

음식물 쓰레기 발효기 제작을 위한 원격외선 가열장치 설계의 물리학적 접근

한 두 희*

Physical Approach of the FIR Heater Design for Food Waste Fermentation

Doo Hee Han*

요 약 지하수의 오염을 막기 위하여 음식물의 배려는 법적 제재를 받는다. 따라서 음식물을 퇴비나 사료로 사용할 수 있는 시스템을 갖추는 것이 바람직하다. 이러한 필요에 따라 음식물 쓰레기 처리용 원격외선 가열기를 법랑 및 전열선을 사용하여 설계하였고, 가열의 효과를 높이기 위한 원격외선 발열 교환기도 설계하였다. 또한 물을 많이 포함하고 있는 음식물 쓰레기의 발효에 알맞은 발열체의 온도가 190°C 부근임과 원격외선 발열체의 원격외선 방사효율을 조사한 결과 흑색의 법랑이 적절함을 확인하였다.

Abstract The reclamation of food waste is brought by law in order to clean the underground water. Thus the food waste feed back system should be prepared. The electric heater and mixing tool for FIR radiation were developed in order to control the food waste fermentation. Also we suggest the optimum temperature 190°C, black enamel ware for food waste control.

Key Words : Far infra red heating, Black body radiation, Far infra red radiation, FIRR mixer

1. 서 론

물체를 가열하면 그 온도가 점점 올라감에 따라 표면의 색깔이 변한다. 처음에는 검붉은 색깔을 띠다가 온도가 상승하면서 점점 환한 황적색을 띤다. 이러한 열복사 에너지 스펙트럼 분포를 설명하려는 시도에서 마침내 전자기 복사의 양자화 개념이 도입되었고 그 결과 양자론이 탄생하게 되었다.

1.1 흑체복사

물체를 가열할 때 방출하는 열복사선은 전자기파의 일종으로 그 스펙트럼 분포는 물체의 온도에 따라 달라진다. 열복사에 대한 이론적 연구는 G.R. Kirchhoff에 의해 1859년 처음으로 시도되었으며, 어떤 파장 λ 에서 물체에 흡수된 복사에너지의 흡수율 $A(\lambda, T)$ 에 대한 복사 에너지의 방출능(emissive power) $E(\lambda, T)$ 의 비는 모든 물체에서 같다는 것을 증명하였다. 특히 입사하는 에너지를 완전히 흡수하는 경우, 흡수율 $A(\lambda, T) = 1$ 이므로

$E(\lambda, T)$ 는 물체의 성질에는 관계되지 않는 보편적 함수라는 것을 알 수 있다.

흑체에서 단위 시간에 단면적을 통하여 모든 파장에 걸쳐서 복사되는 총에너지와 절대온도 사이에 $E(T) = \sigma T^4$ 의 관계식이 성립한다(Stefan-Boltzman 법칙). 복사 에너지의 뾰족한 봉우리는 Wien의 변위법칙 $\lambda_{max}T =$ 일정하므로 설명된다. 이때 λ_{max} 는 주어진 온도에서 방출되는 복사선의 에너지가 최대인 복사선의 파장을 나타낸다.

복사에 대한 연구는 Wien의 복사법칙과 Rayleigh-Jeans의 법칙이 대표적이나 전반적인 복사를 설명하기보다는 복사의 일부(Wien : 짧은 파장 영역, Rayleigh-Jeans : 긴 파장 영역)를 설명하는데 그쳤다[1].

1.2 플랑크 양자론

Max Plank는 Wien의 복사법칙과 Rayleigh-Jeans의 법칙을 면밀히 검토한 결과 그들이 사용한 통계역학(에너지 등분배 법칙)을 수정하여야 함을 알게 되었으며, 그 결과 공동 속에 평형상태에 있는 전자기 복사 진동자의 성질에 대한 새로운 가정을 세우게 되었다. 즉 복사 진동자가 방출 또는 흡수하는 에너지는 진동수에 비례하며 $\epsilon = h\nu$ 로 쓸 수 있고, 진동자의 에너지는 불연속적인 특

*정운대학교 건축공학과 교수
Tel: 041-630-3273

정 에너지 곧

$$\epsilon_n = nh\nu (n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots) \quad (1)$$

중의 한 에너지를 갖는다. 이때 h 는 플랑크 상수이며 $h = 6.626 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ 이다. 또한 열적 평형 상태에 존재할 수 있는 진동자의 상태 분포함수는 Maxwell-Boltzmann의 분포함수

$$N(n) = N_0 e^{-\epsilon_n/kT} \quad (2)$$

로 주어진다 가정한다. 또한 복사 마당의 단위 부피의 진동모드의 수는 Jeans의 수와 같다고 가정한다. 곧, $n(\nu, T) = 8\pi\nu^2/c^3$ 이다.

Planck는 Jeans의 수와 그의 에너지 양자 가설에 의하여 얻은 각 기준 진동의 평균 에너지 식을 이용하여 에너지 밀도에 대한 공식

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (3)$$

을 얻었다. 이식을 이용하면 Stefan-Boltzmann 법칙을 얻을 수 있다. 곧

$$U(T) = \frac{8\pi h\nu}{c^3} \int_0^\infty \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu = \frac{8\pi^5 k^4}{15h^3 c^3} T^4 \quad (4)$$

이다[2].

1.3 광전효과

광전효과란 금속 표면에 빛을 쬐이면 전자가 방출되는 현상을 말한다. 1905년 Ein Stein은 광양자설로 광전효과를 설명하였다. 곧 빛에너지는 공간에 연속적으로 퍼져있지 않고 빛의 진동수에 비례하는 에너지 알갱이로 되어 있으며 이 덩어리를 광양자 또는 광자라 한다. 광자는 전자와 상호작용하여 서로 에너지를 교환한다. 이러한 가정에 의하여 방출되는 광전자의 에너지는

$$K_{\max} = h\nu - W \quad (6)$$

로 주어진다. 이때 K_{\max} 는 광전자의 최대 운동에너지이고 W 는 금속의 일함수이다. Ein Stein이 광양자론으로 광전효과를 성공적으로 설명함으로써 플랑크의 업적이 더 큰 빛을 보게 되었다.

2. 원적외선 가열의 현대 물리화학적 해석

원적외선이 주목을 받게된 것은 오일쇼크로 인하여 에너지 위기를 타개 해 보려는 한 방편으로 여겨졌기 때문이다. 원적외선은 물질을 구성하는 분자의 자기발열을 유발시켜 가열시간을 대폭 단축시키는 효과가 있기 때문

이다. 원적외선은 엄밀히 말하면 전자기파 중 파장이 4~1000 μm 범위의 것을 말한다. 0.78~4 μm 범위의 적외선은 근적외선이라 한다. 태양 빛의 7% 정도가 가시광선인데 비하여 열을 전달하는 적외선은 80%나 된다[3].

2.1 원적외선 가열의 일반적인 특성

원적외선 복사에 의하여 물체의 온도가 상승하는 것은 원적외선의 복사에너지가 물체에 흡수되기 때문이다. 원적외선 복사에너지가 흡수되는 정도는 물질에 따라 다르지만 일반적으로 플라스틱과 식품 등의 고분자 물질은 원적외선 복사를 잘 흡수하는 물질이다[4]. 원적외선이 물질에 가해지면 원자는 결합각을 변화하는 변각 운동, 병진 운동, 회전 운동, 원자 사이의 거리를 줄였다 늘였다 하는 신축 운동 등을 하게 된다. 분자의 진동 특성은 분자의 구조에 따라 달라진다. 원적외선이 고분자 물질에 복사될 때 원적외선의 진동수와 분자의 진동수가 일치하면 공명현상에 의하여 원적외선 복사에너지의 흡수가 극대화된다.

원적외선 가열의 특성은 고분자 물질 등에서 흡수성이 좋으며, 전자파의 일반적인 성질인 직진성과 반사 특성을 갖는다는 것이며, 가열온도는 피가열체와의 거리의 제곱에 반비례한다. 전도나 대류 등의 간접가열이 아니라 직접가열이기 때문에 가열효과가 크며, 가열물과 비접촉으로 가열하게 되면 표면가열이 지나치게 되지 않기 때문에 식품을 굽는 것 등에 효과적이다. 또한 복사체와 흡수체의 온도차가 크기 때문에 가열 공정의 후반에서도 가열 효과가 높아 시간이 절약되며, 가열로가 작아도 되므로 설비의 설치 면적이 줄어들어 제작비용이 줄어든다. 운전에 필요한 에너지 양이 절감되어 운전비용이 줄어들며 진공 속에서도 복사열은 전달되기 때문에 저온에서 수분 건조를 촉진하여 물질에 열변화의 정도가 적은 건조를 할 수 있다.

전기식 원적외선 가열은 온도 제어성이 좋고 균일한 가열이 가능하며 고성능 고품질의 가열처리를 할 수 있으며, 온도의 자동 제어가 가능하며 배기 gas와 배연, 가스 냄새 등이 없어 청정 가열이 가능하다. 또한 안전성, 내구성이 좋으며 조작이 간단하고 보수도 쉽다.

원적외선 가열에 의하여 부수적으로 얻어지는 효과는 살균 효과 및 숙성 발효 효과가 있다. 원적외선 가열과 다른 열원의 특징을 비교하면 Table 1과 같다.

전기식의 원적외선 가열이 상대적으로 우수한 것을 알 수 있다.

2.2 물과 원적외선

음식물 쓰레기의 많은 부분은 물로 구성되어 있다. 원적외선 가열에 사용되는 2.5~30 μm 영역은 0.5~0.04 eV

Table 1. 가열원의 특징

항목	전기식 원적외선 가열	적외선 전구에 의한 가열	연소식 열풍로에 의한 가열
가열 효과	매우 양호	양호	불량
설비비	양호	양호	불량
운전비	양호	보통	양호
온도 제어	매우 양호	매우 양호	보통
설비 공간	매우 양호	매우 양호	보통
조작성	매우 양호	매우 양호	보통
수명	매우 양호	불량	보통
안전성	매우 양호	양호	보통
온도상승시간	양호	매우 양호	보통
환경 공해	매우 양호	양호	불량

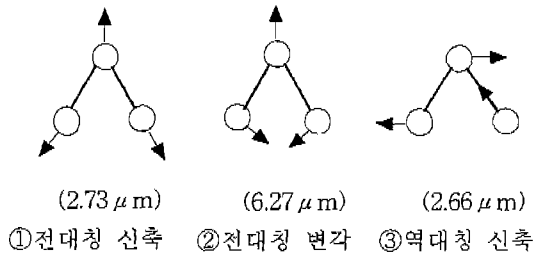


Figure 1. 물의 기준 진동(normal mode) : 팔로 안은 기준 파장

정도의 작은 광자에너지를 갖기 때문에 화학작용은 거의 하지 않는다. 이 범위의 광양자 에너지는 물질의 분자진동이나 결정의 격자 진동을 여기시키는 수준이다. 원적외선 영역에서 물분자의 운동은 세가지의 기본 형태가 알려졌다으며 Figure 1과 같다.

이외에 진동 보다 훨씬 약한 에너지로 일어나는 회전 운동이 있는데 실용적인 파장 대역 보다 훨씬 장파장 쪽에 있으므로 고려하지 않았다. 물의 맛을 좋게 하는 원적외선 영역은 10 μm 전후이며 이것은 신축운동의 4배 모드에 해당한다.

Figure 2에서 흡수 파장대를 2.7, 6.3, 10 μm로 보면 Wien의 법칙에 의하여 800, 190, 17°C 부근이 물의 활성화에 좋은 영역일 것이다. 이중 가열체의 온도를 190°C 부근으로 하는 것이 적절하다고 판단된다.

상은 원적외선의 효과는 많이 알려지지 않았지만, 세라믹 불을 담아놓은 그릇의 물맛이나 질그릇 등에 담아놓은 물의 맛이 좋아지는 것은 물의 산도가 7에서 7.5로 변했기 때문이며 이것은 원적외선에 의하여 전자가 튀어나오는 현상 즉 광전효과와 한 예로 이해된다.

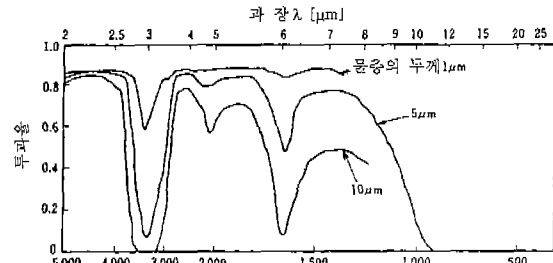


Figure 2. 물의 원적외선 스펙트럼

3. 음식물 쓰레기 발효를 위한 원적외선 가열기의 설계 및 모형실험

원적외선 발열체는 세라믹 재료를 소성 성형한 것이 경제성이나 가격 면에서 우수한데 이것은 피가열체를 담은 용기로 사용하려면 파손의 위험성 때문에 적절하지 못하다. 따라서 금속 재질과 세라믹 재질의 특징을 동시에 갖는 법랑이 원적외선 효과와 내구성을 동시에 지니고 있기 때문에 음식물 쓰레기 발효 용기로 적절하다고 판단된다.

3.1 법랑을 이용한 원적외선 가열 장치의 고안

법랑은 금속 재질의 겉에 도자기 재질을 입힌 것으로 효과는 도자기의 효과를 가지면서 깨어지지 않는다는 장점을 가지고 있다. 법랑 용기와 전기 가열선을 결합시킨 기본적인 형태가 Figure 3에 보여진다[5].

2는 열선을 나타내며, 이것은 띠 형태의 열선으로 대체될 수 있다. 4, 5는 법랑이며, 가능한 두껍게 입히면 효과가 좋을 것이다. Figure 3.2는 원적외선 가열기의 밀면

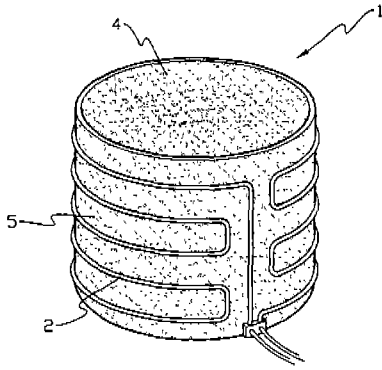


Figure 3. 음식물 쓰레기 발효용 원적외선 가열기 열개도

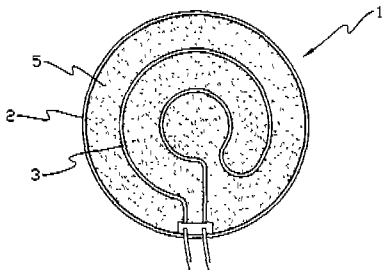


Figure 4. 음식물 쓰레기의 발효용 원적외선 가열기의 밀면

을 나타내준다. 옆면과 밀면에 공히 열선을 만든 이유는 가열 효과를 극대화시키며 균일한 온도 분포를 얻기 위함이다.

법랑의 효과는 외부보다 내부가 중요하므로 내부의 두께가 더 두꺼우면 좋다. 이 고안은 음식물쓰레기가 투입되어 발효 및 건조되는 발효조에 법랑을 코팅하고, 발효조를 전기열선으로 가열하여 발효 및 건조되는 음식물쓰레기에 항균 및 항곰팡이 방취효과와 원적외선 방출효과를 주므로써 가축과 식물에 무해한 양질의 사료와 퇴비를 생산하는 효과를 제공하게 된다[5].

3.2 법랑을 이용한 원적외선 가열 장치를 겸한 교반 장치 고안

이것은 일반 용기나 맥섬석 같은 용기에서 직접 열을 가하면서 교반할 수 있는 장치이다. 본 고안은 교반장치에 있어서, 교반날개를 법랑이 입혀진 철판으로 제작한 후 상기 교반날개를 회전시킴으로써 내용물의 교반이 이루어지게 하여 법랑에 혼합된 항균세라믹에 의해 항곰팡이 기능을 갖도록 하고, 철판의 내부에 전기히터를 내장시켜 철판으로 내용물을 가온시켜 별도의 가온장치를 설치하는 번거로움을 없애는 효과가 있는 것이다[6]. Figures 5~6은 원적외선 발열체 겸용 교반기의 개략도를

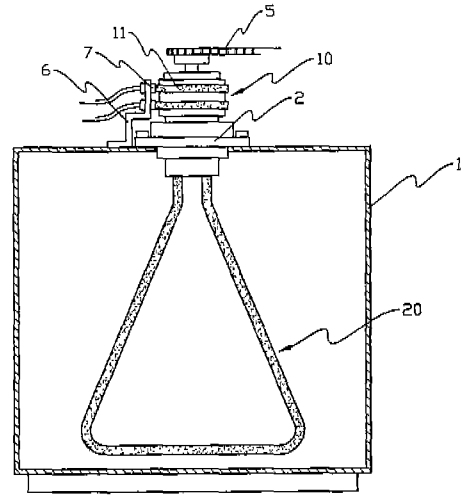


Figure 5. 원적외선 발열체 겸용 교반기

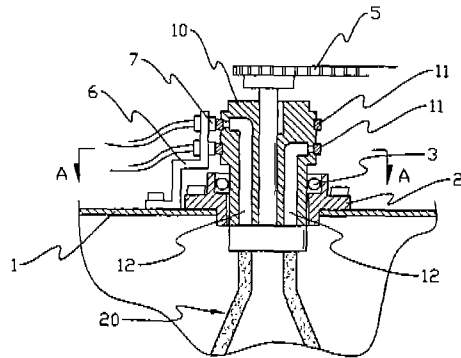


Figure 6. 원적외선 발열체 겸용 교반기

모여준다. 기본적으로 동력 전달 장치, 전원공급용 브러쉬, 법랑을 입힌 금속관, 내부의 전열선으로 구성된다. 금속에 법랑을 입히면 녹슬지 않고, 세균의 번식을 막으며 청결을 유지해 준다.

3.3 법랑 가열체의 색상에 따른 원적외선 방출특성

흑색과 붉은색의 법랑 용기를 만들어 원적외선 방출 효과를 비교하였다. Figure 7는 흑체와 시료를 사용하여 원적외선 방사율을 측정하는 측정기의 열개도를 나타내 준다.

시험온도는 400°C를 사용하였고 원적외선의 파장 범위는 파장범위는 2.5~25 μm 범위를 사용하였다. 스펙트럼을 비교하여 보면 5 μm 이상에서는 유사한 형태를 보이나 5 μm 이하에서 붉은색이 검은색 보다 현격히 작게 방출되는 것을 알 수 있다. 따라서 원적외선 가열체의 법랑 용기는 검은 색이 알맞은 것을 알 수 있다. 검은색

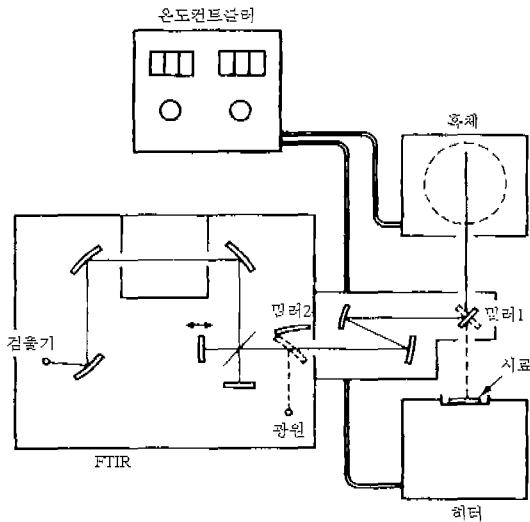


Figure 7. 원적외선 방사율 측정기의 일개도[7]

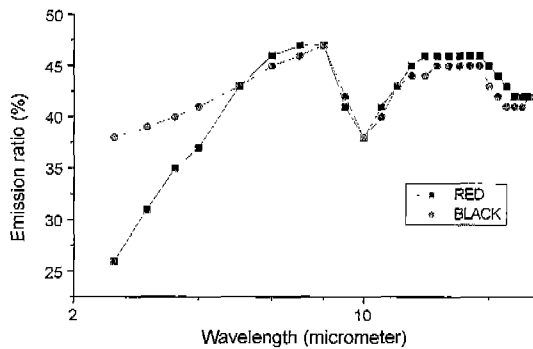


Figure 8. 법랑체의 원적외선 방사율(상대치)

이 전체적으로 방사율이 낮게 나타난 이유는 검은색은 하유약 법랑만 입혔고, 붉은색은 하유약 법랑에 상유약인 붉은색 법랑을 다시 입혔기 때문에 법랑의 양이 많아졌기 때문이다. 법랑의 두께가 두꺼워지면 원적외선 방사물질의 양이 많아지므로 방사율이 커질 것은 자명하다.

4. 토 의

전국적으로 하루에 버려지는 음식물쓰레기(1997년 기준)는 8톤트럭 1,630대분(13,06톤)이며, 연간 트럭 68만여대 분량에 이른다. 이 양은 트럭을 일렬로 세우면 서울과 부산을 8번이나 왕복할 수 있는 길이이다. 아파트 단지를 중심으로 음식물 분리수거가 실시되고 있지만 아직도 많은 음식물 쓰레기가 강으로 유입되거나 토양에 버려지거나 땅에 매립되고 있다. 한편 농촌의 논밭

은 무기질 비료의 다년간 사용으로 영양상태는 빈사상태로 가고 있다. 여기에 과다한 농약의 살포로 토양과 강물이 오염되고 있다. 우리의 농토는 화학비료가 아닌 퇴비와 같은 유기질 비료를 원한다. 가정에서 나오는 음식물 쓰레기를 모두 회수하여 유기질 비료로 사용한다면 환경오염은 줄이고 농촌을 풍요롭게 하는 일거양득이 될 것이다. 일부 유기질 비료로 사용하는 곳이 있지만 발효할 때 나오는 악취는 새로운 공해로 떠오르고 있다. 또한 장비가 고가이면 실제 활용하는 농장이나 농촌에서 쉽게 설치할 수 없다. 따라서 주위환경에 피해를 안주고 소규모 농촌에서도 손쉽게 설치할 수 있는 저가의 음식물 쓰레기 발효기 개발이 필요한 것이다[8].

이를 위한 기초 작업으로 물이 많은 음식물 쓰레기 발효를 위한 원적외선 방사체의 적정 온도가 190°C 부근이며, 이를 위한 원적외선 가열용 용기로서 전열선이 결합된 법랑 용기를 고안하였고, 법랑용기에서도 쓸 수 있지만 다른 용기에서도 사용할 수 있는 원적외선 발열 교환기를 고안하였다. 또한 원적외선 발열용 법랑의 색상은 검은 색이 알맞다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 2001~2002년도 충남환경기술개발센터의 지원으로 이루어졌으며, 그 핵심 내용은 음식물 쓰레기 발효용 원적외선 가열기의 설계 및 원적외선 방출 특성에 관한 것이다.

참고문헌

- [1] 고재걸, “양자역학”, 서울, 청문각, 2000.
- [2] A. Goswami, “Quantum Mechanics”, London, Wm. C. Brown Publishers, 1997.
- [3] 곤노가즈요시, “원적외선-21세기는 2천억불 시장 그 산업실태와 배경원리”, 한국원적외선응용연구소, 서울, 1998.
- [4] 한충수, 박완서, “원적외선 가열의 이론과 실제”, 한국원적외선응용연구소, 서울, 1995.
- [5] 한두희, “음식물 쓰레기 발효용 전기 가열식 원적외선 방열장치”, 특허출원서, 2002.
- [6] 한두희, “직접 전기 가열식 원적외선 방출 교환장치”. 실용신안출원서, 2002.
- [7] 다카지마 히로오, “기초 원적외선 공학”, 서울, 겸지사, 1997.
- [8] 한두희, “원적외선 가열을 이용한 사료 및 유기질 비료용 음식물쓰레기 발효장치 개발”, 충남환경기술개발센터 연구제안서, 2001.