

## 연강 - 스테인리스강의 확산접합에 관한 연구

김승태

한전기공(주) 기술개발실

### Study on Diffusion Bonding of Stainless Steel to Mild Steel

S.T. Kim

Korea Plant Service and Engineering(KPS), 13-1, Huengin-dong, Jung-KU,  
Seoul, Korea

### ABSTRACT

Cladding of stainless steel on mild steel was prepared by diffusion bonding process. The bond strength increased with an increase of bonding temperature and time. It was also found that the bond strength increased as the surface roughness decreased. After the diffusion bonding of stainless steel - mild steel, the mild steel part near the bonded interface showed higher strength than the base steel due to the migration of chromium and nickel from stainless steel to mild steel. Carbon migration from mild steel gave effect on the formation of chromium carbides at grain boundaries of stainless steel. The fractographic features of the imperfectly bonded interface showed rather coarse dimples in the mild steel part and very fine dimples in the stainless steel part.

### 1. 서 론

최근 전자공업, 항공산업, 원자력발전소의 압력용기 등에 많이 사용되고 있는 스테인리스강과 연강의 이중금속접합강<sup>1-3,14,15)</sup>은 아아크용접 등의 용접을 시작으로 하여 폭발압접, 열간압접, 등의 고상접합법을 포함하여 여러 가지 방법으로 실시하고 있으며 이에 대한 용접거동에 대해서도 많은 금속학적 검토가 행해지고 있다. 그러나 고상접합법 중에 접합재료의 소성변형이 매우 작고 접합성이 다양하여 그의 적용이 기대되고 있는 확산접합법을 이용한 이중재료의 접합강에 대한 자세한 검토가 아직 미비한 실정이다.

확산접합이란 모재의 고상선(solidus line) 이하의 온도에서 큰 소성변형을 일으키지 않을 정도의 열과

압력을 가하여 두 재료를 접합시키는 일종의 고상상태접합으로써 접합시키고자 하는 두 재료를 직접 접합시키는 방법<sup>4)</sup>과 접합면간에 삽입금속을 삽입시켜 접합하는 방법이 있으며 최근 TLP(transition liquid phase) 접합법과 같이 삽입금속을 용융시키는 접합법<sup>5)</sup>이 주목되고 있다.

확산접합의 특징<sup>6)</sup>은 용융용접에서 나타나는 주조 조직이나 취성부위가 발생하지 않으므로 모재와 거의 동등한 물리적, 화학적, 기계적 성질을 가지며 최소한의 압력을 가하여 큰 소성변형 없이 접합이 이루어지므로 접합과정을 열처리과정으로 동시에 행할 수 있다. 한가지 제품에 대해 여러 부위를 동시에 접합시킬 수 있으며 대단히 복잡한 형태의 부품면도 면접합이 용이하다. 또한 용융용접으로 용접이 곤란한 고

용접고속, 내열합금 등의 접합이 가능하며 이종금속 및 금속과 세라믹의 이종재료접합도 가능하다.

본 연구에서는 연강과 스테인리스강의 동종금속 및 이종금속의 접합강도에 대한 확산접합의 기본적인 특성을 명확하게 규명하기 위해 접합온도, 압력, 시간과 표면 거칠기가 접합강도에 미치는 영향과 접합부의 금속학적 거동에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 또한 불완전접합의 경우 접합파단면을 전자현미경으로 조사하여 확산접합의 진행과정 및 접합기구를 밝히려 하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에 사용한 시편의 재료는 STS 304 스테인리스강과 연강이며 화학조성은 Table 1과 같다. 연강-연강, 스테인리스강-스테인리스강의 동종금속과 연강-스테인리스강의 이종금속을 확산접합시키기 위해 직경 25mm, 길이 25mm의 봉상형태로 절단한

후 접합시킬 표면을 6가지 종류의 표면 거칠기를 갖도록 연마하고 아세톤으로 탈지한 직후 가열시 접합시킬 표면의 산화방지를 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같이 접합부의 둘레를 탄소강의 경우 MIG용접법으로 스테인리스강의 경우 TIG 용접법으로 완전 밀봉하였다.

확산접합은 실험실에서 제작한 복사가열형로를 사용하여 대기 하에서 확산접합온도까지 가열한 후 시편을 설치하고 가압을 시작하였으며 접합온도, 접합시간, 접합압력은 접합조건에 따라 일정하게 유지하였다. 이때 접합압력은 유압프레스기를 사용하여 기계적으로 가하였다.

확산접합된 시편은 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 접합부위의 미세조직과 접합거동을 조사하였고 접합강도를 인장시험으로 접합면에 수직하도록 Fig. 2와 같이 인장시험편을 제작하여 측정하였다.

Table 1. Chemical compositions of stainless steel and mild steel used in this investigation(wt.%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	S.Al	Fe
S/S	0.07	0.55	1.09	0.029	0.009	8.49	18.29	-	bal.
M/S	0.18	0.01	0.49	0.013	0.008	-	-	0.041	bal.

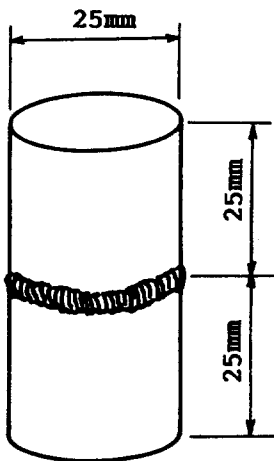


Fig. 1 Preparation for diffusion bonding specimen.

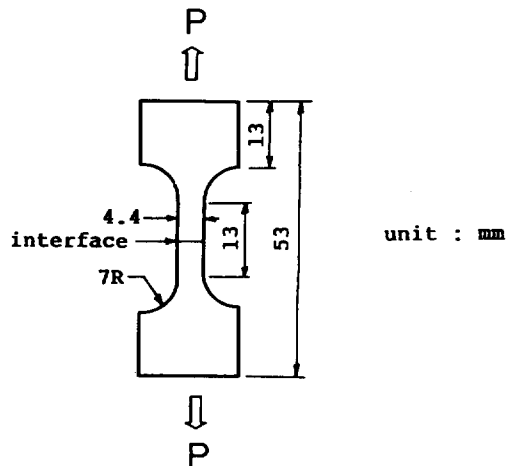


Fig. 2 Shape of the specimen for bond strength measurement.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 접합조건이 접합강도에 미치는 영향

확산접합에 있어서 접합조건으로는 접합온도, 시간, 압력이 중요한 인자이지만 확산접합은 일종의 고상상태접합(solid state bonding)이므로 접합시킬 표면의 표면 거칠기도 큰 영향을 미친다<sup>7)</sup>. Fig. 3은 각 시편의 표면을 SiC 연마지에 의해 표면연마한 것과 버프(buff)연마까지 행한 시편의 표면 거칠기를 나타낸 것이며 SiC 연마지에 의한 표면연마는 표면 거칠기가 다른 no.1~5 까지의 5종류 연마지를 사용하였다. 표면 거칠기는 Tlay surf-6 표면조도계를 사용하여 측정하였으며 측정방향은 마무리 연마한 흔적에 수직인 방향으로 하였다. 이상과 같은 표면연마법에 의해 다양한 표면 거칠기를 갖는 시편을 제작한 후 접합조건에 따라 확산접합을 행하고 접합강도를 측정하였다.

Fig. 4, 5는 표면 거칠기에 따른 접합강도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있 바와 같이 표면 거칠기가 미세할수록 접합강도는 증가하였으며 접합강도 증가 추이가 Fig. 3의 시편 표면 거칠기의 감소 추이와 유사하다는 것으로부터 확산접합의 접합강도는 시편의 표면 거칠기에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

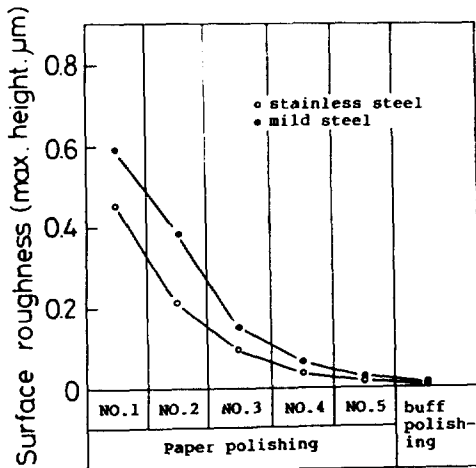


Fig. 3 Surface roughness for the various polishing methods.

Fig. 4에서 no.3 이상의 미세한 표면 거칠기를 갖는 연강-연강 동종금속과 Fig. 5에서 no.5 이상의 미세한 표면 거칠기를 갖는 연강-스테인리스강 이종금속의 경우 접합강도 측정시 파단이 접합계면에서 일어나지 않고 연강모재에서 일어났다. 이것은 Orowan이론<sup>8)</sup>을 적용시켜 볼 때 계면의 접합은 거의 완전히 이루어졌으나 접합계면에 존재하는 약간의 미세한 공동(void)이 노치로 작용하여 국부적인 강도를 증가시키게 되므로 접합계면에서 파단이 일어나지 않고 연강모재에서 일어난 것으로 사료된다.

Fig. 6은 접합온도에 따른 접합강도를 나타낸 것이다. 접합온도가 확산접합에 미치는 영향은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 온도가 증가할수록 접합되는 재료표면의 경도가 감소하여 접합압력이 가해지는 순간 1단계 소성변형이 용이해져 접합면적이 증가하기 때문이다. 또한 온도가 증가함에 따라 금속원자들의 확산이 활발해져 크리프변형량이 증가하여 접합계면에 존재하는 공동을 축소, 소멸 시킴으로써 접합면적이 증가하게 되어 접합강도는 증가하게 된다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 no.1의 표면 거칠기를 갖는 연강-연강 동종금속은 700℃, 스테인리스강-스테인리스강 동종금속과 연강-스테인리스강의 이종금속은 800℃에서 접합이 이루어지지 않았지만 그 이상의

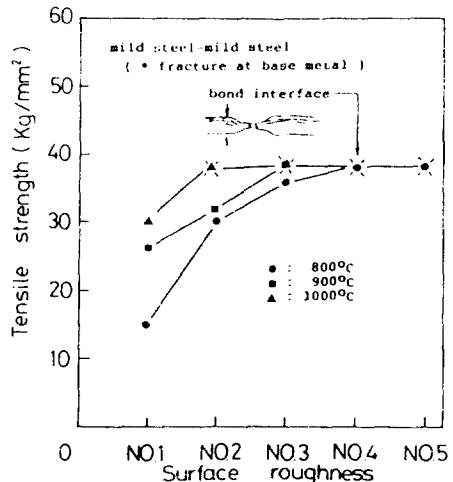


Fig. 4 Relation between the bonding strength and the surface roughness.(bonding parameters; time=30min., pressure=1kg/mm<sup>2</sup>)

온도에서는 접합이 이루어졌으며 온도가 증가할수록 접합강도도 증가하였다. 실제로 임의 온도의 임계변형량 이하에서는 접합이 이루어지지 않는 최소 변형량이 존재하게 되는데<sup>9)</sup> 본 연구에서는 동일한 표면 거칠기, 동일한 압력조건에서 Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 연강-연강 동종금속에서는 700℃ 이상, 연강-스테인리스강 이종금속과 스테인리스강-스테인리스강 동종금속에서는 800℃ 이상의 온도에서의 변형량이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 접합시간에 따른 접합강도를 나타낸 것이다. 확산접합시 접합온도와 압력에 의해 접합계면이 이루어진 후 접합시간이 증가할수록 원자확산과 크리프변형이 증가하게 되어 접합계면에 형성된 공동을 축소, 소멸시켜 접합면적이 증가하게 되므로 접합강도는 증가하게 된다. 그림에서 알 수 있듯이 접합시간이 증가함에 따라 접합강도는 증가하였으나 접합시간이 짧은 경우 접합온도에 따른 접합강도 차이는 매우 크게 나타났고 접합시간이 길어질수록 접합강도의 차이는 감소 하였다. 그리고 접합온도가 증가할수록 시간에 따른 접합강도의 증가율은 점차 감소하였는데 이것은 확산에 의한 접합이 이루어질 수 있는 임계값에 달하는 시간이 제공근에 비례하기 때문이다

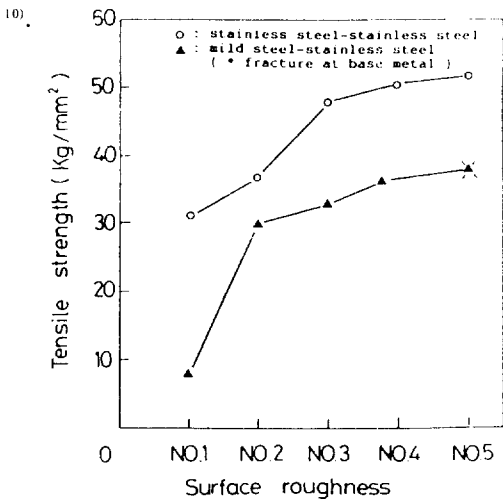


Fig. 5 Relation between the bonding strength and the surface roughness. (bonding parameters ; temperature = 900℃, time = 30 min., pressure = 1kg/mm<sup>2</sup>)

이상과 같은 실험결과 확산접합에 있어서 접합온도와 접합시간이 증가하고 표면 거칠기가 미세할수록 접합강도는 증가함을 알 수 있었다. 그러므로 이종금속의 경우가 동종금속의 경우보다 접합강도가 낮게 나타난 것은 접합압력에 따른 소성변형과 크리프변형에 기인한 것으로 사료된다. 동종금속의 경우 접합압력에 따라 두 금속의 변형률이 같기 때문에 소성변형과 크리프변형에 의해 초기 접합면을 중심으로 변형하면서 접합면적이 증가하게 되어 접합강도가 증가한다. 그러나 이종금속의 경우 연한 금속에 비해 상대적으로 경한 금속은 변형이 거의 없고 연한 금속에서 변형이 많이 발생한다. 또한 동일조건인 표면면마시 표면 거칠기가 연한 금속이 더 거칠기 때문에 소성변형과 크리프변형에 의한 변형이 연한 금속의 골(valley)을 우선적으로 채우게 되므로 접합면에 기여하는 면적이 적게되어<sup>9)</sup> 접합강도가 낮게된 것으로 사료된다. 그러나 표면 거칠기가 어느 임계점 이상으로 작거나 어느 접합압력 이상에서는 연한 금속의 골을 완전히 채우게 되어 경한 금속의 표면을 따라 변형하게 되어 접합면적이 증가하게 될 것이다.

3.2. 접합부위 미세조직 관찰

Fig. 9는 연강-스테인리스강 이종금속의 접합부

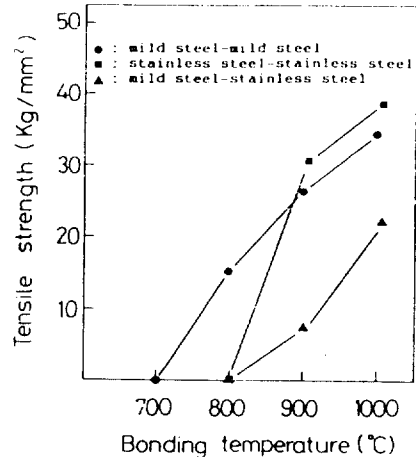


Fig. 6 Relation between the bonding strength and the bonding temperature. (bonding parameters ; pressure = 1kg/mm<sup>2</sup>, time = 30 min., surface roughness = NO.1)

위 미세조직이다. 연강 측에는 탈탄층이 형성되어 있는데 이것은 연강 측의 접합부위에 탄소가 스테인리스강으로 이동한 결과이다.

Fig. 10에서 a)는 연강-스테인리스강 이중금속의 접합부위의 사진으로서 접합계면에 접합이 이루어지지 않는 공동의 존재(화살표시)를 볼 수 있었으며 b), c)와 d)는 접합부위를 EPMA로 원소분석

(mapping)한 것으로 스테인리스강 측의 Cr, Ni이 연강 측으로 약 0.02mm 까지 확산된 것을 알 수 있었다. 이것을 정확히 분석하기 위해 Fig. 11과 같이 접합부위의 Cr, Ni, Fe성분을 정성 분석 하였다. 스테인리스강 측의 Cr성분은 접합계면에서 약 0.1mm 떨어진 곳에서는 모재보다 적게 나타났으며 접합계면에서는 약 25%의 높은 값을 나타내었는데 이것은 스

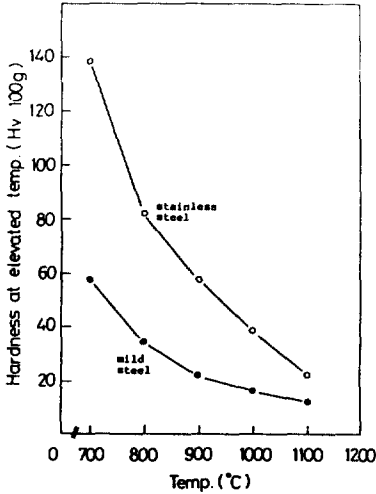


Fig. 7 Hardness at elevated temperature of each base metal<sup>11)</sup>.

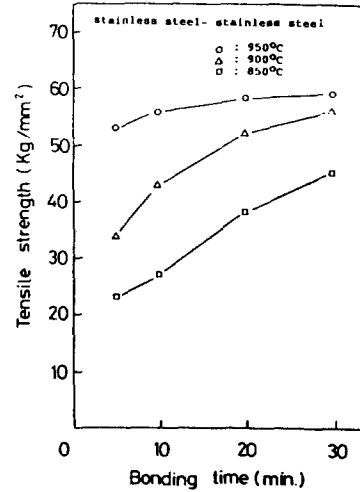


Fig. 8 Relation between the bonding strength and the bonding time. (bonding parameters ; pressure=1kg/mm<sup>2</sup>, surface roughness=NO.5)

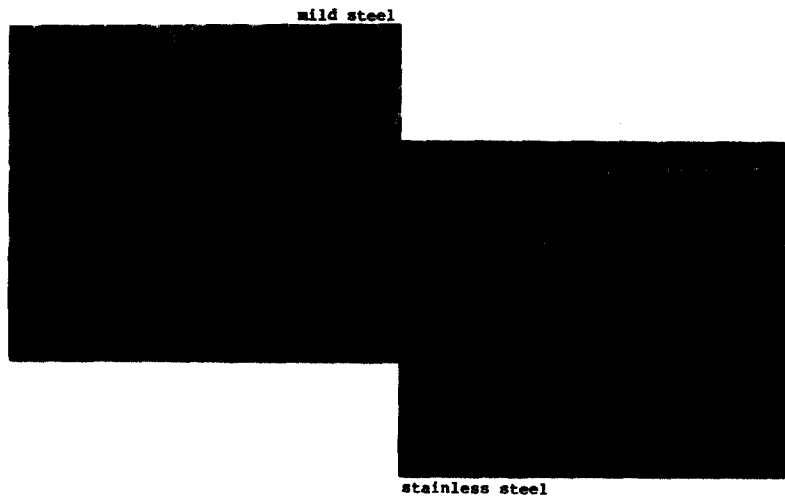


Fig. 9 Microstructure near the bond interface.(bonding parameters ; temperature=900°C, time=30 min., surface roughness=NO.1, pressure=1kg/mm<sup>2</sup>)

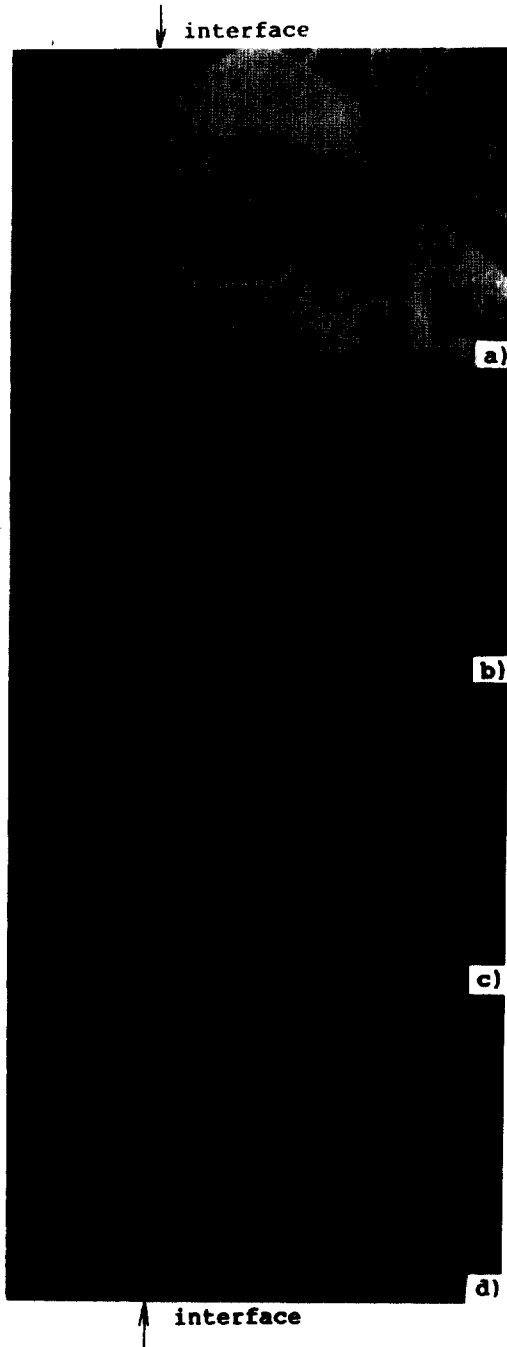


Fig. 10 X-ray scanning image near the bond interface.  
 a) microstructure of mild steel-stainless steel  
 b) Cr c) Ni d) Fe

테인리스강의 Cr이 연강으로 확산하는 도중 접합계면에 편석이 되는 것으로 사료된다. 그러나 Ni은 탄소강 부위로 확산되었지만 스테인리스강 접합계면으로의 편석은 나타나지 않았다.

Fig. 12에서 a)는 연강-스테인리스강 이중금속, b)는 스테인리스강-스테인리스강 동종금속을 확산접합한 경우의 스테인리스강 측의 사진으로써 a)가 b)의 경우에 비해 스테인리스강 입계에 부식이 많이 일어난 것은 연강 측에서 탄소가 스테인리스강으로 확산하여 입계에 탄화물이 석출된 것으로 사료된다. 이렇게 석출된 탄화물은 스테인리스강의 내부식성을 저해시키므로(예민화 현상) 이에 대한 방지책이 필요하다. 일반적으로 연강-스테인리스강의 이중금속을 확산접합시킬 경우 스테인리스강 측의 표면을 Ni 도금하거나 삽입금속으로 Ni 박판을 사용함으로써 연강에서 스테인리스강으로의 탄소확산을 저지할 수 있다고 알려져있다<sup>11)</sup>.

### 3.3. 접합부위 미소경도

Fig. 13은 연강-연강, 스테인리스강-스테인리

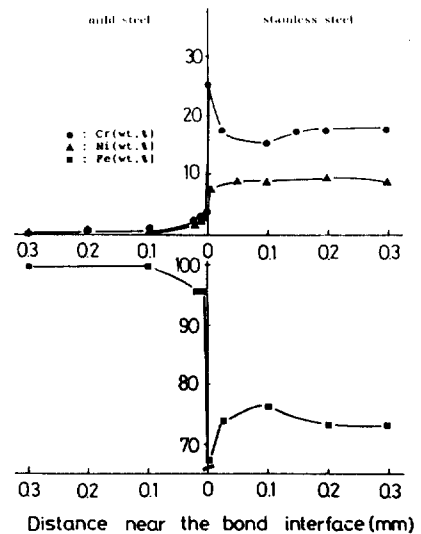


Fig. 11 EDX analysis near the bond interface.  
 (bonding parameters ; temperature=900 °C, time=30 min., surface roughness=NO. 1, pressure=1kg/mm<sup>2</sup>)

스강 동종금속과 연강-스테인리스강 이종금속의 접합부위의 미소경도 실험결과이다.

연강-스테인리스강 이종금속의 경우 접합계면에서 스테인리스강 측으로 약 0.1mm 떨어진 부위에서 미소경도가 가장 낮게 나타났으며 접합계면으로 갈수록 미소경도가 증가하였다. 이것은 Fig. 11의 성분 분석결과에서 나타난 Cr의 편석 거동과 잘 일치 하였으나 냉각시 두 금속의 열팽창계수 차이의 따른 잔류응력의 영향도 함께 내포되었으리라 생각된다. 연강-스테인리스강 이종금속의 스테인리스강 부위가 스테인리스강-스테인리스강 동종금속의 스테인리스강 부위보다 미소경도가 높게 나타난 것은 Fig. 12

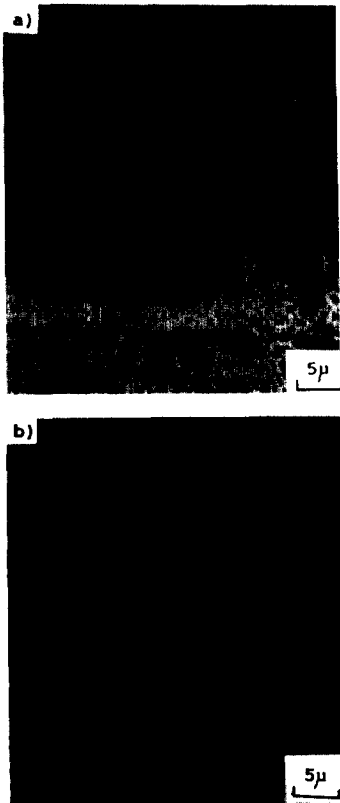


Fig. 12 Microstructure near the bond interface.  
 a) mild steel--stainless steel  
 b) stainless steel--stainless steel  
 (bonding parameters; temperature=900℃, time=30 min., surface roughness=NO.1, pressure=1kg/mm<sup>2</sup>)

에 나타난 바와 같이 연강에서 스테인리스강으로 탄소가 확산하였기 때문이라 사료된다. 한편 Fig. 9에 나타난 바와 같이 연강부위에 탈탄층이 생성 되었음에도 불구하고 접합계면에서 연강 측으로 약 0.2mm 떨어진 부위까지는 연강모재보다 미소경도가 높게 나타난 것은 스테인리스강으로부터의 Cr, Ni의 확산 때문이라고 사료된다.

### 3.4. 파단면 관찰

Fig. 14는 연강-연강 접합강도 측정 후의 파단면 사진이다. Fig. 14의 a), c), e)에서 볼 수 있는 바와 같이 온도가 증가할수록 접합되었던 부위(하얀 부위)가 접합이 이루어지지 않았던 부위(검은 부위)보다 더 많아지는 것을 알 수 있었으며 이것은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 온도가 증가할수록 접합강도가 증가하는 것과 잘 일치하고 있다. 고배율 사진인 b), d), f)에 나타난 바와 같이 800℃에서는 접합이 이루어졌던 ①부위와 접합이 이루어지지 않았던 ②부위에 산화피막이 깨어진 상태로 존재하는 것을 볼 수 있었고 900℃에서는 주로 접합이 이루어진 ③부

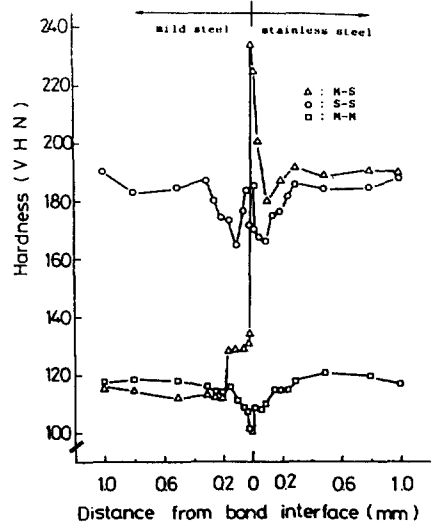


Fig. 13 Hardness distribution near the bond interface.  
 (bonding parameters; temperature=900℃, time=30 min., surface roughness=NO.1, pressure=1kg/mm<sup>2</sup>)

위에 작고 구형에 가까운 산화피막이 존재하였으나 800℃에 비하여 산화피막 크기가 감소함을 알 수 있었다. 이에 반해 1000℃에서는 이러한 산화피막은 거의 관찰되지 않았는데 이것은 접합온도가 증가할수록 자동진공청결처리<sup>12)</sup>, 또는 고온에서 불안정한 산화피막의 분해, 소멸<sup>13)</sup>에 의해 산화피막이 소멸된 것이라 사료된다.

사진이다. 연강 측 표면형태 a)는 연강-연강 동종 금속 접합계면 표면형태와 동일한 입내연성 딩플(dimple)과 벽개표면형태이지만 b)의 스테인리스강 측의 표면형태는 ①부위는 미세한 입내연성 딩플(dimple)을 나타내지만 ②부위와 같이 일어날 때 연강이 떨어져 나와 스테인리스강 위쪽으로 부착된 부위도 관찰할 수 있었다.

Fig. 15는 연강-스테인리스강 이중금속의 표면

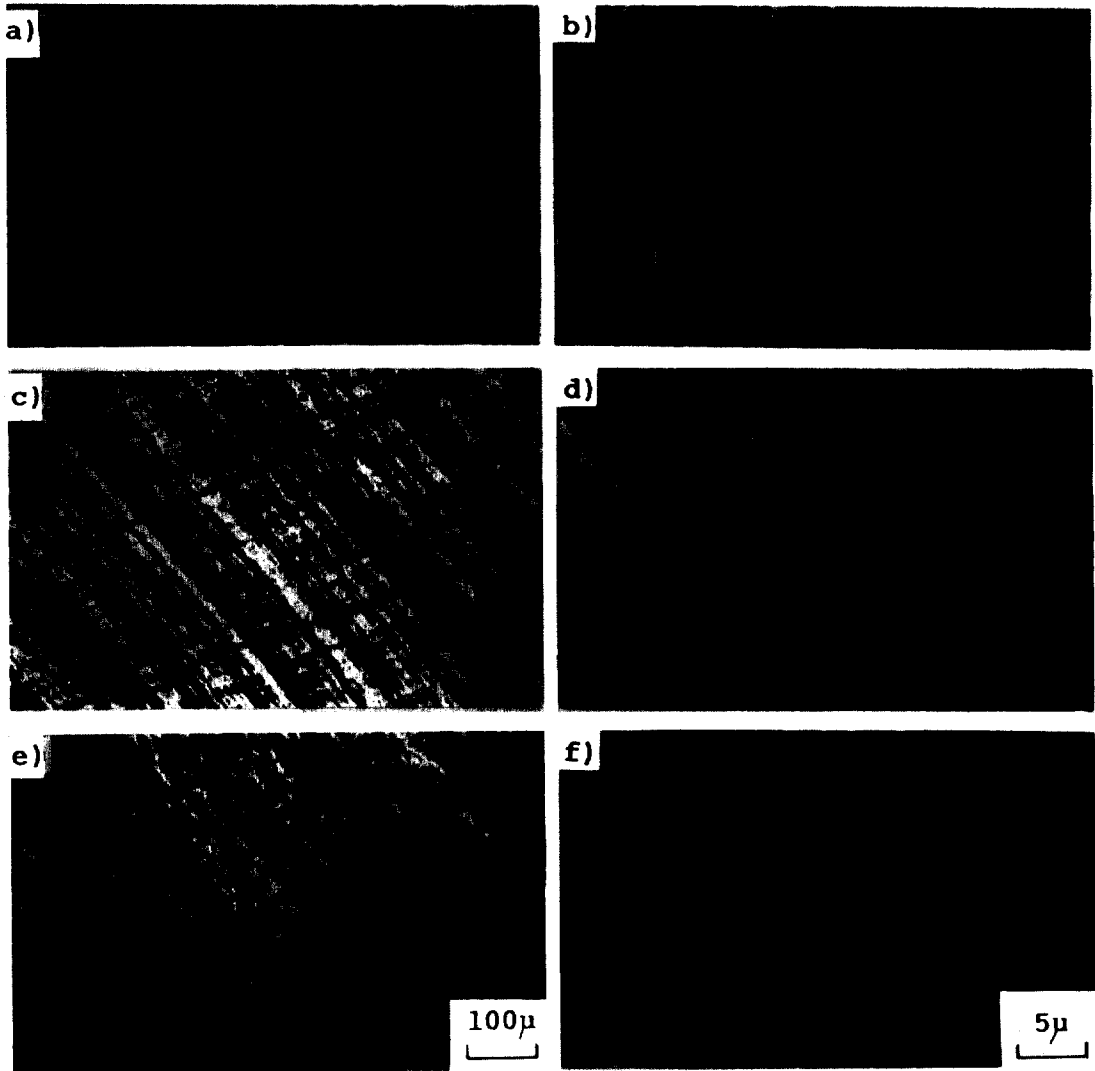


Fig. 14 SEM fractographies of diffusion bonded mild steel-mild steel.  
 (bonding parameters ; time=30min., pressure=1kg/mm<sup>2</sup>, surface roughness=NO.1, temperature  
 a), b) = 800℃    c), d) = 900℃    e), f) = 1000℃)



#### 4. 결 론

연강-스테인리스강 확산접합시 접합온도, 시간, 표면 거칠기의 변수가 접합강도 및 접합부 미세조직에 미치는 영향에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 접합강도는 표면 거칠기가 작을수록, 접합온도가 높을수록, 접합시간이 증가할수록 높아졌다.
2. 접합온도가 낮을수록 표면 거칠기와 접합시간에 따른 접합강도 차이는 크게 변화하며 접합온도가 높을수록 연강-스테인리스강의 접합강도는 연강 동일재의 접합 강도와 유사한 값을 갖는다.
3. 연강-스테인리스강 확산접합시 연강 측 접합부위는 스테인리스강의 Cr, Ni의 확산으로 인해 강도가 증가한다.
4. 연강-스테인리스강 확산접합시 연강으로부터 탄소확산에 의해 스테인리스강 입계에 탄화물이 많이 생성된다.
5. 불완전 접합된 시편에서는 접합면적이 증가할수록 접합강도가 증가하였으며, 연강동일재 접합에서는 입내 연성딴플(dimple)파괴와 입내 취성벽개파괴의 혼합 형태이다. 연강-스테인리스강 접합에서는 접합된 부위의 연강측의 일부가 스테인리스강 측으로 부착되었다.

#### 5. 참고문헌

1. T.J. Moor and K.H. Holko : Weld. J., 9 (1970) 395s
2. E.D. Weisert and G.W. Staiher : Met. Prog., 111 (1977) 33.
3. P.K. Wright, D.A. Snow and C.K. Tay : Met. Tech., 1 (1978) 203.
4. S.H. Carriere and R.V. Wolf : Weld. J., 9 (1965) 398s.
5. D.S. Duvall : Weld. j., 4 (1974) 203s.
6. B.R. Garrett, G.F. Blank and A.J. Ranadive : NASA, CR-409 (1966).
7. 圓城敏男, 池内建仁, 秋川尚史 : 日本溶接學會誌, 第 51卷 (1982) 1028.
8. E. Orowan : Ministry of Supply Armament Research Department Theoretical Research Report, No. 16/45 (1945).
9. 益本 公, 松井繁明, 山田 猛 : 日本溶接學會誌, 第 50卷 (1981) 1179.
10. S. Elliot, I.A. Bucklow and E.R. Wallach : J. Mater. sci., 15 (1980) 2823.
11. R.J. Davies and N. Stephenson : Brit. Weld. J., 3 (1962) 84.

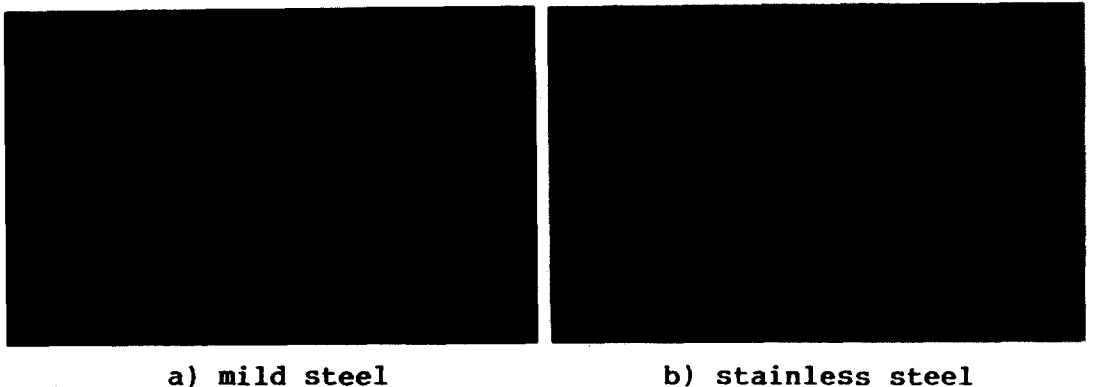


Fig. 15 SEM fractographies of diffusion bonded mild steel-stainless steel.  
 (bonding parapeters ; temperature=900°C, time=30min., ppressure=1kg/mm<sup>2</sup>, surface roughness=NO.1)

12. T.J. Moore : Weld. J., 3 (1972) 106s.

13. 大橋 修, 田沼欣司, 吉原一紘 : 日本溶接學會誌,  
第 55卷 (1986) 53.

14. R.L. Peaslee : Welding J., Oct. (1992) 25

15. M.F. Gittos and T.G. Gooch : Welding J.,  
Dec. (1992) 461s