

<논문> SAE NO. 2000-03-0122

## 최적반력을 가지는 도어 씌일의 단면설계

### Design of Door Seal Section with Optimal Reaction Force

한근조\*, 박영철\*, 심재준\*\*  
Geunjo Han, Youngchul Park, Jaejoon Shim

#### ABSTRACT

In order to improve the function of a door seal, its section design technique is discussed in this study. Its roles are prevention of an inflow of dusts, noise interception, insulation, waterproof, and the vibroisolating action which reduces vibration between the body and the door of a car while running, and the buffer action which sustain the proper reacting force as the door is closed.

In this study, the optimal cross section of a door seal is designed using nonlinear finite element analysis (commercial finite element analysis program EASi-SEAL) and tables of orthogonal arrays with respect to relations between door and door seal to secure the satisfactory airtight property with the minimum force to shut the door.

주요기술용어 : Door seal(도어 씌일), Finite element analysis(유한요소해석), Table of orthogonal array(직교배열표), Optimal cross section(최적 단면 형상)

#### Nomenclature

$C_{ij}$  : material constant  
CLD : compression load deflection

#### Subscriptst

t : Thickness  
h : Height  
w : Width

#### 1. 서론

현대 사회에서 자동차가 보편화되고, 대중화됨에 따라 자동차 성능 향상뿐 아니라 운전자에 대한 편의성과 정숙성을 보다 많이 요구하고 있다. 그러므로, 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 자동차의 여러 가지 부품들이 개발·생산되고 있다. 특히 우수한 탄성복원 특성과 함께 방진, 방음, 완충의 특성을 잘 나타낼 수 있는 고무·포움 재질로 만들어지는 부품은 자동차 내에서 정숙성과 안락함을 최대로 만족시키므로 현재 개발이 가장 왕성하게 이루어지고 있다.<sup>1)</sup>

\* 회원, 동아대학교 기계공학과

\*\* 회원, 동아대학교 대학원

이러한 부품들 중에서 도어를 닫는 최소의 힘으로도 차체 프레임(body frame)과 도어 씨일 사이에 적절한 반력을 유지하여, 만족스러운 밀폐성을 확보함으로써 소음의 차단, 누수 방지 등 여러 역할을 충분히 수행할 수 있는 도어 씨일의 단면 형상을 설계하고자 한다. 본 연구에서는 도어 씨일 전용 유한 요소 해석 프로그램인 EASi-SEAL<sup>2)</sup>과 실험계획법(design method of experiment)의 직교배열표(tables of orthogonal arrays)<sup>3-7)</sup>에 의해서 기존에 설계된 도어 씨일보다 우수성 특성을 지닌 최적의 단면 형상을 구하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구는 단면 형상에 영향을 미치는 설계인자(design factor)를 설정하고, 우선 각 설계인자의 변화에 따라서 도어 씨일 전용 유한 요소 해석 프로그램인 EASi-SEAL을 이용하여 비선형 해석을 수행한다. 이후 각 설계인자에 대한 적절한 수준(level)을 선택한다. 그리고 적은 해석의 횟수로도 많은 해석의 횟수를 통해 얻어지는 결과와 같은 데이터를 얻을 수 있는 실험계획법의 직교배열표에 의해 각각의 설계인자들에서 선정된 수준들을 조합하고, 이후 최소의 갯수로 조합된 수준들에 대해서 비선형 유한 요소 해석을 수행하여 최적의 단면 형상을 구한다. Fig. 1에는 전체적인 연구의 흐름도를 나타내고 있다

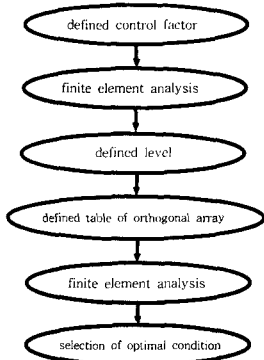


Fig. 1 The flow chart of analysis procedure

## 2.1 도어 씨일의 물성치

고무 부품은 탄성론에 근거한 비선형 특성과 대변형 특성을 가지고 있으므로, 일반적으로 초탄성 및 점탄성 이론으로 나타낼 수 있으며, 각각은 비선형 탄성 해석 및 시간 의존성을 고려한 동해석이 사용된다. 특히 도어 씨일에 사용되는 폼소재의 거동은 물질상수  $C_{ij}$ ( 또는  $\mu_n, \alpha_n, \beta_n$ )에 의해서 결정되며, 이것은 단순한 변형을 포함하는 시험, 1축 인장 및 압축 시험, 2축 인장 시험, 평면 변형을 시험으로부터 얻어지므로, 본 연구에서는 자동차의 도어 씨일의 재료로서 일반적으로 알려진 물성치를 비선형 해석에 인용하였다.<sup>8-10)</sup>

Table 1 The material properties of foam

Material Constants of Strain Energy Function of a Foam	
$\mu_n$	0.620667e-01
$\alpha_n$	0.344802e+01
$\beta_n$	-0.255950e-21

## 2.2 도어 씨일과 차체 프레임의 형상

도어 씨일은 도어에 부착되는 조건에 따라서 다양한 단면형상을 가지고 있고, 또한 차체 프레임도 도어 씨일과 접촉하는 위치에 따라서 단면형상이 여러 가지 목적 때문에 균일하지 않다. 하지만 Fig. 2에서는 대표적으로 두 종류의 차체 프레임 형상과 도어에 부착된 5 종류의 도어 씨일 단면 형상을 대표적으로 다섯 가지 조합으로 (CASE I, II, III, IV, V) 나타내고 있다. 특히, 도어 씨일 B와 D사이의 단면형상은 도어 씨일 형상 중 각각 A와 C, C와 E를 연결하기 위해 무수히 다양한 단면형상이 나타난다. 하지만 본 연구에서는 가장 많은 부분을 차지하는 CASE I (1번 차체프레임과 A번 도어 씨일의 조합)에 대해서 설계 인자들을 설정하고 비선형 유한 요소 해석을 수행하여 각 설계인자의 수준을 선정함으로써, 최적의 단면을 구하고자 하였다.

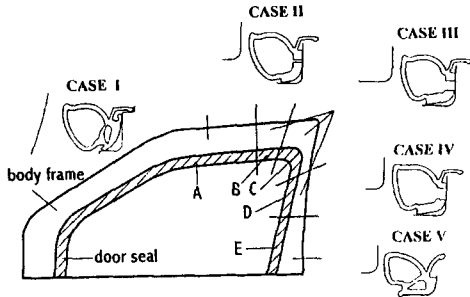


Fig. 2 The shape of cross sections of a door seal and body frame for each case

### 2.3 설계 인자의 결정

본 연구에서는 일반적인 폼 재질을 이용한 도어 씌일 단면형상을 기본으로 하여, 도어 씌일의 적정 반력에 영향을 미친다고 생각되는 인자를 도어 씌일 두께( $t$ ), 도어 씌일 폭( $w$ ), 도어 씌일 높이( $h$ ) 등 형상의 변화로부터 선정한다.

#### 2.3.1 도어 씌일 두께( $t$ )

현재 사용중인 일반적인 도어 씌일 폭은 20.0mm이다. 폭을 증가시키면 도어 씌일의 접촉면적의 증가로 기밀성에 유리하게 적용될 수 있고 폭이 너무 넓으면 반력이 감소할 수 있다. 그리고 폭을 감소시키면 접촉면적의 감소로 반력의 변화를 기대할 수 있다. 그러므로, 폭 20.0mm를 기준으로 두께는 일정하게 2.0mm로 설정하고, 도어 씌일 폭을 Fig. 3(b)에서와 같이 ①부터 ②까지 양쪽을 등간격으로 0.2mm씩 증가, 감소시켜 6단계로 유한 요소 해석을 수행하였다.

#### 2.3.2 도어 씌일 폭( $w$ )

현재 사용중인 일반적인 도어 씌일 폭은 20.0mm이다. 폭을 증가시키면 도어 씌일의 접촉면적의 증가로 기밀성에 유리하게 적용될 수 있고 폭이 너무 넓으면 반력이 감소할 수 있다. 그리고 폭을 감소시키면 접촉면적의 감소로 반력의 변화를 기대할 수 있다. 그러므로, 폭 20.0mm를 기준으로 두께는 일정하게 2.0mm로 설정하고, 도어 씌일 폭을 Fig. 3(b)에서와 같이 ①부터 ②

까지 양쪽을 등간격으로 0.2mm씩 증가, 감소시켜 6단계로 유한 요소 해석을 수행하였다.

#### 2.3.3 도어 씌일 높이( $h$ )

현재 사용중인 도어 씌일의 일반적인 높이는 20.0mm이다. 높이를 증가 또는 감소시키면 도어 씌일의 intrusion 길이에 대한 접촉면적의 증가·감소에 영향을 미치므로 도어 씌일의 반력과 기밀성에 영향을 미친다. 높이 20.0mm를 기준으로 두께는 2.0mm, 폭은 20.0mm로 일정하게 설정하고, 도어 씌일 높이를 Fig. 3(c)에서와 같이 도어 씌일 안쪽 아래면부터 돌기부 끝부분까지 정의하고, ①에서 ②까지 부분만의 높이를 등간격으로 0.2mm씩 증가, 감소시켜 7단계로 유한 요소 해석을 수행하였다.

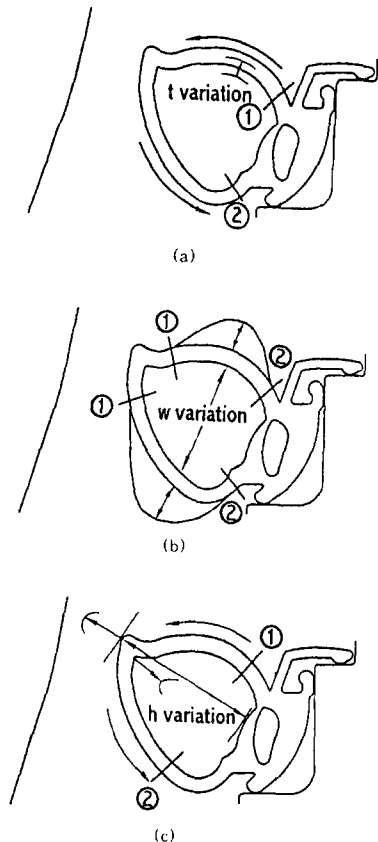


Fig. 3 Variation of each design factor of a door seal

## 2.4 유한 요소 해석을 위한 경계조건과 하중조건

도어가 닫혔을 경우 도어 씌일이 차체와 맞닿는 차체 부분의 프레임은 도어 씌일에 비해 변형이 아주 작게 발생하므로, 강체로 정의하였고, 도어 씌일은 포움 재료로 정의하였다. 도어 씌일이 장착되어 있는 차체 프레임은 모든 방향에 대하여 구속하여 고정하였고, 도어 씌일은 도어 프레임에 의해 구속되어 있다. 바디 프레임은 도어 씌일의 수직 방향으로 1.2m/s의 속도로 초기 접촉부터 10mm까지 밀고 들어가도록 설정하였다.

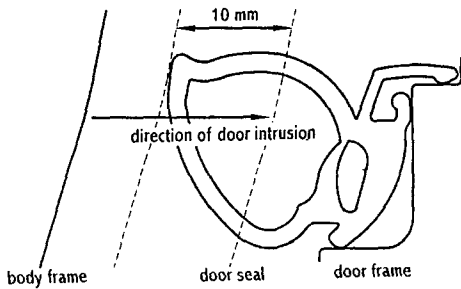


Fig. 4 The boundary condition of door seal and body frame

## 2.5 도어 씌일이 가지는 최적의 반력 곡선 형상과 구간

차체 프레임이 도어 씌일과 접촉할 때 발생하는 반력의 변화를 x축은 차체 프레임의 intrusion 길이로, y축은 반력의 크기로 나타내는 선도를 Compression Load Deflection(CLD)<sup>11)</sup> 선도라고 하며, Fig.5는 일반적인 CLD 선도를 나타낸다. 도어 씌일에 요구되는 목적을 만족하기 위해서, 초기에 차체 프레임과 접촉하는 도어 씌일이 변형할 때는 반력이 급격하게 증가하다가, 어느 정도 도어 씌일이 변형하게 되면 초기 도어를 닫는 힘으로도 최종 목적을 달성하기 위해 반력의 증가는 완만하여야 한다. 이후 도어가 닫히는 지점에서는 다시 반력이 증가하는 것이 이상적인 반력선도라 할 수 있으며 이것을 Good 선도라고 한다. 모든 도어 씌일은 이 곡선에 수렴하여야 한다. 하지만 최적의 반력곡선 형상에서 intrusion 길이보다 반력이 커지면 도어가 닫히

기 전에 다시 열릴 수 있는 문제가 있고, 반대로 반력이 작아지면 적절한 기밀성을 유지하기 어렵다. 다양한 자동차에는 그 자동차에 적합한 반력 곡선 구간을 가지고 있으며, 본 연구에서 채택한 반력곡선 구간은 Fig. 6에 나타내고 있다. 이때 최적 반력곡선 형상, 즉 Good 선도는 중앙에 있는 OK ZONE을 만족하여야 한다.

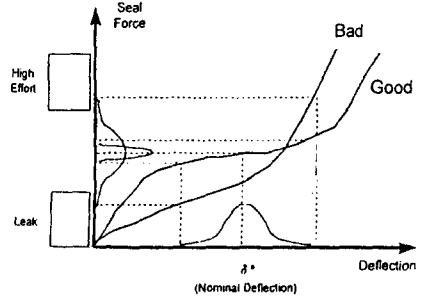


Fig. 5 The Compression Load Deflection diagram of the weatherstrip

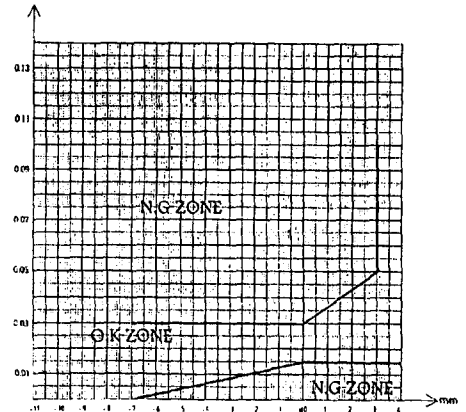


Fig. 6 The feasible zone of displacement-reaction force diagram for door seal

## 2.5 설계 파라미터에 따른 유한 요소 해석 결과와 수준결정

도어 씌일의 단면 특성치에 영향을 미치는 제어인자 두께(t), 폭(w), 높이(h)를 각 인자별로 6~7의 경우로 변화시켜 유한 요소 해석을 수행하였다. 그리고 도어 씌일의 적당한 반력 규정인 weatherstrip CLD선도에서 초기반력은 크게 나타나고, 이후 완만한 반력의 증가를 나타내다가 다시 증가하는 Good선도 경향을 나타내고, 또한

도어 씨일 규정 범위-반력선도에 O.K zone 중심을 통과하는 설계인자를 각각의 설계인자에 대한 수준으로 선택한다.

### 2.5.1 두께 변화

두께변화에 의한 해석의 결과는 Fig. 7에서와 같이 비교적 weatherstrip CLD 선도의 Good선도 경향을 잘 따른다고 할 수 있고 2.1mm, 2.3mm에서 도어 intrusion 길이 10mm 지점에서의 반력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 두께 1.7mm, 1.8mm, 1.9mm의 반력선도에서는 도어 intrusion 길이의 중간인 4mm 이후부터 O.K zone을 만족하지 못하고, 2.0mm, 2.1mm, 2.2mm, 2.3mm는 O.K zone을 만족하였지만 비교적 O.K zone의 중심에 가까운 2.1mm, 2.2mm, 2.3mm을 3 수준으로 선정하였다.

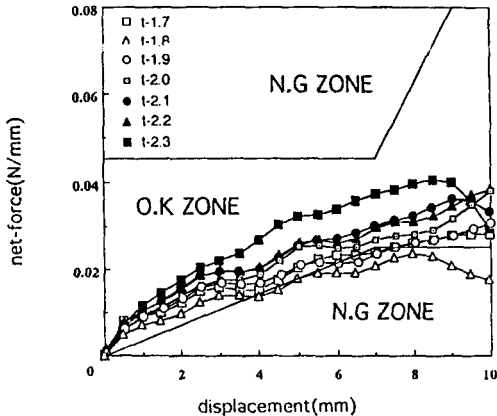


Fig. 7 The displacement-reaction force diagram with respect to the thickness variation

### 2.5.2 폭 변화

폭변화에 의한 해석의 결과는 Fig. 8에서와 같이 비교적 weatherstrip CLD 선도의 Good선도 경향을 따르나, 대체적으로 반력이 낮게 나타나고, 도어 intrusion 길이 7mm에서 각각 20.0mm, 20.4mm의 범위-반력선도만이 O.K zone을 만족하였다. 그리고 19.6mm, 20.8mm,

21.2mm, 21.6mm의 선도들은 O.K zone 아랫부분에 걸치는 낮은 반력으로 나타났다. 또한, 21.2mm, 21.6mm의 선도들은 도어 중간 intrusion 길이 4mm에서부터 반력이 O.K zone을 벗어나는 것을 알 수 있었다. 이런 경향을 고려해 볼 때, 도어 씨일의 폭이 20.0mm, 20.4mm을 수준으로 선택하고, 나머지는 비교적 좋게 나타나는 19.6mm도 수준으로 선택하였다.

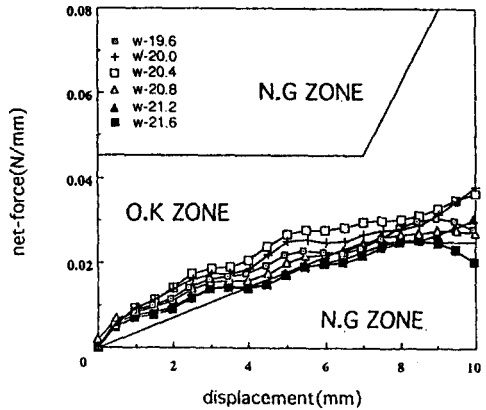


Fig. 8 The displacement-reaction force diagram with respect to the width variation

### 2.5.3 높이 변화

높이 변화에 의한 해석의 결과는 Fig. 9에서와 같이 비교적 weatherstrip CLD 선도의 Good선도 경향을 따른다고 할 수 있고, 도어 intrusion 길이 7mm에서 각각 19.8mm, 20.0mm, 20.2mm의 범위-반력선도만이 O.K zone을 만족하였다. 그리고 19.4mm, 19.6mm, 20.4mm, 20.6mm의 선도들은 O.K zone의 아랫부분에 걸치는 작은 반력으로 나타났다. 특히, 19.4mm, 19.6mm, 20.4mm, 20.6mm의 선도들은 도어 intrusion 길이 6mm에서부터 반력이 O.K zone을 벗어나는 것을 알 수 있었다. 이런 경향을 고려해 볼 때, 도어 씨일의 높이에는 19.8mm, 20.0mm, 20.2mm를 3 수준으로 선정하였다.

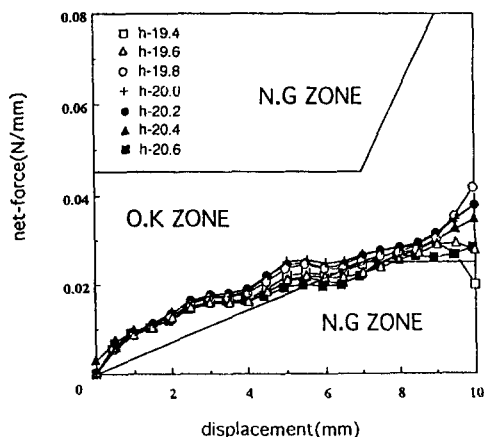


Fig. 9 The displacement-reaction force diagram with respect to the height variation

### 2.5.4 잡음인자(M)

본 해석에서 요소분할시 자동 메시 기능을 사용함으로써 각 모델에서의 요소 크기와 메시 형태가 동일하지 않다. 그러므로 해석값의 미소한 차이가 생길 수 있다. 그러므로, 이것을 고려하기 위해서 요소크기가 0.78mm, 0.79mm, 0.80mm, 0.81mm에 대해 잡음인자(noise factor)로 선정하여 직교배열표에 같이 적용하였다.

### 2.6 실험계획법에 의한 직교배열표에 따른 해석

수많은 모든 조합에 대해 해석을 수행한 후 얻은 결과값과 실험계획법에 의해서 정의된 직교배열표에 따라서 구한 결과값이 거의 일치하므로, 본 연구에서는 수준을 3개로 정의한  $L_9$  직교배열표의 조합에 따라서 해석을 수행한다. 그리고 결과값이 weatherstrip의 CLD 선도의 Good 선도에 가장 잘 수렴하고, O.K zone의 중심을 통과하는 반력곡선을 나타내는 설계인자를 개선된 도어 씨일의 최적단면으로 정의한다.

그리고, Table 2에는 사용된  $L_9$  직교배열표와 intrusion 길이가 4mm, 5mm, 6mm, 7mm일 때 Fig. 6에서 구할 수 있는 최적 반력의 크기와 유한 요소 해석에서 구한 결과 값을 나타내고 있다.

Fig. 10에서와 같이 비교적 모든 조합에서

O.K zone을 만족하였으나, 1-3-3, 3-1-3의 조합선도는 O.K zone을 만족하지 못하였다. 그리고, 나머지 조합 1-1-1 조합, 1-2-2 조합, 2-2-3 조합, 2-3-1 조합, 3-2-1 조합, 3-3-2 조합에서는 O.K zone을 모두 만족하였으나, 최적 조건인 O.K zone의 중심을 만족하고 도어 intrusion 길이에서 적정 반력인, 1~4mm에서 반력이 크게 증가하는 곡선경향과 4~7mm에서의 O.K zone의 중심을 만족하며 완만한 곡선경향을 나타내고, 7mm 이후부터 다시 반력이 증가하는 경향을 보이는 조건을 만족하는 변위-반력선도는 3-3-2 조합 즉, 두께 2.3mm, 폭 20.4mm, 높이 20.0mm인 조건에서 가장 최적 단면조건을 나타내었다.

Fig. 11에서와 같이, 도어가 완전히 닫혔을 때, 도어 intrusion 길이가 보통 7mm인 것에 비해 본 연구에서는 intrusion 길이를 10mm인 것으로 해석하였음에도 불구하고 응력 집중부의 최고 응력이 0.091MPa로써 내구성이 아주 뛰어나다고 할 수 있고, 도어 씨일의 변형 양상도 한 쪽으로 치우침이 없이 변형의 안정성을 가져올 수 있으며, 밀폐성에 있어서도 도어 씨일의 튀어나온 돌기부를 중심으로 빈 공간이 발생되어 2차 씨일의 효과도 나타났다.

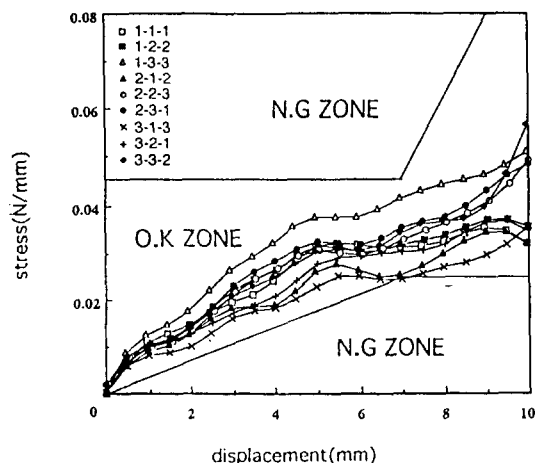


Fig. 10 The displacement-reaction force diagram with respect to the  $L_9$  tables of orthogonal arrays (M=0.79mm)

Table 2 L9 table of orthogonal arrays

요인	t	w	h	M																
구분	두께	폭	높이	잠음인자																
수준	1	2.1	19.6	19.8	요소크기				요소크기				요소크기				요소크기			
	2	2.2	20.0	20.0	0.78 mm				0.79 mm				0.80 mm				0.81 mm			
	3	2.3	20.4	20.2	Door Intrusion 위치				Door Intrusion 위치				Door Intrusion 위치				Door Intrusion 위치			
열 N	1	2	3	4mm	5mm	6mm	7mm	4mm	5mm	6mm	7mm	4mm	5mm	6mm	7mm	4mm	5mm	6mm	7mm	
				0.030	0.032	0.033	0.035	0.030	0.032	0.033	0.035	0.030	0.032	0.033	0.035	0.030	0.032	0.033	0.035	0.030
				MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
1	1	1	1	0.022	0.030	0.031	0.030	0.021	0.029	0.030	0.028	0.024	0.031	0.032	0.031	0.024	0.031	0.032	0.030	
2	1	2	2	0.026	0.031	0.031	0.033	0.026	0.031	0.030	0.032	0.026	0.031	0.030	0.032	0.026	0.030	0.030	0.031	
3	1	3	3	0.033	0.039	0.039	0.042	0.032	0.038	0.038	0.041	0.032	0.038	0.038	0.041	0.031	0.037	0.037	0.040	
4	2	1	2	0.019	0.026	0.026	0.026	0.018	0.025	0.026	0.025	0.019	0.026	0.026	0.025	0.020	0.027	0.027	0.027	
5	2	2	3	0.022	0.026	0.025	0.028	0.027	0.030	0.029	0.032	0.027	0.030	0.030	0.033	0.026	0.030	0.029	0.032	
6	2	3	1	0.025	0.031	0.033	0.035	0.027	0.032	0.032	0.037	0.028	0.032	0.032	0.035	0.026	0.033	0.034	0.038	
7	3	1	3	0.017	0.021	0.022	0.022	0.020	0.026	0.029	0.027	0.028	0.023	0.025	0.024	0.041	0.043	0.046	0.052	
8	3	2	1	0.021	0.028	0.030	0.031	0.021	0.027	0.030	0.031	0.021	0.027	0.029	0.030	0.020	0.028	0.030	0.029	
9	3	3	2	0.024	0.030	0.030	0.033	0.026	0.031	0.032	0.036	0.025	0.030	0.031	0.034	0.024	0.030	0.030	0.033	

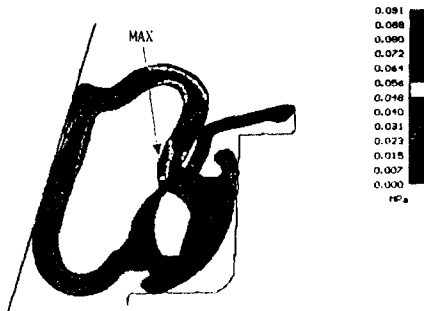


Fig. 11 The cauchy stress distribution of door seal (using EASi-SEAL)

1) 차체 프레임의 형상이 평평한 형상이고, 현재 일반적으로 사용하고 있는 도어 씌일의 두께 2.0mm, 폭 20.0mm, 높이 20.0mm에 비해 두께는 조금 두껍게 하고, 폭은 조금 높게 하여 접촉 면적을 증가시키는 두께 2.3mm, 폭 20.4mm, 높이가 20.0mm인 조건이 최적의 형상을 나타낸다.

2) 최적의 형상에 대해서 비선형 유한요소해석을 수행했을 때, 최고 응력이 0.091~0.098MPa 정도로 내구성이 아주 뛰어나게 나타났으며 변형 양상도 한쪽으로 치우침이 없이 대칭적으로 아주 안정적인 변형거동을 나타내었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 자동차 도어 씌일의 최적 단면 설계를 위한, 설계 변수를 정의하고, 설계 변수인 각 제어인자에서의 비선형 유한 요소 해석을 수행하여 각각의 설계 변수들의 수준을 선정하였다. 그리고, 실험계획법의 직교배열표에 의한 각 수준들의 조합에 의해 비선형 유한 요소 해석을 수행하여 다음과 같은 최적 조건을 얻었다.

### 참고 문헌

- 1) Parag Tope and Vidya Shankar, "Engineering Automotive Body Seals Using Up-Front CAE", IBEC'94, Automotive Body Design & Engineering, pp.120~126, 1994.
- 2) Tope, P., and Shankar, V., "Engineering

- Automotive Body Seals Using Up-Front CAE", Proceedings Automotive Body Design & Engineering, pp. 120-126, 1994.
- 3) 朴聖炫, "現代實驗計劃法", 民英社, 1982.
  - 4) 朴聖炫, "다꾸찌(田口)방법을 중심으로 한 應用實驗計劃法", 英志文化社, 1990.
  - 5) TAGUCHI· G, "실험계획법", 한국공업표준협회, 1982.
  - 6) 한국공업표준협회, "TAGUCHI 실험계획법(II)", 1990.
  - 7) 산학협동 공개강좌, "실험계획 및 분석: 다구치 방법과 직교표의 활용", 한국과학기술원, 1997.
  - 8) Anderson, E., "Nonlinear Finite Element Analysis and Seal Design Optimization", 1996 MARC 25th Anniversary International User's Conference, 1996.
  - 9) 엄정기, 김동석, 박재건, 이명식, "실험계획법과 CAE를 이용한 도아씨일 설계", 한국자동차 공학회 추계학술대회, pp.230~236, 1996.
  - 10) Konter, Ir. A. W. A., "Analysis of Visco-Elastic and Elastomeric Materials", MARC Analysis Research Corporation, 1995.
  - 11) Shashi Venkatakrishnaiah, Radha Krishnan, M., Manohar Motwani, and Manohar Uhlmeyer, "Product Engineering of Automotive Door Seals Using CAE Techniques", IBEC'95, Body Design & Engineering, pp.109~115, 1995.