◎ 논 문

PIV를 이용한 터빈펌프의 동·정익 속도장 계측

임유청* · 서민식* · 이영호**

Measurement of the Velocity Field of Rotor-Stator in a Centrifugal Turbine Pump Using PIV

Yu-Cheong Im*, Min-Sik Seo*, Young-Ho Lee**

Key Words: *PIV(입자영상유속계), Centrifugal Turbine Pump(원심터빈펌프), Impeller(임펠러), Rotor-Stator(동정익), Velocity Distribution(속도분포)*

ABSTRACT

The present experimental study is focused on the application of multi-point simultaneous measurement by PIV(Particle Image Velocimetry) to rotor-stator region within centrifugal turbine pump. Six different kinds of rpm(120, 500, 1000, 1500, 2000 and 2500) are selected as experimental condition. Optimized cross correlation identification to obtain velocity vectors is implemented with direct calculation of correlation coefficients. Fine optical setup concerned with PIV performance is arranged for the accurate PIV measurement of high-speed complex flow. The instantaneous and time-mean velocity distribution and velocity profile are represented quantitatively at the rotor and stator region.

1. 서 론

터보기계의 설계는 유체공학에 관련된 광범위한 지식이 필요하며 이론적인 면과 경험적인 것을 동시에 요구하는 매우 어려운 분야 중의 하나이다. 최근에는 유체기계가 고속, 고압에서 운전하는 경우가 많아지고 있으며 이에 따른 압력변동과 비정상 유체력이 소음과 진동의 원인이 되고 있다. 따라서 고성능 터보기계의 설계를 위해서는 보다 상세한 내부유동의 파악이 선결과제로 등장하고 있다. 한편, 원심펌프에서는 유체가 임펠러 통로를 통과하는 동안에 회전운동에너지가 정압에너지로 바뀌게 되나 보다 효과적으로 정압에너지를 회수하기 위하여 임펠러주위에 곡면 디퓨저 형상의 유로를 만들어서 정압의 회복을 적극적으로 도모하는 방안이 제안되고 있다. 즉, 터빈펌프는 이와 같은 정익 디퓨저가 효과적으로 설치된 펌프이며 고압을 얻기 위하여 보다 용의주도한 설계기법이 필요하다. 이 경우에 회전중의 임펠러(동익)와 가이드베인(정익)과의 사이에는 임펠러 선단위치의 상대적인 위치에 따라서 매우 복잡한 상호작용이 일어날 수 있으며 이에 따른 주기적인 압력변동과 소음진동이 발생할 수가 있다. 최근에는 수치해석기법의 진보에 의하여 터보기계의 복잡한 3차원 내부유동 기구의 해명이 시도되고 있지만 임펠러의 고속회전운동을 동반하는 터보기계에 있어서는 실험적인 접근기법이 보다 정량적인 결과를 제시하는 경우가 많다. 이러한 배경으로부터 최근에 급속히 발전하고 있는 영상처리를 이용한 동시다점 속도계측기법인 PIV를 터보기계 내부유동 계측에 적용한 실험적 연구가 행하여지고 있다.

* 한국해양대학교 대학원
** 한국해양대학교 기계공학과

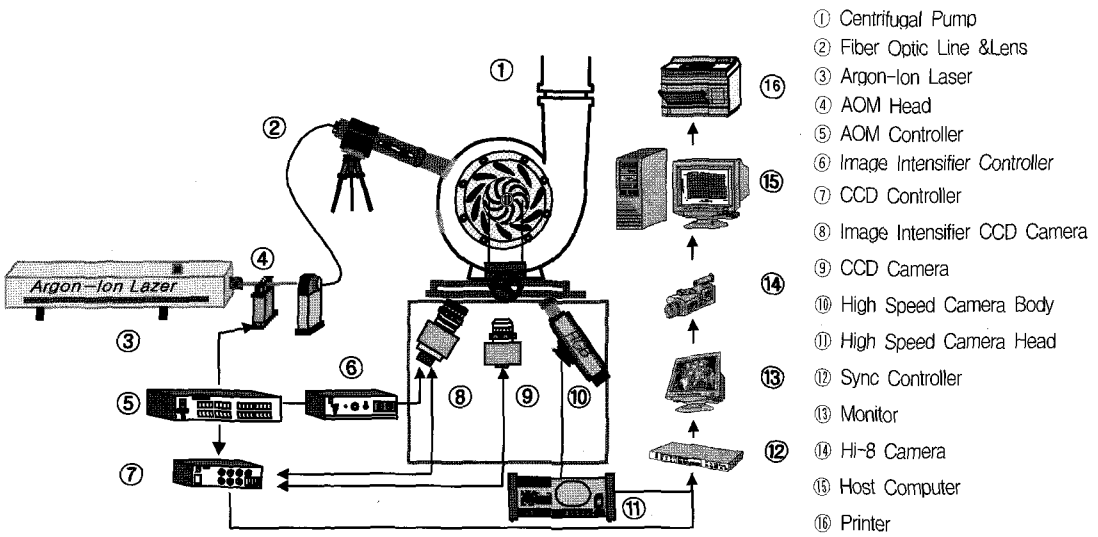


Fig. 1 Schematic Arrangement of PIV System

Dong[1,2] 등은 2차원 원심펌프를 대상으로 하여 벌류트 케이싱의 내부유동 및 선단부와 임펠러 사이의 상호작용 등을 PIV를 이용하여 난동성분 및 와도 등의 제반 유체역학적 물리량의 관점에서 논하고 있다. Hayami[3]는 Francis형의 펌프수차의 내부유동에 계조치 상호상관법을 적용하여 상대속도를 직접 계측하였다. 특히, 비디오 카메라를 회전차의 축에 직접 연결하였으며 이 축에 설치된 슬립링을 이용하여 외부모니터에서 유동장의 영상확인을 행하고 이 영상을 획득할 수 있음으로서 상대좌표에서의 속도벡터를 효과적으로 얻고 있다. Kawahashi[4,5]등은 두 종류의 원심식 송풍기를 대상으로 하여 회전차의 내부유동을 실측하였다. 이들은 이중빔스윕(dual beam sweep)법을 사용하였고 속도벡터 획득기법으로는 레이져스펙클법을 채택하였다. 이[6]는 지금까지 행해져 왔던 유체기계의 적용 연구를 체계적으로 검토하여 PIV를 이용한 유체기계의 유동장 해석 연구의 경향을 언급하고 있다. 이와 같은 배경으로 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 원심터빈펌프중의 실제모델을 선정하여 임펠러속도의 변화에 대응하는 레이저 펄스조정기법을 적용하여 고속유동장의 계측을 행하고자 하였다. 이를 위한 계측기법으로서 비정상의 유동장에 대하여 동시다점으로 속도계측이 가능한 PIV계측 시스템[7]-[8]을 적용하여 계측영역내에서 임펠러의 상대위치의 변화에 따른 순간 및 시간평균의 속도벡터를 정량적으로 획득하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 채택한 실험장치의 구성도이다. 임펠러의 회전수가 최대 3000 rpm까지 조정되는 터빈펌프를 이용하였으며, 계측영역까지 가시화조명이 접근할 수 있도록 케이싱의 외벽에 투명 아크릴창을 가공 설치하였으며, 내부의 정익중 3개를 CNC선반과 만능형 밀링머신을 사용하여 특수 아크릴로 설계 제작하였다. 가공정밀공차는 0~±0.02 mm이며 최대한의 수밀성을 확보하였다. 정익의 실제 모형의 정확한 좌표점을 얻어서 CNC머신센터에 입력하여 직접 가공하였다. 다음으로 아크릴의 투명도를 위하여 폴리싱작업을

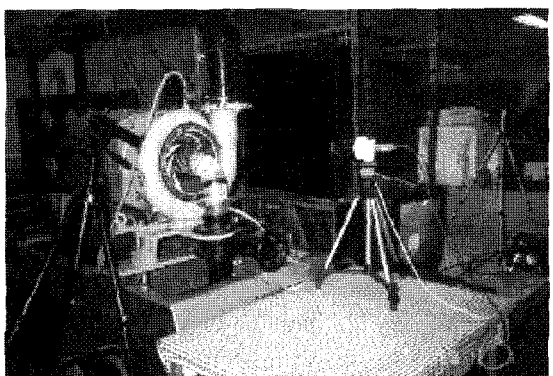


Photo 1 View of Experimental Equipment

행하였으며 케이싱의 측면부에 가로, 세로, 각각 50 mm ×25 mm의 홈을 만들어 아크릴을 부착하여 여기를 통하여 2차원의 sheet광원이 통과하도록 하였다. Photo 1은 실제의 PIV 실험장치의 배치를 보여주고 있다. 유동가시화를 위한 조명장치로서는 5 W 출력의 연속광 Argon-Ion 레이저(Coherent사)를 이용하였으며, 두께 2 mm내외의 2차원 평면조명이 Fiber Optic Cable 및 Cylindrical Lens를 통해서 유동장에 직접 조사된다. Photo 2는 실험에 사용된 원심터빈펌프의 전경이며, Fig. 2는 계측영역의 위치 및 크기를 나타내고 있다. 계측영역의 크기는 가로 및 세가 각각 55×54 mm이다. 작동유체로는 상온의 수도수를 이용하였다. 유동장내의 유체입자 선별문제는 광원과 함께 PIV계측정도에 큰 영향을 미친다. 본 실험에서는 비중이 1.02전후로서 물과의 비중차가 작은 PVC 백색 구형입자를 사용하였다.

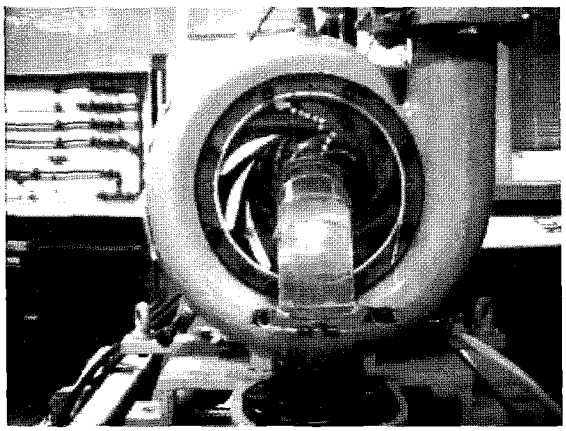


Photo 2 Centrifugal Turbine Pump

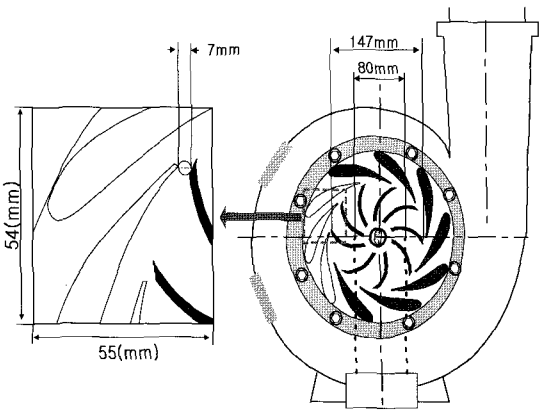


Fig. 2 Definition of Measuring Region

유동장이 충분히 발달하면 직경 120미크론 전후의 PVC 백색 구형입자를 약 140 ㎖ 정도 선별한 다음 정전기를 방지하기 위하여 계면 활성제를 소량 혼합하여 계측 직전에 수조에 투입하였다. 영상은 Hi-8 mm 캠코더를 사용하여 기록하였으며 AOM(Acoustic Optical Modulator : Kanomax사, 10 ㎲)을 이용한 CDD카메라(SONY-XC77RR)와 고속도카메라 (Photron사, B&W, Rabbit-II, 640×240 pixels, 8 bits), 영상강화CCD카메라(Image Intensifier CCD Camera, Hamamatsu사, C4273 MOD)를 병행하여 사용하였다. 제반 실험조건은 Table 1과 같고 여섯 가지의 임펠러 회전속도(120 rpm, 500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm 그리고 2500 rpm)에 대하여 속도벡터를 구하였다. 고속카메라의 경우에는 기록속도를 240 fps로 설정하여 150 rpm이하의 저속 유동장을 기록하였고, 유동장을 촬영할 때에 고속도카메라의 자체메모리에 임시 저장되어 있는 연속영상을 매초 30장의 비율로 재생하여 NTSC방식의 Hi-8 mm 카메라에 기록하였다. NTSC방식의 TV주사에서 1초간 영상은 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있고 1프레임은 1/60초간의 시간간격을 갖는 짝수 필드와 홀수 필드의 화면으로 구성된다. 500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm의 경우에는 CCD 카메라를 사용하였고 AOM에 의하여 단속된 조명으로 CCD카메라에 촬영된 영상은 홀수필드와 짝수피일드에 각각 입력된다. Fig. 3은 AOM의 펄스간격과 펄스폭의 설정관계를 보여주고 있

Table 1 Experimental Conditions

r.p.m	Tip Velocity (m/s)	Pulse Interval (㎲)	Pulse Width (㎲)	Input Device	SAR (pixel)	CAS (pixel)
120	0.92	4167	4167	High-Speed Camera	10	40
500	3.84	500	460	AOM + CCD Camera	9	40
1000	7.67	170	130	AOM + CCD Camera	9	40
1500	11.54	130	110	AOM + CCD Camera	8	40
2000	15.39	110	90	AOM + CCD Camera	8	40
2500	19.23	80	60	I.I. Camera	9	40

SAR (Searching Area Radius)
CAS (Correlation Area Size)

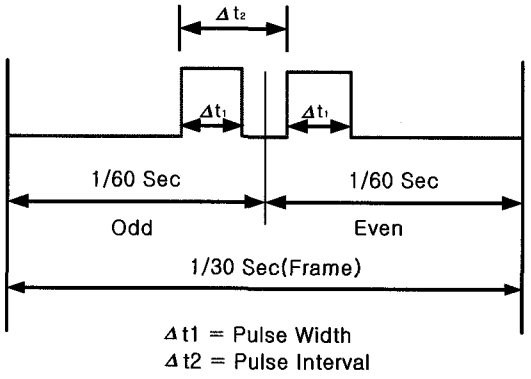


Fig. 3 Video Signal and Pulse Arrangement

다. 고속유동장에서는 가시화를 위하여 분포시킨 추적입자의 이동 변위가 매우 커진다. 이 때에는 펄스간격을 작게 하여야 하므로 각각의 rpm에 대하여 홀수 필드와 짝수 필드의 미소시간 동안의 이동한 거리를 8~11 pixel전후가 되도록 AOM의 펄스간격을 경험적으로 구하였다. 또한, 각각의 rpm에 대해 최적의 펄스폭을 결정하였다. 2500 rpm의 경우에는 펄스폭이 60 μs로 줄어들어 조명이 부족하게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 영상강화 CCD카메라를 이용하였으며, 이 장치의 게인(gain)을 조절하여 적절한 영상의 획득이 가능하도록 하였다.

3. PIV계측

본 가시화실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고 추적입자를 유동장에 주입시킨 다음에 적당한 조명을 제공한다. 계측영역의 영상을 테이프 매체상에 영구 보존을 하기 위하여 Hi-8 mm 캠코더에 저장하였다. 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 영상처리장치에 입력된다. 영상처리장치로는 이미지 그래버(DT3155, 640×480 pixel, B&W)를 CPU(200 MHz)의 호스트 컴퓨터에 내장하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 DT3155보드는 영상저장장치로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 2차원의 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작은 전용의 처리 소프트웨어(CACTUS'97)를 이용하였다. Fig. 4는 1000 rpm에서 계측영역내 임의의 순간영상을 나타낸 것이다. 속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상처리에는 반드시 전처리 과정이 필요하며 다양한 기법들이 소개된다. 이 과정으로 잡음제거, 회전보정 등을 거친 다음, 2치화된 영상으로 탐색반경을

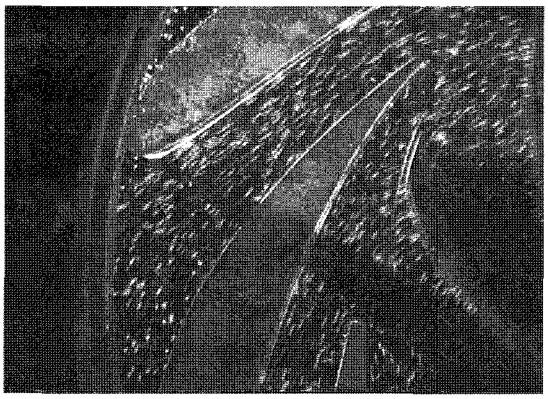


Fig. 4 Instantaneous Flow Field

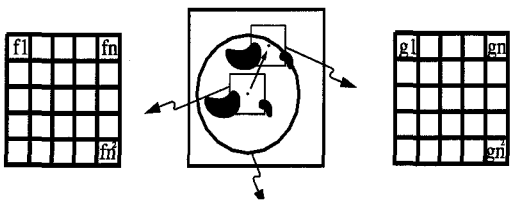
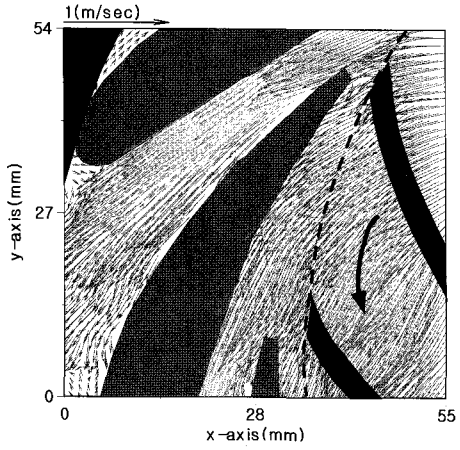


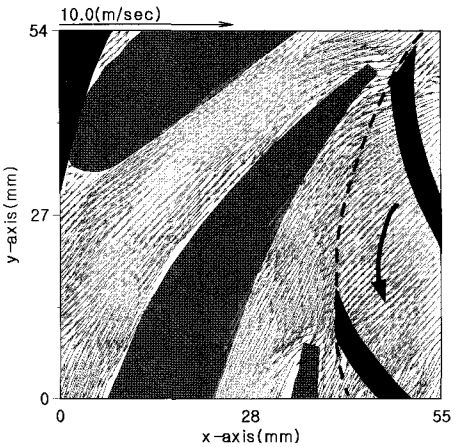
Fig. 5 Diagram of Cross Correlation Method

결정한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하여 상관영역을 설정한다. 전처리 과정 중에 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 100개의 원시영상의 계조치를 산술 평균한 다음, 실제로 처리하고자 하는 순간의 유동장으로부터 감산하는 방법을 택하였다. 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선 윤곽선을 이용하여 CCD카메라의 위치에 대한 회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치 상호상관법을 이용한 동일입자 확인을 실시하였다. Fig. 5는 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상의 계조치에 대하여 식 (1)과 같은 상호상관계수를 이용하여 최대상관계수의 위치를 속도벡터의 종점좌표로 정하는 방법의 원리를 보여주고 있다.

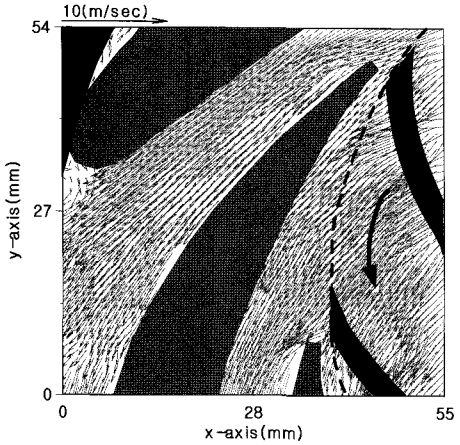
$$C_{fg}=\frac{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i-\bar{f_i})(g_i-\bar{g_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i-\bar{f_i})^2\sum_{i=1}^{n^2}(g_i-\bar{g_i})^2}} \quad (1)$$



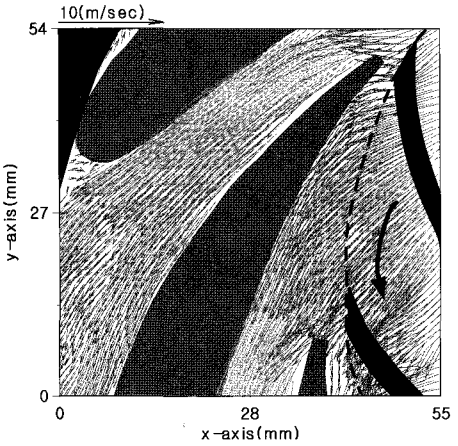
(a) 120 RPM



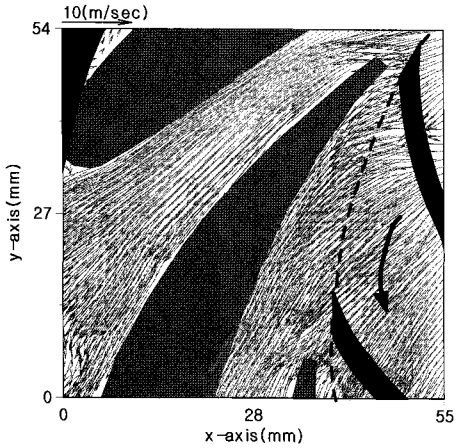
(b) 500 RPM



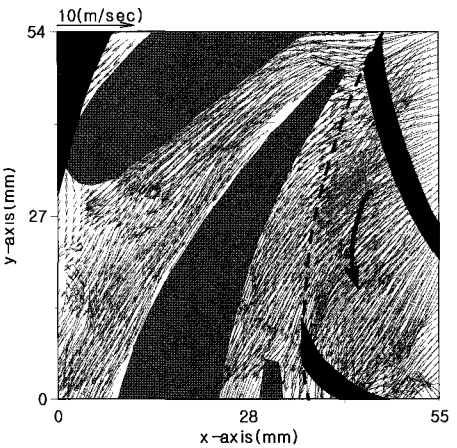
(C) 1000 RPM



(d) 1500 RPM

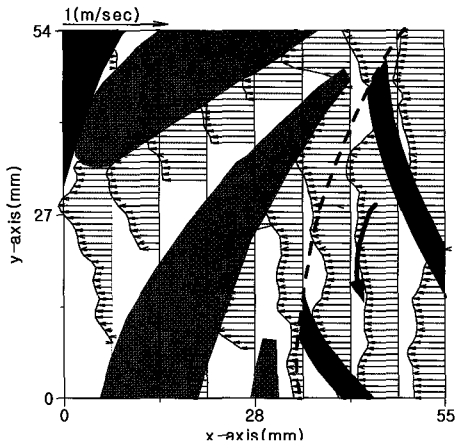


(e) 2000 RPM

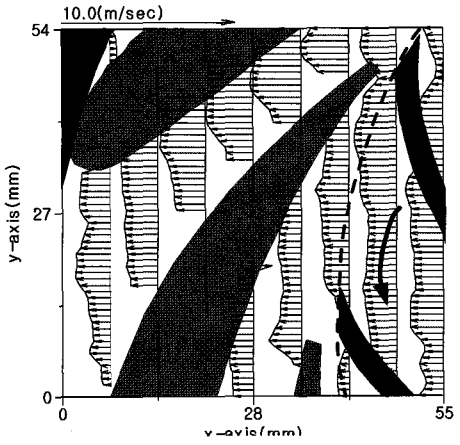


(f) 2500 RPM

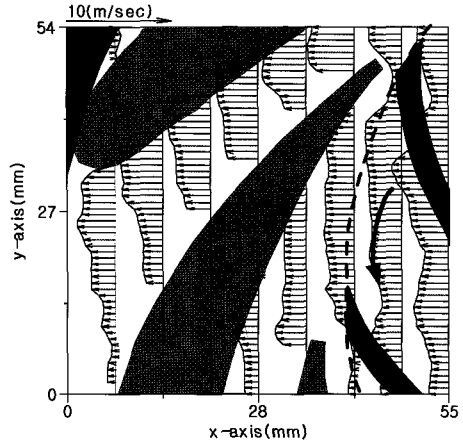
Fig. 6 Instantaneous Velocity Distribution



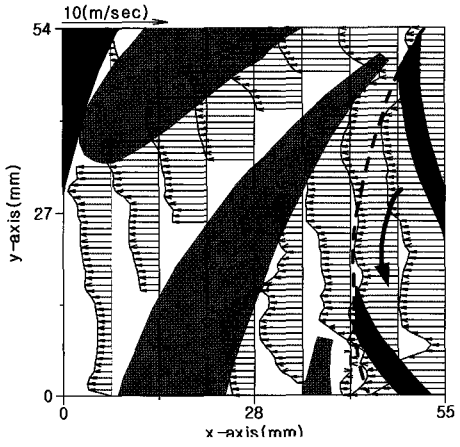
(a) 120 RPM



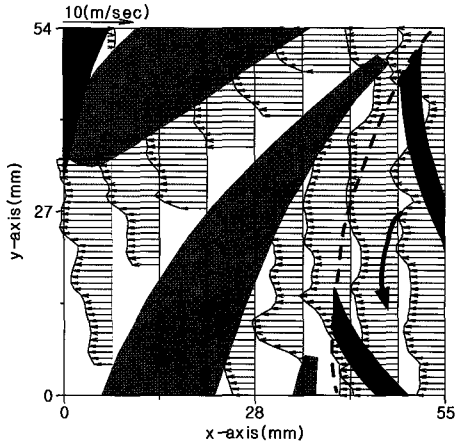
(b) 500 RPM



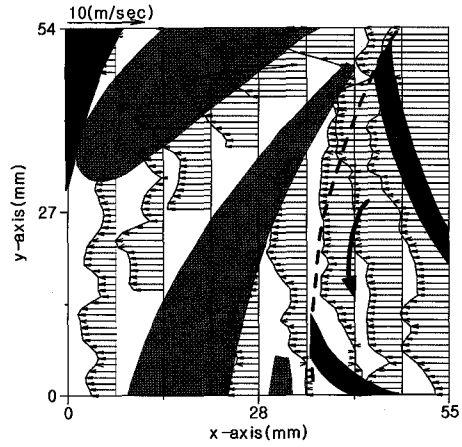
(c) 1000 RPM



(d) 1500 RPM

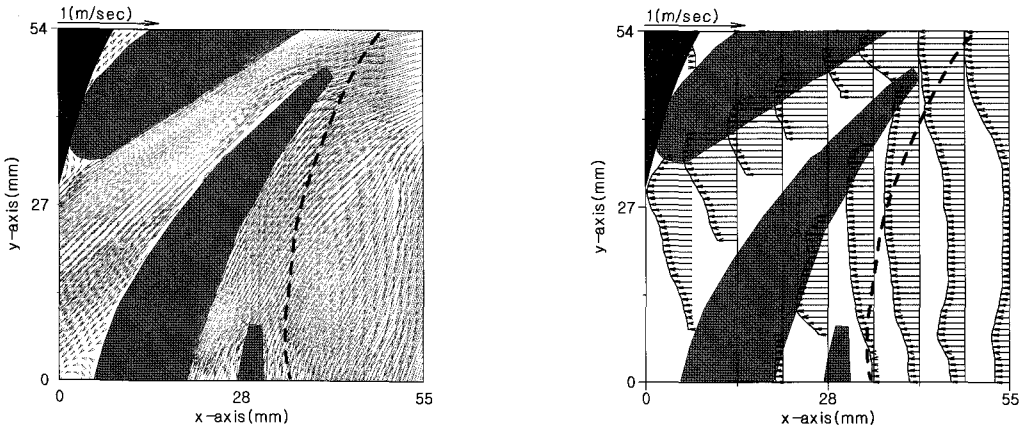


(e) 2000 RPM



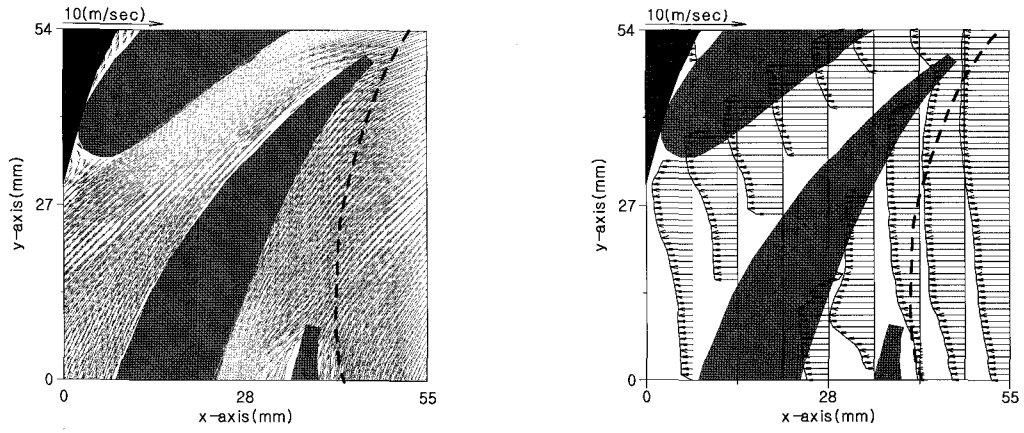
(f) 2500 RPM

Fig. 7 Instantaneous Velocity Profiles



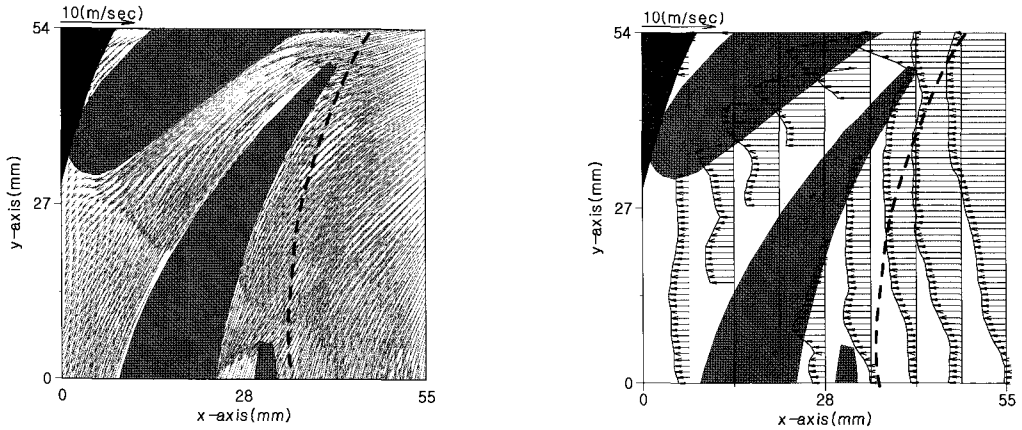
(a) Velocity Vectors (b) Velocity Profiles

Fig. 8 Time-mean Velocity Vectors and Profiles(120 RPM)



(a) Velocity Vectors (b) Velocity Profiles

Fig. 9 Time-mean Velocity Vectors and Profies(1500 RPM)



(a) Velocity Vectors (b) Velocity Profiles

Fig. 10 Time-mean Velocity Vectors and Profiles(2500 RPM)

단 f_i, g_i는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하며 "-"는 평균을 뜻한다. 계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성 뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 속도벡터의 격자수는 50×50이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 9~10픽셀이다. 상관영역의 크기는 40~50픽셀이며 하나의 순간유동장에 대한 처리시간은 펜티엄 기종(CPU 200 MHz)에서 약 1.5~2분이 소요되었다. 시간평균 속도벡터를 얻기 위해서 100개의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산술평균하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 과오벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, pixel 단위를 m/sec로 바꾸는 단위환산 등을 하였다.

3. 계측결과

PIV계측을 이용한 원심터빈펌프의 계측영역내에서 유동장의 순간 속도벡터 및 순간 속도분포를 Fig. 6과 Fig. 7에서 나타내고 있다. Fig. 6은 각각의 rpm에 대한 순간의 속도분포를 보이고 있다. 상부의 속도는 대표속도이고 rpm의 크기 변화에 따라 대표속도를 달리 하였다. 유동은 임펠러 출구에서 유입되어 정익(안내익) 사이의 유로를 통해 유출된다. Fig. 7은 각각의 rpm에 대하여 계측영역을 가로축을 기준으로 8등분한 선상에서 순간 속도분포를 도시한 것이다. 우측에서 첫번째 선도는 유입속도 특성을 나타내고 있다. Figs. 8~10은 120 rpm, 1500 rpm, 2500 rpm에서 100개의 순간속도벡터를 각 격자점에서 산술 평균한 시간평균 속도벡터와 9개의 단면으로 구분하여 도시한 순간속도분포를 나타낸 것으로 전반적인 속도패턴을 잘 파악할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 고속유동장에 대응할 수 있는 PIV시스템을 우선 구성하고자 하였으며, 이를 이용하여 원심터빈펌프의 동정익의 상호작용이 활발한 영역을 대상으로 속도벡터의 계측을 행하였다. 임펠러 회전속도를 120 rpm, 500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm 그리고 2500 rpm으로 변화시켰으며 이 때의 순간 및 시간평균 속도분포를 정량적으로 구하였다. 향후에는 유량의 변화에 따른 유동장의 특성 및 압력성분까지를 포함한 보다 체계적인 연구가 필요하다고 보여진다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(ME-97-B-14)에 의하여 연구되었음으로 사의를 표하는 바이다. 또한, 가시화실험을 위한 가공작업에 큰 도움을 준 한 종석씨에게 깊은 사의를 표한다.

참고문헌

(1) Dong R., Chu S., Katz J., 1992, "Quantitative Visualization of the Flow with the Volute of a Centrifugal Pump. Part A : Technique," Trans. ASME, JFE Vol. 114, pp. 390~395.

(2) Dong R., Chu S., Katz J., 1992, "Quantitative Visualization of the Flow with the Volute of a Centrifugal Pump. Part B : Results and Analysis," Trans. ASME, JFE Vol. 114, pp. 396~403.

(3) Hayami H., Aramaki S., Watanabe Y., 1997, Proc. of 2nd Int.. Workshop on PIV-Fukui'97, pp. 105~108.

(4) Sekiomoto O., Kawahashi M., Hirahara H., 1994, "Visualization of Flow in a Multi-Blade Fan," Proc. of V.S.J Visualization Symp. Vol. 14 Suppl. No. 1, pp. 163~166.

(5) Kawahashi M., Yamamoto K., 1995, "Speckle Method Using Beam Scanning Techniques," Proc. of Int Workshop on PIV-Fukui'95, pp. 155-158.

(6) 이영호, 1997, "유체기계에 있어서의 PIV의 적용", 유체기계 연구개발협의회 연구발표회 논문집, pp. 188~195.

(7) 이영호, 1996, "PIV의 분류 및 원리", 대한기계 학회지 제 36권 12호, pp. 1146~1162.

(8) 이영호, 최장운, 1996, "PIV에서의 계조치 상호상관법개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권, pp. 396~400.