

정면충돌 가속도곡선을 이용한 HIC₁₅ 예측모델에 관한 고찰

하태웅* · 임재문**

A Study on the HIC₁₅ Estimating Model Using Frontal Crash Pulses

Tae-Woong Ha*, Jaemoon Lim**

Key Words: Frontal Crash(정면충돌), Crash Pulse(충돌 가속도 곡선), HIC(머리상해치), Estimating Model(예측모델), NCAP(자동차안전도평가), Linear Regression Model(선형회귀모델)

ABSTRACT

This study is to construct the simple estimating model for the HIC₁₅ of the driver dummy using the frontal impact test results. Test results of 9 vehicles of Hyundai Sonata from the MY2002~MY2020 USNCAP are utilized for constructing the linear regression model. The average accelerations extracted from the vehicle crash pulses are handled as the main factors. The average accelerations of 10 ms interval within 0~100 ms are calculated from the crash pulse data of 9 vehicles. The present estimating model of the HIC₁₅ using the average accelerations of 10 ms interval in the 0~80 ms range shows good agreement with the tested value within 2.4% maximum error.

1. 서론

충돌 가속도 곡선(Crash pulse)은 자동차 충돌상황에서 자동차의 감속(Deceleration)을 기록한 것이며, 충돌 심각도(Crash severity)의 정도를 나타내기 위한 지표로 활용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 충돌 가속도 곡선은 순차적으로 적분하면 속도와 변위가 구해지며, 충돌 가속도 곡선으로부터 충돌하는 과정에서 자동차 전단부에 흡수되는 충돌에너지 구할 수도 있다.⁽⁴⁾ 자동차 전단부에서 흡수하지 못한 충돌에너지는 탑승자의 2차 충격을 유발하는 원인이 되며, 탑승자의 2차 충격을 방지하기 위해 안전벨트와 에어백 등의 승객보호장구가 사용되고 있다. 충돌 가속도 곡선은 자동차의 충돌 성능을 결정하는 중요한 요인이므로, 가속도 곡선을 최적화하여 자동차의 충돌성능을 향상시키기 위한 연구 결과들이 발표되어 왔다.⁽⁴⁻⁶⁾

충돌 가속도 곡선의 최대값 또는 이동평균(Moving average) 최대값을 활용하여 HIC₁₅ 및 가슴변형량(Chest deflection) 등과 같은 인체상해치 지수를 예측하고자 하는 연구들이 발표되어 왔다.⁽¹⁾ 이는 실차충돌시험이나 실차의 유한요소해석을 통하지 않고도 기존의 충돌시험 결과들을 활용하여 인체상해치 지수를 계산하기 위한 수학적 모델을 구성하기 위한 것이다.⁽¹⁻³⁾ 충돌 가속도 곡선의 최대값 및 이동평균 최대값은 충돌심각도의 정도를 파악할 수 있지만, HIC₁₅ 등과 같은 인체상해치 지수를 예측하는 수학적 모델을 구성하는 것에는 한계가 있었다.⁽¹⁻²⁾

임재문⁽²⁾은 USNCAP 정면충돌시험 결과를 이용하여 13종류 자동차의 충돌 가속도 곡선을 0~70ms 범위 내에서 10ms 구간으로 분할하고, 7개의 구간에서 각각 평균 가속도를 구하여 HIC₁₅를 예측할 수 있는 선형회귀모델(Linear regression model)을 개발하였다. Lim⁽³⁾은 28종류 자동차의 충돌 가속도 곡선을 0~100ms 범위로 확대하고, 머리부위의 가속도곡선도 10ms 구간별로 10개의 평균 가속도 및 라이드다운 효율성(Ridedown Efficiency)

* 가천대학교 기계·스마트·산업공학부(기계공학 전공), 교수

** 대덕대학교 기계설계과, 교수
E-mail: jmlim@ddu.ac.kr

을 추가하여 HIC₁₅를 예측할 수 있는 선형회귀모델을 개선했다. Lim⁽³⁾의 선형회귀모델은 자동차별 평균오차가 5% 정도로 나타나 정확도가 향상되었지만, 예측모델 구성을 위한 요인(Factor)들이 임재문⁽²⁾의 모델에 비해 2배 이상으로 증가하여 모델 구성의 복잡도가 증가되었다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 동일한 자동차 제작사에서 일정한 기간에 걸쳐 세대별로 생산되어 시장에 출시되어온 특정한 자동차의 정면충돌시험 결과들을 이용하여 특정한 자동차의 HIC₁₅를 예측할 수 있는 선형회귀모델을 구성하고자 한다. 선형회귀모델은 충돌 가속도 곡선으로부터 구한 10ms 구간별 평균 가속도값만으로 구성하고자 하며, 충돌 가속도 곡선으로부터 평균 가속도값을 구하는 전체 시간의 최적화된 범위에 대해서도 검토하고자 한다.

특정한 자동차에 대한 선형회귀모델은 신차 개발 시에 개념설계 또는 설계변경 단계 등에서 실차 정면충돌시험이나 유한요소해석을 수행하지 않고도 머리상해치를 예측하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 시험자동차 사양 및 정면충돌시험 결과

본 연구에서는 특정한 자동차의 HIC₁₅를 예측할 수 있는 선형회귀모델을 구성하기 위하여 현대자동차의 쏘나타를 선택하였으며, NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)에서 시행한 MY2002~MY2020 NCAP(New Car Assessment Program) 고정벽 정면충돌시험 데이터 중에서 9대의 쏘나타 충돌시험 데이터를 이용하였다. 특정한 한 차종을 정해 일정 기간 동안의 시험결과를 이용하여 선형회귀모델을 구성하는 이유는 서론에서 언급했던 것과 같이, 신차 개발 시나 모델변경 등의 개발 초기단계에서 시험자동차나 유한요소해석 모델이 아직 만들어지지 않았을 경우와 차체구조의 설계변경이 요구되는 상황에서 머리상해치인 HIC₁₅를 간편하게 예측할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다.

시험자동차의 사양과 시험조건은 Table 1에 요약하여 나타내었다.⁽⁷⁾ Table 1에서 보는 것과 같이, MY 2009와 MY2011은 각각 3대 및 2대로 구성되어 있다. 이와 같이 같은 연식에서 여러 대의 자동차가 사용된 것은, NHTSA의 정규 시험 외에 제작사 요청에 의해 추가적으로 수행된 시험으로 보인다.⁽⁸⁾ 즉, 자동차의 전체적인 구성에는 큰 변화는 없으나 승객보호 성능을 향상시키기 위해, 승객보호장구 또는 차체 전단부 구조물 중에서 충돌에너지 흡수를 향상시키기 위한 일부 변경 사항이 있을 것으로

Table 1 Specifications of tested vehicles

No.	Vehicle	Model Year	Weight	Engine Displacement	Impact Velocity
1	V04291	2002	1,679 kg	2,400 cc	55.82 kph
2	V05453	2006	1,710 kg	2,400 cc	56.65 kph
3	V06338	2009	1,718 kg	2,400 cc	56.08 kph
4	V06362	2009	1,714 kg	2,400 cc	56.37 kph
5	V06511	2009	1,708 kg	2,400 cc	56.36 kph
6	V07002	2011	1,681 kg	2,400 cc	56.30 kph
7	V07203	2011	1,670 kg	2,400 cc	56.50 kph
8	V08878	2015	1,712 kg	2,400 cc	56.45 kph
9	V11049	2020	1,639 kg	2,500 cc	56.32 kph

추정된다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 운전자석의 인체모형에 대해서만 HIC₁₅ 예측모델을 구성하고자 한다. USNCAP에서는 2011년 이후에 전방탑승자석(Passenger seat)의 인체모형을 Hybrid III 50%tile 남성 더미(Dummy)에서 Hybrid III 5%tile 여성 더미로 변경하여 사용하고 있기 때문이다.

실차충돌시험에 의한 쏘나타 운전자석 인체모형의 HIC₁₅는 Fig. 1에 나타내었다. HIC₁₅는 정면충돌시험 시 인체모형의 머리중심 부위에서 측정된 가속도값을 식 (1)을 이용하여 최대값이 되는 15ms 구간을 찾아서 구해진다.⁽⁹⁾ HIC는 1986년부터 NHTSA에서 36ms 구간으로 설정하여 사용해왔으나, 2011년 이후에는 Eppinger⁽⁹⁾ 등의 연구결과를 반영하여 15ms 구간으로 설정하여 사용하고 있다.

$$HIC_{15} = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

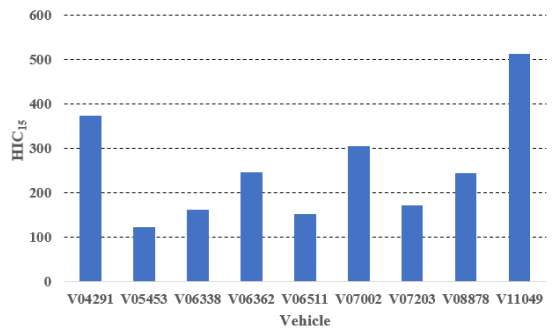


Fig. 1 HIC₁₅ of driver dummies

Fig. 1에 나타난 것과 같이, MY2009의 V06338, V06362, V06511 또는 MY2011의 V07002, V07203과 같이 동일한 연식의 차종이라고 하더라도 시험결과는 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 승객보호장구 등에서 기인할 수도 있고, 미세한 차이이긴 하지만 시험자동차의 중량이나 충돌속도 등에 의한 차이에서 기인한 것일 수도 있다.

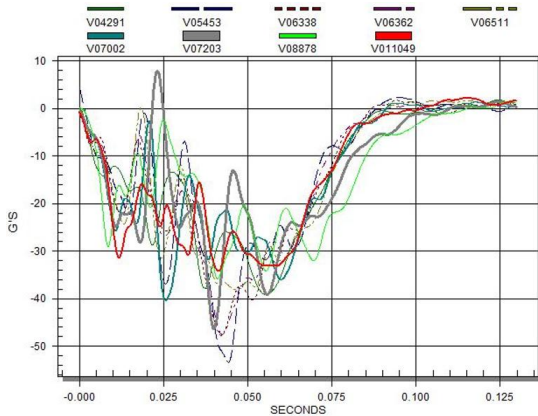


Fig. 2 Crash pulses of vehicles

Fig. 2는 쏘나타 9대의 충돌 가속도 곡선을 나타낸 것이다. 충돌 가속도 곡선의 모양이 일정한 형태로 수렴하지 않고 제각각이어서, 비록 같은 차종이라 하더라도 충돌 특성이 서로 다르게 나타날 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

3. HIC₁₅ 예측모델 구성방법

3.1. 선형회귀모델

선형회귀식은 식 (2)에 나타난 것과 같이 관찰값의 향으로 구해진다. 여기에서, 관찰값은 정면충돌시험으로부터 구해진 차체의 충돌 가속도 곡선이다. HIC₁₅를 예측하기 위한 적합 선형회귀모델(Fitted linear regression model)은 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 식 (2)에서 y 는 자동차별 HIC₁₅ 시험결과, X 는 구간별 평균 가속도값, β 는 계수, ϵ 은 오차항이다. 식 (3)과 (4)에서 \hat{y} 는 HIC₁₅의 예측값, $\hat{\beta}$ 는 적합 계수이다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (2)$$

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (3)$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4)$$

식 (3)과 (4)로부터 본 연구에 사용된 적합 선형회귀모델은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n \quad (5)$$

적합 선형회귀모델의 유효성은 시험결과와 선형회귀모델에 의한 예측값 사이의 결정계수인 R^2 값으로 평가한다. R^2 값이 클수록 예측모델의 유효성이 크며 보다 적절하게 예측되었다고 할 수 있다.^(1,10)

3.2. 평균가속도

자동차의 충돌 가속도 곡선으로부터 10ms 구간별 평균 가속도를 구하기 위해서는 Fig. 3과 같이 가속도 곡선을 적분하여 구한 속도 곡선을 이용한다.

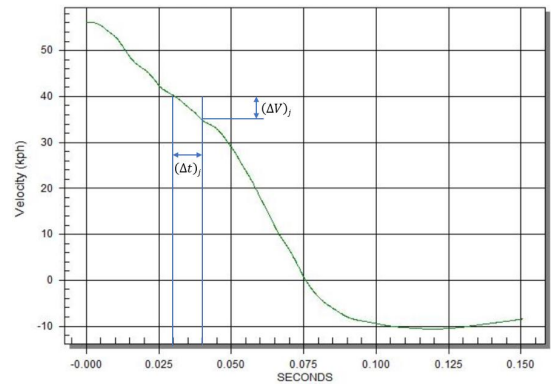


Fig. 3 Velocity curve of vehicle

$$X_{ij} = \left(\frac{\Delta V_j}{\Delta t_i} \right) \quad (6)$$

구간별 평균 가속도는 식 (6)과 같이 구성된다. 식 (6)에서 i 는 Table 2에 나타난 자동차 번호이고 j 는 Fig. 3에 나타난 속도 곡선의 j 번째 구간을 의미한다.

4. HIC₁₅ 예측모델 구성 결과

Table 2에 0~100ms까지 10ms 간격으로 충돌 가속도 곡선으로부터 구한 평균 가속도값을 나타내었다.

Table 2 Average accelerations for 10 ms intervals

Vehicle	Average acceleration values				
	0~10 ms	11~20 ms	21~30 ms	31~40 ms	41~50 ms
V04291	9.45	16.18	19.52	28.15	27.77
V05453	7.35	14.12	23.47	23.77	44.55
V06338	7.85	15.26	21.57	27.46	42.23
V06362	7.98	14.42	22.4	28.43	42.28
V06511	8.26	13.75	22.29	27.06	37.11
V07002	9.01	20.35	26.61	22.27	25.78
V07203	8.66	23.81	8.12	27.09	24.15
V08878	12.39	15.1	10.51	18.39	28.36
V11049	8.75	23.71	22.63	25.03	29.66
Vehicle	Average acceleration values				
	51~60 ms	61~70 ms	71~80 ms	81~90 ms	91~100 ms
V04291	37.09	26.56	13.1	2.81	0.92
V05453	29.0	25.26	9.17	2.86	-1.99
V06338	34.5	24.34	11.24	1.51	-1.3
V06362	31.68	25.78	9.13	1.77	-0.38
V06511	33.12	27.13	14.56	3.6	-0.82
V07002	30.1	27.62	16.85	3.56	-0.69
V07203	32.68	24.26	18.31	7.54	3.55
V08878	28.93	26.12	23.72	10.85	4.99
V11049	32.42	25.99	12.18	3.07	0.9

임재문⁽²⁾은 0~70ms 구간에서 평균 가속도값을 구하였으며, Lim⁽³⁾은 0~100ms 구간에서 평균 가속도값을 구하였다. 임재문⁽²⁾과 Lim⁽³⁾의 연구에서 평균 가속도값의 구간은 최적화된 것은 아니었으며, 충돌 가속도 곡선에서 직관적으로 자동차 탑승자에게 영향을 미쳤을 것으로 예상되는 구간으로 정한 것이었다.

본 연구에서는 70~100ms 구간에서 어느 정도의 범위로 선형회귀모델을 구성하는 것이 적합한지 검토하고자 한다. Table 3은 충돌 가속도 곡선에서 0ms에서 각각 70ms, 80ms, 90ms, 100ms 범위까지 변경하며 HIC₁₅ 예측값을 구한 것이다.

선형회귀모델을 계산하는 과정에서 행렬 연산은 마이크로소프트 엑셀을 사용하였다.⁽¹¹⁾ 각종 충돌관련 데이터의 처리 및 10ms 평균 가속도값은 NHTSA의 PlotBrowser⁽¹²⁾와 엑셀을 사용하여 구하였다.

Table 3에 나타난 것과 같이, 충돌 가속도 곡선에서

Table 3 Tested and estimated values of HIC₁₅

Vehicle	Tested values	Estimated values			
		0~70 ms	0~80 ms	0~90 ms	0~100 ms
V04291	374	317	376	560	-400
V05453	123	62	126	228	-1,281
V06338	162	222	165	265	708
V06362	246	242	249	374	782
V06511	153	192	156	339	-1,678
V07002	306	341	309	581	-1,992
V07203	173	182	175	-2	-3,112
V08878	245	250	247	481	-4,401
V11049	514	488	516	680	-70

0~70ms 범위에서 10ms 구간별로 평균 가속도값을 구해 선형회귀모델을 구성한 것은 평균오차와 최대오차가 각각 17% 및 50%를 나타내었다. 충돌 가속도 곡선의 0~80ms 범위에서는 선형회귀모델이 시험결과와 평균오차 및 최대오차는 각각 1.2%와 2.4%를 나타내었다. 충돌 가속도 곡선의 0~90ms 및 0~100ms 범위에서는 음수(-) 값이 나오는 것을 볼 수 있는데, 이는 두 가지 경우 모두 식 (4)에 필요한 역행렬을 구하는 과정에서 행렬값(Determinant)이 0(zero)에 접근하여 발생한 현상에 의한 결과로 파악되었다. 즉, 이론적으로는 행렬값이 0이 되면 역행렬을 구할 수 없지만, 엑셀에서는 0에 가까운 값이지만 정확한 0은 아니기 때문에 역행렬이 구해진 것이다. 역행렬은 각 항별로 10¹⁰ 이상의 매우 큰 값으로 계산되는 오류가 발생하였으며, 결과적으로 적절하지 못한 선형회귀모델이 구성된 것으로 파악되었다.

Table 3에 나타난 것과 같이, 충돌 가속도 곡선의 0~80ms 범위에서 운전자석 인체모형의 HIC₁₅ 값을 2.4% 범위 내에서 정확하게 예측할 수 있었다. 이에 대한 선형회귀모델은 식 (7)과 같이 정의된다. 식 (7)에서 X₁~X₈은 Table 2에 나타난 0~80ms 범위의 평균 가속도값을 입력하면 된다. Fig. 4는 시험결과와 예측모델의 상관관계를 나타낸 것이다. 결정계수인 R² 값이 1로 나타나 예측모델이 적합한 것을 확인할 수 있다.

$$\hat{y} = -3331.6 + 117.2X_1 + 37.5X_2 - 1.4X_3 - 4.9X_4 + 9.4X_5 + 17.5X_6 + 62.3X_7 - 31.0X_8 \quad (7)$$

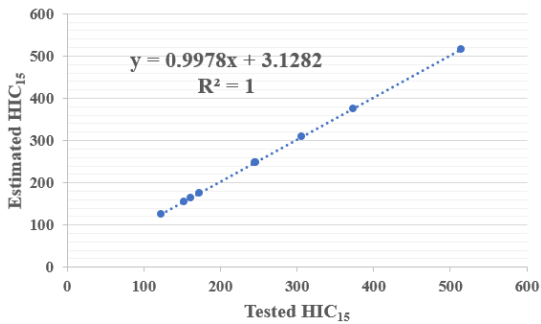


Fig. 4 Linear regression result between test and estimation for HIC₁₅ of driver dummy

5. 고찰

충돌 가속도 곡선은 자동차의 충돌 특성을 나타내며 충돌 에너지 흡수 능력 또는 차체 전단부의 강성 등을 계산할 수 있으므로, 자동차의 모델 변화에 따른 차체 특성의 변화를 고려할 수 있도록 해준다. 충돌 가속도 곡선은 기존에는 단순히 최대 가속도값 또는 이동평균 가속도값 등으로 인체상해치 예측 등과 같은 상관관계를 구성하고자 하였으나 만족할만한 결과는 구하지 못하였다.⁽¹⁻²⁾ 본 연구에서는 임재문⁽²⁾과 Lim⁽³⁾에 의해 제시된 방법을 근간으로, 10ms 구간의 평균 가속도값을 이용하여 HIC₁₅를 예측하는 방법을 특정 승용자동차인 현대자동차 쏘나타에 적용하여, 운전자석 인체모형의 HIC₁₅를 적합하게 예측하는 선형회귀모형을 구성하였다.

충돌 가속도 곡선에서 0~70ms, 0~80ms, 0~90ms 및 0~100ms 범위를 각각 검토하여 어느 범위 내에서 10ms 구간의 평균 가속도값을 구하는 것이 적절한지 검토하였다. 본 연구에서는 0~80ms 범위가 가장 적절하였으며, 0~90ms 및 0~100ms 범위에서는 역행렬의 값이 0에 가까워 예측모형이 적합하지 않은 것을 확인하였다. 충돌 가속도 곡선의 0~80ms 범위 내에서 평균 가속도값을 구해 구성한 선형회귀모형은 최대오차 2.4% 범위 내에서 정확하게 HIC₁₅ 값을 예측하였으며, 선형회귀모형의 정확도를 판단하는 결정계수인 R² 값이 1로 나타나 예측모형이 적합한 것을 확인하였다.

Lim⁽³⁾의 선형회귀모형에서와 같이 머리 가속도 곡선이나 라이드다운 효율성과 같은 요인들을 더 추가하지 않고도, 차체의 충돌 가속도 곡선의 적절한 범위를 찾아 모형을 구성하는 경우에는 임재문⁽²⁾이 제시한 초기 모델의 단점을 극복할 수 있었다.

소형 승용차부터 대형 SUV까지 다양한 차종으로 구성된 임재문과 Lim의 연구결과⁽²⁻³⁾에 비해, 본 연구에서 구한 예측모형의 정확도가 더 향상된 것은, 단일 차종으로 예측모형을 구성한데 기인한 것으로 판단된다.

본 연구에서 충돌 가속도 곡선의 0~90ms 및 0~100ms 범위와 같이 식 (4)에서 필요한 역행렬을 계산할 때 행렬값(Determinant)이 0에 수렴하는 현상이 Lim⁽³⁾의 연구 결과에서는 나타나지 않았다. 이 현상의 원인은 아직 밝혀지지 않았으며 향후 연구과제로 수행할 필요성이 있는 것으로 생각된다.

6. 결론

특정 승용자동차의 MY2002~MY2020 기간 내에서 UNSCAP 정면충돌시험 결과를 이용하여 운전자석 인체모형의 머리상해치인 HIC₁₅ 예측모형을 구성하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 0~70ms, 0~80ms, 0~90ms 및 0~100ms 범위 내에서 충돌 가속도 곡선으로부터 구한 평균가속도값을 이용하여 각각 선형회귀모형을 구성한 결과, 0~80ms 범위에서의 선형회귀모형이 시험결과와 오차는 최대 2.4% 이내이고, 결정계수인 R² 값이 1로 나타나 가장 적합한 것을 알 수 있었다.
- 2) 0~90ms 및 0~100ms 범위의 충돌 가속도 곡선에 의한 평균가속도값으로 구성된 선형회귀모형은 역행렬을 구하는 과정에서 0에 가까운 행렬값(Determinant)이 되어 적합하지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 적합한 충돌 가속도 곡선의 구간을 설정하는 것이 중요하다. 또한, 행렬값이 0이 되는 원인이 밝혀지지 않았으므로 향후 연구가 필요할 것으로 생각된다.
- 3) 다양한 차종으로 구성된 선형회귀모형에 의한 예측 결과보다는 단일 차종으로 구성된 선형회귀모형의 예측 결과가 보다 정확한 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Park, C. K. and Kan, C. D., 2015, "Objective Evaluation Method of Vehicle Crash Pulse Severity in Frontal New Car Assessment Program (NCAP) Tests", Paper No. 15-0055, 24th Enhanced Safety of Vehicles Conference, Gothenburg, Sweden, June 8-11.

- (2) 임재문, 2020, “USNCAP 정면충돌시험 결과를 이용한 HIC₁₅ 예측모델 개발”, 자동차안전학회지, 제 12권, 제4호, pp. 31~38.
- (3) Lim, J. M., 2021, “A Method for Predicting HIC₁₅, Chest g’s and Chest Deflection Based on Results of USNCAP Frontal Impact Tests”, Int. J. Automotive Technology, Vol. 22, No. 3, pp. 657~663.
- (4) Sequeira, G. J., and Brandmeier, T., 2020, “Evaluation and characterization of crash-pulses for head-on collisions with varying overlap crash scenarios”, Transportation Research Procedia, 48. pp. 1306~1315.
- (5) Shi, Y., Wu, J. and Nusholtz, G. S., 2003, “Optimal Frontal Vehicle Crash Pulses - A Numerical Method for Design”, Paper No. 514, 18th Enhanced Safety of Vehicles Conference, Nagoya, Japan, May 19~22.
- (6) Wei, Z., Karimi, H. R. and Robbersmyr, K. G., 2015, “A model of vehicle-fixed barrier frontal crash and its application in the estimation of crash kinematics”, Paper No. 15-0161, 24th Enhanced Safety of Vehicles Conference, Gothenburg, Sweden, June 8-11.
- (7) National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2021, Vehicle Crash Test Database, <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/databases/VSR/veh/QueryVehicle.aspx>.
- (8) 임재문, 2016, “고정벽 정면충돌시험 결과에 미치는 요인 분석”, 자동차안전학회지, 제8권, 제3호, pp. 7~11.
- (9) Eppinger, R., Sun, E., Bandak, F. Haffner, M., Khaewpong, N. and Maltzes, M., 1999, Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems-II, NHTSA.
- (10) Montgomery, D. C., 1997, Design and Analysis of experiments, Fourth Edition.
- (11) 홍관수, 2017, 엑셀을 활용한 통계자료분석, 경문사.
- (12) National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2021, <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/database-and-software>.