

PIV를 이용한 회류수조의 유속 분포 교정에 관한 연구

서성부* · 정광효*

*동의대학교 조선해양공학과

Calibration of Water Velocity Profile in Circular Water Channel Using Particle Image Velocimetry

Sung bu Suh* and Kwang Hyo Jung*

*Development of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

KEY WORDS: Circulating water channel 회류수조, Surface flow accelerator 표면유동가속장치, Particte image velocimetry(PIV) 입자속도 측정법, Velocity uniformity 유속균일성, Turbulence intensity 난류강도

ABSTRACT: This experimental study was performed to find rpms of the impeller and the surface flow accelerator to make a uniform velocity vertical distribution in the circular water channel. PIV technique was employed to measure the water velocity profiles into the water depth from the free surface. The number of instantaneous velocity profiles was decomposed into mean and turbulence velocity components, and the distribution of velocity fluctuation and turbulence intensity were computed for each experimental condition. From these results, the velocity uniformity was quantitatively determined to present the flow quality in the measuring section of the circular water channel. It has been shown that the proper operation of the surface flow accelerator would make the uniform velocity profiles and reduce the velocity fluctuation near the free surface.

1. 서 론

유속이 균일한 유동장 조건에서 유체중의 물체에 의한 유동장 변화에 대한 유체동역학적 특성 연구를 수행하기 위한 균일흐름 발생시험장비로 회류수조가 많이 활용되고 있다. 회류수조는 모형선의 저항시험, 저항시험, 프로펠러 단독 시험과 구조물 주위에 발생하는 유동장 시험 등 다양한 시험에 활용되고 있는데 회류수조 관측부의 유속 분포 및 난류강도는 시험 결과에 직접적인 영향을 미치기 때문에 회류수조의 성능을 유지하기 위해서는 일정한 주기로 보정하고 확인해야 하는 중요한 특성이다. 최은수 등(1989)은 Laser doppler velocimetry (LDV)를 활용하여 회류수조의 유속 분포 및 난류강도를 측정하였고, 임영배 등(2003)은 프로펠러 유속계를 활용하여 임펠러 회전수에 따른 유속분포를 측정하였다. KTTC 회류수조보조(2006)에서 국내 5개 기관의 회류수조에서 동일한 모형선의 저항시험결과를 비교하였다. 5개 기관의 회류수조의 공간 유속 분포오차는 ±2~5.2%이며, 난류강도는 국립수산물과학원 소재 회류수조만 공개 (1% 미만)하고 있으며, 저항시험결과는 기관별 차이가 있어 수조 특성에 따라 저항시험결과가 변화함을 알 수 있다.

유속장 측정방법 중 가장 일반적인 피토투브, 프로펠러 유속계, 자기장식 유속계는 평균유속만 측정가능하고, LDV(Laser doppler velocimetry), ADV (Acoustic doppler velocimetry), Hot wire는 난류계측이 가능하지만, 모든 방법들이 자유수면에 인접한 유속을 측정하기에는 상당한 어려움이 있다. PIV기법은 이러한 단점들을 보완하고, 자유수면에 mm단위까지 인접한 영역까지 순간 유속

장을 측정하여 평균유속장과 난류특성을 계산할 수 있다. 약 20여 전년부터 물체주변 유체 유동장 특성 연구를 위하여 회류수조에서 PIV (Particle image velocimetry) 기법을 활용하여 왔다. (김성민과 이상준, 1996; 나정현과 권순홍, 1999; 노기덕 등, 2006; 박건선과 광영기, 2004) 하지만, 회류수조 성능 및 특성을 조사하기 위해서 PIV기법 활용에 대한 참조자료는 검색되지 않았다.

동의대학교 조선해양공학과 회류수조는 용량 60tons, 유속 범위는 0.1~2.0m/s인 Two-set 임펠러(Impeller) 구동 방식의 수직 순환형 구조로 2010년에 완공되었다. 회류수조의 수축부와 제과판을 통과한 유체의 자유수면부근에서의 유속이 임펠러에 의한 유속보다 느리기 때문에, 표면유동가속계(SFA, Surface flow accelerator, Fig. 1)를 활용하여 수직방향 유속분포를 균일하게 한다.

본 연구에서는 회류수조의 임펠러와 표면유동가속장치의 회전수 (RPM) 변화에 따른 관측부 수직방향 유속 분포 실험을 PIV기법을 활용하여 수행하였으며, 수직 유속 분포(Vertical velocity profile)와 난류강도(Turbulence intensity)를 측정했다. 관측부의 자유수면 부근에서 균일한 수직방향 속도분포를 얻기 위하여 여러 임펠러의 회전수와 표면유동가속장치의 회전수에 대한 실험을 수행하였다.

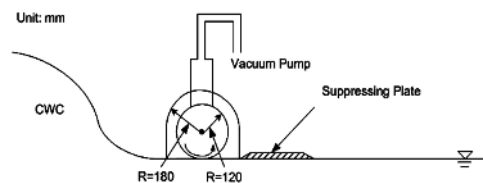


Fig. 1 Sketch of Surface Flow Accelerator

교신저자 정광효: 부산광역시 부산진구 엄광로 995, 051-890-2592, khjung@deu.ac.kr

본 연구는 2011년 부산광역시에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

2. 시험장치 및 조건

동의대학교에 설치된 회류수조에서 실험을 수행하였고, 관측부는 길이 4.15m, 폭 2.1m, 높이 1.2m이다(Fig. 2).

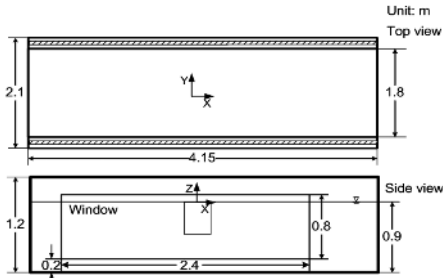


Fig. 2 Sketch of test section

회류수조 관측부의 수직유속분포를 측정하기 위해 CCD카메라를 90° 회전하여 가로 0.17m, 세로 0.24m인 1개의 유속측정구간(FOV, Field of view)에서 High speed CCD 카메라를 이용하여 입자영상을 획득하였다. PIV시스템은 다이오드 연속레이저, 초고속 디지털 CCD카메라, 광학렌즈시스템으로 구성되었다. 다이오드 연속레이저의 최대출력은 8Watt, 파장(Wave length)은 532nm 이고, 초고속 디지털 CCD 카메라는 2352×1728pixels의 해상도와, Max. Hz는 7000f/s, Pixel size는 7μm, 해상도는 8bit의 분해능을 가지고 있다. Sigma 105mm 렌즈를 부착하여 f/2.8의 조리개 값에서 입자영상을 획득하였다. 레이저는 두 개의 Cylindrical plano concave lens로 구성된 광학렌즈시스템을 통과하여 만들어진 약 1mm두께의 레이저 면(Laser light sheet)이 관측부 밑 부분의 설치되어진 거울에서 반사되어 관측부 바닥의 유리면 중앙에 비추어지도록 하였다(Fig. 3). 실험에서 이용된 입자는 비중(Specific Gravity)은 1.02, 크기(d50)는 57μm인 Vestosint 2157을 이용하였다.

CCD 카메라로 PIV 속도장 계산을 위한 이미지 페어(Image pair)를 얻기 위해서 두 개의 이미지간의 시간 간격(Δt)는 1ms로 설정하였다. PIV 속도장을 계산은 이중화상상관기법(Double-frame/single-pulsed method)을 이용하였다. 조사구간(Interrogation window)은 64×64pixels (6.5×6.5mm²)이고 주변 조사구간과 50%의 화상중복(Overlap)을 하여 속도장을 계산하였다. 즉, 주변 속도벡터간의 거리는 3.26mm이다.

회류수조의 관측부에서 균일한 유속분포를 얻기 위한 임펠러 회전수와 표면유동가속장치 회전수를 결정하기위해서 2개의 임펠러 회전수(80, 140rpm)에서 각각 6개의 표면유동가속장치의 회전수에 대해 시험하였다. 시험에 이용된 임펠러의 회전수와 표면유동가속장치의 회전수를 Table 1에 정리하였다.

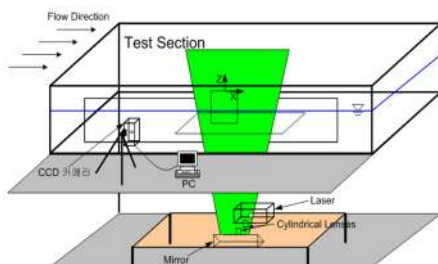


Fig. 3 Sketch of equipment setting for experiment

Table 1 Impeller and SFA RPM conditions

Velocity (m/s)	Impeller RPM	Surface flow accelerator RPM
		0
		80
0.60	80	100
		170
		180
		190
		0
		210
1.03	140	230
		250
		290
		330

3. 모형시험 결과 및 해석

회류수조 관측부에서 유속의 균일성을 조사하기 위해서 수평방향 평균 유속(\bar{u}_i)과 평균제곱근($u_{i, rms}$)의 수직방향 분포를 각 순간 속도장으로 부터 식 (1), (2)를 이용하여 계산하였다.

$$\bar{u}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} u_{i,j} \tag{1}$$

$$u_{i, rms} = \sqrt{\frac{\sum (u_{i,j} - \bar{u}_i)^2}{N_i}} \tag{2}$$

단, u 는 x 방향 유속, i 와 j 는 수평방향 및 수직방향 배열, N_i 는 수평방향의 속도벡터 수이다. 가로 0.17m×세로 0.24m의 유속측정구간(FOV)에서 계측된 순간속도장은 속도벡터 사이의 각격이 3.3mm이며, 총 3816개의 속도벡터(가로 53×세로 72) 정보를 가진다. 수평방향 평균과 평균제곱근은 계측된 순간속도장의 가로 53개의 속도벡터로부터 얻어진 결과이다.

관측부의 시간에 대한 수직방향 유속분포와 난류강도를 계측하기 위해서 Table 1의 조건에서 640개의 순간속도장을 식 (3)과(4)를 이용하여 평균속도(\bar{u})와 난류속도(μ)를 계산하였다.

$$\bar{u}_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N u_{i,j}^l \tag{3}$$

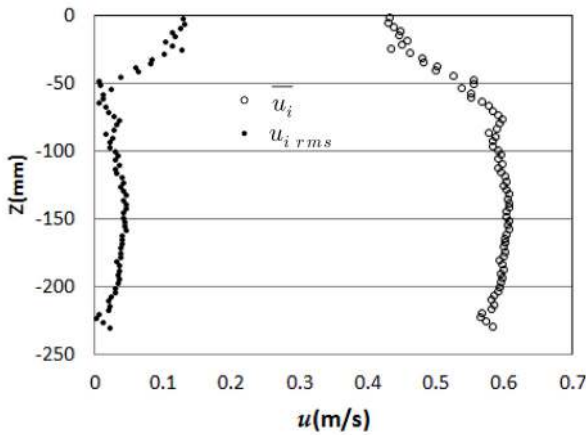
$$u'_{i,j, rms} = \sqrt{\frac{\sum (u'_{i,j})^2}{N}}, \quad (u'_{i,j} = u_{i,j} - \bar{u}) \tag{4}$$

단, N 은 순간속도장의 개수, i 와 j 는 속도벡터의 행열번호, l 은 순간속도장의 순서를 나타낸다.

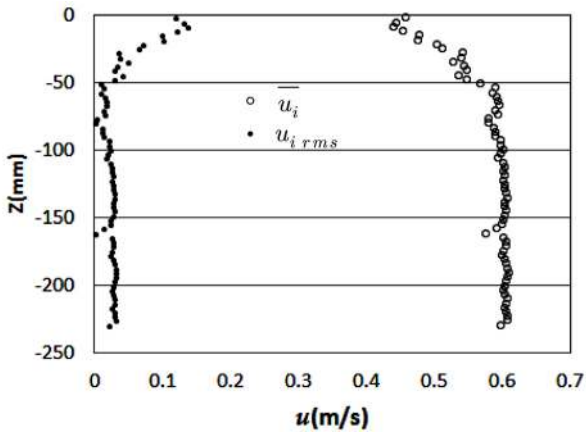
Fig. 4는 회류수조 임펠러를 회전수 80으로 작동할 때 관측부에서 유속 0.6m/s가 계측되며, 표면유동가속장치의 회전수 별로 변화하는 관측부에서의 평균유속의 수직방향 분포와 임펠러 회전수 80으로 단독으로 사용했을 때 자유수면에서 약 -80mm 떨어진 지점 이하에서는 유속분포가 대체로 일정하고, -80mm지점부터 자유수면까지 평균유속은 감소하면서 자유수면 부근에서 유속의 변화가 많음을 알 수 있다(Fig. 4(a)). 임펠러의 회전수를 80으로 고정한 채 표면유동가속장치 회전수를 100으로 높였을 때,

자유수면 부근의 저속 영역 두께가 약 50mm로 감소하고(Fig. 4(b)), 표면유동가속장치 회전수를 190으로 높였을 때, 수직방향 균일한 유속분포를 얻을 수 있다(Fig. 4(c)). 또한, 수직방향으로 균일한 유속분포를 얻기 위해 표면유동가속장치 회전수를 증가시킬수록 자유수면 부근의 u_{rms} 뿐만 아니라 수직방향 u_{rms} 가 감소하는 현상을 동시에 관찰할 수 있다.

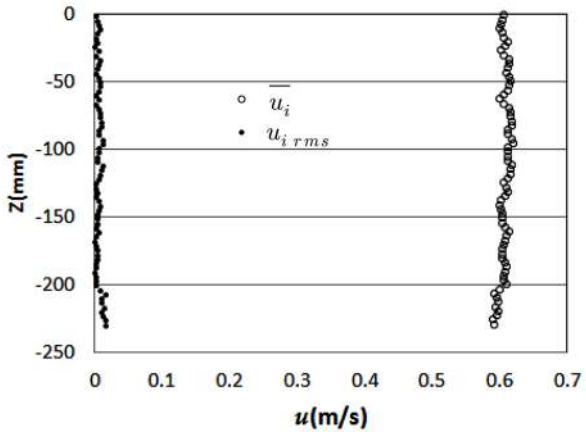
임펠러를 회전수 140로 운용할 때 약 -100mm에서 자유수면까지 평균유속이 감소함을 볼 수 있다(Fig. 5(a)). 임펠러 회전수를 140으로 고정한 채 표면유동가속장치 회전수 250에서는 자



(a) Impeller rpm 80, surface flow accelerator rpm 0

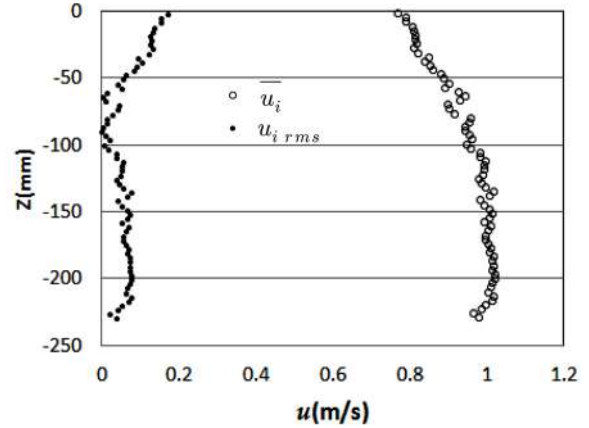


(b) Impeller rpm 80, surface flow accelerator rpm 100

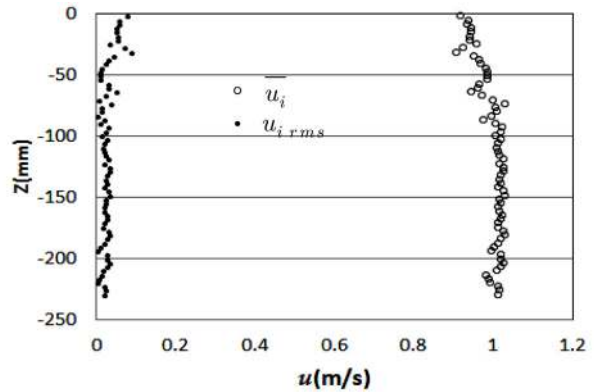


(c) Impeller rpm 80, surface flow accelerator rpm 190

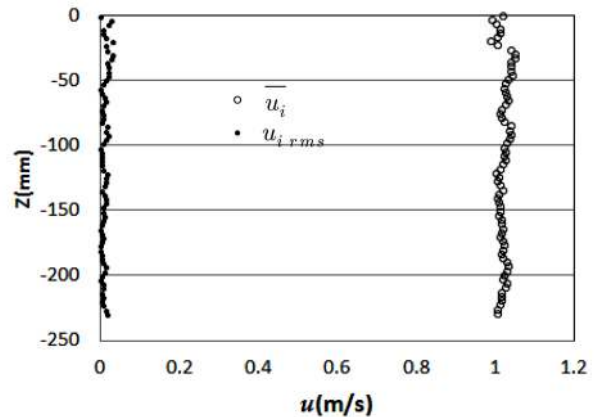
Fig. 4 Horizontal mean velocity (0.60m/s) profile along z axis



(a) Impeller rpm 140, surface flow accelerator rpm 0



(b) Impeller rpm 140, surface flow accelerator rpm 250

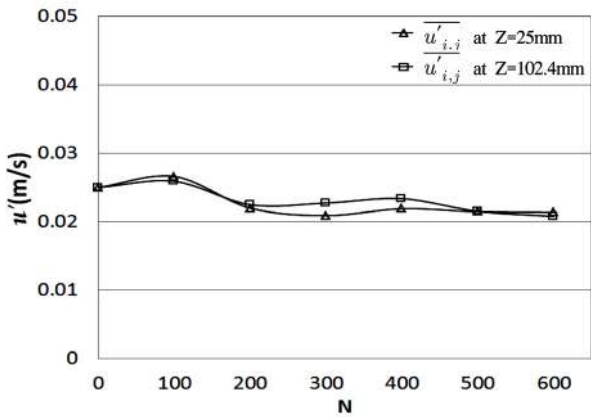


(c) Impeller rpm 140, surface flow accelerator rpm 330

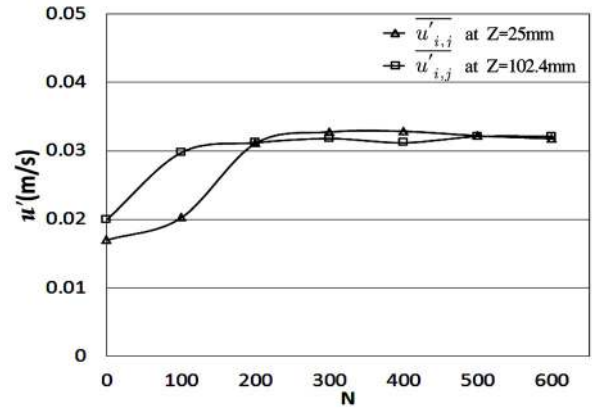
Fig. 5 Horizontal mean velocity (1.03 m/s) profile along z axis

유수면 부근의 저속영역이 약 70mm로 줄었다(Fig. 5(b)). 표면유동가속장치 회전수 330에서 자유수면으로부터 수심방향으로 균일한 유속분포를 얻을 수 있었다(Fig 5(c)). 그리고 알맞은 표면유동가속장치의 작동이 수평방향 유속에 대한 평균제곱근(u_{rms})을 감소시키는 효과가 있으며, 균등한 수직방향 평균유속 분포를 얻을 수 있음을 검증하였다.

순간속도장의 수에 따른 난류성분(u')의 수렴성(Convergence)을 0.60m/s와 1.03m/s 실험의 2개 수심에서 결과를 각각 Fig. 6에서 보여준다. 여기서 N (Number of data)은 순간속도장의 수를 나타내며, 순간속도장 200개 이상에서 난류속도성분의 평균값이 0.021m/s와 0.032m/s로 각각 수렴하며, 평균유속의 약 3%

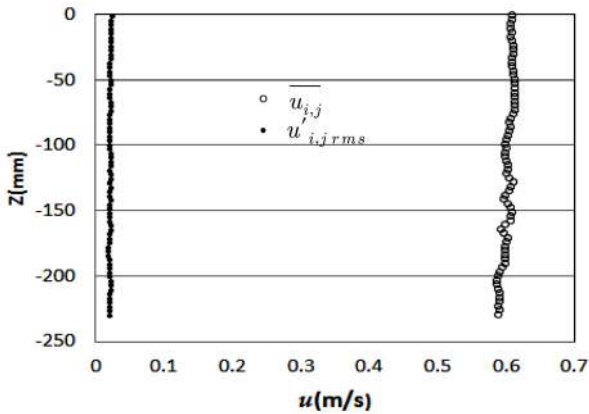


(a) Impeller rpm 80, surface flow accelerator rpm 190

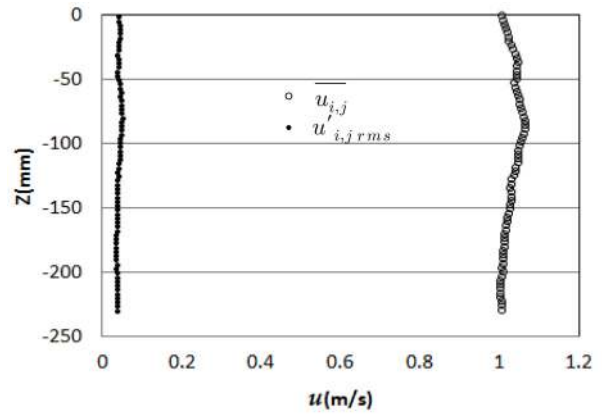


(b) Impeller rpm 140, surface flow accelerator rpm 330

Fig. 6 Convergence of horizontal turbulent component($u'_{i,j}$)

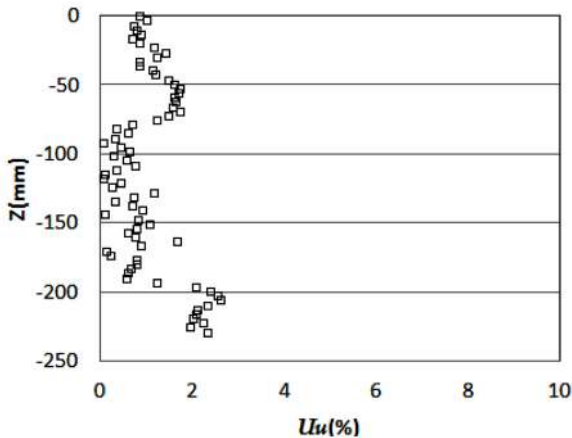


(a) Impeller rpm 80, surface flow accelerator rpm 190

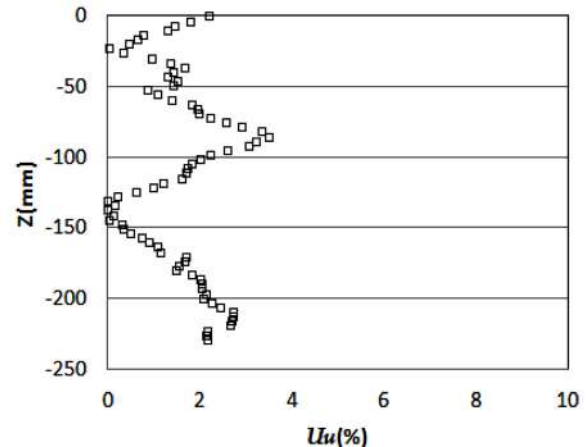


(b) Impeller rpm 140, surface flow accelerator rpm 330

Fig. 7 Mean and turbulence velocity component in z direction



(a) Impeller rpm 80, surface flow accelerator rpm 190



(b) Impeller rpm 140, surface flow accelerator rpm 330

Fig. 8 Mean velocity uniformity in z direction

로 평가된다. 또한, 200개 이상의 순간속도장에서 계산된 두 개의 수심(25mm와 102.4mm)에서 난류속도성분 크기가 비슷함을 알 수 있다(Fig. 6).

수직방향으로 균일한 유속장을 얻기 위해 임펠러(회전수 80과 140)와 표면유동가속장치(회전수 190과 330)를 함께 운용하면서 수직방향의 평균속도와 난류속도성분 분포를 조사하였다(Fig. 7). 0.60m/s와 1.03m/s에서 난류속도성분은 각각 약 0.02~0.03m/s

와 0.03~0.04m/s이고, 수직방향으로 균일한 평균유속과 난류속도성분의 분포를 검증하였다. 회류수조 관측부에서 평균유속의 수직방향 균일성(Mean velocity uniformity, U_u)을 정량화하기 위해서 식(5)를 제안한다.

$$U_u = \left| \frac{(u - \bar{u})}{\bar{u}} \right| \times 100 \quad (5)$$

U_i 가 0%로 가까울수록 일정한 유속분포를 의미한다. 평균유속 0.60m/s를 얻을 수 있는 임펠러 회전수 80와 표면유동가속장치 회전수 190에서 U_i 는 최고 약 3%와 평균 약 1%이고, 평균유속 1.03m/s(임펠러 회전수 140, 표면유동가속장치 회전수 330)에서 최고 약 4%와 평균 약 1.5%로 나타나 수직방향 평균유속의 균일성은 뛰어나다(Fig. 8).

균일한 유속장에서 임의의 구조물 주변의 난류구조(Turbulence structure) 실험을 수행하기 위해서는 회류수조의 난류특성이 파악되어야 한다. 이러한 난류특성 중 난류강도(I , Turbulence intensity)를 순간속도장 640개를 이용하여 계산하였다(식(6)).

$$I_{i,j} = \left(u'^2_{i,j} + w'^2_{i,j} \right)^{1/2} \quad (6)$$

평균유속 0.60m/s에서 난류강도(I_i)는 0.04m/s 이하이며 평균

유속대비 약 4.8%정도이며(Fig. 9(a)), 1.03m/s에서는 난류강도가 0.06m/s이고, 평균유속 대비 약 4.6%정도이다(Fig 9(b)). 이 결과로 회류수조 관측부에서 난류강도 약 5%로 평가된다.

4. 결 론

본 연구에서 회류수조 관측부에서 균일한 유속장을 얻기 위해 임펠러 회전수와 표면유동가속장치 회전수를 교정하는 실험을 수행하고, PIV시스템을 이용하여 평균유속과 난류분포를 계측하였다.

두 개의 평균유속에 대한 여러 표면유동가속장치 회전수에 대한 유속분포, 평균유속, 난류속도성분 및 난류강도를 보고하였다. 실험을 통하여 표면유동가속장치 사용이 자유수면 부근에서 수직방향으로 균일한 유속장을 얻을 수 있고, 난류성분을 감소할 수 있음을 알았다. 두 개의 평균유속(0.603, 1.03m/s)에서 수직방향 유속 균일성(U_i)은 각각 약 평균 1%, 1.5% 이내이고, 난류강도(I)는 5%이내임을 알 수 있다. 또한, 순간속도장 200개 이상에서 난류성분이 수렴하는 결과를 얻을 수 있었다.

본 실험을 통하여 PIV시스템은 여러 유속측정기법에 비하여 회류수조 관측부 자유수면을 포함한 평균유속 및 난류특성 조사에 아주 적합한 실험기법임을 알 수 있다. 또한, 얻어진 평균유속 균일성 및 난류특성의 공간 및 시간적 결과가 회류수조 성능을 평가할 수 있는 결과로 제시될 수 있고, 향후 회류수조를 활용한 가시화 및 난류구조해석 실험 등에 회류수조 특성으로 제공되어 질 것이다.

참 고 문 헌

김성민, 이상준 (1996). "평판 가까이에 놓인 타원형 실린더 주위 유동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제20권, 제8호, pp 2637-2649.

나정현, 권순홍 (1999). "PIV기법을 이용한 편향흐름 발생영역 규명", 한국해양공학회지, 제13권, 제1호, pp 105-112.

노기덕, 김광석, 박지태, 오세경 (2007). "PIV를 이용한 직렬배열에서 2원주 주위의 유동장 특성 연구", 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제2호, pp 159~165.

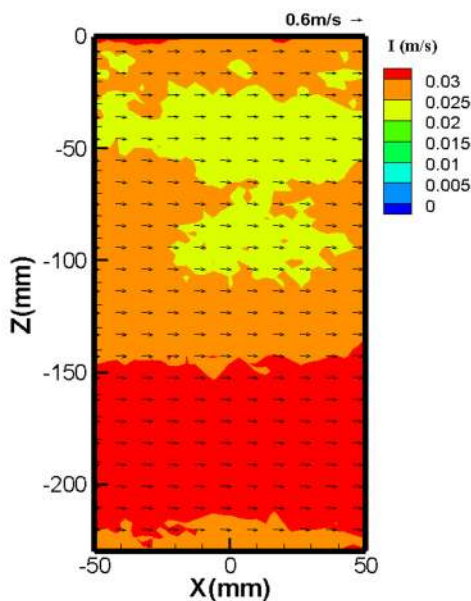
박건선, 곽영기 (2004). "PIV를 사용한 2차원 원형 실린더 주위의 유동해석", 한국해양공학회지, 제18권, 제3호, pp 1-7.

임영배, 정우철, 박찬원, 홍기섭 (2003). "해양공학용 소형 회류수조 설계 및 성능분석", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 198-202.

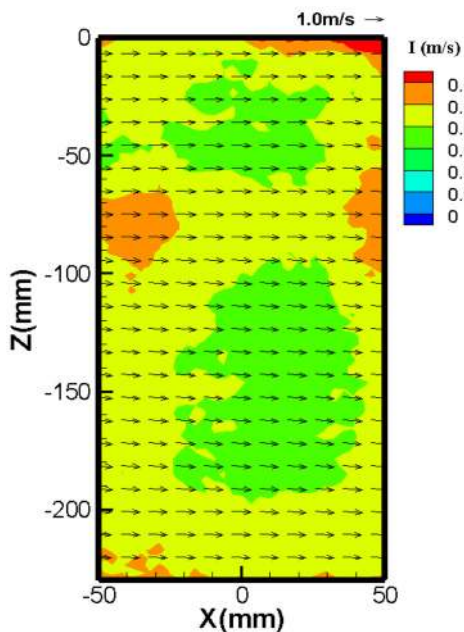
최은수, 성형진, 권장혁 (1989). "레이저 유속계를 이용한 회류수조의 난류유동 측정", 대한조선학회, 제26권, 제3호, pp 1-8

KTTC 회류수조분과 (2006). 회류수조를 이용한 KCS 모형선의 저항시험 보고서

2011년 6월 28일 원고 접수
 2011년 7월 11일 심사 완료
 2011년 8월 16일 게재 확정



(a) Impeller rpm 80, surface flow accelerator rpm 190



(b) Impeller rpm 140, surface flow accelerator rpm 330

Fig. 9 Turbulence intensity(I) with mean velocities