

다중추돌사고의 재구성 해석: 경험적/해석적 방법과 영상사고기록장치 활용

한인환*

홍익대학교 기계정보공학과

Reconstruction Analysis of Multi-Car Rear-End Collision Accidents: Empirical/Analytical Methods, and Application of Video Event Data Recorder

HAN, Inhwan*

Mechano-Informatics and Design Engineering, Hongik University, Sejong 339-701, Korea

Abstract

Multi-car rear-end collision accidents have three categories: sequential collision from the rear which is commonly referred to as chain reaction collision, sequential collision from the front, and mixed-order collision. This paper suggests several effective methods of reconstruction analysis for multi-car rear-end collision accidents. First, by incorporating the traditional empirical method which uses vehicle damage caused by brake dive and passenger injuries, with results of theoretical analysis made within mechanics of rigid body, it is made possible for the method to be put to immediate practical use. A methodology to precisely analyze multi-car rear-end collision accidents was suggested using a simulation program simultaneously with a video event data recorder which is starting to be widely used in domestic vehicles. To go beyond the simple intuitive analysis of the video event data recorder, the simulation analysis based on the results of video analysis was executed to acquire various information, so that the causes and responsibility could be clearly stated.

다중추돌사고의 형태는 연쇄 추돌이라고 불리는 뒤로부터의 순차적인 추돌과 앞으로부터의 순차적인 추돌, 그리고 순서가 섞여 있는 추돌형태로 구분된다. 다중추돌사고에 대하여 몇가지 효과적인 재구성 해석 방안을 제시한다. 브레이크 다이브 등으로 인한 차량 파손과 승객 부상을 활용하는 전통적인 경험적 수법과 강제역학 범주내에서의 이론적인 해석 결과를 구하여 당장예의 실용적인 적용이 가능하도록 하였다. 국내에 보급이 확산되고 있는 영상 사고기록장치를 활용하고 시뮬레이션 프로그램 등을 병행 활용하여 다중추돌사고를 효과적으로 해석하는 방안을 제시하였다. 저장 동영상에 대한 단순 직관적인 조사를 넘어설 수 있도록 동영상 분석 결과에 근거한 시뮬레이션 해석을 수행하여 다중추돌사고에 대한 구체적인 다양한 정보의 획득을 가능하게 하여 원인 규명 및 책임 소재 등을 명확하게 구분할 수 있도록 하였다.

Key Words

Multi-Car Rear-End Collision Accidents, Accident Reconstruction, Chain Reaction Collision, Video Event Data Recorder, ΔV

다중추돌사고, 사고 재구성, 연쇄추돌, 영상사고기록장치, 속도 변화량(ΔV)

* : Corresponding Author
ihhan@hongik.ac.kr, Phone: +82-41-860-2581, Fax: +82-41-862-2664

I. 서론

다중 추돌사고는 일직선으로 상대 속도를 가지는 차량들 사이의 충돌사고이다. 다중 추돌사고의 형태는 대개 3가지로 구분할 수 있다(Nystrom, 2010). 첫째, 흔히 연쇄 추돌(Chain Reaction Collision)이라고 불리우는 뒤로부터의 순차적인 추돌과 둘째 앞으로부터의 순차적인 추돌, 그리고 마지막으로 순서가 섞여 있는 다소 복잡한 추돌형태로 구분된다. 일반적으로 저속 추돌은 추돌과정에서 운동에너지를 소모하게 되고, 작은 규모의 운동량 교환이 이루어져 통상 3중 이내의 추돌에 그치고 4중 이상의 다중 추돌로 이어지기 어려우나, 속도가 높은 상태에서의 추돌은 4중이상의 다중 추돌사고가 발생할 가능성이 높다. 즉, 4중 이상의 다중 추돌에서는 추돌차의 운동량이 큰 상태이므로 속도가 매우 높거나 차체의 질량이 큰 대형차가 관계되는 경우가 많다.

우리나라의 경우 보험제도와 법적 운용 측면에서 추돌사고는 추돌한 차의 운전자에게 모든 책임을 지우고 있어, 일반적으로 추돌당한 차의 승객들은 부상정도가 일부 부풀려지는 경향이 있고, 추돌한 차의 운전자는 부상 정도가 낮게 나타나는 경향이 있다(Han, 2007). 또한, 다중추돌의 경우 승객들은 단순 추돌과는 달리 추돌 충격을 연속적으로 받게 되는 경우와 앞·뒤차와의 연쇄적인 충돌 충격을 받는 경우가 존재한다. 이와 같이 다중 추돌은 충돌구성과 승객의 부상발생 메커니즘도 훨씬 복잡할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 쟁점사항이 존재할 수 있다. 즉, 차량들의 추돌 순서, 속도 및 제동여부 그리고 차간 거리와 운전자의 상태 등에 따라서 손해 배상이 결정될 수 있다.

다중추돌 사고의 통상적인 해석은 승객 부상과 차량 파손 흔적 등 사고 현장에서 수집한 증거들과 목격자나 사고 당사자들의 진술에 근거한 사고조사자의 경험적인 수법에 주로 의존해 왔다. 그러나, 국내에서는 수년전부터 상용차량들을 중심으로 장착되기 시작한 영상 사고기록장치를 활용하여 보다 직관적이고도 정확한 사고 원인 규명과 해석이 가능하게 되었다. 본래 차량용 블랙박스는 지능형 자동차의 한 부분으로 충돌 사고 시 운전자의 각종 조작 상태와 충돌 펄스 및 여러 신호들을 수집하고 저장하여 사고 원인을 규명할 수 있는 정보를 제공하는 사고기록장치로서 북미지역 등에서는 Event Data Recorder(EDR)로 불리우고 있다(Han, 2007). 그런데, 시중에 통용되는 자동차 영상 사고기록장치는 운행

영상을 기반으로 사고 당시 정확을 확인할 수 있으므로 차량용 블랙박스로 통용되고 있는 실정이다. 관련 장치들에 대한 국내의 표준화 움직임이 활발해 지면서 2007년 11월 자동차용 사고 기록장치에 대한 표준(KS R 5076)이 제정(KATS, 2007)되었으며, 필수 저장 정보에 대하여 규정하고 있다. 그러나, 영상 사고기록장치의 경우 여전히 필수 저장 정보에 대한 규정이 부족하여 왔으며, 그간 제정된 사고기록장치에 대한 표준에서 규정하는 필수 저장 데이터 부분에 영상은 포함되지 않았기 때문에 영상 사고기록장치는 별도의 장비라는 개념이 국내 관련 분야에 존재하였다. 이러한 배경 하에서 2011년 6월 KS R 5078 표준으로 제정(KATS, 2011)이 되었으며, 해당 표준에서는 영상 사고기록장치에 대한 필수 저장 정보를 규정하고 있다.

본 논문에서는 충돌 구성이 복잡하고 원인 규명이 애매한 다중추돌사고에 대하여 차량 파손과 승객 부상 등을 활용하는 전통적인 경험적 수법과 관련한 해석 사례들을 제시한다. 이러한 경험적 분석이 현재 보편적으로 활용되고 있기는 하지만, 다중 추돌에 개입된 차량들의 충돌 속도 등에 대해서는 대략적인 추정이 가능할 뿐이며 경우에 따라서는 복수의 사고 시나리오를 제시할 수밖에 없는 한계를 가진다. 따라서, 강제역학 범주 내에서의 이론적인 해석 결과를 구하여 경험적 수법과 함께 당장어의 실용적인 적용이 가능하도록 하였다. 보완적으로 사용하는 해석적 도구는 사고 분석과 관련하여 경험적 방법에서 제시하기 어려운 충돌 관련 정량적 물리량들의 용이한 추정을 가능하게 한다. 마지막으로, 영상기록장치 저장 동영상에 대한 단순 직관적인 조사를 넘어설 수 있도록 동영상 분석 결과에 근거한 시뮬레이션 해석을 병행하여 다중추돌사고에 대한 보다 정확하고 다양한 정보의 획득을 가능하게 하여 원인 규명 및 책임 소재 등을 명확하게 구분할 수 있도록 하였다.

II. 다중추돌사고의 경험적 분석

다중 추돌 사고는 종종 추돌순서에 따른 법적 책임과 승객의 부상발생 정도 때문에 이해 당사자간 치열한 법적 분쟁이 발생하기도 한다. 다중 추돌사고의 해결은 전통적으로 탑승자들의 진술에 의존하는 경향이 높다. 수사기관에서 추돌순서의 결정은 판단이 어려운 경우 가장 앞에 있던 자동차의 탑승자 진술 내용에 의존하여 결정하는 경우가 많다. 그러나 이와 같이 탑승자의 증언에 의

한 방법은 종종 탑승자들의 착각과 실수 등의 인적요인으로 사실과 다르게 결정될 수 있다.

다중 추돌사고의 경험적 해석은 브레이크 다이브 정도를 비교해 해석하는 방법과 승객 상해를 통해 해석하는 방법이 있다. 브레이크 다이브 활용 방법은 비교적 많이 알려져 있으나, 제동 중 다이브 정도가 균일하게 유지되지 않으므로 단순하게 판단하기 어려운 경우도 있다. 승객 상해로부터 다중 추돌사고를 해석하는 방법은 잘 알려져 있지 않다. 승객 부상에 관한 연구는 주로 자동차 안전 분야에서는 오랜 기간 연구되어 왔지만, 사고해석 분야에서는 비교적 관심도가 낮고 승객 상해는 의학 분야라는 인식 때문에 최근에야 이르러 연구가 이루어지고 있다. 본 절에서 제시되는 사례 연구는 Park (2010)에 의해 제공되었다.

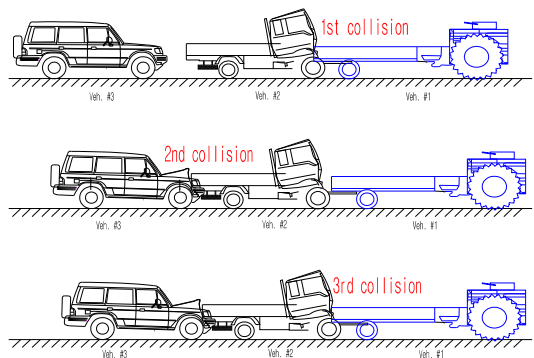
1. 브레이크 다이브 활용 사고해석

브레이크 다이브는 자동차 무게중심 높이와 관성의 법칙 때문에 발생한다. 즉, 제동 운동 상태에서는 타이어와 노면의 마찰력으로 인한 제동력이 앞바퀴에 집중되는 현상으로 인해 무게중심의 관성운동이 변화가 생기며 앞바퀴의 접지 면이 회전 중심축으로 작용(피칭 운동)하여 자동차의 앞부분에 다이브가 발생한다. 브레이크 다이브에 의한 추돌은 자동차의 지상고가 앞부분은 낮아지는 반면에 뒷부분은 높아져 다이브 과정에서의 추돌과 정상적인 주행 또는 정지 차량과의 충돌 접촉부위 높이가 다르게 나타난다. 이러한 점은 다중 추돌사고에서 주로 연속적으로 추돌이 일어난 것인지 각각의 차량이 앞의 차를 추돌한 것인지를 구분하는 중요한 분석 요소가 된다. 또한 제동 운동 상태에서의 브레이크 다이브 정도는 제동 시점에서 가장 크게 일어나고 이동하며 다이브 높이 복원 정도가 달라지는 차량적 특성으로 인해 충돌 접촉손상의 높이에 따라 추돌과정에서의 차량의 운동 상태를 해석할 수 있다. 충돌전의 제동 여부 등을 결정하기 위하여, Ray 등(2006)은 브레이크 다이브 양을 실험을 통하여 구한 바 있다. 이러한 실험 데이터나 혹은 간략한 이론적 분석과 더불어 적절한 브레이크 다이브 양의 측정이 이루어진다면 제동 운동을 포함하여 정확한 충돌 속도 등의 추정이 가능할 수도 있다.

(Figure 1)에 보여지는 사고는 승용차 4대(앞에서부터 A, B, C, D)가 연속적으로 추돌한 사고이다. 이 사고에서 승객의 큰 부상은 발생하지 않았으나 사고의 범



<Figure 1> 4-car rear-end accident scene



<Figure 2> 3-car rear-end collision accident

적 책임 때문에 차량 C와 차량 D의 운전자 주장이 첨예하게 대립되는 사고이다. 차량 C 운전자는 차량 D가 추돌하여 연속적인 추돌이 발생한 것이라 진술하는 반면, 차량 D 운전자는 차량 C가 추돌하여 차량 B, A가 연속 추돌하고 이후 차량 D가 정지 차량 C를 추돌한 것이라고 주장하였다.

차량 A와 차량 B는 접촉손상 높이가 (정지)평형상태의 일반적인 범퍼 높이와 일치한다. 이는 추돌당시 차량 A와 차량 B는 정지 상태였음을 의미한다. 차량 C의 앞부분은 차량 B의 후면부와의 추돌로 under ride 충돌손상을 나타내고 있다. 이것은 차량 C가 차량 B와 추돌할 때 브레이크 다이브 상태였음을 의미하는 것으로 차량 C가 제동으로 인한 감속 운동 상태였다. 차량 D도 앞부분이 under ride 충돌손상을 나타내고 있으며, 차량 D가 차량 C와 추돌할 때 브레이크 다이브로 감속 운동 상태였을 것으로 보여진다. 따라서 차량 C와 차량 D는 순차적으로 앞 자동차를 충돌하였고, 추돌순서는 차량 C가 차량 B를 추돌, 차량 D가 차량 C를 추돌한 것으로 고려할 수 있다.

2. 승객 부상 활용 사고해석

최근 들어 정면충돌 시에는 운전자 보호 장치의 장착으로 의료비 부담이 경감되고 있으나 자동차 충돌 사고에서 가장 빈번한 충돌에서는 부지불식중에 목이 과도하게 뒤쪽으로 구부러졌다가 다시 앞으로 반동하면서 발생하게 되는 편타성 상해(Whiplash Associated Disorders, WAD)로 의료비가 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다.

(Figure 2)에 보여지는 상황은 앞에서부터 농업용 트랙터(차량 1), 화물차(차량 2) 그리고 RV(차량 3)가 3중 충돌한 사고이다. 이 사고는 탑승객이 크게 부상을 당한 사고로 사고의 법적 책임 때문에 차량 2와 차량 3 측의 주장이 첨예하게 대립되었다. 화물자동차와 RV는 브레이크 다이브 특성이 승용자동차와는 다르다. 특히 화물자동차는 무게중심이 자동차 중간 뒤쪽에 위치하기 때문에 브레이크 다이브 현상이 발생하지 않는다. 따라서 승용자동차와 동일한 방식으로 충돌사고를 해석할 수 없다. 하지만 차량의 손상 정도와 승객의 부상 정도를 이용하여 사고를 해석할 수 있다. 차량 1은 손상정도가 심하지 않았고, 차량 2는 차내 탑승공간이 심하게 압착되는 변형이 발생하였으며 충돌로 인한 속도 변화량(ΔV)은 60~80km/h 정도로 구해졌다. 차량 2의 운전자는 차체와 운전석에 하체가 끼여 호흡곤란, 양쪽 하지의 통증, 좌측 발목관절 부위의 개방성 창상을 입었다. 차량 3은 차량 2를 충돌하여 ΔV 가 30~40km/h 정도로 추정되는 손상이 전면부에 전체적으로 발생하였다.

이 사고에서 직관적으로 추정할 수 있는 충돌 순서는 2가지이다. 첫 번째는 차량 1이 정지 이후에 차량 2와 차량 3가 연속으로 충돌하는 다중 충돌이고, 두 번째는 차량 3가 차량 2를 충돌 후 차량 1을 충돌하는 연쇄 충돌이다. 차량 2와 차량 3의 운전자가 첨예하게 대립되는 부분이 바로 이 충돌 순서와 차량 2가 정지 상태였는지 여부이다. 연쇄 충돌의 경우 앞으로 갈수록 ΔV 가 감소하게 되는 데 이 경우에는 연쇄 충돌로 추정하기 어렵다. 또한, 차량 2의 운전자의 주상해 원인은 전면부의 압축 손상에 의한 운전석 공간의 압착인 것으로 판단된다. 추가적인 상해로 안면골 골절 의의가 있다. 충돌사고에서 전방의 차량 운전자에게 발생하는 대부분의 상해는 목 상해이다. 하지만 차량 2의 운전자는 목 상해를 입지 않았고, 오히려 전방의 차량과 충돌시 입을 수 있는 안면 상해를 입었다. 즉, 앞 차량과 먼저 충돌을 하면서 운전

석 전방 유리나 혹은 핸들에 의한 안면 상해를 입은 것이다. 따라서, 차량 2가 차량 1과 먼저 충돌을 하고 후에 뒤따라오던 차량 3이 충돌을 한 것으로 여겨진다. 물론, 본 사고에서 이러한 결론을 입증할 추가적인 다른 정보와 고려 사항들도 있으나 본 논문에서는 서술하지 않는다.

한편, Jewkes(2001)는 다중 충돌에서 승객 부상 등 사고의 심각도를 간략한 이론적 해석으로 제시한 바 있다. 그런데, 이론적 해석 대부분은 본 논문에서 후술하는 충돌 해석 내용들에 포함되거나 혹은 대체될 수 있는 것으로 여겨진다.

III. 다중충돌사고의 이론적 해석

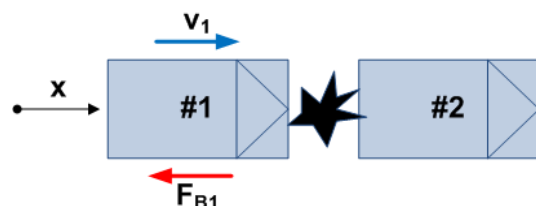
다중 충돌사고를 구성하는 기본 단위로써 2대 차량 충돌사고를 해석하고 전형적인 다중 충돌사고에 그 결과를 바로 활용할 수 있는 3대 차량의 충돌 사고에 대한 해석을 강제역학의 범주내에서 수행한다. 여기서는 충돌과정을 통한 차량 속도변화를 나타내는 ΔV 에 대한 해석적인 표현식들을 주로 구하며, 이와 같이 추정하는 ΔV 는 차량 탑승객의 부상 및 차량 손상 정도 등을 파악할 수 있는 주요한 단서가 된다.

1. 2대 차량 충돌사고 해석

다중충돌사고를 구성하는 단위로써 2대 차량 충돌사고를 1대만 주행하는 상황과 2대가 모두 주행하고 있는 상황에 대하여 각각 해석을 수행한다.

1) 1대 주행

(Figure 3)에서처럼 차량 1이 정지해 있는 차량 2의 후방을 충돌하는 상황이며, 차량 1이 제동을 시작하는 순간($t_1 = 0$) 두 차량의 초기 상대 직선 위치는 $x_{B0}(=x_{10} - x_{20} < 0)$ 이고, 차량 1의 속도는 v_{10} 이다.



<Figure 3> 2-car: 1 moving car

충돌이 개시되기 전의 차량 1에 대한 운동방정식은 식(1)로 쓸 수 있고, 일정한 제동력 F_{B1} 을 가정하면 식(2)가 성립한다.

$$\ddot{x}_1 = -\frac{F_{B1}}{m_1} = -f_{B1} = const. \quad (1)$$

$$2f_{B1}(-x_{R0}) = v_{10}^2 - v_1^2 \quad (2)$$

따라서, 1대 주행에서 충돌 속도(impact speed) $v_R (= v_1 - v_2)$ 은 차량 2를 충돌할 때 ($x_R = x_1 - x_2 = x_1 - x_{20} = 0$) 차량 1의 충돌 속도가 되며 식(3)으로 쓸 수 있다.

$$v_R = v_1 = \sqrt{v_{10}^2 + 2f_{B1}x_{R0}} \quad (3)$$

강체역학의 범주내에서 충돌과정을 통한 차량 속도변화를 나타내는 ΔV 는 두 차량에 대하여 각각 식(4)로 나타난다. 여기서 e 는 충돌전후의 에너지 소산비 혹은 상대속도의 비로 고려할 수 있는 두 차량간의 반발계수이다(Han, 1998).

$$\Delta V_1 = (1+e) \frac{m_2}{(m_1+m_2)} v_R \quad (4a)$$

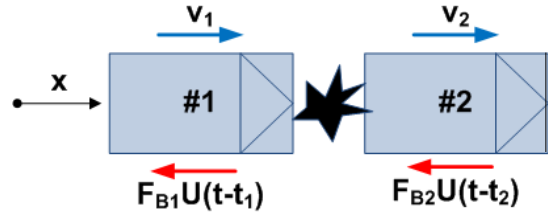
$$\Delta V_2 = (1+e) \frac{m_1}{(m_1+m_2)} v_R \quad (4b)$$

그런데, 다중 추돌사고에서 흔히 발생하는 지속 추돌의 경우에는 Han(2007)에서처럼 기존 강체역학의 범주를 벗어나서 보다 효과적인 충돌해석을 수행할 수 있다. 이 때 충돌 동안의 두 차량의 운동방정식은 식(5)로 나타나며, F_C 는 두 차량간에 작용하는 비선형 연속접촉력이다. 연속접촉력을 결정하는 비선형지수들의 적절한 추정과 식(3)으로 나타나는 초기조건에 근거한 식(5)의 시뮬레이션 해석을 통하여 ΔV 를 포함하는 다양한 충돌 관련정보들을 구할 수 있게 된다.

$$\ddot{x}_1 = (-F_C - F_{B1})/m_1, \quad \ddot{x}_2 = (F_C - F_{B2})/m_2 \quad (5)$$

2) 2대 주행

(Figure 4)는 대오 주행(platoon driving, $v_{10} = v_{20}$)



<Figure 4> 2-car: 2 moving cars

중에 뒤따르는 차량 1이 먼저 제동에 돌입($t_2 = 0$)한 차량 2의 후방을 충돌하는 상황을 보여주고 있다. 차량 1이 뒤늦게 제동을 시작($t_1 > 0$)하고, 충돌 개시시간(collision time instant)은 t_3 가 된다. 충돌 접촉이 시작되기 전의 차량 1과 2에 대한 운동방정식은 식(6)으로 쓸 수 있고, 두 차량의 상대속도와 상대위치를 시간의 함수로 구하면 식(7)로 나타난다. $t_2 = 0$ 으로 고려함에 따라서 t_1 은 제동지연시간이 된다.

$$\ddot{x}_1 = -f_{B1}U(t-t_1), \quad \ddot{x}_2 = -f_{B2}U(t-t_2) \quad (6)$$

$$v_R(t) = -f_{B1}(t-t_1) + f_{B2}(t-t_2) \quad (7a)$$

$$x_R(t) = x_{R0} - \frac{1}{2}f_{B1}(t-t_1)^2 + \frac{1}{2}f_{B2}(t-t_2)^2 \quad (7b)$$

한편, 식(7b)에서 $x_R(t) = 0$ 을 만족하는 충돌 개시 시간 t_3 는 식(8)처럼 보일 수 있다.

$$(f_{B2} - f_{B1})t_3 = \frac{-f_{B1}t_1}{\sqrt{f_{B1}^2 t_1^2 + (f_{B2} - f_{B1})(f_{B1}t_1^2 - 2x_{R0})}} \quad (8)$$

식(8)을 식(7a)에 대입하면, 2대 주행의 2대 추돌사고가 발생하는 $t = t_3$ 에서 충돌 속도 v_R 은 식(9)로 쓸 수 있다.

$$v_R = \sqrt{f_{B1}f_{B2}t_1^2 + 2(f_{B1} - f_{B2})x_{R0}} \quad (9)$$

여기서 만일 두 차량의 단위질량당 제동력을 f_B 로 동일 한 것으로 고려하면 충돌속도는 $f_B t_1$ 이 된다. 충돌과정을 통한 ΔV 는 강체역학의 범주내에서 두 차량에 대하여 식(9)를 가지고 식(4)로부터 각각 구할 수 있게 된다.

2. 3대 차량 충돌 사고 해석

3대 이상의 충돌사고에서는 충돌의 발생순서가 뒤에서부터 앞으로 순차적으로 진행되는 연쇄충돌사고가 가장 흔한 경우이나 그렇지 않은 경우도 있어 문제가 더욱 복잡해진다. 연쇄 충돌에서는 앞에 있는 차량일수록 유효충돌속도와 차량의 손상정도가 작아지게 될 것이다.

1) 1대 주행 (다중충돌-연쇄 충돌)

신호대기 등의 이유로 차량들이 일렬로 정지되어 있는 상황에서 흔하게 발생하는 사고이다. <Figure 5>는 차량 3에 이어 일렬로 정지해 있는 차량 2의 후방을 차량 1이 충돌하는 상황이며, 차량 1이 제동을 시작하는 순간 차량 1과 2 사이의 상대 직선 위치는 x_{R0} 이고, 차량 1의 속도는 v_{10} 이다. 이러한 차량 1과 2의 1차 충돌에 이어 연속적으로 차량 2는 가까운 앞(무시할 수 있는 거리, $x_{R0} \approx 0$)에 정지하고 있는 차량 3의 후방을 충돌하는 다중 충돌이 발생하게 된다. 1차 충돌에서 차량 1의 충돌속도는 식(10)으로 나타내고,

$$v_{R1} = v_1 = \sqrt{v_{10}^2 + 2f_{B1}x_{R0}} \quad (10)$$

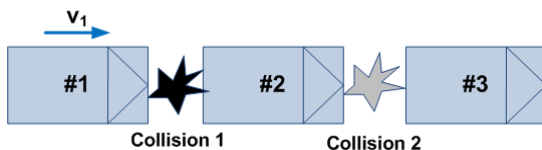
1차 충돌(차량 1과 2 사이의 반발계수 e_1) 후에 두 차량의 ΔV 는 각각 식(11)로 쓸 수 있다.

$$\Delta V_1 = (1+e_1) \frac{m_2}{(m_1+m_2)} v_1 \quad (11a)$$

$$\Delta V_{21} = (1+e_1) \frac{m_1}{(m_1+m_2)} v_1 \quad (11b)$$

따라서, 차량 2의 2차 충돌 속도는 식(12)로 나타나고,

$$v_{R2} = v'_2 = (1+e_1) \frac{m_1}{(m_1+m_2)} v_1 \quad (12)$$



<Figure 5> 3-car chain collision: 1 moving car

2차 충돌후에 차량 2와 차량 3의 ΔV 는 각각 식(13)으로 정리된다.

$$\Delta V_{22} = (1+e_2)(1+e_1) \frac{m_3}{(m_2+m_3)} \frac{m_1}{(m_1+m_2)} v_1 \quad (13a)$$

$$\Delta V_3 = (1+e_2)(1+e_1) \frac{m_2}{(m_2+m_3)} \frac{m_1}{(m_1+m_2)} v_1 \quad (13b)$$

그런데, 차량 2는 두 번의 충돌을 경험하게 됨에 유의하여야 하며 식(11)과 식(13)으로 나타나는 ΔV_{21} 과 ΔV_{22} 를 모두 고려하여야 한다.

이 결과를 확장하여 n 대의 연쇄 충돌 상황을 고려해 $(n-1)$ 대의 일렬로 정지되어 있는 차량을 차량 1이 후방에서 충돌한다고 하면, $(n-1)$ 번의 충돌이 뒤에서 앞으로 순차적으로 발생하게 된다. 차량 k ($k > 1$)는 $(k-1)$ 과 k 번째 충돌을 경험하게 되며 각 충돌에 대한 ΔV 는 식(14)로 정리할 수 있을 것이다.

$$\Delta V_{k1} = \prod_{i=1}^{k-1} (1+e_i) \frac{m_i}{(m_i+m_{i+1})} v_1 \quad (14a)$$

$$\Delta V_{k2} = (1+e_k) \frac{m_{k+1}}{(m_k+m_{k+1})} \Delta V_{k1} \quad (14b)$$

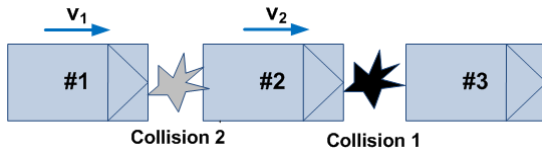
따라서 맨 앞에 있는 차량 n 은 $(n-1)$ 번째 충돌을 경험하며 ΔV 는 식(15)가 된다.

$$\Delta V_{n1} = \prod_{i=1}^{n-1} (1+e_i) \frac{m_i}{(m_i+m_{i+1})} v_1 \quad (15)$$

2) 2대 주행(다중충돌-비연쇄 충돌)

3중 충돌에서 2대가 주행하는 과정에 발생한 사고는 여러 이유로 차량간의 안전거리를 확보하고 있지 못한 경우에 발생하는 다중충돌 사고이다. <Figure 6>에서처럼 대오 주행을 하고 있는 상황에서 차량 3이 급정지를 하게 되면 뒤따르던 차량 2가 차량 3의 후방을 충돌하게 되고 계속해서 차량 1은 차량 2의 후방을 연속적으로 충돌할 수 있게 된다. 전술한 연쇄 충돌과는 충돌 순서가 정반대로 이루어지며 해석 결과도 전혀 다르게 된다.

정지 차량 3을 발견하고 차량 2가 제동을 시작하는 순간 차량 2와 3 사이의 상대 위치는 x_{R1} , 차량 2의 속도는 v_{20} 이다. 차량 2와 차량 3의 1차 충돌에 이어 연속



<Figure 6> 3-car non-chain: 2 moving cars

적으로 차량 1은, 1차 충돌로 속도가 줄게 된 차량 2의 후방을 충돌하는 다중 충돌이 발생하게 된다. 차량 2와 차량 3 사이의 1차 충돌에서 충돌속도는 식(16)으로 나타나고,

$$v_{R1} = v_2 = \sqrt{v_{20}^2 + 2f_{B2}x_{R1}} \quad (16)$$

1차 충돌(차량 2와 차량 3 사이의 반발계수 e_2) 후에 각 차량의 ΔV 는 식(17)로 쓸 수 있다.

$$\Delta V_{12} = (1 + e_2) \frac{m_3}{(m_2 + m_3)} v_2 \quad (17a)$$

$$\Delta V_3 = (1 + e_2) \frac{m_2}{(m_2 + m_3)} v_2 \quad (17b)$$

따라서, 차량 2의 1차 충돌후 속도는 식(18)로 쓸 수 있지만, 차량 2 운전자의 급제동과 더불어 통상 현저히 감소하여 차량 1과의 2차 충돌에서는 전술한 1대 주행 2중 충돌사고로 고려할 수 있다.

$$v'_2 = \frac{m_2 - e_2 m_3}{(m_2 + m_3)} v_2 \quad (18)$$

2차 충돌후 두 차량의 ΔV 를 나타내는 식(4)로부터 알 수 있는 것처럼 차량 2가 경험하는 ΔV 는 연쇄 충돌과는 달리 1차와 2차 충돌에서 거의 동일하게 된다. n 대의 다중 충돌 상황에서도 중간에 있는 차량은 최소 2번의 전후 충돌에서 연쇄 충돌과는 달리 차량 손상 및 승객 부상 등에서 거의 동일한 차량 손상을 경험하는 것이다.

한편, 차량 2가 차량 3과의 충돌을 일단은 회피했다 할지라도 뒤따르던 차량 1로 인해 전술했던 연쇄 충돌이 발생할 수 있게 된다. 이와 같은 n 대의 다중 충돌 상황에서는 차량간의 충돌 순서는 순차적이지 않게 되고 매우 복잡하게 이루어진다. 이러한 경우에는 본 절에서 제시한 해석 결과를 추정된 순서로 각기 적용하여 분석하여야 한다.

IV. 영상기록장치 활용 다중추돌사고해석

영상 사고기록장치를 이용해 사건을 해결할 수 있는 방법은 다양하며 첫 번째로 차선의 길이를 이용하여 속도를 추정하는 방법이 있다. 차선은 도로의 규격으로 길이와 간격이 정해져 있기 때문에 어떤 도로인지를 알게 되면 차선의 길이와 개수 중앙선의 개수를 이용하여 차량의 이동거리를 파악할 수가 있고 영상기록장치 영상을 이용하여 차선을 이동하는 동안의 시간을 파악할 수 있기 때문에 속도를 유추해 볼 수도 있다. 또한 영상기록장치가 장착되어 있는 차량뿐만이 아니라 영상기록장치에 찍힌 차량도 같은 방법으로 알아볼 수가 있기 때문에 사건 해결에 이용이 가능하다. 두 번째로 영상기록장치 영상은 앞 차량의 영상을 담고 있기 때문에 앞 차량의 후미 등을 이용하여 후미 등이 들어오는 지의 여부에 따라 앞 차량의 제동력 사용 유무를 파악하고 완전한 정지상태가 될 때까지의 시간을 파악함으로써 앞 차량의 속도도 파악이 가능하다. 세 번째로 차량 손상부위를 이용하여 브레이크 다이브를 파악할 수 있는 방법도 있는데 전방 영상기록장치 영상은 앞 차량의 후미를 담고 있기 때문에 충돌이 발생하였을 때 영상기록장치를 장착한 차량과 앞 차량의 차량 손상 부위를 파악할 수 있다. 또한 제동력의 유무에 따라 브레이크 다이브가 결정되기 때문에 후미등을 이용하여 앞 차량의 제동력 유무를 파악한다면 쉽게 차량 손상 부위를 파악할 수 있다.

Lin 등(2008)은 충돌사고 재구성 해석에 영상 사고기록장치를 활용한 유사한 연구 결과를 발표하기도 하였으나, 다중 충돌 사고를 다루지는 않았다. 그러나, Fay 등(2002)은 북미지역에서 EDR이라고 불리는 차량용 블랙박스 저장 데이터를 가지고 5중 연쇄추돌사고를 분석한 사례와 활용 방안 등을 제시한 바 있다. 여기서 활용한 정보는 차량 속도, 엔진 RPM, 브레이크 작동여부 등이며 모든 자동차에서 OBD 커넥터 등을 통하여 추출 및 저장이 가능한 아이템들이다.

본 절에서는 상업용 차량을 중심으로 국내 자동차들에 보급이 확산되고 있는 영상 사고기록장치를 활용하고 시뮬레이션 프로그램 등을 보완적으로 활용하여 다중추돌사고를 효과적으로 해석하는 사고 사례 연구 결과를 제시한다. 영상기록장치 동영상들은 블랙박스동호회(2010) 등 인터넷에서 수집되었으며, 본 연구에서 분석한 사례들 중에서 대표적인 두가지를 제시한다.

1. 3중 연쇄추돌사고

사건 영상기록장치를 보게 되면 3차선에서 달리던 오토바이가 A차량의 오른쪽 후미를 충돌하게 되며 A차량이 급정거를 하게 되고, B차량이 A차량의 급정거를 발견한 후 B차량도 급제동을 하여 충돌을 무사히 회피하나 C차량이 속도를 제어하지 못하고 B차량 후미를 추돌하게 되고 B차량은 연쇄적으로 A차량을 추돌하게 되어 사고는 끝나쳐진다. 사고영상은 3중 연쇄추돌사고에 개입되지 않은 외부 차량에 의해 촬영된 것으로 보여진다. 3중 연쇄추돌사고에 개입된 차량들(앞에서부터 A, B, C)의 기본정보가 <Table 1>에 나타난다. <Figure 7>에는 두차례 추돌의 충돌 전과 후의 영상들을 보여주고 있다.

영상장치에 저장된 동영상의 프레임 분석에 따르면, 사고전 차량 C의 평균 주행 속도는 대략 시속 43km 정도였고 정지한 차량 B를 발견하고 후방 8m 지점에서 제동을 시작하여 감속 중 1번째 추돌에서 충돌속도는 시속 30km 내외로 분석되었다. 오토바이 충돌로 정지하고 있던 차량 A와 뒤따르던 급정거 차량 B의 차간거리는 최소 1m 정도로 그리고 2번째 추돌에서 차량 B의 충돌속도는 시속 10km 이내로 구하였다. 동영상 분석을 통한 차량 속도 추정 등의 작업은 최근 교통경찰에서도 수

<Table 1> 3-car chain collision accident: cars

	car A	car B	car C
length	4.56 m	4.55 m	4.80 m
width	1.78 m	1.82 m	1.83 m
weight	1180 kg	1565 kg	1590 kg

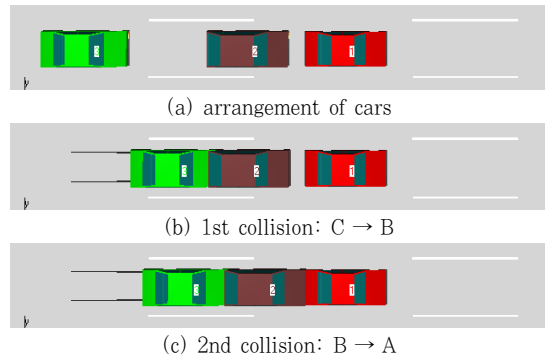


(a) 1st collision: C → B



(b) 2nd collision: B → A

<Figure 7> 3-car chain collision accident video



<Figure 8> 3-car chain collision: simulation

<Table 2> 3-car collision: simulation results

#	car	preimpact (km/h)	postimpact (km/h)	ΔV (km/h)
1	Bullet C	29	13	16
	Target B	0	16	16
2	Bullet B	7	4	3
	Target A	0	4	4

행하고 있다. 영상기록장치에 저장된 동영상 데이터 분석 데이터 등에 근거하여 PC-Crash(Steffan, 2005) 시뮬레이션을 반복적으로 수행하여 영상기록 사고 상황과 적절하게 일치하는 해석 결과를 <Figure 8>과 <Table 2>에 각각 제시하였다. 이는 전형적인 형태의 연쇄 추돌사고로서의 특징들을 잘 보여주고 있다.

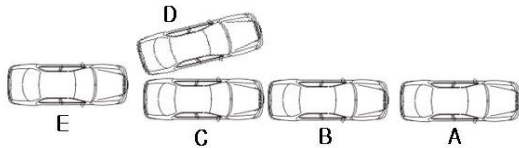
2. 4중 추돌사고

<Table 3>은 국도에서 발생한 4중 추돌 사고에 개입된 차량들에 관한 기본 정보를 보여주고 있다. 차량 A는 급정거 차량으로 추정되며 추돌 사고 원인을 제공하였지만 충돌을 회피하였으므로 제외하였다. <Figure 9>에 제시된 추돌 후 차량 배열을 볼 때 E차량 혹은 C차량으로 인한 다중추돌로 추측이 가능하다. 그런데, <Figure 10>에 보이는 영상기록장치 동영상을 확인하면 A차량이 도로상의 이상 상황을 발견하여 급정거를 하게 되고, 뒤따르던 B차량과 C차량은 연속적으로 무사히 급정거를 하게 되나 브레이크 작동무로 추정되는 D차량이 그대로 C차량의 왼쪽 후미를 추돌(1차 추돌)하게 된다. 그로 인해 C차량이 앞으로 밀리며 B차량의 후미를 추돌(2차 추돌)하게 되고 뒤늦게 E차량이 D차량의 후미를 추돌(3차 추돌)하며 D차량은 왼쪽 차선을 벗어난 것으로 추정된다.

영상기록장치의 영상 분석에 근거한 PC-Crash 시뮬레이션 해석 결과를 (Figure 11)과 (Table 4)에 제시하였다. 동영상의 프레임별 분석을 가지고 차량들의 대략적인 속도 등을 추정하고 반복 시뮬레이션을 통하여 실제 상황에 근접하는 결과를 얻을 수 있다. 영상기록장치를 활용한 시뮬레이션 해석 결과는 복잡한 형태의 다중 추돌사고에 대해서도 사고의 책임 소재와 원인 등을 규명하기 위해 필요한 다양한 정보의 획득을 가능하게 한다.

<Table 3> 4-car collision accident: cars

	car B	car C	car D	car E
length	4.81m	4.91m	4.55m	4.56m
width	1.82m	1.79m	1.82m	1.78m
weight	1400kg	1470kg	1565kg	1180kg



<Figure 9> 4-car: arrangement after accident



(a) 1st collision: D → C

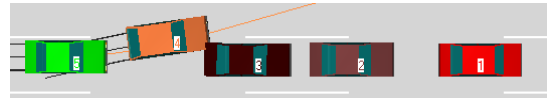


(b) 2nd collision: C → B

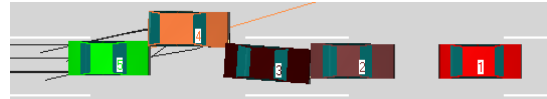


(c) 3rd collision: E → D

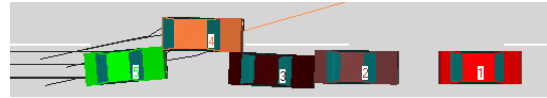
<Figure 10> 4-car collision accident video



(a) 1st collision: D → C



(b) 2nd collision: C → B



(c) 3rd collision: E → D

<Figure 11> 4-car collision accident : simulation

<Table 4> 4-car collision: simulation results

#	car	preimpact (km/h)	postimpact (km/h)	ΔV (km/h)
1	Bullet D	35	19	16
	Target C	0	18	18
2	Bullet C	12	6	6
	Target B	0	6	6
3	Bullet E	25	17	8
	Target D	9	15	6

V. 결론

본 연구에서는 충돌 구성이 복잡하고 원인 규명이 애매한 다중추돌사고 재구성 해석에 대하여 브레이크 다이브 등으로 인한 차량 파손과 승객 부상을 활용하는 전통적인 경험적 수법과 강체역학 범주내에서의 이론적인 해석 결과를 구하여 당장예의 실용적인 적용이 가능하도록 하였다. 다중 추돌사고를 구성하는 기본 단위로서 2중 추돌사고와 다중 추돌의 전형이라고 할 수 있는 3중 추돌 사고에 대한 해석 결과들을 제시하였다. 제시한 해석 결과는 영상 기록 등이 없을 때나 경험적 방법의 한계를 보완하기 위해 필요할 것이다.

국내에 보급이 확산되고 있는 영상 사고기록장치를 활용하고 시뮬레이션 프로그램 등을 보완적으로 활용하여 다중추돌사고를 효과적으로 해석하는 두가지 사례 연구 결과를 제시하였다. 영상기록장치 저장 동영상에 대한 단순 직관적인 조사를 넘어설 수 있도록, 동영상 분석에 근거한 시뮬레이션 해석 결과는 복잡한 형태의 다중 추돌사고에 대해서도 사고의 책임 소재와 원인 등을 규명하기 위해 필요한 한층 정확하고 다양한 정보의 획득을 가능하게 한다. 즉, 저장 동영상의 프레임별 분석

을 가지고 차량들의 대략적인 속도 및 거리 등을 추정하고 반복 시뮬레이션을 통하여 실제 사고 상황에 근접하는 결과를 얻을 수 있다. EDR과 같은 차량용 사고기록 장치가 장착되어 각종 속도 및 가속도 그리고 제동 여부 등의 추가적인 정보의 확보가 이루어진다면, 반복 시뮬레이션의 횟수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 사고 조사의 목적을 뛰어 넘는 훨씬 정교한 재현이 가능할 수 있다.

감사의 글

본 연구에는 (주)피엔에스티의 박승범소장 그리고 홍익대학교 김제용 학생이 자료 수집과 분석 작업 등에 조언과 도움을 주었으며 이에 감사를 표합니다. 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(No. 2009-0073331)

REFERENCES

1. Nystrom, G. A.(2010), Analysis of Multi-Vehicle Rear-End Accidents, SAE Paper 2010-01-0055.
2. Han, I.(2007), Nonlinear Continuous Contact Force Model for Low-Speed Front-to-Rear Vehicle Impact, Journal of Automobile Engineering (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D), Vol.221, No.10, pp.1197~1208.
3. Han, I.(2007), Patent Analysis and Standardization Methods of Automobile Black Box Technology, Journal of Korean Society of Transportation, Vol.25, No.3, Korean Society of Transportation, pp.29~43.
4. Korean Agency for Technology and Standards (2007), System for Accident Data Recording (KS R 5076), Ministry of Knowledge Economy.
5. Korean Agency for Technology and Standards (2011), Video Data Recording Systems for Road Vehicle Accidents(KS R 5078), Ministry of Knowledge Economy.

6. Park, S.(2010), Private Communication (2010.07~09).
7. Ray, S. P., Newbery, T. M. and Koziol, J. A.(2006), Quantifying the Change in Ride Height Due to Braking: Brake Dive Test Data, SAE Paper 2006-01-1563.
8. Jewkes, D. B.(2001), Reconstruction of Accident Severity in a Multiple Vehicle Collision, SAE Paper 2001-01-1283.
9. Han, I.(1998), Impact Analysis for Vehicle Accident Reconstruction, Trans. of Korea Society of Automotive Engineers, Vol.6, No.2, pp.178~190.
10. Lin, Q., Feng, R., Cheng, B., Lai, J., Zhang, H. and Mei, B.(2008), Analysis of Causes of Rear-end Conflicts Using Naturalistic Driving Data Collected by Video Drive Recorders, SAE Paper 2008-01-0522.
11. Fay, R., Robinette, R., Deering, D. and Scott, J.(2002), Using Event Data Recorders in Collision Reconstruction, SAE Paper 2002-01-0535.
12. Black Box Club(2010), Black Box Club (<http://cafe.naver.com/blackboxclub>).
13. Steffan, D.(2005), PC-Crash Operating Manual, Macinnis Engineering Associates.

- ✉ 주 작성자 : 한인환
- ✉ 교신저자 : 한인환
- ✉ 논문투고일 : 2012. 1. 25
- ✉ 논문심사일 : 2012. 2. 28 (1차)
2012. 3. 12 (2차)
2012. 3. 19 (3차)
- ✉ 심사판정일 : 2012. 3. 19
- ✉ 반론접수기한 : 2012. 8. 31
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필