

자동차 바디용 알루미늄 판재의 성형성

野口 修¹ · 高田 健²

Formability of Aluminum Sheet in Automobile Body

O. Noguchi, K. Takata

1. 머리말

최근에 지구 환경 문제에 대한 고려로 배출가스의 규제가 엄격해지고, 자동차 업계에 있어서도 배출가스, 특히 이산화탄소의 감소가 중요한 과제로 되어있다. 자동차에 있어서의 이산화탄소의 배출은 80%이상이 주행에 의해 발생하는 것으로, 차체경량화에 의한 연비의 향상은 지구온난화의 원인[1]인 이산화탄소의 배출량 감소에 직결된 유망한 수단으로 여겨지고 있다.

또, 안전대책, 환경대책, 장비의 충실화 등에 의한 중량의 증가를 경감하기 위해서도 차체의 경감화가 필요하다. 이들 경감화의 필요를 만족하기 위해 재료면에서의 검토가 이루어지고 있으며 경감화 효과가 높은 재료로서 알루미늄의 채용이 확대되고 있다.

비중이 작은 알루미늄 판의 적용은 자동차의 경량화에 효과적이다. 이를테면 판재모델에 굽힘강도를 강판과 등가로 하면 알루미늄 판은 강판의 1.44 배의 두께로 50%의 경량화가 가능하게 된다[2]. 한편, 알루미늄 판의 적용을 확대하기 위한 과제로서는 다이나믹한 디자인에 대응되는 프레스 형성성의 향상이 거론되고 있다[3].

본고에서는 프레스 성형성을 중심으로 자동차용 알루미늄의 특징을 소개하여 바디 판재의 특징을 소개하고 재료의 선택 및 개발에 있어서 중요한 지침으로 되는 성형성 지표에 대하여 해설하였다.

2. 자동차 바디용 알루미늄 판재의 특징

2.1 자동차 바디용 알루미늄 판재의 종류

Fig. 1 에 자동차용 알루미늄 판재(바디판재, 자동차열교환기용판재, 부품용판재 등)의 출하량과 알루미늄 바디판재의 채용차종수의 추이를 나타낸것이다[4~5].

출하량과 채용 차종수는 함께 증가하고 있다. 바디 판재는 알루미늄 합금이 채용되었던 당초는 주로 성형성의 관점에서 5000 계(Al-Mg 계) 합금판이 적용되었다. 그 후 열처리 공정에서 고강도화가 가능한 6000 계(Al-Mg-Si 계) 합금판이 주류로 되었다[6].

5000 계 합금판은 일반재(주로 5052, 5182)와 개발재가 자동차 바디 판재로써 실용화되어 6000 계는 주로 개발재가 실용화 되어있다. Table 1 에 주된 자동차용 알루미늄 바디 판재 개발재를 나타내었다[7-9].

여기서는 TG 시리즈(TG**) 및 TM 시리즈(TM**)를 예로, 자동차용 알루미늄 바디 판재의 개발의 경위와 특징 소개였다.

Table 2 에 자동차 바디용 알루미늄 판재의 기계적 성질을 나타냈다.

2.2 5000 계 합금 바디 판재 특징

5000 계 합금판은 일반적으로 강도, 성형성, 내식성, 표면처리성 및 용접성에 뛰어나다. 5000 계 합금 바디 판재의 개발 경위를 Fig. 2 에 보였다.

原稿接受 : 2007. 8. 9.

1. 古河 スカイ(株)(우)366-8511 深谷市 上野台 1351
 2. 新日本製鐵(株)(우)293-8511 富津市 新富 20-1
- 技術解説 : 塑性の加工(日本 塑性加工 學會誌) 第48卷 第 562 号 pp. 967-971(2007.11)
- 번역자 : 박정서(자유번역가), 김인수(금오공과대학교 신소재 시스템공학부, 교수)

개발은 스트레처 스트레인 마크(ss 마크:Fig. 3)의 억제와 성형성향상을 목표로 행해졌다.

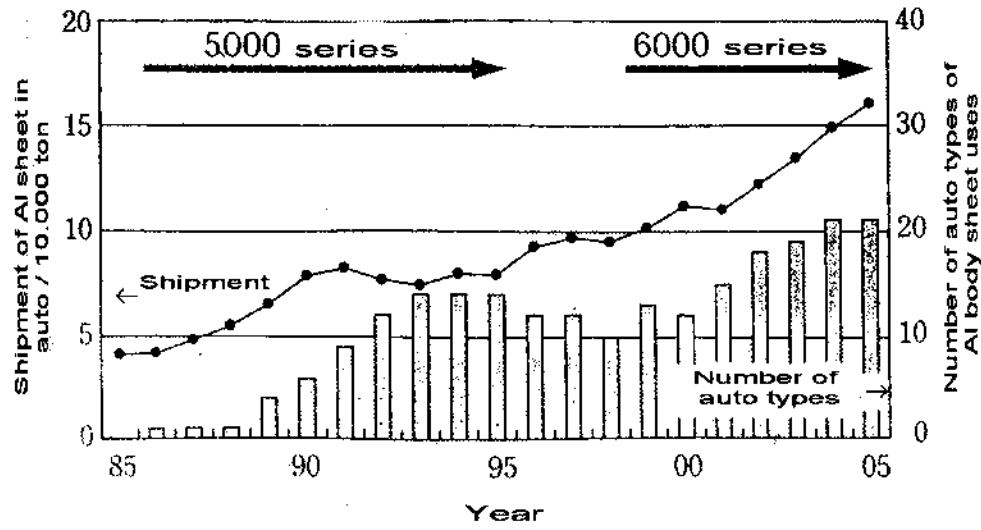


Fig. 1 Shipments of Al sheet and number of autotypes of Al uses[4~5]

Table 1 Main Al body sheet development materials in auto uses[7~9]

5000 Series	TG19, TG25, GC45, GC55, KS5J30, KS5J32
6000 Series	TM30, TM45, TM67, SG112, SG312, KS6K21

Table 2 Mechanical properties of Al body sheet in auto uses

Al series	Name ~ treatment	Tensile strength TS/MPa	Yield strength YS/MPa	Elongation EL/%	n value	r value	Erichsen Er/mm	Limit drawing ratio LDR	The others
5000 series	5052-O	206	98	23	0.26	0.66	9.6	-	general materials
	5182-O	284	137	28	0.30	0.79	9.6	1.96	general materials
	TG19-O	267	127	31	0.31	0.71	10.0	2.02	development materials
	TG25-O	274	117	35	0.35	0.73	10.3	2.03	development materials
6000 series	TM30-T4	214	110	27	0.24	0.73	9.9	1.97	development materials
	TM45-T4	224	115	28	0.26	0.74	10.1	1.98	development materials
	TM67-T4	259	117	31	0.30	0.74	10.2	2.00	development materials
Steel sheet	SPCC	314	176	42	0.23	1.39	11.9	-	development materials

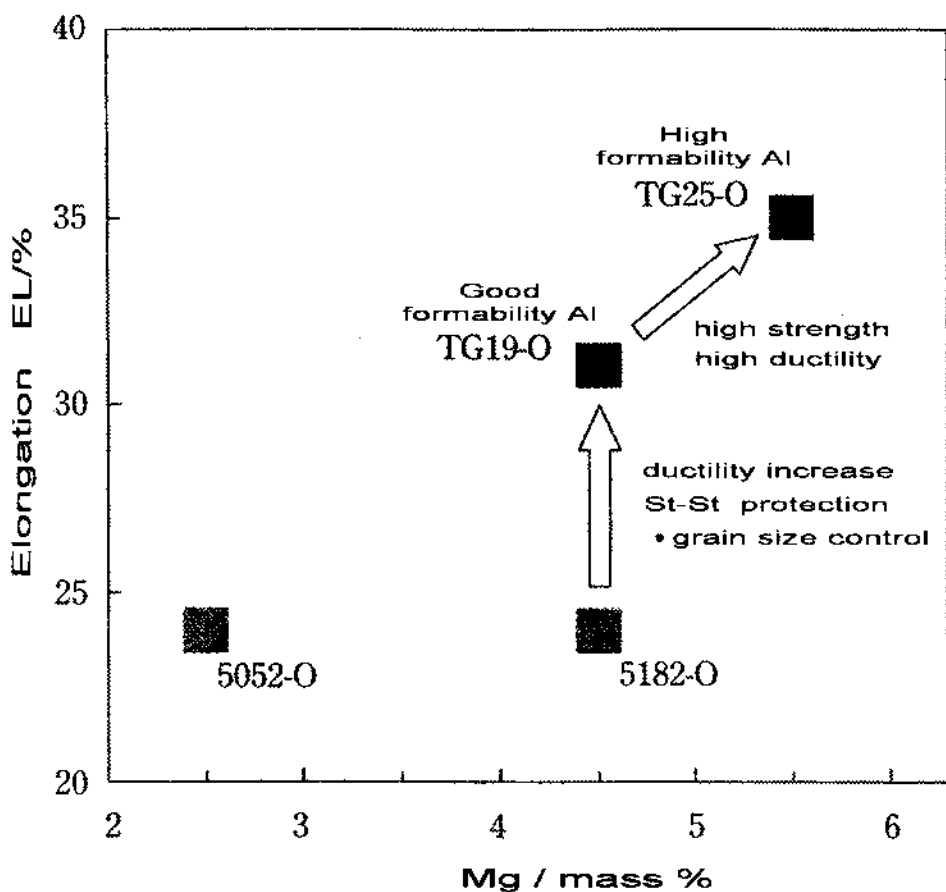


Fig. 2 Developments of 5000 series Al body sheet

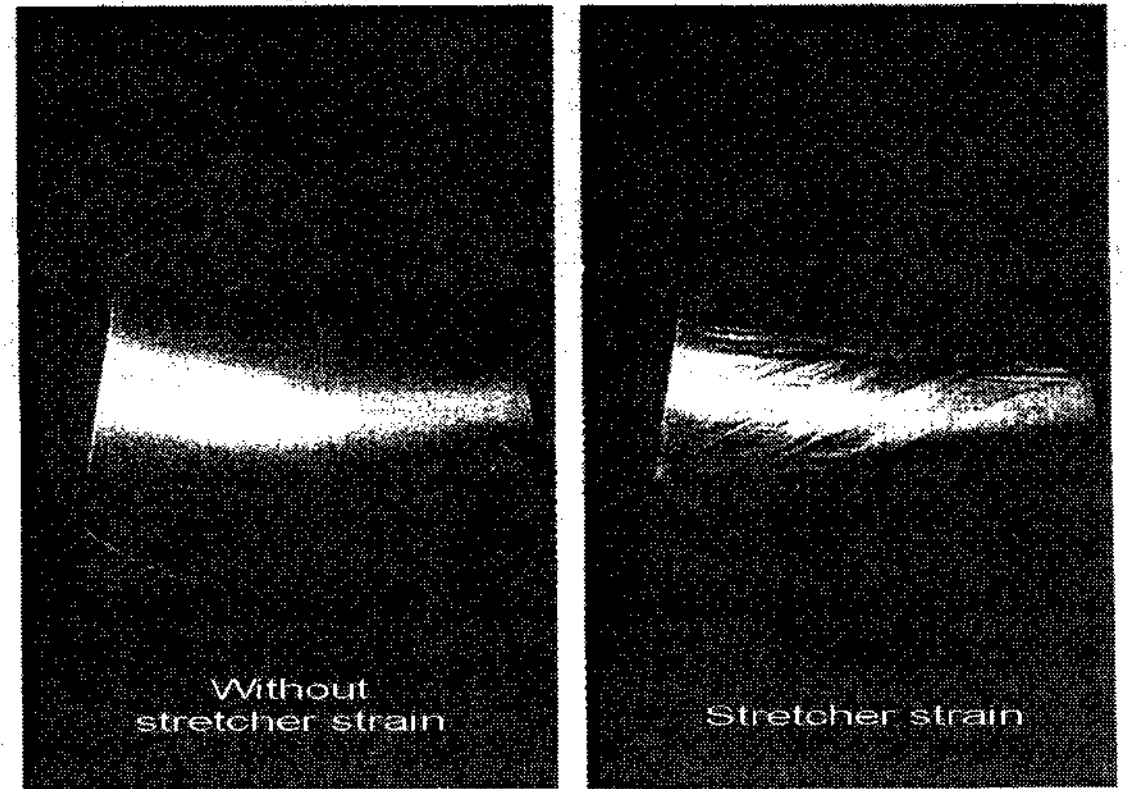


Fig. 3 Without stretcher and stretcher strain mark (ss mark)

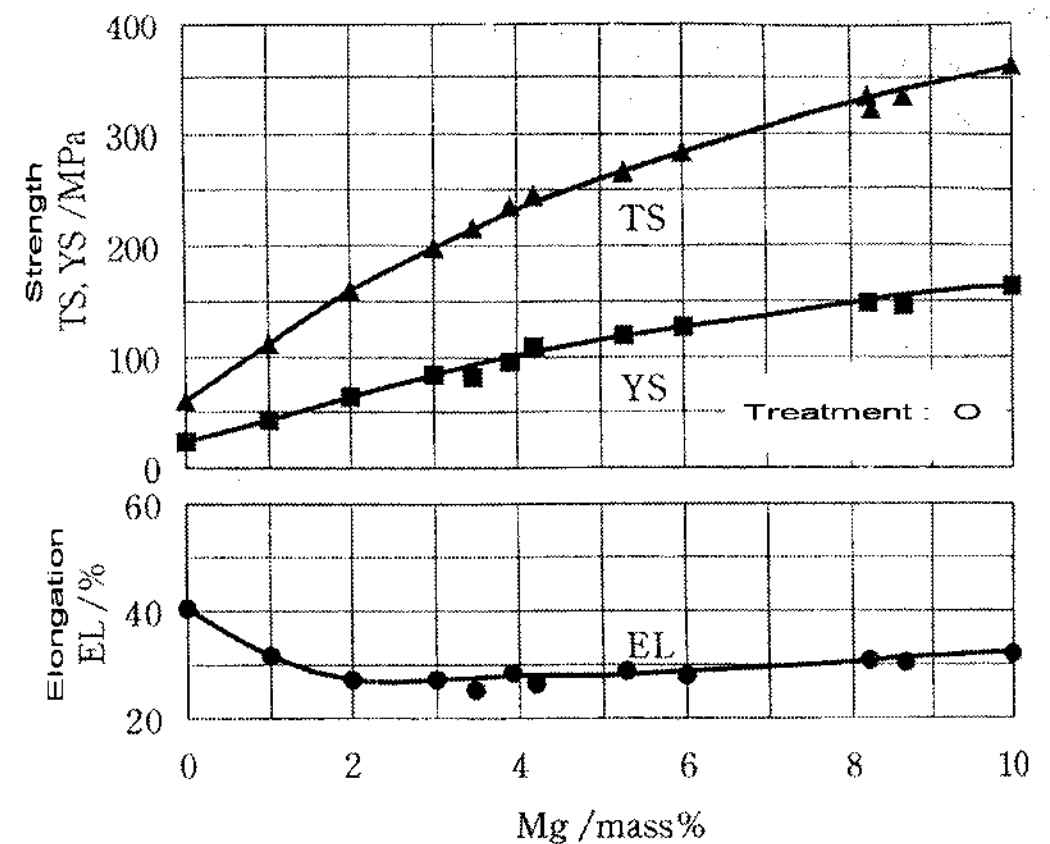


Fig. 4 Mg contents and mechanical properties change in Al-Mg alloy[10]

SS 마크가 발생하면 도장후의 표면에 모양이 남기 때문에 외관 품질이 나빠지고 외장판넬의 적용은 곤란하게 된다. 그래서 결정립크기의 조절에 의한 SS 마크를 억제하는 기술이 개발되었다. 동시에 연성향상에 의한 성형성의 개선이 꾀해지며 4.5% Mg 합금 바디 판재 TG19가 개발되었다.

나아가서 고성형성을 목표로 하여 Mg 첨가량의 증가에 의한 합금개발이 행해졌다. Fig. 4[10]에 보이는 것과 같이 Mg 첨가량을 많이 하면 강도와 연신율이 향상한다. 그러나 Mg 첨가량의 증가는 납연성을 저하시키기 때문에, 공업적으로 제약이 있으며, 대개 5.5%가 한계이다.

이와 같은 이유로 5.5% Mg 합금 바디 판재 TG25가 실용화되었다.

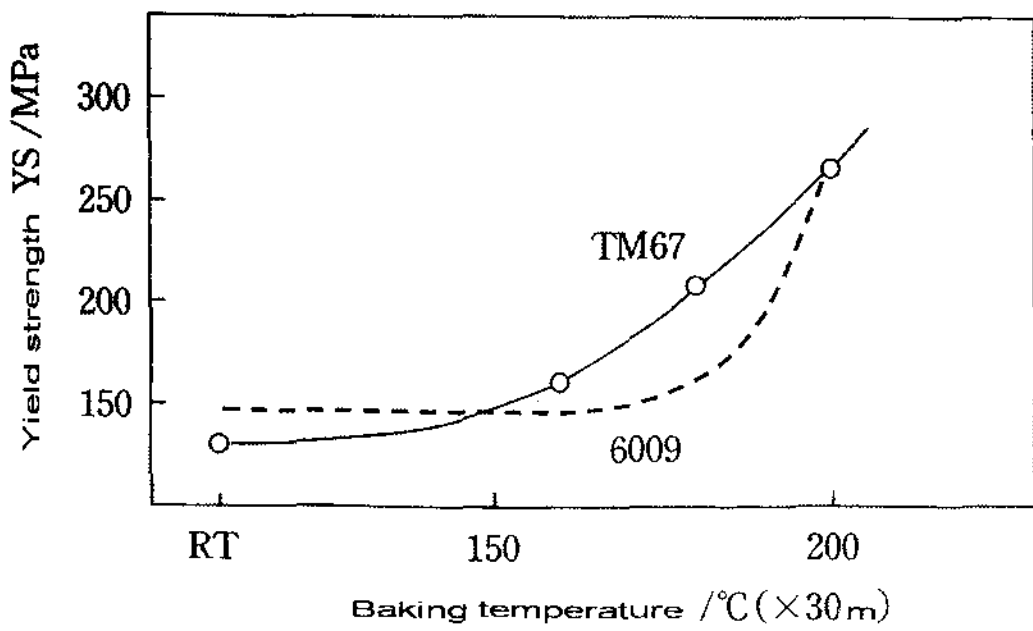


Fig. 5 Baking hard behavior of developed 6000 series Al alloy[10]

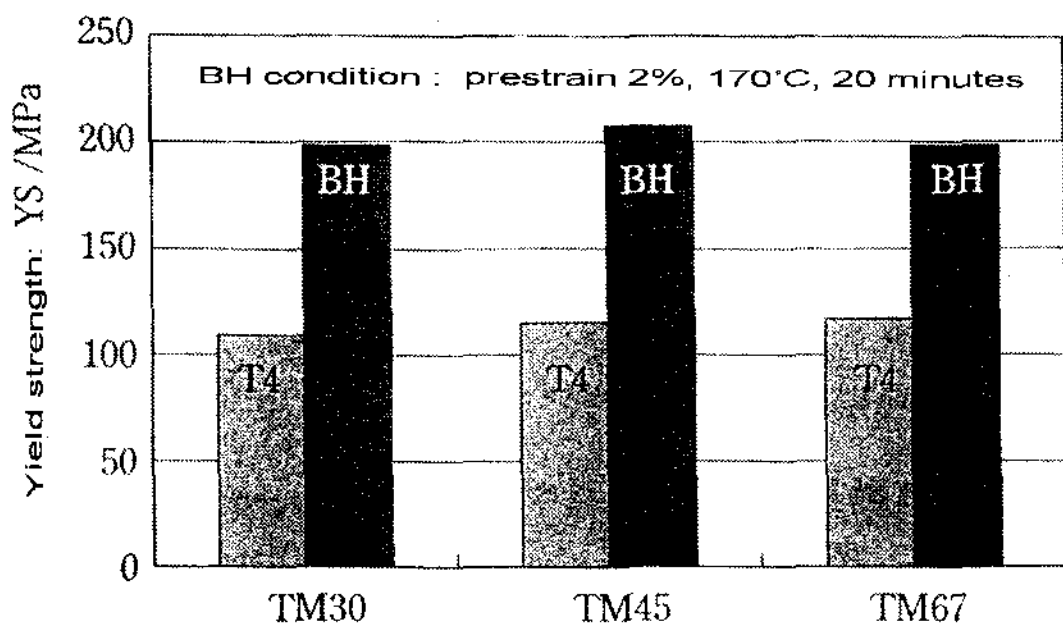


Fig. 6 Baking hard characteristics of 6000 series Al alloy body sheet

2.3 6000 계합금 바디판재 특성

6000 계 합금판은 성형가공시에 SS 마크가 발생하지 않는다. 또, 자동차제조공정의 도장후 열처리 때에 강도가 증가하는 (Baking Hardening: BH) 성질이 있으며, 내 덴팅성이 향상하는 등 바디 판재로서 뛰어난 특징을 갖추고 있다. 일본국내의 자동차생산라인에서는 도장후 열처리온도가 170°C 전후로 비교적 낮고, 가열처리 시간도 20 분 정도로 짧기 때문에[5], 6000 계 합금의 특징은 살릴 수가 없었다. 그러나 Fig. 5[10]에 보이는 것이 일본내의 도장후 열처리 조건에도 충분한 강도가 얻어지는 6000 계 합금판강도가 얻어지는 제조 프로세스가 개발되어, 6000 계 합금판이 바디판재로서 실용화되었다.

Fig. 6 에 6000 계 합금 바디판재의 T4 및 BH 후의 항복응력을 보인다.

프레스성형에 의한 가공경화를 고려한 Prestrain 2%를 부여하여 그 후 170°C, 20 분의 가열처리에 의한 BH 후의 항복응력은 200 MPa 에 달한다.

외장판재에 쓰이는 외장재는 내덴팅성의 관점에서 고풍복응력이어야 하는 것이 바람직하다. 반

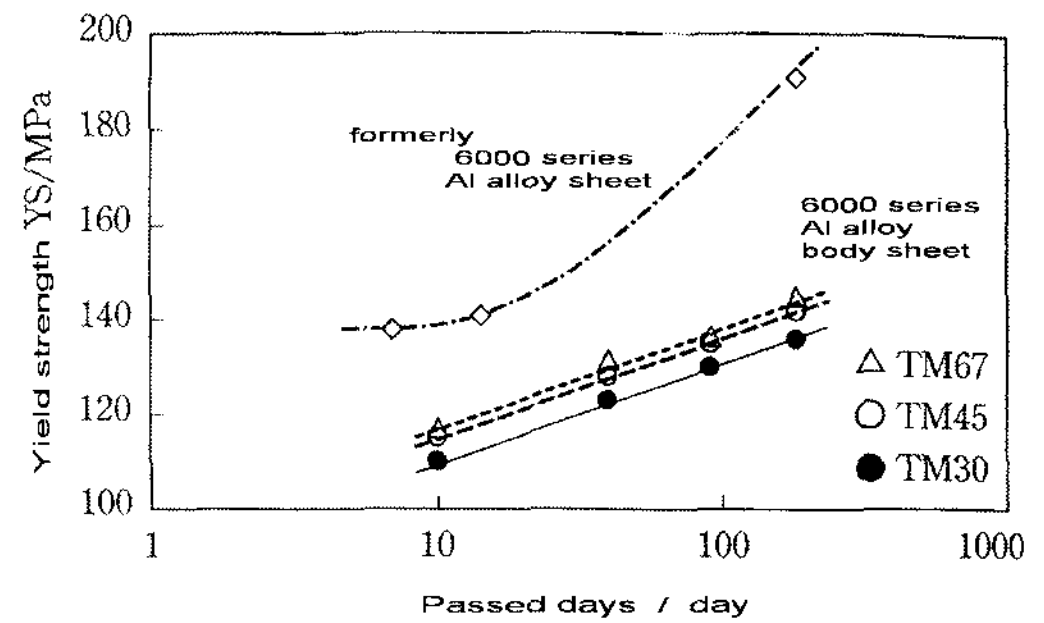


Fig. 7 Room temperature aging characteristics of 6000 series Al alloy body sheet[10]



Fig. 8 Press formed panel

면, 스프링백이 잃어간다. 프레스성형시에는 항복응력이 낮고, 성형후의 도장 열처리로 항복응력이 높아지는 6000 계 합금 바디 판재는 외장재에 적합하다.

외장판재에서는 heming 가공이 될 수 있다. 일반적으로 알루미늄합금판은 국부연신율이 작고, 굽힘한계가 낮다. 특히, 6000 계 합금판은 금속조직적인 요인도 가해지기 때문에 굽힘성의 열화가 현저하며, heming 성에 뒤떨어진다[11]. 그래서, heming 성 개선을 위해서 금속조직의 제어와 저항복응력화가 시도됐다[12]. Fig. 7 에 보이는 것과 같이 6000 계 합금바디판재는 종래의 6000 계 합금판[10]에 비해 실온시효성이 억제되어, 항복응력이 낮게 억제되어 있다. TM30 은 입계석출물의 억제와 저항복응력의 실현에 의해 heming 성을 개선하고, TM45 은 성분조정에 의해 굽힘성을 확보하면서 BH 성 및 성형성을 향상시킨 합금판이다. 또, TM67 은 Ca 의 첨가에 의해 높은 성형성을 부여한 합금판이다.

6000 계 합금바디판재는 외장재로서 뛰어나지만 handling 성, 리사이클 등을 고려하면 내장판넬에 쓰이는 내장재도 6000 계 합금으로 하는 것이 바람직하다. 내장재에 요구되는 가장 중요한 성능은 성형성이며, 이에 성형후의 판넬형상으로 강성을 확보하기 위해 BH 에 의한 강도증가는 반드시 필

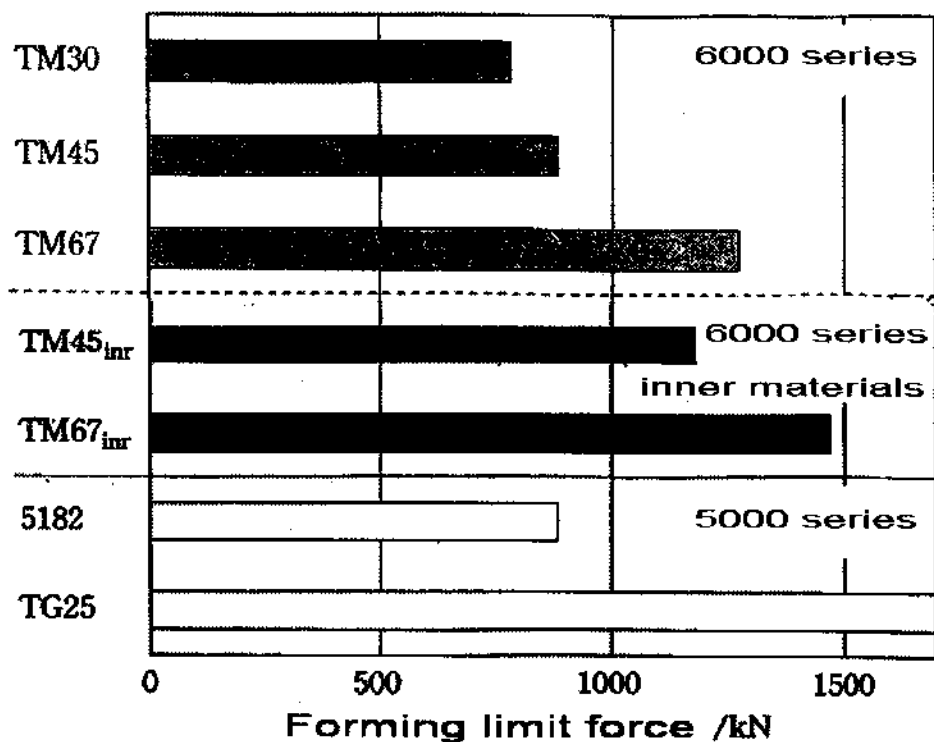


Fig. 9 Forming limit force (B.H.F.) of 6000 series Al alloy

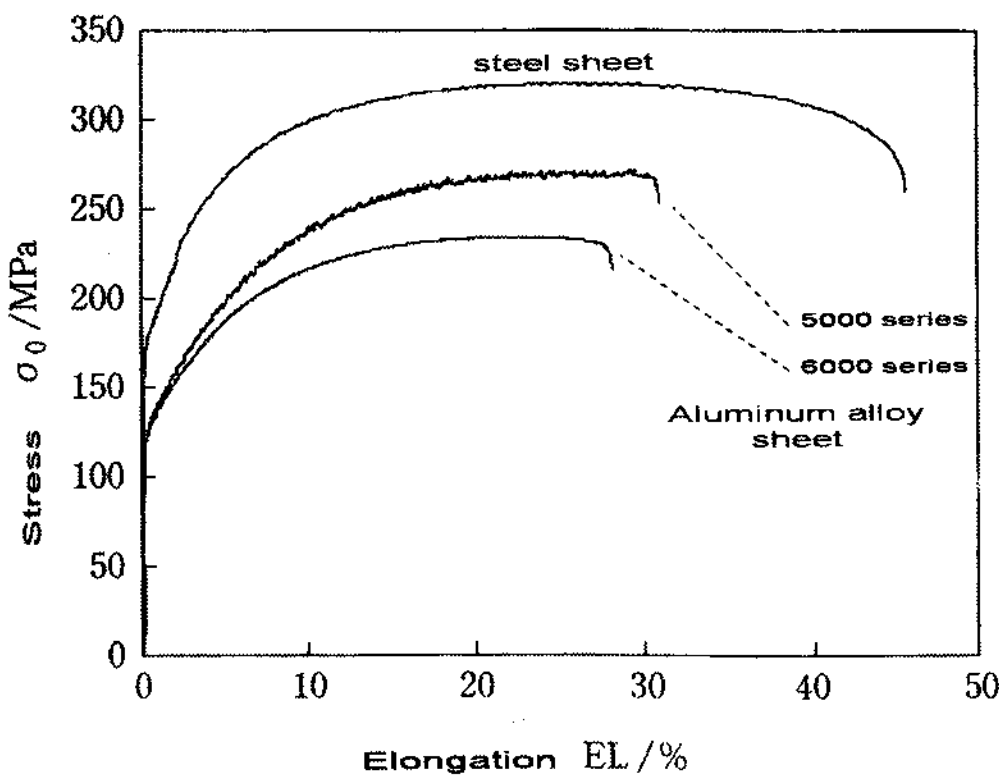


Fig.10 Stress-strain curve of Al alloy sheet and steel sheet

요하지는 않다. 그래서, 열처리방법을 연구하여 BH 에 의한 강도증가는 크지않고, 강도 Balance, 연신율 향상에 의해 양호한 성형성을 부여한 6000 계 합금 바디 판재가 개발되었다.

Fig. 8 에 성형성 평가에 썼던 실험프레스성형을 보이고, Fig. 9 에 6000 계 합금 바디 판재의 성형성을 보였다. 성형성 평가는 판단하지 않으면서 성형되는 최대의 누름력을 나타내는 성형한계 B.H.F.(Blank Holding Force)에 의했다. 성형한계 B.H.F 가 클수록, 성형성은 양호하다.

6000 계 합금 바디 판재에서는 TM30 에 비해 TM45 의 성형한계 B.H.F 가 높고, TM67 의 성형한계 B.H.F 는 더 높다. TM45_{inr} 및 TM67_{inr} 는 각각 TM45 TM67 의 내장판넬 사양재이다. TM45_{inr} 는 TM45 비해 성형한계 B.H.F 가 높고, TM45 보다 성형성은 양호하다. 똑같이 TM67_{inr} 도 TM67 보다 성형한계 B.H.F 가 높고, 성형성이 양호하며 내장

재에 적합하다.

TM30 을 제외한 6000 계 개발합금판의 성형한계 B.H.F 은 5000 계 고성형재 TG25 에는 미치지 않으나 일반재의 5182 보다는 높고, 바디 판재로서 비교적 양호한 성형성을 갖고 있다.

3. 프레스 성형성

3.1 알루미늄 합금판의 기계적 성질의 특징

바디판넬을 포함하여, 자동차부품의 프레스 성형에 사용되는 알루미늄 합금판의 성형성은 강판과 비교되는 일이 많다 Fig. 10 에 알루미늄 합금판 및 강판의 응력-변형률곡선을 보였다. 강판에 비해 알루미늄 합금판은 연신율이 매우 작고 특히 최대하중점 이후 연신율, 즉 국부 연신율이 작다.

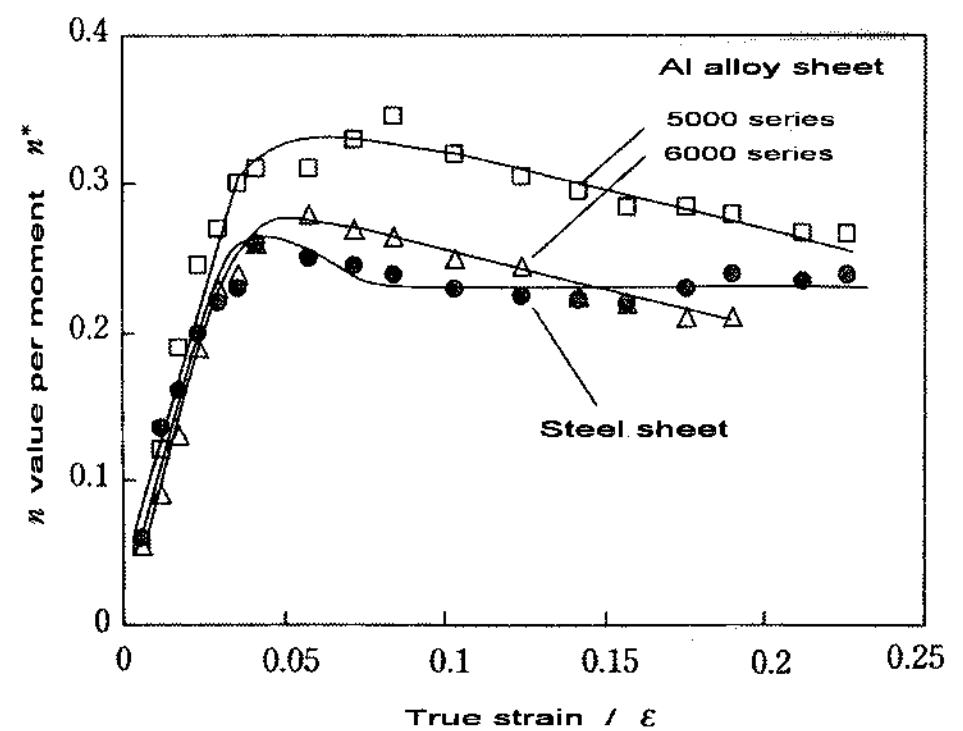


Fig.11 n* value (n value per moment) of Al alloy and steel sheets[14]

일반적으로 알루미늄 합금판의 n 값(가공경화지수)는 강판 보다도 크다.

Fig. 11 에 미소영역의 n 값이며 식(1)에 의해 정의된다는 n*값(순간 n 값) [13]의 변형률에 대한 변화를 표시하였다[14].

$$n^* = (d\sigma/\sigma)/(d\epsilon/\epsilon) \quad (1)$$

$\epsilon \geq 0.1$ 변형률 영역에서 강판의 n*값은 일정하지만 알루미늄 합금판의 n*값은 똑같이 저하하고, 높은 변형률영역에서의가공경화성이 차차감소하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 12에 각 변형률영역에 있어서의 m값(변형률 속도 민감성지수)을 보인다[14]. 강판의 m값은 대개 0.015로 크다. m값이 크면 네킹에 의해 변형영역

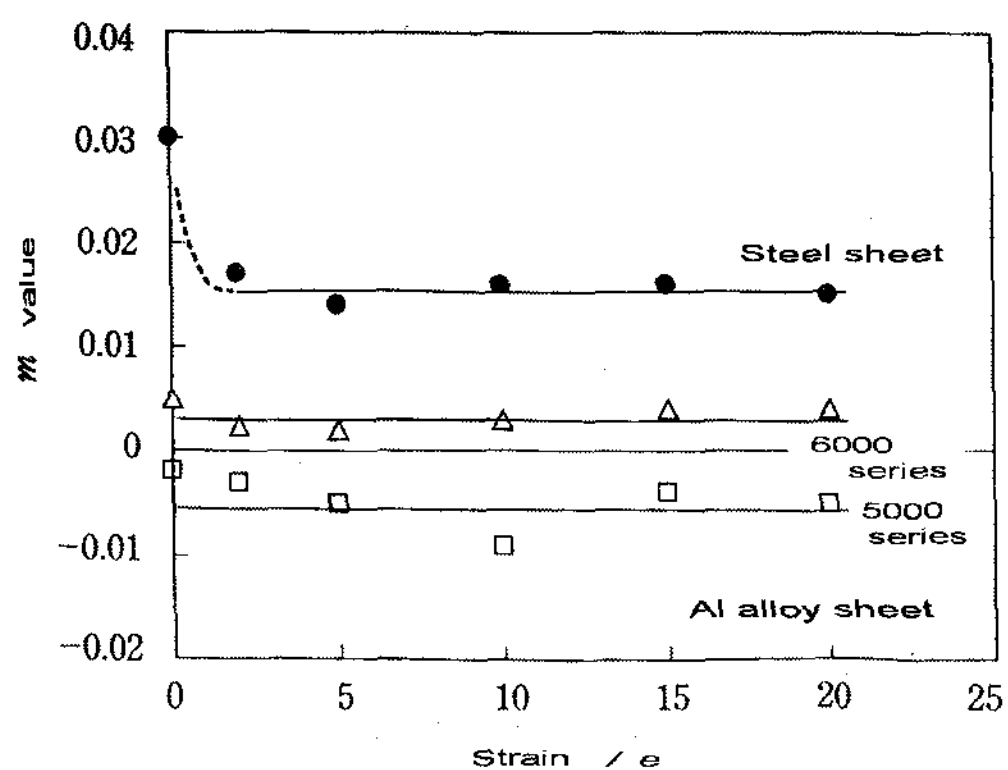


Fig.12 m value of Al alloy and steel sheets[14]

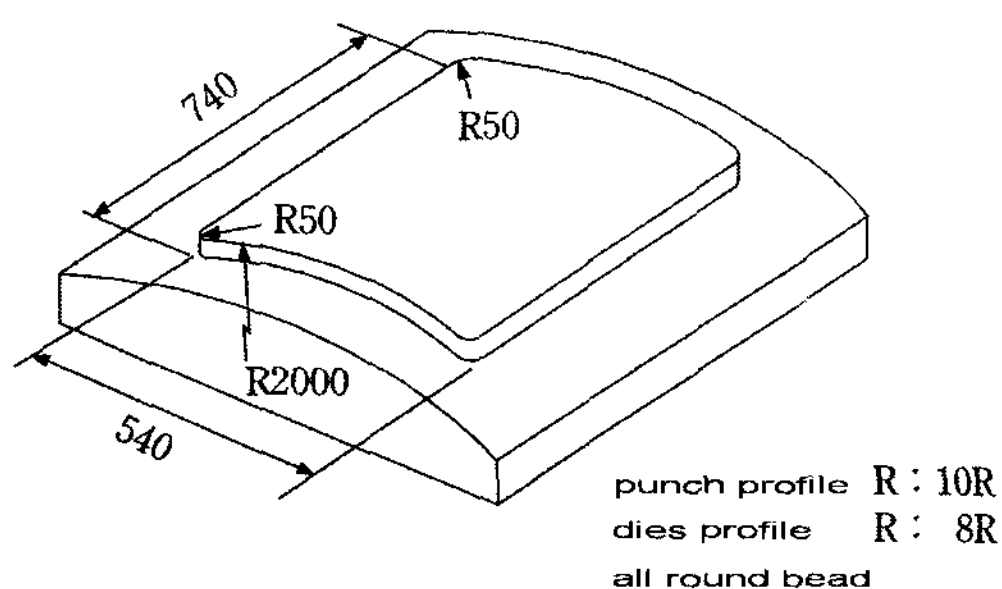


Fig.13 Mold model for formability experiment[17]

이 극소화하고 변형률속도가 증가한 경우 국부의 변형저항이 크게된다. 이 때문에 변형이 주변으로 분산하는 효과가 발생한다고 생각되며 강판의 국부 연신율이 큰 것의 원인이라고 말하고 있다. 그러나 알루미늄 합금판의 m값은 강판에 비해 작고, 변형률 속도의 효과는 기대되지 않는다.

이와 같은 n*값이나 m값의 거동이 알루미늄 합금판의 연신율 특히 국부연신율이 작은 원인이라고 생각된다.

3.2 성형성 지표

성형성 지표는 재료의 선택이나 재료개발에 있어서는 중요한 요소이다. 알루미늄에서 적합한 성형성 지표를 찾아낼 수가 있으며, 이것이 자동차 바디의 알루미늄화에 크게 공헌 하는 것으로 생각된다.

강판에서는 r 값 (소성변형비)가 유효한 성형성 지표이다. 그러나 알루미늄합금판에서는 r 값이 크게 변하지 않는 것도 있고, 반드시 유효한 성형지표는 아니다. 또, 성형성지표는 간편한 시험으로 측정될 수가 있어 바람직하나 인장시험으로 측정된다면 실용상의 가치도 크다. 이와 같은 관점에

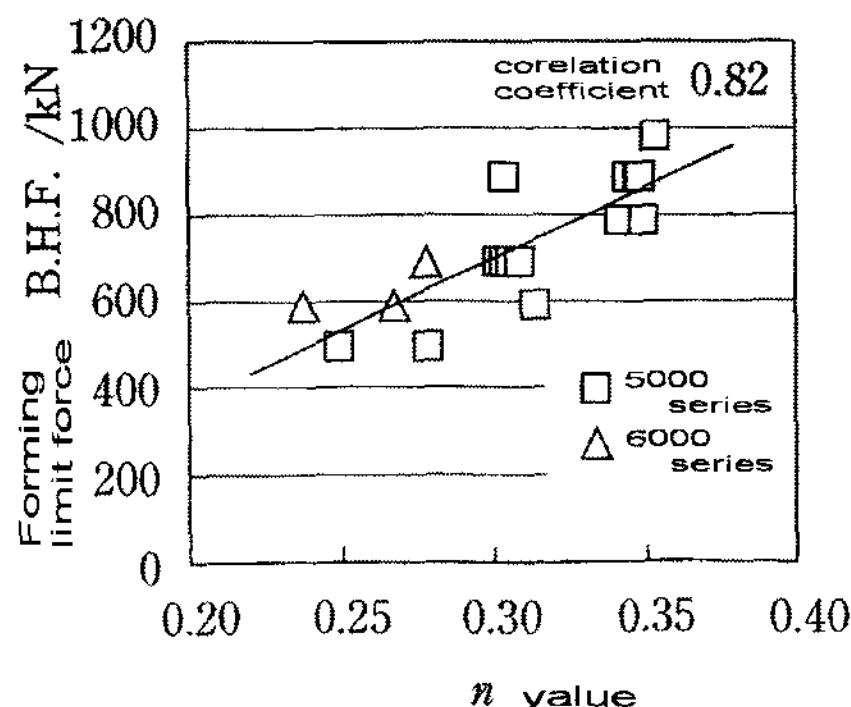
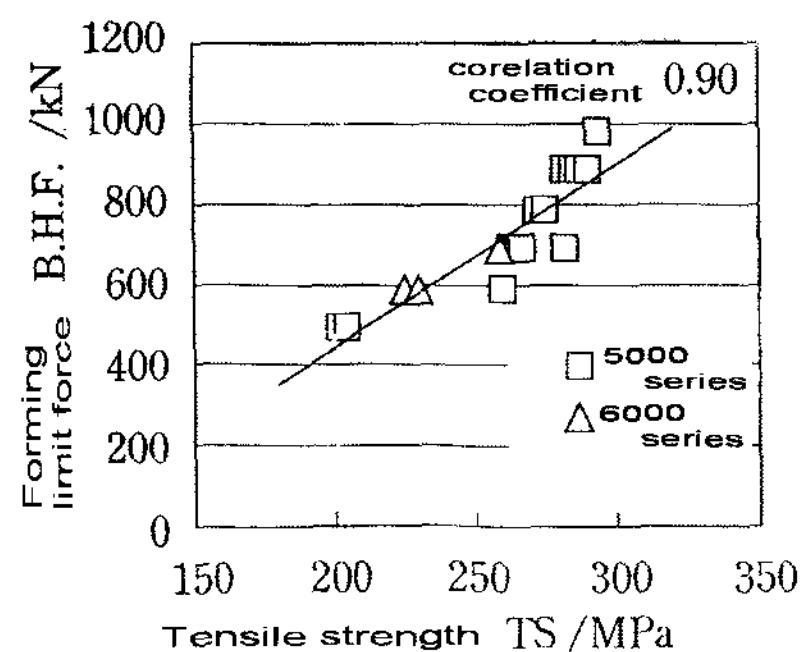
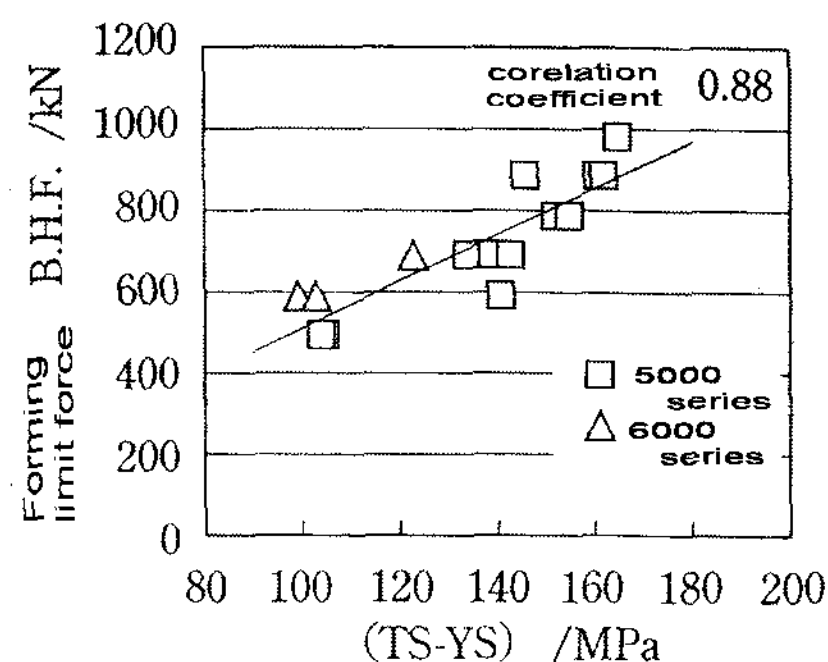


Fig.14 Relationship of TS-YS, TS and n value of Al alloy sheet[17]

서 알루미늄 합금판에 관한 성형성지표가 검토되고, 인장시험에 있어서의 인장강도나 항복응력을 조합한 검토가 행해지고 인장시험에 있어서의 인장강도의 항복응력을 조합한 한 (TS-YS)[15], TS(TS/YS)[16]등이 디프드로잉과 상관이 있다고 보고 되고있다.

저자들은 Fig. 13 에 보인 성형실험용 모델 금형을 이용한 프레스 성형시험에서의 성형한계 B.H.F 에 대한 상관계수의 크기로 성형성지표를 검토했다.

프레스 성형시험에 사용한 5000 계 합금판 및 6000 계 합금판의 (TS-YS), n 값, TS(인장강도) 및 성형한계 B.H.F. 관계를 Fig. 14[17]에 보인다. 성형한계 B.H.F 의 (TS-YS)의 상관계수는 0.88, n 값과의

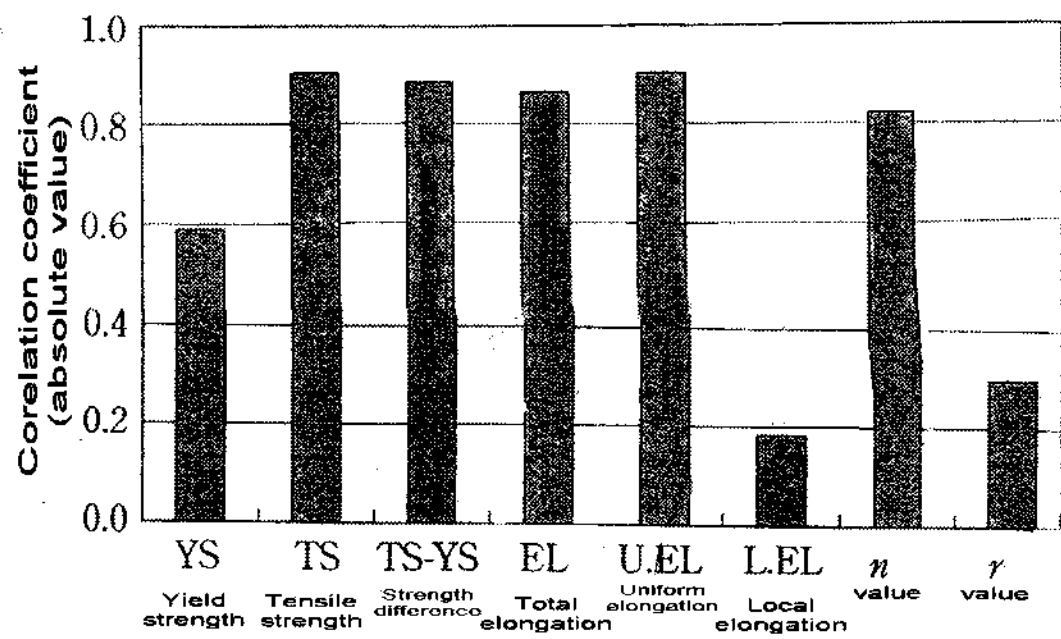


Fig.15 Relationship between materials characteristics and blank holding force (B.H.F.)[17]

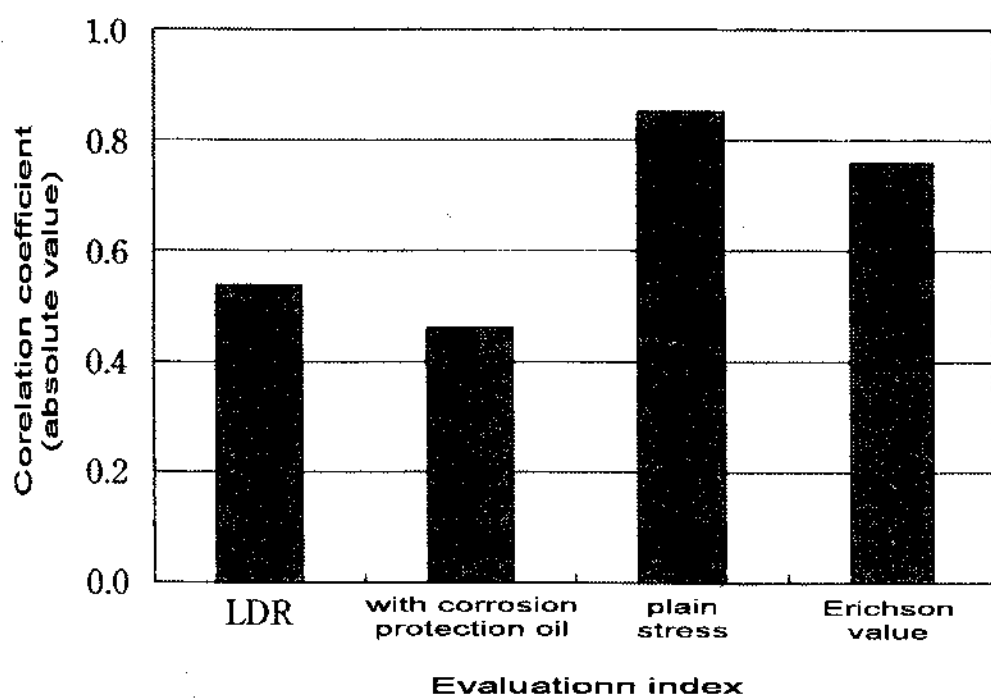


Fig.16 Corelationship between forming limit force (B.H.F.) and evaluation index in small cup forming test[17]

상관계수는 0.82, TS와 상관계수는 0.90이다. (TS-YS)는 성형한계 B.H.F와 양호한 상관관계를 보인다. 또 n 값, TS와 성형한계 B.H.F도 똑같이 양호한 상호관계를 나타낸다.

Fig. 15[17]에 인장시험으로 측정될 수 있는 각 특성값과 성형한계 B.H.F의 상관계수를 표시하였다. 역상관인 경우를 고려하여 각지표와 성형한계 B.H.F의 상관계수의 절대값을 비교했다. TS, (TY-YS), EL(연신율), U.EL(균일연신율), n 값은 상관계수가 0.8 이상으로 좋은 상관을 나타낸다. L.EL(국부연신율), r 값은 상관관계를 작지만, 이것은 알루미늄 합금판인 경우 L.EL와 r 값과 재료에 의해 크게 변하지 않기 때문이라고 생각된다.

다음에, 각종의 소형 컵 시험값과 성형한계 B.H.F의 상관계수를 Fig. 16[17]에 표시하였다. 평면변형인 점이 높은 상관계수가 가장 크다. 프레스성형에 있어서의 파단이 평면변형상태로 되는 부위에서 발생하는 것이 많기 때문에, 평면변형상태에 대한 파단한계를 보이는 평면변형인장이 높

이가 좋은 상관을 나타낸다고 생각된다. 또, 에릭슨값의 상관계수도 크다. 에릭슨값은 판재의 프레스 성형성을 조사하는 간편한 시험법으로서 JIS 규격화되어 널리 쓰이고 있다. 알루미늄합금판에 있어서도, 그 유효성이 재확인되었다고 생각된다.

4. 맺는 말

오일쇼크에서 시작하여, 최근의 교토 의정서에 의한 이산화탄소 배출량 감소방법에 까지, 이유는 변했지만 자동차의 연비향상의 요구는 변하지 않았다. 또, 차체중량은 자동차의 조작이나 운동성에도 깊은 관계되어 있기 때문에 이들의 측면에서도 경량화의 필요가 있으며, 장래에도 차체경량화의 필요성은 변하지 않는다고 생각된다. 경량화를 실현하는 재료로서 알루미늄의 기대도 더욱 크게 된다고 생각된다.

최근의 합금설계와 제조프로세스의 개선에 의해, 자동차 바디용 알루미늄 판재의 성형성은 향상된다. 그렇지만 자동차 바디용 판재에 구해지는 성형에 관한 요구를 채울 때까지에는 이르지 않는다. 또, 성형성지표는 재료개발이나 재료의 선택에 중요한 정보를 보여주는 것이며, 많은 연구보고가 되었으나, 이제까지에는 보편적인 것이라 아울러 측정되기 쉽다. 실용성의 높은 성형성지표를 찾아내지는 않은 것으로 생각된다. 이후, 검토를 진행하여 알루미늄 합금판의 적합한 성형성지표를 찾아낼수 있으며 자동차 바디용 알루미늄 판재의 성형성 및 성형기술이 향상될 것을 기대한다.

본 논문은 한국소성가공학회와 일본소성가공학회의 번역 게재협정에 의하여 저자의 허락을 생략하고 번역하여 게재합니다.

참고 문헌

- [1] 多田博·佐々木憲夫 : 自動車技術, 55-4(2001), 9-16.
- [2] 八木三哉·小宮山恭弘·峯憲一郎 : 同上, 55-4(2001), 29-34.
- [3] 牛尾英明 : 軽金属, 56(2006), 580
- [4] 日本アルミニウム協会 : アルミ板類出荷推移, (2006).

- [5] 片桐知克·竹島義雄·東海林了·和田原英輔·山形·光晴·福井清之·中西栄三郎·須田峰人·南秀和·河合功介·高末鉄幹·森孝男·藤本正男 : 自動車技術会, 26-06, 20064492 (2006), 46-59.
- [6] 高橋淳·勝倉誠人 : 同上, 2006 春大会, 20064396 (2006), 8-11.
- [7] 野口修 : Furukawa-Sky Review, 3 (2007), 1-6. 高橋淳·勝倉誠人: 同上, 2006 春大會, 20064396 (2006), 8-11.
- [8] 竹島義雄 : 住軽技報, 44-1 (2003), 111-118.
- [9] 稻葉隆 : 神戸製鋼技報, 52-3 (2002), 79-82.
- [10] 阿部佑二·吉田正勝·野口修·松尾守·小松原俊雄 : 塑性と加工, 33-375 (1992), 365-370.
- [11] 志賀信道 : 自動車技術会, 2006 年春季大会, 20064396 (2006), 1-7.
- [12] Saga, M., Kikuchi, M., Zhu, Y. & Matsuo, M. : Proc. ICAA-6, (1998), 425-430.
- [13] 薄鋼板成形技術研究会 編 : プレス成形難易ハンドブック 第3版, (2007), 99, 日刊工業新聞社.
- [14] Usuda, M., Hashimoto, K., Amaike T., Katayama, T., Abe, Y. & Yoshida, M.:SAE, No950924 (1995), 191-201.
- [15] 中村真一郎·恵比根美明·佐藤章仁·岩田徳利·富岡良郎·松居正夫 : 44 回塑加連講論, (1993), 613-614.
- [16] 林稔·戸次洋一郎·林登·安永晋拓·松本義裕·橋口耕一 : 92 回軽金属春講概, (1997), 69-70.
- [17] 阿部佑二·吉田正勝·野口修·臼田松男·片山知久 : 平5 塑加春講論, (1993), 301-304.