



Characteristic Change of Coating Films on Tinted Spectacle Lenses by Thermal Stress

Sung-Sil Lee, Jinwoo Kim, So Ra Kim, and Mijung Park*

Dept. of Optometry, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
(Received August 6, 2018; Revised September 27, 2018; Accepted November 11, 2018)

Purpose: In the present study, the characteristic change of tinted lenses with different coatings was investigated when exposed to thermal stress. **Methods:** The clear and tinted lenses made of allyl-diglycol-carbonate material with no coating, hard coating, multi-layered coating, mirror coating were exposed once to the temperatures of 25, 50, 75, and 100°C for 4 hours, and then their adhesion grade, hardness, visible light and ultraviolet transmittances were measured. **Results:** Only hard coated clear lenses showed reduced adhesion grade at a temperature of 75°C, while clear and tinted lenses with other coatings showed similar decrease of adhesion grade at 50°C. However, it was revealed that greater coating damage was shown in the tinted lenses even in the same adhesion grade by detailed surface examination, and the greatest damage was in mirror coated one. The hardness of tinted lenses was reduced by up to 32.9%p depending on the coating type at 100°C, whereas clear lenses showed a decrease of hardness larger than 10%p in hard coating at 100°C, in multi-layered coating and mirror coating at 75°C. The visible light transmittance was not significantly changed however, a relatively large change was shown in tinted lenses compared with clear lenses depending on the degree of thermal stress. The ultraviolet transmittance was not changed in all lenses. **Conclusions:** The characteristics of coating films on tinted lenses by thermal stress was changed larger than clear lenses, and a significant change of the coatings was observed even in a single thermal stress. Therefore, it suggests the necessity about the further study on the degree of damage of the coating film on tinted lenses caused by long-term wear and repeat thermal stress that may occur in daily life, and the establishment of standards for acceptable range of coating film damage.

Key words: Tinted lenses, Thermal stress, Hard coating, Multi-layered coating, Mirror coating, Adhesion grade, Hardness, Visible light transmittance, Ultraviolet transmittance

서 론

대한안경사협회가 한국 깔럼 조사 연구소에 의뢰하여 전국의 만 19세 이상 남녀 1,500명을 대상으로 진행한 2017년 전국 안경 및 콘택트렌즈 사용률 조사 결과 1987년 24.1%였던 안경 사용률이 2017년에는 59.6%로 2배 이상 증가하였다. 전국의 초·중·고생 안경 사용률 또한 2002년 처음 조사 당시 36.0%에서 2017년 43.8%로 크게 증가하였으며, 안경 사용자가 안경 구입 시 고려하는 안경테와 안경 렌즈의 상대적 중요도에 대해서는 안경 렌즈가 안경테에 비해 약 45%p 높은 것으로 나타났다.^[1]

안경 렌즈의 종류에는 크게 유리 렌즈와 플라스틱 렌즈가 있으며, 1930년대 이후로 아크릴산계 수지인 메칠 메타크릴레이트(methyl methacrylate)와 CR-39(columbia resin)라 불리는 아릴-디글리콜-카보네이트(allyl diglycol carbonate)

가 소개되면서부터는 대부분 플라스틱 렌즈가 사용되고 있다. 플라스틱 렌즈의 사용률은 약 70~80%에 이르는 것으로 알려져 있으나 실제 사용 비율은 이보다 훨씬 높을 것으로 예상되며, 현재까지 가장 흔히 사용된 플라스틱 렌즈는 CR-39 계열의 렌즈이다.^[2] 플라스틱 렌즈는 유리 렌즈에 비해 자외선 흡수(UV absorption), 낮은 파손율(low brittleness), 낮은 비중(low density), 취급 용이성(easy usage) 및 착색성(easy tinting) 등과 같은 장점을 가지고 있지만 낮은 광학적 특성, 약한 표면 경도 등과 같은 단점도 가지고 있다.^[3] 이러한 단점을 보완하기 위해 실리콘계 수지막을 입혀 유리 렌즈처럼 표면을 단단하게 하는 하드 코팅(hard coating, HD coating)을 하게 되고, 빛의 반사량을 감소시켜 가시광선 투과율을 증가시키고 유령의 상(ghost image)과 플레어(flare) 현상을 줄이기 위한 멀티 코팅(multi-layered coating, MT coating)을 하며, 또한 빛의 반

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

본 논문의 일부 내용은 2016년도 한국안광학회 동계학술대회에서 포스터로 발표되었음.

사랑을 높여 눈부심을 막고 미용적인 효과를 높일 수 있는 미러 코팅(mirror coating, MR coating)을 한다.^[4,5] 이와 같이 플라스틱 렌즈 위에는 여러 가지 목적을 위한 다양한 코팅막을 입히게 되는데 환경적 요인이 이러한 코팅막에 영향을 미칠 수 있다. 플라스틱 렌즈는 코팅뿐만 아니라 실내 및 야외활동을 포함한 평상시 생활에서 자외선을 차단하고 눈부심을 감소시키거나 미용적인 효과를 높이는 선글라스 생산을 위해 착색 렌즈로 제작되기도 한다.

투명 렌즈와 착색 렌즈 모두 일상생활에서 여름철 차 안이나 찜질방과 같이 온도가 높은 환경에 노출되는 경우가 많다. 이 때 고온에서 쉽게 팽창하는 플라스틱 재질의 특성으로 인해 코팅막이 쉽게 떨어지거나 균열 현상이 나타날 수 있다. 실제로 투명 렌즈를 대상으로 한 연구에서 열에 의해 굴절률, 강도, 광선투과율, 접촉각의 변화가 유발되는 등 투명 렌즈 코팅막의 변화가 관찰된다고 보고된 바 있다.^[6-8]

착색 렌즈는 착색 공정 중에 열처리 및 화학약품 처리와 같이 표면이나 부착력 변화를 유발시킬 수 있는 요인들이 더해 질 뿐만 아니라 플라스틱 렌즈의 표면 및 내부에 침투한 착색 성분에 의해 렌즈 성분 골격 구조의 변형이 유발되어 투명 렌즈와는 다른 표면 특성을 가질 수 있다. 즉, 동일한 열 스트레스를 가했을 때 유발되는 코팅막의 변화는 표면 특성에 차이가 있는 투명 렌즈와 착색 렌즈에서 달라질 수 있다. 실제로 이 등^[9]은 착색 렌즈의 코팅막이 투명 렌즈보다 열 스트레스에 약하여 투명 렌즈의 코팅막에는 영향을 주지 않은 온도에서 착색 렌즈는 균열이 발생하였으며, 착색 렌즈 코팅막의 성분비가 열 스트레스에 의해 변화될 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 열 스트레스가 주어졌을 때 착색 렌즈 코팅막의 주요 기능에 해당하는 광학적 및 기계적 특성 변화 또한 투명 렌즈와 다를 가능성이 있다.

이에 본 연구에서는 아릴-디글리콜-카보네이트 재질에 무 코팅, 하드 코팅, 멀티 코팅 및 미러 코팅된 투명 렌즈와 착색 렌즈를 일정 시간동안 특정 온도로 처리하였을 때의 부착력과 경도, 투과율의 변화를 측정하여 열 스트레스에 대한 착색 렌즈 코팅막의 안정성 및 특성을 평가하고, 투명 렌즈와의 차이를 비교하고자 하였다.

대상 및 방법

1. 실험 재료

실험에 사용된 플라스틱 렌즈는 아릴-디글리콜-카보네이트 재질 렌즈(일도광학, Korea)였으며, 착색 여부만이 다르고 재질 및 굴절률 등 나머지 특성은 모두 동일한 착색 렌즈와 투명 렌즈였다. 착색 렌즈와 투명 렌즈는 각각

Table 1. Clear and tinted spectacle lenses used in the study

Material	Allyl diglycol carbonate (CR-39)
Refractive index (n_d)	1.498
Abbe number	57.8
Density (g/cm^3)	1.32
Diopter (D)	-3.00
Color of dye	Gray
Tinting concentration (%)	85
Diameter (mm)	74

무 코팅, 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅이 되어 있었으며, 착색 렌즈의 색상은 회색이었다(Table 1).

2. 실험 방법

모든 렌즈는 육안검사를 통해 흠이나 긁힘, 왜곡 등 표면 상태의 이상 여부를 확인한 후 실험에 사용하였다. 렌즈를 고온건조기(WOF-155, DAIHAN Scientific, Korea)에서 25, 50, 75, 100°C의 온도로 4시간 동안 처리하였다. 열 처리된 렌즈는 최소 1시간 이상 상온에서 식혔으며, 발생할 수 있는 이물질 제거를 위해 증류수를 이용하여 세척하고 물기를 완전히 제거한 후 실험을 진행하였다. 실험은 온도 조건 당 3개의 렌즈를 각각 사용하였다.

1) 부착력 평가와 표면 관찰

플라스틱 소재의 코팅 평가에 사용되는 미국 재료 시험 협회의 ASTM(american society for testing and material) D3359-97 기준을 적용하여 날카로운 칼로 렌즈 표면에 수직 및 수평으로 각 11×11개의 줄을 1 mm 간격으로 하여 격자무늬를 낸 후 3M 부착력 평가 전용 테이프를 1회 붙였다 떼어냈으며 렌즈마다 3곳을 측정하여 평가하였다. 또한 평가의 기준이 되는 격자무늬를 편광 현미경(DL-400P, Dongwonsystems, Korea)을 사용하여 40배 확대한 후 의료용 카메라(GC-415N-G Honeywell, US)로 촬영하여 관찰하였다.

2) 경도 측정

코팅막의 경도 변화를 알아보기 위해 마이크로 비커스 경도계(MXT-70, Matsuzawa, Japan)를 사용하였으며, 하중은 50 g으로 하였다. 결과는 3개의 렌즈를 각각 10번씩 반복 측정한 후 평균치를 구하여 비교하였다. 경도의 계산 방법은 아래와 같다.

$$\text{계산식} : HV = \frac{\text{시험하중의 크기}}{\text{압입 자국의 표면적}} = \frac{2 \cdot p \cdot \sin(\theta/2)}{d^2} = 1.8544 \frac{p}{d^2}$$

p : 시험 하중 (kgf)

d : 압입 자국 오목 부위의 대각선 길이 (mm)

3) 투과율 측정

렌즈의 투과율 변화를 측정하기 위해 렌즈미터 광 투과율 측정기(TM-1, Topcon, Japan)를 사용하였다. 측정 파장 범위는 UV-B(280~320 nm), UV-A(320~400 nm), 가시광선(400~780 nm) 영역이었으며, 결과는 3개의 렌즈를 각각 3번씩 반복 측정한 후 평균치를 이용하여 비교하였다.

3. 통계 처리

실험 결과는 평균±표준편차로 나타내었으며 SPSS 18.0 for Window를 사용하여 통계 분석하였다. 같은 온도에서 코팅된 투명 렌즈와 착색 렌즈의 정도 차이는 Mann-Whitney test를 실시하였으며, 같은 코팅에서의 온도별 정도 및 투과율 변화는 선형회귀분석을 이용하여 분석하였다. 유의확률이 0.05 미만일 경우 통계적으로 유의한 상관관계가 있다고 판단하였다.

결과 및 고찰

1. 코팅막의 부착력과 표면 변화

25°C에서의 표면 부착력 등급은 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅된 투명 렌즈 모두 5B로 나타났다. 50°C에서 하드 코팅된 투명 렌즈의 표면 부착력 등급은 여전히 5B였으나 멀티 코팅 및 미러 코팅된 투명 렌즈의 표면 부착력

등급은 4B로 낮아졌다. 75°C와 100°C에서 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅된 투명 렌즈의 표면 부착력 등급은 모두 4B였다. 착색 렌즈의 경우 25°C에서의 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅된 렌즈의 표면 부착력 등급은 모두 5B였으며, 50, 75, 100°C에서는 모든 코팅 렌즈의 표면 부착력 등급이 4B로 낮아졌다(Table 2).

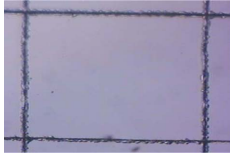
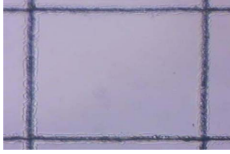
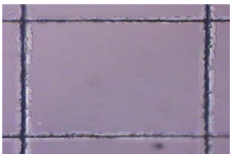


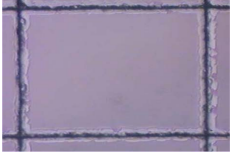
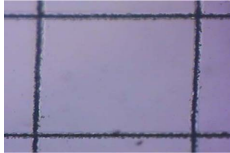
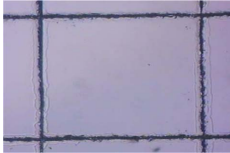
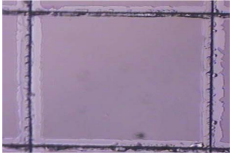
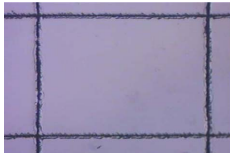
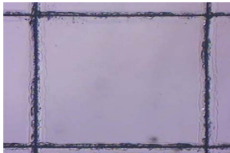
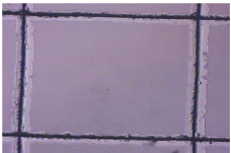
표면 부착력 등급 평가를 통해 50°C의 열 스트레스에 의해서도 코팅막의 변화가 나타남을 알 수 있었다. 50°C의 열 스트레스에서도 표면 부착력 변화가 나타나지 않은 렌즈는 하드 코팅된 투명 렌즈였으며, 착색 렌즈의 경우에는 하드 코팅이 되어 있다하더라도 표면 부착력이 감소하

Table 2. Adhesion grade of coating films on spectacle lenses by thermal stress

Thermal stress (°C)	Type of coating					
	Hard		Multi-layered		Mirror	
	Clear lenses	Tinted [†] lenses	Clear lenses	Tinted [†] lenses	Clear lenses	Tinted [†] lenses
25	5B	5B	5B	5B	5B	5B
50	5B	4B	4B	4B	4B	4B
75	4B	4B	4B	4B	4B	4B
100	4B	4B	4B	4B	4B	4B

[†]Grey color

Table 3. Changes in stability of the surface around the cross-cut of the coating films on clear lenses by thermal stress

Thermal stress (°C)	Type of coating		
	Hard	Multi-layered	Mirror
25			
50			
75			
100			

는 것으로 나타났다. 멀티 코팅 및 미러 코팅된 렌즈의 경우는 50°C의 열 스트레스에서 착색 렌즈뿐만 아니라 투명 렌즈도 표면 부착력의 변화가 나타났으며, 100°C의 열 스트레스에서도 표면 부착력 등급은 변함없이 4B를 유지하여 열 스트레스에 의한 표면 부착력의 변화는 4B이하로 낮아지지 않음을 확인하였다(Table 2).

본 연구 결과를 통해 하드 코팅막의 경우는 착색 렌즈가 투명 렌즈보다 열에 의한 표면 부착력 손상이 더 많음을 알 수 있었으며, 멀티 코팅막과 미러 코팅막의 경우 부착력 등급 평가에서는 착색 렌즈와 투명 렌즈 간에 차이가 없음을 알 수 있었다.

편광 현미경과 의료용 카메라를 이용하여 코팅막이 파열된 부분을 확대하여 관찰한 결과 부착력 평가에서 동일한 등급이 나타났더라도 실제 표면의 손상 정도는 다른 것으로 확인되었다. 투명 렌즈와 착색 렌즈 모두 하드 코팅 막에 비해 멀티 코팅막, 미러 코팅막에서 열 스트레스에 대한 박막 손상 범위와 정도가 더 큰 것으로 관찰되었다(Table 3, 4). 멀티 코팅막과 미러 코팅막은 날카로운 칼로 그은 선 주변으로 박막이 손상됨을 육안으로 확인할 수 있었으며, 하드 코팅막에 비해 온도가 증가할수록 박막 손상 정도의 차이가 더 큰 것으로 나타났다. 특히 미러 코팅막의 경우는 다른 코팅에 비해 은색 박막의 벗겨짐이 더 확연한 것으로 나타났다. 투명 렌즈와 착색 렌즈의 박

막 손상 범위와 정도를 비교한 결과로는 투명 렌즈에 비해 착색 렌즈의 손상이 더 많은 것으로 관찰되어 열 스트레스에 대한 안정성이 투명 렌즈와 착색 렌즈에서 다르게 나타나며 코팅막에 따라서도 다르게 나타남을 알 수 있었다.

2. 경도 변화

25°C에서의 무 코팅된 투명 렌즈의 경도는 15.86±0.52 kgf/mm², 착색 렌즈의 경도는 15.25±0.70 kgf/mm²로 측정되었다. 무 코팅된 투명 렌즈의 경우 25°C를 기준으로 한 50, 75, 100°C에서의 경도 값을 백분율로 환산한 결과 최대 경도 변화가 1.7%p로 나타나 온도에 따른 경도의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 그러나 무 코팅된 착색 렌즈에서는 경도 차이가 최대 7.6%p까지 나타나 렌즈 착색과정에서의 착색제 사용으로 인해 열에 대한 플라스틱 렌즈 경도의 안정성이 떨어지게 되었다는 것을 확인할 수 있었다(Table 5).

25°C의 열 스트레스에서 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅 각각의 경도 값은 투명 렌즈와 착색 렌즈 모두 코팅 종류와 상관없이 유사하였다. 25°C에서의 경도 값에 대한 50°C에서의 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅된 투명 렌즈와 착색 렌즈의 경도 변화는 최대 4.5%p로 나타나 큰 변화가 없는 것으로 확인하였다. 그러나 75°C에서의 경도 측정값은 25°C에 비해 투명 렌즈의 경우 하드 코팅에서

Table 4. Changes in stability of the surface around the cross-cut of the coating films on grey tinted lenses by thermal stress

Thermal stress (°C)	Type of coating		
	Hard	Multi-layered	Mirror
25			
50			
75			
100			

Table 5. The surface hardness of clear and tinted lenses by thermal stress

Thermal stress (°C)	Type of coating	Surface hardness (kgf/mm ²)		P-value
		Clear lenses	Tinted lenses [‡]	
25	No	15.86±0.52	15.25±0.70	0.2752
	Hard	16.30±0.80	16.27±0.83	0.5127
	Multi-layered	16.87±0.74	16.81±0.64	0.8273
	Mirror	16.74±0.58	16.63±0.72	0.8273
50	No	15.88±0.65	15.20±0.62	0.0495*
	Hard	16.19±0.51	15.77±0.82	0.5127
	Multi-layered	16.42±0.67	16.05±0.65	0.2752
	Mirror	16.35±0.72	15.90±0.65	0.2752
75	No	15.59±0.77	15.03±0.67	0.2752
	Hard	15.76±0.65	14.46±0.73	0.0495*
	Multi-layered	15.02±0.46	13.79±0.78	0.0495*
	Mirror	14.73±0.88	12.97±0.98	0.1266
100	No	15.80±0.67	14.09±0.67	0.0495*
	Hard	14.43±0.68	13.58±0.81	0.5127
	Multi-layered	13.71±0.92	12.35±0.84	0.1266
	Mirror	12.59±0.50	11.15±0.72	0.0495*

[‡]Grey color

3.3%p, 멀티 코팅에서 11.0%p, 미러 코팅에서 12.0%p, 착색 렌즈의 경우 하드 코팅에서 11.1%p, 멀티 코팅에서 18.0%p, 미러 코팅에서 22.0%p 변화하는 것으로 나타나 열 스트레스로 인해 렌즈의 경도가 영향을 받았으며, 영향의 정

도는 투명 렌즈보다 착색 렌즈에서 크게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 변화는 100°C의 열 스트레스에서 더욱 커져 투명 렌즈의 경우 하드 코팅에서 11.5%p, 멀티 코팅에서 18.7%p, 미러 코팅에서 24.8%p, 착색 렌즈의 경우 하드 코팅에서 16.5%p, 멀티 코팅에서 26.6%p, 미러 코팅에서 32.9%p 변화되는 것으로 나타났다(Table 5).

각각의 온도에서 동일 코팅된 투명 렌즈와 착색 렌즈에 대해 경도를 비교한 결과 25°C에서는 0.03~0.61 kgf/mm² 차이가 있었으며, 통계적 유의성은 없는 것으로 나타났다. 50°C의 경우 무 코팅된 투명 렌즈와 착색 렌즈 사이에 차이가 있는 것으로 나타났으며, 75°C에서는 미러 코팅에서 1.76 kgf/mm²으로 가장 큰 차이가 나타났으나 통계적 유의성은 각각 1.30 kgf/mm², 1.23 kgf/mm² 차이를 나타낸 하드 코팅과 멀티 코팅에서 나타났다. 100°C에서는 각각 1.71 kgf/mm², 1.44 kgf/mm²으로 가장 큰 차이를 나타낸 무 코팅과 미러 코팅에서 통계적으로 유의한 정도 차이가 나타났다. 75°C 이상에서 투명 렌즈와 착색 렌즈 간에 코팅막 별로 통계적으로 유의한 정도 차이가 나타났다. 75°C에서는 투명 렌즈의 경도가 크게 감소하지 않아 착색 렌즈와 유의한 차이가 있었지만 100°C에서는 투명 렌즈의 경도도 같이 크게 감소하여 오히려 착색 렌즈와 통계적으로 차이가 나지 않은 경우도 발생하였다(Table 5).

선형회귀분석을 이용하여 같은 코팅에서의 온도별 정도 변화를 분석한 결과 무 코팅된 투명 렌즈의 경우 p값이 0.6080, r값이 -0.165로 나타나 온도에 따른 통계적으로 유의한 정도 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 투명 렌즈의 무 코팅을 제외한 모든 투명 렌즈와 착색 렌즈의

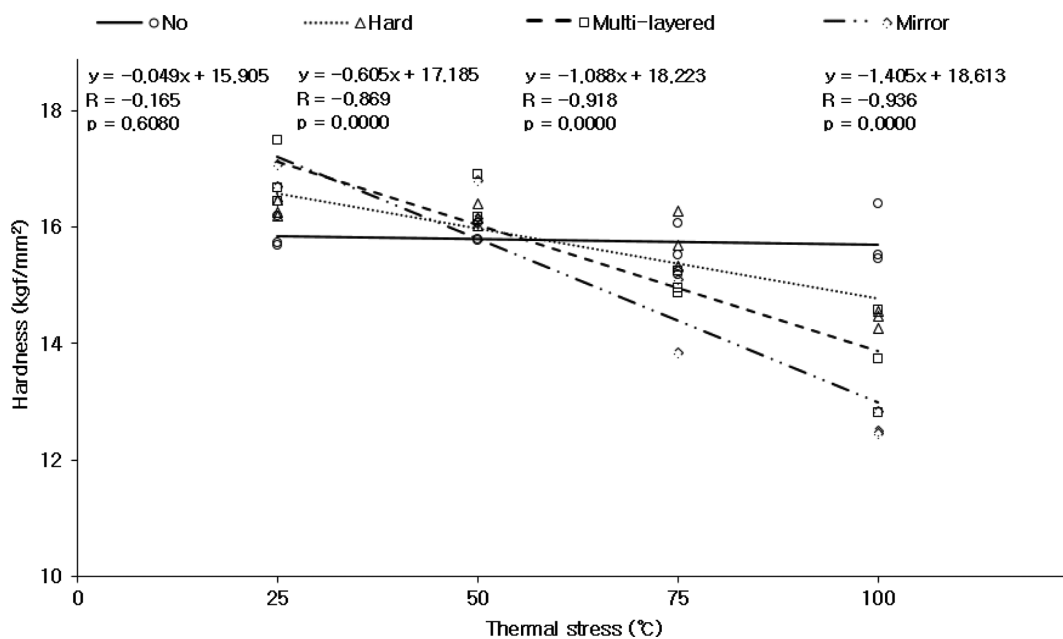


Fig. 1. Changes in surface hardness of clear lenses by thermal stress.

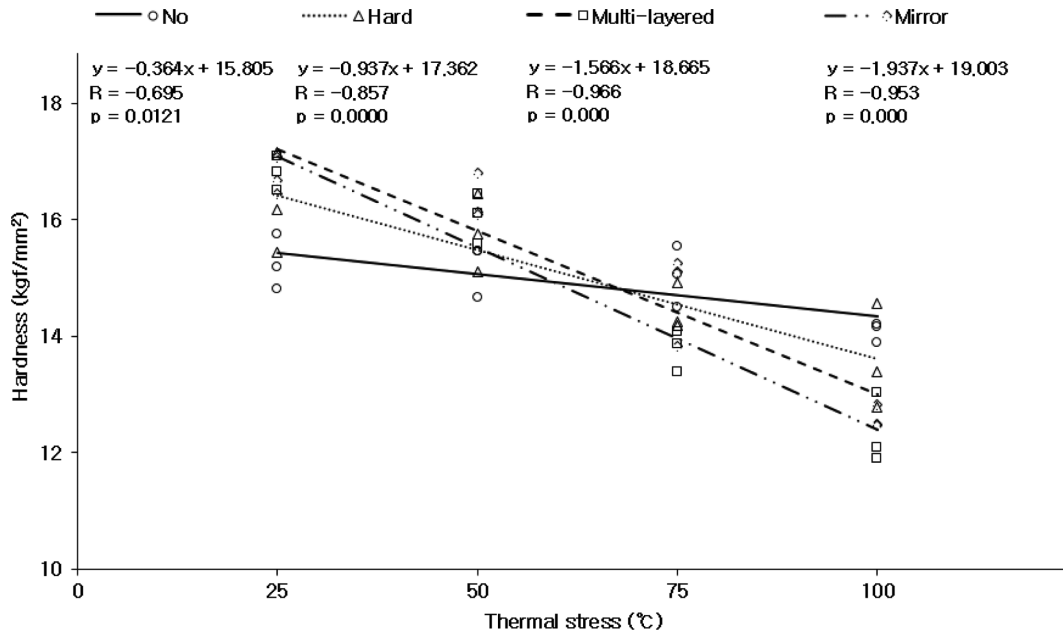


Fig. 2. Changes in surface hardness of grey tinted lenses by thermal stress.

코팅에서는 열 스트레스 정도가 커질수록 통계적으로 유의하게 경도가 감소하는 것으로 나타났다. 무 코팅, 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅의 열 스트레스에 따른 경도 변화 추세선 기울기는 투명 렌즈의 경우 각각 -0.049, -0.605, -1.088, -1.405, 착색 렌즈의 경우 각각 -0.364, -0.937, -1.566, -1.937으로 나타나 멀티 코팅과 미러 코팅이 무 코팅과 하드 코팅에 비해 열 스트레스에 의한 경도 변화 폭이 크다는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 1, 2).

3. 투과율 변화

투명 렌즈와 착색 렌즈의 코팅 별 열 스트레스 자극에 의한 가시광선 투과율의 변화는 대체적으로 온도가 높아질수록 낮아지는 경향을 보였으나 선형회귀분석 결과 무

코팅, 하드 코팅, 미러 코팅된 투명 렌즈의 r값은 각각 -0.151, -0.188, 0.398로 나타나 상관성이 약하며, 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 멀티 코팅된 투명 렌즈의 경우 추세선 기울기 -0.381, 상관계수 -0.666, p값 0.0180으로 나타나 통계적으로 유의한 강한 상관성을 보이며 자극 온도에 따라 가시광선 투과율이 변하는 것으로 나타났다. 착색 렌즈의 경우에는 무 코팅, 멀티 코팅된 렌즈에서 온도 변화에 따라 가시광선 투과율이 통계적으로 유의하게 감소하는 것으로 나타났다. 착색 렌즈의 선형 회귀분석 추세선 기울기는 무 코팅 -0.494, 멀티 코팅 -0.802, 상관계수는 각각 -0.667, -0.718으로 나타났으며, 투명 렌즈에서 상관성을 보였던 멀티 코팅과의 비교를 통해 착색 렌즈가 투명 렌즈보다 상대적으로 열 스트레스의

Table 6. Changes in visible light transmittance of clear and tinted lenses by thermal stress

Lenses	Coating	Visible light transmittance (%)				Linear regression		
		25°C	50°C	75°C	100°C	P-value	Slope	r
Clear	No	92.56±1.02	91.82±0.67	92.84±1.05	91.76±1.51	0.6401	-0.137	-0.151
	Hard	92.67±0.70	92.54±1.26	92.37±0.84	92.31±0.56	0.5590	-0.123	-0.188
	Multi-layered	93.95±0.40	93.54±0.48	93.35±0.60	92.75±0.76	0.0180*	-0.381	-0.666
	Mirror	69.83±0.33	68.94±0.60	70.15±1.12	70.34±0.31	0.1999	0.273	0.398
Tinted†	No	15.81±0.47	16.50±0.47	15.62±0.42	14.46±0.50	0.0178*	-0.494	-0.667
	Hard	15.00±0.33	14.73±0.24	13.88±0.12	14.42±0.58	0.0547	-0.258	-0.567
	Multi-layered	18.24±0.47	18.24±0.47	16.23±1.51	16.23±0.79	0.0086*	-0.802	-0.718
	Mirror	6.75±0.07	8.52±1.27	8.10±0.12	8.02±0.74	0.1708	0.339	0.423

†Grey color

Table 7. Changes in UV light transmittance of clear and tinted lenses by thermal stress

Rays	Lenses	Type of coating	UV light Transmittance (%)				Linear regression		
			25°C	50°C	75°C	100°C	P-value	Slope	r
UV-A	Clear	No	75.63±3.33	74.87±1.59	76.40±1.73	74.87±3.06	0.8725	-0.077	-0.052
		Hard	71.40±4.60	71.97±1.47	72.60±2.94	71.73±2.26	0.7710	0.163	0.094
		Multi-layered	69.10±3.13	69.20±2.59	70.97±2.22	69.07±1.89	0.6997	0.167	0.125
		Mirror	63.13±1.93	63.47±1.72	62.73±1.26	63.73±1.82	0.6784	0.107	0.134
	Tinted [†]	No	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-	-	-
		Hard	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-	-	-
		Multi-layered	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-	-	-
		Mirror	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-	-	-
UV-B	Clear	No	7.93±1.14	6.88±1.49	7.23±1.10	7.77±1.36	0.9496	-0.010	-0.021
		Hard	6.20±1.13	6.77±1.14	7.20±1.13	6.56±1.14	0.2915	0.153	0.332
		Multi-layered	7.03±1.33	6.63±1.27	8.40±1.07	6.93±1.08	0.5393	0.147	0.197
		Mirror	4.97±1.10	5.40±1.00	5.43±1.01	5.17±0.87	0.5769	0.063	0.179
	Tinted [†]	No	1.37±0.56	1.27±0.52	1.07±0.25	1.27±0.69	0.3015	-0.043	-0.326
		Hard	1.10±0.31	1.13±0.43	1.20±0.55	1.03±0.56	0.6599	-0.018	-0.142
		Multi-layered	1.07±0.45	1.07±0.45	1.43±2.03	0.97±0.18	0.5396	-0.026	-0.197
		Mirror	0.93±0.37	1.03±0.41	0.93±0.74	1.00±0.53	0.8325	0.011	0.069

[†]Grey color

영향을 더 많이 받는 것을 확인할 수 있었다(Table 6). 그러나 투명 렌즈와 착색 렌즈 모두 열 스트레스에 의해 1%p 전후의 미미한 가시광선 투과율 차이가 나타나 실생활에 크게 영향을 줄 만한 정도의 변화는 유발되지 않은 것으로 나타났다.

투명 렌즈의 UV-A 투과율은 무 코팅이 가장 높고 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅 순으로 낮았으나 열 스트레스에 의한 UV-A 투과율의 변화는 관찰되지 않았다. 온도 변화에 대한 상관성은 무 코팅, 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅에서 각각 -0.052, 0.094, 0.125, 0.134로 나타났다. 착색 렌즈의 UV-A 투과율은 코팅과 상관없이 모든 렌즈에서 전혀 투과되지 않아 0의 값을 보였으며, 열 스트레스에 의해서도 이러한 UV-A 차단은 그대로 유지되는 것으로 나타났다. 열 스트레스에 대한 UV-B 투과율은 투명 렌즈와 착색 렌즈에서 모두 일정한 값으로 유지되었으며, 통계적으로 유의한 변화나 상관성이 나타나지 않았다. 무 코팅, 하드 코팅, 멀티 코팅 투명 렌즈의 UV-B 투과율은 7%, 미러 코팅 투명 렌즈는 5% 전후의 값을 유지하였다. 착색 렌즈의 경우 투명 렌즈보다 UV-B 투과율이 더 낮았으며 모든 코팅 상태에서 1% 전후의 값을 보였다(Table 7).

본 연구에서는 주로 선글라스용으로 사용되는 착색 렌즈가 투명 렌즈에 비해 여름철 장시간 동안 자동차 안에

보관되는 것과 같은 열 스트레스에 노출될 확률이 더 크며, 침지된 염색성분과 안경 렌즈 재료의 열팽창계수 차이로 인해 착색 렌즈에 코팅된 박막의 안정성이 투명 렌즈보다 더 취약할 것으로 생각되어 25, 50, 75, 100°C에서 4 시간 동안 1회 노출시켰을 때 착색 렌즈와 투명 렌즈의 변화를 비교해 보았다. 선행연구에서 동일한 온도 조건에서 열 스트레스를 주었을 때 표면 손상이 관찰되기 시작한 온도는 멀티 코팅 및 미러 코팅된 착색 렌즈의 경우 75°C였으며, 멀티 코팅 및 미러 코팅된 투명 렌즈의 경우 100°C였다. 하드 코팅된 투명 렌즈와 착색 렌즈의 경우에는 100°C에서도 표면 변화가 관찰되지 않았다.⁹⁾ 그러나 동일한 조건으로 처리한 후 표면 부착력을 평가한 본 연구에서 50°C 열 스트레스가 주어졌을 때부터 하드 코팅된 투명 렌즈를 제외한 모든 렌즈에서 표면 부착력이 저하된 것으로 나타났다. 그러나 하드 코팅된 투명 렌즈도 75°C 열 스트레스에서는 표면부착력이 저하되었다. 즉, 표면 관찰에서는 손상이 없는 것으로 나타난 온도 조건에서도 표면 부착력의 손상은 발생한다는 것을 확인하였다.

표면 부착력의 평가 등급 부여는 ASTM D3359-97을 기준으로 하여 격자선이 깨끗하면 5B, 5% 미만의 박리가 일어났을 때 4B, 5~15%의 박리가 일어났을 경우 3B로 평가하게 된다.¹⁰⁾ 본 연구에서 설정된 온도 중 가장 고온인

100°C 열 스트레스에서의 부착력 평가 등급은 4B로 나타나 실생활에서 발생할 수 있는 온도에 대한 렌즈의 부착력 등급 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 세부 관찰에서 동일한 4B 등급이라 하더라도 열 스트레스에 의한 손상 정도에는 차이가 있는 것으로 밝혀졌다. 즉, 동일한 등급으로 판정된 하드 코팅막 보다 멀티 코팅막, 미러 코팅막의 박막 손상이 더 컸으며 투명 렌즈에 비해 착색 렌즈의 손상이 더 컸다.

각 코팅막을 구성하고 있는 성분들은 각기 다른 것으로 알려져 있다. 하드 코팅을 할 경우 실리콘 성분이나 불소 화합물 성분을 함유하게 되며,^[11,12] 멀티 코팅의 경우에는 제작 과정에서의 불화마그네슘, 불화세륨, 산화알루미늄, 산화지르코늄 증착으로 인해 이와 동일한 성분들을 함유하게 된다.^[13,14] 또한, 미러 코팅에는 산화실리콘, 산화티타늄, 산화지르코늄과 같은 성분들이 함유되어 있다.^[15,16] 이처럼 여러 코팅막은 서로 다른 구성 성분들로 구성되어 있기 때문에 동일한 열 스트레스를 받더라도 상이한 변화가 나타날 수 있다. 실제로 선행연구에서 열 스트레스에 의한 코팅막 구성 성분의 비율 변화를 알아본 결과 하드 코팅막에서 13~39%, 멀티 코팅막에서 38~56%, 미러 코팅막에서 8~24%의 성분 변화가 나타남을 밝힌 바 있다.^[9] 이러한 성분비의 변화가 렌즈의 열 스트레스에 대한 안정성과 코팅막 부착력 감소에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한, 열 스트레스에 노출된 착색 렌즈의 경도 감소 역시 이러한 표면 변화 및 성분 함량비 변화와 관련이 있을 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서 무 코팅된 투명 렌즈의 경우 열 스트레스가 가해져도 경도의 변화가 나타나지 않는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 노^[6]의 연구에서 5시간동안 고온에 노출시킨 아릴-디글리콜-카보네이트 재질 투명 렌즈의 경도가 감소한다는 것과 상이한 결과이다. 이러한 결과가 나타난 것은 본 연구에서 코팅막 고유의 특성을 알아보기 위해 무 코팅 또는 하나의 코팅막을 가진 렌즈를 사용한 반면 노^[6]의 연구에서는 하드 코팅과 멀티 코팅이 동시에 코팅된 안경 렌즈를 사용하였기에 코팅막 별 열팽창계수의 차이가 다르며, 열 스트레스에 노출된 시간 또한 본 연구보다 더 길었다는 것에서 기인할 가능성이 있다. 투명 렌즈와 착색 렌즈의 하드 코팅은 다른 코팅에 비해 온도 변화로 인한 경도 차이가 적은 것으로 나타났는데 이는 하드 코팅의 경우 가수분해 반응과 증착합 반응을 이용한 sol-gel법에 의해 제조된 유-무기 혼성 코팅제를 사용하며, 이러한 방법에서는 화학적 균일성이 높은 생성물이 만들어지기 때문으로 보인다.^[17,18]

열 스트레스로 인한 코팅막의 가시광선 투과에 대한 안정성 역시 착색 렌즈와 투명 렌즈 간에 차이가 있으며, 착색 렌즈의 안정성이 떨어진다는 것을 확인하였다. 또한,

코팅에 따라서도 차이가 있었으며, 멀티 코팅된 착색 렌즈의 가시광선 투과율이 열 스트레스에 가장 큰 영향을 받았다. 멀티 코팅된 렌즈의 경우 다른 코팅에 비해 열팽창 계수가 작으므로 온도 변화에 있어 코팅막이 쉽게 손상 및 제거되었으며,^[19] 이로 인해 렌즈 전후면의 빛 반사율이 증가하였기 때문에 가시광선 투과율의 변화가 가장 컸던 것으로 판단된다. 열 스트레스가 가시광선 투과율에 미치는 영향에 비해 자외선 투과율에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타나 선행연구에서 보고된 바 있는 열 스트레스에 의한 코팅막의 성분 변화가 자외선 차단과 관련 있는 성분의 함유량에는 큰 영향을 미치지 않았다는 것을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다. 그러나 기존 연구들에서는 착색 농도가 진해짐에 따라 투과율이 감소하거나 시력 및 대비감도가 떨어질 수 있으며,^[20,21] 착색 시간이 길수록 반사율과 굴절률이 높아질 수 있다고 하였다.^[22] 따라서, 본 연구에서 확인한 착색 렌즈 코팅막의 특성 변화는 착색 농도에 따라 달라질 수 있으며, 착색 색상 또한 영향을 미칠 수 있다고 예상된다.

결론

본 연구에서는 무 코팅, 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅으로 각기 다른 종류의 코팅이 되어있는 착색 렌즈에 25, 50, 75, 100°C의 온도로 열 스트레스를 주었을 때 유발되는 코팅막의 부착력, 경도, 가시광선 투과율 및 자외선 투과율 변화를 알아보고, 동일한 코팅 상태의 투명 렌즈와 열 스트레스에 대한 저항성에 차이가 있는지를 분석하였다.

착색 렌즈에 열 스트레스가 주어졌을 때 50°C에서 부착력의 약화가 나타났으며, 경도는 75°C에서부터 10%p 이상의 감소가 나타났고, 100°C에서는 코팅에 따라서 최대 32.9%p의 경도 감소가 나타난 반면, 가시광선 투과율은 100°C에서 최대 1.74%p 감소되어 변화 정도가 작았으며 자외선 투과율의 변화는 거의 없었다. 투명 렌즈의 경우는 하드 코팅은 75°C에서, 멀티 코팅과 미러 코팅은 50°C에서 부착력 약화가 나타났으며, 착색 렌즈에 비해 세부 표면 관찰시 박막 손상이 더 적은 것으로 나타났다. 경도는 하드 코팅의 경우 100°C에서, 멀티 코팅과 미러 코팅의 경우 75°C에서 10%p 이상의 손상이 나타났으며, 100°C에서의 경도 감소 폭은 착색 렌즈에 비해 적은 것으로 나타났다. 열 스트레스에 의한 투명 렌즈의 가시광선 투과율 변화 폭은 착색 렌즈에 비해 적었으며, 자외선 투과율의 변화는 없었다. 코팅 별 열 스트레스에 대한 안정성은 하드 코팅이 가장 컸으며, 부착력 검사 시 세부 표면 관찰에서는 미러 코팅의 손상이 가장 컸으나 경도 및 가시광선 투과율의 변화 정도는 멀티 코팅에서 가장 크게 나타났다.

본 연구에서는 다양한 고온 환경에 노출될 수 있는 착색 렌즈의 열 스트레스에 대한 안정성이 투명 렌즈에 비해 떨어진다는 것을 밝혔다. 또한 선행연구에서 밝힌 열 스트레스에 의한 착색 렌즈의 표면 및 성분 함량비 변화가 실제로 착색 렌즈 코팅막의 부착력 및 경도, 렌즈의 투과율과 같은 기능에도 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 그러나 본 연구는 사용한 적이 없는 착색 렌즈에 열 스트레스를 1회 준 상태에서의 코팅막 안정성을 규명한 것이며, 실생활에서 장기간 착용으로 인한 표면의 손상이 발생한 상태에 반복적인 열 스트레스가 가해질 경우 코팅막의 부착력이나 경도, 투과율의 변화는 더 크게 발생할 가능성이 있다. 따라서 반복적인 열 스트레스에 의한 착색 렌즈 코팅막의 손상 정도를 규명하고, 착색 렌즈에 대해 어느 정도의 코팅막 손상이 허용될 수 있을 지에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

REFERENCES

- [1] Korean Optometric Association. The consumption rate of eyeglass and contact lens in Korea, 2017. http://www.optic.or.kr/Cate_03/eOpticnews.asp?nmode=view&OnsSeq=3569&search_type=3(5 January 2018).
- [2] Moon BY, Hwang KJ, Lee YJ, Yu DS. Changes of the plastic lens properties caused by etching of the coating films. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2010;15(1):55-60.
- [3] Yu DS, Lee JH, Ha JW. Thermally curable organic-inorganic hybrid coatings on ophthalmic lenses by the sol-gel method. *J Korea Acad Industr Coop Soc.* 2006;7(3):465-470.
- [4] Park MC, Jung BY, Joo KB, Lee WJ, Moon HS, Hwangbo CK. A study of the optical constants of the hard-coating films by the ellipsometer. *Korean J Vis Sci.* 2006;8(2):37-44.
- [5] Samson F. Ophthalmic lens coatings. *Surf Coat Technol.* 1996;81(1):79-86.
- [6] Noh H. Changes of thin film coating on polymer lenses with varying temperature. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2014;19(1):1-8.
- [7] Yu DS. A study on the functional coating of plastics lenses. PhD Thesis. Soonchunhyang University, Asan. 2007;52-64.
- [8] Cho HG, Moon BY. Study on the changes of ophthalmic plastic lens due to heating. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2011;16(3):247-253.
- [9] Lee SS, Song JM, Kim SR, Park M. The changes in surface and composition ratio of coating films on colored spectacle lenses by thermal stress. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2018;23(2):73-84.
- [10] ASTM International. ASTM D3359-97: standard test methods for measuring adhesion by tape test, 1997. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D3359-97.htm> (5 January 2018).
- [11] Schmauder T, Nauenburg K, Kruse K, Ickes G. Hard coatings by plasma CVD on polycarbonate for automotive and optical applications, *Thin Solid Films.* 2006;502(1-2):270-274.
- [12] Nakayama M, Hayashi T. Synthesis of novel UV-curable difunctional thiourethane methacrylate and studies on organic-inorganic nanocomposite hard coatings for high refractive index plastic lenses. *Prog Org Coat.* 2008;62(3):274-284.
- [13] Kang HS. Glasses materials, 5th Ed. Seoul: Shinkwang-pub. 2010;257-273.
- [14] Kim KC, Anti-reflection coating technology based high refractive index lens with ultra-violet rays blocking function. *J Korea Acad Industr Coop Soc.* 2016;17(12):482-487.
- [15] Kang HS. Glasses materials, 5th Ed. Seoul: Shinkwang-pub. 2010;420-421.
- [16] Park MC, Jung BY, Hwangbo CK. Analysis and design of half-mirror coating for sunglasses. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2003;8(2):111-117.
- [17] Kim DH, Song KC, Chung JS, Lee BS. Preparation of hard coating solutions using colloidal silica and glycidoxypopyl trimethoxysilane by the sol-gel method. *Korean Chem Eng Res.* 2007;45(5):442-447.
- [18] Jeong SH, Cho KI, Park JY, Song KC. Photochromic properties of spiropyran in hard coating films made by sol-gel method. *Korean Chem Eng Res.* 2008;46(2):310-315.
- [19] Kuhr M, Bauer S, Rothhaar U, Wolff D. Coatings on plastics with the PICVD technology. *Thin Solid Films.* 2003;442(1-2):107-116.
- [20] Park MC, Jung BY. The analysis of the UV cut-off effect of tinted lens and the characteristic of UV tester. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2002;7(2):129-134.
- [21] Kim HS. The changes of visual acuity according to tinting concentrations of sunglasses lenses. *Korean J Vis Sci.* 2015;17(3):259-266.
- [22] Kim YG. The refractive index change for tinted time of CR-39 lens. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2000;5(2):151-155.

열 스트레스에 의한 착색 렌즈 코팅막의 특성 변화

이성실, 김진우, 김소라, 박미정*

서울과학기술대학교 안경광학과, 서울 01811

투고일(2018년 8월 6일), 수정일(2018년 9월 27일), 게재확정일(2018년 10월 11일)

목적: 본 연구에서는 각기 다른 코팅의 착색 렌즈가 열 스트레스에 노출되었을 때 코팅막의 특성 변화를 알아보고자 하였다. **방법:** 무 코팅, 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅된 아릴-디글리콜-카보네이트 소재의 투명 렌즈와 착색 렌즈를 4시간 동안 25, 50, 75, 100°C에 1회 노출시킨 후 표면부착력, 경도, 가시광선 투과율, 자외선 투과율을 측정하였다. **결과:** 하드 코팅된 투명 렌즈에서만 75°C에서 부착력 등급 감소가 나타났으며, 다른 코팅 상태의 투명 렌즈와 착색 렌즈에서는 50°C에서 모두 동일한 정도의 부착력 등급 감소가 나타났다. 그러나 세부 표면 관찰을 통해 동일한 부착력 등급이라도 착색 렌즈의 막 손상이 더 크게 나타나며, 미러 코팅의 손상이 가장 큰 것을 확인하였다. 착색 렌즈는 100°C에서 코팅에 따라 최대 32.9%p의 경도 감소가 나타난 반면, 투명 렌즈의 경우 하드 코팅은 100°C, 멀티 코팅과 미러 코팅은 75°C에서 10%p 이상의 경도 감소가 나타났다. 가시광선 투과율의 변화 폭은 크지 않았으나 착색 렌즈가 투명 렌즈에 비해 열스트레스 정도에 따른 변화가 상대적으로 더 컸다. 자외선 투과율은 모든 경우에서 변함이 없었다. **결론:** 열 스트레스에 의한 착색 렌즈 코팅막의 특성 변화는 투명 렌즈보다 더 크게 나타나며 1회의 열 스트레스만으로도 렌즈 코팅막의 유의한 변화가 발생됨을 밝혔다. 일상생활에서의 장기간 착용과 반복적인 열 스트레스로 인한 착색 렌즈 코팅막의 손상 정도에 대한 추가 연구와 허용 가능한 코팅막 손상 정도에 대한 기준 마련이 필요함을 제안한다.

주제어: 착색 렌즈, 열 스트레스, 하드 코팅, 멀티 코팅, 미러 코팅, 부착력, 경도, 가시광선 투과율, 자외선 투과율