

# 음이온 리빙중합에 의한 고분자 나노구조제어

이 재 석 · 한 선 희 · 조 규 진

## 1. 서 론

고분자 합성에 있어서 단분산의 고분자를 얻는다는 것은 무척 어렵다. 이것은 고분자가 성장할 때, 활성종이 주위의 불순물에 의해서 활성을 잃게 되어 분자량 분포가 넓어지기 때문이다. 이와같은 경우 실제대로 분자량을 제어할 수 없을 뿐 아니라 장차 정밀한 구조제어를 요하는 지능재료의 응용에 한계를 갖게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 고분자 성장 활성말단을 안정화 시키려는 노력이 계속되어 왔다. 탄소 이중결합에서 일어나는 연쇄중합에서 개시반응과 성장반응만 있고 연쇄이동이나 정지반응이 없는 경우, 단량체가 모두 중합된 후에도 활성말단이 살아 있어 다시 단량체를 넣으면 계속해서 중합이 가능하다. 이와같은 중합을 리빙중합(living polymerization)이라고 한다.

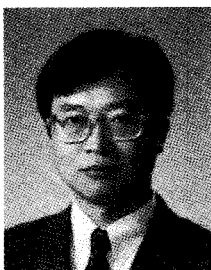
1956년 M. Szwarc에 의해서 음이온 리빙중합이<sup>1</sup>

처음 발표된 이래, 양이온 리빙중합,<sup>2</sup> 배위 리빙중합,<sup>3</sup> 그룹이동중합<sup>4</sup> 등이 연구되어 왔으며, 최근 라디칼 리빙중합에<sup>5</sup> 관한 연구가 활발하게 수행되고 있다. 이와같이 리빙중합에 대한 연구를 활발하게 수행하는 이유는 단분산 고분자의 합성이 가능하고 실제대로의 분자량을 갖는 고분자의 합성과 동시에 분자레벨에서 고분자의 분자량을 조절하여 궁극적으로 고분자를 나노 크기에서 제어할 수 있기 때문이다. 또



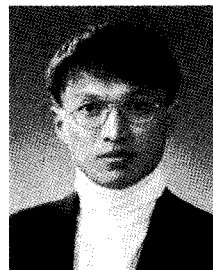
한선희

1998 전남대학교(학사)  
1998~ 광주과학기술원 신소재공학과  
현재 석사과정



이재석

1979 전남대학교(학사)  
1981 한국과학기술원(석사)  
1989 Tokyo Institute of Technology(박사)  
1989~ RIKEN, Japan  
1992 (Special Researcher)  
1992~ Univ. of Oklahoma  
1993 (Research Associate)  
1993~ RIKEN, Japan  
1994 (Frontier Researcher)  
1994~ 광주과학기술원 신소재공학과  
현재 부교수



조규진

1989 경희대학교(학사)  
1992 Univ. of Oklahoma(석사)  
1995 Univ. of Oklahoma(박사)  
1996~ 순천대학교 화학공학과 전임강사  
1998  
1998~ 순천대학교 화학공학과 조교수  
현재

### Control of Polymeric Nano Architectures by Anionic Living Polymerization

광주과학기술원 신소재공학과(Jae-Suk Lee and Seon Hee Han, Dept. of Materials Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology(K-JIST), 1 Oryong-dong, Puk-gu, Kwangju 500-712, Korea)

순천대학교 화학공학과(Gyoujin Cho, Dept. of Chemical Engineering, Suncheon National Univ., 315 Maegok-dong, Suncheon, Chonnam 540-742, Korea)

한, 하나의 단량체의 중합이 끝난 후 다른 단량체를 중합시키면 블록공중합체를 합성할 수 있다.

이와같이 리빙중합법을 이용하면 전기적, 광학적 물성을 갖는 고분자 또는 무기 나노입자의 형태, 크기, 거리를 제어하여 매트릭스 안에 분산시킴으로 고분자 나노구조의 제어가 가능하다. 본 특집에서는 음이온 리빙중합에 의해서 합성된 블록공중합체를 이용하여 고분자 나노구조제어가 가능할 것인가 알아보고, 이러한 나노구조재료를 어떤 기능에 이용할 수 있는가를 기술하고자 한다.

## 2. 음이온 리빙중합(1차 구조제어)

리빙중합 중에서 리빙성에 대한 연구가 가장 잘 이루어져 있고 산업화까지 응용되고 있는 것은 음이온 리빙중합으로서, 중합가능한 단량체에는 한계가 있지만 분자량제어 즉, 1차 구조제어를 할 수 있는 중요한 중합방법이다. 리빙중합에 의해서 얻어진 고분자는 분자량의 크기를 자유로이 조절할 수 있기 때문에 선형 1차구조가 제어되고 말단 활성기에 반응가능한 화합물을 사용하여 고분자 말단에 관능기를 갖는 텔레켈릭 고분자를 합성할 수 있다.<sup>6</sup> 또한, 관능기를 활성중으로부터 보호하고 리빙중합 과정을 거치고 난 후 보호기를 떼어내면 측쇄에 관능기를 갖는 고분자를 얻을 수 있다.<sup>7</sup> 이러한 관능기는 이온 결합에 이용되거나 나노입자를 선택적으로 잡아주는 매트릭스로 사용할 수 있다. 또한 두가지 이상의 단량체를 차례로 반응시키면 블록공중합체를 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 고차구조제어된 나노복합체의 제조가 가능하다.

## 3. 마이크로 상분리 구조의 자발적 형성과 다공성막의 제조(2차, 3차 구조제어)

리빙중합에 의해서 합성된 블록공중합체를 캐스팅

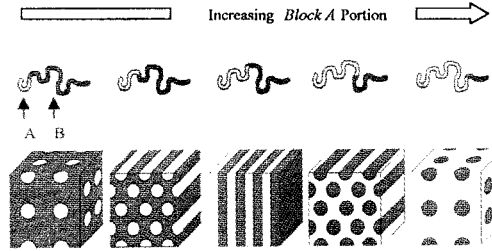


그림 1. Schematic representation of morphology of block copolymers by microphase separation.

하여 필름을 만들면, 같은 고분자는 같은 고분자끼리 모이는 성질때문에 마이크로 상분리가 일어난다. 또한, 각 블록의 분자량비를 제어하면 그림 1에 표시한 모식도처럼 구조가 변하게 되고 설계대로 그 구조를 제어할 수 있다. 즉, 구형(spherical)이나, 막대형(cylindrical) 또는 판상형(lamellar)까지 자유롭게 제어가능하다.

이러한 블록공중합체의 마이크로 상분리 성질을 이용하고, 분자량의 제어에 의한 도메인 크기를 조절하여 최종적으로 다공성막의 기공 크기를 제어한 연구결과를 소개한다.<sup>8</sup> 그림 2에 다공성 막의 제조과정을 모식도로 표현하였다.

스티렌 유도체와 이소프렌으로 된 ABA 블록공중합체를 합성하여 필름을 만들고, 상분리된 하나의 도메인, 즉 스티렌 유도체인 단량체로부터 형성된 고분자를 가교시켜 각종 용매로부터 용해되지 않도록 한다. 다른 하나의 도메인인 폴리이소프렌 부분을 오존에 의해서 분해시키면 다공성막이 제조된다. 폴리이소프렌의 분자량의 크기를 조절하여 상분리된 폴리이소프렌 도메인 크기를 조절하고 최종적으로 폴리이소프렌의 도메인이 분해되기 때문에 기공의 크기는 1차구조인 폴리이소프렌의 분자량 조절에 의해서 제어할 수 있다. 이러한 방법으로 제조된 다공성막을 그림 3에 나타냈다. 그림 3(a)는 필름의 상분리 구조를 TEM으로 관찰한 사진이고, 그림 3(b)는 가교 후, 오존분해에 의해서 제조된 다공성막의 SEM 관찰 사진이다. 상분리 사진에서 검정색으로

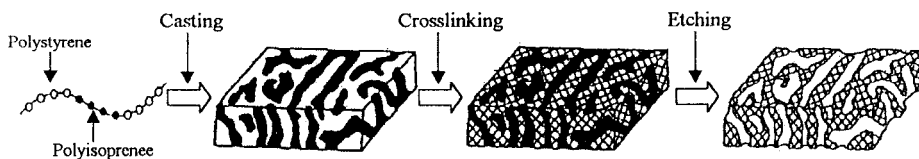


그림 2. Preparation of microporous membrane.

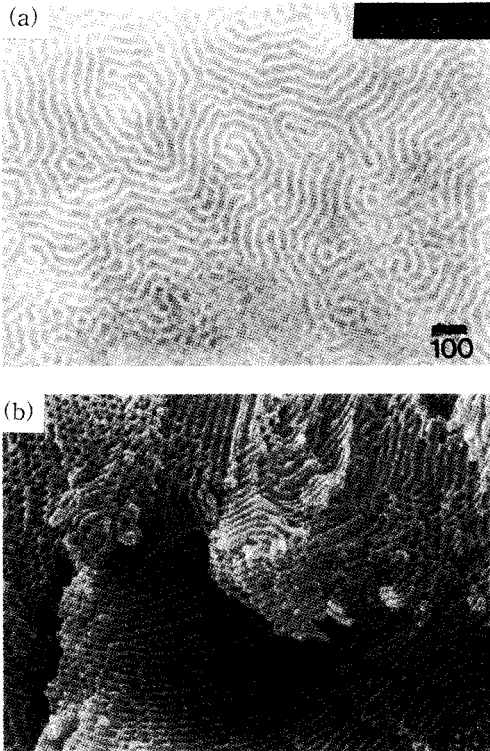


그림 3. Electron micrographs; (a) TEM of the film cast from MIBK, (b) SEM of the cross section of porous membrane, from block copolymer: (100) - (340) - (100).

나타난 도메인이 폴리이소프렌에 해당되고 오존분해되어 기공으로 나타나는데, 두 사진을 비교해 보면 폴리이소프렌의 도메인 크기와 기공의 크기가 일치함을 알 수 있다. 이와같은 방법으로 만들어진 다공성막을 전극위에 형성시켜, 효소를 고정시키고 기질의 농도를 측정할 수 있는 글루코스 센서의 제작을 시도하였다. 다공성막을 센서의 담체로 사용함으로써 기질이 기공을 용이하게 이동하기 때문에 빠른 응답시간을 갖는 센서를 제작할 수 있었다.<sup>9</sup>

최근, 블록공중합체의 상분리에 대한 연구를 활발하게 수행했던 T. Hashimoto 그룹에서도 이와같은 방법으로 다공성막을 제조함과 동시에 나노입자를 다공성막에 혼합시키려는 시도를 하였다. 다공성막의 제조는 위에서 설명한 오존분해에 의해서 이루어졌으며, 나노입자의 제조는 폴리피리딘과 금속유기물의 반응을 통하여 금속입자의 형성을 시도하였다.<sup>10</sup> 그 나노입자의 제조에 대해서는 5절에서 자세히 설명한다. 이와같은 나노입자 충전 다공성막은 장차 반응

과 동시에 반응물과 생성물을 분리가능한 막으로 이용될 수 있을 것이다.

#### 4. 나노구조제어된 고분자 재료의 응용

블록공중합체의 한 도메인에 생체, 분리, 광 기능을 도입하여 구조를 제어하면 기능의 증진 또는 제어가 가능할 것으로 판단된다. 지금까지의 연구 결과들을 설명함과 동시에 제어된 고분자 나노구조가 장차 어떤 분야에 이용 가능할 것인가를 살펴보겠다.

##### 4.1 생체 적합성 재료

친수성과 소수성으로 구성된 블록공중합체는 항혈전성 재료의 하나로서 우수하다고 알려져 있다. T. Okano 그룹은 poly(HEMA)와 폴리스티렌의 블록공중합체를 합성한 후, 혈액적합성을 검토하여 우수한 항혈전성을 나타냈다고 발표하였다.<sup>11</sup> S. Nakahama 그룹에서는 음이온 중합에 의해서 수산기를 보호하고 중합후 탈보호하는 방법으로 poly(HEMA)와 폴리스티렌의 분자량을 조절하여 분자량이 다른 각종 블록공중합체를 합성하고, 그 재료에 대한 항혈전성 시험을 실시하였다. 그 결과 불규칙 공중합체나 단독 고분자보다 친수성-소수성 도메인을 갖는 블록공중합체가 혈액응고인자의 방출이나 혈액응고시간에 있어서 우수한 항혈전성을 나타낸다는 것을 확인하였다.<sup>12</sup> 즉, 리빙중합에 의해서 나노구조가 제어된 재료를 합성하였고, 이를 이용하여 T. Okano 그룹의 항혈전성에 관한 연구결과를 뒷받침하였다.

##### 4.2 해수의 담수화막 재료<sup>13</sup>

T. Fujimoto 등은 ABACA 펜타 블록공중합체를 합성하고, B와 C의 블록에 각각 양, 음전하를 갖는 모자이크 막을 설계하여 해수의 담수화에서의 응용을 시도하였다. 음전하를 띤 B 도메인으로 나트륨 양이온이 통과하게 하고, 양이온을 띤 C 도메인으로 염소이온을 통과시켜 소금을 막분리시키는 공정을 제안하였다. 이러한 소재는 음이온 중합에 의해서 제어할 수 있으며, 나노구조를 이용할 때만 기능을 증진시킬 수 있다. 여기서 A 도메인은 막을 유지하기 위한 지지체로서의 역할과 양이온과 음이온의 통로를 구분지어 주는 역할을 동시에 수행하고 있다고 할 수 있다.

##### 4.3 광기능 재료

정보화 사회라고 일컬어 지는 현대사회는 정보의 대량 전달을 절실히 요구하고 있다. 따라서, 현재 통

신 분야에서는 전기적인 전달방식보다는 광학적인 전달방식에 의해서 대량정보의 전달이 이뤄지고 있다. 광학재료로서 무기물질이 주류를 이뤄 왔지만, 무기물을 사용할 경우 제작이 어렵고 공정에 많은 비용이 소요되기 때문에, 이러한 문제를 극복할 수 있는 유기물 및 고분자 재료를 사용하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 최근 나노구조가 제어된 고분자 재료를 이용하여 광학특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 그중 몇가지를 소개한다.

#### 4.3.1 카이랄 고분자의 광학특성<sup>14</sup>

자연계 또는 생체물질에서 찾을 수 있는 카이랄 그룹은 펩타이드의 주쇄에 존재하고 있는 구조로써, 그 카이랄 특성으로 인하여 헬리칼 구조를 갖게 된다. 폴리이소시아네이트나 폴리메타크릴레이트와 같은 고분자의 경우, 일반적으로 광학활성을 나타내지 못하나, 단량체에 카이랄 그룹을 도입하면 고분자 주쇄와 카이랄 그룹과의 섭동에 의해 한 방향의 헬리칼 구조를 형성하여 광학활성을 갖게 된다. Y. Okamoto 그룹은 합성에 대한 연구를 주로하고 있으며, M. Green은 광학성질에 대한 물성연구를 수행하고 있다.

본 연구그룹에서도 폴리이소시아네이트의 광학물성의 중요성을 인식하고 분자량의 제어를 가능하게 할 리빙성의 발견에 초점을 맞춰 연구를 수행한 결과 -98 °C에서 리빙중합이 가능함을 확인하였고, 그로부터 블록공중합체도 합성하였다. 또한 소자제작시 폴리이소시아네이트만을 사용할 경우 광산란에 의해서 광축정이 곤란한 문제를 폴리이소시아네이트와 무정형인 폴리스티렌과의 블록공중합체 합성으로 해결할 수 있었다. 현재 카이랄 특성과 헬리칼 구조를 이용한 정보저장 소자 등의 광소자 연구가 진행되고 있다.

#### 4.3.2 분자간 상호작용의 광전특성 연구<sup>15</sup>

광통신에 사용되는 유기물이나 고분자는 전기적 및 광학적 특성이 요구되어 지는데, 응용되고 있는 재료로는 유기비선형 재료, 유기발광 재료, 유기광굴절 재료 등이 있고 소자화할 경우 유기물 및 고분자 광학물질을 혼합한다든지, 광전기능을 갖는 물질을 측쇄에 붙여 중합하고 고분자량화 하여 사용한다. 또한, 광학물성을 갖는 고분자거리 블렌드하여 광학소자에의 응용을 고려하고 있는데, 성질이 다른 두 가지 물질을 혼합하면 불균일하게 분포되거나 같은 물질끼리 모이는 현상이 일어나, 최종적으로 광전기능성 물성을 저하시키는 원인이 되고 있다.

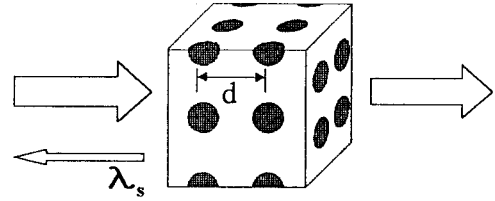


그림 4. Schematic representation for photonic crystal.

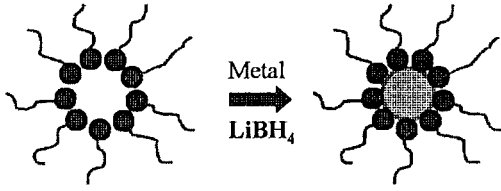
이와같은 현상은 분자간의 상호작용(intermolecular interaction)이 중요한 역할을 하는데 비선형 고분자에서의 dipole-dipole interaction에 의한 영향, 형광 유기물에서의 에너지 전이 현상, aggregate, excimer, exiplex 등이 이에 해당한다. 그러나 이러한 혼합계나 불규칙 공중합체는 전기광학적 물성을 갖는 유기물 또는 고분자가 불균일하게 분산되어 있기 때문에, 나타나는 현상은 통계적인 특성을 보여주고 있다. 따라서, 리빙중합에 의해서 분자간의 거리와 분자수를 정밀하게 제어하고 균일한 크기를 갖는 나노구조를 형성하거나 분자구조를 조절하면, 분자간 상호작용이 광전특성에 미치는 영향에 대한 정밀한 연구가 가능하고, 최적의 광전특성을 갖는 물질의 설계 및 합성이 가능하다.

#### 4.3.3 포토닉 크리스탈(Photonic Crystal)의 원리 규명<sup>16</sup>

리빙중합을 이용하면 블록공중합체의 합성이 용이하고 그림 4와 같이 구형의 형태를 갖는 도메인의 크기 및 구형간 거리의 제어가 가능하다. 그림과 같이 나노구조제어된 고분자에는 일부 파장의 빛이 통과하지 못하는 현상이 나타난다. 통과하지 못하는 빛의 파장은 구형과 구형 사이의 거리와 관계가 있다. 이러한 재료를 일종의 포토닉 크리스탈이라고 한다. 이러한 원리를 규명하기 위해서는 나노구조제어된 재료의 합성이 중요한데, 리빙중합을 이용하면 블록공중합체의 합성이 가능하고, 구형의 크기 및 구형 사이의 거리가 제어될 수 있다. 즉, 리빙중합에 의해서 고분자 나노구조제어를 시도하고 제어된 재료를 이용하면 포토닉 크리스탈 원리를 규명할 수 있을 것이다.

## 5. 나노입자의 제조 및 코팅

최근 유기 및 무기 나노입자에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 반도체 나노입자는 같은 물질이면



### Reverse Micelle

그림 5. Preparation of nano particles by reverse micelle method.

서도 입자 크기가 조절되면 전 가시광선 영역에서 원하는 파장의 빛을 낼 수 있어서 더욱 흥미롭다고 할 수 있다. 그러나, 나노입자를 그대로 사용한 경우 소자화가 어려울 뿐 아니라 효율도 저하될 수 있다. 따라서, 나노입자를 매트릭스 안에 분산시키는 연구는 나노입자의 소자에의 응용을 위해서 필요하다.

### 5.1 나노입자의 제조

#### 5.1.1 역마이셀법과 환원법에 의한 나노입자 제조<sup>17</sup>

역마이셀과 환원을 이용한 나노입자의 제조는 이론적으로 계면활성제가 혼합된 용매 내에서 계면활성제의 자기집합체인 마이셀을 생성시켜 이용하는 방법이다. 일반적으로 계면활성제가 CMC(critical micelle concentration) 이상 존재하게 되면 역마이셀이 형성되고, 친수성 부분에 금, 무기 산화물 등이 모이게 된다. 이때  $\text{LiBH}_4$ 나  $\text{NaBH}_4$  같은 환원제를 용액에 주입하면 쉽게 특정 크기의 나노입자가 제조된다. 나노입자 형성후에도 이들은 여전히 계면활성제의 역할을 통해 입자끼리의 응집이 방지되어 오랜 기간 동안 나노크기의 입자로 보존된다. 역마이셀의 형태나 나노입자 제조 과정을 도식적으로 그림 5에 나타내었다.

#### 5.1.2 Citrate-Induced Reduction법<sup>18</sup>

본 환원법은 오래전부터 널리 알려진 금속입자의 제조 방법으로 Frens에 의해 개념이 확립되었고, 그 후 많은 연구그룹에 의해서 제조되었는데, 10-20 nm 크기의 금속입자 제조시 용이하다. 벌크상태로 존재하는 금속과 3차 증류수의 혼합용액을 끓이는 과정에서 sodium citrate를 주입하면 수십초 내에 용액이 특정 물질의 분자칼라(금의 경우에는 자주빛)로 변하는데, 이로써 나노입자가 생성되었음을 알 수 있다. 이 방법은 50 nm 이상의 크기를 갖는 입자제조시에는 크기분포가 넓은 단점이 있지만, 20 nm 크기의 입자제조에는 용이하고, 입자경 분포도 매우 좁아 많이 이용된다.

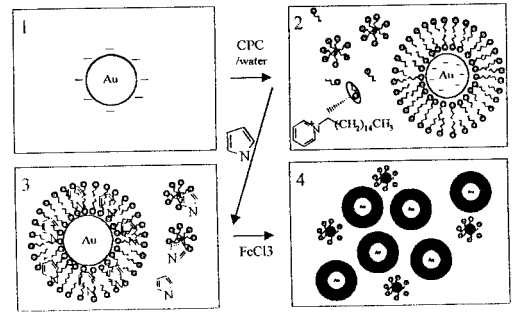


그림 6. Procedure of polymer coating processing on nano particles.

#### 5.1.3 Seeding법<sup>19</sup>

씨딩(seeding)법은 금 나노입자제조에 대한 연구를 집중적으로 하고 있는 펜실베이니아대학의 Natan 그룹에 의해 최근 50 nm 이상의 비교적 큰 나노입자제조시 이용되고 있는 방법이다. 양이온을 띄고 있는 금 입자 표면에 수산기로 환원시킬 수 있는 하이드록실아민을 주입함으로써 콜로이드 금 나노입자를 키워나가는 나노입자 제조법이다. 널리 쓰이고 있는 citrate-induced reduction법보다 비교적 큰 입자제조시 사용되고 입자경 분포가 좁다는 장점이 있다.

#### 5.1.4 습식화합법<sup>20</sup>

반도체 나노입자의 제조시 이용되는 방법으로 크게 bottom-up 방식과 top-down 방식으로 크게 나뉘는데, top-down 방식이 고가의 장비를 필요로 하는 반면, bottom-up 방식은 경제적으로 쉽게 수 나노 크기의 반도체 입자를 제조할 수 있는 장점이 있다.

#### 5.2 나노입자의 코팅<sup>21</sup>

제조된 나노입자의 응집이나 이로 인한 침전을 방지하고 특별히 반도체의 경우에는 입자표면의 불활성화(passivation)역할을 할 수 있도록 나노입자의 표면에 고분자 물질이나 무기 반도체 물질을 얇게 코팅하는 방법이 있는데, 그중 하나로써 자기집합체법을 이용한 템플레이트방법이 사용된다.

이는 그림 6에서 보여준 것과 같이 계면활성제의 자기응집 성질을 이용하여 입자의 표면에 템플레이트를 만들고, 원하는 물질을 템플레이트 내부, 즉 특정 위치에 확산시킴으로 입자 표면을 원하는 물질로 코팅처리 할 수 있다. 규모면에 있어서도 대량생산이 가능하고, 다량의 안정한 나노입자를 제조하는데 경제적이고 우수한 방법이다. 템플레이트 방법을 이용한 나노입자의 코팅에 대한 결과는 그림 7의 TEM

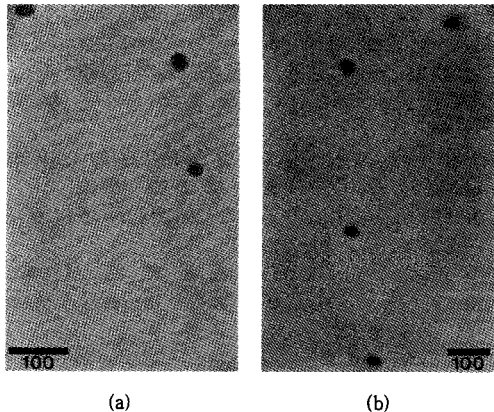


그림 7. TEM microphotographs (a) Au particles, (b) Au/PPy particles prepared by template method.

사진에 나타내었는데, 그림 7(a)는 금 나노입자를 보여주고 있으며, 그림 7(b)는 금 입자를 폴리피롤로 코팅한 경우이다. 이 사진으로부터 25 nm의 금 나노입자의 표면에 고분자를 코팅하여 45 nm 정도의 고분자 코팅된 나노입자가 제조되었음을 알 수 있다.

### 5.3 고분자 매트릭스 안에 나노입자의 균일 분산

나노입자는 용액 내에서는 안정할 수 있지만, 실제 소자에의 응용에서는 나노입자 자체의 응집으로 인하여 많은 어려움이 있다. 따라서, 나노입자를 고분자 매트릭스 안에 균일하게 분산시키기 위한 해결 방안들이 제시되었으나, 효율면에서나 제조면에서 아직 많은 연구가 필요하다.

#### 5.3.1 블록공중합체를 이용한 나노입자 제조 및 분산<sup>22</sup>

대표적으로 MIT의 Cohen, 독일의 Müller, 일본의 Hashimoto 그룹들이 이 방법을 선택하여 나노입자의 제조 및 구조제어에 대한 연구를 하였다. 블록공중합체의 한 블록에 pyridine이나 carboxyl기 같은 특정 관능기를 갖는 도메인을 만들고 입자를 그 도메인으로 끌어들이는 방법으로, 이는 도메인 크기를 조절함으로써 입자의 크기까지 제어할 수 있다는 장점이 있다. 거시적 관점에서는 도메인 내에 입자가 분산된 형태를 띄게 하여 다양한 크기의 입자제조에 우수한 방법이지만, 미시적 관점에서는 도메인 내에서 입자끼리 서로 분리되어 있어서 나노클러스터로써의 상호작용이 없기 때문에 실질적으로 소자에서는 좋은 효율을 보이지 못하고 있어, 이를 보완하기 위한 연구가 계속되고 있다.

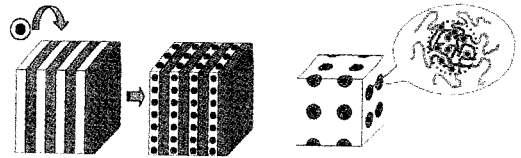


그림 8. Schematic representation of nano-composites fabricated with block copolymer and nanoclusters.

#### 5.3.2 PEO, PVA 등을 이용한 아이오노머법<sup>23</sup>

액정고분자 연구로 잘 알려진 Cornell 대학의 Ober 그룹과 Akimov 등이 매트릭스 고분자로 PEO나 PVA를 사용하고 반도체 입자를 분산시켜 광학소자를 제조하였다. 이와같은 방법은 각종 반도체-폴리머 복합체를 제작하는데 이용되고 있다. 1992년 최초로 CdS, PbS와 같은 반도체 나노입자들의 크기와 함량을 다르게 하여 필름을 형성하고, 광학 안정성을 갖는 발광 소자를 제작하였으나, 나노입자의 균일한 분산이 어려워 좋은 효율을 갖는 소자는 만들지 못했다. 최근 높은 효율이나 균일한 분산을 얻기 위한 최적의 나노입자 함량 등에 대한 연구가 계속되고 있다.

## 6. 결 론

정밀하게 분자량이 제어되는 리빙중합법이 확립되면 블록공중합체의 나노구조를 설계대로 조절할 수 있고, 하나의 블록 안에 유기물, 고분자, 나노입자를 선택적으로 넣어 줄 수 있기 때문에, 매트릭스 안에서 자기질서화에 의한 나노구조제어가 가능할 것이다. 나노입자를 선택적으로 균일하게 분산시키기 위해서 블록공중합체는 나노입자에 친화력이 있는 관능기, 즉 amine, thiol, carboxyl, hydroxyl, ether 기 등을 포함하고 있어야 하며, 나노입자의 표면도 적당한 고분자로 코팅한다든지 관능기로 수식할 필요가 있다. 이렇게 준비된 고분자와 입자를 사용하면 그림 8과 같은 모식도처럼 상분리된 고분자 매트릭스 안에 나노입자를 혼합시켜 설계대로 나노구조를 제어 가능할 것으로 기대된다. 또한, 구형으로 상분리된 구조안에 카이랄티를 갖는 물질, 반도체 나노입자 등의 광전특성을 갖는 물질을 분자레벨로 제어하여 포획시키면 광기능을 증진시킬 수 있을 뿐 아니라 유기물 및 고분자의 광전특성에 대한 새로운 개념 및 원리를 규명할 수 있을 것으로 기대된다. 이와같이 제어된 고분자 나노구조는 전반적인 고분

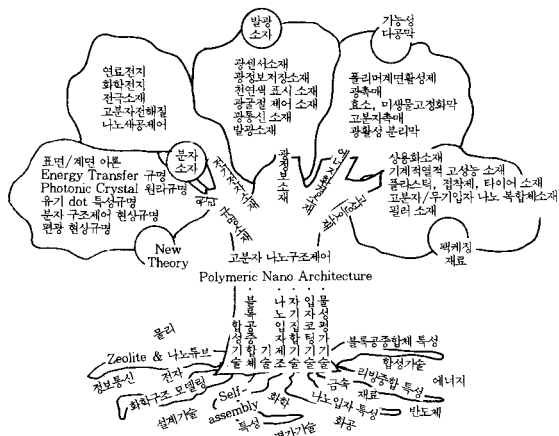


그림 9. Technology tree for polymeric nano architectures.

자 고상(solid state) 연구에 관한 기초이론의 정립 및 새로운 분자공학의 원리규명을 위해서 이용될 수 있을 뿐아니라 광전 소재, 에너지환경 소재, 전기전자 소재, 고성능 소재에도 응용될 수 있을 것이다(그림 9).

### 참 고 문 헌

1. I. M. Szwarc, *Nature*, **178**, 1168 (1956); *ibid.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **78**, 2656 (1956).
2. J. P. Kennedy et al., *J. Macromol. Sci. Chem.*, **A-18**, 1189 (1982-1983); T. Higashimura et al., *Macromolecules*, **17**, 265 (1984); *ibid.*, **17**, 165 (1984); *ibid.*, **23**, 48 (1990); O. W. Webster et al., *Macromolecules*, **23**, 1918 (1990).
3. Y. Doi et al., *Adv. Polym. Sci.*, **73/74**, 201 (1986); *ibid.*, *Makromol. Chem. Rapid Commun.*, **6**, 639 (1985); *ibid.*, *Makromol. Chem.*, **186**, 1825 (1985).
4. D. Y. Sogah et al., *Macromolecules*, **20**, 1473 (1987); *ibid.*, **19**, 1775 (1986).
5. T. Otsu et al., *Makromol. Chem., Rapid Commun.*, **3**, 127 (1982); *ibid.*, *Eur. Polym. J.*, **25**, 643 (1989); M. K. Georges et al., *Macromolecules*, **26**, 2987 (1993); T. C. Chung, *J. Am. Chem. Soc.*, **118**, 705 (1996); M. Sawamoto et al., *Trends in Polym. Sci.*, **4**, 371 (1996); K. Matyjaszewski et al., *Science*, **272**, 866 (1996); C. G. Cho, *Bull. of Korean Chemical Society*, **17**, 678 (1996); C. G. Cho, *Polymer Preprints*, **37**, 409 (1996); C. S. Kim, S. M. Oh, S. Kim, and C. G. Cho, *Makromol. Rapid Comm.*, **19**, 191 (1998).
6. S. Nakahama et al., *Macromolecules*, **23**, 939 (1990); *ibid.*, **26**, 2145 (1993); *ibid.*, **26**, 2126 (1993); *ibid.*, *New Polym. Mater.*, **4**, 53 (1993).
7. S. Nakahama et al., *Prog. Polym. Sci.*, **15**, 299 (1990);

- ibid.*, *Macromolecules*, **20**, 2968 (1987); *ibid.*, **24**, 1449 (1991); *ibid.*, **26**, 6976 (1993); *ibid.*, **19**, 2307 (1986); *ibid.*, **21**, 561 (1988); *ibid.*, **22**, 2602 (1989); *ibid.*, **25**, 535 (1992); *ibid.*, **24**, 5230 (1991); *ibid.*, **26**, 6985 (1993).
8. J.-S. Lee, A. Hirao, and S. Nakahama, *Macromolecules*, **21**, 274 (1988); *ibid.*, **22**, 2602 (1989).
9. J.-S. Lee, A. Hirao, and S. Nakahama, *Sensors and Actuators B*, **3**, 215 (1991).
10. T. Hashimoto, *Macromolecules*, **27**, 1562 (1994); T. Hashimoto, K. Tsutsumi, and Y. Funaki, *Langmuir*, **13**, 6869 (1997).
11. T. Okano et al., *J. Biomed. Mater. Res.*, **15**, 393 (1981).
12. C. Nojiri, S. Nakahama, K. Senshu, T. Okano, N. Kawagoshi, T. Kido, K. Sakai, H. Koyanagi, and T. Akutsu, *ASAIJ*, **39**, M322 (1993); C. Nojiri, T. Okano, H. Koyanagi, S. Nakahama, K-D Park, and S-W Kim, *J. Biomater. Sci. Polymer Edn.*, **4**, 75 (1992).
13. T. Fujimoto et al., *Macromolecules*, **16**, 1 (1993); *ibid.*, **17**, 2231 (1994); *ibid.*, *J. Membrane Sci.*, **19**, 273 (1984).
14. E. Yashima, Y. Maeda, and Y. Okamoto, *J. Am. Chem. Soc.*, **120**, 8895 (1998); M. M. Green, S. Zanella, H. Gu, T. Sato, G. Gottarelli, S. K. Jha, G. P. Spada, A. M. Schoevaars, B. Feringa, and A. Teramoto, *J. Am. Chem. Soc.*, **120**, 9810 (1998); J.-S. Lee, and S.-W. Ryu, *Macromolecules*, **32**, 2085 (1999). 한 석, 류상욱, 김선영, 이재석, 한국고분자학회 추계 발표회 연구논문초록집, **23**, 102 (1998). 신영득, 김선영, 한석, 이재석, 한국고분자학회 춘계 발표회 연구논문초록집, **24**, 30 (1999).
15. I.-N. Kang, D.-H. Hwang, H.-K. Shim, T. Zyang, and J.-J. Kim, *Macromolecules*, **29**, 165 (1996); A. Dogariu, R. Gupta, A. Heeger, and H. Wang, *Synth. Met.*, **100**, 95 (1999); C. W. Tang, S. A. VanSlyke, and C. H. Chen, *J. Appl. Phys.*, 3610 (1989); S. Ozelik, and D. L. Akins, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3057 (1997); M. M. Green et al., U.S. Patent, No. 5,480, 749 (1996); *ibid.*, No. 5,750,049 (1998).
16. K. Yoshino, S. Tatsuhara, Y. Kawagishi, M. Ozaki, A. A. Zakhidov, and Z. V. Vardeny, *J. Appl. Phys.*, **37**, 1187 (1998); P. Rigby, *Nature*, **396**, 415 (1998); I. E. Psarobas, N. Stefanou, and A. Modinos, *J. Opt. Soc. Am. A*, **16**, 343 (1999); K. Yoshino, S. Tatsuhara, Y. Kawagishi, M. Ozaki, A. A. Zakhidov, and Z. V. Vardeny, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2590 (1999); H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Saton, and S. Kawakami, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1212 (1999); E. P. Petrov, V. N. Bogomolov, I. I. Kalosha, and S. V. Gaponenko, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 77 (1998); B. Temilkuran and E. Ozbay, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 486 (1999); H. B. Sun, S. Matsuo, and H. Misawa, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 786 (1999); W. L. Vos, M. Megens, C. M. van Kats, and

- P. Bosecke, *Langmuir*, **13**, 6004 (1997).
17. J. Fink, C. J. Kiely, D. Bethell, and D. J. Schiffrin, *Chem. Mater.*, **10**, 922 (1998).
  18. G. Frens, *Nature*, **241**, 20 (1972).
  19. K. R. Brown and M. J. Natan, *Langmuir*, **14**, 726 (1998).
  20. A. P. Alvisatos, *Science*, **271**, 933 (1996).
  21. G. Cho, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **70**, 2309 (1997); G. Cho, J. S. Lee, D. T. Glatzhofer, G. M. Fung, W. L. Yuan, and E. A. O'Rear, *Adv. Mater.*, **11**, 497 (1999); G. Cho, I.-S. Moon, Y.-G. Shul, K.-T. Jung, J.-S. Lee, and B. M. Fung, *Chem. Lett.*, **7**, 355 (1998); J.-S. Lee, G. Cho, and Y.-S. Cho, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, (1999) in press; J.-S. Lee, S.-H. Han, Y.-S. Cho, H.O. Kang, and G. Cho, *The 2nd Asian Symposium on Organized Molecular Films for Electronics and Photonics*, Beijing, China, p. 173-174, Nov. 1-4 (1998).
  22. B. H. Sohn, R. E. Cohen, and G. C. Papaefthymou, *J. Magn. Mater.*, **182**, 216 (1998); M. Möller, *Synth. Mat.*, **41-43**, 1159 (1991); T. Hashimoto, K. Tsutsumi, and Y. Funaki, *Langmuir*, **13**, 6869 (1997).
  23. I. A. Akimov, I. Yu. Deisyuk, and A. M. Meshkov, *Opt. Spectrosc.*, **72**, 558 (1992); L. L. Beecroft and C. K. Ober, *Chem. Mater.*, **9**, 1302 (1997).