

## 알루미늄-공기 전지의 음극 및 양극의 전기화학적 특성에 미치는 전해질 양이온의 영향

이승환<sup>1</sup>, 윤성재<sup>1</sup>, 최원경<sup>2</sup>, 백창현<sup>3</sup>, 정순기<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>순천향대학교 에너지시스템학과 학생, <sup>2</sup>단국대학교 경영공학과 교수, <sup>3</sup>알루스(주) 연구소장, <sup>4</sup>순천향대학교 에너지시스템학과 교수

## Effects of Electrolyte Cation on Electrochemical Properties of Negative and Positive Electrodes in Aluminum-Air Batteries

Seunghwan Lee<sup>1</sup>, Sungjae Yoon<sup>1</sup>, Weon-Kyung Choi<sup>2</sup>, Changhyun Baeg<sup>3</sup>, Soon-Ki Jeong<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Student, Dept. of Energy Systems Engineering, Soonchunhyang University

<sup>2</sup>Visiting Professor, Dept. of Management Engineering, Dankook University

<sup>3</sup>Researcher, Lab, Alus Co., Ltd.

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Energy Systems Engineering, Soonchunhyang University

**요약** 알루미늄-공기 전지의 성능을 향상시키기 위해서는 전극의 전기화학적 특성에 미치는 전해질의 영향을 이해하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 NaCl, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub>와 같이 동일한 음이온을 가지나 양이온이 다른 전해질을 사용하여 음극과 양극에서 진행되는 전기화학적 산화·환원 반응에 미치는 전해질 양이온의 영향에 관하여 조사하였다. 전극의 방전 전위 및 비용량에 전해질 양이온이 영향을 준다는 것이 방전 시험, 주사전자현미경과 X-선 회절 분석에 의해 확인되었다. NaCl과 LiCl 전해질 용액 중에서 상대적으로 높은 셀 전압과 비용량이 얻어졌다. 양극 표면에는 Ca<sup>2+</sup>와 Zn<sup>2+</sup> 이온에 의해 전극 반응을 방해하는 침전물이 생성되었으며, 이로 인해 양극 성능이 저하되었다. 게다가 Ca<sup>2+</sup> 이온은 음극의 부동태화를 유발하면서 음극의 성능 저하를 촉진시켰다. 이것은 전해질의 양이온이 양극과 음극의 전기화학적 성능에 각각 다른 영향을 주고 있음을 시사하는 것이다.

**주제어** : 알루미늄-공기 전지, 음극, 양극, 전해질, 양이온, 전기화학적 산화·환원 반응

**Abstract** To improve the performance of aluminum-air batteries, it is very important to understand the effect of electrolytes on the electrochemical properties of electrodes. In this study, the effects of electrolyte cations on the electrochemical redox reactions proceeding at the negative and positive electrodes were investigated using electrolytes having the same anion but different cations such as NaCl, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, and ZnCl<sub>2</sub>. It was confirmed by discharge test, scanning electron microscopy and X-ray diffraction analysis that electrolyte cations affect the discharge potential and specific capacity of the electrode. Precipitates were formed on the surface of the positive electrode by Ca<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> ions, resulting in degradation of the performance of the positive electrode. In addition, Ca<sup>2+</sup> ions passivated the negative electrode and accelerated the performance degradation. This suggests that the positive ions of the electrolyte have different effects on the electrochemical performance of the positive and negative electrodes.

**Key Words** : Aluminum-air battery, Negative electrode, Positive electrode, Electrolyte, Cation, Electrochemical redox reaction

\*This work was partly supported by the Technology development Program of MSS (S3102463) and the Korea Electric Power Corporation (Grant number : R20X002-25).

\*This article is extended and excerpted from the conference paper presented at fall meeting held by the Korean Battery Society in 2021.

\*Corresponding Author : Soon-Ki Jeong(hamin611@sch.ac.kr)

Received December 29, 2021

Revised February 6, 2022

Accepted February 20, 2022

Published February 28, 2022

## 1. 서론

금속-공기 1차 전지는 금속의 산화 반응을 음극 반응으로, 공기 중 산소의 환원 반응을 양극(공기극) 반응으로 이용하여 물질이 가지는 화학 에너지를 전기 에너지로 변환하는 전기화학 시스템이다. 이 시스템의 음극 소재로 사용되는 금속으로는 알루미늄, 아연, 리튬, 마그네슘 등이 검토되어 왔으며[1-5], 이 중에서도 아연과 알루미늄을 사용하는 전지가 상용화되어 있다. 아연-공기 전지의 이론 에너지 밀도는  $9500 \text{ Wh cm}^{-3}$ 이며 보청기와 같은 소형 전자기기의 전원으로 사용되고 있다[6-8]. 이와 비교하여 알루미늄-공기 전지의 이론 에너지 밀도는  $21800 \text{ Wh cm}^{-3}$ 로 아연-공기 전지보다 훨씬 크다[9-11]. 따라서 알루미늄-공기 전지는 많은 에너지를 필요로 하는 중대형 전자기기의 전원으로 기대되고 있지만[12-14], 현재는 소형 전자기기의 전원으로만 사용되고 있다. 그 이유는 전극에서 진행되는 전기화학 반응에 관한 과학적 이해가 아직은 매우 부족하여, 전지를 구성하는 물질이 가진 화학 에너지 중 일부만을 전기 에너지로 변환시킬 수 있기 때문이다.

알루미늄-공기 전지의 성능은 전지를 구성하는 음극, 양극 그리고 전해질 용액 간의 전기화학 반응에 크게 영향을 받는다. 이 중에서 전해질 용액은 전지 내부에서 이온의 이동 통로로 작용하며 전류의 흐름을 만들어내는 중요한 역할을 하지만, 한편으로는 음극이 부동태화되거나 양극에 침전물이 축적되는 등의 부반응과도 관련이 있는 것으로 추정하고 있다[4,12]. 이러한 부반응은 전지의 성능 저하를 야기하기 때문에 억제할 필요가 있으며, 이를 위해서는 전해질 용액과 전극 반응의 본질을 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{NaCl}$ 과 같이 동일한 음이온을 가지나 양이온이 다른 전해질을 사용하여 양이온이 음극과 양극의 전기화학적 특성에 미치는 영향에 관하여 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 전극 및 전해질 제조

$\text{Al}(99.4\%)\text{-Mg}(0.4\%)\text{-Sn}(0.1\%)\text{-Gd}(0.05\%)\text{-P}(0.05\%)$ 의 조성을 가진 알루미늄 합금을 음극으로 사용하였다. 음극 표면에 생성되어 있는 산화 피막은 전지를 조립하기 전에 연마기(R&B inc., RB 209 MINIPOL)를

사용하여 제거하였다. 알루미늄 합금을 절단하는 과정에서 표면에 부착되는 소량의 알루미늄은 에탄올(Daejung, 94.5%) 중에서 초음파 처리를 한 후에  $60^\circ\text{C}$ 의 오븐에서 1시간 동안 건조하여 제거하였다. 전해질 용액은  $\text{NaCl}$ (Alfa Aesar, ACS, 99%),  $\text{LiCl}$ (Sigma-aldrich, anhydrous, 99%),  $\text{CaCl}_2$ (Sigma-aldrich, ACS, 99%)를  $1 \text{ mol dm}^{-3}(\text{M})$  및  $\text{ZnCl}_2$ (Alfa Aesar, anhydrous, 98%) 1.1 M을 각각 증류수(Burdick & Jackson, HPLC grade)에 용해시켜 제조하였다.

### 2.2 방전 시험

방전 시험은 자체적으로 제작한 2전극 셀을 이용하여 수행하였다. 전처리된 알루미늄 합금과 이산화망간( $\text{MnO}_2$ )을 각각 음극과 양극으로 사용하였다. 종료 전압을 0 V 또는 -1 V로 설정하여  $10 \text{ mA cm}^{-2}$ 의 전류 밀도로 진행하였다. 음극의 방전 전위는 3전극 셀을 이용하여 측정하였다. 작업 전극으로는 알루미늄 합금, 상대 전극으로는 이산화망간, 기준 전극으로는 포화칼로멜 전극(Saturated calomel electrode, SCE)을 사용하였으며,  $10 \text{ mA cm}^{-2}$ 의 전류밀도로 10분 동안 방전하며 전위를 측정하였다.

### 2.3 전극의 표면 형상 및 침전물 분석

방전에 따른 전극 표면의 형상 변화는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 관찰하였다. 양극에 침전된 화합물의 구조 분석은 X-선 회절법(X-ray diffraction, XRD)을 이용하여 확인하였다. 다양한 전해질 용액 중에서 방전이 진행된 셀을 해체하여 얻어진 양극을 XRD(Rigaku, MiniFlex 600,  $\text{Cu K}\alpha$ , 40 kV, 15 mA)에 의해 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전해질 종류에 따른 방전 특성

알루미늄 합금 음극의 전기화학적 성능을 평가하기 위해 셀로부터 흐르는 전류를 일정하게 유지하면서 전극 전위와 셀 전압을 측정하였다. 이렇게 측정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)은 3전극 시스템에서 얻어진 알루미늄 합금 음극의 방전 전위 곡선이다. 방전 전위는  $\text{CaCl}_2$  전해질 용액 중에서 가장 높았다. 셀

전압은 양극 전위와 음극 전위의 차이므로 음극의 방전 전위가 높을수록 전지의 전압은 낮아지게 된다. 즉, CaCl<sub>2</sub> 전해질 용액이 적용된 전지는 전압이 낮다는 것을 의미하며 이것은 Fig. 1(b)에서도 확인된다. 이러한 전압의 저하는 음극의 부동태화가 상대적으로 많이 진행되었기 때문이다. 이에 대한 자세한 내용은 Fig. 2에 대한 고찰에서 후술할 것이다. 전극의 비용량은 Fig. 1(b)의 결과로부터 구할 수 있다. 방전에 의해 감소한 음극의 질량과 방전에 소요된 시간으로부터 비용량을 구하면 NaCl 전해질 용액에서 최대 비용량 2466 mAh g<sup>-1</sup>이 얻어진다. LiCl, CaCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub> 전해질 용액에서는 각각 2448, 2438, 2429 mAh g<sup>-1</sup>의 비용량이 구형되었다.

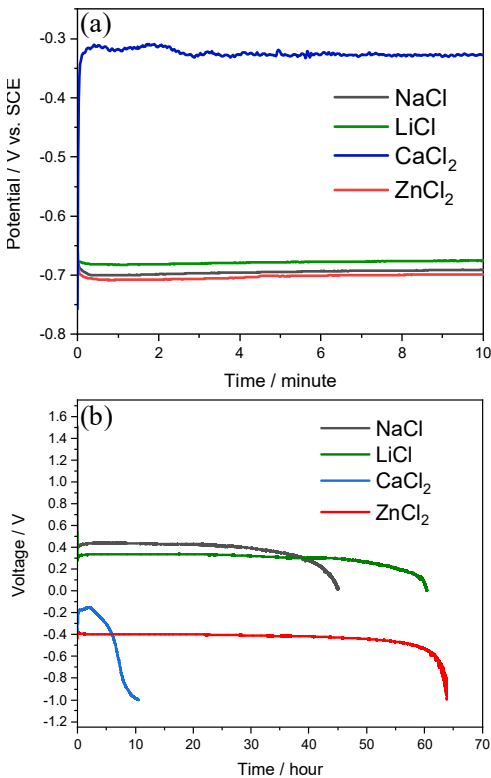


Fig. 1. Discharge (a) potential and (b) voltage curves of the aluminum-air cells in various electrolyte solutions

Fig. 1의 결과는 전해질 용액 중에 존재하는 금속 양이온이 전극의 자기 부식 반응 및 부동태화 반응에 영향을 주었음을 의미하는 것이다. 이것을 확인하기 위하여 방전이 종료된 후의 전극 표면을 광학현미경으로 관

찰하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 적색 사각형으로 표시된 부분으로부터 방전 반응에 의해 음극이 소모된 정도를 확인할 수 있다. 음극의 소모는 CaCl<sub>2</sub> 전해질 용액을 사용했을 때 가장 적었다(Fig.2(c)). 이것은 Fig. 1의 결과와 일치하는 것이다. 즉, 음극의 부동태화가 상대적으로 많이 진행되었고, 이로 인해 알루미늄의 용해가 억제되면서 방전시간이 짧아졌다는 것을 의미한다. Fig. 2(g, i)는 각각 LiCl과 NaCl 전해질 용액 중에서 방전된 양극이며 방전 전의 공기극(Fig. 2(f))과 비교하였을 때 큰 차이가 없다. 그러나 CaCl<sub>2</sub>와 ZnCl<sub>2</sub> 전해질 용액 중에서 방전된 전극에는 흰색 침전물이 생성되어 있음이 확인되었다(Fig. 2(h, j)). 이러한 침전물이 양극과 전해질 사이의 접촉을 방해함으로써 인해 양극에서 진행되는 산소의 환원 반응이 억제되면서 전지 전압이 저하된 것으로 생각된다 [15,16]. 즉, LiCl과 NaCl 전해질 용액 중에서 상대적으로 셀 전압이 높은(Fig. 1(b)) 이유는 양극 표면에 침전물이 생성되는 반응이 억제되었기 때문이다.

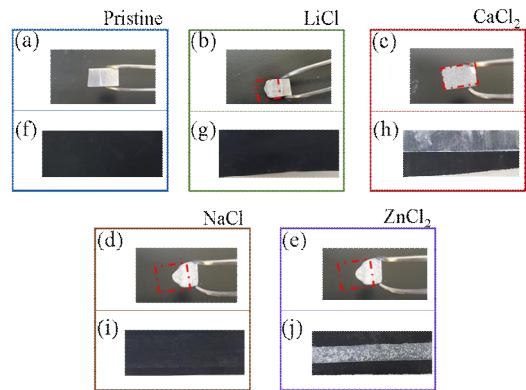


Fig. 2. Optical images of pristine (a) negative and (f) positive electrodes and discharged (b-e) negative and (g-j) positive electrodes in various electrolyte solutions

CaCl<sub>2</sub>와 ZnCl<sub>2</sub> 전해질 용액 중에서 큰 폭의 전압 강하가 발생하는 보다 상세한 원인을 알아보기 위하여 전류밀도 변화에 따른 방전 전압을 확인하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 전류밀도가 커지는 것에 비례하여 전압이 낮아지는데(Fig. 3(a, b)), 이것은 셀의 내부 저항에 기인하는 것이다. 전류밀도를 증가시킨 후 다시 원래의 낮은 전류밀도로 되돌렸을 때의 전압 거동은 전해질 용액에 크게 의존하였다. Fig. 3(b)에서 알

수 있듯이 LiCl과 NaCl 전해질 용액 중에서는 방전 전압이 초기 상태로 회복되었지만, CaCl<sub>2</sub>와 ZnCl<sub>2</sub> 전해질 용액 중에서는 초기 상태의 방전 전압으로 회복되지 않았다. 이것은 음극의 부동태화 및 Fig. 2(h, j)에서 확인되었던 양극 침전물의 복합적인 영향에 기인하는 것으로 생각된다.

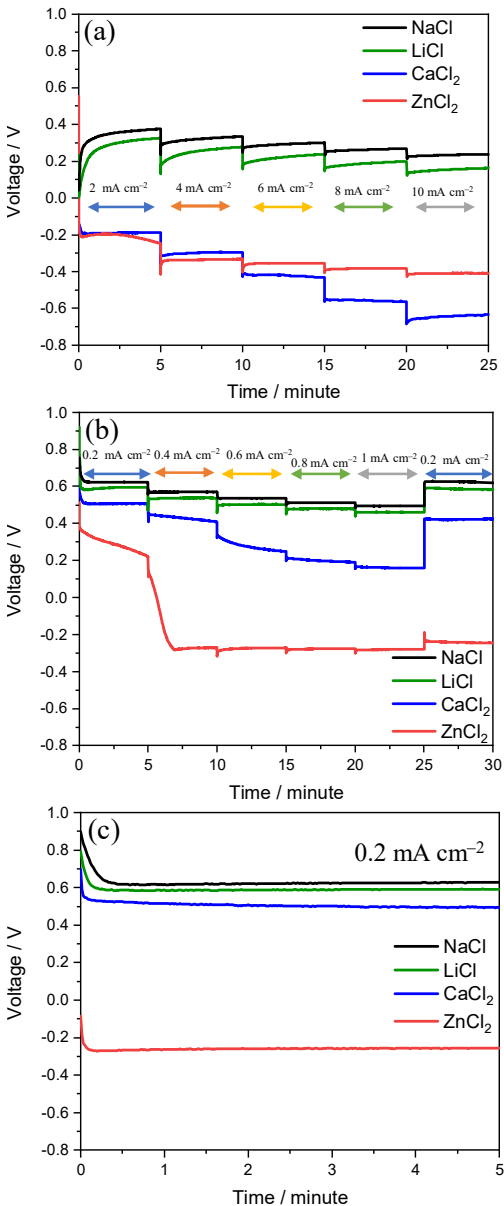


Fig. 3. Discharge voltage curves of the aluminum-air cells at (a) 2–10, (b) 0.2–1, and (c) 0.2 mA cm<sup>-2</sup> in various electrolyte solutions

이러한 양극의 열화가 전지 전압에 미치는 영향을 더욱 상세하게 알아보기 위해, 1시간 동안 방전이 진행되었던 셀의 음극만을 새로운 알루미늄 합금으로 교체한 후 방전 시험을 실시한 결과를 Fig. 3(c)에 나타내었다. 0.2 mA cm<sup>-2</sup>의 전류밀도로 ZnCl<sub>2</sub> 전해질 용액 중에서 얻어진 방전 전압은 Fig. 3(b)에 비해 Fig. 3(c)에서 0.55–0.7 V 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 양극 표면에 생성된 침전물에 의해 산소 환원 반응이 진행되는 전극의 활성 표면적이 감소되었음을 의미하는 것이다.

### 3.2 전극 표면 형상의 전해질 의존성

방전 전압 및 비용량과 같은 전기화학적 특성의 전해질 의존성을 확인하기 위하여 SEM을 이용하여 방전 전후의 전극 표면 형상을 분석하였다. Fig. 4는 10시간 방전을 진행한 음극 표면의 이미지이다. 방전 전에 매끄럽고 평탄했던 전극 표면이, 방전 후에 매우 거친 표면으로 변화되었다. 이것은 전극의 부식에 의한 것으로 부식에 의한 표면 형상의 변화는 전해질 종류와는 큰 관계가 없이 비슷한 양상으로 진행되었다. 부식 반응은 모든 전해질 용액에 공통으로 존재하는 염소 음이온(Cl<sup>-</sup>)의 영향에 기인하는 것으로 추정된다. 염소 음이온과 음극의 산화 반응에 의해 생성된 수산화알루미늄이 반응해 AlCl<sub>4</sub><sup>-</sup> 이온을 생성하면서 전극 피막 상에 결합이 발생하기 때문이다. 즉, AlCl<sub>4</sub><sup>-</sup> 이온의 생성 과정에서 전극 표면의 산화알루미늄 피막이 국부적으로 파괴되기 때문에 유사한 표면 형상이 얻어진 것이다[18–20]. Fig. 5는 10시간 방전을 진행한 양극 표면의 SEM 이미지이다. 양극 표면의 형상은 전해질 용액의 종류에 크게 의존하였다. Fig. 5(b, c)는 각각 ZnCl<sub>2</sub>와 CaCl<sub>2</sub> 전해질 용액 중에서 얻어진 양극 표면의 형상으로, NaCl과 LiCl 전해질 용액 중에서 얻어진 양극에 비해 방전 전후에 있어서 상대적으로 큰 변화가 관찰되었다. 방전 전에 전극 표면에 존재했던 많은 기공이 소실되었으며, 이것은 방전 과정 중에 진행된 전해질의 분해 반응으로 생성된 화합물이 기공을 메꾸었기 때문으로 추정된다. 즉, 전해질의 양이온이 전극 반응에 영향을 주었음을 의미한다.

### 3.3 양극 침전물의 생성 반응 분석

알루미늄-공기 전지의 반응 과정에서 양극에 침전되는 화합물이 전지 전압에 영향을 끼치는 것을 앞에서 확인했다.

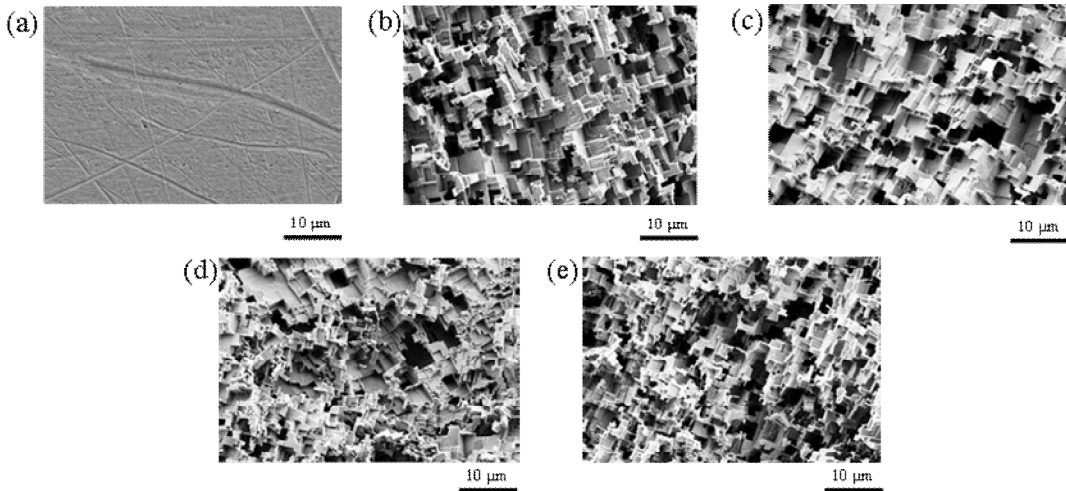


Fig. 4. SEM images of the negative electrode surface (a) before and (b-e) after discharge at  $10 \text{ mA cm}^{-2}$  for 10 hours in (b) 1.1 M  $\text{ZnCl}_2$ , (c) 1.0 M  $\text{CaCl}_2$ , (d) 1.0 M  $\text{LiCl}$ , (e) 1.0 M  $\text{NaCl}$  solutions

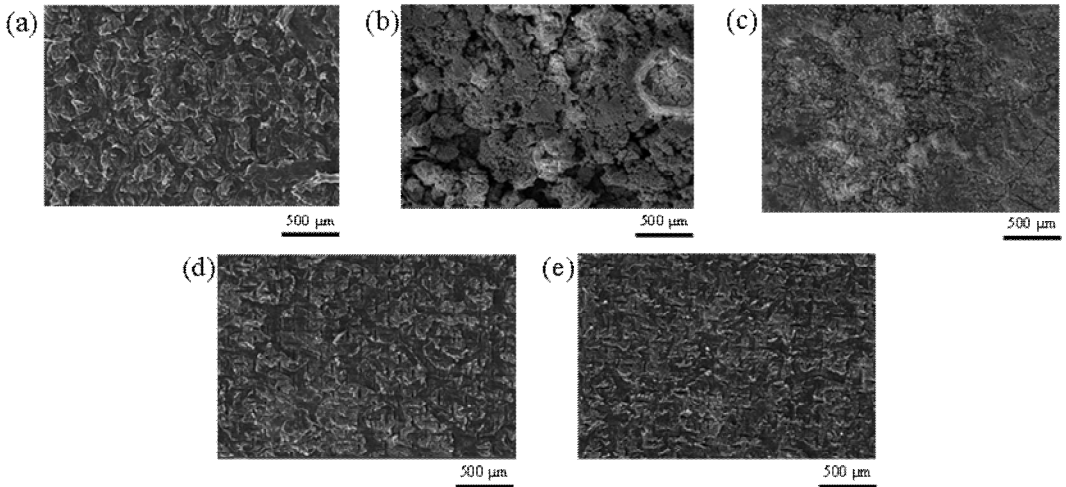
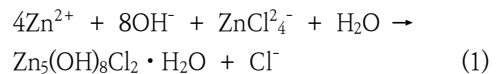


Fig. 5. SEM images of the positive electrode surface (a) before and (b-e) after discharge at  $10 \text{ mA cm}^{-2}$  for 10 hours in (b) 1.1 M  $\text{ZnCl}_2$ , (c) 1.0 M  $\text{CaCl}_2$ , (d) 1.0 M  $\text{LiCl}$ , (e) 1.0 M  $\text{NaCl}$  solutions

이와 같은 양극 표면의 화합물이 생성되는 원리를 이해하기 위하여 XRD 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.  $\text{ZnCl}_2$  전해질 용액 중에서 방전된 전극에서는 방전 전에 존재하지 않았던 새로운 피크가 관찰되었으며(Fig. 6(a, d)), 이것은 아연 금속과  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  화합물의 XRD 패턴임을 확인하였다(Fig. 6(b, c)).  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  화합물은 다음과 같은 반응식 (1)을 통해 생성된 것이다[21].



이렇게 전극에 생성된  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  화합물은 Fig. 1에서 설명한 방전 전압과 비용량의 저하를 유발하는 원인의 하나로 추정된다. 이와 유사한 XRD 패턴의 변화가  $\text{CaCl}_2$  전해질 용액 중에서 방전된 전극에서 관찰되었다(Fig. 7(e)). 이러한 패턴의 변화는 산화 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 생성에 기인하는 것으로(Fig. 7(d),

Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>8</sub>Cl<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O 화합물과 유사하게 방전 전압과 비용량의 저하를 유발하는 원인의 하나로 추정된다. 이와는 대조적으로 NaCl과 LiCl 전해질 용액 중에서 방전된 전극에서는 XRD 피크의 변화가 관찰되지 않았다 (Fig. 7(b, c)). 이것은 전지의 방전 전압 및 비용량에 부정적인 영향을 미치는 부반응이 진행되지 않았음을 의미하며, Fig. 1과 일치하는 결과이다.

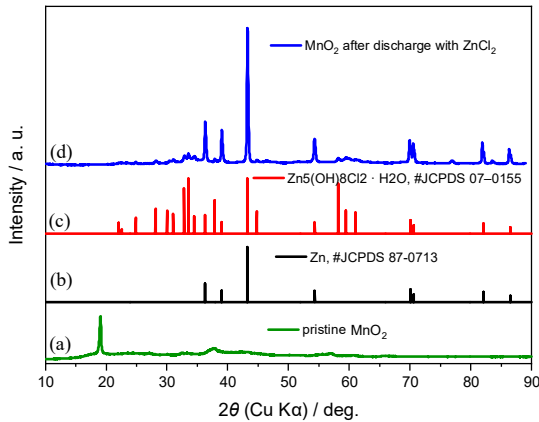


Fig. 6. XRD patterns of the positive electrode before and after discharge in 1.1 M ZnCl<sub>2</sub> solution

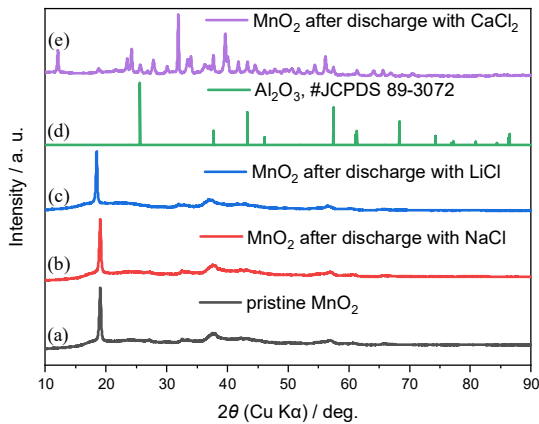


Fig. 7. XRD patterns of the positive electrode before and after discharge in various electrolyte solutions

#### 4. 결론

알루미늄 합금을 음극으로, 이산화망간을 양극으로 사용하는 알루미늄-공기 전지의 셀 전압 및 비용량은 전해질 중에 존재하는 양이온에 크게 영향을 받았다.

Ca<sup>2+</sup>와 Zn<sup>2+</sup> 이온이 존재하는 전해질 용액에 비해 Na<sup>+</sup>와 Li<sup>+</sup> 이온이 존재하는 전해질 용액에서 셀 전압이 0.5-0.8 V 상승했으며, 음극의 비용량은 10-37 mAh g<sup>-1</sup> 증가했다. Ca<sup>2+</sup>와 Zn<sup>2+</sup> 이온에 의해 양극의 성능이 저하되었으며, 음극의 성능은 Ca<sup>2+</sup> 이온에 의해 저하되었다. 이것은 Ca<sup>2+</sup>와 Zn<sup>2+</sup> 이온에 의해 양극 반응을 방해하는 침전물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zn, Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>8</sub>Cl<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O)이 양극 표면에 생성되며, Zn<sup>2+</sup> 이온에 의해서는 음극의 부동태화가 촉진되기 때문이다. 본 연구를 통해 셀 전압의 상승 및 전극의 비용량을 증가시키기 위해서는 전해질의 양이온을 최적화시키는 것이 필요하며, 이를 통해 알루미늄-공기 1차 전지의 에너지 밀도를 증가시킬 수 있음이 확인되었다.

#### REFERENCES

- [1] D. Zhang, H. Zhao, F. Liang, W. Ma & Y. Lei. (2021). Nanostructured Arrays for Metal-Ion Battery and Metal-Air Battery Applications. *Journal of Power Sources*, 493, 229722. DOI : 10.1021/acs.chemrev.9b00628
- [2] W. Li, C. Han, K. Zhang, S. Chou & S. Dou. (2021). Strategies for Boosting Carbon Electrocatalysts for the Oxygen Reduction Reaction in Non-Aqueous Metal-Air Battery Systems. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(11), 6671-6693. DOI : 10.1039/D1TA00203A
- [3] X. Chen, Q. Zou, Z. Shi, Q. Le, M. Zhang & A. Atrens. (2021). The Discharge Performance of an As-Extruded Mg-Zn-La-Ce Anode for the Primary Mg-Air Battery. *Electrochimica Acta*, 404, 139763. DOI : 10.1016/j.electacta.2021.139763
- [4] X. Jia, C. Liu, Z. G. Neale, J. Yang & G. Cao. (2020). Active Materials for Aqueous Zinc Ion Batteries: Synthesis, Crystal Structure, Morphology, and Electrochemistry. *Chemical Reviews*, 120(15), 7795-7866. DOI : 10.1021/acs.chemrev.9b00628
- [5] M. Tamez & J. H. Yu. (2007). Aluminum-Air Battery. *Journal of Chemical Education*, 84(12), 1936A-1936B. DOI : 10.1021/ed084p1936A
- [6] J. Zhang, Q. Zhou, Y. Tang, L. Zhang & Y. Li. (2019). Zinc-Air Batteries: Are They Ready for Prime Time?. *Chemical Science*, 10, 8924-8929.



- DOI : 10.1039/C9SC04221K
- [7] J. Fu, R. Liang, G. Liu, A. Yu, Z. Bai, L. Yang, & Z. Chen. (2013). Recent Progress in Electrically Rechargeable Zinc-Air Batteries. *Advanced Materials*, 31(31), 1805230.  
DOI : 10.1002/adma.201805230
- [8] C. Chakkaravarthy, A. K. Abdul Waheed & H. V. K. Udupa. (1981). Zinc-Air Alkaline Batteries-A review. *Journal of Power Sources*, 6(3), 203-228.  
DOI : 10.1016/0378-7753(81)80027-4
- [9] R. Buckingham, T. Asset & P. Atanassov. (2021). Aluminum-Air Batteries: A Review of Alloys, Electrolytes and Design. *Journal of Power Sources*, 498, 229762.  
DOI : 10.1016/j.jpowsour.2021.229762
- [10] R. Mori. (2013). A New Structured Aluminium-Air Secondary Battery with a Ceramic Aluminium Ion Conductor. *RSC Advances*, 3, 11547-11551.  
DOI : 10.1039/C3RA42211A
- [11] L. D. Chen, J. K. Nørskov & A. C. Luntz. (2015). Al-Air Batteries: Fundamental Thermodynamic Limitations from First-Principles Theory. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6, 175-179.  
DOI : 10.1021/jz502422v
- [12] Q. Li & N. J. Bjerrum. (2002). Aluminum as Anode for Energy Storage and Conversion: A Review. *Journal of Power Sources*, 110(1), 1-10.  
DOI : 10.1016/S0378-7753(01)01014-X
- [13] S. Yang & H. Knickle. (2002). Design and Analysis of Aluminum/Air Battery System for Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 112, 162-173.  
DOI : 10.1016/S0378-7753(02)00370-1
- [14] K. T. Chau, Y. S. Wong & C. C. Chan. (1999). An Overview of Energy Sources for Electric Vehicles. *Energy Conversion and Management*, 40(10), 1021-1039.  
DOI : 10.1016/S0196-8904(99)00021-7
- [15] X. Liu, P. Zhang, J. Xue, C. Zhu, X. Li & Z. Wang. (2021). High Energy Efficiency of Al-Based Anodes for Al-Air Battery by Simultaneous Addition of Mn and Sb. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128006.  
DOI : 10.1016/j.cej.2020.128006
- [16] M. Mokhtar, M. Z. M. Talib, E. H. Majlan, S. M. Tasirin, W. M. F. W. Ramli, W. R. W. Daud, & J. Sahari. (2015). Recent Developments in Materials for Aluminum-Air Batteries: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 32, 1-20.  
DOI : 10.1016/j.jiec.2015.08.004
- [17] N. Chawla. (2019). Recent Advances in Air-Battery Chemistries. *Materials Today Chemistry*, 12, 324-331.  
DOI : 10.1016/j.mtchem.2019.03.006
- [18] D. Cicolin, M. Trueba, & S. P. Trasatti. (2014). Effect of Chloride Concentration, pH and Dissolved Oxygen, on the Repassivation of 6082-T6 Al Alloy. *Electrochimica Acta*, 124, 27-35. DOI : 10.1016/j.electacta.2013.09.003
- [19] H. Lee, I. Park, S. Choi & J. Kim. (2017). Effect of Chloride on Anodic Dissolution of Aluminum in 4 M NaOH Solution for Aluminum-Air Battery. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(4), A549. DOI : 10.1149/2.0171704jes
- [20] Z. Wu, H. Zhang, K. Qin, J. Zou, K. Qin, C. Ban, J. Cui & H. Nagaumi. (2020). The Role of Gallium and Indium in Improving the Electrochemical Characteristics of Al-Mg-Sn-based alloy for Al-air battery anodes in 2 M NaCl solution. *Journal of Materials Science*, 55, 11545-11560.  
DOI : 10.1007/s10853-020-04755-8
- [21] D. Y. Momodu, F. Barzegar, A. Bello, J. Dangbegnon, T. Masikhwa, J. Madito & N. Manyala. (2015). Simonkolleite-Graphene Foam Composites and Their Superior Electrochemical Performance. *Electrochimica Acta*, 151, 591-598.  
DOI : 10.1016/j.electacta.2014.11.015

이 승 환(Seunghwan Lee)

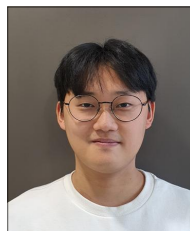
[정회원]



- 2022년 2월 ~ 현재 : 순천향대학교 에너지시스템학과(공학사)
- 관심분야 : 이차전지
- E-Mail : seunghwan0728@naver.com

윤 성 재(Sungjae Yoon)

[정회원]



- 2020년 2월 ~ 현재 : 순천향대학교 나노화학공학과(공학사)
- 관심분야 : 이차전지
- E-Mail : todol37@naver.com

최 원 경(Weon-Kyung Choi) [정회원]



- 1994년 2월 : 단국대학교 공업화학  
과(공학사)
- 1996년 2월 : 단국대학교 공업화학  
과(공학석사)
- 2000년 3월 : 오사카부립대학교 공  
학대학원(공학박사)

- 2008년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 경영공학과 초빙교수
- 관심분야 : 금속-공기전지, 이차전지, 기능수
- E-Mail : cwk5145@dankook.ac.kr

백 창 현(Changhyun Baeg) [정회원]



- 1990년 2월 : 충북대학교 금속공학  
과(공학사)
- 1993년 2월 : 충북대학교 금속공학  
과(공학석사)
- 2003년 2월 : 충북대학교 재료공학  
과(공학박사)

- 2004년 5월 : ㈜포어텍 기술이사
- 2005년 9월 : 충남대학교 연구교수
- 2008년 4월 : ㈜에니폼 연구소장
- 2011년 6월 : ㈜동양AK코리아 연구소장
- 2019년 2월 : ㈜팔 이사
- 2020년 1월 ~ 현재 : 알루스(주) 연구소장
- 관심분야 : 금속공기전지, 경량합금
- E-Mail : semlab@naver.com

정 순 기(Soon-Ki Jeong) [정회원]



- 1994년 2월 : 한양대학교 공업화학  
과(공학사)
- 1996년 8월 : 한양대학교 공업화학  
과(공학석사)
- 2002년 3월 : 교토대학교 물질에너  
지화학과(공학박사)

- 2005년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 에너지시스템학과  
교수
- 관심분야 : 이차전지, 전기화학
- E-Mail : hamin611@sch.ac.kr