

수용액의 교반, 제빙시 교반동력특성과 IPF와의 상관관계

정 동 열, 백 중 현^{*†}, 강 채 동^{**}, 홍 희 기^{***}

경희대학교 대학원 기계공학과, ^{*}한국생산기술연구원, ^{**}전북대학교 기계항공시스템공학부,
^{***}경희대학교 기계산업시스템공학부

Relation of Power Characteristics and IPF in an Aqueous Solution Cooling with Stirring

Dong-Yeol Chung, Jong-Hyeon Peck^{*†}, Cheadong Kang^{**}, Hiki Hong^{***}

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

^{*}Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-825, Korea

^{**}Dept. of Mechanical Engineering, Chonbuk University, Jeonju 561-756, Korea

^{***}School of Mechanical and Industrial System Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

ABSTRACT: This paper presents a relation between power and IPF in solutions with EG 7wt% and (EG+PG+1,6-hexanediol) 7wt%. Using freezing points, IPF was predicted and by the calorimeter method from experiment measured. Compared each method, predicted and measured IPF had similar values. At the same temperature, IPF of EG 7wt% is approximately 10% smaller than IPF of (EG+PG+1,6-hexanediol). Increasing IPF, power and concentration of additive in solution also increase. When low temperature bath is -4°C, IPF of (EG+PG+1,6-hexanediol) is 25%.

Key words: IPF(아이스 충전율), Power(교반동력), Calorimeter method(열량계법), Freezing point(동결점), 1,6-hexanediol(1,6-헥산디올)

기 호 설 명

m : 질량 [g]
 r : 신뢰도 [%]
 L : 잠열 [kcal/kg]
 C : 비열 [kcal/kg · K]
 x : 수용액에 대한 얼음의 비율

σ : 동결점의 표준편차 [°C]
 ω_{stir} : 교반회전수 [rpm]

하첨자

ice : 얼음
sol : 수용액
s : 아이스슬러리 (ice slurry)
mix : 수용액과 슬러리의 혼합물

그리스 문자

1. 서 론

아이스슬러리를 연속적으로 제빙하는 동적형 빙축열 방식은 두꺼운 얼음층을 형성하지 않아 제빙효율을 높이며, 부하추종능력이 우수하다는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 하지만 아이스슬러리를 제

[†] Corresponding author
Tel.: +82-41-589-8343; fax: +82-41-589-8330
E-mail address: pjh6240@kitech.re.kr

빙 또는 배관으로 직접 수송시 관폐색이라는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 제빙방법이나 첨가제의 종류 및 농도에 대한 지속적인 연구가 국내외에서 지속적으로 진행중되고 있다.

Okada 등은 계면활성제(유화제)의 일종인 실란 커플링제(silane coupling agent, 이하 SCA)가 함유된 물에 표면장력이 작은 실리콘 기름을 분산시킨 에멀전 형태의 수용액을 사용하여 제빙시 열교환표면(SUS 재질)에서의 빙부착현상이 효과적으로 억제되는 것을 관찰하였으며 이 때 제빙된 아이스슬러리의 제빙량을 측정하였다. 그리고 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, 이하 EG)과 SCA를 첨가한 수용액을 동일한 제빙방식에 의하여 아이스슬러리를 만든 후 흡인식 분석기를 이용하여 제빙량을 측정하였으나 표면장력에 의해 슬러리속의 빙입자 사이에 잔존하는 수분이 충분히 분리되지 않아 정확한 제빙량을 측정하는데 문제점이 있다고 보고되었다. 또한 용기를 이용한 제빙실험에서 제빙후 용기로부터의 얼음의 분리 여부만으로 빙부착여부를 판단하는 것은 여러 가지 영향을 무시한 것과 정량화 되어 있지 않는 문제점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 교반기 모터의 소요동력과 회전수를 측정하여 비교함으로써 빙부착여부를 판단하는 정량적인 판단결과를 제시하였다.⁽²⁻³⁾

본 실험에서는 선행연구에서 빙부착 억제에 대한 효과가 좋은 EG 4wt%, PG 1.5 wt%, 1,6 헥산디올이 첨가된 수용액과 비교물질로 EG 7wt% 수용액의 제빙과정에서 IPF를 추정 및 측정하였으며 IPF 증가와 교반동력의 상승과의 연관성에 대해 확인하고자 한다.

2. 실험방법

Table 1 Composition of solutions (wt%)

	Water	EG	PG	1,6 Hexanediol
Type 1	93	7	-	-
Type 2	93	4	1.5	1.5

2.1 동결점 측정

동결점을 이용하여 간접적으로 수용액의 농도와 IPF를 계산하기 위해 Table 1에 제시된 EG와 1,6 헥산디올이 첨가된 수용액의 농도에 따른 동결점을 측정하였다. 각각의 수용액을 시험관에 12 ml 주입하여 5번의 측정을 실시하였으며 이때 -10°C로 유지되는 저온항온조에 넣고 냉각시 수용액의 온도변화를 5회에 걸쳐 측정하였다. 그리고 과냉각이 해소된 직후의 온도로부터 각 수용액의 동결점으로 선택하였다. 이때 온도측정은 T-형 열전대를 사용하였으며 수용액의 온도 및 저온 항온조의 온도는 데이터로거(34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)을 이용하여 10초 간격으로 측정하였다.

2.2 제빙실험

Fig. 1는 냉각, 제빙을 위한 실험장치도를 나타내고 있다. 제빙에 사용된 수용액은 증류수에 첨가제를 7wt%의 비율로 혼합하여 950 g을 제작하였다. 제작된 수용액을 상하부가 단열된 스테인리스 용기에 담아 용기의 외부는 저온항온조의 브라인으로 냉각하며 상부에 교반봉이 관통하는 아크릴 마개를 이용하여 단혀진 상태에서 교반의에 의해 강제대류가 형성되며 교반되도록 하였다. 이때 교반속도는 120 rpm으로 설정하였으며 저온항온조내의 브라인 온도는 -5°C로 하였다. 내부 수용액의 온도가 목표로 하는 과냉도(1 K)

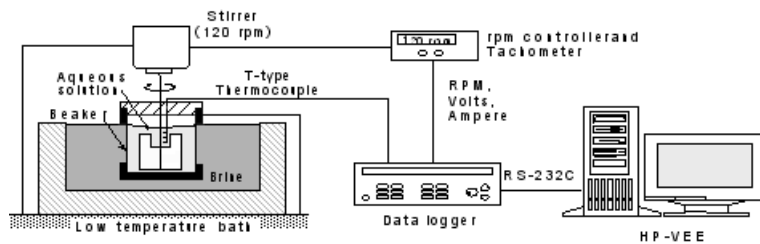


Fig. 1 Experimental apparatus for ice formation

Table 2 Prediction of IPF in solutions according to concentration

Concentration (wt%)	Water (g)	Additive (g)	Ice (g)	Total (g)	IPF (%)
7wt%	93	7	0	100	0
9wt%	88	7	5	100	5
11wt%	83	7	10	100	10
13wt%	78	7	15	100	15
15wt%	72	7	20	100	20
17wt%	68	7	25	100	25

에 이르렀을때 강제적으로 과냉된 수용액에 빙핵을 투여하여 동결을 유도하였다. 제빙과정은 과냉각 해소와 함께 시작되며 동결점에 의해 교반동력과 아이스층진율(Ice packing factor, 이하 IPF)과의 관계를 알기 위해 내부 수용액의 온도에 따라 실험을 종료하였다. 항온조 내부의 브라인 온도 및 용기 내부 수용액 온도와 교반기 모터에 수반되는 전압 및 전류, 교반회전수는 데이터로거와 계측용 프로그램으로 10초마다 측정하였다.

2.3 IPF 측정

열량계법을 이용하여 IPF를 측정하기 위해 스테인리스(SUS 304) 강관(외경 165 mm, 높이 200 mm, 두께 2 mm)에 주위를 150 mm의 우레탄으로 단열하고 하부에 마그네틱 교반기를 설치하여 아이스슬러리(950 g)와 일정온도의 물(950 g)을 혼합하였을 때 용기 내의 수용액(1,900 g) 온도가 전체적으로 균일할 수 있도록 측정장치를 제작하였다. 용기내부의 온도는 중심부에서 축방향 15 mm 간격으로 3개, 원주방향으로 30 mm 떨어진 위치에 2개 지점을 측정하였다.

IPF를 계산하기 위해서는 가정이 필요하다. 제빙시 물이 얼음으로 상변화하므로 계산상에 물의 잠열을 이용하였으며, 농도 변화에 따라 비열값들이 영향을 받지 않는 것으로 간주하였다. 열량계법과 이러한 가정을 기반으로 다음과 같은 식을 서술할 수 있으며 최종적으로 식 (5)의 도출이 가능하다.

$$m_{mix} = m_w + m_s \quad (1)$$

$$m_{mix} \Delta h_{mix} = m_w \Delta h_w + m_s \Delta h_s \quad (2)$$

$$m_s = x m_{ice} + (1-x) m_{sol} \quad (3)$$

식 (2)를 아이스슬러리의 현열부와 잠열부로 나누어 식 (3)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} & m_{mix} C_{p,mix} T_{mix} \\ &= m_w C_{p,w} T_w + x m_{slurry} C_{p,ice} T_{slurry} \\ &+ (1-x) m_s C_{p,sol} T_s + x m_s L_{ice} \end{aligned} \quad (4)$$

$$x = \frac{m_{mix} C_{p,mix} T_{mix} - m_w C_{p,w} T_w - m_s C_{p,sol} T_s - m_s L_{ice}}{m_s (C_{p,ice} T_s - C_{p,sol} T_s + L_{ice})} \quad (5)$$

여기서, 물의 잠열 $L_{ice}=80$ kcal/kg, 물의 비열

$C_{p,w} = C_{p,mix} = C_{p,sol}=1$ kcal/kg, 얼음의 비열을 $C_{p,ice}=0.5$ kcal/kg로 하여 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 동결점 측정과 IPF 계산식

Fig. 2는 시험관 내 수용액의 각 조성에 대하여 동일시료로 총 5회의 반복실험을 통해 얻은 동결점을 나타내고 있으며, 최소자승법을 이용하여 Fig 3에서 나타낸 1차 곡선으로 근사하였고 동결점은 농도에 대하여 약 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (신뢰도 99%)의 범위 내에서 만족하였다.

첨가제를 함유한 수용액을 제빙하여 아이스슬러리로 만든다는 것은 Fig. 3의 상태도에서 수용액 농도의 동결점 이하로 온도가 하강하면 수용액내 첨가제의 농도는 증가하게 되며 고상(얼음)

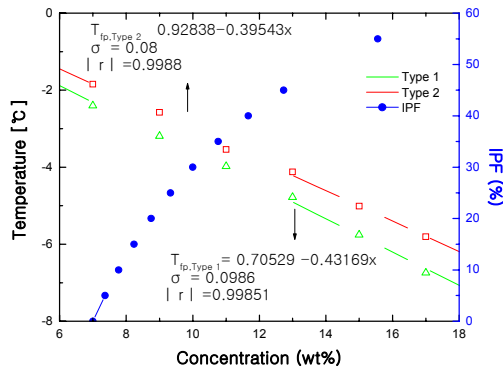


Fig. 2 Relation of freezing point and IPF about concentration on aqueous solutions

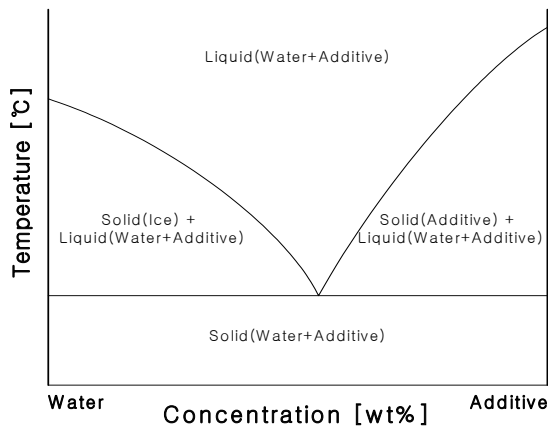


Fig. 3 Phase diagram

을 생성하게 되는 원리와 같으며, 이 원리를 적용하여 Table 1에 제시된 수용액을 제빙시 IPF와 수용액의 동결점의 관계를 이용하여 간접적인 계산이 가능하다. Table 2에서 나타낸 바와 같이 슬러리량이 증가함에 따라 수용액 양은 감소하게 되며 수용액내 첨가제의 농도와 IPF는 증가함을 알 수 있다. 이렇게 추정된 IPF 곡선은 Fig. 3에서의 동결점 곡선과 함께 표현할 수 있다. 추정된 IPF는 로그곡선의 형태를 취하고 있으며 농도가 증가함에 따라 제빙량의 증가율을 서서히 감소하는 형태를 띄고 있다.

3.2 IPF 측정

IPF를 측정하기 위해 Table 1에서 제시된 조성비를 갖는 Type 1과 2의 수용액에 대해 제빙 실험을 하였다. Type 1은 물성치가 잘 알려진 물

질이며 Type 2는 선행연구에서 제빙시 아이스슬러리와 제빙벽면간에 빙부착이 발생하지 않음을 확인하였다. 또한 Type 2는 제빙량이 다른 물질에 비해 많음이 관찰되었다. Fig. 4, 5에는 이들 수용액의 제빙시 용기 내부의 아이스슬러리의 온도와 교반동력에 대해 나타내었으며 또한 동결점을 이용하여 수용액의 농도와 IPF를 예측하였다. 두 수용액 모두 과냉각이 해소된 이후 아이스슬러리의 증가로 인해 교반동력의 상승이 시작되었으며 내부온도가 하강하고 수용액내 첨가제의 농도는 높아지게 된다. 이후 수용액의 농도증가에 의해 아이스슬러리로 제빙되는 양의 증가율은 점차 감소하게 된다. 이로 인해 교반동력의 증가율도 감소하게 되고 실험종료시점 부근에서는 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

용기내부의 온도와 교반동력의 추세에 따른

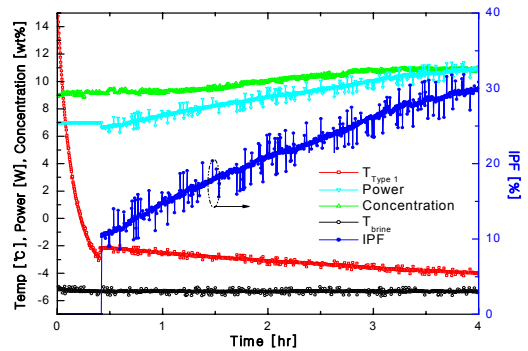


Fig. 4 Time history of IPF and power to an aqueous solution (Type 1)

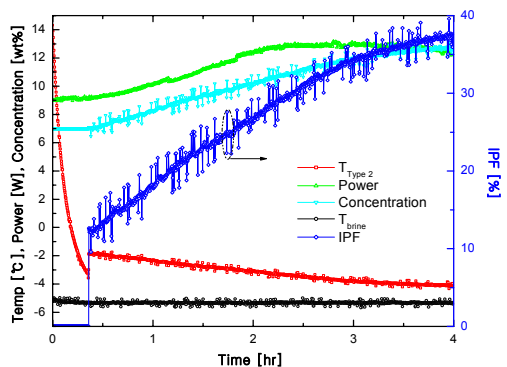


Fig. 5 Time history of IPF and power to an aqueous solution (Type 2)

IPF의 값을 측정하기 위해 과냉각 해소이후 제빙 시간에 따라 몇 개의 실험종료시점으로 나누었으며 매회실험마다 동일한 조성비로 시료를 제작하였다. IPF를 측정하기 위해 제작된 장치를 이용하여 제빙실험 후의 아이스슬러리 및 혼합될 물의 온도와 이들을 혼합한 수용액의 온도를 측정하였다. 매회실험마다 동일한 조성비의 시료를 제작하여 제빙실험을 하였으며 열용량법으로 도출된 식 (5)를 이용하여 실제 IPF를 계산하였으며 이를 동결점에 의해 추정된 IPF와 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 추정된 IPF와 측정된 IPF는 유사한 형태를 취하고 있으며 동일한 동결점을 기준으로 Type1과 2는 약 10%이상의 IPF의 차이가 있음을 알수 있다.

또한 EG 7wt% 수용액 제빙실험에서 아이스슬

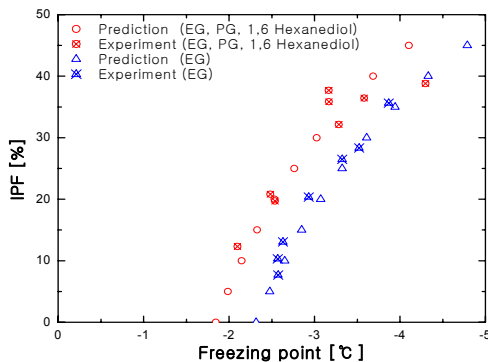


Fig. 6 Comparison of experiment and prediction to IPF

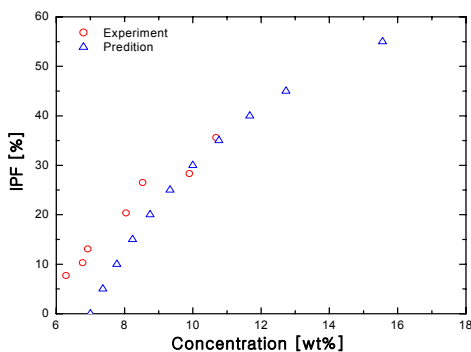


Fig. 7 Comparison of experiment and prediction to IPF

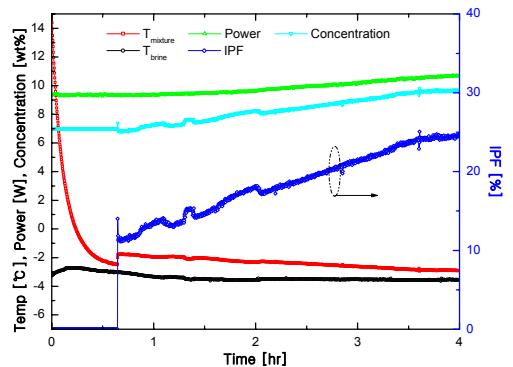


Fig. 8 Time history of IPF and power to an aqueous solution (Type 2 at -3.2°C)

러리의 일부와 슬러리가 포함되지 않은 수용액을 시료로 채취하여 샘플을 굴절계로 측정하였으며 그 결과는 Fig. 7에서 보는 바와같이 추정된 IPF 곡선과 유사한 형태를 보였다. 하지만 아이스슬러리를 직접 추출하여 상온에서 하루정도 방치한 후 굴절계를 이용하여 EG의 농도를 측정된 결과 5wt%의 농도를 갖는 수용액임을 확인하였다. 이는 표면장력으로 인해 슬러리 속에 수용액이 다량 함유되어 있다는 사실⁽⁴⁾을 확인할 수 있었다.

3.3 항온조 온도차이에 의한 교반동력의 차이

Fig. 8은 Type 2 수용액의 제빙시 저온항온조의 온도조건(-3.2°C)을 달리 하였을 때 나타나게 되는 교반동력의 특성을 나타낸 것이다. Fig. 8의 경우 과냉각 해소이후 교반동력은 Fig. 5의 경우와 비교하면 완만한 변화를 보이게 된다. 이는 빙핵투여 후 저온항온조와 용기내부의 온도차의 크기에 의해 용기외부로부터의 냉열의 공급이 작아지면 제빙된 아이스슬러리의 양도 적다. 예측된 IPF는 Fig. 5에서 최종적으로 38%이나, Fig. 8에서는 25%의 IPF를 보이고 있다.

4. 결 론

Type 1, 2의 수용액의 제빙실험으로부터 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 열용량법을 이용하여 측정된 IPF는 동결점을 이용하여 간접적으로 예측한 IPF와 유사하다.

(2) 굴절계를 이용하여 측정된 수용액의 농도는 동결점을 이용하여 간접적으로 예측한 IPF와 차이가 있으나 농도 증가에 따라 IPF의 증가율이 감소하는 특성이 유사하다.

(3) 굴절계를 이용하여 제빙된 아이스슬러리를 상온에서 녹여 5wt%의 농도를 갖는 수용액을 채취하였다. 이는 표면장력에 의해 아이스슬러리에 수용액을 포함한다는 사실을 확인할 수 있었다.

(4) 빙핵투여 후 IPF의 증가는 수용액내의 첨가제 농도의 증가와 더불어 교반동력의 증가하는 연관성을 보여주고 있다.

참고문헌

1. Lee. Y. P. ed. Trends in supply of ice thermal storage system and its Technology, Process of the SAREK 2003 Summer Annual conference (Special session), pp.1-52,
2. Matsumoto, K., Okada, M., Kawagoe, T. and Kang, C. D., 2000, Ice storage system with oil-water mixture(Actual proof of formation of high IPF suspension with adhesion of ice to cooling wall, Trans. JSME (B), Vol. 66, No. 641, pp. 182-188.(Japanese)
3. 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)
4. Kang C. D., Son K., Peck J.,-H., Hong H., 2002, Adhesion of ice slurry in an aqueous solution cooling with stirring, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.14, No.12, pp. 1071-1077.
5. Tsuchida D., Kang C. D., Okada M, Matsumoto K. and Kawagoe, T., 2002, Ice formation process by cooling water-oil emulsion with stirring in a vessel, International Journal of Refrigeration, Vol. 25, pp. 250-258.
6. Kang C. D., Kang Y.-T., Hong H., 2002, Adhesion of ice slurry in a multi-component aqueous solution with stirring and cooling, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.14, No.12, pp. 1063-1070.
7. Lee D. W., Yoon C. I., Yoon E. S., 2002, Experimental study on flow patterns and pressure drop characteristics of ice slurry in small size pipe (1), Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 385-390