

주사슬에 아조벤젠기와 헥사메틸렌기를 갖는 고분자의 합성 및 특성

구수진¹, 이응재², 방문수^{1*}
¹공주대학교 신소재공학부, ²조선이공대학교 생명환경화학공과

Synthesis and Characterization of Polymers with Azobenzene and Hexamethylene Groups in Main Chain

Su-Jin Gu¹, Eung-Jae Lee², Moon-Soo Bang^{1*}

¹Division of Advanced Materials Science and Engineering, Kongju National University

²Department of Bioenvironmental & Chemical Engineering, Chosun College of Science & Technology

요 약 주 사슬에 다양한 조성의 아조벤젠기와 헥사메틸렌기를 갖는 고분자들을 쇼텐-바우만 반응을 이용하여 합성하고, 이들의 물성을 조사하였다. 합성된 고분자들의 화학 구조와 물리적 성질은 푸리에 적외선 분광법 (FT-IR), 핵자기공명 분광법 (¹H-NMR), 시차주사 열량 분석법(DSC), 열 중량 분석법(TGA), 편광 현미경법(POM), X-선 회절법(XRD)으로 조사되었다. 합성된 고분자들은 1.28에서 1.36 dL/g의 고유 점성도를 갖는 비교적 높은 분자량의 고분자들이 합성되었으며, 용해도 조사에 사용된 대부분의 용매에 잘 용해되지 않았다. 고분자 내의 아조벤젠기의 함량이 증가함에 따라 용융 전이온도(T_m)가 급격히 높아졌으며, 아조벤젠 단위체의 함량이 50 mol% 이상인 경우 분해온도 이하에서 상 전이는 일어나지 않았다. 합성된 고분자들 중, MP-A3와 MP-A5는 넓은 액정 온도구간을 갖는 액정 고분자였으며, 약한 액정성을 갖는 네마틱 상을 나타냈다. 합성 고분자들의 이러한 성질의 차이는 *trans* 형태인 아조벤젠기의 선형성과 극성에서 비롯된 분자간력의 변화에 기인하는 것으로 판단된다.

Abstract Polymers with various compositions of azobenzene and hexamethylene groups in the main chain were synthesized by a Schotten-Baumann reaction and their properties were investigated. The chemical structures and physical properties of the synthesized polymers were investigated by Fourier transform infrared spectroscopy, proton nuclear magnetic resonance spectroscopy, differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis, polarized optical microscopy, and x-ray diffraction. The polymers showed an inherent viscosity of 1.28-1.36 dl/g and were relatively insoluble in most organic solvents. The melt transition temperature increased rapidly with increasing number of azobenzene groups in the polymer. When the azobenzene monomer content was more than 50 mol%, no melting transition occurred below the decomposition temperature. Among the polymers with a melt transition temperature, the MP-A3C7 and MP-A5C5 polymers were liquid crystalline materials and exhibited a nematic phase with weak liquid crystallinity over a wide liquid crystal temperature range. This difference in the properties of the synthesized polymers is likely due to the changes in intermolecular forces resulting from the linearity and polarity of the *trans*-form of azobenzene.

Keywords : Azobene, Main-Chain LCP, Mesogenic, Methylene Spacer, Nematic

*Corresponding Author : Moon-Soo Bang(Kongju Univ.)

Tel: +82-41-521-9394 email: msbang@kongju.ac.kr

Received January 21, 2019

Revised February 19, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

1. 서론

액정물질은 액정 형성의 기본구조인 메소젠 단위를 포함하고 있는 분자의 집합체로써, 분자의 크기, 메소젠의 종류, 결합 위치, 배향 등에 따라 다양하게 분류되며, 이들 각각의 액정물질들은 특성이나 응용분야도 달라진다. 일반적으로 저분자량의 액정은 기능성 재료로, 고분자량의 액정은 고성능 재료로 응용되고 있다. 근래에 들어와, 기계적 물성이 우수한 기능성 고분자를 개발하기 위하여 우수한 기계적인 물성을 갖으면서 기능성을 부여할 수 있는 메소젠기를 고분자의 결사슬 또는 주사슬-결사슬에 결합시킨 액정고분자에 대한 연구들이 꾸준히 진행되어 오고 있다[1-5].

특히, 이러한 목적으로 많이 연구되어 온 메소젠기로써 아조벤젠 유도체를 들 수 있다. 아조벤젠은 두개의 페닐기가 아조기(N=N)에 의해 연결되어 있으며, 아조기는 발색단으로써 특정한 색을 가짐과 동시에, 적절한 파장의 빛에 의해 *trans-cis* 이성질화 현상을 나타내는 물질이다. 아조벤젠의 *trans* 이성질체는 막대모양의 구조로 메소젠기로써 역할을 하지만, *cis* 이성질체는 굽은 구조를 하고 있어 메소젠기로써의 역할을 할 수 없다. 따라서, 액정상 온도 영역에서는 자외선에 의해 액정과 등방성 간에 상전이를 조절 할 수 있다[6-10]. 이처럼, 광학적 재료로써 많은 잠재력을 가지고 있는 아조벤젠을 고분자의 주사슬 또는 곁사슬에 결합시키면 아조벤젠의 광학적 거동에 높은 안정성을 부여할 수 있고 가공성을 향상시킬 수 있기 때문에, 이를 응용하여 인공 근육, 스마트 섬유 및 의류, 전자 패키징용 열수축 물질 및 센서 등과 같은 분야에서의 적용을 위해 연구들이 진행되고 있다[11-16].

본 연구에서는 기계적 물성이 우수하며, 고온에서 사용 가능한 광기능성 고분자소재를 제조하기 위한 연구의 일환으로 고분자 주사슬에 광화학적 성질을 갖는 아조벤젠기와 유연결자인 헥사메틸렌기의 조성이 다른 고분자들을 합성하고 아조벤젠기의 함량에 따른 고분자의 열적 특성과 액정성에 대하여 조사하였다.

2. 실험

2.1 시약 및 기기

본 연구에서 단위체로 사용된 시약인 1,6-다이하이드록시헥세인, 테레프탈로일 클로라이드는 Aldrich 사 제품을, 페놀과 4-아미노페놀은 TCI 사 제품을 사용하였고, 중합 용매인 1,1,2,2-테트라클로로에테인 (TCE)과 피리딘은 TCI 사 제품을 정제하여 사용하였다.

합성된 화합물들의 특성분석에 사용된 기기로써, 화학구조 분석은 푸리에 적외선분광기(FT-IR, Perkin Elmer Spectrum 1000)과 ¹H-핵자기공명분광기(¹H-NMR, JEOLJNM-AL300)를, 열적특성 분석은 시차주사열량 분석기(DSC, TA DSC Q20)와 열중량 분석기(TGA, TA TGA Q50)를 이용하였다. 액정성 확인은 가열판(Linkam TP 92)이 장착된 편광현미경(POM, Olympus BX41)과 X-ray diffraction (Rigaku AX2500)을 이용하였으며 보조수단으로 mp 측정기(Fisher Scientific Co.)를 이용하였다.

2.2 합성

Fig. 1과 2는 중합에 사용된 단위체 중 4,4'-다이하이드록시아조벤젠(DHAB)의 합성경로와 고분자의 합성 반응식을 나타내었다. 합성된 고분자들은 MP-Ax와 같이 표기하였다. MP는 아조벤젠을 주사슬에 갖는 고분자를, x는 사용된 단위체 아조화합물의 몰비를 의미한다. 단위체 DHAB는 문헌[17]을 참고하여, 고분자들의 합성은 쇼텐-바우만 반응을 이용하여 합성되었다. 고분자 합성의 경우, MP-A5의 합성을 예를 들어 합성방법을 기술하였다.

2.2.1 4,4'-Dihydroxyazobenzene (DHAB)의 합성

드롭핑 편셀이 장착된 300 mL 반응기에 4-아미노페놀 5.0 g (4.58×10^{-2} mol)을 넣고 염산 5 mL와 증류수 45 mL의 혼합용매에 용해시킨다. 얼음중탕을 이용하여 반응물의 온도를 0°C로 맞춘 후 반응물을 강하게 교반시킨다. 다른 용기에 NaNO₂ 3.16 g (4.58×10^{-2} mol)이 용해되어 있는 수용액 80 mL를 준비하고, 이를 반응기 내로 천천히 떨어뜨려 4-하이드록시벤젠다이아조늄 클로라이드를 생성시킨 후 메탄올 80 mL를 넣어 준다. 다른 용기에 페놀 4.31 g (4.58×10^{-2} mol), NaOH 4.81 g (1.2×10^{-1} mol)을 증류수 40 mL와 함께 넣고 5°C에서 교반하여 용해시킨 후 이를 반응기내로 천천히 떨어뜨리고 상온에서 2h 동안 반응시킨다. 반응 후 반응기내의 메탄올을 감압하여 제거하고 염산과 증류수를 차례로

추가하여 냉각시키고 증류수로 수회 세척하여 건조시킨다. 건조된 생성물은 THF로 용해한 후 *n*-헥세인에 부어 석출시키고 건조된다. 합성된 DHAB의 용융점은 221 °C 였다.

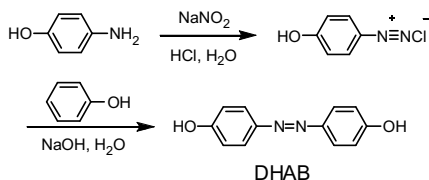


Fig. 1. Synthesis routes of DHAB.

2.2.2 고분자의 합성

드롭핑 편벨이 장착된 100 mL 반응기에 테레프탈로일 클로라이드 1 g을 넣고 TCE 10 mL에 교반하며 용해시킨다. 또 다른 용기에 DHBA 0.53 g (2.46×10^{-3} mol)과 1,6-다이하이드록시 헥세인 0.29 g (2.46×10^{-3} mol)을 TCE/피리딘 (=10 mL/5 mL) 혼합용매에 용해하여 준비하고 상온에서 반응기 내로 천천히 드롭핑한다. 반응물의 온도를 80 °C로 올려 24h 동안 반응시키고, 반응 후 생성물을 비용매인 메탄올내로 떨어뜨려 메탄올과 증류수로 수차례 세척하고, 아세톤을 사용하여 12h 동안 속슬랫한 후, 진공건조기에서 건조하였다.

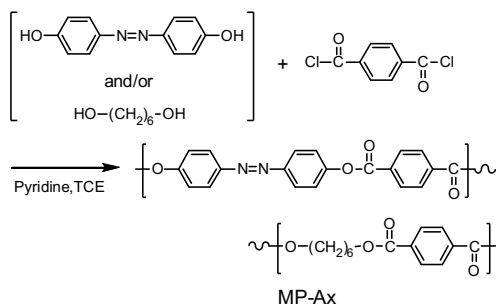


Fig. 2. Scheme for polymerization.

Table 1. Composition of Monomers for Polymers

Polymers	1,6-hexanediol (mol%)	DHAB ^a (mol%)	TC ^b (mol%)	Yield (%)
MP-A0	100	0	100	82.1
MP-A3	70	30	100	75.1
MP-A5	50	50	100	84.5
MP-A7	30	70	100	79.5
MP-A10	0	100	100	89.9

^a 4,4'-Dihydroxyazobenzene; ^b Terephthaloyl chloride

3. 결과 및 고찰

3.1 단위체 구조 확인

합성된 단위체 화합물 DHBA는 IR과 ¹H-NMR 스펙트럼을 통하여 구조 확인을 하였다. Fig. 3에 ¹H-NMR 스펙트럼을 보여 주었으며, IR 스펙트럼은 분석 결과만을 나타내었다.

IR 스펙트럼(ν_{max} , cm^{-1}) 분석 결과, 3359 (OH), 1592 (C=C, Ar), 1451 (N=N)에서 특성 피크들이, ¹H-NMR 스펙트럼(CF₃COOD-*d*, ppm) 분석 결과, 8.3 (4H, ArH-N=N), 7.4-7.5 (4H, ArH-O), 2.5 (2H, OH)에서 피크들이 확인되었다. 이로써, 합성된 단위체 화합물의 특성 작용기들과 분자구조 내의 프로톤의 종류, 프로톤수에 해당하는 면적비가 잘 일치됨으로써 합성을 확인하였다.

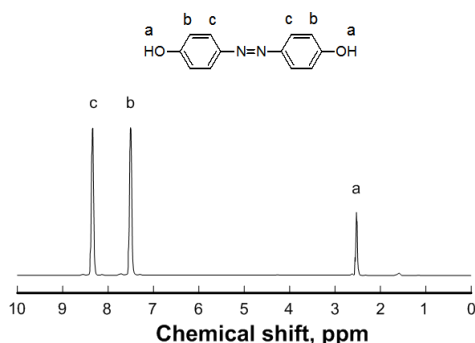


Fig. 3. ¹H-NMR spectrum of DHAB. (CF₃COOD-*d*)

3.2 고분자의 구조 확인

고분자들의 합성 여부는 IR 스펙트라를 통하여 확인하였으며, Fig. 4에 IR 스펙트라를 나타내었다. ¹H-NMR 분석의 경우, 측정을 위한 적당한 용매를 찾지 못하여 수행되지 못하였다.

합성된 고분자들의 IR 스펙트라를 비교하기 위해서 각 스펙트럼의 에스터의 카보닐기 피크의 크기를 동일하게 하여 나타냈다. IR 스펙트라 (ν_{max} , cm^{-1})의 분석 결과, 각 고분자에서 3060 (C-H, Ar), 2930 (C-H), 1718 (C=O, ester), 1271 (C-O, ether)의 피크를 공통적으로 나타냈으며, 아조벤젠기가 없는 MP-A0를 제외한 고분자들에서는 1493 (N=N)의 피크를 확인할 수 있었다. 모든 고분자들은 1717 (C=O, ester) 피크가 나타나고, OH 피크와 (C=O, carboxyl) 피크가 사라짐으로써 고분자의 중합을 확인할 수 있었다.

Table 2. Inherent Viscosity and Solubility Tests of Polymers

Polymer	η_{inh}^a (dL/g)	Solubility ^b								
		CHCl ₃	TCE	H ₂ SO ₄	THF	DMF	Pyridine	DMAc	DMSO	NMP
MP-A0	1.28	○	○	○	△	△	△	△	△	△
MP-A3	1.31	×	△	○	△	△	△	△	×	△
MP-A5	1.35	×	×	△	×	×	×	×	×	×
MP-A7	1.32	×	×	△	×	×	×	×	×	×
MP-A10	1.36	×	×	△	×	×	×	×	×	×

^a Inherent viscosities were measured at a concentration of 0.2 g/dL in TCE/*p*-chlorophenol/phenol (30/35/35=w/w/w) at 30 °C.

^b ○: Soluble at 30 °C; △: soluble in hot solvent; ×: insoluble.

Abbreviation: 1,1,2,2-tetrachloroethane (TCE), tetrahydrofuran (THF), N,N-dimethyl formamide (DMF), N,N-dimethylacetamide (DMAc), dimethyl sulfoxide (DMSO), N-methyl-2-pyrrolidinone (NMP).

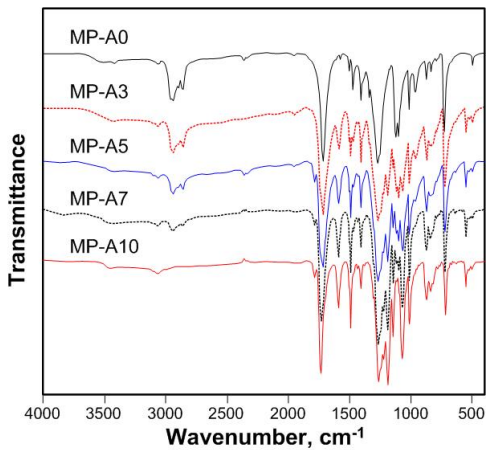


Fig. 4. FT-IR spectra of polymers. (KBr)

각 고분자들은 두 종류의 다이하이드록시 단위체 화합물의 함량비가 다르게 합성되었으므로 고분자내에 4, 4'-다이하이드록시아조벤젠의 함량이 많아짐에 따라 N=N 피크의 증가와 지방족 C-H 피크의 감소를 나타냈다.

3.2 점성도 및 용해도

Table 2는 각 고분자들의 고유점성도와 용해도를 조

사한 결과이다.

고분자들 중, 분자내에 아조벤젠기가 없거나 30 mol%를 함유한 고분자 MP-A0와 MP-A3는 용매와 함께 가열하였을 때 실험에 사용된 대부분의 용매에 용해성을 나타냈으나 그 외의 고분자들은 불용성을 나타냈다. 이는 *trans*-구조를 하고 있는 아조벤젠기의 큰 선형성과 극성으로 인하여 큰 분자간력으로 조밀하게 충전되어 있기 때문이다. 고분자들의 고유점성도(η_{inh}) 측정은 TCE/*p*-chlorophenol/phenol (30/35/35=w/w/w) 혼합용매에 0.2 g/dL 농도의 고분자 용액으로 제조하여 30±0.2의 항온수조에서 측정되었다. 그 결과 1.28-1.36 dL/g의 값으로 조사되었으며, 비교적 높은 분자량의 고분자들이 합성된 것으로 판단된다.

3.3 열적특성

합성된 고분자들의 DSC와 TGA 열곡선을 Fig. 5와 6에 나타내었으며, 이로부터 얻어 진 값들을 Table 3에 정리하였다. 고분자들의 유리전이온도(T_g)는 단독고분자인 MP-A0와 MP-A10의 경우, 각각 83과 97 °C를, 혼성고분자의 경우, 27-68 °C로써 혼성고분자의 T_g 가 더 낮게 나타났으며, 아조벤젠기의 함량이 많은 고분자의 T_g

Table 3. DSC and TGA Data of Polymers

Polymers	T_g (°C)	T_m^a , °C (ΔH_m , J/g)	T_c^a , °C (ΔH_c , J/g)	LC ^b	$T_{d-5w\%}$ (°C)	T_{d-max} (°C)	residue (wt%)
MP-A0	83	138(50)	115(55)	-	357	390	1.1
MP-A3	27	150(11)	130(11)	nematic	328	387	18.3
MP-A5	43	304(2)	-	nematic	340	385	30.9
MP-A7	68	-	-	-	327	387	33.5
MP-A10	97	-	-	-	362	477	39.9

^a T_m and T_c are peak point on DSC thermogram; ^b Liquid crystalline phase.

가 더 높게 나타났다. 이는 아조벤젠기의 단단한 구조로 인하여 고분자 사슬이 운동하는데 더 큰 에너지가 필요하기 때문이다. 고분자들 중, MP-A0, MP-A3, MP-A5는 결정성 고분자이고, MP-A7, MP-A10은 비결정성 고분자로서 용융전이온도(T_m)나 결정화온도(T_c)는 관찰되지 않았다. 고분자 MP-A3와 MP-A5는 분해온도까지 액정성이 유지되고 있음을 POM 관찰로부터 확인하였으며, DSC 열곡선상에서도 이들의 등방성 전이온도는 확인할 수 없었다. 용융점 측정기로 관찰해 본 결과, 결정성 고분자인 MP-A0, MP-A3, MP-A5의 T_m 과 T_c 는 고분자에 아조벤젠기의 함량이 많을수록 높았으며, MP-A7과 MP-A10은 용융되기 전에 분해가 일어남을 확인하였다.

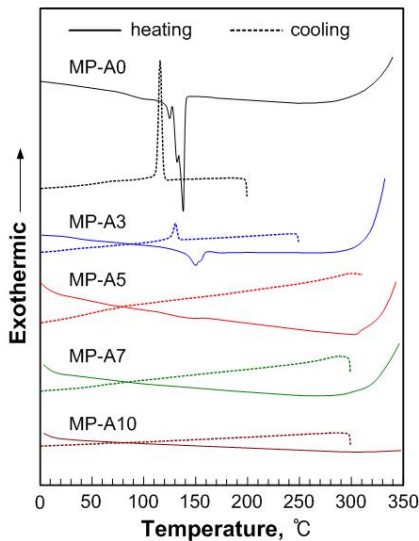


Fig. 5. DSC thermograms of polymers.

분자내 아조벤젠기가 많아짐에 따라 열전이온도가 증가하는 것은 *trans*-구조를 갖는 아조벤젠기의 선형성과 극성으로 인하여 분자사이의 거리가 가까워지고, 이로 인하여 분자간 인력의 급격히 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 따라서, 고분자 사슬의 강직성이 증가할수록 사슬의 열운동이 제한받게 되어 비결정성 고분자가 되는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 6은 합성된 고분자들의 TGA 열곡선으로써, 각 고분자 시료의 5 wt% 무게 손실이 있는 초기분해온도($T_{d-5w\%}$)는 327-362 °C, 가장 빠른 분해속도를 나타내는 온도인 최대분해온도(T_{d-max})는 385-477 °C로써 비교적 높은 분해온도를 나타냈으며, 분해 후, 800 °C에서의 잔

여량은 1.1-39.9 wt%로써 아조벤젠기의 함량이 많은 고분자일수록 더 큰 값을 나타냈다. 이는 유기 고분자 물질에서의 잔여량은 char의 생성량을 의미하고, 분자내 방향족 구조의 함량에 비례하기 때문이다.

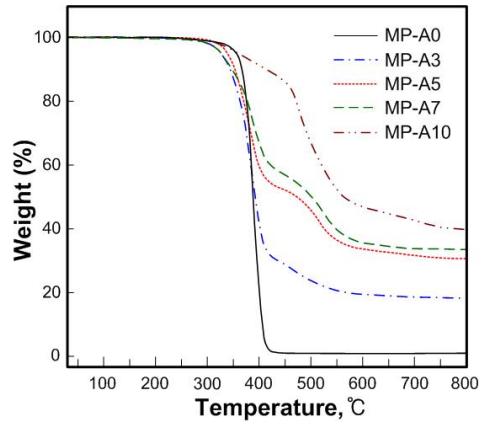


Fig. 6. TGA thermograms of polymers.

3.5 액정성

합성된 고분자들은 가열판이 부착된 POM을 이용하여 액정성을 확인하였으며, 관찰된 액정상의 texture를 Fig. 7에 나타냈다.

고분자들 중, MP-A3, MP-A5는 네마틱상의 thread like texture를 보였고, MP-A0는 액정상을 나타내지 않았으며, MP-A7은 액정상으로서의 전이와 동시에 분해되어 texture를 얻을 수 없었고, MP-A10은 분해온도 이전에 상 전이는 관찰되지 않았다. 고분자 MP-A3와 MP-A5의 경우, 등방성 온도(T_i) 이전에 분해가 일어나 T_i 는 확인할 수 없었다. POM과 mp 측정기를 이용하여 stiropalescence의 세기를 관찰한 결과, MP-A3와 MP-A5는 넓은 액정 온도구간을 나타냈으나 액정성은 약한 것으로 확인되었다.

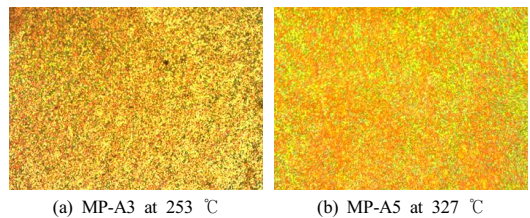


Fig. 7. Cross-polarized optical micrographs of polymers (magnification of x50).

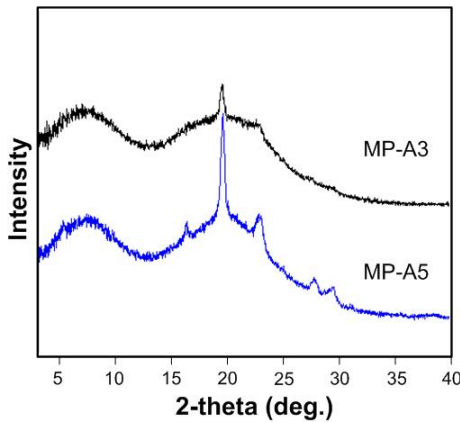


Fig. 8. X-ray diffractograms of polymers.

고분자들 중, 액정성을 나타낸 MP-A3, MP-A5의 X-선 회절곡선을 Fig. 8에 나타냈다. X-선 회절곡선을 얻기 위한 시료는 고분자를 액정온도 구간까지 가열하여 액정상을 형성시킨 후, 액체질소내에서 급냉하여 액정의 배열을 유지시킨 고분자 물질을 시료로 사용하였다. 얻어진 X-선 회절곡선에 의하면 고분자 MP-A3와 MP-A5는 액정상의 결정을 의미하는 피크를 나타냈으며, 피크의 2-theta에 해당하는 d-spacing 값은, MP-A3의 경우 19.6°에서 4.5 Å, 22.8°에서 3.9 Å을, MP-A5의 경우 17.4°에서 5.1 Å, 19.6°에서 4.5 Å, 22.7°에서 3.9 Å의 나타냄으로써 네마틱 액정임을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 아조벤젠기와 헥사메틸렌기를 주사슬에 갖는 단독고분자 또는 혼성고분자를 합성하고 물성을 조사하였다. 합성된 고분자들은 1.28-1.36 dL/g의 고유점성도를 갖는 비교적 분자량이 높은 고분자들이 합성되었으며, 아조벤젠기의 함량이 높은 고분자들은 용해도 조사에 사용된 대부분의 용매에 용해되지 않았다. 고분자내의 아조벤젠기의 함량이 증가함에 따라 용융전이온도가 급격히 높아져 아조벤젠 단위체의 함량이 50 mol% 이상인 경우 분해온도 이하에서 상전이 현상은 없었다. 용융전이온도를 나타내는 MP-A0, MP-A3, MP-A5 중, 아조벤젠기를 갖는 MP-A3, MP-A5는 넓은 액정온도구간을 갖는 액정고분자였으며, 약한 액정성을 보이는 네마틱상임을 확인하였다. 합성고분자들의 이리

한 성질의 변화는 *trans*-구조인 아조벤젠기의 선형성과 극성에서 비롯된 분자간력의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

References

- [1] Y. W. Kwon, D. H. Choi, J. I. Jin, "Liquid crystalline aromatic polyesters", *Polymer (Korea)*, vol. 29, pp. 523-535, 2005.
- [2] D. Y. Kim, "Main chain liquid crystalline polymers", *Polymer Science and Technology*, vol. 2, pp. 415-423, 1991.
- [3] H. Finkelmann, G. Rehage, "Investigations on liquid crystalline polysiloxanes, 2. Optical properties of cholesteric phase and influence of the flexible spacer on the mobility of the mesogenic group", *Macromol. Chem. Rapid Commun.*, vol. 1, pp. 733-740, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.1980.030011206>
- [4] B. Reck, H. Ringsdorf, "Combined liquid-crystalline polymers: rigid rod and semi-flexible main chain polyesters with lateral mesogenic groups", *Macromol. Rapid Commun.* vol. 7, pp. 389-396, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.1986.030070612>
- [5] R. Zentel, M. Brehmer, "Combined LC main chain/side chain polymers", *Acta Polymer*, vol. 47, pp. 141-149, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1002/actp.1996.010470402>
- [6] E. Merino, "Synthesis of azobenzenes: the coloured pieces of molecular materials", *Chem. Soc. Rev.*, vol. 40, pp. 3835-3853, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/c0cs00183j>
- [7] J. R. Park, S. J. Gu, D. S. Yoon, M. S. Bang, J. K. Choi, "Synthesis and properties of symmetrical diazomesogenic liquid crystal compounds with terminal substituents", *Appl. Chem. Eng.*, vol. 26, pp. 698-705, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.14478/ace.2015.1100>
- [8] N. Tamaoki, Y. Aoki, M. Moriyama, M. Kidowaki, "Photochemical phase transition and molecular realignment of glass-forming liquid crystals containing cholesterol/azobenzene dimesogenic compounds", *Chem. Mater.*, vol. 15, pp. 719-726, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm020234c>
- [9] H. J. Kim, "Effect of the position of azobenzene moiety on the light-driven anisotropic actuating behavior of polyvinylalcohol polymer blend films", *Appl. Chem. Eng.*, vol. 23, pp. 65-70, 2012.
- [10] J. R. Park, "Synthesis and properties of cholesteric liquid crystalline polysiloxanes with paired mesogenic groups", Master's Thesis, Kongju University, 2016.
- [11] S. Alazaroaie, V. Toader, I. Carlescu, K. Kazmierski, D. Scutaru, N. Hurduc, C. I. Simionescu, "Liquid crystalline polymers 14. Synthesis and thermal behaviour of some polyethers containing azo-mesogens", *Eur. Polym. J.*, vol. 39, pp. 1333-1339, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(03\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(03)00002-8)

- [12] X. L. Piao, J. S. Kim, Y. K. Yun, J. I. Jin, "Combined type liquid crystalline polymers composed of poly(*p*-phenylene terephthalate) main chain and azobenzene mesogenic side groups attached through polymethylene spacers", *Macromolecules*, vol. 30, pp. 2294-2299, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ma961649k>
- [13] O. M. Tanchak, C. J. Barrett, "Light-induced reversible volume changes in thin films of azo polymers: The photomechanical effect", *Macromolecules*, vol. 38, pp. 10566-10570, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ma051564w>
- [14] Y. Yu, M. Nakano, "Directed bending of a polymer film by light", *Nature*, vol. 425, pp. 145-145, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1038/425145a>
- [15] Y. Yu, M. Nakano, T. Ikeda, "Photoinduced bending and unbending behavior of liquid-crystalline gels and elastomers", *Pure Appl. Chem.*, vol. 76, pp. 1467-1477, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1351/pac200476071467>
- [16] H. Finkelmann, E. Nishikawa, G. G. Pereira, M. Warner, "A new opto-mechanical effect in solids", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, p. 015501, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.87.015501>
- [17] M. Z. Alam, A. Shibahara, T. Ogata, S. Kurihara, "Synthesis of azobenzene-functionalized star polymers via RAFT and their photoresponsive properties", *Polymer*, vol. 52, pp. 3696-3703, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.06.035>

구 수 진(Su-Jin Gu)

[정회원]



•2016년 8월 : 공주대학교 신소재공학부 고분자공학전공(공학석사)

<관심분야>

고분자합성, 광기능성 액정화합물

이 응 재(Eung-Jae Lee)

[정회원]



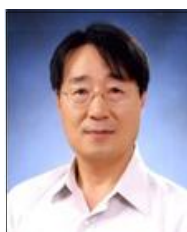
•2009년 4월 ~ 현재 : 조선이공대학교 생명환경화학공과 교수

<관심분야>

고분자합성, 고분자블렌드

방 문 수(Moon-Soo Bang)

[정회원]



•1995년 8월 ~ 현재 : 공주대학교 신소재공학부 고분자공학전공 교수

<관심분야>

고분자합성, 고성능 고분자, 광기능성 액정화합물