

Review

## 고굴절 고분자재료 개발 동향

정우택 · 최건업 · 박상신\* · 손성윤\*<sup>†</sup>

포항공과대학교 화학공학과, \*광운대학교 화학과

(2024년 9월 6일 접수, 2024년 10월 16일 수정, 2024년 10월 18일 채택)

## Research Trends in the Development of High Refractive Index Polymer Materials

Wooteak Jung, Geoneop Choi, Sang Shin Park\*, and Sung Yun Son\*<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology, 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk, 37673, Korea

\*Department of Chemistry, Kwangwoon University, 20 Kwangwoon-Ro, Seoul 01897, Korea

(Received September 6, 2024; Revised October 16, 2024; Accepted October 18, 2024)

**초록:** 유기물 기반의 고굴절률 소자는 첨단 과학 기기 개발로 인하여 중요성이 증가하고 있다. 현재 개발되고 있는 많은 종류의 고굴절률 소자는 크게 헤테로원자 치환 고분자와 하이브리드소자 등으로 구분이 된다. 빛이 고분자 활성층으로 투과되어 내부 원자의 편광현상에 의하여 굴절이 되기 위하여 분자 내부의 강한 극성이 요구되기에 헤테로 원자 치환 고분자류의 연구가 진행이 되고 있으며 이미 잘 알려진 무기물 기반의 구조를 고분자 내부에 삽입하는 연구 또한 활발이 진행되고 있다. 하지만 이러한 연구는 단발성의 연구인 경우가 대부분이고 뚜렷한 경향성이 존재하지 않아 많은 Trial-and-error를 통하여 최적화된 고분자 사슬을 찾는 경우가 대부분이다. 따라 본 총설에서는 여러 종류의 고분자 종류를 나열하며 특히 새로이 부상하고 있는 계산화학을 통한 굴절률 개발 사례를 소개하고자 한다.

**Abstract:** The Organic-based high-refractive index devices have garnered attention due to advancements in scientific instrumentation. Currently, many types of high-refractive index devices under development can be broadly categorized into heteroatom-substituted polymers and hybrid devices. For light to refract through the polymer active layer due to the polarization of internal atoms, strong polarity within the molecule is required. As a result, research on heteroatom-substituted polymers is being conducted. Additionally, there is active research on incorporating well-known inorganic-based structures within polymers. However, most of these studies are isolated cases, lacking clear trends, and often rely on trial-and-error to optimize the polymer chains. In the context, this review aims to enumerate various types of polymers, with a particular focus on emerging cases of refractive index development through computational chemistry.

**Keywords:** polymer optics, refractive index, computation, heteroatom, refraction.

## 서론

현재 과학기술의 진보로 인하여 첨단 광학 기기들의 개발을 위한 새로운 형태와 기능을 띠는 신소재의 중요성이 대두되고 있다.<sup>1-6</sup> 현재 대부분의 고굴절을 띠는 광학소재의 경우 높은 굴절률을 보이는 무기물을 사용하여 높은 성능을 보이지만, 무기물의 특성상 제조 시 높은 공정 단가와 온도가 요구되어 적용 범위가 제한이 된다.<sup>7,8</sup> 반면, 고분자 재료는 가벼

운 무게, 대량 생산을 위한 저온 용액 공정, 저렴한 원가를 장점으로,<sup>9-12</sup> 무기 소재 기반의 고굴절 재료의 대체재로 주목 받아왔다.<sup>13-15</sup> 특히, OLED와 같은 유기물 기반 광학 기기의 빠른 발전에 따라 고굴절률 유기 소재의 개발이 중요한 이슈로 떠오르고 있다.<sup>16</sup> 이러한 배경에서 최근 고굴절률 고분자를 활용한 첨단 디스플레이,<sup>17</sup> OLED,<sup>18,19</sup> 광학 반사방지 코팅 및 이미지 센서 등의 다양한 첨단 기기 제조가 크게 주목받고 있다.

현재 광범위하게 보고되고 있는 고굴절률 고분자의 경우 굴절률( $n=1.6\sim 1.8$ ) 범위 안에 있는 경우가 많다.<sup>20-27</sup> 하지만 현재 고분자의 경우 높지 않은 굴절률과<sup>28-30</sup> 낮은 안정성 등의 이유로 상용화가 되지 않고 있으며 특히 광범위하게 적용이

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
syson@kw.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-1563-5474  
©2024 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

필요한 CMOS나 OLED의 소자의 경우 1.8 이하의 굴절률의 경우 소자 내부의 광추출 효율등의 저하가 생길 수 있어 새로운 고분자의 합성과 개발이 중요하다.<sup>31</sup>

이러한 고굴절 소재 개발에서 기술되는 굴절률은 다음의 Lorentz-Lorenz 방정식에 기술된다.

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{R}{M\rho} = \frac{R_M}{MV} = \frac{R_M}{V_M} \quad (1)$$

$$n = \sqrt{\frac{1+2\frac{R_M}{V_M}}{1-\frac{R_M}{V_M}}} \quad (2)$$

식 (1)은 고분자의 굴절(molecular refraction)(R), 분자의 분자량(M), 분자 밀도(ρ), 몰 굴절(molar refraction)(R<sub>M</sub>), 몰 부피(mole volume)(V<sub>M</sub>)으로 이루어져 있고, 이를 정리하여 굴절률을 기술하는 식 (2)를 얻을 수 있다. 이를 통해, 복굴절률은 식 (3)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} \quad (3)$$

이때, n<sub>∥</sub>, n<sub>⊥</sub>은 각각 평행 굴절률, 수직 굴절률로서, 이것들의 차이를 복굴절률로 정의한다. 일반적으로 렌즈를 통한 포커싱 또는 입사광의 편광상태 유지를 필요로 하는 광학 소자는 낮은 복굴절률을 갖는 재료가 필수이기 때문에, 높은 굴절률과 낮은 복굴절률을 갖는 고분자 재료의 개발이 중요하다.<sup>32,33</sup>

Table 1에서는 원자들 및 유기 원자군들의 굴절률을 나열하였다. 계산 및 실험 적으로 다양한 원소와 작용기들의 서로 다른 굴절률이 나열이 되어 있으며, 이러한 이론적 배경을 통하여 S 치환된 고굴절 고분자 소재의 개발이 주로 진행이 되었으며 더 나아가 주축 원소에 있는 Si, Ge, Sn 그리고 P에서도 많은 고굴절 고분자의 연구가 진행이 되었다.<sup>8,21,34</sup> 이와

**Table 1. Molar Refraction Values of Representative Functional Group and Atoms<sup>14</sup>**

Atom, bond	[R]	Atom, bond	[R]
-H	1.100	(C)-S(II)-(C)	7.80
-Cl	5.967	(C)-S(IV)-(C)	6.98
-I	13.900	-C=S-	7.97
-OH	1.525	-S=S-	8.11
-O-(H)	1.643	>C<	2.418
-O-	1.643	-CH <sub>2</sub> -	4.711
=O	2.211	C=C	1.733
-O-O-	4.035	C≡C	2.336
Se	11.17	Phenyl	25.463
S-Br	8.865	Naphthyl	43.00

같은 이론적 근거로 높은 원자량을 갖는 원소를 고분자 내에 삽입함으로 높은 몰 굴절을 유도하여 고굴절률을 보고한 예시도 있다. 하지만 근본적으로 S를 포함하고 있는 원소의 경우 시간에 따라 황변 현상이 일어나는 노화 현상이 관측이 되고 있으며, 높은 원자량을 갖는 원소를 치환한 경우 가시광 영역에 낮은 투과도를 보이는 사례도 있다. 굴절률을 높이는 다른 방식으로는 굴절률이 높다고 알려진 분자 혹은 유사한 구조를 고분자 내 삽입하여 hybrid 고분자를 제작하는 것이다.<sup>35</sup> 고분자 내부에 무기물과 결합할 수 있는 작용기를 추가하여 무기물을 고분자 내부로 삽입할 수 있으며 특히 비정질 형태로 제작이 되어 비교적 낮은 복 굴절률을 보이는 장점이 있다. 대조적인 컨셉으로 고분자의 결정성을 증가시켜 고분자의 굴절률을 증가시킨 사례도 있다.<sup>36,37</sup> 하지만 이는 무기물들이 무작위 하게 고분자에 삽입이 되어 낮은 투명도를 보이는 경우가 많다는 한계점이 있다. 비슷하게 다이아몬드와 비슷한 구조를 갖는 탄화수소 분자를 고분자내 도입한 경우도 있지만, 굴절률의 한계가 있었다.

본 리뷰는 최근 고굴절 고분자의 연구 동향을 살피고 고굴절 고분자가 나아가야할 방향에 대해 논할 것이다.

### 고굴절 고분자 재료의 분류

**Heteroatom Substitution.** C가 아닌 다른 원소를 고분자 내부에 삽입하는 것은 고분자의 편광도를 증가시켜 빛의 굴절을 증가시킬 수 있다. Ueda 교수팀에 의하여 보고된 황원자군이 고분자의 굴절률과 광 확산에 미치는 영향을 기점으로 많은 연구는 S를 이용하여 높은 굴절을 보이는 고분자를 대거 발표하였다.<sup>38</sup> 해당 고분자 중에서 Figure 1(a), (b), 그리고 Figure 1(c)는 황 치환 고분자의 주축의 꺾힘 정도의 변화를 가져, 분자 간의 상호작용을 감소에 기인한 UV근방의 흡광률 감소를 보였다.<sup>39</sup> 이러한 분자의 배향의 연구를 통하여, Figure 1(b)가 가장 높은 빛 투과도를 보임을 밝혔지만 굴절률의 측면에서 분자간 상호 작용이 줄어들어 감소하는 면을 보였다. 반면에 Figure 1(a)의 경우 비교적 낮은 빛 투과도를 보였지만, 굴절률 측면에서 높은 수치를 보였다. 따라서 알킬기를 도입하여 분자간의 투명도를 증가시킬 수 있지만, 굴절률 적인 측면에서는 다소 감소하는 경향을 보인다. 따라서, 이 상충 관계 하에 최적화를 통해 분자 구조를 변화시킬 필요가 있다. Figure 1(d)와 (e)는 반대로 분자 내부에 꺾힘 정도를 변화할 수 있는 작용기를 도입하였다.<sup>40</sup> 특히, Figure 1(e)는 비교적 자유롭게 기울어져 있을 수 있는 작용기를 포함하고 있다. 또한 이러한 작용기는 몰 굴절률이 높아 1.76으로 높은 굴절률을 보이지만 Figure 1(d)에 비하여 분자간 강한 상호작용을 할 수 있어 낮은 투명도를 보이게 된다.

굴절률을 높이는 또 다른 방법으로는 원자량이 높은 원자를 분자내에 도입을 하는 방법이다. Figure 1(f), (g)의 경우 각각



Figure 1. Chemical structures of representative high refractive index polymers.<sup>13</sup>

고분자 사슬 중앙에 싸이오펜과 셀레노펜을 치환하였다. 더 무거운 원자인 셀레노펜을 치환한 고분자 Figure 1(g)의 경우 기존 Figure 1(f)에 비해 증가 굴절률을 보이게 되지만 복굴절률은 다소 증가하는 양상을 보인다.<sup>41</sup> 이러한 방법과 유사하게 유남호 교수 연구진에서는 서로 다른 차코겐 원소를 치환한 고분자 Figure 1(h)-(k)를 개발하였다. 원소주기율표 상으로 더 높은 족의 원소의 경우 굴절률의 1.71에서 1.778까지 증가하는 양상을 보였으며 복 굴절률은 셀레나이드로 치

환한 Figure 1(j)에서 제일 높은 0.0146을 보였다. 투명도 적인 측면에서 Te 치환한 Figure 1(k)가 가장 낮은 투명성을 보였다. 이러한 높은 원자량의 원자 도입은 원자량에 따른 뚜렷한 경향성을 보이지 않았으며, 일반적으로 낮은 투명도를 보였다.<sup>42</sup> 또 다른 경우로는 분자 내부에 인을 포함하는 고분자를 만드는 것이다. 이러한 고분자의 경우 높은 굴절률을 보이고 비교적 높은 투명성을 보이는 것이 특징이다.<sup>43</sup> 또한 500 °C 열 조건에서 5%정도 분해되는 강한 열 안정성을

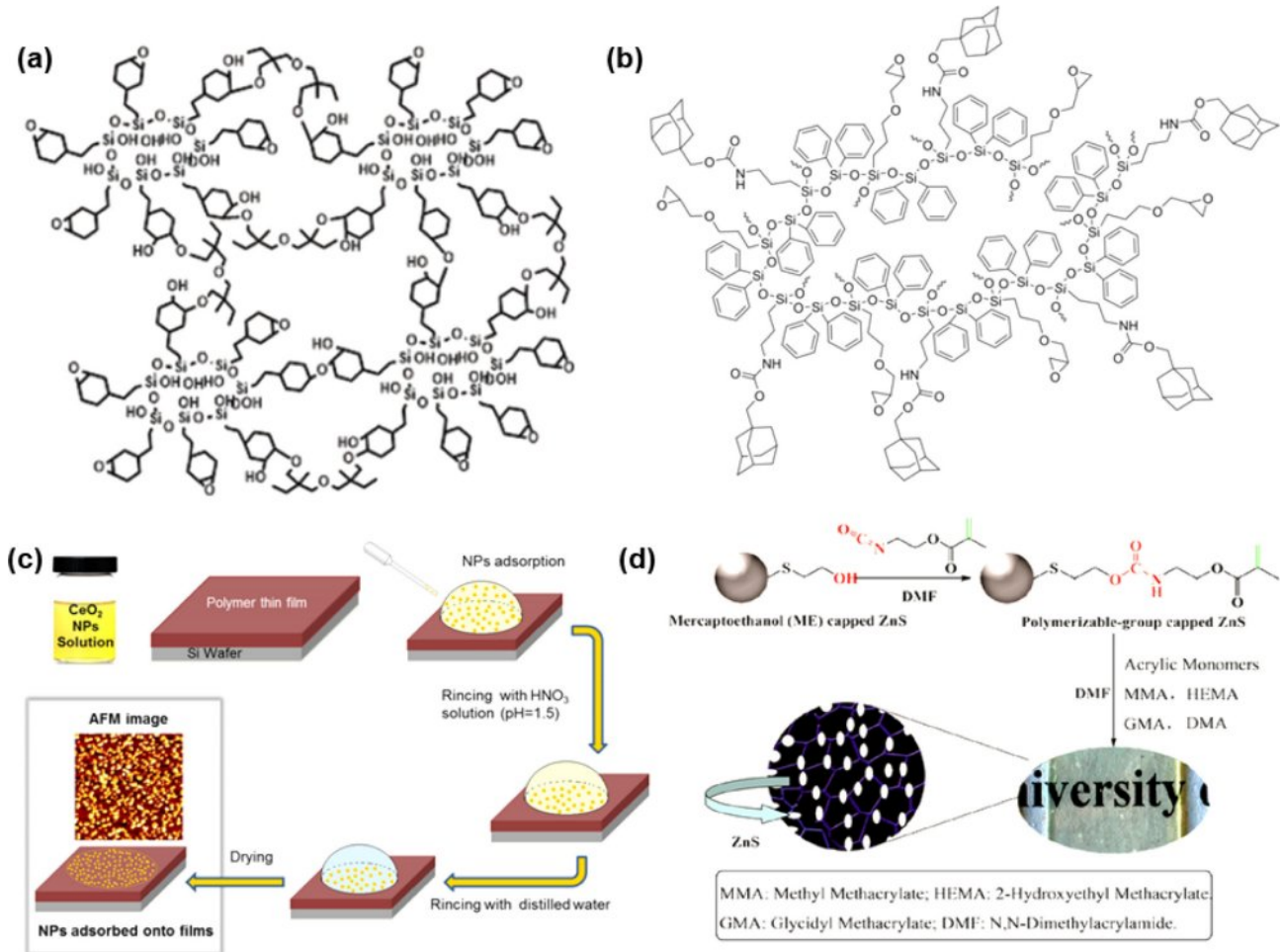
보이는 것이 해당 고분자의 큰 장점이다. 하지만 이런 방식으로 합성된 고분자의 성능과 작용기 간의 인과관계 특성이 아직까지 뚜렷하게 정립되지 않아 인 기반의 고굴절률 고분자 합성은 아직 많은 연구가 필요하다.

**Integration of High Refractive Index(HRI) Molecules.** 고분자 이외에 이미 알려진 수많은 높은 굴절률을 띄는 물질이 있다. 다이아몬드( $n=2.417$ )와 같이 높은 굴절률을 띄는 분자들의 구조를 모사하여 고분자의 삽입한 사례들도 보고가 되고 있으며<sup>44</sup> 지르코늄 화합물과 같은 실제 무기물 파티클을 고분자에 삽입을 한 연구 또한 보고되었다.<sup>45</sup> Figure 2은 대표적인 몇 개의 예시를 나열하였다.

Figure 2(a)와 (b)의 경우, 규소를 포함하고 있는 고분자를

분자 내에 도입을 한 경우이며, 특히 Figure 2(b)는 다이아몬드의 구조와 유사한 아다만테인 분자를 고분자 결사슬에 도입을 가능케했다. Figure 2(a)의 경우 분자 내부에 수분 함량에 따라 빛의 산란되는 정도를 다르게 변화시킬 수 있었으며, 특히 이러한 소자를 OLED로 제작하여 높은 성능을 보였다.<sup>46</sup> Figure 2(b)는 아다만테인의 함량에 따라 굴절률이 1.55에서 1.57까지 증가함을 확인하였으며, 아다만테인의 함량은 고분자 굴절률 개선에 기여할 수 있음을 밝혔다.<sup>47</sup> 하지만 아다만테인의 구조는 다이아몬드 구조를 일부 이기에 다이아몬드처럼 높은 굴절률을 달성하기에는 한계점이 있다.

Figure 2(c), (d)는 고분자 내에 굴절률이 높은 무기물을 삽입하여 고분자-무기물 하이브리드 소자를 제작한 사례이다.



**Figure 2.** Examples of molecules with high refractive indices incorporated into polymers: (a) A silicon-containing polymer compound applicable for OLEDs. Reproduced with permission from Ref. 46, Lim, Y. W. *et al.*, *Adv. Funct. Mater.*, **2018**, 28, 1802944. © 2018, Wiley; (b) A polymer chain containing adamantane, which has a structure similar to diamond. Reproduced with permission from Ref. 47, Tong, L. *et al.*, *Polym. Adv. Technol.*, **2018**, 29, 2245-2252. © 2018, Wiley; (c) A polymer chain containing selenium oxide. Reproduced with permission from Ref. 48, Unni, A. B. *et al.*, *Macromolecules*, **2017**, 50, 1027-1036. © 2017, American Chemical Society; (d) A polymer containing zinc sulfide, which exhibits a high refractive index. Reproduced with permission from Ref. 49, Xu, J. *et al.*, *Macromolecules*, **2018**, 51, 2672-2681. © 2018, American Chemical Society.

Figure 2(c)는 광석에서 쉽게 추출할 수 있는 세륨산화물을 삽입하였으며 Figure 2(d)는 잘 알려진 무기물 반도체인 황화아연을 삽입하였다. Figure 2(c)는 폴리스타일렌 고분자 수지에서 1.585(@545nm)의 높은 굴절률을 보였으며, 특히 고분자 두께에 따라 다른 정도의 세륨산화물을 부착을 시도하였다.<sup>48</sup> Figure 2(d)의 경우 황화아연의 함량에 따른 굴절률의 선형관계를 찾을 수 있었으며 굴절률은 1.652에서 1.751까지 증가함을 보였다.<sup>49</sup> 하지만 무기물 분자를 고분자 내에 삽입을 하는 경우, 삽입되는 함량 및 분산도에 따라 강한 빛 산란성을 보여, 광학 소자로의 활용을 위해서는 분자에 따른 최적화가 필요하다.

### Calculational Study of High Refractive Index Polymers.

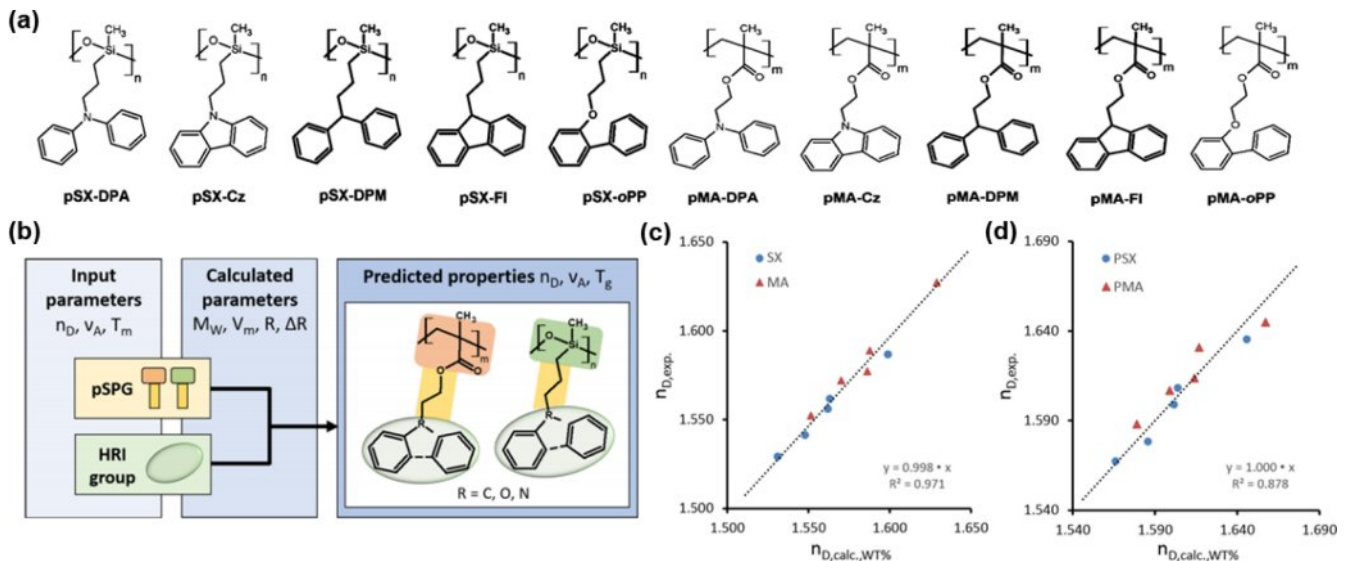
컴퓨터 과학이 발전에 힘입어, 많은 분야에서 계산 결과를 통한 물질의 성능의 예측이 활발히 이뤄지고 있다. 예를 들어, 유기태양전지 등 전도성 고분자분야에서 머신 러닝의 도입은 고효율 성능의 고분자 개발을 가속화시켰다.<sup>50-55</sup> 동일한 맥락에서 고성능 굴절률 고분자의 개발에 대한 계산화학적 접근은 많은 주목을 받아왔다. Norbert Hampp와 그의 연구진은 고굴절률 물질을 예측하기 위하여 Lorentz-Lorenz 방정식에서 출발하여 분자 구조에 따른 굴절률을 예측을 하였다.<sup>56</sup>

그들은 플루오렌, 카바졸과 같이 저렴하고 널리 사용되는 HRI 작용기,<sup>57-60</sup> 메타크릴레이트(MA), 실록세인(SX)와 같은 중합될 수 있는 작용기(Polymerizable group, PG),<sup>61-63</sup> 그리고 이 둘을 이어주는 스페이서(S)를 조합하여 만든 11가지 고분

자를 대상으로 실험적으로 결정된 굴절률 등의 광학적 특성 값들을 계산으로 예측된 값들과 비교하여, 그들이 구축한 계산 모델이 고굴절 고분자 설계에 있어생산적인 수단임을 보였다(Figure 3(a),(b)). 주어진 PG, S, 그리고 HRI의 조합으로 만든 단량체들은 그들이 제시한 계산 모델에 기반한 검량선에서 0.971의 결정 계수를 보였다(Figure 3(c)). 또한, 해당 단량체들은 중합된 후에도 계산값과 실험값간의 상관성을 보이며, 계산화학적인 굴절률 모델링이 고굴절 고분자 설계에서 유용한 도구가 될 수 있음을 보였다(Figure 3(d)). 그러나, 이러한 계산 모델은 이미 알려져 있는 고분자 사슬과 작용기에 대해서만 적용이 될 수 있기 때문에, 기존 굴절률 한계를 극복할 새로운 작용기 예상하거나 설계하기 어렵다는 한계가 있다.

## 결론 및 전망

본 리뷰에서는 굴절률을 증가시키기 위해 서로 다른 연구진에서 진행된 연구 동향에 대해 소개하였다. 현재 광범위하게 사용되고 있는 황 치환 고분자의 경우 현재 1.8을 넘어서는 굴절률이 거의 보고가 되고 있지 않아 새로운 형태의 고분자의 개발이 요구된다. 이를 위해서, 중원소를 포함한 고분자 구조 개발 또한 이에 대한 적절한 대체제이지만, 이 또한 고분자의 투명도 저하 및 색상 문제가 해결되어야 한다. 더 나아가 무기물-유기물 기반의 고분자 하이브리드 소재는 각 소재의



**Figure 3.** (a) Structures of synthesized HRI-polysiloxanes and their corresponding HRI-polymethacrylates; (b) illustration of model for mathematically predicting the refractive index, Abbe number, and glass transition temperature of the polymers; (c) comparison between calculated and experimental values for refractive indices of all monomers, with blue dots representing siloxanes and red triangles representing methacrylates; (d) correlation between calculated and experimentally obtained refractive indices for the studied polymers, where blue dots indicate siloxanes and red triangles indicate methacrylates. Reproduced with permission from Ref. 56, Badur, T. *et al.*, *Macromolecules*, **2018**, 51, 4220-4228. © 2018, American Chemical Society.



계면에서의 빛 산란 및 분산 문제가 예상된다. 고굴절 유기 소재의 폭넓은 상용화를 위해서는 이와 같은 한계들은 필수적으로 개선되어야 한다.

또한 인공지능 발전에 유래한 연구흐름으로서 계산화학적 분자 설계 전략이 소개가 되었다. 높은 굴절률을 보이는 고분자의 경우, 분자 구조와 굴절률 간의 관계 및 경향성을 뚜렷하지 않았으나, 이러한 전략은 응용처에 따른 적절한 값의 굴절률을 갖는 분자 구조를 예측해, 광학 유기 재료 발전에 기여할 것으로 예상된다.

**감사의 글:** 본 연구는 2024학년도 광운대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참 고 문 헌

- Ryu, S. U.; Lee, D. H.; Rehman, Z. U.; Lee, J.-C.; Lim, H.; Shin, G.; Song, C. E.; Park, T. Dithienopyran-based Narrow-bandgap Donor Polymers: Unveiling the Potential for Semitransparent Organic Solar Cells with Enhanced NIR Absorption. *Chem. Eng. J.* **2024**, *485*, 149865.
- Kim, T.; Sohn, S.; Park, S.; Choi, W.; Ahn, H.; Jung, S.; Park, T. Intramolecular Hydrogen Bonding-induced Conformation-locked Multifunctional Emitters for Non-doped OLEDs. *Chem. Eng. J.* **2023**, *478*, 147444.
- Kim, M.; Ryu, S. U.; Park, S. A.; Pu, Y.-J.; Park, T. Designs and Understanding of Small Molecule-based Non-fullerene Acceptors for Realizing Commercially Viable Organic Photovoltaics. *Chem. Sci.* **2021**, *12*, 14004-14023.
- Lee, D.; Cho, H.; Yoon, I. Zirconia Nanocomposites and Their Applications as Transparent Advanced Optical Materials with High Refractive Index. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2023**, *44*, 284-292.
- Li, Y.; Lee, J.; Ok, K. M.  $\text{KHC}_2\text{O}_4 \cdot \text{B}(\text{OH})_3$ : A Nonlinear Optical Crystal with Large Birefringence in the Short-wavelength Ultraviolet Region. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2023**, *44*, 788-793.
- Yu, L.; Xu, Y.; Kim, J.; Lee, J.; Kim, J. S. A Rational Design of AIE-active Fluorophore for the Fingerprint Optical Detection. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2023**, *44*, 516-522.
- (a) Kim, H.; Kim, Y.-R.; Lee, J.; Lee, H.; Jeon, Y.; Park, S.; Kim, Y.-S.; Seong, H.-M.; Kwak, G. Highly Tough, Colorless, Transparent Polyamide-imide Films From One Reaction Vessel Without Purification. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 213-222. (b) Seo, J. Y.; Kang, S. H.; Lee, M. R.; Choi, C.-H.; Lee, S.-H.; Cho, S.; Lee, J.-H.; Baek, K.-Y. Synthesis of Thermo-Controlled Cyclic Olefin Polymers via Ring Opening Metathesis Polymerization: Effect of Copolymerization with Flexible Modifier. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 205-211.
- (a) Luo, X.; Yang, M.; Bu, J.; Chen, T.; Yi, A. Y.; Xu, W. Precise Fabrication of Nanostructured Mixed Metal Oxides by the Integration of Nanoimprinting and Sol-gel Synthesis. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 795-803. (b) Kong, Y. J.; Youm, J. S.; Kong, T. W.; Huh, Y. I.; Kim, J. C. Influence of Surface Treatment of  $\text{CaSO}_4$  on the Drawability and Physical Properties of the PBAT/PLA/ $\text{CaSO}_4$  Composite Sheet. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 615-622.
- Kim, J.; Park, J.; Song, D.; Jee, J.; Gokulnath, T.; Han, S. C.; Jin, S.-H.; Lee, J. W. BDT-based Donor Polymer for Organic Solar Cells to Achieve High Efficiency over 15% for Ternary Organic Solar Cells. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 489-497.
- Ha, J.-W.; Jung, J. G.; Ryu, D. H.; Lee, S.; Song, C. E.; Lim, B.; Jung, Y. J.; Park, J. M.; Hwang, D.-H. Thienoquinolinone-based Acceptor- $\pi$ -acceptor-type Building Block for Polymer Donors in Organic Solar Cells. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 25-31.
- (a) Nketia-Yawson, V.; Nketia-Yawson, B.; Jo, J. W. Influence of Gate Voltage Operation on Effective Mobility of Electrolyte-Gated Organic Transistors. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 707-711. (b) Ha, J.-W.; Jung, J. G.; Ryu, D. H.; Lee, S.; Song, C. E.; Lim, B.; Jung, Y. J.; Park, J. M.; Hwang, D.-H. Thienoquinolinone-based Acceptor- $\pi$ -acceptor-type Building Block for Polymer Donors in Organic Solar Cells. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 25-31.
- (a) Sozmen, F.; Kucukoflaz, M.; Ergul, M.; Inan, Z. D. S.; Bozkurt, Y.; Taydas, D. Synthesis of Multifunctional Organic Nanoparticles Combining Photodynamic Therapy and Chemotherapeutic Drug Release. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 61-69. (b) Cheon, H. J.; An, T. K.; Kim, Y.-H. Diketopyrrolopyrrole (DPP)-Based Polymers and Their Organic Field-Effect Transistor Applications: A Review. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 71-84.
- Higashihara, T.; Ueda, M. Recent Progress in High Refractive Index Polymers. *Macromolecules* **2015**, *48*, 1915-1929.
- Mazumder, K.; Voit, B.; Banerjee, S. Recent Progress in Sulfur-Containing High Refractive Index Polymers for Optical Applications. *ACS Omega* **2024**, *9*, 6253-6279.
- Arefnia, F.; Zibaii, M. I.; Layeghi, A.; Rostami, S.; Babakhani-Fard, M.-M.; Moghadam, F. M. Citrate Polymer Optical Fiber for Measuring Refractive Index Based on LSPR Sensor. *Scientific Reports* **2024**, *14*, 18637.
- (a) Kleine, T. S.; Frish, J. I.; Pavlopoulos, N. G.; Showghi, S. A.; Himmelhuber, R.; Norwood, R. A.; Pyun, J. Refractive Index Contrast Polymers: Photoresponsive Systems with Spatial Modulation of Refractive Index for Photonics. *ACS Macro Letters* **2020**, *9*, 416-421. (b) Peng, J.; Wang, Q.; Wang, J.; Yang, J.; Jiang, T.; Zeng, G. Structure and Properties of Low Dielectric Constant Polyetherimide Films Containing-CF<sub>3</sub> and Cardo Groups. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 826-835. (c) Yu, S. H.; Lim, T.; Baek, K.-Y.; Sung, M. M.; Kim, Y.-S.; Cho, S. NIR-transparent Dark Paints Based on Diketopyrrolopyrrole Pigments for LiDAR-enabled Automobiles. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 1199-1207.
- Qiu, Z.; Han, T.; Kwok, R. T.; Lam, J. W.; Tang, B. Z. Polyarylcyanation of Diyne: A One-pot Three-component Convenient Route for in situ Generation of Polymers with AIE Characteristics. *Macromolecules* **2016**, *49*, 8888-8898.
- Yang, S.; Kim, J. S.; Jin, J.; Kwak, S. Y.; Bae, B. S. Cycloaliphatic Epoxy Oligosiloxane-derived Hybrid Materials for a High-refractive Index LED Encapsulant. *J. Appl. Polym. Sci.* **2011**, *122*, 2478-

- 2485.
19. Park, S.; Lim, S. J.; Kim, J.; Yu, J.-W. Organic Light-emitting Diodes with An Internal Light Extraction Layer Prepared by Intense Pulsed Light. *Macromol. Res.* **2017**, *25*, 1022-1027.
  20. Gu, J.; Wang, X.; Xu, C.; Feng, X.; Zhang, S. Polythiourethane Composite Film with High Transparency, High Refractive Index and Low Dispersion Containing ZnS Nanoparticle via Thiol-ene Click Chemistry. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 603-613.
  21. Ryu, D.; Lee, M.; Sohn, H.; You, N.-H. Synthesis and Characterization of Aromatic Poly(phosphonate)s, Poly(thiophosphonate)s, and Poly(selenophosphonate)s for High Refractive Index. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 583-592.
  22. Alsaif, N. A. M.; Atta, A.; Abdeltwab, E.; Abdel-Hamid, M. M. Synthesis, Structural Characterization, and Optical Properties of PVA/MnO<sub>2</sub> Materials for Optoelectronics Applications. *Macromol. Res.* **2024**, *32*, 35-44.
  23. Shim, J. S.; Kim, H.; Chang, T.; Yoo, Y. H.; Lee, S. J.; Park, K. H.; Kang, H.-j.; Lee, D. H. Preparation of Hollow TiO<sub>2</sub> Nanospheres with Highly Porous Surface for Effective Nucleating Agents in Supercritical Carbon Dioxide Foaming of Thermoplastic Polyurethanes. *Macromol. Res.* **2024**, *32*, 789-797.
  24. Tu, T. K. T.; Salma, S. A.; Jeong, M.; Kim, J. H.; Jeong, Y. T.; Gal, Y.-S.; Lim, K. T. Carbazole-Based Polyimide as a Hole-Transporting Material for Optoelectronic Applications. *Macromol. Res.* **2021**, *29*, 735-742.
  25. Luo, C.; Zuo, J.; Wang, F.; Yuan, Y.; Lin, F.; Zhao, J. Preparation and Properties of Halogen-Free Flame Retardant and High Refractive Index Optical Resin via Click Chemistry. *Macromol. Res.* **2018**, *26*, 346-352.
  26. Ali, F. M.; Maiz, F. Highly Precise Determination of Structural and Optical Parameters of an Innovative (PVA-VOCl) for Flexible Polymer-Semiconductor Devices. *Macromol. Res.* **2020**, *28*, 805-812.
  27. Lee, J.; Yeo, H.; Goh, M.; Ku, B.-C.; Sohn, H.; Kim, H.-J.; Lee, J.-K.; You, N.-H. Synthesis and Characterization of Poly(cyclohexylthioacrylate) (PCTA) with High Refractive Index and Low Birefringence for Optical Applications. *Macromol. Res.* **2015**, *23*, 960-964.
  28. Bong, S.; Yeo, H.; Ku, B.-C.; Goh, M.; You, N.-H. Highly Soluble Polyimide Based on Asymmetric Diamines Containing Trifluoromethyl Group for High Performance Dielectric Material. *Macromol. Res.* **2018**, *26*, 85-91.
  29. Bong, S.; Yeo, H.; Goh, M.; Ku, B.-C.; Kim, Y. Y.; Bong, P.-H.; Park, B.; You, N.-H. Synthesis and Characterization of Colorless Polyimides Derived from 4-(4-aminophenoxy)-2,6-dimethylaniline. *Macromol. Res.* **2016**, *24*, 1091-1097.
  30. Kim, J.-S.; Noh, S.-T.; Kweon, J.-O.; Cho, B.-S. Photopolymerization Kinetic Studies of UV-curable Sulfur-containing Difunctional Acrylate Monomers Using Photo-DSC. *Macromol. Res.* **2015**, *23*, 341-349.
  31. Saito, Y.; Higashihara, T.; Ueda, M. Highly Refractive and Photosensitive Polyimide. *J. Photopolym. Sci. Technol.* **2009**, *22*, 423-428.
  32. Hifumi, R.; Tomita, I. Low Birefringent Properties of Poly (phosphonate) Derivatives. *Macromolecules* **2018**, *51*, 5594-5599.
  33. Nakabayashi, K.; Imai, T.; Fu, M.-C.; Ando, S.; Higashihara, T.; Ueda, M. Poly(phenylene thioether)s With Fluorene-based Cardo Structure Toward High Transparency, High Refractive Index, and Low Birefringence. *Macromolecules* **2016**, *49*, 5849-5856.
  34. Chen, X.; Fang, L.; Wang, J.; He, F.; Chen, X.; Wang, Y.; Zhou, J.; Tao, Y.; Sun, J.; Fang, Q. Intrinsic High Refractive Index Siloxane-sulfide Polymer Networks Having High Thermostability and Transmittance via Thiol-ene Cross-linking Reaction. *Macromolecules* **2018**, *51*, 7567-7573.
  35. (a) Kwon, H.-Y.; Jin, J. Omniphobic, Ice-repellent, Anti-bacterial, Slippery Liquid-infused Porous Surface (SLIPS) Using Sprayable Chitin Nanofiber Coating. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 65-74. (b) Al-Gunaid, M. Q. A.; Shashikala, B. S.; Gayitri, H. M.; Alkanad, K.; Al-Zaqri, N.; Boshala, A.; Al-Ostoot, F. H. Characterization of Opto-Electrical, Electrochemical and Mechanical Behaviors of Flexible PVA/(PANI+La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>)/LiClO<sub>4</sub>-PC Polymer Blend Electrolyte Films. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 650-658.
  36. Yue, T. J.; Ren, W. M.; Chen, L.; Gu, G. G.; Liu, Y.; Lu, X. B. Synthesis of Chiral Sulfur-containing Polymers: Asymmetric Copolymerization of Meso-epoxides and Carbonyl Sulfide. *Angew. Chem.* **2018**, *130*, 12852-12856.
  37. Gao, Q.; Qiu, Z.; Elsegood, M. R.; Chen, M.; Wang, J.; Kwok, R. T.; Lam, J. W.; Tang, B. Z. Regio- and Stereoselective Polymerization of Diynes with Inorganic Comonomer: a Facile Strategy to Conjugated Poly(p-arylene dihalodienes) with Processability and Postfunctionalizability. *Macromolecules* **2018**, *51*, 3497-3503.
  38. Liu, J.-G.; Ueda, M. High Refractive Index Polymers: Fundamental Research and Practical Applications. *J. Mater. Chem.* **2009**, *19*, 8907-8919.
  39. You, N. H.; Higashihara, T.; Ando, S.; Ueda, M. Synthesis of Highly Refractive and Transparent Polyimides Derived from 4, 4'-thiobis [2", 6"-dimethyl-4"- (p-phenylenesulfanyl) aniline]. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.* **2010**, *48*, 656-662.
  40. Liu, J.-G.; Nakamura, Y.; Shibasaki, Y.; Ando, S.; Ueda, M. High Refractive Index Polyimides Derived from 2, 7-bis (4-aminophenylenesulfanyl) Thianthrene and Aromatic Dianhydrides. *Macromolecules* **2007**, *40*, 4614-4620.
  41. You, N. H.; Fukuzaki, N.; Suzuki, Y.; Nakamura, Y.; Higashihara, T.; Ando, S.; Ueda, M. Synthesis of High-refractive Index Polyimide Containing Selenophene Unit. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.* **2009**, *47*, 4428-4434.
  42. Kim, H.; Ku, B.-C.; Goh, M.; Ko, H. C.; Ando, S.; You, N.-H. Synergistic Effect of Sulfur and Chalcogen Atoms on the Enhanced Refractive Indices of Polyimides in the Visible and Near-infrared Regions. *Macromolecules* **2019**, *52*, 827-834.
  43. Kim, H.; Ku, B.-C.; Goh, M.; Yeo, H.; Ko, H. C.; You, N.-H. Synthesis and Characterization of Phosphorus-and Sulfur-containing Aromatic Polyimides for High Refractive Index. *Polymer* **2018**, *136*, 143-148.
  44. Takano, T.; Lin, Y.-C.; Shi, F. G.; Carlson, B.; Sciamanna, S. Novel Methacrylated Diamondoid to Produce High-refractive Index

- Polymer. *Opt. Mater.* **2010**, 32, 648-651.
45. Liu, C.; Hajagos, T. J.; Chen, D.; Chen, Y.; Kishpaugh, D.; Pei, Q. Efficient One-pot Synthesis of Colloidal Zirconium Oxide Nanoparticles for High-refractive-index Nanocomposites. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 4795-4802.
46. Lim, Y. W.; Kwon, O. E.; Kang, S. M.; Cho, H.; Lee, J.; Park, Y. S.; Cho, N. S.; Jin, W. Y.; Lee, J.; Lee, H. Built-In Haze Glass-Fabric Reinforced Siloxane Hybrid Film for Efficient Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs). *Adv. Funct. Mater.* **2018**, 28, 1802944.
47. Tong, L.; Feng, Y.; Sun, X.; Han, Y.; Jiao, D.; Tan, X. High Refractive Index Adamantane-based Silicone Resins for the Encapsulation of Light-emitting Diodes. *Polym. Adv. Technol.* **2018**, 29, 2245-2252.
48. Unni, A. B.; Vignaud, G.; Chapel, J.-P.; Giermanska, J.; Bal, J.; Delorme, N.; Beuvier, T.; Thomas, S.; Grohens, Y.; Gibaud, A. Probing the Density Variation of Confined Polymer Thin Films via Simple Model-independent Nanoparticle Adsorption. *Macromolecules* **2017**, 50, 1027-1036.
49. Xu, J.; Zhang, Y.; Zhu, W.; Cui, Y. Synthesis of Polymeric Nanocomposite Hydrogels Containing the Pendant ZnS Nanoparticles: Approach to Higher Refractive Index Optical Polymeric Nanocomposites. *Macromolecules* **2018**, 51, 2672-2681.
50. Kumar, R.; Koo, D.-H.; Eom, Y.-G.; Choi, J.-M. Biomolecular Phase Separation Through Theoretical and Computational Microscope. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2024**, 45, 420-434.
51. Cho, I.; Moon, S.; Cho, K.-H. A Time-efficient Computational Binding Affinity Estimation Protocol with Utilization of Limited Experimental Data: A Case Study for Adenosine Receptor. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2024**, 45, 778-787.
52. Min, B. K.; Kim, D.; Kim, D.; Rhee, Y. M. Effect of Choosing Coordinate Systems on Computationally Predicting Nonradiative Transition Rates of Flexible Thermally Activated Delayed Fluorescence Molecules. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2023**, 44, 989-1003.
53. Ghule, B. G.; Kim, M.; Jang, J.-H. Predicting Photoresist Sensitivity Using Machine Learning. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2023**, 44, 900-910.
54. You, K.; Kwon, O.-P.; Kim, D. Effects of the Protonation and the Polar Solvation on the Molecular Properties of Methyl Orange: A Density Functional Theory Study. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2023**, 44, 523-527.
55. Park, H.; Park, C. B.; Sung, B. J. Simulation Studies on the Dynamic Heterogeneity of Organic Ionic Plastic Crystals. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2023**, 44, 736-749.
56. Badur, T.; Dams, C.; Hampp, N. High Refractive Index Polymers by Design. *Macromolecules* **2018**, 51, 4220-4228.
57. Gayathri, R. D.; Gokulnath, T.; Park, H.-Y.; Xie, Z.; Jin, S.-H.; Han, S. C.; Lee, J. W. Facile and Stable Fluorene Based Organic Hole Transporting Materials for Efficient Perovskite Solar Cells. *Macromol. Res.* **2022**, 30, 745-750.
58. (a) de Souza, A. G. N.; da Silva, Y. B.; Rodrigues, R. R.; Menandro, A. S.; Péres, L. O. Heat-resistant Luminescent Films: a Thermal Study of Fluorene/thiophene Copolymer-elastomer Blends. *Macromol. Res.* **2024**, 32, 757-766. (b) Salma, S. A.; Kim, J. H. Effect of the Side Chain Functionality of the Conjugated Polyelectrolytes as a Cathode Interlayer Material on the Photovoltaic Performances. *Macromol. Res.* **2022**, 30, 146-151. (c) Kim, I.-B.; Kim, Y.-J.; Kim, D.-Y.; Jang, S.-Y. A Thiophene Based Dopant-Free Hole-Transport Polymer for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Macromol. Res.* **2022**, 30, 391-396.
59. Park, J. Y.; Jang, J. W.; Shen, X.; Jang, J.-H.; Kwak, S. L.; Choi, H.; Lee, B. R.; Hwang, D.-H. Fluorene- and Arylamine-based Photo-crosslinkable Hole Transporting Polymer for Solution-processed Perovskite and Organic Light-emitting Diodes. *Macromol. Res.* **2023**, 31, 721-732.
60. Hfaiedh, A.; Labiedh, M.; Mabrouk, A.; Braiek, M. B.; Alimi, K. Synthesis, Characterization and Structure-property Study of New Push-pull Carbazole Materials. *Macromol. Res.* **2023**, 31, 981-999.
61. Song, K. C.; Park, S.-H.; Kim, J.-S.; Kim, Y.-W. Effects of Addition of Styrene-co-methacrylate Ionomers Neutralized with Various Monovalent Cations on Asphaltene Dispersion in Heavy Oil. *Macromol. Res.* **2023**, 31, 557-567.
62. (a) Kim, J. G.; Shin, H. G. Functional Acrylate Polymer Synthesis: Postpolymerization Modification Approach. *Macromol. Res.* **2022**, 30, 757-765. (b) Bae, J. H.; Choi, B.; Kim, Y.-J.; Lee, H. M.; Kim, K. H.; Han, Y. S. Preparation and Physical Properties of a Silicone Hydrogel Contact Lens Grafted with a Phosphorylcholine-Containing Hydrophilic Copolymer. *Macromol. Res.* **2022**, 30, 446-453. (c) Park, S. M.; Choi, U. H. Highly Stretchable and Conductive Hybrid Gel Polymer Electrolytes Enabled by a Dual Cross-linking Approach. *Macromol. Res.* **2023**, 31, 499-509. (d) Iseki, T.; Biutty, M. N.; Park, C. H.; Yoo, S. I. Local Enhancement of Concentration Gradient Through the Hydrogel-functionalized Anodic Aluminum Oxide Membranes for Osmotic Power Generation. *Macromol. Res.* **2023**, 31, 223-231.
63. Do, Y.; Park, H.; Gokulnath, T.; Sung, K.; Park, H.-Y.; Jin, S.-H. Significance of Siloxane Functionalized Side-Chain  $\pi$ -Conjugated Polymer Donor: Optimization of Active Layer Morphology Toward the Stable All-Polymer Solar Cells. *Macromol. Res.* **2022**, 30, 183-189.

**출판자 공지사항:** 한국고분자학회에 게재된 논문 및 기관 소속의  
관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.