

PIV에 의한 가정용 온수펌프의 유동장 계측

이현* · 임유청* · 김재현** · 이영호***

Measurement of Flow Field in a Domestic Hot-Water Pump by PIV

H. Lee, Y. C. Im, J. H. Kim and Y. H. Lee

Key Words : PIV(입자영상유속계), Image Intensifier Camera(영상강화 카메라), Visualization(가시 화), AOM(광음향 변조기), Hot-Water Pump(온수펌프)

ABSTRACT

The present experimental study is aimed to investigate the flow characteristics of the high-speed flow field within hot-water pump by PIV(Particle Image Velocimetry). As multi-point simultaneous velocity acquisition, 2-D PIV system based upon the two-frame gray-level cross correlation method is adopted using PC frame-grabber and simple video system. Gated image intensifier CCD Camera to cope with illumination problem is arranged for accurate PIV measurement of high-speed complex flow. The velocity vector distribution, velocity profile, and kinetic energy are represented quantitatively at the full-scale region for the deeper understanding of the unsteady flow characteristics in a pump.

1. 서 론

기계, 전기, 화학 등 여러산업의 급격한 발전은 소형, 고효율의 펌프를 요구하고 있으며 이를 만족시키기 위한 펌프의 최적설계 및 성능향상을 위하여 펌프내부의 유동을 가시화하는 것은 가장 기본적이라 할 수 있다.

원심펌프는 원동기에 의하여 회전되는 회전체의 원심작용으로 액체에 에너지를 변환 공급해 주어 높은 곳으로 양수하거나 먼 곳으로 수송하는 펌프로써 다른 종류의 펌프에 비하여 뛰어난 이점을 많이 가지고 있기 때문에 가장 널리 사용되고 있으며 용도도 다양하다. 이러한 원심펌프의 이상적인 설계가 이루어지지 않았을 때 여러 가지 물리적 현상으로 인하여 압력손실, 유동박리 등에 의한 운전장애, 소음, 진동 등을 발생할 수가 있다.

터보 기계의 최적화를 위해 전산유체역학은 효과적인 방법으로서 현재까지 많이 연구, 개발

* 한국해양대학교 대학원

** 귀뚜라미 정밀공업(주)

*** 한국해양대학교 기계·정보 공학부

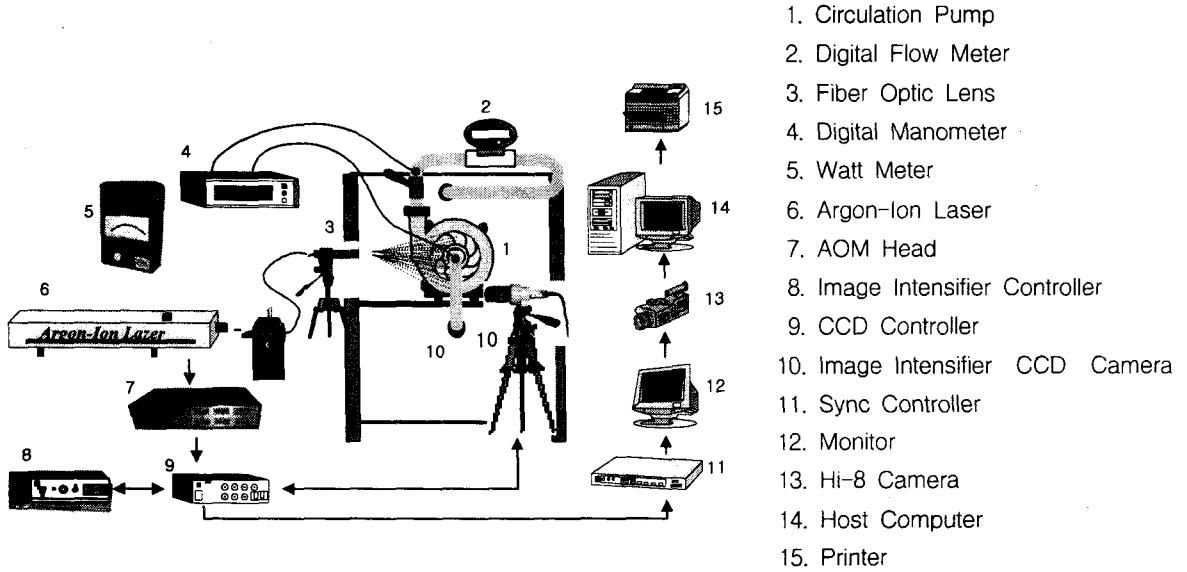


Fig.1 Schematic Arrangement of PIV System

되어 왔다. 그러나 임펠러에 의하여 고속회전을 하는 유체기계를 계산적인 결과만을 가지고 설계하는 것은 한계가 있으며 현장에서 실제로 운전하기 전에 실험을 통한 결과와 비교, 검토되어야 한다. 이러한 이유로 많은 연구자들이 유동장에 전혀 영향을 미치지 않고 임펠러의 특성에 제한을 받지 않는 광학적인 방법을 이용한 실험을 행하였다.

Hayami⁽¹⁾는 펌프수차의 내부유동에 계조차상호상관법을 적용하여 상대속도를 직접 계측하였으며 Xu⁽²⁾는 원심펌프의 임펠러에서의 절대속도와 상대속도를 실험을 통하여 분석하였다. Lee⁽³⁻⁴⁾는 지금까지 행해져 왔던 유체기계의 적용연구를 체계적으로 정리하여 PIV를 이용한 유동장 해석 연구의 경향을 언급하고 있으며, Im⁽⁵⁾은 PIV기법을 이용하여 고속회전하는 디퓨저 펌프의 내부 유동장을 가시화 하였다. 현재에는 고속도의 사진촬영 기술과 컴퓨터의 이미지 처리기술의 급속한 발달로 더불어 디지털영상처리기법을 이용한 PIV를 이용하여 각종 유체기계의 특성을 해석함으로써 정량적인 결과를 제시하고 있다.

현재까지 PIV에 의한 펌프내부의 유동장에 대한 연구는 펌프 내부의 국부적인 유동에 대한

해석에 머물러 왔으나 본 연구에서는 현재 널리 사용되고 있는 가정용 보일러 순환펌프의 실제 모델을 선택하여 80도의 고온상태에서 운전하는 고속유동장에 대응할수 있는 광학적 배치 및 시스템을 구축하여 케이싱 내부 전유동장의 계측을 행하였다. 펌프내부의 고속유동장의 계측을 위하여 비정상 유동장의 동시다점 계측이 가능한 PIV 시스템을 구축하여 형태가 다른 2개의 케이싱으로 동일한 조건하에서 각각의 경우에 대하여 실험을 실시하였고 이의 결과로 시간평균 벡터, 속도 프로파일, 운동 에너지 등을 나타내었다. 본 가시화 실험을 통하여 2가지 케이싱 내에서의 와류, 재순환 등에 의한 손실발생을 계측할수 있었으며, 이러한 결과를 토대로 하여 케이싱 내에서의 손실등을 줄이기 위한 펌프의 최적의 설계자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

그림1은 본 실험에서 채택한 실험장치의 구성도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 순환펌프는 일반 가정의 온수 보일러에 실제로 사용되고 있는 모델을 선정하였으며 가로, 세로, 높이가

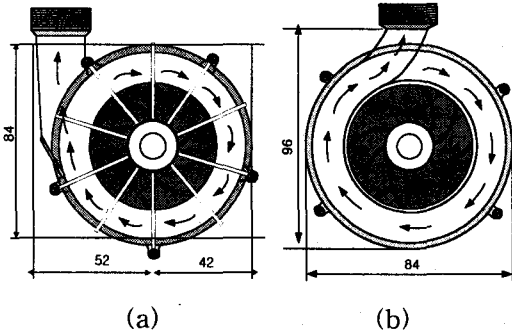


Fig. 2 Definition of Measuring Region



Photo 1 View of Experimental Equipment

각각 300mm×400mm×390mm의 크기를 가지는 저탕식 보일러에 설치하여 80도의 물을 순환하였다. 실험에 사용된 펌프는 전영역이 가시화될 수 있도록 폴리카보네이트로 제작하였으며 펌프운전시 압력을 측정하기 위하여 입·출구관에 각각 1개의 정압탭을 설치하여 디지털 차압계에 연결하여 압력을 측정하였고 펌프의 출구에 벨브와 유량계를 설치하여 유량을 제어하였다. 펌프의 최대 유량은 35 l/min이며 펌프에 쓰이는 모터는 부하에 따라 회전수가 변화하는 가변모터를 사용하고 있다.

그림2는 실험에 사용된 펌프의 구조 및 계측 영역의 크기와 위치를 나타내고 있다. 그림2의 (a)는 기존의 보일러에 사용되고 있는 가스보일러용 펌프이고 (b)는 INLINE 펌프를 나타내고 있다. 본 실험에서는 흡입배관의 구조상 문제로 흡입부분을 중심으로 하여 좌·우측을 각각 그림에서와 같이 두부분으로 구분하여 계측을 실

Table 1 Experimental Condition

	Item	Specification
Visualization Equipment	Image Board	DT3155 (640×480pixel)
	Light Source	5W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	Fiber Optic Lens
Image Processing	Host Computer	Pentium PC(CPU speed:500MHz)
	Calculation Time	0.3min/frame
	Identification	Two-frame Gray-level Cross Correlation Algorithm
	Ratio of Error Vector	Under 1.5%/frame Average:0.4

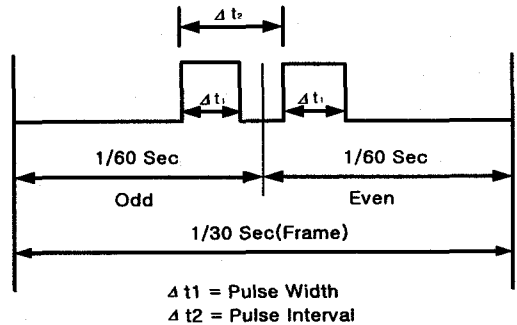


Fig.3 Video Signal and Pulse Arrangement

시하고 계측한 데이터 값을 이용해 후처리 과정에서 합성하는 과정을 거쳤다. 그리고 유체의 박리에 의해 재순환이 발생하는 펌프의 선단부에 대해서는 별도로 계측하여 유동을 해석하였다.

PIV 실험에서 영상처리를 위해서는 계측단면으로의 적당한 조명의 공급과 입자의 선별이 매우 중요하다. 본 실험에서는 광원으로서는 최대 5W 출력의 수냉식 Argon-Ion 레이저가 사용되었으며, 여기에서 나온 직진광은 5m의 Fiber Optic Line을 거쳐서 실린드릭 렌즈로 유도되어 두께 2mm정도의 sheet light가 얻어진다. 입자로서는 직경 120μm 전후의 추종성이 우수하고 비중이 1.02전후로서 물과 비슷한 PVC 백색 구형입자를 선별하고 정전기를 방지하기 위하여 계면 활성제를 소량 혼합한 다음 유동장이 충분히

히 발달하면 계측직전에 저탕식 보일러에 주입한다. 사진 1은 실제의 PIV 실험 장치를 보여주고 있다. 사진에서와 같이 저탕식 보일러의 양면에 펌프를 설치하여 동일조건하에서 실험이 이루어질 수 있도록 하였다. 실험장치 및 영상 획득을 위한 이미지 처리의 제반 실험조건은 Table1에 나타내고 있다. 그림3은 비디오 방식의 영상기록 장치에서의 영상구분과 펄스조명과 관계도를 보여주고 있다. NTSC방식의 TV주사에서 1초간의 영상은 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있고 1프레임은 1/60 초의 시간간격을 갖는 짝수피일드와 홀수피일드의 화면으로 구성되어 있다. 피일드축적에 의해서 설정된 펄스간격 동안 AOM에 의해서 단속된 조명으로 Image Intensifier 카메라에 촬영된 영상은 1/60 초의 시간간격을 갖는 홀수피일드와 짝수피일드에 각각 입력된다.

본 실험에서는 두가지 실험의 경우에 대해서 펄스간격은 짝수피일드와 홀수피일드의 미소시간동안의 이동한 거리를 8~10pixel전후가 될 수 있도록 AOM의 펄스간격을 200 μ s로 설정하였다. 유동장의 최적의 펄스폭을 결정하기 위해서는 원시영상에서의 유효입자의 밀도 및 크기를 토대로 하여 검토되어야 하며 본 실험에서는 펄스폭을 120 μ s로 설정하였으며 각각의 실험에 대하여 영상강화 카메라의 gain과 레이저의 출력을 가장 적절하게 선택하여 최적의 영상을 획득할 수 있도록 하였다.

영상강화 카메라로 촬영된 영상은 Hi-8mm 캠코더에 기록되고 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 영상처리장치에 입력된다. 영상처리장치로는 이미지 그래버(DT3155, 640 \times 480 pixel, B&W)를 CPU(500MHz)의 호스트 컴퓨터에 내장하여 사용하였다. 이 연구에서 사용된 DT3155보드는 영상저장장치로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 2차원의 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작

은 전용의 처리 소프트웨어 (CACTUS 2000)를 이용하였다.

3. 영상처리

이미지 보드로부터 디지털 화상정보를 공급

받아 전처리과정으로 잡음제거, 회전보정 등을 거친다. 전처리과정이 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물 처리를 하여 계조치상호상관법⁽⁶⁾을 이용한 동일입자 확인을 위하여 탐색반경을 결정한 다음 유동장의 분위기에 따라 상관영역을 설정하였다.

전처리는 화상의 질을 개선하거나 화상을 특정한 한 목적에 알맞도록 변환시키는 등의 화상처리를 의미하는데 계조치의 공간분포를 정도 높게 구하기 위하여 300개의 원시영상의 계조치를 산술평균한 다음 실제로 처리하고자 하는 순간 유동장으로부터 감산하는 방법을 택하고 움직이지 않은 부분을 제거하는 배경영상제거에 의한 잡음처리를 하였다. 사진2는 가스 보일러용 펌프의 전처리에 의한 배경영상을 나타낸 것이다. 영상을 기록할 때에는 유동장과 카메라의 위치를 조정하여 수평을 유지하여야 하지만 대부분 카메라 축을 중심으로 약간의 회전각도를 갖게된다. 따라서 기록된 영상은 전체적으로 회전된 상태이므로 회전된 각도만큼 모든 픽셀좌표를 변환하여야 한다. 따라서 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선윤곽선을 이용하여 영상강화 카메라의 위치에 대한 회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치 상호상관법을 이용한 동일입자 확인을 실시하였다. 그림4는 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상의 계조치에 대하여 식(1)과 같은 상호상관계수를 이용하여 최대상관계수의 위치를 속도벡터의 종점 좌표로 정하는 방법의 원리를 보여주고 있다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_x} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n_x} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

단 f_i , g_i 는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하여 $\bar{\quad}$ 는 평균을 뜻한다. 계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 전 계측영역에서 속도벡터의 격자수는 40 \times 40이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은

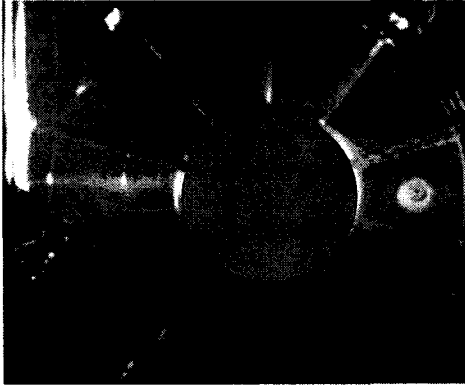


Photo 2 Background Image

8픽셀이다. 상관영역의 크기는 40~40픽셀이며 하나의 순간유동장에 대한 처리시간은 펜티엄기종(CPU 500MHz)에서 약 20~30초가 소요되었다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 파오백터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, pixel 단위를 m/sec 단위로 바꾸는 단위환산, 각각의 실험을 통해 얻은 데이터를 합치는 합성등을 실시하였다. 에러에 의한 이상치는 속도 발산치에 의한 검출방법으로 자동 에러처리를 한 후 대화형의 화면처리로 제거하였고 유효한 동일입자만으로 속도벡터를 구하였으며 제거된 백터는 주위이 값으로부터 보간하여 도하였다

4. 계측결과

80도의 고온에서 운전하는 두가지 순환펌프의 내부 유동장을 PIV계측을 실행하여서 얻은 결과를 그림5에서는 펌프내부 전체를 가시화한 속도분포를 나타내고 있다. 시간평균 속도벡터는 200개의 순간속도벡터를 각 격자점에서 산술 평균한 시간평균 속도벡터 및 시간평균 속도 분포, 운동에너지를 전반적인 속도패턴을 잘 파악할 수 있다. 상부의 속도는 대표속도를 나타내며 가스보일러용 펌프의 토출부 측에서 박리와 재순환이 현저히 나타나는 것을

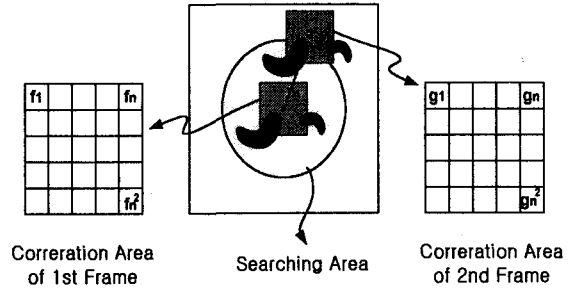


Fig.4 Diagram of Cross Correlation Method

발견할수 있다. 이에 반해 INLINE 펌프의 경우는 토출부에서 속도가 급속히 저하되고 보일러용 펌프와는 상당히 다른 유동 특성을 보이는데 이것은 INLINE 펌프의 경우는 그림2에서 같이 토출구가 곡면으로 제작되어 있기 때문에 계측단면을 달리해야 토출부에서 정확한 유동패턴을 관측할수 있다. 그림6은 펌프 내부 전체의 운동에너지 분포를 나타내고 있다. 그림7은 두가지 케이싱에 대하여 박리가 크게 일어나는 설단부에서의 계측영역을 나타내고 있다. 보일러용 펌프는 펌프전체를 관측할 때와 동일한 방법으로 실험을 실시했으나 INLINE 펌프의 경우는 곡선으로 유체가 토출되기 때문에 토출되는 부분과 수직되는 단면을 측정하였다. 그림8은 설단부에서의 속도분포를 나타내고 있다. 가스 보일러용 펌프의 경우는 출구측 모서리 부근에는 일종의 불연속점을 형성하면서 박리에 의한 와가 존재함을 나타내고 있으며 이로 인한 압력손실이 예상된다. 이 영역에서는 유체가 다시 케이싱으로 흘러 들어가는 재순환현상도 관찰되고 있다. 이에 반해 INLINE 펌프의 경우는 토출부에서는 와가 발생하지 않고 토출구를 벗어난 위치에서 박리에 의한 와가 발생함을 관찰할 수 있다. 위의 결과로 볼 때 INLINE 펌프의 경우 박리에 의한 손실이 가스 보일러용 펌프의 경우보다 압력손실이 적음을 관찰할 수가 있다. 그림9와 그림10은 두가지 케이싱의 X, Y축에 대해 토출부에서 5등분한 선상에서 속도 프로파일을 나타낸 것으로 각 선상에서의 유동특성을 잘 나타내고 있다.

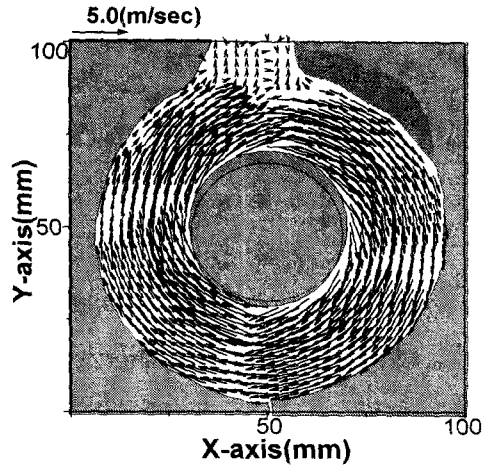
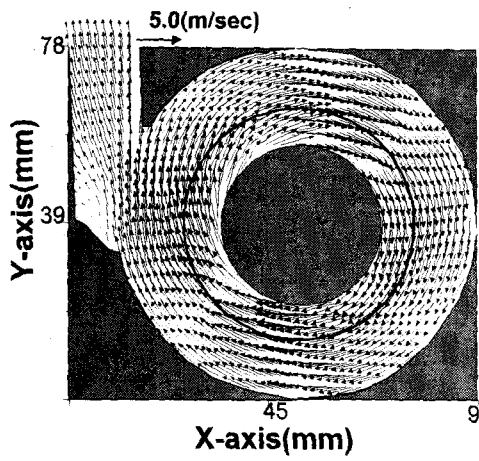


Fig.5 Time-mean Velocity Distribution

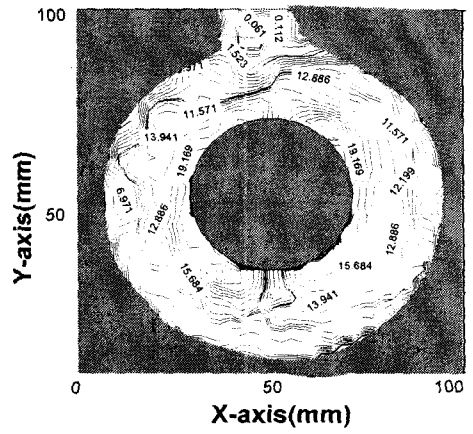
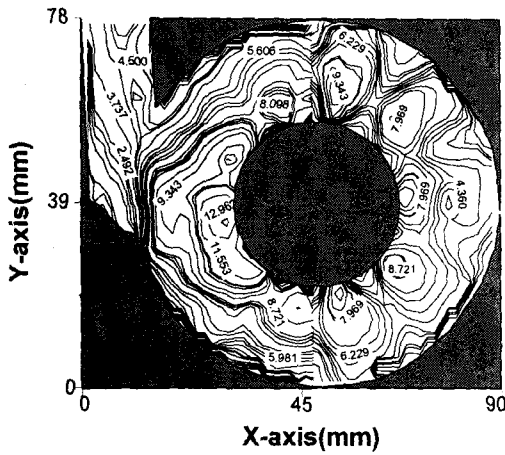


Fig.6 Time-mean Kinetic Energy

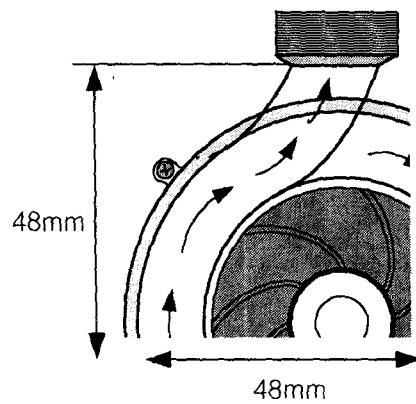
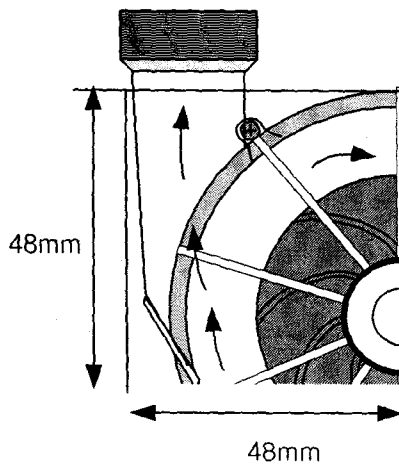


Fig.7 Measuring Region

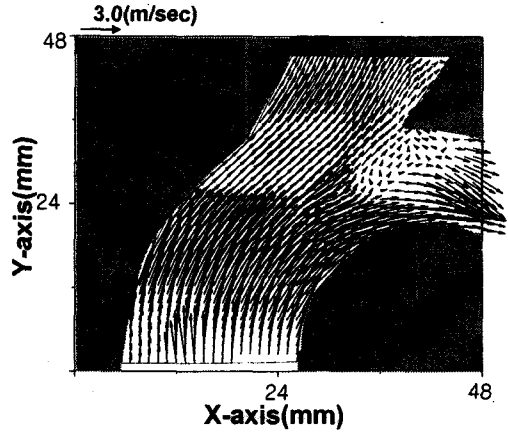
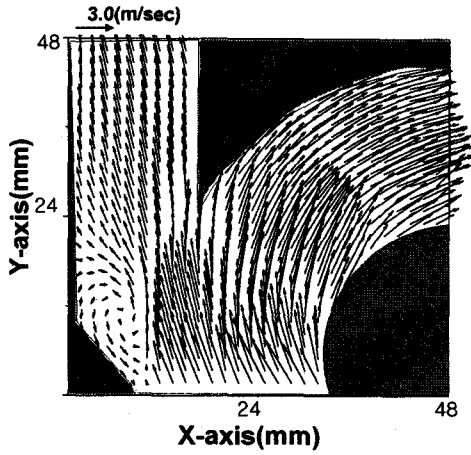


Fig.8 Time-mean Velocity Distribution

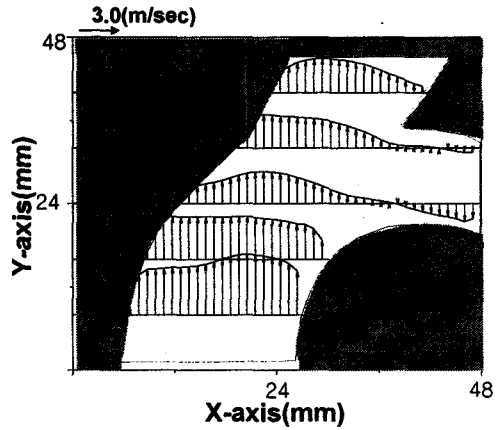
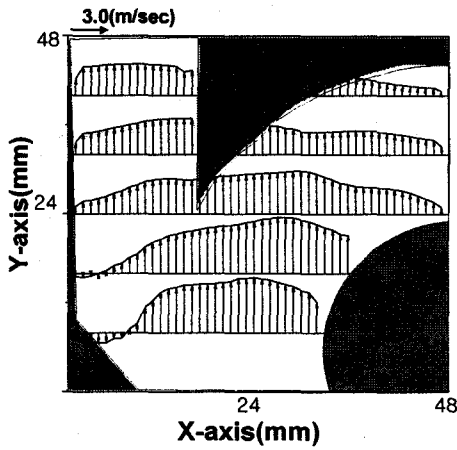


Fig.9 Time-mean Velocity Profiles

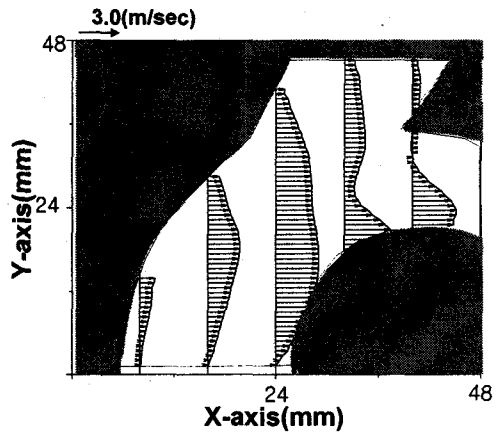
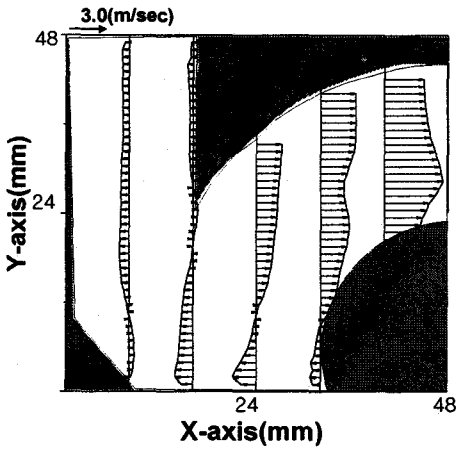


Fig.10 Time-mean Velocity Profiles

5. 결 론

이 연구에서는 임펠러의 고속회전운동을 동반하는 터보기계 내부유동장을 예측할 수 있는 PIV시스템을 구성하고자 하였으며, 이를 이용하여 보일러용 순환펌프의 케이싱 내부의 전 영역과 박리에 의한 와가 일어나는 토출부를 대상으로 속도벡터의 예측을 행하였다. 일반 가스보일러용 펌프와 INLINE 펌프 2가지의 경우에 대하여 순간 및 시간평균 속도 분포, 운동에너지를 정량적으로 구하였다. 본 연구는 향후 보일러계통의 순환펌프를 비롯한 냉온수 순환 및 승압용 펌프의 설계에 있어 기초자료로 사용될 수 있을 것이며 실제의 운전상황에서 발생하는 제반 특성을 포함한 보다 체계적인 연구를 수행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] H. Hayami, S. Aramaki and Y. Watanabe, Proc. of 2nd Int. Workshop on PIV-Fukui '97, pp.105 ~108, 1997.
- [2] Xu Hongyuan, Lu Darong, Jiao Chuanguo, Luo Xianwu, Li Qiwen, Proc. of the 3rd Int. Conference on Pumps and Fans, pp.296~303, 1998.
- [3] 이영호, 유체기계에 있어서의 PIV의 적용, 유체기계 연구개발협의회 연구발표회 논문집, pp.188~195, 1997.
- [4] 이영호, PIV의 분류 및 원리, 대한기계학회 지 제 36권 12호, pp.1146~1162, 1996.
- [5] 임유청, 서민식, 최민선, 이영호, 영상강회카메라를 이용한 디퓨저펌프 고속유동장의 PIV 예측, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집B, pp.135 ~140, 1999.
- [6] 이영호, 최장운, PIV에서의 계조치상호상관법 개발, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집2권, pp.396~400, 1996.

[1] H. Hayami, S. Aramaki and Y. Watanabe,