

전처리가 그래핀을 코팅한 고체고분자 연료전지 분리판의 전기화학적 특성에 미치는 영향

차 성 윤 · 이 재 봉[†]

국민대학교 공과대학 신소재 공학부, 136-702 서울시 성북구 정릉로 77
(2014년 12월 3일 접수, 2014년 12월 23일 수정, 2014년 12월 26일 채택)

Effect of Pretreatments on Graphene Coated Bipolar Plate of PEMFC on Electrochemical

Seong-Yun Cha and Jae-Bong Lee[†]

School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-702, Republic of Korea
(Received December 3, 2014; Revised December 23, 2014; Accepted December 26, 2014)

Effect of pretreatments on the graphene coated bipolar plate of proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) was investigated in simulated environments for PEMFC by using electrochemical measurement techniques. Interfacial contact resistance(ICR) between the graphene coated bipolar plate and the gas diffusion layer(GDL) was measured. The value of ICR decreased with an increase in compaction stress($20\text{N/cm}^2\sim 220\text{N/cm}^2$). ICR of graphene coated bipolar plate was higher than that of bare 316L stainless steel. However, Potentiodynamic measurement results showed that the corrosion resistance of graphene coated bipolar plate was higher than that of bare 316L stainless steel. H_2SO_4 acid pretreatment was the most effective among various pretreatments. The lowest ICR and the corrosion current density were obtained when using H_2SO_4 solution pretreatment.

Keywords : PEMFC, bipolar plate, graphene, stainless steel, interfacial contact resistance, corrosion resistance

1. 서 론

연료전지는 전기화학 반응에 의하여 연료가 갖고 있는 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시켜주는 발전장치로 기존의 발전장치보다 효율이 높고 공해배출도 거의 없기 때문에 지구 온난화, 환경오염, 에너지 자원 고갈 등의 문제를 해결하기 위한 대안으로 주목 받고 있다.

그 중 고체고분자형 연료전지(PEMFC)는 다른 연료 전지에 비해 낮은 온도에서 작동하며 시동시간이 짧고 전류밀도 및 출력 밀도가 높아 이동용 전원 장치로써 응용이 가능하여 자동차뿐만 아니라 가정, 산업 및 휴대장치의 전원으로 이용 가능하다. 이러한 고체고분자형 연료전지의 상용화를 위해서는 전체 스택(stack)가격의 40% 정도를 차지하는 분리판의 가격을 낮추는 것이 필요하다.^{1)~4)}

분리판의 역할은 크게 전도/통전, 배출, 분리 등의 기본적인 역할을 수행한다. 이러한 역할을 수행하기 위해서 우선 분리판과 가스확산층(GDL)간의 전기전도도가 양호해야 한다. 두 번째로는 수소극과 공기극에 공급되는 반응가스의 혼합을 방지하는 역할을 하므로 가스투과율이 낮아야 한다. 세 번째 사항은 연료전지 운전 시 지속적인 전극반응에 의한 내부 온도가 상승하므로 높은 열전도 특성을 가져야 한다. 마지막으로 가혹한 부식환경이 조성되기 때문에 내식성이 좋아야 한다.

과거에 사용되고 있는 분리판은 대부분 고밀도 그래파이트를 사용하고 있으며 그래파이트의 경우 깨지기 쉽고 가공이 어려워 시간이 오래 걸리며 가공비용이 비싼 단점이 있다. 또한 깨지기 쉬운 특성 때문에 분리판의 두께에 한계가 있어 연료전지 스택의 소형화에 어려움이 있다. 따라서 그래파이트를 대신 할 수 있는 저렴하고 가공성이 좋은 분리판의 개발이 필요한 실정이며 이러한 분리판은 미국에너지성

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

Table 1. The required chemical and physical properties for bipolar plate of PEMFC⁵⁾

Propeties	Required values
H ₂ gas permeability	<2×10 ⁻⁶ cm ³ cm ⁻² ·sec in 60~90°C, 3atm, (<0.1mAcm ⁻²)
Corrosion resistance	<1μAcm ⁻² (0.1V, H ₂ anode) (0.6V, Air cathode) in 60~90°C, pH3, 1mM~1M H ₂ SO ₄ /2ppm F ⁻ solution
Interfacial contact resistivity	<10mΩcm ² in 100~150Ncm ⁻²
Cost	<10 US\$kW ⁻¹ (500,000 stack/year)

(Department of Energy, DOE)이 정한 값을 만족 하여야 한다.⁵⁾

현재에는 금속을 이용한 분리판은 우수한 가공성과 전기 전도성을 가지고 있고 가격 경쟁면에 있어서도 유리하여 분리판으로써의 충분한 자질을 가지고 있어 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있다. 특히 Davies 등은⁶⁾ 다양한 종류의 스테인리스 강(321, 304, 347, 316, 310, 904 등)을 사용하여 연료전지 환경에서의 스테인리스 강의 분리판으로서의 성능을 평가 하였으며, Wang 등은^{7,8)} 오스테나이트계 스테인리스 강(349TM)과 페라이트계 스테인리스 강(AISI446)을 이용하여 연료전지 환경에서의 전기화학적 시험을 실시하여 Cr 함량이 높아짐에 따라 부식저항성이 향상되나 부동태 피막의 형성 때문에 바람직하지 않은 접촉 저항 값이 나온다는 보고 하기도 하였다. 또한 Kim 등은⁹⁾ 오스테나이트 스테인리스 강에 텅스텐을 첨가하여 제조한 합금을 이용한 금속 분리판에 대한 연구가 이루어지기도 하였다.

그러나 연료전지의 작동 환경은 부식성이 강한 환경이기 때문에 금속 분리판을 이용한 연료전지의 경우 장시간 작동 시 금속 분리판의 부식으로 인하여 전해질이 오염되기도 하며, 분리판 위에 형성된 부식물 층이 전기전도도를 감소 시키기도 하는 등 연료전지 성능의 감소를 일으키는 원인이 된다. 이를 극복하기 위하여 Hentall 등은¹⁰⁾ Al 기판 위에 금을 코팅하여 분리판으로 사용하기도 하였는데 그 성능은 고밀도 그라파이트와 매우 유사하였으나 성능이 빠르게 저하되고 가격이 비싼 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 316L 스테인리스 강 위에 내식성이 우수한 물질인 그래핀을 코팅하여 전해질 환경에서 분리판의 역할을 충분히 수행할 수 있는 금속 분리판을 개발하고 평가하여 고체 고분자 연료전지의 경제성을 확보하고 연료전지의 효율을 높여 다양한 분야에 적용할 수 있는 고체고분자 연료전지의 개발에 기여하고자 한다.

2. 실험방법

2-1. 그래핀 제조, 전처리 및 coating

그래핀의 제조 방법으로는 크게 물리적, 화학적 박리법으

로 나뉘는데 본 실험에서는 화학적 박리법에서도 대량 생산이 가능하고 대면적 응용에 유리한 Improved Hummer's Method(황산 만을 사용한 Hummer's Method 에 질산을 더 첨가시킨 방법) 를 이용하였다. 이 방법으로 제조된 GO(Graphite oxide)는 DI water에 1mg/ml의 비율로 첨가시켜 24시간 동안 초음파 수조 내에서 분산을 실시하였다.

실험에 사용된 316L 스테인리스 강 시편의 크기는 1.5×1.5cm²로 가공하였으며, 코팅 전 표면은 #100, #320, #800, #1200, #2000 grit까지 SiC 연마지로 차례로 연마 후 다시 1μm 알루미늄 분말을 이용하여 습식 연마한 다음 증류수로 세척하였다. 그리고 전처리 용액이 미치는 영향을 조사하기 위하여 7w% H₂SO₄ 전처리 용액 혹은 8w% HNO₃ 및 3w% HF 혼합 전처리 용액, 두가지 전처리 용액을 각각 따로 따로 사용하여 산세 처리를 한 후 DI water와 acetone 등을 통해 ultrasonic cleaning을 하였다.

코팅 방법으로는 ESD(Electrostatic spray deposition) 장비를 사용하였으며 이는 분산액이 분사되는 needle 에 전류를 걸어 분사입자가 미세하면서도 넓게 분사되며, 코팅되는 시편이 놓이는 stage를 100°C로 가열하여 기판에서 용매의 응집 현상을 방지할 수 있는 장점이 있다. ESD 코팅 조건으로 100 μl/min, 10kV에서 기판온도는 100°C, 기판과 노즐과의 거리는 5cm로 하였다.

ESD 코팅 후에는 24hr동안 100°C에서 hydrazine

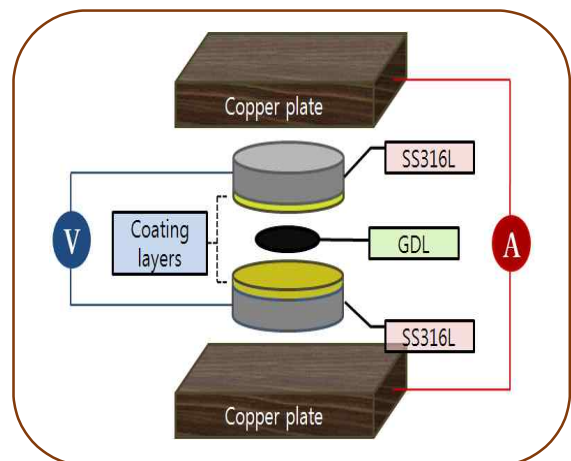
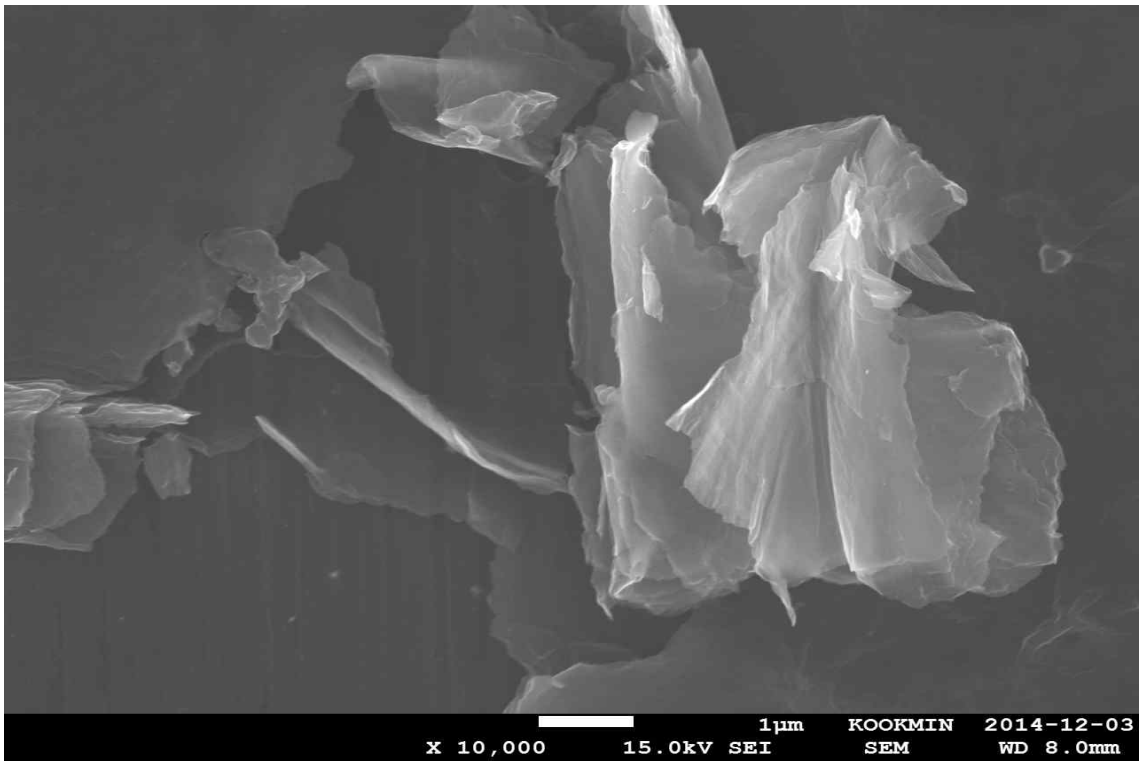
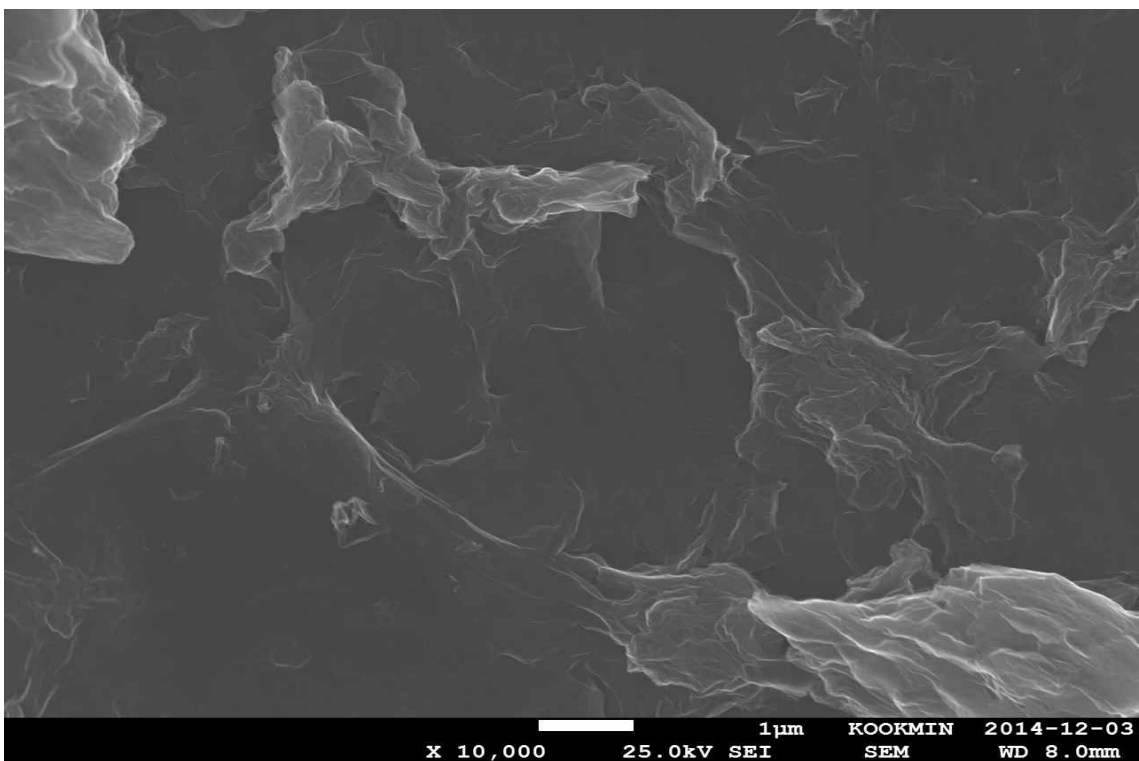


Fig. 1. The schematic setup for ICR measurement.

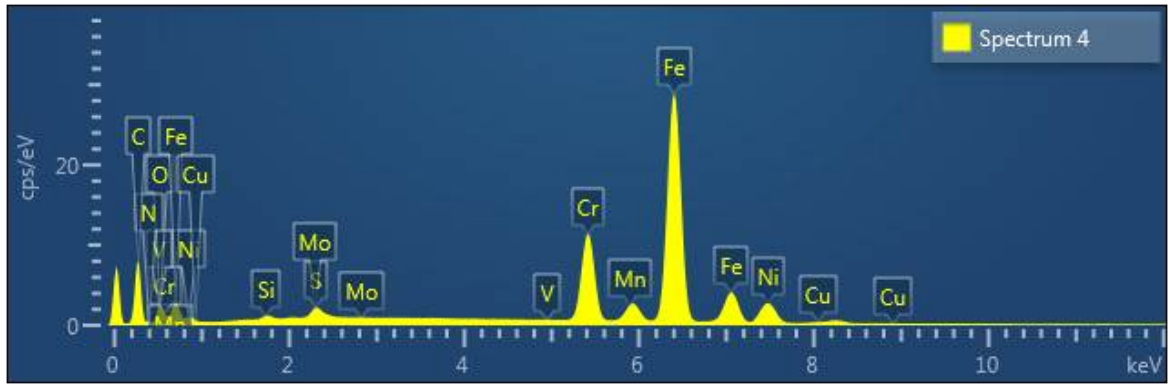


(a)



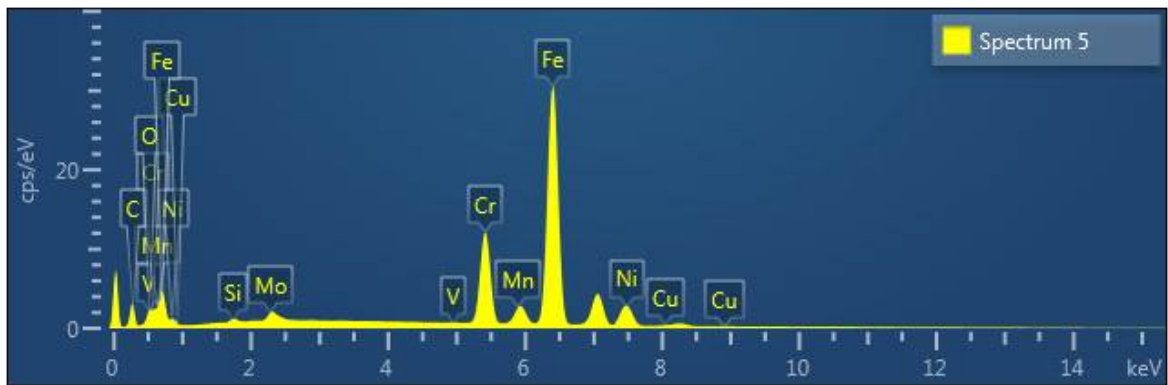
(b)

Fig. 2. FE-SEM micrographs of (a) No. 1 GO (b) No.2 GO.



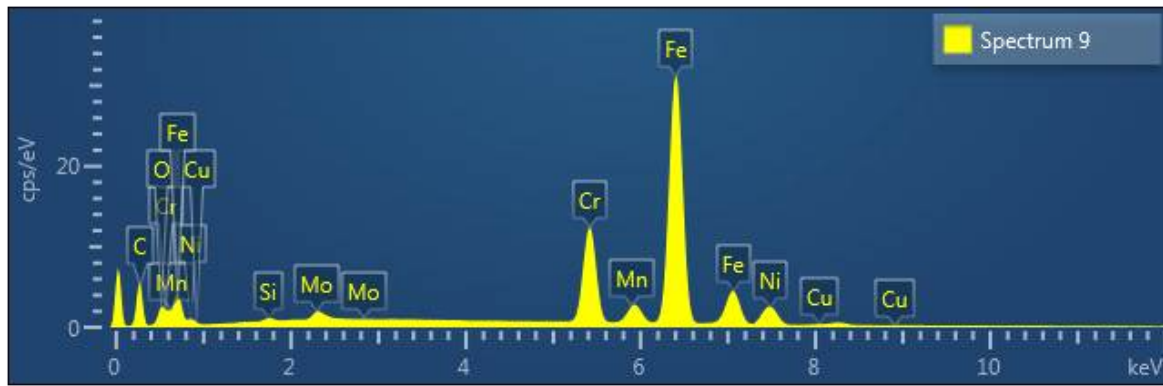
Element	Line Type	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
C	K series	34.77	0.33	66.23
N	K series	1.37	0.47	2.23
O	K series	5.06	0.18	7.23
Si	K series	0.27	0.02	0.22
S	K series	0.21	0.04	0.15
Cr	K series	10.23	0.09	4.50
Mn	K series	1.14	0.04	0.48
Fe	K series	40.06	0.28	16.41
Ni	K series	5.72	0.08	2.23
Cu	K series	0.25	0.04	0.09
Mo	L series	0.92	0.12	0.22
Total:		100.00		100.00

(a)



Element	Line Type	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
C	K series	20.05	0.34	51.71
O	K series	2.76	0.14	5.34
Si	K series	0.37	0.03	0.40
V	K series	0.07	0.03	0.04
Cr	K series	13.33	0.09	7.94
Mn	K series	1.41	0.06	0.80
Fe	K series	52.50	0.26	29.12
Ni	K series	7.46	0.09	3.94
Cu	K series	0.29	0.06	0.14
Mo	L series	1.76	0.09	0.57
Total:		100.00		100.00

(b)



Element	Line Type	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
C	K series	28.29	0.29	61.88
O	K series	3.62	0.12	5.95
Si	K series	0.23	0.02	0.22
Cr	K series	12.00	0.08	6.06
Mn	K series	1.15	0.05	0.55
Fe	K series	47.26	0.22	22.24
Ni	K series	5.89	0.07	2.63
Cu	K series	0.24	0.05	0.10
Mo	L series	1.31	0.07	0.36
Total:		100.00		100.00

(c)

Fig. 3. EDS image and element compositions of (a) No. 1 (b) No.2 and (c) No.3 GO.

process를 실시하여 GO에 붙어있는 작용기를 환원시킴으로써 rGO(Reduced graphite oxide)로 변화시켰다.

2-2. 면간 접촉저항 측정

고체고분자형 연료전지 환경에서의 전기전도도 특성을 평가하기 위하여 PEMFC 스택 내의 환경을 모사해 GDL과 시편 사이의 계면접촉저항을 압력을 변화시키면서 측정하였다. 측정방법으로는 Fig. 1과 같이 전체 저항이 GDL과 시편의 저항 $R_{GDL/STS316L}$ 의 두 배가 되게 측정하였다. 이때 가해진 압력은 $20N/cm^2 \sim 220N/cm^2$ 까지 변화시켰고 양 끝의 구리판에 $0mA/cm^2$ 에서 $700mA/cm^2$ 까지의 전류를 차례로 증가하여 GDL과 시편 사이의 전압강하를 측정한다 뒤 ICR을 계산하였다.

2-3. 전기화학실험 측정

시편의 PEMFC 작동환경에서의 부식거동을 관찰하기 위해 동전위분극 시험, 정전위분극 시험을 실시하였다. 모든 전기화학 시험은 3전극 시스템을 사용하였고 연료전지 작동환경을 모사하기 위하여 $70^\circ C$ 에서 $1M H_2SO_4$ 에 2ppm F-를 첨가한 수용액을 사용하였다. 기준전극은 Ag/AgCl, 상대전극은 백금전극을 사용하며, $0.5mV/sec$ 의 주사속도

로 전위를 증가시키면서 시험을 실시하였다. 그리고 고체고분자 연료전지의 Anode 환경과 Cathode 환경을 위하여 시험 용액에 각각 H_2 와 Air를 purge를 하며 전위에 따른 전류밀도 값을 측정하여 코팅 막의 부식에 대한 저항성을 평가하였다. 동전위분극 시험에서 인가전위의 범위는 부식 전위에서 $200mV$ 아래 전위에서 시작하여 $1.2V_{SCE}$ 까지 분극하였고 주사속도는 $0.5mV/sec$ 로 하였다. 정전위분극 시험은 PEMFC의 양극 작동 전위인 $0.6V_{SCE}$ 와 음극 작동 전위인 $-0.1V_{SCE}$ 에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 그래핀이 코팅된 316L 스테인리스강 표면의 FE-SEM 분석결과

각기 다른 시기에 제조한 미세하게 성분이 다른 세 종류의 GO(No.1, 2, 3) 를 코팅한 시편을 분석하였다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 No. 1 GO와 No. 2 GO로 각각 표시한 시편의 Fe-SEM 사진이다. Fig. 3은 그래핀이 코팅된 표면의 성분을 표로 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 No.1 시편과 No.2 시편 간에는 표면에서 산소 조성의 차이를 보였는데 No.1 GO의 산소의 함량이 No.2 GO와 비교 시 약 2배

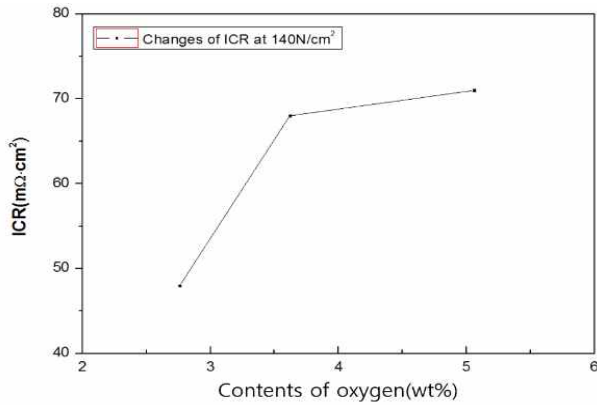
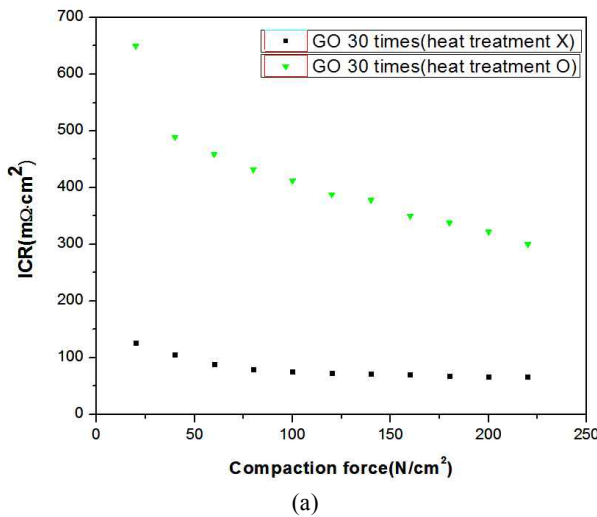
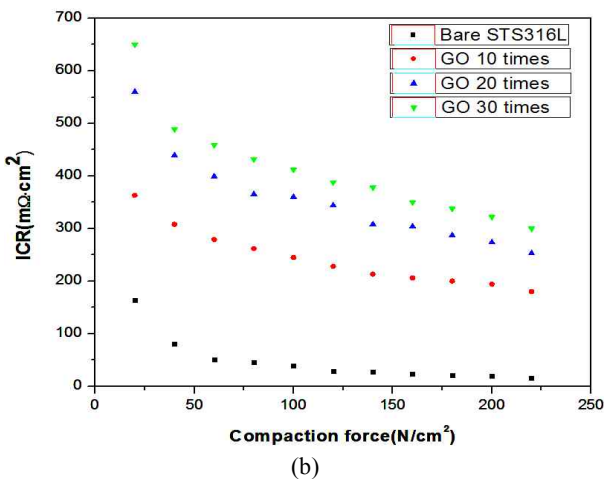


Fig. 4. Changes of interfacial contact resistances at 140N/cm² with oxygen content.



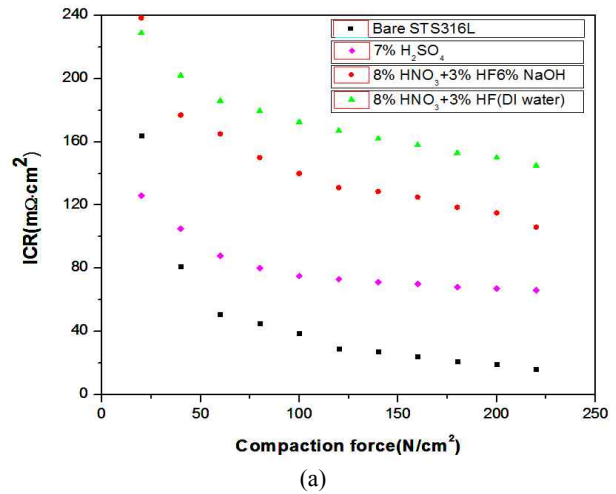
(a)



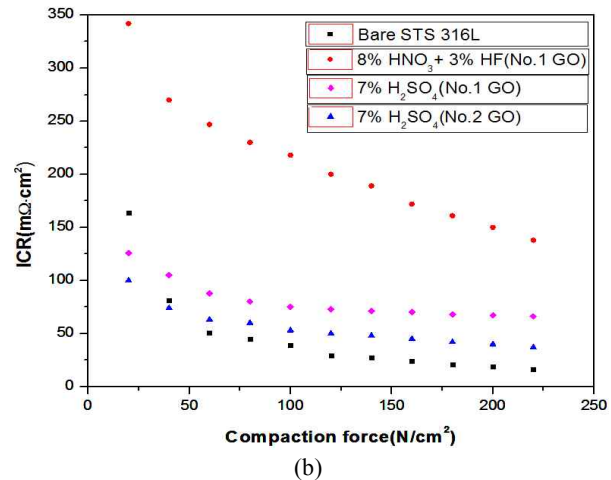
(b)

Fig. 5. Interfacial contact resistance values according to (a) heat-treatment and (b) coating thickness.

(wt%로) 높게 측정되었는데, 이는 No.1 GO가 GO 제조시에 산소기가 남아있었거나, 코팅 후 hydrazine process에서 산소의 농도가 증가한 것으로 생각된다. 또한 No.1 GO



(a)



(b)

Fig. 6. Variation of interfacial contact resistance according to (a) different pretreatment solutions such as 7% H₂SO₄ or 8% HNO₃+3% HF and (b) different GO such as No.1 GO and No.2 GO pretreated by 7% H₂SO₄ solution.

에서는 No.2에서 관찰되지 않은 질소와 황이 측정되었다. 여기서 질소는 hydrazine process에 따른 부산물로 보인다. 따라서 No.1 GO가 No.2 GO에 비해 상대적으로 불순물의 농도가 높음을 알 수 있었다.

Fig. 4는 산소의 함량에 따른 ICR 값을 측정한 그래프이다. No.1 GO, No.2 GO, No.3 GO의 산소의 함량은 각각 5.06wt%, 2.76wt%, 3.62wt% 인데 연료전지 작동환경인 140N/cm²에서 ICR을 측정한 결과 산소의 함량이 증가할수록 ICR값이 증가하는 것을 보여 No.1 이 가장 큰 값을 No.2가 가장 작은 값을 나타내었다. 이는 산소의 표면 농도가 증가할수록 표면에 산화피막이 부동태 피막이 더욱 치밀하여져서 ICR 값을 증가시키는 것으로 판단된다.

3-2. 코팅 두께 및 열처리에 따른 ICR 측정

Fig. 5(a)는 열처리에 따른 ICR을 비교한 그래프이다.

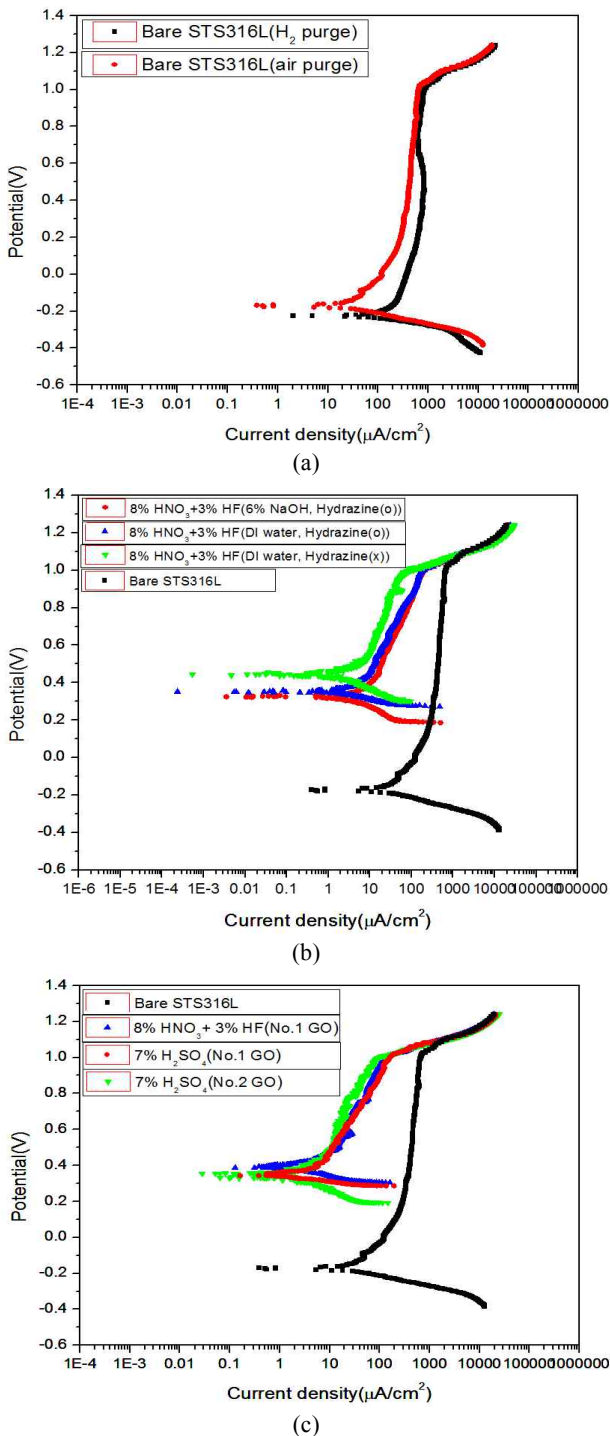


Fig. 7. Potentiodynamic polarization curves in 1M H₂SO₄/2ppm F⁻ aqueous solution at 70°C of (a) bare 316L stainless with air(cathode) and hydrogen gas(anode), and polarization curves in aerated 1M H₂SO₄/2ppm F⁻ aqueous solution at 70°C of (b) graphene (GO and r-GO) coated 316L after 8% HNO₃+3% HF acid pretreatment and of (c) graphene coated(r-GO) 316L pretreated with two different acid solution and 316L with two different GOs.

코팅 후 열처리를 한 시편의 경우 열처리하지 않은 경우보다

ICR이 높게 측정되었다. 이는 코팅 층에 존재하는 산소로 인하여 열처리 과정에서 산화로 인한 산화피막으로 인하여 ICR의 증가를 나타내는 것으로 생각된다. Fig. 5(b)는 코팅 두께에 따른 ICR을 비교한 그래프이다. 코팅 두께에 따른 ICR을 분석한 결과 코팅 두께가 증가할수록 ICR이 증가하였는데 이는 Fig. 5와 마찬가지로 열처리로 인한 코팅층의 산화반응에 따라 ICR이 증가하는 것으로 생각된다.

3-3. 전처리에 따른 ICR 측정

Fig. 6은 전처리에 따른 ICR의 변화를 보여준다. Fig. 6(a)는 7w% H₂SO₄에서 산세처리로 전처리를 하고 후 DI water와 아세톤으로 초음파 세척한 시편과 8w% HNO₃ 및 3w% HF 혼합용액에서 산세처리로 전처리를 한 후 각각 DI water와 6w% NaOH로 중화처리 후 아세톤에서 초음파 세척한 한 시편의 ICR 결과를 나타낸다. 이를 통해 7w% H₂SO₄로 전처리 한 경우가 더 낮은 ICR를 보이는 것을 알 수 있었다. 한편 8w% HNO₃ 및 3w% HF 혼합용액으로 전처리 한 경우에는 중화방법으로 6w% NaOH를 선택한 경우가 DI water 보다 낮은 ICR를 보였다. Fig. 6(b)에서는 Fig. 6(a)와 마찬가지로 7w% H₂SO₄로 전처리 한 경우에 가장 낮은 ICR를 보였으며, 산소의 함량이 상대적으로 적은 No.2 GO로 코팅한 경우 더 낮은 ICR 값을 나타내었다.

3-4. 전처리에 따른 내식성 측정

Fig. 7은 전처리에 따른 동전위분극 곡선을 나타낸다. Fig. 7(a)는 코팅 전 bare 316L 스테인리스강을 각각 cathode 환경과 anode환경에서 측정한 동전위분극 그래프이다. Cathode 와 anode 환경 모두 부동태 구간이 형성되었으며, 부식전류밀도가 anode 환경이 cathode 환경 보다 더 높은 값을 나타내었다. Fig. 7(b)는 전처리 용액으로 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액을 사용한 후 각각 DI water와 6w% NaOH로 중화처리를 한 시편의 동전위분극 곡선을 나타낸다. 동전위분극 곡선 결과, 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액으로 전처리 한 그래핀 코팅한 시편이 Bare 스테인리스 강 보다 부식전류밀도가 감소하고 부식전위 값도 증가하여 내식성이 향상된 것을 알 수 있었다. 중화 방법으로는 DI water 로 중화하는 것이 NaOH로 중화하는 것 보다 더 낮은 부식전류밀도 값을 나타내었다. DI water 로 중화한 시편의 경우에도 hydrazine process 를 적용한 경우(rGO) 와 적용하지 않은 경우(GO) 에 대하여 동전위분극 시험을 실시하였는데 hydrazine process를 적용하지 않은 GO의 경우가 hydrazine process를 적용한 rGO의 경우보다 부식전류밀도가 낮게 측정되었으며 부식전위는 높게 측정되었다. Fig. 7(c)는 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리를 한 경우와 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액으로

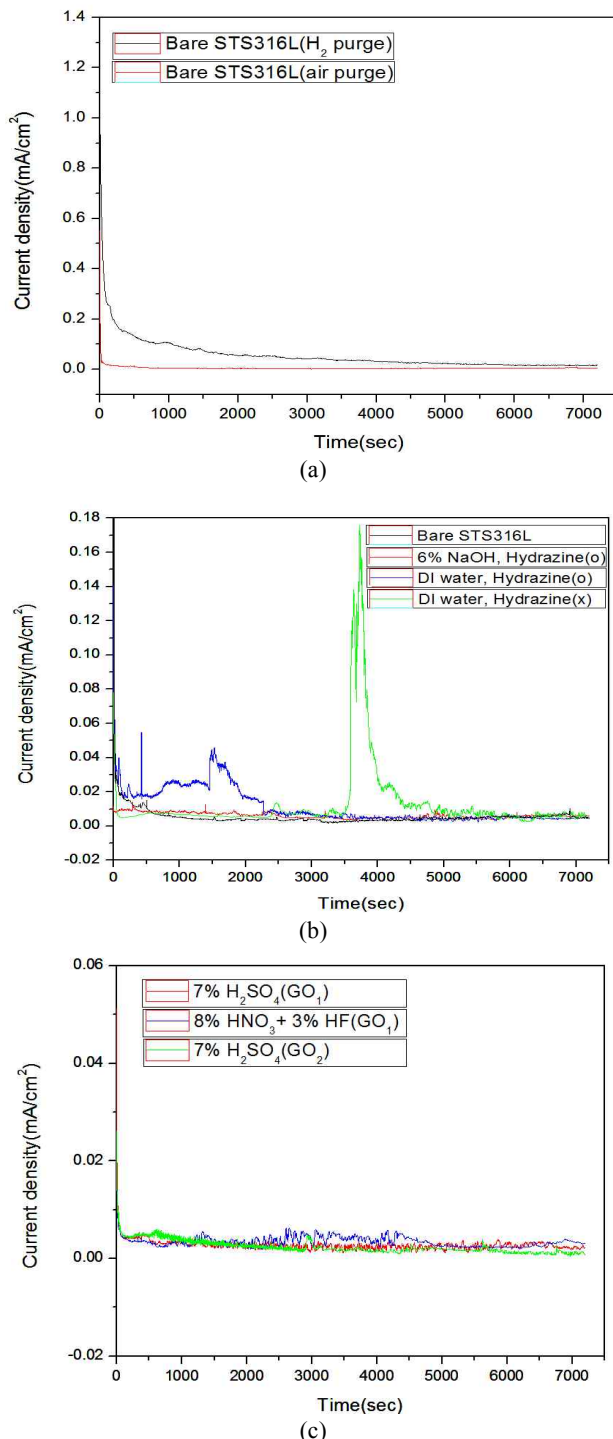


Fig. 8. Potentiostatic polarization curves in 1M H₂SO₄/2ppm F aqueous solution at 70°C of (a) bare 316L stainless with air(cathode, 0.6V_{sce}) and hydrogen gas(anode, -0.1V_{sce}), and polarization curves in aerated 1M H₂SO₄/2ppm F aqueous solution at 70°C of (b) graphene (GO and r-GO) coated 316L after 8% HNO₃+3% HF acid pretreatment and of (c) graphene coated(r-GO) 316L pretreated with two different acid solution and 316L with two different GOs.

전처리 한 경우에 No.1 GO의 동전위분극 곡선과 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리 한 경우 서로 다른 시기에 제조한 No.1 GO와 No.2 GO에 따른 동전위분극 곡선도 나타내었다. 전처리 용액에 따른 동전위분극 곡선의 경우 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리 한 경우가 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액으로 전처리 한 경우보다 더 낮은 부식전류밀도 값을 나타내었으며, No.1 GO와 No.2 GO의 동전위분극 곡선에 따르면 분석한 산소 함량이 적은 No.2 GO가 No.1 GO보다 더 낮은 부식전류밀도 값을 나타내었다. 따라서 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리를 한 경우가 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액으로 전처리 한 경우보다 더 나은 내식성을 나타내는 것으로 생각되며 GO의 산소농도가 증가할수록 더욱 견고한 부동태 피막으로 인한 내식성이 향상되는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 전처리에 따른 정전위 분극 곡선을 나타낸다. Fig. 8(a)는 bare 316L 스테인리스 강을 cathode 환경(0.6V_{sce}(air purge))과 anode 환경(-0.1V_{sce}(H₂ purge))에서 각각 측정된 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 cathode 환경에서 anode 환경보다 더 낮은 전류 밀도 값을 보였다. Fig. 8(b)는 전처리 용액으로 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액을 사용한 후 각각 DI water와 6w% NaOH로 중화처리를 한 시편의 cathode (0.6V_{sce}(air purge)) 환경에서의 정전위 분극곡선을 각각 나타낸다. 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액으로 전처리 한 후 DI water로 중화하는 것이 6w% NaOH로 중화하는 것보다 더 안정한 전류밀도 거동을 나타내었으며 DI water로 중화한 시편의 경우에도 hydrazine process를 적용한 경우(rGO)와 적용하지 않은 경우(GO), hydrazine process를 적용하지 않은 GO의 경우가 hydrazine process를 적용한 rGO의 경우보다 더욱 높은 순간 전류밀도 거동을 나타내었다. Fig. 8(c)에서는 No.1 GO의 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리를 한 경우와 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액으로 전처리 한 경우에 정전위분극 곡선과 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리 한 경우에는 서로 다른 시기에 제조한 No.1 GO와 No.2 GO에 따른 정전위분극 곡선도 나타내었다. 전처리 용액에 따른 No.1 GO의 정전위 분극곡선의 경우 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리 한 경우가 8w% HNO₃ +3w% HF 혼합용액으로 전처리 한 경우보다 더 낮은 전류밀도 값을 나타내었으며, 7w% H₂SO₄ 수용액으로 전처리 한 경우에는 산소농도가 높은 No.1 GO와 산소 함량이 적은 No.2 GO가 유사한 전류밀도 값을 나타내었는데 이는 산소를 purging 하여 용존 산소가 풍부한 cathode 환경의 경우에는 GO 간의 산소 함량의 차이가 전류밀도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론

그래핀을 코팅한 316L 스테인리스강의 표면에 ICR과 내식성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 그래핀이 코팅된 316L 스테인리스 강 ICR을 측정할 결과, 140N/cm²에서 50mΩ 으로 10mΩ 이하인 DOE의 목표값을 만족시키지 못하였으나 코팅된 그래핀의 산소함량이 많을수록, 대기 분위기에서 열처리를 할수록 ICR은 증가하는 것을 할 수 있었는데 이는 표면에 산화피막의 형성에 따른 것으로 판단되어 ICR을 감소시키기 위해서는 산소농도의 감소가 중요함을 알 수 있었다. 따라서 GO에서 rGO로 변환하는 hydrazine process가 중요할 것으로 판단된다.
- 2) 전처리 용액으로는 7w% H₂SO₄에서 전처리 한 경우가 8w% HNO₃ + 3w% HF 혼합용액에서 전처리를 한 경우보다 낮은 ICR과 더 나은 내식성을 나타내었다.
- 3) 연료전지 작동환경 (cathode 및 anode)에서 동전위 분극 시험을 실시한 결과 그래핀이 코팅된 316L 스테인리스강이 bare 스테인리스강보다 더 낮은 부식전류밀도와

부동태전류를 나타내어 내식성이 향상되었다.

References

1. J. B. Lee and I. H. Oh, *Met. Mater. Int.*, **20**, 629 (2014).
2. I. H. Oh and J. B. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **9**, 129 (2010).
3. C. Y. Wen, Y. S. Lin and C. H. Lu, *J. Power Sources*, **192**, 475 (2009).
4. K. Kordesch and G. Simader, *Fuel Cells and Their Applications*, John Wiley & Sons, New York (2006).
5. A. Hermann, T. Chaudhuri and P. Spagnol, *Int. J. Hydrogen Energy*, **30**, 359 (2005).
6. D. P. Davies, P. L. Adcock, M. Turpin and S. J. Rowen, *J. Appl. Electrochem.*, **30**, 101 (2000).
7. H. Wang, M.A. Sweikart, and J.A. Turner, *J. Power Sources*, **115**, 243 (2003).
8. H. Wang, and J.A. Turner, *J. Power Sources*, **128**, 193 (2004).
9. K. M. Kim and K. Y. Kim, *J. Power Sources*, **173**, 917 (2007).
10. P. L. Hentall, J. B. Lakeman, G. O. Mepsted, P. L. Adcock and J. M. Moore, *J. Power Sources*, **80**, 235 (1999).
11. T. J. Fatima, J. W. Lee and W. G. Jung, *J. Ind. and Eng. Chem.*, **20**, 2883 (2014).