

마이크로파(MW) 가열특성

홍 석 인
산업화연구부

식품가공에 있어 가열은 원재료의 물리적, 화학적 성질이나 기계적 성질을 변화시켜 목적하는 성상에 도달하도록 하는 필수적인 공정으로서 가열원에 따라 석유나 가스 연소에 의한 불꽃, 열풍, 증기 등이 사용되거나 전열 등의 적외선 복사열이 주로 이용되어 왔다. 이들은 모두 외부가열방식으로 열원에서 발생한 에너지가 물체의 표면에 전달된 다음 그 물체의 열전도도에 따라 내부까지 가열된다. 이에 반해 고주파 가열은 고주파 전자계(electromagnetic field)의 에너지를 물질내에서 직접 열에너지로 전환시켜 대상물을 가열하는 방식으로 대상이 전도체인 경우 유도가열(induction heating), 절연체인 경우 유전가열(dielectric heating)로 구분한다. 식품은 일반적으로 절연체에 가깝기 때문에 유전가열이 적합하며, 특히 염분이나 기타 전해질 성분을 다량 함유하고 있는 식품에 대해 마이크로파 가열은 열효율이 아주 높고 매우 짧은 시간 내에 가열할 수 있는 장점을 갖는다.

마이크로파 사용주파수

전자기파는 파장이나 주파수에 따라 그림 1과 같이 구분되며(Decareau, 1985), 각각의 용도는 표 1과 같다. 마이크로파는 주파수가 300MHz에서 30GHz(파장: 1m~1cm) 범위의 전자기파로서 이들 대역의 전파는 파장이 긴 UHF TV 방송에서 파장이 짧은 항해장치, 인공위성 통신용 장치, 레

이더 등에 이르기까지 폭넓게 사용되는 중요한 전파이다. 이 때문에 한정된 주파수 대역범위를 혼란 없이 유효하게 이용할 목적으로 국제적인 약속에 따라 주파수 할당이 이루어지고 있는데, ITU(International Telecommunication Union)는 산업, 과학, 의료용(ISM) 용도에 대해 915 ± 13 MHz와 2450 ± 50 MHz, 2가지 주파수만을 허용하고 있다(Grant, 1992).

마이크로파 가열원리

금속이나 반도체와 같은 전도체에 전계(electric field)가 가해지면 내부 자유전자의 이동에 의해 전류가 흐르지만, 절연물에서는 전계가 가해져도 전자의 움직임이 발생하지 않는 대신 정전화와 부전하가 원래의 평형위치로부터 변위되어 전하가 분리되는 분극현상이 일어난다. 이러한 성질을 갖는 물질을 유전체라 하며 분극현상이 고주파수의 전계에 의해 반복될 때 전계의 에너지 중 일부가 유전체에 흡수되어 유전손실로서 발열된다. 미시적인 관점에서 볼 때 유전체에 발생한 분극은 배향, 이온, 전자 분극 등 몇 개의 서로 다른 기구로 이루어지는데, 이들 중 마이크로파 영역에서 가열에 기여하는 것은 주로 배향(방위)분극이다. 즉, 분자나 이온상태에서 쌍극자(dipole)를 갖는 H_2O , HCl 등의 물질에 전계를 가함에 따라 쌍극자가 전계방향으로 정렬하므로서 발생하는 분극을 말한다(Buttler, 1993).

표 1. 전자기파의 파장 영역 및 사용 용도

(Table 1. The spectral distribution and use of electromagnetic field)

주 파 수	파 장	명 칭		일반용도	공업용도
30 - 300 KHz	10 - 1km	LF	중 파	라디오방송	유도가열
300 - 3000 KHz	1000 - 100m	MF			
3 - 30 MHz	100 - 10m	HF	단 파	TV 방송	유전가열 마이크로파가열
30 - 300 MHz	10 - 1m	VHF	초단파		
300 - 3000 MHz	100 - 10cm	UHF	극초단파 (마이크로파)	UHF TV 방송 통신, 레이저	
3 - 30 GHz	10 - 1cm	SHF			
30 - 300 GHz	10 - 1mm	EHF	밀리파	밀리파 통신	

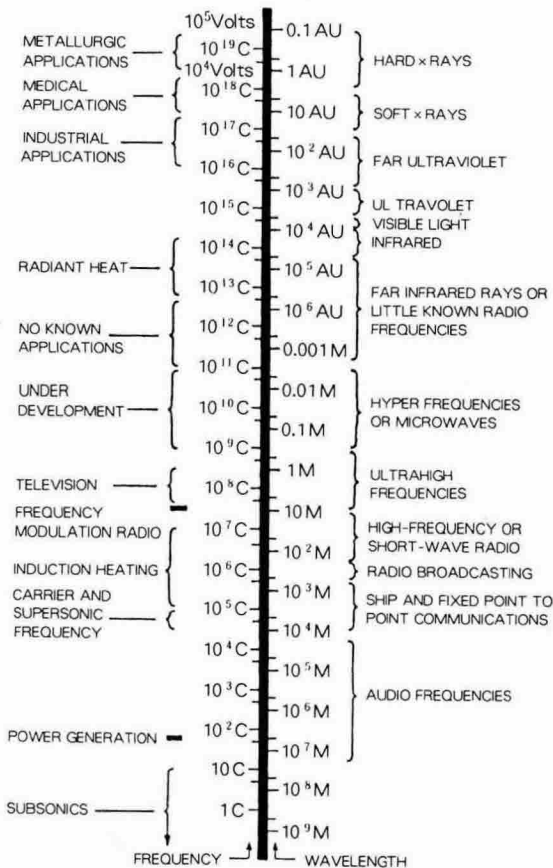


그림 1. 전자기파의 주파수 스펙트럼

유전체에 전파가 닿으면 유전체를 구성하고 있는 분자(쌍극자)가 전파의 에너지를 받아 전기적 평형상태에서 전계 방향의 변화에 따라 진동을 시작하는데 이 분극 진동이 분자간의 마찰을 유발하여 발열현상을 일으킨다. 이를 모형적으로 고찰하면 점성유체 중에 떠 있는 쌍극자를 진동시키는 경우 그 주파수(진동수)가 낮을 때는 그다지 에너지를 필요로 하지 않지만 주파수가 높을 때는 마찰력이 크게 되어 진동시키는데 많은 에너지를 요구한다. 즉, 가해진 전자파에너지가 분자의 진동에너지로 소비되어 물체내에서 열로 바뀌어 가는 것이다. 분극을 일으키는 전계의 방향이 바뀌면 쌍극자는 회전해서 반전하는데 이때 쌍극자 반전의 시간적인 지연(relaxation time)은 유전체가 전기적으로 저항성분을 갖는 것을 의미한다.

유전특성 (Dielectric properties)

마이크로파 가열에 있어서 대상물질의 전기적 성질은 매우 중요한 의미를 갖는다. 특히 상대 유전상수 ϵ' 과 상대 유전손실 ϵ'' 은 각각 전기에너지를 저장, 발산할 수 있는 능력을 나타내는 지표로 사용되며, 또한 그 물질의 전기적 절연능력(insulating ability)을 나타내기도 한다. 실제로 식품은 전기적 절연성이 매우 조악하여 일반적으로 마이크로파에 노출될 경우 대부분의 에너지를 흡수하므로써 순간적인 발열이 이루어진다.

물질의 유전특성(dielectric properties)은 다음과 같이 정의된다(von Hippel, 1954)

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$$

여기서 ϵ 은 complex permittivity, $\tan\delta$ 는 일정 주파수와 온도조건에서의 손실역율(loss tangent), j 는 $\sqrt{-1}$ 이다. 식품의 유전특성은 식품 자체의 화학적 구성성분과 물리적 구조에 밀접하게 관련되어 있으며 주파수와 온도에 따라 상당히 달라지는 것으로 알려져 있다. 액상이나 반고상 식품의 유전특성은 주로 수분함량, 염농도, 고형분함량에 의해 좌우되는데, 이는 분자 수준에서의 마이크로파 가열이 자유 물분자의 쌍극자 회전에 따른 수소결합

파괴와 용존 이온의 전기적 이동에 의해 이루어지기 때문이다. 그림 2에서는 몇몇 대표적인 식품의 유전특성을 이해하기 쉽게 예시하였다(Buffler, 1995).

물질의 고유 유전특성을 직접 측정하는 것은 마이크로파 가열시 대상물질의 발열거동을 이해하는데 필수적이고, 수분함량이나 밀도 등의 물리적 성질과 연계하여 이들 특성을 비파괴적 방법으로 측정하는데 사용될 수 있으며, 마이크로파 이용 장치의 설계에 필요한 주요 정보를 제공한다. 이러한 유전특성은 간단한 원리에 의해 측정이 가능한데, 우선 측정하고자 하는 주파수 영역의 마이크로파를 발생시켜 대상물에 전자기파 신호를 직접 주입한 다음 물질에 의한 신호 변화를 감지하고 이로부터

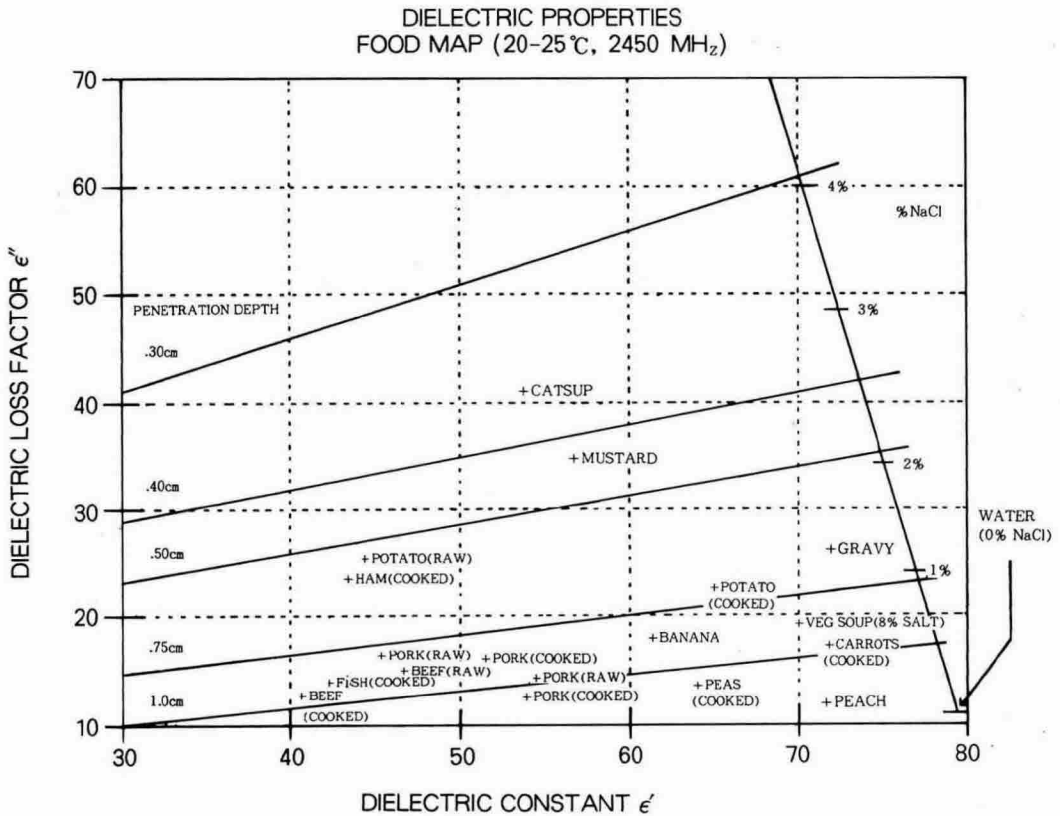


그림 2. 대표적인 식품의 유전특성 도표

유전상수와 손실계수를 계산해 낸다. 일반적으로 전자기파의 발생과 변화 감지에는 network analyzer를 이용하며, 전자파 신호의 주입에는 다양한 고정장치(fixture)가 사용된다. 실제로 이용 가능한 측정방법에는 여러가지가 있으나 각기 나름대로의 장단점이 있어 현재 가장 많이 사용되고 있는 것으로는 Open-Ended Coaxial Probe법, Waveguide and Coaxial Transmission Line법, Resonant Cavity법 등을 들 수 있다. 이들 중 probe 법(그림 3)은 특별히 식품의 유전을 측정에 적합한 방법으로서 폭넓은 주파수 범위에서 유전율을 측정할 수 있으며, 측정 시료의 형태에 구애받지 않기 때문에 사용이 편리한 반면 정확도에 다소 제한이 있어 지방과 같이 유전율이 낮은 물질에는 다소 불리한 단점이 있다. 이에 반해 transmission line 법(그림 4)은 probe법에 비해 보다 정확하고 민감하지만, 상대적으로 낮은 주파수 영역에서는 측정이 불가능하고 측정조작이 어려우며 소요시간도 긴 편이다. 한편 cavity 법(그림 5)은 정확도가 아주 높아 유전손실이 매우 낮은 유리, 플라스틱, 유리 등의 시료 측정에 가끔 사용되지만 오직 한 주파수에서만 측정 가능한 단점이 있어 상용화된 장비는 아직까지 없다(Engelder and Buffler, 1991).

한편 전자파가 피가열물체의 표면에 조사되면 그림 6에 나타낸 바와 같이 대상물에 따라 일부는 반사되고 나머지 일부는 표면을 침투하여 그 물질의 유전손실에 의해 흡수되면서 점차 내부로 전달된다. 이러한 대상물 표면에서의 전자파 반사 및 투과는 대상물과 대기 사이의 고유저항(intrinsic impedance, η)차이에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 물질 내부로 깊이 들어가는 만큼 전파는 점점 약해지고 물질의 ϵ' 과 $\tan \delta$ 가 클수록 전자파의 전달이 더욱 감소한다.

마이크로파 에너지(P_0)가 평판형 유전체에 조사되었을 때 표면에서 반사되는 양(P_r)은 그 물질의 유전특성에 의해 좌우되는데, 특히 ϵ'' 보다는 ϵ' 에 절대적인 영향을 받는다. 실제로 모든 식품에 있어서 ϵ'' 을 무시했을 경우 발생하는 오류는 5% 미만

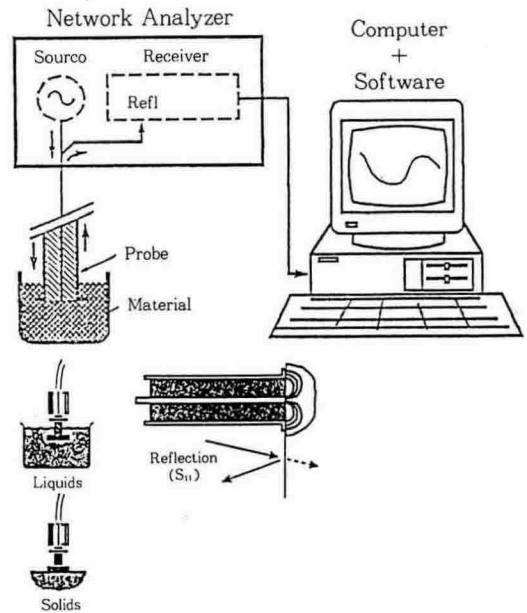


그림 3. Coaxial probe 방법을 이용한 유전특성 측정장치 구성 개략도

이므로, 이를 감안하여 P_r 에 대한 상관식을 정리하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = \left(\frac{\sqrt{\epsilon'} - 1}{\sqrt{\epsilon'} + 1} \right)^2$$

대상물 표면에서 반사된 P_r 을 제외한 나머지 부분은 물질 표면을 침투하여 내부로 전달되며, 그 물질의 마이크로파 흡수력, 즉 유전손실 ϵ'' 이 클수록 흡수량이 증가하여 전달되는 에너지량은 감소한다. 이러한 관계를 구체적인 수식으로 표현하면, 대기중에 놓여진 유전체에 마이크로파를 조사했을 때 단위체적당 에너지 흡수량 P_v 는 다음과 같다.

$$P_v = \frac{5}{9} \times 10^{-10} f E^2 \epsilon' \tan \delta \text{ [W/m}^3\text{]}$$

여기서 f 는 마이크로파의 주파수(Hz), E 는 전기장의 강도(V/m)이다. 앞서 언급했듯이 ϵ' 과 $\tan \delta$ 는 대상물질의 고유값으로 온도나 주파수에 따라 변화한다.

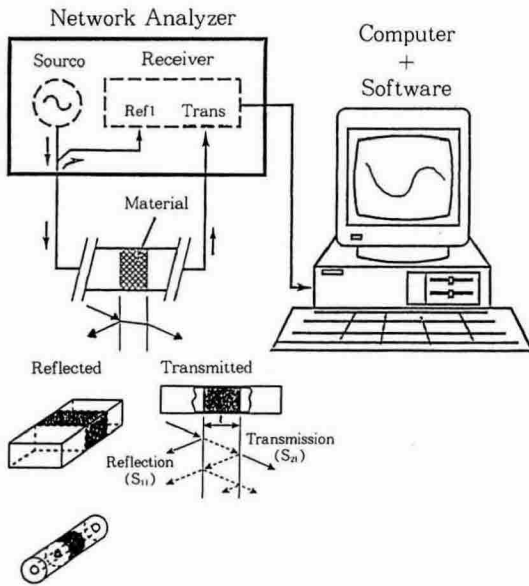


그림 4. Transmission line 방법을 이용한 유전특성 측정장치 구성 개략도

이와 같은 전자파의 전달특성을 나타내기 위하여 침투깊이(penetration depth)라는 개념을 사용하는데, 이는 평판형 물질 내에서 전자파 전력의 감소 양상을 나타내는 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{P(z)}{P_0} = e^{-z/d_p}$$

이때 $P(z)/P_0$ 는 길이(z)의 함수로 나타낸 평판형 물질내 전력 잔존분을 의미한다. 이로부터 침투깊이(d_p)란 대상물 표면을 투과한 전자파의 전력(에너지 밀도)이 $1/e$, 36.8%로 감소하는 길이로 정의되며 대상물질의 유전특성에 따라 크게 좌우되므로 다음 식을 이용하여 그 값을 계산한다.

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2\epsilon'(\sqrt{1+\tan^2\delta}-1)}} \quad [\text{m}]$$

여기서 λ 는 대기중 전자파의 파장으로서 $\lambda=C_0/f$ ($C_0=3 \times 10^8$ m/s)이다.

마이크로파 가열특성

마이크로파 가열은 마이크로파 자체가 열원이 아

니라, 마이크로파를 흡수하는 물질이 그 에너지를 열로 전환시킴으로서 가능하다. 일반적으로 식품에서는 극성분자들이 마이크로파와 상호작용하여 열을 발생시키는데, 그 중에서도 물은 가장 흔한 극성분자인 동시에 대부분 식품의 주성분으로서, 식품의 마이크로파 가열에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 물분자는 분자 내에 +와 -극성을 모두 갖는 쌍극자이므로 마이크로파 전기장이 가해질 경우 자석과 마찬가지로 전기장의 방향으로 분자가 배향하는데, 이때 마이크로파 전기장은 초당 2450 백만번 극성이 변화하므로 이에 따라 식품 내에 존재하는 물분자들의 배향도 급속히 달라지게 된다. 결과적으로 이러한 과정 중에서 식품은 마이크로파로부터 상당한 운동에너지를 얻어 발열하게 되는 것이다.

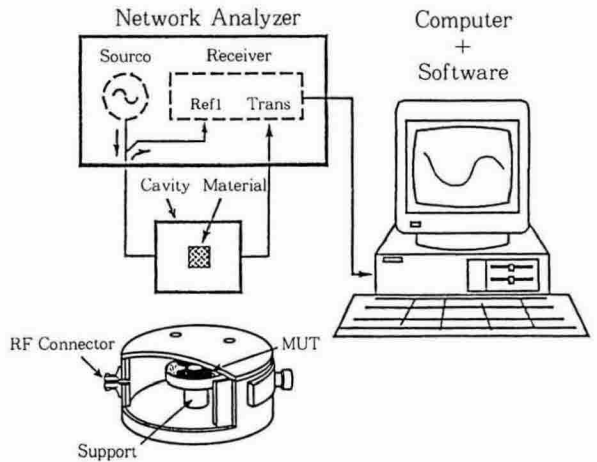


그림 5. Resonant cavity 방법을 이용한 유전특성 측정장치 구성 개략도

한편 이온전도(ionic conduction) 역시 중요한 마이크로파 가열기작으로서, 고유 전하를 띠고 있는 이온은 마이크로파의 영향을 받아 용액 내에서 마이크로파 전기장의 극성이 바뀔 때마다 반대극성 쪽으로 이동한다. 이러한 이온전도의 영향은 염 용액에 대한 마이크로파 가열시 표면의 온도가 더 높

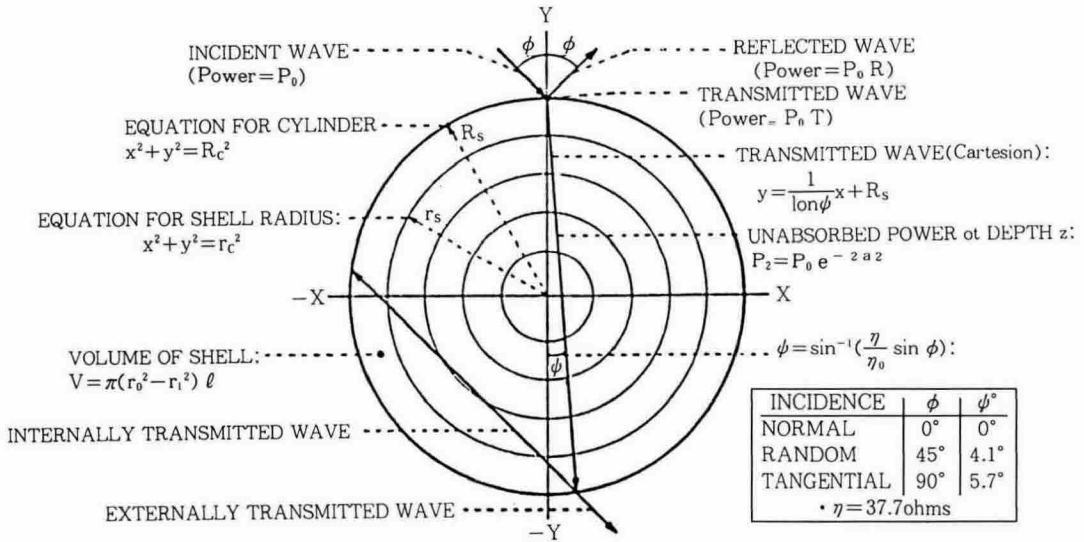


그림 6. 원주형 대상물에 대한 전자파의 반사, 투과, 흡수 모형

아지는 사실로부터 알 수 있으며, 동물이나 식물 세포에 마이크로파 에너지가 가해질 경우에도 세포 유동물질(cellular fluids) 내에서 이온전도가 일어날 수 있다고 한다.

마이크로파 가열과 다른 기존의 가열방법과의 가장 큰 차이점은 마이크로파가 식품 내부로 깊숙이 침투하고 그 과정에서 열이 발생된다는 것이다. 즉, 기존의 가열방법은 외부의 열원으로부터 에너지를 공급받아 대상물질 내에서 열전도에 의해 가열되는 것으로서 대상물질의 표면과 내부에서의 온도구배가 driving force로 작용하지만 마이크로파 가열은 온도구배를 필요로 하지 않는다. 이러한 근본적인 가열방식의 차이로 인해 마이크로파 가열 물질에서는 물질 표면의 온도가 내부 보다 더 낮을 수도 있는데, 이는 기존 가열방법과는 달리 외부의 열원이 없기 때문에 대상물 주변의 온도가 더 낮아서 가열된 물질의 표면에서 증발냉각(evaporative cooling)이 일어나기 때문이다.

마이크로파 가열 영향인자

마이크로파 가열은 식품 자체의 유전특성뿐만 아

니라 크기, 형태, 표면적/부피 비, 비열, 밀도, 열전도도, 증발냉각 등 여러 가지 다른 요인에 의해서도 영향을 받는데, 그 영향 정도는 기존의 가열 방식에 비해 훨씬 더 큰 것으로 생각된다.

가열 대상물의 형태는 마이크로파 가열의 성과를 좌우할 만큼 매우 중요한 인자로서 원통형이나 평판형에 비해 구형일 경우 에너지를 집중시켜 중심부를 가열하기 용이하므로 가장 이상적이다. 그러나 대상물이 구형이라 하더라도 직경이 크면 직접적인 중심부의 가열이 불가능하므로 열전도에 의지할 수밖에 없다. Ohlsson과 Risman(1978)에 따르면 2450MHz의 마이크로파 가열에서는 구형 대상물의 직경이 20~60mm 범위일 때 중심부로 가열이 집중된다고 한다. 이러한 집중적인 중심부 가열은 열전도에 의한 온도구배의 분산을 불가능하게 하므로서 결과적으로 대상물질 자체의 파괴를 야기할 수도 있다. 원통형은 구형 다음으로 마이크로파 가열에 적합한 형태이지만, 중심부의 가열만을 고려할 경우 자칫 표면에서의 과열을 막을 수 없는 단점이 있다. 한편 대상물의 모양이 균일하고 크기가 작은 것일수록 짧은 시간내에 균일하게 가열이

이루어지며 불균일한 것은 과열되거나 건조되기 쉬우므로 마이크로파 가열시 이를 반드시 고려해야 한다. 다만 가열하고자 하는 대상물의 절대량이 마이크로파 가열장치의 캐비티 크기에 비해 너무 작으면 에너지 흡수량이 급격히 감소한다. 피가열체의 부피와 에너지 흡수량의 관계를 나타내기 위해 1000ml 물에 대한 500ml 물의 흡수 에너지 비율(r)을 지표로 사용하는데, 가정용 전자렌지의 경우 통상적으로 r 값은 0.8 이상이다.

피가열체의 위치에 따라서도 가열정도가 달라지는데, 예를들어 가열 대상물이 서로 밀착되어 있는 상태라면 접촉부분이 상대적으로 덜 가열되고 중심보다는 주변에 놓은 것이 더 가열된다. 또한 기존의 가열방식에서와 마찬가지로 대상물의 표면적이 넓을수록 가열과 냉각에 유리하다.

대부분 식품의 비열이나 밀도는 수분함량과 밀접한 관계가 있으며 일반적으로 수분함량이 높을수록 비열과 밀도는 증가하고, 그로 인해 일정 온도까지 가열하는데 필요한 열량이 높아지므로써 마이크로파 처리시간이 길어진다. 한편 열 전도는 마이크로파 가열시 가장 문제가 되는 국부 가열을 억제하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 궁극적으로 온도차를 줄이기 위해서는 마이크로파 가열속도를 줄이는 것이 최선의 방법이다.

마이크로파 가열장치 측면에서는 장치 자체의 출력이나 발생 전자장의 균일성, 가열물체의 공급방법, 가열 캐비티의 크기 및 구성 재질 등에 의해서 상당한 영향을 받는다.

마그네트론(magnetron)은 마이크로파를 발생시키는 핵심장치로서 그 규격과 성능에 따라 대상물에 전해지는 에너지량이 달라지는데, 일반적인 상용 마그네트론의 발진 주파수는 915MHz와 2450MHz으로 제한되어 있다. 마그네트론에 사용되는 영구자석은 사용중 온도 상승에 따라 발생장치의 강도가 약화되므로써 전체적인 출력 감소를 야기시키기 때문에 대개 별도의 냉각장치가 부착된다. 한편 전원 공급부회로에 의해서도 약 15% 내외의 출력 차이가 발생할 수 있으며, 그 중에서도

축전기의 성능이 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

참 고 문 헌

- Buffler, C. R. : *Microwave cooking and processing*, AVI publishing, New York, (1993)
- Buffler, C. R. and Stanford, M. A. : Effects of dielectric and thermal properties on the microwave heating of foods, *Microwave world* 16(1), 5 (1995)
- Decareau, R. V. : *Microwaves in the food processing industry*. Academic Press Inc., Orlando, (1985)
- Decareau, R. V. : *Microwave Foods; New product development*. (1992)
- Engelder D. S. and Buffler, C. R. : Measuring dielectric properties of food products at microwave frequencies. *Microwaves; Industrial, Scientific and Medical Applications*. Artech House, London, (1992)
- Hasted, J. B. : *Aqueous Dielectrics*, Chapman and Hall, London, (1973)
- Nelson, S. O., Forbus, W. Jr. and Lawrence, K. : Microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetables and possible use for maturity sensing. In *Harvest and Postharvest Technologies for Fresh Fruits and Vegetables*, Ed. by Kushwaha, L., Serwatowski, R. and Brook, R., ASAE proceedings of the international conference, Michigan, 497-504 (1995)
- Ohlsson, T. and Risman, P. O. : Temperature distribution of microwave heating spheres and cylinders. *J. Microwave Power* 13(4), 303-310 (1978)
- von Hippel, A. : *Dielectric Materials and Applications*, MIT Technol. Press, Cambridge, MA, (1954)