

다가 음이온성 탄소 양자점 이온 화합물 기반 전해질을 이용한 전기변색 성능 향상

임홍철*

상지대학교 제약바이오전공, 강원특별자치도 원주시, 26339, 대한민국

(2025년 7월 29일 접수 : 2025년 8월 6일 수정 : 2025년 8월 11일 채택)

Enhancement of Electrochromic Properties with Electrolytes Based on Polyanionic Carbon Dot Ionic Complexes

Hong Chul Lim*

Department of Pharmaceutics and Biopharmacy, Sangji University, Wonju 26339, Republic of Korea

(Received July 29, 2025 : Revised August 6, 2025 : Accepted August 11, 2025)

초 록

전해질은 이차전지, 슈퍼커패시터, 연료전지 및 전기변색소자 등 다양한 전기화학 응용 분야에서 핵심적인 역할을 한다. 따라서 높은 이온 전도도, 우수한 전기화학적 안정성, 그리고 환경 친화성을 동시에 갖춘 새로운 전해질의 개발은 효율적인 전기화학 시스템을 구현하는 데 필수적이다. 본 연구에서는 다가 음이온성 탄소 양자점과 K^+ 양이온을 기반으로 하는 새로운 유형의 이온 화합물(K-C dot)을 합성하고 이를 전기변색 시스템에 전해질로서 적용하였다. 나노 크기의 탄소 양자점 음이온은 카운터 이온인 K^+ 양이온과의 정전기적 인력 및 π -양이온 상호작용을 통해 안정적인 이온 화합물을 형성한다. K-C dot은 상용 전해질인 KCl 대비 프러시안 블루(PB) 박막의 전기변색 특성에서 우수한 성능을 보였다. PB 박막은 $101.5 \text{ cm}^2 \text{ C}^{-1}$ 의 높은 착색 효율과 0.92의 우수한 광학 밀도 변화를 나타냈으며, 1,000회의 색 전환 사이클 이후에도 초기 광학 투과도 대비 약 96%의 안정성을 유지하였다. 본 연구 결과는 전기화학 시스템용 전해질 설계에 대한 새로운 통찰력을 제공하며, 에너지 저장 및 변환 소자에 적용 가능한 전해질 개발에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract : Electrolytes play a pivotal role across various electrochemical applications, including secondary batteries, supercapacitors, fuel cells, and electrochromic devices. Consequently, the development of novel electrolytes that simultaneously offer high ionic conductivity, excellent electrochemical stability, and environmental compatibility is essential for the realization of next-generation electrochemical systems. In this study, we synthesized a new type of ionic complex, K-C dot, based on polyanionic carbon dots and their counterion, K^+ cations. We then applied this K-C dot as an electrolyte in an electrochromic system. Nanoscale carbon quantum dots form stable ionic complexes through electrostatic attraction and π -cation interactions with K^+ cations. The K-C dot exhibits superior performance in the electrochromic properties of Prussian blue (PB) thin films compared to the conventional electrolyte, KCl. The PB thin film demonstrated a high coloration efficiency of $101.5 \text{ cm}^2 \text{ C}^{-1}$ and an excellent optical density change of 0.92. Furthermore, it maintained approximately 96% stability relative to its initial optical transmittance after 1,000 color switching cycles. Our research contributes new insights into the

*E-mail: valentie@sangji.ac.kr

strategic design of electrolytes for electrochemical systems, with direct implications for the future development of electrolytes in both electrochromic devices and various energy storage and conversion technologies.

Keywords : Electrolytes, carbon dots, ionic complex, Prussian blue, electrochromic

1. 서 론

전해질(Electrolyte) 염(Salts)은 용해된 혼합물 내에서 이온 수송을 통해 전기 전도성을 나타내는 물질이다. 이는 유기체의 항상성 유지와 같은 생물학적 시스템부터 배터리와 같은 제조품에 이르기까지 일상생활의 여러 영역에서 중요한 역할을 한다.^{1,2)} 예를 들어, 염화 나트륨(NaCl)은 Na^+ 및 Cl^- 이온으로 해리되어 혈압 조절, 체액 균형 유지, 그리고 근육 및 신경 기능의 안정적인 유지에 필수적인 기능을 수행한다.³⁾ 또한, 농업 분야에서 고질소 비료로 널리 쓰이는 염화암모늄(NH_4Cl) 역시 아연-탄소 전지의 전해질로 활용된다.⁴⁾ 이처럼 전해질 염은 재충전 배터리, 전기화학 축전기, 전기분해 장치, 그리고 연료 전지와 같이 화학 에너지를 전기 에너지로 변환하는 다양한 전기화학 응용 분야에서 핵심적인 구성 요소이다.^{5,6)} 금속 양이온과의 이온성 염 형태인 전해질 염은 용해도가 우수하고 화학적으로 비활성을 담보하는 카운터 음이온(Counter anion)의 합성 개발이 주로 연구되고 있다.⁷⁾ 주로 사용되는 전해질로는 $\text{M}^+\text{SO}_4^{2-}$ (Sulfate), M^+ClO_4^- (Perchlorate), M^+PF_6^- (Hexafluorophosphate), $\text{M}^+\text{CF}_3\text{SO}_3^-$ (Triflate) 등이 있다. 그러나 이러한 이온 쌍은 전기화학 셀 내에서 폭발, 전극 부식, 침전물 등 다양한 부반응을 유발하여 전기화학 셀의 성능, 수명 및 안정성과 같은 신뢰성을 저하시키는 문제를 야기한다.⁸⁻¹⁰⁾ 이러한 문제점을 개선하기 위해 유기 질산염, 황산염, 인산염, 유기 보란 복합체, 클러스터 기반 음이온, 방향족 헤테로사이클 등 다양한 형태의 음이온이 연구되고 있지만, 아직까지 기존 전해질 성능을 능가하는 새로운 형태의 전해질은 제시되지 못하고 있다.⁷⁾ 이는 전해질이 이온 전도체로서 높은 이온 전도도를 가져야 하며, 전기화학적으로 비활성이고, 열적으로 안정해야 하며, 비독성 및 친환경적이고 낮은 생산 비용을 충족시켜야 하는 까다로운 전체 조건을 지니고 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 친환경 및 신재생 에너지에 대한 관심과 수요가 증대됨에 따라 새로운 개념의 전해질에 대한 연구는 지속적으로 요구된다. 본 연구에서는 다가 음이온성(Polyanionic) 탄소 양자점(Carbon dots, C-dot)과 금속 양이온으로 구성된 새로운 유형의 전해질 염에 대해 보고한다. 탄소 양자점은 내부 구조가 sp^2 혼성화로 구성된 나노 결정

질 그래파이트(Graphite)로 표면(Basal)과 가장자리(Edge)는 수산화(Hydroxyl, $-\text{OH}$) 및 카르복실(Carboxyl, $-\text{COOH}$)과 같은 다수의 산소 작용기(Oxygen functional groups)를 지니고 있다. 다가 음이온성 탄소 양자점 기반 전해질 염은 단일 이온 전도체 특성과 더불어 높은 열 및 전기 화학적 안정성을 지니고 있다. 이러한 특성을 바탕으로 하나의 탄소 양자점 음이온과 다수의 칼륨(potassium) 양이온으로 구성된 K-C dot 이온 화합물을 전해질 염으로서 전기변색(Electrochromic) 시스템에 응용하였다. 결과적으로, K-C dot 이온 화합물을 전해질로 사용했을 때 상용 전해질 염 보다 우수한 전기변색 특성을 보였다.

2. 실 험

2.1 시약 및 재료

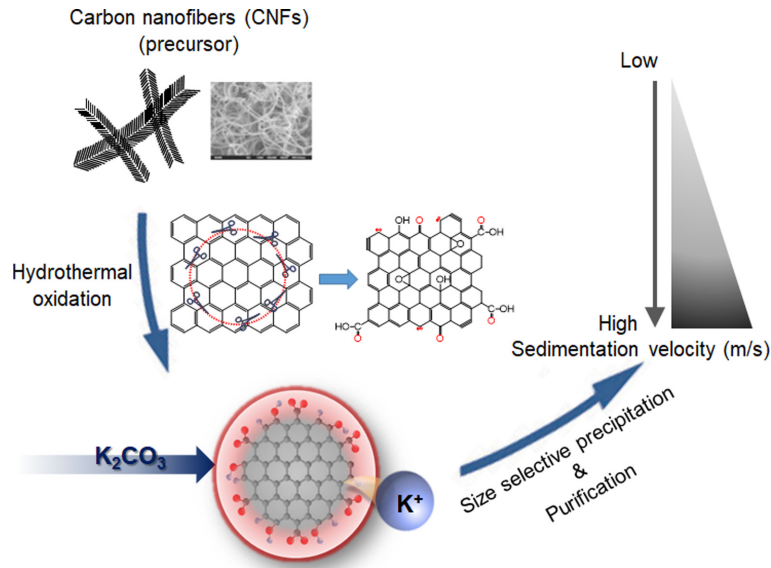
본 연구에 사용된 모든 화학 시약은 시중에서 구입할 수 있으며 추가 정제 없이 사용하였다. 탄소 나노섬유(Carbon nanofiber), 탄산 칼륨(Potassium carbonate, K_2CO_3), 염화수소(Hydrogen chloride, HCl) 페리시안화 칼륨(Potassium ferricyanide, $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$), 염화 철(III)(Iron(III) chloride, FeCl_3), 염화 칼륨(Potassium chloride, KCl), 황산(Sulfuric acid, H_2SO_4), 질산(Nitric acid, HNO_3) 및 에탄올(Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)은 Sigma-Aldrich와 SAMCHUN에서 구입하였다.

2.2 K-C dot 이온 화합물 제조

탄소 나노섬유(NEXCARB-H, 0.30 g)를 진한 황산(18 mL)과 질산(6 mL)의 혼합용액에 투입한 후, 1 hr 동안 초음파 처리하였다. 이어서 반응 조건에 따라 (80°C , 100°C 혹은 120°C 에서 24 hr 동안 교반 반응)을 진행하였다. 반응 종료 후 용액을 냉각시키고, 탄산칼륨 용액을 첨가하여 pH를 4로 조절하였다. 그 다음, 반응 용액과 동일한 부피 비율(1:1)로 에탄올을 첨가하고, 12,000 rpm에서 30 min 원심분리하여 크기 선택적 침전을 수행함으로써 불순물과 K-C dot을 분리하였다. 이 세척 및 분리 과정을 총 5회 반복하였다.

2.3 프러시안 블루($\text{KFe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$, PB) 전착

프러시안 블루(PB) 박막은 세 개의 전극(기준 전극:



Scheme 1. Schematic for preparation of the ionic complex based on polyanionic carbon dots.

Ag/AgCl, 상대 전극: 백금(Pt) 와이어, 작업 전극: ITO/glass)으로 구성된 전기화학 셀을 이용하여 크로노암페로메트리(Chronoamperometry) 방법으로 전착(Electrodeposition)하였다. 전기화학 셀 내 전해질은 0.05 M HCl, 0.05 M $K_3Fe(CN)_6$, 0.05 M $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 가 포함된 수용액으로 구성되었다. PB 박막의 전기화학 전착은 0.72에서 0.77 V의 전위 구간에서 50 s 펄스(Pulse)조건을 6회 수행하는 조건에서 300 s 동안 진행되었다. 전착 후, ITO (Indium Tin Oxide)표면에 고정된 PB 박막은 증류수(DI water)로 세척하여 잔류물을 제거하였으며, 먼지 및 유분으로부터 보호하는 조치를 취하였다.

2.4 실험 장비

전기화학 실험은 실온(RT)에서 3전극 시스템을 갖춘 CHI 기기(650B 전기화학 분석기)를 사용하여 수행되었으며, 모든 전위는 Ag/AgCl 기준 전극을 기준으로 기록되었다. K-C dot의 작용기 및 화학 조성은 단색 Al K_{α} (15 kV, 375 W) 광원을 사용하는 X선 광전자 분광법(XPS, Kratos AXIS Supra)을 통해 분석하였다. 탄소 양자점의 이미지는 200 kV 가속 전압에서 고해상도 투과전자현미경(HRTEM, JEOL KEO-2100)을 통해 확보하였다. 또한, 전기변색 특성은 착색 및 표백 상태에서 각각 10 s 동안 -0.16 V와 0.4 V의 교대 전압(듀티 사이클 50%)을 인가하며, 700 nm 파장에서 투과율 변화를 측정하는 방식으로 광학 밀도 및 착색 효율 등을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

도식 1에 나타낸 바와 같이, 전해질 염의 카운터 음이온 역할을 하는 다가 음이온성 탄소양자점은 탄소나노섬유(Carbon nanofiber)를 전구체(Precursors)로 하여 열 수화 산화과정(Hydrothermal oxidation process)을 통해 만들었다.¹¹⁾ 탄소나노섬유는 그 구성 성분이 탄소를 90% 이상 포함하고 있으며 그래파이트 구조를 지니고 있기 때문에 열팽창 계수가 작아 열에 의한 변형이 적고, 고온 하에서도 기계적 특성의 저하가 적다. 따라서 이를 이용해 개발한 나노 크기의 탄소 양자점 음이온은 그 특질을 설명하기에 상대적으로 간단한 모델이라는 장점을 지닌다. 다가 음이온성 탄소 양자점은 중심부에 sp^2/sp^3 혼성 탄소 구조를 가지며, 가장자리에는 다수의 수산화기와 카르복실기를 포함한다. 반응 용액에 K_2CO_3 를 첨가하여, 탄소 양자점 가장자리의 카르복실 음이온($-COO^-$)과 K^+ 양이온 간의 정전기적 인력(Electrostatic attraction)을 통해 K-C dot 이온 화합물을 형성하였다.¹¹⁾

Fig. 1a의 고 분해능 투과전자현미경 이미지에서 확인되는 것 같이 이온 화합물은 원형 형태이며, 내부의 회절 패턴(Diffraction pattern)이 명확히 관찰되었다. 이는 열 수화 과정에서, 탄소 양자점 내부(core)는 sp^2 공액(Conjugated) 구조를 여전히 유지하고 있음을 의미한다. Fig. 1b에서 K-C dot의 조성을 확인하기 위해, X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy)을 수행하였다. K-C dot은 284.2 eV의

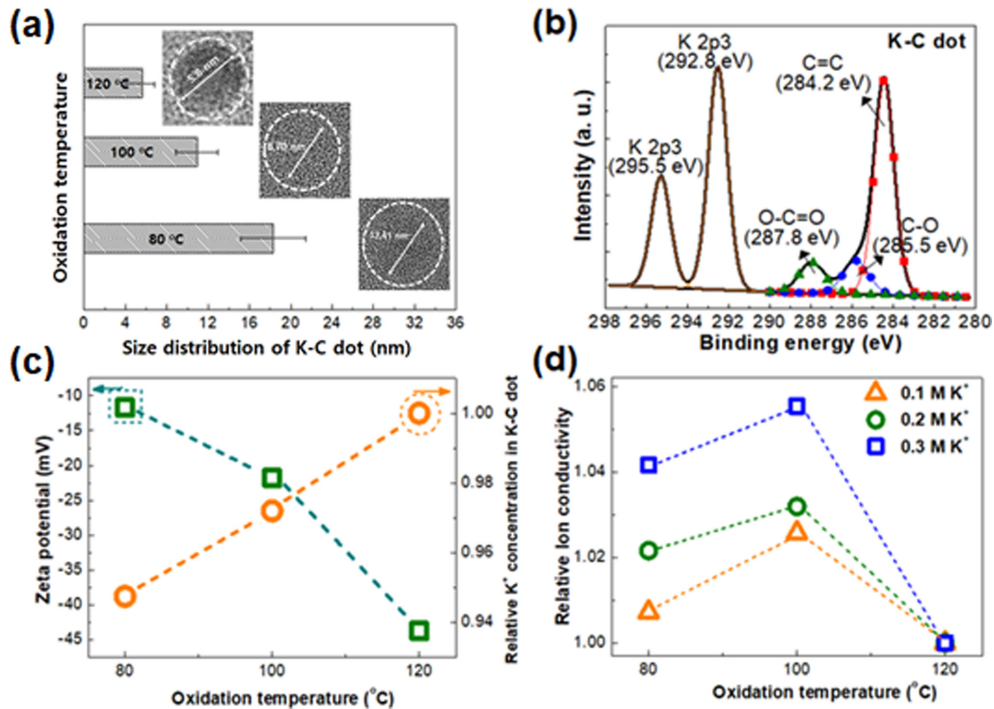


Fig. 1. (a) Size distribution and high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM) images, (b) XPS analysis of K-C dot, (c) Zeta analysis and relative K⁺ counter cation concentration, and (d) relative ionic conductivity values of K-C dot depending on hydrothermal oxidation reaction conditions.

피크가 탄소 도트의 sp^2 도메인에서 발생했음이 관찰되었다. 탄소 양자점의 표면 및 가장자리에 존재하는 산소 작용기는 285.5 eV에서 C-O, 287.8 eV에서 O-C=O로 관찰되었다.^{12,13} 더불어, 292.8 eV와 295.5 eV에서 K 2p 스펙트럼에 해당하는 피크가 관찰되었다.¹¹⁾ 이러한 결과는 표면의 산소 작용기로 인해 탄소 양자점에 음이온성 특성이 부여되었으며, 이에 따라 카운터 이온인 K⁺ 양이온이 유도되었음을 시사한다. Fig. 1a에서 K-C dot 이온 화합물의 크기는 열 수화 반응 온도 조건에 따라 조절할 수 있음을 확인하였다. 반응 온도가 80도, 100도 및 120도 조건에서 K-C dot 이온 화합물의 크기는 각각 18.2, 10.6 및 5.8 nm이었다. 또한, Fig. 1c에서 반응 온도가 증가함에 따라 탄소 양자점의 표면에서 음의 제타 전위(Zeta potential)값이 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 탄소 양자점의 형성 메커니즘에 따라,¹⁴⁾ 크기가 작아질수록 탄소 양자점의 가장자리에 음전하를 띠는 산소 작용기가 더 많이 분포한다는 것을 의미한다. 따라서, 이에 상응하는 카운터 K⁺ 양이온의 농도가 유의미하게 증가하는 결과를 초래하였다. 120 °C를 기준으로 상대적인 이온전도도 값을 보인 Fig. 1d에서 100 °C 조건

에서 준비된 K-C dot의 이온전도도가 제일 우수하였다. 이온 전도도(σ)는 다음의 관계식을 이용하여 계산되었다.

$$\sigma = L/R_b A$$

여기서 R_b 는 전해질 저항, L 은 분리막 두께, 그리고 A 는 전극 면적이다. 결론적으로, 탄소 양자점 음이온과 K⁺ 양이온 간의 정전기적 인력 증대 및 K⁺ 양이온 농도 증가라는 두 가지 핵심 인자가 상호 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

이온 전도도가 제일 우수하였던 100 °C 조건에서 준비된 K-C dot을 전해질 염으로 활용하기 위해 수용액에 용해시킨 후, 전해질로서의 특성을 평가하였다. Fig. 2a에 나타낸 바와 같이, 대표적인 전기화학 활성종인 페리시아나화 칼륨(Potassium ferricyanide, $K_3[Fe(CN)_6]$)을 대상으로 한 순환 전압전류법(Cyclic voltammetry, CV) 측정에서 준 가역적인(Quasi reversible) 1전자 산화/환원(Redox) 반응이 확인되었다. 이는 탄소 양자점이 전기화학적으로 불활성임을 나타내며, 페리시아나화물($Fe(CN)_6^{3-}$)의 산화환원 반응에

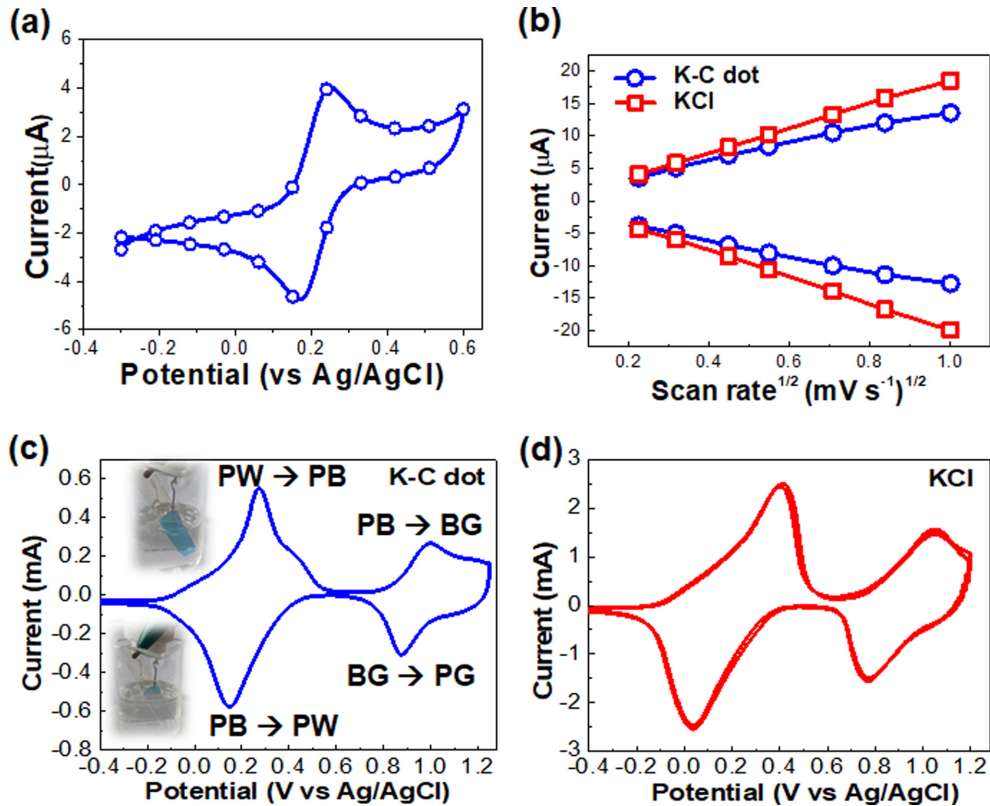


Fig. 2. (a) Cyclic voltammograms of 1 mM potassium ferricyanide ($K_3[Fe(CN)_6]$) according to the 0.1 M K-C dot aqueous solution at a scan rate of 100 mV/s. (b) Oxidation and reduction peak currents of 1.0 mM $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ versus the square root of scan rate in 0.1 M K-C dot (open circle symbol with line) and 0.1 M KCl (open rectangle symbol with line) aqueous solution. Electrochemical behaviors of PB/ITO in an aqueous solution containing (c) 0.5 M K-C dot and (d) 0.5 M KCl at a scan rate of 20 mV/s (Ag/AgCl: reference electrode, Pt wire: counter electrode, and PB thin film: working electrode), (inserted image: coloring/bleaching state of PB thin film).

어떠한 방해도 주지 않음을 시사한다. 페리시안물의 확산 계수(D_0)는 CV 결과에서 얻은 산화 및 환원 피크 전류(i_{pa} 및 i_{pc})를 기반으로 Randles-Ševčík 방정식을 통해 결정되었다.^{15,16)}

$$i_p = 0.4463nFAC(nFvD/RT)^{1/2}$$

여기서 i_p 는 피크 전류(A), n 은 전자 수($\cong 1$), F 는 패러데이 상수($9.6485 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$), A 는 전극 표면적(0.03162 cm^2), C 는 $[Fe(CN)_6]^{3-}$ 의 농도(1 mM), v 는 주사 속도(V s^{-1}), D 는 확산 계수($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$), R 은 기체 상수 $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, T 는 온도(298.15 K)이다. Fig. 2b에서 0.01에서 0.2 V s^{-1} 까지의 주사 속도 제공근에 대한 i_{pc} 와 i_{pa} 그래프는 선형 관계를 보였다. $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ 의 계산된 산화 및 환원 D_0 값은 각각 4.76×10^6 과 $3.45 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 이다. 반면, 1.0 M KCl 전해질을

사용한 $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ 의 산화 및 환원 D_0 값은 각각 6.95×10^6 과 $5.04 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 이다. 이러한 결과는 K-C dot을 전해질로 사용하여 얻은 $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ 의 D_0 값이 문헌에 보고된 D_0 값(산화: 7.26×10^6 , 환원: $6.67 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)에 비해 약간 낮게 측정되었으나¹⁷⁾, 전기화학 시스템 내에서 K-C dot의 전해질로의 적용 가능성을 확인할 수 있음을 보여준다. 상기 결과를 기반으로 전기변색(Electrochromic) 시스템에 적용하여 K-C dot의 전해질로서의 특성을 평가하였다. 이를 위해, ITO 기판 상에 전기변색 물질인 프러시안 블루($KFe^{III}[Fe^{II}(CN)_6]$, PB) 박막을 전기화학적 증착법으로 제작하였다.¹⁸⁾ PB 박막의 전기화학적 거동을 조사하기 위해, 작업 전극(PB 박막), 상대 전극(Pt wire) 및 기준 전극(Ag/AgCl)으로 구성된 3전극 시스템에서 CV 실험을 수행하였다. 산화/환원 반응에 의한 PB 박막의 색 변화는 인가된 전압 또는 전류에 의해 카운

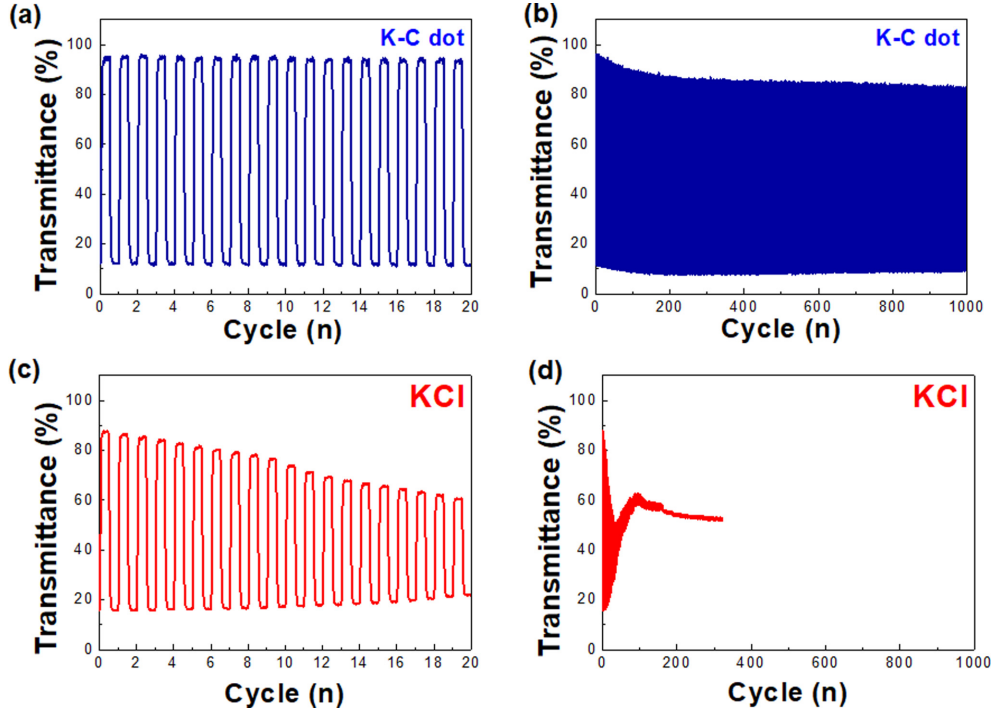
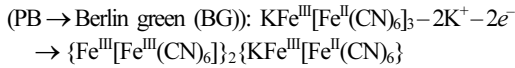
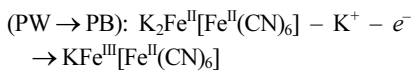
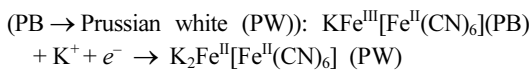


Fig. 3. The in situ optical transmittance of PB thin films for 0.5 M K-C dot (a, b) and 0.5 M KCl (c, d) as a function of operating cycles for PB/ITO at 700 nm (Ag/AgCl: reference electrode, Pt wire: counter electrode, and PB thin film: working electrode).

터 이온이 PB 구조의 격자 채널(Lattice channel)로 삽입(Intercalation)/탈리(Deintercalation)되면서 발생한다. 카운터 이온의 확산에 의한 PB 박막의 산화환원 반응은 다음과 같이 표현된다.¹¹⁾



PB 박막의 전기변색 현상은 전해질과 연관된 두 가지 전기화학적 반응을 수반한다. 첫째는 PB 박막과 전해질 계면에서의 전하 이동 과정이며, 둘째는 PB 격자 내부에서 일어나는 카운터 양이온의 확산에 의한 산화/환원 반응이다. Fig. 2c 및 2d에서 K-C dot 및 KCl을 전해질로 사용하였을 때, 가역적인 PB 박막의 전기화학적 반응이 관찰되었다. 특히 K-C dot이 전해질로 적용된 PB 박막의 피크 전류비(i_{pc}/i_{pa})가 0.90으로 확인되었으며, PB 박막의 환원 및 산화 전

위는 각각 0.149 V와 0.274 V로 측정되었다. PB 물질은 전이금속과 시안화 리간드가 결합하여 형성된 구조로, 전기화학적 산화/환원 반응 시 전하 이동과 격자 내 카운터 이온인 K^+ 양이온의 확산 조절 반응이 주요하게 작용한다. 따라서 CV 실험 결과는 K-C dot 전해질이 전극-전해질 계면에서 안정적인 전하 전달과 이온 전도를 효과적으로 수행하고 있음을 시사한다.

PB 박막의 전기변색 특성인 광학 밀도(OD), 착색 효율(η , $cm^2 C^{-1}$) 및 사이클 수명은 각각 10 s 간격으로 -0.16 V 및 0.4 V의 교대 전압을 인가하며 크로노암페로메트리(Chronoamperometry) 방법을 이용하여 측정되었다. 전기변색 성능의 주요 매개변수인 착색 효율은 PB 박막과 전해질 간의 전하 이동 특성에 의존하며, 색상 변화 반응 시간은 PB 구조 내의 카운터 이온인 K^+ 양이온의 확산 속도에 의해 결정된다. 착색 효율은 주입되거나 방출된 전하 밀도(Q)에 따른 광학 밀도 변화(ΔOD)로 정의되며, 다음과 같은 수식으로 표현된다.^{11,18)}

$$\eta(\lambda) = \frac{\Delta OD}{\Delta Q} = \frac{\log\left(\frac{T_b}{T_c}\right)}{\Delta Q}$$

T_b , T_c 는 각각 착색 상태(Coloring state, PB)와 표백 상태(Bleaching state, PW)의 투과율이다. Fig. 3a와 3b에서 나타낸 바와 같이, K-C dot 전해질을 이용한 전기변색 시스템의 착색 효율과 광학 밀도 변화는 각각 $101.5 \text{ cm}^2 \text{ C}^{-1}$ 및 0.92로 확인되었다. 또한 전기변색 사이클 수명 측정에서는 1,000회의 스위칭 사이클 이후에도 투과도 변화(ΔT)가 1차 사이클 78%에서 1,000차 사이클 75%로 거의 감소하지 않아 우수한 내구성을 확인할 수 있었다. 반면 Fig. 3c와 3d에 나타낸 바와 같이, KCl을 사용한 전기변색 시스템의 η 및 ΔOD 는 각각 $80.2 \text{ cm}^2 \text{ C}^{-1}$ 및 0.67 나타났으며, 스위칭 사이클이 증가함에 따라 PB 박막의 전기변색 특성이 지속적으로 저하되었다. 이는 음이온이 PB 박막 표면을 공격하거나 흡착하여 PB 박막의 열화를 유발할 수 있음을 시사한다.^{11,19} 평균 직경 약 10.6 nm인 큰 다가 음이온성 탄소 양자점은 PB 박막 내 확산이 상대적으로 지연되어, 음이온이 PB 박막을 직접적으로 침식하거나 손상시키는 것을 방지하는 효과가 있다.¹¹ 결과적으로, K-C dot은 PB 박막의 산화/환원 반응을 효과적으로 촉진하여 상용 전해질인 KCl 대비 전해질로서 우수한 전기변색 성능을 보여주었다.

4. 결 론

본 연구에서는 새로운 유형의 K-C dot을 전해질로 성공적으로 개발하였다. K-C dot은 탄소 양자점과 카운터 이온인 K^+ 양이온 사이의 정전기적 상호작용과 π -양이온 상호작용에 의해 형성되었다. K-C dot을 적용한 전기변색 시스템에서는 상용 전해질인 KCl 대비 향상된 전기변색 성능을 나타냈으며, 높은 착색 효율($101.5 \text{ cm}^2 \text{ C}^{-1}$), 우수한 광학 밀도 변화(0.92) 및 긴 사이클 수명을 확보하였다. 본 연구 결과는 K-C dot이 이차 전지, 슈퍼커패시터, 전기화학 트랜지스터 등 다양한 전기화학 에너지 저장 및 변환 소자에 유망한 전해질 소재임을 시사한다.

Acknowledgments

This work was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) under Grant No. 2025RISE (SANGJI-Biohealth). This work was also funded by the Semiconductor R&D Support Program.

References

1. S. Zhang, Y. Ki, H. Song, X. Chen, J. Zhou, S. Hong and M. Huang, *Sci. Rep.*, **6**, 19292 (2016).
2. C. Zhong, Y. Deng, W. Hu, J. Qiao, L. Zhang and J. Zhang, *Chem. Soc. Rev.*, **44**, 7484–7539 (2015).
3. A. Ziomber, A. Machnik, A. Dahlmann, P. Dietsch, F.-X. Beck, H. Wagner, K. F. Hilgers, F. C. Luft, K.-U. Eckardt and J. Titzte, *Am. J. Physiol. Ren. Physiol.*, **295**(6), F1752–F1763 (2008).
4. S. Clark, A. Latz and B. Horstmann, *ChemSusChem*, **10**, 4735–4747 (2017).
5. Z. Zeng, V. Murugesan, K. S. Han, X. Jiang, Y. Cao, L. Xiao, X. Ai, H. Yang, J.-G. Zhang, M. L. Sushko, and J. Liu, *Nat. Energy*, **3**, 674–681 (2018).
6. L. Xiao, S. Zhang, J. Pan, C. Yang, M. He, L. Zhuang and J. Lu, *Energy Environ. Sci.*, **5**(7), 7869–7871 (2012).
7. J. C. Bachman, S. Muy, A. Grimaud, H.-H. Chang, N. Pour, S. F. Lux, O. Paschos, F. Maglia, S. Lupart, P. Lamp, L. Giordano, Y. Shao-Horn, *Chem. Rev.*, **116**(1), 140–162 (2016).
8. R. D. Rogers and K. R. Seddon, *Science*, **302**(5646), 792–793 (2003).
9. X. Li, J. Liang, X. Yang, K. R. Adair, C. Wang, F. Zhao and X. Sun, *Energy Environ. Sci.*, **13**(5), 1429–1461 (2020).
10. H. Wu, Y. Xu, X. Ren, B. Liu, M. H. Engelhard, M. S. Ding, P. Z. El-Khoury, L. Zhang, Q. Li, K. Xu, C. Wang, J.-G. Zhang and W. Xu, *Adv. Energy Mater.*, **9**(41), 1902108 (2019).
11. H.C. Lim, M.-C. Kim, A. Kim, E. Park, Y. Park, R. Chang, J.-I. Hong, K.-W. Park, I.-S. Shin and H. Kim, *Batter. Supercaps*, **5**(3), e202100337 (2022).
12. A. C. Ferrari, J. C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzerum, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, K. S. Novoselov, S. Roth and A. K. Geim, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 187401 (2006).
13. K. Yang, K. Cho, D. S. Yoon and S. Kim, *Sci. Rep.*, **7**, 40163 (2017).
14. J. Peng, W. Gao, B. K. Gupta, Z. Liu, R. Romero-Aburto, L. Ge, L. Song, L. B. Alemany, X. Zhan, G. Gao, S. A. Vithayathil, B. A. Kaiparettu, A. A. Marti, T. Hayashi, J.-J. Zhu and P. M. Ajayan, *Nano Lett.*, **12**(2), 844–849 (2012).
15. J. E. B. Randles, *Trans. Faraday Soc.*, **44**, 327 (1948).
16. A. Sevcik, *Czech. Chem. Commun.*, **13**, 349 (1948).
17. S. J. Konopka and B. McDuffie, *Anal. Chem.*, **42**(14), 1741–1746 (1970).
18. H.C. Lim, E. Park, I.-S. Shin, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **41**(3), 358–361 (2020).
19. A. Roig, J. Navarro, R. Tamarit and F. Vicente, *J. Electroanal. Chem.*, **360**(1–2), 55–69 (1993).