

## 해수용 재료의 TIG용접후 열처리에 따른 특성 평가

### Evaluation of the Properties of Seawater Materials by Heat Treatment after TIG Welding

배동수<sup>1</sup>, 이진경<sup>2\*</sup>

Dong-Su, Bae<sup>1</sup>, Jin-Kyung Lee<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

In this study, in the selection of materials for the elements of a small plant, those with high resistance to corrosion are selected and the material properties of coatings for corrosion prevention are evaluated. In addition, corrosion characteristics and material analysis were performed on the welded part, and the hardness characteristics of the welded part, heat-affected part, and the base metal were evaluated. In the case of the post-weld-heat-treated(PWHT) specimen, the corrosion resistance of STS 316 was lower than that of the specimen without the PWHT due to the formation of intergranular carbide. As a result of evaluating the distribution of the hardness of the weld before and after the PWHT, the hardness of the specimen after the PWHT increased by about 20 Hv. As a result of the corrosion test on the welded specimen, the weight loss tended to increase as the time increased. In the case of the PWHT specimen, the corrosion resistance tended to be significantly lower than that of the specimen without PWHT due to the formation of intergranular carbide.

*Keywords : Corrosion, Hardness, Intergranular carbide, Post weld heat treatment, Small plant, STS 316*

1 정회원, 동의대학교 신소재공학부, 교수, 공학박사,  
나고야대학 E-mail: dsbae@deu.ac.kr

2\* 정회원, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부, 조교수,  
공학박사, 부산대학교, 051-890-1650  
E-mail: leejink@deu.ac.kr

1 Division of Advanced Materials Engineering, Dongeui University

2\* Division of Mechanical, Automotive, Robot Component Engineering,  
Dongeui University, 051-890-1650

## 1. 서론

바다로부터 소금을 생산하는 방식은 바다, 수로, 제 1 증발지, 제 2 증발지, 함수창고, 결정지, 채염, 운반, 소금창고 및 자연탈수 등의 과정을 거친다. 여기서 함수창고는 우기시 소금으로 결정할 수 있는 염수(염도24도)를 저장하는 곳, 날씨가 좋지 않는 날에는 증발지에 있는 염수를 함수창고에 계속 저장 및 배출 공정을 반복적으로 하면서 소금을 만드는 공정을 거친다. 이와 같은 공정에 의해 소금을 확보하기 위해서는 보통 33,000m<sup>2</sup> 이상의 작업장이 필요하고 20일 이상의 기간이 소요될 수 있다. 따라서 위의 공정 중 수로공정에서 함수창고 공정까지 중간공정을 획기적으로 줄이기 위해 소형 플랜트를 제조하여 공정과 소금 제조 공간을 획기적으로 줄이고자 하였다. 소형 플랜트에는 역삼투압 공정(0.0001×10<sup>-6</sup>)의 원리를 이용하여 해수로부터 고순도의 염수를 단기간 내에 저비용으로 추출해 낼 수 있으며 환경 및 인체에 유해한 물질의 발생 및 손실을 최소화할 수 있는 친화적인 고농도 염수를 추출하는 방법 및 그 시스템을 구현하고 역삼투압에 의해 물과 염수를 추출하고 염수는 다시 미스트 장치에 의해 염수의 농도를 높이고, 연속적으로 원심분리기에서 원심력에 의해 최종 물과 고농도 염수로 분리되는 것으로 공정 기술을 개발 하고자하였다. 본 연구에서는 전처리 여과부, 역삼투 처리부, 미립화부, 송풍건조기, 원심분리기, 응축부 등으로 구성되어지는 플랜트의 요소들에 대한 재료선정에서 부식[1-4]에 대한 저항이 높은 것을 선정하고 부식방지를 위한 코팅 등에 대한 재료적 특성을 평가하고자 한다[5-7]. 또한 용접되었을 때 용접부에 대한 부식 특성을 평가하고 용접부에 대한 재질분석을 하고 용접부, 열영향부 및 모재에 대한 경도특성 등을 평가하고자 한다.

## 2. 재료 및 시험방법

본 연구에 사용된 재료는 스테인리스 316로써 부식에 강한 저항성을 가지고 있다. 재료의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다[8].

Table 1. Chemical compositions of STS316.  
(unit: wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	10-14	16-18	2.5

재료의 용접특성을 평가하기 위하여 TIG 용접을 실시하였으며 용접부에 대한 재질을 분석하기 위하여 일정기간 부식을 시킨 재료에 대하여 금속현미경(OM)조직, 비커스경도(Hv) 및 화학성분(EDS)을 분석하였다. 본 실험에 사용된 실험조건은 다음과 같다.

- ▶ 용접후열처리(Post Weld Heat Treatment, PWHT)
  - 600 °C의 온도에서 1시간 동안 가열 후 공냉.
- ▶ 광학 현미경(OM) 관찰
  - 부식액; 왕수(중류수 40 %, 염산 40 %, 질산 20 %)
  - 용접부(weld zone), 열영향부(heat affected zone), 모재(base metal zone)부를 200배율, 500배율, 1,000배율로 촬영
- ▶ Vickers 경도[9]
  - 압입 하중; 0.1 kgf, 압입 유지시간; 10초
  - 경도측정간격; 용접부의 중심으로부터 1.5 mm 간격으로 측정
- ▶ STS 316의 내식성 측정
  - 염수분무기; 중류수 95 %, NaCl 5 % 혼합 용액을 사용
  - 염수분무 처리조건; 용접후열처리 전과 후의 시편 3개씩을 각각 1개월, 2개월, 3개월씩 노출

- 각 조건별 Weight loss 값 측정
- ▶ PVC, 단면 Teflon, 양면 Teflon의 내식성 측정
  - 염수분무기; 증류수 80 %, NaCl 20 % 혼합 용액을 사용
  - 염수분무 처리조건; PVC, 단면 Teflon, 양면 Teflon의 시편 3개씩을 모두 72 시간 노출
  - 각 조건별 Weight loss 값 측정
- ▶ EDS 측정
  - 후열처리 후 3개월 부식시킨 시편의 입계 석출물을 EDS로 화학성분 정성분석
  - 후열처리 후 1개월, 2개월, 3개월 부식 후, 표면에 형성된 부식물질을 brush로 털어내어 채집한 부식물을 EDS로 정성분석 (분석원소: Fe, Ni, Cr, Mo, C, N)
- ▶ 주사전자현미경(SEM) 관찰



Fig. 1 SEM evaluating positions of the specimen

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 TIG용접한 STS 316시편의 후열처리전후의 조직사진

Fig. 2(a)는 TIG 용접을 한 시편면에 대한 후열처리하기 전의 용접부의 광학현미경(OM)조직을 나타내는데, 전형적인 응고조직인 수지상정과 공정조직이 형성되어 있는 것을 보여준다.

Fig. 2(b)는 후열처리한 후의 용접부의 광학현미경(OM)조직을 나타내는 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 전형적인 응고조직인 수지상정과 공정조직이 후열처리한 이후에도 그대로 남아 있

는 것을 알 수 있다. 그리고 상의 경계에 검은 석출물들이 형성되어 있는 것을 보여준다.

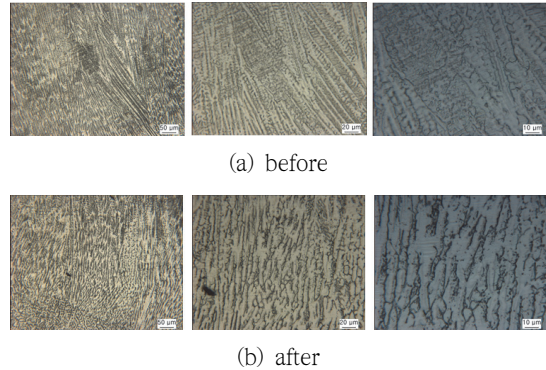


Fig. 2 Microscope of weld zone before and after PWHT

Fig. 3(a)는 TIG 용접한 시편면에 대한 후열처리하기 전의 열영향부의 광학현미경(OM)조직을 나타낸 것으로 모재부와 조직적으로 큰 차이는 보이지 않는 유사한 조직을 나타내지만, 모재부보다 입내와 입계에 검은 석출물이 더 많이 형성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 3(b)는 후열처리한 후의 열영향부의 광학현미경(OM)조직을 나타낸 것으로 후열처리한 이후에도 오스테나이트계 스테인리스강의 고용화처리된 조직과 어닐링쌍정이 그대로 남아 있는 것을 알 수 있다. 그리고 용접부에서와 마찬가지로 후

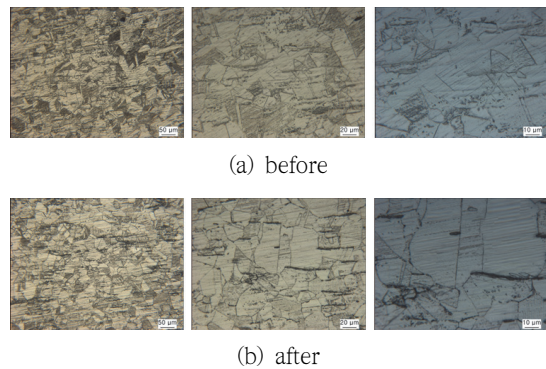


Fig. 3 Microscope of HAZ before and after PWHT

열처리하기 전보다 검은 석출물들이 특히 입계에 더 많이 형성되어 있는 것을 보여준다.

### 3.2 후열처리전 후의 경도 분포

Fig. 4에서는 TIG 용접후 열처리를 행하기 전과 열처리를 한 용접시편의 용접금속부를 중심으로 비커스 경도를 측정한 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)에서는 후열처리전의 비커스 경도를 나타낸 것으로 앞의 조직사진에 나타난 바와 같이 주조조직을 가지는 용접금속부는 190 Hv-200 Hv 정도의 낮은 경도값을 가지는 것을 알 수 있다. 반면에, 열영향부는 위의 조직 사진에 나타난 바와 같이 입내와 입계에에서의 석출물의 형성 및 용접공정 중에 작용하는 급속가열 및 급냉으로 인한 높은 잔류응력의 발생으로 인하여, 모재부보다 높은 210 Hv-220 Hv까지의 경도값을 나타내었다.

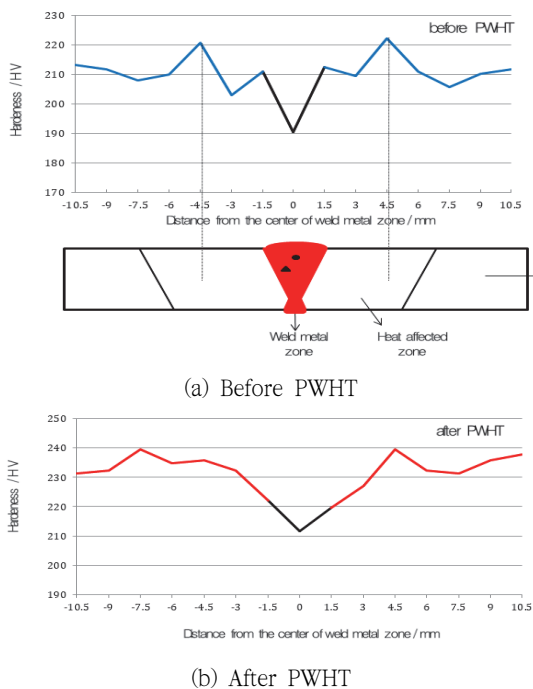


Fig. 4 Hardness distribution before and after PWHT

후열처리한 시험편(Fig. 4(b)에서의 경도분포곡선의 결과는 후열처리 전의 경도분포곡선의 경향이 크게 달라지지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 후열처리 유무와 관계없이 유사한 경향을 보이고 있지만 후열처리한 경우의 경도값이 후열처리하지 않은 시험편보다 평균적으로 약 20 Hv 이상의 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 후열처리한 시편의 경도는, 후열처리 이후의 조직사진을 보면 알 수 있듯이, 후열처리에 의해서 상경계, 입내 및 입계에 석출물들이 석출하기 때문에 석출경화에 의하여, 후열처리를 하지 않은 것에 비하여 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

### 3.3 용접후열처리 전, 후 내식성 비교

STS 316에 대한 내식성 시험은 염수분무시험기(중류수 95 %, NaCl 5 % 혼합 용액을 사용)를 이용하여 실시하였다.

Fig. 5는 후열처리를 행하기 전과 후의 STS 316 용접시편을 염수분무시험기에서 1개월간 부식시험을 행한 시편의 상태와 부식시편에 형성된 표면부식물질을 brush로 제거한 부식물을 채집한 것을 보여준다. 그림에서 보여주는 바와 같이 후열처리한 것이 부식정도가 더 많이 진행되었음을 알 수 있다.

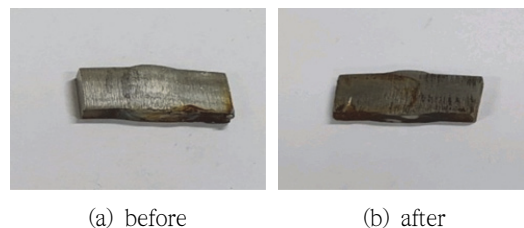


Fig. 5 The specimen surface depend on PWHT (1 month corrosion)

Fig. 6은 후열처리를 행하기 전과 후의 STS

316 용접시편을 염수분무시험기에서 3개월간 부식시험을 행한 시편의 상태와 부식시편에 형성된 표면부식물질을 brush로 제거한 부식물을 채집한 것을 보여준다. 그림에서 보여주는 바와 같이 앞의 1개월에 비하여 부식정도가 더 많이 진행되었음을 알 수 있다.

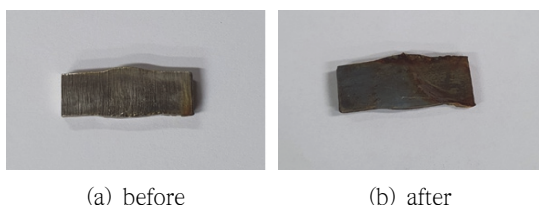
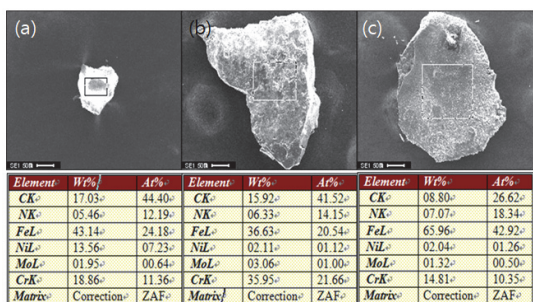


Fig. 6 The specimen surface depend on PWHT (3 months corrosion)

Fig. 7에서는 1개월, 2개월, 3개월의 부식시간을 달리한 시험편의 열영향부(HAZ)의 부식시편에 형성된 표면부식물질을 brush로 제거한 부식물을 채집한 것을 EDS로 점분석한 결과를 보여준다. 이 부식물들도 STS 316의 주요 성분인 Fe, Ni, Cr, Mo의 성분이 검출되고 입계석출물과 같은 M(Fe, Cr)23C6형의 탄화물과 탄화물 주위의 부식물질이 관찰되었다. 그리고, 부식시간이 증가함에 따라, 부식물질의 입자 크기도 증가하는 것을 보여준다.



(a) 1 month (b) 2 months (c) 3 months

Fig. 7 EDS analysis on HAZ according to corrosion times

Fig. 8에서는 후열처리 전, 후의 내식성을 부식시편들의 무게변화를 측정하여, 부식시간에 따른 내식성의 변화를 나타내었다. 그림에서 보여주는 바와 같이 부식시간의 증가에 따라서 후열처리 유무에 관계없이 모두 내식성이 감소하는 것을 알 수 있다.

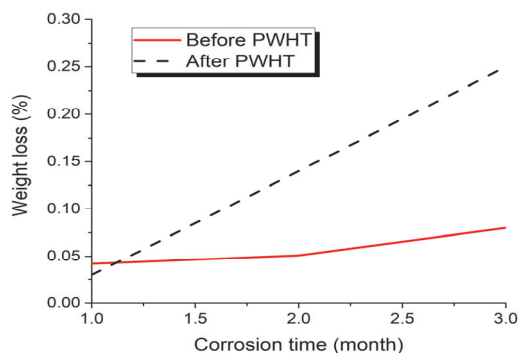


Fig. 8 Weigh loss before and after PWHT

한편, 같은 부식조건에서 후열처리를 행한 용접시편에서 내식성이 크게 감소하는 것을 알 수 있으므로, 용접 후에 일반적으로 행하는 후열처리는 본 연구와 같은 염수분무시험기하에서 사용되는 소형 플랜트용 구조재료에는 내식성에 나쁜 영향을 미치는 것을 의미한다. 즉, 해수에서 고농도 염수를 추출하는 소형 플랜트의 제조시 용접하여 사용하는 STS 316, STS 304는 용접후열처리를 행하지 않아야 한다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 PVC, 단면 Teflon, 양면 Teflon 내식성 비교

본 연구에서는 PVC, 단면 Teflon, 양면 Teflon에 대한 내식성시험을 실시하기 전과 후의 각 시편들의 표면상태를 관찰하였다. 내식성시험은 염수분무시험기(증류수 80 %, NaCl 20 %의 고농도 혼합용액을 사용)를 이용하여 72시간동안 실시한 후, 시편의 상태와 시편에 형성된 표면부식물질을



brush로 제거하여 부식 전후의 무게변화를 측정하여 평가하였다. 20 %의 고농도 염수농도 분위기에서 72시간의 부식을 행하였음에도 육안으로는 각 시편들의 부식정도가 거의 진행되지 않았음을 알 수 있었다. 그리고 PVC 시편의 표면에 형성되어 있던 가공 자국과 스크래치 자국에는 부식시험 후 변색된 부분이 존재하는데 이 변색부분은 PVC 표면에 스크래치를 만든 철강재료의 성분이 스크래치의 틈 사이에 잔존한 결과, 부식시험에서 녹이 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 9에서는 부식후 코팅시편에서의 무게감소를 나타낸 것으로 PVC를 취급하는 중에 생겨 난 가공 자국이나 스크래치 자국부분은 부식시험에 의해서 내식성의 감소로 나타나게 된다는 것을 알 수 있으므로, PVC를 현장에서 취급할 때는 표면에 흠이 생기지 않도록 주의가 필요하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 용접한 STS 316의 내식성 실험결과와 비교해 보면, PVC와 단면 Teflon 및 양면 Teflon의 내식성이 아주 우수한 것을 알 수 있었다.

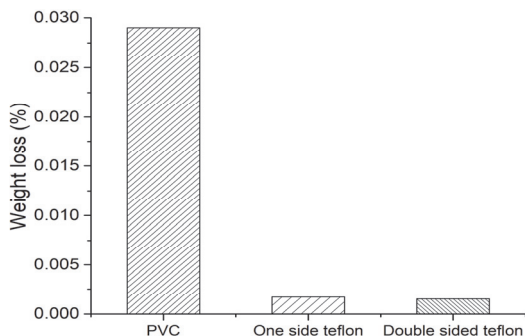


Fig. 9 Weigh loss according to materials

#### 4. 결론

- (1) 용접부와 열영향부에 대한 금속현미경 및 SEM 조직의 관찰결과 전형적인 응고조직인

수지상정과 공정조직이 관찰되었으며 후열처리한 경우에는 상의 경계에 검은 석출물들이 형성되어 입계부식의 양상이 관찰되었다.

- (2) 후열처리전 주조조직을 가지는 용접금속부는 190 Hv-200 Hv 정도의 낮은 경도값을 가지고 열영향부는 입내와 입계에서의 석출물의 형성으로 인하여 210 Hv-220 Hv까지의 높은 경도값을 나타내었으며 후열처리 후 비커스 경도는 후열처리전의 시험편에 비해 모든 영역에서 약 20 Hv이상의 값을 나타내었다.
- (3) 용접시험편에 대한 부식시험 결과 무게감소가 시간에 따라 증가하는 경향을 보였지만 후열처리 한 시편의 경우, 26C6 형의 입계 탄화물의 형성으로 인하여 후열처리를 하지 않은 시편보다 내식성이 크게 저하하는 경향을 나타내었다.
- (4) PVC, 단면 Teflon, 양면 Teflon의 부식시험결과 코팅재료로서의 Teflon은 고농축 염수 분위기 하에서도 내식성의 큰 저하는 관찰되지 않았다.

## 사 사

이 논문은 2021학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(202101830001).

## 참고문헌

- [1] Fu, Y., Luo, H., Du, C., Li, X., J. of Materials Science & Technology, 80, 217-233 (2021).
- [2] Schlegel, M. L., Martin, F., Fenart, M., Blance, C., Varlet, J., Foy, E., Corrosion Science, 184,

- 109368, (2021).
- [3] Chen, X., Gussev, M., Balonis, M., Bauchy, M., Sant, G., *Materials & Design*, 203, 109614, (2021).
- [4] Talha, M., Wang, Q., Xu, M., Ma, Y., Li, Z., Lin, Y., *Colloid and Interface Science Communications*, 42, 100411, (2021).
- [5] Hou, X., Ren, Q., Yang, Y., Cao, X., Hu, J., Zhang, C., Deng, G., Yu, D., Li, K., Lan, W., *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 86, 103718, (2021).
- [6] Amiriafshar, M., Rafieazad, M., Duan, X., Nasiri, A., *Surfaces and Interfaces* 20, 100526, (2020).
- [7] Tan, K. H., Rahman, H. A., Taib, H., *Internationals Journal of Hydrogen Energy*, 44-58, 30591-30605, (2019).
- [8] 공유식, 이진경, *한국산업융합학회논문집*, 22, 2, 191-199, (2019).
- [9] 윤서현, 구세훈, 남기우, *한국산업융합학회논문집*, 22, 6, 681-688, (2019).

---

(접수: 2021.05.28. 수정: 2021.09.30. 게재확정: 2021.10.01.)