◎ 논 문

Q6, Q10 어린이 인체모형 상해치에 대한 안전 구속 시스템 최적화 연구

선홍열* · 이슬* · 김기석* · 윤일성*

The study of optimization of restraint systems for injuries of Q6 and Q10 child dummies

Hongyul Sun*, Seul Lee*, Kiseok Kim*, Ilsung Yoon*

Key Words: CRS(어린이 보호 장치), Restraint system(안전 구속 시스템), ENCAP(유럽 신차 안전도 평가), KNCAP(한국 신차 안전도 평가), Injury(상해치), Input signal(입력신호), Control factor(제어인자), Output response(출력반응), Sled test(슬레드 시험), ISOFIX(유아용 시트 고정장치)

ABSTRACT

Occupant protection performance in frontal crashes has been developed and assessed for mainly front seat occupants over many years, and in recent years protection of rear seat occupants has also been extensively discussed. Unlike the front seats, the rear seats are often occupied by children seated in rear-facing or forward - facing child restraint systems, or booster seats. In the ENCAP, child occupant protection assessments using 18-month-old(P1.5) and 3-year-old(P3) test dummies in the rear seat have already been changed to new type of 18-month-old (Q1.5)and 3-year-old(Q3) test dummies. In addition, ENCAP are scheduled with the development and introduction of test dummies of 6-year-old (Q6) and 10.5-year-old children(Q10) starting 2016. In KNCAP, Q6 and Q10 child dummies will be introduced in 2017 as well. Automobile manufacturers need to develop safety performance for new child dummies closely.

In this paper, we focused on Q6 and Q10 child dummies sitting in child restraint system. Offset frontal crash tests were conducted using two types of test dummies, Q6 and Q10 child dummies, positioned in the rear seat. Q6 and Q10 were used to compare dummy kinematics in rear seating positions between Q6 behind the driver's seat and Q10 behind the front passenger's seat. The full vehicle sled test results of both dummies were conducted with different restraint systems. It showed that several injury and image data was collected as the result of the full vehicle sled test. Based on the results of these investigations, this paper describes which factor is most important and combination is the best performance when evaluating rear seat occupant protection for Q6 and Q10 child dummies.

1. 서 론

오랫동안 정면충돌 시험에서 앞좌석에 앉은 승객 보호에 대한 연구가 진행됐고 최근에는 뒷좌석 승객 보호에 대한 논의가 활발해 지고 있다. 뒷좌석에 대한 승객 보호시험은 2009년에 Japan NCAP에서 최초로 시작되었으며 이때 5th %ile 여성 인체모형이 사용되었다.[1] 이후 ENCAP (European New Car Assessment

* GM Korea Company
E-mail : Hongyul.sun@gm.com

Program)을 비롯한 China NCAP, Australasian NCAP 등은 부분 정면충돌 시험 시 앞좌석의 승객 평가뿐만 아니라 뒷좌석 승객 평가를 위해 어린이 인체모형을 사용하고 있다. 특히 ENCAP 은 부분 정면충돌 시험에서 어린이 인체모형인 P1.5, P3에 대한 안전 성능 평가를 진행한 이후 2014년 부터 Q1.5 Q3를 적용해 평가하고 있으며 2016 년부터 이를 Q6, Q10으로 대체해 더욱 큰 어린이에 대한 승객 보호 시험과 평가를 예정하고 있다.[2] 2017년부터 KNCAP (Korean New Car Assessment Program) 역시 부분 정면 충돌 시험에서 뒷좌석에 Q6, Q10에 대한 안전 성능 평가가 추가될 예정[3]이기 때문에 Q6, Q10 어린이 인체모형에 대한 제작사의 안전 성능 개발이 필수적으로 요구되고 있다.

본 논문에서는 한국 지엠에서 생산하는 소형차의 KNCAP 부분 정면충돌 시험 가속도를 슬레드 시험(Sled test)에 적용하여 시험을 진행하였다. 슬레드 시험결과와 함께 DFSS기법을 이용하여 Q6, Q10 어린이 인체모형 상해치 (Injury)와 안전 구속 시스템(Restraint system)의 상관관계를 분석 하였으며, 이를 최적화하여 Q6, Q10의 상해치가 가장 우수한 안전 구속 시스템의 조합을 찾았다. 위의 최적화 조합을 슬레드 시험으로 검증함으로써 분석에 대한 신뢰성을 확보하였다.

2. 본 론

본 논문은 DFSS(Design for six sigma)기법으로 연구를 진행하였으며 방법론 중 IDDOV(Identify/Define/Develop/Optimize/Verify) 절차를 이용하였다.[4] Identify 단계에서 KNCAP 부분 정면충돌 시험 시 Q6, Q10 어린이 인체모형에 상해치에 대한 안전 구속 시스템 최적화라는 목적을 세우고 시험 조건에 대해 분석하였다. Define 단계에서 슬레드 시험 방법과 시험 결과로써 받을 상해치를 결정하였고 Develop 단계에서 4개의 안전 구속시스템으로 이루어진 제어인자와 L_9직교표를 작성하였다. Optimize 단계에서 L_9직교표에 따라 슬레드 시험을 진행하였으며 ANOVA 분석을 통하여 안전 구속 시스템의 최적화를 실시하였다. Verify 단계에서는 최적화된 안전 구속 시스템을 적용해 슬레드 시험을 시행함으로써 DFSS 예측값에 대한 신뢰성을 검증하였다.

2.1. Q6, Q10 어린이 인체모형 안전 구속 시스템 인자

ENCAP, KNCAP 등 부분 정면충돌 시험에서 Q6, Q10의 상해치에 영향을 주는 안전 구속 시스템에 대한 인자는 차량 구조에 따른 가속도, CRS(Child Restraint System), Seat belt RPT(Retractor Pretentioner), Seat belt LPT(Lab Pertentioner), DLT (Dynamic Locking Tongue), 안전벨트의 위치 등 다양하다. 본 논문은 안전 구속 시스템에 대한 최적화가 목적이므로 차량의 특성을 배제한 안전 구속 시스템들을 제어인자로 선정하였다.

		Child dummy injuries		
		Head	Neck	Chest
		Resultant Acc. 3ms	Fz	Resultant Acc. 3ms
Restraint System	CRS	+		+
	Seat belt	+	+	++
	LPT			+
	Belt positions	+		
	DLT			+

Fig. 1 Function matrix for control factors

Fig. 1은 제어인자 선정을 위한 기능 분석표(function matrix)이며 선정 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Control factors

Level	Control factors			
	CRS	Seat belt	Belt position	DLT
Level 1	Britax	NO RPT	Lower	Yes
Level 2	Maxicosi	4kN+1kN (DLL)	Mid	No
Level 3	Clek	5.5kN (CLL)	Upper	

CRS는 Q6, Q10을 모두 착좌시킬 수 있는 CRS 중 Britax사의 Kidfix, Maxicosi사의 Rodifix, Clek사의 OObr로 선정하였다. 이들은 모두 Rigid ISOFIX로 고정하는 형태이며 Backrest가 있고 CRS의 머리 지지대에 안전벨트가 거치 되는 형태이다. 안전벨트는 RPT의 유무와 Load limiter 종류에 따른 상해치의 비교를 위해서 RPT가 들어가지 않은 사양, 4kN+1kN DLL (Declining load limiter), 그리고 5.5kN CLL(Constant

load limiter)의 세 종류를 선택하였다. 안전벨트 위치는 CRS의 머리 지지대의 높이에 따라 달라지기 때문에 CRS 제작사의 설명서상 기본 위치를 Mid로 정하고 이에 따라 머리지지대 20mm 위, 아래를 각각 Lower, Upper 위치로 선정하였다. Fig. 2와 같이 안전벨트의 위치가 한 단계 높아질 때마다 각 인체모형의 중심선과 안전벨트 각도는 1도씩 줄어들었으며 중심선과 안전벨트 교차점의 높이는 10mm씩 높아졌다.

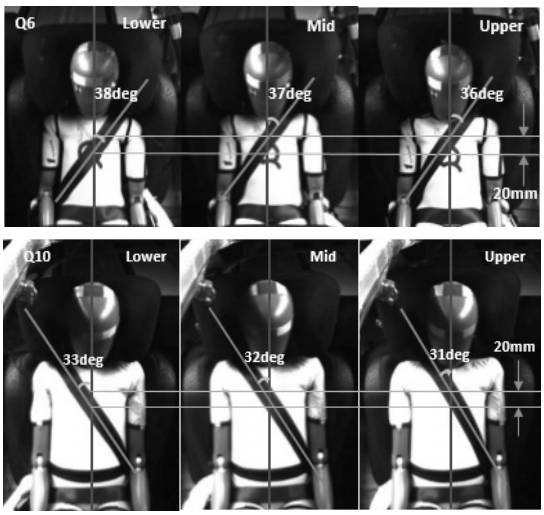


Fig. 2 Q6, Q10 dummy installations according to belt positions

DLT는 인체모형 하부를 구속함에 따라 흉부에 작용하는 힘을 줄여주는 역할을 하며 주로 안전벨트 RPT와 같이 사용되는 안전 구속 시스템이다. 본 논문에서는 DLT 적용에 따른 Q6, Q10 인체모형의 상해치 변화를 알기 위해 적용된 사양과 그렇지 않은 사양 2가지로 제어인자를 결정하였다.

Fig. 1과 Table 1을 통해 완성된 P-Diagram을 Fig. 3으로 나타내었다. 입력신호(Input signal)는 충돌 에너지이며 출력반응(Output response)은 KNCAP과 ENCAP 부분 정면충돌에서 평가되는 Q6, Q10의 상해치인 머리 가속도(Head resultant acc 3ms), 축 방향에 따른 목 하중(Neck Fz), 흉부 가속도(Chest resultant acc. 3ms)로 국한하였다.

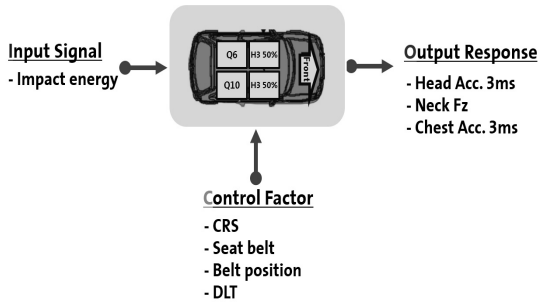


Fig. 3 P-Diagram

2.2. L_9직교표(L_9 orthogonal array matrix)

Table 1에서 선정된 4가지 제어인자로 Table 2와 같이 L_9직교표(L_9 orthogonal array matrix)를 작성하였다. 이 직교표는 Q6, Q10에 대한 최적화된 안전 구속 시스템을 찾기 위한 슬레드 시험과 ANOVA 분산분석을 위한 test matrix이다.

Table 2 L_9 orthogonal array matrix

No.	CRS	Seat belt	Belt positioning	DLT
1	Level 1	Level 1	Level 1	Level 1
2	Level 1	Level 2	Level 2	Level 2
3	Level 1	Level 3	Level 3	Level 2
4	Level 2	Level 1	Level 2	Level 2
5	Level 2	Level 2	Level 3	Level 1
6	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2
7	Level 3	Level 1	Level 3	Level 2
8	Level 3	Level 2	Level 1	Level 2
9	Level 3	Level 3	Level 2	Level 1

2.3. 시험 조건

2.3.1. 슬레드 시험

ENCAP과 KNCAP에서 실시하는 부분 정면충돌 시험은 차 대 차 부분 정면충돌을 재현하기 위한 것으로 평가 대상 차량을 견인해 고정되어 있는 변형벽(Deformable barrier)에 64km/h의 속도로 차량의 폭 40%를 겹쳐서 충돌시키는 방법으로 시험한다. 이때 변형벽은 차량의 강성을 대변하며 64km/h의 시험모드는

서로 달려오는 50km/h차대차 충돌을 재현하기 위한 것이다.[5] 본 논문에서는 위의 부분 정면충돌을 모사하여 Table 2를 따라 슬레드 시험을 시행하였다. 실제 차량 충돌 시험에서 발생한 차량의 가속도 데이터와 슬레드의 가속도 데이터를 일치(correlation) 시켜 시험을 진행하였으며 이때 요잉 (yawing)은 고려대상에서 제외하였다.

Fig. 4 Sled test

2.3.2. 인체 모형 착좌

Q6, Q10 인체모형의 착좌는 IIHS Booster Seat Belt Fit Evaluation Protocol을 참조하였다.[6] Table 3은 인체모형의 착좌 방법을 나타낸다.[7] 이때 1열의 운전석과 조수석은 ENCAP과 KNCAP 부분 정면충돌에서 적용되는 중간 위치로 설정하였다.

Table 3 Q6, Q10 dummy positioning

Protocol	Positioning	
	Q6	Q10
Dummy position	Center of rear LH seat	Center of rear RH seat
CRS installation	Pushing 135±15N on CRS in parallel with seat coushion after positioning center of rear LH or RH seat	
Dummy installation	Pushing 177N on pelvis and chest with 90 deg against seat back	
Seat belt	Pulling 22N on belt after fastening seat belt	
Knee to Knee	170 mm	190 mm
Headrest	Removed	Removed

2.4. 시험 결과 및 분석

2.4.1. 시험 결과

슬레드 시험결과를 Table 4에 정리하였다. Rodifix CRS, Non RPT와 Mid 위치의 안전벨트, DLT는 없는 사양을 적용하여 기본(Base line) 시험을 진행하였으며 이를 기준(Reference)으로 설정하고 결과 상해치를 비율로 나타내었다.

Table 4 Sled test results

No.	Control factor				Injury					
	CRS	Seat belt	Belt Position	DLT	Head acc. 3ms		Neck Fz		Chest acc. 3ms	
					Q6	Q10	Q6	Q10	Q6	Q10
Base	2	1	2	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1	1	1	1	1.09	1.07	1.17	0.71	0.97	1.07
2	1	2	2	2	0.77	0.72	0.81	0.54	0.80	0.93
3	1	3	3	2	0.82	0.78	0.83	0.55	0.85	0.94
4	2	1	2	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	2	2	3	1	0.80	0.57	0.84	0.47	0.80	0.78
6	2	3	1	2	0.80	0.75	0.85	0.56	0.81	0.78
7	3	1	3	2	1.10	1.05	1.16	0.98	0.90	1.04
8	3	2	1	2	0.88	0.81	0.92	0.73	0.83	0.87
9	3	3	2	1	0.92	0.93	1.05	0.83	0.87	1.01

2.4.2 . ANOVA 분산분석(Analysis of variation)

2.3.의 슬레드 시험의 결과로 ANOVA 분산분석을 시행하였다. 이는 머리 가속도, 목 하중, 흉부 가속도의 세 가지 출력반응에 따른 각 안전 구속 시스템인 제어인자의 기여도(Contribution)와 주 효과(Main effect)를 파악하기 위한 것이다. 기여도 그래프는 안전 구속 시스템이 상해치에 영향을 주는 정도를 나타내며 주 효과 그래프는 각 안전 구속 시스템의 수준 차이에 따른 상해치의 변화 경향을 보여준다. 주 효과 그래프에서 x축은 제어인자의 수준이고 y축은 해당 출력반응의 값이며 본 그래프는 y값이 낮을수록 좋은 망소특성을 가진다.

Fig. 5~7은 Q6의 기여도와 주 효과 그래프이다. Fig. 5에서 머리 가속도는 안전벨트가 가장 높은 기여도를 보였지만 안전벨트의 위치와 DLT는 큰 영향을 주지 못했다. 주 효과 그래프에서 Rodifix CRS, 4.0kN+1.0kN의 DLL 벨트, DLT가 적용되지 않은 조건이 좋은 결과를 얻었다. Fig. 6에서 목 하중은 머리 가속도와 다르게 4가지 제어인자가 고른 기여도를 보였으며 Britax CRS, 5.5kN CLL 벨트, 높은 안전 벨트 위치, DLT가 적용되지 않은 조건이 가장 좋은 결과를 얻었다. Fig. 7의 흉부 가속도는 전체적으로 머리 가속도와

기여도, 주 효과 그래프가 유사 하였지만 CRS에 대한 기여도는 머리 가속도 보다 더 낮은 경향을 보였다.

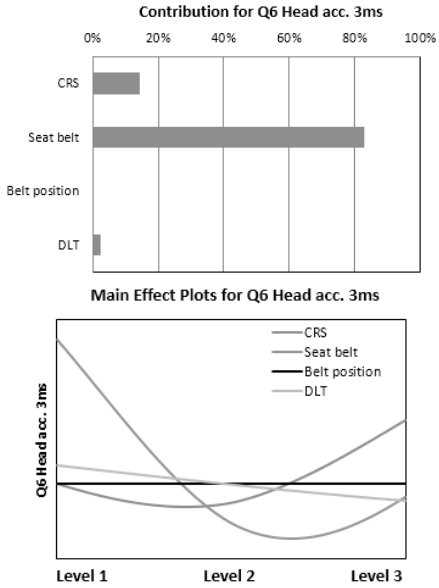


Fig. 5 Contribution and main effect plot for Q6 Head acc. 3ms

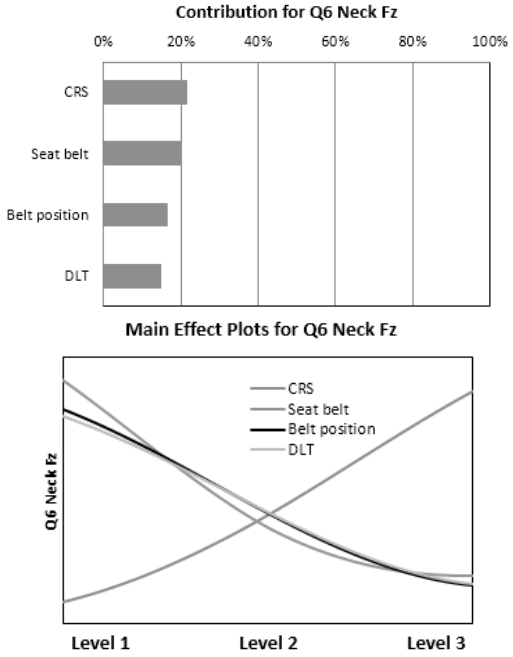


Fig. 6 Contribution and main effect plot for Q6 Neck Fz

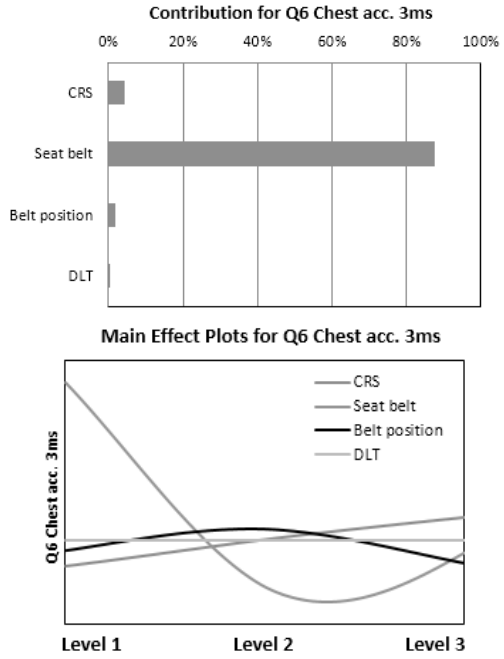
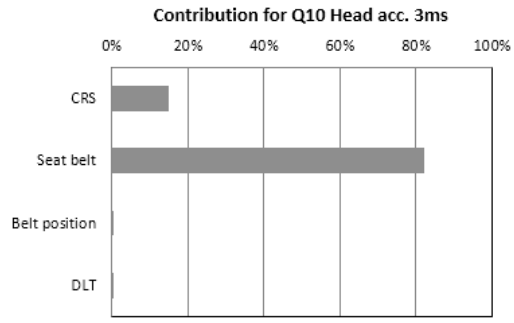


Fig. 7 Contribution and main effect plot for Q6 Chest acc. 3.ms

Fig. 8~10은 Q10의 기여도와 주 효과 그래프이다. 위에서 언급한 Q6의 결과와 유사하게 안전벨트와 CRS의 기여도가 가장 컸으며 주 효과 그래프에서 알 수 있듯이 세 상해치 모두 CRS가 Rodifix일 때, 4.0kN+1.0kN의 DLL벨트를 사용했을 때 가장 낮은 상해치를 나타내었다. Fig. 9의 목 하중에서 DLT가 영향력이 있었으며 적용되었을 때 더 좋은 상해치 값을 보여 타 특성과는 다른 결과를 보였다.



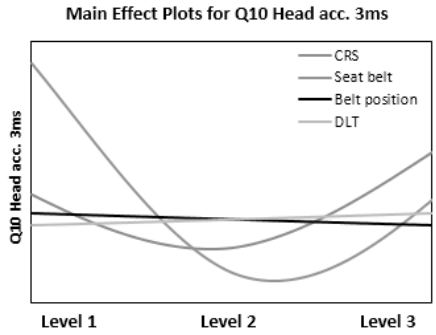
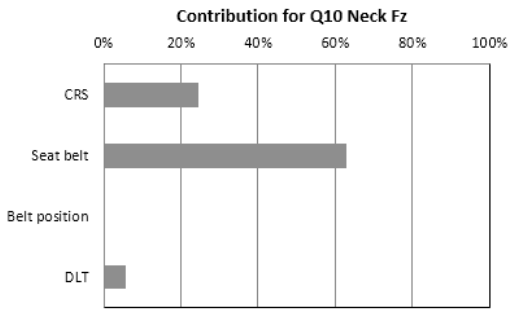


Fig. 8 Contribution and main effect plot for Q10 Head acc. 3ms



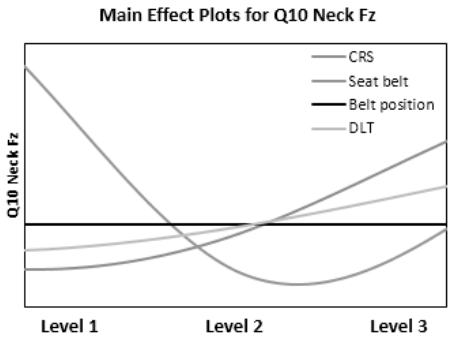
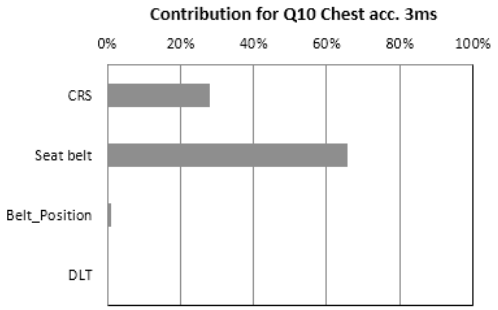


Fig. 9 Contribution and main effect plot for Q10 Neck Fz



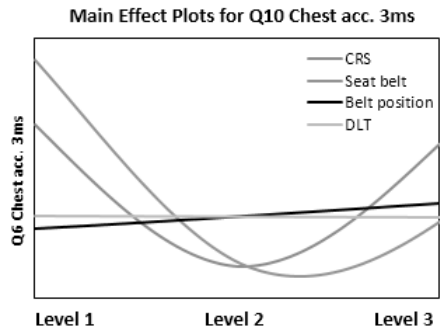


Fig. 10 Contribution and main effect plot for Q10 Chest acc. 3.ms

2.4.3. Q6, Q10 어린이 인체모형 상해치에 대한 최적화

2.4.1.의 ANOVA 분산분석의 결과로 얻은 세 가지 상해치 수치에 따른 최적 조건(Best condition)의 조합을 Table 5에 나타내었다. DLT를 제외하고 Q6와 Q10의 최적 조건이 동일하게 나타났다.

Table 5 Control factor combination of best condition

Control Factor		Best condition	
		Q6	Q10
A	CRS	Maxicosi	Maxicosi
B	Seat belt	4.0+1.0kN	4.0+1.0kN
C	Belt position	Upper	Upper
D	DLT	No	Yes

2.5. 최적 조건에 대한 신뢰성 검증

2.4.2.에서 정한 최적 조건에 대한 신뢰성 검증을 위해 슬레드 시험을 시행하였다. Table 6은 ANOVA 분산분석의 예측 결과와 슬레드 시험 결과 비교표이다. Table 3에서 설정했던 기본 시험을 기준으로 비율로 나타내었으며 Q6에서는 최고 오차율 차가 3%, Q10에서는 최고 오차율 차가 8%로 측정되었으며 평균 오차율에서도 각각 2%, 4%로 유사한 결과가 나타났다. 또한, 기본 시험 대비 Q6는 평균 22%, Q10은 평균 43%의 상해치 향상이 있었다.

Table 6 Validation of ANOVA analysis by Sled test

No	Output response	Base line	Q6		Q10	
			ANOVA	Sled	ANOVA	Sled
1	Head acc. 3ms	1	0.77	0.75	0.57	0.58
2	Neck Fz	1	0.82	0.81	0.47	0.43
3	Chest acc. 3ms	1	0.80	0.77	0.78	0.70
Average		1	0.80	0.78	0.61	0.57

3. 결 론

본 논문에서는 DFSS 기법과 슬레드 시험을 활용하여 Q6, Q10 어린이 인체모형 상해치에 대한 안전 구속 시스템 최적화 연구를 진행하였고 그 결과는 아래와 같다.

1) 해당 연구는 KNCAP 부분 정면충돌 시험의 시험 모드로 진행되었으며 이때 Q6, Q10에 대한 안전 구속 시스템을 제어인자로 선정해 출력반응인 상해치에 주는 영향에 대해 알아볼 수 있었다. 제어인자의 조합으로 직교표를 작성하였으며 슬레드 시험을 통해 제어인자의 각 조합에 따른 출력반응인 머리 가속도, 목 하중, 흉부 가속도 결과를 얻을 수 있었다.
2) ANOVA 분산분석으로 세 가지 출력반응에 대한 제어인자의 기여도와 주 효과를 알 수 있었다. Q6, Q10 모두 CRS와 안전벨트의 기여도가 높았으며 안전벨트의 위치와 DLT는 큰 영향이 없었다. 두 인체모형의 최적화 조합은 DLT를 제외하고 같은 경향을 보였다.
3) 신뢰성 검증을 위하여 출력반응에 대한 제어인자의 최적 조건의 값을 예측하고 동일한 조합으로 슬레드 시험을 시행하였다. Q6에서는 최고 오차율 차가 3%, Q10에서는 최고 오차율 차가 8%로 측정되었으며 이는 각각 Base line 시험 대비 23%, 43%의 상해치 향상을 보였다.

앞으로 본 논문에서 다루었던 최적화 조합을 실제 차량 충돌 시험으로 추가 검증할 것이며 기여도가 높은 CRS와 안전벨트 사양에 대해 더 많은 최적화를 시행할 것이다. 또한, 부분 정면충돌 시험뿐만 아니라 측면 충돌 시험의 Q6, Q10에 대한 안전 구속 시스템 최적화를 추가 진행할 예정이다.

참고문헌

(1) SAE International, “Progress A Study of Rear Seat 6-year-old Dummy Kinematics in Offset Frontal Crashes”, 2013
(2) EuroNCAP, ″Child occupant protection v7.0″, Feb. 2015
(3) Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “KNCAP Updated status”, 2014
(4) GMK Technical Center, “DFSS Fundamental Course & Advanced Course”, 2015
(5) EuroNCAP, “Adult Occupant Protection, Offset-Deformable Barrier”, 2015
(6) IIHS, “Booster evaluations for 2014”, www.iihs.org/iihs/ratings/child-boosters, 2014
(7) Seungki Kim, A Study on Child Restraints System for Q10 dummy in frontal sled test, 2015