

밀리미터파(Millimeterwave) 작용원리와 응용범위

금 준 석

지역특화산업연구단

Principle and Application of Millimeterwave

Jun-Seok Kum

Regional Food Industry Research Group

마이크로파(Microwave)는 주파수 300MHz~300GHz(파장: 1mm~1m) 사이인 전파들을 총칭하며, 이중 30~300GHz 주파수대를 밀리미터파(millimeterwave)라 한다. 원래 마이크로파 기술은 1934년에 비행기 탐색을 위한 레이더에 처음 적용되었으며, 2차 세계대전이 끝난 직후인 1946년에 처음으로 식품을 조리하기 위한 새로운 장치에 응용되기 시작하였다. 최초의 식품응용기기는 미국의 제네랄 일렉트릭 회사가 제작한 마이크로파 오븐으로 당시에는 주로 소시지나 햄버거, 샌드위치 등을 데우는 목적에 이용되었다. 최근에는 밀리미터파(millimeterwave) 30~300GHz 전자기 진동, 초고주파에 대한 관심이 집중되면서 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

식품의 마이크로파 응용은 300MHz와 300GHz사이의 주파수대에서 발생하는 무수히 짧은 파장의 주파수가 식품 물질에 흡수되면서 진동열이 발생하는 원리에서 비롯되었다. 이 때

허용된 주파수는 사용 목적에 따라서 각 나라마다 조금씩 다르며 주로 $915 \pm 25\text{MHz}$ 와 $2450 \pm 50\text{MHz}$ 를 많이 사용하고 있다. 주파수는 산업계, 과학계, 의료계(industrial, scientific, and medical USE-ISM frequency)를 위해 Federal Communications Commission(FCC)에 의해 배정된다. 그 동안 세계적으로 수많은 응용기기가 식품용으로 개발, 보급되어 왔으나 마이크로파를 이용한 식품 가공의 측면에서는 아직도 연구하고, 개척해야 할 영역이 수없이 남아 있기 때문에 식품의 마이크로파 분야는 감히 초기 단계라 해도 과언이 아니다. 그만큼 미래의 식품 분야에서 마이크로파 응용에 거는 기대는 크다고 하겠다. 특히 식품공학 분야에서 마이크로파 가공에 응용될 수 있는 단위 조작의 영역은 넓은 편이며 이들 영역은 단독 또는 혼합적으로 작용하여 마이크로파 가공을 더욱 유용성 있게 만들어 주는 것이다.

Wave Energy 란 무엇인가

돌을 표면이 잔잔한 호수에 던졌을 때 표면을 가르면서 한 지점으로부터 밖으로 퍼져 나오는 물결을 발견할 수가 있을 것이다. 또한 우리가 볼 수는 없지만 표면 밑이나 위에서 나오는 또 다른 파가 있다는 것을 그들의 상대 효과를 발견함으로써 알 수가 있다. 이러한 모든 것들을 통틀어 발산(radiation) 이라고 정의하며 파(wave) 또는 입자들의 형태로 에너지를 발산하는 과정을 가리킨다. 이러한 파들은 호수 표면의 물결처럼 한 점에서 바깥쪽을 향해 퍼져 나간다. 또한 속도는 빛의 속도로 1초당 186,282 miles 의 속도로 퍼져 나감과 동시에 광자(photon) 라고 불리는 작은 에너지를 동반하여 진동을 하게 된다. Radiation 에는 다음과 같이 2가지 종류로 나뉘어진다.

표 1. Radiation 종류

Ionizing	Non-Ionizing
x-ray	radio waves
gamma rays	microwaves
cosmic rays	infra-red waves
ultra-violet rays	

두 종류의 차이점은 ionizing radiation은 온도의 증가가 없거나 아주 미비하여 화학적 변성 정도의 변화만 일으키며 non-ionizing radiation은 온도의 증가를 가져오게 된다.

발열파(radiant waves)는 그들의 파장(wavelength)과 진동 주파수(frequency of vibration), 즉 1초 동안의 cycle 수에 의해 특징지어진다. 즉, 주파수가 증가할수록 파장은 짧아지게 된다. 마이크로파(microwave)는 1초에 수백만 번의 진동을 하게 되며 또한 매우 높은 주파수를 갖게 된다. 따라서 밀리미터파는 매우 짧은 파장을

가지게 된다. 마이크로파의 에너지는 마이크로파의 주파수에서 진동되어서 생긴 에너지를 가지고 빛의 속도로 움직인다. 이러한 과정에서 어떤 물질이 마이크로파를 흡수하게 되면 온도의 상승으로 나타내어진다.

현대 산업에 있어서는 가열에 의해 물질의 물리적, 화학적 성질이나 기계적 성질을 바꾸어서, 소재를 요구하는 성질이나 모양에 가깝게 가공해서 제품을 만들고 있으며, 일반적으로 물건을 만드는 과정에서 대개의 경우 가열과 건조를 목적으로 하는 공정이 있다. 가열을 하는 방법으로는 증유나 가스의 연소에 의한 불꽃이나 온풍, 증기 혹은 전열등 적외선의 복사열이 이용되어 왔다. 이것들은 모두가 피가열체의 외측으로부터의 열원에 의해서 물체의 표면을 가열, 그 물체의 열전도에 따라 서서히 내부까지 가열되어지는 방법이다. 일반적으로 이 가열 방법을 외부 가열이라 한다. 이에 반해 마이크로파 가열은 유전체 손실에 의한 발열을 유효하게 이용하는 것으로 피가열물체가 발열체로 되어 물체 내부로 부터 가열이 되어지기 때문에, 내부 가열 또는 직접 가열이라 하고 있다. 이러한 내부 가열 방식은 일반적으로 열효율이 아주 높고 또 짧은 시간에 가열 할 수가 있는 것이다.

마이크로파를 이용한 물체의 가열은 물체에 직접 가열되는 현상이 아니고 공간을 통해 마이크로파를 방사하는 방법으로 물체에 열을 발생하게 된다. 전자파는 금속의 경우에는 표면에서 반사가 일어나고, 금속이 아닌 유전체의 경우는 전자파가 내부로 투과되어 전자파의 전계 작용에 의해 내부의 하전체인 전자나 원자핵 등을 이동시킨다. 유전체의 경우 내부의 하전체들이 속박되어 있으므로 자유로이 이동하는 것이 아니라 전계방향으로 변위를 일으킨

다. 이러한 현상을 분극이라 하고 물질 내부에 속박되어 있는 하전체의 종류에 따라 분극의 종류도 달라진다. 전자 분극은 원자를 구성하고 있는 정전하의 원자핵과 그 주위를 회전하고 있는 부전하의 전자가 외부전계의 영향으로 편향되는 분극을 말한다. 즉, 원자 분극은 분자를 구성하고 있는 각 원자가 외부전계로 인하여 원자간 간격이 변위되는 분극을 말하며, 배향분극은 2종 이상의 원자가 결합한 분자인 쌍극자의 경우 외부전계에 의해 그 방향으로 쌍극자가 정렬되는 것을 말한다. 따라서 각종 분극이 전자파의 전계에 따라 반복 운동 즉 진동이나 회전이 발생한다. 즉 전계가 가해지면 전기적 평형 상태에서 전계방향에 따라 분극 현상이 반복 발생한다. 분극 운동이 외부전계에 의해 반복적으로 일어날 때 분자 내의 마찰에 의해 열이 발생한다. 각 분극의 특성 주파수에서 전자 분극은 자외선 영역까지, 쌍극자분극은 밀리미터파 영역까지 갖는다. 즉 각종 분극에 대해 열이 발생하는 주파수 영역이 다르다.

마이크로파의 가열 유전체 손실각원리는 금속이나 반도체와 같이 전계가 가해지면 자유로이 움직이는 전자를 갖는 것이 전도체인 반면, 절연물은 전계 내에 있어도 전자의 움직임(전류)은 생기지 않고, 정전하와 부전하가 평형 위치로 부터 변위되어 전하가 분리하는 분극 현상을 일으킨다. 이와 같은 성질을 갖는 물질을 유전체라 하는데, 이 분극 현상이 높은 주파수의 전계에 의해서 반복되어질 때 전계의 에너지 중 일부가 유전체에 흡수되어 유전체 손실로 되어 발열된다. 마이크로파는 공간을 자유로이 전달하지만 금속면에서는 반사하고 전기적으로 절연물인 유전체 내에서는 그 에너지를

점차 잃어 가면서 전달한다. 이 에너지의 감소는 유전체에 의한 마이크로파의 흡수, 즉 마이크로파 가열로 나타난다. 유전체를 전계내에 놓으면, 유전체의 도처에서 분극이 생긴다. 이들 분극이 합쳐 유전체의 표면에 전하를 띠게 하는데, 미시적으로 보면 분극은 몇 개의 서로 다른 구조로 이루어져 있다. 이들 구조 중에서 마이크로파 영역에서 가열에 기여하는 것은 배향 분극(방위 분극)인데, 즉 이것은 분자나 이온에서 쌍극자를 갖는 H_2O , HCl 등의 물질에 전계를 가함에 따라 쌍극자가 전계의 방향으로 정렬해서 생기는 분극을 말한다. 유전체에 전파가 닿으면, 유전체를 구성하고 있는 분자(쌍극자)가 전파(전계)의 힘을 받아 전기적 평형 상태에서 전계방향의 변화에 따라 진동을 시작하는데, 이 분극 진동이 분자간의 마찰로 되어 발열 현상을 일으킨다. 즉 가해진 전자파 에너지가 분자의 진동 에너지로서 소비되어 물체 내에서 열로 바뀌어 가는 것이다. 공기에 놓여진 유전체에 마이크로파를 조사하면 그 단위체적당 소비전력 P 을 계산 할 수 있으며 ϵ_r (비유전율), $\tan\delta$ (유전체 손실각)은 모두 고유의 값으로 온도나 주파수에 따라 변화한다.

마이크로파에서의 가열은 내부 가열이라 해도 전자파는 피가열물체의 표면에 조사되어 표면으로부터 들어가 유전 손실에 의해 흡수되어지면서 점차 내부로 전달되어 간다. 따라서 내부로 들어가는 만큼 전계는 약하게 되어 손실 계수 ϵ_r , $\tan\delta$ 가 큰 물질일수록 내부 가열이 어렵게 된다. 이와 같은 전자파의 침투성을 나타내는 데에 전력반감심도라는 값을 사용하고 있다. 이것은 물체에 조사된 마이크로파의 전력 밀도가 물체의 표면에 있어서의 값보다 반으로 감쇠하는 거리를 나타내는 것이다. 물과 얼음의

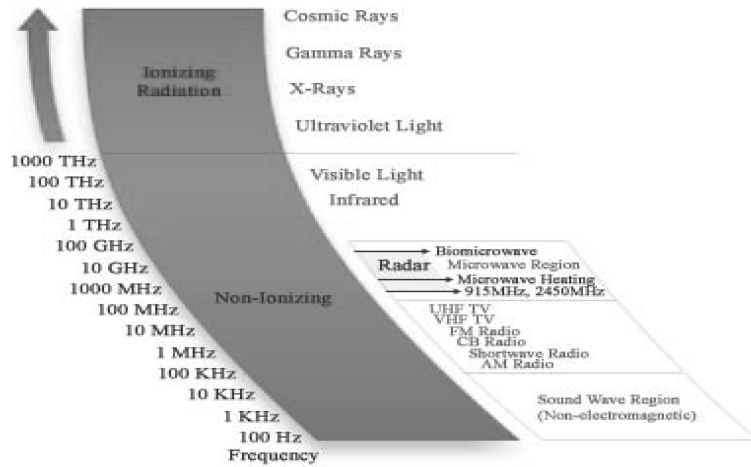


그림 1. 주파수에 따른 전자파 종류

표 2. 주파수에 따른 명칭, 용도

주파수	파장	명칭	주된용도	공업용도
300 ~ 3000MHz	0.1 ~ 0.01	SHF, 마이크로파	마이크로파통신	마이크로파 가열
3 ~ 30GHz	0.01 ~ 0.001	EHF, 밀리파	밀리파통신	
30 ~ 300GHz	0.001 ~ 0.0001	밀리미터파		

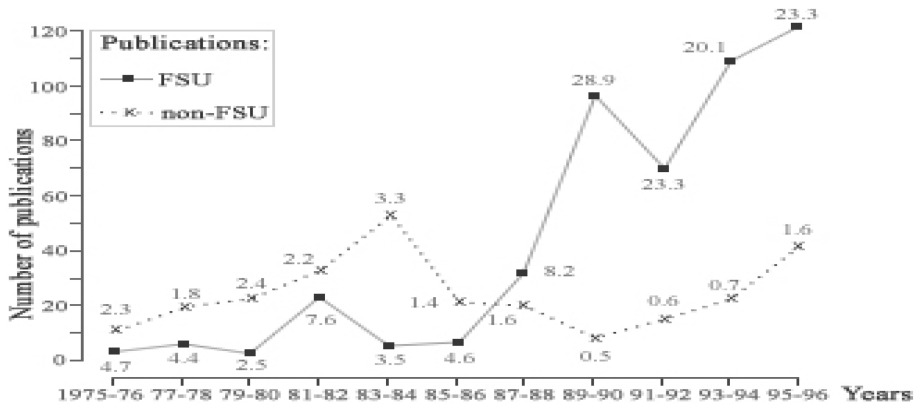


그림 2. 러시아와 타 국가의 밀리미터파에 관한 연도별 발표 논문 건수 비중(%)

ϵ_r , $\tan\delta$ 은 양 계수 모두 물이 얼음보다도 훨씬 큰 값을 가진다.

Millimeterwave(MMW)의 응용

밀리미터파는 주파수 30~300GHz 영역대의

주파수를 말하며 주파수에 따라 세분화하여 명칭을 달리하고 있다(표 2, 그림 1). 최근에는 밀리미터파를 바이오마이크로파(biomimicrowave)로도 불리고 있다.

밀리미터파에 대한 연구결과 발표건수는 그림 2에서 나타나듯이 소련연방에서 매우 급진

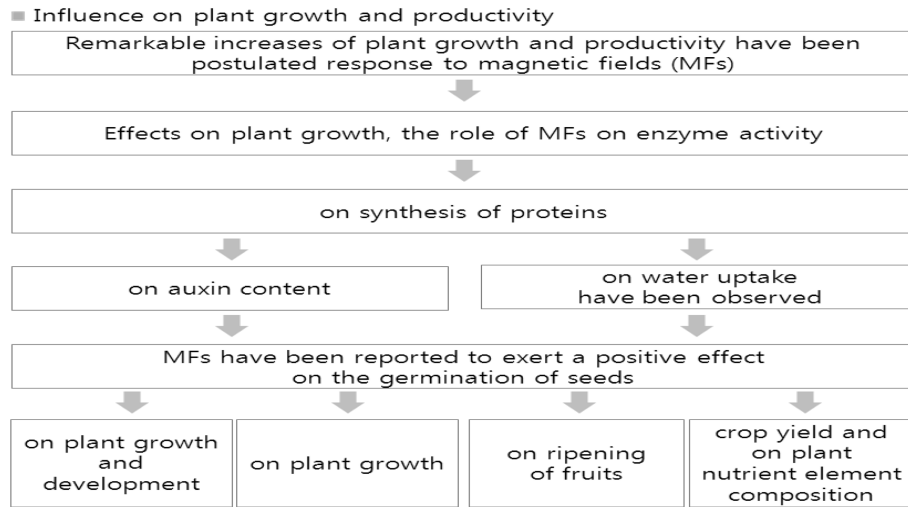


그림 3. 밀리미터파가 식물의 성장 및 생산에 미치는 영향

표 3. 밀리미터파가 식물의 성장률에 미치는 영향

Organism	Duration	Wave	Power	Effects
S.cerivisiae	50min	46GHz	0.03mW/cm ²	성장율에 있어 동요
Barley seed	20min	61.5GHz	0.1mW/cm ²	세포 분열 36% 증가
Spirulina platensis	30min	7.1mm	0.2mW/cm ²	성장율 두배 증가

적인 연구 결과들이 발표되고 있다.

식품 저장 시 채소류는 과일류보다 강한 oxidase, phenolase, peroxidase 등을 함유하여 저장 중 효소의 작용으로 산화, 변색되어 영양이 저하되기 쉬우며 채소류 저장 중 껍질에 상처가 생겨 부패균(*Rhizopusnigricans*)이 침입하여 부석부석해지는 연부현상과 흑반균(*Ceratostomellafimbriata*)에 의해 내부에 검은 반점이 생기는 부패가 진행된다. 채소류를 냉장 보관하면 호흡작용이 약해지므로 오래 저장할 수 있을 것 같으나 부패균은 냉장 온도에서도 잘 번식하여 연부 등 부패가 진행된다. 그러나 MMW를 이용하면 채소류에 함유되어 있는 변색, 영양소 파괴의 주요 인자인 산화효소를 특이적으로 불활성 또는 파괴하여 장기 보관 중에도 신

선함과 영양소를 보존하고 채소류에 오염되어 있는 부패균의 생육을 저해 또는 살균하여 장시간 저장해도 싱싱함을 그대로 유지 가능하다. 또한 광합성에 관여하는 효소를 활성화하여 냉장 보관 중에도 갓 수확한 채소류의 맛을 유지할 수 있다.

밀리미터파의 물리 화학적 효과에 영향을 주는 인자는 고수분의 경우 주파수보다는 구조의 특정한 흡수율(special absorbance rate)로 온도, 두께 및 유전성(dielectric layers)에 많은 영향을 받는 것으로 보고되었다. 또한 성장률에 대한 효과를 보면 특정 작물에 대하여 성장률이 매우 높게 나타났으며 기능성 성분도 증가 또는 생성되는 것으로 보고되었다.

또한 이스트의 한 종류인 *Candida albicans*에

표 4. 밀리미터파가 Candida albicans에 미치는 영향

		Wave		
Modulation	Duration	71.8GHz	72GHz	72.2GHz
1kHz	Short-term	No change	15% less	No change
CW	Long-term	No change	25% more	No change

표 5. 칼슘의 밀리미터파에 대한 작용효과

Organism	Duration	Frequency (GHz)	Power (Watt)	Effects
쥐 골격 근육	5	61	4	Ca ⁺⁺ 23% 증가 (IE/15)
	20			Ca ⁺⁺ 27% 증가
	40			Ca ⁺⁺ 흡수율 48% 증가
신장세포에 있는 수로	20~30	42.25	0.1	활성도 증가
조류세포	30~60	41, 50, 71	5	염화물은 0으로 떨어지며, 10~14시간 후에도 복구되지 않음
		49, 70, 76		염화물은 200~400%증가, 30~40분 범위 원상 복구 가능
개구리 좌골 신경	50~110	77.7	10	주파수에 따라 차이가 많음
		41.14~41.54	0.02~2.6	
근육과 심장 맥박 조정기 세포	1.5	54~78	0.1~0.15	막 횡단 잠재력 손실의 감속

대한 영향을 살펴보면 특정 주파수에 따라 큰 차이를 보여주었다(표 4).

칼슘(Ca⁺⁺)의 밀리미터파에 대한 작용효과는 표 5와 같다.

유기체에 대한 적용 효과를 살펴보면 우선 동물을 상대로 한 실험 결과 피부치료에 관한 연구 결과는 부패시키는 균의 노출이 MMW를 조절하는 동안 연속적인 조사는(continuous wave) 현저 치료 시간의 감소를 나타냈다. 토끼를 이용한 실험에서 밀리미터파를 이용한 치료는 2.9일이 소요되었으며, 밀리미터파를 사용하지 않은 것 보다 7일 빠르게 시간이 단축되었으며 치료제 투입량도 현저히 감소하였다. 부상의 팽윤, 충혈, 침투 및 세균성 오염도 치료기간 동안 감소되었다.

밀리미터파는 임상에도 적용하여 효과들이 발표되었는데 심장 혈관 질병, 호흡기 질환, 피부병, 무력증, 신경통, 당뇨병, 심각한 바이러스성 감염, 화학요법의 증독에 임상효과가 보고되었다. 밀리미터파에 대하여 진행된 연구 결과 및 응용분야를 종합하여 보면 표 6과 같다.

안전성

1968년 10월 18일 의회에 의해 Public Law 90-602(The Radiation Control for Health and Safety Act of 1968) 이 통과되어 발생하는 전자파의 양들이 규격(standard)에 의해 제한을 받게 되었다. 화창한 날에 지구에 도착한 태양열

표 6. 밀리미터파의 임상 연구 결과 및 응용분야

적용대상	조사 대상물	조사 예상결과	응용분야
식물	고등식물 밀, 보리, 완두콩, 사과나무 등	· 발아촉진 · 성장 및 생명현상 자극 · 품질향상 · 저장기간 증가	· 식물재배: 발아, 성장, 저항성, 생산성 증가 · 양조: 맥아즙, 생산성 증가 · 제약: 생물학적 활성물질 생산 효율성 증가
	하등식물 버섯류, 조류	· 생명현상 촉진 · 생산성 증가	· 버섯류 재배 생산성 증가 · 식품산업: 조류 사용 효율성 증가
동물	척추동물 소, 말, 송아지, 개, 고양이	· 비약물성 질병 치료 효과	· 소: 유선염, 자궁내막염 치료 · 송아지: 폐렴치료 · 말: 근육염, 관절염, 전장염, 폐기종, 과로치료 · 애완동물: 상처, 인대와 근육 염좌, 뼈와 관절 결합, 이염, 위장염
	곤충	꿀벌 등	· 성장과 발육 조절 · 식품산업: 해충으로부터 식품의 안전성 확보 · 양봉: 생산성 증가
미생물	원핵생물 세균, 방선균	· 생명현상 자극, 생산성 증가	· 생산 효율성 증가 치즈 제조, 제빵, 낙농 제품 생산, 와인 제조, 사료용 알부민, 아미노산 및 비타민 등
	진핵생물	효모, 곰팡이	

은 보통 60~100mW/cm³의 수치로 측정되므로 태양열이 마이크로파의 방열보다 더 위험스럽게 되며 태양열에 너무 노출되면 눈과 피부에 이상이 있거나 화상을 당하게 된다. 그러나 유출되는 마이크로파에 노출되는 시간이 지나치게 길면 눈의 질병을 가져오는 경우도 있으나 극히 드물고, Allen 박사는 마이크로파의 안정성에 대하여 달빛 아래서 선택하는 것과 같다고 비유하였다.

마이크로파에 의한 DNA 및 단백질 변화 반응 등의 증거로 그 원인이 단지 열 발생이 아닌 다른 현상(thermal effect)에 의한 것이라는 주장의 연구 보고가 있으나 현재까지의 정설로는 마이크로파의 상호 반응은 발생하는 열 효과에 의한 것으로 되어 있다. 인체에 조사된 마이크로파에 의한 열 효과로 고수분 함량과 염류를 함유한 세포에는 해로운 영향을 받는데 특히 피 순환이 적어 방열이 안 되는 신체 부

위에는(예: 눈, 귀, 고환) 열에 의한 손상이 큰 것으로 알려져 있다. 그 증상으로 안구 내 렌즈 단백질의 변성 및 백내장 형성, 귀에 울림 현상, 정자의 살균 증상이 보고되었다.

마이크로파를 이용한 전기 치료법(diathermy)에서는 조사량을 1,000mW/cm²으로 제한하고 있다. 동물의 경우 몸 전체 부위를 마이크로파 100mW/cm²로 노출시켰을 때 상당한 온도 상승이 있는 것으로 보고되었다. American National Standards Institute(ANSI)에서는 시간제한 없이 인체에 해가 없는 기준치를 10mW/cm² 이하로 정하였다.

참고문헌

1. Bengtsson NE, Risman PO, Dielectric properties of foods at 3GHz as determined by a cavity

- perturbation technique. II. Measurements on food materials, J. Microwave Power, **6**(2), 107-123, 1971
2. Bunch WL, Matthews ME, Martin EH, Fate of Staphylococcus aureus in beef-soy loaves used in hospital chill food services systems, J. Food Sci, **42**, 565-566, 1977
3. Chen SC, Collins JL, McCarty IF, Johnston MR, Blanching white potatoes by microwave energy followed by boiling water, J. Food Sci, **36**, 742-743, 1971
4. Cochran WG, Cox GM, Experimental Designs, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1957
5. Copson DA, Microwave irradiation of orange juice concentrate for enzyme inactivation, Food Technol, **8**(9), 397-399, 1954
6. Decareau RV, Microwave in food processing, Food Technol, Aust, **36**(2), 81-86, 1984
7. Hasted JB, Ritson DM, Collie CH, Dielectric properties of ionic solutions. Parts 1 and 2, J. Chem. Phys, **16**, 1-21, 1948
8. Mudgett RE, Goldblith SA, Wang DIC, Westphal WB, Prediction of dielectric properties in solid food of high moisture content at ultrahigh and microwave frequencies, J. Food Process. Preserv, **1**, 119-151, 1977
9. Page RM, The origin of Radar, Anchor Book, New York, USA, 1962
10. Proctor BE, Goldblith SA, Radar energy for rapid cooking and lanching and its effect on vitamin content, Food Technol, **2**(2), 95-104, 1984

금준석 식품공학박사

- 소속 한국식품연구원 지역특화산업연구단
- 전문분야 식품공학(쌀가공 연구, 마이크로파 공학 연구, 탄수화물공학연구)
- E-mail jskum@kfri.re.kr
- TEL 031-780-9056