

<논 문> SAE NO. 943712

## 마찰력이 수반된 자동차 충돌의 동역학적 해석

### Dynamic Analysis of Automobile Collisions with Friction

한 인 환\*  
I. H. Han

#### ABSTRACT

The most commonplace of collisions that directly affect people is that of vehicles. Safety studies have noted a correlation between vehicle occupant injury severity and velocity changes. Methods for estimating collision velocity changes are discussed here. This topic is part of what is referred to as accident reconstruction. Only planar collisions are considered. When a vehicle collides with another, impact dynamics with friction should be considered. This paper presents a general analysis methodology of impact, must dynamics incorporating friction. The presence of friction between sliding contacts during the impact makes the problem difficult since the events such as reverse sliding or sticking, which may occur at different times throughout the impact, must be determined. This paper uses the results of RICSAC experiments for verifying the developed methodology. The analysis and experimental results agree well.

주요기술용어 : Automobile Collisions(자동차 충돌), Rigid-body Mechanics(강체역학), Frictional Impact (마찰 충돌), Impulse-Momentum(역적-운동량), Sliding and Sticking(미끄러짐 정지), Reverse Sliding(역미끄러짐), Experimental Collision(충돌 실험)

#### 1. 서 론

충돌이라는 물리적인 현상에는 무수한 종류가 있으나, 가장 많은 관심이 집중되어 있는 것은 역시 자동차의 충돌일 것이다. 특히 선진 제국에서 승객의 안전을 최대한 고려한 차량의 설계와 해석에 대한 관심이 높아지면서<sup>1)</sup> 자동차 충돌에 대한 실험 및 해석이 자동차 설계에 필수 불가결한 전제조건이 되고 있다. 자동차 충돌시 승

객의 안전도는 충돌후 차량의 속도변화와 깊은 관련이 있기 때문이다. 차량의 충돌 해석을 위해서는 실제 차량을 부수어 해석하는 실차 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하는 해석 방법이 있다. 실차 충돌 실험은 많은 실험비용과 소요시간의 과다등 제약조건이 뒤따르게 된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하는 방법은 독자적으로 이용하기에는 신뢰도에 문제가 있을 수 있으나, 실험비용이 많이 드는 충돌실험의 횟수를 가급적 줄일

\* 홍익대학교 과학기술대학 기계설계학과

수 있도록 하는 역할을 수행할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 차량의 충돌시 동적 거동을 해석하는 방법은 대개 2차원 충돌로 문제를 단순화 할 수 있으며<sup>2)</sup>, 크게 2가지로 나눌 수 있다. 탄소성학적인 접근방법으로 구조적인 해석방법과 강체역학(Rigid Body Mechanics)의 범주 내에서 역적-운동량(Impulse-Momemntum) 이론을 이용하는 해석 방법이다. 최근 들어 전자의 구조적인 해석방법이 주류를 이루고 있고, 강체역학의 범주 내에서의 해석방법과 비교할 때, 실제 물리적 현상에 대한 상사성이라는 관점에서 일단 우위를 점하고 있는 것이 사실이다. 그러나, 구조적인 해석 방법은 그 자체의 속성으로 인한 수학적 난해성과 정확한 모델링의 어려움과 같은 치명적 약점때문에 실제 문제에서의 적용에 한계를 보여줄 수 있다. 기계 부품처리 시스템뿐만 아니라 자동차 충돌 문제에 이르기까지, 강체역학의 범주 내에서 충돌 문제를 해석하는 것이, 많은 경우에 오히려 적절하다는 연구보고<sup>3)</sup>가 있다. 따라서 본 논문에서는 강체역학의 범주 내에서 역적-운동량 이론을 이용한 자동차 충돌의 새로운 해석방법을 제시할 것이다. 역적-운동량 이론을 이용하는 방법은 새로운 것이 아니다.<sup>4)</sup> 초창기의 연구들은 정면충돌로 국한하여 반발계수  $e$ 의 값을 거의 0으로 하였고 마찰계수의 역할은 무시하였다. 후에 마찰계수의 값을 0.4정도로 산정하여 단순 삽입하기도 하였다.

충돌의 경우 법선 역적(Normal Impulse)의 값이 일반 미끄럼 접촉의 법선 힘과 비교할 때 매우 크므로, 마찰에 의해 발생하는 접선 역적(Tangential Impulse)이 간과될 수 없다. 그럼에도 불구하고 기존의 연구들은 마찰의 역할을 무시하거나 혹은, Coulomb의 법칙을 그대로 적용하여 단순히 법선 역적의 값에 마찰계수를 곱하여 접선 역적의 값으로 사용하였다. 실제로 충돌의 짧은 시간동안 충돌하는 물체들의 분리 이전에 그 미끄럼의 방향이 변하거나 정지할 수 있다는 가능성을 간과한 것이다. 따라서, 그 결과는 대체로 부적절한 것이 되고, 상황에 따라서는 충돌후 운동에너지가 충돌전보다 오히려 증가하는 치명적인 오류까지

범하게 되었다.<sup>5)</sup> 이토록 중요하고도 기본적인 문제가 19세기 한 학자의 연구<sup>6)</sup> 이후 거의 일세기 동안 무관심 속에 방치되다가 최근에 일부 학자들<sup>3-5),7-11)</sup>에 의해 재조명되고 있다. 강체역학의 범위 내에서, 짧은 충돌시간동안 역적-운동량 이론과 Coulomb의 법칙을 사용하여 마찰력을 수반하는 충돌문제에 대한 해석을 시도한 연구 결과의 일부가 본 논문 저자에 의해 이미 발표된 바 있다.<sup>12)</sup>

실차 충돌실험은 고가의 장비 및 실험장이 필요하여 수행하기가 불가능하였으므로, 외국의 실차 충돌실험 결과<sup>13)</sup>를 이용하여 충돌해석을 수행하였고 본 논문에서 제시한 마찰충돌 해석 과정의 타당성을 입증하였다.

자동차 충돌해석은 자동차 충돌사고 재구성이란 과정의 일부분을 구성한다. 자동차 충돌사고 재구성이란 사고후 정보를 가지고 사고직전 정보를 재구성하는 것을 의미한다. 본 논문에서 제시하는 결과는 자동차 충돌사고 재구성이라는 관점에서도 이용이 가능할 것이다.

## 2. 마찰 충돌 해석

충돌의 실제 물리적 과정은 매우 복잡하다. 문제의 용이한 수학적 처리를 위해, 약간의 가정이 필요하게 된다. 강체역학에서 충돌현상은 순간적인 것으로 간주된다. 본 논문에서는 충돌현상을 순간적인 것으로 간주하지는 않으나, 시뮬레이션 시간 간격 사이즈보다는 짧은 시간동안 발생하는 것으로 고려한다. 따라서, 충돌의 짧은 시간동안 물체들의 위치는 불변으로 한다.

### 2.1 운동방정식

두개의 물체가 충돌할 경우, 역적(Impulse)은 접촉면 즉 접촉선을 기준으로 법선과 접선 방향으로 각각 접촉점에서 발생한다. Fig.1에 보여지는 일반적인 2차원 Point-to-line 충돌상황에 대해 마찰 충돌해석을 수행한다. 2차원 Point-to-line 충돌에서 접촉선을 포함하고 있는 물체를 언제나 body 1로 고려한다. Fig.1에서  $P_y(t)$ 는 body 2에 작용하는 법선 역적이고  $P_x(t)$ 는 body 2에 작용

하는 마찰 혹은, 접선 역적이다. 같은 크기 반대 방향의 역적들이 body 1에 작용한다. 역적-운동량 이론을 적용하여, 충돌 접촉점 a에서의 접선 방향 상대속도 S(t)와 법선 방향 상대속도 C(t)를 각각 구하면 식 (1)과 (2)로 나타낼 수가 있다. 식 (3)에는 관련된 3개의 상수를 보여주고 있다.

$$S(t) = S_0 - AP_x(t) + BP_y(t) \quad (1)$$

$$C(t) = C_0 + BP_x(t) - A'P_y(t) \quad (2)$$

$$S_0 = S(t_0), \quad C_0 = C(t_0)$$

$$A = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} + \frac{r_{a1x}^2}{I_1} + \frac{r_{a2x}^2}{I_2} \quad (3a)$$

$$A' = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} + \frac{r_{a1x}^2}{I_1} + \frac{r_{a2x}^2}{I_2} \quad (3b)$$

$$B = \frac{r_{a1x}r_{a1y}}{I_1} + \frac{r_{a2x}r_{a2y}}{I_2} \quad (3c)$$

3개의 상수 A, A', B는 충돌전 속도와 무관하며, 충돌하는 두 물체의 기하학적 상대위치의 함수이다. 식 (3)의 표현으로 부터 쉽게 알 수 있는 것처럼, 상수 A와 A'는 항상 양수이고, AA' > B<sup>2</sup>의 관계가 성립함을 주목하여야 한다. 두 개의 물체가 충돌하기 위해서는 C<sub>0</sub>는 역시 양수 이어야만 한다.

2.2 역적(Impulse) 구속조건

Fig.1에 대해 6개의 역적-운동량 다이나믹스 칼라 방정식을 유도할 수 있고, 6개의 속도 성분과 2개의 역적을 포함하는 도합 8개의 변수가 결정 되어야만 한다. 따라서 2개의 구속조건이 더 필요하게 된다. 이 두개의 구속조건은 충돌하는 두 물체의 물리량 즉, Elasticity와 표면의 Roughness에 좌우될 것이다. Poisson에 의하면 강체사이의 충돌과정은 압축과정(Compression Period)과 반발과정(Restitution Period)의 연속적인 진행으로 고려할 수 있다. 충돌에서 압축과정의 종료시점을 나타내기 위해, (P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub>)평면에서 상

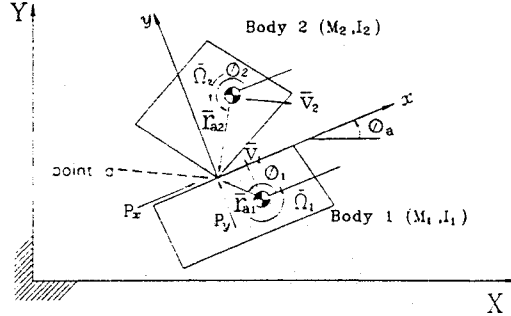


Fig.1 General planar point-to-line impact

대법선속도 C(t)가 0이 되는 직선을 최대 압축선(Maximum Compression Line)으로 정의한다면 식 (2)로부터 식 (4)와 같이 최대압축선을 나타낼 수 있다.

$$C_0 + BP_x - A'P_y = 0 \quad (4)$$

C(t)=0가 되는 순간에 접촉점의 상대 접근속도는 0이 될 것이고, 충돌의 압축과정이 종료된다. 반발계수는 식 (5)로 표현할 수 있고, 식에서 t<sub>c</sub>는 최대 압축 발생시간, t<sub>r</sub>는 충돌 종료시간이다.

$$\frac{P_x(t_r)}{P_y(t_r)} = 1 + e \quad (5)$$

이와 같이 식 (4)와 (5)를 가지고 충돌동안 법선 역적을 결정할 수 있으며, 두 식은 함께 하나의 역적 구속조건식을 제공한다.

Differential 역적은 힘이므로 마찰 역적은 Coulomb의 법칙을 이용할 수 있을 것이다. 3가지의 다른 경우가 식 (6)으로 정리될 수 있다.

$$\text{Stiction (no sliding)} \quad |dP_x| < \mu_k \cdot dP_y \quad (6a)$$

$$\text{Sliding Impending} \quad |dP_x| = \mu_k \cdot dP_y \quad (6b)$$

$$\text{Sliding} \quad |dP_x| = \mu_s \cdot dP_y \quad (6c)$$

식 (6)에서 dP<sub>x</sub>와 dP<sub>y</sub>는 각각 접선과 법선 방향으로의 Differential 선형 역적이고 μ<sub>k</sub>와 μ<sub>s</sub>는 각각 충돌동안의 동마찰계수(Kinetic Friction

Coefficient), 정마찰계수(Static Friction Coefficient)이다. 충돌하는 두 물체의 접촉점에서의 상대 접선속도  $S(t)=0$ 로 하면  $(P_x, P_y)$ 평면에서 Sticking 접촉에 관한 역적의 선형관계식을 식 (7)로 구할 수 있다.

$$S_0 - AP_x + BP_y = 0 \quad (7)$$

이 직선을  $(P_x, P_y)$ 평면에서 미끄럼 정지선(Sticking Line)이라고 정의한다. 식 (6)과 (7)은 또 하나의 역적 구속조건식을 제공한다.

### 2.3 충돌과정의 그래픽 해석

$(P_x, P_y)$ 평면에서 최대압축선(C)과 미끄럼 정지선(S)은 정성적으로 Fig2(a)에서와 같이 나타낼 수 있다. 그 직선들은 아래와 같이  $P_x$ 와  $P_y$ 축과의 교차점들에 의해 정의된다.

$$S_x = \frac{S_0}{A}, S_y = -\frac{S_0}{B}, C_x = \frac{-C_0}{B}, C_y = \frac{C_0}{A}$$

$$\tan\theta_s = \frac{|B|}{A}, \tan\theta_c = \frac{A'}{|B|}$$

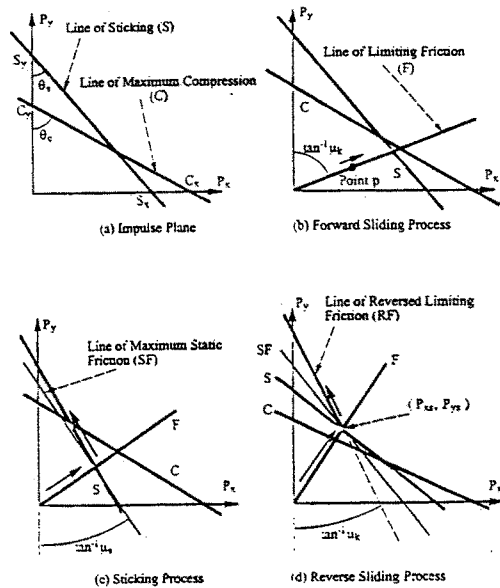


Fig.2 Impact process diagram

$AA' > B^2$ 이므로 각도  $\theta_c$ 는  $\theta_s$ 보다 항상 크다. Fig 2(b)에서 보는 바와 같이,  $S_0$ 가 0이 아니라면 충돌의 초기에 접촉점에서 항상 미끄러지기 시작하므로 표현점 p는 한계마찰선(Limiting Friction Line, F)을 따라 이동하게 된다. 한계마찰선은 식 (8)에 의해 역적 평면상에 표시된다.

$$P_x = i\mu_k P_y \quad (8)$$

$$i = S_0 / |S_0|$$

한계마찰선(F)이 미끄럼 정지선(S)과 교차하는 점에서 두가지의 가능한 변화가 있게 된다. Fig2(c)에서 보는 바와 같이, 미끄럼을 막는 마찰력이 최대정지 마찰력보다 작게 될 때, 표현점 p는 그 교차점에서 충돌의 종료시 까지 미끄럼 정지선 (S)을 따라 이동(미끄럼 정지상태)하게 될 것이다. 이 경우의 마찰 충돌을 미끄럼 정지 (Sliding and Sticking) 충돌로 정의할 것이다. 그런데 Fig2(d)에서 볼 수 있는 것처럼 마찰력이 최대정지 마찰력보다 크게 될 때 마찰은 그 기울기를 유지하며 방향을 바꾸게 될 것이다. 즉, 한계마찰선(F)과 미끄럼 정지선(S)이 교차하는 점이 역시 한계마찰선(RF)의 시점이 될 것이다. 그리고 두개의 직선 F와 S는 역적 평면상에서 기껏해야 1번만 교차할 수 있으므로 마찰의 방향전환도 단 1번만 있게 된다. 역한계마찰선은 식 (9)로 표시되고,  $P_{xs}$ 와  $P_{ys}$ 는 역적 평면에서 직선 F와 S의 교차점에 대한 좌표이다.

$$P_x - P_{xs} = -i\mu_k (P_y - P_{ys}) \quad (9)$$

이때, 표현점 p는 충돌의 종료시까지 역한계 마찰선(RF)을 따라 움직이게 된다. 이러한 마찰 충돌을 역미끄럼(Reverse Sliding) 충돌이라 정의할 것이다.

Fig3과 4는 마찰 충돌의 가능한 6가지 경우를 제시하고 있다. 충돌의 종료시까지 한계마찰선(F)이 미끄럼 정지선(S)과 만나지 않을 경우 표현점 p는 계속 직선 F를 따라 이동하게 되는데 이를 순미끄럼(Forward Sliding) 충돌로 정의한

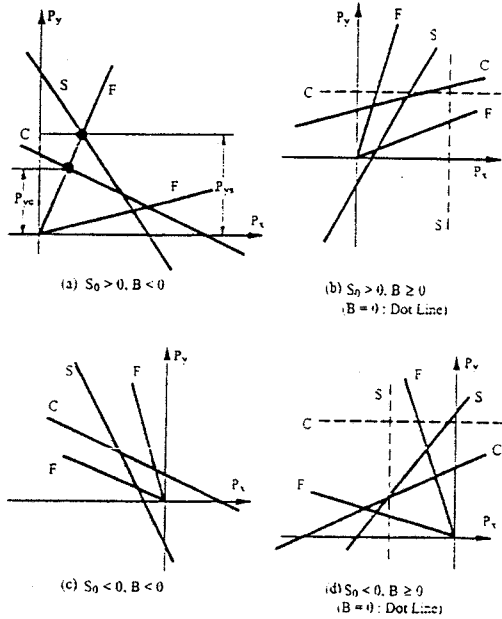


Fig.3 Possible cases of impact process (Oblique Impact :  $S_0 \neq 0$ )

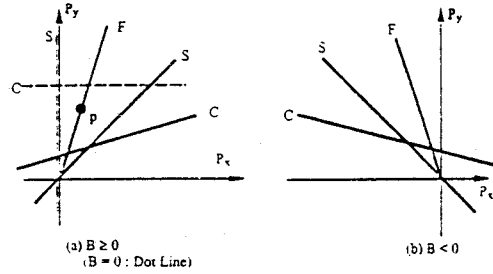


Fig.4 Possible cases of impact process (Direct Impact :  $S_0 = 0$ )

Table 1 Possible cases of impact

$S_0$ $P_{ys}$	Oblique Impact : $S_0 \neq 0$			Direct Impact : $S_0 = 0$ ( $P_{ys} = 0$ )
	$0 < P_{ys} \leq P_{yc}$ or $P_{yc} < 0$	$0 < P_{yc} < P_{ys}$ $\leq (1+e)P_{yc}$	$0 < (1+e)P_{yc} < P_{ys}$ or $P_{ys} < 0$	
$\frac{ B }{A} < \mu_k$	1	3	5	6
$\frac{ B }{A} \geq \mu_k$	2	4	5	7

Sliding and Sticking, or Sticking

Sliding and Reverse Sliding

Forward Sliding

Table 2 Impulses throughout the impact

Case	Normal Impulse $P'_y$	Frictional Impulse $P'_x$
1	$(1+e) \frac{AC_0 + BS_0}{AA' - B^2}$	$\frac{1}{A}(BP'_y + S_0)$
2	$\frac{(1+e)}{A' + iB\mu_k} (C_0 + \frac{2iB\mu_k S_0}{iA\mu_k - B})$	$-i\mu_k P'_y + \frac{2i\mu_k S_0}{iA\mu_k - B}$
3	$(1+e) \frac{C_0}{A' - iB\mu_k}$	$\frac{1}{A}(BP'_y + S_0)$
4	$(1+e) \frac{C_0}{A' - iB\mu_k}$	$-i\mu_k P'_y + \frac{2i\mu_k S_0}{iA\mu_k - B}$
5	$(1+e) \frac{C_0}{A' - iB\mu_k}$	$i\mu_k P'_y$
6	$(1+e) \frac{AC_0}{AA' - B^2}$	$\frac{B}{A} P'_y$
7	$(1+e) \frac{C_0}{A' - jB\mu_k}$	$j\mu_k P'_y$

where  $j = \frac{B}{|B|}$

다. 이 경우는 해석적으로 식 (10)과 같이 표현될 수 있다. 식 (10)에서  $P_{yc}$ 는 직선 F와 C가 교차하는 점의  $P_y$  값이다.

$$0 < (1+e)P_{yc} < P_{ys} \quad (10)$$

$$P_{ys} = \frac{S_0}{iA\mu_k - B}, \quad P_{yc} = \frac{C_0}{A' - iB\mu_k}$$

이러한 해석의 결과들을 정리 요약한 것이 Table 1과 Table 2에 보여진다. 가능한 경우는 모두 7가지로 정리되며, 그 각각의 경우에 대한 역적의 값들을 Table 1과 2에서 보는 바와 같이 구하였다. Table 1에서 Direct Impact의 경우 Impact Case 6은  $S_0$ 가 0이므로 Fig 4에서 볼 수 있는 것처럼 충돌시작부터 미끄럼이 정지되어 충돌종료시 까지 지속되는데 이를 정지(Sticking)충돌이라 정의한다. 이 충돌현상은 미끄럼 정지 충돌의 특별한 경우로 간주할 수 있다. 이 결과들은 시뮬레이션 알고리즘에 삽입되어, 충돌의 발생시마다 적절한 결과치들을 자동적으로 이용하게 될 것이다.

이 결과는 중요한 의미를 가지며, 종래의 해석방법들이 가지는 치명적인 오류나 문제점들을 제거할 수 있게 된다. 즉, 마찰 역적을 무시함으로 인해 생기는 오류가 첫번째이다. 둘째, 단순히 법선 역적에 마찰계수를 산술적으로 곱함으로써, 충돌후의 운동에너지가 충돌 전에 비해 오히려 증가할 수도 있게 되는 치명적 오류이다. 마지막으로 문제에 대한 탄성학적 접근으로 발생하는 수학적 난해성과 비효율성등이다. 본 연구의 결과는 이러한 문제점들을 모두 제거할 수 있게 한다.

### 3. 실차 충돌 실험(RICSAC 자료)

Jones와 Baum<sup>13)</sup>은 미국도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration)의 의뢰로 자동차 충돌실험을 12가지의 경우에 대해 수행, Research Input for Computer Simulation of Automobile Collision(RICSAC)라는 제목으로 발

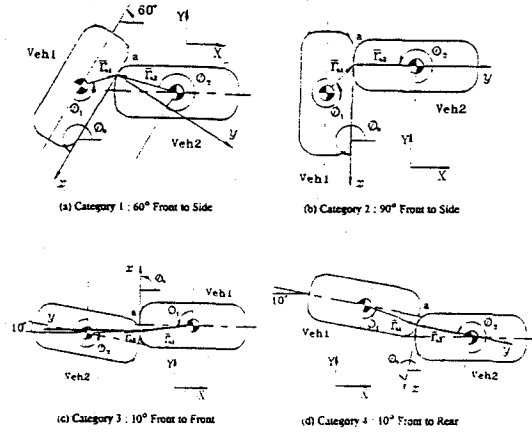


Fig.5 Initial vehicle configurations for experimental collisions

표하였다. RICSAC 실험은 몇가지 점에서 특별하다. 우선, 그 실험은 움직이는 자동차끼리의 충돌 실험이라는 것이다. 종래 대부분의 충돌실험은 정지된 장애물에 대한 충돌실험이었고, 움직이는 차량끼리의 충돌실험은 대규모 자동차 제조업체에서 드물게 그것도 매우 제한되고 특별한 조건 아래에서 수행되곤 하였다. 또한 RICSAC는 충돌전 뿐만 아니라 충돌후 상황에 대해서도 충분한 실험 데이터를 제공하고 있다. 즉, 충돌후 차량들의 선속도뿐만 아니라 각속도에 대한 데이터도 제시하고 있는 점은 그 실험의 치밀성과 충실도를 대변하고 있다. 12가지의 실험사례중, 1가지는 실험 자료의 일부가 불충분하다는 문제가 제기되었으므로, 본 연구에서는 포함하지 않았다.

Fig5는 RICSAC에서 제시한 4가지 기본유형의 충돌 상황을 보여주고 있다. 본 논문의 전절에서 제시한 일반적인 Point-to-line 충돌 모델링과 동일한 방법으로 4가지 기본 충돌유형을 모델링하였다. Table 3은 4유형 11가지 충돌에 관련된 실험자료를 보여주고 있다. RICSAC 실험자료를 Brach<sup>4)</sup>가 평면 Point-to-line 충돌 해석이 용이하도록 추출 변형하였고, 그 자료들을 본 논문에서 제시한 해석기법에 알맞게 다시 재가공 변형한 것이다. 각각의 충돌 경우에 대하여 반발계수와 마찰계수를 정확히 구할 수가 있다면, 본 논문의

마찰충돌 해석 방법을 이용하여 자동차들의 충돌 후 속도들을 계산할 수가 있을 것이다. 그러나, Table 3에서 보여지는 충돌 후 속도는 엄밀한 실험치이다. 그런데, 이 실험치들은 아래와 같은 오류의 가능성이 있다.

- (1) 실험상의 오류
- (2) 자동차들에 대한 부정확한 물성치
- (3) 부적절한  $r_w$ ,  $\phi_a$ 와  $\phi$ 의 선정

RICSAC 실험은 동일한 조건하에서 다시 반복되지 않았기 때문에 실험치 오류의 직접적인 평가는 가능하지 않다. 따라서, 실험치들의 오류의 원인들을 구분하여 그 영향들을 분리, 제거할 수 없다.<sup>10)</sup>

#### 4. 실험 자료 해석

RICSAC 실험 데이터들을 마찰 충돌 해석에 적용하기 위해서는 우선, 반발계수와 마찰계수를 구해야 한다. 여기서는 편의상 등마찰계수와 정마찰계수를 구분하지 않았다. 실험 데이터를 마찰충돌 해석 과정에 부합시키는 계수들을 구하기 위해, 실험에 의해 측정된 충돌 후 속도(Post-impact Velocity)와 마찰 충돌 해석에 의해 예측되는 충돌 후 속도의 차이들의 제곱합을 목적함수로 하였다. 목적함수 Q는 식 (11)로 나타난다.

$$\begin{aligned}
 Q = & w_1(V'_{1x} - \hat{V}'_{1x})^2 + w_2(V'_{1y} - \hat{V}'_{1y})^2 \\
 & + w_3(V'_{2x} - \hat{V}'_{2x})^2 + w_4(V'_{2y} - \hat{V}'_{2y})^2 \quad (11) \\
 & + w_5(\Omega'_1 - \hat{\Omega}'_1)^2 + w_6(\Omega'_2 - \hat{\Omega}'_2)^2
 \end{aligned}$$

에너지 감소량이 충돌해석의 기본적인 양이므로, 식 (11)에서 보여지는 가중치  $w_i$ ( $i=1, 6$ )로 각각의 속도성분들이 운동에너지에 기여하는 비율을 주었다.

##### 4.1 반발계수와 마찰계수

식 (11)로 주어지는 Q를 최소로 하는 반발계수와 마찰계수를 컴퓨터에 의한 반복계산법에 의거 구한 것이 Table 4에 나타나 있다. 여기서

반발계수( $e$ )와 마찰계수( $\mu$ )의 값은 각각 0과 1 사이로 제한하였다. 실험 데이터와 전술한 마찰 충돌 해석의 상용도를 평가하는 기준은 Q의 값이다. 그런데, Table 4에서 볼 수 있는 것처럼 Collision 6, 7과 4, 5에서의 Q의 값이 다른 경우에서 보다 크게 나왔다. 이는, Table 3을 참조하면 알 수 있는 것처럼 충돌 전 속도(Pre-impact Velocity)가 다른 경우에서 보다 크다는 사실에 기인할 것이다. 마찰충돌 해석 과정은 강체역학의 범주 내에서 이루어 졌기 때문이다. 그 4가지 경우를 제외하고는, Q의 값은 비교적 작은 값으로 고루 분포되어 있다는 것을 볼 수 있다.

반발계수의 값은 각 Collision Category에서 매우 적게 변화하는 것으로 보인다. 한 예외는 Collision 8로  $e=0.052$ 이며, Collision 9와 10의 경우는 0.3 근방이다. 자동차 충돌 해석에서 대개의 경우 반발계수  $e$ 의 값을 0로 하는 것이 보편적인 가정이다. 그러나 RICSAC 데이터에 근거해 볼 때, 이 가정은 자동차 충돌의 모든 유형에 적합하지는 않는 것으로 보여진다.

마찰계수의 값들은 흥미있는 특성들을 보여주고 있다. 각 Collision Category에서 마찰계수의 값들은 고른 분포를 보여주고 있는 데, Category들 사이에서는 현격히 다른 변화들을 보여주고 있다. 특히 1, 2번째 Category에서 높은 값, 3, 4번째 Category에서 낮은 값을 보여주고 있는 사실은 충돌의 기하학적 유형에 의해 충분히 예측할 수 있는 것이다. Impact Case에서 볼 수 있는 것처럼, 역미끄럼(Sliding and Reverse Sliding)충돌, 미끄럼정지(Sliding and Sticking)충돌 경우가 많으므로 단순히 법선 Impulse에 마찰계수의 값을 곱하여 접선 Impulse를 구하는 보편적 가정의 심각한 문제점을 보여주고 있다. 그 가정은 순미끄럼(Forward Sliding)충돌에만 적용될 수 있는 것이다. 2번째 Category(90° Front to Side)에서 Impace Case가 3(미끄럼정지)으로 나타난 것은 차체의 충돌 후 분리 전에 미끄럼이 정지된다는 것을 의미한다. 이 또한 충돌의 기하학적 유형을 고려할 때 합리적인 결과이다.

##### 4.2 에너지 감소와 충돌 후 속도

Table 3 Experimental collision/vehicle data

Collision category	Collision number	Vehicle	M (Kg)	I (Nm/s <sup>2</sup> )	r <sub>a</sub> (m)	φ <sub>a</sub> (deg.)	φ (deg.)	V <sub>x</sub> (m/s)	V <sub>y</sub> (m/s)	V' <sub>x</sub> (m/s)	V' <sub>y</sub> (m/s)	Ω' (rad/s)
60° Front to Side	1	1	1398.	2659.	1.05	-120.	141.3	4.43	7.67	-2.07	5.17	0.00
		2	2094.	5055.	2.31		-79.8	-8.85	0.00	-3.76	2.41	-1.57
	6	1	1189.	2263.	0.61		90.0	4.66	8.32	-1.28	5.49	-3.14
		2	1949.	4704.	2.56		-77.9	-9.61	0.00	-5.69	1.26	-0.52
	7	1	1183.	1467.	0.61		90.0	6.50	11.27	-2.33	8.64	-3.35
		2	1678.	4048.	2.56		-77.9	-13.01	0.00	-7.74	1.48	-0.52
90° Front to Side	8	1	2135.	5153.	0.84	-90.	111.2	0.00	9.30	-3.66	6.01	-0.31
		2	2029.	4901.	2.41		-90.0	-9.30	0.00	-3.12	3.27	-1.99
	9	1	2221.	5360.	1.58		150.3	0.00	9.72	-3.02	7.38	0.79
		2	1023.	1323.	1.46		-84.0	-9.48	0.00	-0.86	4.52	-3.14
	10	1	2139.	4079.	1.61		150.8	0.00	14.89	-4.44	11.14	1.26
		2	1045.	1353.	1.06		-90.0	-14.89	0.00	-1.55	8.59	-5.24
10° Front to Front	11	1	1377.	2624.	1.87	90.	99.4	-9.12	0.00	1.77	0.62	0.52
		2	2197.	5306.	2.33		-88.7	8.98	-1.58	1.96	-1.25	0.00
	12	1	1418.	2701.	1.80		99.6	-14.08	0.00	4.28	-0.49	1.57
		2	2046.	4936.	2.22		-89.7	13.87	-2.44	1.93	-2.94	1.05
10° Front to Rear	3	1	1415.	2693.	2.33	-100.	81.4	0.00	0.00	-6.97	1.14	0.00
		2	2242.	5413.	2.69		-97.0	-9.48	0.00	-5.23	0.07	-0.26
	4	1	1446.	2755.	2.12		81.7	0.00	0.00	-9.92	0.42	-0.52
		2	2257.	5448.	2.44		-98.2	-17.30	0.00	-8.94	-0.44	-0.65
	5	1	1147.	1485.	1.75		78.0	0.00	0.00	-11.32	0.84	-1.22
		2	2085.	5032.	2.46		-100.7	-17.75	0.00	-10.46	0.17	-0.21

Table 4 Impact analysis results of experimental collisions-coefficients and energy loss

Collision category	Collision number	Q	e	μ	Impact case*	Energy loss in sim.(%)	Energy loss in exp.(%)
60° F to S	1	7.1	0.000	0.968	1(SS)	52.0	64.3
	6	19.9	0.000	0.689	5(FS)	47.1	55.7
	7	19.5	0.000	0.594	5(FS)	46.6	55.3
90° F to S	8	5.6	0.052	0.442	3(SS)	36.1	53.6
	9	2.1	0.284	0.590	3(SS)	29.7	40.6
	10	7.9	0.304	0.771	3(SS)	31.9	39.0
10° F to F	11	2.0	0.002	0.068	1(SS)	90.9	94.1
	12	7.4	0.101	0.000	2(SR)	91.7	90.7
10° F to R	3	3.2	0.217	0.104	1(SS)	34.3	34.3
	4	10.3	0.089	0.052	2(SR)	36.0	51.7
	5	13.8	0.088	0.097	2(SR)	31.8	42.4

\*FS : Forward Sliding, SS : Sliding and Sticking, SR : Sliding and Reverse sliding



Table 5 Impact analysis results of experimental collisions-comparisons of postimpact velocities

Coll. categ.	Coll. no.	Veh.	V <sub>x</sub> (m/s)			V <sub>y</sub> (m/s)			Ω'(rad/s)		
			Sim.	Exp.	Diff*	Sim.	Exp.	Diff*	Sim.	Exp.	Diff*
60° Front to Side	1	1	-2.27	-2.07	-0.20	5.99	5.17	0.82	0.48	0.00	0.48
		2	-4.38	-3.76	-0.62	1.12	2.41	-1.29	-2.46	-1.57	-0.89
	6	1	-2.19	-1.28	-0.91	7.77	5.49	2.28	-1.25	-3.14	1.89
		2	-5.43	-5.69	0.26	0.33	1.26	-0.93	-1.70	-0.52	-1.18
	7	1	-1.92	-2.33	0.41	11.17	8.64	2.53	-2.11	-3.35	1.24
		2	-7.08	-7.74	0.66	0.07	1.48	-1.41	-2.01	-0.52	-1.49
90° Front to Side	8	1	-4.78	-3.66	-1.12	7.28	6.01	1.27	-0.05	-0.31	0.26
		2	-4.27	-3.12	-1.15	2.13	3.27	-1.14	-2.12	-1.99	-0.13
	9	1	-3.47	-3.02	-0.45	7.92	7.38	0.54	1.39	0.79	0.60
		2	-1.95	-0.86	-1.09	3.91	4.52	-0.61	-3.51	-3.14	-0.37
	10	1	-5.34	-4.44	-0.90	11.40	11.14	0.26	2.50	1.26	1.24
		2	-3.96	-1.55	-2.41	7.15	8.59	-1.44	-5.85	-5.24	-0.61
10° Front to Front	11	1	1.78	1.77	0.01	0.41	0.62	-0.21	1.35	0.52	0.83
		2	2.15	1.96	0.19	-1.84	-1.25	-0.59	-0.10	0.00	-0.10
	12	1	3.60	4.28	-0.68	0.00	-0.49	-0.49	2.79	1.57	1.22
		2	1.62	1.93	-0.31	-2.44	-2.94	0.50	0.06	1.05	-0.99
10° Front to Rear	3	1	-6.56	-6.97	0.41	1.60	1.14	0.46	-0.71	0.00	-0.71
		2	-5.34	-5.23	-0.11	-1.01	0.07	-1.08	-0.27	-0.26	-0.01
	4	1	-10.63	-9.92	-0.71	2.07	0.42	1.65	-1.53	-0.52	-1.01
		2	-10.49	-8.94	-1.55	-1.33	-0.44	-0.89	-0.88	-0.65	-0.23
	5	1	-11.16	-11.32	0.16	2.60	0.84	1.76	-2.39	-1.22	-1.17
		2	-11.61	-10.46	-1.15	-1.43	0.17	-1.60	-0.85	-0.21	-0.64

\* Difference between velocities(Diff.)=Velocity in simulation(Sim.)-Velocity in experiment(Exp.)

에너지 감소가 마찰충돌 해석과정에서 실제 사용되고 있지 않더라도, 이는 충돌해석에서 중요한 의미를 가지는 양이다. Table 4에서, 4가지의 Collision Category에 대해 마찰충돌 해석에 의한 에너지 감소의 평균값은 각각 48.6%, 32.6%, 91.3%, 34.0%이고, 실험치는 58.4%, 44.4%, 92.4%, 42.8%이다. 마찰충돌 해석에 의한 에너지 감소는 충돌 표면에 대한 법선과 접선 성분으로 이루어져 있다. 그러나, 실제로는 자동차끼리의 충돌동안(0.15 sec) 자동차 타이어와 노면과의 마찰(μ=0.87)에 의한 에너지 손실도 있으나, 이는 대개 5%에서 10%내외<sup>4)</sup> 이므로 보통 무시된다. 이를 근거로 볼 때, Table 4에서 볼 수 있는 것처럼 강체역학의

범주 내에서 마찰충돌 해석에 의한 결과는 에너지 감소라는 관점에서 상당히 정확하다고 볼 수 있다.

마찰충돌 해석과 실험 데이터의 마지막 비교는 차량 충돌후 속도의 추정이다. Table 5에서 볼 수 있는 것처럼 모든 경우의 충돌에 대해 충분히 신뢰성 있는 좋은 결과를 보여주고 있다. Collision 3에서 Vehicle 2의 Y-방향 속도에서만 방향이 다를 뿐 나머지 모든 경우에 대해 X, Y 그리고 회전 방향에 대해서도 정확한 일치를 보여주고 있다. 이는 본 논문에서 제시한 마찰 충돌 해석이 자동차 충돌에도 상당한 신뢰도를 가지고 적용될 수 있다는 것을 입증하고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 강제역학의 범주 내에서 역적-운동량 이론을 이용한 자동차 충돌의 새로운 해석 방법으로 마찰충돌 이론을 제시하였다. 그 이론은 일반적인 2차원 마찰 충돌의 현상들을 특성화 및 분류하여 충돌해석에 직접 적용할 수 있도록 한다. 이 결과는 자동차 충돌뿐만 아니라 각종 기계부품처리 시스템, 로봇 시스템 등에도 적용이 가능하다. 실차 충돌실험은 고가의 장비 및 실험장이 필요하여 수행하기가 불가능하므로, 외국의 실차 충돌실험 결과를 이용하여 충돌해석을 수행하였다. 우선 실험 데이터를 마찰충돌 해석 과정에 부합하도록 반발계수와 마찰계수를 구하였다. 마찰충돌 해석 결과와 실험 데이터를 운동에너지 감소량과 충돌후 속도에 대해 비교하였다. 마찰충돌 해석 결과와 실험 데이터를 운동에너지 감소량과 충돌후 속도에 대해 비교하였다. 대부분의 모든 경우에 대해 실험결과와 시뮬레이션 결과는 상당히 좋은 일치율을 보여주었다. 이는 제시한 마찰충돌 해석이 자동차 충돌에도 상당한 신뢰도를 가지고 적용될 수 있다는 것을 입증하고 있다. 본 연구결과가 자동차 설계시 실험비용과 소요시간이 많이 드는 충돌실험의 횟수를 가급적 줄일 수 있도록 하는 역할을 수행할 것으로 기대한다. 본 논문에서 제시하는 결과는 자동차 충돌사고 재구성이라는 관점에서 도 이용이 가능할 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 1992년도 한국과학재단 연구비 지원(923-0900-010-2)을 받아 수행되었다.

## 참 고 문 헌

1. 박경진, 박영선, 이주영, 정근섭, 서명원, 위인혁, "승객 거동해석의 시뮬레이션에 관하여", 자동차공학회지, 제14권, 제6호, pp.29~35, 1992.
2. Ishikawa, H., "Computer Simulation of Automobile Collision-Reconstruction of Accidents", Proc. of 29th STAPP Car Crash Conference, pp.113~127, 1985.
3. Brach, R.M., "Tangential Restitution in Collisions," Proc. of ASME Winter Annual Meeting, AMD-Vol. 103, pp.1~7, 1989.
4. Brach, R.M., "Mechanical Impact Dynamics-Rigid Body Collisions," John Wiley & Sons, New York, pp.223~258, 1991.
5. Keller, J.B., "Impact with Friction", Journal of Applied Mechanics, Vol. 53, pp.1~4, 1986.
6. Routh, E.J., "Dynamics of a System of Rigid Bodies", MacMillan and Co., London, pp.158~171, 1891.
7. Wang, Y. and Mason, M.T., "Modelling Impact Dynamics for Robotic Operations", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.678~685, 1987.
8. Brach, R.M., "Rigid Body Collisions", ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 56, pp.133~138, 1989.
9. Han, I. and Gilmore B.J., "Impact Analysis for Multiple-Body Systems with Friction and Sliding Contact", Proc. of ASME Conf. on Flexible Assembly Systems, pp.99~108, 1989.
10. Dupont, P.E., "The Effect of Coulomb Friction on the Existence and Uniqueness of the Forward Dynamic Problem", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1442~1447, 1992.
11. 한인환, "마찰력이 개재된 강제역학에서의 불일치의 해소-Lötstedt의 미끄러지는 막대", 대한기계학회 '93 추계학술대회논문집, pp.172~177, 1993.
12. Han, I. and Gilmore, B.J., "Multi-Body Impact Motion with Friction-Analysis, Simulation and Experimental Validation", Designated as Best Technical Paper 1990 ASME Design Automation Conference, and ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 115, pp.412~422, 1993.
13. Jones, I.S. and Baum, A.S., "Research Input

- for Computer Simulation of Automobile Collisions”, Vol. IV, Staged Collision Reconstructions, DOT HS-805040, 1978.
14. Heydinger, G.J., Garrott, W.R., Chrstos, J.P., and Guenther, D.A., “A Methodology for Validating Vehicle Dynamic Simulations”, SAE Technical Paper Series 900128, 1990.