

# 보수용접봉의 종류와 용접후 열처리가 용접금속부의 내식성에 미치는 영향에 관한 전기화학적 평가

신재현·문경만<sup>1,\*</sup>

한국해양수산연수원

<sup>1</sup>한국해양대학교 조선기자재공학부

(2010년 11월 1일 접수, 2010년 12월 29일 수정, 2010년 12월 29일 채택)

## An Electrochemical Evaluation on the Corrosion Resistance of Welding Zone due to Kinds of Repair Welding Filler Metals and Post Weld Heat Treatment

Jae-Hyun Shin and Kyung-Man Moon<sup>1,\*</sup>

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

<sup>1</sup>Dept. of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime Univ. Pusan, Korea

(Received November 1, 2010; Revised December 29, 2010; Accepted December 29, 2010)

Recently a fuel oil of the diesel engine of the marine ship is being changed with heavy oil of low quality as the oil price is higher more and more. Therefore the wear and corrosion in all parts of the engine such as cylinder liner, piston crown, spindle and seat ring of exhaust valves are predominantly increased. In particular the degree of wear and corrosion of piston crown is more seriously compared to the other parts of the engine due to operating in severe environment such as the high temperature of exhaust gas and repeating impact. Thus the repair weldment of the piston crown is a unique method to prolong the its life in a economical point of view. In this case, filler metals having a high corrosion and wear resistance such as stellite 6, Inconel 625 and Inconel 718 are mainly being used for repair welding. However it has been often happened that piston crown on the ship,s job site is being actually inevitably welded with mild filler metals. Therefore in this study, filler metals such as E4301, E4313 and E4316 were welded at SS401 steel as the base metal, and corrosion property of their weld metals in the case of post weld heat treatment or not was investigated with some electrochemical methods such as measurement of corrosion potential, cathodic and anodic polarization curves, cyclic voltammogram and polarization resistance etc. in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. Corrosion resistance of the weld metal of E4301 was better than the other weld metals in the case of no heat treatment, however, its resistance was considerably decreased with post weld heat treatment(annealing:625 °C, 2 hr) compared to other weld metals. The weld metals of E4313 and E4316 showed a relatively good corrosion resistance by post weld heat treatment.

**Keywords** : piston crown, weld metal, post weld heat treatment, polarization curves, crrosion resistance

### 1. 서론

세계적인 유가의 상승으로 연료비가 앙등함에 따라 C 중유를 사용하는 대형 선박 디젤기관 연료는 더욱 저질화 되어 연료자체의 비중은 물론 불순물의 함량 또한 증가 되었다. 그리고 이러한 조건에서 운전하는 디젤기관의 경우 저질 중유의 사용으로 인한 실린더라이너와 피스톤 크라운의 링 홈의 마멸 증대 및 중유 중에 함유되어 있는 바나듐(V)과 유황(S)에 의한 고온부식과 저온부식 등<sup>1)</sup>으로 인해 실린더 헤드의 소손과 균열 발생 등이 야기되고 있다. 더욱이 연소

실을 구성하는 주요한 요소인 피스톤상부는 표면 온도가 제일 높은 분위기속에서 작동되며 또한 연소폭발에 의한 강한 반복 충격을 받고 있는 동시에 연소 가스를 끊임없이 배출한다. 뿐만 아니라 피스톤 크라운 역시 피스톤의 끊임없는 반복운동으로 피스톤 크라운의 부식으로 인한 마멸은 피할 수 없는 상황이다. 피스톤 크라운은 고온 하에서의 반복 충격과 압력으로 인한 물리적인 마멸과 전기화학적 부식으로 인한 부식생성물의 연소에 의한 마멸량이 증대 되고 있다. 따라서 전술한 실린더 헤드, 피스톤 크라운 및 배기 밸브의 손상부분은 보수용접을 통하여 재사용함으로써 수명연장에 따른 경제적인 효과를 얻고 있다.

이처럼 손상된 피스톤 크라운의 보수용접 뿐만 아니라 일

\* Corresponding author: lab@hhu.ac.kr

반적으로 강구조물의 제작에는 여러 가지 용접법이 사용되고 있다. 따라서 지금까지 선박과 관련된 강구조물의 제작을 용접으로 할 경우, 이런 구조물의 용접부에 대한 기계적 특성<sup>2)~9)</sup>과 부식 등<sup>10)~15)</sup>에 관한 연구도 많이 발표되고 있다. 그리고 상기한 부품들의 수명연장을 위한 보수용접에 대해서도 다양한 용접방법이 사용되어지고 있다. 필자는 지난 연구<sup>16)</sup>에서 크롬계 내열강의 배기밸브 일부를 모재부로 하고 스텔라이트 용접봉과 용접방법의 영향에 대해서 5% 황산용액에서 연구 고찰한 바 있다. 그러나 운항중인 실제의 선박에서는 연강용접봉으로 긴급하게 보수용접을 해야 하는 불가피한 경우가 종종 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 일반 연강의 한 부분을 모재부로 하고 여기에 연강용접봉으로 보수용접을 하였을 경우 보수용접봉의 종류와 열처리가 용접금속부의 경도와 내식성에 미치는 비교 평가를 전기화학적 측면에서 비교 고찰하였다. 따라서 본 연구의 결과는 연강용접봉의 종류와 열처리가 용접금속부의 내식성에 미치는 영향을 규명함으로써 향후 현장의 상선에서 긴급하게 보수용접을 할 경우 효율적인 용접봉의 사용과 열처리효과에 대한 참고자료를 제공하는데 그 의미가 클 것으로 사료된다.

## 2. 용접봉의 종류와 열처리, 용접조건 및 실험방법

본 실험에 사용된 모재부는 가로 10 cm, 세로 5 cm, 두께 10 mm의 SS401강이며 용접 방법은 교류 피복아크용접 (AC Shielded Metal Arc Welding: AC SMAW)으로 교류 1층 에서 5층까지 용접하였으며 용접된 용접금속부(WM)의 두께는 5 mm 였다. 그리고 용접후의 열처리는 625 °C

Table 1. Types of filler metals and their welding conditions

Filler metals	Dia (∅)	Layer	Voltage (V)	Ampere (A)
E4301	3.2	1	29.0	105
		5	28.5	100
E4313	3.2	1	28.5	103
		5	30.0	105
E4316	3.2	1	25.5	107
		5	24.0	105

Table 2. Chemical compositions of filler metals (wt%)

Filler metals	C	Mn	Si	P	S
E4301	0.08	0.42	0.10	0.016	0.010
E4313	0.08	0.58	0.27	0.014	0.011
E4316	0.08	0.96	0.45	0.012	0.009

에서 2시간 어닐링 열처리를 실시하였으며 용접봉의 종류와 용접방법 및 용접봉의 성분 상세는 Table 1 및 Table 2 와 같다.

그리고 용접된 시험편의 용착금속의 두께를 4 mm로 가공한 후에 가로 2.5 cm, 세로 1.5 cm의 측정용 시험편을 만들었다. 그리고 샌드페이퍼 100번에서 2000번까지 연마한 후 노출면적 1 cm<sup>2</sup>만을 남기고 나머지는 실리콘 수지로 절연 시켰으며 가장자리에 구멍을 뚫고 동선을 연결하여 시험편을 제작하였다. 시험용액은 0.1% 황산용액을 사용하였으며 3 cm/s (PIV: Particle Image Velocimetry 로 측정)의 속도로 용액을 유동(마그네트볼에 의한유동)시키면서 측정하였다. 내식성의 비교평가를 위해 부식전위와 분극곡선 및 사이클릭전도변화 등을 측정하였다. 그리고 분극곡선으로부터 부식전류밀도를 구하였으며, 양극 및 음극분극곡선을 측정된 후의 부식된 표면을 관찰하였다. 또한 각 용접금속부 시험편의 표면을 2000번까지 연마한 후 각각의 시험편의 중심부에서 좌우 1 mm 간격으로 5 mm까지 즉 11 번의 용접금속부의 경도를 측정하고 이들 값의 평균치를 구하였다.

실험에 사용된 측정장치는 CMS-100 프로그램이며 기준전극은 SCE전극, 대극은 백금을 사용하였고 주사속도는 1 mV/s, 그리고 delay time은 1800초로 하였다. 단 사이클릭 전도변화 측정은 +1.5 V ~ -0.5 V 영역에서 30 mV/s의 주사속도로 하였으며 부식된 표면사진은 멀티미디어 영상현미경(Sometech사, Model: SV35)으로 100배 배율로 관찰하였다. 그리고 조직사진을 위한 에칭액으로 3% 나이탈용액을 사용하였다.

## 3. 실험결과

Fig. 1은 각 용접봉으로 용접한 용접금속부의 열처리 유무에 따른 경도변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 열처리에 의해서 모든 용접금속부의 경도가 낮아 졌음을 알 수 있다. 이처럼 열처리에 의해서 경도가 저하되는 것은 용접금속부의 잔류응력이 제거되어 경도가 낮아진 것으로 사료된다. 그리고 E4313과 E4316의 경도변화가 E4301에 비해서 다소 큰 경향을 알 수 있다. Fig. 2는 열처리전 후에 따른 용접금속부의 조직사진 변화를 보여주고 있다. Fig. 1에서 열처리에 의해서 경도가 가장 저하한 E4313의 경우가 전체적으로 현저하게 조직이 조대화된 모습을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 침지 시간 변화에 따른 각종 용접봉으로 용접한 용접 금속부의 부식전위 변화를 나타내고 있다. 침지시간의 경과에 따라 부식전위는 비한 방향으로 이행하고 있음을 알 수 있다. 그리고 침지 초기에는 E4316용접봉으로 용접한 용접금속부의 부식전위가 가장 높았으나 침지 1800초 후에

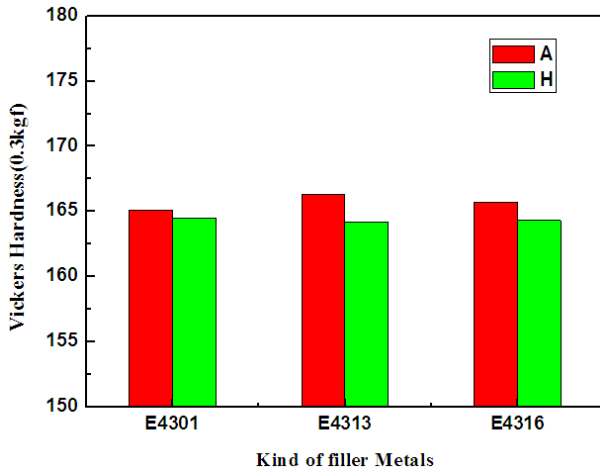


Fig. 1. Variation of vickers hardness of welding metals with post weld heat treatment(H) or not(A).

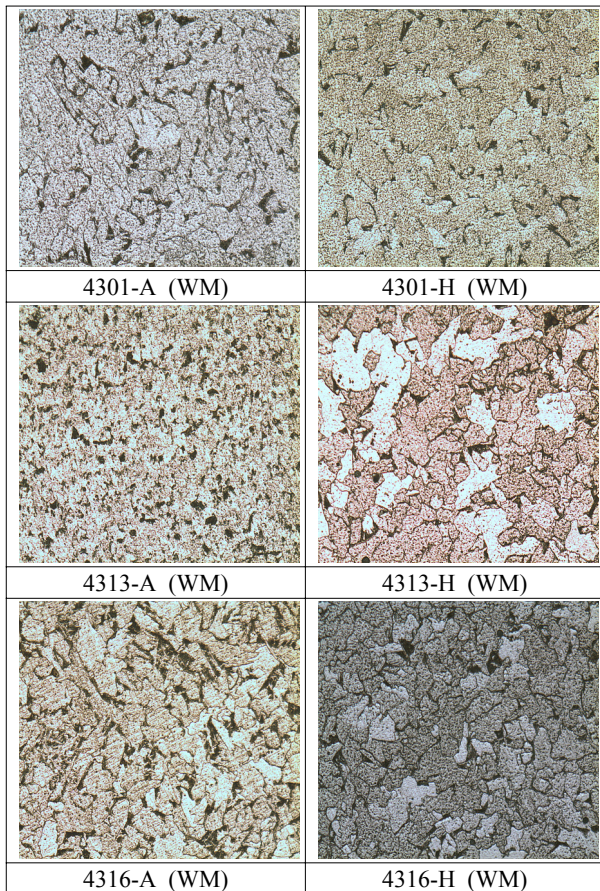


Fig. 2. Variation of microstructures of weld metals with post weld heat treatment(H) or not(A) (x200).

는 오히려 가장 비한 경향을 나타내었다. 그리고 E4313 용접봉으로 용접한 용접금속부의 경우에는 침지 직후에 가장 낮은 부식전위 값을 나타내었으나 1800초 후에는 가장 귀

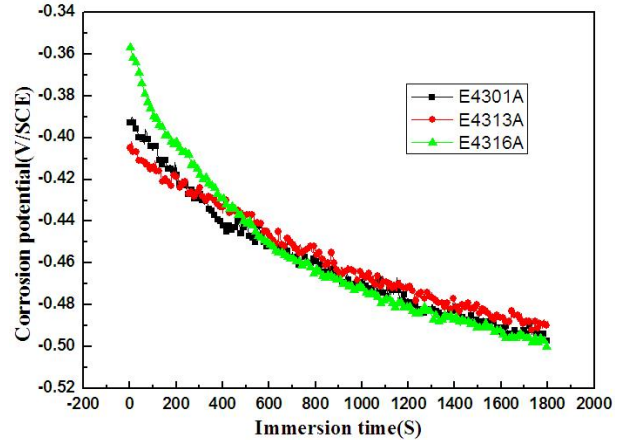


Fig. 3. Variation of the corrosion potentials for various welding metals in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

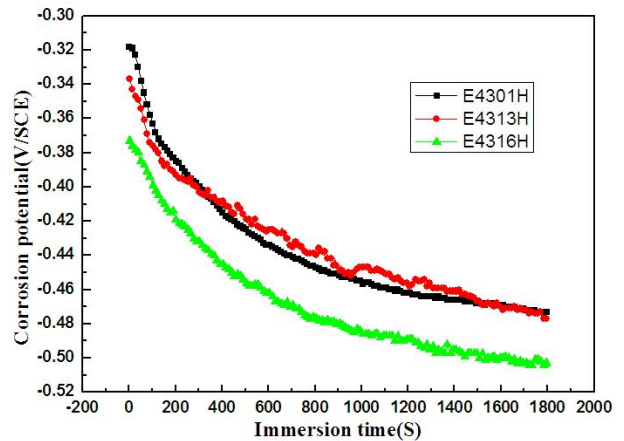
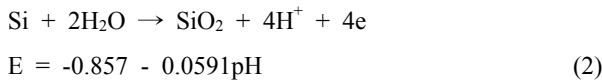
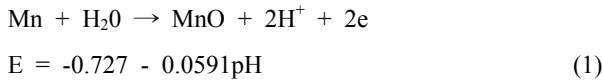


Fig. 4. Variation of the corrosion potential for various welding metals in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution in the case of post weld heat treatment(H) (625 °C, 2h).

한 값을 나타내었다.

Fig. 4는 용접금속부를 열처리한 경우의 부식전위변화를 나타내고 있다. E4316 용접금속부의 부식전위가 가장 비한 전위값을 나타내고 있으며 E4301과 E4313 용접금속부의 부식전위가 비교적 귀한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 열처리에 의해서 E4316의 경우 다른 용접 금속부에 대해서 현저하게 부식전위가 낮은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3과 Fig. 4에서 부식전위의 상대적 값의 편차가 크지 않아 부식전위만으로 내식성의 정도를 비교할 수는 없을 것으로 사료된다. 그런데 Table 2에서 알 수 있듯이 E4316의 경우 다른 용접봉에 비해서 Mn과 Si의 함량이 비교적 높은 경향을 알 수 있다. 전위-pH도<sup>17)</sup>에 의하면 Mn과 Si의 평형전위는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉



따라서 상기 (1), (2)식에 의하면 Mn과 Si의 평형전위가 Fe의 평형전위(-0.44V)에 비해서 현저히 낮으므로 E4316의 부식전위가 비교적 낮은 것은 용접봉의 성분의 영향도 다소 있을 것으로 생각된다.

Fig. 5는 E4301 용접봉으로 용접한 용접금속부의 열처리에 따른 부식전위 변화를 나타내고 있다. 열처리를 함으로써 부식전위가 귀한 값을 나타내는 경향을 알 수 있으며 E4313의 용접금속부도 같은 경향을 나타내었다. 그런데 Fig. 6에서 알 수 있듯이 E4316의 경우에는 열처리에 의해서 오히려

부식전위가 비한 경향을 나타내었다. 따라서 용접봉의 종류와 열처리가 부식전위의 변화에 영향을 미치는 것으로 사료되나 이들 부식전위의 변화와 내식성의 상대적 관계는 현 단계에서 알 수 없으며 다음의 실험결과와 비교고찰을 통해서 알 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 7은 3가지 용접봉으로 용접한 용접금속부의 양극 및 음극 분극곡선을 나타내고 있다. 분극곡선의 형태는 전반적으로 거의 유사한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 E4301 용접금속부의 내식성이 가장 우수하고 E4313 용접금속부의 내식성이 가장 좋지 않은 경향을 정성적으로 알 수 있다.

Fig. 8은 열처리를 하였을 경우 각 용접금속부의 양극 및 음극 분극곡선을 나타내고 있다. E4316의 용접금속부가 내식성이 우수하고 E4301의 경우가 내식성이 상대적으로 좋지 않은 경향을 정성적으로 알 수 있다. 따라서 용접금속부의 내식성이 용접봉의 종류와 열처리 유무에 따라서 변화할 수 있다는 가능성을 실험결과를 통하여 알 수 있었다.

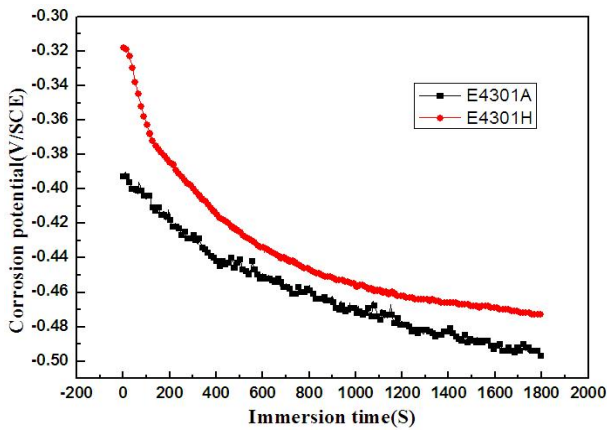


Fig. 5. Variation of corrosion potential of E4301 weld metal in the case of heating treatment(H) or not(A) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

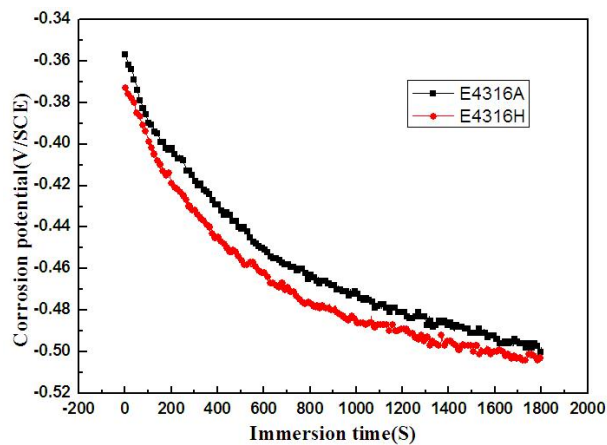


Fig. 6. Variation of the corrosion potential for E4316 weld metal in the case of heat treatment(H) or not(A) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

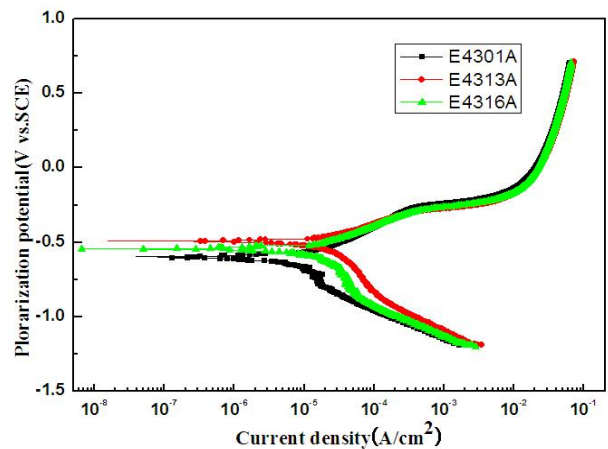


Fig. 7. Variation of cathodic and anodic polarization curves in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

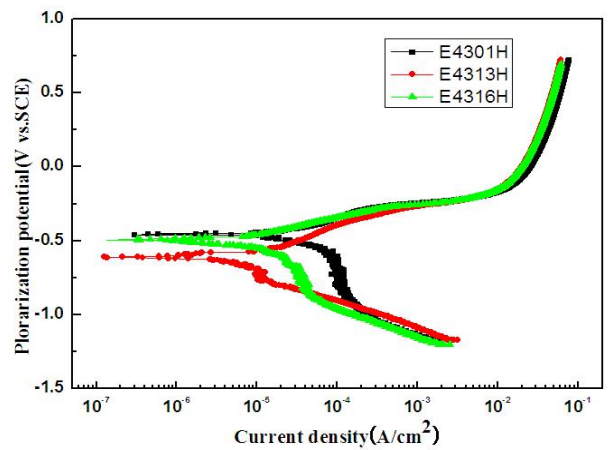


Fig. 8. Variation of cathodic and anodic polarization curves in case of heat treatment(H) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.



Fig. 9는 E4301 용접봉으로 용접한 용접금속부의 열처리 유무에 따른 양극 및 음극 분극곡선을 나타내고 있다. 열처리에 의해서 내식성이 현저하게 떨어지는 경향을 알 수 있다. Fig. 10은 E4313 용접봉으로 용접한 경우 용접금속부의 양극 및 음극분극곡선을 나타내고 있다. 열처리에 의해서 내식성이 비교적 개선된 경향을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 E4316의 용접금속부에서도 같은 경향을 나타 내었다. 그리고 Fig. 11은 타펠 외삽법에 의해서 구한 각 용접금속부의 부식전류밀도변화를 나타내고 있다. 결과적으로 열처리를 함으로써 E4301 용접금속부의 내식성은 오히려 저하되었고 E4313과 E4316의 내식성은 역으로 개선된 실험결과를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 5와 Fig. 6 및 Fig. 11의 비교고찰에서 부식전위와 내식성의 상관관계는 없는 것으로 사료된다. 그러나 Fig. 1과 Fig. 2의 결과에서 알 수 있듯이 열처리에 의해서 경도와 조직의 변화가 있었으며 이들의 변화가 내식성의 변화에 영향을 미친 것으로 사료된다. 즉 E4301 용접금속부의 경우에는 열처리에 의해 내식성은 저하되었고 E4313과 E4316의 경우에는 열처리에 의해서 내식성이 개선된 실험결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 12는 열처리 하지 않은 경우 각각의 용접봉으로 용접한 용접금속부의 15번째의 사이클릭 볼타모그램 선도 변화를 보여주고 있다. 사이클릭선도가 왼쪽의 위치에 있을수록 일정 공급전류밀도에 대한 분극전위가 높은 값을 나타내므로 분극저항 역시 크기 때문에 내식성이 상대적으로 양호한 경향을 유추할 수 있다. 따라서 E4301의 용접금속부가 내식성이 양호하다는 사실을 알 수 있으며 이 결과는 Fig. 11의 부식전류밀도 비교에서 E4301의 내식성이 우수한 경향과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 E4313 용접금속부의 선도가 가장 오른쪽에 위치하고 있는 즉 내식성이 가장 좋지 않은 실험 결과는 Fig. 11의 결과에서도 잘 나타

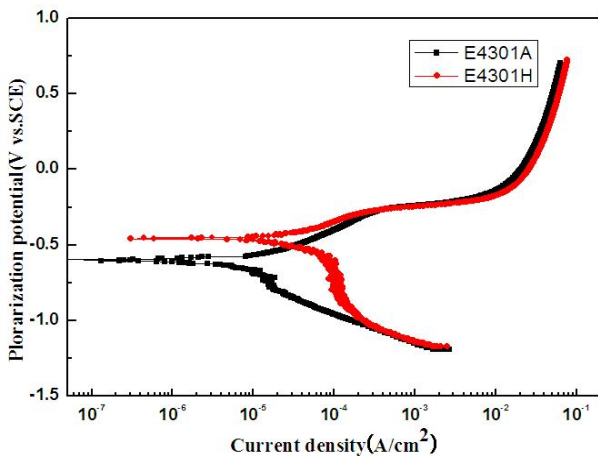


Fig. 9. Variation of cathodic and anodic polarization curves of weld metal(E4301) in case of heat treatment(H) or not(A) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

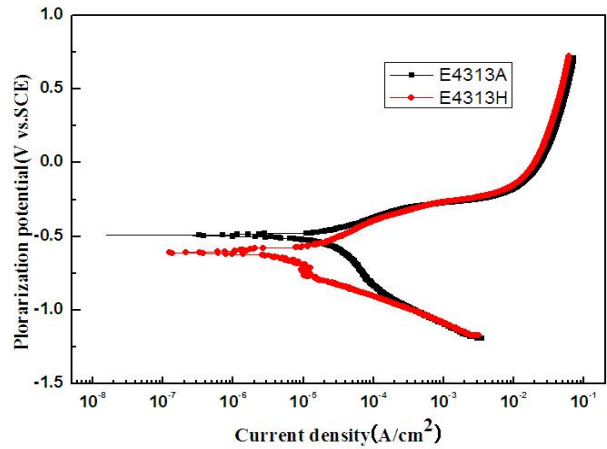


Fig. 10. Variation of cathodic and anodic polarization curves of weld metal(E4313) in the case of heat treatment(H) or not(A) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

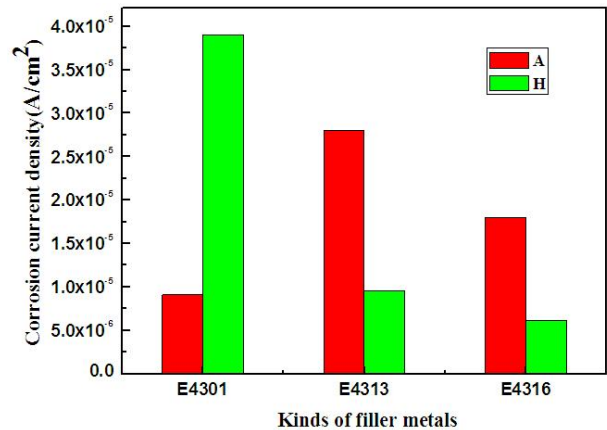


Fig. 11. Variation of corrosion current densities in the case of heat treatment(H) or not(A).

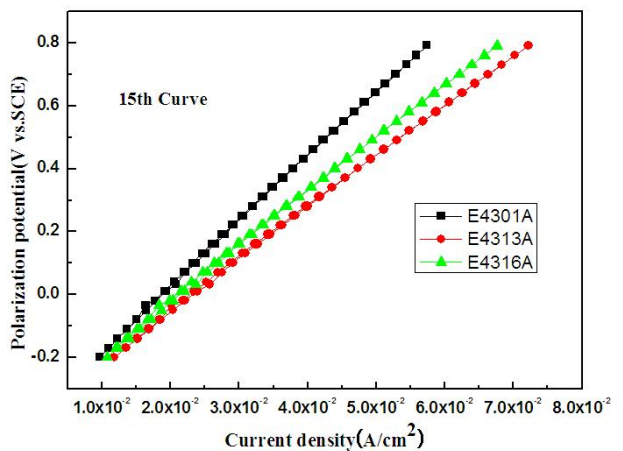


Fig. 12. Variation of cyclic voltammogram of various weld metals in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 열처리한 경우의 용접금속부의 사이클릭선도 변화를 나타내고 있다. E4316의 용접금속부가 가장 왼쪽에 위치하고 있으며 내식성이 가장 양호한 경향을 나타내었다. 이러한 실험 결과는 Fig. 11의 부식전류밀도 비교에서도 같은 경향을 나타내었다. Fig. 14는 E4301 용접금속부의 열처리 유무에 따른 사이클릭선도 변화이다. 열처리에 의해서 오히려 선도가 오른쪽으로 위치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 E4301 용접금속부는 열처리에 의해서 내식성이 저하하는 경향을 알 수 있다. 이 실험 결과는 Fig. 9 및 Fig. 11의 실험결과에서도 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 E4316 용접금속부의 열처리 유무에 따른 사이클릭선도 변화를 나타내고 있다. 열처리에 의해서 선도가 왼쪽에 위치하여 내식성이 개선되는 경향을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 E4313의 용접금속부에서도 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 16은 양극 및 음극분극곡선 측정 후에 부식된 표면의 현상현미경 사진을 보여주고 있다. E4301의 용접금속부는

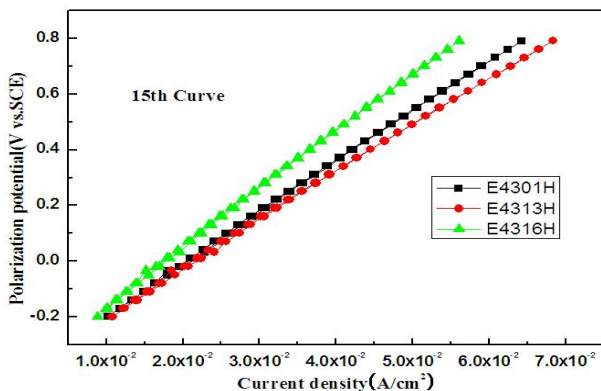


Fig. 13. Variation of cyclic voltammogram of welding metals in the case of heat treatment(H) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

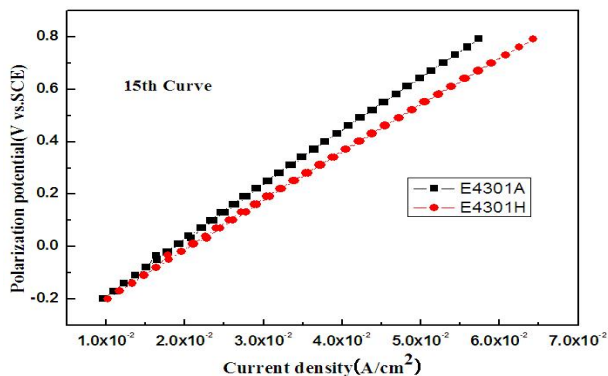


Fig. 14. Variation of cyclic voltammogram of welding metal (E4301) in the case of heat treatment(H) or not(A) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

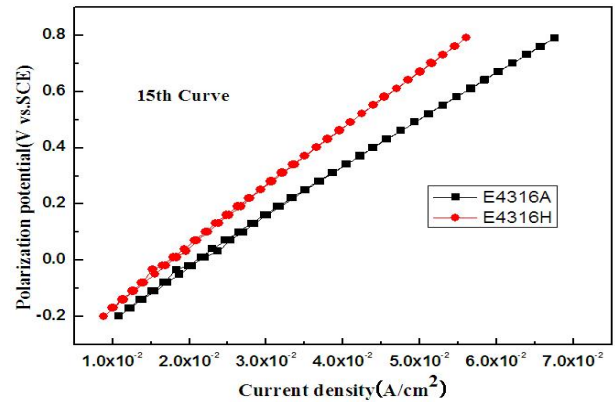


Fig. 15. Variation of cyclic voltammogram of welding metal in case of heat treatment(H) or not(A) in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

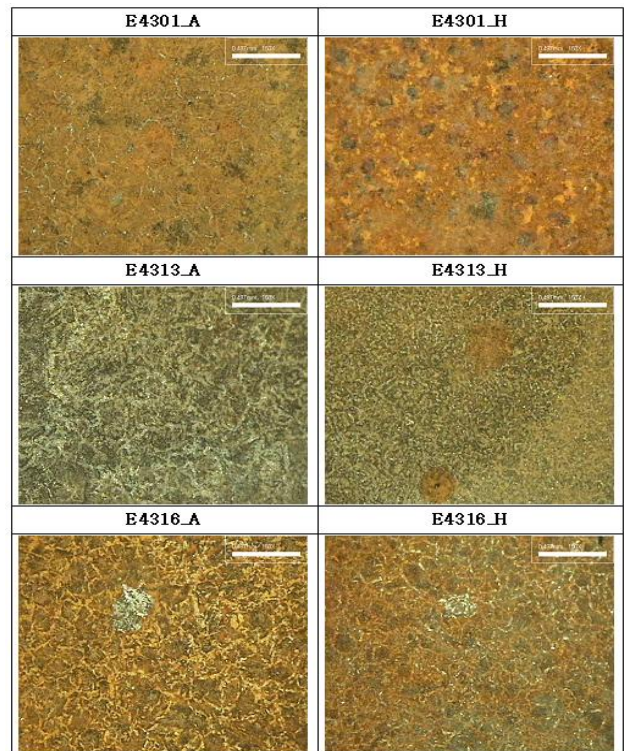


Fig. 16. Morphology of corroded surface of welding metals after drawing of polarization curves in 0.1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution(x100).

열처리에 의해서 부식된 현상이 뚜렷하며 부분적으로 핏팅 현상을 나타내고 있다. 그러나 E4313의 경우에는 열처리 전에는 표면이 다소 오목볼록의 형태를 나타내었으나 열처리에 의해서 표면은 균일한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 E4316 용접금속부도 열처리 전에는 표면의 오목 볼록이 현저하여 어느 특성금속이 선택적으로 부식된 경향을 나타내었으나 열처리에 의해서 표면은 균일한 형태를 나타내는 균일부식 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이처럼 E4316과 E4313의 용접금속부는 열처리에 의해서 내

식성이 개선되었으며 E4301의 경우에는 오히려 열처리에 의해서 내식성이 상대적으로 좋지 않다는 사실을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

지금까지 실제의 선박에서 불가피하게 연강용접봉으로 보수용접을 할 경우 3가지의 연강용접봉으로 용접하고 이들 용접금속부의 내식성을 열처리 유무에 대해서 비교 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 열처리를 하지 않았을 경우에는 E4301의 용접금속부가 내식성이 가장 우수하고 E4316, E4313순으로 내식성이 좋지 않았다.

2) 열처리를 하였을 경우에는 E4316의 용접금속부가 내식성이 가장 우수하고 역으로 E4301의 내식성이 좋지 않았다.

3) 부식전위는 열처리 유무에 따라 변화 하였으며 부식전위의 값과 내식성의 상관관계는 일치하지 않았다.

#### 참 고 문 헌

1. D. H Joon, *Control of Corrosion and Anti-corrosion*, edited by H. Y. Sung, Il Jung Sa Publishing, 465 (1985).
2. M. N Kim, B. Y Kim, and J. D. Han, *J. Oce. Eng. and Tec.*, **14**, 56 (2000).
3. B. Y Kim, C. S. No, G. H. Jung, and M. N Kim, *J. Oce. Eng. and Tec.*, **15**, 75 (2001).
4. J. G. Kim, M. S. Kang, and Y. S. Kim, *J. Oce. Eng. and Tec.*, **20**, 41 (2006).
5. S. H. An, J. J. Jung, and K. W. Nam, *J. Oce. Eng. and Tec.*, **19**, 64 (2005).
6. J. I. Oh, Y. P. Kim, and H. S. Bang, *J. Oce. Eng. and Tec.*, **21**, 64 (2007).
7. S. K. Jang and J. I. Jeon, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **30**, 30 (2006).
8. J. D. Kim, B. L. Kil, and C. J. Lee, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **30**, 629 (2006).
9. J. D. Kim, S. J. Yoo, and J. S. Kim, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **30**, 623 (2006).
10. P. D. Bilmes, C. L. Liorente, Saire Huaman, L. M. Gassa, and C. A. Gervasi, *Corros. Sci.*, **48**, 3261 (2006).
11. Y. H. Lee, Y. H. Kim, and H. Kim, *Corros. Sci. Tec.*, **2**, 219 (2003).
12. I. H. Lo, M. C. Lee, K. Y. Lim, W. Ho, G. C. Y. Yang, and W. T. Tsai, *Corros. Sci. Tec.*, **1**, 361 (2002).
13. K. M. Moon, M. H. Lee, K. J. Kim, J. G. Kim, and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tec.*, **2**, 283 (2003).
14. V. S. Raja, S. K. Vershney, R. Raman, and S. D. Kulkarni, *Corros. Sci.*, **40**, 1609 (1998).
15. L. W. Tsay, W. L. Lin, S. W. Chenct, and G. S. Leu, *Corro. Sci.*, **39**, 1165 (1997).
16. J. G. Kim and K. M. Moon, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **31**, 744 (2007).
17. J. V. Muiylder and M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution*, Ed. by M. Pourbaix, Rergomon press and cebelcor, 287 (1966).