

브레이징을 이용한 Ti/STS321L 접합체의 미세조직과 기계적 특성의 변화

구자명* · 정우주** · 한범석*** · 권상철*** · 정승부*

*성균관대학교 신소재공학과

**大阪大學 環境工學科

***자동차부품연구원

****한국원자력연구소

Variations of Micro-Structures and Mechanical Properties of Ti/STS321L Joint Using Brazing Method

Ja-Myeong Koo*, Woo-Ju Jeong**, Beom-Suk Han***, Sang-Cheol Kwon*** and Seung-Boo Jung*

* School of Advanced Materials Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, Korea

** Graduate school of engineering, Osaka university, Suita, Osaka 565-0871, Japan

*** Korea Automotive Technology Institute, Chon-an 333-910, Korea

****Korea Atomic Energy Research Institute, Dae-jon 305-600, Korea

Abstract

This study investigated variations of micro-structures and mechanical properties of Ti / STS321L joint with various bonding temperature and time using brazing method. According to increasing bonding temperature and time, it was observed that the thickness of their reaction layer increased due to increasing diffusion rate and time. From the EPMA results, Ti diffused to the STS321L substrate according to increasing bonding time to 30min. Hardness of bonded interface increased with increasing bonding temperature and time due to increasing their oxides and intermetallic compounds. XRD data indicated that Ag, Ag-Ti intermetallic compounds, TiAg and Ti₃Ag and titanium oxide, TiO₂ were formed in interface. In tensile test, it was found that the tensile strength had a maximum value at the bonding temperature of 900°C and time of 5min, and tensile strength decreased over bonding time of 5min. The critical thickness of intermetallic compounds was observed to about 30 μ m, because of brittleness from their excessive intermetallic compounds and titanium oxide, and weakness from void.

(Received September 17, 2002)

Key Words : Brazing, Titanium, Stainless steel(321L), BAg-19, Ti-Ag intermetallic compound, Titanium oxide

1. 서 론

현대 산업사회가 점차 고도화됨에 따라, 생산물의 품질, 생산성과 더불어 생산 설비나 작업자의 안정성에도 관심을 가지게 되었다. 따라서 구조물의 안정성을 고려한 재질 선정의 개념도 고품질·다변화되고 있다. 최근에 이러한 요구에 부응하는 재료로서 Ti 및 Ti 합금에 대한 이용이 증가하는 추세이다. Ti는 고가이지만 높은

비강도와 해수, 암모니아 등에 대해서 백금에 필적할만한 우수한 내식성을 가지고 있는 것이 특징으로, 재료 수명을 고려한다면 훨씬 경제적이다. 따라서, 각종 군수, 화학, 발전소 및 항공 재료를 포함하여 패션, 스포츠, 생활용재 및 생체 재료로서 그 용도가 급격하게 증가되고 있다¹⁻⁶⁾. 스테인리스강은 크롬(Cr)에 의하여 형성된 얇고 연속적인 표면 산화피막에 의해 우수한 내식성을 갖게 되는데, 가공성, 내마모성, 내열성이 우수하여 그 적용분야가 매우 광범위한 재료이다. 특히

STS321은 티타늄을 탄소 함량의 5배 이상 첨가시킨 것으로 심한 부식성 상태의 용접물 및 450~850°C의 고온에서 안정하여 고온분위기의 각종 산업 및 시설에 적용되는 강이다^{1,7-8)}. 한편, 단일 재료로는 기계적 특성과 내식성을 동시에 만족하기가 어렵기 때문에, 내식성이 강한 재료와 고강도 철의 접합이 많은 분야에서 요구되고 있다. 하지만 탄소강은 탄소가 Ti과 반응하여 Ti-carbide을 계면에 형성하여 치환형 고용체의 확산을 방해하기 때문에 이러한 응용분야에 적절한 재료가 될 수 없다. 따라서 탄소함량을 줄인 스테인리스강이 하나의 대안으로 떠오르고 있다⁹⁾.

Ti에 대한 접합법으로는 불활성가스나 플럭스를 사용하여 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), 전자빔 용접(Electron Beam Welding), 레이저 용접, 그리고 브레이징 등의 접합방법이 연구되고 있다. GTAW의 경우 복잡한 정밀 부품의 접합이 어렵고, 전자빔과 레이저 용접의 경우 고가라는 단점이 있다. 일반적으로 브레이징의 경우 복잡한 형상의 접합이 가능하고, 반응층이 얇아서 양호한 접합이 가능한 것이 특징이나 아직 Ti의 접합에 대해서는 레이저나 전자빔 용접에 비해 양호한 접합이 보고되지 않고 있다. 이는 Ti의 브레이징 접합시 생성된 취약한 산화물과 금속간 화합물이 재료의 강도를 떨어뜨리는 경우가 많기 때문이다. 따라서, Ti 브레이징 접합시에는 최적의 접합 온도, 시간, 그리고 삽입금속의 선택을 통해 접합 계면에 형성된 화합물의 제어가 중요하다¹⁰⁻¹³⁾.

일반적으로 Ti의 접합에 사용되는 삽입금속은 순 Ag나 Cu, Ni, Mg, Li 등을 첨가한 Ag 합금이다. 순 Ag의 경우 우수한 젖음성을 나타내고 있으나, 강도가 낮고 내식성이 저하되며, 높은 접합온도가 문제가 되고 있다. 또한 최근 고온강도와 내식성이 우수한 Ti-Cu-Ni, Ti-Cu-Ni-B계 합금의 삽입금속이 개발되어 상용화되어 있으나, 전반적으로 높은 용점을 가지고 있는 Ti-Cu-Ni계 삽입금속의 사용에 따른 접합온도 상승과 모재의 결정립 조대화 등이 문제점으로 지적되고 있다¹⁾.

본 연구에서는 내식성이 우수한 Ti와 STS321L의 접합기술이 적용되는 원자력, 수력발전소용 부품제작에 있어서 브레이징에 의한 접합현상을 파악하는 것이 중요하므로 사전연구를 토대로, Ti와 STS321L의 두 이종금속을 Ag-Cu 계열의 삽입금속(Lithobrazze 925, BAg-19, Lucas-Milhaupt, Inc.)을 사용하여 아르곤 분위기에서 접합온도와 시간을 달리하여 브레이징한 후, 최적의 접합공정개발과 함께 접합조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성의 변화에 관한 연구를 하였다. 삽입금속으로 사용된 BAg-19는 스테인리스강을 수소나 불활성 분위기에서 무플럭스 브레이징 접합하기 위해 개발된 Ag에 Cu와 Li을 첨가한 합금으로서, Ti과 STS321L의 접합 온도를 낮추기 위하여 사용되었다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에서 사용된 모재는 순도 99.4%인 Ti(grade 2)와 STS321L이며, 삽입금속으로는 두께가 50 μ m이고 Ag-Cu 계열의 BAg-19를 사용하였다. Table 1에 이들의 조성을 나타내었다. 모재 시험편의 형상은 조직관찰용 시편은 ϕ 10 \times 15mm, 인장시험용 시편은 Fig. 1과 같이 제작하였다.

2.2 실험방법

접합시료는 피접합면을 #1,200번까지 연마하고 삽입금속과 함께 에틸알코올로 초음파 세척한 후, 접합시료

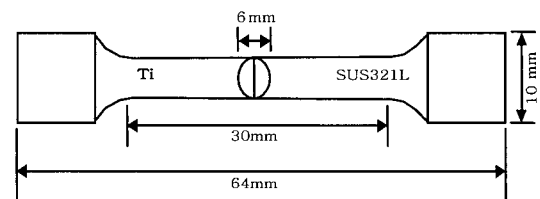


Fig. 1 Schematic diagram of tensile test specimen

Table 1 Chemical compositions of base metals and insert metal

Base metal	Chemical composition, wt%									
	Fe	N	C	H	O	Cr	Ni	Mn	Si	Ti
Ti	0.30	0.03	0.10	0.015	0.25					Bal.
SUS321L	Bal.		~0.03			17~19	9~12	~2	~1	~0.15
Insert metal	Chemical composition, wt%									
	Ag	Cu	Li							
BAg-19	92.5	7.3	0.2							

의 사이에 삽입금속을 삽입한 후 진공고주파접합장치로 접합하였다.

먼저, 접합온도를 결정하기 위하여 퍼짐성 시험을 실시하였다. STS321L의 모재 위에 직경 6mm인 BAg-19 삽입금속을 올려놓고, Fig. 2(a)와 같이 시험온도를 830, 850, 870, 900±2℃까지 2분만에 승온하여 2분간 유지한 후 공냉하였다. 퍼짐성은 식 1의 계산식을 이용하여 평가하였다

$$S = \frac{A_f - A_0}{A_0} \quad (1)$$

여기에서, S는 퍼짐률(spreading rate), A_f 는 용융 후의 삽입금속의 면적, A_0 는 용융 전의 삽입금속의 면적을 의미한다. 한편 Ti의 경우, 확산 접합시 진공 중에서 가열하면 산소의 고용에 의한 표면산화피막의 분해로 인하여 500℃를 정점으로 산화피막은 분해되고 접착저항은 큰 폭으로 감소하여 접합이 용이하게 되기 때문에, 퍼짐성 실험을 실시하지 않았다¹⁾.

에틸알코올로 초음파 세척된 Ti/STS321L과 BAg-19 삽입금속은 접합온도 870, 900, 930±2℃와 접합시간 3, 5, 10, 30min의 조건으로 브레이징 접합을 실시하였다. 접합시편의 조립은 Ti를 상부, STS321L을 하부에 두었다. 접합은 대기가스 성분에 대한 높은 고용도로 인한 산화나 내부 기공 발생을 최소화하기 위하여 3.7×10⁻²Pa(2.8×10⁻⁴torr)로 진공한 후 2.7×10⁴Pa

(20cmHg)까지 아르곤 가스를 주입하여, 아르곤분위기 하에서 실시하였다. 접합온도로 승온하기 전과 접합 후 냉각하는 중에 안정화 구간을 두어 열충격 완화 및 균질한 접합부를 유도하였다. 접합과정에 대한 온도 제어는 Fig. 2(b)에 나타내었다.

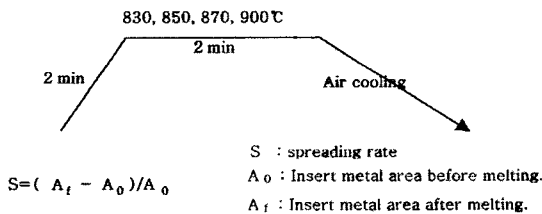
접합부의 미세조직은 10% Nital과 H₂O₂:HNO₃ (1:1)으로 각각 에칭한 후, 광학현미경(optical microscope)과 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)을 사용하여 관찰하였고, EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)를 통하여 계면에 생성된 상의 성분을 분석하였으며, EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)로 Ti, Ag, Cu, Fe, Ni, Cr의 원소들의 접합시간에 따른 계면의 선분석과 면분석을 실시하였다. EPMA 분석시에는 용질원자의 용출을 최소화하기 위하여 10% Nital로 1분간 에칭하였다. 또한, XRD(X-ray Diffractometer)를 사용하여 접합부 근방에 생성된 화합물의 상을 동정하였고, 이때, Co를 타겟으로 사용하였다.

경도시험은 접합면을 수직으로 절단하여 하중 0.98N, 유지시간 10초의 조건 하에서 접합계면을 20 μm간격으로 마이크로 비커스 경도기(micro vickers hardness tester)를 사용하여 측정하였고, 접합부의 강도를 측정하기 위하여 cross head speed를 0.5 mm/min로 하여 인장시험을 행하였다.

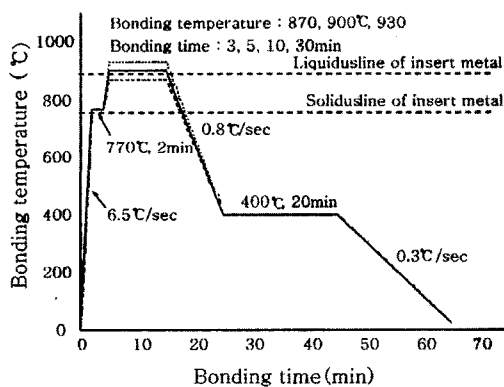
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 퍼짐성시험 결과

접합온도가 증가함에 따라 Ti와 STS321L의 열팽창 계수 차에 의한 열응력 증가와 모재의 기체와의 반응성 증가를 최소화하기 위하여 본 실험에서는 퍼짐성이 비교적 양호한 최적의 접합 온도를 설정하기 위하여 퍼짐성 시험을 실시하였다. Fig. 3은 퍼짐성 시험의 결과를 보여준다. 테스트 전의 BAg-19 삽입금속의 면적은 28.26mm²로 측정되었으며, 830, 850, 870, 900℃에서 퍼짐성시험 후 삽입금속의 면적은 각각 29.67, 29.48, 45.34, 48.49mm²로 측정되었다. 이에 따라 퍼짐률은 각각 5, 4.3, 60.5, 71.6%로 나타났다. BAg-19의 고상선과 액상선은 각각 760, 890℃인데, 시험온도가 830과 850℃에서는 삽입금속의 젖음이 거의 이루어지지 않았다. 시험 온도가 증가할수록 퍼짐성이 증가하여, 시험온도 870℃ 이상에서는 비교적 우수한 퍼짐성이 나타나는 것을 관찰하였다. 따라서, 본 실험에서는 젖음성 실험 결과를 바탕으로, 870, 900 그리고 930℃를 접합온도로 설정하였다.



(a) Temperature profile of spreading test



(b) Temperature profile of bonding test

Fig. 2 Temperature profiles of spreading and bonding test

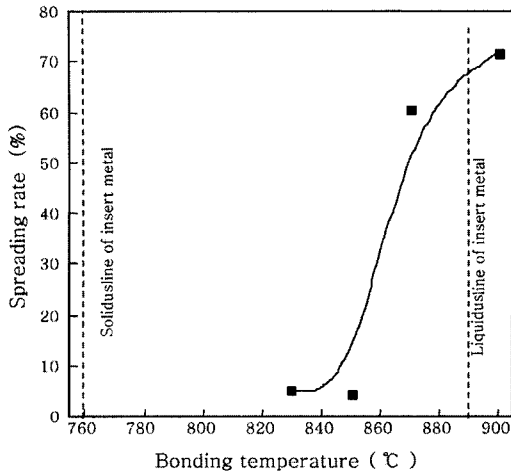


Fig. 3 Results of spreadability test

3.2 접합부의 미세조직 변화

Fig. 4는 BAg-19 삽입금속을 사용하여 Ti/STS321L 이종재료를 접합온도 900°C에서 접합시간 3, 5, 10, 30분에 따른 접합 계면 조직의 변화를 나타낸 주사전 자현미경 사진이다. 접합시간 3분일 경우에는 접합 계면에 Ti-Ag계열의 구상과 침상 조직이 관찰되었는데, 접합시간이 증가할수록 Ti쪽으로 확산해 나감이 관찰되었다. 접합온도 900°C, 접합시간 5분의 조건에서 브레이징 접합된 접합 계면에 형성된 상을 EDS로 분석한 결과, 계면에는 크게 두 가지 상이 석출됨이 관찰되었다. Ti 모재 쪽에 생성된 구상은 EDS 분석결과 Ag-rich로 관찰되었는데, 이는 Ag가 Ti쪽으로 확산하다가 정출된 것으로 판단된다. 그리고, 계면에 형성된 침상은 Ti-Ag계 금속간화합물로 관찰되었는데, 이는 계면으로 확산해 온 Ti와 삽입금속의 Ag가 반응하여 형성된 것으로 사료된다. 인장시험 후 파면 분석 결과, 파면의 딥플(dimple)에 앞서 언급한 구상의 정출된

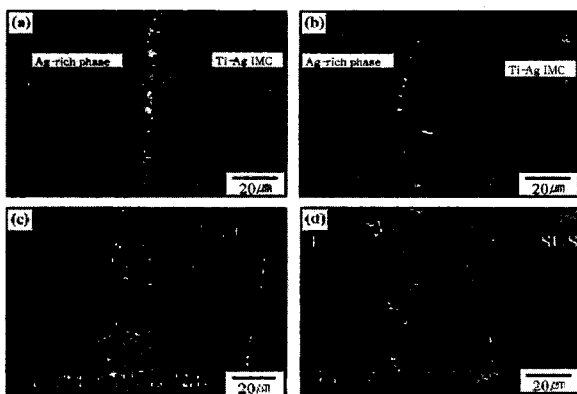


Fig. 4 SEM micrographs of joint interfaces at the bonding temperature of 900°C with various bonding times : (a) 3min, (b) 5min, (c) 10 min, (d) 30min

Ag-rich가 발견되었고, 파괴 시작점(crack initial)으로 작용했을 것으로 사료된다.

Fig. 5는 접합온도 900°C에서 각각 3분, 30분동안 접합한 시편의 계면을 EPMA로 면분석 결과를 나타낸 사진이다. 접합시간 3분의 Ti의 면분석 결과 Ti가 STS와 삽입금속 사이의 계면까지 확산해 간 것을 알 수 있었으며, 접합시간 30분의 사진에서는 Ti가 STS 모재까지 확산이동한 것을 관찰하였다. 또한, STS 모재의 Fe역시 접합계면으로 확산하는 것을 관찰하였다.

Fig. 6은 EPMA를 통하여 접합온도 900°C에서 3분과 30분동안 브레이징한 접합부의 선분석 결과를 나타낸 사진이다. Fig. 5와 6에서 알 수 있는 바와 같이, 접합계면에 발생한 반응층은 접합시간이 증가함에 따라서 증가함을 알 수 있었다. 이러한 반응층의 증가요인은 삽입금속의 성분원소인 Ag 및 Cu가 모재로 확산 이동하고, 모재의 Ti가 접합계면으로 확산 이동하여 새로운 반응층을 형성하여 접합시간의 증가와 더불어 증가되었기 때문이라고 사료된다. Ag의 경우 Ti 모재 쪽

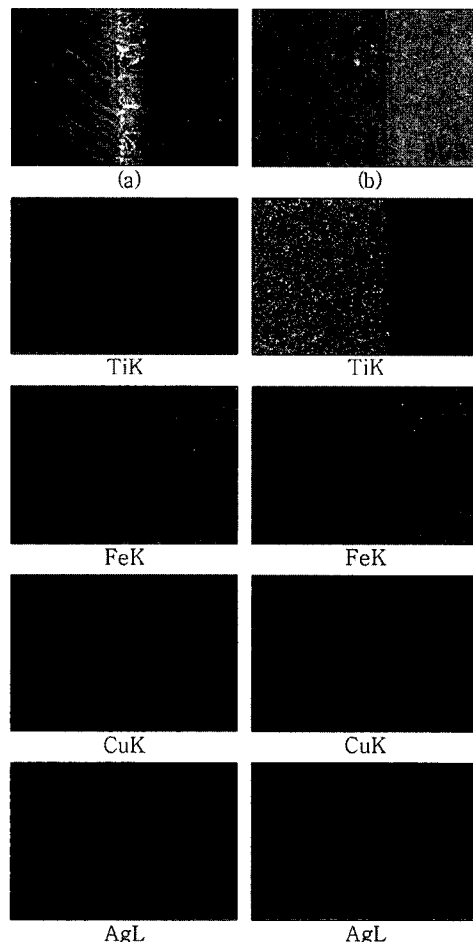


Fig. 5 EPMA mapping results of Ti / SUS321L in interface jointed at 900°C with bonding time of (a) 3min, and (b) 30min.

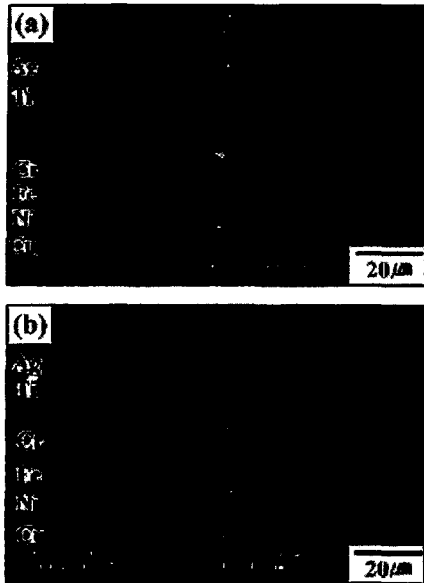


Fig. 6 EPMA line profiles of Ti / SUS321L jointed at 900°C with bonding time of (a) 3min and (b) 30min

으로 편중된 채로 양 모재로 확산 이동하였고, Cu의 경우 접합시간 양쪽 모재로 고르게 확산하였다.

Fig. 7은 접합시간에 따른 반응층 두께의 변화를 나타낸 결과이다. 앞서 설명한 바와 같이 접합시간이 증가함에 따라 반응층의 두께는 점차 증가하는 것이 관찰되었다. 모든 접합 조건의 시편에서 일부의 삽입금속이 접합 중에 접합면 밖으로 배출되었는데, 접합온도 870°C, 접합시간 3분의 시편의 경우 낮은 온도에서 짧은 시간 동안 접합하여 삽입금속이 밖으로 배출된 양이 상대적으로 작았기 때문에 반응층이 상대적으로 크게 측정된 것으로 판단된다.

Fig. 8은 900°C의 접합온도에서 3분과 30분 동안 접합한 접합계면을 XRD로 분석한 결과이다. 접합초기

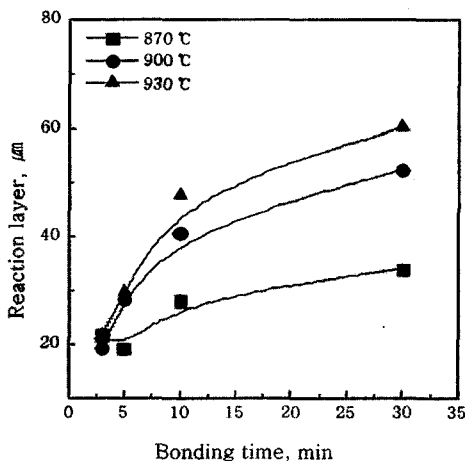


Fig. 7 Thickness variation of reaction layer with bonding temperatures and times

에는 Ti 및 TiAg가 관찰되었으나, 접합시간이 30min으로 증가함에 따라 Ti₃Ag, Ag 및 TiO₂와 같은 산화물도 계면에서 관찰되었다. 계면에 생성된 금속간화합물과 산화물은 계면의 경도를 증가시켰고, 인장강도의 변화에도 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다.

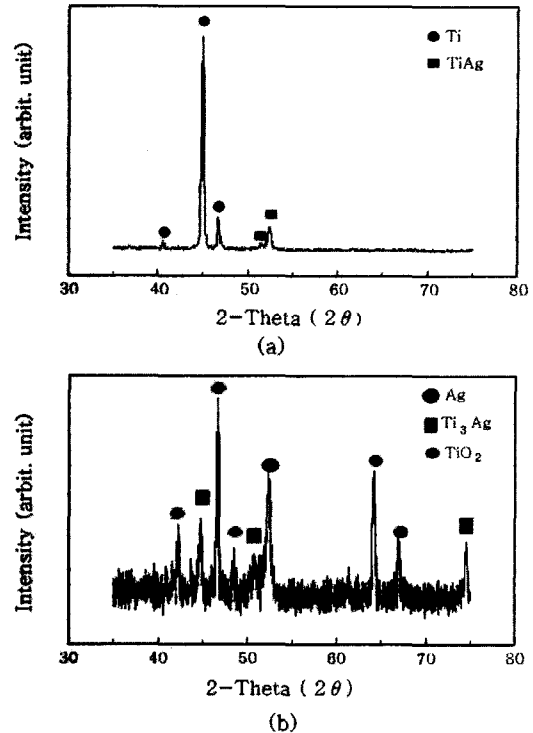


Fig. 8 XRD analysis of Ti / SUS321L joint bonded at 900°C with bonding time of (a) 3min and (b) 30min

3.3. 접합부의 기계적 특성

Fig. 9은 접합온도를 870와 930°C 그리고 접합시간은 3, 10, 30분의 조건에서 접합한 시편의 계면 중심으로부터 20µm간격으로 하중 0.98N을 주어 경도를 측정된 시험결과이다. 접합부의 경도값은 접합시간과 온도가 증가할수록, 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 Ti가 약 600°C이상의 고온에서 기체와의 양호한 반응성에 의한 산화와 고용도 증가에 의해서 접합부의 경도가 증가한 것으로 사료된다¹⁴⁾. Nagai¹⁵⁾의 연구에서는 산소, 질소 탄소의 함량과 경도의 비례 관계를 연구하였으며, 특히 산소의 영향이 가장 크며, 인성의 열화를 함께 초래한다고 보고되었다. 또한, 접합시간이 증가할수록 접합부에서 TiAg 및 Ti₃Ag라는 금속간 화합물이 생성되어 접합부의 경도값이 증가한 것으로 사료된다. 한편, 접합 온도가 증가할수록 접합부의 경도값이 증가하였는데, 이는 온도가 증가함에 따라 모재 및 삽입금속의 원소들의 확산속도 증가와 냉각속도 지

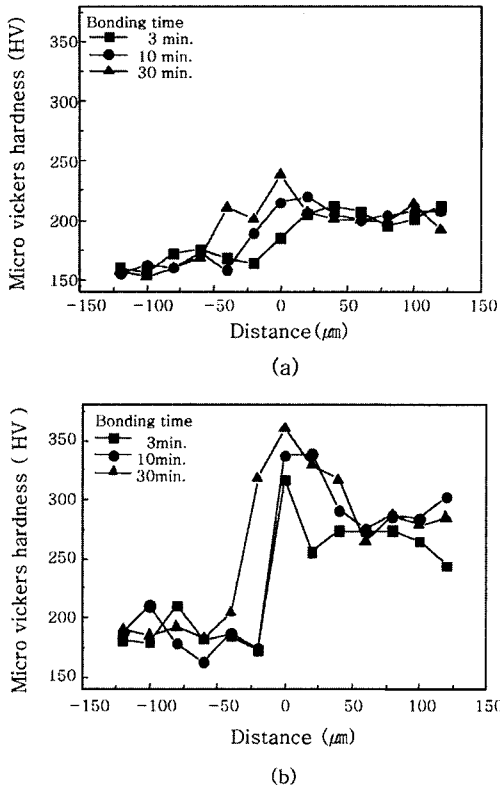


Fig. 9 Hardness variations on reaction layer with bonding time of 3, 10 and 30min at bonding temperature of (a) 870 and (b) 930°C

연에 의하여 확산이 가능한 시간이 증가하여 금속간 화합물 및 산화물의 형성이 더욱 용이해졌기 때문이라고 사료된다.

Fig. 10는 870, 900, 930°C의 접합온도와 3, 5, 10, 30분의 접합시간 조건에서 접합한 후 인장시험한 결과이다. 최대 접합강도를 나타낸 조건은 접합온도 900°C, 접합시간 5분에서 접합한 시편이었다. 접합시

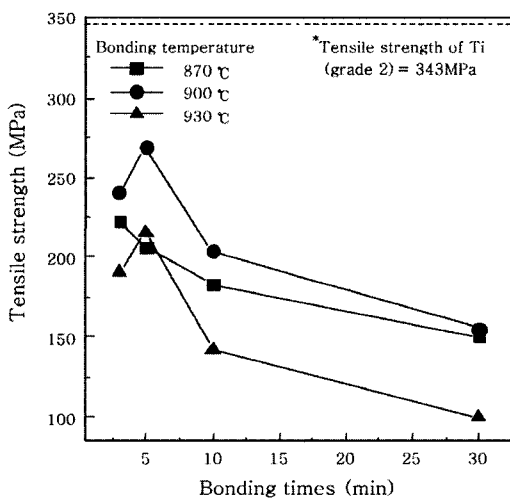


Fig. 10 Variation of tensile strength with bonding times and temperatures.

간이 5분 이상 증가함에 따라 인장강도 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 접합시간이 증가함에 따라 모재 및 삽입금속의 원소들이 서로 확산하여 과잉의 TiAg, Ti₃Ag의 금속간 화합물 및 TiO₂와 같은 산화물이 계면에 형성되어 접합부의 인장강도 값을 저하시키는 요인으로 작용하였기 때문으로 사료된다. 또한, Fig. 7의 조건에 따른 반응층의 성장 결과와 종합해 볼 때, 반응층이 약 30μm 이상 증가하였을 때 접합부의 기계적 특성이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 4(d), 6(b)의 접합시간이 30분인 시편의 경우, 계면에 기공이 관찰되었다. 생성된 기공은 접합 면적을 감소시키고, 응력집중부로 작용되었을 것으로 사료된다. 접합 온도 930°C 시편의 경우, 900°C의 시편보다 강도값의 감소를 관찰하였다. 이는 접합온도의 증가와 이에 따른 냉각시간의 지연으로 인하여, 원자들의 확산속도의 증가와 상대적으로 반응물이 생성될 시간이 길어졌기 때문에, 계면의 취약과 잔류응력 증가가 접합강도에 영향을 끼쳤다고 판단된다¹⁶⁾.

Fig. 11은 900°C/10min의 조건에서 접합한 시편의 인장시험 후 파면사진이다. 전체적으로 Ti와 삽입금속 사이의 계면에서 파단이 일어났으며, 모든 시편에서 취성파괴가 발생하였다. Ag-rich 상과 기공이 파괴 시작으로 작용했을 것으로 판단된다.

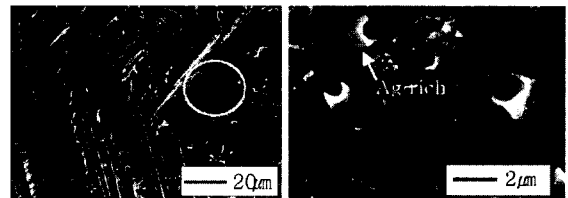


Fig. 11 Fracture surface at bonding temperature of 900°C and time of 10min : (a) ×1000, (b) ×10000

Fig. 12은 인장강도와 반응층 두께의 관계를 나타낸다. 각각의 접합온도에서 임계 반응층 두께가 존재함을 관찰하였으며, 전단강도는 그 두께 이상에서는 감소함을 알 수 있었다. 이 그림에서 주목할 만한 점은, 900°C에서 접합한 시편은 870과 930°C에서 접합한 시편과 비교해 볼 때, 동일한 두께의 반응층이 형성되어도 좀 더 높은 기계적 특성을 나타내었다. 즉, Ti/SUS321L을 BAg-19 삽입금속을 이용해서 브레이징 접합하는 경우, 900°C에서 접합하는 것이 가장 높은 인장강도와 신뢰성이 높은 접합계면을 가질 수 있다는 것을 알 수 있었다. Fig. 13는 870°C/5분에서 접합한 접합계면조직 사진이다. 870°C의 접합 온도는 Ti의 변태 온도(882°C)이하의 온도이기 때문에, 확산속도가 상대적으로 느리다¹⁴⁾. 따라서, Ag가 Ti와 금속간화합물을 형성

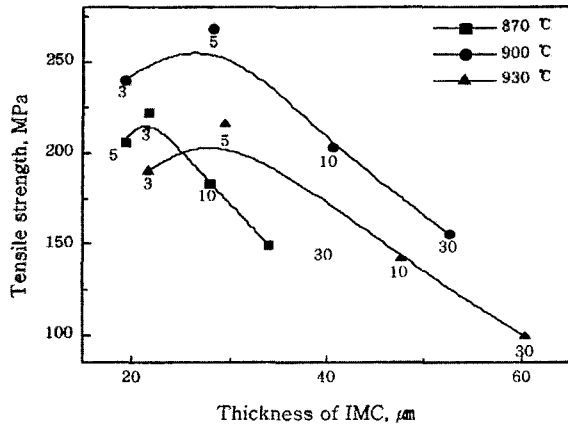


Fig. 12 Relation between thickness of intermetallic compounds and tensile strength. (The number written below respective data points indicates bonding time.)

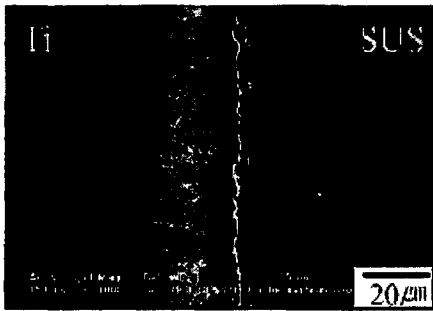


Fig. 13 SEM micrographs of joint interfaces at bonding temperature of 870°C and time of 5min

하지 못하고, 층을 형성하기 때문에 인장강도 값이 낮아진 것으로 판단된다. 그리고, 접합 온도 930°C의 강도 저하는, 기체의 고용도에 따라 Ti의 기계적 특성의 변화가 크게 변화되는데, 상대적으로 접합온도가 높아 다른 조건보다 기체의 고용도 증가 및 TiO₂와 같은 취약한 반응물이 생성되기 쉬운 조건이기 때문으로 판단된다^{1,15)}.

접합온도와 접합 시간에 관계없이 인장시험 후 파괴 형태는 모두 접합계면에서 파괴가 일어났고 모재 파단은 발생하지 않았다. 이것은 순수 Ti(grade 2) 경우의 인장강도값이 343MPa이며¹⁷⁾, 본 연구에서 얻어진 접합체(Ti/STS321L)의 최대인장강도는 268MPa로 모재의 약 80% 정도에 해당하는 인장강도 값으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 Ti와 STS321L을 BAg-19를 삽입금속으로 사용하여 3.7×10^{-2} Pa까지 진공한 후 아르곤

가스를 주입하여 접합온도 870, 900, 930°C, 접합시간 3, 5, 10, 30min에서 브레이징한 후 접합계면의 미세조직을 관찰하고 경도와 인장강도를 측정하고 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 접합온도와 접합시간이 증가할수록 Ti/STS321L의 반응층은 Ti와 Ag의 확산으로 인해 증가하였으며, 접합시간이 길어질수록 반응층 내에 Ti-Ag계열의 금속간화합물과 TiO₂와 같은 산화물 및 기공이 생성됨을 관찰하였다.

2) 접합부의 경도는 Ti와 Ag의 확산으로 인하여, Ti-Ag 계열의 금속간화합물과 TiO₂와 같은 산화물의 생성으로 인해 증가하였다.

3) 접합부의 인장강도는 900°C, 5분의 조건에서 268MPa로 최대 강도를 나타내었으며, 이는 Ti(grade 2) 모재 강도의 약 80% 값에 해당된다. 모든 인장 시험편은 접합 계면에서 파단이 발생하였다.

4) 접합부의 인장강도는 접합시간이 5분 이상으로 길어짐에 따라 감소하였으며, 이는 반응층 내의 과잉의 산화물이나 금속간화합물의 생성과 계면에 기공의 형성으로 인하여 감소하였다고 사료된다. Ti-Ag계의 침상의 금속간화합물은 접합초기의 인장강도를 증가시켰다가, 약 30μm 두께 이상으로 성장하였을 때 접합부의 인장강도를 감소시켰다. 또한, 파면 분석을 통해 딩플에 정출된 Ag-rich가 관찰되었으며, 30min에서 접합한 시편에서 발견된 기공과 함께 응력집중부로 작용되었을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회 : 용접·접합 편람, 대한용접학회, (1998), 143-169, 278-287 (in Korean)
2. 이종문 : 금속리사이클링공학, 세종출판사, (1997), 267-273 (in Korean)
3. 허선무 : Military Applications of Titanium (1), Trends in Metals & Materials Engineering, 13-1(2000), 96-105
4. Peng He, Jiuhai Zhang, Ronglin Zhou, and Xiaoqiang Li : Diffusion Bonding Technology of a Titanium Alloy to a Stainless Steel Web with an Ni Interlayer, Materials Characterization, 43(1999), 287-292
5. Qi Yunlian, Deng Ju, Hong Quan and Zeng Liying : Electron Beam Welding, Laser Beam Welding and Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Sheet, Materials Science and Engineering A, 280(2000), 177-181
6. S. Lathabai, B.L. Jarvis, K.J. Barton : Comparison of Keyhole and Conventional Gas Tungsten Arc Welds in Commercially Pure Titanium, Materials Science and Engineering A, 299(2001), 81-93
7. A. J. Sedriks : Corrosion of Stainless Steels, John Wiley & Sons Inc., (1996), 14

8. 한봉희 역: (조직과 성질을 주로한) 금속재료, 회중당, (1988), 292 (in Korean)
9. B. Aleman, I. Gutierrez and J.J. Urcola : The Use of Kirkendall Effect for Calculating Intrinsic Diffusion Coefficients in a 316L/Ti6242 Diffusion Bonded Couple, Scripta Materialia, Elsevier Science Ltd, **36-5**(1997), 509-515
10. R.R. Wang and G.E. Welsch : Joining Titanium Materials with Tungsten Inert Gas Welding, Laser Welding, and Infrared Brazing, The Journal of Prosthetic Dentistry, November(1995), 521-530
11. H. W. Anselm Wiskott et al. : Microstructures of Brazings and Welds Using Grad 2 Commercially Pure Titanium, The International Journal of Prosthodontics, **14-1**(2001), 40-47
12. W.Y. Kim, B. H. Jung and S. Y. Lee : A Characteristic of Microstructures in Bonding Interlayer of Brazed Titanium to Copper, Journal of KWS, **13-3**(1995), 106-115 (in Korean)
13. P.R.C. Camargo et al. : Microstructural Characterization of Titanium to 304 Stainless Steel Brazed Joints, Welding Journal, **72-12**(1993), 537-544
14. 이지환, 이정중, 김병일, 배차현 : 비철금속재료, 원창출판사, (1993), 428-433 (in Korean)
15. M. Nagai et al. : "Titanium' 80", AIME, **2**(1981), 1109
16. Jeong-Heon Kim, Jeong-Tag Woo and Yeon-Chul Yoo : A Study of Interfacial Structure and Bond Strength of Si₃N₄/Ni-Cr Steel Joint, Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, **32-2** (1994), 224-232 (in Korean)
17. William H. Cubberly et al. : vol. 3. Properties and selection stainless steels, tool materials and special-purpose metals, Metals Handbook 9th Edition, American Society for Metals, (1978), 372-412