

## 차체 외판 부품의 내덴트성 향상을 위한 고강도 강판의 성형에 관한 연구

김태정<sup>1#</sup>, 김익수<sup>1</sup>, 정연일<sup>1</sup>, 윤치상<sup>1</sup>, 임종대<sup>1</sup>

### Forming of Automotive Outer Body Panel using High Strength Steel Sheet for Improving Dent Resistance

T. J. Kim, I. S. Kim, Y. I. Jung, C. S. Yoon, J. D. Lim

#### Abstract

Dent resistance is an important characteristic to avoid damage on automotive outer panels. From a practical point of view, dents can be caused in a number of ways. Considering doors as an example, denting can occur from stone impacts or from the careless opening of an adjacently parked vehicle door. Denting can occur where the door surface is smooth and may not have sufficient curvature to resist dent. These exterior body parts are designed to improve dent resistance using a combination of work hardening and bake hardening. In brief, dent is affected by the shape of the parts and the material properties such as yield strength, strain and thickness. In this work, forming of door outer panel is investigated by Taguchi method. Main parameters are yield strength, thickness, blank size, blank holding force and so on. For the given value of design parameters, forming analysis of the thirty six cases are carried out according to L18 orthogonal array. After comparing the performance by simple conversion of simulation results into dent resistance, the final suggestion of the forming parameters is verified for the best improvement of dent resistance.

**Key Words:** Dent Resistance, High Strength Steel Sheet, Outer Body Panel, Taguchi Method.

#### 1. 서 론

자동차 외판의 면품질을 결정하는 주요 인자로는 강성과 내덴트성이 있다. 덴트는 차량의 운행 중 혹은 주차 시 외부와의 접촉 등으로 인해서 미세한 영구 변형이 남아 있는 경우를 말한다. 이는 자동차 외판의 선형성에 큰 영향을 미치므로 외판 및 중고차 가격에 큰 영향을 미친다. 자동차용 외판 부품의 내덴트성에 관한 연구는 많이 진행되었으며 재료의 항복강도 및 두께와 형상에 따른 함수로 보고되었다<sup>(1-4)</sup>. 그러나 내덴트성은 부품의 위치마다 다르기 때문에 가장 취약한 위치를 기준으로 평가한다. 그러므로 성형 공정을 통해 결정되는 가공 경화량, 소부 경화량 및 두께

변형률을 같이 고려하여야 한다.

본 논문에서 다룰 내용은 도어 외판의 내덴트성을 향상시키기 위해서 성형 공정을 개선하고 적용할 재료를 최적화하기 위한 연구이다. 성형 공정 및 재료 선정을 위해서 다구찌법을 이용하며, 해당하는 경우에 대해서 모두 성형해석을 수행한다. 성형해석 후 선정된 위치의 응력 및 두께를 바탕으로 취약부의 내덴트성을 간접 평가하며 이를 토대로 최적의 공정 변수를 선정한다. 선정된 재료 및 공정 변수에 대해서 최종 성형 해석을 수행하고 그 효과를 파악한다. 내덴트성 평가는 선정된 취약부에 대해서 영구 변형이 남지 않는 최대 하중으로 하며 실제 도장 완료한 부품에 대해서 내덴트성을 평가할 계획이다.

1. 현대기아자동차 연구개발총괄본부 금속재료연구팀  
# 교신저자: voidian@hyundai-motor.com

## 2. 설계인자 및 수준 결정

일반적으로 정적 내덴트성(static dent resistance)은 영구변형이 0.05mm~0.2mm 정도 발생할 경우의 하중으로 평가한다. 외판의 강성(stiffness)과 단순 비례 관계가 아니므로 강성과 내덴트성을 동시에 고려하여 부품을 설계하기가 어렵다.

본 연구에 사용된 부품은 덴트 문제가 많이 발생하는 프론트 도어(front door)의 외판으로 Fig. 1과 같은 금형을 이용하여 프레스(press) 성형을 하게 된다.

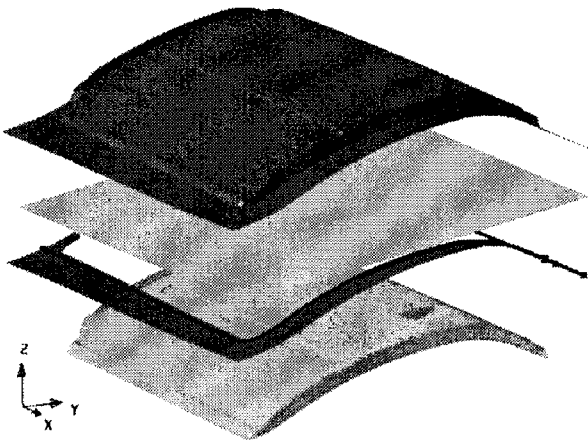


Fig. 1 Tools for forming simulation of the front door

본 연구를 통해서도 부품 형상 변경을 고려하고 있지 않으므로 변경 가능한 인자로는 블랭크 크기, 블랭크 홀딩력(blank holding force), 소재 및 두께 등이 있다. 각각의 인자들에 대한 영향도를 다구찌 방법(Taguchi method)을 통해서 검토할 예정이며 이를 위해 L18(2<sup>13</sup>7) 직교배열표를 이용하였다. 선정된 설계 인자의 수준은 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Parameters for L18 orthogonal array

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Surface Treatment	CR	GA	
Material	340BH	440DP	490DP
Thickness(mm)	0.75	0.70	0.65
BHF(ton)	90	110	130
Blank width(mm)	2530	2510	2550
Blank height(mm)	880	860	900
Draw bead force	100%	90%	80%
Lubricant	세정유	방청유	무방청

첫번째 인자는 표면도금처리 유무로서 일반 냉간압연(CR) 강판과 합금화 용융아연도금(GA) 강판을 선정하였다. 소재는 외판으로 많이 사용되고 있는 소부경화(Bake-Hardening) 강판과 인장강도가 440MPa 급 혹은 490MPa 급의 고강도 이상조직(Dual Phase) 강판을 선정하였다. 드로우 비드력(draw bead force)은 현재 양산 금형에 적용된 비드 형상에 의한 비드력을 100%로 가정하고 비드 형상 및 마찰계수를 완하시킬 계획으로 90%와 80%를 고려하였다. 윤활상태는 현재 세정유 상태로 프레스 가공을 하고 있으나 금형과의 마찰계수에 대한 다양한 거동을 살펴보기 위하여 인위적으로 선정한 수준이다. 즉, 첫 번째 인자인 표면처리 특성과 여덟 번째 인자인 윤활상태의 조합에 따라 아래의 Table 2와 같은 마찰계수를 적용하였다.

Table 2 Friction coefficient

Surface Treatment	Lubricant	Friction coefficient
CR	세정유	0.14
	방청유	0.125
	무방청	0.155
GA	세정유	0.135
	방청유	0.12
	무방청	0.15

소재마다 진응력-진변형률 선도를 측정하여 해석에 적용하였으며 노이즈 인자(noise factor)로 소재의 항복강도, 인장강도 및 두께를 선정하였다. 각각의 노이즈 인자에 대한 산포는 아래의 Table 3과 같다. 아래의 항복강도 및 인장강도의 산포에 따라 응력-변형률 그래프를 수정하여 적용하였다.

Table 3 Scatter in noise factors

Noise Factor	Parameter	N1	N2
Yield Strength (MPa)	340BH	186	260
	440DP	240	290
	490DP	303	330
Tensile Strength (MPa)	340BH	343	380
	440DP	440	490
	490DP	510	550
Thickness (mm)	0.75	0.72	0.78
	0.70	0.67	0.73
	0.65	0.62	0.68

상기 Table 3의 응력 산포값은 소재사에 제공하는 강판 물성의 실측값 중 최소값 및 최대값을 적용한 것이며 두께 산포는 균일하게  $\pm 0.03$ 을 적용하였다.

### 3. 성형 해석

#### 3.1 해석 결과

앞에서 선정된 도어는 좌, 우 동시 성형 부품으로 대칭조건을 이용하여 좌측(LH) 도어 부분만 해석하였다. 성형해석은 Dynaform(LS-Dyna)를 이용하였으며 드로우-비드력은 Dynaform에서 제공하는 등가 비드력의 자동 계산 모델을 적용하였고 90% 및 80%의 수준에 대해서는 Scale 기능을 이용해 비드력을 축소 적용하였다. 요소는 Belytschko-tsay 셸(shell) 요소를 사용하고 평면 이방성(planar anisotropy) 항복 모델은 Barlat and Lian(1989) 모델을 적용하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 마찰계수는 Table 2의 조건을 사용하였다.

내덴트성을 평가하기 위한 위치는 Fig. 2와 같이 4 포인트를 선정하였으며 성형해석 후 각각의 포인트에서의 유효응력 및 두께를 측정하여 Eq. (1)을 이용하여 내덴트성의 대표값( $\Psi$ )으로 변환하여 평가하였다.

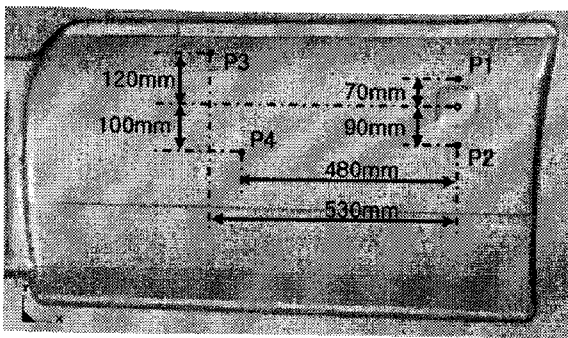


Fig. 2 Measuring points for dent resistance

$$\Psi = K(\rho_1, \rho_2) \cdot \bar{\sigma} \cdot t^2 \quad (1)$$

일반적으로 내덴트성은 항복강도에 비례하고 두께의 제곱에 비례하는 경향이 있다. 또한, 이 중 곡률 형상에 대해서 각각의 곡률 반경에 따라 영향이 있으나 본 연구에서는 형상 변경이 없고 각각의 설계안에 대한 상대 비교가 필요하므로  $K(\rho_1, \rho_2) = 1$ 로 설정하였다. 또한, 실제 내덴트성은 완성차 상태에서 평가하므로 소부경화 효과

를 고려해야 한다. 본 연구에서는 해석에서 나온 유효응력값에 균일하게 50MPa을 더하여 Eq. (1)에 대입하였다. Table 1에 표시한 바와 같이 L18 직교배열표를 적용하고 Table 3과 같은 노이즈 인자를 고려할 경우 모두 36가지의 해석을 수행해야 한다. 각각의 경우에 대한 내덴트성의 변환값을 Table 4에 표시하였고 각각의 인자에 대한 성능값 및 S/N비를 Fig. 3과 Fig. 4에 표시하였다.

Table 4 Equivalent dent resistance from simulation

L18	P1		P2		P3		P4		Mean	S/N
	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2		
1	185.6	228.4	156.1	204.1	121.6	196.2	133.7	194.5	177.5	13.7
2	155.1	177.8	113.4	172.4	126.4	196.8	121.6	170.4	154.2	14.1
3	124.4	170.6	104.3	156.2	98.7	138.9	94.7	143.8	128.9	13.2
4	197.9	255.3	174.1	214.3	175.3	246.3	157.3	208.6	203.6	15.3
5	165.2	198.1	140.9	184.0	112.7	181.0	133.2	176.6	161.5	14.8
6	136.5	204.6	131.3	178.9	127.3	174.7	117.2	170.7	155.1	14.0
7	231.5	298.1	179.9	203.7	170.0	239.5	177.8	227.0	215.9	14.1
8	205.9	250.6	161.6	195.8	166.3	219.0	161.8	219.9	197.6	15.7
9	169.6	228.1	178.7	204.7	139.1	185.0	151.2	175.2	179.0	16.0
10	171.8	206.3	125.5	191.6	150.2	205.1	127.8	196.8	171.9	14.2
11	142.2	178.6	156.1	159.2	114.6	168.3	112.1	163.6	149.3	15.7
12	119.4	181.1	124.5	165.2	106.3	155.8	94.1	159.0	138.2	12.9
13	187.4	254.6	173.2	217.5	168.6	229.0	176.6	213.7	202.6	16.3
14	192.5	258.6	143.9	195.5	168.5	225.3	138.7	189.9	189.1	13.5
15	153.1	210.4	152.2	171.0	125.2	171.3	121.3	157.7	157.8	15.0
16	209.3	293.6	196.2	209.7	181.6	211.9	188.3	220.6	213.9	15.8
17	201.0	249.6	171.0	214.1	164.2	206.4	178.5	205.3	198.8	17.2
18	179.7	213.8	132.6	167.1	154.0	196.3	152.3	183.6	172.4	16.4

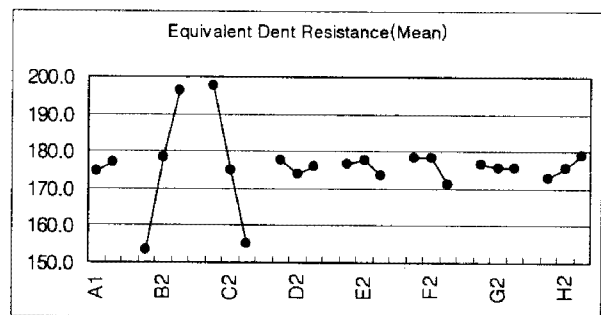


Fig. 3 Equivalent Dent Resistance of parameters

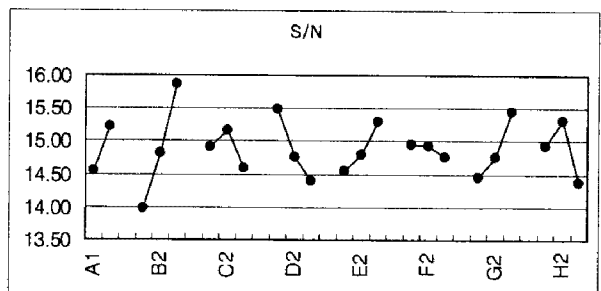


Fig. 4 S/N ratio of parameters

### 3.2 소재 및 공정 조건 결정

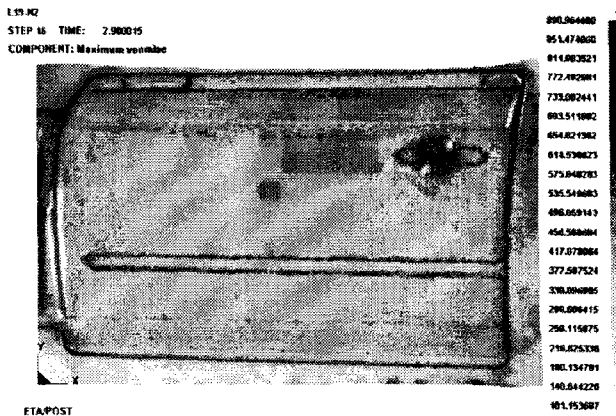
위의 Fig. 3 및 Fig. 4의 결과를 바탕으로 Table 5와 같이 소재 및 공정 조건을 선정하였다. 앞의 결과에서와 볼 수 있듯이 내넨트성에 크게 영향을 미치는 것은 원소재의 강도 및 두께이며 이 두 가지가 결정되었을 경우, 나머지 인자들의 영향은 거의 동등한 수준이다.

**Table 5 Determined levels of design parameters**

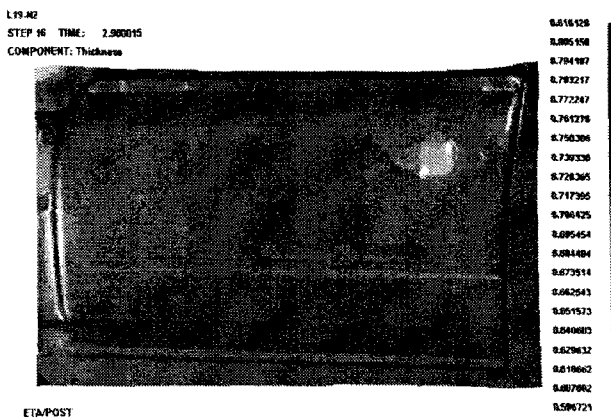
A	B	C	D	E	F	G	H
L2	L3	L2	L1	L3	L1	L1	L2

### 3.3 선정 조건의 성형 해석

앞에서 선정된 소재 및 공정 조건에 대해서 추가 해석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 5와 Table 6에 나타내었다.



(a) Distribution of effective stress



(b) Distribution of thickness

**Fig. 5 Simulation results of the front door for the determined parameters (N2)**

**Table 6 Simulation results for the determined levels**

L18	P1		P2		P3		P4		Mean	S/N
	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2		
19	197.3	262.1	194.7	239.5	159.9	203.4	158.8	191.3	200.9	17.6

본 연구에서는 외연적 적분법을 적용하여 응력 값에 대한 신뢰도가 떨어지지만 상대적 오차는 크게 발생하지 않았을 것으로 예상된다. 그러나, 응력 및 두께 분포에서 알 수 있는 바와 같이 공정 조건으로 해당 물성의 분포를 최적화하기는 어려우며 형상의 최적화가 같이 연구되어야 내넨트성의 개선이 이루어질 것으로 생각된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 외판 부품의 내넨트성을 향상시키기 위하여 소재 및 공정 조건의 최적화를 해석적으로 접근하였다.

- (1) 소재 강도가 높을수록 내넨트성은 향상되며 이는 항복응력의 증가에 기인한다. 본 연구에서는 490MPa 급 DP 강의 외판 적용을 위한 성형 조건을 결정하였다.
- (2) 소재 두께가 두꺼울수록 내넨트성은 향상되며 형상에 따라 강성에 큰 영향을 미치지만 경량화 요구에 맞춰 적절히 선정되어야 한다.
- (3) 그 외 블랭크 홀딩력, 블랭크 크기, 마찰계수 등에 따른 내넨트성 영향도를 다구찌 기법을 통해 살펴보았다.

## 참고 문헌

- [1] N.Asnafi, 1995, On strength, stiffness and dent resistance of car body panels, *Journal of Materials Processing Technology* (49), pp. 13~31.
- [2] GEkstrand, N.Asnafi, 1998, On testing of the stiffness and the dent resistance of autobody panels, *Materials & Design* (19), pp. 145~156.
- [3] S.Holmberg, P.Thilderkvist, 2002, Influence of material properties and stamping conditions on the stiffness and static dent resistance of automotive panels, *Materials & Design* (23), pp. 681~691
- [4] Y.Zhang, X.Lai, P.Zhu, W.Wang, 2006, Lightweight design of automobile component using high strength steel based on dent resistance, *Materials & Design* (27), pp. 64~68