

# 온간 딥 드로잉에서 이종금속판재(STS430-AI3004-AZ31)의 파단 및 두께 예측을 위한 연구

이영선<sup>1</sup> · 이광석<sup>1</sup> · 김대용<sup>#</sup>

## Prediction for Thickness and Fracture of Stainless Steel-Aluminum-Magnesium Multilayered Sheet during Warm Deep Drawing

Y. S. Lee, K. S. Lee, D. Kim

(Received October 21, 2011 / Revised November 23, 2011 / Accepted November 30, 2011)

### Abstract

It is difficult to estimate the properties of multilayered sheet because they are composed of one or more different materials. Plastic deformation behavior of the multilayered sheet is quite different as compared to each material individually. The deformation behavior of multilayered sheet should be investigated in order to prevent forming defects and to predict the properties of the formed part. In this study, the mechanical properties and formability of stainless steel-aluminum-magnesium multilayered sheet were investigated. The multilayered sheet needs to be deformed at an elevated temperature because of its poor formability at room temperature. Uniaxial tensile tests were performed at various temperatures and strain rates. Fracture patterns changed mainly at a temperature of 200°C. Uniform and total elongation of multilayered sheet increased to values greater than those of each material when deformed at 250°C. The limiting drawing ratio (LDR) was obtained using a circular cup deep drawing test to measure the formability of the multilayered sheet. A maximum value for the LDR of about 2 was achieved at 250°C, which is the appropriate forming temperature for the Mg alloy. Fracture patterns on a circular cup and thickness of formed part were predicted by a rigid-viscoplastic FEM analysis. Two kinds of modeling techniques were used to simulate deep drawing process of multilayered sheet. A single-layer FE-model, which combines the three different layers into a macroscopic single layer, predicted well the thickness distribution of the drawn cup. In contrast, the location and the time of fracture were estimated better with a multi-layer FE model, which used different material properties for each of the three layers.

**Key Words** : Multilayered Sheet, Warm Deep Drawing, Limit Drawing Ratio, FE-model, Fracture, Thickness

### 1. 서론

이종금속 판재(multilayered sheet; 다층금속판재, 클래드 판재라고도 함)는 복합재료의 일종으로 서로 성질이 다른 둘 또는 그 이상의 재료를 접합

하여 각 금속의 장점만을 취하여 단일 금속재료보다 우수한 특성을 갖는 재료이며, 접합방법 중에서 압연과 압출에 의한 방법이 가장 경제적이다. 널리 이용되고 있다[1].

현재 상용화되어 있는 다층금속 판재의 경우

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹  
# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹,  
E-mail : daeyong@kims.re.kr

열전도율, 열보존율, 열효율성이 뛰어난 알루미늄과 내염성, 내산성, 내알칼리성 및 내식성이 뛰어난 스테인리스 강을 접합시킨 이종금속 판재가 많이 사용되고 있다.

자동차 부품, 휴대폰, 전자 제품 등에서 경량화에 대한 수요가 증가함에 따라 기존 STS-AI 또는 STS-AI-STS 이종금속 판재의 고유특성(고비강도, 고성형성 등)의 특성을 고려한 이종금속 판재에 대한 요구가 증대되고 있다. 또한 전자파 차폐성, 고비강도 및 경량 소재로 Mg 합금을 접합시킨 STS-AI-Mg 이종금속 판재 개발 및 응용이 다양한 산업분야(주방용기, 전자기기, 플랜트 등)에서 진행되고 있다. Mg 합금의 경우 온도에 따른 성형성은 많은 선행 연구자들의 연구 결과에 의해 분석된 바 있으며, Mg 합금의 최적 성형온도는 200~300℃라는 연구 결과가 보고되고 있다[2~4].

이종금속 판재에 대해서는 특성향상기술[5~6]과 성형성에 대한 연구가 수행된바 있다[7~10].

Lee[5] 등은 STS-AI-Cu 이종금속 판재의 어닐링 처리에 따른 영향을 분석하여 400℃에서 계면에서 발생되는 Al<sub>2</sub>Cu 상이 연신율을 저해함을 보고하였고, Manesh[6] 등은 Al-Fe 이종금속 판재의 어닐링 효과를 분석하여 400℃에서 16 시간 동안 어닐링 처리하는 것이 성형성과 강도에 가장 유리함을 보고한 바 있다.

이종금속 판재의 성형성에 관한 연구로는 딥 드로잉(deep drawing)[7-9]과 신장성형(stretching)[7,8], 굽힘(bending)[10]에 대한 선행연구가 진행된 바 있다. 이종금속 판재를 이용하면 개별소재의 낮은 연성을 향상시킬 수 있으며[8,10], Fe-Al 이종금속 판재의 경우 경도가 높은 소재가 펀치(punch) 측에 위치할 경우가 반대 경우(경도가 낮은 소재가 펀치측에 위치) 보다 높은 성형성을 나타낸다[7,9].

성형관련 수치해석기술은 UHCS(Ultra High Carbon Steel)와 연강 다층판재의 V-굽힘시 탄성회복량에 대한 연구를 통해 다층모델이 단층모델보다 좋은 예측결과를 나타냄을 확인한 바 있으나 단층모델의 유동곡선(flow curve)을 실 측정값이 아닌 각소재 유동곡선의 평균값을 이용하였다[10]. 본 연구에서는 이종금속 판재의 성형 및 파단에 대한 예측기술을 연구하고자 최근 주목 받고 있는 Mg 합금이 적용된 이종소재(STS-AI-Mg)의 변형특성을 분석하고, 원통굽 딥 드로잉 실험을 통해 성형성을 분석하였다. 또한, 강점소성 유한요

소해석을 이용한 수치해석시 파단예측과 성형품 두께분포 예측을 위한 해석모델링 기법에 대해 고찰하고자 하였다.

구체적으로 이종금속 판재의 인장 시험을 통해 온도와 변형률속도(strain rate)에 따른 유동곡선을 얻었으며 연신률(elongation)이 높은 온도 구간(250~300℃)에서 원통굽 드로잉(deep drawing) 실험을 실시하여 성형성 및 한계 드로잉비(LDR)을 조사하였다. 수치해석기법 연구로는 이종금속판재를 단일 소재(3개의 서로 다른 소재를 1개의 등가한 물성의 동일소재)로 가정한 단층소재(single-layer)모델과 이종금속판재를 구성하는 STS, AI합금, Mg합금의 각 물성치를 이용한 다층소재(multi-layer)모델에 대한 수치해석을 통해 STS-AI-Mg 다층구조 판재성형품의 결합예측에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험 소재

본 실험에 사용한 소재는 롤 분당(roll bonding) 방법으로 제조된 STS430-AI3004-AZ31 이종금속 판재로서 상부로부터 STS430, AI3004, AZ31을 적층한 후 열간압연과 열처리 공정을 통해 제조되었으며 각 층의 두께는 공구현미경 측정결과 Fig. 1과 같다. 롤 분당법으로 다층금속소재가 제조될때는 원소재의 소성변형과 열변형이 동반되므로 원소재의 물성이 변화될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 물성치의 신뢰성 향상을 위해 다층금속 소재로부터 각층의 소재를 분리시켜 시편을 채취한 후 물성평가를 수행하였다.



Fig. 1 Cross section of the clad sheet

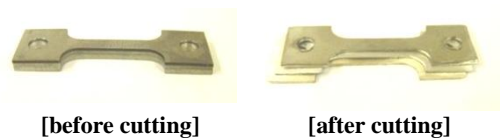


Fig. 2 Tensile specimens of clad sheet and separated sheet

다층금속 판재에서 분리하여 제조된 각 소재별 시험편은 Fig. 2에 나타나 있다. 각 층의 소재를 분리시 시험편에 가공잔류응력이 잔존하지 않도록 하기 위해 수산화나트륨(NaOH)를 이용하여 Al합금을 화학적으로 제거시킨 후 STS430과 AZ31합금의 판재를 분리하였다. 소재 절단시 발생할 수 있는 노치(notch)에 의한 시험편 파단을 최소화하기 위해 소재의 절단면과 옆면을 폴리싱(polishing)처리하였다. 각 소재를 고온인장을 통해 250, 300℃에서 기계적 물성을 구하였다. 이를 다층소재 모델의 물성으로 해석을 수행하였다.

### 2.2 일축 인장시험

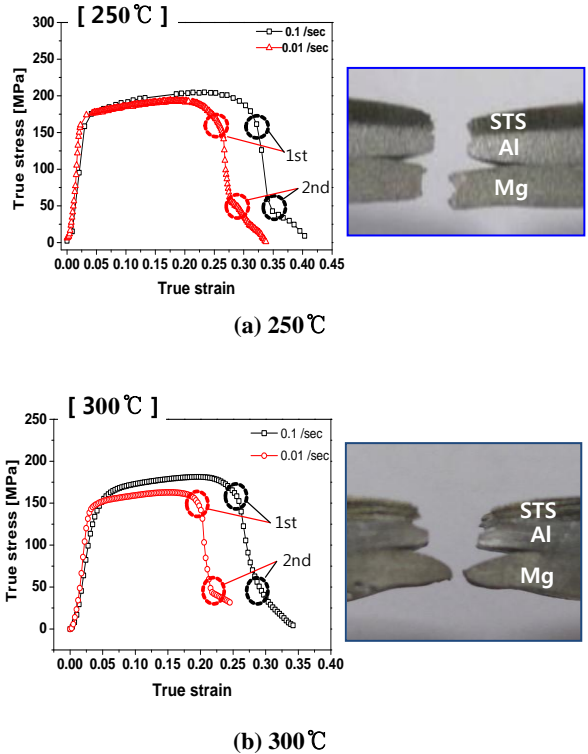
다층금속 판재와 각 층간 개별소재의 유동곡선을 측정하기 위해 밀폐형 가열로 내에서 고온인장시험을 실시하였다. 시험에 사용된 가열로와 인장시험편(ASTM-E8M-01, 판상 서브사이즈)은 참고문헌[11]에 기술되어 있다.

각 소재별 인장시험조건은 Table 1과 같다. 이종금속 판재의 인장시험 결과 가운데 딥 드로잉 실험에 사용된 온도인 250℃, 300℃로 Fig. 3에 온도와 변형율속도에 따른 1축 인장변형 거동을 나타내었다. 일반적인 단일소재와는 달리 2번의 변곡점이 나타나고 있다. 온도에 따라 파단양상이 다르며 첫번째(1<sup>st</sup>) 파단과 두번째(2<sup>nd</sup>) 파단이 발생하는 위치와 소재의 종류가 서로 다르게 나타나고 있다. 다른 온도에 대한 인장시험 결과는 참고문헌[11]에 자세히 언급되어 있다.

온도에 따른 영향으로 100℃에서는 AZ31소재가 먼저 파단된 후 STS430과 Al3004소재가 동시에 파단되었고, 200℃에서는 3가지 소재가 모두 동시에 파단되었다. 250℃에서는 STS430과 Al3004소재가 동시에 AZ31소재 보다 먼저 파단이 되어 200℃ 부근을 경계로 파단양상이 변화되어 200℃ 보다 저온에서는 AZ31합금이 먼저 파단되고 그 보다 고온에서는 STS430소재가 먼저 파단되고 있다. 300℃에서는 STS430이 먼저 파단이 발생된 후 Al3004, AZ31 순서로 파단됨으로써 250℃부근에서의 증가된 AZ31합금 연신특성이 많은 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 400℃에서는 300℃와 유사한 결과를 나타내고 있다. 온도증가에 따라 인장강도가 감소하며 250~300℃에서 연신률이 다소 증가하는 경향을 나타내었다[11].

**Table 1 Tensile test conditions**

Variables	Values
Gage length(mm)	20
Thickness(mm)	3.85
Temperature(℃)	100, 200, 250, 300, 400
Strain rate(/sec.)	10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>-2</sup>



**Fig. 3 Tensile curves and fractured section of multilayered sheet with different temperatures and strain rate**

변형율 속도에 따른 영향은 전반적으로 변형율 속도가 증가할수록 항복강도는 유사하지만 가공경화지수가 증가되고 균일 연신율이 증가되는 경향을 나타내었다. 특히 250~300℃ 영역에서 가공경화와 균일 연신율 증가는 Mg합금의 영향으로 판단되며 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

이러한 인장변형특성은 3가지 소재가운데 Mg합금인 AZ31소재의 특성과 가장 유사한 형태로서 성형성에도 가장 큰 영향을 미칠 것임을 예측하게 하는 부분이다.

다층소재모델의 해석을 위해 300℃에서 측정된 각 소재의 인장특성은 Fig. 4에 나타나 있다.

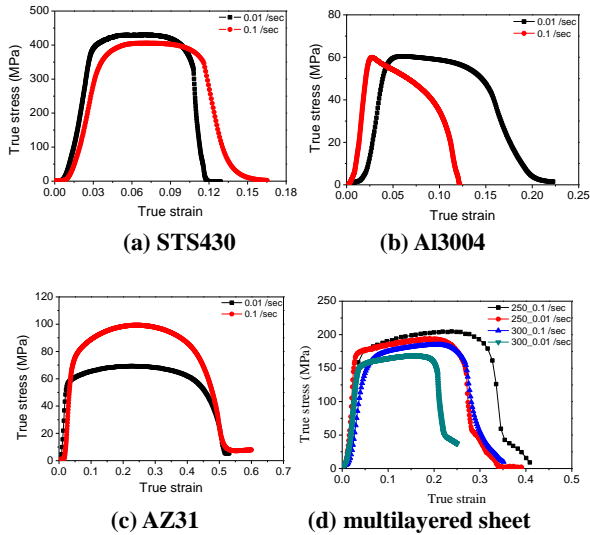


Fig. 4 Results of tensile test for each material (testing temperature: 300 °C)

이종금속 소재에 비해 변형속도에 따른 영향이 크게 작용하고 있음을 알 수 있는데, STS430 소재의 경우는 400MPa수준의 변형저항과 0.1~0.12수준의 균일연신량을 나타내고 있으며 변형 속도가 증가할수록 연신율이 다소 증가하고 있다. Al3004합금의 경우는 60MPa수준의 인장강도 0.1~0.2 수준의 전연신율을 나타내고 있으나 0.1/s의 변형을 속도에서는 변형 속도의 영향이 매우 크게 나타나 0.1/s의 경우는 항복과 동시에 하중에 감소하는 불안전 변형을 나타내고 있다. 반면에 AZ31의 경우는 변형 속도에 매우 민감하게 나타나고 있어 변형저항이 50% 이상 증가되고 있다.

동일조건(300°C)의 이종금속 소재와 비교하면, 다층금속 소재의 유동곡선(Fig. 4(d))은 균일 연신율(0.2~0.25), 전 연신율(0.25~0.35), 유동응력(150~170MPa)로서 STS430, Al3004소재와 AZ31소재의 물성치 평균에 해당되는 특성을 나타내고 있다. 다층금속소재의 연신율이 각 소재(STS430, Al3004)의 개별적 연신율 보다 높게 나타내고 있으며 저 연신율 소재의 클래딩 후 연신율 증가는 참고문헌[8,10]의 연구결과와 동일한 양상을 나타내고 있다.

### 2.3 원통컵 드로잉 실험

이종금속 판재의 성형성을 시험하기 위해 원



(a) Erichsen M/C



(b) die set for warm deep drawing

Fig. 5 Erichsen tester and die set for warm deep drawing

Table 2 Deep drawing test conditions

Temperature (°C)	Heating Time (min.)	Punch Size (mm)	Punch Speed (mm/s)	Clearance (mm)
250	20	φ50	0.5	2.0~2.2
300				

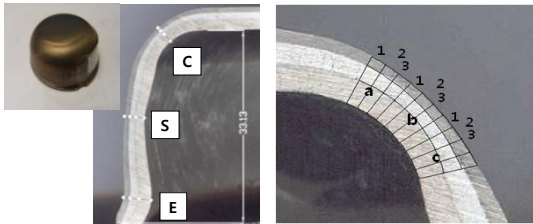
통컵 드로잉 실험을 수행하였으며 Fig. 5는 원통컵 드로잉 실험에 사용된 장비와 다이세트(die set)를 나타내고 있다. 한계드로잉비(LDR)를 측정하기 위한 실험조건은 Table 2와 같다.

원통컵 드로잉은 금형과 소재온도를 동일한 온도로 일정시간(약 20~25min.) 유지한 후 상온 펀치를 이용하여 실험을 수행하였다. 온간 작업용 고온용 고체윤활제(graphite)로 마찰을 저감하였으며 펀치와 금형의 코너부는 소재 두께를 고려하여 반경 5mm를 이용하였다. 블랭크 홀딩력(BHF)이 증가 할수록 드로잉비가 낮아지면서 전 온도구간에서 파단이 발생되어 소재와 홀더(holder) 사이에 압축판을 설치하고 공차(clearance)를 0.5mm 간격을 유지함으로써 결함(파단, 주름 발생)을 억제하였다.

이종금속 판재의 한계 드로잉비를 조사하고자 시편의 치수를 φ87, φ98, φ107, φ117mm로 증가시키며 연신율이 높은 온도구간(250, 300°C)에서 0.5mm/s의 펀치속도로 실험을 수행하였다. 실험

**Table 3 Results of circular cup deep drawing test**

L D R	Blank size (mm)	250 °C		300 °C	
		Image		Image	
1.74	Ø87				
1.95	Ø98				
2.14	Ø107				
2.3	Ø117				



(a) at each position (b) at corner section

**Fig. 6 Positions measuring thickness of drawn cups**

결과는 Table 3과 같이 드로잉비 2.0이상에서는 펀치 코너부에서 파단이 발생되어 한계드로잉비가 2.0 수준임을 알 수 있다. 사용된 AZ31소재의 동일조건 하에서의 한계 드로잉비 또한 2.0 수준임을 감안할 때 결국 다층금속 소재의 한계 드로잉비는 다층금속 소재 가운데 가장 성형성이 낮은 합금(AZ31) 성질에 지배됨을 예측할 수 있다.

Fig. 6(a) 는 250°C에서 성형된 제품(블랭크 직경 Ø98mm)인 원통컵 단면을 나타내고 있다. 각 부분에 대한 평균두께 값은 Table 4에 나타내었다. 성형품의 두께 분포에 대한 해석결과와의 비교와 함께 파단이 발생하는 경우의 해석결과와의 비교를 위해 300°C에서 블랭크 직경 107mm

**Table 4 Wall thickness of drawn cup(blank dia.: 98mm)**

	Experiment (Blank Dia. : 98mm)			FEM (multi-layer)			FEM (single-layer)
C	STS	0.64	3.09	STS	0.53	2.37	2.32
	Al	0.89		Al	0.80		
	Mg	1.56		Mg	1.04		
S	STS	0.87	3.28	STS	0.95	3.79	3.37
	Al	1.01		Al	1.18		
	Mg	1.40		Mg	1.66		
E	STS	1.07	4.58	STS	1.13	4.72	4.48
	Al	1.50		Al	1.67		
	Mg	2.01		Mg	1.92		

**Table 5 Wall thickness of drawn cup(blank dia.: 107mm)**

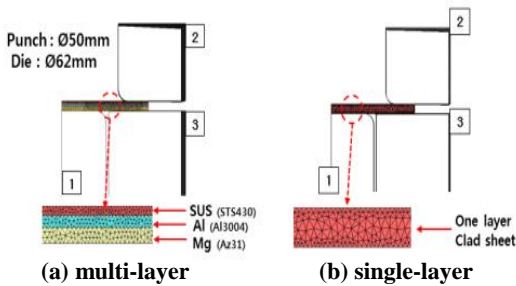
	Experiment (Bla. Dia. : 107mm)			FEM (multi-layer)			FEM (single-layer)
a	STS	0.58	2.99	STS	0.69	3.02	2.91
	Al	0.89		Al	0.92		
	Mg	1.52		Mg	1.41		
b	STS	0.58	2.82	STS	0.68	2.95	2.82
	Al	0.74		Al	0.79		
	Mg	1.5		Mg	1.48		
c	STS	0.66	2.88	STS	0.54	3.50	3.02
	Al	0.77		Al	0.74		
	Mg	1.45		Mg	1.30		

를 사용한 성형품에 대한 두께분포는 파단이 발생한 펀치 코너부에서 측정된 결과를 Fig. 6(b)와 Table 5에 나타내었다. 코너부는 두께가 가장 얇은 부분인 a, b, c에서 측정하였다.

### 3. 원통컵 드로잉 공정 수치해석

#### 3.1 성형 해석 모델

다층금속 판재의 온간 딥 드로잉 공정의 성형 해석을 위해 유한요소해석 프로그램인 Forge 2010™ 를 이용하였다. 해석은 실험과 동일한 조건에 대해 2 가지 경우에 대해 수행하였다. 첫째, 드로잉비 2.0 인 소재에 대해 성형온도 250°C에서 성형된 성형품의 두께분포를 비교하였으며,



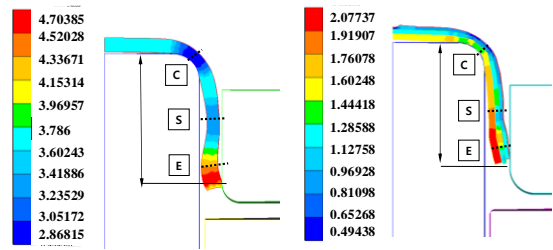
**Fig. 7** Two kinds of FE models used to investigate effect of layer patterns of sheet on deep drawing

둘째, 펀치코너에서 발생된 파단부위 비교를 위해 성형온도 300℃에서 원통컵 드로잉 성형해석을 수행하였다. 성형해석 조건으로 각 소재의 계면은 고착마찰(bilateral-sticking) 조건으로 가정하였고, 윤활은 수용성 흑연윤활제(water + graphite), 펀치속도는 실험과 동일조건(0.5mm/s)을 이용하였다. Fig. 7은 본 연구에서 고찰하고자 하는 해석기법을 나타내는 유한요소모델을 나타내고 있다. Fig. 7(a)은 다층소재모델을 나타낸 것으로 3개 소재를 각기 다른 층으로 구분하고 층간 접착은 완전고착상태로 가정하며 각 소재의 유동곡선은 Fig. 4(a)(b)(c)에 나타나 있는 직접 측정 값을 각각 적용하였다. 반면에 Fig. 7(b)는 Fig. 4(d)에 나타나 있는 다층금속판재의 유동곡선을 이용하고 소재를 1개의 단일층으로 가정한 다층소재모델을 나타내고 있다. 결국, 다층소재모델은 3층의 특성을 거시적 관점에서 1개의 층으로 가정하고 있다.

### 3.2 성형품 두께분포 예측

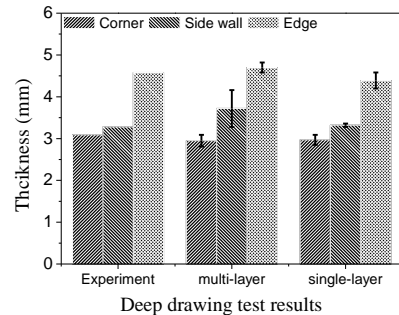
Fig. 8(a)는 다층금속을 단층소재모델로 성형해석한 결과를 나타내고 있다. (b)는 다층소재모델을 이용하여 계산된 원통컵의 유효변형률 분포를 나타내고 있다. 이때 원통컵의 깊이는 33mm 수준이며 동일시점에서 비교하였다. 단층소재모델의 경우가 단면형상에서 실제제품과 보다 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 유효변형률 값은 단층소재모델의 경우가 다층소재모델의 경우보다 2.37~2.63 수준까지 높게 나타나고 있다.

성형품의 두께가 비교된 3가지 부위인 코너부(corner), 측벽부(side wall), 모서리부(edge)에서 실험값과 해석값의 오차는 2가지 해석 모델 모



(a) single-layer (b) multi-layer

**Fig. 8** Section view of circular cup fabricated by deep drawing and effective strain distribution calculated by FEM analysis



**Fig. 9** Comparison of thickness distribution according to the FE model

두에서 컵 코너 부위에서 0.15mm 이하, 모서리 부위에서 0.2mm 이하의 오차를 나타냄을 Fig. 9에서 알 수 있다. 2가지 해석모델간의 차이는 컵 측벽에서 다층소재모델이 더 큰 값을 나타내고 있는데 이는 다층소재모델의 경우 펀치기준으로 가장 바깥쪽에 위치하고 있는 STS430 소재의 강도가 상대적으로 강하므로 굽힘강성이 더 크기 때문이며 Fig. 8(b)의 해석결과에서 확인할 수 있다.

### 3.3 성형품 파단예측

성형온도 300℃, 블랭크 직경  $\phi 107\text{mm}$ 에서 성형시 발생된 파단 발생에 대한 예측을 위해 2가지 해석모델을 이용한 성형해석을 수행하였다. 실험에서 실제 파단된 높이를 측정하고, 성형해석결과로부터 동일한 성형깊이에서 변형률(strain)과 높이를 비교하였으며, 고온인장시험 결과와 비교하여 파단시점을 예측하였다.

판재의 성형한계에 대한 정량적 기준은 성형한계도(forming limit diagram)를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나, 다층금속소재이며 승온상태에

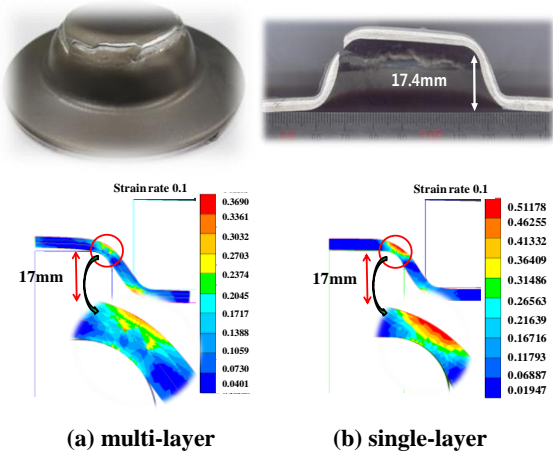


Fig.10 Effective strain distribution of circular cup calculated by using the three-layer model

서의 성형한계도를 구하는 것은 그 자체만으로도 방법설정과 실험 데이터 확립이 방대하게 필요한 만큼, 본 연구에서는 Kim[12] 등이 Mg 합금에 대해 적용한 유효 파단 변형률 이론을 적용한 바와 같은 파단변형률, 즉 연성과괴 발생 시점을 기준으로 파단시점을 예측하고자 하였다. 다층금속소재로부터 각 온도와 변형률 속도별로 직접 측정된 일축인장시험 결과를 이용하여 유효 파단변형률을 계산하고 해석을 통해 그 신뢰도를 분석하였다.

성형깊이 약 17.4mm에서 펀치 코너부 파단이 발생되었으며 Fig. 10에 나타내었다. 파단면 사진에서 STS430소재가 다른 소재 보다 먼저 파단됨을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 4(d)의 인장시험 결과에서 STS430소재가 먼저 파단된 후 Al3004 합금과 AZ31합금이 이후에 파단된 것과 동일한 변형거동을 나타내고 있다.

딥 드로잉시 펀치는 일정속도(0.5mm/s) 작동되므로 파단시점에 대한 분석을 위해 성형속도를 변형률 속도로 변환하면 평균 0.12/s 수준이다. 300℃, 변형률속도 0.1/s 에서 다층금속소재는 변형률 0.3 부근에서 파단되었다(Fig. 4(d)).

유한요소해석결과에서 파단시점을 예측하기 위해 수행된 해석결과로 Fig.10(a)는 다층소재모델을 이용한 경우로서 파단깊이 17mm 에 도달할때 파단부위의 변형률이 실험결과에서 얻은 0.3 과 동일한 값을 나타내고 있다. 반면, 단층소재모델의 경우 Fig. 10(b)에 나타낸 바와 같이 동

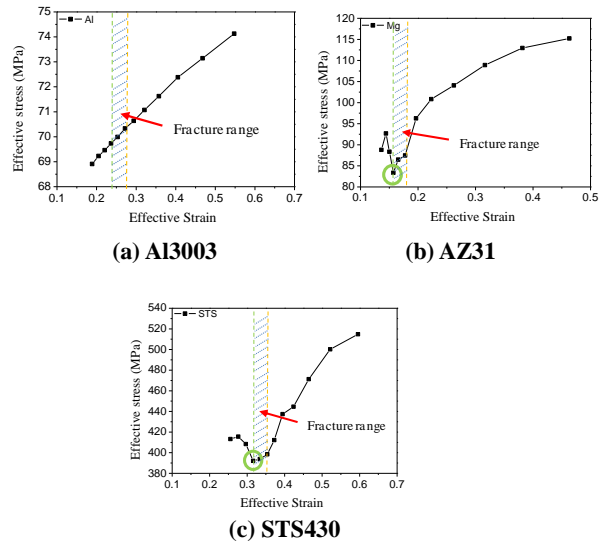


Fig.11 Stress-strain values at punch corner position when fracture is occurred

일 높이에서 변형률 0.51 로 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 결국, 파단예측을 위해서는 다층소재모델을 이용하며 파단기준은 개별소재(본 연구에서는 STS430)의 파단연신율 보다는 다층금속판재의 인장파단시점(Fig. 3 상의 2<sup>nd</sup> 변곡점 발생 변형률)이 적합함을 알 수 있다. 이에 반해 다층금속판재를 구성하는 각 소재를 분리하여 측정한 인장시험결과(Fig. 4(a))을 기준으로 파단시점을 예측한다면 변형률 0.12 이하의 값에서 파단이 발생하는 것으로 판단되므로 부적합한 기준설정이 될 수 있다. 또한 Fig. 11(a), (b), (c)는 파단 발생 부위인 펀치코너부의 성형깊이에 따른 유효응력-유효변형률을 나타내고 있는데, 파단깊이 17mm 에서 응력하락을 나타내고 있으며 300℃에서 최초파단이 발생하는 스테인레스 소재의 파단연신율(약 0.3)과 동일한 값을 나타내고 있다. 결국, 딥 드로잉시 파단예측을 위해서는 다층소재 모델을 이용한 해석과 다층금속 소재의 파단연신율을 기준으로 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 STS430-Al3004-AZ31 이종금속판재의 소재별 인장시험 특성 및 접합된 소재의 인장시험결과와 데이터를 비교·분석하고 원통컵

드로잉 실험과 FEM해석을 통해 드로잉 성형품의 두께분포와 결합예측에 대한 분석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 이중금속 소재의 연신율이 각 소재(STS430, Al3004)의 개별적 연신율 보다 높게 나타나고 있어 이중금속 소재로부터 저 연신율 소재의 연신율 향상을 효과를 확인할 수 있었다.

(2) 변형율 속도에 따른 영향은 전반적으로 변형율 속도가 증가할수록 항복강도는 동일하지만 가공경화지수가 증가되고 균일연신율의 증가가 나타나고 있다. 특히 250~300℃ 영역에서 가공경화와 균일 연신율 증가는 AZ31합금의 영향으로 판단된다.

(3) 원통컵 드로잉 실험을 통해서 이중금속 판재의 한계 드로잉비가 250℃에서 300℃ 구간에서 2.0 수준이었으며 AZ31소재와 동일한 값을 나타내었다. 결국 이중금속 소재의 한계드로잉비는 이중금속 소재 가운데 가장 성형성이 낮은 소재의 성질에 의해 지배됨을 확인하였다.

(4) 이중금속 소재에서 각각 개별로 분리한 시편으로부터 측정된 물성치를 이용한 이중소재모델 성형해석 결과와 클래드 소재물성치를 이용한 단층소재모델 성형해석 결과를 비교하였다. 그 결과, 단면형상과 두께분포는 단층소재모델이 상대적으로 실험과 보다 유사한 값을 나타내었다. 이는 단층소재모델의 경우 편차기준으로 가장 바깥쪽에 위치하고 있는 STS430소재의 굽힘강성이 더 크며 그 효과가 더 크게 작용했기 때문으로 판단된다. 결국 이중금속소재의 소성변형을 정확히 예측하기 위해서는 소재간 접촉계면에 존재하는 접합력 고려방법에 대한 연구가 필요하며 단층소재모델을 사용하는 것이 현재까지는 보다 현실적임을 확인하였다.

(5) 파단예측은 두께분포 예측결과와는 달리 각각 개별로 분리한 이중소재모델의 성형해석기법을 이용하고 이중금속소재의 파단연신율 값을 기준으로 예측이 가능함을 확인하였다. 결국, 두께분포예측은 단층소재모델이 파단예측은 단층소재모델이 보다 적합함을 STS-Al-Mg합금 이중금속 소재의 실험과 해석결과로부터 제안할 수 있다.

단, 본 연구에서 제안한 파단 및 성형품 특성 예측에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 다양한 소재로 구성된 타 이중금속소재에 대한 연구와 분석이 필요하다.

## 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, W. J. Chung, 2001, An elasto-plastic analysis on deep drawing of clad sheet metal, Trans. Mater. Process, Vol.10, No. 5, pp. 411~417.
- [2] 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, Vol.17, No.7, pp. 473~480.
- [3] K. Iwanaga, H. Tashiro, H. Okamoto, K. Shimizu, 2004, Improvement of formability from room Temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy, J. Mater. Process. Technol., Vol.155, pp. 1313~1316.
- [4] F. K. Chen, T. B. Huang, C. K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium ally AZ31 sheet, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol.43, No. 15, pp. 1553~1559.
- [5] J. E. Lee, D. H. Bae, W. S. Chung, K. H. Km, J. H. Lee, Y. R. Cho, 2007, Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets, J. Mater. Process. Technol., Vol.187-188, pp. 546~549.
- [6] H. D. Manesh, K. Taheri, 2003, Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet, J. Alloys Compd., Vol.361, pp. 138~143.
- [7] T. Mori and S. Kurimoto, 1996, Press-formability of stainless steel and aluminum clad sheet, J. Mater. Process. Technol., Vol.56, pp. 242~253.
- [8] F. Yoshida, R. Hino, 1997, Forming limit of stainless steel-clad aluminum clad sheet under plane stress condition, J. Mater. Process. Technol., Vol.63, pp. 66~71.
- [9] M. H. Parsa, K. Yamaguchi, N. Takakura, 2001, Redrawing analysis of aluminum-stainless steel laminated sheet using FEM simulations and experiments, Int. J. Mech. Sci., Vol. 43, No. 10,



pp. 2331~2347.

- [10] T. Oya, N. Tiesler, S. Kawanishi, J. Yanagimoto, T. Koseki, 2010, Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending, J. Mater. Process. Tech., Vol. 210, No. 14, pp. 1926~1933.
- [11] B. K. Hwang, K. S. Lee, S. E. Hong, Y. S. Lee, 2011, Temperature and strain rate dependent

tension properties of stainless steel-aluminum-magnesium multilayered sheet fabricated by roll bonding, Trans. Mater. Process, Vol. 20, No. 3, pp. 257~264.

- [12] W. J. Kim, H. K. Kim, W. Y. Kim, S. W. Han, 2008, Temperature and strain rate effect incorporated failure criteria for sheet forming of magnesium alloys, Mater. Sci. Eng. A, Vol.488, No. 1-2, pp. 468~474.