

Evaluation of Coloration and Discoloration of Photochromic Lenses by their Manufacturing Characteristics

In-yeong Hwang^{1,a}, Seung-Jun Kim^{1,b}, Kwang-Yeon Lee^{1,c}, So Ra Kim^{2,d}, and Mijung Park^{2,e,*}

¹Dept. of Optometry, Seoul National University of Science and Technology, Student, Seoul 01811, Korea

²Dept. of Optometry, Seoul National University of Science and Technology, Professor, Seoul 01811, Korea

(Received February 20, 2020: Revised March 10, 2020: Accepted March 12, 2020)

Purpose: In this study, the transition patterns of coloring and discoloring processes of photochromic lenses were separately compared and analyzed based on their manufacturing characteristics. **Methods:** Photochromic lenses with different manufacturing characteristics of color, manufacturing processing method, and additional coating were exposed to UV rays and the color change was compared by taking photos every 5 seconds and 90 seconds for coloring and discoloring, respectively. The transition degree of the photochromic lenses was also analyzed by calculating the color concentration of those photos through the 'Quantity One' program; the coloring and discoloring speeds were further compared. **Results:** The photochromic lenses were all colored within 40 seconds, regardless of the manufacturing characteristics; however, they were found to take up to 2,700 seconds to be discolored. In the case of photochromic lenses of the same manufacturing processing method, brown lenses showed faster coloring and discoloring than gray lenses and a higher coloring concentration. For the photochromic lenses of the same color, the lenses manufactured by a coating processing method showed faster coloring and discoloring as well as darker coloring than those manufactured by a monomer processing method. Photochromic lenses with additional mirror coating did not show enough additional coloring, as a sufficient amount of UV rays was not absorbed. **Conclusions:** By analyzing the transition patterns of photochromic lenses from the time spent on coloring and discoloring, the effect of the characteristics by the manufacturing process on the pattern and speed of coloring and discoloring were revealed in this study. Therefore, it may be suggested that the selection of photochromic lenses requires consideration of the manufacturing characteristics according to the users' vision lifestyle.

Key words: Photochromic lens, Manufacturing characteristics, Color concentration, Coloring speed, Discoloring speed

서 론

광변색렌즈는 자외선의 세기에 따라 변색되는 광변색성 물질이 포함되어 있는 렌즈로 실내에서는 일반 안경렌즈와 같이 투명한 상태였다가 실외에서는 변색되어 선글라스 대용으로 사용될 수 있는 렌즈를 일컫는다.^[1] 광변색성 물질은 자외선이나 가시광선 등의 전자기 방사선을 흡수하게 되면 화학적 변화로 인하여 색상의 변화가 일어나고, 광원이 제거되면 흡수하고 있던 전자기 방사선이 사라지면서 원래의 투명한 상태로 색이 복구되는 특징을 가진다.^[2-4]

시력교정의 목적으로 안경을 착용하는 경우 소비자들은 실외에서 선글라스를 착용하고자 할 때 착용 중인 안경을 벗고 따로 보관해야 하는 번거로움과 이로 인한 불편함을 호소하는 경우가 많은데 광변색렌즈는 이러한 경우에 사용될 수 있다.^[1] 광변색렌즈는 모노머 방식,^[5] 코팅 방식

등^[6]으로 제조되며 이 때 다양한 염료를 혼합시킴으로써 렌즈가 착색되었을 때 선글라스처럼 다양한 색상의 표현이 가능하다.^[7,8] 또한 일반 안경렌즈와 같이 중합된 광변색렌즈도 미러코팅이나 청광차단코팅 등의 기능성코팅과 같은 후공정 작업으로 가능하다.^[9-11] 이렇게 제조된 광변색렌즈는 자외선의 세기에 따라 스스로 변색되는 것이 장 점이나 그 변화 정도를 인위적으로 조절할 수 없다는 것이 단점이다. 즉, 실외에서는 눈부심 방지를 위한 빠른 변 색과 실내에서는 빠르지 않은 퇴색으로 인한 답답함과 미 관상의 이유로 빠른 퇴색이 각각 요구되는데, 광변색렌즈의 제조방식이 착색과 퇴색 양상에 영향을 미치는 중요한 요인으로 생각되고 있다.

광변색렌즈의 착색 및 퇴색양상과 관련된 선행연구들을 살펴보면 임상적용이 용이한 실제 유통제품을 사용하였거나 다양한 연구조건의 조정이 가능하도록 렌즈를 직접 제

*Corresponding author: Mijung Park, TEL: +82-2-970-6228, E-mail: mjpark@seoultech.ac.kr

Authors ORCID: ^ahttps://orcid.org/0000-0001-6551-4801, ^bhttps://orcid.org/0000-0001-5598-1764, ^chttps://orcid.org/0000-0003-0428-8702, ^dhttps://orcid.org/0000-0001-8786-2815,

^ehttps://orcid.org/0000-0002-4645-7415

본 논문의 일부내용은 2019년도 한국안광학회 동계학술대회에서 포스터로 발표되었음

작하여 연구를 수행한 경우가 많으며, 시간에 따른 광변색 렌즈의 퇴색율을 측정하고 광투과율을 분석하여 퇴색속도를 측정하는 연구가 대부분이다.^[12,13] 이렇듯 광변색렌즈의 퇴색양상에 대한 연구가 주를 이룬 것은 햇빛이나 광원에 노출시킨 후 분광광도계를 사용하여 일정시간 간격으로 광투과율을 측정하는 것이 용이하기 때문인 것으로 생각되며, 착색양상에 대한 연구가 적은 이유는 자외선 조사에 대한 조건의 통제가 쉽지 않고, 퇴색에 비해 상대적으로 짧은 시간동안에 착색이 빠르게 진행되기 때문에 신뢰할만한 결과의 도출이 쉽지 않기 때문으로 생각된다. 이에 본 연구에서는 국내 유통되고 있는 광변색렌즈의 퇴색속도뿐만 아니라 착색속도를 도출하고자 하였으며, 또한 광변색렌즈의 제조공법, 색상 및 기능성코팅(미러코팅) 유무의 차이가 착색 및 퇴색에 미치는 영향을 알아보하고자 하였다.

대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구에서는 색상, 제조공정 및 미러코팅 유무의 차이를 가진 4 종류의 광변색렌즈가 사용되었다(Table 1).

사용된 광변색렌즈 중 A, B 및 D 렌즈의 중심두께는 2.4 mm로 동일하였고, C 렌즈의 경우는 1.5 mm이었다. 굴절률의 경우는 A, B 및 D 렌즈는 1.56로 동일하였고, C 렌즈의 경우는 1.60이었다. D 렌즈는 반사 및 흡수되는 파장 변화에 따른 차이를 최소화하기 위해 금속 미러코팅이 적용된 렌즈이었다.

2. 연구조건 및 방법

온도 및 조도의 변화가 광변색과정에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 모든 과정에서 온도는 23.1±0.5°C, 조도는 1353.3±4.7 Lux로 일정하게 유지되도록 하였으며, 395~405 nm 파장대의 자외선광원(MINI LED LAMP 9W, Neo Nail, Poland)의 위치는 렌즈로부터 35 mm의 수직높이에 위치하도록 하였다. 4종의 광변색렌즈에 자외선광원을 각각 일정시간동안 노출시킨 후, 착색의 경우는 광원에 노출된 후 5초 간격으로 최대 40초까지 카메라(EOS 750D, Cannon, Japan)로 사진을 촬영하였으며, 퇴색의 경우는 광원을 제거하고 처음 9분까지는 90초의 간격으로, 이후 45분까지는 180초 간격으로 사진을 촬영하였다. 이 때 카메라의 각도와 거리에 따른 오차를 최소화하기 위해 촬영시간 동안 위치의

변동이 없도록 하였다. 광투과율 측정은 착색 및 퇴색의 사진 촬영이 모두 종료된 후 동일한 조건에서 다시 자외선광원에 조사시킨 후 실시하였으며, 광투과율의 측정 소요시간이 착색 및 퇴색과정 시 사진촬영에 소요되는 시간에 비하여 길어 최대 변색이 나타난 40초까지 10초 간격으로 Transmission meter(TM-1, Topcon, Japan) 로 측정하였다.

3. 광변색렌즈의 착색 및 퇴색양상 평가

착색 및 퇴색양상을 촬영한 광변색렌즈의 사진을 이미지파일로 변환한 후 렌즈 중앙 1×1 cm² 면적의 색 농도를 ‘Quantity One’ 프로그램(Quantity One 4.6, Bio-Rad, USA)으로 분석하였다. 광변색렌즈의 색상 농도는 0(흰색)~255(검정색)까지의 수치로 나타내었으며, 일정시간 동안 착색 및 퇴색된 정도의 수치 변화를 255에 대한 상대적 비율로 나타내어 분석하였다. 제조공법에 따른 광변색렌즈 간의 착색 및 퇴색양상 비교는 가장 널리 유통되는 색상^[12]이며 기본공법인 모노머공정법으로 제조된 렌즈 A를 기준으로 비교하였다.

4. 통계분석

자외선광원의 조사 및 제거 이후 동일 시간대에서의 렌즈 종류별 착색 및 퇴색 농도의 차이에 대한 통계적 유의성은 Kruskal-Wallis 검정으로 평가하였으며, 동일 광변색렌즈의 시간차이에 따른 색상농도의 차이 사후 검정은 Mann-Whitney 방법으로 실시하였다. 모든 검정의 유의확률은 0.05 미만일 경우 통계적으로 유의한 차이가 있다고 판단하였다.

결과 및 고찰

1. 광변색렌즈 색상에 따른 착색 및 퇴색양상 분석

4종의 광변색렌즈 간의 비교 시 색상 차이에 따른 착색 및 퇴색 양상의 비교는 렌즈 A(회색)와 B(갈색)의 분석을 통하여 알아보았다.

자외선 노출 후 시간에 따른 광변색렌즈의 변색과정을 매 5초 간격으로 사진촬영하여 비교하였다(Fig. 1). 광변색렌즈는 자외선노출 후 5~10초 정도의 빠른 시간 내에 변색이 진행되어 10초를 초과한 시간 대에서는 사진 상으로는 뚜렷한 변색의 진행을 인지하기 쉽지 않았다.

이에 자외선광원 노출 후 광변색렌즈의 변색에 따른 광

Table 1. Specification of photochromic lenses used in the study

	Lens A	Lens B	Lens C	Lens D
Color	Gray	Brown	Gray	Gray
Transition method	Monomer	Monomer	Coating	Monomer
Coating	Multi, hard, ultra-water repellent		Mirror, multi, hard, ultra-water repellent	

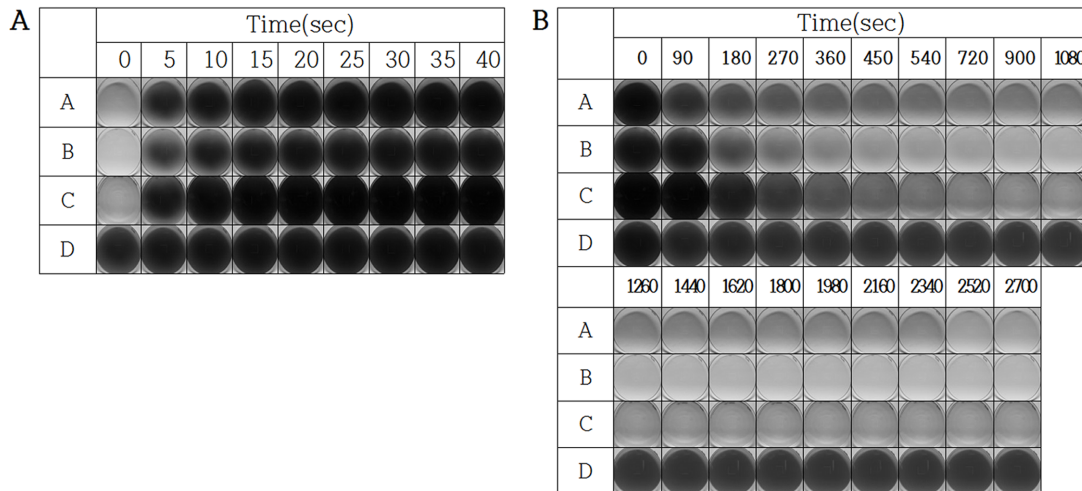


Fig. 1. Representative photos of coloration and discoloration of photochromic lenses. A. coloring process, B. discoloring process

투과율의 변화와 광변색렌즈의 색농도를 시간대별로 알아보았다(Fig. 2~4). 광변색렌즈의 자외선 노출 전 광투과율은 렌즈 A, B, C 및 D의 순서대로 각각 $88.6 \pm 1.5\%$, $89.9 \pm 2.2\%$, $89.9 \pm 0.7\%$ 및 $33.0 \pm 0.3\%$ 로 나타났고, 자외선 노출 10초 후 광투과율은 각각 $21.0 \pm 1.0\%$, $23.2 \pm 0.7\%$, $10.9 \pm 0.2\%$ 및 $15.9 \pm 0.4\%$, 20초 후에는 $13.3 \pm 0.9\%$, $15.7 \pm 0.3\%$, $6.7 \pm 0.2\%$ 및 $11.4 \pm 0.4\%$, 30초 후에는 $10.7 \pm 0.3\%$, $12.9 \pm 1.0\%$, $5.1 \pm 0.2\%$ 및 $9.7 \pm 0.7\%$, 40초 후에는 $9.1 \pm 0.5\%$, $11.2 \pm 0.2\%$, $4.2 \pm 0.2\%$ 및 $8.2 \pm 0.2\%$ 로 측정되어 변색이 진행됨에 따라 광투과율이 감소하였으며 20초 이후에는 광투과율의 감소가 크지 않음을 알 수 있었다(부록1 참조).

한편 자외선광원 조사 후 광변색렌즈의 변색정도를 촬영한 사진의 착색농도를 분석하여 비교한 결과(Fig. 2A), 렌즈 A의 자외선 노출 전 색상농도는 108.7 ± 0.9 이었으며, 자외선 노출 후 5초 및 10초 때의 색상농도는 각각 221.0 ± 0.6 및 233.2 ± 0.3 으로 나타났다. 한편, 렌즈 B의 색상농도는 자외선 노출 전 62.6 ± 0.8 에서 자외선 노출 후 5초 및 10초에서 각각 199.2 ± 2.3 및 223.4 ± 0.2 로 나타나 노출 10초 후에는 렌즈 A와 B사이의 색상차이를 구분하기 어려웠다. 렌즈 A 및 B의 최대 착색농도를 분석한 결과 각각 244.8 ± 0.8 및 237.1 ± 0.5 로 통계적으로 유의한 차이($p = 0.0495$ by Kruskal-Wallis test)를 나타내어 렌즈 A가 렌즈 B보다 더 진하게 변색됨을 알 수 있었다. 이러한 렌즈 A와 B의 자외선 노출 후 변색정도를 최대 변색 시를 100%로 하여 상대적으로 비교하여 보면, 렌즈 A의 경우는 5초 이내에 44.0%, 5초에서 10초 사이에 4.8% 추가 변색 증가를 보인 반면, 렌즈 B의 경우는 5초 이내에 53.6%, 5초에서 10초 사이에 추가적으로 9.5% 변색 증가를 나타낼 수 있었다(부록2 참조).

한편 렌즈 A와 B의 40초 동안의 변색을 초당 착색속도로 비교하면 전체 착색속도는 각각 3.40 및 4.36 scale/sec

로 큰 차이가 없는 것으로 나타나났으나 0~5초 사이의 착색속도는 각각 22.45 및 27.32 scale/sec로, 5~10초 사이의 착색속도는 2.45 및 4.85 scale/sec로 나타나 자외선 노출 후 초기에는 렌즈 A보다 렌즈 B가 더 빠르게 변색됨을 알 수 있었다(Table 2). 따라서 색상의 단독비교 시에는 렌즈 A가 진하게 변색되었다고 판단할 수 있으나 착색속도와 착색증가율을 종합적으로 고려하면 렌즈 B가 렌즈 A 대비 색상의 변화가 더 크고 속도 또한 빠르다고 판단할 수 있다.

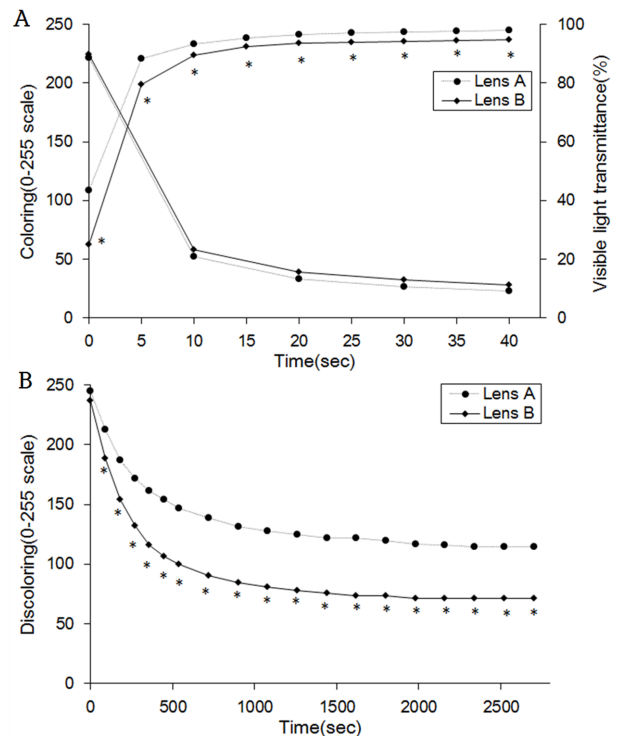


Fig. 2. Comparison of coloring and discoloring patterns and visible light transmittance between lens A and B according to lens color. A. coloring process, B. discoloring process. *Significantly different from the scale of lens A at the level of $p < 0.05$ by Kruskal-Wallis test

Table 2. Coloring speed of photochromic lenses

Time (sec)	Coloring speed (scale/sec)			
	Lens A	Lens B	Lens C	Lens D
Overall average (0~40)	3.40	4.36	3.96	0.38
0~5	22.45	27.32	28.19	1.78
5~10	2.45	4.85	2.14	0.74
10~15	1.03	1.55	0.91	0.45
15~20	0.61	0.58	0.13	0.16
20~25	0.32	0.07	0.15	0.18
25~30	0.04	0.20	0.09	0.14
30~35	0.14	0.18	0.01	0.19
35~40	0.17	0.15	0.02	-0.62

한편, 렌즈 A와 B의 자외선노출 중단 후 퇴색양상을 색 농도를 분석하여 비교하였다(Fig. 2B). 자외선노출 중단 시점에서의 렌즈 A 및 B의 색농도는 244.8 ± 0.8 및 237.1 ± 0.5 이었고, 90초 후에는 각각 212.5 ± 2.7 및 188.8 ± 6.3 로, 180초 후에는 187.1 ± 2.4 및 154.4 ± 6.0 로, 270초 후에는 171.6 ± 1.4 및 132.3 ± 7.2 로 지속적으로 감소하였다. 자외선노출 중단 시점의 색농도를 100%로 하여 매 90초마다 퇴색된 정도를 상대적으로 나타내어 보면 렌즈 A의 경우는 순서대로 12.7%, 10.0% 및 6.1%이었으며, 렌즈 B는 18.9%, 13.5% 및 8.7%에 나타나 270초까지 지속적으로 퇴색이 진행됨을 알 수 있었다(부록3 참조).

한편 렌즈 A와 B의 2,700초 동안 퇴색을 초당 퇴색속도로 비교하면 전체 퇴색속도는 각각 0.05 및 0.06 scale/sec로서 거의 유사한 것으로 나타났으나 0~90초 사이의 퇴색속도는 각각 0.36 및 0.54 scale/sec로, 90~180초 사이의 퇴색속도는 각각 0.28 및 0.38 scale/sec로, 180~270초 사이의 퇴색속도는 각각 0.17 및 0.25 scale/sec로 나타나 자외선 노출 후 빠르게 변색되었던 렌즈 B가 자외선노출 중단 시에도 역시 렌즈 A보다 더 빠르게 퇴색됨을 알 수 있었다(Table 3). 이러한 결과는 퇴색에 따른 렌즈 A와 B의 색농도 비교에서도 관찰할 수 있었다. 즉, 렌즈 A는 115.9 ± 0.1 의 색농도를 나타내는데 소요되는 시간이 2,160초였던 반면, 렌즈 B의 경우는 360초에 이미 동일한 색농도를 나타내었다(Fig. 2B).

이러한 렌즈 A와 B 사이에 존재하는 착색 및 퇴색양상 차이는 각 렌즈에 사용된 염료의 차이에 기인한 것으로 생각되었다. 특정 색상을 만들기 위해서는 먼저 염료의 구조나 구조 내 알킬기의 수 또는 종류를 달리함으로써 적색 또는 주황색과 청색 등의 기본염료를 제조하게 된다. 이러한 기본염료의 혼합으로 회색이나 갈색 등의 색상이 제조되는데 각각의 색을 만드는 염료가 다양할 뿐만 아니라 혼합비율 또한 매우 다양하여 결과적으로는 수많은 색상의 제조가 가능하다. 더욱이 갈색, 검정색의 염료를 활용하여 진하기를 조정하면서 색상을 달리 표현하기도 한다. 따라서 같은 색상이라 하더라도 가해지는 기본원료와

Table 3. Discoloring speed of photochromic lenses

Time (sec)	Discoloring speed (scale/sec)			
	Lens A	Lens B	Lens C	Lens D
Overall average (0~2700)	0.05	0.06	0.06	0.01
0~90	0.36	0.54	0.22	0.18
90~180	0.28	0.38	0.28	0.05
180~270	0.17	0.25	0.37	0.07
270~360	0.12	0.18	0.21	0.02
360~450	0.08	0.11	0.24	0.02
450~540	0.08	0.07	0.14	0.02
540~720	0.05	0.05	0.06	0.01
720~900	0.04	0.03	0.02	0.01
900~1080	0.02	0.02	0.02	0.00
1080~1260	0.02	0.02	0.00	0.00
1260~1440	0.02	0.01	0.01	0.00
1440~1620	0.00	0.01	0.00	0.00
1620~1800	0.01	0.00	0.00	0.00
1800~1980	0.01	0.01	0.00	0.00
1980~2160	0.01	0.00	0.01	0.00
2160~2340	0.01	0.00	0.00	0.00
2340~2520	0.00	0.00	0.00	0.00
2520~2700	0.00	0.00	0.00	0.00

제조공정이 달라지면 조금씩의 차이를 보이게 된다.^[14,15] 염료 제조사, 렌즈 제조사로부터 관련 정보를 모두 제공받지는 못하였으므로 염료의 어떠한 차이가 렌즈 A와 B 사이의 착색 및 퇴색 양상의 차이를 유발하는지 정확하게 알 수는 없으나 렌즈 A의 회색과 렌즈 B의 갈색을 제조하기 위해 사용된 광변색 염료와 그 비율의 차이가 원인으로 작용하였을 것이라 예상되었다.

2. 광변색렌즈의 제조방식에 따른 착색 및 퇴색양상 분석

광변색렌즈의 제조방식 차이에 따른 착색 및 퇴색양상은 렌즈 A(모노머공정법)와 C(코팅공정법)의 분석을 통하여 알아보았다. 자외선광선 노출에 따른 렌즈 A와 C의 색농도를 5초 간격으로 분석하여 비교한 결과, 렌즈 A의 자외선 노출 0초, 5초, 10초 및 15초 때의 색상농도는 각각 108.7 ± 0.9 , 221.0 ± 0.6 , 233.2 ± 0.3 및 238.4 ± 0.6 이었고 렌즈 C의 색상농도는 동일한 시간 대에서 순서대로 91.6 ± 3.0 , 232.5 ± 0.4 , 243.2 ± 0.4 및 247.7 ± 0.4 로 나타났으며, 노출 20초 후에는 렌즈 A와 C사이에는 큰 색상차이를 보이지 않았다. 렌즈 A 및 C의 최대 착색농도를 분석한 결과 각각 244.8 ± 0.8 및 249.8 ± 0.3 로 통계적으로 유의한 차이($p = 0.0495$ by Kruskal-Wallis test)를 나타내어 렌즈 C가 렌즈 A보다 더 진하게 변색됨을 알 수 있었다(Fig. 3A). 이러한 렌즈 A와 C의 자외선 노출 후 변색정도를 최대 변색 시를 100%로 하여 상대적으로 비교하여 보면, 렌즈 A의 경우는 5초 이내에 44.0%, 5초에서 10초 사이에 4.8% 추가 변색증

가를 보인 반면, 렌즈 C의 경우는 동일한 시간 대에서 55.3%, 5초에서 10초 사이에 추가적으로 4.2% 추가 변색증가를 나타냄을 알 수 있었다(부록2 참조). 한편 렌즈 A와 C의 40초 동안의 전체 착색속도는 각각 3.40 및 3.96 scale/sec로 큰 차이가 없었으나, 0~5초 사이의 착색속도는 각각 22.45 및 28.19 scale/sec, 5~10초 사이의 착색속도는 2.45 및 2.14 scale/sec로 나타나 자외선 노출 후 5초 이내에 렌즈 C가 렌즈 A보다 더 빠르게 변색됨을 알 수 있었다(Table 2).

제조공법이 상이한 렌즈 A와 C를 비교하여 보면, 초기 색농도는 렌즈 C가 통계적으로 유의하게 더 높으나 ($p=0.0463$ by Kruskal-Wallis test) 자외선 노출 후 최초 5초 동안 렌즈 C의 빠른 착색속도로 빠르게 변색되며, 최대 착색농도 또한 렌즈 C에서 더 진한 것으로 나타나 ($p=0.0495$ by Kruskal-Wallis test) 변색속도, 광변색렌즈의 투명도, 변색 후 색농도 모두 렌즈 C가 렌즈 A보다 더 우수한 것으로 생각되었다.

한편, 렌즈 A와 C의 자외선노출 중단 후 퇴색양상을 색농도를 분석하여 비교하였다(Fig. 3B). 자외선노출 중단 시점에서의 렌즈 A 및 C의 색농도는 244.8 ± 0.8 및 249.8 ± 0.3 이었고, 90초 후에는 각각 212.5 ± 2.7 및 230.1 ± 3.4 로, 180초 후에는 187.1 ± 2.4 및 205.1 ± 3.0 로, 270초 후에는 171.6 ± 1.4 및 171.4 ± 1.5 로, 360초에는 161.2 ± 0.6 및 152.8 로 감소하였다. 자외선노출 중단 이후 매 90초 이후부터 퇴색정도를 상대적으로 나타내면 렌즈 A는 순서대로 12.7%, 10.0%, 6.1% 및 4.1%이었으며, 렌즈 C는 7.7%, 9.8%, 13.2% 및 7.3%로 나타나 360초까지 지속적으로 퇴색이 진행됨을 알 수 있었다(부록3 참조).

한편 렌즈 A와 C의 전체 퇴색속도를 비교하면 각각 0.05 및 0.06 scale/sec로 서로 거의 유사한 것으로 나타났으나 0~90초 사이의 퇴색속도는 각각 0.36 및 0.22 scale/sec로, 90~180초 사이의 퇴색속도는 0.28 scale/sec로 동일하였고, 180~270초 사이의 퇴색속도는 각각 0.17 및 0.37 scale/sec로, 270~360초에서는 0.12 및 0.21 scale/sec로 나타나 퇴색 초기인 90초까지는 렌즈 A의 퇴색이 빨랐으나, 이후 540초까지의 시간대에서는 렌즈 C의 퇴색속도가 빠른 것으로 나타났다(Table 3). 따라서 렌즈 A는 117.0 ± 0.5 의 색농도를 나타내는데 소요되는 시간이 1,980초였던 반면, 렌즈 C의 경우는 540초에 이미 비슷한 색농도를 나타내었다(Fig. 3B).

제조공정의 차이가 있는 렌즈 A와 C 비교 시 자외선노출 중단 후 초반 퇴색속도는 렌즈 A가 우수한 것으로 나타났으나 그 외 전체적인 착색 및 퇴색속도, 색농도의 최댓값은 렌즈 C가 더 우수한 것으로 판단되었다. 렌즈 A는 모노머공정법으로 제조되었으며, 렌즈 C는 제조사 자체기술의 코팅공정법으로 제조되었다. 렌즈 C의 경우는 기존의 디핑 코팅공정과 유사한 Imbibing 공정을 통하여 렌즈

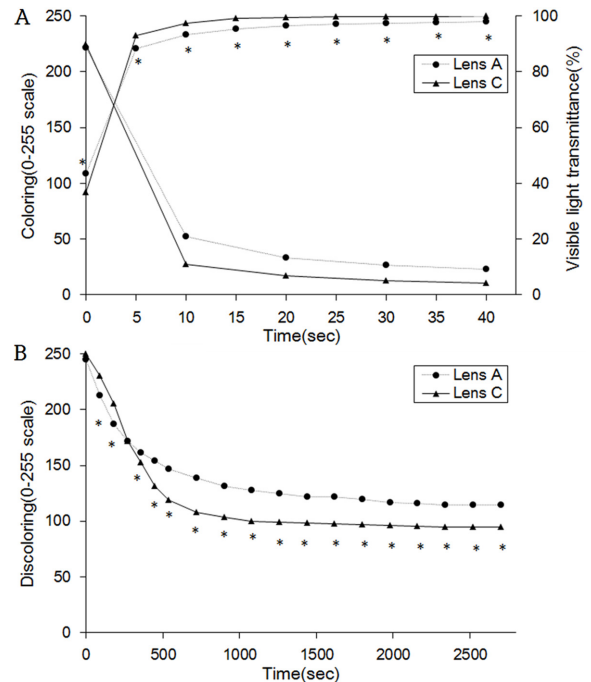


Fig. 3. Comparison of coloring and discoloring patterns and visible light transmittance between lenses A and C according to manufacturing process. A. coloring process, B. discoloring process *Significantly different from the discoloration of lens A at the level of $p < 0.05$ by the Kruskal-Wallis test

를 먼저 제조한 후 렌즈표면 위에 염료층 보호나 강도 강화를 위해 Trans-Bonding™이라는 일종의 하드코팅을 자체 개발하여 적용하였다고 하였다.^[16] 추가적으로 반감기와 온도를 이용한 선행연구에서도 코팅공정법이 모노머공정법보다 비교적 퇴색속도가 빠르다는 결과 값이 도출된 바 있다.^[12,13] 따라서 코팅공정법으로 제조된 광변색렌즈가 모노머공정법으로 제조된 렌즈보다 염료가 안정적이며 더 빠르고 진하게 활성화되는 것으로 예상할 수 있으므로 렌즈 C가 더 적은 부피에서 변색이 일어나기 때문에 착색 및 퇴색속도가 더 빠르고 더 균일하게 분포되어 더 투명하고, 더 짙게 변색되었다고 생각할 수 있겠다.^[17,18]

동일한 색상이어도 배합방법에 따라 다른 염료가 사용될 수 있는데, 회사로부터 렌즈 A와 C 모두 사용한 광변색염료를 제공받지 못하여 명확하게 판단할 수는 없으나 염료나 그 밖에 기능성 코팅의 유무, 렌즈두께에 따른 미세한 색상차이나 자외선 흡수에 대한 민감도 차이 등 다른 변수가 렌즈 A의 빠른 초기 퇴색속도에 관여한 것으로 예측된다. 렌즈 A와 C 사이에는 굴절률 차이가 존재하나 선행연구 결과 다른 변수에 비해 착색 및 퇴색양상에 미치는 굴절률의 영향은 크지 않은 것으로 생각된다.^[15-16,19]

3. 미러코팅 유무에 따른 광변색렌즈의 착색 및 퇴색양상 분석
광변색렌즈의 후공정 코팅으로 인한 착색 및 퇴색양상

의 비교는 선글라스에 많이 사용되는 미러코팅이 적용된 렌즈 D(미러코팅 추가)를 렌즈 A(기본코팅)와 비교 분석함으로써 알아보았다.

자외선 노출에 따른 렌즈 A와 D의 색 농도를 5초 간격으로 비교분석한 결과, 렌즈 A는 0~20초 사이에 108.7±0.9, 221.0±0.6, 233.2±0.3 및 238.4±0.6으로 나타난 반면, 렌즈 D는 동일시간 대에 238.2±0.1, 232.0±0.1, 235.7±0.1 및 237.9±0.1로 나타났다. 렌즈 D의 경우는 미러코팅으로 인하여 가시광선이 상당량 반사되어 자외선 노출 전에도 색 농도가 렌즈 A의 자외선 노출 10초 후에 해당하는 진하기로 측정되었으며, 이후 자외선광선에 노출시키더라도 미러코팅으로 인한 자외선의 반사로 인하여 광변색염료의 포함에도 불구하고 광변색효과가 나타나지 않는 것으로 판단되었다(Fig. 4A, 부록2 참조). 한편 렌즈 A와 D의 착색속도나 퇴색속도, 퇴색양상의 비교는 미러코팅으로 인한 렌즈 D의 미미한 색변화로 인하여 불가능하였다(Table 2, 3, 부록3 참조). 따라서 광변색렌즈에 미러코팅의 적용은 본연의 목적을 상실하게 한다고 사료된다. 그러나 광변색렌즈에 사용되는 광변색염료가 흡수하는 파장 영역이나 미러코팅이 반사하는 파장 영역 또는 반사 정도를 조정한다면 다른 결과가 나타날 수도 있을 것이라 생각되나 이를 뒷받침할만한 추가적인 연구가 요구된다.

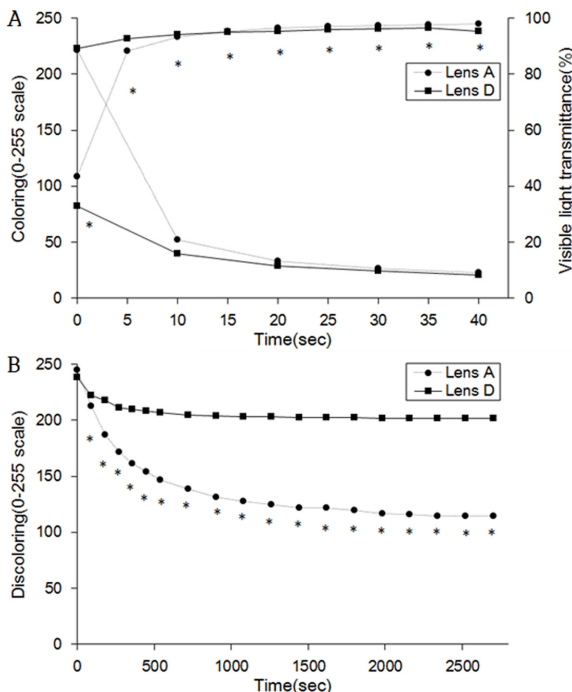


Fig. 4. Comparison of coloring and discoloring patterns and visible light transmittance between lenses A and D according to mirror coating. A. coloring process, B. discoloring process *Significantly different from the discoloration of lens A at the level of $p < 0.05$ by the Kruskal-Wallis test

결론

본 연구에서는 광변색렌즈의 착색 및 퇴색양상이 렌즈의 색상, 제조공정법, 기능성코팅과 같은 제조특성에 의해 어떠한 차이를 보이는지를 매우 빠른 시간 내에 색변화가 완료되는 광변색렌즈의 특성에 맞게 평가하고자 하였으며, 변색속도를 착색 및 퇴색속도로 나누어 시간대 별로 비교 분석하고자 하였다.

자외선노출 후 광변색렌즈의 착색속도는 동일한 모노머 공정법으로 제조된 경우 갈색렌즈 > 회색렌즈로 나타났으며, 광변색의 진하기 정도는 회색렌즈 > 갈색렌즈로 나타났다. 한편 동일한 색상의 광변색렌즈라면 코팅공정법 제조의 렌즈가 모노머공정법 제조의 렌즈보다 착색 및 퇴색속도가 빠를 뿐만 아니라 최고의 착색농도를 가짐을 알 수 있었다. 또한 코팅공정법의 광변색렌즈는 자외선이 없는 조건에서도 낮은 색농도를 가져 높은 투명도를 나타내었다. 모노머공정법으로 광변색렌즈를 제조한 후 기능성코팅으로 미러코팅을 추가적으로 적용한 회색렌즈는 자외선에 노출되기 전부터 가시광선의 반사로 인한 색농도 값을 가졌으며, 추가적으로 자외선에 노출되더라도 광변색렌즈로 흡수되는 자외선양이 부족하여 추가적인 착색변화를 보이지 못하였다.

본 연구에서는 국내 유통 중인 광변색렌즈를 제조특성에 따라 나누어 자외선 노출에 따른 착색 및 퇴색양상을 비교 하였으며, 시간 구간 별 착색 및 퇴색속도를 구하여 제조특성에 따른 차이를 분석하였다. 따라서 빠른 착색의 광변색렌즈를 선호한다면 동일 제조공법의 갈색렌즈 선택을, 진한 농도의 광변색렌즈를 선호한다면 동일 제조공법의 회색렌즈 선택을 제안할 수 있으며, 동일 색상이라면 빠른 착색 및 변색과 실내에서의 투명도를 고려한다면 코팅공정법 제조의 렌즈 선택을 제안할 수 있겠다. 또한 미러코팅 적용의 광변색렌즈는 실내에서의 사용이 어렵다고 판단되었다.

그러나 본 연구 결과는 기제조의 유통렌즈를 사용하여 이러한 차이의 원인으로 예상되는 염료종류나 염료 혼합비율 등을 알 수 없었다는 한계점을 가지므로 이를 고려한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 렌즈 색상에 따른 광변색 정도의 차이가 존재할 가능성이 있으므로 다양한 염료 조합에 따른 색상 차이로 인한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Ha JW, Yu DS. Photochromic lens for patients with photophobia and estimation of clinical trial efficacy. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2005;10(1):27-34.
- [2] Choi DH. Photochromic material. Korea Patent 101226286, 2013.

- [3] Kang HS. Glasses materials, 3rd Ed. Seoul: Shinkwang-pub, 2001;359-367.
- [4] Derojas AA, Thangamathesvaran PM. Lens with photochromic elastomer film and method of making it. U.S. patent 6773108B2, 2004.
- [5] Chen F. Liquid casting compositions, production processes and photochromic optical elements. U.S. Patent 8576471B2, 2013.
- [6] Sakagami T, Machida K, Fujii Y, et al. Photochromic lens. U.S. Patent 4756973, 1988.
- [7] Tokyo Chemical Industry CO., LTD. Product; Photochromic Dyes, 2015. https://www.tcichemicals.com/eshop/ko/kr/category_index/12989(12 August 2019).
- [8] Berkovic G, Krongauz V, Weiss V. Spiropyran and spirooxazines for memories and switches. Chem Rev. 2000; 100(5);1741-1754. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr9800715>
- [9] Noh H. Changes of thin film coating on polymer lenses with varying temperature. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2014;19(1):1-8. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2014.19.1.1>
- [10] Kim KC. A study on the anti-reflection coating effects of polymer eyeglasses lens. J Korea Acad Industr Coop Soc. 2017;18(1):216-221. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.1.216>
- [11] Kang HS. <Mirror Coating Sunglasses> Mirror lens with Excellent Radiation and Reflectivity, 2016. <http://www.opticweekly.com/m/view.php?idx=8179&mcode=m678j15> (29 July 2019).
- [12] Yu DS, Cho HG, Moon BY. Evaluation of fading rate of photochromic lenses in domestic market. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2017;22(1):23-31. DOI: <http://dx.doi.org/10.14479/jkoos.2017.22.1.23>
- [13] Yu DS, Ha JW, Moon BY. Preparation and characteristics of photochromic plastic lenses by hard coatings. J Korea Acad Industr Coop Soc. 2009;10(7):1635-1641. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.7.1635>
- [14] Hughes FJ. Photochromic articles. U.S. Patent 5840926A, 1998.
- [15] Jung JW, Yoon YJ, Shin HJ. Reactive yellow azo dye having low photochromism. Korea Patent 101244345B1, 2012.
- [16] Transitions. Photochromic Technique, 2013. <https://www.transitions.com/ko-kr/why-transitions/the-technology/photochromic-technology/#VrM1j7rAkyOugtsC.99>(11 July 2019).
- [17] Jang DK. Photochromic optical lens having photochromic layer and method of making it. Korea Patent 1020160089236, 2017.
- [18] Qin X, Sugimura H, Boulineau MS, et al. Photochromic lens. U.S. Patent 7858001B2, 2010.
- [19] Koh KH, Jeon IC. A study on the tint performance of photochromic lens by temperature and time. Korean J Vis Sci. 2019;21(2):239-247. DOI: <https://doi.org/10.17337/jmbi.2019.21.2.239>

광변색렌즈의 제조특성에 따른 착색 및 퇴색양상의 비교

황인영¹, 김승준¹, 이광연¹, 김소라², 박미정^{2,*}

¹서울과학기술대학교 안경광학과, 학생, 서울 01811

²서울과학기술대학교 안경광학과, 교수, 서울 01811

투고일(2020년 2월 20일), 수정일(2020년 3월 10일), 게재확정일(2020년 3월 12일)

목적: 본 연구에서는 광변색렌즈의 변색양상을 착색과 퇴색과정으로 구분하여 제조특성에 따라 비교 분석하고자 하였다. **방법:** 색상, 제조공정법 및 추가코팅의 제조특성을 달리한 광변색렌즈에 자외선을 노출시키고 착색 변화는 5초 간격으로, 퇴색 변화는 90초 간격으로 사진을 촬영하여 비교하였다. 또한 광변색렌즈의 변색 정도는 ‘Quantity One’ 프로그램을 사용하여 사진의 색농도를 구하여 분석하였고, 착색 및 퇴색속도를 구하여 비교하였다. **결과:** 광변색렌즈는 제조특성에 관계없이 40초 이내에 모두 착색이 되었으나 퇴색은 최대 2,700초까지 소요됨을 알 수 있었다. 동일 제조의 광변색렌즈의 경우, 갈색렌즈가 회색렌즈에 비해 빠른 착색과 퇴색을 보였으며, 진한 착색 농도를 나타내었다. 동일 색상의 경우, 코팅공정법으로 제조된 광변색렌즈가 모노머공정법으로 제조된 렌즈보다 빠르고 진한 착색 및 퇴색을 보였다. 미러코팅을 추가로 적용한 광변색렌즈는 필요한 정도의 자외선량이 흡수되지 않아 충분한 추가변색을 보이지 않았다. **결론:** 본 연구에서는 광변색렌즈의 변색양상을 착색과 퇴색에 소요되는 시간을 달리하여 분석함으로써 제조공정에서 기인한 특성이 착색 및 퇴색양상과 착색 및 퇴색속도에 미치는 영향을 밝혔다. 따라서 광변색렌즈 선택 시 사용자의 시생활 스타일에 따른 제조적 특성의 고려가 필요함을 제안할 수 있겠다.

주제어: 광변색렌즈, 제조특성, 색농도, 착색속도, 퇴색속도

Supplement 1. Visible light transmittance of photochromic lenses during coloration (unit: %)

Time (sec) \ Lens	Lens A	Lens B	Lens C	Lens D
0	88.6±1.5	89.9±2.2	89.9±0.7	33.0±0.3
10	21.0±1.0	23.2±0.7	10.9±0.2	15.9±0.4
20	13.3±0.9	15.7±0.3	6.7±0.3	11.4±0.4
30	10.7±0.3	12.9±1.0	5.1±0.2	9.7±0.7
40	9.1±0.5	11.2±0.2	4.2±0.2	8.2±0.2

Supplement 2. Calculated color concentration of photochromic lenses during coloration (unit: scale)

Time (sec) \ Lens	Lens A	Lens B	Lens C	Lens D
0	108.7±0.9	62.6±0.8	91.6±3.0	223.1±0.1
5	221.0±0.6	199.2±2.3	232.5±0.4	232.0±0.1
10	233.2±0.3	223.4±0.2	243.2±0.4	235.7±0.1
15	238.4±0.6	231.2±0.6	247.7±0.4	237.9±0.1
20	241.4±0.6	234.1±1.1	248.4±0.1	238.8±0.1
25	243.0±0.9	234.4±1.2	249.2±0.3	239.7±0.1
30	243.3±1.0	235.4±2.0	249.6±0.4	240.4±0.1
35	243.9±1.5	236.3±1.0	249.7±0.2	241.3±0.1
40	244.8±0.8	237.1±0.5	249.8±0.3	238.2±0.1

Supplement 3. Calculated color concentration of photochromic lenses during discoloration (unit: scale)

Time (sec) \ Lens	Lens A	Lens B	Lens C	Lens D
0	244.8±0.8	237.1±0.5	249.8±0.3	238.2±0.1
90	212.5±2.7	188.8±6.3	230.1±3.4	222.4±0.2
180	187.1±2.4	154.4±6.0	205.1±3.0	217.7±0.2
270	171.6±1.4	132.3±7.2	171.4±1.5	211.5±0.1
360	161.2±0.6	115.9±4.8	152.8±0.5	209.6±0.1
450	154.1±1.4	106.4±2.6	131.3±9.1	208.2±0.1
540	146.8±0.6	99.8±2.4	118.8±8.0	206.6±0.1
720	138.4±1.2	90.6±1.4	107.8±5.4	204.8±0.2
900	131.5±1.4	84.4±0.1	103.6±3.8	203.6±0.1
1080	127.7±0.5	80.9±0.2	100.0±4.2	203.6±0.1
1260	124.8±0.2	77.6±0.9	99.5±3.2	203.1±0.2
1440	121.6±0.2	75.7±0.7	98.6±2.8	202.9±0.2
1620	121.6±0.5	73.8±0.5	97.8±3.3	202.4±0.1
1800	119.6±0.4	73.6±0.5	97.2±3.3	202.5±0.1
1980	117.0±0.5	71.6±0.4	96.6±3.7	201.9±0.1
2160	115.9±0.1	71.0±0.3	95.5±4.1	202.0±0.1
2340	114.4±1.4	71.2±0.2	95.1±3.9	201.4±0.1
2520	114.3±1.6	71.1±0.1	94.9±4.3	201.5±0.1
2700	114.3±0.8	71.0±0.2	94.5±4.0	201.6±0.4