

KRISS의 원적외선 분광분포 측정장치 및 원적외선의 응용

김 용 완 (한국표준과학연구원 양자연구부 책임연구원)

1. 머리말

최근에 원적외선은 각종 생산제품에 대한 건조공정에서의 에너지절감에, 원적외선 바이오TV, 전자렌지, 전기밥솥, 후라이팬, 냉장고 등의 가전제품, 농산물의 건조, 식품의 가공처리 및 신선도유지, 환자 치료에 이용되고있으며 원적외선사우나, 화장품, 주택내부의 인테리어, 원적외선침대, 정수기, 원적외선 조명등 및 의류 등의 인체건강 유지 및 향상을 도모하기위해 많이 사용되고있다. 이와같이 원적외선 방출용 세라믹 및 바이오 플라스틱 신소재에 대한 개발 및 사용이 급증함에 따라 개발된 제품의 성능평가에 대한 요구가 늘어나고 있고 또한 적외선 영상온도분포측정을 통해 건물의 단열진단, 누전진단, 군사용 야간관측, 인체의 환부진단등에 이용되는 각종 적외선 열상장비와 각종 광검출기의 성능평가를 위해서도 연속가변 단색광원을 제공하는 원적외선 분광분포측정 장치가 필요하게 되었다. 이에 따라 한국표준과학연구원(KRISS)에서는 1990년부터 3년에 걸쳐 이 장치를 개발완료하여 250~2,500[mm]의 파장영역에서 텅스텐램프의 분광복사 조도(spectral irradiance) 및 분광복사휘도(spectral radiance)와 2.5~20[μm] 영역에서 온도가 200[℃] 이상인 시료의 분광복사휘도 및 분광복사율(spectral emissivity) 측정능력을 갖추게 되었다.

본 글에서는 원적외선 분광분포측정이론, KRISS의 분광복사휘도 및 분광복사율 측정장치 구성과 그 성능 및 원적외선의 응용분야에 대하여 기술하였다.

2. 원적외선 분광분포 측정에 관련된 이론

2.1 적외선의 파장에 따른 구분

적외선은 그림 1에서와 같이 파장이 0.8~1,000[μm] 범위안에 있는 전자기파이며 이 적외선을 다시 세분하여 0.8~1.4[μm]의 영역은 근적외선, 1.4~5[μm]는 중적외선, 5~1,000[μm]는 원적외선이라 한다²⁾. 그러나 일반적인 산업적응용에 있어서의 원적외선이라함은 2.5~25[μm] 파장영역의 의미로 널리 사용되고 있다.

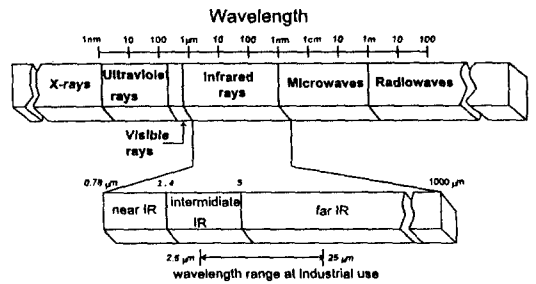


그림 1. 적외선의 파장 구분

2.2 플랑크(Plank) 법칙

흑체(blackbody)란 말 그대로 해석하면 검은 물

체란 뜻으로 검다는것은 그 물체에 입사된 모든 빛이 흡수되어 반사되지 않으므로 사람이 느끼지 못해 검게 보인다는것을 말한다. 사람의 눈이 느끼는 가시광선 뿐 아니라 자외선 및 적외선에 이르기까지의 모든 빛을 100(%) 흡수하고 또 흡수한 만큼 방출하는 물체를 흑체라 하며 이 흑체의 복사율(emissivity)은 전 파장에서 "1"이다.

플랑크법칙은 흑체공동(cavity)의 단위면적에서, 단위입체각으로, 단위파장폭을 갖고 방출하는 복사선속(radiant flux), 즉 흑체의 분광복사휘도(spectral radiance)를 (1)식과 같이 정의하고 있다.

$$L_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \cdot C_1 \cdot \pi^{-1} \cdot n^{-2} \cdot \lambda^{-5} \cdot \{ \exp[C_2 / (n \cdot \lambda \cdot (T + \Delta T))] - 1 \}^{-1} [W / (m^2 \cdot sr)] \quad (1)$$

(1)식에서 C_1 (1차 복사상수) = $3.7418 \times 10^{-16} [W/m^2]$, C_2 (2차 복사상수) = $1.4388 \times 10^{-2} [m \cdot K]$, n 은 공기의 굴절율, ϵ_{λ} 는 흑체의 분광복사율(=1), λ 는 공기중에서의 파장[m], $T[K]$ 는 열역학적 온도이다.

흑체는 원적외선 분광분포측정의 기준으로 사용되며 플랑크법칙을 사용하여 흑체의 분광복사휘도값을 계산하여 성적서값으로 쓰이며 그림 2에 흑체온도변화에 따른 분광복사휘도값을 보여주고있다.

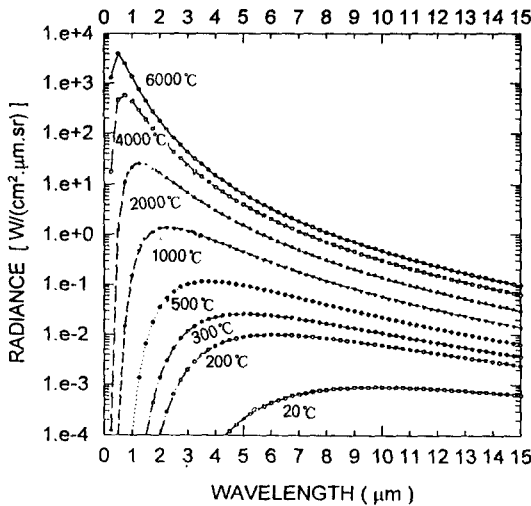


그림 2. 플랑크 법칙으로 계산된 흑체의 분광복사휘도

2.3 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 법칙

플랑크법칙에서는 각 파장에 대한 정보 즉 각파장에서의 복사휘도값을 알 수 있는 반면에 (2)식과 같이 표현되는 스테판-볼츠만법칙에서는 각 파장에 대한 정보는 알 수 없으며 흑체공동의 단위면적에서, 전 파장에 걸쳐 방출하는 총 복사선속을 알 수 있다.

$$M = \sigma T^4 [W/m^2] \quad (2)$$

는 스테판-볼츠만상수 = $5.67032 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$, T 는 열역학적 온도 [K]이다.

(2)식의 의미는 흑체에서 방출하는 복사출사도(radiant exitance)는 흑체의 절대온도 4승에 비례한다는 것이다.

2.4 빈(Wiem) 변위법칙

(3)식으로 표현되는 빈 변위법칙은 흑체의 분광복사휘도값이 최대인 단색광의 파장과 흑체의 절대온도값은 서로 반비례함으로 흑체의 절대온도값이 커지면 상대적으로 분광복사 휘도값이 최대인 단색광의 파장값이 작아진다는것을 의미한다.

$$\lambda \cdot T = 2.897756 \times 10^{-13} [m \cdot K] \quad (3)$$

2.5 키르히호프(Kirchhoff) 법칙

이 법칙은 어떤 물질이든지 그 물질의 성질에 관계없이 일정온도와 동일파장에서 빛의 흡수능력에 대한 복사능력의 비는 일정한 값을 갖는다는것이다 즉 임의의 파장에서 그 물질의 흡수율이 곧 복사율이 된다는것을 의미한다.

2.5 분광분포 측정이론

광원의 분광분포(spectral radiant power distribution of light sources)라 함은 파장에 따라 광이 세기(power)가 어떻게 분포되어 있는냐를 나타내는 일반적인 용어로 좀 더 정확히 표현하면 분광복사휘도(spectral radiance), 분광복사조도(spectral irradiance), 분광복사선속(spectral radiant flux)중에 하나를 말하고 있다고 생각할 수 있으며 위의 측정값에 단위를 없애고 단지 빛의 세기가 최대인 파장

에서 그 빛의 세기를 "1"로 보고 나머지 파장에서의 세기를 규격화시킨 것을 광원의 상대분광 분포 (relative spectral radiant power distribution)라고 한다. 또한 분광복사율(spectral emissivity)은 흑체의 분광복사휘도값에 대한 흑체와 같은 온도로 유지하고 있는 시험광원(시료)의 분광복사휘도값의 비율로 정의된다.

분광복사휘도(L_{λ})는 주어진 점, 방향, 그리고 파장에서 투영된 단위면적당, 단위 입체각당, 단위파장간격당으로 복사(radiate)되는 복사출력(radiant flux)으로 정의되며 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$L_{\lambda} = d^3\Phi / (dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega \cdot d\lambda) \quad (4)$$

위 식에서 ϕ 는 복사선속, A는 그점에서의 면적 Ω 는 그 면적의 법선과 빛의 전파 방향의 사이각 X 는 면적 A에서 전파방향으로의 입체각 X 는 파장이다. 분광복사휘도는 위치, 방향 그리고 파장에 관련된 분광분포를 기술하는 가장 기본이 되는 측정량³⁾이며 모든 다른 복사측정량이 이 분광복사휘도로 부터 유도될 수 있다⁴⁾.

플랑크(Plank) 법칙은 (1)식과 같이 흑체의 분광복사휘도를 정의한다. (1)식에서 흑체의 온도(T)를 알면 임의의 파장에서의 분광복사휘도(L_{λ})를 알 수 있으므로 이 값을 기준으로 하여 그 파장에서 흑체와 시험광원을 비교측정함으로써 시험광원의 분광복사휘도 값을 결정할 수 있다.

분광분포측정장치의 광검출기에서 나오는 광신호 S는

$$S = \int_{\lambda} \int_{\Omega} \int_{A} R_{\lambda} \cdot L_{\lambda} \cdot \cos\theta \cdot d\Omega \cdot dA \cdot d\lambda \quad (5)$$

로 표현되며 위식에서 R_{λ} 는 광검출기를 포함한 분광분포 측정장치(spectroradiometer)의 분광감응도(spectral responsivity)이며 L_{λ} 는 광원의 분광복사휘도, $\cos\theta \cdot dA$ 는 표면적 요소의 투영된 크기이며, $d\Omega$ 는 광검출기가 차지하는 입체각 이다.

흑체의 분광복사휘도 $L_{b,\lambda}$ 를 기준으로 할 때 시험광원의 분광복사휘도 L_{λ} 값은 두 광원을 비교측정

시 필요한 보정계수들까지 고려하면 (6)식과 같이 쓸 수있다.

$$\begin{aligned} L_{\lambda} &= (S_{\lambda}/S_b) \cdot S_{\lambda} \cdot \epsilon_{b,\lambda} \cdot f_{\lambda} \cdot L_{b,\lambda} \\ &= (S_{\lambda}/S_b) \cdot S_{\lambda} \cdot \epsilon_{b,\lambda} \cdot f_{\lambda} \cdot \epsilon_{\lambda} \cdot C_1 \cdot \pi^{-1} \cdot n^{-2} \cdot \lambda^{-5} \\ &\quad \cdot \{\exp[C_2/(n \cdot \lambda \cdot (T + \Delta T))]\}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

(6)식에서 S_b 와 S_{λ} 는 각각 흑체와 시험광원 측정시의 광신호, $L_{b,\lambda}$ 는 흑체의 분광복사휘도, S_{λ} 는 두 광원의 크기 차이에 기인한 보정계수, $\epsilon_{b,\lambda}$ 는 흑체의 분광복사율(spectral emissivity), f_{λ} 는 광검출기의 직선성에 대한 보정계수이다.

3. KRISS의 원적외선 분광분포 측정장치

원적외선 분광분포측정장치의 종류에는 푸우리에 변환형 분광기(Fourier Transform Infrared Spectrometer)와 분산형 분광기(Dispersive Spectrometer)가 있으며 FTIR분광기는 분광분포 측정목적만으로는 분산형 보다 장점이 많아 널리 쓰이고 있다. 그러나 한국표준과학연구원(KRISS)의 장치로 분산형을 채택하였는데 그 이유는 FTIR장치로는 단색광원을 얻을 수 없다는 단점이 있어 연속가변의 단색광원을 필요로 하는 광검출기 및 각종 적외선장비들의 성능평가가 불가능하기 때문에 분산형을 채택하므로 이 장치를 보다 다목적으로 사용하기 위함이었다.

3.1 푸우리에 변환형 분광기(Fourier Transform Infrared Spectrometer)

이 FTIR 은 마이켈슨(Michaelson) 간섭계를 이용한 것으로 1966년 부터 본격적으로 사용되기 시작하여 불과 약 30년의 역사를 가지고 있지만 최근 날로 발전하고있는 광검출기(HgCdTe, TGS), 헬륨-네온 레이저 및 컴퓨터 기술 덕분에 광검출기의 반응속도가 빨라지고, 이 FTIR과 연결되어 사용되고 있는 마이크로 컴퓨터만으로도 푸우리에 급수를 순식간에 전개할 수 있어 측정속도가 빨라지고, 파장 및 측정 정확도가 많이 향상되었다. 이러한 장점과 사용상의 편리성 때문에 분산형보다는 이 FTIR

을 채택하여 사용하고 있다. 그림 3에 FTIR의 마이켈슨 간섭계의 개략도를 보여주고 있다. 분산형에서는 분광장치로 회절격자를 사용하는 반면에 FTIR에서는 마이켈슨 간섭계가 그 역할을 한다는 것이 두 장치의 다른점이다. 이 간섭계는 한개의 빔분할기 (beamsplitter), 고정거울 및 이동거울로 구성되어 광원에서 나온 빛이 빔분할기를 통과하여 일부는 고정거울로 가고 나머지는 반사되어 이동거울로 향하여 각각 그 거울에서 반사되어 다시 빔분할기에서 만날때 갖는 파장의 차이 즉 광로차 때문에 생기는 광학적인 간섭현상이 보환적이거나 또는 상쇄적이거나에 따라 생기는 일종의 간섭도를 만들어주는 역할을 한다.

그러나 원적외선을 방출하는 광원은 일반적으로 단색광원이 아니고 여러 파장의 빛을 방출하는 다색광이어서 제각기 다른 간섭도를 갖고 동시에 광검출기로 입사된다. 이와같이 다색광이 간섭된 빛의 세기측정으로부터 광원의 분광분포를 알아내기위해서 (7)식과 같은 푸우리에 변환방법을 사용하며 이동거울의 위치에 따라 간섭광의 세기를 광검출기로 측정하고 이 데이터를 푸우리에 전개하면 각 파장에서의 빛의 세기 즉 그 광원의 분광분포를 얻을 수 있게된다. 그림 3의 헤륨네온 레이저는 간섭계의 기준파장을 정확하게 잡아주는 역할을 한다.

$$S_p(\lambda_i) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} F(x) \cos(2\pi x / \lambda_i) dx \quad (7)$$

$S_p(\lambda_i)$: 분광스펙트럼

x : 경로

$F(x)$: 광검출기의 신호

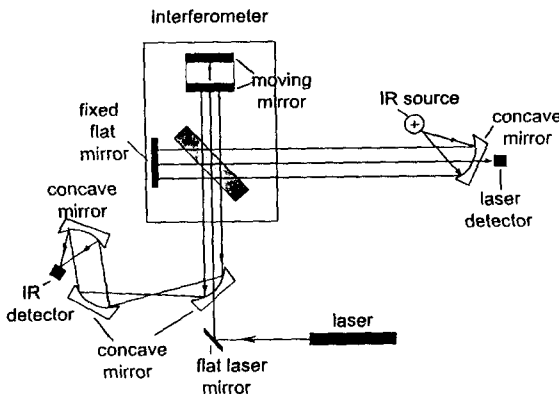


그림 3. FTIR의 개략도

3.2 분산형 분광기 (Dispersive Spectrometer)

분산형 분광기란 회절격자 (grating) 혹은 프리즘의 회절 및 굴절현상을 이용하여 분광시키는 원리를 사용하는 장치를 말하며 이 분광기는 약 한 세기전에 개발되어 사용되어온 전통적인 분광방법이다. 이 분광기의 단점은 광원으로부터 방출되는 다색광의 빛이 회절격자를 통과하면서 단색광이 된 후 광검출기에 입사되므로 아주 미약한 광신호가 발생하여 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio)가 적다는 것이다. 장점으로는 FTIR 분광기로 얻을 수 없는 단색광을 얻을 수 있다는 것이다.

KRISS의 분산형 분광분포측정장치를 사용하여 파장 2.5~20(μm) 영역에서 광원의 분광복사율도 및 분광복사율 측정할 수 있으며 이 장치의 구성요소들은 다음과 같다 (그림 4).

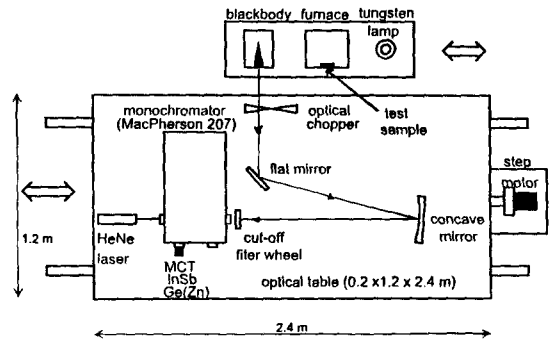


그림 4. 분광분포측정장치의 개략도

3.2.1 장치구성

○ 단색화장치 (monochromator)

이 단색화장치는 McPherson 207로 1개의 회절격자 (grating)을 갖고 있고 (Czerny-Turner형) 각각 두개의 entrance slit과 exit slit를 갖고 있어 둘 중에 어느 slit도 선택하여 사용할 수 있다. 두개의 entrance slit중 한개의 slit앞에 별도의 prism predisperser가 장착되어 있어 0.185~2.5(μm) 파장영역에서 prism-grating double monochromator의 형태로 사용할 수 있다.

파장영역 2.5~20(μm)에서 쓰기위해 snap-in 형태로 되어 있는 회절격자를 75 (groove/mm)로 교환하고 prism predisperser가 설치되어 있지 않은 쪽

의 entrance slit앞에 회절격자를 사용할때 생기는 고차회절광이 중첩되는 것을 막아주는 4개의 cut-off(sorting) 필터들을 필터 wheel속에 설치하였다. 이 필터들의 분광투과도를 FTIR(BIO-RAD 모델 FTS60)로 측정한 결과 RL-1,500필터는 1.5~2.7 [μm] 영역에서, Oriol 57925 필터는 2.5~4.8 [μm], RL-4500 필터는 4.8~8 [μm], RL-7500 필터는 8~13 [μm], Oriol 57965 필터는 11~20 [μm] 파장 영역에서 사용될수 있음을 확인하였다.

이렇게 구성된 장치의 성능을 살펴보면 촛점거리 0.67[m], $f/4.7$, 분산(dispersion)은 20[nm/mm], 분해능(resolving power)은 5 [μm]에서 약 5×10^3 , 파장폭(spectral bandwidth)은 entrance 및 exit slit이 수평의 폭이 0.01~4[mm]까지 연속적으로 조절될 수 있으므로 0.2[nm]에서부터 최대 80[nm] 까지이다. slit의 높이는 2, 4, 6, 8, 16, 20[mm]의 단계로 조절될 수 있다.

○ 광검출기 (Photodetectors)

2.6~20 [μm]의 파장영역에서 분광분포측정에 쓰이는 광검출기로는 0.8~5.5 [μm] 영역에서는 InSb 검출기, 2~20 [μm] 영역에서는 HgCdTe 검출기를 필요에 따라 선택하여 사용하였다.

InSb 광검출기는 EG & G Judson 제품 모델 J10D-M204-R04M-60로 photovoltaic mode로 사용된다. 검출기의 크기는 직경 4[mm], 감응도는 500 [K] 흑체에서 0.502[A/W], 최대검지도는 1.44×10^{11} [$\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$]이다. 이 InSb는 액체질소온도(77K)에서 동작되며 창(window)은 sapphire이며 액체질소 지속시간은 약 6시간이다.

HgCdTe검출기(MCT)는 EG & G Judson 모델 J15D12-M204-SO4M로 광전도형(photo conductive)이다. 검출기 수광부 면적은 4[mm²], 창은 ZnS 이고 액체질소온도에서 사용된다.

○ 광학부 및 광원부

광학부(fore-optics)는 그림 4에서와 같이 금으로 총착된 각각 한개의 평면거울(직경: 100[mm])과 구면거울(직경: 100[mm], 초점거리: 0.5[m]) 및 그 거울들을 상하좌우로 조정할 수 있는 mount로 구성되었다. 이 광학부의 역할은 광원의 상(image)을

단색화장치 entrance slit 면에 "1"의 배율로 맺히게 한다.

광원부(light sources)는 IR-464 흑체, 시료온도 조절용 furnace 및 시료표면 온도 측정장치로 구성되는데 이 광원들은 폭 50[cm], 길이 150[cm]의 광원용 테이블위에 설치되어 좌우이동이 가능하다.

○ 광학테이블 및 자동이동장치

광학테이블은 폭 1.2[m], 길이 2.4[m], 두께는 20[cm]로 바닥에서 80[cm] 높이에 설치하였다. 이 테이블의 원활한 직선운동을 위해 THK의 직선운동장치를 설치하여 1.2x2.4[m]의 광학테이블이 최대 1.2[m] 정도 움직일수 있도록 하였다. 이 이동을 자동제어하기 위해 Oriental UPD599 HG1-A2의 step 모터를 1:3의 가속기(helical gear)를 통해 ball screw(pitch간격: 10[mm])축에 연결시켜 20 [cm/min]의 속도로 광학테이블을 이동 시킬수 있으며 backlash를 보정한후 위치의 정밀도는 0.02[mm] 정도를 나타내었다.

단색화장치와 광원의 상대적 위치를 정확하게 정렬하기 위해 쓰이는 HeNe 레이저는 단색화장치 두개의 exit slit중 광검출기가 설치되지 않은쪽에 설치되어 레이저빔을 반대방향으로 보내어 광원중심에 오도록하였다.

○ 자동제어 및 데이터 처리부

광원의 분광분포측정자동화를 위해 회절격자의 자동제어, 광검출기에서 나오는 광신호의 자동측정, cut off 필터들이 자동교체되도록하였다. 그림 5에 자동제어 및 데이터 처리부의 개략도를 보여주고 있다. 이 자동제어를 총괄하는 마이크로컴퓨터(386)는 회절격자를 제어하는 monochromator controller (788 ABC)를 RS232 방식으로 제어하고, 광검출기에서 preamp를 거쳐 들어오는 광신호의 noise를 줄이기 위해 optical chopper와 같이 쓰이는 lockin amp.(EG & G 5210)와 GPIB 방식으로 interface 되어 그 측정값을 읽도록 하였다. 또한 setting된 파장에 부합되도록 설치 되어야 하는 cut-off 필터는 cut-off filter wheel controller를 통하여 자동구동되고, 광학테이블을 이동시키는 스텝모터는 그 controller를 통하여 마이크로 컴퓨터에 의해 제어된다.

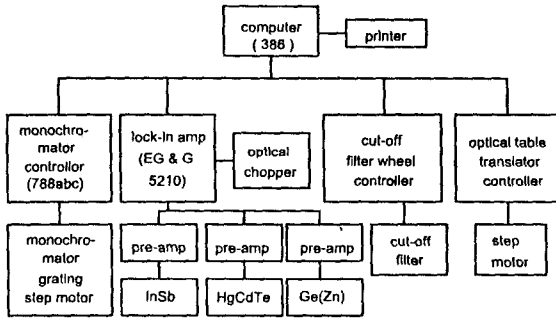


그림 5. 자동제어 및 데이터 처리부의 개략도

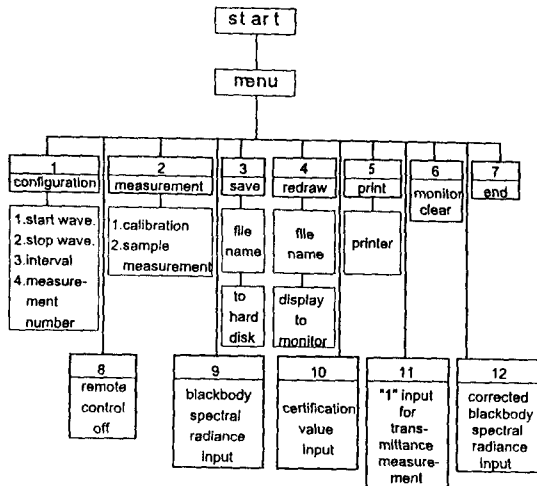


그림 6. 자동제어 및 데이터 처리를 위한 컴퓨터 프로그램의 흐름도

그림 6에 자동제어 및 데이터처리를 위한 프로그램의 흐름도를 보여주고 있다.

3.2.2 장치의 성능평가

○ 흑체(blackbody) 교정

분광복사휘도 표준으로 IR Industries 제품 모델 IR-464 연속온도 흑체를 교정하여 사용하였다. 이 흑체는 200~1,200[°C]의 온도범위를 1[°C] 간격으로 조정가능하며 공동은 cone형으로 각도가 20도, 길이가 약 36[mm]인 원추형 끝에 길이가 4[mm]이고 내경이 0.5인치인 실린더가 이어져 있는 구조를 갖고 있으며 공동의 재질은 stainless로 내부면은 산화처리 되어있고, 입구(opening)의 지름은 0.5인

치 이다. 온도에 대한 안정도는 20분 동안 setting 온도에서 ±1 [°C]정도이다. 온도조절용 감지기는 백금저항을 사용하고 온도측정은 Pt/Pt 10[%] Rh 열전대(S형)로 한다.

이 IR-464 흑체의 교정은 표준과학연구원 온도그룹의 기준복사온도계⁵⁾를 사용하여 600~1,100[°C] 온도범위를 100[°C] 간격(6점)으로 측정하고 이때 S형 열전대 기전력을 빙점(ice point) 기준으로 측정하여 흑체공동의 실제온도를 측정하였다. IR-464흑체 공동의 실제온도(S형 열전대의 기전력으로 표시되는)에 대한 기준복사온도계가 표시하는 온도값을 least square polynomials fitting 방법을 사용하여 600~1,200[°C]까지 1[°C] 간격으로 구하였다. 그러나 IR-464 흑체의 분광복사율이 "1"이 아니고 실제 흑체공동의 온도는 온도 연구실에서 교정받은 온도보다 높기 때문에 교정받은 온도값을 직접 Plank 공식에 대입하여 분광복사휘도값을 구하면 오차가 발생하므로 이 흑체의 정확한 분광복사휘도값을 얻기위해 다음과 같은 방법으로 하였다.

우선 IR-464 흑체의 분광복사율을 구하여, IR-464 흑체의 분광복사율과 이상적인 흑체복사율(=1)과의 차이(Δε)에 기인된 실제 온도차이(ΔT)를 (8)식에서 구하고 (9)식에서와 같이 Planck의 흑체 분광복사휘도 공식에 이 ΔT를 고려하여 분광복사휘도 값을 구하고 이 값에 IR-464의 분광 복사율을 곱함으로써 최종 구하려는 IR-464 흑체의 분광복사휘도값(certification value)을 얻었다.

$$\Delta T = (\lambda_c / C_2) \cdot T^2 \cdot \Delta \epsilon \quad (8)$$

$$C_2 : 2차복사상수(0.01438769[m \cdot K])$$

$$\lambda_c : 기준복사온도계의 사용파장(0.85[\mu m])$$

$$\Delta \epsilon : 이상적인 흑체와 IR-464 흑체의 분광복사율(0.85[\mu m]에서)의 차이$$

$$T : IR-464 흑체의 온도(K)$$

$$L_\lambda = \epsilon_\lambda \cdot C_1 \cdot \pi^{-1} \cdot n^{-2} \cdot \lambda^{-5} \cdot \{ \exp[C_2 / (n \cdot \lambda \cdot (T + \Delta T))] - 1 \}^{-1} \quad (9)$$

$$\epsilon_\lambda : IR-464 흑체의 분광복사율$$

$$C_1 : 1차복사상수(3.741774910^{-16}[W \cdot m^2])$$

$$n : 공기의 굴절율(1.00028)$$

ΔT : 이상적인 흑체복사율과의 차이($\Delta \epsilon$)에서 기인된 실제온도 차이

IR-464 흑체의 분광복사율은 흑체공동 내부의 온도분포를 고려하여 계산한 복사율값으로 이 흑체의 복사율을 계산하는 방법은 참고문헌⁵⁾에서 사용한 프로그램을 사용하였다. 복사율을 계산하는데 필요한 데이터는 흑체공동의 구조와 크기, 흑체공동내부의 온도분포 및 흑체공동 재질의 고유분광복사율(intrinsic spectral emissivity)이다. 흑체공동의 구조는 각도가 20도, 길이가 36[mm]이고 opening의 지름이 12.7[mm]인 원추끝에 지름이 12.7[mm]이고 길이가 4[mm]인 실린더형이 이어진 형태로 되어있으며 원추부분은 20등분, 실린더부분은 4등분하여 각각의 부분을 광원으로 가정하여 유효복사율을 계산하였다. 흑체공동 내부의 온도분포측정은 K형의 열전대로 위치를 변화시키면서 했고 IR-464 온도 setting은 1,000[°C]로 하였다. 이 측정결과를 least square polynominal fitting 방법을 사용하여 5차까지 각항의 계수를 구하여 위치에 대한 온도분포를 계산하였다. 흑체공동의 재질은 stainless를 산화처리한 것으로 이 재질의 고유분광복사율은 참고문헌⁶⁾에서 인용하였다. 이 참고문헌에 의하면 0.85[μm]에서 산화된 stainless steel의 복사율이 약 0.85, 2~15[μm] 파장영역에서의 복사율이 0.8~0.95의 분포를 보이고 있다. 따라서 0.85[μm] 파장에서는 복사율을 0.85로, 2~15[μm] 영역에서는 0.9로 간주하여 계산하였고 복사율값을 0.8 및 0.95로 간주하여 계산한 값도 참고로 표 1에 실었다.

표 1에서와 같이 850[nm]를 유효파장으로 쓰고 있는 기준복사 온도계로 교정된 이 흑체를 2.6~20[μm] 파장영역에서도 사용될 수 있는지의 그 유효성을 확인하기위해 계산한 결과에 의하면 파장변화에 따른 유효복사율값의 변화는 무시할 정도이며, 흑체공동 재질의 고유복사율값이 0.90에서 ± 0.05 변할 때 유효복사율값이 약 ± 0.1 [%] 변화함을 알 수 있다.

○ 단색화장치의 파장교정

파장 2.6~20[μm] 영역에서 단색화장치(mono-

chromator)의 파장이 정확히 맞는지를 보기 위해 파장교정으로 쓰이는 표준기준물 polystyrene film을 사용하여 교정하였다. 회절격자는 분산이 20[nm/mm]인 75(groove/mm)로 설치하고 선폭이 약 1[nm] 되도록 단색화장치의 입사 및 출사 slit 폭을 50[μm]로 조정하였다. polystyrene의 투과도를 측정후 이 기준물의 흡수파장 (3.4200[μm], 6.2477, 6.6997, 8.2095, 9.7267, 11.0327, 13.2031, 14.3308, 18.5151[μm])과의 일치여부를 확인하는 방법으로 파장교정을 하였다(그림 7). 이 파장 교정 결과는 3~20[μm] 영역에서 파장의 정확도는 5[nm] 이내 임을 알 수 있었다.

표 1. IR-464 흑체의 파장, 온도 및 흑체재질 고유복사율의 변화에 따른 유효복사율의 계산결과

파 장 [μm]	흑체공동의 고유복사율 (ϵ_0)	유효복사율 [ϵ_e]	파장 0.85 [μm] 에서 공동의 고유 복사율을 0.85 로 가정하고 계산한 유효복사율과의 차이 [%]
0.85	0.80	0.96948657	-0.13
	0.85	0.97076290	0
	0.90	0.97186774	+0.11
5.00	0.80	0.96948658	-0.13
	0.90	0.97186775	+0.11
	0.95	0.97283191	+0.21
12.00	0.80	0.96948658	-0.13
	0.90	0.97186775	+0.11
	0.95	0.97283191	+0.21
20.00	0.80	0.96948658	-0.13
	0.90	0.97186775	+0.11
	0.95	0.97283191	+0.21

○ 광검출기의 선형성(linearity) 및 광원의 크기 효과 (Size of source effect)

MCT 광검출기에 입사되는 광량에 비례하는 양의 전기신호(저항값의 변화에 따른 전압변화)가 나오는지(선형성)를 보기위해 germanium 필터의 투과도를 측정하였다. 이 Ge 필터의 크기는 1x4 인치이고 두께가 2.5[mm]이다. 먼저 이 필터를 FTIR (BIORAD 제품 FTS-60)로 측정하고 본 연구를 통해 구성된 spectroradiometer로 투과도를 측정하여 그 비

교값을 표 2에 실었다. 이 측정결과에서 투과도값의 차이는 측정된 필터위치의 차이, 두 측정기기의 기하광학적 구조 차이에서 기인된 것으로 판단된다.

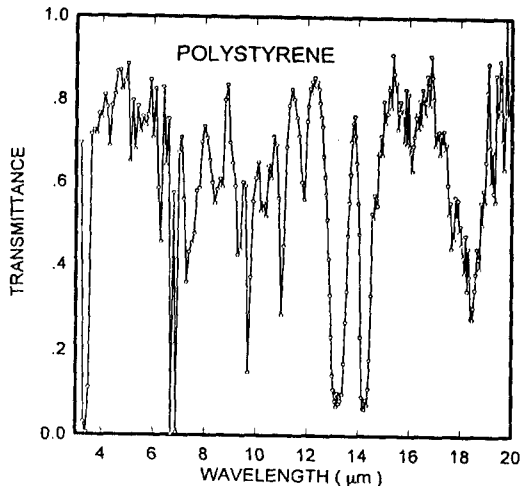


그림 7. 분광분포측정장치 파장 교정용 polystyrene film의 상대투과도(3~20[μm])

광원의 크기 효과(size of source effect)에 의해 크기가 서로 다른 광원을 비교 할 때 측정오차가 발생할 수 있다. 광원의 크기효과는 이 분광분포 측정 장치의 최소측정표적보다 큰 광원을 측정할때 크기가 더 큰 광원의 분광복사 휘도값이 커지는 현상이다. 광원의 크기효과를 보기위해 entrance slit의 폭과 높이는 시료광원의 분광복사휘도 측정조건과 동일한 2×2[mm]로 한 상태에서 광원의 위치에 선광원(line source)으로 간주될 수 있는 직경 0.8[mm]의 텅스텐선을 수직으로 설치하고 전류 18[A]를 인가하여 안정된 후 텅스텐선을 중앙으로하여 위치를 0.5[mm]씩 움직여가며 좌우 10[mm]에 걸쳐 광신호를 측정하였다. 측정파장은 3, 6, 9, 12, 14[μm]에서 하였고 측정결과 파장 변화에 따른 광원의 크기 효과에 대한 변화는 거의 없었다. 또한 3[μm] 파장에서 텅스텐선을 수평으로 설치하고 상하로 10[mm] 움직여가며 같은 실험을 한 결과도 비슷하였다. 이 효과에 대한 측정결과로는 두 광원의 크기가 8[mm] 이상이면 광원의 크기효과는 무시할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 측정장치에서 기준으로 사용되는 흑체공동의 지름이 12.7[mm]이고 시료광원은 일반적

으로 가로 세로가 40[mm]정도 이므로 이 효과는 무시할 정도의 양인 것으로 판단된다.

표 2. FTIR과 spectroradiometer로 측정한 Germanium 필터 투과도 측정결과

WAVELENGTH [μm]	TRANSMITTANCE [%]	
	WITH FTIR	WITH SPECTRORADIOMETER
12.0	43.3	42.8
15.0	39.5	39.9
18.0	23.5	23.7
19.0	21.5	21.8

3.2.3 분광복사휘도 및 분광복사율 측정

이렇게 구성된 spectroradiometer(분광분포 측정 장치)의 성능을 확인하기 위해 Nernst Glower 램프 [Infrared Industries 제품 IR-425(ceramic source)]의 분광복사 휘도를 파장폭 20[nm], 파장간격을 200[nm]로 하여 측정하였다. 우선 이 spectroradiometer로 Nernst Glower 램프의 분광분포를 측정하기전에 온도그룹에서 교정 받은 IR-464 흑체를 사용하여 흑체온도 1,000[°C]에서 이 장치를 교정하였다.

그림 8에는 500[°C] (873[K])와 300[°C](573[K])에서 동작하는 IR-464 흑체와 0.4와 0.5[A]의 인가전류로 동작하는 Nernst Glower 램프의 분광복사휘도 측정치를 보여주고 있는데 이 측정은 2.6~12[μm]와 12~20[μm]로 파장영역을 나누어 측정한 후 조합한 결과이다. 그림 9는 3~14[μm]의 파장영역에서 임의의 시료의 분광복사율의 측정값을 보여주고 있다.

○ 분광복사휘도의 측정오차

Spectroradiometer와 흑체로 구성된 분광복사휘도 측정장치의 불확도(uncertainty) 요인은 다음 몇 가지로 요약될 수 있다.

1. 기준복사온도계(온도그룹) 온도눈금의 불확도
2. 흑체공동(cavity)의 온도안정도
3. 흑체공동의 공간 및 각도 변화에 대한 온도균일도

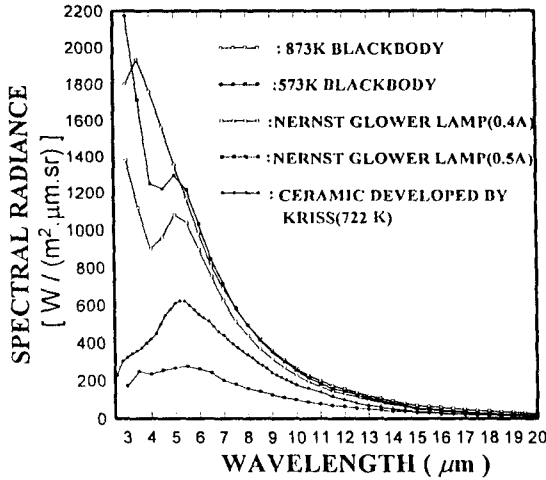


그림 8. 300[°C], 500[°C] 흑체 및 Nernst Glower 램프(0.4, 0.5[A] 전류인가시)의 분광복사휘도 측정결과

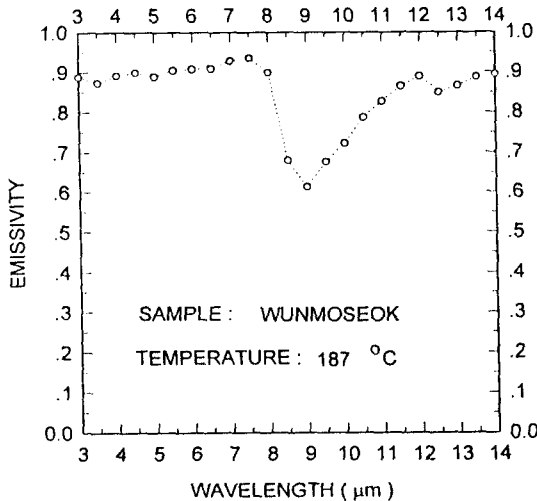


그림 9. 임의의 시료의 분광복사율 측정결과

4. 흑체와 시험광원의 광원의 크기 차이
5. 흑체공동의 온도구배가 고려된 분광복사율의 오차
6. 광검출기(HgCdTe)의 잡음(noise)
7. C_1, C_2 의 불확도에 의한 오차
8. 시험광원(흑체)의 온도안정도, 공간 및 각도 변화에 대한 온도균일도
9. 광검출기의 선형성(linearity)에 의한 오차

표 5는 분광복사휘도 측정장치의 불확도를 정리한

것으로 흑체와 시험광원의 광원크기 차이에 의한 오차는 무시하였고 분광복사율의 보정오차는 흑체공동의 크기오차, 흑체공동 온도의 비균일성, 흑체공동물질의 비균일성 등을 고려하여 분광복사율을 계산한 결과 $\pm 0.15[\%]$ 로 추정하였다. 표준복사 온도계의 온도노준의 불확도는 $\pm 0.4[K]$ 로 (8)식에 의해 $\Delta L_\lambda/L_\lambda$ 를 구했다.

$$100 \Delta L_\lambda/L_\lambda = 100(C_2/(\lambda \cdot T_v^2)) \Delta T_v \quad (8)$$

흑체공동의 온도안정도는 1시간 예비동작 시킨 후 1시간 동안 측정결과 $\pm 1[K]/20$ 분 이었고, 흑체의 공간 및 각도변화에 대한 온도균일도는 흑체공동의 구경면에서 직경이 약 2[mm]의 시계(field of view)

표 3. 분광복사휘도의 측정오차

오차요인	불확도 [%]					
	파장 [μm]					
	2.6	60	9.0	12.0	15.0	20.0
1. 기준복사온도계(온도실) 온도노준의 불확도	0.14	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
2. 흑체공동(cavity)의 온도안정도	0.34	0.14	0.10	0.08	0.06	0.04
3. 흑체공동의 공간 및 각도 변화에 대한 온도균일도	0.17	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02
4. 흑체와 시험광원의 광원의 크기 차이	negligible					
5. 온도구배가 고려된 흑체분광복사율의 오차	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
6. 광검출기의 잡음(noise)	0.3	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3
7. C_1, C_2 의 불확도에 의한 오차	negligible					
8. 시험광원(흑체)의 온도안정도, 공간 및 각도변화에 대한 온도균일도	0.37	0.16	0.11	0.09	0.07	0.05
9. 광검출기의 직선성(linearity)에 의한 오차	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
총 오차 (ROOT OF SUM OF SQUARES)	0.71	0.99	0.48	0.47	0.46	0.46

를 갖고 있는 기준복사 온도계를 사용하여 흑체의 위치를 미세조정할 수 있는 좌우 이동장치 및 각도 회전 장치를 움직여가며 측정된 결과 $\pm 0.5[K]$ 이내에서 흑체의 위치 및 각도를 재현 할 수 있었다. 1 차복사상수 C_1 과 2차 복사상수 C_2 의 불확도는 각각 0.6PPM과 8.4PPM으로 이로 인한 L 의 불확도는 0.01[%] 이하이었다. 광검출기로 쓰인 HgCdTe의 noise는 한 파장에서 약 2초동안 10회 측정된 값의 표준편차의 3배(3σ)를 한값으로 이 값들은 광검출기의 분광검지도(spectral detectivity)와 spectroradiometer의 광로상에 H_2O 및 CO_2 기체의 존재에 의한 빛의 흡수변화에 의해 주로 결정된다.

따라서 이 측정장치의 총불확도는 각 요소들에 의한 불확도를 제공하고 합한 값을 제공근(square root of sum of square)하여 구했다.

4. 원적외선의 응용

원적외선의 응용분야가 광범위한 가장 큰 이유는 관련산업에서 쓰고있는 각종 대상물질의 흡수과장영역이 원적외선의 과장영역과 일치한다는 것이다. 이러한 원리에 부합하기만 하면 어떠한 분야에서도 이 원적외선은 효율적으로 사용될 수 있으며 원적외선의 특성, 효과 및 사용가능한 분야를 참고문헌^{1), 7)~11)}을 인용해 열거해보면 다음과 같다.

4.1 원적외선의 특성 및 효과

원적외선의 특성으로 복사 및 공명흡수작용 등을 들 수 있다. 열이 전달되는 방법에는 전도, 대류 및 복사가 있다. 전도와 대류는 고체, 액체나 공기와 같은 열의 매체가 필요하다. 그러나 원적외선은 전자파로서 직진성, 굴절, 반사 등의 광학적 특성을 갖고 있고 열의 매체가 불필요하여 복사체로부터 방출된 원적외선은 직접 피조사체에 전달되어 열로 바뀌어 열의 전달속도가 빠르고 효율성도 높다는 장점이 있다.

모든 물질을 구성하고 있는 분자들의 구조는 원자들의 배열상태와 결합력의 차이로 고유의 진동 및 회전주파수를 가지고 있으며 끊임없이 신축운동과

변각운동을 하고있다. 이렇게 고유한 진동수를 갖고 운동을 하고있는 분자에 같은 진동수를 갖는 원적외선이 조사되면 이 원적외선의 에너지를 흡수하여 그 고유진동은 더욱 활발하게되어 이 운동에너지가 열로 바뀌게되며 이것을 공명흡수 현상이라고 한다. 그러나 분자의 고유진동수와 다른 원적외선이 조사될 경우 원적외선은 흡수되지 않고 통과한다. 따라서 모든 물질의 결합상태가 다르므로 그 물질의 고유 적외선 흡수 스펙트럼도 제각기 다르며 대부분의 유기화합물은 적외선 영역에서 공명흡수를 하는것으로 알려져있다.

원적외선의 효과로는 생체효과, 물분자의 활성화, 약취제거, 숙성효과, 육성효과, 가열건조효과(에너지 절약), 신선도유지, 진통효과, 대사기능촉진효과, 발한효과 등이 있다고 한다.

4.2 가열작용을 이용한 응용분야

고온발열체로부터 방출되는 원적외선을 이용한 분야는 기계, 식품공업, 전자, 화학, 자동차 등에 확산되기 시작했고 의료, 건강증진을 위한 일부분야에서도 이용되고 있다. 표 4에 가열작용을 이용한 국내 외의 응용분야를 표시했다.

4.3 비가열상태하(상온)에서 응용분야

비가열상태 즉 일반적으로 상온에서의 원적외선 응용분야는 주로 식품의 장기보존 및 건강에 관련된 분야로서 표 5에 요약 하였다. 고온의 원적외선복사체를 사용하는 가열건조공정에서의 에너지 절약분야에서는 그 효율성을 모든 사람에게 확실히 인정받고 있는 반면에 상온제품에 대한 효능에 대해서는 아직 과학적인 이론 및 근거가 미약하다는 이유로 상당한 논란의 대상이 되어 왔다. 어쨌든 경험 및 체험을 바탕으로하여 그 효능이 원적외선에 의한 것임을 주장하면서 이와관련된 제품들을 대대적인 광고와 더불어 고가로 시판하고 있는것도 사실이다. 따라서 상온에서의 응용분야는 제품들의 효능에 대한 보다 적극적이고 과학적인 연구를 필요로 하는 분야인 것 같다.

표 4. 가열상태에서의 원격외선 응용분야

가열의 분류	응용분야의 예	효 과
건조	농수산물, 식품건조, 자동차, 가전제품의 도장건조, 약품건조, 회로판건조, 인쇄잉크건조, 염색건조, 식품	가열의 균일성 신속건조 화학변화가 적음
가열(소경화)	제빵류·과자류의 구움, 냉동식품의 해동, 수지가공, 열경화성성, 구움, 수지의 경화, 육류구이(바베큐기), 요리(전자렌지, 가스오븐, 신기발술, 후라이팬)	균일하고 신속히 가열됨 식품의 경우(구이) 풍미가 있음
예열·보온	양조품의 숙성, 식품의 재배, 가축(양돈)의 사육, 전기요 장판, 난방, 플라스틱의 성형가공, 놀침대, 냉동식품해동	열매체가 불필요 직접열전달 가능(복사)
건강·의 및 사지	사우나, 신체의 일부 가열 및	저온복사효과 신체에 대한 흡수성

사휘도와 분광복사율에 대한 측정지원이 온도가 약 200[℃] 이상인 시료에 한하여 가능하게 되었다. 그러나 상온에서 쓰이는 제품들에 대한 원격외선 분광분포 측정요구가 급증하고 있는 실정이므로 상온시료의 원격외선 분광분포 측정장치 개발이 필요한 것으로 사료된다.

최근 원격외선 관련제품들이 대대적인 광고와 더불어 많이 시판되고 있으나 대부분의 제품들이 그 성능 및 효능에 대한 과학적인 근거가 미약하여 전적으로 소비자의 체험에 의존할 수 밖에 없는 상황이 현재 우리나라의 원격외선 관련산업의 실정인것 같다. 이 원격외선의 응용가능분야가 매우 방대하다는 관점에서 불태 산·학·연이 합심하여 보다 과학적인 방법으로 연구개발하고 제품을 생산한다면 무한한 가능성이 있다고 생각된다.

표 5. 비가열상태에서의 원격외선 응용분야

분 야	제 품	주장하는 효 과
식품보존 및 저장	프라스틱용기, 비닐봉지, 탈취팩, 세라믹스판, 식품수송차량	식품의 신선도유지 장기보존
식용수	프라스틱물병, 시트, 정수기용 불, 필터, 물컵, 주전자	물맛 향상 식수 장기보존
의류 및 침구	침구, 베개, 양말, 내의, 방석, 돌침대, 눈마스크, 복대, 신발갈창, 사우나복	건강증진
인테리어	도매지, 천정다일, 벽돌, 카펫, 원격외선 조명등, 자동차카바, 원격외선 TV	건강증진

참 고 문 헌

- 1) 지철근, 조명 전기설비 학회지 6 No 2, 7, 1992.
- 2) IES handbook, 1984.
- 3) Walker, J. H., et al., NBS Special Publication 250-1.
- 4) Walker, J. H., et al., NBS Special Publication 250-20
- 5) 한재원, 박승남 등, KSRI-90-132-IR, 1990.
- 6) Thermophysical properties of matter vol 9 "Thermal Radiation Properties (coating)". Ifi/Plenum, NewYork, 1972.
- 7) 곤노 가즈요시 저 박완서 역 "원격외선" 한국원격외선 응용연구소, 1990.
- 8) 마쯔시다 가즈히로 저 박완서 역 "원격외선과 물" 한국원격외선응용연구소, 1993.
- 9) 한국원격외선산업협의회 주관 제1회 원격외선 방사체 응용기술 심포지움 교재, 1991.
- 10) 한국원격외선산업협의회 주관 제2회 원격외선 방사체 응용기술 심포지움 교재, 1992.
- 11) 한국원격외선산업협의회 주관 제3회 원격외선 방사체 응용기술 심포지움 교재, 1993.

5. 맺는 말

2.5~20[μm] 파장영역에서 광원의 분광분포(분광복사휘도)를 측정할 수 있는 KRISS 원격외선 분광분포측정장치(spectroradiometer)와 원격외선 응용분야에 대하여 설명하였다.

이 장치를 개발함으로써 광원의 분광분포측정 능력이 확보되어 산업체 및 관련기관에서 요구하는 각종 원격외선 방출 세라믹 및 프라스틱 제품들의 분광복

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 용 완(金容完)
1950년 2월 1일생. 1979년 고려대 물리학과 졸업. 1979년~현재 한국표준과학연구원 양자연구부, 광학그룹 책임연구원.