

## 공리적 설계에 의한 안전기준을 만족하는 자동차용 시트 설계

강 병 수<sup>1)</sup> · 정 자 영<sup>2)</sup> · 신 문 균<sup>\*3)</sup> · 박 경 진<sup>4)</sup>

한양대학교 최적설계기술연구센터<sup>1)</sup> · 대우산업기계<sup>2)</sup> · 한양대학교 BK21 기계사업단<sup>3)</sup> · 한양대학교 기계정보경영학부<sup>4)</sup>

### Design of Automobile Seat for Regulations using Axiomatic Design

Byung-Soo Kang<sup>1)</sup> · Ja-young Jeong<sup>2)</sup> · Moon-Kyun Shin<sup>\*3)</sup> · Gyung-jin Park<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2)</sup>Daewoo Heavy Industries & Machineries Ltd., 7-11 Hwasu-dong, Dong-gu, Incheon 401-020, Korea

<sup>3)</sup>BK21 Division, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>4)</sup>Division of Mechanical and Information Management Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 13 August 2004/ Accepted 4 April 2005)

**Abstract** : The automobile seat must satisfy various safety regulations for the passenger's safety. In many design practices, each component is independently designed by concentrating on a single related regulation. However, since multiple regulations can be involved in a seat component, there may be design confliction among the various safety regulations. Therefore, a new design methodology is required to effectively design an automobile seat.

The axiomatic approach is employed for considering multiple regulations. The Independence Axiom is used to define the overall flow of the seat design. Functional requirements (FRs) are defined by safety regulations and components of the seat are classified into groups which yield design parameters (DPs). The classification is carried out to have independence in the FR-DP relationship. Components in a DP group are determined by using orthogonal array of the design of experiments (DOE). Numerical analyses are utilized to evaluate the safety levels by using a commercial software system for nonlinear transient finite element analysis.

**Key words** : Automobile seat(자동차용 시트), Hige test(동적강도 시험), FMVSS(미국연방자동차안전기준), Axiomatic design(공리적 설계), Independence axiom(독립공리), Decoupled design(비연성화 설계), Orthogonal array(직교배열표)

### 1. 서 론

자동차용 시트의 여러 가지 기능 중에는 차량이 정면으로 충돌하거나 후방추돌시 승객을 보호하는 역할이 있다.<sup>1)</sup> 때문에 승객의 안전을 확보하기 위해 자동차용 시트는 많은 안전법규<sup>2)</sup>와 시트제작사의 자체내규를 만족해야 한다.

관련 법규로 대표적인 것은 미연방자동차안전기

준(Federal Motor Vehicle Safety Standard)<sup>3)</sup>이 있다. 이 기준은 자동차와 자동차부품에 요구되는 법규로 자동차의 디자인, 구조, 성능으로 인하여 차량 사고가 발생했을 때 승객의 불필요한 피해, 부상, 죽음을 방지하기 위한 여러 규정들을 두고 있다. 시트에 관한 안전법규에서 요구하는 것은 각 부품의 기능을 유지하면서 시트가 가지고 있어야 하는 최소한의 강성을 가지도록 하는 것인데, FMVSS202, FMVSS207/210등이 그것들이다. 그 밖에도 각 시트 제작사에서 내부적으로 정한 동적강도시험(hige

\*To whom correspondence should be addressed.  
mkshin@hanyang.ac.kr

test) 등도 만족해야 하는 기준이 된다.<sup>3)</sup>

한편 공리적 설계<sup>4)</sup>는 공학 분야에서 제시되고 있는 유용한 설계이론 중 하나이다. 설계공리 중 독립공리에 의하면 모든 설계에서는 기능요구사항과 설계변수를 독립적으로 결정해야 한다.<sup>5-8)</sup> 독립공리를 만족시키는 비연성화설계는 순차적인 설계순서를 가진다. 시트를 설계할 경우 관련된 모든 안전법규를 모두 만족시켜야 하는데 이를 위해서는 여러 법규를 동시에 고려할 수 있는 통합적 설계방법이 필요하다. 이 연구에서는 개념설계 단계에서 통합적 설계방법의 큰 틀로서 공리적 설계를 사용할 것이다. 이 연구의 목적은 FMVSS202, FMVSS207/210, 동적강도시험을 모두 고려한, 자동차용 시트의 설계방법을 제안하는데 있다. 따라서 개념설계 단계에서 공리적 설계방법에 의해서 시트의 설계 순서를 결정한다. 그리고 시트의 상세설계에서는 실험계획법에 기초한 직교배열표(orthogonal arrays)를 이용하여 시트 각 부품의 치수를 한다. 그러나 시트 설계는 제한조건을 고려해야하기 때문에 일반적인 직교배열표는 사용할 수 없다. 따라서 제한조건을 고려할 수 있는 새로운 직교배열표 이론을 적용하여 시트의 상세설계를 수행한다. 이 상세설계를 위해서 LS-Dyna3D<sup>9)</sup>를 사용하였다.

## 2. 시트에 적용되는 안전법규

시트에 요구되는 중요한 기능은 여러 가지가 있지만 이 연구에서는 승객의 상해를 최소화하는 기능요구사항을 중점적으로 고려하였다. 승객의 상해를 최소화하는 시트를 설계하기 위하여 미연방자동차안전기준 중 시트와 관련된 항목을 만족하는 설계를 구현하려고 한다. 만족해야 할 항목들은 FMVSS202, FMVSS207/210 등이며, 더불어 FMVSS301의 형식을 차용한 후방 썰매실험도 고려할 것이다.

### 2.1 FMVSS202의 개요 및 평가방법

FMVSS202은 머리지지대(head restraint)의 강도를 평가하는 시험 방법으로서 후방추돌이 발생할 경우 승객 머리의 상해를 감소시키기 위한 규정이다. FMVSS202에서는 표준설계위치<sup>2)</sup>를 기준으로 3

단계의 하중을 가한다. 1단계 하중으로는 Fig. 1에서 처럼 등판블럭<sup>10)</sup>의 등판을 이용하여 착석기준점<sup>2)</sup>에 대해 F1(373N·m)의 후방 모멘트를 좌석등받이에 가해서 보정몸통기준선(adjusted torso reference line)을 결정한다. 2단계하중으로는 1단계 하중을 유지한 채로 원통형 머리모형으로 착석기준점에 대하여 F1의 모멘트를 머리지지대의 특정 지점에 일정시간 가하고 다시 일정시간을 유지하여 보정몸통기준선에 대하여 머리모형 끝단까지의 거리를 측정한다. 3단계 하중으로 하중이 890N에 이를 때까지 하중을 증가시켜 머리지지대의 파손 유무를 확인한다. 단계별 경계조건과 하중조건은 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3과 같다.

FMVSS202 시험을 만족하기 위한 기준은 Fig. 1에서 F1의 하중이 가해졌을 때 머리모형의 가장 뒷부분이 보정몸통 기준선에서 수직으로 102mm를 초과하여 뒤쪽으로 이동하지 않는 것이다. 또한 Fig. 3에서 F2의 하중이 가해졌을 때 머리지지대와 머리지지대 부근의 부품들이 파손되지 말아야 한다.

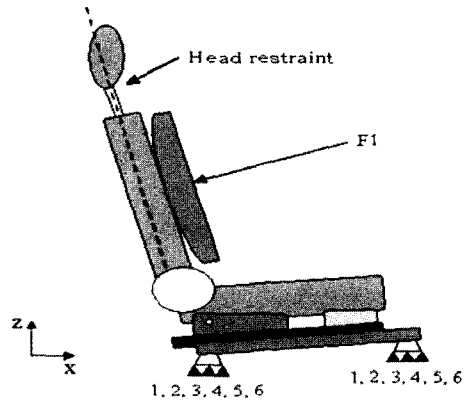


Fig. 1 Boundary and loading conditions in FMVSS202 test (step1)

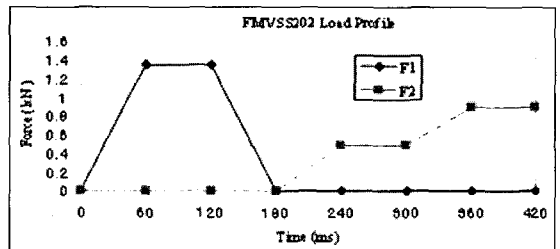


Fig. 2 Load curve for FMVSS202 test

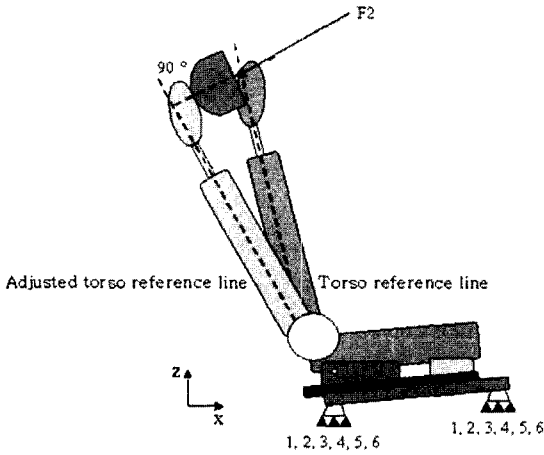


Fig. 3 Boundary and loading conditions in FMVSS202 test (step2)

### 2.2 FMVSS207/210의 개요 및 평가방법

FMVSS207 시험은 충돌 시 좌석의 이탈로 인한 승객의 상해를 감소시키기 위해 좌석 및 그 잠금 장치의 강도 시험방법에 대하여 규정하고 있다. FMVSS210 시험은 안전띠가 승객을 효과적으로 구속하기 위하여 좌석안전띠의 조절기준 및 강도기준과 좌석안전띠부착장치(seat belt anchorage)의 위치 및 강도 시험방법에 대하여 규정하고 있다. 3점식 안전띠를 갖는 자동차용 시트의 경우에는 실험이나 해석상에서 이 두 가지 법규를 동시에 적용하고 있다. FMVSS207 시험은 자동차길이방향을 따라서 앞으로 시트무게의 20배에 해당하는 하중을 가한다. 그리고 FMVSS210 시험은 어깨몸통(shoulder block)과 골반몸통(lap block)에 수평선 위쪽으로 5° 이상 15° 이하의 각도로 13,345N의 하중을 가한다. 하중조건 및 경계조건은 Fig. 4, Fig. 5와 같다.

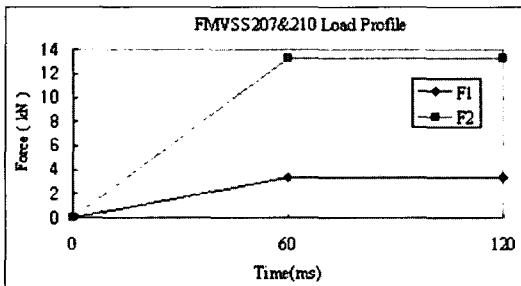


Fig. 4 Load curve for FMVSS207/210 test

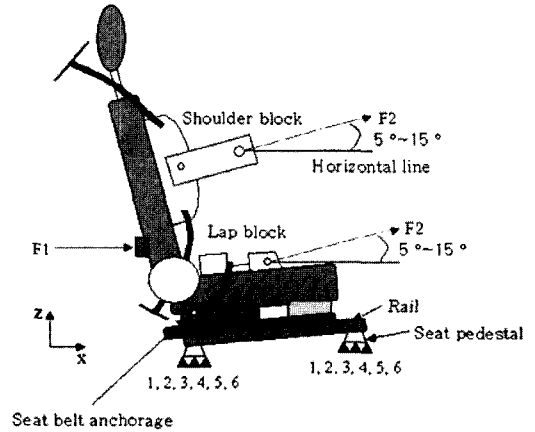


Fig. 5 Boundary and loading conditions in FMVSS207/210 test

FMVSS207/210 시험의 만족기준은 하중이 가해진 뒤 시트지지대와 레일, 안전띠부착장치에서 파손이 일어나지 말아야 하고, 변형 후 안전띠부착장치의 위치가 법규에서 정해진 범위 안에 있어야 한다.<sup>2)</sup>

### 2.3 동적하중시험의 개요 및 평가방법

동적강도시험은 후방 충돌 시 시트의 붕괴에 의한 자동차 내장재와의 2차 충돌을 방지하기 위해서 요구되는 기준이다. 하지만 시트제작사에서는 이 기준을 안전성을 판단하는 기준으로 삼고 있다. 일반적으로 썰매실험(sled test)이라고 많이 불린다. 하중조건 및 경계조건은 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 이 시험에 쓰이는 가속도는 차량의 종류나 시트제작사의 사내규정에 의해서 결정된다.

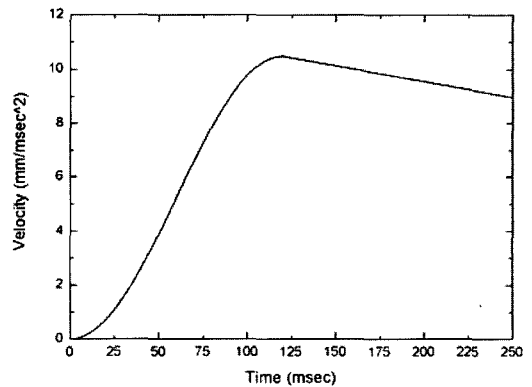


Fig. 6 Crash pulse for Hige test

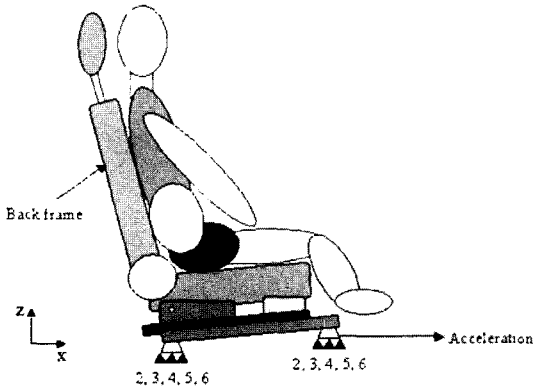


Fig. 7 Boundary condition in Hige test

동적강도시험의 만족기준은 백프레임의 초기 자세에서 가속도가 가해진 후에 뒤쪽으로는 각 변위량이 규정 범위 이하가 되어야 하고 레일의 이탈이 일어나지 말아야 한다. 각 변위량에 대한 기준은 차량의 종류나 시트제작사에 따라 사내규정에 의해 결정된다.

### 3. 공리적설계

설계는 무엇을 원하는가와 그것을 어떻게 얻을 것인가라는 질문의 연속적인 상호작용이라고 할 수 있다. 설계를 하는 동안 명시된 요구 조건들로부터 얻은 정보를 이용하여 설계목적(Design Objective)을 정의함으로써 설계자가 얻고자 하는 것을 결정한다. 이를 기능적 요구(Functional Requirement; FR)라 한다. 기능적 요구를 어떻게 달성할 것인가에 대한 해답은 물리적 영역의 설계 파라미터(Design Parameter; DP)를 통해 얻을 수 있다. 설계 문제의 FR과 DP들은 지그재그 과정을 통해 계층적으로 분해된다. 한 계층은 그 계층만으로 비록 추상적이기는 하지만 완벽한 설계해를 제공한다. FR과 DP가 더 이상 계층적으로 분해되지 않을 시점에 도달하면 그 때가 설계가 완료되는 시점이다.

공리적 설계에서의 공리는 독립 공리(Independence Axiom)와 정보 공리(Information Axiom)로 이루어진다. 독립 공리는 기능적 영역의 기능적 요구(FRs)로부터 물리적 영역의 설계 파라미터(DPs)로 진행되는 사상과정을 정의할 때에, DP와 FR이 일대일로 대응되기를 추천한다. 본 연구에서는 독립공

리만을 적용하여 설계를 수행한다. 독립 공리를 설명하기 위해서 식 (1)의 설계방정식을 사용한다.

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (1)$$

여기서 {FR}은 기능적 요구 벡터이고 {DP}는 설계 파라미터 벡터, [A]는 {FR}과 {DP}와의 관계를 설명하는 설계행렬(design matrix)이다. 이제 다음과 같은 세 종류의 설계방정식을 고려해보자.

#### 연성설계(coupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

#### 비연성화설계(decoupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

#### 비연성설계(uncoupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 X는 FR과 DP가 관련이 있음을 의미하고 0은 관련이 없음을 의미한다.

식 (2)의 연성설계는 FR1을 만족시키기 위해 DP1, DP2, DP3를 동시에 결정해야 하는 경우이다. 이 경우, FR1을 만족하기 위해 DP1, DP2, DP3를 결정하더라도 이 결정이 FR2와 FR3도 만족한다는 보장은 없다. 따라서 주어진 FR들을 모두 만족하기 위해서는 시행착오를 반복하여 DP들을 결정해야 한다. 식 (3)의 비연성화 설계는 순차적 설계를 보여준다. 이 경우, FR1을 만족하기 위해서는 DP1만을 결정하고, FR2를 만족하기 위해서는 이미 결정된 DP1에 추가적으로 DP2만을 결정하면 된다. 마찬가지로 FR3를 만족하기 위해서는 DP1, DP2가 이미 결정되었으므로 DP3만을 결정하면 된다. 식 (4)는 각각의 FR과 DP가 일대일의 대응관계를 이룬다. 독립공리는 FR과 DP가 일대일로 대응되는, 식 (4)와 같은 비연성 설계를 추천하고 있다. 이것이 어렵다면 차선책으로 식 (3)의 비연성화설계를 추천하고 있다. 만약 설계결과가 식 (2)와 같은 연성 설계라면, 이것은 공리적 설계의 관점에서 잘못된 설계이다. 이 경우 설계자는 FR이나 DP를 다시 설정하여 비연성설계

나 비연성화설계가 되도록 하여야 한다.

#### 4. 직교배열표

실험계획법은 특정한 목적을 만족시키기 위해서 실험의 배치를 통해서 설계목적함수를 극대화시키거나 극소화시키는 인자 값을 결정하는 방법이다. 설계에서는 주로 목적함수를 최소화하는 인자의 최적값을 결정하는데 사용된다. 실험계획법에서 전조합실험시법(factorial design)은 정확한 해를 제시한다. 그러나 모든 조합에 대해서 실험을 실시하기 때문에 고가의 설계방법이다. 따라서 실험비용을 절감하기 위해서 전조합중 일부만 실시해서 실험결과를 분석하는 일부실험시법(fractional factorial design)를 많이 사용한다. 일부실험시법은 전조합실험시법의 일부만 가지고 전조합실험시법에 대한 메타모형을 정의하여 그로부터 실험결과의 분석을 이끌어낸다. 따라서 각 인자의 수준을 어떻게 배치하여 어떤 방법으로 실험결과를 분석하느냐가 아주 중요하다.

본 논문에서는 여러 가지 일부실험시법 중에서 설계에 적용한 경우의 대부분이 직교배열표에 의한 설계이기 때문에 직교배열표를 사용하였다. 직교배열표는 많은 인자를 큰 그물을 쳐 기술적으로 있을 것 같은 2인자교호작용을 검출하고, 기술적으로 없을 것 같은 2인자 및 교차의 교호작용을 희생시킨다.

일반적으로 직교배열표를 이용하여 실험을 하거나 설계를 할 때는 다음 과같이 특성치나 목적함수만을 고려하고 제한조건을 고려하지 않는다.

$$\begin{aligned} &\text{To Find } b \in R^n && (5) \\ &\text{to minimize } f(b) && (6) \end{aligned}$$

그러나 본 연구에서 설계하는 문제는 다음과 같이 제한조건이 존재한다.

$$\begin{aligned} &\text{To Find } b \in R^n && (7) \\ &\text{to minimize } f(b) && (8) \\ &\text{subject to } g_j(b) \leq 0, \quad j=1, \quad m && (9) \end{aligned}$$

따라서 위와 같이 제한조건이 존재하는 문제를 직교배열표를 이용하여 설계할 경우에는 특성함수  $\psi(b)$ 를 식 (10)과 같이 새로 정의한다. 그리고 식

(10)을 식 (6)의 목적함수  $f(b)$  대신 사용함으로 제한조건이 없는 문제로 변환해서 설계를 수행한다.

$$\psi(b) = f(b) + P(b) \tag{10}$$

$$P(b) = s \times \sum_{j=1}^m \max[0, v_j] \tag{11}$$

$$\hat{v}_j = \hat{n}_{con} / 21 \tag{12}$$

여기서  $b$ 는 설계변수벡터,  $f$ 는 목적함수,  $P$ 는 추정치의 벌칙함수,  $v_j$ 는  $j$ 번째 제한조건의 최대 위배량의 추정치,  $s$ 는 조절계수이다. 이 때,  $s$ 는  $f(b)$ 와

$$\sum_{j=1}^m \max[0, v_j]$$

의 절대크기에 따라 결정한다. 이

값이 너무 크면 반응치의 최소화가 의미가 없어진다. 반대로 너무 작으면 구한 최적수준이 불용영역에 있을 확률이 높다. 여기서는 경험에 의해서 벌칙함수의 차수(order)가 반응치의 차수보다 한 차수 높도록 설정한다. 여기서 교호작용은 무시했기 때문에 전조합에 대한  $\psi(b)$ 의 추정치를 계산할 수 있다. 따라서 전조합의 수준조건에 따라서 목적함수와 제한조건의 추정치를 구하고, 제한조건의 최대 위배량으로 정의되는 벌칙함수를 계산한다. 그리고 벌칙함수와 목적함수의 추정치를 더해서 추정치  $\psi(b)$ 를 계산한 후에 울림차순으로 정렬한다. 그리고 각 경우에 대해서 위로부터 확인 실험을 실시하여 제한조건을 만족하는 첫 번째 경우를 해로 일단 설정한다. 그리고 직교배열표 상에서 제한조건을 만족하면서 제일 좋은 해와 비교해서 최종해를 결정한다.

#### 5. 시트의 설계

##### 5.1 설계공리에 의한 시트설계

기존의 자동차용 시트의 각 법규별 해석결과를 바탕으로 독립공리를 만족시키는 설계행렬을 구성하였다. 법규별 해석의 구체적인 결과와 실제 시트는 이 연구를 의뢰한 기업의 지적 재산권 보호를 위해 소개하지 않는다. 기존 시트모델을 해석한 결과 FMVSS202 시험은 통과하였지만 FMVSS207/210 시험과 동적강도시험은 통과하지 못하였다.

먼저 기존 모델의 해석을 통해 얻은 자료를 바탕으로

으로 변형량이나 응력값이 상대적으로 큰 부품들을 모두 설계변수로 선정하였다. 그런데 이 연구에서 사용한 해석방법은 외연적 적분법(explicit integration)에 의한 비선형 반응을 구하는 것으로 잡음이 비교적 많은 편이다.<sup>9)</sup> 따라서 응력이나 변형량을 수치 그대로 받아들이는 것은 의미가 없다. 비선형 해석에 의한 해석 결과의 실질적인 의미를 판단하기 위해 현장의 기술자와의 의견 교환이 자주 이루어졌다. 따라서 설계 변수의 선택과정에는 현장 경험에 의한 주관적인 판단 기준이 다소 작용하였다. 시트는 크게 머리지지대(head restraint), 백 프레임(back frame), 쿠션 프레임(cushion frame), 레일(rail), 시트지지대(seat pedestal)로 구성되어 있는데<sup>11)</sup> 이 연구에서는 Table 1과 같이 부품을 분류하였다. Table 1은 각 법규 별로 이 연구에서 사용된 시트를 해석한 결과 상대적으로 변형 및 응력이 큰 부품들을 나타내고 있다. Fig. 8은 Table 1에 있는 시트의 부품들의 위치와 명칭이다. Table 1의 부품들이 설계과정에서 주요 설계변수가 된다. 여기에서 각 부품의 두께, 형상, 재질은 모두 설계변수가 될 수 있다. 그

리고 부품의 추가, 삭제, 메커니즘의 변화를 통해 법규를 만족시키는 또 다른 설계도 가능하다. 그러나 선택의 폭이 너무 광범위하므로 본 논문에서는 부품의 추가, 삭제, 메커니즘의 변화는 없다고 가정하고 각 부품의 두께, 형상, 재질 중에서 두께만을 설계변수로 결정하여 설계하였다.

위치변위량과 각변위량을 결과판단의 기준으로 삼고 있는 FMVSS202, 동적강도시험의 경우에는 시트의 거의 모든 부품들이 법규의 만족여부에 영향을 주고 있다. 그에 비해 특정부품의 파손만을 기준으로 삼고 있는 FMVSS207/210 시험의 경우는 해당되는 부품에만 많은 응력이 발생하는 경향을 보였다.

이 연구의 주된 목적은 만족시켜야 할 법규의 순서가 여러 개인 경우에 설계 과정에서 만족시켜야 할 법규의 순서를 결정하는 것이다. 그 순서를 결정하기 위해 공리적 설계의 설계행렬 개념을 도입하였다. 공리적 설계의 비연성화 설계 개념은 설계 순서를 결정할 수 있는 합리적인 근거를 제시해 준다. 따라서 설계가 비연성화 설계가 되도록, 다시 말하면 설계가 일정한 순서를 가지도록 다음과 같은 방법으로 FR-DP의 관계를 설정하였다. 이 과정에서 Table 1에서 분류한 부품의 집합을 이용하였다.

먼저 세 법규에 모두 영향을 미치는 부품들을 선별하였다. 모든 법규에 영향을 미치는 부품들은 Table 1에서 시트지지대(seat pedestal), 레일(rail)이다. 그 후, 이들이 가장 영향을 많이 미치는 시험인 FMVSS207/210 시험을 만족하는 것을 FR1로 결정하였다. 그리고 세 법규에 모두 영향을 미치는 부품과 FMVSS207/210 시험에만 영향을 미치는 부품들을 모두 하나의 그룹으로 취하여 DPI로 결정하였다. FMVSS207/210 시험에만 영향을 주는 부품은 안전띠 부착장치이다.

다음으로 FMVSS202 시험과 동적강도시험에 공통적으로 영향을 미치는 부품들을 선정하였다. FMVSS202 시험과 동적강도시험에 공통적으로 영향을 주는 부품은 베이스 플레이트(base plate), 파이프(pipe), 백 프레임(back frame), 리클라이너(recliner)이다. 이 부품들이 상대적으로 큰 영향을 미치는 동적강도시험을 만족하는 것을 FR2로 결정하였다.

Table 1 Important parts for design in respective test

Regulations	Parts
FMVSS202	Seat pedestal, Rail, Base plate, Pipe, Back frame, Recliner, Head restraint
FMVSS207/210	Seat pedestal, Rail, Seat belt anchorage
Hige test	Seat pedestal, Rail, Base plate, Pipe, Back frame, Recliner, Upper cross member, Lower cross member

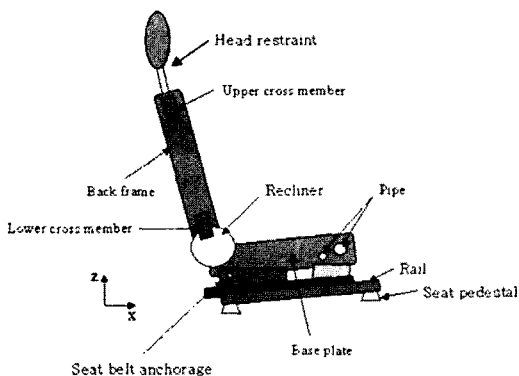


Fig. 8 The parts which are deformed severely in analyses

그리고 FMVSS202와 동적강도시험의 두 시험에 영향을 미치는 부품들과 동적강도시험에만 영향을 미치는 부품들을 하나의 그룹으로 하여 DP2로 결정하였다. FMVSS202 시험에만 영향을 주는 부품은 머리지지대이고, 동적강도시험에만 영향을 주는 부품은 상부 크로스 멤버(upper cross member)와 하부 크로스 멤버(lower cross member)이다.

마지막으로 FMVSS202 시험을 만족하는 것을 FR3로 하고, 선택되지 않고 남은 부품인 머리지지대(head restraint)의 중실봉 지름을 DP3로 결정하였다.

식 (5)는 위와 같은 방법으로 구성한 설계행렬이다.

$$\begin{cases} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{cases} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{cases} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{cases} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 각 요소는 다음과 같다.

FR1: FMVSS207/210을 만족하라.

FR2: 동적강도 시험을 만족하라.

FR3: FMVSS202를 만족하라.

DP1: 시트지지대, 레일, 안전띠 부착부의 두께

DP2: 베이스플레이트, 파이프, 리클라이너, 백프레임, 상부크로스멤버, 하부크로스멤버의 두께

DP3: 머리지지대 중실봉의 지름

C: 중량 증가는 최소화되어야 한다.

C는 제한조건을 나타내고 있다. 현재 설계변수가 오직 각 부품의 두께이기 때문에 무게의 증가가 불가피하다. 따라서 시트의 무게증가를 최소화시키는 것을 제한조건으로 한다.

식 (5)의 설계행렬은 현재의 시트를 개선할 때에 따라야 할 설계 순서를 추천하고 있다. 즉 FMVSS207/210을 먼저 만족시킨 설계를 완성한 후, 동적강도시험을 만족시키는 설계를 수행해야함을 의미한다. 그리고 FMVSS202는 가장 마지막에 고려해야 한다. 이 논문에서 결정된 범규의 순서와 설계변수가 모든 시트에 대해서 적합한 것은 아니다. 각 시트의 특성에 따라서 설계순서와 설계변수는 다르게 결정될 수 있다. 그러나 비연성화 설계가 되도록

설계순서와 설계변수를 결정하는 방법론은 모든 자동차용 시트설계에 적용할 수 있다.

한편, 현재 모델의 설계행렬인 식 (5)의 설계행렬에서  $A_{21}$ ,  $A_{31}$ ,  $A_{32}$ 의 값이 대각항인  $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{33}$  값보다 큰 것을 발견하였다. 이 사실이 의미하는 것은 현재의 설계창에서는 FR1을 달성하는 설계변수인 DP1을 결정한 후에 결정된 DP1을 FR2의 설계과정에 적용하더라도 FR2를 만족하는 DP2를 찾지 못할 수도 있다는 것이다. 또한 FR3를 결정하는 과정에 DP2를 적용할 경우에도 FR3를 만족하는 DP3를 발견하지 못할 경우가 생긴다. 이 때에는 이전 설계변수인 DP1나 DP2 중에서 시트의 중량을 최소한으로 증가시키면서 FR1 또는 FR2를 만족시키는 다른 설계를 선택하여 식 (5)의 순서에 따라 설계를 다시 진행시켜야 한다. 설계과정이 이와 같이 반복될 가능성에 대비하려면 FR1을 만족하는 DP1의 값을 여러 개 확보하여야 한다.

## 5.2 직교배열표를 이용한 상세 설계변수 결정

앞에서 결정한 설계순서와 설계변수에 따라 설계변수의 값을 결정해야 한다. 시트의 해석모델이 크고 설계변수의 수가 많으므로 민감도를 이용하는 최적설계방법으로는 설계변수결정이 쉽지 않다. 본 논문에서는 실험계획법의 직교배열표<sup>12,13)</sup>를 사용하여 설계변수를 결정한다. 그런데 직교배열표는 인자들 간의 교호작용이 미미한 경우에만 그 추정치가 의미가 있다. 그러나 이 문제에서 인자들 사이의 교호작용이 미미한지 여부를 판단하기가 어렵기 때문에 교호작용이 미미하다는 가정은 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 직교배열표를 사용하되 인자들 간의 교호작용이 있다고 가정한다. 교호작용이 있는 경우에는 직교배열표를 사용하여 하여 얻은 해를 최적값이라고 할 수 없다. 이 점을 감안하여 이 논문에서는 최적값을 찾기보다는 현재 설계보다 더 개선된 설계를 찾을 것이다.

## 5.3 DPI의 결정

먼저 DP1에 해당하는 FMVSS207/210 시험을 만족시키는 설계변수를 결정한다. Table 2는 각 설계

Table 2 Design variables and their levels for FMVSS207/210 (mm)

Levels	Design variables		
	Seat belt anchorage	Seat pedestal	Rail
1	2.6	2.7	2.7
2	2.7	2.8	2.8
3	2.8	2.9	2.9

Table 3 Analysis result for FMVSS207/210 with full factorial

Expt. No	Seat belt anchorage	Seat pedestal	Rail	Result
1	1	1	1	Fail
2	2	1	1	Fail
3	3	1	1	Fail
4	1	2	1	Fail
5	2	2	1	Fail
6	3	2	1	Fail
7	1	3	1	Fail
8	2	3	1	Pass
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	2	3	3	Pass
27	3	3	3	Pass

변수와 수준을 나타내고 있다. 앞 장에서 결정하였듯이 DP1로 결정된 부품의 두께가 설계변수가 된다. 앞서 지적하였듯이 식 (5)의 대각행렬의 값이 비 대각행렬의 값보다 작다. 때문에 FR1을 만족하는 DP1을 FR2의 결정과정에 적용하더라도 FR2를 만족하는 DP2를 찾지 못할 가능성이 있다. 이 경우에는 FR1을 만족하는 다른 DP1으로 설계를 처음부터 다시 진행해야 한다. 이 반복을 대비하여 FR1을 만족하는 여러 개의 DP1을 구하는 것이 좋다. 그런데 교호작용이 있다고 가정하였으므로 추정치를 사용하여 여러 개의 DP1을 결정하는 것은 큰 의미가 없다. 따라서 설계변수가 3개이고 각 설계변수의 수준이 3수준이기 때문에 27번의 해석을 수행하여 설계변수의 전조합에 대한 결과를 구하였다. 결과는 Table 3과 같다. Table 3은 두께가 얇은 순서부터 해석결과를 정렬한 것이다. DP1에 해당하는 설계변수는 8번째 조합부터 FMVSS207/210 시험을 만족함을 알 수 있다.

#### 5.4 DP2 및 DP3의 결정

두 번째로 만족해야 할 범규는 동적강도시험이다. 동적강도시험을 만족하는 설계를 수행하기 위한 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Find } DP2 \tag{6a}$$

$$\text{to minimize } Weight \tag{6b}$$

$$\text{subject to Back frame deformation} - 30^\circ \leq 0 \tag{6c}$$

동적강도시험에서는 백프레임의 각변위가 기준값(30°) 이하여야만 시험을 통과할 수 있기 때문에 이를 제한조건인 식 (6c)에 적용하였다. 더불어 중량 증가는 최소화되어야 한다는 식 (5)의 제한조건 C를 고려하기 위해 식 (6b)를 적용하였다. 또한 설계변수가 많고 범규에 대한 해석시간이 오래 걸리기 때문에 DP2의 요소 중에서 4개를 선택하고 각 설계변수에 대하여 3수준의 후보값을 결정하였다. 결정해야 할 DP2에는 설계변수가 여러 개이기 때문에 직교배열표를 이용한 추정치로 설계변수값을 결정하는 것이 효율적이다.

그런데 인자들 간의 교호작용이 있다고 가정하였기 때문에 추정치를 전적으로 신뢰할 수 없다. 따라서 추정치에 의해 얻은 해와 직교배열표상의 수준 조합 중에서 더 좋은 해를 최종해로 결정할 것이다. 이는 교호작용이 있는 경우에는 추정치에 의한 해가 직교배열표상의 실제 조합보다 더 나쁜 경우가 있기 때문이다. 그런데 범규의 만족여부가 제한조건으로 작용하므로 직교배열표 상에 이 제한조건을 고려해야 한다. 따라서 제한조건을 고려할 수 있도록 벌칙함수개념을 도입하여 직교배열표에 적용하였다. Table 4는 설계변수와 수준값을 보여준다. Table 5는 L9(3<sup>4</sup>) 직교배열표와 특성치를 보이고 있다. n<sub>obj</sub>는 시트의 무게에 대한 특성치로서 식 (6a)의 목적함수에 해당된다. n<sub>con</sub>은 동적강도시험에서의 범규기준 위배량에 대한 특성치로서 식 (6c)의 제한조건에 해당된다.

여기서 특기할 만한 사항은 1수준에 가장 두꺼운 부재를 배치한 것이다. 일반적으로 1수준에는 가장 낮은 후보값을 배치하는 것이 직교배열표를 이용한 설계에서 습관처럼 이루어지고 있다. 이 논문에서 이와 반대로 수준을 배치한 이유는 설계변수의 조



Table 4 Design variables and their levels for hige load test (mm)

Levels	Design variables			
	Pipe1	Lower cross member	Base plate	Pipe2
1	2.2	1.8	2.6	2.1
2	1.9	1.5	2.3	1.8
3	1.6	1.2	1.8	1.5

Table 5 Assignment of design variables in L9(3<sup>4</sup>)

Exp. No	Pipe1	Lower cross member	Base plate	Pipe2	$\eta_{obj}$ (Kg)	$\eta_{con}$ (°)
1	1	1	1	1	19.47	-1.60
2	1	2	2	2	19.14	-0.49
3	1	3	3	3	18.82	3.87
4	2	1	2	3	19.13	-0.30
5	2	2	3	1	18.92	2.35
6	2	3	1	2	19.24	-0.53
7	3	1	3	2	18.90	4.38
8	3	2	1	3	19.23	-0.39
9	3	3	2	1	19.02	0.88

Table 6 Average value ( $\eta_{obj}$ ) of the estimated object value (kg)

Design variables	Levels		
	1	2	3
Pipe1	19.14	19.1	19.05
Lower cross member	19.17	19.1	19.03
Base plate	19.31	19.01	18.88
Pipe2	19.14	19.09	19.06

합 중 가장 낮은 수준인 1수준-1수준-1수준의 조합은 직교배열표의 특성상 시 설계 결과에 반영될 확률이 크기 때문이다. 즉, 두꺼운 부재들의 조합이 동적강도시험을 만족할 가능성이 높다는 가정으로부터, 최악의 경우 가장 두꺼운 부재가 해가 될 수 있도록 하기 위해 두꺼운 부재들을 1수준으로 두었다.

Table 5에 열거된 9번의 실험을 수행한 결과를 바탕으로 3<sup>4</sup>번의 해석에 대한 추정치를 각각 구할 수 있다. 먼저 각 설계변수의 수준별 평균값을 구해야 하는데 그 결과는 Table 6과 Table 7에 있다. Table 6과 Table 7의 결과를 바탕으로 시트의 무게와 범규사이 위배량 정도를 추정하였다. 제한조건을 고려할 수 있는 추정치( $\hat{\eta}_{new}$ )로는 식 (7)-식 (9)와 같이 특성치 및 벌칙함수로 구성되는 새로운 반응치를

Table 7 Average value ( $\eta_{con}$ ) of the estimated constraint violation (°)

Design variables	Levels		
	1	2	3
Pipe1	0.59	0.51	1.62
Lower cross member	0.83	0.49	1.41
Base plate	-0.84	0.03	3.53
Pipe2	0.54	1.12	1.06

정의하였다.

$$\hat{\eta}_{new} = \hat{\eta}_{obj} + \hat{P} \quad (7)$$

$$\hat{P} = s \times \sum_{i=1}^n \max[0, \hat{\nu}_i] \quad (8)$$

$$\hat{\nu}_i = \hat{\eta}_{con} / 21 \quad (9)$$

여기서  $\hat{P}$ 는 추정치의 벌칙함수<sup>14)</sup>,  $\hat{\nu}_i$ 는  $i$ 번째 제한조건의 최대 위배량의 추정치,  $s$ 는 조절계수이다.

이 때,  $s$ 는  $\eta_{obj}$ 와  $\sum_{i=1}^n \max[0, \hat{\nu}_i]$ 의 절대크기에 따라 결정한다. 이 값이 너무 크면 반응치의 최소화가 의미가 없어진다. 반대로 너무 작으면 구한 최적수준이 불용영역에 있을 확률이 높다. 여기서는 경험에 의해서 벌칙함수의 차수(order)가 반응치의 차수보다 한 차수 높도록  $s=100$ 으로 설정하였다.

9번에 걸친 해석결과를 바탕으로 81(3<sup>4</sup>)회에 대한 추정치  $\hat{\eta}_{new}$ 를 구하여 올림차순으로 정리한 것이 Table 8과 같다. 추정치의 값이 작은 조합부터 확인 해석을 수행하면서 실제로 동적강도시험을 통과하는지 여부를 점검한다. 이런 식으로 동적강도시험을 만족하면서 추정치가 가장 작은 조합을 직교배열표에 의해 얻은 해로 결정하였다. 그 결과 DP2에 속한 설계변수들의 값이 Table 8의 49번째의 조합에서 백프레임의 변위각이 19.83°로서 실제 동적강도시험을 만족하였기 때문에 49번째 조합을 직교배열표에 의한 해로 선택하였다.

끝으로 직교배열표에 의한 해와 Table 5의 조합 중에서 더 좋은 해를 최종해로 선택한다. Table 8의 49번째 조합으로 얻은 실제 무게는 19.06kg이다. Table 5의 조합 중에서 제한조건을 만족하면서 질량이 19.06kg이하인 조합이 없으므로 추정치에 의한

Table 8 Estimated characteristic values considering constraint violation

Est. No	Pipe1	Lower cross member	Base plate	Pipe2	$\hat{\eta}_{obj}$	$\hat{P}$	$\hat{\eta}_{new}$
42	2	2	2	3	18.97	0	18.97
49	2	3	2	1	18.98	0	18.98
41	2	2	2	2	19	0	19
67	3	2	2	1	19	0	19
15	1	2	2	3	19.01	0	19.01
22	1	3	2	1	19.02	0	19.02
14	1	2	2	2	19.04	0	19.04
33	2	1	2	3	19.04	0	19.04
40	2	2	2	1	19.05	0	19.05
32	2	1	2	2	19.07	0	19.07
6	1	1	2	3	19.08	0	19.08
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	3	3	3	2	18.75	29.75	48.5

해가 더 좋은 해이다. 따라서 Table 8의 49번째 해를 최종해로 결정한다.

DP3의 결정은 기존모델의 설계변수값이 FMVSS 202 시험을 만족하므로 기존의 설계변수의 값을 그대로 사용하였다. 순차적으로 결정된 설계변수값을 각 법규에 대해서 확인해석을 해서 설계순서와 설계변수 값의 타당성을 확인하였다. 최종 설계변경 후 시트의 무게는 기존의 시트무게인 17.84kg보다 1.22kg증가하였지만 FMVSS202, FMVSS207/210, 동적강도시험을 모두 만족하였다.

이 연구에서 사용된 시트에 대하여 만족해야할 법규의 순서는 FMVSS207/210, 동적강도시험, FMVSS202의 순이다. 각 법규에서 중점적으로 다루었던 설계변수로는 FMVSS207/210 시험에 대한 DP1은 시트지지대, 레일, 안전띠부착장치의 두께이다. 동적강도시험에 대한 DP2는 베이스 플레이트, 파이프, 로우어 크로스 멤버의 두께이다. 마지막 FMVSS202 시험에 대한 DP3은 머리지지대 환봉의 반지름으로 결정하였다. 이 논문의 설계행렬을 다르게 되면 대체로 시트의 하부구조에서 시작하여 상부구조로 옮겨가면서 설계를 수행하게 된다.

## 6. 결론

- 1) 기존의 자동차용 시트에 대해서 FMVSS202,

FMVSS207/210, 동적강도시험의 규정에 의한 해석을 수행하고 공리적 설계의 독립공리를 만족시키도록 설계순서와 설계변수를 결정하여 다수의 법규를 만족시키는 설계방법을 제안하였다. 이 문제의 경우 설계행렬의 비대각 행렬의 값이 대각행렬의 값보다 크기 때문에 설계가 반복적으로 진행될 가능성이 있었다.

- 2) 제안된 설계순서로 제한조건을 고려한 직교배열표를 이용하여 모든 법규를 만족시키는 설계변수를 결정하였다. 이 때 교호작용에 의한 영향을 고려하기 위해 전조합을 실시하거나 추정치에 의한 결과와 L9(3<sup>4</sup>)실험조합 속의 실험결과를 비교하여 더 좋은 쪽을 최종해로 선택하였다.
- 3) 향후 모델의 해석결과를 바탕으로 설계변수를 선택할 때 객관적인 설계변수 선택의 정량화 된 기준을 설정할 필요가 있다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단지정 최적설계신기술연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

## References

- 1) C. V. David, "Role of the Seat in Rear Crash Safety," Society of Automotive Engineers, 2002.
- 2) Vehicle Safety Standard Regulation, Ministry Construction&Transportation, Korea, 2003.
- 3) Federal Motor Vehicle Safety Standards And Regulations, National Highway Traffic Safety Administration, 2003.
- 4) N. P. Suh, The Principles of Design, Oxford University Press, New York, 1990.
- 5) N. P. Suh, Axiomatic Design, Oxford University Press, New York, 2001.
- 6) S. H. Do, "Application of Design Axioms for Glass Bulb Design and Software Development for Design Automation," Journal of Mechanical Design, Vol.123, No.3, pp.322-329, 2001.
- 7) K. W. Lee, "Optimization of Structures Using Independence Design Axiom," Ph. D. Dissertation, Hanyang University, 1998.

- 8) K. W. Lee and G. J. Park, "A Structural Optimization Methodology Using the Independence Axiom," Transactions of the KSME(A), Vol.24, No.10, pp.2438-2450, 2000.
- 9) LS-Dyna3D User Manual, Livermore Software Technology, 2001.
- 10) H. B. Stanley and J. M. Harold, Hybrid III: The First Human-Like Crash Test Dummy, Society of Automotive Engineers, 1994.
- 11) Y. H. Kim and S. K. Lee, "Prediction of Impact Characteristics for Automobile Seat," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.196-204, 1999.
- 12) K. H. Lee, G. J. Park, "Discrete Design in Constrained Optimization Using Orthogonal Arrays," Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting(A), pp.980-985, 1996.
- 13) K. H. Hwang, W. S. Kwon, K. H. Lee and G. J. Park, "Design of Structure Using Orthogonal Array Considering Interactions in Discrete Design Spaces," Transactions of the KSME(A), Vol.24, No.12, pp.2952-2962, 2000.
- 14) J. W. Yi, J. S. Park, K. H. Lee and G. J. Park, "Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space," Transactions of the KSME(A), Vol.25, No.10, pp.1621-1626, 2001.