
 論 文

大韓造船學會誌
 第26卷 第3號 1989年 9月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 26, No. 3, September 1989

레이저 유속계를 이용한 회류수조의 난류유동 측정

최은수, 성형진*, 권장혁*

Turbulent Flow Measurements by Laser Velocimeter
in Circulating Water Channel

by

Eun Soo Choi, Hyung Jin Sung* and Jang Hyuk Kwon*

요 약

유동의 가시화 혹은 물체주위의 유동장 측정을 위하여 적당한 크기의 소형 회류수조를 실험실에서 제작, 레이저 유속계를 사용하여 그 유동장 특성을 조사하였다. 수직형 회류수조는 유동이 급이진 부분을 지나면서 실험측정 부분에서 평균속도분포가 균일하지 못하며, 균일한 유동장을 얻기 위해 수축부 다음에 표면유동가속기를 설치하였다. 적당한 표면유동가속도로 안정되고 균일한 속도분포를 얻을 수 있으며, 이 표면유동가속기의 최적점을 찾는 함수로는 단순 평균속도 뿐만 아니라 난류강도도 중요한 요소임이 실험적으로 밝혀졌다.

Abstract

The flow characteristics of a circulating water channel which is appropriate for a flow measurement and visualization in the laboratory has been investigated by using a Laser Doppler Anemometer. In order to get a stable and uniform distribution of mean velocity at the test section, the surface flow accelerator is designed and used. The experimental results that the turbulent structure should be considered with the mean velocity for obtaining the reasonable uniformity at the test section.

1. 서 론

풍동(wind-tunnel)과 수동(water-tunnel)은 다같이 기계, 항공, 조선공학분야 등에서 대단히 중요한 실험장치이지만 풍동에 비하여 수동은 국내에 많이 보급되어 있지 않아 보인다. 따라서 자체적으로 저렴한 가격으로 수동을 제작할 수 있다면 수동의 특성을 살

린, 여러가지 실험들을 다양하게 할 수 있으리라 생각된다.

Table 1은 풍동과 수동의 실험조건을 간략히 비교한 것이다. 일반적인 아음속 풍동의 최대유속을 30 m/s로 하고, 수동의 최대유속을 2 m/s라 하면, Table에서 알 수 있듯이, 레이놀즈수(Reynolds number)는 특성길이(characteristic length scale) L에 대해 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 밀도 차이가 엄청나지만, 점

접수일자 : 1989년 1월 17일, 재접수일자 : 1989년 4월 29일

* 정희원, 한국과학기술대학

Table 1 Comparison of experimental condition between wind-tunnel and water-tunnel

구 분	풍 동	수 동	비
유체의 점성계수	$1.983 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$	$8.6 \times 10^{-4} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$	1 : 43
밀 도	1.1774 kg/m^3	995.8 kg/m^3	1 : 846
동 점 성 계 수	$1.684 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$8.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	1 : 20
최 대 유 속	30 m/s	2 m/s	15 : 1
테 이 놀 즈 수	$1.78 \times 10^6 \text{ L}$	$2.33 \times 10^6 \text{ L}$	1 : 1.3

성계수도 차이가 크고, 또 최대유속이 수동에서는 크지 않기 때문이다. 따라서 수동을 이용하여 레이놀즈수를 크게 바꾸지 못함을 알 수 있다. 그러나 같은 레이놀즈수에 대하여 수동에서는 유속이 작기 때문에 유동의 가시화와 같이 저속이 요구되는 실험을 수행하는 데는 수동이 훨씬 유리하다. 또 유속이 작은 경우에, 수동이 풍동에 비하여 유동이 훨씬 안정하기 때문에, 작은 레이놀즈수에 대한 실험을 위해서는 수동이 유리하다.

수동은 전체를 물로 채우고 밀폐시켜야 하기 때문에 프로우브나 실험장치를 설치하고 이동시킬 때 불편한 점이 많으나 회류수조(circulating water channel)는 시험부(test section)가 개방되어 있기 때문에 상당히 편리하다. 또한 회류수조의 유동특성은 수동에 비해 불안하지만, 근래에 여러가지 부족장치가 개발되어 많은 보완이 이루어져 수동 대신에 쓸 수도 있을 것 같다. 특히 표면유동가속기(surface flow accelerator)의 기능은 대단히 중요하여 형태도 여러가지가 있고, 최근에 제작되는 회류수조는 대부분 이 장치를 갖추고

있다. 표면유동가속기의 선속도를 결정하는 데는 임펠러(impeller)의 선속도를 기준으로 한 회류수 조내의 평균유속 분포에 근거하고 있다.

본 연구에서는 유속측정장치로써 레이저유속계(Laser velocimeter)를 사용하여 표면유동가속기의 선속도 변화에 따라 유동특성이 어떻게 변화하는지를 평균속도 분포, 난류강도(turbulent intensity), 레이놀즈 스트레스(Reynolds stress)의 관점에서 알아보려고 한다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 대학에 설치된 소형회류수조의 개략도를 나타낸 것으로서, 시험부의 단면적은 300(W)×280(D)mm이며 길이는 약 700 mm이다. 수직형(vertical type)이며, 1개의 임펠러가, 회전수를 조절할 수 있는 DC-모터에 부착 설치되어 있다. 유체는 임펠러에서 확산부(diffuser)를 지나 두장의 망 및 천공판(mesh & punched metal)을 통과하여 하니콤(honeycomb)으로 들어간다. 수축부(contractor)의 단면적

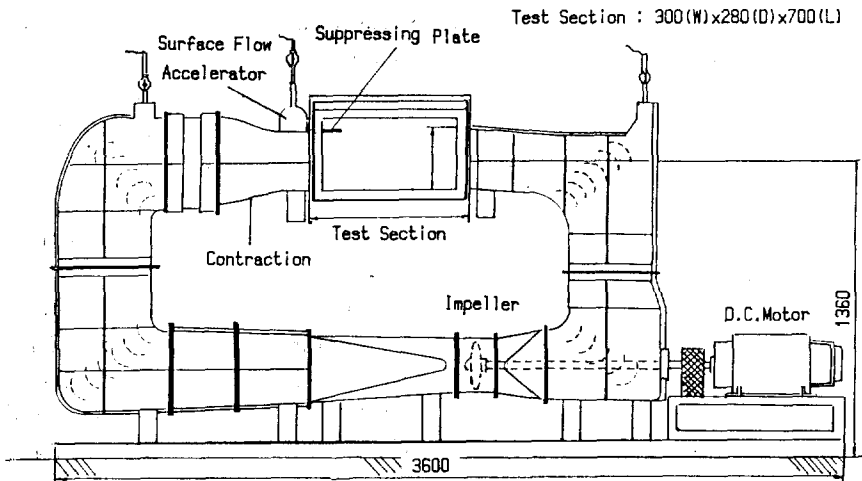


Fig. 1 Schematic diagram of the water channel

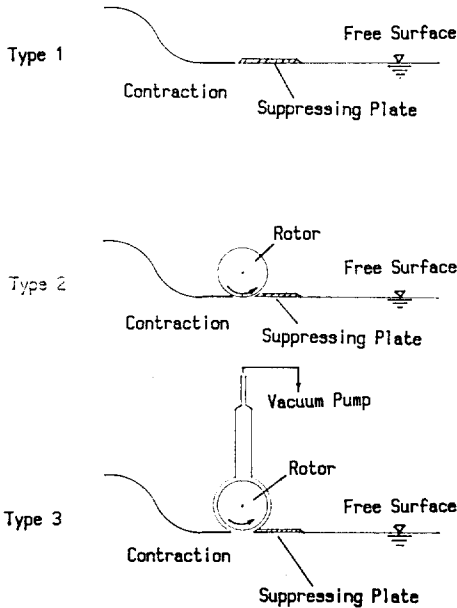


Fig. 2 Schematic diagram of the accelerating system

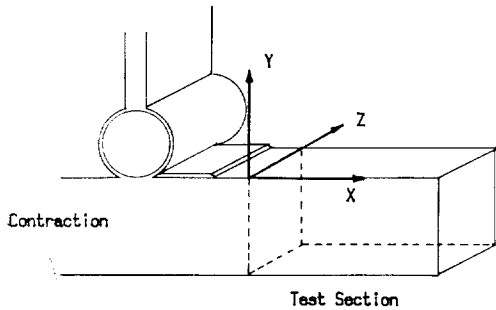


Fig. 3 Coordinate system

소율(contraction area ratio)은 3.2이다. 수축부의 끝부분에 표면유동가속기와 압력파의 누름판(wave suppressing plate)이 설치되어 있음을 볼 수 있는데, 이 장치가 시험부의 유동을 개선하는 역할을 한다.

Fig. 2에는 수축부 끝 부분의 형태를 세가지로 나타내었다. 첫번째 형태와 같이 특별한 가속장치가 없으면 시험부 상부에서의 유속이 지나치게 작아져서 시험부에서의 균일한 속도분포를 얻기가 힘들다. 이것은 유동이 밀폐된 곳에서 자유표면(free surface)을 갑자기 만나므로 유속이 작아지며, 또 유동이 수직으로 끊어진 부분을 지나면서, 반경이 큰 부분에서의 압력이 원심력에 의해 증가함에 따라 유속이 작아진 까닭이다. 두번째와 세번째의 형태는 다같이 원통(cylinder)을 회전시켜 전단력에 의해 표면유속을 증가시키므로써

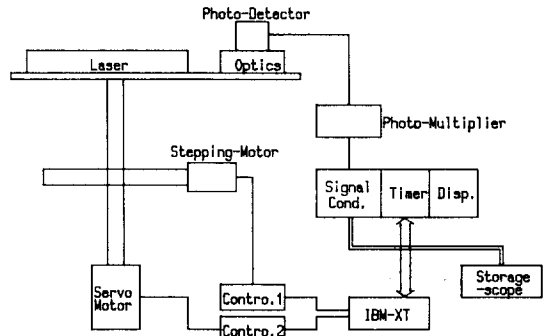


Fig. 4 Schematic diagram of the data acquisition system

첫번째의 결함을 보완하였으며, 세번째와 같이 원통을 밀폐시킨 경우가 효과가 좋았다고 한다. 본 연구에서도 세번째의 형태로 설계하였다. 누름판은 수축부와 표면유동가속기에서 생성되는 압력파를 감소시키는 역할을 한다. 수동의 양단 상부와 표면유동가속기의 상부에 기체 제거를 위하여 진공펌프를 연결하였으며, Fig. 3은 본 연구에서 설정한 좌표계를 나타낸 것으로서, 유동방향을 x 좌표로 잡았다.

유속측정장치로서는 레이저유속계(Laser velocimeter)를 사용하였다. TSI 제품으로서, 레이저는 Spectra Physics사의 20mW Ne-Ne 레이저이다. 이중 빔 후향산란(dual beam backscatter) 방식, 1 성분(component)이며 신호처리기(signal processor)는 모델 1990 C counter-type이다. 레이저의 출력이 약하고 후향산란방식을 쓰기 때문에 별도의 입자의 시딩(seeding)이 필요하여 시중에 흔히 판매되는 백색 수성페인트 에멀션을 사용하였다. 일단 수성페인트 에멀션을 적당한 용기에 풀어, 윗부분만을 충분히 수조에 넣은 후, 한쪽에서는 새로운 물을 공급하고, 한쪽에서는 배출하면서, 디지털 오실로스코프(digitized oscilloscope)에 나타나는 신호를 관찰하면서 입자의 농도를 조절하였다.

Fig. 4는 데이터 취득계(data acquisition system)의 개략도를 나타낸 것이다. 광검출기(photo-detector)에서 나온 신호는 광증폭기(photo-multiplier)에서 증폭되어 신호조절기(signal conditioner)에 들어간다. 이곳에서 밴드패스필터(bandpass filter)에 의해 도플러(Doppler) 신호가 얻어지고 타이머(timer)에서 주파수를 측정한다. 이때 도플러 신호 및 트리거(trigger) 신호가 디지털 오실로스코프에서 관찰되어진다. 타이머는 IBM-PC와 인터페이스(interface)되고 상용

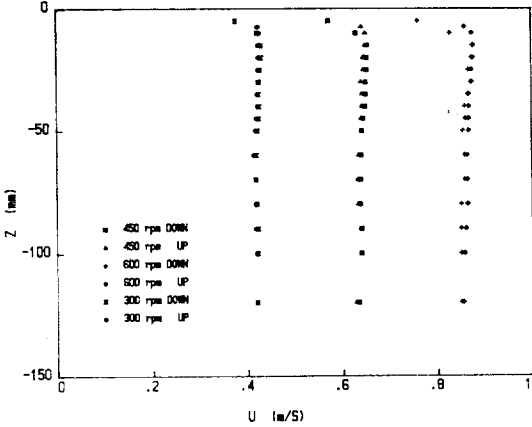


Fig. 5 Lateral mean velocity distribution

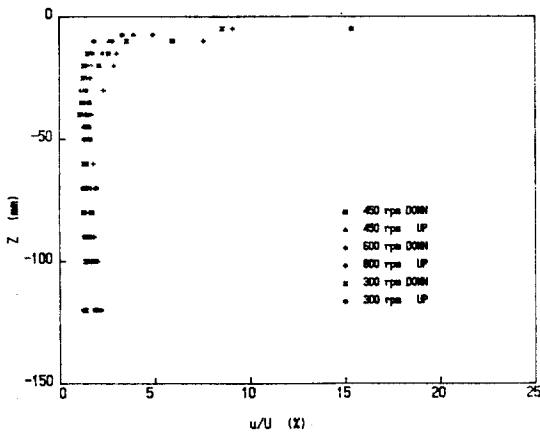


Fig. 6 Lateral turbulent intensity distribution

소프트웨어에 의해 데이터가 처리된다.

레이저 및 광학부분(optics)은 3차원 이송(traversing) 장치에 의해 이송되며, 그중 2차원은 자동이송장치로 이송된다. 수직방향은 서어보(servo) 모터에 의해 이송되며 수평방향은 스텝핑(steping) 모터에 의해 이송되는데, IBM-PC용 방형과 발생기(square wave generator) 인터페이스를 제작하여 전체 시스템을 IBM-PC로 온라인(on-line)화 하였다.

3. 실험결과

(1) z축 방향의 특성

Fig. 5는 임펠러 회전수가 300, 450, 600 rpm 일때, $x=0$, $x=400$ mm에서 z방향에 따라($y=-100$ mm) 측정된 평균속도이다. 경계층의 영향은 $z=-20$ mm만 되면 나타나지 않는다고 볼 수 있으며, $x=0 \sim -30$ mm에

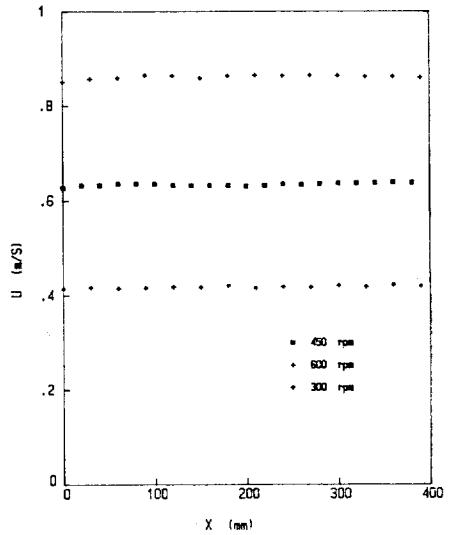


Fig. 7 Mean velocity distribution in the flow direction

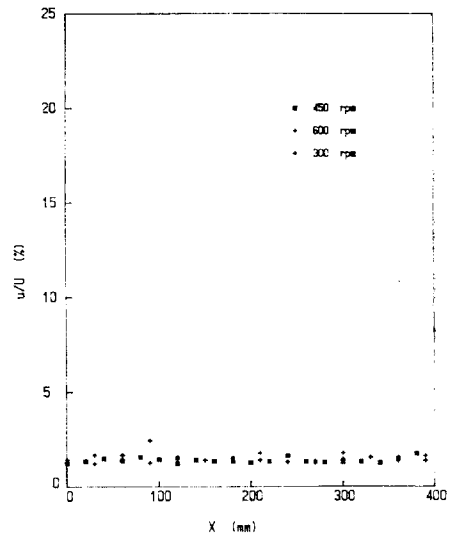


Fig. 8 Turbulent intensity distribution in the flow direction

서의 평균속도가 전체적인 평균속도보다 조금 큰 것은 수축부에 의한 overshoot 때문이다. $z < -40$ mm에서는 평균속도가 거의 균일하므로 $z = -50$ mm에서 측정된 평균속도가 전체 평균속도를 대표한다고 볼 수 있다. Fig.6은 앞에서와 같은 실험조건에서 난류 강도를 측정된 결과이다. 경계층 부근 이외에는 난류강도가 대체로 2% 이내에 든다. 경계층 내에서는 속도구배가

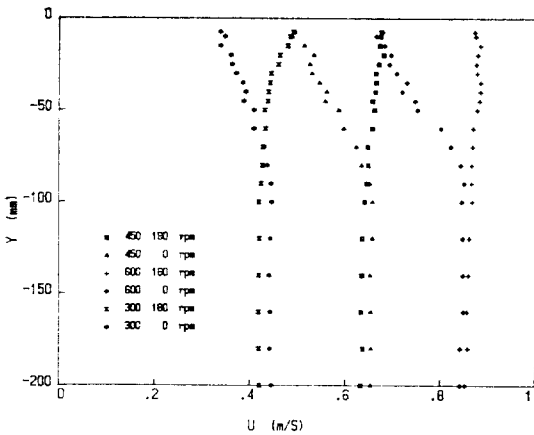


Fig. 9. Mean velocity distribution in the vertical direction at upstream

크고, 따라서 강한 전단유동에 형성되므로 난류 강도가 크고, 이상의 결과는 표면유동가속기를 180 rpm 정도로 회전시키면서 측정된 것이다.

(2) x축 방향의 특성

Fig. 7은 임펠러 회전수가 300, 450, 600 rpm일 때, x축 방향으로($y = -100$ mm, $z = -50$ mm) 레이저 유속계를 이동시키면서 평균속도분포를 측정된 결과이다. 물과 공기의 경계층에 존재하는 정상상태 파동이 5 mm 이내이므로 유동에 그리 영향을 미치지 못하기 때문에 상류나 하류나 대체로 균일한 평균속도를 보인다. Fig. 8은 앞에서 같은 조건에서 난류강도를 측정된 결과로서, 전 영역에서 난류강도가 2% 이내에 든다. 이상의 결과를 볼 때, 상류에서나 하류에서나 유동특성이 크게 다르지 않음을 알 수 있고, 시험부의 길이를 400 mm까지 사용하더라도 별 문제가 없을 것으로 생각된다.

(3) y축 방향의 특성

Fig. 9, 10은 각각 $x=0$, $x=400$ mm에서 y축 방향의 평균속도분포로서, 임펠러 회전수는 300, 450, 600 rpm으로 변화시켜 보았으며, 표면유동가속기의 영향을 알아보기 위하여 표면유동가속기를 180 rpm으로 회전시킨 경우와, 정지시킨 경우에 대하여 실험하였다. 어느 경우나 표면유동가속기를 사용하지 않으면 상부의 유속이 급격히 떨어져, 상부로부터 100 mm 정도의 구간은 평균속도분포 측면에서 볼 때, 사용이 곤란하다. 그런데 특이한 현상은 임펠러 회전수가 300 rpm일 때는 180 rpm의 표면유동가속기 회전수가 과도하게 큼을 알 수 있으나, 임펠러 회전수가 450 rpm을 넘으면 어느 경우나 180 rpm의 표면유동가속기 회전수가 적

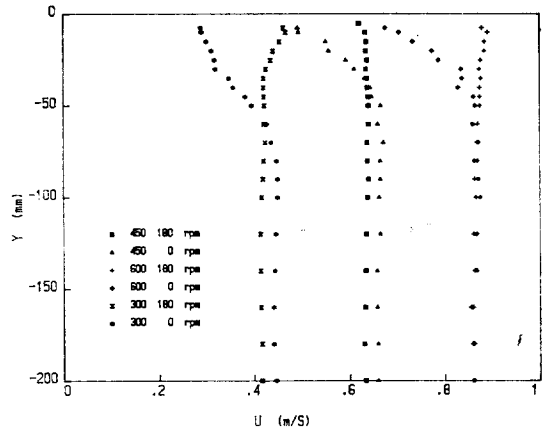


Fig. 10. Mean velocity distribution in the vertical direction at downstream

절해 보이는 것이다. 따라서 이 평균속도분포로서는 표면유동가속기의 적절한 회전수를 결정할 수가 없다. 어쩌면 어느값만 넘으면 된다고 판단할 수도 있을 것이다.

(4) 표면유동가속기의 회전수 결정

표면유동가속기의 적절한 회전수를 결정하기 위하여 평균속도분포와 함께 난류강도의 관점에서 실험하여 보았다. Fig. 11의 (a)~(h)는 $x=0$ 에서 y축 방향으로 레이저유속계를 이동시키면서 여러가지의 속도비 V_{acc}/V_m 에 대하여 평균속도분포 및 난류강도분포를 측정된 것이다. 여기서 속도비라 함은 표면유동가속기의 선속도와 유동의 평균속도와의 비를 말하는데, 표면유동가속기의 선속도는 원통의 반경과 각속도의 곱이다. Fig. 11(a)는 속도비가 0.4인 경우로서, 표면유동가속기의 선속도가 작아 y가 0~20 mm 영역에서 평균속도가 너무 작다. y가 -30~-70 mm 영역에서는 overshoot 현상이 보이는데, 이것은 유동의 경계가 고체면에서 자유표면으로 갑자기 바뀌므로 인한 현상이라 생각된다. y가 0~-70 mm인 영역에서의 난류강도가 아주 크다. Fig. 11(b)는 속도비가 0.74인 경우로서, 표면유동가속기의 선속도를 조금 올리니까 overshoot가 상당히 감소되고 상부의 유동도 평균값에 근사해 보인다. Fig. 11(c)는 속도비가 1.07인 경우로서, 표면유동가속기의 선속도를 더 올리니까 평균속도분포가 대단히 불량해 보인다. 따라서 Fig. 11(b) 상태, 즉 속도비가 0.74인 경우가 최적상태라고 착각하기 쉽다. 그러나 난류강도를 비교해 보면 속도비가 0.74인 경우보다 1.07인 경우가 더 양호하다. 따라서 속도비를 증가

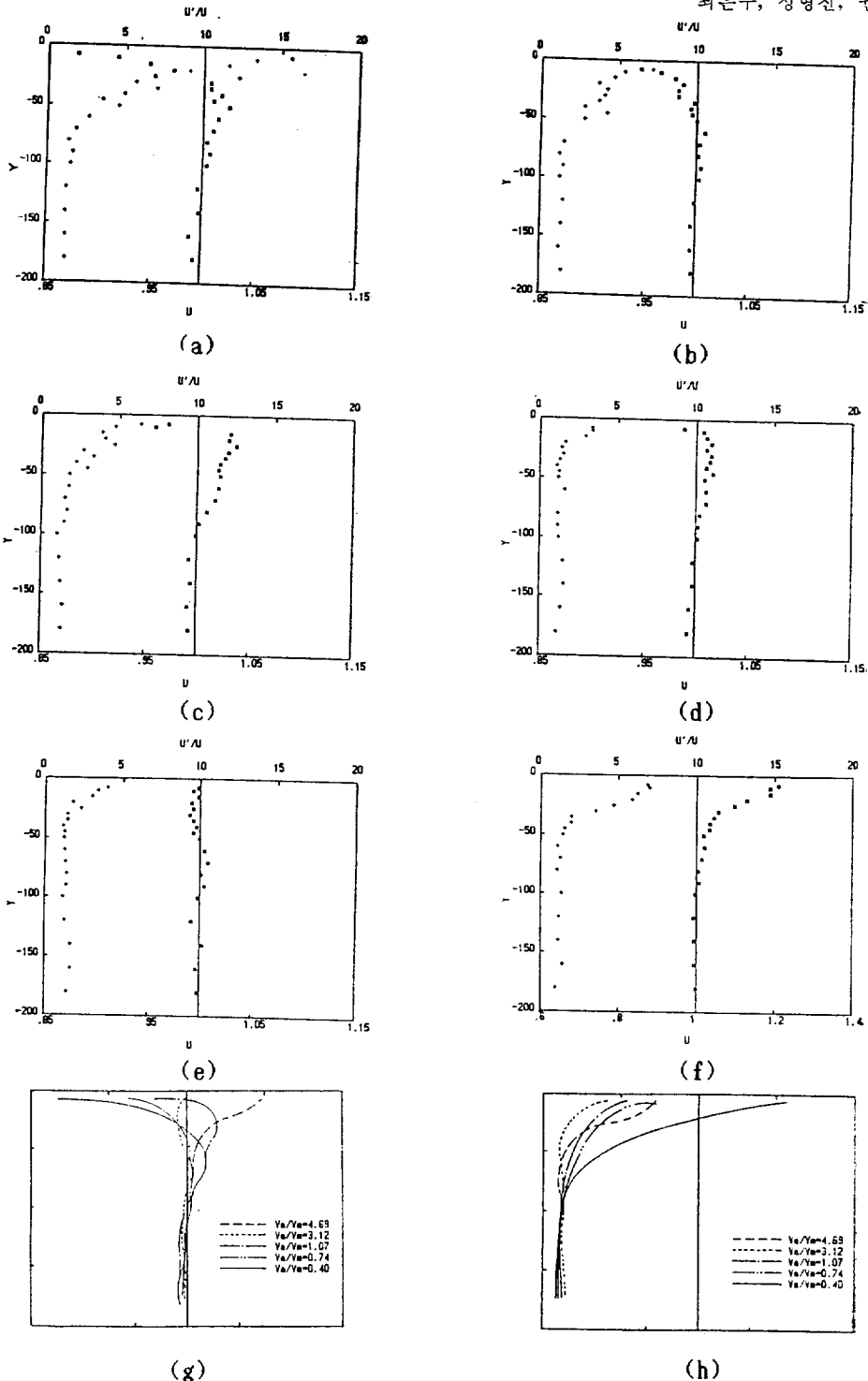


Fig. 11 Mean velocity and turbulent intensity distribution
 (a) $V_{acc.}/V_m=0.40$ ($rpm_{acc.}=30, rpm_m=450$) (b) 0.74(55, 450) (c) 1.07(80, 450)
 (d) 2.11(155, 450) (e) 3.12(225, 450) (f) 4.69(225, 300) (g) Mean velocity
 (h) turbulent intensity

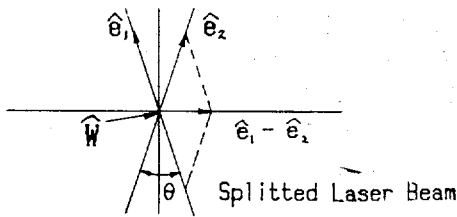


Fig. 12 Mean Reynolds stress measurement by means of 1-component Laser Velocimeter

시킴에 따라 난류강도는 아직도 계속 감소하고 있는 것이다. 실제로 속도비가 0.74인 경우의 유동형태를 눈으로 관찰하여 보면 아직도 상당히 요동이 심함을 볼 수 있다. Fig.11(d)는 속도비가 2.11인 경우로서, 속도비가 1.07인 경우보다 평균속도 분포도 좋아졌고 난류강도도 작아졌다. Fig.11(e)는 속도비가 3.12인 경우로서, 가장 양호해 보이는 상태이다. 평균속도도 거의 균일하고 난류강도도 물·공기 경계 근처를 제외 하면 대체로 2% 이내에 든다. 이때의 유동형태를 눈으로 관찰하여 보면 대단히 부드러워 보인다. Fig.11(f)는 속도비가 4.69인 경우로서, y가 0~50mm 영역에서의 평균속도가 급격히 커지고 난류강도도 상당히 커졌다. 이상의 실험결과를 고려하여 볼 때, 표면 유동가속기의 적절한 선속도는 평균속도분포와 난류강도의 두가지를 모두 고려하여 결정하여야 한다고 생각된다. Fig.11의 g)와 h)를 보면 $V_{acc.}/V_m$ 의 비를 변화시켜 가면서 평균 속도분포와 난류강도분포를 나타내었는데, 표면유동가속기의 선속도를 서서히 높이면 먼저 평균속도분포가 균일한 영역이 나타나지만 아직 난류강도는 상당히 높다. 표면유동가속기의 선속도를 더 높이면 평균속도분포도 균일하면서 난류강도도 양호한 점이 나타난다. 이 점이 실제로 백색 수성 에멀션의 부상으로 인한 유동의 가시화로서도 유동이 안정되어 보이는 점이다.

(5) 레이놀즈 스트레스의 측정

Fig.12와 같이 둘로 나뉘어진 레이저빔 (beam)의 진행방향을 \hat{e}_1, \hat{e}_2 라 하고, 두 빔 사이의 각도를 θ 라 하자. 이 평면은 현재 $z-x$ 평면상에 있고, 이 평면을 z 축을 중심축으로 하여 기울인다면, 그 기울인 각을 ϕ 라 하면 도플러 주파수(Doppler frequency 혹은 beating frequency) ν_D 는

$$\begin{aligned} \nu_D &= \left(\frac{n}{\lambda_0}\right) \dot{W} (\hat{e}_1 - \hat{e}_2) \\ &= \frac{n}{\lambda_0} \cdot U, \quad U = \dot{W}(\hat{e}_1 - \hat{e}_2) \end{aligned} \quad (1)$$

이 된다. 여기서 \dot{W} 는 전체유속벡터이며 U 는 x 방향 유속벡터 성분이다. λ_0 는 레이저 빔의 파장이며, n 은 $|\hat{e}_1 - \hat{e}_2|$ 로서 $2 \sin \frac{\theta}{2}$ 이다. 시간평균(혹은 앙상블평균)을 $\langle \rangle$ 로 나타내면 속도의 요동(fluctuation)의 평균은 영이 되므로 도플러 주파수의 강도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \langle \Delta \nu_D^2 \rangle &= \left(\frac{n}{\lambda_0}\right)^2 \langle [\dot{w}' \cdot (\hat{e}_1 - \hat{e}_2)]^2 \rangle \\ &= \left(\frac{n}{\lambda_0}\right)^2 \langle [u']^2 \rangle \\ &= 4 \left(\frac{n}{\lambda_0}\right)^2 \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} [\langle u'^2 \rangle \cos^2 \phi \\ &\quad + 2 \langle u'v' \rangle \cos \phi \sin \phi + \langle v'^2 \rangle \sin^2 \phi] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\dot{w}' = u'\hat{e}_x + v'\hat{e}_y$ 로서 속도 요동벡터이며, $\langle \hat{e}_1 - \hat{e}_2 \rangle \cdot \hat{e}_x = 2 \sin(\frac{\theta}{2}) \cos \phi$ 의 관계식을 이용하였다. 만일 $\phi_1 = 45^\circ$ 및 $\phi_2 = -45^\circ$ 에 대해서는

$$\begin{aligned} \langle \Delta \nu_D^2 \rangle_1 &= C [\langle u'^2 \rangle + 2 \langle u'v' \rangle + \langle v'^2 \rangle] \\ \langle \Delta \nu_D^2 \rangle_2 &= C [\langle u'^2 \rangle - 2 \langle u'v' \rangle + \langle v'^2 \rangle] \end{aligned} \quad (3)$$

이 되며, 여기서 비례상수 $C = 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \cdot \left(\frac{n}{\lambda_0}\right)^2$ 이다. 그러므로

$$\frac{\langle \Delta \nu_D^2 \rangle_1 - \langle \Delta \nu_D^2 \rangle_2}{\langle \nu_D^2 \rangle} = \frac{C \cdot 4 \langle u'v' \rangle}{U^2} \quad (4)$$

이 된다. 이 관계식 (4)에서 $\phi_{1,2} = 45^\circ, -45^\circ$ 및 $\phi = 0^\circ$ 의 세 방향으로 도플러 주파수를 측정하면 레이놀즈 스트레스 $\langle u'v' \rangle$ 을 구할 수 있다. Fig.13, 14는 표면 유동가속기의 선속도와 평균유속의 비가 1.76 및 3.12인 경우에 대하여 평균 레이놀즈 스트레스를 측정하여 본 것으로서, 속도비가 3.12인 경우에 전체적으로 값이 작게 나옴을 알 수 있다.

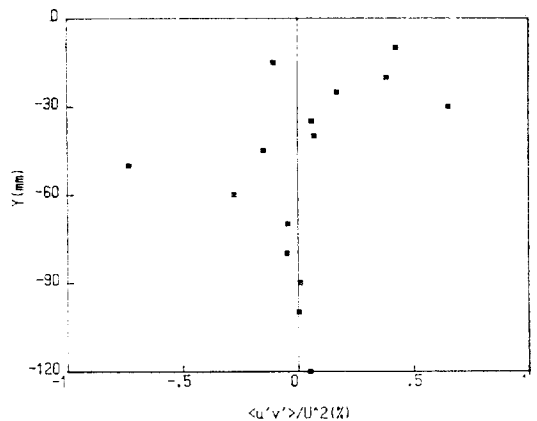


Fig. 13 Mean Reynolds stress distribution at $V_{acc.}/V_m = 1.76$

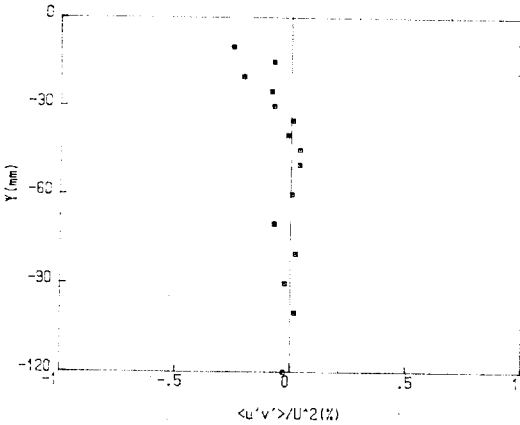


Fig. 14 Mean Reynolds stress distribution at $V_{acc}/V_m=3.12$

4. 결 론

(1) 시험구간(test section)이 $300(W) \times 280(D) \times 700(L)$ mm인 소형회유수조를 제작하여 유동 특성을 관찰하였다.

(2) 유속측정장치로는 레이저유속계(Laser Velocimeter)를 사용하였으며, 20mW 출력의 레이저 빔(beam)을 후향산란(backscatter) 방식으로 사용하기 위하여 별도의 입자를 투입(seeding)하여 신호의 강도를 높일 수 있었다.

(3) 표면유동가속기(surface flow accelerator)를 사용하지 않을 경우에는, 물·공기 경계면 부근에서의 유속이 매우 느리고, 난류강도가 아주 크다.

(4) 표면유동가속기의 적절한 선속도는, 평균속도와

난류강도의 두 가지를 모두 고려하여 결정하여야 한다. 표면유동가속기의 선속도를 서서히 높이면, 먼저 평균속도분포가 균일한 영역이 나타나지만, 아직 난류강도는 상당히 높다. 표면유동가속기의 선속도를 더 높이면, 평균속도분포도 균일하면서 난류강도도 양호한 곳이 나타난다. 이 상태가, 실제로 유동가시화의 관찰에서도 유동이 안정되어 보인다(본 실험에서는 $V_{acc}/V_m=3.12$ 인 경우).

참 고 문 헌

1. M. Ogura, "General Introduction for Circulating Water Channel", C.W.C. Symposium, Tokyo, JAPAN, 1985.
2. Y. Takai, "Laser Doppler Velocimeter", C.W.C. Symposium, Tokyo, JAPAN, 1985.
3. S.E. Logan, "A Laser Velocimeter for Reynolds Stress and Other Turbulence Measurements", AIAA, Vol. 10, No. 7, pp.933-935, 1972.
4. M. Tamashima, S. Matsui and M. Ogura, "Quantitative Measurements with Small Models of Ships in a Circulating Water Channel", Experiments in Fluids, Vol. 1, pp.135-142, 1983.
5. W.H. Stevenson, H.D. Thompson and T.C. Roesler, "Direct Measurement of a Laser Velocimeter Bias Errors in a Turbulent Flow", AIAA, Vol. 20, No. 12, pp.1720-1723, 1981.
6. W.H. Stevenson, "Optical Frequency Shifting by Means of a Rotating Diffraction Grating", Applied Optics, Vol. 9, No. 3, No. 3, pp.649-652, 1970.