

〈논 문〉 SAE NO. 97370114

차체용 알루미늄합금 판재의 스프링백 특성과 브래킷 성형성 향상에 관한 연구

A Study on the Springback Characteristics and Bracket Formabilities
Enhancement of Aluminum Alloy Sheets for Autobody Application

최 문 일*, 강 성 수**
M. I. Choi, S. S. Kang

ABSTRACT

This paper deals with development of brackets by using aluminum alloy sheets which is indispensable for weight reduction of autobody. The press formability of aluminum alloy sheet is estimated by means of tensile test, V bending test, sample manufacturing test and photograph of microstructure. The results show that the elongation, strength, work hardening exponent, plastic anisotropy coefficient of Al 6***series are better than those of Al 5***series, but for general press formability, Al 5***series are better than Al 6***series due to lower yield strength. Since most of mechanical properties of aluminum sheet are generally inferior to those of cold-rolled steel sheet, shape fixability and press formability of aluminum sheet are very poor. For making components of autobody by use of die for steel sheet application, it is essential that die should be modified for least bending and stretching. With the modified die for aluminum, it could be possible to make brackets, the component of autobody. Microstructure of Al 5***series has fine grain and small the 2nd phase and that of Al 6***series has relatively coarse grain. Therefore, it seems that fine grain and small the 2nd phase of Al 5***series is one of the factor of lower yield strength, resistance to stamping work, formation of Lüder's line.

주요기술용어 : Aluminum Alloy Sheet(알루미늄합금 판재), Weight Reduction of Autobody(차체 경량화), Mechanical Property of Aluminum Sheet(알루미늄 판재의 기계적 성질), Press Formability(프레스 가공성), Shape Fixability(형상동결성)

*정회원, 창원전문대학 자동차과

**부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

1. 서 론

최근 환경문제 및 에너지소비절감을 위한 자동차 연비규제의 필요성 등으로 인하여 자동차 경량화가 절실히 요구되고 있다. 즉, 자동차 배기가스증가에 따른 환경오염문제 해결을 위하여 자동차의 연비향상과 전기자동차와 같은 무공해 자동차의 개발이 요구되고 있다.^{1), 2)}

일반적으로 연비를 향상시키기 위한 방법으로 엔진효율 향상 및 주행저항 감소의 방법과 차체의 재료변경에 의한 경량화 방법이 있지만 전자의 경우 거의 한계에 달한 상황이어서³⁾ 차체중량의 경량화에 의한 연비개선을 위하여 강판대신 Al합금판을 자동차 외관에 적용하고 나아가 차체 전부를 Al합금판으로 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{4), 5)}

알루미늄의 비강성(EI/ρ)은 강과 거의 대등하여 강성이 요구되는 구조체에 적용시 경량화 효과가 크지 않으나 비강도(TS/ρ)는 2배 이상이므로 강도를 필요로 하는 구조부분에는 비중차이에 의한 효과가 커서 강판보다 약 50% 이상의 경량화가 가능하여 중량 점유율이 큰 차체 판넬류에 적용시 경량화 효과가 크고 재활용(Recycling)도 가능하여 점차 브래킷(Bracket) 등에도 확대적용될 전망이다. 그러나 현재까지 Al합금의 적용은 높은 가격과 기술적인 문제로 후드(Hood), 트렁크(Trunk), 휠(Wheel) 등에 부분적으로 적용되고 있는 실정이다.⁶⁾ 알루미늄은 강에 비해 형상동결성이 낮아 원하는 형상대로 성형이 잘 되지 않고 특히 점용접성, 도장성 등이 불리하기 때문에 차체의 알루미늄화를 달성하기 위해서는 기존의 알루미늄보다는 강도와 성형성이 우수한 재료의 개발과 프레스성형, 접합, 표면처리 등의 가공주변기술이 확립되어야 할 것으로 판단된다. 하지만 현재까지의 알루미늄합금 판재 성형성에 관한 연구는 이론적인 해석^{7)~9)}에 의존하는 경우가 많았기에 실제로 부품을 성형, 시제품 제작을 통한 알루미늄합금 판재의 프레스성형에 관한 연구의 필요성은 크다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄의 기계적 성질을 기존의 강판과 비교 평가하기 위하여 알루미

늄합금중 상대적으로 용접성과 성형성이 높은 Al-Mg계(5***series)의 비열처리형 Al합금과 비교적 강도가 높은 Al-Mg-Si계(6***series)의 열처리형 Al합금 판재를 사용, 브래킷을 시험제작하고 기계적특성을 고찰해 봄으로써 Al합금 판재의 프레스 성형성 향상방안과 자동차 차체재료로서의 적용가능성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

박판 금속을 소재로 하여 이어붙임없이 소성변형에 의하여 필요한 형상으로 성형하는 공정을 박판성형, 특히 딥드로잉(Dep Drwaing)이라 한다. 이 가공법은 단조, 압출, 압연 등의 체적성형법과 함께 대표적인 금속의 소성가공법이며 자동차의 차체가 대표적인 성형품이다. 체적성형은 재료가 받는 변위는 크지 않지만 성형과정에서 부피에 대한 표면적의 비가 대체로 크게 증가한다. 하지만 박판성형은 큰 형상변화를 수반하고 성형과정에서 판의 두께와 표면적의 변화는 크지 않으며 변형이 국부적으로 일어나는 것이 특징이다. 따라서 체적성형에서는 탄성회복(Spring-back)이 중요하게 취급되고 있다.

프레스에 의한 실제 박판성형공정은 딥드로잉, 인장, 굽힘의 3가지 성형요소가 동시에 존재하며 각 성형부위에 따라 정도가 달라서 해석이 매우 복잡하기에 이를 평가하기 위한 가장 기본적인 방법으로 주로 인장실험이 이용되며 실험결과로 얻어지는 물성치 중 박판의 성형성에 주로 영향을 주는 값은 재료의 이방성(Anisotropy)을 나타내는 소성이방성계수 R 값과 가공경화지수 n 값이다. 박판금속의 이방성은 생산과정에서 판재가 받는 압연(Rolling)과 소둔(Annealing)의 반복에 의해 금속의 내부조직이 결정학적으로 방향성을 가지고 배열되기 때문이며 재료가 이방성을 가지는 경우에는 폭방향과 두께방향의 변형율이 서로 다른 값을 가지게 된다. 이방성을 나타내는 성형성지표와 가공경화지수를 정의하면 다음과 같다.^{10)~12)}

1) 소성이방성계수 R (소성변형율비 : Lankford Value)

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w_t/w_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (1)$$

여기서, f : 최종치수, 0 : 초기치수

ω : 폭방향, t : 두께방향

이 식에서 등방성재료의 R 값은 1이 되고 R 값이 1보다 커지면 인장시 두께감소에 대한 저항이 커지므로 R 값이 클수록 재료의 덩드로잉성은 좋아진다.

2) 평면이방성계수 ΔR (Planar Anisotropy Coefficient)

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90}}{2} - R_{45} \quad (2)$$

일반적으로 0° 가 압연방향이며 드로잉된 컵의 높이와 방향에 따라 다른 Earing의 판정기준이 된다. 즉 $\Delta R > 0$ 일 때는 0° 와 90° 에서, $\Delta R < 0$ 일 때는 $\pm 45^\circ$ 에서 Earing이 발생한다.

3) 수직이방성계수 \bar{R} (평균소성변형율비: Normal Anisotropy Coefficient)

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3)$$

일반적으로 소성이방성계수 R 값은 측정방향에 따라 변하므로 각 방향에 대한 평균소성변형율비가 많이 사용되며 등방성재료인 경우 $\bar{R}=1$ 이 된다.

4) 가공경화지수 n (Work Hardening Exponent)

소성변형시 재료의 형태변화와 함께 강도와 경도는 증가하고 연성은 감소하는 현상을 가공경화라 하며 가공경화의 거동을 정량적으로 나타내는 가장 일반적인 방법이 인장선도에 의한 가공경화식의 결정이다.

박판성형시의 소성변형과정에서 흔히 이용되는 진응력-진변형률 관계를 대수평면(log-log좌표)에 도시하면 직선에 가까운 형태가 되고 이 때의 직선식은 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4)$$

여기서 K : 강도계수(가공경화상수) n : 가공경화지수

위의 관계식을 멱경화법칙이라고도 부르며 Ludwik과 Hollomon에 의해서 처음 제안되었는데 일반적으로 n 값이 클수록 재료의 균일변형능력이 증가, 변형집중이 억제되고 변형이 프레스의 펀치와 접촉부에서 보다 균일하게 분포하여 장출(Stretching)성형성이 좋아지며 강과 알루미늄이 0.2~0.35¹⁰ 정도의 비슷한 값을 가진다. 그리고 Hosford와 Caddell¹⁰은 탄성-완전소성재료에 대해 판이 여러개의 독립된 얇은 층으로 구성되어 있고 판면에 수직인 단면은 굽힘변형후에도 수직상태를 유지한다는 가정하에서 탄성회복을 해석하였는데 그 결과 탄성회복량과 관계된 기계적 물성치는 인장항복강도, 종탄성계수 및 판재의 두께임을 알 수 있고 탄성회복이 인장항복강도와 두께의 비에 비례한다는 것을 이론적으로 나타내고 있다.

3. 실험용 재료 및 실험방법

3.1 실험용 재료

본 실험에 사용되어진 재료는 압연공정으로 생산된 것으로 재료의 입자에 가해지는 방향성에 의해 이방성이 발생된 가공경화재료를 사용하였는데 현재까지 자동차 차체용으로 주로 연구되고 있는 알루미늄 50계열과 60계열 중 대표적인 합금인 Al 5052와 Al 6061의 두께 1.5mm와 2mm 판재를 구입하여 인장실험을 실시하였다. 그리고 알루미늄의 성형시에 문제가 되는 형상동결성(Shape Fixability)을 강판과 비교하기 위해 차체용으로 많이 쓰이는 연 강판인 두께 1mm의 SPCC와 고장력강판인 두께 1mm의 SPRC를 비교 재료로 사용하였다. KS규격에 명시된 Al 5052와 Al 6061 판재의 화학성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었고 SPCC와 SPRC의 화학성분과 기계적 성질을 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Chemical Composition of Al 5052 & 6061

Alloy number	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al 5052	0.25 ↓	0.40 ↓	0.10 ↓	0.10 ↓	2.2 ~2.8	0.15 ~0.35	0.10 ↓	-	Bal.
Al 6061	0.40 ~0.8	0.70 ↓	0.15 ~0.40	0.15 ↓	0.8 ~1.2	0.04 ~0.35	0.25 ↓	0.15 ↓	Bal.

Table 2 Mechanical Properties of Al 5052 & Al 6061 Sheet

Alloy number	Heat treatment	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation
Al 5052	0	1.3~2.9	177~216	64 ↑	19 ↑
Al 6061	T6	0.5~6.5	294 ↑	245 ↑	10 ↑

Table 3 Chemical Composition & Mechanical Properties of SPCC & SPRC

Material	Chemical composition (%)					Mechanical properties		
	C	Mn	P	S	Al	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
SPCC	0.04	0.25	0.01	0.005	0.05	294.2	176.5	40
SPRC	0.04	0.3	0.06	0.005	0.05	352.0	235.3	37

Al 5052, 5182로 대표되는 50계열은 고용강화형의 Al-Mg계 비열처리형 합금으로서 구조용재, 성형용재로 널리 이용되며 우수한 강도와 성형성을 가지고 있고 용접성, 내식성, 표면처리성은 실용 Al합금 중에서도 가장 우수하다. 그러나 성형시에 Lüder's Line이 나타나는 Stretcher-Strain현상이 있어 재료를 박판으로 가공하여 사용할 때 표면이 거칠어지므로 미관이 증시되는 자동차의 외판에는 사용하기 어렵다.¹⁾ 그리고 200°C 이상에서 도장 후 강도와 강성이 증가하는 소부경화성(Paint Bake Hardening, BH성)이 없으며 Mg함유량과 가공열처리조건에 의한 응력부식균열(SCC)의 위험성이 있지만 성형성과 내식성이 우수하여 주로 성형이 깊은 내판에 사용되며 Mg의 첨가에 의해 적층결합에너지(Stacking Fault Energy)를 작게 하여 가공경화지수 n 을 크게함으로써 균일연신량을 개선한 합금이다.

적층결합에너지란 하나의 전위(Dislocation)에서 분리된 2개의 확장전위 사이의 영역, 즉 적층결합의 표면장력을 의미하며 알루미늄은 강에 비해 높은 값을 나타낸다. Al 6061로서 대표되는 60계열은 석출강화형의 Al-Mg-Si계 합금으로서 50계열보다 성형성은 떨어지나 소부경화성이 우수하고 SS현상이 없는 특징으로 외판 등의 미관과 강도를 증시한 용도에 주로 사용되고 있다.¹⁾

3.2 인장실험

인장실험용 재료로는 판재의 성형에 중요한 영향을 미치는 이방성의 효과를 파악하기 위하여 두께 1.5mm Al 5052 판재와 두께 2mm Al 6061 판재에서 압연방향이 0°, 45°, 90°인 인장시편을 채취하였다. 이때의 시편은 KS B 0801 규격의 5호로 하였고 그 형상을 Fig.1에 나타내었다.

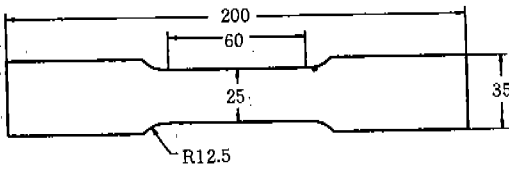


Fig.1 The Dimension of Tensile Specimen(unit : mm)

인장시험에 사용된 MTS(Material Test System) 만능시험기는 최대용량이 25ton이며 Al 50계열의 특징인 Stretcher-Strain현상을 육안으로 관찰하기 위해 크로스 헤드 속도를 비교적 느린 속도인 3mm/min으로 하였고 응력-변형률선도를 얻기 위해서 파단에 이르기까지 인장시켰다. 각각 3개씩의 시편으로 인장시험을 실시하고 평균을 취하여 데이터를 구하려고 하였으나 5000계의 실험과정에서 Lüder's Line의 형성을 의미하는 불규칙한 응력변화(Stress Drop, Serration)가 인장선도의 0.2% 변형을 내에서 나타나는 경우가 많아 물성치를 정확히 구할 수 없어 유용한 데이터를 얻을 수 있을 때까지 실험을 반복 실시하였다. 형상동결결과 밀접한 관계를 가지는 종탄성계수(Young's Modulus) E값은 이 실험에서 얻어진 응력-변형률선도로 0.2% 변형률의 탄성한도 범위 내에서 구하였다.

박판의 장출성형성 평가에 주로 사용되는 가공경화지수 n 은 실험에서 얻어진 인장선도를 2절식 (4), 가공경화식의 형태로 근사하여 구하였고 박판의 이방성효과 및 딥드로잉성을 평가하기 위해 사용되는 소성이방성계수 R 은 약 15% 변형률의 위치라고 사료되는 인장시편의 파단면 3mm상단에서 두께와 폭을 측정하고 식 (1)에 따라 계산하였다.

3.3 V블록굽힘실험

알루미늄은 강에 비해 종탄성계수가 1/3정도로 작아 형상동결성이 낮으므로 큰 탄성회복(Springback)현상을 일으킨다. 스프링백 크기와 기계적 성질과의 관계를 파악하기 위해서 90°V블록으로 굽힘 실험을 실시하고 사용된 V블록을

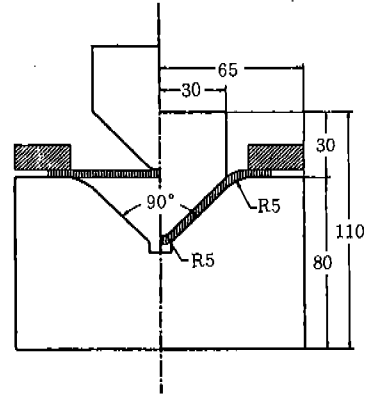


Fig.2 The Configuration of V Block (unit : mm)

Fig.2에 나타내었다. 시편은 KS B 0803 규격을 따라 35mm×100mm로 제작하였고 10ton용량의 Instron 만능시험기를 사용하여 KS B 0804의 굽힘실험방법에 따라 실험을 수행하였다. 그리고 스프링백이 없는 경우, 시편의 좌 우단사이의 거리가 70.7mm이므로 실험후 70.7mm와의 차를 스프링백된 값으로 취하였다. 사용된 재료는 Al 5052, Al 6061, SPCC, SPRC이며 Al 5052는 판재의 두께가 스프링백에 미치는 영향을 조사하기 위해 1.5mm와 2mm의 2종류로 하였다.

스프링백과의 상관데이터인 인장강도와 항복강도는 인장시험에서 얻어진 데이터를 모두 평균하여 취하였고 종탄성계수는 0.2% 탄성한도내의 불규칙한 응력변화(Stress Drop)로 인한 물성치 측정상의 어려움으로 비교적 정확한 값인 Al 5052(0°) 3번 시편과 Al 6061(0°) 2번 시편의 값으로 가정하였다. 스프링백량은 각각의 재료에 대해 5번씩의 굽힘실험을 실시하여 얻어진 데이터를 3개씩 사용하였다.

3.4 시제품제작 및 미세조직 촬영

알루미늄 판재로 제품을 성형할 경우 딥드로잉성과 형상동결성이 낮아서 생기는 주름이나 파단, 큰 탄성회복 현상은 금형의 각 부위를 재설계함으로써 방지 가능하므로¹²⁾ 성형시의 문제점

을 파악하고 새로운 알루미늄용 금형의 설계방안을 찾기 위해 스탬핑공정에서 변형정도가 심한 브래킷을 시제품으로 선정하였다. 브래킷은 차체의 보강재 역할을 하므로 외판에 비해 두꺼워야 하고 급격한 굽힘과 장출 등의 변형을 수반한다. 따라서 1차 시제품 제작실험에서는 각각 두께 2mm의 비교적 두꺼운 Al 5052와 Al 6061판재로 브래킷의 프레스성형을 시도하였고 2차 시제품 제작실험에서는 두께 1.5mm 의 Al 5052와 Al6061로서 같은 실험을 수행하였다. 최종 시제품 제작실험은 1, 2차 실험에서 파단된 시제품을 분석, 강판용 금형을 알루미늄의 변형율한계 등의 기계적 특성에 맞도록 수정하여 실시하였다.

미세조직을 사진촬영함에 있어서는, 알루미늄이 재질이 연하기 때문에 표면을 거울면으로 연마하기가 어려워 미세조직 사진이 잘 알려져 있지 않지만 미세조직이 프레스 성형성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 금속현미경으로 조직사진을 촬영하였다. 먼저 마운팅한 알루미늄을 연마한 후 부식과정을 거쳐 500배의 배율로 미세조직을 촬영하고 50계열의 Lüder's Line 부분과

시제품 제작시의 파단부도 촬영하여 Al 50계열과 60계열을 비교 고찰하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 인장특성

인장실험을 통해 얻어진 결과를 Table 4에 나타내었으며 항복점이 확실하지 않은 재료에서는 0.2%의 영구변형율을 가지는 점을 항복점 대신으로 생각하였는데 이것이 Table 4에 제시된 0.2% Offset 항복강도 또는 내력의 의미이다. 알루미늄은 인장선도 상에서 항복점이 확실하게 나타나지 않기 때문에 알루미늄 항복 강도를 0.2% Offset 항복강도로 생각하여 Table 2와 Table 4를 비교한 결과, 각각의 기계적 성질이 모두 KS 규정에 적합하므로 인장 실험이 잘 수행 되었다고 판단된다. 각 압연방향에 대한 Al 5052와 Al 6061의 인장 선도를 구해본 결과 재료의 압연방향에 대한 0°, 45°, 90°의 방향성은 인장후반에 조금있었으나 대체로 큰 차이를 보이지 않아 방

Table 4 Experimental Results of Tensile Test

Alloy number	Specimen number	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	0.2% offset yield strength (MPa)	Elongtion (%)	Young's modulus (GPa)
Al 5052	5052(0)-3	220.5	129.6	168.5	15.9	72.2
	5052(0)-5	221.5	130.8	169.0	15.6	69.6
	5052(45)-4	211.5	134.6	160.2	21.3	70.6
	5052(90)-1	212.8	133.1	159.7	17.8	70.4
	5052(90)-3	220.5	137.1	166.0	11.2	71.5
Al 6061	6061(0)-1	312.1	148.2	290.3	19.5	70.0
	6061(0)-2	312.6	169.8	290.8	19.0	69.9
	6061(0)-3	312.3	184.0	292.5	18.2	70.7
	6061(45)-1	311.3	152.9	275.3	18.2	69.5
	6061(45)-2	311.0	153.2	280.0	15.8	80.2
	6061(45)-3	309.5	150.0	276.6	18.5	68.8
	6061(90)-1	309.7	160.1	277.4	17.8	69.2
	6061(90)-2	309.1	159.1	276.2	17.5	71.8
6061(90)-3	309.1	157.4	276.5	18.5	67.8	

향성을 고려하지 않아도 가공이 용이할 것으로 판단되지만 강판의 경우엔 방향성을 고려하지 않으면 굽힘 가공이 어렵다고 알려져 있다.¹²⁾

Al 50계열과 60계열의 기계적 성질을 하나의 인장선도로 비교하여 Fig.3에 나타내었는데 Al 6061의 인장강도는 310MPa정도였고 Al 5052의 인장강도는 220MPa정도로 Al 6061이 높았으며 종탄성계수는 비슷하게 나타났다. 하지만 이러한 연신율과 종탄성계수는 강판의 1/3~1/2 정도로 낮은 값이므로 프레스 성형시 강에 비해 열세이고 성형 후 탄성회복에 의한 형상동결성 불량 등의 단점을 예측할수 있다. Al 5052의 실험에서는 Lüder's Line이 시편 표면에 생기는 것을 알수있으며 50계열은 췌기모양의 응력변화 (Stress Drop, Serration)가 나타나고 Lüder's Line의 형성과 완전히 동조(Synchronize)되었다.^{13),14)} Lüder's Line 형성원인은 고용 Mg 원자와 전위망 조직의 발생으로 인해 초기에는 전위의 고착이 있고 이들 전위 중 일부가 국부적 응력 증가가 있는 곳에서 고착 상태에서 풀려 나가는 것에 의해 항복점 연신이 일어나기 때문이다. Lüder's Line은 SS(Stretcher-Strain)마크라고도 불리며 50계열은 SS마크 때문에 표면 거칠 현상을 나타내 미관이 중시되는 자동차 외판에 사용이 어렵지만 60계열은 육안으로 Lüder's Line을 확인할수 없었으며 인장선도 상에서도 불규칙한 응력변화가 나타나지 않아서 외판에 사용이 가능 할것으로 판단된다.

실험에서의 인장선도를 가공경화식 형태로 근

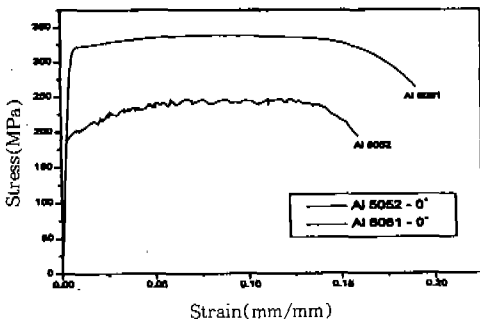


Fig.3 The Comparison of Tensile Test of Al 5052 & Al 6061

Table 5 Strength Coefficient & Work Hardening Exponent

Specimen number	Strength coefficient (K)	Work hardening exponent(n)	Average of n
Al 5052(0°)-1	106.7	0.178	0.186
Al 5052(0°)-2	100.1	0.193	
Al 5052(0°)-3	102.4	0.187	
Al 5052(45°)-1	104.3	0.176	0.171
Al 5052(45°)-2	106.2	0.170	
Al 5052(45°)-3	107.7	0.166	
Al 5052(90°)-1	100.2	0.194	0.180
Al 5052(90°)-2	108.4	0.171	
Al 5052(90°)-3	104.4	0.176	
Al 6061(0°)-1	117.2	0.235	0.239
Al 6061(0°)-2	115.6	0.239	
Al 6061(0°)-3	112.6	0.243	
Al 6061(45°)-1	109.6	0.257	0.255
Al 6061(45°)-2	111.1	0.253	
Al 6061(45°)-3	110.5	0.255	
Al 6061(90°)-1	115.0	0.251	0.252
Al 6061(90°)-2	114.1	0.252	
Al 6061(90°)-3	113.6	0.253	
SPCC	-	-	0.23
CSP3N	-	-	0.22

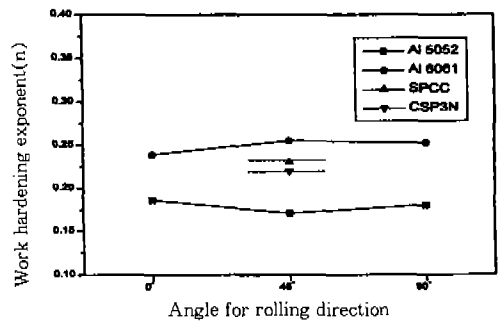


Fig.4 The Comparison of Work Hardening Exponent of each Angle for Rolling Direction

사하여 구한 강도계수(Strength Coefficient) K 와 가공경화지수(Work Hardening Exponent) n 을 Table 5에 나타내었고 Fig.4에는 각 압연 방향에 대한 소성이방성계수의 평균치를 차체용 냉연 강판의 값과 비교하여 나타내었다. 대략 Al 5052는 0.18정도, Al 6061은 0.25정도의 값을 나타내고 있는데 SPCC의 0.23, CSP3N의 0.22와 비교하면 50계열은 다소 낮지만 60계열은 동등 이상의 값을 나타내므로 장출성형성이 비교적 우수, 얇은 드로잉이나 장출성형을 주로 받는 제품의 가공에 적합하다는 것을 알 수 있다. 이처럼 가공경화지수가 동등한 수준을 유지하는 이유는 알루미늄 내의 Mg함량이 증가함에 따라 적층 결함에너지값이 낮아져 확장전위사이의 거리가 증가하므로 전위의 교차슬립(Cross Slip)이 곤란하게 되어 가공경화능이 증가하기 때문이라 판단된다.

4.2 탄성회복(Springback)과 굽힘특성

알루미늄의 종탄성계수(E), 인장강도(TS), 항복강도(YS), 판재의 두께(t), 인장강도/두께(TS/t), 항복강도/두께(YS/t) 등의 기계적 성

Table 6 Mechanical Properties used for Relation with Springback

Material	Thick-ness (mm)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's strength (GPa)	Spring-back (mm)
Al 5052	1.5	217.4	133.0	72.2	6.1
					5.7
					6.9
Al 6061	2.0	310.7	159.4	69.9	9.5
					7.9
					8.8
SPCC	1.0	294.2	176.5	206.0	2.8
					1.3
					2.2
SPRC	1.0	352.0	235.3	200.0	3.2
					2.5
					4.1

질과 탄성회복의 관계를 고찰하기 위해 사용된 데이터를 Table 6에 나타내었다.

Fig.5에 E값과 스프링백과의 관계를 나타내었는데 E값과 스프링백은 반비례하는 경향이였으며 Al 60계열의 스프링백이 50계열보다 컸다. 이처럼 Al 60계열의 강도가 50계열보다 큰 이유는 Fig.3의 인장선도에서 볼 수 있듯이 60계열의 강도가 50계열 보다 커서 항복점을 넘어선 소성영역에서 하중이 제거된 후 탄성 회복되는 양이 많기 때문이다.

Fig.6에 인장강도와 스프링백과의 관계를 나타내었는데 동종의 재료에서는 인장강도가 증가할수록 스프링백이 커짐을 알 수 있다. 이는 인장강도가 높은 재료가 일반적으로 탄성 변형한계도 높고 탄성변형율성분이 차지하는 비율이 큰 결과에 기인한 것으로 판단된다.

Fig.7에 항복강도와 스프링백과의 관계를 나타

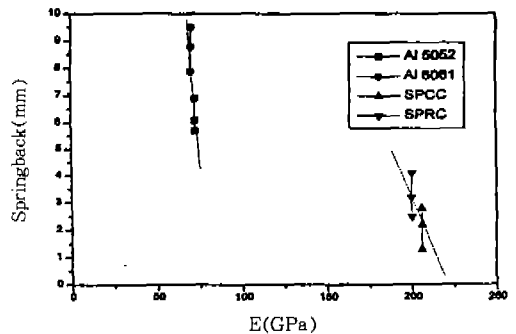


Fig.5 The Relation of Springback & Young's Modulus

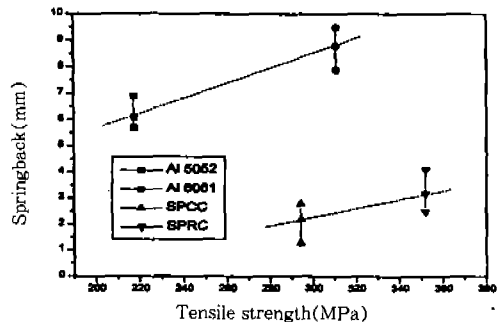


Fig.6 The Relation of Springback & Tensile Strength

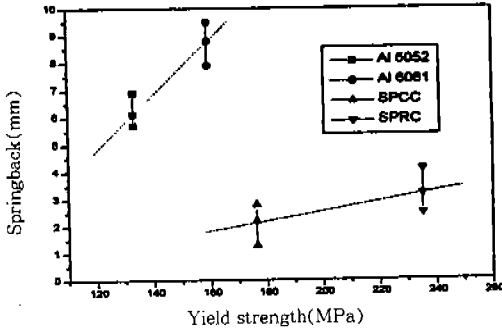


Fig.7 The Relation of Springback & Yield Strength

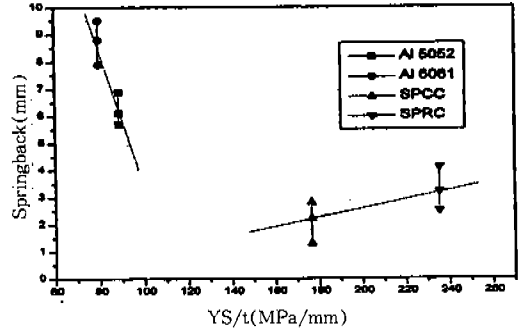


Fig.9 The Relation of Springback & YS/t

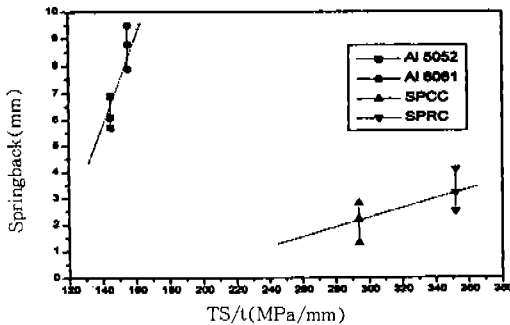


Fig.8 The Relation of Springback & TS/t

내었다. 여기서도 동종재료인 경우 항복강도가 클수록 스프링백이 크게 나타났다. 즉 재료가 강할수록 높은 탄성한계와 큰 탄성구간 때문에 스프링백량이 많아지며 탄성변형율성분과 스프링백량이 대체로 비례하고 있음을 알 수 있다. 그리고 같은 항복강도에서는 종탄성계수가 클수록 스프링백이 적다.

알루미늄의 항복강도와 스프링백의 관계를 표시하는 선을 Hosford와 Caddell의 이론식

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} = \frac{3\sigma_0}{tE'}$$

과 연관시켜 생각한다면 강판의 두께가 1mm, 알루미늄은 1.5mm이고 종탄성계수는 강이 약 3배 정도 커서 알루미늄을 표시하는 선이 강의 경우보다 2배정도 큰 기울기를 가져야 하지만 실제 선도상에서는 3배이상으로 알루미늄의 기울기가 크게 나타난다.

이런 경향은 탄성회복과정에는 두께 및 종탄성계수 외에도 다른 인자의 영향이 있음을 의미하며 Al 50계열이 가공경화에 의해 강도가 높아진다는¹⁵⁾ 점을 감안하면 급형변형 중의 가공경화 때문에 가공경화를 고려하지 않은 이론식과 차이가 나타난다고 생각된다.

Fig.8~Fig.9는 TS/t와 스프링백, YS/t와 스프링백을 비교한 것이다. Al판재는 인장강도와 두께의 비(TS/t)가 증가 할수록 스프링백이 커져 형상 동결성이 나빠지는 것을 알 수 있고 YS/t와 스프링백의 관계에서는 강과 알루미늄이 일정한 경향을 보이지 않았다.¹⁶⁾

이상의 실험결과, 스프링백에 가장 큰 영향을 미치는 것은 E값으로 반비례하는 경향이 있으며 E값이 비슷한 재료의 경우엔 인장강도의 영향을 받으므로 E값이 작고 인장강도가 높은 Al 60계열의 스프링백이 가장 컸다. 따라서 강에 비해 스프링백이 큰 알루미늄의 형상동결성을 향상시키기 위해서는 재질을 개선하여 강도를 낮추거나 공정상의 탄성회복량을 감안하여 판재에 균일한 장출변형(Stretching)을 가하도록 급형의 급형부에 완만한 곡률을 부여하는 방법, 재료에 예비변형(Pre-Strain)을 충분히 주는 방법 등의 성형기술이 필요하다.

4.3 시제품 제작

1,2차 시제품 제작실험에서는 각각 재료의 두께만 1.5mm와 2mm로 다른 조건하에서 행하였고 2차실험에서 Al 5052는 급형과 장출변형이

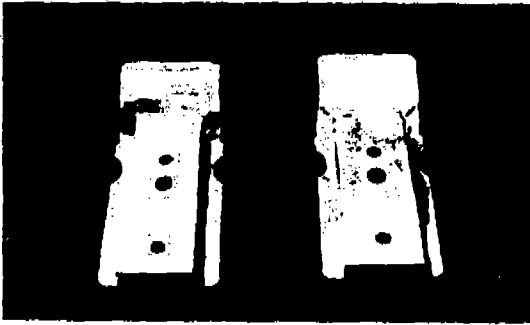


Fig.10 The Product of Final Experiment (Left : Steel Right : Al 5052)

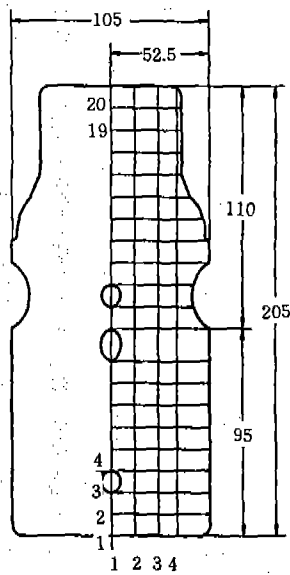


Fig.11 The Configuration of Product in Stamping Process & Shape of Grid for Measuring Strain Distribution (unit : mm) Product

큰 모서리의 곡면 부분에서만 파단을 일으키고 Al 6061은 급격한 선을 따라 파단되었다. 이는 알루미늄 자체의 기계적 성질인 연신율이 강에 비해 낮아서 파단된다고 생각되며 스탬핑가 공성은 60계열보다는 50계열이 우수함을 알 수 있었고 최종실험에 사용될 알루미늄 급형의 설계 방안을 찾기 위해 2차 시제품중 상태가 양호한 두께 1.5mm의 Al 5052 시제품상에 1mm×1mm크기의 그리드(Grid)를 표시하여 스탬핑

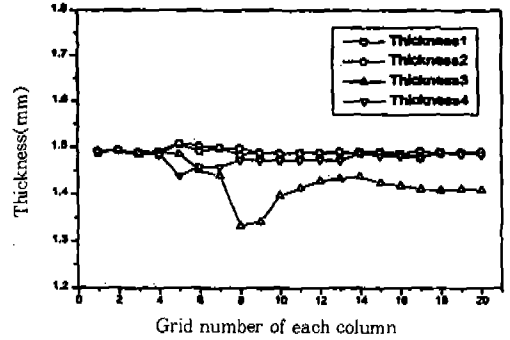


Fig.12 (a) Thickness Distribution of Final Product

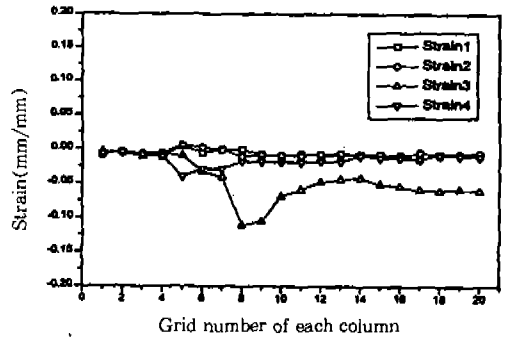


Fig.12 (b) Strain Distribution of Final Product

성형공정후의 두께변화와 변형률 분포를 실측하였다.

스탬핑 성형공정 제품의 그리드형상은 Fig.11에 나타내었고 그리드의 번호는 좌우대칭(Symmetric)이라는 가정하에서 열(Column)을 기준으로 좌측부터 1~4로, 각각의 열에 대해 상단부터 1~20으로 하였다. 2차실험에서는 시제품의 모서리(Thickness3, Strain3) 대부분이 장출변형과 굽힘을 받았고 모서리 곡면부분(Grid8)에서 큰 두께변화와 변형률분포를 나타내었으며 모서리에서 급격한 굽힘과 장출변형을 동시에 수반하여 두께변형율이 18% 정도로 Al 50계열의 연신율을 초과하여 파단이 생겼다. 이를 토대로 시제품이 급격한 굽힘과 장출변형을 받지 않도록 급형을 수정하고 3차 시제품 제작 실험을 수행하여 최종 시제품을 제작하였다. 수정된 급형으로 제작된 시제품을 기존의 강판으로 프레스 성형한

제품과 비교하여 Fig.10에 나타내었는데 최종 시제품은 모서리 곡면부분에서 파단이 없었고 강판으로 성형된 제품과 형상도 거의 유사하였다. 수정된 금형으로 제작된 최종시제품의 두께변화와 변형률분포를 위와 동일한 방법으로 실측하여 구하고 그 결과를 Fig.12에 나타내었다.

금형 수정전의 변형률분포를 나타내는 2차실험에서는 인장과 압축변형율이 모두 존재하는 불균일상태를 나타내었지만 수정된 금형으로 성형된 최종 시제품은 Fig.12(b)에서와 같이 대부분이 프레스에 의한 균일한 압축변형을 받고 있고 최대변형율도 13% 정도로 Al 50계열의 연신율보다는 작아서 파단없는 형상을 보이고 있다. 최종 시제품의 모서리(Thickness3, Strain3)에서는 다른 부분에 비해 상대적으로 큰 장축변형과 굽힘을 받고 있고 특히 모서리 곡면부분(Grid8)에서는 여전히 두께변화와 변형률 분포를 보이고 있으나 금형 수정전의 시제품보다는 변형량이 상

당히 줄어든 결과를 보이고 있다.

4.4 미세조직이 성형성에 미치는 영향

알루미늄 박판은 압연공정으로 제조되기 때문에 미세조직이 주조나 단련용 합금과는 많이 다르다.¹¹⁾ 이런 알루미늄 판재의 미세조직을 관찰하여 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위해 금속현미경 500배 배율로 Al 6061의 조직사진을 촬영하여 Fig.13에 도시하였다.

Fig.13에 도시된 Al 50계열과 Al 60계열의 미세조직 비교에서 50계열보다는 60계열의 평균 결정립크기가 크므로 60계열의 입계강도가 높아서 입계파괴가 일어나지 않고 항복강도가 낮아지므로 연신율이 50계열보다 비교적 높다고 생각된다. 그리고 Al 6061의 제2상 조직이 Al 5052의 제2상 조직보다 크게 나타났는데 50계열 합금은 고용체경화 또는 가공경화에 의해 강도를 가지며 고용된 Mg원자 등은 거의 석출하지

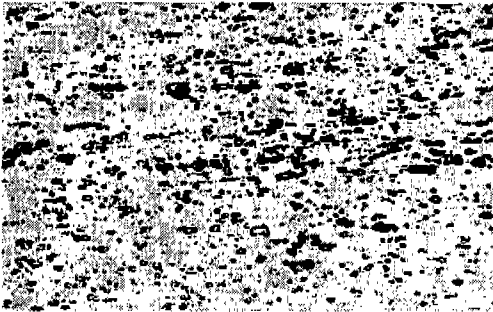


Fig.13 (a) The Microstructure of Al 5052 ($\times 500$)

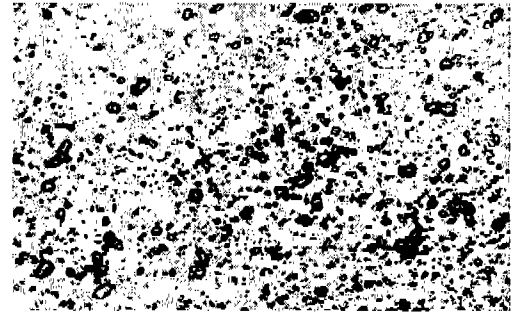


Fig.14 (a) The Microstructure of Al 5052 at SS Mark ($\times 500$)



Fig.13 (b) The Microstructure of Al 6061 ($\times 500$)

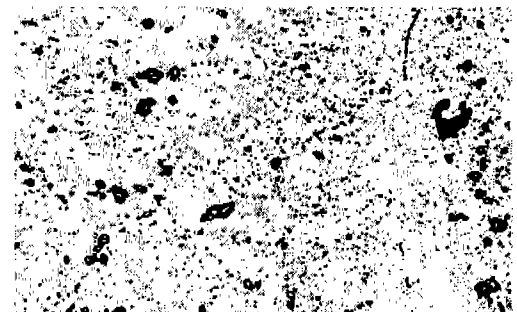


Fig.14 (b) The Microstructure of Al 6061 at SS Mark ($\times 500$)

않고 치환형으로 고용되어 있는 상태이기¹⁶⁾ 때문에 급히변형에 대해 저항하는 정도가 강한 것으로 판단된다. 60계열의 경우는 석출물 때문에 스트림백가공시 저항성을 보임을 알 수 있다.

Fig.14에 Lüder's Line 부분의 미세조직을 나타내었다. 여기서도 Al 5052의 결정립이 미세하게 나타났는데 결정립의 크기가 Lüder's Line의 형성에 영향을 미친다고 알려져 있다.^{13),14)}

즉 기존 전위들이 결정립계에 고착되어 있다가 하중이 증가함에 따라 고착분위기를 벗어나는 순간 항복점 연신, 즉 Lüder's Line이 생긴다고 볼 수 있어 결정립이 미세한 경우 전위고착의 확률이 커지고 Lüder's Line의 형성이 쉽게 일어난다고 생각된다.^{17),18)} 본 연구의 미세조직사진에서도 Al 5052는 결정립 조직이 미세하고 정석출물의 크기가 상대적으로 작은 반면 Al 6061은 조대한 결정립 조직과 큰 정석출물을 보이고 있어서 상대적으로 미세한 Al 50계열의 결정립조직이 Lüder's Line의 형성에 하나의 원인^{19),20)}으로 작용한다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 차체의 경량화를 위해 사용되는 알루미늄 판재의 프레스 성형성을 평가하기 위해서 Al 5052와 Al 6061판재를 사용하여 인장실험, V굽힘실험을 실시하였다. 그 결과를 기초로 차체용 냉연강판과 알루미늄합금 판재의 프레스 성형성 비교 고찰을 위해 시제품을 제작, 평가하였다. 그리고 조직사진을 통해 알루미늄 판재의 미세구조와 프레스 성형성과의 관계를 연구하였는데 그 주요결과는 다음과 같다.

- 1) Al 50계열은 연신율, 강도, 가공경화지수, 소성이방성계수 등의 기계적 성질이 Al 60계열보다 열세였다.
- 2) 판재의 압연방향에 대한 방향성은 50계열의 인장후반에서 약간 나타났으나 인장곡선, 가공경화지수, 소성이방성계수 등에서는 대체로 큰 차이를 나타내지 않았다.
- 3) 알루미늄은 종탄성계수가 강의 1/3수준으로 낮아 형상동결성이 나쁘고 50계열이 60

계열보다는 낮은 항복강도로 인해 탄성회복이 적어 성형성이 상대적으로 우수하였다.

- 4) 차체의 경량화를 실현하기 위해서는 우수한 프레스 성형성을 갖는 알루미늄판재의 개발 및 프레스 가공기술의 최적화가 요구되며 기존의 알루미늄판재로 차체부품을 제작하기 위해서는 급히와 장출변형을 최대한 적게 받도록 금형을 수정해야 한다.
- 5) 강판용 금형에서 알루미늄으로 제작된 시제품은 모서리부분에서 큰 급히와 장출변형을 수반, 파단되어져서 급격한 변형을 받지 않도록 수정된 금형으로 제작된 시제품은 고른 두께변형을 분포를 나타내며 모서리부분의 변형이 줄어들었다.
- 6) Al 50계열의 미세한 결정립은 Lüder's Line 발생의 원인이며 Al 60계열은 결정립이 조대하고 제2상 조직이 커서 비교적 강도와 연신율은 높으나 스트림백 가공한계는 낮았다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. 阿部佑二, 吉田正勝, 野口 修, 松尾 守, 小松原 俊 雄, “最近の自動車ボデー用 アルミニウム板材”, 塑性と加工(日本塑性加工學會誌), Vol.33, No.375, pp.365~372, 1992~4.
2. 김영석, 김기수, 권남철, “차체용 알루미늄 판재의 프레스 성형성”, 한국자동차공학회논문집, Vol.2, No.1, pp.73~83, 1994.
3. 김영석, “알루미늄 판재성형기술의 현황과 과제”, 자동차공학회지, Vol.14, No.1, pp.3~12, 1992.
4. 강석봉, 임차용, 김형욱, “차체 판넬용 Al-

- Mg합금에서 열처리조건 및 조성변화가 인장 특성에 미치는 영향”, 한국자동차공학회논문집, Vol.2, No.2, 제2권 제2호, pp.95~102, 1994.
5. 강석봉, 임차용, 이정무, 노병호, 김대훈, “자동차 차체 판넬용 알루미늄 박판합금의 개발 동향”, 기계와 재료, Vol.5, No.1, pp. 84~93, 1993.
 6. 강석봉, “자동차 차체 경량화를 위한 Al합금 판재의 관련기술”, 기계와 재료, Vol.6, No. 3, pp.102~121, 1994.
 7. 김영탁, 왕노만, “단면성형 해석에 의한 자동차 내부판넬의 설계”, 자동차공학회지, Vol. 12, No.6, pp.48~59, 1990.
 8. 신재현, 김민수, 서대교, “비원형 단면에 대한 판재 성형성(I)”, 한국자동차 공학회 논문집, Vol.2, No.1, pp.84~95, 1994.
 9. 전기찬, 이항수, 유동진, 이정우, 김충환, “차체판넬 프레스 성형공정의 평면변형해석”, 대한기계학회논문집, Vol.16, No.10, pp.1853~1860, 1992.
 10. William F. Hosford, Robert M. Caddell, “Metal Forming-Mechanics and Metallurgy”, PTR Prentice Hall, 1993.
 11. William F. Smith, “Structure and Properties of Engineering Alloys”, McGraw-Hill, 2nd edition, 1994.
 12. 조용식, “프레스 금형설계기술”, 기전연구사, 1994.
 13. J. M. Robinson, “Serrated flow in aluminum base alloys”, International Materials Reviews, Vol.39, No.6, pp.217~227, 1994.
 14. 진선화, 최일동, 강석봉, “자동차용 Al-Mg 합금의 Lüders Line 형성”, 대한기계학회 1996년 춘계학술대회논문집(A), pp.750~755, 1996.
 15. 吉原直武, 荒木建治, 福本 紀, 古林 忠, “自動車パネル 部品による Al合金板の成形性 評価”, 塑性と加工, Vol.37, No.425, pp.641~646, 1996.
 16. 日本輕金屬學會, “アルミニウムの組織と性質”, 1991.
 17. K. Lange, “Handbook of metal forming”, McGraw-Hill, 1985.
 18. 西村 尚, 倉 潮三, “最近のアルミニウム板 成形にあける諸問題”, 經金屬, Vol.32, No. 11, pp.604~621, 1982.
 19. W. Johnson, P.B.Mellor, “Engineering Plasticity”, Ellis Horwood, pp.135~137, 1983.
 20. Roger L. Sharp, “Behavior & Design of Aluminum Structures”, SAE, Vol.104, No. 5, pp.172~184, 1995.