

# 차체 외판 부품의 덴트 특성 향상을 위한 알루미늄 판재의 성형조건에 관한 연구

고세진<sup>#</sup> · 김태정<sup>1</sup> · 김익수<sup>1</sup>

## Forming Condition for Automotive Body Outer Panel using Aluminum Alloy Sheet for Improved Dent Resistance

S. J. Ko, T. J. Kim, I. S. Kim

(Received July 4, 2011 / Revised September 8, 2011 / Accepted September 9, 2011)

### Abstract

Dent resistance is determined by both shape characteristics, i.e., local radius of curvature and sheet thickness, and material properties such as yield strength. This work presents results of a study on the effect of work hardening and bake hardening on dent resistance of aluminum alloy sheet parts by considering the forming condition and baking temperature.

**Key Words** : Dent Resistance, Aluminum Alloy Sheet, Outer Body Panel, Forming Condition, Baking Temperature

### 1. 서 론

최근 편의성에 대한 소비자의 관심이 증가함에 따라 자동차의 성능이 높아지면서 차량의 중량은 점점 증가하고 있다. 그러나, 차량의 중량증가는 연비저하, 배기가스 배출량 과다와 직결되므로, 경량화를 위한 노력이 필요하다. 차량의 경량화를 위해서 고장력 강판의 적용 비율을 늘려가며 경량화를 하고 있으나, 강판 적용만으로는 한계가 있으며 결국 경량 차체재료를 확대해야 한다. 자동차 차체용 경량 재료로 가능성이 있는 금속재료는 알루미늄과 마그네슘이 있으며, 현재 알루미늄 소재가 자동차에 일부 적용되고 있다. 알루미늄 판재는 주로 후드, 트렁크리드, 도어 등의 외판 부품에 적용되며, 이러한 외판부품은 소비자의 직접적인 관찰이 가능하므로 표면 특성이 매우 중요하다.

자동차 외판의 표면 품질을 결정하는 주요인자는 내덴트성이다. 덴트는 차량의 운행 중 혹은 주차 시에 외부와의 접촉 등으로 인해서 미세한 영구 변형이 남아 있는 경우를 말한다. 이는 자동차 외판의 선형성에 영향을 미치므로 외판 및 중고차 가격에 큰 영향을 미친다. 자동차용 외판 부품의 내덴트성에 대한 연구는 많이 진행되었으며, 이는 재료의 항복강도 및 두께와 형상에 따른 함수로 보고되었다[1~5]. 대부분 외판의 형상은 변경하기 쉽지 않으므로 내덴트성을 향상시키기 위해서는 부품 제작 과정을 통해 결정되는 가공 경화량, 소부 경화량 및 두께 변형률을 고려하여야 한다.

본 논문에서는 알루미늄 판재의 사전변형량과 소부 온도에 따른 성형조건에 의해 항복 강도 변화를 확인하고, 항복강도 증가에 대한 내덴트성 영향을 분석하여 내덴트성을 향상시킬 수 있는 각각의 공정 및 인자의 적정 범위를 찾아내고자

1. 현대기아자동차 연구개발총괄본부 자동차강판개발TFT  
# 교신저자: 현대기아자동차 연구개발총괄본부 자동차강판개발  
TFT, ksjin@hyundai.com

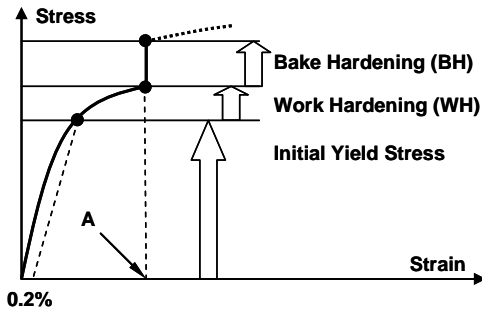


Fig. 1 Schematic diagram of variation of yield stress in deformed part

하였다. 6000 계열 알루미늄 부품은 소재를 프레스 과정(소성가공)을 통해 부품의 형상으로 만들고, 이후 도장라인에서 높은 온도의 오븐을 통과하면서 소부된다. 따라서, 부품 상태의 항복강도는 아래 Fig. 1 과 같이 원소재의 항복강도에 소성가공에 따른 가공 경화량 (Work hardening) 과 오븐 통과에 따른 소부경화량 (bake hardening)을 포함해야 최종 부품의 항복강도가 된다[5~8].

실제 내텐트 성능을 평가할 수 있는 형상 제작을 위해 도어 형상과 유사한 간이형 부품 금형을 제작하고 성형 깊이 및 블랭크 홀딩력에 변화를 주어 가공경화량을 제어하고자 하였다. 또한, 현양산 조건을 고려하여 3 가지 소부 온도를 선정하고 각 온도별 소부경화량을 평가하였으며 다양한 조합을 통한 최종 부품에 대하여 내텐트성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

자동차에 사용되는 알루미늄 판넬 소재는 주로 5000 계열 소재와 6000 계열 소재가 적용되는데, 표면 특성이 중요한 외판재의 경우 일반적으로 6000 계열이 사용되고, 고성형이 요구되는 내판재의 경우 5000 계가 사용된다. 본 논문에서는 외관 부품의 텐트 특성을 판단하기 위해서 알루미늄 6000 계열 소재를 사용하였고, 상세 성분은 Table 1 과 같다. 6000 계열의 알루미늄은 일반 소부경화강판과 유사하게 소부 경화 특성을 가진다. 이러한 소부경화능은 초기 사전변형률에 따른 함수이므로 그 거동을 정확하게 살펴보기 위해서 인장 시험편에 다양한 초기 사전변형을 가하고 소부 시킨 후 소부 경화량을 평가하였다.

Table 1 Chemical composition of 6XXX Aluminum alloy sheet(wt.%)

Cu	Mn	Mg	Si	Fe
0.25↓	0.05~0.2	0.4~0.8	0.3~0.6	0.35↓

가공경화량 및 소부경화량이 실제 부품에서 미치는 내텐트 성능을 평가하기 위해서 부품 성형 후 변형률 측정 장비인 ARGUS 로 변형률을 측정하였다. 또한, 앞에서 구한 변형률 및 소부 조건에 따른 소부 효과를 예상하여 내텐트 성능측정 부위의 최종 항복강도를 예측하여 실험 결과와의 관계를 분석하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 조건에 따른 소부경화 효과

소재의 가공경화 및 소부 온도에 따른 영향을 확인하기 위해서, 가장 기본적인 인장 시험을 통해서 기계적 물성을 평가하였다.

가공경화량은 각각의 시험편에 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10%의 사전변형을 가한 후 시험을 중지하고 각 가공경화 조건별로 오븐에서 150℃, 170℃, 190℃로 20 분간 소부시킨 후 인장 시험을 다시 하여 항복강도의 변화량으로 소부 경화 효과를 측정하였다.

Fig. 2 에 의하면, 가공경화와 소부 경화를 한 후 평가한 인장시험 결과는 사전 변형률이 클수록, 소부온도가 높을수록 항복강도는 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 3 은 인장시험 결과를 바탕으로 각 조건에서 가공경화효과를 제외한 순수한 소부 경화량 (Bake hardening: BH)을 계산한 결과이다. BH는 식 (1)에 의해서 측정할 수 있다.

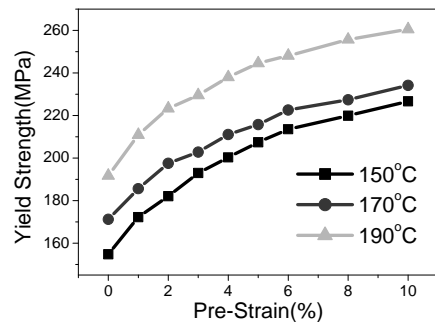
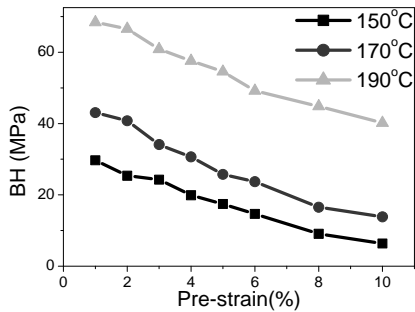


Fig. 2 Variation of yield strength with pre-strain and baking temperature change



**Fig. 3 Variation of BH result with pre-strain and baking temperature change**

$$BH = P_2/A_0 - P_1/A_0 \quad (1)$$

A<sub>0</sub> = Initial cross section area

P<sub>1</sub> = Yield strength after pre-strain

P<sub>2</sub> = Yield strength after pre-strain and bake hardening

각 조건에서의 BH 량을 계산한 결과, BH 는 소부 온도가 높을수록 증가하였다. 그런데, 2% 사전 변형율을 기준으로 할 때, 일반적인 소부경화 강판의 경우 30~45MPa 정도의 강도가 향상되는 반면, 알루미늄 150℃의 소부 온도에서는 소부 경화 량이 25MPa 정도로 상대적으로 낮았다. 그러므로, 알루미늄 외판부품의 적용시 소부 온도는 최소 160℃ 이상으로 적용하는 것이 타당할 것으로 보인다. 190℃의 경우는 66MPa 정도의 높은 소부 경화 효과를 보였다. 이는 온도가 높을수록 석출물의 활성화 에너지가 높아지고, 확산속도가 빨라져서 석출이 용이하기 때문이다. 또한, 고온에서 일정한 크기까지의 석출물 조대화는 추가적인 강도 향상을 기대할 수 있다[9].

BH 량은 사전변형을 1~3% 주었을 때가 가장 높게 나타내고, 그 이후부터는 감소하는 패턴을 보였는데, 낮은 변형률에서는 전위 밀도가 올라감에 따라 석출물과의 상호작용에 의해 증가하는 반면, 높은 변형률에서는 소재 내 전위가 너무 많게 되어 오히려 소부 경화 정도는 줄어드는 것으로 나타났다.

Fig. 3 의 실험결과를 바탕으로 사전 변형률(p) 및 소부 온도(T)에 따른 소부 경화량(BH)을 최소 사승법을 이용하여 식(2)와 같이 근사화하였다.

$$BH(p, T) = A \cdot \exp(-B \cdot p) \cdot \exp(C \cdot T_i) \cdot \exp(D \cdot p \cdot T_i) \quad (2)$$

where, A=0.0396, B=136.75, C=15.14, D=262.1

p = pre-strain

T<sub>i</sub> = T/T<sub>m</sub> (T, T<sub>m</sub>= absolute temperature,

T<sub>m</sub>=melting temperature)

식 (2)는 각각 사전변형(p) 및 온도(T)에 대한 지수함수로 근사화하고 이 두 변수의 1 차 곱의 지수함수를 포함하여 두 변수간의 상호작용 항까지 고려하였다. 온도항(T<sub>i</sub>)은 소재의 녹는점으로 정규화하고 절대온도값으로 변환하여 0~1 의 값을 가지도록 하였다. 식 (2)의 결과는 3.2 의 덴트 시험 결과에 대한 정확한 검증을 위하여 이용될 것이다.

### 3.2 외판강성 및 내덴트성 평가

외판 강성 및 내덴트성의 평가는 Fig. 4와 같이 실시하며, 이 시험을 위한 시험편은 Fig. 5와 같은 형상의 부품으로 성형하여 제작하였다. 외판강성은 하중 20kgf에서의 실시간 변위량을 기준으로 평가한다. 또한, 내덴트성은 육안으로 확인 가능한 영구변형량(0.1mm 이내)이 발생하는 최소 하중으로 나타낸다. 하지만 본 연구에서는 다양한 경화 조건에 따른 실험의 횟수를 줄이고자, 하중 25kgf에서의 영구변형량으로 내덴트성을 평가하였다. 내덴트성 평가용 치구는 직경 36mm의 폴리우레탄(경도 Hs 85) 소재를 사용하였다.

먼저 성형 조건 설정을 위하여 크랙이 발생하지 않는 최대 성형 한계 깊이를 측정하였다. 블랭크 크기를 450×450mm로 고정하고 블랭크 홀딩력을 120Ton으로 했을 때 41mm의 깊이까지 국부 네킹이 발생되지 않았다. 따라서, 가공경화를 가장 많이 발생시킬 수 있는 성형 깊이와 블랭크 홀딩력(blank holding force ; BHF)을 각각 40mm와 120Ton으로 선정하였다. 성형 깊이는 중간인 20mm를 추가 선정하였으며 블랭크 홀딩력은 80Ton, 40Ton의 조건을 추가하여 Table 2와 같이 총 4가지 경우의 성형 조건을 선정하였다.

주름 발생의 억제를 위해 비드(bead)를 추가하여 Fig. 6 과 같이 부품을 성형하였다. 중앙부에서 각각의 가공량을 확인하기 위해, 변형률 측정 장비를 이용하여 변형율을 측정하였으며 그 결과를 Fig.7 및 Table 3 에 표시하였다.

Fig. 7 에 보는 바와 같이 선정된 가공 조건에 따라, 변형량의 차이가 발생되었다. 변형량은 중



Fig. 4 Photo of dent resistance equipment

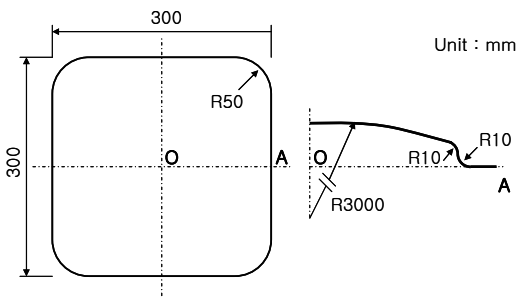


Fig. 5 Drawing of the part for dent test

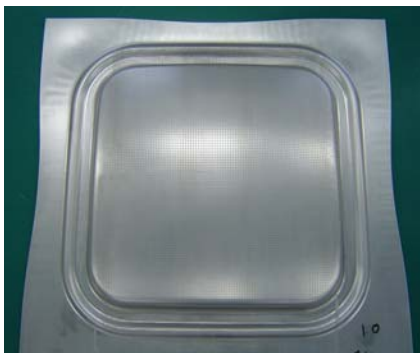


Fig. 6 Test specimen to measure work-hardening for various forming conditions

Table 2 Test conditions (Forming depth and BHF) for dent resistance

Forming condition	(a)	(b)	(c)	(d)
Forming depth(mm)	20	40	40	40
BHF(ton)	40	40	80	120

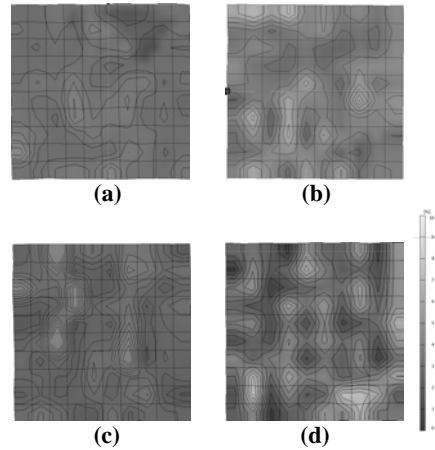


Fig. 7 Measured mises strains at the center region (Forming condition :depth- BHF), (a) 20mm-40ton, (b) 40mm-40ton, (c) 40mm-80ton, (d) 40mm-120ton

Table 3 Measured Von Mises strains for various forming condition at the center region (Forming condition :depth- BHF)

Forming condition	Strain (%)
20-40	1.812
40-40	2.164
40-80	4.628
40-120	6.840

심부 30x30mm 에서의 평균 Von Mises strain 을 측정하였다. Table 3 에 보면, 블랭크 홀딩력이 동일하게 40ton 인 시험편(20-40, 40-40)에서 성형 깊이에 관계없이 변형율은 2% 전후로 매우 낮게 나타났다. 이는 낮은 블랭크 홀딩력으로 인해 소재의 유입이 과다하여 변형이 적게 발생된 것으로 판단된다.

조건별 시험편의 소부 경화를 위해 오븐에 넣고 앞의 인장 시험편과 동일한 조건인 150℃, 170℃, 190℃에서 20 분간 소부 시킨 후 외관 강성 및 내텐트성을 측정하였다. 외관 강성은 하중 20kgf 를 부여했을 때의 실시간 변위로 측정하며 그 결과를 Table 4 에 표시하였다.

Table 4 에서 보인 바와 같이 각 조건별로 소부 온도 변화에 따라서는 외관강성은 거의 차이가 나지 않는다. 그러나, 성형 깊이가 20mm 인 시험

**Table 4 Results of stiffness(displacement) with forming and baking temperature change(Forming condition :depth- BHF)**

Forming Condition	Temperature (°C)	Displacement (mm)
20-40	150	6.45
	170	6.39
	190	6.56
40-40	150	7.35
	170	7.53
	190	7.69
40-80	150	7.11
	170	7.46
	190	7.72
40-120	150	7.61
	170	7.44
	190	7.78

**Table 5 Dent resistance results(residual deformation) with forming and baking temperature change (Forming condition :depth- BHF)**

Forming condition	Temperature (°C)	Residual deformation (mm)
20-40	150	0.58
	170	0.54
	190	0.23
40-40	150	0.59
	170	0.59
	190	0.24
40-80	150	0.47
	170	0.42
	190	0.20
40-120	150	0.35
	170	0.31
	190	0.16

편과, 40mm 인 시험편에서는 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 정확한 원인 분석을 위해서 중앙부의 두께를 측정하였으며 성형깊이가 20mm, 40mm 인 경우 각각 9.8mm, 9.6~9.55mm 로 측정되었다. 결국 외관강성은 부품의 두께에 가장 민감

한 것으로 판단할 수 있다.

동일한 시험편을 이용하여, 내넨트성 평가를 실시하였다. 내넨트 평가는 중심부에서 25kgf의 하중을 부여했을 때 발생하는 잔류 소성변형량으로 측정하였다. Table 5에 보인 바와 같이 잔류 소성변형량은 성형 조건에 따른 변형량 감소보다는 소부 온도 증가에 따른 변형량 감소가 더 큰 것을 알 수 있다. 즉, 소부 온도가 증가됨에 따라 각각의 성형 조건별로 소성 변형량 감소가 최대 43.8%~59.3%의 향상되었다.

Fig. 7에서 측정된 변형률( $p$ )과 각각의 소부 온도( $T$ )를 기반으로 식 (2)를 적용하여 구한 예상 항복강도를 Table 6에 나타내었다. 일반적으로 내넨트성( $\lambda$ )은 식 (3)과 같이 항복강도에 비례하고 두께( $t$ )의 제곱에 비례하는 경향이 있다[2,4,10]. 부품의 형상 함수인  $\rho(x)$ 에 의해서도 영향을 받으나 본 연구에서는 동일한 형상에 대해 평가하므로 고려하지 않았다. 식(3)을 적용한 내넨트성 예측값을 Table 6에 같이 나타내었다.

$$\lambda(\rho, \sigma_Y, t) = \rho(x) \cdot \sigma_Y \cdot t^2 \quad (3)$$

Table 6에 표시한 측정된 잔류 소성변형량의 역수(Dent stiffness)와 식 (3)을 통해 예측된 내넨트성 값의 상관관계를 살펴보기 위하여 그 경향을 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서와 같이 95%의 정확도를 가지는 단순 비례 관계에 있으므로 본 연구를 통해 예측된 식 (2)의 결과가 타당한 것을 알 수 있다.

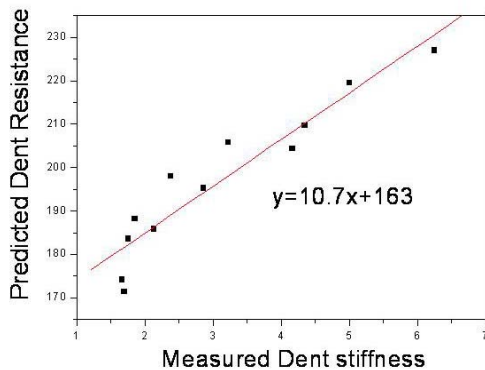
이러한 결과와 내넨트 결과를 비교해 볼 때, 동일한 변형율인 경우 소부 온도가 증가할수록 내넨트성은 좋아지며 190°C에서 그 성능이 2 배 이상 증대되는 것을 볼 수 있었다. 그러므로, 6000 계열 알루미늄 외판에서 내넨트성이 크게 부족한 경우 190°C 이상의 소부 온도를 적용하면 내넨트 성능을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

그리고, 동일한 온도에서 변형율이 커질수록 내넨트성은 좋아지는 것으로 측정되었다. 이것은 변형율이 커질수록 발생된 전위가 석출물의 생성처로 작용되어 석출물이 미세하게 분산 석출되었기 때문인 것으로 보인다[11].

향후 알루미늄 도어 양산시 내넨트성의 향상을 위해서는 소부 온도 및 초기 변형율을 고려하여 목표한 넨트 성능을 확보할 수 있도록 조건을 최적화 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

**Table 6 Predicted yield stress and dent resistance**

Forming condition	YP after prestrain (MPa)	Predicted BH (MPa)	Predicted YP(pre-strain+BH)	Thick-ness (mm)
20-40-150	154	27.4	181.4	0.980
20-40-170	154	42.0	196.0	0.980
20-40-190	154	64.3	218.3	0.980
40-40-150	159	25.7	184.7	0.960
40-40-170	159	40.2	199.2	0.960
40-40-190	159	62.8	221.8	0.960
40-80-150	186	16.5	202.5	0.958
40-80-170	186	29.7	215.7	0.958
40-80-190	186	53.2	239.2	0.958
40-120-150	203	11.1	214.1	0.955
40-120-170	203	22.6	225.6	0.955
40-120-190	203	45.9	248.9	0.955



**Fig. 8 Correlation between measured dent stiffness and predicted dent resistance(Eq.(3))**

#### 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 부품의 성형 조건 및 소부 조건에 대한 다양한 실험을 통해 외관 강성 및 내텐트성에 미치는 영향도를 분석하여 향후 알루미늄 차체 외관 부품의 적용시 인자와 성능과의 관계를 확인하여 아래 (1) 및 (2)와 같이 사전변형을 및 온도 조건을 도출하였다.

(1) 사전변형을 통한 가공경화량이 많을수록 내텐트성은 향상되며, 이는 항복응력의 증가에 기인하였다. 사전변형을 10%까지 항복응력은 꾸준히 증가하였으며, BH 량은 1~3% 사전변형을 주었을 때가 가장 높았다.

(2) 소부 온도가 높을수록 내텐트성은 향상되었다. 170℃ 이하에서의 단위 온도당 증가량보다 170℃ 이상에서의 단위 온도당 증가량이 큼을 알 수 있다.

(3) 6000 계열의 알루미늄 관재에 적용할 수 있는 소부경화량 예측 식을 사전변형을 및 소부 온도에 대한 함수로 정의하고 본 연구 결과를 바탕으로 타당성을 검증하였다.

(4) 두께 변형이 크지 않는 외관 부품의 경우, 내텐트성을 증가시키기 위해서는 6000 계열의 알루미늄 관재에서는 가공 경화보다는 소부 조건 최적화를 통한 항복강도 상승이 효과적이었으며, 최대 59.3%의 향상이 가능하였다.

#### 참고 문헌

- [1] N. Asnafi, 1995, On strength, stiffness and dent resistance of car body panels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 49, pp. 13~31.
- [2] G. Ekstrand, N. Asnafi, 1998, On testing of the stiffness and the dent resistance of autobody panels, Mater. Design, Vol. 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, Mater. Design, Vol. 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, Mater. Design, Vol. 27, pp. 64~68.
- [5] I. S. Kim, T. J. Kim, 2007, Development of Door outer panel using HSS for improving dent resistance, Trans. of Mater. Process, Vol. 16, No. 4, p. 254.
- [6] T. Kvackaj, I. Mamuzic, 2006, Development of bake hardening effect by plastic deformation and annealing conditions, METALURGIJA, Vol. 45, pp. 51~55.
- [7] L. Hong, Zhao Gang, Liu Chun-ming, Zuo Liang, 2007, Effects of different tempers on precipitation hardening of 6000 series aluminium alloys, Trans. of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 17, pp. 122~127.
- [8] K. Dehghani, A. Nekahi, M. A. M. Mirzaie, 2010, Optimizing the bake hardening behavior of Al7075

using response surface methodology, Mater. Design, Vol. 31, pp. 1768~1775.

- [9] C. H. Shen, 2011, Pre-treatment to improve the bake-hardening response in the naturally aged Al-Mg-Si alloy, J. Mater. Sci. Technol. , Vol. 27, No. 3, pp. 205~212.

[10] Dicellello JA et al.1974, Design criteria for the dent resistance of autobody panels, SAE, pp. 389~397.

- [11] Z. qiang, Y. Yang, 2010, Precipitation process along dislocations in Al-Cu-Mg alloy during artificial aging, Mater. Sci. and Eng.: A, Vol. 528, Issue 2, pp. 706~714.