

구조 및 입체 이성질체 디아민 함유 폴리이미드의 구조-특성 상관관계

유환철 · 정재우 · 정진원 · 정찬문[†]

연세대학교 화학과

(2015년 5월 5일 접수, 2015년 6월 10일 수정, 2015년 7월 17일 채택)

Structure-Property Relationship of Polyimides Based on Constitutional and Stereo Isomer Diamines

Hwan-Chul Yu, Jae-Woo Jung, Jin-Won Jeong, and Chan-Moon Chung[†]

Department of Chemistry, Yonsei University, Wonju, Gangwon-do 220-710, Korea

(Received May 5, 2015; Revised June 10, 2015; Accepted July 17, 2015)

초록: 본 연구에서는 다양한 구조의 2무수물과 디아민 이성질체를 사용하여 폴리이미드를 합성하고, 폴리이미드의 화학구조-특성간의 상관관계를 연구하였다. 2무수물로서는 방향족과 지방족 구조를 사용하였고, 디아민은 phenylenediamine과 diaminocyclohexane 화합물의 구조 및 입체 이성질체 구조를 사용하였다. 합성된 폴리이미드의 용해성, 광투명성, 열적 특성 등을 조사하여 구조가 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 1,2 디아민 함유 폴리이미드는 1,4 디아민 함유 폴리이미드에 비하여 용해성과 광투명성이 높은 것으로 나타났는데, 이는 1,2 디아민의 도입이 더 불규칙하게 구부러진 폴리이미드 구조를 가지게 하여 조밀한 분자 쌓임을 방해함으로써 결과적으로 분자간의 인력을 약화시킨 결과로 판단된다. 또한 지방족 디아민의 경우 *trans* < *cis* < *trans-cis* mixture의 순으로 폴리이미드의 광투명성이 높아지고 유리전이온도(T_g)가 낮아지는 것으로 나타났는데, 그 이유도 상기의 순으로 조밀한 분자 쌓임이 더 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

Abstract: Polyimides have been prepared from a variety of dianhydrides and isomeric diamines, and their structure-property relationship has been studied. Aromatic and aliphatic dianhydrides were reacted with constitutional and stereo isomers of phenylenediamine and diaminocyclohexane. Solubility behavior, optical transparency, and thermal properties of the obtained polyimides were investigated and the effect of their chemical structure on the properties was studied. Polyimides based on 1,2 diamines showed higher solubility and higher optical transparency than those of 1,4 diamine-containing polyimides. This is probably attributed to more irregularly bent structures of 1,2 diamine-based polyimides. The bent structure would result in less close chain packing, and consequently, weaker intermolecular interactions between polyimide chains. In the cases of aliphatic diamine-based polyimides, optical transparency increased and glass transition temperature decreased in the order of *trans*, *cis*, and *trans-cis* mixture. This is also attributable to decrease in the degree of close chain packing in the same order.

Keywords: structure-property relationship, polyimide, isomeric diamine, solubility, transparency, thermal property.

서론

폴리이미드는 기계적, 화학적, 열적 특성이 우수한 고성능 고분자(high performance polymers)로 구분된다. 현재까지 주로 방향족 폴리이미드가 개발되어, 전자, 기계, 우주, 항공 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 그러나 방향족 폴리이미드는 유기용매에 대한 용해도가 낮아 가공성이 떨어지고, 황색 또

는 진한 갈색을 띠기 때문에 무색투명성을 중요시하는 분야에는 사용될 수 없는 문제가 있다. 이러한 단점은 주로 폴리이미드 분자 내 및 분자간의 전하이동 착물(charge transfer complex, CTC) 형성에 기인한다.¹⁻³ 2무수물 단위가 전자 받개로, 디아민 단위가 전자 주개로서 작용하여 CTC를 형성하는 것으로 알려져 있다.¹ CTC 형성을 감소시켜 용해도 및 투명성을 향상시키고 기계적, 열적 특성이 우수한 폴리이미드를 개발하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다.⁴⁻¹¹ 본 연구에서는 이러한 연구의 일환으로서, 폴리이미드의 화학구조-특성 관계를 규명하는 기초연구를 수행하였다.

본 연구에서는 다양한 구조의 2무수물과 디아민 화합물로

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: cmchung@yonsei.ac.kr

©2015 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

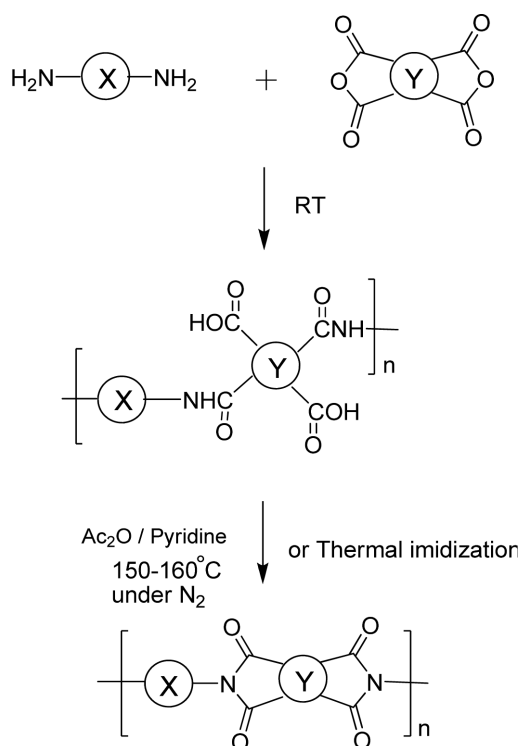
부터 전방향족, 부분지방족, 전지방족 폴리이미드를 합성하였다. 2무수물은 방향족과 지방족 구조를 사용하였고, 디아민은 방향족 및 지방족 구조, 1,2- 및 1,4-구조, 그리고 *cis*, *trans* 및 *cis-trans* mixture 구조를 사용하였다. 합성된 폴리이미드의 용해성, 점도, 광학적 특성, 열적 특성 등을 조사하여 화학구조가 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

실 험

시약 및 재료. 본 연구에서 사용한 2무수물과 디아민의 구조를 Figure 1에 나타내었다. Pyromellitic dianhydride(PMDA)와 1,2,4,5-cyclohexanetetracarboxylic dianhydride(HPMDA)는 Sigma-Aldrich사로부터 구입하였다. 1,4-Phenylenediamine(1,4-PDA), 1,2-phenylenediamine(1,2-PDA), *trans*-1,2-diaminocyclohexane(*trans*-DACH), *cis*-1,2-diaminocyclohexane(*cis*-DACH), *trans* & *cis*-1,2-diaminocyclohexane(*mix*-DACH), *trans*-1,4-diaminocyclohexane(*trans*-CHDA), *trans* & *cis*-1,4-diaminocyclohexane(*mix*-CHDA)는 TCI사로부터 구입하였다. *N,O*-Bis(trimethylsilyl)trifluoroacetamide(BSTFA)는 Sigma-Aldrich사로부터 구입하였다.

분석 및 실험장비. 적외선 흡수 분광분석(FTIR)은 Perkin Elmer Spectrum one B FTIR 분광계로 실시하였다. UV/visible 스펙트럼은 Perkin Elmer Lambda 25 UV/Vis 분광계로 측정하였다. 폴리이미드의 용해성은 실온에서 용매 1 mL에 폴리이미드 분말 10 mg을 투입하여 조사하였다. 점도는 폴리이미드 분말을 *N*-methylpyrrolidone(NMP)에 0.50 g/dL의 농도로 용해시켜 Cannon-Fenske 점도계를 사용하여 30 °C에서 측정하였다. 열분석은 질소 공급 하에 각각 20 °C/min와 10 °C/min의 승온 속도로 Shimadzu DSC-60와 TGA-50를 사용하여 실시하였다.

방향족 디아민 함유 폴리이미드 합성(Scheme 1). 50 mL 플라스크에 질소 분위기 하에서 NMP(20 mL)와 방향족 디아민(5.00 mmol)을 넣었다. 디아민이 용해된 후, 2무수물(5.00



Scheme 1. Synthesis of fully aromatic polyimides.

mmol)을 0 °C에서 첨가하였다. 혼합 용액을 1시간 동안 0 °C에서 교반하였고 23시간 동안 실온에서 교반하여 폴리이미드 산을 합성하였다. 폴리이미드는 화학적 이미드화 방법을 통해 제조하였다. 상기 용액에 무수아세트산 및 피리딘을 첨가하고 5시간 동안 150-160 °C로 가열하였다. 용액을 실온으로 냉각시킨 후 증류수에 넣어 침전을 생성시켰다. 여과에 의해 침전물을 회수한 다음 증류수와 메탄올로 세정하고 100 °C, 진공 분위기 하에서 건조하여 폴리이미드를 얻었다. IR (KBr, cm⁻¹) HPMDA/1,2-PDA: 1783, 1722, 1389; PMDA/1,2-PDA: 1781, 1740, 1380, 1359; HPMDA/1,4-PDA: 1787, 1709, 1370; PMDA/1,4-PDA: 1780, 1718, 1351.

Dianhydride		Diamine		
PMDA		1,4-PDA	mix-CHDA	<i>trans</i> -CHDA
HPMDA		1,2-PDA	mix-DACH	<i>trans</i> -DACH
				<i>cis</i> -DACH

Figure 1. Dianhydrides and diamines used in this study.

지방족 디아민 함유 폴리이미드 합성(Scheme 2). 50 mL 플라스크에 질소 분위기 하에서 NMP 20 mL와 지방족 디아민을 넣었다. 용액을 교반하면서 0 °C에서 BSTFA(5.0 mmol)를 첨가하였다. 얻어진 용액을 15분 동안 0 °C에서, 30분 동안 실온에서 교반하였다. 이후 2무수물(5.00 mmol)을 0 °C에서 투입하였다. 혼합 용액을 0 °C에서 1시간 동안 교반한 다음 실온, 질소 분위기 하에서 23시간 동안 교반하였다. 생성된 폴리믹 실릴에스터 용액을 증류수에 재침전하여 폴리믹산의 백색 침전물을 얻었다. 침전물을 여과에 의해 회수하고 증류수와 메탄올로 세척한 후 진공 하에서 건조시켰다. 폴리이미드는 화학적 이미드화 방법을 통해 제조하였다. 상기 폴리믹산의 용액에 무수아세트산 및 피리딘을 첨가하고 5

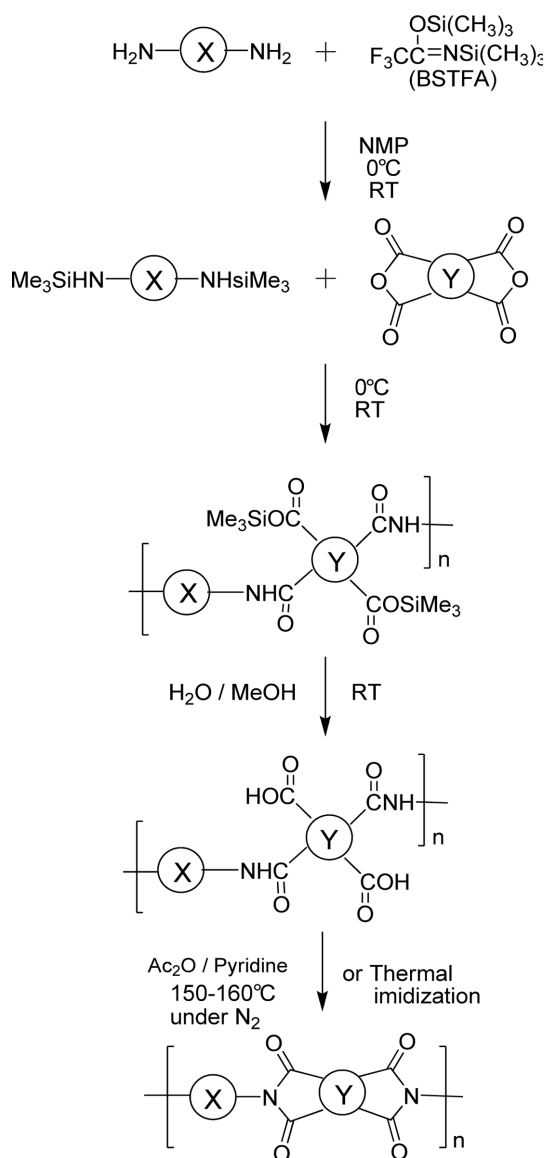
시간 동안 150-160 °C로 가열하였다. 용액을 실온으로 냉각시킨 후 증류수에 넣어 침전을 얻었다. 여과에 의해 침전물을 회수한 다음 증류수와 메탄올로 세정하고 100 °C, 진공 분위기 하에서 건조하여 폴리이미드를 얻었다. IR(KBr, cm^{-1}) HPMDA/mix-DACH: 1772, 1713, 1380; HPMDA/trans-DACH: 1773, 1714, 1381; HPMDA/cis-DACH: 1772, 1709, 1375, 1348; PMDA/mix-DACH: 1773, 1720, 1379, 1345; PMDA/trans-DACH: 1772, 1720, 1381, 1349; PMDA/cis-DACH: 1769, 1720, 1342; HPMDA/mix-CHDA: 1769, 1701, 1375; HPMDA/trans-CHDA: 1768, 1700, 1375; PMDA/mix-CHDA: 1770, 1712, 1378, 1355; PMDA/trans-CHDA: 1769, 1702, 1377, 1355.

폴리이미드 필름 제조. 광학적 특성 조사를 위한 폴리이미드 필름은 열적 이미드화에 의하여 제조하였다. 폴리믹산 용액을 세정된 석영 기판에 회전도포하여 폴리믹산 박막을 얻었다. 열적 이미드화는 폴리믹산 필름을 오븐 내에서 단계적으로 가열하여 실시하였다. 먼저, 필름을 50 °C에서 24시간 가열하여 용매를 제거하고, 온도를 80, 120, 220 °C로 단계적으로 승온하였다. 각 온도에서 1시간 동안 가열하였다. 마지막으로 250 °C에서 6시간 동안 가열함으로써 폴리이미드 필름을 제조하였다.

결과 및 토론

본 연구에서 사용한 2무수물과 디아민 화합물을 Figure 1에 나타내었다. 2무수물 화합물로서는 방향족 PMDA와 지방족 HPMDA를 사용하였다. 방향족 디아민으로서 1,4-PDA와 1,2-PDA를 사용하였고, 지방족 디아민 화합물로서는 구조 이성질체로서 1,4 및 1,2 구조(각각 CHDA 및 DACH), 입체 이성질체로서 이들의 *cis*, *trans* 및 *cis-trans* mixture 구조를 사용하였다. 이들 2무수물과 디아민 화합물들을 조합하여 전방향족, 부분지방족, 전지방족 폴리이미드를 합성하였다.

방향족 디아민 함유 폴리이미드의 경우 2무수물과 디아민을 반응시켜 폴리믹산을 합성한 후 폴리믹산의 화학적 이미드화 반응에 의하여 폴리이미드를 합성하였다(Scheme 1). 지방족 디아민 함유 폴리이미드의 경우는 지방족 디아민의 높은 염기성 때문에 폴리믹산과 디아민간의 염이 생성되어 분자량이 매우 낮아지는 것으로 알려져 있다.¹² 따라서 실릴화시약인 BSTFA를 사용하여 아미노기를 보호함으로써 염의 생성을 방지하는 *in-situ* silylation 방법이 보고되어 있다.¹³ Scheme 2에 나타내었듯이 본 연구에서는 실릴기로 보호된 디아민을 합성한 후 *in-situ* 상태에서 2무수물을 투입하여 silyl ester 구조를 가진 폴리믹산을 합성한 후 화학적 이미드화 반응을 통하여 폴리이미드를 합성하였다. 한편, 광학적 성질의 조사를 위한 폴리이미드 필름은 폴리믹산의 열적 이미드화에 의하여 제조하였다.



Scheme 2. Synthesis of fully and partially aliphatic polyimides.

합성된 폴리이미드의 FTIR 스펙트럼을 Figure 2 및 Figure 3에 나타내었다. 이미드 C=O의 asymmetric stretching에 의한 흡수띠가 1769-1780 cm^{-1} 에서, 이미드 C=O의 symmetric stretching에 의한 흡수띠가 1702-1722 cm^{-1} 에서, 그리고 C-N stretching에 의한 흡수띠가 1351-1389 cm^{-1} 에서 관찰됨으로써 폴리이미드의 생성을 확인하였다.

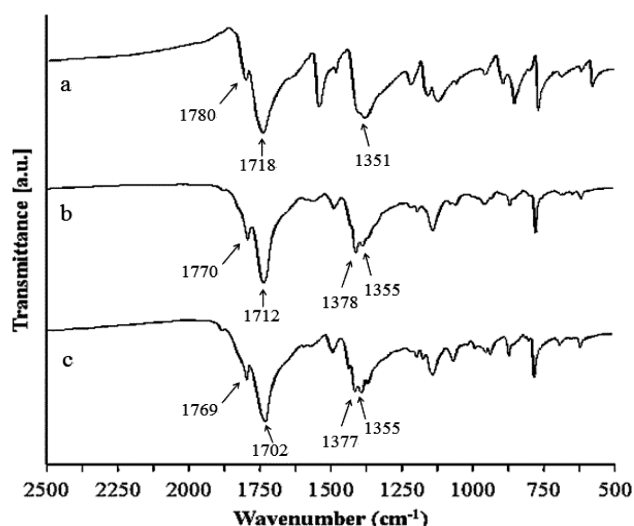


Figure 2. FTIR spectra of PMDA-based polyimides: (a) PMDA/1,4-PDA; (b) PMDA/mix-CHDA; (c) PMDA/trans-CHDA.

얻어진 폴리이미드의 용해성을 다양한 용매를 사용하여 조사하였다. 1 mL의 용매에 10 mg의 폴리이미드 분말을 넣어 용해성의 정도를 조사하였고 그 결과를 Table 1에 요약하였다. HPMDA/DACH 폴리이미드는 다양한 용매에 우수한 용해성을 나타내었다. PMDA, PDA 또는 CHDA를 포함하는

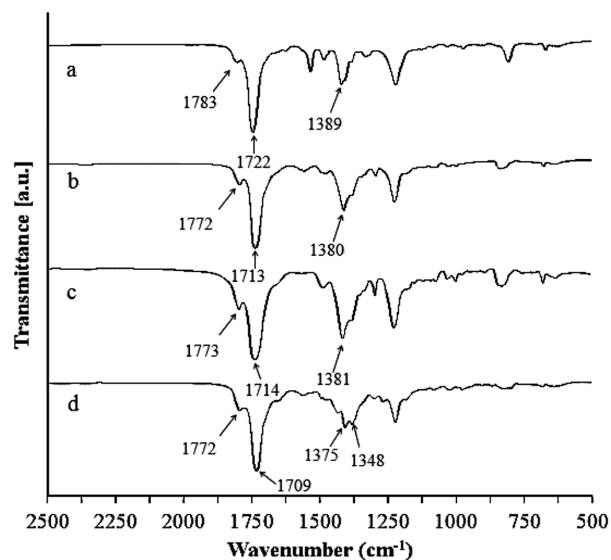


Figure 3. FTIR spectra of HPMDA-based polyimides: (a) HPMDA/1,2-PDA; (b) HPMDA/mix-DACH; (c) HPMDA/trans-DACH; (d) HPMDA/cis-DACH.

Table 1. Solubility Behavior of Polyimides^a

Polyimide ^b	Solvent ^c									
	DMSO	DMAc	DMF	NMP	THF	Dioxane	Py	CHCl ₃	Acetone	MeOH
HPMDA/1,2-PDA	++	++	++	++	++	+-	+-	+-	--	--
HPMDA/mix-DACH	++	++	++	++	++	++	++	++	+-	--
HPMDA/trans-DACH	++	++	++	++	++	++	++	++	--	--
HPMDA/cis-DACH	++	++	++	++	++	++	++	++	+-	--
PMDA/1,2-PDA	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	--	--
PMDA/mix-DACH	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	--
PMDA/trans-DACH	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	--
PMDA/cis-DACH	++	++	++	++	+-	++	++	++	+-	--
HPMDA/1,4-PDA	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	--	--	--
HPMDA/mix-CHDA	++	++	++	++	+-	+-	++	+-	--	--
HPMDA/trans-CHDA	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	--	--
PMDA/1,4-PDA	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
PMDA/mix-CHDA	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	--	--
PMDA/trans-CHDA	+-	+-	+-	+-	--	+-	+-	--	--	--

^aSolubility; ++: soluble at room temperature; +-: partially soluble; --: insoluble. ^bChemically imidized polyimides from PAAs in NMP using pyridine and acetic anhydride at 160°C for 5 h. ^cDMSO: dimethylsulfoxide; DMAc: dimethylacetamide; DMF: dimethylformamide; NMP: *N*-methyl-2-pyrrolidone; THF: tetrahydrofuran; Py: pyridine; CHCl₃: chloroform; MeOH: methanol.

Table 2. Inherent Viscosities and Yields of Poly(amic acid)s

Poly(amic acid)	Inherent viscosity (dL/g) ^a	Yield (%)
PAA-HPMDA/1,2-PDA	0.46	97
PAA-HPMDA/mix-DACH	0.47	94
PAA-HPMDA/trans-DACH	0.46	96
PAA-HPMDA/cis-DACH	0.45	92
PAA-PMDA/1,2-PDA	0.39	94
PAA-PMDA/mix-DACH	0.38	95
PAA-PMDA/trans-DACH	0.36	92
PAA-PMDA/cis-DACH	0.36	92
PAA-HPMDA/1,4-PDA	0.59	92
PAA-HPMDA/mix-CHDA	0.61	95
PAA-HPMDA/trans-CHDA	0.53	95
PAA-PMDA/1,4-PDA	0.66	93
PAA-PMDA/mix-CHDA	0.69	96
PAA-PMDA/trans-CHDA	0.67	97

^aMeasured in NMP at a concentration of 0.5 g/dL at 30 °C.

폴리이미드는 대체적으로 낮은 용해도를 나타내었다.

HPMDA를 포함하는 폴리이미드는 PMDA를 포함하는 폴리이미드보다 대체적으로 높은 용해도를 나타내는데 이것은 지방족 구조의 도입에 의하여 분자간 CTC 형성이 감소하여 결과적으로 분자간 인력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 방향족 디아민인 PDA는 폴리이미드 사슬간의 인력을 증가시켜 용해도를 감소시킨다. 아울러, DACH 함유 폴리이미드는 CHDA 함유 폴리이미드에 비하여 대체적으로 더 높은 용해도를 나타낸다. 그 이유로서는 DACH의 1,2 구조로 인하여 DACH 함유 폴리이미드가 더 불규칙하게 구부러진 구조를 가져 조밀한 분자 쌍임을 방해함으로써 결과적으로 분자간의 인력을 약화시키기 때문인 것으로 추정된다.

Table 2에 나타난 바와 같이 본 연구에서 합성된 폴리(아미드)산의 점도는 0.36-0.69, dL/g의 범위에서 나타난다. 폴리(아미드)산의 수율은 92-97%를 나타내었다.

폴리이미드 필름의 투명성을 평가하기 위하여 UV-vis 분광 분석을 실시하였다. 분석에 사용된 필름을 얻는 데 있어서 일부 폴리이미드의 용해성이 낮기 때문에 폴리(아미드)산으로 필름을 제조한 후 열적 이미드화 방법에 의하여 폴리이미드 필름을 제조하였다. 두께 2-10 μm의 폴리이미드 필름을 사용하여, 광투과율 1%에 해당하는 컷오프 파장과 400 및 550 nm에서의 광투과율을 측정하였다(Table 3). 본 연구에서 합성한 전방향족, 부분지방족, 전지방족 폴리이미드 중에서 전방향족 폴리이미드(PMDA/PDA)가 가장 긴 컷오프 파장과 가장 낮은 투과율을 나타내는 것을 볼 수 있다. 부분지방족 폴리이미드 중에서는 방향족 디아민인 PDA를 함유한 폴리이미드

Table 3. Optical Properties of Polyimide Films

Polyimide ^a	Film thickness (μm)	Cutoff wavelength (nm)	400 nm ^b transi (%)	550 nm ^c transi (%)
HPMDA/1,2-PDA	4	371	8	85
HPMDA/mix-DACH	6	218	99	99
HPMDA/trans-DACH	5	262	94	95
HPMDA/cis-DACH	6	254	96	96
PMDA/1,2-PDA	4	467	1	66
PMDA/mix-DACH	6	272	94	97
PMDA/trans-DACH	2	342	71	88
PMDA/cis-DACH	6	288	86	96
HPMDA/1,4-PDA	5	442	1	78
HPMDA/mix-CHDA	4	293	80	95
HPMDA/trans-CHDA	10	335	74	88
PMDA/1,4-PDA	6	501	0	26
PMDA/mix-CHDA	6	335	76	88
PMDA/trans-CHDA	3	344	68	88

^aFilms prepared by spin-coating of poly(amic acid)s and subsequent thermal imidization. ^bPercent transmittance at 400 nm. ^cPercent transmittance at 550 nm.

(HPMDA/PDA)가 비교적 긴 컷오프 파장과 매우 낮은 광투과율을 나타내었다. 이에 비하여 방향족 2무수물인 PMDA를 함유한 부분지방족 폴리이미드(PMDA/DACH 및 PMDA/CHDA)는 투명성이 현저히 낮아지지 않았다. 예상했던 대로 전지방족 폴리이미드(HPMDA/DACH 및 HPMDA/CHDA)가 가장 높은 투명성을 나타내었다. 이것은 지방족 구조의 도입에 따른 컨쥬게이션과 CTC 형성의 억제에 기인한 것으로 판단된다.²

지방족 1,2 디아민인 DACH와 지방족 1,4 디아민인 CHDA를 함유한 폴리이미드의 투명성을 비교할 때, DACH 함유 폴리이미드의 투명성이 CHDA 함유 폴리이미드에 비하여 높은 것이 확인되었다. 특히, mix-DACH를 함유한 전지방족 폴리이미드(HPMDA/mix-DACH)는 218 nm의 컷오프 파장과 99%의 광투과율을 나타내었다. 이것은, DACH 구조 함유 폴리이미드는 CHDA 함유 폴리이미드에 비하여 더 불규칙하게 구부러진 구조를 가짐으로써 분자간 CTC 형성을 효과적으로 방해하며, 더욱이 trans-DACH 구조와 cis-DACH 구조가 혼합된 mix-DACH 함유 폴리이미드에서는 이러한 효과가 극대화되는 것으로 판단된다. 지방족 디아민의 입체구조도 투명성에 영향을 주는 것으로 나타나는데 trans < cis < mix 순으로 투명성이 증가하는 것을 확인하였다. 이것도 상기한 바와 같이, 보다 불규칙하게 구부러진 구조를 가져 보다 효과적으로 CTC 형성을 방해할수록 투명성이 향상되는

Table 4. Thermal Properties of Polyimides

Polyimide ^a	T_g (°C)	T_{10} (°C) ^b
HPMDA/1,2-PDA	-	439
HPMDA/mix-DACH	-	437
HPMDA/ <i>trans</i> -DACH	-	461
HPMDA/ <i>cis</i> -DACH	-	412
PMDA/1,2-PDA	353	- ^c
PMDA/mix-DACH	250	405
PMDA/ <i>trans</i> -DACH	344	421
PMDA/ <i>cis</i> -DACH	305	445
HPMDA/1,4-PDA	-	492
HPMDA/mix-CHDA	-	435
HPMDA/ <i>trans</i> -CHDA	-	440
PMDA/1,4-PDA	-	- ^c
PMDA/mix-CHDA	275	417
PMDA/ <i>trans</i> -CHDA	319	464

^aPrepared by chemical imidization. ^bTemperatures at which specimens show 10% weight loss when TGA is conducted up to 500 °C. ^cWeight loss percentage is less than 10% at 500 °C.

것으로 이해할 수 있다.

폴리이미드의 열적 성질을 조사하기 위하여 유리전이온도(T_g)와 열분해온도(T_{10})를 측정하였다(Table 4). T_g 는 HPMDA의 폴리이미드에서는 관찰되지 않았다. PMDA/DACH계 폴리이미드에서는 함유된 DACH 입체구조 기준으로 mix < cis < *trans*의 순으로 T_g 가 증가하는 경향을 보였다. 이것은 상기 폴리이미드의 순서대로 좀 더 조밀한 분자 쌓임이 이루어져 분자간 인력이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. PMDA/CHDA계 폴리이미드에서도 함유된 CHDA의 입체구조 기준으로 mix < *trans*의 순으로 T_g 가 증가하여 유사한 경향을 나타내었다.

열분해온도(T_{10})는 *trans* 디아민 함유 폴리이미드가 mix 디아민 함유 폴리이미드에 비하여 높은 열분해온도를 나타낸다. 특히 HPMDA/*trans*-DACH는 전지방족 폴리이미드 중에서 가장 높은 T_{10} (461 °C)을 나타내었다.

결 론

다양한 구조의 2무수물 및 디아민 화합물을 사용하여 폴리이미드를 합성하고 그 특성을 조사하여 비교하였다. 용해성

측면에서는 HPMDA와 DACH를 함께 함유하는 폴리이미드가 다양한 용매에 가장 우수한 용해성을 나타내었다. 또한 광투과성 측면에서도 HPMDA와 DACH를 포함하는 폴리이미드가 262 nm 이하의 컷오프 파장과 94% 이상의 광투과도로 우수한 특성을 나타내었다. DACH가 함유된 폴리이미드가 높은 용해성, 투과도를 갖는 이유는 DACH가 기본적으로 지방족 구조이기 때문에 CTC 형성을 억제하고, 또한 DACH의 1,2 구조로 인하여 DACH 함유 폴리이미드가 매우 불규칙하게 구부러진 구조를 가져 분자 쌓임을 방해함으로써 분자 사슬간 간격이 넓어 결과적으로 분자간의 인력을 약화시키기 때문이다. 또한 지방족 디아민의 경우 *trans*, *cis*, *trans-cis* mixture의 순으로 폴리이미드의 광투명성이 높아지고 유리전이온도(T_g)가 낮아지는 것으로 나타났는데, 그 이유도 상기의 순으로 조밀한 분자 쌓임이 더 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 특히 전지방족 폴리이미드 HPMDA/*trans*-DACH가 우수한 용해성, 투명성, 열 안정성을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. A. S. Mathews, I. Kim, and C.-S. Ha, *Macromol. Res.*, **15**, 114 (2007).
2. T. Matsumoto, Y. Maeda, and N. Takeshima, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **13**, 327 (2000).
3. Y. Liu, Y. Zhang, S. Guan, L. Li, and Z. Jiang, *Polymer*, **49**, 5439 (2008).
4. J. Li, J. Kato, K. Kudo, and S. Shiraishi, *Macromol. Chem. Phys.*, **201**, 2289 (2000).
5. M. Hasegawa, M. Fujii, J. Ishii, S. Yamaguchi, E. Takezawa, T. Kagayama, and A. Ishikawa, *Polymer*, **55**, 4693 (2014).
6. S. V. Kumar, H.-C. Yu, J. Choi, K. Kudo, Y.-H. Jang, and C.-M. Chung, *J. Polym. Res.*, **18**, 1111 (2011).
7. H.-C. Yu, S. V. Kumar, J. Choi, K. Kudo, Y.-H. Jang, and C.-M. Chung, *High Perform. Polym.*, **24**, 418 (2012).
8. K.-H. Nam, W. Lee, K. Seo, and H. Han, *Polymer(Korea)*, **38**, 510 (2014).
9. A. E. Eichstadt, T. C. Ward, M. D. Bagwell, I. V. Farr, D. L. Dunson, and J. E. McGrath, *J. Polym. Sci. Part B; Polym. Phys.*, **40**, 1503 (2002).
10. E. Schab-Balcerzak, D. Sek, A. Volozhin, T. Chamenko, and B. Jarzabek, *Eur. Polym. J.*, **38**, 423 (2002).
11. S. Chisca, V. E. Musteata, I. Stoica, I. Sava, and M. Bruma, *J. Polym. Res.*, **20**, 111 (2013).
12. U. Shibasaki, S. Ando, M. Ueda, Y. Oishi, and K. Mori, *Macromolecules*, **35**, 2277 (2002).
13. Y. Oishi, S. Onodera, J. Oravec, K. Mori, S. Ando, Y. Terui, and K. Maeda, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **16**, 263 (2003).