

■ 論 文 ■

충돌 후 속도와 충돌 변형으로부터 자동차 충돌 재구성

Automobile Collision Reconstruction Using Post-Impact Velocities and Crush Profile

한 인 환

(홍익대학교 기계정보공학과 부교수)

목 차

- | | |
|------------------------|--------|
| I. 서론 | IV. 결론 |
| II. 자동차 충돌 역해석 | 참고문헌 |
| III. 충돌계수 추정과 시뮬레이션 해석 | |

요 약

본 논문에서는 자동차 충돌사고 재구성에 직접 적용이 가능하도록, 주어지는 두 차량의 충돌후 속도, 차량에 관한 간단한 물성치와 기하학적 상대 위치들에 근거하여 충돌 직전 속도 성분들을 계산하는 소위 충돌 거동에 대한 역해석 방법을 제시한다. 또한, 제시하는 역해석 방법이 실용적 의미를 가지게 하기 위해서, 충돌 후 조건들로부터 반발계수와 역적비에 대한 적절한 추정 방법과 더불어 충돌 변형으로부터 유추할 수 있는 충돌 과정 동안의 에너지 손실에 근거한 역해석 방안도 포함한다. 실차충돌 실험자료의 분석 결과에 따르면, 역적-운동량 이론에만 근거한 역해석 결과뿐만 아니라 에너지 손실에 근거한 역해석 결과도 실험 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다. 강제역학의 범주내에서 역해석을 수행할 수 없는 공통속도 조건과 같은 경우나 반발계수에 관한 추정 결과가 적절하지 않게 되는 등 단지 역적-운동량이론만을 이용한 해석 결과가 미흡한 경우에는 에너지 손실에 근거한 역해석 방법을 보완적으로 활용할 수 있을 것이다. 본 논문에서 제시한 충돌 과정 역해석 결과는 자동차 충돌 해석 결과 및 충돌 전·후 거동에 대한 역미끄럼 해석 결과와 유기적으로 결합하여 자동차 충돌 사고 전 과정에 대한 직접적인 역해석을 수행할 수 있는 사고 재구성 패키지의 개발을 기대할 수 있다.

본 논문은 한국과학재단 연구비 지원(96-0200-13-01-3)에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

1. 서론

본 논문에서는 자동차 충돌사고 원인 조사에 직접 적용이 가능하도록, 충돌 거동에 대한 역 해석 방법을 제시한다. 즉, 주어지는 두 차량의 충돌후 속도, 차량에 관한 간단한 물성 자료와 충돌의 기하학적 상대 위치들에 근거하여 충돌 직전 속도 성분들을 계산하는 것으로서 일련의 자동차 사고 재구성 과정(Brach, 1991)에서 핵심적인 부문에 속한다. 사고 재구성을 위해서는 충돌 과정의 역 해석이 요구되지만 구조역학적인 해석 방법으로는 가능하지 않다. 반면, 강제역학 충돌 모델은 역적-운동량 법칙을 이용하고 대수 연립방정식으로 표현되므로, 소위 역 충돌 계산을 가능케 한다. 사고 재구성에서, 통상 충돌전 속도는 모르고 충돌 후 동적 상황이 해석의 출발점이 되므로, 역계산은 중요하다. 자동차 충돌 재구성에 관한 기존 연구들은 거의 대부분 역적-운동량 이론에 근거하고 있으며, 최근의 실차 충돌 실험 결과들(Wirth et al., 2000; Bailey et al., 2000)도 이러한 적용의 유효성을 뒷받침하고 있다.

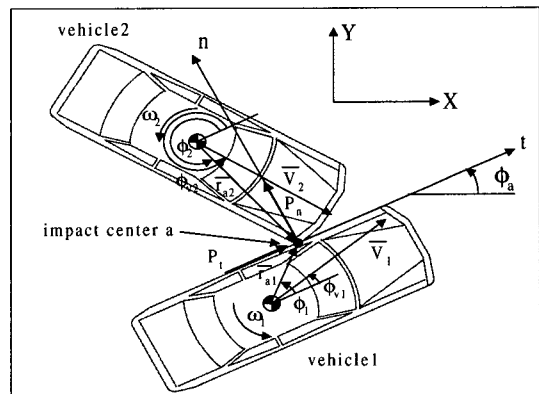
그런데, 실제 사고 재구성에서는 불확실한 여러 조건들이 혼재되어, 차량과 관련된 많은 동적 계수들을 정확히 구하는 것이 불가능하거나 혹은, 불필요할 수 있으므로 사고 상황에서 차량의 충돌 거동을 해석하기 위한 모델도 이에 부합해야 한다. 따라서, 각종 계수들은 사고 상황으로부터 용이하게 얻을 수 있거나 어느 정도 추정이 가능해야 실질적인 의미를 가지게 된다. 최근, Brach(1998)은 다양한 충돌 상황에서 충돌 해석을 위한 반발계수와 역적비와 같은 충돌 계수들을 구하기 위하여 강제충돌 모델로부터 구한 에너지 손실량과 CRASH 방법으로 계산된 에너지 손실을 반복 비교하는 방법을 제안한 바 있다. 한편, 본 저자는 충돌 중심에서의 구속 조건으로 법선 방향은 반발 계수, 접선 방향은 단순히 역적비의 개념을 도입하여 역적-운동량 이론에 근거한 자동차 충돌 모델과 함께 충돌계수들을 충돌 전 조건으로부터 자동적으로 추정하는 방법을 통한 실용적인 충돌 순해석 방안을 발표(1998)하였다. 본 저자를 포함한 많은 연구자들의 해석 결과(Brach, 1991; Ishikawa 1994)에 따르면, 충돌 중심에서 충돌 후 법선 혹은 접선 방향의 상대속도가 0인 공통속도 조건에서는 순수한 강제 충돌 모델로부터 해석적인 역계산이 가능하지

않게 된다. 따라서, 이러한 조건에서의 역계산이 반드시 가능하도록 해야 한다. 또한 실질적인 역해석을 위해서는 충돌 후 조건으로부터 역적비, 반발계수의 추정이 용이해야 한다.

본 논문에서는, 본 저자(1998)가 발표한 자동차 충돌 해석 결과에 근거하여 충돌 후 조건들로부터 반발계수와 역적비의 추정 방법과 역 해석 알고리즘을 제시한다. 또한, 공통속도 조건이나 혹은 단지 역적-운동량이론만을 이용한 해석 결과가 미흡한 경우에도 적용할 있도록 충돌 과정 동안의 에너지 손실에 근거한 역 해석 방안도 포함한다. 충돌 재구성의 경우에는, 충돌 해석과는 달리 충돌 변형 상태의 확보가 가능하며 이러한 차량의 변형 형태로부터 운동 에너지 손실을 구하는 일반적인 방법들(Genta, 1997; Neptune et al., 1995; Prasad 1992; Welsh and Struble, 1999)은 널리 알려져 있다.

II. 자동차 충돌 역 해석

본 논문에서 제시하는 충돌 모델은 기본적으로 역적-운동량 이론에 근거하여 충돌중심(impact center)에서의 구속조건으로 법선 방향은 반발계수를, 접선방향으로는 역적비를 사용하였다. <그림 1>에서 ϕ_{n1} , ϕ_{n2} 는 각 차량의 진행방향, 즉 속도방향을 나타낸다. P_n , P_t 는 각각 차량2에 작용하는 법선 및 접선역적이며, 크기는 같고 방향이 반대인 역적들이 차량1에 작용한다. 역적-운동량 이론을 적용하면, 충돌전 질량중심의 속도와 충돌 중심 a에서의 접선 및 법선 방향 상대속도 s_0 와 c_0 를 충돌 후 속도와의 관계로 각각 구하면



<그림 1> Modeling of colliding vehicles

식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다. 식(2)에서, 충돌이 가능하기 위해서 c_0 는 양수이어야만 한다. 아래 첨자 0는 충돌 개시 초기 상황, 그리고 t, n 은 각각 접선 및 법선 방향 성분을 의미하며, 식(3)에는 차량의 질량 관성 및 기하학적 상대위치와 관련된 3개의 상수를 보여주고 있다.

$$v_{10t} = v_{1t} + \frac{1}{m_1} P_t, \quad v_{10n} = v_{1n} + \frac{1}{m_1} P_n \quad (1a)$$

$$\omega_{10} = \omega_1 - \frac{1}{I_1} (r_{a1n} P_t - r_{a1t} P_n)$$

$$v_{20t} = v_{2t} - \frac{1}{m_2} P_t, \quad v_{20n} = v_{2n} - \frac{1}{m_2} P_n \quad (1b)$$

$$\omega_{20} = \omega_2 + \frac{1}{I_2} (r_{a2n} P_t - r_{a2t} P_n)$$

$$s_0 = v_{a10t} - v_{a20t} = s + A P_t - B P_n \quad (2)$$

$$c_0 = v_{a10n} - v_{a20n} = c - B P_t + A' P_n$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{r_{a1n}^2}{I_1} + \frac{r_{a2n}^2}{I_2} \\ A' &= \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{r_{a1t}^2}{I_1} + \frac{r_{a2t}^2}{I_2} \\ B &= \frac{r_{a1t} r_{a1n}}{I_1} + \frac{r_{a2t} r_{a2n}}{I_2} \end{aligned} \quad (3)$$

식(1)과 같이 6개의 역적-운동량 방정식으로 유도할 수 있고, 6개의 속도 성분과 2개의 역적 성분을 포함하는 총 8개의 변수가 결정되어야 한다. 따라서 2개의 구속조건이 필요하게 되는데, 이때의 구속조건으로 반발계수 e 와 역적비 μ_r 이 식(4)로 주어진다.

$$e = -\frac{c}{c_0}, \quad \mu_r = \frac{P_t}{P_n} \quad (4)$$

그리고, 충돌후 조건들만으로 법선 및 접선 역적에 대한 해석적 표현이 가능해지며, 결국 각 차량들의 충돌전 속도를 구할 수 있게 된다. 그런데, 충돌 중심 a 에서의 충돌후 상대 법선 속도 c 가 0인 경우를 포함한 공통속도 조건에서는 식(4)로부터 반발계수 e 가 0이 되며, 이에 상응하는 역적을 해석적으로 구할 수 없으므로 충돌전 속도를 결정할 수 없게 된다.

한편, 충돌과정 동안의 이론적인 운동에너지 손실은 식(5)로 표현할 수 있으며,

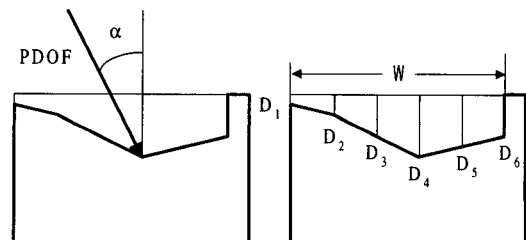
$$\begin{aligned} T_L &= \frac{1}{2} \sum_i [m_i (v_{i0t}^2 + v_{i0n}^2 - v_{it}^2 - v_{in}^2) \\ &\quad + I_i (\omega_{i0}^2 - \omega_i^2)] \\ &= \frac{1}{(A' - \mu_r B)^2} [(1 + \frac{1}{e})^2 c^2 (\frac{A}{2} \mu_r^2 + \frac{A'}{2} \\ &\quad - \mu_r B) - (1 + \frac{1}{e}) c (A' - \mu_r B) (\mu_r s + c)] \end{aligned} \quad (5)$$

그런데, 식(5)로 표현되는 에너지 손실이 음수의 값을 가질 수 없으므로, 역적비는 식(6)과 같이 제한한다.

$$\begin{aligned} (1 + \frac{1}{e})^2 c^2 A + 2 (1 + \frac{1}{e}) B c s &< 0 : \\ (\mu_{rT})_1 &\leq \mu_r \leq (\mu_{rT})_2 \\ (1 + \frac{1}{e})^2 c^2 A + 2 (1 + \frac{1}{e}) B c s &> 0 : \\ \mu_r &\leq (\mu_{rT})_1, \quad \mu_r \geq (\mu_{rT})_2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (\mu_{rT})_{1,2} &= \frac{A' s + \frac{1}{e} B c}{(1 + \frac{1}{e}) A c + 2 B s} \\ &\cdot [1 \pm \sqrt{1 + \frac{(1 - \frac{1}{e}) A' c \{ (1 + \frac{1}{e}) A c + 2 B s \}}{(A' s + \frac{1}{e} B c)^2}}] \end{aligned}$$

Delta-V(ΔV)는 충돌 차량의 속도 변화로서 정의되며, 충돌 정도나 승객의 안전도를 평가하는 기준으로 널리 사용되고 있다(Robinette et al., 1994). ΔV 는 2차 충돌 즉, 승객과 차량 내부와의 충돌 속도를 추정할 수 있게 하기 때문이다. CRASH 계열 프로그램들에서 주요한 변수인 PDOF는 DOI(Direction of Impulse)로도 불리는 데, 변형면에서의 충격력 즉, 역적의 방향을 나타낸다. 일반적으로 충돌 변형형태로부터 시각적인 유추가 어느 정도 가능한 것으로 알려져 있고(Cooper, 1990), ΔV 의 방향과 일치한다.



(그림 2) Crush profile and PDOF

α 는 <그림 2>에서 볼 수 있는 것처럼, 충돌면에 법선 방향을 기준으로 한 PDOF 각도이다.

공통속도 조건하에서 e 가 0이 되어 역 해석이 불가능하게 되거나, 단지 역적-운동량이론만을 이용한 해석 결과가 미흡한 경우에는, 차량의 변형 형태로부터 에너지 손실을 추정하여 이로부터 역계산을 수행할 수 있다. 전통적으로 자동차 사고 재구성 프로그램들에서는 차량의 충돌 변형으로부터 변형 에너지 즉 대략적인 운동에너지 손실을 구하기 위하여 식(7)로 나타나는 Campbell(1974)의 방법이 사용된다.

$$T_L = \frac{W}{5} [5G + \frac{P}{2} (D_1 + 2D_2 + 2D_3 + 2D_4 + 2D_5 + D_6) + \frac{Q}{6} (D_1^2 + 2D_2^2 + 2D_3^2 + 2D_4^2 + 2D_5^2 + D_6^2 + D_1D_2 + D_2D_3 + D_3D_4 + D_5D_6)] (1 + \tan^2 \alpha) \quad (7)$$

여기서 $G = \frac{P^2}{2Q}$

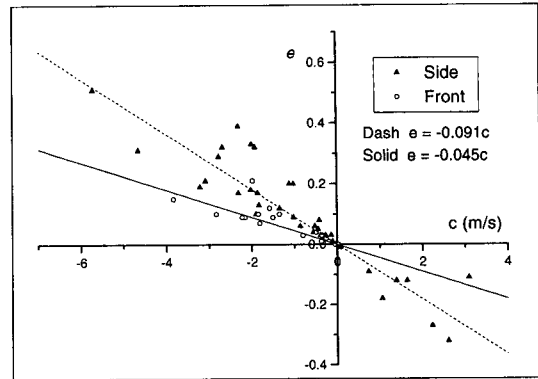
식(7)에서 W 는 변형면폭, D_i 는 변형량을 나타내며, <그림 2>에 보여지고 있다. P, Q 는 차량의 강성계수들(stiffness parameters)을 의미하며 충돌 실험에 의해 결정되어야 하는 값들이나, 차량의 윤거 등을 선택 기준으로 하여 대략적인 값을 추정할 수도 있다. 식(5)로 표현되는 이론적인 운동에너지 손실에 관한 표현식에 역적-운동량 방정식 (1)을 적용하면, 상응하는 법선 역적을 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$P_n = \frac{1}{A \mu_r^2 + A' - 2\mu_r B} [-(\mu_r s + c) + \sqrt{(\mu_r s + c)^2 + 2T_L (A \mu_r^2 + A' - 2\mu_r B)}] \quad (8)$$

이처럼 차량의 변형 상태로부터 에너지 손실을 구할 수 있으면, 공통속도 조건을 포함한 어느 경우에도 역적값을 구할 수 있게 되어 역적-운동량 방정식으로부터 충돌 전 속도를 계산하게 하는 역해석이 항상 가능하다.

III. 충돌 계수 추정과 시뮬레이션 해석

역 해석 방법을 유효하게 활용하기 위해서는, 충돌 후 조건으로부터 역적비와 반발계수의 추정이 가능해



<그림 3> Empirical eq. for estimating e : relationship between c and e

야만 한다. 따라서, 많은 횟수의 실차 충돌실험 결과를 통해 적절한 충돌 후 조건과 충돌 계수들과의 관계식을 구해야 한다. JARI에서 수행한 45회(한인환, 1998) 그리고 RICSAC 11건 (Brach, 1991)의 실차 충돌실험과 관련한 자료를 해석하여, 반발 계수와 역적비를 추정하는 방법을 구한다.

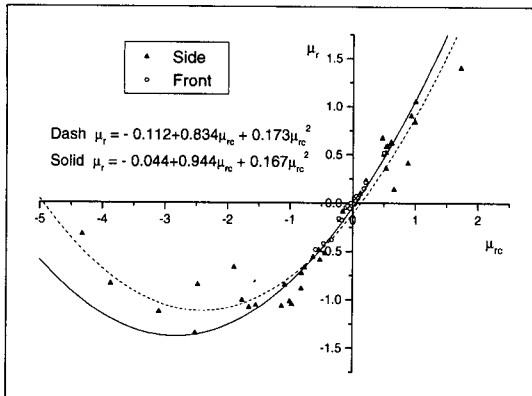
실차충돌 실험 분석 결과에 따르면, 반발계수 e 는 충돌 중심에서의 충돌 후 법선 방향 상대속도 c 와 충돌 유형에 따라 어느 정도의 상관관계를 보여주었다. <그림 3>과 식(9)는 상관관계와 추정식을 나타내며, Front는 충돌유형이 Front to Front나 Front to Rear인 경우, Side는 Front to Side를 의미한다.

$$\begin{aligned} e &= -0.045c \quad (Front) \\ e &= -0.091c \quad (Side) \end{aligned} \quad (9)$$

그런데, 역적비의 경우 충돌 후 조건에만 근거하는 상관 계수를 설정하는 것이 가능하지 않았다. 따라서, 본 논문저자(1998)의 충돌 해석 연구에서 제시하였던 역적비 추정식을 보완하여 반발계산을 통해 역적비를 구할 수 있도록 하였다. <그림 4>와 식(10)은 각각 상관관계와 추정식을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \mu_r &= -0.044 + 0.944 \mu_{rc} + 0.167 \mu_{rc}^2 \quad (Front) \\ \mu_r &= -0.112 + 0.834 \mu_{rc} + 0.173 \mu_{rc}^2 \quad (Side) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\mu_{rc} = \frac{A' s_0 + B c_0}{B s_0 + A c_0}$



〈그림 4〉 Empirical eq. for estimating μ_r : relationship between μ_{rc} and μ_r

식(10)에서 μ_{rc} 는 충돌 해석에서 충돌 유형을 특성화할 수 있는 계수의 하나로 설정되었던 것이며, 공통속도 조건하에서의 역적비를 의미하고 충돌 전 속도에 의해 결정된다. 총 56건의 실차 충돌 실험 결과에 따르면 역적비가 -2.0과 2.0사이의 값을 가지므로, 역적비의 범위를 그와 같이 설정하였다. 구간내 임의의 값을 역적비로 설정하고 충돌 역 해석을 수행하여 계산된 충돌전 속도를 가지고, 식(10)을 통해 상응하는 역적비를 추정한다. 이 과정을 반복하여, 임의로 설정한 역적비와 추정된 역적비의 차이가 일정 값 이내에 들어오게 되면 계산을 종료하거나 혹은, 구간내의 역적비 중에서 추정 역적비와 가장 오차가 적은 값을 취하게 된다. 충돌 해석과 역 해석에 관한 결과에서, 역적비는 충돌 전 조건과 아주 좋은 상관 관계를 보여 주고 있는 반면, 반발계수의 경우 충돌 전 조건보다 충돌 후 조건이 다소 나은 상관 관계를 보여주었다. 따라서, 역해석을 위해서는 충돌 후 조건으로부터 반발계수를 추정하고 충돌 전 조건과 관련한 역적비 추정식을 가지고 반복 계산을 통해 역적비를 추정하는 것이 적절하다.

사고 차량의 변형 부위로부터 최소한 PDOF 방향 즉 역적비의 부호에 대한 유추는 가능할 것이므로, 역적비에 관한 정보가 전혀 없는 경우(IEST1)와 역적비의 부호가 알려진 경우(IEST2)에 대하여 각각 역 해석 작업을 수행한 결과와 실차 충돌 실험 결과(EXP)를 〈표 1〉에 요약하였다. 본 연구에서의 실차 충돌 실험에서 사용된 차량의 제원과 속도 등 자세한 자료는 본 저자에 의해 발표된 충돌 해석에 관한 논문(1998)을 참조할 수 있다. 반발계수는 IEST1,

IEST2의 경우 모두 충돌 후 조건에 근거한 추정식(9)에 의해 계산되었다. 차량들의 충돌 전 속도의 크기와 방향을 보면, 〈표 1〉에서 알 수 있는 것처럼, 거의 모든 경우의 충돌에 대하여 IEST2가 충분히 신뢰성 있는 좋은 결과를 보여주고 있다. IEST1이 IEST2에 비해 전반적으로 부정확한 결과를 나타내고 있는 데, 이는 차량의 충돌 변형 상황으로부터 최소한 역적비 부호의 유추가 매우 중요하다는 사실을 암시한다. 〈그림 5〉와 〈그림 6〉은 차량 충돌 유형별로 실험 결과와 역 해석 결과(IEST2)에서 각 차량 속도의 크기와 방향을 비교해서 나타낸 것인데, 몇가지 경우를 제외하고는 차량의 충돌 유형에 관계없이 비교적 고른 일치를 보여주고 있다.

한편, RICSAC 11건의 실험에 대해서는 충돌 변형에 대한 자료의 확보가 가능하여 에너지 손실에 근거한 역해석 방법을 병행하였다. 에너지 손실로부터 법선 역적을 계산할 때, 식(8)을 활용하게 되므로 반발계수에 대한 별도의 추정 작업이 필요없으며, 역적비의 경우는 전술한 것과 동일한 방법을 채용하였다.

역적-운동량 이론에만 근거한 역 해석 결과와 에너지 손실에 근거한 방법이 추가된 결과를 비교하면, 정면충돌 또는 추돌의 경우에는 후자의 방법이 측면 충돌의 경우에는 전자의 방법이 비교적 좋은 일치를 보여주고 있으나, 전반적으로 정확도 면에서 큰 차이가 있다고는 볼 수 없다. 그리고, 후자의 에너지 손실에 근거한 역해석 방법은 전자의 역적-운동량 이론에만 근거한 해석 방법에 비해 차량의 충돌변형에 관한 정보를 추가로 요구하고 있다는 사실을 염두에 두어야 한다.

IV. 결론

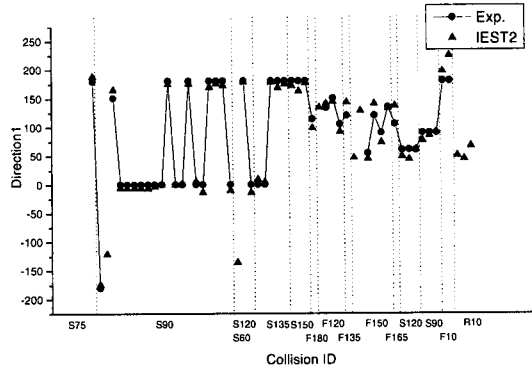
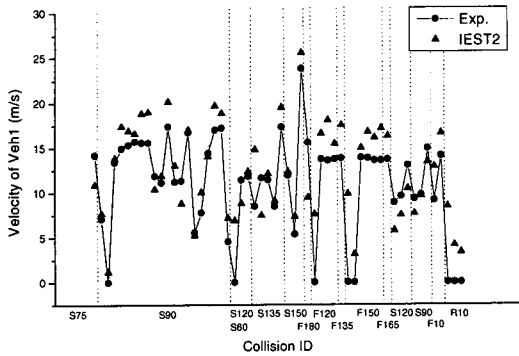
본 논문에서는 자동차 충돌사고 조사에 직접 적용이 가능하도록, 주어지는 두 차량의 충돌후 속도, 차량에 관한 간단한 물성 자료와 충돌의 기하학적 상대 위치들에 근거하여 충돌 직전 속도 성분들을 강제 역학의 범주내에서 계산하는 소위 충돌 거동에 대한 역 해석 방법을 제시하였다. 또한, 역 해석 방법이 실용적 의미를 가지게 하기 위해서, 충돌 후 조건들로부터 반발계수와 역적비에 대한 적절한 추정 방법과 더불어 충돌 변형으로부터 유추할 수 있는 충돌 과정 동안의 에너지 손실에 근거한 역 해석 방안도 포함하

〈표 1〉 Collision reconstruction results-JARI and RICSAC

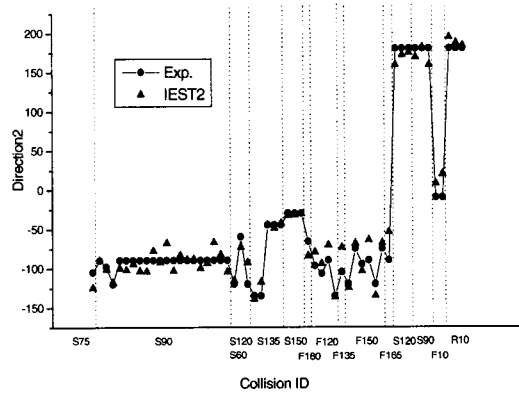
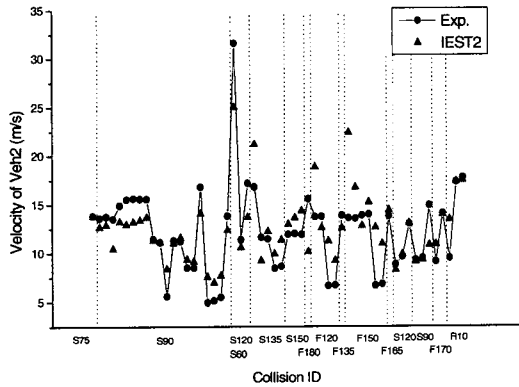
Collision Categories	Collision ID	Vel. of Veh1 (m/s)	ϕ_{n1} (Deg.)	$\omega 1$ (rad/s)	Vel. of Veh2 (m/s)	ϕ_{n2} (Deg.)	$\omega 2$ (rad/s)	e	μr	ρ	
75° Front to Side	S75T1	Exp.	14.19	180.00	0.00	13.83	-105.00	0.00	0.04	-0.57	0.28
		IEST1	10.31	-171.13	-1.08	14.05	-126.81	-4.86	0.05	0.12	0.17
		IEST2	10.91	-172.23	-0.85	13.77	-124.33	-4.19		-0.01	0.16
S90T1	S90T1	Exp.	7.03	180.00	0.00	13.60	-90.00	0.00	0.17	-0.46	0.38
		IEST1	3.65	-144.26	0.01	12.17	-113.64	-4.84	0.21	0.42	0.26
		IEST2	7.65	-174.75	0.71	12.64	-90.05	0.22		-0.59	0.34
S90T2	S90T2	Exp.	0.00	*	0.00	13.75	-97.98	0.00	-0.12	0.00	0.30
		IEST1	2.30	-169.72	0.98	13.23	-93.42	1.28	-0.15	-0.50	0.28
		IEST2	1.16	-121.22	0.56	12.86	-101.26	-0.51		0.00	0.21
S90T3	S90T3	Exp.	13.41	151.10	0.00	13.50	-120.00	0.00	0.10	-0.18	0.37
		IEST1	13.83	165.17	2.61	10.41	-118.02	0.70	0.17	-0.63	0.27
		IEST2	13.83	165.17	2.61	10.41	-118.02	0.70		-0.63	0.27
S90T4	S90T4	Exp.	14.90	0.00	0.00	14.90	-90.00	0.00	0.01	0.62	0.36
		IEST1	17.36	-6.25	0.06	13.22	-100.28	-2.12	0.01	1.37	0.41
		IEST2	17.36	-6.25	0.06	13.22	-100.28	-2.12		1.37	0.41
S90T5	S90T5	Exp.	15.30	0.00	0.00	15.50	-90.00	0.00	0.03	0.55	0.39
		IEST1	16.88	-6.74	0.38	12.94	-101.91	-2.55	0.04	1.36	0.38
		IEST2	16.88	-6.74	0.38	12.94	-101.91	-2.55		1.36	0.38
S90T6	S90T6	Exp.	15.70	0.00	0.00	15.60	-90.00	0.00	0.05	0.53	0.32
		IEST1	16.60	-6.64	0.63	13.18	-94.75	-0.64	0.08	1.10	0.24
		IEST2	16.60	-6.64	0.63	13.18	-94.75	-0.64		1.10	0.24
S90T7	S90T7	Exp.	15.56	0.00	0.00	15.56	-90.00	0.00	0.02	0.56	0.29
		IEST1	9.09	-4.86	3.89	16.46	-62.14	7.53	0.03	-0.60	0.24
		IEST2	18.80	-6.60	0.09	13.36	-103.55	-2.94		1.63	0.38
S90T8	S90T8	Exp.	15.56	0.00	0.00	15.56	-90.00	0.00	0.00	0.59	0.34
		IEST1	8.97	-10.41	3.00	15.48	-64.20	6.92	0.00	-0.53	0.22
		IEST2	18.97	-6.93	-0.32	13.67	-103.84	-3.51		1.61	0.44
S90T9	S90T9	Exp.	11.84	0.00	0.00	11.44	-90.00	0.00	0.18	0.56	0.37
		IEST1	5.83	1.96	1.96	13.81	-59.68	3.07	0.18	-0.47	0.32
		IEST2	10.37	-3.81	0.37	11.29	-77.58	-0.99		0.26	0.28
S90T10	S90T10	Exp.	11.10	0.00	0.00	11.10	-90.00	0.00	0.17	0.91	0.23
		IEST1	11.85	-0.29	-0.32	11.10	-92.27	-0.61	0.17	1.10	0.27
		IEST2	11.85	-0.29	-0.32	11.10	-92.27	-0.61		1.10	0.27
S90T11	S90T11	Exp.	17.36	180.00	0.00	5.58	-90.00	0.00	0.20	-0.68	0.16
		IEST1	20.15	174.85	2.58	8.36	-68.10	3.12	0.10	-1.03	0.44
		IEST2	20.15	174.85	2.58	8.36	-68.10	3.12		-1.03	0.44
S90T12	S90T12	Exp.	11.20	0.00	0.00	11.30	-90.00	0.00	0.12	0.67	0.36
		IEST1	4.12	11.20	2.40	13.26	-60.79	6.78	0.12	-0.70	0.41
		IEST2	13.02	-0.18	-0.67	11.01	-103.08	-2.60		1.20	0.46
S90T13	S90T13	Exp.	11.30	0.00	0.00	11.20	-90.00	0.00	0.51	0.41	0.14
		IEST1	7.71	3.72	1.22	11.75	-81.09	2.09	0.52	-0.15	0.09
		IEST2	8.80	1.89	0.89	11.60	-83.46	1.51		0.00	0.10
S90T14	S90T14	Exp.	16.70	180.00	0.00	8.50	-90.00	0.00	0.06	-0.85	0.27
		IEST1	5.49	159.98	-4.18	15.69	-140.51	-13.59	0.05	1.55	0.55
		IEST2	17.00	175.72	0.62	9.34	-88.77	0.14		-0.71	0.32
S90T15	S90T15	Exp.	5.56	0.00	0.00	8.47	-90.00	0.00	0.31	0.16	0.12
		IEST1	4.31	10.42	-0.54	9.47	-82.72	1.31	0.24	-0.35	0.18
		IEST2	5.22	5.72	-0.60	9.13	-88.43	0.10		0.00	0.18
S90T16	S90T16	Exp.	7.75	0.00	0.00	16.80	-90.00	0.00	0.19	0.23	0.38
		IEST1	2.02	-50.63	3.28	16.86	-152.56	9.05	0.29	-0.83	0.48
		IEST2	10.02	-13.62	0.50	14.07	-93.71	-2.81		0.73	0.34
S90T17	S90T17	Exp.	14.39	180.00	0.00	4.94	-90.00	0.00	0.03	-1.07	0.31
		IEST1	5.44	-179.79	-4.35	10.57	-152.56	-10.50	0.01	1.67	0.51
		IEST2	14.06	169.67	-0.95	7.58	-93.71	-1.24		-0.52	0.38
S90T18	S90T18	Exp.	17.00	180.00	0.00	5.14	-90.00	0.00	0.20	-0.34	0.09
		IEST1	19.70	176.10	2.52	6.99	-67.00	3.06	0.09	-1.06	0.38
		IEST2	19.70	176.10	2.52	6.99	-67.00	3.06		-1.06	0.38
S90T19	S90T19	Exp.	17.17	180.00	0.00	5.50	-90.00	0.00	0.08	-1.01	0.23
		IEST1	18.83	172.40	1.70	7.71	-82.47	0.40	0.04	-0.80	0.40
		IEST2	18.83	172.40	1.70	7.71	-82.47	0.40		-0.80	0.40
S90T20	S90T20	Exp.	4.53	0.00	0.00	13.81	-90.00	0.00	0.13	0.12	0.46
		IEST1	7.14	-10.24	-0.39	12.35	-104.49	-3.49	0.17	0.68	0.49
		IEST2	7.14	-10.24	-0.39	12.35	-104.49	-3.49		0.68	0.49

<표 1> Collision reconstruction results-JARI and RICSAC(continue)

Collision Categories	Collision ID	Vel. of Veh1 (m/s)	ϕ_{i1} (Deg.)	$\omega 1$ (rad/s)	Vel. of Veh2 (m/s)	ϕ_{i2} (Deg.)	$\omega 2$ (rad/s)	e	μT	ρ	
120° Front to Side	S120T1	Exp.	0.00	*	0.00	31.56	-120.00	0.00	-0.11	0.67	0.29
		IEST1	8.03	-144.53	6.20	24.46	-112.27	4.96	-0.28	-0.62	0.07
		IEST2	6.85	-135.65	5.68	25.01	-115.84	3.48		0.00	0.05
	S120T2	Exp.	11.39	180.00	0.00	11.38	-60.01	0.00	0.00	-1.02	0.49
		IEST1	8.79	178.24	-0.97	10.57	-73.28	-2.76	0.00	-0.43	0.34
		IEST2	8.79	178.24	-0.97	10.57	-73.28	-2.76		-0.43	0.34
	S120T3	Exp.	11.80	0.00	0.00	17.17	-119.98	0.00	0.21	0.98	0.38
		IEST1	6.81	-38.92	3.76	13.78	-63.83	6.87	0.28	-0.80	0.24
		IEST2	12.36	-14.00	1.25	13.69	-92.72	1.54		0.56	0.22
135° Front to Side	S135T1	Exp.	8.47	0.00	0.00	16.80	-135.00	0.00	0.09	1.19	0.61
		IEST1	8.81	-140.76	4.96	8.34	-97.58	8.69	0.09	-1.09	0.44
		IEST2	14.76	9.28	-3.18	21.19	-139.29	-5.45		1.44	0.80
	S135T2	Exp.	11.61	0.00	0.00	11.61	-135.00	0.00	0.03	1.45	0.57
		IEST1	8.29	4.59	0.97	9.74	-121.47	2.94	0.02	0.44	0.35
		IEST2	8.29	4.59	0.97	9.74	-121.47	2.94		0.44	0.35
	S135T3	Exp.	11.40	180.00	0.00	11.44	-45.00	0.00	-0.32	-0.82	0.12
		IEST1	12.08	178.10	0.98	12.20	-44.67	0.37	-0.24	-1.02	0.23
		IEST2	12.08	178.10	0.98	12.20	-44.67	0.37		-1.02	0.23
	S135T4	Exp.	8.44	180.00	0.00	8.44	-45.00	0.00	0.39	-1.12	0.53
		IEST1	0.57	144.34	-3.37	6.30	-109.10	-7.89	0.21	1.44	0.56
		IEST2	9.08	168.69	1.36	9.91	-48.64	-0.39		-0.84	0.63
	S135T5	Exp.	17.30	180.00	0.00	8.64	-45.00	0.00	-0.01	-0.86	0.21
		IEST1	19.48	175.29	2.27	11.35	-42.86	1.15	-0.01	-1.09	0.43
		IEST2	19.48	175.29	2.27	11.35	-42.86	1.15		-1.09	0.43
150° Front to Side	S150T1	Exp.	11.90	180.00	0.00	11.90	-30.06	0.00	0.32	-1.50	0.49
		IEST1	12.31	172.01	1.46	12.97	-32.62	-0.39	0.18	-1.06	0.55
		IEST2	12.31	172.01	1.46	12.97	-32.62	-0.39		-1.06	0.55
	S150T2	Exp.	5.33	180.00	0.00	12.00	-29.94	0.00	0.33	-1.03	0.56
		IEST1	7.32	162.58	1.87	13.63	-32.20	0.09	0.18	-0.94	0.69
		IEST2	7.32	162.58	1.87	13.63	-32.20	0.09		-0.94	0.69
	S150T3	Exp.	23.80	180.00	0.00	11.89	-29.97	0.00	-0.18	-0.90	0.14
		IEST1	25.55	177.06	1.84	14.33	-30.77	-0.07	-0.09	-1.12	0.30
		IEST2	25.55	177.06	1.84	14.33	-30.77	-0.07		-1.12	0.30
180° Front to Front	F180T1	Exp.	15.56	114.01	0.00	15.56	-65.99	0.00	0.01	-0.38	0.97
		IEST1	9.82	102.45	-3.03	10.48	-80.11	-3.17	0.02	-0.13	0.95
		IEST2	9.82	102.45	-3.03	10.48	-80.11	-3.17		-0.13	0.95
120° Front to Front	F120T1	Exp.	0.00	*	0.00	13.71	-97.13	0.00	0.03	-0.05	0.43
		IEST1	7.18	10.84	-6.39	16.86	-120.55	-7.54	0.02	0.96	0.78
		IEST2	7.57	133.77	1.26	18.84	-79.51	5.24		-0.50	0.77
	F120T2	Exp.	13.70	132.99	0.00	13.75	-107.00	0.00	0.09	-0.17	0.64
		IEST1	10.76	116.80	-3.30	14.43	-125.07	-4.51	0.10	0.25	0.64
		IEST2	16.55	141.08	2.45	12.58	-94.33	2.95		-0.47	0.70
	F120T3	Exp.	13.58	150.00	0.00	6.64	-90.00	0.00	0.12	-0.48	0.56
		IEST1	18.02	144.12	-0.27	11.24	-70.61	4.30	0.07	-0.62	0.79
		IEST2	18.02	144.12	-0.27	11.24	-70.61	4.30		-0.62	0.79
	F120T4	Exp.	13.72	105.00	0.00	6.72	-135.00	0.00	0.10	0.09	0.60
		IEST1	16.64	118.54	4.02	5.62	-80.27	4.57	0.08	-0.46	0.75
		IEST2	15.41	91.45	-3.56	9.24	-136.75	-1.01		0.33	0.73
135° Front to Front	F135T1	Exp.	13.81	119.98	0.00	13.86	-105.01	0.00	0.09	-0.04	0.76
		IEST1	17.48	142.88	6.04	12.56	-73.82	5.80	0.10	-0.68	0.84
		IEST2	17.48	142.88	6.04	9.24	-73.82	5.80		-0.68	0.84
150° Front to Front	F150T1	Exp.	0.00	*	0.00	13.58	-120.00	0.00	0.04	0.53	0.57
		IEST1	6.95	171.97	-5.48	12.08	-83.01	-1.11	0.02	-0.64	0.78
		IEST2	9.84	45.95	-5.48	22.37	-124.91	-1.11		0.75	0.88
	F150T2	Exp.	0.00	*	0.00	13.53	-75.01	0.00	0.10	-0.10	0.44
		IEST1	3.11	127.68	5.25	16.75	-68.54	3.04	0.06	-0.33	0.71
		IEST2	3.11	127.68	5.25	16.75	-68.54	3.04		-0.33	0.71
	F150T3	Exp.	13.88	53.79	0.00	13.85	-94.97	0.00	0.15	0.20	0.83
		IEST1	14.94	44.13	-2.22	12.79	-103.98	-1.76	0.17	0.39	0.84
		IEST2	14.94	44.13	-2.22	12.79	-103.98	-1.76		0.39	0.84
	F150T4	Exp.	13.83	120.01	0.00	13.97	-90.00	0.00	0.03	-0.10	0.87
		IEST1	16.73	140.51	5.07	15.22	-64.13	2.99	0.04	-0.61	0.91
		IEST2	16.73	140.51	5.07	15.22	-64.13	2.99		-0.61	0.91



〈그림 5〉 Validation results of inverse calculation : velocities of vehicle1



〈그림 6〉 Validation results of inverse calculation : velocities of vehicle 2

었다. 실차 충돌 실험 결과 자료를 토대로 한 본 연구 결과에 따르면, 역적-운동량 이론에만 근거한 역 해석 결과뿐만 아니라 에너지 손실에 근거한 역 해석 결과도 실험 결과와 좋은 일치를 보여주었다. 그런데, 에너지 손실에 근거한 역 해석 방법은 역적-운동량 이론에만 근거한 해석 방법에 비해 차량의 충돌 변형에 관한 정보를 추가로 필요로 함에도 불구하고 정확도 면에서는 충돌 유형 별로 다소의 차이는 존재하지만, 전반적으로는 어느 방법의 우위를 논할 수 없다. 따라서, 일반적인 경우에는 강제역학의 역적-운동량 법칙에 근거한 방법의 활용도가 더 높다고 할 수 있다. 그러나, 강제역학의 범주내에서 역 해석을 수행할 수 없는 공통속도 조건과 같은 경우나 반발계수에 관한 추정 결과가 적절하지 않게 되는 등 단지 역적-운동량이론만을 이용한 해석 결과가 미흡한 경우에는 에너지 손실에 근거한 역 해석 방법을 보완적으로 활

용할 수 있을 것이다.

기존의 연구나 상용 프로그램들에서는, 사고 조사자가 추측한 충돌 전 속도를 가지고 충돌 해석을 수행하도록 하여 결국 충돌 전 속도 및 관련 계수들을 반복 수정하도록 요구하고 있다. 따라서, 사용자에게 계속되는 반복 작업과 더불어 많은 숙련도를 필연적으로 요구하게 되는 한계를 가지고 있다. 그러나, 제시한 역 해석 방법은 실제 또는 유추된 차량의 충돌 후 속도로부터 직접 충돌 전 속도를 계산하는 것이 언제나 가능하도록 하였다. 한편, 본 논문에서 제시한 충돌 과정 역 해석결과는 본 논문 저자에 의해 발표된 자동차 충돌 해석 결과(1998) 및 충돌 전, 후 거동에 대한 의미그림 해석 결과(1999)와 유기적으로 결합하여 자동차 충돌 사고 전 과정에 대한 직접적인 역 해석을 수행할 수 있는 사고 재구성 패키지의 개발을 기대할 수 있다.

참고문헌

1. 한인환 (1998), "자동차 사고 재구성을 위한 충돌해석," 한국자동차공학회논문집, 제6권, 제2호, pp. 178~190.
2. 박상욱, 한인환 (1999), "자동차 사고 재구성을 위한 제동과 미끄럼 동역학 및 역해석," 한국자동차공학회논문집, 제7권, 제4호, pp.189~202.
3. Bailey, M.N. et al. (2000), "Data from Five Staged Car to Car Collisions and Comparison with Simulations," *SAE Paper* 2000-01-0849.
4. Brach, R.M. (1991), "Mechanical Impact Dynamics-Rigid Body Collisions," John Wiley & Sons, New York, pp.223~252.
5. Brach, R.M. (1998), "Crush Energy and Planar Impact Mechanics for Accident Reconstruction," *SAE Paper* 980025.
6. Campbell, K.L. (1974), "Energy Basis for Collision Severity," *SAE Paper* 740565.
7. Cooper, G.W. (1990), "Work, Energy, and Speed From Damage in Traffic Accidents," Northwestern University Traffic Institute.
8. Genta, G. (1997), "Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation," World Scientific Publishings Co., pp.461~494.
9. Ishikawa, H. (1994), "Impact Center and Restitution Coefficients for Accident Reconstruction," *SAE Paper* 940564.
10. Neptune, J.A., Flynn, J.E., Underwood, H.W., Chavez, P.A. (1995), "Impact Analysis Based upon the CRASH3 Damage Algorithm," *SAE Paper* 950358.
11. Prasad, A.K. (1992), "Energy Absorbing Properties of Vehicle Structures and Their Use in Estimating Impact Severity in Automobile Collisions," *FISITA Paper* 925209.
12. Robinette, R.D., Fay, R.J., and Paulsen, R.E. (1994), "Delta-V: Basic Concepts, Computational Methods, and Misunderstandings," *SAE Paper* 940915.
12. Welsh, K.J. and Struble, D.E. (1999), "Crush Energy and Structural Characterization," *SAE Paper* 1999-01-0099.
13. Wirth, J.L., Marine, M.C. and Thomas, T.M. (2000), "An Analysis of a Staged Two-Vehicle Impact," *SAE Paper* 2000-01-0464.