

롤 압연된 STS-Al-Mg 이중금속판재의 온도와 변형율속도에 따른 1축인장 변형특성

황범규¹ · 이광석¹ · 홍순익² · 이영선[#]

Temperature and Strain Rate Dependent Tension Properties of Stainless Steel-Aluminum-Magnesium Multilayered Sheet Fabricated by Roll Bonding

B. K. Hwang, K. S. Lee, S. E. Hong, Y. S. Lee

(Received April 22, 2011 / Revised May 18, 2011 / Accepted May 23, 2011)

Abstract

Multilayer(clad) sheets, composed of two or more materials with different properties, are fabricated using the roll-bonding process. A good formability is an essential property for a multilayered sheet in order to manufacture parts by plastic deformation. In this study, the influences of temperature and strain rate on the plastic properties of stainless steel-aluminum-magnesium multilayered(STS-Al-Mg) sheets were investigated. Tensile tests were performed at various temperatures and strain rates on the multilayered sheet and on each separate layer. Fracture of the multilayered sheet was observed to be temperature-dependent. At the base temperature of 200°C, all materials fractured simultaneously. At lower temperatures, the Mg alloy sheet fractured earlier than the other materials. Conversely, the other materials fractured earlier than the Mg alloy sheet at higher temperatures. The uniform and total elongations of the multilayered sheet were observed to be higher than that of each material at a temperature of 250°C. Larger uniform elongations were obtained for higher strain rates at constant temperature. The same trend was observed for the Mg alloy sheet, which exhibited the lowest elongation among the three materials. The tensile strengths and elongations of the single layer sheets were compared to those of the multilayer material. The strength of the multilayered sheet was successfully calculated by the rule of mixture from the values of each single layer. However, no simple correlation between the elongation of each layer and that of the multilayer was obtained.

Key Words : Multilayered Sheet, Tensile Test, Strain Rate, Plastic Deformation

1. 서 론

이중금속 판재(multilayered sheet; 다층판재, 클래드 판재라고도 함.)는 복합재료의 일종으로 서로 성질이 다른 둘 또는 그 이상의 재료를 접합하여 단일 금속재료와는 다른 특성을 갖는 재료이다. 접합방법으로는 압연에 의한 방법이 가장 경제적이며 널리 이용되고 있다[1].

현재 상용화되어 있는 이중금속 판재는 열전도율, 열보존율, 열효율성이 뛰어난 알루미늄과 내염성, 내산성, 내알카리성 및 내식성이 뛰어난 스테인리스 스틸을 접합시킨 이중금속 판재가 대표적이다. 또한 자동차 부품, 휴대폰, 전자 제품 등에서 경량화에 대한 수요가 증가함에 따라 전자파 차폐성, 인체 친화성, 고비강도 경량 소재인 Mg합금을 접합시킨 STS-Al-Mg 이중금속 판재 개

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹

2. 충남대학교 나노소재공학과

교신저자: 이영선, E-mail: lys1668@kims.re.kr

발 및 응용이 진행되고 있다. 그러나 Mg합금이 포함된 이종금속 소재에 대한 연구는 현재까지 미미한 상태이다.

이종금속 판재에 대한 선행연구로는 특성향상을 위한 연구[5~6]와 성형성에 대한 연구가 수행된 바 있다[7~10]. Lee[4] 등은 STS-Al-Cu 이종금속 판재의 어닐링 처리에 따른 영향을 분석한 결과 어닐링 온도 400℃ 경우, 계면에서 Al₂Cu 상이 발생되어 연신율이 저하됨을 보고하였다. Manesh[5] 등은 Al-Fe 이종금속 판재의 경우 400℃에서 16시간 동안 어닐링 처리하는 것이 성형성과 강도에 가장 유리함을 보고 하였다[4]. 이종금속 판재 제조 공정 조건에 대한 선행연구들과는 달리, 소재 응용을 위한 성형성 연구는 부족한 상태이다.

본 연구에서는 STS-Al-Mg 이종금속판재의 성형성에 대한 기초 데이터 확보를 위해 1축 인장시험을 수행하여 온도와 변형률속도에 따른 소성변형 및 파단특성을 분석하였다. 또한 이종금속을 구성하고 있는 각 소재들의 인장특성과 비교함으로써 이종소재의 소성변형 특성에 미치는 인자들의 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시험 소재

본 실험에 사용한 소재는 롤 본딩(roll bonding) 방법으로 제조된 STS430-Al3004-AZ31 이종금속 판재로서 각 소재에 대한 화학 조성은 Table 1과 같다. Fig. 1(a)와 같이 상부로부터 STS430, Al3004, AZ31합금을 적층한 후 열간압연과 열처리 공정을 통해 제조되었다. 각 소재의 두께는 공구현미경 측정결과 STS430(0.98mm), Al3004(1.24mm), AZ31(1.63mm)의 두께로 Fig. 1(b)와 같다.

롤 본딩법으로 이종금속소재가 제조될 때는 소성변형으로 원소재의 물성이 변화될 수 있으므로 원소재의 변형특성을 이종소재 특성 분석에 바로 적용할 수 있는지에 대한 분석이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 각 소재별의 물성에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 이종금속소재로부터 각층의 소재를 분리시켜 시험편을 채취한 후 인장시험을 수행하였다. 이종금속 판재의 시험편은 Fig. 2(a)에 나타내었으며, 분리하여 제조된 각 소재별 시험편은 Fig. 2(b)에 나타나 있다.

각 층의 소재를 분리하기 위해 화학적 방법으로 수산화트륨(NaOH)를 이용하였다. 수산화나트

Table 1 Material chemical compositions

SUS	C	Cr	Mn	Si	Fe
(STS430)	≤0.12	16~18	≤1.0	≤1.0	Bal.
Al	Mn	Mg	Fe	Si	Al
(Al3004)	1~1.5	0.8~1.3	≤0.7	≤0.3	Bal.
Mg	Al	Zn	Mn	Si	Mg
(AZ31)	2.5~3.5	0.6~1.4	0.2~1.0	≤0.1	Bal.

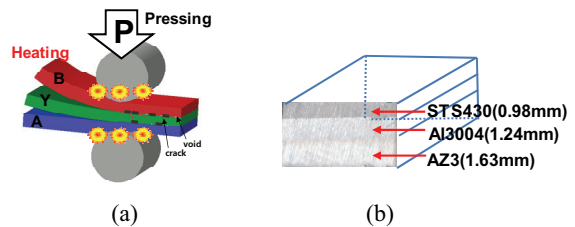


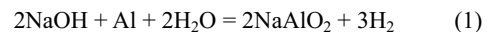
Fig. 1 Schematic diagram of roll bonding process and cross section of the multilayered sheet: (a) roll bonding process, (b) cross section



Fig. 2 Tensile specimens of multilayered sheet and separated sheet: (a) multilayered sheet, (b) separated sheet

륨과 물의 비율을 6:4로 하여 시험편을 넣고 소재가 분리될 때까지 교반하였다.

화학 반응식은 식 (1)과 같다.



식(1)과 같이 Al3004합금을 화학적으로 제거한 후 STS430과 AZ31합금의 판재를 분리하였다. 또한 Al3004합금을 분리하기 위해 STS430과 AZ31합금을 절단한 후 잔존하는 합금은 연마(polishing) 처리하였다. 소재 절단 시 발생하는 표면 노치(notch)에 의한 시험편 조기파단을 최소화하기 위해 소재의 절단면과 옆면을 연마하였다.

2.2 인장시험

이종금속판재와 각 층간 단일소재를 온도와 변형률속도에 따른 유동곡선을 측정하기 위해 밀폐

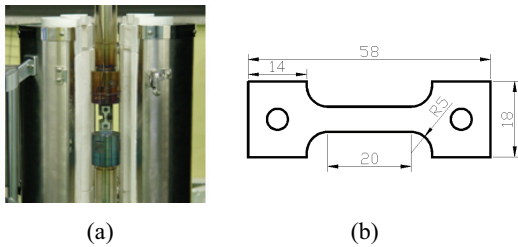


Fig. 3 Tensile test equipment and specimen : (a) tensile test equipment, (b) specimen

Table 2 Tensile test conditions

Variables	Values
Gage length(mm)	20
Thickness(mm)	Multilayer sheet : 3.85
	STS430 : 0.98, Al3004 : 1.24
	AZ31 : 1.63
Temperature(°C)	Room Temp., 100, 150, 200, 250, 300, 400
Strain rate(/sec.)	10^{-1} , 10^{-2}

형 가열로 내에서 고온 인장시험을 실시하였다. 정확한 변형률을 측정하기 위해서는 변위측정기 (extension meter)를 부착해야 하지만 승온된 상태 이며 대변형을 측정해야 하기 때문에 고온 변위측정기 사용이 곤란하여 인장시험기 자체의 변위로 진변형률을 계산하였다. Fig. 3(a)는 만능인장시험기 (UTM)와 함께 사용된 가열로이며, Fig. 3(b)는 인장 시험편(ASTM-E8M-01, sub-size)을 나타내고 있다.

다층소재와 개별소재의 인장시험조건은 Table 2 와 같다.

AZ31 합금의 경우 온도에 따른 성형성은 많은 선행 연구자들의 연구 결과에 의해 분석된 바 있다. 상온에서 낮은 성형성으로 인해 온간이나 열간에서 성형이 이루어지는 AZ31 합금의 최적 성형온도는 200~300°C 영역이다[2~4]. 본 연구에서 사용된 이종금속 소재 가운데 상대적으로 성형성이 가장 취약한 소재는 AZ31 합금이다. 3 가지 소재 가운데 가장 낮은 성형성을 갖는 소재의 영향이 가장 큰 만큼, AZ31 합금의 영향인자를 기준으로 온도 범위는 250~300°C를 기준으로 하여 상온부터 400°C까지, 변형률속도(strain rate)는 0.1, 0.01/sec.에서 시험하였다. 시험편은 온도 균일화를 위해 목표온도에서 약 20~30min 동안 유지하였다. 시험 온도 기준은 열전대(thermocouple)를 통해 직접 측정된 소재의 실제 온도를 이용하였다.

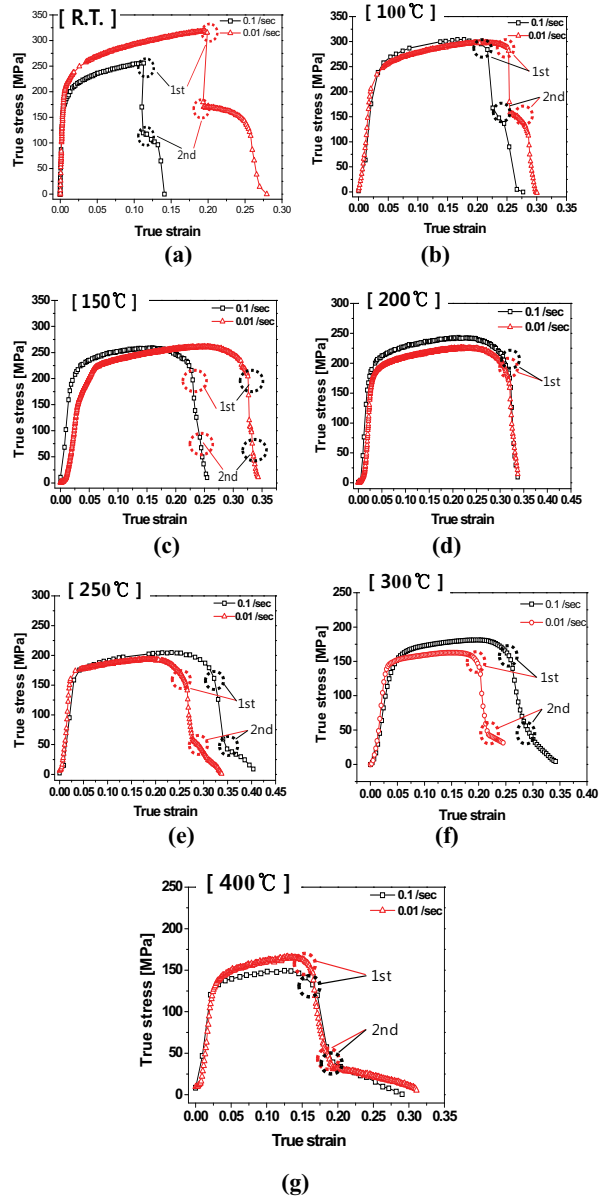


Fig. 4 True stress-strain curves of multilayered sheet under various strain rates at temperatures of : (a) room temp., (b) 100°C, (c) 150°C, (d) 200°C, (e) 250°C, (f) 300°C and (g) 400°C

3. 결과 및 토의

3.1 이종금속판재 인장변형 특성

이종금속 판재의 인장시험 결과로 Fig. 4에 온도와 변형률속도에 따른 1축 인장변형 거동을 나타

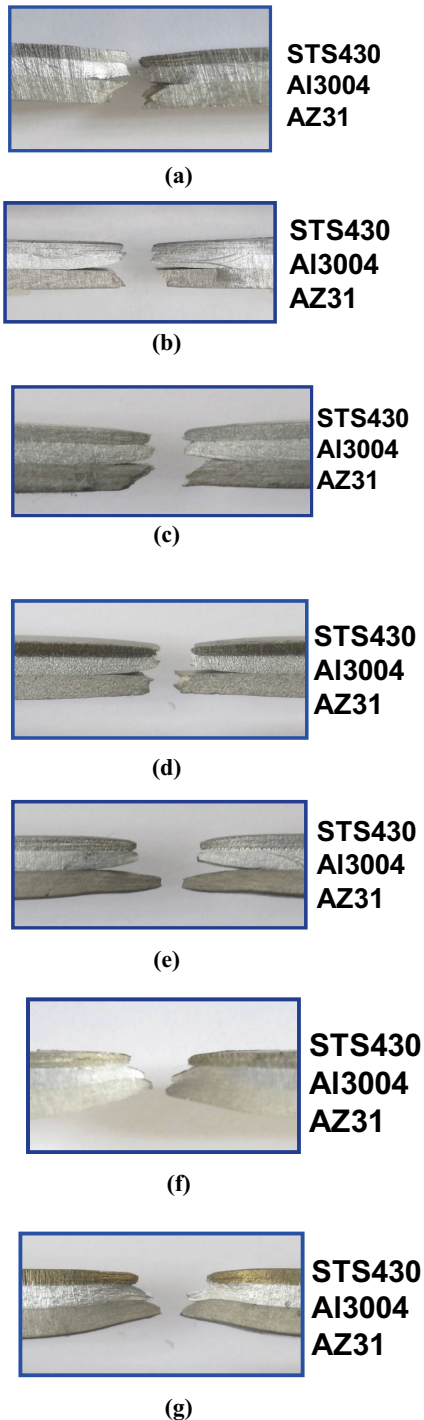


Fig. 5 Fractured section of multilayered sheet under various strain rates at temperatures of : (a) room temp., (b) 100 °C, (c) 150 °C, (d) 200 °C, (e) 250 °C, (f) 300 °C and (g) 400 °C

내었다. 일반적인 단일소재와는 달리 2번의 변곡 점이 나타나고 있다. 온도에 따라 파단 양상이 첫번째(1st) 파단과 두번째(2nd) 파단이 발생하는 위치와 소재의 종류가 온도와 변형률속도 따라 상이한 결과를 나타내고 있다.

3.1.1 온도영향

온도에 따른 영향으로 상온(room temp.) 및 100 °C에서는 AZ31합금이 먼저 파단된 후 STS430과 Al3004소재가 동시에 파단되었다. 상온인장 시험에서는 큰 연신없이 취성파단(brittle) 양상을 보이는데 이는 AZ31합금의 낮은 파단 특성 때문이다. 150 °C에서도 STS430과 Al3004합금이 먼저 파단되었지만 거의 동시에 파단되는 양상을 나타내었다. 반면, 200 °C에서는 3가지 소재가 모두 동시에 파단되었다. 250 °C에서는 STS430과 Al3004합금이 동시에 AZ31합금 보다 먼저 파단 되었다. 결국 200 °C 부근을 경계로 파단양상이 변화되어 200 °C 보다 저온에서는 AZ31합금이 먼저 파단되고 그 보다 고온에서는 상대적으로 STS430합금이 먼저 파단 되고 있다. 300 °C에서는 STS430합금이 먼저 파단이 발생된 후 Al3004, AZ31 순서로 파단 됨으로써 250 °C부근에서의 증가된 AZ31합금 연신 특성이 많은 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 400 °C에서는 300 °C와 유사한 경향이지만 총연신율은 감소하는 결과를 나타내고 있다. 각 온도 별 파단 양상 분석은 Fig. 5 파단면 사진에서 확인할 수 있다. Fig. 5(a)~(g)에 파단면 사진에서 200 °C를 기준으로 첫번째 파단과 두번째 파단이 발생하는 소재 종류와 경향이 변화되었다.

온도증가에 따라 항복강도 및 인장강도는 감소하며 250~300 °C에서 균일연신율과 총연신율이 다소 증가하는 경향을 나타내고 300 °C 이후부터는 감소하고 있음을 Fig. 6(a), (b), (c)에서 확인할 수 있다.

3.1.2 변형률 속도 영향

Fig. 6(d)는 온도와 변형률 속도에 따른 균일연신율을 나타내고 있다. 온도 증가에 따라 200~250 °C구간 까지는 균일연신율이 증가되었다.

0.01/sec.일때가 0.1/sec.보다 상대적으로 큰 균일연신율을 나타내었다. 그러나 200~350 °C에서는 변형률 속도가 상대적으로 높은 0.1/sec.에서 보다 큰 균일연신율을 나타내고 있다. 이러한 현상은

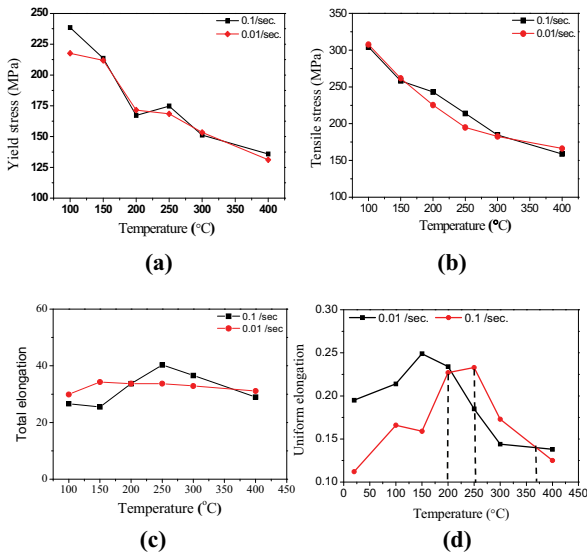


Fig. 6 Yield, tensile strength and elongation at each temperature and strain rate : (a) yield strength, (b) tensile strength, (c) total elongation, (d) uniform elongation

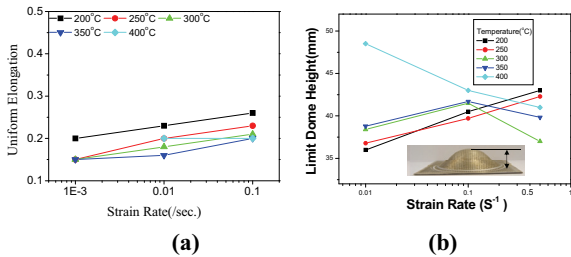


Fig. 7 Uniform elongation and limit dome height of AZ31 at each temperature and strain rate : (a) uniform elongation, (b) limit dome height

AZ31합금의 특성을 따르는 것으로 Fig. 7(a), (b)에서 알 수 있듯이 AZ31합금은 변형률 속도가 증가될수록 균일연신율이 증가되는 현상으로부터 그 원인을 설명할 수 있다.

3.2 단층 개별소재 인장시험

롤 본딩 후 이중금속을 구성하고 있는 각 소재들이 소성변형특성에 미치는 영향이 무엇인지 원인 분석을 위해 다층소재를 각각의 단층 개별소재로 분리하였다. 분리된 각 개별소재를 사용하여 다층소재 인장시험과 동일 조건으로 시험을 수행하여 결과를 비교·분석 하였다.

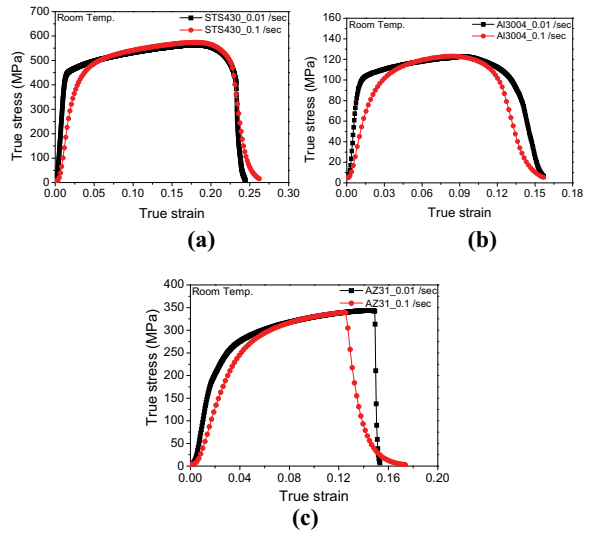


Fig. 8 True stress-strain curve of results at each material at room temperature : (a) STS430, (b) Al3004, (c) AZ31

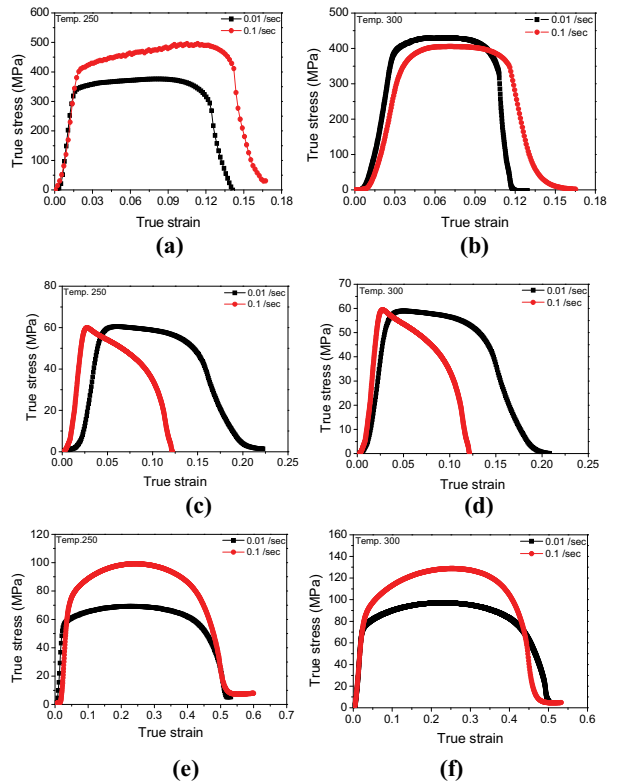


Fig. 9 True stress-strain curve of each material at high temperature : (a) STS430 250°C, (b) STS430 300°C, (c) Al3004 250°C, (d) Al3004 300°C, (e) AZ31 250°C, (f) AZ31 300°C

3.2.1 온도 및 변형률속도의 영향

Fig. 8은 단층 개별소재 상온 인장시험 결과를 나타내었다. Fig. 8(a)에서의 STS430은 450MPa 수준에서 항복이 시작되어 550MPa 이상의 인장강도, 0.25의 연신율을 나타내고 있다. 반면 Al3004와 AZ31은 0.15수준의 낮은 연신율을 Fig. 8(b), (c)를 통해 나타내고 있다. 상온 상태에서는 변형률 속도의 영향은 나타나지 않고 있다. 상온에서는 3가지 소재 모두 변형률속도의 영향이 거의 없으며, 이것은 일반적인 현상이다. 시험의 신뢰성을 높이기 위해 다층소재와 동일 조건인 250~300°C에서 인장시험을 수행하였다. 개별 소재 고온시험 결과 STS430은 온도가 증가함에 따라 연신율이 감소함을 Fig. 9(a), (b)를 통해 알 수 있다. 한편 온도가 증가할수록 연신율은 감소하는 경향을 보이는데 이러한 현상은 동적변형률시효(dynamic strain aging) 현상과 관련되어 나타난다고 보고되어 있다[9]. 또한 Fig. 9(c)~(f)에서 Al3004의 경우 변형률 속도 0.1/sec.에서는 항복과 동시에 과단이 발생하였고 0.01/sec.에서 균일 연신 및 총연신율이 높게 나타났다. AZ31소재는 고온에서 연신율이 약3배 이상 증가 하였으며 변형률속도가 증가 할수록 인장강도가 증가함을 알 수 있다.

3.3 단층 개별소재와 이중금속소재 변형특성 관계

롤 본딩으로 접합된 이중금속 소재인 다층소재와 각각 분리된 단층 개별소재와의 특성을 비교·분석하였다. 1축 인장의 기본적인 변형특성인 항복강도, 최대인장강도 그리고 연신율에 대한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a), (b)에 나타나 있는 항복강도 및 최대인장강도는 STS430합금이 다른 합금에 비해 현저히 높게 나타났다. 그리고 AZ31합금의 경우 온도가 증가함에 따라 항복강도가 감소하며 250~300°C에서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Al3004합금의 경우 변형률속도와 온도 증가에 관계 없이 항복강도와 최대인장강도는 유사하게 나타났다. 다층소재 제조를 위한 중간소재로 접합에 크게 관여하지만 전체적인 물성에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

연신율에 대한 비교 결과를 Fig. 10(c)에 나타내었다. STS430합금의 경우 온도가 증가함에 따라 연신율은 감소하였다. 또한 다른 소재와는 달리 변형률 속도가 느릴수록 연신율이 낮게 나타나고 있다. Al3004합금의 경우 연신율의 변화는 크게 나

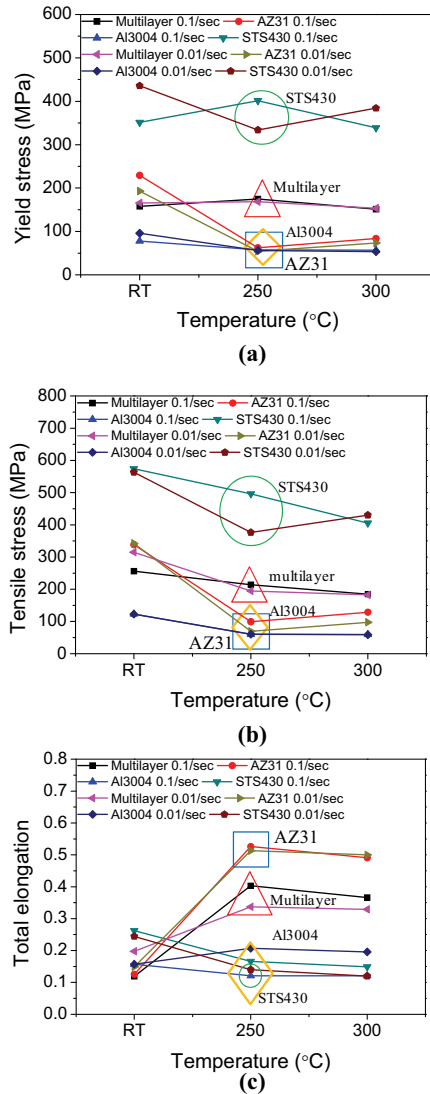


Fig.10 Comparison graph of yield, tensile strength and elongation at temperature at each material and multilayered sheet : (a) yield stress, (b) tensile stress, (c) total elongation

타나지 않았지만, AZ31합금은 250~300°C에서 현저히 증가함을 알 수 있고 온도증가와 변형률속도에 따라 연신율이 변화되는 현상은 AZ31합금의 영향으로 판단되며, 다층소재의 총연신율에 주된 영향을 미침을 알 수 있다.

이중금속 소재를 각각 절단한 단층소재를 이용하여 250~300°C에서 변형률 속도에 따라 각 소재의 유동곡선(응력-변형률) 합에 대한 평균 값을

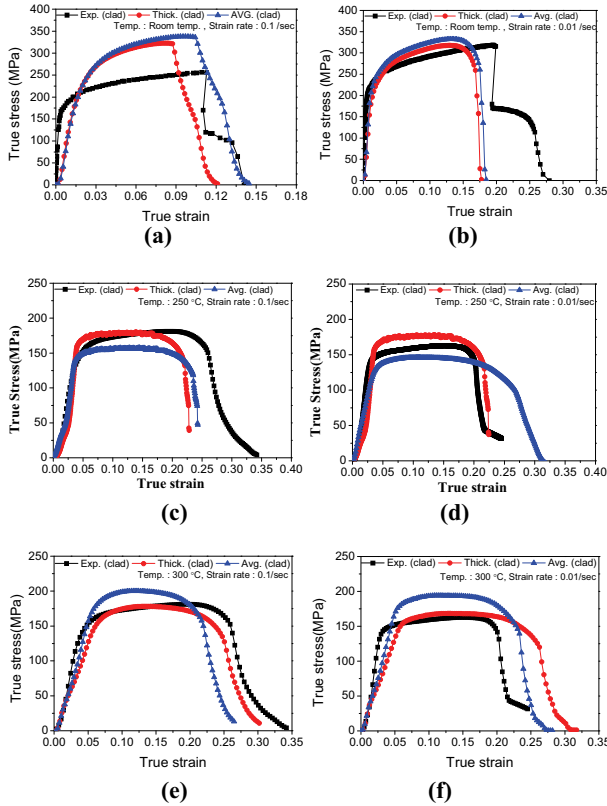


Fig.11 The flow stress curves and considering the thickness by each material : (a) room temperature strain rate 0.1/sec, (b) room temperature strain rate 0.01/sec, (c) 250 °C strain rate 0.1/sec, (d) 250 °C strain rate 0.01/sec, (e) 300 °C strain rate 0.1/sec, (f) 300 °C strain rate 0.01/sec

비교 하였다. 또한 각 소재별 물성 데이터에 롤 본딩으로 접합된 다층소재의 소재 두께를 고려한 평균값으로 비교·분석 하였다.

비교 식은 식(2), (3)과 같다.

유동곡선 합에 대한 대수적 평균값

$$[(STS430) + (Al3004) + (AZ31)]/3 \quad (2)$$

두께를 고려한 평균값

$$[t_a(STS430) + t_b(Al3004) + t_c (AZ31)]/T_t \quad (3)$$

식 (3)에서 t_a 는 STS430소재의 두께, t_b , t_c 는 Al3004와 AZ31소재의 두께를 t_t 는 이종금속소재

전체 두께를 나타내고 있다.

온도 및 변형률속도가 증가함에 따라 (2), (3)식에 의해 계산된 유동응력을 Fig. 11에 나타내었다. 두 수식 모두 상온에서 나타나는 2번의 파단 현상(변곡)을 예측할 수는 없었으며, 응력은 두께를 고려한 경우가 보다 유사한 경향을 나타내고 있는 반면, 연신율은 동일한 경향을 나타내지 않고 있다. 이러한 연신율의 예측 어려움은 개별소재의 연신율 이외에 개별소재간 계면 접합력이 작용하고 있기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 STS430-Al3004-AZ31 다층소재와 단층소재의 소성변형 해석에 필요한 유동응력 특성을 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이종금속 판재의 고온 인장시험을 통해 100~150 °C에서는 AZ31합금이 STS430, Al3004합금 보다 먼저 파단되고 200 °C에서는 3가지 소재가 동시에 파단되었다. 250 °C 이상의 온도에서는 AZ31합금의 성형성이 향상되어 STS430, Al3004합금이 AZ31합금 보다 먼저 파단되었다.

(2) 이종금속 소재의 인장강도는 각 소재(STS430, Al3004, AZ31)의 개별적 인장강도의 유효(rule of mixture) 값으로 나타나고 있으며 이종금속의 최대 인장강도는 상대적으로 가장 강도가 높은 소재인 STS430합금의 영향을 받고 있다.

(3) 상온에서부터 온도증가에 따라 균일연신율이 증가되어 200~250 °C구간에서는 상온보다 2배 이상 증가되어 0.2이상을 나타내었다.

(4) 변형률 속도에 따라 변화가 거의 없는 항복 강도와는 달리 균일연신율은 함께 증가되었다. 200~350 °C구간에서는 변형률 속도가 상대적으로 높은 0.1/sec. 경우가 0.01/sec.보다 큰 균일연신율을 나타내었다.

(5) 이종금속소재의 온도와 변형률속도에 따른 연신율 변화는 AZ31합금의 특성과 동일한 양상을 나타내었다. 결국, 이종금속소재의 강도는 구성소재들 가운데 강도가 우수한 소재(STS430)가, 성형성은 가장 취약한 소재(AZ31)가 지배적인 영향을 주고 있다.

후 기

본 연구는 소재원천사업(상변태/임계제어 접합

금속소재 설계기술, 과제번호 M-2009-01-0014)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Y. Ryu, Y. E. Kim, J. H. Kim, 2001, Improvement of square cup drawability of clad sheet metal by warm forming technique, *Trans. Mater. Process*, Vol.10, No.3, pp. 253~260.
- [2] K. Iwanaga, H. Tashiro, H. Okamoto, K. Shimizu, 2004, improvement of formability from room Temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy, *J. of Mater. Process. Tech*, Vol.155, pp. 1313~1316.
- [3] Fuh-Kuo Chen, Tyng-Bin Huang, Chih-Kung Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheet, *Int. J. of Mach. Tools & Manuf*, Vol.43, pp. 1553~1559.
- [4] J. E. Lee, et. al, 2007, Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets, *J. of Mater. Process. Tech.*, Vol.187-188, pp. 546~549.
- [5] H. D. Manesh, K. Taheri, 2003, Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet, *J. of Alloys and Compounds*, Vol.361, pp. 138~143.
- [6] T. Mori, S. Kurimoto, 1996, Press-formability of stainless steel and aluminum clad sheet, *J. of Mater. Process. Tech.*, Vol.56, pp. 242~253.
- [7] F. Yoshida, R. Hino, 1997, Forming limit of stainless steel-clad aluminum clad sheet under plane stress condition, *J. of Mater. Process. Tech.*, Vol.63, pp. 66~71.
- [8] T. Oya, N. Tiesler, S. Kawanishi, J. Yanagimoto, T. Koseki, 2010, Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending, *J. of Mater. Process. Tech.*, Vol.210, pp. 1926~1933.
- [9] J. M. Robinson, M. P. Shaw, 1994, Microstructural and mechanical influences on dynamic strain aging phenomena, *Int. Mater. Rev.*, Vol. 39, pp. 113~112.
- [10] J. H. Jung, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J.H. Lee, 2008, Forming limits diagram of AZ31 alloy sheet with the deformation mode, *Trans. Mater. Process. Tech.*, Vol.17, No.7, pp. 473~480.