

# 광원의 방사조도의 변동에 따른 시료의 온도와 적외선 복사량의 변화

(A Change in the Temperature of Samples and the Infrared Radiation on the Irradiance Variation of Light Sources)

한중성\* · 김기훈 · 김 훈

(Jong-Sung Han · Gi-Hoon Kim · Hoon Kim)

## 요 약

물질을 구성하는 분자가 빛을 흡수하면 그 빛의 파장에 따른 복사에너지에 의하여 열적 반응이나 광화학적 반응이 일어난다. 특히 적외선 복사에 의한 열적 반응은 물질의 온도상승이나 온도하강 등의 과정을 통하여 물질의 물리적 손상을 초래한다. 따라서 적외선을 포함하는 복사에너지의 조사에 의하여 전시물, 진열장내의 전시물의 온도 변화를 측정하여 그 온도의 변화 범위보다 적은 온도 변화가 전시물에서 일어나도록 조명을 제한하고 알맞은 광원을 선정하여야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 광원에 의한 시료의 온도상승과 적외선 복사량을 측정할 수 있는 측정시스템을 구축하고, 전시조명용으로 많이 사용하는 여러 광원을 대상으로 각 광원의 방사조도를 변화시키면서 시료의 표면온도와 적외선 복사량을 각각 측정하였다. 측정의 결과를 토대로 방사조도와 온도 및 적외선 복사량간의 함수관계를 파악하고, 조도의 변동에 따른 시료의 온도 변화 및 적외선 복사량의 변화를 비교, 분석하였다.

## 1. 서 론

광원의 복사에너지가 물질에 입사하면, 그 물질의 고유한 특성에 따라 그 에너지의 일부는 흡수되고 나머지는 반사되거나 투과된다. 물질을 구성하는 분자가 빛을 흡수하면 그 빛의 파장에 따른 복사에너지에 의하여 열적 반응이나 광화학적 반응이 일어난다. 특히 적외선 복사에 의한 열적 반응은 물질의 온도상승이나 온도하강 등의 과정을 통하여 물질의 물리적 손상을 초래한다. 즉 조명에 의해 전시물의 온도가 상승하거나 냉각이 되면 물질의 팽창, 수축이 수반된다. 이 현상이 반복되면 물질내의 수분의 증발과 흡수에 의해, 팽창계수가 다른 물질의 조합으로 구성된 유물이나 서화와 같은 전시물의 경우 각종 염료나 안료 등의 접착력을 약화시켜 이탈, 박리와 함께 비틀림, 찌그러짐 등과 같은 물리적 손상이 발생하고 전시공간간의 온도 변화와 상대습도의 변화가 초래된다[1,2].

조명에 의한 전시물의 물리적 손상 여부를 규정하기는 매우 어려우며, 어느 정도의 온도 상승과 수분 방출이 전시물의 보존에 위험한 영향을 미칠 것인지에 대해서는 그다지 밝혀진 바 없으나, 조명에 의한 전시물의 온도 변화가 실내에서 통상적으로 발생하는 온도의 변화보다 크다면 기준으로 설정된 보존 기간보다 빨리 전시물의 손상이 발생될 것으로 생각할 수 있다. 따라서 적외선을 포함하는 복사에너지의 조사에 의하여 전시물, 진열장내의 전시물의 온도 변화를 측정하여 그 온도의 변화 범위보다 적은 온도의 변화가 전시물에서 일어나도록 조명을 제한하고 알맞은 광원을 선정하는 등 손상에 대한 적절한 조명환경을 마련하여 손상의 최소화나 보존에 많은 노력을 기울여야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 전시조명용으로 많이 사용하는 여러 광원을 대상으로 각 광원의 방사조도를 단계별로 변화시키면서 시료의 표면온도와 적외선 복사량을 각각 측정하였다. 측정의 결과를 토대로 방사조도와 온도 및 적외선 복사량간의 함수관계를 파악하고, 조도변동에

다른 시료의 온도 변화 및 적외선 복사량의 변화를 비교, 분석하였다.

## 2. 적외선 복사에 의한 전시물의 온도상승과 물리적 손상

조명에 의한 전시물의 손상은 크게 광화학적 손상과 물리적 손상으로 구분된다. 광화학적 손상은 자외선 및 가시광선과 관련이 있으며, 물리적 손상은 열적인 효과를 갖는 적외선 복사에 의해서 일어난다. 즉, 물질에 대하여 자외선과 파장이 짧은 자색 부근의 가시광선은 광화학반응에 의하여 변·퇴색 및 구조적인 손상을 일으키며, 적외선과 파장이 긴 적색 부근의 가시광선은 건조에 의한 물리적 손상을 일으킨다.

조명에 의한 전시물의 물리적 손상의 경우, 적외선을 포함한 복사에너지와 안정기 등의 조명시스템에 의해 전시물의 온도가 상승한다. 전시물의 온도상승은 광원의 복사에너지 중에서 강한 열적 에너지를 갖으면서 침투력이 좋은 적외선이 주로 일으킨다. 온도상승의 정도는 전시물의 분광흡수율에 따라 다르며, 분광흡수율이 클수록 높아진다. 물리적 손상은 조명장치의 on/off 등에 의해 전시물의 온도가 상승하거나 냉각되면서 전시물의 팽창과 수축이 수반되고 이에 따른 수분의 증발과 흡수의 주기적인 반복이 주요 원인인 것으로 알려져 있다. 특히 가죽이나 목조품인 경우 극단적인 가열과 냉각으로 균열과 깨짐의 결과를 가져오므로 특별히 문제가 될 수 있다. 또한 여러 종류의 물질의 조합으로 구성된 전시물의 경우에는 물질의 팽창계수가 서로 다르기 때문에 박리, 찌그러짐 등의 물리적 손상을 일으킨다.

전시물의 물리적 손상에 영향을 미치는 요소는 조명 외적인 요소를 포함하여 그 변수가 매우 다양하고 복잡적이지만 주로 생각할 수 있는 것은 다음과 같다. 먼저 광원에 대해서는 광원의 분광에너지분포, 사용 등기구의 배광분포, 전시물과 광원간의 거리와 각도, 광원의 점등과 소등 시간 등이 모두 영향을 미친다. 그리고 전시물에 대해서는 전시물의 형상, 전시물을 이루는 물질의 종류, 전시물의 색상 등이 있으며 두 종류 이상의 물질로 이루어진 전시물의 경우에는 이들의 분포형태, 부착형태 등 기하급수적으로 변수가 증가한다. 또한 환경에 대해서는 주위 온도 및 상대습도, 진열장의 크기 및 구성 물질 등이 있다. 이와 같이 퇴색이나 열화의

현상은 조명 뿐 아니라, 온도나 습도의 변화 등 각 요소가 단독 또는 복합적으로 작용하여 발생한다[2,3].

조명의 경우, 전시조명에서 스포트조명 및 빔조명을 이용한 연출조명에 백열전구나 할로겐전구 등 가시광선과 더불어 많은 열을 방출하는 광원이 많이 사용된다. G. Thomson과 S. Staniforth의 연구에 의해 백열전구를 이용한 조명의 조도가 200[lx] 일 때 피조물의 온도는 색상에 따라 1~1.5[°C] 정도 상승하고, 500[lx]에서는 2~3[°C] 정도 상승하는 것이 알려져 있다. 형광램프의 가열효과는 위의 반 정도이며 주광은 이보다 적대[4]. 또한 전시물의 경우, 전시물 표면의 분광흡수율에 따라 온도상승이 다르다. 즉, 동일한 조명의 조도라도 분광흡수율이 클수록 온도가 높아진다. 예를 들어 흑색 물체의 온도상승은 백색 물체 보다 50[%] 정도 높은 것으로 알려져 있다[2].

그리고 온도 및 습도의 경우에는, 전시자료의 보존 및 전시에 이상적인 기상환경조건으로 온도 20±2[°C], 상대습도 50±5[%]의 온·습도 조건이 오래전부터 제시되어 왔다. 온도의 영향은 29~48[°C]에서는 큰 차이는 없으나 66[°C]에서는 29[°C]에 비해 약 2배의 작용을 하는 것으로 알려져 있다. 또한 습도는 특히 직물염료에 대해 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. K McLaren은 목면섬유에 천연염료를 부착하여 습도의 변화와 목면의 내광성과의 관계를 조사하여 퇴색의 비율이 습도와 밀접한 관계가 있다는 것을 밝혔다. 특히, 목재, 지류, 섬유 등의 습기가 많은 유기물질을 건조한 공기중에 놓으면, 그 물질의 내부로부터 일정한 수분이 방출되어 공기중의 상대습도는 평형을 유지한다. 예를 들어 온도 25[°C], 상대습도 50[%]의 상태는 건조공기 1[m<sup>3</sup>]중에 수분을 10[g] 정도 포함한다. 이 상태에서 온도를 3[°C] 상승시키면 상대습도는 약 42[%]로 떨어지며, 습도를 50[%] 정도로 유지하려면 2[g/m<sup>3</sup>]의 수분이 필요하다. 이러한 주변 상황에 전시물이 놓여 있으면 전시물 자체의 습도가 주변과 평형을 이루기 위하여, 전시물에 포함되어 있던 얼마간의 수분이 이탈되며, 반대로 온도가 내려가면 공기중의 수분은 거꾸로 유물에 흡수된다. 물이 기화하여 방출하는 순간에는 큰 힘이 작용하므로 흡수보다는 방출의 경우가 보존 측면에서 위험하다[2,3].

전시물의 조명에 의한 물리적 손상을 저감시키는 방법으로는 광원의 경우, 단위조도당 적외선 복사량이 적은 광원을 사용한다. 특히, 쿨 빔 PAR전구나 MR형 할

로겐전구와 같이 적외선이 최소화되도록 디자인된 광원을 선택하는 것이 좋다. 또한 적외선 복사를 저감시킬 필요가 있는 곳에서는 적외선 흡수필터나, 적외선 투과 다이크로의 반사각이 사용될 수 있다. 보통 백열전구에는 적외선 흡수필터를, 할로겐전구에는 적외선 흡수필터나 적외선 투과 다이크로의 반사각이 많이 사용되고, 형광램프에는 전면에 유리 또는 플라스틱의 필터를 장착한다. 그리고 진열장 등의 한정된 공간내의 전시물에 대한 조명에서는 진열장내의 온도상승에 특히 신경을 써야하며, 안정기 등의 발열원이 되는 부분은 진열장 외부로 격리시키고 대류 또는 강제통풍에 의한 냉각을 실시하는 등의 방법이 있다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 시료의 온도변화 측정

방사조도의 변동에 따른 시료의 온도변화의 측정을 행한 실험실은 면적 2.5[m]×3.5[m], 높이 3[m]인 실내의 개방 공간으로서, 내부에 반사의 영향을 억제하기 위해 무반사 흑색 페인트가 칠해진 일종의 암실이다. 측정 당시 주위환경은 주위온도 23±1[°C], 상대습도 49±3[%] 정도를 유지한 상태였으며, 공기의 유동을 최대한 억제하였다.

시험용 광원은 박물관에서 일반적으로 사용되는 백열전구, 다이크로의 할로겐전구, 3파장 전구식 형광램프를 사용하였다. 등기구가 부착된 스탠드는 측정 높이와 수평이동이 가능하도록 하였다.

피조사물인 시료는 그림 1에 나타낸 바와 같이 6종류를 사용하였다. 시료의 선정에 있어서, 물리적 손상과 관련된 개별 시료의 특성 파악보다는 조명에 의한 물질의 온도상승 여부에 주안점을 두었기 때문에 특수한 시료 보다는 일반적인 시료를 택하였다. 각 시료는 1.5[cm]의 정사각형 모양이며, 일정한 간격으로 반경 10[cm] 이내에 위치시켰다. 그리고 시료는 대류와 전도의 영향을 고려하여 평판에서 5[cm] 위에 설치된 줄 위에 걸쳐놓은 상태에서 빛에 노출시켰다.

시료의 중심에서 수직으로 윗부분에 광원을 설치하여 최대 배광이 시료의 중심을 향하도록 한 뒤, 시료의 중심부에서 단계별로 정해진 조도를 측정하여 그 단계의 조도에 맞게 조명시스템을 세팅시켰다. 그 상태에서 10분간 점등한 후 각 시료의 중심 온도를 측정하였다. 이 과정을 조도 단계별로 시료와 조명기구 사이의 거

리를 변화시키면서 반복하였다. 조도 변동 범위는 표 1과 같이 100[lx]~2000[lx]까지 총 9 단계로 하였다. 그리고 초기상태의 일정한 온도를 유지시키기 위해서 각 램프의 측정이 끝날 때마다 충분한 환기를 시키고 시료의 온도가 실온과 같아진 다음에 실험을 행하였다.

각 시료의 온도측정에는 비접촉식 적외선온도계(Model TA-0510b, Minolta, Japan)를 사용하였으며, 이 온도계로 1.5[m] 정도 떨어진 곳에서 측정 주기마다 6개의 시료를 빠른 시간 내에 측정하였다. 또한 주위온도와 적외선 온도계의 보정용으로 접촉식 열전온도계(Model RS-232, Center, Taiwan)를 사용하였다.

#### 3.2 적외선 복사량의 측정

본 측정은 앞에서 서술한 '시료의 온도변화 측정'과 비슷한 실험방법으로 같은 실험실에서 수행하였다. 시험용 광원은 온도변화 측정에서 사용하였던 100[W] 백열전구, 50[W] 다이크로의 할로겐전구, 23[W] 3파장 형광램프를 포함하여 20[W] 직관형 형광램프, 20[W] MR16형 다이크로의 할로겐전구, 100[W] 소형 메탈헬라이드램프 등 총 6종을 대상으로 하였다.

적외선 복사량의 측정은 범용 광모니터(774 Environmental Monitor, Type 774, ELSEC, UK)를 사용하였다. 이 측정기기는 적외선(IR), 가시광선, 자외선(UV), 그리고 온도를 동시에 측정하여 저장한 후 컴퓨터로 데이터를 전송할 수 있다. 이 계측기는 350[nm]~40[μm] 파장 범위에서 0~1000[W/m<sup>2</sup>]까지 적외선 측정이 가능하다.

광모니터의 수광 센서의 중심에서 수직으로 윗부분에 거리 변동이 가능한 등기구를 설치하여 최대 배광이 센서의 중심을 향하도록 한 뒤, 단계별로 정해진 조도를 측정하여 그 단계의 조도에 맞게 조명시스템을 세팅시켰다. 그 상태에서 10분간 점등한 후 각 측정 단계마다 광원의 적외선 복사량과 중심부 표면온도를 각각 측정하였다. 이 과정을 조도 단계별로 시료와 조명기구 사이의 거리를 변화시키면서 반복하였다.

측정당시의 주위환경은 주위온도 약 23±1[°C], 상대습도 49±3[%]를 유지한 상태였으며, 초기상태의 일정한 온도를 유지시키기 위해서 각 램프의 측정이 끝날 때마다 충분한 환기를 시키고 시료의 온도가 실온과 같아진 다음에 실험을 행하였다. 그리고 조도의 변동 범위는 10[lx]~2000[lx]까지 총 15 단계로 하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

그림 1은 백열전구(IL100W, 100W/220V, clear bulb)의 조도를 변동시키면서 각 시료의 온도상승을 측정할 결과 중에서 조도가 500[lx], 1000[lx] 일 때의 온도상승 값을 그래프로 나타낸 것이다. 전체적으로 조도가 증가하면서 온도도 점차 상승하는 추이이며, 분광흡수율이 높은 흑색의 피혁 시료가 가장 높은 값을 보이고 있는 반면 반사율이 가장 높은 색상인 백색의 복사지가 가장 낮은 온도상승을 보이고 있다. 대체적으로 온도상승 폭이 큰 피혁 시료를 제외한 나머지 시료들은 비슷한 온도상승을 보이고 있다. 6종의 시료들의 온도상승 평균치는 500[lx]에서 1.8[°C], 1000[lx]에서는 2.9[°C]로서, 두 조도 사이에 1.1[°C]의 차이가 생긴다. 본 그림에는 나타나지 않았지만 전체적으로 2000[lx]에서의 온도상승 값이 500[lx]의 온도 값에 비해 약 2배 정도 높게 나타났다.

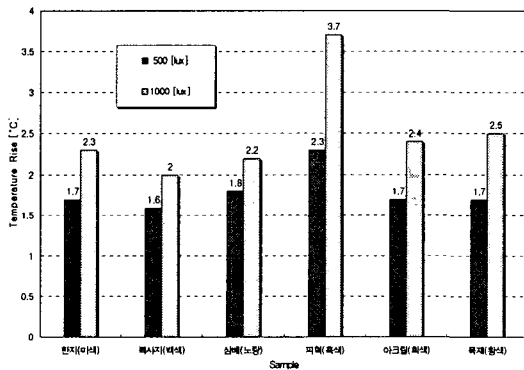


그림 1. 백열전구의 조도변동에 따른 시료의 온도상승

그림 2는 앞에서 언급한 백열전구를 포함한 3파장형 전구식 형광램프(FL23W, 23W/220V)와 다이크로익 할로겐전구(HL50W, 50W/12V)의 온도상승 시험 결과를 바탕으로, 각 광원마다 조도 단계별로 얻어지는 각 시료의 표면온도 값을 전체 시료에 대해 평균한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 조도의 증가에 따라 완만하게 온도가 증가하고 있으며, 같은 조도 증가에서의 온도상승은 백열전구가 가장 크고, 형광램프와 할로겐전구는 비슷한 수준을 보이고 있다. 측정 초기의 온도인 23.5[°C]에서 서서히 온도가 증가하여 2000[lx]에서 백열전구의 온도는 28.3[°C], 형광램

프는 25.5[°C], 할로겐전구는 25.8[°C]의 온도 변화를 나타내고 있다.

그림 3은 그림 2의 결과를 바탕으로 각 조도가 500 [lx], 1000[lx], 2000[lx] 일 때의 온도상승 값을 3가지 광원에 대하여 그래프로 나타낸 것이다. 이 광원들을 이용하여 전시물에 500[lx]의 조도를 제공하려는 경우, 백열전구는 2.[°C], 3파장 형광램프는 0.4[°C], 다이크로익 할로겐전구는 0.5[°C]의 온도상승이 있다. 조도가 높을수록 백열전구와 형광램프 및 할로겐전구에 의한 온도상승의 폭은 더욱 커진다. 예를 들어 2000[lx]의 경우 온도상승은 각각 4.3[°C], 2[°C], 2.3[°C]이며, 백열전구가 형광램프에 비해 2배 이상 높은 것으로 나타났다.

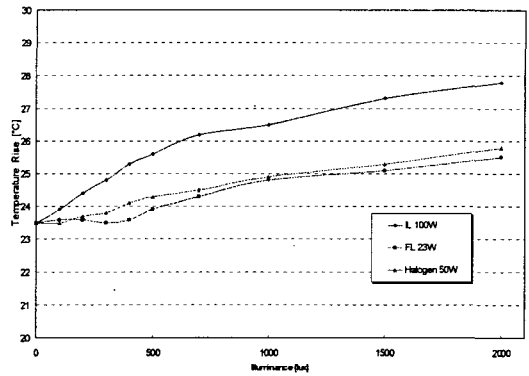


그림 2. 각 광원의 조도 변동에 따른 온도상승 추이

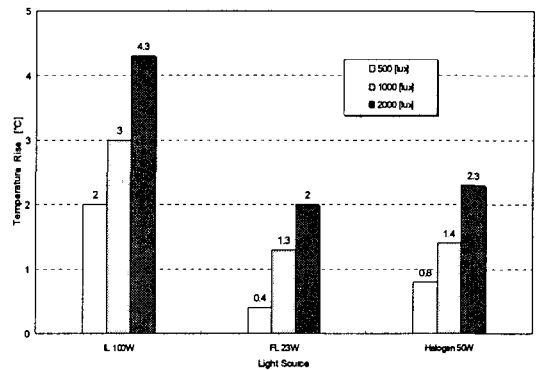


그림 3. 각 광원의 조도 변동에 따른 온도상승 비교

표 1은 조도 변동에 따른 적외선 복사량을 3가지 램프에 대해 나타낸 것이다. 적외선 복사에 의한 가열효

과는 심각한 손상의 원인이 되므로 어느 한도 이하로 제한할 필요가 있다. 그러나 현재까지 각국의 기준치에서 적외선 복사량을 제한하는 내용은 없으며, 이에 대한 연구도 별로 없는 실정이다. 광원의 적외선 복사에 의해 인체가 느끼는 육체적 부담에 대한 연구에 의하면, 인간의 정수리에 약  $20[\text{mW}/\text{m}^2]$ 의 적외선 복사량이 제공되면 온기를 주관적으로 느끼며, 이 정도의 적외선 복사량은 형광램프에서  $1000[\text{lx}]$  이상, 공조겸용 조명 기구를 사용한 경우에는  $2500\sim 3000[\text{lx}]$ 일 때 발생하는 것으로 알려져 있다[5]. 표 1의 측정치에서  $20[\text{mW}/\text{m}^2]$  정도의 적외선 복사량이 발생하는 조도는 백열전구가  $100[\text{lx}]$  정도에서,  $23[\text{W}]$  3파장 형광램프는  $700\sim 1000[\text{lx}]$  사이,  $50[\text{W}]$  할로겐전구는  $400[\text{lx}]$  부근이다.

표 1. 광원의 조도변동에 따른 적외선 복사량

조도[ $\text{lx}$ ]	IL100W	FL23W	HL50W
	IR[ $\text{mW}/\text{m}^2$ ]	IR[ $\text{mW}/\text{m}^2$ ]	IR[ $\text{mW}/\text{m}^2$ ]
100	19.3	14.9	14.2
200	25.5	14.8	15.5
300	32.2	15.8	16.1
400	39.3	16.5	20.3
500	43.3	18.2	21.6
700	50.7	19.7	23.1
1000	73.2	20.6	28.7
1500	95.6	23.2	33
2000	133	25.5	39.7

그림 4는 3가지 광원의 조도의 변동에 따른 적외선 복사량의 변화 추이를 그래프로 나타낸 것이다. 3가지 광원 중에서  $100[\text{W}]$  백열전구가 압도적으로 적외선을 많이 방출하고 있으며, 조도의 증가에 따라 비례적으로 적외선이 증가하는 추이를 보이고 있다. 특히  $500[\text{lx}]$  이후에는 증가의 폭이 상당히 커짐을 볼 수 있다. 반면 할로겐전구가 형광램프보다 적외선을 좀 더 많이 방출하고 있으나, 두 램프 모두 비슷한 양상으로 조도 증가에 따라 완만히 증가하는 추이를 보이고 있다.  $500[\text{lx}]$ 에서 백열전구의 적외선 복사량은  $43.3[\text{mW}/\text{m}^2]$ 로서, 이 값은 형광램프의 2.4배, 할로겐전구의 2배에 해당하며,  $2000[\text{lx}]$ 에서는 무려 형광램프의 5.2배, 할로겐전구의

3.4배에 달한다.

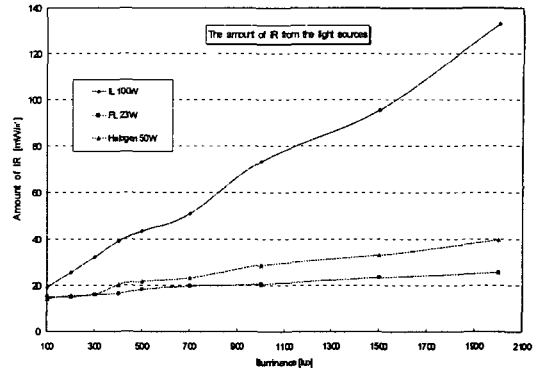


그림 4. 조도 변동에 따른 적외선 복사량의 상승 추이

그림 5는 전시물의 온도상승과 적외선 복사량과의 관계를 알아보기 위해, 백열전구의 조도변동에 따른 적외선 복사량의 변화와 시료의 온도상승간의 변동 추이를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 적외선 복사량의 증가에 따라 시료의 온도도 비례적으로 상승하고 있음을 볼 수 있다. 점등 후 백열전구에서  $20[\text{mW}/\text{m}^2]$  정도의 적외선 복사량이 시료에 제공될 때, 시료의 표면온도는 약  $24[^\circ\text{C}]$ 가 되고, 이때의 조도는  $100[\text{lx}]$  정도였다. 시료의 표면온도가  $24[^\circ\text{C}]$ 에서  $2[^\circ\text{C}]$  정도 증가한  $26[^\circ\text{C}]$  부근에서의 적외선 복사량은 약  $45[\text{mW}/\text{m}^2]$  정도가 된다.  $26[^\circ\text{C}]$  이후에는 적외선 복사량에 비해 시료의 온도상승 폭은 약간 둔화되나 꾸준히 증가하고 있으며,  $133[\text{mW}/\text{m}^2]$ 의 복사량이 제공되는 시점에서는  $27.8[^\circ\text{C}]$ 까지 상승하였다.

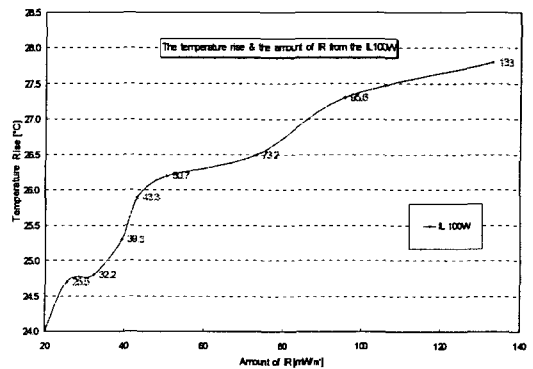


그림 5. 시료의 온도상승과 적외선 복사량의 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 광원에 의한 시료의 온도상승과 적외선 복사량을 측정할 수 있는 측정시스템을 구축하고, 전시조명용 광원을 대상으로 광원의 방사조도를 변화시키면서 각 시료의 온도상승과 적외선 복사량의 변화를 각각 측정하였다. 측정의 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 조도의 변동에 따른 온도 변화의 경우, 조도가 증가하면 각 시료의 온도도 점차 상승하였으며, 평균적으로 500[lx]의 조도에서 1.8[°C], 1000[lx]에서는 2.9[°C]의 온도상승을 보였다. 또한 분광흡수율이 높은 색의 시료가 가장 높은 온도상승 값을 보였다.

(2) 광원별 온도상승의 비교에서, 같은 조도에서의 온도상승은 백열전구가 가장 크고, 형광램프와 할로겐전구는 비슷한 수준을 보였다. 2000[lx]의 조도에서 백열전구는 4.3[°C], 3파장 형광램프는 2.0[°C], 다이크로익 할로겐전구는 2.3[°C]의 온도상승이 있었다.

(3) 백열전구가 형광램프와 할로겐전구에 비해 적외선을 많이 방출하고 있으며, 조도의 증가에 따라 비례적으로 적외선이 증가하는 추이를 보였다. 500[lx]에서 백열전구의 적외선 복사량은 43.3[mW/m<sup>2</sup>]로서, 이 값은 형광램프의 2.4배, 할로겐전구의 2배에 해당한다.

(4) 조도변동에 따른 적외선 복사량의 변화와 시료의 온도상승간의 관계에 있어서, 적외선 복사량의 증가에 따라 시료의 온도도 비례적으로 상승하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) 大澤善次郎, "高分子の劣化と安定化", 武蔵野 クリエイト, 東京, 1992
- (2) 森田恒之, "博物館の展示照明と微氣象變化", 照明學會誌, Vol. 74, No. 4, pp. 220~202, 1990
- (3) G. Thomson, "The Museum Environment, 2nd ed.", Butterworth-Heinemann, Oxford, 1986
- (4) G. Thomson, S. Staniforth, "Conservation and museum lighting", Museum Information Sheet IS No 6, Museums Association, 1985
- (5) 森礼於 譯, "光と照明: 光工學の理論と實際", 日本理工出版會, 1994