

# 스키드마크 및 요마크를 이용한 차량사고재구성

이승종<sup>#</sup>, 하정섭<sup>\*</sup>

## The Vehicle Accident Reconstruction using Skid and Yaw Marks

Seung-Jong Yi<sup>#</sup>, Jungsub Ha<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

The traffic accident is the prerequisite of the traffic accident reconstruction. In this study, the traffic accident (forward collision) and traffic accident reconstruction (inverse collision) simulations are conducted to improve the quality and accuracy of the traffic accident reconstruction. The vehicle and tire models are used to simulate the trajectories for the post-impact motion of the vehicles after collision. The impact dynamic model applicable to the forward and inverse collision simulations is also provided. The accuracy of impact analysis for the vehicular collision depends on the accuracy of the coefficients of restitution and friction. The neural network is used to estimate these coefficients. The forward and inverse collision simulations for the multi-collisions are conducted. The new method for the accident reconstruction is proposed to calculate the pre-impact velocities of the vehicles without using the trial and error process which requires the repeated calculations of the initial velocities until the forward collision simulation satisfies with the accident evidences. This method estimates the pre-impact velocities of the vehicles by analyzing the trajectories of the vehicles. The vehicle slides on a road surface not only under the skidding during an emergency braking but also under the steering. A vehicle oversteering or cornering with excessive speed loses the traction and leaves the yaw marks on the road surface. The new critical speed formula based on the vehicle dynamics is proposed to analyze the yaw marks and shows smaller errors than ones of the existing critical speed formula.

**Key Words** : traffic accident reconstruction(사고재구성), pre-impact(충돌전), post-impact(충돌후), oversteer(과도한 스티어링 조작), critical speed(임계속도), skid mark(스키드마크), yaw mark(요마크), coefficient of restitution(반발계수), coefficient of friction(마찰계수)

### 1. 서론

과학적인 차량충돌사고 재구성을 위해서는 첫 번째 충돌 전/후 및 당시의 충돌지점과 속도를 알아내야 한다. 이를 위해서 충돌상황에 대한 물리

적 증거 즉 차량 및 노면상태에 대한 데이터를 수집하여야 한다. 즉 사고재구성을 위해서 사고현장의 흔적들과 파편들 그리고 최종정지위치를 조사하여야 한다.

차량충돌시뮬레이션은 사고재구성을 위한 예

접수일: 2003 년 5 월 15 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일

# 교신저자: 한양대학교 자동차공학과  
E-mail sjyi@hanyang.ac.kr, Tel. (02) 2290-0454

\* 한양대학교 자동차공학과

비작업이기때문에 사고재구성의 정확성을 향상시키기 위하여 충돌시뮬레이션과 사고재구성을 함께 수행하여야 한다. 이를 위해서 차량충돌실험 데이터를 이용하거나 해석적인 방법들을 사용하였다.

유한요소법을 이용한 프로그램들은 잘 정의된 충돌상황 아래서 차량의 변형을 계산할 수 있다. 그러나 이 프로그램들은 차량의 구조에 대한 상세한 정보와 성능이 뛰어난 컴퓨터를 요구하기 때문에 사고재구성에 사용하기에는 적합하지 않다.

이에 여러 연구자들이 해석적인 방법을 이용하여 정확한 사고재구성을 위하여 갖가지 변수들을 사용하였다. Cannon<sup>1</sup>은 반발계수를 사용하였고, Fricke<sup>2</sup>와 Neptune<sup>3</sup>은 타이어의 흔적을 분석하여 차량의 진행경로와 회전정도를 구하여 사고재구성을 하였다. Han<sup>4</sup>은 사고재구성을 위하여 전/후 충돌 동적모델을 개발하였다. 그러나 이들 방법들은 단일변수 사용에 따른 한계를 드러내었다. 또한 EDVAP 및 PC-CRASH 와 같은 상용패키지들은 충돌전 속도를 추정하기 위하여 노면의 타이어 흔적 및 증거들이 일치할 때까지 충돌 시뮬레이션을 계속하여야 하기 때문에 사고재구성에 과도하게 많은 시간을 요구한다.<sup>5,6,7</sup>

한편 차량충돌의 물리적 증거인 타이어마크는 차량이 진행방향으로 미끄러질 때 발생하는 스키드마크와 진행방향 측면으로 미끄러질 때 발생하는 요마크로 분류할 수 있다. 즉, 스키드마크가 브레이크 조작에 의해서 바퀴가 잠김으로써 발생하는 종방향미끄럼흔적이라면, 요마크는 핸들조작에 의해서 발생하는 횡방향미끄럼흔적이다. 따라서 요마크는 회전하기 위해서 핸들을 조작시에 원심력을 이기지 못해서 발생하게 된다.<sup>2,8</sup> 횡방향의 가속도에 의하여 발생하는 요마크는 타이어의 형태와 크기, 공기압, 노면의 상태, 차량의 거동특성에 대한 함수이다. 요마크가 발생할 때 차량의 운동은 발산한다.<sup>2</sup> 기존의 요마크 해석방법은 원심력과 구심력이 같다는 조건으로부터 비교적 단순한 요마크속도추정식(critical speed formula)을 사용하였다. Dickerson<sup>9</sup> 등은 차량의 슬립각이나 횡방향가속도가 클 때 위의 요마크속도추정식이 실험결과와 많은 오차가 있음을 보였다. Brach<sup>10</sup>는 가속상태, 등속상태, 감속상태 중에서 감속상태에서 많은 오차가 발생함을 보였다.

본 연구의 목표는 차량의 사고재구성을 위해서 물리적 증거인 스키드마크 및 요마크를 이용하

여 정확도 높은 충돌 및 역충돌 시뮬레이션을 수행하는데 있다. 이를 위해서 충돌후의 차량궤적을 분석함으로써 충돌전의 속도를 추정하였고, 신경망을 이용해서 반발계수와 마찰계수를 추정하였다. 또한 차량의 거동상태를 포함하는 새로운 요마크 속도추정식을 제안하였다.

## 2. 시뮬레이션 모델

차체를 사각형 강체로 가정한 Fig. 1 과 같은 차량모델과, 모든 타이어는 같고 타이어에 전달되는 힘은 직접적으로 차량의 무게중심에 전달된다고 가정한 타이어모델을 사용하였다. 시뮬레이션 모델에서 외력으로 중력과 타이어와 노면 사이의 마찰력만을 고려하였다. 차량은 충돌후에 감속운동을 하기 때문에 현가장치와 엔진 그리고 공기저항의 영향은 무시하였다.

차량모델은 종방향, 횡방향, 요잉방향으로 속도 성분을 가지며 3 개의 좌표계, 즉 지면에 고정된 전체좌표계(global coordinate system  $XY$ )와 차량의 무게중심에 고정된 차량좌표계 (body coordinate system  $x'y'$ ) 그리고 각 타이어에 고정된 타이어좌표계 (tire coordinate system  $x''y''$ )를 사용하여 모델링하였다.

차량좌표계에서 차량의 종방향과 횡방향 힘은 다음과 같다.

$$F_y' = R(\delta)F^1 + R(\delta)F^2 + F^3 + F^4 \quad (1)$$

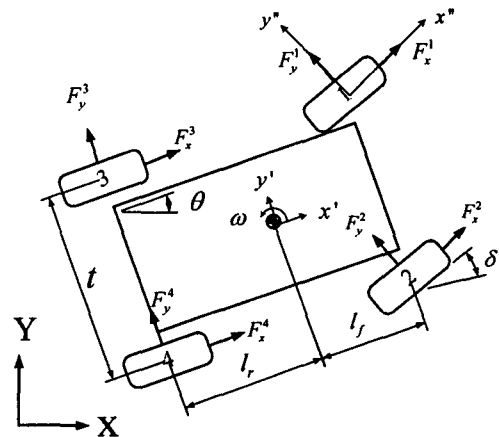


Fig. 1 Vehicle model

여기서  $\mathbf{F}_r^v$  는 종방향 및 횡방향 힘,  $\mathbf{F}^i$  는 타이어 좌표계에서  $i$  번째 타이어의 힘, 그리고  $\mathbf{R}(\delta)$  는 타이어좌표계에서 차량좌표계로의 변환행렬을 나타낸다.

차량좌표계의 힘 성분들을 전체좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_a^v = \mathbf{R}(\theta)\mathbf{F}_r^v \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{F}_a^v$  는 전체좌표계에서의 힘 벡터이다.

차량의 무게중심에 대한 모멘트  $M^v$  는 다음과 같다.

$$M^v = \begin{bmatrix} -\frac{t}{2} & l_f & \frac{t}{2} & l_r & -\frac{t}{2} & -l_r & \frac{t}{2} & -l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\delta)\mathbf{F}^1 \\ \mathbf{R}(\delta)\mathbf{F}^2 \\ \mathbf{F}^3 \\ \mathbf{F}^4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $t$  는 트랙의 길이,  $l_f$  는 중심에서 앞차축까지의 거리,  $l_r$  는 중심에서 뒤차축까지의 거리를 나타낸다.

차량이 종방향이나 횡방향으로 가속도를 가지면 각 바퀴에서 하중전이(weight shift)가 일어난다. 이것을 고려하여 차량의 각 바퀴에 걸리는 수직항력( $N^i$ )을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N^1 &= \frac{mg}{2} \frac{l_r}{l_f + l_r} - \frac{m\dot{v}_x h}{2(l_f + l_r)} - \frac{m\dot{v}_y h}{t} \frac{c_f}{c_f + c_r} \\ N^2 &= \frac{mg}{2} \frac{l_r}{l_f + l_r} - \frac{m\dot{v}_x h}{2(l_f + l_r)} + \frac{m\dot{v}_y h}{t} \frac{c_f}{c_f + c_r} \\ N^3 &= \frac{mg}{2} \frac{l_f}{l_f + l_r} + \frac{m\dot{v}_x h}{2(l_f + l_r)} - \frac{m\dot{v}_y h}{t} \frac{c_r}{c_f + c_r} \\ N^4 &= \frac{mg}{2} \frac{l_f}{l_f + l_r} + \frac{m\dot{v}_x h}{2(l_f + l_r)} + \frac{m\dot{v}_y h}{t} \frac{c_r}{c_f + c_r} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $m$  은 차량의 질량,  $h$  는 차량의 중력중심

높이,  $c_f, c_r$  는 현가틸트강성계수를 나타낸다.

각 타이어의 슬립각  $\alpha$  는 조향각과 타이어의 실제 진행방향 사이의 각으로 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha^1 &= \tan^{-1} \left( \frac{v_{y'} + l_f \omega}{v_{x'} - \frac{t}{2} \omega} \right) - \delta \\ \alpha^2 &= \tan^{-1} \left( \frac{v_{y'} + l_f \omega}{v_{x'} + \frac{t}{2} \omega} \right) - \delta \end{aligned} \quad (5)$$

$$\alpha^3 = \tan^{-1} \left( \frac{v_{y'} - l_r \omega}{v_{x'} - \frac{t}{2} \omega} \right)$$

$$\alpha^4 = \tan^{-1} \left( \frac{v_{y'} - l_r \omega}{v_{x'} + \frac{t}{2} \omega} \right)$$

여기서  $\omega$  는 차량의 회전각속도 이다.

대부분의 타이어모델은 부가적인 타이어좌표계를 필요로 한다. 이 좌표계의 각 축들은 타이어의 종방향과 횡방향 힘과 수직항력에 대응하도록 설정된다. 본 연구에서는 PC-CRASH 타이어모델을 사용하였다.

### 3. 충돌 운동방정식

본 연구에서는 사고재구성을 위한 충돌해석에 적합한 단순한 모델을 사용하였다. 이 모델은 차량의 부분적인 변형을 계산하는 것이 아니라, 충돌시의 차량의 운동을 분석하는 것이 목적이며 다음과 같이 가정을 하였다. 충돌동안 차량의 모멘텀은 보존되고 타이어의 힘과 외력은 무시한다. 또한 차량의 질량과 무게중심 그리고 요관성모멘트는 변하지 않는다. 그리고 충격력의 합은 충돌중심에 집중된다.

차량의 충돌을 정확하게 분석하기 위해서는 반발계수와 마찰계수를 정확하게 구하여야 한다.<sup>1</sup> 이들 계수들을 정확하게 추정하기 위하여 신경망을 사용하였다.

#### 3.1 충돌 운동방정식

충돌직후의 속도와 사고재구성에서 충돌직전의 속도를 구하기 위하여 Fig. 2 와 같은 충돌을 고려하였다.

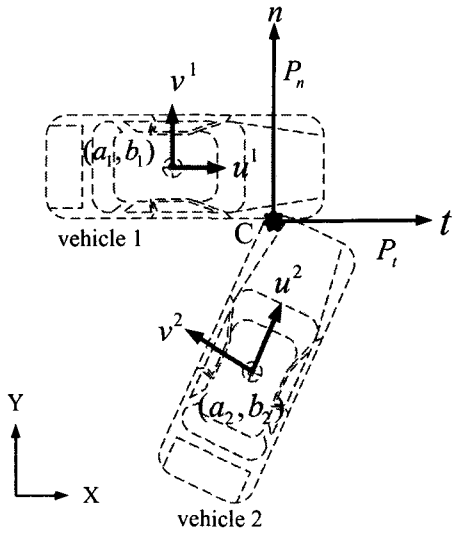


Fig. 2 Collision of two vehicles

점 C 는 두 차량의 충돌시 접촉점(충돌점)을 나타내며 한 개의 점으로 가정하였다. 점  $(a_i, b_i)$  는 충돌점에 고정된 충돌좌표계에 대한 차량의 무게중심의 좌표값이다.  $p_n$  은 수직충격력,  $p_t$  는 접선충격력을 나타낸다.  $u^i$  및  $v^i$  는 각각 차량  $i$  의 종방향 및 횡방향 속도를 나타낸다.

각 차량에 대해서 충돌직후의 속도와 충돌직전의 속도를 구하기 위하여 6 개의 방정식이 필요하며 이를 행렬식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ a_1 m_1 & -b_1 m_1 & I_z^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 m_2 & -b_2 m_2 & I_z^2 \\ 1 & 0 & -a_1 & -1 & 0 & a_2 \\ -\mu_c m_1 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n^1 \\ V_t^1 \\ \omega_1^1 \\ V_n^2 \\ V_t^2 \\ \omega_1^2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ a_1 m_1 & -b_1 m_1 & I_z^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 m_2 & -b_2 m_2 & I_z^2 \\ -e & 0 & e a_1 & e & 0 & -e a_2 \\ -\mu_c m_1 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n^1 \\ v_t^1 \\ \omega_0^1 \\ v_n^2 \\ v_t^2 \\ \omega_0^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $V_n^i, V_t^i, \omega_1^i$  및  $v_n^i, v_t^i, \omega_0^i$  는 각각 차량  $i$  의 충돌후 및 충돌전의 법선 및 접선 속도 그리고 각속도를 나타낸다.  $m_i$  및  $I_z^i$  는 각각 차량  $i$  의 질량 및 질량관성모멘트이다. 반발계수  $e$  와 마찰계수  $\mu_c$  는 아래와 같다.

$$e = \frac{p_R}{p_A} = -\frac{V_n^1 - a_1 \omega_1^1 - V_n^2 + a_2 \omega_1^2}{v_n^1 - a_1 \omega_0^1 - v_n^2 + a_2 \omega_0^2}, \quad \mu_c = \frac{p_t}{p_n}$$

### 3.2 신경망을 이용한 반발계수 및 마찰계수 추정

반발계수는 충돌시 차량의 탄성도에 대한 측정이며 초기속도에 의존한다. 빠른 속도에서의 충돌은 심한 차량의 소성변형을 유발하기 때문에 반발계수는 크게 작아진다. 차량의 충돌은 편심충돌(offset collision)도 포함하기 때문에 1 차원적으로 해석하기 어렵다. 마찰계수는 접선방향의 충격력을 표현하기 위하여 사용되는 계수이다.

차량의 충돌분석의 정확성은 상대적인 법선방향 및 접선방향의 속도, 충돌각도 그리고 충돌형태에 따라 변하는 반발계수 및 마찰계수에 크게 영향을 받는다.

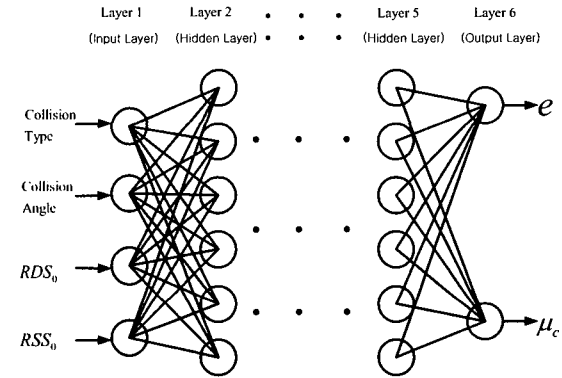


Fig. 3 Architecture of the neural network

본 연구에서는 Fig. 3 과 같은 신경망을 사용하여 이들 계수들을 추정하였다.<sup>11,12</sup> 이것은 4 개의 숨겨진 층(hidden layers)과 입력층, 출력층으로 구성된다. 4 개의 숨겨진 층은 각각 6 개의 뉴런을 가진다. 입력층은 충돌형태, 충돌각,  $RDS_0$ ,  $RSS_0$  에 대한 뉴런으로 구성하였고, 출력층은 반발계수

와 마찰계수로 구성하였다. 역전파학습알고리즘(back-propagation learning algorithm)을 본 신경망 학습을 위하여 사용하였다. 입력층과 출력층의 활성화함수로 선형전달함수를 사용하였고, 숨겨진 층의 활성화함수로 텐시그모이드전달함수를 사용하였다. JARI 와 RICSAC 의 자료들을 신경망 학습을 위하여 사용하였다.<sup>13,14</sup>

#### 4. 충돌 시뮬레이션

차량의 충돌시뮬레이션은 사고재구성을 위한 예비작업이다. 차량의 충돌을 충돌전, 충돌시, 그리고 충돌후의 3 단계로 나누어서 다음과 같은 시나리오를 갖는 다중충돌을 시뮬레이션 하였다. 3 대의 차량이 교차로에서 차량 1 은 60 km/h 의 속도로 동쪽으로, 차량 2 는 40 km/h 의 속도로 60° 북 동쪽으로, 차량 3 은 60 km/h 의 속도로 서쪽으로 이동하고있다. 차량 1 은 차량 2 와 첫번째 충돌후, 0.45 초 후에 차량 3 과 두번째 충돌을 하였다.

충돌후 차량의 모든 바퀴는 정지할 때까지 락(lock)이 된다고 가정하였고 마찰계수  $\mu = 0.7$  의 노면에 스키드마크를 남겼다. 첫번째 충돌에서 신

경망을 이용해서 구한 반발계수는 -0.12 이었고 마찰계수는 -0.5 이었다. 두번째 충돌에서의 반발계수는 0.1 이었고 마찰계수는 -0.6 이었다.

Fig. 4 는 충돌후 시간에 따른 차량의 궤적을 나타낸다. 차량 1 은 첫번째 충돌후 종방향속도 14.42 m/s, 횡방향속도 3.8 m/s, 각속도 2.12 rad/s 를 얻었고, 반시계방향으로 0.69 rad 회전하였다. 또한 두번째 충돌후 종방향속도 -1.23 m/s, 횡방향속도 -2.21 m/s, 각속도 5.21 rad/s 를 얻었다. 두 번째 충돌후 반시계방향으로 1.51 rad. 회전하였고, 0.8 초 후에 정지하였다. 차량 2 는 충돌후 종방향속도 10.46 m/s, 횡방향속도 -1.46 m/s, 각속도 -2.41 rad/s 를 얻었다. 충돌후 시계방향으로 0.86 rad 회전하였고, 1.57 초 후에 정지하였다. 차량 3 은 충돌후 종방향속도 -5.85 m/s, 횡방향속도 -5.43 m/s, 각속도 -1.26 rad/s 를 얻었다. 충돌후 시계방향으로 0.36 rad 회전하였고, 1.17 초 후에 정지하였다.

#### 5. 스키드마크 분석

차량의 사고재구성에서는 일반적으로 충돌전의 속도에 관심이 있다. 사고재구성은 사고현장의 흔적들 및 파편들과 최종정지위치를 조사하면서 시작한다.<sup>2</sup> 차량의 진행경로와 회전정도는 타이어의 흔적을 분석함으로써 알 수 있다.<sup>2,3</sup> EDVAP 과 PC-CRASH 와 같은 상용패키지들은 사용자가 충돌 전 속도를 추정하기 위하여 노면의 타이어흔적과 증거들이 일치할 때까지 충돌시뮬레이션을 계속하도록 요구한다.<sup>5,6,7</sup> 따라서 이 문제점을 해결하기 위하여 시행착오 없이 충돌전의 속도를 구하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 충돌후의 차량궤적을 분석함으로써 충돌전의 속도를 추정하였다.

##### 5.1 새로운 사고재구성 방법

충돌후의 직진속도  $V_p$  는 마찰계수  $\mu$  인 노면에 나타나는 전체 스키드마크의 길이를 측정하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_p = \sqrt{2g\mu S_{total}} \tag{7}$$

충돌후의 직진속도와 각속도의 비는 아래와 같이 가정할 수 있다.

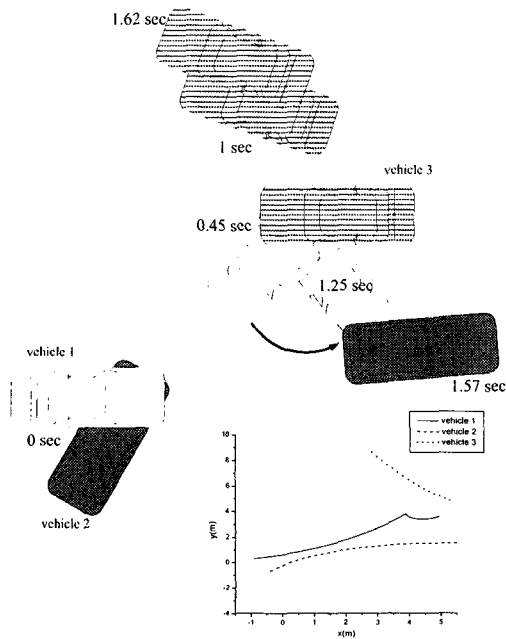


Fig. 4 Trajectories of the post-impact vehicles

$$\frac{\omega_1}{V_p} \approx \frac{\theta^A}{S^A} \quad (8)$$

여기서  $\theta^A$  및  $S^A$ 는 각각 궤적의 초기점에서 임의점까지의 회전각 및 스키드길이를 나타낸다.

따라서 충돌후 차량의 속도성분들은 다음과 같다.

$$V_x = \text{sgn}(S_x^A) \sqrt{\frac{V_p^2 \gamma^2}{\gamma^2 + 1}}$$

$$V_y = \text{sgn}(S_y^A) \sqrt{\frac{V_p^2}{\gamma^2 + 1}} \quad (9)$$

$$\omega_1 \approx V_p \frac{\theta^A}{S^A}$$

여기서  $\gamma = \frac{V_x}{V_y} \approx \sqrt{\frac{S_x^A}{S_y^A}}$  이다.

두 차량이 충돌할 때 충돌각도는 일정하고 각 속도는 0 이 되기 때문에 차량  $i$  의 충돌전의 속도  $v_{initial}^i$  는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$v_{initial}^i = \sqrt{(v_n^i)^2 + (v_t^i)^2} \quad (10)$$

여기서  $v_n^i = V_n^i - \frac{I_z^1 \omega_1^1 b_2 - I_z^2 \omega_1^2 b_1}{m_i (a_2 b_1 - a_1 b_2)}$  이고,

$v_t^i = V_t^i - \frac{I_z^1 \omega_1^1 a_2 - I_z^2 \omega_1^2 a_1}{m_i (a_2 b_1 - a_1 b_2)}$  이다.

## 5.2 사고재구성 시뮬레이션

4 장의 충돌시뮬레이션 결과를 이용하여 새로운 스키드마크분석방법의 정확성을 평가하였다. Fig. 6 은 사고재구성 시뮬레이션 알고리즘을 나타낸다.

사고재구성은 충돌후 차량의 궤적을 분석함으로써 시작하였다. 노면의 타이어 흔적으로부터 측정되는 자료들( $S_{total}^A, S_x^A, S_y^A, \theta^A, S^A$ )을 이용하여 차량의 궤적을 분석하고 충돌직후의 속도를 계산하는데 사용하였다. 충돌방정식을 사용하여 충돌직후의 속도로부터 충돌직전의 속도를 구하였다.

Table 1 과 2 는 충돌직후의 종방향속도  $V_x$ , 횡방향속도  $V_y$ , 각속도  $\omega_1$  이며 스키드마크 분석 결과들이다. Table 3 은 세 차량의 충돌직전속도  $v_{initial}$  에 대한 사고재구성 결과들이다.

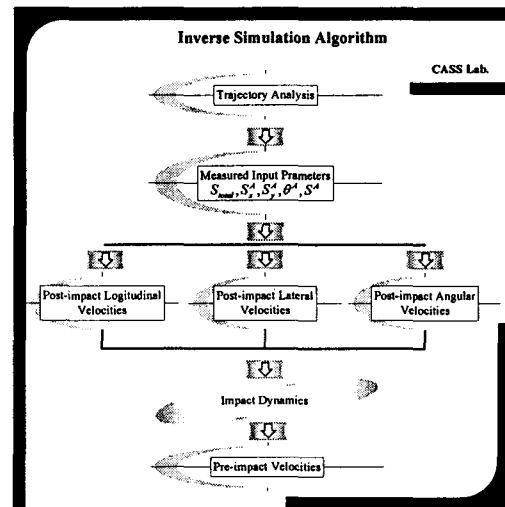


Fig. 5 Algorithm of the inverse collision simulation

Table 1 Skid-mark analysis results after second collision

	$V_x$ (m/s)	$V_y$ (m/s)	$\omega_1$ (rad/s)
Vehicle 1	-2.08	-3.7	5.51
Vehicle 3	5.67	-5.67	-1.19

Table 2 Skid-mark analysis results after first collision

	$V_x$ (m/s)	$V_y$ (m/s)	$\omega_1$ (rad/s)
Vehicle 1	13.01	4.92	1.9
Vehicle 3	9.63	-4.7	-2.55

Table 3 Pre-impact velocities

	Vehicle 1	Vehicle 2	Vehicle 3
$v_{initial}$ (m/s)	16.94	12.56	15.47

충돌 및 사고재구성 시뮬레이션 결과들은 약간의 오차를 보였는데, 이는 사고현장으로부터 측정할 수 있는 자료의 한계로 인하여 사고재구성의 정확성에 한계를 가졌기 때문이다. 또한 충돌 및 사고재구성 시뮬레이션은 서로 다른 알고리즘을 가지고 있기 때문에 두 결과 값들이 정확하게 일치하기 힘들었으나 지루한 반복계산을 수행하지 않고 구할 수 있는 가능성을 보였다.

### 6. 요마크 분석

타이어마크는 차량이 미끄러질 때 진행방향으로 발생하는 스키드마크와, 진행방향 측면으로 발생하는 요마크로 분류할 수 있다. 스키드마크가 브레이크 조작에 따른 바퀴의 잠김으로 인해서 발생하는 종방향미끄럼흔적이라면 요마크는 핸들 조작에 의해서 발생하는 횡방향미끄럼흔적이다. 즉 요마크는 회전하기 위해서 핸들을 조작시에 원심력을 이기지 못해 발생한다.<sup>2,8</sup> 요마크는 타이어의 형태와 크기, 공기압, 노면상태, 차량거동특성의 함수이며, 요마크가 발생할 때 차량의 운동은 발산한다.<sup>2</sup>

기존의 요마크해석방법은 원심력과 구심력이 같다는 조건으로부터 아래와 같은 비교적 단순한 임계속도추정식(critical speed formula)을 사용하였다.

$$v = \sqrt{fgR} \tag{11}$$

여기서  $f$  는 타이어와 노면과의 마찰계수,  $R$  은 곡선궤적의 반경 그리고  $g$  는 중력가속도이다.

그러나 이식은 차량의 거동특성에 따른 오차를 보인다. Dickerson<sup>9</sup> 등은 슬립각이나 횡방향가속도가 클 때 위의 임계속도추정식이 실험결과와 많은 오차를 보임을 보였다. Brach<sup>10</sup> 는 가속상태, 등속상태, 감속상태 중에서 감속상태에서 많은 오차가 발생함을 보였다. 따라서 차량의 거동상태를 포함하는 새로운 요마크속도추정식을 제안하였다.

#### 6.1 새로운 요마크속도추정식

차량의 요마크는 곡선형태이며 시작부분에서 끝부분으로 갈수록 반경이 작아지는 나선형을 보인다. 몇 개의 구간으로 나누어서 곡선의 반경을 측정하면, 차량의 무게중심의 궤적이 된다. 곡선반

경  $R$  은 Fig. 6 으로부터 현의 길이  $l$  과 중간세로좌표  $h$  를 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다. 제일 큰 반경을 구하기 위해서, 여러 개의 원호중 요마크가 시작하는 지점으로부터 측정된 원호를 사용하였다.

$$R = \frac{l^2}{8h} + \frac{h}{2} \tag{12}$$

급핸들 조작시 차량은 오버스티어링이 되면서 안정성을 잃고 횡방향으로 미끄러지는데, 이때 사선방향의 빗살무늬흔적(striations)을 가진 요마크가 발생한다.

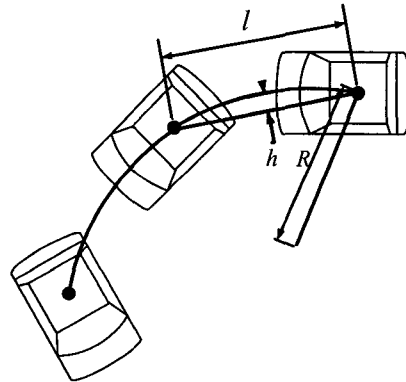


Fig. 6 Radius of the vehicle under the curved path

오버스티어링 차량에서 임계속도는 차량이 안정성을 잃고 발산하는 속도이다. 이 속도를 요마크가 발생하는 속도로 볼 수 있다. 임계속도에서 요마크를 분석하기 위하여 Fig. 7 과 같은 바이시클모델을 사용하였다. 타이어횡력  $Y$  와 요잉모멘트  $N$  은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Y = C_F \tan^{-1}\left(\beta + a \frac{\omega}{v_x}\right) + C_R \tan^{-1}\left(\beta - b \frac{\omega}{v_x}\right) \tag{13}$$

$$N = aC_F \tan^{-1}\left(\beta + a \frac{\omega}{v_x}\right) + bC_R \tan^{-1}\left(\beta - b \frac{\omega}{v_x}\right) \tag{14}$$

여기서  $\beta$  는 슬립각,  $\omega$  는 각속도,  $C_F, C_R$  는 코너링강성계수,  $v_x$  는 종방향속도,  $a$  와  $b$  는 각

각 중심에서 앞차축 및 뒤차축까지의 거리이다. 식 (13)과 (14)를 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$N = f(\beta, \omega) = N_\beta \beta + N_\omega \omega \quad (15)$$

$$Y = f(\beta, \omega) = Y_\beta \beta + Y_\omega \omega = m \frac{v_x^2}{R} \quad (16)$$

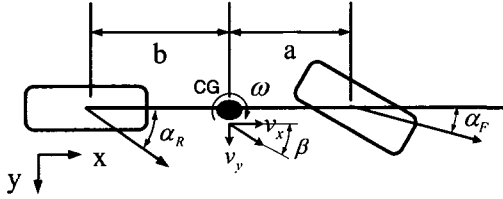


Fig. 7 The bicycle model

위의 식들로부터 아래식을 구할 수 있다.

$$\frac{\omega}{N} = \frac{Y_\beta}{N_\beta Y_\omega - m v_x N_\beta - Y_\beta N_\omega} \quad (17)$$

$\omega/N$ 가 무한대가 되면 차량은 발산하고 이때의 속도가 임계속도가 되며, 이때 식(17)의 분모는 0이 되어야 한다. 한편  $N_\beta$ 와  $Y_\omega$ 는 아주 작은 값이기 때문에  $N_\beta Y_\omega$ 를 무시하고 다시 정리하면 아래와 같은 식이 되며 이식은 식(15)에서 요잉모멘트가 0일 때의 조건과도 일치한다.

$$\beta N_\beta = -\omega N_\omega \quad (18)$$

따라서 각속도와 차량의 속도비는 회전각도와 이동거리의 비와 같다고 가정하면 아래와 같은 새로운 요마크속도추정식을 구할 수 있다.

$$v_x = \sqrt{\frac{R}{m} \left( C_F \tan^{-1} \left( \beta + a \frac{\theta}{S} \right) + C_R \tan^{-1} \left( \beta - b \frac{\theta}{S} \right) \right)} \quad (19)$$

여기서  $\beta = -\frac{\theta}{S} \frac{a^2 C_F + b^2 C_R}{a C_F - b C_R}$ 이다.

횡력은 슬립각이 작은 구간 ( $\beta < \beta_{\max}$ )에서는 슬립각과 선형적인 비례관계를 보이지만, 슬립각이 큰 구간 ( $\beta > \beta_{\max}$ )에서는 일정한 값을 가진다.<sup>7</sup> 따라서 슬립각이 최대횡력을 갖는 슬립각  $\beta_{\max}$  보다 큰 경우에는 아래의 식을 사용한다.

$$v_x = \sqrt{\frac{R}{m} \left( C_F \tan^{-1} \left( \beta_{\max} + a \frac{\theta}{S} \right) + C_R \tan^{-1} \left( \beta_{\max} - b \frac{\theta}{S} \right) \right)} \quad (20)$$

## 6.2 새로운 요마크속도추정식 검증

새로운 요마크속도추정식의 정확성을 검증하기 위하여 Brach의 시뮬레이션 자료를 이용하였다.<sup>10</sup> Fig. 8은 새로운 방법이 기존의 방법보다 정확도가 높고 오차가 적음을 보여주고 있다. 새로운 방법의 평균오차 4.64%는 기존 방법의 평균오차 9.28%의 절반 밖에 되지 않았다. 두 모델 모두  $\theta/S$ 가 0.023의 근처의 값을 가질 때 가장 적은 오차를 보였다.

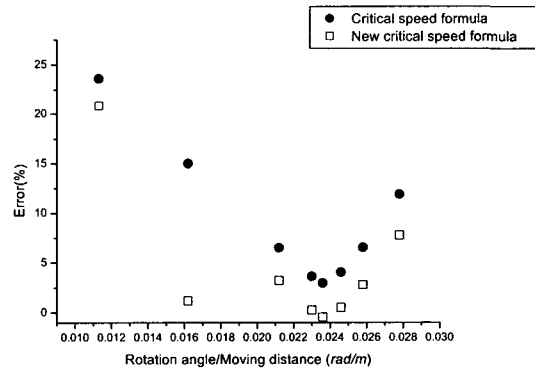


Fig. 8 Errors of the new and existing critical speed formulas

## 7. 결론

차량충돌시뮬레이션은 사고재구성을 위한 예비 작업이다. 본 연구에서는 사고재구성의 결과 정확성을 향상시키기 위하여 다중충돌에 대한 충돌시뮬레이션과 역시뮬레이션을 수행하였다. 충돌 후 차량의 거동궤적을 시뮬레이션하기 위하여 차량모델과 타이어모델을 사용하였으며, 사고재구성을 위해서 충돌분석에 적합한 단순한 충돌모델을 제안하였다. 충돌분석의 정확성은 반발계수와 마



찰계수에 의존하기 때문에 이들 계수들을 추정하기 위하여 신경망을 사용하였다.

충돌후의 차량궤적을 분석함으로써 충돌전의 속도를 구하는 새로운 방법을 제안하였다. 그러나 사고 현장으로부터 측정할 수 있는 자료의 한계와 충돌 시뮬레이션과 사고재구성의 알고리즘의 상이함으로 인하여 사고재구성의 정확성에 다소의 한계를 보였다.

기존의 간단한 요마크속도추정식이 가지는 문제점들을 줄이고 보다 정확한 계산을 제공할 수 있는 새로운 요마크속도추정식을 제안하였다. 이 추정식은 차량의 운동학적인 특성을 보다 잘 표현함으로써 오차의 범위를 줄였다. 두 추정식 사이의 평균오차를 살펴보면 기존의 것이 9.28% 인데 반하여 새로운 요마크속도추정식은 오차가 4.64%로 절반 정도 밖에 되지 않았다.

### 참고문헌

1. Cannon, J. W., Dependence of a Coefficient of Restitution on Geometry for High Speed Vehicle Collisions, SAE 2001-01-0892.
2. Fricke, L., B., Traffic Accident Reconstruction, Northwestern University Traffic Institute, 1990.
3. Neptune, J. A., Flynn, J. E., Chavez, P. A. and Underwood, H. W., "peed from Skids: A Modern Approach, SAE 950354.
4. Han, I. And Park, S-U, "Inverse Analysis of Pre- and Post-Impact Dynamics for Vehicle Accident Reconstruction," Vehicle System Dynamics, Vol. 36, No. 6, pp. 413-433, 2001.
5. Woolley, R. L., The 'IMPACT' Computer Program for Accident Reconstruction, SAE Paper No. 850254, Society of Automotive Engineers, 1985.
6. Steffan, H. and Moser, A., The Collision and Trajectory Models of PC-CRASH, SAE 960886.
7. Cliff, W. E. and Montgomery, D. T., Validation of PC-Crash - A Momentum-Based Accident Reconstruction Program, SAE 960885.
8. Bellion, P., Project Y.A.M. (Yaw Analysis Methodology) Vehicle Testing and Findings - Victoria Police, Accident Investigation Section, SAE 970955, pp. 928-938.
9. Dickerson, C. P., Arndt, S. M., Arndt, M. W. and Mowry, G. A., Evaluation of Vehicle Velocity Predictions Using the Critical Speed Formula, SAE 950137.
10. Brach, R. M., An Analytical Assessment of the Critical Speed Formula, SAE 970957.
11. Kim, M. S., Yang, S. H., Lee, S. H. and Lee, S., "Lane and Obstacle Recognition using Artificial Neural Network," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 10, pp. 25- 34, 1999.
12. Oh, K. H. and Song, C. K., "Absolute Vehicle Speed Estimation using Neural Network," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 9, pp. 5158- 34, 2002.
13. Ishikawa, H., Impact Model for Accident Reconstruction-Normal and Tangential Restitution Coefficients, SAE 930654.
14. Shoemaker, N. E., "Research Input for Computer Simulation of Automobile Collisions - Staged Collisions," Vol. 2 & Vol. 3, Calspan Report ZQ-6057-V-4 & V-5, Contract DOT-HS-7-01511, Dec. 1978.