Proc. of 4th KSV Conference
KMU, Busan, Korea, Nov. 19, 2004

PIV에 의한 원관내 Ice Slurry의 유동계측

황태규†· 홍성대*· 박성룡** · 백태실*** · 도덕희****

PIV Measurement on Ice Slurry Pipe Flow

Tae Gyu Hwang, Seong Dae Hong, Seong Ryong Park, Tae Sil Baek and Deog Hee Doh

Abstract

Experimental studies were reported on the characteristics of flows in a circular pipe in which ice slurry is flowing. This was mainly due to deficiency of conventional measurement techniques. In this report, the flow characteristics are quantitatively investigated by the use of PIV technique concerning the Ice Packing Factor(IPF) and the power changes of pump motor. It was experimentally verified that the power loss does not increase any more at a certain IPF value.

Key Words : Particle Imaging Velocimetry(입자영상유속계), Ice Packing Factor(얼음충진율), Circular pipe(원관)

기호설명

Y : 중량 [kg]
f : 제 1 시각 영상밝기정보
g : 제 2 시각 영상밝기정보
IPF : 얼음충진율 [%]
U_D : 관직경에 대한 대표속도
U_{max} : 원형관 중심에서의 최대속도

1. 서 론

최근, 빙축열을 이용한 냉방시스템의 실용화를 위한 연구가 보고 되고 있다. 빙축열시스템은 심야의 값싼 전력을 이용하여 야간동안 얼음을 가공한 뒤 이를 주간에 슬러리형태로 냉방시스템에 직접 공급하기 때문에 환경 및 인체에 영향이 전혀 없는 무공해 냉방시스템으로 보고 있다. 빙축열시스템의 설계에 있어서 중요하게 고려되는 것으로서 얼음 충진율(IPF)에 따른 펌핑구동력의 변화 및 시스템 내부의 유동특성이나 이에 대한 연구보고는 적절한 계측법의 부재로 인하 여 거의 보고된 바가 없다고 할 수 있다. 최근, 유동가시화를 위한 입자를 유동장에 직접 투입하여 유동장의 속도분포를 얻어 낼 수 있는 PIV[1]계측법은 유동장 전체에 걸쳐서 속도분포를 얻어 낼 수 있다는 점, 시간변화에 따른 속도분포를 얻어 낼 수 있다는 점으로부터 공학의 다양한 분야에 적용이 되고 있다.

Inaba 등[2]은 전기전도도법에 의한 IPF측정기를 도입하여 관내에 흐르는 얼음의 양을 계측함으로써 빙축열시스템의 설계자료로 활용하고 있다. 이 방법은 관내 IPF에 따른 관내 유동특성을 조사 할 수 없다는 점이 단점으로 지적된다. 즉, IPF에 따른 관내 압력강하특성과 유동구조의 조사에는 적절치 못하

† 한국해양대 대학원 기계공학과
E-mail:andrew@bada.hhu.ac.kr
* (주)한빛파워서비스
** 에너지기술연구소 폐열이용연구팀
*** 포항대학 자동차과
**** 한국해양대 기계정보공학부

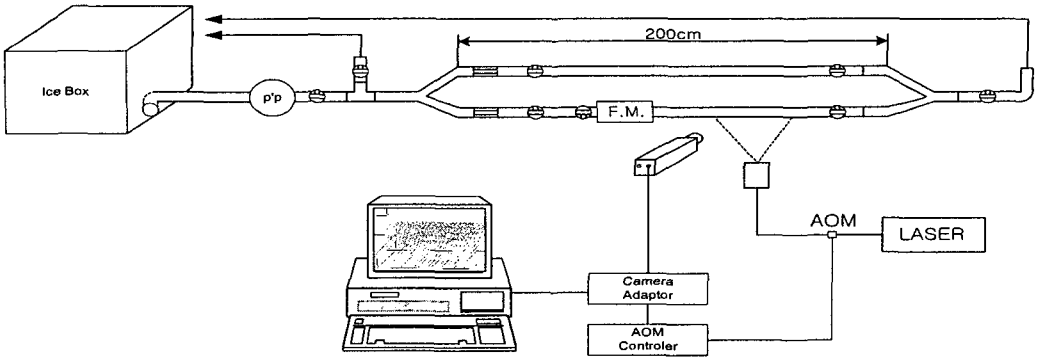


Fig. 1 Overall PIV system for ice slurry flows.

다 는 단 점 을 가 지 고 있 다 .

Durand[3]는 플러그 유동조건에서 층류의 슬러리 유동의 마찰항력은 단일유체만 흐를 때보다 감소함을 밝혔다. 그러나, 슬러리유동의 마찰항력이 감소하는 유동의 구조에 관한 연구는 지금까지 없었다. 물-얼음 슬러리류에 대한 유동구조에 관한 연구도 마찬가지로 같은 맥락에서 없다고 하겠다. 본 연구에서는 PIV계측기법을 이용하여 IPF에 따른 관내유동특성을 조사함으로써 물-얼음슬러그 유동에서의 마찰항력감소와 관련된 연구를 시도하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 1과 같이 물-얼음 슬러리 순환펌프(PM-250PM, 월로펌프(주)), 질량유량계(LS5377-23), 물-얼음 슬러리 탱크, PIV계측시스템 등으로 구성되어 있다. 원심펌프는 물-얼음을 슬러리 상태로 순환시키며, 질량유량계에서 이를 측정한다. 온도의 계측을 위해서는 디지털 감온센서(KM330)를 사용하였다. PIV계측시스템부는 광원(아르곤레이저) 및AOM[4][5]시스템, 카메라부 및 영상처리부로 구성된다. 이 때 카메라와 레이저 광원의 설치는 Fig. 2와 같으며, 측정영역은 외경이 35mm(t=2mm)인 아크릴원관으로 관내 얼음-물의 온도는 탱크내부의 온도로 하였다. Ice Slurry를 제조하기 위하여 전기 빙삭기(SIS-8)를 사용하였다. 빙삭기로 약 1~2mm 직경의 얼음덩이로 만든 뒤 이들을 수온 약 11 ℃의 물에 투입하여 0℃가 될 때까지 기다린 다음, (이때, IPF = 0%로 정의) 이후 추가로 투입되는 얼음의 양을 γ_{ice}, 초기 물의 양을 γ_w 로 하여 식 (1)과 같이 IPF에 대한 경험적 계산식[2]을 적용하였다.

$$IPF = \frac{\gamma_{ice}}{1.5\,\gamma_w + \gamma_{ice}} \times 100 \qquad (1)$$

2.2 데이터 처리

2차원의 속도계측을 Probe를 이용하여 두께 1-3mm전후의 Laser sheet light를 형성시켰다. 실험 영상은 NTSC 방식의 CCD카메라(SSC-M370)와 이미지 그래버(DT 64)를 사용하여 저장하였으며, 비교적 빠른 유속을 계측하기 위하여 AOM을 사용하여 광원의 펄스를 제어하였다. 속도계측을 위해서 연구개발용 상용소프트[5](Thinker's EYES)를 사용하였으며 근본적으로 계조치상호상관법[6]을 적용하고 있다. 이 방법은 미소시간동안 유동장의 화상의 계조패턴은 크게 변화하지 않는다고 가정하여 제1프레임(1st image frame)에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소시간 후의 제2프레임(2nd image frame)에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타내므로 두 프레임간의 정해진 범위 내에서 임의의 위치를 중심으로 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관 계수 값을 구한 뒤 그 중 가장 큰 값을 동일입자군의 이동위치로 간주함으로써 속도벡터를 얻어내는 방법이다. 식 (2)는 두 프레임간의 상호상관계수를 구하는 식을 나타낸다.

$$c_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i - \overline{f_i})(g_i - \overline{g_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i - \overline{f_i})^2 \sum_{i=1}^{n^2}(g_i - \overline{g_i})^2}} \qquad (2)$$

여기서 f_i , g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며 $\overline{\ }$는 연속화상에 대한 시간평균을 의미한다. 일반적으로 화상의 데이터를 취급할 때 벡터의 종점을 결정함에 있어서 픽셀해상도에 의존하는 경우에는 상하좌우방향으로 최대 ±1픽셀의 불확실성분이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 1픽셀 이내에까지 종점을 결정

할 수 있는 서브픽셀보간법[5]을 도입하였다. 또한 얻어진 속도벡터는 상관영역의 크기나 탐색영

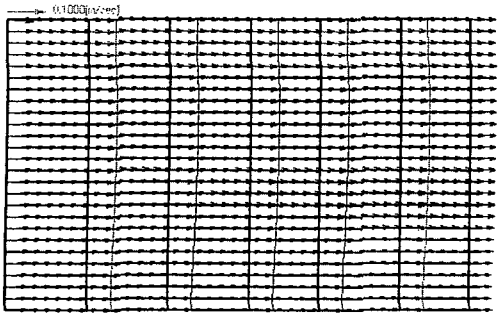


Fig. 2 Mean velocity profile.

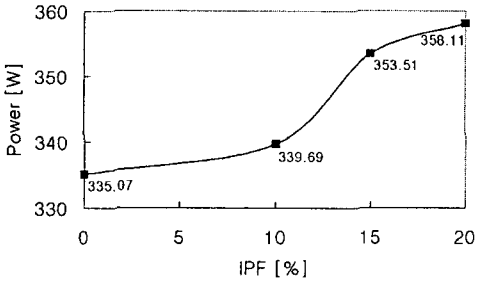


Fig. 3 Pump's power vs IPF.

역의 크기에 따라서 에러벡터를 측정할 수도 있는데 본 연구에서는 유동의 연속성을 고려한 에러벡터법[5]을 도입하여 오류벡터를 최대한 줄였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 1은 실험조건을 나타내며 Table 중의 A는 pump의 motor에 부가된 전력을 알기 위하여 Table 과 같은 조건에서 실제로 계측한 전류의 크기를 나타낸다. Fig. 2는 약 6.5초에 해당하는 196 시각분의 순간속도분포들의 평균속도 프로파일을 나타내고 있다. Fig. 3은 IPF와 소비전력과의 관계를 나타낸다. IPF가 10~15%구간에서 모터의 구동동력이 급격하게 증가함을 알 수 있으며, 20%이상에서는 더 이상의 동력이 증가되지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 4에 잘 나타나 있는데 임의의 IPF에 대하여 레이놀즈수의 증가에 따른 모터의 동력변화는 보이지 않음을 알 수 있다. 즉 본 실험은 IPF의 변화에 따른 펌프동력의 변화만 고려한 것으로 타당한 결과를 보였다.

한편, 펌프를 이용한 관내유동에 있어서 압력강하는 내부유동유지 및 펌프동력을 결정하는 중요한 파라미터이다. 마찰인자는 Colebrook에 의해서 제시된 상관식[7] (3)을 사용하였으며, 초기 마찰계수(f_{old})를 구하기 위하여 ϵ/D가 충분히 작다는 전제조건하에서 Blasius에 의한 상관식

Table 1 Experimental conditions

유속[m/sec] Re \ IPF		0%	10%	15%	20%
0.10	motor's Amper[A]	1.6	1.62	1.68	1.7
1744					
0.20	motor's Amper[A]	1.6	1.62	1.68	1.7
3488					
0.30	motor's Amper[A]	1.6	1.62	1.68	1.7
5232					

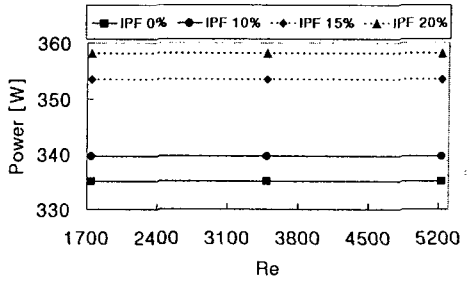


Fig. 4 Power vs Reynolds number for IPF variation.

을 사용하였다. 사용된 아크릴관의 평균조도(ϵ)는 0.0015mm이며, 관직경(D)은 31mm이다. 식(3)을 반복계산함으로써 f_{new}를 구할 수 있다.

$$f_{new} = \frac{0.25}{\{log[(\frac{\epsilon}{D})/3.7 + \frac{2.51}{Re^* \sqrt{f_{old}}}]\}^2} \quad (3)$$

$$gh_L = f^*(\frac{L}{D})^*(\frac{V^2}{2}) \quad (4)$$

$$\Delta P = f^*(\frac{L}{D})^*(\frac{\rho V^2}{2}) \quad (5)$$

식(3)의 결과를 식(4)와 식(5)에 각각 대입함으로써 관내 에너지 손실(gh_L)과 압력손실(ΔP_L)을 구하였다. 이 때 물성치로는 0℃물의 밀도(ρ =1000kg/m^3)와 측정영역에 해당하는 관길이(L=1m)를 사용하였다. Fig. 5는 레이놀즈수가 할 때 관내 압력손실(에너지 손실)을 나타내고 있다. Fig. 6 (a)~(c)는 U_D가 각각 0.1, 0.2, 0.3m/sec일 때 IPF에 따른 속도프로파일의 비교를 나타낸 것으로, R은 원관의 반경, U_{max}는 원관의 중심에서의 streamwise방향(x방향) 속도크기를, U_r은 중심으로부터 반경 r인 위치에서의 streamwise방향속도크기를 나타낸다. IPF 변화에 의한 관벽면에서의 속도변화는 U_D가 증가할수록 U_{max}에 근접함을 확인할 수 있다. 얼음충진량이 특정량 이상이 되면 U_{max} 속도가 U_D와 관계없이 낮게 유지되며, 관벽면에서는 마찰항력의

감소로 벽면유속이 증가함으로 상대적으로 벽면 유속과 U_{max}유속간의 차가 줄어든 것에 기인하다

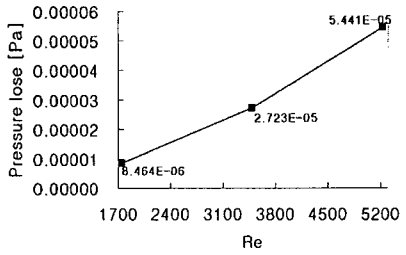
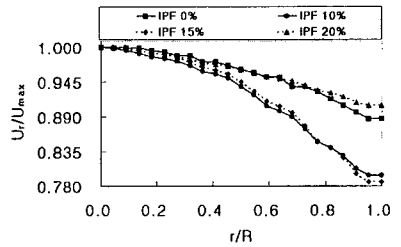
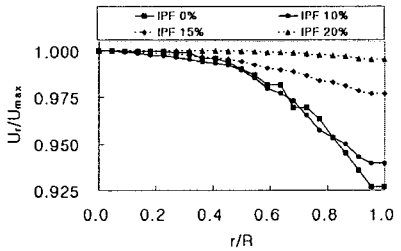


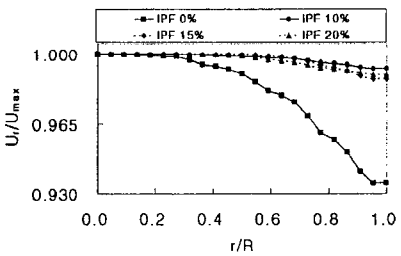
Fig. 5 Relation of Pressure lose(ΔP_L) and Re.



(a) U_D = 0.1m/s



(b) U_D = 0.2m/s



(c) U_D = 0.3m/s

Fig. 6 Comparison of velocity profile for IPF.

고 볼 수 있다. 따라서 얼음 잠열에 의한 냉각 효율의 향상은 대표속도 U_D와 얼음충진량 IPF에 영향을 받으며, 본 실험 결과 U_D=0.3m/s 일 때 IPF 10%일 때가 얼음 잠열을 최대한 사용할 수 있는 조건으로 사료된다. 한편, 동일유속에 대해서 필요이상의 IPF의 증가는 펌프구동동력의 증가를 초래하므로 오히려 비효율적이다.

4. 결 론

PIV계측기술을 이용하여 Ice Slurry의 IPF에 따른 원관내부의 유동특성을 조사할 수 있었으며 그 과정에서 다음과 같은 내용을 정리할 수 있었다. IPF가 10%정도에서 Motor의 구동동력이 급격히 증가했다가 15%이후에서는 그다지 뚜렷한 증가를 보이지 않았다. 이는 아이스 슬러리 유동에 있어 펌프에 대한 최적의 IPF가 있음을 의미한다고 볼 수 있다. IPF를 일정히 유지하고 유량을 증가시켰을 때 레이놀즈수의 증가에 따른 모터의 구동동력의 변화는 그다지 나타나지 않았다. PIV 계측 기술에 의해서 얼음 잠열을 최대한으로 이용할 수 있는 최적의 조건인 IPF 10%와 U_D=0.3m/s를 확인할 수 있었다.

참고문헌

1) Adrian, R. J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.

2) Inaba, H., Horibe, A. and Yokota M., 1997, "Study of cold heat energy release characteristics of flowing ice water slurry in a pipe", Trans. of the JSRAE, Vol.14, No.3, pp.265-276.

3) Durand, R., 1953, "Basic relationships of the transportation of solids in pipes", Proc Minn. Hydraulics Conv., pp. 89-99.

4) Kobayashi, T., and Saga, T. 1991, "Development of a Real-Time Velocimetry Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using a Digital Image Processing Design", ASME FED-Vol.128, pp.1220-1227.

5) Doh, D.H., Hyun, B.S., Choi, S.W., Hong, S.D, 1999, "Panoramic-PIV system and its application to tandem oil fences", Proc. of 3th International Workshop on Particle Image Velocimetry, Santa Barbara, pp. 613-618.

6) Utami, T., Blackwelder, R., 1991, "A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization", Exp. in Fluids, Vol.10, pp.213-223.

7) Colebrook, C.F., 1939, "Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition between the smooth and rough pipe laws", J. Inst. Civ. Eng. Long., Vol. 11.