

적외선 복사에 의한 시료의 온도상승과 온도분포 측정

(Measurements of Temperature Rise and Temperature Distribution of Samples by Infrared Radiation)

한중성* · 김기훈 · 김훈

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

(세경대학 전기에너지시스템과 교수 · 강원대학교 전기공학과 박사과정 · 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수)

Abstract

When a light is projected upon a material, part of its radiation energy is absorbed and the rest is reflected or transmitted according to the nature of the material. The molecules of the substance absorbing a light obtains the radiation energy to the wavelength of the light to make photochemical degradation by ultraviolet ray or thermal reactions like physical damage by infrared ray. The degree of damage by radiation energy varies to the substances of materials, the spectral power distribution of the light source and the duration of irradiation. Because the damage brings about a devaluation of material and once damaged, it is irretrievable, it is necessary to minimize the damage and conserve the native quality of a material by a protective lighting system. A measuring system was set up to measure the temperature rise of each sample by infrared radiation from light sources. And the temperature rise and temperature distribution by various infrared lamps were measured with varying time.

1. 서론

조명은 자료의 전시뿐만 아니라 일상생활에서도 없어서는 안 될 필수적인 존재이다. 자연광이든 인공광이든 간에 광원에서 제공되는 복사에너지에는, 인간의 눈에 보이는 가시광선 외에도 이보다 파장이 짧은 자외선과 파장이 긴 적외선이 포함되어 있으며, 이들은 모두 전자파의 형태로 전시물에 조사된다. 전시자료의 상당부분을 차지하고 있는 유기물에 대하여 자외선과 파장이 짧은 보라색 부근의 가시광선은 광화학 반응에 의하여 변색 및 구조적인 손상을 일으키며, 적외선과 파장이 긴 적색부근의 가시광선은 건조에 의한 물리적 손상을 일으킨다.

복사에너지에 포함되어 있는 자외선, 가시광선, 적외선 중에서 열적 효과와 가장 관련이 큰 것은 적외선이다. 적외선 뿐 아니라 가시광선과 자외선도 물체의 온도를 상승시키는 효과를 갖고 있으나, 특히 적외선은 대부분의 물질에서 적외선의 흡수율과 침투깊이가 크므로 적외선이 전시물의

온도상승에 주로 기여하게 된다.

박물관이나 전시실 등에서 사용되는 광원 중에서 천공광이나 형광등에서의 복사에너지는 상대적으로 적외선이 적으나 태양직사광, 백열전구나 할로겐전구와 같이 온도방사를 하는 광원은 복사에너지의 대부분을 적외선이 차지하고 있다[1]. 전시실을 개방하는 주간의 관람시간에는 점등하고, 전시실을 폐쇄하는 야간에는 소등을 함으로서 계속적으로 반복되는 광원의 점멸에 의해 전시물의 온도가 상승·하강하며 이에 따른 전시물 자체의 팽창과 수축, 습기의 흡수와 방출이 전시물의 손상을 가져오게 된다[2]. 따라서 이러한 광원으로 전시물을 조명할 경우 온도의 상승이 어느 정도 일어나는지를 파악하여, 적외선 양을 적정 한도 이하로 제한하는 노력이 필요하다.

본 연구에서는 적외선 복사열의 시간에 따른 온도상승과 온도분포를 측정할 수 있는 측정시스템을 구성하였다. 이 측정시스템으로 인공섬유와 같은 무기물과 돼지고기와 같은 유기물을 대상으로, 일정한 거리에서 적외선 복사에너지를 조사하였을

때, 시간의 경과에 따라 어느 정도의 온도상승이 있으며 온도분포가 어떠한지를 백열전구와 특성이 비슷한 여러 가지 적외선전구로 비교 측정하였다.

2. 적외선 복사에너지의 흡수와 방출

적외선은 가시광선보다 파장이 길고 마이크로파 보다는 파장이 짧은 일종의 전자파로써 강한 열적 작용을 갖는 복사선을 말한다. 일반적으로 적외선의 파장대역은 $0.78[\mu\text{m}] \sim 1,000[\mu\text{m}]$ 의 범위로 규정하고 있으며, 이를 국제조명위원회(CIE)에서는 $0.78[\mu\text{m}] \sim 1.4[\mu\text{m}]$ 영역을 근적외선, $1.4[\mu\text{m}] \sim 3[\mu\text{m}]$ 영역을 중적외선, $3[\mu\text{m}] \sim 1,000[\mu\text{m}]$ 을 원적외선 영역으로 구분하고 있다[3,4].

Bohr의 양자론에 의하면 원자내의 전자가 한 궤도에서 다른 궤도로 이동하려면 두 궤도 사이의 에너지 차이에 해당하는 양을 흡수하거나 방출하여야만 한다. 원자들이 높은 온도나 다른 힘에 의한 에너지를 흡수하여 여기되었을 때, 여기상태(excited state)라 불리는 높은 에너지준위로 옮겨간다. 역으로 여기상태의 원자가 낮은 에너지준위로 되돌아 갈 때에는 복사에너지를 방출하며, 이때 방출한 에너지량은 방출된 복사선의 파장을 결정하고, 그 파장 성분에 따라 방출스펙트럼(emission spectrum)을 형성한다[5].

일반적으로 전자는 에너지가 낮은 궤도로부터 순차적으로 메우고 있으며, 이 상태를 정상상태라 한다. 정상상태에 있는 원자에 가열, 방전, 전자파 조사 등의 방법으로 외부에너지를 가하면, 원자내의 전자는 에너지가 높은 바깥쪽의 궤도로 전이하여 원자는 일시적인 높은 에너지의 불안정한 상태에 놓이는 여기상태로 된다. 여기된 원자는 외부로부터 자극을 받지 않아도 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ [sec] 정도의 빠른 속도로 낮은 에너지의 정상상태의 궤도로 이행하며, 그때 충돌 등으로 흡수된 외부 에너지를 복사의 형태로 방출한다. 과잉된 에너지가 많을수록 복사에너지의 파장은 짧아지고, 그 반대이면 파장은 길어진다[6]. 일반적으로 적외선 복사는 물체가 그다지 고온이 아니더라도 절대영도 이상에서는 어떠한 온도에서도 발생한다.

한편, 연속스펙트럼을 갖는 복사선이 물질에 조사되었을 때, 어떤 파장의 복사선은 흡수되고 나머지는 투과되거나 반사된다. 물질이 특정한 파장을 흡수하는 것은 그 물질의 고유한 특성 때문이며, 물질이 가열 또는 여기되었을 때에 방출하는 것과 같은 파장들의 복사선을 흡수하게 된다. 물질이 흡수하는 파장의 형태를 흡수스펙트럼

(absorption spectrum)이라 한다[5].

그리고 각 물질을 구성하는 여러 분자의 구조는 그 원자의 질량구조상의 결합방식이나 배열의 상태 그리고 결합력의 차이로부터 특유의 진동과 회전 주파수를 갖고 있다. 따라서 분자가 실제로 진동하는 진동수는 분자의 구조에 따라서 특정한 값으로 결정된다. 적외선 복사에너지를 고분자물질의 분자에 조사할 경우, 복사에너지의 진동수와 분자의 진동수가 일치하는 일종의 공명흡수상태로 되면 분자는 적외선 복사에너지를 흡수하여 진동이 활발해진다. 그 결과 물질의 온도가 빠르게 상승하게 되며, 이러한 현상을 공명흡수현상이라고 한다. 유기분자의 경우, 적외선 흡수스펙트럼이 나타나는 파장범위는 $3[\mu\text{m}] \sim 1,000[\mu\text{m}]$ 정도의 원적외선 영역이며, 근적외선 영역에서의 흡수는 거의 영에 가깝다[7].

또한 유기화합물의 경우는 이 물질들이 갖는 에너지 흡수대역을 $6[\mu\text{m}] \sim 12[\mu\text{m}]$ 정도로 잡고 있으며, 이는 원적외선 파장대역인 $3[\mu\text{m}] \sim 1,000[\mu\text{m}]$ 내에 해당하므로 공명흡수작용이 일어나고, 이 경우에 유기물의 내부와 외부는 동시에 온도상승이 일어난다. 유기체인 인체 내에 공명흡수현상이 일어나면, 분자 내에 커다란 에너지가 발생하여 그의 대부분이 열로 변하고 일부는 활성화 에너지로 변하여 분자가 활성화된다.

반면 진동수가 일치하지 않는 영역의 복사에너지는 물질의 표면에서 반사되거나 물질에 흡수되지 않고 투과하므로 에너지의 흡수에는 기여하지 않는다. 이것이 적외선 복사에 의한 가열 메커니즘이며, 고분자 물질에만 한정되지 않고 모든 적외선 흡수물질에 적용된다. 다시 말하면, 어떤 물체의 분자에 임의의 진동수를 갖는 적외선이 투사될 경우 그것과 일치하는 진동수로 진동하고 있는 분자가 그 물질 중에 있다면, 그 분자는 적외선에너지를 흡수하여 분자운동이 더욱 격렬해진다.

이러한 공명흡수현상이 일어나면 원자간의 운동이 활발하게 되어, 이 운동에너지는 대부분 열로 변하고, 일부는 활성화 에너지로 변하여 분자를 활성화시킨다. 그러나 해당되는 진동수를 갖는 분자가 없을 경우에는, 적외선을 흡수되지 않은 채, 분자를 통과하거나 반사하므로 공명흡수현상이 일어나지 않는다. 그리고 각종 물질에 적외선을 투사할 경우, 각 물질마다 분자의 결합상태가 다르므로 공명흡수가 일어나는 특성 또한 각각 다르게 나타나며, 각자 물질 고유의 적외선 흡수스펙트럼을 갖는다.

물체에 있어서 에너지의 흡수 또는 방출은 전

도, 대류, 복사중의 한가지 이상의 과정을 통해서 일어난다. 전도와 대류는 접촉되는 매체를 통해서 일어나는 에너지의 이동인데 반하여 복사는 매체와 관계없이 발열체로부터 복사되는 에너지를 피사체가 받을 때 피사체를 구성하고 있는 물질의 성질에 따라서 에너지가 선택적으로 흡수되는 상태를 말한다.

열역학에 의하면 물체의 온도는 그 물질이 놓여 있는 주위 온도와 같아지는 방향으로 상승하거나 하강한다. 다시 말해서 물체와 주위 환경 사이에는 항상 열에너지의 출입이 계속되고 물체는 에너지를 흡수하거나 방출함으로써 주위 온도와 평형을 이루고자 한다. 이러한 과정을 거쳐 물체는 열평형상태에 이르게 된다. 따라서 열역학 제2법칙에 따라 모든 물체는 주위보다 온도가 높을 때는 열에너지를 방출하고, 역으로 낮은 상태에서는 열에너지의 흡수체로 작용하게 된다[6].

열에너지의 전달방식으로는 대류, 전도 및 복사가 있으나, 적외선은 열복사의 형태로 열을 전달한다. 적외선은 전자파의 일종으로 직진, 굴절, 반사 등의 광학적 특성이 있으며, 열의 매체가 불필요하고, 열원으로부터 직접 전자파가 복사되어, 상대 물체에 조사되는 즉시 열로 된다. 그러므로 광선과 같이 공기나 진공에 관계없이 공간을 통과하여 열에너지가 전달되는 특성을 가지고 있다.

열의 전도나 대류의 경우는 열의 이동량이 발열체와 흡수체 쌍방간 온도차의 함수인 것에 비하여, 열복사의 경우는 전자파의 형태로 빛과 같은 속도로 직접 가열물체에 흡수되어 열의 이동량은 쌍방간 온도의 4제곱의 차의 함수로 된다. 따라서 온도차가 클 경우는 복사에 의하여 열을 전달하는 방식이 매우 유리하다고 볼 수 있다.

고온이나 저온에서도, 대상물체의 표면 및 중심부로 신속히 침투하기 위해서는 내부의 자기발열이 필요하다. 이는 적외선에서는 가능하다. 인체에 대한 적외선 복사에너지의 침투력은 파장의 평방근으로 나타낸다. 즉 조사되는 복사에너지의 파장이 4배이면 침투력은 2배로 되어 체중 깊이 들어간다. 따라서 파장이 짧은 근적외선은, 파장이 긴 원적외선에 비하여 침투력이 떨어진다고[7].

3. 실험방법

3.1 무기물 시료의 온도상승실험

본 실험은 면적 2.5[m]×3.5[m], 높이 3[m]

공간의 무반사 흑색 페인트가 칠해진 암실에서 행하여졌다. 전구의 유리구 밀면과 시료판과의 거리는 측정의 효율성을 고려하여 50[cm]로 하였다. 전구가 부착된 스탠드는 앵글로 제작하여 측정 높이와 수평이동이 가능하도록 하였으며, 세팅 후 고정시킨 상태에서 점등하여 실험을 행하였다.

시료부를 구성하는 시료판은 두께 8[mm], 한 변의 길이 800[mm]인 정사각형의 합판으로 이 시료판 위에 일정한 간격으로 1[cm] 높이의 13개의 측정점이 있으며, 측정점 간의 간격은 10[cm]로 중심부에서 최외각까지의 거리는 반경 30[cm]이다.

램프의 점등시간은 30분으로 정하였으며, 이는 시료면의 온도상승이 이 정도의 시간에서 거의 포화상태에 이른다는 것을 예비실험을 통하여 검증한 결론이다. 측정 주기는 점등 후 최초 10분까지는 온도가 급격히 증가함을 감안하여 2분 간격으로, 10분 이후부터는 5분 간격으로 측정하였다.

본 실험에서 사용한 무기물시료는 두께 2[mm] 지름 20[mm]인 원형의 갈색 인공섬유이다. 각 시료는 램프 중심부와의 수직선 아래에 위치한 중심부(center)를 중심으로 반경 10[cm] 간격마다 사방으로 3개씩 위치하고 있으며, 제일 외곽부가 30[cm] 이므로 중심부까지 합하여 총 13개의 시료가 시료판 위에 1[cm] 높이로 놓여있다. 시료에서 시료판으로의 전도에너지 손실을 줄이기 위하여 열전도가 낮은 플라스틱위에 시료를 놓고, 시료를 시료판에 고정시켰다.

온도측정에 사용한 온도계는 비접촉식 적외선 온도계(Model TA-0510b, Minolta, Japan)와 접촉식 열전온도계(Model RS-232, Center, Taiwan)를 병행하여 사용하였다. 적외선 온도계는 사전에 열전온도계의 지시 온도에 근사하게 보정을 행하였으며, 시료부에서 1.5[m] 정도 떨어진 곳에 거의 고정된 상태에서 측정 주기마다 13개의 시료를 빠른 시간 내에 측정하였다. 그리고 초기상태의 일정한 온도를 유지시키기 위해서 각 램프의 측정이 끝날 때마다 충분한 환기를 시키고 시료의 온도가 실온과 같아진 다음에 실험을 행하였다.

3.2 유기물 시료의 온도상승실험

측정시스템은 앞에서 언급한 무기물 시료의 실험에서 사용한 것을 그대로 사용하였으며, 측정방법도 이와 유사하다. 다만 유기물 시료를 중심부와 중심부에서 반경 30[cm] 떨어진 제일 외곽의

한곳에 위치해 놓고, 무기물 실험과 같은 측정 주기로 실험용 광원마다 두 곳의 시료를 각각 측정하였다.

본 실험에서 사용한 유기물 시료는 모피-비계-살코기 층이 있는 넓이 50[mm]×60[mm], 두께 15[mm]의 돼지고기로써, 시료는 비슷한 크기와 부위를 갖는 2개를 마련하였다. 유기물의 표피부위와 피하부위의 적외선 침투력과 온도상승의 정도를 알아보기 위해 이 시료를 선정하였다. 시료의 표피부위와 피하부위의 온도상승의 정도를 측정하기 위해서 접촉식 열전온도계를 사용하였으며, 피하부위 측정시 이 온도계의 열전 센서를 시료의 중심에서 약 12[mm] 깊이의 내부에 삽입시켜 놓고 측정하였다.

4. 실험결과

그림 3.1과 그림 3.2에 인공섬유를 대상으로 한 무기물 시료의 온도상승과 온도분포 추이를 나타내었다. 이 그래프들은 시간에 따른 온도상승을 각 영역별로 나타낸 것이다. 측정 당시의 주위온도는 24[°C]이며, 정해진 측정 주기에 따라 비접촉식 적외선 온도계로 중심부(center)를 중심으로 반경 30[cm] 이내에 위치한 13개 시료의 표면온도를 측정하였다.

각 영역의 온도는 조사시간이 경과됨에 따라 증가하나 일정한 값에 이르면 포화된다. 포화의 정도와 온도상승의 정도는 각 영역에 따라 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 대체적으로 점등 후 5분 이내에 온도가 급격히 상승하며, 그 이후에는 완만히 증가하는 경향이 있다. 그리고 중심부의 경우, 30분간 적외선 복사에 의한 시료에의 온도상승 폭이 17[°C] 이상으로 적외선 복사가 시료의 온도상승에 상당히 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

그림 3.1은 A사의 250[W] 적색코팅 적외선전구에 의한 온도상승과 온도분포를 보인 것이다. 조사면의 중심부로 갈수록 온도가 높으며, 30분간 중심부의 온도가 22[°C] 이상으로 큰 폭의 온도상승을 보이고, 중심부에서 30[cm] 거리에 있는 영역의 온도와 비교하여 거의 2배에 달하고 있다. 중심부에서 반경 20[cm] 사이는 각각 약 10[°C] 정도의 온도 차이를 보이고 20[cm]와 30[cm] 사이는 3[°C] 정도의 차이가 난다.

그림 3.2에 적색코팅을 한 B사의 250[W] 적외선전구에 대한 온도상승과 온도분포 추이를 나타내었다. 이 전구는 중심부에서의 30분간 온도상승

은 17[°C] 이상이며, 10[cm]와 20[cm] 사이에 비교적 큰 온도차를 보이고 있다. 이는 이 램프가 적외선 복사에너지를 중앙으로 집중하여 방출하고 있다는 것을 시사한다.

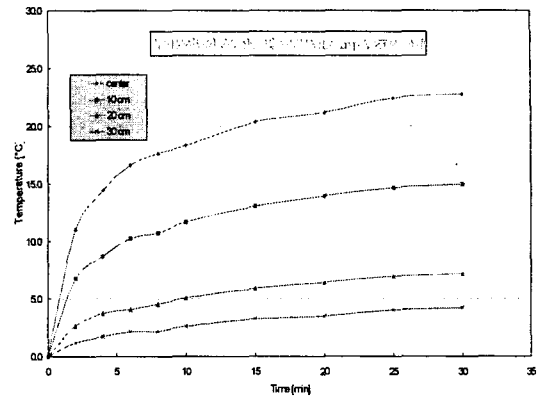


그림 3.1 250[W] Red코팅 IR Lamp A에 의한 무기물 시료의 온도상승 및 온도분포

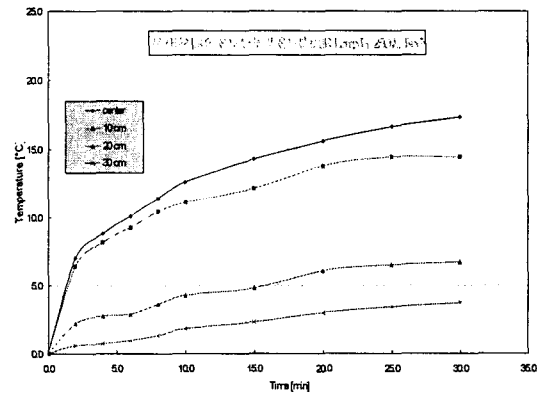


그림 3.2 250[W] Red코팅 IR Lamp B에 의한 무기물 시료의 온도상승 및 온도분포

그림 3.3과 그림 3.4는 모피-비계-살코기 층의 부위를 갖는 돼지고기를 대상으로 한 유기물 시료의 온도상승실험 결과를 나타낸 것이다. 이 결과들은 시간에 따른 온도변화를 3가지 램프에 대하여 영역별로 나타낸 것이다. 250[W] 전구의 경우 중심부에서 30분간 적외선 복사에 의한 유기물 시료에 표피부위의 온도상승 폭이 20[°C] 이상으로 나타났다. 이는 동일 조건의 무기물 시료의 실험과 비교하여 3[°C]~7[°C] 정도 높은 것으로써, 적외선 복사가 무기물보다 유기물에의 흡수율과 침투력이 더 크다는 것을 시사한다고 생각한다.

그림 3.3은 모피가 있는 유기물 시료 표피부위의 온도변화를 보인 것이다. 시간에 따른 온도의

변화는 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. A사의 250[W] 적색코팅 램프가 최고 30.6[°C]의 온도상승을 보이고 있으며, 표피부위의 온도상승의 폭은 피하부위에 비해 약 4[°C] 정도 높은 것으로 나타났다.

그림 3.4는 유기물 시료 피하부위의 온도상승의 정도를 중심부에서 측정된 결과이다. 열전온도계의 열전 센서는 시료의 중심에서 약 12[mm] 깊이의 내부에 삽입시켜 놓고 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 피하부위의 온도상승은 시간이 지남에 따라 선형적으로 증가하고, 30분에서 A사의 250[W] 적색코팅 전구에 의한 피하부위의 온도가 약 26[°C]에까지 달하고, 시료의 중심부에서 표피부위와 피하부위간의 온도상승 정도는 전구마다 약간의 차이는 있지만 약 4.2[°C]~5.8[°C] 정도의 차이인 것으로 미루어 적외선이 유기물체에 침투효과가 상당하다고 생각된다.

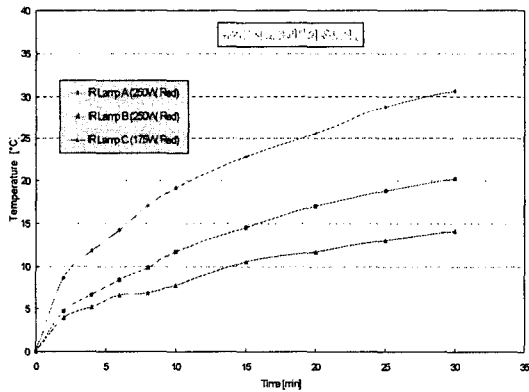


그림 3.3 유기물 시료 표피부의 온도상승

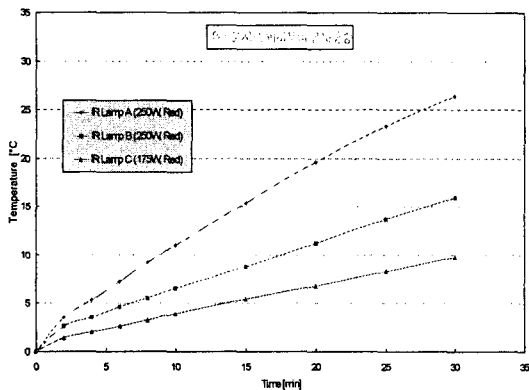


그림 3.4 유기물 시료 피하부의 온도상승

5. 결론

본 연구에서는 적외선 복사열의 시간에 따른 온도상승과 온도분포를 측정할 수 있는 측정시스템을 구성하고 그 시스템으로 인공섬유와 같은 무기물과 돼지고기와 같은 유기물을 대상으로, 일정한 거리에서 적외선 복사에너지를 조사하였을 때, 시간의 경과에 따라 어느 정도의 온도상승이 있으며 온도분포가 어떠한지를 비교 측정하였다.

무기물 시료의 경우, 각 영역의 온도는 조사시간이 경과됨에 따라 증가하나 일정한 값에 이르면 포화된다. 대체적으로 점등 후 5분 이내에 온도가 급격히 상승하며, 그 이후에는 완만히 증가하는 경향이 있다. 그리고 중심부 시료의 경우, 30분간 적외선 복사에 의한 시료에의 온도상승 폭이 17[°C] 이상으로 적외선 복사가 시료의 온도상승에 상당히 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

그리고 250[W] 전구의 30분간 적외선 복사에 의한 중심부 유기물 시료의 표피부위의 온도상승 폭이 20[°C] 이상으로 나타났다. 이는 동일 조건의 무기물 시료의 실험과 비교하여 3[°C]~7[°C] 정도 높은 것으로써, 적외선 복사가 무기물보다 유기물체에 흡수율과 침투력이 더 크다는 것을 시사한다.

또한 중심부에서 유기물 시료의 표피부위와 피하부위간의 온도상승 정도는 전구에 따라 약간의 차이가 있지만 약 4.2[°C]~5.8[°C] 정도의 차이인 것으로 미루어 적외선이 유기물체에 침투효과가 상당하다는 것을 말해준다.

참 고 문 헌

- [1] Garry Thomson, "The Museum Environment, 2nd ed.", Butterworth-Heinemann, Oxford, 1986,
- [2] 森田恒之, "博物館の展示照明と微気象變化", 照明學會誌, Vol. 74, No. 4, pp. 220~202, 1990
- [3] IESNA, "Lighting Handbook, 9th ed.", IESNA, New York, 2000
- [4] 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
- [5] R. E. Dickerson, I. Geis, "Chemistry, Matter, and the Universe", Benjamin, 1996
- [6] W. Schnabel, "Polymer Degradation Principle and Practical Applications", Macmillan, 1981
- [7] 지철근, "원적외선의 특성", 한국조명전기설비학회지, Vol. 15, No. 1, 2001