[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 24, No. 1, 2004

관외착빙형 빙축열조의 제빙성능에 관한 연구

박용주*, 임광빈**, 조남철**

*성균관대학교 대학원 기계공학과(yjpark@skku.edu)
**안산공과대학 기계과(yimkb@act.ac.kr), (chonc@act.ac.kr)

An Experimental Study of Ice-Making Performance on the Ice Storage System using Spiral Tube

Park, Yong-Joo*/ Yim, Kwang-Bin**/ Cho, Nam-Cheol***

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Sungkyunkwan University(yjpark@skku.edu),
**Dept. of Mechanical Eng., Ansan College of Technology(yimkb@act.ac.kr), (chonc@act.ac.kr)

Abstract

An experimental investigation was performed to compare ice making characteristics of ice storage system with smooth and spiral tube. During the freezing processes in the shell and tube type ice storage tank with smooth tube, heat resistance of the ice layer caused a decrease in freezing rate. Also, the phenomena of bridging made the increasing rate of ice making less. In order to improve the ice making rate, spiral tube(pitch=6㎜) was used in the present study. The ice making rate and the decreasing of bridging for the spiral tube were higher than those for the smooth tube.

Keywards : 빙축열(ice storage), 제빙(ice making), 스파이럴 관(spiral tube)

기 호 설 명

t	:	시간 (min., hour)
T	:	온도 (℃)
δ	:	반경방향의 제빙 두께 (mm)
ε	:	제빙율 (%)

1. 서 론

최근 대체에너지 개발 및 에너지 저장 시스템에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있으며 그 중 발전설비의 효율적인 운전 및 하계 피크부하 절감을 위하여 심야전력을 적극 권장하고 있다.[1~4] 그 중 빙

축열 시스템은 야간에 냉동기를 구동하여 축열조에 냉기를 저장하였다가 주간에 냉방하는 시스템으로 최근에는 단위 체적 및 단위 중량당 열에너지의 저장용량이 크고 체적과 중량을 크게 줄일 수 있는 잠열을 이용한 소형 빙축열 시스템이 이용되고 있다.

빙축열에 관한 연구로는 물- 얼음의 상변화 과정에 대하여 Riger,H. and Beer,H.[5], Brester, R.A. and Gebhart,B.[6], Ho,C.J. and C.H. Chu[7], Fukusako,S. and Yamada,M.[8], Yim, C.S.and Lee,C.M. et al[9], Hao,Y.L. and. Tao,Y.X[10] 등의 여러 연구자들에 의하여 활발히 진행되었다. 또한, Suh,J.S. and Ro,S.T. et al[11], Bak, Y.D. and Cho,H.C. et al[12] 등은 배관 내 유동하고 있는 물의 제빙 및 내향응고열전달에 대하여 연구하였으며, Kalhori,B. and Ramadhyani,S.[13], Ho,I.H. and Yim,C.S. et al[14] 등은 핀을 단 축열관 외부에서 제빙성능에 관한 연구를 수행한바 있다. 최근에 Inabe,H and Lee,D.W.[15] Horibe,A and Inabe,H et al[16] 등은 물 이외에 아이스 슬러스의 배관 내 상변화 연구도 활발히 수행하고 있다.

현재 구조가 간단하여 널리 사용되고 있는 관외착빙형 빙축열 시스템은 축열재와 열교환하는 전열관 주위에서 얼음이 성장하며 전열관을 따라 냉매의 온도의 상승에 따라 길이방향에 따른 얼음의 두께는 달라진다. 이러한 결과는 입구측에서 얼음이 결합하는 브리징(bridging) 현상을 초래하여 제빙능력을 저하시킬 뿐만 아니라 출구측에서는 얼음의 두께가 얇아 축열능력을 완벽하게 발휘하지 못하게 된다.

제빙과정은 축열하는데 사용되는 냉매 및 유속 및 기타조건에 따라 매우 복잡 다양하지만 본 연구에서는 전열관을 따라 상승하는 냉매온도의 영향으로 발생하는 길이 방향의 얼음의 두께 변화를 파악함으로써 균일한 얼음의 성장을 유도할 수 있는 전열관 설계를 제시하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 매끈한 관(smooth tube)과 스파이럴 관(spiral tube)을 이용하여 축열과정 시 발생하는 전열관 주위에서의 얼음의 성장과정을 연구함으로써 빙축열조에 사용되는 전열관의 성능 비교를 하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

그림 1은 현재 널리 상용화되고 있는 미끈한 관을 사용하는 관외착빙형 빙축열 시스템(shell and tube type ice storage system)에서 빙축열조의 제빙 성능실험을 수행하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험초기 냉수의 초기온도를 7℃로 맞추고 6시간 강제 운전하여 축냉 시킨다. 그리고 축냉 과정 중 축열조의 상, 중, 하 세 곳에 열전대(Φ:0.12㎜, T-type)를 설치하여 자료획득장치(Yokogawa-DA100)를 이용하여 축열재의 온도 변화를 측정하였다. 얼음의 두께변화량을 측정하기 위해 버어니어 캘리퍼스를 이용해서 30분 간격으로 얼음의 두께를 측정하였다. 한편 축냉 과정 중 제빙량은 축냉시간에 따라 증가하는 수위변화를 통하여 제빙량을 계산하였다. 방냉은 축열 과정이 끝난 후 실내기를 통해 냉수의 온도 7℃가 될 때까지 강제로 방냉시키면서 축열재 등의 온도를 측정하였다.

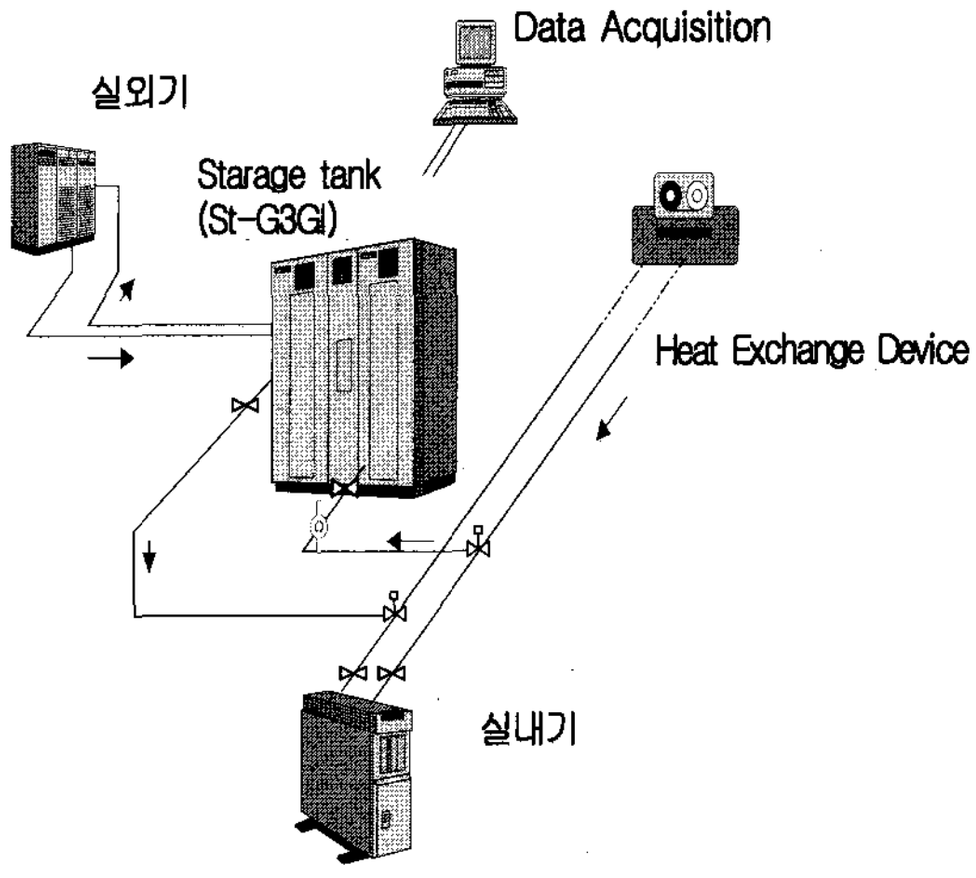

그림 1. 빙축열조의 제빙 성능 실험 개략도

그림 2는 미끈한 관과 스파이럴관의 제빙 성능을 비교하기 위하여 제작한 투명 아크릴 원통(t : 3mm, Φ : 250 mm)과 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험은 아크릴 원통관에 직경 9.52 mm, 길이 1m의 미끈한 일반 동관(smooth tube)과 **그림 3**에서 보는 것과 같이 피치(pitch) 6 mm인 스파이럴형 동관(spiral tube)를 각각 원통관 내에 설치하여 항온조에서 -10℃(±1℃)로 유지되고 있는 브라인을 유량 600 ml/min로 일정하게 유동시켰다. 이 때 냉수의 초기평균 온도는 7℃(±0.5)로 유지한 후 10시간 동안의 냉수의 온도변화 및 제빙량을 측정하였다.

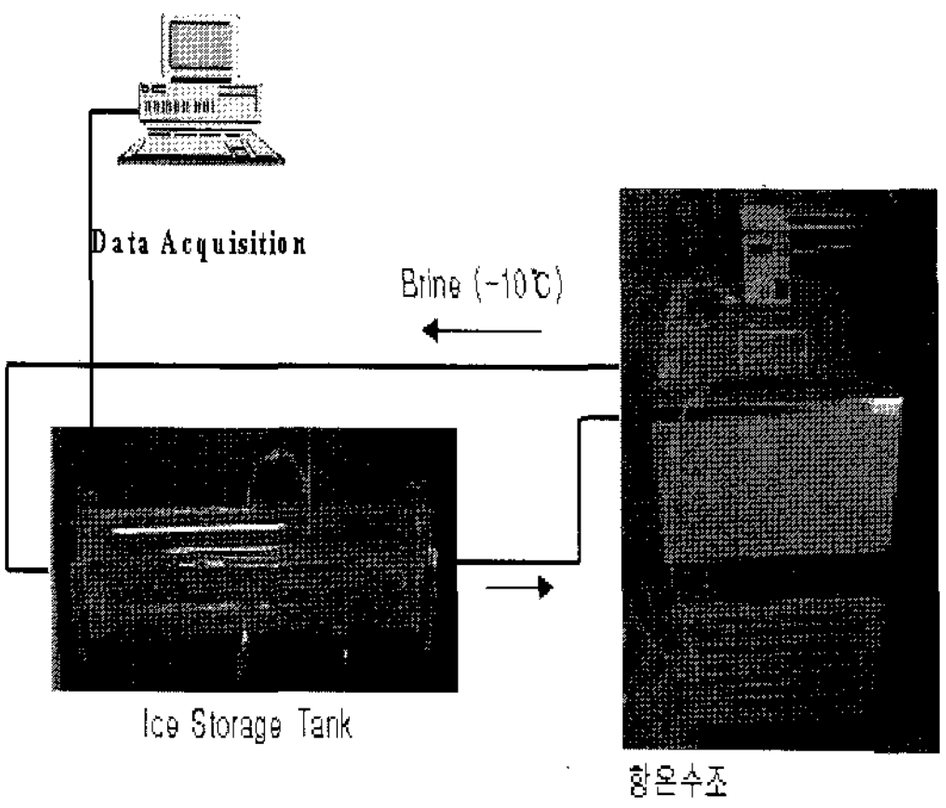

그림 2. 관의 제빙성능 비교 실험장치 개략도

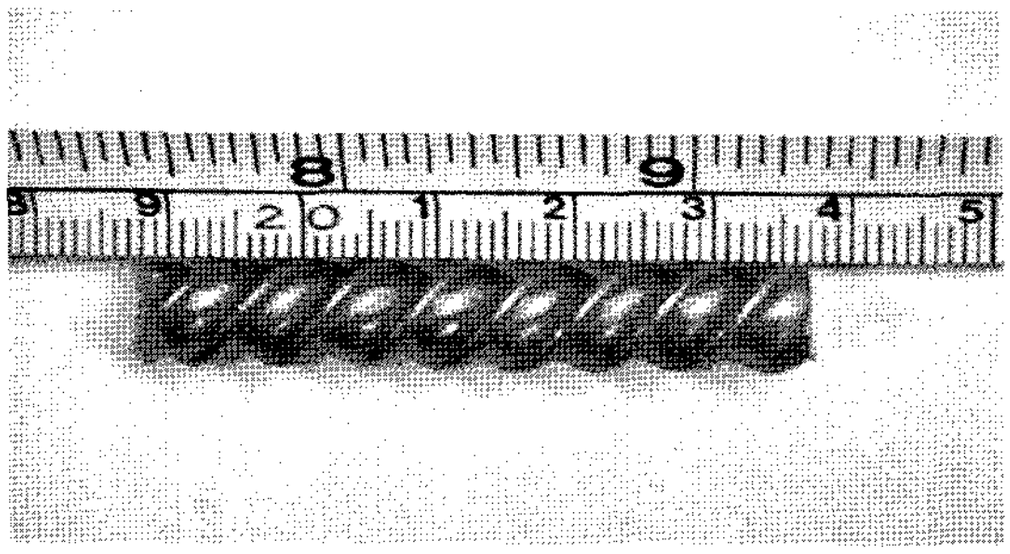

그림 3. 스파이럴 관

운전과정 중에 얼음의 두께변화량을 측정하기위해 길이 방향으로 원통 윗부분에 직경 5㎜의 홈(hole)을 일정한 간격으로 3개를 뚫은 다음 버어니어 캘리퍼스를 이용해 30분 간격으로 그 값을 측정 기록하였다. 또한 제빙량을 구하기 위하여 원통내에 물을 가득 채우고 중앙에 10 mm의 홈(hole)을 내어 고무튜브에 연결하고 축열이 이루어지면서 증가하는 물의 부피량을 메스실린더를 이용하여 그 값을 읽고 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 쉘-튜브형 빙축열조의 열 및 제빙성능

그림 4, 5는 축냉 과정과 방냉 과정 동안의 시간에 따른 미끈한 관(smooth tube) 을 사용하는 쉘-튜브형 빙축열조 내 상부, 중간부, 하부에서의 축

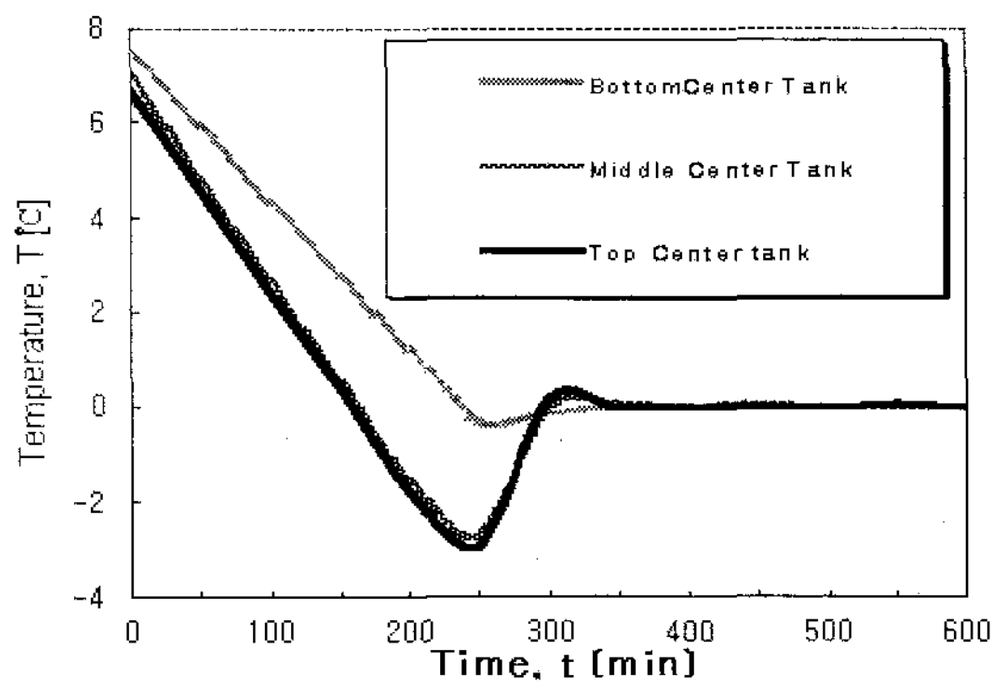

그림 4. 축냉과정 시의 축열조 내 축열재의 온도분포

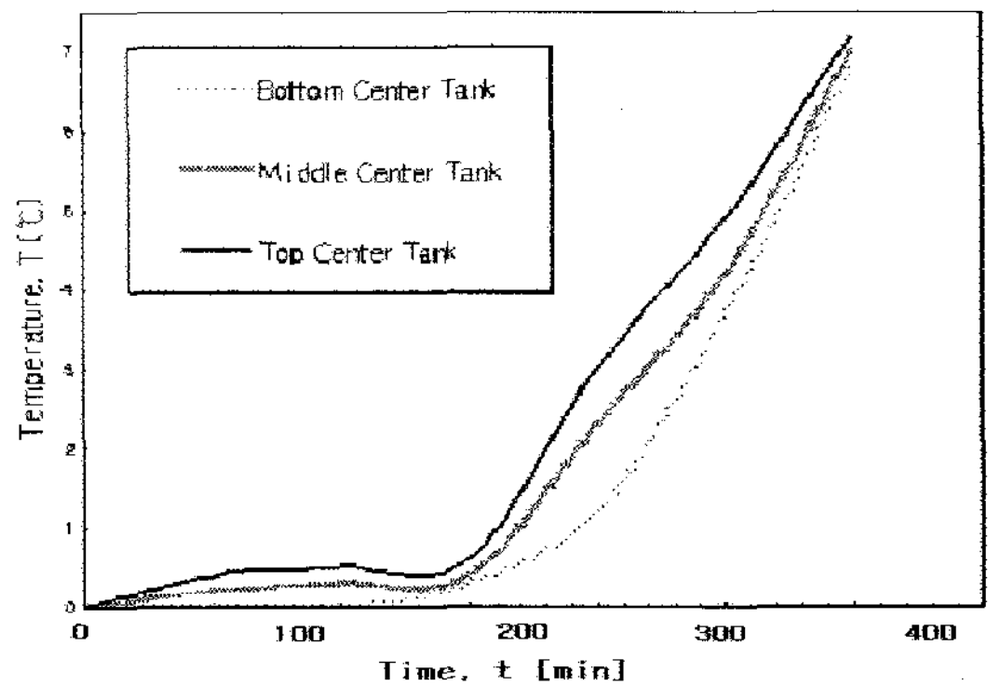

그림 5. 방냉과정 시의 축열조 내 축열재의 온도분포

열재 온도변화를 나타내고 있다. **그림 4**는 축냉 과정의 시간에 따른 축열재 온도분포로 시간이 증가함에 따라 온도가 점점 감소하게 되고 약 250분까지 일정한 기울기로 감소하여 축열조 내 상, 중에서 -3℃ 부근까지 과냉 됨을 알 수 있다. 그리고 약 350분까지 다시 온도가 상승하여 이후 0℃ 부근으로 일정한 온도분포를 나타냄을 알 수 있다. 즉, 350분 이후에서는 축열재의 온도변화가 없는 것으로 보아 축냉효과가 거의 나타나지 않는 것으로 보여 진다.

그림 5는 방냉 과정 동안의 축열조 내 상하의 온도변화로 축열재의 평균온도가 7℃시에 도달할 때까지의 변화를 보여주고 있다. 실내기를 통하여 냉방을 시작한 이후 축열재의 온도는 약 0.5℃ 부근을 유지하고 있으며 축열재가 다시 축열조로 귀환하는 입구 측인 축열조 상에서의 온도가 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 한편, 냉방을 시작한 후 약 3시간이 경과 한 후 축열재의 온도는 일정한 기울기를 유지하며 증가하고 있다. 이러한 현상은 냉방 후 약 3시간 여 동안 결빙된 얼음의융해잠열을 이용하여 냉방효과를 발휘한 것으로 보이며 이후 축열재의 현열에 의한 냉방효과임을나타내고 있다.

그림 6은 축열조의 제빙실험을 통해 얻은 얼음의 두께변화를 나타낸 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 얼음의 두께는 약 100분 동안 2-3㎜이하로 결빙이 거의 발생하지 않았으며 주로 현열에 의한 축냉이 발생한 것으로 보여 진다. 이후 약 100~350분까지 약 250 여분 동안 얼음의 두께 증가율이 가장 높게 나타났으며 350분 이후에서는 다시 증가율이 감소했음을 알 수 있다. 이러한 결과는 **그림 4**에서도 알 수 있듯이 얼음형성에 따르는 열저항 및 브리징현상으로 인하여 약 350분 이후에서는 축냉효과가 많지 않음을 나타내고 있다.

3.2 미끈한 관과 스파이럴 관의 제빙성능

그림 7은 **그림 2**의 실험 장치를 통해 각각 일반미끈한 관(smooth tube)과 스파이럴관(spiral tube)을 이용 축냉 과정 동안의 제빙량을 측정하여 비교한 그림이다. 축냉 과정은 브라인 (-10℃)을 이용하여 6시간 동안 진행하였다. 그림에서 보는 과 같이 축냉이 시작된 이후 약 150분까지 미끈한 관의 제빙량이 스파이럴 관에 비해 다소 높거나 비슷한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 반면 150분이 지난 이후에서는 스파이럴관의 제빙량이 미끈한관에 비해 약 8%정도 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 결과는 스파이럴 관내의 벽 내부 구조에 의한 유동의 변화에 따른 내부 대류 열전달이 향상된 결과라 할 수 있다.

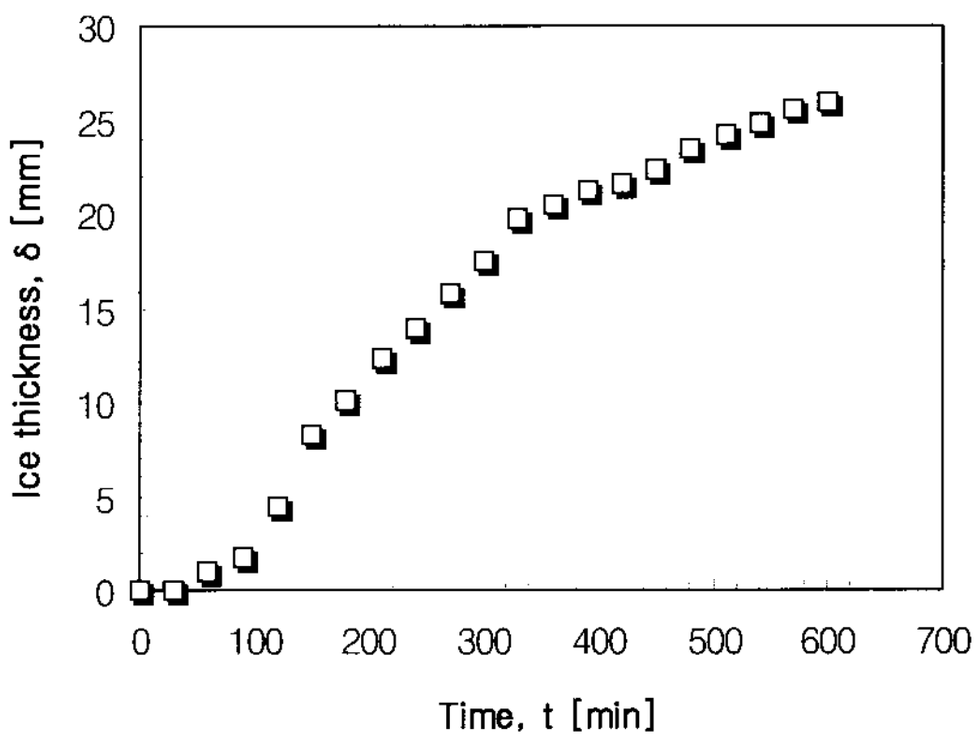

그림 6. 축냉과정 시의 얼음의 두께변화

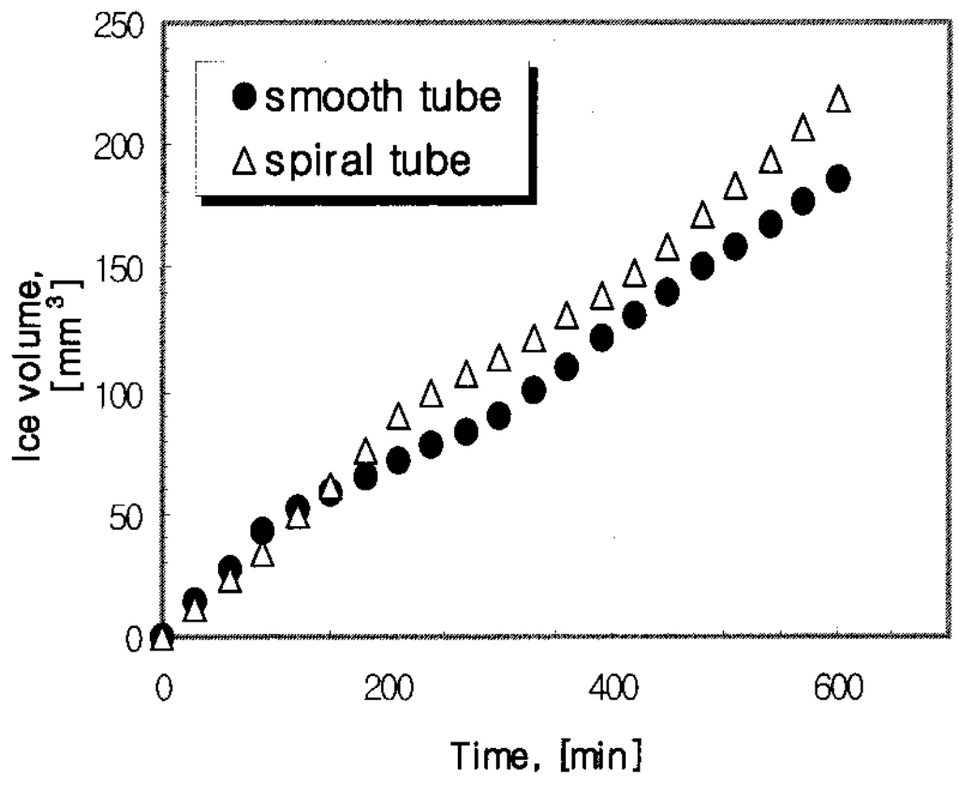

그림 7. 미끈한 관과 스파이럴 관의 제빙량 비교

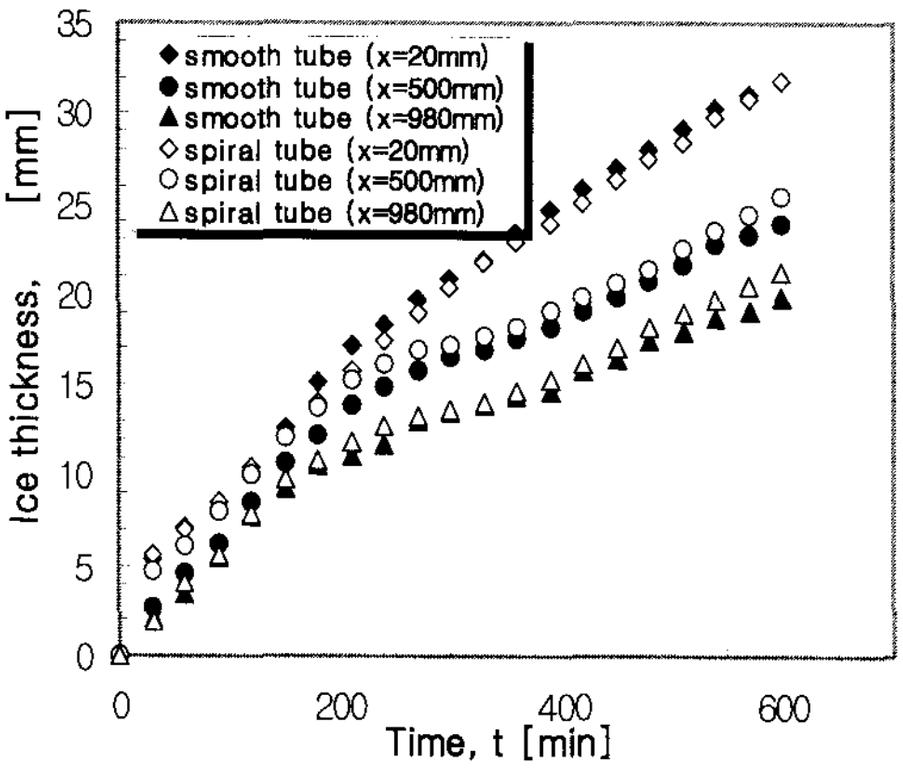

그림 8. 전열관의 길이 방향에 따른 얼음의 두께변화

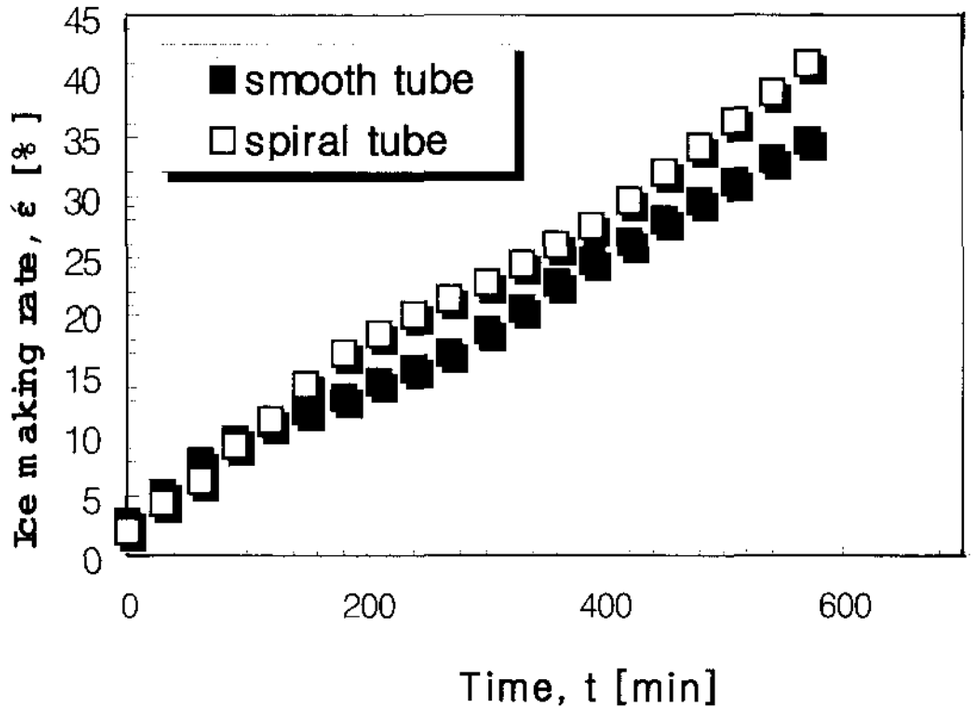

그림 9. 시간에 따른 제빙율의 변화

그림 8은 축냉 과정 중 전열관 길이 방향에 따른 얼음의 두께변화를 나타낸 그림으로 길이 방향으로 각각 20, 500, 980㎜에서 얼음의 두께를 측정하였다. 그림에서 보는 것과 같이 미끈한 관의 경우 약 150분까지는 위치에 따른 얼음의 두께변화가 많지 않은 것으로 나타났지만 이후 200여분 후에서는 위치에 따른 변화가 큰 것으로 나타났다. 특히 입구 측(20㎜)과 중간부분(500㎜)의 얼음의 두께 변화가 중간부분(500㎜)과 출구 측(980㎜)의 변화보다 약 50% 정도 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 이러한 현상은 축냉 과정 시 냉매의 입, 출구 측의 얼음의 두께 변화가 심하여 축냉효율이 저하되며 입구 측에서 다른 피치 (pitch)에서 성장하는 얼음과 서로 브리징현상을 초래하여 방열효과 또한 저하되는 현상을 초래하게 된다. 반면 스파이럴 관의 경우 길이 방향에 따라 다소 얼음의 두께 변화를 초래하나 미끈한 관에 비해 입구 측(20㎜)에서 얼음의 두께가 작고 출구 측(500㎜, 980㎜)으로 갈수록 큰 결과를 나타내고 있다. 즉, 전열관의 길이 방향에 따라 미끈한 관의 얼음의 두께에 비해 다소 균일하게 성장하였음을 알 수 있다.

그림 9은 **그림 8**과 유사한 결과로 시간에 따른 제빙율을 나타내고 있다. 축냉 후 약 150분까지 미끈한 관의 제빙율이 높거나 비슷한 결과를 나타내며 이후 스파이럴 관의 제빙율이 약 7-8% 높게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 널리 사용되고 있는 쉘-튜브형 소형빙축열 시스템 축열조의 축냉효율 및 방냉효율를 개선하기 위하여 축열조내 삽입되는 전열관(냉동기의 증발기) 주위에서 결빙되는 얼음의 성장과정과 두께변화, 제빙량 및 제빙율, 축, 방냉 과정에서의 축열재의 온도분포 등을 측정 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미끈한 관(smooth tube)을 대신하여 스파이럴 관(spiral tube)을 사용한 결과 제빙량이 7-8%정도 증가하였으며 전열관의 길이방향에 따른 얼음의 성장 불균등을 다소 해소 할 수 있었다. 즉, 제빙량의 증가는 축열조의 축냉효율의 상승을 의미하며 전열관의 냉매 증발온도의 상승에 따른 얼음의 성장 불균등의 해소는 축냉효율 뿐만 아니라 방냉효율 또한 증가시킨다.

(2) 축냉효율 및 방냉효율을 저하하는 브리징현상 및 얼음의 성장 불균등은 전열관의 길이방향에 따라 상승하는 증발온도의 영향에 의해 초래되

는 현상으로 스파이럴관이 매끈한 관보다도 브리징 현상이 완화되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 정유택, 장영근, 김석현, 증발기가 축냉조에 내장된 소형 빙축열시스템의 열성능에 관한 연구, 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, 2001, pp. 1196-1202.
2. 유호선, 김영인, 빙축열조의 방냉과정에 대한 해석, 공기조화 및 냉동공학 논문집, Vol. 1, No. 1, 1989, pp. 9-20.
3. 한국전력공사, 축냉설비 실증시험 세부기준, 1992.
4. 한국전력공사, 축냉식 냉방시스템에 관한 실증시험 및 평가기준, 1993.
5. Rieger, H. and Beer, H., The Melting Process of Ice inside Horizontal Cylinder : Effects of Density Anomaly, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 108, 1986, pp. 166-173
6. Brewster, R. A. and Gebhart, B., An Experimental Study of Natural Convection Effects on Downward Freezing of Pure Water, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, 1988, pp. 331-348.
7. Ho, C. J. and Chu, C. H., The Melting Process of Ice from a Vertical Wall with Time-Periodic Temperature Perturbation inside a Rectangular Enclosure, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 13, 1993, pp. 3171-3186.
8. Fukusako, S. and Yamada, M., Recent Advances in Research on Water-Freezing and Ice-Melting Problems, Int. J. of Experimental Heat Transfer, Thermodyna- mics and Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 1, 1993, pp. 90-105.
9. 임장순, 이채문, 조남철, 김동춘, 수평원관내 체적변화를 고려한 얼음의 용융시 전열특성에 관한 연구, 설비공학 논문집, Vol. 13, No.12, 2001, pp. 1266-1274.
10. Hao, Y.L. and Tao, Y.X., Heat Transfer Characteristics of Melting Ice Spheres under Forced and Mixed Convection, J. of Heat Transfer(ASME), Vol.124, Oct., 2002, pp. 891-903
11. Suh, J . S., Kim, M. G., Ro, S. T. and Yim, C. S., Ice-formation phenomena for laminar water flow in a stenotic tube, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 10, No. 1, 1998 ,pp. 11-21.
12. Bak, Y. D., Cho, H. C., Choi, B. I. and Kim, K. S., An Experimental Study for the Liquid Freezing Phenomena in a Pipe During Ice Plugging, Transcations of KSME(B), Vol. 25, No. 3, 2001, pp. 366-372.
13. Kalhori, B. and Ramadhy, S. Studies on Heat Transfer From a Vertical Cylinder, With or Without Fins, Embedded in Solid Phase Change Medium, Transcation of the ASME, Vol.107, Feb.,1985, pp.44-50
14. 서인호, 고재윤, 이채문, 임장순, 저온공조용 빙축열 시스템에서의 열전달 특성에 관한 실험적 연구, 공기조화 냉동공학회 하계 학술 발표회 논문집, 2000, pp.896-902
15. Inaba, H. and Lee, D.W., Study on the Critical Conditions of Ice Formation for Continuous Ice Making System in a Cooling Pipe, 3rd KSME-JSME Thermal Eng. Conf., pp.1233-1238
16. Horiba, A., Inaba, H. and Haruki, N., Continuous Making Characteristics of Ice Slurry with Functional Surfactant, The 5th Proc. of IIR Workshop of Ice Slurries, 2002