Journal of Radiation Industry 15(1) : 47~53(2021)

감마선 조사를 이용한 폴리우루시올 합성 및 특성 평가

정성린[1,*] · 박종석[1] · 임윤묵[1] · 윤국중[2]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]배재대학교 정밀응용과학부

Synthesis and Characterization of Polyurushiol Prepared by Gamma-irradiation

Sung In Jeong[1,*], Jong-Seok Park[1], Youn-Mook Lim[1] and Guk-joung Yoon[2]

[1]*Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do, Republic of Korea*

[2]*Division of Fine Science and Engineering, Paichai University, Republic of Korea*

Abstract - Urushiol, mainly extracted from lacquer tree, is known to have excellent thermal stability, antibacterial properties, and antioxidant properties. Since urushiol cannot be effectively synthesized, it is common to extract it from lacquer tree using organic solvents. In this study, polyurushiol was successfully synthesized by simultaneous gamma-irradiation cross-linking using binary monomer mixtures (urushiol/3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate (TMPMA) and urushiol/dipentaerythritol hexaacrylate (DPEHA)) in various ethanol/H_2O_2 solutions. The structural changes and thermal properties of the synthesized polyurushiol were confirmed through Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), thermal gravimetric analyzer (TGA), and contact angle measurements. Gamma-ray irradiation was performed to grafting the monomer into urushiol with hydrophobic TMPMA or hydrophilic DPEHA, and it was confirmed that thermal behavior and moisture barrier properties were effectively improved through this.

Key words : Polyurushiol, Radiation, Polymerization, Cross-linking, 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate, Dipentaerythritol hexaacrylate

서 론

옻나무(*Rhus verniciflua* 또는 *Rhus vernicifera*)는 옻나무과(*Anacardiaceae*)에 속하는 낙엽교목으로서 중앙아시아 고원지대 및 히말라야 지방이 원산지이며, 현재 전 세계적으로 열대지방을 중심으로 아열대 지방과 온대 지방에 널리 분포하고 있고, 한국, 중국 및 일본 등의 동아시아권에서 천연 도료로써 공예품 및 생활용품 등에 사용되고 있다(Kim *et al*. 2006). 옻나무에서 채취되는 생 옻 또는 옻 액은 우루시올, 수분, 고무질, 라케이즈(Lacase), 함 질소물질로 이루어져 있으며, 이중 우루시올은 옻 액 중 70% 가량을 차지하는 주성분으로서, 우루시올의 화학구조는 Fig. 1과 같다(Snyder *et al*. 1989). C_{15}-알킬 또는 알케닐 그룹을 가지고 있는 3-치환된 카테콜들의 복합체이며, 그 주성분은 이중 결합수가 3개인 3-(8′Z, 11′E, 13′Z-펜타데카트리에닐)카테콜(3-(8′Z, 11′E, 13′Z-pentadecatrienyl)catechol)이다. 지금까지 C_{15} 측쇄에 이중 결합수가 0, 1, 2 또는 3개인 3-치환된

* Corresponding author: Kwang Pyo Kim, Tel. +82-63-570-3083, Fax. +82-63-570-3079, E-mail. sijeong@kaeri.re.kr

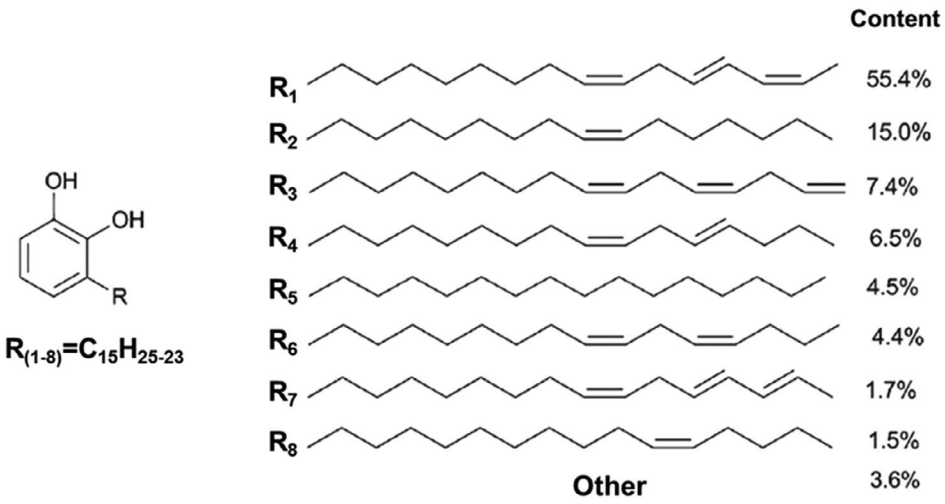

Fig. 1. Chemical structure of urushiol from *Rhus vernicifera*.

알킬카테콜 13개 성분이 밝혀져 있고, 우루시올은 이들 단량체(monomer)와 라케이즈에 의해 단량체가 자연 중합된 형태인 중합체(polymer)들이 혼합되어 있다.

옻의 주요 구성성분인 우루시올은 초기에는 알러지 반응을 일으키는 것으로 보고되었으나 이후 강력한 항산화력, 항균력, 방수, 내화학성, 방충 및 방부 효과가 밝혀짐에 따라 전통적으로 옻이 가지고 있던 내구성이 화학적으로 증명되었다(Yoon *et al*. 2018).

그러나 종래의 옻칠은 합성수지 도료와 달리 습도가 높은 특이한 환경 조건 하(상대습도 70%, 20~25°C)에서 건조되는 특성 때문에 작업성이 까다롭고 가격이 고가인 문제점이 있다(Yoon *et al*. 2018). 또한, 옻칠은 자연적으로 함유되어 있는 첨가 성분 및 물로 인해 생활 제품류 및 산업재료 등에 사용하기가 까다롭고 피부 접촉 시 알러지 현상을 유발하는 부작용을 해결하지 못하고 있는 단점이 있다(Choi *et al*. 2012). 한편, 종래 자외선 경화형 우루시올 도료는 우루시올의 경화를 위하여 일반적인 광경화 조성물의 필수 성분인 광경화 개시제 사용에 따른 비용 증가 및 미반응된 잔류 개시제 제거에 어려움이 있었으며, 자외선 경화에 의해서도 옻 독이 제거되지 않은 상태에서 UV 도료와 혼합함으로써 도료 혼합 공정 및 상기 혼합 코팅제의 도정 과정에서 옻 알러지가 발생하여 작업자들의 도료 혼합 및 코팅 공정에 대한 기피하는 현상이 일어나 작업상에 많은 애로점이 발생되는 문제를 가지고 있다(Lin *et al*. 2010; Xia *et al*. 2011). 최근 들어, 방사선 처리에 의한 옻나무 수액의 알러지 유발성분을 제거한다는 연구들이 이루어지고 있으며(Jeong *et al*. 2011), 우루시올의 고분자화에 대한 기초 및 응용 연구는 초기 단계이다(Kang *et al*. 2008; Kim *et al*. 2013; Jung *et al*. 2014; Jung *et al*. 2015). 본 연구팀에서는 방사선을 이용하여 실란계 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate (TMPMA) 가교구조 형성으로 인한 화학적 안전성 증가와 동시에 유/무기 복합 구조 형성으로 인한 고온 안전성이 향상된 수소이온교환막을 제조하였다(Sung *et al*. 2011; Lee *et al*. 2012). 따라서, 본 연구에서는 방사선 조사 조건에서 개시제 사용 없이 빠른 경화와 건조가 가능한 우루시올, 친수성 및 소수성 아크릴레이트 단량체가 결합된 폴리우루시올을 제조하였으며 화학적 특성 및 내열성에 대한 실험을 실시하였다.

재료 및 방법

1. 재료

본 연구에 사용된 정제된 우루시올(순도 95%)은 옻칠정제연구소에서 구매하였으며, 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate (TMPMA), dipentaerythritol hexaacrylate (DPEHA), 과산화수소, 에탄올은 Sigma-Aldrich 제품을 사용하였다.

2. 시료의 제조

에탄올과 과산화수소 용액이 100 : 0, 85 : 15, 50 : 50, 15 : 85, 0 : 100의 부피비로 혼합된 혼합용액을 상온에서 제조하였다. 제조된 혼합용액을 용매로 하여 30% 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate (TMPMA), 30% dipentaerythritol hexaacrylate (DPEHA), 50% 우루시올 용액을 상온에서 각각 제조하였다. 상기에서 제조된 각각의 TMPMA: 우루시올, DPEHA : 우루시올 용액을 부피비로 1 : 1 비율로 각각 혼합한 후 30분 동안 상온에서 교반기 500 rpm에서 혼합된 코팅 조성물을 제조한 후 용액의 균질성을 확인하기

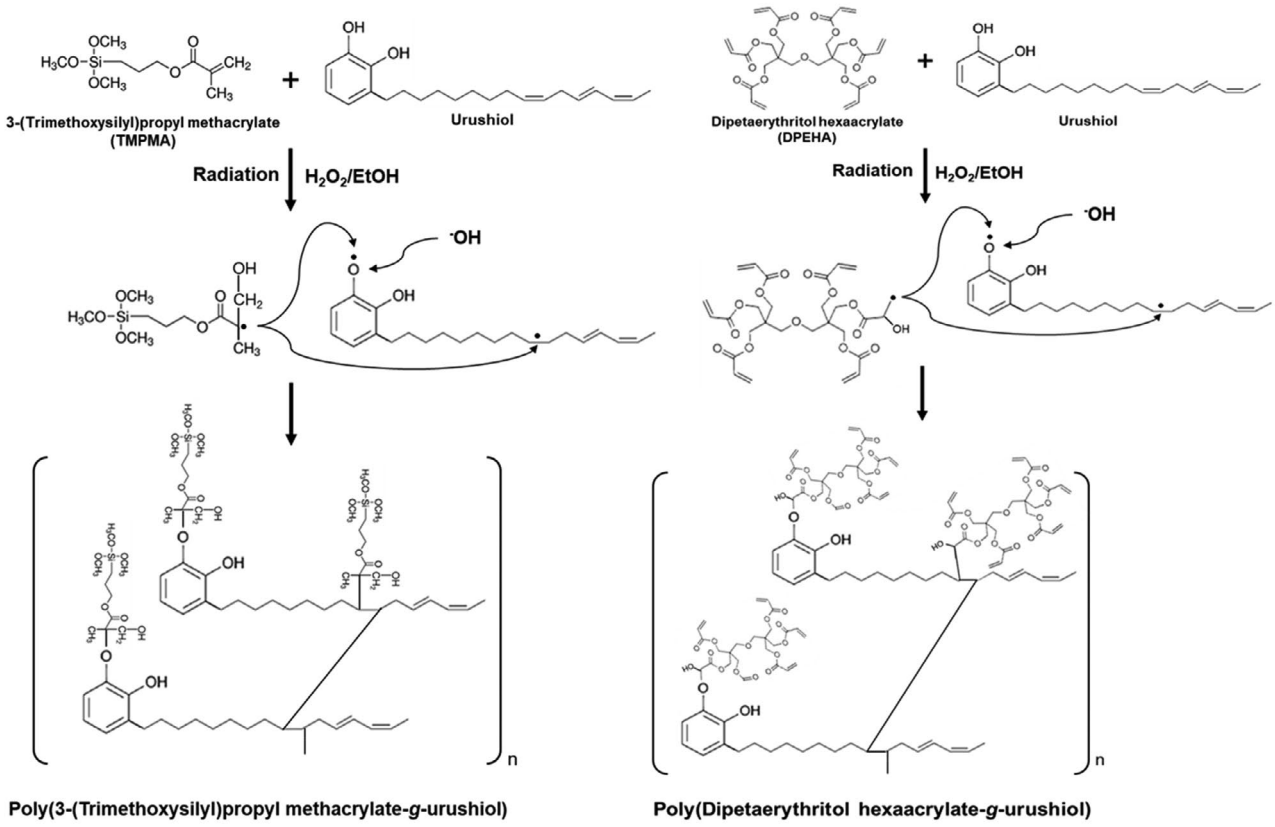

Fig. 2. Schemes of synthetic mechanism for polyurushiol by radiation.

위해 24시간 동안 정치 보관하였다. 우루시올 코팅도막 제조는 용매(에탄올 : 과산화수소 = 85 : 15)로 만든 우루시올 용액, TMPMA : 우루시올, DPEHA : 우루시올 코팅 조성물을 비커에 넣고 유리 도막을 넣어 담침시킨 후에 1 μm 내지 2 μm의 두께로 도포한 후, ^{60}Co에서 발생되는 감마선을 이용하여 50 kGy·hr^{-1}의 조사 선량률로 300 kGy 흡수선량으로 방사선을 조사하여 우루시올 코팅층을 제조하였다. 방사선 조사된 폴리우루시올과 코팅도막의 미반응물을 에탄올을 사용해 세척하고 80°C에서 1일 동안 건조하였다(Fig. 2).

3. 특성분석

3.1. ATR-FTIR

우루시올 코팅된 유리도막에서 에탄올과 과산화수소의 조성비에 따른 우루시올의 성분 분석 및 방사선 가교를 포함하는 화학적 변화를 측정하기 위해 우루시올 코팅된 유리도막을 진공건조시킨 후 ATR-FTIR (TENSOR 37 Spectrophotometer BRUKER)로 분석을 실시하였고, DLa TGS 검출기(detector)를 사용하여 4,000~600 cm^{-1} 파장 범위를 주사회수 64회, 분해능 4 cm^{-1}의 조건으로 시료들을 분석하였다.

3.2. SEM

코팅된 유리도막에서 우루시올, TMPMA-우루시올, DPEHA-우루시올 코팅층의 표면 분석을 위해 주사전자현미경(FE-SEM, Scanning Electron Microscopy, Hitachi S-4800) 장치를 이용하여 표면 분석을 수행하였다.

3.3. XPS

우루시올 코팅층의 화학적 성분 분석을 위해 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy, ESCALAB-210 VG Science) 장치를 이용하여 우루시올, TMPMA-우루시올, DPEHA-우루시올의 코팅층을 대상으로 원소 분석을 수행하였다.

3.4. TGA

폴리우루시올의 열분해 분석을 위해 TGA (Thermo Gravimetric Analysis D-TGA (SDT 2960) TA Instruments) 장치를 이용하여 우루시올, TMPMA-우루시올, DPEHA-우루시올의 코팅층을 대상으로 열안전성 분석을 수행하였다.

3.5. Contact angle

우루시올 코팅층의 표면 친수화 분석을 위해 접촉각 측정(Phoenix-300, surface electro optics) 장치를 이용하여 우루

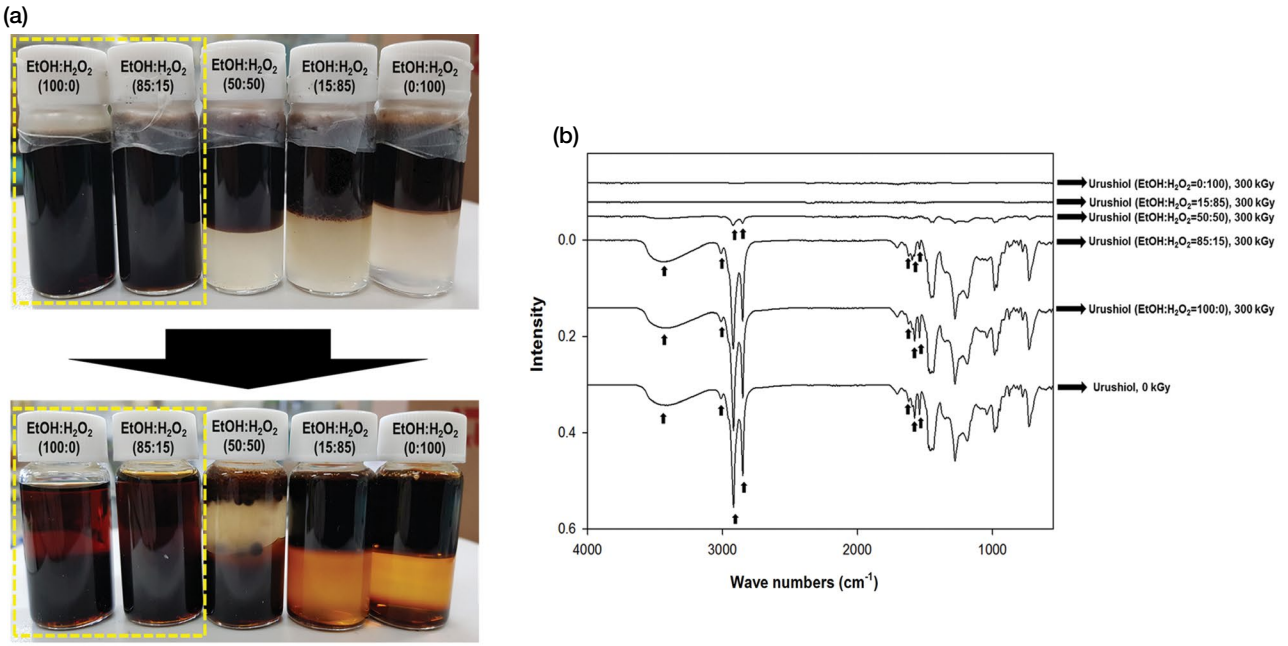

Fig. 3. (a) Blending solution after 1 day at room temperature and (b) ATR-FTIR spectra of urushiol in ethanol/H_2O_2 solutions by gamma-irradiation (300 kGy).

시올, TMPMA-우루시올, DPEHA-우루시올의 코팅층을 대상으로 접촉각 분석을 수행하였다.

결과 및 고찰

에탄올과 과산화수소 용액이 100 : 0, 85 : 15, 50 : 50, 15 : 85, 0 : 100의 부피비로 혼합된 용매로 50% 우루시올 용액을 제조 후 상온에서 1일 보관하였을 경우, 100% 에탄올과 85% 이상 에탄올 혼합용액(에탄올 : 과산화수소 = 100 : 0~85 : 15)에 녹인 우루시올 용액은 상분리 없이 균일한 상태로 유지가 되는 반면, 85% 미만 에탄올 혼합용액(에탄올 : 과산화수소 = 85 : 15~0 : 100)에서는 우루시올과 용매 사이에서의 상분리 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 천연 기름 성분인 우루시올의 폴리우루시올 합성 시 산화반응에 참여하는 과산화수소의 첨가량이 15% 미만인 경우에 우루시올 균질 용액이 제조 가능하다는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3(a)). 또한, 방사선 조사 시 혼합용액 중 산화제인 과산화수소 함량에 따른 우루시올 구조 변화를 확인하기 위해서 ATR-FTIR를 이용하여 4,000~400 cm^{-1}의 범위에서 측정하여 확인하였다(Fig. 3(b)). 용매와 산화제가 방사선 조사 시 산화제가 증가할수록 우루시올의 가교도가 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 방사선을 조사하지 않고 건조한 우루시올 원액에서 나타나는 고유의 피크로써 하이드로실기(-OH) 피크는 3,000~3,600 cm^{-1}, 불포화 알킬기(unsaturated alkyl group)의 =CH- 피크는 3,012과 1,626 cm^{-1}, 벤젠 고리(benzene ring) 피크는 1,580 cm^{-1}, 포화 알킬기(saturated alkyl group)의 -CH_2 피크는 2,920와 2,854 cm^{-1}, C=C 피크는 1,621~1,629 cm^{-1}에서 나타나는데, 그 결과 우루시올은 포화 알킬기와 불포화 알킬기를 가지는 카테콜(catechol) 구조를 형성하고 있음을 확인하였다. 또한, 감마선 300 kGy 조사 시 건조된 우루시올(에탄올 : 과산화수소 = 100 : 00~85 : 15) 중 산화제인 과산화수소 함량이 15% 미만에서는 우리시올의 카테콜(catechol) 구조가 안정적으로 형성하고 있지만, 건조된 우루시올(에탄올 : 과산화수소 = 85 : 15~0 : 100) 중 산화제인 과산화수소 함량이 15% 이상에서는 우루시올의 모든 작용기가 확인 되지 않는 것을 확인하였다. 이는 방사선 조사 시 우루시올 용액 중 과다한 과산화수소에 의해 우루시올 화학구조가 산화반응으로 인해 카테콜 분자 구조가 분해 및 변화된 것으로 사료된다.

따라서, 본 실험에서는 에탄올 : 과산화수소(85 : 15)으로 혼합된 용매로 우루시올과 소수성 TMPMA와 친수성 DPEHA 아크릴레이트 단량체 혼합액을 유리 도막에 담침하여 균일 코팅을 한 후 방사선을 조사하여 합성된 폴리우루시올의 특성 분석을 실시하였다. 그 결과, Fig. 4(a-c)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 방사선 조사 시 에탄올과 과산화수소의 85 : 15 비율인 혼합 용액에 녹인 우루시올과 TMPMA-우루시올이 코팅된 유리 도막의 표면이 매끈한 것을 확인할 수 있었다. 우루시올 자체의 표면에너지가 낮은 특성으로 후처리 없이 소수성 코팅 박막을 제조할 수 있었다. 한편, DPEHA-우루시올이 코팅된 유리 도막에서

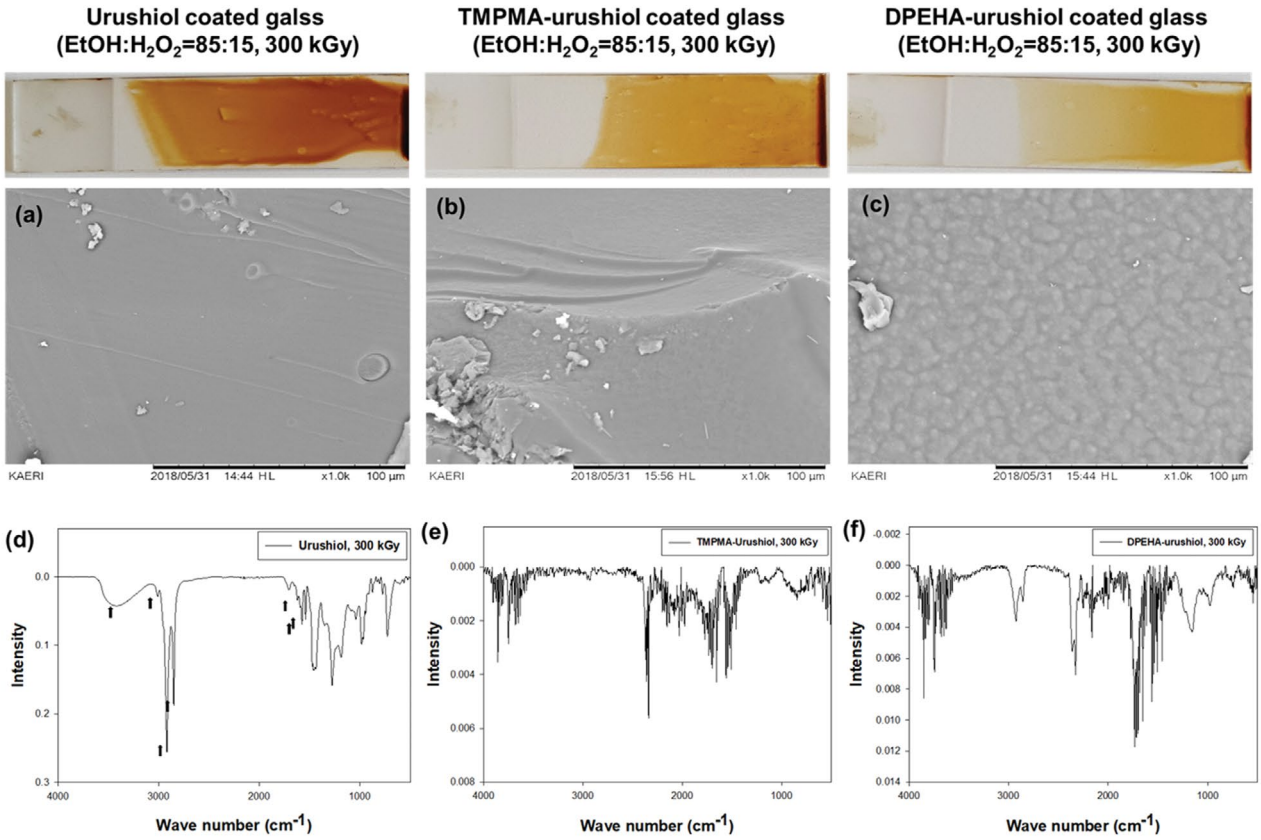

Fig. 4. (a-c) SEM images and (d-f) ATR-FTIR spectra of urushiol, TMPMA-urushiol, and DPEHA-urushiol coated glasses by gamma-irradiation.

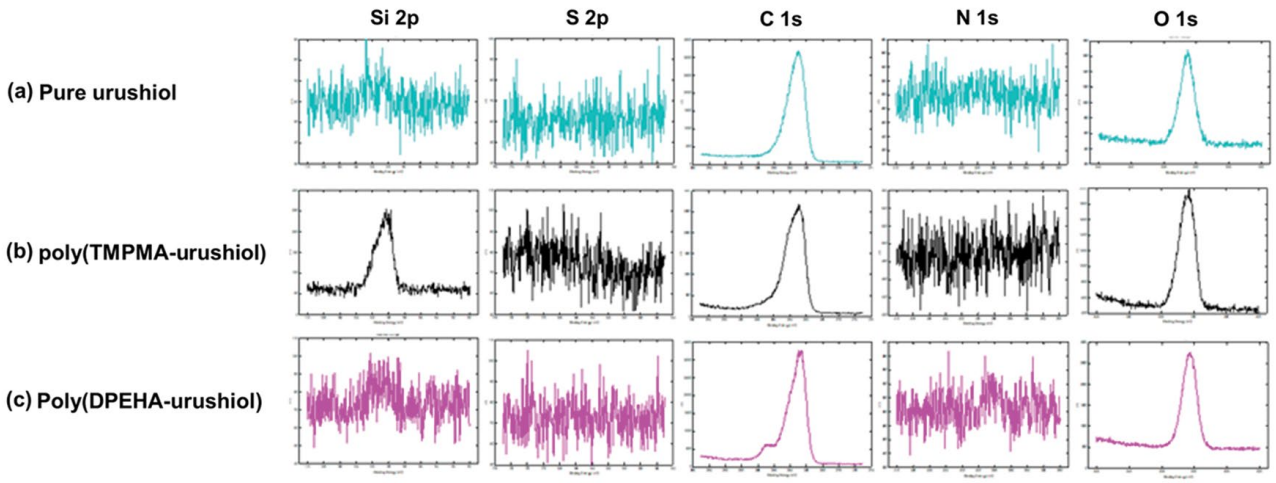

Fig. 5. XPS spectra of (a) urushiol, (b) TMPMA-urushiol, and (c) DPEHA-urushiol coated glasses by gamma-irradiation.

는 거친 표면이 되는 것으로 보아 소수성을 갖는 우루시올과 TMPMA을 포함하는 코팅 조성물을 대상으로 하여 방사선에 개질된 TMPMA-우루시올 코팅 표면은 균일한 반면에 친수성 아크릴레이트 단량체인 DPEHA을 적용하는 경우에서는 친수성과 소수성 분자의 상분리로 인해 불균일한 표면이 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 4(d-f)에서는 방사선 300 kGy 조사 시, 에탄올 100%로 녹인 우루시올을 코팅한 유리 도막에서는 거의 화학적 구조변화가 없는 것으로 유리도막에 코팅된 우루시올이 액체 상태로 확인 되었지만, 혼합용액에서 과산화수소 부피비가 증가할 수

록 우루시올의 카테콜 구조가 가교구조로 인해 특정 피크가 사라지는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로, 방사선 조사하지 않고 건조한 우루시올 원액에서 나타나는 고유의 피크인 하이드로실기(-OH) 피크는 3,000~3,600 cm^{-1}, 불포화 알킬기(unsaturated alkyl group)의 =CH- 피크는 3,012과 1,626 cm^{-1}, 벤젠 고리(benzene ring) 피크는 1,580 cm^{-1}, 포화 알킬기(saturated alkyl group)의 -CH_2 피크는 2,920 및 2,854 cm^{-1}, C=C 피크는 1,621~1,629 cm^{-1}에서 나타나는데, 그 결과 우루시올은 포화 알킬기와 불포화 알킬기를 가지는 카테콜(catechol) 구조를 형성하고 있음을 알 수 있다. 이유는 방사선에 의해 이온화된 우루시올, 에탄올, 과산화수소 중 과산화수소의 산화력이 증가되어 우루시올 화학구조의 가교 및 개질이 촉진된 것으로 유리도막에 코팅된 TMPMA-우루시올 및 DPEHA-우루시올이 폴리우루시올로 합성되었다는 것을 확인하였다. 만약, 아크릴레이트계 단량체와 우루시올과의 결합이 충분하지 않아 방사선 조사 시 분자간의 가교구조가 불충분하게 일어나는 문제가 있으며, 아크릴레이트계 단량체의 함량이 초과하는 경우에는 아크릴레이트계 단량체와 우루시올과의 공유 결합으로 인한 개질보다는 아크릴레이트계 단량체 간의 단일 중합(homopolymerization)의 과다 발생으로 불균일한 경화가 일어나는 문제점이 발생 될 수 있다고 사료된다.

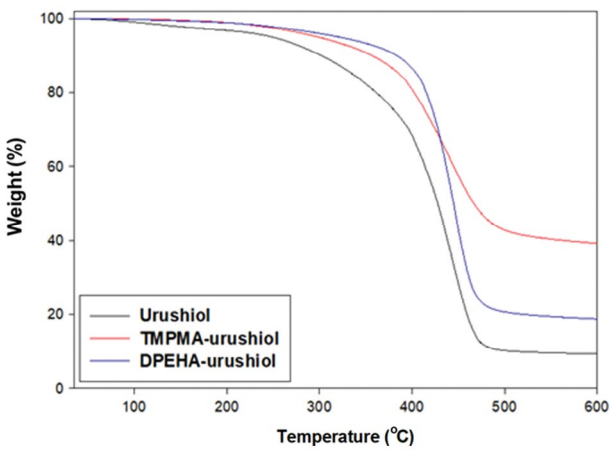

Fig. 6. TGA curves of urushiol, TMPMA-urushiol, and DPEHA-urushiol coated glasses by gamma-irradiation.

여러 조성물의 혼합물로 코팅된 표면의 분석은 XPS 장치를 이용하여 분석하였다. Fig. 5(a, c)는 우루시올, TMPMA-우루시올 및 DPEHA-우루시올 조성물로 코팅 표면의 스펙트럼에서 O_{1s}, C_{1S} 원소에 해당하는 피크를 532.51, 284.31에서 확인하였다. 특히, Fig. 5(b)의 TMPMA-우루시올 중 TMPMA에 함유된 소수성인 규소(Si)의 피크는 Si_{2p} (154,30)로 확인하였다.

방사선 조사된 우루시올 코팅층의 열분해 분석을 위해 TGA 장치를 이용하여 우루시올의 농도를 낮추어 아크릴레이트계 단량체와 우루시올을 동일한 중량비로 포함하는 우루시올 및 아크릴계 단량체 혼합물 사용하여 획득된 코팅층에서 무게 감소율을 각각 1 중량%, 5 중량%, 10 중량%, 20 중량%, 30 중량%, 40 중량% 및 50 중량%로 설정하여 수행하였다. 그 결과, 아래 Fig. 6에서 확인할 수 있는 바와 같이, 원액인 우루시올보다 아크릴레이트 단량체가 도입된 우루시올 코팅 조성물에서 분해되는 온도가 102°C에서 189~197°C로 상승하는 것으로 알 수 있었다. 이때, $T_{1\%}$는 시료의 전체 무게를 100%으로 환산했을 경우 시료 무게가 1% 감소 시 측정된 온도를 의미한다. 한편, 시료 무게가 5%에서 30%로 감소되었을 때 온도인 $T_{5\sim30\%}$에서도 아크릴 단량체의 효과로 인해 열안정성이 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 무게 감소 40% 이상에서는 모든 시료에서 열분해 온도가 급격하게 낮아지는 것으로 보이지만 400°C 이상에서는 방사선 조사된 우루시올보다 아크릴레이트 단량체가 도입된 우루시올에서 열안정성이 우수하다는 것을 알 수 있었으며, 우루시올 대비 아크릴레이트 도입된 우루시올의 잔유 무게량이 차이는 DPEHA-우루시올보다 TMPMA-우루시올에서 높은 폴리우루시올이 합성되었다는 것을 알 수 있었다. 본 결과를 통해 방사선 조사 시 우루시올과 아크릴레이트의 결합을 통해 열안정성이 우수한 폴리우루시올이 합성되었다는 것을 확인할 수 있었다.

방사선 조사된 우루시올 코팅층의 친수화 분석을 위해 Contact angle 장치를 이용하여 방사선 300 kGy 조사 시 우

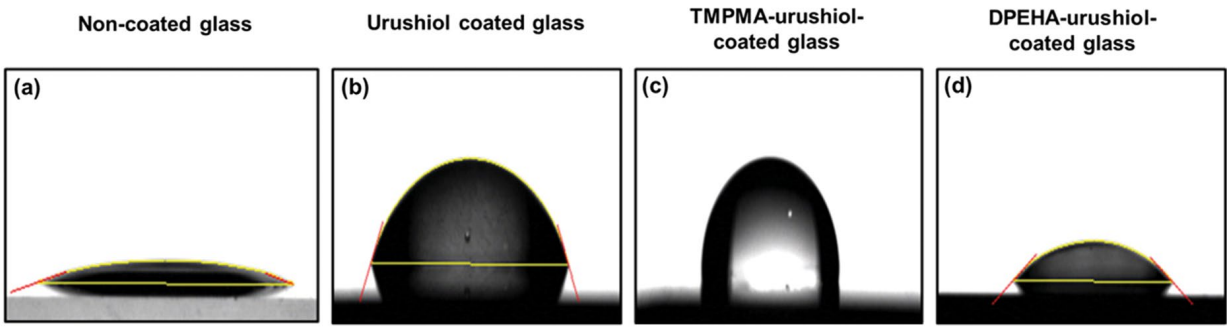

Fig. 7. Contact angle images of urushiol, TMPMA-urushiol, and DPEHA-urushiol coated glasses by gamma-irradiation.

루시올, 소수성 TMPMA-우루시올 및 친수성 DPEHA-우루시올 조성물로 코팅된 시료 표면의 접촉각을 측정하였다 (Fig. 7). 방사선 조사 시 코팅되지 않은 유리 도막, 우루시올, TMPMA-우루시올, DPEHA-우루시올이 코팅된 유리 도막의 접촉각은 12.3°, 56.1°, 102.4°, 39.2° 등으로 분석되었다. 천연 기름성분인 우루시올에 소수성 TMPMA가 개질된 폴리우루시올은 소수성으로 증가되었으며, DPEHA-우루시올인 경우에는 친수성 아크릴레이트의 영향으로 소수성이 감소는 되었으나 폴리우루시올 합성에는 문제가 없는 것을 확인하였다. 따라서, 더 높은 소수성을 얻기 위하여 최적의 소수성 아크릴레이트 단량체의 농도 조건 확립이 필요하며, 방사선 조사 시 친수성을 갖는 물질 표면의 소수화 또는 고분자의 물성 향상을 위한 가교제로도 응용 가능할 것으로 사료된다.

결 론

본 연구에서는 옻나무에서 추출한 우루시올과 소수성 실란계 커플링제인 1 관능기를 갖는 TMPMA와 6 관능기를 갖는 DPEHA의 방사선 접목 중합반응을 통해 열안전성이 향상된 가교구조의 폴리우루시올을 제조하였다. 폴리우루시올 중합과정에서 우루시올과 아크릴레이트와의 반응으로 폴리우루시올 합성 여부를 ATR-FTIR, XPS을 통해 확인하였다. TMPMA와 DPEHA를 첨가하여 제조한 폴리우루시올은 아크릴레이트를 첨가하지 않은 우루시올과 비교하여 열안전성이 매우 향상되는 것을 확인하였다. 특히, 소수성을 갖는 우루시올에 실란계 TMPMA 도입을 통해 소수성을 갖는 폴리우루시올을 제조할 수 있었다. 추후, 폴리우루시올은 천연에서 추출된 우루시올 물질로 매우 친환경적이고 기능성 물질 도입을 위해 방사선 조사 시 고분자의 열안전성 및 물성 향상을 위한 커플링제 및 금속, 고분자, 유리 나무 재료의 소수성 표면처리용 코팅제 등과 같은 다양한 사업 분야에서 다양한 기능을 수행할 수 있는 응용성이 클 것으로 예상된다.

사 사

이 논문은 전라북도의 재원으로 전북테크노파크의 소재·부품·장비기술개발지원사업으로 지원받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

Choi HS, Yeo SH, Jeong ST, Choi JH, Park HS and Kim MK. 2012. Preparation and characterization of urushiol free fermented *Rhus verniciflua* stem bark (FRVSB) extracts. *Korean. J. Food Sci. Technol.* **44**(2):173-178.

Jeong IY, Park YD, Jin CH, Choi DS, Byun MW, Ryu HW, Kim DY and Baek JY. 2011. Reduction of skin allergy of *Rhus verniciflua* sap utilizing radiation technology. *J. Radiat. Ind.* **5**(1):25-33.

Jung S, Kim D and Seo J. 2014. Preparation and the antioxidant and antibacterial activities of urushiol powders (YPUOH). *Prog. Org. Coat.* **77**:1465-1470.

Jung S, Kim D and Seo J. 2015. Properties of LDPE composite films using polyurushiol (YPUOH) for functional packaging applications. *Appl. Chem. Eng.* **26**(1):23-28.

Kang SK, Cho IS and Kim SB. 2008. Preparation and characterization of antimicro polyurethane foam modified by urushiol and cardanol. *Elastomer* **43**(2):124-132.

Kim D, Jeon SL and Seo J. 2013. The preparation and characterization of urushiol powders (YPUOH) based urushiol. *Prog. Org. Coat.* **76**:1465-1470.

Kim J. 2006. Analysis of the urushiol in Korean lacquer. *Korean J. Food & Nutr.* **19**(3):267-270.

Lee JH, Sohn JY, Shin DW, Song JM, Lee YM, Nho YC and Shin J. 2012. Fabrication of silane-crosslinked proton exchange membranes by radiation and evaluation of fuel cell performance. *Polymer* (*Korea*) **36**(4):525-530.

Lin J, Xu Y and Xia J. 2010. UV-induced polymerization of urushiol. II: Effects of hydrogenation degree of urushiol on surface morphology. *Prog. Org. Coat.* **67**:365-369.

Snyder DM. 1989. An overview of oriental lacquer; art and chemistry of the original hightech coating. *J. Chem. Educ.* **66**(12):977-980.

Sung HJ, Sohn JY, Song JM, Shin and Nho YC. 2011. Preparation of poly (styrene-co-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate)-grafted ETFE films by a simultaneous irradiation grafting method. *Polymer* (*Korea*) **35**(5):478-482.

Xia J, Lin J, Xu Y and Chen Q. 2011. On the UV-induced polymeric behavior of Cheinese lacquer. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **3**:482-489.

Yoon G. 2018. Change of lacquer surface by radiation. *J. Radiat. Ind.* **12**(4):333-336.

Received: 15 February 2021
Revised: 2 March 2021
Revision accepted: 17 March 2021