

충돌방향 해석을 위한 정성적 추론이론 개발 및 적용

이대희* · 박진수*

도로교통공단 교통과학연구원 · *교통안전공단
(2017. 3. 14. 접수 / 2017. 5. 29. 수정 / 2017. 6. 21. 채택)

A Qualitative Method to Find Out the Impact Direction in Traffic Accident

Dae Hee Lee* · Jin Soo Park*

Traffic Science Institute, KoROAD

*Korea Transportation Safety Authority

(Received March 14, 2017 / Revised May 29, 2017 / Accepted June 21, 2017)

Abstract : The physical tool for analyzing collision accidents narrows down to the conservation law of momentum. The conservation law of momentum which is also utilized to investigate or to analyze a traffic accident is essential to Newton mechanics. This paper suggests an alternative analytical tool based on the conservation law of momentum. Simply put, the tool is a alternative qualitative method of analyzing a car's direction to find out whether it is driving over the centerline. This paper proposes a deduction theory that use qualitative information to make a qualitative analysis of which car drove over the center line.

Key Words : qualitative reasoning, direction of impact

1. 서론

충돌을 분석하는 물리적인 툴(tool)은 운동량 보존법칙으로 귀결된다. 운동량 보존법칙은 뉴턴 역학의 가장 중요한 내용이며, 교통사고 조사·분석의 분야에도 활용되고 있다.

이 연구논문에서는 운동량 보존법칙을 근거로 하는 또 다른 사고분석 툴을 제시한다. 이것을 한마디로 표현하자면 “충돌 이후 이동방향을 근거로 하여 충돌방향을 해석하는 정성적 사고조사 추론 이론”에 관한 방법이다.

정성적 정보에 근거한 추론을 다루는 정성적 물리학(Qualitative Physics)은 미국을 중심으로 활발히 연구되고 있으며, 실용화되어 산업 분야에서 응용이 확대되고 있다고 한다¹⁾.

특히 일명 “블랙박스”의 등장으로 자동차 사고 분석 분야에서도 자연스럽게 정성적 추론이 활발하게 일어나고 있다. 그러나, 이렇게 눈으로 그 정도를 확인할 수 있는 분야에서는 활발하게 일어나지만, 그렇지 않은 부분에서는 아직까지 정량적 정보에 의존하는 경향

이 높다.

여기서는 정성적 정보를 근거로 하여 자동차가 진행하는 평면에서 위에서 사고 당사자 주장의 개연성 여부를 중앙선을 기준으로 살펴보는 방법을 통해 어느 자동차가 중앙선 침범을 하였는지를 분석할 수 있는 추론 이론을 제시한다.

2. 본론

2.1 이론적 배경

자동차 사고는 두 자동차 사이의 충돌로 사건화 된다. 이 충돌은 급격한 속도 변화를 수반하며 시간당 속도 변화를 가속도라고 한다. 가속도 크기에 따라 인명과 재산의 손실이 발생하여 자동차 사고라는 재앙으로 귀결된다.

이렇게 자동차가 충돌하게 되면, 아주 짧은 시간이지만, 두 자동차가 마치 한 물체처럼 운동한다. 한 물체라고 함은 두 자동차가 뜻하지 않게 서로 붙어서 움직이는 경우를 말한다. 즉, 충돌 순간을 다시 정의하면 “아주 짧지만 한 물체처럼 운동하는 순간”이라고 정의

* Corresponding Author : Dae Hee Lee, Tel : +82-33-749-5445, E-mail : primette@koroad.or.kr
Traffic Science Institute, KoROAD, Hyeuksin-ro 2 Wonju-si, Kangwon-do 26466, Korea

할 수 있다.

뉴턴의 제1법칙인 “관성 보존의 법칙”에 의해 충돌 중 마치 한 물체처럼 움직이는 두 물체의 관성은 보존되어야 한다. 따라서 충돌직전 두물체의 관성의 합과 충돌직후 두 물체의 관성의 합은 변치 않아야 하는 것으로 생각할 수 있다.

위 내용을 개념화하여 수식으로 정리한 것이 운동량 보존법칙이다.

$$\vec{P}_i = \vec{P}_e \quad (1)$$

$$\vec{P}_{1i} + \vec{P}_{2i} = \vec{P}_{1e} + \vec{P}_{2e} \quad (2)$$

$$m_1 \vec{v}_{1i} + m_2 \vec{v}_{2i} = m_1 \vec{v}_{1e} + m_2 \vec{v}_{2e} \quad (3)$$

식(3)에서 운동량 보존법칙은 2개의 스칼라량(m_1, m_2)과 4개의 벡터량($\vec{v}_{1i}, \vec{v}_{2i}, \vec{v}_{1e}, \vec{v}_{2e}$)으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

그리고 4개의 벡터량은 아래와 같이 각각 2개씩 총 8개의 스칼라량으로 쪼갤 수 있다. 결국 운동량 보존 법칙은 10개의 스칼라량으로 구성되어 있다. 질량 2개를 제외한 나머지 스칼라량 8개는 아래와 같다.

$$m_1 \vec{v}_{1i} + m_2 \vec{v}_{2i} = m_1 \vec{v}_{1e} + m_2 \vec{v}_{2e}$$

v_{1i}	v_{2i}	v_{1e}	v_{2e}
d_{1i}	d_{2i}	d_{1e}	d_{2e}

v_{1i} : \vec{v}_{1i} 의 크기(속력)

v_{2i} : \vec{v}_{2i} 의 크기(속력)

v_{1e} : \vec{v}_{1e} 의 크기(속력)

v_{2e} : \vec{v}_{2e} 의 크기(속력)

d_{1i} : \vec{v}_{1i} 의 방향

d_{2i} : \vec{v}_{2i} 의 방향

d_{1e} : \vec{v}_{1e} 의 방향

d_{2e} : \vec{v}_{2e} 의 방향

그동안 자동차 사고조사 분석의 분야에서 운동량 보존 법칙은 충돌 전 자동차 속력을 정량적으로 추정할 때 사용하는 틀로 사용되어 왔다. 즉, 충돌 전 속도 2개를 제외한 나머지 스칼라 값 8개를 모두 현장증거로 추정하여 구할 수 있을 때, 방정식을 이용하여 충돌 전 속도 2개를 구할 때 운동량 보존법칙을 사용한다. 식(3)에서 보듯이 이 식에는 정성적인 값이 들어갈 여지가 없다.

이러한 전통적인 정량적 방법에는 스칼라 값 8개중 하나만 알지 못해도 문제를 해결할 수 없는 문제점이 있다. 그렇기 때문에 자동차 사고조사 분석의 분야에서 충돌 전 속도를 추정함에 있어 단한 개 또는 두 개의 스칼라 값을 확인하지 못해 불능으로 처리하는 경우도 종종 있다. 이러한 경우 변칙적으로 재현프로그램의 최적화 기능을 이용하기도 하는데, 이것은 과학적인 방법이 아니라 자동차 사고해석을 애니메이션화 하는 바람직하지 않은 발상이다.

실제 사고현장에서 정량적 분석에 필요한 스칼라 값 8개를 모두 알기 어렵거니와 설령 그 값을 다 구하였다 할지라도 방정식을 만들어 계산해야하는 현실적인 복잡성으로 인해 많은 경우 식(3)을 통한 정량적 분석은 현장 실무자들이 사용하기를 꺼려하기도 한다.

또한 정량적 분석은 정확한 결과를 도출하는 장점이 있기는 하지만, 정량분석 분석 조건을 만족시키는 스칼라 값 8개를 현장에서 모두 구할 수 없는 경우가 많기 때문에 현장 활용성이 떨어진다. 즉, 정량적 분석이 가장 과학적인 분석방법이기는 하지만 모든 것을 해결해 주지는 못한다.

사고구명에 중요한 증거인 타이어 마크 혹은 노면 흔적이 비와 눈 또는 풍화작용에 의해 소멸되는 경우²⁾에는 충돌 전 방향에 대해 논란이 발생하는 경우가 있으며, 특히 중앙선 침범 여부에 대해서는 보험금 수령과 결부되어 있기에 극심한 논쟁이 발생할 수 있다.

이 논문은 이와 같이 중앙선 침범 여부 등과 같이 충돌 방향에 대해 당사자 간의 의견이 대립할 때, 각각의 진술과 의견의 개연성 여부를 확정하는 과학적인 추론 기법에 대한 것이다.

조금 더 구체적으로 설명하면, 정량적 분석의 구성요인 스칼라 값 8개 중 현장에서 쉽게 구할 수 있는 충돌 전후 이동방향을 표시하는 4개의 스칼라 값만으로 중앙선 침범의 개연성을 확정하는 정성적 추론 기법을 소개한다.

이 방법은 현장에서 쉽게 구할 수 있는 충돌 전후 이동방향 4개 사이의 관계성에 관한 것이기 때문에 스칼라 값 8개를 모두 알기위해 많은 시간을 투자할 필요가 없고, 또 복잡한 계산이 필요치 않다는 점에서 현장 활용성이 높을 것으로 보인다.

2.2 정성적 추론식 소개 및 유도

운동량 보존법칙은 다음과 같다. 이것은 스칼라 값 10개 사이의 관계성에 관한 것이다.

$$m_1 \vec{v}_{1i} + m_2 \vec{v}_{2i} = m_1 \vec{v}_{1e} + m_2 \vec{v}_{2e}$$

이것을 구성하는 스칼라 값 10개 중 방향 4개 사이의 관계는 아래와 같다. 각항의 속도의 크기와 방향을 정확히 알면, 위 운동량 보존법칙과 같이 좌변과 우변이 완전히 일치하여 이퀄(=)기호를 붙일 수 있다. 그러나, 방향을 나타내는 4개만을 따로 떼어 놓고 생각하면, 그 관계성은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{1i} + d_{2i} \approx (d_{1e} + d_{2e}) \quad (4)$$

여기서 4개는 방향을 나타내는 성분이므로, 속력은 고려하지 않는다. 그리고, 자동차 충돌의 반발계수는 0.1 ~ 0.3 에 있다는 연구를 근거³⁾로 충돌 후 두 방향에 특히 괄호를 붙여 연산의 우선권을 부여한다.

여기서는 충돌 전후 이동방향만을 고려한 식(4)를 이용한 정성적 분석을 통해 중앙선 침범사고 원인 규명의 가장 결정적 요인인 충돌방향에 대해 논할 것이다. 이와 같이 정성적 연산으로 계산할 수 있는 근거는 Table 1과 같다.

Table 1. basic theorems of a qualitative method

<p>① As the relative velocity before collision gets higher, the coefficient of restitution gets closer to 0.</p> <p>② As the coefficient of restitution gets closer to 0, the volume and direction of d_{1e}, d_{2e} gets equal.</p>
--

2.3 정성적 추론식 오차 검토

2.3.1 노면 마찰의 영향 검토

정성적 분석은 속도의 크기가 아니라, 방향을 대상으로 하고 있으므로, 두 자동차와 도로 노면사이의 마찰로 인한 충격력의 흡수에 영향을 받지 않는다. 왜냐하면, 노면마찰에 영향을 주는 힘의 방향은 중력방향인데, 그 방향은 여기에서 검토하는 방향과는 무관하여 영향을 미치지 못하기 때문이다. 따라서, 충돌 시 자동차와 노면사이에 미치는 마찰은 이곳에서 다루는 방향에 영향을 주지 않는다.

다만, 충돌 시 두 자동차 사이의 반발충격력이 자동차와 노면사이의 마찰력보다 작은 경우에는 충격력이 마찰력에 흡수되는 것처럼 보여 충돌한 방향성을 확인할 수 없기 때문에 현실적으로 정성적 추론으로 분석할 수 없다.

이러한 경우는 특히 교통이 번잡한 도심도로에서 차선변경 중 가벼운 충돌사고가 발생하는 경우에 흔히 발견된다. 흔히 “접촉사고”라 불리는 사고 발생시에는 반발충격력의 일부를 두 차의 차체가 흡수하고 나머지 충격력은 노면과 타이어에서 흡수되어 충돌 후 두 차의 운동량의 방향을 확인할 수 없다.

2.3.2 상대적 질량비 차이가 미치는 영향 검토

정성적 분석 방법은 질량과 속도의 크기인 속력을 고려하지 않고 방향을 근거로 이론을 전개하기 때문에 원칙적으로 질량비를 고려할 여지가 없다.

그렇지만, 질량이 큰 화물차와 질량이 비교적 작은 승용차가 충돌하면, 질량이 작은 승용차의 방향성은 노면에서 쉽게 확인할 수 있으나, 질량이 큰 화물차의 방향성은 노면에서 쉽게 확인할 수 없는 경우가 있다⁴⁾. 이것은 작은 차가 큰차에 미친 충격력보다, 큰 차에 미친 노면마찰력이 더 큰 경우이고, 본질적으로 위의 “접촉사고”와 같은 이유로 하여 정성적 추론으로 분석할 수 없다.

2.3.3 자동차 충돌 자세가 미치는 영향 검토

두 자동차가 충돌하는 자세는 이곳에서 다루는 정성적 분석에 영향을 주지 않는다. 왜냐하면, 운동량 보존법칙에서 충돌하는 두 자동차의 충돌자세는 고려사항이 아니기 때문이다. 만약 동일한 두 자동차가 직각 충돌을 하도록 충돌 전 속도를 고정시켜 충돌 접촉면을 각각 달리하면, 각각 충돌 후 속도는 변하게 된다⁵⁾. 즉, 두 자동차의 충돌 자세에 따라 충돌 후 이동방향이 달라진다. 그러나, 두 자동차의 충돌 전 두 방향의 합과 충돌 후 두 방향의 합은 거의 비슷하다는 성질은 변하지 않는다.

3. 적용 사례

3.1 사고 사례(1)

Fig. 1은 현장 증거를 이용하여 확인한 소형차와 중형차의 충돌 상황을 나타낸 도면이다. 중형차가 우에서 좌로 주행 중에 있었다는 점에는 당사자 간에 이견이 없으나, 소형차의 충돌 직전 주행 방향에 대해서는 당사자간 서로 다른 의견을 진술하고 있다.

소형차를 제외한 당사자, 즉 중형차 운전자, 현장 목격자 등은 소형차가 빗길에 미끄러지며 중앙선을 침범하여 충돌하였다고 주장한다. 즉 소형차의 충돌 직전 방향은 대략 화살표(↗) 방향으로 미끄러지며 중형차와 충돌했다는 말이다. 중형차 운전자는 처음에는 소형차의 전조등이 보였으나, 충돌 직전에는 보이지 않은 채로 충돌하였다고 하며 소형차의 중앙선 침범을 주장하고 있다.

소형차측은 소형차가 사고 중형차 앞에서 달리던 중이었고, 비가 오는 날이라 진행방향으로 미끄러지는 바람에 과속으로 달리는 중형차와 그림과 같이 충돌하였다고 주장하면서 중앙선 침범을 부인하고 동일방향 사고라고 주장하고 있다. 간단히 말해, 소형차 측은 충돌 직전 소형차는 화살표(←) 방향으로 미끄러지며

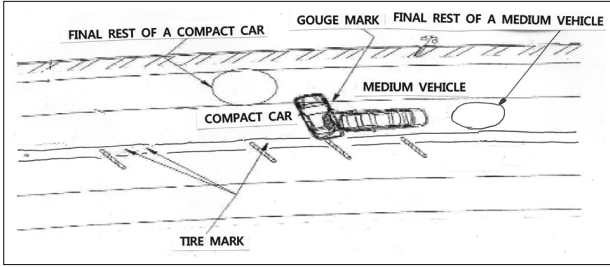


Fig. 1. Compact car vs medium vehicle.

중형차와 충돌했다는 주장이다.

사고 현장에는 충돌 지점을 확인해주는 타이어 흔적인 컬리전 스크러브(Collision Scrub)와 노면파인 흔적인 가우지 마크(Gouge Mark)가 있고, 충돌 후 소형차의 운동 방향을 확인해 주는 노면흔적인 구루브즈(Grooves)가 있다⁴⁾. 그러나 소형차의 충돌 직전 방향을 표시하거나 암시하는 현장 증거는 발견되지 않았다.

이러한 경우에는 기존의 정량적인 방법 또는 현장에 산재한 물적 증거를 통한 방법으로는 당사자의 주장을 규명할 수 없다. 정량적 분석으로는 10가지 스칼라 값을 확정할 수 없기 때문에 의미있는 계산을 할 수 없다. 즉 불능이다.

이 사고를 새로운 정성적 방법으로 소형차의 충돌 직전 충돌 방향을 생각해보자.

식(4)에 따라 충돌 전후 각 차의 방향성의 관계는

$$d_{1i} + d_{2i} \approx (d_{1e} + d_{2e}) \text{ 이고,}$$

이 사고는 소형차와 중형차 사이의 관계 이므로

$$d_{\small{s}i} + d_{\small{z}i} \approx (d_{\small{s}e} + d_{\small{z}e})$$

로 바꿔 표현할 수 있다.

여기서 각각의 충돌 후 방향은 아래와 같다.

$d_{\small{s}i}$: 소형차의 충돌 전 방향 (쟁점)

$d_{\small{z}i}$: 중형차의 충돌 전 방향 (←) (당사자 모두 인정)

$d_{\small{s}e}$: 소형차의 충돌 후 방향 (↘) (현장 증거)

$d_{\small{z}e}$: 중형차의 충돌 후 방향 (→) (당사자 모두 인정)

이제 정성적 방법으로 소형차의 충돌 전 방향을 구해보자.

$$d_{\small{s}i} + d_{\small{z}i} \approx (d_{\small{s}e} + d_{\small{z}e})$$

$$d_{\small{s}i} + \leftarrow \approx (\searrow + \rightarrow) \dots\dots\dots ①$$

$$d_{\small{s}i} \approx (\searrow + \rightarrow) - \leftarrow \dots\dots\dots ②$$

$$d_{\small{s}i} \approx \searrow + \rightarrow \dots\dots\dots ③$$

$$d_{\small{s}i} \approx \swarrow \dots\dots\dots ④$$

새로운 정성적 방법으로 소형차의 충돌 직전 주행 방향을 추론하면, 소형차의 충돌 직전 미끄러진 방향은 화살표 (↗) 방향과 화살표 (→) 방향 사이에 존재하며, 화살표 (↘) 방향이 가장 가능성이 높다고 할 수 있다.

즉, 소형차 측이 주장하는 화살표 (←)와 같은 방향으로 미끄러졌을 개연성은 전혀 없다. 반면에 나머지 당사자가 주장하는 화살표 (↗)와 같은 방향과는 부합한다. 따라서, 이 사고의 경우 소형차의 주장은 개연성이 없는 주장이며, 새로운 증거나 사실이 나오지 않는 경우에는 중형차 운전자 또는 목격자의 주장이 옳다고 볼 수 있다.

화살표 연산하는 과정을 조금 살펴보자. ①단계에서 충돌 후 두 자동차의 방향을 먼저 더하는 것은 상대적으로 두 값의 크기가 비슷한 성질을 이용하여 오차를 줄이기 위함이며, ③단계에서 화살표의 방향이 바뀐 것은 -가 +로 바뀌었기 때문이다. 그리고, ④단계에서 이중실선 화살표는 약간의 오차를 나타내는 것에 비해 실선 화살표는 유일하게 정확한 방향을 가리키고 있다. 이것은 소형차의 충돌 직전 방향은 실선 화살표 보다 반드시 위에 있어야 함을 의미하기 때문에 소형차 측의 주장은 사실과 다르다는 것을 나타낸다.

이처럼 새로운 정성적 방법은 당사자의 주장을 뒷받침할만한 공학적인 방법이나 현장 증거가 없어 정확한 충돌 방향을 확정할 수 없을 때, 현장에 남아있는 충돌 전후의 방향만을 이용하여 각 당사자 주장의 개연성 여부를 검증하는 방법이다.

3.2 사고 사례(2)

Fig 2 도면은 현장 증거를 근거로 하여 작성하였고, 실제 충돌상황과 일치한다⁶⁾. 여기서는 정확한 사실관계가 규명된 사고사례를 이용하여 정성적 방법을 검증하고자 한다.

그림의 위에서 좌로 진행하던 4.5톤 트럭은 빗길에 미끄러져 요마크를 그리며 중앙선을 침범하여 좌에서 우로 주행 중이던 승용차와 충돌하였다. 그리고, 충돌 직후에 승용차와 4.5톤 트럭은 거의 같은 방향으로 튕겨져 나갔다.

위 그림과 같은 도로구조에서 위에서 좌로 주행하며 흔히 일어나는 중앙선 침범차의 방향은 화살표 (↙) 방향이다. 즉, 커브길에서 중앙선을 침범한 후 자기 차로로 복귀하면서 사고가 나는 경우를 말한다. 그런데, 이번 사고는 그 경우와 다르게 화살표 (↖) 방향이다.

이 사고는 4.5t 트럭이 남긴 요마크라는 물적 증거가 뚜렷이 있었기에 트럭의 충돌방향을 분명히 알 수 있다.

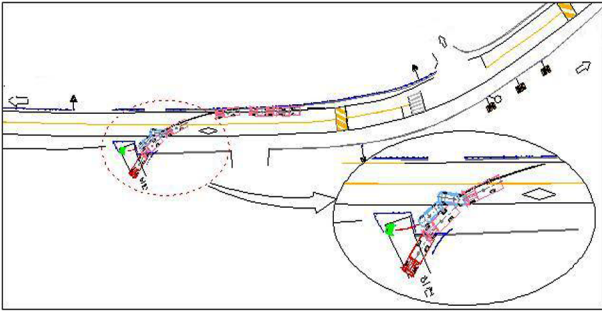


Fig. 2. medium vehicle vs truck(4.5 t).

여기서는 초기에 요마크라는 물적 증거를 확보하지 못하여 트럭의 충돌방향에 대해 논란이 있는 경우를 가정하여 정성적 방법으로 중앙선 침범의 방향을 확정할 수 있는지 여부를 검증해 보자.

먼저, 화살표를 이용한 정성적 방법으로 트럭의 충돌 전 방향을 구해보자. 사고 사례에서는 트럭의 충돌 전 방향은 현장에 있는 요마크의 방향과 일치하지만, 여기서는 요마크가 없었다는 것을 전제로 어떤 방향으로 트럭이 중앙선을 침범하였는지를 추정하여 보자.

$d_{\text{트}i}$: 트럭의 충돌 전 방향 (쟁점)

$d_{\text{승}i}$: 승용차의 충돌 전 방향 (\longrightarrow)
(당사자 모두 인정)

$d_{\text{트}e}$: 트럭의 충돌 후 방향 (\swarrow)
(공통속도)

$d_{\text{승}e}$: 승용차의 충돌 후 방향 (\swarrow)
(공통속도)

$$d_{\text{트}i} + d_{\text{승}i} \approx (d_{\text{트}e} + d_{\text{승}e})$$

$$d_{\text{트}i} + \longrightarrow \approx (\swarrow + \swarrow) \dots\dots\dots ①$$

$$d_{\text{트}i} \approx (\swarrow + \swarrow) - \longrightarrow \dots\dots\dots ②$$

$$d_{\text{트}i} \approx \swarrow + \longleftarrow \dots\dots\dots ③$$

$$d_{\text{트}i} \approx \swarrow + \swarrow + \longleftarrow \dots\dots\dots ④$$

트럭이 중앙선을 침범하며 승용차와 충돌한 방향을 화살표를 이용한 정성적 방법으로 구하면 위와 같이 화살표 (\longleftarrow) 방향과 화살표 (\swarrow) 방향 사이에 있으며, 가장 가능성이 높은 방향은 위의 화살표 (\swarrow) 방향과 같다. 이것은 그림에서와 실제 트럭이 승용차와

충돌한 방향과 일치한다.

사실관계가 규명된 사고 상황 도면을 이용하여 정성적 추론의 정확성에 대해 검증해보았다. 물론, 여기서 다루는 정성적 방법은 사고 상황을 사실과 같게 추론하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

이 논문에서는 중앙선침범 교통사고와 같이 교통사고 원인규명에 있어 충돌 방향이 쟁점일 때 당사자 주장의 개연성 여부를 판단하는 정성적 추론이론을 소개하였다. 교통사고를 정량적 모델로 분석하는 조사 분석 기법의 한계를 극복하는 이론을 제시하고 있는 점과 정성적 모델로 충돌을 해석하는 새로운 방법을 시도하고 있다는 점에서 긍정적이라 할 것이다.

앞으로 이 논문에서 다루지 못한, 충돌하는 두 자동차의 유효충돌속도가 상대적으로 낮아 상호간의 반발충격력이 중력에 의한 노면마찰력에 비해 작은 접촉사고에 대해서는 차 내부의 물체(인체, 차안에서 움직이는 물체 등)의 움직임을 근거로 당사자 주장의 개연성 여부를 확정하는 기법에 대해서 더 연구가 있어야 한다. 또한 오토바이와 버스가 충돌하는 경우와 같이 상호간의 반발충격력이 크기가 큰 자동차의 노면마찰력보다 작은 경우에도 대해서도 충돌 전후 이동방향을 근거로 당사자 주장의 개연성 여부를 확정하는 심도 깊은 기법에 대한 연구도 필요하다.

References

- 1) Kim Hyunkuang and Han Inwhan, "A Qualitative Theory of Collision for Reconstruction of Automobile Accidents", pp 1-2, 1997.
- 2) Donald J. Van Kirk, "Vehicular Accident Investigation and Reconstruction", CRC Press 2001.
- 3) Dr. Steffan Datertechnik, "A Simulation Program for Vehicle Accidents Operation Manual", 1997.
- 4) State of Texas, "Vehicle Damage Guide for Traffic Crash Investigations", 2014.
- 5) Steven G Shelby, "Denta-V As a Measure of Traffic Conflict Severity", 2011.
- 6) Road Traffic Authority of Korea, "Heavy Traffic Accident Reports", pp 131-137, 2011.