

■ 技術研究 ■

# 교통사고 재현 프로그램 PC-CRASH의 주요 충돌 인자 설정

Establishment of Important Impact Parameters of  
Traffic Accident Reconstruction Program "PC-CRASH"

**하 왕 수**

(도로교통안전관리공단 경기도지부)

**한 석 영**

(한양대학교 자동차공학과 부교수)

## 목 차

- I. 서론
    - 1. 연구배경 및 목적
    - 2. 연구범위 및 방법
  - II. 충돌 해석 모델
  - III. 교통사고 사례 재현
    - 1. 교통사고 사례 선정
    - 2. 교통사고 재현을 위한 충돌 인자
    - 3. 교통사고 재현 방법 및 결과
  - IV. 모의실험을 통한 충돌특성 주요 인자들의 추정식 구성
    - 1. 모의 실험 방법
    - 2. 충돌 특성 주요 인자들의 추정식 구성
    - 3. 추정식 초기치 설정방법 및 유효성
  - V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 충돌 인자, 차량 최종위치간 거리 및 자세(각), 초기치 설정, 반복횟수, 시간 단축 효과

## 요 약

현재 국내에서는 교통사고 재현 방법이 노면 흔적물에 의존하여 이루어지고 있고, 노면 흔적물이 없는 경우 교통사고 재현은 불가능하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 외국에서는 충돌모델을 이용한 교통사고 재현 프로그램을 활용하고 있는 추세이다. 현재 우리나라에서 가장 많이 사용하는 교통사고 재현 프로그램 PC-CRASH를 활용하기 위해서는 각 사고마다 알맞은 충돌특성 인자 값을 사용자가 직접 입력하여 사용하여야 하나, 이를 활용할 수 있는 활용자료가 부족한 실정이다.

본 연구는 국내에서 실제 발생된 교통사고 사례에 대해 교통사고 재현 프로그램인 PC-CRASH와 충돌에 영향을 미치는 충돌 인자들로 교통사고를 재현하였고, 차량의 최종위치간 거리와 자세에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보았다. 또한 실제 역 해석을 하기 위해 차량의 최종위치와 자세만으로 각각의 사례에 적절한 인자값을 추정할 수 있는 회귀식을 구성하였고, 통계적으로 신뢰성을 검증하였다. 사고 재현에 필요한 주요 충돌인자들의 초기치 설정시 추정식을 이용할 경우, 사고 재현 프로그램 활용 시, 시간 단축 효과를 프로그램 내부에 있는 유전자 알고리즘의 반복횟수로 추정식의 통계적 검증을 하였다.

## 1. 서론

### 1. 연구 배경 및 목적

국내의 경우 2001년 한해동안 교통사고로 인해 사망자 8,097명, 부상자 386,539명이 발생하여 하루 평균 사망자는 22명, 부상자는 1,059명인 것으로 나타났다. 특히 국내 지리적 특성상 많이 형성되어 있는 일반국도의 차 대 차 교통사고 중 정면 충돌 사고는 다른 사고 유형에 비해 치사율이 가장 높은 것으로 나타났고, 교차로 사고는 인구가 밀집된 도시지역에서 빈번하게 발생하는 실정이다. 교통사고의 특징은 인적, 물적 피해뿐만 아니라 사고 후 책임성여부에 따라 사법적, 행정적 제재를 받는다. 이 때문에 사고 당사자는 민·형사상 책임을 면하고자 사고 사실을 부인 또는 진실을 은폐하려고 한다. 따라서 정확한 교통사고 분석 및 재현이 이루어지지 않는다면 당사자들간의 분쟁뿐만 아니라 사회적 문제로 대두될 수 있다. 최근 국내에서도 교통사고로 인한 피해의 심각성으로 과학적인 교통사고 재현에 관한 연구가 활성화되고 있으나 교통사고 처리의 특수성 때문에 쉽게 접근할 수 있는 자료가 제한적이고 체계적 연구 활동 또한 부족하다. 교통사고의 재현은 상당히 복잡한 작업이고 사고 종료 상황으로부터 가능한 모든 정보를 수집·분석하여 사고의 거동 및 원인을 분석하는 작업이다. 하지만 대부분의 사고 재현 방법은 노면 흔적물에 의존하므로 초동조치의 미비로 인해 소중한 자료를 놓치는 경우와 노면 흔적물이 없는 경우 교통사고 재현은 불가능하게 된다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 외국의 경우 차량 충돌사고에 관한 공학적 해석방법은 Emori(1956)에 의해 최초로 시도되면서 꾸준히 발전하여 사고재현 프로그램이 개발됐다. 하지만 모든 사고 재현 프로그램들이 사용자가 사고 재현에 필요한 인자들의 초기치를 직접 입력하여 반복적으로 수행함으로써 유사한 사고 형태를 찾아가는 사고 재현 방식으로 구성되어 있다. 따라서 처음 사용하는 사용자는 적절한 초기치를 설정하기 위해 막대한 시간적 투자를 하여야 하며 올바른 재현 여부도 판단하기 어려운 실정이다. 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 교통사고 재현 프로그램 PC-CRASH는 역적-운동량(impulse-momentum) 이론을 바탕으로 Kudlich와 Slibar(1966)가 제안한

충돌 모델을 이용하여 오스트리아에서 개발한 것으로, Cliff와 Montgomery(1996)에 의해 실차 실험을 한 결과, 효과가 입증된 프로그램이다. 하지만 충돌 인자들의 초기치 설정은 타 프로그램과 같이 사용자가 직접 입력하여야 한다. 따라서 이러한 경우 교통사고 재현에 관련된 인자에 대해 적절한 값을 추정하기가 어렵다. 본 연구의 목적은 사고재현 프로그램 PC-CRASH를 활용하기 위해 실제 발생된 대표적 교통사고 사례를 재현하고, 충돌에 관련된 인자들을 모의 실험하여 실제 사고 종료 상황에서 얻을 수 있는 기본적인 자료들 중 차량 최종위치간 거리와 자세만으로 충돌 인자들의 적절한 값을 추정할 수 있는 추정식을 개발하고 이를 이용하여 유사한 교통사고 해결 및 사고재현 프로그램 운영을 위해 초기치 설정에 투자되는 시간을 단축하는데 기여하고자 한다.

### 2. 연구범위 및 방법

본 연구는 발생하는 교통사고 중 치사율이 가장 높은 중앙선 침범 사고와 도심지역에서 흔히 발생하는 교차로 사고 중 노면 흔적이 많이 발생된 정면 충돌 사고를 대상으로 선정하였다. 교통사고 재현을 하려면 사고 진행 상황과 반대되는 역 해석을 하여야 하므로 이를 위해 여러 가지 자료가 필요하지만 그중 가장 정확하고 손쉽게 얻을 수 있는 차량 최종위치간 거리와 자세를 형태별로 크게 두 가지로 구분하여 이를 이용한 교통사고 재현 방법을 모색하였다. 최종위치 및 자세는 세부적으로 충돌 후 두 차량의 최종위치가 같은 방향으로 이동하여 정지하는 경우를 교통사고 사례 1, 충돌 후 각각 다른 방향으로 이동되어 정지한 경우를 교통사고 사례 2로 나누었다. 선택된 교통사고 사례를 상용 교통사고 재현 프로그램 PC-CRASH와 프로그램 내부에서 운용되는 최적화 기법인 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 재현하였고, 이때 모의실험에 대한 정확성을 기하기 위해 최종위치와 자세에 대한 오차율이 1% 미만일 때까지 반복 계산을 실행하였으며 재현된 상태의 오차율이 최소가 된 상태에서 실제 발생된 타이어 흔적 및 노면 상처 등 노면흔적과 이동궤적, 그리고 차량 최종위치와 자세를 비교하여 신뢰성을 입증하였다. 이를 참값이라 가정하고 교통사고 재현에 영향을 미치는 주요 충돌 인자(impact parameters)들의 인자 값을 변

화시커 교통사고 재현에 필요한 인자들의 적절한 초기치를 추정할 수 있는 추정식을 구성하였다. 추정식은 통계적 방법으로 검증하였다.

## II. 충돌 해석 모델

차량 충돌에 의한 교통사고 해석은 차량의 충돌 전 거동, 충돌 거동, 충돌 후 거동의 3단계로 나누어 해석하는 것이 일반적이며, 그중 충돌 거동은 최초 접촉(first contact), 최대 충돌(maximum engagement), 분리(separation)의 단계로 또다시 나눌 수 있다. 실제 차량간 충돌현상은 충돌점을 기준으로 압축 변형이 발생하고 속도가 같게 되는 공통속도와 반발현상에 의해 영구 변형 또는 원형의 형태로 복원되는 일련의 과정을 거친다. 이러한 과정은 매우 복잡하고 난해하므로 적절한 해석을 하기 위해서는 수학적 모델이 필요하다. 2차원 평면상에서 차량 충돌의 경우를 도해하면 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있다.

두 차량의 충돌시 역적의 교환점을 충돌점(impulse point)이라 가정하고 좌표계는 충돌점을 원점으로 충돌면의 법선방향을 n축, 접선방향을 t축으로한다. 또한  $a_1, b_1, a_2, b_2$ 는 각 차량의 무게중심으로부터 충돌점까지의 n, t방향의 회전반경이다. 뉴튼의 제2 운동 법칙은 충돌에서 차량의 운동상태를 제공해주며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $mv$ 는 운동량을 의미하며, 식(1)을 임의의 시간에 대하여 적분하면 식(2)와 같이 표현되고, 이식은 운동량의 시간 변화율로 결국

두 대의 차량이 충돌시 작용하는 역적(impulse)으로 표현 될 수 있다.

$$F_r(t) = m \frac{dv_r}{dt} \tag{1}$$

$$P_r = \int_{T_1}^{T_2} F_r dt$$

또는  $P_r = m v_r(t_2) - m v_r(t_1)$  (2)

충돌시 각 차량에 작용하는 회전력에 있어서도 식(2)와 마찬가지로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_r = \int_{T_1}^{T_2} N_r dt$$

또는  $M_r = I_r \omega_r(t_2) - I_r \omega_r(t_1)$  (3)

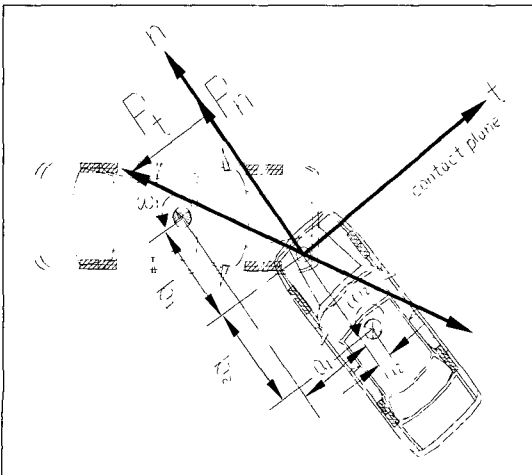
- $P_r$  : 역적
- $t$  : 시간
- $F$  : 힘
- $r$  : 방향 성분
- $I$  : 회전 관성 모멘트
- $\omega$  : 각속도

식(2)와 식(3)을 이용하여 충돌점에서 각 방향성분의 역적을 구하면 식(4)와 식(5)처럼 쓸 수 있고,  $P_n$ 과  $P_t$ 는 1차량에 작용하는 법선 및 접선의 역적이며, 같은 크기, 반대방향의 역적들이 2차량에 작용한다.

$$\begin{aligned} m_1(v_{1n} - v_{10n}) &= P_n \\ m_1(v_{1t} - v_{10t}) &= P_t \\ m_2(v_{2n} - v_{20n}) &= -P_n \\ m_2(v_{2t} - v_{20t}) &= -P_t \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} I_1(\omega_1 - \omega_{10}) &= P_n \cdot a_1 - P_t \cdot b_1 \\ I_2(\omega_2 - \omega_{20}) &= -P_n \cdot a_2 + P_t \cdot b_2 \end{aligned} \tag{5}$$

- $m$  : 차량 질량
- $v_{10n}, v_{20n}$  : 1, 2차량의 충돌 직전 n방향 무게중심 속도
- $v_{10t}, v_{20t}$  : 1, 2차량의 충돌 직전 t방향 무게중심 속도
- $v_{1n}, v_{2n}$  : 1, 2차량의 충돌 직후 n방향 무게중심 속도



<그림 1> 충돌 해석 모델

- $v_{1t}, v_{2t}$  : 1,2차량의 충돌 직후 t방향 무게중심 속도
- $\omega_{10}, \omega_{20}$  : 1,2차량의 충돌 직전 각속도
- $\omega_1, \omega_2$  : 1,2차량의 충돌 직후 각속도
- $I$  : 관성 모멘트
- $a, b$  : 성분별 회전 반경

두 차량의 충돌 후 속도를 구하기 위하여 변형이 발생하는 동안 1차량에 작용하는 역적은 2차량에 의해 야기된 힘으로 간주 할 수 있으므로 식(4)와 (5)를 각 방향 성분별 시간에 대하여 적분하면 충돌 중심의 이동량 및 회전량을 얻을 수 있다. 차량의 전체 운동량은 보존되며 접선 및 법선방향을 고려할 때 식(4)와 (5)는 식(6)과 (7), (8)로 정리하여 다시 쓸 수 있다.

$$m_1 v_{10n} + m_2 v_{20n} = m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n} \tag{6}$$

$$m_1 v_{10t} + m_2 v_{20t} = m_1 v_{1t} + m_2 v_{2t} \tag{7}$$

$$-I_1 \omega_{10} - I_2 \omega_{20} + a_1 m_1 v_{10n} - b_2 m_1 v_{10t} + a_2 m_2 v_{20n} - b_1 m_2 v_{20t} = -I_1 \omega_1 - I_2 \omega_2 + a_1 m_1 v_{1n} + b_2 m_1 v_{1t} + a_2 m_2 v_{2n} - b_1 m_2 v_{2t} \tag{8}$$

충돌점을 기준 좌표계로 1차량의 상대속도를 각 성분별로 구하면 차량의 무게중심 속도와 각속도를 합한 형태로 식(9)와 (10)으로 나타낼 수 있고, 2차량에 대해서도 같은 형태로 표현된다.

$$V_{1n} = v_{1n} + \omega_1 \cdot a_1 \tag{9}$$

$$V_{1t} = v_{1t} + \omega_1 \cdot b_1 \tag{10}$$

따라서 각 방향성분별 두 차량의 상대속도는 식(11)과 (12)처럼 표현할 수 있고, 상기식들과 조합하면 식(13)과 (14)와 같이 두 차량의 충돌 후 속도와 충돌 전 속도를 구할 수 있게 된다.

$$V_T = V_{T1} - V_{T2} \tag{11}$$

$$V_N = V_{N1} - V_{N2} \tag{12}$$

$$V_T' = V_{1t} - V_{2t} = V_T + C_1 P_t - C_3 P_n \tag{13}$$

$$V_N = V_{1n} - V_{2n} = V_N - C_3 P_t + C_2 P_n \tag{14}$$

여기서,

$$C_1 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{b_1^2}{I_1} + \frac{b_2^2}{I_2} \tag{15}$$

$$C_2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{a_2^2}{I_1} + \frac{b_2^2}{I_2} \tag{16}$$

$$C_3 = \frac{a_1 b_1}{I_1} + \frac{a_2 b_2}{I_2} \tag{17}$$

여기서  $V_T$ 와  $V_N$ 는 접선방향 및 법선방향의 충돌 전 상대 속도이며,  $V_T'$ 는 충돌 후 접선방향 상대속도,  $V_N'$ 는 충돌 후 법선방향 상대속도이다.  $C_1, C_2, C_3$ 는 질량관성과 차량의 기하학적인 형상, 그리고 충격 위치의 상대 위치에 의해 다르게 결정 될 수 있는 함수이며, 식(4), (5) (6), (7), (8)는 차량의 충돌 원리를 설명해 주는 식이다.

식(4), 식(5)로부터 속도 및 각속도에 대한 6개의 역적-운동량 방정식을 유도할 수 있고, 6개의 속도 성분과 2개의 역적을 포함한 8개의 변수가 결정되어야 한다. 따라서 2개의 구속 조건이 필요하게 되며, 각 방향성분과 충돌특성을 고려할 때, 재료적 특성에 따른 반발과 마찰에 관계될 것이다. 구속조건 부가방법은 충돌모델 설정시 크게 3가지로 나뉘며, 첫째, 충돌 종료시 충돌 접촉점에서의 상대속도를 0으로 가정한 공통속도(common velocity) 개념이고, 둘째 역적-운동량(impulse-momentum)이론을 바탕으로 충돌면의 구속조건을 법선방향(normal direction)과 접선방향(tangential direction)에 반발계수(inter-vehicle coefficient friction)를 사용하는 방법, 셋째, 역적-운동량 이론을 바탕으로 충돌면의 구속조건을 법선 방향은 반발계수, 접선방향은 마찰계수를 이용하는 방법이다. 본 논문에서 사용된 교통사고재현 프로그램 PC-CRASH의 차량 충돌 모델은 역적-운동량이론을 기반으로 세 번째 범주에 속한다. 충돌과정은 압축과정(compression phase)과 반발과정(restitution phase)의 연속적인 진행으로 이루어지며 따라서 법선방향은 차량의 재료적 변형 또는 파손에 의한 압축 및 반발시 발생할 수 있는 충돌 전, 후 상대속도의 변화 비를 시간에 대하여 적분한 역적 형태인 반발계수로 정의할 수 있고, 접선방향은 차체간

미끄럼 역적 개념의 마찰계수  $\mu$ 를 부가하여 식(20)과 같이 적용한다. 반발계수  $e$ 는 차량의 재료적 특성에 따라 다르지만 충돌 후 상대속도의 크기가 충돌 전 상대속도의 크기보다 크지 않으므로 일반적으로  $0 \leq e \leq 1$  사이 값을 갖는다. 즉 차량의 충돌 현상은 소성충돌에 가깝고,  $e=1$ 이라는 것은 완전 탄성충돌을 의미한다. 반발계수를 역적의 형태로 표현하면 식(18)와 같고, 총 역적의 형태로 표현하면 식(19)과 같이 쓸 수 있다.

$$e = \frac{P_R}{P_C} = \int m \frac{|v_2 - v_1|}{|v_{20} - v_{10}|} dt \quad (18)$$

$$P_{total} = P_C + P_R = P_C(1 + e) \quad (19)$$

- $P_{total}$  : 충돌시 총 역적
- $P_C$  : 압축과정시 역적
- $P_R$  : 반발과정시 역적

한편, 차량이 정면충돌과 같은 형태의 충돌현상은 반발계수만으로 표현이 가능하나, 예각이나 둔각의 형태로 충돌 현상이 발생할때 차량간 재료 표면의 마찰현상이 발생되고, 따라서 또 다른 구속조건인 마찰계수를 식(20)과 같이 부가한다.

$$P_t = \mu P_n, \text{ 또는 } \mu = \frac{P_t}{P_n} \quad (20)$$

따라서 두가지 구속조건을 이용하여 역적을 다시 표현하면 식(21)과 (22)로 표현될 수 있고 이식을 식(4), (5)와 식(13), (14)를 이용하여 다시 풀면 충돌 전, 후 두 차량의 속도를 구할 수 있게 된다.

$$P_t = (1+e) \frac{V_N C_3 + V_T C_2}{\mu (C_3^2 - C_1 C_2)} \quad (21)$$

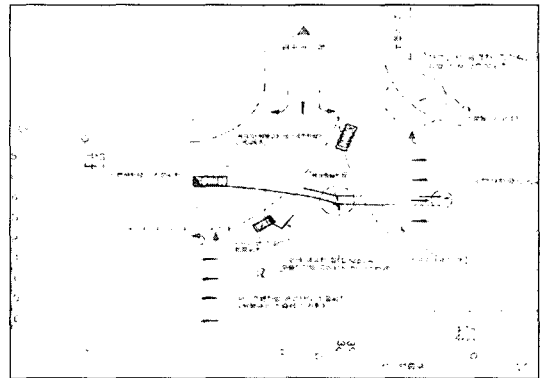
$$P_n = (1+e) \frac{V_N C_1 + V_T C_3}{\mu (C_3^2 - C_1 C_2)} \quad (22)$$

### III. 교통사고 사례 재현

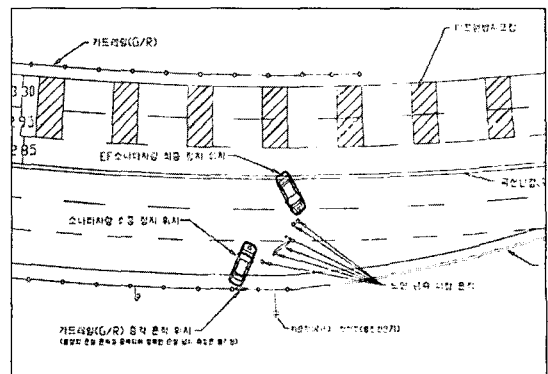
#### 1. 교통사고 사례 선정

차량의 충돌사고는 유형별로 세분하면 크게 정면충

돌, 측면충돌, 추돌 등으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 국내에서 흔히 발생하는 실제 교통사고 사례 중 도심에서 빈번하게 발생하는 교차로 사고와 치사율이 가장 높은 정면 충돌사고를 선정하여 연구하였다. 차량 충돌 시 여러 요인에 의해 차량의 최종위치 및 자세가 여러 가지 모양으로 나타날 수 있지만, 충격위치로부터 충돌 후 이동현상 및 최종위치 형태별로 나누었다. 교통사고 사례 1은 교차로에서 흔히 발생할 수 있는 두 차량이 충돌 후 같은 방향으로 이동하여 분리된 채 최종 위치한 경우이며, 교통사고 사례 2는 정면 충돌사고 경우로, 두 차량의 충돌 후 서로 다른 방향으로 이동하여 분리된 채 최종 위치한 경우이다. 사고재현에 보다 정확성을 기하기 위해 충돌 후 노면에 발생된 타이어 흔적 및 노면상처(road scar)가 많은 사례를 선택하여 차량의 거동과 비교하여 분석할 수 있도록 하였다. 사고의 상황도는 <그림 2>, <그림 3>과 같다.



<그림 2> 교통사고 사례 1의 사고 상황도



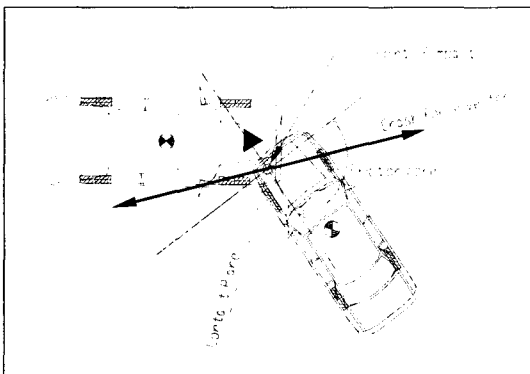
<그림 3> 교통사고 사례 2의 사고 상황도

## 2. 교통사고 재현을 위한 충돌 인자

올바른 교통사고 재현을 위해서는 사고에 대한 적절한 인자 값을 설정해야 한다. 충돌 해석을 수행하는 목적은 충돌 현상과 충돌 후 정보를 가지고 사고가 발생할 수 있는 충돌 전·후 인자들의 적절한 조건을 찾아 사고상황을 올바르게 판단하는 것이다. 그 과정은 매우 복잡하며 사고 재현에 필요한 인자들도 방대하다 할 수 있다. 교통사고와 관련된 인자들을 크게 도로적 측면, 인적 측면과 차량적 측면으로 나누어 표현 할 수 있지만 세부적인 모든 인자들을 이용하여 사고 재현을 하기는 사실상 불가능하다. 따라서 충돌 특성에 영향을 미치는 동적 인자를 한정하여 해석하는 것이 바람직하다. 충돌 거동 현상에 대하여는 차량과 노면과의 마찰 계수 및 타이어의힘 등 여러 인자로 또다시 나눌 수 있지만, 본 논문에서는 동적 거동에 필요한 타이어와 노면과의 마찰계수는 시뮬레이션을 통해 얻어진 값으로 고정시켰고 충돌 특성에 영향을 미치는 인자들을 가지고 전도사고와 무관한 2차원적 해석으로 한정하였다. 충돌 특성에 필요한 인자들은 PC-CRASH 내부 모듈에 있는 인자들로 <표 1> 및 <그림 4>와 같다.

<표 1> 충돌 인자들

충돌 인자		기호	단위
충돌 전 인자	충돌 직전 속도	V	km/h
	충돌 직전 자세(각)	$\theta$	deg
충돌 인자	충돌 위치	$X_i$	m
		$Y_i$	
	접촉면 각	$\psi$	deg
	복원 계수	e	-
	차량간 마찰계수	$\mu$	-



<그림 4> 충돌 인자들

## 3. 교통사고 재현 방법 및 결과

교통사고 재현 방법은 노면흔적을 분석하여 차량의 거동현상을 분석하는 동특성 분석과 차량 파손부위를 분석하는 충돌특성 해석으로 나누어질 수 있다. 충돌 특성 해석은 차량의 손상깊이, 손상 폭, 힘의 방향 등을 토대로 추상적으로 추정하여 분석자의 능력에 따라 다양각색으로 분석된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 사고 재현 프로그램이 만들어졌으나 교통사고 재현은 사고 종료 후 자료들을 가지고 역 추정하는 방법밖에 없으므로 이러한 고전적 해석방법과 사고재현 프로그램의 정밀한 계산 능력을 혼합하여 재현하고자 하였다. 선정된 교통사고 사례를 PC-CRASH와 내부에서 운영되는 유전자 알고리즘을 사용하여 충돌특성에 관련된 인자들을 적절히 조합하여 실제 발생된 사례의 최종위치 및 자세와 시뮬레이션 결과의 오차율 1% 미만인 될 때까지 반복하여 실행하였다. 오차율은 최소자승법(mean squares method)에 의해 가중치(weighted total error)가 최소가 되게 하는 방법으로 이때 가중치는 차량의 최종 중심 위치와 자세가 되며 식(23)과 같이 표현되고, 식(24)과 식(25)은 실제 차량의 위치 및 자세와 모의실험에 의한 차량의 최종위치와 자세간의 차이에 대한 가중치이다. 또한 오차율이 최소가 된 상태에서 실제 발생된 타이어 흔적 및 노면 상처 등의 노면 흔적들과 비교하여 신뢰성을 입증하였다.

총 가중치 오차율(Q)

$$Q = \frac{\sqrt{\sum_i (W_i \cdot X_i)^2}}{\sum_i W_i^2} \cdot 100\% \quad (23)$$

$W_i$  : 인자들의 가중치

$X_i$  : 관측치와 계산치(모의실험)의 차이

최종위치 및 자세에 대한 오차율 ( $X_i$ )

$$X_{Rest\ position} = \frac{\|P_{RestSi} - P_{RestActual}\|}{\|P_{RestActual} - P_{ImpactActual}\|} \quad (24)$$

$X_{Rest\ position}$  : 최종위치에 대한 거리 오차

$P_{RestSi}$  : 모의실험 결과치(최종위치)

$P_{RestActual}$  : 관측치(최종위치)

$P_{ImpactActual}$  : 충격 위치(관측치)

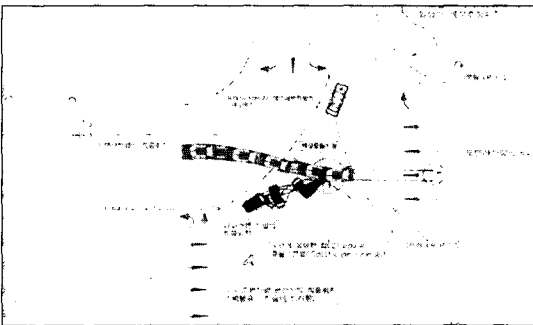
$$X_{Rest\ Heading} = \frac{ARCCOS(D_{Rest\ Si} \cdot D_{Rest\ Actual})}{\pi} \quad (25)$$

- $X_{Rest\ Heading}$  : 최종위치에 대한 자세(각) 오차
- $D_{Rest\ Si}$  : 모의실험 결과치(최종위치 자세)
- $D_{Rest\ Actual}$  : 관측치(최종위치 자세)

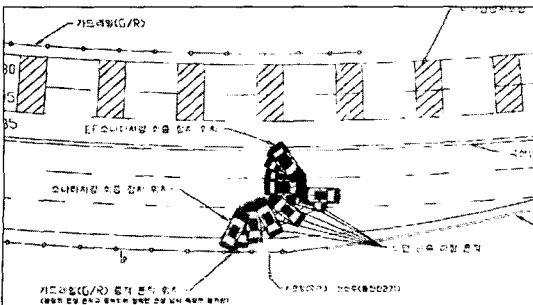
〈표 2〉 교통사고 사례별 재현된 충돌 인자 값

교통사고 사례 재현			
	인자값	교통사고사례1	교통사고사례2
충돌전 인자	$V_1$	72.91	139.01
	$V_2$	11.03	86.01
	$\theta_1$	180.08	178.47
	$\theta_2$	43.41	1.57
충돌 인자	$\mu$	0.94	0.47
	$e$	0.08	-0.1
	$\psi$	144.02	232.81
	$X_i$	45.74	35.07
	$Y_i$	-33.36	-21.86
최종 위치 인자	$d'_{12}$	10.74	9.2
	$\theta'_{12}$	146.32	244.87
Total error	-	1.0%	0.7%

$d'_{12}$  : 차량 최종위치간 거리  
 $\theta'_{12}$  : 차량 최종위치간 자세(각)



〈그림 5〉 교통사고 사례 1의 사고 재현도



〈그림 6〉 교통사고 사례 2의 사고 재현도

## Ⅳ. 모의실험을 통한 충돌특성 주요인자들의 추정식

### 1. 모의실험 방법

실험방법은 재현된 7개의 충돌 인자 값 중 1개의 초기 인자 값만 변화를 주고, 나머지 6개의 인자 값은 고정시킨 후 충돌 모의실험을 통해 차량의 최종위치간 거리와 자세가 어떻게 변화하는지 알아보았다. 최종위치간 거리는 두 차량간의 무게 중심 거리를 뜻하며, 최종위치간 자세는 두 차량간의 전면이 이루는 각 차이를 의미한다. 인자 값의 변화 범위는 교통사고 재현 결과에 의해 얻어진 데이터를 참값이라 가정하고 이 값을 기준으로 상, 하 일정한 간격으로 변화를 주었다. 실험범위는 반발계수와 마찰계수의 경우 실차 충돌 실험 결과와 비교하여 재현된 인자 값이 최대 값 혹은 최소 값에 가까우면 이 값에서 상방향 또는 하방향으로 일정한 변화를 주어 실험하였고, 접촉면 각은 실제 파손부위를 고려할 때, 차량 전면을 기준으로 90°에서 180°범위를 넘지 않을 것으로 판단하고 이 범위 내에서 실험을 하였다. 충돌 각은 충돌 전 차량들의 전면 방향을 기준으로 일정한 변화를 주었고, 속도 방향은 전면이 향하는 방향과 같다는 가정하에 정면 충돌사고를 감안하여 90°에서 180°사이 값으로 하였다. 특히 충돌 방향에 따라 두 차량이 충돌 후 이동하는 과정에서 2차 및 3차 충돌을 고려하여 먼저 일정한 변화를 주어 시뮬레이션 한 후, 이동과정 시 충돌 횟수가 가능한 같게 되는 범위 내에서 실험하였다. 속도 차 변화의 경우 양 차량의 속도 차를 등간격으로 일정하게 변화를 주었으며, 충돌위치의 경우 X축과 Y축으로 변화를 각각 나누어 실험하였다.

〈표 3〉 교통사고 사례 1의 충돌 인자 변화 범위

교통사고 사례 1							
인자		하향 변화		초기치	상향 변화		변화범위
$V_{12}$	-	42	52	62	72	82	$\pm 10\text{km/h}$
$\theta_{12}$	-	127.47	132.47	136.47	136.47	147.47	$\pm 5^\circ$
$X_i$	-	45.54	45.64	45.74	45.84	45.94	$\pm 0.1\text{m}$
$Y_i$	-	-33.56	-33.46	-33.36	-33.26	-33.16	$\pm 0.1\text{m}$
$\psi$	-	124.02	134.02	144.02	154.02	164.02	$\pm 10^\circ$
$e$	-	0.02	0.05	0.08	0.11	0.14	$\pm 0.03$
$\mu$	0.14	0.34	0.54	0.74	0.94	-	$\pm 0.3$

〈표 4〉 교통사고 사례 2의 충돌 인자 변화 범위

교통사고 사례 2						
인자	하향 변화		초기치	상향 변화		변화범위
$V_{12}$	33	43	53	63	73	$\pm 10\text{km/h}$
$\theta_{12}$	156.9	161.9	166.9	171.9	176.9	$\pm 5^\circ$
$X_i$	34.87	34.97	35.07	35.17	35.27	$\pm 0.1\text{m}$
$Y_i$	-22.06	-21.96	-21.86	-21.76	-21.66	$\pm 0.1\text{m}$
$\Psi$	227.81	230.31	232.81	235.31	237.81	$\pm 2.5^\circ$
$e$	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	$\pm 0.1$
$\mu$	0.27	0.37	0.47	0.57	0.67	$\pm 0.1$

2. 충돌특성 주요 인자들의 추정식 구성

교통사고 재현은 사고 진행 현상과 반대로 역 해석을 하여야 하므로 사고 후 얻어질 수 있는 자료로써 재현이 가능하여야 한다. 따라서 사고 후 가장 손쉽게 얻을 수 있는 자료인 차량간의 최종위치간 거리 및 자세(각)로부터 인자 값을 추정할 수 있는 추정식을 구성하여, 사고 재현 프로그램 사용 시 초기값 설정에 적용하고자 하였다.

본 연구에서 수행한 모의실험 결과를 가지고 최소

자승법에 의해 각 사례마다 최종위치간 거리 및 자세만을 독립변수로 하여 인자들을 추정할 수 있는 2차식을 구성하였다. 추정식은 SPSS통계프로그램을 이용한 회귀분석에 의하여 회귀식 모형으로 구성되었으며 결정계수( $R^2$ )로 추정식을 통계적으로 검증하였다. 회귀분석이란 변수들의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석 방법을 말한다.

회귀 모형식은 식(26)와 같이 정규 방정식(normal equations)으로 표현되고, 각 각의 사례별 추정식에 필요한 계수인 최소자승 추정값(least squares estimates)은 〈표 5〉 및 〈표 6〉에 나타내었다.

$$\eta_n = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i,j=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j t \quad (26)$$

$$\eta_n : V_{12}, \theta_{12}, X_i, Y_i, \mu, e, \Psi$$

$$X_1 : d_{12}, \quad X_2 : \theta_{12}$$

여기서  $\eta_n$ 은 주요 충돌 인자들이며,  $X_1, X_2$ 는 차량간 최종위치 및 자세를 의미한다.

〈표 5〉 교통사고 사례 1의 최소 자승 추정치

인자 \ 계수	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$\beta_{12}$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_0$	$R^2$
$V_{12}$	1.8926	0.0034	-0.1722	2.2901	0.2716	-0.5387	0.99
$\theta_{12}$	-11.1290	-0.05785	1.1699	-0.0087	9.9396	-745.931	0.98
$X_i$	-0.8181	-0.00026	0.0295	11.4056	-0.2146	7.6870	0.99
$X_j$	-0.1546	0.0016	-0.0144	6.7920	-0.6107	-0.0180	0.99
$\mu$	-198.8489	-12.192085	19.2293	120.61539	2500.8427	30.75894	0.95
$e$	-0.1128	-0.9 E-7	0.00024	0.01075	-0.0010	-0.0095	0.99
$\Psi$	0.0018115	2.1566 E-6	-0.106757	0.0008162	-0.000103	1.754388	0.90

〈표 6〉 교통사고 사례 2의 최소 자승 추정치

인자 \ 계수	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$\beta_{12}$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_0$	$R^2$
$V_{12}$	0.3668	0.0031	-0.0260	-1.7923	-0.3584	-0.0036	0.99
$\theta_{12}$	-1.0831	-0.0029	0.0754	1.5017	1.0303	5.4398	0.99
$X_i$	-0.4005	0.000004	0.0010	7.2674	-0.0081	1.5563	0.99
$Y_i$	0.1449	-0.0000002	0.0033	-3.5617	-0.0329	-0.6286	0.99
$\mu$	0.0845	-0.00531	-0.042334	4.0809	2.5216	-15.4333	0.95
$e$	-0.00016	-0.000016	0.00081	-0.2116	0.0163	0.0019	0.99
$\Psi$	0.07598	-0.001903	0.0013	-2.5650	0.78857	-64.2760	0.98



### 3. 추정식 초기치 설정방법 및 유효성

최종위치간 거리와 자세만으로 구성된 추정식을 이용하여 속도차를 추정할 경우, 여러 가지 경우가 나올 수 있다. 즉, 10km/h의 속도차를 구한 경우 각 차량의 속도는 10km/h와 20km/h, 20km/h와 30km/h 등 여러 가지 경우가 발생할 수 있어, 초기값 설정에 어려움이 있다.

따라서 속도차의 선택 폭을 줄이기 위해 충돌 위치에서 각 차량이 최종위치까지 이동된 거리만을 가지고 충돌 후 각 차량의 속도를 추정하여 비교하는 방법을 추가하였다. 충돌 위치는 노면상에 발생한 타이어 흔적 및 노면상처로 대략적인 위치를 파악할 수 있다. 충돌 위치에서 최종위치까지 거리는 측정에 의해 결정된다. 이동 거리만으로 충돌 후 속도를 추정하는 방법은 노면상을 활주하는 차량의 타이어 및 차체가 노면과의 마찰에 의해 차량의 운동에너지가 소산된다는 에너지 보존의 법칙으로부터 유도되어진다. 이때 운동에너지 소산에 의한 감속은 견인계수(drag factor)에 의해 추정할 수 있으며, 이것은 타이어와 노면 마찰, 그리고 노면 구배를 모두 포함하고 있다.

$$V_i = \sqrt{(V_e^2 - 2 \cdot f \cdot g \cdot s)} \quad (27)$$

- $V_i$  :  $i$  지점에서의 충돌 직후 속도
- $V_e$  : 최종 속도
- $f$  : 견인계수(drag factor)
- $g$  : 중력 가속도(9.8m/sec<sup>2</sup>)
- $s$  : 충돌 후 최종위치까지의 이동거리(m)

식(27)을 이용하여  $V_i$ 를 추정할 경우, 충돌특성 주요 인자 중 속도 차에 대한 초기치 설정 폭이 제한적으로 선택될 수 있다. 하지만 이동거리에 의한 충돌 후 추정속도는 차량 파손에 의한 에너지 손실이 고려되지 않은 속도이므로 충돌 전 속도를 설정할 때는 이동거리에 의해 추정된 충돌 후 속도와 비교하여 충돌 후 속도보다 크게 초기치를 설정하면 초기값을 제한적으로 선택할 수 있다. <표 7>과 <표 8>은 상기 연구한 두 가지의 각 사례들을 두 차량의 최종위치간 거리 및 자세만으로 구성된 추정식으로 인자 값의 초기치를 재 차 설정한 후, 유전자 알고리즘을 이용하여 검증한 결과이다. 무작위(random) 값은 교통사고

<표 7> 교통사고 사례 1에 대한 통계적 검증

인자	반복 횟수		에러율	
	설정치	임의치	설정치	임의치
$V_{12}$	35	48	1.3%	1.3%
$\theta_{12}$	2	17	1.4%	3.8%
$X_i$	27	54	0.8%	0.8%
$Y_i$	24	38	0.8%	0.8%
$\psi$	2	5	0.8%	0.8%
$e$	1	9	0.8%	0.8%
$\mu$	5	9	2.3%	2.3%

<표 8> 교통사고 사례 2에 대한 통계적 검증

인자	반복 횟수		에러율	
	설정치	임의치	설정치	임의치
$V_{12}$	32	60	1.8%	1.8%
$\theta_{12}$	22	34	3.8%	48.3%
$X_i$	18	28	1.9%	1.9%
$Y_i$	31	33	1.9%	1.9%
$\psi$	2	5	2.3%	2.3%
$e$	2	11	2.1%	2.1%
$\mu$	5	10	2.1%	2.1%

재현 전문가들 중 일부가 제시한 인자값들의 평균치로 일반인이 처음 설정하여 사용할 경우보다 정확도가 높은 값이다. <표 7>과 <표 8>에서 보듯이 추정식을 이용할 경우 반복횟수 및 오차율이 보다 향상된 것을 알 수 있다.

### V. 결론

교통사고 재현을 위한 사고 재현 프로그램 PC-CRASH를 사용하기 위해 충돌 특성 주요 인자들에 대한 초기치 설정문제는 가장 어렵고, 많은 시간이 투자되는 부분으로 모의실험을 통한 해석에 있어서 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 본 연구에서는 실제 발생한 교통사고 사례를 이용하여 교통사고 재현을 위한 차량 충돌특성 주요 인자들의 초기치를 결정할 수 있는 추정식을 구성하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 교통사고 사례별 충돌특성 인자들에 대하여 차량 최종위치간 거리 및 자세만으로 역 추정을 할 수 있는 다음과 같은 추정식을 구성하였다.

$$\eta_n = \beta_0 + \sum_{i=0}^2 \beta_i X_i + \sum_{i>j}^2 \beta_{ij} X_i X_j$$

$$\eta_n : V_{12}, \theta_{12}, X_i, Y_i, \mu, e, \Psi$$

$$X_1 : d_{12}, X_2 : \theta_{12}$$

- (2) 교통사고 사례별 충돌특성 인자들에 대한 추정식은 결정계수( $R^2$ )로 통계적 검증을 하였다.
- (3) 2가지 사례를 추정식으로 다시 초기치 설정한 경우와 무작위 값을 적용한 경우를 비교 하였을때, 사고 재현 프로그램 활용 시 재현 시간 단축 효과를 PC-CRASH 내부에서 운영되는 유전자 알고리즘 반복횟수로 검증하였다.

실제 교통사고를 분석·규명하기 위하여 여러 가지 방법을 사용하나, 그 중 가장 경제적이며 공학적 해석이 용이한 사고 재현 프로그램의 이용은 보다 정확한 해석을 해 줌으로써 교통사고의 명확성을 더해 줄 것이며, 나아가 국민의 복진 증진은 물론 선진교통문화 정착에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 도로교통안전관리공단(2001), "2001판 교통사고 통계분석" p.63.
2. 경찰청·도로교통안전관리공단(2001), "교통사고 조사 전문화교육 1".
3. Emori R.(1968), "Analytical Approach to Automobile Collisions", SAE No.680016.
4. Cambell K. L.(1974), "Energy Basis for collision Severity", SAE No. 740565.
5. Ishikawa Hirotoosh(1993), "Impact Model for Accident Reconstruction - Normal and Tangential Restitution Coefficients", SAE Paper No. 930654.
6. Ishikawa Hirotoosh(1994), "Impact Center and Restitution Coefficients for Accident Reconstruction", SAE Paper No. 940564.
7. Steffan H. and Moser, A.(1996), "The Collision

and Trajectory Models of PC-CRASH", SAE paper 960886.

8. Cliff W. E. and Montgomery D. T.(1996), "Validation Of PC-CRASH - A Momentum-Based Accident Reconstruction Program", SAE paper 960885.
9. Branch R. M.(1991), "Mechanical Impact Dynamics - Rigid Body Collision", John Wiley And Sons, New York.
10. 한인환(1994), "마찰력을 수반된 자동차 충돌의 동역학적 해석", 한국자동차공학회 논문집, 제2권 제2호, pp.1~11.
11. 한인환(1997), "자동차 사고 재구성을 위한 충돌 해석", 자동차사고 과학연구회 논문집, pp.39~55.
12. Lynn B. Fricke(1990), "Traffic Accident Reconstruction", Northwestern University Traffic Institute, USA.
13. Neptune J. A., Flynn J. E.(1995), Chavez P. A., and Underwood H. W., "Speed from Skids : A Modern Approach", SAE paper 950354.
14. Andreas Moser and Hermann Steffan(1998), "Automatic Optimization of Pre-Impact Parameters Using Post Impact Trajectories and Rest Positions", SAE paper 980374.
15. Dr. Steffan Datentechnik(1999), "PC-CRASH 6.0 Operating Manual", Austria.
16. 박성현(1990), "현대실험계획법", 영지문화사.
17. 이학식·김영(2001), "SPSS 10.0 매뉴얼", 법문사.

✉ 주 작 성 자 : 하왕수

✉ 논문투고일 : 2003. 1. 13

논문심사일 : 2003. 2. 10 (1차)

2003. 4. 4 (2차)

심사판정일 : 2003. 4. 4

✉ 반론접수기한 : 2003. 8. 31

# 박사학위논문소개 · 교통관련 국제회의 안내

## 박사학위논문소개

시간간격에 대한 연구를 통한 고속도로상의 정체 교통류 모형화

김태완

비용-효율적인 중앙분리대 설치여부판단기준 개발에 관한 연구

박제진

교통안전관리시스템개발을 위한 위험사상의 정량적 평가에 관한 연구

빈미영

## 교통관련 국제회의 안내

