

感光性高分子의 最近의 研究動向

洪 性 一

서 론

감광성 고분자는 광(UV, E-beam, X-ray)의 작용에 의하여, 단시간내에 화학적 변화를 일으킴으로써 용해도, 점도, 투명도, 굴절률, 전도도, 이온 투과성 등의 물성 변화를 일으키는 재료이다. 특히 광조사 전후의 변화한 용해도 차를 이용하는 고해상력의 포토레지스트(photoresist)는 인쇄판, 전자 부품의 제조와 가공, IC, LSI, VLSI 및 반도체 소자 등 관련 산업의 급속한 발달에 기인하여, 그 연구¹⁻⁹가 활발히 진행되고 있으며, 이들의 물성 개발이 시급한 실정이다.

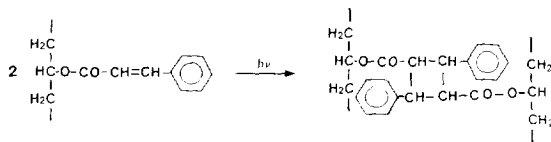
감광성 고분자는 고분자 자체가 감광기를 지닌 경우 뿐만 아니라, 반응성 모노머, 반응성 올리고머, 광개시제, 증감제, 열안정제 등을 바인더(binder) 고분자 중에 분산시킨 복합 재료이다. 이 감광성 고분자를 반응 형태에 의해 구분하면, 광가교 반응을 수반하는 고분자나 모노머를 갖는 고분자, 고분자의 주쇄 혹은 측쇄의 감광기나 바인더 고분자 중에 분산시킨 감광제(sensitizer)가 광변성을 수반하는 고분자계, 그리고 광중합형 고분자와 광분해형 고분자로 구분할 수 있다.

광 가 교

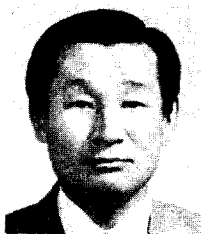
광가교에 의해 불용해성을 나타내는 고분자 반응은 측쇄 관능기 간의 이량화 반응에 의한 가교와

고분자에 분산된 이관능성 모노머가 가교제로서 고분자 간의 가교 반응을 일으키는 두가지 형태가 있다.

1959년 Minsk에¹⁰⁻¹¹ 의해 cinnamic acid와 PVA로 부터 합성된 PVA cinnamate사 KPR(Kodak photoresist), 네가형 포토레지스트로 최초로 사용된 이래, 사진 제판용 레지스트로서 중요성을 인정받고 있다. 올레핀과 같은 불포화기는 200nm 이하의 단파장 광에 의해 cyclobutane 환을 형성, 광이량화 하며, 특히 cinnamic acid와 같이 벤젠 고리와 공역되면 보다 긴 파장(30nm)에서 광이량화가 일어나므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.



이 cinnamate계 감광성 고분자는 보존 안정성이



본학회 부회장

1958 서울대 화공과(공학사)

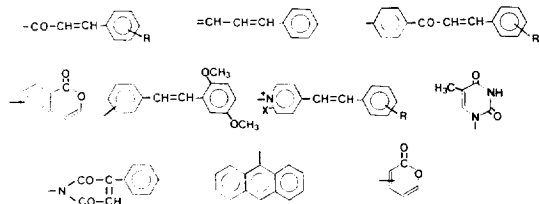
1974 서울대 화공과(공학박사)

현재 서울대 섬유공학과

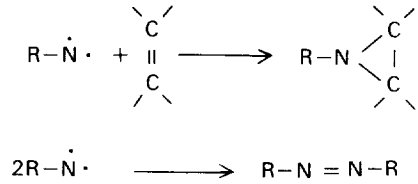
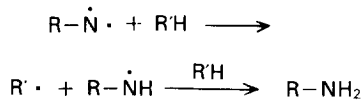
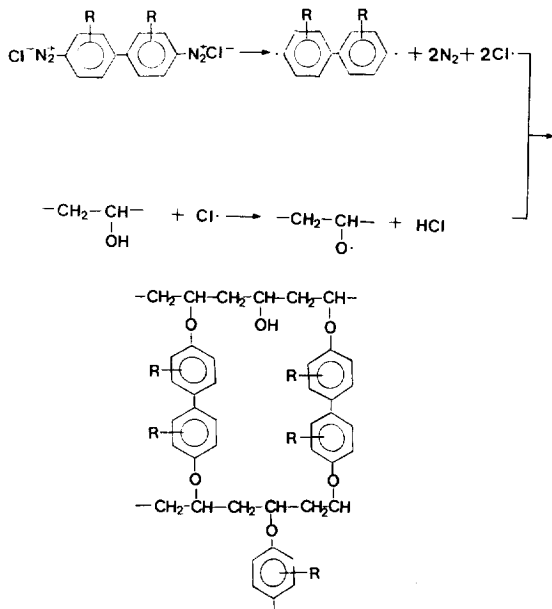
교수

서울대학교 섬유공학과(Sung-Il Hong, Dept. of Textile Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

있고, 금속판 도포시 감광층이 온도, 습기에 거의 영향을 받지 않으므로 금속판의 부식 가공, print 배선의 제조, PSI^[1] 판용 포토레지스트로 이용되고 있다. 광이량화에 사용되는 대표적인 감광기는 다음과 같다.



Cinnamate계와 함께 네가형 포토레지스트로 가장 현저히 응용되고 있는 고분자는 diazo/azido계 감광성 고분자이다. 이 diazo/azido계는 광분해에 의해 생성된 여기 상태의 분해 생성물(singlet 또는 triplet)에 의해 가교 반응이 일어난다.^{12, 13}



특히 비스아릴아지드 화합물과 환화 시스폴리이소플렌¹⁴과의 광가교 반응에 의한 네가형 레지스트는 2μm 이상의 선폭을 이용하는 반도체 소자 공정에 널리 응용되었다. 그러나 이 레지스트의 경우는 현상액으로 사용하는 solvent에 의한 swelling이 문제시 되어, 2μm 이하의 선폭이 요구되는 VLSI에서는 적용할 수 없다.

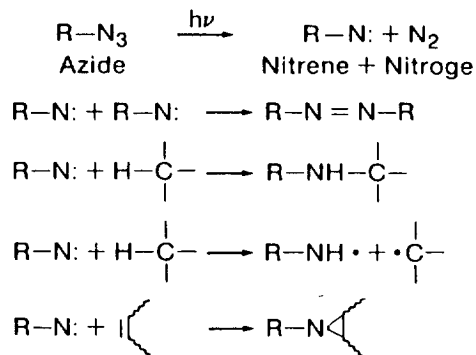
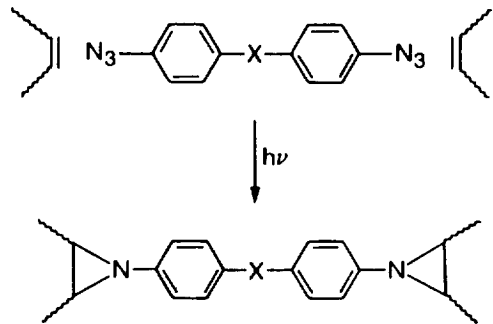
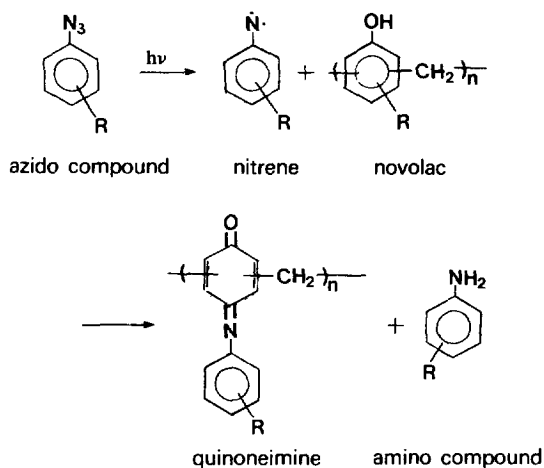


Fig. 1. Crosslinking reactions in bisarylazide rubber resists.

광 변 성

고분자의 축쇄나 주쇄, 또는 고분자 바인더 중에 분산된 감광기가 광에 의해 분자 구조를 변화시킴으로써, 용해도 변화를 유도, 화상을 형성하는 감광성 고분자로 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다.^{1~5}

Azide 화합물, novolac계 감광성 고분자는 광조사에 의해 azide 화합물이 nitrene을 형성, 알칼리 가용의 novolac 수지와 반응하여, 알칼리 난용성의 quinoneimine을 형성한다. 따라서 알칼리 수용액을 현상액으로 사용하면 노광부의 azide 화합물이 novolac의 가용기를 폐쇄하므로 네가형 화상을 형성한다.¹⁵



이계의 고분자는 부식 PS¹¹¹ 판에 널리 응용되어 왔다.

o-Diazonaphthoquinone(DNQ) 유도체의 광변성을 이용한 감광성 고분자는 고해상력을 주는 레지스트로서, 사진 식각 공정(lithography)에서 가장 널리 사용되고 있는 고분자 중 하나이다. DNQ 유도체를 이용한 고분자의 포지(positive) 화상형성능에 대한 광화학 분해 기구는 염기성 현상액에서 비노광부에 존재하는 DNQ가 matrix resin과 coupling 반응을 일으켜 상대적으로 용해도를 저

하시킨다고 생각하였으나, 1944년 Süss가 DNQ는 광분해로 반응성이 좋은 ketene을 형성하고, 이는 물과 반응 carboxylic acid를 형성하므로, 현상액에서 노광부의 용해도를 상승시킨다는 반응 기구를 제시하였다. 1969년 Levine은 광분해에 의해 형성된 ketene이 광분해 반응을 일으키지 않은 DNQ와 반응, lactone을 형성하며 이는 현상액에서 개환 반응을 일으킴으로써 용해도를 증가시킨다는 반응 기구를 제시하였다.¹⁶ 이들 기구에 근거하여 광분해 DNQ 거동을 도시하면 Fig. 2와 같다. 독일 Kalle Corporation에서 인쇄판에 적용하기 위해 DNQ를 sensitizer로 적용한 이래, 1920년 American Subsidiary Azoplate Corporation에서 DNQ를 sensitizer, novolac을 matrix resin으로 이용한 레지스트를 개발하여 최초로 미세 회로 제작에 이용하였다. 이 포지형 포토레지스트는 전술한 비스아릴아지드계의 네가형 포토레지스트보다 고해상력, 산소와 열에 대한 안정성 및 에칭에 대한 내구성이 매우 우수하다는 장점에 기인, 1960년대 이후 급속한 개발이 이루어지고 있으며, 초집적화

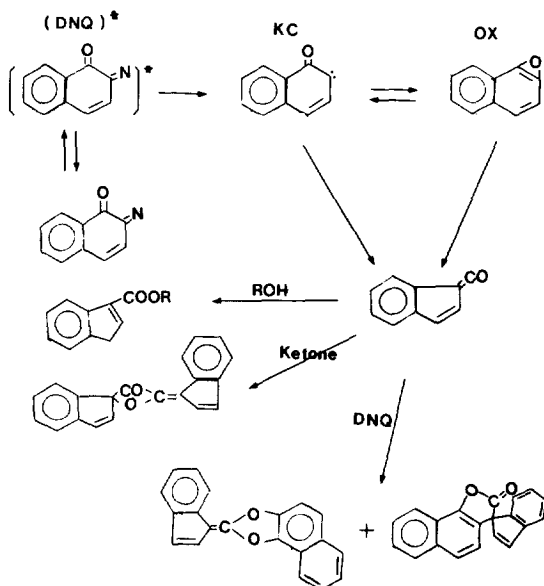


Fig. 2. Naphthoquinonediazide(DNQ) and Wolff Rearrangement.

를 위한 submicron pattern 형성에 관건이 되고 있다. DNQ와 multihydroxybenzophenone과의 ester 유도체, novolac계의 감광성 고분자는 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 고해상력의 포지형 레지스트이다. DNQ계 감광성 고분자의 경우, 1 μ m 최저 선폭이 그 한계치로 인식되었으나 사진식각 공정(lithography) 자체의 개선으로 0.5 μ m 이하의 선폭도 실현 가능함이 여러 연구를 통해 보고되고 있다.^{17, 18}

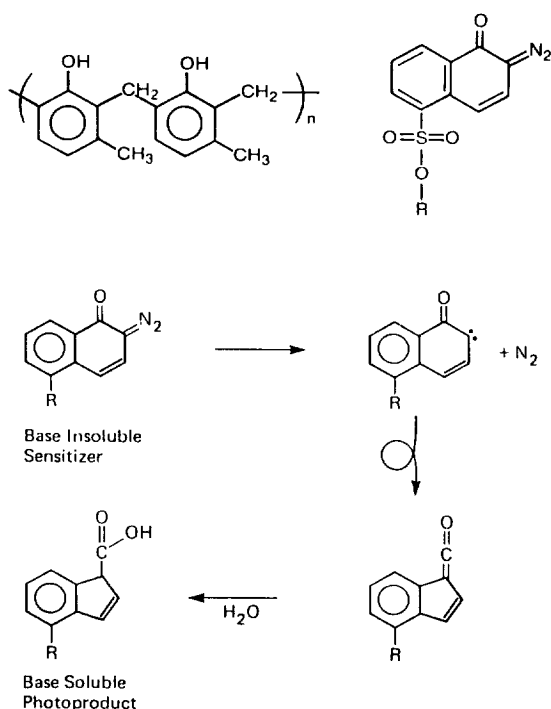


Fig. 3. Photochemical trasformation of diazona phthoquinone sensitizer.

이 계에 manazoline, imidazole, triethanolamine 따위의 염기 촉매를 부가해 사용하고, 공정을 개선하면 image reverse에 의한 네가형 화상도 가능하다.¹⁹ 여기서 염기 촉매는 baking 공정에서 decarboxylation을 촉진한다.

DNQ를 cresol novolac과 직접 중축합한 고분자는 윌셀 인쇄와 같은 프린트 기술에 널리 응용되

었는데 이 경우는 near UV를 광원으로 사용한 포지형 레지스트로 응용된 예이다. 그러나 이 계에 deep UV를 적용시, DNQ의 가교 반응에 의해 네가형 레지스트도 가능하다는 연구 결과도 발표된 바 있다.²⁰

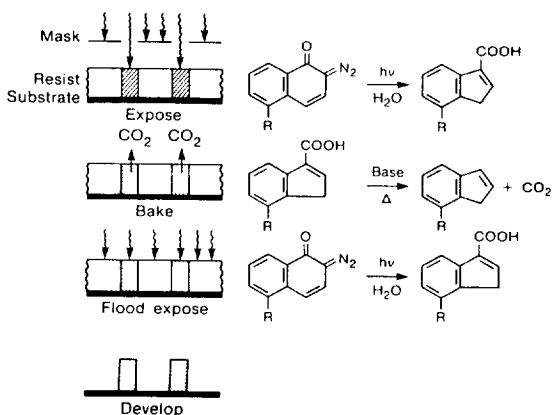
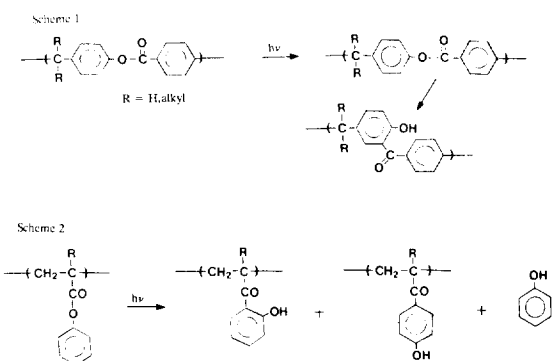


Fig. 4. The base-catalyzed image-reversal process.

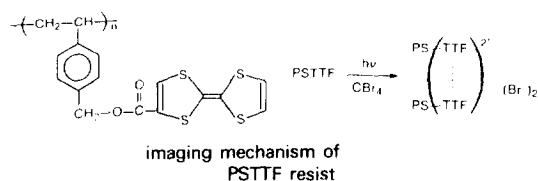
DNQ계에서 살펴본 바에 의하면, 포지형이나 네가형 화상 형성의 결정 여부는 현상액에 대한 선택적 용해성에 기인한다. 따라서 광변성기와 현상액의 선택에 따라서, dual tone 화상이 가능한 레지스트를 설계할 수 있다.

Poly(*p*-formyloxystyrene)은 주쇄나 측쇄에 phenol ester가 scheme 1, scheme 2와 같이 광조사에 의해 Photo-Fries 전위가 일어난다.^{21~22}



이 전위에 의해 생성된 acylphenol은 비노광부 고분자와의 polarity 차이를 일으키므로 현상액으로 극성 용매 사용시는 노광부를 상실하는 포지형 화상을, 비극성 용매 사용 시는 비노광부를 상실하는 네가형 화상을 형성한다. Poly (*p*-formylloxystyrene)의 Photo-Fries 전위에 의해 생성된 poly (*p*-hydroxystyrene)은 deep UV 조사에 대해 투명해, sensitivity가 상승되며, polarity 변화 이외에도 주쇄 절단(광분해)에 의한 용해도 증가 효과도 나타난다. 이러한 Photo-Fries 전위는 poly (*p*-acetoxystyrene), poly(*p*-acetamidostyrene), poly(phenyl methacrylate), poly(methacryl anilide) 등의 styrene계나 methacrylate계 감광성 고분자에서도 응용 가능하다.

이외에도 polystyrene-tetrathiofulvalene은 노광부가 고분자 complex를 형성, polarity를 향상 시킴으로써 dual tone 레지스트로 응용되기도 한다.^{23, 24}



감광성 고분자를 미세 패턴 형성에 적용하기 위해서는 resolution 향상이 전제되어야 한다. resolution을 향상시키는 방법 중의 하나로 단파장 (deep UV, E-beam, X-ray) 광원에 대해 광감응을 보이는 감광성 고분자를 개발하는 것이다.

MMA와 MAA의 공중합체에 sensitizer로 *o*-nitrobenzylcholate를 첨가한 감광성 고분자는^{25~27} 광조사시 이 sensitizer가 *o*-nitrobenzaldehyde와 cholic acid로 광분해하므로, 노광부에 용해도를 증가시키는 포지형 deep UV 레지스트로 응용된다. 이 고분자는 광변성과 동시에 고분자 주쇄 절단도 진행, 분자량 감소에 의한 용해도 상승 효과도 나타난다.

Novolac resin에 5-diazo-Meldrum's acid를 se-

nsitizer로 사용한 감광성 고분자나 dihydropyridine과 hexacryl bisimidazole을 sensitizer로 사용한 감광성 고분자도 deep UV 레지스트로 응용할 수 있다.

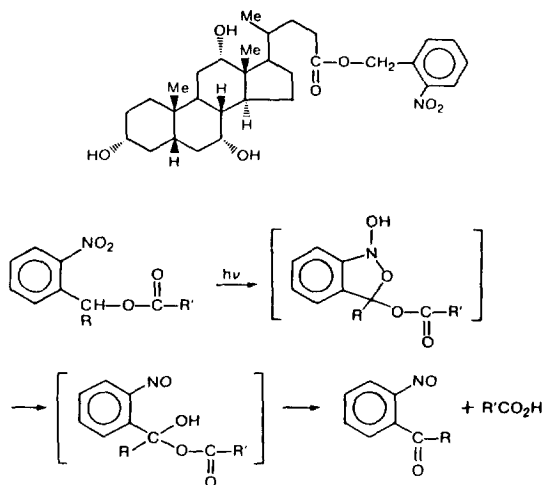


Fig. 5. Photochemical decomposition of *o*-nitrobenzylcholate

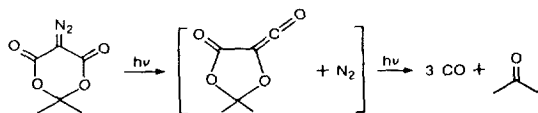
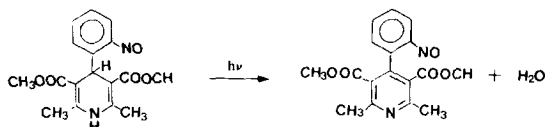
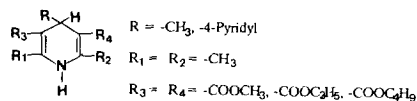


Fig. 6. Photochemical decomposition of 5-diazo Meldrum's acid.



광 중 합

Radical 중합

광개시제의 자외선 흡수는 $\pi \rightarrow \pi^*$ 전자 전이(방향족 화합물), 또는 $n \rightarrow \pi^*$ 전자 전이(카르보닐 화합물)를 동반하며, 여기된 분자의 광개시 반응은 다음의 네가지 경우로 대별된다.

(1) 직접 분절(fragmentation)이 일어나 자유 라디칼이나 루이스 산을 생성하는 경우

(2) 전자 이동을 일으켜 자유 라디칼로 되는 경우(electron transfer)

(3) 에너지를 다른 물질에 전달하여 그 물질로 하여금 라디칼을 생성케 하는 경우(electron transfer)

(4) 수소 추출 반응에 의한 자유 라디칼을 생성하는 경우(hydrogen abstraction)

acrylamide, acrylonitrile, acrylic acid, acrylic ester 등의 이중 결합을 가진 모노머는 광중합 개시제의 라디칼 형성에 의해 라디칼 중합이 이루어진다. 특히 이관능성 모노머(methylene bisacrylamide, methylene glycoldimethacrylate)인 경우는 중합과 가교가 동시에 이루어진다. 일반적으로 많이 사용되는 광개시제는 다음과 같다.

- 아조 화합물 : AIBN, α -azo-1-cyclohexane, carbonitrile
- 과산화물
- 벤조인 및 유도체 : benzoin, benzoin ether, benzoin thioether, benzoin methyl ether.
- 옥심 에스테르 화합물
- 유기 할로젠 화합물 : quinaldine-bromine, lutidine-bromide.
- 벤조페논-아민계 화합물 : benzophenone, Michler's ketone, chlorothioxanthone

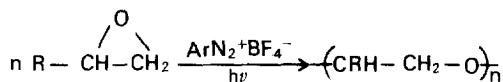
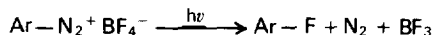
광 Cation 중합

광조사에 의해 cation 중합 개시제가 발생하는 광 cation 중합계는 산소의 영향이 없고, 열안정성이 우수하고, 광조사 후 가열에 의해 유효한 postcure가 가능하며, 여러가지 모노머의 중합이 가

능한 장점을 지닌다.

a) Aryldiazonium salts $[\text{Ar}-\text{N}_2^+\text{X}^-]$

Ar기로서 nitro, methoxy, chloride를 치환기로 갖는 벤젠을, 음이온(X^-)으로서는 PH_6^- , AsF_6^- , SbF_6^- , SbCl_6^- , BF_4^- , SnCl_6^{2-} , FeCl_4^- , BiCl_6^{2-} 을 갖는 aryl diazonium salt는 광조사에 의해 Lewis acid를 발생하므로, 각종 epoxy 수지 중합에 이용된다.^{29~31}

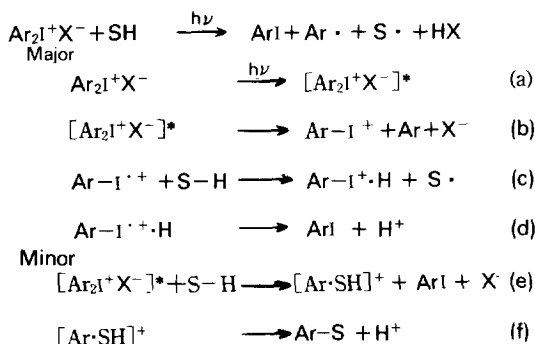


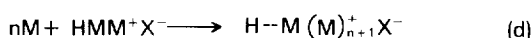
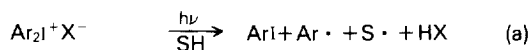
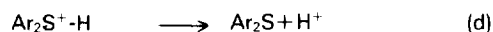
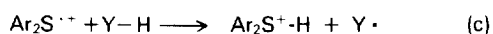
b) Diaryliodonium salts $[\text{Ar}_2\text{I}^+\text{X}^-]$

Triarylsulphonium salts $[\text{Ar}_3\text{S}^+\text{X}^-]$

Triaryl selenonium salts $[\text{Ar}_2\text{Se}^+\text{X}^-]$

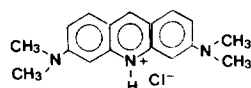
Aryl기로서 methyl, methoxy, t-butyl, nitro, chloride, CH_3CONH -기를 갖는 벤젠, 음이온(X^-)으로서는 PF_6^- , AsF_6^- , BF_4^- , ClO_4^- , CF_3SO_3^- , FSO_3^- , F_2PO_2^- 를 갖는 diaryliodonium salt^{32~37}, triarylsulphonium salt^{38~40}, triarylselenonium salt는 C-I 결합(C-S, C-Se)이 광조사 후 라디칼로 개열되면, 다음과 같이 Brønsted acid를 발생시킨다.³⁵ 생성된 Brønsted acid는 epoxy, aromatic ether, aromatic acetal, lactone, vinyl monomer 등이 광범위한 모노머에 대해 cation 중합을 행한다.⁴¹



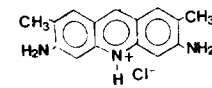


$\text{Ar}_2\text{I}^+\text{X}^-$ 의 광분해 및 이를 이용한 광cation 중합은 다음의 acridine orange 등의 색소를 이용하면 광증감 효과를 얻을 수 있다.

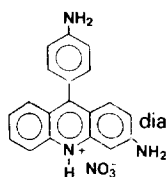
Acridine Orange (C.I.146005)



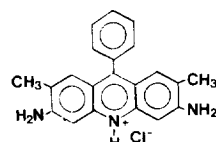
Acridine Yellow (C.I.146025)



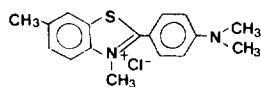
Phosphine R (C.I.146045)



Benzoflavin (C.I.146065)



Setoflavin T (C.I.149005)



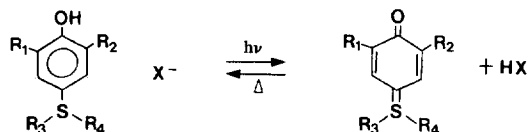
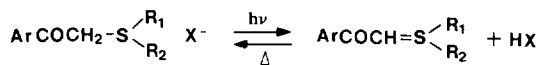
c) Dialky phenacyl sulphonium salts

Dialkyl-4-hydroxy phenyl sulphonium salts

Phenacyl sulphonium salts와 hydroxy phenyl sulphonium salts는 광조사에 의해 다음과 같이 ylide와 Bronsted acid를 형성하며, 열에 의해서는 sulphonium salt를 형성하는 가역 반응이 이루어

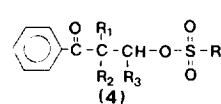
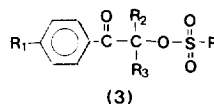
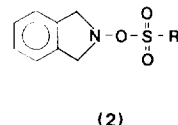
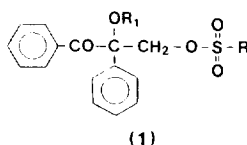
진다.^{42~44}

광조사에 의해 생성된 Brønsted acid는 epoxide, aromatic acetal, viny ether 등의 cation중합에 이용된다.



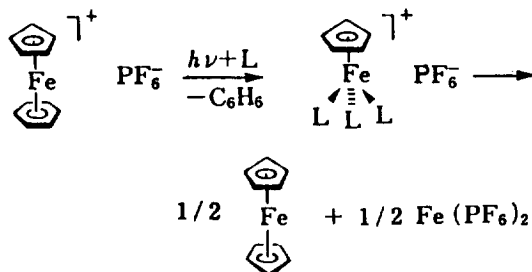
d) Sulfon산 ester

Sulfon산 ester (1)⁴⁵, *N*-hydroxyimidsulfonate (2)⁴⁶, α -sulfonyloxyketone (3)⁴⁷, β -sulfonyloxyketone (4)⁴⁸은 광조사에 의해 sulfonic acid를 발생하여 cation 중합을 개시한다.

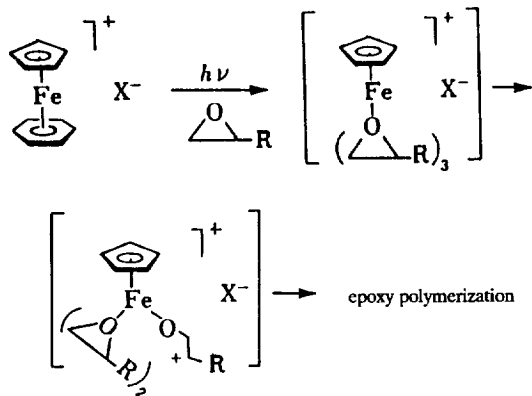


e) Iron-arene Complexes

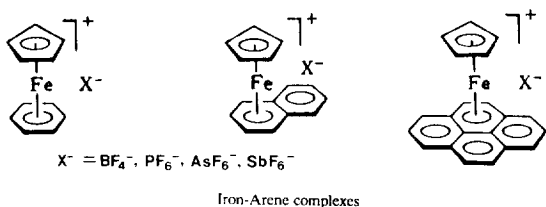
(η^6 -benzene) (η^5 -cyclopentadienyl) 철(II) [CpFeBz]⁺의 PF_6^- 염을 광조사하면, 벤젠환을 다른 배위자($\text{L}=\text{CO}$, RNC etc)로 치환한다고 알려져 있다.



이 배위자 치환 반응을 이용해 $[\text{CpFeBz}]^+\text{PF}_6^-$ 에 epoxide를 첨가한 후, 자외선 혹은 가시광선을 조사하면 epoxide가 철(II)의 배위자가 되고 철의 Lewis 산으로서 움직임에 의해 epoxy환을 개환, 중합 반응을 개시한다.



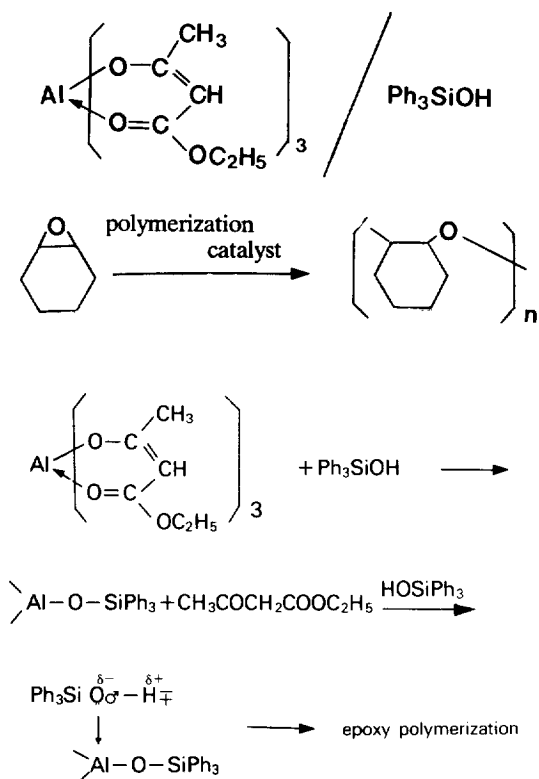
광개시제가 되는 철-Arene 화합물은 아래 그림과 같다. 이 광개시제의 광에 의한 생성물은 무색이므로 광투과성이 좋아, 두꺼운 film을 형성해도 사용이 가능하다.



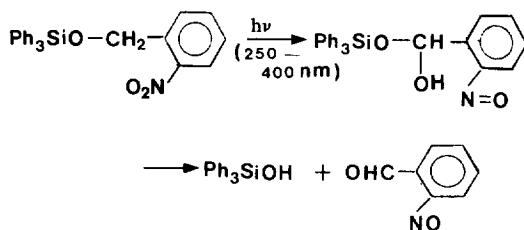
f) Silanol-aluminium 착체

유기 silanol과 aluminium 착체의 혼합 촉매는 epoxy 화합물을 실온에서 용이하고 빠르게 중합시킬 수 있다.^{50, 51}

이 촉매계에서는 silanol의 일부가 Al 착체와 반응하여, Al-O-Si 결합을 갖는 화합물을 생성한다. 잔존하는 silanol의 산소 원자가 Al-O-Si 결합의 Al에 배위하면, 배위한 silanol의 -OH가 강하게 분극되어 cation 을 형성, epoxy환을 개환하며 중합을 행한다.



o-nitrobenzylsilyether는 250~400nm의 광조사로 silanol이 생성되므로, Al 착체와 함께 epoxy 화합물이 광 cation 중합 개시제로 사용된다.⁵²

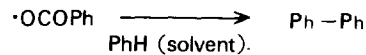
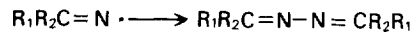
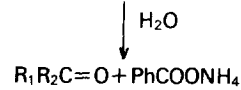
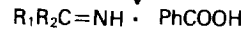
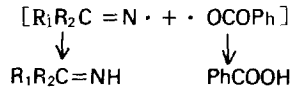
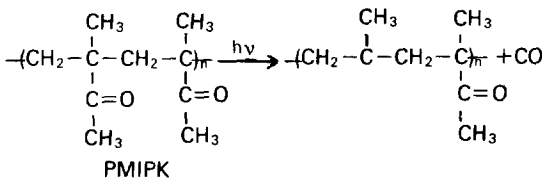
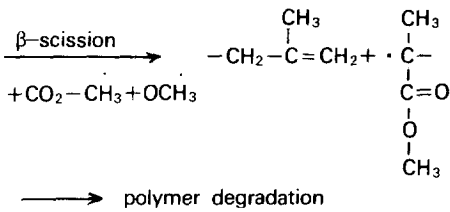
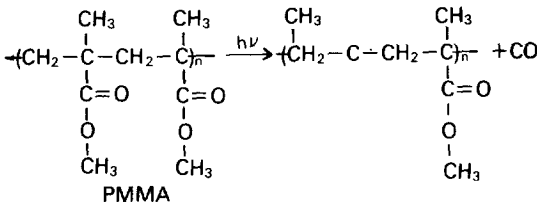


광 분 해

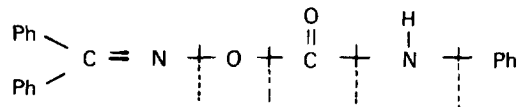
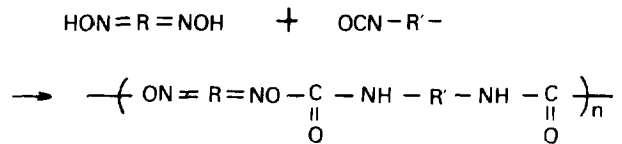
광분해형 고분자는^{53, 54} 광분해에 의해 저분자화함으로써 용해도 상승 등의 물성 변화를 일으키는 고분자로서, carbonyl기 함유 고분자, oxime기 함유 고분자, 그리고 nitro기 함유 고분자가 그 대표적인 예이다.

Carbonyl기 함유 고분자

광분해형 고분자의 가장 대표적인 예인 methyl-methacrylate(MMA), Poly(methyl isopropenyl ketone)(PMIPK)은 다음과 같이 광분해 한다.



정할 수 있으며, 광분해에 의한 주쇄 절단 위치는 다음과 같다.



PMMA나 PMIPK등의 광분해형 고분자의 주쇄 절단은 deep UV 조사에 의해 이루어지므로, 포지형 deep UV 레지스트로서 응용되어 왔다.

Oxime기 함유 고분자

Oxime 화합물의 N-O 결합은 그 에너지가 53 kcal/mole로 다른 결합 에너지보다 낮기 때문에 광에 의해 쉽게 라디칼로 분해한다.^{55~57}

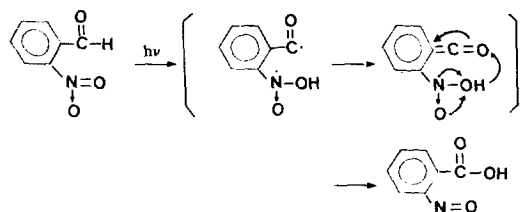
Oxime ester 이외에 oxime urethane의 광분해 거동을 고찰하기 위하여 Campbell에 의해 isocyanate와 oxime의 축합으로 oxime urethane이 합성되었다.⁵⁸

이 고분자의 광분해성은 모델 화합물을 통해 추

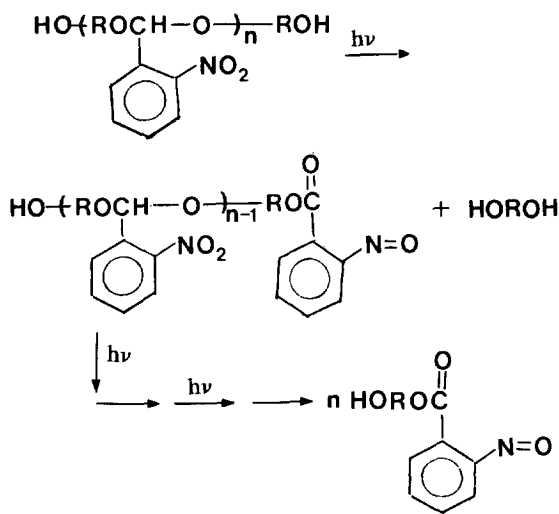
이 oxime 유도체의 광분해로 생성된 라디칼은 MMA, VAC의 photopolymerization, photograft, photocrosslinking 등에 응용되고 있다.

Nitro기 함유 고분자

Nitro 화합물은 광에 의해 다음과 같은 반응을 일으킨다.⁵⁹



이 반응을 이용, Petropoulos는 *o*-nitrobenzaldehyde와 glycol의 축합 중합한 poly (*o*-nitrobenzaldehyde acetal)의 광분해성을 검토하였다.⁶⁾



결 론

반응 형태에 따른 여러가지 감광성 고분자의 최근 연구 동향에 관하여 개관 하였다. 특히 포토레지스트로 사용되는 감광성 고분자는 IC, LSI, VLSI의 미세 가공 분야의 중요한 재료로서, 이것을 이용하는 제반 공업의 고속화, 고성능화 또는 간편화를 지향하는 process 기술의 진보에 따라 새로운 재료를 필요로 하게 된다. 따라서 새로운 용도에 응용하기 위한 새로운 재료의 탐색 개발 연구가 끊임없이 계속되고 있다.

또한 최근에는 감광성 고분자는 광이 조사되는 부분만 선택적이고 순간적으로 작용이 일어나는 장점으로 포토레지스트 이외에도 광개시제를 이용한 UV-curing resin이 표면 코팅에, 광분해형 고분자의 T_g , 결정성 등 물리적 성질 개선으로 농업용 비닐에 응용하고자 연구가 진행, 실용화 단계에 접어들고 있다.

참 고 문 헌

1. M. J. Bowden, S. R. Turner, "Electronic and Photonic Applications of Polymers", American Chemical Society, Washinton, D. C. (1988).
2. L. F. Thompson, "Materials for Microlithography," American Chemical Society, Washington, D. C. (1984).
3. L. F. Thompson, C. G. Wilson, and M. J. Bowden, "Introduction to Microlithography," American Chemical Society, Washington, D. C. (1983).
4. 山岡亞夫, 森田 浩, "感光性 樹脂," 共立出版 (1988).
5. F. A. Vollenbroek and E. J. Spiertz, "Advances in Polymer Science : 84 Electronic Applications," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York (1977).
6. M. Bolsen, *Microelectronic Engineering*, **3**, 321 (1985).
7. A. N. Broers, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-28(II)**, 1268 (1981).
8. F. A. Vollenbroek, E. J. Spiertz, and H. J. J. Kroon, *polym. Eng. Sci.*, **23**, 17 (1983).
9. N. J. Bowden, L. F. Thompson, S. R. Fahrenholtz, and E. M. Doerries, *J. Electrochem. Soc. : Solid-State Science and Technology*, **128**(6), 1304 (1981).
10. L. M. Minsk, J. G. Smith, W. P. Van Deusen, and J. F. Wricht, *J. Appl. Polym. Sci.*, **2**, 302 (1959).
11. E. M. Robertson, W. P. Van Deusen and L. M. Minsk, *J. Appl. Polym. Sci.*, **2**, 308 (1959).
12. S. Patai, "The Chemistry of Diazonium and Diazo Groups," John Wiley and Sons, New York (1978).

13. T. Tsunoda and T. Yamaoka, *J. Appl. Polym. Sci.*, **8**, 1379 (1964).
14. W. De Forest, "Photoresist, Materials and Processes", McGraw Hill, New York (1975).
15. T. Tsunoda and T. Yamaoka, Y. Osabe, and Y. Hata, *Photogr. Sci/ Eng.*, **20**, 188 (1976).
16. J. Pacnasky and J. R. Lyerla, *IBM J. Res. Develop.*, **23**, 42 (1979).
17. F. Coopmans and B. Roland, *SPIE* Vol. 631 "Advances in Resist Technology and Processing III", pp 34~39 (1986).
18. F. Coopmans and B. Roland, *SPIE* Vol. 633 Optical Microlithography V". pp 262-269 (1986).
19. H. Mositz, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-32** (3). 1672 (1985).
20. Y. Yamashita, R. Kawazu, K. Kawazura, S. Ohno, T. Asano, K. Kobayashi and G., J. Magamatsu, *Vac. Sci/ Technol.*, **B3**, 314 (1985).
21. J. M. J. Frechet, T. G. Tessier, C. G. Willson, and H. Ito, *Macromolecules*, **18**, 317 (1985).
22. C. G. Willson, H. Ito, J. M. J. Frechet, T. G. Tessier, and F. M. Houlihan, *J. Electrochem. Soc.*, **133**, 181 (1986).
23. D. C. Hofer, F. B. Kaufman, S. R. Kramer, and A. Aviram, *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 314 (1980).
24. F. B. Kaufman and S. R. Kramer, Extended Abstracts of the Electrochemical Society Spring Meeting, Electrochemical Society, Montreal, Canada, 1982, Abstract 270.
25. C. W. Wilkins, E. Reichmanis, and E. A. Chandross, *J. Electrochem. Soc.*, **129**, 2552 (1982).
26. E. Reichmanis, C. W. Wilkins, D. A. Price, and E. A. Chandross *J. Electrochem. Soc.* **190**, 1433 (1983).
27. E. A. Chandross, E. Reichmanis, C. W. Wilkins, and R. L. Hartle, *Can. J. Chem.*, **61**, 817 (1983).
28. B. D. Grant, N. J. Cleack, R. J. Twieg, and C. G. Willson, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-28**, 1300 (1981).
29. S. I. Schlesinger, *Photogr. Sci. Eng.*, **18**, 387 (1974).
30. S. I. Schlesinger, *Photogr. Sci. Eng.*, **14**, 513 (1974).
31. G. Smets, A. Aerts, and J. Van Erum, *Polym. J.*, **12**, 539 (1980).
32. I. V. Crivello, USP 3, 981, 897, Sept. 21 (1976).
33. G. H. Smith, Belg. Patent 828, 841, Nov. 7 (1975).
34. J. V. Crivello and J. H. W. Lam, *J. Polym. Sci. Symp.*, **56**, 383 (1976).
35. J. V. Crivello, and J. H. W. Lam, *Macromolecules*, **10**, 1307 (1977).
36. J. V. Crivello, and J. H. W. Lam, and C. N. Volante, *J. Rad. Curing*, July, 2 (1977).
37. S. P. Pappas, B. C. Papps, L. R. Gatechair, and W. Schnabel, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **22**, 69 (1984).
38. J. V. Crivell and J. H. W. Lam, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **17**, 977 (1979).
39. J. V. Crivell and J. H. W. Lam, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **18**, 2677, 2697 (1980).
40. J. V. Crivell, Belg. Patent 828, 670, May, 2, (1974).
41. C. B. May, and Y. Tanaka, "Epoxy Resin Chemistry and Technology", Marcel Dekker, Inc., New York, pp 199, (1975).
42. J. V. Crivell and J. H. W. Lam, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **17**, 2877 (1979).
43. J. V. Crivell and J. L. Lee, *Macromolecules*, **14**, 1141 (1981).
44. J. V. Crivell and J. H. W. Lam, *J. Polym. Sci.*,

- Polym. Chem. Ed.*, **18**, 1021 (1980).
45. H. A. Gaur, C. J. Groenenboom, H. J. Hageman, G. T. M. Hakvoort, P. Oosterhoff, T. Overeem, R. J. Polman, and S. van der Werf, *Makromol. Chem.*, **185**, 1975 (1984).
 46. C. A. Renner, USP 4, 371, 605 (1980).
 47. R. Kirchmayr and W. Rutsoh, EP 84515 (1982).
 48. R. Kirchmayr and W. Rutsoh, EP 89922 (1982).
 49. T. P. Gill and K. R. Mann, *Inorg. Chem.*, **19**, 3007 (1980).
 50. S. Hayase, T. Ito, S. Suzuki, and M. Wada, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **20**, 3155 (1982).
 51. S. Hayase, T. Ito, S. Suzuki, and M. Wada, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **19**, 2185 (1981).
 52. S. Hayase, Y. Onishi, S. Suzuki, and M. Wada, *Macromolecules*, **18**, 1799 (1985).
 53. B. Ranby and J. F. Rabek, "Photodegradation, Photo-oxidation, and Photostabilization of Polymers", John Wiley and Sons, (1975).
 54. 永松元太郎, 乾英夫, "感光性 高分子", 講談社, (1977).
 55. A. Stojilkovic and Trasvac, *Tetrahedron Letters*, **17**, 1405 (1970).
 56. H. Ohta and K. Tokumaru, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **48(8)**, 2393 (1975).
 57. G. A. Delzenne, U. Laridon, and H. Peeters, *Eur. Polym. J.*, **6**, 933 (1970).
 58. T. W. Campbell, V. S. Foldi, and R. G. Parrish, *J. Appl. Polym. Sci.*, **2(4)**, 81 (1959).
 59. J. G. Calvert and J. N. Pitts, "Photochemistry", pp 477-480, John Wiley and Sons (1969).
 60. C. C. Petropoulos, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **1**, 1637 (1977).

폴리13