

## 전도성 고분자와 절연성 고분자의 특성 및 동향

# Properties and Trends in Conductive and Insulating Polymers – A Review

### \*Corresponding author

Jaewoong Lee

(jaewlee@yu.ac.kr)

장아영, 이지수, 이상오<sup>1</sup>, 이재웅\*영남대학교 섬유시스템공학과, <sup>1</sup>영남대학교 의류패션학과Ayoung Jang, Jisu Lee, Sang Oh Lee<sup>1</sup>, and Jaewoong Lee\*

Department of Fiber System Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

<sup>1</sup>Department of Clothing and Fashion, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

Received December 06, 2023

Revised December 14, 2023

Accepted December 18, 2023

### Textile Coloration and Finishing

TCF 35-4/2023-12/274-283

© 2023 The Korean Society of Dyers and Finishers

**Abstract** Conductive polymers are polymers that conduct electricity like metal conductors. Unlike typical organic polymers, they are polymers that have the electrical, magnetic, and optical properties of metals or semiconductors. For Example, these conductive polymers include Polypyrrole (PPy), Polyaniline (PANI), and Polythiophene (PT). On the other hand, Insulating polymers do not conduct electricity well while providing insulation, which is the opposite of conductivity. With the exception of conductive polymers, most polymers are non-conductors. Insulating polymers include polyimide (PI), polystyrene (PS), and poly(vinyl alcohol) (PVOH, PVA, or PVAL). Although many different polymers exist, we have simply illustrated the properties and recent developments of conductive and insulating polymers, which have opposite properties.

**Keywords** *conductive polymer, polypyrrole, polyaniline, polythiophene, polyimide, insulating polymer, polystyrene, poly(vinyl alcohol)*

## 1. 서 론

전도성고분자는 도핑 전에는 절연체 이거나 반도체 이지만 p-도핑(부분적인 산화) 또는 n-도핑(부분적인 환원) 의해 전자가 비편재화(delocalization)되어 금속영역까지 전기전도도의 조절이 가능한 공유결합성 유기고분자이다<sup>1)</sup>. 이러한 전도성 고분자의 예로는, Polypyrrole(PPy), Polyaniline(PANI), Polythiophene(PT)등이 있으며, 전도성 고분자에 대한 연구로 2000년 Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid 및 Hideki Shirakawa가 노벨화학상을 수상했다. 이들이 발견한 전도성 고분자는 기존의 고분자 소재들이 가지고 있는 가공성을 가지면서 기존의 무기소재들이 가지고 있었던 전기적, 광학적 성질들을 갖는 새로운 소재이다. 이러한 새로운 소재의 발견은 다

양한 응용분야를 탄생시켰으며, 이들의 다양한 가능성으로 인하여 수많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다<sup>2,3)</sup>.

전도성 고분자는 여러 가지 상용 고분자가 지니고 있는 장점 이외에 전기 전도성을 지니고 있어 응용분야가 더욱 더 넓어질 것으로 예상이 된다. 다만, 이 전도성 고분자들은 상용 고분자들에 비해서 상대적으로 범용 용매에 대한 용해성이 떨어지고, 제조 과정도 복잡하므로 아직도 다소간의 한계점들이 존재하고 있다<sup>4)</sup>. 이러한 한계점들을 극복하기 위해 다양한 물질들과 결합하거나 혼합하는 등의 복합 소재 형태로 개발이 되어 왔다. 전도성 고분자와 다양한 물질의 복합 소재가 개발되어 물성 향상이 이루어진다면 상당한 부가가치를 발생시킬 수 있어 전도성 고분자는 특정 분야에서 매우 유망한 소재로 각광받고 있다<sup>5)</sup>.

한편, 전도성 고분자를 제외한 대부분의 고분자 소재는 전기가 잘 통하지 않는 절연체이다. 따라서 기본적으로 많은 고분

자 소재들이 Organic Field-Effect Transistor(OFET)용 유기 절연체로 사용이 가능하다. OFET의 성능 향상 및 용액 공정조건 등을 고려하였을 때, 일반적으로 사용되는 유기절연체는 poly(vinyl alcohol)(PVOH, PVA, or PVAl), Polyimide(PI), Poly(methyl methacrylate)(PMMA), polystyrene(PS) 및 CYTOP 등이 있다<sup>6)</sup>. 절연재료의 연구에는 원자의 핵 외 전자 배치가 중요한 의미를 갖는다.

원자의 바깥쪽에 위치하는 전자는 원자의 전기적, 기계적, 화학적 및 열적 성질의 대부분을 결정한다. 일반적으로 전기 절연재료에 요구되어지는 성능으로는 절연파괴전압이 높아야하는 것 뿐만 아니라 유전특성, 내열성, 내수성, 내후성, 기계적 특성, 내유성 등 종합적인 성질이 고려되어야 한다<sup>7)</sup>.

반면에 전기 절연성 고분자는 전자기기가 소형화되고 고집적화 됨에 따라 제한된 면적에서 열 발생이 크게 증가하고 있으며 축적된 열은 제품의 열화와 수명 단축을 초래하고 신뢰성을 떨어뜨리기 때문에 열관리 대책이 중요한 이슈로 등장하고 있다<sup>8)</sup>.

기존의 전도성 고분자와 절연성 고분자에 대해 정리된 리뷰 논문이 극히 제한적인 바, 본 논문에서는 전도성 고분자와 절연성 고분자에 대한 특성을 간략히 알아보고 그에 관련된 연구 내용을 정리 하고자 한다.

## 2. 전도성 고분자

유기 고분자의 가공성과 기계적인 성질을 가지면서 금속의 고유한 전기적·자기적 특성을 갖는 고분자를 전도성 고분자라고 부른다. 전도성 고분자는 Polypyrrole(PPy), Polyaniline(PANI), Polythiophene(PT) 등과 같이 conjugated된 π-전자 구조를 갖는 유기 고분자에서 발견되어지는데 doping에 의해 전자 또는 hole의 추가로 금속성에 준하는 전기전도도를 갖는다.

1862년 Letheby는 묽은 황산에서 아닐린의 양극 산화를 처음으로 보고했으며, 이로 인해 백금 전극에 불용성의 청흑색 빛이 나는 분말 침전물이 생성되었으며, 이때 생성된 물질이 PANI이다. 1876년 Goppelsroeder는 추가 실험을 통해 아닐린의 산화(Heinze 1989)에 의해 올리고머가 형성된다는 사실을 확립했다. Nattaet 등(1958)은 Polyacetylene을 합성했고 Dall'olio 등(1968)은 당시 피롤 블랙(pyrrole black)이라고 불리는 또 다른 화합물인 PPy를 발견했다. 그러나 1977년이 되어서야 Shirakawa와 그의 동료들은 Polyacetylene의 할로젠 도핑이 전도성을 극적으로 증가시켰다는 것을 보여주는 중요한 논문을 발표하였다<sup>9,10)</sup>.

현재 25개가 넘는 전도성 고분자 시스템이 보고되었으며 이들 중 주요한 전도성 고분자의 화학 구조를 Figure 1에 나타내었다<sup>11)</sup>. 이들은 교대로 탄소-탄소 이중 결합을 갖는 공액 구조를 갖고 있다는 공통점이 있다(Figure 1).

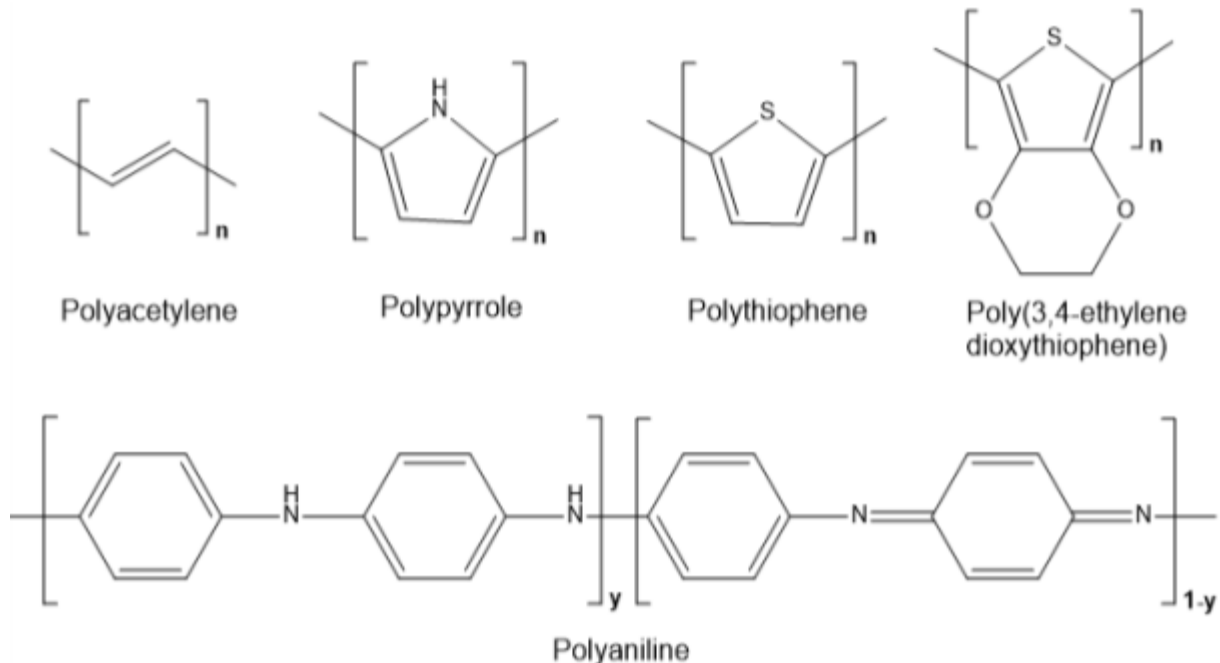


Figure 1. Chemical structures of representative conductive polymers<sup>9)</sup>.

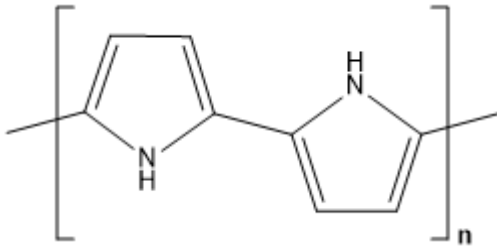


Figure 2. Chemical structure of polypyrrole<sup>13</sup>.

전기화학적 관점에서 볼 때 공액 고분자의 가장 중요한 측면은 전자 전도체로 작용하는 능력이다. 일반적으로 전기 전도성은 폴리머의 공액 길이와 폴리머에 존재하는 활성 도펀트의 양에 따라 결정될 수 있다. 전하 캐리어의 수는 다른 요인이 변하지 않는 한 도펀트 농도의 정도에 따라 달라지기 때문이다. 이 특성은 폴리머의 전하에 따라 재료 안팎으로 도펀트 이온이 이동하는 것과 함께 특정 전위에서 산화환원 전환을 통해 추가로 제어된다<sup>9</sup>.

### 2.1 Polypyrrole

Polypyrrole(PPy)은 피롤의 산화 중합을 통해 얻은 유기 고

분자이다.  $H(C_4H_2NH)_nH$ 의 화학식을 가지는 고체로, 이는 전자, 광학, 생물학 및 의료 분야에 사용되는 본질적으로 전도성이 있는 고분자이다(Figure 2).

PPy의 첫 번째 사례 중 일부는 피롤 마그네슘 브로마이드 (pyrrole magnesium bromide)에서 피롤 블랙이 형성됨을 보고한 Angeli와 Pieroni에 의해 1919년에 보고되었다. 그 이후로 피롤 산화 반응이 연구되어 과학 문헌에 보고되었다<sup>12</sup>. PPy는 쉬운 합성, 산화된 형태의 안정성, 높은 전기 전도도 및 우수한 산화환원 특성으로 인해 수많은 전도성 고분자 중에서 가장 광범위하게 연구되었다. PPy는 산화된 형태의 양전하 전도성 고분자이며, 과산화되면 전도성과 전하를 잃는다. 중립 상태에서는 기계적으로 약하고 절연성이 있다<sup>13</sup>. PPy은 높은 안정성, 향상된 전도성으로 인해 상업적 관심이 증가하고 있다. PPy은 단독 중합체 및 복합물을 비교적 쉽게 형성할 수 있다는 특징을 갖는다. PPy은 과산화수소의 존재 하에서 피롤 단량체의 화학적 산화에 의해 처음 제조되었으며 흑색 분말 물질이었다. PPy은 도핑되지 않은 순수한 상태에서 절연 물질처럼 행동하며 Br 또는 I와 같은 할로겐 전자 수용체로 도핑될 때  $10^{-5} \text{ s/cm}$ 의 일정한 전도도를 나타낸다<sup>14,15</sup>.

전도성 고분자의 한계점을 극복하기 위해 다양한 이종 물질들과 혼합하거나 결합하여 복합 소재의 형태로 개발이 되어왔다. PPy를 리그닌 표면에 코팅을 시켜 리그닌 표면에 PPy를 형성시키고 이를 하이드로젤에 도입시켜 전기전도성을 지니는 하이드로젤을 얻었을 뿐만 아니라 생체적합성을 개선한 센서로

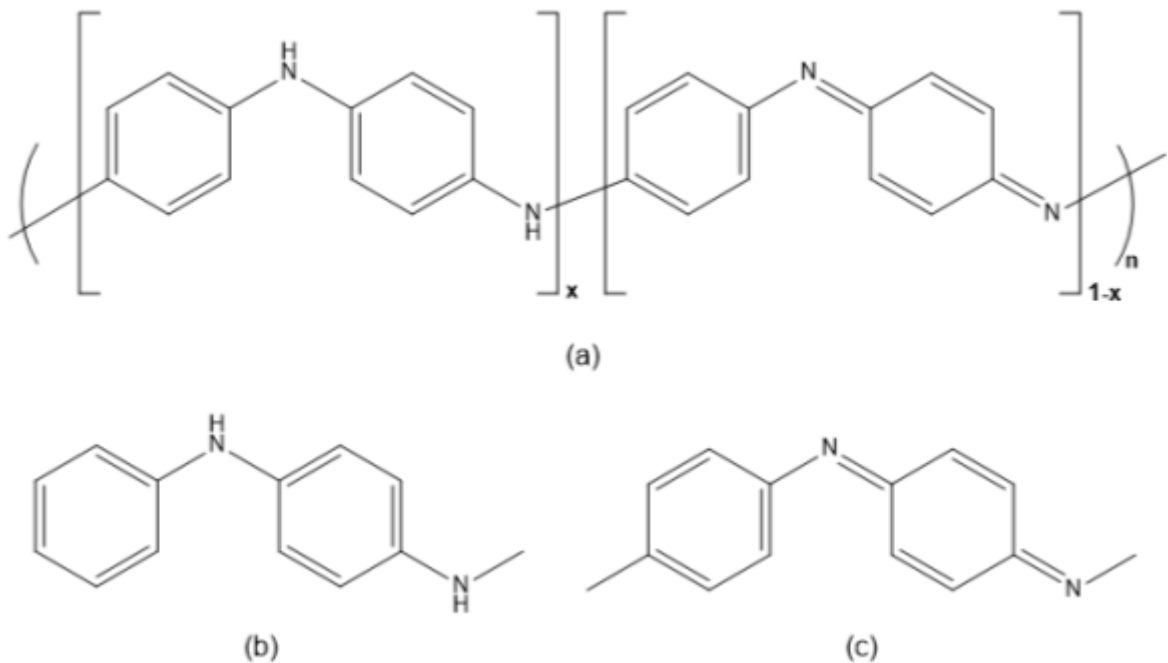


Figure 3. A general chemical structure of polyaniline and its repeating units. (a) A general chemical structure of polyaniline, (b) Reduced repeating unit, and (c) Oxidized repeating unit<sup>17</sup>.

활용을 하였다<sup>16)</sup>.

### 2.2 Polyaniline

Polyaniline(PANI)은 가장 오래된 전도성 고분자 중 하나이며, 광범위하게 검토되었다. 폴리피롤이 그 뒤를 잇는 가장 많이 연구된 전도성 고분자이다. 19세기에 처음 발견된 PANI은 원래 “Aniline Black”으로 알려졌다. 나중에 이 물질이 전기적으로 전도성이 있다는 사실이 밝혀졌고 연구가 계속 되었다. 도핑이라고도 알려진 고분자의 양성자화는 PANI가 전기 전도성을 갖게 되는 메커니즘이다<sup>17,18)</sup>. PANI는 도핑된 상태에서 전도성을 가져오는 공액구조를 사용한다. PANI는 높은 열적, 전기적, 환경적/화학적 안정성과 같은 독특한 특성과 합리적인 가격을 지닌 전도성 계열 중 널리 사용되는 고분자이다<sup>19)</sup>.

PANI의 화학 구조를 결정하는 가장 중요한 두 가지 요소는 산화환원 상태와 도핑 수준이다. PANI은 주로 세 가지 구별 가능한 산화 상태, 즉 완전히 환원된 상태(leucoemeraldine), 절반 산화된 상태(emeraldine), 완전히 산화된 상태(permigraniline)를 가지며, 그 사이에 사실상 무한한 산화 상태가 존재한다. 따라서 원칙적으로 PANI은 완전히 환원된 형태부터 완전히 산화된 형태까지 산화 상태의 연속체로 존재할 수 있다. PANI의 일반적인 화학 구조는 Figure 3과 같다<sup>17,20,21)</sup>.

PANI은 바이오 센서, 전자 장치 및 생체 의학 응용 분야와 같은 여러 분야에서 광범위한 응용 가능성을 가지고 있다. 그러나 PANI은 분해속도가 늦고 가공성이 좋지 않아 현재 적용 분야가 제한적이다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 PANI에 나노 셀룰로오스를 혼합하여 항균제, 항산화제, 센서, 전자기 차폐장치, 연료 전지 및 생의학 응용분야에서 상당한 잠재력을

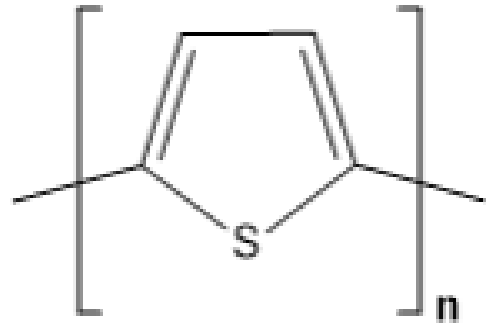


Figure 4. Polythiophene(PT)<sup>23)</sup>.

보여주고 있다. 또한 순수한 PANI는 본질적으로 세포독성이 있지만 셀룰로오스와 혼합하면 유망한 결과가 얻어져 생분해성 전도성 물질 개발을 위한 신기술로 개발이 되었다<sup>22)</sup>.

### 2.3 Polythiophene

Polythiophene(PT)은 황 헤테로고리로 중합된 화합물이다. PT는 불용성 유색 고체로, 화학구조는 Figure 4에 나타내었다<sup>23)</sup>. 상대적인 합성 용이성, 우수한 열 및 산화 안정성, 높은 전자 운반체 이동성 및 가공 용이성으로 인해 전도성 고분자 분야에서 오랫동안 중요한 역할을 해 왔으며 전계 효과 트랜지스터와 같은 전자 응용 분야에서 널리 사용되었다.

PT는 산화되면 전도성을 띠게 된다. 전기전도성은 폴리머의 백본(Backbone)을 따라 전자가 비편재화되어 발생한다<sup>24-26)</sup>.

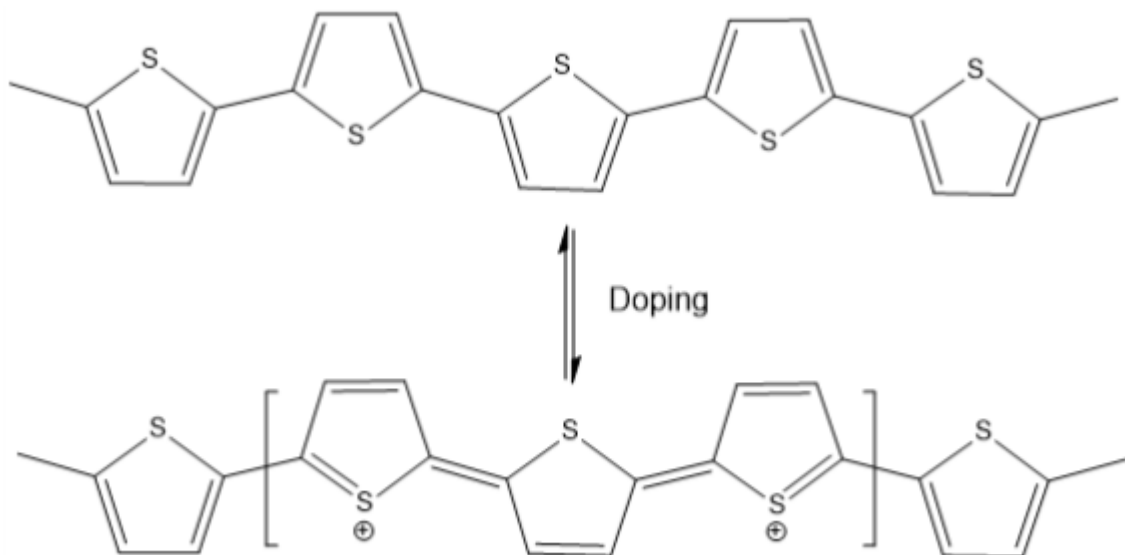


Figure 5. Doping of polythiophene(PT)<sup>28)</sup>.

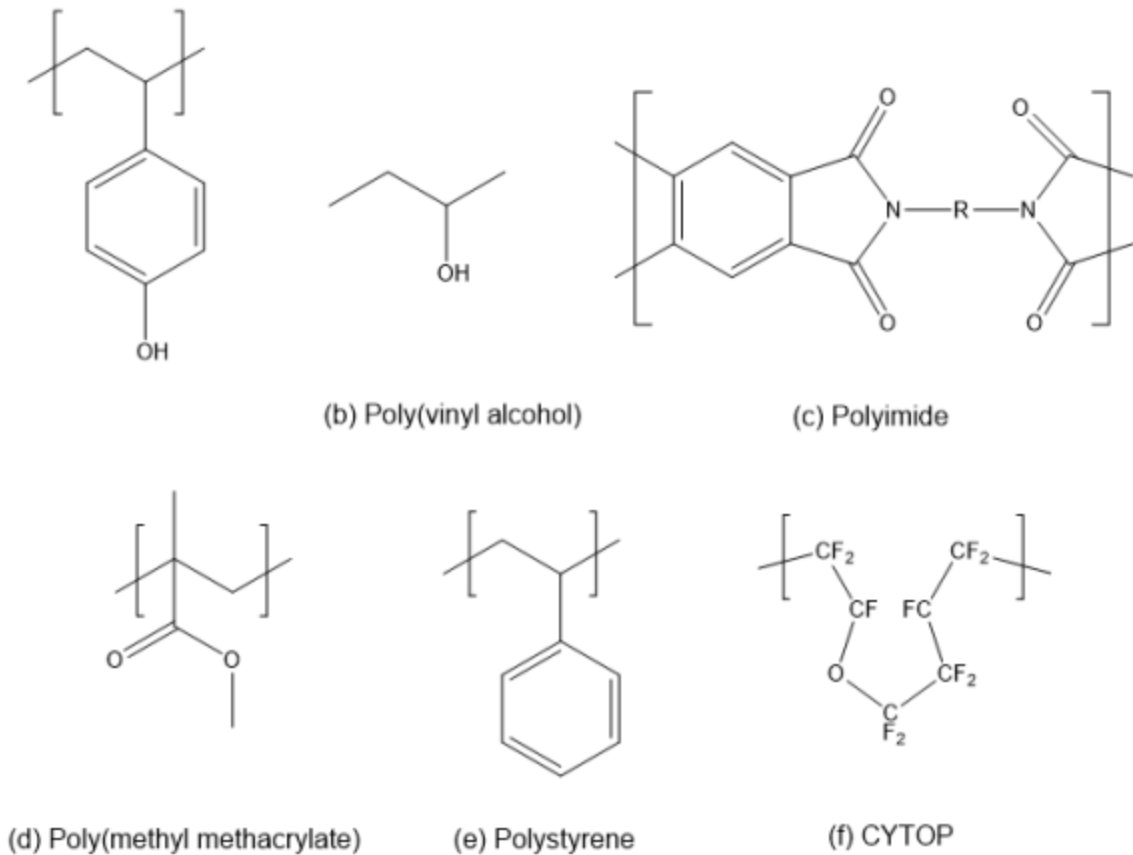


Figure 6. Molecular structure of representative organic insulating polymers<sup>35)</sup>.

PT는 일반적인 유기 고분자로 대부분의 용매에 잘 녹지 않는 빨간색 고체이다. 그러나 산화제로 처리하면 물질이 어두운 색을 띠고 전기 전도성이 된다. 산화를 “도핑”이라고 한다<sup>27)</sup>.

P-도핑은 이러한 비편재화된 궤도에서 전자의 이동성을 증가시키며 폴리머는 높은 전도성을 갖게 된다(Figure 5). PT의 전기 전도도는 고분자 골격을 따라 전자가 비편재화 되었기 때문에 발생한다. PT는 산화제로 처리하면 전기 전도성이 되는 일반 중합체이다. I 및 Br과 같은 PT을 도핑하는 데에는 다양한 시약이 사용이 된다<sup>28,29)</sup>. P-도핑의 전자는 고분자 골격의 HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital)에서 도펀트(dopant)로 이동하며 정공을 만든다. 반면 n-도핑의 전자는 고분자 골격의 LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital)에서 이동하여 전하 운반자의 역할을 한다. 높은 안정성을 가지는 P-도핑에 집중되어 있다<sup>30,31)</sup>.

PT는 도핑되지 않은 상태의 높은 안정성, 구조적 변형의 용이성 및 용액 가공성으로 인해 장치 응용 분야에서 큰 관심을 받고 있다. PT는 산화되면서 전도성을 띠게 되는데, PT 필름은 전기적, 광학적 및 물리적 특성을 고려할 때 유기 태양 전지 및 염료 감응형 태양 전지에서 PT 필름의 사용은 크게 증가했다. PT 기반 고분자는 반도체에서 도체로 전이할 수 있는 능

력과 다른 물질과 적층하여 도핑이나 화학적 변형을 통해 물질을 쉽게 제어할 수 있다는 점 때문에 전계효과 트랜지스터, 메모리 소자, 유기발광 다이오드, 태양전지 등에 널리 사용되고 있다<sup>32,33)</sup>.

### 3. 절연성 고분자

일반적으로 사용되는 고분자 절연체는 우수한 절연성과 광범위하게 변화할 수 있는 기계적 특성 및 화학적 안정성으로 다양한 절연 분야에 사용되고 있다<sup>34)</sup>. 전도성 고분자를 제외한 대부분의 고분자들은 전기가 용이하게 전도되지 않는 부도체이다<sup>35)</sup>.

Figure 6은 대표적인 유기절연체용 고분자의 분자구조를 나타낸 것이다. 절연성을 판단할 때는 절연파괴 강도를 측정한다. 절연파괴는 유전체(절연체)에서 강한 전기장이 인가될 때 수많은 전자들이 갑자기 전도대역 안으로 여기되어 유전체 전류 흐름이 급격히 증가되어 전기 절연성이 소실된다. 이때가 임계치를 초과하면 갑작스런 큰 방전 전류가 유전체를 통해 흐르게

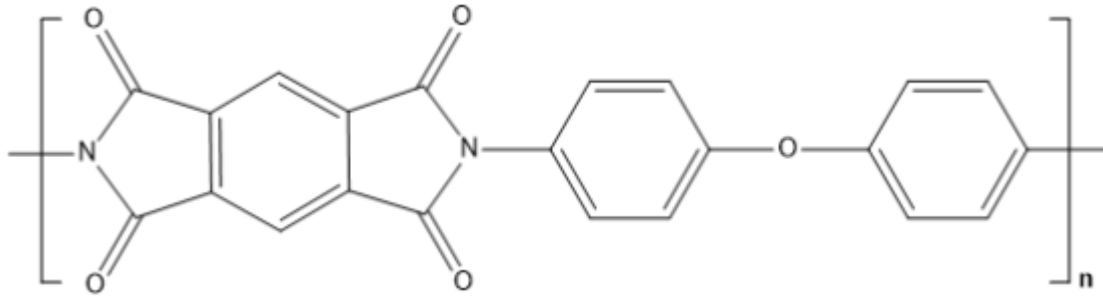


Figure 7. Chemical structural formula of kapton, a representative polyimide(PI) film<sup>39</sup>.

되고 결국, 유전체가 국부적으로 재료의 손상(녹임, 태움 등) 또는 파괴가 일어나는 현상이다. 따라서 절연성 고분자에는 높은 절연파괴 성능이 요구되어진다<sup>36</sup>.

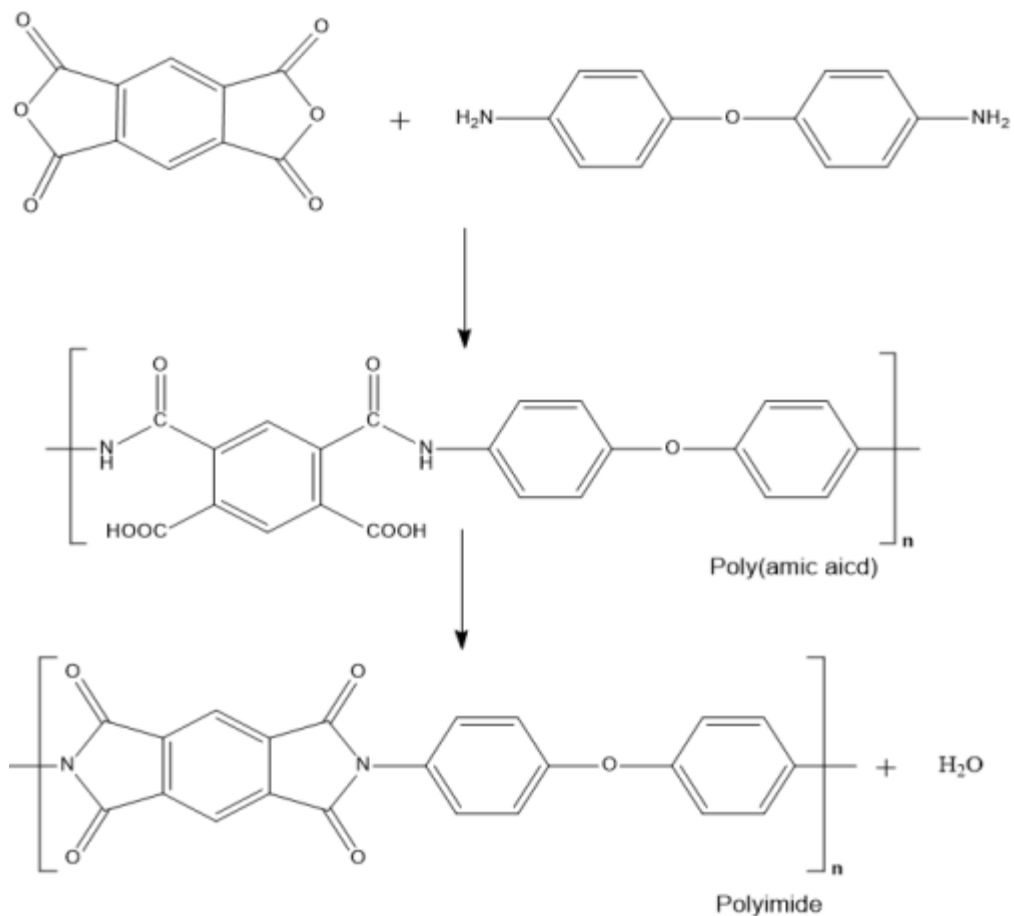


Figure 8. Synthesis route of representative polyimide(PI) PMDA-ODA<sup>39</sup>.

### 3.1 Polyimide

Polyimide(PI)는 이미드 단량체의 중합체로, 1955년 이후로 대량생산되어 왔다. PI는 고온의 연료 전지, 디스플레이, 다양한 군사적 용도와 같은 견고한 유기 재료를 요구하는 분야에서 다양하게 사용되고 있다. 이는 PI가 가지고 있는 높은 내열성의 성질 때문이다. Figure 7과 같이 고전적인 PI는 피로멜리트산 이무수물(pyromellitic dianhydride)과 4,4'-옥시디아닐린(4,4'-oxydianiline)의 축합에 의해 생성되는 kapton이다<sup>37,38</sup>.

방향족 PI는 diamine와 방향족 anhydride 반응을 통해 합성되며, 이로 인해 다양한 성질의 PI가 합성이 된다. PI는 2단계의 반응을 통해 PI의 전구체인 Polyamic acid(PAA)가 제조가 되는데, 이를 Figure 8에 나타내었다<sup>39</sup>.

제1단계는 PAA제조 단계로 diamine이 용해된 반응용액에 dianhydride가 첨가되어 개환, 중부가 반응으로 인해 만들어진 다. 이때 중합도를 높이기 위해서 요구되는 것은 반응 온도, 용매의 수분 함유량, 단량체의 순도조절 등이 있다. 사용되는 반응 용매로는 N,N-dimethylformamide(DMF)와 N,N-dimethylacetamide(DMAC)등의 극성 유기용매가 주로 사용된다. PAA는 diamine와 dianhydride의 카보닐기의 C 원자 간의 친핵성 치환반응(nucleophilic substitution reaction)에 의하여 생성되기 때문에 반응의 속도는 diamine의 친핵성과 카보닐기의 친전자성에 의해 결정이 된다<sup>39-41</sup>. 2단계는 1단계에서 제조한 PAA를 화학적 이미드화를 하는 방법 또는 350°C 이상에서 열적 이미드화 하는 방법이 있다. 열적 이미드화의 열처리를 통해 탈수 및 고리화 반응이 일어나게 되면 PAA가 이미드화하여 PI를 얻을 수 있다. 또한 열적 이미드화를 할 때 촉매나 첨가제를 첨가한다면 열처리 온도를 200°C의 수준까지 대폭 낮추는 방법도 있다<sup>42-44</sup>.

PI는 온도 안정성, 용매에 대한 저항성, 기계적 강도 등 우수한 특성으로 인해 항공우주 산업, 의료 및 전자 장치, 센서와 같은 첨단 기술 응용 분야에서 필름, 섬유, 나노섬유, 멤브레인, 접착제 또는 코팅과 같은 다양한 형태로 사용된다. PI코팅은 배터리의 기계적 강도와 열수축 저항성을 향상시키는 데에 사용이 된다. 기존의 140°C까지 내열성을 갖고 시판 PE 분리막과 달리 열수축 현상이 발생하지 않는 PI 에어로겔-폴리에틸렌 이중층 복합 분리막은 안전성이 높은 리튬이온 배터리의 폭발 및 과충전에 대비한 안전한 사용환경을 제공한다<sup>45</sup>.

### 3.2 Polystyrene

Polystyrene(PS) 또는 폴리스티롤(polystyrol)은 열가소성 플라스틱의 하나로 가볍고, 맛과 냄새가 없다. 생활 용품, 장난감, 전기절연체, 라디오, 텔레비전 케이스, 포장재 등에 사용한다. PS은 취성이 있어 단독으로 사용되는 경우는 거의 없고 다른 중합체와 혼합해서 사용하는 경우가 많다. 부타디엔 고무(butadiene rubber)를 섞어서 SBR, SBS, HIPS 등으로 사용된다. 폴리스타이렌(PS)는 Figure 9와 같이 방향족 탄화수소 스티렌의 단량체로 만든 합성 중합체이다<sup>46,47</sup>.

열가소성 폴리머인 PS은 실온에서 고체상태이지만 유리 전이 온도(Tg)인 약 100°C 이상으로 가열하면 유동했다가 냉각이 되

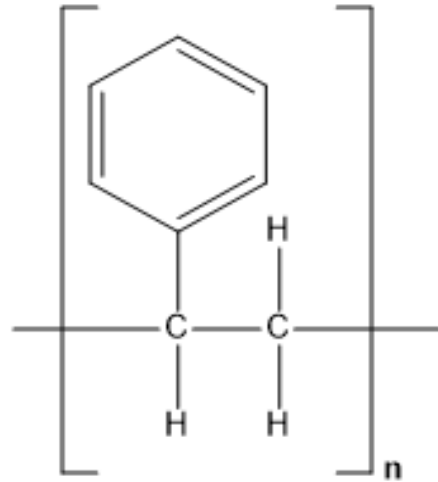


Figure 9. Polystyrene(PS)<sup>46</sup>.

면 다시 단단해진다. 이러한 온도 거동은 압출과 성형 및 진공 성형에 활용이 된다. 왜냐하면 미세한 디테일을 가진 주형으로 주조할 수 있기 때문이다. 온도 거동은 광가교결합에 의해 제어될 수 있다<sup>48,49</sup>.

Expanded polystyrene(EPS)는 PS를 발포제의 작용으로 팽창시킨 것이다. EPS는 가벼우면서도 단단한 폼을 갖고 있어 보온성과 내충격성이 뛰어나 다양한 용도로 널리 사용되는 단열 재료로 최근 들어 건설산업 분야에서 많이 적용하고 있다. EPS의 폼은 약 98%의 공기를 함유한 작은 구형 입자로 구성된 경량의 다공성 플라스틱이다. 이 미세 다공형 폐쇄 셀 구조는 EPS에 탁월한 절연 및 충격 흡수 특성을 제공한다<sup>50</sup>. 한편, ASTM 표준에 따르면 PS은 생분해가 되지 않는 것으로 간주된다. 이는 외부 환경, 해안과 수로를 따라, 특히 거품 형태로 그리고 바다에서 쓰레기 형태로 축적되고 있다<sup>51</sup>.

### 3.3 Poly(vinyl alcohol)

Poly(vinyl alcohol)(PVOH, PVA, or PVAl)은 수용성 합성 고분자이다. 무색, 무취이며 다용도성, 물에 대한 높은 용해도, 저렴한 비용, 무독성, 유연한 친수성 네트워크 및 무엇보다도 전자적 특성으로 인해 유기 박막 트랜지스터의 유전체 재료로 적용되는 가장 많이 연구된 폴리머일 것이다. PVA는 분자구조에 극성의 -OH 그룹을 가지고 있어 높은 유전율을 가지는 특성이 있어 저전압 구동에 유리하다<sup>52</sup>. PVA는 비닐아세테이트 단량체를 중합하여 얻은 폴리비닐아세테이트(PVAc)를 가수분해하여 생산된다. 가수분해 반응은 불완전하여 다양한 가수분해 정도를 갖는 폴리머가 생성된다<sup>53</sup>. PVA의 화학적 구조의 사진은 Figure 10에 나타났다. 폴리비닐알코올은 종종 PVA라는 약어로 지칭되지만, 보다 일반적으로 PVA는 폴리비닐 아세테이트를 지칭하며 목재 접착제, 실러 및 수용성 플라스틱으로 일반적으로 사용된다<sup>54,55</sup>.

유기 전자 분야의 최근 연구는 환경 친화적이면서 전기적 특

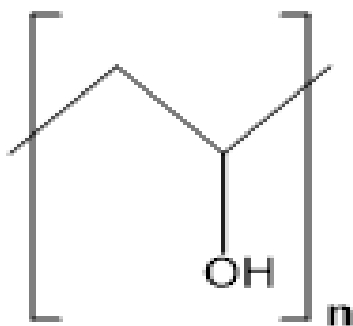


Figure 10. Polyvinyl alcohol<sup>54)</sup>.

성을 발현하는 소재를 찾는 데 중점을 두고 있다. OFET에 사용되는 일반적인 유전체 재료로는 PMMA, PVP, PS 등의 폴리머가 있다. 이러한 폴리머는 가볍고 유연한 전자 제품을 만들 수 있지만 생분해성 물질이 아니며 유기 용매에 용해되는 특성을 지니고 있다. PVA는 직물, 접착제 및 코팅 산업에 사용되는 저가형 폴리머로 물과 같은 환경 친화적인 용매에 쉽게 용해되며 적절한 미생물이 있는 경우 생분해가 된다. PVA의 단점 중 하나는 습기에 민감하여 유전체 특성을 크게 변화시킬 수 있다는 점이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 CNC와 PVA를 블렌딩하여 OFET소자에 적용을 한다. CNC를 첨가하여도 PVA의 유전체 특성이 보존 되었으며, CNC가 유기 전자 장치용 수용성 폴리머의 가공성을 개선하기 위해서 PVA에 환경 친화적인 첨가제로 사용 되었다<sup>56)</sup>.

#### 4. 결 론

전도성 고분자는 우수한 전기적 특성, 우수한 가공성과 제조의 편리성으로 반도체와 전기소자 등 많은 분야에서 응용이 되어왔다. 특히, 전도성 고분자의 한계점을 극복하기 위해 이종의 물질을 도핑하거나, 서로 다른 도전성 고분자의 복합화를 통한 연구가 활발히 보고 되었다. Polypyrrole(PPy)의 경우, 리그닌의 표면에 PPy를 코팅하여 매우 안정적이고 섬세한 센서 소재의 제조가 가능했으며, 이를 하이드로젤에 도입하여 생체적합성이 개선된 소재의 제조 가능하다는 점이 긍정적으로 보인다. 이처럼 전기전도도가 도체에 속하는 합성금속으로 산화환원이 가능하여 전지 등의 전극 재료로, 반도체 특성을 가지고 있어 발광다이오드, 포토다이오드와 같은 광 소자나 전계효과 트랜지스터와 같은 전자소자 등으로 응용할 수 있으며, 정전기 방지막, 산화 방지막, 전기발광소자 등의 실제 응용분야가 생성되고 있다. 전도성 고분자 소재의 안정성 및 성능을 개선하는 노력이 지속적으로 진행되고 있으며, 이들 소재의 가공을 위한 공정 기술들이 발전해 나가고 있다. 전도성 고분자가 미래에는 전자 소자의 핵심재료로 사용될 것이 확실시된다. 또한 전도성 고분자를 이용한 고기능, 고생체 적합성의 생체 센서 및 생체

전극에 대한 최근의 연구에 활발한 연구의 결과로 머지않아 센서 및 전극의 상용화가 기대된다.

절연재료 개발과 더불어 친환경 케이블 절연재료, 몰드변압기 등 각종 전기전자부품의 절연재료로서 사용할 수 있는 절연재료 응용기술이 연구되어지고 있다. 최근 수 십 년간 OFET를 비롯한 유기물 기반의 유연 전자소자는 소자 성능 측면에서 괄목할 만한 성과를 보여주었다. 하지만 유연성과 대면적 저가 공정과 같은 장점에도 불구하고 상용화까지는 아직 해결해야 할 부분들이 상당히 남아있다. 반면, 외부에서 장기간 절연재료를 사용하면 다양한 환경적 요인들로 인해 절연재료의 특성이 변화하면서 절연파괴가 발생하거나 열화로 인한 절연성능 저하가 발생할 수 있다. 따라서 절연재료의 신뢰도를 높이기 위해 전기적, 열적 요인들이 열화에 얼마나 많은 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다. 또한 절연성능을 향상시키기 위해서는 절연재료 자체를 명확하게 이해한다면 미래의 유연 전자소자의 유기절연체로 충분히 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 20011293, 고내열(200도 이상) 전기절연지 및 전기자동차용 구동모터 개발), No.P0012770, ICT융합섬유 제조과정 전문인력 양성).

#### References

1. E. O. Kim, S. B. Park, S. H. Lee, and S. J. Lee, Light Emitting Diodes Based on Polyaniline, *Journal of the Korean Chemical Society*, **45**(2), 156(2001).
2. A. G. M. Diarmid, Synthetic Metals: A Novel Role for Organic Polymers (Nobel Lecture), *Angew. Chem. Int. Ed.*, **40**(14), 2581(2001).
3. I. Salzman, G. Heimel, M. Oehzelt, S. Winkler, and N. Koch, Molecular Electrical Doping of Organic Semiconductors: Fundamental Mechanisms and Emerging Dopant Design Rules, *Acc Chem Res.*, **49**(3), 370(2016).
4. J. Bae, Identification of Toxic Chemicals Using Polypyrrole-cyclodextrin Hybrids, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 186(2019).
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(2019).
6. S. Park, S. Sung, W. J. Lee, and M. H. Yoon, Dielectric Materials for Large-Area and Flexible Electronics,



- Cross-Linked Polymer Dielectrics*, **7**, 226(2016).
7. J. P. Cárdenas-R, M. Cea, K. Santín, G. Valdés, R. Hunter, and R. Navia, Characterization and Application of a Natural Polymer Obtained from *Hydrangea macrophylla* as a Thermal Insulation Biomaterial, *Composites Part B: Engineering*, **132**, 10(2018).
  8. N. Kim, J. Y. Park, D. K. Kim, M. Y. Lee, C. M. Hong, S. H. Bae, J. H. Yoon, and J. H. Yun, Thermal Conductivity Studies on Electrically Insulating Polymer Composites in Relation to Mechanical Properties, *Polym. Korea*, **44**(4), 559(2020).
  9. D. D. Ateh, H. A. Navsaria, and P. Vadgama, Polypyrrole-based Conducting Polymers and Interactions with Biological Tissues, *J. R. Soc. Int.*, **3**, 741(2006).
  10. S. B. Adejolu and G. G. Wallace, Conducting Polymers and the Bioanalytical Sciences: New Tools for Biomolecular Communications- A Review, *Analyst*, **1996**, 699(121).
  11. J. Yang, S. Kim, Y. Jang, H. Jo, and J. Y. Lee, Electrically Conducting Polymer-Based Biosensors and Bioelectrodes Applications, *KIC News*, **18**(6), 29(2015).
  12. T. V. Vernitskaya and O. N. Efimov, Polypyrrole: a Conducting Polymer; its Synthesis, Properties and Applications, *Russ. Chem. Rev.*, **66**(5), 443(1997).
  13. K. Deshmukh, M. B. Ahamed, R. R. Deshmukh, S. K. K. Pasha, P. R. Bhagat, and K. Chidambaram, Biopolymer Composites with High Dielectric Performance, *Interface Engineering*, **3**, 27(2017).
  14. R. Kiebooms, R. Menon, and K. H. Lee, Synthesis, Electrical, and Optical Properties of Conjugated Polymers, *Elsevier*, **8**(1), 1(2001).
  15. A. D. A. Bhattacharya and S. Das, Electrochemical Preparation and Study of Transport Properties of Polypyrrole Doped with Unsaturated Organic Sulfonates, *Polymer*, **34**, 4375(1996).
  16. 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**(4), 411(2020).
  17. E. Song and J. W. Choi, Conducting Polyaniline Nanowire and Its Applications in Chemiresistive Sensing, **3**(3), 498(2013).
  18. G. Zamiri and A. S. M. A. Haseeb, Recent Trends and Developments in Graphene/Conducting Polymer Nanocomposites Chemiresistive Sensors, *Materials(Basel)*, **13**(15), 3311(2020).
  19. R. S. Mohammad and Z. Payam, Polyaniline/graphene-based Nanocomposites, *Fundamentals and Emerging Applications of Polyaniline*, **10**, 165(2019).
  20. S. Stafström, J. L. Brédas, A. J. Epstein, H. S. Woo, D. B. Tanner, W. S. Huang, and A. G. MacDiarmid, Polaron Lattice in Highly Conducting Polyaniline: Theoretical and Optical Studie, *Phys. Rev.*, **59**, 1464(1987).
  21. A. J. Heeger, Semiconducting and Metallic Polymers: The Fourth Generation of Polymeric Materials, *J. Phys. Chem. B*, **105**, 8475(2001).
  22. K. R. Ashvinder, F. Scarpa, and V. K. Thakur, Cellulose /polyaniline Hybrid Nanocomposites: Design, Fabrication, and Emerging Multidimensional Applications, *Industrial Crops and Products Part A*, **187**, 115356(2022).
  23. G. Tourillon and F. Garnier, New Electrochemically Generated Organic Conducting Polymers, *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, **135**(1), 173(1982).
  24. B. N. Christian and I. McCulloch, Recent Advances in Transistor Performance of Polythiophenes, *Progress in Polymer Science*, **38**(12), 2053(2013).
  25. S. Zuppolini, V. Guarino, and A. Borriello, Advanced Organic Electroactive Nanomaterials for Biomedical Use, *Healthcare, Environmental and Energy*, **6**, 141(2020).
  26. M. P. Robert and C. T. Barry, The Development of Conjugated Polymers as the Cornerstone of Organic Electronics, *Polymer*, **207**, 122874(2020).
  27. M. Kobayashi, J. Chen, T. C. Chung, F. Moraes, A. J. Heeger, and F. Wudl, Synthesis and Properties of Chemically Coupled Poly(thiophene), *Synthetic Metals*, **9**(1), 77(1984).
  28. M. T. Ramesan and K. Suhailath, Role of Nanoparticles on Polymer Composites, Micro and Nano Fibrillar Composites (MFCs and NFCs) from Polymer Blends, *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, **13**, 301(2017).
  29. P. Vahdatiyekta, M. Zniber, J. Bobacka, and T. P. Huyn, A Review on Conjugated Polymer-based Electronic Tongues, *Analytica Chimica Acta*, **1221**, 340114(2022).
  30. N. Ka and C. S. Rout, Conducting Polymers: a Comprehensive Review on Recent Advances in Synthesis, Properties and Applications, *RSC Advances*, **10**, 5659(2021).
  31. R. Balint, N. J. Cassidy, and S. H. Cartmell, Conductive Polymers: Towards a Smart Biomaterial for Tissue Engineering, *Acta Biomaterialia*, **10**(6), 2341(2014).
  32. P. K. Thaneshwor, K. G. Patrick, G. Schreckenbach, and S. F. Michael, Polythiophene: From Fundamental Perspectives to Applications, *Chem. Mater.*, **29**, 10248(2017).
  33. A. Husain, S. Ahmad, and F. Mohammad, Synthesis, Characterisation and Ethanol Sensing Application of Polythiophene/graphene Nanocomposite, *Materials Chemistry and Physics*, **239**, 122324(2020).
  34. H. G. Lee and J. G. Kim, A Study on Oxidation Induction Time Lifetime Analysis of Polymer Insulation Materials, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers(KIIEE)*, **36**(4), 38(2022).

35. Y. H. Kim, Requirements and Representative Materials for Organic Insulating, *Materials*, **8**, 6921(2017).
36. J. M. Im and H. H. Choi, Irreversible Charge Trapping at the Semiconductor/Polymer Interface of Organic Field-Effect Transistors, *Journal of Adhesion and Interface*, **21**(4), 129(2020).
37. W. W. Wright and H. A. Michael, "Polyimides in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley-VCH, Germany, 2002.
38. W. M. Laurence, Polyimides, Effect of Temperature and Other Factors on Plastics and Elastomers, *Polyimides*, **5**, 213(2008).
39. S. W. Lee, J. Y. Kim, S. J. Kwon, and H. M. Seo, Polyimide and Polyimide Composite Films, *Polymer Science and Technology*, **24**(1), 17(2013).
40. B. Hojjati, R. Sui, and P. A. Charpentier, Synthesis of TiO<sub>2</sub>/PAA Nanocomposite by RAFT Polymerization, *Polymer*, **48**, 5850(2007).
41. S. S. Madaeni, S. Zinadini, and V. Vatanpour, A New Approach to Improve Antifouling Property of PVDF Membrane Using in Situ Polymerization of PAA Functionalized TiO<sub>2</sub> Nanoparticles, *Journal of Membrane Science*, **380**(1-2), 155(2011).
42. C. Huang, J. Li, D. Sun, R. Xuan, Y. Sui, T. Li, L. Shang, G. Zhang, R. Sun, and C. P. Wong, Comprehensive Properties Study of Low-temperature Imidized Polyimide with Curing Accelerators, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 14886(2020).
43. Y. Kim and J. Chang, Transparent Polyimide Nanocomposite Films with Various Equi-biaxial Stretching Ratios, *The Polymer Society of Korea*, **36**(4), 478(2012).
44. B. J. Lee, A Study of the Photosensitive Characteristic and Fabrication of Polyimide Thin Film by Dry Processing, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, **56**(1), 139(2007).
45. A. S. Hicyilmaz and A. C. Bedeloglu, Applications of Polyimide Coatings: a Review, *SN Applied Sciences*, **3**, 363(2021).
46. J. Scheirs and D. Priddy, Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**(14), 4462(2004).
47. A. Merrington, Recycling of Plastics, Applied Plastics Engineering Handbook, Processing and Mater, *Plastics Design Library*, **11**, 177(2011).
48. G. T. Carroll, M. E. Sojka, X. Lei, N. J. Turro, and J. T. Koberstein, Photoactive Additives for Cross-Linking Polymer Films: Inhibition of Dewetting in Thin Polymer Films, *Langmuir*, **22**(18), 7748(2006).
49. Y. H. Weng, H. K. Tsao, and Y. J. Sheng, Patterning Dewetting and Self-Healing of Polymer Nanofilms on a Brush Layer, *The Journal of Physical Chemistry C*, **123**(6), 3560(2019).
50. N. H. R. Sulong, S. A. S. Mustapa, and M. K. A. Rashid, Application of Expanded Polystyrene(EPS) in Buildings Andconstructions: A Review, *Journal of Applied Polymer Science*, **136**(20), 47529(2019).
51. B. G. Kwon, K. Saido, K. Koizumi, H. Sato, N. Ogawa, S. Y. Chung, T. Kusui, Y. Kodera, and K. Kogure, Regional Distribution of Styrene Analogues Generated from Polystyrene Degradation Along the Coastlines of the North-East Pacific Ocean and Hawaii, *Environmental Pollution*, **188**, 45(2014).
52. H. L. Park, S. H. Lee, M. H. Kim, and H. Kim, Effect of Photoresponsive Polymer Gate Insulators on Performance of Poly(4-vinylphenol)-based Organic Phototransistors, *ACS Appl. Mater. and Interf.*, **10**, 24055(2018).
53. E. A. V. Etten, E. S. Ximenes, L. T. Tarasconi, T. S. G. Irene, M. C. F. Maria, and H. Boudinov, Insulating Characteristics of Polyvinyl Alcohol for Integrated Electronics, *Thin Solid Films*, **568**, 111(2014).
54. S. Magni, Polyvinyl Alcohol, *Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition)*, **7**, 859(2023).
55. X. Wang, D. Liang, X. Feng, and L. Ye, A Derivative-free Optimization Algorithm Based on Conditional Moments, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **331**(2), 1337(2007).
56. N. T. Mathieu, A. R. Nicole, A. Peltekoff, C. Sundaresan, C. Miao, Y. H. Wadood, and H. L. Benoît, Improving Thin-Film Properties of Poly(vinyl alcohol) by the Addition of Low-Weight Percentages of Cellulose Nanocrystals, *Langmuir*, **36**(13), 3550(2020).

## Authors

- 장아영** 영남대학교 파이버시스템공학과 석사과정 학생  
**이지수** 영남대학교 파이버시스템공학과 석사과정 학생  
**이상오** 영남대학교 의류패션학과 교수  
**이재웅** 영남대학교 파이버시스템공학과 교수