

알루미늄 기지 자동차에 쓰이는 탄소강 리벳과 그래파이트간의 갈바닉 부식 방지 연구

서 동 일 · 이 재 봉[†]

국민대학교 공과대학 신소재공학부, 02707 서울특별시 성북구 정릉로 77
(2017년 4월 20일 접수, 2017년 6월 22일 수정, 2017년 6월 23일 채택)

Study on Prevention of Galvanic Corrosion between Carbon Steel Rivets and Graphite Used in Aluminum Matrix Automobiles

Dong-II Seo and Jae-Bong Lee[†]

School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea
(Received April 20, 2017; Revised June 22, 2017; Accepted June 23, 2017)

Aluminum alloy matrix may be used for manufacturing lighter automobiles. However, galvanic corrosion may occur between the rivet joint combining aluminum alloy matrix and a CFRP (carbon fiber reinforced plastic) laminate. The possibility of galvanic corrosion may be investigated by measuring galvanic couple currents. Two types of galvanic current measuring methods were used. One method is to use potentiodynamic polarization curves and the other is the ZRA (zero resistance ammeter) method. For galvanic corrosion experiments graphite, a major component of CFRP, was used with carbon steel (rivets) and 6061 aluminum alloys. Regardless of carbon steel, Ni deposited carbon steel, and 316L stainless steels we also investigated the possibility of reduction in galvanic corrosion. Results revealed that even though Ni deposited carbon steel or 316L stainless rivet may slightly increase galvanic current density between those and Al matrix, substitute rivets for carbon steel may be considerably useful for reducing overall galvanic corrosion.

Keywords: galvanic corrosion, graphite, nickel, electrodeposition, SS316L

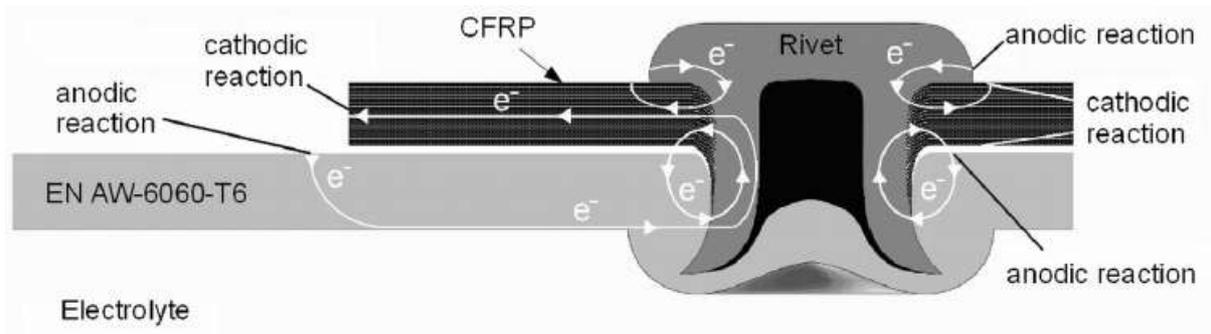
1. 서 론

자동차의 경량화와 그에 따른 연비 향상을 위하여 가볍고 강도가 뛰어난 금속으로 차체를 대체하려는 필요성이 중요해지고 있다. 특히 알루미늄 합금으로 차체를 설계하는 경우 알루미늄의 낮은 밀도와 충분한 강도 때문에 자동차 강판과 차체로 사용하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1]. 또한 알루미늄 합금 차체의 내식성과 충격 강도의 향상을 위해 CFRP(carbon fiber reinforced plastic)를 알루미늄 합금에 접합 시키려는 연구도 활발히 진행되어지고 있다 [1]. CFRP는 높은 충격 강도와 충격을 흡수하는 성능이 뛰어난 복합재료로 이미 자동차와 항공산업에 쓰이고 있다 [2]. 그러나 CFRP는 주로 그래파이트로 이루어져 있어 금속과의 용접이 어려워 Fig. 1과 같이 탄소강으로 이루어진

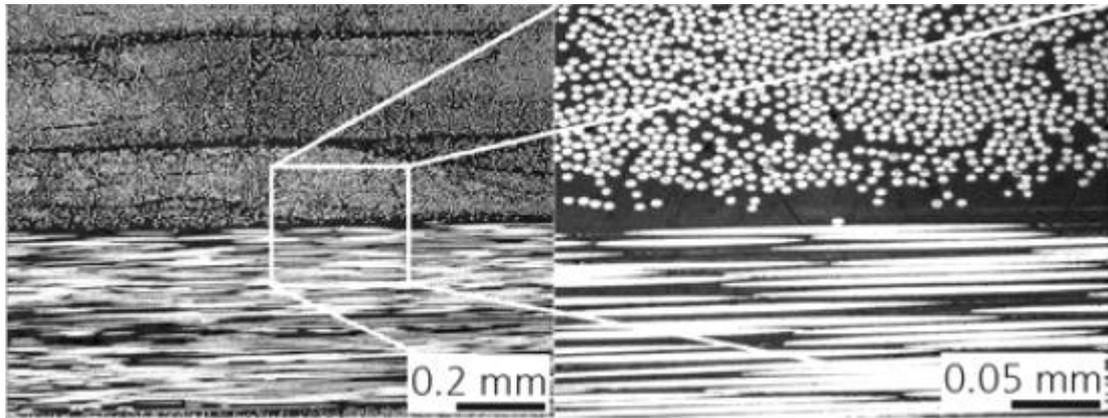
리벳을 사용하여 CFRP와 알루미늄 합금을 체결하는 공정을 거친다. 이 과정에서 탄소강과 알루미늄 합금 또는 탄소강과 CFRP 사이의 전위차로 인해 갈바닉 부식이 발생하게 된다 [1,3]. 이러한 갈바닉 부식이 일어나게 되면 차체의 손상은 물론 안전성의 문제가 발생할 수도 있다.

갈바닉 부식은 우선적으로 부식되는 양극과 부식되지 않는 음극과 그 사이의 전해질로 구성 되는데 [4] 탄소강과 알루미늄 합금의 경우 갈바닉계열에서 부식전위가 높은 탄소강이 음극이 되고 부식전위가 낮은 알루미늄 합금은 양극으로 작용하여 알루미늄 합금에서 갈바닉 부식이 일어나게 되며 또한 탄소강과 CFRP사이에는 오히려 탄소강이 양극이 되고 CFRP가 음극으로 작용하게 되어 탄소강에서 갈바닉 부식을 일으키게 된다 [5]. 본 연구에서는 두가지 종류의 리벳조인트의 갈바닉 부식 가능성을 모두 고려하기 위하여 탄소강 리벳에 니켈 도금을 하거나 또는 탄소강 리벳 재료를 316L 스테인리스 강 재료로서 교체하여 갈바닉 부식을 지

[†] Corresponding author: leejb@kookmin.ac.kr



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Schematic of joint part between CFRP and aluminum alloy by rivet [1], (b) structure of CFRP [8].

Table 1 Chemical composition of Watts Solution

Chemical Name	Formula	Metric
Nickel sulfate	$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	300 g/L
Nickel chloride	$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	150 g/L
Boric acid	H_3BO_3	52 g/L

연시키고자 하는 실험을 하였다. 특히 탄소강과 CFRP사이의 갈바닉 부식이 알루미늄 합금기지과 탄소강 사이의 갈바닉 부식보다 더 심각하다고 알려져 있기 때문에 [1] 본 연구에서는 탄소강과 CFRP의 주 성분인 그래파이트 간의 갈바닉 부식에 더욱 초점을 맞출 것이며 알루미늄 기지와 갈바닉 부식 가능성도 함께 조사 하고자 한다. 그래파이트의 물성은 CFRP의 물성과 차이가 있으나 갈바닉 부식을 일으키는 원인은 CFRP의 주성분인 그래파이트이기 때문에 실험에 사용되었다. 탄소강으로 이루어진 리벳의 첫번째 갈바닉 부식 개선 방법으로 탄소강 리벳에 접착성이 우수하다고 알려진 Watts 용액을 도금욕으로 사용하여 [6] 니켈도금을 하였는데, 니켈이 갈바닉 계열의 탄소강의 활성 전위를 귀방향으로 이동 시키는 효과로 갈바닉 부식을 지연시키고자

한 것이다. 두번째 개선 방법은 탄소강 리벳 대신에 316L 오스테나이트 스테인리스 강 리벳으로 교체하였는데 이는 갈바닉 계열에서 탄소강보다 스테인리스강이 귀방향 전위를 가진 합금인 것을 착안한 것이다 [7]. 본 실험에서는 CFRP와 알루미늄 합금을 리벳으로 체결하는 것으로 가정하여 CFRP의 주 성분인 그래파이트와 리벳 재료 그리고 알루미늄 합금기지와 리벳 재료 간의 갈바닉 전류밀도를 직접 측정하였다. 갈바닉 계열에서 그래파이트의 전위는 보다 매우 높은 귀방향에 위치하고 있으므로 실제 CFRP의 경우 좀더 가혹하다고 할 수 있으며 이 실험 결과로 니켈도금을 한 탄소강과 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 탄소강을 대체한 경우를 각각 비교하여 그래파이트와 리벳 재료 간의 갈바닉 부식에 대한 개선 효과를 확인 하고

자 한다.

본 연구에서 갈바닉 전류밀도 측정은 두가지 독립적인 실험 방법을 사용하였는데 첫번째는 혼합전위 이론을 이용하여 동전위 분극곡선 실험을 통해 양극으로 작용하는 재료의 산화반응 곡선과 음극으로 작용하는 재료의 환원반응 곡선의 교점을 측정하여 갈바닉 전류밀도를 구하는 방법이고 두번째는 영저항전류계(ZRA, zero resistance ammeter)를 이용하여 서로 다른 두 재료를 직접 연결하여 갈바닉 전류 밀도를 직접 측정하는 방법이다. 두가지 독립적인 실험방법을 각각 실시하여 얻은 실험 결과를 토대로 탄소강 리벳 대신 니켈 도금한 탄소강리벳과 316L 오스테나이트 스테인리스강 리벳으로 탄소강 리벳을 대체의 경우의 갈바닉 전류밀도를 측정하여 갈바닉 부식 저감 가능성을 상호 비교하고자 한다.

2. 실험 방법

2-1 시편 준비

실험에 사용된 그라파이트는 25 mm x 25 mm x 3 mm 크기의 판 형태로 플랫 셀에 고정시켜서 사용하였다. 탄소강과 316L 오스테나이트 스테인리스강은 에폭시 레진으로 마운팅을 하였고, 절연 테이프를 사용하여 노출 면적제어를 하였다. 또한 자동차 차체의 기지재료로 6061 알루미늄 합금을 사용하였다 [9]. 시편은 모두 2000 grit까지 습식연마 후 증류수와 에틸 알코올로 세척하여 실험에 사용하였다.

탄소강 표면위의 니켈 도금을 한 시편의 경우는 노출면적을 1 cm^2 로 제어하여 2000 grit까지 연마 하였으며 전처리로 초음파 세척기에 1분동안 세척을 하여 이물질 제거를 하였다. 그리고 7% 황산용액에 10초동안 침지 시켜 표면을 활성화 하였다. 도금 용액은 Watts 용액을 사용 하였고 도금용액의 성분은 Table 1에 나타냈다 [10]. 도금 시 Watts 용액의 온도는 50°C 로 일정하게 유지 하였고 800 RPM으로 교반을 하여 수소에 의한 도금 성능의 저하를 방지하였다. 도금에 사용한 전원공급장치(DCS80-13E)로 도금 전류를 50 mA/cm^2 로 일정하게 유지하여 도금 층을 성장시켰으며 니켈 도금 전류 인가 시간은 40분과 80분으로 각각 다르게 시행하여 도금층의 두께를 조절하였다.

2-2 갈바닉 전류밀도 측정 방법

2-2-1 동전위 분극곡선을 이용한 갈바닉 전류밀도 측정

3% NaCl시험용액에서 각 시편에 대해 3전극 시스템으로 동전위 분극 실험을 실시 하였다. 전위차계 (Gamry CMS110/TDC1)를 사용하여 0.5 mV/sec 의 주사 속도로 전위를 증가시키면서 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 기준전극은 포화 카로멜 전극을 사용하였으며 상대전극은 백금전극을 사용하였다. 산소의 영향을 배제한 부식 특성을 보기 위

하여 질소 가스를 주입하여 탈기조건에서 실험을 하였으며, 실제환경의 조건도 함께 고려하기 위하여 공기를 주입하여 통기조건에서도 실험을 각각 실시하였다. 각각의 동전위 분극 그래프를 그린 후 혼합전위 이론에 따라 양극의 산화곡선과 음극의 환원곡선의 교점을 구하여 갈바닉 전류밀도를 측정 하였다.

2-2-2 영저항전류계(ZRA, zero resistance ammeter)를 통한 갈바닉 전류 밀도 측정

동전위 분극곡선 실험과 동일하게 3% NaCl용액에서 실험을 진행하였다. 동전위 분극 실험과 마찬가지로 산소의 영향을 배제한 부식 특성을 보기 위하여 질소 가스를 이용한 탈기조건과 실제환경을 모사하기 위하여 공기를 주입한 통기조건으로 각각 실험을 실시하였다. 갈바닉 전류는 전류와 시간에 대한 측정 그래프에서 가장 낮은 값을 가지는 전류를 갈바닉 전류로 선택하였으며 분극곡선 실험 결과와 비교하기 위해서 면적으로 갈바닉 전류를 나누어 갈바닉 전류 밀도를 구하였다.

3. 결과

3-1 그라파이트와 탄소강, 탄소강과 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 전류밀도 측정 결과

Fig. 2는 그라파이트 및 탄소강과 탄소강 및 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 전류밀도를 동전위 분극곡선 실험을 이용한 측정 결과와 영저항전류계를 이용한 측정 결과를 나타내었다. 탄소강과 그라파이트 사이의 갈바닉 전류밀도가 탄소강과 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 전류밀도보다 높게 측정되었는데 이는 탄소강과 그라파이트간의 더 큰 전위차에 기인하는 것으로 생각된다. Fig. 3은 동전위 분극 곡선 실험을 이용한 측정 결과인데 탄소강과 그라파이트 사이의 갈바닉 전류밀도가 탄소강과 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 전류밀도보다 탈기 시에는 $253 \mu\text{A/cm}^2$, 통기 시에는 $162 \mu\text{A/cm}^2$ 더 크게 나타나 탄소강과 그라파이트 사이의 갈바닉 부식이 탄소강과 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 부식보다 더 구동력이 크므로 갈바닉 부식이 더 쉽게 일어난다는 것을 알 수 있다. 영저항전류계를 이용한 갈바닉 부식 실험에서도 탄소강과 그라파이트간의 갈바닉 전류밀도가 탄소강과 알루미늄 합금간의 갈바닉 전류밀도보다 탈기 시 $136 \mu\text{A/cm}^2$, 통기 시 $167 \mu\text{A/cm}^2$ 더 크게 나타나 탄소강과 그라파이트 사이의 갈바닉 부식이 더 쉽게 일어난다는 것을 다시 한번 확인 할 수 있었다.

3-2 그라파이트와 탄소강, 그라파이트와 니켈을 도금한 탄소강 사이의 갈바닉 전류밀도 측정 결과

그라파이트와 탄소강 사이의 갈바닉 전류밀도가 탄소강과 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 전류밀도보다 크기 때문에

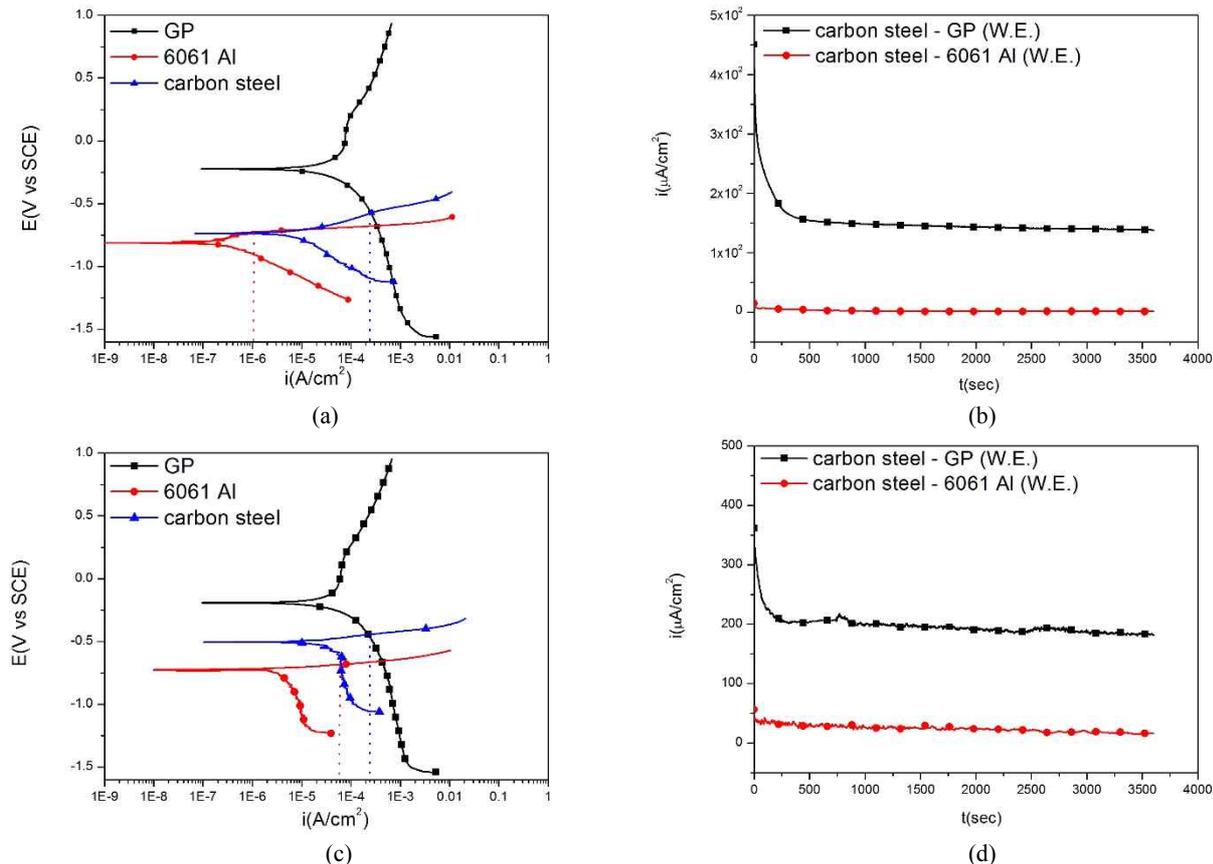


Fig. 2 Galvanic current density between 6061 Al, carbon steel and graphite by using; (a) potentiodynamic polarization in deaerated (b) ZRA in deaerated, (c) potentiodynamic polarization in aerated and (d) ZRA in aerated 3% NaCl solution.

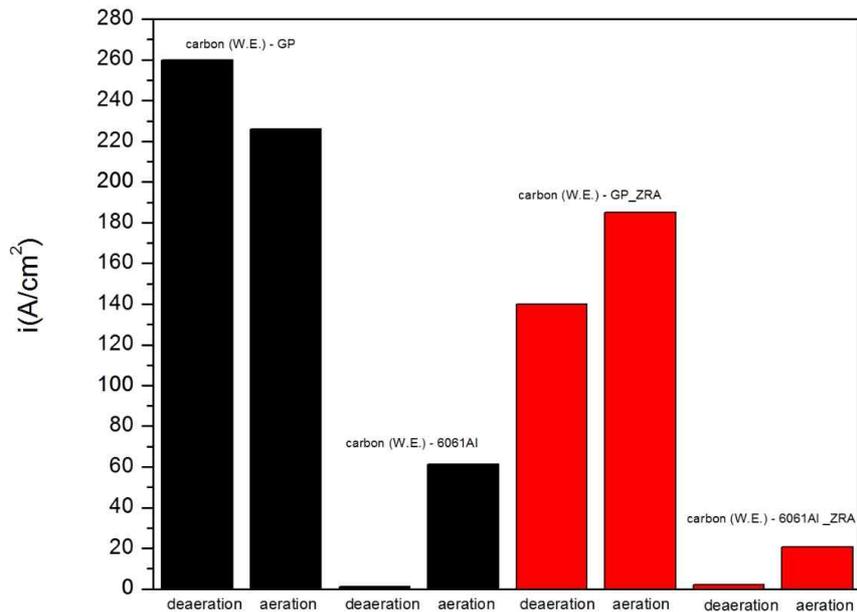


Fig. 3 Galvanic current density variation for deaerated or aerated 3% NaCl solution by using the potentiodynamic polarization curves and zero resistance ammeter.

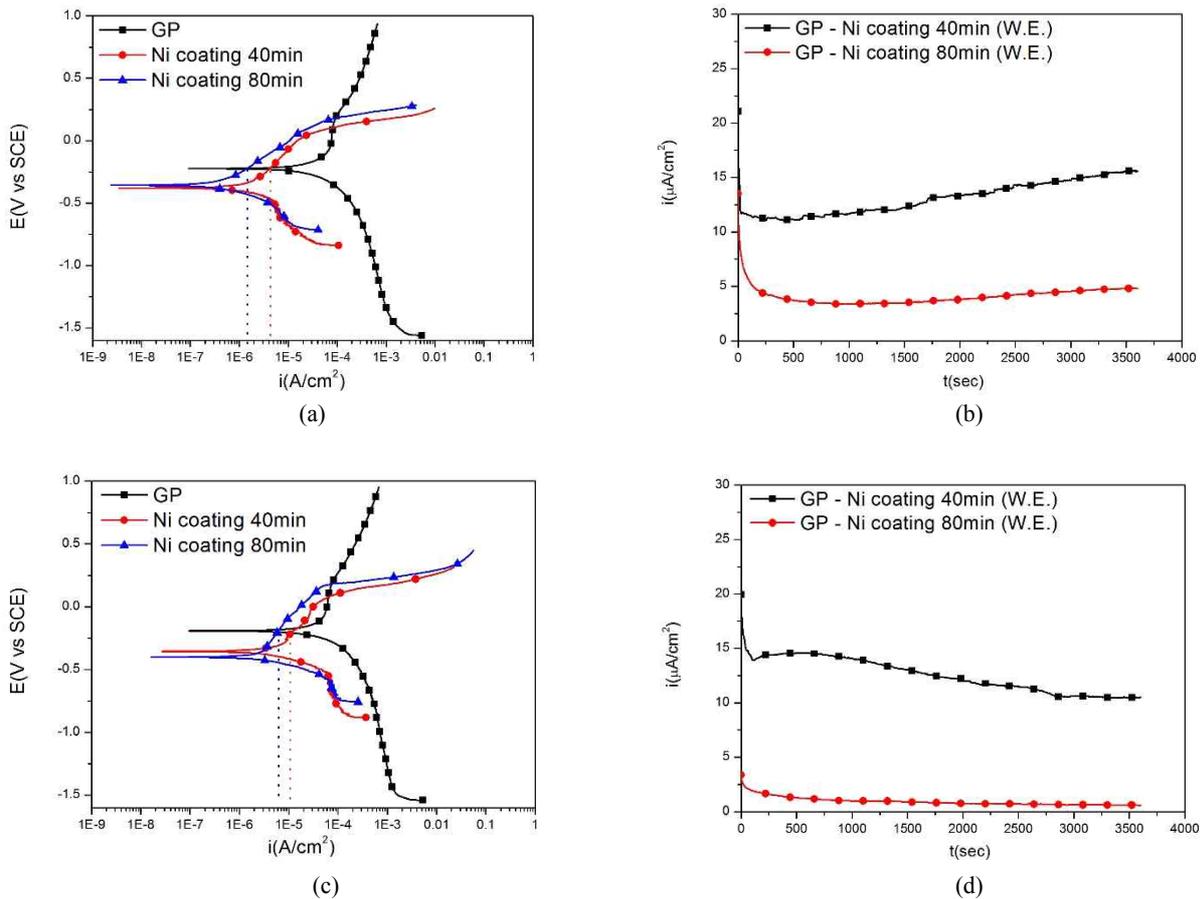


Fig. 4 Galvanic current density between Ni coating to carbon steel and graphite by using; (a) potentiodynamic polarization in deaerated (b) ZRA in deaerated, (c) potentiodynamic polarization in aerated and (d) ZRA in aerated 3% NaCl solution.

이러한 문제를 해결하기 위하여 탄소강에 니켈도금을 하였다. 탄소강에 니켈도금을 하게 되면 갈바닉 부식이 지연 될 거라 예상된다. Fig. 4는 탄소강에 니켈 도금 전류 시간을 40분과 80분을 각각 인가하여 니켈도금 실험을 실시 한 후 동전위 분극 곡선을 이용한 갈바닉 전류밀도 측정결과와 영저항전류계를 이용한 갈바닉 전류밀도 측정결과를 보여 준다. 동전위 분극 곡선 실험을 이용한 갈바닉 전류밀도 측정에서 탄소강 표면에 80분간 니켈 도금을 한 경우가 탄소강 표면에 40분간 니켈 도금을 한 경우보다 탈기 시에 $5.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시에 $5.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 갈바닉 부식 전류밀도가 작게 측정되었다. 영저항전류계를 이용한 측정결과에서도 탄소강에 80분 니켈 도금을 한 경우가 탄소강에 40분 니켈 도금을 한 경우보다 탈기 시 $7.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시 $9.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 갈바닉 전류밀도가 작게 측정되어 Fig. 5에서 알 수 있듯이 80분 니켈 도금한 탄소강이 40분 니켈 도금을 한 탄소강보다 갈바닉 전류밀도가 낮음으로서 갈바닉 부식에 대한 저항성이 다소 높았는데 이는 탄소강에 니켈

도금 전류를 80분 인가 한 경우가($5.8 \mu\text{m}$) 탄소강에 니켈 도금 전류를 40분 인가한 경우($2.6 \mu\text{m}$) 보다 니켈 도금 층이 2배 이상 더 두껍기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 6은 도금 처리를 하지 않은 탄소강과 그래파이트, 니켈 도금 전류를 80분 인가한 탄소강 과 그래파이트 간의 갈바닉 전류 차이를 나타내며 Fig. 7은 탄소강에 니켈 도금 전류를 80분 인가한 경우가 도금 처리를 하지 않은 탄소강보다 그래파이트와의 갈바닉 전류밀도가 탈기 시 $251 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시 $219 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 작게 측정되어 탄소강에 니켈 도금 전류를 80분 인가한 경우가 도금 처리를 하지 않은 탄소강에 비해 갈바닉 부식 저항성이 현저히 개선되었다. 영저항전류계를 이용한 갈바닉 전류밀도 측정 결과에서도 니켈 도금 전류를 80분 인가한 탄소강의 경우가 도금 처리를 하지 않은 탄소강 경우보다 그래파이트와의 갈바닉 전류 밀도가 탈기 시 $133 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시 $180 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 적게 측정되었는데 이는 니켈 도금을 하여 그래파이트와의 전위 차이를 작게하므로 갈바닉 부식에 영향을 주는 구동력

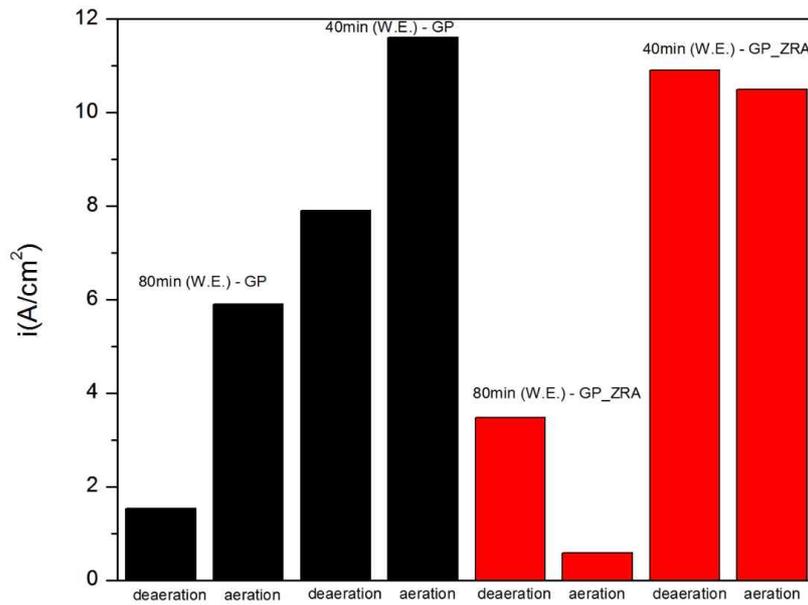


Fig. 5 Galvanic current density between graphite and Ni coating to carbon steel (during 80min, 40 min) for deaerated or aerated 3% NaCl solution by using the potentiodynamic polarization curves and zero resistance ammeter.

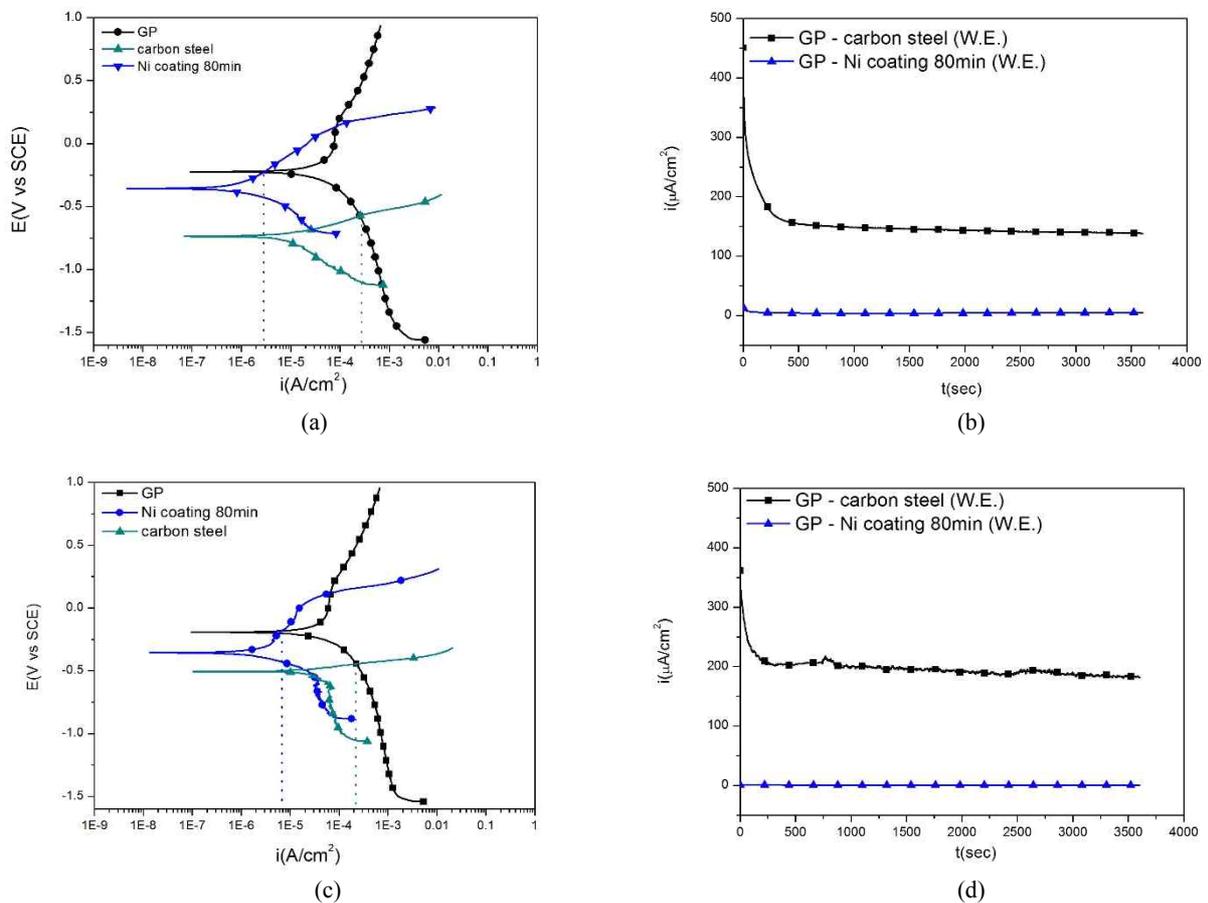


Fig. 6 Galvanic current density among Ni coating to carbon steel (during 80min), carbon steel and graphite by using; (a) potentiodynamic polarization in deaerated (b) ZRA in deaerated, (c) potentiodynamic polarization in aerated and (d) ZRA in aerated 3% NaCl solution.

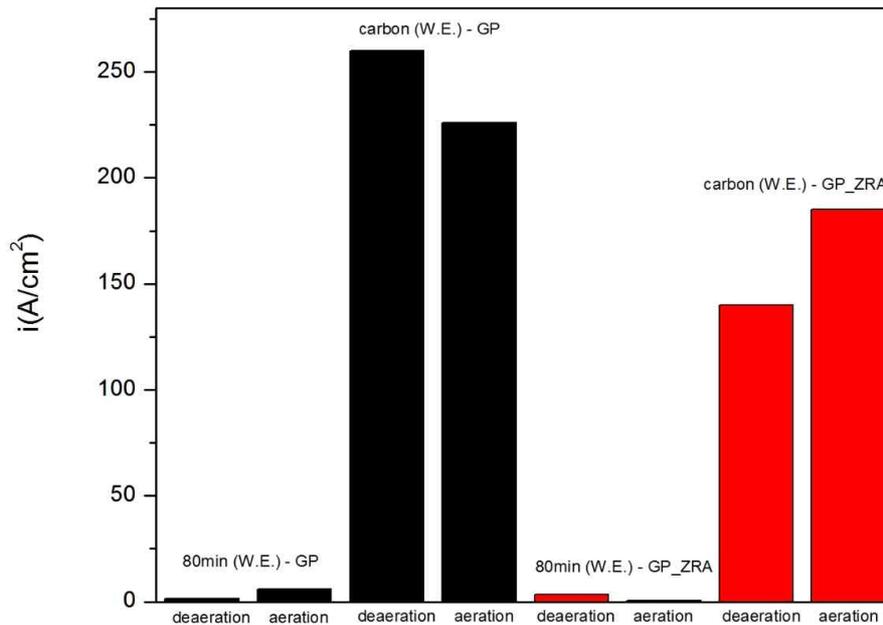


Fig. 7 Galvanic current density between Ni coating to carbon steel (during 80min), carbon steel and graphite for deaerated or aerated 3% NaCl solution by using the potentiodynamic polarization curves and zero resistance ammeter.

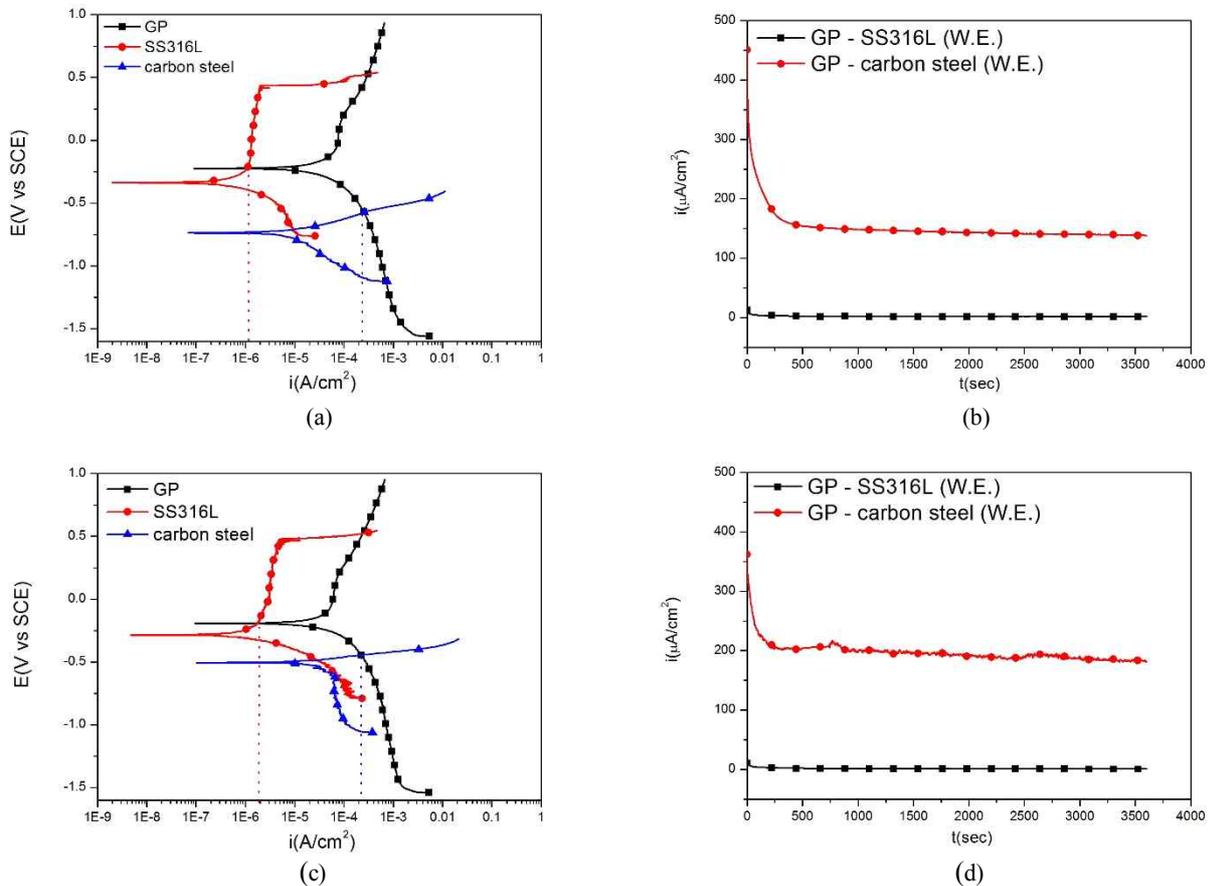


Fig. 8 Galvanic current density between SS316L, carbon steel and graphite by using; (a) potentiodynamic polarization in deaerated (b) ZRA in deaerated, (c) potentiodynamic polarization in aerated and (d) ZRA in aerated 3% NaCl solution.

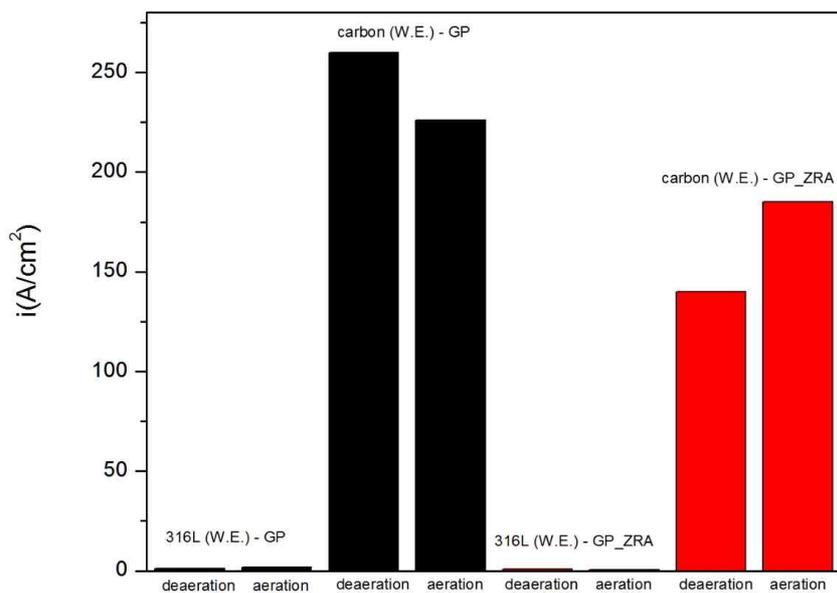


Fig. 9 Galvanic current density between SS316L, carbon steel and graphite for deaerated or aerated 3% NaCl solution by using the potentiodynamic polarization curves and zero resistance ammeter.

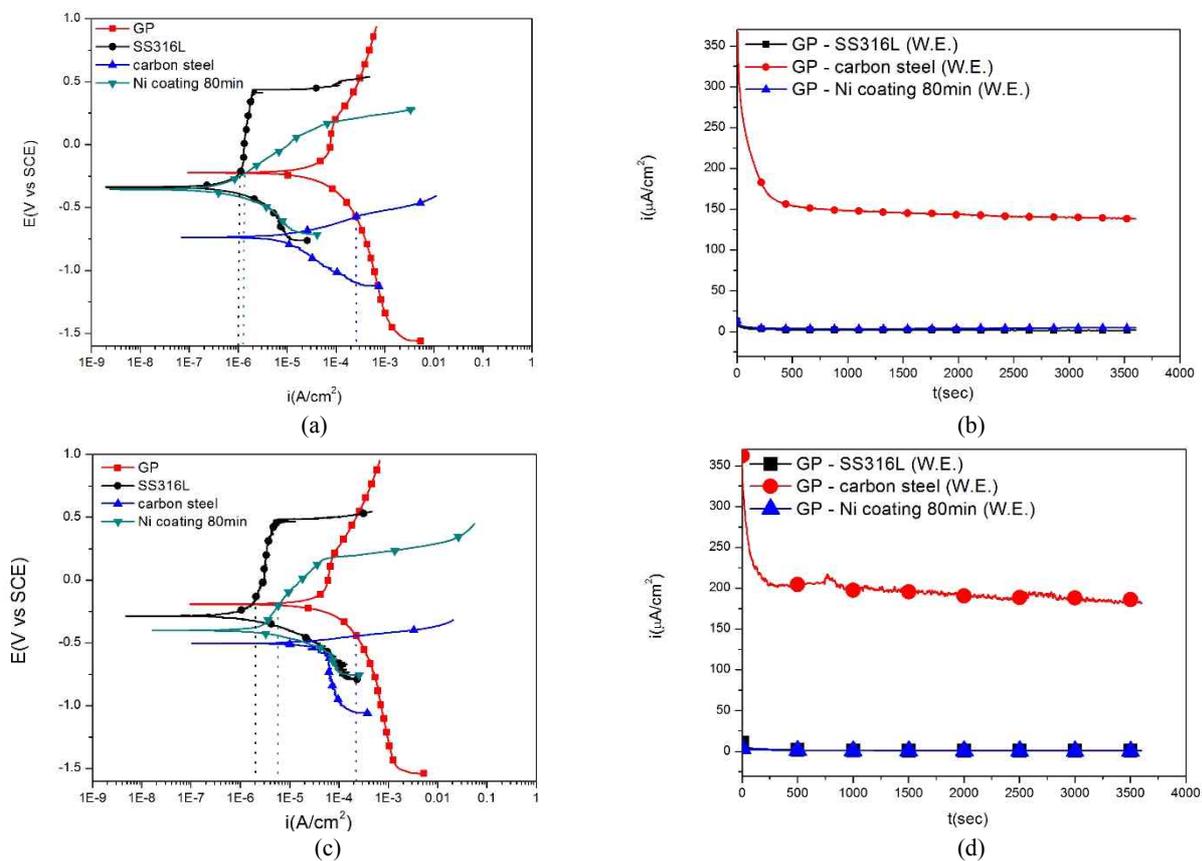


Fig. 10 Galvanic current density between SS316L, Ni coating to carbon steel (during 80min), carbon steel and graphite by using (a) potentiodynamic polarization in deaerated (b) ZRA in deaerated, (c) potentiodynamic polarization in aerated and (d) ZRA in aerated 3% NaCl solution.

이 크게 감소 되었기 때문이라고 판단된다.

3-3 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체하여 그래파이트와 갈바닉 전류밀도를 측정된 결과

Fig. 8은 동전위 분극 곡선을 이용한 갈바닉 전류 측정 결과인데, 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체한 경우 그래파이트와 316L 오스테나이트 스테인리스 강 사이의 갈바닉 전류밀도가 탄소강과 그래파이트 간의 갈바닉 전류밀도 보다 낮아 갈바닉 부식 저항성이 향상된 것으로 보인다. Fig. 9에서 그래파이트와 탄소강 사이의 갈바닉 전류밀도 보다 그래파이트와 316L 오스테나이트 스테인리스 강 사이의 갈바닉 전류밀도가 탈기 시에 $252 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시에 $223 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 낮았으며 영저항전류계를 이용한 실험에서도 탈기 시 $136 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시 $180 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 316L 오스테나이트 스테인리스 강과 그래파이트 사이의 갈바닉 전류밀도가 탄소강과 그래파이트 사이의 갈바닉 부식 전류밀도 보다 작게 측정되었다.

3-4 탄소강을 니켈 도금한 탄소강으로 대체한 경우와 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체한 경우 그래파이트와의 갈바닉 전류밀도 측정결과

Fig. 10은 탄소강에 니켈 도금을 80분 동안 시행한 경우와 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체한 경우를 그래파이트와의 갈바닉 전류밀도로 비교한 것이다. 동전위분극 곡선 실험을 이용한 결과에서 탄소강에 니켈 도금 전류를 80분 인가 한 것 보다 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체한 경우가 갈바닉 전류밀도로 비교할 때 탈기 시 $1.37 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시 $6.38 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 더 작아 갈바닉 부식 저항성이 탄소강에 니켈 도금 전류를 80분 인가한 경우보다 더 좋았다. 또한 영저항전류계를 이용한 실험에서도 동전위 분극 실험을 이용한 측정 결과와 마찬가지로 탈기 시 $2.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 통기 시에는 $0.02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 만큼 316L 오스테나이트 스테인리스 강과 그래파이트 사이의 갈바닉 전류밀도가 니켈도금을 한 탄소강과 그래파이트 간의 갈바닉 전류밀도보다 더 작았다. 따라서 탄소강에 니켈을 도금한 경우보다 탄소강을 316L 오

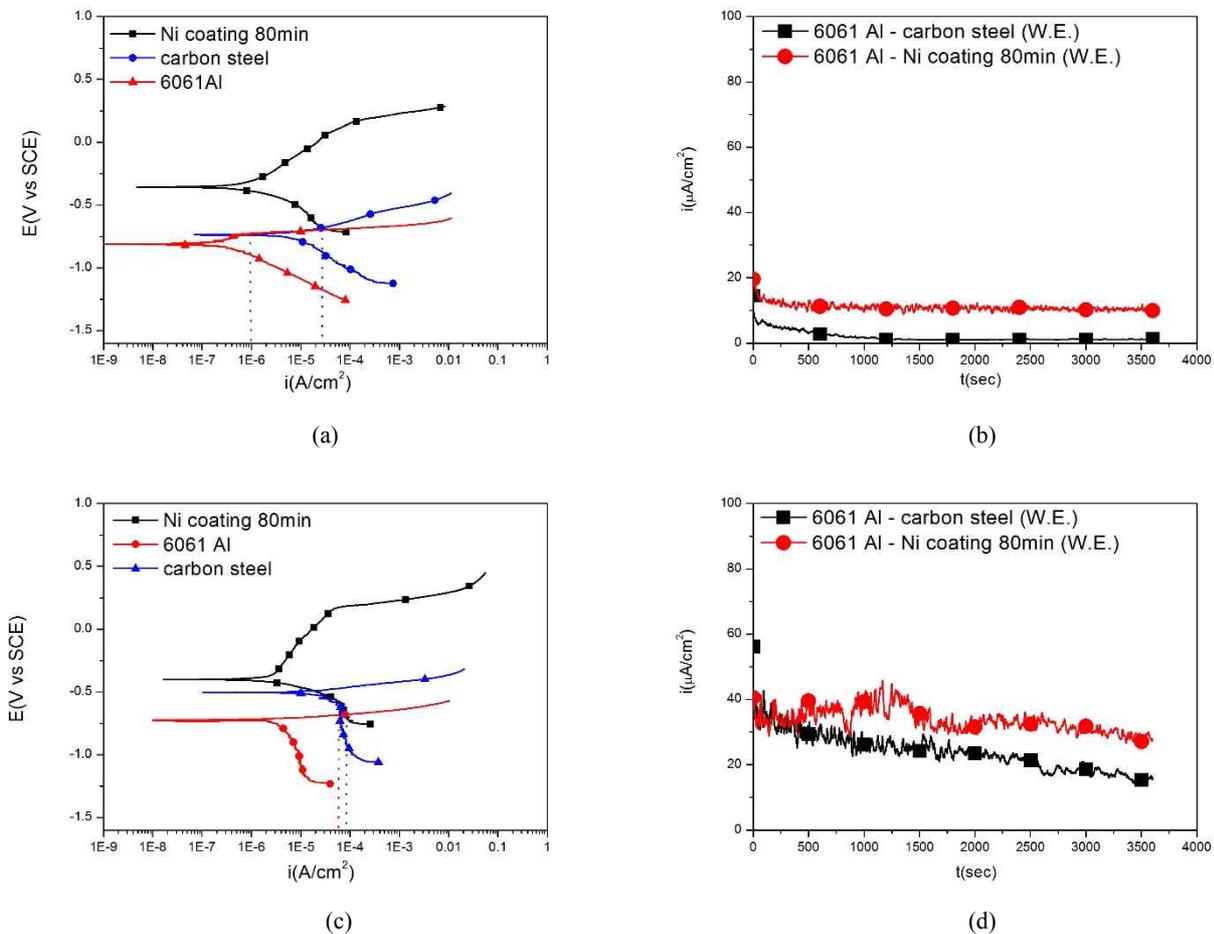


Fig. 11 Galvanic current density between 6061 Al, Ni coating to carbon steel (during 80min) and carbon steel by using (a) potentiodynamic polarization in deaerated (b) ZRA in deaerated, (c) potentiodynamic polarization in aerated and (d) ZRA in aerated 3% NaCl solution.

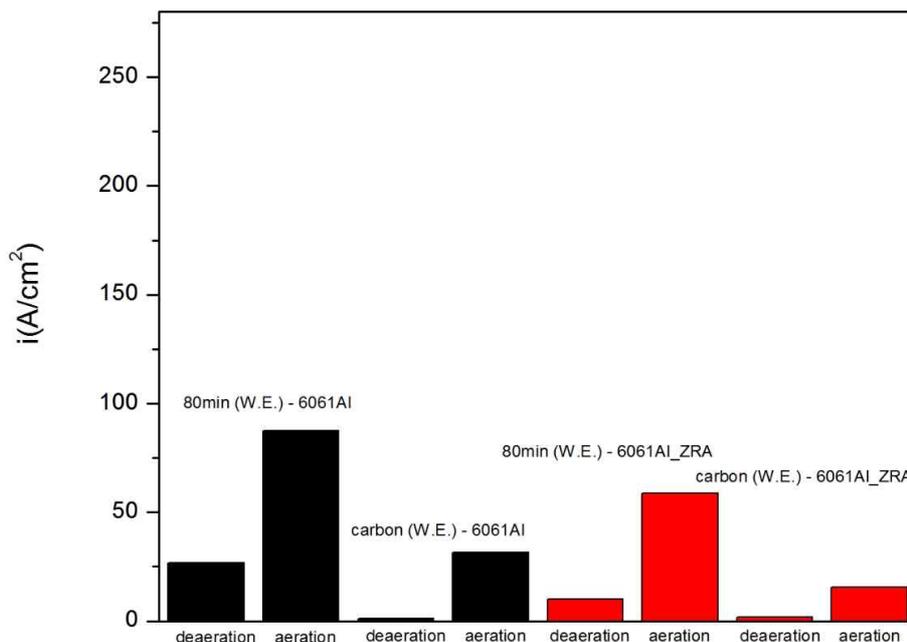


Fig. 12 Galvanic current density between 6061 Al, carbon steel and Ni coating to carbon steel (during 80 min) for deaerated or aerated 3% NaCl solution by using the potentiodynamic polarization curves and zero resistance ammeter.

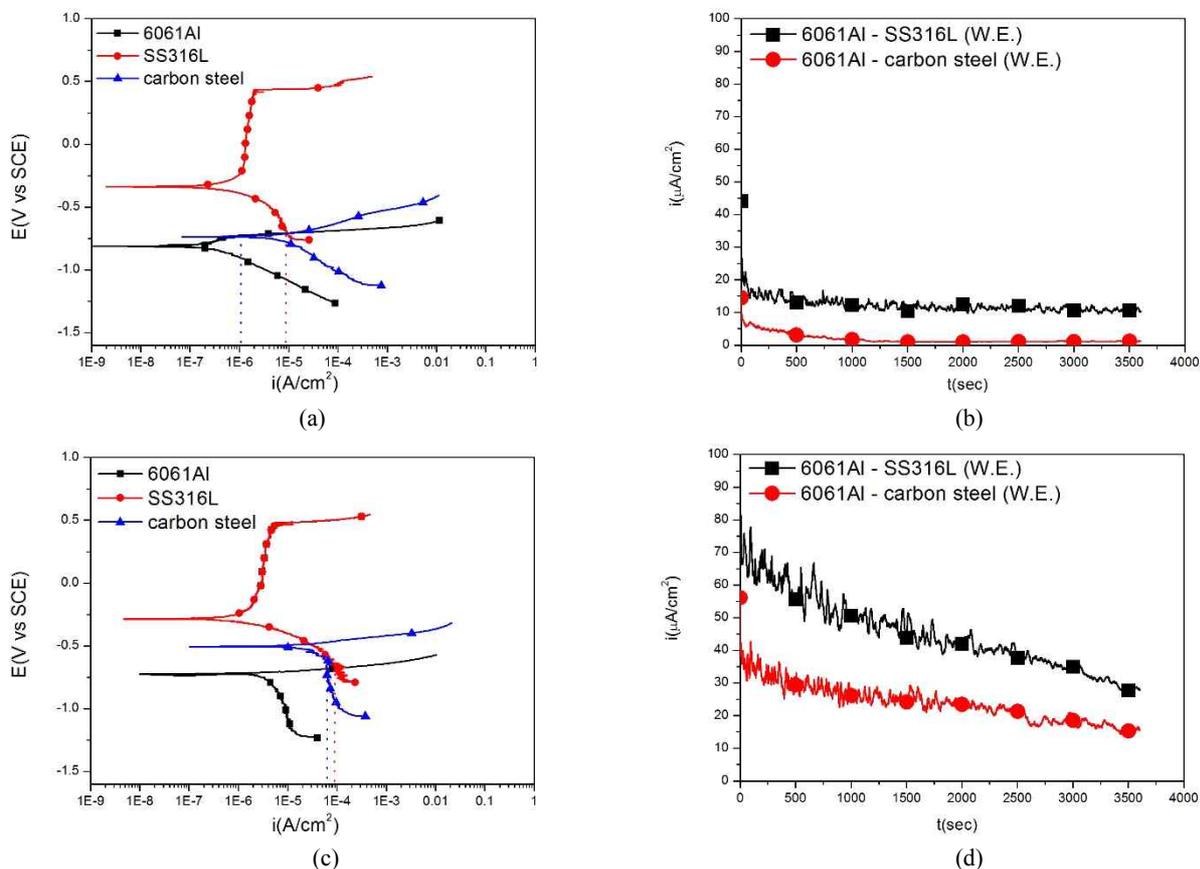


Fig. 13 Galvanic current density between 6061 Al, SS316L and carbon steel by using; (a) potentiodynamic polarization in deaerated (b) ZRA in deaerated, (c) potentiodynamic polarization in aerated and (d) ZRA in aerated 3% NaCl solution.

스테나이트 스테인리스 강으로 대체하여 사용한 것이 갈바닉 부식에 대해 더 저항성을 보였다. 그러나 그 차이는 크지 않아 니켈도금을 한 탄소강이나 316L 스테인리스 강 모두 갈바닉 부식 감소에 매우 효과적이었다.

3-5 6061 알루미늄 합금과 탄소강을 니켈도금한 탄소강으로 대체하여 측정된 갈바닉 전류밀도

Fig. 11은 알루미늄 합금과 탄소강과 80분동안 니켈 도금 처리를 한 탄소강과 알루미늄 합금간에 동전위 분극 실험을 이용한 경우와 영저항전류계를 이용한 경우 측정된 갈바닉 전류밀도 차이를 보여준다. Fig. 12에서 동전위 분극 실험을 이용하여 측정된 탄소강과 알루미늄 합금의 갈바닉 전류밀도는 탄소강에 니켈도금을 80분 인가한 경우와 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 전류밀도보다 탈기 시 $36.5 \mu A/cm^2$, 통기 시 $14.7 \mu A/cm^2$ 만큼 작게 측정되었으며 영저항전류계를 이용한 실험에서는 니켈 도금 전류를 80분 인가한 탄소강의 경우가 탈기 시에 $7.94 \mu A/cm^2$, 통기 시에 $12.1 \mu A/cm^2$ 만큼 갈바닉 전류가 작게 측정되어 알루미늄 합금과 탄소강 간의 갈바닉 부식 저항성이 탄소강에 80분동안 니켈 도금 처리를 한 탄소강과 알루미늄 합금 경우보다 더 좋았다.

3-6 6061 알루미늄 합금과 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체하여 측정된 갈바닉 전류밀도

Fig. 13은 알루미늄 합금과 탄소강 그리고 알루미늄 합금

과 탄소강을 대체한 316L 오스테나이트 스테인리스 강 간의 동전위 분극 곡선을 이용한 방법과 영저항전류계를 이용한 방법으로 갈바닉 전류밀도를 측정된 결과이다. Fig. 14에서 알 수 있듯이 동전위 분극 곡선 실험을 이용하면 탈기 시에 $6.08 \mu A/cm^2$, 통기 시에 $40.3 \mu A/cm^2$ 만큼 작게 측정되었으며 영저항전류계를 이용한 실험에서도 측정된 탄소강과 알루미늄 합금사이의 갈바닉 부식 전류밀도가 오스테나이트 스테인리스 강과 알루미늄 합금 사이의 갈바닉 전류밀도보다 탈기 시 $8.51 \mu A/cm^2$, 통기 시 $12.6 \mu A/cm^2$ 만큼 낮게 측정되어 알루미늄 합금과의 갈바닉 부식 저항성은 탄소강이 316L 오스테나이트 스테인리스 강보다 더 좋았다. 이는 6061 알루미늄과 탄소강 간의 전위차이가 6061 알루미늄과 316L 스테인리스 강의 경우보다 작은데 그 원인이 있다.

4. 고찰

4-1 탄소강에 니켈 도금을 한 경우보다 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체한 경우가 그래파이트와의 갈바닉 부식 저항성이 더 큰 이유

본 연구에서는 갈바닉 계열을 이용하여 탄소강 리벳과 CFRP를 모사한 그래파이트와의 갈바닉 부식을 완화하기 위하여 갈바닉 계열에서 탄소강과 그래파이트의 전위 차가 매우 크므로 탄소강을 니켈도금 하거나 316L 오스테나이트 스테인리스 강으로 대체하여 그래파이트와의 전위차를

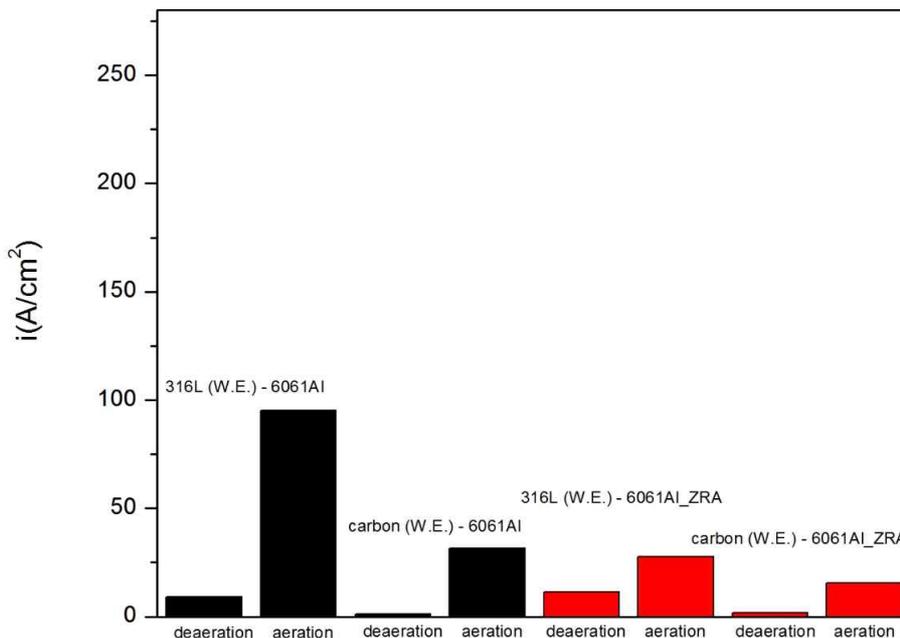


Fig. 14 Galvanic current density between 6061 Al, SS316L and carbon steel for deaerated or aerated 3% NaCl solution by using the potentiodynamic polarization curves and zero resistance ammeter.

줄어 갈바닉 전류밀도를 낮추었다.

탄소강에 니켈 도금을 한 경우 그래파이트와의 갈바닉 부식 저항성은 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 대체한 경우보다 다소 낮았다. 더욱이 도금 시간을 80분으로 충분히 하여도 316L 오스테나이트 스테인리스강이 더 나은 갈바닉 부식 저항성을 보였다. 그러므로 316L 오스테나이트 스테인리스강이 니켈 도금을 한 탄소강보다 기존 탄소강 리벳을 대체하기에 더 적합하다고 판단이 된다. 또한 니켈 도금을 한 탄소강은 박리로 인한 탄소강의 노출위험이 존재하지만 316L 오스테나이트 스테인리스강의 경우는 탄소강을 완전히 대체하기 때문에 박리가 되어 탄소강이 노출되는 경우는 없어 외부에서 오는 충격이나 기계적 마찰에 덜 민감할 것으로 생각된다 [11,12].

결론적으로 그래파이트와의 갈바닉 전류밀도가 316L 오스테나이트 스테인리스강에서 가장 낮아 가장 좋은 갈바닉 부식 저항성을 나타낸다.

4-2 탄소강에 니켈 도금을 한 경우와 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 대체한 경우 알루미늄 합금과의 갈바닉 부식 저항성이 탄소강보다 오히려 나빠지는 이유

탄소강에 니켈 도금을 한 경우와 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 대체한 경우는 비록 그래파이트와의 갈바닉 부식 저항성은 기존 탄소강보다 그래파이트와의 전위차가 줄어들어 따라 개선되었으나 알루미늄 합금과의 전위차는 기존 탄소강보다 증가하여 갈바닉 부식의 구동력이 오히려 증가할 것이라고 예상되는데 실험 결과에서도 기존 탄소강보다 탄소강에 니켈 도금을 한 경우와 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 대체한 경우가 알루미늄 합금과의 갈바닉 전류밀도는 더 큰 값을 나타내 그래파이트와의 갈바닉 부식은 감소시킬 수는 있으나 알루미늄 합금과의 갈바닉 부식은 오히려 증가되는 것으로 확인이 되었다.

4-3 탄소강 대신 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 대체한 리벳을 적용해야 하는 이유

본 연구에서 CFRP의 주 재료인 그래파이트를 사용하여 그래파이트와 리벳 사이의 갈바닉 부식을 리벳의 재료인 탄소강에 니켈도금을 하거나 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 대체하여 그래파이트와의 전위차를 줄임으로서 갈바닉 부식 저항성을 향상시켰다. 그러나 알루미늄 합금과의 갈바닉 부식 가능성은 기존의 탄소강에 비해 탄소강을 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 대체한 경우가 오히려 증가하였다.

본 실험에서는 면적을 동일하게 제어하여 갈바닉 전류 측정 실험을 실시 하였지만 자동차 강판의 실제 환경을 고려한다면 본체인 알루미늄 합금기지와 리벳과의 갈바닉 부식

은 음극으로 작용하는 리벳과 양극으로 작용하는 알루미늄 합금이 소음극-대양극의 형태를 나타내므로 실제 알루미늄 기지에서 나타나는 갈바닉 전류밀도는 현저히 낮아 갈바닉 부식은 거의 무시할 수 있다. 또한 알루미늄 합금은 실제 환경에서 부도체인 부동태 피막을 형성하게 되면 갈바닉 부식의 가능성을 더욱 줄어든 것이다. 따라서 탄소강 리벳을 316L 오스테나이트 스테인리스강 리벳으로 대체하면 갈바닉 부식 저항성이 현저히 향상되리라 판단 된다.

5. 결론

1. 탄소강 리벳에 니켈도금을 하거나 탄소강 리벳을 316L 오스테나이트 스테인리스강 리벳으로 대체하면 그래파이트와 리벳간의 전위차에 따른 구동력을 감소시키므로 갈바닉 부식가능성을 감소시킬 수 있었으며 그래파이트와의 갈바닉 부식 저항성은 니켈을 80분동안 도금한 탄소강보다 316L 오스테나이트 스테인리스강이 다소 좋았다.
2. 또한 갈바닉 전류 밀도를 분극곡선이나 영저항전류계로 측정한 결과로 보아 316L 오스테나이트 스테인리스강이 니켈 도금을 한 탄소강 보다 갈바닉 부식 저항성이 높고, 박리나 외부 충격을 고려하면 316L 오스테나이트 스테인리스강이 더 적합하리라 생각된다.
3. 탄소강 리벳을 니켈을 도금한 탄소강 리벳 혹은 316L 오스테나이트 스테인리스강 리벳으로 대체하면 비록 본체인 알루미늄 합금과의 갈바닉 전류는 증가하나 알루미늄 자동차 본체 기지의 경우 리벳보다 큰 면적을 가지고 있고 알루미늄 합금 표면에는 부동태 피막이 표면에 형성될 것이므로 실제 갈바닉 부식의 가능성은 그리 크지 않다.

References

1. M. Mandel and L. Kruger, *Materialwiss. Werkstofftech.*, **43**, 4 (2012).
2. L. T. Harper, T. A. Turner, J. R. B. Martin, and N. A. Warrior, *J. Compos Mater.*, **44**, 931 (2010).
3. M. Mandel, *Corros., Sci.*, **73**, 172 (2013).
4. X. G. Zhang, *Galvanic Corrosion, Uhlig's Corrosion Handbook, 3rd ed.*, p. 123, John Wiley & Sons (2011).
5. T. Mohammadreza and S. Hamid, *J. Compos. Constr.*, **5**, 200 (2001).
6. G. A. Di Bari, *Modern Electroplating*, 5th ed., p. 79, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey (2010).
7. R. Baboian, *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, ASM Handbook*, p. 210, ASM International (2003).
8. M. Wicklein, S. Ryan, D. M. White, and R. A. Clegg, *Int.*

- J. Impact Eng.*, **35**, 1861 (2008).
9. K. Suk-Won and L. Jae-Bong, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, **40**, 1191 (2002).
 10. ASTM Standard B689, Standard Specification for Electroplated Engineering Nickel Coatings (1997).
 11. V. Minakshi, S. A. Vasanwala, and A. K. Desai, *J. Eng. Res. Appl.*, **4**, 657 (2014).
 12. T. Izabela, Ph.D. Thesis, p. 60, Cracow University of Technology (2014).