

전역 최적화기법을 이용한 승객보호장치의 설계

전 상 기^{*1)} · 박 경 진²⁾

델파이 코리아(주)¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

Design of Occupant Protection Systems Using Global Optimization

Sang-Ki Jeon^{*1)} · Gyung-Jin Park²⁾

¹⁾Delphi Korea Corp., 5-30 Bangye-Ri, Munmak-Eup, Wonju-Si, Gangwon 220-800, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 20 July 2004 / Accepted 15 September 2004)

Abstract : The severe frontal crash tests are NCAP with belted occupant at 35mph and FMVSS 208 with unbelted occupant at 25mph. This paper describes the design process of occupant protection systems, airbag and seat belt, under the two tests. In this study, NCAP simulations are performed by Monte Carlo search method and cluster analysis. The Monte Carlo search method is a global optimization technique and requires execution of a series of deterministic analyses. The procedure is as follows. 1) Define the region of interest 2) Perform Monte Carlo simulation with uniform distribution 3) Transform output to obtain points grouped around the local minima 4) Perform cluster analysis to obtain groups that are close to each other 5) Define the several feasible design ranges. The several feasible designs are acquired and checked under FMVSS 208 simulation with unbelted occupant at 25mph.

Key words : Occupant analysis(승객거동해석), NCAP(New Car Assessment Program), FMVSS 208, Monte Carlo search method(몬테 칼로 탐색법), Cluster analysis(군집분석)

1. 서론

세계 여러 나라는 자동차 안전에 대한 법규를 제정하여 충돌 사고시 승객 보호를 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 미국의 경우 연방 자동차 안전 기준(FMVSS, Federal Motor Vehicle Safety Standard)은 사고 예방, 사고 순간 그리고 사고 이후의 확산을 방지하기 위한 다양한 규정을 명시하고 있다. 특히 개정된 승객 충돌 보호(occupant crash protection) 규정인 FMVSS 208¹⁾은 사고 순간의 다양한 정면 충돌 조건과 승객에 대하여 규정하고 있다. FMVSS 208 규정이 개정됨에 따라 자동차업계에서는 진보된 에어

백(advanced airbag), 승객 감지 장치 그리고 좌석 위치 장치 등을 개발하여 자동차에 적용²⁾하고 있다.

충돌 상황을 컴퓨터를 이용하여 모사하는 승객거동해석은 차체 보다는 자동차 내부에 있는 인체 모형(dummy)에 더 관심을 갖고 다양한 상해 결과를 평가하는 방법이다. 일반적으로 승객거동해석을 이용한 설계 방법에는 실험계획법³⁾, 다투치법⁴⁻⁸⁾ 그리고 반응표면 분석법^{9,10)}과 같은 근사화 방법이 많이 적용된다. 이와 같은 근사화 방법은 전반적인 경향과 분포를 파악하기 어려우며 하나의 국부 최적점(local optimal point)을 찾는다.

그러나 자동차 설계 단계에서 고려해야 하는 시험 항목이 증가하면서 각 부품간의 연성 관계가 복잡해지고 있다. 설계는 반복적인 과정이며 수학적

*To whom correspondence should be addressed.
sang.ki.jeon@delphi.com

모델과 실제 시험을 포함하는 분석 단계의 유기적인 결합에 의해 완성된다. 따라서 한 단계에서 실시한 하나의 최적점은 증가된 다른 시험 항목을 모두 만족하기 어렵기 때문에 반복적인 최적화 과정이 필요하다.

실제 도로에서의 자동차 충돌 상황은 다양한 형태로 존재한다. 승객의 성별, 체형별, 나이별 그리고 운전 속도와 자세에 따른 충돌 유형과 상해 분석은 안전 법규 제정을 위하여 필요하다. 특히 미국의 도로교통안전국(NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration)은 1970년대부터 NASS (National Automotive Sampling System), SCI (Special Crash Investigations), CIREN (Crash Injury Research and Engineering Network) 등을 지원하여 각종 사고와 그에 따른 상해 정보를 수집, 관련 연구자에게 제공¹¹⁾하고 있다. 이와 같이 실제 사고를 토대로 안전띠와 에어백 유무에 따른 상해 관련성과 효용성이 연구¹²⁻¹⁵⁾되고 있으며 상해 예측 프로그램도 개발¹⁶⁾되고 있다. 이러한 연구는 충돌 시험을 규정하는데 중요한 자료가 된다.

현재 자동차의 가혹한 동적 정면 충돌 시험 조건은 자동차안전도평가제도¹⁷⁾(NCAP, New Car Assessment Program)의 35mph 충돌 조건(안전띠 착용)과 FMVSS 208의 25mph 충돌 조건(안전띠 미착용)으로 나눌 수 있다. 승객보호장치인 에어백과 안전띠는 다양한 충돌 조건에서 상해치가 최소화 되도록 설계되어야 하기 때문에 다목적함수 최적화(multi objective optimization) 문제이다. 그러나 FMVSS 208은 법규 시험 항목이므로 상해 기준을 충분히 만족해야 한다. 본 연구에서는 다목적함수 최적화 문제의 접근 방법으로 35mph 정면 충돌 조건을 먼저 전역 최적화(global optimization)하였다. 전역 최적화를 진행하면서 다수의 유용 설계 구간을 구하여 25mph 정면 충돌 조건을 평가하는 다단계 방법이다. 전역 최적화기법은 몬테 칼로 탐색법(Monte Carlo search method)과 군집분석(cluster analysis)을 함께 이용하는 방법^{18,19)}을 적용하였다. 몬테 칼로 탐색법은 탐색 횟수가 충분히 커야 하나 강건한 구조를 가진다. 또한 해석이 최적화과정에 독립적이므로 다수의 컴퓨터로 해석이 가능하다.

우선 에어백과 안전띠에 큰 영향을 주는 설계 변수와 실현 가능한 설계 영역을 선정하였다. 35mph 정면 충돌 조건의 주어진 설계 영역에서 1000회의 난수를 발생하여 승객거동해석을 수행하였다. 몬테 칼로 해석 결과는 전체 설계 공간에서의 전역적 탐색 결과이다. 따라서 해석 결과를 최소값으로 정렬하고 분류하여 20개의 유용 영역(feasible region)을 결정할 수 있었다. 최적화는 목적함수를 최소화하는 설계 변수를 찾아가는 과정이므로 선택된 유용 영역 결과들로부터 설계 구간을 결정해야 한다. 군집분석(cluster analysis)²⁰⁾은 개체들을 가까운 순서로 군집(집합)화하는 통계적 분석 기법으로 20개의 유용 영역에 대하여 군집 분석을 수행하여 4개의 군집을 추정할 수 있었다. 4개의 군집에 대해 25mph 정면 충돌 조건에서의 승객거동해석을 실시함으로써 다양한 상해 결과를 평가할 수 있다.

2. 승객 보호 충돌 시험

2.1 승객 충돌 보호 규정(FMVSS 208)

미국 정부는 1960년대에 자동차의 환경과 안전에 대한 법안을 제정하였다. 1968년부터 시행된 이 법안은 연방 자동차 안전 기준(FMVSS)이라 불리고 있으며 도로교통안전국(NHTSA)이 관할하고 있다. NHTSA 및 관련 연구 자료²¹⁾에 따르면 현재까지 개발된 자동차 안전 장치 중 가장 승객 보호 효과가 큰 장치는 에어백이며, 에어백과 3점식 안전띠를 동시에 착용하는 것이 가장 안전하다고 평가하고 있다.

초기에 개발된 에어백은 50% 남성 인체 모형(dummy)을 기준으로 해석과 시험을 진행하여 개발되었다. 따라서 작은 여성이나 유아에게 불리한 경우가 발생하였다.²¹⁾ 기술적 진보와 사회적 요구에 따라 2000년 5월에 승객 충돌 보호 규정인 FMVSS 208은 다양한 정면 충돌 조건과 인체 모형을 채택하도록 크게 개정되었다. 개정된 FMVSS 208 규정은 50% 남성 인체 모형, 5% 여성 인체 모형 그리고 유아 인체 모형을 사용하여 다양한 조건에서 시험을 실시하도록 규정하고 있다. Fig. 1과 Table 1은 50% 남성 인체 모형과 5% 여성 인체 모형만을 고려한 개정된 시험 항목과 상해 기준이다.

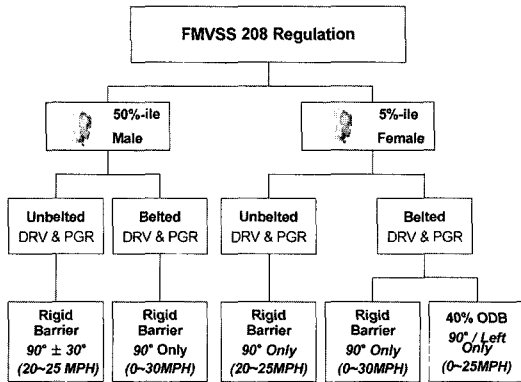


Fig. 1 FMVSS 208 : 50%ile and 5%ile dummy (Phase 1)

Table 1 Summary of injury criteria

criteria	50%ile male	5%ile female
HIC15	700	700
chest acceleration (g)	60	60
chest deflection (mm)	63	52
neck injury (N_{ij})	1.0	1.0
neck peak tension (N)	4170	2620
neck peak compression (N)	4000	2520
femur load (kN)	10.0	6.8

여기서 HIC15는 머리상해기준값(HIC, Head Injury Criteria)인 식 (1)에서 $(t_2 - t_1)$ 구간을 15msec으로 계산한다.

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

2.2 자동차 안전도 평가 제도(NCAP)

FMVSS 208과 함께 중요한 승객 충돌 시험으로 준법규 시험인 자동차안전도평가제도(NCAP, New Car Assessment Program)가 있다. 자동차안전도평가 제도는 관련기관에서 충돌 시험을 실시하여 그 결과를 별(★)등급으로 구분하여 소비자에게 발표하는 제도이다. 승객 안전성 평가 방법은 35mph 고정 벽 정면 충돌 시험을 실시하여 $(t_2 - t_1)$ 구간이 36msec로 식 (1)의 머리상해기준값을 계산한다. 최종적인 상해값인 중상율 입을 가능성 ($P_{combined}$)은 HIC36과 흉부가속도를 식 (2)에 대입하여 구한다. $P_{combined}$ 은 Table 2와 같이 5단계로 구분되며 최저등급을 별 1개, 최고등급을 별 5개로 표시한다.

$$P_{combined} = P_{head} + P_{chest} - (P_{head} \times P_{chest}) \quad (2)$$

where,

$$P_{head} = [1 + \exp(5.02 - 0.00351 \times HIC36)]^{-1}$$

$$P_{chest} = [1 + \exp(5.55 - 0.0693 \times ChestG)]^{-1}$$

Table 2 NCAP star rating

star rating	criteria
★	46% or greater chance of serious injury
★★	36% to 45% chance of serious injury
★★★	21% to 35% chance of serious injury
★★★★	11% to 20% chance of serious injury
★★★★★	10% or less chance of serious injury

3. 전역 최적화기법

최적화기법은 설계 단계에서 중요한 설계 정보와 기준을 제공한다. 최적화기법은 미분 계산이 어려우면 수학적인 엄밀해를 유도하기 힘들다. 또한 수치적 미분이 필요한 다양한 방법들은 계산 속도는 빠르지만 국부 최적점(local optimal point)에 빠질 수 있다. 따라서 전역 최적화기법을 위하여 확률적 개념이 이러한 단점을 보완하고자 할 때 사용된다. 전역 최적화 기법으로는 격자 탐색법과 임의 탐색법, 유전 알고리즘, 시뮬레이티드 어닐링, 진화 전략, 면역 알고리즘 등이 있다.

1970년 Becker와 Lago¹⁸⁾는 전역 최적화를 위하여 군집분석을 이용한 추계론적 최적화기법을 제안하였고 그 이후 많은 연구^{19,22)}가 있었다. 본 연구에서도 임의 탐색법인 몬테 칼로 탐색법과 통계적인 분석 기법인 군집분석을 함께 적용하였다. 몬테 칼로 탐색법은 비선형성이 심한 문제에서도 적용이 가능하며 강건한 구조를 갖는다. 확률적 탐색법이므로 탐색 횟수가 커야 되는 단점이 있으나 해석과 최적화과정이 독립적이므로 다수의 컴퓨터에서 해석을 수행 할 수 있다. 이 방법은 크게 세 부분으로 나누어진다.

- 1) 흥미 영역에서의 표본 추출
- 2) 국부 최적 영역을 선택
- 3) 선택된 영역을 군집분석으로 집합화하여 설계 구간 결정

이 과정을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 우선 주

어진 최적화 문제를 충분한 고정 횟수로 몬테 칼로 탐색법을 실시한다. 출력된 결과들은 제한조건들과 최소값으로 생각되어지는 임의의 기준을 만족하는 결과들만 정렬하여 분류하면 이 결과들은 유용 영역에서의 결과들이다. 최적화는 일종의 역문제 (inverse problem)이므로 선정한 유용 영역으로부터 설계변수들을 찾아내는 과정이 필요하다. 이는 통계적 분석 기법인 군집분석을 통하여 유용 영역의 구간을 추정 할 수 있다.

군집분석²⁰⁾이란 설계 변수들로부터 관측된 출력 결과가 있을 때 설계 변수들을 가까운 순서대로 집합(set)이나 군집(cluster)을 형성하는 통계적 분석 방법이다. 이 때 가까운 순서를 나타내는 척도로서 "거리(distance)"가 정의되며 보통 유클리드 거리 (euclidean distance)를 많이 이용한다. p 차원의 공간에서 두 점 $X=(x_1, x_2, \dots, x_p)$ 와 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_p)$ 간의 유클리드 거리 $d(X, Y)$ 는 식 (3)과 같이 정의되며 변수간의 단위가 다르면 표준화한다.

$$d(X, Y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_p - y_p)^2} \quad (3)$$

군집분석 방법에는 여러 가지²³⁾가 있으며 광범위하게 계층적 군집법(hierarchical clustering)과 비계층적 군집법(nonhierarchical clustering)으로 나눌 수 있다. 계층적 군집법은 전체 대상을 독립적인 각각의 개별 군집에서 시작하여 이들의 각 거리를 기준으로 유사한 대상들을 군집화 시켜 나가는 방법으로 단일 결합법, 평균 결합법, 완전 결합법 등이 있다. 계층적 군집법은 어느 방법이든 각 개체가 스스로 군집인 상태로 출발한다. 따라서 첫 단계에서의 군집 수는 개체 수와 같다. 다음 단계에서는 가장 유사한 두 개체를 합병함으로써 군집 수를 줄인다. 이 과정을 반복하여 최종적으로는 모든 개체가 단일 군집이 된다. 따라서 개체간의 관계를 알 수 있으며 나무형 그림(dendrogram)으로 표현 할 수 있다.

비계층적 군집법은 거리를 기준으로 군집화 되어 가는 과정에서 군집수가 줄어드는 것이 아니라, 사전에 정한 군집 수에 따라 전체 대상을 가장 가까운 중심점을 갖는 군집에 할당하여 군집화하는 방법으로 자료가 큰 경우에 유리하며 K 평균법이 있다.

4. 승객보호장치의 설계

4.1 목적함수와 최적화 과정

자동차 개발 단계에서는 관련 부품이 구체화되어 있지 못하고 시간적 제한으로 많은 해석과 충돌 시험을 수행하기 어렵다. 본 연구에서도 50% 남성 인체모형에 대한 시험 조건만을 고려하였다. Fig. 2는 50% 남성 인체모형에서 충돌 조건과 설계간의 연성 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 2를 보면 동일 조건에서 가장 가혹한 시험 조건은 35mph 정면 충돌 조건(안전띠 착용)과 25mph 정면 충돌 조건(안전띠 미착용)이다. 자동차의 승객 안전성은 승객보호장치 뿐만 아니라 차체 특성에도 관련되어 있지만 본 연구에서는 승객보호장치만을 고려하였다. 두 개의 충돌 조건에 대하여 승객 보호 장치인 에어백과 안전띠의 설계 변수들은 연성 관계에 있으며 해석과 시험을 진행하면서 각 설계 변수들을 조정하여 결정해야 한다. 또한 두 충돌 조건에 따른 승객 상해치를 모두 최소화 해야 되기 때문에 식 (4)와 같은 다목적 함수 최적화(multi objective optimization) 문제로 정식화할 수 있다.

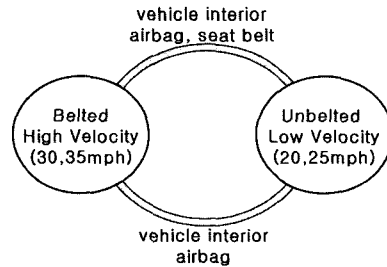


Fig. 2 Relation between test and design

Find design_variables

$$\text{Minimize } 35\text{mph_injury}, 25\text{mph_injury} \quad (4)$$

일반적인 근사 최적화기법은 단일해를 제시한다. 따라서 목적함수가 여러 개인 경우 목적함수마다 가중치를 두어 계산하거나 일부의 목적함수를 제한 조건으로 설정하여 최적화²⁴⁾한다. 그러나 25mph 정면 충돌 조건은 법규 시험이기 때문에 Table 1과 같은 많은 상해 기준이 충분히 만족해야 한다. 따라서 본 연구에서는 35mph 정면 충돌 조건을 먼저 전역

최적화를 수행하였다. 이 때 목적함수는 스칼라 형태로 제공되는 중상을 입을 가능성 ($P_{combined}$)이다. 전역 최적화를 진행하면서 군집분석을 이용하여 다수의 유용 설계 구간을 추정하고 25mph 정면 충돌 조건을 평가하는 다단계 방법을 적용하고자 한다.

4.2 몬테 칼로 탐색법을 이용한 NCAP해석

우선 자동차안전도평가제도(NCAP)에 대한 해석을 MADYMO를 사용하여 수행하였다. 네델란드 응용과학연구소(TNO)에서 개발한 승객거동해석 프로그램인 MADYMO(Mathematical Dynamical Models)²⁵⁾는 다물체 동역학과 유한 요소법이 통합된 상용 해석 프로그램이다. 다양한 형태의 기구학적 연결(joint)에 의해 인체 모형(dummy) 등을 강체로 간단하게 표현하고 에어백과 같은 상세 부분만 유한 요소로 표현함으로써 빠른 계산이 가능하다. 따라서 자동차 설계 단계에 필요한 대규모의 설계 변수에 대한 연구에 적합하다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 운전석의 정면충돌 조건을 MADYMO를 사용하여 모사하였다. 계기판(Instrument Panel)과 앞유리(windshield) 등의 차체 환경과 에어백은 유한요소망을 사용하였고 안전띠는 인체모형과 접촉하는 부분만을 유한요소망으로 구성하여 인체모형과의 접촉을 해석하도록 하였다. 안전띠의 힘-변형 특성은 단품 실험을 통하여 정의하였으며 초기 설계 단계에서의 해석 모델이기 때문에 이전 차량의 정면 충돌 시험 자료를 활용하였다.

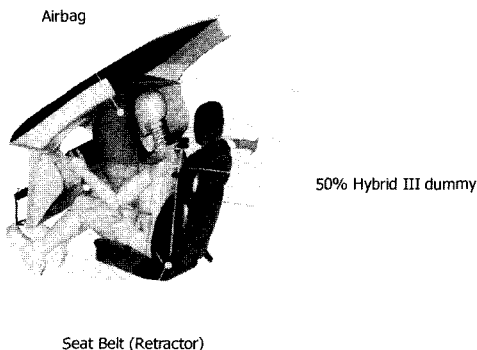


Fig. 3 MADYMO model

해석에 적용된 설계 변수와 조건은 Table 3과 같으며 승객보호장치인 에어백과 안전띠에 대한 설계 변수들이다. 에어백 지름(cushion diameter)과 누출 구멍(vent hole)은 에어백 내의 지지 압력을 나타내는 중요한 설계 변수들이며 안전띠와 관련된 하중 제한장치(load limiter)의 하중과 시간은 승객의 흉부 가속도를 절감하기 위해 필요한 설계 변수이다.

각각의 설계변수에 대한 난수 발생은 균일 확률 분포로 가정하였고 발생 횟수는 1000회로 하였다. Fig. 4는 해석 결과를 머리상해기준값과 흉부가속도에 따라 도시한 그림으로 별 4개와 5개에 걸쳐 분포하고 있다. 전반적인 해석 결과를 보면 $P_{combined}$ 의 평균은 12.4, 표준편차는 2.29이다. 임의의 기준을 사용하여 유용 영역의 설계점들을 선택 할 수 있으며 본 연구에서는 $P_{combined}$ 가 9% 이내를 기준으로 설정하였다. 이 때 해석 결과를 정렬하여 9% 이내인 설계점들을 찾으면 약 20개이다. 이 20개의 설계점들은 확률적인 최적점들이며 Fig.4에서와 같이 유용 영역(feasible region)이 된다.

Table 3 Stochastic variables and design ranges

Variables	Ranges	Distribution
Cushion diameter	670 - 730 mm	Uniform
Vent hole diameter	20 - 40 mm	Uniform
Load limiter force	3000 - 6000 N	Uniform
Load limiter time	60 - 110 msec	Uniform

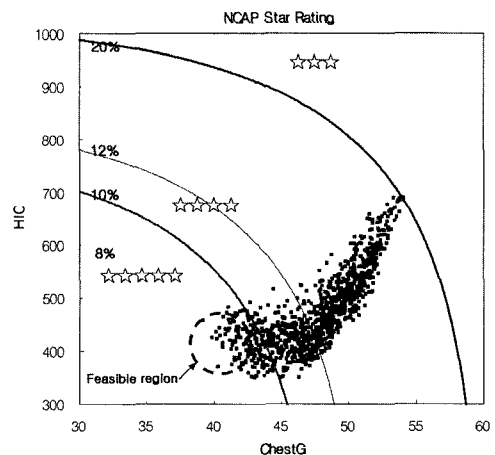


Fig. 4 Response clouds generated by Monte Carlo Simulation using MADYMO

유용 영역의 20개의 설계점을 개체로 하는 군집 분석을 미니탐²³⁾을 사용하여 실시하였다. 본 해석에서 사용된 설계 변수들은 단위가 다르기 때문에 표준화를 실시하였고 계층적 군집 방법 중의 하나인 와드 연결법을 적용하였다. Fig. 5는 군집분석을 실시한 후 생성된 나무형 그림(dentrogram)이다. 나무형 그림은 개체간의 거리를 기준으로 단계별 군집 결과물을 계보적 구조로 시각화한 그림으로 개체간의 군집 관계를 설명하고 있다.

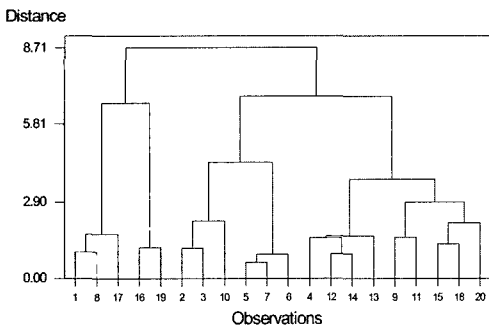


Fig. 5 Dentrogram generated by cluster analysis

최적의 군집 수를 결정하는 통계적인 방법은 아직까지도 주요 연구의 대상이다. 일반적으로 계층적 군집 방법에서 구한 나무형 그림을 참조하여 군집간의 거리가 급격히 증가하는 계층에서 수평선으로 절단하여 그 이하의 군집을 하나의 군집으로 결정하는 방법이 널리 사용되고 있다. Fig. 5에서 거리가 3~5사이에서 큰 변화를 보이므로 이 계층에서 군집을 분류하면 Table 4와 같다. Table 5는 Table 4에서 구한 군집분석 결과를 이용하여 각 군집에 해당하는 설계 변수들의 평균 설계 구간과 그에 따른 해석 결과이다. 각 설계 구간에 차이가 있음을 알 수 있으며 목적함수인 $P_{combined}$ 가 9%를 만족하고 있다.

Table 4 Cluster analysis results

cluster	design points	No. of points
cluster 1	1,8,17	3
cluster 2	2,3,5,6,7,10	6
cluster 3	4,9,11,12,13,14,15,18,20	9
cluster 4	16,19	2

Table 5 Average of design region and analysis results

Variables	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Cushion diameter	724.0	712.8	694.9	723.6
Vent hole diameter	32.9	37.3	31.2	37.4
Load limiter force	3153	3083	3185	3659
Load limiter time	73	90	90	82
HIC36	352	423	375	433.1
Chest G	41.4	41.1	40.8	39.6
$P_{combined}$	8.4	8.9	8.4	8.4

4.3 FMVSS 208 (25mph unbelted) 해석

Table 5의 유용 설계 구간을 사용하여 안전띠 미착용의 25mph 정면 충돌 해석을 수행하였다. 안전띠 미착용의 경우이므로 4개의 설계 변수 중 2개의 에어백 변수만이 고려된다. 본 해석에 사용된 에어백이 진보된 에어백(advanced airbag)으로 고압(high pressure)과 저압(low pressure)을 갖고 있기 때문에 두 경우를 모두 해석하였다. 에어백의 압력은 차량 특성과 다양한 충돌 형태에 따라 최적화 되어야 한다. 일반적으로 운전석용 에어백은 정적 탱크 시험(60L)에서 저압은 130~170kPa, 고압은 180~230kPa 범위에 있다.

Fig. 6~9는 군집별 상해 결과를 Table 1에 따라 백분율로 환산한 표이다. 에어백 압력에 따라 머리, 목과 관련된 상해가 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 에어백의 압력 특성과 안전띠 착용 여부에 따라 인체 모형의 거동이 크게 차이가 나기 때문이다. 안전띠 미착용인 경우의 머리와 목 상해 특성은 비정상자세조건과 함께 중요한 연구 과제이다.

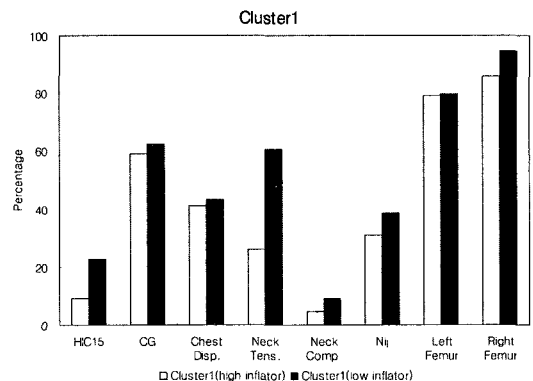


Fig. 6 FMVSS 208 injury (25mph unbelted) of cluster 1

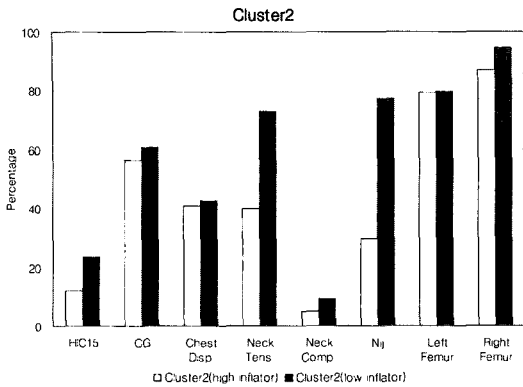


Fig. 7 FMVSS 208 injury (25mph unbelted) of cluster 2

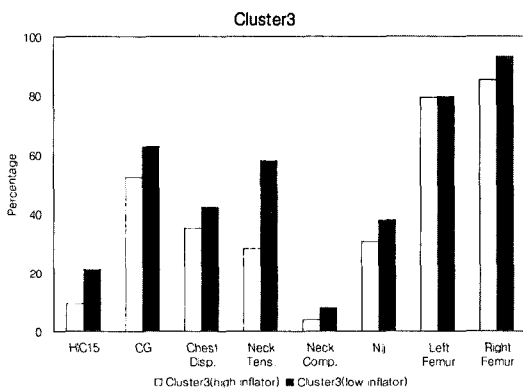


Fig. 8 FMVSS 208 injury (25mph unbelted) of cluster 3

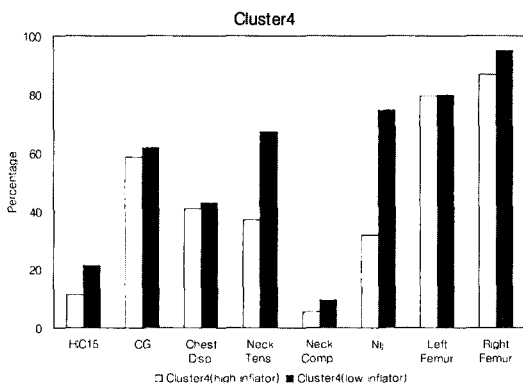


Fig. 9 FMVSS 208 injury (25mph unbelted) of cluster 4

전반적으로 상해 기준을 만족하고 있으나 대퇴부(femur)의 하중이 높게 나타났다. 따라서 무릎 보호대(knee bolster)에 대한 보완이 필요하다. 군집 2와 4(Fig. 7과 Fig. 9)의 결과를 보면 목 상해치인 Nij가 높다. 이는 에어백 가스 압력과 관련된 누출 구멍(vent

hole)이 커서 운전대와 접촉이 일어나기 때문이다. 대퇴부(femur) 하중을 제외하면 군집1과 3이 양호한 결과를 보이고 있다. 다수의 유용해는 절충(trade-off)을 통하여 설계안을 결정할 수 있다. 26) 일반적으로 흉부가속도는 감소되기 어렵기 때문에 Table 5를 참고하여 흉부가속도가 작은 군집3을 우선적으로 결정하였다.

5. 결론

- 1) 자동차안전도평가제도(NCAP)와 새로 개정된 FMVSS 208에 대한 승객 충돌 보호 문제를 다목적함수 최적화 문제로 정식화하였다. 일반적으로 근사 최적화기법은 단일 해를 제시하므로 두 충돌 조건을 다루는데 어려움이 있다. 따라서 고속 충돌(35mph)의 몬테 칼로 탐색법과 군집분석을 적용하여 4개의 유용 영역을 추정하였고 4개의 설계 구간을 이용하여 저속 충돌(25mph)에서 상해를 해석하였다.
- 2) 4개의 유용해를 이용한 저속 충돌 해석에서 대퇴부 하중이 기준치에 근접하고 있다. 따라서 유용해들을 채택하기 위해서는 대퇴부 상해에 대한 개선이 필요함을 알 수 있었다. 다목적함수 최적화는 다수의 유용해로부터 절충(trade-off)이 필요하며 두 충돌 조건의 종합적인 평가를 통하여 설계안을 결정할 수 있었다. 본 해석에서는 50% 남성 인체 모형만을 고려하였으므로 다른 시험 결과들도 이용할 수 있다.
- 3) 몬테 칼로 탐색법은 엄밀한 수학적 최적화 이론을 따르지 않지만 데이터 중심적인 확률 이론에 근거한 실용적인 탐색법이다. 몬테 칼로 탐색법은 일반적인 최적화기법에 비해 많은 탐색을 필요로 한다. 하지만 최적화 과정이 해석과 컴퓨터 환경에 독립적이므로 다수의 컴퓨터에서 동시에 해석을 수행하면 절대적 계산 시간을 줄일 수 있다.

후 기

이 연구는 벨파이 코리아(주)와 한국과학재단 지정 최적설계기술연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) 49 CFR, PART 571, FMVSS 208 : Occupant Crash Protection, NHTSA, 2003.
- 2) M. Beecham, New Technologies for Automotive Safety, Just-Auto Company, 2001.
- 3) K. R Dickson and M. Afzal, "Airbag Restraint System Design by Mathematical Crash Simulation and Design of Experiments," SAE901717, 1990.
- 4) Y. S. Park, J. Y. Lee and G. J. Park, "An Airbag Design for the Safety of an Occupant using the Orthogonal Array," Transactions of KSAE, Vol.3, No.2, pp.62-77, 1995.
- 5) K. H. Lee, I. S. Eom, G. J. Park and W. I. Lee, "Robust Design for Unconstrained Optimization Problems Using Taguchi Method," AIAA Journal, Vol.34, No.4, 1996.
- 6) J. M. Lim and G. J. Park, "Design Recommendations of the Occupant Protection Systems Using Orthogonal Arrays," Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.208-215, 1999.
- 7) K. W. Hwang, W. S. Kwon, K. H. Lee and G. J. Park, "Design of Structure Using Orthogonal Array Considering Interaction in Discrete Design Space," Transactions of KSME, Vol.24, No.12, pp.2952-2962, 2000.
- 8) K. H. Lee, J. W. Yi, J. S. Park and G. J. Park, "An Optimization Algorithm using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space for Structures," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.40, 2003.
- 9) S. K. Jeon, An Optimum Design of Airbag System based on Crash Simulation, KAIST Master's Thesis, 1996.
- 10) U. P. Hong and G. J. Park, "Determination of Crash Pulse and Optimization of Crash Components Using Response Surface Approximate Optimization," Journal of Automobile Engineering, Vol.217, No.3, 2003.
- 11) <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-30/ncsa/>.
- 12) C. E. Nash and S. T. McDonald, "New Technologies and Techniques for Nass Accident Investigations," SAE850245, 1985.
- 13) A. C. Malliaris, K. H. Digges and J. H. DeBlois, "Injury Patterns of Car Occupants Under Air Bag Deployment," SAE950867, 1995.
- 14) P. Ardoino, "Car Crash and Safety Testing," Crashworthiness of Transportation Systems : Structural Impact and Occupant Protection, pp. 189-205, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1997.
- 15) P. Thomas and R. Frampton, "Crash Testing for Real World Safety - What Are the Priorities for Casualty Reduction," The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Paper No.351, 2003.
- 16) J. Augenstein, E. Perdeck, J. Stratton, K. Digges, G. Bahouth, N. Borchers and P. Baur, "Methodology for the Development and Validation of Injury Predicting Algorithms," The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Paper No.467, 2003.
- 17) <http://www.nhtsa.dot.gov/NCAP/Info.html> html.
- 18) R. W. Becker and G. V. Lago, "A Global Optimization Algorithm," In Proceedings of the 8th Allerton Conference on Circuits and Systems Theory, pp.3-12, 1970.
- 19) A. A. Torn, <http://www.abo.fi/~atorn/Globopt.html>.
- 20) Y. S. Choi and K. M. Jeong, Minitab Multivariate Analysis, pp 183-216, Eretec, 2002.
- 21) <http://www.nhtsa.dot.gov/people/injury/airbags/208con2e.html>.
- 22) J. Hassan, G. Nusholtz and M. D. Forrest, "A Stochastic Approach for Occupant Crash Simulation," SAE2000-01-1597, 2000.
- 23) Minitab Users Manual, Eretec, 2003.
- 24) J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill Book Company, New York, 1989.
- 25) MADYMO Manual, TNO, 2004.
- 26) A. D. Belegundu and T. R. Chandrupatla, Optimization Concepts and Application in Engineering, Prentice Hill, New Jersey, 1999.