

내덴트성 향상을 위한 고강도 도어 외판 개발

김익수[#]· 김태정¹· 정연일¹· 윤치상¹· 임종대¹

Development of Door Outer Panel using High Strength Steel Sheet for Improving Dent Resistance

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

(Received May 10, 2007)

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 eighteen 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 optimal improvement of dent resistance.

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

1. 서론

자동차 외판의 품질을 결정하는 주요 인자로는 강성(stiffness)과 내덴트성(dent resistance)이 있다. 덴트는 차량의 운행 중 또는 주차 시 정적/동적 외력에 의해서 미세한 영구 변형이 남아 있는 경우를 말한다. 이는 자동차 외판의 선형성에 큰 영향을 미치므로 외판 품질 및 중고차 가격에 영향을 미친다. 이러한 자동차용 외판 부품의 내덴트성에 관한 연구는 많이 진행되어 왔으며 재료의 항복강도, 두께 및 형상에 큰 영향을 받는 것으로 보고되었다[1~4]. 그러나 내덴트성은 부품의 위치마다 다르기 때문에 부품의 전체적인 내덴트성

경향을 개선시키는 것이 중요하다. 그러므로, 기본 소재의 물성뿐만 아니라 성형 공정을 통해 결정되는 가공 경화량, 소부 경화량 및 두께 변형률을 고려하여 부품을 개발해야 한다.

본 논문에서 다룰 내용은 도어 외판의 내덴트성을 향상시키기 위해서 재료를 최적 선정하고 성형 공정을 개선하는 것이다. 재료 선정 및 성형 공정 개선을 위해서 실험계획법을 이용하며, 해당하는 경우에 대해서 모두 성형해석을 수행한다. 성형해석 후 선정된 위치의 응력 및 두께를 바탕으로 내덴트성을 간접 평가하며 이를 토대로 최적의 소재 및 공정 변수를 선정한다. 선정된 설계 변수에 대해서 최종 성형 해석을 수행하고 검증

1. 현대자동차 연구개발총괄본부 금속재료연구팀
교신저자: 현대자동차 연구개발총괄본부 금속재료연구팀,
E-mail: kimiksoo@hyundai-motor.com

한다. 또한, 도장까지 완료한 실부품을 제작하여 내넨트성을 평가하고 기존의 부품과 비교한다.

2. 차체 외판용 고강도 강판

최근까지 자동차용 외판으로는 270MPa급의 연강판(mild steel)이나 340MPa급의 소부경화강판(bake hardening steel sheet)을 사용하고 있다. 소부경화강판은 차체 외판의 내넨트성을 개선시키기 위하여 적용되기 시작하였으나 최근에는 이를 더욱 개선시키기 위하여 490MPa급의 고강도강판을 이용한 부품 개발까지 연구되고 있다.

2.1 소재별 기계적 물성

소부경화형으로는 인장강도 390MPa급 이상은 얻기 어려워 이상조직강(dual phase)이 일반적이다. 현재까지는 440MPa급 및 490MPa급의 이상조직강이 차체 외판용 고강도강판으로 개발되었으며 이를 적용하기 위해서는 설계 및 공정 개발이 필요하다. 각 소재별 기계적 물성은 Table 1 과 같다.

Table 1 Mechanical Property of Steel Sheets

Material	YP(MPa)	TS(MPa)	El(%)
SPRC340BH	228	353	40
SPFC440DP	259	447	34
SPFC490DP	333	522	30

위의 표에서 볼 수 있는 바와 같이 소재의 강도가 490MPa 급까지 올라가면서 신율이 30%까지 떨어지며 이방성계수(Lankford value)도 거의 1.0 에 근접하기 때문에 성형성이 문제가 될 수 있다. 이러한 문제점을 사전에 방지하기 위하여 형상을 단순화시키거나 최적의 공정 조건을 선정할 필요가 있다. 현재까지의 연구결과에 의하면 넨트는 소재가 항복점을 넘으면서 발생하기 때문에 항복강도가 중요한 인자가 된다. 그러므로 소재가 고강도화 될수록 내넨트성이 증가할 것으로 예상되지만 증가 정도 및 위치에 따른 산포 개선 정도를 면밀히 검토하여 적용 여부를 결정해야 한다.

2.2 소재 및 공정조건에 따른 가공경화량

본 연구에서는 부품의 가공경화량을 개선시키기 위해서 소재 및 공정조건을 선정한다. 그 이전에 소재의 크기 및 블랭크 홀딩력(blank holding force)이 가공경화량에 미치는 영향도를 알아보기

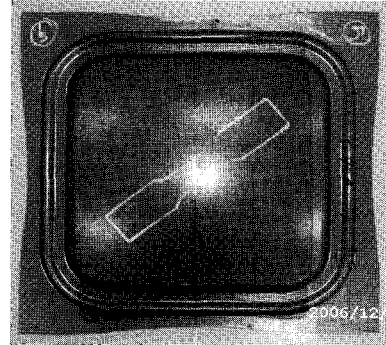


Fig. 1 Test specimen to measure work-hardening for various forming conditions

Table 2 Work-hardening for the conditions

Blank size(mm)	SPFC440DP		SPFC490DP	
	YP(MPa)	BHF	YP(Mpa)	BHF
Initial	259	-	333	-
450x450	336	25ton	372	25ton
490x490	344	25ton	397	25ton
450x450	375	75ton	421	75ton
490x490	401	75ton	437	75ton

위해서 Fig. 1 과 같이 다양한 조건에 대해서 소재를 성형하고 중앙부에서 인장시편을 채취하여 가공경화량을 비교하였다.

위의 Table 2 에서 볼 수 있는 바와 같이 원소재 대비 최종 가공경화량은 39~142MPa 정도로 블랭크 크기 및 블랭크 홀딩력의 조건에 따라 차이를 보이고 있다. 또한, 블랭크 크기 차이에 의해 가공경화량 차이는 약 8~26MPa 정도 발생했으며 블랭크 홀딩력의 차이에 의해 가공경화량이 39~57MPa 정도 차이가 난다. 이러한 결과를 바탕으로 차체 부품의 성형에서도 초기 블랭크의 크기 및 블랭크 홀딩력에 따라 가공경화량에 차이를 보일 것이며 이러한 차이가 내넨트성에도 영향을 미칠 것이다. 그러므로 고강도강판을 이용한 부품의 개발에서는 이러한 가공경화량을 최대화할 수 있는 공정 변수의 연구도 필요하다.

3. 설계 인자 및 수준 결정

일반적으로 정적 내넨트성(static dent resistance)은 영구변형이 0.1mm 정도 발생할 경우의 하중으로 평가한다. 외판의 강성과 단순 비례 관계가 아니

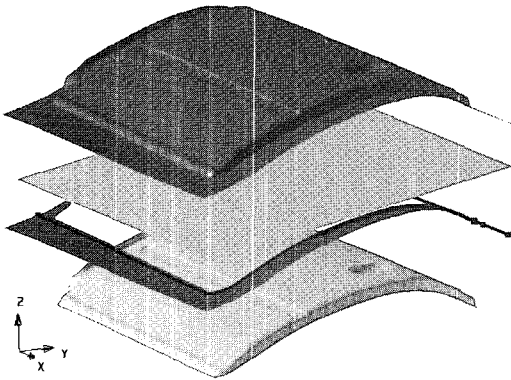


Fig. 2 Tools for forming simulation of the front door

므로 강성과 내덴트성을 동시에 고려하여 부품을 설계하기가 어렵다.

본 연구에 사용된 부품은 덴트 문제가 많이 발생하는 프론트 도어(front door)의 외판으로 Fig. 2와 같은 금형을 이용하여 성형을 하게 된다.

본 연구를 통해서서는 부품 형상 변경을 고려하고 있지 않으며 변경 가능한 인자로는 블랭크 크기, 블랭크 홀딩력(blank holding force), 소재 및 두께 등이 있다. 각각의 인자들에 대한 영향도를 다루는 방법(Taguchi method)을 통해서 검토할 예정이며 이를 위해 L18(2¹³⁷) 직교배열표를 이용하였다. 선정된 설계 인자의 수준은 Table 3에 표시하였다. Oil #1은 세정유(leveling oil)이며 Oil #2는 방청유(anti-corrosion oil)이다.

Table 3 Parameters for L18(2¹³⁷) 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)	140	170	200
Blank width(mm)	2530	2510	2550
Blank height(mm)	880	860	900
Draw bead force	100%	90%	80%
Lubricant	Oil #1	Oil #2	No oil

첫번째 인자는 표면도금처리 유무로서 일반 냉간압연(CR) 강판과 합금화 용융아연도금(GA) 강판을 선정하였다. 소재는 외판으로 많이 사용되고 있는 340MPa급 소부경화강판과 이상조직강판의 440MPa급 및 490MPa급 소재를 선정하였다. 두께

는 현재 외판으로 많이 적용되고 있는 일반적인 수준을 선정하였으며 블랭크 홀딩력도 양산용 프레스를 고려하여 적용 가능한 범위에서 선정하였다. 블랭크의 가로, 세로 크기는 현재의 금형에서 변경 가능한 크기이며 가이드 핀(guide pin)을 이동시켜 소재를 금형에 안착시킬 수 있다. 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. 실제 해석에서는 첫 번째 인자인 표면처리 특성과 여덟 번째 인자인 윤활상태의 조합에 따라 아래의 Table 4와 같은 마찰계수를 적용하였다. 마찰계수는 실험을 통해 측정되어야 하지만 그 변화가 미세하고 실험 오차 문제를 없애기 위하여 관련 연구[5~10]를 참조하여 타당한 값으로 선정하였다.

Table 4 Friction coefficient

Surface Treatment	Lubricant	Friction coefficient
CR (Cold rolled)	Oil #1	0.14
	Oil #2	0.125
	No oil	0.155
GA (Galvannealed)	Oil #1	0.135
	Oil #2	0.12
	No oil	0.15

소재마다 응력-변형률 선도(stress-strain curve)를 측정하여 해석에 적용하였으며 노이즈 인자(noise factor)는 내덴트성 측정위치로 선정하였다. 내덴트성 측정위치는 Fig. 3과 같이 3위치로 선정하였는데 이는 내덴트성 평가를 위해 일반적으로 측정되는 위치이다. 본 연구에서는 각 위치에 따른 내덴트성 산포를 줄이는 목적도 포함되어 있으므로 타당한 노이즈 인자 선정이라 할 수 있다.

4. 성형 해석

4.1 설계 인자 영향 분석

앞에서 선정한 도어는 좌, 우 동시 성형 부품으로 대칭조건을 이용하여 좌측(LH) 도어 부분만 해석하였다. 성형해석은 LS-Dyna3D를 이용하였으

며 드로우-비드력은 Dynaform 에서 제공하는 등가 비드력(equivalent bead force)의 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)을 고려하였다. 항복 모델(yield function model)은 Barlat and Lian(1989) 모델을 적용하였다. 마찰계수는 앞에서 언급한 바와 같이 각각의 경우에 대해 Table 4 의 값을 사용하였다.

내넨트성을 평가하기 위한 위치는 Fig. 3과 같이 3포인트를 선정하였으며 성형해석 후 각각의 포인트에서의 유효응력 및 두께를 측정 후 Eq. (1) 을 이용하여 내넨트성의 대표값(Ψ)으로 변환하여 평가하였다.

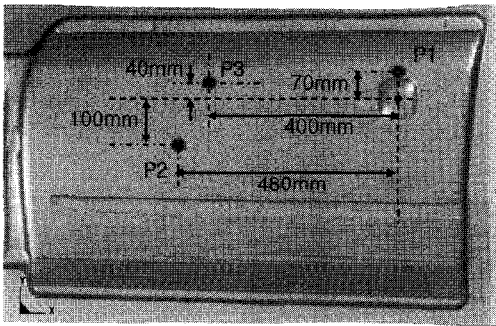


Fig. 3 Measuring points for dent resistance

$$\Psi = (\sigma_0 + WH + BH) \cdot (t_0 + \Delta t)^2, \quad (1)$$

where WH=Work Hardening (MPa)
BH=Bake Hardening (Mpa)

일반적으로 내넨트성은 항복강도에 비례하고 두께의 제곱에 비례하는 경향이 있다. 이는 부품 상태의 물성에 근거해야 하므로 Eq. (1)과 같이 초기 항복응력(σ_0)뿐만 아니라 가공경화량(WH) 및 소부경화량(BH)을 포함하여야 하며 두께도 초기 두께(t_0)에 가공으로 인한 두께 변화량(Δt)을 포함하여야 한다. 소부경화량은 해석적으로 구하기 어려우므로 일반적 실험을 통해 측정되는 범위인 30~50MPa중 50MPa를 균일하게 적용하였다. 앞의 Table 3과 같이 잘 알려진 L18직교배열표를 이용할 경우 모두 18가지의 경우가 나오며 이러한 모든 경우에 대해 성형해석을 수행하였다. 각각의 경우에 대한 내넨트성 변환값(Ψ)을 Table 5에 표시하였고 각각의 인자에 대한 S/N비 및 성능값을 Fig. 4와 Fig. 5에 표시하였다.

Table 5 Equivalent dent resistance from simulation

	A	B	C	D	E	F	G	H	P1	P2	P3	Mean	S/N
L1	1	1	1	1	1	1	1	1	228.4	196.2	194.5	206.4	20.7
L2	1	1	2	2	2	2	2	2	177.8	196.8	170.4	181.7	22.5
L3	1	1	3	3	3	3	3	3	170.6	138.9	143.8	151.1	19.0
L4	1	2	1	1	2	2	3	3	255.3	246.3	208.6	236.8	19.6
L5	1	2	2	2	3	3	1	1	228.1	181.0	176.6	195.2	16.7
L6	1	2	3	3	1	1	2	2	204.6	174.7	160.7	180.0	18.1
L7	1	3	1	2	1	3	2	3	298.1	239.5	227.0	254.9	16.5
L8	1	3	2	3	2	1	3	1	245.6	219.0	219.9	228.2	23.6
L9	1	3	3	1	3	2	1	2	228.2	185.0	175.2	196.1	16.9
L10	2	1	1	3	3	2	2	1	206.3	205.1	196.8	202.7	31.8
L11	2	1	2	1	1	3	2	2	178.6	168.3	163.6	170.2	27.0
L12	2	1	3	2	2	1	1	3	181.1	155.8	159.0	165.3	21.6
L13	2	2	1	2	3	1	3	2	254.6	229.0	203.7	229.1	19.1
L14	2	2	2	3	1	2	1	3	238.6	225.4	189.9	217.9	18.8
L15	2	2	3	1	2	3	2	1	210.4	171.3	157.7	179.8	16.4
L16	2	3	1	3	2	3	1	2	273.6	221.9	220.6	238.7	18.0
L17	2	3	2	1	3	1	2	3	249.6	206.4	205.3	220.4	18.8
L18	2	3	3	2	1	2	3	1	213.8	196.3	183.6	197.9	22.3

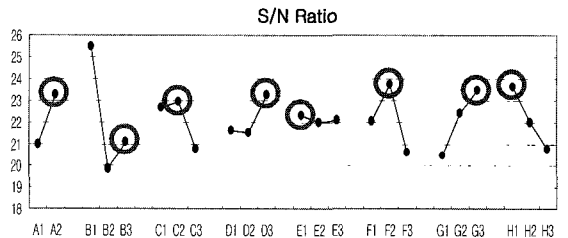


Fig. 4 S/N ratio according to each parameter

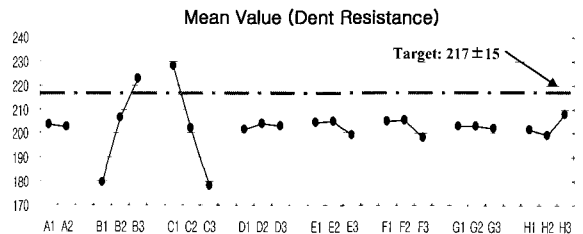


Fig. 5 Equivalent Dent Resistance of parameters

Table 6 Determined levels of design parameters

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

4.2 소재 및 공정 조건 결정

위의 Fig. 4 및 Fig. 5의 결과를 바탕으로 Table 6과 같이 소재 및 공정 조건을 선정하였다. 앞의 결과에서 볼 수 있듯이 내넨트성에 크게 영향을 미치는 것은 원소재의 강도 및 두께이며 이 두 가지가 결정되었을 경우, 나머지 인자들의 영향은 거의 미미한 수준이다.

4.3 선정 조건의 성형 해석

앞에서 선정된 소재 및 공정 조건에 대해서도 해석을 실시하였으며 그 결과로는 초기사양에 비해서 내덴트성 평균값이 20.9정도 상승한 것을 볼 수 있다(Fig. 6 및 Table 7).

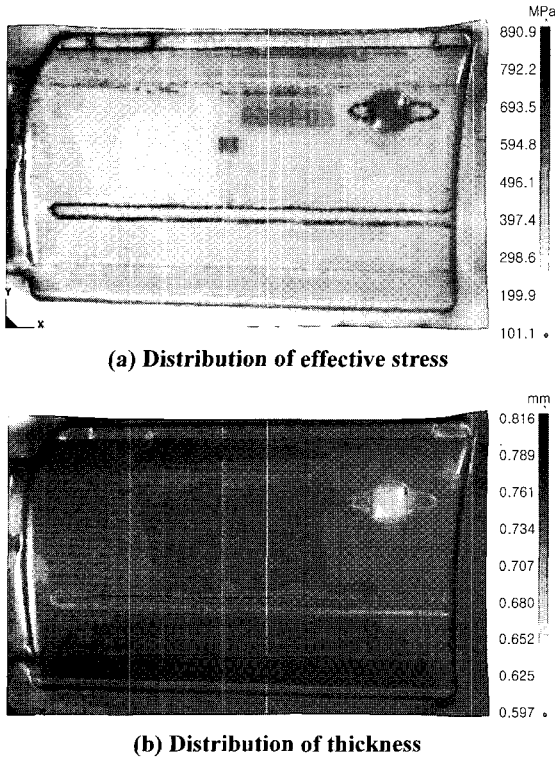


Fig. 6 Simulation results of the front door for the determined parameters

Table 7 Simulation results and experimental results for the determined parameters

	Initial				Optimal			
	P1	P2	P3	Mean	P1	P2	P3	Mean
Simulation	222.4	196.2	194.5	204.4	235.1	225.4	215.3	225.3
Experiment	223.2	200.9	191.4	205.1	235.3	224.9	216.1	225.4
Error	0.4%	2.3%	-1.6%	0.4%	0.1%	-0.2%	0.4%	0.1%

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

5. 실험 및 비교

5.1 부품 개발

앞에서 선정된 설계 인자에 의해 소재를 결정하고 1공정인 프레스 공정 조건을 변경한 후 제작한 부품은 Fig 7과 같다. 좌, 우 동시 성형 부품으로 평가는 왼쪽(LH) 도어 부품에 대해서 평가하였다. 1공정인 프레스 부품에 대해서 앞에서 선정된 측정점 3포인트의 가공경화량을 측정하는 것을 Table 7에 같이 나타내었다. 즉, 3포인트에서 인장시편을 채취하여 인장 실험한 결과값이며 해석 값에 비해서 오차 범위 2.3% 이내인 것을 알 수 있다.

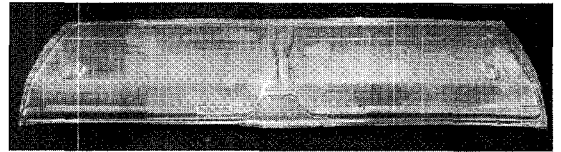


Fig. 7 Formed front door panel for the determined parameters

5.2 내덴트성 비교

위에서 개발한 부품에 대해서 후속 공정인 트리밍(trimming) 및 헤밍(hemming) 공정을 수행하고 도어 어셈블리(assembly)로 완성한 차량에 대해서 내덴트성을 평가한 결과가 Table 8 과 같다. 이는 도장까지 완료한 부품으로 실차에 부착한 상태에서 평가된 결과이다.

Table 8 Results of the dent resistance in the front door formed by determined parameters

Initial		Optimal					
Stiffness (displacement)	Dent Resistance (kgf)			Stiffness (displacement)	Dent Resistance (kgf)		
	P1	P2	P3		P1	P2	P3
8.5mm	P1	P2	P3	9.1mm	P1	P2	P3
	35	17	20		35	18	35

강성(stiffness)은 20kgf의 외력에 대한 변형량으로 변위(displacement)가 작을수록 강성이 좋은 것을 의미한다. 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 강성은 8.5mm에서 9.1mm로 약간 떨어졌는데 이는 두께에 대한 영향이 큰 것으로 보인다. 즉, 초기 사양의 소재 두께는 0.75t이지만 최종 사양은

0.7t로 7% 정도 두께가 얇아졌으며 강성도 약 7% 정도 낮아졌다. 내넨트성은 영구변형이 0.1mm 정도 발생할 때의 외력으로 P1에서는 측정할 수 있는 최대값인 35kgf에서도 영구변형이 발생하지 않았다. P2에서는 17kgf에서 18kgf로 6%정도 개선되었으며 P3에서는 측정 한계 하중인 35kgf까지 덴트가 발생하지 않았으므로 약 75% 이상 개선된 것으로 볼 수 있다.

P3는 도어의 중앙부로 덴트 및 강성 문제가 많이 발생하는 부위이다. 이를 개선시키기 위해서 실차에서는 고분자 물질인 차체 판넬 보강재(body panel reinforcement)를 바르고 있다. 이러한 효과는 본 연구에서 고려되지 않았지만 실험에서는 본 효과가 들어가 있으므로 내넨트성값이 예측치 이상으로 크게 측정된 것으로 보인다. 또한, 강성과 내넨트성은 비례하지 않는 경향도 있다. 즉, 강성이 약할수록 탄성복원이 잘되어 내넨트성이 좋아지는 연구결과도 보고되며 이러한 이유들이 복합적으로 작용한 것으로 예측된다.

6. 결론

본 연구에서는 차체 외판 부품의 내넨트성을 향상시키기 위하여 소재 및 공정 조건의 최적화를 실험계획법 및 해석적으로 접근하고 실부품 제작 및 실험을 통해 검증하였다.

(1) 소재 강도가 높을수록 내넨트성은 향상되며 이는 항복응력의 증가에 기인한다. 본 연구에서는 고강도 강판인 490MPa 급 DP 강의 외판 적용을 위한 성형조건을 결정하였다.

(2) 소재 두께가 두꺼울수록 내넨트성은 향상되고 형상에 따라 강성에 큰 영향을 미치며 본 연구에서는 경량화 및 연비개선 요구에 맞춰 선정되었다.

(3) 고강도 강판의 성형성 문제를 해결하고 가공경화량을 최적화하기 위해서 블랭크 홀딩력, 블랭크 크기, 마찰계수 등에 따른 내넨트성 영향도를 다구찌 기법을 통해 살펴보고 최적화하였다.

(4) 실부품을 제작하여 내넨트성을 평가해 본 결과, 위치에 따라 6%~75%의 내넨트성 향상 효과

를 보았으며 고강도 강판으로 인한 성형성 문제를 사전에 검증하였다.

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] G. Ekstrand, 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.
- [5] J. G. Lenard, 1998, The effect of lubricant additives on the coefficient of friction in cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology*(80-81), pp. 232~238.
- [6] J. Kosanov, J. G. Lenard, J. Uhrig, B. Wallfarth, 2006, The effect of lubricant additives on the coefficient of friction in the flat-die test, *Materials Science and Engineering*, (427), 1-2, pp. 274~281.
- [7] 박동환, 강성수, 2001, 판재 성형을 위한 마찰 계수에 관한 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 28~31.
- [8] 이봉현, 금영탁, 2001, 윤활과 표면조도를 고려한 박판 성형 마찰 모델, 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 7, pp. 543~550.
- [9] 김대현, 이동환, 김원태, 문영훈, 2004, 자동차용 냉간압연재의 원형 드로우비드 성형시 강판 재질별 마찰특성에 관한 연구, 한국소성가공학회 압연심포지엄, pp. 83~90.
- [10] 이경수, 이정민, 김상주, 김병민, 2005, 도금강판과 무도금강판의 마찰특성을 고려한 성형성 평가, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 440~443.