

Laser 용접한 스테인리스강의 용접부위의 부식특성에 관한 평가

문경만* · 원종필* · 박동현* · 김윤해* · 이명훈** · 김진경***

*한국해양대학교 공과대학 조선기자재 공학부

**한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

***한국해양수산연수원 교육연구처

Evaluation of Corrosion Property of Welding Zone of Stainless Steel by Laser Welding

Kyung-Man Moon*, Jong-Pil Won*, Dong-Hyun Park*, Yun-Hae Kim*,
Myung-Hoon Lee* and Jin-Gyeong Kim***

*Department of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime University, Pusan, Korea

**Department of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Pusan, Korea

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

KEY WORDS: Laser welding 레이저용접, Intergranular corrosion 입계부식, Weld metal 용접금속, Heat affected zone 열영향부, Corrosion current density 부식전류밀도, Chromium depletion 크롬결핍

ABSTRACT: Laser welding was carried out on austenitic 304 (STS 304) and 22 APU stainless steels. In this case, the differences between the corrosion characteristics of the welding zones of the two stainless steels were investigated using electrochemical methods. The Vickers hardness values of the weld metal (WM) zones in both cases, the STS 304 and 22 APU stainless steels, showed relatively higher values than those of other welding zones. The corrosion current densities of the heat affected zone (HAZ) of the 22 APU and the base metal (BM) zone of the STS 304 exhibited the highest values compared to the other welding zones. It is generally accepted that when STS 304 stainless steel is welded using a general welding method, intergranular corrosion is often observed at the grain boundary because of its chromium depletion area. However, when laser welding was performed on both the STS 304 and 22 APU stainless steels, no intergranular corrosion was observed at any of the welding zones. Consequently, it is considered that the intergranular corrosion of stainless steel can be controlled with the application of laser welding.

1. 서 론

육해상용 구조물과 설비의 재료는 철강 재료가 대부분이며, 이들 강구조물 등은 70~80%가 용접으로 제작되어 사용되어 진다고 할 수 있다. 따라서 용접의 중요성은 널리 인지되어 왔으며 강의 용접에 관한 용접부위의 물리적, 기계적 성질의 변화에 관한 연구가 많이 보고되고 있다(김민남 등, 2000; 김복인 등, 2001; 김진경 등, 2006; 안석환 등, 2005; 오종인 등, 2007; Jang and Jeon, 2006; Kim et al., 2006a; Kim et al., 2006b). 그리고 이들 강구조물이 가혹한 부식 환경에서 사용될 경우 용접부위에 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.

한편 최근에 원자력산업 및 석유화학산업 등의 발전과 함께 오스테나이트계 스테인리스강의 사용빈도가 증가하고 있는 추세에 있다. 예를 들면, 케미컬 탱커의 화물 탱크는 내식성이 우

수한 오스테나이트계 스테인리스 강판 혹은 클래드(clad) 강판을 사용하기도 하며, 가혹한 부식 환경이나 연료전지의 극판 등에는 크롬계 스테인리스강을 용접하여 제작함으로써 내식성을 증대시키고 있는 실정이다. 그런데 일반적인 오스테나이트계 스테인리스강을 용접할 경우, 용접열영향부의 온도가 예민화 온도인 450°C~850°C의 영역에서 연강보다 열전도도가 1/3 정도로 낮으므로 용접열의 확산이 지연되어 일정기간 머물게 되므로, 입계에 크롬탄화물(Cr₂₃C₆)이 석출함과 동시에 크롬결핍영역이 발생하므로, 이 영역이 양극으로 작용하여 부식이 되는 소위 입계 부식이 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 입계부식을 억제하기 위해 탄소함량을 줄이거나 탄소와 친화력이 크롬보다 더 강한 Ti, Nb 등을 첨가하는 스테인리스강을 사용하거나, 또는 용접 후 용접부위를 1,050°C 전후의 용체화처리를 실시하는 방법 등과 같은 입계부식에 대한 연구와 억제 방법도 많이 보고되고 있다(Nobuo, 1964; Hiroshi, 1978; Yoshihiko, 1972; Devine, 1990).

그리고 최근에는 선박의 열교환기 등에 고 내식성의 티탄 또는 스테인리스강을 사용하며 이때 일반용접 대신 레이저 용접을

하는 경우가 있다. 레이저용접의 경우 초기비용은 고가이나 장기적으로 용접부의 부식억제에 따른 경제성이 훨씬 있는 것으로 사료된다. 그러나 레이저 용접의 경우 일반용접에 비해서 용접부의 부식억제효과와 유무에 대한 연구결과는 거의 없는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 크롬계 스테인리스강인 22 APU와 크롬-니켈계 스테인리스강인 STS 304를 피복아크용접이나, 불활성 가스 용접 대신에 에너지 밀도가 높은 레이저 용접을 실시하여 크롬함량 및 니켈함량유무에 따른 각 용접부의 부식특성에 미치는 레이저용접의 영향을 전기화학적으로 비교 고찰하여 보았다. 따라서 본 연구결과는 각종 스테인리스강 구조물의 용접부에 대한 부식 억제를 위해서 레이저 용접법의 적합성과 그 효율성 등을 검토하는데 있어 유익한 참고 자료가 되리라 기대된다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 용접 재료 및 용접조건

실험에 사용한 크롬계 스테인리스강 22 APU와 오스테나이트계 스테인리스강 STS 304의 시험편 치수는 가로 100mm 세로 150mm이고, 각각 두께는 2.5mm, 1.5mm이었다. 22 APU와 STS 304는 용접봉 없이 레이저 용접을 실시하였다. 시험편의 주요 성분은 Table 1과 같으며, 용접 조건은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of 22 APU and STS 304

| Material | Cr | Ni | C | Mn | Si | Cu | Al |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 22 APU | 22.0 | | 0.03 | 0.55 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| STS 304 | 19.0 | 9.25 | 0.08 | 2.0 | 1.0 | | |

Table 2 Welding conditions of 22 APU and STS 304 in the case of Laser welding

| Kind | Welding condition |
|---------|------------------------------|
| 22 APU | P=2kW, V=50mm/s, Ar(15L/min) |
| STS 304 | P=2kW, V=50mm/s, Ar(15L/min) |

2.2 용접부위의 경도 및 전기화학적 실험

각각의 용접부위에 대한 경도측정을 하기 위하여 시험편을 용접 방향과 직각 방향으로 기계 절단, 가공하고 샌드페이퍼로 2000번으로 연마한 후 각각의 시험편을 에칭(Etching)하였으며, 에칭된 시험편은 Fig. 1과 같다.

경도의 측정방법은 용접금속부의 경우 용접 금속부의 중심부에서 모재부 방향으로 좌우 1mm 간격으로 3점의 위치에서 경도를 각각 측정하여 평균값을 구하였다. 그리고 용접열영향부는 흰바탕의 용접금속부와 모재부의 경계영역선을 따라 좌우의 상하 3점의 위치에서 측정하여 평균값을 구하였다. 또한 모재부는 용접금속부 중심에서 좌우 13mm(22 APU의 경우 좌우 11mm)의 위치에서 각각 2점의 위치에서 경도를 측정하고 평균값을 구하였다.

부식전위와 분극곡선 등을 측정하기 위하여 각 부위의 표면적을 1cm² 혹은 0.5cm² 만을 노출시키고 다른 부분은 에폭시로

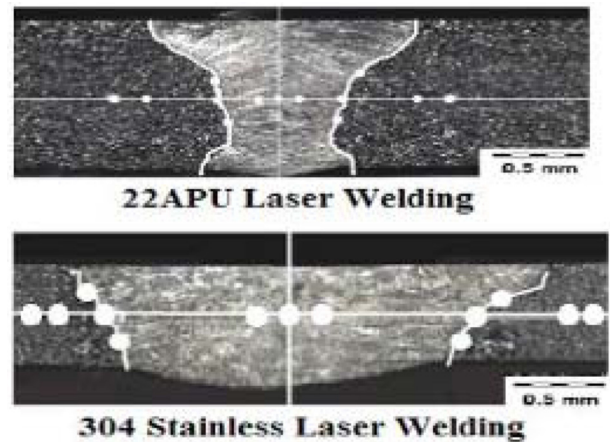


Fig. 1 Cross section view of test specimens of 22 APU and STS 304 with Laser welding

절연시켰다. 그리고 각각 전기화학적 실험은 해수를 3cm/s(PIV: Particle image velocimetry로 측정)의 유동 상태에서 CMS-100 시스템이 내장된 측정 장치(Won. A. Tech Garmy사, 주사속도: 1mV/s, 대극: 백금, 기준전극: SCE)로 실시하였고 부식 전위 변화, 양극 및 음극 분극곡선, 사이클릭 볼타모그램(주사속도: 30 mV/s, 측정영역: -0.5V~1.5V) 등을 측정하였으며, 볼타모그램 측정 후 부식된 표면사진을 주사 전자현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

22 APU와 STS S304 스테인리스강에 대해 레이저 용접한 경우, 용접부위에 대한 경도 측정값을 Table 3과 Fig. 2에 정리하여 나타내었다. 22 APU와 STS 304 모두 용접금속(WM: Weld metal)부의 경도가 가장 높았으며, 용접열영향부(HAZ: Heat affected zone)와 모재(BM: Base metal)부의 순으로 점차 경도가 저하하는 경향을 알 수 있었다. 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; 전대회, 1985)는 보고도 있으며 한편으로 용접금속부가 덴드라이트 조직으로 변하면서 결정입자의 조대화(안석환 등, 2005; 신민교, 1987)와 함께 경도가 상승하는 경우도 있다는 연구결과도 있다.

스테인리스강은 일반적으로 열전도도가 낮으며 또한 22 APU

Table 3 Variation of Vickers hardness of welding parts between 22 APU and STS 304 in the case of Laser welding

| (Unit : Hv) | | | |
|-------------|-----|-----|-----|
| | WM | HAZ | BM |
| 22 APU | 255 | 248 | 247 |
| STS 304 | 263 | 251 | 224 |

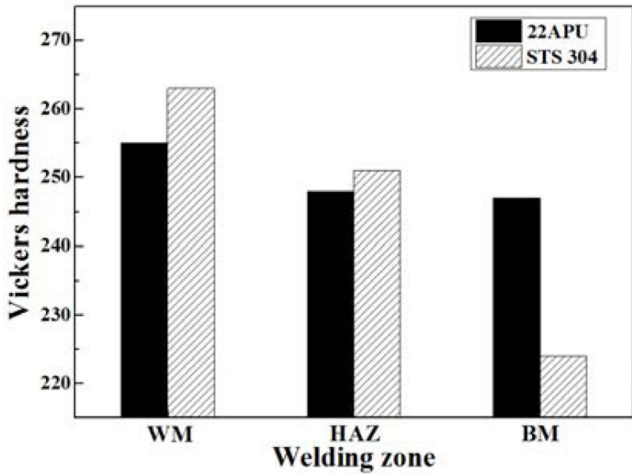


Fig. 2 Variation of vickers hardness of welding zones for 22 APU and STS 304 stainless steel

의 경우는 시험편의 두께가 STS 304보다 약 1.7배 두꺼우므로 두께가 얇은 STS 304에 비해 용접입열이 용접금속부, 용접열영향부 및 모재부에 느리게 전달되므로 경도 차이가 상대적으로 적게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 용접을 실시한 22 APU의 경우 침지시간의 변화에 따른 부식전위의 변화를 각 용접부위 별로 나타내고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 용접열영향부의 부식전위는 침지후 750초까지는 귀한 방향으로 이행하였으나 그 이후 점점 낮은 방향으로 이행하여 침지 3,500초에서는 가장 낮은 전위 값을 나타내었으며, 용접금속은 침지 2,000초까지 침지 시간의 경과와 함께 점점 상승하였으나, 그 이후는 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 모재부의 부식전위는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 침지 초기에는 가장 낮았으나, 침지 시간이 경과함에 따라 귀한 방향으로 이행하여 가장 높은 전위 값을 나타내었다.

Fig. 4에서는 STS 304의 경우 침지시간의 변화에 따른 부식전위의 변화를 각 용접부위 별로 나타내고 있다.

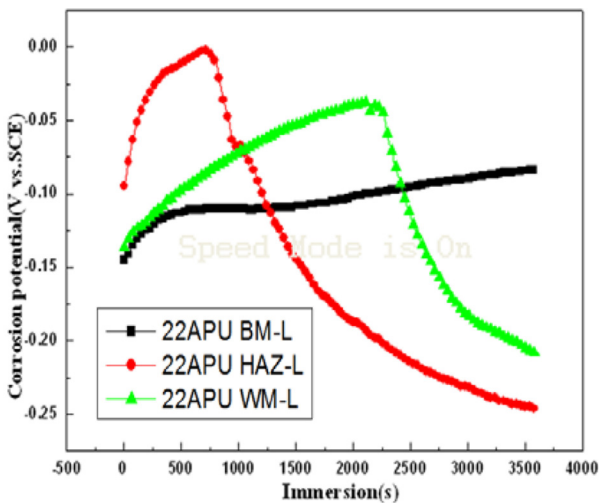


Fig. 3 Variation of corrosion potentials for welding zones of 22 APU in seawater solution

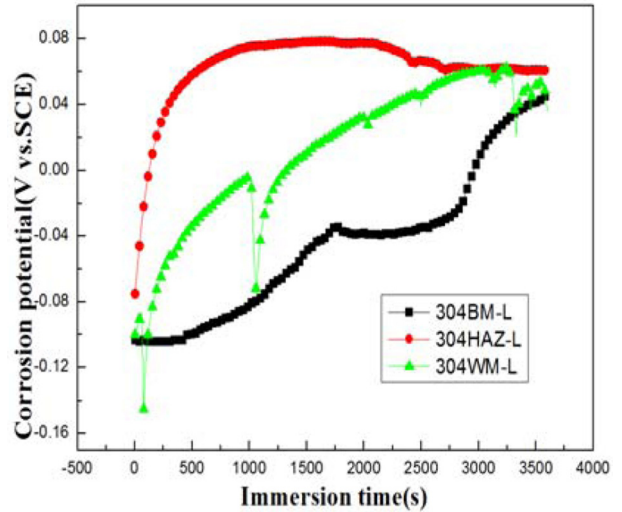


Fig. 4 Variation of corrosion potentials for welding zones of STS 304 in seawater solution

침지 직후부터 열영향부의 부식전위가 귀 방향으로 이행하면서 높게 나타났으며 침지 약 500초 후부터 안정되는 경향을 보였다. 그리고 용접금속부의 경우에는 점진적으로 귀 방향으로 이행하면서 약 3,000초부터는 열영향부와 거의 같은 값으로 안정되는 것을 알 수 있다. 그러나 모재부의 경우에는 침지 초기부터 비교적 비한 전위 값을 나타내면서 점차 상승하였으나 가장 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

본 실험의 결과 각 용접부위 별 부식전위 변화와 Table 3의 경도값의 상관관계를 비교할 때, 22 APU와 STS 304 모두 용접금속부의 경도가 가장 높았으나 부식전위는 22 APU의 경우 가장 비한 값을 STS 304에서는 가장 귀한 값을 나타내는 실험결과를 얻을 수 있었다. 따라서 경도와 부식전위의 상관관계는 반드시 일치하지 않았으며, 그 이유는 모재금속의 성분의 종류와 함량비 및 용접 과정에서 열의 영향에 의한 이들 금속의 확산 이동 등 다른 원인에 기인하는 것으로 생각된다.

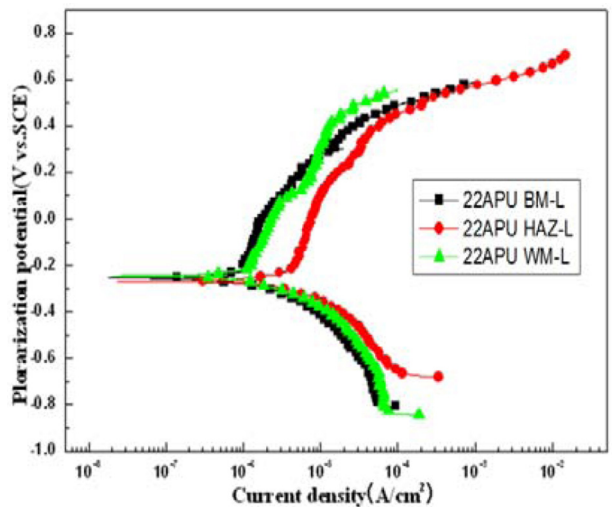


Fig. 5 Anodic and cathodic polarization curves of welding zones for 22 APU in seawater solution

Fig. 5는 22 APU에 레이저 용접한 경우, 각 용접부위에 대한 양극 및 음극 분극곡선을 나타내고 있으며, 용접열영향부의 내식성이 정성적으로 가장 떨어지는 경향을 보여주고 있다. 그러나 레이저 용접한 STS 304의 경우는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 오히려 모재부의 내식성이 가장 좋지 않은 경향을 정성적으로 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6의 분극곡선에서 타펠외삽법으로 구한 부식전류밀도를 각 재료 별로 정리하여 Table 4와 Fig. 7에 나타내고 있다.

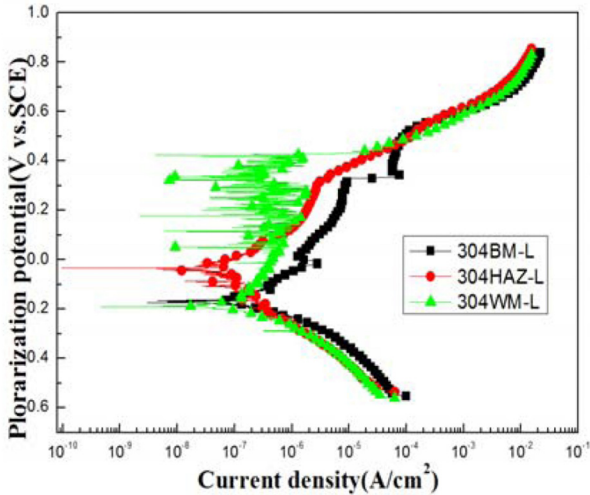


Fig. 6 Anodic and cathodic polarization curves of welding zones for STS 304 in seawater solution

Table 4 Relationship of variation of corrosion current density between 22 APU and STS 304 in the case of Laser welding (A/cm²)

| | WM | HAZ | BM |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 22 APU | 4.3×10^{-8} | 9.7×10^{-8} | 2.2×10^{-8} |
| STS 304 | 1.9×10^{-8} | 3.8×10^{-8} | 8.1×10^{-8} |

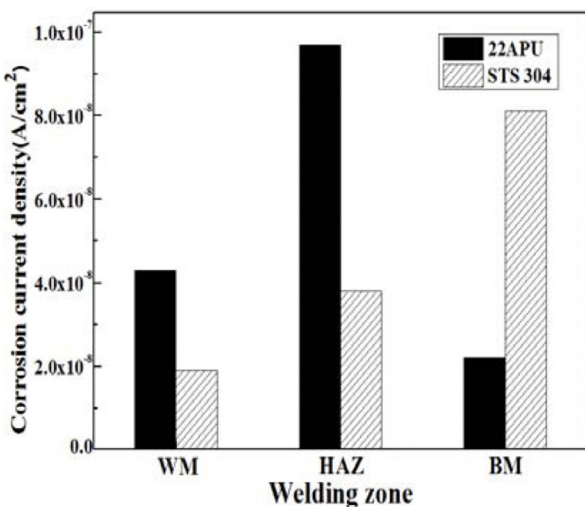


Fig. 7 Comparison of corrosion current densities of welding zones between 22 APU and 304 stainless steels

22 APU 용접부위에서는 모재부의 부식전류밀도가 가장 낮았으며 용접금속과 용접열영향부 순으로 부식전류밀도가 증가함을 알 수 있다. 그런데 STS 304 용접부위는 용접금속부의 부식전류밀도가 가장 낮았으며 그리고 용접열영향부보다 모재부의 부식전류밀도가 가장 높은 값을 보여 주고 있음을 알 수 있다. 22 APU에 레이저 용접을 실시한 경우 용접열영향부가 가장 높은 부식전류밀도를 나타내는 이유는 레이저 용접 중에 고온도의 열에너지가 순간적으로 공급되어 용접열영향부의 크롬 등이 모재부로 확산 이동되어 Fig. 3에서 알 수 있듯 부식전위가 가장 낮은 값을 나타내며 부식전류밀도는 증가한 것으로 생각된다. 그리고 STS 304의 경우에도 순간적으로 고온의 열에 의해서 용접되므로 모재부의 크롬 등 금속성분의 확산이동에 의한 용접금속부의 경도의 상승과 함께 치밀한 크롬 산화막의 형성에 의해 용접금속부의 내식성이 가장 좋은 것으로 사료된다.

Fig. 8은 레이저용접을 실시한 22 APU 시험편에 대한 15번째의 사이클릭 볼타모그램을 나타내고 있다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 모재부는 가장 왼쪽의 위치에 나타내고 있으며, 용접금속은 중앙부에 그리고 열영향부는 가장 오른쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다.

이들의 결과는 전술한 Table 4와 Fig. 5 및 7의 부식전류밀도 값의 변화와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉 Fig. 7의 결과에서 22 APU의 열영향부의 부식전류밀도가 클수록 Fig. 8에서의 사이클릭 볼타모그램은 가장 오른쪽에 위치하는, 다시 말해서 공급전류밀도에 대한 분극저항이 감소하는 경향과 일치한다는 사실을 잘 알 수 있다.

그리고 Fig. 9는 STS 304의 용접시험편에 대한 15번째의 사이클릭 볼타모그램을 나타내고 있다. 용접금속부가 가장 왼쪽에서 수직의 형태를 나타내고 있으며, 열영향부가 중앙의 위치에 있으며 그리고 모재부의 경우가 가장 오른쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 STS 304의 경우 모재부의 분극저항이 가장 적은, 즉 내식성이 가장 좋지 않은 경향을 나타내고 있음을 정성적으로 알 수 있다. 이들의 결과 역시 전술한 Table 4와 Fig. 6 및 7의 부식전류밀도 값의 변화와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 부식전류밀도가 클수록 사이클릭 볼타모그램의 선

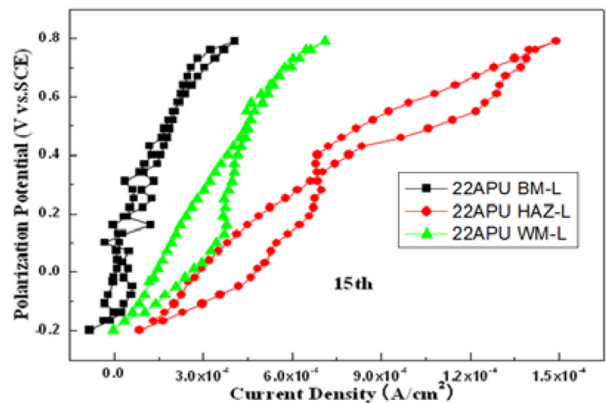


Fig. 8 Variation of cyclic voltammogram of 15th curves for various welding parts of 22 APU in case of Laser welding

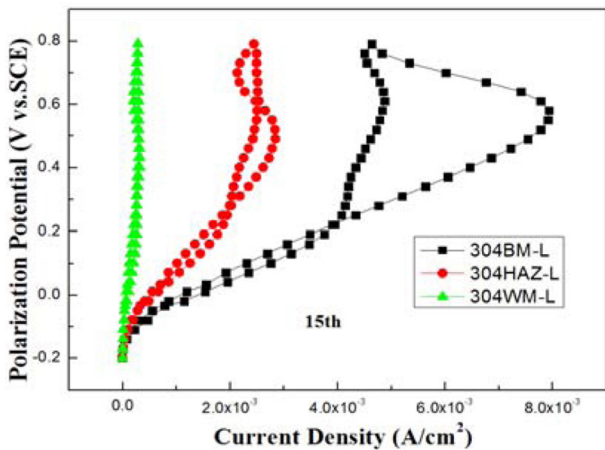


Fig. 9 Variation of cyclic voltammogram of 15th curves for various welding parts of STS 304 in case of Laser welding

도는 오른쪽으로 기우는 다시 말해서 공급전류밀도에 대한 분극 저항이 감소하는 경향과 일치한다는 사실을 재확인 할 수 있었다.

Fig. 10은 15번째의 사이클릭 볼타모그램 측정 후의 부식된 표면을 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 22 APU의 경우 각 용접부 부위의 부식된 표면 양상이 뚜렷한 차이를 보이지 않고 또한 입계 부식이 발견되지 않았으며 STS 304의 용접열영향부에는 뚜렷한 입계 부식이 관찰되지 않았으나 22 APU에 비해서 미세한 입계 부식과 용접열영향부에 미세한 핏팅이 발생되고 있음을 관찰 할 수 있었다. 크롬계 스테인리스강의 입계부식 발생 온도는 약 925°C 이상이며, 650~815°C에서 짧은 시간 가열하면 예민화가 없어진다. 그리고 크롬계 스테인리스강의 입계탄소함량이 0.01% 이하를 함유한 경우에도 입계부식이 발생하기도 한다는 결과가 있다(이학렬, 1991). 따라서 탄소함량이 각각 0.08%와 0.03%인 STS 304와 22 APU는 입계부식의 발생가능성이 충분하나, 본 실험의 결과 전술한 바와 같이 입계부식은 뚜렷하게 발생하지 않았다. 이와 같은 결과는 레이저 용접을 할 경우 용접입열 양의 에너지 밀도, 모재의 두께와 열전도도 등을 포함한 다소 복합적인 요인에 기인한 것으로 사료된다.

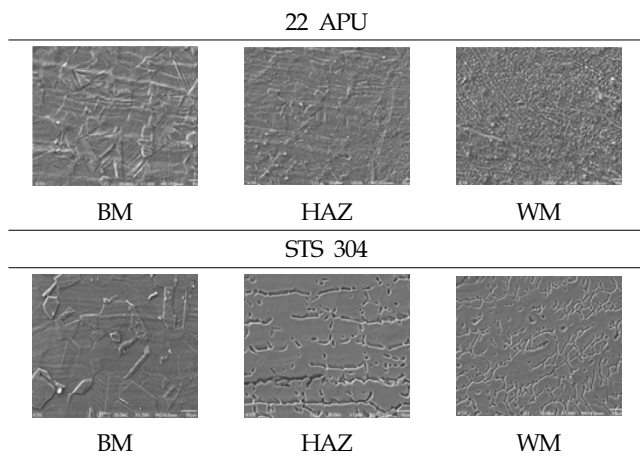


Fig. 10 SEM microphotographs of corroded surface after 15th cyclic voltammogram of 22 APU and STS 304

4. 결 론

지금까지 22 APU 및 STS 304 스테인리스강에 대해 레이저 용접을 실시한 후 용접부위에 대한 내식성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 22 APU와 STS 304의 시험편에 대해 레이저 용접을 실시한 결과 두 금속 모두 용접금속부의 경도가 제일 높게 나타났으며, 모재부의 경도가 가장 낮게 나타났다.

(2) 22 APU 스테인리스강의 경우 용접열영향부의 내식성이 가장 좋지 않았으며, 모재부가 내식성이 가장 우수하였고, STS 304의 경우에는 모재부의 내식성이 가장 나쁘고 용접금속부의 내식성이 가장 좋은 것으로 나타났다.

(3) 22 APU시험편의 경우 모든 용접부에서 입계부식이 발견되지 않았으나, STS 304의 경우 용접열영향부에 미세한 입계부식과 용접금속부에는 미세한 핏팅이 다소 관찰되었다.

(4) 결과적으로 22 APU와 STS 304 스테인리스강의 경우 레이저 용접에 의해서 입계부식의 발생을 억제할 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 수중용접봉의 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.

이학렬 (1991). "금속부식공학", 연경문화사, pp 246-247.

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). "Weldability of Al 7075 Alloy According to Different Tools and Welding Conditions by F.S.W.", Journal of the Korean Society of Marine Engi-

- neering, Vol 30, No 1, pp 30-41.
- Kim, J.D. Kil, B.L. and Lee, C.J. (2006a). "The Weldability of laminated 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.
- Nobuo, 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.

2012년 6월 11일 원고 접수

2012년 8월 6일 심사 완료

2012년 8월 20일 게재 확정