

아크릴레이트 계 UV차단 코팅막의 물성에 관한 연구

권순우* · 김병준* · 노혜란***†

*서울과학기술대학교 안경광학과, **서울과학기술대학교 의공학·바이오소재 프로그램
(2016년 9월 26일 접수, 2016년 10월 18일 수정, 2016년 11월 10일 채택)

Study of Physical Properties of UV Protective Film with Acrylate Polymers

Soonwoo Kwon*, Byungjoon Kim*, and Hyeran Noh***†

*Department of Optometry, Seoul National University of Science and Technology,
138 Gongneung gil, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

**Convergence Institute of Biomedical Eng. & Biomaterials, Seoul National University of Science and Technology,
138 Gongneung gil, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received September 26, 2016; Revised October 18, 2016; Accepted November 10, 2016)

초록: 스핀코팅 시 액체의 유변학적 성질을 고려하여 다관능 아크릴레이트 기반의 광학용 자외선 차단 코팅을 개발하였다. 스핀코팅 시 변수들(회전속도, 고정 회전속도 도달시간, 가속시간)에 따른 코팅막의 광 차단율, 코팅 두께 그리고 코팅의 신뢰성을 평가하였다. 그 결과 우레탄 올리고머 추가 없이 다관능의 아크릴레이트 단량체의 조합으로 UV 차단율이 68%(UV-A와 UV-B) 이상 가능하고 가시광선 투과율이 95% 이상인 광학용으로 적합한 광 차단 코팅을 제조하였다. 스핀코터의 회전 속도와 최고 회전속도 도달 시간이 증가함에 따라 코팅 박막의 두께와 자외선 차단율이 증가하는 추세를 보였다. 본 연구에서는 실험과 이론으로 스핀코팅 공정과정을 분석하였으며 그 결과 우수한 광학 특성, 내마모성, 내화학성을 지니는 UV차단 코팅막을 개발하였다.

Abstract: Acrylate based UV protective coating was developed with understanding of rheological properties of polymer fluid. Depending on variables (a rotating speed, ramping time to reach the fixed speed, and crosslinking time), we evaluated physical properties such as film thickness, light blocking rate, and reliability. As a result, thin optical transparent film with UV blocking rate of 68% (total of UV-A and UV-B) and visible light transmittance of more than 95% was developed with acrylate based polymer film excluding urethane oligomers. With increasing rotating speed and ramping time to reach the fixed rotating speed, thickness and the light blocking rate of film was increased. In conclusion, we examined the spin coating process both experimentally and fundamentally with acrylate based UV protective coating. The developed UV protective film showed good optical properties in addition to satisfactory wear and chemical resistances.

Keywords: rheology, UV protective coating, acrylate, spin coating, polymer film.

서 론

광학용 플라스틱에는 polymethyl methacrylate(PMMA), polycarbonate(PC), polyethylene terephthalate(PET) 등의 투명한 고분자가 굴절률, 사용 용이성 등에 따라 선택되어 사용되고 있다. 이 광학용 플라스틱은 대체로 광 투과율이 유리보다 낮고, 유리와는 달리 마찰이나, 화학약품, 온도 등의 요인에 변성이 되기 쉬운 단점이 있다. 이런 렌즈의 물성은 박막 코팅으로 개선될 수가 있는데 예를 들어, 빛 반사 방지,

복굴절 감소, UV 빛 차단 등의 광학적, 그리고 강도와 경도 등의 기계적 물성을 강화시키기 위해 유, 무기 박막 코팅이 광범위하게 적용되고 있다.^{1,2}

이 중 UV 차단 코팅제의 주원료로 사용되는 아크릴레이트 고분자는 관능기의 종류, 개수 및 중합도 등에 따라 물리적, 광학적 물성이 달라진다. 일반적으로 우레탄과 공중합한 다관능 아크릴레이트의 함량이 높을수록, UV 차단 효과도 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 우레탄의 비중이 전체의 80% 보다 높으면, 일정한 두께의 균일한 코팅 막 형성이 어려워 오히려 광 투과도가 떨어질 수 있다. 이 때에 실레인계 복합물을 추가하여 우레탄의 함량을 낮춘 효과적인 UV 차단제를 개발하기도 한다.^{3,4} 우레탄과 공중합된 다관능 아크릴레이트를 사용하여, 열 안정성과 경도가 증가된 코팅막을 제조

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hrnoh@seoul.ac.kr

©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

할 수 있으나, 방향족 우레탄 아크릴레이트의 경우 자외선에 의해서 오히려 황변 현상이 발생할 수도 있다.^{4,8}

아크릴레이트 기를 포함하는 polydimethylsiloxane(이하 PDMS)계 관련 연구가 활발한데, PDMS 기반 코팅액은 고굴절률의 코팅막의 효과적인 형성이 가능하나, 제조공정이 단순하지 않다.⁹⁻¹¹ 일반적으로 유-무기 하이브리드 코팅막 형성을 위한 복합체 입자의 형성까지 반응 시간이 24시간 이상 걸리며, 무기재료를 포함하는 코팅막과 유기 소재의 열 팽창률이 달라 건조과정 중 코팅막에 크랙이 발생하기가 쉽다. 뿐만 아니라, 최종 코팅막의 가시광선 투과도가 90% 이상 되지 않아 일반 광학용 재료로 사용되기에는 무리가 있다. 이외에도 황이 포함된 아로마틱계 올리고머와 공중합한 아크릴레이트계 UV 차단제의 개발도 이루어지고 있으나 도막이 견고하지 못하고 용해성이 떨어져 공정이 까다로운 단점이 있다.¹¹

플라스틱의 경도를 강화하기 위해 금속 나노입자를 첨가하여 코팅막을 제조하기도 한다. 그러나 나노입자를 포함하는 코팅막은 열 경화 방식을 이용하기 때문에 그 과정에서 휘발성 유기물이 발생되어 친환경적이지 않다. 또한 금속 입자의 함량이 증가할수록 굴절률과 경도가 증가하나, 광 투과율이 급속히 떨어지는 단점이 있다.⁹

코팅막의 제조방법에 있어서 스핀 코팅 방법은 전자기기, 광학재료 등의 다양한 코팅산업에 적용되는 공정이다. 하지만, 코팅액의 특성이나 공정조건에 따른 변수들을 고려하지 않은 채 실험적으로 제조되는 현실이다. 회전하는 플레이트의 속도, 회전 시간, 그리고 코팅액의 유동성(rheology) 등이 균일한 코팅막을 형성하는 공정변수와 긴밀한 관계가 있다.¹²

아크릴레이트는 경도와 강도가 좋으며 광 투과율이 우수한 UV 차단 코팅막을 제조하는 주 원료로 사용되는데 본 연구는 우레탄을 사용하지 않고 여러 관능기를 가진 아크릴레이트 단량체만의 조합으로 저렴하고 단순한 UV 차단 코팅액을 개발하고자 하였다. 특히, 스핀코팅 시간, 속도, 가교시간 등 공정조건을 달리하여 스핀 코팅에서의 액막의 흐름을 이해하고 최적의 코팅 특성을 지닌 UV 차단 코팅막을 개발하고, 이러한 공정 조건이 제조된 코팅 층의 광학적 특성 및 부착 성, 내구성에 미치는 영향을 확인하였다.

실 험

실험재료. 2관능형 아크릴레이트인 1,6-hexanediol diacrylate(Sigma-Aldrich, 80%, USA, 이하 HDDA)와 6관능형 아크릴레이트인 dipentaerythritol hexaacrylate(Sigma-Aldrich, USA, 이하 DPHA)를 사용하였으며, isopropyl alcohol(Sigma-Aldrich, 이하 IPA), ethyl acetate(Sigma-Aldrich, 99%, 이하 EA)와 광 개시제로 Irgacure 184(BASF, USA), Irgacure 651(BASF, USA)를 사용했다. 시약 제조에 사용된 각 재료들은 별도의 정제 없이 사용하였다. 피착제로는 아크릴(가로 70 mm,

세로 70 mm, 높이 4 mm)을 이용하였다.

방법. 코팅액 제조: 아크릴레이트 단량체는 전체 코팅액의 총 42.5 wt%로 2관능기인 HDDA를 26.56 wt%로 사용하고 DPHA를 15.94 wt%로 배합하였다. 희석 용매로는 IPA와 EA를 각각 26.4 wt%로 총 53.12 wt%로 배합하였고 광 개시제로는 Irgacure 184를 3.82 wt%, Irgacure 651을 0.53 wt%로 배합하였다. 이후 자력식 교반기로 10분간 교반하였다.

스핀 코팅: 본 연구에서 차용하는 rpm은 스핀코터 ACE-200(동아무역, Korea)의 분당 회전 수를 말하며 연구에 활용된 기계는 0부터 8000 rpm까지 실험 가능한 것으로 확인되었다. 4000부터 8000 rpm까지 1000 rpm 간격으로 5단계로 1 mL를 40초 동안 스핀 코팅하였다. 설정된 최고 회전 속도에 도달되는데 걸리는 시간은 10초 간격으로 1, 10, 20, 그리고 30초로 4 단계로 실험하였다.

자외선 경화: 스핀 코터기(UltraLum Inc사, CEX-800, Korea)의 수은 램프 파장은 365 nm, 에너지는 999.9 mJ로 고정하였다. 조사시간은 7, 10, 15, 20, 25, 40, 60, 90, 120, 130, 135, 140, 그리고 145분으로 총 13 단계로 실시하였다.

코팅 두께 및 신뢰성 평가: 도막의 두께는 Salu Tron D1/D2(LAB&TOOLS, Korea)를 이용하여 μm 단위로 측정하였다. 접착력은 ASTM D3359를 따라, 코팅의 표면에 6×6 혹은 11×11로 1 mm 간격으로 칼집을 낸 후 투명 OPP 테이프를 이용하여 부착 후 급격히 잡아당겨 표면을 평가하였다. 이소프로필 알코올(Sigma-Aldrich, IPA)을 사용하여 내약품성 실험을 하였다. 약품에 적신 천으로 코팅막을 50회 문지른 후 광 투과율을 측정하였다. 연필경도 측정기(CT-PC1, Core tech, Korea)의 연필경도 측정용 연필에 1 kg 하중을 가하여 측정하였다.

결과 및 토론

본 연구에서는 우레탄-아크릴레이트 올리고머를 제외하고 여러 관능기를 지니는 아크릴레이트만의 배합으로 제조가 간편한 UV 차단 코팅액을 개발하고자 하였다. 접착력과 점도 희석의 역할을 하는 2관능기인 HDDA와 경화속도와 경도 증가의 역할을 하는 다관능기인 DPHA를 포함하는 용액의 유동을 이해하기 위한 공정과정을 연구하였다. 스핀 코팅은 회전하는 판 위에 도막을 입히고자 하는 물질 위에 코팅액의 유동 즉 흐름에 의해 코팅막이 형성되는 공정이다. 이 코팅 공정에는 회전판의 속도, 코팅액의 용량, 코팅액의 점성 등 최종 코팅막의 물성을 결정하는 여러 변수들이 고려되어야 한다. 본 연구에서 고려한 변수인 스핀코터의 분당 회전속도(rpm), 최대 회전속도 도달 시간 그리고 가교시간에 따른 코팅막의 물성은 다음과 같다.

코팅막의 두께. 본 연구에 사용된 아크릴레이트의 비율에 따른 코팅 용액의 점도는 전단 속도에 영향을 받지 않는 뉴

토니안 흐름을 보였다(Figure 1). 뉴토니안 흐름을 보이는 아크릴레이트 농도 중 42 wt%에서 스핀 코터의 공정 변수에 따른 코팅막의 두께 변화를 알아보았다.

스핀 코터의 분당 회전 속도가 증가할수록 코팅된 도막의 두께가 얇아졌는데 이는 분당 회전수가 증가함에 따른 원심력의 증가로 코팅액이 빠르게 유동한 것으로 사료된다(Figure 2).

고정 스핀 속도가 일정한 상태에서 코팅 두께(α)는

$$\alpha = Kw \left(\frac{v}{\theta^2 r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)^{12}$$

로 여기서 v 는 점도, w 는 acrylate의 농도(wt%), θ 는 회전 속도, r 은 피 코팅면의 반지름이고 Q 는 코팅 용액의 흐름 속도 (mL/s)이다.

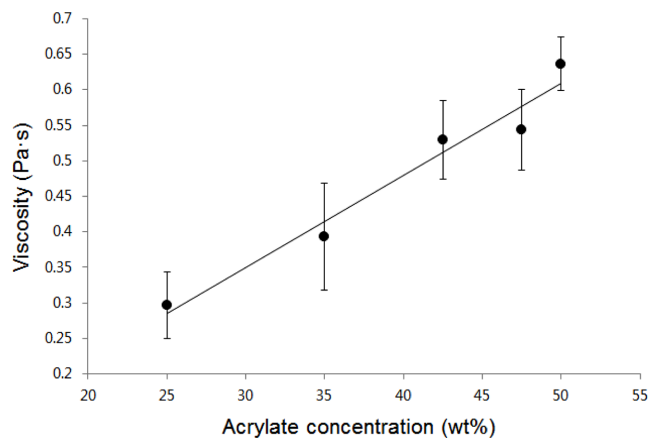


Figure 1. Newtonian viscosity of coating solution with increasing acrylate concentrations.

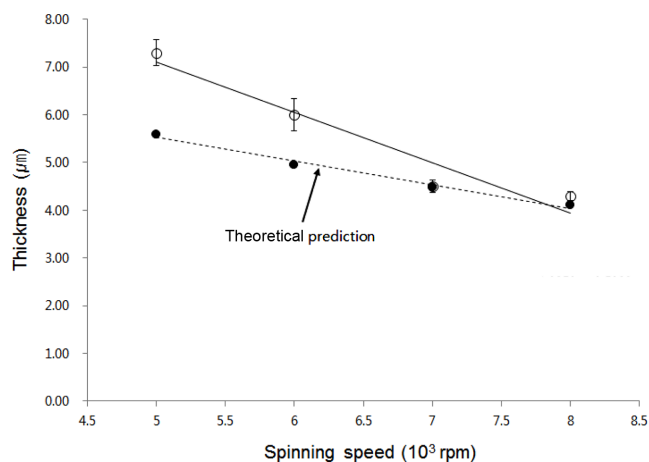


Figure 2. Theoretical and experimental film thickness with changes of spinning speed.

K 는 $(81Q/16\pi)^{0.33}$ 상수로 나타낼 수 있다.¹²

Washo의 식 (1)에 따르면 코팅 두께는 용액의 흐름 속도에 영향을 받으며 회전 속도에 반비례한다.

Figure 2는 식 (1)에 계산된 이론 치와 실험에 의한 코팅막의 두께를 회전 속도에 따라 나타냈다. 회전 속도가 증가함에 따라 코팅 두께가 감소하는 경향으로 특히 7000 rpm 이상의 고속의 회전에서는 실험과 이론 값이 잘 부합하는 것으로 나타났다. 그러나 6000 rpm 미만에서의 코팅 두께는 이론 치보다 크게 나타났는데 이는 이론 상 시간에 따른 유체의 속도가 일정하다고 가정하였는데($dQ/dt=0$) 실제로 6000 rpm 미만의 상대적으로 저속에서의 코팅액 흐름 속도가 시간에 따라 약간의 변화가 있는 준안정상태(quasi-steady state)이기 때문인 것으로 사료된다.

그렇다면 고정 스핀 속도가 처음부터 일정하지 않은 상태($dQ/dt \neq 0$), 즉 시간에 따라 스핀 속도가 증가하는 상태에서의 코팅 두께(α)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = Kw \left(\frac{v}{\theta^2 r^2} \right)^{0.33} \left[1 + 0.395K^2 \left(\frac{\theta^2}{vr^4} \right)^{0.33} t \right]^{-0.5} \quad (2)^{12}$$

실험적으로 고정 회전 속도에 도달하는 시간을 조절하여 고정 스핀 속도가 일정하지 않은 상태에서의 코팅막의 두께의 시간에 따른 영향을 알아 보았다. 고정 회전속도 도달 시간은 최소 1초부터 30초까지 10초 간격으로 실시하였다. Figure 3에 나타난 것처럼, 도막의 두께는 시간에 영향을 받는데 고정 속도 도달 시간이 길어질수록 코팅액의 유동 속도 또한 증가하여 도막의 두께가 얇아지는 것으로 나타났다. 일반적으로 회전축 방향 전단율에 의해 전단응력은 결정되는데 이 전단응력은 다시 회전 속도에 영향을 받는다(단, 용액의 점도는 균일하다는 가정이다). 따라서 시간에 따른 회전 속도

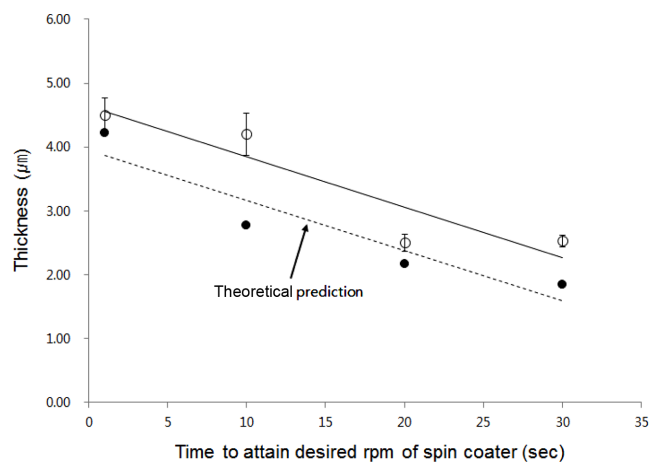


Figure 3. Theoretical and experimental film thickness with changes of time to attain desired rpms of a spin coater.

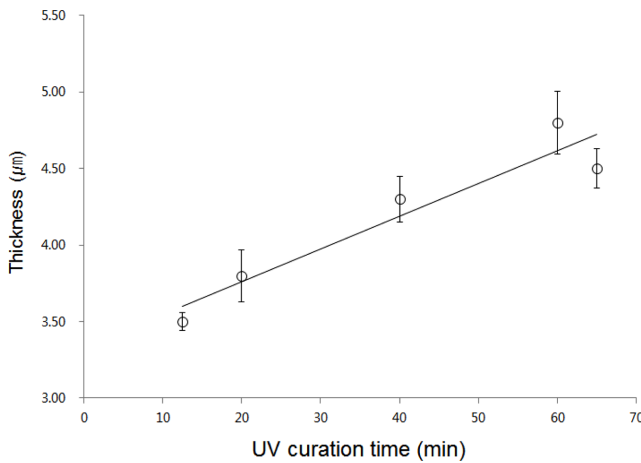


Figure 4. Film thickness with changes of UV curing time.

의 차이가 클 경우 이는 코팅액의 준 정상상태 유동을 유발하게 된다. 코팅액의 준 정상상태 유동시간이 길어지면 코팅막의 두께가 일정하게 유지되기가 어려울 수 있다. 식 (2)를 바탕으로 한 코팅막의 두께와 고정 회전속도 도달 시간의 기울기는 -0.079 ± 0.007 이고 실험에 의한 기울기는 -0.079 ± 0.006 으로 근소한 차이로 부합하는 것으로 나타났다.

스핀코팅 공정에 의한 코팅막은 회전 속도, 시간 외에도 피코팅제의 넓이(r)에도 영향을 받는다.¹³ 본 연구에서는 코팅액의 부피를 일정하게 하여 코팅 면의 크기를 동일하게 실험하였다. 이 외에도 고분자 코팅막의 경우 스핀 공정 이후의 UV 가교 시간, 광파장의 세기 등 후 공정에도 코팅의 물성이 영향을 받을 수 있다. 광파장의 세기를 일정하게 하고 가교 시간을 달리한 결과 대체로 가교시간이 길수록 코팅막의 두께가 두꺼운 경향을 보였다. 이는 가교 시간이 길어짐에 따라 아크릴레이트의 가교 밀도가 높아져 코팅막의 수축이 유발된 것으로 보인다.¹⁴ 이에 따라 수축된 코팅막으로 인해 두께가 증가한 것으로 사료된다(Figure 4).

코팅막의 광 차단 효과. 최대 UV 차단율을 나타내는 조건에서 UV-B는 50% 이상 투과율이 차단되고 UV-A는 10% 이상 차단되는 동시에 가시광선 영역은 90% 이상 투과되는 코팅 효과가 나타났다. 코팅막의 광 차단율은 스핀코터의 회전속도가 증가할수록 증가하다가 8000 rpm일 때 광 차단율이 오히려 감소하였다(Figure 5). 스핀코팅은 회전 시 코팅액의 퍼짐으로 박막을 생성하는데, Emslie는 코팅액의 점성이 충분히 낮을 때 평평한 원판 위의 소재에 균일하고 얇은 막의 형성이 가능함을 이론적으로 나타냈다.^{15,16} 본 연구에서 회전속도가 7000 rpm일 때에 광 차단율이 일정하게 유지된 것을 보아 균일한 막이 형성된 것으로 보인다.

스핀코터의 회전 속도가 8000 rpm으로 유지될 경우, 빠른 회전 속도에 코팅액의 분산이 저해되어 찰알이 퍼지는 듯 코팅이 균일하게 되지 않았다. 8000 rpm 이상의 고속 회전은

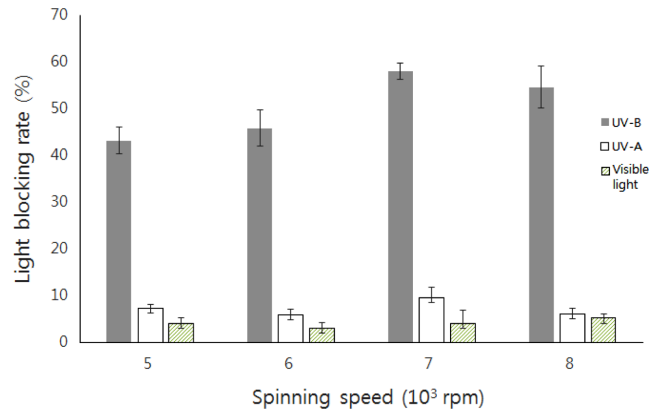


Figure 5. Light blocking rate with changes of revolution per minute of a spin coater. Filled block is UV-B, open block is UV-A, and slashed block is visible light.

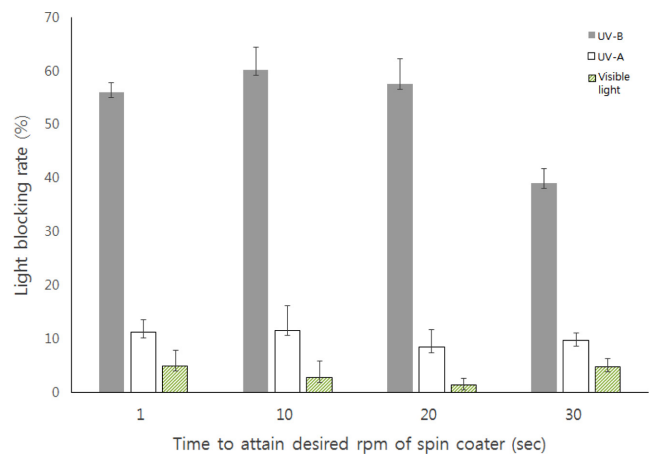


Figure 6. Light blocking rate with changes of time to attain desired rpms of a spin coater. Filled block is UV-B, open block is UV-A, slashed block is visible light.

본 코팅액의 점도와 총 부피에 비해 분당 회전수가 높아 균일한 도막 형성이 어려운 것으로 파악된다.

빠른 속도의 회전에서 아크릴레이트 용액의 전단력보다 회전판의 원심력이 너무 강할 경우 코팅막이 오히려 균일하지 못할 수 있는데, 8000 rpm의 회전속도에서는 코팅액을 바깥으로 밀어내는 강한 원심력에 의해 박막이 균일하지 못하고 코팅액의 울퉁불퉁한 문침이 나타난 것으로 보인다.

스핀 코터의 최적 회전속도를 7000 rpm으로 정하고 이 때 고정 회전속도에 도달하는 시간에 따른 도막의 광 차단율을 알아보았다. 그 결과 고정 회전속도 도달 시간별 광 차단율은 1, 10, 그리고 20 초에서는 큰 차이가 나타나지 않았으나 30초 일 때는 도막의 광 차단율이 상대적으로 낮게 나타났다(Figure 6).

코팅액은 회전 초기에 다량 회전판 중심에 흐르게 되는데

이후 회전 시간에 따라 유체의 흐름의 양에는 차이가 있다. 회전 초기 즉, 고정 회전속도 도달 시간이 0일 때에는 순간적으로 다량의 코팅액의 유입되어 피착체에 접촉하게 된다. 이 때, 피착체의 표면 장력을 넘어서 피착체 표면이 코팅액으로 젖음(wetting)상태가 됨을 예측할 수 있다.¹⁷ 이후 고정 회전속도에 도달할 때까지 회전판의 가속으로 인해 다량의 코팅액이 재료 표면에 흐르게 된다. 이 때, 정상상태 유동(steady state flow) 또는 준 정상상태 유동(quasi steady state flow)에 의해 코팅액이 피착체 표면에 흐르게 된다.¹²

회전판의 고정 회전속도 도달 시간이 짧을 경우에는 코팅액이 준 정상상태 유동에 의해 흐르게 되고, 이에 따라 유체의 흐름이 불규칙하여 결국 도막이 불규칙하게 형성될 수 있다고 알려져 있다. 반대로 유체의 준 정상상태 유동이 짧고 정상상태 유동이 길게 일어날 경우, 코팅막은 균일하게 형성된다. 정상상태 유동일 때 유체는 회전판의 원심력에 의한 퍼지려는 힘과 회전 중심에 작용하는 전단응력간의 균형에 의해 코팅막의 균일성이 결정된다.^{17,18}

고정 회전속도 도달 시간이 상대적으로 긴 30초일 때, 즉 회전판의 회전 속도변화 시간이 길어짐에 따라 코팅액의 회전판 중심으로부터 흐르는 준 정상상태 유동 시간이 길어진다. 결과적으로 코팅막이 불균일하게 형성되어 광 차단율이 급격히 낮아진 것으로 파악된다.^{17,19}

가교 시간에 따른 코팅막의 광 차단율은 Figure 7에 나타난 바와 같이 가교 시간이 증가함에 따라 즉, UV 광에 노출될 시간이 길어질수록, 30에서 50% 이상 증가하였다. 약 60분의 가교 시간에서 부분이 아닌 전체 코팅막이 가교된 것으로 보인다. 광 차단율은 초기 가교시간에 급격히 증가하는 양상을 보였는데 이는 코팅액의 점도가 낮아 아크릴레이트 분자들의 운동성이 활발하여 빠른 광 가교가 일어난 것으로 보인다. 가교 시간이 60분 이상에서는 코팅막에 의한 광 차단율 증가 폭이 완만하게 증가하다가 더 이상 증가하지 않는 포화 현상이 나타났다. 가교 시간이 길어지면서 아크릴레이트의 고분자 형성이 이루어져 용액의 점도가 증가했기 때문으로 사료된다.^{20,21}

내구성 평가. 스핀 공정 시, 분당 회전속도, 고정 회전속도 도달 시간, 가교 시간이 각각 7000 rpm, 1 초, 60분일 때 광 특성과 코팅 두께가 일정한 것으로 나타나 이러한 조건의

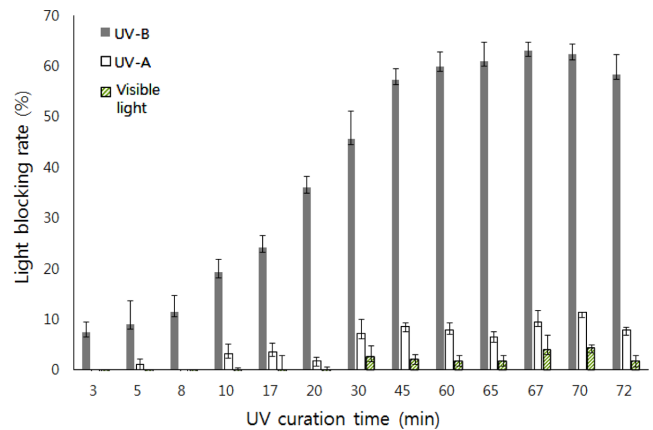


Figure 7. Light blocking rate with changes of UV curing time. Filled block is UV-B, open block is UV-A, slashed block is visible light.

코팅막의 내구성 평가를 실시하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 코팅막의 접착력은 ASTM 기준으로 3B 등급이고 연필 경도는 2H로 나타났다. 내약품성 평가 후 UV 차단력은 UV-B의 경우 평균 56.2%, UV-A는 12%, 가시광선은 4.2%로 나타나 평가 전(UV-B, UV-A, 가시광선, 58.1, 12, 4.0%)과 비슷하여 화학 약품에 대한 내구성이 우수한 것으로 나타났다.

결론

다관능 단량체로 배합된 코팅액을 광 중합하여 광학용 UV 차단 코팅막을 제조하였다. 본 연구에서는 광 투과율이 좋은 아크릴레이트 단량체 기반의 자외선 경화형 코팅액 개발을 위해 스핀코팅 공정 조건을 연구하였고 제조된 코팅막의 신뢰성을 평가하였다. 스핀 코터의 분당 회전속도, 고정 회전속도 도달 시간, 가교 시간이 각각 7000 rpm, 1 초, 60분일 때 적절한 광 차단율을 지니면서 가시광선 투과율이 우수한 것으로 나타났다. 두께는 평균 4.5 μm 이고 3B 등급의 부착력을 갖고 있으며 내약품성이 우수하였다. 본 연구에서는 우레탄을 사용하지 않고 다관능 아크릴레이트 단량체의 배합으로 스핀코팅 공정 조건을 달리하여 우수한 가시광선 투과율과 60% 이상의 UV-A, UV-B를 차단하는 저비용, 친환경인 광학 코팅제를 개발하였다.

Table 1. The Effect of Coating Process on the Property of Coating Films

Composition	wt%	Processing type	Pencil hardness	Adhesiveness	Chemical resistance	Light blocking rate after chemical resistance test
1,6-Hexanediol Diacrylate	25.56	Revolution per minute (rpm)	7000			
Dipentaerythritol hexaacrylate	15.94	Ramp time (s)	1	2H	3B	Good
Alcohol	53.12	UV curing time (min)	60			56.2% (UV-B), 12% (UV-A), 4.2% (Visible light)

감사의 글: 본 연구는 서울과학기술대학교 교내학술지원비로 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. J. W. Woo, J. S. Hong, H. K. Kim, and M. Y. Lyu, *Polym. Korea*, **40**, 175 (2016).
2. J. H. Cho, S. R. Park, H. Kim, and M. Y. Lyu, *Polym. Korea*, **36**, 131 (2012).
3. F. Masson, C. Decker, T. Jaworek, and R. Schwalm, *Prog. Org. Coat.*, **39**, 115 (2000).
4. C. Decker, F. Masson, and R. Schwalm, *Polym. Degrad. Stabil.*, **83**, 309 (2004).
5. I. Sondi, T. Fedynyshyn, R. Sinta, and E. Matijevic, *Langmuir*, **16**, 9031 (2000).
6. S. Tasic, B. Bozic, and B. Dunjic, *Prog. Org. Coat.*, **51**, 321 (2004).
7. W. H. Lu, W. J. Xu, Y. M. Wu, X. Zhou, Y. B. Lu, and Y. Q. Xing, *Prog. Org. Coat.*, **56**, 252 (2006).
8. Y. K. Cho and W. K. Lee, *Polym. Korea*, **40**, 439 (2016).
9. F. Bauer, H. J. Glasel, U. Decker, H. Ernst, A. Freyer, E. Hartmann, V. Sauerland, and R. Mehnert, *Prog. Org. Coat.*, **47**, 147 (2003).
10. V. A. Soloukhin, W. Posthumus, J. C. M. Brokken-Zijp, J. Loos, and G. de With, *Polymer*, **43**, 6169 (2002).
11. A. Martinez, J. Perez-Juste, and L. Liz-Marzan, *Adv. Mater.*, **22**, 1182 (2010).
12. B. Washo, *IBM J. Res. Dev.*, **21**, 190 (1977).
13. T. S. Kim and M. U. Kim, *Fluid Dyn. Res.*, **41**, 28 (2009).
14. X. Xiao and C. Hao, *Colloid Surface A*, **359**, 82 (2010).
15. A. Emslie, F. Bonner, and L. Peck, *J. Appl. Phys.*, **29**, 858 (1957).
16. T. S. Kim, *J. Illass. Korea*, **18**, 146 (2013).
17. E. A. Vogler, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **74**, 69 (1998).
18. W. Flack, D. Soong, A. Bell, and D. Hess, *J. Appl. Phys.*, **56**, 1199 (1984).
19. L. Schwartz and R. Roy, *Phys. Fluids*, **16**, 569 (2004).
20. S. H. Lee, H. G. Kim, and S. S. Kim, *Macromol. Res.*, **18**, 40 (2010).
21. S. Kaewpirom and D. Kunwong, *J. Polym. Res.*, **19**, 9995 (2012).