

## 초음파 처리조의 구조에 따른 살균효과 연구

이양래<sup>a\*</sup>, 김현세<sup>a</sup>, 백민혁<sup>a</sup>

## Research on Ultrasonic Sterilization Effect of Treatment Equipments

Yanglae Lee<sup>a\*</sup>, Hyunse Kim<sup>a</sup>, Minhyuck Baek<sup>a</sup><sup>a</sup> Korea Institute of machinery and materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	6	August	2013
Revised	11	September	2013
Accepted	24	September	2013

## Keywords:

Sterilization  
Ultrasonic  
Nonthermal  
Flow type  
Heptagonal

## ABSTRACT

In the process of sterilization during the manufacture of beverages, both the treatment time and the temperature influence the beverage taste and flavor. Therefore, to improve the beverage quality, a nonthermal sterilization method is preferred to a high-temperature one. A nonthermal method, ultrasonic treatment by shock waves from cavitation, has been known to have a sterilizing effect. In this study, to observe the effect of ultrasonic frequency and treatment time on beverage quality, batch type ultrasonic equipment was fabricated and tested. Further, to evaluate the applicability of this ultrasonic method to an in-situ process, flow type ultrasonic heptagonal equipment was fabricated and then used to perform a sterilization experiment. Subsequently, the sterilizing effect was measured under ultrasonic and low-temperature (55°C) treatments. Based on the obtained results, ultrasonic sterilization technology that can be applied for treatments at flowrates of up to 3 L/min was developed.

## 1. 서론

식음료의 보전성 향상을 위한 살균방법으로서 대부분 가열 살균 방법이 이용되고 있으나, 열에 의해 음료의 풍미나 맛이 저하되고 영양소가 파괴되는 단점이 있다. 이를 보완하고 품질을 향상시키기 위해서 비가열 살균방법이 요구되고 있으며, 비가열 살균방법으로는 전기장, 자기장, 초단파 및 초고압 등이 있다<sup>1,2</sup>. 초음파 살균은 비가열 살균방법 중의 하나로서 강한 초음파가 수중에 전달될 때 부압(negative pressure)이 걸리는 시점에서 캐비테이션(cavitation)이 반복적으로 발생하게 되며, 그 내부는 진공으로 되어있기 때문에 붕괴 시 약 5,000°C, 1,000 기압의 초임계 반응장의 조건이 생성되

고 경계면에서는 약 2,000°C의 고온과 강한 충격파가 형성되는데 이때의 충격파에 의해 살균효과를 갖게 된다. 초음파에 의한 살균 효과는 소나(sonar: sound navigation and ranging)가 대잠수함 전에 이용되면서 초음파에 의해 물고기가 죽는 현상으로부터 최초로 확인되었다. 그 후 세균을 죽이거나 비활성화하는 방법으로써 초음파를 이용한 연구가 오랫동안 수행되어 왔다. Hughes 및 Nyborg 등은 미생물의 세포와 초음파간의 상호작용에 관한 메카니즘을 이해하는데 연구의 주안점을 두었으며, 캐비테이션 현상과 그의 파괴력, 국소가열현상과 활성산소(free radical)의 형성 등의 문제에 대해 연구하였다<sup>3</sup>. 또한, Alliger는 초음파의 순간적인 조사에 의해 세포벽으로부터 세포질막(cytoplasmic membrane)이

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7337

Fax: +82-42-868-7355

E-mail address: ylee@kimm.re.kr (Yanglae Lee).

유출되면서 세포벽이 얇아지게 된다는 연구결과를 발표하였으며<sup>[4]</sup>, 1980년대에 들어서는 초음파를 열 또는 화학 살균제와 조합했을 때의 살균효과에 대한 연구들이 이루어져 왔다<sup>[5-13]</sup>.

본 연구는 초음파 살균기술을 식음료에 적용하는 연구의 일환으로써, 먼저 초음파의 주파수 및 처리시간에 따른 대장균의 살균효과를 알아보고자 배치식(batch type)의 초음파장치를 제작하여 기초실험을 수행하였으며, 이를 기반으로 연속식 7각조(heptagonal)의 초음파장치를 설계 및 제작하였고, 이를 이용하여 대장균과 마이크로박테리움(microbaterium)을 대상으로 초음파와 열을 병행한 살균실험을 수행함으로써 가공 음료에 대한 살균효과를 분석, 평가하였다.

## 2. 배치식 초음파 살균장치를 이용한 기초연구

초음파의 주파수와 처리시간 및 인가전력에 따른 기초적인 살균효과를 알아보기 위해 가장 간단한 구조로서 Fig. 1과 같이 처리조 밑면에 초음파 진동자(transmitter)가 부착된 배치식의 초음파장치를 제작하였다. 특징으로는 20~80 W의 전력(input power)을 인가할 수 있으며, 다주파수 진동자를 이용함으로써 하나의 진동자로 28, 40, 80 kHz 주파수의 초음파를 발생시킬 수 있다. 처리용량은



Fig. 1 Sterilization equipment of the batch type

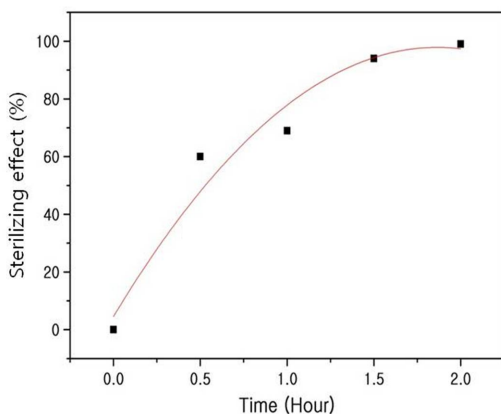


Fig. 2 Sterilizing effect for the treatment time by ultrasonic

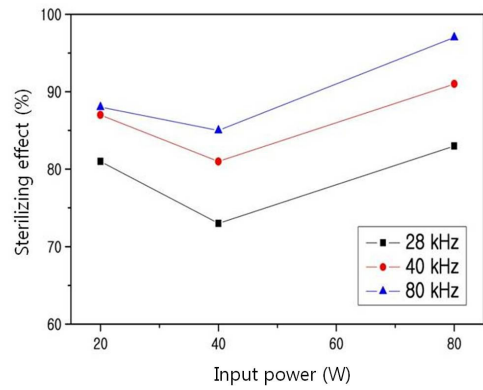


Fig. 3 Sterilizing effect for the frequency and input power

1,000 ml이고 에너지밀도는 80 W를 기준으로 0.08 W/ml이다. 살균실험은 멸균수 1 L에 대장균  $1.1 \times 10^7$ 개를 접종하고, 40 kHz, 40 W의 초음파로 2시간 동안 수행하였으며, 시간별 살균효과를 관찰하기 위해 30분 간격으로 시료를 채취하였다. Fig. 2는 초음파의 처리시간에 따른 살균효과를 보여주고 있다.

실험결과, 처리시간 30분까지는 살균효과가 급상승하다가 점차 포화되는 경향을 나타냈으며, 2시간 후에는 99%의 살균효과를 보였다. Fig. 3은 초음파의 주파수와 인가전력에 따른 살균효과로서 28, 40, 80 kHz의 주파수에서 인가전력 20, 40, 80 W의 조건을 주어 30분간 살균실험을 수행하였다. 실험결과를 보면 살균효과는 40 W에서 감소하였다가 80 W에서 다시 증가하는 경향을 나타내었으며, 주파수에 따른 영향을 보면 80 kHz에서 최고 97%로 가장 높은 살균효과를 보였다.

## 3. 5각형의 초음파 처리조

### 3.1 초음파 처리조의 설계 및 제작

대부분이 연속식인 식품제조공정을 감안하여 볼 때 배치식 보다

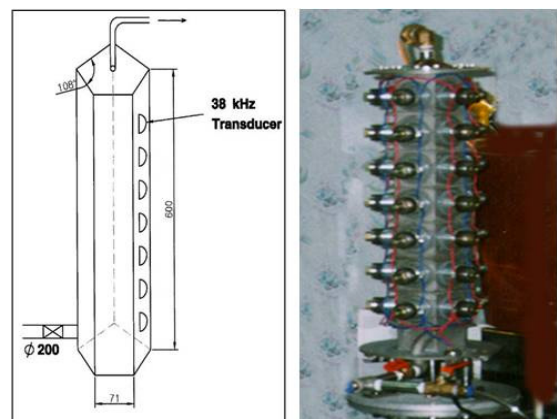


Fig. 4 Structure of pentagonal ultrasonic sterilization equipment

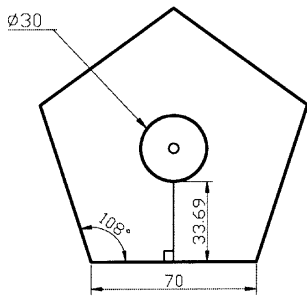


Fig. 5 Sectional view of pentagonal ultrasonic sterilization equipment

Table 1 Sterilizing effect of sonication alone on E. Coli KCTC 2441 for the treatment of flow rate

Treatment flow rate	Number of bacteria (cells/ml)		Sterilizing effect (%)
	Before treatment	After treatment	
2 L/min	$1.6 \times 10^3$	$5.5 \times 10^2$	65.6

는 연속식의 초음파장치 개발이 필요하게 되는 바, Fig. 4와 같이 연속식 5각조(pentagonal)의 초음파장치를 설계 및 제작하였으며, 배치식에 비해서 에너지 밀도를 높이고 처리 용량도 늘렸다.

설계사양으로 초음파 진동자는 38, 40 kHz 2가지를 사용하였으며, 인가전력은 2,750 W, 처리조의 용량은 5,203 ml, 에너지밀도는 0.528 W/ml, 처리유량은 2 L/min이다. Fig. 5는 5각조 처리조의 단면으로서 중심부에는 40 kHz 푸시-풀(push-pull type) 진동자가 위치하며, 각 변의 중심부에는 38 kHz 랑즈빈(Langevin type) 진동자가 위치하게 된다. 이와 같이 주파수가 약간 다른 2종류의 진동자를 적용함으로써 정재파를 방지하는 외국의 연구사례를 감안하였으며<sup>5)</sup>, 아울러 본 연구에서 독자적인 홀수각형으로 설계함으로써 정재파가 방지되도록 하였다. 5각조 처리조의 살균효과를 알아보기 위해 상온에서 E. Coli KCTC 2441을 대상으로 처리유량 2 L/min로 하여 살균실험을 수행하였다. Table 1은 실험 결과로서 초음파 처리전 초기 세균수가  $1.6 \times 10^3$  cell/ml에서 처리 후에는  $5.5 \times 10^2$  cell/ml로 감소함으로써 65.6%의 살균효과를 보였다.

#### 4. 7각형의 초음파 처리조

##### 4.1 초음파 처리조의 설계 및 제작

배치식 및 5각조 초음파장치 등의 기초연구 결과를 고려해 볼 때 초음파를 식음료의 살균공정에 적용할 만큼 스케일 업(scale-up) 하기 위해서는 보다 더 긴 처리시간과 적절한 에너지밀

도가 필요하다. 이에 따라 대용량의 연속식 초음파장치가 요구되는 바, Fig. 6과 같이 연속식 7각조의 초음파장치를 설계 및 제작하였다. 주요 사양으로, 초음파의 주파수는 40 kHz, 인가전력은 5,900 W, 처리조의 용량은 20 L, 에너지 밀도는 0.295 W/ml이다. 살균 실험공정은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 처리 전 저장조에 heater를 설치하여 저온(55°C)에서 초음파를 병행한 실험을 할 수 있도록 하였고, 초음파 처리조 뒤에는 처리된 식음료를 냉각할 수 있는 열교환기를 설치하였으며, 처리된 식음료를 저장할 수 있는 저장조를 두었다.

초음파 처리조는 정재파를 방지할 수 있도록 7각형의 구조로 설계하였으며, 푸시-풀 진동자를 처리조의 중앙에 설치하여 초음파의 에너지밀도를 높였다. 또한, Fig. 7의 초음파 처리조 외부에는 다수의 랑즈빈 진동자가 부착되게 되고 이로부터 조사되는 초음파의 높은 음압이 푸시-풀 진동자의 표면에 걸리게 되면 진동자의 임피던스가 변화되어 출력이 저하될 수가 있다. 또한 온도에 따라 초음파의 파장이 달라지게 되므로 이러한 점들을 설계에 감안하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 두 진동자 간의 거리를 설계함으로써 위에 언급한 문제점들을 방지할 수 있도록 하였다.

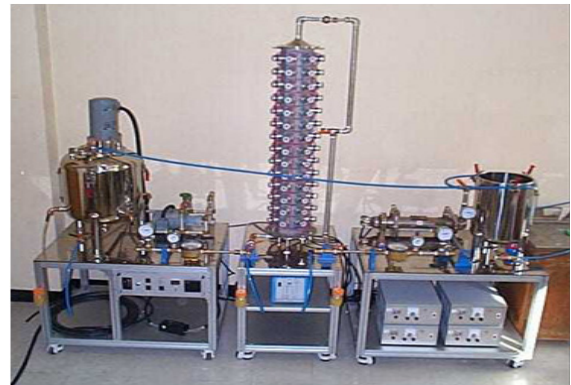


Fig. 6 Heptagonal ultrasonic sterilization equipment of flow type

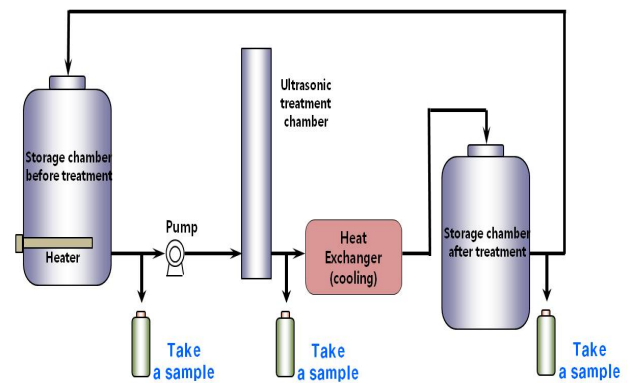


Fig. 7 Process chart for heptagonal ultrasonic sterilization equipment

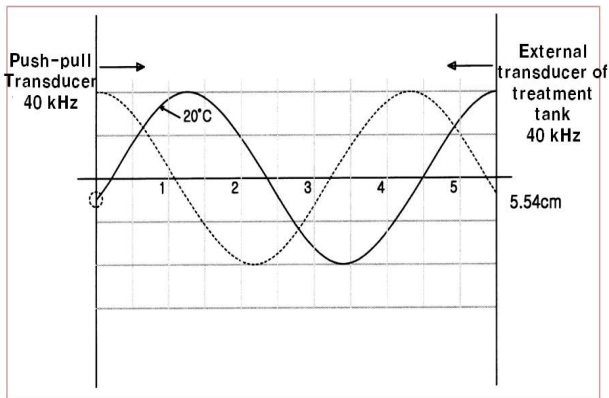


Fig. 8 Distribution of sound pressure in treatment chamber

#### 4.2 초음파 단독 실험

7각조 처리조에 대한 상온에서의 초음파 단독 실험은 우선 처리조 및 배관라인을 95°C에서 15분간 살균한 후, 20°C로 냉각시키고, 식음료에 균주를 접종하였으며, 2 L/min 처리유량에서 초음파로 살균하는 공정으로 진행되었다. 대상균주는 E. Coli KCTC 2441 과 E. Coli DH5a로서 35°C에서 24시간 배양한 후 생균수 검사를 하였다. 실험결과는 Table 2에 나타내고 있으며 처리유량 2 L/min에서 100%의 살균을 보임으로써 열을 전혀 가하지 않은 초음파 단독의 살균효과를 확인하였다. 또한 이와 같은 조건에서 처리유량에 따른 영향을 관찰하기 위해 상온에서 2 L/min, 3 L/min, 5 L/min으로 유량을 달리하며 살균실험을 수행하였다. 실험결과는 Table 3, 4에 나타내었으며, 균주에 상관없이 처리유량이 증가함에 따라 살균효과는 감소하는 것으로 나타났다.

또한 5각조에서 실험한 2 L/min 처리유량의 살균효과와 비교해 보았다. 5각조의 초기 세균수  $1.6 \times 10^3$ , 살균효율 65.6%인것에 반해 7각조에서는 초기 세균수  $52 \times 10^0$ , 살균효율 100%로 나타났다. 여기서 초음파의 특성상 초기 세균수가 적을수록 살균효율이 감소하게 되는 점을 감안하여 볼 때, 7각조 처리조가 훨씬 더 높은 살균효율을 보이고 있으며, 따라서 7각조 처리조에서 더 강력한 초음파 반응장이 형성되는 것으로 분석되었다.

Table 2 Sterilizing effect of sonication alone

Kinds of bacteria	Number of bacteria (cells/ml)		Sterilizing effect (%)
	Before treatment	After treatment	
E. Coli KCTC 2441	$2 \times 10^1$	0	100
E. Coli KCTC DH5a	$52 \times 10^0$	0	100

Table 3 Sterilizing effect of sonication alone on E. Coli KCTC 2441 for the treatment of various flow rate

Treatment flow rate	Number of bacteria (cells/ml)		Sterilizing effect (%)
	Before treatment	After treatment	
2 L/min	$2 \times 10^1$	0	100
3 L/min	$63 \times 10^2$	$45 \times 10^1$	92.9
5 L/min	$33 \times 10^1$	$3 \times 10^1$	90.9

Table 4 Sterilizing effect of sonication alone on E. Coli KCTC DH5a for the treatment of various flow rate

Treatment flow rate	Number of bacteria (cells/ml)		Sterilizing effect (%)
	Before treatment	After treatment	
2 L/min	$52 \times 10^0$	0	100
3 L/min	$294 \times 10^3$	$68 \times 10^2$	97.6
5 L/min	$35 \times 10^1$	$56 \times 10^0$	84

#### 4.3 가온 초음파 실험

가온 초음파 실험은 초음파와 55°C의 저온 조건을 조합한 것으로서, 일반적인 대장균(E. Coli) 보다는 내열성이 강한 마이크로박테리움(M. lacticum KCTC 1625)을 선택하여 실험하였다. 마이크로박테리움은 63°C에서 30분, 또는 75°C에서 15분간 생존할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 실제로 이 균의 내열성을 알아보기 위해 55°C에서 초기균수를 변화시켜가면서 시간에 따른 생균수를 검사하였으며, 그 결과는 Table 5와 Fig. 9에 나타내었다. 균수는 처리시간 5분을 기점으로 하여 급격하게 감소하는 경향을 나타내었으나, 이후 감소가 둔화되는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 예비실험을 거쳐서 마이크로박테리움에 대한 가온(55°C) 초음파처리 실험을 수행하였다.

실험방법은 처리조 및 배관라인의 살균을 위해 95°C의 증류수를 15분간 순환시킨 후에 55°C의 온도로 냉각시키고 균주를 투여하여 1분간 교반한 다음, 3 L/min의 처리유량에서 실험을 수행하였다.

Table 5 Heat resistance property of microbacterium

Treatment time (min)	Number of bacteria (cells/ml)				
	$10^6$	$10^5$	$10^4$	$10^3$	$10^2$
0	6100000	600000	62000	6200	620
5	41600	6700	510	71	1
10	22300	4960	330	40	1
15	13600	3620	267	34	1

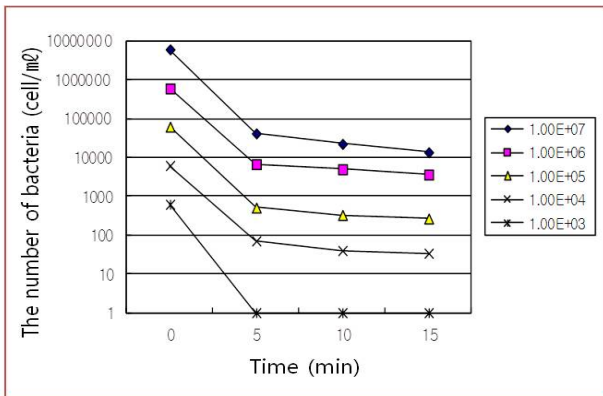


Fig. 9 Experiment on heat resistance of microbacterium at 55°C

Table 6 Sterilizing effect of sonication on microbacterium with heat (55°C)

Test condition	Number of bacteria (cells/ml)		Sterilizing effect (%)
	Before treatment	After treatment	
3 L/min, sonication, 55°C	351×10 <sup>0</sup>	37×10 <sup>0</sup>	89.5

실험 결과는 Table 6과 같이 처리전의 균수는 351 cell/ml에서 처리 후 37 cell/ml로 감소하였으며, 약 89.5%의 살균효과를 보였다.

4.4 초음파 후 저온살균 실험

초음파 후 저온살균은 가온 초음파 실험과는 달리 먼저 초음파로 살균한 후에 저온으로 일정시간 살균을 하는 방법으로써, 3 L/min 유량으로 초음파처리 후에 시료를 바로 저온(55°C)으로 유지하고 5분 간격으로 생균수를 검사하였다. Table 7에 나타난 실험 결과를 볼 때 대장균뿐만 아니라 내열성이 강한 마이크로박테리움도 초음파 처리 후 저온살균과정에서 5분 이내 100% 살균효과를 나타내었다. E. Coli KCTC2441은 55°C에서 약 30분간 생존하고, M.lacticum KCTC 1625는 65°C에서 약 30분간을 생존할 수 있는 내열성 균임을 감안하여 볼 때 초음파를 이용하여 살균효율 제고와 처리시간 단축이 가능하므로써 효과적인 살균처리방법으로 분석되었다.

가온 초음파 실험과 초음파 후 저온살균 실험에 있어서는 초음파와 저온(55°C)살균처리를 조합하고 분리하는 차이만 있을 뿐, 처리 유량 3 L/min과 처리온도 55°C 등의 실험조건은 동일한 바, 두 방법의 실험결과를 비교해 보았다. 저온(55°C)조건에서 초음파처리를 병행한 가온 실험의 경우 마이크로박테리움의 살균효과가 89.5%로 나타났으나, 초음파 후 저온살균 실험에서는 완전히 살균된 것으로 나타남에 따라 두 개의 처리과정을 분리해서 수행한 경

Table 7 Results of sterilization at 55°C after sonication alone

Kinds of bacteria	Sonication alone (3 L/min)		Sterilization at 55°C 5 min
	Number of bacteria before treatment (cells/ml)	Number of bacteria after treatment (cells/ml)	
Microbacterium (M. lacticum KCTC 1625)	243×10 <sup>2</sup>	53×10 <sup>2</sup>	0
Colon bacterium (E. Coli KCTC 2441)	812×10 <sup>2</sup>	145×10 <sup>2</sup>	0
	63×10 <sup>2</sup>	45×10 <sup>1</sup>	0

우가 더 높은 살균효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 살균에 걸리는 시간에 있어서도 가온 초음파 실험에서는 살균시간이 약 7분 이상이 소요됨에도 불구하고 100% 살균이 되지 않았으나, 초음파 후 저온살균 실험에서는 5분 이내에 100% 살균이 됨으로써 처리 시간에 있어서도 더 효율적인 것으로 분석되었다.

한편, 기존의 65°C에서의 30분간 살균하는 저온살균법과 비교해 볼 때 30분에서 5분 이내로 살균시간을 단축할 수 있었다. 또한 살균온도도 약 10°C 이상 감소시킬 수 있었으며, Table 3, 4와 같이 처리유량에 따른 초음파 단독 실험결과를 고려해 볼 때 처리유량도 5 L/min 까지 증대가 가능할 것으로 예측되었다.

4.5 초음파에 의한 영양소 변화 실험

초음파가 영양소에 미치는 영향을 알아보기 위해 우유 17종과 사과즙 15종에 대해 초음파 처리 전·후의 영양소 변화상태를 아미노산 분석기로 분석하여 비교해 보았다.

우유와 사과즙을 54°C 와 60°C로 가온 한 후 배양된 세균을 접종하고, 살균실험을 수행하였으며, 실험 전·후에 시료를 채취하여 영양소에 대한 변화를 비교하였다. Table 8, 9는 살균실험 전·후의 우유와 사과즙에 대한 아미노산 분석결과를 나타내고 있다.

Table 8 Variation of amino acid composition of milk

Amino acid	Blank	54°C	54°C, ultrasonic	60°C	60°C, ultrasonic
Aspartic acid	101.16	102.01	101.79	102.18	102.68
Threonine	57.64	58.28	58.09	56.03	57.25
Serine	68.95	69.25	69.57	56.68	69.76
Glutarnic acid	283.90	292.88	298.13	292.11	289.03
Proline	122.01	123.94	125.47	124.18	123.72
Glycine	24.63	24.81	25.59	25.86	24.82
Alanine	41.34	41.05	41.66	41.16	41.57

**Table 9 Variation of amino acid composition of apple**

Amino acid	Blank	54°C, ultrasonic
Aspartic acid	15.307	15.613
Threonine	0.587	0.631
Serine	1.965	1.944
Asparagine	184.742	187.886
Glutamic acid	3.398	3.369
A-aminoapodic	0.145	0.177
Glycine	0.083	0.098

살균실험 전과 초음파처리를 하지 않은 54°C 및 60°C, 그리고 초음파처리를 병행한 54°C 및 60°C에서의 실험결과를 비교해 볼 때 초음파에 의한 아미노산의 특이한 성분변화가 나타나지 않았으며, 이로써 식음료에 있어서 초음파가 영양소 파괴에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 식음료에 대한 초음파 살균기술을 개발하기 위해서 배치식과 연속식 5각조의 초음파 장치를 제작하여 살균효과에 대한 기초연구를 수행하였고, 이를 기반으로 살균 처리량을 증대시키기 위해서 연속식 7각조 초음파장치를 제작하였으며, 이 장치를 이용하여 초음파 단독 실험, 가온 초음파 실험, 초음파 후 저온살균 실험 등을 수행하여 살균효과를 분석하였다.

연속식 7각조 초음파장치를 이용한 실험결과를 요약해 보면, 대장균에 대한 초음파 단독 실험 결과, 처리유량 2 L/min에서 100%의 살균효과를 보였고, 초음파 후 저온(55°C)살균 실험에서는 처리유량 3 L/min로 초음파 처리후 저온처리를 하게 되면 5분 이내에 100% 살균효과를 보였으며, 기존의 저온살균법과 비교하여 살균시간을 30분에서 5분 이내로 단축할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 우유와 사과주스에 대해 초음파처리 전·후의 영양소 성분을 검사한 결과, 초음파에 의해 영양소가 파괴되지 않음을 확인할 수 있었다.

따라서 상온에서 3 L/min까지 살균처리 할 수 있는 초음파 기술이 개발되었으며, 이어서 UV 등과 조합함으로써 상호 보완적이고 시너지효과가 기대되는 연구가 후속으로 수행될 예정인 바, 이러한 조합 살균처리에 관한 연구를 통하여, 초음파 살균처리기술의 실용화가 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 2012년도 중소기업청 재원의 출연연·중소기업 공동 기술개발사업으로 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

## References

- [1] King, A. D., Bolin, H.R., 1989, Physiological and microbiological storage stability of minimally processed fruits and vegetable, *Food Technol* 43:2 132-135.
- [2] Um, H. J., Kim, D. M., Choi K. H., Kim, G. H., 2005, A survey on consumer's perception of fresh-cut, agri-food products for quality enhancement, *Korean Soc Food Sci Nutr* 34 1566-1571.
- [3] Vanklink, E. G. M., Smulders, F. J. M., 1989, Sanitation by ultrasonic cavitation of steel mesh gloves used in the meat industry, *Journal of Protection* 52:9 660-664.
- [4] Sala, F. J., Burgos, S., Lopez, P., Raso, J., Effects of heat and ultrasound on microorganisms and enzymes, *New Methods of Food Preservation*. 176-204.
- [5] Evans, D. A., 1986, Application of ultrasound for disinfection and pasteurization, Doctorate Thesis, University of Massachusetts, United States.
- [6] Garcia, M. L., Burgos, J., Sanz, B., Ordonez, A., 1989, Effect of heat and ultrasonic waves on the survival strains of bacillus subtilis, *Journal of Applied Bacteriology* 67 619-628.
- [7] Ordonez, J. A., Aguilera, M. A., Garcia, M. L., Sanz, B., 1987, Effects of combined ultrasonic and heat treatment (thermoultrasonication) on the survival of a strain of staphylococcus aureus, *Journal of Dairy Research* 54 61-67.
- [8] Wrigley, D. M., Llorca, N. G., 1992, Decrease of salmonella typhimurium in skim milk and egg by heat and ultrasonic wave treatment, *Journal of Food Protection* 55:9 678-680.
- [9] Lillard, H. S., 1993, Bactericidal effect of chlorine on attached salmonellae with and without sonification, *Journal of Food Protection* 56:8 716-717.
- [10] Sierra, G., Boucher, R. M. G., 1971, Ultrasonic synergistic effects in liquid-phase chemical sterilization, *Applied Microbiology* 22:2 160-164.
- [11] Boucher, R. M. G., 1979, A tool to improve biocidal efficacy of sterilants or disinfectants in hospital and dental practice, *Journal of Pharmaceutical Sciences* 14:1 1-12.
- [12] Earnshaw, R. G., Appleyard, J., Hurst, R. M., 1995, Understanding physical inactivation processes: combined preservation opportunities using heat, ultrasound and pressure, *Journal of Food Microbiology* 28 197-219.
- [13] Dekernion, P. S., Reimers, R. S., Leftwich, D. B., 1980, Application of ultrasonics and electrostatics in wastewater treatment and disinfection, *National Technical Information Service* 1-41.