

호주 신차안전도평가의 하부다리 상해치 개선을 위한 경차의 Footrest 형상 최적화

김요셉* · 이만수* · 남정인* · 한재녕*

Footrest design optimization of a small vehicle to improve ANCAP lower leg injury

Joseph Kim*, Mansu Lee*, Joungin Nam*, Jaenyung Han*

Key Words : Lower Tibia Index(하부다리상해치), ANCAP(호주신차안전도평가), ODB(Offset Deformable Barrier), DFSS(Design For Six Sigma), Footrest(발판)

ABSTRACT

In order to protect occupant during car crash accident, Regulation and NCAP(New Car assessment Program) have been developed among various countries like U.S.A., Europe, Korea and Australia. Especially NCAP scores affect to sales of vehicles. So vehicle makers are trying to get good score in NCAP. Low leg injuries play an important role in Australia and Euro NCAP and these injuries are related with footrest design. Optimization of footrest design in early stage of vehicle development is necessary to obtain better and robust results of low legs during crash tests. In this paper, DFSS method and finite element model were used to optimize the low leg performance in small RHD vehicles. Compared with the lower leg injury of base model, the lower leg injury of proposed model was slightly improved and robustness was enhanced also.

1. 서론

자동차의 숫자가 증가함에 따라 자동차 사고의 빈도수도 증가하고 있다. 이런 사고에 대하여 승객을 안전하게 보호하기 위해서, 각 국에서는 NCAP(New Car Assessment Program)을 실시하고 있고, 대표적인 나라는, 유럽, 미국, 호주, 한국, 중국 등이 있다. 이러한 NCAP의 결과는 자동차 판매에도 영향을 주기 때문에 제작사에서는 좋은 점수를 얻기 위해서 노력하고 있는 중이다. 특히 경차의 경우, 공간의 제약에 의해 좋은 점수를 얻기 어렵고, 하부다리의 상해치의 경우 차량의 변형에 민감하기 때문에 하부다리 상해치 개선

에 어려움이 많다. 발판 형상 또한 하부다리 상해치와 관계가 있는데, 공간과 편안함(Comfort)에 대한 제한도 있기 때문에 하부다리 상해치의 개선은 쉽지 않다.^{(1),(2)} 특히 경차의 RHD(Right Hand Drive)차량의 경우 공간의 제약이 크기 때문에 발판을 설계하는데 있어서 어려움이 큰 것이 실정이다.

본 논문에서는 경차의 공간적인 제한 조건과 편안함을 고려하면서 호주 신차 안전도 평가의 운전석 왼쪽 하부다리의 상해치를 개선하기 위하여, 발판(Footrest)의 형상최적화를 진행하였다. 이것을 위해 DFSS(Design for Six Sigma) 기법을 이용한 유한요소해석으로 강건한 최적 디자인을 찾았다. 유한요소해석을 위해서 LS-Dyna를 이용하였다.

* GM Korea
E-mail : joseph.kim@gm.com

2. 호주 신차 안전도 평가

2.1. 정면충돌모드

호주신차안전도 평가의 정면 충돌 평가는 Fig. 1과 같은 모드로 진행을 한다. 차량을 64 km/h로 견인을 하여, 차량의 40%부분을 변형벽(ODB, Offset Deformable Barrier)에 정면으로 충돌시킨다. 사용되는 인체 모형은 H3 50thile 더미를 사용하며, 운전석과 조수석에 위치를 시킨다.

평가는 더미의 각 신체 부위의 상해치로부터 계산을 하며, 0에서 4점까지 보간법에 의해 점수를 산출한다. 이 점수를 합하여 총점을 계산 한 후 별을 이용하여 최대 5개까지 부여를 하게 된다. 각 신체 부위는 머리와 목, 흉부, 상부다리 그리고 하부다리로 나누게 된다. 신체 부위의 점수에 따라 Fig. 2와 같이 녹색부터 빨간색까지 색으로 표시를 하여, 자동차의 안전 성능이 각 부위별로 어떻게 나타나는지 표시를 하게 된다.

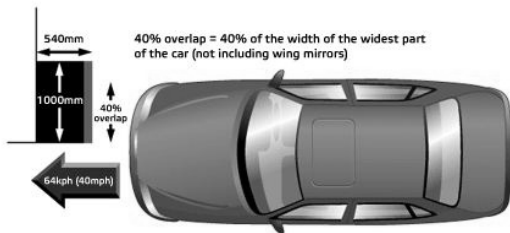


Fig. 1 Schematic of the ANCAP frontal test mode

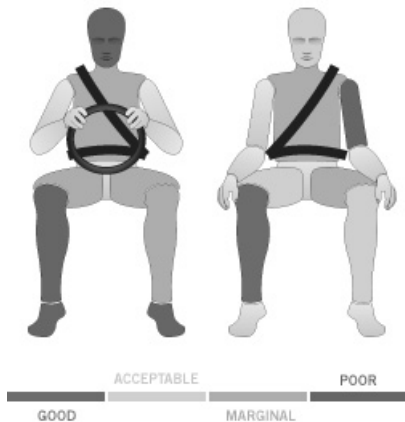


Fig. 2 Injury assessment diagram of ANCAP frontal tests.

2.2. 하부다리상해치

호주신차안전도평가에서는 하부다리상해치로 정강이뼈 압축하중과 정강이뼈 지수 값으로 평가를 한다. 정강이뼈 압축하중은 정강이뼈의 축방향으로 가해지는 하중을 측정하며, 정강이뼈 지수는 식(1)과 같이 구해진다.^{(3),(4)}

$$TI = \left| \frac{M_R}{(M_C)_R} \right| + \left| \frac{F_Z}{(F_C)_Z} \right| \quad (1)$$

where

$$M_R = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2}$$

$$(M_C)_R = 225.0 \text{ Nm}$$

$$(F_C)_Z = 35.9 \text{ kN}$$

이 정강이뼈 지수(TI, Tibia Index)와 정강이뼈 압축하중은 Table 1과 같은 한계값을 가지고 평가한다. 이 한계값에 보간법을 이용하여 최대 4점의 점수를 가질 수 있다. 정강이뼈 지수와 정강이뼈 압축하중 중 최저점을 최종적으로 선택을 하여 총점 계산에 이용한다.

Table 1 Injury assessment of lower leg

	Low limit		High limit	
	Injury	Score*	Injury	Score*
Tibia Index	1.3	0	0.4	4
Axial Force (kN)	8.0	0	2.0	4

* Interpolation

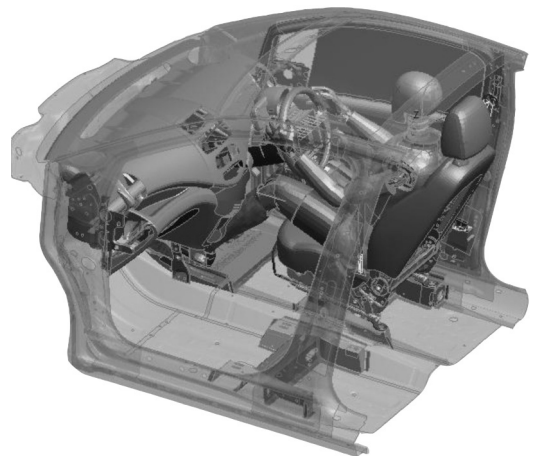


Fig. 3 CAE model for analysis

3. Development Concept for optimization

3.1. 개발절차

차량개발을 위하여, 설계단계에서 해석을 통하여 디자인을 최적화 하는 것이 중요하며, 특히 발판의 경우 그 형상에 따라 하부다리 상해치에 큰 영향을 미치기 때문에 형상의 최적화가 차량초기 단계에서부터 요구되어진다.

본 연구에서는 차량개발 초기단계에 다리 상해치를 줄이고, 승객의 편안함도 줄 수 있도록 DFSS기법과 유한요소해석을 통하여 Footrest 형상을 설계하였다. DFSS를 위한 유한요소해석은 개발차량의 이전 모델로 진행을 하였다.

3.2. CAE 모델

CAE를 통하여서 하부다리 상해치를 최적화하기 위해서 먼저 유한요소모델을 구성하였다. 모의충돌시험 모델로 실차의 앞부분 반을 모델링을 하였고, 여기에 실차 충돌 해석으로부터 얻어진 감속도 펄스를 사용하였다. Dash panel의 변형 또한 실차 충돌 해석으로부터 가져와서 CAE 모델에 반영하였다. Fig. 3은 여기에 사용된 모델을 보여주고 있다.

이 전 모델 차량의 경우 RHD차량에 대해서는 발판이 없었다. 따라서 발판이 없이 본 모델을 실차 충돌 시험과 Correlation을 진행하였고, 더미의 하부다리 상해치 펄스는 Fig. 4와 같다. 그리고 그 값들을 Table 2

에 정리하였다.

본 Correlation된 모델을 가지고, 선행적으로 Footrest가 하부다리 상해치에 미치는 영향을 보기 위하여 Base footrest 모델에 대한 해석을 진행을 하여, 기본이 되는 Footrest 없는 모델과 비교를 하였다. 그 결과 Footrest가 있는 경우, Footrest에 얹어지는 왼쪽 다리의 위쪽 압축하중의 증가로 인하여, Tibia index point가 약 0.6 점 감소하게 되었다. 따라서 기본 Base가 되는 footrest의 디자인을 최적화가 필요하였다.

Table 2 Correlation Results without footrest

Performance Criteria		CRASH		CAE	
		Result	Point	Result	Point
Lower Leg	TI LH upper	0.65	2.889	0.71	2.622
	TI LH lower	0.47	3.698	0.49	3.600
	Comp. LH	3.87	2.753	2.63	3.580
		2.753		2.622	

4. DFSS를 통한 최적화

최적의 Footrest의 형상을 찾기 위해서, DFSS를 진행을 하였다. Fig. 5에 사용된 P-diagram을 나타내었다. 최적화 해야 할 제어인자는 Footrest의 Roll각도, EA foam의 stiffness, Footrest의 폭, 그리고 footrest의 pitch 각도로 삼았다. 특히, footrest의 폭은 위쪽부분과 아래쪽 부분을 조합하여 하나의 제어인자로 만들어 사용하였다.

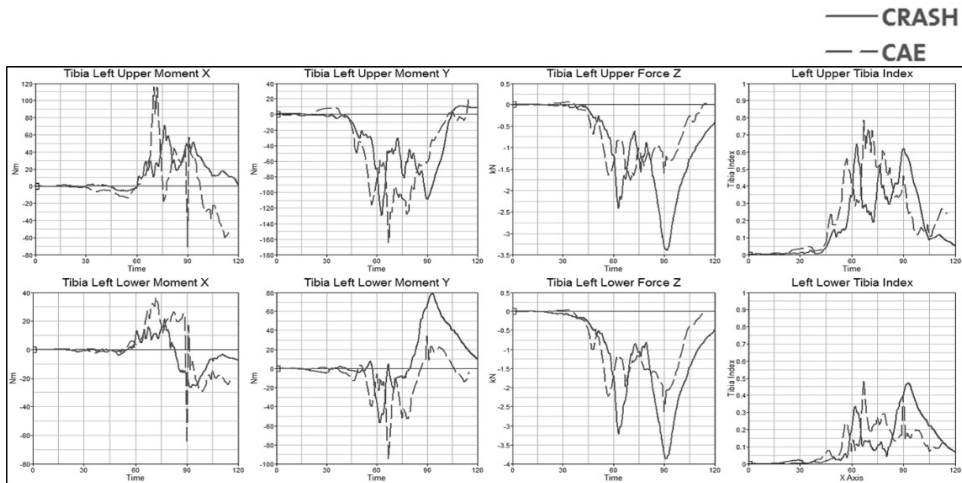


Fig. 4 Correlation Pulses : Crash Test vs CAE

강건한 설계를 위하여 노이즈는 발을 놓는 위치의 편차, 무릎 사이의 거리 편차 그리고 더미의 H-point 에 대한 편차로 삼았다.

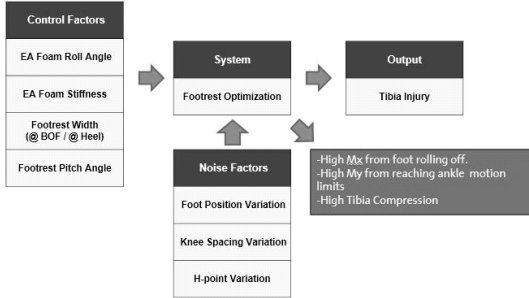


Fig. 5 P-diagram for optimization using DFSS

4.1. 제어인자

제어인자들은 Table 3과 Fig. 6에서 보는 것처럼 4 개로 구성을 하였다. 이때, 발판의 높이는 운전자의 편안함을 고려하여 240 mm로 하였으며 각 제어 인자도 운전자의 편안함을 고려하여 설정을 하였다.

Table 3 Control factors of DFSS

	Control Factor	1	2	3
A	EA Foam Roll Angle (deg)	-10	0	+10
B	Carpet insert EA Stiffness/ density (kg/m ³)	40	25	55
C	Width @ BOF (mm)	60	73	81
	Width @ Heel (mm)	29	42	50
D	Pitch Angle of rearward surface (deg)	146	136	126

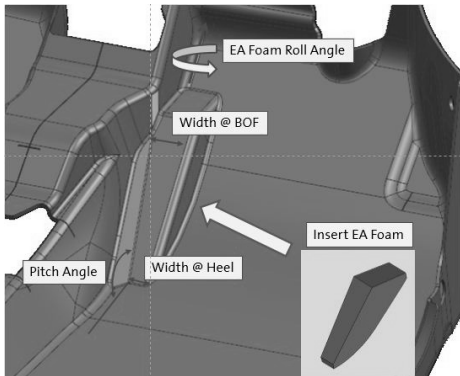


Fig. 6 Picture of control factors from the mother vehicle

4.2. 노이즈 인자

노이즈 인자로는 시험에서 인체모형을 착석시킬 때 발생 될 수 있는 편차들로 삼았다. 첫 번째 노이즈 인자는 발이 앞뒤로 위치 시켜 지는 것이고, 두 번째 인자는 무릎사이의 간격으로 설정하였다. 세 번째는 H-point의 편차를 노이즈로 삼았다. 설정 범위는 Table 4에 나타내었으며, 각 노이즈를 Fig. 7에 나타내었고, 선행 해석을 통하여, 노이즈를 가장 좋은 조건과 가장 나쁜 조건 하나로 만들어 Table 5에 표시하였다.

Table 4 Noise factors for optimization

Noise Factors		N1	N2
A	Foot position variation	Foremost (-10 mm)	Rearmost (+10 mm)
B	Knee spacing variation	Small (-10 mm)	Large (+10 mm)
C	H-point variation	Foremost (-13 mm)	Rearmost (+13 mm)

Table 5 Noise combining from Pre-CAE analysis

Noise	Worst	Best
Foot position variation	+10 mm	-10 mm
Knee spacing variation	-10 mm	+10 mm
H-point variation	-13 mm	+13 mm

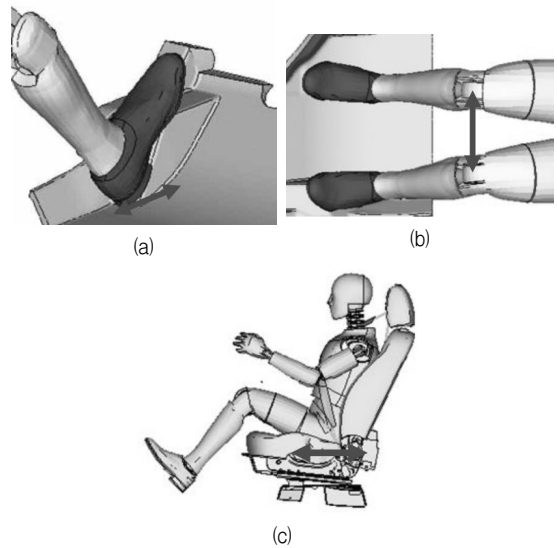


Fig. 7 Schematics of Noise : (a) Foot forward position (b) Distance between knees (c) H-point forward direction

Table 6 Simulation results of DOE

Run	EA foam Roll Ang.	EA Foam Stiffness	Footrest Width	Footrest Pit. Ang.	N1(Best Condition)				N2(Worst Condition)			
					Upper TI	Lower TI	Tibia Comp.	Lower Leg Assess.	Upper TI	Lower TI	Tibia Comp.	Lower Leg Assess.
	A	B	C	D								
1	1	1	1	1	0.65	0.90	4.08	1.778	0.59	0.69	2.77	2.711
2	1	2	2	2	0.62	0.77	3.71	2.356	0.89	0.73	3.84	1.822
3	1	3	3	3	0.87	0.53	2.78	1.911	0.95	0.71	2.61	1.556
4	2	1	2	3	0.68	0.69	3.08	2.711	0.96	0.64	3.84	1.511
5	2	2	3	1	0.78	0.42	2.42	2.311	0.80	0.45	4.01	2.222
6	2	3	1	2	1.00	0.84	4.29	1.333	0.93	0.67	4.61	1.644
7	3	1	3	2	0.68	0.72	3.52	2.578	0.61	0.98	5.05	1.967
8	3	2	1	3	1.03	1.39	4.51	0.000	1.48	1.52	4.38	0.000
9	3	3	2	1	0.77	0.41	2.38	2.356	0.70	0.77	2.89	2.356

4.3. DOE와 최적화

하부다리 상해치를 개선하기 위한 최적 디자인을 찾기 위해서 L9 직교배열표를 사용하였다. Table 6에 L9 직교배열표에 따른 제어인자의 구성과 각 해석 결과를 표시하였다.

평균 값과 S/N를 통하여 최적의 제어인자 조합을 찾기 위해 Fig. 8에 평균값과 S/N 민감도 분석을 나타내었다. 이 그래프들을 이용하여 각 인자의 좋은 조건들을 골랐다. 이 때, 두 가지 경우를 선택하였는데, 평균값 관점에서 상해치가 작은 경우와 S/N가 커서 강건성이 높아지는 경우를 선택하여 Table 7에 표시하였다. Opt #1은 Average값이 작은 것으로 최적화된 점을 나타내었고, Opt #2는 평균 값은 약간 높지만, S/N 값이 Opt #1보다 조금 높은 것으로 최적화된 것이다.

최적화를 검증하기 위하여 DFSS를 통하여 예측된 값과 실제 최적 조합의 CAE를 진행하였고, 이 결과를 Table 8에 나타내었다. 예측 값의 경우, Base Case에서 2.000의 점수를 받았고, Opt #1과 Opt #2는 각각

2.978과 3.520의 향상된 성능을 예측하였다. 이 제어인자의 조합을 CAE로 확인을 하면, Base Case는 2.178을 나타내었고, Opt #1은 2.311, Opt #2는 2.267을 나타내었다. 이 두가지 경우 중 평균 값이 조금 크지만 강건성이 큰 Opt #2를 최종 형상으로 선정하였다.

Table 7 Optimized case

	A	B	C		D
			BOF	Heel	
Opt #1	-10	55	81	50	126
Opt #2	-10	40	81	50	126

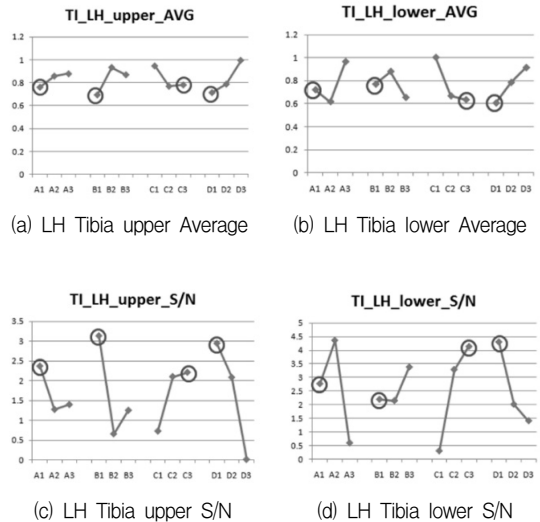


Fig. 8 Sensitivity Analysis with respect to control and noise factors

Table 8 DFSS Prediction and Verification

		DFSS Prediction			CAE Confirmation		
		Base	Opt #1	Opt #2	Base	Opt #1	Opt #2
Tibia Upper Index	Injury	0.85	0.63	0.46	0.81	0.78	0.79
	Rating	2.000	2.978	3.733	2.178	2.311	2.267
	S/N	1.08	3.73	5.61	1.24	2.08	1.99
Tibia Lower Index	Injury	0.65	0.31	0.43	0.62	0.40	0.43
	Rating	2.889	4.000	3.867	3.022	4.000	3.867
	S/N	4.08	6.86	5.68	4.62	7.84	7.23
Tibia Comp. Force	Injury	4.19	2.25	2.71	3.64	3.21	3.06
	Rating	2.540	3.833	3.520	2.907	3.193	3.293
	S/N	-12.66	-7.85	-9.41	-11.93	-10.33	-10.11
Injury Assessment		2.000	2.978	3.520	2.178	2.311	2.267

5. 결론

Footrest의 유무 및 형상은 하부다리 상해치에 영향을 준다. 또한 이 footrest는 승객의 편안함과도 관계가 있기 때문에 그 형상에 대한 설계는 중요하다.

본 연구에서는 하부다리상해치를 개선하기 위하여, DFSS기법을 사용하여 그 형상을 최적화 하였다. 제어 인자로 footrest의 Roll angle, EA foam Stiffness, footrest 폭, 그리고 footrest의 pitch angle이다. 강건한 설계를 위하여 충돌시험 시 인체모형을 착석 시킬 때

나타날 수 있는 편차를 노이즈 인자로 삼았고, L9 직교 배열표를 이용하여 DFSS를 진행하였다.

그 결과 평균 값이 우수한 경우와 S/N값이 우수한 경우를 선택하였고, 이 모델에 대하여 확인 CAE를 했을 때, 하부다리 상해치의 값이 초기 모델 대비 각각 0.133과 0.089점의 개선 효과가 있었고, 기본 모델에 비하여, S/N 값에서 개선을 하여 조금 더 강건한 디자인을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) D.W. Park, S.J. and W.S. Yoo, 2007, "Study on Relationship between Discomfort and Body Pressure Distribution on the Seat under Height of Footrest and Angle of Seatpan", Transaction of KSAE, Vol. 15, No. 6, pp. 38~43.
- (2) H.S. Lee, I.K. Kim, and Y.J. Ko, "Footrest Optimization for the Improvement of Lower Leg Injury", 2010, KSAE Annual Conference, KSAE10-A0459, pp. 2589~2593.
- (3) Euro NCAP, "Assessment Protocol - Adult Occupant Protection", 2013, Ver. 6.0
- (4) ANCAP, "ANCAP Notes on the Assessment Protocol", 2012, Ver. 5.1