

여성 승객을 고려한 동승자석 안전벨트의 설계 최적화

김 윤 배¹⁾ · 김 형 준¹⁾ · 한 재 녕²⁾ · 김 형 일²⁾ · 채 수 원^{*3)}

고려대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한국지엠 안전기술전략팀²⁾ · 고려대학교 기계공학부³⁾

The Optimization of Passenger Seat Belt Design for Female Passenger

Yun-Bae Kim¹⁾ · Hyung-Jun Kim¹⁾ · Jae-Nyung Han²⁾ · Hyungil Kim²⁾ · Soo-Won Chae^{*3)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²⁾Safety Strategy and Core Technology, GM Korea Company, 199-1 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received 4 April 2011 / Revised 6 September 2011 / Accepted 6 January 2012)

Abstract : The design of automobile occupant seat belt system has been studied by using MADYMO. Based on the FMVSS 208 (Federal Motor Vehicle Safety Standards 208) and the USNCAP (United States New Car Assessment Program) regulations, seat belt design parameters were chosen for the design improvement to the 5th percentile female dummy: limit force of load limiter, time to fire of shoulder belt, inlet length of shoulder belt, inlet length of lap belt. The design of experiment method was employed to optimize the design parameters of passenger seat belt. Range of injury probability due to the change of H-point position was estimated by the simulation.

Key words : Female passenger injury(여성 동승자 상해), Crash simulation(충돌 시뮬레이션), Seat belt(안전벨트), Belt design parameter(벨트 설계인자), Design of experiment method(실험계획법)

1. 서 론

자동차 사용이 증가 하면서 승객의 안전에 대한 문제가 중요시 되고 있다. 그에 따라 운전자를 보호하는 안전벨트(Seat belt)와 에어백 등의 안전장치가 개발되었다. 하지만 평균체형보다 작은 어린이와 여성 승객의 경우 안전벨트가 상해가능성을 증가시키는 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 이에 미 연방 도로 교통 안전국(NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration)은 여성승객과 어린이 승객에 관한 충돌 테스트 규정을 미 연방 자동차 안전기준(FMVSS 208, Federal Motor Vehicle Safety Standard)에 제시하였다.²⁾ 미 연방 자동차 안전기준 FMVSS 208을 만족하기 위한 실차의 충돌테스트는 많은 비용이 소모되고 이를 절감하기 위해 CAE를 이용한 충돌 시뮬레이

션(Crash simulation) 역할이 확대되고 있다.³⁾

지금까지의 안전벨트 관련 연구는 운전자와 동승자의 상해에 관한 연구와 후방석의 안전벨트 최적화의 연구⁴⁾가 진행되었으나 여성 동승자 상해(Female passenger injury)와 관련한 안전벨트 설계인자 최적화 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 안전벨트 설계인자에 대한 여성 승객의 상해를 평가하고 최적화 연구를 수행하였다. 먼저 안전벨트의 설계인자(Belt design parameter)를 정하고 각 설계인자가 승객의 상해에 미치는 경향을 알아보았다. 도출된 결과를 실험계획법(Design of experiment method)을 이용하여 승객의 상해를 최소화 하는 안전벨트의 최적 설계조합을 찾아내었고, 최적화된 설계조합을 바탕으로 노이즈 인자에 대한 상해 가능성의 변화 값을 알아보았다.

*Corresponding author, E-mail: swchae@korea.ac.kr

2. FMVSS 208 및 USNCAP

FMVSS 208은 미 연방 자동차 안전 기준으로 차량 충돌에 대한 탑승자 보호법이다. 이 기준을 맞추지 못하면 미국 내 자동차 판매를 할 수 없는 강제 규정이다. USNCAP(United States New Car Assessment Program)은 미국 교통부 산하 고속도로 안전국에서 주관하는 프로그램으로서 미국 내 판매되는 신차의 충돌 성능을 실제 시험을 통해 평가하고 시험 결과를 공표하여 소비자들이 차량을 선택하는데 중요한 참고 자료가 된다.

2.1 FMVSS 208

FMVSS 208의 정면충돌 평가시험은 머리, 목, 가슴 대퇴부의 상해를 규정하고 있다. 머리 상해는 더미의 머리 중심의 가속도로 결정된다. 임의의 시점으로부터 15ms 구간의 두부 상해치(HIC)인 식 (1)로 정의되고 Hybrid III 5thpercentile 여성더미의 경우 이 값이 700을 넘어서는 안 된다. 목 상해(N_{ij})는 식 (2)로 정의되고 충돌 시 가슴과 머리의 상대 변위로 인해 굽힘력, 전단력, 장력이 발생하는데 목 상부에 장착된 로드셀(load cell)로 측정하고 이 값이 1.0을 넘어서는 안 된다. 가슴 상해(chest deflection)는 안전벨트에 의한 갈비뼈의 변위로 측정한다. 이때 변위는 52 mm를 넘어서는 안 된다. 다리 상해는 대퇴부 내에 설치되어 있는 로드셀을 이용하여 굽힘력, 전단력, 장력을 측정한다. 측정값이 6805 N을 넘어서는 안 된다.

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

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{zc}} + \frac{M_{OCy}}{M_{yc}} \quad (2)$$

- F_z : Force at the point of transition from to neck
- F_{zc} : Critical force
- M_{OCy} : Total moment
- M_{yc} : Critical moment

2.2 USNCAP

USNCAP은 소비자들이 쉽게 인식할 수 있도록

Table 1 Star rating for USNCAP based on probability injury

Star rating	Range of probability injury
★★★★★	Prob<0.100
★★★★	0.100≤Prob<0.150
★★★	0.150≤Prob<0.200
★★	0.200≤Prob<0.400
★	0.400≤Prob

Table 1과 같이 별(star rating)을 사용하여 등급을 표시한다. 별이 5개인 경우 가장 높은 등급이고 등급 판정은 상해 가능성 수치(probability injury value)를 사용한다.

5thpercentile 여성더미에 대한 안전벨트 시스템 설계를 위해 다음과 같은 상해 가능성 수치를 정의 하였다.¹⁾

$$P_{head} = \Phi \left(\frac{\ln(HIC15) - 7.45231}{0.73998} \right) \quad (3)$$

$$P_{chestdefl} = \frac{1}{1 + e^{10.5456 - 1.7212 * (chestdefl)^{0.4612}}} \quad (4)$$

$$P_{femur} = \frac{1}{1 + e^{5.7945 - 0.7619 * Femurforce}} \quad (5)$$

$$P_{neck} = \frac{1}{1 + e^{3.2269 - 1.9688 * N_{ij}}} \quad (6)$$

식 (3)~(6)의 목적 함수는 USNCAP에서 정한 5th percentile 여성더미의 각 부분별 상해를 측정하는 함수이다. P_{head} 는 머리상해, $P_{chestdef}$ 는 가슴상해, P_{femur} 는 대퇴골 상해, P_{neck} 는 목 상해를 평가하는 식이다. 각각의 가능성으로부터 조합된 상해 가능성 수치는 식 (7)과 같이 조합된다.

$$P_{joint} = 1 - (1 - P_{head}) \times (1 - P_{neck}) \times (1 - P_{chest}) \times (1 - P_{femur}) \quad (7)$$

3. 충돌 시뮬레이션 모델

충돌 시뮬레이션은 탑승자 안전해석(Occupant Safety Analysis)분야에서 널리 사용되고 있는 MAD-YMO를 사용하였다. 정확도를 높이기 위해 유한 요소 모델을 사용하였고, 해석 속도를 높이기 위해 앞 보닛을 제거한 하프카 모델로 BIW(body-in-white), 인스트루먼트 패널(instrument panel), 시트(seat), 카펫(capet), 에어백(air-bag)을 모델링 하였다. 동승



Fig. 1 Modeling of a safety belt system for crash simulation



Fig. 2 Belt fitting for crash simulation

자 상해를 평가하기 위하여 5th % tile 여성 더미를 하프카 모델에 앉혔다. 벨트의 궤적은 XMADgic을 이용하였다. XMADgic에서는 벨트 착용 도구를 제공하고 있으며 이렇게 생성된 벨트 궤적은 충돌 시뮬레이션을 가능하게 한다.³⁻⁶⁾ Fig. 1은 벨트가 더미에 착용된 모습이며, Fig. 2는 모델링 된 하프카 및 5th % tile 여성 더미의 모습이다.

3.1 안전벨트 설계인자

본 연구에서는 동승자의 상해를 최소화 하는 안전벨트 설계를 위하여 최적화된 로드리미터의 한계하중(limit force)과 프리텐셔너의 조합을 찾았다.

로드리미터는 충돌시 안전벨트가 운전자의 흉부를 강하게 구속하여 생기는 상해를 예방하기 위해 차량 충돌 직후 단계적으로 벨트에 걸린 압력을 풀어주는 장치를 말한다. 이 장치를 통하여 벨트로 인해 생기는 2차 상해를 예방할 수 있다.⁷⁾

프리텐셔너는 충돌 시 탑승자의 상체를 보다 효과적으로 구속하는 역할을 한다. 차량이 충돌하면 프리텐셔너에 작동 신호가 입력되고 가스를 발생시

Table 2 Design parameters in relative scale

Load limiter limit force (A)	Shoulder belt pretensioner TTF (B)	Shoulder belt pretension inlet length (C)	Lap belt pretensioner inlet length (D)
67%	67%	78%	67%
83%	83%	89%	83%
100%	100%	100%	100%
117%	117%	111%	117%

켜 가스의 압력에 의해 안전벨트를 잡아당겨 운전자를 구속하는 역할을 한다. 이를 통하여 운전자가 운전대에 강하게 부딪치는 것을 예방 할 수 있다. 프리텐셔너는 작동시간(PT TTF)과 프리텐셔너의 작동에 의한 솔더 벨트의 유입길이(PT inlet length)의 변화 또한 랩 벨트 유입 길이(Lap PT inlet)의 변화에 따른 상해를 알아 볼 수 있다.

각 설계인자가 여성 동승자 상해에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험계획법을 이용하여 Table 2와 같이 조건을 정하였고 각 인자의 변화에 대한 최적 조건을 찾기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 설계인자 평가

머리상해와 목 상해에 에어백의 영향이 가장 크기 때문에 이번 시뮬레이션 결과는 가슴 상해에 초점을 두고 분석하였다.⁸⁾

Fig. 3은 로드리미터의 한계하중(A인자)을 변경하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 로드리미터의 한계하중이 작을수록 상해가 감소하는 방향으로 나왔다. 즉, 안전벨트의 과도한 한계하중은 승객의 안전에 심각한 결과를 일으키는 결과를 얻었다.

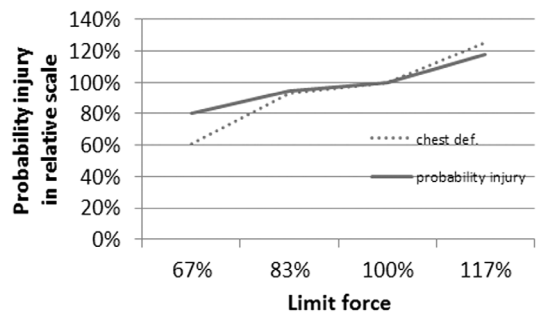


Fig. 3 Effect of load limiter limit force variation on USNCAP probability injury

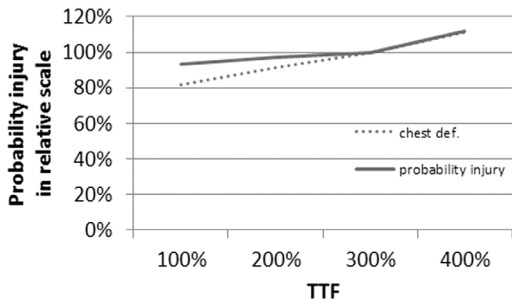


Fig. 4 Effect of shoulder belt time to fire (TTF) variation on USNCAP probability injury

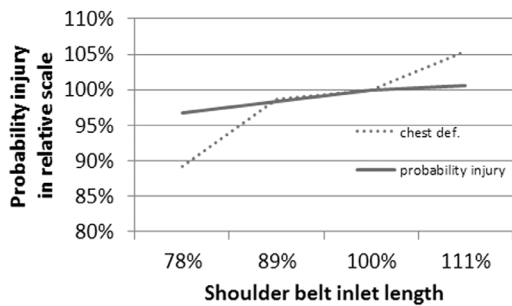


Fig. 5 Effect of shoulder belt pretensioner inlet length variation on USNCAP probability injury

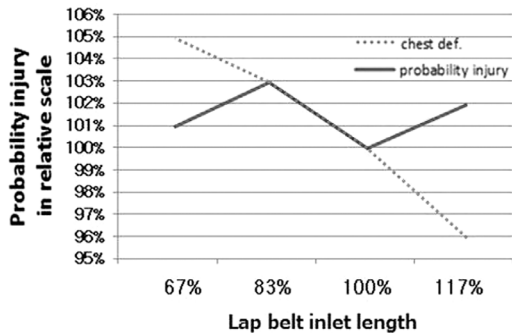


Fig. 6 Effect of lap belt pretensioner inlet length variation on USNCAP probability injury

숄더 벨트의 작동 시간(B 인자)에 대하여는 Fig. 4에서 나타난 것처럼 가슴상해에 큰 영향을 미친다. 프리텐서너의 작동 시간이 짧을수록 차량과 더미의 상대속도에 따른 더미의 운동 에너지가 작아져 상해가 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 나타난 것처럼 숄더 벨트 프리텐서너의 벨트 유입량(C 인자)이 클수록 가슴 상해가 증가하였다. 이는 벨트의 길이가 짧아지면서 벨트에 걸

리는 장력 증가로 인해 가슴에 전달되는 힘이 증가되면서 나타난 현상이다.

Fig. 6은 랩 벨트 프리텐서너의 벨트 유입량(D인자)에 따른 가슴 변위를 나타낸 그래프이다. 랩 벨트의 유입량이 클수록 가슴 상해가 줄어들었다. 이것은 랩 벨트의 유입량이 커짐에 따라 H-point의 이동거리가 줄어들고 이로 인하여 가슴 상해치가 감소한 것으로 판단된다. 이 인자는 다른 인자들보다 상해 가능성에 미치는 영향이 작았다.

3.3 설계인자 조합 변수의 영향

위의 시뮬레이션을 바탕으로 각 인자가 상해에 미치는 영향도 및 인자간의 교호 작용을 알아보기 위해 Table 3의 L8(2⁴) 직교 배열표를 사용 하였다.

Table 3 L8(2⁴) orthogonal array for evaluating the effectiveness between design parameters in injury

Run	1 A	2 B	3 C	4 D	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

1×2 1×4 1×7
 4×7 2×7 2×4

본 연구에서는 Table 4에서와 같이 4개의 설계인자와 2자유도 조건에 맞는 총 8번의 시뮬레이션을 수행하여 상해 가능성 수치를 구하고 이를 통해 동승자의 상해를 최소화하는 최적의 조합을 찾았다. 이를 검증하기 위해 민감도 및 교호작용을 분석하였다. Fig. 7은 설계인자의 민감도를 분석한 결과이다. A인자의 기울기가 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 A인자가 결과에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 의미한다.

Table 4 Design parameters values at level 2

	A	B	C	D
1	67%	67%	78%	100%
2	83%	83%	89%	117%

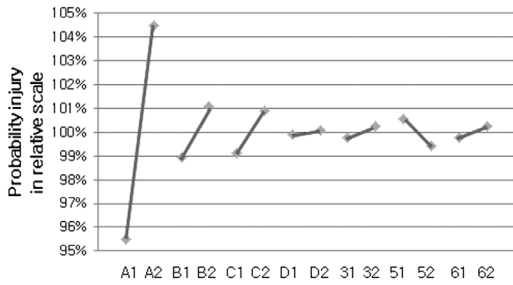
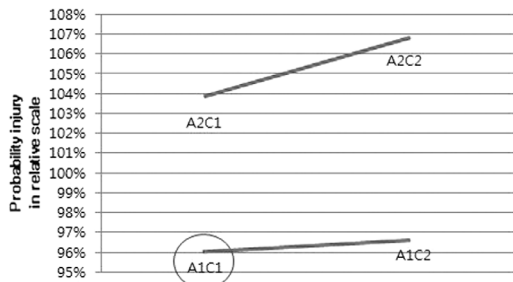


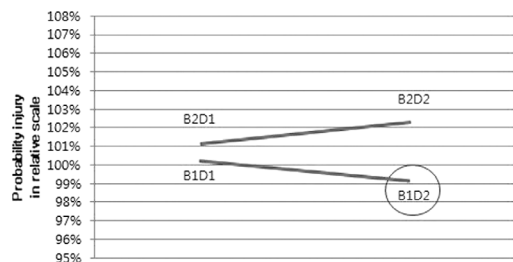
Fig. 7 Sensitivity between belt design parameters

직교 배열표에 따른 8개의 모델에 대해 교호작용을 고려하지 않은 예상 최적 조합은 A1B1C1D1이다. 민감도 분석을 통하여 A 인자가 상해 가능성에 약 19%의 변화 폭으로써 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었으며, 또한 B 인자와 C 인자의 경우 상해 가능성에 미치는 민감도는 A 인자보다 상대적으로 작게 나타났다. D 인자의 경우 상해에 커다란 영향을 주지 않았다.

31부터 62까지의 인자를 이용하여 설계인자의 교호작용을 평가하였고, Fig. 7에서 51, 52인자의 기울기가 가장 크므로 Table 3의 1×4, 2×7 열 즉, A 인자와 C 인자 그리고 B 인자와 D 인자의 교호작용을 평가하였다.



(a) Interaction between A and C



(b) Interaction between B and D

Fig. 8 Interaction between design parameters

Fig. 8과 같이 인자간의 교호 작용 분석에서 A1B1C1D2의 조합이 상해 가능성이 가장 낮게 나타났지만 직교배열표상에 나타나지 않아 A1B1C1D2의 조합으로 시뮬레이션을 수행 하였다. 시뮬레이션 결과 94.8%로 A1B1C1D1조합의 상해가능성 수치93.5%보다 더 크게 나왔으므로 A1B1C1D1 조합을 최적 조합으로 선정하였다. 이것은 최적화 이전 모델에 비해 상해 가능성이 약 21.5% 하락하였다.

3.4 노이즈 인자에 대한 영향

설계에 반영 될 수 있는 설계인자 수준 최적 조합에 추가하여 노이즈 인자로써 탑승자의 탑승위치와 관련한 H-point 위치에 따른 상해치 경향을 알아보았다.

시뮬레이션은 최적 조합으로 선정된 A1B1C1D1 조합을 기준으로 수행 하였으며, Fig. 9는 H-point의 상대적인 위치를 H1부터 H9까지 표현한 것이다. H-point는 H-5를 기준으로 X축과 Z축으로 ±10mm 씩 움직여 평가하였다.

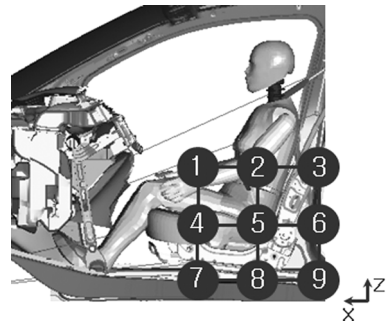


Fig. 9 H-point position

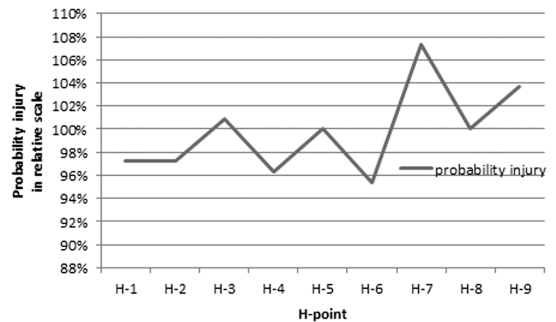


Fig. 10 Effect of H-point variation on USNCAP probability injury

H-point 위치에 따른 상해 가능성 시뮬레이션 결과는 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 최소 상해가 H-6 위치에서 발생 하였고 최대 상해는 H-7위치에서 발생하였다. H-5의 상해가능성 값의 +7.3% ~ -4.6%의 범위이다.

4. 결론

조수석 안전벨트의 설계인자에 대한 여성더미의 상해 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 실험계획법을 이용하여 안전벨트 설계인자 수준을 최적화 하였으며, 이에 따라 여성 동승자의 상해치가 FMVSS208조항을 만족하면서 USNCAP의 등급을 개선할 수 있었다.
- 2) 여성 동승자를 고려한 상황에서 4개의 안전벨트 설계인자 중 로드리미터의 한계하중이 탑승자의 상해에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 로드리미터의 한계하중을 작게 하여 설계에 반영 한다면 상해를 줄이는 것이 가능하다.
- 3) H-point 위치에 따른 상해가능성 변화는 기준 위치인 H-5에 대해 $\pm 10\%$ 이하로 나타났다. 이는 약 12%의 변화 폭을 가지는 것이다. 설계인자 중 가장 민감한 것으로 나타난 로드리미터 한계하중이 약 19%의 변화폭을 가지는 것에 비교하면 충돌시 탑승자의 탑승위치 또한 상해 가능성에 적지 않은 영향을 주는 것으로 보인다.
- 4) 추후에 여성이 아닌 남성(50th % tile) 및 다른 신체 사이즈를 조건으로 같은 연구를 수행하여 신체 사이즈에 따른 설계인자 최적화와 상해치를 비교할 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(No.2010-0001648)의 지원과 GMDAT 산학과제(R1002981)의 지원을 받아 수행된 연구이다.

References

- 1) J. W. Gattett and P. W. Braunstein, "The Seat Belt Syndrome," The Journal of Trauma, Vol.2, No.3, pp.220-238, 1962.
- 2) National Highway Traffic Safety Administration(NHTSA), Consumer Information; New Car Assessment Program; Notice, 2008.
- 3) A. Nouredine, A. Eskandarian and K. Digges, "Computer Modeling and Validation of Hybrid III Dummy for Crashworthiness Simulation," Mathematical and Computer Modelling, pp. 885-893, 2002.
- 4) H. Zellmer, S. Luhrs and K. Bruggemann, Optimized Testament Systems for Rear Seat Passengers, NHTSA 98-S1-W-23, 1998.
- 5) TNO, MADYMO Theory and reference Manual, 2004.
- 6) Y.-C. Deng, "Analytical Study of the Interaction between the Seat Belt and a Hybrid III Dummy in Sled Tests," SAE 88068, 1988.
- 7) W.-H. Yang, Y.-S. Park, G.-J. Park, S.-H. Park and H.-J. Lee, "Frontal and Rear Crash Analyses and Design of a Belt Integrated Seat for Occupant Safety" Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.295-310, 2003.
- 8) M. C. Walz, NCAP Test Improvements with Pretensioner and Load Limiters NHTSA Evaluation Note DOT-HS 809 563, March, 2003.