

청색광과 자외선 차단 특성을 갖는 플라스틱 필름의 제조

강석환 · 김훈관 · 송기창[†]

건양대학교 의료신소재학과
(2025년 3월 31일 접수, 2025년 4월 17일 수정본 접수, 2025년 4월 19일 채택)

Preparation of Plastic Films with Blue Light and Ultraviolet Ray Blocking Properties

Suk Hwan Kang, Hun Kwan Kim and Ki Chang Song[†]

Department of Biomedical Materials, Konyang University, 158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon 35365, Korea
(Received 31 March 2025; Received in revised from 17 April 2025; Accepted 19 April 2025)

요 약

본 연구에서는 수분산 폴리우레탄에 청색광 및 자외선 흡수 염료를 각각 혼합하여 코팅 용액을 제조하고 이것을 기재인 PET sheet 위에 도포한 후 열경화 시킴에 의해 청색광과 자외선을 동시에 차단할 수 있는 플라스틱 필름을 제조하였다. 청색광 흡수 염료인 노란색의 quinoline yellow와 pigment yellow 74의 첨가량이 증가함에 따라 400~450 nm 파장의 고에너지 청색광의 투과율이 감소되어 청색광 차단 효과가 향상되었다. 그러나 pigment yellow 74의 첨가는 quinoline yellow 보다 더 진한 노란 색상의 필름이 얻어져 시인성이 좋지 못했으며, 500~800 nm 영역에서의 가시광선 투과율이 크게 감소한다는 문제점들이 있었다. 한편 자외선 흡수제인 benzotriazole과 benzophenone 첨가량이 증가함에 따라 코팅 필름의 320~400 nm의 UV-A 파장에서의 평균 투과율이 크게 감소하여 자외선 차단 효과가 크게 향상되었다. 그러나 benzotriazole 첨가량의 증가는 코팅 필름의 시인성을 크게 저하시키지 않았으나, benzophenone 첨가량의 증가는 코팅 필름의 색을 진한 노란색으로 변화시켜 시인성을 크게 저하시켰다.

Abstract – In this study, coating solutions were prepared by mixing waterborne polyurethane with blue light and ultraviolet absorption dyes, applying them on the PET sheet as a substrate, and then thermosetting them to produce a plastic films that can block blue light and ultraviolet rays at the same time. As the amount of yellow quinoline yellow and pigment yellow 74, which are blue light absorption dyes, increased, the transmittance of high-energy blue light with a wavelength of 400 to 450 nm decreased, improving the effect of blocking blue light. However, the addition of pigment yellow 74 had problems that the visibility was poor because a darker yellow film was obtained than quinoline yellow, and the visible light transmittance in the 500-800 nm region was significantly reduced. As the amount of benzotriazole and benzophenone, which are UV absorbers, increased, the average transmittance of the coating films at a wavelength of 320-400 nm decreased significantly, resulting in a significant improvement in the UV blocking effect. However, the increase in the amount of benzotriazole did not significantly reduce the visibility of the coating film, while the increase in the amount of benzophenone caused the coating film to change to a dark yellow color, significantly decreasing its visibility.

Key words: Blue light, Ultraviolet ray, Blocking, Quinoline yellow, Benzotriazole

1. 서 론

청색광(blue light)이란 400~500 nm 파장의 푸른빛으로 인간의 눈으로 볼 수 있는 가시광선 중에서 가장 파장이 짧고 자외선에 가까운 강한 에너지를 가지고 있다[1]. 청색광은 400~450 nm 파장의 단파장 청색광과 450~500 nm 파장의 장파장 청색광으로 나눌 수

있다[2]. 단파장 청색광은 매우 높은 에너지를 가지고 있어 우리 눈의 각막이나 수정체에서 흡수되지 않고 망막까지 도달하여 안구의 피로를 느끼게 할 뿐 아니라 안구 세포에 손상을 줄 수 있다[2]. 반면에 장파장 청색광은 바이오 리듬을 안정화할 수 있으며, 수면 상태, 기분, 기억력 등을 개선시킬 수 있으므로 인체에 이롭다고 알려져 있다[2]. 따라서 우리 눈을 손상시키는 청색광은 주로 단파장 청색광을 의미한다. 청색광은 스마트폰, 컴퓨터와 TV 모니터, LED 조명 등의 전자기기에서 특히 많이 방출되는데, 이 청색광에 장시간 눈이 노출되면, 선명한 시야가 방해되고 안구 건조, 눈 피로, 불면증, 어깨 결림, 요통 등의 다양한 증상이 발생하게 된다[3-4]. 자외선의 경우에는 우리 눈의 각막이나 수정체에서 모두 흡수되기 때

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: songkc@konyang.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

문에 망막은 안전하나 청색광은 매우 높은 에너지를 가지고 있어 수정체를 통해 망막까지 직접 통과하여 치명적인 눈의 질병인 황반변성을 유발시킨다[5]. 이러한 이유로 장시간 업무 시, 사용되는 스마트폰 및 컴퓨터 모니터에서 발생하는 청색광을 차단하는 것이 눈 건강에 꼭 필요하다[6-9].

자외선은 태양광 중에서 가장 짧은 파장으로 눈에 해롭다. 자외선 노출은 광각막염, 백내장, 노인성 황반변성 등과 같은 질환을 유발한다[10]. 자외선은 파장에 따라 장파장(320-400 nm)의 UV-A, 중파장(280-320 nm)의 UV-B, 단파장(200-280 nm)의 UV-C로 분류된다[10]. UV-A는 파장이 긴 광선으로 에너지는 약하나 피부의 진피까지 도달하여 피부의 탄력을 감소시켜 주름을 생성시키는 만성 광노화의 원인이다[11]. UV-B는 피부의 표피와 진피의 유두층까지 도달하여 피부를 태우는 등 즉각적인 반응을 일으키며 UV-B에 대한 직접적인 피부 노출은 광노화, 홍반, 색소 과다 침착, 피부암을 유발한다[12]. UV-C는 파장이 가장 짧은 광선으로 가장 큰 에너지를 가져 살균 효과가 있으나 오존층에 의해 흡수되어 지표면에 도달하지 못하므로 피부에 큰 영향을 미치지 않는다[13]. 따라서 UV-A와 UV-B가 사람에게 유해한 자외선으로 알려져 있다[12-13].

Quinoline yellow나 pigment yellow 74는 식품, 화장품 및 코팅 산업에서 착색용으로 많이 사용되는 수용성의 노란색의 염료이다. 보색 원리에 의하면 청색광의 보색은 노란색이므로[2], 노란색 염료를 사용하면 청색광을 흡수할 수 있으므로 청색광 차단 효과가 있다고 판단된다. 한편 자외선 차단제로서 유기계 자외선 흡수제와 무기계 자외선 차단제가 주로 사용되어지고 있다[14]. 유기계 자외선 흡수제는 자외선을 흡수시켜 피부에 침투하지 못하도록 작용을 하는 것이며, 무기계 자외선 차단제는 자외선을 산란, 반사시켜 피부에 침투하지 못하도록 하는 역할을 한다[14]. Benzophenone과 benzotriazole은 현재 가장 널리 사용되는 유기계 자외선 흡수제로 자외선 흡수 범위가 넓으며, 투명성이 우수한 장점이 있다[15]. 무기계 자외선 차단제로는 zinc oxide(ZnO)와 titanium dioxide(TiO₂)가 주로 사용되어지고 있다[16]. 이때 ZnO와 TiO₂의 입자 크기는 가시광선의 산란을 줄여 백탁현상(white effect)을 최소화하기 위해 60~100 nm의 나노 입자들이 주로 사용되고 있다[17].

청색광과 자외선의 과도한 노출은 우리 몸의 안구와 피부에 심각한 손상을 끼치므로, 청색광과 자외선으로부터 우리 몸을 보호하는 것이 중요하다. 현재 스마트폰과 컴퓨터 모니터 등에 부착 가능하며, 청색광과 자외선을 동시에 효과적으로 차단할 수 있는 플라스틱 필름 개발에 대한 필요성이 지속적으로 요구되고 있다. 본 연구에서는 청색광을 흡수하는 염료로서 quinoline yellow와 pigment yellow 74를 사용하였으며, 자외선 흡수 염료로 benzophenone과 benzotriazole을 사용하였다. 코팅 도막을 형성할 수 있는 코팅제인 수분산 폴리우레탄에 위의 청색광 및 자외선 흡수 염료들을 혼합하여 코팅 용액을 제조한 후 PET 기재 위에 도포하여 자외선 및 청색광을 동시에 차단할 수 있는 플라스틱 필름을 제조하였다. 이 과정 중 코팅 용액의 조성이 코팅 도막의 물성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험

2-1. 시약 및 재료

본 실험에서는 청색광 차단 코팅 용액을 제조하기 위해 플라스틱

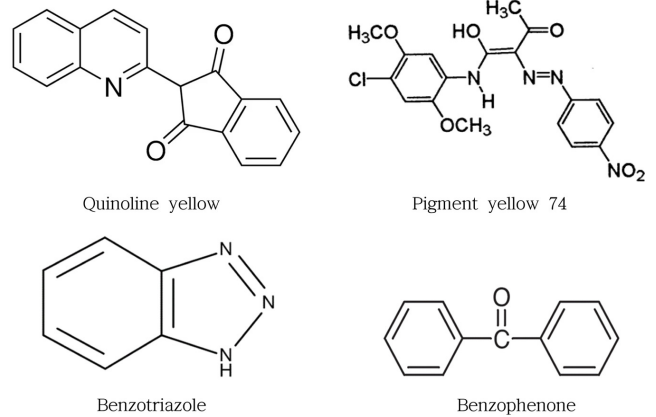


Fig. 1. The structures of chemicals used in this study.

기재 위에 도막을 형성할 수 있는 기본 코팅제로 수분산 폴리우레탄 (waterborne polyurethane, AU309, solid content 40 wt%, particle size <200 nm)을 (주)아펙에서 구입하여 사용하였다. 또한 청색광 (400~500 nm)을 차단하기 위한 청색광 흡수 염료로서 quinoline yellow(95%, Sigma-Aldrich)와 pigment yellow 74 (98%, Sudarshan Chemical Industries)를 사용하였다. 한편 UV-A (320~400 nm) 파장을 차단하기 위한 UV 흡수 염료로서 benzotriazole (Tinuvin, Seongwonsc)과 benzophenone (>99.0%, Tokyo Chemical Industry)을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 화학물질들의 구조식을 Fig. 1로 나타내었다. 또한 코팅을 위한 플라스틱 기재로서 가로 50 mm × 세로 50 mm × 두께 1 mm인 poly(ethylene terephthalate) (PET) sheet를 사용하였다.

2-2. 청색광 및 자외선 차단 코팅 필름 제조

먼저 Table 1과 같이 수분산 폴리우레탄 5 g에 청색광 흡수 염료인 pigment yellow 74와 quinoline yellow를 각각 다양한 양을 첨가하였고, 자외선 차단을 위해 자외선 흡수 염료인 benzotriazole과 benzophenone을 각각 다양한 양으로 첨가하였다. 그 후 첨가된 시약들이 충분히 분산될 수 있도록 1 h 동안 교반 하여 청색광 및 자외선 차단 코팅 용액들을 제조하였다. 코팅 필름 제조를 위해 먼저 기재인 PET sheet를 에탄올로 깨끗하게 세척한 뒤, 플라즈마 장치 (CUTE, Femto Science, Korea) 내의 챔버에 sheet를 위치시키고, 진공 펌프를 이용하여 5×10^{-1} torr로 진공 상태를 만든 후, 산소를 30 sccm로 흘려주면서 50 kHz, 100 W의 조건에서 10 min간 표면 처리를 진행하여 PET 기재의 표면을 친수성으로 개질하였다. 그 후 코팅 용액들을 전처리된 PET 기재 위에 적당량 적하한 후 바코더 #24(RDS사)를 사용하여 PET 기재 표면에 용액을 고르게 도포한 뒤 60°C에서 10 min간 열건조를 진행하여 청색광 및 자외선 차단 플라스틱 필름을 제조하였다.

2-4. 코팅 필름의 물성 측정

코팅 필름의 자외선 및 가시광선 영역의 투과율을 측정하기 위해 UV-vis spectrometer (UV-2450, Shimadzu)를 이용하여 200~800 nm 파장에서 투과율을 측정하였다. 또한 색도계인 Colorimeter (LS173, Linsang Technology)를 사용해 코팅 필름의 색차값(b*)을 측정하였다.

Table 1. Composition of the coating solutions prepared with different additives

Sample code	Waterborne polyurethane	Quinoline yellow	Pigment yellow 74	Benzotriazole	Benzophenone	
S1	5 g	0.001 g	-	-	-	
S2		0.003 g	-	-	-	
S3		0.005 g	-	-	-	
S4		0.007 g	-	-	-	
S5		0.015 g	-	-	-	
S6		0.020 g	-	-	-	
S7		-	-	0.005 g	-	-
S8		-	-	0.010 g	-	-
S9		-	-	0.015 g	-	-
S10		-	-	0.020 g	-	-
S11		-	-	0.030 g	-	-
S12		-	-	0.040 g	-	-
S13		-	-	-	0.04 g	-
S14		-	-	-	0.08 g	-
S15		-	-	-	0.12 g	-
S16		-	-	-	0.16 g	-
S17		-	0.020 g	-	0.20 g	-
S18		-	-	-	-	0.25 g
S19		-	-	-	-	0.50 g
S20		-	-	-	-	0.75 g

3. 결과 및 토론

3-1. 용액들의 흡광도 분석

Fig. 2(a), (b)는 각각 다른 종류의 청색광 및 자외선 흡수 염료 들을 증류수에 0.008 g/L의 같은 농도로 용해시킨 후 UV-vis spectrophotometer를 이용해 용액들의 흡광도를 측정된 결과이다. Fig. 2(a)에서 청색광 차단 염료로 quinoline yellow를 사용 시에는 220 nm, 290 nm, 410~450 nm의 파장에서 강한 흡광도를 보였다. 반면에 청색광 차단 염료로 pigment yellow 74를 사용했을 때는 240 nm와 420 nm의 파장에서 강한 흡광도를 나타내었다. 따라서 고에너지 청색광 파장 영역인 400~450 nm에서는 quinoline yellow와 pigment yellow 74 모두 청색광 차단 효과가 우수하다고 판단된다.

한편 Fig. 2(b)에서 자외선 흡수 염료들의 흡광도를 측정한 결과 benzotriazole은 210 nm와 350 nm 파장에서 강한 흡광도를 나타낸 반면 benzophenone은 210 nm와 250 nm의 파장에서 강한 흡광도를 나타내었다. 이 결과로부터 UV-A 파장 영역인 320~400 nm에서는 benzotriazole이 benzophenone 보다 자외선 차단 효과가 우수함을 알 수 있다.

3-2. 청색광 흡수 염료들의 청색광 차단 효과

수분산 폴리우레탄 5 g에 청색광 흡수 염료인 노란색의 quinoline yellow을 Table 1과 같이 각각 0.001 g(S1), 0.003 g(S2), 0.005 g(S3), 0.007 g(S4), 0.015 g(S5), 0.020 g(S6)으로 첨가량을 달리하여 다양한 조성의 코팅 용액들을 제조하였다. Fig. 3은 quinoline yellow 첨가량을 변화시켜 제조된 코팅 필름들의 색상을 나타낸 그림이다. 비교적 적은 양인 0.001 g(S1)의 quinoline yellow를 첨가하였을 때는 옅은 노란색 색상을 얻을 수 있었으나, quinoline yellow의 첨가량이 증가할수록 청색광 차단 필름의 색상은 짙은 노란색으로 변화하는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 Table 2에서 색차값(b*)이 S1의 17.6에서 S6의 44.0으로 증가하여 quinoline yellow의 첨가량이 증

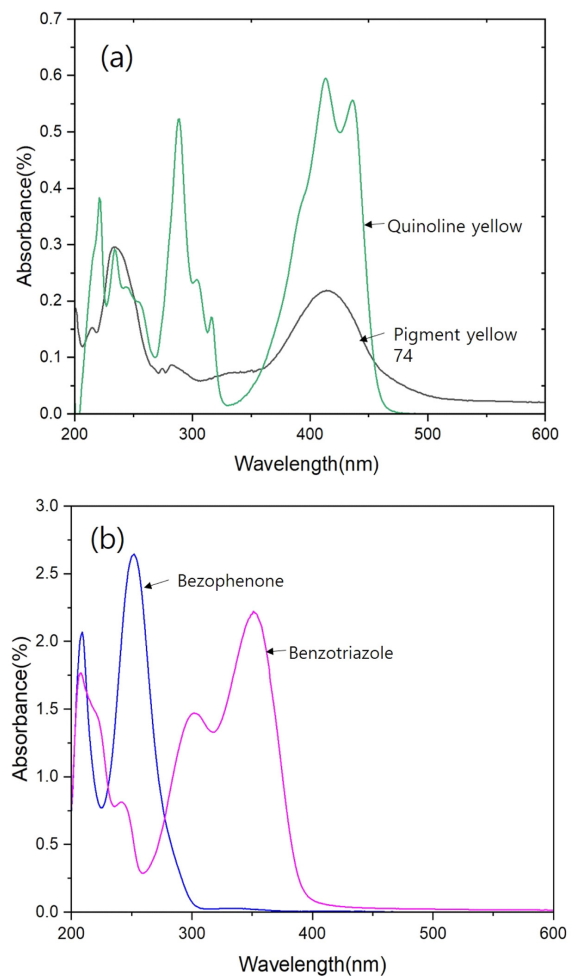


Fig. 2. Absorption spectra of different types of substances dissolved in water at the same concentration. (a) UV absorbers and (b) blue light absorbers.

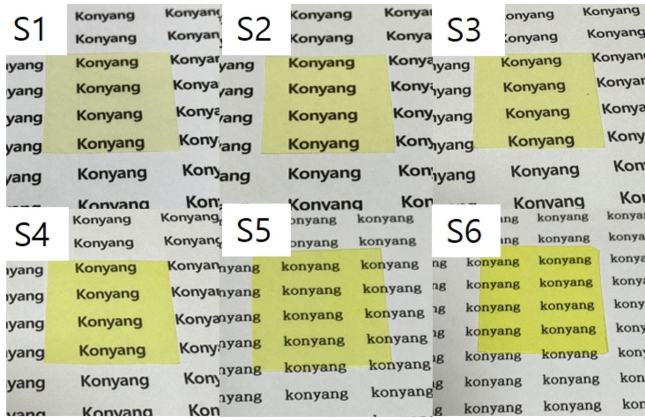


Fig. 3. Photographs of coating films prepared with different amounts of quinoline yellow.

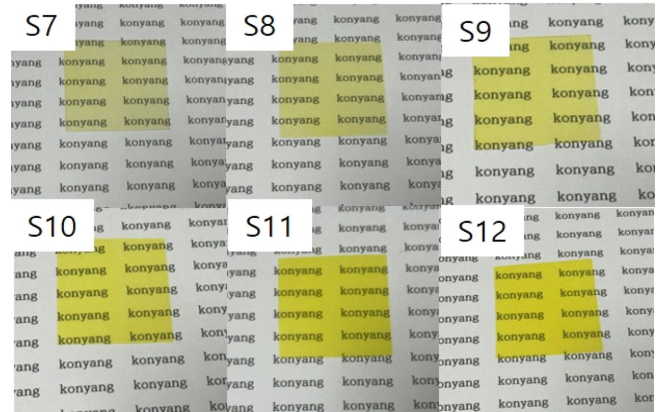


Fig. 5. Photographs of coating films prepared with different amounts of pigment yellow 74.

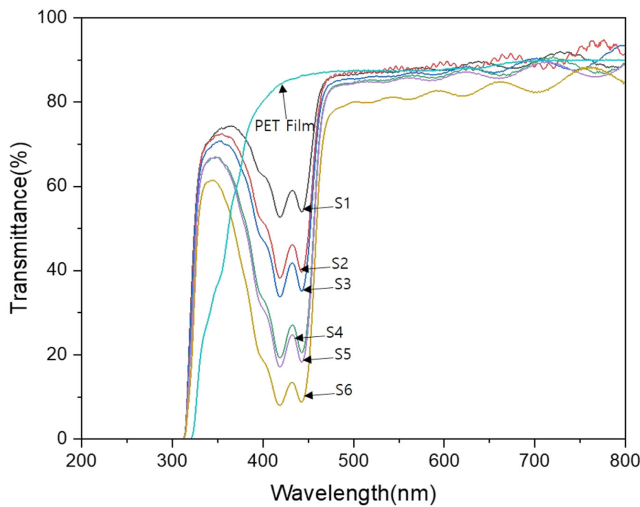


Fig. 4. UV-visible transmittance curves of coating films prepared with different amounts of quinoline yellow.

가할수록 코팅 필름의 색상이 짙은 노란색으로 변해 시인성이 저하되는 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 4는 청색광 흡수 염료인 노란색의 quinoline yellow 첨가량을 달리해서 제조된 필름들의 고에너지 청색광 파장 영역인 400~450 nm에서의 가시광선 투과도를 UV-vis spectrophotometer를 이용해 측정한 결과로 quinoline yellow 첨가량이 증가함에 따라 400~450 nm

파장의 청색광 영역에서의 투과율이 크게 감소되어 청색광 차단 효과가 향상됨을 알 수 있었다. 또한 이 결과는 Table 2에서 청색광 파장인 420 nm에서 필름의 투과도가 S1의 52%에서 S6의 8%로 크게 감소되는 결과와 잘 일치한다. 이것은 청색광인 푸른색의 보색은 노란색이므로 노란색 염료의 첨가량이 증가할수록 푸른색을 흡수하는 능력이 증가해 청색광 차단 효과가 향상되는 보색 원리로 설명될 수 있다[2]. 또한 Table 2에서 알 수 있듯이 quinoline yellow의 첨가량이 0.001 g(S1)에서 0.020 g(S6)으로 증가할수록 320~400 nm의 UV-A 평균 투과율은 68%에서 47%로 감소하므로, quinoline yellow의 첨가량 증가는 UV-A 차단에도 약간의 향상 효과를 보였으나 전반적으로 자외선 차단 효과가 좋지 못하다는 문제점이 있었다.

수분산 폴리우레탄 5 g에 청색광 차단 염료인 노란색의 pigment yellow 74를 Table 1과 같이 각각 0.005 g(S7), 0.010 g(S8), 0.015 g(S9), 0.020 g(S10), 0.030 g(S11), 0.040 g(S12)으로 첨가량을 달리하여 코팅 용액들을 제조한 후 PET 필름 위에 도포하여 제조된 코팅 필름들의 색상을 Fig. 5로 나타내었다. 비교적 적은 양인 0.005 g(S7)의 pigment yellow 74를 첨가하였을 때는 옅은 노란색 색상을 얻을 수 있었으나, pigment yellow 74의 첨가량이 증가할수록 청색광 차단 필름의 색상은 진해져 0.040 g(S12)이 첨가된 경우에는 짙은 노란색 색상을 보였다. 이 결과는 Table 3에서 코팅 필름들의 색차값(b^*)이 S7의 25.3에서 S12의 86.4로 크게 증가하여 pigment yellow 74의 첨가량이 증가할수록 짙은 노란색으로 변해 시인성이 저하되는 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 2. Visible light transmittance, color difference value(b^*), and average UV-A transmittance of coating films prepared with different amounts of quinoline yellow

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Visible light transmittance (at 420 nm)	52%	38%	33%	19%	17%	8%
Color difference value (b^*)	17.6	28.3	30.3	40.4	40.4	44.0
Average UV-A transmittance (320~400 nm)	68%	66%	64%	59%	42%	47%

Table 3. Visible light transmittance, color difference value(b^*), and average UV-A transmittance of coating films prepared with different amounts of pigment yellow 74

	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Visible light transmittance (at 420 nm)	53%	47%	35%	22%	15%	3%
Color difference value (b^*)	25.3	34.9	46.6	63.9	75.1	86.4
Average UV-A transmittance (320~400 nm)	63%	60%	52%	45%	39%	22%

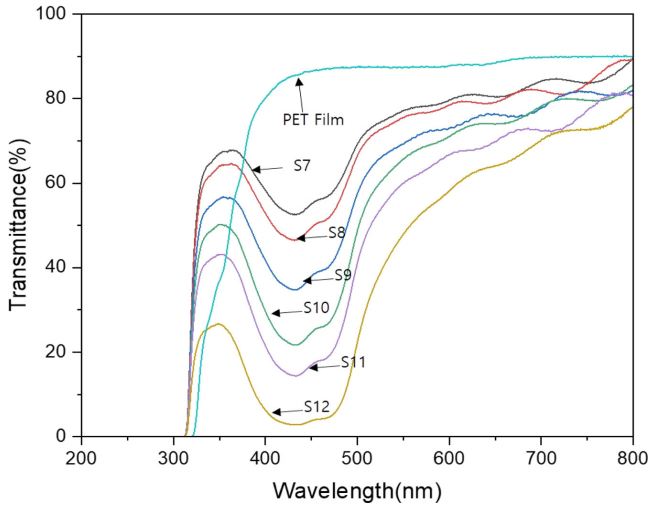


Fig. 6. UV-visible transmittance curves of coating films prepared with different amounts of pigment yellow 74.

Fig. 6은 청색광 흡수 염료인 pigment yellow 74 첨가량을 달리 해서 제조된 청색광 차단 필름들의 가시광선 투과도를 측정할 결과이다. Pigment yellow 74 첨가량이 증가함에 따라 400~450 nm 파장의 고에너지 청색광 영역에서의 투과율이 크게 감소되어 청색광 차단 효과가 향상됨을 알 수 있었다. 이는 Table 3에서 청색광 파장인 420 nm에서의 투과도가 S7의 53%에서 S12의 3%로 크게 감소되므로 pigment yellow 74 첨가량이 증가함에 따라 청색광 차단 효과가 향상되는 결과와 잘 일치하고 있다. 그러나 pigment yellow 74 첨가량이 증가함에 따라 500~800 nm 파장의 가시광선 영역에서의 투과율이 크게 감소되는 것을 알 수 있었다. 한편 Table 3에서 알 수 있듯이 pigment yellow 74의 첨가량이 0.005 g(S7)에서 0.040 g(S12)으로 증가할수록 320~400 nm의 UV-A 파장 영역에서의 자외선 평균 투과율이 63%에서 22%로 크게 감소되므로, pigment yellow 74의 첨가는 quinoline yellow의 첨가 시 UV-A 파장 영역에서의 자외선 평균 투과율이 68%에서 47%로 감소하는 것 보다 자외선 차단에 더 큰 효과를 보임을 알 수 있었다.

이상에서 알 수 있듯이 quinoline yellow와 pigment yellow 74 두 염료들 모두 첨가량이 증가함에 따라 400~450 nm 파장의 고에너지 청색광 영역에서의 코팅 필름들의 투과율이 크게 감소되어 청색광 차단 효과가 우수함을 알 수 있었으며, 이는 Fig. 2(a)의 용액들의 흡광도 분석 결과와 잘 일치한다. 또한 pigment yellow 74의 첨가는 quinoline yellow의 첨가 보다 UV-A 파장 영역에서의 자외선 차단에 더 큰 효과를 보임을 알 수 있었다. 그러나 pigment yellow 74의 첨가량 변화에 따른 색차값(b*)은 25.3~86.4의 범위를 보여 quinoline yellow의 17.6~44.0의 범위 보다 더 큰 색차값을 보여 시인성이 좋지 못했다. 색차값이 큰 노란색의 플라스틱 필름은 스마트폰 및 컴퓨터 모니터용으로 사용 시 일반적으로 사람들이 선호하는

색상이 아니므로 상품성이 떨어진다. 또한 pigment yellow 74의 첨가량 증가는 500~800 nm의 가시광선 파장 영역에서의 투과율이 크게 감소한다는 문제점이 있으므로 코팅 필름 제조 시 청색광 차단 염료로서 pigment yellow 74 보다는 quinoline yellow를 사용하는 것이 보다 효율적이라고 판단된다.

3-3. 자외선 흡수 염료들의 자외선 차단 효과

청색광 흡수 염료로 quinoline yellow를 사용 시에는 위의 Fig. 4와 Table 2에서 알 수 있듯이 400~450 nm 영역의 고에너지 청색광 차단 효과는 우수하나 320~400 nm 영역의 UV-A 차단 효과가 좋지 못하다는 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 Table 1에서 수분산 우레탄 5 g에 청색광 흡수 염료인 quinoline yellow 0.020 g을 첨가하고 자외선 흡수 염료인 benzotriazole을 각각 0 g(S6), 0.04 g(S13), 0.08 g(S14), 0.12 g(S15), 0.16 g(S16), 0.20 g(S17)으로 첨가량을 달리하여 혼합해 다양한 코팅 용액들을 제조하였다. Fig. 7은 자외선 흡수 염료인 benzotriazole 첨가량을 각각 달리하여 제조된 코팅 필름들의 색상을 나타낸 그림이다. Benzotriazole 첨가량 변화에 따른 필름들의 색상은 모두 옅은 노란색을 보여 색상 변화가 거의 없었으며, 이는 Table 4에서 색차값(b*)이 S6과 S17이 각각 44.0과 48.0을 보여 benzotriazole 첨가량 변화는 시인성에 큰 영향을 미치지 못한다는 Fig. 7의 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 8은 자외선 흡수 염료인 benzotriazole 첨가량을 달리하여 제조된 코팅 필름들의 자외선과 청색광 파장 영역에서의 투과도를 UV-vis spectrophotometer를 이용해 측정할 결과이다. Benzotriazole 첨가량이 증가함에 따라 400~450 nm 파장의 고에너지 청색광 영역에서의 투과율은 큰 차이는 없지만, 320~400 nm의 UV-A 파장에서는 투과율이 크게 감소하여 자외선 차단 효과가 크게 향상됨을 알 수 있었다. 이는 Table 4에서 320~400 nm의 UV-A 파장 영역에서의 자외선 평균 투과율이 S6의 47%에서 S17의 2%로 크게 감소되는 결과와 잘 일치하고 있다. 이로부터 benzotriazole 첨가량이

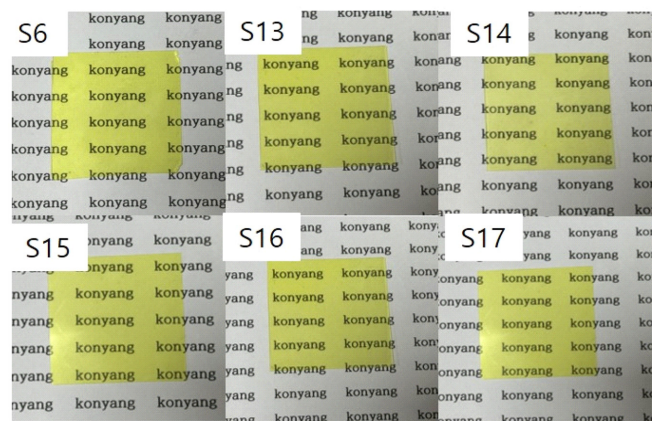


Fig. 7. Photographs of coating films prepared with different amounts of benzotriazole.

Table 4. Visible light transmittance, color difference value(b*), and average UV-A transmittance of coating films prepared with different amounts of benzotriazole

	S6	S13	S14	S15	S16	S17
Visible light transmittance (at 420 nm)	8%	8%	11%	11%	10%	8%
Color difference value (b*)	44.0	47.0	44.0	44.0	40.4	48.0
Average UV-A transmittance (320~400 nm)	47%	21%	13%	6%	5%	2%

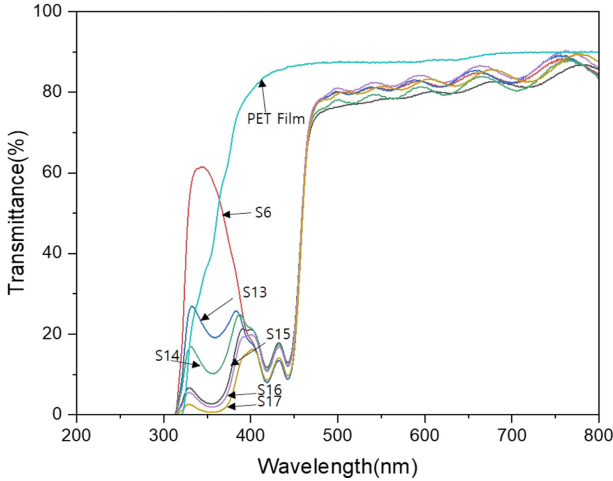


Fig. 8. UV-visible transmittance curves of coating films prepared with different amounts of benzotriazole.

증가함에 따라 UV-A 영역에서의 투과율이 감소함을 알 수 있어 benzotriazole의 첨가는 UV-A 차단에 효과적으로 기여함을 알 수 있었다.

자외선 흡수 염료인 benzophenone이 청색광 및 자외선 차단에 미치는 영향을 알기 위해 Table 1에서는 수분산 폴리우레탄 5 g에 청색광 흡수 염료인 quinoline yellow을 0.020 g 첨가한 후 자외선 흡수 염료인 benzophenone을 각각 0 g(S6), 0.25 g(S18), 0.50 g(S19), 0.75 g(S20)으로 첨가량을 달리하여 코팅 용액들을 제조하였다. Fig. 9는 benzophenone 첨가량을 달리하여 얻어진 코팅 용액들을 기재인 PET 기재 위에 도포해 얻어진 필름들의 색상을 나타낸 그림이다. Benzophenone 첨가량이 증가될수록 필름의 색은 보다 짙은 노란색으로 변화하여 시인성이 저하되었으며, 이는 Table 5에서 색차값(b*)이 S6의 44.0이 S20에서 61.5로 증가하므로 benzophenone 첨가량이 증가할수록 코팅 필름들이 짙은 노란색으로 색상이 변해



Fig. 9. Photographs of coating films prepared with different amounts of benzophenone.

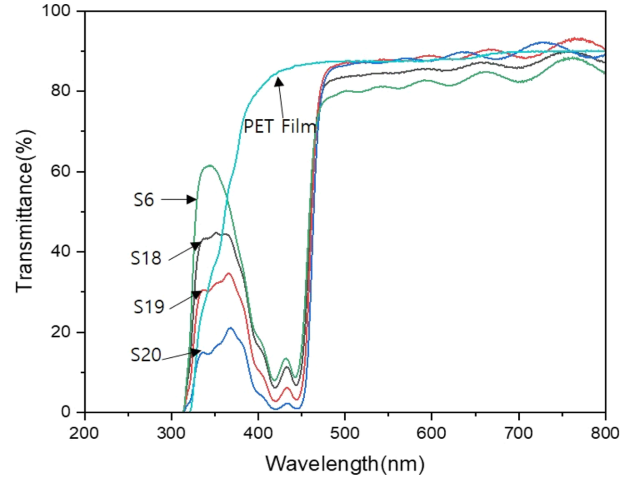


Fig. 10. UV-visible transmittance curves of coating films prepared with different amounts of benzophenone.

시인성이 저하되는 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 10은 자외선 흡수 염료인 benzophenone 첨가량을 달리하여 제조된 코팅 필름들의 자외선 및 가시광선 투과도를 UV-vis spectrophotometer를 이용해 측정된 결과이다. Benzophenone 첨가량이 증가할수록 320~400 nm 영역에서의 투과율이 감소하여 UV-A 차단율이 증가하였으며, 이 결과는 Table 5에서 benzophenone 첨가량이 0 g(S6)에서 0.075 g(S20)으로 증가할수록 320~400 nm의 UV-A 파장 영역에서의 자외선 평균 투과율이 47%에서 11%로 감소되는 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 이 그림에서 benzophenone 첨가량이 증가할수록 400~450 nm에서의 투과율이 약간 감소하여 고에너지 청색광 차단 효과가 증가됨을 알 수 있었다. 이 결과는 Table 5에서 benzophenone 첨가량이 0 g에서(S6) 0.075 g으로(S20) 증가할수록 420 nm 파장에서의 투과율이 8%에서 2%로 감소하여 청색광 차단 효과가 약간 향상되는 결과와 잘 일치하고 있다.

이상의 결과로부터 자외선 흡수 염료인 benzotriazole 첨가량이 0 g에서 0.20 g으로 증가함에 따라 320~400 nm의 UV-A 파장에서의 투과율이 47%에서 2%로 크게 감소하여 자외선 차단 효과가 크게 향상됨을 알 수 있었다. 이는 자외선 흡수 염료로 benzophenone 사용 시 첨가량이 0 g에서 0.75 g으로 증가함에 따라 UV-A 파장에서의 투과율이 47%에서 11%로 감소하는 것에 비해 UV-A 차단에 더욱 효율적이라는 것을 의미하며, Fig. 2(b)의 용액들의 흡광도 분석 결과와 잘 일치하고 있다. 한편 자외선 흡수 염료인 benzophenone 첨가량 증가는 UV-A와 고에너지 청색광 차단 효과를 동시에 향상시켰으나, 색차값(b*)이 44.0에서 61.5로 크게 증가하여 진한 노란색의 색상이 얻어졌다. 이는 benzotriazole의 경우 색차값(b*)이 44.0에서 48.0으로 약간 증가하는 것에 비해 시인성이 좋지 못하다는 문제점이 있으므로, 자외선 흡수 염료로 benzophenone 보다는 benzotriazole을 사용하는 것이 유리하다고 판단된다.

Table 5. Visible light transmittance, color difference value (b*), and average UV-A transmittance of coating films prepared with different amounts of benzophenone

	S6	S18	S19	S20
Visible light transmittance (at 420 nm)	8%	7%	3%	2%
Color difference value (b*)	44.0	52.6	59.2	61.5
Average UV-A transmittance (320~400 nm)	47%	30%	22%	11%

4. 결 론

본 연구에서는 수분산 폴리우레탄에 청색광 및 자외선 흡수 염료들을 각각 혼합하여 코팅 용액들을 제조하고 이것을 기재인 PET 필름 위에 도포하고 열경화 시킴에 의해 청색광과 자외선을 동시에 차단할 수 있는 플라스틱 필름들을 제조하였다. 이 과정 중 UV-vis spectrophotometer를 이용해 자외선과 청색광 차단 효과를 측정하였고, Colorimeter를 사용해 코팅 필름들의 색차값(b*)을 측정하였다. 청색광 흡수 염료인 노란색의 quinoline yellow 첨가량이 증가함에 따라 400~450 nm 파장의 고에너지 청색광의 투과율이 크게 감소되어 청색광 차단 효과가 향상되었다. 또한 quinoline yellow의 첨가량 증가는 320~400 nm의 UV-A 차단에도 약간의 향상 효과를 보였다. 한편 청색광 흡수 염료로 노란색의 pigment yellow 74의 첨가는 고에너지 청색광과 UV-A 차단 효과가 동시에 우수하였지만 quinoline yellow 보다 더 진한 노란 색상의 필름이 얻어져 시인성이 좋지 못했으며, 500~800 nm 영역에서의 가시광선 투과율이 크게 감소한다는 문제점이 있었다. 따라서 청색광 흡수 염료로서 pigment yellow 74 보다는 quinoline yellow를 사용하는 것이 보다 효율적이라고 판단된다.

자외선 흡수 염료인 benzotriazole의 첨가량이 증가함에 따라 코팅 필름들의 320~400 nm의 UV-A 파장에서의 평균 투과율이 51%에서 2%로 크게 감소하여 UV-A 차단 효과가 크게 향상됨을 알 수 있었다. 또한 benzotriazole 첨가량 증가에도 불구하고 필름들의 색상 변화는 거의 없어 benzotriazole 첨가량 증가는 필름의 시인성을 크게 저하시키지 않음을 알 수 있었다. 반면 자외선 흡수제인 benzophenone 첨가량이 증가함에 따라 코팅 필름의 320~400 nm의 UV-A 파장에서의 평균 투과율이 49%에서 11%로 감소하여 자외선 차단 효과를 보였으나, benzotriazole을 사용한 경우와는 달리 색차값(b*)이 48.0에서 61.5로 크게 증가하여 시인성이 좋지 못한 문제점이 있었다. 따라서 자외선 흡수 염료로서 benzophenone 보다는 benzotriazole을 사용하여 자외선 차단 필름을 제조하는 것이 유리하다고 판단된다. 본 연구를 통해 다양한 청색광과 자외선 흡수 염료들을 사용하여 자외선과 청색광을 효과적으로 차단하는 코팅 필름을 제조할 수 있었으며, 이는 탈부착이 가능한 스마트폰 및 컴퓨터 모니터용 필름과 콘택트 렌즈 등의 다양한 분야에 적용될 수 있다.

References

1. Lawrenson, J. G., Hull, C. C. and Downie, L. E., "The Effect of Blue-Light Blocking Spectacle Lenses on Visual Performance, Macular Health and the Sleep-Wake Cycle: a Systematic Review of the Literature," *Ophthalmic Physiol. Opt.*, **37**(6), 664-654(2017).
2. Su, K., Tao, Y. and Zhang, J., "Highly Transparent Plasticized PVC Composite Film with Ideal Ultraviolet/High-Energy Short-Wavelength Blue Light Shielding," *J. Mater. Sci.*, **56**(10), 17353-17367(2021).
3. Nam, S. H., Kim, Y. K., Kim, K., Hong, H. S., Yu, S. Y. and Kim, E. S., "Effects of Blue Light on Eye of Zebra Fish and Protective Role of Polyphenolic Compounds," *J. Korean Ophthalmol. Soc.*, **62**(1), 77-84(2021).
4. Behar-Cohen, F., Martinsons, C., Viénot, F., Zissis, G., Barlier-Salsi, A., Cesarini, J. P., Enouf, O., Garcia, M., Picaud, S. and Attia, D., "Light-Emitting Diodes (LED) for Domestic Lighting: Any

- Risks for the Eye?," *Prog. Retin. Eye Res.*, **30**(4), 239-257(2011).
5. Kang, S. Y., Hong, J. E., Choi, E. J. and Lyu, J., "Blue-Light Induces the Selective Cell Death of Photoreceptors in Mouse Retina," *J. Korean Ophthalmic Opt. Soc.*, **21**(1), 69-76(2016).
 6. Zhao, Z. C., Zhou, Y., Tan G. and Li, J., "Research Progress About the Effect and Prevention of Blue Light on Eyes," *Int. J. Ophthalmol.*, **11**(12), 1999-2003(2018).
 7. Nakanishi-Ueda, T., Majima, H. J., Watanabe, K., Ueda, T., Indo, H. P., Suenaga, S., Hisamitsu, T., Ozawa, T., Yasuhara, H. and Koide, R., "Blue LED Light Exposure Develops Intracellular Reactive Oxygen Species, Lipid Peroxidation, and Subsequent Cellular Injuries in Cultured Bovine Retinal Pigment Epithelial Cells," *Free Radical Research*, **47**(10), 774-780(2013).
 8. Song, D. G., Lee, J., Choi, H. J. and Kim, J. K., "Study on Contact Lens That Blocks Blue Light from LED," *Polym. Korea*, **46**(1), 62-67(2022).
 9. Leung, T. W., Li, R. W. and Kee, C., "Blue-Light Filtering Spectacle Lenses: Optical and Clinical Performances," *PLOS ONE*, **12**(1), e0169114(2017).
 10. Park, S. W., Im, S. H., Hong, W. T., Yang, H. K. and Jung, Y. K., "Lignin-Derived Carbon Quantum Dot/PVA Films for Totally Blocking UV and High-Energy Blue Light," *Inter. J. Biolog. Macromol.*, **268**(2), 131919(2024).
 11. Choi, B. H. and Kim, Y. J., "Characteristics of Polycarbonate Film by Ion Beam for UV Block," *Polymer(Korea)*, **29**(6), 588-592(2005).
 12. Lee, H. G., Won, Y. S., Koh, E. B., Kim, Y. A., Kim, J. E., Kim, Y. J., Han, C. W., Choi, M. W., Kim, J. I. and Jeon, Y. J., "Protective Effects of *Ecklonia Cava* Film on UV-B-Induced Photodamages," *Korean J. Fish Aquat. Sci.*, **50**(6), 714-720(2017).
 13. Yu, D. S., Lee, J. H. and Ha, J. W., "UV Blocking Coatings by Combination of Organic-Inorganic Hybrid Materials and UV Absorbers," *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **7**(6), 1296-1301(2006).
 14. Han, C., Wang, F., Gao C., Liu P., Ding, Y., Zhang, S. and Yang, M., "Transparent Epoxy-ZnO/CdS Nanocomposites with Tunable UV and Blue Light-Shielding Capabilities," *J. Mater. Chem. C*, **3**, 5065-5072(2015).
 15. Liu, Y. S., Ying, G. G., Shareef, A. and Kookana, R. S., "Photostability of the UV Filter Benzophenone-3 and Its Effect on the Photodegradation of Benzotriazole in Water," *Environ. Chem.*, **8**(6), 581-588(2011).
 16. Lu, J., Fang, J., Li, J. and Zhu, L., "Engineering Highly Transparent UV-Shielding Films with Disassembled Polydopamine Oligomers as Light Adsorber," *Appl. Surf. Sci.*, **550**, 149284 (2021).
 17. Yun, K. H., Lee, J., Moon, Y. J., Go, H. K., Lee, Y. and Lee, D. K., "Preparation of Blocking Ultraviolet Mica Composites Using Nano-TiO₂," *J. Oil & Applied Science*, **35**(4), 1197-1205(2018).

Authors

Suk Hwan Kang: Ph.D candidate, Department of Biomedical Materials, Konyang University, 158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon 35365, Korea; 22856501@konyang.ac.kr

Hun Kwan Kim: Master's candidate, Department of Biomedical Materials, Konyang University, 158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon 35365, Korea; 24806501@konyang.ac.kr

Ki Chang Song: Professor, Department of Biomedical Materials, Konyang University, 158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon 35365, Korea; songkc@konyang.ac.kr