



시스템단위 해석모델을 이용한 측면충돌시험 평가방안연구

염근철* · 안병직

현대자동차 충돌안전해석2팀

A Study of Side Impact Test Assessment Using the Side System Simulation Model

Kunchul Yeom* · Byengjik Ahn

Vehicle Safety CAE Team 2, Hyundai Motor Company, 12 Heolleung-ro, Seocho-gu, Seoul 06797, Korea
(Received 8 February 2018 / Revised 23 March 2018 / Accepted 3 April 2018)

Abstract : In this paper, we used the side impact test assessment via computer simulation. In order to assess the full vehicle side impact performance clearly after the test, the side system simulation model is developed, which can decrease the analysis run-time and easily become the correlation between the test and the simulation. In consideration of the factors affecting the full vehicle performance of side impact, a method is proposed using this side system simulation model that can probabilistically assess a full vehicle side impact performance.

Key words : Side impact(측면충돌), Side system model(측면시스템모델), Probability(확률), USNCAP(미국신차 안전도평가프로그램), ES-2re(유럽남성측면충돌더미)

Subscripts

- LH : left hand
- LWR : lower
- MID : middle
- UPR : upper
- MDB : moving deformable barrier
- NCAP : new car assessment program
- SAB : side airbag

차량의 충돌성능 개발목표를 달성하기 위한 활동을 한다. 충돌시험팀은 시험결과 분석을 통해 개선안을 도출하고, 충돌해석팀은 시험결과 및 해석결과 분석을 통하여 개선안을 마련하여 이를 해석적 검증 후 시험과 설계에 공유한다. 특히, 시험결과 분석과 개선안 검토시 엔지니어들은 그동안 쌓은 경험과 반복작업을 통하여 개선안을 만드는데, 해석팀의 경우 완성차(Full vehicle) 해석모델을 이용하여 이러한 작업을 주로 진행한다. 하지만 완성차 해석결과와 시험결과의 코릴레이션(Correlation) 어려움, 완성차 해석에 따른 검증 시간의 지연, 시험에서 발생할 수 있는 산포 검토의 한계성으로 명확한 문제점 분석 및 개선안의 정확한 검증이 어렵다. 불명확

1. 서론

프로토타입측면충돌시험 결과가 차량 성능 개발 목표를 만족하지 못했을 경우 해석팀과 시험팀은

*A Part of this paper was presented at the KSAE 2017 Fall Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: kcyum21@hyundai.com

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.

한 시험결과 분석과 이를 통해 제안된 검증되지 않은 개선안이 차기 시험차에 반영되어 시험될 경우 개발 목표를 또 다시 불만족시킬 수 있으며 이러한 상황이 반복될 경우 차량개발 시간과 비용이 증가하게 된다.

본 연구는 북미NCAP 측면 MDB 충돌시험¹⁾ 평가시 불명확한 성능 평가로 인해 야기되는 개발시간과 비용의 증가를 줄이기 위해 저비용, 고효율의 측면시스템 해석 모델과 통계적 분석방법을 이용하여 측면 충돌 시험 후 차량 성능을 명확하게 검토할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

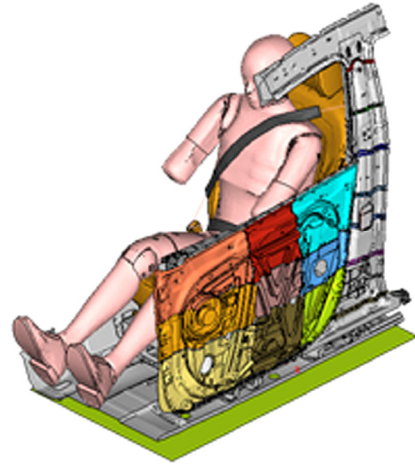


Fig. 1 Side system model

2. 측면 시스템 모델

2.1 측면 시스템 모델 개발

해석을 이용하여 차량의 성능을 확률적으로 판단하기 위해서는 차량성능에 영향을 미치는 인자들을 설계변수로 정의하고 이를 변경하여 다양한 조건에 대한 결과를 빠르게 얻어야 한다. 이러한 작업을 위해 완성차 모델을 활용할 경우 해석시간의 증가로 개발 기간을 맞추기 힘들고 차체변형과 같은 더미(Dummy)상해에 영향을 주는 인자의 조건을 임의로 변경하기 어려워 통계분석 이용에 한계가 있다.

본 연구에서는 완성차 해석 모델을 이용할 경우 발생하는 문제점을 개선하여 통계 분석에 쉽게 적용할 수 있는 Fig. 1과 같은 측면 시스템 모델을 LS-DYNA²⁾ 해석 코드를 이용하여 개발하였다. 측면 시스템모델은 측면 충돌시 더미 상해에 영향을 미치는 Front LH Door, B-Pillar LH, Front Seat, SAB, Front Seatbelt로 구성된 모델로서 측면 충돌시 발생하는 완성차의 글로벌 차량 거동과 로컬한 차체 변형을 재현할 수 있다. 특히, 로컬한 차체 변형을 재현하기 위해 Front LH Door 판넬을 9등분, B-필라를 8등분으로 나눈 후 각 영역을 *CONSTRAINED_JOINT_TRANSLATIONAL_MOTOR 키워드³⁾를 이용하여 변형량을 조절할 수 있도록 구성하였다. 이 측면 시스템모델은 더미 상해에 영향을 미치는 인자 값을 자유롭게 제어할 수 있어, 시험/해석간의 코릴레이션이 용이하며 해석시간이 완성차 해석대비 75% 감소하여 통계분석 활용에 적합한 모델이다.

3. 상해 영향인자 통계분석

3.1 시험-해석 정합성 검토

통계 분석을 위해서는 시험-해석 사이에 정합성이 높은 해석모델이 필요하다. 본 측면 시스템 모델은 더미 상해에 영향을 미치는 인자 값의 변경이 자유로워 완성차 해석대비 시험-해석 코릴레이션이 용이하다.

즉, 도어 변형량, B-Pillar 변형량의 크기를 자유롭게 조절할 수 있어 시험 결과와 정합성이 높은 해석 결과를 얻을 수 있다. Fig. 2와 Table 1은 시험-해석 코릴레이션 결과로써 가슴 변위 최대값 기준 시험-

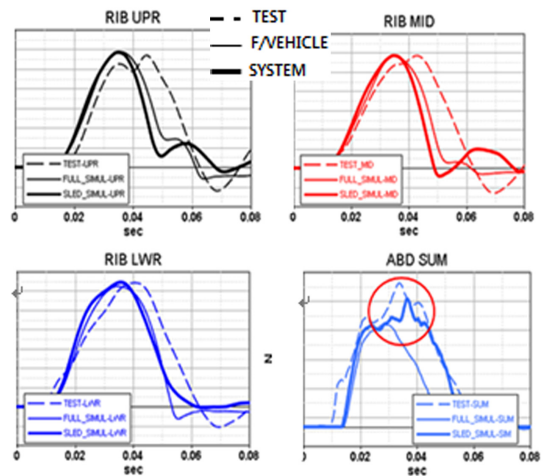


Fig. 2 Comparison of simulation-test injury curve

Table 1 Comparison of test-simulation injury result

		Test-simulation
Chest	UPR	-0.9(3 %)
	MID	0(0 %)
	LWR	-0.1(0.3 %)
ABDOMEN	FR	+119(30 %)
	MID	-8(1.6 %)
	RR	+55(8.7 %)
	SUM	+165(11 %)
PELVIS		+124(5.1 %)

해석 3 % 이내 차이만이 발생하고 있고 특히, 복부 상해의 경우 30~40 ms에 발생하는 피크(Peak)개형이 완성차 해석결과 대비 시험결과를 잘 표현하고 있다.

3.2 설계변수 DOE 샘플링 해석

설계인자의 변화범위에서 더미 상해에 대한 모집단을 대표하는 표본을 산출하기 위해 Hyperstudy⁴⁾에서 제공하는 Hammersley⁵⁾ 방법을 이용하여 DOE (Design of Experiment) 샘플링 해석을 210회 수행하였다. 이때 반응(Response)인자로는 ES-2re 더미⁶⁾ 상해를 나타내는 가슴 Upper/Middle/Lower 변위, 복부 하중, 골반하중 총 5개 인자를 선정하였고 반응값에 영향을 미치는 설계인자인 도어 변형량, B-Pillar 변형량, 측면 시스템 글로벌 Y 방향 이동량, SAB 벤트홀(Vent Hole) 크기, 총 19개 인자를 설계변수로 정의하였다.

설계인자의 초기값, 상/하한값을 Table 2에 정리하였다. 여기서 정의된 도어 변형량, B-Pillar 변형량 그리고 측면시스템 글로벌 이동량의 초기값 및 상/하한값은 시험시 발생 할 수 있는 변형량을 표현하기 위해 각 부분의 변형량에 곱해지는 스케일(Scale) 값이다.

3.3 반응값 정규성 검증

210회 샘플링 해석으로부터 더미의 가슴, 복부, 골반 상해 결과, 즉 반응값을 얻었다. 본 연구에서는 반응값의 모집단이 정규분포를 이루고 있어야 함으로 샘플링 해석의 표본 결과를 이용하여 반응값의 모집단에 대한 정규성을 검증했다.⁷⁾ 모집단의 정규성 검정을 위해 본 연구에서는 먼저 반응값들에 대

Table 2 Definition of design variables

Design variable	Initial value	LWR bound	UPR bound
DR_UPR_FR	1.0	0.8	1.2
DR_UPR_MID	1.0	0.8	1.2
DR_UPR_RR	1.0	0.8	1.2
DR_MID_FR	1.0	0.8	1.2
DR_MID_MID	1.0	0.8	1.2
DR_MID_RR	1.0	0.8	1.2
DR_LWR_FR	1.0	0.8	1.2
DR_LWR_MID	1.0	0.8	1.2
DR_LWR_RR	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO1	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO2	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO3	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO4	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO4_1	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO5	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO6	1.0	0.8	1.2
BPLR_NO7	1.0	0.8	1.2
VHOLE	80	65	95
PLATEY	1.0	0.8	1.2

해 Box plot을 이용한 특이치 데이터 검토를 실시하였다. 특이치 데이터 검토 결과 210개 데이터 중 40개 특이치를 확인하였으며 이를 삭제하고 각 반응값 당 170개 데이터를 이용하여 모집단에 대해 미니탭(Minitab)을 이용하여 Anderson-Darling 정규성 검정⁷⁾을 실시하였다. 정규성 검정 결과 가슴 Upper/Middle/Lower 변위, 골반 하중은 p 값이 0.05 이상이나와 정규성을 만족 하였으나 복부 하중의 경우 p 값이 0.05보다 작아 정규성 검정에 실패했다. 복부 하중에 대한 정규성을 확보하기 위해 미니탭에서 제공하는 Johnson 변환⁸⁾을 이용하여 식 (1)과 같은 변환식을 얻어

$$-0.941362 + 1.01828 * \text{Asinh}((X - 1214.1) / 125.469) \quad (1)$$

복부 하중값을 변환 후 정규성 검정을 재 실시한 결과 p 값이 0.05를 넘어 정규성 검정을 완료했다.

3.4 반응값 모 평균/표준편차 구간 추정

3.3에서 각 반응값의 모집단이 정규분포임을 확률적으로 확인했으므로 반응값 모집단 평균과 표준

편차를 구간추정 할 수 있다. 식 (2)는 모 평균을 식 (3)⁹⁾은 모 표준편차를 구간 추정하는 식으로서,

$$\bar{X} - t_{1-\frac{\alpha}{2}(\phi)} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + t_{1-\frac{\alpha}{2}(\phi)} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

where

- \bar{X} : sample mean
- $t_{1-\frac{\alpha}{2}(\phi)}$: t distribution
- α : significance level
- S : sample standard deviation
- n : number of data
- σ : population standard deviation
- ϕ : degree of freedom

본 연구에서는 이를 이용하여 신뢰수준 95 %로 모 집단의 평균과 표준편차를 구간 추정하였다. Table 3은 샘플링해석 결과로 나온 반응값의 모 평균과 표준편차를 구간 추정한 결과이다.

$$\frac{(n-1)s^2}{X^2_{1-\frac{\alpha}{2},\phi}} < \sigma^2 < \frac{(n-1)s^2}{X^2_{\frac{\alpha}{2},\phi}} \quad (3)$$

where

- $X^2_{1-\frac{\alpha}{2}}$: chi-square distribution
- α : significance level
- S : sample standard deviation
- n : number of data
- σ : population standard deviation
- ϕ : degree of freedom

Fig. 3은 가슴 Upper 변위의 모 평균과 표준편차를 추정한 결과로서 모 평균이 29.55~30.26 mm 사이

Table 3 Population mean and standard deviation interval estimation result of response

	Mean	Standard deviation
Rib upper	29.55~30.26	2.23~2.63
Rib middle	28.84~29.64	2.37~2.94
Rib lower	31.49~32.25	2.25~2.79
Abdomen	-0.14744 ~ 0.169645	0.94~1.17
Pelvis	2324.6 ~ 2424.7	298.7 ~ 369.9

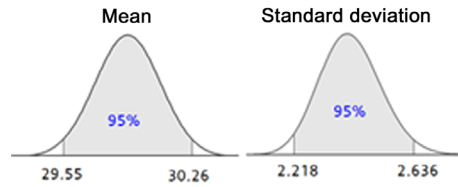


Fig. 3 Population mean and standard deviation of rib upper displacement

에 있을 확률이 95 %이고 모 표준편차가 2.218~2.636 사이에 있을 확률이 95 %임을 나타낸다.

3.5 반응값 정규분포 산출

3.4에서 각 반응값의 모 평균과 표준편차를 구간 추정하였으므로 이를 이용하여 모 집단을 대표하는 정규분포를 구할 수 있다. 본 연구에서는 구간 추정된 모 평균과 표준편차의 최소/최대값을 조합하여 각 반응값 당 4개의 정규분포를 구하였다. 가슴 Upper 변위의 경우 모 평균의 최소/최대값 29.55와 30.26, 모 표준편차의 최소/최대값 2.13과 2.63을 조합하여 Fig. 4와 같이 4개의 정규분포를 구할 수 있다.

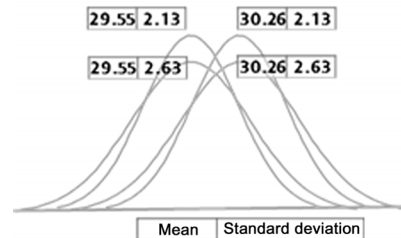


Fig. 4 Normal distribution of Rib upper displacement

Table 4 Population mean and standard deviation combination of response

	Mean	STD div.		Mean	STD div.
	Rib MID	28.84		2.37	Abdomen
28.84		2.94	-0.14744	1.172	
29.64		2.37	0.16964	0.9464	
29.64		2.94	0.16964	1.172	
Rib LWR	Mean	STD div.	Pelvis	Mean	STD div.
	31.49	2.25		2324.6	298.7
	31.49	2.79		2324.6	369.9
	32.25	2.25		2424.7	298.7
	32.25	2.79		2424.7	369.9

가슴 Middle/Lower, 복부하중, 골반하중에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 각각에 대해 4개의 평균과 표준편차 조합을 만들었고 이를 Table 4에 정리하였다.

4. 성능목표 달성확률

C세그 차량 북미NCAP 측면 MDB 시험 전석 상해 목표를 가슴변위 26 mm 이하, 복부하중 1 kN 이하, 골반하중 3 kN 이하로 정하고, 이때 성능목표 달성 확률이 90 % 이상일 경우 개발 성능목표를 달성한 것으로 판단하겠다. 3.5에서 각 반응값에 대한 모집단을 대표하는 정규분포를 4개씩 구했으므로 이를 이용하여 개발 목표 이하의 값이 나올 확률을 각각의 정규분포를 이용하여 구할 수 있다. 가슴 Upper 변위의 경우 Fig. 5와 같이 4개의 정규분포로부터 26 mm 이하가 나올 확률 구간이 2.3~8.8 %인 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 방법으로 각 반응값에 대해 목표달성 확률 구간을 구한 결과를 Table 5에 정리하였다. 가슴 변위의 경우 최악조건 목표달성확률이 0.3~2.4 %로서, 이 수치는 개발목표 달성확률 90 % 이상을 만족시키는데 매우 부족한 결과이다. 또한, 복부하중 달성확률 0.5~3.6 % 역시 목표를 만족시키지 못하고

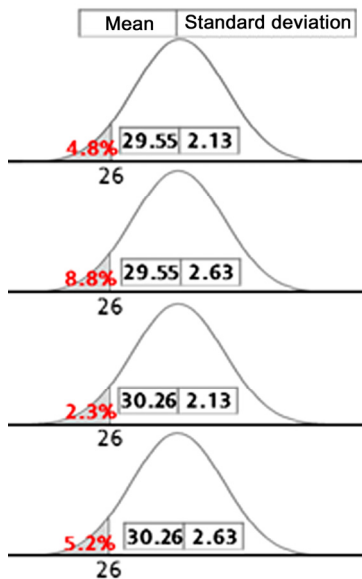


Fig. 5 Target achievement probability

Table 5 Interval of response target achievement probability

Rib MID	6.2 ~ 16.7 %
Rib LWR	0.3 ~ 2.4 %
Abdomen	0.5 ~ 3.6 %
Pelvis	94.0 ~ 98.8 %

있다. 하지만 골반 상해의 경우 달성확률이 94.0~98.8 %로서 목표를 만족하고 있다. 이상의 결과로 현 차량 시스템으로 동일한 시험을 반복할 경우 가슴과 복부 상해가 개발 목표를 만족시킬 수 없음을 확률적으로 확인 할 수 있으며 차량의 성능을 향상시키기 위해서는 SAB 벤트홀 변경과 같은 단편적인 개선이 아닌 SAB 사양 변경이나 차체 추가 보강, 차량 부품의 패키지레이아웃 변경과 같은 근본적인 개선이 필요하다는 것을 의미하며, 개선 방향 검토시 210회의 샘플링 해석 결과를 이용할 수 있다.

5. 성능목표 달성확률구간 신뢰성 검증

본 연구에서 구해진 목표달성 확률구간은 다수의 모 평균과 표준편차 중 최대/최소 값을 조합하여 만들어진 정규분포를 이용하여 산출된 확률로서 이에 대한 신뢰성을 검토하는 것이 필요하다. 이를 위해 미니탭에서 제공하는 랜덤 데이터 생성기능과 식 (4)⁸⁾를 이용하여 10000개의 모 평균을 생성하고, 모 표준편차도 랜덤 데이터 생성기능과 식 (5)⁸⁾를 이용하여 10000개의 모 표준편차를 생성한다. 이렇게 만들어진 10000개의 모 평균, 표준편차를 엑셀에서 제공하는 NORM.DIST()를 이용하여 반응값의 개발 목표치 이하가 나올 확률을 구한 후 이 값들이 3.3에서 검토한 목표달성 확률구간 사이에 몇 개 있는지를 확인하게 되면 목표달성 확률구간의 신뢰성을 확률적으로 검토할 수 있다. 가슴 Upper 변위의 경우 26 mm이하가 나올 확률 2.3~8.8 %사이에 있는 데이터의 개수가 10000개 중 9934개 이며 이는 Upper 변위의 목표달성 확률구간 신뢰성이 99.34 %라는 것을 확률적으로 나타내는 것이다.

$$\mu = \bar{X} - t^* \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{X^2}} \quad (5)$$

Table 6 Reliability of target achievement probability interval

Response	Reliability
Rib UPR	99.34 %
Rib MID	99.57 %
Rib LWR	99.34 %
Abdomen	99.12 %
Pelvis	99.39 %

where

- \bar{X} : sample mean
- t : t distribution
- s : sample standard deviation
- n : number of data
- μ : population mean
- X^2 : chi-square distribution

동일한 방법으로 각각의 반응값에 대해 목표달성 확률구간의 신뢰성을 검토한 결과를 Table 6에 정리하였으며 각 반응값의 목표달성 확률구간의 신뢰성이 99 % 이상임을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 측면 시스템해석 모델을 이용하여 차량의 충돌 성능을 확률적으로 평가할 수 있는 방법을 제안한 것으로, 이에 대한 성과는 다음과 같다.

- 1) 측면충돌 시험-해석 코릴레이션이 용이하고 완성차 대비 해석 시간을 줄일 수 있으며 성능에 영향을 미치는 인자에 대해 상세 검토가 가능한 측면 시스템해석 모델을 개발하였다.
- 2) 충돌시험 후 차량의 충돌 성능을 확률적으로 평가할 수 있고 성능개발목표 불만족시 개선안을 제시할 수 있는 방법론을 만들었다.

References

- 1) H. K. Beom, "Statistical Review for New USNCAP Side Crash Test Results," Transactions of KSAE, Vol.21, No.2, pp.104-113, 2013.
- 2) Livermore Software Technology Coporation, www.lstc.com, 2017.
- 3) Livermore Software Technology Coporation, LS-DYNA MANUAL, Vol.1, R7.1, pp. 422-435.
- 4) Altair Engineering Inc., www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/hw13.0/help/hst/hst.htm?hyperstudy_introduction.htm, 2017.
- 5) Altair Engineering Inc., www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/hw13.0/help/hst/hst.htm?hammersley.htm, 2017.
- 6) Humanetics Innovative Solutions, www.humaneticsatd.com/crash-test-Dummies/side-impact/es-2re, 2017.
- 7) Minitab Inc., http://support.minitab.com/ko-kr/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/normality/test-for-normality/, 2017.
- 8) Minitab Inc., support.minitab.com/ko-kr/minitab/17/topic-library/quality-tools/capability-analyses/distributions-and-transformations-for-nonnormal-data/data-transformations/#what-does-the-johnson-transformation-do, 2017.
- 9) B. H. Kim, K. J. Cha, K. H. Dong, I. H. Jang and Y. S. Park, "Probability and Statistics for Engineering and Natural Science," Free Academy, No.2, pp.154-158, pp.176-177, pp.181-182, 2009.