

Analysis of Radiation Shielding Efficiency according to Color and Diopter Variation of Tinted Spectacle Lenses

Beom-Hee Han^{1,a}, Hye-Gyoung Chon^{1,b}, and Youngju An^{2,c,*}

¹Dept. of Radiological Science, Baekseok Culture University, Professor, Cheonan 31065, Korea

²Dept. of Optometry, Baekseok Culture University, Professor, Cheonan 31065, Korea

(Received February 11, 2026; Revised March 11, 2026; Accepted March 14, 2026)

Purpose: This study aimed to provide foundational data for protecting the crystalline lens during diagnostic radiological examinations by quantitatively analyzing the effects of lens color and refractive power in commercially available sunglass lenses on radiation shielding efficiency. **Methods:** Three lens colors (brown, gray, and yellow) were selected, each with three refractive powers: convex (+3.00 D), plano (0.00 D), and concave (-3.00 D). Radiation exposure conditions ranged from tube voltages of 40 to 120 kVp and tube current-time products of 10 to 32 mAs. Each condition was tested five times to calculate the mean and standard deviation of the dose (μGy), and shielding rates were comparatively analyzed. **Results:** A positive correlation was observed, with higher refractive power (more convex) leading to a stepwise improvement in shielding efficiency as central lens thickness increased. In the analysis by lens color, yellow lenses showed the highest shielding performance at the same power level, followed by brown lenses, which performed best in the low-energy range. This suggests that lens colorants contribute significantly to radiation attenuation. Furthermore, shielding efficiency exhibited an energy-dependent trend, with higher efficiency at lower tube voltages, whereas changes in tube current-time product (mAs) did not significantly affect the shielding rate. Multivariate analysis of variance (MANOVA) revealed a significant color \times tube voltage \times refractive power interaction, indicating that combinations of lens color and thickness enhance shielding performance within specific energy bands. **Conclusions:** This study demonstrates that everyday sunglass lenses can provide a degree of ocular protection in low-dose radiation environments and may serve as a cost-effective alternative to specialized protective eyewear.

Key words: Sunglasses lenses, Color, Diopter, Radiation shielding rate, Lens dose

서 론

현대 의학 및 산업 분야에서 방사선 기술의 활용이 보편화됨에 따라, 방사선 작업 종사자뿐만 아니라 일반 대중의 방사선 피폭 저감에 대한 사회적 관심이 증대되고 있다. 인체의 안구는 방사선 노출에 매우 취약한 조직으로, 특히 수정체는 저선량의 방사선 조사 환경에서도 전리 방사선의 생물학적 기전에 의해 수정체 혼탁이나 방사선 유발 백내장(radiation-induced cataract)이 발생할 수 있다.^[1-3] 방사선에 의한 수정체 손상은 주로 적도부(equator) 상 피세포의 유전적 변형에서 기인한다.^[4] Kleiman은 전리 방사선이 수정체 내 활성산소(ROS)의 불균형을 초래하여 단백질의 산화적 손상을 가속화하고, 이로 인해 수정체 섬유의 질서 정연한 구조가 파괴됨을 밝힌 바 있다.^[5] 이러한 생화학적 변화는 가시광선의 투과를 방해하는 혼탁을

형성하며, 이는 노인성 백내장과는 구별되는 특유의 후낭하 혼탁(posterior subcapsular opacity) 패턴을 보인다.^[5] 이에 국제방사선방호위원회(ICRP)는 수정체의 연간 등가선량 한도를 기존 150 mSv에서 20 mSv로 하향 조정하며 안구 보호의 시급성을 강조하였다.^[6,7]

일반적으로 안구 보호를 위해 납 안경(lead glasses)이 사용되지만, 과도한 무게와 불편한 착용감으로 인해 일상적인 환경이나 저선량 노출 상황에서의 활용도는 제한적이다. 이에 따라 최근에는 일반 광학 렌즈나 착색렌즈의 방사선 차폐 가능성이 대두되고 있다. 착색렌즈 렌즈는 자외선 차단 기능 외에도 렌즈를 구성하는 고분자 물질의 밀도와 첨가제에 따라 방사선 감쇠 효과를 나타낼 수 있다. 특히 렌즈의 색상은 빛의 투과율뿐만 아니라 화학적 조성의 밀도 변화를 야기하며, 도수(diopter)의 변화는 렌즈 중심부와 주변부의 두께 차이를 유발하여 방사선의 실

*Corresponding author: Youngju An, TEL: +82-41-550-2772, E-mail: yjan@bscu.ac.kr

Authors ORCID: ^ahttps://orcid.org/0009-0000-5732-4530, ^bhttps://orcid.org/0009-0007-7113-9041, ^chttps://orcid.org/0000-0003-1084-6395

질적인 투과 경로에 영향을 미친다.^[8] Koukorava 등은 전문 방호구 뿐만 아니라 일반 생활 안경 또한 유의미한 수준의 수정체 선량 저감 효과가 있음을 보고하였다.^[9] 특히 납이 함유되지 않은 플라스틱 및 유리 렌즈도 전면 입사 방사선에 대해 약 45%에서 70% 사이의 선량 감소 효과를 보였으며, 이는 렌즈의 기하학적 구조와 두께가 차폐 효율을 결정하는 핵심 요인임을 시사한다.^[9]

실제 방사선 감쇠 효율은 물질의 밀도뿐만 아니라 구성 원소의 실효원자번호(effective atomic number)에 밀접하게 의존한다.^[10] 착색렌즈의 고굴절 소재(high-index)나 착색에 사용되는 유기·무기 화합물 내의 황(S) 또는 중금속 기반 첨가제는 렌즈의 감쇠계수를 높여,^[11,12] 광전효과(photoelectric effect)를 통한 저에너지 X선의 흡수 확률을 증대시키는 주요 변수로 작용할 수 있다. 중재 시술 및 산업 현장에서 발생하는 안구 피폭의 주원인은 저에너지 대역의 산란 방사선이다. 에너지 대역이 낮을수록 물질의 감쇠계수는 급격히 증가하므로, 비납계(non-lead) 고분자 렌즈라 할지라도 저에너지 산란선에 대해서는 어느 정도 방호역할을 수행할 수 있다.^[13] 또한 착색렌즈의 기능성 코팅과 착색제는 단순한 광학적 차단을 넘어 렌즈 내부의 물리적 밀도 경계를 재구성함으로써, 광자와 물질 간의 상호작용 확률을 변화시키는 기제로 작용한다.^[14] 그럼에도 불구하고 기존 연구들은 주로 전문 방호구의 성능 평가에 국한되어 왔다.

이에 본 연구에서는 착색렌즈의 재질적 특성인 색상과 구조적 특성인 도수를 복합 변인으로 설정하여 방사선 차폐 효율(shielding efficiency)에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 또한 에너지 대역(kVp) 변화와 방사선량에 따른 차폐 효율의 종속성을 함께 검토함으로써 일상적인 착색렌즈의 방사선 방호 성능을 객관적으로 평가하고, 향후 기능성 안구 보호구 개발을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

대상 및 방법

1. 실험대상

본 연구에서는 선글라스 제조에 흔히 쓰이는 고굴절 티오우레탄(thiourethane) 수지 기반의 굴절률 1.60인 유기 렌즈를 시료로 선정하였다. 실험 변인 통제를 위한 군 분류는 다음과 같다. 첫째, 렌즈의 색상 변인을 설정하기 위해 착색농도 85%의 brown, gray, yellow 3가지 렌즈를 준비하였다. 착색제는 황(S) 화합물이 함유된 유기 분산 염료를 사용하여 렌즈 매트릭스 내부로 침투시킨 방식을 채택하였다. 둘째, 렌즈 두께 변인은 동일 굴절률 소재의 볼록렌즈(+3.00 D, 3.80 mm), 평면렌즈(0.00 D, 1.90 mm), 오

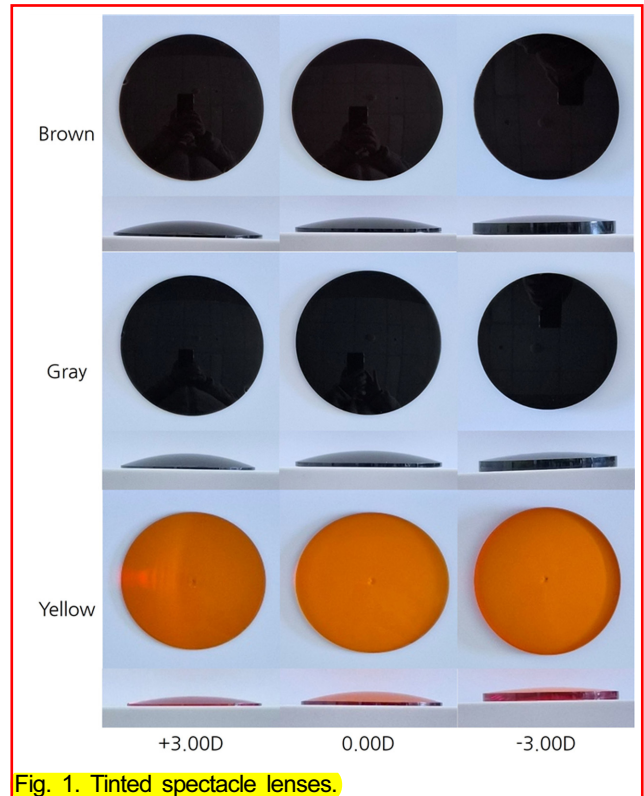


Fig. 1. Tinted spectacle lenses.

목렌즈(-3.00 D, 1.15 mm)로 구성하였다(Fig. 1).

2. 측정장비

본 연구에서는 착색렌즈의 방사선 차폐 효율을 분석하기 위해 진단용 X선 발생 장치(diagnostic X-ray generator)를 방사선원으로 사용하였다(Fig. 2). 특히 의료 종사자의 실제 피폭 환경을 정밀하게 재현하고자 관전압을 40 kVp에서 120 kVp까지 가변하며 조사 조건을 설정하였다.

렌즈 투과 전후의 미세 선량 변화를 정밀 측정하기 위해 독일 IBA Dosimetry사의 Magicmax Universal 측정기를 사용하였다(Fig. 3). 해당 장비는 국제원자력기구(IAEA) 산하



Fig. 2. Diagnostic x-ray generator.

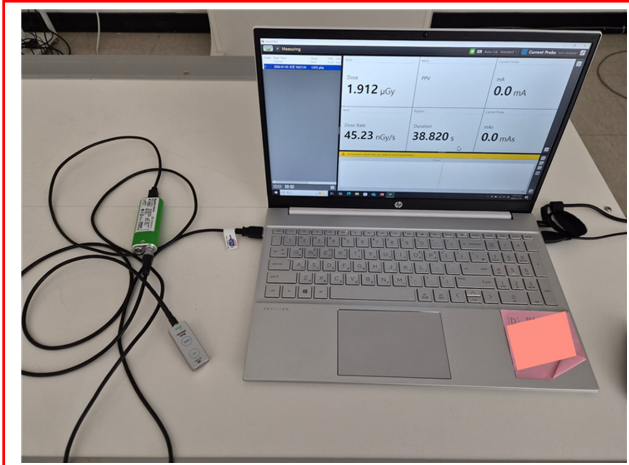


Fig. 3. MagicMaX universal x-ray meter.

이차표준선량계측기관(SSDL)으로 등록된 IBA Calibration Lab에서 검교정을 완료하여 데이터의 대외적 신뢰도를 확보하였다. 또한, 실험 시 산란선(scattered radiation)에 의한 측정 오차를 최소화하기 위해 콜리메이터(collimator)를 이용하여 조사야를 최대한 좁게 조정하였다.

3. 연구방법

방사선 감쇠는 매질의 원자번호, 밀도 및 두께에 비례하므로, 정확한 차폐 효율 분석을 위해 렌즈의 물리량을 정밀하게 산출하였다. 렌즈의 두께는 디지털 마이크로미터를 사용하여 렌즈의 광학적 중심점(optical center)을 각각 측정하였다. 방사선 조사 및 선량 측정은 표준 기하학적 배치를 준수하여 수행하였다(Fig. 4).

FDD(focus-to-detector distance)는 100 cm, 조사야(field size)는 10 cm×10 cm로 설정하였으며, 입사선량(I₀)은 시료를 거치지 않은 상태에서 검출기에 도달하는 표준 선량으로 정의하였다. 투과선량(I) 측정은 조사구와 검출기 사이에 시료를 수직으로 거치한 후 수행되었으며, 관전류량(mAs)을 10, 20, 32 mAs로 고정한 상태에서 각각의 투과



Fig. 4. Experimental method.

선량을 측정하였다. 모든 실험은 각 착색 농도 및 도수별로 관전압(kVp)을 40~120 kVp로 변화시키며 총 5회 이상 반복 측정하여 평균값을 도출하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 렌즈의 방사선 차폐율을 다음과 같이 산출하였다.

$$\text{방사선 차폐율(\%)} = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100 \quad \text{Eq.(1)}$$

I₀: 입사선량

I: 투과선량

특히 렌즈 재료의 방사선 저지 능력을 수치화하기 위해 램베르트-베르 법칙(Beer-Lambert law)을 적용한 선감쇠계수(linear attenuation coefficient, μ)를 산출하였다.^[15]

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{Eq.(2)}$$

I₀: 입사선량

I: 투과선량

x: 렌즈의 두께

4. 통계처리

본 연구에서 수집된 모든 데이터는 SPSS 23.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 통계 프로그램을 사용하여 분석하였다. 각 측정치는 평균±표준편차(Mean±SD)로 나타내었으며, 렌즈의 도수 변화에 따른 방사선 차폐 효율의 유의미한 차이를 검증하기 위해 독립표본 t-검정(Independent t-test) 및 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 실시하고 사후 검정(Tukey HSD)으로 집단 간의 차이를 분석하였다. 모든 통계적 데이터의 유의수준은 0.05 미만일 경우 통계적으로 유의한 것으로 간주하였다.

결 과

1. 착색렌즈의 색상 및 도수에 따른 방사선 차폐율

1.1. Brown 착색렌즈(+3.00 D, 0.00 D, -3.00 D)

Brown 착색렌즈의 광학적 중심점(optical center)에서 측정된 방사선 차폐율을 살펴보면 모든 조사 조건에서 렌즈 두께가 가장 두꺼운 +3.00 D(3.80 mm) 렌즈가 가장 높은 차폐 효율을 보였다. 구체적으로 32 mAs, 40 kVp 조건에서 +3.00 D 렌즈의 차폐율은 41.65%로 가장 높게 측정되었으며, 32 mAs, 120 kVp 조건에서 -3.00 D 렌즈의 차폐율은 14.17%로 가장 낮게 측정되었다.

에너지 강도(kVp)에 따른 영향을 분석한 결과, 관전압(kVp)이 증가함에 따라 모든 굴절력에서 차폐율이 감소하는 경향이 확인되었다. +3.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 40.97~41.65%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 23.00~24.30% 수준으로 급격히 저하되었다. 0.00 D 렌즈의 경우,

40 kVp에서 약 27.82~28.63%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 15.22~16.25% 수준으로 저하되었다. -3.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 19.59~20.14%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 14.17~14.76% 수준으로 저하되었다. 렌즈 재질의 방사선 저지 능력을 나타내는 물리적 지표인 선감쇠계수(μ)를 산출하여 분석한 결과, 방사선 차폐율이 높게 나타난 저에너지 영역(40 kVp)과 중심부 두께가 두꺼울수록 선감쇠계수(μ) 값이 높게 형성되는 경향을 보였다.

모든 에너지 대역에서 굴절력별 그룹 간 차폐율은 통계적으로 매우 유의한 차이를 보였다($p < 0.001$). 관전류량의 증가보다 관전압의 변화가 차폐율에 더 민감하게 작용하는 것으로 나타났고, 일원배치 분산분석 결과에서도 굴절력이 차폐율에 미치는 효과는 통계적으로 유의하였으며($p < 0.001$), 사후 검정(Tukey)을 통해 모든 집단 간의 유의미한 평균 차이를 확인하였다. 특히 저에너지 대역(40

kVp)에서 +3.00 D와 0.00 D 간의 차폐율 차이가 10 mAs에서 13.15%, 20 mAs에서 12.96%, 32 mAs에서 13.01%로 가장 뚜렷하게 나타났으며, 관전압이 증가함에 따라 집단 간 편차는 점진적으로 감소하는 경향을 보였으나 통계적 유의성은 모든 대역에서 유지되었다.

방사선량(mAs)에 따른 영향을 분석한 결과, 조사량(mAs)을 10, 20, 32 mAs로 변화시켰을 때, 동일한 kVp 조건 하에서의 차폐율 변화는 미미하였으며 일정한 수준을 유지하였다(Table 1).

1.2. Gray 착색렌즈(+3.00 D, 0.00 D, -3.00 D)

Gray 착색렌즈의 광학적 중심점(optical center)에서 측정된 방사선 차폐율을 살펴보면 모든 조사 조건에서 중심 두께가 가장 두꺼운 +3.00 D(3.80 mm) 렌즈가 가장 높은 차폐 성능을 나타냈다. 구체적으로 32 mAs, 40 kVp 조건

Table 1. Radiation shielding rate at the optical center of brown-tinted spectacle lenses

mAs	kVp	None (μ Gy)	+3.00 D (3.80 mm)			0.00 D (1.90 mm)			-3.00 D (1.15 mm)			t	F
			Dose (μ Gy)	Shielding Rate ^a (%)	μ	Dose (μ Gy)	Shielding Rate ^b (%)	μ	Dose (μ Gy)	Shielding Rate ^c (%)	μ		
10	40	73.83±0.18	43.58±0.20	40.97	-0.81	53.29±0.10	27.82	-0.32	58.96±0.18	20.14	0.09	a>b*** b>c***	12.18 p***
	60	200.16±0.40	137.70±0.30	31.21	-0.96	154.92±0.31	22.60	-0.39	163.56±0.76	18.29	0.06	a>b*** b>c***	
	80	424.10±0.92	304.04±1.10	28.31	-1.00	340.26±0.82	19.77	-0.42	351.78±2.19	17.05	0.05	a>b*** b>c***	
	100	756.54±1.68	554.06±0.46	26.76	-1.02	627.76±0.79	17.02	-0.46	637.64±0.79	15.72	0.03	a>b*** b>c***	
	120	1075.00±1.58	813.78±2.12	24.30	-1.06	907.84±1.39	15.55	-0.47	916.32±1.66	14.76	0.02	a>b*** b>c***	
20	40	144.38±0.19	84.54±0.15	41.44	-0.80	103.26±0.23	28.48	-0.31	116.10±0.29	19.59	0.08	a>b*** b>c***	12.42 p***
	60	417.90±0.96	288.14±0.39	31.05	-0.96	322.44±0.52	22.84	-0.38	343.90±0.82	17.71	0.06	a>b*** b>c***	
	80	897.24±1.90	649.24±0.22	27.64	-1.01	717.92±0.64	19.99	-0.42	752.48±1.29	16.13	0.04	a>b*** b>c***	
	100	1555.60±1.34	1146.80±0.84	26.28	-1.03	1282.20±1.10	17.58	-0.45	1318.00±0.71	15.27	0.03	a>b*** b>c***	
	120	2201.60±2.70	1676.40±1.14	23.86	-1.06	1855.00±2.35	15.74	-0.47	1885.00±0.71	14.38	0.02	a>b*** b>c***	
32	40	236.04±0.57	137.74±0.11	41.65	-0.80	168.46±0.15	28.63	-0.30	189.44±0.26	19.74	0.08	a>b*** b>c***	18.64 p***
	60	708.28±1.75	488.98±0.87	30.96	-0.96	544.34±0.89	23.15	-0.38	583.00±0.81	17.69	0.05	a>b*** b>c***	
	80	1472.60±0.89	1070.00±0.71	27.34	-1.02	1173.40±1.67	20.32	-0.41	1235.60±2.07	16.09	0.04	a>b*** b>c***	
	100	2498.20±2.77	1858.40±1.67	25.61	-1.04	2053.80±0.84	17.79	-0.45	2121.80±1.48	15.07	0.02	a>b*** b>c***	
	120	3535.40±2.97	2722.40±3.05	23.00	-1.07	2960.80±2.68	16.25	-0.46	3034.60±1.82	14.17	0.01	a>b*** b>c***	

One-way ANOVA followed by Tukey's post-hoc test
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

에서 +3.00 D 렌즈의 차폐율은 38.98%로 가장 높게 측정되었으며, 20 mAs, 120 kVp 조건에서 -3.00 D 렌즈의 차폐율은 13.42%로 가장 낮게 측정되었다.

에너지 강도(kVp)에 따른 영향을 분석한 결과, 관전압(kVp)이 증가함에 따라 모든 굴절력에서 차폐율이 감소하는 경향이 확인되었다. 특히 +3.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 38.66~38.98%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 23.56~25.06% 수준으로 저하되었다. 0.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 25.12~25.65%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 16.90~17.27% 수준으로 저하되었다. -3.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 19.40~22.48%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 13.42~14.07% 수준으로 저하되었다. 차폐율이 높은 +3.00 D 렌즈와 저에너지(40 kVp) 영역에서 선감쇠계수(μ)의 절대값이 크게 나타났다.

모든 에너지 대역에서 굴절력별 그룹 간 차폐율은 통계

적으로 매우 유의미한 차이를 보였다($p<0.05$). 하지만 조사량(mAs)을 10, 20, 32 mAs로 점진적으로 증가시켰을 때, 동일한 관전압(kVp) 조건하에서 측정된 각 렌즈의 차폐율은 거의 일정하게 유지되었다(Table 2).

1.3. Yellow 착색렌즈(+3.00 D, 0.00 D, -3.00 D)

Yellow 착색렌즈의 광학적 중심점(optical center)에서 측정된 방사선 차폐율을 살펴보면 중심 두께가 가장 두꺼운 +3.00 D(3.80 mm) 렌즈가 모든 조건에서 가장 높은 차폐효율을 나타냈다. 구체적으로 32 mAs, 40 kVp 조건에서 +3.00 D 렌즈의 차폐율은 40.87%로 가장 높게 측정되었으며, 32 mAs, 40 kVp 조건에서 -3.00 D 렌즈의 차폐율은 17.47%로 가장 낮게 측정되었다.

에너지 강도(kVp)에 따른 영향을 분석한 결과, 관전압(kVp)이 40 kVp에서 120 kVp로 증가함에 따라 모든 굴절

Table 2. Radiation shielding rate at the optical center of gray-tinted spectacle lenses

mAs	kVp	None (μ Gy)	+3.00 D (3.80 mm)			0.00 D (1.90 mm)			-3.00 D (1.15 mm)			t	F
			Dose (μ Gy)	Shielding Rate ^a (%)	μ	Dose (μ Gy)	Shielding Rate ^b (%)	μ	Dose (μ Gy)	Shielding Rate ^c (%)	μ		
10	40	73.83±0.18	45.28±0.20	38.66	-0.85	55.29±1.45	25.12	-0.35	59.50±0.13	19.40	0.08	a>b*** b>c***	14.82 p***
	60	200.16±0.40	135.36±0.70	32.37	-0.94	155.54±0.30	22.29	-0.39	165.14±0.42	17.50	0.05	a>b*** b>c***	
	80	424.10±0.92	298.18±1.27	29.69	-0.98	336.04±0.56	20.76	-0.41	354.18±0.27	16.49	0.04	a>b*** b>c***	
	100	756.54±1.68	550.92±1.16	27.18	-1.02	614.06±0.94	18.83	-0.43	642.84±0.99	15.03	0.02	a>b*** b>c***	
	120	1075.00±1.58	805.58±1.58	25.06	-1.05	889.34±1.28	17.27	-0.45	928.12±0.63	13.66	0.01	a>b*** b>c***	
20	40	144.38±0.19	88.39±0.11	38.78	-0.84	107.70±0.20	25.41	-0.35	111.92±3.68	22.48	0.11	a>b*** b>c**	13.54 p***
	60	417.90±0.96	278.96±0.72	33.25	-0.93	325.54±0.52	22.10	-0.39	349.22±0.27	16.43	0.04	a>b*** b>c**	
	80	897.24±1.90	636.80±0.61	29.03	-0.99	716.82±0.75	20.11	-0.42	755.58±0.69	15.79	0.03	a>b*** b>c***	
	100	1555.60±1.34	1144.60±0.55	26.42	-1.03	1266.40±2.19	18.59	-0.44	1328.80±1.10	14.58	0.02	a>b*** b>c**	
	120	2201.60±2.70	1670.20±1.30	24.14	-1.06	1829.00±1.87	16.92	-0.46	1906.20±2.77	13.42	0.00	a>b*** b>c**	
32	40	236.04±0.57	144.04±0.36	38.98	-0.84	175.50±0.12	25.65	-0.35	189.42±0.80	19.74	0.08	a>b*** b>c***	16.84 p***
	60	708.28±1.75	475.34±0.86	32.89	-0.94	551.00±0.48	22.21	-0.39	586.04±0.51	17.26	0.05	a>b*** b>c***	
	80	1472.60±0.89	1053.40±0.89	28.47	-1.00	1178.60±0.55	19.96	-0.42	1237.00±0.71	16.00	0.03	a>b*** b>c***	
	100	2498.20±2.77	1856.40±1.14	25.69	-1.04	2039.80±2.77	18.35	-0.44	2122.60±1.82	15.03	0.02	a>b*** b>c***	
	120	3535.40±2.97	2702.60±0.89	23.56	-1.07	2937.80±2.17	16.90	-0.46	3038.00±1.00	14.07	0.01	a>b*** b>c**	

One-way ANOVA followed by Tukey's post-hoc test
* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$

력에서 차폐 효율은 점진적으로 감소하였다. 특히 +3.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 40.01~40.87%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 24.40~25.56% 수준으로 저하되는 양상을 보였다. 0.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 29.01~29.32%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 19.79~20.26% 수준으로 저하되는 양상을 보였다. -3.00 D 렌즈의 경우, 40 kVp에서 약 23.83~24.28%였던 차폐율이 120 kVp에서는 약 17.47~17.88 % 수준으로 저하되는 양상을 보였다.

모든 에너지 대역에서 굴절력별 그룹 간 차폐율은 통계적으로 매우 유의미한 차이를 보였다($p < 0.001$). 하지만 방사선량(mAs)에 따른 변화는 각 렌즈의 차폐율(%) 자체에는 유의미한 변화를 주지 않았다. 동일한 kVp 조건 내에서 mAs를 증가시켜도 차폐율의 변동폭은 1% 내외로 매우 적었으며, 이는 차폐 효율이 방사선의 양적 요소보다는 에너지의 질적 요소(kVp)와 물질의 두께에 의해 결정됨을

시사한다(Table 3).

1.4. 착색렌즈의 모든 실험군 데이터를 통합한 분석

본 연구에서 사용된 모든 실험 변인(색상, kVp, mAs, 굴절력)이 방사선 차폐율에 미치는 복합적 영향을 규명하기 위해 다차원 분산분석한 결과, 굴절력($F=3854.12, p < 0.001$)과 관전압($F=2145.67, p < 0.001$)이 차폐율에 대하여 극히 유의미한 효과를 나타냈으며, 렌즈 색상 또한 유의미한 효과($F=185.34, p < 0.001$)를 보였다. 특히 ‘색상×관전압×굴절력’의 3차 상호작용이 통계적으로 유의하게 나타났는데 ($p < 0.001$), 이는 렌즈의 착색 성분이 에너지 강도에 따른 굴절력별 차폐 효율의 변화 양상에 유의미하게 개입하고 있음을 보여준다. 반면, 관전류량(mAs)은 단독 효과 및 타 변인들과의 모든 상호작용에서 통계적 유의성이 나타나지 않았다($p > 0.05$). 이는 진단방사선 영역에서 선량의 강도를

Table 3. Radiation shielding rate at the optical center of yellow-tinted spectacle lenses

mAs	kVp	None (μGy)	+3.00 D (3.80 mm)			0.00 D (1.90 mm)			-3.00 D (1.15 mm)			t	F
			Dose (μGy)	Shielding Rate ^a (%)	μ	Dose (μGy)	Shielding Rate ^b (%)	μ	Dose (μGy)	Shielding Rate ^c (%)	μ		
10	40	73.83±0.18	44.29±0.19	40.01	-0.82	52.41±0.16	29.02	-0.30	56.24±0.16	23.83	0.13	a>b ^{***} b>c ^{***}	14.12 p ^{***}
	60	200.16±0.40	132.02±0.28	34.04	-0.92	148.20±0.33	25.96	-0.34	155.58±0.43	22.27	0.11	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	80	424.10±0.92	294.34±0.63	30.60	-0.97	321.58±0.41	24.17	-0.37	335.34±1.43	20.93	0.10	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	100	756.54±1.68	547.92±0.79	27.58	-1.01	589.30±1.09	22.11	-0.39	607.12±0.86	19.75	0.08	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	120	1075.00±1.58	800.28±1.73	25.56	-1.04	857.16±1.09	20.26	-0.42	882.82±3.58	17.88	0.06	a>b ^{***} b>c ^{***}	
20	40	144.38±0.19	85.93±0.18	40.48	-0.82	102.50±0.30	29.01	-0.30	109.92±0.24	23.87	0.13	a>b ^{***} b>c ^{***}	15.24 p ^{***}
	60	417.90±0.96	275.48±0.28	34.08	-0.92	309.08±0.37	26.04	-0.34	324.54±0.84	22.34	0.11	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	80	897.24±1.90	627.94±2.21	30.01	-0.98	687.32±1.20	23.40	-0.38	713.36±0.82	20.49	0.09	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	100	1555.60±1.34	1132.80±1.10	27.18	-1.02	1218.20±1.10	21.69	-0.40	1254.80±1.30	19.34	0.08	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	120	2201.60±2.70	1655.40±1.95	24.81	-1.05	1765.60±2.07	19.80	-0.42	1811.20±0.84	17.73	0.06	a>b ^{***} b>c ^{***}	
32	40	236.04±0.57	139.58±0.37	40.87	-0.81	166.84±0.65	29.32	-0.29	178.74±0.38	24.28	0.14	a>b ^{***} b>c ^{***}	15.84 p ^{***}
	60	708.28±1.75	467.36±0.34	34.01	-0.92	522.50±1.87	26.23	-0.34	549.84±0.52	22.37	0.11	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	80	1472.60±0.89	1033.40±1.52	29.82	-0.98	1127.60±0.89	23.43	-0.37	1173.20±0.84	20.33	0.09	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	100	2498.20±2.77	1829.00±0.71	26.79	-1.02	1963.20±3.56	21.42	-0.40	2025.60±1.34	18.92	0.07	a>b ^{***} b>c ^{***}	
	120	3535.40±2.97	2672.60±1.34	24.40	-1.06	2835.80±1.79	19.79	-0.42	2917.80±1.92	17.47	0.05	a>b ^{***} b>c ^{***}	

One-way ANOVA followed by Tukey’s post-hoc test
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Table 4. Multivariate analysis of radiation shielding rate in tinted spectacle lenses

Source	df	F	p	η^2
Diopter	2	3854.12	$p < 0.001$	0.912
Color	2	185.34	$p < 0.001$	0.864
kVp	4	2145.67	$p < 0.001$	0.245
mAs	2	1.05	$p < 0.352$	0.002
Color×kVp×Diopter	16	12.45	$p < 0.001$	0.084
Color×mAs×Diopter	8	0.54	$p < 0.824$	0.001
Corrected Model	161	142.189	$p < 0.001$	0.958

df: degrees of freedom, η^2 : effect size

결정하는 mAs의 변화가 렌즈의 고유한 물리적 차폐율(%)에는 영향을 미치지 않음을 시사한다.

결론적으로 차폐 성능의 극대화를 위해서는 관전류량의 조절보다는 에너지 대역(kVp)에 적합한 굴절력(power)의 선택과 렌즈 색상(color)의 조합이 우선적으로 고려되어야 함을 통계적으로 입증하였다(Table 4).

2. 착색렌즈 굴절력에 따른 색상별 렌즈 중심점의 방사선 차폐 효율 비교 분석

2.1. 원시용 볼록렌즈(+3.00 D)

+3.00 D 렌즈의 색상별 방사선 차폐 효율을 분석한 결과, 차폐 성능은 관전류량(mAs)보다 관전압(kVp) 변화에 대해 높은 상관관계를 보였다. 모든 시료에서 관전압이 40 kVp에서 차폐 지수는 평균 약 40.20%, 120 kVp에서 차폐 지수는 평균 약 24.30%으로 나타나(표로 제시하지 않음), 방사선 에너지 강도에 따른 에너지 의존적 감쇠 특성이 뚜렷하게 나타났다. 반면, 동일 전압 내에서 관전류량을 10 mAs에서 32 mAs로 증가했을 때의 효율 변화는 2.00% 미만으로 파악되어 차폐 효율에 미치는 영향은 제한적임을 확인하였다.

렌즈 색상에 따른 비교 분석 결과, 저에너지 대역(40 kVp)에서는 brown 색상이 가장 높은 수치(최대 41.65%)를 기록하며 초기 차폐 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 그러나 60 kVp 이상의 중·고에너지 영역으로 진입 하면서 brown과 gray의 효율은 급격히 감소한 반면, yellow 색상은 상대적으로 완만한 감쇠 곡선을 그리며 전 구간에서 가장 높은 잔존 효율(120 kVp 기준 24.40~25.56%)을 유지하여 에너지 투과 및 감쇠 억제 측면에서 가장 효과적임이 증명되었다(Fig. 5).

2.2. 평면 렌즈(0.00 D)

0.00 D 렌즈의 색상별 방사선 차폐 효율을 분석한 결과, 모든 렌즈에서 관전압(kVp) 증가에 따라 차폐 효율이 유

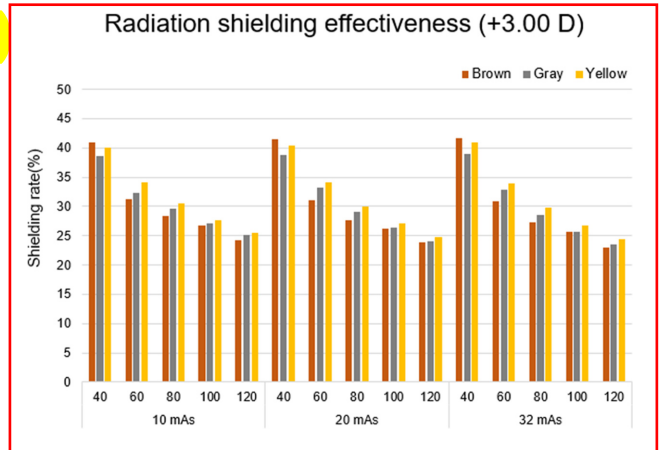


Fig. 5. Radiation shielding effectiveness by lens color at +3.00 D conditions.

의미하게 감소하는 에너지 의존적 경향이 확인되었다. 특히 40 kVp에서 평균 27.61%, 120 kVp에서 평균 17.61%로 관전압이 상승함에 따라 차폐율은 뚜렷한 감쇠 특성을 보였다(표로 제시하지 않음). 반면, 관전류량(10, 20, 32 mAs) 변화에 따른 차폐율 변동폭은 1.00% 내외로 산출되어, 관전류량의 증가는 차폐 효율 결정에 지배적인 요인이 아님이 증명되었다.

색상별 차폐 성능을 비교한 결과, 저에너지 영역(40 kVp)에서 yellow 색상이 평균 29.12%로 가장 높은 차폐율을 나타냈으며, brown(28.31%), gray(25.39%) 순으로 그 뒤를 이었다. 60 kVp 이상의 중·고에너지 영역에서도 yellow 색상은 타 색상 대비 압도적으로 우수한 차폐 유지력을 보였다. 구체적으로 120 kVp 조건에서 yellow는 약 19.95%의 효율을 유지한 반면, gray(17.03%)와 brown(15.85%)은 상대적으로 가파른 감소율을 기록하며 낮은 수치를 나타냈다.

결론적으로 0.00 D 조건 하에서 Yellow 색상 렌즈는 전 에너지 대역(full energy range)에서 가장 우수한 차폐 성능을 보였으며, 에너지 대역이 상승할수록 Brown과 Gray

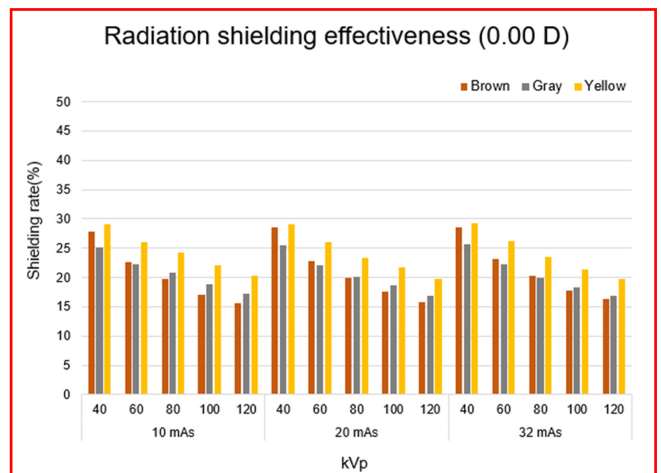


Fig. 6. Radiation shielding effectiveness by lens color at 0.00 D conditions.

렌즈의 성능 저하 폭이 Yellow에 비해 상대적으로 더 크게 발생하는 것으로 분석되었다(Fig. 6).

2.3. 근시용 오목렌즈(-3.00 D)

-3.00 D 렌즈의 색상별 방사선 차폐 효율을 분석한 결과, 타 D 조건(+3.00 D, 0.00 D)과 마찬가지로 관전압(kVp) 증가에 따른 뚜렷한 차폐 성능의 감소가 확인되었다. 40 kVp에서 평균 21.45%, 120 kVp에서 평균 15.28%로 관전압이 상승함에 따라 차폐율은 감소하였다(표로 제시하지 않음). 한편, 관전류량(mAs)의 변화에 따른 효율 변동은 매우 미미하여, 강한 에너지 대역에서의 차폐 성능은 주로 관전압에 의해 결정됨을 재확인하였다.

색상별 비교 분석 결과는 다음과 같다. 전 구간 yellow 색상의 우세로 나타났으며, -3.00 D 조건에서는 저에너지(40 kVp)부터 고에너지(120 kVp)에 이르기까지 yellow 색상이 가장 높은 차폐 효율을 기록하였다. 40 kVp에서 yellow는 평균 24.13%의 수치를 보였으며, 이는 동일 조건의 brown(19.82%), Gray(20.54%) 대비 약 17.00~21.00% 높은 효율이다.

에너지 감쇠 민감도를 살펴보면, 고전압(120 kVp) 구간에서 yellow는 평균 17.69%의 수치를 유지하며 차폐율을 최소화했으나, gray(13.71%)와 brown(14.43%)은 상대적으로 낮은 차폐율을 보였다. 특히 gray 색상은 관전압 증가에 따른 성능 저하가 가장 두드러지게 나타나 고에너지 영역에서 가장 낮은 차폐율을 보였다.

결론적으로 -3.00 D 환경에서 yellow 색상 렌즈는 에너지 전 대역에서 가장 안정적이고 우수한 차폐 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 이는 렌즈의 굴절률이 음의 방향으로 커질수록(매질의 물리적 두께나 형상이 변화함에 따라) yellow 색상이 가진 방사선 투과 및 흡수 특성이 타 색상에 비해 환경 변화에 더 강인하게(robustness) 작용하고 있음을 시사한다(Fig. 7).

3. 착색렌즈에 따른 굴절력별 렌즈 중심점의 방사선 차폐 효율 비교 분석

3.1. Brown 착색렌즈

Brown 착색렌즈의 굴절력(+3.00 D, 0.00 D, -3.00 D) 변화에 따른 방사선 차폐 효율을 관전압(kVp)과 관전류량(mAs)의 변화에 따라 분석한 결과, 모든 조사 조건에서 렌즈의 굴절력이 음(-)에서 양(+)의 방향으로 높아질수록 방사선 차폐 효율은 유의미하게 증가하는 양상을 보였다. 저에너지 영역(40 kVp, 10 mAs) 기준, +3.00 D에서 40.97%로 가장 높은 차폐 성능을 기록하였으며, 0.00 D에서 27.82%, -3.00 D에서 20.14%로 굴절력이 낮아짐에 따라 차폐율이 급격히 감소하였다. 고에너지 영역(120 kVp, 32 mAs) 기

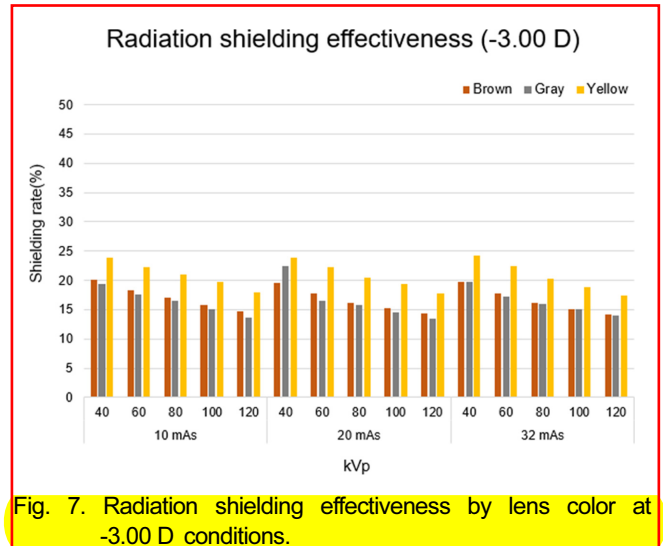


Fig. 7. Radiation shielding effectiveness by lens color at -3.00 D conditions.

준, +3.00 D에서 41.65%로 가장 높은 차폐 성능을 기록하였으며, 0.00 D에서 28.63%, -3.00 D에서 19.74%로 굴절력이 낮아짐에 따라 차폐율이 감소하였다. 관전압(kVp) 증가에 따른 차폐 효율의 에너지 의존성을 살펴보면, 관전압이 40 kVp에서 120 kVp로 증가함에 따라 모든 굴절력 조건에서 차폐 효율은 에너지 의존적으로 감소하였다. +3.00 D 조건의 경우, 관전압 상승에 따라 차폐율은 40.97%에서 24.3%으로 약 40.70% 감소하며 가장 큰 변동 폭을 보였다. 0.00 D 조건의 경우, 27.82%에서 15.55%로 약 44.10% 감소하여 관전압 변화에 가장 민감하게 반응하였다. -3.00 D 조건의 경우, 20.14%에서 14.76%으로 약 26.70% 감소하였다.

관전류량을 10 mAs에서 32 mAs로 상향 조정하며 분석한 결과, 동일 관전압 내에서의 신호 강도 변화는 1.50% 미만의 미미한 수준으로 산출되었다.

결과적으로 brown 착색렌즈는 굴절력이 높을수록 방사선 차폐 성능이 강화되는 특성을 보이며, 특히 +3.00 D 조건에서 저전압 대역의 방사선을 차단하는 데 가장 탁월한 성능을 발휘하였다. 반면, 음의 굴절력(-3.00 D) 환경은 전 구간에서 상대적으로 낮은 차폐 효율을 보이나, 고전압으로 갈수록 발생하는 차폐 성능의 소실 폭은 가장 적어 에너지 변화에 대해 높은 강인함(robustness)을 나타냈다(Fig. 8).

3.2. Gray 착색렌즈

Gray 착색렌즈의 굴절력(+3.00 D, 0.00 D, -3.00 D) 변화에 따른 방사선 차폐 효율을 관전압(kVp)과 관전류량(mAs)의 변화에 따라 분석한 결과, 모든 조사 조건에서 Gray 착색렌즈의 굴절력이 음(-)에서 양(+)의 방향으로 높아질수록 방사선 차폐율은 유의미하게 증가하는 양상을 보였다. 저에너지 영역(40 kVp, 10 mAs)을 기준으로 분석

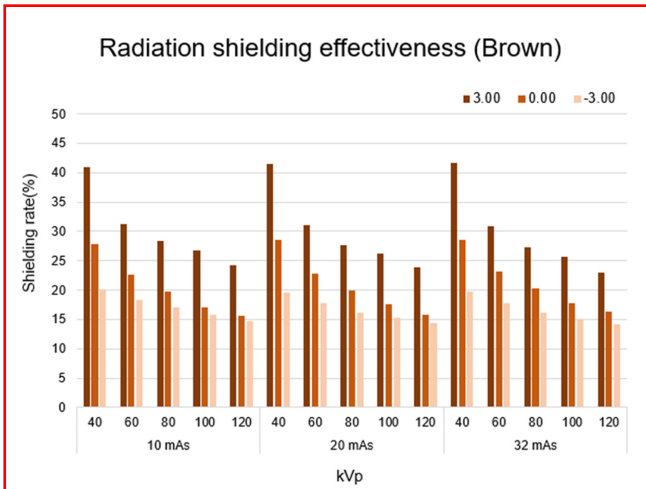


Fig. 8. Radiation shielding effectiveness by diopter for brown-tinted spectacle lenses.

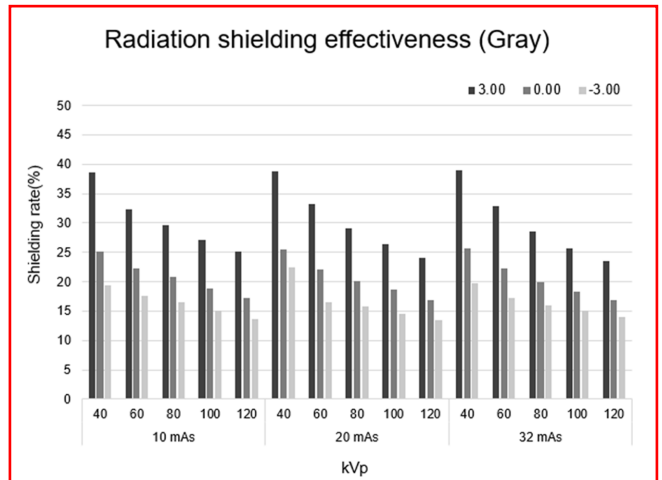


Fig. 9. Radiation shielding effectiveness by diopter for gray-tinted spectacle lenses.

한 결과, +3.00 D에서 38.66%로 가장 높은 차폐 성능을 기록하였으며, 0.00 D에서 25.12%, -3.00 D에서 19.40%로 굴절력이 낮아짐에 따라 차폐율이 선형적으로 감소하는 것이 확인되었다. 고에너지 영역(120 kVp, 32 mAs) 기준, +3.00 D에서 38.98%로 가장 높은 차폐 성능을 기록하였으며, 0.00 D에서 25.65%, -3.00 D에서 19.74%로 굴절력이 낮아짐에 따라 차폐율이 감소하였다.

관전압(kVp) 증가에 따른 차폐 효율의 에너지 의존성을 살펴보면, 관전압이 40 kVp에서 120 kVp로 증가함에 따라 모든 굴절력 조건에서 차폐율은 에너지 의존적으로 감소하는 경향을 보였다. +3.00 D 조건의 경우, 관전압 상승에 따라 차폐율은 38.66%에서 25.06%로 약 35.20% 감소하였다. 0.00D 조건은 25.12%에서 17.27%로 약 31.30% 감소하였으며, -3.00 D 조건은 19.40%에서 13.66%로 약 29.60% 감소하였다. Gray 렌즈는 타 색상 렌즈에 비해 굴절력별 감소폭의 차이가 상대적으로 적어, 전압 변화에 대해 비교적 일관된 에너지 의존성을 나타내는 것으로 분석되었다.

관전류량을 10 mAs에서 32 mAs로 상향 조정하며 분석한 결과, 동일 관전압 내에서의 차폐율 변화는 모든 굴절력에서 1.00% 내외의 미미한 수준으로 산출되었다. 이는 관전류량의 증가가 gray 렌즈의 방사선 차폐 성능에 미치는 실질적인 영향은 매우 제한적이며, 차폐율은 주로 관전압과 렌즈 굴절력에 의해 결정됨을 의미한다.

결과적으로 gray 착색렌즈는 굴절력이 높을수록 방사선 차폐 성능이 강화되는 특성을 보이며, 특히 +3.00 D 조건에서 저전압 대역의 방사선을 차단하는 데 탁월한 성능을 발휘하였다. 반면, 음의 굴절력(-3.00 D) 환경은 전 구간에 상대적으로 낮은 차폐율을 나타냈으나, 고전압으로 갈수록 발생하는 차폐 성능의 소실 비율은 약 29.60%로 가장 적어 에너지 변화에 대해 안정적인 강인함(robustness)

을 유지하는 특징을 보였다(Fig. 9).

3.3. Yellow 착색렌즈

Yellow 착색렌즈의 굴절력(+3.00 D, 0.00 D, -3.00 D) 변화에 따른 방사선 차폐율을 관전압(kVp)과 관전류량(mAs)의 변화에 따라 분석한 결과, 모든 조사 조건에서 yellow 착색렌즈의 굴절력이 음(-)에서 양(+의 방향으로 높아질수록 방사선 차폐율은 유의미하게 증가하는 양상을 보였다. 저에너지 영역(40 kVp, 10 mAs)을 기준으로 분석한 결과, +3.00 D에서 40.01%로 가장 높은 차폐 성능을 기록하였으며, 0.00 D에서 29.02%, -3.00 D에서 23.83%로 굴절력이 낮아짐에 따라 차폐율이 단계적으로 감소하는 것이 확인되었다. 고에너지 영역(120 kVp, 32 mAs) 기준, +3.00 D에서 40.87%로 가장 높은 차폐 성능을 기록하였으며, 0.00 D에서 29.32%, -3.00 D에서 24.28%로 굴절력이 낮아짐에 따라 차폐율이 감소하였다.

관전압(kVp) 증가에 따른 차폐율의 에너지 의존성을 살펴보면, 관전압이 40 kVp에서 120 kVp로 증가함에 따라 모든 굴절력 조건에서 차폐율은 에너지 의존적으로 감소하는 경향을 보였다. +3.00 D 조건의 경우, 관전압 상승에 따라 차폐율은 40.01%에서 25.56%로 약 36.10% 감소하였다. 0.00 D 조건은 29.02%에서 20.26%로 약 30.20% 감소하였으며, -3.00 D 조건은 23.83%에서 17.88%로 약 25.00% 감소하였다. Yellow 렌즈와 마찬가지로 관전압 변화에 가장 민감하게 반응하였다. Yellow 렌즈의 경우, 타 색상 렌즈와 비교하여 굴절력별 감소폭의 차이가 상대적으로 적어 전반적으로 고른 에너지 의존성을 나타냈다.

관전류량을 10 mAs에서 32 mAs로 상향 조정하며 분석한 결과, 동일 관전압 내에서의 차폐율 변화는 최대 약 0.86% 수준으로 산출되었다. 이는 다른 렌즈군과 마찬가지로 1.00% 내외의 미미한 변동으로, 관전류량의 변화가

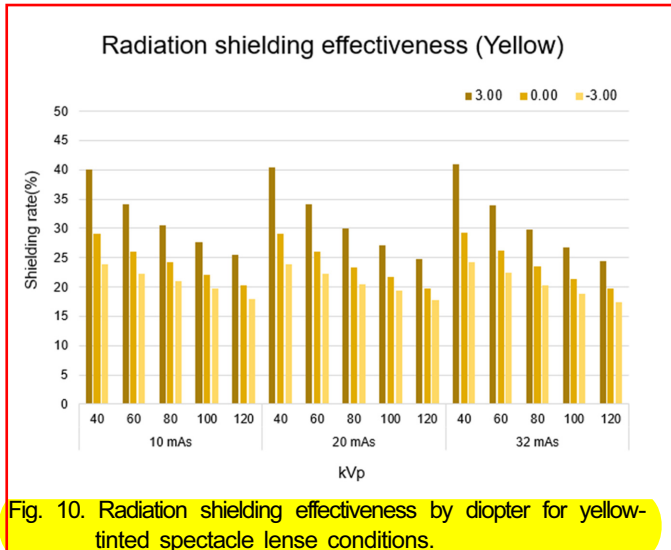


Fig. 10. Radiation shielding effectiveness by diopter for yellow-tinted spectacle lense conditions.

yellow 렌즈의 방사선 차폐 성능에 미치는 실질적인 영향은 매우 낮은 것으로 확인되었다.

결론적으로 yellow 착색렌즈는 굴절력이 높을수록 방사선 차폐 성능이 강화되는 특성을 보이며, 특히 +3.00 diopter 조건에서 저전압 대역 방사선에 대해 우수한 차단 성능을 발휘하였다. 특히 음의 굴절력(-3.00 D) 환경에서도 타 색상 렌즈(brown 20.14%, gray 20.76%)보다 높은 23.83%의 초기 차폐율을 기록하였으며, 고전압으로 갈수록 발생하는 성능 소실 폭(25.00%)이 가장 적어 전 에너지 영역대에서 고르고 안정적인 차폐율(robustness)을 유지하는 특징을 보였다(Fig. 10).

고 찰

본 연구는 진단용 방사선 검사 환경에서 안구 수정체 보호를 위한 대안으로서 시중 착색렌즈의 방사선 차폐율을 정량적으로 분석하였다. 실험 결과, 착색렌즈는 색상과 굴절력에 따라 일정 수준 이상의 방사선 차폐 효과를 나타냈으며, 특히 저에너지 대역에서의 방호 성능이 두드러졌다. 이는 고가의 전용 납 안경을 상시 착용하기 어려운 임상 현장이나 저선량 산란선에 노출되는 환경에서 착색렌즈가 일정 수준의 방호효과를 제공할 수 있음을 시사한다.^[16]

가장 주목할 만한 결과는 렌즈의 굴절력(diopter)과 차폐율 간의 상관관계이다. 모든 색상에서 +3.00 D의 볼록렌즈가 41.65%로 가장 높은 차폐율을 보였으며, 평면(0.00 D), 오목렌즈(-3.00 D) 순으로 효율이 감소하였다. 이는 렌즈의 굴절력이 높아질수록(볼록할수록) 방사선이 투과해야 하는 중심부 두께가 증가하기 때문이다. 램베르트-베르 법칙(Beer-Lambert law)에 따라 방사선 감쇠는 매질의 두께에 지수함수적으로 비례하므로, 볼록렌즈의 물리적 두께 증가가 광전효과 및 산란의 확률을 높인 것으

로 판단된다.^[17] 이는 일반 안경 렌즈의 두께가 두꺼울수록 방호 효과가 크다는 Koukorava 등의 선행 연구와도 일치하는 결과이다.^[9] 그리고 일반 안경 렌즈가 저에너지 조건에서 최대 6.97%의 차폐 성능을 보인 Han 등의 선행 연구보다도 높은 결과로 나타났다.^[13] 따라서 개인용 보호 안경은 최후의 방어선으로서의 역할을 수행하게 된다. 또한 조사 부위와의 거리를 40% 늘리면 노출량을 절반으로 줄일 수 있다는 Akahane 등의 논문보다도 진일보한 연구 결과이다.^[18]

렌즈의 색상(color) 변인 또한 차폐율에 유의미한 영향을 미쳤다. 동일한 굴절력 조건에서 yellow 렌즈가 전반적으로 우수한 차폐 성능을 보였으며, brown 렌즈는 40 kVp와 같은 저에너지 영역에서 특화된 감쇠 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 렌즈 착색 공정에서 투입되는 화학적 첨가제와 관련이 깊다. 본 실험에 사용된 렌즈는 황(S) 화합물을 포함한 유기 분산 염료를 사용하였는데, 황은 실효원자 번호가 상대적으로 높아 저에너지 X선과의 상호작용 확률을 높이는 역할을 한다.^[19] 특히 다차원 분산분석(MANOVA)을 통해 확인된 ‘색상×관전압×굴절력’의 상호작용 효과는 특정 에너지 대역에서 착색 성분과 렌즈 두께가 시너지 효과를 일으킬 수 있음을 입증한다.

에너지 대역(kVp)에 따른 변화를 살펴보면, 관전압이 낮을수록 차폐율이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이는 에너지 파장이 길수록 물질의 질량감쇠계수가 커진다는 물리적 특성에 기인한다.^[20] 의료 현장에서 의료진의 안구 피폭을 유발하는 주원인이 직접선보다는 에너지가 감쇠된 산란선(scattered radiation)임을 고려할 때, 착색렌즈의 저에너지 대역 차폐 특성은 임상적으로 매우 큰 의미를 갖는다. 비납계(non-lead) 소재임에도 불구하고 40 kVp 대역에서 약 40% 내외의 차폐율을 기록한 것은 고무적인 결과이다.

반면, 관전류량(mAs) 변화는 차폐율(%) 자체에 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 않았다. 이는 방사선의 ‘양’보다는 ‘질(energy)’과 ‘매질의 특성’이 차폐율을 결정하는 핵심 변수임을 확인시켜 준다.^[21] 따라서 보호구 선택 시 노출되는 방사선의 선량보다는 해당 검사의 관전압 설정치와 산란선의 에너지 분포를 우선적으로 고려해야 한다.

본 연구의 한계점으로는 실험에 사용된 렌즈의 굴절률이 1.60에 국한되었다는 점이다. 또한 안경렌즈는 굴절력에 따라 렌즈의 중심부와 주변부의 두께가 달라지는 점을 감안할 때 중심점 측정값만으로 전체 방호력을 일반화하기에는 한계가 있다. 따라서 추후 연구에서 중심부와 주변부의 차이에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

하지만 일상적인 착색렌즈가 저선량 방사선 환경에서 안구의 수정체를 보호할 수 있는 최소한의 방어선이 될

수 있음을 입증했다는 점에서 그 학술적 가치가 크다.

결 론

본 연구에서는 착색렌즈의 색상(brown, gray, yellow) 및 굴절력(+3.00 D, 0.00 D, -3.00 D) 변화가 방사선 차폐율에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, 모든 색상의 렌즈에서 굴절력이 높고 중심 두께가 두꺼울수록 방사선 차폐율이 유의미하게 증가하는 것으로 나타났다. 특히 렌즈의 기하학적 형상이 볼록한 +3.00 D 렌즈는 저에너지 영역(40 kVp)에서 약 38.66~41.65%의 가장 높은 차폐 성능을 기록하였다.

모든 에너지 대역을 통합 분석했을 때, 차폐율의 크기는 볼록렌즈(+3.00 D) > 평면렌즈(0.00 D) > 오목렌즈(-3.00 D) 순으로 유의미하게 나타났으며, 굴절력이 양(+)의 방향(볼록)으로 커질수록 차폐율이 증가하는 강한 상관관계가 확인하였다.

반면, 관전압(kVp)이 증가하여 방사선 에너지가 높아질수록 모든 렌즈의 차폐율은 에너지 의존적으로 감소하였다. 색상별 분석한 결과에 따르면, 다양한 검사 환경(40~120 kVp)에서 범용적으로 사용할 차폐체를 선택해야 한다면 yellow 재질이 가장 논리적인 선택이며, 특히 고에너지 투과가 발생하는 검사일수록 brown보다는 yellow나 gray를 사용하는 것이 방사선 방어 효율 측면에서 유리하다는 것이 확인되었다. 관전류량(mAs)의 변화는 차폐율에 유의미한 영향을 미치지 않았다. 결론적으로 일상적인 착색렌즈는 저에너지 산란 방사선에 대해 일정 수준의 방호 효과를 제공하며, 특히 높은 굴절력의 볼록렌즈가 안구 피폭 저감에 보다 효과적임을 입증하였다. 이는 향후 경량화된 기능성 안구 보호구 설계의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] Kim MJ, Kim JH. Radiation exposure and protection for eyes in pain management. *Anesth Pain Med.* 2017;12(4):297-305. DOI: <https://doi.org/10.17085/apm.2017.12.4.297>
- [2] Ainsbury EA, Barnard S, Bright S, et al. Ionizing radiation induced cataracts: recent biological and mechanistic developments and perspectives for future research. *Mutat Res Rev Mutat Res.* 2016;770(B):238-261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.07.010>
- [3] Vigneux G, Pirkanen J, Laframboise T, et al. Radiation-induced alterations in proliferation, migration, and adhesion in lens epithelial cells and implications for cataract development. *Bioengineering.* 2022;9(1):29. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering9010029>
- [4] Udroui I, Sgura A, Chendi A, et al. DNA damage in lens epithelial cells exposed to occupationally-relevant X-ray doses and role in cataract formation. *Sci Rep.* 2020;10:21693. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78383-2>
- [5] Kleiman NJ. Radiation cataract. *Ann ICRP.* 2012;41(3-4):80-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.06.018>
- [6] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 118, 2012. [https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118\(23 March 2026\)](https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118(23%20March%202026)).
- [7] Rhee DB, Kwak CK, Bae IH, et al. Evaluation of the radiation dose reduction effect of the E-Mask for lens protection and its clinical applications. *New Phys Sae Mulli.* 2025;75(6):492-502. DOI: <https://doi.org/10.3938/NPSM.75.492>
- [8] Jeong SW. The effect of color and density of tinted ophthalmic lens on peripheral refractive error. MS Thesis. Seoul National University of Science and Technology, Seoul. 2025;130-133.
- [9] Koukorava C, Farah J, Struelens L, et al. Efficiency of radiation protection equipment in interventional radiology: a systematic Monte Carlo study of eye lens and whole body doses. *J Radiol Prot.* 2014;34(3):509-528. DOI: <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/3/509>
- [10] Kim HJ. Radiation physics for self-directed learning, 3rd Ed. Seoul: Bookhill, 2017;130-155.
- [11] Mazumder K, Voit B, Banerjee B. Recent progress in sulfur-containing high refractive index polymers for optical applications. *ACS Omega.* 2024;9(6):6253-6279. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08571>
- [12] Zhou Y, Zhu Z, Zhang K, et al. Molecular structure and properties of sulfur-containing high refractive index polymer optical materials. *Macromol Rapid Commun.* 2023;44(23):2300411. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.202300411>
- [13] Han BH, An Y. The radiation shielding rate of spectacle lenses according to changes in degree. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2025;30(3):209-216. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2025.30.3.209>
- [14] Ritchie AW, Cox HJ, Gonabadi HI, et al. Tunable high refractive index polymer hybrid and polymer-inorganic nanocomposite coatings. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2021;13(28):33477-33484. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaami.1c07372>
- [15] Mayerhöfer TG, Pahlow S, Popp J. The Bouguer-Beer-Lambert law: shining light on the obscure. *Chem Phys Chem.* 2020;21(18):2029-2046. DOI: <https://doi.org/10.1002/cphc.202000464>
- [16] Barnard SGR, Ainsbury EA, Quinlan RA, et al. Radiation protection of the eye lens in medical workers—basis and impact of the ICRP recommendations. *Br J Radiol.* 2016;89(1060):20151034. DOI: <https://doi.org/10.1259/bjr.20151034>
- [17] Kırbıyık M, Bilici S. Evaluation of optical and radiation protection parameters of high refractive index polymers. *J Phys Chem Funct Mater.* 2023;6(2):152-160. DOI: <https://doi.org/10.54565/jphcfum.1324778>
- [18] Akahane M, Yoshioka N, Kiryu S. Radiation protection of

- the eye lens in fluoroscopy-guided interventional procedures. *Interv Radiol.* 2022;7(2):44-48. DOI: <https://doi.org/10.22575/interventionalradiology.2022-0006>
- [19] Nyangoma J, Oryema B. A comparative study of photon radiation-shielding properties of different glass types for use in health facilities. *Reinvention.* 2024;17(S1). DOI: <https://doi.org/10.31273/reinvention.v17iS1.1376>
- [20] Ohno S, Konta S, Shindo R, et al. Effect of backscatter radiation on the occupational eye-lens dose. *J Radiat Res.* 2024;65(4):450-458. DOI: <https://doi.org/10.1093/jrr/rrae034>
- [21] Shindo R, Yamamoto K, Ohno S, et al. Evaluation of radiation protection by lead glasses for interventional radiology physicians wearing prescription glasses: considering dose reduction by prescription glasses excluding lead. *J Radiat Res.* 2025;66(5):486-495. DOI: <https://doi.org/10.1093/jrr/rraf047>

착색렌즈의 색상과 굴절력 변화에 따른 방사선 차폐율 분석

한범희¹, 천혜경¹, 안영주^{2,*}

¹백석문화대학교 방사선과, 교수, 천안 31065

²백석문화대학교 안경광학과, 교수, 천안 31065

투고일(2026년 2월 11일), 수정일(2026년 3월 11일), 게재확정일(2026년 3월 14일)

목적: 본 연구는 진단용 방사선 검사 시 안구의 수정체 보호를 위한 기초 자료를 확보하고자, 시중에서 흔히 사용되는 착색렌즈의 색상 및 굴절력 변화가 방사선 차폐율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. **방법:** 실험을 위해 Brown, Gray, Yellow 세 가지 색상의 렌즈를 선정하였으며, 각 색상별로 볼록(+3.00 D), 평면(0.00 D), 오목(-3.00 D)의 굴절력을 적용하였다. 방사선 조사 조건은 관전압 40~120 kVp, 관전류량 10~32 mAs 범위에서 변화를 주어 5회 조사하여 평균과 표준편차를 구하고 선량을 μGy 단위로 표시하고 각 실험값에 대해 방사선 차폐율을 비교 분석하였다. **결과:** 모든 실험 조건에서 렌즈의 굴절력은 방사선 차폐 성능을 결정하는 가장 유의미한 독립변인으로 확인되었다. 특히 굴절력이 높을수록(볼록할수록) 렌즈 중심부의 물리적 두께가 증가함에 따라 차폐율이 단계적으로 향상되는 양의 상관관계를 나타냈다. 렌즈 색상에 따른 분석에서는 yellow 렌즈가 동일 굴절력 대비 가장 우수한 차폐 성능을 기록하였으며, 이어 저에너지 영역에서는 brown이 가장 우수하게 나타나 렌즈에 함유된 착색제 성분이 방사선 감쇠 과정에 유의미하게 기여하고 있음을 입증하였다. 또한, 차폐율은 관전압이 낮을수록 극대화되는 에너지 의존적 경향을 보였으나, 관전류량(mAs)의 변화는 차폐율(%) 자체에 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 다변량 분산분석(MANOVA)을 통한 상호작용 분석 결과에서도 ‘색상×관전압×굴절력’의 복합적인 상호작용이 유의하게 나타나, 특정 에너지 대역에서 착색 성분과 렌즈 두께의 조합이 차폐 성능을 증폭시킬 수 있음을 확인하였다. **결론:** 본 연구는 고가의 전용 방호 안경을 대체하여 일상적인 착색렌즈가 저선량 방사선 환경에서 일정 수준의 안구 보호 기능을 수행할 수 있음을 통계적으로 규명하였다는 데 학술적 의의가 있다.

주제어: 착색렌즈, 색상, 굴절력, 방사선 차폐율, 수정체선량