

## 압연에 의한 STS/Al/STS 클래드판재 제조시 롤과 STS 사이의 마찰의 영향

정영훈\*·지광구\*·서진유\*·신명철\*

(2002년 5월 21일 접수)

## The Effect of Friction between Roll and STS on the Roll Cladding Behavior of STS/Al/STS Sandwich Sheet

Y. H. Chung, K. K. Jee, J. Y. Suh and M. C. Shin

### Abstract

Sandwich sheets composed of stainless steel/aluminum/stainless steel were produced by roll cladding. In order to investigate the effect of the friction between roll and cladding sample, the lubrication condition of the roll surface was varied. Clad rolling without lubrication gave rise to a small increment of the normal strain of aluminum in the rolling direction. This experimental result was confirmed by FEM modeling. Through-thickness hardness gradients in the mid aluminum layer was successfully explained by variations of the strain state through thickness layers. FEM modeling implied that cladding without lubrication led to a large shear strain variation at the surface of aluminum layer.

**Key Words** : Roll Cladding, STS/Al/STS, Friction Coefficient

### 1. 서론

스테인리스강은 내식성이 좋고 표면이 깨끗하지만 열전도도가 떨어진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 열전도도가 좋은 알루미늄을 접합한 Al/STS 접합판재가 주방용구 재료로 각광을 받아왔다. 이는 알루미늄과 스테인리스강이 냉간 및 온간에서 압연에 의한 압력으로 접합이 이루어져 다른 폭발 용접법이나 확산 용접법에 비해서 효율적이고 경제적인 생산이 가능하였기 때문이다.

알루미늄과 스테인리스강을 한 판씩 접합한 Al/STS 판재는 국내에서도 연구되었고<sup>(1)</sup> 또한 상용화되었다. 최근에 선진국의 주방용기에는 빠르고 안전하게 음식을 만들 수 있는 유도가열용 접합판재가 많이 사용되고 있다. 유도가열용 주방용기는 대개 유도가열시 전력효율이 좋은 STS 430 계열 합금과 열전도도가 높은 Al 합금 그리고 내식성이 우수한 STS 304 합금을 3층으로 접합시킨 소재로 만든다. 그러므로 보다 향상된 기능성을 갖춘 다층 접합판재의 생산기술에 대한 연구가 필요하다.

\* 한국과학기술연구원 재료연구부

STS/Al/STS 접합판재의 생산기술은 기존의 Al/STS 접합공정에서 연구되었던 접합기구, 접착강도에 미치는 공정변수의 영향에 대한 이해<sup>(2-3)</sup>를 바탕으로 발전 가능하다. 그러나 Al/STS 접합공정과 STS/Al/STS 접합공정은 변형거동이 크게 다를 것임을 쉽게 예상할 수 있다. 또 STS/Al/STS 판재의 응용 분야를 고려하면, 접합 후에 딥드로잉(Deep Drawing)과 같은 후가공 공정을 거쳐야 하므로 접합판재의 가공성이 좋아야 한다. 접합판재의 우수한 가공성을 만족시키기 위한 일차적인 조건으로 스테인리스강 판재 조직의 변형상태가 최소화 되어야 한다. 이는 스테인리스강이 알루미늄과 접합되어 있으므로 열처리에 의한 충분한 어닐링이 어렵기 때문이다.

본 연구는 STS/Al/STS 판재의 압연 접합 공정에서 불과 STS 판재 사이의 마찰이 판재의 변형거동과 접합 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 압연접합실험

### 2.1 실험방법

STS 304, Al 3003, STS 436을 각각 0.4, 3.0, 0.5mm의 두께로 준비하여 300°C의 온도에서 압연하였다. 불과 STS 사이의 마찰의 영향을 알아보기 위해 전혀 윤활유를 바르지 않은 시편(NOL)과 WD-40으로 윤활 처리한 시편(L)을 준비하여 압연접합하였다.

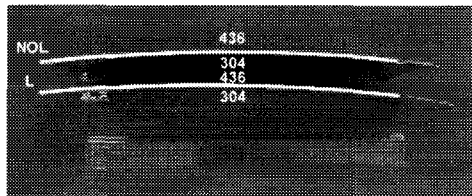


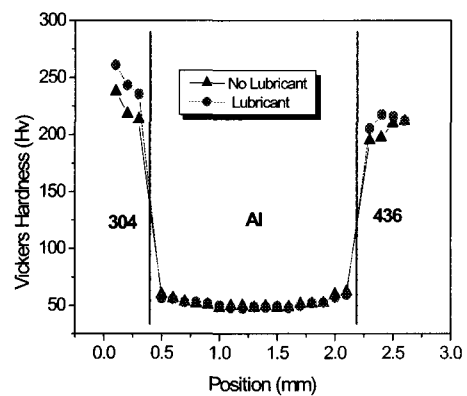
Fig. 1 The Specimens roll clad with (L) and without (NOL) lubrication

### 2.2 실험결과

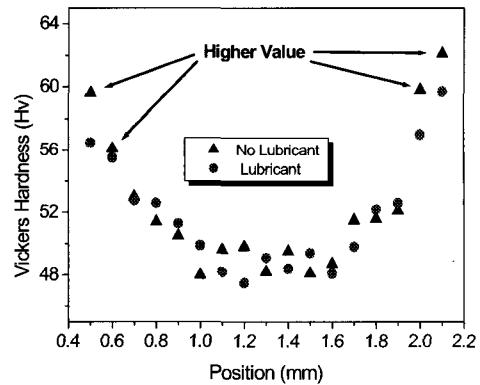
Fig. 1은 압연 후의 두 시편을 나란히 놓은 모습이다. 두 가지 시편 모두에서 STS의 길이가 더 길게 보이는 것은 Al이 STS에 비해 유동응력이 작기 때문에 훨씬 많이 늘어날 것으로 예상하여 압연 전에 STS의 길이를 충분히 길게 하였기 때문이다. 이 그림에서 주목할 만한 점은 STS표면에 윤활유를 전혀 바르지 않고 압연한 시편의 STS가 윤활유를 바르고 압연한 시편에 비해 더 늘어났다는 점이다. 즉, 마찰력이 증가함에 따라 STS의 변형량이 감소하였다. 그러나 Al의 길이는 두 시편이 거의 차이가 없어 보인다. 변형량을 더 정밀하게 측정하기

Table 1 Reduction of each ply of STS/Al/STS claddings

		before(mm)	after(mm)	reduction(%)
N	STS436	0.4	0.4	0
	Al3003	3.0	1.84	38.7
O	STS304	0.5	0.49	2
	STS436	0.4	0.37	7.5
L	Al3003	3.0	1.85	38.3
	STS304	0.5	0.48	4



(a)



(b)

Fig. 2 Distribution of Vickers Hardness along the thickness direction in (a) whole thickness and (b) Al region

위해 각 압연 판재의 두께를 측정하고 변형전의 각 판재의 두께로부터의 변형량을 계산하여 Table 1에 나타내

었다. 윤활유를 바르지 않은 조건에서 STS의 변형이 줄어들고 Al의 변형이 약간 늘어난 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 2 (a)는 시편의 두께 방향에 대해 0.1mm 간격으로 측정된 마이크로 비커스 경도값 분포도이다. 경도 하중은 200g이었다. 윤활유를 바른 경우의 STS의 경도값이 윤활유를 바르지 않은 경우의 STS의 경도값보다 높았다. 이는 앞에서의 두께 측정에 의한 변형량 결과와 같은 경향을 보여준다. 윤활유를 바른 경우 변형량이 증가하여 가공경화량이 커진 것이다. Fig. 2 (b)는 (a)에서의 Al의 부분을 확대한 것이다. Al의 경도가 STS에 비해 많이 낮기 때문에 (a)에서는 Al의 경도분포 경향을 파악할 수 없다. Al의 경도는 두 시편에서 큰 차이는 없지만 STS와의 계면 부근에서는 윤활유를 바르지 않은 시편의 경도값이 높아지는 경향을 찾을 수 있다. 윤활유를 쓰지 않은 경우에는 마찰력이 커짐에 따라 STS의 경도값은 감소하였지만 Al은 STS와의 계면 부근에서 경도값이 국부적으로 상승하였다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 계산방법

상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS/Standard를 써서 탄소성 변형해석을 하였다. 문제의 크기를 줄이기 위해 Al 양쪽의 STS를 같은 재료로 설정하여 대칭형으로 만들었다. 롤의 지름은 400mm, 압연전의 Al의 두께는 2.8mm, 압연전의 STS의 두께는 0.5mm 그리고 롤 사이의 간격은 3.0mm로 하여 압하율 21%로 압연하도록 하였다. Fig. 3에 이것의 개략도를 나타내었다.

계산에 사용한 재료의 소성변형 유동응력을 Fig. 4에 나타내었다. 상온에서의 유동응력값을 사용하였고  $\sigma = K \epsilon^n$ 의 형태를 가정하여 STS는  $K=1276 \text{ MPa}$ ,  $n=0.45$ , Al은  $K=179 \text{ MPa}$ ,  $n=0.20$ 을 따르도록 하였다.<sup>(4)</sup>

롤과 STS 간의 마찰계수는 쿨롱(Coulomb)마찰계수를 사용하여  $\mu=0.2, 0.6$ 의 두 가지 경우에 대해 계산을 하였다. 그리고 STS와 Al 사이의 마찰조건은  $\mu=1.0$ 으로 하였다. 실제 압연 접합에서는 접합이 이루어지기 전에는 두 판재가 서로 미끄러지다가 접합이 이루어진 후에 함께 이동한다. 유한요소해석에서 이와 같은 현상을 고려하기는 어렵기 때문에 일정한 값의 마찰계수를 갖는 마찰조건으로 고려하였고 마찰계수는 롤과 STS 사이의 마찰계수보다 큰 값으로 설정하였다.

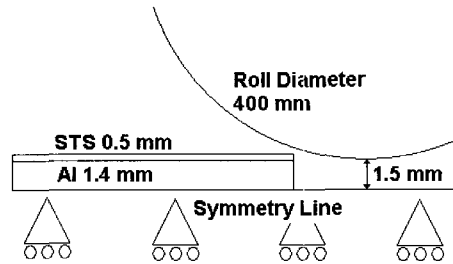


Fig. 3 Schematic diagram of the geometric condition used in finite element analysis

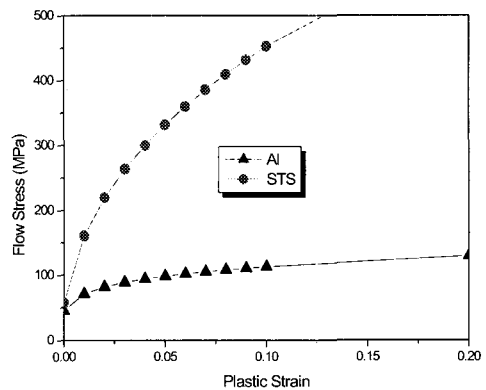


Fig. 4 Flow curves of two materials used in finite element analysis

#### 3.2 계산결과

Fig. 5 (a)와 (b)는 각 마찰조건에서의 유한요소망의 변형모양을 보여준다. 주목할만한 점은 Fig. 5 (b), 즉  $\mu=0.6$  인 경우에 STS 와의 경계면 부근에서의 Al 의 국부적인 전단변형량이 증가한다는 것이다. 이것은 Fig. 2 (b)에서 윤활유를 바르지 않은 압연조건에서 STS 와의 경계면 부근에서의 Al 의 경도값이 국부적으로 커지는 것과 일치한다. 이 현상을 보다 잘 이해하기 위해 각 압연조건 중립점(Neutral Point)에서의 유효소성변형량(Effective Plastic Strain)을 두께 방향에 따라 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 윤활을 하여 Al의 변형량은 줄어들었고 STS의 변형량이 늘어난 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5에서 본 것과 같이  $\mu=0.6$  인 조건에서 STS와 의 경계면 부근에서의 Al 의 변형량이 국부적인 전단변형에 의해 크게 증가한 것을 알 수 있다.

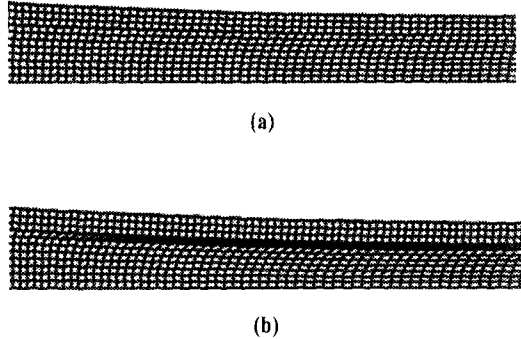


Fig. 5 The flow pattern with the friction coefficient of (a) 0.2 and (b) 0.6 between STS and roll

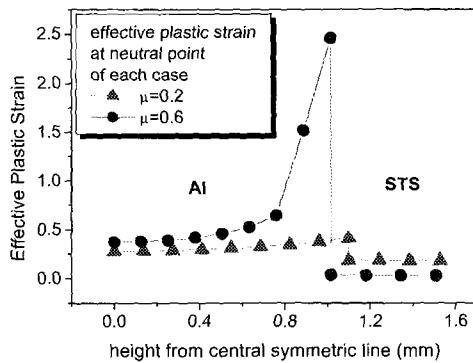


Fig. 6 Distribution of effective plastic strain at the neutral point of each rolling deformation

#### 4. 고찰

롤과 계면 사이의 마찰이 증가함에 따라 STS와의 계면 부근에서 Al의 국부적인 변형이 증가하고 STS의 변형이 감소하는 현상을 실험과 유한요소해석에서 동시에 확인하였다. 이러한 현상은 하나의 판재를 압연할 때 롤과 재료의 표면 사이의 마찰에 의해 재료의 표면에서 발생하는 불균일한 전단변형으로부터 이해할 수 있다. 일반적인 압연에서 형상학적인 인자<sup>(5)</sup>와 롤과 재료 사이의 마찰<sup>(6)</sup>에 의해 표면에서 국부적인 전단변형이 발생하는 것은 이미 잘 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 그러나 STS/Al/STS 압연접합의 경우에는 마찰력이 커짐에 따라 유동응력이 큰 표면의 STS 보다는 STS의 바로 밑에 있으며 유동응력이 상대적으로 낮은 Al에서 변형이 집중적으로 일어난

다. 반면에 마찰력이 작을 경우에는 전체적으로 적층재료별 변형률의 차이가 적어지면서 순수한 압연변형에 가까워진다. 그러므로 압연에 의해 STS가 연신되는 양이 커지는 것이다.

마찰력이 클 때 STS의 변형이 적게 일어난다는 것은 STS/Al/STS 접합판재의 생산 측면에서 중요한 이점을 제공한다. STS의 변형이 최소화되면 이후의 덤드로잉과 같은 후가공공정에서 유리하기 때문이다. 또한 이러한 거동은 STS와 Al 사이의 접착력에도 좋은 영향을 줄 것으로 예상된다. Nakamura 등은 두 가지 판재의 접합되기 직전의 상호미끄러짐이 접착강도를 향상시켜준다는 보고를 하였다.<sup>(8)</sup> 롤과 STS 사이의 마찰력이 커지면 STS와 Al 사이의 계면에서 미끄러지려고 하는 힘이 커지면서 계면 부근의 Al의 변형량이 크게 증가한다. 이것으로부터 본 연구에서의 윤활유를 쓰지 않은 (NOL) 시편의 계면 접착력이 윤활유를 쓴 (L) 시편보다 계면접착력이 더 클 것임을 예측할 수 있다.

#### 5. 결론

STS/Al/STS 압연 접합에서 롤과 STS 사이의 마찰이 증가함에 따라 STS의 변형량은 줄어들었고 Al의 변형량은 증가하였다. 이러한 변형거동은 유한요소해석과 알루미늄의 두께방향 경도 분포를 통해 확인할 수 있었으며, 마찰이 클 때 STS와의 계면 부근에서 알루미늄의 국부적인 전단변형량이 증가하였기 때문이다.

#### 후기

본 연구는 21C 프론티어 차세대 소재성형 기술개발 사업단의 지원(PS006-1-00-00)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- (1) Shi-Hoon Choi, Jae Wook Kwon and Kyu Hwan Oh, 1996, "Prediction of Inhomogeneous Texture in Clad Sheet Metals by Hot Roll Bond Method", Metals and Materials, vol. 2, no. 3, pp. 133~140.
- (2) Maki S, Nakamura M, Matsuda T, Nagai N, 1989, "Influence of Rolling Condition on Bond Strength

- in Cladding of Steel Sheet with Aluminum”, Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, vol. 30, no. 336, pp. 71~76.
- (3) D. Pan, K. Gao and J. Yu, 1989, “Cold Roll Bonding of Bimetallic Sheets and Strips”, Materials Science and Technology, vol. 5, pp. 934~939.
- (4) 이동녕, 1994, 재료강도학, 문운당 출판사, pp.82~83.
- (5) W. Truszkowski, J. Krol and B. Major, 1980, “Inhomogeneity of Rolling Texture in fcc Metals”, Metallurgical Transactions A, vol. 11A, pp. 749~758.
- (6) I. L. Dillamore and W. T. Roberts, 1963-64, “Crystallographic Texture Variations through Rolled Aluminum and Copper Sheet”, vol. 92, pp. 193~199.
- (7) 허무영, 2002, “압연재에서 불균일 집합조직의 형성”, 한국소성가공학회지, vol. 11, no. 1, pp. 14~23.
- (8) Masao Nakamura, Seijiro Maki, Tadaaki Matsuda and Naoki Nagai, 1988, “Cold Bonding of Metal Sheets Using Mutual Sliding by Modified Contact Differential Speed Rolling”, Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, vol. 29, no. 327, pp.404~410.(2) Bassani, J. L., 1977, “Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties”, Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 651~156.