

곡관과 연속된 경사관 내에서 유동하는 아이스슬러리의 압력손실에 미치는 유속의 영향

박 기 원[†], 김 규 목^{*}

여수대학교 냉동공학과, ^{*}(주)다원에이씨 기술연구소

Influence of Velocity on Pressure Drop of Flowing Ice Slurry in Elbow and its continued Inclined Tube

Ki-Won Park[†], Kyu-Mok Kim^{*}

Department of Refrigeration Engineering, Yosu National University, Yeosu 550-749, Korea

^{*}Technical Research Center, Dawon AC Co., Daegu 711-855, Korea

(Received December 6, 2004; revision received May 11, 2005)

ABSTRACT: This study experimented to understand the effects of transporting ice slurry through elbow and inclined tube. And at this experiment it used propylene glycol-water solution and a diameter of about 2mm ice particle. The experiments were carried out under various conditions, with velocity of water solution at the entry ranging from 1.0 to 3.5m/s and elbows and inclined tubes of 4 kinds angle with 30°, 45°, 90° and 180°. The pressure drop between the tube entry and exit were measured.

According to angle of bending, the highest pressure drop was measured at 30° elbow and the lowest pressure drop was measured at 90° elbow, and there are only a little differences of pressure drop between 45° elbow and 180° elbow. According to angle of inclined tube, the highest pressure drop was measured at 90° inclined tube and the pressure drop at 45°, 30°, 180° inclined tubes were lower successively. The lowest pressure drop in elbows and inclined tubes was measured at velocity of 2.0~2.5 m/s and concentration of 10 wt%.

Key words: Elbow(곡관), Inclined tube(경사관), Flowing velocity(유동유속), Pressure drop(압력손실)

기 호 설 명

V : 유속 [m/s]

C_{sol} : 수용액의 농도 [wt%]

그리스 문자

D : 관내경 [mm]

IPF : 빙층전율(Ice Packing Factor)

ΔP : 압력강하 [Pa]

[†] Corresponding author

하첨자

Tel.: +82-61-659-3274; fax: +82-61-659-3274

E-mail address: pkw@yosu.ac.kr

in : 입구

1. 서 론

오늘날 오존층 파괴 및 온난화 등 지구환경에 대한 문제와 계절간, 주야간의 전력수요 격차가 커지는 문제 등이 대두되면서 환경보호와 에너지 이용효율의 극대화를 위한 노력이 일반화되고 있다. 그 대책의 일환으로 실용화된 빙축열시스템 중 아이스슬러리형은 정적 제빙방식에서 발생하는 제빙시의 열저항 문제를 해결하면서 부하추종성도 우수하다는 평을 받고 있다. 더구나 제빙열을 배관을 통해 수요측까지 수송하는 경우 매우 높은 열수송능력을 발휘할 수 있다.

그러나 아이스슬러리를 효율적으로 부하측까지 수송하기 위하여 해결되어야 할 부분들로서는 여러 가지를 들 수 있는데, 그 중 고-액 이상류인 아이스슬러리가 정체하지 않는 조건, 관내를 동결폐쇄시키지 않는 조건을 파악하는 것이 중요하다. 그러나 지금까지의 배관계에 대한 연구들은 주로 수평관과 수직관에 대한 연구들이고, 얼음을 사용함으로써 실험조건을 안정화시키기 어려운 문제도 있었겠지만 연구자에 따라 서로 상이한 결과를 발표하기도 하는 등 명확한 결론을 얻기에는 어려움이 있었다.⁽¹⁻⁴⁾

이처럼 배관을 이용하여 아이스슬러리를 수송함에 있어 아직 그 유동상태가 명확히 파악되지 않은 부분이 많으며, 설계자료 또한 매우 불충분한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선행 연구⁽⁵⁻⁷⁾와 같이 유동 아이스슬러리를 필요로 하는 열교환기까지 공급하기 위한 배관시스템 중 다양한 각도의 곡관과 경사관을 대상으로 고려하였다. 그러나 본 연구에서는 선행 연구에 비해 유속의 범위를 증가시키고 이러한 부분들에서 아이스슬러리가 유동될 때의 압력손실이 최소가 되는 유속을 찾아내고자 하였다. 이를 통하여 효율적인 에너지 이용 및 전력수급의 불안정을 해소할 수 있는 아이스슬러리형 빙축열 시스템의 기술을 더욱 발전시킬 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 곡관과 경사관에서의 아이스슬러

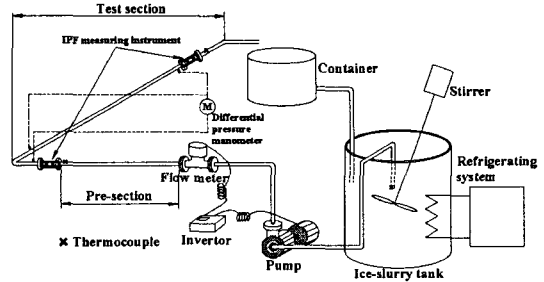


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

리 유동특성을 살펴보기 위하여 Fig. 1과 같이 아이스슬러리 혼합탱크, 펌프, IPF 측정기, 차압측정용 마노미터, 유속측정부, 유동안정화구간부, 그리고 시험부(곡관, 경사관)로 실험장치를 구성하였다.

모든 시험부는 내경을 25 mm로 하였으며, 관내 아이스슬러리의 유동상태를 파악하기 위하여 곡관부 전체와 경사부 입·출구를 투명한 아크릴로 제작하였고, 나머지 부분은 PVC이다. 그리고 곡관시험부는 곡률 반경 1.5D를 기준으로 하여 밴딩각도 30°, 45°, 90°, 180°의 4종을 가공하여 그 대상으로 하였으며, 경사시험부는 곡관시험부 출구에 곡관시험부의 각도에 따라 1,000 mm의 직관을 연결하였다. 각 시험부의 입구측과 출구측에 각각 차압측정용 텀과 IPF 측정기를 설치하였는데, 차압측정에는 수은주 마노메타를 이용하였으며, IPF는 전기전도도법으로 측정⁽⁸⁾하였다.

아이스슬러리 혼합탱크에는 냉동장치를 설치하여 내부온도가 과냉각상태를 유지할 수 있는 일정온도(0~-2°C 정도)가 되도록 하였으며, 혼합탱크 내에는 교반기를 설치하여, 탱크 내의 얼음입자와 물이 안정적이며 균질한 상태를 유지할 수 있도록 하였다.

아이스슬러리의 공급 유속을 일정하게 유지하기 위하여 시험부 입구에 유량계를 설치하고 인버터로 펌프의 회전수를 제어하였다. 또한 각 시험부의 입구측으로 공급되는 아이스슬러리에 편류가 생기지 않도록 유동안정화구간부를 설치하였다.

본 실험에서 사용한 얼음입자는 일정용기 내에 필요농도(10 wt%)로 조절된 프로필렌글리콜 수용액(CH₃CH(OH)CH₂OH)을 채우고 이를 약 -25°C의 저온 냉동고에서 24시간 이상 동결시켜 쇄빙기로 절삭한 것이다. 얼음입자 200개를 샘플로 채집하여 디지털카메라로 찍어서 입자직경을 측정한다.

결과 대부분이 1.7~2.2 mm의 입자직경을 가지고 있고, 얼음입자의 평균 직경은 1.943 mm이었다.⁽⁹⁾

2.2 실험방법

우선 수도수를 혼합탱크 내에 주입하고 냉동기를 가동하여 수송관 내의 수온이 0℃ 이하로 유지되도록 하였다. 이때 펌프를 이용하여 공기가 혼합되지 않도록 혼합탱크의 밑바닥으로부터 탱크 내 유량의 3/4 지점에서 유입하고 유량계와 인버터를 이용하여 일정유속, 안정한 흐름을 유지하도록 하였다. 이와 같은 과정을 통하여 수송관 내의 수온과 유속이 충분히 안정된 것을 확인한 후에 아이스슬러리 혼합탱크에 쇠빙기로 절삭한 프로필렌글리콜 수용액 얼음입자를 투입하고 교반기를 운전하여 수송관 내의 IPF가 소정의 값으로 안정될 때, 각 시험부에서의 압력변화와 입·출구의 IPF를 측정하였다.

본 실험에 있어서는 아이스슬러리 시험부 내의 유동특성에 영향을 미치는 인자라고 생각되는 아이스슬러리의 공급 유속, 수용액의 농도 및 시험부의 형상에 따라 아래의 조건에서 실험을 수행하였다. 이들 중 유속은 3.5 m/s 이상에서는 압력손실이 계속 증가할 것이고, IPF 40% 이상에서는 유속이 빠르다 하여도 쉽게관이 폐색될 것이며, 수용액의 농도는 10 wt%일 때가 가장 안정된 결과를 나타내므로^(6,7,9) 아래와 같은 범위로 한정하였다.

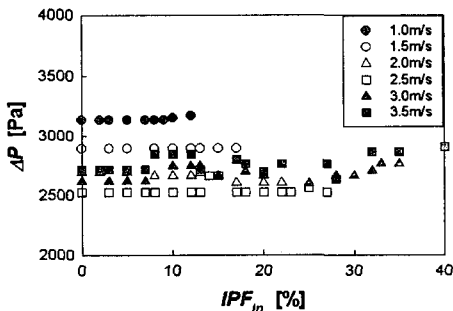
- 아이스슬러리의 공급유속 : $V_{in} = 1.0 \sim 3.5$ m/s
- 아이스슬러리의 공급 IPF : $IPF_{in} = 0 \sim 40\%$
- 수용액의 농도 : $C_{sol} = 10$ wt%
- 시험관의 형상 : 곡관부, 경사부

3. 실험결과 및 고찰

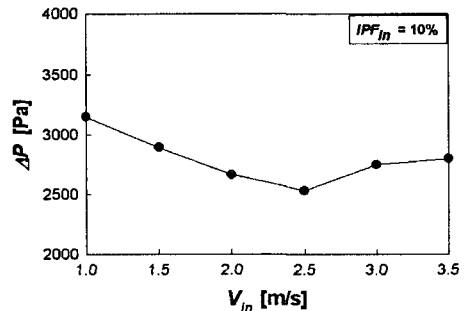
3.1 30° 곡관과 경사관

Fig. 2는 30° 곡관에서의 결과로, 그림 (a)에서는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 3.0 m/s를 제외하고는 동일유속인 경우 IPF에 따라서는 압력손실에 큰 변화가 나타나지 않으나, 압력손실은 1.0 m/s일 때가 가장 크고, 2.5 m/s일 때가 가장 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 압력손실의 변화로, 1.0~2.5 m/s의 범위에서는 유속이 증가할수록 압력손실이 감소하다가 2.5~3.5 m/s의 범위에서는 유속에 따라 압력손실이 다시 증가하고 있다. 이는 유속이 느린 상태에서는 수용액에 함유된 얼음입자가 관벽을 따라 부유하여 유동하기 때문에 관벽과의 마찰손실이 크게 작용하여 압력손실이 커지게 되고, 유속이 일정한 계 이상으로 빨라지게 되면 유속증가에 의한 압력손실의 증가가 크게 작용하는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 30° 경사관에서의 결과로, 그림 (a)에서는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 1.5 m/s와 3.0 m/s를 제외하고는 동일유속인 경우 IPF에 따라서는 압력손실에 큰 변화가 나타나지 않으나, 유속에 따른 압력손실은 1.0 m/s일 때가 가장 크고, 2.0~2.5 m/s일 때가 가장 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 압력손실의 변화로, 1.0~1.5 m/s의 범위에서는 압력손실이 급격하게 감소하지만, 1.5~2.5 m/s에서는 유속의 증가에 따른 영향을 크게 받지 않고 있다. 그러나 2.5~3.0 m/s에서 압력손실은 다시 증가하고 있다.

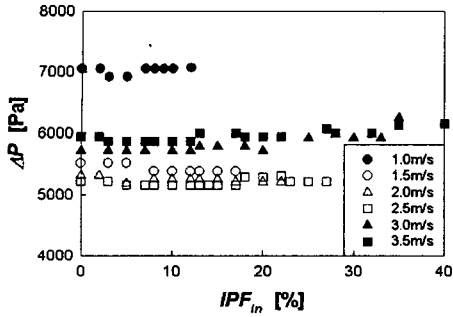


(a) Following IPF

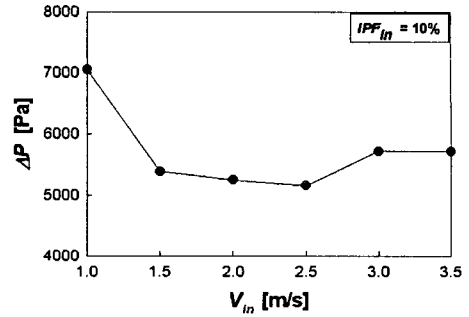


(b) Following velocity

Fig. 2 Variation of pressure drop at 30° elbow.



(a) Following IPF



(b) Following velocity

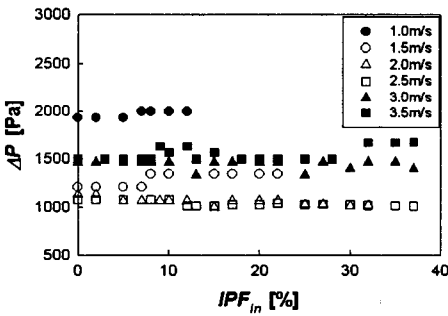
Fig. 3 Variation of pressure drop at 30° inclined tube.

이런 결과로 미루어 보면 30° 곡관과 경사부에서 수용액의 농도 10 wt%인 아이스슬러리를 수송할 때에는 2.5 m/s 정도가 최적유속임을 알 수 있다.

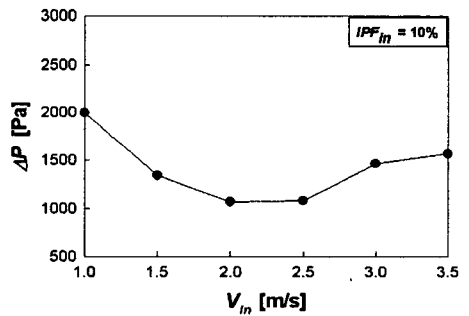
3.2 45° 곡관과 경사관

Fig. 4는 45° 곡관에서의 결과로, 그림 (a)에서

는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 3.5 m/s를 제외하고는 동일 유속인 경우 IPF에 따라서는 압력손실에 큰 변화가 나타나지 않으나, 유속에 따른 압력손실은 1.0 m/s일 때가 가장 크고, 2.0~2.5 m/s일 때가 가장 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 압력손실의 변화로,

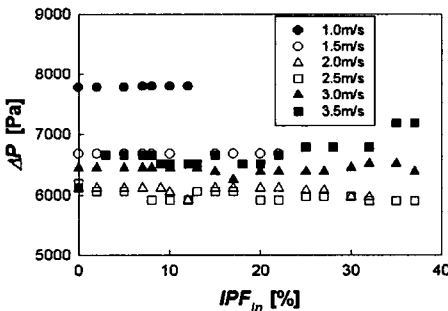


(a) Following IPF

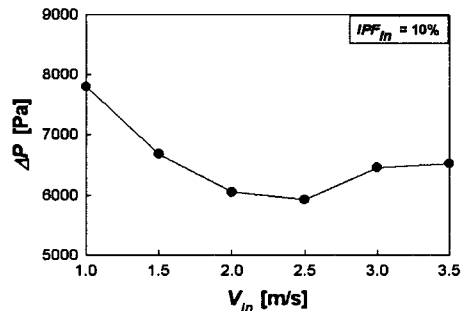


(b) Following velocity

Fig. 4 Variation of pressure drop at 45° elbow.



(a) Following IPF



(b) Following IPF and velocity

Fig. 5 Variation of pressure drop at 45° inclined tube.

1.0~2.0 m/s의 범위에서는 유속이 증가할수록 압력손실이 감소하다가 2.0~2.5 m/s 사이에서는 큰 변화가 없으며, 2.5~3.5 m/s의 범위에서 압력손실이 다시 증가하고 있다.

Fig. 5는 45° 경사관에서의 결과로, 그림 (a)에서는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 3.5 m/s를 제외하고는 동일유속인 경우 IPF에 따라서는 압력손실에 큰 변화가 나타나지 않으나, 유속에 따른 압력손실은 1.0 m/s일 때가 가장 크고, 2.0~2.5 m/s일 때가 가장 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 변화로, 1.0~2.0 m/s의 범위에서는 유속이 증가할수록 압력손실이 감소하지만, 2.0~2.5 m/s의 범위에서는 그 변화가 그다지 크지 않고, 2.5~3.5 m/s의 범위에서는 유속이 증가하면 압력손실은 다시 증가하고 있다. 그 이유는 30°인 경우와 같은 것으로 생각된다.

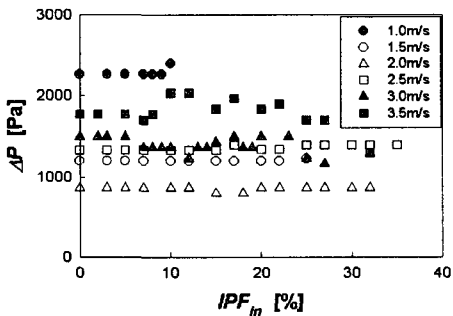
이런 결과로 미루어 보면 45° 곡관과 경사부에서 수용액의 농도 10 wt%인 아이스슬러리를 수

송할 때에는 2.0~2.5 m/s 정도가 최적유속임을 알 수 있다.

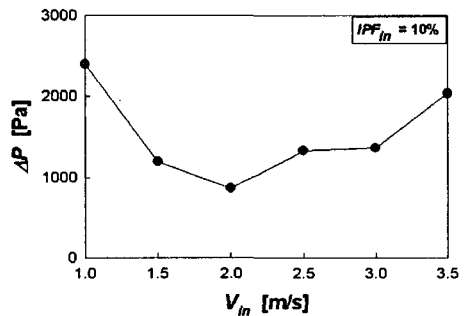
3.3 90° 곡관과 경사관(수직관)

Fig. 6는 90° 곡관에서의 결과로, 그림 (a)에서는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 3.0 m/s와 3.5 m/s를 제외하고는 동일유속인 경우 IPF에 따라서는 압력손실에 큰 변화가 나타나지 않으나, 유속에 따른 압력손실은 1.0 m/s일 때가 가장 크고, 2.0 m/s일 때가 가장 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 변화로, 1.0~2.0 m/s의 범위에서는 유속이 증가할수록 압력손실이 감소하다가 2.0~3.5 m/s의 범위에서는 유속에 따라 압력손실이 다시 증가한다.

Fig. 7는 90° 경사관에서의 결과로, 그림 (a)에서는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 1.0 m/s를 제외하고는

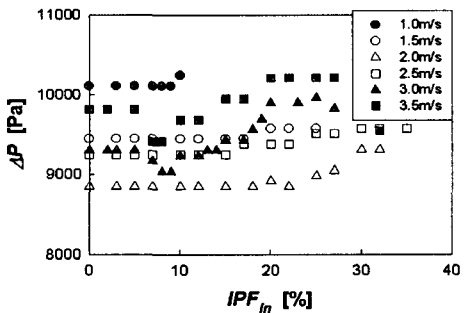


(a) Following IPF

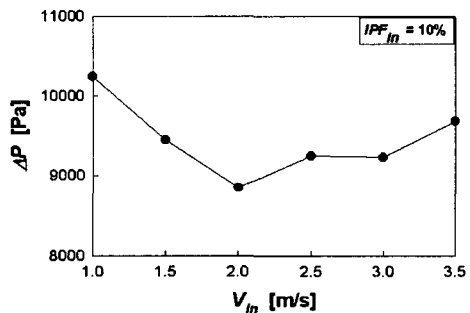


(b) Following IPF and velocity

Fig. 6 Variation of pressure drop at 90° elbow.



(a) Following IPF



(b) Following IPF and velocity

Fig. 7 Variation of pressure drop at 90° inclined tube.

IPF가 증가할수록 압력손실이 커지고 있으며, 그 경향은 2.0m/s 이상의 유속에서 더욱 뚜렷하다. 그러나 유속에 따른 압력손실은 1.0m/s일 때가 가장 크고, 2.0m/s일 때가 가장 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 변화로, 유속 1.0~2.0m/s의 범위에서는 유속이 증가할수록 압력손실이 감소하지만, 2.0~3.5m/s의 범위에서는 유속이 증가하면 압력손실도 함께 증가하는 경향을 나타낸다. 그 이유는 30°인 경우와 같은 것으로 생각된다.

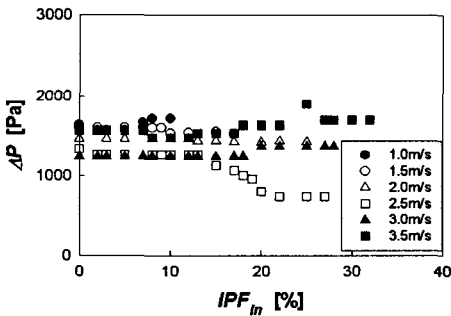
이런 결과로 미루어 보면 90° 곡관과 경사부에서 수용액의 농도 10 wt%인 아이스슬러리를 수송할 때에는 2.0m/s 정도가 최적유속임을 알 수 있다.

3.4 180° 곡관과 경사관(수평관)

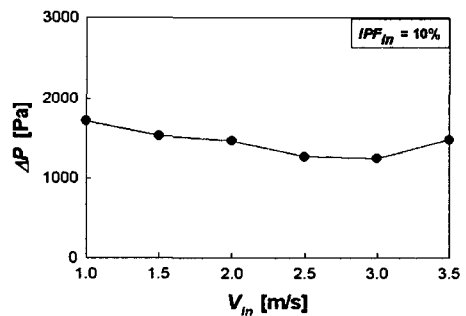
Fig. 8은 180° 곡관에서의 결과로, 그림 (a)에서는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 2.5m/s와 3.5m/s를 제외하

고는 동일유속인 경우 IPF에 따라서는 압력손실에 큰 변화가 나타나지 않으나, 유속에 따른 압력손실은 1.0m/s, 1.5m/s, 3.5m/s일 때가 가장 크고, IPF 약 15%까지는 2.5m/s와 3.0m/s, 그 이상의 IPF에서는 2.5m/s일 때가 가장 압력손실이 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 변화로, 그 결과 전체적으로 유속에 따라 그다지 큰 변화를 보이지는 않지만, 1.0~3.0m/s의 범위에서는 유속의 증가에 따라 조금씩 압력손실이 낮아지고 있으며, 3.0~3.5m/s의 범위에서는 유속에 따라 다시 증가한다. 이런 경향은 기존의 연구^(10,11)에서와 유사한 경향이다.

Fig. 9는 180° 경사관(수평관)에서의 결과로, 그림 (a)에서는 입구의 IPF와 유속의 변화에 따른 압력손실을 나타내었다. 그림에서 3.5m/s인 경우를 제외하고는 동일유속인 경우 IPF에 따라서는 압력손실에 큰 변화가 나타나지 않으나, 유속에 따른 압력손실은 3.5m/s일 때가 가장 크고, 1.5

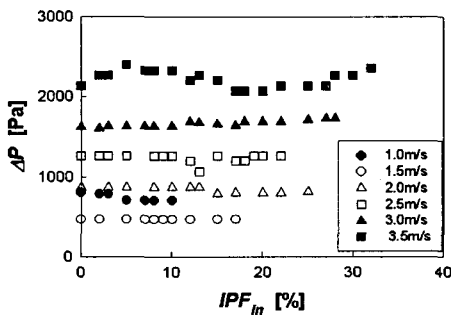


(a) Following IPF

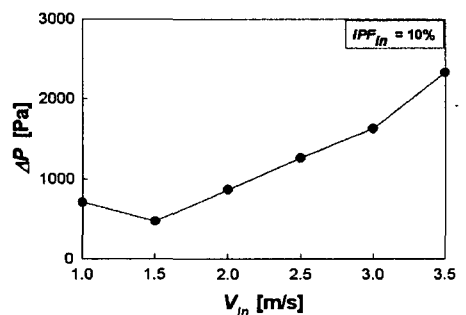


(b) Following velocity

Fig. 8 Variation of pressure drop at 180° elbow.



(a) Following IPF



(b) Following velocity

Fig. 9 Variation of pressure drop at 180° inclined tube.

m/s일 때가 가장 적게 나타난다. 그림 (b)에서는 입구 IPF를 10%로 하였을 때 유속에 따른 변화로, 1.0~1.5 m/s의 범위에서는 유속에 따라 압력손실이 줄어들고 있지만, 1.5~3.5 m/s의 범위에서는 유속에 따라 지속적으로 증가하고 있다. 이는 다른 경사관에서의 결과와는 다른 결과이며 직관부이기 때문에 유속이 빠를수록 관내에서의 압력손실이 증가하는 것으로 생각된다.

이런 결과로 미루어 보면 180° 곡관과 경사부에서 수용액의 농도 10 wt%인 아이스슬러리를 수송할 때에는 곡관부에서 2.5~3.0 m/s 정도의 빠른 유속으로 통과한 뒤 수평관에서는 1.5 m/s로 유지하여 주는 것이 최적임을 알 수 있다.

4. 결 론

수용액의 농도를 0~40 wt%, 유속을 1.0~3.5 m/s, 공급 IPF를 10%로 하였을 때 각종 곡관부, 경사부에서의 압력강하에 대하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 곡관시험부에서는 굽힘각도에 따라 30° 곡관부에서 가장 높은 압력손실을 나타내고, 90° 곡관부에서 가장 낮았으며, 45°, 180° 곡관부에서는 그다지 큰 차이가 없다.

(2) 경사관시험부에서 경사각도에 따라 90° 경사관에서 압력손실이 가장 높으며, 45°, 30°, 180°의 순으로 압력손실이 낮아지고 있었다.

(3) 30° 곡관과 경사부에서는 2.5 m/s, 45° 곡관과 경사부에서는 2.0~2.5 m/s, 90° 곡관과 경사부에서는 2.0 m/s에서 가장 낮은 압력손실을 나타내었으나, 180°인 경우는 곡관부에서 2.5~3.0 m/s, 경사부에서 1.5 m/s일 때 가장 낮은 압력손실을 나타내었다.

(4) 전체적으로 곡관부에서의 최적유속은 2.0~2.5 m/s, 경사부에서의 최적유속은 2.0 m/s인 것으로 파악된다.

참고문헌

1. Park, S. S. and Peck, J. H., 2000, Ice making thermal storage, energy saving and environment, Journal of Korean Society Mechanical Engineering, Vol. 40, No. 4, pp. 40-44.

2. Yanagihara, R., 1998, Evaluation of ice storage systems, Japan Association of Refrigeration, Vol. 73, No. 844, pp. 58-63.

3. Park, K. W., 1998, Current status of research and new development on ice heat storage system technology, Magazine of Korean Refrigeration and Air Conditioning Technical Association, Vol. 15, No. 4, pp. 119-131.

4. Knodel, B. D. and France, D. M., 1988, Ice-water slurry flow in a circular pipe, Heat and Mass Transaction, Vol. 15, pp. 239-245.

5. Kim, K. M., Park, K. W., Jung, J. C. and Roh, G. S., 2003, Flowing characteristics of ice-slurry in elbows with various angle, Proc. SAREK 2003 Summer Annual Conference, pp. 1285-1290.

6. Kim, K. M. and Park, K. W., 2003, Flowing characteristics of ice-slurry in inclined tube, Proc. SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 507-512.

7. Kim, K. M., Park, K. W. and Kwon, I. W., 2004, Effect on ice slurry flowing in the elbow of various angle, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 142-149.

8. Kitahara, T. and Shirakashi, M., 1993, Hydraulic conveying of snow and ice-development of a snow-fraction meter-, Setpyo, Vol. 55, No. 4, pp. 307-315.

9. Park, K. W., Miura, H., Horibe, A. and Inaba, H., 2000, Quantity of ice slurry in cooled tube by continuous ice making using organic water solution, Energy Engineering Journal, Vol. 9, No. 3, pp. 221-227.

10. Takahashi, H., Masuyama, T. and Kawashima, T., 1992, Experimental study on flow characteristics of ice-water slurries in a horizontal pipe, Jap. J. Res. Mat., Vol. 108, No. 5, pp. 357-363.

11. Knodel, B. D., France, D. M. and Choi, U. S., 2000, Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries, Applied Thermal Engineering, Vol. 20, pp. 671-685.