

알루미늄5182/폴리프로필렌/알루미늄5182 샌드위치 판재의 톱니모양 거동¹⁾

김기주^{*1)} · 신광선²⁾

쌍용자동차 CAE팀¹⁾ · 서울대학교 재료공학부²⁾

Serration Behavior of AA5182/Polypropylene/AA5182 Sandwich Sheets

Kee Joo Kim^{*1)} · Kwang Seon Shin²⁾

¹⁾CAE Team, Ssangyong Motor Company, 150-3 Chilgoi-dong, Pyungtaek-si, Gyeonggi-do 459-711, Korea

²⁾School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 28 January 2004 / Accepted 30 March 2004)

Abstract : The AA5182/polypropylene/AA5182 (AA/PP/AA) sandwich sheets have been developed for the application for automotive body panels in the future light weight vehicles with significant weight reduction. It has been reported that the 5182 aluminum sheet shows Lüders band because of dissolved Mg atoms that causes fabrication process problem, especially surface roughness. The examination of serration behavior has been made after the tensile deformation of the AA/PP/AA sandwich sheets as well as that of the 5182 aluminum skin at room and elevated temperatures. All sandwich sheets and the 5182 aluminum skin showed serration phenomena on their flow curves. However, the magnitude of the serration was significantly diminished in the sandwich sheet with the high volume fraction of the polypropylene core. According to the results of the surface roughness analysis after the tensile test, the sandwich sheet evidently showed lower Lüders band depth than the 5182 aluminum skin. Strain rate sensitivity, *m*-value, of the 5182 aluminum skin was -0.006. By attaching this skin with polypropylene core which has relatively large positive value, 0.050, *m*-value of the sandwich sheets was changed to the positive value. The serration reduction of the sandwich sheets was quantitatively investigated in the point of the effect on the polypropylene core thickness variation, that on the strain rate sensitivity. It was found that the serration reduction degree from the experimental results of the sandwich sheet was higher than that from the calculated values by the rule of mixture based on volume fraction of the skins and the core.

Key words : Sandwich sheet(샌드위치 판재), AA5182(5182 알루미늄 합금), Polypropylene(폴리프로필렌), Serration behavior(톱니모양 거동), Lüders band(리더스 밴드), Strain rate sensitivity(변형속도민감도)

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 대기오염을 줄이고 연비를 향상시키려는 노력이 계속되고 있으며, 그에 대한 법적 제재도 강화되고 있는 실정이다. 이러한 노

력의 일환으로써 자동차의 경량화가 관심의 대상이 되고 있으며, 차체용 판재를 강판으로부터 알루미늄 판재로 대체하려는 노력이 지속되어, 일부 고급 차종을 중심으로 알루미늄 판재가 적용되고 있다. 경량화 대체 판재로 개발된 샌드위치 판재란 이종의 단일 혹은 복합판재를 조합·적층하여 제조한 판재를 말한다. 저밀도를 가진 폴리프로필렌을 코어

*To whom correspondence should be addressed.
kjkimfem@smotor.com

제로 사용하고 상대적으로 강도가 높은 알루미늄 표면판재를 접합시켜 제조한 샌드위치 판재는 경량성으로 인해 자동차 차체용 판재에의 적용에 상당한 잠재력을 가지고 있다.¹⁻³⁾ 일반적으로 자동차용 고성형성 알루미늄 합금 판재로는 5xxx계 합금이 사용되고 있다. 그러나, 강도 및 성형성이 우수한 알루미늄 5xxx계 합금의 경우에는 주 합금원소가 Mg으로, 인장시험시 표면에는 Lüders band가, 응력-변형률 곡선 상에서는 톱니모양 거동(serration behavior)이 관찰된다.^{4,6)} 이러한 Lüders band는 판재성형시 표면거칠음 유발하므로 자동차용 판재로의 적용에 큰 문제점을 야기하고 있다. 일반적으로 톱니모양 거동은 합금원소로 존재하는 용질원소의 확산속도가 충분히 클 때 변형 중에 전위가 용질원소에 묶이고, 가해지는 응력에 따라 변형을 계속하기 위하여 이러한 전위들이 용질원소의 분위기에서 갑작스럽게 방출되는 과정이 반복되면서 나타나는 현상으로 받아들여지고 있다.⁶⁾ 이러한 효과는 전위의 이동도(mobility)를 바꿀 수 있는 초기 변형속도의 변화와 용질원소의 확산속도를 달리할 수 있는 온도 등의 변화에 따라서 발생을 감소시키거나 소멸시킬 수 있다.^{4,6)}

본 연구에서는 자동차 차체에 적용 가능한 알루미늄 샌드위치 판재(이하 샌드위치 판재)를 접합하여 제작하였으며, 초기 변형속도와 온도 등의 변화가 AA5182 알루미늄 표면판재 및 샌드위치 판재의 톱니모양 거동에 미치는 영향에 관해 조사하였다. 또한 폴리프로필렌 코어재가 샌드위치 판재의 표면거칠음 양상변화에 미치는 영향을 고찰하였다. 톱니모양 거동이 변형속도민감도의 변화와 관계가 있으므로 그 정도의 양상을 비교하기 위하여 AA5182 알루미늄 표면판재, 폴리프로필렌 및 샌드위치 판재의 변형속도민감도 평가를 병행하여 실시하였으며 샌드위치 판재의 경우 코어재인 폴리프로필렌의 두께를 여러 가지로 달리하여 인장시험 후 톱니모양 거동의 변화를 관찰하였다.

2. 샌드위치²⁾ 판재의 제조 및 실험방법

샌드위치 판재는 먼저 fillet 상태의 폴리프로필렌을 압출한 후, 표면 양쪽에 압연재인 AA5182 알루

미늄 합금 판재를 접합하여 제조하였다. 접합은 140°C에서 EVA(ethylene vinyl acetone) 수지 접착제를 이용하여 행하였다. 표면판재로 사용한 AA5182 알루미늄 합금의 두께는 0.2 mm로 정한 상태에서 폴리프로필렌 코어재의 두께를 0.6, 0.8, 2.0 및 3.0 mm로 변화시켜 전체 샌드위치 판재의 두께를 1.0, 1.2, 2.4 및 3.4 mm가 되도록 하여 폴리프로필렌 코어재의 두께 변화가 샌드위치 판재의 톱니모양 거동의 변화에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 사용한 AA5182 알루미늄 합금 판재는 압연 후 어닐링(annealing, 350°C, 2 h)을 하였으며, Table 1에 화학적 조성을 나타내었다. Fig. 1에 샌드위치 판재의 형상을, 또한 Table 2에 구성재료의 제원을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of AA5182 aluminum alloy (wt. %)

Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Cr	Ti	Al
4.51	0.34	0.18	0.08	0.05	0.02	0.02	bal.

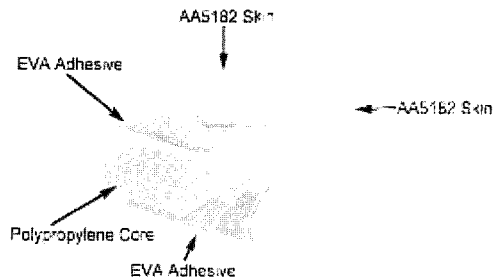


Fig. 1 Schematic diagram of the AA/PP/AA sandwich sheet

단일 재료 대비 샌드위치 판재의 톱니모양 거동 변화를 관찰하기 위하여 인장시험을 행하였으며 각 구성 단일재료인 AA5182 알루미늄 표면판재와 폴리프로필렌 판재의 인장시험도 병행하였다. 인장시험은 ASTM E8에 따라 표점거리 25 mm인 판상시편을 이용하였으며, 500 kgf 용량의 정적 인장시험기 (Instron Co.; Instron 5565)를 사용하여 미세한 하중 변화를 측정하였다. 이 때 시험 초기 변형속도는 $5 \times 10^{-4}/\text{sec} \sim 5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 로 달리하였으며, 변형률은 extensometer (Instron Co.; 스트레인 게이지용)를 사

용하여 측정하였다. AA5182 알루미늄 표면판재와 폴리프로필렌 판재 및 샌드위치 판재의 변형속도민감도 평가는 두 가지 방법으로 실시하였는데, $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$, $5 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 및 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 로 변형속도를 달리하여 유동응력을 측정하는 방법과 $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 의 변형속도로 인장하중을 가하다가 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 으로 변형속도를 100배 증가시켰다가 다시 $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 으로 복원시켜 그 때의 응력증감폭을 측정하는 방법을 사용하여 비교하였다. 또한 톱니모양 거동의 온도에 따른 영향을 알아보기 위하여 고온 인장시험을 실시하였으며 고온 인장시험은 80°C, 120°C 및 160°C의 온도에서 시편을 30분간 유지시킨 후 행하였다. 인장시험 시 Lüders band로 인한 시편 표면의 거칠기 영향을 비교하기 위하여 샌드위치 판재 및 AA5182 알루미늄 표면판재의 조도를 표면조도기(surface roughness measuring instrument)를 이용하여 측정하였다. 샌드위치 판재의 인장시험 후, AA5182 알루미늄 판재부분과 폴리프로필렌 코어재간 접합부분에서의 파괴 단면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

Table 2 Specifications of the AA/PP/AA sandwich sheet

Designation of sandwich sheet		1.0SW	1.2SW	2.4SW	3.4SW
Al skin material	Thickness (mm)	0.2	0.2	0.2	0.2
PP core material	Thickness (mm)	0.6	0.8	2.0	3.0
Sandwich sheet	Thickness (mm)	1.0	1.2	2.4	3.4

3. 실험 결과

3.1 시험온도에 따른 톱니모양 거동

Fig. 2에 AA5182 알루미늄 표면판재, 폴리프로필렌 판재 및 1.2SW 샌드위치 판재의 전형적인 상온 인장곡선을 나타내었다. AA5182 알루미늄 표면판재의 경우 톱니모양 거동이 거의 전 변형 구간에서 나타나고 있으며 시편 표면에서 다수의 Lüders band를 관찰할 수 있었다. 1.2SW 샌드위치 판재의 경우, 변형률에 따른 응력의 수준으로 보아 대부분의 하중을 AA5182 알루미늄 표면판재가 감당함을 알 수

있으며, 폴리프로필렌 판재는 연신율이 높게 측정(500% 이상) 되었으나 Fig. 2에는 변형률 30%까지만 약하여 표기하였다. Fig. 2에서 특기할 사항은 변형률에 따른 톱니모양 거동의 응력진폭(stress amplitude or stress drop, $\Delta\sigma$)이 AA5182 알루미늄 표면판재에서 보다 1.2SW 샌드위치 판재에서 현저히 줄었다는 것이다.

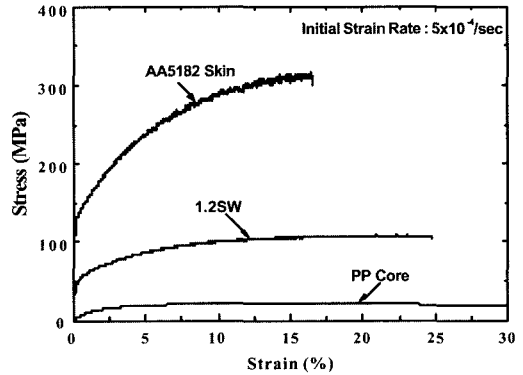


Fig. 2 Room temperature tensile stress-strain curves of AA5182 skin, polypropylene core and 1.2SW sandwich sheet

Fig. 3은 상온 인장시험 후 샌드위치 판재의 파괴 단면 관찰사진이다. 접합부의 파괴 단면을 관찰한 결과 파괴된 접합부의 끝단에서 인장파괴 직전까지 접합이 끊어지지 않은 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 2에서 샌드위치 판재의 연신율이 AA5182 알루미늄 표면판재보다 큰 것으로부터 AA5182 알루미늄 표면판재와 폴리프로필렌 코어재 간의 접합력은 양호한 수준임을 알 수 있다.

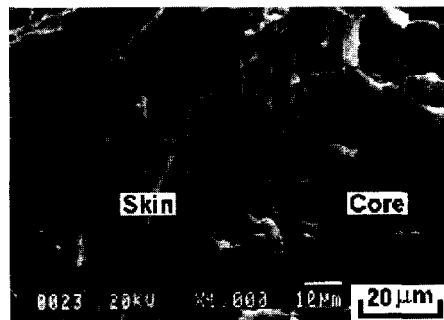
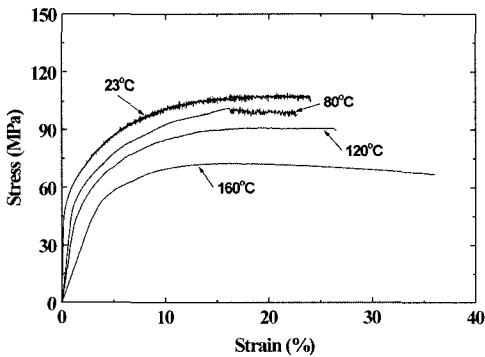
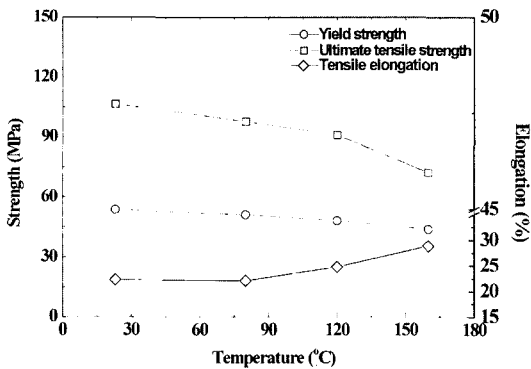


Fig. 3 SEM fractograph of the 1.2SW sandwich sheet after tensile test at room temperature

Fig. 4에는 샌드위치 판재의 온도에 따른 인장곡선과 항복강도, 인장강도 및 연신율의 변화를 나타내었다. Fig. 4(a)의 인장곡선에서 특징적으로 보이는 것은 상온에서는 거의 전 구간에 걸쳐 톱니모양 거동이 발생하였으나, 80 °C에서는 약 17 % 임계변형률(critical strain)후에 톱니모양 거동이 발생하였으며 120 °C와 160 °C에서는 톱니모양 거동이 관찰되지 않았다. Fig. 4(a)에서 샌드위치 판재가 톱니모양 거동이 일어나기 시작하는 임계변형률이 온도에 따라 증가하는 이유는 온도가 높을 경우는 용질원자의 확산속도가 재료내부에서 전위와 함께 이동할 수 있을 정도로 충분히 빨라지므로 톱니현상이 감소하거나 소멸되기 때문이다. 또한, Fig. 4(b)에서 온도의 증가에 따라 항복강도와 인장강도는 감소되었으며 연신율은 증가하는 양상을 나타내고 있다.



(a) Stress-strain curves



(b) Change in tensile properties

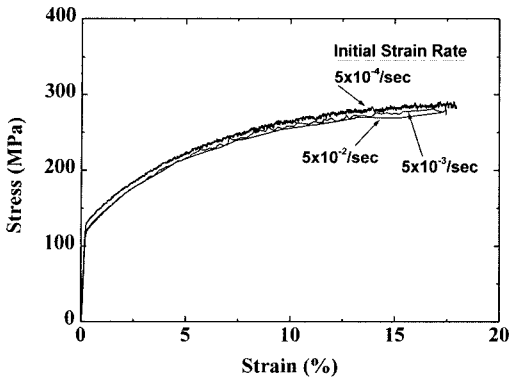
Fig. 4 Stress-strain curves of the 1.2SW sandwich sheets and the change in tensile properties as a function of temperature

3.2 변형속도 변화에 따른 톱니모양 거동

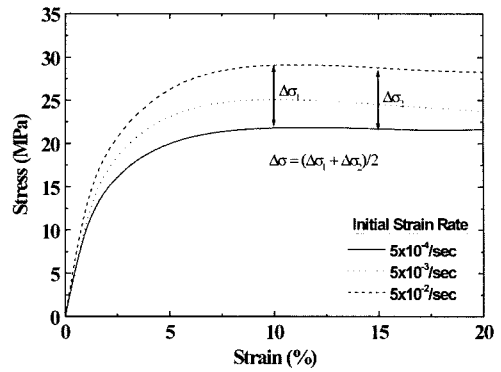
일반적으로 금속재료의 인장시험시 변형속도를 증가시키면 재료의 응력이 증가하며, 고온용 재료가 아니라면, 고온 인장시험시 변형속도 증가에 따른 재료의 응력 증가가 더욱 큰 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 그러나, Lüders band를 수반하는 톱니모양 거동이 나타나는 재료의 경우에는 변형 중 재료의 국부적인 연화와 전파가 반복되어 오히려, 변형속도 증가에 따라 응력이 감소한다.^{4,6)} 그러므로, 샌드위치 판재와 구성재료 사이의 상호작용을 변형속도 변화에 따른 응력의 증가와 감소 측면에서 조사하였다. Fig. 5(a), (b), (c) 및 (d)에 각각 초기 변형속도 변화에 따른 AA5182 알루미늄 표면판재, 폴리프로필렌 판재, 1.2SW 및 2.4SW 샌드위치 판재의 변형거동을 나타내었다. Fig. 5(a)의 AA5182 알루미늄 표면판재의 경우에는 초기 변형속도가 빠를수록 유동곡선상의 응력이 감소하였으며 변형속도가 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 인 경우에 톱니모양 거동이 상당히 억제되었다. 그러나, Fig. 5(b)의 폴리프로필렌 판재의 변형속도 변화에 따른 유동응력의 변화는 AA5182 알루미늄 표면판재와는 정반대의 양상으로, 변형속도가 빠를수록 급격한 응력의 증가를 보였다. 그러므로, Fig. 5(c) 및 (d)의 경우와 같이, 변형속도 증가에 따른 응력 수준의 증가 경향이 지배적인 폴리프로필렌을 코어재로 접합한 1.2SW 및 2.4SW 샌드위치 판재의 경우에는 변형속도 증가에 따라 응력이 증가하는 경향을 나타낼 수 있다.

3.3 변형속도민감도 평가

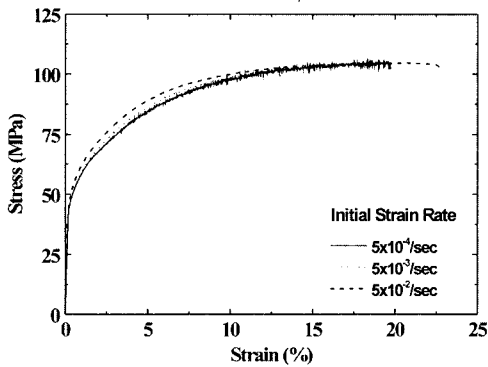
Fig. 2의 인장곡선에서 알 수 있듯이 AA5182 알루미늄 표면판재에서 발생하는 것으로 알려진 톱니모양 거동이 폴리프로필렌 코어재의 접합으로 제조된 샌드위치 판재에서는 감소된 것으로 나타났다. 이에, 톱니모양 거동의 응력진폭 감소의 정량 분석 및 감소원인 규명을 위하여 변형속도민감도를 측정하였다. Fig. 6에 AA5182 알루미늄 표면판재와 폴리프로필렌 판재 및 1.2SW 샌드위치 판재의 변형속도민감도 측정결과를 나타내었다. AA5182 알루미늄 표면판재와 샌드위치 판재는 초기 변형속도는 $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 으로 인장시험 중 변형률



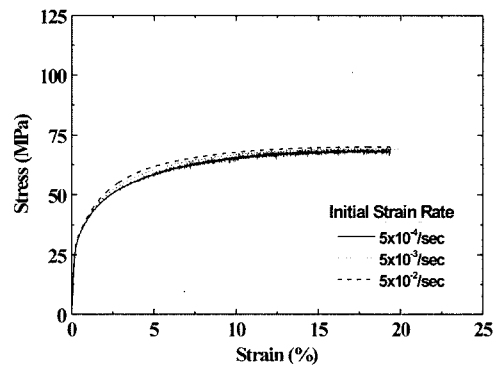
(a) AA5182 skins



(b) polypropylene cores



(c) 1.2SW sandwich sheet



(d) 2.4SW sandwich sheet

Fig. 5 Room temperature stress-strain curves of (a) AA5182 skins, (b) polypropylene cores, (c) 1.2SW sandwich sheet and (d) 2.4SW sandwich sheet as a function of strain rate

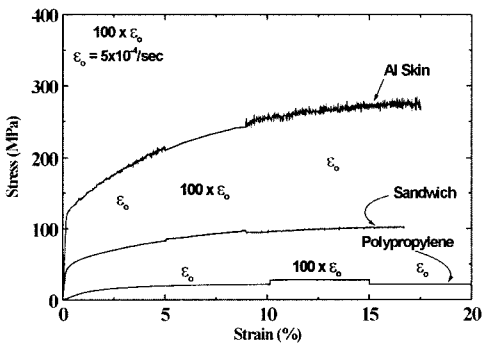


Fig. 6 Strain rate sensitivity on stress-strain curves of AA5182 skin, polypropylene core and 1.2SW sandwich sheet

5%에서 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 으로 속도를 증가시켰다가 다시 변형률 8%에서 원래의 속도로 감소시켜 그 때의

응력 변화를 측정하였으며, 폴리프로필렌 판재는 앞서와 동일한 변형속도로 증감하여 시험하였으나, 변형속도 변화 시점의 변형률은 폴리프로필렌의 탄성영역이 크기 때문에 완전한 소성영역에서의 변형속도 변화를 부여하기 위하여 Fig. 6에서와 같이 10%와 15%로 정하였다. AA5182 알루미늄 표면판재의 경우는 민감도가 음(negative)의 값을 나타내었으며 폴리프로필렌 코어재를 접합하여 제조한 샌드위치 판재 및 폴리프로필렌 판재의 경우는 양(positive)의 값을 나타내었다.

Fig. 7에 1.0SW, 1.2SW, 2.4SW 및 3.4SW 샌드위치 판재의 변형속도민감도 측정결과를 나타내었다. 폴리프로필렌 코어재의 두께가 두꺼울수록 변형속도 증가에 따른 응력증가 경향이 현저함을 알 수 있다.

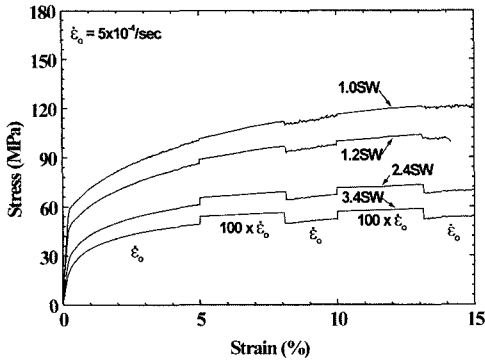


Fig. 7 Strain rate sensitivity on stress-strain curves of 1.0SW, 1.2SW, 2.4SW and 3.4SW sandwich sheets

3.4 Lüders band 관찰

샌드위치 판재의 경우 톱니모양 거동이 AA5182 알루미늄 표면판재보다 감소하였으므로, 판재의 표면거칠기에 영향을 주는 Lüders band수의 감소와 그 깊이가 낮아질 것으로 기대된다. 그러므로 인장시험시 발생하는 Lüders band로 인한 표면거칠기의 변화를 관찰하였다. Fig. 8은 AA5182 알루미늄 표면판재와 샌드위치 판재의 인장시험 후 시편의 Lüders band 관찰결과이다. AA5182 알루미늄 표면판재의 경우 샌드위치 판재 보다 Lüders band가 더 빈번하고 표면이 거친 것을 알 수 있다.

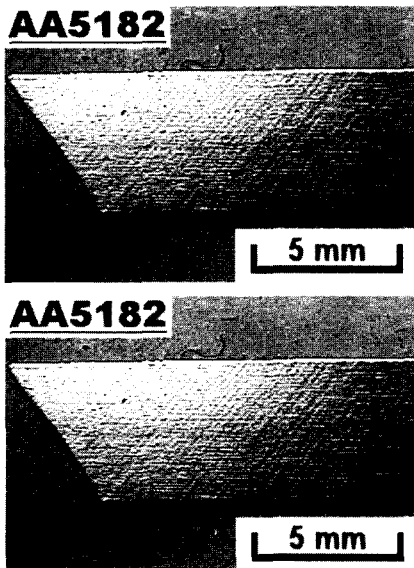


Fig. 8 Lüders band observation of the AA5182 skin and 1.2SW sandwich sheet

Fig. 9는 인장시험 후 AA5182 알루미늄 표면판재와 샌드위치 판재 시편의 표면거칠기를 표면조도기를 이용하여 측정된 결과이다. AA5182 알루미늄 표면판재의 표면이 샌드위치 판재의 표면에서 보다 더 거칠게 나타났으며 이것으로부터 샌드위치 판재의 경우 Lüders band로 인한 표면거칠기가 AA5182 알루미늄 단일 합금 판재보다 줄어들었음을 입증할 수 있었다.

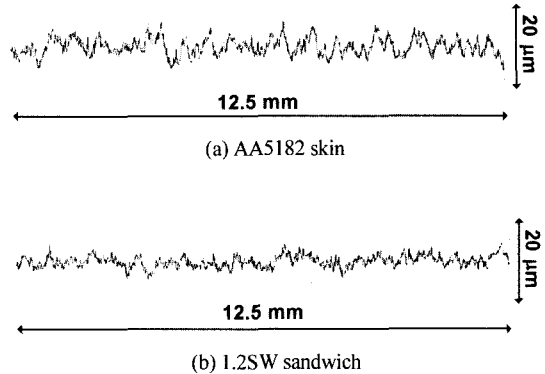


Fig. 9 Surface roughness of the (a) AA5182 skin and (b) 1.2SW sandwich sheet

4. 고찰

4.1 톱니모양 거동의 응력진폭

변형률에 따른 톱니모양 거동의 응력진폭이 AA5182 알루미늄 표면판재에서보다 1.2SW 샌드위치 판재에서 현저히 줄어들며 2.4SW 샌드위치 판재에서는 거의 나타나지 않았으므로, 그 정도와 원인을 정량적으로 분석하였다. Fig. 10은 변형률에 따른 톱니모양 거동의 응력진폭을 나타내었는데, 1.2SW 샌드위치 판재와 2.4SW 샌드위치 판재의 응력진폭을 식 (1)과 같이 혼합률(rule of mixture)에 따라 AA5182 알루미늄 판재와 폴리프로필렌 판재의 응력진폭(폴리프로필렌 판재의 응력진폭은 0)을 가중 평균하여 함께 나타내었다. Fig. 10(a)에서, AA5182 알루미늄 표면판재의 경우 최대 10 MPa의 응력진폭을 갖는 것을 알 수 있었으며, 1.2SW 샌드위치 판재의 경우는 최대 2.3 MPa의 응력진폭을 가지며, 2.4SW 샌드위치 판재의 경우는 최대 0.4 MPa의 응력진폭을 가짐을 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 10(b)

에는 변형률에 따른 톱니모양 거동의 응력진폭을 식 (1)과 같이 혼합률에 따라 AA5182 알루미늄 판재와 폴리프로필렌 판재의 응력진폭을 가중평균하여 계산한 값을 정규표준화(normalization)하여 나타내었다. 여기서 정규표준화 방법은 측정된 응력진폭을 각각의 변형률에서 측정된 응력으로 나누어 계산($\Delta\sigma/\sigma$) 하였으며 분석결과 샌드위치 판재의 톱니모양 거동의 감소경향이 현저하였다. 즉, AA5182 알루미늄 표면판재에 폴리프로필렌 판재가 접합된 샌드위치 판재의 톱니모양 거동이 AA5182 알루미늄 단일판재보다 줄어들어 안정한 변형거동을 보임을 알 수 있다. 또한, Fig. 10(b)로부터 혼합률로 계산하여 정규표준화한 1.0SW, 1.2SW와 2.4SW 샌드위치 판재의 응력진폭 계산값은 AA5182 알루미늄 표면재의 응력진폭 실험값과 거의 유사한 값들을 나타내었으나, 각 샌드위치 판재들의 응력진폭 실험값은 이 보다 현저히 낮은 값들을 나타내고 있다. 그러므로, 샌드위치 판재의 응력진폭 감소는 AA5182 알루미늄 표면판재와 폴리프로필렌 코어재의 부피분율을 고려하여 혼합률에 따라 식 (1)로 계산된 응력진폭 감소보다 더 감소폭이 크다고 할 수 있으며, 이것은 샌드위치 판재가 알루미늄 단일 표면판재보다 불안정 변형상인 톱니모양 거동이 현저히 감소함을 나타내는 결과이다.

4.2 인장시험 변수에 따른 톱니모양 거동 변화

톱니모양 거동을 나타내는 판재의 유동곡선의 변화($d\sigma$)는 식 (2)에서 보는 바와 같이 변형률(ϵ), 변형속도($\dot{\epsilon}$) 및 온도(T)에 따라 변하는데, 일반적인 유동 응력의 국부화 현상(flow localization)을 설명하는데 많이 이용되고 있다.⁷⁾ 본 연구에서는 불안정 국부변형을 나타내는 톱니모양 거동에 미치는 실험변수의 영향을 식 (2)에 의하여 고찰하였다.

$$\Delta\sigma_{S.W.} = f_{Skin} \Delta\sigma_{Skin} + f_{Core} \Delta\sigma_{Core} \quad (1)$$

$$d\sigma = \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\epsilon}\right)_{\epsilon,T} d\epsilon + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\epsilon}}\right)_{\epsilon,T} d\dot{\epsilon} + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial T}\right)_{\epsilon,\dot{\epsilon}} dT \quad (2)$$

변형속도 변화의 경우, 표 3에서와 같이 AA5182 알루미늄 표면판재에서는 초기 변형속도가 $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 에서 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 로 증가할 때 톱니모양 거동이 발

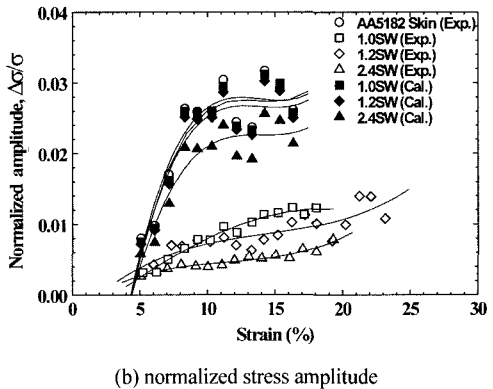
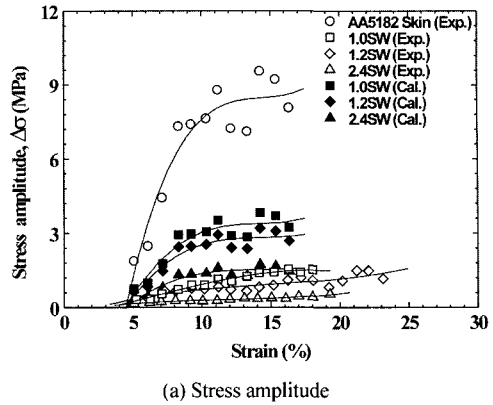


Fig. 10 Comparison of the experimentally measured and calculated (a) stress amplitude and (b) normalized stress amplitude of the sandwich sheets and AA5182 skin vs. tensile strain

Table 3 Initiation point of serration behavior, critical strain(ϵ_c)

Specimens	Critical strain (%)		
	at $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$	at $5 \times 10^{-3}/\text{sec}$	at $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$
AA5182 skin	0.7	1.7	4.4
1.2SW sandwich	1.7	4.0	9.0

생하는 임계변형률(ϵ_c)이 0.7%에서 4.4%로 증가하였다. 변형속도가 증가할수록 임계 변형률이 증가하는 이유는 변형속도가 충분히 빠른 경우 전위주위에 분위기를 형성하는 Mg 용질원자들의 확산속도가 이동하는 전위를 따라갈 수 있을 정도로 시간적 여유가 충분하지 않아, 전위의 용질원자에 의한 고착-이완이 활성화되지 못하기 때문이다. 1.2SW

샌드위치 판재에서는 초기 변형속도가 $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 에서 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 로 증가할 때 톱니모양 거동이 발생하는 임계변형률이 1.7%에서 9.0%로 증가하며 표 3에 나타난 바와 같이 전 범위에서 AA5182 알루미늄 표면판재에서 보다 임계변형률이 높았다.

한편, 시험온도의 경우, Fig. 4(a)에서 1.2SW 샌드위치 판재의 고온 인장시험시 초기 변형속도 $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$, 시험온도 80°C 에서 임계변형률이 17%였으며 120°C 이상의 온도에서는 톱니모양 거동이 나타나지 않았다. 그러므로, 실제 샌드위치 판재의 가공시 표면거칠기 제어를 위한 공정변수로는 변형속도에 의한 제어보다는 온도에 의한 제어가 효과적일 것이다.

일반적으로 톱니모양 거동의 분석에서는 임계변형률로 그 정도를 비교할 수 있는데,^{6,8)} 식 (3)으로 표현된다.

$$\rho_m C_v = K_1 \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (3)$$

여기서, ρ_m 은 이동 전위의 밀도, C_v 는 공공의 농도, $\dot{\epsilon}$ 는 변형속도, Q 는 활성화에너지, R 은 기체상수, T 는 온도이다. 공공의 농도는 변형률에 대하여 식 (4)와 같이 증가하며, 이동 전위의 밀도 ρ_m 은 마찬가지로 식 (5)와 같다.

$$C_v = A \dot{\epsilon}^m \quad (4)$$

$$\rho_m = B \dot{\epsilon}^\beta \quad (5)$$

식 (3), 식 (4) 및 식 (5)와의 관계로부터 식 (6)을 얻을 수 있으며, 실험값으로부터 변형률 의존상수 값 $m+\beta$ 를 얻을 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_c^{(m+\beta)} = K_2 \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (6)$$

식 (6)의 관계를 이용하여 AA5182 표면판재와 1.2SW 샌드위치 판재의 변형속도에 따른 임계변형률의 변화로부터 변형률 의존상수($m+\beta$)를 구하였으며, 이 값을 다른 연구자들^{8,9)}이 알루미늄 압연합금판재에서 구한 값과 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. AA5182 표면판재의 경우에는 $m+\beta$ 값이 2.42였으며, 샌드위치 판재는 2.79였다. 또한, AA5182 표면판재의 경우에는 AA8090-T8과 비슷한 기울기(변형률 의존성)를 보이고 있다. AA2090-T8 합금의 경

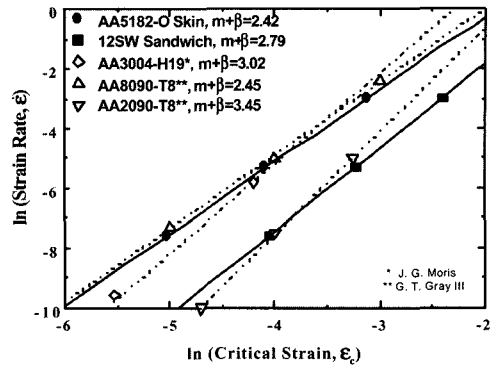


Fig. 11 Comparison on strain rate dependency of the AA5182 skin and sandwich sheet with various rolled sheets

우는 4년 동안 자연시효 처리하여 톱니모양 거동이 거의 나타나지 않도록 제조한 합금으로 $m+\beta$ 값이 3.45정도로 가장 높은 값을 보이고 있다. 그러므로 샌드위치 판재의 $m+\beta$ 값이 상대적으로 AA5182 표면판재보다 높게 나타나는 것으로 보아 임계변형률에 대한 변형률 의존성이 커서 샌드위치 판재의 톱니모양 거동이 상당히 억제되었음을 정량적으로 알 수 있다.

4.3 변형속도민감도 해석

Fig. 5에서 샌드위치 판재의 경우는 폴리프로필렌 판재의 강한 변형속도 증가에 따른 응력 증가 영향으로 AA5182 알루미늄 표면판재의 변형속도 증가에 따른 응력 감소 경향을 억제해주고 있음을 알 수 있었다. 또한, AA5182 표면판재의 톱니모양 거동이 샌드위치 판재보다 현저하다는 것과 변형속도가 증가하면서 발생빈도가 감소함을 알 수 있었으며, 변형속도 증가에 따라 유동응력이 크게 감소함을 알 수 있다. 한편, 1.2SW 샌드위치 판재는 변형속도 증가에 따라 유동응력의 감소는 없었으며 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이것은 폴리프로필렌의 큰 변형속도 증가에 따른 응력 증가 경향 때문이다.

샌드위치 판재의 변형속도 증가에 따른 유동응력의 변화와 관련하여 톱니모양 거동과 밀접한 관계가 있다고 알려진 변형속도민감도 평가로 그 현상의 정도를 정량화 할 수 있었는데, Table 4에 각각의

변형속도민감도 값을 정리하였다. 앞서 분석한대로 AA5182 알루미늄 표면판재의 변형속도민감도 값은 -0.006이나, 폴리프로필렌의 민감도 값이 0.050으로 상당히 높은 값을 보이고 있으며, 이것으로 인하여 1.0SW, 1.2SW, 2.4SW 및 3.4SW 샌드위치 판재의 값이 양의 값인 0.002~0.026을 나타냄을 알 수 있다. 많은 연구자들이, 톱니모양 거동이 나타나는 급속은 재료의 Lüders band로 인한 국부연화와 전파(propagation)의 반복으로 변형속도민감도 값이 음의 값을 갖는다고 하였다.⁸⁻¹¹⁾ 폴리프로필렌 코어재의 두께만을 변화시켜 다양한 두께로 제조한 여러 샌드위치 판재의 경우 Table 4에서 보는 바와 같이 변형속도민감도 값이 모두 양의 값을 나타내고 있으며, 이것은 변형속도에 따른 재료의 연화과정과 전파의 양상이 AA5182 알루미늄 표면판재 보다는 상대적으로 줄어들었다는 증거이기도 하며, 폴리프로필렌의 높은 변형속도민감도 값에 기인한 것 때문이다.

Table 4 Experimentally measured strain rate sensitivity (m) of AA5182 skin, polypropylene core and sandwich sheets

Specimens	Sensitivity ($=\Delta \ln \sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$)	
AA5182 skin	-0.006 (at 5 % tensile strain)	-0.006 (at 8 % tensile strain)
Polypropylene core	-	0.050 (at 10 % tensile strain)
1.0SW	0.004 (at 5 % tensile strain)	0.002 (at 8 % tensile strain)
1.2SW	0.010 (at 5 % tensile strain)	0.007 (at 8 % tensile strain)
2.4SW	0.021 (at 5 % tensile strain)	0.015 (at 8 % tensile strain)
3.4SW	0.025 (at 5 % tensile strain)	0.026 (at 8 % tensile strain)

4.4 샌드위치 판재의 톱니모양 거동과 Lüders band 형성 기구

샌드위치 판재의 톱니모양 거동과 표면거칠기가 감소하였으므로, 톱니모양 거동의 변형기구를 설명하기 위하여 샌드위치 판재, AA5182 알루미늄 표면판재 및 폴리프로필렌 중심판재의 하중-변위곡선을 Fig. 12에 나타내어 비교하였다. 여기서, 1.2SW

샌드위치 판재는 앞서와 동일한 접합방법으로 제조한 시편의 하중-변위곡선이며, AA5182+AA5182는 AA5182 알루미늄 판재를 두 장 겹쳐 놓고 접착하지 않은 채 인장시험 후 얻은 하중-변위곡선이다. 또한, AA5182+PP는 AA5182 알루미늄 판재와 폴리프로필렌 판재를 역시 접합하지 않은 채 인장 그립(grip)에 기계적으로 물려 인장시험 후 얻은 하중-변위곡선이다. 그림에서 AA5182+AA5182 판재의 경우 변위에 따른 하중 강하 진폭(load drop amplitude)이 AA5182 알루미늄 판재 한 장으로 구성된 판재나 다른 판재에 비하여 가장 크다. AA5182 알루미늄 판재의 경우 두 장을 그립에 물려 하중을 가할 시, 두 판재가 접합 없이 그립에 물려 있으므로 서로 아무런 영향을 미치지 못하여 하중 강하 진폭은 더욱 커지는 것을 알 수 있다. AA5182 알루미늄 판재 두 장과 폴리프로필렌 중심판재의 접합으로 구성된 1.2SW 샌드위치 판재의 경우 AA5182+AA5182 판재의 하중 강하 진폭보다는 현저하게 작다. AA5182+PP의 경우 접합 없이 단순 그립에 물려 인장시험 하였으므로, 단일 AA5182 알루미늄 표면판재의 하중 강하 진폭과 비교하여 차이가 없다.

Fig. 12에서 1.2SW 샌드위치 판재와 AA5182 알루미늄 표면판재의 최대하중을 비교하면, 각각 856.5 N과 341.4 N 이었다. 1.2SW 샌드위치 판재의 경우 표면판재의 상·하부 판재 두 장에(341.4 N × 2장 = 642.8 N) 폴리프로필렌 중심판재의 최대하중(120.3 N)을 더하면 803.1 N이 된다. 즉, 1.2SW 샌드위치 판재에 비해(856.5 N) 53.4 N이 차이가 나며, 이 차이는 1.2SW 샌드위치 판재의 높은 접합하중에 기인하는 것이다. 한편, Fig. 10(a)를 보면, 단순 혼합물인 식 (1)을 이용하여 계산한 톱니모양 거동의 응력진폭이 인장시험으로 측정된 응력진폭보다 높았는데, 그 이유는 Fig. 12로 설명할 수 있다. 즉, Fig. 10(a)는 식 (1)을 이용하여 폴리프로필렌 중심판재의 응력진폭을 0으로 놓아 혼합물을 사용하여 계산한 응력진폭을 나타낸 것이므로 식 (1)의 우변은 0이 되며 폴리프로필렌 중심판재의 부피비 역시 0이다. Fig. 12에서 AA5182 알루미늄 표면판재의 최대하중은 341.4 N이므로 폴리프로필렌 중심판재를 식 (1)에 따라 제외하면 1.2SW 샌드위치 판재의 최대하중은

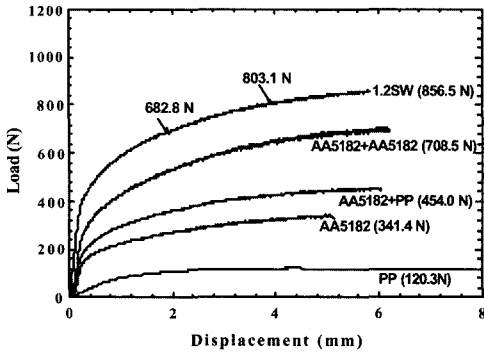


Fig. 12. Load-displacement curves of various sheets

682.8 N에 불과하다. 그러므로, 식 (1)의 혼합률을 이용하여 톱니모양 거동의 응력진폭을 계산한 결과는 실험 결과에서의 하중과 일치하지 않는 것이며, 혼합률로 계산한 응력진폭은 Fig. 12에 표시한 대로 682.8 N이 나타나는 약 2 mm의 변위 후의 하중강하를 응력으로 환산하여 계산한 것이다. 따라서, 샌드위치 판재의 톱니모양 거동을 AA5182 알루미늄 표면판재와 비교하기 위해서는 응력진폭보다는 하중강하 진폭을 분석하는 것이 더 유용할 것이다.

Fig. 9의 경우, 샌드위치 판재의 Lüders band로 인한 표면거칠기가 AA5182 알루미늄 표면판재 대비 감소하였을 뿐만 아니라, Fig. 12의 경우 역시 인장 시험 후 측정된 하중-변위곡선에서 1.2SW 샌드위치 판재의 톱니모양 거동으로 인한 하중 강하 진폭이 AA5182 알루미늄 표면판재 두 장을 겹쳐 시험한 판재 대비 감소하였으며 그 원인은 다음과 같다. 전통적으로 시편 표면에 가시적으로 확인 가능한 Lüders band의 형성은 평면 슬립(planar slip)의 종류로 생각해 왔다.¹²⁾ 즉, 전위와 용질원자의 상호작용에 의해 시편 표면에 평면슬립 형태로 국부적인 변형이 발생하면서 응력 강하가 일어나고 다시 슬립부의 Lüders band 턱 주위가 가공경화 되면서 다른 밴드로 전파(propagation)되는 과정이 반복된다. 이 때, 더 이상의 가공경화를 이룰 수 없는 Lüders band는 계속 연화되어 불안정 변형거동을 하게 되며 갑작스런 단면적의 감소로 파괴에 이르는 것이다. Fig. 9를 통하여 표면거칠기¹³⁾의 골의 발생 빈번도를 조사한 결과, AA5182 알루미늄 표면판재와 1.2SW 샌드위치 판재의 골의 발생 빈번도가 각각 105개와 133

개로 1.2SW 샌드위치 판재가 27 % 높았다. 또한, Fig. 9에서 AA5182 알루미늄 표면판재와 1.2SW 샌드위치 판재의 표면거칠기는 5.1 μm 와 3.9 μm 로 1.2SW 샌드위치 판재가 31 % 낮다. 1.2SW 샌드위치 판재의 경우, 표면거칠기는 AA5182 알루미늄 판재보다 감소하는 동시에 거칠기 표시 골의 발생 빈번도는 증가하였으며 표면거칠기 감소 정도와 골의 발생 빈번도 증가횟수가 비슷하다. 즉, 샌드위치 판재에는 폴리프로필렌 중심판재가 접합되어 있으므로 상·하부 표면판재가 하중을 감당하면서 국부 연화과정인 Lüders band가 형성되더라도 밴드의 깊이가 더 커지는 것을 높은 변형속도민감도를 갖는 폴리프로필렌 중심판재가 수용하여 알루미늄 표면판재가 충분한 가공경화를 이루지 않더라도 다른 밴드로 전파되는 것으로 보인다. 따라서 밴드의 깊이가 깊지 않은 것으로 나타난 샌드위치 판재의 표면거칠기를 나타내는 골의 횟수가 AA5182 알루미늄 표면판재보다 조밀하며 빈번한 것이다.

Fig. 13에 1.2SW, 2.4SW 및 3.4SW 샌드위치 판재의 하중-변위곡선을 AA5182 알루미늄 표면판재와 함께 나타내었다. 또한, Fig. 14에 Fig. 13에서 분석한 최초의 하중 강하가 일어나는 변위들을 정량적으로 나타내었다. 샌드위치 판재에서 톱니모양 거동이 완전히 소멸되지는 않았으며, 단지 톱니모양 거동으로 인하여 갑작스럽게 하중이 강하하는 최초 시작 변위는 폴리프로필렌의 두께가 두꺼울수록 증가하였다. 하중-변위곡선 상에서 갑작스런 변위의 확장(expansion)을 동반하는 톱니모양 거동으로 인한 하중 강하 정도가 AA5182 알루미늄 표면판재 두 장을 겹쳐 놓고 인장시험 하여 얻은 하중 강하 정도보다 낮은 이유는, 인장시험기가 하중-변위 신호를 받을 때 하중의 강하와 동반된 변위의 확장을 폴리프로필렌 중심재가 흡수하기 때문이다. 샌드위치 판재의 두께가 증가할수록 톱니모양 거동으로 인한 최초 하중 강하 변위가 증가하는 것은 첫째, 샌드위치 판재의 중심판재인 폴리프로필렌의 두께가 두꺼워짐에 따라 하중의 많은 부분을 폴리프로필렌이 감당하기 때문이며, 둘째 외부에서 샌드위치 판재로 가해지는 하중의 일부분이 접합 하중으로 흡수되어 AA5182 알루미늄 표면판재에 부여되는 하중

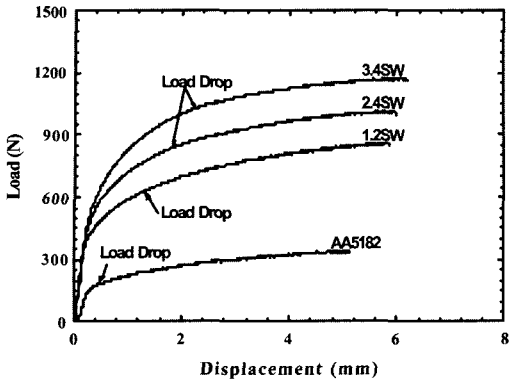


Fig. 13 Load-displacement curves of AA5182 skin and sandwich sheets

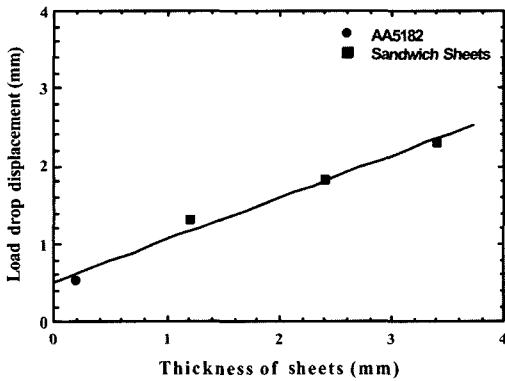


Fig. 14 Effect of sheet thickness on initial load drop displacement

이 분산되기 때문이다. Table 4에 나타난 것처럼 샌드위치 판재의 두께가 증가함에 따라 변형속도민감도 역시 증가한다. 샌드위치 판재의 두께를 증가시킬 때 표면판재의 두께는 일정하게 두고 폴리프로필렌 중심판재의 부피비만 증가시켜 제조하였으므로 폴리프로필렌 중심판재의 부피분율이 커질수록 변형속도민감도가 증가하는 것은 당연하다.

5. 결론

본 연구에서는 샌드위치 판재와 그 구성재인 AA5182 알루미늄 표면판재 및 폴리프로필렌 코어재에 대하여 온도와 변형속도 변화에 따른 인장시험과 파면관찰, 변형속도민감도 측정시험 및 표면거칠기 측정시험을 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AA5182 알루미늄 표면판재 및 샌드위치 판재의 톱니모양 거동 변화 연구 결과 샌드위치 판재에서 톱니모양 거동이 AA5182 알루미늄 표면판재보다 현저하게 줄어들었는데, 이것은 응력진폭의 감소(AA5182 표면판재의 최대 응력진폭: 10MPa, 1.2SW 샌드위치 판재의 최대 응력진폭: 2.3MPa), 변형속도증가에 따른 유동응력의 증가 경향, 높은 임계변형률에 따른 높은 변형의존상수(AA5182 표면판재의 $m+\beta$ 값: 2.42, 샌드위치 판재의 $m+\beta$ 값: 2.79), Lüders band로 인한 표면거칠기의 감소 및 양(positive)의 변형속도민감도 값(AA5182 표면판재: -0.006, 1.2SW 샌드위치 판재: 0.007, 폴리프로필렌 판재: 0.050) 측정결과와 부합한다.
- 2) 샌드위치 판재의 실제 가공시 유동곡선에서 관찰되는 톱니모양 거동의 발생을 감소시키기 위해서는 변형속도에 의한 제어(상온 인장시험 초기 변형속도 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 에서 임계변형률 4.4%)보다는 온도에 의한 제어(80 °C의 온도에서 인장시험시 임계변형률 17%, 그 이상의 온도에서 동적변형시효 현상 소멸)가 효과적일 것이다.
- 3) 샌드위치 판재의 두께가 증가할수록 톱니모양 거동으로 인한 최초 하중 강하 변위가 증가하는 것은 첫 째, 샌드위치 판재의 중심판재인 폴리프로필렌의 두께가 두꺼워 짐에 따라 하중의 많은 부분을 폴리프로필렌이 감당하기 때문이며, 둘째 외부에서 샌드위치 판재로 가해지는 하중의 일부분이 접합 하중으로 흡수되어 AA5182 알루미늄 표면판재에 부여되는 하중이 분산되기 때문이다.

References

- 1) E. W. Veenstra, "Aluminum-Plastic-Aluminum Sandwich Sheet for Maximum Weight Reduction in Body Panels," SAE 930706, pp. 1-10, 1993.
- 2) K. J. Kim, K. S. Shin, "Characterization of Aluminum Sandwich Panels," Proc. of 5th Next Generation Vehicle Workshop, KATECH, pp.639-647, 1997.
- 3) K. S. Shin, K. J. Kim, S. W. Choi, M. H. Rhee,

- "Mechanical Properties of Aluminum/ Polypropylene/Aluminum Sandwich Sheets," *Metals and Materials*, Vol.5, No.6, pp.613-618, 1999.
- 4) J. M. Robinson, M. P. Shaw, "The Influence of Specimen Geometry on the Portevin-Le Chatelier Effect in an Al-Mg Alloy," *Mat. Sci. & Eng.*, Vol.A159, pp.159-165, 1992.
 - 5) J. M. Robinson, M. P. Shaw, "Observations on Deformation Characteristics and Microstructure in an Al-Mg Alloy during Serrated Flow," *Mat. Sci. & Eng.*, Vol.A174, pp.1-7, 1994.
 - 6) G. Han, I. D. Choi, S. B. Kang, "Effect of the Factors on the Formation of Lüders Line in Al-Mg Alloys," *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.* Vol.34, No.4, pp.470-477, 1996.
 - 7) S. L. Semiatin, J. J. Jonas, "Formability and Workability of Metals," *ASM Series in Metal Processing*, Ohio, pp.51-116, 1983.
 - 8) J. C. Huang, G. T. Gray III, "Serrated Flow and Negative Rate Sensitivity in Al-Li Base Alloys," *Scripta Metall.*, Vol.24, pp.85-90, 1990.
 - 9) D. Park, J. G. Morris, "The Portevin-Le Chatelier Effect in an Al-Mn-Mg Alloy," *Scripta Metall.*, Vol.29, pp.365-369, 1993.
 - 10) S. C. Park, K. S. Shin, "Serration Behavior of 2090 Al-Li Alloys," *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.*, Vol.33, No.6, pp.743-749, 1995.
 - 11) C. P. Ling, P. G. McCormick, "The Effect of Temperature on Strain Rate Sensitivity in an Al-Mg-Si Alloys," *Acta Metall. Mater.*, Vol.41, No.11, pp.3127-3131, 1993.
 - 12) D. A. Koss, K. S. Chan, "Fracture along Planar Slip Bands," *Acta Mater.*, Vol.28, pp.1245-1252, 1980.
 - 13) W. Steiner, G. Stinwender, "Fatigue Simulation of Power Train Components During the Design Process," *Int. J. of Automotive Tech.*, Vol.2, No.1, pp.9-16, 2001.