

평판형 열교환기에서의 제빙억제를 위한 초음파의 영향

조기량¹ · 최광일² · 김온³ · 박기원[†]

(Received September 30, 2016 ; Revised March 9, 2017 ; Accepted March 28, 2017)

Effect of ultrasonic waves on anti-freezing for plate-type heat exchanger

Ki-Ryang Cho¹ · Kwang-Il Choi² · On Kim³ · Ki-won Park[†]

요약: 본 연구는 저온환경에서의 평판형 열교환기에 대해 제빙을 억제할 수 있는 방법을 살펴보았으며, 그 방법으로 초음파의 발생에 따른 제빙특성을 관찰하였다. 본 실험에서 최적의 조건을 찾아내기 위해 에틸렌글리콜을 브라인으로 사용하고, 온도는 -8~-16°C로 순환시켰으며, 제빙에 사용된 물은 1~3mm 두께로 공급하여 데이터를 기록하였다. 또한 초음파의 발생정도에 따른 변화를 확인하기 위해 출력을 조절하여 실험을 진행하였다. 그 결과 제빙억제 효과는 브라인 온도, 제빙두께, 초음파 주파수의 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

주제어: 평판형 열교환기, 초음파, 제빙억제

Abstract: This study attempted to examine a method of anti-freezing on a plate-type heat exchanger in a low-temperature environment. Freezing condition was observed after ultrasonic waves were generated. Data were recorded to determine the optimal conditions for freezing. Ethylene glycol, which is commonly used in antifreeze formulations, was used as the brine, and the temperature was varied between -8 and -16°C. The water for freezing provided by the thickness of 1-3 mm. In addition, experiments were conducted by adjusting the output to identify the changes that occurred due to the incidence of ultrasonic energy. The results of the anti-freezing effect were brine temperature, freezing thickness, and frequency band of ultrasonic waves.

Keywords: Plate type heat exchanger, Ultrasonic, Anti-freezing

1. 서론

원통다관형 열교환기는 온도와 압력, 유체 등 사용조건 선택의 폭이 넓은 점과 요구되는 열교환 능력의 크기에 따라 다양한 제작이 가능하여 산업공정용으로 많이 사용되고 있다. 그리고 증기압축식 냉동장치에서의 다중관 열교환기의 성능에 관한 연구[1] 등 냉동·공조산업에서도 상용화되어 있는 냉수 생산용 냉각기의 대부분에는 원통다관형 열교환기가 적용되고 있다.

그러나 냉수 냉각용으로 운전 중인 냉동기의 냉매 관에서는 관 외부에 얼음이 생성되기 쉽고, 이 얼음이 성장하면서 주위의 관을 서로 밀어내게 되어 관이 파손되기도 한다. 그리고 냉동시스템에서는 이러한 현상으로 인해 액 압축을 유발시켜 치명적인 고장을 초래하기도 한다. 따라서 냉동시스템에는 동파방지를 위한 여러 가지 방법이 사용되고 있지만, 시스템을 정지시키지 않고 동결이 일어나지 않도록 하는 새로운 방법을 찾을 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 열교환기 표면에서의 동결 내지 착빙을 억제할 수 있는 방안을 찾기 위한 전 단계로서 우선 평판형 열교환기를 대상으로 하여 초음파를 이용하는 방법의 가능성을 강구하고자 하였다.

착빙을 억제하기 위하여 초음파를 이용하는 연구로서는, Palacios *et al.* [2]이 헬리콥터가 구름을 통과하며 비행할 때 날개에 착빙되어 커지는 얼음입자를 초음파를 이용하여 억제하였다는 연구결과를 들 수 있다. 국내에서는 Gong *et al.* [3]의 빙축열시스템에서 초음파(40 kHz)를 이용한 과냉각 아이스 슬러리 방식에 대한 연구, Lee *et al.* [4]의 열판과 초음파(28, 50 kHz)를 이용하여 저주파가 해동에 미치는 영향에 관한 연구, Youn *et al.* [5]의 초음파(28 kHz)를 가진 방향을 나누어 파라핀의 용융현상을 조사 등을 들 수 있다. 이 외에도 초음파에 의한 열전달 촉진현상에 관한 연구로, Kim *et al.* [6], Jeong [7][8], Yang *et al.* [9][10], Park *et al.* [11][12], Ryu *et al.* [13]의 연구도 있었지만 본 연구에서 수행하고자

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5732-8291>): Department of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Chonnam University, 50, Daehak-ro, Yeosu-si, Jeonnam, 59626, Korea, E-mail: pkw@jnu.ac.kr, Tel: 061-659-7274

1 School of Electrical, Electronic Communication and Computer Engineering, Chonnam University, E-mail: krcho@chonnam.ac.kr, Tel: 061-659-7236

2 Enes Eng, Co. LTD, E-mail: imcgi@jnu.ac.kr, Tel: 070-4708-1725

3 School of Electrical, Electronic Communication and Computer Engineering, Chonnam University, E-mail: kimon@jnu.ac.kr, Tel: 061-659-7230

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하는 동결의 억제라는 목적과는 다른 개념들로 이루어졌다.

따라서 본 연구에서는 열교환기 표면에서의 착빙을 억제할 수 있는 방안으로 초음파를 이용하였으며, 초음파 에너지가 제빙에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 동제 평판형 열교환기에 적용해 보았다.

동결의 대상으로는 물을 사용하였고, 초음파를 조사한 후의 데이터들과 비교 분석하는 방법으로 결과를 도출하였다. 또한 열교환기 내의 증발온도를 고려하여 다양한 온도의 브라인을 공급하였다. 그리고 기존 연구에서는 주로 저주파수에서의 제빙현상을 이용하고 있으므로 가급적 고주파수(1600, 1750 kHz)를 사용하고자 하였다. 또, 초음파 조사 시에 캐비테이션이 발생할 수 있다는 사실을 고려하여 초음파 조사에 의한 파장 이외의 현상에 의해 미치는 영향을 실험조건에서 제거하는 것도 중요하게 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 **Figure 1**과 같으며, 장치는 크게 브라인(에틸렌글리콜 30% 수용액)의 온도를 조절하는 항온조와 브라인 순환계, 그리고 시험구간으로 구성되어 있다.

브라인의 온도(제빙온도)를 조절하는 항온조의 용량은 700 L로 하였고, 시스템의 온도제어 편차는 설정 온도 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 을 유지하면서 3 HP 냉동시스템에 의해 냉각될 수 있도록 하였다. 그리고 물과 브라인의 순환을 위해 소형 순환펌프를 사용하였으며, 수조에는 약 10 L의 물이 외부와 단열된 상태로 보관되고 필요시 일정 부하를 더하기 위해 1.8 kW급의 전기히터를 설치하였다.

시험부의 스테인레스 수조는 W 370 mm, L 460 mm, H 200 mm의 크기로 하였으며, 2 mm 두께의 SUS 304재질을 사용하여 맞댄 부분을 모두 용접하였다. 수조의 외표면은 외부와의 열교환을 차단하기 위해 단열하였고, 바닥으로부터 50 mm 상부에 1.5 mm 두께의 동판을 설치하였다. **Figure 2**는 시험부에 설치된 동판을 간략히 나타낸 것으로, 크기는 W 460(± 2) mm, H 370(± 2) mm로 하였으며 측정을 위해 센서를 부착하였다.

시험부와 항온조 사이의 배관은 누설방지와 함께 보온을 실시하여 저온상태의 브라인이 순환되면서 외부 열교환으로 인해 발생하는 손실이 최소화되도록 하였다.

초음파 진동자는 주위에서 쉽게 구할 수 있는 것으로 직경 25 mm의 압전 세라믹 소자이며, PCB 회로로 이루어진 장치에 전원과 조절용 저항을 추가하였는데, 이는 초음파 에너지의 출력 정도에 따라 제빙에 미치는 영향을 밝혀내기 위함이었다. 진동자는 브라인의 입구 쪽 위치에 별도로 고정하지 않고 배치하였으며, 그 주위에는 열전대를 상하 좌우 30 mm 간격, 동판에서 1 mm 높이로 설치하여 대상 유체의 온도변화를 측정하였다. 또 진동자로부터 230 mm

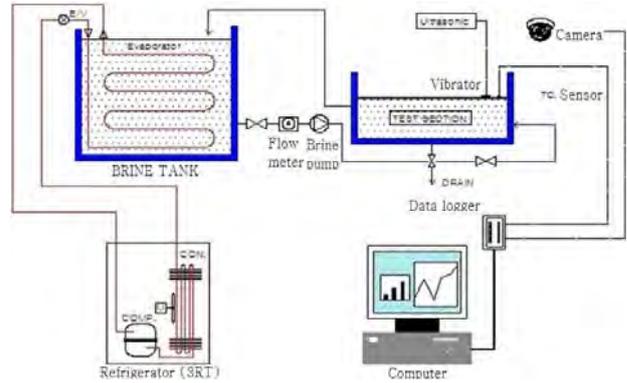


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

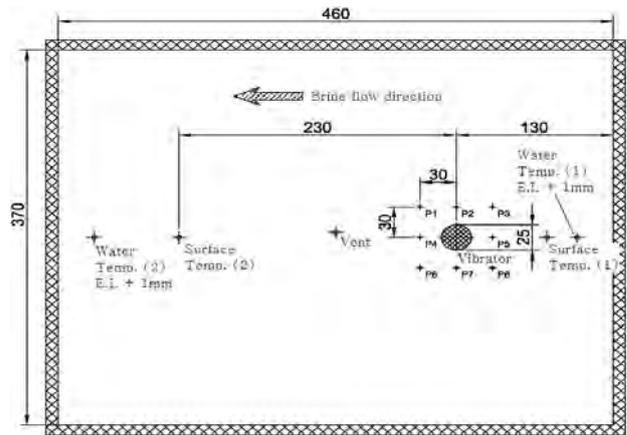


Figure 2: Measurement point in test section

떨어진 위치에도 온도센서를 설치하여 초음파 에너지가 영향을 줄 수 있는 거리를 파악할 수 있도록 하였다. 기타 구성품으로는 브라인의 유량을 측정하기 위해 항온조 출구 측에 설치된 유량계, 브라인의 공급온도를 측정하기 위한 열전대 등이 있다.

2.2 실험방법

평판에서의 제빙실험을 위해 항온조 내에는 에틸렌글리콜(30%) 수용액을 채우고, 시험부 수조에는 제빙대상인 물을 채운다. 항온조의 브라인을 실험온도로 냉각하도록 냉동기온도제어기를 설정하고, 준비된 시험부인 평판 하부에 조절된 유량의 브라인을 순환시킨다. 이렇게 하여 실험조건으로 유지되면 실험을 시작하고 계속하여 브라인을 순환시키면서 데이터를 기록한다.

위 방법을 반복하면서 초음파를 조사하지 않고 실시한 제빙실험과 초음파를 조사하여 실시한 제빙실험으로 구분하여 실시하고, 또 초음파를 조사한 때의 실험은 초음파의 출력을 약하게 한 경우와 강하게 한 경우로 세분화하여 상태를 확인하였다.

실험이 시작되는 시점과 온도가 동결점으로 하강하여 과냉각이 해소되는 시점, 마지막으로 목표량의 제빙이 완료되는 시점 등 육안으로 관찰 가능한 변화를 촬영하여 비교 확인하였다. 각 인자의 실험이 완료되면 시험부 수조내의 브라

인을 드레인시켜 각 지점이 시험조건으로 회복되도록 하였으며, 제빙이 완료된 동판은 상온의 물을 채워 넣는 방법으로 제상하였다. 간혹 초음파 조사로 인해 제빙이 완료되지 못할 때는 그 부분을 도식화하고 기록하여 참고자료로 삼았다.

본 연구에서 사용된 실험인자 및 범위를 Table 1에 정리하였다.

Table 1: Experimental range

component		range
brine temperature [°C]		-16 ~ -8
brine flow velocity [m/s]		0.27
initial water temperature [°C]		8
water height [mm]		1 ~ 3
ultrasonic frequency [kHz]	non	0
	low	1600
	high	1750

3. 결과 및 고찰

3.1 일반적인 제빙의 경향

Figure 3은 초음파의 조사에 따른 제빙억제효과를 확인하기 전에 일반적인 제빙의 경향을 파악하기 위하여 2 mm 높이(최대제빙두께)의 물을 채우고 제빙온도를 -8°C ~ -16°C로 다르게 순환시키면서 시험부의 온도변화를 측정 기록하여 제빙특성을 해석한 것이다.

전체적으로는 Park [14]에서와 같이 물 분자가 빙결정으로 상변화하는 과정을 나타내고 있다. 즉, 빙핵이 형성되어 동결이 시작되면 잠열방출로 인해 물의 온도강하비율이 감소하고 냉각속도가 동결에 의한 잠열방출속도보다 크기 때문에 과냉각도가 증가한다. 이때 냉각속도와 잠열방출속도가 균형을 되면 최대 과냉각도(ΔT_{max})가 된 후 잠열방출속도가 냉각속도를 상회하면서 물의 온도가 상승하지만, 증대된 얼음 표면의 간섭이 일어나 잠열방출속도 및 ΔT 가 감소하면서 동결속도도 감소한다. 또, 일정시간 후에는 일정하면서 작은 과냉각도에서 동결이 진행되고, 동결계면이 감소하여 최종적으로 동결이 완료됨을 보여주고 있다.

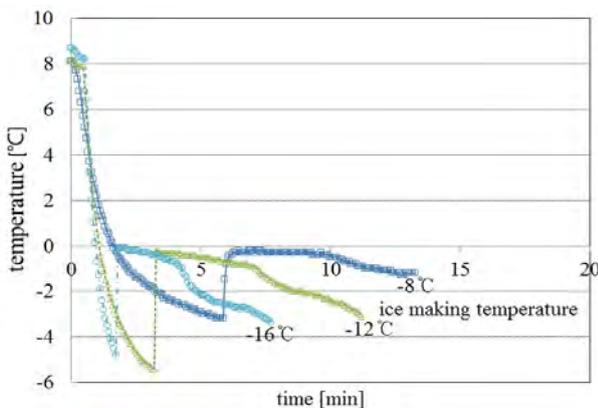


Figure 3: Effect of ice making temperature on supercooling break off time. (non ultrasonic, ice making thickness 2 mm)

그림에서 전체적으로는 제빙온도가 낮을수록 과냉각해 소시간이 짧아지는 것을 알 수 있다. 그 결과를 Table 2에도 정리하였다.

Table 2: Experimental result of the supercooling break off time and time difference according ice making temperature

ice making temperature [°C]	-8°C		-12°C		-16°C	
	$\Delta t =$	4°C	4°C			
supercooling break	6m		3m10s		1m40s	
off time [min/sec]	$\Delta h =$	2m50s	1m30s			

즉, 제빙온도가 낮을수록 더욱 빠르게 과냉각이 해소되는 것을 알 수 있다. 이는 제빙온도가 낮을수록 냉각속도가 빨라지기 때문으로 판단된다. 따라서 제빙온도가 높을수록 제빙에 소요되는 시간이 길어진다는 것을 의미하므로 제빙을 억제 또는 지연시키기 위해서는 제빙온도를 가급적 높게 하여야 할 것이다.

Figure 4는 초음파 사용에 따른 제빙억제효과를 확인하기 전에 일반적인 제빙의 경향을 파악하기 위하여 제빙온도를 -10°C로 한 상태에서 최대제빙두께 1~3 mm일 때의 진동자 주위의 평균온도를 나타낸 것으로, 과냉각 해소시간을 중심으로 살펴보기 위해 실험 시작 후 20분까지만 정리하였다. Figure 4(a)의 초음파를 조사하지 않은 때의 과냉각해 소시간은 1 mm와 2 mm일 때가 3 mm일 때보다 짧았지만, Figure 4(b)의 약한 초음파 사용 시에는 1 mm일 때가 가장 짧았고, Figure 4(c)의 강한 초음파 사용 시에는 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다. 따라서 초음파 진동자가 평판의 표면에 위치하고 있는 관계로 표면에서부터의 제빙이 억제되어 최대제빙두께에 따라서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 그러나 초음파의 출력을 강하게 할수록 최대 제빙두께에 따른 영향이 적다는 것으로 미루어보아 제빙을 억제하는 데에는 초음파의 사용이 효과적이라고 판단된다.

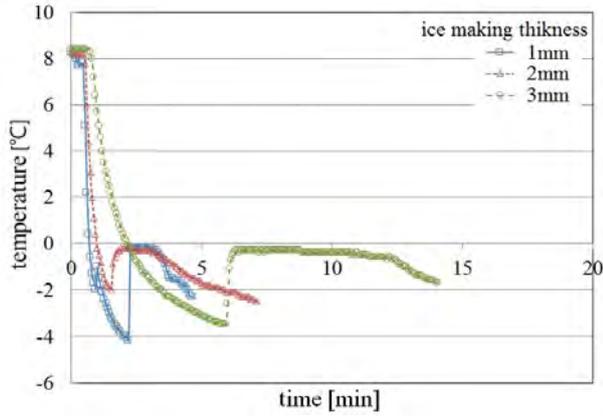
3.2 초음파에 의한 영향

3.2.1 주파수에 따른 영향

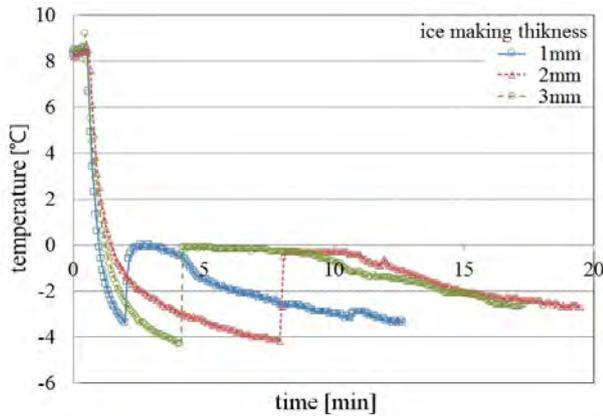
Figure 5는 제빙온도를 -8~-10°C, 최대제빙두께를 1~3 mm로 한 상태에서 진동자 주위의 평균온도를 나타낸 것으로, 과냉각 해소시간을 중심으로 살펴보기 위해 실험 시작 후 20분까지만 정리하였다. 그 결과를 Table 3에도 정리하였다.

즉, 초음파를 조사함에 따라 과냉각 해소시간이 Figure 5(a)인 경우에는 약 3.8~5배, Figure 5(b)인 경우에는 약 1.9~2.4배, Figure 5(c)인 경우에는 약 1.5~1.7배 길어지는 것으로 나타났다. 제빙온도가 -10°C일 때보다 -8°C일 때 초음파의 영향이 두드러졌지만, Figure 5(c)인 경우에는 오히려 초음파의 출력을 약하게 한 경우에 비해 초음파 출력을 강하게 한 때에 과냉각 해소시간이 더 길어지는 것으로 나타났다.

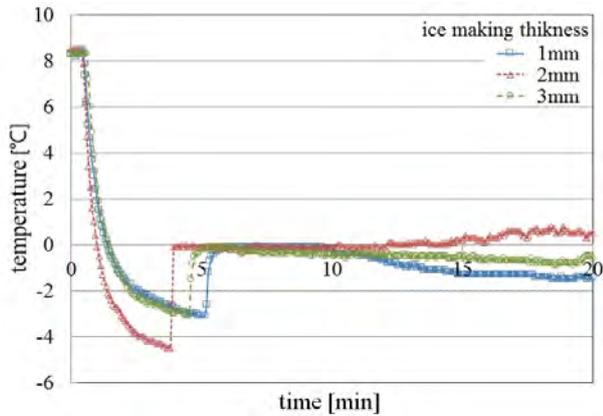
따라서 초음파를 사용함으로써 제빙을 지연시키는 효과를 파악할 수 있었다.



(a) non ultrasonic

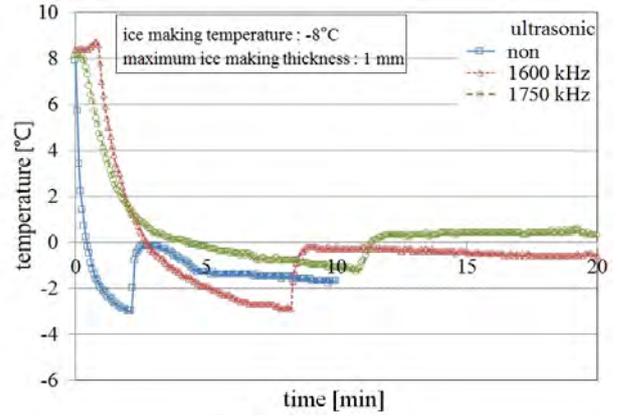


(b) ultrasonic (1600 kHz)

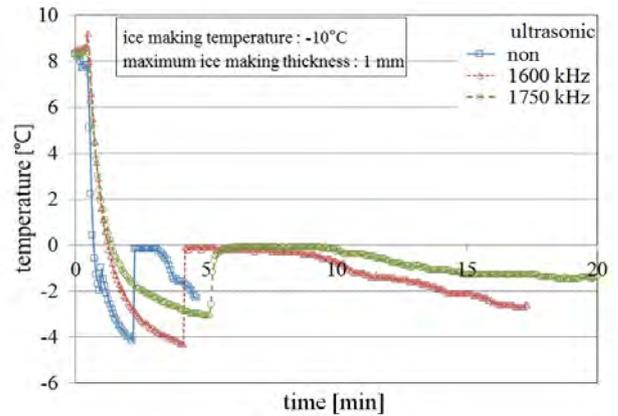


(c) ultrasonic (1750 kHz)

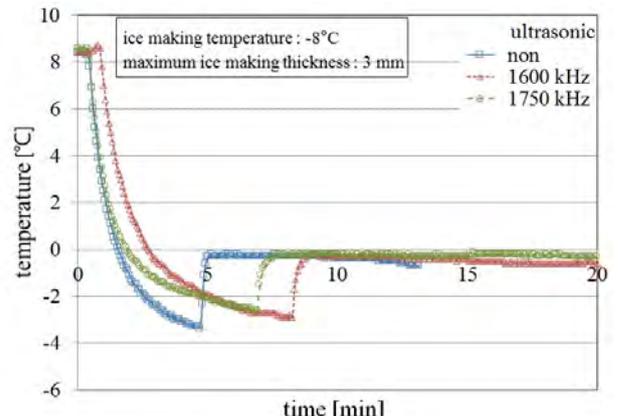
Figure 4: Effect of ice making thickness on supercooling break off time. (ice making temperature -10°C)



(a) temperature -8°C and thickness 1mm for ice making



(b) temperature -10°C and thickness 1mm for ice making



(c) temperature -8°C and thickness 3mm for ice making

Figure 5: Effect of ultrasonic frequency on supercooling break off time

Table 3: Effect of ultrasonic on supercooling break off time

condition		(a)	(b)	(c)
ultrasonic	①non	2m10s	2m10s	4m50s
	②low	8m25s	4m10s	8m20s
		②/①=388%	192%	172%
	③high	11m	5m10s	7m
		③/①=508%	238%	145%

3.2.2 진동자 위치에 따른 영향

Figure 6은 제빙온도를 -10°C , 최대제빙두께를 2 mm, 초음파 주파수를 1750 kHz로 한 상태에서 초음파 진동자 주위와 진동자로부터 230 mm 떨어진 위치에서의 제빙상태를 비교한 것이다. 그림에서 어느 경우나 과냉각이 해소되는 시점은 약 4분 정도로 나타나고 있어 230 mm 정도의 거리

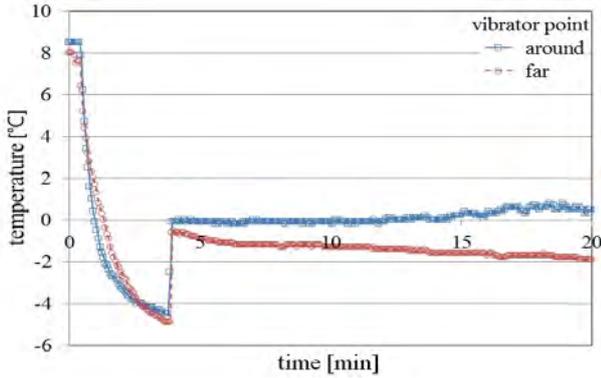
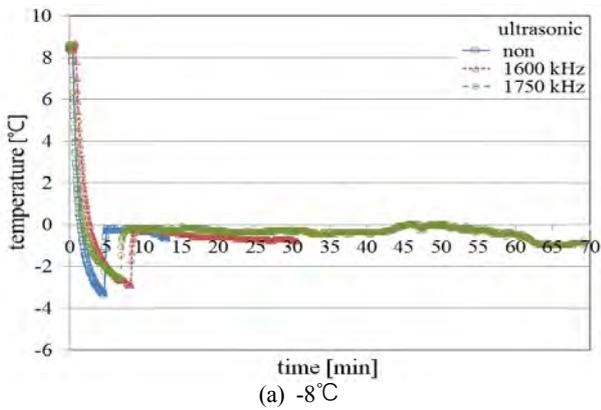
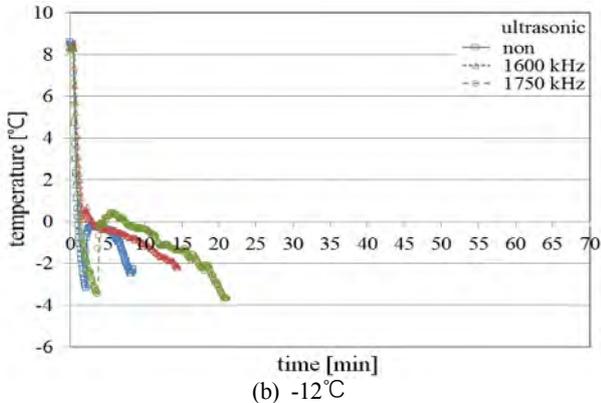


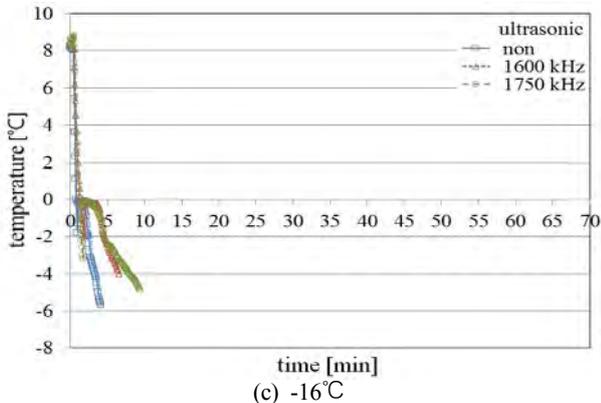
Figure 6: Effect of vibrator position on supercooling break off time. (ice making temperature -10°C , ice making thickness 2 mm, ultrasonic 1750 kHz)



(a) -8°C



(b) -12°C



(c) -16°C

Figure 7: Effect of ultrasonic frequency on ice making time. (ice making thickness 3 mm)

이내에서는 초음파의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 그러나 제빙온도는 초음파 진동자로부터 멀어질수록 낮아지고 있음을 볼 때 초음파의 영향이 완전히 미치지 못하는 것으로 판단할 수 있다.

3.2.3 제빙 완료시점의 비교

Figure 7은 최대제빙두께를 3 mm로 한 상태에서 초음파 주파수와 제빙온도별로 제빙이 완료되는 시점을 나타낸 것이다. 전체적으로는 제빙온도가 낮을수록 제빙이 완료되는 시간은 짧아지고 있으며, 초음파 주파수가 높을수록 제빙 완료시간은 길어지는 것을 알 수 있다. 그리고 **Figure 7(a)**의 제빙온도 -8°C 에서는 초음파 출력을 강하게 한 경우 제빙이 완료되지 못하였다. 이는 높은 제빙온도로 인하여 열 유속이 느려졌을 뿐만 아니라 초음파로 인하여 열전달계수가 작아졌기 때문이라고 판단된다.

따라서 전체적으로 초음파를 조사한 경우는 초음파를 조사하지 않은 경우에 비해 과냉각 해소시간 및 제빙이 완료되는데 소요되는 시간이 더 많이 필요하였음을 볼 때 초음파의 사용이 제빙억제에 효과가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 평판형 열교환기에서 초음파 에너지의 사용이 제빙에 미치는 영향을 살펴 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 초음파의 주파수를 조절하면 얼음의 제거 및 제빙억제에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
- (2) 브라인 온도(제빙온도)가 높을수록 과냉각 해소시간이 길어져 제빙에 소요되는 시간이 길어진다는 것을 확인하였다.
- (3) 초음파 진동자에 의해 표면에서부터의 제빙이 억제되어 최대제빙두께에 따라서는 큰 영향을 받지 않았지만 착빙을 억제하는 데에는 초음파의 사용이 효과적이라고 판단된다.
- (4) 1600 kHz보다 1750 kHz의 초음파 진동자를 사용한 경우에 제빙억제효과가 다소 좋은 것으로 확인되었다. 그러나 제빙억제에 더욱 효과가 있는 초음파 주파수에 대해서는 앞으로 좀 더 살펴보아야 할 것으로 판단된다.

References

[1] J. D. Kim, "An experimental study of the performance characteristics on multiple-tube heat exchanger in the vapor compression refrigeration system," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 1, pp. 37-43, 2009 (in Korean).

[2] J. L. Palacios, E. C. Smith, H. Gao, and J. L. Rose, Ultrasonic Shear Wave Anti-Icing System for

- Helicopter Rotor Blades, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, 2006.
- [3] C. S. Gong, A Study on the Supercooled Ice Slurry Type using Ultrasonic Wave in the Ice Thermal Storage System, M.S Thesis, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea, 2011 (in Korean).
- [4] J. H. Lee and T. H. Kim, "A experimental study on the ultrasonic influence for melting the paraffin the ice," Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 13, no. 11, pp. 1106-1113, 2001 (in Korean).
- [5] J. H. Youn, K. U. Park, and Y. K. Oh, "A study on melting characteristics affected by position of ultrasonic vibrators," Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Winter Conference, pp. 286-291, 2001 (in Korean).
- [6] D. H. Kim, Y. C. Kweon, and J. H. Jeong, "Experimental study on CHF enhancement of plate by ultrasonic," Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference, pp. 1512-1517, 2003 (in Korean).
- [7] J. H. Jeong, D. H. Kim, and Y. C. Kweon, "Experimental study of the ultrasonic vibration effects on CHF occurring on inclined flat surfaces," Energy Engineering Journal, vol. 12, no. 2, pp. 139-144, 2003 (in Korean).
- [8] J. H. Jeong, "The effect of ultrasonic vibration on heat transfer augmentation of forced convective flow in circular pipes," Energy Engineering Journal, vol. 13, no. 4, pp. 275-280, 2004 (in Korean).
- [9] H. D. Yang and Y. K. Oh, "A numerical study on analysis of acoustic pressure during the boiling heat transfer in the water," Journal of the Institute Research of Mechanical Technology, vol. 8, no. 2, pp. 143-157, 2005 (in Korean).
- [10] H. D. Yang and Y. K. Oh, "A study of the effect of pressure formation on heat transfer via ultrasonic vibration," Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Winter Conference, pp. 75-80, 2004 (in Korean).
- [11] S. H. Park, D. H. Jung, and Y. K. Oh, "Heat transfer characteristics of phase change material affected by ultrasonic vibrations in enclosure," Journal of Research Institute of Energy and Resources Technology, vol. 23, no. 1, pp. 47-59, 2001 (in Korean).
- [12] S. H. Park and Y. K. Oh, "Phase-change heat transfer in the presence of acoustic streaming," Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Conference, pp. 247-251, 2002 (in Korean).
- [13] J. C. Ryu, H. Yang, and H. Y. Kwak, "Temperature distribution and heat transfer from the pulsating bubble in ultrasonic field," Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference, pp. 241-246, 1992 (in Korean).
- [14] K. W. Park, Thermal Transfer Phenomena in the Low Temperature Environment and Application, Tae-Hun Publisher, p. 83, 2001 (in Korean).