

낙구식 점도계를 이용한 아이스슬러리의 점도측정에 관한 연구

김 명 준^{*}, 유 직 수^{**}, 임 재 근^{*}, 최 순 열^{*}

^{*}군산대학교 동력기계시스템공학전공, ^{**}군산대학교 대학원

A Study on the Measuring Method of Ice Slurry Viscosity Using the Falling Sphere Viscometer

Myoung-Jun Kim^{**}, Jik-Su Yu^{**}, Jae-Keun Lim^{*}, Soon-Youl Choe^{*}

^{*}Department of Power System Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

^{**}Graduate school of Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

(Received April 25, 2007; revision received July 25, 2007)

ABSTRACT: The present study has dealt with the measuring method of ice slurry viscosity using falling sphere viscometer. The experimental apparatus was composed by test section and high-speed video system. And the spheres used in this study were alumina and glass. The main parameters were ice packing factor (IPF) and falling velocity of sphere so the acquired results were discussed for these parameters. The viscosity of ice slurry was calculated by using measured falling velocity and moving distance at instantaneous time and the Stokes hypothesis was used for this calculation. It was clarified that possible measuring range was IPF = 0.06~0.14 of this type of measuring device and measuring method. In addition, it was clarified that the viscosity of ice slurry increased to increase of ice packing factor (IPF) of ice slurry

Key words: Falling sphere viscometer(낙구식 점도계), Ice slurry(아이스슬러리), Ice packing factor(얼음의 체적분율)

기 호 설 명	
d : 구의 직경 [mm]	t : 시간 [s]
f : 관벽에 대한 보정계수	v : 낙하 속도 [m/s]
g : 중력 가속도 [m/s ²]	x : 임의 거리 [m]
IPF : 얼음의 체적분율	그리스 문자
N : 샘플 수	
P : 구에 작용하는 힘 [Pa · m ²]	μ : 점도 [Pa · s]
r : 구의 반경 [mm]	ρ : 밀도 [g/cm ³]
T : 온도 [K]	

하첨자

† Corresponding author

Tel.: +82-63-469-1849; fax: +82-63-469-1849

E-mail address: mjkim@kunsan.ac.kr

m : 평균(아이스슬러리)

w : 물
 0 : 임의의 순간

1. 서 론

근년, 주야간 전력수요의 불균형이 문제 되고 있는 가운데 그 대책의 하나로서 빙축열 시스템이 주목 받고 있다.⁽¹⁾ 현재의 빙축열 시스템으로는 주로 냉각면에서 얼음을 성장시키는 정적 제빙형이 사용되고 있지만 얼음의 성장과 함께 전 열면에서의 열저항이 증가하는 문제점 등을 안고 있다.⁽²⁻⁴⁾

또한 정적 제빙형의 문제점을 개선하기 위한 방법으로서, 생성된 얼음을 냉각면으로부터 연속적으로 떼어내는 동적 제빙형에 대한 관심이 높아지고 있으며 서서히 보급되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 또한 동적 제빙형으로 만들어진 얼음 중 일부는 그 입자가 작기 때문에 물에 혼합시켜 유동성을 가지게 하는 아이스슬러리로서도 사용할 수 있게 된다.

아이스슬러리를 이용한 냉열유송에 관해서는 유동성을 평가하는 하나의 중요한 무차원수인 레이놀즈수가 널리 사용되고 있지만 레이놀즈수를 산출하는 과정에 있어서 필요한 점도 및 동점도는 아이스슬러리와 같은 고-액 이상류에 대해서는 정의하기가 어렵다. 또한 아이스슬러리의 유동특성을 보다 정확하고 명확하게 평가하기 위해서는 아이스슬러리의 점도측정이 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 실험에서는 아이스슬러리의 점도측정법의 하나로 회전식점도계에 의한 아이스슬러리의 손상 등이 발생할 우려가 없는 낙구식 점도계⁽⁸⁾에 의한 측정을 제안하고 실험 및 검토를 행했다.

2. 낙구식 점도계의 측정원리

낙구식 점도계에 의한 점도의 측정원리는 시험 유체에 구를 낙하시켜 그 때의 저항 및 낙하속도로부터 점도를 산출하는 방법이다.

반경 r 의 구가 점도 μ 의 유체 내를 충분히 낮은 속도 v 로 움직이고 있을 때 구에는 Stoke의 법칙에 의해 다음과 같은 힘 P 가 작용한다.

$$P = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v \quad (1)$$

또한 밀도 ρ_0 의 구가 밀도 ρ 의 유체내를 낙하한다고 할 때 소정의 시간에 대한 속도를 v_0 라고 하고 구에 작용하는 힘은 연직하방을 정(+)으로 하면

$$P_1 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_0 \cdot g \quad (\text{중력}) \quad (2)$$

$$P_2 = -\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g \quad (\text{부력}) \quad (3)$$

로 표시되고 상기의 식(2) 및 식(3)과 전술한 Stoke의 저항력 P 의 3개로 나타낼 수 있는 식으로 구에 작용하는 힘을 정리할 수 있다.

그리고 일정속도 v_0 일 때 이러한 힘들의 합은 0이 된다. 따라서 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot g = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v_0 \quad (4)$$

결과적으로 식(4)로부터 점도 μ 는 식(5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{2 \cdot r^2 \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot g}{9 \cdot v_0} \\ &= \frac{d^2 \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot g \cdot t \cdot f}{18 \cdot x} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 d 는 구의 직경, x 는 일정시간동안 구가 낙하한 거리, f 는 관벽에 대한 보정계수이다.

본 실험에서는 미리 점도를 알고 있는 순수한 물($T = 273.15 \text{ K}$)을 이용해 보정계수 f 를 구하고, 구가 일정구간 x 를 진행했을 때의 거리와 시간 t 를 측정하여 식(5)를 이용해 유체의 점도를 산출하였다. 보정계수는 본 실험에서 사용한 아크릴 판과의 마찰에 의해 발생하는 운동량의 증가에 대한 값을 정리한 것으로 앞에서 설명한 물을 이용하여 측정된 점도값에 대한 보정 계수를 의미하며 그 값은 구의 직경 및 유속의 변화에 따라 미세한 차이(유리구의 경우, 0.869; 알루미늄구의 경우, 0.895)는 있으나 평균값으로는 0.882였다. 따라서 본 연구의 목적인 아이스슬러리의 *IPF* (Ice Packing Factor; 얼음의 체적분율)에 따른 점도를 산출하는데 있어 보정계수의 값으로는 0.882를 사용하였다. 또한 아이스슬러리의 밀도 ρ 는 *IPF*를 이용해 겉보기 밀도를 계산해 그 값으로 하였다.

아래의 Table 1에는 본 실험에서 사용한 유체들의 밀도 및 실험의 범위를 나타내고 있다. 표

Table 1 Density of each fluid used in this experiment and experimental ranges

Test fluids	Density
Lubricant(Linseed oil)	0.926 [g/cm ³]
Ice water slurry	0.993 [g/cm ³]
Fluorinert(FC-87, 3M)	1.632 [g/cm ³]
Experimental ranges	
Materials of spheres	Glass(2.52[g/cm ³]) Alumina(3.59[g/cm ³])
Diameters of spheres	4~6[mm]
Velocities of spheres	0.25~0.6[m/s]
IPF	0.06~0.14

에 있는 값들로부터 알 수 있는 바와 같이 각 유체간의 밀도차가 확연히 나타나고 있다. 따라서 본 실험에서 각 유체간의 혼합은 일어나지 않았으며, 명확한 경계를 구성하고 있었다.

위의 Table 1에 나타나 있는 아이스슬러리의 밀도는 IPF를 0.1로 가정한 경우의 아래의 식으로부터 구한 겉보기 밀도를 나타내고 있다.

$$\rho_m = 0.9 \cdot 1.00 [g/cm^3] + 0.1 \cdot 0.93 [g/cm^3] = 0.993 [g/cm^3] \quad (6)$$

3. 실험방법

Fig. 1, Fig. 2에는 본 실험 장치의 개략도 및 시험부 상세도를 나타내었다. 시험부에 있는 점도 측정부는 구의 낙하거리를 읽을 수 있도록 스케일을 부착시킨 내경 80 mm, 길이 500 mm의 아크릴 원통 및 두께 10 mm, 폭 170 mm의 아크릴 판 그리고 동관을 삽입한 덮개로 구성되어 있다. 측정에 사용한 구는 촬영을 용이하게 수행하기 위해 형광색으로 착색한 알루미늄제 및 유리제의 것을 사용했다.

먼저, 실험준비로서 얼음을 일정한 분포로 만들기 위해 점도 측정부에 윤활유 및 미리 IPF를 조정된 아이스슬러리와 플로리나트(Fluorinert, 불소계 불활성 액체)를 시험부인 아크릴제 원통에 넣은 후 항온조에 넣어 얼음의 체적분율인 IPF를 일정하게 유지되도록 온도를 조절하였다. 그리고 아이스슬러리를 교반시켜 얼음입자가 아이스

슬러리층내에서 균일한 분포가 되도록 조절한 후 구를 낙하시켜 그 양상을 고속카메라(최고시간 폭 1/250 sec)로 촬영해 일정구간 x를 통과하는데 걸리는 시간 t를 측정함으로써 점도를 산출하였다. 또한, 항온조에는 주위공기와의 열전달에 의한 영향을 차단하기 위해 촬영부분이외에는 단열재를 설치하여 실험시간(1회 측정시간 약 1~2초)동안의 IPF는 일정하게 유지되었다.

IPF의 조정은 얼음입자를 생성시키는 메스실린더내에 빙핵을 투입한 후 생성되는 얼음입자를 항온실내에서 채로 걸러 채집한 얼음의 직경을 현미경을 이용해 측정한 후 입자의 모양을 구형으로 가정하여 체적을 산출하였다. 그리고 샘플수를 이용해 얻은 총 얼음입자의 체적과 아이스슬러리를 만들기 위한 물과의 체적비율로 소정의

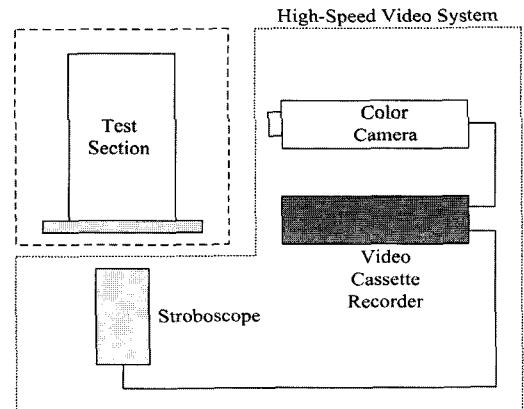


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

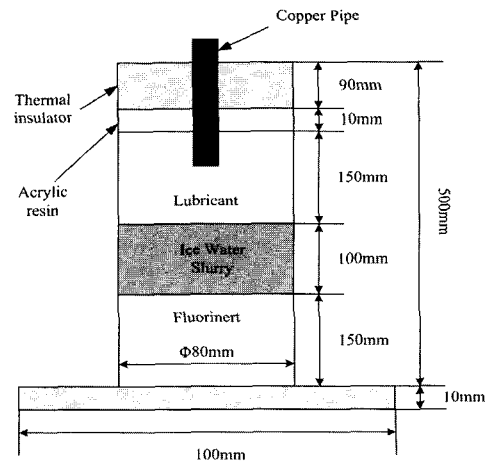


Fig. 2 Detail of test section.

IPF를 조정하였다.

아이스슬러리의 점도측정에 소요되는 시간은 실험의 준비단계를 포함해 총 10여분이 소요되었다. 이 시간동안의 열의 이동을 최소한으로 줄이기 위해 실험은 항온실내에서 이루어졌으며, 실험 후 채집한 얼음입자의 체적이 실험초기의 값과 거의 일치하는 값을 얻었다. 단열재로 싸여 있는 시험부가 항온조내에서 온도조절이 되고 있어 외부와의 열전달에 의한 IPF의 변화는 관찰되지 않았으며, 실험시간이 매우 짧기 때문에 아이스슬러리에 분산되어 있는 얼음입자의 부상 역시 본 실험의 조건내에서 관찰되지 않았다.

점도측정에 사용된 구는 재질에 의한 영향(밀도에 의한 영향)과 체적에 의한 영향을 고려하기 위해 알루미늄으로 만든 구와 유리로 만든 구를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 구의 선정(낙하특성)

본 실험에 있어서는 식(5)를 이용해 점도 μ 를 산출할 때 구의 낙하속도를 일정하게 유지시켜야 한다. 따라서 실제의 측정을 행하기 전에 $IPF = 0$ 의 조건에서 낙하시켰을 때 $d = 4\text{ mm}$ 및 6 mm 의 알루미늄구, 그리고 $d = 5\text{ mm}$ 의 유리구에 대해서 구의 낙하속도 분포를 0.01 m 간격으로 측정하였다.

Fig. 3으로부터 $d = 6\text{ mm}$ 의 알루미늄구가 다른 2종류의 구에 비해 속도의 편차가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 그 원인으로는 구의 직경이 6 mm 의 경우가 다른 구에 비해 커서 관벽 부근에서의 와동 영향이 생겼기 때문이라고 생각할 수 있다. 이와 같은 결과로부터 본 실험에서는 4 mm 의 알루미늄구와 5 mm 의 유리구를 이용하여 아이스슬러리의 점도를 측정하였다.

Fig. 4, Fig. 5는 본 실험에 사용한 알루미늄구 및 유리구의 직경 d 및 밀도 ρ 의 분포를 나타내고 있다.

4.2 현상의 재현성

식(5)로부터 점도 μ 는 낙하속도 v 의 1차함수인 것을 알 수 있다. 따라서 아이스슬러리 내를 낙

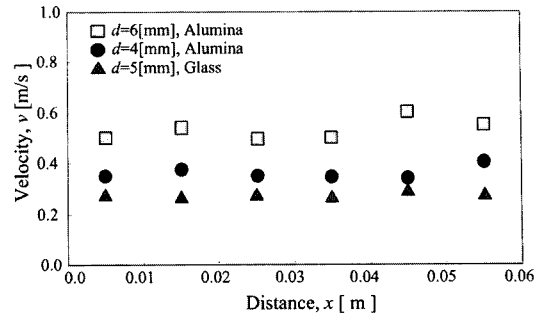
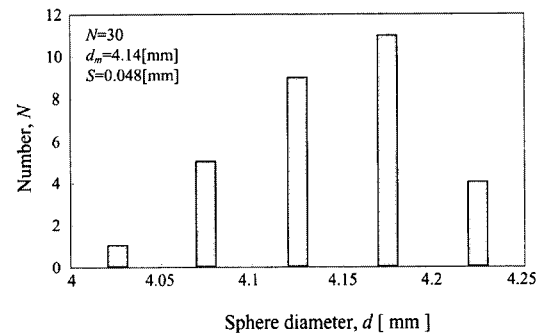
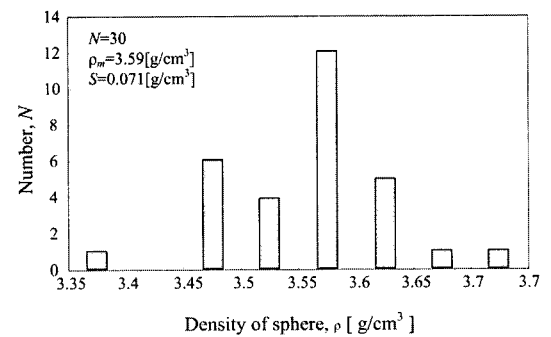


Fig. 3 Falling velocity profile of sphere in pure water ($IPF = 0$).



(a) diameter

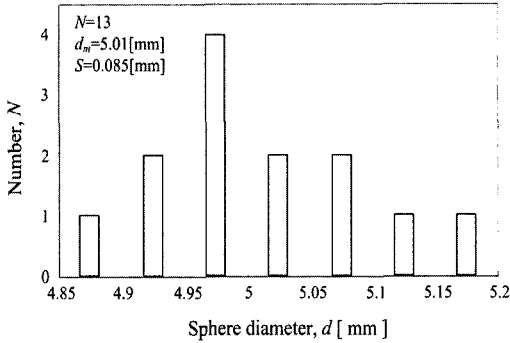


(b) density

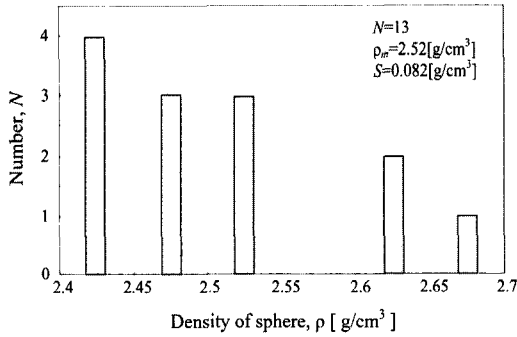
Fig. 4 Diameter and density distribution of alumina sphere.

하하는 구의 낙하속도 v 와 순수한 물의 내부로 낙하하는 구의 낙하 속도 v_w 의 속도비(v/v_w)는 이론상으로는 어떠한 경우에도 일정하게 된다.

Fig. 6은 알루미늄구 및 유리구에 대해서 $IPF = 0.1$ 의 아이스슬러리 및 순수한 물에서의 낙하속도를 측정하고 속도비를 산출한 결과를 나타내고 있다. Fig. 6으로부터 $IPF = 0.1$ 에 대해서 알루미늄



(a) diameter



(b) density

Fig. 5 Diameter and density distribution of glass sphere.

낙구 및 유리구 양측에서 거의 같은 현상(아이스슬러리의 점도증가에 의한 속도비 감소 현상)이 일어나고 있음을 알 수 있다. 즉, Fig. 6의 실선은 측정에 사용한 알루미늄구 및 유리구의 속도비가 일정(알루미늄구의 $v/v_w =$ 유리구의 v/v_w)함을 나타내고 있으며, 실선을 기준으로 상부의 삼각형 영역은 유리구에 대한 아이스슬러리의 속도비 감소를 나타내는 영역이고, 하부의 삼각형 영역은 알루미늄구에 대한 속도비 감소 영역을 나타내고 있다.

따라서 실제의 아이스슬러리에 대한 점도 측정에는 알루미늄구 및 유리구를 아이스슬러리에 순차적으로 낙하시켜 낙하속도비가 같아질 때의 값(실선위에 데이터가 정렬할 때의 값, $y=x$)을 샘플링하여 아이스슬러리의 점도를 산출하였다.

본 실험의 범위내에서는 Fig. 6에 ●으로 나타낸 데이터들이 최적의 점도 측정점으로 되며, 이러한 영역을 ▨으로 나타내었다.

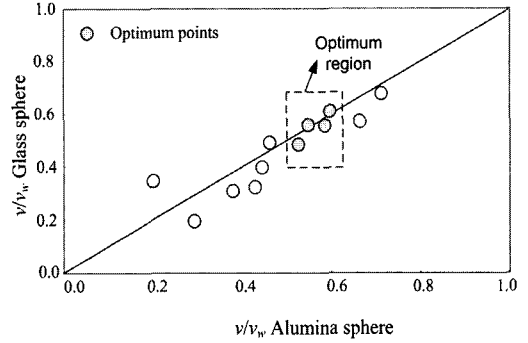


Fig. 6 Falling velocity ratio at $IPF = 0.1$.

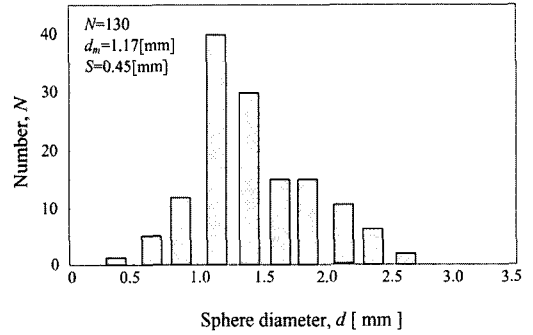


Fig. 7 Diameter distribution of ice particle.

4.3 점도의 측정

Fig. 7에 본 실험에서 사용한 얼음의 입자경 분포를 나타내었다. 충분히 냉각시킨 메스실린더(용적 500 ml)를 이용해 먼저 소정의 IPF 를 갖는 아이스슬러리를 만든 후 구의 낙하속도를 측정해 점도를 산출했다.

그 결과가 Fig. 8이다. 그리고 Fig. 8의 실선은 Vand⁽⁹⁾의 슬러리에 대한 아래의 상관식으로부터 산정한 $IPF = 0.1$ 에 대한 점도를 나타내고 있다.

$$\frac{\mu_m}{\mu_w} = (1 - IPF - 1.16 \cdot IPF^2)^{-2.5} \quad (7)$$

Vand의 상관식으로 구한 아이스슬러리의 점도와 본 연구에서 측정된 점도는 경향은 유사하지만, 값에 있어서는 최대 150% ($IPF = 0.14$ 의 경우) 정도 차이를 보이고 있다. 이러한 차이가 발생한 이유로서는 Vand가 발표한 상관식은 구형의 마이크로캡슐의 입자경이 0.3~400 μm 정도에 해당하지만, 본 연구에서 다루는 얼음입자는 입자경

이 1.17 mm로, 약 30배 정도 차이를 보이고 있기 때문에 판단된다.

본 실험을 통해 얻어진 데이터를 정리하여 $IPF = 0.06 \sim 0.14$ 에 대한 정리식을 식(8)에 나타내었다.

$$\mu_m = 9.7437 \cdot 10^4 \cdot IPF^{8.957} + 3.765 \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

5. 결 론

본 실험에서는 아이스슬러리의 점도를 측정하기 위한 하나의 방법으로서 낙구식 점도 측정기의 원리를 이용하여 실제로 아이스슬러리의 병충진율의 변화에 따른 점도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 낙하구의 직경이 너무 크면 관벽과의 마찰이 상승하여 아이스슬러리의 점도측정에 영향을 미치는 것을 알았다.

(2) 두 가지 재질의 낙하구를 사용하여, 물에서 측정된 속도값과 아이스슬러리에서 측정된 속도값과의 비로 정리할 수 있는 속도비에 대한 최적 측정 범위를 정리하였다.

(3) Vand의 슬러리에 대한 정리식과의 비교를 통해 아이스슬러리의 점도측정에 대한 본 실험의 타당성에 대해서 검토하였으며, IPF 의 범위($IPF = 0.06 \sim 0.14$)내에서 정리식을 도출하였다.

후 기

이 논문은 2007년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

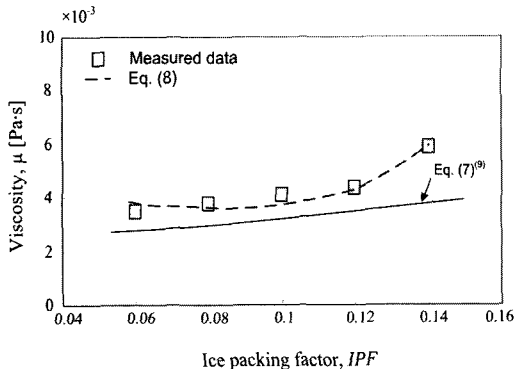


Fig. 8 Viscosity of ice slurry.

참고문헌

- Inaba, H., 1998, Functionally Thermal Fluid and It's Application, Report of Research & Development Center of Takasaga Thermal Engineering Co., Ltd. No. 12.
- Min, J. K., Yoo, A. G., Kim, J. H. and Kim, S., 1993, A study on real time model of transfer process in an ice-on-coil tank, Proceedings of the SAREK winter annual conference, pp. 40-46.
- Winters, P. J., 1991, Phase two laboratory testing of direct freeze ice slurry district cooling, Project final report, U.S. Department of Energy.
- Horibe, A., Inaba, H., Haruki, N., Miura, H. and Park, K. W., 2000, Continuous ice making in a cooled pipe with flowing water solution, Proceeding of the 4th JSME- KSME Thermal Engineering Conference (International Conference Center Kobe), Vol. 2, pp. 529-534.
- Cleary, C. S., 1990, Hydraulic characteristics of ice slurry and chilled water flow, Advanced Energy Transmission Fluids Final Report of Research.
- Knodel, B. D. and France, D. M., 1988, Ice water slurry flow in a circular pipe, Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 239-245.
- Horibe, A., Inaba, H., Haruki, N. and Park, K. W., 2001, Melting heat transfer of flowing ice slurry in a pipe, Fourth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration, pp. 145-152.
- Holtz, F., Roux, J., Ohlhorst, S., Behrens, H. and Schulze, F., 1999, The effects of silica and water on the viscosity of hydrous quartzofeldspathic melts, American Mineralogist, Vol. 84, pp. 27-36.
- Vand, V., 1945, Theory of viscosity of concentrated suspensions, Nature, 155, pp. 364-365.