

# 광방사에 의한 채색지의 새로운 내광성 평가 방법

(New Evaluation Method for the Lightfastness of Colored Papers by Radiant Energy)

김훈\* · 김홍범\*\* · 권세혁\*\*\*

(Hoon Kim · Hong-Bum Kim · Sae-Hyuk Kwon)

## 요 약

광방사에너지에 의해 염료나 안료의 밀도가 감소하며, 밀도 변화는 색변화를 초래한다. 이 연구에서는 방사에너지에 의한 염료밀도의 변화와, 밀도변화에 따른 색변화에 대한 가정을 이용하여 방사에너지에 의한 색변화를 예측할 수 있는 관계식을 만들었다. 또한 실험을 통하여 식중의 손상계수를 산출하였다. 이 식과 계수의 적절성을 검증하기 위하여 시료들을 일반 광원으로 변색시키면서 그 변색의 크기를 측정하고 계산치와 비교한 결과, 대부분의 시료에서 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 가시 방사대에서 분광 손상계수는 분광 흡수율과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

## Abstract

Density of a dye or pigment reduces by radiant energy, and density change induces color change. In this paper, we have worked out an equation to predict the color change by the radiant energy under the assumption of colorant density changing pattern by radiant energy and the color changing pattern by colorant density change. And the damaging factors in the equation was established by experiments. To evaluate the effectiveness of the equation and the method, several samples were irradiated by common light source and color change was measured. Good coincidence between the measured and the calculated color change was found. And it was also found that there is a close relationship between the spectral damaging factor and the spectral absorptance in visible wavelength range.

### 1. 서 론

박물관이나 미술관에서의 전시와 보존 기능은 박

물관의 존립에 필요한 양쪽 수레바퀴와 같아서, 서로의 균형이 이루어져야 올바른 기능 수행이 가능하다. 그런 의미에서 전시조명은 전시와 보존이라는

\*정회원 : 강원대학교 전기공학과 교수

\*\*정회원 : 국립중앙박물관 건립추진기획단 설비과장,  
고려대학교 전기공학과 박사과정

\*\*\*정회원 : 고려대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 1997. 8. 27

상반된 목적에 대한 절충의 의미로서, 광방사 에너지의 균형 있는 제어를 원칙으로 한다[1].

그러나 명백한 논리 없이 보존상의 이유로 어렵게 조명할 수밖에 없다는 주장은 잘못된 것이다. 전시와 보존의 절충이란 관람객의 감상에 의한 지적 심미적 즐거움을 차단하면서까지 전시물을 보존하는 것은 아니다. 즉 어느 한쪽의 기능을 충족시키지 못하면서, 나머지 한쪽의 만족스러운 대안을 구하려는 것은 아니다.

전시품의 관리를 포함한 박물관 소장품의 합리적인 효율적인 관리를 위해서는, 올바른 내광성의 평가가 중요하다. 이를 위해서는 광방사에 의한 점진적인 손상이 소장품으로서의 가치를 떨어뜨려, 소장품이 수명을 다할 때까지의 손상에 대한 예측이 이루어져야 한다. 과도하게 산정한 내광성은 전시의 융통성을 제한하며, 반대로 포괄적인 제한은 빛에 대단히 민감한 전시물의 손상을 간접적으로 인정하는 논리의 모순을 갖고 있다.

색상을 가진 미술품의 표면에서의 열화는 소장품으로서의 가치를 결정하는 본질적인 내용이다. L. S. Harrison의 상대분광반응도에 대한 정량적 평가 이후, 자외방사에 의한 손상을 차단함으로써 보존을 거할 수 있다는 논리가 지배적이었으나[2], 색상을 가진 미술품의 손상에 자외방사보다 가시방사의 역할이 크다는 주장이 계속 제기되고 있다[3~5]. 염료나 안료의 특성, 혹은 매염제 등에 따라 열화 특성에 차이가 있다는 것이 보편적인 견해이다[6].

본 연구에서는 채색 시료의 자외방사에 의한 파장별 퇴색 평가를 바탕으로 해서[7], 가시방사까지에 의한 분광손상계수를 구하고, 새로운 방법에 의해 내광성을 평가하려고 한다. 특히 자외방사의 완전 차단을 기본으로 하는 현재의 전시조명 기준에서 볼 때, 가시방사에 의한 손상 평가는 대단히 중요하다. 또한 퇴색이 방사에너지의 흡수를 전제로 하는 광화학반응임을 고려하여, 색재료의 분광흡수율과 분광손상계수의 관련성을 밝히고자 한다.

## 2. 이론적 배경

광원에서의 방사는 가시방사 외에 적외방사와 자외방사의 비가시방사를 포함한다. 광방사 에너지가 물질에 입사하면 광화학작용을 일으키며, 망막의 시세포에 빛의 감각을 불러일으키는 것은 가시방사의 광화학작용에 의한 것이다. 작용의 결과로 시료에 나타나는 변 퇴색 등의 여러 가지 영구적 변화는 손상으로 인식된다.

광화학작용의 기본 메커니즘은 방사에너지의 흡수를 전제로 한다. 방사에너지가 흡수되어도 반응이 지속하기 위해서는 반응에 필요한 최소한의 에너지, 즉 활성화에너지가 필요하다. 임계파장은 물질의 결합에너지보다 큰 활성화에너지의 흡수가 반응으로 이어지는 한계 파장이다. 광화학반응이 광량자의 흡수를 전제로 할 때, 가시방사에 의한 광화학작용은 쉽게 물질의 분광흡수율과 관련지어 생각할 수 있다. 물론 감광성에 의한 광화학작용과 같은 예외가 있으나, 광방사의 분광손상계수의 조사시에 고려해야 할 요소이다.

물체를 이루고 있는 분자의 수가 대단히 많을 때, 입사하는 광량자에 대한 반응 확률이 일정하다고 가정하면, 반응이 진행하여 누적하는 정도는 입사하는 광량자 수에 비례한다. 그러나 반응에 관계되는 분자의 수는 반응이 진행할수록 감소하여, 시간이 경과함에 따라 반응 확률이 낮아지며, 최종적으로는 반응이 정지한다.

일반적인 물질의 경우 일정한 방사에너지 밀도 하에서 반응에 의하여 입자의 밀도가 변화하는 관계는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\frac{dC(t)}{dt} = -k \cdot C^n \quad (1)$$

C : 물질을 구성하는 분자의 밀도

k : 비례상수

n : 물질의 특성에 따른 지수

대부분의 염료나 안료에 있어서는 시간의 경과에 따라 입자밀도가 포화하는 형태로서 물질의 특성에 따른 지수 n의 값이 1이다[9]. Johnston-Feller의 실험은 시료에서의 염료 손실이 염료의 밀도에 비례하는 것을 입증하고 있다[10]. 이 과정을 시료에 쪼

인 방사에너지의 함수로 유도하기 위하여 다음과 같이 생각하였다.

중심파장  $\lambda_i$ 이며, 비교적 좁은 파장범위에 걸친 방사에너지가 시료에 조사될 때, 시료에 있어서의 염료의 단위시간당 변화는

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\alpha_i P_i C$$

$C(t)$  : 염료의 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\alpha_i$  : 손상계수  
 $P_i$  : 조사된 방사에너지의 밀도 [W/m<sup>2</sup>]

와 같이 생각할 수 있으며, 위 식에서 부호가 음인 것은 염료의 감소를 나타낸다. 또한 손상계수  $\alpha$ 는 비례상수로서 방사에너지의 파장에 따라 값이 달라진다. 이 식을 풀면

$$C(t) = C_0 e^{-\alpha_i P_i t}$$

$C_0$  : t=0일 때의 염료밀도

와 같이 되어, 방사에 의하여 염료가 지수함수적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

위의 식은 손상계수  $\alpha$ 를 상수로 볼 수 있을 정도의 좁은 파장범위에 대한 식으로서 만약 넓은 파장 범위의 방사에너지가 시료에 공급된다면, 이를 각각 중심파장  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 의 여러 파장범위에 대한  $P_1, P_2, \dots, P_n$ 으로 나누어서 생각하면 된다. 즉,

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\alpha_1 P_1 C - \alpha_2 P_2 C - \dots - \alpha_n P_n C$$

$$C(t) = C_0 e^{-(\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \dots + \alpha_n P_n)t}$$

와 같이 된다.

또한 염료의 손실과 그 결과로 나타나는 변색을 다음과 같이 관련지을 수 있다. 최초 염료의 밀도가  $C_0$ 일 때 CIE LAB 색공간에서의 시료의 색좌표를  $Q_0$ , 또한 최종적으로 염료가 모두 손실되어 밀도 0으로 되었을 때의 색좌표를  $Q_\infty$ 라고 하고, 염료가 손실됨에 따라 변화하는 색좌표가  $Q_0$ 와  $Q_\infty$ 를 잇는 직선상에 있고, 색좌표 사이의 거리가 염료 밀도의 차이에 비례한다고 가정하면 다음과 같은 비례식이 성

립된다.

$$\frac{|Q_\infty - Q_0|}{(C(t) - C_0)} : (0 - C_0) = |Q(t) - Q_0| : (C(t) - C_0) \quad (8)$$

이 식에서  $Q(t)$ 는 염료밀도가  $C(t)$ 일 때의 색좌표이다. 두 색좌표 사이의 거리는 색차  $\Delta E$ 이므로 이를 이용하여 위 식을 정리하면,

$$\Delta E_\infty : -C_0 = \Delta E_t : (C(t) - C_0)$$

$$\Delta E_\infty = |Q_\infty - Q_0|$$

$$\Delta E(t) = |Q(t) - Q_0|$$

와 같이 된다. (5)식을 대입하여 정리하면,

$$\Delta E(t) = \Delta E_\infty (1 - e^{-(\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \dots + \alpha_n P_n)t}) \quad (10)$$

로 되므로 색변화와 방사에너지의 관계를 유도할 수 있다.

특정 시료에 대한 손상계수  $\alpha$  및 최종 변색치  $\Delta E_\infty$ 의 값은 다음과 같이 구할 수 있다. 자외선과 가시광선 대역에 걸쳐 연속 스펙트럼을 내는 광원의 빛을 차광파장  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n (\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_n)$ 의 여러 하이패스 (highpass) 필터들을 통해 시료에 조사하여 변색을 정기적으로 측정한다. 필터를 통하지 않고 직접 조사된 빛이 가장 변색을 급속하고 심하게 시키며, 그 변색을 장기간 측정하여  $\Delta E_\infty$ 의 값을 추정한다. 가장 큰 차광파장을 갖는 필터를 경유한 빛은 손상을 가장 작게 시키는 적외선 파장대이므로 이 방사에너지를  $P_n$ 으로 보고 시간에 따른 변색 측정치를 이용하여  $\alpha_n$ 을 계산한다. 그 다음으로 큰 차광파장을 갖는 필터를 경유한 빛의 방사에너지는  $(P_n + P_{n-1})$ 로 볼 수 있으므로 그 변색치를 이용하여  $\alpha_{n-1}$ 을 계산할 수 있으며, 이 과정을 연속하여  $\alpha$ 까지의 값을 모두 구할 수 있다.

### 3. 실험과 계수의 산출

실험에 사용한 장치의 구조는 본 학회지 10권 2호에 게재된 논문의 장치와 같다[7]. 이전의 실험에서는 차광파장이 주로 자외선 영역에 걸친 6종의 필

터를 사용하였으나, 이번의 실험에서는 가시광선 영역에서의 변색 특성을 분석할 수 있도록 차광과장이 자외선에서부터 가시광선의 적색 한계까지인 14종의 필터를 사용하였다. 필터의 차광과장은 각각 265, 309, 338, 366, 400, 435, 455, 495, 530, 570, 610, 665, 725, 780(nm)이며, 크세논 램프에서 직접, 또는 각 필터를 경유하여 시료에 조사되는 방사에너지의 분광에너지 분포는 그림 1과 같다.

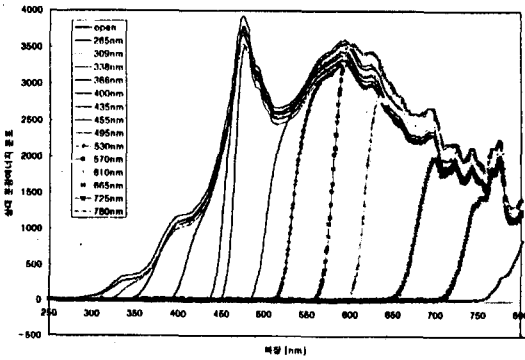


그림 1. 크세논 램프와 각 필터를 경유하여 시료에 조사되는 방사에너지의 분광에너지 분포  
Fig. 1. Spectral Power Distribution of the Radiation on the Samples from Xe Lamp through Filters

시험에 사용한 시료는 일반 복사지, 색지 3종(적색, 녹색, 청색), 치자로 염색한 닥종이 등 5종이며, 특히 색지 3종은 가시광 영역에서의 손상계수와 반사율의 관계를 조사하기 위하여 선정된 것이다. 약 3주일에 걸쳐 시료를 변색시키면서 그 변색을 측정, 기록하였다. 변색의 측정장치로는 기존 사용하던 삼자극치 방식의 측색계보다 높은 정확도를 갖는 미놀타사의 CM-2002 분광측색계를 사용하였다.

각 시료에서 변색은 방사에너지가 클수록, 방사에너지의 과장이 짧을수록 잘 일어나며, 시간이 경과함에 따라 증가하나, 일정치에 이르면 변색의 증가 추세가 감소하여 전체적으로 식 (8)이 나타내는 변색과 같은 형태를 이룬다. 그림 2에는 복사지, 적색 색지, 치자염색 닥종이의 시간에 따른 변색 추이를 보였다.

이와 같은 변색 측정치를 토대로, 2장에서 논의한 방법을 적용하여 각 과장대에서의 손상계수  $\alpha$ 의 값을 구할 수 있다. 그림 3에는 실험에 사용된 시료

들의 과장에 따른 손상계수를 보였다. 계수를 구하는 과정에서 최종 변색치  $\Delta E_{\infty}$ 는 변색이 포화의 경향을 보이기 시작한 뒤, 변색치 중에서 가장 큰 값에 1.1배를 하여 구하였으며, 이 값은 계산의 결과에 거의 영향을 미치지 않는다.

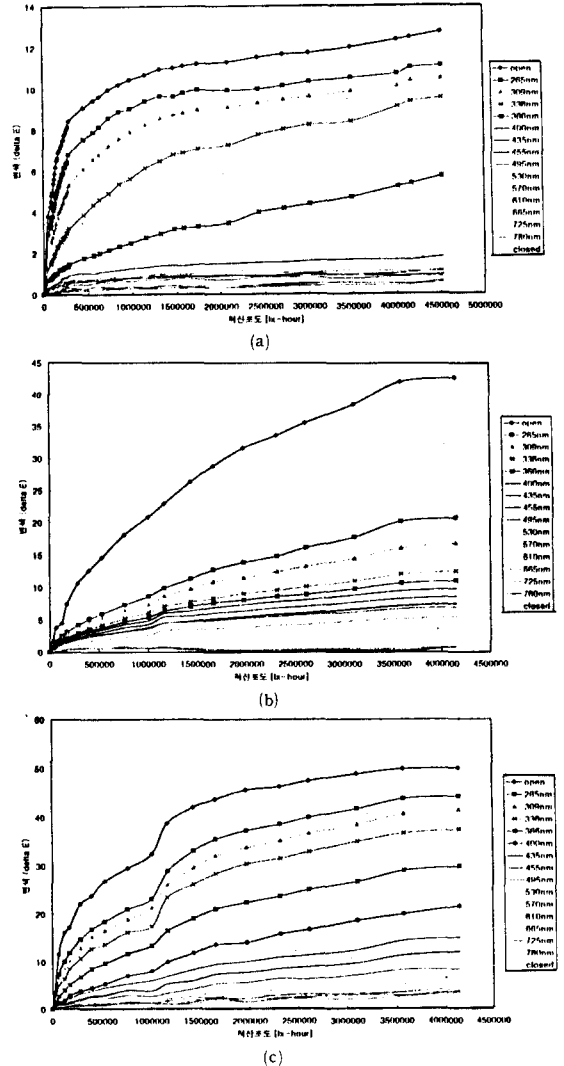


그림 2. 복사지, 적색 색지, 치자염색 닥종이의 변색 추이  
Fig. 2. Color Change Trend of the Pulp Paper, Red-Colored Paper, and Traditional Paper Dyed by Chiya

그림 3에서 알 수 있듯이 손상계수는 자외선 영역에서 매우 크며, 과장이 길어질수록 작아진다. 그러나 해리손의 손상계수에서와 같이 지수함수적인 감소는 아니며 상대적으로 불규칙한 형태라고 할 수

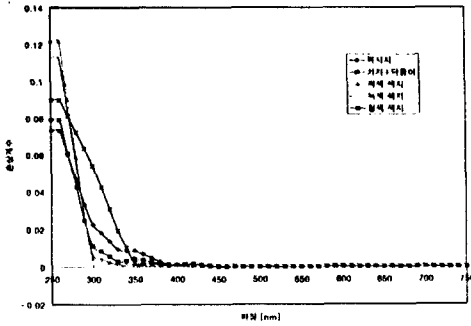


그림 3. 각 시료의 분광 손상계수  
Fig. 3. Spectral Damaging Factors of the Samples

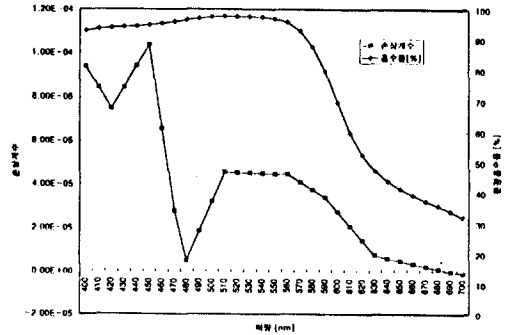
있다. 이는 필자들이 이전 논문에서도 주장한 바 있듯이[7], 특정 파장의 방사에너지가 손상을 시키는 정도는 시료가 그 방사에너지를 흡수하는 정도와 관계가 있을 것이라는 것을 시사한다.

손상의 정도가 흡수율에 비례하는 관계를 가진다면, 이미 손상이 크고 색의 보임과 상관없는 자외선 대역을 차단한 전시용 광원에서 흡수율이 높은 파장대의 가시광선 부분을 적절히 제거함으로써 손상을 더욱 줄일 수 있을 것이다. 제거된 파장대역은 원래 반사가 작아서 시료의 색의 보임에 큰 영향을 미치지 않는 부분이므로, 제거의 정도를 적절히 조절함으로써 색의 편차와 손상을 최소화시키는 방법이 가능할 것으로 생각된다.

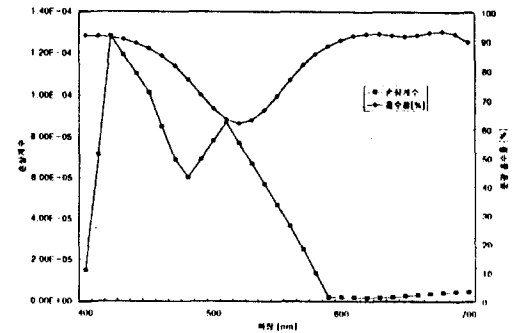
이러한 방법이 가능할 것인지에 대한 예비조사로서 적, 녹, 청 삼색의 색지에 대하여 가시광선 대역에서의 흡수율과 손상계수의 관계를 조사하여 그 결과를 그림 4에 보였다. 그림에서 보듯이 적색 색지의 경우에는 손상계수가 흡수율에 거의 비례하는 특성을 보이고 있다. 청색 색지는 손상계수가 큰 단파장 가시광 부분을 제외하고는 흡수율과 손상계수의 상관도가 높다. 녹색 색지의 경우에는 가시방사의 단파장과 중간파장 범위에서 상관성이 있다. 이 부분에 대해서는 가시광만으로 변색시키는 실험을 행하여야 구체적인 입증 가능성이 있으나, 매우 장기간의 실험을 요하므로 장래의 과제로 미룬다.

#### 4. 실증실험 및 검토

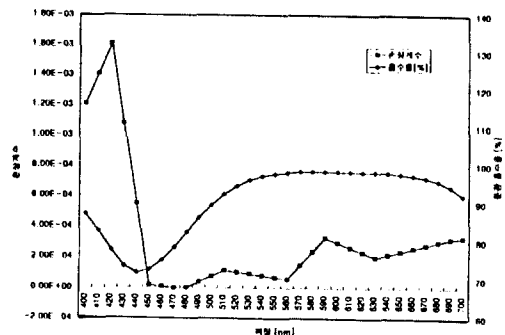
이상의 이론과 실험을 통하여 구하여진 손상계수



(a) 적색 색지



(b) 녹색 색지



(c) 청색 색지

그림 4. 적, 녹, 청 색지의 가시파장 대역에서의 분광손상계수와 분광흡수율

Fig. 4. Spectral Absorbance and Spectral Damaging Factors of the Red, Green, and Blue Colored Papers in the Visible Wavelength Range

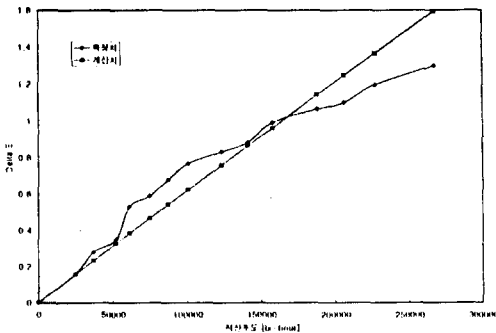
의 정확도 및 유용성을 검증하기 위하여 실증실험을 수행하였다. 손상계수를 구한 시료들을, 일반적으로 사용되는 광원으로 조명하여 변색시키고, 누적조도에 따른 색의 변화를 측정된 값과 (8)식을 이용하여 계산한 값을 비교하였다. 광원으로는 일반적으로 사

용되고 광출력이 안정되어있는 주광색 형광램프를 택하였으며, 시료에 1,000[lx]정도의 조도를 제공하며 2주일간 변색을 측정하였다.

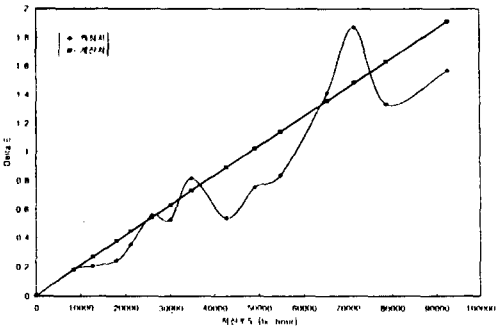
각 시료에서 적산조도에 대한 변색의 측정치와 계산치를 비교하여 그림 5에 보였다. 치자로 염색한 닥종이를 제외한 모든 시료에서 측정치와 계산치가 매우 잘 일치하는 결과를 보였다. 치자염색한 닥종이에서는 전반적으로 계산치가 작으며, 계수의 일부가 과소평가된 것으로 보인다. 이 시료는 특히 초기의 심한 변색으로 인하여 자외선 영역에서의 계수 평가에 문제가 있으며, 이를 극복하기 위해서는 계수를 구하기 위한 실험의 초기에 낮은 조도로 서서히 변색시킬 필요가 있다. 이 실험도 매우 긴 시간을 요하므로 추후의 과제로 미룬다.

## 5. 결론

이 연구에서는 방사에너지에 의한 염료밀도의 변

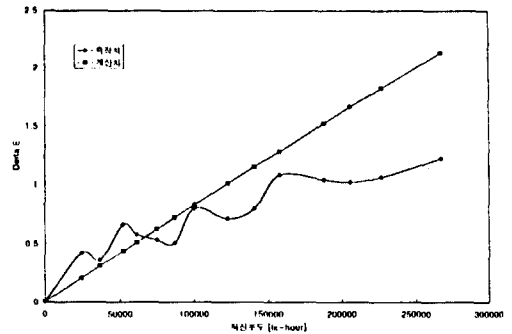


(a) 복사지

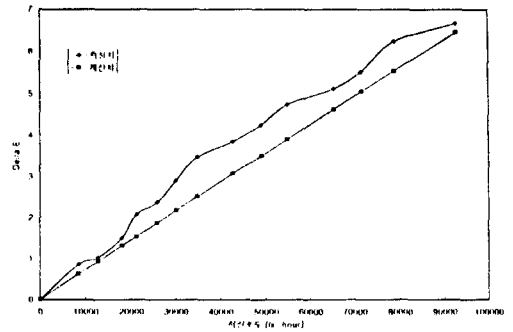


(b) 적색 색지

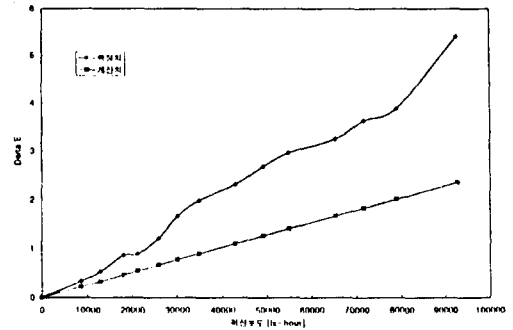
화와, 밀도변화에 따른 색변화에대한 가정을 이용하여 방사에너지에 의한 색변화를 예측하는 식을 만들었으며, 실험을 통하여 식 중의 손상계수를 산출하는 기법을 개발하여 여러 시료에 대한 분광 손상계수를 구하였다. 이 식과 계수의 적절성을 검증하기 위하여 시료들을 일반 광원으로 변색시키면서 그 변



(c) 녹색 색지



(d) 청색 색지



(e) 치자 염색 닥종이

그림 5. 각 시료의 변색 측정치와 계산치  
Fig. 5. Measured and Calculated Color Changes of the Samples

색의 크기를 측정하고 계산치와 비교한 결과, 대부분의 시료에서 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이 기법을 이용하면 시료의 변색을 정확히 예측할 수 있으며, 박물관의 전시물 뿐 아니라 방사에너지에 의하여 변색을 보이는 대부분의 물질에 대하여 이용할 수 있을 것이다. 다만 초기에 변색이 심한 물질은 정확한 계수의 산출을 위하여 서서히 변색을 시켜야 하며, 이 실험은 추후의 과제이다.

또한 연구과정에서 색상을 가진 물체의 분광손상 계수와 분광 흡수율과의 관련성을 예측할 수 있었으며, 이는 기존의 Harrison에 의한 상대손상계수의 한계를 보여주는 것이다. 또한 이는 색상을 가진 전시물의 전시에서, 전시물의 흡수율이 높은 가시광 대역의 방사를 제어함으로써 전시물의 내광성을 향상시키면서 관람에 지장을 주지 않을 수 있는 전시 기법의 가능성을 제시한다. 그러나 이 관계를 보다 명확히 하기 위해서는 가시광 대역에서의 손상계수 평가를 위한 보다 정밀하고 장기적인 실험이 필요하다.

색상을 가진 전시물 중에서 가벼운 타치나 열은 색조를 띤 것은 상대적으로 내광성이 약하다는 것이 정설이다. 특히 우리의 고유한 염색기법에 의한 전통적인 물감은 천연 재료를 이용하여 중복하여 염색함으로써 색상을 달리하고 있다. 문명화하면서 사라져가는 전통기법에 의해 발현된 색상의 모습을 유지하기 위해서는 보존 측면에서 계속 연구가 필요하다

참 고 문 헌

[1] 김홍범, "진열장 조명의 이론적 기준과 시설에 대한 고찰", 보존과학연구 제17집, pp 157~191, 1996.

[2] L. S. Harrison, "Report on the deteriorating effects of modern light sources", The Metropolitan Museum of Arts, 1954.

[3] A. H. Taylor and W. G. Pracejus, "Fading of colored materials by light and radiant energy", Illuminating Engineering, Vol. 45, No. 3, p.149, 1950 (L. S. Harrison, ibid., 1954에서 재인용).

[4] D. Saunders, "UV filters for artificial light sources", National Gallery Technical Bulletin 13, 1989.

[5] A. J. Henderson, F. F. LaGiusa and T. K. McGowan, "Dye fading", LD & A, 21(5), pp. 18~25, 1991.

[6] T. Padfield and S. Landi, "Lightfastness of the natural dyes", Studies in Conservation, Vol. 11, pp. 181

~196, 1966.

[7] 김훈, 김홍범, "조명에 의한 박물관 전시물의 변색 측정에 관한 연구", 한국조명 전기설비학회지, 제10권 제5호, pp. 43~51, 1996.

[8] R. L. Feller, "Accelerated aging", The Getty Conservation Institute, p.45, 1994.

[9] R. L. Feller, "Accelerated aging", The Getty Conservation Institute, p.23, 1994.

[10] C. Cuttle, "Damage to museum objects due to light exposure", Lighting Research and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 1~9, 1996.

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 훈(金 燾)

1958년 8월 6일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸. 1983년 서울대 대학원 전기공학과(석사). 1988년 서울대 대학원 전기공학과(박사). 1993년 호주국립대학 방문교수. 현재 강원대 공대 전기공학과 부교수, 당학회 편수 이사.



김 홍 범(金 弘 範)

1954년 5월 25일생. 1978년 서울대 공대 공업교육과 전기전공 졸. 1994년 고려대 산업대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 문화체육부 국립중앙박물관 건립추진기획단 설비과장, 고려대학교 전기공학과 박사과정.



권 세 혁(權 世 赫)

1949년 5월 4일생. 1974년 서울대 공대 공업교육과 전기전공 졸. 1976년 서울대 교육대학원 공업교육과 졸(교육학 석사). 1980년 미국 Iowa주립대 전기공학과 졸(석사). 1984년 미국 Iowa주립대 전기공학과 졸(박사). '76년~'78년 홍익공전 전임강사. 충남대 전기공학과 강사. 현재 고려대 공대 전기공학과 교수.