



1. 서론

현재 정보화 사회에서 폭발적으로 증가하는 다양한 정보의 형태를 하나의 통신망으로 통합시켜 제공하는 광대역초고속정보망의 구축이 절실히 요구되고 있다. 이러한 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리의 초고속화를 구현하기 위해서는 파장다중분할기능에 광증폭 기능을 도입한 고이득 광증폭 집적소자의 개발이 절대적으로 요구되고 있으며, 또한 신개념의 광소자 및 부품들의 개발이 필수적이다. 왜냐하면 현재의 눈부신 광정보·통신 산업 발전의 물적 토대인 반도체 재료와 강유전체 무기재료를 근간으로 발전한 기존의 광소자들이 거의 한계 성능을 보이고 있기 때문이다. 또한 이러한 소재들은 형태의 변형이 어려운 물론 제한된 분자구조 때문에 사용 목적에 부합되는 성능을 나타내도록 조성과 구조를 조절하기 때

까지 상용화되지 못한 이유는 유기 고분자 물질의 열적 불안정성과 광통신 파장영역(1.3 또는 1.55 μm)에서 유기 고분자 재료에 다수 존재하는 C-H 결합 overtone 밴드의 광흡수에 의해 광전송 손실이 일어나기 때문이다. 이는 광신호 전송 및 광신호 변조, 스위칭 등의 신호 처리 과정에서 발생하는 광세기 감쇠를 초래하여 광정보를 상실하게 한다. 이러한 광정보 고분자 소재가 지니고 있는 근본적인 문제점인 광세기 감소를 보상하기 위해, 기존에 장거리 광통신에 이용되는 광증폭 광섬유의 원리를 도입한 평면도파로용 광증폭 소재 연구가 절대적으로 필요하다.

광증폭 고분자 소재의 개발을 위해 현재 일본, 미국, 유럽 등의 선진국들에서는 고분자 소재에 단순한 희토류 이온 착화합물을 고분자 매질에 도핑시킨 평면도파로형 광증폭 소재에 대한 연구가 중점적으로 이루어지고 있으나 아직 개발 초기 단계이기 때문에 정확한 개념조차 확립되

특집 ─ New Optical Material(I)

유기 광증폭 소재의 현황 및 전망

노수균, 김용희, 송복주, 김환규*

우 힘들다. 결국 초고속 정보 통신 사회를 조속히 실현하기 위해서는 기존 물질의 한계를 빨리 극복하도록 신소재의 개발에 힘써야 한다. 이러한 시대 요구에 따라 유기고분자 소재 연구가 종합정보통신망 구축을 위한 미래의 광정보 재료로서 지대한 관심의 대상이 되어 있으며, 첨단 연구대상으로 가장 각광받고 있다. 이는 유기고분자 소재가 무기재료와 반도체에 비하여 다음과 같은 우수성을 갖고 있기 때문이다. 즉, 분자 화학에 의해서 물질의 성능을 쉽게 제어/합성할 수 있고, 저렴한 가격으로 인하여 경제성이 아주 좋고, 응답속도가 빠르고, 광대역폭이 수십 - 수백 Tbps 정도로 매우 높으며, 소자 제작 공정이 저온에서 단순하고, 가공성이 좋고, 집적화가 매우 유리하다.

유기 고분자 재료가 현재 사용되고 있는 무기재료보다도 월등히 우수한 특성을 가지고 있음에도 불구하고, 지금

지 않은 상태이며, 소재의 구조-광특성 상호 연관성이 체계적으로 정립되어 있지 않고 있다.^{1,2} 따라서 희토류 이온과 리간드 구조 변화에 따른 광증폭 수명 시간, 여기자 거동 등의 증폭 원리에 관한 체계적인 연구와 이를 기초로 한 분자공학에 의한 고효율 희토류 금속 착화합물의 설계 및 합성이 필요하다. 또한 희토류 이온을 고농도로 도입할 때 발생하는 비발광 효과를 없애는 방안, 합성된 착화합물의 광증폭 효과가 감쇠되지 않고 고농도로 함유할 수 있는 고분자 매질 개발 등의 총괄적인 연구가 절실히 요구된다.

여기서는 희토류 금속의 일반적인 성질 및 분광학적 성질, 이를 이용한 광증폭의 원리, 유기 광증폭 소재에 대한 기본적인 개념과 개발 현황을 보다 상세히 소개하고자 한다.

* 한남대학교 집광나노소재 연구센터 & 신소재공학과

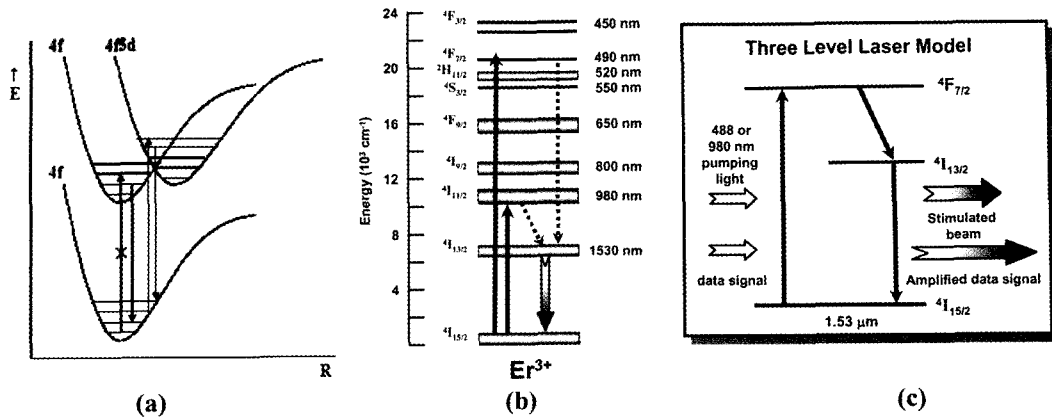


그림 1. 희토류 이온의 허용된 $4f^n-4f^{n-1}5d^1$ 전이 및 Er^{3+} 이온의 광증폭 원리

2. 희토류 원소와 희토류 이온의 광증폭원리 의 기본 개념

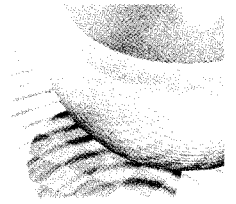
2-1. 희토류 이온의 분광학적인 성질

희토류 이온(Ln^{3+})의 전자구조는 [Xe] 구조로부터 계속하여 4f 궤도함수가 순서대로 채워지는 $4f^n$ ($n=1\sim 14$)의 구조를 갖는다. 이들 $4f^n$ 궤도함수는 바깥궤도함수인 $5s^2$ 와 $5p^6$ 에 의해 비교적 효과적으로 차폐되기 때문에 주위 음이온 및 쌍극자 분자와의 상호작용에서 공유결합성은 거의 없고 정전기적 결합성만을 띠게 된다. 이러한 $4f^n$ 궤도함수의 특성으로 인하여 란타늄 이온 및 이들 이온의 착화합물의 분광학적 특성은 d전자에 의해 특성이 이루어지는 전이금속과는 판이하게 다르며 전이금속에서 흔하지 않은 발광을 내는 특성을 갖고 있다. 수용액 및 결정 상태에서 대부분의 란타늄 이온의 착화합물이 보여주는 흡수 스펙트럼은 4f 전자배치로부터 생기는 다중도의 바닥상태와 들뜬상태간의 전이에 해당한다. 일반적 전기 쌍극자에 의한 $4f \rightarrow 4f$ 간의 전이는 선택규칙에 의해 금지되지만, 실험적으로 $4f \rightarrow 4f$ 간의 전이 흡수 스펙트럼이 관찰되었다. 이에 대한 이론적인 고찰이 60년대 중반에 Judd와 Ofelt에 의해 발표되었다.³ Judd-Ofelt 이론의 기본적 골격은 상이한 반전성(parity)을 가진 궤도 함수와 $4f^n$ 궤도 함수간에 결정장 포텐셜에 의하여 혼합이 일어나는 섭동이론이다. 즉 희토류 금속의 $4f^n$ -전자껍질의 에너지 준위는 같은 parity를 갖고 있어서 $4f^n-4f^n$ 간의 전이는 금지되어 있다. 이와는 반대로 odd-parity 파장 함수

와의 혼합으로 $4f^n-4f^{n-1}5d^1$ 전이 또는 전하이동 전이 ($4f^n-4f^{n-1}L$, L=ligand)와 혼합이 일어나서 일부 허용상태로 바뀌게 된다(그림 1a). 따라서 고체상에서는 흡수와 발광의 복사 단면적(absorption and emission cross-section)이 작고, 그에 따른 발광시간은 ms 정도로 매우 길다. 또한, 희토류 이온 주위의 전기장 영향으로 축퇴되어 있던 4f 에너지 준위가 이로 인해 Stark-splitting이 일어난다. 그러나 $5s^2$ 와 $5p^6$ 의 바깥 궤도함수에 의한 차폐로 인해 갈라짐의 크기가 작고, 그 결과로서 선포이 좁은 발광이 일어나게 된다. 또한 이러한 전이는 희토류 이온 주위에 배위하고 있는 배위자의 환경에 매우 민감하며 일반적으로 단순한 배위 환경에서보다는 복잡한 배위자의 계와 만날 때 매우 강한 흡수전이나 방출전이를 나타내는 특징을 보여주고 있다. 이러한 전이를 초과민 전이(hypersensitive transition)이라 하고 희토류 이온의 에너지 준위는 항기호로 나타낸다.

2-2. 희토류 이온의 광증폭 원리

희토류 이온은 발광 특성에 따라 가시광선 영역(Sm^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} : 강한 발광; Pr^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} : 약한 발광)과 근 적외선 영역(Pr^{3+} , Nd^{3+} , Dy^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+})에서 각각 발광한다. Er^{3+} 이온과 Nd^{3+} 이온이 발광하는 1.53와 1.34 μm 파장은 광통신에서 기본파장으로 이용되고 있다. Sm^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} 과 같은 희토류 이온은 가시광선 영역에서 발광이 일어나기 때문에 발광다이오드(LED)로 이용가능 할 것이다. 본 연구에서 다루는 Er^{3+} 착화합물



의 1.53 μm 발광은 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 에너지 준위보다 더 높은 준위에서 전달된 에너지가 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 까지 비발광성 전이를 한 후에 ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 발광성 전이가 일어나는 것으로 알려져 있다 (그림 1b). Er^{3+} 이온의 광증폭 원리는 그림 1c에 나타내었듯이 Er^{3+} 이온에 조사된 펌프 레이저(0.488, 0.98 또는 1.48 μm)의 광자(photon)를 흡수하여 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 에너지 준위보다 더 높은 에너지 상태로 들뜨게 되고, ${}^4\text{I}_{13/2}$ 에너지 준위보다 더 높은 준위에서 전달된 에너지가 준안정 들뜬 상태(metastable excited state)의 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 까지 비발광성 전이를 하게 된다.

이때 준안정 들뜬상태의 에너지와 동일한 신호광(1.55 μm)이 입사하게 되면 들뜬상태의 에너지는 신호광의 파장과 편광상태가 동일한 특성의 광으로 유도방출(stimulated emission)하게 되고 전자들은 바닥상태로 떨어지게 된다(${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, 발광성 전이). 결과적으로 입사된 신호광과 유도 방출된 광(1.55 μm)이 합해져서 신호광이 증폭이 되는 원리이다.

3. 유기광증폭 소재의 개발 현황

기존의 광섬유 실리카에 도핑되는 Er^{3+} 농도는 100~1,000 ppm 정도이며, 그 이상이 되면 Er^{3+} 이온간의 상호작용에 의해 비발광 과정이 주로 일어나서 광증폭 효율이 급격히 떨어지게 된다. 이러한 이유로 실리카 광섬유에 Er^{3+} 을 도핑 시키는 방법으로는 고이득 광증폭이 불가능하고, 따라서 평면도파로형 광증폭소자(EDWA: erbium-doped waveguide amplifiers) 형태로 30 dB 정도의 광증폭을 기대하기가 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하고 평면도파로형 직접광증폭 소자를 구현하기 위한 새로운 물질로서 유기 리간드가 붙어 있는 희토류 착염형 화합물과 고분자에 희토류 착염형 화합물을 도핑 시킨 물질이 주목을 받고 있다.

3-1. 유기 광증폭 소재의 기본 개념

기존의 무기계 광증폭 소재에 사용되는 SiO_2 와 Al_2O_3 등의 무기계에서 란타늄 이온의 자체의 낮은 몰흡광계수와 용해도로 인해 발광 세기가 약하며, 광증폭 이득을 높이기 위해 Er^{3+} 이온의 농도를 높이게 되면 Er^{3+} 이온간의 응집으로 비발광 경로(energy migration, upconversion,

excited state absorption)를 통해 발광세기가 급격하게 감소하면서 낮은 광증폭 이득을 야기 시킨다. 또한 충분한 광증폭 이득을 얻기 위해선 Er^{3+} 이온이 도핑된 광증폭 소자의 구조가 선형이 아닌 긴 loop 형태의 구조를 가지게 되어 소자 집적화 및 소자 제작공정이 어려운 단점이 있다. 최근 유기 리간드를 이용한 광증폭 소재로 이러한 문제점을 해결하기 위해 Er^{3+} 이온을 외부환경(단분자, 용매 등)으로부터 효과적으로 단절시키고 몰흡광계수가 높은 유기 리간드를 도입하려는 연구가 진행되고 있다.

유기 광증폭 소재의 기본 개념은 유기 리간드에서 빛 에너지를 흡수하여 단일항-단일항 전이(singlet-singlet transition; S_0 , S_1)로 여기된 단일항(single-state)의 에너지가 계간교차(intersystem crossing, ISC)에 의하여 삼중상태(triplet state)로 여기에너지가 이동하며, 리간드의 삼중상태에서 희토류 이온으로 비복사성 에너지 전달(nonradiative energy transfer: nonradiative ET)이 이루어진다. 이러한 유기계 광증폭 소재는 Er^{3+} 이온과 착물을 형성할 수 있는 유기 리간드로부터 에너지를 흡수하여 Er^{3+} 이온으로 에너지를 전달시킴으로써 Er^{3+} 이온을 직접 여기시키는 것보다 효과적으로 밀도 반전(population inversion)을 높일 수 있어 외부광의 세기(pump power)를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 이런 유기계 광증폭 소재는 앞서 서론에서 살펴본 바와 같이 광증폭용 소재로서의 응용성을 고려하여 희토류 금속 착화합물의 근적외선 발광에 대한 연구가 중요하게 인식되었다. 희토류 금속 착화합물의 발광은 리간드의 가장 낮은 삼중상태나 단일항에서 희토류 중심 금속 이온으로 에너지가 전달됨으로서 일어난다고 알려져 있다. 하지만, 최근 본 연구단에서 개발한 유기광증폭 소재중 에너지 전달 경로가 여기된 단일상태 및 삼중상태 뿐만 아니라 리간드의 분자간 전하 전이(ICT: intramolecular charge transfer) 상태에서도 희토류 중심 금속 이온에 에너지 전달이 되는 것을 처음으로 밝혔다.⁴

3-2. 유기 광증폭 소재의 개발현황

희토류 이온들은 몰흡광계수가 적어서 직접 여기시키는 방법으로는 증폭된 발광을 얻기가 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Er^{3+} 이온을 외부환경(단분자, 용매 등)으로부터 효과적으로 단절시키고 몰흡광계수가 높은 유기 리간드를 도입하여 에너지전달 현상을 이용한 유기

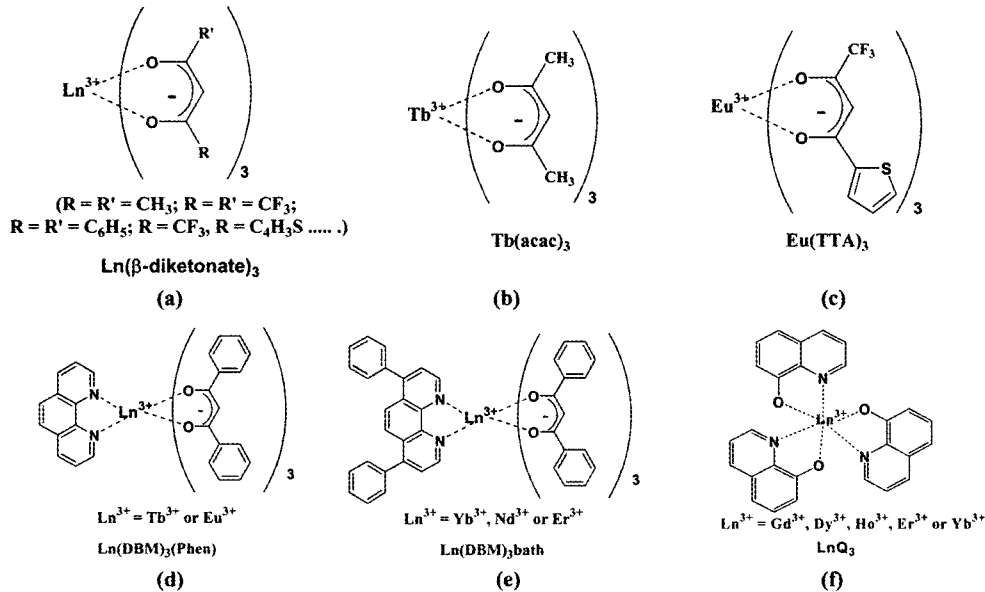


그림 2. β -Diketonate 및 hydroxyquinolate 계 착화합물의 화학적 구조

광증폭 소재의 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.

3-2-1. β -diketonate 및 8-hydroxyquinoline 계 유기 광증폭 소재

유기 증폭 소재중에 β -diketonate 유도체가 처음 보고 되었고,⁵ 여기 과정이나 에너지 전달 효율은 β -diketonate의 골격에 첨가되는 치환기에 영향을 받으며, 즉, β -diketonate 착화합물의 감응된 발광세기는 메틸, 트리플루오르메틸, 페닐, 펜타플루오르페닐, 치오페닐, 폴리 방향족 단위체 등과 같은 여러 가지 치환체에 크게 영향을 받는다(그림 2a).

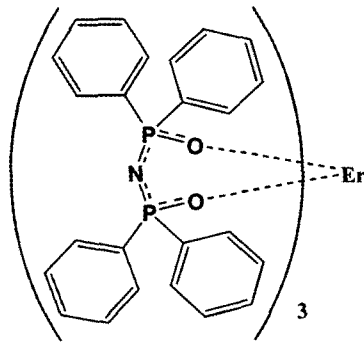
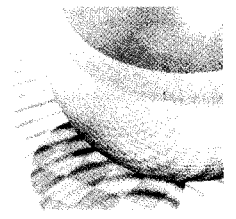
Kido 등⁶은 Tb-tris(acetylacetonato)(그림 2b)을 포함하는 OLED(organic light emitting diodes)로부터 밝은 초록색 발광을 관찰하였고 Eu-tris(thenoyltrifluoroacetato)⁷(그림 2c)로부터 붉은 발광을 관찰하였다. 또한 그들은 Eu(DBM)₃(Phen)(그림 2d), Tb(DBM)₃(Phen)(그림 2e) 및 TPD로부터 백색 전자발광 소자를 제작하였다.⁸ Yanata 등⁹은 tris(dibenzoylmethanato) 배위자를 이용하여 희토류 착물을 합성하였고 유기 LEDs로부터 근적외선 유기발광을 관찰하였다. Adachi 등¹⁰은 진공증착에 의해 Eu(DPM)₃:BCP를 합성하였고 여기서 DPM(bis(dipivaloylmethanato))의 거대한 t-부틸기는 희토류 이온의 농도 소멸을 이완하였고 리간드의 BCP 흡

수 파장 영역을 여기시킴으로 BCP에서 희토류 이온으로 효과적인 에너지 전달이 일어나는 것을 관찰하였다.

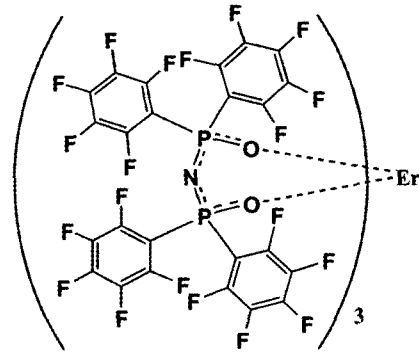
희토류 금속의 근적외선 발광에 대한 연구에서는 광증폭용 소재로서의 응용성 뿐만 아니라 근적외선 영역 전계 발광 소자로서 응용성도 타진하고 있다. 이러한 연구는 영국 London 대학의 W. P. Gillin과 R. J. Curry에 의해 이루어졌다.¹¹⁻¹² 이들은 실리콘원소에 도핑할 수 있는 tris(8-hydroxyquinoline) 계통의 EQ₃(그림 2f)를 합성하고, 351와 457 nm의 Ar⁺ 이온 레이저로 여기시켜서 가시광선과 근적외선 영역에서의 발광현상을 관찰하였다. 이들은 300 K에서 1.54 μm 의 근적외선 영역을 관찰하였고 또한 ITO/TPD/EQ₃/Al의 유기 소자를 제작하여 근적외선 영역에서의 전기발광현상(electroluminescence; EL)을 관찰하였다. Thompson 등¹³은 EQ₃(Ln = Gd, Dy, Ho, Er, and Yb)의 착화합물로 광학 및 진동적인 특성을 상세히 연구하였다.

3-2-2. Phosphinate 계 유기 광증폭 소재

근적외선 영역에서 C-H 결합을 갖는 물질 대신에 낮은 에너지 C-F 진동자를 갖는 phosphinate 케레이트를 이용한 유기 증폭물질은 현재 상당히 흥미를 갖는다. 흔히 C-H 결합은 발광 세기를 감소시키고 여기 상태를 소멸시켜 여기 상태의 수명 시간을 감소시키는 것으로 알려져



Er(tpip)₃



Er(F-tpip)₃

그림 3. Phosphinate 계 착화합물의 화학적 구조

있다. 최근에 Long 등^{14a}은 플루오르로 치환된 것과 치환되지 않은 phosphinate 킬레이트 리간드^{14b}를 이용한 Er³⁺ 유기 증폭물질을 합성하여 발광수명을 상대적으로 비교하였다(그림 3). 그들은 플루오르 치환된 Er³⁺ 착물의 발광수명시간은 그렇지 않은 것보다 용액에서는 10배, 고체상에서는 30배, 그리고 얇은 박막 상태에서는 50배 정도 증가되는 것을 보고하였다.

3-2-3. Porphyrin계 유기광증폭 소재

Harrison 등¹⁵은 기존에 알려져 있던 포르피린을 리간드로 사용하는 Er(TPP)acac 착화합물(그림 4a)을 합성하고 광학적 특성이 잘 알려져 있는 MEH-PPV와 PPP 계통의 고분자 매질(PPP-OR 11)에 도핑하여 전색 발광 소재 물질로서 응용 가능성을 확인하였다(그림 4b). 특히 포르피린은 계간교차 양자효율이 거의 100%를 나타내는 물질로, 이는 발색단의 삼중항에 의해 희토류 금속을 쉽게 여기시킬 수 있는 증감제(sensitizer)로 작용하기 때문이다.

최근 Kim 등¹⁶은 그의 연구단에서 개발한 배위자 교환 반응을 통해 널리 알려진 초분자 화합물을 약간의 화학적인 구조를 변형시켜 메탈로포르피린을 이용한 희토류 착화합물을 합성하였다. 이는 고분자 매질에 도핑시킨 기존의 연구방법과는 달리 광을 흡수하여 복합체 중심계로 에너지 전달하는 집광효과를 고려한 것으로 광물질적인 특성, 고분자 매질의 좋은 용해도, 이온-이온간의 상호작용이 없는 희토류 이온이 캡슐화된 초분자 착화합물 및 희토류

이온 착염 등을 이용한 구조 변환에 따른 여기자 수명, 여기자 거동, 에너지 전달 등의 증폭원리에 관한 체계적인 연구를 하였다.

포르피린은 다양한 전이금속(Zn, Fe, Co, Ni, Pt)들과 착화합물을 형성하며, 백금(Pt) 금속이 포함된 착화물은 백금 금속의 중원자 효과(heavy atom effect)에 의해 포르피린 단일항(S1)의 계간교차(intersystem crossing, ISC) 효율 증가로 포르피린의 삼중항 상태가 많이 생성된다. 생성된 포르피린 리간드의 삼중항 상태에서 희토류 이온으로 효과적인 비복사성 에너지 전달(nonradiative energy transfer)은 포화된 8- 및 9-배위 착화물은 Er³⁺ 이온에 직접적인 여기에서 6-배위체의 불포화된 착화물의 발광세기의 비교에서 1.53 μm 영역 부근에 아주 강한 발광세기가 보였다. 이는 고체상에서 Zn(II)-와 Pt(II)-포르피린의 포화된 9-배위체 착물(그림 4 c, d)을 메탈로포르피린의 최대흡수위치의 여기 파장으로부터 준안정 들뜸 상태에서 바닥상태로 4f 껍질내 전자전이에 의해 발광된 것이다.

삼중항 상태에서의 여기에너지는 안정한 분자상태의 삼중항 산소(triplet oxygen)가 활성이 큰 단일항 산소로 전환되면서 비발광 과정이 일어나는데, Er³⁺-(Pt-por1)₃(terpy)보다 Er³⁺-(G2-Pt-por1)₃(terpy)의 경우 외부 안테나로 인하여 비발광 물질(용매, 산소)과 Er³⁺ 이온의 상호작용을 감소시키고, 외부 안테나에서 빛을 흡수하여 여기된 에너지를 중심 이온으로 전달시키는 광집광 현상으로 근적외선에서의 강한 발광현상을 관찰할 수 있었

유기 광증폭 소재의 현황 및 전망

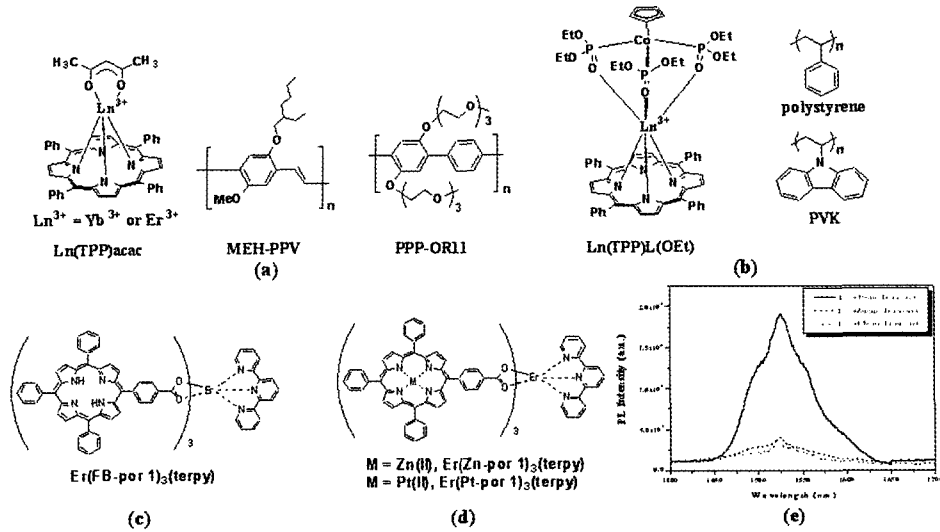


그림 4. 포르피린 계 착화합물 및 고분자 매트릭의 화학적 구조와 근적외선 발광 스펙트럼

다(그림 4 e).

3-2-4. 덴드리머형 유기 광증폭 소재

앞서 설명한 유기 단분자 리간드 외에도 덴드리머 형태를 포함하는 초분자체 리간드를 사용한 희토류 이온 착화합물에 대한 보고도 있다. 특히 불소를 포함하는 착화합물은¹⁷ 3%의 높은 양자효율 나타낸다. 이는 고에너지의 진동과 용매분자를 완전히 배제하였기 때문으로 보여진다. 그 외에도 독일 본대학의 Vögtle은 희토류 금속과 강한 배위를 하는 것으로 알려진 아마이드(amide)기로 이루어진 덴드리머를¹⁸⁻¹⁹ 합성하였는데, 이 덴드리머의 경우는 말단에 24개의 dansyl기를 포함하고 있으며 희토류 금속에 에너지를 전달해 주는 효과가 있다. 이들은 산소를 제거한 용액 상에서 근적외선 영역에서의 발광을 관찰하였다.

3-2-5. 신개념의 유기 광증폭 소재

현재 일본, 미국, 네덜란드 포함한 유럽 등의 선진 각국들은 새로운 물질로서 기존에 널리 알려진 초분자 화합물의 착염에 유기 안테나를 도입하여 에너지 전달현상을 이용한 희토류 착염형 화합물의 개발과 고분자에 희토류 착염형 화합물을 도핑 시킨 물질에 대한 연구를 중점적으로 하고 있다. 그러나, 단순한 안테나를 이용한 에너지전달 모델은 희토류 이온의 중심배위 환경에 따라 발광세기와 발광수명에 영향을 받으며, 양자효율이 여전히 낮은 특성

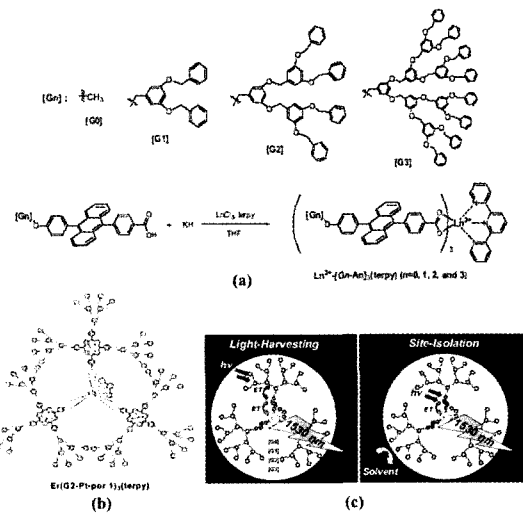


그림 5. 덴드리머 형 안트라센(a) 및 포르피린(b) 착화합물의 화학적 구조와 집광효과 및 자리분리효과(c)

과 주계와 받게와의 거리에 따라 발광특성이 크게 변한다는 단점을 나타낸다.

본 연구단에서는 앞서 언급한 단순한 희토류 이온의 고분자 매트릭의 도핑이 아닌 초분자 화합물을 이용한 구조-특성간의 상호관계를 규명하기 위해 그림 5에 나타난 안트라센(그림 5a) 및 포르피린(그림 5b) 착화합물과 집광효과를 부여한 덴드리머형 초분자 물질을 설계 합성하고 그에 따른 여기자 거동, 여기자 평균수명, 에너지 전달 메커니즘과 광증폭 원리에 관한 체계적인 연구를 하고 있다. 유기 희토류 착염형 화합물은 희토류 이온의 배위수

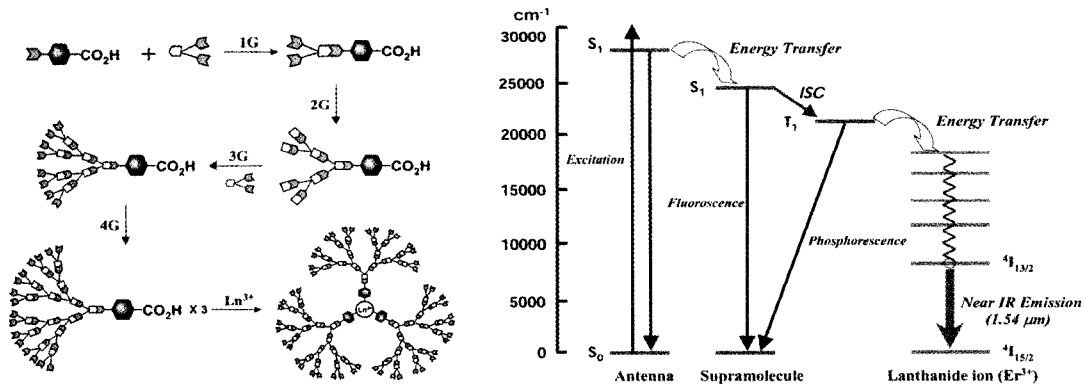
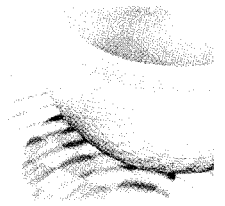


그림 6. 덴드리머형 초분자 착화합물의 설계 및 유기 광증폭소재의 에너지 전달 모식도

와 외부환경(단분자, 용매 등)에 크게 영향을 받는다. 이에 포화된 9-배위체의 희토류 착염형 화합물은 집광 효과가 좋은 포르피린 및 안트라센 유도체와 terpyridine을 도입하여 외부환경에 대한 영향을 최소화하는 자리고립 효과(site-isolation effect)와 이온-이온간의 상호작용이 없는 희토류 이온이 캡슐화된 희토류 이온 착염형 초분자 물질에 집광 효과를 부여한 덴드리머형 집광 착염형 광증폭 소재를 합성하였다.^{20,21}

그림 6에서는 분자공학으로 자리고립 효과와 집광 효과를 부여한 덴드리머형 초분자 물질의 설계 및 합성과 빛을 흡수하는 초분자 리간드에서 Er^{3+} 이온으로의 에너지 전달 모식도를 간략히 나타내었다. 유기 리간드로부터 에너지를 흡수하여 Er^{3+} 이온으로 에너지를 전달시킴으로써 Er^{3+} 이온을 직접 여기시키는 것보다 효과적으로 밀도 반전(population inversion)을 높일 수 있어 외부광의 세기(pump power)를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

이런 에너지 구배를 통한 광집광 현상은 신개념의 유기 광증폭 소재 뿐만 아니라 다른 응용분야에서도 적용이 가능하리라 생각된다.

4. 맺음말 및 전망

평면도파로형 광증폭 직접회로형 소자의 개발은 대용량 광통신, 정보저장 및 정보처리의 초고속광통신 시스템의 구현에 필요하다. 현재, Er^{3+} 이온이 도핑된 실리카 증폭기가 널리 사용하고 있지만 종래의 무기-유기 매개체에서

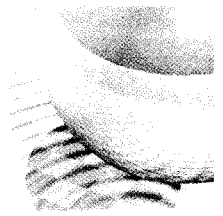
Er^{3+} 의 낮은 용해도 때문에 낮은 광증폭이 일어난다. 기존의 광섬유 실리카에 도핑하는 Er^{3+} 농도는 100~1,000 ppm 정도이며, 그 이상이 되면 Er^{3+} 이온간의 상호작용에 의해 비발광 프로세스가 주로 일어나서 광증폭 효율이 급격히 떨어지게 된다. 이러한 이유 때문에 실리카 광섬유에 Er^{3+} 이온을 도핑 시키는 방법으로는 고이득 광증폭이 불가능하고 평면도파로형 광집적회로 형태로는 30 dB 정도의 광증폭을 기대하기가 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하고 평면도파로형 광증폭 소자를 구현하기 위해 현재 일본, 미국, 네덜란드 포함한 유럽 등의 선진 각국들은 새로운 물질로서 기존에 널리 알려진 초분자 화합물을 유기 리간드로 사용하여 에너지 전달현상을 이용한 희토류 착염형 화합물의 개발과 고분자에 희토류 착염형 화합물을 도핑 시킨 물질에 대한 연구를 중점적으로 하고 있다. 그러나 이에 대한 연구가 아직 개발 초기 단계여서 이러한 신물질에 대한 개념조차도 확립되지 않은 상태로 소재의 구조-광특성 상호 연관성은 체계적으로 정립되어 있지 않다.

본 연구단에서는 단순한 희토류 이온 착화합물의 합성과 이를 고분자 매질에 단순하게 도핑시킨 기존의 연구방법과는 달리, 광을 흡수하여 복합체 중심계로 에너지 전달하는 집광 효과를 고려해 광물질적인 특성, 고분자 매질의 좋은 용해도, 이온-이온간의 상호작용이 없는 희토류 이온이 캡슐화된 초분자 착물 및 희토류 이온 착염형 초분자 물질에 집광 효과를 부여한 덴드리머형 집광 착염형 광증폭 소재를 설계 및 합성하였다. 또한 희토류 이온의 착물의 구조 변환에 따른 여기자 평균수명, 여기자 거

동, 에너지 전달 등의 증폭 원리에 관한 체계적인 연구를 하고 있다. 이를 토대로 광통신용 광증폭을 위한 신기능성 고효율 에너지 변환을 이용하여 신소재인 광소자(평면도파로형 광증폭 직접소자, 플라스틱 레이저 및 광바이오화학센서) 및 분자 광전자 소재(인공 광합성 모델 제시, 태양에너지, 광스위칭 소자, 분자 트랜지스터, 전기발광 표시광자 등)에 응용할 수 있는 획기적인 시너지 소재 개발을 창출하고자 한다. 그러므로 본 연구단의 결과에 따라서 반도체 산업에서 트랜지스터가 집적화(integrated circuit)됨으로서 현재의 정보산업혁명이 가능하였듯이, 광통신을 비롯한 광산업에서도 개개의 광소자를 집적하여 광집적 회로를 구현함으로써 광산업의 획기적 발전과 이로 인하여 생활양식의 변화를 일으킬 수 있다. 이러한 점에서 현재 사용되고 있는 광섬유형 광증폭기를 매우 작게 집적화시킬 수 있는 형태, 즉 평면도파로형 형태로 구현하는 것은 과학 기술적 가치가 매우 크다고 할 수 있다. 특히 평면도파로형 광증폭 집적 신소자 개발을 위해 필요한 초고효율 평면도파로형 광증폭 소재의 개발이 이루어지면 이 분야에 있어서 일대의 재료혁명을 불러일으킬 수 있다. 또한 초고효율 평면도파로형 광증폭 고분자 소재의 구조 변형과 광증폭 원리를 응용·활용하여, 1.55 μm 파장 영역에서의 레이저 개발에 돌파구를 제시할 수 있을 것이고, 아울러 평면도파로형 광증폭 소재 기술에 비선형 광학 색소를 도입하게 되면, 지금까지 상용화를 막았던 비선형 광학소재의 광전송 손실이라는 문제점을 일시에 해결하게 되어서 고속 스위칭 광소자용 소재기술의 상용화를 앞당길 수 있을 것이다. 이에 따라 지금까지 제한적으로 사용되었던 유기 고분자 재료를 초고속 정보·통신 산업분야에서 무한한 응용성을 갖도록 확장할 수 있다.

참고문헌

1. (a) H. K. Kim, S. G. Roh, K.-S. Hong, J.-W. Ka, N. S. Baek, J. B. Oh, M. K. Nah, Y. H. Cha, and J. Ko, *Macromol. Res.* 11(3), 133(2003) and see references cited therein. (b) H. K. Kim, J. B. Oh, N. S. Baek, S. G. Roh, M. K. Nah, and Y. H. Kim, *Bull. Kor. Chem. Soc.* 26(2), 201(2005) and see references cited therein. (c) S. G. Roh, Y. H. Kim, and H. K. Kim, "Handbook of Organic Electronics and Photonics", American Scientific Publishers, in press(2007).
2. (a) S.-G. Roh, N. S. Baek, J.-W. Ka, D. L. Joo, J. C. Lee, M. K. Nah, S. M. Ma, J. B. Oh, K. L. Paik, Y. H. Cha, J. H. Jo, and H. K. Kim, *Polymer Sci. & Technol. (SPK)* 13(6), 783(2002). (b) E. Desurvire, "Erbium-doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
3. (a) B. R. Judd, *Phys. Rev.* 127, 750(1962). (b) G. S. Ofelt, *J. Chem. Phys.* 37, 511(1962).
4. Y. H. Kim, N. S. Baek, and H. K. Kim, *ChemPhysChem* 7(1), 213(2006).
5. L. R. Melby, N. J. Rose, E. Abramson, and J. C. Caris, *J. Am. Chem. Soc.* 86, 5125(1964).
6. J. Kido, K. Nagai, and Y. Ohashi, *Chem. Lett.* 657(1990).
7. (a) J. Kido, K. Nagai, and Y. Okamoto, *Chem. Lett.* 1267(1991). (b) J. Kido, K. Nagai, and Y. Okamoto, *J. Alloys Compd.* 192, 30(1993).
8. J. Kido, W. Iketa, M. Kimura, and K. Nagai, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35, 394(1996).
9. (a) Y. Kawamura, Y. Wada, Y. Hasegawa, M. Iwamura, T. Kitamura, and S. Yanagita, *Appl. Phys. Lett.* 74, 3245(1999). (b) Y. Kawamura, Y. Wada, M. Iwamura, T. Kitamura, and S. Yanagita, *Chem. Lett.* 280(2000).
10. T. Oyamada, Y. Kawamura, T. Koyama, H. Sasabe, and C. Adachi, *Adv. Mater.* 16(13), 1082(2004).
11. W. P. Gillin and R. J. Curry, *Appl. Phys. Lett.* 74, 798(1999).
12. (a) R. J. Curry and W. P. Gillin, *Appl. Phys. Lett.* 75, 1380(1999). (b) R. J. Curry and W. P. Gillin, *Syn. Met.* 111, 35(2000).
13. J. Thompson, R. I. R. Blyth, G. Gigli, and R. Cingolani, *Adv. Funct. Mater.* 14(10), 979(2004).
14. (a) G. Mancino, A. J. Ferguson, A. Beeby, N. J. Long, and T. S. Jones, *J. Am. Chem. Soc.* 127, 524(2005). (b) T. Q. Ly and J. D. Woollins, *Coord. Chem. Rev.* 176, 451(1998). (c) S. W. Magennis, S. Parsons, A. Corval, J. D. Woollins, and Z. Pikramenou, *Chem. Commun.* 61(1999). (d) S. W. Magennis, S. Parsons, and Z. Pikramenou, *Chem. Eur. J.* 8, 5761(2002).
15. (a) B. S. Harrison, T. J. Foley, M. Bouguettaya, J. M. Boncella, J. R. Reynolds, K. S. S. Schanze, J. Shim, P. H. Holloway, G. Padmanaban, and S. Ramakrishnan, *Appl. Phys. Lett.* 79, 3770(2001). (b) T.-S. Kang, B. S. Harrison, T. J. Foley, A. S. Knefely, J. M. Boncella, J. R. Reynolds, and K. S. Schanze, *Adv. Mater.* 15, 1093(2003).
16. (a) K. L. Paik and H. K. Kim, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 370, 185(2001). (b) N. S. Baek, M. K. Nah, Y. H. Kim, S.-G. Roh, and H. K. Kim, *Bull. Kor. Chem. Soc.* 25(4), 443(2004). (c) S. G. Roh, N. S. Baek, K.-S. Hong, and H. K. Kim, *Bull. Kor. Chem. Soc.* 25(3), 343(2004). (d) N. S. Baek, S.-G. Roh, Y. H. Kim, M.-K. Nah, and H. K. Kim, *J. Nonlinear Optical Physics & Materials* 13(3-4), 627-632(2004). (e) S. G. Roh, J. B. Oh, M. K. Nah, N. S. Baek, Y. Lee, and H. K. Kim, *Bull. Kor. Chem. Soc.* 25(10), 1503(2004). (f) S.-G. Roh, M. K. Nah, J. B. Oh, N. S. Baek, and H. K. Kim, *Polyhedron* 24, 137(2004).
17. Y. Hasegawa, T. Ohkubo, K. Sogabe, Y. Kawamura, Y. Wada, N. Nakashima,



and S. Yanagida, *Angew. Chem. Int. Ed. Angl.* **39**, 357(2000).
 18. F. Vögtle, M. Gorka, V. Vicinelli, P. Ceroni, M. Maestri, and V. Balzani, *Chem PhysChem* **12**, 769(2001).
 19. V. Vicinelli, P. Ceroni, M. Maestri, V. Balzani, M. Gorka, and F. Vögtle, *J. Am. Chem. Soc.* **124**, 6461(2001).
 20. (a) N. S. Baek, M. K. Nah, Y. H. Kim, S.-G. Roh, and H. K. Kim, *Bull. Kor. Chem. Soc.* **25**(4), 443(2004). (b) J. B. Oh, K. L. Paik, J.-W. Ka, S.-G. Roh, M. K. Nah, and H. K. Kim, *Mat. Sci. Eng. C 4*, 257(2004). (c) J. B. Oh, M.-K. Nah, Y. H. Kim, and H. K. Kim, *J. Luminescence* **111**, 255(2005).
 21. (a) H. K. Kim, N. S. Baek, J. B. Oh, S.-G. Roh, Y. H. Kim, M. K. Nah, K.-S. Hong, B. J. Song, and G. Zhou, *J. Nonlinear Optical Physics & Materials* **14**, 555(2005). (b) N. S. Baek, Y. H. Kim, S.-G. Roh, B. K. Kwak, and H. K. Kim, *Adv. Funct. Mater.* **16**, 1873(2006). (c) J. B. Oh, M. K. Nah, Y. H. Kim, M. S. Kang, J. W. Ka, and H. K. Kim, *Adv. Funct. Mater.* **17**, 413(2007)

2001. 3. ~ 현재 미국재료학회 정회원
 2002. 9. ~ 현재 Member of the New York Academy of Sciences
 1996. 1. ~ 1997. 12. 편집위원, 한국고분자학회 고분자 과학과 기술
 1999. 1. ~ 2000. 12. 편집이사, 한국고분자학회 고분자 과학과 기술
 2003. 1. ~ 2004. 12. 총무이사, 한국고분자학회 분자전자부문위원회
 2002. 1. ~ 2003. 12. 기획이사, 한국고분자학회 대전. 충청지부
 1998. 1. ~ 1999. 12. 조직간사, 대한화학회 고분자화학분과회
 2004. 1. ~ 2004. 12. 총무간사, 대한화학회 고분자화학분과회
 2001. 1. ~ 2000. 12. 상임편집위원, 대한화학회 「화학세계」
 2005. 1. ~ 2005. 12. 학회발전위원, 한국고분자학회 학회발전위원회
 2005. 1. ~ 2006. 12. 편집위원, 한국광과학회 Journal of Photoscience
 2005. 1. ~ 현재 편집위원, 한국고분자학회 Macromolecular Research
 2006. 1. ~ 2006. 12. 감사, 대한화학회 대전. 충청지부
 2007. 1. ~ 2008. 12. 위원장, 한국고분자학회 분자전자부문위원회

노수균

E-mail : sg02431@hannam.ac.kr

학력
 1981 ~ 1987 대구대학교 화학과 학사
 1987 ~ 1989 경북대학교 화학과 석사
 1989 ~ 1994 프랑스 파리 6 대학교 화학과 박사

경력
 1994 ~ 1996 시간강사 및 박사후 연구원 (경북대학교, 교육부 기초과학)
 1996 ~ 1997 연수연구원 (한국과학기술원 자연과학연구소)
 1997 ~ 1998 위촉 및 선임연구원 (포항공과대학교 지능초분자연구단)
 1998 ~ 2001 박사후 연구원 (경북대학교, BK21)
 2002 ~ 2003 연구원 (한남대학교 신기능성 집광소재 연구단)
 2003 ~ 현재 연구교수 (한남대학교 집광나노소재 연구센터)

김용희

E-mail : josephin@hannam.ac.kr

학력
 1983 ~ 1986 충남대학교 화학과 학사
 1987 ~ 1989 충남대학교 화학과 석사
 1992 ~ 1996 충남대학교 화학과 박사

경력
 1996 ~ 2000 박사후 연구원 (한국표준과학연구원)
 2000 ~ 2003 선임연구원 ((주) 아하이언스)
 2003 ~ 현재 연구교수 (한남대학교 집광나노소재 연구센터)

송복주

E-mail : bjsong@hannam.ac.kr

학력
 1983 ~ 1987 한남대학교 화학과 학사
 1988 ~ 1998 한남대학교 화학과 석사 및 박사

경력
 1998 ~ 1999 박사후 연구원 (한국화학연구원)
 1999 ~ 2001 시간강사 (한남대학교)
 2001 ~ 2003 박사후 연구원 (한남대학교 신기능성 집광소재 연구단)
 2003 ~ 2004 연구교수 (한남대학교 신기능성 집광소재 연구단)
 2004 ~ 2006 선임연구원 (한국화학연구원)
 2006 ~ 현재 연구교수 (한남대학교 집광나노소재 연구센터)

약 령



김환규

Kim, Hwan Kyu: 金 煥 圭

한남대학교 신소재공학과 집광나노소재 연구센터
 전화: 042-629-8855 & 팩스: 042-629-8851
 Email: hwankim@mail.hannam.ac.kr
 Homepage(연구센터): http://www.cslhm.org
 Homepage(학과): http://www.polymerhannam.org

학력
 1980. 2. 울산공과대학 공업화학과 (현, 울산대 화학과) (공학사)
 1982. 2. 한국과학기술원(KAIST) 화학과 고분자화학 (이학석사)
 1990. 12. Carnegie-Mellon University 화학과 고분자화학 (이학박사)
 (지도교수: Prof. K. Matyjaszewski)

경력
 1982. 3. ~ 1986. 7. 한국화학연구원 연구원
 1991. 1. ~ 1993. 2. Cornell University 재료공학과 박사후 연구원
 (지도교수: Prof. C. K. Ober)
 1993. 3. ~ 1994. 8. 한국전자통신연구원 선임연구원
 (과제 리더: 폴리머 광소자)
 1994. 8. ~ 현재 한남대학교 신소재공학과 조교수, 부교수 & 교수
 2001. 6. ~ 2005. 5. 한남대학교 "신기능성 집광소재 연구단" 단장
 (과학기술부 지정 창의연구단)
 2004. 9. ~ 현재 한남대학교 "집광나노소재 연구센터" 센터장
 (과학기술부 & 한국과학재단 지정 국가지정연구실)

수상
 1. 대한화학회 고분자화학분과회 학술진보상 (1998. 4.)
 2. 한국고분자학회 고분자학술상 (2001. 4.)
 3. 한남대 우수연구교수상 (2001. 4.)
 4. 이달의 과학기술인상 (대전광역시) (2005. 1.)

학회 활동
 1993. 3. ~ 현재 한국고분자학회 종신회원
 1993. 3. ~ 현재 대한화학회 종신회원
 1987. 3. ~ 현재 미국화학회 정회원