

■ 論 文 ■

## 차량 사고 분석에서 측정의 불확실성

Uncertainty of Measurements in the Analysis of Vehicle Accidents

한 인 환

(홍익대학교 기계정보공학과 교수)

박 승 범

(PNST 법과학기술연구소 소장)

### 목 차

- |                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| I. 서론                   | 2. 스키드마크(제동거리) 길이 측정 |
| II. 차량 사고 거동 해석에서의 불확실성 | 3. 요마크 측정            |
| III. 사고현장에서 거리와 마찰계수 측정 | 4. 마찰계수 측정           |
| 1. 사고현장에서 거리 측정         | 5. 차량 충돌 변형량 사진계측    |
| 2. 사고현장 마찰계수 측정 방안      | V. 결론                |
| IV. 사고 조사 측정 실험         | 참고문헌                 |
| 1. 곡선반경 및 직선거리 측정       |                      |

Key Words : 교통사고, 재구성 해석, 측정 불확실성, 타이어 자국, 마찰계수, 변형 측정  
 Traffic Accident, Reconstruction Analysis, Measurement Uncertainty, Tire Marks, Coefficient of Friction, Crush Measurement

### 요 약

교통사고의 재구성 해석은 도로와 사고흔적, 자동차 손상 등 다양한 자료들을 분석함으로써 이루어진다. 대부분의 자료들은 사고 해석에서 변수로 작용하며, 측정으로부터 구해지는 자료들은 조사자와 도구, 주어진 환경 등에 의해 측정 오차가 발생된다. 따라서 사고해석에서는 측정 오차에서 비롯되는 불확실성이 항상 존재한다. 본 연구는 불확실성이 존재할 가능성이 매우 높은 도로 기하구조와 타이어 흔적 등 길이와 마찰계수 등에 대해 반복 측정 실험을 함으로써 교통 사고해석에서의 불확실성을 정량화하였다. 또한 자동차 충돌 변형량의 사진 계측에 대한 불확실성에 대해서도 해석 결과를 제시하였다. 이러한 통계학적 분포들은 사고 재구성 불확실성을 추정하기 위해 입력 계수의 적절한 범위를 결정하는 것을 도울 수 있다.

Reconstruction analysis of traffic accident is done by analyzing diverse data such as the road, accident traces and damage on the automobile. Most data can be a variable in the process of analysis, and measurement error of the data occurs from the investigator, tool and the given environment. Therefore, accident analysis always has some risks of measurement uncertainty. This research quantify the uncertainty in traffic accident analysis by conducting repetitive measurement experiments for variables with high probability of uncertainly such as length (i.e. geometric structure of the road, tire marks) and coefficient of friction. This paper also suggests an analysis result for the uncertainly of photographic observation of automobile crush measurement. These statistical distributions can help determine appropriate ranges for the input data in order to estimate the accident reconstruction uncertainty.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

교통사고 재구성은 사고 발생과정에서 나타나는 각종 사고 흔적과 도로 기하구조의 측정을 전제로 이루어지며, 대부분의 측정값들은 사고 재구성 결과의 타당성과 신뢰도에 직접적인 영향을 미친다. 차량 사고에서의 측정은 정밀 제조사 등의 특별한 경우를 제외하고는 최초의 현장조사자에 의해 결정되며, 1회적인 측정에 국한되는 경우가 대부분이다. 결과적으로 측정의 신뢰성은 조사자와 측정 방법에 전적으로 의존된다.

사고 재구성에 직접적으로 영향을 미치는 측정은 스키드마크와 요마크로 대표되는 타이어 흔적과 금속성 흔적(gauge mark), 충돌 변형, 차량과 보행자 그리고 낙하물의 최종위치간 거리 등이 있다. 사고 재구성에서는 대부분의 측정값을 직접적으로 사용하지만 마찰계수와 같이 측정대상 또는 주어진 정보량 간의 비례계수는 사고 차량의 파손 등으로 동일 조건의 실험이 불가능한 경우가 많아 일반적인 실험에 근거한 기존 자료들을 사용하게 된다. 자동차 사고에서의 마찰계수 측정과 관련된 연구 결과에 따르면 측정값은 측정자와 도로 자체의 특성, 차량의 기본 특성 등에 따라 실제 값을 기준으로 신뢰구간을 형성한 범위 내에 존재한다(Brach and Dunn, 2004). 또한 동일한 노면에서도 도로 상황과 측정자, 반복 측정에 따라 값이 달라지는 것을 볼 수 있다(Bartlett et al., 2006). 이와 같이 사고에서의 측정은 조사자와 측정 방법에 따라 측정 오차가 포함되어 있으며, 간접적인 자료의 사용이 포함될 경우 조사 분석 결과의 불확실성은 더욱 커져 재구성 결과에서 심각한 오류가 발생할 수 있다.

자동차 사고에서 속도 추정은 노면 흔적을 측정하고 타이어와 노면의 견인계수를 활용하여 속도를 추정하거나 차량의 변형 정도를 통한 비교로 충격량을 구하여 이루어진다(Han et al., 2001). 이러한 방식은 타이어 흔적의 시작이 대부분 명확하지 않아 조사자에 따라 측정값이 달라지는 문제점이 있다. 또한 국내의 경우 속도 산출 시 사고로부터 구해진 직접적인 자료가 아닌 유사 조건으로 전제한 문헌상 마찰계수 값을 적용시키기 때문에 신뢰성에 문제가 있다. Bartlett 등(Bartlett et al., 2002)의 연구에서도 이러한 문제들이 광범위한 실험들을 통하여 구체적으로 제시된바 있다.

본 연구에서는 다양한 측정 실험을 통해 교통사고 해석을 위한 측정에서 불확실성을 정량화하고 이에 대한 대응 방안 즉, 사고 재구성에서 불확실성을 추정하는 근거를 제공하고자 하였다. 측정 실험은 우리나라 교통사고 조사방법의 현실성을 고려하여 동일한 측정 대상에 대한 반복 측정과 측정 대상, 측정 방법의 다양성, 측정 집단의 전문성 등으로 세분화하여 이루어졌다. 측정 결과는 통계를 활용하여 사고 해석에서의 불확실성과 오류 가능성에 대하여 분석하였다.

### II. 차량 사고 거동 해석에서의 불확실성

측정 관련 불확실성은 일반적으로 단 한 번의 측정으로 얻은 결과에서 가장 크게 나타나며, 측정값 자체의 신뢰성에도 문제가 있다. 사고 거동 계산에서의 불확실성을 평가하는 방안에는 관련 분야에 크게 4가지 방안이 잘 알려져 있다. 첫 번째는, 각종 계수들의 범위를 산정하고 이에 근거하여 계산식 결과의 범위를 구하는 가장 기본적인 방법이다. 이는, 스키드마크의 길이로부터 차량의 제동 속도를 구할 때 견인계수의 상, 하한치(Upper and Lower Bounds)를 사용하는 것 등을 대표적인 예로 들 수 있다. 두 번째는 오차 전파(Propagation of Error)로도 불리는 미분학을 활용하는 것이고, 세 번째는 평균 및 분산 등의 통계학 개념에 근거한 방안이다. 이 세 가지는 대수적인 기법에 근거한 불확실성의 해석적 평가 방법들이다. 네 번째는 최근에 들어와서 널리 쓰이고 있는 Monte Carlo 시뮬레이션 방법에 근거한 불확실성 평가 방안으로, 1990년대 초반 Wood 등(Wood and O'Riordan, 1994)에 의해 사고재구성 해석 분야에서 활용되기 시작하였다. 실제로 사고 거동 계산에서의 불확실성을 평가하는 방안은 더 이상 새로울 것이 없다는 일부 의견도 있으나, 국내에는 이러한 불확실성 평가 방법 자체가 전혀 보급되지 않은 상황이다. 사고 거동 재구성 해석 결과에서 불확실성의 원인은 기본적으로 입력 변수에 기인한다. 그리고, 불확실성을 평가하는 해석적인 방법들은 전술한 것처럼 비교적 잘 알려져 있지만, 문제가 되는 부분은 바로 이러한 입력 변수들에 대한 통계학적인 측정이다.

사고 재구성 해석 계산 결과의 불확실성은 각종 입력 계수들의 불확실성의 함수이다. 따라서, 본 연구에서는 자동차 도로를 포함한 가능한 사고현장에서 다양한 실험자들의 반복적인 각종 계측 실험들을 진행하였다. 도로

상에서 직선 및 곡선을 따른 거리, 호 및 각도의 측정 그리고 스키드마크와 요마크 등의 타이어 자국과 사진 등으로부터 자동차 충돌 변형을 측정하여 통계적인 해석을 수행하였다. 본 연구에서와 같이 표준 분포를 가정한 통계 분석에서, 표본의 수가 30개 이상이 될 때 모평균( $\mu$ )과 모분산( $\sigma^2$ )은 표본평균( $\bar{x}$ )과 표본분산( $s^2$ )에 유사하므로(Brach and Brach, 2005), 대개의 경우 표본 크기는 30 이상이 되도록 측정 실험을 하였다. 본 논문에서 이후 언급되는 평균과 분산, 표준편차는 모두 표본평균, 표본분산, 표본표준편차를 뜻하며 표본이라는 말은 생략한다. 평균은 데이터 값들의 합을 표본 크기  $n$ 으로 나누어 구해지며, 데이터들의 무게 중심을 뜻한다.

이러한 연구 결과들은 일반적인 차량 거동 시뮬레이션 프로그램들 뿐만 아니라 PC-Crash, HVE 등의 자동차 사고 해석 프로그램에서에서 입력계수들의 불확실성을 고려한 해석 결과 평가 방안을 구할 수 있게 한다 (Brach et al., 2007).

### III. 사고현장에서 거리와 마찰계수 측정

#### 1. 사고현장에서 거리 측정

사고 해석의 근거로 사용되는 현장조사는 일반적으로 도로 상에 나타난 각종 사고 흔적 외에 도로의 기하구조와 각종 교통안전 시설 환경을 포함한다. 교통사고에서의 현장조사는 사고흔적 증거 수집의 의미도 있지만, 사고현장 상황의 측정 도면화를 통한 사고 재구성에서의 정밀성을 높이기 위한 목적도 포함되어 있다.

사고현장에서의 측정은 경사와 각도를 제외하고 대부분 특정 조사 대상 사이의 거리 측정이며, 측정 기구와 수단에 따라 측정 방법이 다르다. 일반적으로 거리의 측정은 조사자의 편의상 줄자와 굴림자, 레이저 측정기를 주로 사용하고 있으며, 아주 드물게 정밀 측량기를 사용하기도 한다. 모든 거리 측정 도구는 자체적인 허용오차가 있으나, 교통사고 조사의 일반적인 거리 측정에서 cm단위 이하의 정밀성은 요구되지 않으므로 이들 허용오차는 무시할 수 있다. 그러나 요마크의 경우 측정 대상에 따라서는 cm 단위 이상의 측정 오차들은 결과 값에 크게 영향을 미칠 수 있으므로 측정 불확실성은 분석 결과에 매우 중요한 의미가 있다.

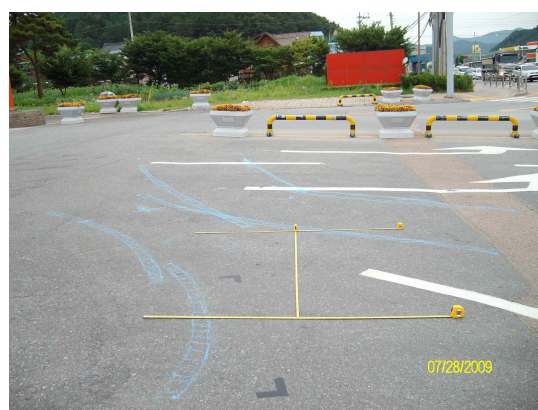
교통사고현장에서 거리 측정은 도구와 방법에 따라 크게 3가지 정도로 구분할 수 있으며, 각각의 방법에 따

라 장단점이 있다.

첫 번째로 사고현장 조사자들이 가장 많이 사용하고 있는 줄자 또는 굴림자로 측정하는 방법이다. 이 방법은 사고현장의 주요 측정 대상물에 대해 개별적으로 직접 측정해야하므로 측정시간이 길다는 단점이 있는 반면에 줄자의 측정은 실측에 대한 사진촬영으로 결과에 대한 기록물을 제시하여 증거화 시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 줄자와 달리 굴림자의 경우는 구조상 측정자에 따라 측정 오차가 크고, 거리가 길수록 측정 오차도 커질 수 있다는 단점이 있다.

두 번째로 사진 계측 방법이 있다. 현재 이 방법은 국내에서는 아직 보편화되지 않았다. 실제 현장을 단순 촬영한 사진 자체만으로는 사진 속의 특정 위치 간 길이를 측정할 수 없으나 길이 또는 축적 비율에 대한 정보가 포함된 사진일 경우 사진 속의 측정 대상에 대한 길이를 추정할 수 있다.

<그림 1>의 경우 3개의 줄자를 각각 2m로 고정시켜 도로상에 배치한 후 촬영한 모습이다. 평면상으로 볼 때는 모두 같은 길이 이지만 촬영 시 원근에 따라 사진 상의 길이는 다르게 나타난다. 사진에서도 이미 알고 있는 줄자의 길이를 통해 원근비율을 결정할 수 있으므로 간접적인 길이 측정이 가능하다. 이는 실제 사고현장에서 매우 짧은 시간 내에 도로 상의 각종 흔적의 위치를 측정해야 할 경우 3개 정도의 고정길이가 표시된 줄자와 함께 여러 방향에서 촬영한 사진을 통해 측정 대상 사이의 길이를 간접 측정하는 데 매우 도움이 된다. 이와 같은 방법은 실제 값과 측정값 사이의 오차가 클 수 있다는 단점이 있다. 최근 포토모델러 같은 S/W들은 사진 측정 오차를 최소화시킬 수 있고, 측정 결과에 대해 입체적인



<그림 1> 사진계측을 위한 현장사진

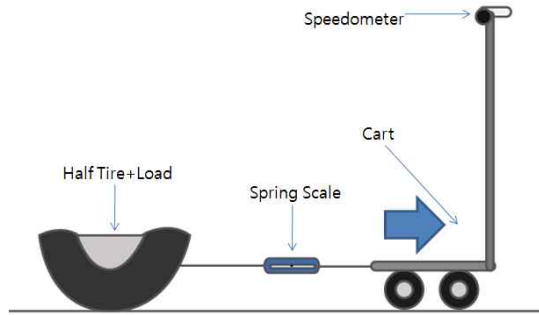
재구성이 가능하다는 장점이 있으나 사진 촬영에서 타겟 설정 등 조사자들의 사용상 불편 요소들이 있어 범용화 되지 않고 있다(Du et al., 2009).

세 번째는 광파측정기, 도화시스템, 3-D 스캔 장비 등의 고급 측량기나 휴대용 레이저 측정기 등을 이용하는 방법이다. 광파측정기는 고가이고 비교적 긴 거리의 도로 등 토목용 측정에 주로 사용되며, 교통사고 조사에서는 도로구조 또는 시설 결함 등과 관련된 사항에 제한적으로 사용하고 있다. 또한 도화시스템과 3-D 스캔 장비 등의 고가 장비들도 현재까지 사고조사에서의 활용성은 매우 낮은 편이다. 휴대용 레이저 측정기는 레이저 빛의 특성상 제약이 커서 사고조사에 잘 사용되지 않았으나, 측정부분을 화면으로 보여주는 기능 등이 최근 보완되었다. 그러나 이러한 레이저 측정 장비들은 거리 측정에 대한 객관적인 증거화 제시가 어려워 동일 사고현장에 대한 측정자 간의 측정 오차가 크게 발생할 경우 신뢰성 논란이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 고가의 첨단화 장비 또는 현시점에서 활용도가 현저히 낮은 장비들은 제외하고 국내 사고조사 현장에서 주로 사용하고 있는 방법들에 한정하였다.

2. 사고현장 마찰계수 측정 방안

대부분의 교통사고에서는 도로 상에 타이어 흔적이 발생되는 경우가 많다. 주로 사고 전후에 발생되는 타이어 흔적들은 사고 해석에 있어 차량 이동궤적, 충돌위치, 속도 등 매우 유용한 정보들을 제공한다. 특히 스키드마크와 요마크 등은 발생된 타이어 흔적으로부터 속도를 추정할 수 있으며, 이를 위해서는 도로와 타이어 사이의 마찰계수 값이 필요하다. 자동차의 타이어와 도로 간의 마찰계수 값은 노면의 종류와 상태, 타이어의 마모상태, 탑승인원, 제동초기속도에 따라 달라진다. 추정 속도는 마찰계수 값에 따라 달라지기 때문에 노면 조건에 따라 적용할 수 있는 마찰계수 값이 필요하다. 이를 위해 여러 가지 변수를 고려하며 사고 상황과 근접한 환경에서 측정 가능한 장치가 필요하다. 이와 관련하여 외국의 경우 다양한 측정 장치가 개발되어 있으나, 국내의 경우는 교통사고 조사를 위하여 개발된 측정 장치도 없고, 전혀 활용되고 있지도 않다.

본 연구에서는 교통사고현장 조사에서 간편하게 사용할 수 있으며 측정 결과를 비교적 신뢰할 수 있는 두 가지의 간단한 장치를 고안, 제작하여 실험에 활용하였다.



<그림 2> 용수철저울 활용 마찰계수 측정 장치

첫 번째는 <그림 2>에서 보는 바와 같은 용수철저울을 이용한 장치이며 기본 원리는 식(1)에 따른다. 식(1)에서  $F$ 는 카트를 사용해 무게(car tire)  $M$ 을 끄는 힘이며, 저울에 그 수치가 표시된다.

$$F - \mu Mg = Ma \tag{1}$$

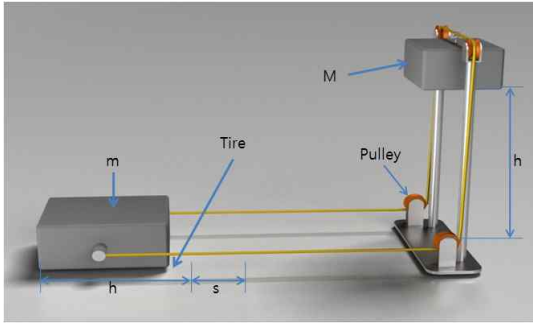
카트에는 속도계를 장착해 일정한 속도로 끄는 것이 가능하도록 하였다. 속도가 일정하면 가속도  $a$ 가 0이 되므로 용수철저울에 걸리는 힘  $F$ 는 타이어와 노면 사이에 작용하는 마찰력이 된다. 식(1)에 따라 저울에 표시되는 힘  $F$ 를 무게  $M$ 으로 나눠주면 마찰계수  $\mu$ 를 구할 수 있다. 그리고 타이어와 카트를 연결하는 용수철은 지면과 평행을 유지하도록 설계해 각도에 따른 수직항력의 변화를 고려할 필요가 없도록 하였다.

두 번째는 중력을 이용한 측정 장치로 용수철을 이용한 측정 장치의 단점인 정속 작동을 보완하였다. 실제 차량 스키드마크가 생기는 제동 과정과 유사하게 감속 작동(Varat et al., 2003)하도록 하여 사고 재구성 해석에 적절한 마찰계수 값을 구할 수 있도록 하였다.

<그림 3>에서 마찰 측정 대상 물체와 수직 이동체의 질량을 각각  $m$ 과  $M$ 으로 하면, 수직 이동체가  $h$ 만큼 하강하는 동안 두 물체는 등가속 운동을 하게 되며 그 가속도  $a$ 는 식(2)로 구할 수 있으며, 속도는 식(3)에 보여지는 값에 이르게 된다.

$$a = \frac{(M - \mu m)g}{(M + m)} \tag{2}$$

$$v^2 = 2 \frac{(M - \mu m)g}{(M + m)} h \tag{3}$$



<그림 3> 중력 이용 마찰계수 측정 장치

타이어를 밑면에 부착한 측정 대상 물체(m)가 s만큼 활주한 후에 정지하게 된다면 마찰계수는 식(4)로 구할 수 있게 된다.

$$\mu = \frac{Mh}{[(M+m)s + mh]} \quad (4)$$

이렇게 제작된 마찰계수 측정장치들은 마찰 계수 값을 알고 있는 표면 위에서 반복 실험을 통하여 그 신뢰도를 사전 검증하도록 하였다.

#### IV. 사고 조사 측정 실험

##### 1. 곡선반경 및 직선거리 측정

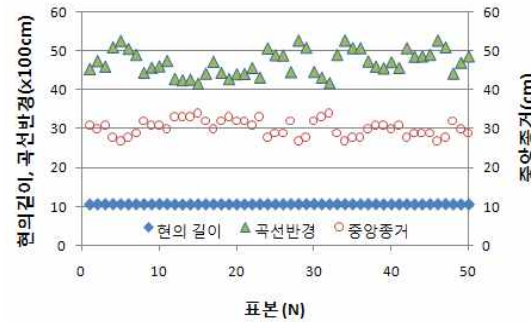
첫 번째 도로측정은 사고 발생 지점의 도로 곡선반경이다. 중앙선을 기준으로 현은 30m 줄자, 중앙중거는 3.5m 줄자를 이용하여 각각 측정하였고, 현의 길이(C)와 중앙중거(M)에 근거하여 곡선반경(R)을 구하는 식(5)에 적용하여 해당 도로의 곡선반경을 구하였다.

$$R = \frac{C^2}{8M} + \frac{M}{2} \quad (5)$$

<표 1>은 50회의 반복 측정 결과를 나타낸 것으로 현과 중앙중거의 표준편차는 2.2cm와 1.9cm로 미세하고 현의 경우 길이에 비하여 정확한 데이터를 얻었다. 줄자를 이용해 도로 형상을 측정할 경우에는 길이에 상관없이 측정자의 실수가 아닌 경우 측정 결과의 신뢰도에는 큰 문제가 없음을 알 수 있다. 그러나 곡선반경은 두 측정값이 포함된 대수 계산을 통해 구하기 때문에 작은 오차에도 민감하게 반응할 수 있다. <표 1>에서 보는 것처럼

<표 1> 곡선의 현과 중앙중거 측정 결과 (단위:cm)

구분	현	중앙중거	곡선반경
평균	1064.5	30.3	4713.6
표준편차	2.2	1.9	296.9
최소신뢰	1063.9	29.8	4631.3
최대신뢰	1065.1	30.8	4795.9



<그림 4> 측정 및 곡선반경 계산 결과의 산포도

로 곡선반경의 표준편차는 297cm에 이르고, 신뢰구간 역시 다른 데이터들은 2cm 내외 인 것에 비하여 대략 165cm라는 구간을 형성하고 있음에 유의하여야 한다. <그림 4>는 측정 및 곡선반경 계산 결과의 산포를 보여 주고 있다.

이미 서술한 것처럼 줄자에 의한 직선거리 측정은 표준편차가 상당히 작은 것으로 나타났다. 도로상의 4개의 대상 지점에 대해 직선거리를 측정하였다. 직선거리는 7.5m 줄자를 사용하여 측정하였으며, <표 2>에서 볼 수 있는 것처럼 측정 상의 오차는 무의미할 정도로 균일하게 매우 작았다.

##### 2. 스키드마크(제동거리) 길이 측정

###### (1) 비포장길 스키드마크 길이 측정

노면 조건에 따른 측정 오차를 고찰하기 위해 비포장 도로인 잔디와 모래, 자갈 길에서 가상의 스키드마크 길

<표 2> 도로에서의 직선거리 측정 (단위 cm)

구분	①	②	③	④
평균	687.3	625.4	687.5	559.4
표준편차	2.0	2.2	2.2	2.2
최소신뢰	686.8	624.8	686.9	558.8
최대신뢰	687.9	626.0	688.1	560.0

<표 3> 비포장 길에서의 스키드마크 길이 측정 (단위 cm)

구분	잔디		자갈		모래	
	출자	굴림자	출자	굴림자	출자	굴림자
평균	252.4	250.5	432.2	414.9	342.0	346.1
표준편차	1.8	2.6	2.2	9.1	2.4	9.6
최소신뢰	252.0	249.9	431.8	413.0	341.5	344.0
최대신뢰	252.8	251.0	432.7	416.9	342.5	348.2
최소값	249.0	246.0	428.0	398.0	336.0	328.0
최대값	259.0	257.0	439.0	438.0	348.0	360.0

이 측정 실험을 하였다. 총 80회에 걸쳐 측정하였고, 같은 길이의 스키드마크(제동거리)를 출자와 굴림자 2가지 도구를 이용하여 측정하고 그 결과들을 비교하였다. 분석의 신뢰구간은 95%이다. 출자의 경우 27.5%, 굴림자의 32.5%가 각각 신뢰구간 안에 속해있다. 자갈길에서의 실험 결과는 출자의 경우 22.5%, 굴림자는 10%가 신뢰구간에 포함되었다. 모래길에서의 실험 결과는 출자의 경우 22.5%, 굴림자의 8.75%가 이에 해당된다. <표 3>은 3종류의 비포장 길에서의 스키드마크 측정 및 분석 결과를 요약 비교하고 있다.

비포장 길 스키드마크 측정에서 출자와 굴림자를 비교하면 잔디를 제외한 자갈과 모래의 경우 출자의 정확도가 더 높고 오차가 작은 것으로 분석된다. 자갈 길 측정에서 굴림자는 잔디나 평지에서와 같이 원활하게 바퀴가 구르지 않아 측정에 오차가 더 생겼다. 모래 역시 자갈만큼은 아니지만 잔디보다는 큰 오차가 발생하였다. 모래에서의 측정은 측정자에 따라 발생하는 편차가 매우 크게 분석되었다. 모래 길 위에서 스키드마크의 특성상 시작 부분을 달리 볼 수 있기 때문이다.

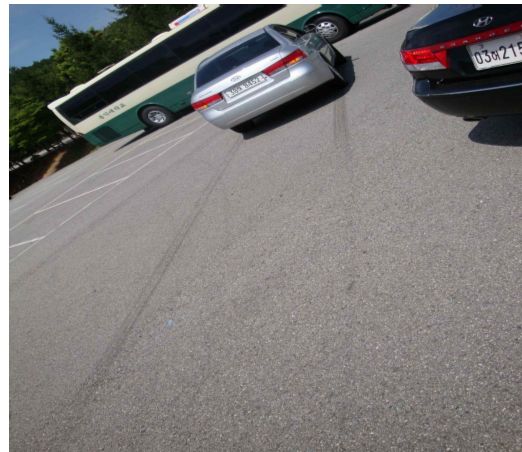
(2) 아스팔트 도로 스키드마크 측정

아스팔트 도로에서 자동차 급제동 실험 시 스키드마크 시작 부분에는 희미한 타이어 흔적이 발생한다. 이 희미한 타이어 흔적을 그림자(shadow) 스키드마크라고 하며, 흔적 발생 후 차량 통행에 따라 조사자가 발견하기 어렵고, 짧은 시간이 경과해서도 관측이 명확하지 않은 특징이 있다. 실험에서는 이러한 점을 감안하여 그림자 스키드마크가 사라진 이후에 측정하였다.

아스팔트 노면에서는 다른 비포장 길에 비해 스키드마크의 형태가 명확하게 유지되므로 확연하게 오차가 적은 측정 결과들을 얻을 수 있었다. <표 4>에 보여지는 것

<표 4> 아스팔트 도로 스키드마크 길이 측정

구분	측정 길이 (cm)
평균	1314.5
표준편차	1.2
최소신뢰	1314.1
최대신뢰	1314.9
최소값	1311.0
최대값	1316.0



<그림 5> 측정을 위하여 생성한 스키드마크

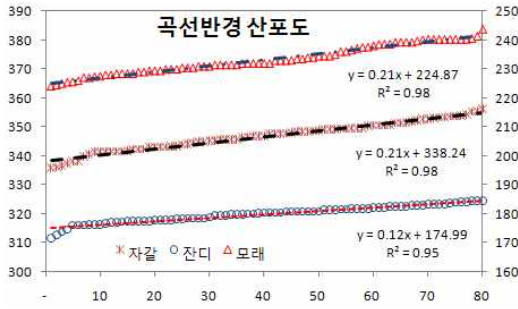
처럼 13m 길이의 스키드마크 반복 측정에서 표준편차가 1.2cm에 불과하였다. <그림 5>는 본 측정 실험에서 활용하기 위하여 아스팔트 도로 위에 생성한 스키드마크를 보여주고 있다.

3. 요마크 측정

일반적인 스키드마크는 제동에 의해서 생기는 반면 요마크는 조향에 의해서 생성이 된다. 차량이 선회운동을 할 때 뒷바퀴는 앞바퀴 안쪽으로 따라 돌게 되지만 급격한 선회 시에는 원심력이 타이어의 마찰력보다 커지게 되어 차량은 옆으로 미끄러지면서 차체의 회전으로 뒷바퀴는 앞바퀴의 안쪽이 아닌 바깥쪽으로 진행하게 된다. 이를 요잉(Yawing)이라 하고 이때 발생된 타이어 자국을 요마크라 한다. 이번 실험에서는 실차 실험에 의한 요마크와 함께 가상의 요마크를 노면에 표시하고 이를 측정하였다. 요마크 측정실험의 주된 목적이 반복 측정에서의 오차와 이에 따른 계산 결과의 불확실성을 확인하는데 있으므로 설정된 가상의 요마크는 실제 발생되는

<표 5> 노면 조건별 산출된 곡선반경 (cm)

구분	곡선반경		
	잔디	자갈	모래
평균	179.9	346.8	233.3
표준편차	2.9	4.9	4.9
최소신뢰	179.3	345.7	232.3
최대신뢰	180.5	347.8	234.4
최소값	171.4	335.7	224.2
최대값	184.6	356.2	243.8



<그림 6> 비포장도로 곡선반경 산포도-계산식

요마크보다 곡선반경을 작게 하였다. 또한 실제 요마크에서는 측정 대상이 아닌 요마크의 호를 굴림자로 측정함으로써 비선형 길이 측정에 적합한 굴림자 측정에서의 불확실성을 분석하고자 하였다. 곡선반경을 구하기 위해 현과 중앙 종거의 길이를 줄자를 이용하여 측정하였다.

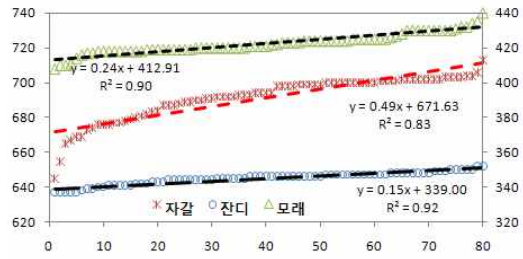
(1) 비포장도로에서 요마크 측정

비포장도로의 상황에서 요마크 측정 시 불확실성을 알아보기 위해 잔디, 자갈, 모래에서 측정해보았다. 비전문가 그룹에서 이들 노면 조건별로 반복 측정된 현과 중앙 종거의 값을 활용하여 곡선반경을 구한 결과는 <표 5>에 보여진다.

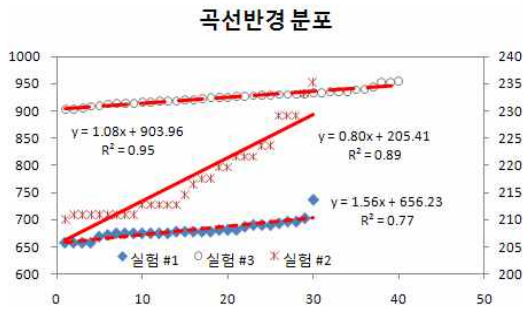
대상 노면들에서 각각 80회의 반복 측정에서 곡선반경을 계산한 데이터들은 <그림 6>에서 알 수 있는 것처럼 정규분포의 형태를 지니고 있다. 잔디의 경우 80회 측정 중 25%가 신뢰구간 안에 포함되었고, 자갈의 경우 20%, 모래의 경우 21.3%의 데이터가 신뢰구간에 속하는 것으로 나타났다.

요마크 곡선의 호를 굴림자로 측정한 결과는 <그림 7>에 보여지며, 잔디에서 8.75%, 자갈에서 21.25%, 모래에서 7.5% 만이 신뢰구간에 포함되는 것으로 나타났다. 이는 굴림자의 측정원리상 반복 측정에서 동일 결

요마크 곡선의 굴림자 길이 측정 분포



<그림 7> 비포장도로 곡선반경 산포도-굴림자



<그림 8> 아스팔트 곡선반경 산포도-계산식

<표 6> 아스팔트 요마크 곡선반경 (cm)

구분	실험 1	실험 2	실험 3
평균	217.8	680.5	926.1
표준편차	7.5	15.7	13.0
최소구간	215.1	674.9	922.1
최대구간	220.5	686.1	930.1

과를 가져오기 어렵다는 측면과 실험 참가자의 측정 태도와도 관계있는 것으로 여겨진다.

(2) 아스팔트 도로에서 요마크 측정

아스팔트에서의 실차 실험에 의한 요마크 생성은 비교적 낮은 속도에서 이루어져 희미하게 발생되었다. 흔적의 생성으로부터 수 시간이 지난 후에는 발생정도가 희미한 부분에서부터 육안 관측이 어려울 정도로 흔적의 구별이 되지 않아 측정자의 측정 시점에 따라 오차도 발생되었다. 이것은 실험 오류에 포함되지만 실제 교통사고 현장조사에서도 발생하는 문제점으로 이 자체가 현실의 문제점을 포함하므로 의미가 있는 측정 실험인 것으로 판단된다. 실험은 비전문가 그룹과 전문가(도로교통사고 감정사) 그룹으로 이루어졌으며, 비전문가 그룹에

서는 30회의 측정, 전문가 그룹에서는 40회의 측정 표본을 통해서 분석이 이루어졌다.

<표 6>은 실험 결과를 비교·정리한 것이며 실험 3이 전문가 그룹의 측정 결과이다. <그림 8>은 측정 결과에 근거한 곡선 반경의 산포를 보여주고 있다.

이번 실험결과 측정그룹과 노면 조건에 관계없이 명확한 데이터를 얻는 것은 불가능 하였으나 전문가 그룹이 비전문가 그룹에 비하여 보다 정규분포를 이루는 데이터를 측정하는 것을 볼 수 있다. 전문가들이 사고 분석을 하여도 요마크와 같은 복합 데이터를 이용하여 곡선 반경을 추정하는 경우에는 측정에 있어서의 불확실성이 선명하게 나타난다. 하지만 곡선반경의 추정 형태에 있어서 정규분포를 이루는 것으로 보아 측정 방법에는 이상이 없음을 알 수 있고 개개인에 따른 차이는 있더라도 다른 변수에 의하여 잘못 측정하는 경우가 드물다는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 사고현장 측정에 있어서 5회 이상의 반복 측정이 이루어 질 경우 보다 확실한 사고 분석에 도움이 될 것이다.

요마크의 곡선반경을 구하기 위해서는 현과 중앙중거라는 2가지 매개변수가 필요하기 때문에 이들 변수의 작은 측정 오차에도 곡선반경 계산 결과는 큰 차이를 보였다. 이에 따라 대부분의 데이터가 신뢰구간을 크게 벗어나게 되었다. 요마크의 곡선반경을 그래프로 나타내었을 때 정규분포를 이루고 있음을 확인 하였으나 신뢰구간에서 벗어난 데이터들이 많아 실제로 사용하기에는 어려움이 많다. 다만 정규분포의 형태를 지니고 있어 실험 자체에서의 오류라기보다는 측정 상황과 측정자에 따른 변수들에 의한 차이로 추정된다. 여러 노면에 따라 측정을 하였지만 95%의 신뢰구간에 해당되는 데이터가 20%가 넘는 결과가 없다는 점은 사고 해석상에 있는 불확실성을 알 수 있게 한다. 호의 측정에 있어서도 줄자가 아닌 굴림자를 사용하였기 때문에 오차가 커졌다. 실험을 함에 있어 자갈과 같은 노면에서는 더욱 오차가 큼을 알 수 있다. 이러한 측정 데이터의 대부분은 실제 사고현장에서 측정을 하더라도 충분히 일어날 가능성이 높다.

<표 7>은 위 분석 결과를 바탕으로 각 평균값과 그에 따른 신뢰구간을 정리한 것이다. 길이가 길어질수록 측정을 하여 얻은 데이터들의 오차도 커지는 경향을 보이고 있다. 실제 사고현장에서 측정한 요마크의 경우 실험 데이터보다 길이가 긴 경우가 대다수이므로 곡선반경을 추정함에 있어 오차가 더욱 커질 것으로 예상된다.

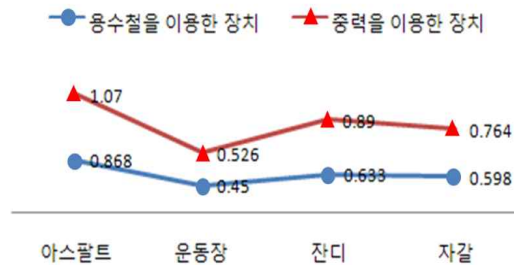
<표 7> 곡선반경의 신뢰구간 정리 (cm)

구분	평균	최소신뢰	최대신뢰
잔디	179.9	179.3	180.5
자갈	346.8	345.7	347.8
모래	233.3	232.3	234.4
아스팔트 #1	217.8	215.1	220.5
아스팔트 #2	680.5	674.9	686.1
아스팔트 #3	926.1	922.1	930.1

4. 마찰계수 측정

마찰계수는 실제 교통사고 해석에서 아주 정교한 값을 요하는 변수가 아니며 그러한 측정이 필요하거나 실제 그렇게 용이하지도 않다. 본 연구에서는 사고 발생 현장에서 마찰계수 측정의 불확실성을 확인하려고 하였다. 전술한 것처럼 용수철저울을 이용한 마찰계수 측정장치와 이 장치의 불편 사항을 일부 개선한 중력이용 마찰계수 측정장치를 사용하여 구한 마찰계수를 분석하였다. 차량을 이용해 노면에 스키드마크를 생성하고 이 스키드마크의 길이를 바탕으로 실제 노면과 차량사이의 마찰계수를 구해 각 장치에서 측정한 마찰계수 값들과 비교하였다. 실험은 총 10회씩 반복 측정 하였고, 평균값을 이용하여 결과를 비교 분석 하였다.

두 장치로 측정한 마찰계수는 노면의 종류에 따라서도 측정 결과의 차이를 명확하게 나타냈다(<그림 9>). 이는 구배를 포함하는 노면의 특성과 두 장치의 마찰계수를 측정하는 구조의 상이함으로 측정값들에서 눈에 띄는 차이가 발생한다고 볼 수 있다. 그러나 중력이용 장치로 측정한 값이 모든 노면에서 용수철저울활용 장치 측정값보다 일관되게 높게 나오는 것은 중력을 이용한 장치에서는 하중이 증가속하면서 멈추는 과정이 저속에서 운동마찰계수가 정지마찰계수에 근접하게 상승한 것에 기



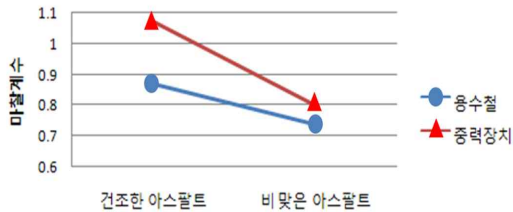
<그림 9> 노면 종류별 측정 마찰계수 평균값



인한다고 여겨진다. 이는 기존의 다른 방식의 마찰계수 측정 장치들과 비교하여 사고해석 분야에서 매우 중요한 장점이 된다.

<그림 10>을 볼 때 건조한 노면에서 젖은 노면으로의 마찰계수 변화율이 용수철장치에서는 15% 정도가 감소하였고 중력이용 장치에선 대략 25%가 감소되었다. 여기서도 중력이용 장치에서 예측된 마찰계수 변화율 25%가 신뢰할 수 있는 값으로 볼 수 있다. 즉 실제 젖은 노면위에선 25%의 마찰계수가 감소하는 것으로 예상되므로 같은 속도라도 해당 아스팔트 노면에서 건조한 상태에 비해 빗길에서 25% 더 미끄러진다.

<표 8>과 <그림 11>은 아스팔트, 모래, 자갈 노면에서의 마찰계수 측정 결과들을 요약 비교하고 있다. 그런데 자갈길에서 두 장치 모두 18-28%의 상당히 큰 오차를 보였다. 두 마찰계수 측정 장치 모두 자갈 표면에서의 마찰계수를 측정할 반면 실제 차량을 가지고 실제 계수 측정 시 차량의 큰 무게(수직항력)로 자갈의 표면이 아닌 자갈을 파면서 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 자갈표면의 마찰계수 보다 더 큰 마찰계수가 작용한다는



<그림 10> 아스팔트노면 상태별 측정 마찰계수

<표 8> 실제 속도와 장치별 추정 속도 비교

노면	실제 속도 km/h	용수철		중력	
		속도 km/h	오차 %	속도 km/h	오차 %
아스팔트	60	54	10.3	60	0.4
모래	55	50	9.8	54	2.5
자갈	35	25	28.0	28	18.6



<그림 11> 실제 속도와 장치별 추정 속도

증거이다. 그러므로 큰 수직 하중에 의해 파일만한 다져지지 않은 도로의 마찰계수는 무의미하거나 큰 오차율을 감안하고 사고 해석을 수행하여야 할 것이다. 자갈을 제외한 두 노면에서의 오차율을 분석해 보면 용수철을 이용한 장치의 경우 10%정도의 오차율이 나온 반면 중력을 이용한 장치의 추정속도 오차율은 0-2.5% 정도에 불과하였다.

통상 국내에서 사고 해석시에 활용하는 기존 문헌에 있는 아스팔트 노면 마찰계수는 0.7-0.9로 용수철저울을 이용한 마찰계수 측정값과 유사하지만 실제 차량을 이용한 스키드마크 실험에서 나온 마찰계수 수치(1.0 근방)와는 차이를 보였다. 반면 중력이용 장치에서는 이와 거의 동등한 수치를 구해 낼 수 있었다. 이는 실제 스키드마크가 생기는 원리와 유사한 방식으로 평균적인 마찰계수를 구했기 때문이라고 여겨진다. 따라서 기존 문헌에 있는 마찰계수 값을 사고해석에 적절한 검토 없이 사용하는 것은 대단히 주의하여야 한다. 또한, 자갈과 같은 고르지 못한 노면이나 제대로 다져지지 않은 길에서의 사고 해석은 통상적인 방식으로 측정된 마찰계수를 활용하는 것이 불가하다.

### 5. 차량 충돌 변형량 사진계측

교통사고의 현장조사에서 도로상의 각종 사고 흔적 외에 측정이 필요한 부분은 사고 차량이다. 대부분의 교통사고에서는 사고차량의 소성변형이 발생하게 되는데 소성 변형된 모습과 형태, 깊이 등을 통해 충돌자세와 충돌 속도 등을 추정하게 된다. 일반적으로 사고가 발생하게 되면 현장조사자에 의해 많은 양의 사진을 촬영하게 되는데, 실제 손상 깊이 등을 함께 측정하는 경우가 거의 없다. 그러나 현실에서는 종종 민사 재판 등에서 현장조사자에 의해 촬영된 사진만으로 자동차의 손상 깊이와 손상형태 등이 법적 다툼의 쟁점화가 되는 경우가 있다. 사고현장의 각종 흔적 측정에서도 반복적인 측정 결과 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 실측 대상물이 존재하지 않은 상황에서 여러 장의 사진과 차량의 제원정보를 통해서 차량의 충돌 변형량을 측정할 경우 실제 대상물을 직접적으로 측정하는 것보다 측정 오차는 실제 측정값보다 훨씬 클 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 이와 같은 사진계측 오차는 직업적으로 자주 경험해야 하는 전문가 그룹과 일반인 그룹 사이에 더욱 큰 오차가 발생될 여지가 크다. 또한 전문가 그룹에서도 개인적인 경험과

<표 9> 차량 변형량 측정

구분	G-car	N-car	R-car	S-car	
A-전장(cm)	494	449	425	467	
B-전폭(cm)	186	172	170	185	
C-축거(cm)	294	257	250	270	
측거변형 (cm)	좌	10	10	9	0
	우	7	10	9	5
D-앞 오버행(cm)	88	-	84	95	



<그림 12> 실험참가자에게 제시된 N 차량 사진

계측방법에 따라 상당한 오차가 발생할 것으로 추정할 수 있다.

충돌 변형량 사진계측에 관한 실험은 정면 장벽충돌

<표 10> 측정값 분석 (단위 cm)

		G-car	N-car	R-car	S-car
사 진	평균값	54.5	58.8	58.8	50.2
	표준편차	15.6	12.6	13.7	15.3
	상대오차율	28.7%	21.4%	23.3%	30.5%
캐 드	평균값	63.8	58.7	40.3	42.7
	표준편차	1.0	1.5	1.2	2.5
	상대오차율	1.6%	2.6%	2.9%	5.9%
진실 값		60.6	56.8	37.7	30.2

실험 차량에 대해 충돌전후 모습과 차량 제원에 대한 기초적인 정보를 제공하고 실험참가자 각자의 방법으로 측정을 하도록 요구했다. 20명으로 구성된 참가자들은 현재 사고분석을 직업적으로 하고 있거나 분석 관련 자격증 취득자로 제한했다. 실험에 앞서 실험 목적과 기본적인 측정 범위에 대해 구체적으로 설명하였고, 측정 방법에 대해서는 제한을 두지 않았다. 충돌 변형량의 측정 기준(점)은 참가자 마다 다를 수 있으므로 이에 따른 실험의 절차적 오차를 줄이기 위해 실험 차량의 중앙띠(center line)를 기준하여 차량 앞면부 범퍼 정중앙을 측정 기준점으로 제시하였다. 실험에 사용된 차량들은 차량 전면부가 좌우 대칭의 유선형 구조이고, 완전 전면 고정벽 충돌실험 차량이므로 정중앙 기준점에서 소성 변형깊이의 최대값을 갖는 것으로 나타났다.

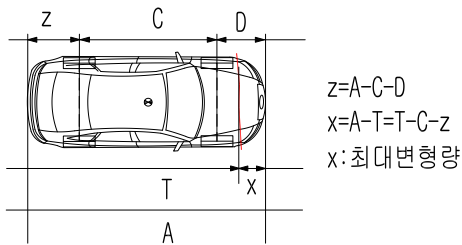
실험 참가자들에게는 <표 9>에 보여지는 것처럼 4대의 장벽충돌 차량이 제시되었으며, 실험차량 명은 각각 G, N, R, S-car로 하고, 관련 사진은 G-14, N-10, R-10, S-8 장이 제시되었다. 또한 G와 N(<그림 12>)은 근접에서 촬영된 측면사진이 포함되어있고, R과 S(<그림 13>)는 포함되지 않았다.

<표 10>은 <그림 14>에 나타나는 변형량 측정 실험 결과들을 요약하고 있다. 실험 참가자들은 측정의 주된 방법으로 대부분 실험 차량들의 앞 오버행 간격(전면부 최정점에서 바퀴 중심축 사이의 거리)을 세분화하여 비교하는 방법을 사용하는 것으로 나타났다. 이 방법을 사용한 그룹에서는 차량 제원과 충돌 후 변형에 대한 정보가 상대적으로 측정값을 결정하는 중요한 요인인 것으로 나타났다.

일부의 실험 참가자들은 일반적으로 실험 참가자들이 사용한 방법에 부가적으로 캐드의 도면을 활용해 좀 더 세밀한 측정을 시도하였다. 표본 수가 3개인 CAD 활용 그룹은 일반 측정 그룹과 비교할 때 상대적으로 표준편



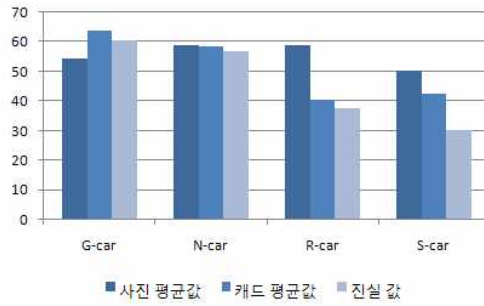
<그림 13> 실험 참가자에게 제시된 S 차량 사진



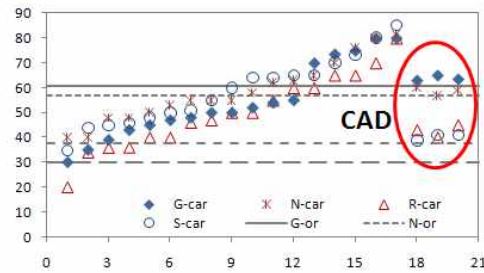
<그림 14> 차량 변형량 측정

차가 작게 나타나 상대오차율이 작게 나타났다. 또한 이들 그룹의 측정값은 S-car를 제외하고 실험 차량의 기계적 실 측정값의 10% 범위내로 측정되어 측정 정확도와 안정성에서 우수한 것으로 나타났다.

충돌실험에서 소성변형에 대한 기계적 측정값을 진실 값이라 할 때 실험결과의 평균값을 CAD 사용그룹과 일반 그룹으로 세분화하여 분석한 결과는 <그림 15-16>에 나타난 것처럼 CAD 그룹이 진실 값에 근접하였다. 또한 충돌실험 차량에 대해 측면에서 근접 촬영한 사진이 제공된 경우는 그렇지 않은 그룹에 비해 진실 값에 가까운



<그림 15> 측정방식 및 진실 값 비교



<그림 16> 측정 산포도 및 진실 값

측정을 하였다. 이것은 실험자들의 사진계측 원리가 오버행과 전륜축 중심(바퀴중심)간의 간격을 통해서 측정이 이루어지기 때문이다. 따라서 교통사고 차량조사에서 손상의 압축방향 측면에서 근접 촬영하는 것이 후에 분쟁에서의 사진 계측 시 도움이 되는 것으로 나타났다.

V. 결론

본 연구에서 사고 해석 측정 실험은 국내 실정에 맞도록 계획하였고, 수행한 측정 실험 결과들을 분석하여구한 신뢰구간과 범위, 표준편차 등은 자동차 사고 재구성 해석시에 도움이 되도록 정리하였다. 사고 해석에 있어 가장 정확한 방법은 매 상황마다 측정에 의해 신뢰가 가능한 데이터를 얻고 분석을 하는 방법이다. 하지만 실제 매번 제대로 된 측정을 하는 것은 시간 지체와 여건상 불가능하거나 어려운 것이 사실이다. 교통사고 해석과정에 있어서 현장 조사의 경우 최단 시간동안 사고 상황에 대한 각종 흔적 및 파손 정도를 파악하여야 한다. 이는 교통 흐름의 방해를 최소화하기 위해 사고 현장의 장기 보존이 힘들기 때문이다. 또한, 차량 상태 및 도로 상황 등

교통사고현장 정보의 불확실성에 의한 한계를 극복하기엔 많은 어려움이 있다.

따라서, 본 연구는 불확실성의 정도가 매우 높을 수 있는 도로 기하구조와 타이어 흔적 등 길이 측정과 마찰계수 측정 등에 대해 반복 실험을 함으로써 교통 사고해석에서의 불확실성을 정량화하였다. 또한 자동차 충돌 변형량의 사진 계측에 대한 불확실성에 대해서도 해석 결과를 제시하였다. 이러한 통계학적 분포들은 교통사고 측정의 오류에 대한 대응 방안(오차전파나 Monte Carlo 방법 등) 즉, 사고재구성 불확실성을 구하는 근거가 되어서 입력 계수의 적절한 범위를 결정하도록 할 수 있다.

### 참고문헌

1. Brach, R.M. and Dunn, P.F.(2004), "Uncertainty Analysis for Forensic Science", Lawyers & Judges Publishing Company, Inc., Arizona.
2. Bartlett, W., Baxter, A., Livesay, E., Schmidt, B., Stanard, T. and Wright, W.(2006), "Comparison of Drag-Sled and Skidding-Vehicle Drag Factors on Dry Roadways", SAE Paper 2006-01-1398.
3. Han, I. and Park, S.(2001), "Inverse Analysis of Pre- and Post-Impact Dynamics for Vehicle Accident Reconstruction," Vehicle System Dynamics. Vol. 36, No. 6, pp.413~433.
4. Bartlett, W., Wright, W., Masory, O., Brach, R.M., Baxter, A., Schmidt, B., Navin, F. and Stanard, T.(2002), "Evaluating the Uncertainty in Various Measurement Tasks Common to Accident Reconstruction", SAE Paper 2002-01-0546.
5. Wood, D.P. and O'Riordain, S.(1994), "Monte Carlo Simulation Methods Applied to Accident Reconstruction and Avoidance Analysis", SAE Paper 940720.
6. Brach, R.M. and Brach, R.M.(2005), "Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods", SAE International.
7. Brach, R.M., Guzek, M. and Lozia, Z.(2007), "Uncertainty of Road Accident Reconstruction Computations", Proc. of 16th EVU Conference, Poland.
8. Du, X., Jin, X., Zhang, X., Shen, J., Hou, X.(2009), "Geometry Features Measurement of Traffic Accident for Reconstruction Based on Close-Range Photogrammetry", Advances in Engineering Software. Vol. 40, No. 7, pp.497~505.
9. Varat, M.S., Kerkhoff, J.F., Husher, S.E., Armstrong, C.D. and Shuman, K.F.(2003), "The Analysis and Determination of Tire-Roadway Frictional Drag", SAE Paper 2003-01-0887.

✉ 주 작성자 : 한인환

✉ 교신저자 : 한인환

✉ 논문투고일 : 2010. 1. 20

✉ 논문심사일 : 2010. 2. 22 (1차)

2010. 3. 29 (2차)

2010. 4. 2 (3차)

✉ 심사판정일 : 2010. 4. 2

✉ 반론접수기한 : 2010. 10. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필