

大韓造船學會論文集
 第28卷 第2號 1991年 10月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol.28, No.2, October 1991

LDV를 이용한 캐비테이션 터널에서의 프로펠러 축 주위의 난류유동계측

안종우*, 현범수*, 이진태*

LDV Measurements of Turbulent Flow around Propeller Shaft at Cavitation Tunnel

by

J.W.Ahn*, B.S.Hyun* and J.T.Lee*

요 약

캐비테이션 터널내에서 프로펠러 축 주위의 난류유동 특성을 레이저 유속계(LDV)를 이용하여 측정하였다. 우선 캐비테이션 터널의 시험부에서 유동의 균일도 및 난류유동 특성을 조사하였으며, 다음은 프로펠러 축 주위의 난류유동장을 축 주위의 난류경계층 및 후류에서 조사하였다. 프로펠러 축 주위의 경계층 유동 내에서는 일반적인 축 대칭 난류경계층 유동장의 특성이 잘 나타난 반면, 축 후류의 반류유동장에서는 복잡한 유동장이 발견되었다.

Abstract

Experimental studies are made of the characteristics of turbulent flow around the propeller shaft in Cavitation Tunnel using a 2-component LDV system. First the flow uniformity and turbulence levels at the test section are measured. The turbulent boundary layer around the propeller shaft and the wakes behind the propeller shaft are also measured. It is shown that the former represents the general turbulent boundary layer around the propeller shaft but the latter represents the complicated flows behind it.

발표: 1990년도 대한조선학회 추계연구발표회('90. 11. 10)

접수일자: 1990년 12월 26일, 재접수일자: 1991년 5월 13일

* 정회원, 한국해사기술연구소

Nomenclature

Symbol	Definition
L	hub and cap length
R	hub radius
r_o	local radius of the body
U_o	freestream velocity
U, V, W	mean velocity components in (X, r, θ) directions
$\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}$	Reynolds normal stresses in (X, r, θ) directions
k	turbulent Kinetic energy $(= (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2)$
$\overline{u'v'}, \overline{u'w'}$	Reynolds shear stresses in (X, r, θ) directions
$\overline{u'^2}, \overline{v'^2}$	turbulent intensities in (X, Y) directions
X, Y, Z	Cartesian coordinate system(Fig.3)
X, r, θ	cylindrical coordinate system(Fig.3)
E	expansion ratio of beam expander
f	focal length of focusing lens
k	half of beam crossing angle
λ	wavelength of laser beam
D_{e-2}	laser beam diameter multiplied by E
d_{e-2}	$4\lambda f/\pi D_{e-2}$
d_m	maximum diameter of focusing point
d_f	fringe spacing of focusing point
l_m	maximum length of focusing point
N_{FR}	no. of fringes of focusing point

1. 서 론

성능이 우수한 프로펠러를 개발하기 위해서는 프로펠러 및 축 주위 유동의 특성을 파악하여야 한다. 이러한 유동특성의 파악은 정도 높은 실험 결과들의 축적에 의해서 가능하며, 특히 프로펠러 주위의 유동이 난류하는 점을 감안할 때 난류를 계측할 수 있는 기술의 축적도 매우 중요하다.

본 실험은 캐비테이션 터널에서의 균일 유동 및 프로펠러 축(shaft) 주위의 난류 유동특성을 파악하기 위하여 시도되었다. 문제의 단순화를 위해서 프로펠러를 장치하지 않았고, 축

을 회전시키지 않았다. 유동 계측은 2방향의 속도를 동시에 계측할 수 있는 LDV 장치를 이용하여 수행하였다. 난류성분을 계측하기 위하여 초점 렌즈만이 움직이던 측정점 이송장치를 레이저 광원을 포함한 전체 광학계가 움직일 수 있는 보다 정밀한 이송장치를 사용하였으며, 2방향의 속도자료를 동시에 취득하기 위하여 coincidence window간격을 설정할 수 있는 Interface(TSI 1998A Master Interface)를 사용하였다.

캐비테이션 터널에 어떤 물체도 장치 않은 상태에서 수행된 균일유동의 난류성분 계측은 본 터널의 정도 파악과 함께 계측의 신빙성을 알기 위하여 수행되었다. 터널 계측부의 균일

도 및 난류강도를 측정하였고, 유속 변화에 따른 난류 강도 및 난류전단응력을 측정하였다. 또한 측정의 신빙성을 알아보기 위하여 coincidence window의 시간 간격 변화에 따른 난류전단 응력성분 (u,v)을 측정하였다.

고정된 프로펠러 축 주위에서는 유동은 프로펠러 축과 허브만을 측정부에 장치해서 실험을 실시하였다. 이는 가장 간단히 형성할 수 있는 축 대칭 유동의 경계층 및 후류 유동장에서의 난류전단 응력성분을 측정하여 유동 특성을 파악하기 위하여 수행되었다. 축 주위의 경계층 유동내에서는 일반적인 축 대칭 난류 경계층 유동장의 특성이 잘 나타난 반면, 축 후류의 반류 유동장에서는 복잡한 유동이 발견되었다. 이는 당초 프로펠러 축이 축 대칭체의 유동장을 형성할 것이라 생각되었지만 실제로서 완전한 축대칭성이 형성되지 않으면서 나타난 현상일 것이라 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

캐비테이션 터널에서의 유동측정은 측정부

단면의 크기가 600mm×600mm인 제1계측부에서 수행하였다[1]. 본 실험을 위하여 사용한 2성분 LDV 장치는 기존의 장치에서 두가지 변화가 있었는데[2], 이는 난류 응력성분측정을 원활케 하기 위함이었다. 첫째는 산란된 신호의 강도를 높이기 광학계 조절(alignment)이 용이하도록 Fig.1과 같이 레이저 본체 및 광학계 전체를 이동하여 측정위치(측점)를 이동할 수 있는 이송장치의 사용이다. 기존의 이송장치[2]는 거울을 이용하여 최소한의 광학계(측점 렌즈)만이 움직이도록 구성되었는데, 작동 및 설치가 용이한 반면 광학계 조절이 어렵고 레이저 빛이 여러 거울을 통과할 때 빛의 강도가 약해지는 단점이 있었다. 이는 평균 유속만을 측정하는 데는 문제가 없었지만 순간적인 난류 응력성분을 측정하기에는 상당히 어려운 점이 있었다. 둘째는 2방향의 측정된 자료를 동시에 취득할 수 있는 자료 취득장치의 보완이다. 기존의 자료취득장치는 자료의 동시 취득을 못한 반면, Fig.1에서 나타난 것과 같이 본 실험에서 새로이 설치된 Interface는 2개의 계수기(counter)의 불연속적인 각각의 신호를 정해진 시간안에 함께 측정할 수 있도록 하는 coinci-

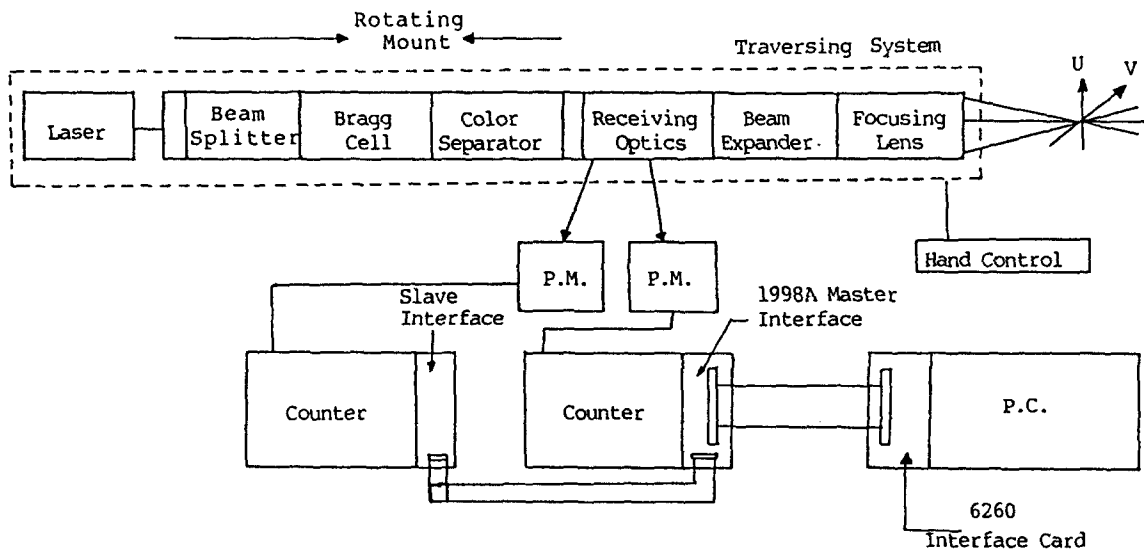


Fig. 1 Arrangement of the LDV system

dence window가 장치되어 있어 자료의 동시 취득을 수행할 수 있었다[3].

실험에 사용된 촛점 렌즈는 촛점 길이가 350mm로써 각각의 간섭을 위한 레이저 광의 반각(κ)은 2.805도 이다. 빛이 2.27배의 확산계(Beam Expander)를 지나기 전에 레이저 빛의 지름(D_{e-2})은 1.2mm이며, 확산계를 지난후 2색 3선이 이루는 타원체의 측정점(촛점)에서의 제원은 다음과 같다.

Item	Green Beam	Blue Beam
$\lambda(nm)$	514.5	488.0
d_{e-2}	0.0842	0.0798
$l_m(mm)$	1.7206	1.6307
$d_m(mm)$	0.0843	0.0799
$d_f(\mu m)$	5.257	4.986
N_{FR}	16	16

SNR(Signal-to-Noise ratio)을 높이기 위하여 캐비테이션 터널에 사용한 산란입자는 평균 입자지름이 $0.22\mu m$ 인 Titanium Dioxide 였다. 비교적 입자가 작아서 처음 실험시작시 5cc정도 터널에 주입시키면 적당한 것으로 나타났다. 이는 본 캐비테이션 터널의 총 용수량이 50톤 임을 감안할 때, 대략 10톤에 1cc 정도의 극미한 양이었다. 그 이상을 주입시켰을 경우(10cc 정도) 터널 용수를 혼탁하게 하여 오히려 산란광의 신호를 약화시켰다. 만일 LDV 실험기간이 길어져 입자가 부족하다고 생각될 경우는 1cc정도씩 추가로 주입하는 것이 바람직하다.

레이저 광이 40mm 두께의 플라스틱 유리(plexiglass)와 굴절율의 변화는 Snell의 법칙을 이용하여 계산한 후 실제적인 계측을 수행하였다. 계측은 터널 시험부 중심 축에 정밀 가공을 한 물체를 장치한 후 플라스틱 유리의 안쪽 벽면과 물체 표면에 측정점을 위치하여 양쪽의 거리를 계측하는데 플라스틱 안쪽 벽면은 육안에 의해 측정점 위치를 선정하였고, 물체 표면에서는 주파수 shifter를 이용하여 정현파(sine 파)가 가장 선명하게 나오는 점을 측정점 위치로 선정하였다. 거리 계측은 $1/100mm$ 정도를

가지고 있는 측정점 이송장치를 이용하였다. 측정 결과를 계산 결과와 비교하였는데 0.5% 이내의 차이가 나타났다.

2.2 Coincidence window의 사용

LDV를 이용한 난류 유동계측시 중요한 고려사항으로는 여러가지가 있겠으나, 그중 특히 coincidence window 폭 및 전체 sample 수를 적절히 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. coincidence window란 Fig.2에서 보는 바와 같이 두개의 계수기 채널(counter channel : 녹색광 및 청색광)에서 받아들이는 순간 속도치들 중 어느 주어진 미소시간 동안에 함께 얻어진 자료만을 처리하기 위하여 정의된 시간 간격으로 이의 최적치는 유동의 특성, 유속 및 측정부의 공간 분해능 등에 따라 변하게 된다. 예를 들어, 유속이 4.8m/s인 유동장에 LDV의 공간분해능이 $d=0.08mm$ 인 청색광이 사용될 때, 측정 부위를 통과하는 산란입자의 통과시간은 $t=d/v=16.7\mu s$ 이 되므로, 같은 산란입자로 부터 얻어진 신호가 두 채널에서 동시에 계측됨을 보장하기 위하여 coincidence window의 간격은 $10-20\mu s$ 으로 취해져야 한다. 만일 이 값이 지나치게 크게 잡힐 경우 레이놀즈 응력(u,v)의 두 순간속도값 사이에 상관관계(correlation)가 제대로 이루어지지 못하여, 대부분의 경우 실제보다 작은 값을 얻게된다. 한편 window 폭이 너무 좁을 경우 취득 가능한 데이터가 급격히 감소하게 됨은 물론이다. 이의 평가를 위한 몇가지 예비조사를 캐비테이션 터널에서 실시하였고, 최종적으로 coincidence window 폭을 $10\mu s$ 로 고정하여 사용하기로 결

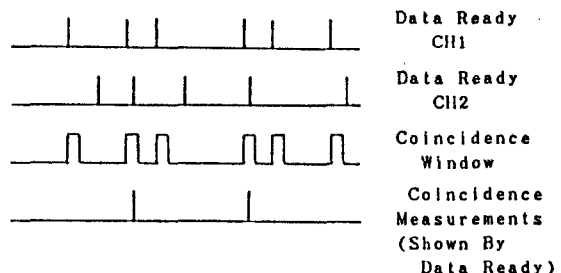


Fig. 2 Coincidence window

정하였다. 이때 단위 시간당 측정부를 지나는 데이터(Data rate)는 U, V 방향 모두 50개/초 정도면 되는 것으로 나타났다. 유속평균 및 레이놀즈 응력치들을 얻기 위한 sample 개수는 대략 1000-2000개 이었는데, 4-5분의 측정 시간이 소요되었다. 이는 통상적인 random mode(두 채널 사이의 상관관계를 고려치 않고 모든 데이터를 받아들이는 모드)를 사용할 경우 약 30초 정도에 같은 양의 데이터를 얻을 수 있는 것과 비교할 때, 2개의 계수기에서 측정된 데이터의 10%정도 만이 난류성분 도출을 위하여 채택되었음을 의미한다.

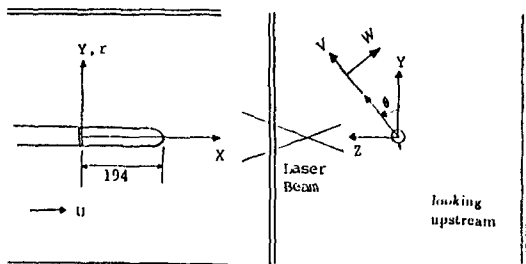


Fig. 3 Coordinate system for propeller shaft set-up

2.3 실험 방법

실험에 사용된 좌표계는 Fig.3에 나타나 있으며, 유속 측정시에도 같은 좌표계를 사용하였다. 여기서 X=0의 위치는 반류스크린 위치로 부터 30cm 떨어진 위치이다. 레이저 빛은 Fig.3에 나타난 방향에서 입사하여 Y방향을 따라서 U, V 속도 성분을, Z 방향을 따라서 U, W 속도 성분을 동시에 측정하였다. 장비 특성상 U, V 및 W의 속도 성분을 동시에 측정할 수 없었고, 특히 V, W 속도 성분을 동시에 측정할 수 없다는 아쉬움이 있었다.

터널 균일 유속 측정은 캐비테이션 터널의 J25 동력계 축을 최대한 제거한 후에 수행되었으며[1], Master Interface에서 random과 coincidence의 두가지 모우드를 사용하였다. 터널 임펠러 rpm변화에 따라서 유속 및 난류성분을 측정하였으며, 주로 500rpm(U=4.8m/s)에서 실험을 수행하였다.

프로펠러 축 주위의 유동은 Fig.4에 나타난 것과 같이 프로펠러 축 주위에서 3위치 및 프로펠러 축 후류에서 4 위치에서 평균 유속 및

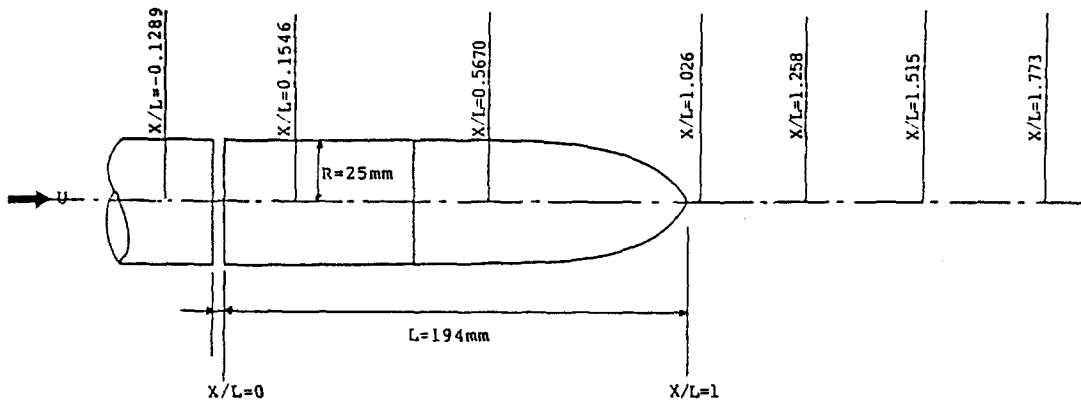


Fig. 4 Measuring positions of the propeller shaft system

난류 응력성분을 측정하였는데 측정시 터널 시험부의 유속은 4.8m/s였다. Coincidence 모우드에서만 측정이 수행되었으며, 난류응력성분 중 $\overline{v'w'}$ 의 측정이 실험장치 특성상 불가능하였다. X/L=1.026위치와 같이 축의 가까운 후류(near wake)에서 급격한 속도 감소로 인한

단위시간당 데이터 수가 적어져 측정이 어려웠는데, random 모우드로써 평균 유속만을 측정하는 것은 가능했으나, coincidence 모우드로써 난류성분을 동시에 측정하는 것은 현재로는 불가능하였다. (추후에 레이저 빛의 강도 향상 및 터널 덮개 유리의 두께 감소로 가능할 수도 있음.)

3. 실험 결과

3.1 캐비테이션 터널의 균일 유동

캐비테이션 터널에 어떤 물체도 장치하지 않은 상태에서 터널 계측부에 균일도 측정 및 난류 강도를 측정하였고, 유속변화에 따른 난류 강도 및 난류 응력성분 $\overline{u'v'}$ 을 계측하였다. 또한 난류계측의 신빙성을 파악하기 위한 coincidence window의 시간 간격에 따른 난류 응력성분 $\overline{u'v'}$ 의 변화를 계측하였다.

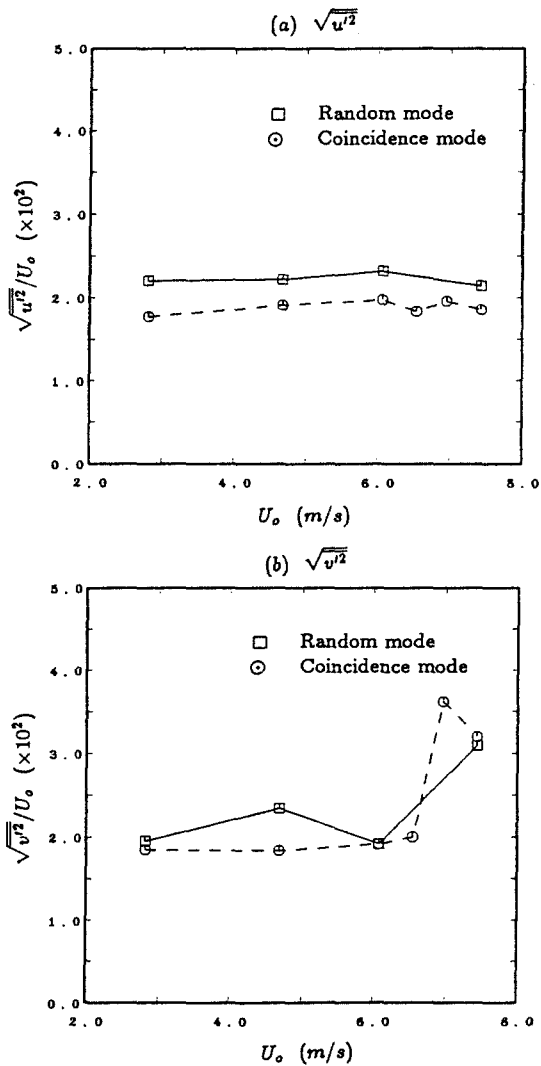


Fig. 5 Turbulent intensities of the uniform flow at Cavitation Tunnel at position (0,50,100)

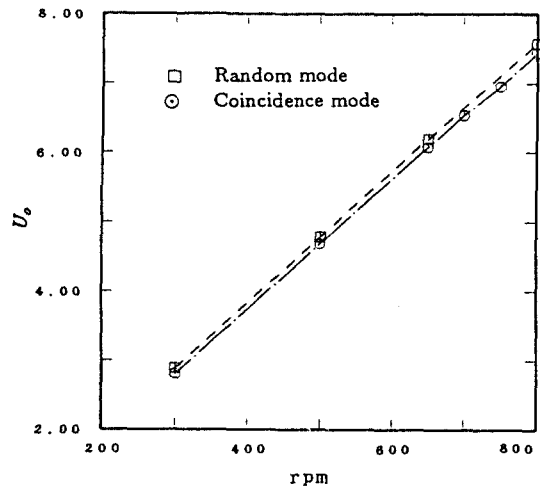


Fig. 6 Mean velocity of the uniform flow at Cavitation Tunnel at position (0,50,100)

터널 계측부 유속의 균일도 측정은 임펠러 rpm이 500rpm(4.8m/s)이고, random 모드에서 수행하였다. X=0.0위치에서 Y는 35mm에서 100mm까지 변화시켰고, Z는 -50mm에서 150mm 위치까지 변화시켰는데, 축 방향속도 U는 한, 두군데를 제외하고는 거의 0.5%이내의 균일도를 가지고 있었으며, 난류강도도 거의 일정하게 나타났다. 한편 V와 W 속도성분은 거의 나타나지 않았다.

본 터널에서 유속변화에 따른 난류강도의 측정은 LDV 신호처리기에서 처리되는 두개의 모드, 즉 random 모드와 coincidence 모드에서 수행되었다. 속도 변화에 따른 난류강도는 Fig.5에 있는 예에서 나타난 것과 같이 U, V 방향에서 대체로 2% 정도이며, 유속이 6.5m/s에 이르게 되면 V방향에 난류강도가 커지는 것으로 나타났으며, 일반적으로 random 모드에서 난류강도가 커지는 것으로 나타났다. 유속이 6.5m/s 이상에서 난류강도가 증가하는 것은 임펠러 주위의 유동장의 변화, 즉 박리현상 및 캐비테이션 발생 등이 계측부 유동장에 영향을 주지 않았는가 생각되며, 난류강도가 random 모드에서 약간 증가하는 것은 Fig.6에 나타난 평균유속에서 그 원인이 있

다고 할 수 있다. 평균유속 역시 random 모드에서 약간 커지는 것으로 나타났는데, 이는 높은 주파수의 신호가 계측될 가능성이 있다는 것을 보여준다.

2% 정도의 난류강도는 일반적인 풍동에서 이 값이 0.5%내외인 점을 감안할 때 작은 값은 아니지만 본 터널과 유사한 크기의 회류 수조등에서 얻어지는 난류강도가 대략 이 범위로 알려져 있으므로 타당한 결과로 여겨진다. 난류강도가 커지는 이유는 터널 상류쪽에 안내판(Guide vane) 및 정류 격자에서 생성된 속도 변동이 아직도 존재하고 있는데 그 원인이 있다고 하겠다.

Coincidence 모드에서 난류 응력성분의 계측은 새로이 장착된 LDV system의 난류응력 성분 계측여부, 적당한 산란입자의 양 및 계측의 신빙성 여부를 알아보기 위하여 수행하였다. 우선 coincidence window 설정시간에 따른 난류 전단응력성분 ($\overline{u'v'}$)의 계측을 수행하였는데, Fig.7과 같이 시간 간격(window width)이 길어짐에 따라 계측값이 작아지는 것으로 나타났는데, 계측 데이터 사이에 시간의 상관관계를 따져보면 두 데이터 사이에 시간

간격이 멀어질수록 서로의 상관관계가 없어져 계측값이 작아진다고 알려져 있으므로 타당한 결과라고 생각된다. 여기서 시간축에 random은 random모드에서 난류계측을 수행한 것으로 U의 값이 계측된 후 다음에 계측된 V값이 무조건 동시 계측 자료로써 인정되는 것으로써 coincidence window를 무한대로 설정한 것과 같은 효과이다. 앞에서 언급한 바와 같이 10 μ s로써 coincidence window를 설정하여도 동시계측에 지장이 없는 것으로 나타났다.

10 μ s의 coincidence window에서 실험된 터널 유속 변화에 따른 전단응력의 계측은 난류 전단응력 $\overline{u'v'}/U_0^2$ 이 10⁻⁴정도로써 무시할만한 결과가 나타났는데, 이는 터널 시험부에 어떤 물체가 존재하지 않을때 난류전단응력이 생성될 수 없다는 점을 감안할 때 당연한 결과라고 생각된다.

3.2 축에서의 경계층 유동

본 캐비테이션 터널의 축대칭 축(shaft)은 그 회전부의 길이(L)가 194mm이고 0.6186L (120m)까지의 반경(R)이 25mm이다. 프로펠러 축이 회전하지 않고 있으므로 그 주위 유동은 축대칭 경계층 및 반류로 이상화할 수 있다. 물론 실제의 경우 이상화한 유동으로부터 어느정도 벗어난 유동을 얻게 되며, 이를 판정하는 것 또한 본 실험의 목적 가운데 하나이다.

실험장치 상세도 및 계측 위치는 Fig.4에 나타나 있다. 계측은 크게 두 영역, 즉 축 경계층 유동 및 반류내 유동에 걸쳐 수행되었다. 전자는 프로펠러 축 주위 유동특성을 파악함은 물론 본 실험의 상부경계조건을 알아보기 위함이며, 축 후류의 유동특성 및 반류유동의 축대칭성등을 파악키 위함이다.

Fig.8에 나타난 경계층 주위의 평균유속성분 (U, V, W)으로 부터 알 수 있듯이 축 주위의 경계층은 그 축방향 위치의 변화에 따라 거의 변치 않으며, 특히 V, W성분이 매우 작음을 보여준다. 이는 축 주위의 어떤 방향으로의 압

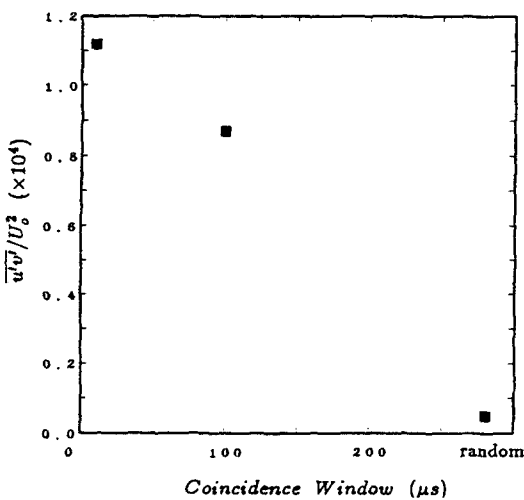


Fig. 7 Variation of turbulent shear stress according to the coincidence window interval

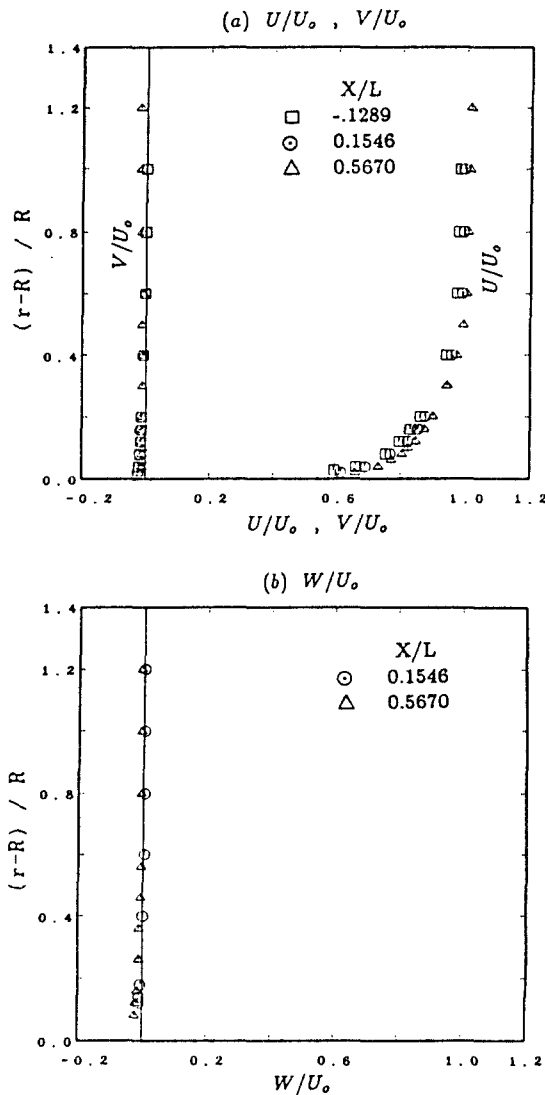


Fig. 8 Mean velocities inside the boundary layer of the shaft

력구배도 거의 작용하지 않기 때문에 당연한 결과로 보인다. 또한 본 실험 결과로부터 경계층 두께는 $X/L=0.567$ 에서 약 $(r-R)/R=0.5$ 가량인 것을 알 수 있는데, 이를 평판 난류유동에 대한 1/7-법칙을 사용하여 역으로 구해보면, 본 캐비테이션 터널의 shaft 주위의 유동은 그에 등가한 평판 유동으로 생각해도 큰 무리가 없음을 예측할 수 있다. Fig.8에 해당하는 난류응력성분들은 Fig.9에 나타나 있다. 일반적

인 경계층 유동의 특성을 그대로 보여주고 있는데, $\overline{u^2}$ 값이 다른 두방향 성분 $\overline{v^2}$ $\overline{w^2}$ 에 비하여 상당히 큰 값을 주고 있는 것이 특이할 만한 점이다. \overline{uv} 성분은 그 절대치는 작으나 반경방향으로의 변화가 큰 것을 알 수 있는데, X-모멘텀 방정식에 존재하는 $\frac{\partial \overline{uv}}{\partial Y}$ 로 볼 때 난류응력에 지배적인 항임이 잘 보여진다. $\overline{u^2}$ 은 반경방향 변화는 크나 모멘텀 방정식상에는 $\frac{\partial \overline{u^2}}{\partial X}$ 로만 표현되기 때문에 그 영향이 평균 유동 결정에 거의 기여치 못함을 유의해야 한다.

Fig.9(e)에는 \overline{uw} 가 보여지는데 이는 X-모멘텀의 원주방향 변화를 나타내는 항으로 원래는 0이 되어야 하는 값이나, 본 실험의 정도 및 유동의 축대칭성으로 부더의 차이를 보기 위하여 참고로 수록되었다.

즉, 등방성 와점성 모델(isotropic eddy viscosity model)로부터

$$\overline{u'w'} = \nu_t \left(\frac{\partial W}{\partial X} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

로 표시되기 때문에 $\overline{u'w'}$ 는 거의 존재하지 않게 된다. 여기서 ν_t 는 난류 와점성계수를 나타낸다. 그럼으로 부터 알 수 있듯이 이값이 상당히 작은 점으로 미루어, 경계층 유동의 축대칭성은 그런대로 잘 유지되고 있음을 알 수 있다. 이 차이는 비록 작은 값이지만 실험의 계측 오차라고는 말하기 어려우며, 유동의 축대칭성으로 부터 벗어난 정도에서 그 이유를 찾아야겠다.

마지막으로 Fig.9-(f)에 있는 난류유동에너지(turbulent kinetic energy) 분포를 보면, 난류에너지의 전파 방향을 알 수 있다. 난류에너지는 축 벽면에서 발생하여 반경방향으로 전파됨을 잘 보여주고 있는데 대략 $(r-R)/R=0.8$ 정도까지의 영역에 걸쳐 에너지 교환이 이루어지고 있다. 축방향으로의 변화가 거의 없는 점은 유동의 대류항이 지배하는 유동 특성을 의미한다.

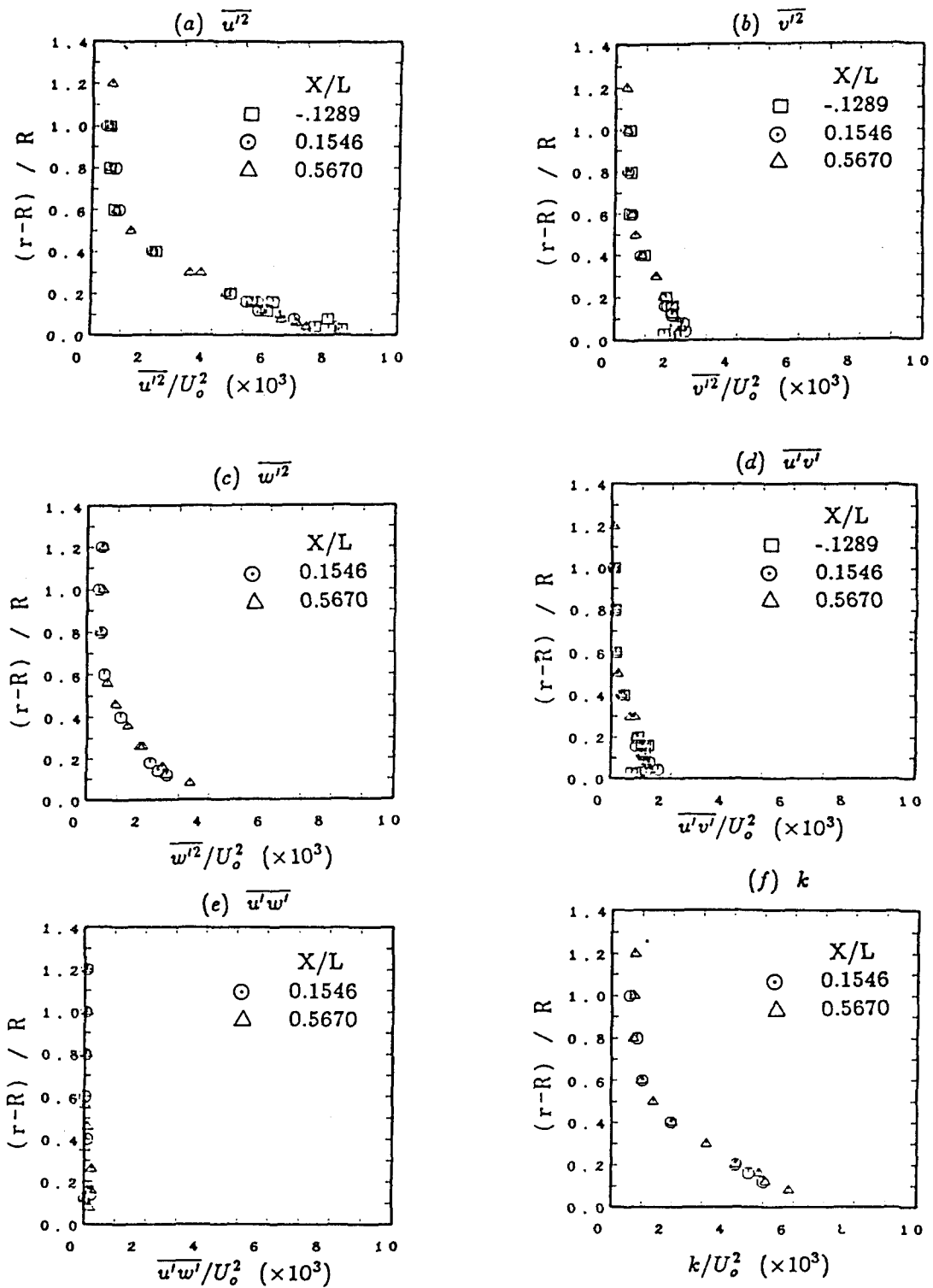


Fig. 9 Turbulent quantities inside the boundary layer of the shaft

3.3 후류(wake)에서의 유동

프로펠러 축 후류에서의 유동은 경계층내 유동과는 달리 비교적 복잡한 유동을 형성하고 있다. 첫째로, 프로펠러 허브에서의 형상으로부터 압력의 축방향 구배가 형성되어 유동을 바꾸어 주고, 그 유동이 후류영역으로 전개되어 나간다. 둘째로, 캐비테이션 터널 계측부 전면에 위치한 축을 지지하는 지지대들로부터의 영향이 후류영역에서 모이기 때문에 그로부터의 영향을 피할 수 없게 된다. 끝으로 후류의 특성상 후류의 중심선(wake centerline)이 불안정한 특성을 나타내므로, 기하학적인 후류중심(wake center)과 물리적인 의미를 갖는 후류중심이 서로 다를 수 있기 때문에 발생하는 문제점들이 존재할 수 있다.

Fig.10에서 평균유속분포를 보여주고 있다. 경계층 유동과 마찬가지로 원주방향속도 W는 존재하지 않는 것이 이상적이나 반류내에서 그 값이 나타나고 있다. 주로 $0 < r < 0.4R$ ($0 < r < 1\text{cm}$)내에서 비교적 큰 변화를 보여주고 있는데, 터널 계측부 전면에 위치한 지지대로부터의 유동 교란이 주된 이유로 생각된다. 한편, 축방향 속도 U가 하류로 이동함에 따라 속도가 본래속도(freestream velocity)쪽으로 회복됨을 보여주고 있으며, 반경방향속도 V는 $X/L=1.026$ 부터 1.515까지 감소하는 경향을 보이며, $X/L=1.515$ 정도가 되면 반류 경계층 두께가 거의 일정하게 회복됨을 예측할 수 있다. 즉, 허브끝에서 부터 약 $X/R=4$ ($X/L=1.54$)정도 떨어진 위치까지 가까운 후류(near-wake) 및 중간후류(intermediate wake)가 형성되며 그 이후로는 먼후류(far-wake) 특성을 가질 것으로 보인다. 이에 대한 자세한 정보는 추후 좀더 자세한 측정을 통하여 얻어야겠다. 여섯 개의 레이놀즈응력 성분들의 분포는 Fig.11에 나타나 있는데, 전반적으로 경계층 유동에 비하여 매우 다른 성질을 보이고 있다. 예를 들어 $\overline{v'^2}$ 이나 $\overline{w'^2}$ 의 경우 그수의 최대치가 후류 중심선이 아닌 $r/R=(0.2-0.4)$ 사이에 나타나

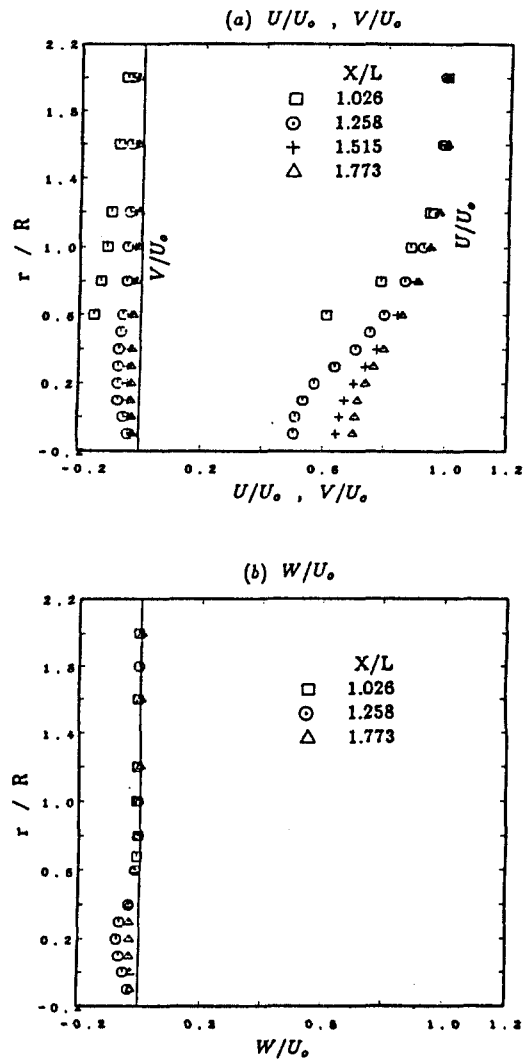


Fig. 10 Mean velocities at downstream of the shaft

고 있는데 이로 부터 반류내에서 일반적인 난류에너지의 전달 과정을 알 수 있다. 또한 $X/L=1.773$ 가 되면 $0 < r/R < 0.6$ 정도까지 반류에너지 분포가 거의 균일하게 나타났는데 이로 부터 반류영역 안에서 난류에너지 전달이 거의 정지했음을 알 수 있으며, 따라서 그 영역에서 평균 유속성분들의 변화도 적을 것임을 또한 추론할 수 있다.

레이놀즈 전단 응력 $\overline{u'v'}$ 의 경우 (Fig.11-(d)) 역시 $X/L=1.773$ 정도가 되면 $\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial Y}$ 가

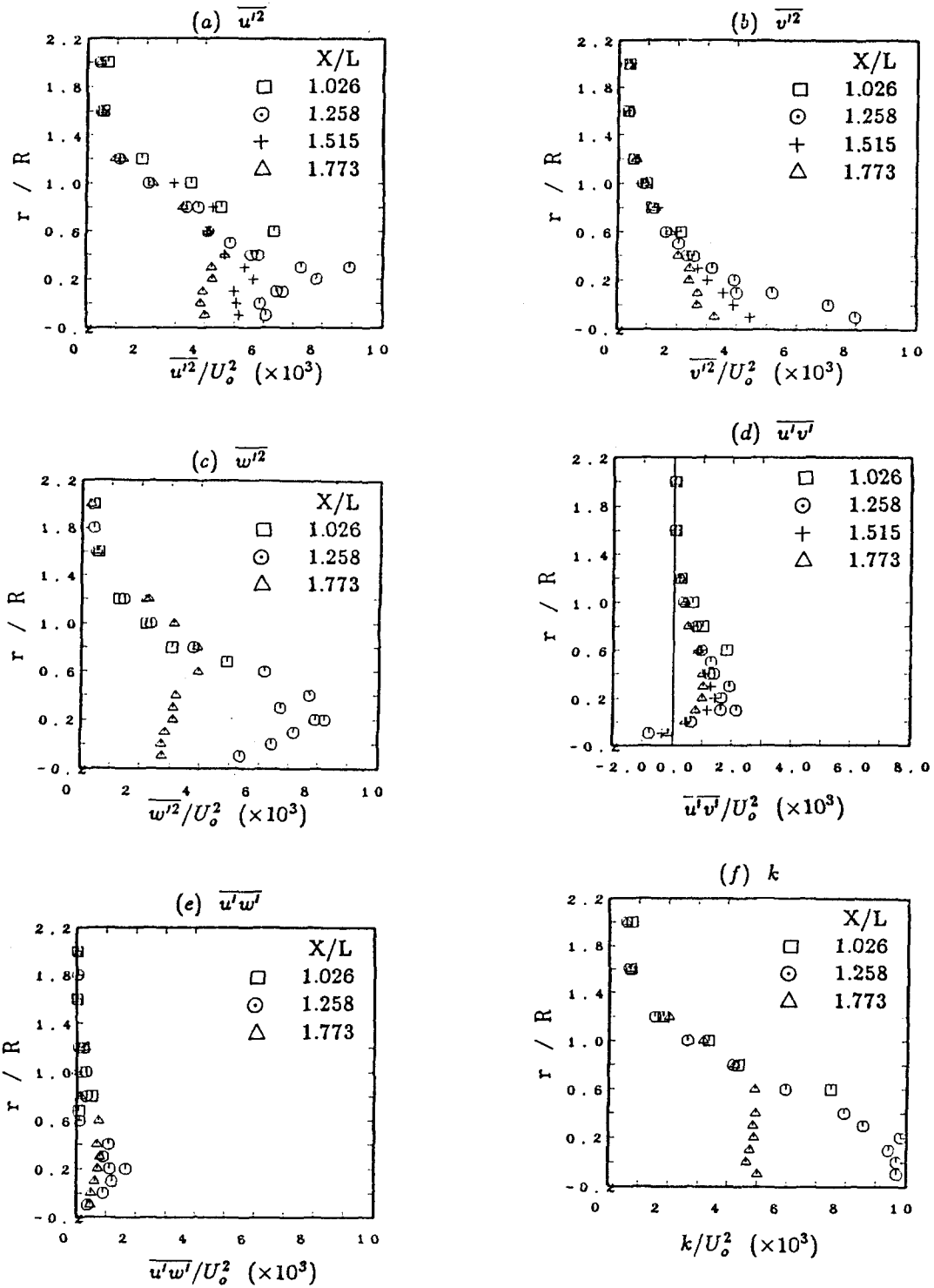


Fig. 11 Turbulent quantities at downstream of the shaft

비교적 적어지게 됨을 잘 보여주고 있다. 한가지 특기할 사항으로는 반류영역에서(특히 가까운 후류와 중간후류) $\frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial Y}$ 가 $\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial Y}$ 에 비하여 결코 적지 않다는 점으로 이로부터 축대칭 유동의 경우에도 r방향의 모멘텀 방정식이 무시되어서는 정확히 유동해석이 어렵다는 점을 알 수 있다. 끝으로, $\overline{u'w'}$ 를 살펴보면 (Fig.11-(e)), $\overline{u'v'}$ 보다는 작으나, 거의 그와 비슷한 차수(order)의 값들을 나타내고 있다. 이는 식 (1)에서 보였듯이 이상적인 축대칭 유동의 경우 무시되어야 할 값으로, 이로부터 본 캐비테이션 터널 프로펠러 축후류 ($1.258 < X/L < 1.773$)에서의 유동의 비축대칭성이 드러나 보이고 있다. 주된 이유로는 역시 프로펠러 축을 지지하는 지지대들로부터 야기된 레이놀즈 응력성분(혹은 속도 fluctuation)이 반류 영역으로 진행하여 그 부근 기존의 불안정한 축대칭 유동과 상호간섭을 일으켜서 생성된 성분으로 보인다. 물론 원주방향 평균 유속 W의 존재로부터 이를 유추할 수 있겠고 또한, LDV 계측 자체의 계측오차도 있을 수 있겠다. 이로부터 우리가 얻을 수 있는 정보는, 실제 상황에서는 이상화한 모델로부터 유동을 불안정하게 만드는 요소가 항상 존재하며 이를 파악하기 위해서는 난류성분의 계측이 크게 도움을 줄 수 있다는 점이다. 본 실험의 경우 압력계측이 실시되지 않았기 때문에 자세한 사항은 알기 어려우나, 만일 압력분포를 안다고 가정할 때, 반류 계측으로부터 평균유동의 변화가 압력변화에 의한 것인지 또는 난류성분에 의한 것인지 등도 밝힐수가 있겠다.

3.4 실험결과 고찰

본 실험이 축대칭 유동이고 등방성 와점성이라고 가정한다면 레이놀즈 전단응력 분포로부터 V_t 를 구해볼 수 있다. 등방성 와점성 모델로부터 v_t 는 다음과 같다.

$$\overline{u'v'} = v_t \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) \quad (2)$$

여기서 $\frac{\partial U}{\partial r} \ll \frac{\partial V}{\partial X}$ 의 관계가 성립하므로

$v_t = \frac{\overline{u'v'}}{\partial U / \partial r}$ 로 나타낼 수 있다. Fig.12는 경

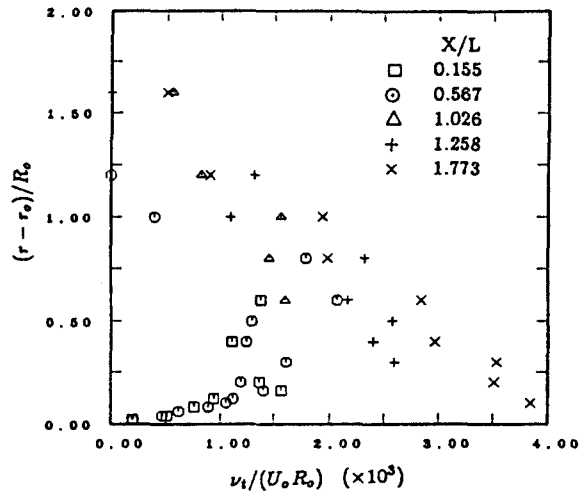


Fig. 12 Eddy viscosity distribution

계측과 후류에서의 U_0 와 R_0 로 무차원된 경계층 유동에서는 벽면근처와 본래속도 영역을 제외하고는 1.5근처에서 값이 형성되나 후류에서는 후류에서는 X방향으로 거리가 진행됨에 따라 일정한 값이 형성되지 않으면서 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이와같은 경향은 기존의 논문에서도 어느정도 나타나지만 [4,7], 본 실험 결과에서는 그 정도가 큰 것으로 나타났다.

Fig.13은 간단한 얇은 경계층의 완전 난류(fully-turbulent) 영역에서 거의 0.15정도의 값이 나오는 구조변수(structure parameter) a_1 를 고려한 것이다. Fig.13에서 살펴보면 a_1 의 값은 $(r-r_0)/R_0$ 가 0.1~0.7 위치에서 0.11 내지 0.12 근처에 값이 형성되었다. 기존에 열선 유속계로 축대칭 유동을 계측한 결과를 살펴보면 대략 0.15근처에 값이 형성된 것을 볼 수 있는데 [4,7], 이런 점으로 미루어 보아 본 실험 결과는 시간 상관관계에 문제가 있는 것이 아닌가 생각된다. 앞으로 coincidence window

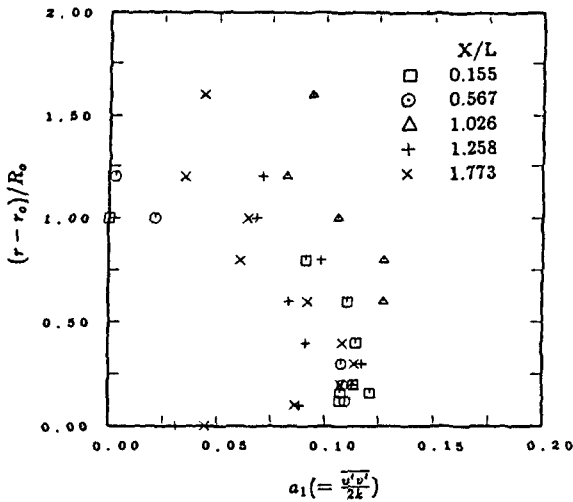


Fig. 13 Turbulent structure parameter

를 $1\mu s$ 까지 설정할 수 있는 인터페이스를 설치할 예정이어서 많은 개선이 이루어 지리라 생각된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 LDV를 이용한 캐비테이션 터널에서의 균일류 및 축(shaft) 주위의 난류 유동계측을 실시하였다. 연구결과와 앞으로의 활용방안에 대하여 정리하면 다음과 같다.

(1) 레이저 광원 및 광학계 전체를 움직일 수 있는 측정점 이송장치 및 새로운 Interface (TSI 1998 Master interface)를 이용하여 유동의 난류성분을 성공적으로 계측할 수 있었다. 특히 측정점 이송장치의 교체는 난류 계측에 필수적인 것으로 나타났다.

(2) 캐비테이션 터널 시험부의 균일 유동 계측결과 유동의 균일도는 0.5% 정도로 나타났으며, 난류강도는 $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{v'^2}$ 성분 모두 2% 내외였다. 일반적인 풍동에서 이값이 0.5% 내외인 점을 감안할 때 비교적 작은 값은 아니지만 본 터널과 유사한 크기의 회류수조 등에서 얻어지는 난류정도가 대략 이 범위로 알려져 있으므로 타당한 결과로 여겨진다.

(3) 프로펠러 축에서의 경계층 유동에서는 경계층, 난류 응력성분 및 난류 에너지 등이 X-방향 위치에 따라 큰 변화가 없는 것으로 보아 관성력(혹은 대류항)이 큰 유동장의 특성을 보여주었다. 또한 v_i 및 a_1 의 값도 비교적 안정된 분포를 보여주었다.

(4) 반류에서의 유동은 축대칭 유동이라고 가정하였으나, 실제적으로는 엄밀한 의미의 축대칭 유동이 이루어지지 않음으로써 다소 복잡한 유동이 형성되었다. 특히 \overline{uw} 의 경우 경계층에서는 비교적 작은값이 계측되었으나, 반류에서는 \overline{uw} 의 크기와 비슷한 값이 계측되었으며, v_i 의 값도 등방성 와점성모델로 가정하기에는 어려운 점이 있었다.

(5) 추후에 프로펠러 축을 회전시킨 경우의 유동특성을 파악하게 되면, 앞으로 복잡한 형상(propeller, etc)을 갖는 물체주위에 난류유동 계측을 수행하는데 기본적인 비교 자료로서 그 활용가치가 있으리라 여겨진다.

후 기

본 논문은 과학기술처의 '90년도 기본과제로 수행한 연구결과와 일부이다. LDV를 이용한 유동장의 특성 파악은 앞으로도 계속 수행할 예정이며, 학회지를 통하여 연구결과를 발표할 예정이다. 본 연구에 많은 수고를 아끼지 않았던 추진기기술실 이창용, 김경열씨에게 감사드리며, 기타 관련제위께 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] 이창섭 외, "캐비테이션 터널의 시운전 시험 및 캐비테이션 시험법 개발에 관한 연구", 한국기계연구소 연구보고서 UCN 131A-276.D, 1982.
- [2] 안종우 외, "LDV를 이용한 2차원 프로펠러단면 주위의 난류유동 특성연구", 한국기계연구소 연구보고서 UCE 426-1275.D, 1989.

- [3] Menon, R.K., "Three-Component Velocity Measurements in the Interblade Region of a Fan", ASME Paper no. 87-GT-207, Gas Turbine Conference, Anaheim, California, 1987.
- [4] Hyun, B.S., "Measurements in the Flow around a Marine Propeller at the Stern of an Axisymmetric Body", Ph.D. Thesis, Mech. Engr., Uni. Iowa City, IA, 1990.
- [5] Stuart D. Jessup, "An Experimental Investigation of Viscous Aspects of Propeller Blade flow", Ph.D. thesis, the Catholic University of America, 1989.
- [6] Min, K.S., "Numerical and Experimental Method for the Prediction of Field Point Velocities around Propeller Blades", Rept. No 78-12, Dept. of Ocean Eng., MIT, 1978.
- [7] Patal, V.C. and Lee, Y.T., "Thick Axisymmetric Turbulent Boundary Layer and Near Wake of a Low-Drag Body of Revolution", IIHR Report No. 210, The University of Iowa, 1977.
- [8] Bissonnette, L.R. and Mellor, G.L., "Experimental on the Behavior of an Axisymmetric Turbulent boundary Layer with a Sudden Circumferential Strain", JFM, Vol. 63, Part 2, pp. 369-413, 1974.
- [9] F. Durst, A. Melling J.W Whitelaw, "Principles and Practics of Laser Doppler Anemometry", Academic Press, 1981.