

# Alloy 82/182 이종금속 용접부 열영향부의 기계적물성치 특성 파악

김진원<sup>†</sup>·김종성<sup>\*</sup>·이경수<sup>\*\*</sup>

## Characterization of Mechanical Properties in the Heat Affected Zones of Alloy 82/182 Dissimilar Metal Weld Joint

Jin Weon Kim, Jong Sung Kim, and Kyung Soo Lee

**Key Words:** Heat Affected Zone (열영향부), Dissimilar Metal Weld (이종금속), Alloy 82/182 (18/182 합금), Mechanical Properties (기계적물성치)

### Abstract

The paper presents the characteristics of mechanical properties within the heat affected zone (HAZ) of dissimilar metal weld between SA508 Gr.1a and F316 stainless steel (SS) with Alloy 82/182 filler metal. Tensile tests were performed using small-size specimens taken from the HAZ regions close to both fusion lines of weld, and the micro-structures were examined using optical microscope (OM) and transmission microscope (TEM). The results showed that significant gradients of the yield stress (YS), ultimate tensile stress (UTS), and elongations were observed within the HAZ of SA508 Gr.1a. This was attributed to the different microstructures within the HAZ. In the HAZ of F316 SS, however, the welding effect dominated the YS and elongation rather than UTS, and TEM micrographs conformed the strengthening in the HAZ of F316 SS was associated with a dislocation-induced strain hardening.

### 1. 서 론

원전 1차 계통 주요 기기에는 다양한 형태의 이종금속 용접부가 존재하며, 대부분의 이종금속 용접부에는 Alloy 82/182가 용가재로 사용되었다. Alloy 82/182 용가재는 저합금강과 오스테나이트 스테인리스강 중간 정도의 열팽창계수를 가지며, 저합강에서 용접부로의 탄소 확산을 저지하는 능력이 매우 우수하다.<sup>(1)</sup> 그러나, 최근 Alloy 82/182 용가재가 사용된 이들 이종금속 용접부에서 응력 부식균열 (Primary water stress corrosion cracking,

PWSCC)에 의한 결함이 발생됨에 따라 이들 용접부에 대한 건전성 확보가 중요한 이슈로 대두되고 있다.<sup>(2-3)</sup> 원전 1차 계통수 환경에서 PWSCC 발생은 이종금속 용접부에서 재료물성치의 불균일성에 따른 높은 잔류응력 때문인 것으로 알려져 있다. 또한, 이종금속 용접부에서 재료물성치의 급격한 변화는 용접부에 대한 건전성 평가에서 불확실성을 증가시키는 요인이 되고 있다.<sup>(4)</sup> 따라서, 이종금속 용접부에서 국부적인 기계적물성치 파악은 이들 용접부에 대한 건전성 평가의 신뢰성 확보 측면에서 매우 중요하다.

이와 관련하여 최근 Alloy 82/182를 용가재로 사용한 저합금강과 스테인리스강 용접부를 대상으로 국부적인 재료물성치 평가가 이루어졌다.<sup>(5-7)</sup> 이들 연구에 의하면 버터링부를 포함한 Alloy 82/182 용융부 내에서는 두께 방향으로 약간의 강도 차이를 보였으나 전체적으로 기계적물성치의 불균일성이 크지 않은 것으로 파악되었다. 그

---

† 회원, 조선대학교 원자력공학과  
E-mail : jwkim@chosun.ac.kr  
TEL : (062)230-7109 FAX : (062)232-9218

\* 순천대학교 기계공학과

\*\* 한전전력연구원, 원전기계그룹

---

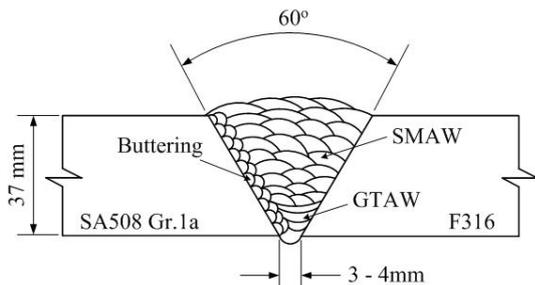
러나, 용접부를 가로질러 재료의 종류가 달라짐에 따른 기계적물성치의 변화는 뚜렷하였다. 특히, 용접 열영향부 (HAZ, Heat Affected Zone) 주위에서 항복강도, 인장강도, 그리고 연신률 등이 크게 변화하였다. 재료물성치의 급격한 변화는 페라이트 쪽 뿐만 아니라 오스테나이트 스테인리스강 HAZ에서도 관찰되었다. 용접부 주위에서 이와 같은 강도불일치는 용접부 균열의 거동에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서, 강도불일치가 크게 발생하는 HAZ 주위에서 재료물성치에 대한 상세한 평가가 요구되고 있다. 그러나, 아직까지 이중금속 용접부의 HAZ부에 대한 기계적물성치 평가가 체계적으로 이루어지지 않았으며, 특히 F316 SS HAZ부에 대해서는 재료물성치의 변화 거동과 원인을 명확히 파악하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 Alloy 82/182가 용가재로 사용된 이중금속 용접부의 HAZ부 내에서 기계적물성치의 분포와 특성을 자세히 파악하고자 한다. 이를 위해서 Alloy 82/182가 용가재로 사용된 이중금속 용접 시편의 용접선 부근에서 일정 간격으로 소형시편을 채취하여 상온에서 인장시험을 수행하였다. 또한, 광학현미경 (OM)과 투과전자현미경 (TEM) 관찰을 통해 HAZ부에 대한 미세조직적 특징을 살펴보았다. 이를 바탕으로 이중금속 용접부의 HAZ부에서 기계적물성치를 파악하고, 기계적물성치 변화의 원인을 미세조직 관찰 결과로부터 파악하였다.

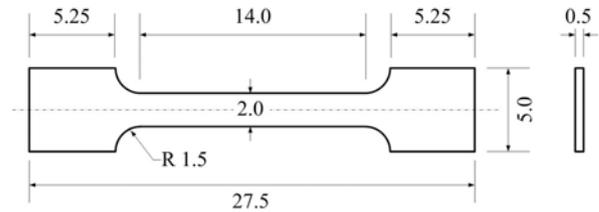
## 2. 시험 절차

### 2.1 시험 재료 및 시편

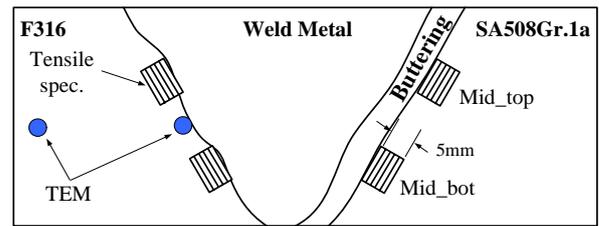
시험에는 두께가 37mm인 판상의 SA508 Gr.1a 페라이트강과 F316 스테인리스강 (F316 SS)을 Alloy 82/182 용가재를 이용하여 용접한 시편을



**Fig. 1** Schematic diagram of the dissimilar metal weld design and welding procedure



**Fig. 2** Dimensions of the tensile specimens (the scale in mm)



**Fig. 3** Locations of the tensile specimens and TEM specimens near the fusion line

사용하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 용접 시편은 V-홈 맞대기 용접으로 제작되었다. V-홈의 용접에 앞서 SA508 Gr.1a쪽 면은 Alloy 82 용접봉을 사용하여 2층을 Buttering 용접하였으며, 잔류응력 제거를 위해 610~620°C에서 1.5시간 동안 용접 후열처리를 하였다. V-홈 용접시 루터부 2~3층은 Alloy 82 용접봉을 사용한 수동 GTAW (Gas-tungsten Arc Welding), 나머지 용접은 Alloy 182 용접봉을 사용한 자동 SMAW (shielded-metal arc welding)를 적용하여 용접하였다.

인장시험에는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 게이지부의 형상이 0.5mm×2.0mm×14mm인 소형 판상시편이 사용되었으며, 이 시편은 선행 연구에서 신뢰성 있는 인장데이터를 주는 것으로 확인되었다.<sup>(7)</sup> 인장시편은 용접선에서 모재 방향으로 5mm 위치까지 일정 간격으로 5개씩 채취되었다. 모든 시편은 길이방향 (용접 방향)으로 가공되었으며, 두께 방향으로는 중상단 (Mid\_top)과 중하단 (Mid\_bot) 위치에서 각각 시편을 채취하였다. F316 SS HAZ부에 대한 미세조직적 특징을 파악하기 위한 TEM 시편은 HAZ부와 F316 SS 모재에서 각각 채취되었다 (Fig. 3).

### 2.2 시험 절차

모든 인장시험은 100kgf의 로드셀이 장착된 기계식 인장시험기를 사용하여 상온에서 준정적 하중속도로 수행하였다. 시험시 시편의 변위는 10mm extensometer를 이용하여 측정하였으며,



**Fig. 6** Photographs of the test set-up

Fig. 4는 시편이 장착된 상태의 시험 장면을 보여 주고 있다.

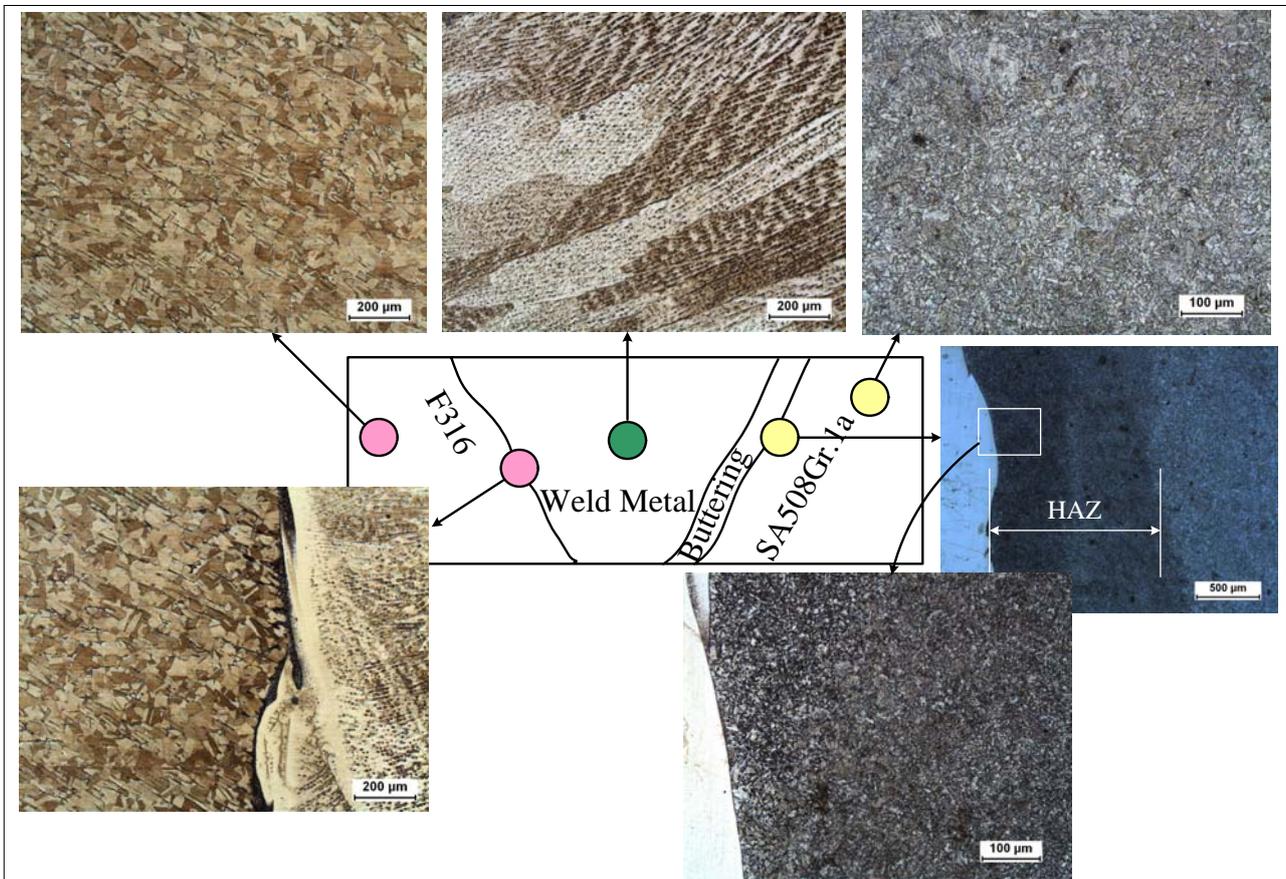
광학현미경 (Olympus model GX51)을 이용하여 SA508 Gr.1a 및 F316 SS HAZ부와 모재부의 미세 조직을 관찰하였다. 추가적으로 TEM (JEOL JEM-2100F)을 이용하여 F316 SS HAZ부와 모재부에 대한 미세조직을 관찰하였다. 광학현미경을 이용한 미세조직 관찰을 위해 SA508 Gr.1a 모재와 HAZ부는 3% 나이탈 용액을 이용하여 에칭하

였으며, F316 SS 모재와 HAZ부는 Kalling's 용액을 이용하여 에칭하였다.

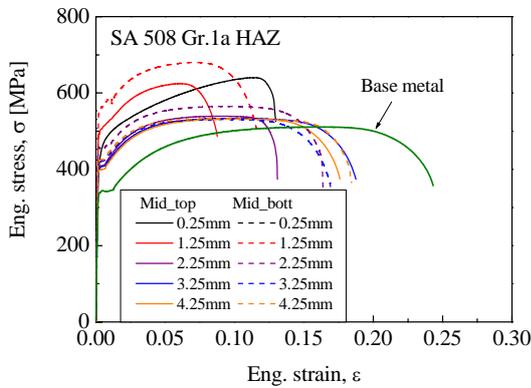
### 3. 시험 결과 및 토의

#### 3.1 미세조직 관찰

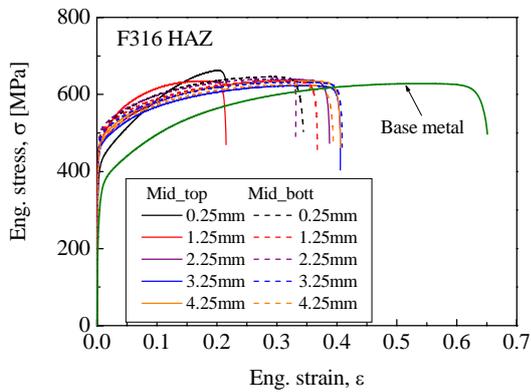
Fig. 5는 광학현미경을 이용하여 모재, 용접부, 그리고 HAZ부의 미세조직을 관찰한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 SA508 Gr.1a 모재부는 전형적인 템퍼드 베이나이트 조직을 보였으나, *Buttering*에 인접한 SA508 Gr.1a 영역은 모재부와는 뚜렷이 구분되는 미세조직을 보였다. 즉, 용접선에서 약 1.5~2.0mm 영역까지 모재와는 구분되는 미세조직의 HAZ부가 형성된 것을 알 수 있다. 또한, HAZ부 내에서도 용접선에서부터 위치에 따라 탄소고갈 영역, 조대한 상부 베이나이트 영역, 미세한 페라이트-베이나이트 영역 등의 미세조직이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나, F316 SS HAZ부는 미세조직적으로 모재부와 동일한 미세조직을 보였다. 즉, 델타 페라이트



**Fig. 5** Microstructures of base metals and HAZs of the Alloy 82/182 dissimilar metal weld joint between SA508 Gr.1a and F316 SS plates



(a) SA508 Gr.1a HAZ



(b) F316 SS HAZ

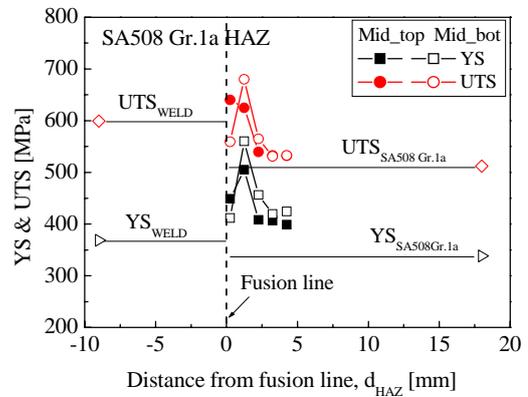
**Fig. 6** Engineering stress-strain curves at HAZs of SA508 Gr.1a and F316 SS

가 산재하고 있는 전형적인 오스테나이트 조직을 보였다.

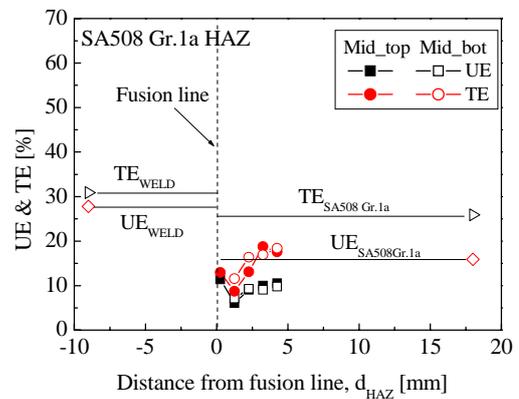
### 3.2 열영향부의 재료물성치 평가

Fig. 6은 인장시험에서 주어진 공칭 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. SA508 Gr.1a와 F316 SS HAZ부의 응력-변형률 곡선은 시편 위치에 관계없이 전체적으로 각각의 모재에 비해 높은 응력과 낮은 연신률을 보였다. SA508 Gr.1a HAZ부의 경우, 용접선에 가까운 2개의 시편에서 응력-변형률 곡선이 다른 시편들과 다른 경향을 보였다. F316 SS HAZ부에서는 용접선에 가까운 1개의 시편을 제외하면, 모든 시편은 위치에 관계없이 거의 유사한 응력-변형률 거동을 보였다.

Fig. 7(a)는 SA508 Gr.1a HAZ부의 항복응력 (YS)과 인장응력 (UTS)을 용접선에서부터 위치에 따라 나타낸 것이다. YS와 UTS는 용접선에서부터



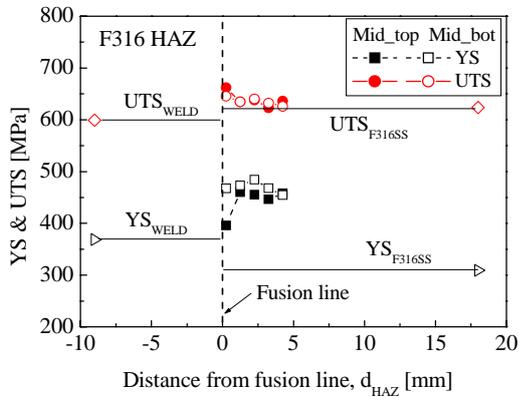
(a) YS and UTS



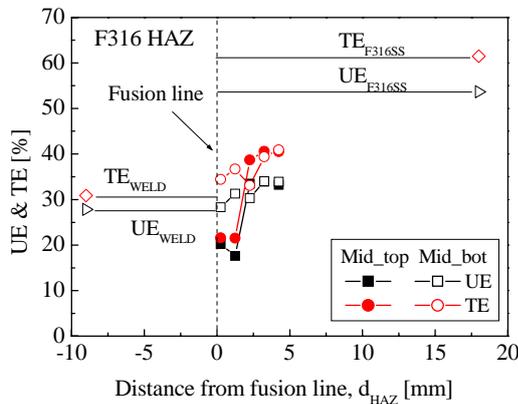
(b) TE and UE

**Fig. 7** Variations of tensile properties within the HAZ of SA508 Gr.1a

위치에 따라 크게 변화하였으며, 용접선에 인접한 영역보다 용접선에서 약 1mm 정도 떨어진 위치에서 최대 값을 보였다. HAZ부에서 최대 YS와 UTS는 모재에 비해 약 60%와 35% 정도 높은 값이다. 용접선에서 1mm 이상 떨어진 위치에 따라 YS와 UTS는 급격히 감소하여 일정한 값에 수렴하였다. 그러나, 모재에 비해 여전히 높은 값을 보였다. 총 연신률 (TE)과 균일 연신률 (UE) 역시 모든 영역에서 모재보다 낮은 값을 보였으며, 위치에 따른 YS와 UTS의 변화와 유사하게 용접선에서 1mm 정도 떨어진 위치에서 최소 TE와 UE를 보였다 (Fig. 7(b)). 최소 TE와 UE는 모재에 비해 약 50% 정도 작았으며, 용접선에서 5mm 정도 떨어진 위치에서도 모재에 비해 약 30% 정도 낮은 TE와 UE를 보였다. 따라서, SA508 Gr.1a의 경우 용접선에서 5mm 정도 떨어진 위치까지 용접에



(a) YS and UTS

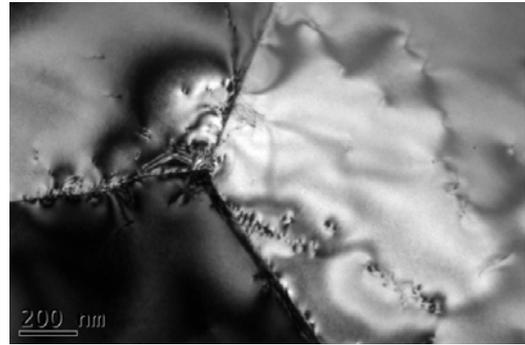


(b) TE and UE

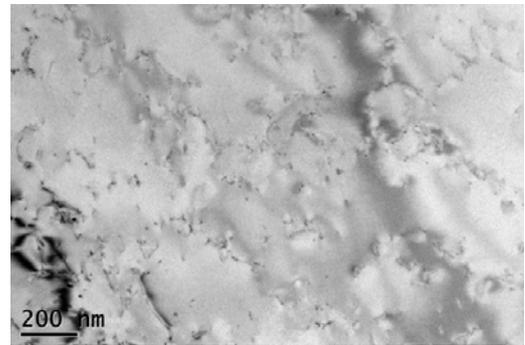
**Fig. 8** Variations of tensile properties within the HAZ of F316 SS

의한 기계적물성치의 변화가 관찰되었으며, 용접선에서 약 1mm 정도 떨어진 좁은 영역에서 기계적물성치의 구배가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

앞서 살펴본 미세조직 관찰 결과와 기계적물성치의 분포를 비교하면, YS와 UTS가 최대이고 TE와 UE가 최소인 영역은 조대한 상부 베이나이트 영역과 일치하며, YS와 UTS가 수렴하는 영역은 미세한 페라이트-베이나이트 영역과 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 용접선 인접부에서 YS와 UTS가 낮게 나타나는 것은 이 영역에서의 탄소 고갈과 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한, 선행 연구에서 SA508 Gr.1a HAZ부의 데이터 분산이 높게 관찰되었는데,<sup>(6,7)</sup> 이는 HAZ부 내에서 위치에 따른 미세조직적 차이가 크고 이로 인해 위치에 따른 기계적물성치의 변화가 크기 때문인 것



(a) F316 base metal



(b) F316 HAZ

**Fig. 9** Comparison of TEM micrographs observed from the base metal and the heat affected zone of F316 SS

을 알 수 있다. 결론적으로 이중금속 용접부의 SA508Gr.1a HAZ에서는 위치에 따라 기계적물성치가 크게 변화하였으며, 이러한 특징은 용접 과정에서 상변태에 의해 생성된 다양한 미세조직이 SA508 Gr.1a HAZ 내에 분포하기 때문이다.

한편, F316 SS HAZ부에서 YS는 모재에 비해 약 50% 정도 높은 값을 보였으나, UTS는 용접선 인접 영역을 제외하면 모재와 거의 유사한 값을 보였다 (Fig. 8(a)). 또한, SA508 Gr.1a HAZ부와 비교하여 F316 SS HAZ 내에서는 YS와 UTS의 구배가 크지 않았다. TE와 UE는 전체적으로 모재에 비해 낮은 값을 보였으며, 용접선 인접부에서 가장 낮고 용접선에서 멀어짐에 따라 점차 증가되는 경향을 보였다. 용접선 인접 영역의 TE와 UE는 모재보다 약 50%정도 낮은 값을 보였다. 따라서, F316 SS의 경우에도 용접선에서 5mm 이상 떨어진 위치까지 용접에 의한 기계적물성치의 변화가 나타났으며, UTS보다 YS의 증가와 연신률의 감소가 뚜렷한 것을 알 수 있다. SA508 Gr.1a의 경우에는 HAZ 영역에서 기계적물성치의 변화가 광학현미경을 통한 미세조직 관찰 결과로

부터 간단히 설명되었다. 그러나, F316 SS의 경우에는 용접 열영향에 의해 상변태가 발생하지 않으므로 F316 SS HAZ부에서 기계적물성치의 변화가 간단히 설명되지 않는다. 이종금속 용접부에 대한 일부 기존 연구에서는 HAZ부의 강도 증가가 결정립 재결정 또는 탄화물의 석출에 기인하는 것으로 설명되고 있다.<sup>(5,8)</sup> 그러나, 이것은 본 연구에서 관찰된 F316 SS HAZ의 기계적물성치 변화를 충분히 설명하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 TEM을 이용하여 F316 SS HAZ부에 대한 미세조직적 특징을 관찰하였다. Fig. 9는 F316 SS HAZ부에 대한 TEM 관찰 결과를 F316 모재에 대한 관찰 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 F316 SS 모재와 비교하여 HAZ부에서 석출물 분포의 차이는 뚜렷하지 않지만, 전위 밀도가 상당히 높게 나타났다. 따라서, F316 SS HAZ에서는 석출물보다 높은 전위 밀도가 기계적물성치 변화의 주된 원인인 것을 알 수 있다. 즉, F316 SS HAZ부에서 변형을 강화 현상이 강도 증가와 연신률 감소의 주요 원인인 것을 알 수 있다. 이는 F316 SS HAZ부에서 UTS 보다 YS의 증가 현상이 뚜렷한 것과 잘 일치한다. 또한, 선행 연구에서 관찰된 것과 같이 시험 온도가 증가됨에 따라 F316 SS HAZ부에서 강도가 크게 감소하고, F316 SS 모재와 유사한 소성불안정응력 (PIS, plastic instability stress)를 보이는 현상과도 잘 일치한다.<sup>(7)</sup> 일반적으로 재료가 변형 강화되는 경우에 UTS보다 YS가 크게 증가하며, 시험온도가 증가됨에 따라 강도가 크게 감소한다. 또한, 가공 경화되어 강도가 증가할지라도 PIS는 거의 유사한 값을 보이는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> F316 SS의 용접 인접 영역에서 변형에 의한 강화 현상은 가열과 냉각에 따른 용접부와 인접영역 사이의 팽창과 수축률 차이에 따른 것으로 판단된다.<sup>(10)</sup>

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Alloy 82/182 용가재를 사용하여 용접한 SA508 Gr.1a와 F316 SS 시편의 열영향부에 대한 기계적물성치를 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SA508 Gr.1a 열영향부 내에서는 위치에 따라 항복응력, 인장응력, 연신률 등의 기계적물성치가

급격히 변화하였다. 용접선에서 약 1mm 정도 떨어진 좁은 영역에서 기계적물성치의 구배가 가장 크게 나타났으며, 용접선에서 약 5mm 까지 용접에 의한 열영향이 관찰되었다.

2) F316 SS쪽 열영향부 내에서 기계적물성치의 구배는 크지 않았지만, 용접선에서 약 5mm 이상까지 열영향에 의한 항복응력의 증가와 연신률의 감소가 뚜렷이 관찰되었다. 투과전자현미경 관찰 결과에 의하면 F316 SS에서 용접 열영향에 의한 기계적물성치의 변화는 용접부 인접영역에서 소성 변형에 의한 강화 효과 때문인 것으로 파악되었다.

#### 참고문헌

- (1) M. Sireesha, S.K. Albert, V. Shankar, and S. Sundaresan, 2000, *J. of Nucl. Materials*, Vol. 279, pp.65-76.
- (2) J.I. Bennetch, G.E. Modzelewski, L.L. Spain, and G.V. Rao, 2002, *PVP-Vol. 437*, pp.179-185.
- (3) USNRC, "Information Notice 2000-17, "Crack in weld area of reactor coolant system hot leg piping at V.C. summer," Oct. 18, 2000.
- (4) A. Laukkanen, P. Nevasmaa, U. Ehrnsten, R. Rintamaa, 2007, *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 237, pp. 1-15.
- (5) C. Jang, J. Lee, J.S. Kim, and T.E. Jin, 2008, *Int J. of Pres Vess. & Piping*, Vol. 85, pp. 635-641.
- (6) J.W. Kim, J.H. Lee, J.S. Kim, and T.E. Jin, 2007, *Proc. of KNS spring meeting*.
- (7) J.W. Kim, J.S. Kim, K.S. Lee, and T.S. Byun, 2008, *J. of Nucl. Materials*, submitted.
- (8) A. Celik, A. Alsaran, 1999, *Mater. Charact.*, Vol. 43, pp.311-318.
- (9) T.S. Byun and K. Farrell, 2004, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp.1597-1608.
- (10) R. Stoenescu, R. Schaeublin, D. Gavillet, N. Baluc, 2007, *J. of Nucl. Materials*, Vol. 362, pp. 287-292.