

사업용 버스 차량 충돌사고 해석

한인환*

홍익대학교 기계정보공학과

Analysis of Commercial Bus Vehicle Collision Accidents

HAN, Inhwan*

Department of Mechanical and Design Engineering, Hongik University, Sejong 339-701, Korea

Abstract

In this paper, characteristics and types of vehicle accidents involving buses that differ from common passenger cars are analyzed. When heavy vehicles are involved in collision accidents, the external impulse conveyed through bus tire from road surface cannot be ignored, so the conventional rigid-body impact model cannot be applied. As a solution, an analysis model which directly considers the tire impulse or considers the bus as moving barrier has been proposed. Also, as there are many instances in which the location of contact point or coefficients related to rotational motion cannot be estimated, utilization of point-mass collision model has been sought. By applying the proposed analysis model to an actual accident case and comparing with the result of the conventional analysis which does not consider the tire impulse, it is shown that the velocity of bus and other values close to the actual amount can be obtained.

본 논문에서는 승용차와는 다른 버스 차량의 사고 관련 특징 및 버스가 개입된 교통사고의 특성과 유형들을 조사 분석하였다. 그런데, 충돌사고에 버스와 같은 대형 차량이 포함되어 있을 때에는 노면으로부터 버스 타이어를 통해 전달되는 외부 충격량을 무시할 수 없으므로 기존의 강체 충돌 모델을 그대로 적용할 수가 없게 된다. 따라서, 이에 대한 해결 방안으로서 타이어 충격량을 직접 고려하거나 혹은 버스 차량을 마치 이동 장벽처럼 고려하는 해석 모델을 작성하였다. 또한, 실제 사고에서 차량의 충돌 접촉점의 위치나 회전 운동과 관련한 계수들을 추정할 수 없는 경우가 많으므로 질점 충돌모델의 활용방안도 함께 모색하였다. 본 논문에서 제시하는 해석 모델을 실제 사고사례에 적용하여 기존의 타이어의 충격량을 고려하지 않는 해석 결과와 비교하여 버스 차량의 속도 등을 실제와 유사하게 구할 수 있음을 보여주었다.

Keywords

bus, commercial vehicle, collision accident, rigid-body impact, tire impulse
버스, 상용차량, 충돌사고, 강체충돌, 타이어 충격량

* : Corresponding Author
ihhan@hongik.ac.kr, Phone: +82-44-860-2581, Fax: +82-44-862-2664

Received 17 September 2013, Accepted 26 December 2013

© Korean Society of Transportation
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

사업용 차량은 사업에 사용되는 자동차를 뜻하며 물건 수송에 사용되는 트럭이나 사람을 수송하는 버스 등을 말한다. 2012년 기준으로 국내 사업용 차량 교통사고 발생현황은 전체 50,617건 중 버스가 8,582건, 화물수송차량이 6,511건으로 승용차 관련 사고가 80%에 이르는 비사업용과는 달리 버스와 화물수송차량이 구성비를 높게 차지하고 있다. 또한 차종별 대형교통사고 발생건수 추세를 살펴보면 승합차가 전체의 56%에 이르는 등 화물차량을 포함하는 사고가 68%나 차지하고 있어 인명피해의 심각한 상황을 보여준다. 사업용 버스는 시내, 시외, 고속, 노선버스가 포함되며 화물수송은 토사운송차량, 위험물운송차량, 청소차, 콘크리트믹서, 냉동차, 컨테이너, 노선 및 구역화물차량을 포함하고 있다(Korean National Police Agency, 2013).

버스를 비롯한 화물차 등 대형 사업용 차량의 경우에는 완성차 회사나 관련 기관에서 충돌 시험을 수행하지 않을 뿐만 아니라, 충돌 사고 해석 등에 관한 연구까지도 승용차에 비하면 대단히 희소한 상황이다. 탑승객 무게를 제외하더라도 통상 승용차보다 10배에 이르는 큰 무게를 가지는 버스 차량이 승용차와 충돌할 때 버스의 경우에는 속도 변화(ΔV)가 작게 되어 상대적으로 승객 부상이나 차량 손상도 작을 수 있다. 그러나, 고속으로 주행하거나 선회를 하는 버스의 경우에는 무게중심이 높은 관계로 충돌은 대개 전복 사고로 이어지면서 많은 인명 피해를 가져오는 대형사고가 된다. 그런데, 기존 버스 사고 해석에 관한 연구는 대개 운전자의 위험운전 행태(Oh, 2012)나 혹은, 교통안전에 관한 내용들(Korea Research Institute of Transportation Industries, 2013)이 주를 이루고 있으며, 충돌사고 분석에서도 승용차의 충돌 해석 결과(Han, 1998)를 그대로 적용하거나 혹은 승객부상 해석(Mayrhofer et al., 2005)에 집중되어 있다.

본 논문에서는 우선 승용차와는 상이한 버스 차량의 교통사고 관련 특징을 조사하고, 버스가 개입된 충돌사고의 유형과 특성을 사례와 함께 분석한다. 그런데, 버스와 같은 대형 차량이 개입한 충돌 사고의 경우에는 승용차 간의 충돌사고와는 달리 운동량 보존 법칙을 적용하기가 어려운 것으로 알려져 있다(Hickman and Hill, 2000). 따라서 기존 승용차 기반의 충돌사고 해석 결과를 확장하여 실무적인 적용이 가능한 버스 차량

의 충돌사고 해석 방안을 구한다. 본 연구에서 제시하는 버스 차량 충돌사고에 대한 강제 충돌해석은 충격량-운동량 이론을 활용한 기존의 승용차 간 충돌 사고 해석 모델(Han, 1998; Han, 2013)에 근거한다. 그런데, 버스와 같은 대형 차량의 충돌 해석에서는 충돌 과정 동안 차량 타이어나 노면 사이의 외부 충격량의 효과를 고려하여야 한다. 즉, 버스나 트럭과 같은 대형 차량이 개입된 충돌 현상에서는 노면에서 타이어를 통해 전달되는 마찰 충격량의 값이 차량간의 충돌 접촉에서 발생하는 충격량과 비교할 때 무시할 만하지 않다(Brach and Brach, 2011). 또한, 버스와 승용차와의 충돌 사고에서는 버스 차량은 이동 장벽과 같은 역할을 하는 것으로 고려하여 해석할 수도 있다. 그리고, 버스와 같은 대형 차량이 개입된 충돌 사고의 재구성 해석 목적이나 상황에 따라서는 이동 장벽과 충돌하는 질점 모델로 고려할 수도 있다.

본 논문에서 제시하는 해석 모델을 실제 사고 사례에 적용하여 기존의 타이어의 충격량을 고려하지 않는 해석 결과 등과 비교 분석한다. 승용차와는 달리 대형 버스와 같은 사업용 차량에 대해서는 충돌 실험과 관련한 데이터가 대단히 희소하므로, 실제 승용차 충돌 실험 데이터에 근거하여 충돌 차량을 버스로 대체하고 상용 사고해석 프로그램을 통한 시뮬레이션 해석 결과도 부가적으로 활용하였다.

버스 차량 특징 및 사고 특성

버스는 통상 시내버스, 저상버스 그리고 고속버스로 구분할 수 있다. 이러한 버스 차량의 제원(Hyundai Motor Company, 2013)을 살펴보면 전장이 일반 승용차량의 2배 이상인 9m에서 길게는 12m에 달하며, 축거는 고속버스의 경우에는 6.1m 정도이고 다른 버스는 5.4m 내외가 된다. 전폭은 2.5m 내외로 대개 큰 차이가 없으나, 전고는 연료통의 위치 때문에 차종별로 많게는 50cm 적게는 10cm가량 차이가 나는데, 대개 3-3.5m로 승용차의 2배에 이른다. 본 논문에서는 승용차와 비교하여, 교통사고와 관련한 버스 차량의 주요한 특징 및 사고 특성을 제시한다.

1. 질량

우선, 충돌사고 해석에서 버스의 가장 주요한 특징은

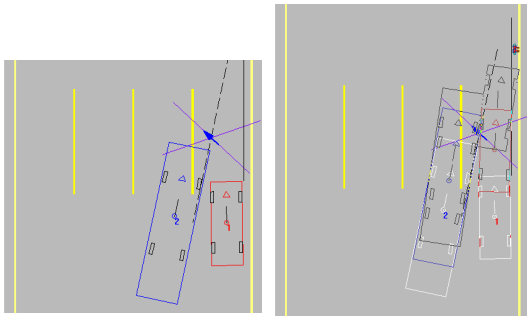


Figure 1. Bus collision: mass characteristics

질량의 크기와 그 변동성이다. 버스는 승용차의 10배에 이르는 질량을 가질 뿐만 아니라, 시내버스의 경우에는 승합 인원 및 위치 변동이 심하므로 질량 특성에 수시로 많은 변화가 따르게 된다. 이는 운전자의 입장에서는 제동을 비롯한 차량의 동적 특성이 매순간 변하게 되어 주행 중 위험성이 가중될 수 있을 뿐만 아니라 사고의 재구성 해석을 어렵게 하는 요인이다.

또한, 버스와 같은 대형 차량이 개입되어 질량 차이가 매우 커다란 차량간의 충돌 현상에서는 노면에서 버스 타이어를 통해 전달되는 충격량의 값이 차량간의 충돌 접촉에서 발생하는 충격량과 비교할 때 무시할 만하지 않으며, 버스는 충돌한 승용차량에 대하여 이동 장벽과 같은 역할을 하게 된다. 따라서, 버스 충돌 사고에서는 승용차 간의 충돌과는 달리 운동량 보존 법칙을 적용하기 어려우며, 버스의 경우 손실되는 에너지의 양은 대개 무시할 만하다.

Figure 1에 보여지는 상황은 시내 버스(시속 40km)가 카니발 승합차(시속 70km)를 측면 충돌하여 진로가 변경된 승합차가 앞 범퍼가 아닌 우측 펜더로 보행자를 충격한 것으로 추정되는 사고이다. 승합차를 충격한 차량이 버스가 아닌 동등한 질량을 가진 승용차인 경우에는 피충돌 승합차의 진로가 거의 바뀌지 않는 것과는 상이한 결과를 이론적 추론이나 상용 프로그램을 통한 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

2. 높이

버스는 높이 즉 무게중심이 승용차에 비하여 높으며, 전후면부가 박스형으로 훨씬 넓다. 최근 시내 주행을 많이 하는 저상 CNG 버스의 경우 연료통을 기존 버스와는 달리 천장에 둔다. 따라서, 저상버스에서는 승합

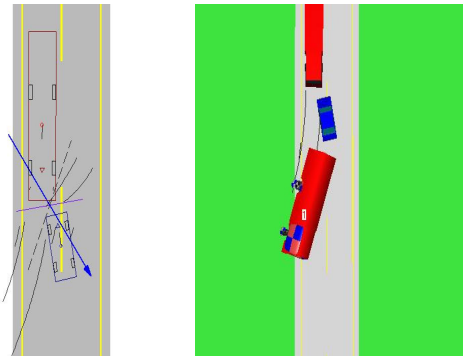


Figure 2. Bus collision: height characteristics

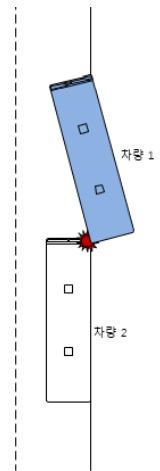


Figure 3. Bus collision: length characteristics

인원이 많을수록 무게중심이 아래로 이동하는 반면, 고속버스의 경우는 화물칸 등이 있기 때문에 승객이 많으면 오히려 무게중심이 높아진다. 무게 중심이 높게 되면 급선회나 충돌 사고 등에서 전복으로 이어질 가능성이 매우 크게 된다. 일반 시내버스와 마을버스 승객들은 안전벨트를 하지 않으며, 고속버스라 하더라도 안전벨트 착용률이 승용차에 비하여 저조하므로 전복 등의 경우에는 대형 인명피해 등을 가져오게 된다.

Figure 2에는 카니발 승합차량이 시속 80km의 속도로 주행하다가 중앙선을 침범하여 마주오던 고속버스 좌측 앞부분을 충돌하여 버스를 전도케 하는 사고 상황을 시뮬레이션 해석한 결과가 보여진다. 이런 사고에서는 통상 버스 승객인원 중 다수의 중상이 발생하며, 이는 대개 충격으로 인한 버스의 전복에 기인한다. 동일한 상황에서 버스가 아닌 승용차는 전복 사고가 발생하지 않을 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있다.

3. 길이

승용차에 비해 3배에 달하는 긴 축거를 가지는 버스 차량의 경우, 회전반경이 크게 되고 내륜차가 크므로 조향 등에서 승용차와 매우 상이한 운전 환경을 가지게 된다. 또한, 대부분의 승용차량이 전륜 구동방식을 가지는 데 반하여 버스는 후륜구동방식을 택하고 있을 뿐만 아니라 엔진도 뒤에 있고 좌석도 후미에 집중되어 있는 질량 분포도 조향의 어려움을 더하고 있다. 더욱이, 버스 운전자는 승용차 운전자에 비하여 주행 중 보다 많은 장비와 장치를 다루어야 하는 경우가 흔하다.

Figure 3에는 버스의 긴 길이 때문에 흔히 발생하는 대표적인 사고 사례를 보여주고 있다. 옆 차로에서 주행 중인 버스 차량 1의 차로 변경으로 발생하는 충돌사고를 보여주는 데, 버스 중앙차로제 실시 등으로 인하여 정류장 부근이나 혹은 많은 버스가 운집하여 있는 터미널 등에서 흔히 발생한다. 또한, 축거가 긴 버스 차량의 경우 교차로에서 회전을 할 때 내륜차로 인하여 안쪽 뒷바퀴의 회전 반경이 짧게 되어 승용차 혹은 보행자 및 이륜차를 충격하는 사고가 많이 발생하게 된다.

4. 제동장치

버스 차량은 대형 트럭과 마찬가지로 제동장치는 대개 공기압 구동의 드럼 브레이크가 장착된다(Varner and Sutphen, 2011). 그런데 이런 공기압 브레이크는 비교적 큰 제동력을 발휘할 수 있는 반면에, 시간 지연이 거의 없는 유압식 브레이크와는 달리 통상 0.5-1.5초의 시간 지연이 발생한다. 이는 부분적으로는 공기의 압축성과 밸브 및 관로에서의 공기압 강하에 기인한다. 또한, 공기압 브레이크는 구조상 많은 부수적인 장치를 필요로 한다(Hickman and Hill, 2000). 이는 버스 차량의 제동 상황에서 승용차와는 달리 시간 지연과 함께 급제동이 이어지며, 주 제동 시스템에 이상이 발생할 가능성이 상대적으로 높음을 의미한다. 따라서, 트럭과 마찬가지로 버스와 같은 대형 차량은 이외에도 드럼 브레이크의 페이드 현상 등을 대비하여 배기브레이크와 리타더(retarders)와 같은 보조제동장치가 장착된다. 한편, 버스 차량의 타이어는 승용차에 비하여 낮은 구름저항계수와 마찰계수를 보여주며(Wong, 2008; Poirette et al.,

2013), 대개 제동력의 배분이 덜 이상적이 되므로 비상 상황에서 바퀴 잠김이 더 잘 발생하게 된다. 이는 승용차와 비교하여 버스 운행에서 사고 위험성을 가중하는 중요한 요인으로 작용하기도 한다.

버스 차량 충돌 해석

버스 차량 충돌사고에 대한 강제 충돌해석은 충격량-운동량 이론을 활용한 본 저자의 충돌사고 해석 모델(Han, 1998; Han, 2013)을 기본적으로 활용한다.

차량 간의 충돌 사고에서 차량의 크기와 회전 운동을 고려하는 강제 모델은, 충돌 중심 즉, 차량의 충돌면에서 충격량이 집중되어진 한 점으로 고려할 수 있는 상당충돌접촉점에서의 구속 조건으로 법선 방향은 반발계수, 접선 방향은 충격량비를 설정한다. 그런데, 버스와 같은 대형 차량이 충돌사고에 포함되어 있을 때에는 이러한 강제 충돌 모델을 그대로 사용하는 데 어려움이 따른다. 버스에 비하여 훨씬 작은 무게를 가진 승용차와의 충돌사고에서 버스의 속도 방향은 충돌 전후에 변화하지 않으며 마치 이동 장벽과 같은 역할을 한다. 즉, 승용차와의 충돌로 인한 버스 타이어의 횡방향 힘이 노면 마찰력보다 작게 되어 버스 차량의 횡방향 운동이 구속되는 것이다.

충돌동안 차량간 충격량과 타이어 충격량의 크기를 비교하기 위하여 Brach et al.(2011)이 제시한 것과 유사한 예가 Figure 4에 보여진다. 충돌접촉점에서 차량간에 주고 받는 충격량을 P , 노면으로부터 타이어를 통해 차량에 전달되는 외부 마찰 충격량을 각각 Q_1 , Q_2 로 한다. 승용차에 해당하는 차량 2의 질량을

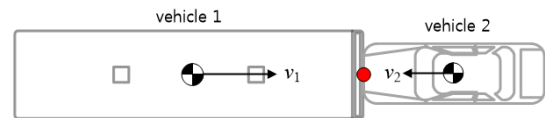


Figure 4. Inline head-on vehicle collision

Table 1. Impulses in inline collision events

| n | P | Q ₁ | Q ₁ /P | %Q ₁ /P (T = 0.2 sec, f = 0.6) | |
|----|---------------------|----------------|--------------------------------|---|-------------------------|
| | | | | v ₀ = 60km/h | v ₀ = 30km/h |
| 10 | $\frac{20}{11}mv_0$ | $10fmgT$ | $\frac{11}{2} \frac{fgT}{v_0}$ | 39 | 78 |
| 1 | mv_0 | $fmgT$ | $\frac{fgT}{v_0}$ | 7 | 14 |

m 으로 하고, 버스에 해당하는 차량 1은 차량 2의 n 배 질량을 가지는 것으로 한다. 차량간의 충돌에서 반발계수의 값을 0으로 하는 공통속도조건(common velocity condition)을 가정하게 되면 충돌 후 두 차량의 속도는 모두 v 가 된다. 한편, 충돌지속시간은 T (대략 200ms) 그리고 양 차량의 충돌 속도는 v_0 로 동일한 크기이고 방향은 정반대로 고려하였다. 이 경우에 두 차량의 충돌후 속도와 차량간 충격량을 구하면 식(1)로 나타난다.

$$v = \frac{(n-1)}{(n+1)}v_0, \quad P = \frac{2n}{(n+1)}mv_0 \quad (1)$$

타이어와 노면 사이의 마찰 견인계수(frictional drag coefficient)는 f (대략 0.6)로 하고, 차량 1에 작용하는 타이어 충격량과 차량간 충격량에 대한 비율을 나타내면 식(2)가 된다.

$$Q_1 = nfm_gT, \quad Q_1/P = \frac{(n+1)}{2} \frac{fgT}{v_0} \quad (2)$$

식(2)에서 볼 수 있는 것처럼, 차량 1을 대형 버스 그리고 차량 2를 승용차로 가정하여 $n=10$ 으로 하면 승용차간 충돌($n=1$)에 비하여 타이어 충격량의 값은 5.5배 증가하게 된다. 이와 같이 Table 1에 정리한 것을 보면, 승용차간 충돌의 경우 10% 내외에 머물던 타이어 충격량의 비율이 버스가 개입되면 39%에서 충돌 속도가 시속 30km로 되면 78%에 이르는 것을 볼 수 있다.

저속 충돌이 아닌 통상 시속 30km 이상의 충돌 사고에서는 짧은 충돌 시간동안 차량간의 충돌접촉점에서

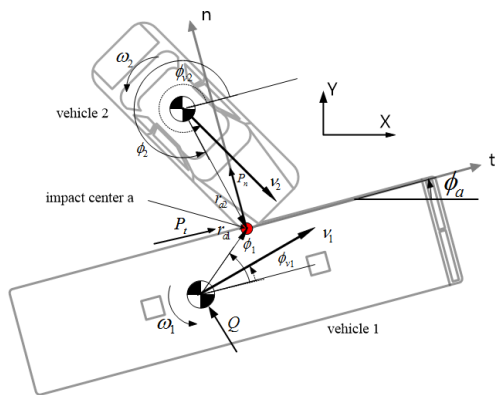


Figure 5. Rigid-body impact model with tire impulse

의 충격량만을 고려하며, 외부 충격량인 타이어 충격량은 비교적 작은 값으로 고려하여 무시할 수도 있다 (Han, 2007). 그런데, 충돌사고에 버스와 같은 대형 차량이 포함되어 있을 때에는 저속뿐만 아니라 비교적 고속인 상황에서도 노면으로부터 버스 타이어를 통해 전달되는 외부 충격량을 무시할 수 없으므로 기존의 강제 충돌 모델을 그대로 적용할 수가 없게 된다. 따라서, 이에 대한 해결 방안은 타이어 충격량을 직접 고려하는 해석 모델을 작성하는 것이다.

Figure 5에서 P_n 과 P_t 는 각각 차량 1로부터 차량 2에 작용하는 법선 및 접선 충격량이다. 동일한 크기/반대 방향의 충격량들이 차량 2로부터 차량 1에 작용하게 된다. 대형 버스에 해당하는 차량 1의 무게중심에 적용되는 외부 충격량 Q 는 노면으로부터의 타이어 충격량을 나타내며, 충돌 동안 그 방향이 변화하지 않는다고 가정하는 차량 1의 속도 v_1 에 수직으로 작용한다고 고려한다.

충격량-운동량 이론을 적용하면, 충돌 직후 두 차량의 무게중심 속도와 회전속도를 식(3)으로 나타낼 수 있다. 아래 첨자 0는 충돌 직전 상황, 그리고 t 와 n 은 각각 접선 및 법선 방향 성분을 의미한다.

$$v_{1t} = v_{10t} - \frac{1}{m_1}(P_t + Q\sin\phi_{v1}), \quad (3a)$$

$$v_{1n} = v_{10n} - \frac{1}{m_1}(P_n - Q\cos\phi_{v1}),$$

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

$$v_{2t} = v_{20t} + \frac{1}{m_2}P_t, \quad (3b)$$

$$v_{2n} = v_{20n} + \frac{1}{m_2}P_n,$$

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

충돌후 충돌중심 a 에서의 접선 및 법선 방향 상대속도 s (상대 미끄럼속도)와 c (상대 접근속도)를 각각 구하면 식(4)로 나타낼 수가 있으며, 식(5)에는 차량의 질량관성 및 충돌접촉점의 위치와 관련된 상수(Han, 1998) A, A', B 를 보여주고 있다.

$$s = v_{a1t} - v_{a2t} = s_0 - AP_t + BP_n \quad (4)$$

$$c = v_{a1n} - v_{a2n} = c_0 + BP_t - A'P_n$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{r_{a1n}^2}{I_1} + \frac{r_{a2n}^2}{I_2} \\
 A' &= \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{r_{a1t}^2}{I_1} + \frac{r_{a2t}^2}{I_2} \\
 B &= \frac{r_{a1t} r_{a1n}}{I_1} + \frac{r_{a2t} r_{a2n}}{I_2} \\
 s_0 &= v_{a10t} - v_{a20t} = (v_{10t} - r_{a1n}\omega_{10}) - (v_{20t} - r_{a2n}\omega_{20}) \\
 c_0 &= v_{a10n} - v_{a20n} = (v_{10n} + r_{a1t}\omega_{10}) - (v_{20n} + r_{a2t}\omega_{20})
 \end{aligned} \tag{5}$$

식(3)에 보여지는 6개의 식으로부터, 6개의 충돌후 속도 성분과 3개의 충격량을 포함하는 도합 9개의 변수가 결정되어야 하므로 3개의 구속조건이 더 필요하게 된다. 두개의 구속조건은 충돌계수로부터 나오게 되는데, 반발계수 e 와 법선 충격량에 대한 접선 충격량의 비로 정의되는 충격량비 μ_r 로 식(6)에 보여진다.

$$c = -e c_0, \quad P_t = \mu_r P_n \tag{6}$$

식(6)에서 반발계수 $e=0$ 인 경우는 법선방향 공통 속도 조건을 정의하며, 반발계수가 물리적으로 가질 수 있는 하한치 값이 된다.

한편, 충돌 동안 그 방향이 일정한 v_1 에 수직으로 작용하는 타이어 충격량 Q 을 고려하면, Q 는 v_1 에 수직인 차량간 충격량 값을 상쇄시켜야 하므로 식(7)에 보여지는 조건을 만족시켜야 한다.

$$Q = -P_t \sin\phi_{v1} + P_n \cos\phi_{v1} \leq f m_1 g T \tag{7}$$

나머지 한 개의 구속조건의 역할을 하는 식(7)의 타이어 충격량 Q 는 전술한 것처럼, $f m_1 g T$ 의 상한치를 가지게 된다. 이는 실질적으로는 충돌 과정동안 차량의 속도 구속조건이 되며 식(8)로도 표현할 수 있게 된다.

$$\frac{v_{10n}}{v_{10t}} = \frac{v_{1n}}{v_{1t}} \tag{8}$$

충돌중심에서의 상대속도에 대한 표현식(4)와 구속조건 식(6)을 가지고, 충돌 전 조건으로부터 충격량에 대한 해석적인 표현을 구하면 식(9)로 나타난다. 식(9)에 보여지는 차량간 충격량의 값을 충격량-운동량 식(3)에 적용하면 두 차량의 충돌후 속도를 구할 수 있게 된다.

$$P_n = \frac{(1+e) c_0}{A' - \mu_r B}, \quad P_t = \frac{\mu_r (1+e) c_0}{A' - \mu_r B} \tag{9}$$

강제 충돌의 경우 충격량비는 간혹 충돌 중심에서의 마찰 계수로 고려하기도 하는 데, 본 연구에서 충격량비는 마찰계수를 의미하는 것은 아니며 양과 음의 값을 모두 가질 수 있다. $s=0$ 일 경우 즉, 충돌하는 두 차량의 충돌 중심에서의 분리이전에 상대 미끄럼이 정지된다면 반발계수에 대한 정의와 식(4)로부터 충격량비 μ_r 가 식(10)과 같이 임계충격량비 μ_{rc} 로 결정되며 이는 접선방향 공통속도조건이 된다.

$$\mu_{rc} = \frac{A' s_0 + (1+e) B c_0}{B s_0 + (1+e) A c_0} \tag{10}$$

따라서, μ_{rc} 는 충격량비가 가질 수 있는 상한치 값 ($|\mu_r| \leq |\mu_{rc}|$)이 되며 대개 충돌 경우마다 상이한 값으로 구해진다. 식(10)에서 볼 수 있는 것처럼, 임계충격량비는 차량 질량특성, 충돌 자세 및 반발계수 값들에 의해 결정된다.

충돌사고 해석 예제

충돌사고에 버스와 같은 대형 차량이 포함되어 있는 충돌 사고 해석을 위해 작성한 타이어 충격량을 직접 고려하는 해석 모델을 활용한 사례 연구를 수행하였다. 그런데, 버스와 승용차와의 충돌 사고에서는 승용차 무게의 10배 가까이에 이르는 버스는 이동 장벽과 같은 역할을 하는 것으로 고려하여 해석할 수도 있다. 또한, 실제 사고에서 차량의 충돌 접촉점의 위치나 회전 운동과 관련한 계수들을 추정할 수 없는 경우에는 질점 충돌모델을 활용하는 것이 효과적일 수 있다.

1. 충돌사고 이동장벽 모델

승용차와 충돌하는 버스 차량을 마치 이동 장벽처럼 단순 고려하는 해석 모델에서, 무한대의 질량을 가진다고 고려하는 버스 즉 차량 1은 식(11a)에서처럼 충돌후 속도 방향뿐만 아니라 크기도 불변이며, 승용차에 해당하는 차량 2의 충돌 직후 차량의 속도는 식(11b)로 나타낼 수 있다.

$$v_{1t} = v_{10t}, v_{1n} = v_{10n}, \omega_1 = \omega_{10} \quad (11a)$$

$$v_{2t} = v_{20t} + \frac{1}{m_2} P_t, v_{2n} = v_{20n} + \frac{1}{m_2} P_n, \quad (11b)$$

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

이동장벽 충돌에서, 차량의 질량 관성 및 충돌접촉점의 위치와 관련된 3개의 상수 A, A', B 는 식(12)에 나타내었다.

$$A = \frac{1}{m_2} + \frac{r_{a2n}^2}{I_2}, A' = \frac{1}{m_2} + \frac{r_{a2t}^2}{I_2} \quad (12)$$

$$B = \frac{r_{a2t} r_{a2n}}{I_2}$$

3개의 상수 값을 식(9)에 적용하여 차량간 충격량 값을 계산하고 그 결과를 식(11b)에 적용하면, 승용차(차량 2)의 충돌후 속도를 식(13)으로 구할 수 있게 된다.

$$v_{2t} = v_{20t} + \frac{\mu_r (1+e) c_0 I_2}{I_2 + m_2 r_{a2t} (r_{a2t} - \mu_r r_{a2n})} \quad (13)$$

$$v_{2n} = v_{20n} + \frac{(1+e) c_0 I_2}{I_2 + m_2 r_{a2t} (r_{a2t} - \mu_r r_{a2n})}$$

$$\omega_2 = \omega_{20} + \frac{(1+e) c_0 m_2 (r_{a2t} - \mu_r r_{a2n})}{I_2 + m_2 r_{a2t} (r_{a2t} - \mu_r r_{a2n})}$$

한편, 버스와 같은 대형 차량이 개입된 승용차 충돌 사고의 재구성 해석 목적이나 상황에 따라서는 이동 장벽과 충돌하는 질점 모델로 고려할 수도 있게 된다. 실제 자동차 충돌 사고해석에서는 여러 가지 이유로 충돌하는 차량 충돌 접촉점의 위치를 특정하기 힘들거나 질량관성 모멘트 등 회전 운동과 관련한 계수들을 추정할 수 없는 경우가 많다. 이러한 경우에는 질점 충돌모델을 활용하여야 한다. 또는, 추돌이나 정면충돌 사고와 같이 충돌에서 차량의 회전 운동을 고려하지 않아도 될 상황이나 강체충돌 해석에 앞선 예비 해석 등에서도 활용하게 된다. 앞서 제시한 강체충돌 모델 관계식들로부터 식(14)에 보여지는 질점 조건들을 활용하여 질점충돌 모델에 관한 식들을 구성하면 승용차(차량 2)의 충돌후 속도를 식(15)로 구할 수 있다.

$$r_{a1t} = r_{a1n} = r_{a2t} = r_{a2n} = 0, \omega_{10} = \omega_{20} = 0 \quad (14)$$

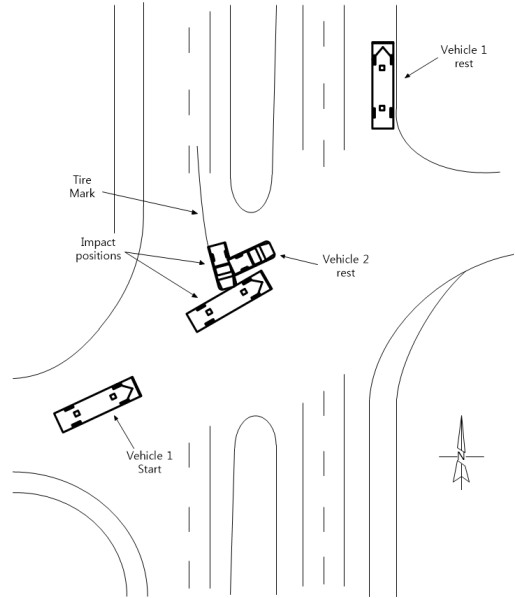


Figure 6. Scene of a bus collision accident

$$v_{2t} = v_{20t} + \mu_r (1+e) c_0 \quad (15)$$

$$v_{2n} = v_{20n} + (1+e) c_0$$

여기서,

$$c_0 = v_{10n} - v_{20n}$$

그런데, 질점 충돌모델에서 사용하는 충돌계수 특히 반발계수의 값은 강체 충돌 모델에서와 별도로 상이하게 추정되어야 한다는 사실에 유의하여야 한다(Han, 2013).

2. 버스 충돌사고 사례 연구

충돌사고에서 노면으로부터의 타이어 충격량을 고려하는 해석 모델을 실제 문제에 적용하기 위하여 Brach et al.(2011)이 제시한 사례에서 대형 트럭을 버스(vehicle 1)로 대체한 실제 사고 상황이 Figure 6에 보여진다. 충돌 차량은 소형 픽업트럭(vehicle 2) 그대로 고려하였다. 고속도로에서 소형 픽업트럭이 남쪽으로 주행중에, 분기점에서 고속도로 북쪽 차선으로 진입하기 위해 서쪽에서 동쪽으로 횡단하는 버스(대형트럭)를 충격한 사고이다. 당초 이 사고 사례 해석에서는 대형트럭(버스의) 충돌전 속도는 4.5m/s 로 알려진 상황에서 픽업트럭의 충돌전 속도를 추정하는 것이다.

Table 2. Analysis results of a bus collision

| | | v (m/s) | ϕ_v (deg) | ω (rad/s) | e | μ_r | |
|-------|---------|--------------|-------------------|---------------------|-------|---------|-------|
| Pre | Brach | 1 | 4.47 | 1.67 | 0.00 | | |
| | | 2 | 5.81 | -52.83 | 0.00 | | |
| Post | Brach | 1 | 4.09 | -0.33 | -0.17 | | |
| | | 2 | 1.29 | 1.54 | 1.43 | | |
| | Tire Q | 1 | 4.15 | 1.67 | 0.19 | 0.19 | -0.52 |
| | | 2 | 1.41 | -19.16 | 2.46 | | |
| | 0Q | 1 | 4.20 | 10.63 | 0.19 | | |
| | | 2 | 1.41 | -19.16 | 2.46 | | |
| | Barrier | 1 | 4.47 | 1.67 | 0.00 | 0.0 | 0.06 |
| | | 2 | 3.79 | 1.96 | 0.32 | | |
| Point | 1 | 4.47 | 1.67 | 0.00 | 0.0 | -0.52 | |
| | 2 | 1.17 | -6.37 | 0.00 | | | |

충돌에서 전술한 공통속도 조건을 채용하고, 대형트럭(버스)의 충돌후 방향은 불변이라는 가정하에서 현장에서의 차량 최종 정지위치 등을 고려하고, 반복계산을 통하여 픽업트럭의 충돌전 속도는 5.8m/s로 계산하였다.

이 해석에서 가정한 조건들과 Brach 등이 계산한 결과를 본 논문에서 제시하는 타이어 충격량 모델들과 비교하여 요약한 결과는 Table 2에 보여진다. Table 2에서 볼 수 있는 것처럼, 실제 사고 분석에서 픽업트럭은 충돌 순간 반시계방향으로 회전을 하고 속도의 크기는 감소하나 버스의 경우에는 그 속도의 방향은 거의 유지되며 크기만 다소 감소하는 것으로 나타난다. 그런데, Table 2에는 타이어 충격량을 고려하지 않은 강제충돌 해석(0Q)의 결과도 함께 나타내었다. 타이어의 충격량을 고려하지 않는 경우에는 버스 차량의 속도 크기가 실제보다 크게 나타나며, 방향 변화가 다소 과장되게 나타나는 것을 볼 수 있다. 충돌하는 픽업트럭의 경우에는 타이어 충격량을 고려하지 않으므로 기존 해석 결과들과 동일하다.

전술한 이동장벽 모델과 질점 모델 해석 결과도 Table 2에 보여지는 데, 이동장벽 모델의 결과가 질점 모델보다 다소 나은 결과를 보여준다. 강제모델에서 반발계수와 충격량비는 본 저자의 이전 연구(Han, 2013)에서 충돌전 조건을 가지고 작성한 반발계수와 충격량비에 대한 추정식을 활용하여 계산하였다. 그런데, 보다 단순한 이동장벽 모델과 질점 모델의 경우에는 반발계수는 0으로하고 충격량비는 임계충격량비로 설정하는 공통속도 조건을 채용하였다. 한편, Figure 7은 PC-Crash 시뮬레이션 해석 결과를 충돌 전후 프

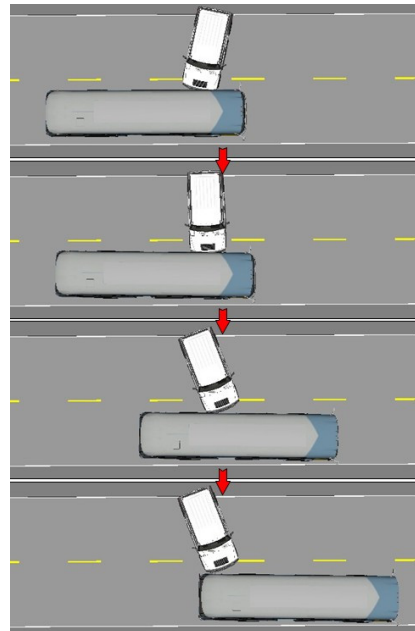


Figure 7. PC-Crash simulation of a bus collision

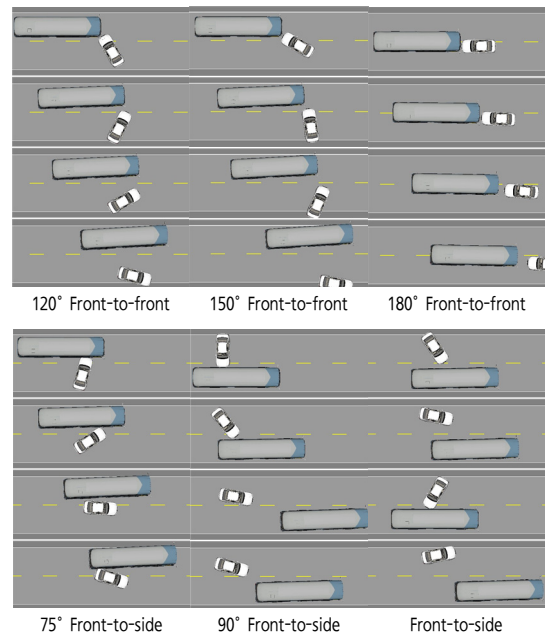


Figure 8. Simulation of bus collision events

레이프로 나타내었다. 충돌후 버스의 속도 방향 변화가 다소 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

승용차와는 달리 대형버스와 같은 사업용 차량에 대해서는 충돌 실험과 관련한 데이터가 희소하여, JARI에서 수행하였던 45회의 승용차간의 실차실험 결과

(Ishikawa, 1994)들 중에서 버스 충돌사고에 비교적 부합하는 데이터들을 가지고 본 논문에서 제시한 타이어 충격량 모델뿐만 아니라 이동장벽과 질점 모델도 활용하여 해석하였고, PC-Crash 시뮬레이션 결과 그리고 당초 승용차간의 충돌 실험 결과와의 차이를 살펴보았다. 모든 충돌 이벤트에서 PC-Crash로 수행한 결과들은 충돌후 버스 차량의 속도 크기가 본 연구에서 제시하는 모델보다 미미하게 크게 나타나나, 속도의 방향 변화는 5도 이상으로 과장되게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 그 결과들은 대개 진술한 특성들과 유사하였으나, 실제 실험 결과들이 아니므로 큰 의미를 부여하기는 어렵다. Figure 8은 이와 같은 JARI 충돌 실험결과에서 볼 수 있는 다양한 정면 그리고 측면 충돌 상황에 대한 PC-Crash 그래픽 해석 결과들을 요약하였다. 승용차간의 충돌에서와는 많이 다르게, 버스가 이동장벽과 같은 역할을 하는 충돌 거동을 여러 정/측면 충돌 이벤트들에서 살펴 볼 수 있다.

결론

본 연구에서는 승용차와는 다른 버스 차량의 사고 관련 특징 및 버스가 개입된 교통사고의 특성과 유형들을 조사 분석하였다. 그런데, 충돌사고에 버스와 같은 대형 차량이 포함되어 있을 때에는 노면으로부터 버스 타이어를 통해 전달되는 외부 충격량을 무시할 수 없으므로 기존의 강제 충돌 모델을 그대로 적용할 수가 없게 된다. 따라서, 이에 대한 해결 방안으로서 타이어 충격량을 직접 고려하거나 혹은 버스 차량을 마치 이동장벽처럼 고려하는 해석 모델을 작성하였다. 또한, 실제 사고에서 차량의 충돌 접촉점의 위치나 회전 운동과 관련한 계수들을 추정할 수 없는 경우가 많으므로 질점 충돌모델의 활용방안도 함께 모색하였다.

본 논문에서 제시하는 해석 모델을 실제 사고사례에 적용하여 기존의 타이어의 충격량을 고려하지 않는 해석 결과와 비교하여 버스 차량의 속도 등을 실제와 유사하게 구할 수 있음을 보여주었다. 또한, 이동장벽 모델과 질점 모델 해석 결과도 함께 구하였는데, 이동장벽 모델의 결과가 질점 모델보다 다소 나은 결과를 보여주었다. 그런데, 버스 충돌 실험 자료나 과학적인 사고 사례들에서 정량적인 데이터들을 구하기가 불가하여, 외국의 기관에서 수행하였던 승용차간의 실차실험 결과들 중에서 버스 충돌사고에 비교적 부합하는 데이

터들을 가지고 본 논문에서 제시한 모델들을 활용한 해석 결과들을 비교하였다. 실제 버스 차량 충돌 실험이 아니므로, 상용 사고해석 프로그램을 통한 시뮬레이션 해석 결과 그리고 승용차 실험 결과 등을 함께 분석하였다.

승용차와는 달리 대형버스와 같은 사업용 차량에 대해서는 충돌 실험과 관련한 데이터가 희소하여 연구 및 분석 등에 애로 사항이 있으나, 대형 사업용 차량 등이 개입된 사고 과정 전체에 대한 보다 과학적인 재구성 해석에 실무적인 적용이 가능할 것을 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2013R1A1A4A01007748).

REFERENCES

- Brach R. M., Brach R. M. (2007), Analysis of Collisions Involving Articulated Vehicles, SAE Paper 2007-01-0735.
- Brach R. M., Brach R. M. (2011), Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods, 2nd ed., SAE International, United States.
- Han I. (1998), Impact Analysis for Vehicle Accident Reconstruction, Trans. of Korea Society of Automotive Engineers, 6(2), 178-190.
- 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), 221(10), 1197-1208.
- Han I. (2013), Impulse-Momentum Based Analysis of Vehicle Collision Accidents Using Monte Carlo Simulation Methods, International Journal of Automotive Technology, Submitted(under review).
- Hickman R. S., Hill P. F. (2000), Bus and Recreational Vehicle Accident Reconstruction and Litigation, Lawyers and Judges Publishing Company, Inc., United States.

- Hyundai Motor Co. (2013), Specification(<http://www.hyundai.com>).
- Ishikawa H. (1994), Impact Center and Restitution Coefficients for Accident Reconstruction, SAE Paper 940564.
- Korea Research Institute of Transportation Industries (2013), Basic Research Report (<http://www.kriti.re.kr>).
- Korean National Police Agency (2013), Road Traffic Accidents in Korea 2012, Korean National Police Agency.
- Mayrhofer E., Steffan H., Hoschopf H. (2005), Enhanced Coach and Bus Occupant Safety, Proceedings of the 19th International Technical Conference of the Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number 05-0351.
- Oh J. (2012), Driving Behavior Analysis of Commercial Vehicles(Buses) Using a Risky Driving Judgment Device, International Journal of Highway Engineering, 14(1), 103-109.
- Poirette N., Bayan F. P., Suway J., Cornetto A., Cipriani A., Wahba R. (2013), Stiffness Coefficients of Heavy Commercial Vehicles, SAE Paper 2013-01-0796.
- Varner R. W., Sutphen R. F. (2011), Commercial Vehicle Accident Reconstruction and Investigation, 2nd ed., Lawyers and Judges Publishing Company, Inc., United States.
- Wong J. Y. (2008), Theory of Ground Vehicles, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., United States.

- ☞ 주 작성자 : 한인환
- ☞ 교신저자 : 한인환
- ☞ 논문투고일 : 2013. 9. 17
- ☞ 논문심사일 : 2013. 11. 14 (1차)
2013. 12. 26 (2차)
- ☞ 심사판정일 : 2013. 12. 26
- ☞ 반론접수기한 : 2014. 6. 30
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필