

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(11), 949-956(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.11.949

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 태양광 복사 가속화 시험을 통한 에폭시 폴리머의 색 변화 특성 연구

이상봉\*, 이동건\*, 김명준\*, 이수용\*, 박정선\*\*, 강태엽\*\*\*, 백상화\*\*\*

Research on the Decolorization of Epoxy Polymer  
by Accelerated Solar Radiation Test

Sang-Bong Lee\*, Dong-Geon Lee\*, Myung-Jun Kim\*, Soo-Yong Lee\*, and Jung-Sun Park\*\*

Tae-Yeop Kang\*\*\* and Sang-Hwa Baek\*\*\*

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University\* ,\*\*

Defence Systems Test Center, Agency for Defence Development\*\*\*

## ABSTRACT

There are a number of effects by solar radiation in many aerospace industrial fields, such as degradation of mechanical properties, sealing effect of sealants or decolorization. Because it takes long time to investigate these effects by using the light of natural state, new methods are developed for accelerating this phenomenon. In this paper, we developed an apparatus to simulate accelerated solar radiation phenomenon selecting irradiation intensity  $1,120\text{W}/\text{m}^2$  as the designed environment. Epoxy polymer as the composite material was chosen and processed by ASTM-D638, a reference for tensile test of polymer and plastic. Total color shift was selected as the test category to evaluate acceleration of the test. We obtained acceleration factors and numerical model from test data and concluded it can shorten test periods by accelerated irradiation intensity of  $1,120\text{W}/\text{m}^2$ .

## 초 록

태양광 복사에 의한 기계적 부품의 강성 및 강도 저하, 변색 등의 영향이 다양한 항공우주 산업분야에서 관찰되고 있다. 이러한 현상에 대한 연구를 위해 자연 상태의 태양광에 대한 노출 시험을 수행할 수 있지만 균일한 시험환경 구현이 어렵고 과도한 시간과 비용이 요구된다는 문제점이 있다. 이를 극복하고자 본 논문에서는 자연 상태의 태양광 복사강도 ( $1,120\text{W}/\text{m}^2$ )를 가속화 할 수 있는 시험 장치를 개발하고, 섬유강화 복합재료에 사용되는 epoxy polymer에 대한 가속화 시험을 통하여 태양광 복사에 따른 색 변화 특성을 연구하였다. 시험 시편은 인장 시험 규격인 ASTM-D638에 따라 제작하였으며, 시험 기간에 따른 색 변화 특성에 관한 가속계수와 역제곱 모형을 산출하였다. 본 연구를 통해 복사강도가 증가할 수록 동일한 변화량에 도달하기까지 소요되는 시간을 단축할 수 있다는 것을 확인하였다.

**Key Words** : Solar Radiation(태양광 복사 현상), Irradiation Intensity(복사강도), Epoxy Polymer(에폭시 폴리머), Acceleration Factor(가속계수), Inverse Power Model(역제곱 모형), Total Color Shift(색 변화량)

† Received : August 16, 2016

Revised : October 24, 2016

Accepted : October 24, 2016

\*\* Corresponding author, E-mail : jungsun@kau.ac.kr

## I. 서 론

자연 환경을 구성하는 많은 요소들 중 태양광은 기상상태나 계절에 관계없이 항상 존재하는 환경 요소이다. 태양광은 전자기파의 일종으로써 복사(radiation)의 형태로 지표면에 도달하며, 여러 분야에 사용되는 재료에 대해 다양한 변화를 일으키는 환경 요소이다. 항공 및 기타 산업분야에서 찾을 수 있는 태양광 복사현상의 영향은 전투기 캐노피를 제작하는데 쓰이는 복합재료의 변색 및 햇빛 투과율의 변화, 의류나 식료품의 변색으로 인한 제품의 가치 저하, 건물 외벽에 주로 쓰이는 밀폐재(sealant)의 밀폐 기능 저하 등을 고려할 수 있다[1].

태양광 복사에 의한 재료의 특성 변화를 알아보기 위해 다수의 연구들이 수행되었다. 국내에서는 graphite epoxy 복합재료를 대상으로 5년간 자연환경에 노출시킨 시편과 태양광, 습도 환경에 대한 가속화 시험장치인 Weather-O-Meter를 이용해 2,000시간 노출시킨 시편을 대상으로 가속계수를 평가하는 연구가 수행되었다[2,3]. 국외의 경우 Nguyen이 탄소섬유강화 복합재료와 철제 평판의 접착 시편 및 epoxy 계열의 접착제 시편을 자외선(Ultra Violet) 환경에 노출하여 기계적 특성 변화를 평가하였다. 자외선 노출 기간에 따라 기계적 강도 등이 저하되었으며, epoxy 시편의 경우 색이 어떻게 변하는 황변현상이 관찰되었다[4]. Fischer와 Ketola는 태양광이 아닌 실내조명 환경에 노출된 프린터용 잉크의 색 변화 특성을 살펴보았다. 조명의 종류 및 거리에 따른 시편의 색 변화 정도를 시편의 RGB 색 정보를 측정하여 정량적으로 평가하였다[5].

그러나 이러한 시험들은, 특정 과장 영역만 방출하는 램프를 사용하여 자외선 또는 가시광선의 영향을 연구하였거나, 자연 상태의 태양광을 그대로 이용해서 시간이 오래 걸린다는 단점이 있었다. 본 연구에서는 MIL-STD-810G를 기준으로 태양광 복사 환경의 모사 및 가속화 시험이 가능한 시험 장치를 개발하였다. MIL-STD-810G에서 규정하고 있는 태양광 복사 시험 규격에 따라 소비전력 2,500W의 메탈 할라이드 램프를 사용하고 기준 복사강도인  $1,120\text{W}/\text{m}^2$ 을 최대 3.5배까지 증가시켜 가속화 시험이 가능하도록 하였다. 또한 온도 설정 및 제어는 필름 형태의 히터와 냉각팬을 사용해 만족시키도록 제작하였다. 이를 통해 항공우주 구조물의 주재료인 복합재료에 적용되는 epoxy polymer 소재 시편에 대한 태양광 복사 가속화 시험을 수행하여 색 변화 특성을 평

가하였다. 이때 epoxy 시편의 경우 인장시험 규격인 ASTM-D638을 기준으로 제작하였다. 또한 별도의 색 촬영 장치를 제작하여 태양광 복사 노출에 따른 색 변화 특성을 평가하였으며, 이를 이용하여 측정된 색 변화량 데이터를 바탕으로 가속화 시험주기에 따른 색 변화 특성에 관한 가속화 모형을 네 종류의 형태로 정의하였다. 또한 개발된 태양광 복사 가속화 시험장치의 복사강도에 따른 가속계수를 평가하였다.

## II. 본 론

### 2.1 가속화 시험의 개요 및 물리적 이해

#### 2.1.1 태양광 복사 현상의 물리적 이해

NASA에 의해 알려진 태양이 방출하는 총 에너지는  $3.8 \times 10^{26}\text{Watt}$ 이다. 태양과 지구 중심 간 거리는 1천문단위(AU, astronomic unit)라고 하며,  $149,597,870,700\text{m}$ 에 달한다. 전자기파의 일종인 태양광이 지닌 에너지는 역제곱 법칙(inverse power law)에 의해 지구에 도달하는 과정에서 식 (1)에 따라 산출된다.

$$\frac{3.8 \times 10^{26} (\text{Watt})}{4\pi \times (1\text{AU})^2} = 1,352\text{W}/\text{m}^2 \quad (1)$$

식 (1)의 결과로 얻는 물리량을 태양광 복사강도(irradiation intensity)라 하며, 이 값은 높이 지구의 대기권 최외곽 표면에서 측정했을 때의 값으로 정의하고 1 solar constant라고 명명한다. UN 세계 기상 기구(WMO, world meteorological organization)에서는 이 복사강도를  $1,367\text{W}/\text{m}^2$ , NASA와 ASTM은  $1,353\text{W}/\text{m}^2$ 이라고 규정하였다. 태양광이 열권, 중간권, 성층권, 대류권 순서로 대기를 거치며 지표면에 도달하기까지 광 해리(光解離)현상, 오존층 형성, Rayleigh 산란 등으로 이 복사강도 값은  $1,120\text{W}/\text{m}^2$ 으로 감소하게 된다.

#### 2.1.2 가속화 시험의 개요

MIL-STD-810G에서는 태양광 복사 시험을 실제 일조현상을 모사하는 열 효과(thermal effect) 시험과 정상상태의 복사강도에 시편을 노출시키는 화학선 효과(actinic effect) 시험으로 구분하고 있다. 여기서 재료 변색의 경우 태양광 복사의 화학선 효과에 의한 것으로 규정하고 있다. 본 논문에서는 epoxy polymer의 태양광 복사에 따른 색 변화 특성을 평가하기 위하여 화학선 효과 시험 조건을 가속화하여 시험을 수행하였다.

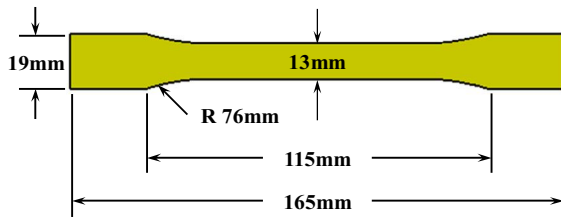


Fig. 1. Dimensions of the test specimen

지표면에 도달하는 복사강도( $1,120\text{W}/\text{m}^2$ )를 사용 환경으로 설정하였고 이것을 1 SUN이라 명명하였다. 가속화 환경시험에 필요한 복사강도는  $2,240\text{W}/\text{m}^2$ 와  $3,920\text{W}/\text{m}^2$ 로 산정하였으며 각각 1 SUN의 2배, 3.5배라는 의미로 2 SUN, 3.5 SUN이라 정의하였다. 또한 방사되는 빛으로 인해 수반되는 시험 주위의 온도는 평균  $90^\circ\text{C}$ 로 결정하여 복사강도와 마찬가지로 일정하게 유지하는 형태로 시험조건을 설정하였다. 시험주기는 정상상태의 복사강도를 5시간 방사하고 1시간 차단하는 것을 1주기로 규정하였으며 각각 28주기, 56주기에 걸쳐 2회 수행하도록 계획하였다. 사용한 epoxy 시편은 polymer 및 플라스틱의 기계적 특성 측정 시험 규격인 ASTM-D638을 참고로 하여 Fig. 1과 같이 제작하였다.

단계별 복사강도마다 각각 3개씩의 시편을 동일한 기간 동안 노출시킨 뒤 시험군의 평균 색 변화량을 산출하고, 이를 태양광 노출시간에 따라 예측할 수 있는 수학적 관계식과 가속화 모형을 산출하였다. 또한 산출된 관계식으로부터 특정한 색 변화량 수준에 도달하는데 소요되는 시간을 각각의 복사강도 별로 산출하여, 기준이 되는 환경에서의 소요 시간과 비교할 수 있도록 가속계수를 산출하고 가속화 모형을 생성하였다.

## 2.2 가속화 시험장치 개발

### 2.2.1 시험장치 개념 구상

태양광 복사 현상을 특성 변화의 변수로 설정하고 이 현상이 가속화 된 시험 환경을 조성하기 위해서는 별도의 시험장치 설계 및 제작이 필요하다. Fig. 2는 이러한 시험이 가능하도록 구상한 가속화 시험장치의 개념도이다.

시험장치의 외형은 온도 유지를 위해 밀폐된 캐비닛(cabinet)형태로 결정하였고, 높은 온도와 광선으로 인해 변형이 일어나지 않도록 알루미늄 프레임(frame)과 철제 판넬(panel)을 사용하였으며 난반사를 방지하고자 모든 부품들은 흑색 피막 처리하였다. 또한 완전 밀폐를 위해 알루미늄 프레임과 철제 판넬 사이는 내열 실리콘을 도포하여 빈틈이 없도록 하였다. 마지막으로 램프가

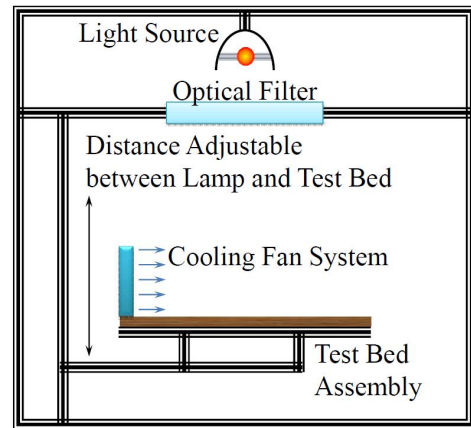


Fig. 2. Schematic of test apparatus

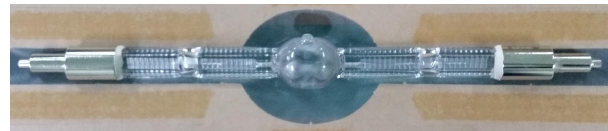


Fig. 3. The metal-halide lamp (2,500W)

설치될 광원부와 시편을 놓을 시험조(test chamber) 사이에는 광학 필터를 장착하여 시편에 닿는 빛의 스펙트럼을 조정하였다.

### 2.2.2 광원부의 램프 선정

태양광 복사시험의 궁극적인 목적은 태양광선에 의한 효과를 관찰하는 것이기 때문에 자연 상태의 태양광선을 인공적으로 모사하기 위한 램프의 선정이 중요하다. 태양광 복사현상 시험의 지침을 제공하는 MIL-STD-810G의 METHOD 505.5에서는 메탈 할라이드 램프(metal halide lamp)와 제논-아크 램프(xenon-arc lamp), 할로겐 램프(halogen lamp) 등을 태양광 모사에 적합한 램프 및 구성방식으로 제안하고 있다. 이 중 메탈 할라이드 램프가 제논-아크 램프에 비해 같은 사용 시간 동안 복사강도의 감소가 더 적다는 점과, 전극에서 발생하는 전기적 노이즈(noise)로 인해 스펙트럼이 분산되는 현상이 덜하다는 장점을 갖고 있으므로 시험 장치의 광원부에는 Fig. 3과 같은 소비전력 2,500W의 메탈 할라이드 램프를 사용하였다.

### 2.2.3 광학필터 설계 및 제작

메탈 할라이드 램프로부터 나오는 빛의 스펙트럼은 자연광과 많은 차이를 보인다. 이를 자연광에 최대한 근접할 수 있도록 본 연구에서 개발한 시험 장치는 광원부와 시험대 사이에 광학필터(optical filter)를 장착하고 있다. Fig. 4는 이러한 광학필터의 조립 개념도와 시험 장치에 장착한

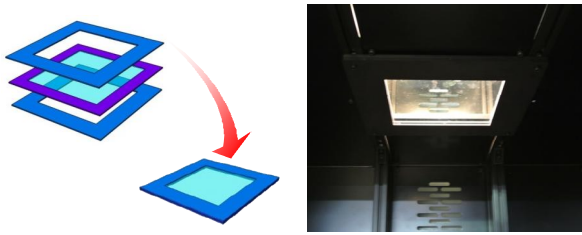


Fig. 4. Assembly of the optical filter

결과를 함께 나타내고 있다.

2.2.4 온도 설정을 위한 구성

시험 주위의 온도는 90℃로 설정하였으며 이를 일정하게 유지하기 위하여 가열과 냉각을 동시에 가하는 형태로 온도 조절 시스템을 구성하였다. 여러 종류의 가열 장치를 탐색하여 시험장치 내부 과열의 가능성, 시공의 용이함, 온도 제어 및 유지의 용이함 등을 비교하는 과정을 수행하였고, 그 결과 벽면을 이용해 시공할 수 있는 필름 히터(film heater)를 가열 장치로 채택하였다. 또한 시험대 주위에 3개의 냉각용 팬을 설치하여

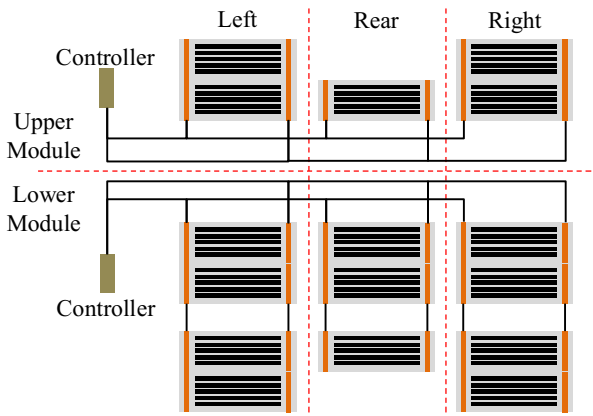


Fig. 5. Electrical schematic of film heater

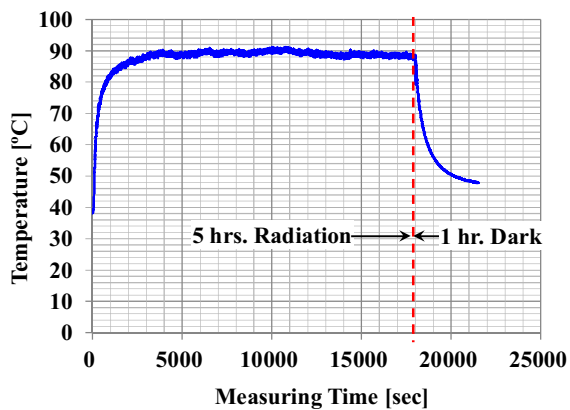
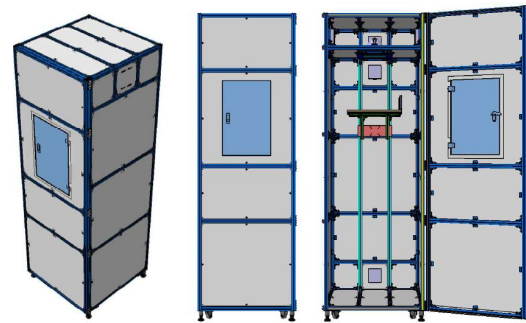


Fig. 6. Average temperature on the test bed



(a)



(b)

Fig. 7. (a) Apparatus designed by CAD; (b) Actual test apparatus

시험 주위 온도를 조절/유지하는 방식을 구성하였다. Fig. 5는 시험 장치의 벽면을 이용한 필름 히터의 배선도이며, Fig. 6은 이를 이용해 1주기 동안 시험대 위의 평균 온도를 측정한 결과이다.

2.2.5 시험 장치 제작 결과

태양광 복사 가속화 시험 장치의 설계 및 제작 결과는 Fig. 7과 같다. 시험 장치의 제원은  $810 \times 840 \times 2480(mm^3)$  이며 바닥면에 4개의 바퀴를 장착하여 필요에 따라 이동 가능하다.

3.1 태양광 복사 가속화 시험

3.1.1 가속화 시험 시편 제작

태양광 복사 가속화 시험은 Fig. 8과 같은 절차로 수행된다. 먼저 시험용 시편 제작에 사용된 재료는 Bisphenol-A type의 XFR-17053 Epoxy polymer resin으로써 경화제는 Dyhard 100s, 촉매제는 Dyhard 500ur을 사용하였다. 이들을 각

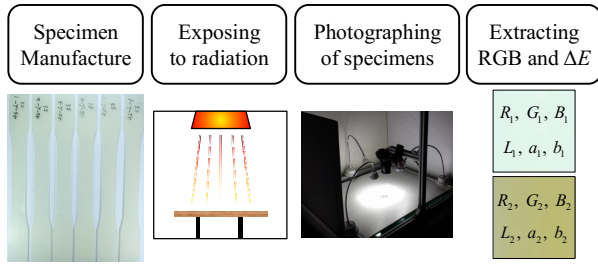


Fig. 8. Procedure of accelerated radiation test

각 100 : 6.5 : 3의 무게 비율로 혼합하여 표준 경화조건과 Fig. 1에 나타난 시편의 형상 및 제원에 따라 제작하였다.

3.1.2 가속화 한 복사환경 노출시험

Table 1에 언급한 것과 같이 각각의 가속화 복사강도 단계별로 3개씩의 시편을 배치하였다. 복사강도 영역에 시편을 배치할 때에는 시편의 gauge section이 해당 영역에 들어가도록 Fig. 9와 같이 삼각형 형태로 배치한다. Fig. 9의 (a)와 (b)는 각각 28주기, 56주기의 시편 배치 결과를 나타내고 있다.

3.1.3 시편 색 촬영 장치 제작

태양광 복사에 따른 시편의 색 변화량, ΔE를 평가하기 위하여 균일한 조건(초점, 거리, 조명 등)에서 시편의 색 촬영을 할 수 있는 촬영 장치를 제작하였다.

국제조명위원회(CIE)는 인간이 가장 정확한 색

Table 1. The number of specimens for each test categories

Irradiation Intensity	28 Cycles	56 Cycles
1 SUN	-	3 EA
2 SUN	3 EA	3 EA
3.5 SUN	3 EA	3 EA
Total No.	6 EA	9 EA

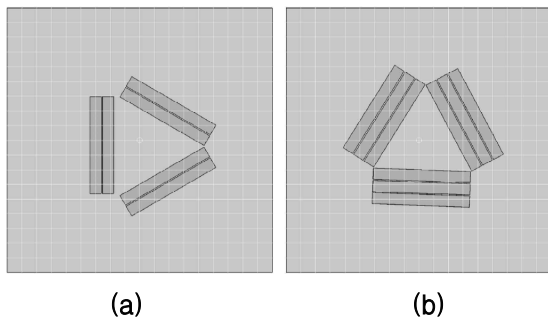


Fig. 9. (a) Location for 28 cycles test; (b) for 56 cycles test

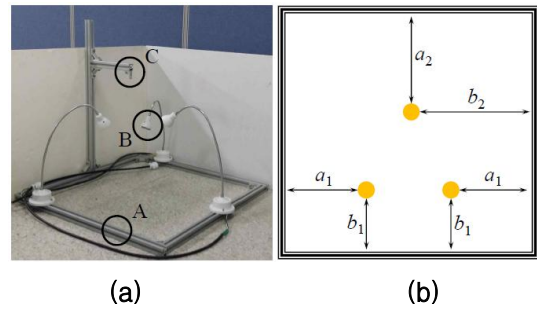


Fig. 10. (a) Photograph shooting apparatus; (b) Dimension of lamp heads

Table 2. Dimensions of lamp heads

Dimension	Value (mm)
$a_1$	210
$b_1$	160
$a_2$	200
$b_2$	250
$H$	320

을 인지할 수 있는 조명의 조건을 'D65'라고 명명하였다. 'D'는 daylight를, '65'는 광원의 색 온도가 6,500K임을 의미한다. Fig. 10(a)는 이러한 조명조건을 발현할 수 있도록 자체 제작한 색 촬영 장치이다. 사진에서 A는 램프를 고정하기 위한 알루미늄 프레임 조립체, B는 색 온도 6,500K을 발현하는 LED 스탠드 램프, C는 디지털 카메라를 고정하는 브라켓(bracket)이다. Fig. 10(b)는 LED 램프 머리 부분의 위치를 나타내고 있으며, Table 2는 Fig. 10(b)의 dimension값을 정리한 것이다. H는 모든 램프의 머리 높이이며 Table 2의 모든 값은 ±20mm의 공차를 갖는다.

3.1.4 RGB 색 공간 및 색 변화량 측정 이론

임의의 색을 표현할 때에는 R, G, B의 값을 함께 기술하여 표현한다. 예를 들어 흰색의 경우 R, G, B값이 255, 255, 255이며 청록색의 경우 R, G, B가 각각 0, 255, 255의 값을 갖는다. 이를 RGB 색 공간의 표현이라고 정의한다.

색 변화량은 R, G, B의 선형 및 비선형 변환을 거친 L, a, b값의 전, 후 차이로 도출하는 물리량이다. RGB 색 공간에서 추출된 값은 Fairman과 Hemmendinger가 도출한 선형 변환 행렬을 따라 먼저 XYZ 색 공간의 값으로 변환된다[6]. XYZ 색 공간으로의 변환은 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

이후 K. Leon에 의해 XYZ 색 공간의 값을 Lab 색 공간으로 비선형 변환하는 이론이 마련되었으며 이 과정은 식 (3), (4)와 같다[7].

$$\begin{aligned} L &= 116f(Y/Y_n) - 16 \\ a &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29} & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)에서  $X_n, Y_n, Z_n$ 은 표준 흰색의 XYZ값이며 모두 1,440의 값을 갖는다.  $L$ 은 0과 100사이의 값으로 색의 밝기를 나타낸다.  $a$ 와  $b$ 는 각각 적색 또는 녹색, 황색과 청색으로의 치우침 정도를 각각 (+), (-)로 나타낸다. 태양광 복사 시험 전 시편의 RGB값을 각각  $R_1, G_1, B_1$  시험 후의 값을  $R_2, G_2, B_2$ 라고 하면 식 (2), (3), (4)에 의해  $\Delta L, \Delta a, \Delta b$ 값을 구할 수 있고, 이를 식 (5)에 대입하여 색 변화량  $\Delta E$ 를 도출한다.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (5)$$

$\Delta E$ 는 무차원(non-dimensional) 수이며,  $\Delta E = 2.3$ 을 JND(just noticeable difference)라고 한다.

### 3.2 시험 결과 및 가속화 성능 평가

#### 3.2.1 시험 결과 및 색 변화량 측정 결과

Figure 11(a)~(c)는 1 SUN, 2 SUN, 3.5 SUN의

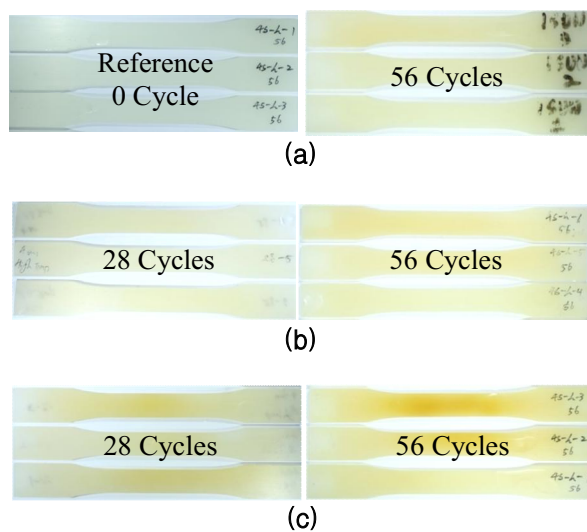


Fig. 11. (a) Test results under 1 SUN; (b) Under 2 SUN; (c) Under 3.5 SUN

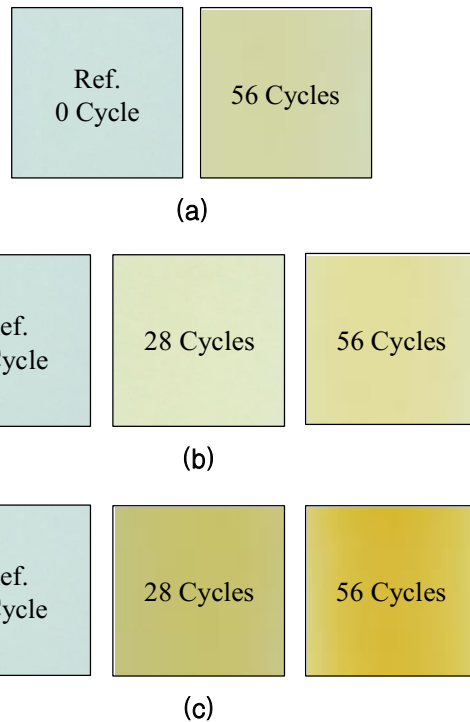


Fig. 12. (a) Color shift of gauge section under 1 SUN;(b) Under 2 SUN; (c) Under 3.5 SUN

Table 3. Average RGB values of each specimen

W/m <sup>2</sup>	Cycles	R	G	B
	0(Ref.)		209.83	231.08
1,120	56	213.03 ±2.08	220.67 ±5.39	180.82 ±10.18
	28	217.34 ±6.20	225.31 ±7.25	193.97 ±1.57
2,240	56	225.60 ±0.58	228.11 ±4.70	177.16 ±13.72
	28	192.57 ±4.99	193.55 ±4.99	130.24 ±14.54
3,920	56	220.10 ±2.36	209.87 ±13.65	118.39 ±40.03

복사강도에 각각 28, 56주기씩 노출된 epoxy polymer 인장 시험 시편을 Fig. 10에 나타난 색 촬영 장치를 이용해 촬영한 결과이다.

Figure 12는 200×200 pixels로 Fig. 11에서 추출한 시험 전, 후 gauge section의 digital image를 나타내고 있다. MATLAB을 이용해 1 pixel당 R, G, B값을 추출하였으며 각 시편 당 40,000개의 R, G, B값 평균을 해당 시편 색의 시험 전, 후 대푯값으로 하여 Table 3으로 정리하였다. Table 4는 식 (2) ~ (5)를 이용해 도출한 3개 시편의 평균 색 변화량  $\Delta E$ 의 값을 정리한 결과이다.

3.2.2 색 변화량 관계식 및 가속계수 평가

Table 4의 결과를 바탕으로 가속화 복사강도 별로 시험주기에 따른 색 변화량 간의 관계식을 도출하였다. X를 시험주기 0, 28, 56 Cycles로 하고 Y를 2 SUN과 3.5 SUN에서의 색 변화량으로 하여 최소제곱법으로 관계식의 계수를 도출하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

Figure 13은 Table 4, Table 5의 선도와, 1 SUN에서 56주기 동안의 색 변화량  $\Delta E_{1,SUN} = 11.52$ 를 고장 발생으로 가정하고, 각각의 가속화 복사강도에서 이 값에 도달하기 까지 소요된 시험주기를 구하는 과정을 나타낸다. Fig. 13의  $t_{2,SUN}$ 과  $t_{3.5,SUN}$ 은 식 (6), (7)과 같이 구하였다.

$$Y_{2,SUN} = 0.3792X - 0.0023X^2 = 11.52 \quad (6)$$

$$Y_{3.5,SUN} = 1.0553X - 0.0084X^2 = 11.52 \quad (7)$$

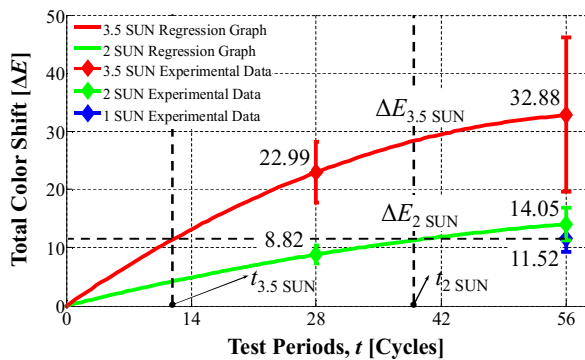


Fig. 13. Graphs of two equations and lives under 2 SUN and 3.5 SUN

Table 4. Measurement results of  $\Delta E$

	1 SUN, 56C	2 SUN, 28C	3.5 SUN, 28C	2 SUN, 56C	3.5 SUN, 56C
#1	8.46	9.53	23.34	10.15	15.25
#2	12.10	6.64	16.44	15.31	36.16
#3	14.00	10.29	29.20	16.69	47.24
$\mu$	11.52	8.82	22.99	14.05	32.88
$\sigma$	2.30	1.57	5.22	2.82	13.27

Table 5. Coefficients and each relation equation

	$a_1$	$a_2$	$a_3$
2 SUN	0	0.3792	-0.0023
3.5 SUN		1.0553	-0.0084
$\Delta E_{2,SUN}$	$Y_{2,SUN} = 0.3792 X - 0.0023 X^2$		
$\Delta E_{3.5,SUN}$	$Y_{3.5,SUN} = 1.0553 X - 0.0084 X^2$		

또한 56주기를 고장 시간으로 가정하여 식 (8), (9)와 같이 가속계수를 구하였다.

$$AF_{2,SUN} = 56 / 40.10 = 1.40 \quad (8)$$

$$AF_{3.5,SUN} = 56 / 12.07 = 4.64 \quad (9)$$

3.2.3 가속화 모형 산출 및 가속계수 평가

가속화 모형은 1차 선형 모형, 2차 다항식 모형, 지수함수 모형, 역제곱 모형을 대상으로 회귀 분석 하였다. 고장시간  $\tau$ 와 가속변수  $I$ 를 입력하여 최소제곱법으로 각 모형의 관계식과 결정계수  $R^2$ 를 Table 6에 나타내었으며 Fig. 14는 가속화 모형과 실제 산출된 소요 시험주기를 함께 나타낸 것이다. Table 7은 가속화 모형으로부터 가속계수들과, 실제 시험 데이터로부터 구한 가속계수를 비교한 것이다. 본 연구에서 산출한 epoxy polymer의 색 변화 특성에 대해 가장 적합한 가속화 모형은 2차 다항식 모형이라 추정하였다.

Table 6. Comparison of four acceleration model and  $R^2$

Accel. Model	Equation	$R^2$
1 <sup>st</sup> linear	$\tau = -0.0158I + 74.32$	0.9981
2 <sup>nd</sup> polynomial	$\tau = 69.67 - 0.0112I - (8.9 \times 10^{-7})I^2$	1.0000
Exponential	$\tau = 117.26e^{-0.0005I}$	0.9604
Inverse Power	$\tau = (2.89 \times 10^5)I^{-1.1960}$	0.8647

Table 7. Comparison of acceleration factors from four acceleration models

Accel. Model	$AF_{2,SUN}$	$AF_{3.5,SUN}$
1 <sup>st</sup> linear	1.45	4.57
2 <sup>nd</sup> polynomial	1.39	4.63
Exponential	1.75	4.06
Inverse Power	2.29	4.47
Experimental	1.40	4.64

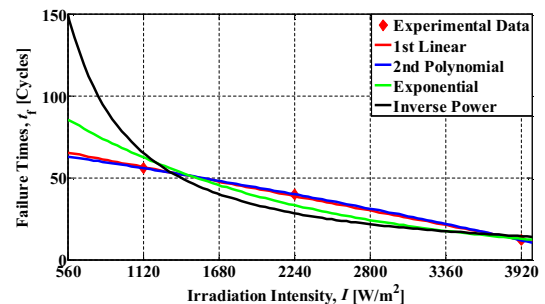


Fig. 14. Graph of inverse power model and experiment data

#### IV. 결 론

본 논문에서는 태양광 복사 가속화 시험장치를 직접 개발하고, 항공우주용 복합재료에 적용되는 epoxy polymer 소재의 태양광 복사 노출에 따른 색 변화량 특성을 평가하였다.

태양광 복사현상을 모사할 수 있는 가속화 시험 장치를 설계/제작하였으며, 색 변화량을 정량화하기 위해 색 촬영 장치를 직접 제작하였다. 색 변화량은 RGB 및 Lab 색 공간 값을 이용해서 도출하였으며, 각 시편의 gauge section에 대한 색 변화 특성을 평가하였다. 태양광 복사 노출시간에 따른 색 변화 특성에 관한 네 종류의 가속화 모형을 정의하였다. 산출된 가속화 모형을 사용하면 태양광의 화학선 효과에 의한 색 변화량의 특성을 예측할 수 있으며, 2차 가속화 모형의 경우 복사강도를 2배, 3.5배 가속화 하였을 때 시험 시간이 각각 1/1.4배, 1/4.6배로 단축된다고 추정할 수 있다. 본 논문을 통해 정의된 가속화 모형은 태양광 복사강도 조건 및 노출 시간에 따른 epoxy polymer 소재의 색 변화 특성을 예측 및 평가하기 위해 활용될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원(계약번호 201405048)을 받아 수행하였으며, 국방과학연구소 관계자에게 감사를 표합니다.

#### References

1) MIL-STD-810G, *Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, US Dept. of

Defense, 2008

2) Shin, K.B., Cho, S.B., Hong, C.S., Kim, C.G., Kim, B.K., Kim, H.J., Choi, B.I., "The Study of Characteristics of Composite Materials under Space Environments," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 27, No. 4, 1999, pp. 54-64.

3) Kim, C. G., and Hong, C. S., "Correlation of Accelerated Aging Test to Natural Aging Test on Graphite-Epoxy Composite Materials," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, Sep. 2003, pp.849~861.

4) Nguyen, T., Bai, Y., Zhao, X., and Al-Mahaidi, R., "Effects of Ultraviolet Radiation and Associated Elevated Temperature on Mechanical Performance of Steel/CFRP Double Strap Joints," *Composite Structure*, Vol. 94, June. 2012, pp.3563~3573.

5) Fischer, R. M., and Ketola, W. D., "Exposure Test Results for Inkjet Inks in Interior Light Environments," *Durability 2000: Accelerated and Outdoor Weathering Testing*, ASTM STP 1385, Jan. 2000, pp.87~102.

6) Fairman, H. S., Brill, M. H., and Hemmendinger, H., "How the CIE 1931 Color-Matching Functions were Derived from Wright-Guild Data," *Color Research and Application*, Vol. 22, Feb. 1997, pp.11~23.

7) Leon, K., Mery, D., Pedreschi, F., and Leon, J., "Color Measurement in L\*a\*b\* Units from RGB Digital Images," *Food Research International*, Vol. 39, Mar. 2006, pp.1084~1091.