

초음파가 얼음과 파라핀 용해에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

이 재 효[†], 김 태 훈^{*}

건국대학교 기계공학과, *건국대학교 대학원

A Experimental Study on the Ultrasonic Influence for Melting the Paraffin the Ice

Jai-Hyo Lee[†], Tae-Hun Kim^{*}

Department of Mechanical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
Graduate School, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received August 16, 2001; revision received September 20, 2001)

ABSTRACT: This paper presents experimental works on the ultrasonic influence during melting of ice and paraffin and compared the paraffin's result with ice's results. The experiments was carried out under two setting conditions.: 1) Heater without ultrasonic vibration, 2) heater with ultrasonic vibration. Experimental observations show that the ultrasonic vibration enhances significantly the phase-change process (melting) so that the melting time is reduced about 16~25% compared to those of melting process without ultrasonics in the melting of both ice and paraffin. But the influence of ultrasonics was not significant to affect the reduction of the power consumption. In the case of paraffin, the reduction rate of power consumption was about 20%, but the reduction of the power consumption was increased about 0~12%.

Key words: Ultrasonic(초음파), Melting(용해), Paraffin(파라핀), Ice(얼음)

1. 서 론

식품의 저장기간 향상을 위하여 냉동기술은 많은 발전을 이루어 왔다. 하지만 냉동 후에 식품을 해동하기 위한 기술발전이 미흡할 뿐 아니라 그 필요성도 충분히 인식되지 않고 있는 것이 지금의 현실이다.

채래의 해동방법으로는 4℃의 저온해동, 상온해동, 물해동, 열풍해동 등의 방법이 있지만 긴 해동시간으로 인하여 미생물의 성장이 빠르고 수분증발과 드립(drip) 형성에 의한 중량손실이 발생하며, 표면의 산화로 인하여 색이 변화하고 표면이 건조하는 등의 문제가 발생되고 있다.

기존방법의 문제로 인해 해동시간을 단축하여 채래의 해동방법의 문제점을 극복하고 경제적인 효과를 얻기 위한 급속해동에 관한 연구들이 진행되어 오고 있다. 급속해동에는 진공해동과 전기적 에너지를 이용한 방법이 있다. 진공해동의 경우에는 낮은 온도에서 해동시킬 수 있는 장점이 있는 동시에 진공상태의 탈기상태이므로 식품의 산화가 억제될 수 있지만 진공장치와 소음문제로 인하여, 일반적으로 사용하기에는 어려운 면이 있다. 전기적 에너지를 이용한 대표적인 방법이 마이크로웨이브를 이용한 방법이다. 마이크로웨이브를 이용한 경우, 세균번식을 막고 품질의 저하 없이 드립손실을 줄이는 동시에 가장 신속한 방법이지만 주파수가 높을수록 침투 깊이가 낮아져 제품의 두께가 제한된다.

이런 이유로 28 kHz, 50 kHz의 초음파를 이용하여 저주파가 해동에 미치는 영향과 그 원인이

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-450-3469; fax: +82-2-447-5886

E-mail address: jaihyole@konkuk.ac.kr

되는 요소를 찾기 위해 우선, 파라핀과 얼음을 매질로 하여 직육면체 형태의 경우에 대하여 실험하였다. 그 결과 실제 가공물의 해동에 있어 용해시간을 단축하고 사용되는 에너지를 줄일 수 있는 방법을 찾아내고자 하였다.

우선 이제까지 공학적인 관점에서 연구된 논문들을 살펴보면 Cho and Sunderland⁽¹⁾는 상변화 물질이 용해과정과 응고과정에서의 열전도 문제에 대하여 연구하였고, Yen⁽²⁾은 상변화 과정에서 고체와 액체의 경계에서 자연대류의 현상에 대해 연구하였으며, Larson and London⁽³⁾은 초음파의 교란에 의해 표면에서 액체로의 열전달이 증가한다는 결과를 얻었다. 초음파 진동이 용해속도에 영향이 있다는 것을 주장한 Hong⁽⁴⁾의 논문에는 주파수가 증가할수록 초음파의 영향이 증가하는데 상변화 물질의 용해시 물질 내 열전달을 촉진시켜 용해시간을 단축시킨다고 하였다.

한편 식품공학에 관련된 논문을 살펴보면 1997년의 Kang et al.⁽⁵⁾은 해동온도가 해동에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 1998년의 발표된 Kim et al.⁽⁶⁾은 해동속도가 제품에 미치는 영향에 관하여 연구하였고, 1999년의 Lee and Park⁽⁷⁾은 마이크로웨이브를 이용한 급속해동에 대해 연구하였다.

이상의 논문들을 바탕으로 실험에 앞서 해동에 영향을 주는 여러 요소 중에서 관심을 둔 것은 해동시간과 소비전력량, 해동시에 제품의 온도의 균일한 정도이다. 또한 본 논문에서 행해진 얼음에 대한 실험결과는 1999년의 Um⁽⁸⁾의 파라핀에 대한 실험결과와 비교하여 초음파가 파라핀에 미치는 영향이 얼음에도 유사하게 나타나는지 판별하고자 하였다. 덧붙여 매질의 하단에서 조사되는 초음파가 그 위치에 의한 에너지 전달에 큰 영향이 있는지 알아보기 위해 파라핀에 대해 하단에 열판을 설치한 뒤에 실험하여 그 영향을 측정하였다. 이 때에 온도가 낮아질 때의 영향을 확인하고자 열판의 온도를 점차 낮추어 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 초음파 탱크

초음파 탱크는 Fig. 1과 같이 내부 크기가 높

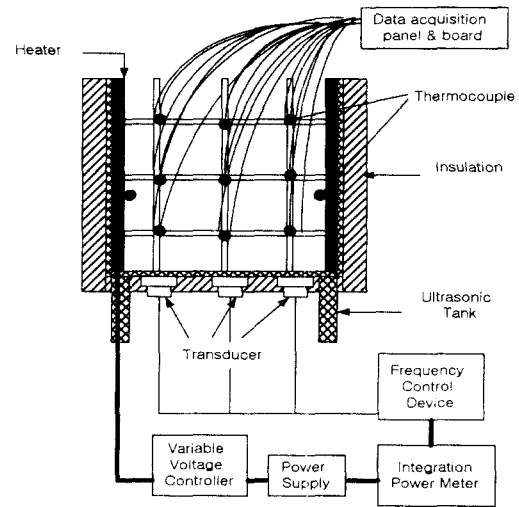


Fig. 1 The diagram of ultrasonic tank.

이 16.5 cm, 길이 23.5 cm, 폭 14.7 cm, 두께 0.1 cm로 SUS 316L을 사용하여 초음파에 의한 침식 작용을 최소화하였으며, 하단에는 진동자의 부착 공간을 위해 네 개의 지지대를 설치하였다. 또한 벽을 통한 공기 중으로의 열손실을 막기 위하여 탱크 외부에 6 mm 석면판, 3 cm 압축 스티로폼, 3 mm 합판 순으로 단열벽을 설치하여 단열이 되도록 하였다. 이 열손실을 내외부의 온도로 계산하면 전체 입력전력의 0.35~0.5% 정도를 보여주고 있어 전체 해석에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

2.1.2 초음파 발생장치

28 kHz, 50 kHz의 일정한 주파수를 발생하기 위해서 진동자와 주파수 발생장치(generator)를 특수 제작하였다. 진동자는 국산 "일산선택"사의 제품인 IBL-35 30D-50H(35φ)를 사용하였고, 주파수 발생장치는 초음파 발생장치와 주파수를 발생하여 전송할 수 있는 회로를 구성하여 케이스에 내장시키고 전원을 개폐할 수 있도록 스위치를 설치하였다. 진동자와 초음파 탱크의 접촉은 특수 집착제와 자동가열로 등에 의한 고도의 진동자 집착기술을 이용해서 고강도로 집착하여 진동자의 이탈을 방지하였다.

2.1.3 열 공급장치

초음파 탱크의 양쪽 수직 가열판은 가로 14.2

cm, 세로 16.2cm, 두께 0.2cm의 동판과 같은 크기의 두께 6mm 석면판 사이에 열선을 배선하고 고온에 견딜 수 있는 접착제로 접착하여 가열기 위에 일정한 열량이 분배될 수 있도록 하였다. 가열기의 바깥면에는 두꺼운 섬유유리 절연체로 절연과 단열이 되게 하였고, 안쪽 면은 파라핀과 직접 접촉되도록 하였다. 또한 열판과 열전대 온도계를 연결하여 일정 온도일 경우 전원을 차단해 주는 온도조절장치와 릴레이 회로를 구성하였다. 그리고, 초음파 탱크와 가열기에 소요되는 전력량을 산출하기 위해 적산전력계를 통하여 초음파 탱크 및 가열기에 전력이 공급되도록 배선하였다.

2.1.4 온도 감지장치

용해과정 동안에 온도분포를 측정하기 위하여 지름 0.5mm의 18개 크로멜-알루멜(K-type)의 열전대와 이를 지지할 수 있는 격자를 제작하여 탱크 내부에 설치하였다. 열전대의 설치형태는 바닥에서 3cm 이격 후 4cm 간격으로 3단을 설치하였고 양 열판에서 각각 3cm 이격 후 8cm 간격으로 3축을 설치하였는데 하단의 열판 쪽에서부터 채널 1, 2, 3-4, 5, 6의 순으로 설치하고 중간단 7, 8, 9-10, 11, 12 및 상단 13, 14, 15-16,

17, 18번 채널로 각각 설치한다. 격자의 재질은 설치된 열전대의 측정력과 물질 내의 열전달에 영향을 최소화하기 위해 나무를 사용하였다. 또, 온도조절을 위한 열전대를 2개의 열판 중간부분에 각각 부착하여 열판의 온도가 릴레이 회로에 의해 조절되도록 설치하였다.

2.1.5 데이터 처리 시스템

주프로그램의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 열전대로부터 감지된 신호를 DT-730T 보드를 통하여 18채널로 받아서 주프로그램인 Hewlett-Packard사의 DT-VEE를 이용해 매 3초 간격으로 데이터를 얻었다.

2.2 실험방법

용해실험을 하기에 앞서 열전대를 격자에 설치 후 백금온도계를 이용하여 열전대 및 온도조절계를 보정하고 열판에 전류를 가하여 용해를 시작한다.

Table 1은 표준온도(20°C)에서의 파라핀의 물성치를, Table 2는 0°C에서의 얼음의 물성치를 나타내며, 실험결과는 상호 비교한다.

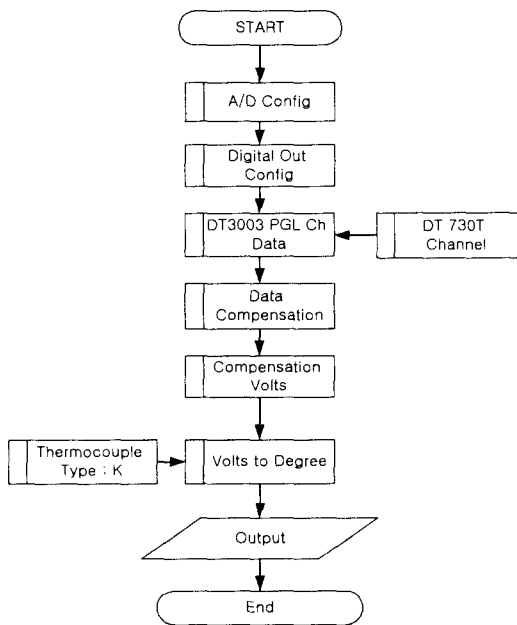


Fig. 2 Data processing outline.

Table 1 Properties of paraffin

Property	Numerical value
Thermal conductivity (κ)	0.2386 W/(m °C)
Density (ρ)	863.03 kg/m ³
Heat of fusion (Δh)	241.60 kJ/kg
Specific heat (c_p)	2872.47 kJ/kg °C
Fusion temp (°C)	53.2
Flash point (°C)	204.44
Viscosity (98.9°C)	0.00028 m ² /s

Table 2 Properties of ice

Property	Numerical value
Thermal conductivity (κ)	2.22 W/(m °C)
Density (ρ)	910 kg/m ³
Heat of fusion (Δh)	333.6 kJ/kg
Specific heat (c_p)	0.84 kJ/kg °C
Fusion temp (°C)	0°C
Flash point (°C)	100°C
Viscosity (98.9°C)	0.00000126 m ² /s

2.2.1 얼음에 대한 실험

1) 열판만을 이용한 용해

초음파를 방사하지 않은 상태에서 얼음 용해과정의 온도분포를 실험한다. 실험의 종료시점은 초음파 탱크 내의 얼음이 완전히 용해되어 하부채널 6개의 평균 온도가 20℃일 때로 한다.

- (1) 열판이 1개인 경우
- (2) 열판이 2개인 경우

2) 열판과 초음파를 동시에 작동

열판과 초음파 발생장치를 동시에 작동하여 용해과정의 온도분포를 실험한다. 초음파 발생장치가 전력측정기를 이용하여 소요전력량을 측정한다.

- (1) 열판이 1개와 50 kHz의 초음파
- (2) 열판이 2개와 50 kHz의 초음파
- (3) 열판이 1개와 28 kHz의 초음파

2.2.2 파라핀에 대한 실험

1) 온도가 변화하는 열판

초음파를 방사하지 않은 상태에서 2개 열판과 하부에 열판에서 전원을 공급하여 온도분포를 실험한다. 실험의 종료시점은 초음파 탱크 내의 파라핀이 완전히 용해되어 채널 18개의 평균 온도가 100℃일 때로 한다. 열판의 온도는 각각 100℃, 90℃, 80℃, 70℃로 한다.

2) 온도가 변화하는 열판과 초음파

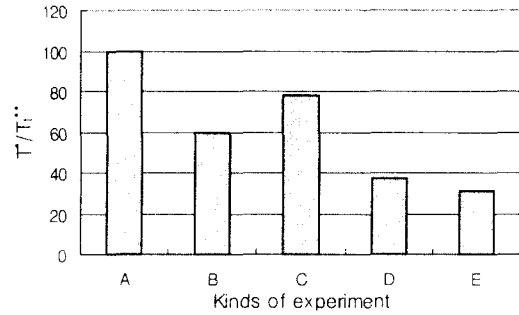
하부의 열판 대신에 초음파(50 kHz)를 작동시킨다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 얼음에 대한 실험결과

3.1.1 얼음의 용해시간

Fig. 3은 Table 3의 내용 중 용해시간을 열판



- * : melting hours
- ** : melting hours for A case
- A : one heater without ultrasonic
- B : one heater with ultrasonic 28 kHz
- C : one heater with ultrasonic 50 kHz
- D : two heater without ultrasonic
- E : two heater with ultrasonic 50 kHz

Fig. 3 Distribution of normalized melting time for ice.

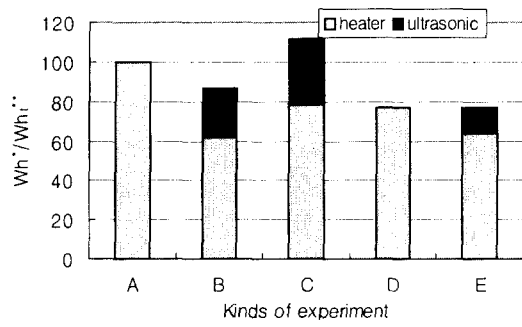
하나와 초음파를 조사하지 않은 경우를 기준으로 무차원화한 것이다. 하나의 열판만을 사용한 것을 기준으로 하면 하나의 열판과 28 kHz를 사용한 것은 용해시간을 40% 하나의 열판과 50 kHz를 사용한 것은 22%를 줄일 수 있었으며, 열판을 두 개 사용한 초음파를 사용한 경우는 68%의 시간을 줄일 수 있었다.

3.1.2 얼음의 소비전력량

Fig. 4은 Table 3의 내용 중에 소비전력량을 열판 하나와 초음파를 조사하지 않은 경우를 기준으로 무차원화한 것이다. 이때 하나의 열판과 28 kHz를 사용하는 경우는 13%의 소비전력량을 줄일 수 있었으며, 50 kHz를 사용하는 경우에는 11% 증가하였다. 그리고 열판 두 개를 사용하는 경우에는 23%, 열판 두 개와 50 kHz를 사용하는

Table 3 The comparison of melting time and electricity consumption

Parameter	Melting time (min)	Electricity consumption quantity (W-h)		
		Heater	Ultrasonic	Total
One heater without ultrasonic effect	267.35	718.6		718.6
Two heater without ultrasonic effect	100.1	553.0		553.0
One heater with 28 kHz ultrasonic effect	158.8	443.1	179.4	622.5
One heater with 50 kHz ultrasonic effect	208.45	565.8	238.5	804.3
Two heater with 50 kHz ultrasonic effect	84.0	457.1	94.9	552.0



* : electricity consumption
 ** : electricity consumption for A case
 A : one heater without ultrasonic
 B : one heater with ultrasonic 28 kHz
 C : one heater with ultrasonic 50 kHz
 D : two heater without ultrasonic
 E : two heater with ultrasonic 50 kHz

Fig. 4 Distribution of normalized electricity consumption for ice.

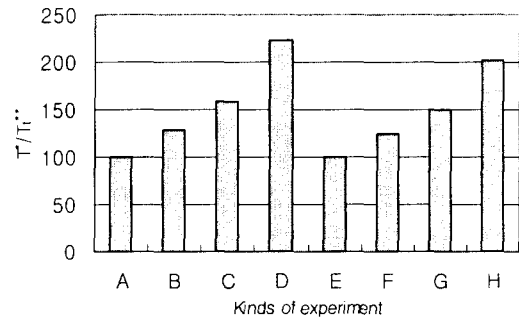
경우에는 26% 정도의 소비전력량을 줄일 수 있었다.

3.2 파라핀에 대한 실험결과

Table 4는 파라핀에 대한 실험결과를 나타낸 것이다.

3.2.1 파라핀의 용해시간

Fig. 5는 하부에 열판을 설치하고 전체 열판의 가열온도가 100℃인 경우를 기준으로 열판의 온도에 따른 용해시간을 무차원화한 것이다. 온도가 90~70℃로 낮아질 때 용해시간은 열판만을



* : melting time
 ** : melting time for A case in A~D case or E case in E~H case
 A : 100℃ without ultrasonic
 B : 90℃ without ultrasonic
 C : 80℃ without ultrasonic
 D : 70℃ without ultrasonic
 E : 100℃ with ultrasonic 50 kHz
 F : 90℃ with ultrasonic 50 kHz
 G : 80℃ with ultrasonic 50 kHz
 H : 70℃ with ultrasonic 50 kHz

Fig. 5 Distribution normalized melting time for paraffin.

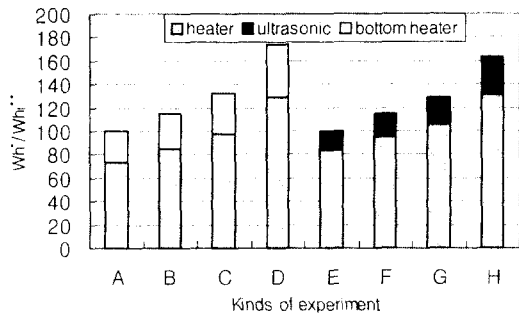
사용하는 경우는 28~123% 증가하였고 초음파를 사용하는 경우에는 25~102% 증가하여 초음파를 사용하는 경우가 적은 증가를 보였다.

3.2.2 파라핀의 소비전력량

Fig. 6은 하부에 판을 설치하고 열판의 가열온도가 100℃인 경우를 기준으로 열판의 온도에 따른 소비전력량을 무차원화한 것이다. 전체 열판의 가열온도가 90~70℃로 낮아질 때 열판만을 사용한 경우는 15~73%, 초음파를 사용한 경우가

Table 4 The comparison of melting time and electricity consumption

Parameter	Melting time (min)	Electricity consumption (W-h)			
		Heater	Ultrasonic	Bottom heater	Total
100℃ heater without ultrasonic effect	92	599.43		209.79	809.22
90℃ heater without ultrasonic effect	118	688.97		241.13	930.10
80℃ heater without ultrasonic effect	146	791.39		276.99	1068.38
70℃ heater without ultrasonic effect	206	1038.85		362.55	1398.40
100℃ heater with ultrasonic effect	94	612.46	113.40		725.86
90℃ heater with ultrasonic effect	118	693.63	142.35		835.98
80℃ heater with ultrasonic effect	141	764.29	170.09		934.38
70℃ heater with ultrasonic effect	190	955.38	229.20		1184.58



- * : electricity consumption
- ** : electricity consumption for A case in A~D case or E case in E~H case
- A : 100°C without ultrasonic
- B : 90°C without ultrasonic
- C : 80°C without ultrasonic
- D : 70°C without ultrasonic
- E : 100°C with ultrasonic 50 kHz
- F : 90°C with ultrasonic 50 kHz
- G : 80°C with ultrasonic 50 kHz
- H : 70°C with ultrasonic 50 kHz

Fig. 6 Distribution normalized electricity consumption for paraffin.

15~63%로 초음파의 경우가 적은 소비전력량의 증가를 보였다.

3.3 얼음과 파라핀에 대한 실험의 비교

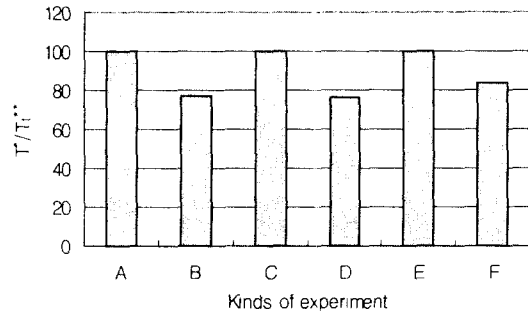
파라핀과 얼음에 대해서 두 개의 열판을 사용하고 초음파를 사용하지 않은 경우를 기준으로 초음파를 사용한 경우를 무차원화하였다. 덧붙여 고형물을 포함한 파라핀의 경우도 넣어 그 경향을 비교하였다.

3.3.1 용해시간 비교

Fig. 7은 용해시간을 비교한 것이다. 파라핀의 경우 내부의 고형물에 관계없이 초음파를 사용한 경우가 23%의 용해시간 감소를 보였으며 얼음의 경우에는 16% 정도의 시간 감소를 보였다.

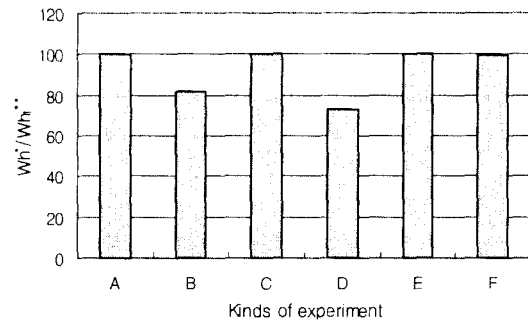
3.3.2 소비전력량 비교

Fig. 8은 소비전력량을 비교한 것이다. 파라핀 내부에 고형물이 있는 경우가 17%, 파라핀의 경우가 12% 감소하였지만 얼음의 경우에는 큰 변화가 없었다.



- * : melting time
- ** : melting time for A case
- A : two heater without ultrasonic for paraffin
- B : two heater with ultrasonic for paraffin
- C : two heater without ultrasonic for paraffin
- D : two heater with ultrasonic for paraffin
- E : two heater without ultrasonic for ice
- F : two heater with ultrasonic for ice

Fig. 7 Comparison of melting time of ice and paraffin (50 kHz).



- * : electricity consumption
- ** : electricity consumption for A case
- A : two heater without ultrasonic for paraffin
- B : two heater with ultrasonic for paraffin
- C : two heater without ultrasonic for paraffin
- D : two heater with ultrasonic for paraffin
- E : two heater without ultrasonic for ice
- F : two heater with ultrasonic for ice

Fig. 8 Comparison of electricity consumption of ice and paraffin (50 kHz).

3.4 용해시 온도분포

Fig. 9는 얼음에 대한 실험에서 열판 두 개만을 이용한 경우의 온도분포를 나타낸 것이며 Fig. 10은 얼음에 대한 실험에서 열판 두 개와 초음파

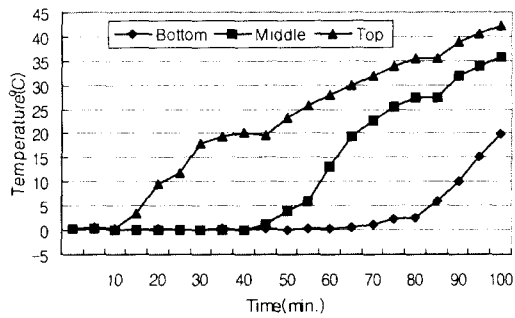


Fig. 9 Average temperature distribution on two heaters without ultrasonic for ice.

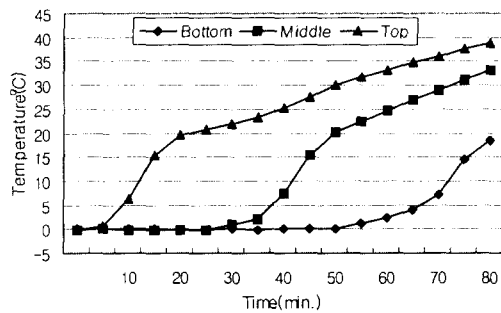


Fig. 10 Average temperature distribution on two heaters with ultrasonic 50 kHz for ice.

(50 kHz)를 사용한 경우의 온도분포를 나타낸 것이다. 하단, 중간단, 상단 각 6개 채널의 평균 온도를 취하여 서로간의 온도차를 비교하면 하단 부분이 용해되기 전까지는 초음파를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우 모두 유사한 경향을 보이나 하단이 용해되기 시작한 후에는 열판만을 사용한 경우가 초음파를 사용한 경우보다 최대 15% 정도 온도차가 증가하였다.

4. 결 론

초음파 이용에 따른 용해시간의 영향은 얼음의 경우 16~22% 감소하고 파라핀의 경우 25% 감소하여 유사한 경향을 보였지만 영향의 정도에는 차이가 있었다.

초음파 이용에 따른 소비전력량의 영향은 얼음의 경우 0~12% 증가하고 파라핀의 경우 20% 감소하는 경향을 보였다.

용해시간과 소비전력량에서의 이러한 결과는 파라핀의 점성이 물의 점성보다 약 200배 큰 값을 가져 액체상태에서 초음파의 교란효과에 의한 대류효과가 물보다는 더 큰 것으로 보이며, 얼음에서 50 kHz보다 28 kHz가 용해시간과 소비전력이 작은 것은 얼음의 밀도가 커서 초음파의 침투 깊이에 영향이 크기 때문으로 보이며, 추후 세밀하게 실험을 하여 검증할 필요가 있다.

파라핀의 용해과정에서 초음파의 사용이 내부의 온도를 균일하게 하는 데 영향을 미치는지의 여부는 뚜렷한 차이를 찾을 수는 없었다.

참고문헌

1. Cho, S. H. and Sunderland, J. E., 1969, Heat conduction problems with melting or freezing, *J. of Heat Transfer*, Aug., pp. 125-131.
2. Yen, Y. C., 1988, Melting of PCM, *Chem. Eng. progr. sym. ser.*, Vol. 65, No. 92, pp. 245-250.
3. Larson, M. B. and London, A. L., 1962, A study of the effects of ultimate vibration on convective heat transfer to liquids, *ASME*, 62-HT-44, pp. 62-68.
4. Choi, K. J. and Hong, J. S., 1990, Experimental studies of melting phenomena from a constant heat flux vertical plate, *Experimental Heat Transfer*, Vol. 3, p. 49.
5. Kang, H. J., 1997, Effect of Thawing and Stored Temperature on Growth of Pathogenic Microorganisms in Beef Cuts, *Korean J. Vet. Publ. Hlth*, Vol. 21, No. 2, pp. 159-163.
6. Kim, C. J., 1998, Studies on Physico-Chemical Characteristics of Forzen Beef at as Influenced by Thawing Rates, *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.*, Vol. 18, No. 2, pp. 142-148.
7. Lee, J. K. and Park, J. Y., 1999, Rapid Thawing of Frozen Pork by 915 MHz Microwave, *Korean J. Food Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 1, pp. 54-61.
9. Um, C. J., 1999, A experimental study on the ultrasonic influence for melting the par-

affin with solid particles, MS thesis, Konkuk University.