

알루미늄 판재성형기술의 현황과 과제

Recent and Future Development of Stamping Technology for Aluminum Car Body Sheets

김 영 석
Young Suk Kim



- 김 영 석
- 1957년 9월생
- 최적 소성가공 기술개발 및 컴퓨터용용 판재의 스탬핑 성형해석
- 산업기술과학연구소 용접연구센터

표1 브라이언의 CAFE 법안

연 도	강 화 내 용
~1994	27.5 mile/gallon
1995~2000	1988년 실적치의 20% 연비개선
2001~	1988년 실적치의 40% 연비개선

1. 머릿말

자동차에 대한 요구성능은 점차 높아가고 주행성능 및 내구성의 향상, 소음의 저감, 배기가스의 대책과 충돌 안전대책 등의 수요요구에 부응하기 위하여 각종 기능이 추가되고 있다. 이들은 자동차의 중량을 증가시키는 요인이 되어 연비를 낮추는 원인이 된다. 또한 지구환경 보존의 측면에서 자동차 배기가스에 포함된 CO₂ 가스 증가에 따른 오존층의 파괴에 의한 지구온화 현상이 심각해져 최근 미국에서는 CAFE 규제 (Corporate average fuel economy : 기업별 평균연비 규제 - 1975년 12월 발효) 법안의 강화가 제안되어 자동차 중량의 감소, 연비의 향상이 자동차 업체에 요구되고 있다. 표1은 미국상원의원인 브라이언이 제안한 CAFE 규제 강화법안을 나타낸다. 이 법안에 따르면 2001년 이후부터는 현재 연비의 40% 개선을 요구하고 있다.

자동차 중량 면에서 보면 현재 소형차를 기준으로 평균 중량인 1,300kg에서 약 780kg 정도로 감소되어야 하는 것을 의미한다. 이러한 배경하에서 자동차의 경량화는 피할 수 없는 문제로 대두되고 있다. 자동차의 연비향상을 위한 대책이 여러 기술면에서 검토되고 있지만 그 중에서 차체의 경량화가 중요한 역할을 하게 될 전망이다.

이 글에서는 경량화 소재로서 최근 주목을 받고 있는 알루미늄 판재를 대상으로 알루미늄 판재의 기본물성과 스탬핑 성형특성에 대하여 검토하고 대량, 고속 생산체계의 확립을 위해 스탬핑 성형기술면에서 해결하여야 할 과제에 대하여 논하고자 한다.

2. 연비향상 대책

통상 연비를 향상시키기 위해서는 표2, 3과 같이 엔진효율의 향상 및 주행저항 저감에 따른 연비기술과 자동차를 구성하고 있는

표 2 연비 향상기술

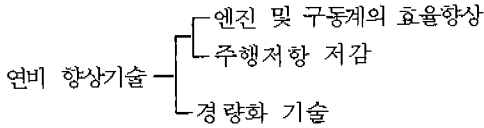


표 3 경량화 기술

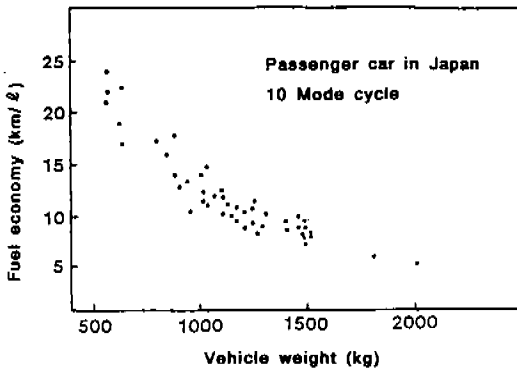
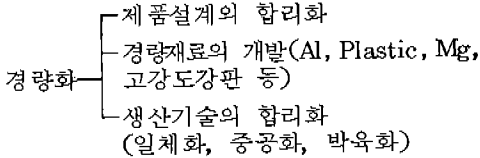


그림 1 차량중량과 연비관계

재료변경 등에 의한 차체의 경량화기술에 관한 두가지의 접근방법이 있다. 자동차의 중량과 연비 간에는 그림 1에 나타난 것과 같은 관계가 있어 통상 차체 중량이 1% 가벼워지면 연비도 1%정도 개선된다고 볼 수 있다.¹⁾ 한편 엔진의 효율향상과 주행저항 감소를 위한 연비기술의 개선은 현재 거의 한계에 달한 상황이어서 차체 중량의 경량화에 의한 연비 개선이 크게 기대되고 있다.

3. 자동차의 알루미늄화 추세

차체의 경량화 방법으로서 차체의 소형화 (size down), 구동형식의 변경 등에 위한 기획, 구성 등의 변경, 사용 부품수의 삭감 및 일체화, 박육화 등에 의한 설계, 생산기술의 변경 등이 고려되지만 가장 효과가 큰 것은

소재 자체의 변경 즉, 종래의 일반 냉연강판으로부터 고강도강판과 표면처리강판의 채용으로 인한 박육화와 알루미늄(비중이 철의 1/3 정도)이나 프라스틱(비중이 철의 약 1/4)과 같은 경량소재의 활용이다. 한편 고강도강판에 대해서는 최근에 거의 확보상태에 있어 CAFE 규제 강화에 대한 대응책으로 알루미늄과 프라스틱 사용량 증가에 의한 차량의 경량화가 주요 관심이 되고 있다. 차체의 강도 및 강성 그리고 생산성과 제조단가면에서 본격적인 양산체제를 가정한 경우에 요구되는 제특성을 냉연강판과 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다.²⁾ 여기서 알 수 있듯이 경량화 효과를 최대한 발휘하면서 다른 요구 특성이 균형을 이루고 있는 경량소재는 알루미늄이다. 한편 프라스틱에 의한 경량화 효과는 10~15%인데 반해 알루미늄에 의한 경량화 효과는 45~50%에 달하고 있고 제사용(recycling)면에서도 알루미늄 쪽이 유리하여 금후에는 알루미늄을 중심으로 경량화가 추진될 것으로 생각된다. 알루미늄과 프라스틱 이외에 경량화 소재로 주목받는 것은 티타늄(Ti)과 마그네슘(Mg)이 있다.

표 4는 일본 자동차업체의 소재 사용비율을 나타낸다. 1989년을 기준으로 철은 73%, 수지는 8%, 알루미늄은 5% 정도이지만 2000년에 철이 20%, 수지가 26%, 알루미늄이 35% 그리고 기타가 14% 정도의 사용비율을 점할 것으로 예상된다.

표 4 보통 소형 승용차에 있어서 원재료 구성비의 추이(wt%)

소 재	1977년	1983년	1989년	200년
철 강	80.9	76.0	73.3	19.7
알루미늄	2.6	3.5	4.9	35.0
비철금속	2.1	2.1	2.5	5.3
수 지	3.5	5.7	7.5	26.0
기 타	10.9	12.7	11.4	14.0
차량총중량	-	-	1,300kg	780kg

* 2000년은 1989년의 차량 총 중량의 40% 경량화를 실현한 경우의 가정임.

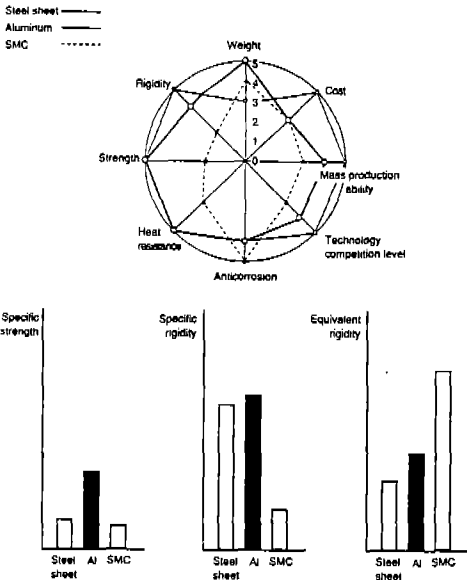


그림 2 자동차 몸체 판넬에 대한 요구특성의 비교

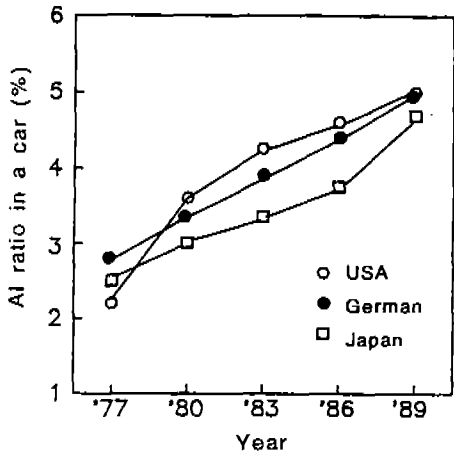


그림 3 각국에 있어서 연도별 자동차의 알루미늄화 추세

이러한 배경하에서 최근 혼다의 NSX와 Porsche 928 모델 등은 차체 전체를 알루미늄 합금으로 제조하여 차량 중량의 대폭적인 경량화를 꾀하였으나 아직까지 철강과 비교하여 알루미늄의 소재가격이 3~4 배 정도 높은 편이어서 주로 스포츠 카와 같은 고급차를 중심으로 알루미늄에 의한 경량화가 진행되고 있는 상황이다. 향후 알루미늄 채용부위의 확대에 따른 경량화율의 증가는 제조단가의 저가에 달려있다고 볼 수 있다. NSX의 경우는

몸체에 약 200 kg, 사시에 약 100 kg, 엔진에 약 100 kg 정도의 알루미늄 합금이 사용되고 있어 전체적으로 약 420 kg의 알루미늄 합금이 사용되어 철강과 비교하여 31.3% 정도의 경량화가 이루어지고 있고, Porsche 928 모델의 경우는 몸체에 약 62 kg의 알루미늄이 사용되어 약 45%의 중량감소와 전체적으로는 약 19%의 경량화 효과를 피하고 있다. 그림 3은 일본, 미국, 독일의 3대 자동차 생산국에 있어서 자동차의 알루미늄화율의 추이를 나타낸다.¹⁾ 각국에서 5년간에 1%씩 증가하여 1989년 현재 알루미늄 소재는 약 5%의 점유율을 나타내고 있다.

지금까지 알루미늄 합금은 알루미늄의 경량특성과 물리적 특성을 최대한 발휘할 수 있는 부품에 주로 사용되고 있고 적용분야를 분류하면 크게 다음의 네 부분으로 분류할 수 있다.

(1) 경량특성을 활용한 부품

- Brake master cylinder, Engine mount, Fuel tank, A/C bracket, Bumper Hood in/out, Sun roof, Door in/out, Trunk lid in/ ut, Fender

(2) 열전도성이 뛰어난 점을 활용한 부품

- Piston, Cylinder head, Raditor, Heat exchanger

(3) 온해온도가 낮아 취금이 용이한 점을 활용한 부품

- Transmission case, Front cover, Cylinder block

(4) 미관의 미려함을 활용한 부품

- Al wheel

알루미늄의 비강성 (E/ρ)은 철과 거의 동등하므로 강성이 요구되는 구조체에의 적용은 경량화 효과가 거의 없으나 비강도 (σ_{Ts}/ρ)는 2 배 이상이므로 강도를 필요로 하는 구조 부분에는 대폭적인 경량화가 가능하다. 한편 자동차의 내·외판재로 사용하는 경우는 비중차이에 의한 효과가 커서 강판보다 약 50% 이상의 경량화가 가능하며 그림 4에서와 같이 본넷(후드), 휠더, 트렁크 리드, 도어, 루프 등 중량점유율이 큰 판넬에 주로 적용되고 있고 점차 그 적용범위가 확대될 전망이다.²⁾

표 6 알루미늄 합금의 기계적 성질

Alloys	Temper	Tensile Properties			YS After Baking Kgf/mm ²		Formability					
		TS Kgf/mm ²	YS Kgf/mm ²	El. %	170 °C × 30min	200 °C × 30min	Erichsen Value mm	\bar{n}	\bar{r}	LDR	Minimum Bend Radii (180°)	
					—	—						
Al Cu	2036	T 4	34.7	19.9	24	16.2 ¹⁾	26.0 ²⁾	9.5	0.23	0.75	2.08	1t
	AU2G	T 4	28.2	18.3	27	—	—	9.4	0.25	0.59	—	—
	2038	T 4	33.1	17.6	25	18	30	—	0.26	0.75	—	—
	2008	T 4	25.3	12.7	28	—	24.6 ²⁾	—	—	—	—	—
Al Mg	KS5030*	T 4	29	14	30	15	15	9.8	0.30	0.70	2.11	0.5t
	5182	0	29	14	28	14	14	9.6	0.30	0.79	2.11	0.5t
	5052	0	21	10	23	10	10	9.6	0.26	0.66	2.08	0 t
Al Mg Si	6009	T 4	26.7	14.0	27	14.2	25.6	9.6	0.23	0.70	2.06	0.5 ~ 1t
	6010	T 4	33.0	21.3	26	22.6	35.1	9.4	0.22	0.70	2.08	1t
	6111	T 4	30	16	26~29	—	—	8.4	—	—	—	—
	AC-120	T 4	35.5	14.3	30	—	—	—	0.24	—	—	—
S P C E			32.0	18.0	42	18	18	11.1	0.23	1.39	—	0 t

금의 두 종류로 대별된다. 6,000 계는 주로 200 °C 이상에서 도장 후 소부경화성 (paint bake hardening)에 의한 강도 및 강성이 향상되고 스트레처 스트레인 현상이 없는 특징으로 주로 외판 등의 강도를 증시킨 용도에 사용되고 있으며 대표적인 합금으로 6009와 AC120 합금이 있다. 한편 5,000 계는 스트레처 스트레인 현상을 나타내고 소부경화성은 없지만 성형성과 내식성이 우수하여 주로 성형이 깊은 내판에 사용된다. 5,000 계는 마그네슘(Mg)의 첨가에 의해 적층 결함에너지를 작게 하여 가공경화지수 n 을 크게 함으로써 균일연신량을 크게 개선한 합금이다.

표 5.6에서 Al-Cu(-Mg)계는 다른 합금계에 비하여 내식성이 나빠 일본에서는 사용하고 있지 않으나 최근 AICOA사가 구리(Cu)량을 줄인 2008 합금을 개발하여 6009 합금보다 성형성이 우수하고 또한 동등한 내식성을 갖도록하여 미국을 중심으로 사용하고 있다. 한편 일본의 경우는 Al-Mg-Si계 합금은 Al-Mg 계 합금보다 소부경화가 적다는 이유로 별로 사용되고 있지 않고 현재는 주로 Al-4.5Mg 계 합금에 미량의 Cu를 첨가하여 스탬핑 공정에서 얻어진 변형경화가 도장공정에서 연화하지 않도록한 합금(Al-Mg-Cu 계 합금)이 널리 사용되고 있다.

그림 6에 혼다의 NSX의 판넬에 채용한 알루미늄합금의 종류를 나타내었다.⁶⁾

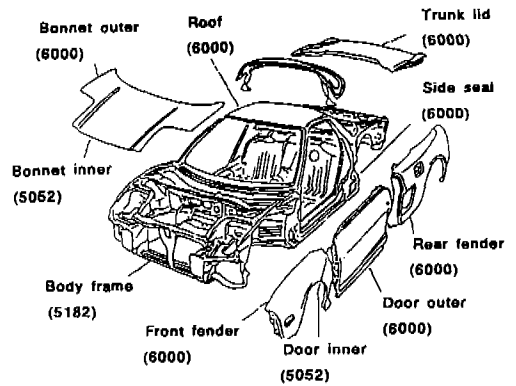


그림 6 혼다 NSX의 판넬에 사용한 알루미늄 합금 종류

5. 알루미늄 판재의 인장 및 성형특성

5.1 인장특성

자동차 몸체 판넬의 성형은 장출(stretching), 드로잉(drawing), 굽힘(bending), 장출 후렌징(stretch flanging) 가공 등의 복합성형에 의해 소정의 형상으로 스탬핑 가공된다. 그림 7은 알루미늄 합금과 냉연강판의 인장응력-연식을 곡선을 나타낸다.⁴⁾ 알루미늄 합금은 표 6에서 알 수 있듯이 냉연강판과 비교하여 균일 연식율은 거의 동등하지만 <111> 방향으로의 집합조직의 발달이 적어 덩 드로잉성의 척도인 이방성계수 R 값이 낮기 때문에 최대 응력 이후의 국부 연식율이 작은 특징이 있다.

이런 특징은 판넬의 굽힘가공시에 외 섬유층에 가공크랙을 야기하여 굽힘가공에 대한 제약을 야기한다.

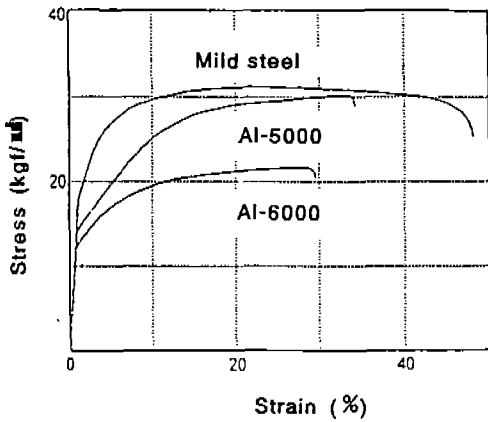


그림 7 단축 인장응력-연신을 곡선

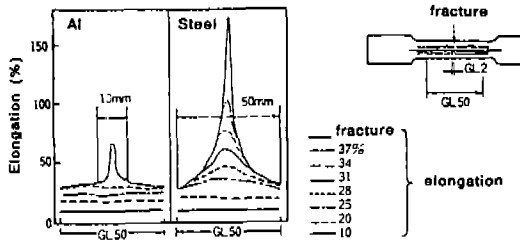


그림 8 게이지 길이 2mm에서의 변형을 분포

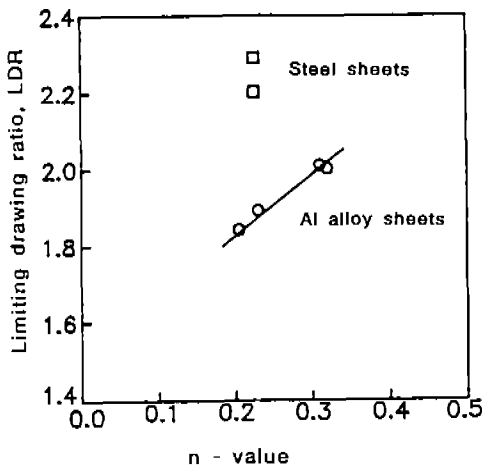


그림 9 가공경화지수와 한계드로잉성 관계

그림 8은 게이지 길이가 2mm에서의 변형을 분포를 나타낸다. 알루미늄 합금은 변형의 전과성이 나빠 변형집중이 쉬워 스탬핑 성형성이 열세에 있음을 예측할 수 있다. 알루미늄 합금은 표 6에 나타난 것과 같이 강판에 비하여 전 연신을 El , 굽힘가공성의 척도인 국부 연신을 El_2 및 딥 드로잉 가공성의 척도인 이방성계수 R 값 등의 성형성 지표가 나빠기 때문에 일반적으로 형상이 복잡한 딥 드로잉 부품에 대해서는 냉연강판과 비교하여 스탬핑 성형성이 나빠다. 그러나 장출성형성을 나타내는 척도인 가공경화지수 n 은 냉연강판과 거의 동등 이상이어서 얇은 드로잉이나 장출성형을 주로 받는 제품의 가공에 적합하다는 것을 알 수 있다.

따라서 알루미늄 판재의 경우는 그림 9에 나타난 바와 같이 냉연강판에서와 같이 드로잉 성형성과 R 값과의 밀접한 상관성을 보이지 않고, 한정된 알루미늄 합금계에 대해서 전 연신을 El 과 가공경화수지 n 값이 드로잉 성형성과 상관관계를 갖는 특징이 있다.³⁾ 그러므로 R 값은 알루미늄 판재의 경우 스탬핑 성형성을 평가하는 척도로 간주하기에는 어렵다고 볼 수 있다.

5.2 프레스 성형특성 및 최적 성형기술

알루미늄 판재는 국부 연신율이 작으므로

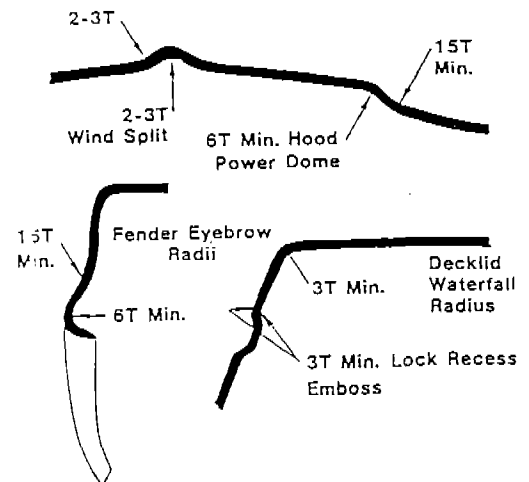


그림 10 외관성형시의 한계곡률

다이 및 드로오 비이드부의 곡률 반경과 헤밍 (hemming) 공정에서 굽힘곡률에 제한을 받고 이 경우 최소 곡률은 넓은 영역에 변형이 분포하도록 충분히 크게 하는 것이 필요하다.⁷⁾ 통상 곡률은 냉연강판의 경우보다 2~3배 정도 크게 취한다. 그림 10은 알루미늄 판재의 외판 스탬핑 성형시에 한계곡률을 나타내고, 그림 11은 내판의 후렌지, 헤밍부의 추천 곡률을 나타낸다.⁸⁾ 알루미늄 판재는 180° 굽힘 가공시에 외 섬유층에 크랙이 야기되므로 헤밍부에는 로프 헤밍 (rope hemming)을 택하여 섬유층에 심한 국부변형을 억제하도록 한다. 그림 12는 본넷 외판 성형을 위한 냉연강판과 알루미늄판재에 대한 드로오 비드, 드로

잉 각 및 다이곡률 등에 대한 금형설계의 비교를 나타낸다.⁹⁾

그림 13은 원통 덩드로잉 성형실험에서 다이의 곡률반경과 한계 드로잉성과의 관계를 나타낸다.⁹⁾ 알루미늄 판재의 파단한계를 향상시키기 위해서는 좌굴의 발생을 고려하여 다이 곡률반경을 가능한 한 크게 하는 것이 유리하다.

그림 14는 대표적인 알루미늄 합금의 성형 한계선(FLC : forming limit curve)을 나타낸다.¹⁰⁾ 알루미늄 합금은 냉연강판과 비교하여 드로잉 영역과 장출 영역에서 모두 성형한계선이 낮아 성형성이 열세에 있음을 알 수 있다.

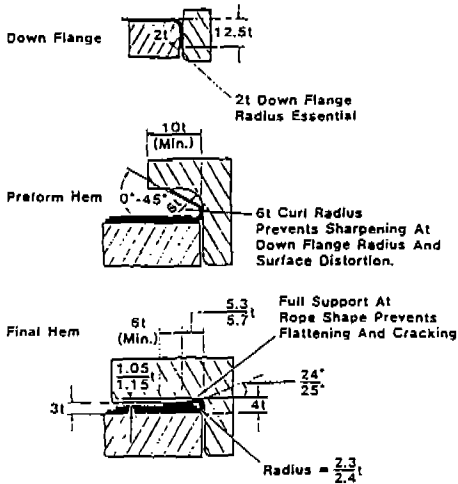


그림 11 후렌지, 로프 헤밍시의 한계곡률

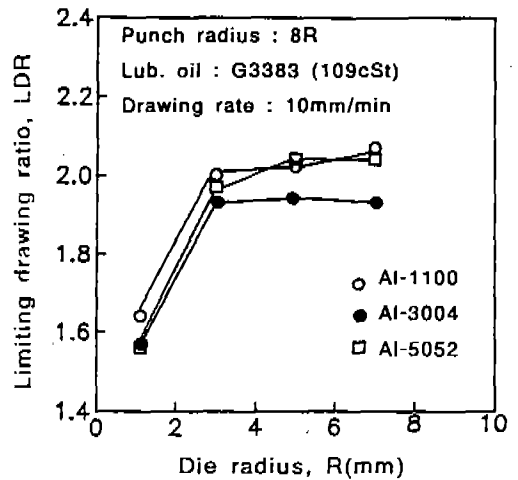


그림 13 다이 곡률반경과 한계드로잉성 관계

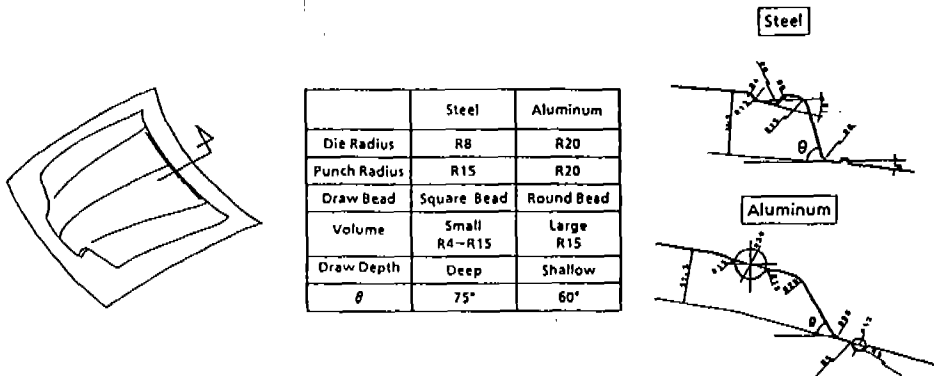


그림 12 알루미늄판재와 냉연강판의 금형설계 비교

그러나 알루미늄 합금의 FLC는 냉연강판과 비교하여 절대값은 낮지만 변형경로에 의존하지 않고 FLC 곡선의 형상이 비슷하기 때문에 냉연강판에서 사용되는 스탬핑 성형성 향상기술을 알루미늄 합금에도 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 그림 15는 길이 200mm, 폭

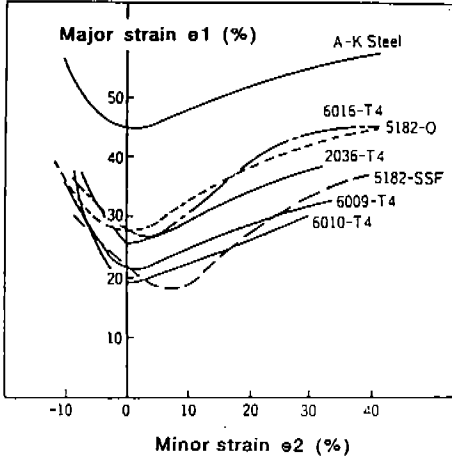


그림 14 대표적인 알루미늄 합금의 성형 한계도

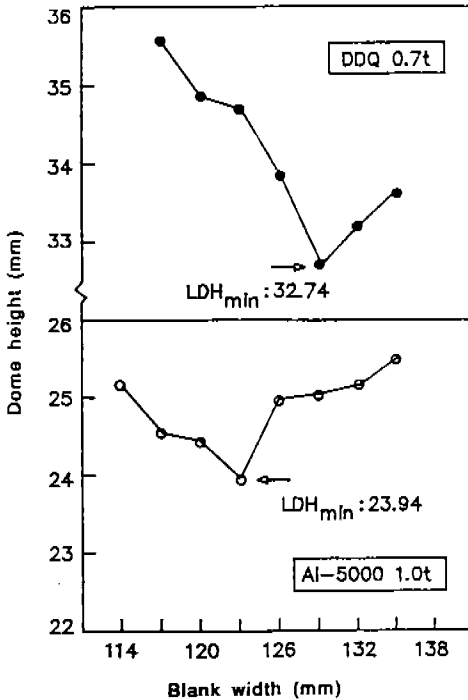


그림 15 Al-5000 판재와 냉연강판의 시편폭에 따른 한계돔 높이 비교

Wmm인 시편을 이용하여 시편의 폭을 114mm부터 3mm 간격으로 변화시켜 FORD 규격¹²⁾에 따른 펀치장출시험을 행하여 시편의 폭 변화에 따른 파단시의 한계돔 높이를 나타낸다.⁷⁾ 냉연강판의 경우와 비교하면 알루미늄 판재의 돔높이는 전반적으로 냉연강판의 70% 수준이고, 냉연강판에서는 최소 한계돔높이를 나타내는 시편의 폭이 129mm인데 반해 알루미늄 판재의 경우는 낮은 이방성계수로 인해 폭이 좁은 123mm에서 최소를 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 현재 알루미늄화가 상당히 진행되어 있는 본넷, 도어 외판, 트렁크 리드 등은 드로잉이 쉽고 곡률이 커서 스탬핑 성형후에 형상동결에 대한 문제가 야기된다. 알루미늄 합금은 강판과 비교하여 탄성계수가 1/3($E_{Al} = 7,000 \text{ kg/mm}^2$) 정도로 낮기 때문에 그림 16에 표시한 것과 같이 스프링 백 및 좌굴이 일어나기 쉽다.¹⁾ 이런 스프링 백을 감소시키기 위해서는 재료의 항복강도 σ_{yp} 를 낮추거나 금형 펀치에 평탄부위를 없애고 공정에서 판재에 1.5~2.0% 정도의 균일한 스트레칭을 가하도록 펀치부에 완만한 곡률(over crown)을 부여하거나 재료에 예비변형(pre-strain)을 충분히 주는 등의 성형기술 등이 요구된다. 상기와 같은 알루미늄 합금의 스탬핑 성형

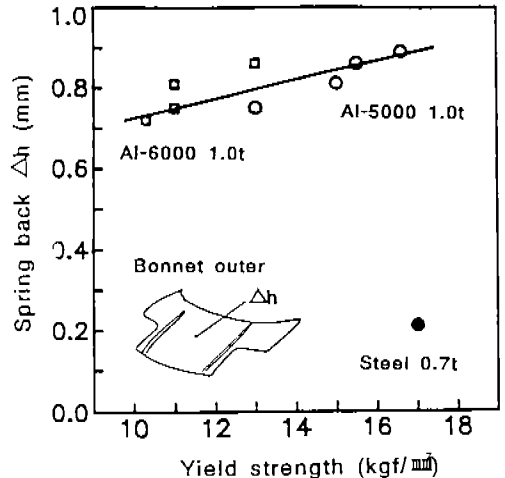


그림 16 본넷 외판 성형시 스프링 백량의 비교

성은 냉연강판의 60~70% 정도로 Drawing Quality (DQ) 수준이며 스템핑 성형성 및 형성동결성을 향상시키기 위한 연구는 냉연강판 수준의 기계적 특성을 갖는 합금계의 개발과 알루미늄 스템핑에 적합한 공정 및 금형 설계와 스템핑 가공기술의 확립에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 재료측면에서는 주로 Al-Mg 계의 비 열처리형 합금쪽으로 진행되고 있고 현재 35% 정도 연신율을 갖는 합금이 개발되어 있다. 향후 현재 냉연강판 수준인 40

% 연신율을 목표로 연구에 박차를 가하고 있다. 또한 알루미늄 합금의 스템핑 성형성 및 형성동결성을 확보하고 향상시키기 위한 방법으로 온간 스템핑 성형, 액압성형 및 블랭크 호울더 제어기술과 같은 스템핑 성형기술면과 스템핑 금형의 곡률, 가공 윤활유 등과 같은 스템핑 가공조건면 그리고 성형난이 부품의 분할성형 후 조립 등과 같은 공정설계면에서 검토가 병행하여 이루어지고 있다. 여기서 블랭크 호울더 제어성형기술은 판활성형 초기에 블랭크 호울더 압력을 낮게 설정하고 성형 말기에 높게하여 성형할 판넬의 전 영역에 걸쳐 대부분을 2축 인장상태로 하는 것에 의해 몸통좌굴을 제어, 소거하는 기술이다.

그림 17은 덤 드로잉 가공을 받는 도어 내판을 분할하여 평면부는 굽힘성형과 코너부는 얇은 드로잉 성형하여 두 부품을 접합가공한 예를 나타낸다.⁶⁾

그림 17에 알루미늄 판재의 스템핑 가공공정을 나타내었다. 냉연강판의 경우와 비교하여 공정상에서의 큰 차이는 알루미늄은 재료단가가 높기 때문에 재료관리 특히 스크랩의 회수는 확실하게 하여야 하고, 표면경도 및 비중이 낮기 때문에 스템핑가공 중 과소재의 블랭킹, 트리밍 공정 중에 증발하는 미세 분말의 부유에 의해 스템핑된 판넬에 외관 흠(pimple)을 야기하기 쉬운 생산설비의 관리 및 금형의 재질선택에 특히 주의가 요구되는 점이다.

끝으로 표 7에 트렁크 리드 판넬에 냉연강판을 대신하여 사용한 알루미늄 판재의 고강도화 결과 두께감소에 따른 가격과 무게에 비교를 나타내었다.⁹⁾ 1980년 모델에 대해 트렁크 리드 외판에 적용되던 0.99mm의 2036 합금이 0.76mm의 6010 합금으로 대체되고 내판은 0.78mm의 5182 합금에서 0.71mm의 6009 합금으로 바뀌었다. 이에 따라 알루미늄 판재는 냉연강판 보다 0.88 \$/kg 정도의 추가비용이 더 소요되는 것을 알 수 있다.

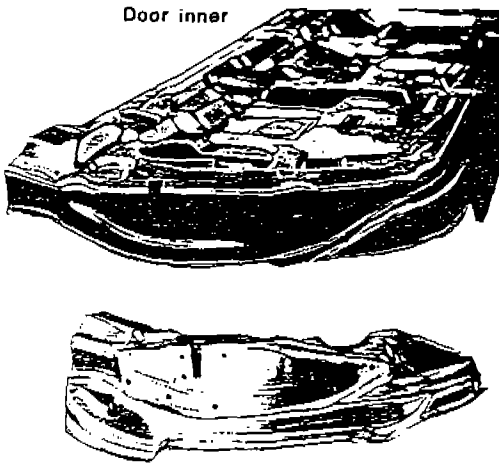


그림 17 분할성형된 도어내판

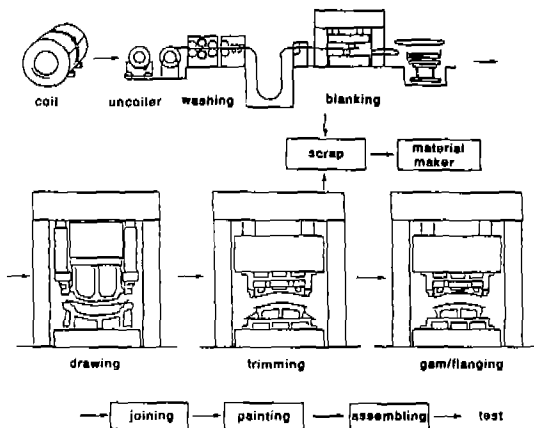


그림 18 알루미늄 판재의 스템핑 공정

표 7 트렁크 리드 제조시에 냉연강판과 알루미늄의 가격 비교

항 목	트렁크 리드의 재료(외판/내판)		
	0.76t 1010 steel 0.58t 1010 steel	0.99t 2036 -Al 0.78t 5182 -Al	0.76t 6010 -Al 0.71t 6009 -Al
Total Blank Wt. (kg)	24.20	10.82	9.34
Total Blank Cost (\$)	11.17	25.41	23.02
Trunk Lid Wt. (kg)	19.06	8.52	7.36
Wt. Saved (kg)	-	10.52	11.70
Offal Credit (\$)	0.45	2.18	1.88
Net Material Cost Penalty (\$)	-	12.53	10.42
Material \$/kg Saved	-	1.19	0.88

6. 맺 음 말

앞에서 논한 바와 같이 자동차 중량의 경량화를 위한 몸체의 알루미늄화 추세는 최근 지구환경 보호측면에서 필수적이라 볼 수 있으며, 현재 사용하고 있는 강판과 비교하여 제조단가를 낮추고 강판의 스탬핑 성형 및 용접·조립라인에서 동등하게 고속·대량 생산이 가능한 생산기술을 구축하는 것이 알루미늄에 의한 경량화를 꾀하기 위해 필요하다.¹⁹⁾ 알루미늄 판재의 스탬핑 성형성 확보를 위해서는 냉연강판 수준의 기계적 성질의 확보, 금형 및 가공변수에 대한 최적 가공조건 확립과 알루미늄에 적합한 신가공기술의 개발 등이 금후의 과제이다.

참 고 문 헌

1. 자동차 경량화 특집, “알루미늄 합금의 성형가공(I), 자동차 경량화와 프레스가공(II)”, 프레스기술, 29권 2호, pp. 17~79, 4호, pp.17~64, 1991.
2. 櫻井, “혼다 NSX 알루미늄 몸체의 가공기술”, 소형제, Vol.9, pp. 1~8, 1991.
3. 山崎, “알루미늄판의 프레스 성형성”, 제 137회 소성가공 심포지움, pp.27~36, 1991.
4. 末田, “자동차 몸체의 알루미늄 합금화의 현상과 과제”, 제 3회 경금속 테크노취럼, pp.16~24, 1991.

5. 淺野, “경량화용 알루미늄 전신재의 진전”, 문헌 3과 상동, pp.9~18, 1991.
6. 伊東, “알루미늄 차체의 구조와 프레스 성형기술”, 문헌 3과 상동, pp.19~26, 1991.
7. 김영석, “알루미늄-5,000계 판재의 인장 및 성형특성 평가”, 산업과학기술연구소, 자동차경량화 위원회 자료, pp.1~17, 1991.
8. Smith, N.M. and Grant, J.E., “Reducing the cost of aluminium body panels”, SAE Technical Paper No. 800931, 1980.
9. Ujihara, S. et al., “Minimizing the weight of autobody and aluminium sheets”, Proc. of Int. Conf. on Recent Advances in Science and Engineering of Light Metals, Tokyo, pp. 1163-1170, 1991.
10. Rodrigues, P.M.B., “A new 6xxx series aluminium car body sheet alloy”, Sheet Metal Industries, pp. 149-151, 1984.
11. Kinoshita, H., “Progress of aluminium application in automobile”, 문헌 9와 상동,
12. Ford, “Operating procedure for the LDH test”, Ltwt. Matl’s Div. Engrg., Ford, 1984.
13. 산업과학기술연구소, “자동차용 소재의 알루미늄화 기술가이드”, 산업과학기술연구소, 자동차 경량화 위원회 자료, pp.1~33, 1991.