

# 전도성 고분자-리그닌 복합소재의 전기화학적 특성 분석

배 준 원<sup>†</sup>

동덕여자대학교 응용화학과  
(2022년 3월 13일 접수, 2022년 3월 21일 수정, 2022년 3월 30일 채택)

## The Electrochemical Characterization of Conducting Polymer-Lignin Composite

Joonwon Bae<sup>†</sup>

Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748 Republic of Korea  
(Received March 13, 2022; Revised March 21, 2022; Accepted March 30, 2022)

### 초 록

표면의 전하 특성이 다른 두 가지 리그닌을 사용하여 이전 연구에서 제시된 간단한 방법인 용액상 화학적 중합을 이용하여 폴리피롤@리그닌(PPy@lignin) 및 폴리피롤@리그노설포네이트(PPy@lignosulfonate) 복합소재를 제조하였다. 폴리피롤은 두 가지 리그닌 표면에서 각각 성공적으로 중합되었으며, 얻어진 복합소재들은 주사전자현미경, 순환전압전류법, 임피던스(impedance) 분석법 등을 이용하여 분석하였다. 이러한 결과들을 바탕으로, 리그닌의 종류가 달라도 복합재료들은 성공적으로 제조되는 것을 알 수 있었으며, 전기적 특성도 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 다만, 개별 리그닌의 표면 특성 차이로 나타나는 물성 차이가 존재함을 임피던스 분석으로 판단할 수 있었다. 나아가, 두 가지 복합소재를 아가로스(agarose) 겔(gel)에 투입하여 전도성 겔을 형성하고 이 겔들의 특성들을 역시 순환전압전류법으로 살펴보았으며, 전기전도도를 측정하여 제시하였다. 리그닌의 전기절연성에도 불구하고 전도성 겔이 전기전도도를 포함한 전기적 특성을 유지하는 것을 알 수 있었다. 이는 전도성 겔의 활용이 가능하다는 점을 의미한다.

### Abstract

Two types of lignin materials with a different surface ionic character were used and polypyrrole layer was introduced on the lignin surface to obtain polypyrrole@lignin and polypyrrole@lignosulfonate composites using a simple chemical oxidation polymerization, reported in a previous article. Polypyrrole was effectively prepared regardless of the lignin type and the resulting composites were investigated using scanning electron microscope (SEM), cyclic voltammetry (CV), and impedance analysis. SEM and CV results showed that the obtained composites retained stable electrochemical properties after introduction of polypyrrole on the lignin surface. Impedance analyses showed that the surface properties of composites were dependent on lignin characteristics. In addition, the composites were embedded in agarose, an gelifying agent, to obtain conductive gels. It was found that the conductive gels possessed an electrical conductivity and also retained stable electrochemical properties, which indicated that the conductive gels might be useful for some applications.

**Keywords:** Lignin, Polypyrrole, Conductive gel, Lignosulfonate, Electrochemical analysis

## 1. 서 론

리그닌은 목재 외피의 주요 성분 중 하나로, 최근 유해 소재를 대체할 수 있는 저독성 식물 소재로 많은 관심을 끌고 있다. 그러나, 종이 생산이 가능한 셀룰로오스(cellulose)에 비해 활용이 제한되어 있었다. 기계적 물성이 우수하고 화학적인 안정성이 뛰어나므로 복합소재, 기계재료, 피복 등으로 활용될 가치가 있다고 볼 수 있으므로 이에 대한 연구는 반드시 필요하다. 리그닌은 다양한 단위체로 구성된 복합적인

고분자 구조로 보는 것이 타당하다[1]. 이러한 이유로 리그닌의 성질을 정확하게 파악하는 것이 매우 난해하다[2]. 특히, 리그닌을 구성하는 단량체를 개별적으로 분리 또는 단리할 수 있다면 이는 화학적 관점에서 볼 때 매우 획기적인 기술이 될 수 있다[3]. 왜냐하면, 리그닌의 단량체들이 석유화학공업에서 활용될 수 있는 가능성이 크거나 기존 석유화합물을 대체할 수 있는 물질들이기 때문이다. 따라서, 현재까지의 연구 활동은 다소 제한적이고 미약하나 향후 많은 연구활동이 필요한 분야이다[4].

전기 전도성 고분자는 2000년대에 들어와서 관련 기술이 많은 발전을 거듭하고 있으며, 거의 대부분의 전기 및 전자 디바이스에 활용될 수 있는 가능성이 큰 물질로 오랜 기간 동안 관심을 끌고 있다. 폴리아세틸렌(polyacetylene), 폴리피롤(polypyrrole), 폴리아닐린(Polyaniline), 폴리사이오펜(Polythiophene) 등 대표적인 전도성 고분자들은

<sup>†</sup> Corresponding Author: Dongduk Women's University  
Department of Applied Chemistry, Seoul 02748 Republic of Korea  
Tel: +82-2-940-4506 e-mail: redsox7@dongduk.ac.kr, joonwonbae@gmail.com

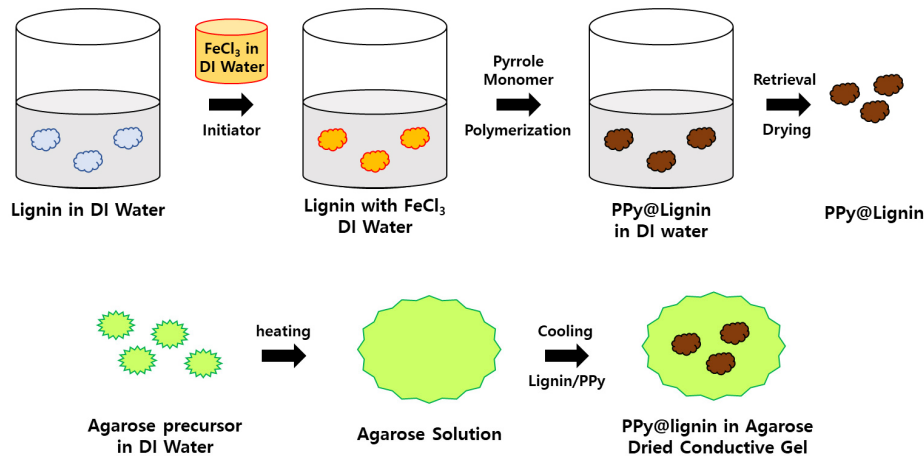


Figure 1. A scheme showing the preparation procedure of PPy@lignin and PPy@lignosulfonate composites and conductive gels.

각각 대체불가능한 장점을 갖고 있으며, 특정한 분야에서는 매우 경쟁력이 있는 소재로 각광받고 있다[5]. 다만, 전도성 고분자들은 상용 고분자들에 비해서 대체로 유수의 범용 용매에 대한 용해성이 떨어지고, 제조 과정도 상대적으로 복잡하므로 아직도 극복해야만 하는 hurdle(장애물)이 존재하고 있다[6]. 그럼에도 불구하고, 위에서 언급한 점들을 극복하기 위해서 이중 물질과 혼합하거나 분자 수준에서 결합하여 다양한 소재들이 제시되고 있다[7]. 분자 수준의 변형을 통한 방식은 합성적인 기술이 필요하고 복잡하므로 경쟁력이 약하고, 다른 물질과 혼합하는 방식이 다소 유리하다고 볼 수 있다. 만약, 전도성 고분자와 리그닌을 결합하여 새로운 물성을 갖는 복합체가 생성이 된다면 비록 두 가지 물질들이 약점을 지니고 있으나, 장점들이 결합하여 시너지 효과를 발생한다면 매우 긍정적으로 고려될 수 있다[8].

본 연구에서는 두 가지 형태의 리그닌, 즉 이온 특성을 갖는 리그닌(리그노 설프네이트, lignosulfonate)와 그렇지 않은 리그닌을 도입하여 폴리피롤과 혼합하는 방식으로 복합소재들을 제조하여 이들의 전기화학적 물성을 면밀히 파악하고자 한다. 이전 연구에서 리그닌과 폴리피롤의 복합체를 제조하여 전기적 센서로 활용가능성이 있는 점을 보고하였다[9]. 여기에서 나아가, 리그닌의 특성이 얻어지는 복합체의 전기화학적 물성에 미치는 영향을 살펴보는 것은 향후 이 물질들의 활용도를 파악하는 데 있어 상당히 중요한 정보가 된다. 따라서, 리그닌이 이온 특성의 보유 여부에 상관없이 폴리피롤과의 복합체 형성이 가능한지 먼저 파악해 보았다. 이어서 이들 소재들의 전기화학적 특성을 순환전압전류법과 임피던스 분석법으로 자세히 살펴보았다.

한편으로, 분말 상태인 폴리피롤@리그닌의 활용도를 향상시키는 측면에서 복합소재를 아가로즈 젤에 포함하여 최종적으로 전도성 젤을 형성하였다. 분말 상태보다는 패드(pad) 형태의 활용도가 뛰어나므로, 패드 형태 제작을 위해 안전하고 독성이 약하며 생체적합성이 좋은 아가로즈 젤을 매체로 도입하였다[10]. 먼저, 얻어진 전도성 젤 패드의 전기전도도를 측정하여 제시하였다. 이는 제조된 복합소재의 활용도를 가능하게 하는데 있어서 중요하다고 판단된다. 또한, 순환전압전류법으로 분석하여 전도성 젤의 전기화학적 특성에 영향을 미치는 리그닌의 영향에 대해서도 고찰해 보았다. 향후 활용 가능성이 높은 물질인 리그닌은 현재까지 물성 및 활용에 대한 연구 활동이 상대적으로 미진하므로, 본 연구는 향후 연관 분야 연구 활동을 추구하는 데 있어서 중요한 정보를 제공할 가능성이 높은 의미가 있다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

리그닌 및 리그노설프네이트는 동경화성공업(Tokyo Chemical Incorporation, Tokyo, Japan)에서 구매하여 받은 상태로 사용하였다. 단량체인 피롤(pyrrole), 도핑제(dopant,  $\text{FeCl}_3$ ), 하이드로젤 전구체인 아가로즈(agarose)는 알드리치(Aldrich, WI, USA)사에서 구매하여 추가적인 정제없이 사용하였다. 범용 용매류는 삼진화학(서울, 대한민국)에서 구매하여 사용하였다.

### 2.2. 폴리피롤@리그닌 및 폴리피롤@리그노설프네이트 복합소재 제조

리그닌(0.25 g)을 증류수(50 mL)에 분산시킨다. 개시제이자 도핑제인  $\text{FeCl}_3$ (1 g)를 증류수(5 mL)에 녹인 용액을 위의 용액에 도입하고 피롤 단량체(0.75 g)를 투여한다. 고분자화 반응은 1시간가량 진행되고, 얻어진 고분자 복합소재는 에탄올과 증류수로 3번 이상 세척하였다. 얻어진 물질을 여과지로 거른 후에 오븐에서 2시간, 상온에서 24시간 건조하였다. 폴리피롤@리그노설프네이트에 대해서도 동일한 방식으로 제조하였다.

### 2.3. 전도성 젤 제조

적당량의 아가로즈를 물에 녹이고 온도를 섭씨 90도까지 올려 모두 녹인다. 이후에 온도를 내려가면서 약 섭씨 60도가 되었을 때, 아가로즈와 동일한 양의 폴리피롤@리그닌 복합소재를 냉각되고 있는 아가로즈 용액에 투입하여 혼합한다. 이 때, 혼합이 잘 되고 엉김이 발생하지 않도록 주의한다. 온도를 상온으로 더욱 낮추면 전도성 젤이 얻어진다. 아가로즈와 폴리피롤@리그닌 복합소재의 비율은 조절이 가능하다. 복합소재 및 전도성 젤의 제조 과정은 Figure 1에 나타나 있다.

### 2.4. 분석 및 측정

전자현미경 사진 및 엑스선 원소분석 결과는 Zeiss Gemini 300 (Land Baden, Germany) 주사전자현미경으로 가속 전압 5~10 kV에서 촬영하여 얻었다. 순환전압전류법 및 임피던스 분석은 3극 측정용 비커 셀(beaker cell)이 장착된 Palm Sens 4 (Amsterdam, Netherland) 정전압 장치(potentiostat)으로 측정되었다. 백금(Pt) 및 은/염화은(Ag/AgCl)

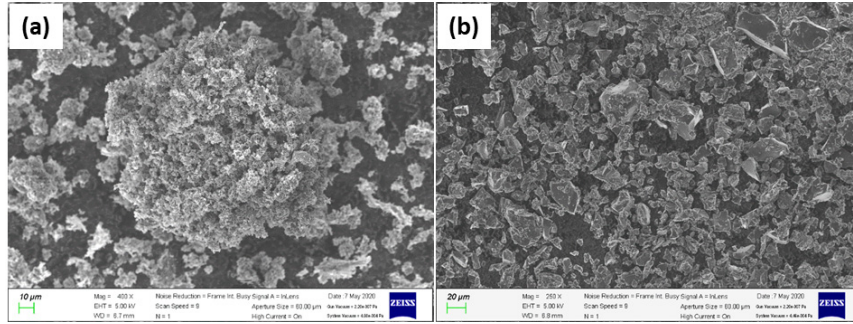


Figure 2. SEM images of (a) PPy@lignin and (b) PPy@lignosulfonate composites.

보조 및 기준 전극으로 도입되었다. Phosphate saline buffer (PBS), 1 mol 농도의 황산, 0.5 mol 농도의  $\text{NaClO}_4$ 가 전해질로 사용되었고, 스캔 속도는 100 mV/s로 하였다. 임피던스 분석은  $10^{-1}$ ~ $10^5$  Hz 범위에서 측정되었고, Nyquist 및 Bode plot으로 제시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

리그닌은 무정형의 고체로 모양과 크기가 다양하다. 따라서, 리그닌의 존재하에서 폴리피롤을 중합하기 위해서는 가급적 리그닌의 모양을 일정하게 만드는 것이 중요하다. 이를 위해 분쇄기를 통해서 수마이크로미터 수준의 크기를 갖는 리그닌 플레이트(platelet)를 수득하였다. 본 연구에서 사용된 리그닌이나 리그노설포네이트 두 가지 소재 모두 분쇄기에서 수마이크로미터 수준으로 파쇄될 수 있었다. 이어서 리그닌을 물에 도입한 후 간단한 용액상 화학적 중합법을 통해 폴리피롤을 형성시켰고, 이 고분자의 경우 개시제/도펀트(dopant)로 사용되는  $\text{FeCl}_3$ 가 잔존할 수 있다. 이 경우, 특히 염소 음이온( $\text{Cl}^-$ )이 표면 전하 특성에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 여러번 세척하여 이 요소를 최소화하도록 시도하였다.

Figure 2는 얻어진 복합소재들의 외형적 특성을 나타내는 주사전자현미경 사진을 보여주고 있다. 형태적 특성은 한 두 가지로 나타내는 것은 무리이나, 비교적 일정한 사이클을 갖는 무정형 입자로 볼 수 있다. 이는 분쇄를 통한 크기 조절의 효과라고 볼 수 있다. 왜냐하면, 리그닌이나 리그노설포네이트의 모양에 영향을 줄 수 있는 외부 요소는 없고, 전처리가 분쇄에 의해서 이루어졌기 때문이다. 특히, 폴리피롤@리그닌의 경우 문침현상이 폴리피롤@리그노설포네이트에 비해서 다소 두드러진 것으로 나타났는데, 이는 폴리피롤@리그닌 입자들에 존재하는 쌍극자들 간의 약한 정전기적 상호작용이 폴리피롤@리그노설포네이트에 비해서 크기 때문이다[10]. 에너지분산형 엑스레이 원소 분석 결과 얻어진 PPy@lignin 복합소재들에 존재하는 염소 이온의 조성비율은 매우 낮다는 것이 확인되었다[10]. 이러한 결과로부터 두 가지 복합소재들이 매우 효과적으로 제조되었다는 것을 일단 확인할 수 있었고, 나아가 전기화학적 분석을 할 수 있는 가능성을 확인하였다고 볼 수 있다.

Figure 3은 실험에서 제시된 방법으로 제조된 폴리피롤을 순환전압전류법으로 전해질의 종류에 따라 분석하여 얻은 결과를 나타낸 그래프이다. 전압의 범위는 기존 문헌을 참고하여 상당히 넓은 범위를 선정하였다[6]. 이는 폴리피롤의 전기화학적 거동을 넓은 범위에서 살펴보고 얻어진 복합소재들과 실질적인 비교를 하기 위함이다. 그래프에서 보듯이 폴리피롤의 경우 넓은 전압 범위에서 상당히 안정적인 프

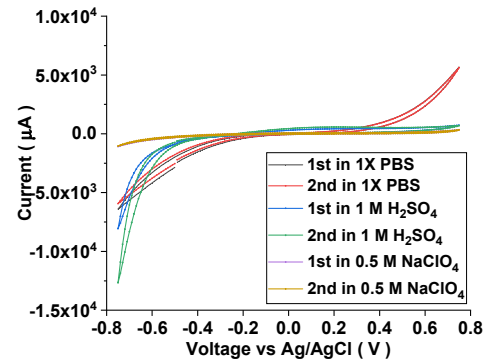


Figure 3. Cyclic voltammograms of polypyrrole polymer measured in several different electrolytes.

로파일을 나타내는 것을 볼 수 있으며, 여러 가지 전해질을 변화시켜 사용하더라도 전기화학적 거동에 있어서 눈에 띄는 차이점은 발견되지 않았음을 확인할 수 있었다. 동일한 전해질을 사용한 경우, 첫 번째 스캔과 두 번째 스캔의 차이도 두드러지지 않았다.

리그닌에 대한 CV 분석을 다룬 문헌을 참고하였을 때, PPy의 CV 결과로 비교해 볼 때 두드러진 차이점은 드러나지 않았다. 즉, Figure 3에서 제시된 전위차 범위에서 특별한 산화 환원 반응이 나타나지 않았다[11].

폴리피롤을 순환전압전류법으로 스캔할 때, 고분자화 반응이 충분히 이루어지지 않았다면 잔류반응에 해당하는 산화/환원 반응이 일어나는 완만한 피크(peak)가 발생하는 것이 일반적이다. 하지만, 본 결과에서는 이러한 양상이 나타나지 않았고, 이는 고분자화 반응이 실질적으로 일어나서 형성이 완료되었음을 의미한다. 한 편으로, 중성에 해당하는 PBS를 사용한 경우에 비해, 산이나 염기를 전해질로 사용했을 때 양쪽 끝에서 전류값이 증가/감소하는 경향이 나타나는데, 이는 전해질의 이동도가 높아서 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 이 끝단에서의 거동은 폴리피롤의 거동을 고찰하는 데 있어서 물질의 특성에 의한 주요한 현상은 아니라고 판단된다.

Figure 4는 위와 동일한 방식으로 측정된 본 연구에서 제조된 폴리피롤@리그닌 및 폴리피롤@리그노설포네이트의 순환전압전류법 분석 결과를 나타내고 있다. 전체적으로 폴리피롤과 비슷한 안정적인 프로파일을 나타내고 있으며, 산화/환원 반응이라고 볼 수 있는 완만한 피크는 역시 존재하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 복합재료의 전기화학적 특성은 리그닌의 존재보다는 폴리피롤의 전기화

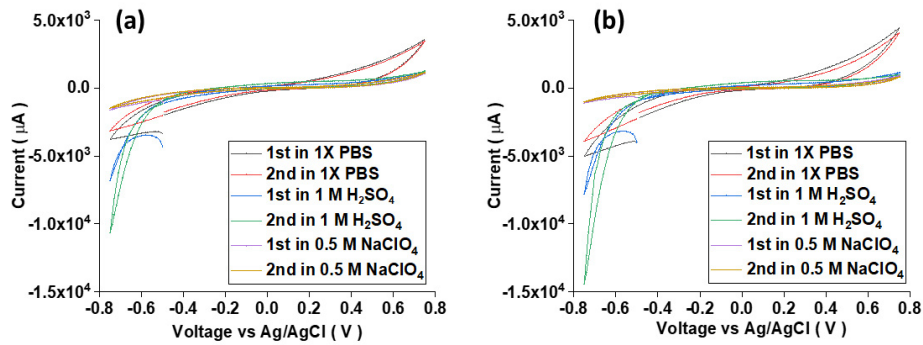


Figure 4. Cyclic voltammograms of polypyrrole@lignin and polypyrrole@lignosulfonate composites measured in several different electrolytes.

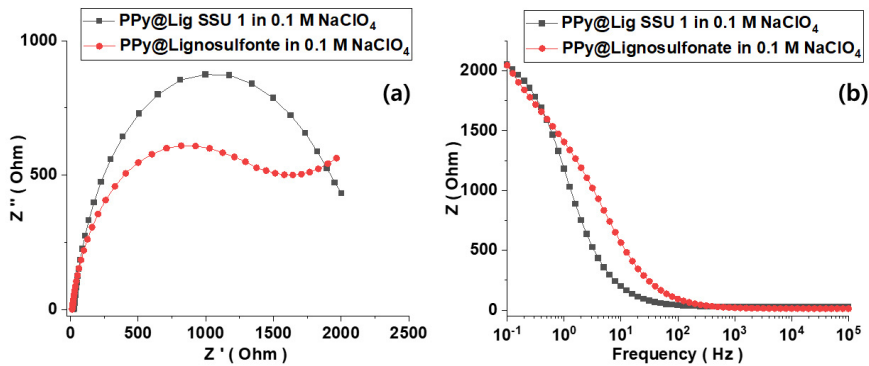


Figure 5. (a) Nyquist and (b) Bode plots of polypyrrole@lignin and polypyrrole@lignosulfonate composites obtained by impedance analysis in base electrolyte.

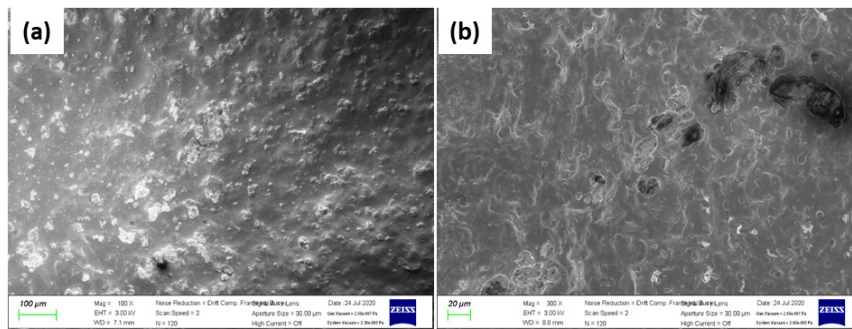


Figure 6. SEM images of conductive gels containing (a) polypyrrole@lignin and polypyrrole@lignosulfonate composites.

학적 거동 및 특성에 더 의존한다는 것을 의미한다. 다만, PBS를 전해질로 활용하였을 때 아주 약한 축전특성이 나타나는 것을 인지할 수 있는데, 이는 리그닌의 다소 넓은 표면적으로 인한 효과라고 볼 수 있다. 그러나, 이 결과로부터 축전효과가 있다고 보기는 어렵다.

리그닌과 리그노설포네이트는 명백한 이온 특성상 차이점을 지니고 있기 때문에, 이를 포함한 복합소재는 어떠한 상이점을 지닐 것으로 예상하였고, 이를 확인하기 위해 임피던스 분석을 실시하였다. 순환전압전류법에서 도출된 사실로 볼 때 염기 전해질에서 가장 넓은 전압 범위에서 안정적인 프로파일을 얻을 수 있었으므로 임피던스 분석에서는 염기 전해질을 사용하였다. Figure 5는 폴리피롤@리그닌 및 폴리피롤 @리그노설포네이트의 임피던스 분석 결과를 Nyquist 및 Bode plot으로 제시한 것이다. Figure 5(a)의 Nyquist plot을 보면, 폴리

피롤@리그닌은 구형의 그래프를 보여주는 반면 폴리피롤@리그노설포네이트는 구형에서 벗어나 와버그(Warburg) 임피던스 형태를 보여주고 있다. Bode plot에서는 주파수에 따라서 복합 저항의 크기가 어떻게 변화하고 있는지를 보여주고 있다. 눈에 띄는 점은 폴리피롤@리그노설포네이트에서 복합 저항 값이 폴리피롤@리그닌보다 크게 나타났음을 알 수 있는데, 이는 리그노설포네이트의 이온 전하에 의해서 전하 및 전해질 이동이 저해를 받는다는 점을 의미한다. 순환전압전류법 분석에서는 두드러지지 않았던 차이점이 임피던스 분석에서는 약하게나마 드러나는 것으로 이해할 수 있다. 그러나, 순환전압전류법의 주요한 산화/환원 반응의 차이를 나타내는 반면, 임피던스 분석은 소재 계면에서의 미세 거동 차이를 나타내는 경향이 강하므로 두 복합소재의 물성 차이는 실제 활용 측면에서는 크지 않을 것으로 볼 수



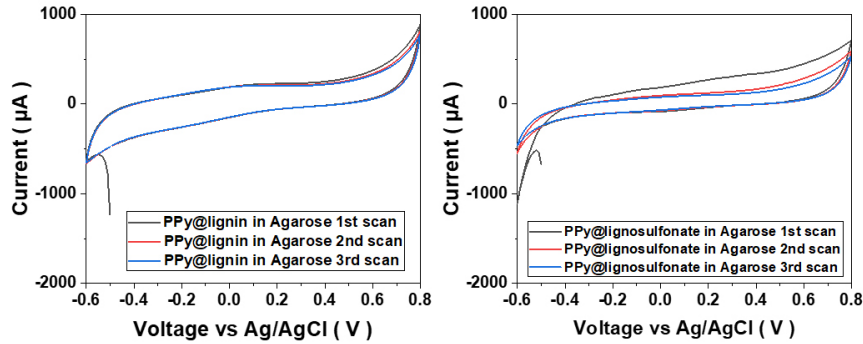


Figure 7. Cyclic voltammograms of conductive gels containing (a) polypyrrole@lignin and polypyrrole@lignosulfonate composites measured in base electrolyte.

있다[7].

이 실험에서 얻어진 두 복합소재들은 분말 형태이므로 활용상 제한이 따른다. 따라서, 이를 어떠한 매체에 도입하여 패드나 패치, 또는 덩어리 형태로 성형하여 활용하는 것이 효율적이라고 사료된다. 리그닌은 저독성 물질이므로 생체적합성 소재와 결합하여 활용한다면 매우 경쟁력이 높다고 볼 수 있다. 따라서, 아가로즈 젤에 도입하여 전도성 젤로 제조하고자 하였다[10]. Figure 6은 복합소재들을 각각 아가로즈 젤에 도입하여 얻어진 전도성 젤의 전자현미경 사진을 보여주고 있다. 이 전도성 젤들의 전기전도도는 각각  $10^{-6}$  S/m 수준으로 얻어졌으며, 이는 전도성 물질로 활용될 수 있는 최소한의 전기전도도는 충분히 상회하는 것으로 판단할 수 있다[8]. 전도도를 얻기 위해 복합재료의 함량을 50 wt%에서 200 wt%로 증가시키면서 전도도의 변화 양상을 고찰해 보았을 때, 약 150 wt%가 되면 적용가능한 전기전도도를 가지는 것을 확인하였다. Figure 6은 150 wt%의 전도성 복합재료를 포함한 아가로즈 젤의 표면을 보여주고 있는데, 약간의 거칠기(roughness)가 존재하나 비교적 고른 형상을 보여주고 있다.

위의 전자현미경 사진으로부터 복합소재들이 젤 속에 충분히 함침되어 있다는 사실을 간접적으로 확인할 수 있었다. 이를 검증하기 위해 복합소재들을 포함한 전도성 젤들을 각각 순환전압전류법으로 분석하여 Figure 7에 나타내었다. 여기서 보듯이 전도성 젤들의 순환전압전류법 분석 결과는 복합소재들과는 상당히 유사하다. 즉, 전도성 젤의 전기화학적 특성은 복합소재보다는 아가로즈 젤의 전기화학적 상태에 의존하고 있지 않다는 것을 나타내고 있다. 추가적인 분석이 필요하지만 Figure 7에 나타난 분석 결과는 리그닌 기반 복합소재들이 전도성 젤 속에 효과적으로 포함되어 있다는 것을 의미하는 것으로 판단할 수 있다. 전체적으로 두 전도성 젤의 프로파일은 매우 유사하다. Figure 2, 3에서 보여준 결과와는 다소 차이는 점은 모양이 다소 사각형으로 변화하였는데, 이는 아가로즈 젤에 복합소재가 도입이 되면 축전 성능이 다소간 향상된다는 것이다. 이는 아가로즈가 제공하는 수용 능력에서 기인한다고 판단할 수 있다. 그러나, 이에 대한 조금 더 심도 있는 실험적 분석이 반드시 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

폴리피롤과 비교할 때, 폴리피롤과 리그닌 복합소재는 리그닌의 전하 특성에 관계없이 매우 안정적인 전기화학적 물성을 지닌다는 점을 순환전압전류법 분석을 통해서 확인하였다. 얻어진 복합소재의 특성은 리그닌의 영향보다는 전도성 고분자의 특성에 더욱 의존하는 것을

알 수 있었다. 이 복합소재의 활용도 향상을 위한 방편으로 생체적합성을 지니는 아가로즈 젤에 도입하여 전도성 젤을 제조하고 전기전도도를 측정하였다. 전기적으로 절연성을 지니는 리그닌의 존재에도 불구하고 복합소재는 전도성을 지니는 것으로 확인되었다. 전도성 젤에 대한 전기화학적 분석을 통해서 복합소재가 아가로즈 젤 내부에 효과적으로 포함되어 있는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 아직도 많은 연구가 필요한 리그닌 물질 및 활용 분야 향후 연구에 있어 중요한 정보를 제공해 줄 것으로 기대된다.

#### 감 사

이 연구는 동덕여자대학교의 연구 지원으로 수행되었습니다. (2021년)

#### References

1. V. K. Thakur, M. K. Thakur, P. Raghavan, and M. R. Kessler, Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2**, 1072-1092 (2014).
2. Q. Fu, Y. Chen, and M. Sorieul, Wood-based flexible electronics, *ACS Nano*, **24**, 3528-3538 (2020).
3. D. Liang, X. Zhu, P. Dai, X. Lu, H. Guo, H. Que, D. Wang, T. He, C. Xu, H. M. Robin, Z. Luo, and X. Gu, Preparation of a novel lignin-based flame retardant for epoxy resin, *Mater. Chem. Phys.*, **259**, 124101 (2021).
4. S. Mohammadalnejhad, H. Almasi, M. Esmaili, Physical and release properties of poly(lactic acid)/nanosilver-decorated cellulose, chitosan, and lignocellulose nanofiber composite films, *Mater. Chem. Phys.*, **268**, 124719 (2021).
5. J. Bae, K. Shin, O. S. Kwon, Y. Hwang, J. An, A. Jang, H. J. Kim, and C.-S. Lee, A succinct review of refined chemical sensor systems based on conducting polymer-cyclodextrin hybrids, *J. Ind. Eng. Chem.*, **79**, 19-28 (2019).
6. F. N. Ajjan, M. J. Jafari, T. Rebis, T. Ederth, and O. Inganäs, Spectroelectrochemical investigation of redox states in a polypyrrole/lignin composite electrode material, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 12927-12937 (2015).
7. T. Rebis and G. Milczarek, A comparative study on the preparation of redox active bioorganic thin films based on lignosulfonate and conducting polymers, *Electrochim. Acta*, **204**, 108-117 (2016).
8. T. Rebis, M. Sobkowiak, and G. Milczarek, Electrocatalytic oxida-

- tion and detection of hydrazine at conducting polymer/lignosulfonate composite modified electrodes, *J. Electroanal. Chem.*, **780**, 257-263 (2016).
9. S. Y. Park, S. Park, H. J. Kim, Y. Im, and J. Bae, Preparation of Hydrogels Containing Polypyrrole@lignin Hybrids and Application in Sensors, *Appl. Chem. Eng.*, **31**, 411-415 (2020).
  10. Y. Hwang, J. Y. Park, O. S. Kwon, S. Joo, C.-S. Lee, and J. Bae, Incorporation of hydrogel as a sensing medium for recycle of sensing material in chemical sensors, *Appl. Surf. Sci.*, **429**, 258-263 (2018).
  11. P. Bober, N. Gavrilov, A. Kovalcik, J. Micusik, C. Unterweger, I. A. Pasti, I. Sedenkova, U. Acharya, J. Pflieger, S. K. Filippov, J. Kulicek, M. Omastova, S. Breitenbach, G. Ciric-Marjanovic, and J. Stejskal, Electrochemical properties of lignin/polypyrrole composites and their carbonized analogues, *Mater. Chem. Phys.*, **213**, 352-361 (2018).

#### Authors

Joonwon Bae; Ph.D., Associate Professor, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748 Republic of Korea; redsox7@dongduk.ac.kr, joonwonbae@gmail.com