

Perylene Bisimide 유도체의 적색 유기 형광체 합성 및 특성 연구

이승민¹, 정연태^{1,2,a}

¹ 부경대학교 LED융합공학전공

² 부경대학교 융합디스플레이공학과

Synthesis and Characterization of Red Organic Fluorescent of Perylene Bisimide Derivatives

Seung Min Lee¹ and Yeon Tae Jeong^{1,2,a}

¹ Department of LED Convergence Lighting for Shipbuilding, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

² Department of Display Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received June 19, 2017; Revised July 20, 2017; Accepted July 31, 2017)

Abstract: The white light of a hybrid LED is obtained by using red and green organic fluorescent layers made of polymethylmethacrylate (PMMA) films, which function as color down-conversion layers of blue light-emitting diodes. In this research, we studied the fluorescence properties of a red organic fluorophore, employing perylene bisimide derivatives applicable to hybrid LEDs. The solubility, thermal stability, and luminous efficiency are important characteristics of organic fluorophores for use in hybrid LEDs. The perylene fluorescent compounds (1A and 1B) were prepared by the reaction of 4-bromophenol and 4-iodophenol with N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1,6,7,12-tetrachloroperylene-3,4,9,10-tetracarboxyl diimide (1) in the presence of dimethyl formaldehyde (DMF) at 70°C. The synthesized derivatives were characterized by using ¹H-NMR, FT-IR, UV/Vis absorption and PL spectra, and TGA analysis. Compounds 1A and 1B showed absorption and emission at 570 nm and 604 nm in the UV/Vis spectrum. We also documented favorable solubility and thermal stability characteristics of the perylene fluorophores in our work. Perylene fluorophore 1, with the 4-bromophenol substituent 1A, exhibited particularly good thermal stability and solubility in organic solvents.

Keywords: Perylene bisimide, Organic fluorescent, Hybrid LED, PL quenching, Thermal stability, Photoluminescence (PL) & Absorption, PMMA film

1. 서론

전 세계적으로 대표적인 백열램프 조명기기에 대한

생산·수입을 금지하면서 조명산업에서 LED가 각광을 받고 있다. LED는 화합물 반도체에 전류를 흐르게 하여 P-N 접합 부분에서 전자와 홀의 결합으로 빛을 방출하는 방식으로 친환경적이고 저 전력 소비, 우수한 발광효율 등의 장점이 있다 [1]. 일반조명기기뿐만 아니라 조선해양, 자동차 헤드램프, TV용 백라이트 등 많은 산업분야로 확대되고 있으며 이러한 장점을 가진 LED는 조명산업 분야에서 백색광이 많이 요구되고 있

a. Corresponding author; ytjeong@pknu.ac.kr

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다. 백색광을 구현하기 위한 몇 가지 방법 중 하나인 GaN (gallium nitride) 계열의 blue LED와 YAG:CE 계열의 노란색 무기형광체를 사용하는 hybrid LED를 이용하여 down-conversion 유형으로 백색광을 구현하는 방식이 있다 [2]. 이러한 hybrid LED 방식에서 일반적으로 무기형광체를 사용하여 백색광을 구현하지만, 무기형광체를 사용하는 공정은 높은 제조 단가와 대량 생산 및 제조 공정의 어려움 등의 문제점을 가지고 있다 [3]. 이와 같은 무기형광체의 단점을 보완하기 위하여 무기형광체 대신에 유기형광체를 사용하는 연구가 수행되어 왔다 [4]. 유기형광체는 무기형광체와 비교하여 용해도 특성이 우수하여 분산 및 도포가 용이하고, 구조를 목적과 용도에 맞추어 쉽게 변형할 수 있어서 제조비용이 저렴하고, 대량 생산을 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 열적 특성이 낮아 수명이 짧은 문제가 있어 열적특성의 향상을 위한 연구가 계속되고 있다 [5].

Perylene bisimide 유도체는 다중 벤젠고리 결합의 매우 높은 공명 안정화 에너지를 갖는 평면구조 형태로 우수한 열 안정성, 분광특성, 내용매성 및 내화학적 등의 특성을 가지고 있어 태양전지, 안료, 염료 및 반도체와 같은 유기 전자재료로 응용되고 있다 [6,7].

본 연구실에서는 이러한 특성을 갖는 perylene bisimide 유도체의 구조를 설계하고 합성하여 유기용매에 대한 용해도와 열적·화학적 특성 및 우수한 분광특성을 갖는 유기 전자재료 개발 연구를 진행하여 왔다 [8,9].

이와 같은 연구 경험을 바탕으로 hybrid LED용 유기형광체로 사용이 가능한 perylene bisimide 유도체에 대한 연구를 수행하여, imide 위치에 원자량이 큰 브로민 원자를 도입하여 열 안정성을 증진시킨 결과를 보고하였다 [10].

본 연구에서는 더 나아가서 perylene bisimide 구조에서 bay 위치에 있는 벤젠 고리에 원자량이 큰 아이오딘, 브로민 원자를 가지고 있는 phenoxy 치환기를 도입한 적색 유기형광체(1A, 1B)를 합성하여 용해도 특성, 열적 특성 및 발광특성을 확인하고, hybrid LED에 적용할 유기형광체로서의 적성을 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시약 및 분석기기

1, 6, 7, 12 - Tetrachloroperylene - 3, 4, 9, 10 - tetracarboxylic dianhydride는 Alibaba사에서 구입

하여 사용하였고, tetra-n-butylammonium tribromide, 4-bromophenol, 4-iodophenol은 Alfa Aesar사에서 구입하여 사용하였고, PMMA (polymethyl methacrylate)는 Sigma-Aldrich사에서 구입하였다. FT-IR spectrum 측정을 위한 기기는 Pekin-Elmer (U.S.A)사의 Spectrum X를 사용하였고, UV/ Vis absorption & PL spectra 측정은 Shimadzu사의 UV-2450을 사용하였다. 구조 분석을 위해 JEOL사의 JNM ECP-400기기를 사용하여 ¹H-NMR spectrum 측정하였고, 열중량 분석(TGA)을 위한 기기는 PERKIN-ELMER사의 TGA 7을 사용하였다. PL emission & excitation spectrum은 HITACHI사의 F-4500기기를 사용하여 측정하였다.

2.2 Halophenoxy perylene 형광체의 합성

Halophenoxy perylene 유기형광체 (1A,1B)의 합성 과정을 그림 1에 나타내었다.

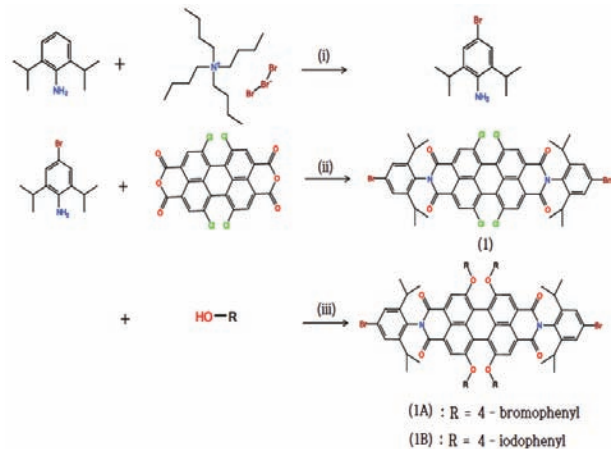


Fig. 1. Synthesis of 1A,1B; (i) CaCo_3 , CH_3OH , 25°C , 12 h, (ii) propionic acid, 120°C , 48 h, and (iii) K_2CO_3 , DMF, HCl, 70°C , 24 h.

2.2.1 4-Bromo-2,6-diisopropylaniline의 합성

Tetra-n-butylammonium tribromide (4.83 g, 10 mmol), 2,6-diisopropylaniline (1.77 g, 10 mmol)을 이용하여 이전에 본 연구실에서 보고한 합성 과정을 통하여 제조하였다 [10].

yield: 62% (1.62 g).

2.2.2 N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1, 6, 7, 12-tetrachloroperylene-3, 4, 9, 10-tetracarboxylic diimide (1)의 합성

1,6,7,12-Tetrachloroperylene tetracarboxylic dianhydride (1.01 g, 2 mmol), 4-bromo-2,6-diisopropylaniline (2.56 g, 10 mmol)과 propionic acid (60 mL)를 125 mL 플라스크에 첨가하고 argon 분위기 하에서 120°C로 48시간 반응시켰다 [11]. 반응 혼합물을 상온으로 냉각시켜 생성된 고체 침전물을 필터 하였다. 필터한 고체생성물을 물/메탄올(1:3) 혼합 용매로 세척하여 정제한 다음 완전히 건조하여 순수한 생성물 (1.10 g, 1.1 mmol)을 얻었다.

yield: 55% ¹H-NMR (CDCl₃): δ 1.15 (d, 24H) 2.63 (heptet, 4H), 7.4 (s, 4H), 8.7 (s, 4H).

2.2.3 N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1, 6, 7, 12-tetra[4-bromophenoxy]perylene-3, 4, 9, 10-tetracarboxylic diimide (1A)의 합성

N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1, 6, 7, 12-tetrachloroperylene-3, 4, 9, 10-tetracarboxylic diimide (0.30 g, 0.3 mmol), 4-bromophenol (0.50 g, 3 mmol), potassium carbonate (0.20 g, 1.5 mmol)를 100 mL 플라스크에 넣고, 여기에 용매로 20 mL의 DMF를 첨가하고, argon 분위기로 70°C에서 24시간 반응을 진행하였다 [10]. 반응이 완료된 후, 반응 혼합물을 상온에서 냉각시키고 난 다음, 반응혼합물을 50 mL의 2N hydrochloric acid에 넣었다. 2시간 동안 교반을 수행하여 침전물을 생성시킨 후, 생성된 침전물을 감압필터를 이용하여 분리했다. 이렇게 분리한 생성물을 물로 씻어주고 완전히 건조시켰다. 건조된 고체 생성물을 DCM/Acetone 혼합용매를 이용해 실리카겔 관 크로마토그래피로 분리하여 보라색 분말 형태의 순수한 생성물(0.37 g, 0.57 mmol)을 얻었다.

yield: 80%, m.p: 180~183°C, FT-IR: 2964 (C-H, aromatic), 1706, 1671 (C=O, amide), 1580 (C=C, aromatic), 1480, 1407 (C-C, aromatic), 1338, 1211 (C-N, aromatic amines), 958, 874, 741 (trisubstituted benzene ring), 822 (para-substituted ring) cm⁻¹, ¹H-NMR (CDCl₃): δ 1.1 (d, 24H), 2.63 (heptet, 4H), 6.82 (d, 8H), 7.4 (d, 8H), 7.42 (s, 4H).

2.2.4 N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1, 6, 7, 12-tetra[4-iodophenoxy]perylene-3, 4, 9, 10-tetracarboxylic diimide (1B)의 합성

N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1,6,7,12-tetrachloroperylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide (0.51 g, 0.5 mmol), 4-iodophenol (0.47 g, 5 mmol)를 1A의 합성 과정을 통하여 제조하였다.

yield: 78% (0.68 g), m.p: 180~183°C, FT-IR: 2963 (C-H, aromatic), 1708, 1670 (C=O, amide), 1583 (C=C, aromatic), 1475, 1403 (C-C, aromatic), 1334, 1277 (C-N, aromatic amines), 951, 870, 746 (trisubstituted benzene ring), 825 (para-substituted ring) cm⁻¹, ¹H-NMR (CDCl₃): δ 1.1 (d, 24H), 2.62 (heptet, 4H), 6.7 (d, 8H), 7.38 (d, 8H), 7.6 (s, 4H).

3. 결과 및 고찰

3.1 Halophenoxy perylene 형광체의 용해도 특성

합성된 halophenoxy perylene 유기형광체(1A,1B)는 용액 상태에서는 높은 발광효율을 나타내지만 고체 상태에서는 응집된 상에서 발생하는 분자간의 상호작용으로 인해 PL quenching이 발생하여 비발광상태가 나타났다. 이러한 특성으로 인해 hybrid LED 방식에서 합성된 유기형광체와 광학 특성이 우수하고 바인더 역할을 할 수 있는 폴리스타이렌을 유기용매에 녹여 플라스틱 확산판에 도포하여 사용 된다 [5]. 이러한 공정을 위하여 합성된 1A, 1B가 어느 정도의 유기용매에 대한 용해도를 가져야 한다. 일반적인 유기용매인 클로로포름, 메탄올, 에틸아세테이트, 디메틸포름아마이드에 대한 1A, 1B의 용해도 측정 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1에서 N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1, 6, 7, 12-tetrachloroperylene-3, 4, 9, 10-tetracarboxylic diimide (1) 보다 적색 유기형광체 (1A, 1B)의 용해도가 우수함을 볼 수 있다. 그 이유는 bay 위치에 있는 Cl 원자에 원자량이 큰 아이오딘, 브로민 원자를 가지고 있는 부피가 큰 phenoxy 치환기의 도입으로 평면구조를 추가적으로 휘게 하여 용매 침투가 용이하게 되어 용해도가 증진되는 것으로 생각

Table 1. The solubility of halophenoxy perylene fluorescent in organic solvents.

Perylene	Chloroform	Methanol	EA	DMF
1	△	×	△	△
1A	●	△	●	●
1B	●	×	○	○

(● : ≥ 5 wt%, ○ : 3~5 wt%, △ : 1~3 wt%, × : < 1 wt%)

한다 [12]. 그 결과, 합성된 halophenoxy perylene 유기형광체(1A,1B)는 클로로포름, 에틸아세테이트, 디메틸포름아마이드에서 3 wt% 이상 용해되는 특성을 보여주었고, 특히 1A 형광체는 메탄올을 제외한 모든 유기용매에 5 wt% 이상 용해되는 우수한 용해도 특성을 표 1에서 확인할 수 있다.

3.2 Halophenoxy perylene 형광체의 열적 특성

LED 조명 장치가 사용될 때 발열로 시간이 경과되면 100°C 이상으로 온도가 상승한다고 한다. 이러한 온도 변화에 의하여 유기형광체의 발광 세기와 색상 변화가 일어나기도 하는데, 온도에 따른 발광특성 변화를 최소화하기 위해 hybrid LED에 사용되는 유기형광체는 높은 열 안정성이 요구된다. 합성된 halophenoxy perylene 유기형광체(1A,1B)분말의 열 안정성 특성을 열중량분석(TGA)으로 측정하여 얻어진 결과를 그림 2에 나타내었다.

합성된 halophenoxy perylene 유기형광체 (1A,1B) 화합물은 다중 벤젠 고리결합의 방향성 구조이고 imide기의 벤젠 고리 위치에 원자량이 큰 브로민의 도입과 bay 위치에 분자량이 큰 할로젠 원소를 가지고 있는 phenoxy기를 도입하여 분자량 증가로 인한 열 안정성 향상을 기대하였다. 그러나 예상했던 분자량 차이보다는 원자간(C-Br, C-I) 결합세기의 차이가 열적 특성에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었으며, 그리고 bay 위치에 있는 벤젠 고리에 할로젠 치환기를 도입하는 효과보다 미미함도 이전 연구 결과와 비교함으로써 알 수 있었다 [10]. 그림 2에서 볼 수 있듯이 합성한 1A와 1B는 각각 170°C에서 약 5 wt%의 중량 감소가 일어났고, 특히 브로민 치환기를 갖는 1A 화합물이 170°C에서 385°C까지는 거의 중량 감소가 없는 결과를 보여 1B와 비교하여 상대적으로 우수한 열 안정성을 가짐을 확인하였다.

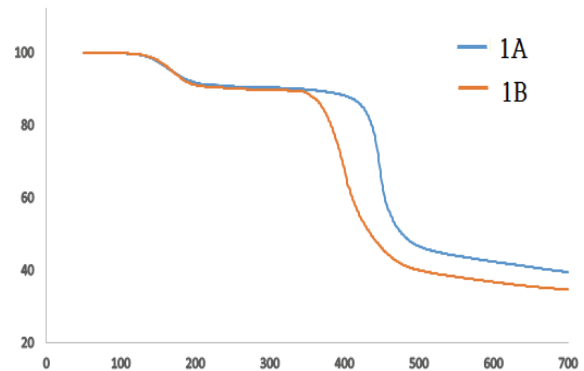


Fig. 2. TGA thermograms of halophenoxy perylene fluorescent.

3.3 Halophenoxy perylene 형광체의 분광 특성

합성된 halophenoxy perylene 유기형광체(1A,1B)를 MC (methylene chloride) 용매에 20 ppm 농도로 녹여 UV/Vis 스펙트럼 및 PL 스펙트럼을 측정하여 그림 3에 나타내었다.

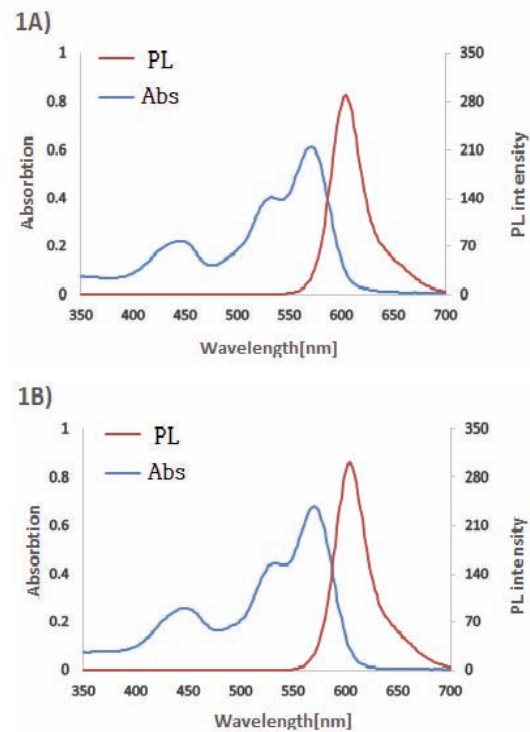


Fig. 3. UV/Vis absorption & PL spectra of 1A, 1B in methylene chloride.

Table 2. The optical properties of halophenoxy perylene fluorescent.

	Max.Absorption peak (nm)	Max.PL peak (nm)
1A	570	604
1B	570	604

그리고 얻어진 결과를 표 2에 요약하여 나타내었다. Bay 위치에 각각 4-bromophenoxy, 4-iodophenoxy 치환기를 도입한 1A, 1B 유기형광체는 동일하게 570에서 최대 흡수파장을 나타내었다. 그리고 1A, 1B를 450 nm의 광을 이용하여 여기 시킨 경우에 604 nm에서 동일한 최대 발광파장을 나타내어, 둘 다 적색 유기형광체로 활용될 수 있음을 확인하였다.

3.4 Halophenoxy perylene 형광체의 필름 제조 및 특성분석

적색 유기형광체는 down-conversion 방식의 hybrid LED에서 플라스틱 확산판에 도포하여 사용되기 때문에 투명하고 가시광선에 대한 투과율이 높고, 우수한 광학특성을 가진 PMMA (polymethyl methacrylate, Mw ~ 350,000)가 바인더로 사용된다 [13]. 이러한 연유로 PMMA 필름 안에서 유기형광체는 hybrid LED에 적합한 분광 특성이 요구된다. 제조한 유기형광체와 PMMA 최적의 조성을 결정하고, PMMA 필름상태에서의 분광 특성을 알아보기 위하여 유기형광체를 함유하는 PMMA 필름을 제조하였다.

합성한 halophenoxy perylene 유기형광체(1A,1B)의 10, 5, 1 wt% 용액을 1A, 1B 동일하게 0.04 g, 0.02 g, 0.004 g과 PMMA(0.36 g, 0.38 g, 0.40 g)를 EA (ethyl acetate 5 g) 용매에 녹여 만들었으며, 이 용액의 조성은 고체 성분(유기형광체 + 고분자)이 8 wt% 정도 된다. 이 용액을 잘 교반하여 균일한 용액으로 만든 다음, spin coater를 이용하여 미리 준비한 silicon wafer에 코팅시켰다. 그리고 10 분간 100°C hot plate 위에서 건조시킨 후, 코팅된 필름을 핀셋으로 silicon wafer에서 떼어내었다.

Halophenoxy perylene 유기형광체 1A, 1B를 첨가한 PMMA 필름의 분광 특성을 관찰하기 위하여 Hitach사의 F-4500 fluorescence spectrophotometer을 사용하여 흡수, 발광스펙트럼을 측정하였다. 그 결과, 합성된 유기형광체 1A와 1B는 576 nm, 578 nm에서

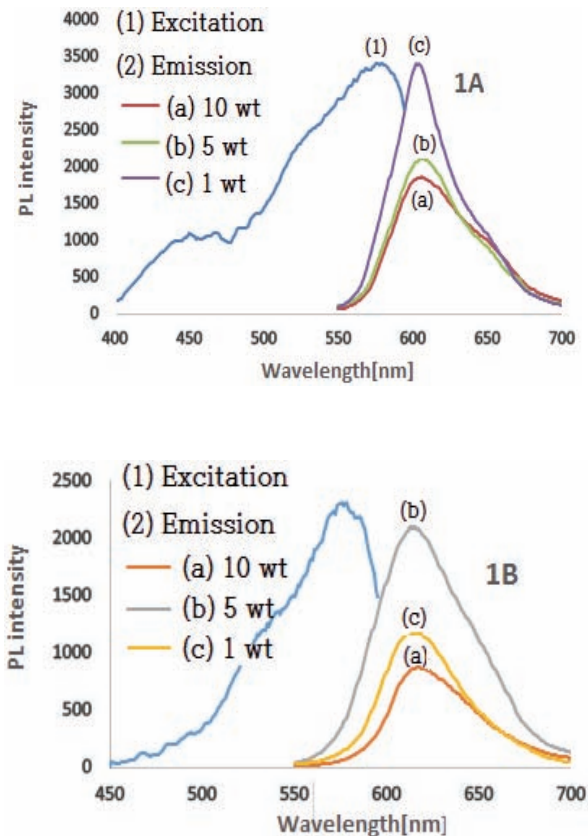


Fig. 4. PL emission and Excitation spectra of 1A and 1B in blended thin films of PMMA.

최대흡수파장을 나타내었고, 본 연구에서 개발하는 적색형광체는 blue LED를 여기 광으로 사용하여 백색광을 목표로 하는 down-conversion 방식의 hybrid LED에 사용할 목적이기 때문에 blue 영역인 450 nm 파장의 광으로 여기 시켜 유기형광체 1A와 1B는 610 nm, 612 nm 최대 발광파장의 발광스펙트럼을 얻었다.

그림 4의 (a)는 PMMA 필름 내 유기형광체 1A의 농도가 1 wt%에서 가장 강한 발광 세기를 나타내었고, 5 wt%, 10 wt%로 농도가 높아질수록 유기형광체 분자 간 거리가 짧아져 퀀칭이 일어나 발광 세기가 감소하는 것으로 생각 한다 [14]. 그림 4의 (b)에서 유기형광체 1B의 경우는 1A와 질량농도(wt%)는 같을지라도 몰농도는 낮기 때문에 상대적으로 형광체 간의 거리가 늘어나서 퀀칭이 억제되어, 농도가 5 wt%일 때 발광 세기가 가장 강하였고, 1B의 농도가 10 wt%로 높은 경우에는 형광체 분자 사이에 퀀칭이 일어나 발광세기가 약해지는 것을 확인하였다.

4. 결론

열 안정성과 분광특성이 우수하여 형광체 및 다양한 분야의 유기 전자재료로 응용 가능성을 가진 것으로 보고된 perylene bisimide 기본 구조로 4-bromo-2,6-diisopropylaniline을 도입한 bisimide 구조를 합성하고, 합성한 perylene bisimide의 bay 위치에 원자량이 큰 브로민, 아이오딘 원자를 갖는 phenoxy 치환기를 도입하여 hybrid LED용 적색 유기형광체(1A, 1B)를 합성하였다. 합성한 halophenoxy perylene 형광체 (1A,1B)의 구조를 ¹H-NMR, FT-IR을 이용하여 확인하고, 열 안정성, 용해도, 발광특성을 조사하였다.

본 연구실에서 이전에 보고한 N,N'-bis(4-bromo-2,6-diisopropylphenyl)-1,6,7,12-tetraphenoxyperylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide와 비교하였을 때 [10], 합성된 1B의 용해도는 다소 감소하였지만 1A의 경우 일반적인 유기용매인 클로로포름, 에틸아세테이트, 디메틸포름아마이드에서 5 wt% 이상의 우수한 용해도 특성을 나타내었다. 그리고 열 안정성 특성에서는 유기형광체 1A가 170°C 까지 약 5 wt%의 중량 감소가 일어난 뒤, 385°C 까지 거의 중량 감소가 없어 1B와 비교하여 높은 열 안정성을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 bay 위치에 원자량이 큰 브로민과 아이오딘을 첨가한 phenoxy 치환기의 도입으로 분자량의 증가에 따라 열 안정성의 증진을 예상하였지만 효과가 미미하였다.

이러한 결과를 바탕으로 합성한 halophenoxy perylene 유기형광체 (1A,1B)를 첨가한 PMMA 필름을 제조하여 분광특성을 분석하였다. 유기형광체 1A(1 wt%)를 첨가한 PMMA 필름을 450 nm의 blue광으로 여기 시켰을 때 가장 효율적인 발광을 나타내었으며, 최대 발광파장이 610 nm의 적색발광을 나타내어 hybrid LED용 적색형광체로 활용 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 수송기기 특화조명 핵심 기술개발 전문인력양성사업(과제번호: N0001363, 조선·해양플랜트·해양환경 LED융합조명 핵심기술개발 전문인력양성)으로 지원된 연구임.

REFERENCES

- [1] G. Singh and D. S. Mehta, *J. Opt.*, **15**, 025710 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/2/025710>]
- [2] D. Bera, S. Maslov, L. Qian, J. S. Yoo, and P. H. Holloway, *J. Disp. Technol.*, **6**, 645 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2010.2064284>]
- [3] S. B. Raut, S. J. Dhoble, and R. G. Atram, *Adv. Mat. Lett.*, **2**, 373 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2011.3075am2011>]
- [4] F. Galeotti, W. Mróz, M. Catellani, B. Kutrzeba-Kotowska, and E. Kozma, *J. Mater. Chem. C*, **4**, 5407 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C6TC00486E>]
- [5] E. Kozama, W. Mroz, and F. Galeotti, *Dyes Pigm.*, **114**, 138 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2014.11.009>]
- [6] P. S. Hariharan, J. Pitchaimani, V. Madhu, and S. P. Anthony, *J. Fluoresc.*, **26**, 395 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10895-015-1725-8>]
- [7] L. Zhang, D. He, Y. Liu, K. Wang, Z. Guo, J. Lin, and H. J. Zhang, *Org. Lett.*, **18**, 5908 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.6b03012>]
- [8] K. S. Park and Y. T. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 398 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2011.24.5.398>]
- [9] K. Baek and Y. T. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 140 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.2.140>]
- [10] S. M. Lee and Y. T. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 48 (2017). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.1.48>]
- [11] Z. Yuan, J. Li, Y. Xiao, Z. Li, and X. Qian, *J. Org. Chem.*, **75**, 3007 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1021/jo100231j>]
- [12] J. Choi, C. Sakong, J. H. Choi, C. Yoon, and J. P. Kim, *Dyes Pigm.*, **90**, 82 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2010.11.006>]
- [13] S. Y. Min, J. Bang, J. Park, C. L. Lee, S. W. Lee, J. J. Park, U. Y. Jeong, S. J. Kim, and T. W. Lee, *RSC Adv.*, **4**, 11585 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c3ra46809g>]
- [14] D. L. Dexter and J. H. Schulman, *J. Chem. Phys.*, **22**, 1063 (1954). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1740265>]