

**解 說**

大韓熔接學會誌  
第10卷第2號 1992年6月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 10. No. 2, Jun., 1992

## 철강재료의 고상접합기술

김 영 섭\* · 권 영 각\* · 장 래 응\*

### Solid State Joining of Iron and Steels

Y. S. Kim\*, Y. G. Kweon\*, R. W. Chang\*

#### 1. 개 요

저탄소강은 일반적으로 용접성이 우수하지만 완전한 접합 강도와 용접부에서의 결함을 방지하기 위해서는 많은 주위가 필요하다. 용접부의 기계적 성질은 그 미세구조에 따라 좌우되는데, 이 구조는 모재의 화학 조성, 용접 조건 그리고 후열처리에 의하여 결정이 된다. 이와같이 용융용접에 의한 저탄소강의 접합부는 저탄소 함량으로 응고 균열에 대한 저항이 높다. 그러나 탄소의 함량이 증가하므로써 용접성은 저하하여, 0.3% 이상에서 용접부는 과열, 과냉, 저온 균열과 porosity에 취약하게 된다. 구조용강에 있어서는 용접성에 대한 일반적인 기준이 없으므로 이러한 재료는 모재와 용접부의 기계적 성질, 고온 및 저온 균열성, 열간 및 냉간 가공성등을 고려하게 된다. 그러나 가장 중요한 것은 용접부의 신뢰도이다. 탄소강과 저합금강에 있어서 용접은 높은 강도를 얻을 수 있어야 하며 접합부에서 모재의 원래의 특성을 유지하여야 하고 결함이 없어야 할 것이다. 이와같은 결함은 모재의 용점 이하에서 접합을 실시하는 고상접합으로 충분히 억제할 수가 있다.

고상접합에서는 근본적인 미세조직의 결정화도 피할 수 있으며 고온균열과 같은 결함의 위험도 배제할 수

있다. 고상접합은 용융용접과는 달리 모재를 용융시키지 않고 고체상태에서 접합을 하는데, 신금속 및 신소재의 개발과 첨단산업의 발달로 고상접합 기술이 크게 각광을 받고 발전하게 되었다. 이와같은 접합기술의 발전으로 기존의 용접으로는 접합이 불가능한 소재, 용접기술의 적용이 곤란한 복잡한 형상, 복합기능 소재, 고품질 및 고정밀성이 요구되는 소재등의 접합이 가능하게 되었다. 이러한 접합기술로는 brazing, 확산접합, 마찰용접 등이 주로 많이 이용되고 있다. Brazing은 용점이 낮은 filler metal이 모재의 사이에서 용융상태로 유입되어 냉각되면서 접합되는 방식이고 확산접합은 모재의 접합계면에서 원자의 상호 확산으로 접합을 하게 된다. 한편 마찰용접은 계면에서 회전에 의한 마찰열로 접합하는 방식이다. 본 기술해설에서는 이러한 고상접합기술을 이용한 철강재료의 접합에 대하여 고찰하도록 하겠다.

#### 2. Brazing

##### 2. 1. 탄소강과 합금강

저탄소강과 저합금강은 비교적 손쉽게 brazing할 수 있는데, 진공 또는 불활성 분위기에서 Cu filler metal을 사용하여 1080°C 이상에서 brazing하며, Ag filler me-

\*정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

tal을 사용할 경우 더 낮은 온도에서 접합이 가능하다. 합금강의 경우는 brazing 후에 열처리 공정을 거칠 수 있는데 이 때 합금강의 특성을 유지하기 위하여 열처리 온도가 고상선에서 사용할 수 있는 filler metal을 사용하여야 한다. 냉각에 의한 경화 합금에서는 brazing 온도에서 급냉하여 경화를 일으키므로 강의 임계온도 이하의 filler metal을 사용하여 모재의 야금학적인 특성을 변화시키지 않고 brazing 할 수 있다. 한편 접합시 접합면 사이의 gap size가 brazed joint의 기계적 성질에 많은 영향을 미치게 되는데, Fig.1에 그 크기에 따라 AISI4340 접합부의 기계적 성질이 변하는 것을 보여 주고 있다<sup>1)</sup>. 매우 작은 gap에서는 강도가 현저히 감소하고 있는 것을 알 수가 있다.

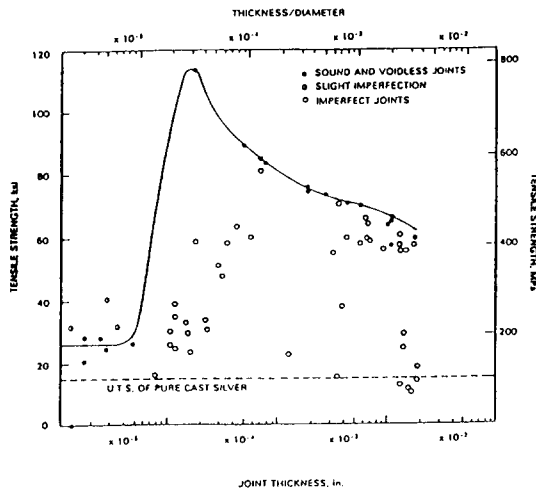


Fig.1 Relationships of tensile strength to brazed joint thickness of 0.5in(12.7mm) diameter Ag brazed butt joints in AISI 4340

저합금강과 저탄소강의 brazing은 여러가지 방법(torch, furnace, induction heating)을 사용할 수 있으며 다양하게 적용이 되고 있다. 특히 자동차의 각종 부품에 많이 이용되고 있다. 많이 이용되는 저합금강으로는 AISI 23xx Ni강, 31xx Ni-Cr강, 41xx Cr-Mo강, 43xx Ni-Cr-Mo강 등이 있다.

패삭강은 torch brazing으로 접합할 수 있는데 Pb의 함량이 0.25%~0.35% 이어도 Ag filler metal과 AWS type 3 flux를 사용하였을 때 Pb에 의한 나쁜 영향은 없는 것으로 나타났다. Cu, Ni계 filler metal을 사용하여도 만족할만한 접합부를 얻을 수 있다.

고탄소강은 0.45% 이상의 탄소를 함유하고 있고 공구강은 0.6~1.4%의 탄소를 함유하고 있다. 따라서 고탄소강의 brazing은 경화를 일으키기 전이나 경화를 일으키는 중에 실시하는 것이 적절하며 고탄소강의 경우 경화온도구역이 760~820°C 이므로 820°C 이상의 filler metal을 사용하는 것이 좋다. 한편 brazing과 경화가 한번에 이루어질 때 filler metal은 용체화 온도(austenizing temperature) 또는 그 이하의 고상온도가 되어야 한다.

1.5C-12Cr 공구강은 수소 분위기에서 Cu filler metal을 사용하여 우수한 접합부를 얻는다. 1.0C-5Cr-1.0Mo강의 경우에는 Ag filler metal을 사용하여 수소 분위기에서 furnace brazing을 하는데 접합중에 경화작용이 발생한다.

## 2.2. 주철

일반적으로 주철의 brazing은 세심한 주위와 특별한 조건들이 요구된다. 주철은 임계온도(변태온도) 이상 가열하면 미세구조가 austenite로 변하게 된다. 냉각시에 새로운 조직으로 변하는데 냉각속도가 빠르면 martensite로 변하거나 미세한 pearlite와 cementite로 변한다. 두 경우 모두 열영향부에서는 피해야 하는 조직이다. 이 임계온도는 조성에 따라 다른데 Si이 증가하면 그 온도도 상승한다. 주철의 종류로는 white, gray, malleable, ductile cast iron 등이 있는데 이들중에서 white 주철의 brazing은 용이하지 않아 brazing 전에 오염된 표면을 전기화학적 방법이나 화학적 방법으로 깨끗하게 세척한 후 oxidizing flame이나 grit blasting 등으로 건조시킨다. 저융점 Ag filler metal을 사용하면 비교적 젖음성(wettability)이 좋아 접합이 용이하다. Ductile, malleable 주철은 760°C 에서 brazing을 실시하며, 고탄소주철을 Cu filler metal로 brazing할 경우 국부적으로 얇은 부위의 용융을 막기 위하여 낮은 온도에서 작업해야 한다<sup>1)</sup>. Gray, malleable, ductile iron 들은 잘 팽창하며 열전도성이 나쁘기 때문에 brazing시 가열 및 냉각 cycle에 신경을 써야 한다.

## 2.3. Stainless Steel

대부분의 stainless Steel은 Cr의 함량이 높기 때문에 brazing이 곤란하여 이들 합금의 brazing은 순수 수소 또는 진공중에서 실시하는 것이 가장 적합하다. 또한,

dew point가  $-51^{\circ}\text{C}$  이하이어야 Cr 산화물의 생성을 방지하여 젖음성을 좋게 할 수 있고, torch brazing시 flux를 사용하여 잔존하는 Cr 산화물을 제거시킬 수도 있다. Stainless steel의 filler metal로는 Ag, Cu, Cu-Zn 합금등이 사용되는데 Ni를 포함하고 있는 Ag 합금은 내식성이 우수하다. 그러나 P를 함유한 filler metal은 접합부에서 취약한 Ni와 Fe의 phosphides를 생성하기 때문에 높은 응력을 받는 부품의 접합에는 사용하지 않는다. B를 함유한 Ni계 filler metal은 Ti 이나 Al 또는 두가지를 모두 함유한 stainless steel의 brazing에 적합한데, 그것은 B가 flux의 작용을 도와서 모재에서의 wetting을 좋게하기 때문이다.

Martensite 계 stainless steel(403, 410, 414, 416, 420, 431)은 오스테나이트(austenitizing) 온도범위 이상에서 brazing후 경화되기 때문에 brazing후 annealing을 하여야 한다. 또한 이 합금들은 어떤 filler metal을 사용하면 응력균열(stress cracking)을 일으킬 수 있다.

Ferrite 계 stainless steel(405, 406, 430)은 경화형이 아니기 때문에 열처리에 의하여 미세한 입자들을 얻을 수 없다. 이 합금들은  $980^{\circ}\text{C}$  이상에서 brazing할 경우 물리적 특성이 저하되게 되는데, 그 이유는 과도한 결정립의 성장이 일어나기 때문이다. 또한  $340-600^{\circ}\text{C}$  온도범위에서 장시간 brazing하면 인성이 저하된다. 그러나  $790^{\circ}\text{C}$  정도에서 적당한 시간 열처리하면 어느 정도 인성이 회복된다.

석출경화형 stainless steel은 Cu, Mo, Al, Ti등의 원소가 첨가되고, 이러한 원소의 첨가로 석출경화열처리에 의해 경화가 일어난다. 이러한 형태의 합금들을 brazing할 때 heating cycle을 합금의 열처리 cycle과

일치시켜야 한다.

Fig.2는 STS 304의 접합시 동일 접합조건하에서 brazing 시간 변화에 따라 나타난 접합부 조직 사진으로 3분간 brazing하면  $25\mu\text{m}$  정도의 접합부를 형성한 반면, 7분간 접합하면  $15\mu\text{m}$  정도의 미소한 접합부가 형성됨을 알 수 있다<sup>2)</sup>. 또한, 양 접합부의 경도 분포를 조사한 결과 접합부(a)는 matrix를 따라 Hv 60의 분포를 나타냈고 filler metal과 모재사이의 상호확산영역에서는 Hv 280을 보인 반면, 접합부 (b)는 matrix를 따라 Hv 150, 상호확산영역에서 Hv 350의 경도분포를 보여 접합부 (a)와 모재(Hv 145)에 비해 전체적으로 높은 경도분포를 나타내고 있다. 따라서 STS 304의 접합시 접합 시간은 접합부 성능을 좌우하는 중요한 요인으로 볼 수 있을 것이다. Fig.3은 brazed joint의 굽힘강도를 나타내고 있는데 STS 304나 430 모두 접합시간에 따라 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다<sup>2)</sup>.

### 3. 확산접합

#### 3. 1. 탄소강

일반적으로 강은 brazing이나 용융용접성이 우수하기 때문에 확산접합법을 많이 사용하지는 않는다. 그러나 특수한 경우, 즉 크고 평탄한 면의 고정밀도 접합을 원할 경우 사용이 가능하다. 예를들어 AISI 1020 강의 접합은  $982-1240^{\circ}\text{C}$ , 7MPa, 1-15min에서  $1093-1204^{\circ}\text{C}$ , 35kpa, 2hr까지의 광범위한 접합조건하에서 이루어 질 수 있는데 불활성 분위기나 대기중에서도

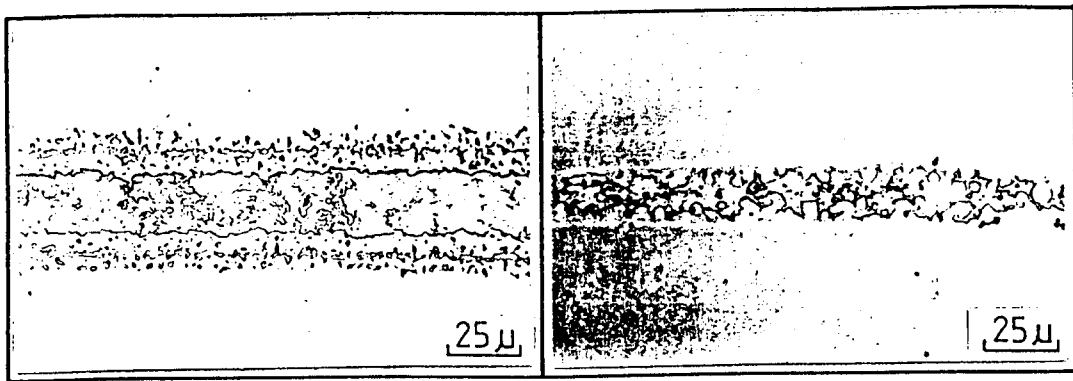
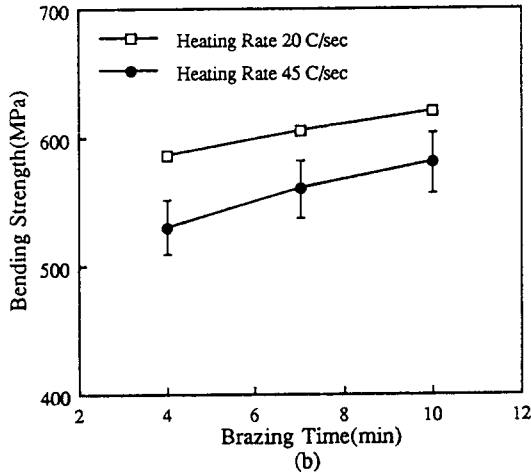
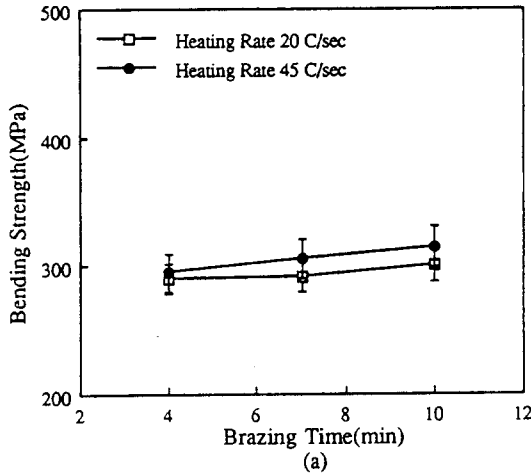


Fig.2 Microstructures show the effect of brazing time in STS 304 brazed joints



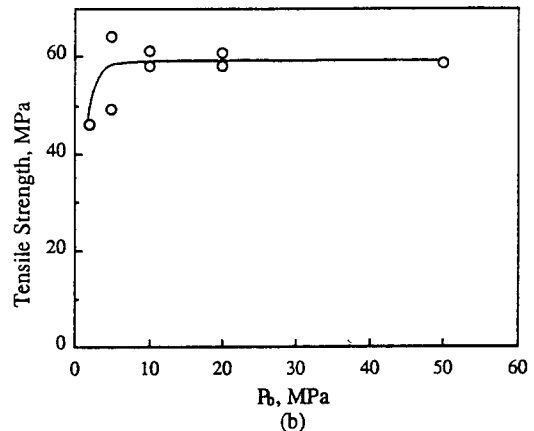
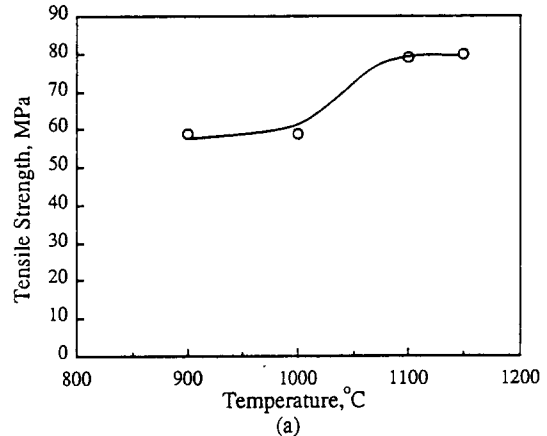
**Fig.3** The effect of brazing time on the bend strength in (a) STS 304 brazed joint and (b) STS 430 brazed joint

접합이 가능하다.

0.12C-2Cr-4Ni, 0.18C-2Cr-4Ni-W, 0.3C-Cr-Ti-Si, 0.3C-Cr-Ti-Ni-Si, 0.3C-2Cr-2Ni-Mo, 0.18C-2Cr-Mo의 확산접합이 집중적으로 많이 연구되었다<sup>3)</sup>. 최적 접합조건-T=1423-1453K, Pb=9.8MPa, t=12min-하에서 0.12C-2Cr-4Ni강과 0.3C-Cr-Ti-Si강의 경우 완전한 최고의 강도를 얻었다. 충격강도는 때때로 모재보다 낮은 값을 나타내었다. 과열에 의하여 접합부에 취성이 나타날 수 있지만, 접합후 열처리로 방지할 수가 있다. 충격강도는 접합 압력에 의존하는 것으로 보였는데, 최대 확산계수에 해당하는 접합 압

력에서 최대가 되었다.

공구강에 있어서는 기본적으로 경도가 높아야 한다. 대개의 경우 이러한 공구는 고속도 공구강으로 제조를 한다. 용융용접과 저항용접으로 제작을 할 때 공구의 표면이 반응용되어 그 계면에 ledeburite조직을 형성한다. 한편 용접부가 탈탄이 되어 탄화물이 감소하며 합금원소들도 희석이 된다. 반면에 최적 조건(T=1100°C, P<sub>b</sub>=9.8MPa, t=5min, P<sub>vac</sub>=0.13Pa)하에서 공구강 SKH 2의 확산접합 결과 아주 우수한 접합부를 얻게 된다 (Fig4&5). 계면에 매우 얇은 층이 형성되어 있어도 용융층이나 ledeburite조직은 관찰되지 않았다. 접촉면에서 물리적인 접합계면을 발견할 수 없었다. 후열처리 (annealing)를 실시한 결과 접합강도가 두배 이상 증가한 것을 발견할 수 있었다(Fig6).



**Fig.4** Effect of (a) bonding temperature and (b) pressing load on the strength of joints in SKH2 tool steel

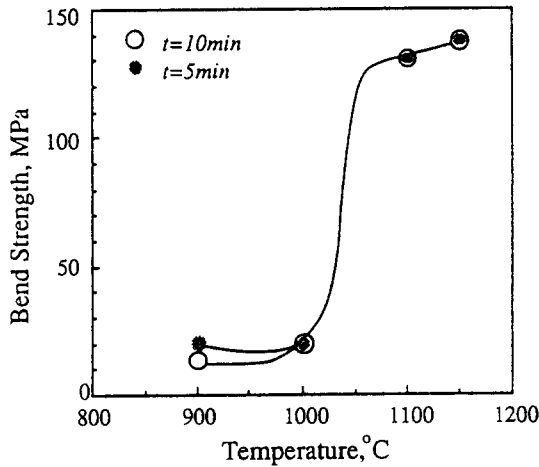


Fig. 5 Bending strength of joints in SKH2 tool steel as a function of bonding temperature.  $P_b=20\text{MPa}$

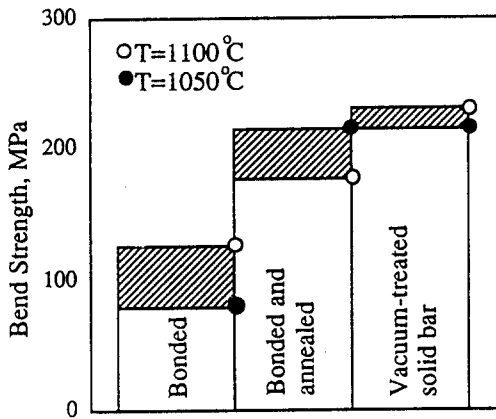


Fig.6 Bending strength of joints made at  $P_b=10\text{MPa}$  and  $t=5\text{min}$ . The shaded areas give spread in experimental data.

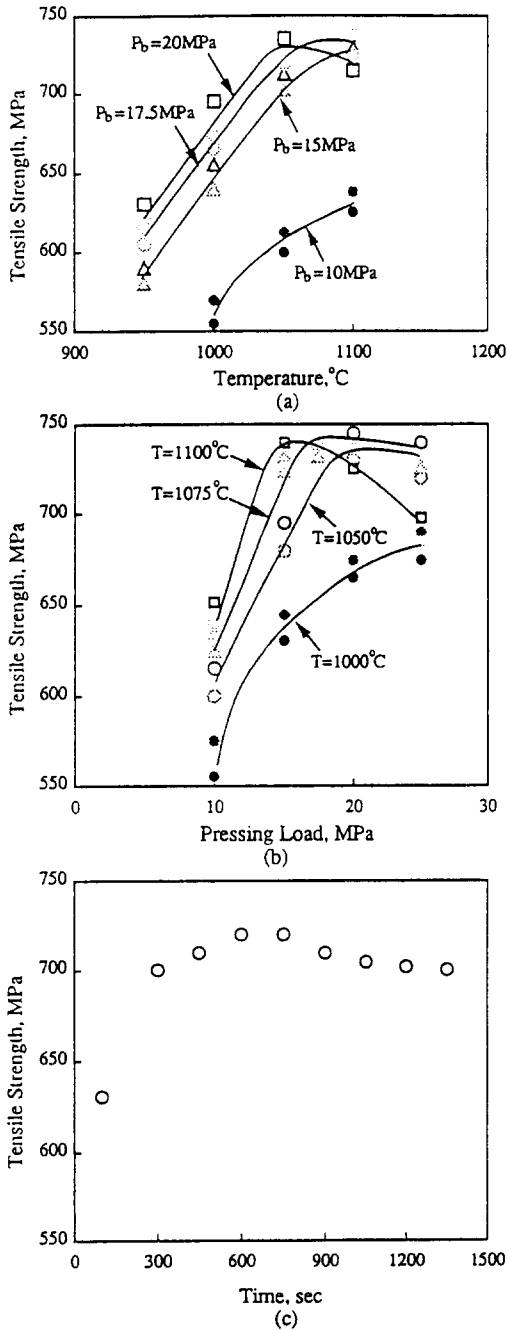
### 3. 2. Stainless steel

Stainless steel중에서 용접에 많이 이용되고 용접성이 우수한 것은 STS 304(18%Cr-8%Ni)와 같은 austenite계이다. 일반적으로 이러한 강종은 내식용으로 많이 이용되며, Cr과 Ni의 함량이 증가하게 되면 고온 재료로서 내열강종이 된다. Cr-Ni강에 있어서는 Cr탄화물의 석출로 특성이 저하되므로 C의 함량을 0.1-0.15% 미만으로 한다. 그리고 용접을 할 경우 austenite 조직을

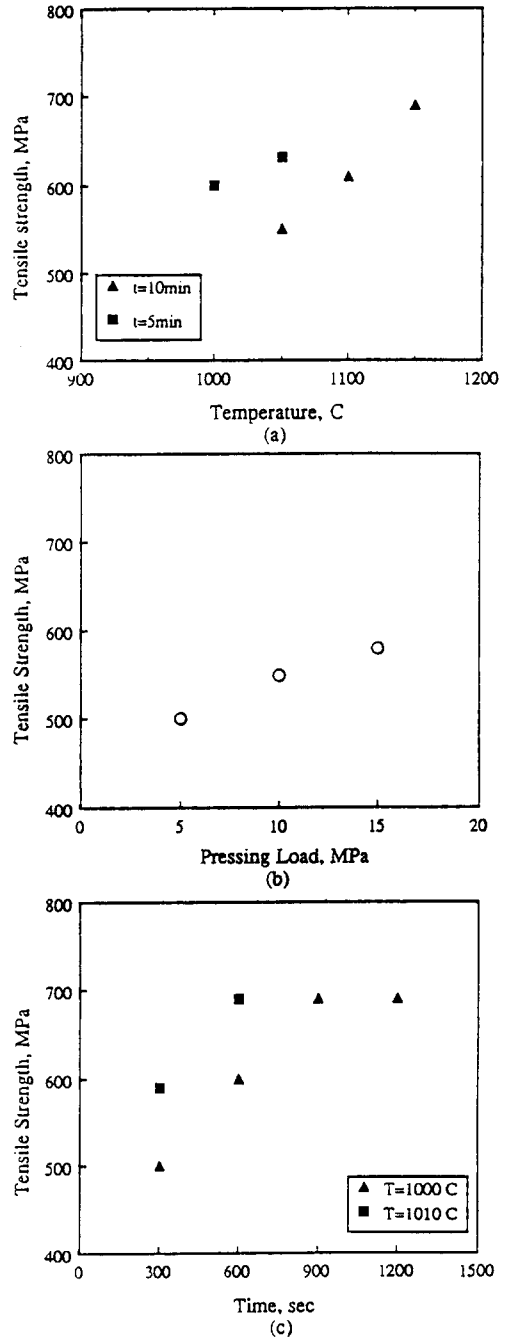
유지시키며 내식성과 같은 특성도 유지시키도록 노력하여야 한다. austenite 조직의 분해는 재료를 austenite 변태온도 이상으로 가열하거나, austenite 형성 원소를 감소시키든지, 그리고 C의 함량을 증가시키든지, 혹은 여러가지 미량원소를 과다하게 첨가하므로써 발생한다. 그러므로 austenite계의 용접에서는 가열 시간과 입열량을 최소로 하도록 하여야 한다. 용접후 또는 사용중에 용접부가 파단을 일으키게 되는 고온 균열의 방지를 위하여 특별히 주의를 하여야 한다. Martensite계와 martensite-ferrite계 강종은 쉽게 경화를 일으키므로 후열처리를 반드시 실시한다. 한편 용접전 가열도 필요하다. 용융용접에 있어서는 용착금속의 연성향상과 균열방지를 위해 많은 연구가 되어왔다. 고Cr ferrite계에서는 용융선에서 취성을 일으키는 주요 원인인 거대한 조직이 형성된다. Ferrite강은 우수한 용접을 얻기가 어려우므로 40-60%의 ferrite 조직을 갖는 austenite-ferrite 2상조직강으로 대체를 많이 한다.

Stainless steel의 진공확산접합으로 이와 같은 용접에 의한 특성의 저하를 방지할 수 있다. 대표적인 예로서 진공검사용으로 사용되는 표준 검출장치가 있는데 직경 20mm, 높이 10mm의 실린더로 두개의 austenitic stainless steel(0.12C-18Cr-10Ni-Ti)을 확산접합하여 제작한다. 이 접합은 접합부에서 용해되지않고 변형의 양도 접합압력으로 조절할 수 있으므로 어떠한 크기의 형태라도 만들 수가 있다. 이 강종에 있어서 최적 접합조건은  $T=1000^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=19.6\text{MPa}$ ,  $t=10\text{min}$ ,  $P_{vac}=2.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 이다. Fig.7은 0.45C-14Cr-14Ni-2W-Mo강의 접합강도에 대한 접합조건 변화의 영향을 보여주고 있는데 최적조건으로는  $T=1077^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=17\text{MPa}$ ,  $t=10\text{min}$ ,  $P_{vac}=9.8 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 이다. 한편 이 접합에서 충격인성은 모재와 같은 수준으로 나타났다. 이상과 같은 접합에서 입계 또는 입간creep과 확산에 의하여 미세구조의 변화가 일어난다는 것을 알 수 있다. 접합압력이 높으면 그만큼 creep 속도가 증가하여 접합부에서 결정의 성장이 일어나게 되어 결국 재결정을 일으킨다. Austenite계 접합에서 고품질의 접합을 얻기 위하여는 재결정을 일으켜야 하지만 그것은 한계가 있다. 재결정의 한계는 결정 성장과 합금원소의 재배분에 의하여 결정된다. 이러한 한계에서는 접합부의 충격인성이 나빠지게 마련이다. 일반적으로 austenite계의 접합은 우수한 접합부를 형성한다.

Martensite계(0.14C-17Cr-2Ni)의 일반적인 접합조건은  $T=1000^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=14.7-25.5\text{MPa}$ ,  $t=20\text{min}$ ,  $P_{vac}=6.5 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 이며 접합중에 경화 현상을 보이므로  $A_{31}$  이하와



**Fig.7** Effect of (a) bonding temperature (b) pressing load and (c) duration of pressure on the ultimate tensile strength of joint in 0.45C-14Cr-14Ni-2W-Mo steel.  
 $P_{vac} = 1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$ ,  $t = 10\text{min}$ .



**Fig.8** Effect (a) bonding temperature ( $P_b = 4.9\text{MPa}$ ), (b) pressing load ( $T = 1100^\circ\text{C}$ ), (c) bonding time ( $P_b = 4.9\text{MPa}$ ) on the tensile strength of joints in 0.12C-18Cr-9Ni-Ti steel + 0.14C-17Cr-2Ni steel

A<sub>c1</sub> 이상에서 tempering을 실시하여야 한다. 소둔한 시편에 있어서 경도(R<sub>c</sub> 15-20)가 감소하였으며 기계적 성질중 연성이 증가하였다. 이러한 현상은 접합부에서 화학적으로 균질화가 일어났기 때문이다. 용융용접으로 제작한 유압장치의 elbow는 martensite계 02C-13Cr강으로 되어 있는데 1000°C 이상으로 가열할 때 용접부에 균열이 발생할 수 있고 경도도 상승하게 된다. 한편 잔류응력으로 미세균열이 발생하게 된다. 그러나 확산접합에서는 이러한 결함을 발견할 수 없을 것이다. T=940-960°C, P<sub>b</sub>=15.7MPa, t=10min, P<sub>vac</sub>=0.13Pa로 접합하였을 때 위와같은 미세균열이나 내부결합은 존재하지 않고 접합후 냉각중에 소둔의 효과가 있어서 경화 현상도 일어나지 않는다. 이와같이 접합한 elbow들을 175MPa의 유압에서 시험하였을 때 결함이나 누수도 없었다. 그리고 31MPa의 압력과 0.05Hz의 주파수로 15-70°C에서 시험한 결과 우수한 접합을 이루었음을 보여주었다.

일반적으로 stainless steel 표면에는 얇은 산화층이 존재하기 때문에 접합전에 이를 제거해야만 한다. 이러한 경우 건조한 수소분위기중에서 접합을 하거나 양극세척(anodic cleaning)후 Cu를 도금하여 접합할 수 있다. 도금층위의 산화물은 접합시 수소에 의하여 제거가 된다. 예로서 AMS 5630 martensite 계 stainless steel은 1093°C, 690kpa, 1.5 시간의 조건에서 2.5μm 두께의 Cu층을 filler metal로 사용하여 접합할 수 있다.

### 3. 3. 이종재료

이종재료의 접합에서는 접합부가 사용되는 환경에서의 신뢰성에 영향을 미치는 인자를 고려하여야 한다. 이러한 것은 용융용접시 모재 가까이에서 있는 화학적인 변화, 조성의 변화에 의한 취약한 응고산화층의 존재, 미세구조적으로 상이한 재료의 용접에 의한 잔류응력이다. 이러한 것 때문에 용접부에서는 화학적, 미세구조적, 기계적인 불균일이 발생한다. 구조적으로 유사한 강을 용접할 때에는 열처리에 의하여 용접부에서 발생하는 응력을 제거하게 된다. 상이한 구조의 강을 용접할 때에는 이러한 열처리로 열팽창 계수가 다르므로 오히려 새로운 응력상태를 발생시키게 된다. 예를들어, pearlite 강과 austenite강을 용접하면, tempering후 냉각과정중에 austenite쪽에는 인장응력이 pearlite쪽에는 압축응력이 형성된다. Pearlite강을 고 Cr강에 용접할 때에는 그 경우가 반대로 된다. 확산접합에서는 이러한 화학적, 구조적, 기계적인 불균일을 방지하거나 크게 감소시킬 수 있으며 잔류응력의 크기와 영향도 크게 감소시킬 수

있다.

Austenite계 0.12C-18Cr-9Ni-Ti합금과 martensite계 0.12C-13Cr 합금의 접합에서 최적 조건은 T=1050°C, P<sub>b</sub>=14.7MPa, t=20min, P<sub>vac</sub>=0.13×10<sup>-2</sup> - 6.5×10<sup>-2</sup>Pa이다. 최대 인장강도는 627.2 MPa이며 연신율은 60%이다. 파단은 0.12C-18Cr-9Ni-Ti합금측에서 일어났다. 접합조건을 T=1000°C, P<sub>b</sub>=14.7MPa, t=10min,으로 하였을 때 접합부에서 파단이 일어났으며, T=1100°C에서 접합하였을 때에는 상당한 결정성장이 있는 martensite 쪽에서 파단이 발견되었다. 그러므로 최적조건으로 접합한 시편은 1050°C에서 oil quenching하고 700°C에서 tempering한 후 냉각시켜야 한다. 그렇게하여 불필요한 경도증가를 제거시킬 수 있다. 접합부에서의 결함은 없고 결정성장이 발견된다. Martensite강에서 austenite강으로 탄소가 확산하여 접합부의 austenite쪽에 Cr탄화물이 석출된다. 그러나 열처리에 의하여 결정이 미세화 되며 탄화물도 용해되고 양쪽이 본래의 미세구조를 갖게된다. 실험실적인 접합으로 부터 실제 제품 생산을 위해 접합할 때에는 접합조건이 영향을 받게 된다. 접합재료의 크기가 커지고 형상이 변하기 때문에 가열 조건이 달라지게 되어 제품의 단면에 온도의 분포가 다르게 나타나며, 접합부에서의 열제거에도 영향을 미치게 된다. 그러므로 접합조건에 있어서 약간의 변화가 있게 된다. 위에서 예를 들은 경우에 실제 부품의 제작에서 형상의 변화를 최소화하기 위하여 접합압력을 4.9MPa로 하였다<sup>4)</sup>.

고압/저압 chamber에서 사용되는 bimetallic membrane은 0.12C-18Cr-9Ni-Ti합금과 0.14C-17Cr-2Ni 합금의 확산접합으로 제조한다. 이 때 사용되는 최적 접합조건은 T=1100°C, P<sub>b</sub>=6.9-7.84MPa, t=10min, P<sub>vac</sub>=2.6×10<sup>-3</sup> - 5.2×10<sup>-3</sup>Pa이다. 이 membrane은 접합후에 650-670°C에서 1.5시간동안 tempering을 실시한다. 한편 접합강도는 모재 수준인 것을 알 수 있다. (Fig.8). 접합온도와 압력을 증가시키게 되면 상당한 소성변형이 일어난다<sup>5)</sup>.

자성재료인 0.2C-3Cr-Mo-W-V강을 비자성재료인20Cr-4Ni-10Mn강과 0.25C-17Cr-4Ni-15Mn강에 확산접합할 때에 구조적인 변화를 일으켜 접합부에서 20Cr-4Ni-10Mn강의 15mm정도까지 재결정을 일으킨다. 그러므로 이 강의 경도가 BHN 200에서 185로 낮아지게 된다. 반면에 0.2C-3Cr-Mo-W-V강은 접합부로부터 28mm까지 경도가 BHN 190에서 330-350으로 상승한다. 이러한 문제를 억제하기 위해서는 접합조건을 T=1000°C, P<sub>b</sub>=14.7MPa, t=10min, P<sub>vac</sub>=0.13Pa로 하며 가열은 0.2C-3Cr-Mo-W-V강에 치우쳐 실시한다. 0.2C-3Cr

-Mo-W-V강과 0.25C-17Cr-4Ni-15Mn-2V강의 확산접합은  $T=1100^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=14.7\text{MPa}$ ,  $t=10-20\text{min}$ ,  $P_{\text{vac}}=0.13\text{Pa}$ 에서 실시하는데 이 조건은 전기 모터의 rotor disc(직경220mm, 두께 28mm)를 접합하는데 이용된다<sup>5)</sup>.

고속도 공구강 SKH-2와 탄소강 S45C의 확산접합은  $T=1000^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=19.6\text{MPa}$ ,  $t=5\text{min}$ ,  $P_{\text{vac}}=6.5 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 에서 우수한 접합부를 형성한다. 강도 시험에서는 대부분 S45C쪽에서 파단이 일어난다. 이 조건하에서 접합할 때 변형이 5% 정도 발생한다. 이 변형량은 실제 제품에서는 매우 큰 것이므로 변형량 감소를 위하여 표면을 조도  $0.16\mu\text{m}$  이하로 가공하고 접합조건중에서  $T=900^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=9.8\text{MPa}$ 로 하여 접합한다. 그러나 접합후 변형이 2.8-3.2% 정도 발생한다. 결국 Cu와 Ni 같은 filler metal을 사용하게 되는데 전기도급하여 접합한다. Ni filler metal을 사용하고 접합온도를  $800^{\circ}\text{C}$ 로 할 때 높은 기계적 성질을 보인다. Ni층의 두께를  $2\mu\text{m}$ 로 하고 표면의 조도를  $0.36-0.04\mu\text{m}$ 로 하면 최적접합조건은  $T=800^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=0.98\text{MPa}$ ,  $t=20\text{min}$ ,  $P_{\text{vac}}=6.5 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 이 된다. 이때 접합부의 변형은 0.1% 정도로 낮아진다. 그리고 접합부의 인장강도는  $637\text{MPa}$ 이며 전단강도는  $183.3-212\text{MPa}$ 이 된다. 이와같이 filler metal을 이용하는 방법으로 천이액상확산접합이 있다. 이 방법은 brazing과 확산접합을 조합시킨 것으로 STS304와 SM17C, SM45C의 접합을 Ni계 filler metal을 사용하여 접합하였다<sup>6)</sup>. Ni-18.5Cr-7.5Si-1.4B(MBF-50)을 사용하여 가장 만족할 만한 접합부를 얻었다. 한편 실험적으로 제조한 filler metal(0.5-1.0%B, 6.8%Si)을 사용하였을 때에도 좋은결과를 얻었는데, 이 경우에는 기계적 성질 및 내식성에 나쁜 영향을 미치는 탄화물/붕화물의 생성을 억제하기 때문으로 나타났다.

자동차의 변속기 gearbox를 제조하는데에 gear hub와 ring gear사이에 정밀 접합을 해야 할 필요가 있다. ring gear는 0.05-0.15% C의 저탄소강으로 되어 있으며, gear hub는 0.16-15% C의 저합금으로 되어 있다. Gear hub의 경도는 BHN 140이며, ring gear는 BHN 100-110이다. 두 재료를 탄소강의 접합조건인  $T=1000-1100^{\circ}\text{C}$ ,  $P_b=19.6\text{MPa}$ ,  $t=5-10\text{min}$ 으로 접합하게 되면 접합부에서 변형을 일으키는데 변형량이 적다고 하더라도 육안으로 쉽게 식별할 수가 있다. 이러한 변형을 최소화하기 위해서는 아래와 같은 두가지 방법을 사용한다.

방법1: 두 재료를  $1000-1150^{\circ}\text{C}$ 에서  $14.7\text{MPa}$ 로 5분간 유지한다. 그런 후 온도를  $750^{\circ}\text{C}$ 로 내리고 압력을  $19.6\text{MPa}$ 로 증가시켜 10분간 유지시킨다.

방법2: 두 재료를  $1050-1100^{\circ}\text{C}$ 에서  $14.7\text{MPa}$ 로 5초간 유지시킨다. 그리고 온도를 그대로 하고 압력을 8.8-9.8

MPa로 감소시켜 5분간 유지한다. 그런 후 방법 1)에서와 같이 온도를  $750^{\circ}\text{C}$ 로 내리고 압력을  $19.6\text{MPa}$ 로 상승시켜 10분간 유지한다.

위의 두가지 방법에서 첫단계의 목적은 최대의 접촉 면적을 갖도록 표면의 골곡(asperity)들을 파괴시키는 것이다. 이 단계는 짧은 시간에 이루어져야 하는데 그렇지 않으면 많은 변형을 일으키기 때문이다. 접합부의 변형을 방지하기 위하여 저온에서 실시하는 둘째단계의 목적은 확산을 촉진시키기 위한 것이다. 두가지 방법에서  $50-100^{\circ}\text{C}$ 로 냉각을 하면 약간의 산화가 있어도 매우 우수한 접합을 얻게 된다. 접합을 실시한 후에는 대개 비틀림 시험을 실시한다. 경도는 접합전의 값과 동일하며 치수는 육안으로는 식별이 불가능한  $0.3\text{mm}$ 미만으로 변하게 된다.

#### 4. 마찰용접

마찰용접의 원리는 확산접합에서 설명한 대로 금속내부에서 미시적으로 두원자 사이가 평형상태로 되는 것이다. 따라서 두 금속원자를 결합시킬 때에는 양쪽 소재의 표면원자가 인력으로 서로 잡아 당기게 되는 거리보다 가깝도록 인위적으로 접촉되어야 한다. 이와같은 접촉을 위해서는 막대한 힘이 필요하므로 접근에 필요한 재료의 변형저항을 저하시키는 방법으로 고온의 열원을 이용하게 되며 마찰용접에서는 마찰력을 이용하고 있다. 마찰용접중 재료의 접촉부에서 마찰열로 소비되는 회전에너지 E는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E=1/2 I\omega^2 = 2I\pi^2 n^2 / 3600$$

일의 단위는  $\text{kg} \cdot \text{m}$ 이며, 위의 관계식에서 I는 회전축축의 관성 모멘트( $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ )이고,  $\omega$ 는 회전축의 각속도, n는 회전축의 초기회전수(rpm)이다. 베어링등에 의한 에너지 손실을 생략하더라도 이 마찰일의 대부분은 접촉면에서 발생하고 충분히 고온( $1250-1300^{\circ}\text{C}$ )에 도달하므로 마찰추력에 의하여 완전히 접합을 이루게 된다. 그러므로 마찰용접의 인자로는 회전축의 초기 회전수, 관성 모멘트, 가압력이 된다.

이와 같은 마찰용접의 장점은 다음과 같다.

- 용가재가 필요없다.
- flux 또는 보호 gas가 필요없다.
- 작업환경이 깨끗하다.
- 접합하고자 하는 모재의 표면상태가 다른 접합에 비하여 까다롭지가 않다.
- 열영향부가 매우 좁다.



- 마찰용접은 대부분의 공업재료에 이용할 수 있으며 이중 금속간에도 적용할 수 있다.
- 대부분 접합부의 강도가 모재 이상이다.
- 작업자의 숙련도가 요구되지 않는다.
- 접합시간이 다른 접합법에 비하여 매우 짧아 단시간에 끝날 수 있다.

한편 단점으로는 다음과 같이 몇가지를 들 수 있다.

- 회전을 이용하므로 접합 모재의 어느 한쪽은 단면이 원형이어야 하는 형상에 대한 제한이 있다. 그러나 최근에 회전 운동이 아닌 왕복운동에 의한 마찰용접 장치의 개발로 모재에 대한 형상의 제한이 없어지게 되었다.
- 접합부의 강도는 모재와 동등하거나 이상이 되지만 충격치가 낮아 접합부의 인성이 낮은 단점이 있다. 이러한 마찰용접은 자동차 공업에서 많은 실용화를 이루고 있는데 주요부품으로는 steering shaft, engine valve, rear axle housing, front drive 부품등이 있다. 그리고 산업기계에는 Al guide roller, 건설 기계용 piston rod등에 이용되고 있다.

#### 4. 1. 탄소강

일반적으로 탄소강은 마찰용접이 잘 이루어지는데 SS41의 경우 마찰접합면을 구분하기가 힘들 정도이다. 마찰압접한 인장시편의 경우 모재의 인장강도와 거의 비슷한 값을 나타내고 있으며 파단이 접합부에서 일어나지 않고 모재쪽에서 일어난 것으로 볼 때 접합강도는 최소한 모재의 인장강도보다는 높을것으로 판단된다.

접합부의 경도는 Hv 210으로 모재(Hv 145)보다 훨씬 높다. 이것은 결정의 미세화가 원인이며 중심부와 외부에서의 경도 차이는 거의 없었다<sup>7)</sup>.

#### 4. 2. Stainless steel

STS301의 접합부는 모재의 인장강도보다 낮은 강도를 나타내었다. 이것은 열영향부의 경도값이 다소 떨어지는 것과 관계가 있다. 한편 이 열영향부는 SS41의 경우보다 좁은 것으로 나타났다. 마찰접합시편의 피로강도는 모재와 비슷한 수준으로, 고주기 피로강도는 비슷한 경향을 보여주며 저주기 피로강도는 모재에 비하여 낮았다. 모재인 경우에는 피로파면에서 흔히 나타나는 sheel 무늬를 띄고 있었으나 마찰용접한 경우에는 동심원 형태의 파면이 두드러졌다. 이러한 파면 양상이 중심부에서만 관찰되었는데 열영향부를 따라 파단이 일어나다가 시편 중심부에서는 접합부를 따라 파단이 일어나는 것으로 보인다. 미소경도 측정결과 열영향부에서 경도값이 떨어지나 접합면에서 경도값이 상승하는 경향을 보이고 있다. 열영향부의 경도값이 모재보다는 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 recovery와 recrystallization에 의해 거대한 조직으로 되었기 때문으로 판단되며 접합면(faying surface)에서의 경도상승은 미세한 조직에 의한 것으로 여겨진다<sup>7)</sup>.

#### 4. 3. 이종재료

마찰용접을 적정조건에서 실시한 결과 접합강도는

**Table 1** Results of tensile test for base metals and friction welded metals

Specimen	Dia (mm)	Yield load(kg)	Max. load(kg)	Y. P. (kg/mm <sup>2</sup> )	T. S. (kg/mm <sup>2</sup> )	E. L. (%)	파 단 위 치
STS301	8.02	2150	3700	42.58	73.28	68.40	
〃	7.99	2125	3600	42.40	71.84	63.36	
〃	7.99	2125	3700	42.40	73.83	69.60	
SS41	7.93	1800	2588	36.46	52.42	36.08	
〃	7.95	1900	2670	38.30	53.82	37.76	
〃	7.94	1850	2625	37.38	53.04	35.76	
STS/STS	8.02	2000	3363	39.61	66.60	34.60	용접부
〃	7.99	2000	3349	39.91	66.85	34.71	〃
SS/SS	7.94	1900	2675	38.39	54.05	26.40	모 재
〃	7.93	1875	2650	37.98	53.68	28.12	〃
〃	7.94	1875	2662	37.89	53.80	27.20	〃
STS/SS	7.90	1875	2675	38.27	54.60	28.40	SS모재
〃	7.90	1800	2650	36.74	54.09	32.40	〃
〃	7.91	1950	2638	39.70	53.70	26.00	〃

Table 2 Characteristics of friction welding joints

	인장강도	경도	HCF 강도	LCF 강도	LCF 파단부
SS/SS	모재이상	접합부 증가	모재수준	모재수준	계면(동심원)
STS/STS	약간감소(5-10%)	접합부 불균일	모재수준	약간감소	HAZ, 계면 (중간부 동심원)
STS/SS	SS 이상	상기의 중간형태	약간감소	SS수준	SS HAZ, 계면 (중간부 동심원)

오히려 모재의 인장강도를 상회하는 경향이 있으며, Table1에 SS41/STS301의 마찰압접에 대한 인장시험결과를 보여주고 있다. 이러한 이종재료의 마찰용접에서 피로강도는 동종재료의 그것에 비하여 낮은 것으로 나타났다. 이에 대한 것은 Table2에서 종합해 보았다.

또한 예로서 pump shaft는 전체를 stainless steel로 제작하였으나 일부를 AISI1018강으로 대체하여 마찰압접하므로써 재료비 절감효과를 가져왔을뿐 아니라 탄소강의 사용으로 가공시간을 단축하여 생산성 향상을 가져왔다.

## 5. 맺음말

일반적으로 고상접합기술은 첨단소재의 접합에 많이 적용되고 있다. 철강재료는 첨단소재로서의 그 기능이 제한되어 있다. 그러나 고상접합으로 고품질, 고정밀도의 접합부를 제조할 수 있으므로 철강재료의 내마모, 내식성 표면개질 또는 clad강의 제조등으로 철강재료를 고부가가치화 할 수 있다. 그러므로 이러한 기술의 적용 범위 확대에 철강재료의 수요 증대를 기대할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Welding hand book, Vol.2, American Welding Society, 1991
2. 김숙환외, 철강 및 신소재 접합기술개발(III), 산업과학기술연구소, 1990
3. N. F. Kazakov, Diffusion Bonding of Materials, Mir Publishers, Moscow, 1981
4. N. F. Kazakov, Diffusion Bonding in Vacuum, Mashinostroyeniye, Moscow, 1968
5. G.V.Konyushkov et al(ed.), Diffusion Bonding in Electronics, Energiya, Moscow, 1974
6. 김우열외, 304 스텐레스강과 구조용탄소강과의 천이 액상확산접합에 관한 연구, 대한용접학회지, 제9권 제4호, p28, 1991
6. 김숙환외, 제철소 설비 안정성 향상 연구, Part III. 보수접합기술, 산업과학기술연구소, 1992