

PIV에 의한 가정용보일러용 순환펌프의 내부 유동장 계측

Measurement of Flow Field in a Domestic Boiler Circulation Pump by PIV

임유청 · 김재현 · 최민선 · 이영호

Y. C. Im, J. H. Kim, M. S. Choi and Y. H. Lee

Key Words : PIV(입자영상유속계), Circulation Pump(순환펌프), Impeller(임펠러), AOM(광음향 변조기), Velocity Distribution(속도분포)

Abstract : The purpose of the present experimental study is to apply multi-point simultaneous measurement by PIV(Particle Image Velocimetry) to high-speed flow region within a domestic boiler circulation pump. Two different kinds of flow rate(27 l/min, 19 l/min)are selected as experimental condition. A volute casing and impeller made of transparent Polycarbonate were made for the easy access of the illumination laser via fiber optical line and cylinder lens assembly to the measuring region. A CCD camera is synchronized with AOM to acquire clear original particle images. Optimized cross correlation identification to obtain velocity vectors is implemented by direct calculation of correlation coefficients. The instantaneous and time-mean velocity 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 commercial circulation pump.

1. 서 론

유체역학에 관련된 기계나 기기의 설계 또는 성능향상을 위한 제반 과정에서 가장 기본적인 것은 유동장의 거동을 파악하는 일이며 각종 터보기계의 설계에 있어서도 이 점이 해결되어야 한다. 원심펌프는 주로 원심력의 작용에 의하여 작동유체의 압력을 상승시키는 것으로서 유체가 임펠러와 와류실을 통과하는 동안 회전운동에너지가 정압에너지로 바뀌게 된다. 원심펌프의 최적설계를 위해서는 제반 설계법에 대하여 이론적인 것으로부터 경험적인 것까지 여러 가지 사항이 요구되며, 원심펌프의 성능을 극대화 하기 위하여 각 구성요소들의 용의주도한 설계과정이 매우 중요하다. 원심펌프내부의 내부유동에서는 여러 가지 유동 현상으로 인하여 유동박리나 마찰과 같은 비정상 유체력

에 의한 압력손실, 소음 진동이 발생할 수가 있다.

최근에는 수치해석적 방법에 의하여 펌프 내부의 복잡한 유동장 해석을 행하거나, 손실예측을 위하여 이론적인 성능해석 방법이 개발되고 있으나 임펠러의 고속회전을 동반하는 유체기계의 설계에 직접 적용하는데 있어서는 여러 가지 한계점을 지니며 실험적인 접근기법이 보다 정량적인 결과를 제시하는 경우가 많다. 이러한 배경으로부터 최근에는 컴퓨터를 비롯한 관련 하드웨어의 비약적인 발전과 더불어 급속히 발전하고 있는 디지털 영상처리기법을 이용한 PIV를 터보기계 내부유동 계측에 적용한 연구¹⁾³⁾가 행하여지고 있다. 그러나 이들은 속도장을 포함한 제반 유체역학적 해석의 관점에서 상세히 논하고 있지만 계측영역은 내부 유동장 일부분에 국한되었다. 본 연구에서는 현재 시판되고 있는 가정용 보일러 순환펌프의 실제모델을 선정하여 고속유동장에 대응할수 있는 광학적 배치 및 시스템을 구축하여 케이싱 내부 전유동장의 계측을 행하고자 하였다.

이를 위한 계측기법으로서 비정상 유동장에 대하여 동시다점으로 속도계측이 가능한 PIV시스

접수일 : 1999년 6월 12일
임유청 : 한국해양대학교 대학원
김재현 : 귀뚜라미정밀공업(주)
최민선 : 목포해양대학교 기관공학부
이영호 : 한국해양대학교 기계공학부

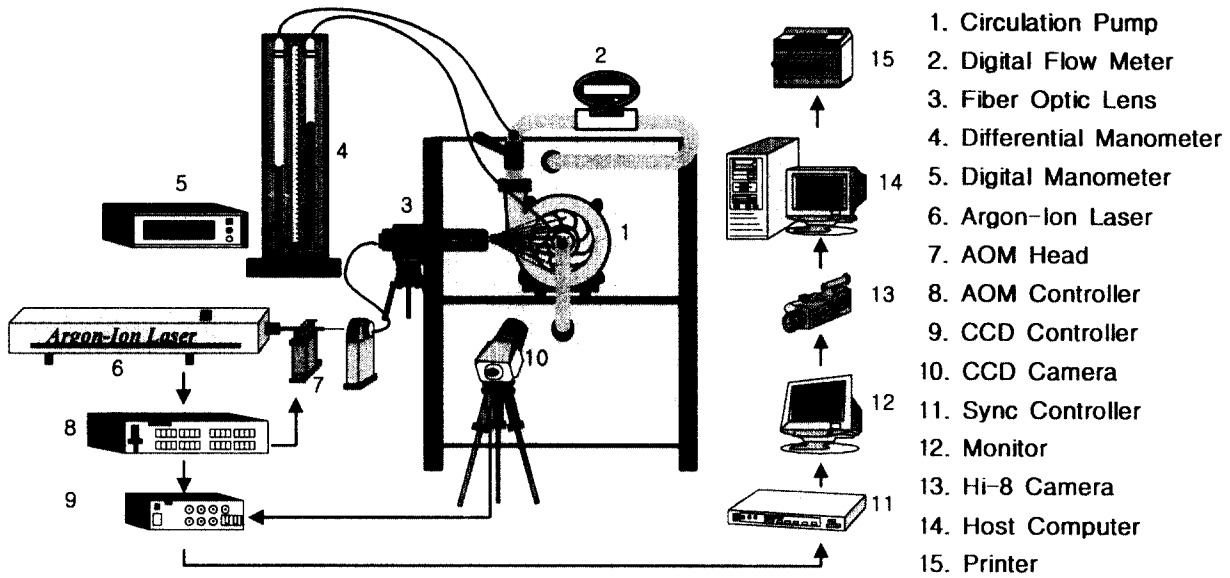


Fig. 1 Schematic arrangement of PIV system

템^{4,6)}을 적용하여 계측영역내에서 유량변화에 따른 순간 및 시간평균 속도벡터, 운동에너지 등을 정량적으로 도시하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 채택한 실험장치의 구성도이다. 실험은 저탕식 보일러의 온수공급측에 설치되는 순환펌프의 실제모델을 이용하였으며 가로 390mm, 세로 390mm의 크기를 갖는 수조의 물에 설치된 디지털 유량계를 연속적으로 통과하면서 평균유량이 계측되었다. 순환펌프의 최대양수량은 35 l/min이며 유량은 출구밸브를 이용하여 조절하였다. 전 계측영역까지 가시화 조명이 충분히 접근할 수 있도록 케이싱과 임펠러의 투명성을 확보하였다. 재질은PC(Polycarbonate)이며 케이싱과 임펠러의 실제 모형의 금형에 인젝션몰딩법으로 주입한후 충진을 시켜 냉각하였다. 압력측정을 위하여 순환펌프의 입구관과 출구관에 각각 1개의 정압탭을 설치하였으며 내경8mm의 플라스틱 튜브를 삽입한 후 디지털 마노메타(OKANO사, MODEL: POP-503)와 차압계까지 직접 연결하였다. Photo. 1은 실제의 PIV 실험장치의 배치를 보여 주고 있다. PIV가시화 작업은 광원과 입자로 속도를 구하기 위한 영상데이터를 얻는 과정이므로 PIV계측에 있어 매우 중요한 요소이다. 유동가시화를 위한 조명장치로서는 5W출력의 연속광 Argon-Ion 레이저(Coherent사)를 이용하였으며, 두께 1.5mm내외의

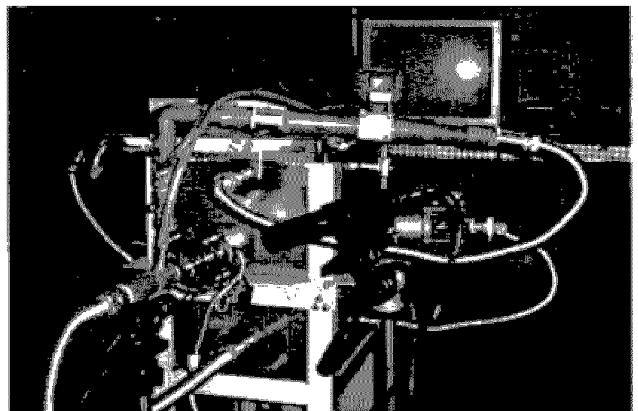


Photo. 1 View of experimental equipment

2차원 평면조명이 Fiber optic cable 및 Cylindrical lens를 통해서 유동장에 직접 조사된다. 입자의 선별은 유동장의 속도와 계측방법에 따라 달라지며 부력 또는 침강력의 영향이 최소화 될 수 있도록 하여야 한다. 본 실험에서는 비중이 1.02전후로서 물과의 비중차가 작은 PVC 백색 구형입자를 사용하였다. 유동장이 충분히 발달하면 직경 120미크론 전후의 PVC 백색 구형입자를 약 100ml 정도 선별한 다음 정전기를 방지하기 위하여 계면 활성제를 소량 혼합하여 계측 직전에 수조에 투입하였다. Fig. 2와 Table 1은 순환펌프의 전체적인 구조 및 외형도, 제원을 나타내고 있으며 Fig. 3은 계측영역의 위치 및 크기를 나타낸다. 계측영역은 두 가지로 순환펌프의 축을 중심으로 좌우로 설정하였으며 계측영역의 크기는 가로 및 세로가 각각 50×

78mm, 40×78mm이다. 작동유체로는 상온의 수도수를 이용하였다. 영상은 Hi-8mm 캠코더를 사용하여 기록하였으며 AOM(Acoustic Optical Modulator : Kanomax사, 10 μ s)을 이용한 CDD카메라(SONY-XC77RR)로 영상을 획득하였다. 제반 실험조건은 Table2와 같고 두가지의 유량에 대하여 속도벡터를 구하였다. 그림5는 비디오방식의 영상기록 장치에서의 펄스간격과 펄스폭의 설정관계를 보여주고 있다. 사용된 CCD카메라는 필드축적 및 비월주사 방식으로 조정되어 있다. CCD카메라와 유동장과의 거리는 350mm로 유지하였고 카메라의 조리개는 2로 고정하였다. AOM은 홀수 피일드의 수직동기신호를 기준으로 1/30초의 펄스사이클을 제공한다. 따라서 제 1펄스를 홀수피일드에 제2펄스를 짝수피일드에 공급하게 되면 CCD카메라의 한 프레임의 영상에는 홀수 및 짝수피일드에서의 펄스조명에 의한 입자가 기록된다. 이 영상은 연속적으로 NTSC방식의 Hi-8mm 캠코더에 녹화되며 이렇게 저장된 영상은 속도벡터의 추출에 이용된다. NTSC방식의 TV주사에서 1초간 영상은 흑백 또는 칼라 영상의 구분에 관계없이 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있고 1프레임은 1/60초간의 시간간격을 갖는 짝수피일드와 홀수피일드의 화면으로 구성된다.

Fig. 4는 AOM의 펄스간격과 펄스폭의 설정관계를 보여주고 있다. 고속유동장에서는 가시화를 위하여 분포시킨 추적입자의 이동 변위가 매우 커진다. 이 때에는 펄스간격을 작게 하여야 하므로 원

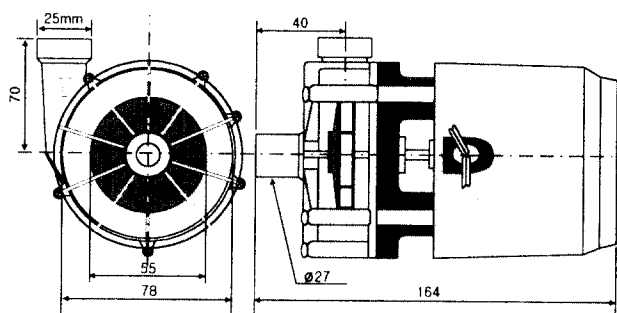


Fig. 2 Dimensions of circulation pump

Table 1 Specification of circulation pump

Power Supply	AC220V 60Hz
Power Consumption	50W
Total Head	4.5m
Maximum Capacity	35 l /min(H=0.5)
Liquid Temperature	0~85℃

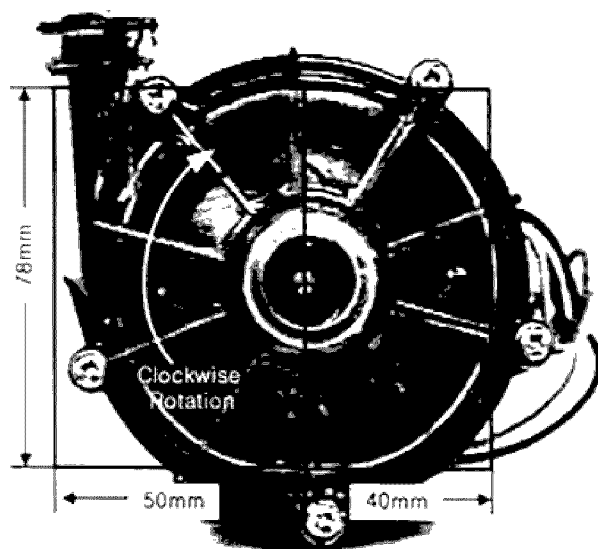


Fig. 3 Definition of measuring region

시영상의 계산영역 272×421pixel, 214×421pixel에 대하여 홀수필드와 짝수필드의 미소시간 동안의 이동한 거리를 8~10pixel전후가 되도록 AOM

Table 2 Experimental condition

	Item	Specification
Visualization Equipment	Image Board	DT3155 (640×480pixel)
	Light Source	5W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	Fiber Optic Lens
Measuring Condition	Working Fluid	Water
	Temperature	19.9 °c
	Particle	Nylon12(120 μ m)
	Flow rate(Q)	27 l /min 19 l /min
	Suction Pressure (kg/cm ²)	-0.048 -0.014
	Delivery Pressure (kg/cm ²)	0.231 0.099
	Diferential Pressure (kg/cm ²)	0.181 0.087
	Input Device	AOM+CCD Camera
	Time Resolution	200(μ s)
Image Processing	Host Computer	Pentium PC(CPU speed:200MHz)
	Calculation Time	0.8min/frame
	Idenification	Two-frame Gray-level Cross Correlation Algorithm
	Ratio of Error Vector	Under 1.5%/frame Average:0.4

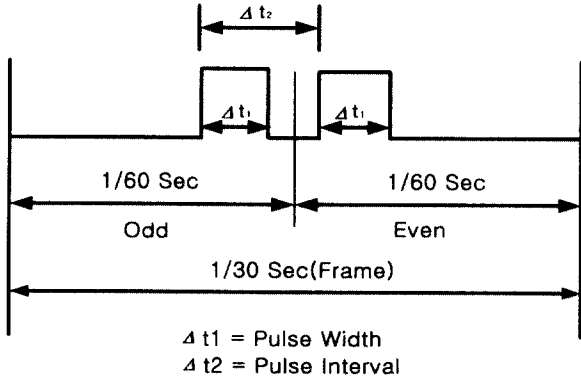


Fig. 4 Video signal and pulse arrangement

의 펄스간격을 200 μ s로 설정하였다. 유동자의 최적의 펄스폭을 결정하기 위해서는 원시영상에서의 유효 입자의 밀도 및 크기를 토대로 하여 검토되어야 하며 본 실험에서는 펄스폭을 120 μ s로 설정하였다.

3. PIV계측

본 가시화실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고 추적입자를 유동장에 주입시킨 다음에 적당한 조명을 제공한다. 계측영역의 영상을 테이프 매체상에 영구 보존을 하기 위하여 Hi-8mm 캠코더에 저장하였다. 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 영상처리장치에 입력된다. 영상처리장치로는 이미지 그래픽(DT3155, 640 \times 480pixel, B&W)를 CPU(200MHz)의 호스트 컴퓨터에 내장하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 DT3155보드는 영상기록매체로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 비트(bit)단위로 정의되는 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작은 전용의 처리 소프트웨어(CACTUS'97)를 이용하였다. 그림4는 유량이 27 l/min에서 계측영역내 배경영상을 나타낸 것이다. 속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상처리에는 반드시 전처리 과정이 필요하며 다양한 기법들이 소개된다. 이과정으로 잡음 제거, 회전보정 등을 거친 다음, 2치화된 영상으로 탐색반경을 결정한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하여 상관영역을 설정한다. 전처리 과정중에 가장 큰 비중을 차지하는 것은 잡음제거에 있어 큰 효과를 얻을 수 있는 배경제거(background elimination)이다. 이것은 계측영역에서 입자를 제외한 고정물체를 제거하여 영상의 불필요한 부분을 최소화하며 처리영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위한 것이다. 이를 위하여 연속된 300개의 원시영

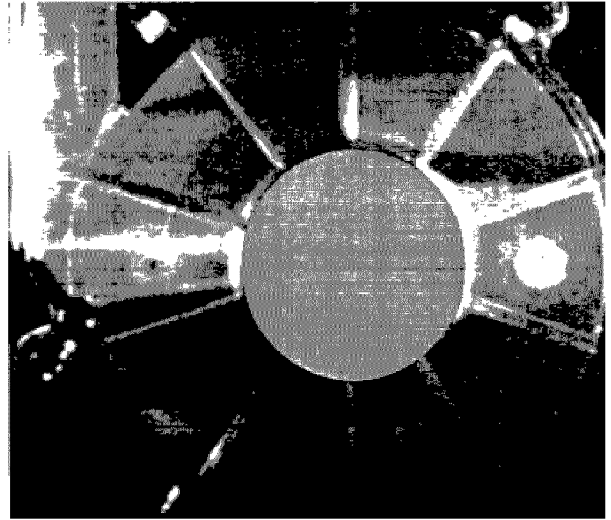


Fig. 5 Background image

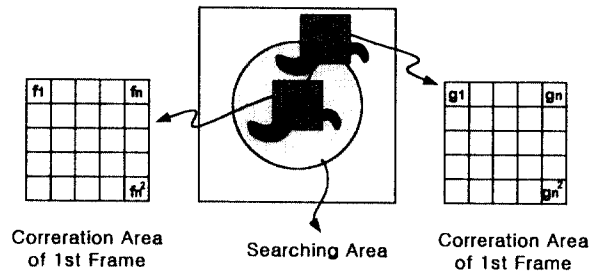
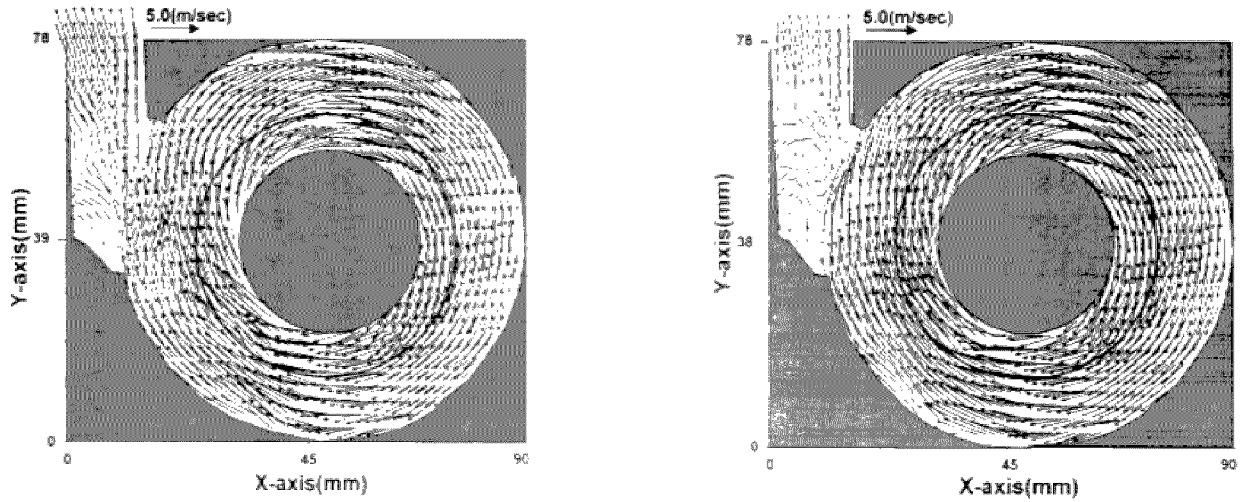


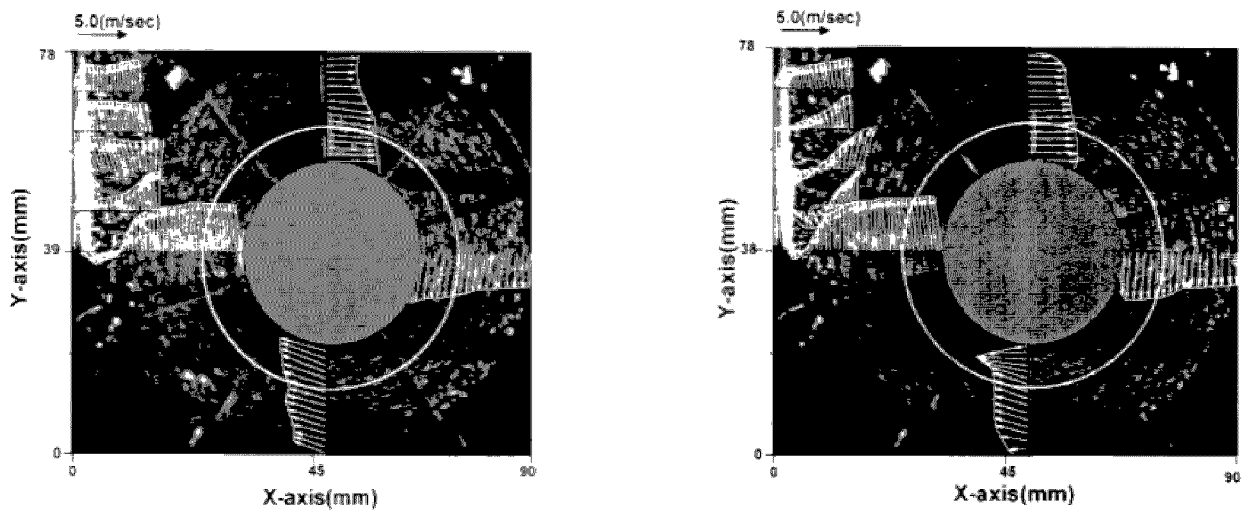
Fig. 6 Diagram of cross correlation method

상의 계조치를 산술 평균한 다음, 실제로 처리하고자 하는 순간의 유동장으로부터 감산하는 방법을 택하였다. Fig. 5는 계측영역내 배경영상을 나타낸 것이다. 영상을 기록할 때에는 유동장과 카메라의 위치를 조정하여 수평을 유지하여야 하지만 대부분 카메라 축을 중심으로 약간의 회전각도를 갖게 된다. 따라서 기록된 영상은 전체적으로 회전된 상태이므로 회전된 각도만큼 모든 픽셀좌표를 변환하여야 한다. 따라서 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선유폴선을 이용하여 CCD카메라의 위치에 대한 회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치 상호상관법을 이용한 동일입자 확인을 실시하였다. Fig. 6는 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상의 계조치에 대하여 식(1)과 같은 상호상관계수를 이용하여 최대상관계수의 위치를 속도벡터의 중점좌표로 정하는방법의 원리를 보여주고

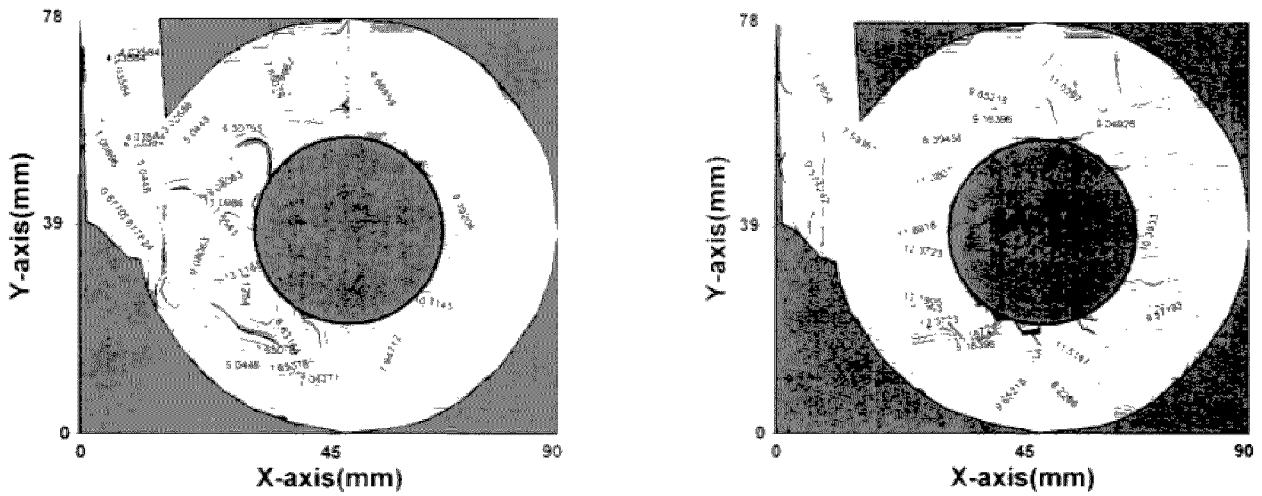
$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$



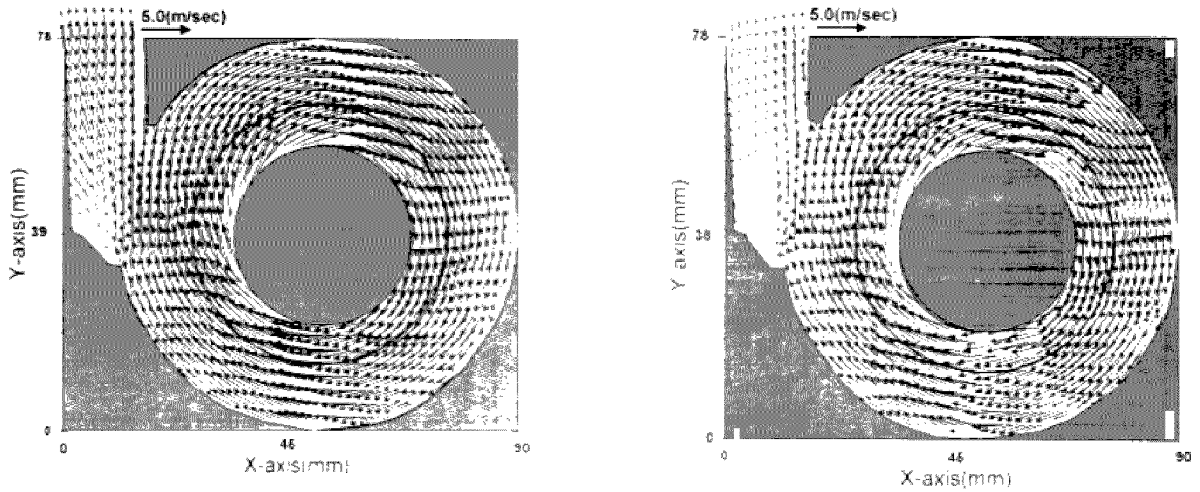
(a) (b) Fig. 7 Instantaneous velocity distribution



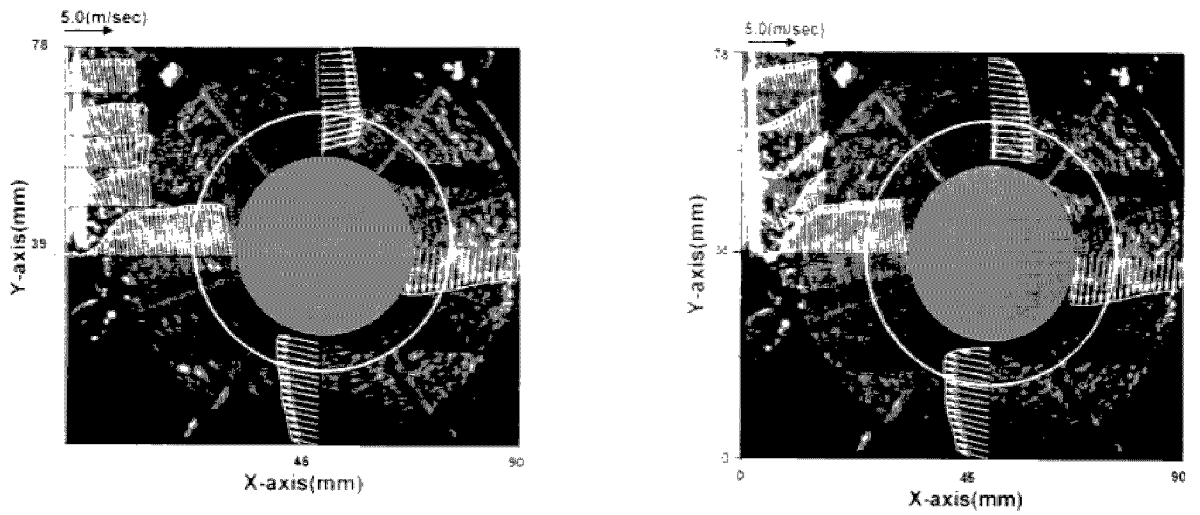
(a) (b) Fig. 8 Instantaneous velocity profiles



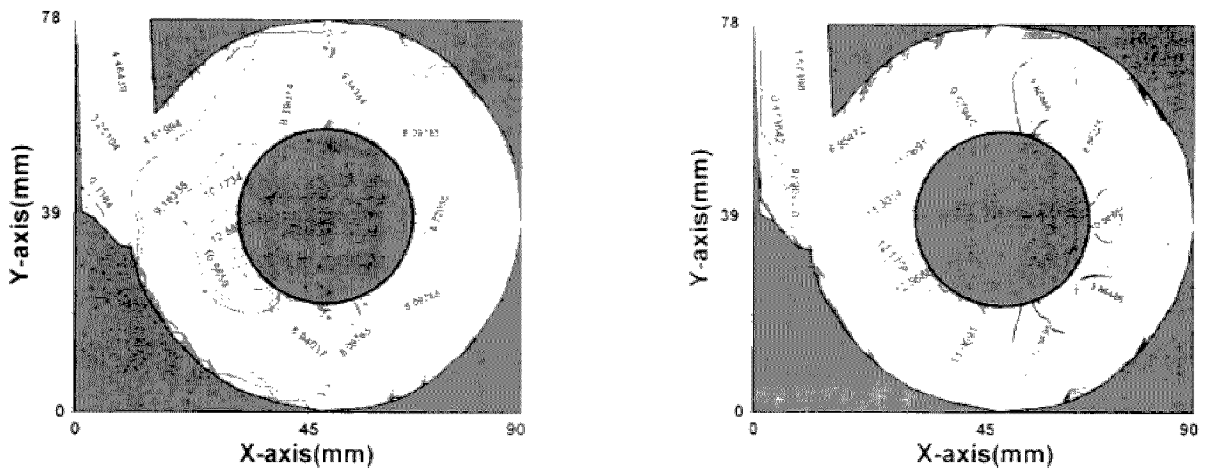
(a) (b) Fig. 9 Instantaneous kinetic energy



(a) Fig. 10 Time-mean velocity distribution (b)



(a) Fig. 11 Time-mean velocity profiles (b)



(a) Fig. 12 Time-mean kinetic energy (b)

Fig. 12 Time-mean kinetic energy

있다. 단 f_i, g_i 는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하며 “-”는 평균을 뜻한다. 계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 전계측영역에서 속도벡터의 격자수는 60×50 이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 8~10픽셀이다. 상관영역의 크기는 40~50픽셀이며 하나의 순간유동장에 대한 처리시간은 펜티엄기종(CPU 200MHz)에서 약 40~50초가 소요되었다. 시간평균 속도벡터를 얻기 위해서 100개의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산술평균 하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 과오벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, pixel 단위를 m/sec로 바꾸는 단위환산 등을 하였다. 에러에 의한 이상치는 속도발산치에 의한 검출방법으로 자동 에러처리를 한후 대화형의 화면처리로 제거하였고 유효한 동일입자만으로 속도벡터를 구하였으며 제거된 벡터는 주위가 값으로부터 보간하여 도시하였다

4. 계측결과

PIV계측을 이용한 순환펌프의 계측영역내에서의 유동장의 순간 속도벡터 및 순간 속도분포를 Fig. 7,8에서 나타내고 있다. Fig. 7은 각기다른 유량에 대한 속도분포를 보이고 있다. 상부의 속도는 대표 속도이고 내부의 실선은 임펠러 바깥지름의 궤도를 도시한 것이다. 임펠러를 벗어난 유체는 케이싱을 통해 송출관으로 유출된다. 케이싱의 출구측 모서리 부근에는 일종의 불연속점을 형성하면서 박리에 의한 와가 존재함을 나타내고 있다. 유량이 감소와 함께 와의 규모는 확대됨을 알수 있고 이에따른 압력손실이 예상된다. 이 영역에서는 유체가 다시 케이싱으로 흘러들어가는 재순환 현상도 관찰되고 있다. Fig. 8은 각각의 유량에 대해 흡입관측 반경방향으로 2등분하였고 케이싱 출구 영역에서 5등분한 선상에서 순간 속도분포를 나타낸 것으로 각 선상에서의 유동특성을 잘 나타내고 있다. Fig. 9는 운동에너지를 나타낸 것이다. 임펠러 궤도를 벗어난 유체의 운동에너지는 큰 폭으로 감소하며 펌프의 중심축 원편 반경방향으로 운동에너지가 큰 규모로 발달해 있음을 알수 있다. Fig. 10,11,12는 100개의 순간속도벡터를 각 격자점에서 산술 평균한 시간평균 속도벡터 및 시간평균 속도 분포, 운동에너지를 전반적인 속도패턴을 잘

파악할 수 있다. 두가지 유량에 27 l/min, 19 l/min에 해당하는 각각의 평균속도는 3.49m/sec, 3.60m/sec로 계측되었으며 유량의 변화와 함께 임펠러의 회전속도가 증가함을 알 수가 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 임펠러의 고속회전운동을 동반하는 터보기계 내부유동장을 계측할 수 있는 PIV시스템을 구성하고자 하였으며, 이를 이용하여 보일러용 순환펌프의 케이싱 내부의 전 영역을 대상으로 속도벡터의 계측을 행하였다. 유량을 27 l/min, 19 l/min 으로 변화시켰으며 이 때의 순간 및 시간평균 속도 분포, 운동에너지를 정량적으로 구하였고 입구관과 출구관에서 압력을 계측하였다. 본 연구는 향후 보일러 계통의 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.

후 기

본 가시화실험을 위한 가공작업에 큰 도움을 준 한중석씨에게 깊은 사의를 표하는 바이다.

참고문헌

1. R. Dong, S. Chu and J. Katz, "Quantitative Visualization of the Flow with the Volute of a Centrifugal Pump", Part A : Technique, Trans. ASME, JFE Vol. 114, pp. 390~395, 1992
2. R. Dong, S. Chu and J. Katz, "Quantitative Visualization of the Flow with the Volute of a Centrifugal Pump", Part A : Results and Analysis, Trans. ASME, JFE Vol. 114, pp. 396~403, 1992
3. H. Hayami, S. Aramaki and Y. Watanabe, Proc. of 2nd Int. Workshop on PIV-Fukui '97, pp. 105~108, 1997
4. 이영호, "유체기계에 있어서의 PIV의 적용", 유체기계 연구개발협의회 연구발표회 논문집, pp. 188~195, 1997
5. 임유청, 서민식, 최민선, 이영호, "영상강화카메라를 이용한 디퓨저펌프 고속유동장의 PIV계측", 대한기계학회 춘계학술대회는논문집 B, pp. 135~140, 1999
6. 이영호, "PIV의 분류 및 원리", 대한기계학회지 제36권 12호, pp. 1146~1162, 1996