

타이어 펑크 차량의 주행 및 충돌후 거동

한인환^{1*} · 임상현² · 박종찬³ · 최지훈³

¹ 홍익대학교 기계정보공학과, ² 홍익대학교 학부생, ³ 국립과학수사연구원 교통사고분석과

Coasting and Post-impact Motion of a Vehicle With Tire Blowout

HAN, Inhwan^{1*} · LIM, Sanghyun² · PARK, Jong-Chan³ · CHOI, Jihun³

¹ Department of Mechanical and Design Engineering, Hongik University, Sejong 339-701, Korea

² Undergraduate, Hongik University, Sejong 339-701, Korea

³ Traffic Accident Analysis Division, National Forensic Service, Gangwon 220-170, Korea

Abstract

In this paper, various tire blow-out force experiment data were collected and analyzed to obtain approximate values of related coefficients such as rolling resistance, self-aligning torque, cornering stiffness, and radial stiffness for the analysis of the motion of vehicles with tire blow-outs. These coefficients related to tire blow-outs were input into a vehicle accident analysis program to simulate and examine the effects of tire blow-outs. Various configurations and velocities of vehicle collisions without tire blow-outs were also used as reference to establish collision events of vehicle collisions with tire blow-outs. For the events, the simulation analysis was performed and collision characteristics were obtained. Consideration of tire blow-outs or damages suggested in this study will greatly contribute to more reliable vehicle accident reconstructions.

본 논문에서는 펑크 타이어 힘 시험 연구 결과들을 다양하게 수집하고 분석하여, 펑크(blow-out) 타이어 차량 동적 거동 해석을 위한 구름저항력(rolling resistance), 셀프 얼라이닝 토크(self aligning torque), 코너링 강성(cornering stiffness), 반경방향 강성(radial stiffness)과 같은 관련 계수들의 적정값을 추정하였다. 이러한 타이어 펑크 관련한 입력계수들을 자동차 사고 해석 상용 프로그램에서 설정하여 타이어 펑크 효과를 구현한 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 그리고, 정상 차량들 간의 다양한 충돌 형태들과 속도 등을 참조하여, 펑크 차량의 충돌 유형들을 구성하고 시뮬레이션 해석을 수행하여 충돌 특성을 구하였다. 본 연구에서 제시하는 타이어 펑크 혹은 손상에 대한 고려는 보다 신뢰성 있는 자동차 사고 재구성에 기여할 수 있을 것이다.

Keywords

accident reconstruction analysis, coasting motion, post-impact motion, tire blow-out, tire force
사고 재구성 해석, 주행 거동, 충돌후 거동, 타이어 펑크, 타이어 힘

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

Received 27 May 2014, Accepted 6 August 2014

© 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

타이어 펑크와 같은 손상에 의해서 충돌 사고가 발생할 경우 차체 변형 및 승객 상해 정도가 증가하게 된다. 특히 여름철 전체 교통사고 비율(09-11년 기준) 중 타이어 펑크에 의한 충돌사고는 47%에 이르고 있다. 또한, 100건의 사고가 발생할 경우 다른 교통사고에 비하여 사망자 수의 비율은 승용차의 경우 대략 3.5배, 화물차의 경우는 3배 정도로 증가한다(Korea transportation safety authority, 2012).

타이어 펑크는 공기압의 급격한 변화로 인해 노면으로부터 타이어에 전달되는 힘에 변화가 발생하여 차량의 동적 거동에 영향을 주게 된다. 따라서, 타이어 펑크를 수반하는 자동차 사고에서 펑크를 고려하지 않는다면 신뢰성 있는 분석이 가능하지 않을 수 있다. 그런데, 펑크 차량의 동적 거동에 관한 기존의 연구들은 펑크 차량의 성능 시험/분석에 관한 것들이 대부분이며, 법공학 관례에서는 펑크 사고 사례 분석이나 자동차 사고 해석 시뮬레이션 프로그램 개발과 관련한 것들(Blythe et al., 1998; Pillai, 2005; Schmeitz et al., 2005; Smith, 2004; Vorotovis et al., 2013; Robinette et al., 2000; Parczewski, 2013; Prasanna Kumar et al., 2004; Lozia, 2005; Kasprzak et al., 2006; Collier et al., 1980)로 매우 미흡한 상황이다. 더욱이, 차량간의 충돌에서 펑크가 수반될 때 고려해야 하는 충돌후 거동 변화에 관한 연구들은 찾아보기 어렵다. 차량간의 충돌 사고에서 타이어 펑크가 발생하게 되면 차량의 속도 변화가 과도하거나 혹은 예측이 어려울 수도 있으며, 정상 주행 상황과는 달리 운전자의 대응 운전도 용이하지 않으므로 펑크 효과가 확대되는 경향이 있다. 또한, 국내외 교통사고분석 분야에서 비교적 널리 보급되어 있는 자동차 사고 분석 상용프로그램인 PC-Crash(Ver. 9.2)에서는 타이어 펑크를 고려하는 모듈이 존재하지 않고, 북미지역에서 개발되어 활용되고 있는 HVE에는 타이어 블로우-아웃 모듈(EDC, 2006)이 있으나 그 적정성과 활용성을 확인하기 어렵다.

본 논문에서는 우선 펑크 타이어의 힘 연구 결과들을 광범위하게 수집하고 분석하여 구름저항력, 셀프 얼라이닝 토크, 코너링 강성, 반경방향 강성과 같은 관련 계수들의 적정값을 추정하였다. 그리고, 이에 근거하여 타이어 펑크와 관련된 입력계수들을 설정하고 자동차 사고 분석 프로그램(PC-Crash)을 활용하여 신뢰성 있는 시뮬레이션 해석을 수행하는 방안을 제시한다.

타이어 파손 유형과 특성

타이어 파손의 유형은 대개 트레드 분리(tread belt separation), 타이어 펑크(tire blowout), 화학적인 손상 등으로 나누어 볼 수 있다. 타이어의 화학적 손상은 고무의 변질 혹은 관리 미흡에 의해서 발생하는 경우가 대부분이며, 트레드 분리 및 펑크와 같은 경우에는 노면상의 이물질 혹은 타이어의 심한 마모나 충돌 사고 등에 의해서 발생하게 된다.

1. 타이어 파손과 사고 분석

타이어 트레드 분리는 트레드 부와 벨트간의 분리를 말한다. 타이어의 지속적인 회전운동 때문에 발생한 열로 인하여 타이어를 구성하고 직접 노면과 접촉하는 부분인 트레드, 타이어의 골격인 카카스(carcass), 트레드와 카카스 사이에 삽입된 층인 벨트, 타이어의 측면부인 사이드 월(side wall), 카카스 내층에 배치되어 있는 고무층인 이너라이너(inner liner) 등이 서로 잘 접촉되어 있지 못하고 분리되는 이러한 현상은 주로 타이어의 저공기압 또는 차량의 과하중 그리고 지속적인 고속주행에 의해서 발생된다. 손상된 타이어의 트레드 부는 분리된 모습으로 진행되기 때문에 노면과 닿는 면적의 증가로 인하여 구름저항력이 증가한다. 이로써 차량은 손상된 타이어 위치로 편향되는 결과를 가져오게 된다. 트레드 분리는 타이어 공기압을 포함하고 있는 케이싱(casing) 영역의 파손을 불러오지 않기 때문에 타이어 공기압에 직접적인 변화를 주지 않는다. 그러나, 트레드 분리가 발생한 상태로 운행을 지속할 경우 벨트 마모로 인하여 케이싱 영역에 손상을 입혀 펑크가 발생할 가능성이 있다. 그러므로 트레드 분리현상은 타이어 펑크의 선과정이라고 볼 수 있다.

타이어 펑크는 통상 주행 중에 노면에 놓여 있던 물체(나사, 못, 볼트 등)를 밟고 진행하면서 물체가 타이어의 그루브(groove)에 박히게 되고 계속되는 회전운동에 따라서 트레드, 벨트 그리고 카카스를 뚫고 들어가 타이어 내부에 손상을 입혀 공기가 빠지는 현상이다. 이에 타이어 공기압이 급격하게 손실되는 버스트(burst)라고 불리는 현상이 있는데, 지속적인 주행을 하고 있는 타이어에서 공기압이 낮아지게 되면 타이어 접지부 뒤쪽에서 스탠딩 웨이브가 발생하고 이때 지속적인 응력을 받고 있는 트레드 부, 사이드 월, 비드(bead) 중 한 부위가

응력을 버티지 못하고 발생하는 열에 의해서 파괴되는 경우를 말한다. 노면 상에 존재하는 이물질에 의한 펑크는 트레드 부에 대부분 손상을 입히게 된다. 하지만 트레드 부의 경우 안쪽에 강철 코드가 들어있기 때문에 서서히 공기가 빠져나간다. 하지만 타이어의 옆면인 사이드 월부는 섬유질로 구성되어 있기 때문에 타이어 파손이 발생할 경우 타이어는 급격한 공기손실을 동반하게 된다. 실제 이러한 타이어 펑크는 자동차 측면 충돌 사고뿐만 아니라 충돌 시험 등에서도 발생하며, 차체와 승객을 포함한 충돌사고의 심각성과 사고 재구성 분석의 불확실성을 가중시키는 주요한 원인으로 작용한다.

이처럼 타이어 파손이 발생하게 되면 노면과 접지면 사이의 마찰저항이 커지고 정상적인 주행을 하지 못한다. 손상된 타이어는 정상적인 타이어에 비해 회전저항이 높아지게 되고 이는 타이어 간의 속도 차이를 발생시킨다. 이는 차량을 한쪽으로 틀어지게 하는 요잉(yawing) 현상을 발생시킨다. 주행 중에 오른쪽 앞바퀴가 파손되면 차체는 오른쪽으로 틀어지고 왼쪽 앞바퀴 파손 시에는 왼쪽으로 마찬가지로 뒤쪽 바퀴의 경우에도 파손된 방향 쪽으로 차량이 틀어지게 된다. 이러한 파손의 경우 뒷바퀴의 파손보다 조향을 담당하는 앞바퀴에서의 파손이 차량을 더 크게 요잉하는 원인이 될 수 있다.

적정공기압을 가지고 있는 타이어가 차량의 운동방향 변화에 의해서 회전을 하게 되면 노면과 접촉하는 부분(contact patch)에는 변형이 발생하게 된다. 그러면 노면 접촉면에서는 부분적으로 영역이 나누어지게 된다. 첫 번째로는 노면과의 점착력을 유지하고 있는 점착영역 그리고 점착을 유지하지 못하고 미끄러지는 미끄럼영역으로 나누어진다. 이때 타이어에서는 이러한 미끄럼 영역을 원래상태로 되돌리려는 힘인 코너링력이 작용하게 되어 차량은 회전하고자 하는 방향으로 진행하게 된다. 하지만 타이어의 급격한 공기손실이 발생하게 되면 타이어를 구성하고 있는 트레드와 사이드 월은 원래의 형상을 유지 못하게 된다. 이로 인하여 타이어의 노면 접촉면적은 증가하게 되며 이처럼 차량이 회전하게 되면, 접촉면적에 나누어져 있는 점착영역과 미끄럼 영역의 비율이 달라져 미끄럼 영역이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이로써 미끄럼 영역을 원래의 상태로 되돌리려는 힘인 코너링력이 감소하게 되고 차량은 원하는 방향으로 진행하지 못하게 된다(Clark, 1981). 이와 같이 타이어 트레드 분리 및 타이어 펑크가 발생하게 되면 차량은 진행 차로를 유지하지 못하고 다른 차로를 침범하게 되며 타 차량 혹은 도

로 시설물 등과 충돌을 일으켜 2차 사고를 유발하기도 한다. 화물차량의 경우 일반 승용차보다 차량 자체의 무게 중심이 높기 때문에 이러한 타이어 파손이 발생하여 급격한 조향 시에 차량이 전복되는 사고도 종종 발생한다.

2. 펑크 타이어 힘 해석

타이어 펑크가 발생해 공기압이 급격히 감소하게 되면 타이어의 유효 반지름은 감소하게 되고 노면 접촉면적은 약 2배정도 증가하게 된다(Dixon, 1996). Figure 1은 공기압에 따른 트럭용 래디얼 타이어 자국(footprint)의 길이를 나타낸 것이다. 타이어 공기압이 100psi일 때 8in의 길이를 가지고 있으며, 공기압이 50%이상 감소하여 43psi가 되면 타이어 자국은 13in로 증가한다(Brown et al., 1996).

타이어 공기압의 급격한 감소로 인하여 구름 저항은 증가하게 된다. Figure 2를 보면 정상 상태의 공기압을 2.1bar로 설정하였을 때, 타이어 펑크가 발생하게 되어

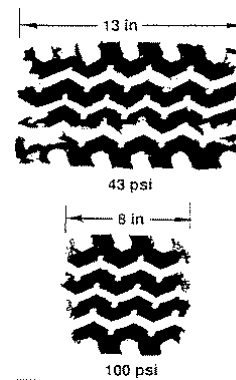


Figure 1. Tire footprint (Brown et al., 1996)

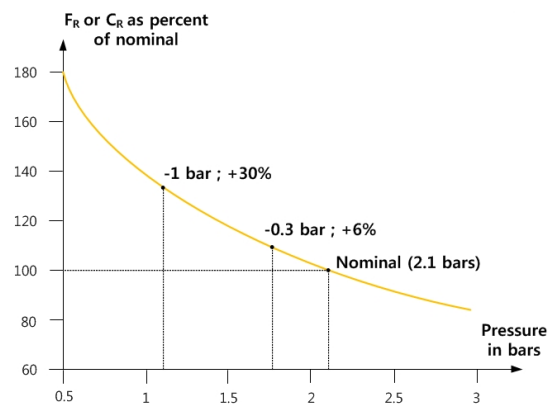


Figure 2. Rolling resistance (Clark, 1981)

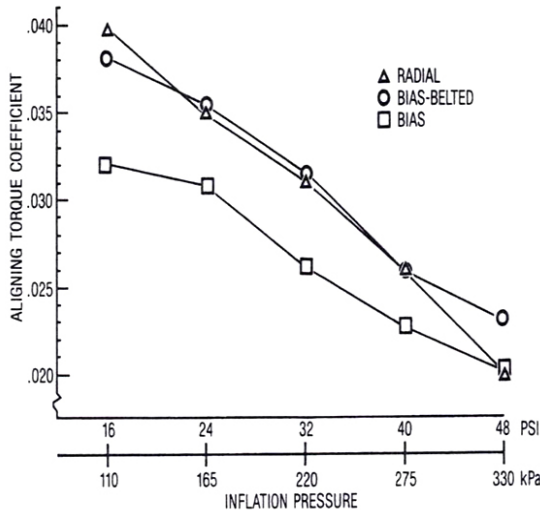


Figure 3. Aligning torque (Collier et al., 1980)

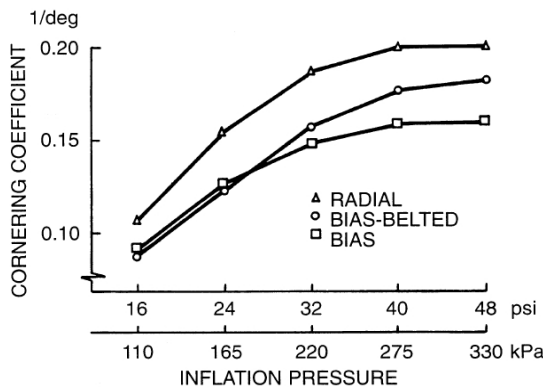


Figure 4. Cornering stiffness coefficient (Wong, 2008)

타이어 공기압이 대기압과 같은 1bar(1atm)근방으로 떨어지게 되면 타이어의 구름저항력은 대략 30%정도 증가하는 것을 볼 수 있다(Clark, 1981).

한편, 펑크 타이어에서 노면과의 접촉면적이 증가하고 측력(side force)과 코너링력 사이의 거리로 정의되는 뉴메틱 트레일(pneumatic trail)이 증가한다(Wong, 2008). 결국 횡력과 뉴메틱 트레일의 곱으로 표현되는 셀프 얼라이닝 토크도 증가하게 된다.

Figure 3에서 볼 수 있는 것처럼, 정상상태의 공기압(35psi)에서는 셀프 얼라이닝 토크 계수는 0.3 정도에 위치하지만 펑크가 발생하게 되어 공기압이 15psi 정도로 떨어지게 되면 셀프 얼라이닝 토크 계수는 대략 0.4의 값을 가지게 된다(Collier et al., 1980). 따라서, 펑크가 발생하면 셀프 얼라이닝 토크 계수는 약 30%정도 증가하는 것으로 추정할 수 있다.

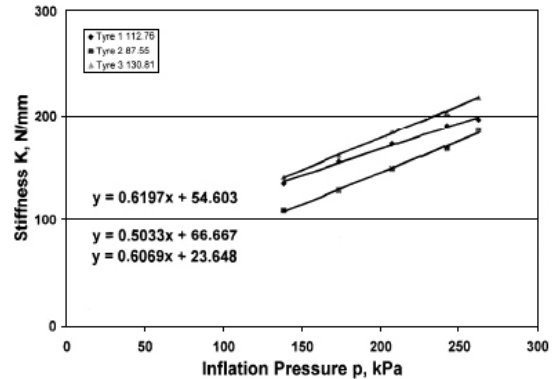


Figure 5. Radial stiffness(Pillai, 2005)

한편, 펑크가 발생하면 공기압은 급격하게 감소하고 코너링 강성을 수직력(normal force, F_z)으로 나눈 값인 코너링 강성계수(cornering stiffness coefficient)도 감소한다. Figure 4을 보면 래디얼 타이어의 경우 정상상태 공기압(35psi)에서 코너링 강성계수가 0.2 근방에 위치하는 것을 볼 수 있다. 타이어 펑크가 발생함에 따라 공기압이 15psi로 떨어지게 되면 코너링 강성계수는 대략 0.1의 값으로 된다. 이와 같이 펑크가 발생했을 때 타이어의 코너링 강성계수는 약 40-50% 정도 감소하는 것으로 고려할 수 있다(Wong, 2008).

펑크가 발생하게 되면 차량 하중으로 인한 수직력(normal force, F_z)은 감소하게 되며(Parczewski, 2013; Clark, 1981), 타이어 반경 변형(radial deformation)은 증가한다. 반경에 따른 수직(반경방향) 하중 변화율로 정의되는 타이어 반경강성에 대한 기존 연구(Pillai, 2005)에 따르면 타이어 내부압력이 증가함에 따라서 반경강성 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. Figure 5에서 볼 수 있는 것처럼, 정상 타이어(200kPa 공기압)에 비하여 펑크 타이어(100kPa)의 반경강성은 대략 50%정도 감소하는 것으로 추정할 수 있다.

타이어 펑크 차량의 거동

타이어 펑크가 발생하게 되면, 전술한 것처럼 코너링(캠버)/반경 강성계수(힘), 구름저항력 그리고 셀프 얼라이닝 토크가 비교적 큰 폭으로 변화하면서 차량의 동적 거동에 영향을 준다. 본 연구에서는 자동차 사고해석 프로그램들을 활용하여 시뮬레이션 해석을 수행하였으며, 구름저항력과 코너링/반경 강성계수와 관련한 입력 계수들을 설정하여 타이어 펑크 효과를 구현하였다. 시

물레이션 해석 결과는 타이어 펑크 관련 실제 사고 사례들을 통하여 유용성과 신뢰성을 확보하였다.

1. 펑크 차량 거동 시뮬레이션 해석

본 연구에서는 펑크 차량의 동적 거동을 시뮬레이션 해석하기 위하여 국내의 교통사고분석 분야에서 비교적 널리 보급되어 있는 상용프로그램인 PC-Crash를 사용하였다. 북미지역에서 개발되고 그 지역에서만 주로 활용되고 있는 상용프로그램인 HVE에는 타이어 블로우아웃 모듈이 있으나 PC-Crash에서는 타이어 펑크를 고려하는 모듈이 존재하지 않으므로, 전술한 펑크 타이어 힘 해석 결과들에 근거하여 입력 계수들의 값들을 적절하게 설정하여야 한다.

우선 타이어 구름저항과 관련하여 PC-Crash에는 직접 관련한 계수를 설정하는 것이 가능하지 않으므로, 제동인자(brake factor) 변경으로 대체하였다. 정상 타이어의 구름저항 계수는 차량 속도에 따라서 래디얼 타이어와 바이아스 타이어에서 식(1)과 같이 보고되고 있다 (Wong, 2008).

$$f_{r:radialtire} = 0.0136 + 0.40 \times 10^{-7} V^2 \quad (1a)$$

$$f_{r:bias\ tire} = 0.0169 + 0.19 \times 10^{-6} V^2 \quad (1b)$$

전술한 것처럼, 펑크 타이어의 경우 구름저항력이 대략 30% 정도 증가하게 되므로 정상 타이어에 비해 제동인자를 상응하는 만큼 증가 설정할 수 있다. 식(1)로 구한 구름저항 계수를 이용하여 차량의 감가속도를 구하고, 반복 시뮬레이션을 통하여 이에 상응하는 제동인자를 추정할 수 있게 된다.

타이어 공기압의 변화에도 불구하고 횡력(코너링력)이 최대치에 도달하는 임계 미끄럼각(critical slip angle)은 비교적 일정한 값을 보이는 것으로 알려져 있다 (Kasprzak et al., 2006). 펑크 타이어의 경우 코너링 강성계수는 40~50% 감소하고, 임계 미끄럼각이 일정한 값을 갖는다면 횡력의 최대치 또한 코너링 강성계수와 같은 비율로 변화하게 된다. 본 연구에서는 타이어 모델에서 펑크 효과를 고려하여 비선형 모델을 설정하고, 코너링 강성계수와 횡력 최고치에 상응하는 감소 설정을 하였다.

타이어 펑크와 함께 약 50%까지 감소하는 반경방향 강성은 타이어의 반경을 변경하여야 하는 데, PC-Crash

에서 축 단위가 아닌 단일 타이어의 제원 변경은 가능하지 않다. 따라서, 타이어의 크기를 변화시킬 수 있는 설정에서 타이어를 적정량(타이어 높이 즉 노면으로부터 휠까지의 길이) 들어 올리도록 설정하였다.

한편, 펑크 차량의 동적 거동에 끼치는 영향이 비교적 작다고 판단되는 캠버 강성계수와 셀프 얼라이닝 토크의 변화는 그 정량적인 수치를 추정하기도 어려울 뿐만 아니라 관련한 적절한 프로그램 입력계수를 설정하는게 불가하였으므로 제외하였다. 그런데, 타이어 블로우아웃 모듈을 가지고 있는 HVE에서는 각개의 입력계수들(특히 강성계수)을 개별로 적절하게 변경하는 것이 불가능하나, 본 연구에서는 타이어 펑크 관련 사고 상황에 맞추어 비교적 유연하게 각개 입력 계수의 설정이 가능하게 된다.

Table 1에 보여지는 차량(타이어는 해당 차량 기본 장착모델)을 가지고, 전술한 입력계수들(구름저항력, 코너링/반경 강성계수)을 Table 2에서처럼 설정하였고 PC-Crash 시뮬레이션 해석 결과를 HVE 타이어 펑크 모듈과 비교분석 하였다. HVE 타이어 펑크 모듈에서는 각개 입력계수의 값을 조절할 수는 없지만 구름저항력은 정상 타이어의 10배, 강성계수(코너링, 반경)는 0.1배를 일괄 적용한 것으로 알려져 있다(EDC, 2006). Table 2에서 F_{max} 는 최대 횡력, F_{slip} 는 임계 미끄럼각 이후의 최종 횡력, F_{op} 는 코너링 강성을 의미하며, 타이어 설치 변경(geometry change)은 타이어를 Z축으로 타이어 높이 0.12m(타이어 폭x편평비)만큼 올리는 것을 의미한다. 제동인자의 경우 차량 속도에 의해 구름저항력이 결정되고이에 상응한 감가속도값을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 차량의 속도별로 90km/h(0.21m/s²), 60km/h(0.19m/s²), 30km/h(0.18m/s²)에 상응하는 제동인자를 각각 설정하였다.

PC-Crash와 HVE 두 상용프로그램의 시뮬레이션으로 각각 구한 펑크 차량의 운동 경로와 실제 펑크 사고

Table 1. Vehicle model data for simulation

Model	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Wheelbase (m)	Tire data
BMW 318is	4.42	1.69	1.39	2.7	P205/60R15

Table 2. Simulation parameters setting value

	F_{max}	F_{slip}	F_{op}	Geometry Change(m)
Default	1.1	1	15	0
Change	0.605	0.55	8.25	0.12

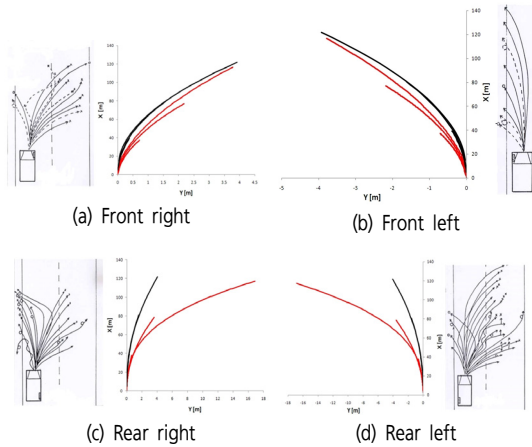


Figure 6. Trajectory of vehicles

분석 결과(Grogan, 1972)를 함께 나타낸 것이 Figure 6에 보여진다. 시뮬레이션은 차량 속도를 변화하면서 수행하였으며, 적색(호린색)이 HVE 그리고 흑색(진한색)이 PC-Crash의 수행 결과를 표시한 것이다. Figure 6에서는 차량 전후좌우 바퀴가 핑크난 상황에 대한 결과를 나타내었으며, 그래프의 측면에 있는 그림은 실제 핑크 사고 분석 결과(61건)에서 차량의 운동 경로를 보여 주고 있다. 그림속의 실선은 경트럭 그리고 점선은 승용차의 거동을 의미한다.

핑크 사고 사례를 보게 되면 앞바퀴 핑크 시 차량은 핑크가 발생한 방향으로 이동하지만, 후륜 핑크 시에는 시뮬레이션 결과와는 달리 차량이 핑크가 발생한 반대 방향으로 이동하는 경우를 많이 볼 수 있다. 이는 시뮬레이션 결과에서 알 수 있는 것처럼, 후륜 핑크시에 전륜 핑크보다 핑크난 바퀴 방향으로의 차량 편향이 더 심하게 되고, 이에 대한 운전자의 과도한 대응운전 등의 영향으로 실제 사고에서는 반대 방향으로의 편향이 발생하는 것으로 추정된다. HVE의 타이어 블로아웃 모듈과 본 연구에서 설정한 입력 계수들로 설정한 PC-Crash 시뮬레이션 결과는 Figure 6에서 보는 것처럼 모든 경우에 대하여 편향 특성과 정도가 비교적 일치하며, 실제 사고 사례들에 대해서도 후륜 핑크 일부 사례들을 제외하고는 적정하다고 여겨진다.

2. 핑크 차량 거동 사례 분석

실제 타이어 핑크 사고 장면이 촬영된 블랙박스 등 동영상 자료들을 수집하여, 전문 입력 계수들의 값들을

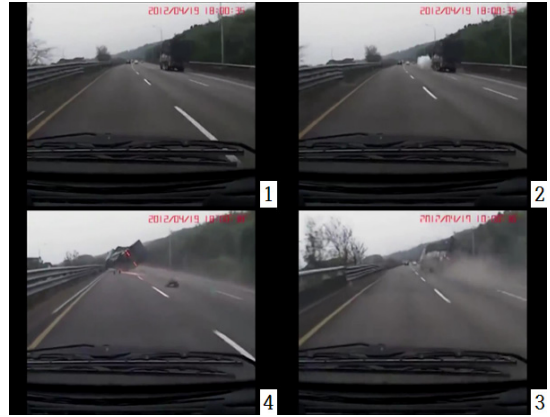


Figure 7. Truck tire blow-out scenes(Youtube)

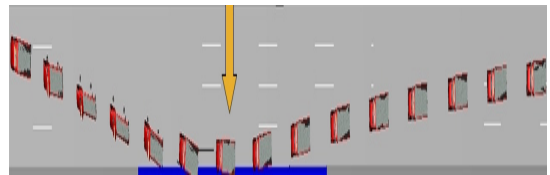


Figure 8. Truck tire blow-out simulation

입력한 시뮬레이션 수행 결과와 비교 분석하였다. 사고 동영상에서는 도로 시설물 특히 차선 활용과 프레임별 분석을 통하여 차량 속도 등의 정보를 직접 추출하였다 (Korea academy of traffic accident investigation, 2012).

Figure 7은 155km/h로 주행하는 화물 차량의 좌측 전륜 타이어 핑크로 발생한 사고 상황을 순차적으로 보여주고 있다. 정상 주행(1)하던 차량에서 핑크가 발생(2)하며, 핑크가 발생한 좌측 방향으로 편향(3)하여 3차로부터 1차로까지 횡방향으로 대략 12m를 이동하고 좌우로 심하게 흔들리며 가드레일과 충돌(4)하여 진행하다가 결국은 전복되는 사고이다.

Figure 8은 타이어 핑크와 관련한 계수들을 입력하여 수행한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 가드레일과 충돌 지점을 표시하는 화살표까지 차량이 3차로에서 가드레일(회색라인) 방향으로 12m 정도 이동하여 화살표 이후부터는 가드레일과 충돌하고 흔들리며 이동하게 된다.

한편, Figure 9의 사고 동영상은 120km/h로 주행하는 승용차의 좌측 후륜 타이어에서 핑크가 발생하여 차량이 좌측으로 편향하는 상황을 차례로 보여주고 있다. 영상 속에서 차량은 핑크가 발생한 후부터 가드레일까지 종 방향으로 약 40m를 이동하였다. 최종적으로 운전자가 가드레일을 인지하여 핸들을 우측으로 돌려 차량

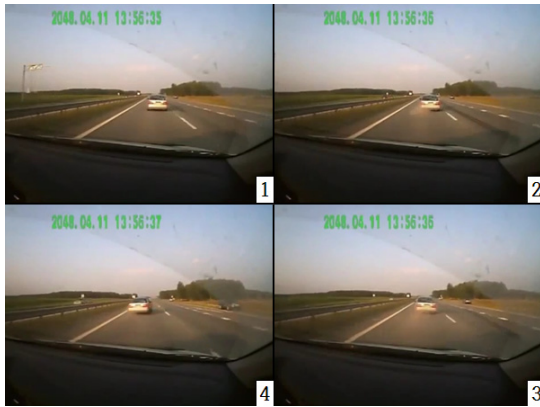


Figure 9. Passenger car tire blow-out scenes(YouTube)

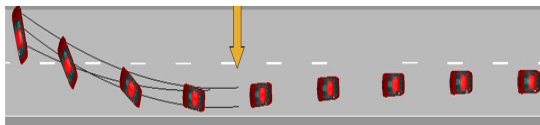


Figure 10. Passenger car tire blow-out simulation

이 미끄러진다. Figure 10의 시뮬레이션 결과를 보면, 노란색 화살표까지는 Figure 9의 사고 영상에서처럼 종방향 이동거리는 약 50m, 횡방향 이동거리는 차로 1개(4m)이다. 그 이후에는 앞서 말한 운전자의 대응운전으로 인하여 차량이 미끄러지는 거동을 표현하였다.

본 절에서 제시한 두 가지 사고 사례에서, 화물트럭과 승용차 두 차량 모두 펑크발생 후 펑크 타이어 방향으로 편향되는 결과를 보여주었다. 하지만 펑크 발생 후 두 차량 모두 운전자의 대응운전에 의해서 우측으로 핸들을 급조향하였고 화물 트럭의 경우는 결국 전복이 되었지만 승용차의 경우에는 전복되지 않고 미끄러지는 거동을 보였다. 이는 무게 중심이 높은 트럭과 같은 차량의 경우 타이어 펑크가 발생하여 운전자가 급격한 대응조작을 하면 전복과 같은 상황이 발생하는 것을 추정할 수 있다.

펑크 차량의 충돌 후 거동

차량간의 충돌 사고에서 타이어 펑크가 발생하게 되면 충돌 차량의 속도 변화가 과도하거나 혹은 예측이 어려울 수도 있으며, 정상 주행 상황과는 달리 운전자의 대응 운전도 용이하지 않으므로 펑크 효과가 확대되는 경향이 있다. 또한, 충돌 상황에서 타이어 펑크가 발생하게 되면 차량 충돌 지점이 상대적으로 높아지게 되고 충격량은 차체로 직접 전달되어 차량 손상 변형 및 탑승자의 부상 등이 가중되는 경향이 있다.

Table 3. Colliding vehicle models

	Mass (kg)	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Wheel base(m)	Tire data
S	885	3.595	1.595	1.485	2.385	P155/70R13
M	1400	4.820	1.835	1.470	2.795	P205/65R16
L	1530	4.910	1.860	1.470	2.845	P225/55R17

Table 4. Collision analysis results

	CollID		ν_{0t} (m/s)	ν_{0n} (m/s)	ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	Position
Small-Large	S75T1	Veh 1	-14.19	0.00	-5.54	-5.77	RR
		Veh 2	-3.58	-13.36	-0.66	-0.66	
	S90T6	Veh 1	15.70	0.00	5.18	5.41	LR
		Veh 2	0.00	-15.60	0.28	0.28	
	S90T19	Veh 1	-17.17	0.00	-1.61	-1.86	RR
		Veh 2	0.00	-5.50	-0.01	-0.01	
Middle-Middle	S150T1	Veh 1	-11.90	0.00	-0.91	-1.20	RR
		Veh 2	10.30	-5.96	-0.25	-0.25	
	S75T1	Veh 1	-14.19	0.00	-3.87	-4.18	RR
		Veh 2	-3.58	-13.36	-1.07	-1.07	
	S90T6	Veh 1	15.70	0.00	3.46	3.75	LR
		Veh 2	0.00	-15.60	0.35	0.35	
Middle-Large	S90T19	Veh 1	-17.17	0.00	-0.64	-0.94	RR
		Veh 2	0.00	-5.50	-0.01	-0.01	
	S135T2	Veh 1	11.61	0.00	1.76	2.02	LR
		Veh 2	-8.21	-8.21	0.02	0.02	
	S135T5	Veh 1	-17.30	0.00	-2.45	-2.72	RR
		Veh 2	6.11	-6.11	-0.05	-0.05	
S150T2	Veh 1	-5.33	0.00	-1.13	-1.38	RR	
	Veh 2	10.40	-5.99	0.06	0.06		
Middle-Large	F120T3	Veh 1	-11.76	6.79	0.67	0.81	RF
		Veh 2	0.00	-6.64	-2.14	-2.14	
	F165T1	Veh 1	-3.60	13.20	0.58	0.4	LF
		Veh 2	0.00	-13.80	-0.25	-0.28	
	S75T1	Veh 1	-14.19	0.00	-3.96	-4.27	RR
		Veh 2	-3.58	-13.36	-0.90	-0.9	
S90T6	Veh 1	15.70	0.00	3.46	3.75	LR	
	Veh 2	0.00	-15.60	0.29	0.29		
S90T19	Veh 1	-17.17	0.00	-0.83	-1.13	RR	
	Veh 2	0.00	-5.50	-0.01	-0.01		
F120T3	Veh 1	-11.76	6.79	0.73	0.88	RF	
	Veh 2	0.00	-6.64	-2.00	-2.00		

JARI에서 시행한 실차 충돌 테스트(45건) (Ishikawa, 1994)를 바탕으로 정상 차량들 간의 다양한 충돌 형태들과 속도 등을 참조하였고, 펑크 차량에서의 충돌 형태들을 동등하게 구성하고 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 차량 모델은 국내 차량을 특정화 하여 설정하였고, Table3에 요약한 것처럼 소형차량, 중형차량, 대형차량으로 구분하였다.

차량들의 충돌은 3개 그룹(소형-대형, 중형-중형, 중형-대형 차량간)으로 하였고, 펑크 효과를 강조하기 위

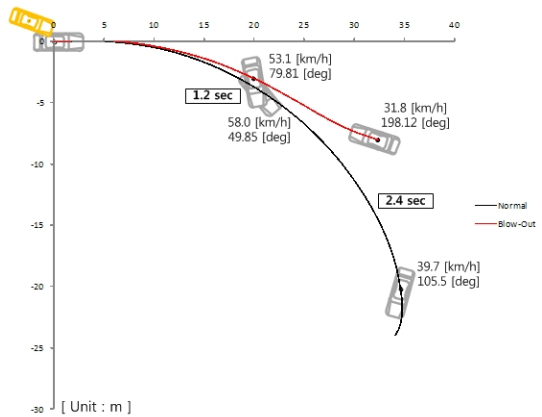
해 가벼운 차량을 피충돌 차량으로 설정하였다. 차량간의 충돌 속도 조건은 피충돌 차량 기준으로 3가지(동등한 속도, 속도가 빠르거나 혹은 느린 경우)로 구분하였으며, 측면 충돌의 경우에는 대개 후륜 핑크 그리고 정면 충돌의 경우에는 전륜 핑크로 고려하였다. 이는 시뮬레이션 분석을 통하여, 측면 충돌에서는 전륜 핑크로 고려하면 두 차량이 서로 계속 간섭하는 경우가 많아 거동의 확인이 어려웠고, 결국 핑크 효과가 상대적으로 미흡하게 나타나기 때문이다.

실차 충돌 테스트의 충돌 상황에 대해서는 전술한 그룹별로 각각 17건(측면충돌 11건, 정면충돌 6건) 모두 51건의 시뮬레이션을 수행하였으며, 타이어 핑크로 인한 차량의 충돌 거동 변화가 비교적 뚜렷한 16건(측면충돌 13건, 정면충돌 3건)의 충돌해석 결과를 Table 4에 요약하였다. Table 4에는 충돌 전 속도, 정상 차량과 핑크 타이어 차량의 각속도 그리고 충격 지점(핑크 타이어 위치)을 보여주고 있으며, 핑크 차량의 각속도의 경우 시뮬레이션에서 설정한 기본 값인 300ms를 기준으로 확인하였다.

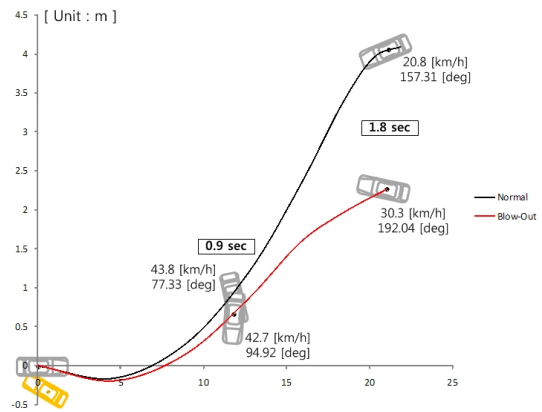
충돌 시뮬레이션 결과, 타이어 핑크로 인한 충돌 거동의 변화는 대부분 측면충돌의 경우에 많이 발생하였다. 특히, 90도 측면 충돌일 때는 모든 그룹에서 거동의 변화를 확인할 수 있다. 대개 핑크 차량은 정상 차량에 비해 이동하는 거리는 감소하고 차량의 회전각도는 증가함을 볼 수 있다. 이는 타이어 핑크로 인해 각종 저항력과 차체 변형 등의 증가로 차량이 받는 운동량은 다소 감소하는 것에 일부 기인한다.

또한, 핑크가 발생함에 따라 핑크 타이어를 중심으로 모멘트가 작용하여 충돌이 끝날 때의 각속도는 정상 차량간의 충돌사고에서 보다 약간(0.2-0.3rad/s) 큰 값을 확인하였다. 반면 정면충돌의 경우, 전체 시뮬레이션에서 거동 변화가 확인되어지는 비율은 아주 작다. 이러한 경우 각속도의 변화량은 0.1-0.15rad/s의 값을 보여주고 있고, 대부분 정면충돌에서는 충돌 과정에서 차량이 서로의 진로를 간섭하므로 상세한 거동의 변화를 확인할 수가 없었다.

Figure 11에 제시한 2가지 경우에서 흑색(진한색)은 정상 피충돌 차량의 충돌후 거동, 적색(흐린색)은 핑크 피충돌 차량의 충돌후 거동을 보여주고 있다. Figure 11(a)는 충돌 형태가 30도인 측면 충돌이며, 속도는 피충돌 차량의 경우 67km/h, 충돌 차량의 경우는 48km/h이다. 충돌후 1.2초까지는 거의 유사한 거동을



(a) Crash angle: 30 degree



(b) Crash angle: 150 degree

Figure 11. Post-impact motion : vehicle 1(gray), vehicle 2(yellow)

보이고 있으나, 이후에는 좌측 편향되는 핑크 차량(좌측 후륜)과 정상 차량의 경로 차이가 비교적 크다. 1.2초 경과 후 두 차량의 회전각도는 약 30도의 차이를 보이고 있으나, 2.4초에서는 핑크 차량은 198도, 정상 차량의 경우 105도 회전한 것을 볼 수 있다. 또한 2.4초에서 핑크 차량은 최종위치에 도달하였지만 정상 차량은 2.4초 이후에도 계속 진행을 하여 약 1초 후에 최종위치에 도달하게 된다. Figure 11(b)는 충돌 형태가 150도인 측면 충돌이며, 속도는 피충돌 차량의 경우 58km/h, 충돌 차량의 경우는 43km/h이다. 이 경우, 0.9초에서 회전각도는 약 20도의 차이를 보여주며 1.8초 경과해서는 35도 가량 차이를 보여준다. 이 경우에도 우측 후륜이므로 핑크 후 차량의 거동은 정상 거동보다 오른쪽으로 편향되고 있다.

한편, Figure 11(b)에 보여지는 충돌에서 피충돌 차량을 Table 5에 보여지는 대형트럭으로 바꾸어 시뮬레

Table 5. Truck specification data

Truck	Mass (kg)	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Wheel base(m)	Tire data
Truck	7080	10.125	2.45	3.105	5.8	245/70R19

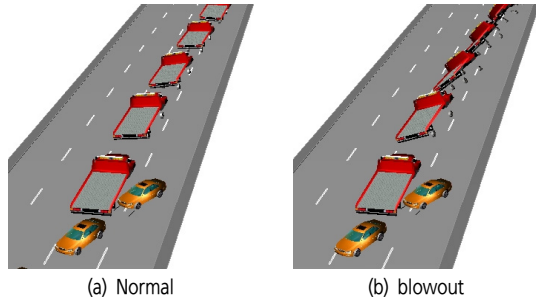


Figure 12. Post-impact truck motion: rear-right blowout

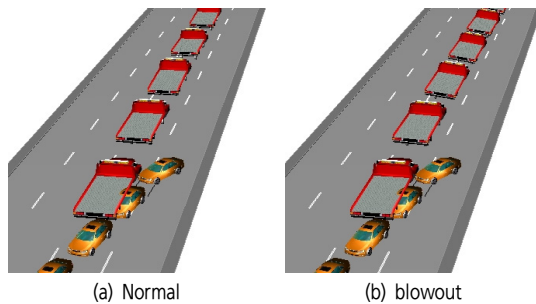


Figure 13. Post-impact truck motion: front-right blowout

이션을 수행하였다. Figure 12는 정상 차량의 충돌후 거동과 우측 후륜펑크 차량의 충돌후 거동을 각각 보여 주고 있다. 펑크가 발생한 화물차량의 경우 Figure 11(b)에 보여지는 승용차와는 달리 좌우요동이 심해져 차체가 전복되는 것을 확인할 수 있다. 화물차량 충돌 과정 중 후륜 펑크 타이어는 잠기게 되고, 이로 인해서 횡력에 대응하는 힘이 0이 되며 차량은 앞 축을 기준으로 요잉 모멘트가 발생하며 계속 불안정하게 되어 결국 전복하게 된다.

Figure 13은 후륜 충돌이 아닌 전륜 충돌(우측 전륜 펑크)로 상황을 바꾸어 실행한 시뮬레이션 결과이다. 정상상태의 경우 승용차와 충돌 이후에도 화물차량의 거동은 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한, Figure 12에서 보여지는 상황과는 달리 펑크가 발생해도 화물차량은 전복되지 않을 뿐만 아니라 정상 차량과 비교하여도 경로의 차이는 확인하지 않다. 이는 충돌 과정 중 펑크로 인하여 우측으로 편향하게 되며, 전륜 펑크 타이어는 잠기고 차량 뒤축을 기준으로 복원 모멘트가 발생하여 정상 주행이 가능할 수 있기 때문이다.

결론

본 논문에서는 펑크 타이어 힘과 관련한 시험 연구 결과들을 다양하게 수집하고 분석하여, 펑크 타이어 차량 동적 거동 해석을 위한 구름저항력, 셀프 얼라이닝 토크, 코너링 강성, 반경방향 강성과 같은 관련 계수들의 적정값을 추정하였다. 이러한 타이어 펑크 관련한 입력계수들을 자동차 사고 해석 프로그램(PC-Crash)에서 적절하게 설정하여 타이어 펑크 효과를 구현한 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션 해석 결과들은 실제 사고 사례들과 비교 분석하였다. 전륜 또는 후륜에서 펑크가 발생할 경우 차량은 모든 속도에 대해서 펑크가 발생한 방향으로 편향하는 것을 볼 수 있다. 다만, 후륜 펑크의 경우에는 실제 사고 사례나 혹은 시뮬레이션 프로그램들(PC-Crash와 HVE) 간에 전륜에 비하여 상당한 궤적 차이를 확인하였다. 이는 후륜 펑크의 동적 거동에 대한 민감성과 더불어 운전자의 대응운전(조향) 영향에 기인하는 것으로 여겨진다.

한편, 정상 차량들 간의 다양한 충돌 형태들과 속도 등을 참조하여, 펑크 차량의 충돌 유형들을 동등하게 구성하고 시뮬레이션 해석을 수행하여 펑크 차량 충돌 특성을 구하였다. 펑크 차량의 충돌 거동에서는 정상상태의 차량에 비해 이동 거리는 감소하고 차량 회전량은 증가함을 볼 수 있다. 이는 타이어 펑크로 인해 각종 저항력과 차체 변형 등의 증가로 차량이 받는 운동량은 다소 감소하는 것으로 보여진다. 또한 펑크가 발생함에 따라 펑크 타이어를 중심으로 모멘트가 작용하여 충돌이 끝날 때 각속도가 정상 차량보다 다소 큰 것으로 나타났다. 또한 펑크 차량이 정상 차량과 확연히 다른 거동을 보이는 상황은 측면충돌의 경우에 다수 확인할 수 있었다. 하지만 앞축에서 충돌이 발생할 경우는 충돌 차량이 서로의 진로를 간섭하므로 상세한 거동의 변화는 확인할 수 없었다. 타이어 펑크가 결부된 승용차간의 충돌에서는 차량이 충돌 후에 미끄러지게 되면서 정지하게 된다. 하지만 승용차보다 무게중심이 높은 화물차량의 경우에는 충돌 후 펑크 발생 시 전복의 가능성이 높음을 확인 할 수 있다.

본 연구에서 제시하는 타이어 펑크 혹은 손상에 대한 고려는, 차량의 최종 정지 위치나 자세로부터 차량의 충돌 거동 등을 정확하게 파악하려고 하는 사고 재구성 해석에 기여할 수 있을 것이다.

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

- Blythe W., Day T.D., Grimes W.D. (1998), 3-Dimensional Simulation of Vehicle Response to Tire Blow-outs, SAE Paper 980221.
- Brown C., Sessions J. (1996), Variable Tire Pressures for Tropical Forests? "Synthesis of Concept and Applications", FO, W2809, 125.
- Clark S.K. (1981), The Mechanics of Pneumatic Tires, NBS Monograph 122, US Government Printing Office, Washington DC.
- Collier B.L., Warchol J.T. (1980), The Effect of Inflation Pressure on Bias, Bias-Belted and Radial Tire Performance, SAE Paper 800087.
- Engineering Dynamics Corporation (2006), HVE Manual, Beaverton, Oregon, USA.
- Grogan R.J. (1972), The Effect of Tyre Deflation on Vehicle Behaviour, Journal of the Forensic Science Society, 12(1), 285-302.
- Ishikawa H. (1994), Impact Center and Restitution Coefficients for Accident Reconstruction, SAE Paper 940564.
- Kasprzak E.M., Lewis K.E., Milliken D.L. (2006), Tire Asymmetries and Pressure Variations in the Radt/Milliken Nondimensional Tire Model, SAE Paper 2006-01-1968.
- Korea Academy of Traffic Accident Investigation (2012), 4972 Handling an Accident, 11, 22-30.
- Korea Transportation Safety Authority, Press Releas, <http://www.ts2020.kr/ind/prt/InqDetNANNewsData.do?bbsCd=203&bbsSn=456>, 2014.
- Lozia Z. (2005), Simulation Tests of Biaxial Vehicle Motion after a "Tire Blow-Out", SAE Paper 2005-01-0410.
- Parczewski K. (2013), Effect of Tyre Inflation Pressure on the Vehicle Dynamics During Braking Manouvre, Eksploatacja I Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 15(2), 134-139.
- Pillai P.S. (2005), Inflation Pressure Effect on Whole Tyre Hysteresis Ratio and Radial Spring Constant, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 13(2), 110-116.
- Robinette R.D., Fay R.J. (2000), Drag and Steering Effects From Disablements of Run Flat Tires, SAE Paper 2000-01-1316.
- Schmeitz A.J.C., Besselink I.J.M., Hoogh J.D., Nijmeijer H. (2005), Extending the Magic Formula and SWIFT Tyre Models for Inflation Pressure Changes, Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, 201-225.
- Smith N.D. (2004), Understanding Parameters Influencing Tire Modeling, 2004 Formula SAE Platform.
- Vorotovs G.S., Akicevic B.B., Mitic S.R., Stamenkovic D.D. (2013), Determination of Cornering Stiffness Through Integration of A Mathematical Model and Real Vehicle Exploitation Parameters, FME Transactions, 41(1), 66-71.
- Wong J.Y. (2008), Theory of Ground Vehicles, 4th ed, John Wiley & Sons, Inc., United States.
- <http://www.youtube.com/watch?v=2bCnFVvuIS8>
- http://www.youtube.com/watch?v=nHCccVDg_hc
- ♣ 주 작성자 : 한인환
- ♣ 교신저자 : 한인환
- ♣ 논문투고일 : 2014. 5. 27
- ♣ 논문심사일 : 2014. 7. 22 (1차)
2014. 8. 6 (2차)
- ♣ 심사판정일 : 2014. 8. 6
- ♣ 반론접수기한 : 2015. 2. 28
- ♣ 3인 익명 심사필
- ♣ 1인 abstract 교정필