<기술논문>

작은 체형의 여성 승객을 고려한 조수석 에어백의 설계 개선

권 울¹⁾ · 김 권 희^{*1)} · 손 창 규²⁾ · 김 형 일²⁾

고려대학교 기계공학부¹⁾ · 한국지엠 기술연구소²⁾

Improvement of Passenger Airbag Based on the Injury Assessment of the 5th Percentile Female Dummy

Yul Kwon¹⁾ · Kwonhee Kim^{*1)} · Changkyu Son²⁾ · Hyungil Kim²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Technical Center, GM Korea Company, 199-1 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 15 December 2010 / Revised 6 February 2012 / Accepted 17 April 2012)

Abstract : Automobile airbag deployment process has been studied with MADYMO software. Based on the FMVSS208 and USNCAP(United States New Car Assessment Program) regulations, four parameters were chosen for the design improvement with reference to the 5th percentile female passenger dummy: time to fire, vent hole size, tether length and tank test pressure of inflator. Sensitivity analyses based on orthogonal arrays show that enhanced protection of small females can be achieved with improved USNCAP rating within the boundary of FMVSS 208.

Key words : Passenger airbag(PAB 조수석 에어백), MADYMO(마디모), FMVSS 208(미연방 자동차 안전 기준 208), USNCAP(Unite States New Car Assessment Program, 미국신차평가프로그램), Airbag design parameters(에어백 설계 인자), Orthogonal array(직교 배열표)

1. 서론

승용차의 보급이 증가하면서 안전도 문제가 중요시 되고 있다. 차량 충돌 시 에어백은 승객의 상해치를 저감시킨다고 알려져 있다. 하지만 평균 체형보다 작은 승객의 경우와 비정상 착좌일 때에는 오히려 상해치를 증가시키는 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 이에 미연방 도로교통 안전국(NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration)은 미연방 자동차 안전기준 208(FMVSS 208, Federal Motor Vehicle Safety Standard)을 제정하였다.²⁾

FMVSS 208 및 USNCAP(Unite States New Car Assessment Program)을 만족하기위한 실차의 충돌

테스트에는 많은 비용이 소요되어 이를 절감하기 위한 CAE의 역할이 더욱 확대되고 있는 추세이다.^{3,4)}

본 연구에서는 USNCAP에서 조수석에 50th%ile 남성 더미 대신 5th%ile 여성 더미를 앉히는 조건이 추가됨에 따라서 조수석 에어백을 전개하는데 영향을 주는 설계인자를 변경하여 5th%ile 여성 승객의 상해를 평가하고 상해 발생 구조를 분석하고자 한다.⁵⁾ 설계변수로는 점화 시점(time to fire), 통기구멍(vent hole) 크기, 테더(tether) 길이 및 위치, 인플레이터(inflator) 폭압 등을 선정하였다.⁶⁾ 선정된 변수들에 대하여 민감도 분석을 실시하여 승객 상해도를 줄이는 에어백의 설계개선 방향을 도출하고자 한다.⁷⁾

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

2. FMVSS 208 및 USNCAP

FMVSS 208은 차량 충돌에 대한 탑승자 보호법에
로 유아에 대한 보호, 중저속과 고속에서 승객의 동
시보호, 다양한 승객과 비정상 자세에서의 승객 보
호를 목적으로 하고 있다.

2.1 FMVSS 208

정면충돌 시험에서 상해는 머리, 목, 가슴, 대퇴부
로 규정하고 있다.

머리 상해는 더미(dummy) 머리무게 중심에서의
가속도로 결정된다. 임의 시점으로부터 15ms 구간의
두부 상해치(HIC)는 식 (1)로 정의되며 5th%ile 여성
더미의 경우에 이 값이 700을 초과해서는 안 된다.

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

Where, $t_2 - t_1$ is not more than 15ms

$a(t)$ = head acceleration

목 상해는 에어백 전개 초기에 가슴과 머리의 상
대 변위로 인해 발생하며 가장 중요한 상해기준이
다. 이는 더미의 목 상부에 로드셀을 장착하여 측정
한다. 목 인장(Tension)이나 압축(Compression)은 에
어백, 차량내부 및 더미의 상대위치에 따라 발생한다.
y방향 모멘트는 목이 앞으로 숙여지는 굴곡
(Flexion)과 목이 뒤로 젖혀지는 신전(Extension)이
나타난다. 목 상해는 식 (2)로 표현되는 인장, 압축,
모멘트의 복합 상해치(N_{ij})로 정의되며 그 값이 1.0
을 초과해서는 안 된다.^{8,9)}

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad (2)$$

Where, N_{ij} : N_{ie} = Neck tension-extension,

N_{if} = Neck tension-flexion,

N_{ce} = Neck compression-extension,

N_{cf} = Neck compression-flexion,

F_{zt} = axial force, M_y = bending moment,

F_{int} , M_{int} = critical intercept values

2.2 USNCAP

USNCAP은 자동차 안전도 향상을 목적으로 제작
사건 자율 경쟁을 위하여 법규와는 별도로 엄격한

Table 1 Definition of probability injury for frontal crash
with respect to 5th %ile hybrid III female dummy by
USNCAP

Injury Criteria	Risk Curve
Head (HIC ₁₅)	$P_{head}(AIS3+) = \Phi \left(\frac{\ln(HIC15) - 7.45231}{0.73998} \right)$ where Φ = cumulative normal distribution
Chest (deflection in mm)	$P_{chest_defl}(AIS3+) = \frac{1}{1 + e^{10.5456 - 1.7212 * (ChestDefl)^{0.4612}}}$
Femur (force in kN)	$P(AIS2+) = \frac{1}{1 + e^{5.7949 - 0.7619 * Femur_Force}}$
Neck (Nij and tension/compression in kN)	$P_{neck_Nij}(AIS3+) = \frac{1}{1 + e^{3.2269 - 1.9688 * Nij}}$ $P_{neck_Tens}(AIS3+) = \frac{1}{1 + e^{10.958 - 3.770 * Neck_Tension}}$ $P_{neck_Comp}(AIS3+) = \frac{1}{1 + e^{10.958 - 3.770 * Neck_Compression}}$ $P_{neck} = \max(imum(P_{neck_Nij}, P_{neck_Tens}, P_{neck_Comp}))$

Table 2 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

시험을 실시하며, 평가 결과는 소비자들이 쉽게 인
식하도록 별표(★)를 사용한 등급으로 표현된다.¹⁰⁾
별표가 많을수록 높은 등급이다. 등급판정(star
rating)에 사용되는 상해 가능성 수치(Probability
Injury, PI value)을 정의하는 식을 Table 1에 수록하
였다. 등급별 Probability Injury값의 범위를 Table 2
에 정리하였다.

Table 1에서와 같이 각각의 가능성으로부터 조합
된 상해 가능성 수치는 다음 식 (3)과 같이 조합된다.

$$P_{comb} = 1 - (1 - P_{head}) \times (1 - P_{neck}) \times (1 - P_{chest}) \times (1 - P_{femur}) \quad (3)$$

3. 에어백 전개 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모델

MADYMO Release 7.2를 사용하여 조수석 에어
백(PAB, Passenger airbag)을 모델링 하였다.^{11,12)}

해석의 정확도를 위하여 더미를 제외한 모든 부
분은 유한요소 모델로 구성되어 있으며, 해석시간
의 단축을 위하여 Fig. 1과 같이 절반을 모델링 하였다.

Fig. 1 A half car model with a passenger airbag

Table 3 The weight and dimensions of vehicle occupants

	5th-percentile adult female	50th-percentile adult male
Weight	102 pounds	164 pounds ± 3
Erect sitting height	30.9 inches	35.7 inches ± 1
Hip breadth (sitting)	12.8 inches	14.7 inches ± 7
Hip circumference (sitting)	36.4 inches	42 inches
Waist circumference (sitting)	23.6 inches	32 inches ± 6
Chest depth	7.5 inches	9.3 inches ± 2
Chest circumference:		
(nipple)	30.5 inches	37.4 inches ± 6
(upper)	29.8 inches	
(lower)	26.6 inches	

FMVSS 208 및 USNCAP에 근거로 하여, Table 3과 같이 hybrid III 5th%ile facet 여성 더미를 조수석 의자에 위치시키고 벨트를 착용한 56km/h 정면충돌 상황을 적용하였다.²⁾

3.2 개별 설계인자의 영향

에어백의 전개와 승객 상해에 연관된 가장 영향력 있는 설계변수들로 점화시점, 통기구멍 크기, 테더 길이, 인플레이터 압력 등을 들 수 있다.⁶⁾ 각 변수 값들은 현업에서 선택한 기존 설계 값에 대한 비율로 표현하기로 한다. 자동차 사망 사고 원인의 대부분을 머리 상해치가 차지하고 있기 때문에,¹³⁾ 승객 상해의 시뮬레이션 결과는 머리 상해치(HIC₁₅)와 목 상해치(N_{ij})에 초점을 두고 분석하였다.

점화시점을 변경하여 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 2에서와 같이 머리 상해치가 목 상해치에 비하여 매우 민감한 것을 알 수 있었고, 점화시점이 빠를수록 Probability Injury값이 낮게 나왔다. 에어백의 과도한 지연전개는 승객 구속력에 심각한 문제를 일으키는 결과를 얻었다.¹⁴⁾

(a) Probability injury for head and neck

(b) Total probability injury for head, neck, chest and femur

Fig. 2 Effects of TTF (Time to fire) variation on USNCAP probability injury values in relative scale with respect to a previous design

(a) Probability injury for head and neck

(b) Total probability injury for head, neck, chest and femur

Fig. 3 Effects of vent hole size variation on USNCAP probability injury values in relative scale with respect to a previous design

통기구멍 크기에 대하여는 Fig. 3에 보인 것처럼 머리 상해치가 가장 민감한 반응을 보였고, 통기구멍 크기가 클수록 Probability Injury값이 낮게 나왔다.

(a) Probability injury for head and neck

(b) Total probability injury for head, neck, chest and femur

Fig. 4 Effects of tether length variation on USNCAP probability injury values in relative scale with respect to a previous design

(a) Probability injury for head and neck

(b) Total probability injury for head, neck, chest and femur

Fig. 5 Effects of inflator pressure variation on USNCAP probability injury values in relative scale with respect to a previous design

승객이 에어백과 접촉할 때 통기구멍으로 에어백 내부의 가스가 적절히 배출되어야 머리 상해를 줄일 수 있는 것으로 판단된다.

테더 길이에 대하여는 Fig. 4와 같이 목 상해치가 가장 민감한 반응을 보였다. 테더 길이가 지나치게 짧으면 에어백이 충분히 전개되지 않아 승객의 머리가 차체 내부와 접촉하고 목 상해치가 크게 증가하는 경향이 관측된다.

인플레이터 압력을 변경하여 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 5에서와 같이 머리 상해치가 목 상해치에 대하여 조금 더 민감한 반응을 보였고, 압력이 90%로 설정한 경우에는 에어백이 모양을 갖추기 전에 머리가 대시보드에 충돌 하였다. 또한 압력이 지나치게 높은 경우에는 오히려 상해치가 상승하는 것을 알 수 있었다.

3.3 조합 변수의 영향

각 인자가 조수석 여성 더미의 Probability Injury 값에 미치는 영향을 분석하고 인자 간의 교호작용을 조사하기 위하여 Table 4에 보인 L8(2⁴) 직교 배열표를 사용하였다. 앞서 선정된 4가지의 설계인자의 값들을 현업에서 채택되었던 설계값에 대한 비율로 각각 표현하였다. 지금까지 언급한 예비해석에서 가장 좋은 결과를 보여준 값들과 기존의 설계값을 기준으로 Table 5와 같이 2수준의 변수조합을 작성하여 최적 조합을 찾고자 하였다. A×B는 A인자와 B인자의 교호작용을 나타낸다.

Table 4 L8(2⁴) orthogonal array

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

Table 5 Design parameter values at 2 levels

	A Time to fire	B Vent hole size	C Tether length	D Inflator pressure
1	80%	100%	95%	95%
2	100%	117%	100%	100%

Fig. 6 Sensitivity of probability injury on the 2-level parameter settings A, B, C and D (Table 5)

Fig. 7 Probability injury subject to interaction A×B and C×D (Table 5)

직교배열표에 따른 8개 모델에 대하여 Probability Injury 값에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 4개의 인자들 가운데서 통기구멍 크기가 Probability Injury 값에 가장 큰 영향을 미치는 것을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 교호작용을 고려하지 않은 예상 최적조합은 A1B2C2D1이다.

Fig. 7에 보인 설계인자 A×B 및 C×D에 대한 교호작용 분석에서는 A1B2C1D1 조합이, Fig 8에 보인 설계인자 A×C 및 B×D에 대한 교호작용 분석에서는 A1B2C1D2 조합에 대하여 Probability Injury 값이 가장 작게 나타났다.

이 두 가지 조합에 대한 Probability Injury 값을 비교하여 A2B2C1D2 조합을 최적조합으로 선정하였다.

Fig. 8 Probability injury subject to interaction A×C and B×D (Table 5)

3.4 남성 더미에 대한 영향

USNCAP에서 조수석에 대해서는 작은 체형의 여성 승객이 받는 상해에 대하여 초점을 맞추고 있지만, FMVSS208에서 규정하고 있는 남성 더미에 대한 법규를 만족하여야 하기 때문에, 여성 더미에게 최적화된 설계인자 조합을 남성 더미에게 적용시켰을 경우에 대하여 추가적인 실험을 진행하였다. 그 결과는 여성 더미보다 남성 더미의 중량이 더 크므로 에어백의 압력이 부족하여 현업에서 설정한 기존 모델의 경우보다 머리 상해치와 목 상해치가 상승하는 경향을 나타내었다. 하지만 FMVSS 208에 규정되어 있는 기준치를 만족하였다.

3.5 벨트 미착용 조건에 대한 영향

앞에서 결정된 설계인자 최적조합들을 적용하여 FMVSS 208에 제시되어 있는 여성 더미의 40km/h (25mph) 벨트 미착용(Unbelted) 조건²⁾을 적용시켜 기존 변수조합 A2B1C2D2와 새로운 변수조합 A1B2C1D2에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션을 실시한 결과 기존 설계조합(A2B1C2D2)의 경우에는 머리 상해치와 목 상해치 모두 FMVSS 208 규정을 만족하였으나, 새로운 변수조합(A1B2C1D2)은 머리 상해치, 목 상해치 모두 FMVSS 208 규정을 만족하지 못하였다.

Fig. 9 Unbelted test of 5th percentile female dummy (A1B2C1D2)

Fig. 10 Effects of vent hole size on HIC_{15} and N_{ij} in relative scale for unbelted frontal crash at 40km/h with respect to 5th percentile female dummy

Fig. 9는 새로운 변수조합에 대한 더미와 에어백의 거동을 나타낸다. 인플레이터의 압력이 불충분하여 머리 부분이 자동차의 앞 유리에 부딪히는 것을 확인할 수 있다. 에어백의 압력을 보충하기 위하여 다른 설계인자들의 변경 없이 통기구멍의 크기를 117%와 108% (Fig. 3 참조)사이의 구간으로 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 10(a)에서 보인 것과 같이 통기구멍 크기를 110% 수준으로 선택하면 머리 상해치와 목 상해치에 대한 FMVSS 208 규정을 만족시킬 수 있다. 기존 설계값에 대하여 점화시점을 80%, 통기구멍의 크기

를 110%, 테더 길이를 95% 그리고 인플레이터 압력을 100%로 설정하면 시속 56km 벨트착용 정면충돌 및 시속 40km 벨트 미착용 조건에 대한 FMVSS 28 규정을 만족하면서 5th percentile female dummy의 상해치를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이 경우, 머리 상해치는 기존 설계에 비하여 78.8%, 목 상해치는 122% 수준으로 얻어짐을 확인하였다.

4. 결론

조수석 에어백 전개에 대한 여성 더미의 상해치 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 선정된 4개 인자 중에서 에어백의 통기구멍 크기가 여성 상해에 가장 큰 영향을 미친다.
- 2) FMVSS 208을 만족하는 범위 내에서 정면충돌에 대한 조수석 여성 더미의 USNCAP의 등급을 개선하는 것이 가능하다.
- 3) 충돌 상황, 승객 체형 및 착석 자세는 매우 다양하므로 5th percentile 여성 승객뿐만 아니라 모든 승객에 대한 종합적 성능을 고려한 에어백 최적설계에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(2010-0001641)과 GMDAT 산학과제(R1006991)로 지원을 받아 수행된 연구이다.

References

- 1) H. K. Ko, K. H. Kim, C. K. Son and D. S. Kim, "Effects of Design Variables on the Injury of Small-sized Passengers," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.3, pp.1425-1429, 2007.
- 2) www.nhtsa.gov, 2010.
- 3) T. Kiuchi, "A Simulation Study on Inflation Induced Injury and NCAP with Depowered Airbag," 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 98-S11-0-15, 1998.
- 4) T. J. Trella, R. R. Samaha and E. J. Smith, "The Use of Advanced Analytical Techniques in Side Impact Crashworthiness Research," 15th

- Int. Tech. Conf. on the Enhanced Safety of Vehicles, 96-S6-O-10, 1996.
- 5) H. S. Lee, J. H. Yim and D. S. Kim, "Improvement CAE Study of New USNCAP Frontal Occupant Performance," Annual Conference Proceedings, KSAE, KSAE09-A0399, 2009.
 - 6) K. H. Lee and W. S. Joo, "Robust Design of a Driver-side Airbag Using the Taguchi Method," Transactions of KSAE, Vol.12, No.2, pp.131-138, 2004.
 - 7) Y. Kwon and K. H. Kim, "Injury Assessment of 5th Percentile Female Dummy with Respect to the Passenger Airbag Design Parameters," Annual Conference Proceedings, KSAE, KSAE10-A0450, 2010.
 - 8) Federal Safety Standards FMVSS 208, Injury Criteria for the 49 CFR Part 571.208, NHTSA, 2008.
 - 9) J. W. Han and K. H. Kim, "An Analysis of the Child and Adult Dummy Injury Mechanism with Respect to the Passenger Airbag Design Parameters," Spring Conference Proceedings, KSAE, KSAE09-B0216, 2009.
 - 10) Department of Transportation, New Car Assessment Program, NHTSA, Docket No. NHTSA-2006-26555, 2008.
 - 11) TNO, MADYMO Theory Manual Release 7.2, 2010.
 - 12) TNO, MADYMO Applications Manual Release 7.2, 2010.
 - 13) S. Kleiven, "Evaluation of Head Injury Criteria Using a Finite Element Model Validated Against Experiments on Localized Brain Motion, Intracerebral Acceleration, and Intracranial Pressure," IJCrash 2006, Vol.11 No.1 pp.65-79, 2006.
 - 14) J. Seo, K. Choi, J. Yoo and J. Oh, "A Study on Occupant Protection Performance according to the Airbag Triggering Time," Spring Conference Proceedings, KSAE06-S0191, 2006.