

해외직구 아이섀도 제품의 중금속 오염 실태 연구

이선미, 김현진, 이서윤, 김도연, 박성아

식약품연구부 약품화학팀

A Study on Heavy Metal Contamination in Overseas Direct Purchase Eyeshadow Products

Sunmi Lee, Hyeon-jin Kim, Seo-youn Lee, Doyeon Kim and SungAh Park

*Drug Chemistry Team, Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment,
120, Hambakbong-ro 140beon-gil, Buk-gu, Busan 46616, Republic of Korea*

Abstract

Overseas direct purchase of cosmetics has increased annually in Korea, especially for color cosmetics such as eyeshadows. Recent reports of heavy metal contamination exceeding Korean regulatory standards in eyeshadows from low-cost online platforms have raised major safety concerns. This study aimed to monitor heavy metals in overseas direct purchase eyeshadows and provide baseline data to inform consumer choice and support safety management of hazardous products. A total of 144 eyeshadow samples purchased from low-cost overseas direct purchase platforms were analyzed for nine heavy metals (Pb, Ni, As, Hg, Sb, Cd, Cu, Co, Cr). Samples were classified by color group, lightness, undertone, texture, and finish type, and compared using Welch ANOVA with Games-Howell post-hoc tests. Detection rates exceeded 98.6% for Pb, Ni, and As. Exceedance of Korean regulatory standards occurred in 4.9% of samples for Pb (maximum 36.86 $\mu\text{g/g}$, 1.8-fold), 11.1% for As (maximum 23.05 $\mu\text{g/g}$, 2.3-fold), and 0.7% for Sb (maximum 89.88 $\mu\text{g/g}$, 9.0-fold). Among the 24 samples exceeding the limits, 20 were matte pressed powders, 3 were matte creams, and 1 was a glitter pressed powder, indicating that exceedance cases were concentrated in matte finishes and pressed powder textures. Among the five classification systems, finish type and texture appeared to account for the largest differences in heavy metal contents in this study, while lightness showed moderate effects for some metals (e.g., Ni, Co, Cr) and color group and undertone generally had smaller effects. Further research with broader brands and product ranges is needed to confirm these patterns.

Key words : overseas direct purchase, eyeshadow, heavy metals, contamination

1. 서론

화장품은 소비자의 일상생활 전반에서 폭넓게 사용되는 제품이며, 그 중 아이섀도는 눈 주위의 민감한 피부에 직접 사용하는 대표적인 색조 화장품이다. 안구 주변 피부는 다른 부위에 비해 각질층이 얇고 투과성이 높아 외부 물질의 흡수가 상대적으로 용이하다^{1),2)}. 이러한 특성 때문에 아이섀도와 아이라이너와 같은 눈화장용 제품이 일반 피부에 사용하는 화장품보다 국소 및 전신의 중금속 노출 위험이 더 클 수 있으며 장기간 사용 시 체내 축적과 만성 독성 가능성이 제기되고 있다^{3),4),5),6),7)}.

최근 해외직구는 일상적인 소비 형태 중 하나로 자리 잡아가고 있고 그 규모도 지속적으로 증가하고 있다⁸⁾. 화장품의 해외직구액 규모 또한 2022년 대비 2024년에 약 39% 증가하여 뚜렷한 성장 추세를 보이고 있으며⁹⁾, 이 중 색조화장품은 저렴한 가격대와 최신 뷰티 트렌드를 빠르게 반영한 색상, 디자인 등으로 인해 젊은 소비자층을 중심으로 수요가 확대되고 있는 것으로 보고되고 있다^{10),11)}. 특히 저가 온라인 해외직구 플랫폼의 상대적으로 낮은 가격과 손쉬운 접근성으로 인해 소비자의 구매가 지속적으로 확대될 것으로 예상된다^{12),13)}.

그러나 해외직구 화장품은 정식으로 수입·유통되는 제품과는 다른 안전관리 체계하에 놓여 있다. 정식 수입 화장품은 책임판매업자가 유통 전에 제조번호별 품질검사를 실시하고, 국내 「화장품 안전기준 등에 관한 규정」에 따른 중금속 및 유해 성분 등에 관한 안전기준을 충족해야 하며^{14),15)}, 필요 시 통관 단계에서 관계 기관의 표본검사 대상이 될 수 있다¹⁶⁾. 반면 개인이 직접 해외에서 구매(해외직구)하는 화장품은 대부분 자가사용 물품으로 분류되어, 일반적인 수입 화장품과는 달리 통관 시 성분 서류 제출이나 사전 시험검사 없이 반입되며, 유통 전 품질검사 및 국가 차원의 정기적인 안전성 검사 대상에서도 제외된다¹⁷⁾. 또한 국가별로 사용이 허용된 원료와 중금속 허용 기준이 상이하므로, 해외직구 화장품이 국내 안전 기준을 충족하는지에 대한 별도의 확인이 필요하다¹⁸⁾.

아이섀도는 주로 다양한 색상 표현을 위해 무기 안료(inorganic pigments)를 사용한다. 산화철(iron oxide), 크롬 옥사이드(chromium oxide), 카드뮴 황화물(cadmium sulfide) 등의 안료는 색

상 표현에 효과적이거나 광물 유래 원료 특성 상 납(Pb), 니켈(Ni), 비소(As), 수은(Hg), 안티몬(Sb), 카드뮴(Cd), 코발트(Co), 크롬(Cr) 등의 중금속이 불순물로 포함될 수 있다^{19),20),21),31)}. 특히 안료 정제 및 제조 과정의 품질관리 수준에 따라 중금속 함량이 상대적으로 높을 수 있다는 점에서 저가 제품의 경우 주의가 요구된다⁶⁾.

국내 유통화장품 안전관리 기준에서는 중금속의 검출 허용 한도를 납 20 µg/g, 니켈 35 µg/g(눈 화장용), 비소 10 µg/g, 수은 1 µg/g, 안티몬 10 µg/g, 카드뮴 5 µg/g 이하로 설정하고 있다¹⁴⁾. 이는 화장품에 인위적으로 첨가되지 않았으나 제조나 보관 과정에서 비의도적으로 혼입되어 기술적으로 완전한 제거가 불가능한 경우에 한하며, 구리, 코발트, 크롬 등은 별도의 검출 허용 한도가 설정되어 있지 않다.

최근 저가 해외 직구 온라인 플랫폼에서 판매되는 색조화장품, 특히 아이섀도 제품에서 국내 중금속 기준치를 현저히 초과한 검출 사례가 보고되고 있다. 2024년 서울시 조사에서는 해외 온라인 플랫폼에서 판매하는 아이섀도에서 비소가 기준치(10 µg/g)의 19.8배에 해당하는 198 µg/g까지 검출되었고 또 다른 제품에서는 납이 기준의 3.6배(72.8 µg/g) 수준으로 검출되는 등, 중금속 오염이 국내 기준치를 크게 초과하는 사례가 확인되었다^{22),23)}. 2024년 한국소비자원이 저가 해외직구 플랫폼에서 판매되는 색조화장품을 대상으로 실시한 안전실태 조사에서도 아이섀도 제품에서 기준을 65배 초과하는 수준의 납(1,307 µg/g)이 검출되었다²⁴⁾. 이러한 결과들은 해외직구 아이섀도 제품에서 중금속 오염과 기준 초과 사례가 반복적으로 확인되고 있음을 보여주며, 향후 해외직구 아이섀도 제품에 대한 지속적인 안전성 검사와 오염 실태 연구의 필요성을 시사한다.

국제적으로 화장품의 중금속 함량에 관한 연구가 수년간 수행되어 왔다^{6),7),25)}. 중국의 경우 시판 화장품의 중금속(특히 니켈과 코발트) 함량을 조사한 연구들이 있으며^{20),25)}, 미국 FDA도 유통 화장품에 함유된 비소, 납, 카드뮴, 크롬, 코발트 등 중금속 함량을 조사해 왔다²¹⁾. 또한 국내의 경우에도 색조화장품에 대한 중금속 함량 조사연구는 보고되고 있으나^{26),27)}, 아이섀도만을 대상으로 색상, 명도, 제형, 광택 등 제품 특성에 따른 중금속 함량의 비교 분석은 국내외에서 거의 보고되지 않았다^{3),25),27)}.

해외직구 화장품의 관리적 사각지대와 최근 보고된 기준치 초과 사례들을 통해 저가 해외 직구 아이세도 제품의 중금속 오염 실태를 파악하고 지속적으로 모니터링할 필요성이 제기된다. 특히 제품의 색상, 명도, 톤, 제형, 광택(무광, 펄, 글리터) 등 다양한 특성에 따른 중금속 함량을 조사함으로써 중금속 함량과 제품 특성 간 관련성을 알아보고 이를 통해 유해 제품 관리나 소비자의 제품 선택에 도움이 되는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료

저가 해외직구 온라인 플랫폼들 가운데 다수의 아이세도 제품을 판매하고 있는 A사와 자체 브랜드(PB, Private Brand)를 판매하는 B사에서 총 35개의 아이세도 제품을 구매하였다. 판매량이 높은 제품들 가운데 다양한 제품형태, 색상 및 제형이 포함되도록 선정하였다. 아이세도 제품 중 다수의 분리된 색상을 포함하는 경우 각각을 다른 시료로 구분하여 총 144건의 시료에 대하여 본 실험을 진행하였다. 이 중 팔레트형은 120건, 스틱형 12건, 어플리케이터형 9건, 단지형 3건이며 제형별로는 압축 파우더가 120건, 크림 15건, 리퀴드 9건이었으며 이 중 펄/글리터가 포함된 시료는 49건이었다(Table 1). 제품의 색채 특성은 색상이 속하는 색상 범주를 기준으로 10개의 색상군으로 구분하고, 밝기 수준에 따라 명도 단계(1~5)를 분류하였으며, 색상의 온도적 특성은 쿨톤, 뉴트럴톤, 웜톤의 3 범주로 구분하였다.

2.2. 시약 및 표준품

중금속 분석을 위해 사용한 시약들 중 질산은 Matsunoen Chemicals LTD (Japan)에서 구입하였으며 염산과 불산은 Sigma-Aldrich (USA), 증류수는 Supelco (Germany), L-시스테인은 Merck (Germany)로 부터 구매하였다. 중금속 혼합 표준원액은 AccuStandard (USA), 수은 표준원액은 Merck (Germany)의 제품을 사용하였다.

2.3. 표준용액 조제

중금속 혼합 표준원액(10 µg/mL)를 1% 질산으로 희석하여 중금속 8종 분석을 위한 검량선용 표준

용액(1, 2, 5, 10, 20, 40 µg/L)을 조제하였다. 수은 표준원액(1,000 µg/mL)은 0.001% L-시스테인 용액으로 희석하여 검량선 작성을 위한 표준용액(100 µg/L)을 조제하였다.

2.3. 시험용액 조제

시료 약 0.2 g을 취하여 마이크로웨이브용 분해 용기에 넣고 질산 7 mL, 염산 2 mL, 불산 0.5 mL를 가한 후 후드 내에서 24시간 방치한 다음 마이크로웨이브(ultraWAVE, Milestone, Italy)에 넣고 30분간 분해하였다. 상온으로 식힌 분해물을 100 mL 용량플라스크에 옮기고 증류수를 가하여 100 mL로 맞춘 다음 멤브레인 필터 (PVDF, 0.45 µm)로 여과하여 납, 니켈, 비소, 안티몬, 카드뮴, 구리, 코발트, 크롬의 분석을 위한 시험용액으로 하였다.

2.4. 기기분석

시험용액 중 중금속 8종(납, 니켈, 비소, 안티몬, 카드뮴, 구리, 코발트, 크롬)의 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(NexION 1000, PerkinElmer, USA)를 이용하였으며 분석조건은 Table 2와 같다. 수은 분석을 위해 시료 약 50 mg을 수은분석기용 시료보트에 취하고 금아말감환원법에 의한 수은분석기(MA-3000, NIC, Japan)를 이용하여 Table 3에 제시된 조건으로 분석을 수행하였다.

2.5. 통계분석

통계분석은 SPSS Statistics(version 31.0.1.0; IBM, USA)를 사용하여 수행하였다. 모든 중금속 함량 자료에 대해 기술통계 분석을 실시하여 평균, 표준편차, 중앙값 및 범위를 산출하였다. 각 중금속별 검출률은 정량한계(limit of quantitation, LOQ) 이상으로 검출된 시료의 비율로 정의하였으며, 국내 유통화장품 안전관리 기준을 적용하여 기준초과 시료의 건수 및 비율(%)을 산출하였다. 색상군, 명도, 톤, 제형, 광택의 5가지 분류 체계에 따른 중금속 함량의 차이는 Welch의 분산분석(Welch ANOVA)을 사용하여 비교하였으며, 분류체계별 효과 크기를 평가하기 위해 각 중금속에 대해 F 통계량을 산출하였다. 그룹 간 평균 차이에 대한 사후분석은 Games-Howell 검정을 적용하였다. 모든 통계 분석에서 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

Table 1. Classification of 144 eyeshadow samples by product format, texture, finish type, color group, lightness and undertone

Category	Subcategory (Description)	n
Product Format	Palette	120
	Stick	12
	Liquid Applicator	9
	Pot	3
	Total	144
Texture	Pressed Powder	120
	Cream	15
	Liquid	9
	Total	144
Finsh Type	Matte	95
	Pearl	45
	Glitter	4
	Total	144
Color group	Group 1 (White/Cream)	5
	Group 2 (Beige/Champagne)	25
	Group 3 (Brown/Taupe)	37
	Group 4 (Pink/Rose/Mauve)	32
	Group 5 (Red/Burgundy)	2
	Group 6 (Orange/Coral/Peach)	7
	Group 7 (Yellow/Gold/Bronze/Copper)	17
	Group 8 (Green/Olive/Mint)	9
	Group 9 (Blue/Teal)	9
	Group 10 (Grey/Black/Silver)	1
Total	144	
Lightness	Very Light	24
	Light	52
	Medium	52
	Dark	16
	Very Dark	0
	Total	144
Undertone	Warm	51
	Neutral	68
	Cool	25
	Total	144

3. 결과 및 고찰

3.1. 검출현황

본 연구에서는 저가 해외 직구 온라인 플랫폼의 아이새도 시료 144건을 대상으로 납(Pb), 니켈(Ni), 비소(As), 수은(Hg), 안티몬(Sb), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 코발트(Co), 크롬(Cr) 총 9종의 중금속 함량을 분석하였다. 그 결과 납, 니켈, 비소, 구리, 코발트, 크롬은 대부분의 시료에서 정량한계(LOQ) 이상으로 검출되어 모두 98.6% 이상의 검출률을 나타내었으나, 카드뮴은 전체 144건 중 64건(44.4%), 수은은 46건(31.9%)에서 검출되었고 안티몬은 2건(1.4%)으로 매우 낮은 검출 양상을 보였다(Table 4).

국내 유통화장품 안전관리 기준에서 설정된 중금속 허용 기준(납 20 µg/g, 니켈 35 µg/g, 비소 10 µg/g, 수은 1 µg/g, 안티몬 10 µg/g, 카드뮴 5 µg/g 이하)을 적용한 결과, 144건 중 24건(16.7%)이 기준을 초과하였고, 항목별로 납은 7건(4.9%), 비소는 16건(11.1%), 안티몬은 1건(0.7%)에서 기준 초과가 관찰되었다. 반면 니켈, 수은 및 카드뮴은 모든 시료에서 기준 이내로 나타났으며, 구리, 코발트 및 크롬은 별도의 검출 허용 기준이 설정되어 있지 않아 기준 초과 여부는 확인되지 않았다.

본 연구에서 검출된 비소의 최대 농도는 23.05 µg/g으로 허용 기준의 2.3배였고, 이는 2024년 서울

시 조사에서 보고된 해외직구 아이새도 제품의 비소 검출농도인 198 µg/g(19.8배 초과)보다는 낮지만 역시 기준을 뚜렷하게 초과하는 수준을 보였다^{22),23)}. 납의 경우 본 연구에서의 최대 농도는 36.86 µg/g(1.8배 초과)로, 2024년 해외직구 색조 화장품을 대상으로 한 한국소비자원 조사에서 보고된 아이새도 내 납 1307 µg/g(기준치의 65배)에 비해 상대적으로 낮았으나²⁴⁾ 기준 초과된 7건이 모두 무광의 압축파우더 제형에서 확인되었다는 점에서 제형과 광택 특성에 따른 기준 초과 양상이 공통적으로 관찰되었다. 반면 비소는 압축파우더 제형뿐만 아니라 크림 제형에서도 기준 초과 사례가 확인되어, 중금속 항목에 따라 제형별 오염 분포에 차이가 있음을 알 수 있었다. 안티몬은 전체적으로 검출률은 낮았으나 기준을 초과한 1건의 농도가 89.88 µg/g으로 기준의 9.0배에 달해 개별 시료 수준의 유해 가능성을 시사하였다(Table 4, Table 5).

2025년 이루어진 서울시 보건환경연구원과 충청북도 보건환경연구원의 국내 유통 눈화장용 화장품 각 60건과 30건에 대한 중금속 검사 결과, 모든 제품이 기준 이내로 안전성이 보고된 반면^{28),29)}, 같은 해 해외직구 화장품을 대상으로 수행된 식품의약품안전처 조사에서는 눈화장용 제품류 360건 중 62건(17.2%)이 기준을 초과하였고, 식약처·관세청·한국

Table 2. Instrumental parameters of ICP-MS spectrometer

Parameter	Pb	Ni	As	Sb	Cd	Cu	Co	Cr
Mass	208.0	59.9	90.9	120.9	110.9	62.9	58.9	51.9
Plasma gas flow (L/min)					15			
Auxiliary gas flow (L/min)					1.2			
Nebulizer gas flow (L/min)					0.92			
RF power (W)					1600			
Analog stage voltage (V)					-1950			
Pulse stage voltage (V)					1000			

Table 3. The atomize method setting of mercury analyzer

	Atomize method setting					
	Heat temp. (°C)	Flow (L/min)	Heat time (s)	Slope time (s)	Start duty (%)	Max Duty (%)
Dry	0	0.00	0	0	0	0
1st Decomposition	180	0.40	120	120	5	10
2nd Decomposition	850	0.40	120	30	10	100
3rd Decomposition	0	0.00	0	0	0	0

소비자원 협업 조사에서는 색조화장품 및 눈화장용 제품 91건 중 3건(3.3%)에서 비소·안티몬·니켈 등의 기준 초과 사례가 보고되었다³⁰⁾.

이러한 결과들로 볼 때 국내 정식 유통과정을 거친 눈화장용 화장품은 국내 중금속 허용기준을 대

체로 충족하지만, 해외직구 온라인 플랫폼을 통해 구매된 아이섀도 등 눈화장용 제품에서는 본 연구에서 확인된 기준 초과 사례 뿐 아니라 타 기관 조사에서의 기준 초과 사례들도 반복적으로 관찰되어 해외직구 아이섀도에서 고농도 비소·납·안티몬 오염

Table 4. Summary of mean concentrations (\pm SD), median values, detection ranges, detection rate and exceedance rates of nine heavy metals in eyeshadow samples (n=144).

	Pb	Ni	As	Hg	Sb	Cd	Cu	Co	Cr
Concentration ($\mu\text{g/g}$)	4.751 \pm 6.874	3.928 \pm 3.820	3.622 \pm 5.155	0.003 \pm 0.008	0.627 \pm 7.490	0.116 \pm 0.184	141.027 \pm 543.528	2.306 \pm 3.739	7.064 \pm 8.494
Median ($\mu\text{g/g}$)	2.411	2.795	1.419	0.001	0.000	0.027	2.361	0.978	5.218
Detection Range ($\mu\text{g/g}$)	N.D. ~ 36.861	0.011 ~ 27.274	N.D. ~ 23.045	N.D. ~ 0.094	N.D. ~ 89.884	N.D. ~ 0.826	0.066 ~ 3686.238	N.D. ~ 23.743	0.327 ~ 73.623
Detection Rate (%: n)	99.3 (143)	100.0 (144)	98.6 (142)	31.9 (46)	1.4 (2)	44.4 (64)	100.0 (144)	98.6 (142)	100.0 (144)
Exceedance Rate (%: n)	4.9 (7)	0.0 (0)	11.1 (16)	0.0 (0)	0.7 (1)	0.0 (0)	-	-	-

Table 5. Samples Exceeding the Regulatory Limit for Heavy Metals (n = 24)

Sample No.	Heavy Metal	Concentration ($\mu\text{g/g}$, limit)	Color Group	Lightness	Undertone	Texture	Finish Type
S012	As	12.805 (10)	G4 (Pink/Rose/Mauve)	Light	Cool	Powder	Matte
S015	Pb	34.998 (20)	G3 (Brown/Taupe)	Dark	Neutral	Powder	Matte
S018	Pb	36.861 (20)	G8 (Green/Olive/Mint)	Dark	Neutral	Powder	Matte
S028	Pb	22.623 (20)	G8 (Green/Olive/Mint)	Medium	Warm	Powder	Matte
S029	Pb	25.179 (20)	G8 (Green/Olive/Mint)	Dark	Warm	Powder	Matte
S055	As	12.689 (10)	G6 (Orange/Coral/Peach)	Light	Warm	Cream	Matte
S056	As	16.290 (10)	G1 (White/Cream)	Very Light	Neutral	Cream	Matte
S058	As	13.197 (10)	G4 (Pink/Rose/Mauve)	Light	Cool	Cream	Matte
S077	As	16.630 (10)	G2 (Beige/Champagne)	Very Light	Neutral	Powder	Matte
S078	As	19.811 (10)	G2 (Beige/Champagne)	Very Light	Warm	Powder	Matte
S079	As	23.045 (10)	G4 (Pink/Rose/Mauve)	Light	Neutral	Powder	Matte
S080	As	19.896 (10)	G3 (Brown/Taupe)	Light	Neutral	Powder	Matte
S082	As	20.489 (10)	G2 (Beige/Champagne)	Very Light	Neutral	Powder	Matte
S083	As	13.743 (10)	G2 (Beige/Champagne)	Very Light	Neutral	Powder	Matte
S084	As	18.032 (10)	G4 (Pink/Rose/Mauve)	Light	Neutral	Powder	Matte
S085	As	18.991 (10)	G4 (Pink/Rose/Mauve)	Light	Neutral	Powder	Matte
S086	As	16.776 (10)	G3 (Brown/Taupe)	Medium	Neutral	Powder	Matte
S088	As	11.127 (10)	G2 (Beige/Champagne)	Very Light	Neutral	Powder	Matte
S092	As	13.323 (10)	G2 (Beige/Champagne)	Light	Neutral	Powder	Matte
S095	As	11.978 (10)	G1 (White/Cream)	Very Light	Neutral	Powder	Matte
S100	Pb	28.725 (20)	G2 (Beige/Champagne)	Medium	Neutral	Powder	Matte
S101	Pb	35.459 (20)	G3 (Brown/Taupe)	Medium	Neutral	Powder	Matte
S102	Pb	22.423 (20)	G3 (Brown/Taupe)	Dark	Neutral	Powder	Matte
S104	Sb	89.884 (10)	G1 (White/Cream)	Very Light	Neutral	Powder	Glitter

* Powder in this table refers to pressed-powder textures (compressed powder eyeshadows).

사례가 지속적으로 발생하고 있음을 알 수 있다 (22),24),28),29),30)

본 연구에서 기준초과가 확인된 제품은 두 구매 플랫폼 중 모두 A사(100%)에서 판매된 제품이었으며, 제조국은 모두 중국으로 나타났다. 이는 2025년 해외직구 화장품에 대한 정부 합동 시험검사에서 보고된 부적합 제품 230건의 제조국 중 중국의 비율이 97%이고 판매 플랫폼 중 A사의 비율이 95%로 보고된 결과와 유사한 양상을 보였다³⁰⁾.

본 연구의 해외직구 아이섀도 제품들의 중금속 함량 분포를 살펴보면, 납, 비소, 카드뮴, 구리 및 코발트에서 평균값(납 4.751 µg/g, 비소 3.622 µg/g, 카드뮴 0.116 µg/g, 구리 141.027 µg/g, 코발트 2.306 µg/g)이 중앙값(납 2.411 µg/g, 비소 1.419 µg/g, 카드뮴 0.027 µg/g, 구리 2.361 µg/g, 코발트 0.978 µg/g) 보다 큰 경향이 관찰되어, 이들 중금속의 분포가 오른쪽으로 치우친 비대칭 형태임을 확인할 수 있었다(Table 4). 특히 구리는 평균값이 중앙값의 약 60배로 나타나, 일부 시료에서 상당히 높은 농도가 검출되었음을 보여준다. 한편 안티몬은 중앙값이 0.000 µg/g으로 대부분의 시료에서 검출되지 않았으나, 극소수 시료에서의 고농도 검출로 인해 분포가 한쪽으로 치우친 양상을

보였다. 니켈과 크롬은 앞서 언급한 중금속들에 비해 분포가 비교적 대칭적인 경향을 보였으며, 수은은 평균과 중앙값 간 비율이 상대적으로 크지만 전체 함량 수준이 매우 낮아 분포 특성 해석에는 제한이 있었다. 이러한 분포 특성은 일부 중금속(특히 구리와 안티몬)의 경우 소수의 고농도 시료가 전체 평균을 크게 높이고 있어, 평균값만으로는 전체 노출 수준과 고농도 시료의 존재를 동시에 파악하기 어렵다는 점을 시사한다.

3.2. 색상군별 중금속 함량

아이섀도 시료를 10개의 색상군으로 분류하여 중금속 함량을 비교 분석한 결과, 여러 중금속에서 색상군 간 평균 함량과 분포 양상에서 차이를 나타냈다(Table 6, Table 7; Figure 1, Figure 2). 각 색상군의 시료 수가 균일하지 않고, 일부 색상군에서는 분산이 크고 이상치와 비대칭성이 관찰되어, 등분산을 전제로 하는 고전적 일원배치 분산분석보다는 표본 크기와 분산의 불균등에 보다 강건한 Welch 분산분석(Welch ANOVA)과 Games-Howell 사후검정을 적용하였다. 그 결과, 납(Welch p = 0.037), 니켈(Welch p = 0.013), 비소(Welch p = 0.002), 카드뮴(Welch p = 0.004), 구리(Welch

Table 6. Mean concentrations (±SD) of heavy metals with regulatory limits (Pb, Ni, As, Hg, Sb, Cd) by color group in 144 eyeshadow samples

Color group	n	Pb (µg/g)	Ni (µg/g)	As (µg/g)	Hg (µg/g)	Sb (µg/g)	Cd (µg/g)
Group 1	5	2.252 ± 3.342	1.493 ± 1.328	5.837 ± 7.732	0.002 ± 0.004	17.977 ± 40.197	0.124 ± 0.159
Group 2	25	6.057 ± 6.924	3.004 ± 2.138	5.846 ± 6.727	0.004 ± 0.005	0.018 ± 0.089	0.181 ± 0.232
Group 3	37	6.477 ± 8.672	6.673 ± 5.475	4.206 ± 4.271	0.006 ± 0.016	0.000 ± 0.000	0.144 ± 0.188
Group 4	32	2.672 ± 2.573	2.675 ± 1.655	3.584 ± 6.255	0.002 ± 0.003	0.000 ± 0.000	0.121 ± 0.225
Group 5	2	1.741 ± 1.207	3.570 ± 2.134	1.675 ± 1.662	0.003 ± 0.005	0.000 ± 0.000	0.028 ± 0.020
Group 6	7	1.776 ± 1.531	1.898 ± 0.888	3.176 ± 4.616	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000	0.088 ± 0.135
Group 7	17	1.758 ± 1.537	2.663 ± 2.237	0.603 ± 0.482	0.001 ± 0.001	0.000 ± 0.000	0.017 ± 0.014
Group 8	9	13.569 ± 12.063	6.719 ± 4.535	3.350 ± 2.598	0.003 ± 0.004	0.000 ± 0.000	0.117 ± 0.095
Group 9	9	3.141 ± 4.076	2.520 ± 1.683	1.100 ± 1.638	0.003 ± 0.002	0.000 ± 0.000	0.030 ± 0.035
Group 10	1	0.075 ± N.A.	1.690 ± N.A.	0.110 ± N.A.	0.000 ± N.A.	0.000 ± N.A.	0.002 ± N.A.

* N.A.: Not Applicable (Sample size = 1)

p = 0.002), 코발트(Welch p = 0.007), 수은(Welch p = 0.008)은 색상군 간 평균 함량 차이가 통계적으로 유의하였다. 반면 크롬은 색상군 간 평균 함량 차이가 통계적으로 유의하지 않았으나(Welch p = 0.079), 색상군 8에서 가장 높은 평균 함량을 보였다. 안티몬은 대부분의 색상군에서 불검출되어 통계 분석에 제한이 있었다.

허용기준이 설정된 중금속 중 납 함량을 색상군 별로 살펴보면, 색상군 8(그린/올리브/민트 계열)의 평균 함량은 13.6 µg/g(±12.1 µg/g)으로 가장 높았고, 색상군 3(브라운/토프 계열)과 색상군 2(베이지/샴페인 계열)도 각각 6.5 µg/g(±8.7 µg/g), 6.1 µg/g(±6.9 µg/g)으로 다른 색상군에 비해 상대적으로 높은 수준을 보였다(Table 6, Figure 1A). 반면 색상군 1, 6, 7은 1.7~2.3 µg/g 범위의 낮은 함량을 나타냈다. Figure 1A에서 색상군 8과 3은 사분위수 범위가 넓고 최대값이 각각 36.9 µg/g, 35.5 µg/g로 나타나, 두 색상군 내 납 농도의 변동성이 크고 일부 시료에서 높은 농도의 납이 포함되어 있음을 보여준다. 납 허용기준(20 µg/g)을 초과한 시료 7건의 분포를 보면, 색상군 8에서 3건(S018: 36.86 µg/g, S028: 22.62 µg/g, S029: 25.18 µg/g), 색상군 3에서 3건(S015: 35.00 µg/g, S101: 35.46 µg/g, S102: 22.42 µg/g)이 검출되어 전체 기준 초과된 시료의 85.7%가 이 두 색상군에 집중되었고, 나머지 1건은 색상군 2(S100: 28.73 µg/g)에서 확인되었다(Table 5).

Welch 검정 결과 색상군 간 납 함량 차이는 통계적으로 유의하였으나(F(8, 17.09) = 2.77, p = 0.037), Games-Howell 사후검정에서는 대부분의 쌍별 비교에서 유의수준 0.05에 도달하지는 못했다. 그럼에도 색상군 8과 색상군 3의 평균 농도와 기준 초과 시료 수가 모두 다른 색상군보다 높아, 이들 색상군 시료에서 상대적으로 높은 납 노출 가능성이 있음을 보여준다.

니켈 함량은 색상군 3(브라운/토프 계열)과 색상군 8(그린/올리브/민트 계열)에서 각각 6.67 µg/g(±5.47 µg/g), 6.72 µg/g(±4.54 µg/g)으로 높았으며, 색상군 1, 6, 7, 9에서는 1.5~2.7 µg/g 범위의 낮은 수준을 보였다(Table 6, Figure 1B). Figure 1B에서 색상군 3과 8은 중앙값과 사분위수 범위가 다른 색상군보다 높고 이상치도 다수 관찰되었으며, 최대값은 색상군 3에서 27.3 µg/g로 관찰되었다. Welch 검정 결과 색상군 간 니켈 함량 차이는 유의하였으며(F(8, 16.28) = 3.61, p = 0.013), 사후검정에서 색상군 3은 색상군 1, 2, 4, 6, 7, 9와 유의한 차이를 보였다[p ≤ 0.015]. 이는 브라운/토프 계열 시료에서 니켈 함량이 다른 여러 색상군보다 일관되게 높게 나타났음을 의미한다.

비소의 함량은 색상군 1(화이트/크림 계열)과 색상군 2(베이지/샴페인 계열)에서 각각 5.84 µg/g(±7.73 µg/g), 5.85 µg/g(±6.73 µg/g)으로 높

Table 7. Mean concentrations (±SD) of heavy metals without specific regulatory limits (Cu, Co, Cr) by color group in 144 eyeshadow samples

Color group	n	Cu (µg/g)	Co (µg/g)	Cr (µg/g)
Group 1	5	0.675 ± 0.863	0.503 ± 0.526	2.130 ± 2.224
Group 2	25	5.016 ± 8.256	1.206 ± 1.023	5.633 ± 3.751
Group 3	37	6.737 ± 10.270	5.533 ± 5.831	8.546 ± 12.736
Group 4	32	13.739 ± 32.109	0.918 ± 0.792	5.483 ± 3.318
Group 5	2	9.746 ± 3.386	1.297 ± 0.981	13.806 ± 10.714
Group 6	7	2.234 ± 2.302	0.616 ± 0.275	5.091 ± 3.117
Group 7	17	7.413 ± 15.456	0.772 ± 0.627	6.478 ± 7.981
Group 8	9	1364.600 ± 1183.148	4.223 ± 3.534	16.775 ± 11.588
Group 9	9	782.966 ± 1203.295	0.780 ± 0.946	5.373 ± 4.284
Group 10	1	0.904 ± N.A	0.165 ± N.A	1.353 ± N.A

* N.A.: Not Applicable (Sample size = 1)

았고, 색상군 7(옐로/골드/브론즈/코퍼 계열)은 0.60 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.48 \mu\text{g/g}$)으로 낮았다(Table 6, Figure 1C). Figure 1C에서 색상군 1과 2는 이상치가 다수 관찰되었으며, 최대값은 색상군 4(핑크/로즈/모브 계열)에서 23.0 $\mu\text{g/g}$ 로 나타났다. 비소 기준초과 16건 중 절반이 색상군 1과 2에 분포하였고, 색상군 2는 전체 기준초과 시료의 25.0%(6/24)를 차지하였다(Table 5). Welch 검정 결과 색상군 간 비소 함량 차이는 유의하였으며($F(8, 15.39) = 5.77, p = 0.002$), 사후검정에서 색상군 9(블루/틸 계열)는 색상군 3보다 유의하게 낮았다($p = 0.031$).

이러한 결과는 화이트/크림 및 베이지/샴페인 계열 시료에서 비소 함량이 상대적으로 높게 나타났음을 보여주며, 이들 색상에서 주로 사용되는 산화철, 티타늄 디옥사이드, 천연 운모 등 미네랄 계 안료에 비소가 불순물로 포함될 수 있다는 선행 보고와 맥락을 같이 한다^{19),21)}.

카드뮴 함량은 전체적으로 낮았으며, 색상군 2(베이지/샴페인 계열)가 0.18 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.23 \mu\text{g/g}$)으로 가장 높고 색상군 7(옐로/골드/브론즈/코퍼 계열)이 0.017 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.014 \mu\text{g/g}$)으로 가장 낮았다(Table 6, Figure 1F). Figure 1F에서 색상군 2, 3,

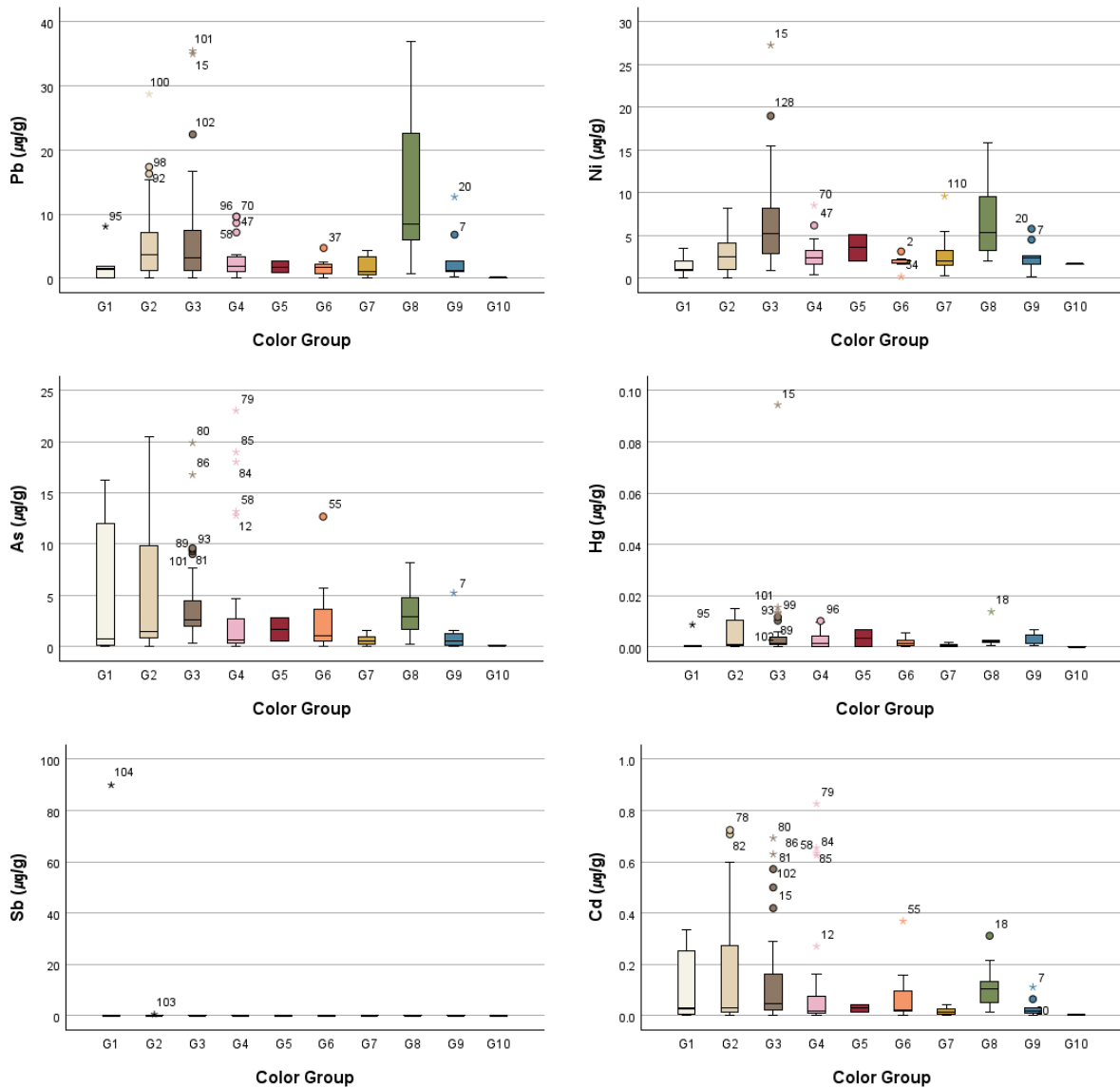


Figure 1. Boxplots of color-group-specific concentrations of heavy metals with regulatory limits in 144 eyeshadow samples. (A) Pb; (B) Ni; (C) As; (D) Hg; (E) Sb; (F) Cd.

4에서 이상치가 관찰되었고, 최대값은 색상군 4(옐로/골드/브론즈/코퍼 계열)에서 0.83 µg/g로 나타났다. Welch 검정 결과 색상군 간 카드뮴 함량 차이는 유의하였으며($F(8, 16.16) = 4.79, p = 0.004$), 사후검정에서 색상군 2는 색상군 7보다 유의하게 높았다($p = 0.037$). 절대 농도는 허용기준(5 µg/g)보다 충분히 낮았으나, 베이지/샴페인 계열에서 카드뮴이 상대적으로 높은 경향을 보였다.

수은 함량은 모든 색상군에서 0.001~0.006 µg/g 범위로 매우 낮았고, 색상군 3(브라운/토프 계열)의 평균이 0.0055 µg/g(±0.016 µg/g)으로 가장 높았다(Table 6, Figure 1D). Figure 1D에서 색상군 3에서 이상치가 관찰되었으며, 최대값은 0.094 µg/g이었다. Welch 검정 결과 색상군 간 수은 함량 차이는 유의하였으며($F(8, 15.31) = 4.19, p = 0.008$) 일부 색상군 쌍에서 유의한 쌍별 차이가 관찰되었으나, 모든 값이 허용기준(1 µg/g)을 크게 못미치는 수준을 보였다.

안티몬은 색상군 1(화이트/크림 계열)에서 평균 18.0 µg/g(±40.2 µg/g)으로 검출된 반면, 색상군 3~9에서는 모두 불검출이었다(Table 6, Figure

1E). 이는 색상군 1의 한 시료에서 89.9 µg/g이 검출된 이상치의 영향이며, 역시 색상군 2(베이지/샴페인 계열)의 한 시료에서 0.446 µg/g으로 검출된 경우를 제외하고 나머지 시료에서는 검출되지 않았다(Table 5). 분산이 0인 그룹이 다수여서 Welch 검정은 수행되지 않았고, 사후검정에서도 색상군 1과 다른 색상군 간 평균 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($p = 0.966$). 전체적으로 안티몬 오염은 드물었으나, 화이트/크림 계열의 극소수 시료에서 높은 농도가 관찰될 수 있음을 나타낸다.

국내 검출 허용기준이 따로 설정되어 있지 않은 중금속 중 구리 함량을 색상군별로 비교한 결과, 색상군 간 현저한 차이가 관찰되었다(Table 7, Figure 2A). 색상군 8(그린/올리브/민트 계열)의 평균 구리 함량은 1364.6 µg/g(±1183.1 µg/g)으로 가장 높았고, 색상군 9(블루/틸 계열)도 783.0 µg/g(±1203.3 µg/g)으로 높은 수준을 나타냈다. 반면 색상군 1(화이트/크림 계열)과 6(오렌지/코랄/피치 계열)은 각각 0.67 µg/g(±0.86 µg/g), 2.23 µg/g(±2.30 µg/g)으로 낮았다. Figure 2A에서 색상군 8과 9는 중앙값이 수백 µg/g 수준으로 높고

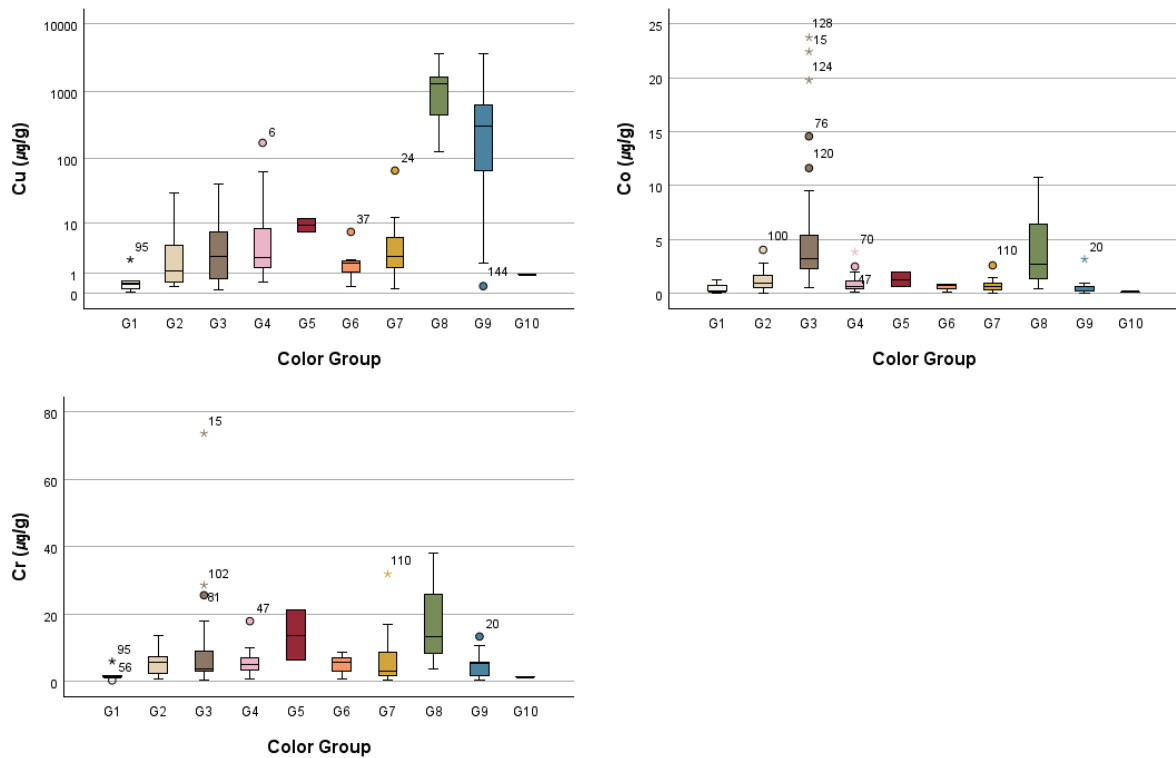


Figure 2. Boxplots of color-group-specific concentrations of heavy metals without specific regulatory limits in 144 eyeshadow samples. (A) Cu; (B) Co; (C) Cr.

사분위수 범위가 넓었으며, 색상군 8의 최대값은 3663.5 $\mu\text{g/g}$ 에 달했다. Welch 검정 결과 색상군 간 구리 함량 차이는 유의하였고($F(8, 17.69) = 5.35, p = 0.002$), 사후검정에서 색상군 1은 색상군 3(브라운/톤 계열)보다 유의하게 낮았다($p = 0.029$). 이와 같은 그린·블루 계열에서의 높은 구리 농도는 해당 색상의 발색에 구리 프탈로시아닌 등 구리계 안료가 사용된다는 점을 고려할 때⁶⁾, 이러한 안료에 포함된 구리 성분을 반영한 결과일 수 있다³¹⁾. 색상군 8과 9의 평균 함량이 다른 색상군에 비해 월등히 높았으나, 그룹 내 표준편차가 매우 커서 대부분의 쌍별 비교에서는 통계적 유의성에 도달하지 못했다($p > 0.05$). 이는 그린·블루 계열 시료 내에서도 구리 함량에 큰 차이가 존재하며, 색상을 구현하는 구리계 안료의 사용 여부와 사용량이 시료 간에 다를 수 있음을 나타낸다.

코발트 함량 역시 색상군 간 유의한 차이를 보였다(Table 7, Figure 2B). 색상군 3(브라운/토프 계열)의 평균 코발트 함량은 5.53 $\mu\text{g/g}(\pm 5.83 \mu\text{g/g})$ 으로 가장 높았고, 색상군 8(그린/올리브/민트 계열)은 4.22 $\mu\text{g/g}(\pm 3.53 \mu\text{g/g})$ 으로 두 번째로 높았다. 색상군 1, 6, 7, 9는 0.5~1.3 $\mu\text{g/g}$ 범위로 낮은 수준이었다. Figure 2B에서 색상군 3과 8은 이상치가 다수 관찰되었으며, 색상군 3의 최대값은 23.7 $\mu\text{g/g}$ 로 나타났다. Welch 검정 결과 색상군 간 코발트 함량 차이는 유의하였고($F(8, 16.42) = 4.16, p = 0.007$), 사후검정에서 색상군 3은 색상군 1, 2, 4, 6, 7, 9와 유의한 차이를 보였다($p \leq 0.002$). 이는 브라운/토프 계열 시료에서 코발트 함량이 다른 여러 색상군보다 일관되게 높았음을 의미한다.

크롬 함량은 색상군 간 차이가 상대적으로 작았고, Welch 검정 결과 통계적으로 유의하지 않았다($F(8, 15.96) = 2.26, p = 0.079$). 색상군 8(그린/올리브/민트 계열)의 평균 크롬 함량은 16.8 $\mu\text{g/g}(\pm 11.6 \mu\text{g/g})$ 으로 가장 높았고, 색상군 3(브라운/토프 계열)도 8.5 $\mu\text{g/g}(\pm 12.7 \mu\text{g/g})$ 으로 비교적 높았으며, 색상군 1, 2, 6, 7, 9는 2.1~6.5 $\mu\text{g/g}$ 범위에 분포하였다(Table 7, Figure 2C). Figure 2C에서 색상군 8은 중앙값과 사분위수 범위가 높고 이상치가 관찰되었으나, Welch 검정 결과 색상군 간 크롬 함량 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($F(8, 15.96) = 2.26, p = 0.079$). 다만 색상군 8의 평균값이 다른 색상군에 비해 일관되게 높은 경향

을 보여, 그린 계열 시료에서 크롬 함량이 상대적으로 높을 수 있음을 시사한다.

색상군별 중금속 함량 분석을 종합하면, 구리, 납, 니켈, 비소, 코발트 등 일부 중금속이 특정 색상군에서 상대적으로 높은 수준으로 나타나는 패턴이 관찰되었다. 특히 그린/올리브/민트 및 브라운/토프 계열 시료에서 납·니켈·구리·코발트 함량이 높고 기준 초과 사례가 집중되는 양상은, 이들 색상군에서 중금속 노출에 대한 주의가 필요함을 시사한다(19),20),21),25),31).

3.3. 명도별 중금속 함량

아이새도 시료를 명도에 따라 5단계(Very Light, Light, Medium, Dark, Very Dark)으로 분류하여 중금속 함량을 비교 분석한 결과, Very Dark에 해당하는 시료는 없었으나 여러 중금속에서 명도에 따른 평균 함량 및 분포 양상에 뚜렷한 차이가 관찰되었다(Table 8, Table 9; Figure 3, Figure 4). Welch 검정 결과, 납(Welch $p = 0.048$), 니켈(Welch $p < 0.001$), 구리(Welch $p = 0.032$), 코발트(Welch $p < 0.001$), 크롬(Welch $p < 0.001$)의 명도군 간 평균 중금속 함량 차이는 통계적으로 유의하였다. 반면 비소(Welch $p = 0.155$), 카드뮴(Welch $p = 0.055$), 수은(Welch $p = 0.561$)은 명도군 간 유의한 차이가 없었다.

납의 명도별 평균 함량은 Dark(10.30 $\mu\text{g/g} \pm 12.73 \mu\text{g/g}$) > Medium(4.81 $\mu\text{g/g} \pm 7.06 \mu\text{g/g}$) > Light(3.92 $\mu\text{g/g} \pm 4.43 \mu\text{g/g}$) > Very Light(2.75 $\mu\text{g/g} \pm 2.64 \mu\text{g/g}$) 순으로, 명도가 어두워질수록 높아지는 경향을 보였다(Table 8, Figure 3A). Figure 3A에서 Dark 명도군은 사분위수 범위가 넓고 최대값이 36.9 $\mu\text{g/g}$ 로 나타나, 그룹 내 변동성이 컸다. Welch 검정 결과 명도 간 납 함량 차이는 유의하였으나($F(3, 50.49) = 2.83, p = 0.048$), 사후검정에서는 대부분의 쌍별 비교에서 유의수준 0.05에 도달하지 못했다($p > 0.05$). 납 기준초과 7건 중 4건(57.1%)이 Dark 명도군에서 발생하였으며, 나머지는 Medium과 Light 명도군에 분포하였고 Very Light 명도군에서는 기준초과가 관찰되지 않았다(Table 5).

니켈의 명도별 평균 함량은 Dark(9.36 $\mu\text{g/g} \pm 7.34 \mu\text{g/g}$) > Medium(3.99 $\mu\text{g/g} \pm 2.89 \mu\text{g/g}$) > Light(3.07 $\mu\text{g/g} \pm 2.03 \mu\text{g/g}$) > Very

Light(2.05 µg/g ±1.43 µg/g) 순이었다(Table 8, Figure 3B). Figure 3B에서 Dark 명도군은 중앙값이 높고 사분위수 범위가 넓었으며, 최대값은 27.3 µg/g으로 관찰되었다. Welch 검정 결과 명도 간 니켈 함량 차이는 매우 유의하였고(F(3, 49.29) = 9.31, p < 0.001), 사후검정에서 Dark 명도군은 Very Light(p = 0.006) 및 Medium(p = 0.050)과, Medium 명도군은 Very Light와 각각 유의한 차이를 보였다[p ≤ 0.050].

비소의 명도별 평균 함량은 Very Light(5.59 µg/g ±7.19 µg/g), Light(4.01 µg/g ±5.98 µg/g), Dark(2.73 µg/g ±2.47 µg/g), Medium(2.60 µg/g ±3.22 µg/g) 순으로, 명도가 어두워질수록 감소하는 경향을 보였다(Table 8, Figure 3C). Figure 3C에서 Light 명도군은 최대값이 23.0 µg/g로 나타나 기준을 초과하는 시료를 포함하고 있었고, Medium 명도군에서도 여러 이상치가 관찰되었다. 그러나 Welch 검정 결과 명도 간 비소 함량 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(F(3, 53.75) = 1.82, p = 0.155).

카드뮴의 명도별 평균 함량은 Very Light(0.168

µg/g ±0.235 µg/g) > Dark(0.139 µg/g ±0.195 µg/g) > Light(0.133 µg/g ±0.207 µg/g) > Medium(0.066 µg/g ±0.108 µg/g) 순이었다(Table 8, Figure 3F). Figure 3F에서 Very Light와 Light 명도군에서 이상치가 관찰되었으며, 최대값은 Light 명도군에서 0.83 µg/g로 나타났다. Welch 검정 결과 명도 간 카드뮴 함량 차이는 유의수준에 근접했으나(F(3, 44.95) = 2.72, p = 0.055) 통계적으로 유의하지는 않았다. 세 명도군 모두 카드뮴 농도는 허용기준(5 µg/g)을 크게 미치지 못하였다.

수은의 명도별 평균 함량은 Dark 0.010 µg/g(±0.023 µg/g), Medium 0.003 µg/g(±0.003 µg/g), Light 0.002 µg/g(±0.004 µg/g), Very Light 0.002 µg/g(±0.003 µg/g)으로, 모든 명도군에서 0.002~0.010 µg/g의 매우 낮은 범위에 분포하였다(Table 8, Figure 3D). Welch 검정 결과 명도 간 수은 함량 차이는 유의하지 않았으며(F(3, 46.13) = 0.69, p = 0.561), 사후검정에서도 모든 쌍별 비교에서 유의한 차이가 관찰되지 않았다[p > 0.05].

Table 8. Mean concentrations (±SD) of heavy metals with regulatory limits (Pb, Ni, As, Hg, Sb, Cd) by lightness in 144 eyeshadow samples

Lightness	n	Pb (µg/g)	Ni (µg/g)	As (µg/g)	Hg (µg/g)	Sb (µg/g)	Cd (µg/g)
Very Light	24	2.745 ± 2.638	2.045 ± 1.427	5.590 ± 7.190	0.002 ± 0.003	3.764 ± 18.344	0.168 ± 0.235
Light	52	3.915 ± 4.431	3.065 ± 2.028	4.009 ± 5.980	0.002 ± 0.004	0.000 ± 0.000	0.133 ± 0.207
Medium	52	4.806 ± 7.057	3.989 ± 2.893	2.601 ± 3.216	0.003 ± 0.003	0.000 ± 0.000	0.066 ± 0.108
Dark	16	10.296 ± 12.733	9.355 ± 7.340	2.732 ± 2.472	0.010 ± 0.023	0.000 ± 0.000	0.139 ± 0.195
Very Dark	0	-	-	-	-	-	-

Table 9. Mean concentrations (±SD) of heavy metals without specific regulatory limits (Cu, Co, Cr) by lightness in 144 eyeshadow samples

Lightness	n	Cu (µg/g)	Co (µg/g)	Cr (µg/g)
Very Light	24	6.567 ± 25.843	0.696 ± 0.556	3.638 ± 2.701
Light	52	18.603 ± 66.518	1.294 ± 1.049	5.368 ± 3.152
Medium	52	252.241 ± 703.777	2.678 ± 3.419	7.149 ± 6.115
Dark	16	379.149 ± 965.414	6.965 ± 7.580	18.413 ± 18.547
Very Dark	0	-	-	-

안티몬은 Very Light 명도군에서만 평균 3.76 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 18.34 \mu\text{g/g}$)으로 검출되었고, Light, Medium, Dark 명도군에서는 모두 불검출($0.000 \mu\text{g/g}$)이었다(Table 8, Figure 3E). 이는 Very Light 명도군의 단일 시료에서 89.9 $\mu\text{g/g}$ 이 검출된 이상치의 영향이며, 나머지 시료에서는 검출되지 않았다(Table 5). 분산이 0인 그룹이 다수여서 Welch 검정은 수행되지 않았고, 사후검정에서도 Very Light와 다른 명도군 간 평균 차이는 유의하지 않았다($p = 0.748$).

구리의 명도별 평균 함량은 Dark($379.1 \mu\text{g/g}$ $\pm 965.4 \mu\text{g/g}$), Medium($252.2 \mu\text{g/g}$ $\pm 703.8 \mu\text{g/g}$),

Light($18.6 \mu\text{g/g}$ $\pm 66.5 \mu\text{g/g}$), Very Light($6.57 \mu\text{g/g}$ $\pm 25.84 \mu\text{g/g}$) 순으로 명도가 어두워질수록 크게 증가하였다(Table 9, Figure 4A). Dark와 Medium 명도군에서는 표준편차가 매우 크고, 최대값이 모두 $3000 \mu\text{g/g}$ 이상에 도달하여 일부 시료에서 매우 높은 구리 농도가 관찰되었다. Welch 검정 결과 명도 간 구리 함량 차이는 유의하였으며($F(3, 50.01) = 3.18, p = 0.032$), 사후검정에서 Dark 명도군은 Medium 명도군과 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$).

코발트의 명도별 평균 함량은 Dark($6.97 \mu\text{g/g}$ $\pm 7.58 \mu\text{g/g}$) > Medium($2.68 \mu\text{g/g}$ $\pm 3.42 \mu\text{g/g}$)

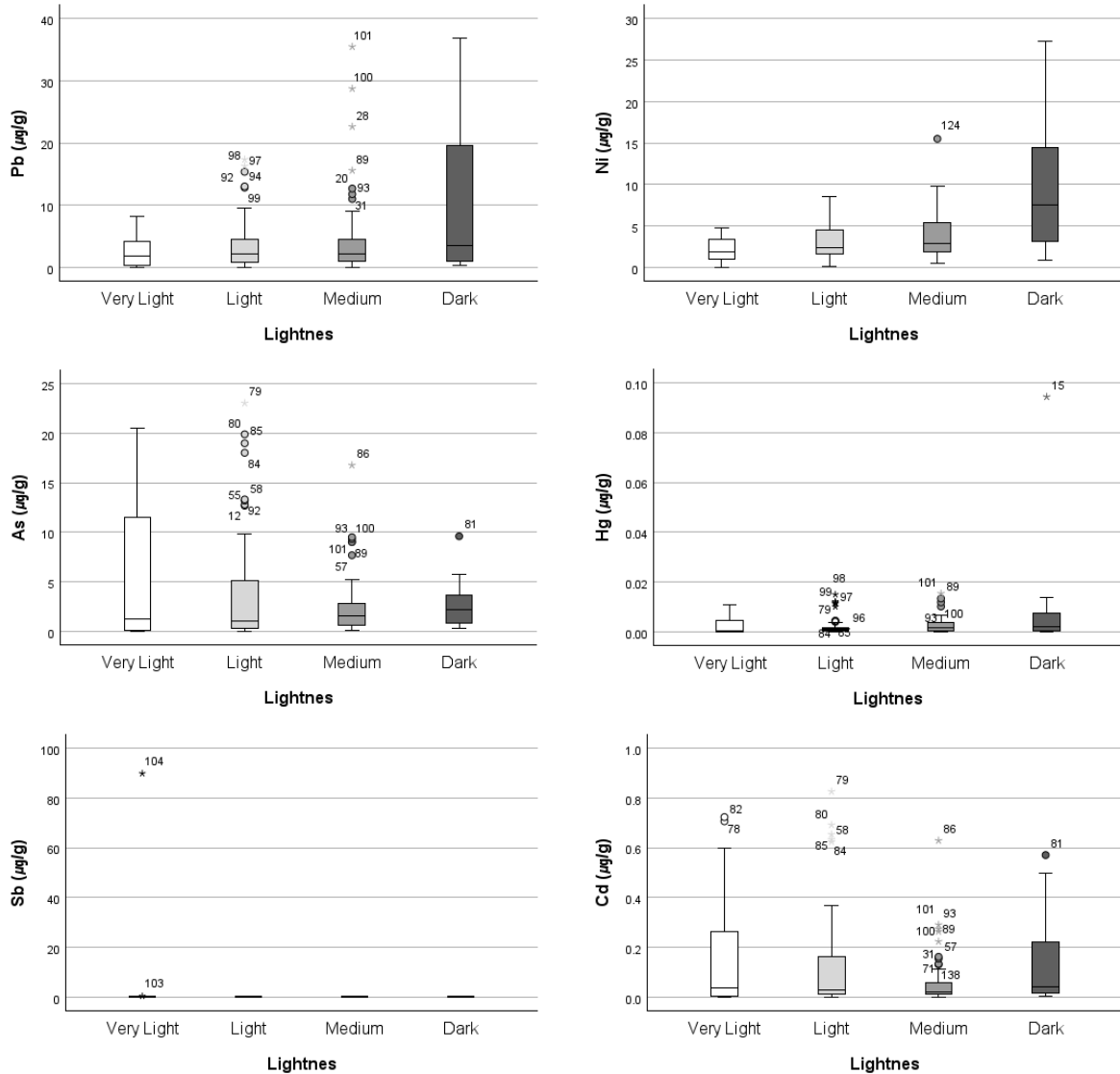


Figure 3. Boxplots of concentrations of heavy metals with regulatory limits by lightness category in 144 eyeshadow samples. (A) Pb; (B) Ni; (C) As; (D) Hg; (E) Sb; (F) Cd.

> Light($1.29 \mu\text{g/g} \pm 1.05 \mu\text{g/g}$) > Very Light($0.70 \mu\text{g/g} \pm 0.56 \mu\text{g/g}$) 순으로, 구리와 유사하게 명도가 어두울수록 증가하는 패턴을 보였다 (Table 9, Figure 4B). Figure 4B에서 Dark 명도군은 중앙값과 이상치가 높았으며, 최대값은 $23.7 \mu\text{g/g}$ 로 나타났다. Welch 검정 결과 명도 간 코발트 함량 차이는 매우 유의하였고($F(3, 50.35) = 11.57, p < 0.001$), 사후검정에서 Dark 명도군은 Very Light($p = 0.021$), Light($p = 0.040$)보다 유의하게 높았으며, Medium 명도군 역시 Very Light($p < 0.001$), Light($p = 0.033$)보다 유의하게 높았다($p \leq 0.040$).

크롬의 명도별 평균 함량은 Dark($18.41 \mu\text{g/g} \pm 18.55 \mu\text{g/g}$), Medium($7.15 \mu\text{g/g} \pm 6.12 \mu\text{g/g}$), Light($5.37 \mu\text{g/g} \pm 3.15 \mu\text{g/g}$), Very Light($3.64 \mu\text{g/g} \pm 2.70 \mu\text{g/g}$) 순으로 명도가 어두울수록 높아졌다(Table 9, Figure 4C). Figure 4C에서 Dark 명도군은 중앙값과 사분위수 범위가 높고, 최대값은 $73.6 \mu\text{g/g}$ 로 나타났다. Welch 검정 결과 명도 간 크롬 함량 차이는 매우 유의하였으며($F(3,$

$48.36) = 7.35, p < 0.001$), 사후검정에서 Dark 명도군과 Medium 명도군은 Very Light 명도군보다 각각 유의하게 높았다($p = 0.027, p = 0.004$).

명도별 결과를 종합하면, 납, 니켈, 구리, 코발트, 크롬은 명도가 어두울수록 평균 함량이 증가하는 공통된 패턴을 보였고, 특히 Dark 명도군에서 높은 평균값과 넓은 분포, 고농도 시료가 관찰되었다. 납 기준초과 7건 중 4건(57.1%)이 Dark 명도군이었고, 구리·코발트·크롬에서도 Dark 명도군의 최대값이 다른 명도군보다 뚜렷하게 높았다는 점은, 본 연구에서 어두운 명도의 시료들이 상대적으로 높은 중금속 함량과 관련되어 있을 가능성을 시사한다. 반면 비소, 카드뮴, 수은은 명도 간 차이가 통계적으로 유의하지 않거나 제한적이었으며, 안티몬은 매우 밝은 명도의 극소수 시료에서만 높은 농도가 관찰되었다.

3.4. 톤별 중금속 함량

아이세도 시료를 톤(Undertone)에 따라 Warm (따뜻한 톤), Neutral(중성 톤), Cool(차가운 톤)의

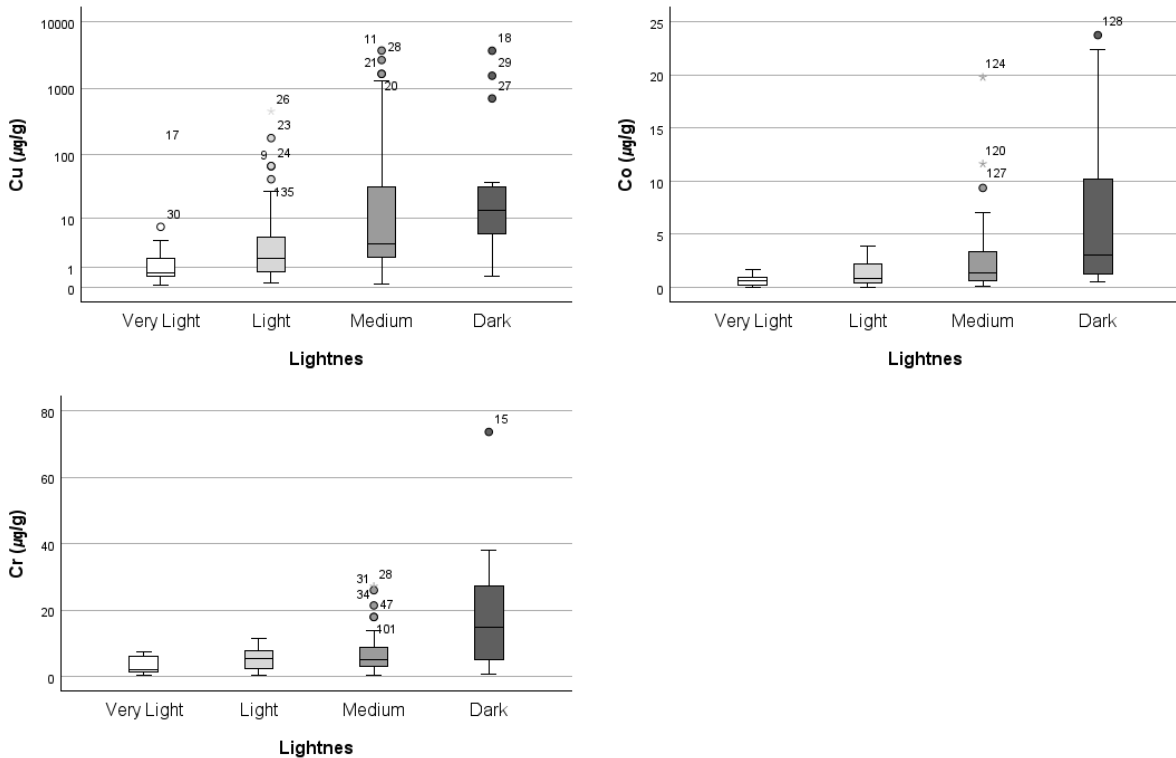


Figure 4. Boxplots of concentrations of heavy metals without specific regulatory limits by lightness category in 144 eyeshadow samples. (A) Cu; (B) Co; (C) Cr.

3가지로 분류하여 중금속 함량을 비교 분석한 결과, 여러 중금속에서 톤에 따른 평균 함량 및 분포 양상에 차이가 관찰되었다(Table 10, Table 11; Figure 5, Figure 6). 톤별 시료 분포는 Warm 51개, Neutral 68개, Cool 25개로 표본 수 불균형이 있어, Welch 분산분석(Welch ANOVA)과 Games-Howell 사후검정을 적용하였다. 그 결과, 납(Welch $p = 0.034$), 니켈(Welch $p = 0.020$), 비소(Welch $p = 0.004$), 카드뮴(Welch $p = 0.004$), 코발트(Welch $p < 0.001$)는 톤 간 평균 중금속 함량 차이가 통계적으로 유의하였다. 반면 수은(Welch $p = 0.062$), 구리(Welch $p = 0.519$), 크롬(Welch $p = 0.296$)은 유의한 차이가 나타나지 않았다. 안티몬은 대부분 불검출되어 통계 분석에 제한이 있었다.

납의 톤별 평균 함량은 Neutral 톤에서 $6.38 \mu\text{g/g} (\pm 8.53 \mu\text{g/g})$ 으로 가장 높았고, Warm 톤 $3.19 \mu\text{g/g} (\pm 4.98 \mu\text{g/g})$, Cool 톤 $3.50 \mu\text{g/g} (\pm 3.54 \mu\text{g/g})$ 순이었다(Table 10, Figure 5A). Figure 5A에서 Neutral 톤은 사분위수 범위가 넓고 최대값은 $36.9 \mu\text{g/g}$ 으로 그룹 내 변동성이 크게 나타났다. Welch 검정 결과 톤 간 납 함량 차이는 유의하였으며($F(2, 84.02) = 3.53, p = 0.034$), 사후검정에서 Neutral 톤은 Warm 톤보다 유의하게 높았다($p = 0.032$). 납 기준초과 7건 중 6건이 Neutral 톤, 1건이 Warm 톤에 속해 있어, 조사 대상 범위에서 기

준초과 사례가 Neutral 톤에 주로 분포하였다(Table 5).

니켈 함량은 톤 간 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. Neutral 톤의 평균 니켈 함량은 $4.7 \mu\text{g/g} (\pm 4.6 \mu\text{g/g})$ 으로 가장 높았으며, Warm은 $3.4 \mu\text{g/g} (\pm 3.2 \mu\text{g/g})$, Cool은 $2.8 \mu\text{g/g} (\pm 1.8 \mu\text{g/g})$ 순으로 낮아졌다(Table 10, Figure 5B). 박스플롯(Figure 5B)에서 Neutral 톤은 최대값이 $27.3 \mu\text{g/g}$ 으로 관찰되었으며 이상치도 다수 나타났다. Welch 검정 결과 톤 간 니켈 함량의 차이는 유의하였으며($F(2, 88.37) = 4.08, p = 0.020$), 사후검정(Games-Howell)에서 Neutral 톤은 Cool 톤과 유의한 차이를 보였다($p = 0.014$).

비소의 톤별 평균 함량은 Neutral 톤 $5.18 \mu\text{g/g} (\pm 6.16 \mu\text{g/g})$, Cool 톤 $2.50 \mu\text{g/g} (\pm 3.72 \mu\text{g/g})$, Warm 톤 $2.10 \mu\text{g/g} (\pm 3.49 \mu\text{g/g})$ 순이었다(Table 10, Figure 5C). Figure 5C에서 Neutral 톤은 이상치가 다수 관찰되었으며, 최대값은 $23.0 \mu\text{g/g}$ 로 나타났다. Welch 검정 결과 톤 간 비소 함량 차이는 유의하였으며($F(2, 70.79) = 6.09, p = 0.004$), 사후검정에서 Neutral 톤은 Warm($p = 0.002$)과 Cool($p = 0.035$) 톤보다 모두 유의하게 높았다. 비소 기준초과 16건 중 상당수가 Neutral 톤에 분포하여, 기준초과 사례가 Neutral 톤에 상대적으로 집중되는 양상이 관찰되었다(Table 5). 이러한 패턴은 Neutral 톤 시료의 색상, 특히 화이트/크림 및

Table 10. Mean concentrations (\pm SD) of heavy metals with regulatory limits (Pb, Ni, As, Hg, Sb, Cd) by undertone in 144 eyeshadow samples

Undertone	n	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	As ($\mu\text{g/g}$)	Hg ($\mu\text{g/g}$)	Sb ($\mu\text{g/g}$)	Cd ($\mu\text{g/g}$)
Warm	51	3.189 ± 4.984	3.441 ± 3.205	2.096 ± 3.492	0.002 ± 0.002	0.009 ± 0.062	0.060 ± 0.122
Neutral	68	6.381 ± 8.527	4.708 ± 4.582	5.178 ± 6.161	0.005 ± 0.012	1.322 ± 10.900	0.170 ± 0.221
Cool	25	3.502 ± 3.537	2.799 ± 1.836	2.504 ± 3.717	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000	0.080 ± 0.133

Table 11. Mean concentrations (\pm SD) of heavy metals without specific regulatory limits (Cu, Co, Cr) by undertone in 144 eyeshadow samples

Undertone	n	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Co ($\mu\text{g/g}$)	Cr ($\mu\text{g/g}$)
Warm	51	121.360 \pm 459.334	1.949 \pm 3.522	6.789 \pm 7.063
Neutral	68	99.292 \pm 488.893	3.089 \pm 4.337	7.826 \pm 10.451
Cool	25	294.666 \pm 789.348	0.904 \pm 0.933	5.553 \pm 4.101

베이지/샴페인 계열에서 산화철, 티타늄, 디옥사이드, 천연 운모 등 미네랄 계 안료가 주로 사용되고, 이들 안료에 비소 불순물이 포함될 수 있다는 선행 연구와도 부합한다^{19),21)}.

수은의 톤별 평균 함량은 Neutral 톤 0.0049 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.012 \mu\text{g/g}$), Cool 톤 0.0024 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.002 \mu\text{g/g}$), Warm 톤 0.0017 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.002 \mu\text{g/g}$)으로 모두 0.001~0.005 $\mu\text{g/g}$ 범위에 해당하였다(Table 10, Figure 5D). Figure 5D에서 Neutral 톤에서

이상치가 관찰되었고 최대값은 0.094 $\mu\text{g/g}$ 로 나타났다, Welch 검정에서 톤 간 수는 함량 차이는 유의수준에 도달하지 않았고($F(2, 74.83) = 2.89, p = 0.062$), 사후검정에서도 모든 쌍별 비교에서 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$).

카드뮴의 톤별 평균 함량은 Neutral 톤 0.170 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.221 \mu\text{g/g}$), Cool 톤 0.080 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.133 \mu\text{g/g}$), Warm 톤 0.060 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.122 \mu\text{g/g}$) 순이었다(Table 10, Figure 5F). Figure 5F에서 Neutral

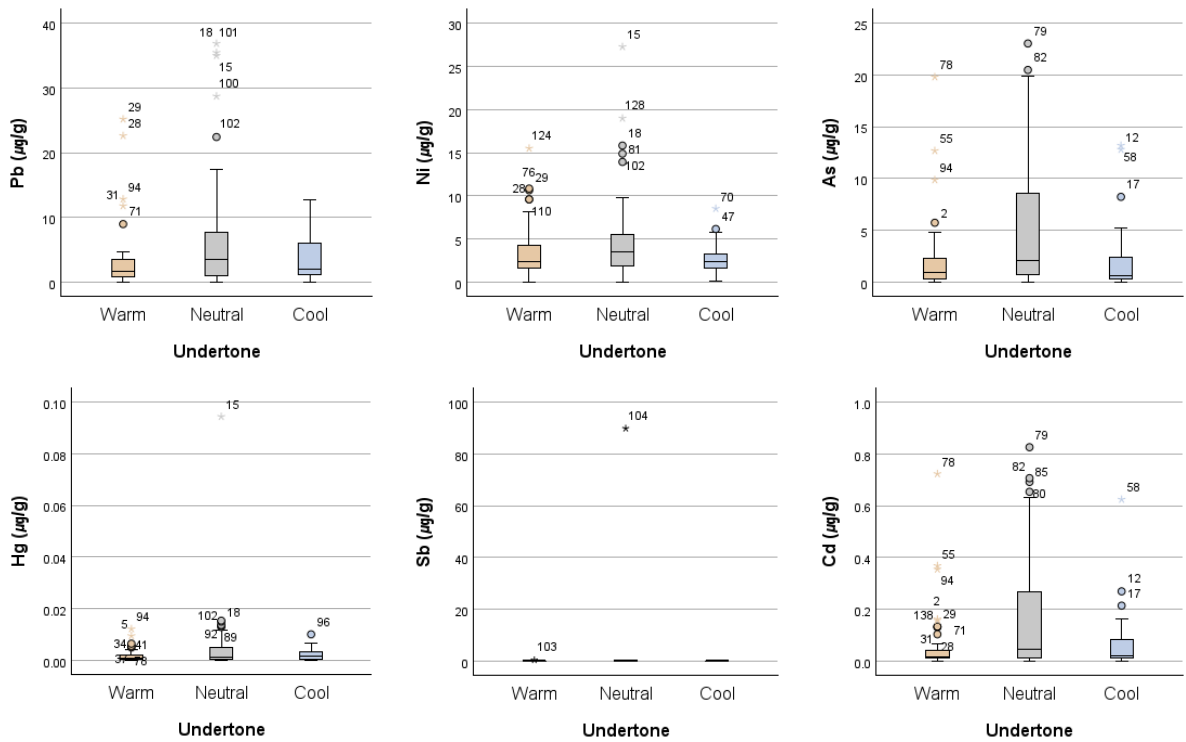


Figure 5. Boxplots of concentrations of heavy metals with regulatory limits by undertone category in 144 eyeshadow samples. (A) Pb; (B) Ni; (C) As; (D) Hg; (E) Sb; (F) Cd.

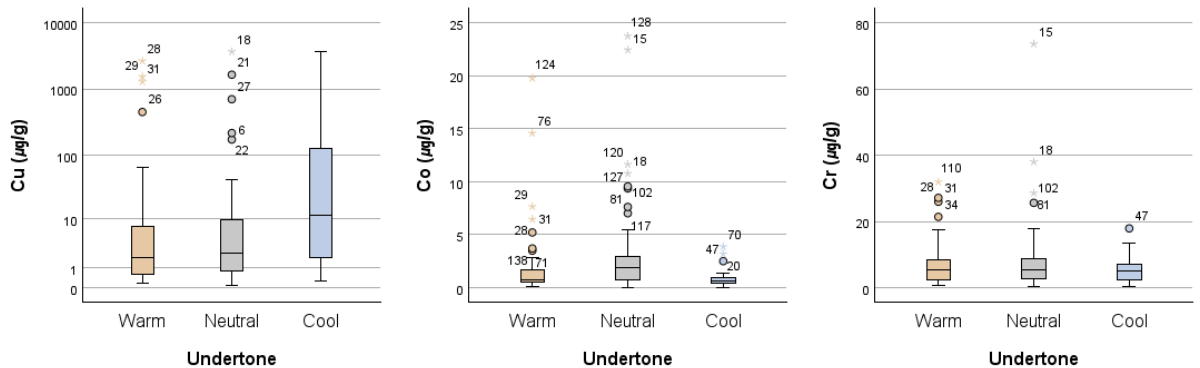


Figure 6. Boxplots of concentrations of heavy metals without specific regulatory limits by undertone category in 144 eyeshadow samples. (A) Cu; (B) Co; (C) Cr.

톤에서는 여러 이상치가 관찰되었으며, 최대값은 0.826 µg/g로 나타났다. Welch 검정 결과 톤 간 카드뮴 함량 차이는 유의하였으며($F(2, 70.14) = 6.10, p = 0.004$), 사후검정에서 Neutral 톤은 Warm 톤보다 유의하게 높았고($p = 0.002$), Cool 톤과는 경계 수준의 차이를 보였다($p = 0.051$). 모든 톤에서 카드뮴 농도는 허용기준(5 µg/g)을 크게 밑도는 수준을 나타내었다.

안티몬의 톤별 평균 함량은 Neutral 톤에서만 1.32 µg/g(± 10.90 µg/g)으로 나타났고, Warm 톤 0.009 µg/g(± 0.062 µg/g)과 Cool 톤 0.000 µg/g에서는 거의 검출되지 않았다(Table 10, Figure 5E). 이는 Neutral 톤에 속한 단일 시료에서 89.88 µg/g의 높은 농도가 검출된 이상치의 영향이며, 나머지 시료에서는 대부분 불검출이었다(Table 5). 분산 구조의 특성상 Welch 검정과 사후검정 결과는 제한적으로 해석되어야 하며, 전체적으로 안티몬 오염은 특정 시료에 국한된 것으로 보인다.

구리 함량을 톤별로 비교한 결과, Cool 톤의 평균 구리 함량은 294.7 µg/g(± 789.3 µg/g)으로 가장 높았으며, Warm은 121.4 µg/g(± 459.3 µg/g), Neutral은 99.3 µg/g(± 488.9 µg/g) 순이었다(Table 11, Figure 6A). Figure 6A에서 Cool 톤은 최대값이 3686.2 µg/g에 이르고 사분위수 범위가 넓어 그룹 내 변동성이 매우 컸다. 그러나 Welch 검정 결과 톤 간 구리 함량 차이는 유의하지 않았으며($F(2, 57.67) = 0.66, p = 0.519$), 사후검정에서도 모든 쌍별 비교에서 유의한 차이가 관찰되지 않았다($p > 0.05$).

코발트의 톤별 평균 함량은 Neutral 톤 3.09 µg/g(± 4.34 µg/g), Warm 톤 1.95 µg/g(± 3.52 µg/g), Cool 톤 0.90 µg/g(± 0.93 µg/g) 순이었다(Table 11, Figure 6B). Figure 6B에서 Neutral 톤은 이상치를 포함하고 있었으며, 최대값은 23.7 µg/g로 나타났다. Welch 검정 결과 톤 간 코발트 함량 차이는 매우 유의하였고($F(2, 89.71) = 8.77, p < 0.001$), 사후검정에서 Neutral 톤은 Cool 톤보다 유의하게 높았다($p = 0.001$).

크롬의 톤별 평균 함량은 Neutral 톤 7.83 µg/g(± 10.45 µg/g), Warm 톤 6.79 µg/g(± 7.06 µg/g), Cool 톤 5.55 µg/g(± 4.10 µg/g)이었으며(Table 11, Figure 6C), Neutral 톤에서 중앙값과 사분위수 범위가 상대적으로 높은 양상을 보였다.

그러나 Welch 검정 결과 톤 간 크롬 함량 차이는 유의하지 않았고($F(2, 88.44) = 1.23, p = 0.296$), 사후검정에서도 유의한 쌍별 차이는 나타나지 않았다($p > 0.05$).

톤별 결과를 종합하면, Neutral 톤에서 납, 니켈, 비소, 카드뮴, 코발트의 평균 함량이 Warm 및 Cool 톤보다 다소 높은 값으로 나타났으나, 이러한 톤 간 중금속 함량의 차이는 일부 금속에 한정되어 있었고 전반적인 차이의 크기도 크지 않았다. 이러한 결과만으로는 톤이 중금속 함량을 구분하는 뚜렷한 기준이 되는지 단정하기 어렵고, 색상군과 명도 분포 등 다른 분류 변수와의 관계를 함께 고려한 추가 분석이 필요하다.

3.5. 제형별 중금속 함량

아이세도 시료를 제형에 따라 압축파우더형(Pressed Powder), 크림형(Cream), 액체형(Liquid)의 3가지로 분류하여 중금속 함량을 비교 분석한 결과, 대부분의 중금속에서 제형 간 평균 함량 및 분포 양상에 뚜렷한 차이가 관찰되었다(Table 12, Table 13; Figure 7, Figure 8). 제형별 시료의 수는 압축파우더형 120개, 크림형 15개, 액체형 9개로 표본 수 불균형(최대 13.3배 차이)이 관찰되어, Welch 분산분석(Welch ANOVA)과 Games-Howell 사후검정을 적용하였다. 그 결과, 납(Welch $p < 0.001$), 니켈(Welch $p < 0.001$), 비소(Welch $p < 0.001$), 수은(Welch $p = 0.001$), 카드뮴(Welch $p < 0.001$), 구리(Welch $p = 0.012$), 코발트(Welch $p = 0.027$), 크롬(Welch $p < 0.001$)은 제형 간 평균 중금속 함량 차이가 통계적으로 매우 유의하였다. 반면 안티몬은 대부분 불검출되어 통계 분석에 제약이 있었다.

납의 제형별 평균 함량은 압축파우더형 5.47 µg/g(± 7.28 µg/g), 크림형 1.26 µg/g(± 2.23 µg/g), 액체형 0.94 µg/g(± 0.72 µg/g) 순으로 압축파우더형에서 가장 높았다(Table 12, Figure 7A). Figure 7A에서 압축파우더형은 사분위수 범위가 넓고 최대값이 36.9 µg/g로 이상치가 다수 관찰되었다. Welch 검정 결과 제형 간 납 함량 차이는 매우 유의하였고($F(2, 39.64) = 20.29, p < 0.001$), 사후검정에서 압축파우더형은 크림형($p < 0.001$)과 액체형($p < 0.001$) 모두보다 유의하게 높았다. 납 기준 초과 7건은 모두 압축파우더형에서만 발생하였고,

크림형과 액체형에서는 기준초과 사례가 관찰되지 않았다(Table 5). 이는 압축파우더형 제형이 납 기준초과 위험과 관련이 있을 가능성을 시사한다.

니켈의 제형별 평균 함량은 압축파우더형 4.40 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 3.99 \mu\text{g/g}$), 액체형 1.80 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 1.41 \mu\text{g/g}$), 크림형 1.40 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 1.07 \mu\text{g/g}$) 순이었다(Table

Table 12. Mean concentrations (\pm SD) of heavy metals with regulatory limits (Pb, Ni, As, Hg, Sb, Cd) by texture in 144 eyeshadow samples

Texture	n	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	As ($\mu\text{g/g}$)	Hg ($\mu\text{g/g}$)	Sb ($\mu\text{g/g}$)	Cd ($\mu\text{g/g}$)
Pressed Powder	120	5.473 ± 7.281	4.403 ± 3.987	3.747 ± 5.255	0.004 ± 0.009	0.753 ± 8.205	0.124 ± 0.190
Cream	15	1.256 ± 2.226	1.404 ± 1.066	4.088 ± 5.642	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.108 ± 0.182
Liquid	9	0.943 ± 0.716	1.797 ± 1.411	1.179 ± 1.048	0.001 ± 0.002	0.000 ± 0.000	0.018 ± 0.021

Table 13. Mean concentrations (\pm SD) of heavy metals without specific regulatory limits (Cu, Co, Cr) by texture in 144 eyeshadow samples

Texture	n	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Co ($\mu\text{g/g}$)	Cr ($\mu\text{g/g}$)
Pressed Powder	120	168.503 \pm 591.971	2.528 \pm 4.016	8.039 \pm 8.949
Cream	15	4.272 \pm 7.324	1.038 \pm 1.532	2.563 \pm 2.485
Liquid	9	2.600 \pm 1.589	1.446 \pm 1.095	1.561 \pm 1.143

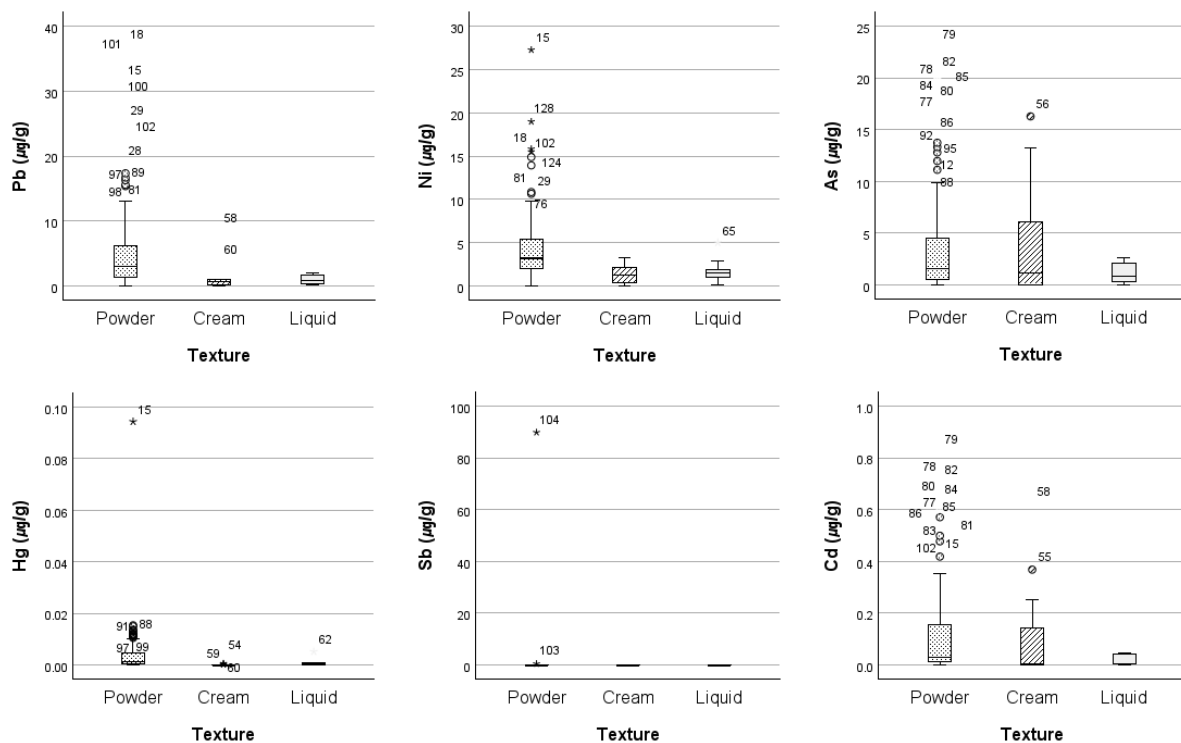


Figure 7. Boxplots of concentrations of heavy metals with regulatory limits by texture category in 144 eyeshadow samples. (A) Pb; (B) Ni; (C) As; (D) Hg; (E) Sb; (F) Cd. In this figure, 'Powder' refers to pressed powder textures.

12, Figure 7B). Figure 7B에서 압축파우더형은 중양값이 높고 이상치가 관찰되었으며, 최대값은 27.3 µg/g으로 나타났다. Welch 검정 결과 제형 간 니켈 함량 차이는 매우 유의하였고(F(2, 25.47) = 21.93, p < 0.001), 사후검정에서 압축파우더형은 크림형(p < 0.001)과 액체형(p = 0.017) 모두보다 유의하게 높았다.

비소의 제형별 평균 함량은 크림형 4.09 µg/g(±5.64 µg/g), 압축파우더형 3.75 µg/g(±5.26 µg/g), 액체형 1.18 µg/g(±1.05 µg/g) 순으로 액체형에서 가장 낮았다(Table 12, Figure 7C). Figure 7C에서 크림형과 압축파우더형 모두 이상치가 관찰되었고, 크림형의 최대값은 23.0 µg/g에 도달하였다. Welch 검정 결과 제형 간 비소 함량 차이는 매우 유의하였으며(F(2, 30.58) = 10.07, p < 0.001), 사후검정에서 압축파우더형과 크림형은 모두 액체형보다 유의하게 높았다(각각 p = 0.003). 비소 기준초과 16건은 대부분 압축파우더형에서, 일부는 크림형에서 관찰되었고, 액체형에서는 기준초과 사례가 없었다(Table 5). 이러한 결과는 본 연구에서 액체형 제형의 비소 기준초과 가능성이 다른 제형에 비해 상대적으로 낮았음을 보여준다.

수은의 제형별 평균 함량은 압축파우더형 0.004 µg/g(±0.009 µg/g), 액체형 0.001 µg/g(±0.002 µg/g), 크림형 0.000 µg/g으로, 모든 제형에서 절대농도는 매우 낮았다(Table 12, Figure 7D). Figure 7D에서 압축파우더형은 소수의 이상치를 포함하고 있었으며, 최대값은 0.094 µg/g이었다. Welch 검정 결과 제형 간 수은 함량 차이는 유의하였으나

(F(2, 20.24) = 11.22, p = 0.001), 모든 값이 허용기준(1 µg/g)을 충분히 밑도는 수준이었다.

카드뮴의 제형별 평균 함량은 압축파우더형 0.124 µg/g(±0.190 µg/g), 크림형 0.108 µg/g(±0.182 µg/g), 액체형 0.018 µg/g(±0.021 µg/g) 순으로 액체형에서 가장 낮았다(Table 12, Figure 7F). Figure 7F에서 압축파우더형과 크림형에서는 이상치가 관찰되었으나, 액체형에서는 이상치가 나타나지 않았다. Welch 검정 결과 제형 간 카드뮴 함량 차이는 매우 유의하였고(F(2, 34.18) = 17.02, p < 0.001), 사후검정에서 압축파우더형과 크림형은 모두 액체형보다 유의하게 높았다(각각 p < 0.001, p = 0.010). 세 제형 모두에서 카드뮴 농도는 허용기준(5 µg/g)보다 현저히 낮았다.

안티몬은 크림형과 액체형에서 모두 불검출이었고, 압축파우더형에서만 평균 0.75 µg/g(±8.21 µg/g)으로 검출되었다(Table 12, Figure 7E). 압축파우더형의 높은 표준편차는 단일 시료에서 측정된 89.9 µg/g의 극단값에 기인하며, 나머지 시료에서는 대부분 불검출이었다(Table 5). 분산이 0인 그룹이 존재해 Welch 검정은 수행되지 않았고, 사후검정에서도 유의한 차이는 나타나지 않았다[p > 0.05].

구리의 제형별 평균 함량은 압축파우더형 168.5 µg/g(±592.0 µg/g)에서 가장 높았고, 크림형 4.27 µg/g(±7.32 µg/g), 액체형 2.60 µg/g(±1.59 µg/g)에서는 낮았다(Table 13, Figure 8A). 압축파우더형은 최대값이 3000 µg/g 이상에 도달하는 극단적인 이상치를 포함하고 있었으며, 사분위수 범

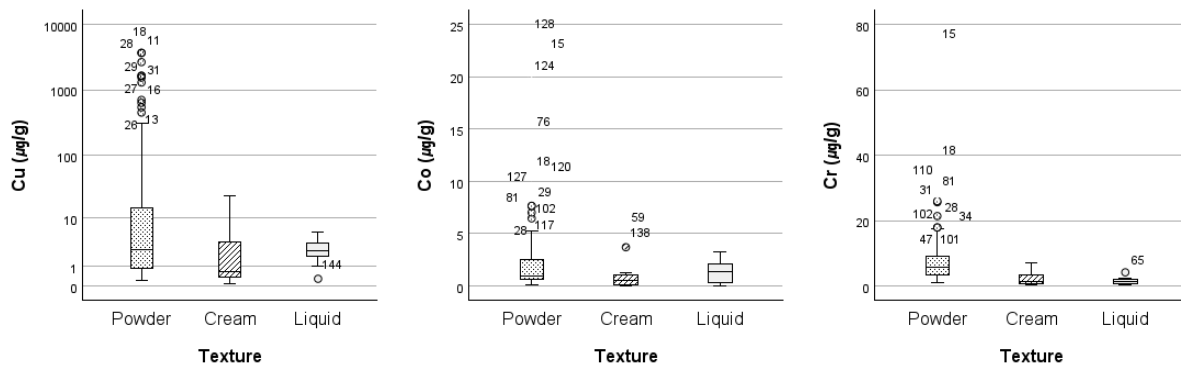


Figure 8. Boxplots of concentrations of heavy metals without specific regulatory limits by texture category in 144 eyeshadow samples. (A) Cu; (B) Co; (C) Cr. In this figure, 'Powder' refers to pressed powder textures.

위도 넓었다. Welch 검정 결과 제형 간 구리 함량 차이는 유의하였으며($F(2, 37.84) = 4.98, p = 0.012$), 사후검정에서 압축파우더형은 크림형보다 유의하게 높았다($p = 0.011$).

코발트의 제형별 평균 함량은 압축파우더형 2.53 $\mu\text{g/g}(\pm 4.02 \mu\text{g/g})$, 액체형 1.45 $\mu\text{g/g}(\pm 1.10 \mu\text{g/g})$, 크림형 1.04 $\mu\text{g/g}(\pm 1.53 \mu\text{g/g})$ 순이었다 (Table 13, Figure 8B). Figure 8B에서 압축파우더형은 이상치를 포함하고 있었고, 최대값은 23.7 $\mu\text{g/g}$ 에 달했다. Welch 검정 결과 제형 간 코발트 함량 차이는 유의하였으나($F(2, 29.26) = 4.10, p = 0.027$), 사후검정에서는 명확한 쌍별 유의성이 관찰되지 않았고($p > 0.05$), 압축파우더형이 다른 제형보다 전반적으로 높은 수준을 유지하는 경향만 확인되었다.

크롬의 제형별 평균 함량은 압축파우더형 8.04 $\mu\text{g/g}(\pm 8.95 \mu\text{g/g})$, 크림형 2.56 $\mu\text{g/g}(\pm 2.49 \mu\text{g/g})$, 액체형 1.56 $\mu\text{g/g}(\pm 1.14 \mu\text{g/g})$ 순으로 압축파우더형이 가장 높았다(Table 13, Figure 8C). Figure 8C에서 압축파우더형은 최대값이 73.6 $\mu\text{g/g}$ 로 나타나 이상치를 다수 포함하고 있었다. Welch 검정 결과 제형 간 크롬 함량 차이는 매우 유의하였으며($F(2, 40.61) = 25.43, p < 0.001$), 사후검정에서 압축파우더형은 크림형($p < 0.001$)과 액체형($p < 0.001$)보다 모두 유의하게 높았다.

제형별 결과를 종합하면, 압축파우더형 아이새도

가 크림형과 액체형에 비해 대부분의 중금속에서 더 높은 평균 함량과 넓은 분포를 보였고, 납·비소·안티몬 기준초과 시료의 87.5%가 압축파우더형이었다. 액체형은 다른 제형들에 비해 대체로 낮은 중금속 농도 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 제형 구분이 아이새도 시료의 중금속 함량 수준과 관계있는 특성임을 시사하지만, 제형 자체의 효과와 각 제형과 관련된 안료 조성·함량, 희석 정도, 제조 공정의 차이를 구분하여 평가하기 위해서는 추가적인 분석이 필요하다.

또한 본 연구에서는 제품형태(팔레트, 스틱, 액상 어플리케이터, 단지형) 분류도 수행하였으나, 모든 팔레트형 시료가 제형 분류에서 압축파우더형과, 모든 액상 어플리케이터형 시료가 액체형과 일치하여 제품형태와 제형 간 분석 결과가 중복되는 양상을 보여, 결과 제시에서는 제형 분류만을 중심으로 기술하였다.

3.6. 광택별 중금속 함량

아이새도 시료를 광택(Finish type)에 따라 무광(Matte), 펄(Pearl), 글리터(Glitter)의 3가지로 분류하여 중금속 함량을 비교 분석한 결과, 거의 모든 중금속에서 광택에 따른 평균 함량에 뚜렷한 차이가 관찰되었다(Table 14, Table 15; Figure 9, Figure 10). 광택별 시료 분포는 무광 95개, 펄 45개, 글리터 4개로 표본 수 불균형(최대 24배 차이)

Table 14. Mean concentrations (\pm SD) of heavy metals with regulatory limits (Pb, Ni, As, Hg, Sb, Cd) by finish type in 144 eyeshadow samples

Finsh Type	n	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	As ($\mu\text{g/g}$)	Hg ($\mu\text{g/g}$)	Sb ($\mu\text{g/g}$)	Cd ($\mu\text{g/g}$)
Matte	95	6.477	4.837	5.277	0.005	0.000	0.169
		± 7.863	± 4.273	± 5.675	± 0.010	± 0.000	± 0.208
Pearl	45	1.519	2.295	0.428	0.001	0.000	0.014
		± 1.560	± 1.715	± 0.406	± 0.001	± 0.000	± 0.013
Glitter	4	0.098	0.712	0.250	0.000	22.582	0.003
		± 0.086	± 0.668	± 0.264	± 0.000	± 44.868	± 0.002

Table 15. Mean concentrations (\pm SD) of heavy metals without specific regulatory limits (Cu, Co, Cr) by finish type in 144 eyeshadow samples

Finsh Type	n	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Co ($\mu\text{g/g}$)	Cr ($\mu\text{g/g}$)
Matte	95	152.896 \pm 548.909	3.177 \pm 4.341	8.141 \pm 9.595
Pearl	45	127.554 \pm 560.689	0.642 \pm 0.579	5.266 \pm 5.417
Glitter	4	10.681 \pm 20.573	0.323 \pm 0.224	1.707 \pm 0.554

이 관찰되어, Welch 분산분석(Welch ANOVA)과 Games-Howell 사후검정을 적용하였다. 그 결과, 납(Welch $p < 0.001$), 니켈(Welch $p < 0.001$), 비소(Welch $p < 0.001$), 수은(Welch $p < 0.001$), 카드뮴(Welch $p < 0.001$), 구리(Welch $p = 0.023$), 코발트(Welch $p < 0.001$), 크롬(Welch $p < 0.001$)은 광택 간 평균 중금속 함량 차이가 통계적으로 매우 유의하였다. 안티몬(Sb)은 무광과 펄에서 불검출이었고 글리터에서만 검출되어 통계 분석에 제한이 있었다.

납의 광택별 평균 함량은 무광 6.48 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 7.86 \mu\text{g/g}$), 펄 1.52 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 1.56 \mu\text{g/g}$), 글리터 0.098 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.086 \mu\text{g/g}$) 순으로 무광에서 가장 높았고 글리터에서 가장 낮았다(Table 14, Figure 9A). 글리터의 최대값은 0.217 $\mu\text{g/g}$ 에 불과하여 전반적으로 매우 낮은 수준이었다. Welch 검정 결과 광택 간 납 함량 차이는 매우 유의하였으며($F(2, 82.65) = 48.39, p < 0.001$), 사후검정에서 무광은 펄($p < 0.001$)과 글리터($p < 0.001$) 모두보다, 펄은 글리터보다 유의하게 높았다($p < 0.001$). 납 기준초과 7건은 모두 무광 마감에서만 발생하였고, 펄과 글리터

에서는 기준초과 사례가 관찰되지 않았다. 이는 무광 마감의 기준초과와 관련이 있을 가능성을 시사한다.

니켈의 평균 함량은 무광 4.84 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 4.27 \mu\text{g/g}$), 펄 2.30 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 1.72 \mu\text{g/g}$), 글리터 0.71 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.67 \mu\text{g/g}$) 순으로 역시 무광에서 가장 높았다(Table 14, Figure 9B). Figure 9B에서 무광은 중앙값이 높고 이상치도 다수 관찰되었으며, 최대값은 27.3 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. Welch 검정 결과 광택 간 니켈 함량 차이는 매우 유의하였고($F(2, 15.33) = 26.85, p < 0.001$), 사후검정에서 무광은 펄($p = 0.001$)과 글리터($p < 0.001$) 모두보다 유의하게 높았다.

비소의 광택별 평균 함량은 무광 5.28 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 5.68 \mu\text{g/g}$), 펄 0.43 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.41 \mu\text{g/g}$), 글리터 0.25 $\mu\text{g/g}$ ($\pm 0.26 \mu\text{g/g}$)으로, 무광이 펄과 글리터에 비해 현저히 높았다(Table 14, Figure 9C). Figure 9C에서 무광은 이상치가 다수 관찰되었고, 최대값은 23.0 $\mu\text{g/g}$ 로 나타났다. Welch 검정 결과 광택 간 비소 함량 차이는 매우 유의하였으며($F(2, 11.14) = 33.57, p < 0.001$), 사후검정에서 무광은

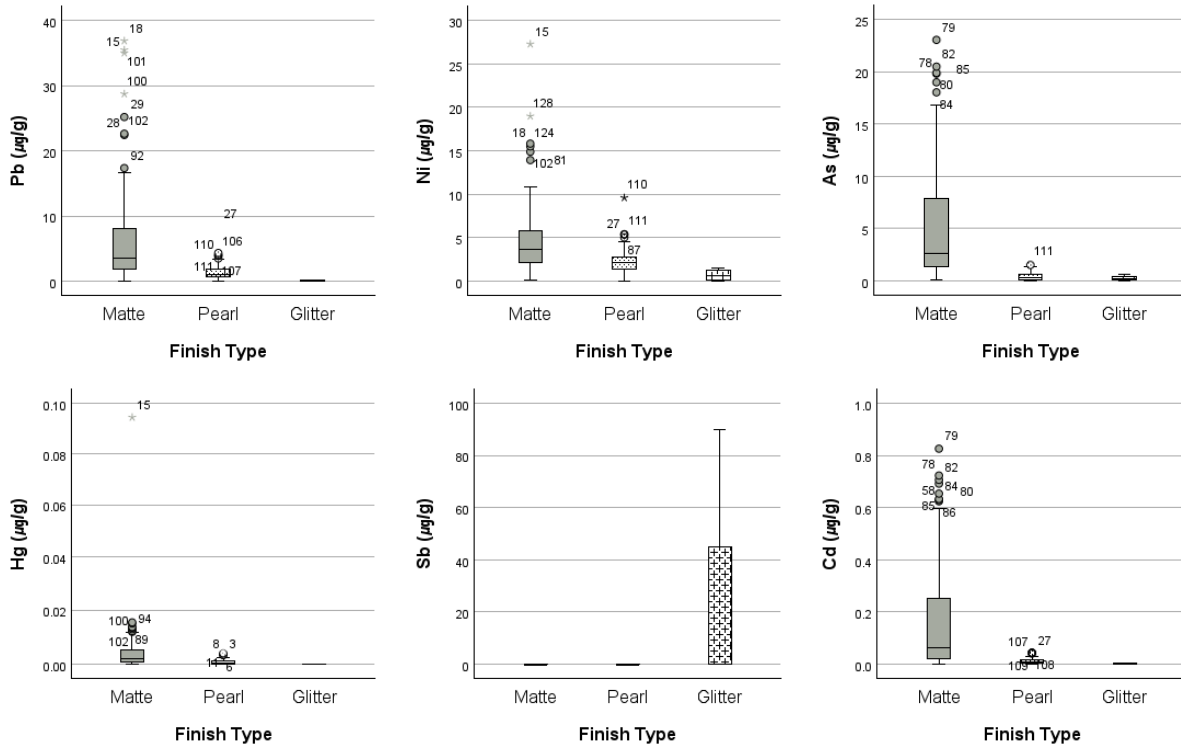


Figure 9. Boxplots of concentrations of heavy metals with regulatory limits by finish type category in 144 eyeshadow samples. (A) Pb; (B) Ni; (C) As; (D) Hg; (E) Sb; (F) Cd.

펠(p < 0.001)과 글리터(p = 0.023) 모두보다 유의하게 높았다. 비소 기준초과 시료는 대부분 무광 마감에서 관찰되었다.

수은의 광택별 평균 함량은 무광 0.005 μg/g(±0.010 μg/g), 펄 0.001 μg/g(±0.001 μg/g), 글리터 0.000 μg/g으로, 모든 광택에서 절대 농도는 매우 낮은 수준이었다(Table 14, Figure 9D). Figure 9D에서 무광에서 소수의 이상치가 관찰되었으나 값 자체는 0.094 μg/g 이하에 머물렀다. Welch 검정 결과 광택 간 수은 함량 차이는 통계적으로 유의하였지만(F(2, 82.40) = 18.91, p < 0.001), 모든 값이 허용기준(1 μg/g)을 충분히 밑도는 수준이었다.

카드뮴의 광택별 평균 함량은 무광 0.169 μg/g(±0.208 μg/g), 펄 0.014 μg/g(±0.013 μg/g), 글리터 0.003 μg/g(±0.002 μg/g) 순이었다(Table 14, Figure 9F). Figure 9F에서 무광에서만 이상치가 관찰되었고, 펄과 글리터에서는 이상치가 나타나지 않았다. Welch 검정 결과 광택 간 카드뮴 함량 차이는 매우 유의하였으며(F(2, 74.96) = 42.52, p < 0.001), 사후검정에서 무광은 펄(p < 0.001)과 글리터(p < 0.001) 모두보다 유의하게 높았다. 모든 광택에서 카드뮴 농도는 허용기준(5 μg/g)을 크게 미치지 못하였다.

안티몬은 무광과 펄에서는 전혀 검출되지 않았고, 글리터 4건 중 일부에서만 검출되었다(Table 14, Figure 9E). 글리터의 평균 안티몬 함량은 22.6 μg/g(±44.9 μg/g)으로 매우 높았으며, 최대값은 89.88 μg/g으로 허용기준(10 μg/g)의 9.0배에 해당하였다. 시료 수가 4건에 불과하고 기준초과도 1

건에 그쳤다는 점을 고려하면, 안티몬 오염은 특정 글리터 제품이나 배치에 국한된 현상일 가능성이 크다.

구리의 광택별 평균 함량은 무광 152.9 μg/g(±548.9 μg/g), 펄 127.6 μg/g(±560.7 μg/g), 글리터 10.7 μg/g(±20.6 μg/g)이었다(Table 15, Figure 10A). 무광과 펄 모두에서 매우 큰 표준편차와 극단적인 이상치가 관찰되었고, 최대값은 3000 μg/g 이상에 이르렀다. Welch 검정 결과 광택 간 구리 함량 차이는 유의하였으나(F(2, 81.40) = 3.94, p = 0.023), 사후검정에서는 뚜렷한 쌍별 유의성은 나타나지 않았다(p > 0.05). 전반적으로 무광과 펄은 높은 구리 농도와 큰 변동성을, 글리터는 낮은 농도를 보였다.

코발트의 광택별 평균 함량은 무광 3.18 μg/g(±4.34 μg/g)에서 가장 높았고, 펄 0.64 μg/g(±0.58 μg/g), 글리터 0.32 μg/g(±0.22 μg/g) 순이었다(Table 15, Figure 10B). Figure 10B에서 무광은 이상치를 포함하고 있었으며, 최대값은 23.7 μg/g로 나타났다. Welch 검정 결과 광택 간 코발트 함량 차이는 매우 유의하였고(F(2, 17.95) = 19.18, p < 0.001), 사후검정에서 무광은 펄(p = 0.001)과 글리터(p = 0.048) 모두보다 유의하게 높았다.

크롬의 광택별 평균 함량은 무광 8.14 μg/g(±9.60 μg/g), 펄 5.27 μg/g(±5.42 μg/g), 글리터 1.71 μg/g(±0.55 μg/g) 순으로 무광이 가장 높았다(Table 15, Figure 10C). Figure 10C에서 무광은 사분위수 범위가 넓고 이상치가 다수 관찰되었으며, 최대값은 73.6 μg/g로 나타났다. Welch

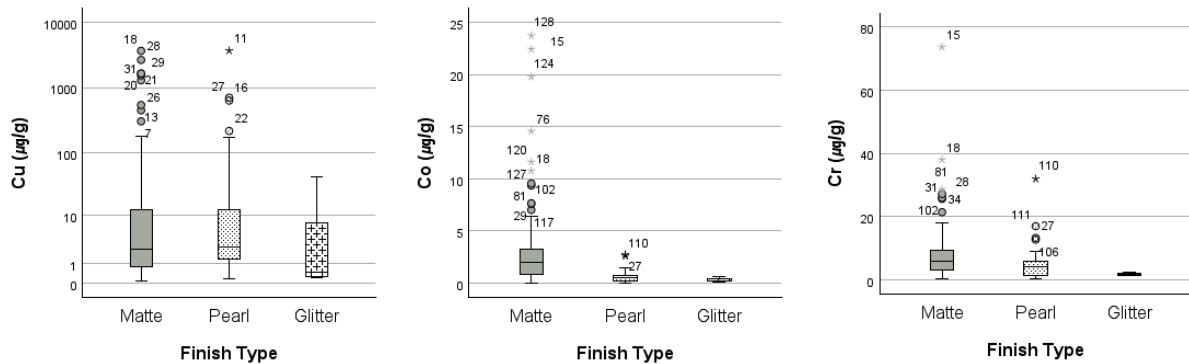


Figure 10. Boxplots of concentrations of heavy metals without specific regulatory limits by finish type category in 144 eyeshadow samples. (A) Cu; (B) Co; (C) Cr.

검정 결과 광택 간 크롬 함량 차이는 매우 유의하였고($F(2, 72.49) = 26.14, p < 0.001$), 사후검정에서 무광은 펄($p = 0.007$)과 글리터($p < 0.001$) 모두보다 유의하게 높았다.

광택별 결과를 종합하면, 무광(matte) 아이세도가 펄(pearl)과 글리터(glitter)에 비해 납·니켈·비소·카드뮴·코발트·크롬 등 대부분의 중금속에서 더 높은 평균 함량과 넓은 분포를 보였으며, 납·비소 기준초과도 모두 무광 시료에서만 확인되었다. 글리터 시료는 전반적으로 낮은 농도 범위에 분포했으나, 안티몬의 경우 극소수 글리터 시료에서만 규제 기준을 크게 초과하는 고농도가 관찰되어, 특정 원료 조합에서 예외적인 고함량이 발생할 수 있음을 시사한다. 전반적으로 본 연구에서는 광택 유형에 따라 아이세도 시료의 중금속 함량 수준의 차이가 나타났으며, 특히 무광 시료에서 납·니켈·비소·카드뮴·코발트·크롬의 평균 함량이 펄과 글리터보다 높게 관찰되었다. 다만 각 광택 분류군 간 시료 수 차이를 고려할 때, 무광 마감과 중금속 함량 간의 관계를 보다 명확히 평가하기 위해서는 광택별 시료 구성이 균형 잡힌 추가 연구와 안료 조성·공정 특성에 대한 정밀 분석이 필요하다.

3.7. 분류체계 간 다중비교 및 종합 분석

본 연구에서는 색상군, 명도, 톤, 제형, 광택의 5가지 분류체계에 따른 중금속 함량 차이를 서로 비교하기 위해, Welch 분산분석에서 산출된 F-값을 각 분류체계 간 중금속 함량 차이의 상대적 크기를 가늠하는 지표로 사용하였다. 8개 중금속에 대해 각 분류체계별로 계산된 F-값의 범위는 색상군(2.77~5.77), 명도(0.69~11.57), 톤(1.23~8.77), 제형(3.94~25.43), 광택(3.94~48.39)이었으며, 각 중금속별로 어떤 분류체계에서 집단 간 중금속 함량 차이가 상대적으로 크게 나타났는지는 Table 16과 Figure 11에 제시하였다.

광택은 납, 니켈, 비소, 수은, 카드뮴, 크롬 등 7개 중금속에서 다섯가지 분류특성 중 가장 큰 F값을 보여, 이들 중금속 함량과의 연관성이 가장 뚜렷하게 나타난 분류특성이었다. 예를 들어 납에서 광택의 F값은 48.39로 제형의 F값 20.29보다 약 2.4배 높았으며, 비소에서도 광택의 F값(33.57)이 제형(10.07)보다 훨씬 컸다. 제형은 구리를 제외한 대부분의 중금속에서 두 번째로 큰 F값을 보여 광택 다음으로 중금속 함량과의 연관성이 큰 분류특성이었으며, 특히 니켈($F = 21.93$), 카드뮴($F = 17.02$), 크롬($F = 25.43$)에서 제형에 따른 F값 차이가 두드러졌다. 명도는 니켈($F = 9.31$), 코발트($F = 11.57$), 크롬($F = 7.35$) 등 일부 중금속에서 중간 이상의 F

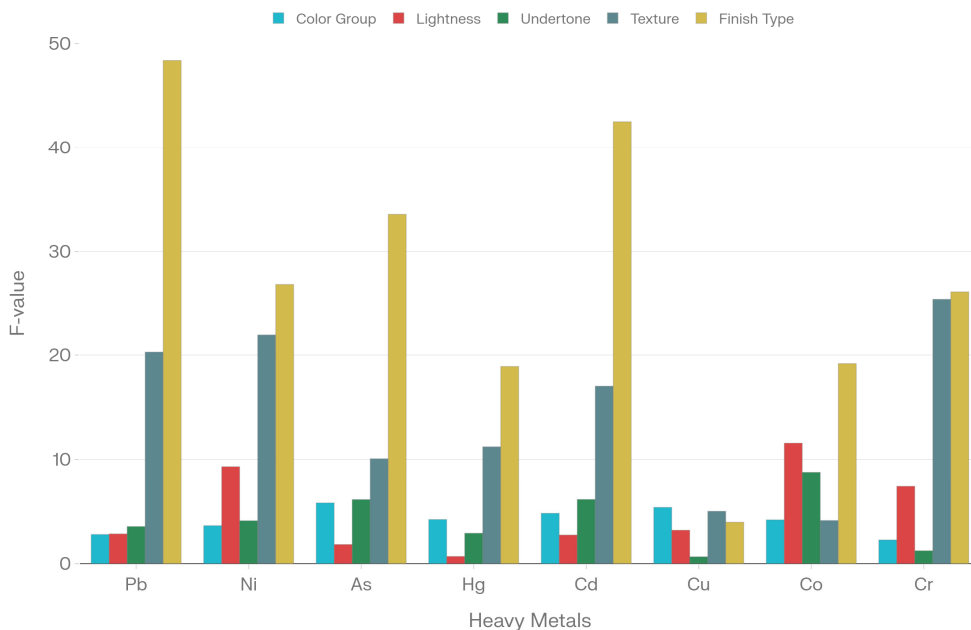


Figure 11. Effect Size Comparison (F-values) of Five Classification Systems on Heavy Metal Content.

값을 보여, 특정 중금속에서는 의미있는 분류특성으로 나타났다. 반면 색상군과 톤은 대부분의 중금속에서 F값이 한 자릿수 범위에 머물러 광택·제형·명도에 비해 상대적으로 약한 연관성을 보였으나, 구리에서는 색상군의 F값(5.35)이 다른 분류특성보다 다소 크게 나타나 구리 함량과 특정 색상군(그린·블루 계열) 사이의 연관성이 시사되었다. 톤은 여러 중금속에서 통계적으로 유의한 평균 차이가 관찰되었음에도 불구하고 F값의 크기가 대체로 한 자릿수에 그쳐, 본 연구 범위에서는 중금속 함량과의 연관성이 상대적으로 제한적인 분류특성으로 확인되었다.

구리의 경우 색상군(F = 5.35), 명도(F = 3.18), 제형(F = 4.98), 광택(F = 3.94)의 F값이 모두 중간 정도 수준을 보여, 구리 함량과의 연관성이 특정 하나의 분류특성에만 국한되는 양상은 관찰되지 않았다. 이는 구리 함량이 특정 색상군(그린/블루 계열) 뿐 아니라 제형·광택 등 여러 분류특성과 복합적으로 연관되어 있을 가능성을 시사한다. 코발트는 명도(F = 11.57)와 광택(F = 19.18)에서 비교적 큰 F값을 보여, 이 두 분류특성이 코발트 함량과의 연관성이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

광택과 제형의 조합에 따라 중금속 평균 함량이 크게 달라지는 양상도 확인되었다. 납의 경우 무광+압축파우더 조합의 평균 함량은 약 7.3 µg/g인 반면, 글리터+압축파우더 조합에서는 약 0.1 µg/g, 펄+액체형 조합에서는 약 0.5 µg/g 수준에 머물러, 광택·제형 조합에 따라 최대 수십 배 이상의 차이가 나타났다. 비소에서도 무광+압축파우더 조합의 평균 함량(약 5.3 µg/g)은 액체형(약 1.2 µg/g)에 비

해 약 4-5배 높았다. 또한 기준초과 시료 24건 중 대부분이 특정 광택·제형 분류체계 조합에 집중되어 나타났다. 납 기준초과 7건은 모두 무광+압축파우더 조합에서 나타났으며, 비소 기준초과 16건 중 13건은 무광+압축파우더 조합이고 3건은 무광+크림 조합이었다. 안티몬 기준초과 1건은 글리터+압축파우더 시료에서 관찰되었다. 이러한 결과는 본 연구에서 무광 광택과 압축파우더 제형이 중금속 함량 및 기준초과 사례와의 연관성이 특히 큰 조합임을 보여준다.

종합하면, 본 연구에서 설정한 5가지 분류체계 중 광택과 제형은 중금속 함량과의 연관성이 가장 크고 비교적 일관되게 나타난 분류특성이었으며, 명도는 니켈·코발트·크롬 등 일부 중금속에서 중간 수준의 연관성을 보였다. 반면 색상군과 톤은 대부분의 중금속에서 상대적으로 작은 F값을 보여, 본 연구에서는 중금속 함량과의 연관성이 제한적인 분류특성으로 나타났다. 다만 구리에서 색상군, 코발트에서 명도가 비교적 큰 F값을 보인 점은, 특정 중금속에서는 색상 특성이나 밝기 특성이 함께 고려될 필요가 있음을 시사한다. 이러한 결과는 일부 시료에서 관찰된 함량 분포를 토대로 한 통계적 비교이며, 광택 및 제형과 중금속 함량과의 연관성을 규명하기 위해서는 원료 조성, 안료 사용량, 제조 공정 특성 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결론(요약)

본 연구에서는 저가 해외직구 온라인 플랫폼에서 판매되는 아이새도 144건을 대상으로 9종 중금속(납, 니켈, 비소, 안티몬, 카드뮴, 구리, 코발트, 크

Table 16. Ranking of Classification Factors by Influence on Heavy Metal Contents Based on F-values

Heavy Metal	Color Group	Lightness	Undertone	Texture	Finish Type	Dominant Factor
Pb	2.77	2.83	3.53	20.29	48.39	Finish type
Ni	3.61	9.31	4.08	21.93	26.85	Finish type
As	5.77	1.82	6.09	10.07	33.57	Finish type
Hg	4.19	0.69	2.89	11.22	18.91	Finish type
Cd	4.79	2.72	6.10	17.02	42.52	Finish type
Cu	5.35	3.18	0.66	4.98	3.94	Color group
Co	4.16	11.57	8.77	4.10	19.18	Finish type
Cr	2.26	7.35	1.23	25.43	26.14	Finish type

롬)의 함량을 측정하였다. 시료를 색상군, 명도, 톤, 제형, 광택의 5가지 분류 체계로 구분하고, 각 분류 체계별 시료군 사이의 중금속 함량과 기준초과 양상을 비교분석하였다.

1. 납, 니켈, 비소, 구리, 코발트, 크롬의 검출률은 98.6% 이상이였으며, 납은 7건(4.9%, 최대 36.86 µg/g, 기준의 1.8배), 비소는 16건(11.1%, 최대 23.05 µg/g, 2.3배), 안티몬은 1건(0.7%, 최대 89.88 µg/g, 9.0배)에서 국내 유통 화장품의 안전관리 기준을 초과하였다. 니켈, 수은, 카드뮴은 모든 시료에서 기준 이내였으며, 검출 허용 기준이 미설정된 중금속 중 구리는 일부 시료에서 높은 농도를 나타내었다.
2. 색상군별 분석에서 납, 니켈, 비소, 카드뮴, 구리, 코발트, 수은 등 여러 중금속의 색상군 간 평균 함량 차이는 통계적으로 유의하였으나, 효과 크기는 상대적으로 크지 않았다. 그린/올리브/민트 및 브라운/토프 계열에서는 납·니켈·구리·코발트의 평균 함량이 높고 납 기준 초과 시료가 집중되었으며, 화이트/크림 및 베이지/샴페인 계열에서는 비소 평균 함량과 기준 초과 시료가 상대적으로 많아, 일부 색상군에서 중금속 함량과 기준 초과 위험이 높을 수 있음을 보여주었다.
3. 명도별 분석에서 Dark 명도군의 평균 납 함량이 Very Light 명도군보다 약 3.8배 높았고, 이 차이는 경계 수준의 통계적 유의성을 보였다(Welch p = 0.048). 명도가 어두워질수록 납, 니켈, 구리, 코발트, 크롬의 평균 함량이 전반적으로 증가하는 양상이 관찰되었으며, 납 기준 초과 7건 중 4건(57.1%)이 Dark 명도군에 분포하고 구리·코발트·크롬에서도 Dark 명도군에서 높은 최대값이 나타나, 어두운 명도의 시료에서 일부 중금속 함량이 상대적으로 높은 수준을 보이는 경향이 있었다.
4. 톤별 분석에서 Warm, Neutral, Cool 톤 간 중금속 함량 차이는 전반적으로 크지 않았으며, 일부 금속(납, 니켈, 비소, 카드뮴, 코발트)에서 Neutral 톤이 Warm 및 Cool 톤보다 다소 높은

평균 함량을 보였다(Welch p = 0.034-0.001). 이러한 결과로 볼 때, 톤에 따른 중금속 함량 차이는 본 연구에서는 크지 않은 수준으로 나타났다.

5. 제형별 분석에서 압축파우더형의 평균 납 함량은 액체형보다 약 6배 높았고, 크림형은 두 제형 사이의 중간 수준을 보였다. 납, 니켈, 비소, 수은, 카드뮴, 구리, 코발트, 크롬 모두에서 제형 간 평균 함량 차이가 통계적으로 유의하였으며, 납·비소·안티몬 기준 초과 24건 중 21건(87.5%)이 압축파우더형에서 관찰되어, 본 연구의 시료에서는 압축파우더 제형에서 상대적으로 높은 중금속 함량과 기준 초과 사례가 많이 나타나는 양상이 확인되었다.
6. 광택별 분석에서 무광(matte)의 평균 납 함량(6.5 µg/g)이 글리터(glitter)(0.098 µg/g)보다 약 66배 높았고, 비소 역시 무광(5.3 µg/g)과 글리터(0.25 µg/g) 사이에 약 21배의 차이가 관찰되었으며, 펄(pearl)은 두 유형 사이의 중간 수준을 보였다. 또한 납·비소 기준 초과 시료는 모두 무광 시료에서만 확인되었다. 안티몬의 경우 대부분 불검출이었으나, 극소수 글리터 시료에서만 규제 기준을 크게 초과하는 고농도가 관찰되었다.
7. 아이세도 시료를 구분하는 5가지 분류체계(색상군, 명도, 톤, 제형, 광택)와 중금속 함량과의 연관성을 F-값으로 비교한 결과, 광택과 제형은 다섯가지 분류특성 중 중금속 함량과의 연관성이 가장 크고 비교적 일관되게 나타난 분류특성이었으며, 명도는 니켈·코발트·크롬 등 일부 중금속에서 중간 수준의 연관성을 보였다. 반면 색상군과 톤은 대부분의 중금속에서 상대적으로 작은 F값을 보여, 본 연구에서는 중금속 함량과의 연관성이 상대적으로 적은 분류특성으로 관찰되었다. 특히 기준초과 시료 24건 중 20건이 무광+압축파우더 조합에서, 3건이 무광+크림 조합에서, 1건이 글리터+압축파우더 조합에서 발생하여, 기준초과 사례가 무광 광택과 압축파우더 제형 조합에 집중되는 양상을 보였다.

본 연구를 통해 저가 해외직구 아이새도 화장품에서 납·비소·안티몬의 기준 초과 사례가 확인되었으며, 특히 무광+압축파우더 조합에서 기준 초과 시료가 집중되는 양상이 관찰되었다. 아이새도의 중금속 함량은 색상 자체보다는 광택과 제형 분류에 따라 상대적으로 더 큰 차이를 보였으며, 동일 중금속 중에서도 분류 조합에 따라 수십 배의 농도 차이가 발생할 수 있음이 확인되었다. 한편, 중금속 함량과 광택 및 제형과의 연관성을 보다 명확하게 규명하기 위해서는 원료·안료 조성 및 제조 공정 특성 등을 포함한 체계적이고 심화된 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- Emeriewen K, See GL, Anissimov Y, and Roberts MS, "The permeability of human eyelid skin to topically applied drugs", *Skin Pharmacol Physiol*, **33**(6), pp.330-339(2020).
- See GL, Anissimov YG, and Roberts MS, "Eyelid skin as a potential site for drug delivery to the ocular region", *J Pharm Pharmacol*, **70**(4), pp.475-485(2018).
- Volpe MG, Nazzaro M, Di Stasio M, et al., "Determination and assessments of selected heavy metals in eye shadow cosmetics from Italy, China, and USA", *Microchem J*, **101**, pp.65-69(2012).
- Lee KY, Kim YR, et al., "Comparison of heavy metal contents in eyeliner products", *J Environ Health Sci*, **41**(4), pp.255-262(2015).
- Al Amry M, et al., "Toxic effect of cadmium found in eyeliner to the eye of a 21-year-old female", *Middle East Afr J Ophthalmol*, **18**(2), pp.137-140(2011).
- Iwegbue CMA, Bassef FI, Tesi GO, et al., "Concentrations and exposure risks of some metals in facial cosmetics", *Ecotoxicol Environ Saf*, **127**, pp.50-57(2016).
- Kicińska A, et al., "Health risks from heavy metals in cosmetic products", *Sci Rep*, **15**, p.316(2025).
- 관세청, 2024 관세연감, p29(2024).
- 통계청, 국가통계포털 온라인쇼핑동향조사, <http://kosis.kr> (2025).
- 아주경제, [C-뷰티의 역습] "싸고 예뻐서 샀는데"... '안전 사각지대'에 놓인 C-뷰티, <https://www.ajunews.com>, January(2026).
- 브릿지경제, K-뷰티, 광군제서 밀려났는데, C-뷰티 국내 판매는 급증, <https://www.vival00.com>, November(2025).
- 정보통신정책연구원(KISDI), 중국 유통 플랫폼의 글로벌 확장과 대응 방안-테무 모델을 중심으로, 정보통신정책연구원, pp.12-28(2025).
- 여성경제신문, "유행 따라하다 건강 위험"...테무·알리 타고온 C-뷰티, 안전성 '도마', <https://www.womaneconomy.co.kr>, December(2025).
- 식품의약품안전처, 화장품 안전기준 등에 관한 규정(식약처 고시 제2025-63호), September(2025).
- 식품의약품안전처, 화장품법 시행규칙(총리령 제2060호) October(2025).
- 관세청, 관세법 제246조의3에 따른 안전성 검사 업무처리에 관한 고시(관세청고시 제2025-58호), November(2025)
- 관계부처 합동, "해외직구 급증에 따른 소비자 안전 강화 및 기업 경쟁력 제고 방안", 보도자료, May(2024).
- 식품의약품안전처, 해외 화장품 직접 구매 시 주의하세요, 보도자료, April(2024).
- Bashir H, Ibrahim ABM, Ullah H, et al., "Heavy metal in cosmetics and its risk to future generation in remote area of Azad Jammu and Kashmir Trarkhel District Sudhnoti", *Scientific Reports*, **15**, p.43847, (2025).
- Wang HL, Zhu YY, Chen XY, et al., "Presence of impurities of nickel and cobalt in facial cosmetics available on the Chinese market", *Contact Dermatitis*, **87**(5), pp.459-465(2022).
- U.S. Food and Drug Administration, FDA's Testing of Cosmetics for Arsenic, Cadmium, Chromium, Cobalt, Lead, Mercury, and Nickel Content, <https://www.fda.gov>,

- March(2022).
22. 서울특별시, 해외직구 아이섀도우 제품 비소 19.8배 검출... 화장품 소비 주의, 보도자료, October(2024).
 23. 서울시전자상거래센터, 해외직구 제품 안전성 검사결과 [10월 둘째주], <http://ecc.seoul.go.kr>, October(2024).
 24. 한국소비자원, 저가 해외직구 플랫폼 안전실태 조사 결과: 색조 화장을 중심으로, 한국소비자원, pp.1-23(2024).
 25. Zhang Y, Liu S, Wang B, et al., "Contamination of heavy metals in cosmetics: A systematic review", *Environmental Research*, **220** p.114989(2023).
 26. Kim MK, Lee JY, and Park SJ, "Heavy metal content in cosmetic products marketed in South Korea: a multitype survey", *Food and Chemical Toxicology*, **162**, p.112933(2022).
 27. 최채만, 황영숙, 박애숙 등, "국내시판 중인 색조화장품의 중금속 농도에 관한 연구", *대한화장품학회지*, **40**(3), pp.269-278(2014).
 28. 서울특별시 보건환경연구원, 국내 유통 색조화장품 중금속 조사... 카드뮴·니켈 등 모두 기준 이내, 보도자료, April(2025).
 29. 충청북도 보건환경연구원, 충북 유통 눈화장용 제품 중금속 '안전'... 색조 화장품 적합 판정, 보도자료, September(2025).
 30. 식품의약품안전처, [부처합동] '25년 해외직구 화장품 시험검사 결과 공개, 보도자료, December(2025).
 31. Hunger, K., *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications*, Wiley-VCH, pp.425-452(2003).