

PIV를 사용한 2차원 원형 실린더 주위의 유동해석

박건선* · 곽영기*
*목포대학교 선박해양공학과

Flow Survey around Two-Dimensional Circular Cylinder using PIV Technique

GUN-SUN PARK* AND YOUNG-KI KWAK*

*Department of Naval Architecture and Marine engineering, Mokpo National University, Mokpo, Korea

KEY WORDS: Particle Image Velocimetry PIV, Circulating Water Channel 회류수조, Flow Visualization 유동가시화, Velocity Distribution 유속분포

ABSTRACT: Flow visualization and velocity field measurement methods have practical applications in the various fluid engineering fields, such as mechanics, ships, and heat fluids. In this study, the basic principles and theoretical methods are used to establish an application technique of Particle Image Velocimetry (abbreviated to PIV below). Accordingly, the measured results of velocity field distribution of a section inside the Circulating Water Channel (abbreviated to CWC below) are computed using the PIV is presented. The uniformity of velocity distribution of the section in CWC is confirmed, by comparing this PIV data with the existing current meter data. Also, in order to measure the flow fields of surroundings of 2-dimensional cylinder in the CWC, the flow visualization technique using the PIV is applied.

1. 서 론

유동가시화는 비접촉 방식으로 유동 자체를 교란시키지 않으면서 어떤 순간의 전체 유동장을 가시화함으로써 측정하고자 하는 유동에 대한 공간적인 유동정보를 제공한다. 화상처리 기술을 이용한 입자영상 속도장(PIV) 측정기법의 기본원리는 시간 간격(Δt) 동안 유체와 함께 움직인 입자들의 변위정보를 CCD 카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 화상데이터로 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측하고 시간 간격(Δt)로 나누어줌으로써 속도벡터를 추출하는 것이다.

속도장 측정은 입자영상(particle image)의 취득, 속도벡터의 추출, 그리고 추출한 속도장 결과를 나타내는 3단계 과정으로 이루어진다. 입자영상을 취득하는 과정에서는 적절한 tracer 입자를 선정하고, 실린더형 렌즈를 이용하여 레이저 평면광을 만들어 측정하고자 하는 유동평면을 조사하게 한 후, CCD 카메라와 같은 영상입력장치를 평면광에 수직으로 설치하여 입자영상을 취득하게 된다. 입자영상 취득시 tracer 입자의 크기와 concentration, 카메라 노출 시간, 시간간격(Δt) 등은 실험조건 및 사용하고자 하는 PIV 속도장 측정시스템에 따라 다르게 설정하여야 한다. 취득한 입자영상으로부터 속도벡터를 추출하는 과정은 입자변위를 어떻게 구하느냐에 따라 여러 가지 방법이 사용되고 있으며, 속도벡터 추출 알고리즘도 다양하다.

본 연구에서는 PIV 실험장비에 대한 유동가시화와 속도장 측정의 기본원리, 데이터 처리기법 알아보고 속도장 분포를 결과로서 도출하여 나타내고자 하였다. 회류수조의 폭방향 및 깊이방향의 유속 분포를 계측하여 회류수조내의 유속의 균일함을 실험을 통해서 결과로 제시하고자 하였고, 그 결과를 유속 계로 측정된 값과 비교하여 나타내고자 한다. 또한 2차원 물체 주위의 유동 분포를 알아보고자, 원형 실린더 주위의 유동 분포를 이미지화하여 데이터를 해석하고 결과로 나타냄으로서 회류수조에서의 PIV 실험에 대한 기법을 확립하고자 하였다.

이에 대한 결과로서 실린더 주위의 유동장을 PIV를 이용해서 측정된 결과를 속도 벡터로 나타내고자 하였다. 위와 같은 실험들의 경험을 통해서 다양한 기계 및 선박 그리고 열유체 분야에 접목시켜 활용하고자 한다(Lee, 2002).

2. PIV의 실험장치

2.1 레이저

Nd:YAG 레이저는 Nd³⁺ 이온에 의하여 생성되는 빔으로서 PIV 측정에 있어서 가장 중요한 고체 레이저이다. Nd³⁺ 이온은 여러 가지 다른 물질과 혼합되어질 수 있는데, 일반적으로 YAG crystals이 사용된다. Nd:YAG 레이저는 높은 증폭과 우수한 기계적, 열적 특성을 가지고 있다. PIV 실험에서는 double-oscillator 방식의 dual Nd:YAG 형태로 많이 사용되고 있다. 왜냐하면 이와 같은 double-oscillator system은 같은 pulse strength로 두 레이저 빔 사이의 시간간격을 자유롭게

제1저자 박건선 연락처: 전라남도 무안군 청계면 도림리 61
061-450-2760 gspark@mokpo.ac.kr

조절할 수 있기 때문이다. Nd:YAG레이저는 1064nm에서 강한 빛을 방출한다. PIV실험에서는 특별한 Crystals를 이용하여 기본파장인 1064nm를 frequency-double을 통해 532nm로 바꾸어 사용하게 되며, 본 PIV 실험에 사용한 Dual-head Nd :YAG Lsser의 특성을 아래의 Table1에 나타내었다.

Table 1 Dual-head Nd:YAG Laser Specifications

Laser Type	Flash lamp pumped Q switch water cooled
Pulse Width	6 to 8 ns
Energy	150mJ per pulse
Pulse Repetition Rate	30Hz max
Beam Diameter	5mm
Beam Divergence	<0.6 mrad
Temperature	70°±10°F, 21°±5°C
Beam Height	10.8cm (3.25.)
Cooling	Internal water cooling Deionized water only

2.2 렌즈 조합에 의한 평면광 생성기법

Expanding beam에 의한 방법은 여러 가지 렌즈의 조합으로 된 beam expander로 laser에서 발생된 빛을 확산시켜 light sheet를 생성시킨다. Expanding beam 방법의 장점으로는 빛의 강도, 취급하기 쉬움, 그리고 이용도 등을 들 수 있으며, 단점으로는 light sheet가 균일하지 못하다는 것이다. 즉, 레이저 빔이 거의 Gaussian 강도분포를 가지기 때문에 두께 방향으로 균일한 light intensity를 얻기가 어렵다. Nd:Yag 레이저와 같은 높은 강도의 다른 광원들에 대해서는 몇 가지 렌즈의 조합이 얇은 레이저 평면광을 생성시키기 위해 대개 요구되어지며 적어도 하나 이상의 부가적인 렌즈가 그 빛을 적당한 두께로 초점화하기 위해서 필요하다(Lee, 2002).

두 개의 구형 렌즈와 하나의 실린더형 렌즈를 사용한 조합은 평면광을 보다 적절하게 만들어 준다. 이 경우에는 짧은 focal length의 구형렌즈가 사용된다. 평면광의 폭은 실린더형 렌즈의 focal length에 의해 결정되어진다. 이 방식은 focal line이 pulsed레이저에도 사용될 수 있는 상대적으로 큰 범위를 가지기 때문에 확산렌즈-negative focal length-에도 사용될 수 있다. 평면광의 높이는 실린더형 렌즈를 변화시켜서 조절하며 평면광의 두께는 구형 렌즈의 길이방향 위치를 변화시켜서 조절하게 된다. 본 PIV 실험에 사용한 렌즈의 특성은 아래의 Table2에 나타내었다.

Table 2 Optics Specifications

Lens	Specification
Spherical lens	PLANO-Convex LENS 25.4mm dia, EFL 200
Spherical lens	PLANO-Convex LENS 25.4mm dia, EFL 20
Cylindrical lens	50.8×9.0mm size, EFL -50mm
Mirror	Wavelength range 532nm, 45degree angle if incidence 508mm dia

2.3 CCD 카메라

Taylor micro-scale λ 를 2개의 조사구간 크기로 하여 작은 scale의 eddy 거동을 분해능이 1K×1K인 CCD카메라를 이용하여 PIV 방식으로 측정할 경우에는 관측영역의 크기가 30cm×30cm를 넘기 힘들다. 보다 넓은 영역의 유동에 대해 PIV속도장 측정을 할 경우에는 35mm이상의 film이나 2K×2K pixel 이상인 고해상도 CCD카메라를 사용하여야 한다.

Interline transfer CCD sensor는 active pixel들 사이에 추가적인 vertical transfer register가 존재하여 그 이름이 붙여졌는데, 수직방향으로 붙어있는 odd-line과 even-line pixel 두 개가 vertical shift register에서 하나의 저장위치를 공동으로 사용하게 된다. Pixel의 active area에 축적된 전하들은 storage area로 빠른속도($\Delta t_{transfer}=1\mu s$)로 이동하게 되는데, 이러한 빠른 이동특성은 CCD sensor로 하여금 electronic shuttering 역할을 가능하게 한다. 주요 단점으로는 각각의 light sensitive area 옆에 있는 추가적인 저장영역으로 인해 fill-factor가 감소된다는 것인데, sensor 앞에 마이크로 렌즈를 설치함으로써 fill factor를 개선시킬 수 있다. 이 방식의 CCD sensor는 active pixel의 절반만큼의 charge storage site들을 가지고 있기 때문에, 수직방향 분해능이 절반으로 줄어들게 된다. 본 실험에서 사용된 CCD카메라의 특성은 아래의 Table3과 같다.

Table 3 CCD Camera Specifications

Image device	Progressive scanning interline transfer CCD with microlens
Total Pixels	≥1008 (H) × 1018 (V)
Light sensitive pixels	≥1008 (H) × 1018 (V)
PIV frame-straddling	≤380nsec between frames for high speed flow
Pixel size	9.0 μm × 9.0 μm
Camera control and output	-Frame rate ≥30 frames / sec, maximum -Control settings Free run : Triggered exposure, Triggered double exposure -Control interface via Serial, RS-232, or RS-422
Camera body	-Lens mount C-mount, F-mount

2.4 추적입자

PIV 측정기법은 속도의 기본 차원인 길이와 시간을 바로 구하여 유체의 속도 대신에 입자의 속도를 측정하는 간접적인 측정 기법이다. 따라서, 유체와 입자 운동사이의 차이를 최소화하거나 없애기 위해서는 추적입자의 유체역학적 특성을 점검하여야 한다. 일반적으로 추적입자는 가시성이 좋아야 하고, 입자와 유체사이의 미끄럼이 적어야 하며, 입자가 부력의 영향을 받지 않아야 한다. 추적입자를 사용한 PIV 속도장 측정에 있어서 지배적 오차 요인은 유체밀도 ρ 와 추적입자 밀도 ρ_p 가 일치하지 않을 때 발생하는 중력에 의한 힘을 들 수 있다. 실제로 입자의 운동을 예측하기 위하여 중력에 기인한 속도 U_g 는 Stokes drag law로부터 유도할 수 있다. 즉, 아주 낮은 레이놀즈 수에서 점성유체 내에 놓여 있는 구형입자를 고려했을 때 U_g 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_g = d^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} g \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, μ 는 유체의 동점성 계수, 그리고 d_p 는 입자의 직경을 나타낸다. 위 식과 마찬가지로 계속적으로 가속되는 유체에서 입자의 속도 감쇄(lag) U_s 는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$U_s = U_p - U = d^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} a \quad (2)$$

여기서 U_p 는 입자속도를 나타낸다. 만약 입자밀도가 유체밀도보다 큰 경우, U_p 의 step response는 일반적으로는 다음과 같은 지수법칙을 따른다.

$$U_p(t) = U[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_s})] \quad (3)$$

여기서, 완화시간(relaxation time) τ_s 는 다음과 같이 주어지며,

$$\tau_s = d^2 \frac{\rho_p}{18\mu} \quad (4)$$

유체와의 속도 평형을 얻기 위한 입자의 경향을 재는 척도로서 사용되어진다.

3. PIV의 데이터 처리기법

3. 1 신호처리

입자영상에서 얻어지는 영상정보는 2차원 평면에서의 입자 위치와 각 픽셀에서의 밝기(gray level)값이며, 이러한 영상정보를 이용하여 입자영상으로부터 속도벡터를 추출하는 일련의 과정이 신호처리이다. 입자 영상을 이용한 속도장 측정기법에는 일반적으로 개별입자를 추적하는 방법(PTV)과 입자군의 농도 및 밝기분포에 대한 상관관계로부터 속도벡터를 구하는 신호처리 방법(PIV)이 주로 사용되고 있다. PIV 방식에서는 빛의 밝기 분포로 되어있는 입자영상으로부터 입자들의 변위벡터를 추출하기 위해서 자기상관법(auto-correlation) 또는 상호상관법(cross-correlation)을 사용한다. 상관함수를 구하는 방법에는 상관관계를 수치적으로 구하는 직접적인 방법과 광학 또는 power 스펙트럼을 이용한 간접적인 방법이 있다.

3. 2 PIV 평가 기법

가장 많이 사용되고 있는 PIV방법 중의 하나는 이중프레임, 상호상관법(single exposure / double frame, cross-correlation)을 이용한 digital PIV 속도측정기법이다. Digital PIV 속도장 측정을 위한 입자영상은 매우 좁은 폭을 가진 필스형태의 조명을 이용하여 입자영상에 streak가 형성되지 않게 하고, 충분한 입자 쌍이 분포되도록 2개의 입자영상사이의 시간간격(Δt)을 조절하여야 한다. 특히 입자 쌍의 거동이 직선 등속도로 이

동한다고 가정할 수 있도록 시간간격이 충분히 짧아야 한다. 왜냐하면 두 장의 입자영상을 취득하는 시간사이에 있었던 입자의 곡선운동 정보는 잃어버리게 되기 때문이다. 따라서 하나의 입자 쌍으로부터 가속도 정보는 얻을 수 없다.

입자변위벡터 분석은 각각의 입자영상을 여러 개의 작은 element로 나눈 미소조사구간 단위로 행하여진다. 신호처리 관점에서 보면, 두 개의 입자영상 중 처음의 것을 시스템의 입력이라 가정하고, 두 번째 입자영상을 출력이라고 가정할 수 있다. 이 때 시스템의 전달함수를 H 라고 하면, 이는 입력영상 I 를 출력 영상 I' 으로 변환시키며, 변위함수(d)와 부가적인 noise(N)으로 구성된다. 구하고자 하는 변수는 변위함수 d 가 되고, N 은 영상기록시 생성된 noise나, 입자의 3차원적 유동에 기인한 noise 성분이다. 이와 같은 시스템에서 입자영상 I 와 I' 을 이용해 변위함수 d 를 구하기 위해 식(5)와 같은 이산 상호상관함수를 이용하게 되는데, 통계적 관점에서 국부적으로 가장 잘 match되는 입자영상 부분을 찾게 된다.

$$R_{II'}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-K}^K I(i, j)I'(i+x, j+y) \quad (5)$$

식(5)에서 변수 I 와 I' 은 입자영상에서 추출된 sample, 즉 빛의 강도이며, I' 은 I 보다 큰 면적을 갖는다. 기본적으로, I 는 I' 의 구간 내에서 이동하며, 상호상관함수 $R_{II'}(x, y)$ 는 중복되는 각 픽셀에 해당하는 빛의 강도 I 와 I' 의 곱의 합을 계산하는 것이다. 즉, 상호상관함수 $R_{II'}$ 는 주어진 x, y 위치에서 두 개의 조사구간이 일치하는 정도를 계산하는 것이며, 상관 평면에서 상호상관계수가 가장 큰 값을 가지는 위치까지의 거리를 미소 조사 구간에서의 입자 이동변위로 판단한다. 상호상관법은 선형이동을 전제조건으로 하며, 미소 조사구간의 크기가 커질수록 계산하여야 하는 곱셈의 수가 증가한다. 그리고 회전이나 변형은 이와 같은 1차함수 방법으로 분석되지 않으며, 입자들이 선형이동한 평균거리는 미소 조사구간을 벗어날 수 없다. 조사구간의 크기는 변위구배와 같은 2차효과를 무시할 수 있을 정도로 작게 선택되어야 한다.

상호상관함수를 직접적으로 계산하지 않고 operation count를 줄이기 위하여 두 함수의 상호상관 함수값은 이들 함수의 Fourier 변환들의 공액복소수의 곱과 같다는 식 (6)의 상관법칙을 이용한다. 여기서 I 와 I' 위의 상첨자 기호 \wedge 는 Fourier 변환을 의미하며, $*$ 는 복소수 conjugate를 나타낸다.

$$R_{II'} \Leftrightarrow \wedge_I \cdot \wedge_{I'}^* \quad (6)$$

이 식과 함께 Fast Fourier Transform(FFT)의 적용으로 Fourier 변환을 효과적으로 수행할 수 있으며, 그 결과로 식 (5)에서 N^2 order인 operation count가 $N \log_2 N$ order로 줄어들게 된다.

이 방법은 2차원적인 직접적인 계산 대신에, 같은 크기의 조사구간에 대해 수행한 2번의 2차원 FFT에 의해 구해진 Fourier 계수의 complex-conjugate를 곱한 후, 이 결과를 다시 inverse Fourier 변환하여, 구하고자 하는 $N \times N$ 크기의 상호상관 평면을

구하는 것이다. 계산횟수를 비교하면 N^4 의 order에서 $N2\log 2N$ 으로 줄어든다. Fourier 변환의 특성인 실수 항들의 대칭관계, 그리고 허수 항들은 서로 conjugate관계라는 특성을 이용하여 상관함수분석을 효율적으로 수행하여 계산시간을 크게 줄일 수 있다. Double frame/single exposure, cross correlation은 시간 t 에서의 입자영상과 $t+\Delta t$ 에서의 입자영상을 각각 다른 프레임에 취득하는 경우에 적용하는 상호상관법 방식의 속도추출 과정으로서 각각의 입자영상에서 정의된 미소 조사 구간을 이용하여 상호상관함수를 계산하게 되며, 대부분의 경우 FFT 알고리즘을 이용하여 계산하게 된다. 역 Fourier 변환 이후 하나의 최대상관값만 나타나므로 유동방향의 모호성이 없다는 장점을 가지고 있다(Lee, 2002).

3. 3 에러 벡터 분석

PIV 기법을 이용하여 유동의 속도장을 측정하고자 할 때, 다수의 입자영상을 취득하여 분석하게 되며, 또한 난류유동 실험 시 난류통계치를 구하기 위해 취득하는 입자영상의 양은 수십 기가바이트에 이른다. 일반적으로 PIV 데이터의 후처리과정은 error 벡터제거, 제거된 오류벡터 자리에 새로운 속도벡터 삽입, 그리고 속도벡터의 smoothing으로 이루어진다. 입자영상으로부터 상관방식 PIV를 이용하여 얻은 속도 벡터장은 대부분 에러 벡터를 가지고 있다. 그러나 많은 양의 데이터를 수작업을 통해 오류속도 벡터를 제거하는 것은 비효율적이며, 주관적인 요소가 포함될 수 있으므로, 일정한 기준을 가진 알고리즘을 통해 자동적으로 오류속도벡터를 제거하는 과정이 필요하다. 오류속도벡터는 주위의 올바른 속도벡터들과 비교할 때 그 크기 및 방향이 크게 다르며, 대부분의 경우 이러한 오류속도 벡터가 여러개 존재한다. 이러한 오류속도벡터는 상관함수 계산과정에서 입자변위가 아닌 다른 요인으로 생긴 최대상관값에 기인하여 나타난다. 그 요인으로는 입자영상의 noise, 쌍을 이루지 못한 입자, 그리고 실험장치로부터 생긴 빛의 난반사 등이 있다. 오류속도벡터들은 난류특성치들을 통계처리하기 이전에 완전히 제거되어야 하며, 오류속도벡터와 실제 속도벡터 사이에 구별이 불분명한 경우에도 해당 벡터를 제거시킨다.

오류속도벡터가 남아있는 경우, 속도벡터가 추출되지 못한 점들에 대한 보간과정이나 와도장 등의 계산에 미분함수를 적용할 때 오류속도벡터 주변의 올바른 벡터들에 큰 영향을 주게 된다. PIV 데이터 검증 과정에 쓰이는 알고리즘은 여러 가지가 있으며, 유동 또는 실험장치에 따라 적합한 알고리즘을 선택하여 사용하여야 한다. 대표적인 알고리즘으로는 global histogram operator 와 dynamic mean value operator 등이 있다. 본 실험에서 사용하는 Dynamic mean value operator는 분석하고자 하는 속도벡터의 크기($|U_{2D}(i, j)|$)와, 가장 가까운 주변 속도벡터들의 평균크기($\mu_n(i, j)$)를 비교하여 오류속도벡터 여부를 판단한다. 대부분의 경우 3×3 matrix 형태로 가장 가까운 8개의 속도벡터를 선택하며, 주변 속도벡터들의 평균값과 비교하여 그 차이의 절대값이 일정 threshold값 ϵ 이상이 되면 해당 속도벡터를 오류속도벡터로 처리한다. 이 방식은 속도벡터의 U, V성분에 대해 동일하게 적용할 수 있으며, 넓은 영역의 주변 속도벡터를 선택할 수 있다.

이 방법의 단점으로 급격한 유동구조 변화로 불연속점이 존

재하는 유동에는 적용할 수 없다. 왜냐하면 주변 속도벡터들과의 비교를 통해, 실제 입자변위벡터가 오류벡터로 판별되어 제거될 가능성이 있기 때문이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 식(7)처럼 기준 threshold인 ϵ 값을 국부적으로 변화시키면서 적용하는 방법도 있다.

$$|\mu_U(i, j) - U_{2D}(i, j)| < \epsilon_{thresh}$$

$$\epsilon_{thresh} = C_1 + C_2 \sigma_U(i, j) \quad \text{where} \quad (7)$$

여기서 C_1, C_2 는 상수이며,

$$\sigma_U^2(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\mu_U(i, j) - U_{2D}(n))^2 \text{이다.}$$

원시 속도벡터장에 대해서 error vector해석으로 모든 오류 속도벡터가 제거되면, 제거된 벡터들의 위치에 새로운 속도벡터값을 대체 삽입하게 되며, 대부분의 경우 weighting function을 이용한 Gaussian 또는 bilinear interpolation을 통해 보간이 이루어진다. 또한, 실험데이터는 수치해석 데이터와는 달리 noise가 존재하므로, 어느 정도의 smoothing을 필요로 한다. 보통의 경우 3×3 , 또는 5×5 크기의 smoothing kernel을 사용하게 된다(Lee, 2002).

4. 회류수조에서의 PIV실험방법 및 유속분포 측정

4. 1 회류수조에서의 PIV 실험장치 및 방법

회류수조 및 PIV 실험장치의 개략도는 Fig 1에 보여주고 있으며, 관측부의 크기는 길이 3m, 높이 0.8m, 폭 1m이다. PIV 시스템장치는 CCD Camera, Dual Nd:YAG Laser, Cylindrical lens와 Spherical lens, Mirror, Synchronizer, 추적입자(particle) 등으로 구성되어 있다.

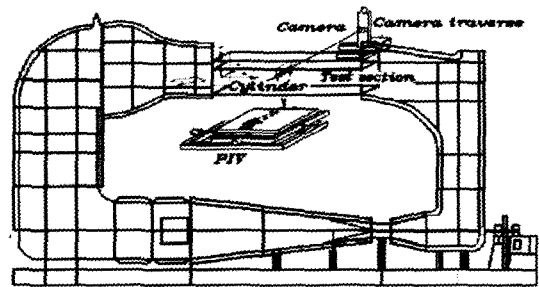


Fig. 1 Circulating water channel and PIV system

렌즈의 조합에 의한 두께 1mm정도로 생성된 빛은 laser sheet로 변환되어 Mirror를 통과하여 관측영역의 단면에 투사하도록 조절하였다. 추적입자는 $40\mu\text{m}$ 의 silver coated hollow glass spheres를 사용하였고, 실험에 사용된 CCD camera와 Nd:YAG Laser는 2축 이송장치에 의하여 움직일 수 있도록 만들어졌다. 레이저의 펄스 간격은 측정 가능한 속도 범위를 제한하는 중요한 인자 중 하나이므로 유동장의 속도를 고려하여 결정하였다. CCD camera에 의하여 짧은 시간 간격을 두고 얻

어진 두 장의 1008×1018 Pixels 크기의 영상은 image sharpening의 상호 상관법을 적용한 pre-processing, peak search algorithm은 Gaussian interpolation을 사용하였고, 상관 영역의 크기는 64×64 pixels, 50% overlapping하여 2704개의 벡터를 구하였다. 여러 벡터를 처리 방법으로는 일정한 기준을 가진 알고리즘을 사용하여 에러벡터를 제거, 제거된 오류벡터 자리에 새로운 속도벡터 삽입, 그리고 속도벡터의 smooth처리를 하는 프로그램을 사용하여 에러 벡터를 처리하였다.

위에서 언급한 3단계의 처리과정을 통한 결과값으로서 평균 속도를 나타낸 벡터과일, 난류강도, 난류운동에너지, 와도분포를 포함하고 있는 데이터파일이 생성된다. 생성된 벡터 및 데이터 파일은 그래픽화하여 나타낼 수 있는 Tecplot 및 다양한 프로그램과 호환이 가능하므로, Tecplot을 이용한 속도벡터 분포 및 와도 분포등을 그려 낼 수 있다.

4.2 회류수조 내의 유속 분포 결과

Fig. 2에서는 유동장의 분포를 벡터로 표시한 결과로서 에러 벡터 처리 전과 후의 결과를 비교하여 제시함으로써 적당한 에러 벡터를 처리해야 한다는 것을 알 수가 있다. 추적 입자의 크기, 카메라의 Focusing, Time delay도 입자의 뚜렷한 영상을 얻는데 상당히 중요 인자로 작용하므로 잘 판단하여야 한다. 특히 Time delay가 맞지 않는 경우 영상이 제대로 안 찍히는 경우가 많으므로, 동기장치의 Q-switch와 Flash lamp를 교대로 하나씩 분리한 후 확인하여 카메라에 두 장의 영상이 Δt의 시간 간격을 두고 들어오는지 체크하여 실험조건에 맞추어야 한다.

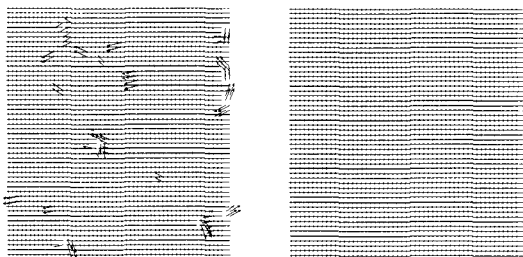


Fig. 2 Error vector pre-processing and post-processing

Fig. 3에서는 회류수조 내에서 임의의 특정단면에서 길이 방향의 유동 분포가 균일한지 알아보기 위하여 유동장의 분포를 결과 제시하였는데, 그 결과를 분석하면 당연한 결과이겠지만 대체적으로 균일 속도벡터임을 나타내 보여주고 있다.

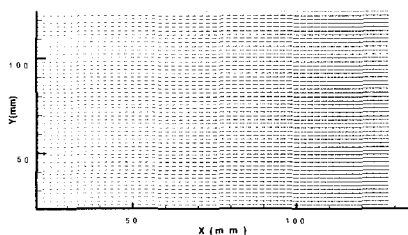


Fig. 3 Uniform flow

회류수조 내 속도의 균일성을 알아보기 위해서 관측부의 시작점으로부터 1.8m 떨어진 지점에서 자유표면으로부터 깊이 방향 80mm~200mm 유동장을 측정하여 길이 방향에 따른 속도 분포를 속도 별로 자유표면 가속기(S.F.A)를 사용한 경우와 사용하지 않을 경우로 나누어 Fig. 4 ~ Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 여기서 그림을 살펴보면 길이방향에 따른 속도분포를 비교해 보면 비교적 균일한 분포를 나타내고 있으며, 깊이 방향에 따른 속도 분포는 자유표면으로부터 깊이질수록 속도가 감소하고 있다는 것을 볼 수가 있다.

Fig. 8 ~ Fig. 9에는 길이방향 임의의 한점(X=100mm)에서 각각의 평균속도마다 깊이 방향에 따른 속도 분포를 나타내었는데, 자유표면으로부터 깊이가 증가할수록 속도가 감소하는 분포를 볼 수가 있었다. 또한 자유 표면 가속기의 영향을 알아보기 위해서 자유표면 가속기(Surface flow accelerator)를 사용했을 때와 사용하지 않았을 때 깊이 방향에 따른 값을 비교 제시하였다. 평균 속도가 저속에서 고속으로 갈수록 자유표면 가속기의 별다른 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 회류수조 내 계측부에서 각 RPM에 따른 100mm or 150mm 깊이에서의 유속을 보여주는 곡선들이다(김영수, 2001). Fig. 8 ~ Fig. 10의 값을 비교하면 유속계로 측정 한 속도와 PIV를 사용한 속도 분포의 차이를 알 수가 있는데, 그 값의 차이는 대체적으로 약 5~10%의 범위 내에 들어감을 볼 수가 있다.

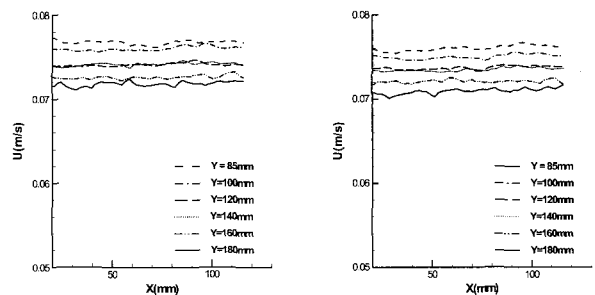


Fig. 4 Velocity distributions in lengthwise direction in CWC (U=0.071m/s without S.F.A, U=0.071m/s with S.F.A)

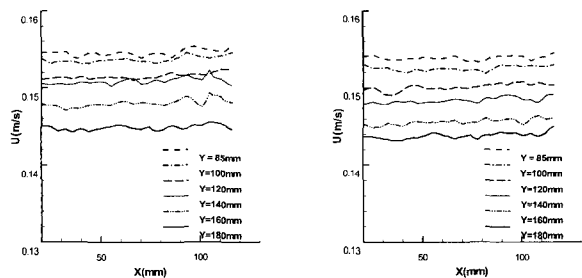


Fig. 5 Velocity distributions in lengthwise direction in CWC (U=0.142m/s without S.F.A, U=0.142m/s with S.F.A)

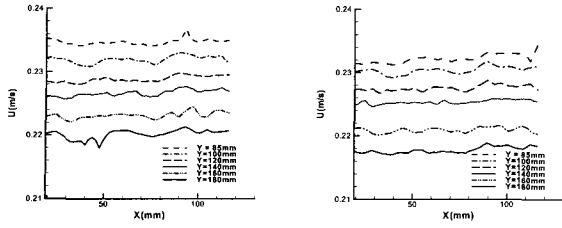


Fig. 6 Velocity distributions in lengthwise direction in CWC ($U=0.213\text{m/s}$ without S.F.A, $U=0.213\text{m/s}$ with S.F.A)

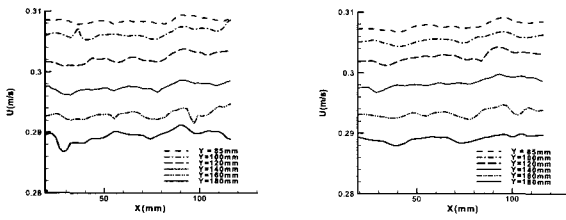


Fig. 7 Velocity distributions in lengthwise direction in CWC ($U=0.284\text{m/s}$ without S.F.A, $U=0.284\text{m/s}$ with S.F.A)

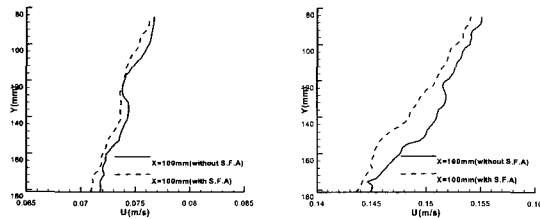


Fig. 8 Velocity distributions in lengthwise direction in CWC ($U=0.071\text{m/s}$, $U=0.142\text{m/s}$)

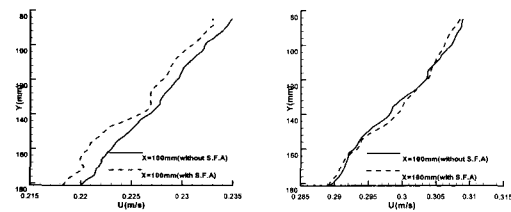


Fig. 9 Velocity distributions in depthwise direction in CWC ($U=0.213\text{m/s}$, $U=0.284\text{m/s}$)

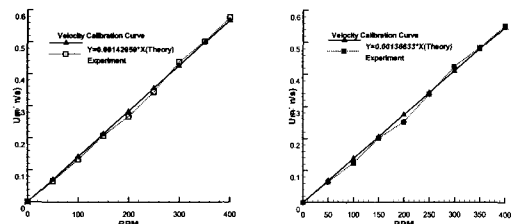


Fig. 10 Velocity - RPM calibration curve (Depth = 100mm, 150mm)

4.3 원형실린더 주위의 유속 분포

원형 실린더 주위의 유동을 계측하기 위하여 먼저 회류수조 내의 속도를 계측하였고, 그 결과 길이방향의 속도 분포는 비교적 균일하며 그 정확도가 비교적 뛰어난 기초실험의 검증 결과로 제시하였다. 회류수조 관측부의 시작점으로부터 1.8m 떨어진 지점에 직경(D)이 50mm인 아크릴 원형실린더를 설치하여 주위의 유동 분포를 관찰하고자 하였다. 길이방향으로는 원형 실린더의 중심이 자유표면으로부터 100, 120, 160mm되는 떨어진 지점에 설치하여 그 주위의 유동 분포의 결과를 제시하고자 하였다. Laser sheet는 실린더에서 떨어져 나가는 vortex를 관찰하기 위하여 실린더 후류의 15cm×15cm정도를 조사하도록 조절하였다(현범수 등, 1998). 앞에서 언급한 실험 조건을 통하여 유동 분포를 속도벡터 분포와 와도 분포로 나타내고자 한다. Fig. 11 ~Fig. 16에 나타난 유동 분포는 자유표면으로부터 깊이(S)와 직경(D)의 비가 2.0, 2.4 3.2인 지점에서 유속의 크기를 바꿔가며 관찰한 순시 속도벡터 분포와 순시 와도장 분포를 나타내었다. 그 결과로서 Rn 수에 따른 영향을 살펴보면, 낮은 Rn 수에서 vortex의 위치는 실린더 후류 바로 근처에서 생성되고 위, 아래에 생기는 vortex가 대칭적으로 발생하는 모습을 볼 수가 있다. 하지만 Rn 수가 커짐에 따라서 Vortex가 비대칭적으로 형성되고 그 구조도 복잡해짐을 관찰할 수가 있었다. 또한, 원형 실린더의 잠수 깊이에 따른 영향을 살펴보면, S/D가 커짐에 따라 vortex 분포가 비대칭적으로 발생되고 그 위치도 달라짐을 또한 볼 수가 있었다. 실린더 윗부분에서는 빛의 난반사로 인해서 shadow zone이 형성되며 그 영역에서는 오류가 개입되어 에러 백터가 존재함을 알 수가 있다. 속도벡터로 나타낸 그림에는 여러 개의 vortex 분포를 한 화면에 보여주지 못하였는데, 그 이유는 CCD카메라 및 실험 장비들의 한계에 따른 작은 화상처리영역 때문일 것이다.

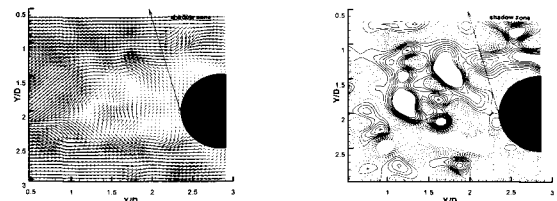


Fig. 11 Instantaneous velocity field and vorticity field at $S/D = 2.0$ ($Re=7500$)

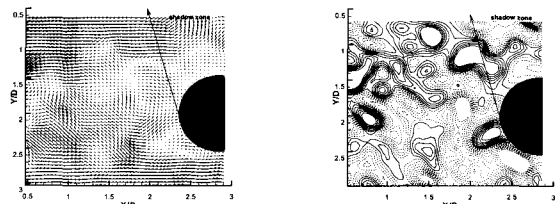


Fig. 12 Instantaneous velocity field and vorticity field at $S/D = 2.0$ ($Re=15100$)

5. 결 론

회류수조 내에서의 PIV를 사용한 2차원 물체 주위의 유동 현상을 해석하고자 할 때에는 앞에서 언급한 실험장비에 대한 기본적인 개념을 이해하여 그에 맞는 실험기법들을 충분히 숙지해야 할 것으로 판단된다. 또한 PIV장비를 사용해서 실험을 하고자 할 때에는 레이저간의 동기, 카메라의 Focusing, Time delay를 잘 맞추고 실험 조건에 맞는 추적입자를 seeding하여 좋은 입자영상을 얻을 수 있도록 해야 한다. 취득한 영상은 상호 상관법을 적용한 pre-processing, 에러벡터 제거, 새로운 대체 벡터 삽입, smoothing의 과정을 거친 에러 벡터 분석 과정, post-processing과정 등 각 단계를 거쳐서 데이터 값을 추출하여 분석하게 된다. 유동가시화 기법에 대한 기본적인 개념을 설명과 더불어 PIV를 사용한 회류수조 내의 유속 분포를 측정하여 나타내었다. 또한 PIV를 사용해서 측정된 유속 분포와 전자식 유속계로 측정된 유속 분포의 결과를 비교제시 하였다. PIV를 사용하여 2차원 원형 실린더 주위의 유동 분포를 확인 함으로서 PIV 실험기법을 확립하고자 하였다.

본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 회류수조 내의 임의단면에서의 유동장 분포를 해석한 결과 길이 방향의 유속 분포는 대체적으로 균일하게 형성되었으며, 전자식 유속계로 측정된 값과 비교하면 5~10% 정도의 오차 범위를 보였으며, 깊이방향에 따른 속도 분포의 차이는 자유표면으로부터 깊어질수록 점차 증가함을 볼 수가 있었다.
- (2) 2차원 원형 실린더 주위의 유동 분포의 측정 결과를 순시 속도 벡터로 나타내어 봄으로서 원형 실린더로부터 떨어져 나가는 Vortex street를 확인할 수 있었다.
- (3) 지금까지 본 연구에서 수행한 실험들을 통하여 회류수조에서의 PIV 실험기법을 확립할 수 있었으며, 앞으로 다른 다양한 분야에서의 응용도 기대할 수 있게 되었다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

김영수 (2000). 회류수조에서의 정량적인 계측에 관한 연구, 목포대학교 석사학위 논문
 현범수, 신용원, 최경신, 이영호 (1998). "PIV를 이용한 2차원 실린더 주위 유동해석", 대한조선학회 춘계학술대회논문집, pp 44-47.
 Lee, S.J. (2002). PIV Velocity Field Measurement Techniques and pplications, POSTECH, pp 7-186.

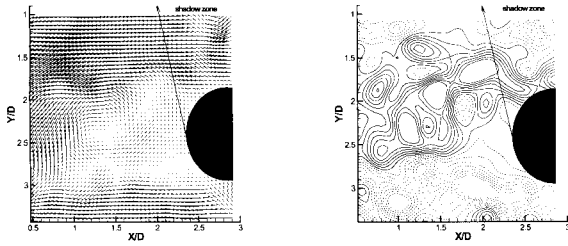


Fig. 13 Instantaneous velocity field and vorticity field at $S/D = 2.4(Re=7500)$

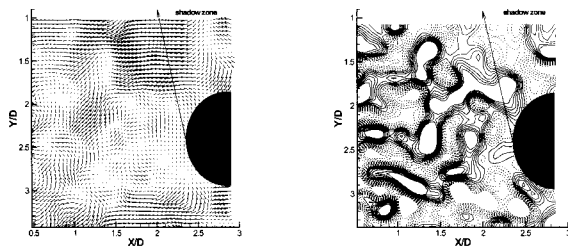


Fig. 14 Instantaneous velocity field and vorticity field at $S/D = 2.4(Re=15100)$

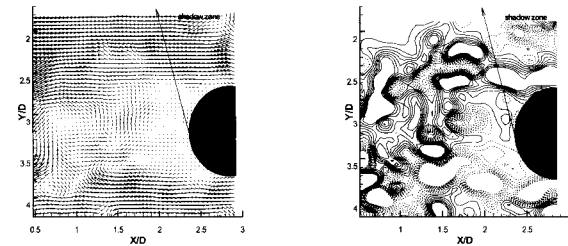


Fig. 15 Instantaneous velocity field and vorticity field at $S/D = 3.2(Re=7500)$

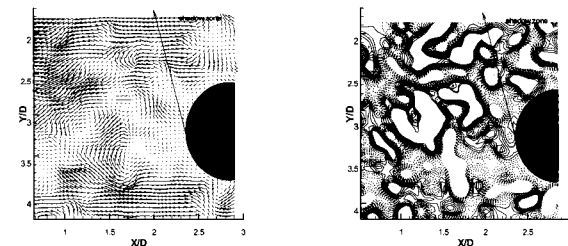


Fig. 16 Instantaneous velocity field and vorticity field at $S/D = 3.2(Re=15100)$

2004년 3월 15일 원고 접수
 2004년 5월 21일 최종 수정본 채택