

자동차용 부동액내의 구리 및 철 이온이 알루미늄의 부식에 미치는 영향

소순영¹, 이주희², 장희진^{2*}

¹청운대학교 화학공학과, ²조선대학교 신소재공학과

Effect of Copper and Iron Ions in Automotive Antifreeze on Aluminum Corrosion

Soon-Young Soh¹, Ju-Hee Lee², Hee-Jin Jang^{2*}

¹Dept. of Chemical Engineering, Chungwoon University

²Dept. of Material Science and Engineering, Chosun University

요약 합성한 부식억제제를 포함하는 자동차용 부동액 6종을 제조하고 부동액 내에 함유되어 있는 구리와 철 이온이 알루미늄의 부식에 미치는 영향을 검토하였다. 전기화학 분석에서 3주 동안 침지시킨 알루미늄 시편을 작동전극으로 사용한 경우 부식전위가 원 부식전위인 -1.0 V 근방에서 -0.45 V 근방으로 증가하였다. 이것은 침지 기간 동안에 알루미늄 표면에 산화막이 성장하였기 때문으로 생각된다. 알루미늄 단독 부식의 경우와 비교하여 3개 시편 동시 부식의 경우 부식전위 상승(-0.85V ~ -0.4 V → -0.37V ~ -0.51V) 및 부식속도 증가(10^{-8} A/cm² ~ 10^{-6} A/cm² → 10^{-7} A/cm² ~ 10^{-6} A/cm²)하였는데, 이는 갈바닉 부식의 원리에 따라 예상한 것과 일치한다. 알루미늄 시편의 표면분석에서 XPS 상의 구리 산화물 관련 피크의 세기가 큰 시료가 AFM 분석에서 상대적으로 높낮이 편차 또는 거칠기가 크게 나타났다. 따라서 용액 내의 구리 이온이 알루미늄 시편 부식에 일정부분 영향을 미친 것으로 판단된다. 6종의 시료 중에서 부식방지제로 1-Aminomethyl(N',N'-di(2-hydroxy ethyl)benzotrazol을 0.6 wt% 사용한 6번 부동액이 알루미늄 시편의 부식에 따른 높낮이 편차 및 거칠기가 가장 작게 나타났으므로 알루미늄에 대한 부식억제성이 가장 우수한 것으로 판단되었다.

Abstract The effect of copper and iron ions contained in automobile antifreeze on aluminum corrosion was investigated by manufacturing six types of automobile antifreeze containing synthesized corrosion inhibitors. The result of the electrochemical analysis shows that when an aluminum specimen immersed for three weeks was used as the working electrode, the corrosion potential had increased remarkably from around -1.0 V, which is the original corrosion potential, to around -0.45 V. This is considered to be due to the growth of an oxide film on the aluminum surface during the immersion period. In the case of simultaneous corrosion of three specimens compared to the case of aluminum alone corrosion, the corrosion potential rises (-0.85V ~ -0.4 V → -0.37V ~ -0.51V), and the corrosion rate increases (10^{-8} A/cm² ~ 10^{-6} A/cm² → 10^{-7} A/cm² ~ 10^{-6} A/cm²), which is consistent with the prediction from the principle of galvanic corrosion. In the surface analysis of the aluminum specimen, the sample with a large intensity of copper oxide-related peaks on XPS had a relatively large height deviation or roughness in AFM analysis. Therefore, it is concluded that the copper ions in the solution have a certain influence on the corrosion of the aluminum specimen. Among the six samples, antifreeze No.6 using 0.6 wt% 1-Aminomethyl(N', N'-di(2-hydroxyethyl)benzotrazol as a corrosion inhibitor showed the smallest deviation in height and roughness due to corrosion of aluminum specimens.

Keywords : Aluminum, Antifreeze, Corrosion, Polarization Curve, Surface Analysis

본 논문은 2021학년도 청운대학교 학술연구구성비의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hee-Jin Jang(Chosun Univ.)

email: heejin@chosun.ac.kr

Received September 16, 2021

Revised November 8, 2021

Accepted January 7, 2022

Published January 31, 2022

1. 서론

자동차용 부동액은 크게 열전달 매체인 글리콜 류, 거품을 제거해 주는 소포제 및 금속의 부식을 막아주는 부식억제제로 구성된다. 자동차용 부동액의 역할은 자동차 엔진 성능을 유지하도록 온도를 일정하게 유지하는 한편 라디에이터 및 워터펌프 등 순환시스템 내부의 부식을 방지하는 것이다. 최근에는 부동액의 장기간 사용에 따른 금속의 부식특성에 대한 이해를 바탕으로 부식억제제의 성능개선 및 환경안정성 향상을 위한 다양한 연구가 행해지고 있다[1-3].

일반적으로 부식에 따른 가속화 정도는 부식조건에 따라 큰 차이가 나타난다. 이 때 부식억제제는 금속 표면에 균일한 피막을 생성하여 금속표면의 전기화학적 반응성을 변화시켜 부식속도를 감소시키는 작용을 하는 것으로 알려져 있다[4]. 이와 같은 부식에 따른 내식성을 평가하는 방법으로는 전기화학[5-7] 또는 표면분석[8,9] 방법이 보편적으로 사용된다.

새로운 부동액의 개발과 관련하여 신규로 4종의 부식억제제를 합성하였다. 부식억제제는 최근 다양한 조건의 실험에서 부식억제 성능이 있는 것으로 보고되고 있는 benzotriazol계 화합물[10,11] 및 triazine계 화합물[12,13] 계열의 구조를 갖는 유도체를 합성하여 사용하였다. 새로운 유도체는 기존 화합물 구조에 탄화수소 계열의 기능기를 도입함으로써 부식방지에 어떠한 효과가 있는지 검토하고자 하였다. 나아가 최근 폭발적으로 증가하는 전기자동차용 부동액으로 사용가능한지 검토하기 위한 기초자료로 삼고자 하였다. 이렇게 합성한 부식방지제를 포함하는 자동차용 부동액 6종을 제조하고 부동액의 부식방지 기능 및 장시간 사용 가능성 여부의 평가를 수행하였다.

자동차에는 다양한 금속 소재가 사용되는 데, 특히 구리, 철 및 알루미늄이 다양한 부품의 형태로 사용되고 있다. 그중에서 알루미늄은 내구성이 뛰어난 경량소재로서 가벼운 무게, 높은 안전성, 연비, 적은 배기가스 배출 및 재활용과 같은 다양한 장점으로 인해 자동차 제조업체들이 선호하는 재료이다[14]. 부동액의 순환과정에서 접촉하는 금속재료에 대한 부식성 검토를 위하여 냉각 장치에 사용되는 구리, 철 및 알루미늄의 시편들을, 제조한 부동액에 침시켰다. 오븐에서 3주간을 경과시킨 후 부동액 및 시편의 상태를 전기화학 방법 및 표면 분석 방법을 사용하여 분석하였다. 특히 본 연구에서는 장시간 열화시험을 수행한 부동액 내에 함유되어 있는 구리 및 철

이온이 알루미늄의 부식에 미치는 영향을 중점적으로 검토하였다.

2. 실험

2.1 부동액 제조

부동액의 제조 방법을 부동액 No.1을 기준으로 제시하였다. 다른 5개의 부동액은 제조 방법은 동일하며, 첨가제의 종류 및 사용량의 차이가 있으므로 이를 Table 1에 표기하였다.

에틸렌글리콜 250 g을 1,000 ml 3구 플라스크에 넣고 서서히 교반한다. 250 ml 비이커에 첨가제로서 Molybdate 0.5 g을 물 10 g에 넣고 60°C에서 5분간 교반시켜서 완전히 용해되면 3구 플라스크에 투입하고 교반한다. 다른 250 ml 비이커에 합성한 부식방지제 2,4,6-Tris(5'-carboxypentylamino) 1,3,5-triazine 3g을 Benzoic acid 25 g에, 넣고 60°C에서 5분간 교반하여 완전히 용해되면 에틸렌글리콜이 투입되어 있는 1,000 ml 3구 플라스크에 투입 후 교반하였다. 에틸렌글리콜 50 g을 추가로 투입하고 30분 동안 교반하여 부동액 시료를 제조하였다. 이렇게 제조한 6종 부동액의 조성을 Table 1에 상세히 수록하였다.

Table 1. Recipe of Antifreeze Formulation

Contents	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
Ethylene Glycol	300g	300g	300g	300g	300g	300g
Benzoic acid	25g	25g	12.5g	12.5g	-	-
Benzotriazol	-	-	12.5g	12.5g	25g	25g
Water	10g	10g	10g	10g	10g	10g
Molybdate	0.5g	0.5g	0.5g	0.5g	-	-
Sodium Nitrite	-	-	-	-	0.3g	0.3g
Corrosion Inhibitor (wt%)	8901 3g (0.9)	8903 3g (0.9)	8903 3g + 8902 0.7g (1.0)	8903 3g + 8904 0.7g (1.0)	8904 1g (0.3)	8904 2g (0.6)
Total (g)	338.5	338.5	339.2	339.2	336.3	337.3

* Corrosion Inhibitor Notation

1)8901 : 2,4,6-Tris(5'-carboxy pentylamino)1,3,5-triazine

2)8902:1-Aminomethyl(N',N'-di(2-hydroxyethyl)tolutrazole

3)8903 : 2,4,6-Tris(5'-carboxyundelamino)1,3,5-triazine

4)8904:1-Aminomethyl(N',N'-di(2-hydroxyethyl)benzotrazole

2.2 부동액 알루미늄 부식성 평가실험

제조된 자동차용 부동액 시료 6종에 3종(구리, 철, 알루미늄)의 금속 시편을 넣고 98℃ 오븐에서 3주간을 경과시켰다. 자동차의 경우 일반적으로 엔진 냉각수 온도가 89℃ ~ 92℃가 유지되도록 운영되는 데, 이 온도에서 엔진 오일이 최상의 상태로 순환되도록 시스템이 구성되기 때문이다[15]. 따라서 부동액을 정상적인 운전 조건보다 높은 온도인 98℃에서 3주간을 경과시킴으로써 금속의 열화속진이 보다 빨리 진행되도록 실험 조건을 설정하였다. 부식실험에 사용된 시편은 각각 2 cm×2 cm×0.2 cm 크기로 제작하여 사용하였으며, 3주 후 알루미늄 시편을 꺼내어 부동액을 전해질로 한 통상적인 3전극 전기화학 셀을 사용하여 동전위분극곡선을 측정하였다. 전해질용액은 별도의 탈기없이 실온에서 사용하였으며, 작동전극은 알루미늄 시편, 대전극은 탄소봉, 기준전극은 Ag/AgCl로 하였다. 20분 동안 개방회로 전위를 측정하고, 개방회로 전위로부터 -0.5V 낮은 전위에서 시작하여 10 mV/s의 속도로 0.5V까지 전위를 상승시키면서 전류를 측정하였다.

2.3 알루미늄 표면 분석

알루미늄 시편의 부식 양상을 정량적으로 파악하기 위하여 원자힘현미경(AFM; Atomic Force Microscope, Tosca Anton-Paar사)를 이용하여 부식 후 시편 표면의 3차원 프로파일을 측정하여 비교하였다. 아울러 부식생성물의 조성 분석을 위하여 X선 광전자 분석기(XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy, K-alpha Thermo VG Scientific사)를 사용하여 알루미늄 시편 표면의 산화 정도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기화학 분석

Fig. 1은 새롭게 제조한 부동액을 전해질 용액으로, 알루미늄 원 시편을 작동전극으로 사용하여 측정된 알루미늄의 분극곡선이다. 부동액 No.1에서는 부식전위가 낮은 편이며 부식전위 이상에서 전류밀도가 거의 증가하지 않는 안정한 부동태 거동을 보였다. 다른 용액들에는 부식전위 이상에서 전류밀도가 점차 증가하였으며, 부식전위와 부식속도가 용액 종류에 따라 차이가 있었다.

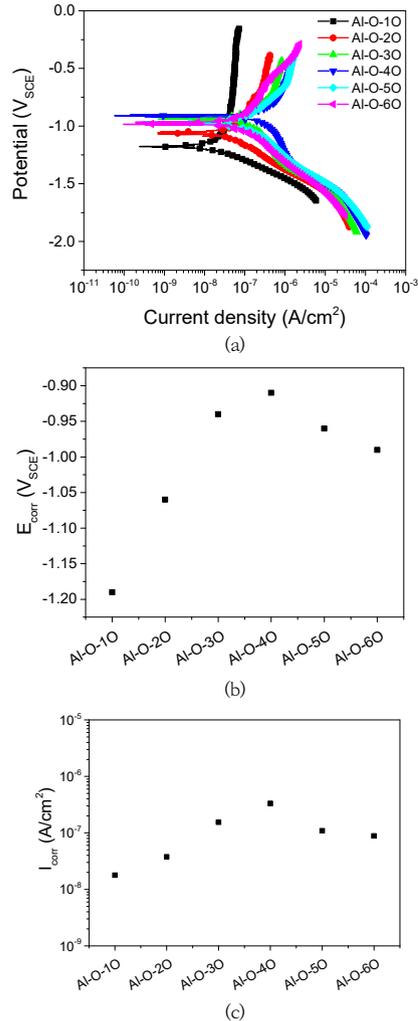


Fig. 1. (a) Polarization curve, (b) corrosion potential, and (c) corrosion rate of aluminum using in the antifreeze original solution and the original specimen as working electrode

부식억제제를 함유한 부동액에서 알루미늄 시편의 부식전위는 -1.20 ~ -0.90 V로 No.1에서 가장 낮고 No.4에서 가장 높았다. 부식속도의 경우 No.1이 가장 작아 10⁻⁸ A/cm² 근방이었으며, No.4에서는 다른 용액에서보다 수배 또는 수십배 빠른 부식 속도를 나타내었다.

실제 사용 환경에서 알루미늄 합금은 동일한 부동액 내에 오랜 시간 동안 구리 배관 및 철 부품등과 교차하여 접촉하게 되므로, 사용 기간이 어느 정도 경과된 후에도 부식억제제의 효과가 유지되는지 살펴보았다.

Fig. 2는 새롭게 제조한 부동액을 전해질 용액으로, 3주간 구리 및 철 시편과 함께 침지했던 알루미늄을 작동전극으로 하여 측정된 알루미늄의 분극곡선이다.

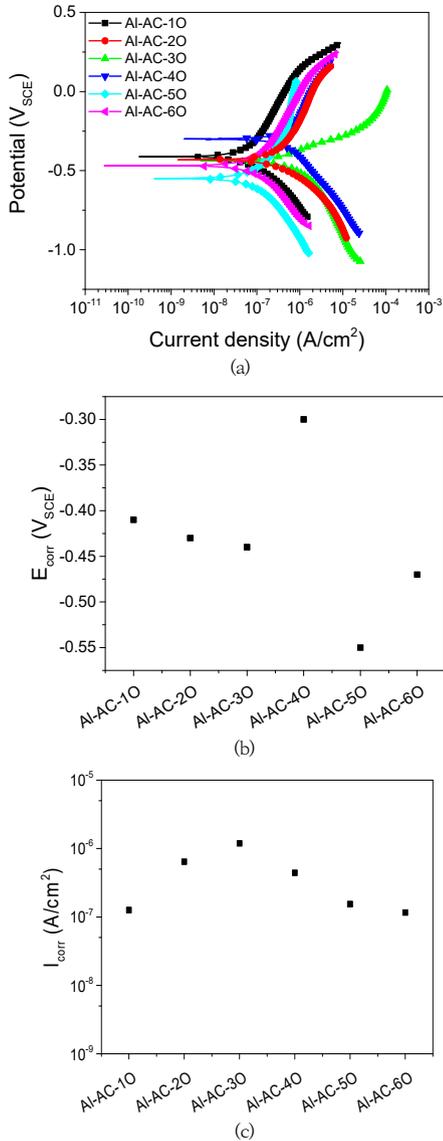


Fig. 2. (a) Polarization curve, (b) corrosion potential, and (c) corrosion rate of the aluminum using in the antifreeze original solution and aluminium specimen immersed for 3 weeks as working electrode

3주간 구리 및 철 시편과 함께 침지했던 알루미늄을 작동전극으로 하여 새로 제조된 부동액에서 측정된 분극 거동(Fig. 2)은 침지 이력이 없는 알루미늄의 분극 거동(Fig. 1)과 정성적, 정량적으로 차이를 보인다. 모두 전위

증가에 따라 전류밀도가 증가하는 양상을 보였으며, 부동액 원액과 원 시편으로 실험한 경우에 부식전위가 -1.0 V 근방이었던 것에 비하여 3주 동안 침지시킨 알루미늄 시편을 작동전극으로 사용한 경우 부식전위가 -0.45 V 근방으로 눈에 띄게 증가하였다. 이것은 3주간의 침지 기간 동안에 알루미늄 표면에 산화막이 성장하였기 때문으로 생각된다.

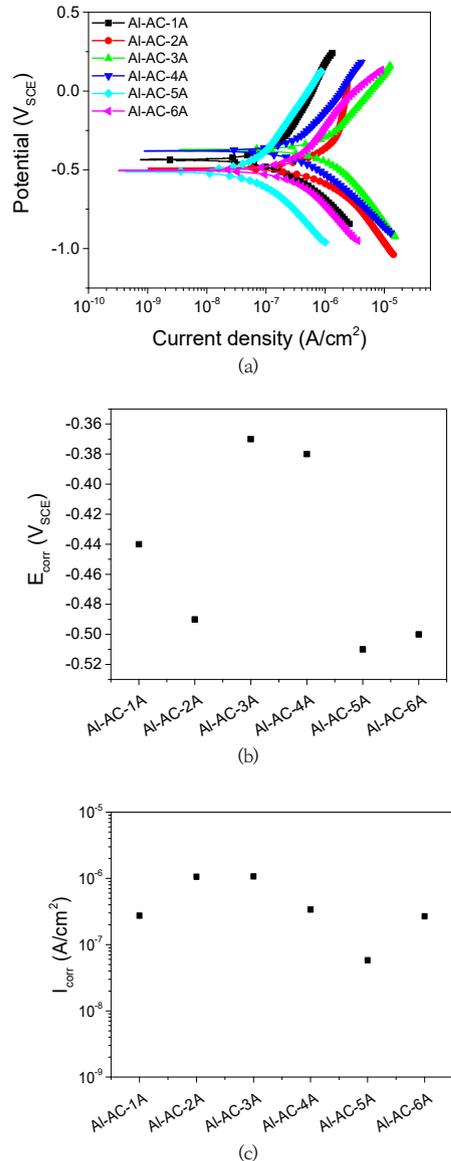


Fig. 3. (a) Polarization curve, (b) corrosion potential, and (c) corrosion rate of the aluminum using in the antifreeze solution immersed for 3 weeks and aluminium specimen immersed for 3 weeks as working electrode

Fig. 3은 3주간 세 가지 금속을 98℃에서 3주간 함께 침지하여 알루미늄, 구리 및 철 이온이 모두 녹아있는 용액을 전해질 용액으로 사용하고, 3주간 침지시킨 알루미늄을 작동전극으로 하여 측정된 분극곡선이다. 부식전위는 $-0.51 \sim -0.37V$ 로 Fig. 2에서 측정된 바와 유사하고 부식 속도 또한 $10^{-7} A/cm^2 \sim 10^{-6} A/cm^2$ 근방으로 Fig. 2와 유사하였다. 따라서 구리 및 철 이온이 녹아 있는 환경에서도 알루미늄의 산화막이 잘 형성되어 있는 경우 산화막에 의해 부식 특성이 주도된다는 것을 알 수 있다.

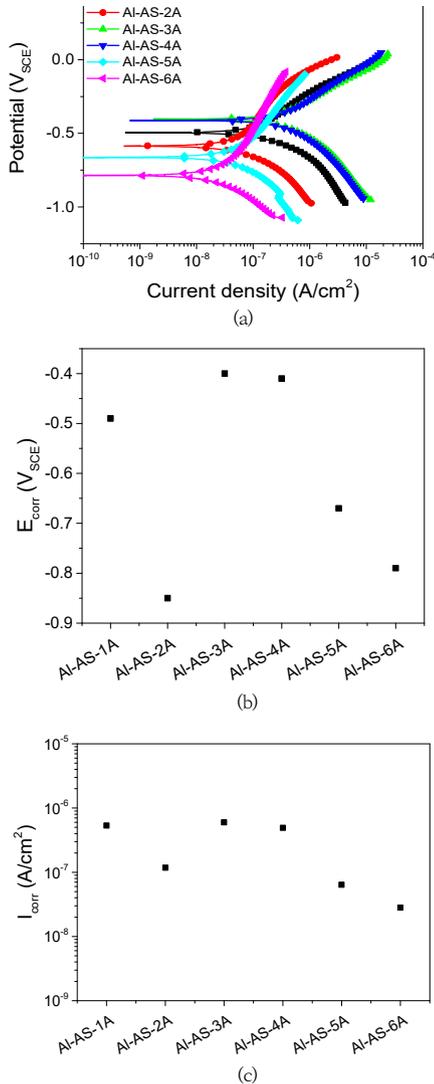


Fig. 4. (a) Polarization curve, (b) corrosion potential, and (c) corrosion rate of the aluminum using in the antifreeze solution immersed for 3 weeks and aluminum specimen only immersed for 3 weeks as working electrode

Fig. 4는 3개의 금속 시편이 아닌 알루미늄 금속만 단독으로 침지시킨 후 3주간 98℃ 오븐에서 경과시킨 용액을 전해질 용액으로 사용하고, 3주간 단독으로 침지시킨 알루미늄 시편을 작동전극으로 사용하여 측정된 분극곡선이다. 부식전위는 $-0.85 \sim -0.4 V$ 이었으며, 부식 속도는 $10^{-8} A/cm^2 \sim 10^{-6} A/cm^2$ 사이로 나타났다. 이는 3개 금속을 동시에 부식시켜 측정된 Fig. 3과 비교할 때, 부식전위가 대체로 하강하였으나 그 중에 No.3 및 No.4 시료의 경우 변화 폭이 가장 작았다. 부식속도의 경우에는, No.1과 No.4를 제외한 네 용액에서 3개 금속을 동시에 침지했던 용액에서 측정된 부식속도보다 알루미늄만 침지했던 용액에서 측정된 경우의 부식속도가 상대적으로 낮았다.

이러한 결과는 알루미늄의 부식에 다른 금속 이온이 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 갈바닉 시리즈로부터 잘 알려져 있듯이 구리, 철, 알루미늄의 순으로 부식전위가 높으므로, 구리나 철 이온이 존재하는 환경에서는 갈바닉 부식 효과에 의하여 알루미늄의 부식전위가 상승하고 부식속도가 증가한 것으로 설명된다.

3.2 알루미늄 표면 분석

3.2.1 XPS 분석

각각의 부동액 피막의 형성 조건이 다르므로 부동태 두께 및 표면 상태 또한 차이를 보이게 된다. 이러한 차이를 알아보기 위하여 XPS를 이용하여 표면 분석을 실시하였다. Fig. 5는 6개의 알루미늄 시편의 표면에서의 survey spectrum이며, Fig. 6은 Al2p 성분에 대한 high resolution spectrum이다.

Fig. 5에서 보여주듯 XPS에서 나타나는 주요 피크는 C(1s), N(1s), O(1s) 피크 외에 Al2p(금속의 결합에너지 72.6 eV, Al₂O₃ 결합에너지 74.6 eV 및 75.6 eV), 및 Cu2p(금속 및 산화물 모두 결합에너지가 933 eV 및 952 eV 근방으로 구분하기 어려움)가 있다. 구리 관련 피크[16-a]는 No.2에서 가장 컸으며, 산화철 피크 [16-b]는 6개 시료 모두에서 검출되지 않았다. 이로부터 용액 내의 구리가 알루미늄 시편 부식에 일정 부분 영향을 미친 것으로 판단되며, 철은 알루미늄 부식에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 특히 시료 No.2의 경우 XPS 스펙트럼에서 구리 산화물 관련 피크의 세기가 다른 시료들에 비해 유난히 크게 나타났다. 이것은 용액에 함유되어 있던 구리 이온이 알루미늄 표면에서 상당량 환원 및 부착되었음을 보여주는 것으로서, Fig.

3(b)와 Fig. 4(b)에서 No.2의 부식전위가 용액 내 구리 이온의 존재 여부에 따라 가장 큰 차이를 보인 결과와 잘 일치한다. 따라서 No.2는 용액 내 구리 이온에 의한 부식 가속화를 차단하는 효과가 약하며, 반면에 No. 3, No. 5, No. 6는 구리 이온이 함유된 용액에서 구리의 영향을 방지하는 효과가 있는 것으로 판단된다.

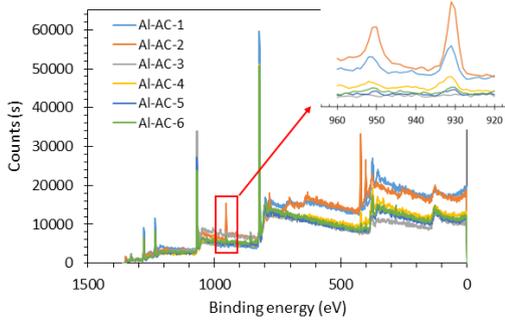


Fig. 5. XPS spectra at the surface of aluminum specimen impregnated with copper and iron in antifreeze for 3 weeks.

아울러 Fig. 6에 나타난 것처럼 Al2p 고해상도 스펙트럼에서는 Al 금속(72.6 eV) 및 산화물(74.6 eV 및 75.6 eV)의 피크[16-c]가 겹쳐 관찰되었다.

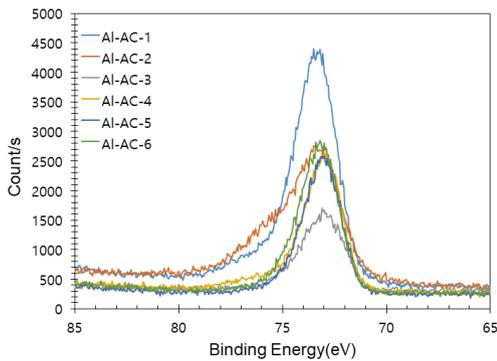


Fig. 6. XPS high resolution spectrum of aluminum specimen impregnated with copper and iron in antifreeze for 3 weeks.

다른 시료들에 비하여 No.2의 스펙트럼에서 산화물 피크가 더 큰 것을 볼 수 있으며, 이로부터 No.2 시편 표면에는 다른 경우보다 많은 양의 부식생성물이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 AFM 분석

3주간 함침시켜 부식된 알루미늄 시편의 표면 거칠기

를 AFM을 이용하여 살펴보았으며 그 결과를 Fig. 7에 수록하였다.

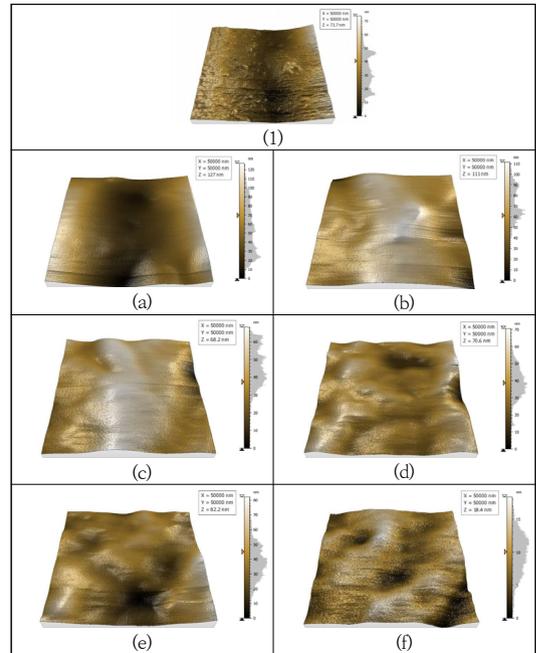


Fig. 7. AFM images of surface of aluminum specimens impregnated with copper and iron in antifreeze for 3 weeks, (1) Origin aluminum specimen (a) No.1 (b) No.2 (c) No.3 (d) No.4 (e) No.5 (f) No.6

알루미늄 원판의 경우 -10.4 nm부터 24.2 nm 까지 34.6 nm의 편차를 보였다. 부동액 No.1은 -17.0 nm부터 35.0 nm까지, No.2는 -31.9 nm부터 30.4 nm까지, No.3는 -19.0 nm 부터 12.8 nm까지, No.4는 -25.3 nm부터 19.2 nm까지, No.5는 -17.1 nm부터 15.7 nm까지, No.6는 -8.9 nm부터 8.8 nm까지 높낮이 편차를 보였다. 거칠기(Ra)는 부동액 No.1부터 No.6 까지 각각 0.23nm, 0.38nm, 0.43nm, 0.72nm, 0.36nm, 0.20nm로 나타났다. 거칠기는 No.4가 가장 크게 나타났으며, No.5) No.1) No.6 시료 순으로 작게 나타났다. 이는 전기화학 분석에서 부동액 No.5 및 No.6의 부식 속도가 가장 느리게 측정된 것과 상당부분 일치할 결과라고 판단된다. 한편 알루미늄 시편의 부식에 의한 높낮이 편차는 No.2가 가장 컸으며 그 다음이 No.1과 No.3이고 No.4 ≈ No.5 >> No.6순으로 알루미늄 시편의 부식에 따른 높낮이 편차가 작은 것으로 나

타났다.

따라서 AFM 분석 결과 알루미늄 시편의 높낮이 편차 및 거칠기가 가장 작게 나타난 No.6 부동액이 구리 이온을 함유한 용액에서 알루미늄의 부식 억제 성능이 상대적으로 우수한 것으로 판단되었다.

4. 결론

부식억제제를 각기 다르게 첨가한 부동액 6종에서 알루미늄의 부식 속도를 평가하였다. 전기화학 분석을 시행한 결과 모두 전위 증가에 따라 전류밀도가 증가하는 양상을 보였으며, 부동액 원액과 원 시편으로 실험한 경우에 부식전위가 -1.0 V 근방이었던 것에 비하여 3주 동안 침지시킨 알루미늄 시편을 작동전극으로 사용한 경우 부식전위가 -0.45 V 근방으로 눈에 띄게 증가하였다. 이것은 침지 기간 동안에 알루미늄 표면에 산화막이 성장하였기 때문으로 생각된다. 아울러 3개의 시편을 동시 부식시킬 경우 알루미늄 단독 부식의 경우와 비교하여 부식전위 상승(-0.85V ~ -0.4 V → -0.37V ~ -0.51V) 및 부식속도 증가(10^{-8} A/cm² ~ 10^{-6} A/cm² → 10^{-7} A/cm² ~ 10^{-6} A/cm²)가 발생하였다. 알루미늄 시편 표면의 XPS 스펙트럼에서 알루미늄과 함께 구리 산화물 피크가 관찰된 사실과 종합하여 볼 때, 이는 구리 이온이 알루미늄 표면에 부착되어 알루미늄의 부식을 가속화시킨 결과로 판단된다.

XPS 스펙트럼에서는 No.3, No.5, No.6 부동액이 구리 이온이 함유된 용액에서 구리의 영향을 방지하는 효과가 있는 것으로 판단되었으나, AFM 분석 결과 No.6 부동액이 알루미늄 시편의 높낮이 편차 및 거칠기가 가장 작게 나타남으로서 구리 이온을 함유한 용액에서 알루미늄의 부식 억제 성능이 상대적으로 우수한 것으로 판단되었다. 이상의 결과를 종합할 때 부식방지제로 1-Aminomethyl(N',N'-di(2-hydroxyethyl)benzotriazole를 0.6 wt% 사용한 No.6 부동액이 구리 이온을 함유한 용액에서 알루미늄의 부식 억제 성능이 상대적으로 우수한 것으로 판단되었다.

References

[1] G. L. F. Mendonça, S. N. Costa, V. N. Freire, P. N. S. Casciano, A. N. Correia, and P. Lima-Neto,

"Understanding the corrosion inhibition of carbon steel and copper in sulphuric acid medium by amino acids using electrochemical techniques allied to molecular modelling methods", *Corrosion Science*, Vol. 115, pp. 41-55, Feb., 2017, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.11.012>

- [2] B. Jegdić, B. Bobić, and S. Linić, "Corrosion behaviour of AA2024 aluminium alloy in different tempers in NaCl solution and with the CeCl₃ corrosion inhibitor", *Materials and Corrosion*, Vol. 71, No. 3, pp.352-364. Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.201911219>
- [3] S. Liu J. Dong W. W. Guan J. M. Duan R. Y. Jiang Z. P. Feng and W. J. Song, "The synergistic effect of Na₃PO₄ and benzotriazole on the inhibition of copper corrosion in tetra n-butylammonium bromide aerated aqueous solution", *Materials and Corrosion*, Vol. 63, pp. 1017-1025, Jan., 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.201106346>
- [4] C. G. darivaand A. F. Galio, "Corrosion inhibitors - principles, mechanisms and applications", Nova Science Publishers, Feb. 2014, pp. 365-379 DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/57255>
- [5] K. H. Lee, J. H. Park, S. H. Ahn, J. W. Seo, and H. J. Jang, "Study on Corrosion of Automotive Coil Spring Steel by Electrochemical Impedance Spectroscopy", *Corrosion Science and Technology*, Vol. 16, No. 6, pp. 298-304, Dec., 2017. DOI: <https://doi.org/10.14773/cst.2017.16.6.298>
- [6] S. K. Min, K. T. Kim, and W. S. Hwang, "Improvement of Corrosion Resistance for Copper Tube by Electrochemical Passivation", *Corrosion Science and Technology*, Vol.10, No.4, pp.125-130, 2011. <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ARTO01585531>
- [7] G. L. F. Mendonça, S. N. Costa, V. N. Freire, P. N. S. Casciano, A. N. Correia, and P. de Lima-Neto, "Understanding the corrosion inhibition of carbon steel and copper in sulphuric acid medium by amino acids using electrochemical techniques allied to molecular modelling methods", *Corrosion Science*, Vol. 115, pp. 41-55, Feb., 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.11.012>
- [8] T. T. Ngoc Lan, N. T. Thanh Binh, N. Nhi Tru, T. Yoshino, and M. Yasuki, "Development of Copper Corrosion Products and Relation between Surface Appearance and Corrosion Rate", *Corrosion Science and Technology*, Vol. 7, No.2, pp.99-111, 2008. https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=C00070200099
- [9] M. Finšgar, "The first X-ray photoelectron spectroscopy surface analysis of 4-methyl-2-phenylimidazole adsorbed on copper", *Analytical Methods*, Vol. 7, pp.6496-6503, 2015. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/a/c5ay00896d/unauth>

[10] C. Jing , Z. Wang, Y. Gong, H. Huang, Y. Ma, H. Xie, H. Li, S. Zhang, and F. Gao, "Photo and thermally stable branched corrosion inhibitors containing two benzotriazole groups for copper in 3.5 wt% sodium chloride solution", *Corrosion Science*, Vol. 138, pp.353-371, July, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.027>

[11] A. Shanaghi, A. R. Souri, M. Rafie, and P. K. Chu, "Effects of Benzotriazole on nano-mechanical properties of zirconia-alumina-Benzotriazole nanocomposite coating deposited on Al 2024 by the sol-gel method" *Applied Physics A*, Vol. 125, .728 Sep., 2019.
<https://doi.org/10.1007/s00339-019-3022-x>

[12] M.Yadav, S.Kumar, N.Tiwari, I.Bahadur, and E.E.Ebenso, 'Experimental and quantum chemical studies of synthesized triazine derivatives as an efficient corrosion inhibitor for N80 steel in acidic medium', *J.of Molecular Liquids*, Vol. 212, pp.151-167, Dec. 2015.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.09.019>

[13] I. B. Obot, S. Kaya, C. Kaya, and B. Tuezuen, 'Theoretical evaluation of triazine derivatives as steel corrosion inhibitors: DFT and Monte Carlo simulation approaches', *Res Chem Intermed*, Vol. 42, pp.4963-4983, 2016
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11164-015-2339-0>

[14] Innopolis, Global Market Trend Report-Automotive Aluminum Market, Market Report, Korea, Mar. 2021, pp.1-13
<https://www.innopolis.or.kr/fileDownload?titleId=177428&fileId=1&fileDownType=C¶mMenuId=MENU00999>

[15] S. I. Hong, "Automotive engine performance analysis of antifreeze content and water type", *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, No.3, pp.1594-1599, Mar. 2015.
DOI:<http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.3.1594>

[16-a] <https://www.thermofisher.com/kr/ko/home/materials-science/learning-center/periodic-table/transition-metal/copper.html>

[16-b] <https://www.thermofisher.com/kr/ko/home/materials-science/learning-center/periodic-table/transition-metal/iron.html>

[16-c] <https://www.thermofisher.com/kr/ko/home/materials-science/learning-center/periodic-table/other-metal/aluminium.html> (accessed Nov. 08, 2021)

소 순 영(Soon-Young Soh)

[정회원]



- 1999년 2월 : 충남대학교 공업화학과 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 2012년 3월 : 한화케미칼(현 한화솔루션) 연구임원
- 2015년 4월 ~ 현재 : 청운대학교 화학공학과 부교수

<관심분야>

화학제품 제조공정 개발, 부식, 공정최적화

이 주 희(Ju-Hee Lee)

[정회원]



- 2020년 2월 : 조선대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 신소재공학과 (박사과정)

<관심분야>

부식, 산화, 표면처리

장 희 진(Hee-Jin Jang)

[정회원]



- 2006년 8월 : KAIST 신소재공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 신소재공학과 부교수

<관심분야>

부식, 산화, 표면처리