

# 일체형 시트의 충돌특성 개선을 위한 최적설계

## Optimization of the Integrated Seat for Crashworthiness Improvement

이 광 기†                      이 광 순\*                      박 현 민\*\*                      최 동 훈\*\*\*  
Lee, Kwangki                      Lee, Kwang-Soon                      Park, Hyun-Min                      Choi, Dong-Hoon  
(논문접수일 : 2002년 9월 5일 ; 심사종료일 : 2003년 12월 6일)

### 요 지

자동차 산업에서 안전에 대한 법적인 요구 및 시장 수요의 증가에 따라 강도와 경량화라는 안전과 환경에 대한 상반된 목적을 만족시켜야 하기 때문에 일체형 시트의 설계는 점점 더 중요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 미국시험규정 FMVSS210에 따라 외연적 유한 요소해석 프로그램인 LS-Dyna를 사용하여 시트 충돌해석을 수행하였다. 하지만 충돌해석은 많은 해석시간을 요구하기 때문에 효율적이고 신뢰성 있는 최적설계방법이 요구된다. 따라서 통계적 기법인 실험계획법과 반응표면모델을 적용하여 많은 해석시간을 요구하는 LS-Dyna해석을 가능한 줄이고 비선형 최적설계 알고리즘을 적용하여 강도와 경량화를 동시에 최적화하고자 한다. 본 연구에서는 실험계획법을 사용하여 최대 변위 및 총중량에 대한 설계영역을 탐색하고 반응표면모델을 구성하여 최적설계를 수행하였다.

**핵심용어** : 일체형 시트, 충돌해석, 유한요소해석, 반응표면모델, 최적설계

### Abstract

Due to increasing legal and market demands for safety in the automotive design process, the design of integrated seat is important more and more because it should satisfy the conflict between stronger and lower weight for safety and environmental demands. In this study for crash simulations, the numerical simulations have been carried out using the explicit finite element program LS-Dyna according to the FMVSS 210 standard for safety test of seat. Since crash simulations are very time-consuming and a series of simulations that does not lead to a better result is very costly, the optimization method must be both efficient and reliable.

As a result of that, statistical approaches such as design of experiments and response surface model have been successfully implemented to reduce time-consuming LS-Dyna simulations and optimize the safety and environmental demands together with nonlinear optimization algorithm. Design of experiments is used for exploring the design space of maximum displacement and total weight and for building response surface models in order to minimize the maximum displacement and total weight of integrated seat.

**Keywords** : *integrated seat, crashworthiness, finite element analysis, response surface model, optimization*

## 1. 서 론

최근 들어 승용차에도 많이 적용되고 있는 일체형 시트(또는 3점식 벨트시트, 이하 일체형 시트)는 승객의 거동

과 안정성의 측면에서 활발한 개발이 이루어지고 있는 실정이다. 실제로 일체형 시트는 시트벨트(또는 안전벨트, 이하 시트벨트)를 구속시키는 3점과 승객의 거동을 고려한 하단부의 서스펜션 시스템이 기존의 시트와 비교해 크게

† 책임저자, 정회원 · ㈜프레임맥스 이사  
전화: 2295-3984; Fax: 2291-0441  
E-mail: kklee@iframax.com

\* 한양대학교 최적설계신기술연구센터 전임연구원

\*\* 한일이화 주식회사

\*\*\* 한양대학교 최적설계신기술연구센터 소장

· 이 논문에 대한 토론을 2004년 3월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2004년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

다른점이라고 할 수 있다. 이런 변화에서 충돌에 의한 변형에 가장 영향을 받는 것은 시트벨트의 구속에 의한 시트 등받이 부분의 변형 및 등받이와 하단부를 연결하는 부위의 파손이고, 이러한 원인은 3점식 구속에 의한 등받이 부위의 응력집중에 의한 것으로 볼 수 있다.

즉 응력집중에 의해 등받이가 과도한 변형을 하게 되고 이러한 변형은 등받이와 하단부의 연결부위로 이어져 결국은 연결부위의 파괴로 이어진다. 이러한 현상은 실제 자동차 충돌시 승객에게 커다란 상해를 가하게 되며, 실제로 안전규격에서도 문제를 야기시킬 수 있다.

본 연구에서는 JMP라는 통계 프로그램을 이용하여 실험계획법을 수행하고 실험계획법에 따른 유한요소 해석은 비선형 동적해석 및 충돌해석에 많이 사용되고 있는 LS-Dyna를 사용하여 동적 과도해석을 수행하였다. 통합설계 프로그램인 ModelCenter를 이용하여 실험계획법과 같은 반복적인 해석 및 최적화에 대한 프레임워크를 만들고 최적해를 찾아 나갔다. 최적화는 가장 변형이 심한 등받이 상단부인 앵커리지(Anchorage)라고 일컫는 부분의 변위를 목적값으로 설정하였다. 해석에 사용된 하중, 더미, 동적거동 시간 등은 미연방 자동차안전규정(FMVSS210)을 기준으로 설정하였다.<sup>1)</sup>

## 2. 외연적 프로그램에 의한 시트의 동적거동 해석

### 2.1 유한요소 모델링

본 연구에서 사용된 유한요소 모델은 일체형 시트와 상체, 하체 더미이며, 더미의 기본 사양은 그림 1과 같다. 더미는 미연방 자동차안전규정 중 FMVSS210에서 제시되는 상부, 하부더미이며, 일반적인 인체의 상체, 하체를 기준으로 제시된 사양이라고 볼 수 있다. 동적해석에 사용된 프로그램은 LS-Dyna이며, 모델의 요소 및 물성모델은

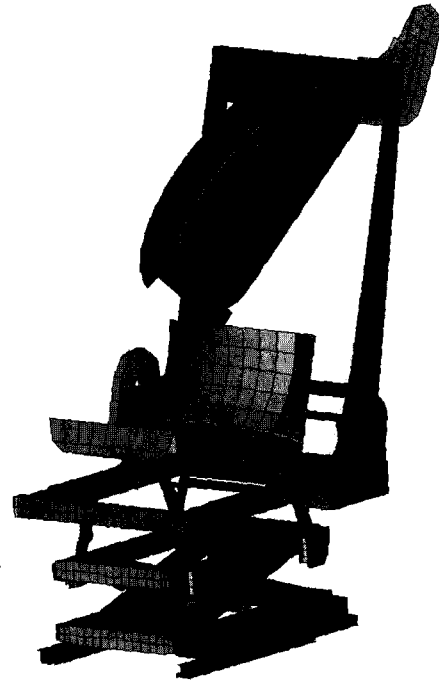


그림 2 LS-Dyna model of integrated seat

Belyschko-Tsay Shell과 Piecewise Linear Plasticity를 사용하였다. 일부 기어 및 볼트, 보강재에는 Solid요소를 사용하였고, 더미는 강체로 가정하였다. 또한 시트 벨트는 LS-Dyna에서 제공하는 Seat belt요소를 사용하여 모델링 하였다.<sup>2)</sup> 그림 2는 해석에 사용된 유한요소 모델이며, 일체형 시트, 상체 및 하체더미, 시트 벨트 등으로 구성되어 있다. 완성된 모델은 약9800개의 노드와 7500개의 요소로 구성되어있다.

실제 거동에서 더미는 강체로 가정되었고, 하중 및 하중점은 상체더미의 6개 노드에 3000lb의 힘을 수평보다 10° 위쪽 방향으로 가하였다. 하체더미에는 6개의 노드에 5000lb의 힘을 역시 수평보다 10° 위쪽으로 가하였다. 전체 거동이 일어나는 시간은 100msec로 설정하여 짧은 시

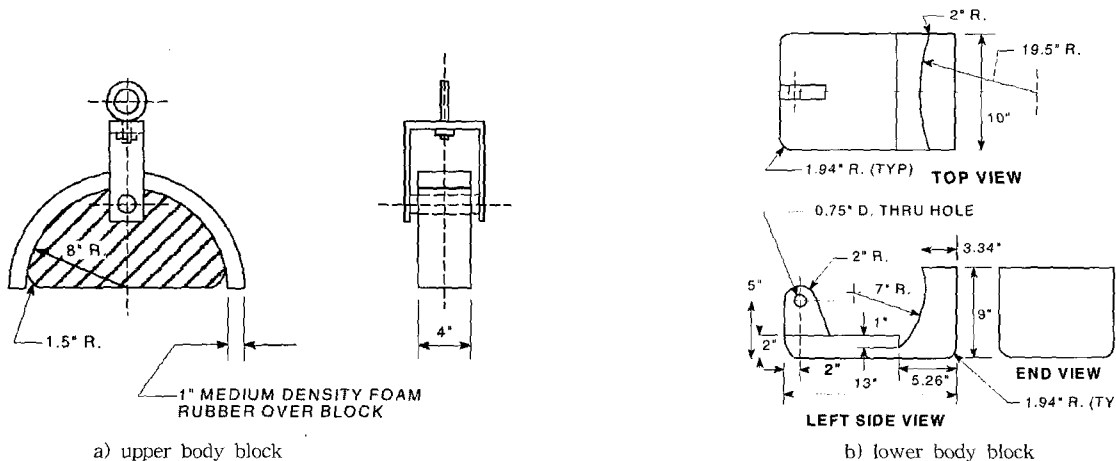


그림 1 Body block (Dummy)

간동안 시트에 가해지는 변형 양상을 관찰 할 수 있었다.  
 그림 3, 그림 4, 그림 5는 일체형 시트의 시간에 따른 응력 분포를 보여주고 있다. 상체, 하체더미에 하중이 가해

짐에 따라 등받이의 프레임, 등받이와 하단부를 연결하는 부위가 가장 심한 변형을 일으키고 있음을 관찰 할 수 있다.

### 2.2 실험계획법

LS-Dyna 일체형 시트 유한요소 모델은 그림 6과 표 1과 같이 설계변수가 9개의 두께 변화이고 출력이 최대 변형과 총 무게의 2가지인 경우에 대하여 실험계획을 수행하고 반응표면모델(Response Surface Model)을 구성하였다.<sup>3)~5)</sup>

표 1에 표시된 9개 설계변수의 두께 범위는 현재 설계 값을 기준으로 하여 실제 사용이 가능한 두께 범위를 설계자와 협의의 하여 선정하였다.

이때 설계변수는 다음 식(1)을 이용하여 [-1, 1]의 영역으로 정규화하여 적용한다.



그림 3 Dynamic transient result at 50msec - stress

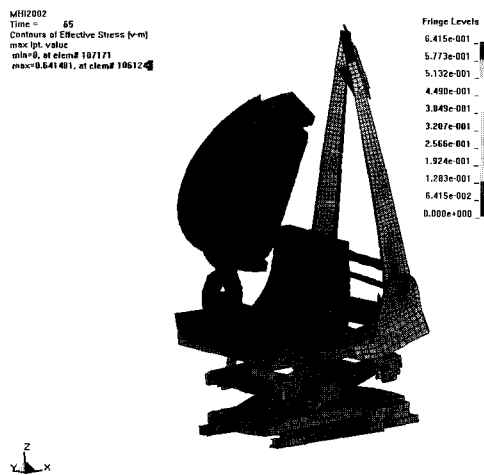


그림 4 Dynamic transient result at 65msec - stress

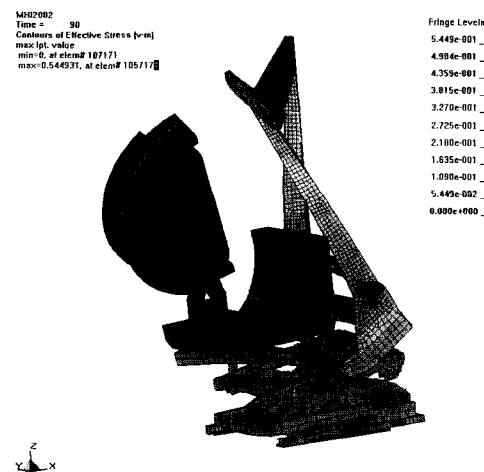


그림 5 Dynamic transient result at 90msec - stress

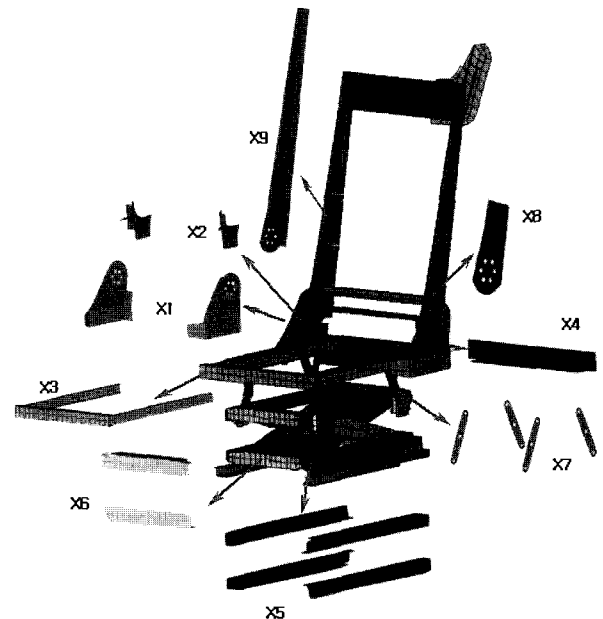


그림 6 Design variables of integrated seat

표 1 9 design variables

No	Name	Description	Min	Max
1	x1	Recliner bracket	2	4
2	x2	Recliner bracket reinforcement	1	3
3	x3	Front tilting bracket	2	4
4	x4	Rear tilting bracket	3	5
5	x5	Side suspension frame	2	4
6	x6	Front suspension frame	2	4
7	x7	Tilting link	4	6
8	x8	Back frame reinforcement	6	8
9	x9	Back frame	2	4

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{c_i}, c_i = const. \quad (1)$$

여기서  $\bar{x}_i$ 는 설계변수  $x_i$ 의 평균값을 의미한다. 9개 설계변수에 대한 2가지 응답들의 상관관계인 반응 표면모델은 식(2)와 같은 다항식의 반응표면모델로 구성할 수 있다.

$$Y = X^T\beta + \epsilon \quad (2)$$

여기서  $Y = [y_i]$ ,  $X = [X_i X_i X_i]$ ,  $\epsilon$ 은 모델 오차를 나타내며, 식(2)의 반응표면모델의 미지 계수 항인  $\beta = [\beta_i]$ 는 최소자승법을 적용하여 다음 식(3)과 같이 구한다.

$$L = \sum \epsilon^2 = \sum (Y - X^T\beta)^T (Y - X^T\beta) \quad (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \therefore \beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

따라서 식(2)는 다음과 같이 표현되며  $Y_0$ 는 최대 변형과 총 무게의 2가지 LS-Dyna 응답변수를 의미한다.

$$Y = X^T\beta + \epsilon = X^T [(X^T X)^{-1} X^T Y_0] \quad (4)$$

본 연구에서는 표 1의 9개 설계변수를 모두 [-1, 1]의 2수준으로 정규화하여 적용하였으며 실험계획법 중에서 2수준 일부실시법으로 널리 사용되는 Plackett-Burman법 12회와 1회의 중심점 해석을 LS-Dyna 해석에 적용하였다. 총 13회의 LS-Dyna 반복 해석은 그림 7과 같이 통합설계 프로그램인 ModelCenter를 사용하여 자동으로 수행하였다.<sup>6)</sup>

하지만 충돌해석과 같이 비선형성을 가질 가능성이 높은

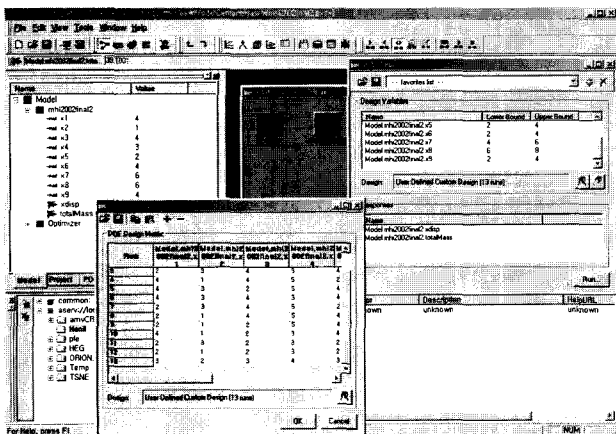


그림 7 LS-Dyna automation within ModelCenter framework

총 13회의 제한된 LS-Dyna 반복 해석만으로는 정확한 선형의 반응표면모델을 구성하기 어렵기 때문에 이러한 충돌 해석에 2수준의 설계변수 범위를 고려한 실험계획법을 적용하기에는 많은 무리가 따를 수 밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 비선형성을 반응표면모델을 구성할 때 고려하기 위하여 총 13회의 LS-Dyna 반복 해석 결과 각각에 가중치를 추가하여 가중치 반응표면모델을 구성하였다. 여러 가지 가중치 방법 중에서 Huber가 제시한 식(5)와 식(6)과 같은 최소-최대 가중치 방법을 반복적으로 적용하여 총 13회 LS-Dyna 반복 해석 결과에 대한 가중치 반응표면모델을 구성하였다.<sup>7)</sup>

$$Y = X^T\beta + \epsilon = X^T [(X^T W X)^{-1} X^T W Y_0] \quad (5)$$

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |e_i|/\hat{\sigma} \leq 1 \\ e_i/\hat{\sigma} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $e_i$ 는 13회 반복해석의 잔차를 의미하고  $\hat{\sigma}$ 는 잔차의 평균제곱근을 의미한다. 가중치 반복 계산 결과 13번째 해석 결과(1회의 중심점)의 가중치만 0.6238을 나타내었고 다른 12회 해석 결과의 가중치는 1로 나타났다. 가중치 분석 결과를 통하여 중심점 부근에서 비선형성을 갖는 것을 알 수 있었으며 이것은 만약 최적 값이 중심점 부근에 있다면 해석 결과 부근에서 다시 LS-Dyna 유한요소 해석을 통한 검증이 필요하다는 것을 의미한다.

### 2.3 반응표면모델에 의한 설계영역 탐색

다음 그림 8에 LS-Dyna 유한요소 모델의 9개 설계변수에 대한 주효과(Main Effect)를 표시하였다.<sup>8)</sup>

일체형 시트의 최대 변형(xdisp)과 총 무게(totalMass)에 대한 9개 설계변수의 두께변화에 따른 경향을 보여준다. 먼저 최대 변형인 경우 [701mm~994mm] 범위에서 변화하며 총 무게인 경우에는 [34.9kg~40.6kg] 범위에서 변화하는 것을 보여준다. 즉 이 범위는 주어진 9개 설계변수의 변화에 의하여 얻을 수 있는 최대 변형과 총 무게의 최대 및 최소 범위를 의미하며 이 범위를 넘어가는 값들은 주어진 설계변수의 범위 안에서는 얻을 수 없다는 것을 의미한다.

최대 변형인 경우에는 x3(Front Tilting Bracket)이 가장 큰 전역 민감도를 나타내며 총 무게인 경우에는 x5(Side Suspension Frame)가 가장 큰 전역 민감도를 나

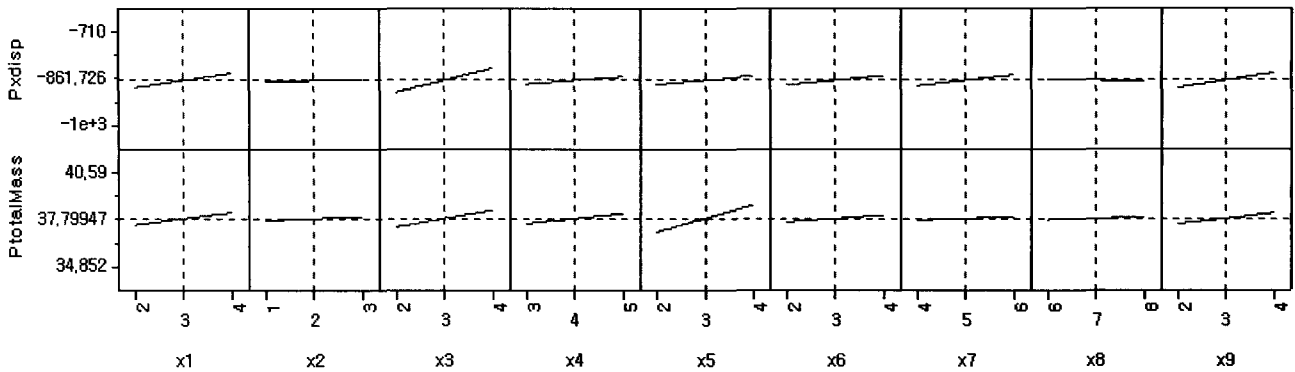


그림 8 Main Effect of integrated seat model

타낸다. 하지만 9개 설계변수 중에서 단지 x8(Back Frame Reinforcement)인 경우만 최대 변형과 총 무게가 동일하게 변화하는 경향을 보여주며 다른 8개 설계변수들은 모두 상반되는 경향을 보여준다. 따라서 2가지 LS-Dyna 출력에 대하여 최적의 해를 찾으려면 x8을 제외한 8개 설계변수들의 타협점을 잘 선택해야 한다는 것을 알 수 있다.

다음 그림 9와 그림 10은 JMP를 사용하여 그린 Pareto Plot을 보여주며 Pareto Plot은 응답에 대한 설계변수들의 민감도를 영향이 큰 순서로 보여주는 통계기법으로 총 합이 백분율을 나타낸다. 그림 9는 최대 변형에 대한 설계변수들의 기여도를 백분율로 보여주며 x3 > x1 > x9 > x7 > x6의 순서로 기여도가 크다는 것을 알 수 있으며 언급된 5개 설계변수의 총 기여도는 최대 변형의 80%를 차지하는 것을 알 수 있다.

다음 그림 10은 총 무게에 대한 기여도를 보여주며 x5

> x3 > x1 > x4 > x9의 순서로 기여도 백분율을 보여주며 언급된 5개 설계변수의 총 기여도도 총 무게의 80%를 차지하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 그림 9와 그림 10을 비교해보면 최대 변형과 총 무게에 모두 영향을 주는 설계변수는 x1과 x3인 것을 알 수 있다. x1과 x3은 최대 변형에는 50%의 기여를 하고 총 무게에는 약 33%의 기여를 하는 것을 알 수 있다.

### 3. 일체형 시트의 충돌특성 최적설계

#### 3.1 최적설계 수식화

유한차원을 가진 최적설계 문제는 일반적으로 목적함수  $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 와 제한조건  $g_j(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } f_i(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad i=1,2,\dots,I \quad (7)$$

$$\text{Subject to } g_j(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad j=1,2,\dots,J \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u \quad (9)$$

여기서,  $\mathbf{x}$ 는  $n$ 개의 설계변수 벡터이고  $\mathbf{p}$ 는  $m$ 개의 시스템 변수 벡터이고  $I$ 는 목적함수의 수를  $J$ 는 제한조건의 수를 의미한다.

일체형 시트의 최적설계를 위해서는 다음 식(10)과 같이 최대 변형( $xdisp$ )을 최소화하는 것을 목적함수로 하고 총 무게( $totalMass$ )를 초기 설계보다 작게 하는 제한조건으로 고려하여 최적설계 수식화를 수행하였다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } xdisp \\ &\text{subj. to } totalMass \leq 37.99g \end{aligned} \quad (10)$$

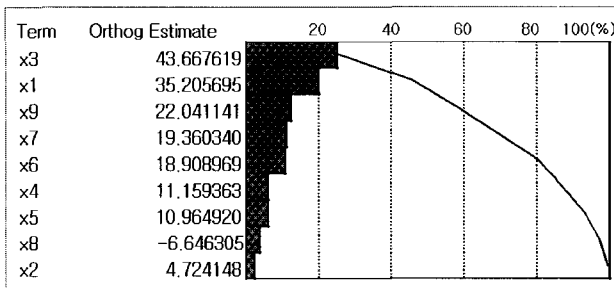


그림 9 Sensitivity of maximum displacement

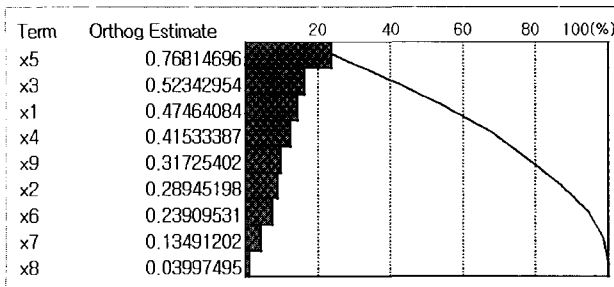


그림 10 Sensitivity of total mass

### 3.2 SQP 알고리즘에 의한 최적설계

3.1절의 식(10)과 같이 목적함수와 제한조건이 있는 비선형 최적설계 문제를 해결하는 위하여 본 연구에서는 LS-Dyna 동적해석 결과로부터 만들어진 최대 변형 및 총 무게의 반응표면모델에 SQP(Sequential Quadratic programming) 알고리즘을 적용하여 ModelCenter 프레임 워크에서 최적설계를 수행하였으며 초기 값은 현재 설계 값을 사용하여 수행하였다.<sup>6),9)</sup>

다음 표 2에 일체형 시트 모델의 최적설계를 수행한 결과를 표시하였다. 먼저 최대 변형인 경우는 초기값과 비교하여 5.53%(45.7mm) 감소하였으며 총 무게 제한조건인

표 2 Optimal result of integrated seat

내 용	초기값	최적값	변화(%)
최대 변형(mm)	826.76	781.06	-5.53
총 무게(kg)	37.99	37.905	-
x1	3	3.724	24.13
x2	2	1	-50
x3	3.2	4	25
x4	4	3	-25
x5	3	2	-33.33
x6	3	4	33.33
x7	7	6	-14.29
x8	7.2	6	-16.67
x9	3.2	4	25

표 3 Comparison between LS-Dyna and weighted response surface model

내 용	LS-Dyna	WRSM	오차(%)
최대 변형(mm)	781.06	767.89	1.69
총 무게(kg)	37.905	37.906	-

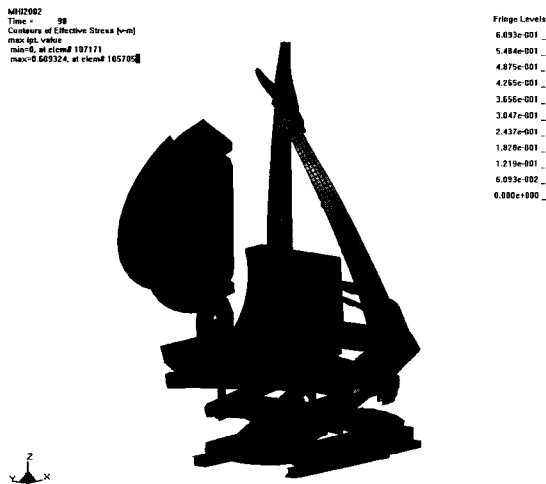


그림 11 Optimal displacement from LS-Dyna - stress

경우도 주어진 초기 제한조건 값인 37.99Kg을 만족하는 것을 알 수 있다.

가중치 반응표면모델을 통하여 구한 일체형 시트 모델의 최적설계 값과 LS-Dyna 검증 해석을 비교한 결과는 다음 표 3과 같다. 최대 변형 및 총 무게에 대한 LS-Dyna 해석 결과는 가중치 반응표면모델(WRSM) 결과와 최대 변형만이 1.69%의 오차를 보여주며 이것은 반응표면모델 결과와 LS-Dyna 해석 결과가 매우 잘 일치한다는 것을 의미한다.

다음 그림 11은 최적설계로부터 구한 최적 값을 LS-Dyna로 확인 해석을 수행한 결과를 표시하였다.

### 4. 결 론

한번 해석에 계산비용이 많이 들어가고 비선형 해석을 수행해야 하는 LS-Dyna 충돌해석과 같은 범용 유한요소해석 프로그램의 최적설계를 위하여 가중치 반응표면모델에 의한 최적설계를 수행하였다.

제안된 최적설계 방법을 범용 유한요소해석 프로그램인 LS-Dyna에 적용하였으며 LS-Dyna로 모델링된 일체형 시트 모델의 최대 변형에 최적설계를 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험계획법에 기초한 LS-Dyna 와 같은 범용 유한요소 프로그램의 해석 결과에 가중치 반응표면모델을 구성하여 적은 해석을 통해서도 손쉽게 전역 민감도 해석을 수행하였다.
- 2) 이미 구성된 목적함수 및 제한조건에 대한 가중치 반응표면모델을 통하여 LS-Dyna 해석을 다시 수행할 필요가 없이 설계 영역의 변화에 대한 많은 What-if 해석 및 Trade-off 해석을 수행하였다.
- 3) 가중치 반응표면모델에 의한 최적설계를 직접 유한요소해석 프로그램에 최적설계를 수행하기에는 불가능했던 계산비용이 많이 드는 충돌해석과 같은 문제에 적용하여 최적 값을 구하였다.

#### 기호설명

- X : 정규화된 설계변수 벡터 (입력)
- Y : 응답변수 벡터 (출력)
- $\beta$  : 반응표면모델 반응계수 벡터
- W : Huber 가중치
- $e_i$  : 잔차
- $\hat{\sigma}$  : 잔차의 평균제곱근
- $f_i$  : 목적함수
- $g_i$  : 제한조건

### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. 미연방 자동차안전규정 FMVSS 210
2. LSTC Inc., *LS-Dyna Keyword User's manual ver. 960*, 2002
3. Myers, Montgomery, *Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York, 1995
4. Srinivas Kodiyalam, Jian Su Lin and Brett A. Wujek, "Design of Experiments based Response Surface Models for Design Optimization", Proceedings of the 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit and AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum-Part 4, 1998, pp.2718~2727
5. Patrick N. Koch, Dimitri Mavris, "Multi-Level, Partitioned Response Surfaces for Modeling Complex Systems", Proceedings of the 7<sup>th</sup> AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposia on Multidisciplinary Analysis and Optimization-Part 3, 1998, pp.1954~1968
6. Phoenix Integration Inc., *ModelCenter User's Guide ver 4.0*, 2002
7. Huber, P. J., "Robust Estimation of a Location Parameter", *Annals of Mathematical Statistics*, 35, 1994, pp.73~101
8. SAS Institute Inc., *JMP 4.0 User's Guide*, 2002
9. Raphael T. Haftka and Zafer Gurdal, *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, 1992