*Transactions of KSAE, Vol. 25, No. 6, pp.758-766 (2017)*

Copyright ⓒ 2017 KSAE / 151-12
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
**DOI https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.6.758**

<기술논문>

# 차량 전복사고에서 탑승자 거동에 대한 동적 해석모델 연구

백 세 룡[1)] · 김 천 호[1)] · 조 정 권[2)] · 임 종 한[3)] · 윤 준 규[*3)]

가천삼송자동차연구센터 연구팀[1)] · 교통안전공단 울산지사[2)] · 가천대학교 기계공학과[3)]

# A Study on the Dynamic Analysis Model for Passenger Behavior in a Vehicle's Rollover Accidents

Seryong Baek[1)] • Cheonho Kim[1)] • Jeongkwon Cho[2)] • Jonghan Lim[3)] • Junkyu Yoon[*3)]

[1)]*Research Team, Gachon-Samsong Automotive Research Center, 1342 Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 13120, Korea*
[2)]*Ulsan Branch Office, Korea Transportation Safety Authority, 90-1 Beonyeong-ro, Nam-gu, Ulsan 44721, Korea*
[3)]*Department of Mechanical Engineering, Gachon University, Gyeonggi 13120, Korea*
***(Received 3 July 2017 / Revised 25 August 2017 / Accepted 14 September 2017)***

**Abstract** : A vehicle rollover refers to a type of vehicle crash in which a vehicle rotates at least 90 degrees on the basis of its driving direction. Rollovers in South Korea are found to have a fatality rate 3.5 times higher than front collisions. This study analyzed the movements of a vehicle using PC-Crash and a passenger's movements using MADYMO in order to analyze a passenger's movements in the event of a vehicle rollover. Results of a test conducted under the dolly test conditions of FMVSS 208 after placing dummies on the driver's seat and the front passenger seat were compared with simulation. Regarding movements of the vehicle, data acquired by a sensor installed on the outside of the vehicle were compared with the results of simulation. As for the passenger's movements, a video footage of the vehicle interior were compared with the results of simulation. PC-Crash and MADYMO use different coordinate systems. Owing to this issue, only two-dimensional passenger movements in a car crash can be analyzed. This study investigated methods for simulating the three-dimensional movements of a vehicle by linking the two programs. Results showed that when one free joint element was applied to $D_x$, $D_y$ and $D_z$ for translation motion and $R_y$, $R_x$ and $R_z$ were applied in sequence to three revolute joint elements for rotational motion, as methods for linking the dynamic behavior of PC-Crash to MADYMO, the movements of the two vehicles corresponded exactly with each other and the passenger's movements also showed very similar forms.

**Key words** : Traffic accident(교통사고), Rollover crash(전복 충돌), PC-Crash(피씨 크래시), MADYMO(마디모), Passenger behavior(승객 거동), Dolly test(전복 시험)

## 1. 서 론

경찰청 통계자료에 의하면 2015년 우리나라에서 발생한 전도 및 전복 사고의 사망자는 232명으로 전체 교통사고 사망자의 약 5 %에 불과하지만 발생건수로 비교했을 때, 정면충돌사고의 사망자 발생비율보다 약 3.5배 높은 것으로 파악되었다.[1)] 차량전복이란 차량의 진행방향 축을 기준으로 90도 이상 회전이 일어나는 경우를 말한다. 차량의 전복을 결정하는 요소는 초기속도, 차량윤거, 현가장치의 강

*A part of this paper was presented at the KSAE 2017 Spring Conference
*Corresponding author, E-mail: jkyoon@gachon.ac.kr

성 등이며, 특히 차량의 속도가 빠를수록 전복이 발생하기 쉬운 것으로 확인된다.[2] 이와 같이 차량의 전복은 빠른 속도에서 일어나며, 차량의 회전으로 인한 탑승자의 움직임이 크기 때문에 상해 또한 커질 수 있다. 특히 탑승자가 안전벨트를 하지 않은 경우 좌석 또는 차량에서 이탈하게 되어 상해확률은 더욱 커진다. 교통사고에서 사고의 피해자는 자동차손해배상보장법에 따라 가해 차량의 보험사로부터 그 손해를 보상받도록 되어있다.[3] 따라서 차량이 단독으로 전복사고가 일어난 경우 해당 차량의 보험사는 동승자의 피해에 대한 보상을 해야 할 뿐만 아니라 운전자는 사고의 상황에 따라 법적 책임이 따를 수 있다. 일부 운전자들은 처벌을 피하기 위해 사망한 탑승자를 운전자로 만드는 경우도 발생한다. 이러한 경우 운전자 식별을 위해 여러 가지 조사기법이 존재한다. 일반적으로 많이 사용되는 3점식 안전벨트의 경우 버클을 기준으로 몸통 쪽을 감싸는 Should-belt와 허리 쪽을 감싸는 Lap-belt로 나누어진다. 우리나라는 차량의 왼쪽에 운전석이 위치하고 있으므로 운전자는 왼쪽어깨에 Should-belt가 닿게 되며, 보조석 탑승자의 경우는 오른쪽 어깨가 Should-belt에 닿게 된다. 이때 사고가 발생하면 관성에 의해 운전자의 몸이 앞으로 나가며 벨트와 탑승자의 의복 간에 마찰이 일어나며 흔적이 남거나 신체에 손상을 주게 되는 경우가 발생하여 운전자를 식별할 수 있다. 또한 안전벨트를 착용하지 않고 사고가 발생하는 경우 차량은 감속이 일어나지만 탑승자는 관성에 의해 계속 앞으로 나가려는 성질에 의해 차량 내부의 구조물과 충돌하게 된다. 이때 발생하는 인체의 손상과 차량 내부 구조물의 손상을 비교하여 운전자와 탑승자를 구분할 수 있다. 하지만 전복이 일어나는 차량에서 안전벨트를 하지 않은 다수의 탑승자가 좌석 또는 차량에서 이탈하여 사망하는 경우 운전자를 찾는 것은 매우 어렵다. 차량 전복에 관련된 연구동향으로 이은덕 등[4]은 국가별 전복사고 현황을 조사하여 전복사고가 전체 교통사고의 약 15 %를 차지하는 반면 사망률은 35 %에 달하는 것을 확인하였고, 차량 전복시험이 실제 교통사고를 잘 모사하는지 검토하였고, 또한 방정훈과 이병훈[5]은 경사면에서 선회 운동하는 SUV 차량의 Roll 거동해석을 다물체 동역학 해석프로그램을 이용해 수행하였으며, 그 결과로 현가장치와 타이어의 마찰이 적절하게 모델링된 경우 시뮬레이션을 통한 전복특성을 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. Steffan과 Moser[6]은 교통사고 재현 및 분석 프로그램을 이용하여 전복사고에서의 차량 움직임을 실제 시험과 비교 분석을 통하여 차량의 타이어, 현가장치, 차체와 노면 사이의 마찰계수가 전복사고의 재현에 있어 매우 중요한 요소라는 것을 확인하였다. 교통사고분석은 일반적인 시험과는 다르게 사고 당시의 상황을 정확하게 알 수 없기 때문에 다양한 조건을 설정하고 매우 많은 횟수의 해석을 반복 수행하며, 그 결과를 검증하기 위해 실제 차량의 파손상태, 노면의 흔적 등과 비교분석하는 절차를 밟는다. 따라서 시뮬레이션 시간을 단축하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 차량전복이 발생했을 때 탑승자의 거동을 파악하기 위한 분석시간을 줄이기 위해 차량의 전복사고현상을 교통사고 분석프로그램인 PC-Crash[7]를 이용하여 Roll, Pitch, Yaw 거동을 도출하였으며, 그 결과를 탑승자 거동 및 상해분석 프로그램인 MADYMO[8]에 적용하여 탑승자 거동을 분석하였다.

## 2. 전복시험 및 해석방법

차량의 동적 전복시험방법에는 Dolly test, Inverted drop test, CRIS(Controlled rollover impact system), JRS(Jordan rollover system)등의 다양한 테스트 방법이 있다. 동적 전복시험은 자동차의 전복사고에 대한 안전성을 평가하기 위해 수행되고 있으며, 각 국가의 법규 및 차량 제조사의 목적에 따라 다양한 방법으로 수행되고 있다. 우리나라 역시 자동차 안전기준에 따라 동적 및 정적 시험을 적용하고 있으나 시험의 용이성 및 반복성 등의 문제로 정적시험을 통과한 경우 동적시험을 면제해주고 있다. 하지만 정적시험 평가방법이 실제 전복사고를 재현하는데 한계가 있다는 연구결과가 제시되고 있는 실정이다.[4]

본 연구에서는 미국의 FMVSS 208 등에 의한 시험방법 중 하나인 Dolly test 결과를 이용하였다. Dolly test는 대차 위에 시험차를 올린 후 48.3 km/h

의 속도로 대차를 이동시켜 전복을 일으키는 평가 방법이다.

### 2.1 전복시험

본 연구에서는 OPEL VECTRA 차량의 운전석과 보조석에 더미를 착좌시켰으며, 안전벨트는 착용하지 않은 조건으로 시험하였다. Fig. 1과 Table 1은 시험 조건과 차량의 제원을 나타낸 것이다. 시험장치로 차량내부에 설치된 카메라 및 데이터 수집장치와 외부카메라로 구성되어있다. 내외부에 설치된 카메라를 통해 차량 및 더미의 거동을 수집하였고, 차량에 설치된 데이터 수집 장치는 차량의 회전정보인 Roll, Pitch, Yaw 정보를 수집하는데 사용되었다.

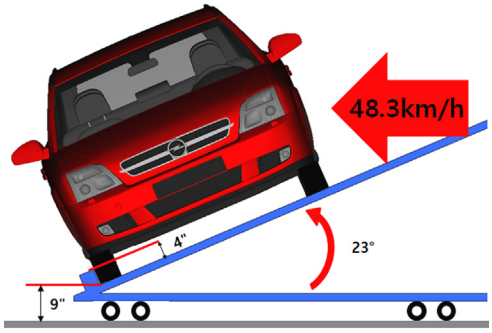


Fig. 1 Rollover test condition

Table 1 The specification of test vehicle

| Maker model | Length (mm) | Width (mm) | Height (mm) | Wheel base (mm) | Weigh (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| OPEL VECTRA | 4,495 | 1,710 | 1,420 | 2,635 | 1,215 |

Fig. 2 Rest position of dummy

시험은 시험차량이 진행방향을 축으로 약 2회전 후 시험장 끝에 설치된 구조물에 보조석 뒷바퀴가 걸린 상태로 정지하였다.

Fig. 2는 더미의 최종 위치를 나타낸 것으로 더미는 시험 중 좌·우 방향으로 큰 거동을 보였으며, 차량의 정지와 동시에 운전석 더미가 보조석 쪽으로 쓰러진 상태로 최종 위치하였다.

### 2.2 해석방법

MADYMO 프로그램은 탑승자 거동해석 프로그램으로 최근 저속 추돌사고에서 경추 상해를 주장하는 경우 상해 여부를 판단하기 위한 목적으로 주로 사용되고 있다.[9] 하지만 차량을 모델링하고 시뮬레이션 하는데 매우 많은 시간을 필요로 한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 차량 충돌해석 프로그램인 PC-Crash를 이용해 차량의 거동을 분석하고, MADYMO에서 탑승자의 거동만 분석하는 기법을 이용해 분석시간을 매우 단축시킬 수 있다. 현재 두 프로그램을 연계하여 해석하는 방법은 국내외에서 이미 사용되고 있다.[10] 하지만 두 프로그램이 사용하는 회전방법이 서로 달라 2차원 운동에서만 제한적으로 사용된다. 2차원에서의 운동은 $D_x$, $D_y$, $R_z$ 로만 움직이므로 기존의 연계방법으로 대부분의 교통사고 분석이 가능하지만 전도 또는 전복이 일어나는 3차원 운동에서의 연계해석은 두 프로그램의 데이터 호환의 어려움으로 사용되지 않고 있다. 본 연구에서 전복과 전도 같은 3차원 운동이 발생하는 사고에서의 차량운동을 연계하는 방법에 대해 알아보고 해석을 수행하였다.

#### 2.2.1 차량의 회전

PC-Crash는 차량의 기본적인 제원, 현가장치, 타이어 특성 등이 적용되어 있으며 쉽게 그 값을 변경해 차량을 구성하여 프로그램에 적용할 수 있다. 또한 차량의 구성요소가 차체를 이루는 4개의 강체와 각 바퀴를 이루는 4개의 강체, 현가장치는 스프링 댐퍼로 매우 단순하게 모델링되어 빠른 시간에 해석할 수 있다는 장점이 있다. 회전의 계산은 로테이션방법을 이용하여 차량의 회전운동을 나타내며 출력할 수 있는 데이터는 글로벌좌표 기반의 회전데이터와 차량 로컬 좌표 기반의 회전데이터를 출력

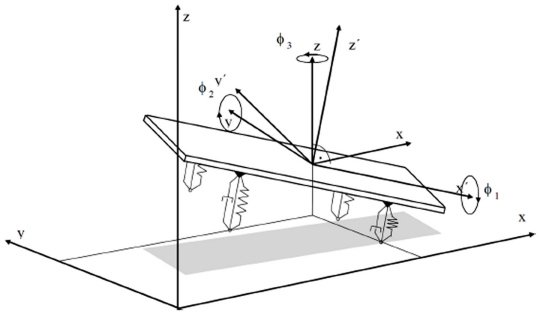


Fig. 3 The coordinate systems of PC-Crash

할 수 있다. 본 연구에서는 MADYMO 프로그램과의 연계를 위해 글로벌좌표 기반의 회전데이터를 사용하였다.[7)]

Fig. 3은 PC-Crash의 좌표체계로 차량의 회전은 무게중심 위치를 기준으로 식 (1), (2), (3)과 같이 계산된다.

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_1) & \sin(\phi_1) \\ 0 & -\sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} \cos(\phi_2) & 0 & \sin(\phi_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\phi_2) & 0 & \cos(\phi_2) \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$T_3 = \begin{pmatrix} \cos(\phi_3) & \sin(\phi_3) & 0 \\ -\sin(\phi_3) & \cos(\phi_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

차량 로컬좌표를 기준으로 3축의 회전은 $T_1$, $T_2$, $T_3$로 나타낼 수 있으며, 식 (4), (5)와 같이 가정하면, 식 (6), (7)에 따라 글로벌 시스템으로 계산된다.

$$s_1 = \sin(\phi_1), s_2 = \sin(\phi_2), s_3 = \sin(\phi_3) \tag{4}$$

$$c_1 = \cos(\phi_1), c_2 = \cos(\phi_2), c_3 = \cos(\phi_3) \tag{5}$$

$$T = \begin{pmatrix} c_2 \cdot c_3 & c_2 \cdot s_3 & -s_2 \\ s_1 \cdot s_2 \cdot c_3 - c_1 \cdot s_3 & s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 + c_1 \cdot c_3 & s_1 \cdot c_2 \\ c_1 \cdot s_2 \cdot c_3 + s_1 \cdot s_3 & c_1 \cdot s_2 \cdot s_3 - s_1 \cdot c_3 & c_1 \cdot c_2 \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} c_2 \cdot c_3 & s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 - c_1 \cdot s_3 & c_1 \cdot s_2 \cdot s_3 + s_1 \cdot s_3 \\ c_2 \cdot s_3 & s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 + c_1 \cdot s_3 & c_1 \cdot s_2 \cdot s_3 - s_1 \cdot s_3 \\ -s_2 & s_1 \cdot c_2 & c_1 \cdot c_2 \end{pmatrix} \tag{7}$$

#### 2.2.2 차량의 충돌

차량과 노면의 충돌은 차량을 구성하는 타원체가 노면을 침투하는 정도를 계산하여 외력을 가하는 방법으로 계산된다. 차체는 4개의 타원체로 모델링되며 각각의 타원체 크기는 Fig. 4와 같이 차량의 제원 및 외형의 크기를 조절하는 방법으로 변경할 수 있다.

노면과 차량의 접촉 계산은 Fig. 5와 식 (8), (9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.[7)]

$$\overline{n_e} = -\overline{n_p} \tag{8}$$

$$\lambda = |P_e - P_p| \tag{9}$$

$$\overline{F_t} = |\overline{F_n}| \cdot \mu \cdot \| \overline{V_{Pp}} - \overline{V_{Pe}} \| \tag{10}$$

여기서 $\lambda$은 Ellipsoid가 노면에 침투한 깊이를 나

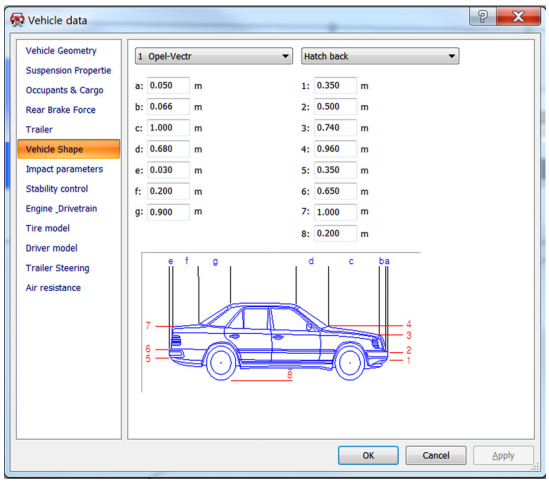


Fig. 4 The coordinate systems of PC-Crash

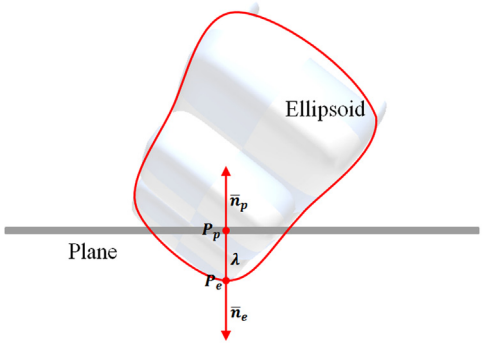


Fig. 5 The ellipsoid contact

타내며, $\overline{F_t}$은 접선 방향에 대한 접촉력으로 수직 접촉 성분인 $\overline{F_n}$에 마찰계수 $\mu$와 속도성분인 $\overline{V_{Rp}}$와 $\overline{V_{Rx}}$로부터 계산된다.

### 2.3 탑승자의 운동

본 연구에 사용된 시험자료에 따르면 운전석과 보조석에 탑승한 더미 모델이 차량의 운동에 따라 내부에서 좌우로 거동하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 현상을 모사하기 위해 MADYMO 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 2.3.1 MADYMO 모델링

본 연구에서는 MADYMO 시뮬레이션을 위해 Euler 회전을 적용하였다.[8] 두 프로그램의 서로 다른 회전체계로 인해 조인트를 새롭게 모델링하는 방법으로 회전운동을 일치시켰다. Fig. 6은 차량 모델의 구성도를 나타낸 것으로 차량의 무게중심점에 한 개의 Free Joint 요소와 세 개의 Revolute Joint 요소를 적용하였다.

차량의 병진운동 $D_x$, $D_y$, $D_z$는 하나의 Free Joint 요소에 적용하였으며, 회전운동 $R_x$, $R_y$, $R_z$는 세 개의 Revolute Joint 요소에 각각 적용하였다. 두 프로그램간의 회전계산방법이 다르기 때문에 회전운동은 $R_y$, $R_x$, $R_z$의 순서로 적용해야만 차량의 움직임이 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 승객석 내부를 모델링한 것으로 승객석은 탑승자가 차량내부에서 움직이는 것을 관찰하기 위해 78개의 Surface-Ellipsoid 요소로 차체 및 시트, 스티어링 휠 등을 모델링하였고, 1개의 Surface-Cylinder 요소로 대시보드 패널을 모델링하였다.

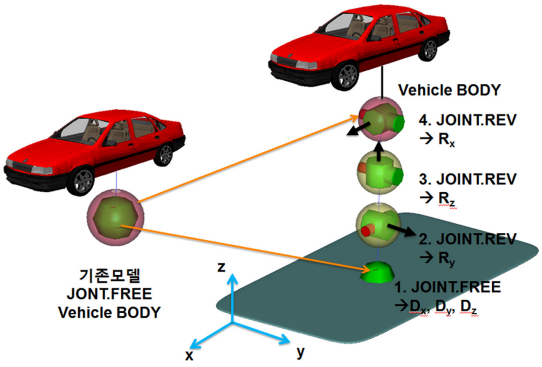


Fig. 6 MADYMO model for prescribed motion using the data of PC-Crash

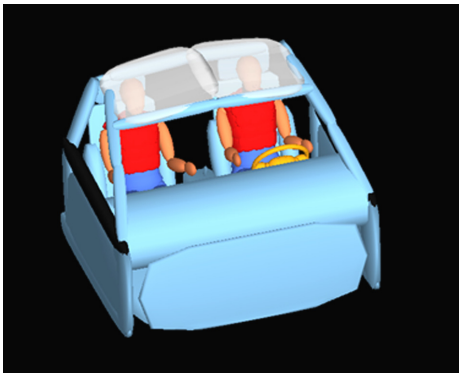

Fig. 7 MADYMO model

## 3. 해석결과

앞서 서술했던 바와 같이 두 개의 프로그램을 이용해 차량의 전복 및 전도 사고를 시뮬레이션하여 Table 2에 해석시간을 나타내었다.

Table 2 The solving time for simulation

| | MADYMO | PC-CRASH + MADYMO |
|---|---|---|
| Solving time | 370 minutes | Under 1 minute |
| | | 90 minutes |

*Intel(R) Core(TM) i7=4702HQ CPU @ 2.20GHz, Ram 16GB

MADYMO 프로그램만 이용해 시뮬레이션 했을 때와 차량의 운동은 PC-Crash를 이용했을 때 계산시간을 비교하면 두 개의 프로그램을 이용했을 때 약 1/4 수준으로 해석시간이 감소한 것을 나타내었다. 따라서 PC-Crash 및 MADYMO 프로그램을 조합해서 활용하는 방법이 훨씬 해석시간이 단축되므로 효율적인 방법이라고 판단할 수 있었다. 시뮬레이션에서 얻어진 결과 분석은 데이터 수집장치와 영상을 통해 수집된 결과를 시뮬레이션 결과와 비교분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

### 3.1 PC-Crash 시뮬레이션 결과

차량의 움직임은 차량 내부에 장착된 데이터 수집장치를 통해 취득하였으며, 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교분석하였다. 또한 시험 장면을 촬영

한 동영상과 시뮬레이션결과의 3차원 영상을 비교하였다. Fig. 8은 본 연구에서의 주요 움직임인 Roll 거동에서 시험과 시뮬레이션의 각속도를 비교한 것으로 약 1.7 s까지 유사한 결과를 보였으나 약 1.7 s ~ 2.7 s 구간에서 다소 차이가 있는 것으로 확인되었다. Fig. 9는 Roll 각도를 나타낸 것으로 시뮬레이션이 약 0.1 s 정도 빠르게 회전하는 것을 볼 수 있지만 유사한 결과를 나타냈으며, 각속도와 동일한 구간에서 오차를 보이는 것으로 확인되었다.

강체모델을 사용하는 해석의 경우 외력이 작용해도 구조적 변화가 발생하지 않으며, 외력이 제거되면 원래의 상태로 복귀된다.

강 본 연구에 사용된 차량 모델도 강체 기반의 모델로 노면과 차량 루프 부분이 두 번째 충돌하는 경우 첫 번째 충돌에 의한 변형이 고려되지 않아 오차가 발생하는 것으로 확인되었다.

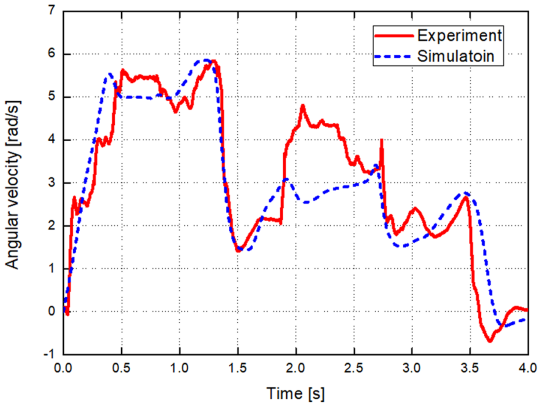


Fig. 8 Comparison of roll velocity

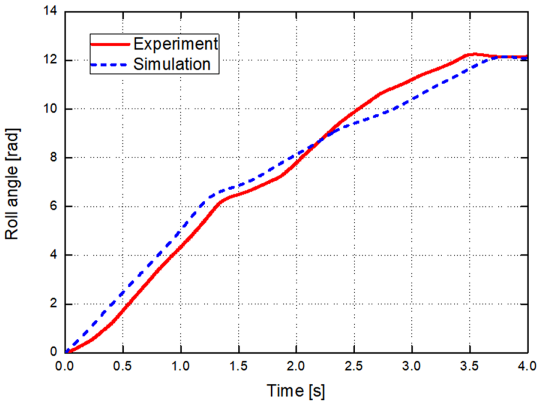


Fig. 9 Comparison of roll angle

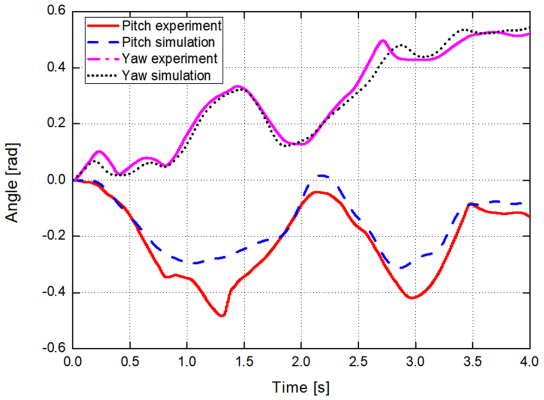


Fig. 10 Comparison of pitch and yaw angle

Fig. 10은 Pitch와 Yaw 각의 특성을 나타낸 것으로 시험과 해석의 결과를 비교한 것이다. Yaw 각은 유사한 거동을 나타냈으나 차량의 Y축 방향 움직임인 Pitch 값에서 다소 차이를 나타내었다. 실제 차량은 차체의 구조에 따라 전면부, 측면부, 후면부의 강성이 다르지만 프로그램에 적용된 차량 루프의 강성은 차체부분의 강성 값이 차량의 중량에 따라 자동적으로 적용되고, 1/4에 해당하는 값이 지붕부분에 적용된다.[9] 따라서 차체영역에 따른 강성 값이 세분화되어있지 않아 발생한 것으로 파악되었다. 하지만 그 차이가 크지 않으며 Roll 거동에 비해 상대적으로 매우 작은 거동을 보이므로 오차를 무시할 수 있다고 판단하였다. Fig. 11은 시험과 시뮬레이션의 차량 운동을 비교한 것이다.

### 3.2 MADYMO 시뮬레이션 결과

교통사고 분석을 위한 탑승자의 거동해석은 인체라는 매우 복잡한 조직의 특성을 파악하기 어렵고, 운전자의 자세와 근육의 긴장상태 등을 알 수 없기 때문에 활발하게 이루어지지 않고 있다. 하지만 대형 충돌사고나 전복과 같이 사람의 힘으로 대처할 수 없을 정도의 큰 외력이 가해지는 경우 시뮬레이션을 통해 그 경향을 분석할 수 있다. Fig. 12는 탑승자의 동적거동을 나타낸 것으로 좌측에 정렬된 사진은 실제 시험에서 더미의 움직임을 촬영한 사진이다. 시험 차량은 보조석 방향으로 23도 기울어진 상태로 48.3 km/h의 속도로 이동하는 대차에서 이탈 후 차량의 진행방향을 축으로 약 2회전 후 정지한다.

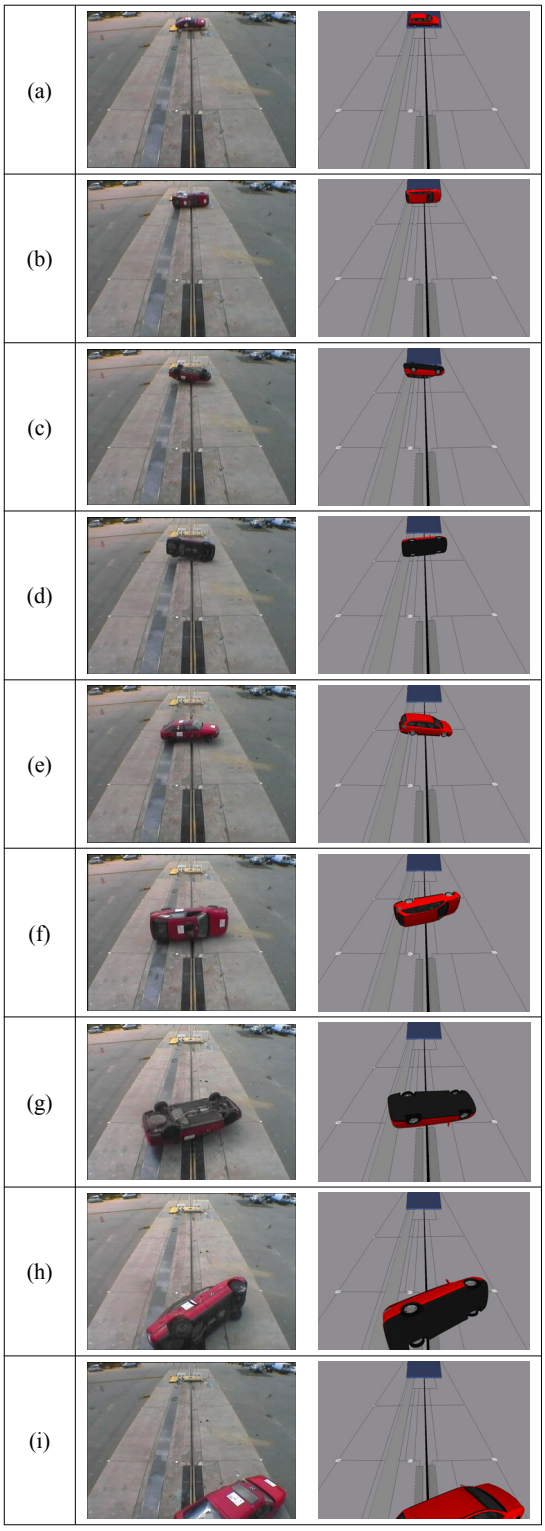


Fig. 11 Rollover test and simulation dynamics

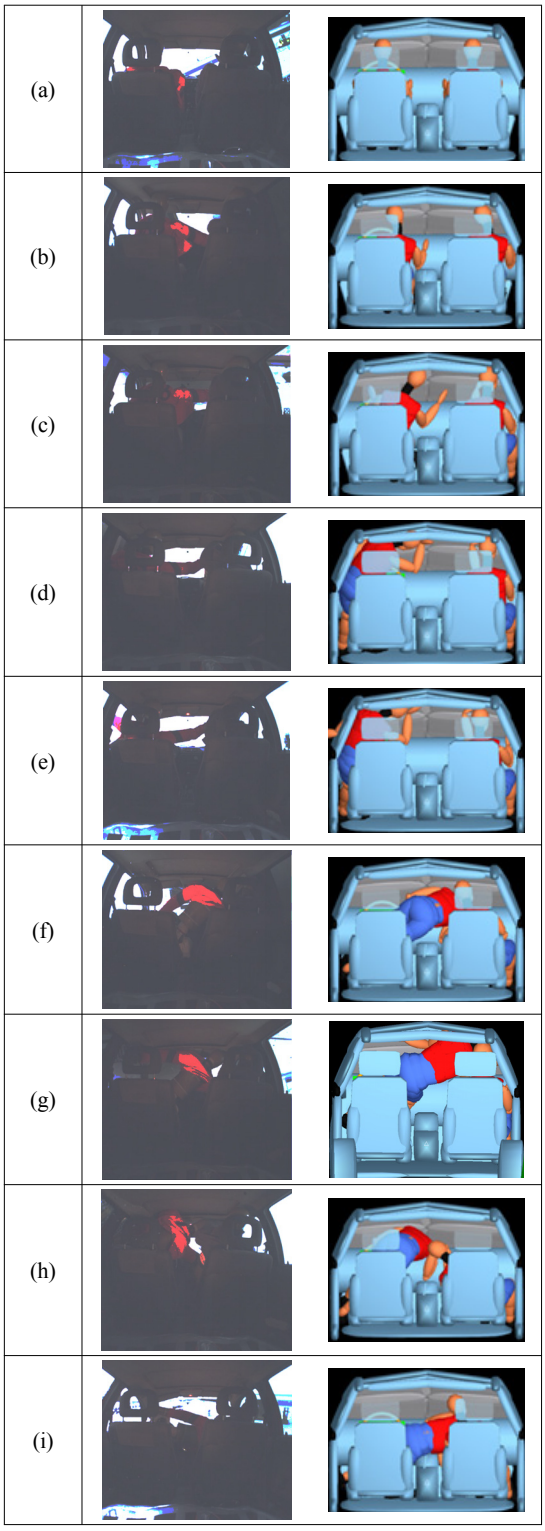


Fig. 12 Passenger dynamics

Table 3 The dynamics of passenger

| | Experiment contact | Simulation contact | Match |
|---|---|---|---|
| (a) | - | - | - |
| (b) | Driver head - Roof | Driver head - Roof | ○ |
| (c) | Driver head - Roof | Driver head - Roof | ○ |
| (d) | Driver left shoulder - Left door | Driver left shoulder - Roof | × |
| (e) | Driver head - Roof | Driver head - Roof | ○ |
| (f) | Driver head - Passenger head | Driver head - Passenger head | ○ |
| (g) | Driver head - Passenger head | Driver head - Passenger head | ○ |
| (h) | Driver left shoulder - Roof | Driver right shoulder - Passenger head | × |
| (i) | Driver torso - Passenger torso | Driver torso - Passenger torso | ○ |

이때 차량의 좌측면, 우측면과 지붕면이 노면과 접촉한다. Table 3은 탑승자가 움직일 때 차량 또는 보조석 탑승자와 접촉한 상태를 나타낸 것으로 (b)는 차량의 우측면이 노면과 최초 접촉한 시점, (c)는 차량의 지붕면이 노면과 접촉한 시점을 나타낸다. 이때 운전석에 탑승한 더미는 시험과 시뮬레이션 모두 머리가 차량의 천장에 접촉하는 모습을 보였다. (d)는 차량의 좌측면이 노면과 접촉하는 시점으로 시험에서는 더미의 왼쪽 어깨가 왼쪽 도어와 접촉하였으나 시뮬레이션에서는 천장과 접촉하는 결과를 나타냈다. (e), (f), (g)는 차량의 바퀴, 우측면, 천장이 순서대로 접촉한 시점으로 시험과 시뮬레이션이 유사한 결과를 나타냈다. (h)는 차량의 좌측면이 노면과 2차 충돌하는 시점으로 시험에서는 더미의 좌측 어깨가 천장과 접촉했지만 시뮬레이션에서는 좌측 어깨가 차량의 내부와 접촉하지 않았다. (i)는 차량이 최종 정차한 시점으로 운전석에 탑승한 더미가 보조석에 탑승한 더미 위로 쓰러진 상태로 최종 정지하는 형태를 나타냈으며, 시험과 시뮬레이션의 결과가 매우 유사하게 나타났다. 시험과 시뮬레이션에서의 전체적인 움직임은 유사하게 나타났으나 접촉 지점에서 미세한 차이를 나타냈다. 본 연구의 시뮬레이션에 사용된 탑승자 더미는 Hybrid III 모델로 전방 충돌시험에 사용되는 더미이다. 하지만 본 연구에서는 관절만 가지고 있는 마네킹 더미가 사용되었다.

더미는 시험의 방법에 따라 전방충돌, 측면충돌, 후방충돌용 등으로 다양한 모델이 있으며 해당 충돌에 따른 인체의 상해를 측정하기 위해 서로 다른 구조를 가지고 있다.[11] 하지만 전복충돌을 위한 더미는 아직 개발되지 않았다.

또한 본 연구의 시험과 같이 안전벨트를 하지 않은 경우 더미의 움직임이 매우 크기 때문에 파손의 위험이 있을뿐더러 데이터를 수집하기 위한 케이블로 인하여 움직임의 제한이 있을 수 있다. 따라서 센서가 장착되지 않은 더미를 사용했다. 실제 시험과 시뮬레이션에 사용된 더미는 조인트의 강성, 마찰 등이 다른 관계로 탑승자 운동에서 상이한 결과를 나타내는 것으로 확인되었다. 실제 사고에서도 탑승자의 자세와 근육의 긴장상태에 따라 거동이 달라질 수 있으므로 분석에 주의해야할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 차량전복이 발생했을 때 탑승자의 거동을 파악하기 위한 분석시간을 줄이기 위하여 탑승자 거동해석을 위한 시뮬레이션 모델을 제작하여 해석한 결과는 다음과 같다.

1) PC-Crash 및 MADYMO 프로그램 간의 동적거동을 연동하기 위한 방법[12]으로 차량의 병진운동은 $D_x$, $D_y$, $D_z$는 하나의 Free Joint 요소에 회전운동은 세 개의 Revolute Joint 요소에 각각 $R_y$, $R_x$, $R_z$의 순서로 적용했을 때 두 차량의 움직임이 정확하게 일치하는 것을 확인하였다.
2) 두 프로그램 간의 연동해석을 통해 교통사고 분석을 위한 해석시간을 약 1/4 수준으로 줄일 수 있어 효율적인 방법을 제시할 수 있었다.
3) 차량운동은 노면과 차체가 첫 번째 충돌하는 경우 매우 유사한 결과를 나타냈으나 동일한 부분이 다시 충돌하는 경우 강체로 구성된 시뮬레이션모델의 특성으로 인해 약간의 오차를 보이는 것을 확인하였다. 탑승자 운동에서도 더미 모델의 차이로 인한 오차가 발생했지만 그 차이가 크지 않고, 움직임의 경향을 분석하는 목적으로의

활용이 가능하다는 것을 확인하였다.

본 연구에서 사용된 해석기법은 교통사고분석을 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 다양한 시험 조건과 실제 교통사고 사례를 적용하여 충분한 검증이 더해진다면 안전장치 개발, 법규 시험 개정을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References


1) Traffic Accident Analysis System, Korean National Police Agency, http://taas.koroad.or.kr, 2017.
2) S. J. Kwon, C. J. Kim, C. Y. Bae, B. H. Lee, T. Y. Koo and C. T. Cho, "A Study on Vehicle Rollover Analysis Due to Tire Characteristic Factors," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.756-761, 2009.
3) Korean Ministry of Goverment Legislation, National Legal Information Center, http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=188425&efYd=20170101#0000, 2017.
4) E. D. Lee, J. W. Lee and G. H. Kim, "Current Research Trends for Vehicle Dynamic Rollover," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1022-1025, 2012.
5) J. H. Bang and B. H. Lee, "A Roll-behavior Analysis of SUV in Turning Motion on a Slop," Transactions of KSAE, Vol.22, No.4, pp.131-137, 2014.
6) H. Steffan and A. Moser, "How to Use PC-CRASH to Simulation Rollover Crashes," SAE 2004-01-0341, 2004.
7) PC-Crash 11.0 Operating and Technical Manual, DSD, 2016.
8) MADYMO Manuals R.7.6, TASS, 2015.
9) S. J. Kim, W. J. Jeon, W. S. Park, Y. I. Seo and K. Son, "Occupant Neck Injury Assessment Caused by Backward Movement of a Preceding Vehicle at a Low Impact Velocity," Transactions of KSAE, Vol.21, No.3, pp.66-73, 2013.
10) X. Y. Zhang, X. L. Jin and J. Shen, "The Computer Aided Analysis of the Bus Accidents Oriented to the Numerical Simulation of the Injury of the Human Body," WSEAS Transactions on Computers, Vol.10, No.5, pp.146-155, 2011.
11) K. Mizuno, Crash Safety of Passenger Vehicles, The University of Nagoya Press, Nagoya, 2012.
12) S. R. Baek, C. H. Kim, J. K. Cho, J. K. Yoon and J. H. Lim, "A Study on the Analysis of Occupant Motion in the Rollover Accident," KSAE Spring Conference Proceedings, p.925, 2017.