

## 최근 초음파 기술과 응용

### Ultrasound Application on Food Technology

김영진 | 전통식품연구단

Young-Jin Kim | Traditional Food Research Group

최근 초음파(ultrasound, US) 기술의 원리와 응용, 특히 식품의 생리활성물질에 관련된 응용기술에 대하여 기술하였다. 간단한 초음파 기술은 제외하고, 유화, 용해, 조직개선, 균질화(homogenization), 점도, 추출, 건조, 결정화, 거품제거(defoaming) 등의 기술에 관한 것이다. 특히 초음파에 의한 추출(UAE)을 상세히 기술하였다. 오늘날 초음파 기술은 생리활성물질의 추출 같은 산업화에 응용되고 있으며, 기능성을 강화하기 위한 추출에도 이용하고 있다. 이러한 초음파 기술은 장래 효과적인 식품기술이 될 것이며, 또한 식품의 성질을 이해하는 데 도움이 될 것이다.

### 서 론

지난 수년간 식품은 영양을 공급한다는 기본적인 기능을 넘어서 건강을 증진시키거나 질병을 예방하는 기능으로 소비자의 관심이 집중되었다. 이러한 점에서, 식품은 영양학적 의미와 관능적 특성뿐만

아니라 생리활성(bioactivity) 기능에서도 중요해지고 있다. 기존 가열처리는 미생물을 죽이고 효소를 불활성화 시키는 등의 식품을 조리하는 방법으로 가장 많이 사용하는 공정이다. 그러나 과도한 가열처리는 식품의 물리화학적 성질을 해치며, 관능특성과 생리활성 기능도 해치게 된다. 그러므로 신선한 품질을 유지하기 위하여 온화한 가공기술, 예를 들면 고압처리, 전자기 등 새로운 기술이 끊임없이 시도되고 있다. 대부분 수십 년 전부터 시도되었고 비용과 효율면에서 평가되고 있는데, 이러한 기술 중에 초음파 기술(ultrasound, US)이 있으며 초음파 기술에는 온화한 압력과 온도를 조절하는 기술(manothermosonication, MTS)도 있다. 초음파 기술은 식품 보존뿐만 아니라, 가스제거, 거품조절, 혼합, 예멸전 형성, 연화에도 사용되고 있다.

여기서는 초음파와 관련된 유화능, 용해도, 조직, 점성 등과 생리활성물질의 가공에 관한 최신 정보를 제공하고자 한다. 그리고 비용-효율이 우수한 대규모 추출공정에 대해서도 기술하고자 한다.

## 식품에서 초음파 기술

초음파 기술은 인간의 청각으로 감지되는 것보다 더 높은 주파수의 파동을 이용하는 것이다(> 16 kHz). 이 초음파는 물질 또는 물질의 표면에서 파동이 생기고 퍼져 나간다. 초음파 주파수는 여러 가지 범위로 나눌 수 있다. 식품에 사용되는 초음파는 비파괴범위(100 kHz~1 MHz)로써, 저출력(<1 W cm<sup>2</sup> US)으로 사용된다. 저출력 초음파는 보통 식품의 단

단함(firmness), 숙성도(ripeness), 당 함량(sugar content), 산도(acidity) 등의 분석에 사용된다. 저주파 초음파(16~100 kHz)는 식품의 물리화학적 성질을 변화시키는데 사용되는 것으로 고출력(10~1000 W cm<sup>2</sup>)이다. 저주파 초음파를 식품에 사용하는 예를 설명하고자 한다.

액체에 대한 초음파는 주로 공동현상(空洞現象)과 관련된다. 초음파는 매질의 압축과 소원으로 파동을 전달하는 과정이다(그림 1). 압력이 높아지는

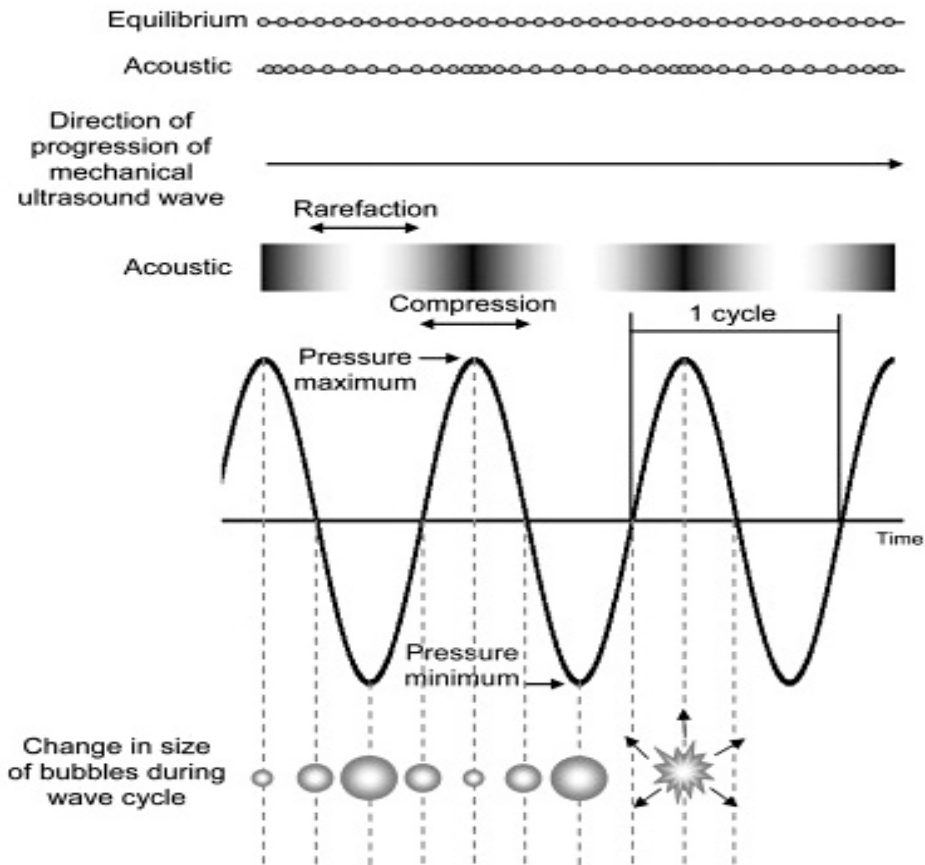


그림 1. 초음파 기술의 원리: 초음파에 의하여 매질 중 압력이 높은 부분과 낮은 부분이 나타나고, 방울(bubble)의 크기도 달라진다. 압력이 높은 부분은 방울이 압축되어 작아지고, 압력이 낮은 부분은 방울이 팽창하고 터진다.

압축이 있고 그 다음에 압력이 낮은 소원이 다가오고, 양쪽의 끌림에 의하여 소원한 부분이 미세한 가스(gas), 거품(bubble)이 형성된다. 이러한 거품이 액체 전반에 펼쳐지고, 점차 성장하여 불안정한 균열이 일어난다. 이 공동현상에 의하여 과도적인 거품이 한 점에 모여져서 에너지가 축적되면 고온(5,000 K)과 고압(1,000 기압)이 일어나고, 전단력을 가진 에너지 파동과 교란을 일으키는 파동을 일으킨다. 이러한 압력, 열, 교란이 조합되어 여러 가지 효과를 가져오게 된다. 공동을 일으키는 정도는 액체에 대한 에너지(kWh L<sup>-1</sup>)와 강도(W cm<sup>2</sup>)에 의하여 결정되며, 액체의 점도, 표면장력, 증기압, 용존 가스의 성질과 농도, 고형물질의 존재, 온도, 압력 등에 따라 영향을 받는다.

거품 크기의 변화로 인하여 액체 내부에서는 빠르고 강한 흐름이 나타난다. 이 에너지는 액체 내에서 보통 열로 흡수되는데, 실제 액체온도는 70℃ 이하이다. 다른 중요한 것으로는 물 분자가 분해되어 자유 라디칼(free radical)을 형성하여 다른 분자와 반응하는 것이다( $H_2O \rightarrow H + \cdot OH$ ). 이러한 물리 화학적 작용을 여러 가지 식품공업에서 응용하게 된다.

## 초음파의 물리적 효과

초음파가 응용된 것은 제2차 세계대전 당시, 유화(emulsification) 기술에 사용되었다. 그러나 식품산업에 사용되는 것은 최근의 일이다. 과거의 전통적인 에너지로는 할 수 없었던 것을 최근 고출력 초음파가 개발되면서 새롭게 응용하게 되었다. 예를 들면 다음과 같은 것이 있다.

## 유화 공정, 균질화 공정 (Emulsification, Homogenization)

섞이지 않는 두 가지 액체를 혼합할 때, 유화가 일어난다. 하나의 액체가 다른 액체의 공동 안으로 들어야 한다. 공동이 만들어지는 동안, 한 액체의 작은 방울(bubble)은 다른 액체에 의하여 파괴될 수도 있고, 충격(shock)이 가해질 때 효과적으로 혼합되기도 한다. 약한 초음파와 에너지를 사용하여 아주 작고 안정한 에멀전을 형성시킬 수 있다. 이 원리는 석유화학, 폴리머 합성, 화학공업, 섬유, 제약, 화장품공업에서는 이미 널리 사용되고 있지만 식품공업, 즉 과일주스, 마요네즈, 토마토케첩에서는 최근에 들어 시도되고 있다. 에멀전은 전통적인 방법보다 초음파에 의하여 더 안정되는데, 특히 마요네즈에서는 보기 좋은 흰색을 만들어준다.

초음파는 기름/물 에멀전(oil in water emulsion)에서 형성된 크립을 안정화시킨다. 예를 들면 높은 강도의 초음파를 사용해서 pH 4-5의 팜유와 베타 락토글로브린-알지네이트 복합체를 에멀전으로 만들었을 때 층 분리(droplet)되는 현상이 상당히 감소하였다고 한다.

그러나 반대로 초음파가 에멀전 분리에 사용될 수도 있다. 코코넛 오일과 물의 혼합 에멀전에 초음파 처리(2 MHz)를 했을 때 즉시 층 분리가 일어났고, 초음파 강도와 시간이 증가할수록 층 분리도 더 커졌다는 보고도 있다. 초음파 처리에 의하여 층 분리가 일어나는 것은 크립의 형성, 응고, 융합 등 복잡한 과정으로 일어난다. 층 분리는 초음파가 에멀전을 형성시킬 때 부작용으로써 일어난다. 에멀전의 온도가 높아지면 초음파 흡수가 일어나서 에멀전 안정성이 낮아진다. 만일 초음파로 나쁜 결과가 나타난다

면 에멀전이나 현탁이 안정하도록 초음파 공정을 조절할 필요가 있다.

초음파로 지방구 크기(fat globule size)를 더 작게 만들 수 있다. 우유에 초음파를 고강도로 처리하여 지방구를 81.5% 이상 감소시킬 수 있었다고 한다. 온도별 실험에서 저온보다는 70.0~75.5℃에서 지방구가 더 잘 분포된다고 한다. 저온에서는 카제인이 지방구에 붙어서 작아지지 않는 것인데, 온도가 높아지면 카제인이 현탁되는 것으로 생각되고 있다. 치즈를 만들 때, 우유의 균질화 공정에서 초음파를 사용하면 치즈 생산이 증가하는데, 지방구에 연결되어 결합되는 단백질이 증가하기 때문이라고 한다. 최근 전지 우유를 가열-초음파로 처리하고 전자현미경으로 관찰하였다. 그 결과 전지 우유 중의 지방구가 파괴되어 작은 지방구로 되고, 표면에 카제인 마이셀이 결합하는 것으로 밝혀졌다.

### 점도와 조직의 변화(Viscosity, Texture)

초음파 강도에 따라 식품의 점도는 증가하거나 감소할 수 있고, 효과도 일시적이거나 오래 지속할 수 있다. 액체 중의 공동(cavitation)은 전단(끊어짐)을 일으킬 수 있고, 틱소트로픽(thixotropic) 유체인 경우에는 점도가 일시적으로 감소된다. 만일 초음파의 에너지가 크다면 분자량과 점도는 감소한다.

옥수수 전분입자를 초음파로 처리하면 점도가 감소하는데, 이것은 글리코실 결합을 부분적으로 분해하여 전분입자의 크기가 감소되는 것과 관계가 있다. 그러나 반대의 경우도 가능하다. 예를 들면 토마토 퓨레(puree)를 초음파 처리하면 수분이 섬유질 속으로 깊이 침투하여 점도는 증가된다. 또 초음파 처리로 단백질의 구조가 변화되기도 한다. 즉 아미

노산의 친수성 부분이 열려서 물 분자에 대한 결합력(water binding capacity)이 증가되어 점도가 증가되기도 한다.

유제품에 대한 초음파의 효과도 연구되었다. 요구르트에서 유산균 스타터를 접종하기 전에 초음파 처리하면 균질화가 증가되어 요구르트의 점도가 증가된다. 또 40℃로 가열하고 적당한 압력에서(2 kg cm<sup>2</sup>) 초음파 처리하면(20 kHz, 12초) 요구르트의 물성이 개선된다. 아직 이 메커니즘은 정확하게 알려져 있지 않지만, 지방구의 균질화가 직접적인 원인은 아닌 것으로 밝혀졌으며, 발효나 단백질 변성 등이 요구르트의 조직이나 점성에 관련되는 것으로 장래 더 평가되어야 할 것이다.

유제품에 강력한 초음파를 처리한 연구도 있다. 초음파는 근육섬유 단백질을 이완시켜서 수분결합능(water binding capacity), 연화도(tenderness), 점착성(cohesiveness)이 개선된다.

### 추출(Extraction)

강력한 초음파는 식품의 생리활성물질을 추출하는데 이용된다. 강력하고 값싸고 재현성 있으며 간단하므로 많이 사용된다. 초음파의 기계적 효과로 추출용매가 깊이 침투하게 된다. 만일 식품이 건조되어 있다면 초음파는 부풀리고, 수화시키고, 세포벽의 구멍을 크게 낸다. 세포벽이 파괴되면 내용물이 쉽게 유출될 수 있다. 온화한 초음파를 사용하면 구조와 분자의 성질을 변화시키지 않고 추출할 수 있으므로 열에 쉽게 파괴되는 성분들에 이용될 수 있다. 여러 가지 성분이 초음파로 추출되었다(표 1).

초음파로 포도씨의 폴리페놀을 추출하는 조건이 연구되었다. 추출률은 추출시간, 추출온도와 관련

있지만, 초음파에 의하여 가장 크게 영향을 받았다. 초음파 추출은 다른 고온 추출법만큼 효과적이었는데, 특히 추출시간을 감소시키는 장점이 있었다. 초음파는 수화 공정과 파쇄 공정을 개선하여 추출용매가 물질 안에 쉽게 들어가게 하는 것으로 생각되고 있다.

망콩에서 이소플라본(isoflavone)과 트랜스 레스베라트롤(trans-resveratrol)을 초음파로 추출하는 조건이 연구되었다. 그 결과 바이오차닌 A(biochanin A)와 트랜스 레스베라트롤(trans-resveratrol)은 80 kHz, 다이드제인(daidzein)과 제니스테인(genistein)은 25 kHz에서 추출하는 것이 가장 효과적이었다. 단일 파장보다는 복합 파장이 더 효과적이었는데,

두 가지 파장이 단일 파장보다 더 효과가 높은 것은 거품의 층들이 증가하여 입자크기가 감소되는 것으로 설명되고 있다.

초음파는 콩에서 이소플라본(isoflavone)을 추출하거나 인삼에서 진저롤(gingerol)을 초임계 CO<sub>2</sub>로 추출할 때도 추출률 상승에 효과가 있다. 초임계 추출에도 초음파는 세포를 파괴하고 용매가 내부조직으로 침투를 쉽게 하여 추출률을 높이고 추출시간을 감소시킬 수 있는 것으로 생각되고 있다.

초음파 추출이 좋은 효과가 있다고 보고된 연구는 많지만, 아직 추출된 성분의 안전성(stability)에 대한 연구는 매우 적다. 생강이나 중국 생강(finger root), 심황(turmeric)에서 5분간 초음파 처리하여 얻

표 1. 생리활성물질의 추출에 사용된 초음파 기술

생리활성물질	초음파 추출 조건	공정조건	참고문헌
로즈마리-카르노믹산(carnosic acid from rosemary)	건조잎 10 g + 100 ml 부탄논/에틸아세테이트/에탄올, 50℃, 15분 혼 시스템(20 kHz) 초음파 조(40 kHz)	물 추출시간 단축(15분:3시간) 초음파 처리는 용매 의존성을 감소, 더 경제적, 안전함	Albu, Joyce, Paniwnyk, Lorimer, Mason, 2004
포도씨-페놀성분과 항산화제, 안토시아닌색소(anthocyanins)	포도씨 분쇄 2 g + 100 ml 52% 에탄올 55~60℃, 30분 수조에서 초음파처리(40 kHz, 250 W)	표면반응으로 최적화 함 추출률 상승	Ghafoor et al., 2009
타이 향신료에서 항균성물질(생강, 중국생강, 심황)	건조 분쇄물 10 g + 100 ml 헥산/이소프로판올 초음파 침(20 kHz, 5분, 6.8 W/cm <sup>2</sup> )	추출 용매와 초음파 처리로 추출시간 감소	Thongson et al., 2004
새우껍질-키틴(Chitin)	스텐레스 스틸 침(41 W/cm <sup>2</sup> ) 미네랄 제거 초음파 (0.25 M HCl, 1:40 w/v, 40℃, 4시간) 단백질 제거 초음파 (0.25 M NaOH, 1:15 w/v, 40℃, 4시간)	추출이 간단하고 추출시간 단축, 결정생성이 적음. 키토산(chitosan)으로 전환율 우수	Kjartansson, Zivanovic, Kristbergsson, Weiss, 2006
플라보노이드(flavonoids from <i>Folium eucommiae</i> )	건조시료 5 g + 300 ml 42% 에탄올 초음파 조(59 kHz, 55℃, 70분)	초음파 추출은 가열처리, 마이크로웨이브 추출, 효소 추출보다 우수	Huang, Xue, Niu, Jia, Wang, 2009
올리브 잎-올레오로페인(oleuropein)과 관련 바이오페놀(biophenols)	건조잎 분말 1 g + 에탄올:물(59:41), 5ml/min, 40℃, 25분 초음파 침을 수조에 담금(20 kHz, 450 W)	동적 초음파 추출, 파일럿 규모 기존 방법보다 효과적(추출률 100% 도달에 25분: 기존 24시간)	Japón-Luján, Luque-Rodríguez, Luque de Castro, 2006

은 추출물과 기존방법으로 24시간 동안 얻은 추출물로 항균력을 조사하였다. 그 결과 초음파 추출물은 리스테리아(*Listeria*)에서는 약간 낮은 억제활성을 보였으나, 살모넬라(*Salmonella*)에 대해서는 거의 비슷한 억제활성을 보였다. 강력한 초음파로 추출된 생리활성물질 중 카로티노이드(carotenoid), 아스타잔틴(all-E astaxanthin)은 초음파 처리시간이 길어질수록, 초음파가 강력해질수록 더 빨리 탈색되었다.

최근 식품공업에서 초음파 추출에 대한 이용가능성을 조사한 결과, 공업적 규모로 추출할 수 있으며 경제성도 있는 것으로 나타났다. 초음파는 식품의 추출률을 상승시키고, 추출시간을 단축시키며 생산성을 높일 수 있다. 물 추출법에도 이용될 수 있고 안전한 유기용매(generally recognised as safe, GRAS)를 사용하여 추출할 수도 있다. 또한 온화한 가열처리와 초음파를 병용하여 열에 민감한 식품소재를 추출하는데도 이용할 수 있다.

## 다른 응용

기존 가열건조방법 대신 라디오주파(radiofrequency), 적외선 가열방법 같은 온화한 가공기술도 있다. 식품건조에 초음파를 이용한 연구도 있다. 초음파는 미세한 진동, 작은 구멍의 형성, 작은 기공의 형성으로 식품의 건조에 이용된다. 초음파와 가열의 시너지효과에 의하여 더 온화한 조건에서 건조할 수 있고, 열에 불안정한 성분이 변화되는 것을 감소시킬 수 있다. 그러나 아직 상업적으로 이용하는 수준은 아니다.

초음파는 동결식품에서 얼음 핵의 형성과 성장에 영향을 미칠 수 있다. 식육, 과일, 채소에서 조직이 연화되거나 해동될 때 세포물질이 녹아나오는 것을

감소시킬 수 있고, 영양성분을 더 오래 잘 보존할 수 있다.

또한 초음파 기술은 거품이 품질을 해치는 식품, 예를 들면 탄산음료 등에 이용될 수 있다. 초음파에 의하여 거품이 파괴되는데, 이것은 초음파가 거품표면에 부분적인 진공을 형성시키거나 거품방울 간의 충돌, 거품의 움직임 등 상호작용에 의하여 일어나는 것 같다. 장래 화학적 거품방지제나 병에 주입할 때의 거품방지 공정은 초음파 기술에 의하여 감소되거나 사용하지 않을 수 있다.

## 초음파의 화학적 효과

초음파의 물리적 효과는 연구가 많이 진행되었지만, 화학적 효과에 대해서는 연구가 적다. 초음파에 의하여 공동이 형성되는 동안 하이드록실 라디칼(hydroxyl radical)이 형성되어 식품성분을 쉽게 산화시킬 수 있다. 식품 종류나 가공 공정에 따라 좋은 효과가 나타날 수 있고, 또는 나쁜 효과가 나타날 수도 있다. 올리브유와 대두유에 초음파를 처리하면 산화물이 생성되어 나쁜 효과를 나타낸다.

식품의 항산화제의 효력은 하이드록실 반응이 일어나는 정도에 따라 달라진다. 라디칼이 생성되면 페놀(phenol) 같은 성분에 나쁜 영향을 가져온다. 그러나 다른 성분들, 예를 들면 플라보노이드(flavonoids)는 하이드록실 반응이 일어나면 더 증강된다. 대체로 하이드록실 라디칼( $\cdot\text{OH}$ )은 식품성분에 나쁜 영향을 주므로 주파수가 낮은 초음파가 선호된다. 주파수가 높은 초음파를 사용하면 하이드록실 라디칼이 더 많이 생성된다. 초음파로 추출할 때 생성되는 하이드록실 라디칼은 아스코르브산(ascorbic acid)과 에탄

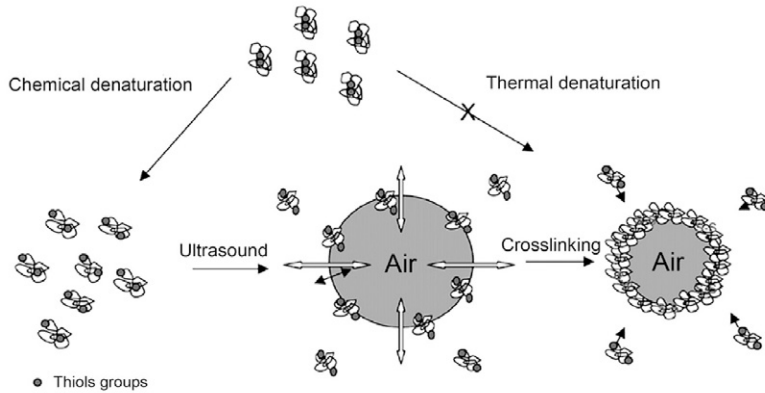


그림 2. 라이소자임과 공기-물의 상호결합 모형. 물에서 생긴 공동이 산화제를 만들고 cystein S-S 결합을 촉진한다.

올(ethanol) 같은 첨가물을 넣으면 제거할 수 있다.

단백질의 기능성은 분자 내 상호작용에 의하여 영향을 받는다. 물을 초음파 처리하면 라디칼들과 슈퍼옥사이드(superoxide)들이 생성되는데, 이들이 단백질 분자에 결합할 수 있다. 라이소자임(lysozyme)에 초음파를 가했을 때, 작은 방울들이 라이소자임에 결합되어 있는 것이 보고되었다(그림 2). 그 결과 라이소자임의 자유로운 티올(thiol) 그룹이 노출되었고, 항균효과는 오랫동안 유지되었다.

또한 과산화수소(hydrogen peroxide)를 소혈청단백질(bovine serum albumin, BSA)과 혼합하고 초음파 처리하면 혈청단백질의 화학구조를 변화시켜 응고시킨다. 초음파 처리는 혈청단백질의 설피하이드릴 그룹(sulfhydryl group)을 산화시켜서, 설피산(sulfinic acid)과 설피산(sulfonic acid)으로 변화시킨다. 초음파에 의하여 혈청단백질이 응고하는 것은 분자 간 S-S 결합이 아니고, 변화된 혈청단백질이 전자결합(electrostatic)이나 소수성 결합(hydrophobic interaction)으로 응고되는 것으로 생각되고 있다.

## 결론과 미래

초음파 기술이 과거에도 알려져 있었지만, 식품에 대한 응용기술과 생리활성물질에 대한 효과는 최근에 알려지게 되었다. 초음파 기술은 빠르고 효과적이며, 믿을만하고 일정한 품질을 가진 제품을 생산할 수 있는 능력도 지니고 있다. 초음파 발생기, 초음파 전달기, 증폭기가 개발되었고 미국과 유럽에서는 실험실적 수준에서 점차 상업적 수준으로 발전되었다. 그리고 에너지 비용과 유지비가 적어서 상업적으로 이용할 수 있게 되었다. 또한 연속적인 대규모 공정도 개발되었고, 초음파 공정으로 전환할 때 드는 재정적 부담이 많지 않고 단기간에 이익을 얻을 수 있으며 유지비가 싸다는 점 때문에 초음파 공정으로 장래 전환될 것이다.

여기에서 소개한 여러 가지 기술 중 초음파 추출 기술(UAE)이 현재로써는 가장 기술적·경제적으로 식품에 이용될 가능성이 가장 높다. 최근에는 독성이 없는 추출용매를 사용하여 생리활성물질을 추출하는 것이 추세인데, 초음파 추출 같은 다른 기술과

초음파 기술이 응용되어서, 깨끗하고 신속하며 경제적으로 생리활성물질을 추출하는데 사용될 수 있을 것이다. 그리고 추출할 때 해로운 라디칼이 형성되는 것을 막기 위하여 라디칼 소거제를 사용하는 것처럼, 추출조건을 조절하면 쉽게 산화하는 성분도 추출할 수 있을 것이다.

다른 혁신적인 식품가공기술처럼 고생산성 초음파 기술은 아직 표준화된 기술은 아니다. 그러나 새로운 초음파 응용기술을 공업적 수준으로 개발할 필요가 있다. 그리고 미래의 초음파 기술을 개발하기 위하여 초음파의 강도, 주파수, 식품에 미치는 영향과 같은 물리화학적 메커니즘에 관한 연구가 필요할 것이다.

#### ● 자료출처 ●

Soria AC, Villamiel M, Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review, Trends Food Sci Technol, 21, 323-331, 2010

#### 김 영 진 농학박사

소 속 : 한국식품연구원 전통식품연구단  
 전문분야 : 김치의 기능성, 전통식품, 식품화학  
 E-mail : yjkim@kfri.re.kr  
 T E L : 031-780-9046