

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.2.217>

IIBC 2018-2-26

## LS-DYNA를 이용한 SUV와 승용차의 측면충돌 특성에 대한 연구

### A Study on the Side Impact Characteristics Occurred from SUV-to-Passenger Car using LS-DYNA

임종한\*

Jong-Han Lim \*

**요약** 차량의 측면은 전면이나 후면과 다르게 비대칭으로 설계되어있기 때문에 측면충돌이 일어나는 경우 충돌부위에 따라 차체의 변형정도가 크게 달라진다. 충돌로 인하여 차체에 탄성 및 소성 변형이 일어날 때 운동에너지가 차체로 흡수되어 운동량이 감소하게 된다. 일반적으로 교통사고분석은 충돌 후 차량의 거동을 운동량 보존법칙으로 분석하며 차체의 변형에 따른 에너지 흡수량은 반발계수를 적용해 그 오차를 보정한다. 본 연구에서는 차체의 구조와 각 부품의 재료특성을 적용한 유한요소 차량모델을 LS-DYNA로 해석하였으며, 그 결과를 분석하여 SUV와 승용차의 측면충돌에서 차량의 접촉부위에 따른 반발계수와 충돌감지시간을 도출하였다. 최종적으로 산출된 반발계수와 충돌감지시간을 실제 교통사고 사례에 적용하였을 때 결과오차의 개선효과를 얻었다. 유한요소해석 모델을 이용하여 도출한 초기 입력값을 적용했을 때 기존의 분석기법보다 해석의 신뢰도가 높다는 결과를 얻게 되었다.

**Abstract** Since the sides of a vehicle are designed asymmetrically unlike its front or rear, the degree of deformation of the car body greatly differs depending on the site of collision if a broadside collision takes place. When elastic deformation and plastic deformation occur in the car body occur due to a collision, the kinetic energy is absorbed into the body, and the momentum decreases. Generally, an analysis of traffic accidents analyzes the vehicle's behavior after a collision by the law of momentum conservation and corrects the error of the amount of energy absorption due to the deformation of the car body, applying a restitution coefficient. This study interpreted a finite element vehicle model applying the structure of the car body and the material properties of each part with LS-DYNA, analyzed the result and drew the restitution coefficient and the depth of penetration according to the contact area of the vehicle in a broadside collision between an SUV and a passenger car. When the finally calculated restitution coefficient and depth of penetration were applied to the examples of the actual traffic accidents, there was an effect on the improvement of the error in the result. It was found that when the initial input value, drawn using the finite element analysis model, it had a higher reliability of the interpretation than that of the existing analysis techniques.

**Key Words** : Side Impact, LS-DYNA, Coefficient of Restitution, Crsach detecting time, Depth of Penetration

\*정회원, 가천대학교 기계공학과  
접수일자: 2018년 1월 22일, 수정완료: 2018년 2월 22일  
게재확정일자: 2018년 4월 6일

Received: 22 January, 2018 / Revised: 22 February, 2018

Accepted: 6 April, 2018

\*Corresponding Author: [kkjong@gachon.ac.kr](mailto:kkjong@gachon.ac.kr)

Dept. of Mechanical Engineering, Gachon University, Korea

## I. 서 론

2016년 전체 차대차 충돌 교통사고는 162,009건이며 그 중 측면 충돌사고는 73,397건으로 전체 차대차 충돌사고의 45.3%로 절반 가까운 비중을 차지하고 있다<sup>[1]</sup>.

측면충돌이 일어나면 차량 측면부와 탑승자의 공간이 협소한 관계로 전, 후방 충돌과 비교했을 때 상대적으로 큰 부상을 입는 경향을 보이고 있다. 차량 충돌사고에 대한 연구는 전방충돌 및 후방충돌에 대해 집중적으로 이루어지고 있어 측면충돌에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 교통사고는 충돌 전, 충돌, 충돌 후의 세 단계로 나눌 수 있다. 충돌 전, 후 단계는 차량의 동적 거동에 대한 분석으로 간단한 물리식을 계산하는 방법으로 분석할 수 있으며, 교통사고 분석 프로그램을 이용하면 매우 빠른 시간에 계산할 수 있다. 우리나라에서 일반적으로 사용되는 교통사고 프로그램인 PC-Crash는 차량의 움직임을 계산하며, 충돌은 실험을 통해 도출한 충돌 반발계수와 DOP(Depth of penetration)값을 적용하여 충돌을 계산한다. 하지만 충돌 단계는 차체의 구조와 충돌 자세에 따라 그 특성이 모두 다르기 때문에 사용자는 충돌 상황 및 형태를 분석하여 반발계수, DOP와 같은 입력변수를 적절하게 적용해야 한다. 이러한 입력변수를 도출하기 위한 방법으로는 실제 충돌실험 또는 유한요소 해석 프로그램을 이용한 해석을 통해 충돌 전 후 속도를 측정하고, 차량이 최대로 변형하는 시점을 찾는 방법이 있다. 이에 관련하여 충돌사고 분석 및 재현에 관한 연구 동향으로 Han 등<sup>[2]</sup>은 두 차량모두 소형차인 경우의 측면충돌을 유한요소 해석프로그램으로 수행하여 충돌 전, 후 속도를 도출하였다. 도출된 속도 정보로 반발계수를 계산한 결과로 차량 측면의 50% 움푹으로 충돌했을 때는 정면충돌과 유사한 반발계수의 특성을 보였으나 75%와 100% 움푹에서는 반발계수가 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인하였다. Baek 등<sup>[3]</sup>은 PC-Crash와 MADYMO 프로그램의 좌표계를 연동할 수 있는 조인트 모델 제작을 통해 새로운 탑승자 거동분석 방법을 제안하였다. 그 결과로 탑승자 거동분석을 위한 모델 제작 시간과 계산 시간을 획기적으로 단축시켰다. Kwon 등<sup>[4]</sup>은 LS-DYNA 프로그램을 이용한 가드레일 충돌분석을 통해 속도, 차량 중량이 달라지는 경우 차량 및 가드레일 파손상태를 파악하고, 탑승자 상해정도를 파악하였다. 그 결과로 최근 대형 차량과 고성능 차량의 증가에 대응하

기 위해 현재 설치된 가드레일의 안전기준을 높여야 한다고 제안하였다. Oh 등<sup>[5]</sup>은 약 7 km/h에서 10 km/h의 저속충돌에서의 충돌 반발계수를 도출하기 위해 총 6회 실차 충돌시험을 수행하여 충돌 전, 후 속도를 측정하였다. 그 결과로 저속 충돌에서 발생하는 반발계수는 약 0.66에서 0.85 범위에 존재한다는 것을 확인하였고, 그 결과를 교통사고 분석 프로그램인 PC-Crash에 적용했을 때 실차 시험과 시뮬레이션의 속도변화 오차가 약 4% 내외로 매우 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. Kang 등<sup>[6]</sup>은 범퍼빔의 형상과 재질을 개선해 에너지 흡수율은 유지하면서 중량을 최소화할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 본 연구에서는 중량과 구조가 서로 다른 SUV 차량과 승용차의 측면충돌을 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 충돌특성을 파악하고, 그 결과로 도출된 충돌 전, 후 속도변화로 반발계수를 계산하여 운동량 보존법칙을 이용한 차량충돌해석 프로그램인 PC-Crash에 적용했을 때 차량 거동을 확인하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 차량의 충돌역학

교통사고는 추돌사고와 같이 1차원 형태로 충돌이 일어나는 경우와 측면충돌과 같이 2차원 평면에서 발생하는 충돌사고로 나눌 수 있다<sup>[7]</sup>. 그림 1은 2차원 평면에서 발생한 직각충돌을 나타낸 것이다.

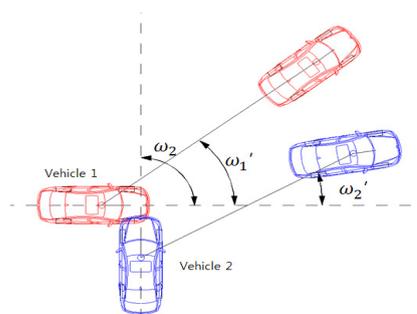


그림 1. 2차원 충돌형태  
Fig. 1. Diagram of two-dimensional collision

직선으로 주행하는 차량은 1차원 운동형태를 보이고 있으나 측면에 충돌하게 되면 운동량은 직각성분으로 분해되며 2차원 운동을 하게 된다. 각각의 성분은 식 (1)과

(2)로 표현된다.

$$m_1 v_1 \cos \omega_1 + m_2 v_2 \cos \omega_2 = m_1 v_1' \cos \omega_1' + m_2 v_2' \cos \omega_2' \quad (1)$$

$$m_1 v_1 \sin \omega_1 + m_2 v_2 \sin \omega_2 = m_1 v_1' \sin \omega_1' + m_2 v_2' \sin \omega_2' \quad (2)$$

여기서  $m_1$ 과  $m_2$ 는 차량의 질량,  $v_1$ 과  $v_2$ 는 차량의 충돌 전 속도,  $v_1'$ 과  $v_2'$ 는 차량의 충돌후 속도,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_1'$ ,  $\omega_2'$ 는 각각 차량의 충돌전의 진입각도와 충돌후의 이탈각도를 나타낸다. 위의 수식을 이용하여 차량의 충돌 후의 속도와 이탈각도를 계산할 수 있다.

반발계수는 충격량을 이용한 방법, 에너지 흡수량을 이용한 방법, 두 물체의 충돌전후 상대속도비를 이용한 방법으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 두 물체의 충돌전후 상대속도비를 이용하였다. 식 (3)은 충돌 전후 속도의 상대속도비로 반발계수를 계산하는 방법이다.

$$e = \frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} \quad (3)$$

여기서  $v_1'$ 과  $v_2'$ 는 충돌후 속도,  $v_1$ 과  $v_2$ 는 충돌전 속도를 나타낸 것이다. 일반적으로 반발계수는 0에서 1사이의 값을 가지며, 충돌속도가 높아질수록 0에 가까운 값을 가진다. 보통 전후방 충돌의 경우 약 30 km/h 이상에서 약 0.1 정도의 반발계수를 가진다<sup>[8]</sup>.

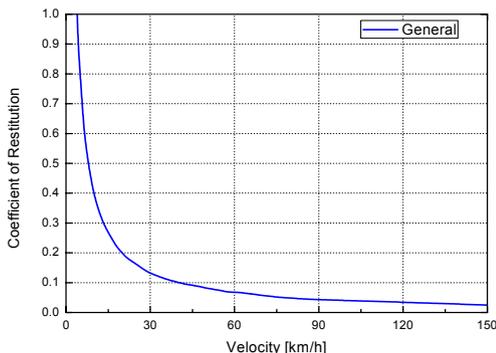


그림 2. 일반적인 충돌의 속도-반발계수 특성  
 Fig. 2. Velocity-restitution coefficient of the general impact

## 2. 유한요소 해석을 이용한 충돌해석

충돌의 현상은 충돌 전, 충돌, 충돌 후의 세 가지 현상으로 나눌 수 있다. 교통사고가 발생하는 경우 충돌 이후 발생한 차량의 파손상태와 노면의 흔적 등을 분석하여 충돌 시점의 속도와 자세를 추정한다. 일반적으로 교통사고 분석에 사용되는 프로그램으로는 PC-Crash가 있으며, 이 프로그램은 교통사고 발생 당시의 상황을 분석하고 재현하는데 매우 효과적이다. PC-Crash 프로그램은 충돌전과 후의 차량움직임 파악에는 특화되어 있지만 충돌시점의 분석은 매우 단순화되어 있으며, 그 설정을 사용자가 입력할 수 있게 되어있다. 따라서 PC-Crash의 사용자는 많은 경험을 필요로 하거나 기존에 실험된 연구 결과를 바탕으로 입력 값을 적용한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 충돌해석에 특화된 LS-DYNA 프로그램을 이용해 충돌시점을 분석하였다. LS-DYNA로 해석된 결과로부터 PC-Crash에 입력되는 반발계수 및 DOF값을 도출하였다. LS-DYNA는 유한요소해석 프로그램으로 본 연구에서는 외연적 유한요소법 (Explicit finite element method)을 이용해 해석을 수행하였다.

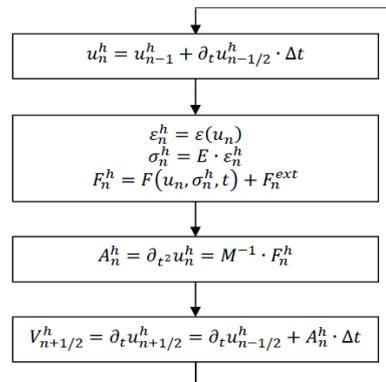


그림 3. 외연적 유한요소 해석절차  
 Fig. 3. Analysis procedure of explicit finite element

여기서 첫 번째 단계인  $u_n^h$ 는 Node의 변위를 주어진 시간 간격에 따라 계산하는 것이며, 두 번째 단계인  $F_n^h$ 는 적용된 재료의 응력-변형률 관계를 이용하여 응력을 계산한다. 세 번째 단계인  $A_n^h$ 는 내부와 외부의 힘을 기반으로 Node의 가속도를 계산한다. 마지막 단계로 Node

의 속도인  $v_{in}^h$ 를 계산한 후 설정된 시간과 계산 간격에 따라 계산을 반복한다<sup>[9]</sup>.

### 3. PC-Crash의 시뮬레이션

PC-CRASH는 차량의 중량과 속도, 반발계수의 정보를 이용해 운동량보존법칙으로 충돌이 계산된다. 충돌을 계산하는 시점은 두 차량이 최초 접촉후의 최대 변형에 도달하는 시간을 DOP값으로 설정할 수 있다. 일반적인 충돌상황에서 차량이 최대 변형에 이르는 시간은 30~60 ms이며, PC-Crash에서는 그 중간에 해당하는 값인 45ms에 충돌이 일어난다고 가정하여 그 시점에서 충돌후의 속도와 이탈각도를 계산한다<sup>[10]</sup>. 차량충돌에서 두 차량의 충돌전의 속도와 자세를 가지고 충돌후의 값을 계산하며, 이 단계에서 차체변형에 의한 에너지 흡수량을 반발계수로 적용한다. 그러나 사고의 상황에 따라 이 두 개의 값은 차량의 속도와 충돌하는 물체에 따라 달라질 수 있으므로 0~60 ms 범위에서 15 ms 단위로 설정할 수 있으며, 사고의 상황에 따라 사용자가 임의로 DOP값을 설정하는 것이 가능하다.

## III. 해석범위

### 1. 시험차량의 제원

본 연구에서는 SUV차량과 소형차의 측면충돌에 대한 연구로 SUV차량은 Toyota RAV4 차량모델을 이용하였으며, 승용차는 Suzuki Swift 차량모델을 이용하여 유한요소해석을 진행하였다.

그림 4는 NCAC(National Crash Analysis Center)에서 제공하는 차량모델<sup>[11]</sup>이며, 표 1은 차량의 제원을 나타낸 것이다.

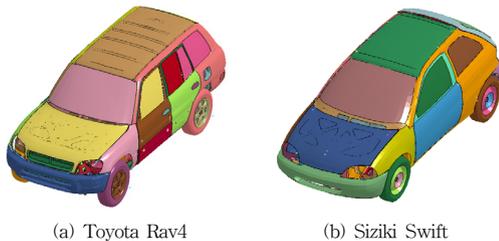


그림 4. 유한요소 차량모델  
Fig. 4. Vehicle model for finite element

표 1. 시험 차량의 제원

Table 1. Specification of tests vehicle

unit ; mm, kg

Make Model	Length	Width	Height	TrackAxle	Wheel base	Weight
Toyota Rav4	4,120	1,700	1,660	1,460	2,410	1,315
Suzuki Swift	3,745	1,590	1,350	1,365	2,265	755

### 2. 시뮬레이션 조건

시뮬레이션은 정지된 SUV차량의 측면을 승용차가 충돌하는 경우와 전지된 소형차의 측면을 SUV가 충돌하는 조건을 설정하고 해석을 수행하였다. 그림 5는 위치에 따른 측면의 충돌자세를 나타낸 것이다.

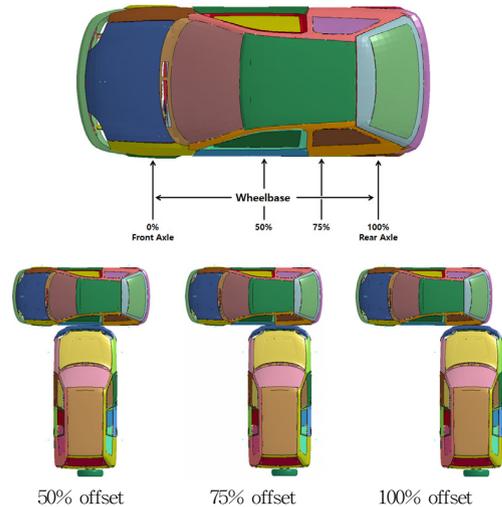


그림 5. 충돌자세  
Fig. 5. Impact position

표 2. 충돌자세에 따른 차량속도 조건

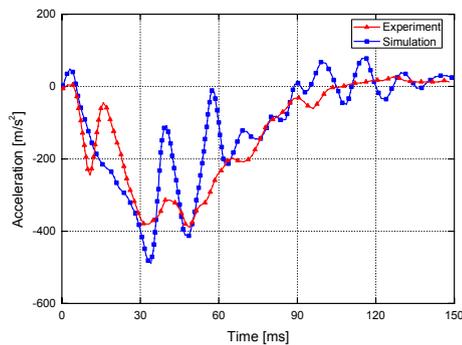
Table 2. Conditions of vehicle velocity according to impact position

Impact position	50 %	75 %	100 %
Vehicle	Toyota Rav4	Suzuki Swift	
Impact speed	10 km/h	0 km/h	
	20 km/h	0 km/h	
	30 km/h	0 km/h	
	40 km/h	0 km/h	
	60 km/h	0 km/h	
	80 km/h	0 km/h	
	100 km/h	0 km/h	

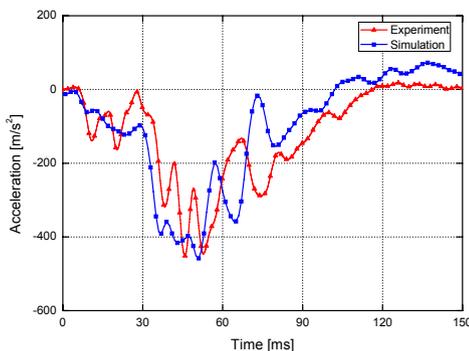
표 2는 충돌자세와 차량의 속도조건을 나타낸 표로 충돌차량은 Toyota Rav4로 설정하였고, 피충돌차량은 Suzuki Swift로 정의하였다. 충돌속도는 10 km/h에서 100 km/h로 설정하였으며, 반발계수가 급격하게 변화되는 낮은 속도인 10 km/h에서 40 km/h까지는 10 km/h간격으로 설정하였고, 속도에 따른 반발계수 변화가 크지 않은 고속영역인 60 km/h에서 100 km/h까지는 20 km/h간격으로 설정하여 각 충돌자세 당 7회의 해석을 수행하였다.

### 3. 시뮬레이션 차량모델의 검증

본 연구에 사용된 차량모델의 검증을 위하여 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administrator)의 충돌시험 결과<sup>[12]</sup>와 비교 분석하였으며, 그림 6은 실차시험과 시뮬레이션의 가속도특성을 비교한 것이다.



(a) Toyota Rav4



(b) Suzuki Swift

그림 6. 시험과 시뮬레이션의 가속도특성

Fig. 6. Acceleration Characteristics of test and simulation

그 결과로 56 km/h의 속도로 고정 장벽을 충돌했을 때의 결과로 시험과 시뮬레이션 결과가 매우 유사한 것을 확인하였다. 여기서 약 0~30 ms 구간은 차량의 범퍼에서부터 라디에이터 패널까지의 구간으로 구조적으로 강성이 다소 낮기 때문에 가속도가 크지 않으며, 약 30~50 ms 구간은 차량 프레임에 충격이 전달되며 가속도가 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 그 이후 엔진과 전륜타이어에서 최대 변형에 도달한 후 재료의 탄성에 의해 미소한 값으로 다시 되돌아온다. Suzuki swift 차량의 경우 약 50 ms 이후 차체가 복원되는 과정에서의 가속도 값의 차이가 나타났지만 본 연구에서는 충돌 후 최대 변형이 일어나는 시점까지의 결과로 연구를 수행하였으므로, 약 50ms 이후의 오차에 대해서는 문제가 없을 것으로 판단하였다.

### 4. PC-Crash를 이용한 시뮬레이션

PC-Crash는 운동량보존법칙을 기반으로 하는 시뮬레이션 프로그램이며, 그 외 입력변수는 기존에 수행되었던 실험의 결과를 이용하므로 계산시간이 매우 빠른 장점이 있다. 하지만 유사한 조건으로 사전에 시험된 자료가 없는 경우 사용에 어려움이 있을 수 있다. 시험자료가 없는 경우 PC-Crash에 기본으로 적용된 설정 값을 이용하여 시뮬레이션을 할 수 있지만 오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 PC-Crash에서 기본으로 제공하는 입력변수를 사용해 1차 시뮬레이션을 하였으며, LS-DYNA를 이용해 도출한 반발계수와 DOP(Depth of penetration)값을 적용하여 2차 시뮬레이션을 한 결과를 비교하였다. 결과의 비교는 PC-Crash에서 제공하는 오차 분석기능을 이용하였다<sup>[9]</sup>. 이 공식은 차량의 충돌 후 이동거리와 최종 정착한 상태의 차량 각도를 기반으로 실제 실험값과 시뮬레이션의 결과를 비교한다. 일반적인 사고해석에서 오차가 5% 미만인 경우 신뢰할만한 결과를 얻었다고 판단한다.

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_i (w_i \cdot x_i)^2}{\sum_i w_i^2}} \times 100\% \quad (3)$$

식 (3)에서  $w_i$ 는 각 차량의 오차를 산정할 때의 비중을 나타내며, 차량에 이동거리와 각도의 비중을 각각 0~100% 범위내에서 설정할 수 있다.  $x_i$ 는 차량의 이동거리와 각도의 오차를 각각 계산한 값이다. 차량의 이동거리

로 계산하는 오차계산은 식 (4)와 같다.

$$\text{Vehicle}_{\text{Rest-Position}} = \frac{|P_{\text{Rest-test}} - P_{\text{Rest-actual}}|}{|P_{\text{Rest-actual}} - P_{\text{Impact-actual}}|} \quad (4)$$

여기서  $\text{Vehicle}_{\text{Rest-Position}}$  는 차량의 위치오차,  $P_{\text{Rest-test}}$  는 시뮬레이션의 차량 최종위치,  $P_{\text{Rest-actual}}$  는 차량이 실제로 정지한 최종위치를 나타낸 것이며,  $P_{\text{Impact-actual}}$  는 차량의 충돌위치를 나타낸 것이다.

차량의 최종 정지각도의 오차를 구하는 방법은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\text{Vehicle}_{\text{Rest-heading}} = \frac{\cos^{-1}(d_{\text{Rest-actual}} \cdot d_{\text{Rest-test}})}{\pi} \quad (5)$$

여기서  $\text{Vehicle}_{\text{Rest-heading}}$  는 차량의 각도오차,  $d_{\text{Rest-test}}$  는 시뮬레이션의 차량 최종각도,  $d_{\text{Rest-actual}}$  는 차량이 실제로 정지한 최종각도를 나타낸 것이다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 충돌자세에 따른 파손형태

유한요소해석은 충돌부위에 따라 각 7회씩 총 21회 시뮬레이션을 하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 그림 6은 각 자세별 100 km/h에서 나타난 두 차량의 최대 변형량을 나타낸 것으로 100% 충돌에서 가장 작은 변형이 발생하고 50% 충돌에서 가장 큰 변형이 일어난 것을 확인할 수 있다.

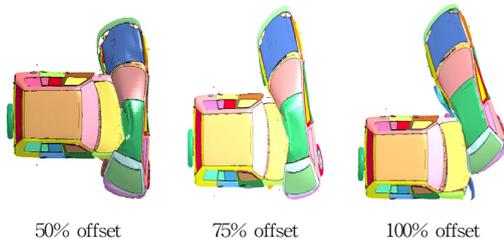


그림 7. 100km/h에서 최대 변형량  
Fig. 7. Maximum deflection at 100 km/h

### 2. 충돌자세와 속도에 따른 파손시간

차량이 충돌하게 되면 차량간의 접촉에 의해 서로 운동량을 교환한다. 그림 1에서 나타난 차량의 충돌형태를 나타난 바와 같이 PC-Crash에서는 운동량보존법칙을 기반으로 교환되는 운동량을 계산하며 차체 변형에 의한 운동량 손실은 반발계수를 적용하고, 차량의 강성과 충돌 자세 및 위치에 따른 오차는 DOP값을 적용하여 보정할 수 있다. 표 3은 LS-DYNA 해석으로부터 도출된 DOP값을 나타낸 것이다.

표 3. 충돌자세에 따른 차량의 파손시간

Table 3. Time of vehicle deformation according to impact position

Impact position [offset]	50%	75%	100%
Impact speed [km/h]	Depth of penetration [ms]		
10	46	39	39
20	35	27	26
30	28	22	19
40	24	18	17
60	24	17	17
80	22	16	13
100	22	15	12

전체 조건에서의 DOP값은 46~12 ms 범위에 존재하는 것을 확인하였다. Offset 50%에서 100%로 갈수록 충돌감지의 시점이 짧아졌으며, 속도가 높아질수록 충돌감지 시점이 빨라진다는 것을 확인하였다. 본 연구 결과에서 DOP의 최대값은 46 ms로 PC-Crash의 기본 설정값인 45ms와 유사하게 나타났지만 100%, 100 km/h 조건에서 최솟값인 12 ms로 나타났다. 측면충돌은 전방과 후방에 비해 상대적으로 거리가 짧은 특성을 가지고 있으며, 특히 뒤차축을 충돌하는 경우 구조적으로 매우 강한 성질을 가지고 있기 때문에 충돌 부위에 따라 결과의 차이가 큰 것으로 확인되었다.

### 3. 충돌자세와 속도에 따른 반발계수

그림 8은 두 차량의 충돌 전과 충돌 후 속도로 계산된 반발계수특성을 나타낸 것이다. 10 km/h에서 20 km/h까지는 모든 조건에서 비교적 유사한 반발계수 값을 나타냈으나 충돌속도 30 km/h에서부터 차이를 나타냈다. Offset 50% 조건은 40 km/h에서 100 km/h까지 약 0.30

에서 0.25로 반발계수가 비슷하게 유지되었으며, Offset 75% 조건은 100 km/h까지 약 0.46에서 0.29로 점차적으로 감소하는 것을 확인하였다. Offset 100% 조건에서는 30 km/h에서 100 km/h까지 약 0.46에서 0.15로 반발계수가 다른 조건에 비해 급격하게 감소하는 것으로 확인되었다.

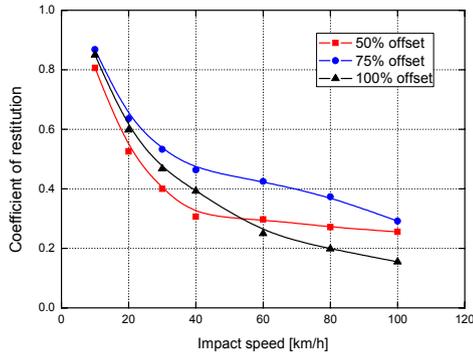


그림 8. 유한요소해석을 통해 도출한 반발계수  
 Fig. 8. Coefficient of restitution acquired by finite element analysis

Offset 75%의 경우 Suzuki swift 차량의 뒤차축과 Toyota Rav4 차량의 Impact-beam 부분이 충돌하는 모습을 나타냈다. 본 연구의 결과를 이용해 반발계수를 사용할 때는 실제 차량의 파손상태를 파악하여 충돌차량의 Impact-beam이 피 충돌차량의 뒤차축 또는 강성이 높은 부분에 충격하는지 여부를 사전에 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 충돌전후 속도차이를 이용해 반발계수를 도출하였다. 차체 변형으로 인해 에너지 흡수율이 달라지기 때문에 차체의 강성에 따라 반발계수가 달라진다. 차량을 측면에서 보았을 때 앞, 뒤 부분은 차축이 존재하므로 강성이 높고, 중심 부분은 상대적으로 강성이 낮게 설계되어 있다. 따라서 Offset 100% 조건에서 높은 반발계수를 가져야 하지만 가장 낮은 결과를 나타냈다.

그림 9는 충돌자세 Offset 100%, 충돌속도 100 km/h에서의 충돌 후 변형량과 자세를 나타낸 것이다. 그림 9(b)에 나타난 바와 같이 Rav4 차량이 Swift 차량의 뒷차축부분을 충격하며 차체변형이 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 Swift 차량의 무게중심에서 떨어진 곳을 충격하며 회전이 일어난 것으로 확인되었다.

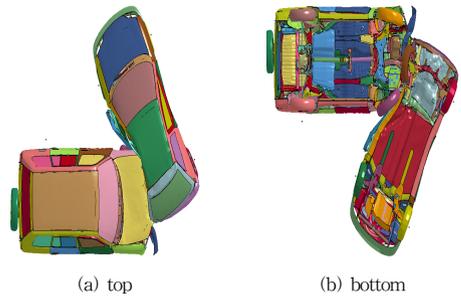
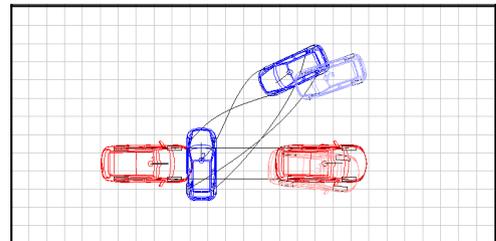


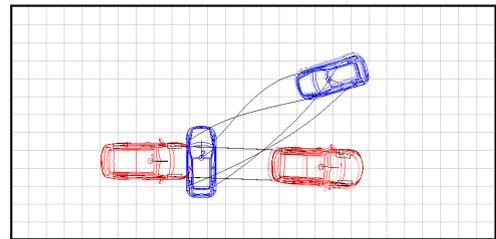
그림 9. Offset 100%, 100km/h 조건에서의 충돌자세  
 Fig. 9. Position after impact of offset 100% & 100 km/h

#### 4. 시뮬레이션 검증

본 연구에서는 실제 측면충돌 사고 4건에 대해 운동량 보존법칙을 이용한 시뮬레이션을 하였으며, 에너지흡수에 따라 발생하는 속도변화는 LS-DYNA 해석을 통해 도출한 반발계수와 DOP값을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 여기서 적용한 실제 측면충돌사고의 자료는 NHTSA에서 수집하는 교통사고 데이터베이스인 NASS(National Accident Sampling System)자료를 활용하였다. NASS자료는 사고차량의 파손상태와 충돌속도 등의 정보와 함께 현장과 탑승자 상해에 대한 자세한 내용을 확인할 수 있다.



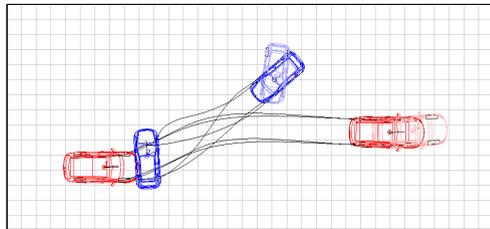
(a) Error: 13.0 %



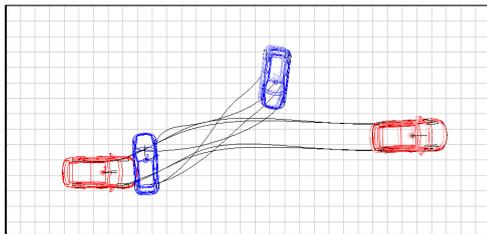
(b) Error: 2.0 % 0.4

그림 10. 차량 1과 차량 2의 시뮬레이션  
 Fig. 10. Simulation of vehicle 1 and 2

첫 번째 사고상황은 충돌차량의 속도가 38 km/h이고, 피충돌차량의 속도는 23 km/h로 유한요소해석 모델의 50%, 40 km/h 조건과 유사한 형태를 보이고 있어 DOP값은 24 ms, 반발계수는 0.30을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 여기서 차량 1은 왼쪽에서 진입하는 SUV차량으로 적색으로 나타내고, 차량 2는 직진하는 승용차로 청색으로 나타냈다. 그림 10(a)의 결과는 프로그램에 기본 설정된 DOP값과 반발계수로 해석한 것을 나타낸 것으로 두 차량의 충돌 후 이동거리와 정지각도를 식 (3)~(5)에 대입하여 계산했을 때 13.0%의 오차가 나타났고, 그림 10(b)의 결과는 DOP값과 반발계수를 사용했을 때 2.0%의 오차를 나타낸 것으로 약 11.0%의 오차를 줄일 수 있었다.



(a) Error: 12.3 %



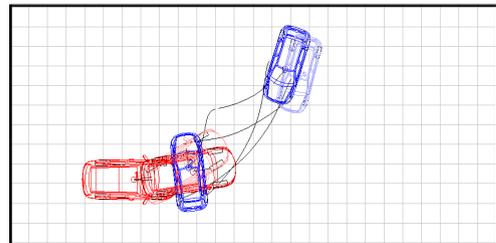
(b) Error: 2.2 % 0.37

그림 11. 차량 3과 차량 4의 시뮬레이션  
Fig. 11. Simulation of vehicle 3 and 4

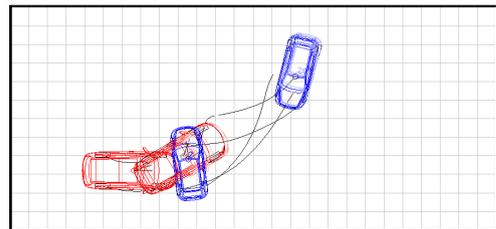
두 번째 사고상황은 충돌차량의 속도가 49km/h이고, 피 충돌차량의 속도는 18km/h로 유한요소해석 모델의 50%, 50km/h 조건과 유사한 형태를 보이고 있어 DOP값은 24 ms, 반발계수는 0.30을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 11(a)의 결과는 PC-Crash의 기본 설정 값을 이용하여 시뮬레이션한 것으로 12.3%의 오차가 나타났으며, 그림 11(b)의 결과는 유한요소해석을 이용하여 도출한 DOP값과 반발계수를 적용한 후 해석을 한 것으로 2.2%의 오차를 나타내어 상당한 신뢰성을 보였다. 여기

서 기본값 설정을 이용한 시뮬레이션에서 오차가 크게 나왔던 이유는 기본으로 설정된 반발계수인 0.10을 사용했을 때 새롭게 도출한 반발계수인 0.30보다 운동에너지가 더 많이 소실됨을 알 수 있었다.

그림 12는 세 번째 사고상황으로 충돌차량이 33 km/h의 속도로 22 km/h로 주행하고 있는 피충돌차량의 운전석 측면의 B-Pillar와 뒤차축의 중심부분을 충돌하였을 때 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 그 결과로 PC-Crash의 기본값을 사용했을 때 7.8%의 오차를 나타냈으나 유한요소해석을 통해 도출한 결과를 이용하여 시뮬레이션을 했을 때 1.6%로 매우 신뢰성이 있는 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Error: 7.8 %

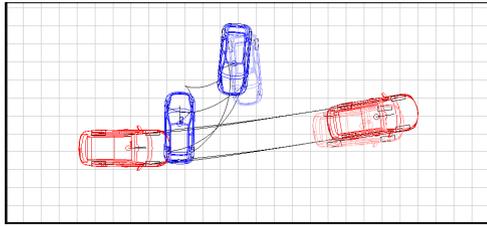


(b) Error: 1.6 %

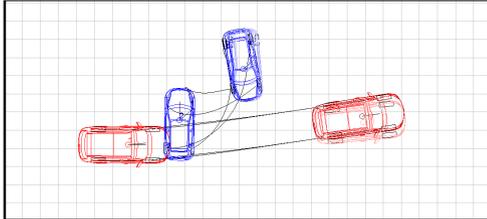
그림 12. 차량 5와 차량 6의 시뮬레이션  
Fig. 12. Simulation of vehicle 5 and 6

그림 13은 네 번째 사고상황으로 약 52 km/h의 속도로 주행하고 있는 SUV차량이 26 km/h로 주행하던 승용차의 운전석쪽 뒤차축 부분을 충돌했을 때 결과를 나타낸 것이다. 이 때 충돌차량은 약 10도, 피충돌 차량은 약 195도 회전 후 정차하였다.

그 결과로 기본조건은 8.9%의 오차를 나타냈으며, 유한요소해석을 통한 도출한 결과는 2.8%의 오차를 나타내어 시뮬레이션 해석의 신뢰성을 잘 확인할 수 있었다.



(a) Error: 8.9 %



(b) Error: 2.8 %

그림 13. 차량 7과 차량 8의 시뮬레이션  
 Fig. 13. Simulation of vehicle 7 and 8

## V. 결론

본 연구는 SUV와 소형차의 측면충돌 특성을 차량모델로 시뮬레이션 결과의 검증에 위해 다양한 사고유형의 차로 해석하여 측면충돌의 사고 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 측면충돌의 경우 차체의 구조에 따른 강성의 영향으로 차량의 충돌부위에 따라 반발계수와 DOP값이 달라진다는 것을 확인하였다.
- (2) Offset 100% 조건과 같이 피 충돌차량의 충격지점이 무게중심에서 떨어진 곳에 충격한 경우 회전이 일어나므로 충돌 이후의 속도차이를 이용한 반발계수를 도출하는 방법을 사용할 때 주의해야 한다.
- (3) 본 연구에서 다른 측면충돌과 같은 조건에서는 PC-Crash에서 기본으로 제공하는 반발계수인 0.10과 DOP값인 45 ms를 사용했을 때 보다 유한요소해석을 이용하여 도출한 DOP값과 반발계수 값을 사용했을 때 오차를 줄여 신뢰성이 있는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 2차원 직각 충돌조건으로 피충돌차량이 움직이지 않는 상황에서 해석을 수행하였지만 향후 실제의 다양한 차대차 측면충돌에 관련된 실차변수를 적용하여 연구를 수행한다면 충돌사고분석의 신뢰성은 더욱더 향상될 것으로 사료된다.

## References

- [1] National Police Agency, "TAAS system of National Police Agency", 2017.
- [2] Y. K. Han, S. R. Baek, J. K. Yoon and J. H. Lim "A Study on Side Impact from Car-to-Car using Finite Element Analysis", Journal of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication, Vol. 15, No. 3, pp. 201-209, 2015.  
<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.3.201>
- [3] S. R. Baek, C. H. Kim, J. K. Cho, J. H. Lim and J. K. Yoon "A Study on the Dynamic Analysis Model for Passenger Behavior in a Vehicle's Rollover Accidents", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 6, pp. 758-766, 2017.  
<https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.6.758>
- [4] O. H. Kwon, S. R. Baek, J. K. Yoon and J. H. Lim "A Study on Crash Analysis of Vehicle and Guardrail using a LS-DYNA Program", Journal of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication, Vol. 16, No. 3, pp. 179-186, 2016.  
<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.3.179>
- [5] W. T. Oh, J. H. Kim, J. H. Choi, Y. m. Ha, H. S. Park and J. C. Park, "A Study on the Coefficient of Restitution for Low-speed Rear-end Vehicle Impacts", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 5, pp. 600-606, 2017.  
 DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.5.600>
- [6] J. S. Kang, M. H. Song, J. Y. Lim, "A Preliminary Study on the Structural Performance of the Bumper-Beams for High-Strength Steel

- Applications", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 6, pp. 78-84, 2017.  
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.6.78>
- [7] J. H. Chun, "A Study of Collision Speed Estimation at Intersection", University of Seoul, 2011.
- [8] "Traffic Accident Analysis Manual", Korea Road Traffic Authority, 2011.
- [9] "LS-DYNA Theory Manual", Livermore Software Technology Corporation, 2017.
- [10] "PC-Crash Technical Manual", Dr. Steffan Datentechnik, 2017.
- [11] National Crash Analysis Center, <http://www.ncac.gwu.edu/>
- [12] National Highway Traffic Safety Administration-National Automotive Sampling System, <http://www.nhtsa.gov/NASS>

#### 저자 소개

##### 임 중 한(정회원)



- 1995년 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학  
학과 교수
- 주관심분야 : 미래형자동차, 지능형자  
동차 IT분야
- e-mail : [kkjong@gachon.ac.kr](mailto:kkjong@gachon.ac.kr)