

강좌

마이크로파 가열이론

A Theory of Microwave Heating

조 광 환*

정회원

K. W. Cho

1. 서론

마이크로파는 전시중에 레이다로서 널리 이용되어 많은 활약을 하여 왔지만 전쟁이 끝남과 동시에 군용레이다의 수요가 격감하여 마이크로파 전문업체는 레이다를 대신하는 용도로서 가열에 이용하는 것을 고안했다. 1945년 미국의 전문업체에서 마이크로파 도파관의 개구부에 옥수수를 놓았더니 이것이 가열되어 부풀어 터지는 것이 관측되었고 계란의 가열을 시도하였으나 급격한 가열로 파열되어 기술자가 상처를 입은 사고가 발생하였다. 그래서 안전성과 효율향상을 목표로 개방된 공간이 아니라 밀폐된 용기중에 마이크로파를 도입하는 방식이 고안되었다. 이렇게 하여 마이크로파 오븐이 탄생하고 이윽고 그것이 발전하여 가정용의 전자렌지가 되고, 터널형의 공업용 가열장치가 되어 고무가류, 식품 등의 건조, 냉동육의 해동 등 널리 실용화 되었던 것이다.

물질을 가열하거나 건조(탈수)하는 수단으로서 불, 열풍, 증기, 전열에 의한 적외선의 복사 등이 이용되고 있다. 이들은 물체의 외측으로부터 열을 가하여 물체의 표면을 가열하고 그 물체의 열전도에 의하여 서서히 내부까지 가열하는 방법으로 외부가열이라고 부른다. 이에 대하여 높은 주파수를 갖는 전계를 이용한 유전자열과 더 높은 주파수의 전자파

를 이용하는 마이크로파 가열에 있어서는 피 가열물 자체가 발열체가 되어 물질의 내부에서 가열이 이루어지기 때문에 내부가열이라고도 한다. 이러한 내부 가열의 경우 물체의 외부에 있어서의 산란하는 여분의 열이 거의 없고 원리적으로 아주 효율이 좋은 가열을 할 수 있다.

마이크로파 가열은 전자렌지로서 일반 가정에 보급되어 널리 알려진 기술이지만 식품의 가열 뿐만 아니라 최근에는 공업적인 면에서 많은 이점을 활용하여 응용의 범위가 넓어지고 있다.

여기서는 마이크로파 가열의 원리, 특징, 이점 등 기초이론 및 각종물질, 유전특성과 가열을 위한 장치 및 구성부품, 구체적인 응용에 등에 대하여 소개한다.

2. 마이크로파 가열의 기초이론

가. 마이크로파란 ?

전류에는 직류와 교류의 2종류가 있지만 일반적으로 마이크로파라고 칭하는 것은 주파수 300MHz 부터 30GHz의 교류의 범위에 붙여진 통칭이다. 따라서 마이크로파에서는 1초간에 3억에서 300억회나 전류의 방향이 변한다. 이와같이 교류의 주파수가 높아지면 전류는 도체중에서는 물론 절연물과 공간

* 농업기계화연구소 가공기계과

마이크로파 가열이론

에서조차 자유로히 흐르는 성질을 갖는다. 자유공간에 흘러나온 마이크로파는 전파라고 부르며 그 속도는 빛의 속도와 같이 매초 3×10^8 m이므로 주파수 f Hz의 전파의 파장 λ 는 다음식으로 주어진다.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^{10}}{f} \text{ (cm)}$$

표 1에 전파의 주파수 혹은 파장에 의한 전파의 명칭과 용도를 나타낸다. 마이크로파는 그 파장이 1cm에서 100cm에 이르고 있기 때문에 센치파라고도 부르는 일도 있으며 우리들이 전파로서 이용하고 있는 파중에서는 파장이 짧은 부류에 속하고 있다. 이 이하의 짧은 파장이 되면 서브미리파, 원적외선, 적외선을 거쳐 가시광선에 이른다.

표 1 전파의 명칭과 용도

주 파 수	파장(m)	명 칭		주요일반용도	공업용도
30 ~ 300kHz	$10^4 \sim 10^3$	LF	중 파	방 송	유 도 가 열
300 ~ 3,000kHz	$10^3 \sim 10^2$	MF	단 파	TV방송	유전가열 마이크로파가열
3 ~ 30MHz	$10^2 \sim 10$	HF	초 단 파	UHF, TV방송, 마이크로파통신, 레이다	
30 ~ 300MHz	10 ~ 1	VHF	극초단파 (마이크로파)		
300 ~ 3,000MHz	1 ~ 0.1	UHF			
3 ~ 30GHz	0.1 ~ 0.01	SHF			
30 ~ 300GHz	0.01 ~ 0.001	EHF	미 리 파	미리파통신	

이와 같이 마이크로파는 광에 가까운 파장이기 때문에 전자파의 성질외에 빛에 가까운 성질을 갖고 있기 때문에 다른 전자파와는 다른 이용의 길이 열려 있다.

또 마이크로파 대역의 파장은 파장이 길은 UHF에서의 텔레비전방송에서 가장 파장이 짧은 영역에서는 인공위성파의 통신, 또 전 영역에 걸친 레이다 등, 아주 넓은 범위에서 이용되어 가장 중요한 전파로

되어 있다. 그렇기 때문에 한정된 주파수의 대역범위를 혼란시키지 않고 유효하게 이용할 목적으로 국제적인 규정에 의하여 표 2와 같이 주파수의 할당이 되어 있다.

공업용 가열·건조용으로는 ISM (Industrial Scientific and Medical Use) 대역이 정해져 있지만 이 대역중 마이크로파 가열·건조용으로는 915MHz와 2.45GHz의 2종류의 주파수가 할당되어 있다.

표 2 ISM밴드(ISM Band)

주 파 수	할 당 지 역
13.56MHz ± 6.78kHz	전 지역
27.12MHz ± 160kHz	전 지역
40.68MHz ± 20kHz	전 지역
433.92MHz ± 0.2%	오스트리아, 포르투갈, 스위스, 독일연방공화국, 유고슬라비아
915MHz ± 25MHz	그린랜드, 남북아메리카
2,450MHz ± 50MHz	알바니아, 불가리아, 헝가리, 폴란드, 루마니아, 소련, 체코슬라바키아를 제외한 전 지역
5,800MHz ± 75MHz	전 지역
22,125MHz ± 125MHz	전 지역

나. 마이크로파 가열의 원리

금속과 반도체와 같이 전계내에서 자유로이 움직일 수 있는 전자를 갖는 도전체에 대하여 소위 절연체는 전계내에 놓으면 전자의 움직임(전류)은 생기지는 않지만 정(正)전하와 부(負)전하가 평행위치에서 변위하여 전하가 분리하는 분극현상이 생긴다. 이와 같은 성질을 갖는 물질을 유전체라고 부르고 있다. 이 분극현상이 높은 주파수의 전계에 의해 서로 되풀이 될 때 전계의 에너지를 점차로 잃어 버리면서 감쇠하면서 전반한다. 이 에너지의 감쇠는 유전체에 의해 흡수되어 유전체가 가열된다. 전계의 주파수가 마이크로파 대역에 있을 때 마이크로파 가열이라고 한다.

유전체에 있어서 그림 1(a)과 같이 그 내부에 있어서 일반적으로 플러스(+)의 이온과 그 부근에 속박되어 있는 마이너스(-)의 전자가 쌍을 이루고 있어 전체로서는 전계 제로(0)의 상태로 되어 있다. 그러나 유전체를 전계내에 놓으면 그림 1(b)와 같이 유전체의 곳곳에서 전기적 평형 상태로부터의 변위, 즉 분극이 생기어 이온과 전자의 쌍이 전계의 방향으로 정렬한다. 이와 같이 전계를 가함에 따라 쌍극자가 전계의 방향에 정렬하여 생기는 분극을 배향분극 또는 방위분극이라고 한다. 또 이 전계가 그림 1(c)와 같이 역으로 되면 이온-전자쌍의 방향도 역의 배열로 변한다. 이와 같이 하여 분극을 발생시키는 전계의 방향이 변하면 쌍극자는 회전하여 반전한다. 그러나 주파수가 큰 전계를 받으면 쌍극자는 주위의 분자와의 사이에 저항을 받아 전계의 속도에 충분히 추종할 수 없게 된다. 이 저항에 의한 마찰에 의하여 에너지가 소비되고, 소비된 에너지는 유전물질내에서 열로 변한다.

쌍극자의 반전의 시간적 지연은 전기적으로는 유전체가 저항성분을 갖는 현상이 된다. 이 때 유전체내에서 열로 변하는 전력손실 P는 다음 식으로 주어진다.

$$P = \frac{1}{1.8} f E^2 \epsilon \tan \delta \times 10^{-10} \text{ (W/m}^3\text{)}$$

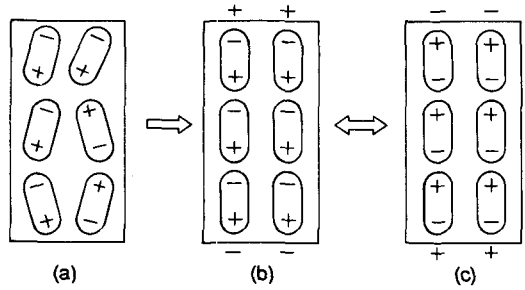


그림 1 마이크로파 전계하에서의 분자의 움직임.

여기서 f는 마이크로파의 주파수(Hz), E는 마이크로파 전계의 크기(V/m), ε과 tan δ는 각각 물질의 비유전율과 유전체 손실각(또는 유전역률)을 말한다.

이것을 매 시간당 단위체적에 대하여 발생하는 열량으로 환산하면

$$Q = \frac{1}{2.1} f E^2 \epsilon \tan \delta \times 10^{-8} \text{ (cal)}$$

이 된다. 따라서 발생하는 열량은 주파수에 비례하고, 또 손실계수(ε x tan δ)에 비례한다.

다. 마이크로파 가열의 특징

종래에는 신탄, 석유, 전열, 가스, 증기, 적외선 등의 열원을 이용한 외부 가열방식에 의하여 농수산물의 건조, 식품의 조리, 가공이 수행되어 왔다. 즉 이들 외부 열원으로부터 전도, 대류, 복사에 의하여 물체에 열에너지를 주어 가열하는 방식으로 열은 피 가열물체의 표면에서 내부로 전도에 의하여 전해진다. 따라서 피 가열물체의 품질을 변화시키지 않도록 표면온도를 억제하면 열이 식품의 속까지 도달하는 데에 상당한 가열시간을 필요로 한다. 한편 마이크로파 가열에서는 피 가열물체가 외부 열원없이 발열하는 특색이 있어 큰 물체에서도 표면 및 내부를 거의 동시에 가열할 수가 있기 때문에 식품의 품질을 손상없이 단시간에 가열·건조처리가 가능하다.

마이크로파 가열은 물체 자체가 발열체로 되는 가열방식이기 때문에 종래의 열 전도에 의한 외부가열에 없는 다음과 같은 특징이 있다.

(1) 급속가열

열풍과 같이 열 전도를 이용하는 가열법에 비하여 마이크로파 가열은 피 가열물 자체가 발열하기 때문에 열 전도에 의하지 않고 내부의 온도를 높일 수 있다. 이 때문에 가열에 요하는 시간을 크게 단축시킬 수 있고, 또 비교적 일정하게 온도를 올릴 수가 있다.

(2) 균일가열

외부 가열에서는 내외의 온도구배를 피할 수 없고 균일 가열하려고 하면 시간이 걸린다. 마이크로파 가열에서는 유전체내의 전기력선이 균일하게 발생하려고 하면 온도 상승도 일정하게 된다. 외부 가열에서는 외측의 온도는 높고 내측의 온도는 낮지만 마이크로파 가열에서는 내외의 발열량을 동일하게 할 수가 있다.

(3) 국부가열

외부 가열에서는 국부만을 가열할 수는 곤란한 경우가 많다. 국부에 열판을 대서 외부 가열할 경우는 온도를 올리는 데에 시간을 요하기 때문에 열 전도로 가열부분이 넓어지는 것을 피할 수 없다. 마이크로파 가열에서는 가열해야 할 부분에 전극을 대서 전기력선이 집중하도록 고안하면 좁은 범위에서도 가열할 수 있다. 가열시간이 짧기 때문에 가열부분의 넓이는 작다.

(4) 레벨링(Levelling)

물질중에 마이크로파 흡수가 큰 것이 있으면 그 부분의 발열이 크기 때문에 수분 분포가 일정하지 않는 물질을 건조하여 균일수분으로 하는 효과가 있다.

(5) 열 효율

마이크로파는 오븐속에 놓아둔 피 가열물만에 흡

수되고 주위의 벽(금속)과 공기를 가열하지 않기 때문에 당연히 열 효율이 높다. 따라서 작업환경의 개선에도 상당히 유용하다고 할 수 있다. 또 에너지를 필요 부분에 집중시킬 수 있기 때문에 열 효율이 높다.

(6) 기타

전술한 특징외에 마이크로파는 피 가열물의 음쪽 패인 부분에도 거의 균일하게 침투하여 가열하기 때문에 복잡한 형상이라도 비교적 균일하게 가열할 수 있다. 또 가열 전력의 제어가 용이하고 응답이 빠르기 때문에 작업의 개시, 종료로부터 가열의 온도조절 등을 모두 순식간에 행할 수 있다.

라. 마이크로파 가열의 이점

전술한 바와 같은 특징을 살려 공업가열의 열원으로서 마이크로파를 이용하면 다음과 같은 이점을 갖는 가열장치를 만들 수가 있다.

- (1) 가열건조공정의 자동화, 성력화가 가능함
- (2) 가열건조장치의 점유면적을 작게 할 수 있음
- (3) 공정시간의 단축으로 설비 및 재고를 최소화할 수 있음
- (4) 작업환경의 개선과 작업의 안정을 도모할 수 있음
- (5) 대기오염 등의 공해를 일으키지 않음
- (6) 가열상태의 재현성이 좋고 품질의 향상을 기대할 수 있음

마. 마이크로파 가열의 이용방향

마이크로파 가열은 각 방면에 걸쳐 이용되고 있지만 그 주요한 것을 들면 다음과 같다.

- (1) 식품의 발포(센베이, 스낵 등), 방부(식품의 곰팡이 방지), 살균, 건조(야채, 계란, 육류, 마카로니, 기타), 가열조리(생선목, 베이콘, 식품의 재가열), 해동, 탬퍼링 등
- (2) 곡류의 해충구제, 건조 등

(3) 고무, 합성수지의 가류, 발포성형, 중합고화 등

(4) 피혁 가공공정에 있어서의 건조

(5) 종이 및 직물의 염색 정착, 건조

(6) 목재의 건조, 접착, 휘가공

(7) 의료분야에 있어서 뇌내효소고정, 실험동물의 탈수, 건조

(8) 노재의 건조, 주형 건조

(9) 암반, 해저, 건조물 콘크리트의 파쇄

(10) 산업용 및 원자력관계 폐기물의 소각재용융 고화, 유리제조 등

바. 마이크로파 사용상의 주의사항

마이크로파는 많은 특색과 이점을 갖고 있지만 그 반면에 특성을 잘 이해하여 사용하지 않으면 충분한 성과를 얻을 수가 없다.

(1) 부하의 문제

마이크로파는 금속에는 흡수되지 않고 표면에서 전부 반사되고 말기 때문에 부하의 일부에 금속이 있으면 그 일부분은 전혀 가열되지 않는다. 이것은 특히 포장재료에 대하여 주의하지 않으면 안 되는 것으로 금속박판에 의한 포장과 금속분에 의한 인쇄 등은 피하지 않을 수가 없다. 또 가는 금속편이 있을 경우는 그 선단에 마이크로파 전계가 집중하여 방전을 일으키기도 하고 그 근방이 과열되기도 한다. 따라서 피 가열물내에 금속편이나 철사 등이 혼입되지 않도록 충분히 주의하지 않으면 안된다. 가열에 이용하는 용기와 컨베이어벨트 등도 금속은 부적절하다. 마이크로파를 투과하기 쉬운 플라스틱과 세라믹 등이 가장 적합하다.

가열장치는 가능한 한 피 가공물을 균일하게 가열하도록 고안되어 있지만 균일하게 가열되는 일이 적다. 따라서 가열장치에 회전날개 반사판(stirrer)을 장착하기도 하고 혹은 회전 원판(turn table)에 의해 피 가열물을 회전시키도록 고안되어 있다. 또 물품의 형상에 따라 특별한 금속치구를 부착하면 치구의 효과로 각 부의 온도가 균일하게 가열되어 양호한 결

과를 얻을 수가 있다.

또 전자렌지로 식품을 가열할 경우 식품의 양이 충분하면 렌지의 출력에 상당한 가열온도가 얻어지지만 식품이 양이 적을 경우는 출력만큼의 가열효과가 얻어지지 않는 수가 많다. 이것은 부하의 정합이 되어 있지 않기 때문에 발전기로부터 나온 마이크로파가 부하에서 반사되어 재차 발전기로 되돌아가기 때문에 충분한 출력이 부하에서 소비되지 않기 때문이다.

(2) 전파법상의 문제

전파법상에서는 통신의 방해가 되지 않도록 마이크로파 가열용 주파수대가 할당되어 있어(ISM주파수대) 이 주파수대에 대하여는 자유로이 사용할 수가 있고 공기중의 누설전력의 강도는 제한되어 있지 않다. 그러나 이들 전파를 발생시키는 발전기는 대부분의 경우 지정주파수 근방의 불요복사와 고주파 등의 스프리아스 방사를 포함하고 있는 수가 많다. 이들 스프리아스 방사는 일반적으로 ISM대를 벗어나 있으므로 통상의 누설전파와 똑같이 엄격히 제한되어 있다. 흔히 사용되고 있는 2.45GHz의 경우 그의 5배고주파는 바로 텔레비전 위성방송 파장대가 되기 때문에 수신장애를 일으킬 우려가 있다. 이 때문에 스프리아스방사에 대하여는 충분히 주의하지 않으면 안된다.

(3) 보건상의 문제

마이크로파 누설전력이 어느 정도 인체에 영향이 있는가는 아직 정확히 알려져 있지 않지만 근년 전자파의 인체에 대한 영향이 문제가 되기 시작하여 규제되어 있는 나라가 많다. 미국에서는 현재 10mW/cm²이 한도로 되어 있다.

3. 각종 물질의 유전특성

가. 유전특성 측정법

마이크로파 전계내에서의 피 가열물체는 유전손실에 의해 전력이 손실되어 가열된다. 마이크로파는

표면에서 침투하여 유전손실에 의하여 손실되면서 점차 내부로 침투하여 간다. 따라서 내부로 진행됨에 따라 마이크로파 전계강도는 약해져 발열량이 작아지기 때문에 유전손실이 큰 물질일수록 내부에의 가열이 곤란하기 때문에 마이크로파 가열에 있어서는 피 가열물의 유전특성을 아는 것이 중요하다. 또 마이크로파에 의한 가열을 하기 위해서는 목적으로 하는 피 가열물의 마이크로파 특성, 즉 손실계수의 값을 미리 측정하여 놓으면 마이크로파 가열의 적합·부적합과 난이가 추측되어 계획을 세우기 쉽다. 이때문에 목적물의 비 유전율(ϵ)과 유전체 손실각($\tan \delta$)을 측정하는 것은 중요하다.

마이크로파 영역에 있어서 유전 재료의 유전특성 ϵ 과 $\tan \delta$ 의 측정에 관한 방법은 지금까지 많이 보고되어 있지만 원리적으로는 투과법, 정재파법 또는 반사파법, 공진법, 섭동법 등으로 분류되지만 사용 주파수에 따라서 측정법을 선택하여야 한다.

(1) 투과법

투과법은 시료내를 투과하는 전자파의 위상과 감쇠량을 교정된 위상기와 감쇠기로 구하는 것으로 특히 파장이 짧은 마이크로파대에 적합하다.

(2) 정재파법(반사파법)

정재파법은 분포정 수선로에 있어서 종단임피던스가 선로의 특성 임피던스와 다를 때 선로에 생기는 정재파를 이용하여 ϵ 과 $\tan \delta$ 를 구하는 방법으로 ϵ 과 $\tan \delta$ 이 큰 고체, 액체, 기체에 이용된다.

(3) 공진법

전기회로의 공진현상을 이용하여 공진회로소자의 일부를 구성시킨 시료의 ϵ 과 $\tan \delta$ 를 구하는 것으로 저손실 시료의 측정에 적합하고 수십 MHz에서 수십 GHz에 걸친 넓은 범위의 주파수 범위에서 이용된다.

(4) 섭동법

파장에 비하여 시료의 치수가 극히 작은 경우에 적용되는 방법으로 시료 삽입에 의한 공진기의 공진

주파수 및 전기용량의 변화로부터 ϵ 과 $\tan \delta$ 을 구하는 방법으로 전술한 방법에 비하여 정도는 떨어지지만 ϵ 과 $\tan \delta$ 의 산출법이 간단하고 시료가 적으며 특히 투자율의 측정도 가능하여 최근 이용되고 있다.

비교적 낮은 주파수에 있어서의 유전특성의 측정은 결국 콘덴서를 만들어 이들의 등가병렬 용량과 등가병렬 콘덕턴스를 측정하는 것으로서 이 방법은 직류에서 100MHz 정도의 고주파수까지 적용되지만 더욱 더 고주파수로 되면 콘덴서는 정의 할 수 없게 된다. 그래서 유전체가 전송선로의 특성에 미치는 영향을 이용하여 측정하는 분포 정수가 이용되고 주파수가 높아짐에 따라 전송 선로는 동축선에서 도파관으로 변한다.

곡물의 유전 특성의 측정에 있어서 많은 연구자가 이용한 측정방법을 정리하면 표 3과 같다. 표 3에서와 같이 저주파수에서는 샘플홀다는 동축선이 이용되고 측정기구는 Q메타 혹은 RX메타 등이 이용되지만 고주파 범위에서는 도파관과 정재파 측정기가 이용된다.

나. 각종 물질의 유전 특성

(1) 유전율(ϵ)과 유전역율($\tan \delta$)

일반적으로 발열량은 ϵ 과 $\tan \delta$ 의 적에 비례한다. ϵ 과 $\tan \delta$ 은 물질에 따라서 결정되는 값이며 이 값이 클수록 발열하기 쉽기 때문에 $\epsilon \times \tan \delta$ 를 손실계수라고 하며 고주파 유전가열의 적부를 결정하는 중요한 요소이다. 그러나 엄밀히 말하면 ϵ 과 $\tan \delta$ 는 물질에 따라 일정한 값이 아니며 물질의 상태 즉 함수율, 온도, 밀도에 따라 다르며 주파수에 따라서도 다르다.

일반적으로 손실계수가 큰 경우에는 주파수와 전압이 비교적 낮아도 충분한 발열을 기대할 수 있지만 함수율이 낮고, 밀도가 작은 식품은 손실계수가 작기 때문에 급속가열을 위해서는 주파수와 전극 전압을 높여야만 한다. 농산물의 손실계수는 그 조성이 복잡하여 명확하게 제시할 수는 없지만 다른 유전체의 손실계수에 비하면 비교적 크다고 할 수 있

표 3 곡물의 유전특성의 측정방법

Frequency	Electrical Instrument	Sample Holder	Reference
250~500Hz, 1, 2, 5, 10, 20kHz	General Radio Type 1608-A Impedance Bridge	Coaxial	Corcoran et al.(1970)
50~200kHz, 1, 5, 20, 50MHz	Boonton 160-A Q-meter	Coaxial	Nelson et al.(1973)
50~250MHz	Boonton 250-A RX-meter	Coaxial with open-circuit termination	Jorgensen et al.(1970)
200~500MHz	General Radio Type 1602-B Admittance Meter	Coaxial	Stetson and Nelson(1970)
30MHz to 1 or 2GHz	Time-domain Reflectometer	Coaxial with short-circuit termination	Kwok et al.(1979)
1GHz	Rohde & Schwartz Type LMD Slotted Line, Signal Generator and Null Indicator	Coaxial(short-circuited) (special design)	Nelson(1973)
2.45, 9.4GHz	Marconi Slotted Line Hewlett-Packard Slotted Line	Transmission line filled with sample and terminated with matched load	Chugh et al.(1973)
5.4GHz	Rohde & Schwartz Type LMC Non-slotted Line, Signal Generator, and UBK Indicator	Coaxial(special design)	Nelson(1973)
12.1GHz	Rectangular-wave guide X-band system	Straight wave guide section and plunger	Nelson(1972), Gorakhpurwalla et al. (1975)

표 4 각종물질의 유전율, 유전역율 및 손실 계수

물 질	유 전 율 (ϵ)	유 전 역 율 ($\tan \delta$)	손 실 계 수 ($\epsilon \cdot \tan \delta$)
물(3,000MHz)	77	0.15	11.55
얼음(-12℃, 2,450MHz)	3.2	0.00095	0.003
돼지고기(-12℃, 2,450MHz)	6.8	1.2	8.16
쇠고기(-12℃, 2,450MHz)	5.0	0.15	0.75
감자(2,450MHz)	4.5	0.2	0.9
완두콩(2,450MHz)	2.5	0.2	0.5
시금치(2,450MHz)	13.0	0.5	6.5
소맥분(함수율 8%, 4MHz)	2.6	0.03	0.078
목재(경건재)	3	0.03	0.09
목재(연건재)	5	0.065	0.325
생 고 무	2.3~2.6	0.012	0.028~0.03
폴리에틸렌	2.3	0.0005	0.012
염화비닐	3~5	0.025~0.05	0.075~0.25
플리스치롤	2.6~3.0	0.0002~0.0004	0.0012~0.005

다. 이것은 농산물중에 포함되어 있는 수분의 영향에 의한 것으로 물자체의 손실계수가 상당히 크기 때문이다. 농산물을 가열할 경우, 가열에 의하여 수분이 증발함에 따라서 손실계수가 감소하기 때문에 발열량도 점차 감소하여 과열되는 경우가 적다.

표 4에 각종 물질의 유전율, 유전역율 및 손실계수를 나타낸다. 농산물의 손실계수는 함수율이 높을수록 증가하며, 온도 및 밀도의 증가에 따라서도 증가한다.

(2) 마이크로파의 침투깊이

마이크로파 가열은 피 가열물의 형상과 크기에 제약을 받는 일은 적지만 마이크로파가 침투하는 깊이에 대하여는 충분한 주의가 필요하다. 일반적으로 마이크로파가 피 가열물의 표면에 조사되어 표면으로부터 침투하여 유전손실에 의해 흡수되어 점차로 세력이 약해지면서 내부로 침투하여 가기 때문에 내부로 갈수록 전계는 약해져 손실계수가 큰 물질일수록 내부까지의 가열이 어렵게 된다. 즉 손실이 상당히 클 경우(발열량이 클 경우) 마이크로파는 어느 깊이 이상에는 도달할 수 없게 된다. 마이크로파가 물질속으로 침투하는 깊이 $D(m)$ 는 물체에 조사된 마이크로파의 전력밀도가 물체의 표면에 있어서의 값과 비교하여 반분으로 감쇠하는 거리로 표시하며, 파장 및 물질의 유전 특성에 지배되며 다음식으로 나타낸다.

$$D = 0.347 \times (\lambda / 2\pi) \{2 / (\epsilon (1 + \tan \delta)^{1/2} - 1)\}^{1/2} (m)$$

여기서 λ 는 파장(m), π 는 원주율이다. 마이크로파 침투깊이는 파장이 짧을수록(주파수가 높을수록) 또 피 가열물체의 유전율과 유전역율이 클수록 알아지기 때문에 손실계수가 크고 두꺼운 물체의 경우에는 표면과 내부에서 큰 온도차가 생길 우려가 있다.

동일 주파수를 이용하여 동일 물체를 가열할 경우 마이크로파가 침투하는 깊이가 피 가열물체의 상태 즉 온도, 함수율, 밀도 등에 의하여 다르나 일반적으로 균일가열을 할 수 있는 한계는 마이크로파 침투깊이의 2배 정도로 이 이상으로 큰 것(두꺼운 것)은 중앙부까지 전파되는 마이크로파의 에너지가 작아져 표층부와 중앙부 사이에 온도차가 생겨 균일가열이 어렵게 되어 마이크로파 가열을 수행할 경우 침투 깊이는 중요한 변수이다.

4. 마이크로파 가열장치

가. 가열장치의 구성

마이크로파 가열장치는 마이크로파를 발생하는 발전장치와 피 가열물에 마이크로파를 조사하는 가열부(일종의 가열로)로 되어 있다. 그림 2에 마이크로파 가열장치의 기본구성도를 나타낸다. 발전부와 가열부의 사이에는 아이소레타, 마이크로파 분배기, 파워모니터, 정합기 등의 부대기기가 필요에 따라 설치되어 도파관에 의하여 접속되어 있다.

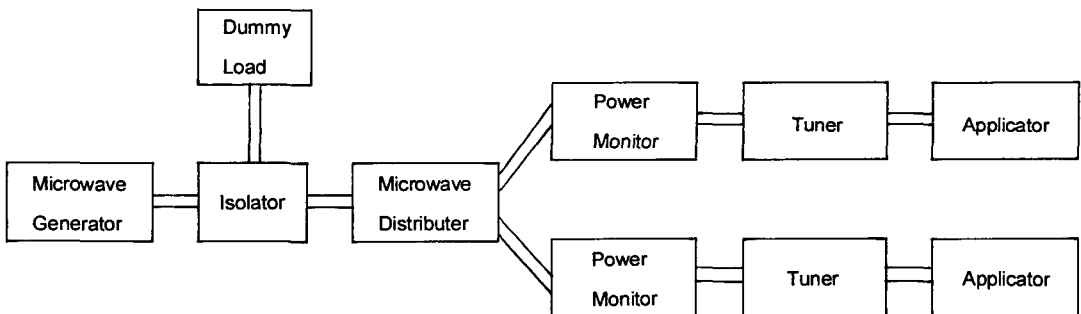


그림 2 마이크로파 가열장치의 기본구성도.

(1) 마이크로파 발생장치(Microwave Generator)

마이크로파의 발생원으로서 통상은 마그네트론(magnetron)을 이용하고 있지만 특히 대전력을 필요로 할 경우는 대전력의 크라이스트론(clystron)이 이용된다.

(2) 아이소레이타(Isolator)

발전 장치로부터 발생된 마이크로파의 전력은 도파관을 경유하여 가열부로 유도되어 그 곳에서 흡수되지만 피 가열물의 마이크로파 흡수양상에 따라 도파관에서 가열부를 본 임피던스가 변하여 마이크로파 전력은 전부가 가열부에서 흡수되지 않고 일부는 반사되어 발전장치로 되돌아 온다. 이것을 발전부측 마그네트론에 그대로 되돌려 보내면 발전에 지장을 초래한다. 아이소레이타는 가열부에서 반사하여 온 마이크로파 전력을 발전부로 되돌려 보내지 않고 다른 방향으로 유도하여 그 곳에서 흡수하도록 하는 부품으로 서큘레이타(Circulator)와 더미로드(Dummy Load)로 구성되어 있다.

(3) 파워모니터(Power Monitor)

발전부로부터 가열부로 향하는 마이크로파 전력과 가열부에서 부하의 변동 등에 의한 전기적 부정합 때문에 발전부로 향하여 반사되어 오는 전력파를 따로 따로 측정하는 모니터로 마이크로파 출력의 제어 등에 불가결한 것이다.

(4) 튜너(Tuner)

정합기, 임피던스 조정기라고도 하며 전원, 발전기의 임피던스와 전송선을 포함한 부하의 임피던스가 일치하지 않으면 부하의 정합이 잡히지 않아 입사전력은 반사되어 전원측으로 되돌아가 가열효율이 저하할 뿐만 아니라 전원을 파손시킬 우려가 있다. 이러한 경우 부하외에 임피던스를 변화시켜 합성시킨 전임피던스의 정합을 잡으면 마이크로파 전력은 부하에 충분히 소비되도록 된다. 이와같이 외부에 부가하여 임피던스를 변화시키는 장치를 튜너라고 한다.

(5) 마이크로파 분배기(Microwave Distributer)

1대의 발전장치로부터 발생한 마이크로파 전력을 2분하여 가열부로 유도하기 위한 부품이다.

나. 마이크로파 가열부의 종류

가열부는 일종의 爐로 피 가열물의 재질, 형상, 가열의 목적 등에 따라 로에 대한 각종의 고안이 되어 있다. 실용면에서는 열풍, 적외선, 수증기 등을 병용하여 이용하는 것, 또 오븐내를 진공 혹은 감압으로 하는 등 피 가열물의 상태와 가열의 목적에 따라 여러 방법으로 조합하여 보다 효율이 높은 가열이 이루어지도록 하고 있다.

(1) 상자형로(Oven)

상자형의 오븐은 가장 대표적인 것으로 가정용 전자렌지에 이용되고 있는 것이다. 그림 3(a), (b)에 배치식(Batch Type)과 콘베이어식(Conveyor Type)의 상자형로의 개념도를 나타낸다. 이 두 방식 모두 비교적 대형의 블록상 피 가열물을 대상으로 하는 경우에 많이 이용된다. 콘베이어식 오븐의 경우는 길이를 이용하여 분말상에 가까운 물질을 가열하는데 적합하다. 배치식 오븐은 다량의 물질을 장시간 처리하는데 적합하다. 한편 콘베이어식 오븐은 피 가열물이 콘베이어로 반송되면서 가열 처리되므로 연속생산이 가능한 로이다. 또 배치식과 콘베이어식의 조합에 의한 가열방식도 이용되고 있다.

오븐 설계상 가장 중요한 것은 피 가열물을 균일하게 필요한 온도까지 승온시키는 것이나 물질의 손실계수와 침투깊이의 영향 및 오븐내의 마이크로파 전력 분포의 불균일에 의해 가열균이 생기는데 마이크로파 전력의 불균일에 의한 원인이 가장 커 마이크로파 전력분포의 균일화가 실용면에서는 기술의 하나의 포인트이다.

오븐내에의 마이크로파 공급은 통상 도파관을 이용하지만 이 방식은 1개소에서의 공급으로 어느 정도의 불균일한 전력 공급이 되지 않을 수 없다. 이러한 불균일한 전력공급을 피하기 위해서는 분배기에 의하여 다 분할하여 다수의 도파관으로 오븐의 여러

곳에 공급하는 방법을 채택하고 있다. 이것은 유효한 방법이지만 비용이 많이 들어 마이크로파 공급부가 사이에 스타라(금속의 마이크로파 반사판을 쉘 모양으로 하여 회전하도록 한 것)를 설치하여 오븐내에 전력을 교반하여 공급하는 방식과 회전식의 테이블을 이용하여 피 가열물을 오븐내에서 이동시키면서 가열하는 방식이 이용되고 있다. 콘베이어에 의

한 피 가열물의 이송도 균일가열에 상당히 유효하다. 마이크로파는 금속중에 갇혀 외부로 새어나오지 않지만 약간의 간격이라도 있으면 공진에 의해 다량의 마이크로파 전력이 오븐 밖으로 방출되는 일 있다. 배치식 오븐의 문에서 새어나오지 않도록 충분히 주의하여 설계·제작할 필요가 있다.

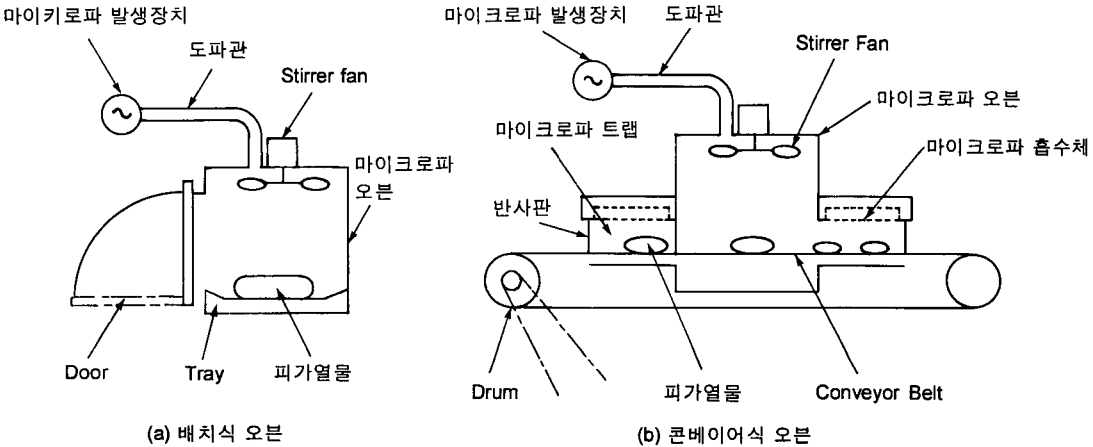


그림 3 상자형로(오븐)의 개념도.

콘베이어식 오븐에 있어서는 피 가열물을 연속적으로 처리할 목적으로 하고 있기 때문에 반입, 반출부는 항상 개방되어 있다. 따라서 이 개구부에서의 전파의 누설을 완전히 방지할 수는 없지만 안전 기준치 이하로 하는 것은 그다지 곤란하지 않다.

(2) 도파관형오븐

피 가열물이 판상으로 체적에 비하여 표면적이 큰 형상의 물질은 가열속도에 비하여 방열량이 많아 쉽게 온도가 올라가지 않으며 오븐내의 마이크로파 전력의 이용율도 좋지 않다. 이와 같은 형상은 얇은 범위에 전력을 집중시켜서 효율 좋게 가열하기 위한 로가 여러 종류 고안되어 있다.

도파관형 오븐에는 슬롯(Slot) 도파관형로, 도파관절곡로, 라다(Ladder)형 가열로 등이 있으며 슬롯도파관 형로는 도파관내의 전계가 최대가 되는 부분을 피 가열물을 연속적으로 통과시켜 가열하는 방

식이고, 도파관 절곡로는 슬롯부를 중심으로 하여 도파관을 여러 차례 절곡하여 그 사이를 피 가열물을 통과시켜 마이크로파 흡수 효율을 높여 가열하는 방식이다. 또 라다형 가열로는 도파관에 연속적으로 규칙적인 슬롯을 통하여 외부로 새어 도파관의 표면 영역에 갇혀서 전반하는 마이크로파 전력을 이용하여 도파관의 외부 표면부에서 가열하는 방식이다.

(3) 기타 가열로

안테나를 도파관의 선단에 부착하여 마이크로파를 피 가열체에 조사하는 방법도 있으며 이는 마이크로파를 집중적으로 피 가열물에 조사할 수가 있는 장점이 있지만 전파가 새는 것을 방지하기 위한 어떠한 방지책을 취하지 않으면 안된다. 또 도파관의 측면에 적당한 슬릿을 설치하여 선상 또는 면상으로 마이크로파 조사원을 만들어 조사하는 가열로도 있다.

이상으로 대표적인 가열로를 소개하였지만 실용 면에서는 마이크로파와 열풍, 적외선, 수증기 등과 병용하여 이용하는 것 또 오븐내를 진공 혹은 감압으로 하는 등 피 가열물의 상태, 가열의 목적에 따라 여러 가지 수단을 조합시켜 보다 효율이 좋은 가열 방법을 고안하여 계속 개량되어야 할 것이다.

다. 마이크로파 가열의 응용 예

마이크로파가열의 응용례중 대표적인 것 몇 개를 소개한다.

(1) 식품산업에의 응용

식품에의 응용으로서의 생식물의 가열가공이 가장 일반적이지만 가정용으로 이용되는 전자렌지와는 달라서 공업적으로는 단순한 가열을 단시간에 수행하는 것이 경제적으로 유리하다고는 할 수 없다. 그래서 마이크로파 가열의 특징을 충분히 발휘할 수 있는 것이 아니면 경제적이 못 된다. 이와 같은 특징이 있는 가열로서는 다음과 같은 예를 들 수 있다.

(가) 살균, 방부를 위한 가열

(나) 냉동식품의 해동을 위한 가열

(다) 보존, 건조식품을 만들기 위한 가열 등 으로 이들에 대하여 상세히 설명한다.

(가) 살균, 방부

마이크로파에 의한 살균과 방부는 마이크로파 전계에 의한 특수한 효율이 작용하기 때문이라는 논의도 있지만 통상의 가열에 의한 살균과 변함이 없다고 생각된다. 그러나 외부 가열에 의한 방법에 비하여 상당히 단시간내에 전체를 소정의 온도까지 올릴 수 있기 때문에 세균 등의 환경의 급격한 변화를 줄 수가 있다. 또 외부에서의 열 전도에 의한 가열에 비하면 균일한 온도로 승온시킬 수 있기 때문에 살균을 위하여 품질을 변화(노화)시키지 않고 가열할 수 있다. 이것이 마이크로파에 의한 가열의 큰 효과이다.

더욱이 최종적으로 포장을 한 후에 포장상태로 살균과 방부처리를 할 경우도 있다. 실제로 여러 종류

의 과자류를 마이크로파에 의한 가열처리를 한 것과 하지 않은 것을 만들어 같은 환경에서 장시간 보존하여 저장효과를 비교한 결과 마이크로파 가열처리를 행함으로써 2~3배 장시간 보존이 가능하였다.

(나) 냉동식품의 해동

수산물, 축산물의 냉동화와 그 유통기구의 발달에 따라 이들 해동이 중요한 과제로 되어 있다. 동결에 관하여는 급속한 동결에 의해 품질, 선도를 충분히 유지시키는 기술이 확립되어 있지만 해동의 기술은 구명되어 있지 않다. 현재 대부분의 경우 자연(혹은 일정 온도)에 방치하는 방법과 물에 의한 해동과 같은 방법이 이용되고 있지만 이들 방법으로는 해동에 요하는 시간이 길고 또 경우에 따라 품질의 열화를 가져올 우려가 있다.

이와 같은 현상에 있어서 마이크로파 전력을 이용한 해동은 전면적으로 유효하다고는 할 수 없지만 방법에 따라서는 획기적인 해동성능의 개선을 가져오는 수단으로서 기대할 수 있다. 그 장점으로서는

① 해동에 요하는 시간이 짧다.

② 복잡한 형상과 또 골판지포장과 플라스틱필름 등의 포장상태에서도 해동처리가 가능하다.

③ 작업장소에 불문하고 작업환경과 제품자체를 위생적으로 유지한 채 해동할 수 있다.

등을 들 수 있다. 그러나 마이크로파에 의한 해동의 어려운 점은 액화한 수분과 동결하여 있는 수분과의 사이에 전력의 흡수에 큰 차가 있는 것이다. 일단 액화한 부분은 급속히 마이크로파 흡수율이 크게 되어 가속적으로 고온이 된다. 이와 같은 국소적인 온도상승을 막기 위해서는 간격을 두고 간헐적으로 가열하고 내부의 열 전도에 의해 온도의 균일화를 꾀하는 방법이 이용되고 있다. 해동 종료시의 식품의 온도는 통상 -3°C 전후로 한다. 이 정도의 온도가 절단과 슬라이스에 적합하다고 한다.

(다) 식품 건조에의 응용

마이크로파 가열에 의한 급속한 가열은 건조식품의 제조에도 큰 효과를 발휘하고 있다. 특히 풍미의 열화를 최소한으로 제한하는 등의 장점은 신속처리

시간과 함께 공업적인 대량 생산에 유효하다. 또 인스턴트 식품에 적용할 경우 식용시의 복원의 품질이 현저하게 개선되는 경우가 많다.

대규모 보존 식품과 인스턴트 식품의 생산에 감압 건조와 동결 감압건조가 이용되고 있지만 건조를 촉진시키기 위한 열원으로서 마이크로파 가열이 상당한 효력을 발휘한다.

기타 식품에의 응용으로서의 생선목 제품의 가공 등에도 이용되고 있어 미각상의 특수한 효과를 얻는 예도 있다. 또 쌀을 원료로 한 과자의 가공에 이용하면 고속으로 가공할 수 있으므로 양산에 상당한 효과를 발휘한다.

(2) 접착재 등의 건조에의 응용

일반적으로 접착재의 건조와 고화에는 장시간 방치해야 하지만 생산 공정상 방치시간을 단축하는 것은 재고량의 감소 등에 중요한 문제이다. 마이크로파 가열에 의한 접착재의 건조와 고화의 고속화는 적용 가능한 경우에는 상당히 효과가 있는 경우가 많다.

목재의 성형 합판을 위한 접착 재료의 건조와 주물용속재료의 건조, 경화등에 마이크로파 가열이 상당히 유효하다는 것은 잘 알려져 있는 일이다. 또 여러겹으로 된 종이를 만들기 위하여 이용되는 풀의 건조는 특수 도파관형 가열로와의 조합에 의해 작은 마이크로파 전력을 유효하게 건조에 활용하여 고속도로 건조를 가능하게 한다.

(3) 요업에의 응용

요업에 있어서 점토의 건조도 자연방치(또는 고온 방치)에 의한 방법이 이용되어 장시간의 공정시간을 요하는 것이다. 여기에 마이크로파 가열을 이용함으로써 이 공정을 대폭으로 단축할 수 있다. 그러나 마이크로파의 에너지는 고가이어서 전면적으로 마이크로파로 가열, 건조시키는 것은 대단한 일이다. 실제로는 마이크로파 전력과 고온 분위기와와의 조합 등을 고안하여 4계절을 통하여 공정시간의 균일화를 도모하는 등의 잇점을 살려 가격과 효과와의 최적조건을 구명 할 필요가 있을 것이다.

(4) 목재제품의 가열 가공

목재의 휨가공을 위하여 마이크로파 가열을 이용하여 프레스 성형하는 방법은 흥미있는 응용의 일 예이다. 목재의 휨가공에 마이크로파를 이용하는 특징은 주로 다음과 같이 고려된다.

① 리그닌, 헤미세로로스의 난화온도까지 온도를 단시간에 상승시킬 수 있다. 즉 마이크로파 가열방식은 내부 가열방식이기 때문에 목재 자체를 직접 발열시킬 수가 있어 단시간에 종래의 방법으로는 실현할 수 없는 큰 에너지를 재료에 공급할 수가 있다.

② 결합수의 감소 과정에 있어서 함수율 분포가 중심부 보다 주변부에서 높게 되어 가공상 문제가 되는 재료의 쪼개짐 방지에 큰 효과가 있다. 이것은 마이크로파 가열을 할 경우 재료의 온도 분포가 표면보다 중심부가 고온이 되어 재료 내부의 증기압이 증대하고 재료중의 물이 수증기의 형태로 외부로 향하여 이동하기 때문이다.

③ 가열작업의 간략화와 작업환경을 개선할 수 있다. 마이크로파 장치는 거의 대부분이 전기적 제어에 의해 운전가능하기 때문에 누구라도 조작할 수 있으며 간단한 조작으로 가열조건을 즉시 설정할 수 있다. 또 기본적으로는 재료 이외는 가열되지 않기 때문에 쓸데없는 에너지를 소비하는 일이 없다.

이와 같은 특징을 갖는 마이크로파 가열 공정으로서는 함수율이 높은 상태에서 마이크로파를 조사하면서 건조과정에서 변형을 증대시키면 좋다. 난화전처리, 휨가공 및 건조에 의한 변형을 동시에 수행하기 위하여는 프레스형 마이크로파 가열장치가 편리하다.

(5) 폐기물 등의 처리에의 응용

산업폐기물은 그 중에 유해 물질을 포함할 경우 폐기후의 유해물질의 방출 등을 방지하지 않으면 안 된다. 여러 폐기물중에서 소각할 경우 마이크로파를 이용하여 그 재를 용융, 고화하는 방법이 폐기물 처리의 이상적 방법으로서 주목되고 있다. 용융하여 유리상으로 고화하여 그 속에 유해물질을 넣을 뿐만 아니라 폐기물 전체의 용적도 대폭으로 작게 할 수 있다. 이 減容의 특성은 원자력 관계의 폐기물의 처

리기술로서 아주 유효한 것이다.

참 고 문 헌

5. 결 론

마이크로파 가열에 대한 개요와 약간의 응용예에 대하여 설명하였으나 마이크로파의 각종 특징을 갖는 가열 방법으로 단순히 열원으로서 이해하지 말고 전술의 특징을 살린 이용 방법을 검토함으로써 금후 자동화, 성력화, 환경개선 및 제품의 품질향상과 신제품 개발의 넓은 응용면이 있는 것으로 생각되어 이미 이러한 목적으로 많은 마이크로파 가열장치가 이용되고 있다.

마이크로파 응용장치는 현재 식품가공 분야에서부터 원자력 관계에 이르기까지 광범위한 산업분야에 정착하고 있지만 금후 용도가 발전 확대하여 나갈 것으로 기대된다.

1. 堀 克彦. 1986. 工業用電氣加熱. (財團法人)省エネルギー-センタ-
2. Mohsenin, Nuri N. 1984. Electromagnetic Radiation Properties of Foods and Agricultural Products. Gordon and Breach Science Publishers. 401~487
3. Nelson, S. O. 1973. Microwave Dielectric Properties of Grain and Seed. Trans. ASAE. 16(4), 902~905.
4. Nelson, S. O. 1982. Factors Affecting the Dielectric Properties of Grain. Trans. ASAE. 25(4), 1045~1049, 1056
5. 紫田長吉郎. 1986. 工業用マイクロ波應用技術. (株)電氣書院