

일체형원자로 증기발생기용 Ti합금과 스테인레스강
이종금속 접합부의 브레이징

Brazing of Ti and Stainless Steel Dissimilar Metal Joint
for SMART Steam Generator

권상철, 임혁준, 김성호, 김용완, 김종인

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 일체형원자로 증기발생기용 Ti합금/스테인레스강 이종금속의 브레이징 접합 기술을 최적화하고, 접합부의 접합강도에 영향을 주는 접합계면에서의 반응에 관하여 검토 하는데 목적을 두었다. 진공전기가열로에서 두 종류의 은계 용가재를 사용하여 Ti 합금과 스테인레스강을 접합시켰다. 인장시편을 사용하여 가열조건에 따른 접합강도를 측정하여 최적조건을 구하였고, 실제 사용될 이종금속 접합부를 그와 같은 조건에서 접합시켰다. 접합강도의 관점에서 BAg-19 용가재가 BVAg-30보다 좋았다. 용가재의 용융온도에서부터 가열속도를 최대한 빠르게 하고, 940℃에서 강제 냉각시켰을 때, 311MPa까지 도달하였다. 접합강도를 향상시키기 위해서는 접합계면에서 금속간화합물의 생성을 적게 하기 위하여 가능 한 가열속도를 빠르게 하고, 접합온도에서 유지시간을 작게 하여야 한다.

Abstract

The purposes of this study were first to optimize the brazing technology of Ti alloy/stainless steel dissimilar joint for the steam generator of System Integrated Modular Advanced Reactor(SMART), and second to investigate the reaction at a joint interface affecting the brazed joint strength. The joint between Ti alloy and stainless steel was brazed in a vacuum electric furnace with two kinds of silver brazing filler metals. Optimal brazing conditions were obtained through measuring joint tensile strength at each heating condition with brazed tensile test specimens. The real dissimilar metal joint of the steam generator was brazed according to the optimized brazing condition. From the joint strength point of view, brazed joints using BAg-19

filler metal was superior compared to the joints prepared with BVAg-30 filler metal. When the specimens were heated as fast as possible from the melting temperature of filler metal, reached 940°C and cooled with Ar gas, the joint tensile strength was 311 MPa. To maximize the joint strength, the heating rate must be fast and the brazing time must be short such that the intermetallics formation is minimized.

1. 서론

브레이징 기술은 기원전 4000년경부터 사용되기 시작하여 현대에서는 전자산업, 항공산업 및 자동차산업 등 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 적용되고 있다. 일반 용접이 불가능한 부분에서의 접합과 대량 생산이 가능하기 때문에 오늘날에도 많은 연구가 진행되고 있다. 일체형원자로의 증기발생기 전열관 재료로서 Ti합금을 사용하게 됨으로써, 외부 배관 계통의 스텐레스강 튜브와 접합이 필요하다. 일반 용접 방법으로는 용접계면에서 취성의 금속간화합물의 생성으로 접합이 불가능하다[1]. 따라서 Ti합금과 스텐레스강의 적합한 이종금속 접합방법을 모색한 결과 브레이징을 선택하였다.

Ti합금은 내식성이 우수하기 때문에 화학공업분야에서 수요가 증가하고 있지만, 고가이기 때문에 적용범위가 제한되어 있다. 스텐레스강 또한 내식성이 우수하고 가격이 상대적으로 저렴하기 때문에 Ti합금과 스텐레스강을 접합하면 사용범위가 넓다. 일체형원자로 증기발생기의 브레이징 접합부는 Ti 합금 Gr. 9과 스텐레스강 321로 되어 있으며, 브레이징 접합을 하더라도 접합계면에서 Ti-Fe의 금속간화합물이 생성되어 접합강도는 모재의 강도에 도달하지 못한다. 따라서 Ti합금 튜브의 접합부는 숫나사, 스텐레스강 튜브의 접합부는 암나사로 하여 소켓이음을 하고 나사사이의 공극에는 용가재로 채워서 누설을 방지하도록 설계되었다. Ti합금 튜브를 숫나사로 스텐레스강 튜브를 암나사로 한 이유는 스텐레스강이 열팽창계수가 크기 때문에, 반대로 할 경우 브레이징 접합온도에서는 접합부의 간격이 좁게 되고 냉각중에 간격이 크게되어 접합부에 결함이 발생되기 때문이다.

Ti합금과 스텐레스강의 접합은 일반용접 이외에 폭접[2], hot-rolling[3], 마찰용접[4], 확산접합[5]등이 연구 개발되고 있다. 그러나 접합강도를 브레이징 접합강도 보다 향상시킬 수는 있지만 모재강도에는 도달하지 못하므로, 일체형원자로에서는 소켓이음을 적용하였다.

Ti합금과 스텐레스강의 브레이징에 관하여는 상당히 오래 전부터 시도되었으나[6-8] 아직 접합강도가 300MPa이상된 것은 보고되어 있지 않고, 브레이징기술에 관하여도 충분히 알려져 있지 않다. 용가재는 여러 가지를 시도한 자료가 있으나[6, 7, 9, 10], 본 연구에서는 BAg-19와 BVAg-30을 사용하여 비교하였다. 접합부의 나사사이의 간격을 AWS[11]에서 제안하는 0.05 mm 이내로 할 수 없으므로 용가재의 용융점과 응고점의 폭이 큰, 즉 공정조각에서 벗어난 조성이라야 용가재의 용융물이 공극을 채우기가 용이하므로 작업성이 좋다. 따라서 BVAg-19를 채택하고 공정조성에 가까운 즉 액상선온도와 고상선온도의 폭이 좁은 BVAg-30과 비교하여 보았다.

Ti합금은 산화가 잘 되기 때문에 진공로를 사용하였다. 금속가열은 전기유도로나 반사

로가 적당하지만 일체형원자로에서 사용될 접합용 시료의 구경이 4종류이기 때문에 각각에 맞는 것을 구하기가 용이하지 않아 전기로를 사용하였다.

2. 실험방법

2.1 재료

접합강도 측정용 시편은 Ti합금 Gr. 2와 스텐레스강 321을 사용하여 봉상형 시편을 그림 1과 같이 제작하였다. 증기발생기용 시료는 Ti합금 Gr. 9으로서 $\alpha + \beta$ 합금이고 Gr. 2는 α 합금으로 미세조직이 다르지만, 직경 10 mm의 Gr. 9 환봉은 구하기 어려워 Gr. 2 환봉으로 대신하였다. 증기발생기용 시료는 Gr. 9과 스텐레스강의 봉재를 사용하여 그림 2와 같이 제작하였다. 재료의 화학조성은 표 1과 같다.

용가재는 접합강도 시험편에는 Lucas-Milhaupt의 BAg-19와 BVAg-30, 두께 50 μ m의 박판을, 증기발생기용 시료에는 BAg-19, 직경 1mm의 선재를 고리모양으로 가공하여 사용하였다. 화학조성과 용융점 및 응고점은 표 2와 같다. 증기발생기용 시료는 용가재를 설치하기 위하여 그림 2과 같이 스텐레스강 튜브의 끝단에 주입구를 용접으로 부착시켰다.

2.2 전처리

접합강도 측정용 시편의 접합면은 사포지 #1200으로 연마하였고, 증기발생기용 시료는 기계가공한 상태 그대로 사용하였다.

스텐레스강과 용가재는 물과 아세톤으로 세척하고, Ti합금은 물, 아세톤으로 세척하고 표면의 산화층을 제거하기 위하여 40% HNO₃ + 2% HF + 58% H₂O 용액에 2분 정도 담근 후, 다시 물과 아세톤으로 각각 2분 정도 세척하여 잔류 용액을 제거 시켰다.

2.3 브레이징

인장시편은 시편사이에 용가재를 끼운 후, 그림 3과 같은 고정구를 사용하여 Ti봉이 위에, 스텐레스봉이 아래에 놓이도록 하였다. 증기발생기용 시료는 암수나사를 체결하고 역시 Ti튜브는 위에 스텐레스 튜브는 아래에 놓이도록 하고 용가재를 주입구에 끼워 넣었다.

가열은 프랑스 Vide Appareilles Scientifiques에서 제작한 진공전기가열로를 사용하였다. 진공확산 펌프가 부착되어 있고, 진공은 8×10^{-6} torr로 유지하였다. 단, 용가재의 용융온도에서는 1×10^{-5} torr까지 유지할 수 있었다. 가열속도를 10°C/분으로 하고, 브레이징온도에서는 Ar 가스를 사용하여 400°C까지는 18°C/분으로 이후 실온까지는 7°C/분으로 냉각시켰다. 브레이징 온도를 BVAg-30의 경우에는 850°C에서 20°C간격으로 910°C까지, BAg-19의 경우에는 880°C에서 20°C간격으로 960°C까지 각각의 유지시간에 따른 접합강도를 비교하였다.

2.3 측정 및 분석

접합강도 측정은 Instron 인장시험기에서 cross-head speed를 0.5 mm/분으로, full load scale을 2 ton으로 하여 파괴시의 강도를 구하였다. 파단면은 EDS 분석기가 장착된

JEOL JSM-6500 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 분석하였다.

증기발생기용 시료는 접합강도 측정에서 얻은 최적 브레이징 조건을 적용하여 접합시킨 후, 튜브의 길이 방향으로 절단하여 접합계면을 관찰하였다. 접합계면을 연마한 후, 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 결함을 관찰하고, 접합계면의 반응층을 성분분석 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합강도

브레이징온도에서 4분간 가열 하였을 때, 온도별 접합강도 측정 결과는 그림 4와 같다. BAg-19가 BVAg-30보다 용융점이 높아 최고 강도의 온도가 더 높게 나타났다. BVAg-30은 868℃에서 199MPa이고 BAg-19는 844℃에서 274MPa이다. BVAg-30은 850℃에서 870℃까지 접합강도가 급히 상승하고 이후 접합강도를 어느 정도 유지하는데 반하여, BAg-19의 경우에는 880에서 940℃까지 서서히 증가하다가 이후 급격히 감소한다. 두 용가재 모두 액상선 온도에서 약 50℃ 높은 온도에서 접합강도가 최고이다. Peaslee[9]는 Ti합금과 스텐레스강의 브레이징에서 BVAg-30을 추천하였지만 BAg-19가 BVAg-30보다 접합강도면에서 좋음을 알 수 있다. 일반적으로 Ag계 용가재는 스텐레스강에 대한 젖음성이 좋지 않다. BAg-19는 Li를 첨가하여 젖음성을 향상시킨 용가재이기 때문에 접합강도가 좋은 것으로 사료된다. BAg-19를 사용하여 940℃에서 유지시간에 따른 접합 강도는 그림 4와 같다. 유지시간이 짧을수록 접합강도가 크며 4분 정도까지는 큰 차이가 없고 그 이후 급히 감소한다. 940℃에 도달 후 즉시 냉각시켰을 때 접합강도는 311MPa이다. 브레이징 온도에서 유지시간이 길면 그만큼 금속간화합물이 많이 생성되므로 브레이징 시간이 짧을수록 좋음을 알 수 있다. 그러나 시편의 표면과 중심사이에 온도 차이가 있기 때문에 940℃에 도달하더라도 시편의 온도가 균일하게 될려면 시간이 필요하므로 4분 정도 유지하더라도 접합강도는 크게 감소하지 않는다.

3.2 파단면 분석

BVAg-30과 BAg-19를 사용하여 브레이징 온도에서 4분간 유지 후, 접합강도를 측정한 스텐레스강 접합면의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 그림 5와 같다. BVAg-30으로 852℃에서 접합시킨 경우 파면의 중앙부는 접합이 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 이것은 스텐레스강이 용가재에 대한 젖음성이 좋지 않음을 보여 준다. 상대적으로 868℃에서 접합시킨 시편은 접합이 거의 이루어지긴 했으나, 일부 취성파단이 일어났음을 알 수 있다. 반면에 BAg-19로 접합시킨 시편에서는 모두 용가재가 전 계면에서 젖었음을 알 수 있다. 그러나 960℃의 경우 우하단에 취성 파단이 있음을 알 수 있다. 이것은 브레이징 온도가 높아서 금속간화합물이 많이 생성되어 스텐레스강과의 접합면에서 파단이 발생하였음을 알 수 있다. 각 파면의 EDS로 성분분석한 결과는 표 3과 같다. BVAg-30, 852℃의 취성 영역은 스텐레스강의 조성으로 용가재에 의한 접합이 전혀 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 연성영역에서는 용가재 성분 중에서 Ag는 나타나지 않고, Cu와 Pd 성분이 검출되었다. Ti이 상당량 검출되고 있기 때문에 TiFe의 금속간화합물이 존재할 가능성이 있다. 869℃에서는 취성 영역에서 852℃보다 Ti이 많이 검출되고

있고 Cr 또한 많은 양이 검출되고 있다. 하지만 스텐레스강의 조성이 거의 유지되고 있다. 연성 영역에서는 Fe보다 Ti이 더 많이 검출되는 것으로 보아 스텐레스강의 표면이 아닌 반응층에서 파단이 발생하였음을 알 수 있다. BAg-19, 944°C의 취성 영역에서는 Ag가 검출되지만 아주 적은 양이고 Cu가 검출된다. Ti가 상당량 검출되는 것은 용가재를 통하여 확산되어 스텐레스강의 표면에서 Fe와 반응하기 때문이다. 연성 영역에서는 취성 영역보다 Ti이 많이 검출되지만 Ag가 많이 검출되므로 스텐레스강 표면보다 접합계면의 중앙의 용가재 부분에서 파단이 발생한 것으로 보인다. 960°C에서는 944°C보다 취성영역과 연성 영역에서 Ti이 상당량 검출되고 있다. 이것은 온도가 높기 때문에 그만큼 TiFe 또는 TiFe₂의 금속간화합물이 많이 생성된 것으로 보인다. Ag역시 검출되고 있으나 944°C 보다 적게 검출된다. Cu도 많이 검출되고 있는데 Cu역시 Ti와 Ti₂Cu의 금속간 화합물을 형성한다. 그러나 Ti₂Cu는 Ti-Fe의 금속간화합물에 비하여 접합강도를 크게 저하시키는 것은 아닌 것으로 알려져 있다.

3.3 증기발생기용 시료

증기발생기용 시료를 접합강도 시험 결과에 따라 BAg-19를 사용하여 940°C까지 가열 후, 냉각시킨 결과 Ti합금과 스텐레스강 접합부 전 계면에서 결함이 없이 접합이 가능하였다. 하지만 용가재가 접합부의 하단부로 누설되는 현상이 발생하였다. 따라서 용가재의 주입량을 원래 계산한 것보다 많게 하여야 주입구에서 용가재가 부족되는 현상을 방지할 수 있었다. 940°C 이하에서는 브레이징 온도에서 유지시간이 길지 않으면 누설되는 현상을 방지할 수 있었다. 시료의 접합전 상태와 접합후 길이 방향으로 절단한 모양은 그림 6 (a)와 같다. 용가재의 양이 부족할 때 접합부 하단으로 누설이 발생할 경우 낮은 온도에서는 그림 6(b)와 같이 스텐레스 튜브를 따라 아래로 용가재가 흐르지 않고, Ti합금 튜브를 따라 위로 올라가서 응고한다. 이것은 스텐레스강보다 Ti합금이 젖음성이 좋기 때문이다. 그러나 940°C에서는 스텐레스 튜브를 타고 아래로 흘러 내렸다. 이것은 스텐레스강의 젖음성은 좋지 않고, 용가재의 용융물의 유동성이 커져 퍼짐성이 좋게 됨으로써 Ti합금과 스텐레스강 사이의 접합부 간격이 크기 때문에 표면장력에 비하여 중력의 영향이 커져 흘러내리는 것으로 사료된다. 이러한 현상을 방지하여 작업성이 좋게 할려면, 스텐레스강에 대한 용가재의 젖음성을 향상시킬 필요가 있다. Peaslee[9]는 스텐레스강 표면에 Ni피막을 15 μ m 정도 입힐 것을 추천하고 있다. Ni을 전기도금할 경우 증기발생기용 시료의 접합부는 나사로 되어 있어서 표면에 두께가 고르게 피막층을 입히기가 쉽지 않다. 물론 무전해 도금 방법이 있으나, 브레이징 접합용으로는 일반적으로 무전해 도금이 좋지 않은 것으로 알려져 있다. 도금이외에 Ni 피막을 입히는 방법으로 CVD, plasma coating 등이 있으나, 상당한 설비가 필요하다. 앞으로 이에 대한 연구 검토가 필요하다.

3.4 증기발생기용 시료의 접합계면 분석

증기발생기용 시료의 접합계면에서의 반응층을 주사전자현미경으로 분석하였다. 그림 7 (a)에서 Ti합금과 용가재사이의 접합계면의 상태를 보여준다 약 6 μ m 정도의 두께로 TiCu₂의 금속간화합물이 생성되어 있다. Ti합금에서 용가재 방향으로 금속간화합물이 성장하였음을 알 수 있으며, Ti합금 표면의 특정 위치는 잘 성장하지 않고 있음을 알 수

있다. Ti합금의 표면에 따라 성장 속도의 차이가 발생하는 이유는 아직 파악되지 않았다. 계면으로 부터 Ti합금의 중심방향으로 공정상이 생성되어 있으며 특정 위치에서 길게 생성되어 있음을 알 수 있다. 이것은 Ti합금의 grain boundary를 따라 공정상이 잘 생성됨을 보여준다. 즉 Cu가 grain boundary를 따라 확산되어 들어감을 알 수 있다, 공정상은 브레이징 온도에서 Ti가 Cu를 고용하여 β 상이 되고 상온으로 냉각하면 α 상의 Ti과 $TiCu_2$ 의 공정상을 형성하는 것으로 보인다. 그러나 용가재와의 계면에서는 Cu의 양이 많기 때문에 $TiCu_2$ 만의 층이 형성될 수 있다. 그림 7(b)에서 스텐레스강과 용가재 사이의 계면에도 금속간화합물이 $3\mu m$ 정도의 두께로 형성되어 있다. $TiCu_2$ 의 생성과 달리 스텐레스강의 표면에 고르게 형성되어 있음을 알 수 있다. Ti-Fe의 금속간화합물로 판명되거나 $TiFe$ 와 $TiFe_2$ 가 어떻게 분포하고 있는 지는 향후 분석 예정이다.

4. 결론

Ti합금 Gr. 2와 스텐레스강을 Ag계의 용가재, BAg-19와 BVAg-30를 사용하여 브레이징 접합을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 진공 분위기에서 BAg-19 용가재를 사용하였을 때, BVAg-30보다 큰 접합강도를 얻을 수 있다. 이것은 BVAg-30보다 스텐레스강에 대한 젖음성이 좋기 때문이다.

(2) BAg-19의 용가재를 사용할 경우 브레이징 온도는 $940^{\circ}C$ 에서, 유지시간을 짧게 할수록 접합강도가 크며, 브레이징 온도에 도달한 후, 바로 냉각시킬 경우 접합강도가 311MP이었다. BAg-19의 경우 $940^{\circ}C$ 이상에서는 접합강도가 급격히 감소한다.

(3) 증기발생기용 시료를 브레이징 할 경우, $940^{\circ}C$ 에서 용가재의 용융물이 접합계면으로 부터 누설이 생기므로 용가재의 양을 충분히 공급하여야 한다.

(4) Ti합금과 용가재의 접합계면에서 $TiCu_2$ 의 금속간화합물이 생성되며, 금속간화합물층 아래에는 금속간화합물과 α 상의 공정조직을 형성한다. 특히 공정상은 Ti합금의 grain boundary를 따라 성장한다. 스텐레스강과 용가재 사이의 접합계면에서는 Ti-Fe의 금속간화합물이 두께가 고르게 생성된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 후원으로 수행되는 원자력중장기 연구개발사업의 일부로 수행되었음.

참고문헌

1. M. Futamata and A. Fuji, Q. J. Jpn. Weld. Soc., Vol. 7, No. 4, 1989, p. 432.
2. T. Konuma, Y. Funamoto, Y. Sasada and T. Itsuma, J. Jpn. Atomic Energy Inst. Vol. 32, 1990, p. 803.
3. Y. Komizo, K. Kogawa and S. Miura, Proc. Conf. Jpn. Weld. Soc., Vol. 46, 1990, p. 206.
4. M. Futamata and A. Fuji, Q. J. Jpn. Weld. Soc., Vol. 7, No. 2, 1989, p. 432.

5. O. Ohashi, K. Ei and H. Irie, *Welding International*, Vol. 10, No. 3, 1996, p. 188.
6. J. F. Rudy, R. M. Necheles and H. Schwarzbart, *Weld. J.*, Vol. 38, 1959, p. 202-s.
7. M. M. Schwarz, *Welding Research Council Bulletin* No. 244, 1978.
8. P. R. C. Camargo, R. E. Trevisan and S. Liu, *Weld. J.*, Vol. 72, No. 12, 1993, p. 533-s.
9. R. L. Peaslee, *Weld. J.* Vol. 71, No. 5, 1992, p. 112.
10. 작자미상, *Industrial Heating*, Vol. 48, No. 3, 1981, p. 31.
11. AWS, *Standard for Brazing Procedure and Performance Qualification*, 1991.

표 1. Ti합금 Gr. 2, Gr. 9 및 스텐레스강 321의 화학조성

1) Ti합금

단위 : wt. %

합금	화 학 조 성								
	Al	V	Fe	O	H	N	C	가타	Ti
Gr. 2	-	-	0.059	0.117	0.0004	0.03	0.005	-	Bal.
Gr. 9	3.5	2.5	0.25	0.15	0.008	0.03	0.08	0.3	Bal.

2) 스텐레스강

단위 : wt. %

화 학 조 성									
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al
0.046	1.57	0.026	0.024	0.56	0.33	9.28	17.19	0.37	0.057

화 학 조 성			
V	Ti	Sn	Fe
0.104	0.450	0.010	Bal.

표 2 용가재의 화학조성, 응고점 및 용융점

단위 : wt. %

용가재	화 학 조 성					응고점	용융점
	Ag	Cu	Pd	Li	Other	℃	℃
BAG-19	92.69	7.06	-	0.24	0.01	760	891
BVAg-30	67.16	27.93	4.90	-	0.01	807	810

표 3 브레이징온도에서 4분간 유지후 스텐레스강의 접합계면에서 EDS 점분석에 의한 성분분석 결과

Unit : at. %

			Fe	Ni	Cr	Ti	Ag	Cu	Pd
BVAg-30	852℃	취성	71.06	8.85	19.80	0.49	-	-	-
		연성	49.68	3.59	9.73	33.78	-	2.59	0.62
	868℃	취성	61.32	3.22	31.29	4.18	-	-	-
		연성	26.24	6.59	1.70	43.31	-	20.24	2.11
BAG-19	944℃	취성	54.96	3.95	14.56	23.96	0.68	2.46	-
		연성	43.88	2.86	9.69	28.80	13.63	1.15	-
	960℃	취성	16.73	4.59	1.27	49.11	2.73	25.57	-
		연성	20.93	4.90	1.95	51.47	3.44	17.31	-

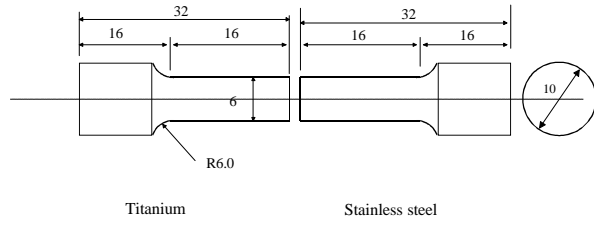
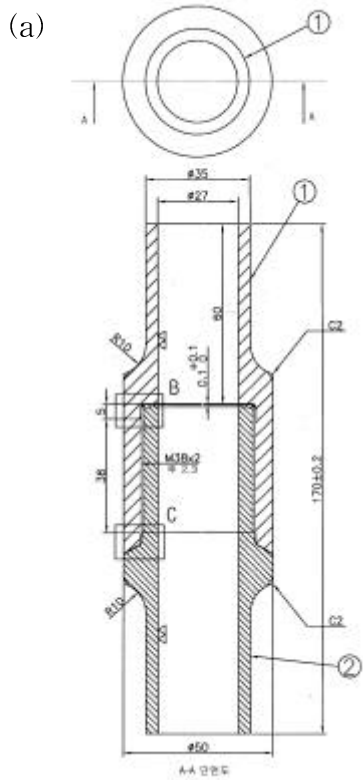


그림 1 브레이징용 인장시편



- ① 스텐레스강
- ② Ti 합금

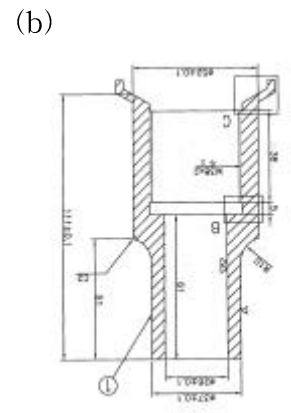


그림 2 증기발생기용 접합시료: (a) Ti튜브와 스텐레스튜브의 체결상태, (b) 주입구를 부착시킨 스텐레스 튜브

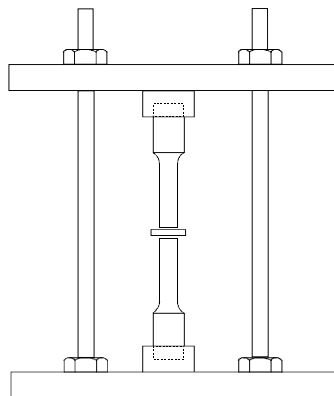


그림 3 인장시편 고정구

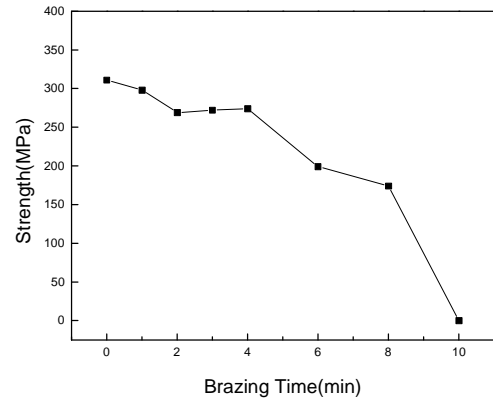
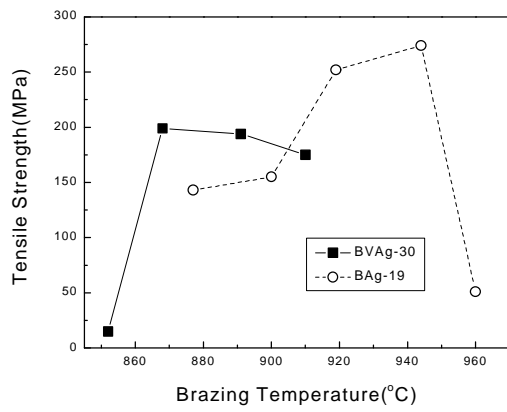
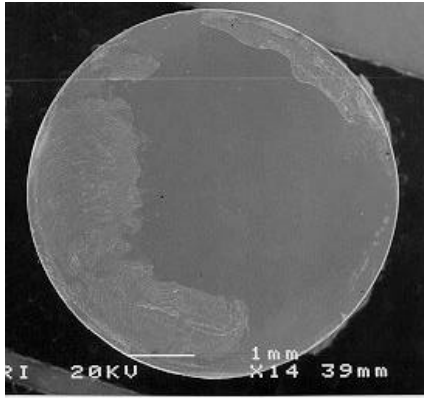
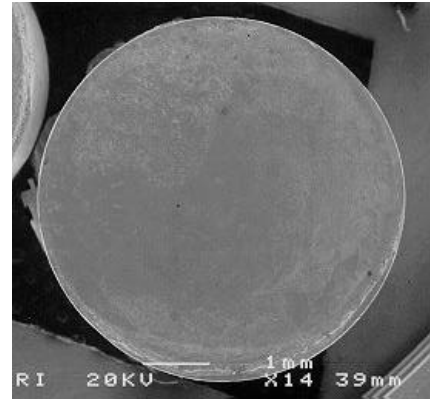


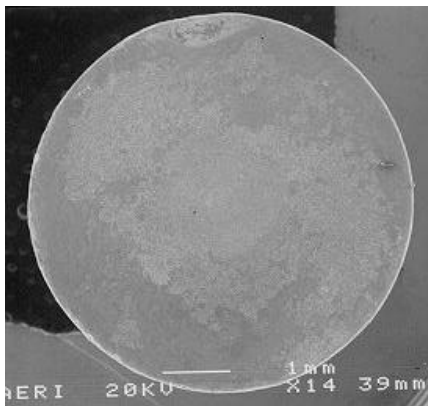
그림 4 (a) 브레이징 온도별 집합강도, (b) BAg-19의 940에서 유지시간에 따른 집합강도



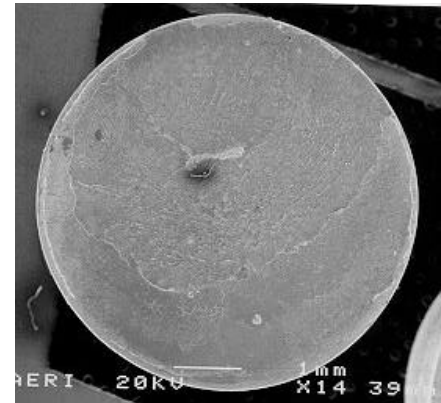
(a)



(b)



(c)

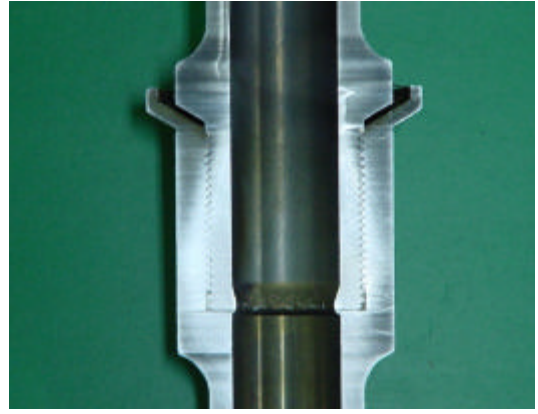


(d)

그림 5. 각 브레이징 온도에서 4분간 유지한 시편의 스텐레스강 집합면의 파단면 (a) BVAg-30, 852°C, (b) BVAg-30, 868°C, (c) BAg-19, 944°C, (d) BAg-19, 960°C

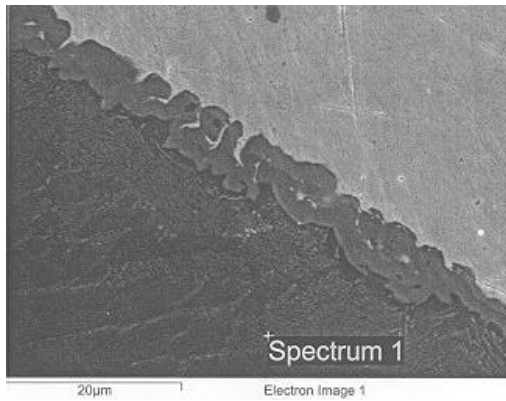


(a)

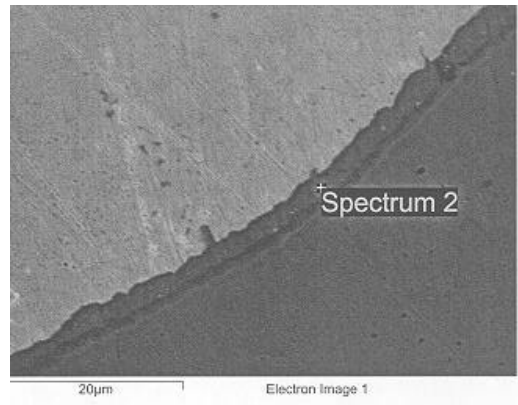


(b)

그림 6. 증기발생기용 시료: (a) 접합전과 접합후 절단 한 상태, (b) 용가재가 접합계면 하단부를 통하여 누설한 상태



(a)



(b)

그림 7 접합계면 분석: (a) Ti합금과 용가재 사이, (b) 스텐레스강과 용가재 사이