

## 304 스테인리스강의 용접부위의 부식특성에 관한 전기화학적 평가

문경만\* · 김윤해\* · 김종도\*\* · 이명훈\*\* · 김진경\*\*\*

\*한국해양대학교 공과대학 조선기자재 공학부

\*\*한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

\*\*\*한국해양수산연수원 교육연구처

### Electrochemical Evaluation of Corrosion Property of Welding Zone of 304 Stainless Steel

Kyung-Man Moon\*, Yun-Hae Kim\*, Jong-Do Kim\*\*, Myung-Hoon Lee\*\* and Jin-Gyeong Kim\*\*\*

\*Dept. of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime Univ., Busan, Korea

\*\*Dept. of Marine System Engineering, Korea Maritime Univ., Busan, Korea

\*\*\*Education and Research Division, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Laser welding 레이저용접, TIG welding 텅스텐 불활성가스 용접, Corrosion potential 부식전위, Weld metal 용접금속, Heat affected zone 열영향부, Polarization curves 분극곡선, Chromium depletion 크롬결핍

**ABSTRACT:** Two kinds of welding methods are used for austenitic 304 stainless steel: laser welding and TIG welding. The difference in the corrosion characteristics of the welded zone between these two welding methods was investigated using electrochemical methods, such as corrosion potential measurements, polarization curves, cyclic voltammograms, etc. The Vickers hardnesses of all the welded zones (WM: Weld Metal, HAZ: Heat Affected Zone, BM: Base Metal) showed relatively higher values in the case of laser welding than for TIG welding. Furthermore, the corrosion current densities of all the welding zones showed lower values compared to TIG welding. In particular, the corrosion current density of the HAZ with TIG welding had the highest value of all the welding zones, which suggests that chromium depletion due to the formation of chromium carbide appears in the HAZ, which is in the range of the sensitization temperature. Thus, it can easily be corroded with a more active anode. Consequently, we found that the corrosion resistance of all of the welding zones for austenitic 304 stainless steel could apparently be improved by using Laser welding.

#### 1. 서 론

최근 산업사회의 급격한 발전과 함께 육해상의 각종 강구조물의 설비는 급격히 증가하고 있으며 또한 이들 강구조물은 용도와 사용조건에 따라 용접을 이용하여 제작된다고 하여도 과언은 아니다. 따라서 용접의 중요성은 널리 인지되어 왔으며 용접에 관련된 즉 용접부 주위의 강의 물리적 기계적 성질의 변화에 관한 연구가 많이 보고 되고 있다(김민남 등, 2000; 김복인 등, 2001; 김진경 등, 2006; 안석환 등, 2005; 오종인 등, 2007; Jang and Jeon, 2006; Kim et al., 2006a; 2006b). 그리고 이들 강구조물이 가혹한 부식 환경 하에 있을 경우 용접부 주위의 부식으로 인한 경제적 손실과 안전재해 사고를 유발 할 수 있으므로 일반강의 용접부식에 대한 연구 결과(Bilmes et al., 2006; Lee et al., 2003; Lo et al., 2002; Moon et al., 2003; Raja et al., 1998; Tsay et al., 1997)도 다소 보고되고 있다. 그리고 최근 원자력산업, 항공기산업 및 석유화학산업 등의 발전으로 고 내식

성의 오스테나이트계 스테인리스강의 사용빈도가 증가하고 있는 추세에 있다. 그런데 이들 스테인리스강의 구조물 제작을 위한 용접시에 용접부 주위의 예민화 현상에 따른 크롬결핍에 의한 입계부식에 대한 연구결과(Nobuo, 1964; Hiroshi, 1978; Yoshihiko, 1972; Devine, 1990)는 많이 보고되고 있으며 여기에 대한 억제방법도 많이 보고되고 있다.

일반적으로 스테인리스강을 용접할 경우 열영향부의 온도가 예민화 온도 400°C에서 800°C의 영역에서 일정기간 머물면 입계에 크롬탄화물(Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>)의 석출과 함께 크롬결핍영역이 나타나고 이 영역이 양극으로 작용하여 부식되는 소위 입계부식이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 경우 입계부식을 억제하기 위해서 탄소함량을 줄이거나 혹은 탄소와의 친화력이 좋은 금속원소 등을 첨가하는 경우도 있다. 최근에는 선박의 열교환기 등이고 내식성의 티탄 또는 스테인리스강을 사용하며 이때 일반용접 대신 레이저 용접을 하는 경우가 있다. 레이저용접의 경우 초기비용은 고가이나 장기적으로 용접부의 부식억제에 따른 경

교신저자 김진경: 부산광역시 남구 용당동 123, 051-620-5768, jg21kim@naver.com

본 연구는 2009년도 5월 창원에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에서 발표된 논문입니다.

제성이 훨씬 있는 것으로 사료된다. 그러나 레이저 용접의 경우 일반용접에 비해서 용접부의 부식억제효과의 유무에 대한 연구 결과는 없는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 304 스테인리스강을 일반용접 즉 TIG 용접과 레이저 용접을 하였을 경우 각 용접부의 부식특성을 비교고찰하여 보았다. 따라서 본 연구결과는 각종 구조물의 용접부 부식억제를 위해 일반용접과 레이저용접의 장단점을 파악하고 최적의 용접방법을 선택하는데 유익한 참고 자료가 되리라 기대된다.

## 2. 사용 재료 및 실험 방법

### 2.1 용접 재료 및 용접조건

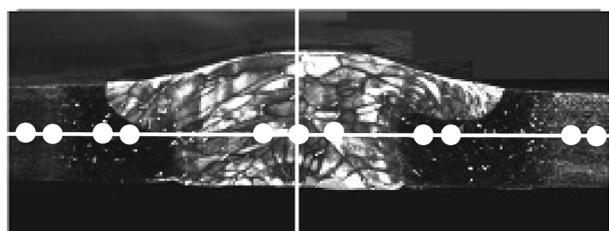
실험에 사용한 시험편은 시중에서 주로 사용되는 304 스테인리스강으로 두께는 1.5mm이며 가로 10cm 세로 15cm의 강판을 사용하였다. 그리고 일반용접의 경우 맞대기 용접을 하였으며 레이저 용접의 경우에는 아르곤 분위기에서 실시하였다. 시험편의 주요성분은 Table 1과 같으며 용접 조건은 Table 2와 같다.

**Table 1** Chemical composition of 304 stainless steel

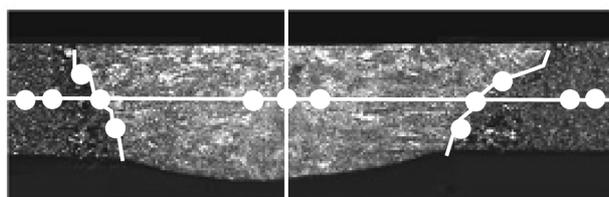
	Cr	Ni	C	Mn	Si	S	P
min	18	8.0					
max	20	10.5	0.08	2.0	1.0	0.03	0.045

**Table 2** Welding conditions in case of laser and TIG welding

Welding condition	
L-304 (Laser welding)	P=2 kw, V=50 mm/s, Ar (15 l/min)
T-304 (TIG welding)	DC 220 V, 140 A, 11~13 V, D.C straight polarity 2.4φ, Tungsten bar (2.0%Th)



TIG welding



Laser welding

**Fig. 1** Cross section view of test specimens with TIG and laser welding

### 2.2. 용접부위의 경도 및 전기화학적 실험

각각의 용접부위에 대한 경도측정을 하기 위하여 시험편을 용접 방향과 직각 방향으로 기계 절단, 가공한 후 샌드페이퍼로 2000번까지 연마한 후 각각의 시험편을 에칭(Etching)하였으며 에칭된 시험편은 Fig. 1과 같다. 그리고 TIG용접의 경우 용접 금속 중심부에서 모재부 방향으로 좌우 1mm 간격으로 3점의 위치에서 경도를 측정하여 평균값을 구하였다. 열영향부는 용접금속부 중심에서 좌우 6mm 떨어진 지점에서 1mm 간격으로 각 2점의 위치에서 경도를 측정하였고 모재부는 중심부에서 좌우 11mm 떨어진 지점에서 1mm 간격으로 각 2점의 위치에서 측정하였다. 그리고 레이저 용접의 열영향부는 Fig. 1에서와 같이 좌우 흰바탕의 용접금속부와 모재부의 경계영역점 위아래의 3점의 위치에서 각각 측정하여 평균값을 구하였다. 그리고 부식 전위와 분극곡선 등을 측정하기 위하여 각 부위의 표면적을 1cm<sup>2</sup> 혹은 0.5cm<sup>2</sup> 만을 노출시키고 다른 부분은 에폭시로 절연한 후 각각의 전기화학적 실험을 실시하였다.

전기화학적 실험은 해수를 3cm/s(PIV: Particle image velocimetry로 측정)의 유동 상태에서 부식 전위 변화, 양극 및 음극 분극곡선(측정장치: Won. A.Tech Garmy사의 CMS-100 시스템, 주사속도: 1mV/s 대극: 백금, 기준전극: SCE), 사이클릭 볼타모그램(주사속도: 30mV/s, 측정영역: -0.5V~1.5V) 등을 측정하였으며, 조직과 부식표면사진은 멀티미디어 영상현미경(Sometecht 사, Model: SV35) 으로 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

304 스테인리스강을 레이저용접과 일반용접을 하였을 경우 용접부의 각 부위에 대한 경도 측정값을 Table 3에 정리 하였으며 그리고 이들 값의 관계를 알기 쉽게 Fig. 2에 나타 내었다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 레이저용접과 TIG용접에 관계없이 용접금속부(WM: Weld metal)의 경도가 가장 높았으며 그리고 레이저용접의 경우에는 열영향부(HAZ: Heat affected zone)와 모재부(BM: Base metal)의 순으로 점차 경도가 저하하는 경향을 알 수 있었다. 그러나 TIG용접의 경우에는 모재부와 열영향부의 순으로 경도가 저하하는 경향을 알 수 있었다. 다시 말해서 열영향부가 모재부에 비해서 오히려 경도가 낮았다. 일반적으로 용접 열영향부(HAZ: Heat affected zone)가 급냉에 의한 담금질(Quenching)효과에 의해서 경도가 상승하고 용접금속부의 경도가 낮아지는 경우가 있으나 경우에 따라서는 용접금속부의 성분이 모재부로 혹은 모재부의 성분이 용접금속부로 확산 이동하여 용접금속부의 경도가 높고 열영향부의 경도가 오히려 낮아지는 경우도 있다(김진경 등, 2006; 신민교, 1987; 전대

**Table 3** Relationship of variation of vickers hardness of welding parts between laser and TIG welding (Hv)

	WM	HAZ	BM	Remark
L-304	263	251	224	L: Laser welding
T-304	250	181	191	T: TIG welding

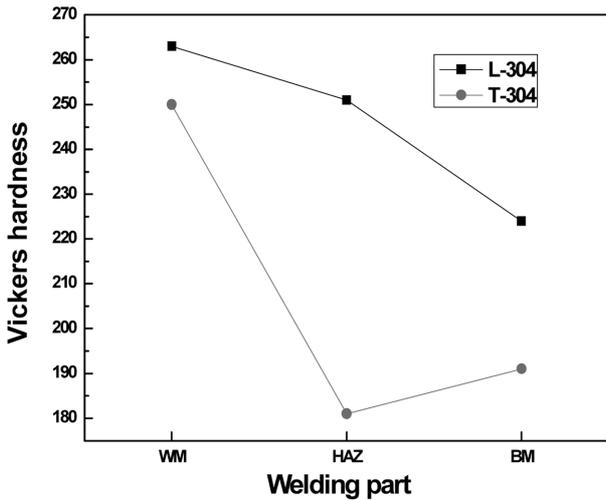


Fig. 2 Variation of vickers hardness of welding parts between laser and TIG welding

희, 1985)는 보고도 있으며 한편으로 용접금속부가 덴드라이트 조직으로 변하면서 결정입자의 조대화(안석환 등, 2005; 신민교, 1987)와 함께 경도가 상승하는 경우도 있다는 연구결과도 있다. 본 실험에서는 스테인리스강을 용접하였을 경우 즉 레이저용접을 하였을 경우 순간적으로 고온도의 열이 가해지기 때문에 경도가 높은 모재부의 크롬이 용접금속부로의 확산이동에 의해 용접금속부의 경도가 높고 또한 열영향부가 뚜렷하게 존재하지 않으므로 열영향부 모재부 순으로 순차적으로 경도가 낮아지는 것으로 사료된다. 그리고 TIG용접의 경우에는 열영향부가 존재하며 열영향부가 예민화온도 영역에 있는 경우 크롬탄화물의 형성과 함께 크롬 결핍영역에 있으므로 열영향부의 경도가 가장 낮은 것으로 사료된다.

Fig. 3은 레이저용접을 하였을 경우 침지시간의 변화에 따른 부식전위의 변화를 각 용접부위 별로 나타내고 있다. 침지 직후부터 열영향부의 부식전위가 귀방향으로 이행하면서 높게 나타났으며 침지 약 500초 후부터 안정되는 경향을 보였다. 그리고

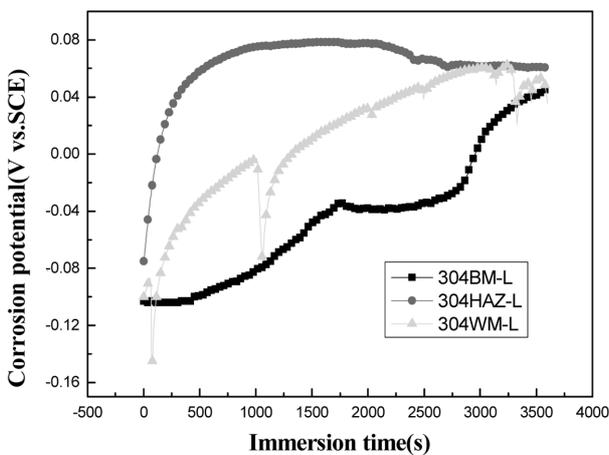


Fig. 3 Variation of corrosion potential of welding parts in case of laser welding

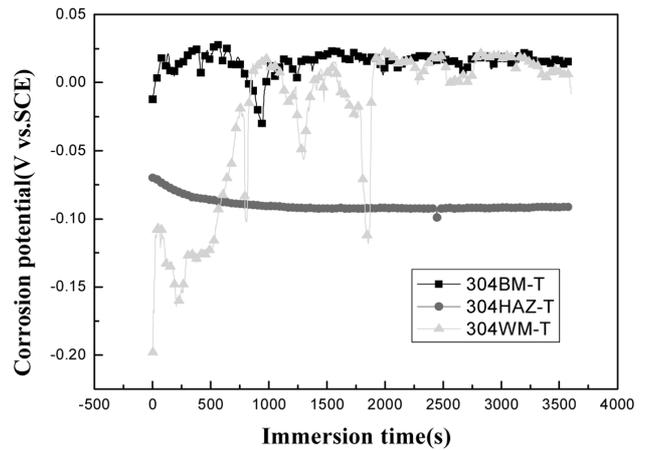


Fig. 4 Variation of corrosion potential of welding parts in case of TIG welding

용접금속부의 경우에는 점진적으로 귀방향으로 이행하면서 약 3000초 부터는 열영향부와 거의 같은 값으로 안정되는 것을 알 수 있다. 그러나 모재부의 경우에는 침지초기부터 비교적 비한전위값을 나타내면서 점차 상승하였으나 가장 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 TIG용접을 하였을 경우의 침지시간의 경과에 따른 부식전위의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 열영향부의 부식전위가 가장 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 모재부의 부식전위는 침지 초기부터 귀한 값을 유지하며 안정된 경향을 보였으며 용접금속부는 침지 초기에는 비한 값을 나타내었으나 점차 귀한 값으로 이행하면서 침지 약 2000초 까지 심한 진동을 하였으나 그 이후부터 안정되는 경향을 보였으며 약 3500초 후 부터는 용접금속부와 거의 같은 값을 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4에서 열영향부의 부식전위는 레이저용접에서 가장 귀한 값을 TIG용접에서는 가장 비한 값을 나타내었음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 TIG용접의 경우 각 용접부위에 대한 양극 및 음극분

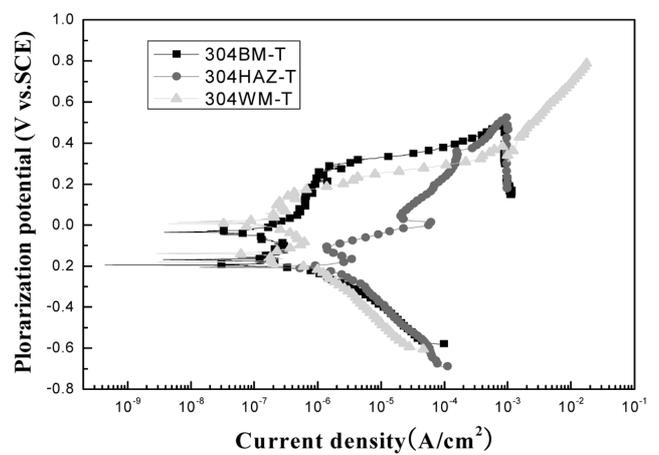


Fig. 5 Variation of anodic and cathodic polarization curves in case of TIG welding

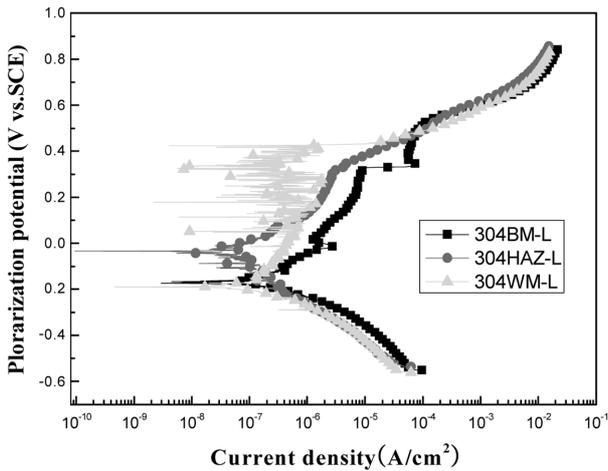


Fig. 6 Variation of anodic and cathodic polarization curves in case of laser welding

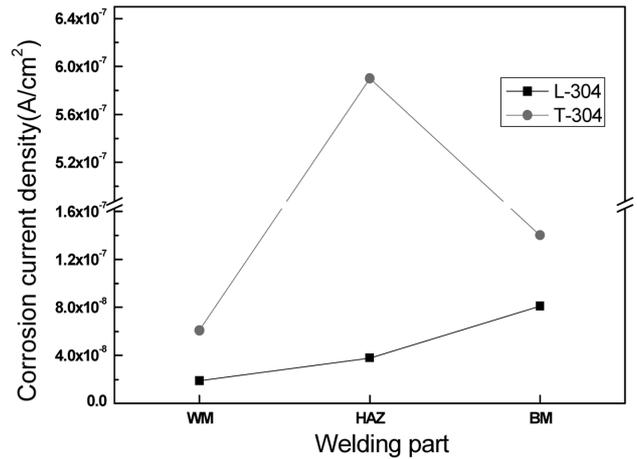


Fig. 8 Variation of corrosion current density of welding parts

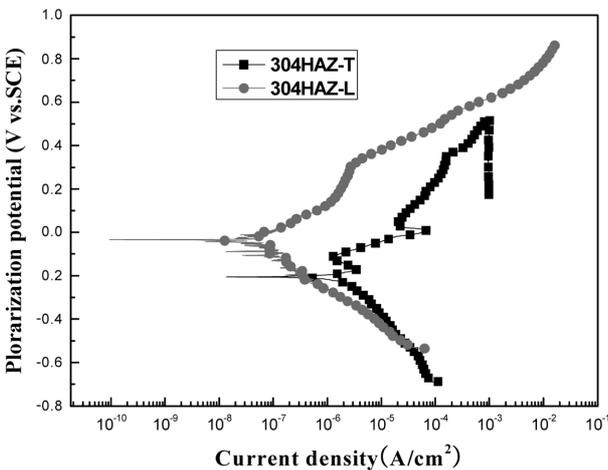


Fig. 7 Variation of anodic and cathodic polarization curves of HAZ in case of both laser and TIG welding

Table 4는 Fig. 5와 Fig. 6의 분극곡선에서 타펠의삼법에 의해서 구한 부식전류밀도를 각 용접방법에 따라 정리하여 나타내고 있으며 Fig. 8은 각 용접부위별의 부식전류밀도를 비교하여 나타내고 있다. 레이저용접의 경우에는 용접금속부의 부식전류밀도가 가장 낮으며 열영향부와 모재부의 순으로 부식전류밀도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 그런데 TIG용접의 경우에는 용접금속부의 부식전류밀도는 레이저용접과 마찬가지로 가장 낮은 값을 나타 내었으나 열영향부의 부식전류밀도 값은 레이저용접과는 반대로 가장 큰 값을 나타내었음을 알 수 있었다. 그리고 레이저용접에 비해서 TIG용접의 경우가 용접부 각 부위별에서의 부식전류밀도는 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 레이저용접의 경우에는 순간적으로 고온의 열에 의해서 용접되므로 크롬의 이동에 의한 경도의 상승과 함께 치밀한 크롬산화막의 형성에 의해 용접금속부의 내식성이 가장 좋은 것으로 사료된다. 반면에 TIG용접의 경우에는 열영향부가 예민화온도 영역에 들어감에 따라 열영향부에서 용접금속부로 크롬의 이동이 확산되고 동시에 크롬탄화물의 형성에 의해 크

극곡선을 나타내고 있다. 열영향부의 내식성이 가장 좋지 않은 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 레이저용접의 경우에는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 오히려 모재부의 내식성이 가장 좋지 않은 경향을 정성적으로 알 수 있다.

Fig. 7은 레이저용접과 TIG용접을 하였을 경우 열영향부에 대한 양극 및 음극분극곡선을 나타내고 있다. TIG용접의 분극곡선이 오른쪽으로 치우쳐져 있음을 알 수 있다. 따라서 TIG용접의 경우 열영향부의 내식성이 레이저용접에 비해서 좋지 않다는 결과를 얻을 수 있다.

Table 4 Relationship of variation of corrosion current density (A/cm²) between laser and TIG welding

	WM	HAZ	BM	Remark
L-304	$1.9 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-8}$	$8.1 \times 10^{-8}$	L: Laser welding
T-304	$6.1 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$	T: TIG welding

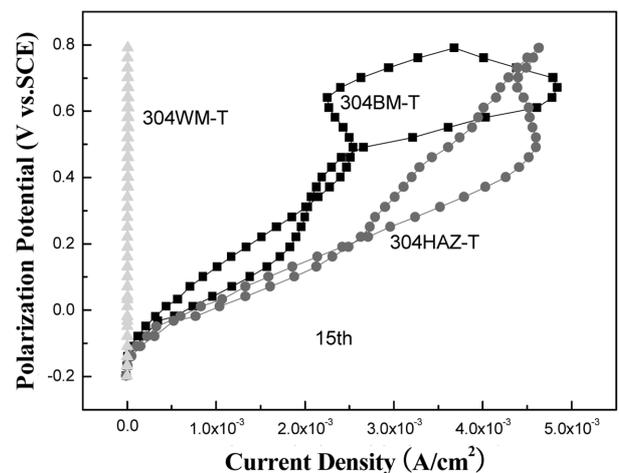


Fig. 9 Variation of cyclic voltammogram of 5th curves for various welding parts in case of TIG welding

톱의 결핍영역이 열영향부에 형성되어 열영향부의 부식전류밀도는 다른 용접부 부위에 비해서 가장 높게 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 9는 TIG용접의 시험편에 대한 15번째의 사이클릭볼타모그램을 나타내고 있다. 용접금속부의 분극곡선이 수직으로 나타나고 있으며 열영향부의 분극곡선이 가장 오른쪽으로 기울고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10에서는 레이저용접의 경우를 나타내고 있으며 용접금속부는 Fig. 9의 TIG용접과 마찬가지로 수직의 형태를 나타내고 있으나 모재부의 경우가 가장 오른쪽으로 기울고 있으므로 분극저항이 가장 적은, 즉 모재부가 내식성이 가장 좋지 않은 경향을 나타내었다.

이들의 결과는 전술한 Fig. 8의 부식전류밀도 값의 변화와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉 Fig. 8의 결과에서 부식전류밀도가 클수록 Fig. 9 및 Fig. 10에서의 분극곡선은 오른쪽으로 기울어 다시 말해서 공급전류밀도에 대한 분극저항이 감소하는 경향과 일치한다는 것을 잘 알 수 있었다.

Fig. 11은 15번째 사이클릭볼타모그램 측정 후의 표면을 영상

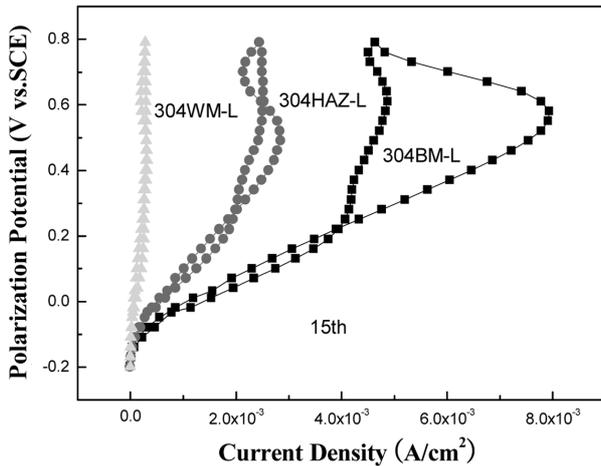


Fig. 10 Variation of cyclic voltammogram of 15th curves for various welding parts in case of laser welding

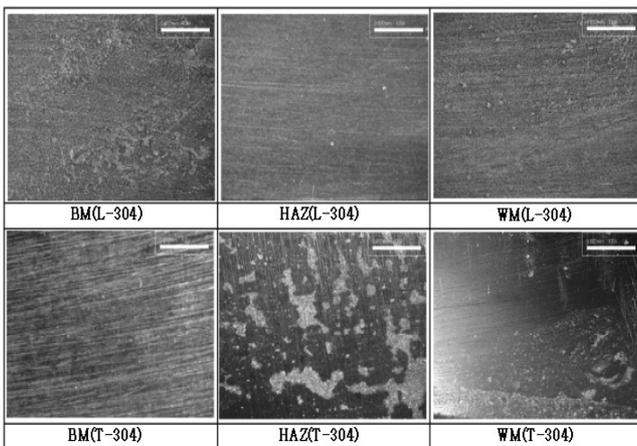


Fig. 11 Morphologies of corroded surface after 15th cyclic voltammogram

현미경으로 관찰한 결과이다. 레이저 용접의 경우에는 각 용접부 부위의 표면에 부식된 현상이 나타나지 않고 있으나 TIG용접의 경우에는 레이저 용접에 비해서 표면상태가 다소 부식된 현상을 나타내고 있으며, 특히 열영향부의 경우에는 레이저용접에 비해서 부식생성물의 형성과 함께 현저하게 부식된 양상을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

### 4. 결 론

지금까지 304 스테인리스강에 대해서 레이저용접과 TIG용접을 실시하여 각 용접부 부위의 내식성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 레이저용접의 경우에는 TIG용접에 비해서 각 용접부 부위의 경도가 높게 나타났으며, 특히 TIG용접에서 열영향부의 경도는 가장 낮게 나타났다.
- (2) 각 용접부 부위별에 관계없이 레이저용접의 경우가 일반 용접에 비해서 내식성이 양호한 사실을 알 수 있었다.
- (3) 용접방법의 종류에 관계없이 용접금속부의 내식성이 다른 용접부에 비해서 가장 양호하였다.
- (4) 레이저용접에서는 열영향부의 부식전류밀도가 모재부보다 양호하였으나 TIG용접의 경우에는 열영향부의 부식전류밀도가 모재부 및 용접금속부에 비해서 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다.
- (5) 결과적으로 304 스테인리스강은 TIG용접에 비해서 레이저용접을 함으로써 열영향부의 부식발생을 억제하고 동시에 모든 용접부 부위의 부식을 현저하게 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

김민남, 김복인, 한정동 (2000). “습식수중 용접봉의 기계적 성질에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp 56-61.

김복인, 노창석, 정교현, 김민남 (2001). “피복성분에 의한 수중 용접봉의 아크 안정성 개선에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 75-79.

김진경, 강명신, 김영식 (2006). “선박용 디젤기관의 주철 부품 보수 용접 특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제20권, 제2호, pp 41-45.

신민교 (1987). 기계공작법, 아성출판사, pp 242-245.

안석환, 정정환, 남기우 (2005). “용접 열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성평가”, 한국해양공학회지, 제19권, 제4호, pp 64-71.

오종인, 김영표, 박호경, 방한서 (2007). “선체구조용 A급 강재의 하이브리드 용접에 대한 열 및 역학적 특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp 64-68.

전대희 (1985). 부식과 방식의 관리, 일중사, pp 294-298.

Bilmes, P.D. Liorente, C.L. Saire Huaman, Gassa L.M. and Gervasi, C.A. (2006). “Microstructure and Pitting Corrosion of 13CrNiMo Weld Metal”, Corrosion Science, Vol 48, pp

- 3261-3270.
- Devine, T.M. (1990). "The Mechanism of Sensitization of Austenitic Stainless Steel", *Corrosion Science*, Vol 30, No 23, pp 135.
- Hiroshi, I. (1978). "Study of Weld Decay in SUS 304", *Journal of Japanese Welding Society*, Vol 47, No 3, pp 153.
- Jang, S.K. and Jeon, J.I. (2006). "Wedability of Al 7075 Alloy According to Different Tools and Welding Conditions by F.S.W.", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol 30, No 1, pp 30-41.
- Kim, J.D., Kil, B.L. and Lee, C.J. (2006a). "The Weldability of Haminated Stator Core for Motor by Pulsed Nd: YAG Laser[I]", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol 30, No 5, pp 629-635.
- Kim, J.D., Yoo, S.J. and Kim, J.S. (2006b). "Optimization of Pulsed Nd: YAG Laser Welding Conditions for Sealing of Lithium-ion Battery", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol 30, No 5, pp 623-628.
- Lee, Y.H., Kim, Y.H. and Kim, H. (2003). "Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steel in Natural Sea Water with Different Post Welding Treatment", *Corrosion Science and Technology*, Vol 2, No 5, pp 219-224.
- Lo, I.H., Lee, M.C., Lim, K.Y., Ho, W., Yang, G.C.Y. and Tsai, W.T. (2002). "Effect of Heat Treatment on the Pitting Corrosion Behavior of 347SS Weld Overlay", *Corrosion Science and Technology*, Vol 31, No 5, pp 361-367.
- Moon, K.M., Lee, M.H., Kim, K.J., Kim, J.G. and Kim, S.J. (2003). "A Study on the Post-Weld Heat Treatment Effect to Mechanical Properties and Hydrogen Embrittlement for Heating Affected Zone of a RE36 Steel", *Corrosion Science and Technology*, Vol 2, No 6, pp 283-288.
- Nubuo, F. (1964). "Effect of Thermal Cycles on Corrosion Resistance in a Type 304 Stainless Steel", *Journal of Japanese Welding Society*, Vol 33, No 1, pp 55.
- Raja, V.S., Vershney, S.K., Raman, R. and Kulkarni, S.D. (1998). "Influence of Nitrogen on the Pitting Corrosion Behavior of 904L Weld Clad", *Corrosion Science*, Vol 40, No 10, pp 1609-1625.
- Tsay, L.W., Lin, W.L., Chenct, S.W. and Leu, G.S. (1997). "Hydrogen Sulphide Stress Corrosion Cracking of 2.25 Cr-Mo Steel Weldments", *Corrosion Science*, Vol 39, No 7, pp 1165-1176.
- Yoshihiko, M. (1972). "Corrosion of Austenitic Stainless Steel Welds", *Journal of Japanese Welding Society*, Vol 41, No 2, pp 154.

---

2009년 5월 6일 원고 접수

2009년 7월 17일 심사 완료

2009년 8월 19일 게재 확정