

교반냉각에 의한 아이스슬러리의 생성 및 부착

손 권*, 강 채 동**, 홍 회 기*

경희대학교 대학원*, 서울대학교 기계항공공학부 BK사업단**, * 경희대학교 기계산업시스템공학부

Formation and Adhesion of Ice Slurry by Cooling Water Mixture with Stirring

Kwon Sohn*, Chaedong Kang**, Hiki Hong*

*Graduate School, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

**School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

† School of Mechanical and Industrial system engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

ABSTRACT: Ice adhesion on cooling wall is troublesome in ice formation. The purpose of the present study is to investigate the possibilities of a two-component aqueous solution as a thermal storage material for continous ice formation. By cooling and freezing under stirring the solution in a stainless steel (SUS304) which was immersed in controlled temperature bath, the behavior of ice formation and adhesion was observed with measuring temperature and load variation.

Key words: Freezing(동결), Ice adhesion(빙부착), Additive(첨가제), Ice slurry(아이스슬러리)

1. 서 론

동적형 빙축열 방식의 제빙과정에서 돌발적 또는 지속적으로 발생하는 냉각면에서의 빙부착은 축열재료에 대해 유동성 및 열전달 저하를 가져오는 주된 요인으로 시스템 성능에 직접적으로 영향을 끼친다. Okada 등에 의해 냉각면에서의 빙부착억제를 위하여 표면장력이 작은 실리콘 기름을 첨가제가 함유된 물에 분산시킨 에멀션을 축열재료로 한 제빙방식이 제안되었다.^(1, 2) 에멀션을 이용한 제빙실험으로부터 수 내지 수십 마이크로 크기의 미세한 입자형 얼음을 생성하였고, 장기적으로 저장할 경우 빙입자 사이의 재결정을

억제하는 등 주목할 만한 결과를 보이고 있다. 또한 냉각면에 빙부착이 발생하는 조건을 냉각 표면의 재질상태와 냉각속도로 나타내었다^(2, 3). 그러나 실리콘 기름은 유기물이라는 점에서 환경친화적인 물질로 보기 어렵고 또한 고가이므로 다량으로 사용하는 빙축열 시스템에 적용시 경제성 및 유지 보수에 대하여 문제점을 안고 있다.

알코올계로서 브라인으로 널리 사용되고 있는 에틸렌글리콜(ethylene glycol, 이하 EG)은 물에 혼합되기 쉬우며, 물성이 상당 부분 알려져 있으며 소량사용시 환경에 큰 영향을 주지 않는 물질로 알려져 있다. 또한 첨가제로서 실란커플링제(silane coupling agent, 이하 SCA) 등은 유기물과 무기물 그리고 물과 무기물 사이에 개재하여 빙부착을 억제하는 효과를 피하기 위해 사용되고 있다. 현재까지 수용액 계에서의 제빙에 관해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나^(4, 5) 유동상태

† Corresponding author
Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-8106
E-mail address: hhong@khu.ac.kr

Table 1 Composition ratio of aqueous solution(vol%)

H ₂ O	Ethylene glycol	SCA*
96	1	3
93	4	3
89	8	3
85	12	3
81	16	3

*SCA: Silane Coupling Agent

에서의 빙부착 억제제를 위한 연구는 부족한 형편이다.

본 연구에서는 저가의 EG와 첨가제로 소량의 SCA를 사용한 2성분계 수용액을 제작하고 스테인리스 재질의 용기 내에서 교반/냉각하는 배치식 제빙실험을 통하여 수용액의 조성비가 빙부착에 미치는 영향을 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1 동결점 측정

2성분계 수용액의 동결점에 대한 자료를 얻기 위하여 냉각실험을 하였다. 시료는 총체적의 3%에 해당하는 소량의 SCA를 증류수에 혼합하여 시료를 수용액을 만든 다음 에틸렌글리콜의 농도를 변화시켜 가면서 동결점의 변화를 측정하였다. 시료의 구성은 Table 1과 같다. 피펫에 의해 계량된 각 시료를 내경 13.35 mm, 길이 120.7 mm 유리 시험관에 넣은 후, 시료의 농도분포를

억제하기 위하여 시료를 시험관에 봉입된 상태로 수 초간 손으로 흔들어서 교반시켰다.

각 시험관의 시료의 양은 13 ml이며 수용액의 온도를 측정하기 위해 T-형 열전대를 직경 1.2 mm 스테인리스 세관에 넣은 후 충전용 본드로 틈새를 밀봉하여 시험관 마개에 설치하였다.

각기 다른 농도의 시료를 갖는 시험관을 저온 항온조에 넣고 브라인으로 상온에서 -20℃까지 연속적으로 냉각하여 수용액의 온도변화를 측정하였다. 수용액의 동결점은 동일 농도의 시료에 대하여 5차례씩 냉각실험을 수행하여 각 시험관에 대하여 과냉각 상태로부터 해소된 직후의 온도 상승값으로부터 측정하였다. 냉각과정 동안 수용액의 온도, 저온 항온조 내부 및 외기온도를 데이터로거(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)를 사용하여 5초 간격으로 측정하였다.

2.2 제빙실험

Fig. 1에 제빙실험 및 측정장치의 구성도를 나타내었다. 제빙에 사용된 수용액은 3 vol%의 첨가제를 물(수돗물)에 녹인 수용액에, EG의 농도를 총체적의 1, 4 그리고 7 vol%로 나누어 혼합하여 각기 300 ml로 하였다. 제작한 혼합액을 스테인리스 재질의 용기(외경 73.35 mm, 높이 120 mm, 두께 1 mm, 용량 500 ml)에 담은 후 교반기(익형: 수직평판식, 익수: 3개)를 사용하여 교반속도를 120 rpm으로 일정하게 유지하는 동안 용기의 외측을 항온조의 브라인으로 냉각하였다. 브라인 온도가 목표로 하는 과냉도(2 K 또는 4 K)에 이르렀을 때 혼합액 온도를 약 5분 이상 초

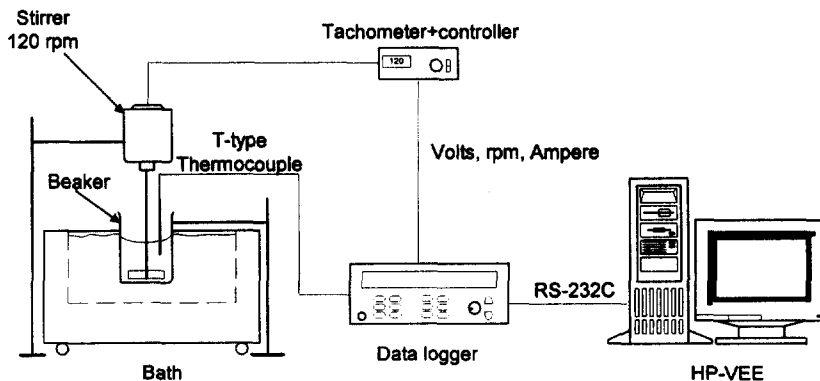


Fig. 1 Experimental apparatus for ice formation.

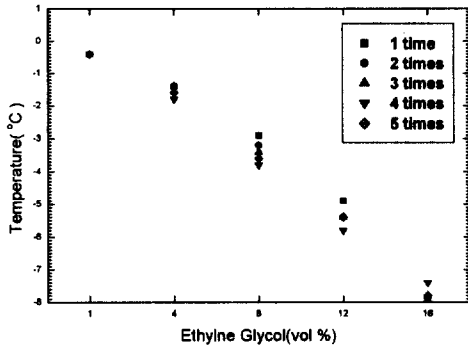


Fig. 2 Relation between concentration and freezing point on EG-silanol aqueous solution.

기 평형온도로 유지시켜 혼합액의 초기온도를 일정하게 하였다. 초기조건으로 혼합액을 평형온도에서 약 5분 이상 유지시킨 후, 약 1 g의 얼음을 과냉각 상태의 수용액에 투입하여 강제적으로 동결시켰다. 제빙과정은 과냉각 해소와 함께 시작되며 제빙량을 일정하게 유지하기 위하여 각 수용액의 종료시의 동결점을 추정하였다.

항온조 내부의 브라인 온도 및 용기 내의 혼합액의 온도(용기 중심부의 교반의 상부근처)와 교반기 모터에 인가되는 전압과 전류를 데이터로거로 5초 마다 측정하여 데이터를 저장하였다. 데이터로거의 구성은 동결점 측정실험과 동일하다. 또한 과냉각 해소 후 10분마다 생성된 얼음을 채취하여 CCD카메라(40 배율)로 얼음 입자의 모습을 촬영하였다. 그리고 분액기를 이용하여 제빙 종료시의 제빙량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 동결점 측정

Fig. 2는 시험관 내 (SCA의 초기농도는 3 vol%로 일정) 수용액의 각 조성에 대하여 동일시료로 총 5회의 반복실험을 하여 얻은 동결점을 나타낸다. 동결점 저하가 2차곡선에 가까우나 EG가 약 8 vol%까지는 농도증가에 따른 동결점 저하를 농도의 1차함수로 간주하여 제빙량이 약 150 g이 될 때의 동결점을 계산하여 제빙 종료시점을 추정하였다.

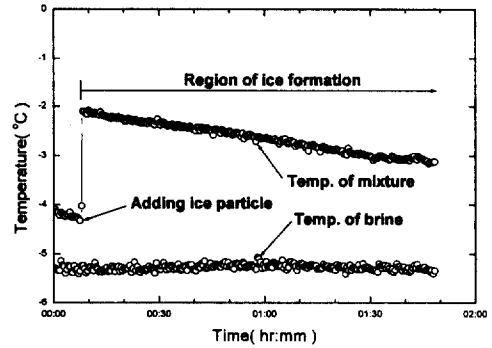


Fig. 3 Freezing process of aqueous solution.(EG 4 vol%)

3.2 제빙실험

Fig. 3은 EG 4 vol%의 냉각과정으로 과냉각 상태에서부터 동결 후의 혼합액의 온도변화를 나타내고 있다. 동결개시 후 용기 내에서 미세한 얼음이 발생하였고 상변화에 따른 응고잠열 방출로 동결점까지 온도가 상승한 이후 용기 내 얼음의 증가에 따른 농도증가로 인하여 동결점이 직선에 가깝게 서서히 하강하고 있다. Fig. 4는 동결로부터 80분이 지난 후에 얻은 슬러리 형태의 얼음을 CCD카메라로 촬영한 모습이다. 입자의 유동성으로 인하여 평균 입자의 지름을 구하기가 어려웠으나 대체로 수 내지 수십 마이크론의 입자가 엉켜있는 미세한 슬러리임을 알 수 있다. 실험 종료시의 동결점은 -3.8°C 로 하였고 이때의 제빙량은 175 g으로 농도변화로 추정된 값 150 g에 비해 약 14% 크게 나타났다. 이는 분액기로부터 수분을 제거하여 제빙량을 측정할 때 빙 입자간에 남아있는 수분이 영향을 미친 것으로 보인다. Fig.



Fig. 4 Photograph of ice slurry. (EG 4 vol%)

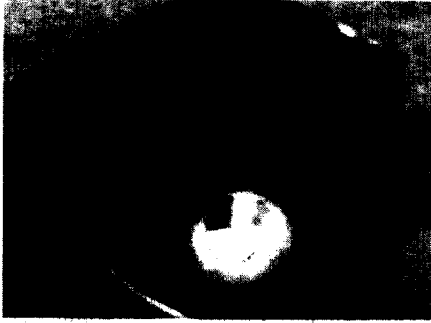


Fig. 5 Ice on cooling wall of beaker.(ice adhesion case)



Fig. 6 State of cooling wall of beaker.
(ice non-adhesion case)

5, 6은 EG 조성비를 1, 7 vol%로 구성한 혼합액에 대한 각각의 냉각과정 후의 제빙양상을 나타낸다. 실험종료 후 용기를 서서히 역전시켜 중력에 의해 아이스슬러리를 떨어낸 다음 용기벽면에서의 빙 부착여부를 확인하였다. 이 때 부착여부는 얼음 입자 사이에 혹은 냉각면과 얼음 사이에 결합이 이루어지더라도 용기를 기울였을 때 냉각면을 따라 얼음이 분리되면 부착하지 않은 것으로 간주하였다. 그 결과, 2 K의 동일 과냉도 하에서 EG 1 vol%를 첨가한 경우 얼음이 용기 벽면에 부착하였으나 7 vol%를 첨가한 경우에는 빙 부착이 일어나지 않았다. 이는 EG의 조성비의 증가에 따른 상대적인 냉각 열유속의 저하에 의한 영향으로 볼 수 있다.

제빙 형태 면에서 볼 때 과냉도가 4 K일 때 EG 농도가 큰 쪽 (4 vol%)보다 작은 쪽 (1

vol%)에서 용기 벽면에 부착된 얼음의 평균두께가 두꺼웠고 부착정도도 강하였다.

그러나 EG 4 vol% 혼합액의 경우에는 빙부착의 강도가 약하여 약 2분 정도 후에 벽면에 부착되어 있던 얼음들이 모두 분리되었다. 이와 같이 실험 종료 후 용기를 뒤집었을 때 용기로부터 얼음의 분리여부만으로 빙부착을 판단하는 것은 용기의 착탈 및 일시적인 분위기에의 노출 등의 영향을 무시한 것으로 무엇보다도 정량화되어 있지 않은 문제점을 갖고 있다. 이에 본 연구에서는 빙부착의 판단을 종래의 방법^(2, 3)과 함께 교반기 모터가 냉각과정 동안 소요되는 동력과 회전수를 함께 비교함으로써 빙부착을 판단하고자 하였다. 회전수는 교반기의 출력으로부터, 그리고 소요동력은 교반기에 부가된 순시전압과 전류의 곱으로부터 구하였다.

Fig. 7은 빙부착이 일어난 경우로서 물, EG, SCA의 조성비가 96 : 1 : 3 (vol%)인 혼합액을 초기과냉도 4 K로 하였을 때의 시간에 따른 용기 내 온도, 소요동력 및 회전수의 변화를 나타내었다. 과냉각 해소 직후로부터 약 20분 동안 소요동력과 회전수에서 변화를 찾아 볼 수 없으나 얼음과 교반기 날개의 마찰에 의해 생기는 것으로 판단되는 소리가 나기 시작하는 때 (약 30분 경과)를 기점으로 소요동력이 계단형태로 증가하여 그 후로 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 냉각면 상에서 성장한 얼음 선단부가 교반기와 부딪힘에 따른 저항증가로 볼 수 있다. 이 후로 용기 벽면에 부착/성장하는 얼음의 정도와 액 중의 얼음량이 점차 증가함에 따라 교반기

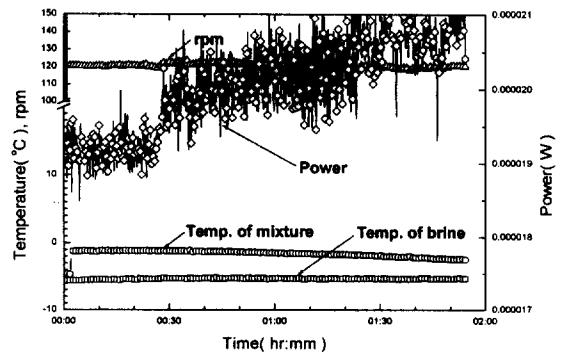


Fig. 7 Time history of temperature and power to an aqueous solution.
(EG 1 vol%)

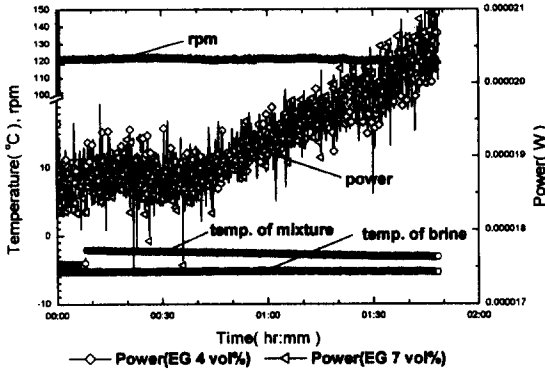


Fig. 8 Time history of temperature and power to an aqueous solutions. (EG 4, 7 vol%)

의 소요동력이 점차 증가하여 약 110분 후에는 급격히 증가하여 그 저항으로 인해 교반기가 정지되었다.

Fig. 8는 빙부착이 일어나지 않은 경우로 과냉도 2 K, EG농도가 각각 4 vol%와 7 vol%의 용기 내 온도 및 소요동력을 나타낸다. 양 쪽 모두 제빙 시작 후 약 40분 이후부터 동력이 서서히 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 제빙량의 증가로 유동저항이 증가함과 함께 교반기의 소요동력이 점차 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 제빙 종료 때까지 벽면에서의 빙부착은 관찰되지 않았고 빙 입자간의 응결도 거의 없는 슬러리 상태로 나타났다. 그러나 과냉도를 4 K로 할 경우 주어진 제빙량 한도에서 빙부착이 발생하였다.

4. 결론

동적형 빙축열 시스템의 축열재료로서 첨가제와 에틸렌글리콜을 함유한 수용액의 제빙으로부터 다음과 같은 부착특성을 얻었다.

- (1) 허용된 제빙량 하에서 동일한 과냉도(2 K) 하에서 에틸렌글리콜을 4 vol% 이상 첨가하였을 때 빙부착이 일어나지 않았다.
- (2) 허용된 제빙량 하에서 체적비(물:EG:SCA)가 93:4:3인 경우 과냉도가 큰 쪽에서 빙부착이

발생하였다.

(3) 빙부착여부를 모터의 소요동력으로부터 판단할 수 있는 정량적인 판단결과를 제시하였다. 그 결과, 빙 부착시 소요동력은 급격하게 증가하였다. 반면에 빙 비부착시 소요동력은 완만하게 증가하였다.

참고문헌

1. Matsumoto, K., Okada, M., Kawagoe, T. and Kang, C., 2000, Trans. JSME (B), Vol. 66, No. 641, pp. 182.(Japanese)
2. Kang, C. D., Okada, M., Oda, S., Matsumoto, K., Kawagoe, T., 2001, Investigation of Effective Factor on Ice Formation Process of Ice Thermal Energy Storage Using Water-Oil Emulsion -Effective of Wall Material and Cooling rate to Ice Adhesion on Cooling Wall-, Trans. of the JSRAE, Vol. 18, No. 1, pp. 51-59.(Japanese)
3. Kang, C. D., Ro, S. T., ODA, S., Matsumoto, K., Kawagoe, T., 2001, Ice Adhesion Control on Cooling Wall with Water-Oil Emulsion, Proceedings of the SAREK 2001 Summer Annual Conference, Vol. 1, pp. 622-627.
4. Hirata, T., Nagasaka, K. and Ishikawa, M., 2000, Crystal ice formation of solution and its removal phenomena at cooled horizontal solid surface, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, No.3, pp. 333-339.(Japanese)
5. Inada, T., Yabe, A., Saito, T., Lu, S.S., Zhang, X., Yoshimura, K., Tanaka, M., Grandum, S., Microscale analysis of ice crystals made from aqueous solutions by scanning tunneling microscope", 6th International Symposium on Thermal Engineering and Sciences for Cold Regions, Darmstadt (Germany), August 22-25, 1999.