으로, 충돌속도에 대해서는 최종정지위치를 이용한 최적화방법을 이용하면 속도에 추가하여 충돌후 차량의 운동특성에 대한 정확한 교통사고 원인 분석이 이루어 질 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 경찰청(1994), 교통사고처리지침(교안 63320-1712), 제2조 제2항.
 2. 경찰청(1995~1999), 교통사고통계.
 3. 경찰청(2001), 도로교통법 제2조 제4의2항.
 4. 사단법인 한국자동차공학회(1996), 자동차 기술 핸드북, 기초, 이론편.
 5. 하야시 히로시(林洋)(1992), 교통사고감정공학.
 6. Stannard Baker. J & Lynn B. Fricke(1986), The Traffic Accident Investigation Manual, Northwestern University Traffic Institute.
 7. Steffan Datentechnik(1997), PC-CRASH A Simulation Program for Vehicle Accident Technical Manual.
 8. Lynn. B. F. K(1990), Traffic Accident Reconstruction, Northwestern University Traffic Institute. U.S.A.
 9. Stannard Baker. J.(1975), Traffic Accident Investigation Manual. Northwestern University Traffic Institute, U.S.A.
 10. McGREW. D. R(1976), Traffic Accident Investigation and Physical Evidence, Charles C Thomas Publisher, U.S.A.
 11. Stannard Baker. J., Lynn. B. F.(1986), The Traffic Accident Investigation Manual, Northwestern University Traffic Institute, U.S.A.
 12. Lynn B. Fricke(1986), Traffic Accident Reconstruction, Northwestern University Traffic Institute, U.S.A
 13. Rudolf Limpert(1994), Motor Vehicle Accident Reconstruction and cause analysis, Michie Co. U.S.A.
- ☞ 주 작 성 자 : 유장석
- ☞ 논문투고일 : 2001. 11. 1
 논문심사일 : 2002. 2. 27 (1차)
 2002. 3. 20 (2차)
 2002. 7. 28 (3차)
- 심사판정일 : 2002. 7. 28
- ☞ 반론접수기간 : 2002. 12. 31