

## 블랭킹 공정을 이용한 STS/Al 클래드 판재의 계면 접합력 측정에 관한 연구

김태호<sup>1</sup> · 이광석<sup>2</sup> · 김지훈<sup>3</sup> · 문영훈<sup>3</sup> · 이영선<sup>2</sup>, 윤은유<sup>#4</sup>

### Study About Measurement of Interfacial Bonding Strength of STS/Al Clad sheet by Blanking Process

T. H. Kim, K. S. Lee, J. H. Kim, Y. H. Moon, Y. S. Lee, E. Y. Yoon

(Received May 4, 2018 / Revised July 18, 2018 / Accepted August 27, 2018)

#### Abstract

The clad sheet material is produced by a roll-bonding process of one or more materials with different properties. Good formability of clad sheet material is an essential property in to deform a clad metal sheet into a part or component. Performance of the clad sheet material largely depends on interfacial bond strength between different materials. In this study, interfacial bond strength of STS/Al clad sheet was analyzed by varying experimental parameters using a blanking process. Experimental parameters are the punching speed, clearance, and stacking order of plate materials. In addition, blanking test results were compared with bond strengths measured by the T-peel test, that analyzes interface bonding strength of the standard clad sheet. The blanking process was analyzed by the finite element method under the sticking condition of interface of different materials, and experimental results and analysis results were compared.

**Key Words:** STS/Al Clad Sheet, Interfacial Bonding Strength, Blanking Test, FEM, Sticking Condition

## 1. 서 론

가전제품, 자동차 부품 및 기타 공업 제품의 주 재료로 단일 금속의 재료가 많이 사용되어 왔지만, 최근엔 금속 재료의 형상과 성능에 대한 기술적인 특성상 단일 판재로는 제품의 기능을 만족시킬 수 없어, 서로 성질이 다른 2종 이상의 단일 판재를 적층 접합하여 각각의 장점을 서로 보강할 수 있도록 2매판 또는 3매판으로 제작되고 있는데 이러한 적층 복합 판재(Laminated Composite Plate)를 클래드(Clad) 판재라고 한다[1-4].

클래드 판재는 모재 금속에 새로운 기능을 부여하기 위해 모재 금속 판재 표면에 다른 금속 판재를 금속학적으로 붙인 접합판재를 말한다. 서로 특성이 다른 둘 또는 그 이상의 재료를 접합하여 각

금속의 장점을 취하고 단일 우수한 특성을 갖도록 제단한 복합 재료의 일종으로 접합방법으로는 롤본딩(roll bonding), 마찰접합(friction stir welding), 확산접합(diffusion bonding), 폭발압접(explosive welding) 등이 있는데, 압연과 압출에 의한 방법이 가장 경제적으로, 널리 응용되고 있다.

현재 상용화되어 있는 클래드 판재의 경우 열전도율, 열보존율, 열효율성이 뛰어난 알루미늄과 내염성, 내산성, 내알카리성 및 내식성이 뛰어난 스테인리스 스틸을 접합시킨 클래드 판재가 많이 사용되고 있다. 이러한 클래드 판재의 특성 가운데, 이종재료 간 계면의 계면접합력은 중요한 정량적 데이터 중 하나이다. 계면접합력은 이종소재간 표면(계면)의 접합강도를 나타내는 것으로 소재가 그 자체 또는 제품으로 성형시 결함 발생에 영향을 줄 수 있는 공정연계 물성에 해당한다[5]. 접착된 계

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 연구원

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소 책임 연구원

3. 부산대학교 기계공학과 교수

4. 한국기계연구원 부설 재료연구소 선임 연구원

# Corresponding Author: Korea Institute of Materials Science, senior researcher, E-mail:eyoon@kims.re.kr

Table 1 Chemical Compositions of STS & Al (Unit: %)

Stainless Steel (STS439_0.5mm)	C	Cr	Fe	Mn	Ni	Si	Ti
	0.07	18.0	78.33	1.0	0.50	1.0	1.10
Aluminum (Al3003_1.0mm)	Al	Cu	Fe	Mn	Si	Zn	Other
	96.7~99.0	0.05~0.20	≤0.7	1.0~1.5	≤0.6	≤0.1	≤0.15

면의 접합력을 측정하기 위한 일반적인 박리 시험 법에는 180° 박리시험(ASTM B903), 유동 롤러 박리 시험(ASTM D3167), T형 박리 시험법(ASTM D1876) 등이 있으나[6] 접합력에 따라 시험 소재 준비에 많은 어려움이 존재하고 박리 과정에 있어 소재에 상당한 손상이 가해지며, 소재의 두께나 접합 강도에 의해 박리가 불가능해 시험편 준비가 순조롭지 못한 경우가 발생하기 때문에 기존 시험법의 단점을 보완하고 대체할 수 있는 단순한 계면 접합력 측정에 관한 연구를 수행하고자 하였다.

본 연구에서는 압연접합 (roll bonding)으로 제작된 STS/Al 클래드 판재의 블랭킹 실험을 통해 측정된 펀치 하중과 클래드 판재를 각 단일 소재로 분리하여 겹쳐 놓은 상태에서의 블랭킹 실험을 통해 측정된 펀치 하중을 이용하여 하중의 차이만큼을 접합력으로 정의하고자 제안하였으며, 표준박리 시험법인 T형 박리시험을 수행하여 결과를 비교분석 함으로써 타당성을 검증하고자 하였다.

또한, 상온 단축 인장 실험을 통해 압연 접합된 판재에서의 각 소재에 대한 기계적 물성을 구하였으며, 측정된 물성을 이용한 유한요소해석과 비교 함으로써 임계파단지수(Critical Damage Value, CDV)을 도출하였다. 추가로, 측정된 임계파단지수를 적용한 블랭킹 공정에 대한 해석을 수행하여 접합 계면 간의 접합조건을 분석하고자 하였으며, 해석은 상용 해석프로그램인 DEFORM<sup>TM</sup>을 사용하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 소재

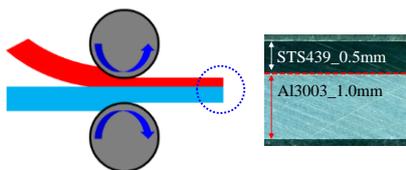


Fig. 1 Appearance of STS/Al clad sheet

본 실험에 사용된 소재는 STS439-0.5t와 Al3003-1.0t를 압연하여 제작한 두께 1.5mm의 STS/Al 클래드 판재를 사용하였으며, 압연 후 각 소재에 대한 두께를 측정하여 Fig. 1에 나타내었다. 클래딩 전 원 소재에 대한 화학 조성표를 Table 1에 나타내었으며, Fig. 2는 블랭킹 금형의 단면도를 나타내고 있다. 블랭킹 금형의 경우 펀 형태의 직경이 서로 다른 펀

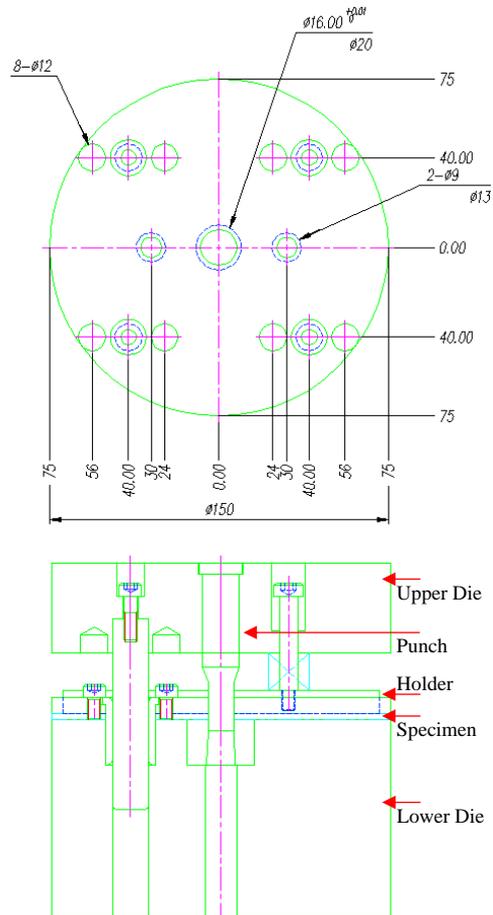


Fig. 2 Schematic diagram of blanking tool

치를 사용하여 다이와의 간극 조절이 가능하도록 하였고, 상부다이 가압 시 두 개의 스프링에 의해

시편에 블랭크 홀딩력이 전달되도록 하였다.

### 2.2 T 형 박리시험(T-peel test)

본 실험에 앞서, 가장 일반적으로 사용되는 표준 박리시험법인 T 형 박리시험법을 이용하여 클래드 판재의 계면접합력을 측정하였으며, 이후에 블랭킹 공정을 이용한 접합력 측정 연구의 비교기준으로 이용하였다. 시험에 사용된 시편은 길이 300mm × 폭 10mm 크기의 띠(band) 형태로 가공하여 끝단부 약 50mm 를 박리시켜 T 형태로 만들어 상부와 하부 지그에 각각 고정시킨 후 상부 지그가 이동하며 박리가 진행된다(Fig. 3).

박리 속도는 0.1mm/s의 속도에서 수행되었으며, 탄성 구간(elastic region)을 제외한 약 140mm 진행된 시편 박리하중의 평균값을 측정하였다

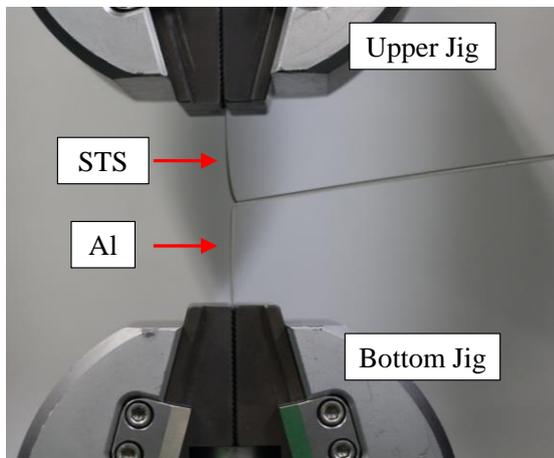


Fig. 3 Setup of T-peel test

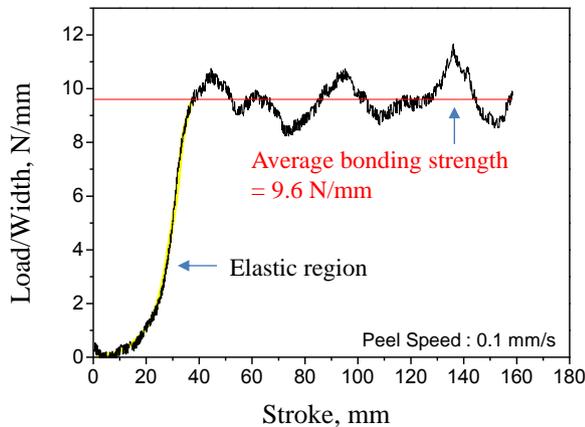
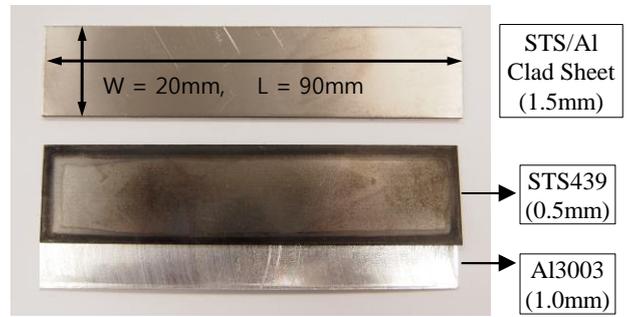


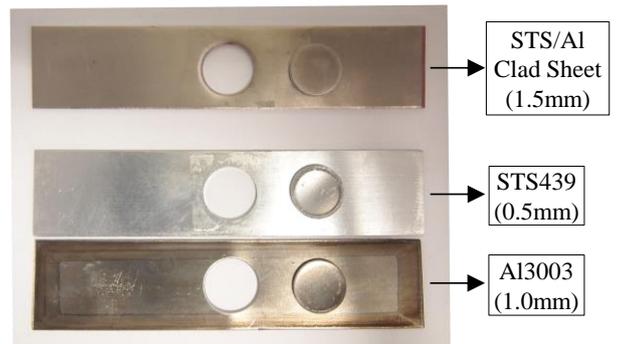
Fig. 4 Result of T-peel test

Fig. 4 와 같이 평균 박리하중은 9.6N/mm로 측정 되었으며, 박리되는 동안 하중이 일정하게 유지되지 않고 8.2 - 11N/mm 사이에서 변하는 이유는 접합 계면간의 박리가 접합부위에 따라 미시적으로는 동일 하지 않기 때문으로 판단된다.

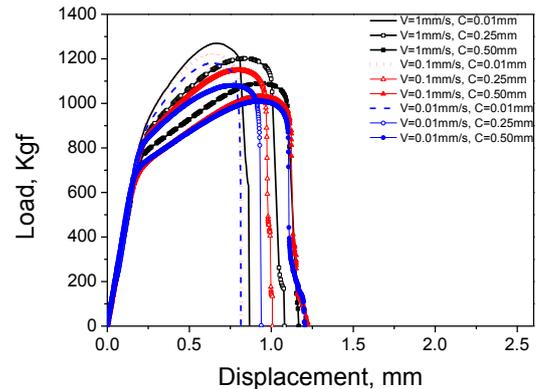
### 2.3 블랭킹 실험 및 결과



(a) Specimens for blanking test



(b) Specimens after blanking test  
Fig. 5 Specimens of blanking test



(a) clad

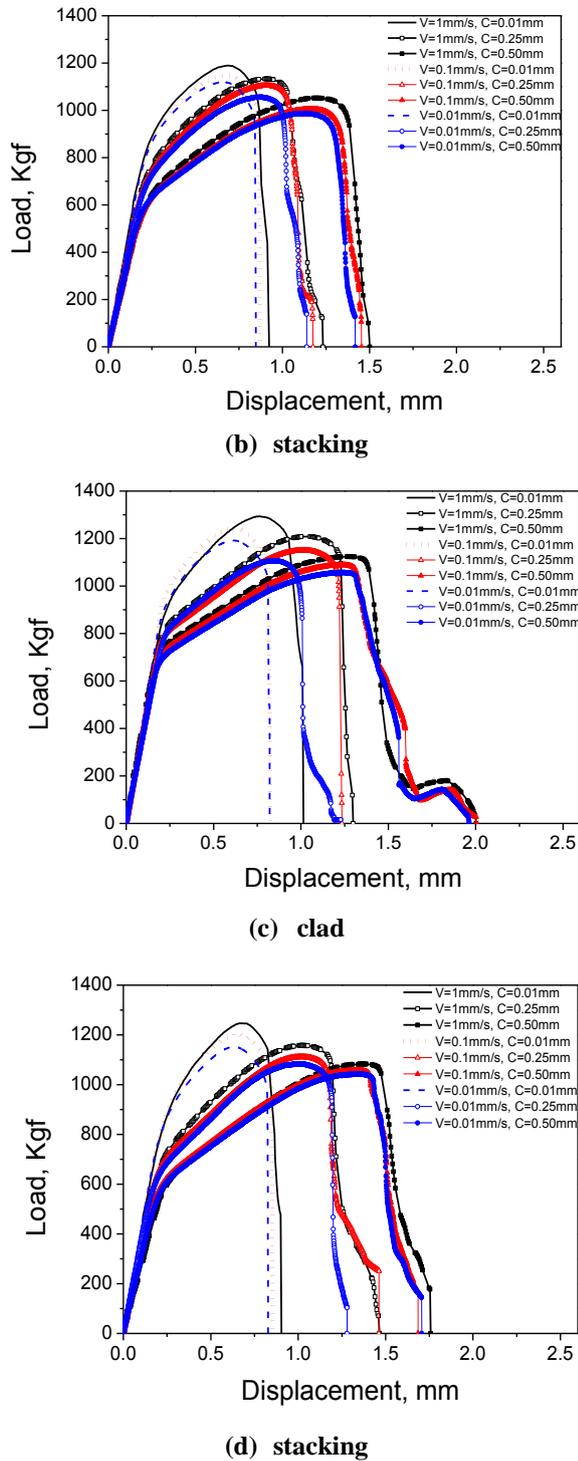
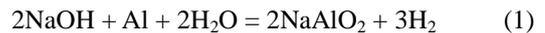


Fig. 6 Results of blanking test: (a) clad sheet & STS-upper, (b) stacking sheet & STS-upper, (c) clad sheet & Al-upper, (d) stacking sheet & Al-upper

Table 2 Interfacial bonding strength measured by blanking test

Stacking Position	Clearance (mm)	Punch Velocity (mm/s)	Bonding Force (N)	Bonding Strength (N/mm)
STS (Upper)	0	0.01	793.3	15.79
		0.1	934.0	18.59
		1	1036.5	20.63
	0.25	0.01	320.0	6.37
		0.1	586.8	11.68
		1	907.3	18.06
	0.5	0.01	306.5	6.10
		0.1	334.1	6.65
		1	515.5	10.26
Al (Upper)	0	0.01	511.9	10.19
		0.1	550.1	10.95
		1	613.9	12.22
	0.25	0.01	307.0	6.11
		0.1	520.5	10.36
		1	600.4	11.95
	0.5	0.01	209.0	4.16
		0.1	445.6	8.87
		1	571.2	11.37

클래드 판재와 단순 적층 상태의 실험을 수행하기 위하여 클래드 판재를 기계적, 화학적 방법을 이용하여 각각의 단일 소재로 분리하였다. 알루미늄 소재를 얻기 위해서는 스테인리스 소재는 연마 (Polishing) 하였으며, 스테인리스 소재를 얻기 위해서는 수산화 나트륨(NaOH) 과 물(H<sub>2</sub>O)을 약 1:2 를 이용하여 소재가 분리될 때까지 교반하였으며, 반응식은 식 (1)에 나타내었다.



클래드 판재의 블랭킹 실험을 통해 측정된 펀치 하중과 클래드 판재를 각각의 단일 소재로 분리하여 계면간 접합력이 없는 단순 적층 상태에서의 블랭킹 실험을 통해 측정된 펀치 하중을 상호 비교하여 펀치하중의 차이만큼을 접합력으로 간주하였으며 (식 (2)), Fig. 5에 블랭킹 실험 전, 후의 시험편에 대하여 나타내었다. 실험을 통해 측정된 펀치 행정 거리에 대한 하중을 Fig. 6에 그래프로 나타내었으며, 측정된 하중과 각 시험 조건에 따른 펀치 둘레로 나누어 클래드 판재의 접합력으로 계산하였으며,

Table 2에 나타내었다 (식 (3)). 블랭킹 공정시 실험 변수의 영향을 분석하고자 펀치 속도는 3가지 조건 ( $V = 0.01\text{mm/s}$ ,  $0.1\text{mm/s}$ ,  $1\text{mm/s}$ ), 펀치-다이 간의 간극은 3가지 조건 (Clearance =  $0.01\text{mm}$ ,  $0.25\text{mm}$ ,  $0.5\text{mm}$ ), 소재 적층 순서는 2가지 조건 (STS-upper, AI-upper)에 대한 실험을 수행하였다.

$$F_{clad} - F_{stack} = \Delta F \quad (2)$$

$$S_B = \frac{\Delta F}{l_B} = \frac{\Delta F}{2\pi P_r} \quad (3)$$

Where,  $F_{clad}$ : blanking punch force on clad sheet

$F_{stack}$ : blanking punch force on stacking sheet

$\Delta F$ : bonding force of clad sheet

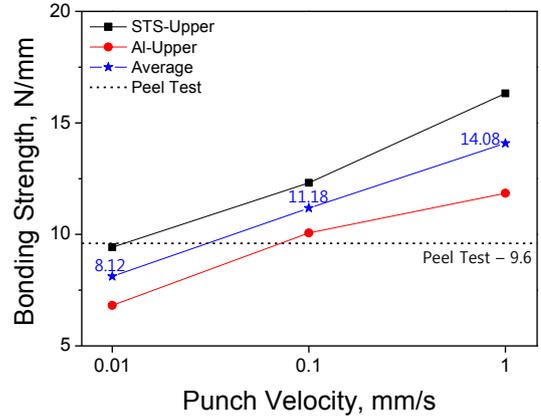
$S_B$ : bonding strength

$l_B$ : blanking punch circumference

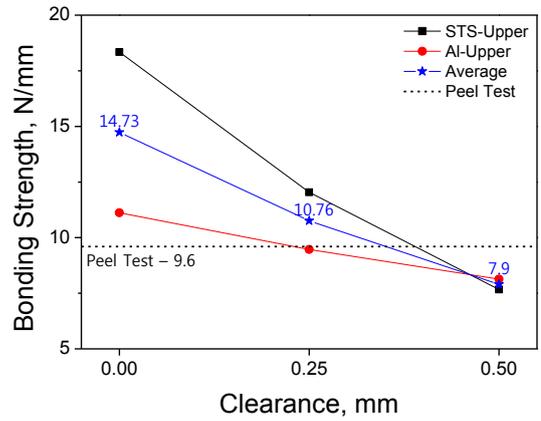
$P_r$ : blanking punch radius

시험 결과 1) 펀치속도가 증가할 수록 시편 파단 행정거리는 감소하였으나, 펀치하중은 증가하였으며, 계면 접합력 또한 높게 측정되었다. 2) 펀치-다이 간의 간극(Clearance)이 증가할 수록 펀치하중은 감소하였으나 시편 파단 행정거리는 증가하는 것을 확인하였고, 낮게 측정되었다. 3) 소재 적층 순서에 있어 연질 소재인 알루미늄이 펀치와 접촉하는 상부에 위치할 때 상대적으로 펀치 하중이 더 높게 측정되었으며, 시편 파단까지의 행정거리 또한 증가하였으나 계면 접합력은 더 낮게 측정되었다. 이는 상대적으로 성형성(Formability)이 좋은 스테인리스가 변형량이 크게 작용하는 펀치 외곽부에 위치함으로써 알루미늄 소재의 파단이 지연됨에 따라 펀치 하중이 증가하게 되고, 소재 파단까지의 행정거리 또한 증가한 것으로 판단된다

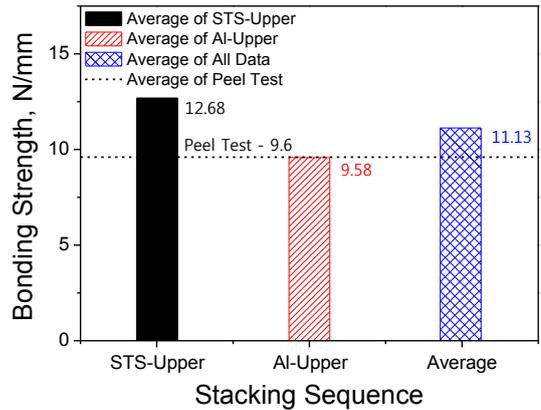
블랭킹 실험을 통해 측정된 하중으로부터 계산된 계면 접합력은 Fig. 7에 나타내었다. 펀치 속도가 0.01, 0.1, 1mm/s의 속도로 증가할수록 접합 하중 또한 증가하는 경향을 나타내었으며, 각 블랭킹 속도에 따른 평균 접합 하중은 Fig. 7 (a)에 나타내었다. 반면, 클리어런스의 경우 0.01, 0.25, 0.5mm로 증가할수록 접합 하중은 감소하는 경향을 나타내었으며, Fig. 7 (b)에 나타내었다.



(a) Effect of punch velocity, mm/s



(b) Effect of clearance, mm



(c) Comparing the blanking test and peel test

Fig. 7 Effects of punch velocity and clearance on interfacial bonding strength (a), (b), and comparison between blanking test and T-peel test (c).

소재 적층 순서에 따른 모든 조건에서의 시험 결과의 평균 접합 하중을 측정하여 T-박리시험을 통해 측정된 접합 하중과 비교한 결과를 Fig. 7 (c)에 나타내었다. 스테인리스 소재가 상부에 위치한 조건에서 12.68N/mm, 알루미늄이 상부에 위치한 조건에서 9.58N/mm 의 평균 접합 하중을 나타내었으며, 전체 평균 접합하중은 11.13N/mm 이다. 블랭킹 실험을 통해 측정된 접합 하중의 경우 펀치 속도나 클리어런스, 소재 적층 순서에 따른 실험 변수에 의해 하중이 다소 높거나 낮게 측정되는 경향이 있으나 모든 실험 조건에 대한 전체적인 평균을 측정한 결과 T-박리시험 결과와 근사한 값을 나타냄을 확인하였다.

소재 적층순서에 따른 실험 데이터의 산포정도를 측정하기 위해 표준편차를 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 알루미늄이 상부에 위치한 조건에서의 표준편차 값이 스테인리스가 상부에 위치한 조건보다 데이터의 산포 정도가 더 작게 나타났으며, 연질 소재인 알루미늄이 상부에 위치한 조건에서 평균 접합하중과 데이터 신뢰도가 더 높게 나타남을 확인하였다.

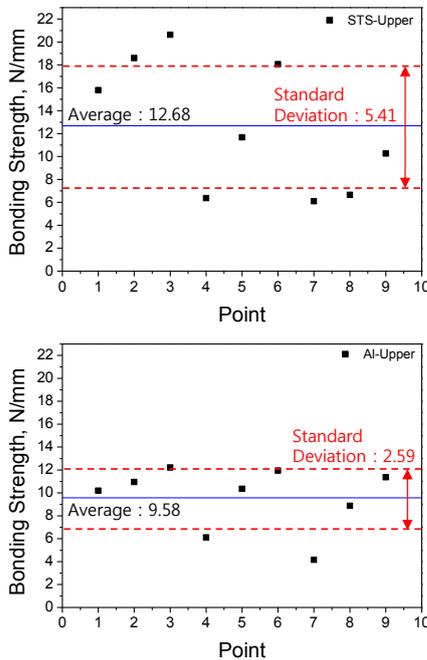


Fig. 8 Effect of standard deviation of bonding strength according to the stacking position

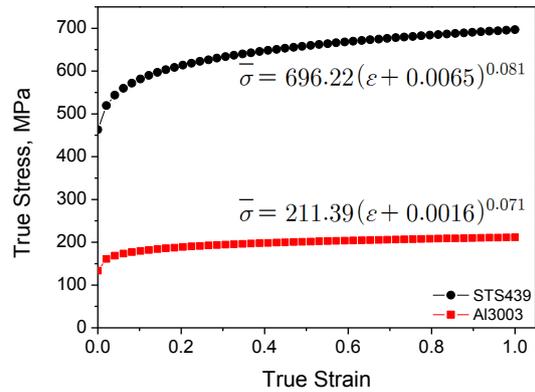


Fig. 9

Flow stress curves of single layer sheet

### 3. 해석

#### 3.1 인장 해석

Table 3 Condition of tensile analysis

Material	1) STS439
	2) Al3003
Mesh Size	0.05 mm
Punch Velocity	1.25mm/s (0.1/s)
Constitutive Model	Rigid-plastic
Friction Coefficient	Cold forming steel die (0.12)
Temperature	Room temp (20°C)
Damage	Normalized C&L

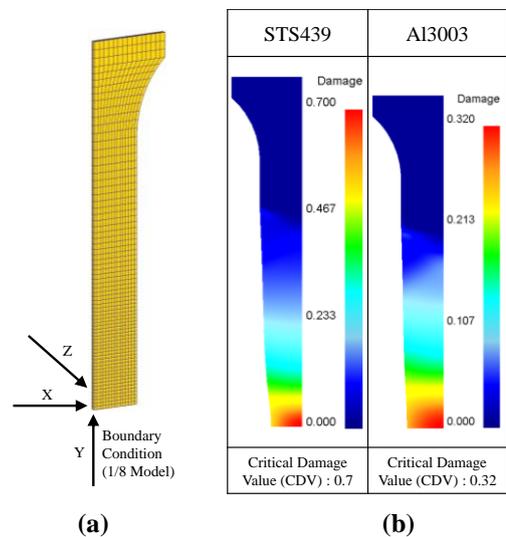


Fig. 10 FE analysis model and results of tensile test: (a) Tensile specimen model, (b) Calculated for STS439 and Al3003 critical damage values

원소재(압연 전)의 기계적물성과 압연 접합된 소재의 물성은 큰 차이를 나타내기 때문에 블랭킹 공정에 대한 정확한 수치 해석을 위해서는 클래드 판재의 물성이 필요하다. 따라서, 클래드 판재를 개별로 분리하여 상온 단축 인장시험을 수행하였다. 인장 시험편은 압연 방향(rolling direction)에 대하여 ASTM-E8M(sub Size) 규격으로 제작하였고, 표점 거리 (gauge length) 는 25mm 이며, 0.1/s 의 변형률 속도 (strain rate)에서 실험을 수행하였다.

상온 인장 실험을 통해 유동응력을 측정하여 강도계수 (K, strength coefficient) 와 가공 경화 지수 (n, strain hardening exponent) 를 구할 수 있었으며, Fig. 9 와 같은 네킹 발생 이후 대변형률이 적용된 유동응력 그래프를 얻을 수 있었고, 이를 유한요소해석 프로그램에 적용하였다.

블랭킹 공정 해석을 위한 임계파단지수를 측정하기 위하여 인장실험을 모사한 유한요소해석을 수행하였으며, 해석 조건은 Table 3에 나타내었다. 시험편은 Fig. 10(a)와 같이 강소성체(rigid plastic)로 가정하였고, 대칭성을 고려하여 1/8모델을 사용하였다. 부위별 해석 정밀도를 높이기 위해 육면체요소(hexahedral brick element) 를 적용하였다. 인장 실험에서 시험편이 파단된 펀치 행정거리만큼 인장해석을 진행하여 동일한 파단 변위에서의 임계파단지수를 측정하였다.

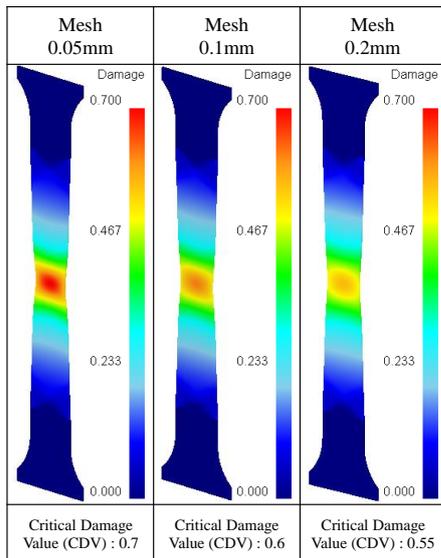


Fig. 11 Effect of critical damage value by mesh size

소성 가공 공정 중 파단 발생을 예측하기 위한 다양한 이론적 근거에 의한 연성과파괴기준이 제시되어 있는데[7-11], 본 연구에서는 최대인장변형에너지 밀도에 근거한 Normalized Cockroft & Latham 식(4)을 이용하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C \quad (4)$$

where,  $\sigma^*$ : 1<sup>st</sup> principal stress  
 $\bar{\epsilon}$ : Effective strain  
 $C$ : Materials constant

인장해석 결과 Fig. 10(b) 에서와 같이 시편 중앙부의 네킹 발생 지점에서 최대 손상지수가 나타남을 확인하였으며, STS439 의 임계파단지수 = 0.7, AI3003 의 임계파단지수 = 0.32 로 측정되었다. 임계파단지수는 유한 요소 크기에 큰 영향을 받는 값이므로 요소 크기를 0.05, 0.1, 0.2mm 로 변경하며 인장 해석을 수행하였다. 동일한 펀치 행정거리만큼 변형이 발생할 경우 요소 크기가 증가할수록 임계파단지수는 감소되는 경향을 나타내고 있어(Fig. 11) 동일한 요소크기를 블랭킹 공정 해석에도 적용하였다.

### 3.2 블랭킹 해석

본 연구에서는 계면 접합조건을 변경하며 블랭킹 실험을 통해 측정된 접합하중과 유사한 조건을 찾고자 하였으며, Fig. 12 에 블랭킹 공정의 어셈블리(assembly) 모델을 나타내었다. 먼저, 클래드 판재를 비분리(non-separable) 접합상태에 대한 블랭킹 해석을 수행하였다. 비분리 접합의 경우 소재 계면간의 접합이 절대 떨어지지 않는 조건으로, 해석 결과 실

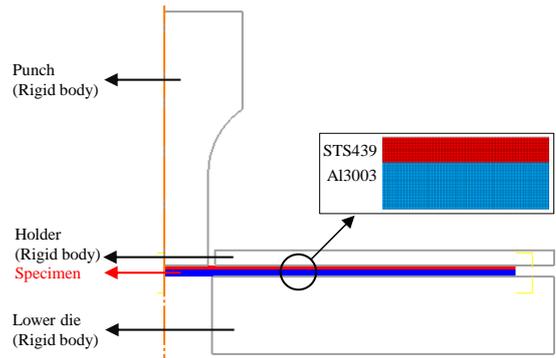


Fig. 12 Finite element modeling

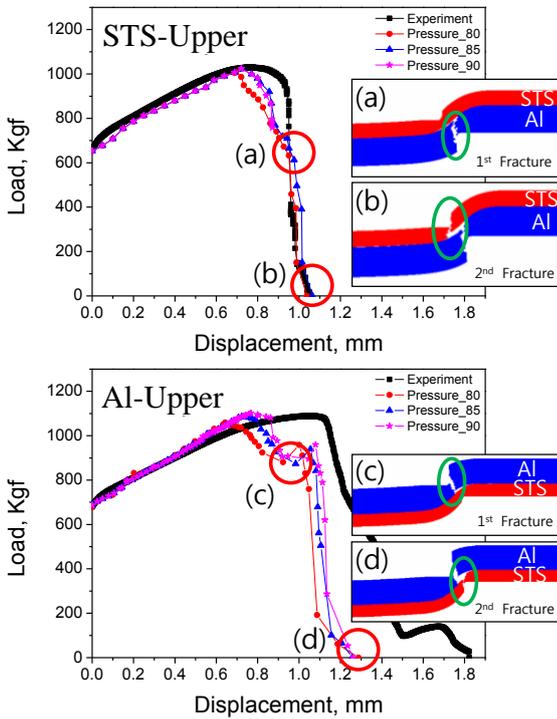


Fig. 13 FE analysis results by pressure conditions

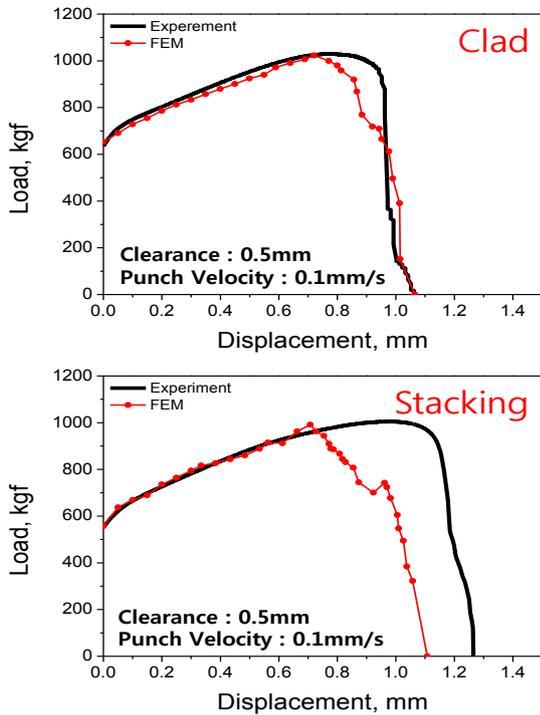


Fig. 14 Comparison by Blanking Test and FEM

제 접합하중 보다 높게 측정되는 경향을 나타내어 계면간 압력조건을 3 가지 조건(80, 85, 90 MPa)으로

변경하여 해석을 수행하였다. 해석은 실험과 동일한 클리어런스 0.5mm, 펀치 속도 0.1mm/s 의 조건에서 소재 적층 순서를 변화시키며 수행하였다.

해석결과 시편 적층 순서와 관계없이 1 차 Al3003 의 파단 이후 STS439 소재의 파단을 확인하였고, 압력 조건의 경우 절대 압력 85MPa 에서 실험과 가장 유사한 결과를 나타내었으며, 결과 비교 그래프를 Fig. 13 에 나타내었다.

측정된 접합조건을 적용하여 클리어런스 0.5mm에 서 펀치 속도 3종류 및 소재 적층 순서를 변경하며 추가적인 해석을 수행하였다. 해석을 통해 측정된 펀치 하중과 실험을 통해 측정된 펀치 하중을 비교 한 결과 모두 최대 3%를 초과하지 않는 오차를 나타내며 실험과 유사한 경향을 나타내었다. 이로써 접합조건을 이용하여 해석을 통한 클래판재의 접합력 측정이 가능함을 확인하였고, 실험과 해석결과 비교 그래프를 Fig. 14에 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 T형 박리 시험법의 단점(시편 준비 어려움)을 개선한 블랭킹 공정을 이용한 개선된 방법을 제안하였으며, 1.5mm 두께의 STS/Al 이중 접합 소재의 계면 접합력을 측정하였으며, 표준 박리시험 결과와 비교 분석하였다. 실험분석 결과 블랭킹 공정의 계면 접합력 측정가능성을 확인할 수 있었다. 또한, 상온 인장 실험을 통한 압연 후 소재에 대한 유동응력 그래프를 유한요소해석에 적용하여 임계파단지수를 도출하였으며, 소재 계면간의 압력을 이용한 접합 조건을 적용하여 클래드 판재의 블랭킹 공정을 모사한 유한요소해석을 통한 계면 접합력의 예측 가능성을 확인하였다.

- (1) 표준 박리시험법인 T-박리 시험을 통해 측정된 계면 접합력과 블랭킹 시험을 통해 측정된 접합력의 결과값이 거의 동일한 값(오차 3% 이내)을 나타내었다.
- (2) 블랭킹 시험시 클래드 판재의 위치에 따른 영향은 연질 소재인 알루미늄이 상부에 위치한 적층 조건에서의 접합력 측정 결과가 더 유사하게 나타남을 확인하였으며, 그 원인은 다른 클래드 판재에 대한 추가 연구를 통해 규명하고자 한다.

- (3) 유한요소해석시 소재 계면 간의 압력을 이용한 접합조건을 적용하여 블랭킹 실험 결과와 유사한 해석 결과를 도출할 수 있었으며, 유한요소해석을 통해 클래드 판재의 블랭킹 실험에 대한 수치해석이 가능함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 재료연구소 주요사업(고강도 알루미늄 판재 열처리 연계 성형 기술 개발, 과제번호 PNK5660)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [1] B. A. Movchan, F. D. Lemkey, 1997, Mechanical properties of fine-crystalline two-phase materials, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 224, No. 1-2, pp. 136-145.
- [2] G. Heness, R. Wuhler, W. Y. Yeung, 2008, Interfacial strength development of roll-bonded aluminium/copper metal laminates, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 483-484, No. 1, pp. 740-742.
- [3] S. T. Hong, K.S. Weil, I. T. Bae, J. P. Choi, J. Pan, 2010, Annealing induced interfacial layers in niobium-clad stainless steel developed as dipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cell stacks, *J. Power Sources*, Vol. 195, No. 9, pp. 2592-2598.
- [4] L. Ghalandari, M. M. Moshksar, 2010, High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB, *J. Alloys Compd.*, Vol. 506, No. 1, pp. 172-178.
- [5] F. Nowicke, A. Zavaliangos, H. C. Rogers, 2006, The effect of roll and clad sheet geometry on the necking instability during rolling of clad sheet metals, *Int. J. of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 8, pp. 868-877.
- [6] S. H. Choi, K. H. Kim, K. H. Oh, D. N. Lee, 1997, Tensile deformation behavior of stainless steel clad aluminum bilayer sheet, *Mater. Sci. and Eng. A*, Vol. 222, No. 2, pp. 158-165.
- [7] K. Osakada, K. Mori, 1987, Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging, *CIRP Annals*, Vol. 27, No. 1, pp. 135-139.
- [8] F. A. McClintock, 1968, A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Hole, *J. Appl. Mech.*, Vol. 35, No. 2, pp. 363-371.
- [9] T. C. Lee, L. C. Chan, P. F. Zheng, 1997, Application of the Finite-Element Deformation Method in the Fine Blanking Process, *J. of Mater. Process. Tech.*, Vol. 63, No. 1-3, pp. 744-749.
- [10] A. K. Ghosh, 1976, A criterion for ductile fracture in sheets under biaxial loading, *Metallurgical Transactions*, Vol. 7, No. 4, pp. 523-533.
- [11] M. G. Cockcroft, D.J. Latham, 1968, Ductility and the Workability of Metals, *J. Inst. Metals*, Vol. 96, pp. 33-39.