

열간압연에 의한 스테인레스 클래드강 제조

김승태* · 권숙인**

Fabrication of Stainless Clad Steel by Hot Rolling

S.T. Kim*, S.I. Kwun**

Key Words : Stainless Clad Steel(스테인레스클래드강), Hot Rolling(열간압연), Auto Vacuum Cleaning Process(자동진공청결처리), Threshold Deformation(최소임계변형), Shear Bond Strength(접합전단강도), Surface Roughness(표면거칠기), Bonding Mechanism(접합기구).

Abstract

Stainless clad steels were made through hot rolling process. Backing plates employed in this study were HSLA steel and mild steel. The shear bond strength increased with an increase of the soaking temperature and time. It was also found that the shear bond strength increased with an increase of the reduction ratio. The threshold deformation was observed to be 20% and 10% respectively when the soaking conditions of 15min. at 900°C and 30min. at 1000°C were applied. Either the rolling or the transverse direction did not give any significant difference in the shear bond strength. Stainless steel-HSLA steel was superior to stainless steel-mild steel in terms of mechanical properties even though the shear bond strengths of both clad steels were in the same range of magnitude. Because the above experimental results were in contrary to the existing mechanisms, the new model was proposed to describe the bonding mechanism and the void formation.

1. 서 론

최근 세계적으로 클래드 복합재료의 응용은 그

기능과 경제성으로 인해 사용도가 급속도로 신장하고 있으며 또한 조합하는 재료의 종류도 점차 증가하는 실정이다.

일반적으로 클래드 복합재료의 제조방법에는 주

* 학생회원, 고려대학교 대학원

** 정회원, 고려대학교 공과대학

조법, 소결법, 압력을 이용하는 방법, 열과 압력을 동시에 이용하는 방법 등이 있다. 그중 열과 압력을 이용하는 방법은 고상접합의 과정으로 접합부에 열과 압력을 가하여 용융상의 출현없이 두 금속재료를 접합하는 방법인데 압력을 주는 방법에 따라 다음 세가지로 나누어 진다.

즉 프레스로 압력을 주어 접합면에 확산을 유도하여 접합을 시키는 확산접합¹⁾과 순간적인 폭발의 힘으로 높은 접촉압력을 주어 접합시키는 폭발접합²⁾ 그리고 판상재료를 연속적으로 접합시키기 위해 압연기로 압력을 가해 접합을 이루는 열간압연접합³⁾이 있다. 열과 압력을 이용하는 방법에서 가장 크게 대두되고 있는 문제점은 접합시킴 표면의 산화피막과 거칠기라고 알려져 있다.

그러나 열간압연접합에 있어서는 접합시킴 표면주위를 용접하여 밀폐시킴으로써 진공 또는 불활성 가스 분위기를 사용치 않고서도 열간압연온도에서 soaking 시 접합시킴 표면의 산화피막을 자동진공청결처리(auto vacuum cleaning process)⁴⁾에 의해 제거시키거나, 또는 고온에서 불안정한 산화피막의 분해, 소멸에 의해 제거시킨다⁵⁾. 표면거칠기에 따른 asperity들은 온도가 증가할수록 소성변형이 용이해지므로 압연시 접합성이 향상된다. 또한 열간압연접합은 연속작업으로 인한 대량생산이 가능하므로 공업적으로 중요한 의미를 지니는 가장 바람직한 방법이다.

연강이나 저합금고장력강에 스테인레스강을 접합시킨 스테인레스 클래드강(stainless clad steel)은 고가인 스테인레스강의 내식성과 가격이 저렴한 연강이나 저합금강의 가공성 또는 강도를 동시에 얻을 수 있는 기능성 복합재료로써 내식성과 내마모성이 우수하고 가공성이 용이하여 접합성 및 용접성 그리고 기계적성질 향상등의 장점이 있다. 이렇게 우수한 성질을 갖고 다양한 분야에서 사용되고 있는 스테인레스 클래드강은 미국, 일본 등에서는 이미 사용되고 있으나 생산에 관한 자료는 별로 알려지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 열간압연접합법을 사용하여 스테인레스 클래드강의 제조에 관한 기초자료를 마련하고 실제적인 클래드강 제조방법을 제시하며 그에 따른 여러가지 기계적성질, 물리적성질을 검토하여 클래드강의 접합기구를 규명함으로써 일반산업에의 응용에 대처 할 수 있는 방법과 가능성 여부를 모색코자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 시편의 재료로서 지지금속(backing metal)으로는 두께 6mm의 연강과 저합금고장력강(이하:저합금강) 판재를 사용하였고 클래드 금속으로는 두께 3mm의 스테인레스강 판재를 사용하였으며 그들의 화학조성은 Table 1과 같다.

스테인레스강-연강층재 및 스테인레스강-저합금강층재는 일정크기로 절단한 후 접합표면을 연마하고 아세톤으로 탈지한 직후 Fig. 1에 나타난 바와 같이 접합부의 둘레를 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 법으로 완전 밀봉하였다. 연마후 접합시킴 표면거칠기(surface roughness)는 Fig. 2와 같은 정도로 모든 조건이 동일하도록 하였다. 열간압연은 soaking 온도 800, 900, 1000, 1150, 1200℃에서 15, 30, 60분씩 각각 유지시킨후 곧바로 꺼내어 압연비가 10, 20, 30, 36, 42%가 되도록 열간압연하였다. 압연은 모든 시편에 대해 one pass로 행하였다.

열간압연접합된 시편은 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 접합부위의 미세조직과 접합거동을 조사하고 접합강도를 측정하여 파단면과 비교 검토하였다. 접합강도는 ASTM A-264 규정에 따라 Fig. 3과 같이 접합계면의 전단강도 측정용 시편으로 가공한 후 Fig. 4와 같이 특수하게 제작한 grip을 이용하여 상온에서 Instron으로 cross head speed 2.4×10^{-4} mm/min, 하에서 행하였다.

Table 1 Chemical compositions of the materials used for stainless clad steel(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Nb	Fe
S/S	0.07	0.55	1.09	0.029	0.009	8.49	18.29			BAL
M/S	0.15	0.01	0.49	0.013	0.008			0.041		BAL
HSLA	0.15	0.06	1.29	0.016	0.006			0.048	0.019	BAL

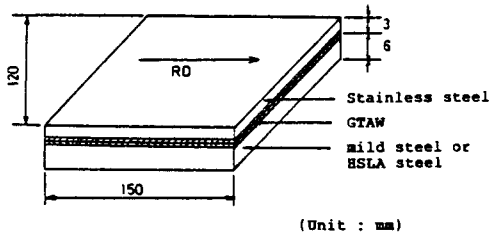


Fig. 1 Specimen for hot rolling of stainless clad steel

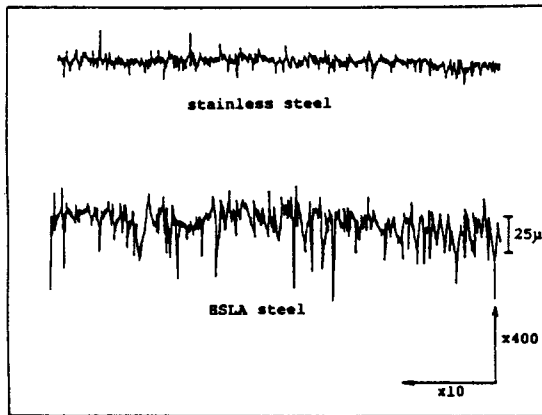


Fig. 2 Surface roughness of specimens

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 접합강도

각각의 실험조건에 따라 열간압연에 의해 접합시킨후 가장자리를 절단하여 얻은 스테인레스 클래드강의 접합강도를 Table 2에 나타내었다. 이 결과로부터 soaking 온도와 시간, 압연비가 증가함에 따라 접합강도는 증가함을 알 수 있었다. 기지금속이 연강 또는 저합금강의 어느 경우에서나 클래드강의 접합강도 차이는 거의 나타나지 않았으며 모든 실험조건에서 접합이 이루어진 스테인레스 클래드강의 접합강도는 ASTM A-264에 규정된 접합강도의 최소값 2000psi(=14 kg/mm²)을 잘 만족시키고 있다.

압연에 의해 접합을 이루는 roll bonding 기구는 소성변형을 수반하는 변형접합(deformation bonding)으로써 접합시킬 표면의 청정상태나 거칠기, 표면에 존재하는 산화층의 거동등이 중요한

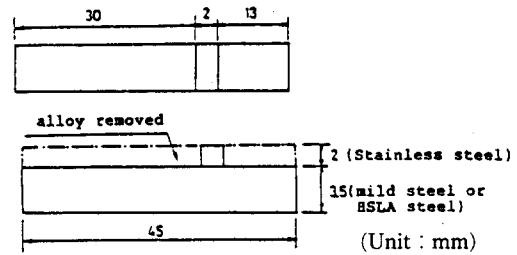


Fig. 3 Shear test specimen of stainless clad steel

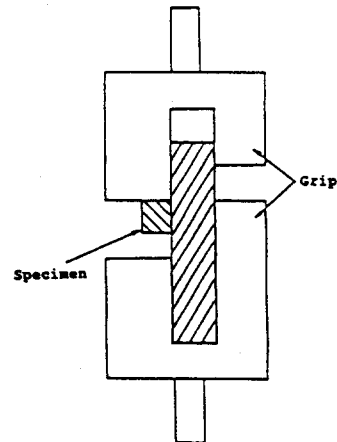



Fig. 4 Schematic of shear test grip

인자이다. 그러나 본 실험에서는 접합계면 주위를 용접하여 완전히 밀폐시켜 외부와의 공기흐름을 차단시킴으로써 열간압연을 위한 고온에서 soaking 시 새로운 산화피막은 형성되지않고 접합시킬 표면의 기존 산화피막은 soakig 온도와 시간이 증가함에 따라 자동진공청결처리되거나 고온에서 불안정한 산화피막의 분해 등에 의해 제거, 소멸되므로 bare metal의 접촉면적이 증가하여 접합강도가 증가하게 된다⁸⁾. 특히 이종금속의 열간압연 접합시 두 금속의 기계적 성질차이에 의해 연한 금속이 경한금속 보다 변형이 크므로 경한금속의 표면을 따라 늘어나면서 접촉면적이 증가하고 경한금속의 표면에 존재하는 산화피막의 제거가 용이해져 접합강도가 더욱 상승하게 된다⁹⁾.

Fig. 5, Fig. 6과 Fig. 7은 스테인레스 클래드강 제조시 soaking 온도와 시간, 압연비가 접합강도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 soaking 온도와 시간, 압연비가

Table 2 Shear bond strengths of stainless clad steels (kg/mm²)

Temp. (°C)	Soaking Time (min.)	Reduction (%)				
		10	20	30	36	42
800	15	RD TD		X	X	X
	30			⊗	X	
	60		X	X	X	
900	15	X	25 24	47 45	52 49	53 49
	30	X	28 30	49 30		
	60	X	30 30.5	34 32		
1000	15	X	35 35	53 52	55 48	
	30	29	56 28	48		
	60	29	34 30	33		
1150	30	0	0	0		
1200	15	0	0	0	0	0

*  RD=Rolling direction
TD=Transverse direction

X: Stainless clad steel was not bonded

⊗: HSLA-HSLA clad steel was bonded but stainless-HSLA clad steel was not bonded

O: Stainless clad steel was bonded but shear bond strength was not estimated

증가할수록 접합강도는 증가한다. 이것은 soaking 온도와 시간이 증가함에 따라 접합시킬 표면에 존재하는 산화피막의 분해소멸이 용이하게 되어 bare metal 면적이 증가하고 또한 soaking 온도와 압연비가 증가할수록 접촉면의 asperity들의 소성변형이 크게 되므로 bare metal이 접촉계면을 따라 늘어 나면서 변형하기 때문에 접합면적이 증가하게 되어 접합강도는 증가하게 된다. 한편 압연비의 증가에 따라 접합강도의 증가율은 점차 감소하는데 이것은 상기에서 기술한 바와 같이 열간압연접합의 접합강도에 미치는 인자들의 복합 작용에 의해 접합면적이 증가하게 되어 접합강도의 최대 임계치 즉 접합이 이루어질 수 있는 총면적의 약 80% 이상의 접합면적⁸⁾에 근접하게 되기

때문이라고 사료된다.

그러나 Fig. 6에 나타난 soaking 온도 900, 1000°C에서 60분 유지하였을때 접합강도가 낮게 나타난 것은 3.2절에 나타난 새로운 접합기구모델과 같은 불균일한 접합계면 형성과 Photo.1에 나타나 있는 연강 또는 저합금강의 접합계면 부위의 결정립성장으로 인해 접합강도 측정시 파단이 접합계면에서 일어나지 않고 연한 금속인 연강 또는 저합금강에서 일어났기 때문이며 그 파단면은 3.4 절의 Photo. 5에 나타나 있다.

고상접합에서 중요한 인자중 하나인 표면거칠기는 거칠기가 클수록 접촉면적이 적어지기 때문에 접합강도가 저하된다⁹⁾. 그럼에도 불구하고 Table 2에서 볼 수 있듯이 soaking 온도 800°C, soaking 시간 30분, 압연비 30%에서 표면거칠기가 스테인레스강보다 더욱 큰 저합금강-저합금강, 연강-연강은 접합이 이루어졌지만 스테인레스강-연강, 스테인레스강-저합금강은 압연비가 42%에서도 접합이 이루어지지 않는것은 표면거칠기에 의한 요인보다는 접합표면의 산화피막에 기인한것으로 사료된다. 즉 soaking 온도 800°C에서는 연강이나 저합금강의 산화피막이 자동진공청결처리, 불안정한 산화피막의 분해등에 의해 소멸되어 접합이 이루어지지만 스테인레스강은 접합이 이루어지지 않고 900°C에서 접합이 이루어진것으로 미루어 보아 스테인레스강 산화피막의 불안정에 의한 접합임계온도는 900°C임을 알 수 있었다. 이러한 실험결과로부터 이종금속의 열간압연접합시에는 산화피막의 분해, 소멸이 용이하고 상대적으로 경도가 낮은 금속이 접합형성에 중요한 역할을 한다고 사료된다.

또한 Table 2에 의하면 열간압연접합시 접합이 이루어질 수 있는 최소변형인 임계변형(threshold deformation)¹⁰⁾은 스테인레스 클래드강의 경우 soaking 온도와 시간이 900°C, 15분 이상이면 압연비가 20% 이었으며 1000°C, 30분 이상이면 압연비가 10%이었다. 그리고 열간압연접합에서 압연방향에 따른 접합강도의 이방성 유무를 조사하기 위해 압연방향에 0°방향으로 절단한면(rolling direction;RD)과 90°방향으로 절단한면(transverse direction;TD)의 접합강도를 조사한 결과 압연방향에 따른 차이는 거의 없었다.

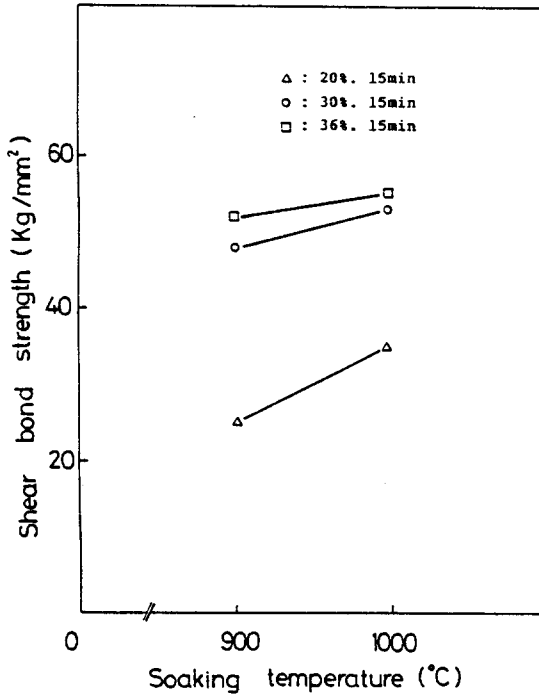


Fig. 5 Relation between the shear bond strength and the soaking temperature

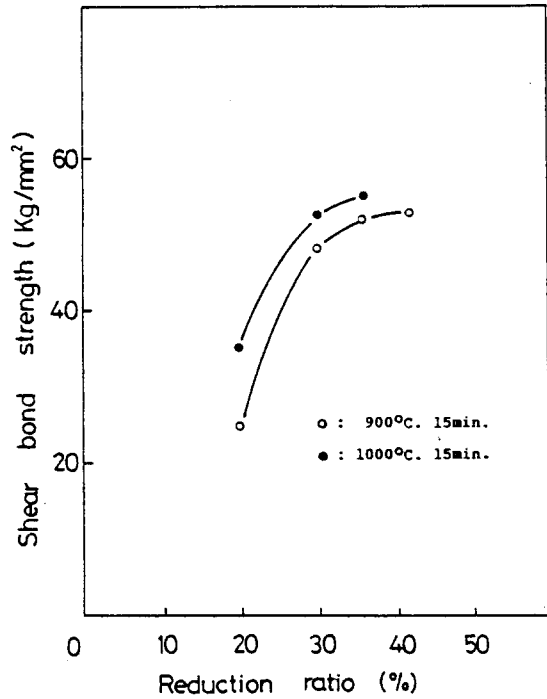


Fig. 7 Relation between the shear bond strength and the reduction ratio

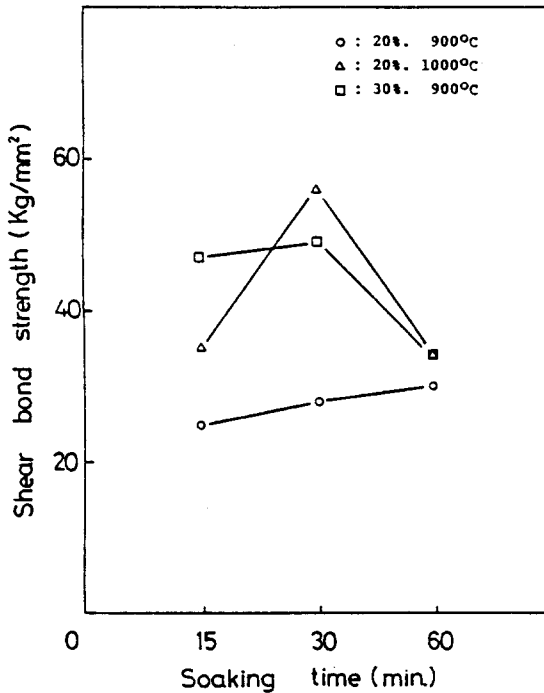


Fig. 6 Relation between the shear bond strength and the soaking time

3. 2. 접합부 미세조직

Photo. 1은 soaking 온도 1000°C, 압연비 20%, soaking 시간이 각각 15분과 60분의 열간압연조건에서 접합되었던 스테인레스강-저합금강 층재의 미세조직으로 a)와 b)는 5% nital 용액으로 화학부식시킨 저합금강측이고 c)와 d)는 10% oxalic 용액으로 전해부식시킨 스테인레스강측이다, soaking 시간이 증가함에 따라 저합금강의 결정립은 조대화 되었고 접합계면의 형태가 불균일 하였으며 b)와 d)의 경우 접합계면에서 약간 떨어진 스테인레스강 부위에 검은 점들이 접합계면을 따라 균등하게 존재하였다. Soaking 시간이 15분인 경우 a)와 c)에 나타난 바와 같이 일반적인 고상접합의 접합계면에 형성되는 전형적인 접합계면의 void양상¹¹⁾을 나타내고있지만 soaking 시간이 60분인 경우 b)와 d)에 나타난 바와 같이 접합계면에서 약간 떨어진 스테인레스강 부위의 검은 점들의 존재는 특이한 현상이다. 이러한 검은 점들을 분석하기 위해 SEM의 Y-modulation을 이용하여 조사한 결과 Photo. 2에 나타난 바와 같

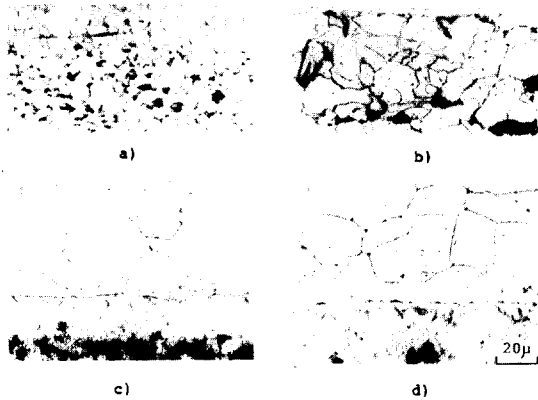


Photo. 1 Microstructures of stainless clad steel
 a),b): microstructures of HSLA steel side
 c),d): microstructures of stainless steel side
 (bonding parameters; soaking temp.=1000°C, reduction=20%, soaking time a), c)=15min. b), d)=60min.)

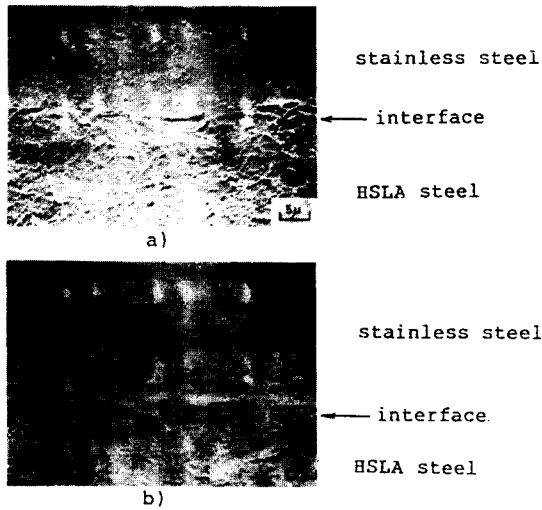


Photo. 2 Y-modulations of interfacial voids in the stainless clad steel
 (bonding parameters; soaking temp.=1000°C, reduction ratio=20%, soaking time a)=15min, b)=60min.)

이 검은 점들이 void임을 알 수 있었다.

Photo. 3은 스테인레스강 부위의 void의 생성원인을 규명하고자 EPMA를 사용하여 성분분석한 결과이다. a)에서 스테인레스강의 Cr과 Ni은 void 부위에서 급격히 저하하지만 Fe 함량은 중

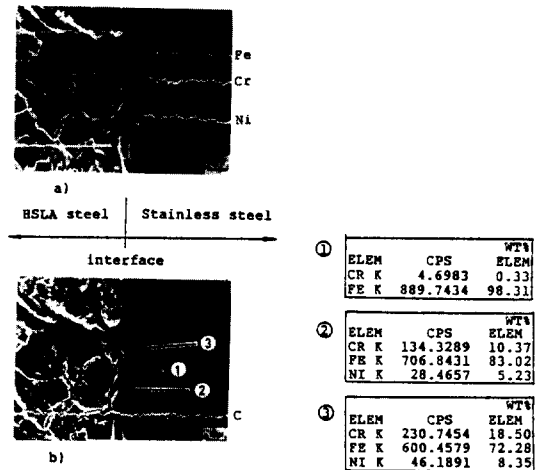


Photo. 3 EPMA analysis of stainless clad steel
 (bonding parameters; soaking temp.=1000°C, reduction ratio=20%, soaking time=60min.)

가하였다. 또한 b)에서 ①과 ③부위는 각각 전형적인 저합금강과 304 스테인레스강의 조성을 나타내었으며 void와 저합금강 사이인 ②부위에서는 Cr-10.37%, Ni-5.23%, Fe-83.02%로써 304 스테인레스강에 비해 Cr과 Ni 함량은 저하하고 Fe 함량은 증가 되었다.

일반적으로 동종금속의 열간압연접합시에 나타나는 void는 접합계면에 존재하고 이종금속의 경우 경도차가 매우 큰 경한 금속과 연한 금속의 열간압연접합에 적용되고 있는 경한 금속의 침투기구(penetrating mechanism)¹²⁾에 의한 void생성 또한 접합계면에 존재한다. 그러나 본 실험에서는 이러한 접합기구에 의한 void 생성과는 달리 접합계면에서 약간 떨어진 스테인레스강 부위에서 void가 생성되었다는 점에서 기존 접합기구로는 스테인레스 클래드강의 접합기구를 설명할 수 없으므로 다음과 같은 접합기구 모델을 제시하고자 한다.

본 실험의 열간압연에 의한 스테인레스 클래드강에 대한 접합기구 모델은 다음과 같은 전제 조건을 갖는다.

- 1) 열간압연에 의한 접합은 순간적으로 이루어지는 고상상태 접합이므로 확산접합과는 달리 접합계면 부위에서의 확산은 거의 발생하지 않는다.¹³⁾
- 2) 열간압연 온도에서 스테인레스강의 고온경도는

- 연강 또는 저합금강의 고온경도 보다 크다⁴⁾.
- 3) 접합하고자하는 금속의 표면거칠기는 미시적으로 볼 때 충분히 크며 특히 연한 금속인 연강 또는 저합금강의 표면거칠기는 더욱 크다(Fig. 2).
- 4) 충분한 soaking 시간에 의해 접합시킬 표면의 산화피막은 거의 제거되어 bare metal 상태이다^{4),5)}.

상기의 조건을 만족시키는 두 금속의 접합과정은 Fig. 8에 나타나 있는 바와 같다. 접합표면거

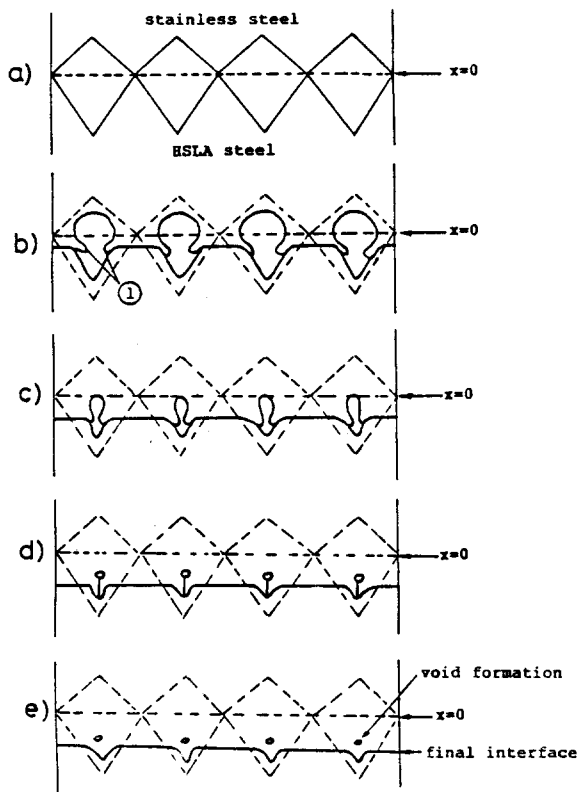


Fig. 8 New model of bonding mechanism and void formation in the stainless clad steel

칠기에 따른 asperity 들이 a)와 같이 peak-peak 로써 접촉이 이루어진다면 초기 접촉계면은 $x=0$ 이 된다. 그러나 열간압연에 의한 압력으로 인해 상대적으로 연한 금속의 변형이 용이하므로 미소 경도 측정시 금속표면의 압흔 생성과 같이 초기 접촉계면은 b)와 같이 이동하고 또한 그 이동한 양만큼 연한 금속이 valley를 채우기 때문에 valley크기는 점점 감소하게 된다. 변형이 적은 경한 금속은 연한 금속과의 접합계면에서 ①로 표시된 부위와 같이 변형하게 될 것이다. 계속해서 압력이 가해지면 c)와 d)같이 연한 금속의 valley는 계속 채워지고 경한 금속의 ①부위끼리 만나게 되어 e)와 같이 경한 금속 부위에 void가 생성되어 Photo. 1에 나타난 접합부위를 갖게된다.

그러나 이러한 스테인레스강 부위에 void가 생성되었음에도 불구하고 접합강도 측정시 파단이 연강이나 저합금강에서 발생한 것으로 미루어 보아 전단강도에는 큰 영향을 주지 않으나 피로와 같은 낮은 반복응력하에서는 피로균열생성의 자리로서 작용하리라 생각되며 그밖의 다른 기계적 성질에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서는 더욱 많은 연구가 필요하다고 사료된다.

3.3. 스테인레스 클래드강의 기계적 성질에 미치는 기지금속의 영향

Table 3은 soaking 온도 1000°C, soaking 시간 15분, 압연비 20%의 조건으로 스테인레스 클래드강 제조시 기지금속으로 연강과 저합금강을 사용하여 열간압연접합한 후의 변형율을 조사한 것이다. 저합금강이 연강보다 고온경도가 높기때문에 열간압연시 저합금강은 스테인레스강의 소성변형을 보다 많이 유발시키기 때문에 기지금속으로 저합금강을 사용한 경우 스테인레스강은 19%, 저합금강은 21%의 변형율을 나타내었지만 연강을 사

Table 3 Reduction ratio of stainless steel-HSLA steel and stainless steel-mild steel

		Thickness before rolling (mm)	Thickness after rolling (mm)	Reduction ratio of clad steel (%)
S/S-HSLA	S/S	3	2.43	19.0
	HSLA	6	4.79	20.2
S/S-M/S	S/S	3	2.67	11.0
	M/S	6	4.54	24.3

(bonding parameters; soaking temp.=1000°C, reduction ratio=20%, soaking time=15min.)

용한 경우에는 스테인레스강은 11%만의 변형율을, 연강은 24%의 변형율을 나타내었다.

접합계면 부위의 미소경도변화를 Fig. 9에 나타내었다. 기지금속으로 저합금강을 사용한 경우 스테인레스강의 미소경도가 연강을 사용한 경우보다 높게 나타났는데 이것은 Table 3에 나타난 바와 같이 동일 압연조건에서 저합금강을 사용한 경우가 스테인레스강의 변형율이 커서 가공경화 효과가 크기때문이라 사료되며, 저합금강이 연강보다 미소경도가 높은 것은 Photo. 4에서와 같이 저합금강이 연강보다는 미세한 결정립을 갖고 탈탄폭도 적기 때문이다. 또한 접합계면 부위에 있어서 연강이나 저합금강 부위의 경도가 모재보다 낮게 나타나는 것은 탄소의 탈탄과 결정립 성장에 기인한 것이며 스테인레스강 부위의 경도가 모재보다 높게 나타난 것은 변형율차이에 따른 잔류응력 때문이라 사료된다.

이러한 결과로 부터 스테인레스 클래드강 제조 시 기지금속으로 저합금강이나 연강을 사용할 경우 접합강도의 차이는 나타나지 않았지만 스테인

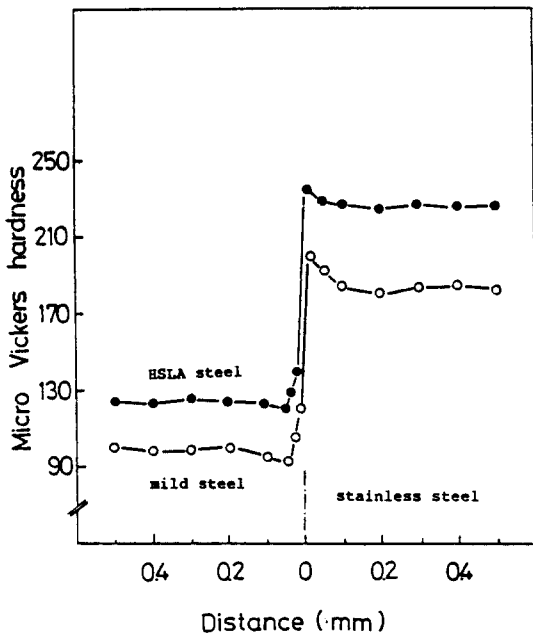


Fig. 9 Hardness distribution at the bonded interface of stainless clad steel (bonding parameters: soaking temp. = 1000°C, reduction ratio=20%, soaking time = 15min.)

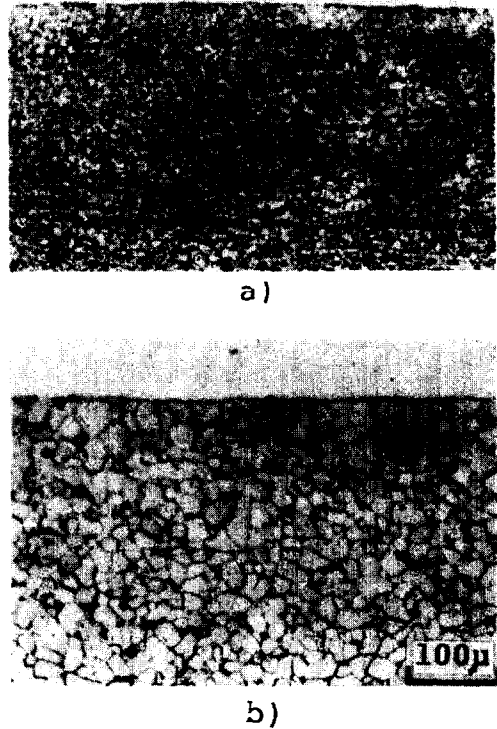
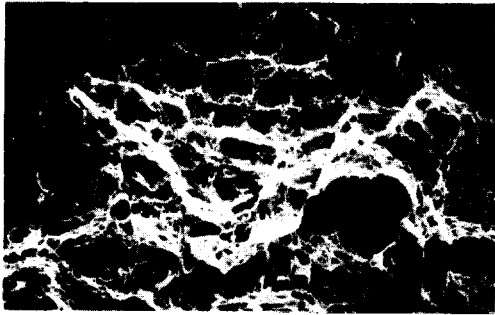


Photo. 4 Microstructures of stainless clad steel
 a) microstructure of HSLA steel
 b) microstructure of mild steel
 (bonding parameters; soaking temp. = 1000°C, reduction ratio=20%, soaking time = 15min.)

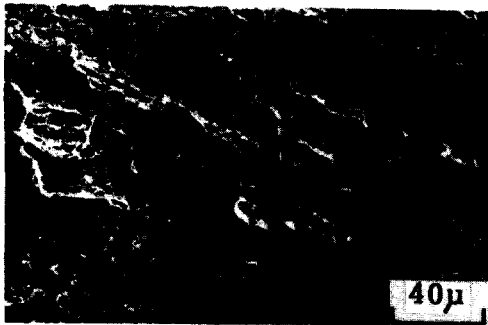
레스 클래드강의 기계적 성질은 저합금강을 기지금속으로 사용한 경우가 좋다고 사료된다.

3. 4. 파단면 관찰

Photo. 5는 스테인레스강-저합금강의 전단강도 시험 후의 파단면 사진이다. a)는 접합계면에서 파단이 일어나지 않고 기지금속인 저합금강에서 파단이 일어난 것으로써 저합금강의 전형적인 연성 dimple 파면을 보이고 있다. b)는 접합계면에서 파단이 이루어진 것으로 접합되었던 부위의 파단(하얀부위)과 접합이 이루어지지 않았던 부위(검은 부위)가 구별되며 접합되었던 부위의 파단 형태는 연성dimple 파괴양상을 보였고 접합이 이루어지지 않았던 부위에서는 접합전 모재 표면의



a)



b)

Photo. 5 Fractographs after shear bond test in the stainless clad steel

- a) fracture at HSLA steel
 b) fracture at stainless steel-HSLA steel interface
 (bonding parameters; soaking temp. = 1000°C, reduction ratio = 20%, soaking time a) = 60min, b) = 15min.)

scratch가 남아있는 것이 관찰되었다. a)에서 파단이 접합계면에서 일어나지 않는 것은 3.2절에서 제시된 모델에 의한 완전접합과 Photo. 1에 나타난 접합계면의 불균일성에 의한 것으로 사료된다.

4. 결 론

열간압연에 의한 스테인레스 클래드강 제조시 압연온도, soaking 시간, 압연비의 변수가 접합강도 및 접합기구에 미치는 영향에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스테인레스 클래드강의 임계변형은 열간압연온도와 시간이 900°C, 15분 이상이면 20%이고 1000°C, 30분 이상에서는 10%이었다.

2. 열간압연온도, 압연비, soaking 시간이 증가함에 따라 접합강도는 증가하였으며 압연방향에 대해 0°방향(RD)과 90°방향(TD)의 접합강도 차이는 거의 없었다.
3. 스테인레스 클래드강 제조시 기지금속으로 저합금고장력강이나 연강을 사용할 경우 접합강도에는 큰 차이가 없으나 연강의 경우 심한 탈탄층과 결정립 조대화로 인해 클래드강의 기계적 성질이 저하하리라 사료된다.
4. 본 연구의 열간압연에 의한 스테인레스 클래드강의 접합계면의 void양상이 기존의 접합기구에 의한 void 양상과 다르기 때문에 새로운 열간압연접합의 접합기구 및 void 생성기구에 대한 도식적인 모델을 제안하였다.

참고문헌

- 1) B.Derby and E.R. Wallach : Diffusion bonds in iron and a low-alloy steel, J.Mater. Sci., Vol.19, (1984), pp. 3149.
- 2) 村上善一, 西田 捻 : 溶接クラット鋼の境界部挙動について, 日本溶接學會誌, 第41卷, (1972), pp. 83.
- 3) 益本 功, 玉置維昭, 峯 久允 : 2.5%こつケル鋼-軟鋼あひひ9%ニツケル鋼-軟鋼異種 鋼材からなる層材の靱性について, 日本溶接學會誌, 第40卷, (1971), pp. 579.
- 4) T.J. Moore and K.H. Holko: Practical method for diffusion welding of steel plate in air, Weld. J., Vol.3, (1972), pp. 106s.
- 5) 大橋 修, 田沼 欣司, 木村 峰 : 擴散溶接の密着部での酸化皮膜部の挙動, 日本溶接學會誌, 第44卷, (1986), pp. 53.
- 6) J.A. Cave and J.D. Williams : The mechanism of cold pressure welding by rolling, J. Inst. Metals, Vol.101, (1973), pp. 203.
- 7) E. Holmes: Brit. Weld. J., Vol.10, (1959), pp. 29.
- 8) S. Elliot, I.A. Bucklow and E.R. Wallasch : An examination of diffusion bonded intrfaces in a mild steel, J. Mater. Sci., Vol.15, (1980), pp. 2823.

- 9) R.M. Brick: Hot roll bonding of steel, *Weld. J.*, Vol.10, (1970), pp. 440s.
- 10) L.R. Vaidyanath, M.G, Nicholas and D.R. Milner: Pressure welding by rolling, *Brit. Weld. J.*, Vol.1, (1959), pp. 263.
- 11) K.H. Holko: Hot press and roll welding of Ti-6Al-4V with auto-vacuum cleaning, *Weld. J.*, Vol.5, (1962), pp. 433.
- 12) D.R. Milner and G.W, Rowe: Fundamentals of solid phase welding, *Met. Rev.*, Vol.7, (1962), pp. 433.
- 13) 仲西恒雄, 近藤一夫, 中村光雄, 米澤征壽: Al-Cu熱間壓接端繼手の高温長時間加熱の影響について, *日本溶接學會誌*, 第45卷, (1976), pp. 1023.
- 14) 益本 公, 松井繁明, 山田 猛: 스테인레스鋼と軟鋼의擴散溶接に關する研究, *日本溶接學會誌*, 第50卷, (1981), pp. 1179.