

## 승원 안전을 고려한 승용차 A-Pillar Trim의 최적 설계

### Optimum Design of A-Pillar Trim for Occupant Protection

김형곤\*, 강신일\*\*  
Hyoung-Gon Kim, Shinill Kang

#### ABSTRACT

NHTSA has been conducting biomechanical studies to reduce head injuries sustained during automotive collision. Furthermore, NHTSA added the new regulation to the FMVSS 201, limiting the equivalent HIC (Head Injury Criterion) value under 1000. In the present work, a methodology was developed for the optimum design of the A-pillar trim with rib-structures. The design variables for the rib-structures were the transverse spacing, the longitudinal spacing, and the thickness. The required sets of the design variables were decided based on the design of experiments. The head impact simulations were carried out using the LS-DYNA3D, and the HIC(d) values were computed using the results of the head impact simulation. The objective function was constructed using the response surface method (RSM). When the obtained optimum values were not inside the region of interest, the design procedures were repeated by changing the region of interest. Finally, an A-pillar trim with rib-structures, which resulted in HIC(d) value under 850 for 15 mph head-trim impact, was developed.

주요기술용어 : FMVSS201, A-pillar trim, Rib, Design of experiments, Response surface method, HIC(Head Injury Criterion)

#### 1. 서론

북미교통안전협회(NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration)는 air

bag이 장착되어 있는 차량에 대해서도 연간 1591건의 사망 사고와 13600건의 MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) 2 이상의 상해가 upper interior part(Pillar, Roof Side Rails, Windshield Header, Rear Header)와 머리 충격으로 발생한다고 추정하였다. 이는 차량과 충돌물 사이의 1차 충돌 순간에 발생하는 충격에 의해서가 아니라 탑승자와 탑승자 앞의 내장재와의 2차 충돌에 의한 사고가 더욱 치명적

\* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 연세대학교 기계전자공학부

이라는 것을 의미한다. 이에 자동차안전법규(FMVSS 201, 내장재 충격에 관한 승원 보호 법률)를 개정하여 upper interior parts에 대한 2차 충격량을 규제하는 법률을 만들었다. 이는 내장재의 테스트 방법과 그 안전 기준에 대한 별도의 규정을 정의하는 것으로 자동차 내장재의 구조와 부분 모델 테스트의 중요성을 보여주는 것이다. FMVSS 201에 의하면 인체의 머리 모형인 FMH(Free Motion Headform)를 이용하여 15mph(6.7m/s)의 속도로 벨트 상단부의 모든 부위에 대한 충돌 시 HIC(d) 값이 1000 이하가 되도록 규정하고 있으며,<sup>1)</sup> 이로 인하여 2차 충돌 시 에너지를 흡수할 수 있는 내장재 설계에 관한 연구가 활발히 시작되게 되었다. 보통 에너지를 흡수하는 방법으로는 trim과 차체 강판 사이에 foam을 삽입하거나 rib을 설계하는 방법이 있다<sup>2)</sup>. 그러나 foam을 사용하는 방법은 비용이 많이 들고, 단일공정으로 생산해 낼 수 있는 rib 구조에 비하여 생산 공정이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. rib 구조를 가지는 내장재 설계의 방법은 Lorenzo<sup>2)</sup> 등에 의하여 제시되었으나, 이에 대한 최적 설계 방법론에 대한 연구는 발표된 바가 없다. 이에 본 연구에서는 충격흡수 구조를 가지는 내장재의 최적 설계 방법론을 제시한다.

본 연구에서는 내장재 중 특히 rib 구조를 가지는 A-pillar trim을 설계하였다. rib은 충돌 시 변형이 적절히 일어나면 에너지 흡수 구조로서 이용될 수 있지만 만약 강성이 약하여 rib 부위가 에너지를 다 흡수하지 못하고 붕괴되는 경우에는 두부가 강 구조물에 충돌하게 되어 두부 손상의 위험이 있으며, 반대로 강성이 강하여 변형이 완전히 일어나지 않는 경우에도 trim의 강성에 의하여 두부에 손상을 줄 수 있으므로 형상에 대한 최적설계 해를 도출하는 것은 rib 구조를 갖는 A-pillar trim의 설계에 매우 중요하다.

내장재의 형상 설계를 위해 설계 변수를 정의하고 실험계획법을 적용하여 초기의 설계구간 내에서 실험점을 선택한다. 이를 바탕으로 유한요소 설계를 한 후 LS-DYNA3D를 이용하여 충

돌 해석을 수행하고, HIC(d) (equivalent Head Injury Criterion)를 계산한다. 반응표면법(Response Surface Method)을 적용하여 설계 변수와 HIC(d)의 관계를 가장 잘 표현할 수 있는 회귀함수를 구성하고, 이를 목적함수로 최적 설계 문제의 해를 도출하며, 초기 설계영역 이외의 구간에서 최적값을 가진다면 설계영역을 수정하고 위의 과정을 반복함으로써 최적의 충격흡수 rib 구조를 결정하게 된다.

## 2. Headform 모델링

### 2.1 Headform

본 연구에서는 Fig.1과 같이 HYBRID III 50% dummy의 코를 제거하고, skull과 skin, lumped mass를 사용하여 headform의 유한요소 모델을 구성하였다. skull은 rigid body (LS-DYNA3D material model type 20)를 이용한 shell 요소로 이루어져 있고, skin은 linear viscoelastic material(LS-DYNA3D material model type 6)을 이용한 solid 요소로 이루어져 있으며, skull과 skin의 접합 부분은 공통 절점을 가지고 있다. 1457개의 절점과 1448개의 shell 요소로 이루어진 skull의 두께와 밀도는 실제 인간의 두부 측정치와 질량, 관성모멘트, 무게중심

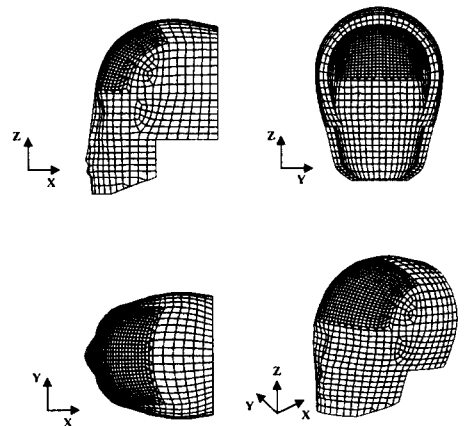


Fig. 1 The FE model of headform

Table 1 Inertia properties of the featureless headform

Mass Properties	Physical Measurement <sup>3)</sup>	FE Model Prediction
mass	4.5479 kg	4.536 kg
Ixx	17.5127 ton mm <sup>2</sup>	17.516 ton mm <sup>2</sup>
Iyy	20.2977 ton mm <sup>2</sup>	20.920 ton mm <sup>2</sup>
Izz	17.6313 ton mm <sup>2</sup>	17.762 ton mm <sup>2</sup>
Ixy	0 ton mm <sup>2</sup>	-0.067 ton mm <sup>2</sup>
Iyz	0 ton mm <sup>2</sup>	-0.081 ton mm <sup>2</sup>
Izx	1.9546 ton mm <sup>2</sup>	3.653 ton mm <sup>2</sup>

의 위치가 일치하도록 정의되어야 한다. 실제 인간의 두부에 대한 inertia properties에 큰 영향을 미치는 brain을 skull이라는 shell 요소로 표현하기가 용이치 않으므로 lumped mass를 이용하여 보정하게 된다. 실제 인간의 두부 질량은 약 4.54kg 정도이며, 만약 유한요소 모델의 질량만을 보정하고 관성모멘트에 관한 보정을 하지 않는다면 충돌 시험에 있어서 두부의 회전 거동이 실제와 같지 않으므로 정확한 해석 결과를 얻을 수 없다. 본 연구에서 사용되어진 유한요소 모델에서는 9개의 lumped mass를 정의하고, 이를 강체인 skull과 가상적으로 연결하여 하나의 part로 인식하게 함으로써 skull의 위상과 같은 위상을 유지하도록 하였다. skin은 4365개의 절점과 2896개의 solid 요소로 이루어져 있으며, 두 층으로 구성하여 한 층으로 구성하였을 때보다 정확한 충돌 해석 결과를 가진다.

## 2.2 Headform의 검증

### 2.2.1 질량, 관성모멘트에 대한 검증

Headform의 질량, 관성모멘트는 Wayne State University Biomechanics Department

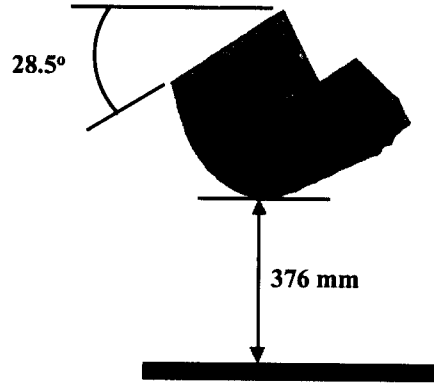


Fig. 2 Simulation model for headform drop test

에서 실험적으로 측정하였다.<sup>3)</sup> 측정된 실제 headform의 inertia properties를 만족시키기 위하여 9개의 lumped mass를 이용하여 각각의 lumped mass의 양과 위치를 결정짓게 된다. Table 1은 Wayne State Univ.에서 측정된 inertia properties와 본 연구에 사용된 유한요소 모델의 inertia properties를 비교한 것으로써 주어진 오차 범위 내에서 만족할 만한 결과를 보인다.

### 2.2.2 Head Drop Calibration

북미교통안전협회의 규제에 따르면 서로 다른 headform 모델이더라도 특정 범위의 충돌 반응량에 수렴할 수 있도록 headform을 376mm의 높이에서 강체 판에 떨어뜨려 무게중심에 위치한 3축 가속도계에서 측정된 가속도의 최대합성 가속도가 225G와 275G 사이에 들어와야 한다고 정의하고 있다. Fig.2는 headform drop 시험에 대한 simulation의 방법을 보여주고 있다.

headform의 전체 충돌 특성에 가장 크게 영향을 미치는 skin은 시간 의존성을 가지는 선형 점탄성 모델로 정의할 수 있고, 전단완화거동은 다음의 식으로 표현된다.

$$G(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty})e^{-\beta t} \quad (1)$$

Table 2 Linear viscoelastic material parameters for headform skin model

$x$	$G_0$	$G_\infty$	$\beta$	$\rho$
560 MPa	4.2 kPa	1.8 kPa	1.3 sec <sup>-1</sup>	1850kg/m <sup>3</sup>

여기에서,  $G_0$ 는 short term 전단계수,  $G_\infty$ 는 long term 전단계수,  $\beta$ 는 감쇄 상수,  $t$ 는 시간이다<sup>7)</sup>.

Kahlil<sup>4)</sup>는 skin의 점탄성 재료의 물성치에 대하여  $G_0=3.3kPa$ ,  $G_\infty=2.7kPa$ ,  $\beta=0.5\text{ sec}^{-1}$ 를 이용하여 headform 모델을 개발하였다. 본 연구에서는 Kahlil<sup>4)</sup>의 물성치를 기준으로  $G_0$ ,  $G_\infty$ ,  $\beta$  등 3가지 parameter를 변화시켜가며 Table 2와 같은 본 유한요소 두부모델에 가장 적합한 parameter를 도출하였다. 이 과정에서 Chou<sup>5)</sup> 등이 제시한 각각의 parameter들이 충돌 반응량에 미치는 영향에 관한 연구 결과를 참고하였다. Fig.3은 Kahlil<sup>4)</sup>의 시뮬레이션 결과와 실제 두부 모델의 시험 결과를 본 연구의 시뮬레

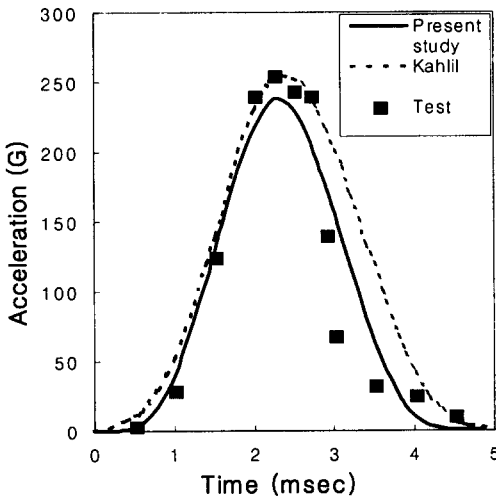


Fig. 3 Headform response of head drop test and simulation

이션 결과와 비교한 것으로써 시뮬레이션의 결과는 시험 결과와 잘 일치할 뿐만 아니라 최대 합성가속도가 경계조건인 225G와 275G 사이에 존재함을 보여준다.<sup>4,6)</sup>

### 3. 실험계획법

#### 3.1 A-Pillar Trim의 설계

A-pillar trim의 설계 시 주요 설계 변수는 panel 형상, trim 형상, 가로방향 rib 간격, 세로방향 rib 간격, rib 두께, rib 높이 등을 꼽을 수 있다. 본 연구에서는 충격에너지를 흡수하는 rib 구조의 설계에 초점을 두어 panel과 trim은 고정된 형상으로 설계 변수에서 제외시킨다. 그리고 rib의 높이는 panel과의 간격이 3mm가 되도록 설계를 함으로써 실제 설계 변수는  $X_1$ =가로방향 rib의 간격,  $X_2$ =세로방향 rib의 간격,  $X_3$ =rib 두께로 정의하였다.<sup>2)</sup>

#### 3.2 반응표면법

반응표면분석은 여러 개의 설계변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변

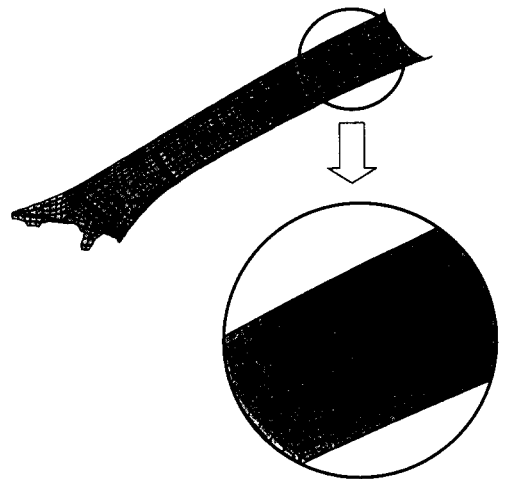


Fig. 4 Rib structures of A-pillar trim

수  $\eta$ 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다.

독립변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 와 종속변수  $\eta$  사이의 미지의 함수를  $f$ 로 나타내면

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (2)$$

가 된다. 이 반응함수는 일반적으로  $k$ 개의 독립변수에 대한 중회기모델(multiple regression model)로 나타내어 질 수 있다. 이는 독립변수들의 모든 영역에서 만족할 필요는 없고 단지 흥미영역(region of interest) 내에서만 만족한다는 가정 하에서 가능하다. 본 연구에서  $k=3$ 이며, 이때 2차의 회귀함수 형태는 다음과 같다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i < j}^3 \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

식(3)의 계수를 추정하기 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법이 최소자승법(Least Square Method)이다. 최소자승법은 에러의 제곱의 합이 최소가 되도록 하여 회귀계수를 찾아내는 방법이다. 어떤 설계영역  $R$ 에서 모델의 에러항을  $\epsilon$  이라고 하고,  $\epsilon$ 이  $N(0, \sigma^2)$ 의 정규분포를 따른다고 가정하면, 실험의 총 회수가  $n$  일 때  $k$ 번째 실험의 설계변수  $x_{ik}$ 와 반응량  $y_k$ 의 관계는

$$y_k = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_{ki} + \sum_{i < j}^3 \beta_{ij} x_{ki} x_{kj} + \epsilon_k \quad (4)$$

와 같이 나타나고, 에러의 최소자승함수(least square function)는 다음과 같다.

$$L = \sum_{k=1}^n \epsilon_k^2 \quad (5)$$

$$= \sum_{k=1}^n (y_k - \beta_0 - \sum_{i=1}^3 \beta_i x_{ki} - \sum_{i < j}^3 \beta_{ij} x_{ki} x_{kj})^2$$

식(5)에서 회귀계수  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 에 대하여 최소자승함수  $L$ 이 최소가 되게 하는 최소제곱 추정량  $b_0, b_i, b_{ij}$ 를 구함으로써 2차회귀함수를 구성할 수 있다.

### 3.4 실험계획법의 수립

가로방향, 세로방향의 rib 간격은 20mm, 두께는 1mm를 중심점 (0, 0, 0)으로 정의하고 가로방향의 간격과 세로방향의 간격 15mm에 대하여  $X_1=-1, X_2=-1, 20\text{mm}$ 에 대하여  $X_1=0, X_2=0, 25\text{mm}$ 에 대하여  $X_1=1, X_2=1$ 로 놓고, 두께에 대하여 0.8mm를  $X_3=-1, 1.0\text{mm}$ 에 대하여  $X_3=0, 1.2\text{mm}$ 에 대하여  $X_3=1$ 로 정의하여 실험계획법을 수립하였다.

### 3.5 LS-DYNA3D를 이용한 해석 및 HIC값의 계산

Fig.5는 비선형 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하여 A-pillar에 대한 두부 충돌 시뮬레이션을 수행하는 과정을 보여주고 있으며, Fig.6은 두부 충돌 후 A-pillar trim의 rib 부위가 변형된 형상을 보여주고 있다. 두부 모형의 무게 중심에 위치한 3축의 가속도계로부터 얻은 신호는 Fig.7과 같이 나타나며, 이를 처리하여 HIC(Head Injury Criterion)을 계산한다. HIC에 대한 정의는 다음과 같다.

$$HIC = \max \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$t_2 - t_1 < 36 \text{ msec} \quad (7)$$

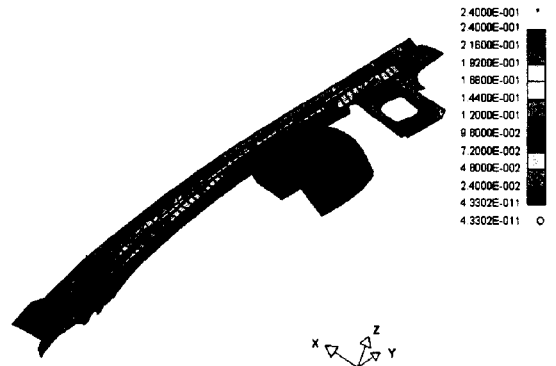


Fig. 5 Head impact simulation

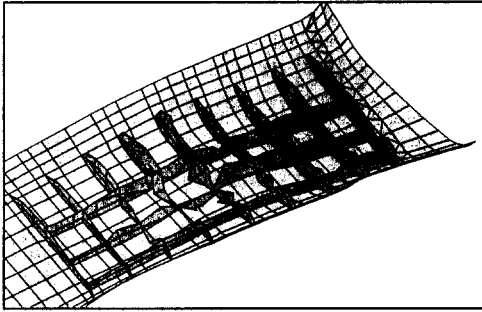


Fig. 6 Rib structures after impact

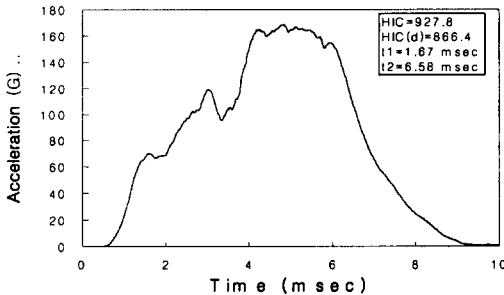


Fig. 7 Headform response

$$a_r = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \text{ [G]} \quad (8)$$

$$HIC(d) = 0.75446 \times HIC + 166.4 \quad (9)$$

식(6)에서 시간의 단위는 sec이며, 가속도의 단위는 중력가속도 G이다.

### 3.6 실험계획법을 이용한 결과 분석

Fig.8은 본 연구에서 개발한 내장재 최적 설계의 방법에 대한 과정을 보여주고 있다.

중심합성법을 이용하여 얻은 15개의 실험점에 대하여 변수  $X_1, X_2, X_3$ 와 반응량 HIC(d) 사이의 관계를 반응표면법을 이용하여 2차의 회귀함수로 구성하면 다음과 같다.

$$\widehat{HIC}(d) = 862.75 + 30.28X_1 - 2.88X_2 - 24.27X_3 + 32.67X_1^2 + 34.76X_2^2 + 32.76X_3^2 + 44.40X_1X_2 - 40.23X_1X_3 - 60.08X_2X_3 \quad (10)$$

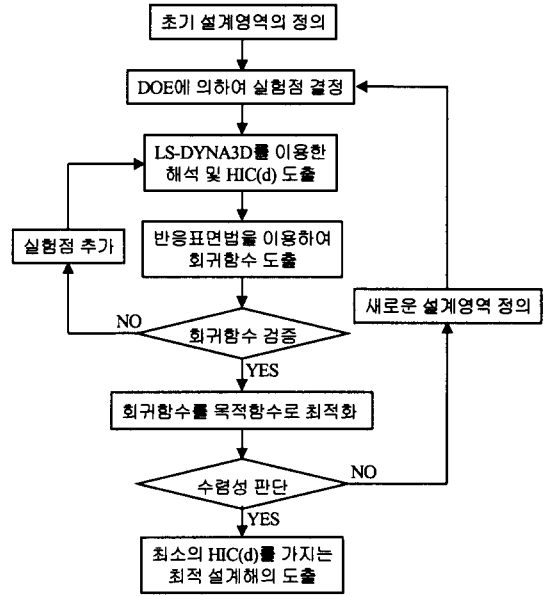


Fig. 8 Flowchart of methodology of optimum design for interior parts

식(10)의 회귀함수에 대한 R-square 값은 0.6856이며, 이는 구성된 반응표면이 실제 반응량과 큰 오차를 가짐을 의미한다. 중심합성법은 시간과 비용을 절감하는 장점을 가지고 있으나 본 연구에서는 적절한 반응표면을 구성하지 못하므로 full factorial design을 적용하여 데이터의 개수를 증가시켰다. 변수  $X_1, X_2, X_3$ 에 대하여 각각 -1, 0, 1의 세 가지 경우의 조합에 의하여 총 27개의 실험점에 대한 반응량을 얻어내는 방법이다. 이에 대한 2차 회귀함수를 구성하면 다음과 같다.

$$\widehat{HIC}(d) = 840.95 + 28.61X_1 + 24.27X_2 - 3.43X_3 + 10.38X_1^2 + 81.99X_2^2 + 37.91X_3^2 + 36.07X_1X_2 - 47.19X_1X_3 - 44.86X_2X_3 \quad (11)$$

식(11)의 회귀함수에 대한 R-square 값은 0.8259이며, 이 또한 반응표면과 실제 반응량 사이의 오차가 큼을 의미한다. R-square 값을 높이고 적절한 반응표면을 구성하기 위해서는 보다

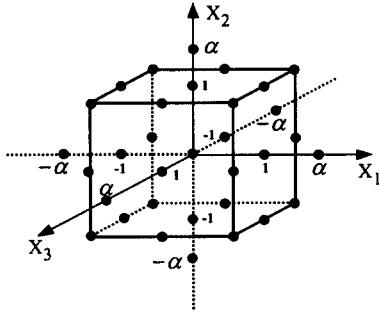


Fig. 9 Extended experimental design

많은 데이터가 필요하므로 Fig.9와 같은 full factorial design과 중심합성법을 합쳐 놓은 형태의 실험계획법을 적용하여 반응량을 구하였다. 또한 회귀함수는 차수가 높을수록 반응량을 보다 근사하게 표현하므로  $X_1, X_2, X_3$ 에 대한 3차의 회귀함수를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{HIC}(d) = & 845.19 + 25.27X_1 + 71.07X_2 \\ & - 42.91X_3 + 31.55X_1^2 + 50.99X_2^2 + 38.21X_3^2 \\ & + 36.07X_1X_2 - 47.19X_1X_3 - 44.86X_2X_3 \\ & - 13.54X_1^3 - 38.99X_2^3 - 2.39X_3^3 + 8.08X_1^2X_2 \\ & + 36.88X_1^2X_3 + 48.42X_1X_2^2 - 23.11X_1X_3^2 \\ & - 2.38X_1X_2X_3 + 25.93X_2^2X_3 - 19.79X_2X_3^2 \end{aligned} \quad (12)$$

R-square 값이 0.9012로 원하는 신뢰성을 가지고 있으며, 초기 설계구간  $-1 \leq X_1 \leq 1, -1 \leq X_2 \leq 1, -1 \leq X_3 \leq 1$ 에서  $\widehat{HIC}(d)$ 를 최소로 만드는  $X_1, X_2, X_3$ 는  $X_1 = -0.300, X_2 = -0.480, X_3 = -0.015$ 이다. 식(12)의 전체적인 경향을 살펴보면  $X_1$ 이 감소할수록  $\widehat{HIC}(d)$ 의 값이 감소하는 경향을 나타내고,  $X_3$ 는  $X_1$ 이 감소함에 따라 같이 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고  $X_2$ 는 거의 -0.5 부근에서 최소의 값을 가진다. 이러한 경향을 고려하여 보다 정확한 해를 구하기 위하여 새로운 설계구간을 정의하였다. 이에 앞서  $X_2$ 는 거의 일정한 값에서 최소의 반응량이 나오므로,  $X_2 = -0.48$ 의 값으로 고정을 시키고  $X_1$ 과  $X_3$ 의 두 변수에 대하여 새로운 설계구

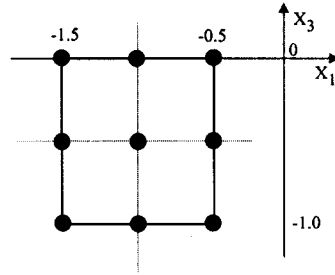


Fig. 10 Full factorial design for reduced number of parameters ( $X_1$  and  $X_2$ )

간  $-1.5 \leq X_1 \leq -0.5, -1.0 \leq X_3 \leq 0.0$ 에서 Fig.10과 같은 full factorial design으로 실험점을 정의하고, 이에 대한 결과를 2차 회귀함수로 구성한다. 9개의 실험점과 반응량 사이의 2차 회귀함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{HIC}(d) = & 910.75 + 78.97X_1 - 20.15X_3 \\ & + 91.79X_1^2 + 130.51X_3^2 - 134.40X_1X_3 \end{aligned} \quad (13)$$

R-square 값은 0.8604이며,  $\widehat{HIC}(d)$ 를 최소로 만드는  $X_1$ 과  $X_3$ 는  $X_1 = -0.600, X_3 = -0.230$ 으로 새로운 설계구간의 범위 내에서 수렴한다. 본 연구의 결과, 처음 설계구간을  $-1 \leq X_1 \leq 1, -1 \leq X_2 \leq 1, -1 \leq X_3 \leq 1$ 으로 정하고 반응표면법을 이용하여 회귀함수를 구성하였으며, 이를 바탕으로 HIC(d)를 최소화시킬 수 있는 새로운 설계구간  $-1.5 \leq X_1 \leq -0.5, -1.0 \leq X_3 \leq 0.0, X_2 = -0.48$ 을 설정하여 반응표면법을 재수행함으로써 최적의 설계해를 구할 수 있었다. 본 연구에서 도출한 A-pillar에 대한 두부 충돌 시 HIC(d)를 최소로 만들 수 있는 최적 설계해는 가로방향 rib 간격  $\approx 17.0\text{mm}$ , 세로방향의 rib 간격  $\approx 17.6\text{mm}$ , rib 두께  $\approx 0.954\text{mm}$ 이며, 이때의 HIC(d) 값은 824.2 였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 shell 요소를 사용한 skull 과 solid 요소를 사용한 skin, 그리고 9개의

lumped mass로 유한요소 headform 모델을 구성하였으며, 실제 두부와 동일한 거동을 가질 수 있도록 유한요소 headform 모델의 전체적인 질량과 관성모멘트를 보정하였다. 또한 drop calibration 시뮬레이션을 통하여 최적의 skin 물성치를 도출하였으며, 시뮬레이션의 결과를 실제 두부의 drop 시험의 결과와 비교함으로써 도출한 물성치의 타당성을 보였다 그리고 차량 충돌 시 내장재 A-pillar에 대한 두부 충격을 최소화시키는 방안으로 rib 구조를 가지는 A-pillar trim을 설계하였으며, 이에 대한 최적 설계 방법론을 제시하였다. 가로방향의 rib 간격, 세로방향의 rib 간격, rib 두께를 설계변수로 정의하고, 실험계획법을 적용하여 얻은 실험점에 대한 해석 및 시뮬레이션을 통하여 HIC(d) 값을 얻었으며, 반응표면법을 적용하여 회귀함수를 구성하고, 이를 목적함수로 하여 최적의 설계해를 도출하였다. 초기 설계구간에서 도출한 변수의 최적값과 회귀함수를 토대로 설계변수와 HIC(d) 사이의 전체적인 경향을 파악하고, 새로운 설계구간을 정의할 수 있었으며, 이 구간 내에서 다시 반응표면법을 재수행 함으로써 보다 정확한 해에 접근할 수 있었다. 본 연구에서는 북미교통안전협회에서 정의한 head와 내장재 사이의 15mph 충돌 시험 시 HIC(d) 값이 1000 이하가 되도록 하는 규정을 만족하는 내장재 설계 방법론을 제시하였으며, 현재 본 연구를 통해 설계된 내장재 성형 등의 실험적 연구가 진행중이다.

## 후 기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 과학기술기초 중점연구(기계공학) 연구비에 의하여 수행되었으며, 본 연구에 도움을 주신 Delphi의 홍정화 박사님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) Standard No.201 : Head Impact Protection , Part 571 - Federal Motor Vehicle Safety Standard, National highway traffic Safety Administraion, Department of Transportation, 1995.
- 2) L. Lorenzo, M. Mirdamadi, K. Fennessy-Ketola, "A Methodology for Developing Interior Trim Panels to Comply with the New FMVSS N0.201 Legislation", International Congress & Exposition pp.1-9, SAE 960152, 1996.
- 3) S. D. Barbat, H. Y. Jeong, P. Prasad, "Finite Element Modeling and Development of the Deformable Featureless Headform and Its Application to Vehicle Interior Head Impact Testing", International Congress & Exposition, pp. 61-69, SAE 960104, 1996.
- 4) T. B. Kahlil, T. C. Lin, "Simulation of the Hybrid III Dummy Response to Impact by Nonlinear Finite Element Analysis", The 38th Stapp Car Crash Conference Proceeding, pp. 325-343, SAE 942227, 1994.
- 5) C. C. Chou, S. D. Barbat, N.(Nick) Liu, "Additional Notes on Finite Element Models of Deformable featureless headform", SAE International Congress & Exposition, SAE Publication SP-1226, pp. 55-66, SAE 970164, 1997.
- 6) 이화원, Free Motion Headform FE Model 개발, 한국자동차공학회 1998년도 추계 학술대회 pp.1058-1063, 1998.
- 7) LS-DYNA3D Ver.950 Theory Manual, Liver more Software Technology Corporation, pp.16-15, 1998.