

PIV를 이용한 디퓨저펌프 정익에서의 성능과 유동특성에 관한 연구

김정환[†] · 김범석* · 김진구** · 함승덕** · 이영호***

(원고접수일 : 2003년 4월 14일, 심사완료일 : 2003년 5월 26일)

A Study on Flow Characteristics and Efficiency in Guide Vane of Diffuser Pump Using PIV Measurement

Jeong-Hwan Kim[†] · Beom-Seok Kim* · Jin-Gu Kim** · Seung-Duck Hahm** · Young-Ho Lee***

Key words : PIV(입자영상유속계), Diffuser Pump(디퓨저펌프), Guide Vane(안내깃), Impeller(임펠러), Rotor-Stator(동정익), Clearance(틈새)

Abstract

The present experimental study is focused on the application of multi-point simultaneous measurement by PIV(Particle Image Velocimetry) to guide vane region within diffuser pump. Various different kinds of rotational velocity were 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. Variable flow pattern are represented quantitatively at the stator region.

1. 서 론

터보기계 설계는 유체공학에 관련된 광범위한 지식이 필요하며 이론적인 면과 경험적인 것을 동시에 요구하는 매우 어려운 분야 중의 하나이다. 최근, 유체기계가 고속, 고압에서 운전하는 경우가 많아지고 있으며 이에 따른 압력변동과 비정상 유체력이 소음과 진동의 원인이 되고 있다. 한편, 원

심펌프에서는 유체가 임펠러 통로를 통과하는 동안에 회전운동에너지가 정압에너지로 바뀌게 되나 보다 효과적으로 정압에너지를 회수하기 위하여 임펠러 주위에 곡면 디퓨저 형상의 유로를 만들어서 정압의 회복을 적극적으로 도모하는 방안이 제안되고 있다. 즉, 디퓨저펌프는 이와 같은 정익디퓨저가 효과적으로 설치된 펌프이며 고압을 얻기 위하여 보다 용의주도한 설계기법이 필요하다. 이

[†] 책임저자(한국해양대학교 대학원 기계공학과) E-mail : jhkim@pivlab.net, T : 051)410-4718

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 충북과학대학 컴퓨터응용기계과

*** 한국해양대학교 기계·정보공학부

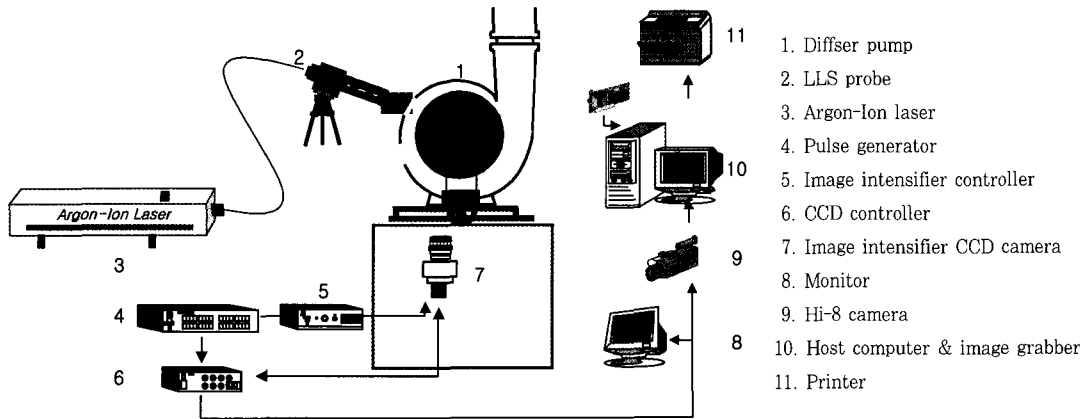


Fig. 1 Schematic arrangement of PIV system

경우에 회전중의 임펠러(동익)와 가이드 베인(정익)과의 사이에는 임펠러 선단위치의 상대적인 위치에 따라서 매우 복잡한 상호작용이 일어날 수 있으며 이에 따른 주기적인 압력변동과 소음진동이 발생할 수 있다. 최근, 수치해석기법⁽¹⁾⁽²⁾의 진보에 따라 터보기계 내부의 복잡한 3차원 유동특성의 규명이 시도되고 있지만 임펠러의 고속회전운동을 동반하는 터보기계에 있어서는 실험적인 접근기법이 보다 정량적인 결과를 제시하는 경우가 많다. 이러한 배경으로부터 본 연구에서는 비정상상의 유동장에 대하여 동시다점으로 속도정보를 파악할 수 있는 PIV시스템⁽³⁾⁻⁽⁷⁾을 적용하여 임펠러의 고속회전운동을 동반하는 터보기계 내부유동장을 계측할 수 있는 PIV계측기법을 확립하는데 일차적인 목표를 두었다. 그리고 이를 이용하여 현재 시판되고 있는 디퓨저 펌프 내부의 동·정익의 상호작용이 활발한 영역에서 임펠러 회전속도의 변화와 가이드베인 틈새 변화에 따른 유동특성을 체계적으로 고찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 채택한 실험장치의 구성도이다. 임펠러의 회전수가 최대 3000rpm까지 조정되는 디퓨저펌프를 이용하였으며, 계측영역까지 가

시화 조명이 접근할 수 있도록 케이스의 외벽에 투명 아크릴창을 가공 설치하였고, 가공정밀공차는 $0 \sim \pm 0.02\text{mm}$ 이며 최대한의 수밀성을 확보하였다.

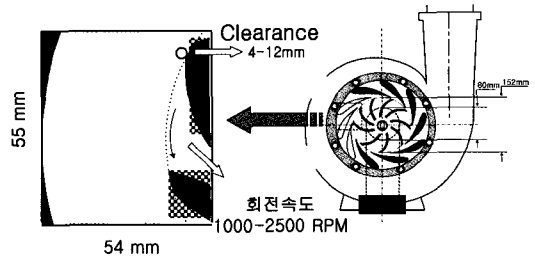


Fig. 2 Definition of measuring region and clearance

Fig. 2는 펌프내부 계측영역의 위치 및 크기를 나타내고 있는 개략도이다. 계측영역의 범위는 가로 및 세로가 각각 55mm×54mm이다. 작동유체로는 상온의 수도물을 이용하였다. 유동장내의 유체입자 선별문제는 광원과 함께 PIV계측 정도에 큰 영향을 미친다. 본 실험에서는 비중이 1.02전 후로서 물과의 비중차가 작은 PVC 백색 구형입자를 사용하였다. 그리고 임펠러의 선단과 디퓨저 입구부의 틈새(clearance)가 커지면 커질수록 안내깃의 유로폭은 작아지는 형상을 나타내고 있으며, 그 틈새의 변화에 따라 실험을 행하였다. 그리고 영상은 Hi-8mm 캠코더를 사용하여 기록하였으며, 펄스발생기(Kanomax사, 10μs)를 이용한 영상강화CCD카메라(Image intensifier CCD

camera, Hamamatsu사, C4273)를 사용하였다. 제반 실험조건은 Table 1과 같고 4가지의 임펠러 회전속도(300, 500, 800, 1000 rpm)와 틈새는 5가지의 조건(4, 6, 8, 10, 12 mm)에 대해서 속도벡터 및 다양한 물성치를 구하였다.

Table 1 Experimental Conditions

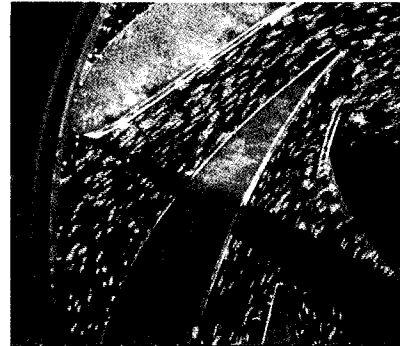
r.p.m	Clearance (mm)	Pulse interval (μ s)	Pulse width (μ s)	Input device	SAR (pixel)	CAS (pixel)
300	4, 6, 8, 10, 12	3167	3167	I.I Camera	9	41
500	4, 6, 8, 10, 12	500	460	I.I Camera	8	41
800	4, 6, 8, 10, 12	280	200	I.I Camera	8	41
1000	4, 6, 8, 10, 12	170	130	I.I Camera	9	41

2.2 PIV계측

본 가시화 실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고 추적입자를 유동장에 주입시킨 다음에 적당한 조명을 공급한다. 계측영역의 영상은 Hi-8 mm캠코더에 저장하며 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 영상처리장치에 입력하게 된다. 영상처리장치로는 DT3155라는 이미지 그래버를 사용하였으며 본 연구에서 사용한 DT3155보드는 영상저장장치로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작은 PIV처리 코드인 CACTUS 2000을 사용하였다. Fig. 3은 1000rpm에서 계측영역내의 임의의 순간영상을 나타낸 것이다.

속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상처리에는 반드시 전처리 과정이 필요하며, 이 과정으로 잡음 제거, 회전보정 등을 거친 다음, 이치화된 영상으로 탐색반경을 결정한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하여 상관영역을 설정한다. 전처리 과정 중에 가장 큰 비중을 차지하는 것은 잡음제거에 있어 큰 효과를 얻을 수 있는 배경제거이다. 이것은 계측영역에서 입자를 제외한 고정물체를 제거하여 영상의 불필요한 부분을 최소화하며 처리영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위한 것이다. 이를 위하여 연속된 200개의 원시영상의 계조치를 산술평균

한 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 장애물 처리를 하여 계조치상호상관법⁽²⁾을 이용한 동일입자를 확인하고 후처리에 의해 속도벡터 등의 다양한 유동정보를 구하였다. 아래의 식 (1)은 상호상관계수⁽⁸⁾를 나타내고 있다.



(a) Original image



(b) Background image for noise reduction

Fig. 3 Separated background image

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

여기서 f_i , g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며 “-”는 평균을 나타낸다.

계조치상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 속도벡터의 격자수는 40×60 이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 8~9 픽셀이다. 상관영역의 크기는 40~45 픽셀이며 시간평균 속도벡터를 얻기 위해서 200개의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산술평균하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 에러벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, 픽셀단위를 m/sec로 바꾸는 단위환산 등을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 PIV계측을 통한 다양한 틱새에 대한 디퓨저 펌프의 내부유동장의 속도벡터분포이다. 이 유동장들은 각각 200프레임의 영상을 합산하여 평균한 것이다. 그리고 가이드 베인에 의해 조명이

부족한 부분은 장애물처리가 되었으며 이러한 속도의 계측은 종래의 LDV나 열선유속계 등을 이용하여 얻고 있지만, 본 연구에서는 비정상적 계측데이터를 두 가지 경우에 대하여 동시에 산술평균하여 구할 수 있었다. 그리고 각각의 경우에 대해서 속도벡터를 관찰해 보면 틱새가 커질수록 가이드 베인 사이의 유로폭은 감소하고 있으며 유로폭의 감소로 인해 입구측에서의 속도는 빨라지고 이로 인한 운동량이 증가하고 있으며 (c)와 (f)에서 가이드 베인의 형상의 변화로 인해서 가이드 베인 벽면에 미소하게 박리가 발생하고 있음을 알 수가 있다. 그리고 각각의 틱새에 대해서 300 rpm의 경우와 500 rpm의 경우를 비교해보면 대체적으로 서로 유사한 유동패턴이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 300rpm과 500rpm에서의 운동에너지지를 나타낸 것이다. 300rpm과 500rpm의 경우 모두 큰 운동에너지는 틱새 4mm, 6mm, 8mm에서는 안내깃 입구에서 나타나고 있으며 틱새

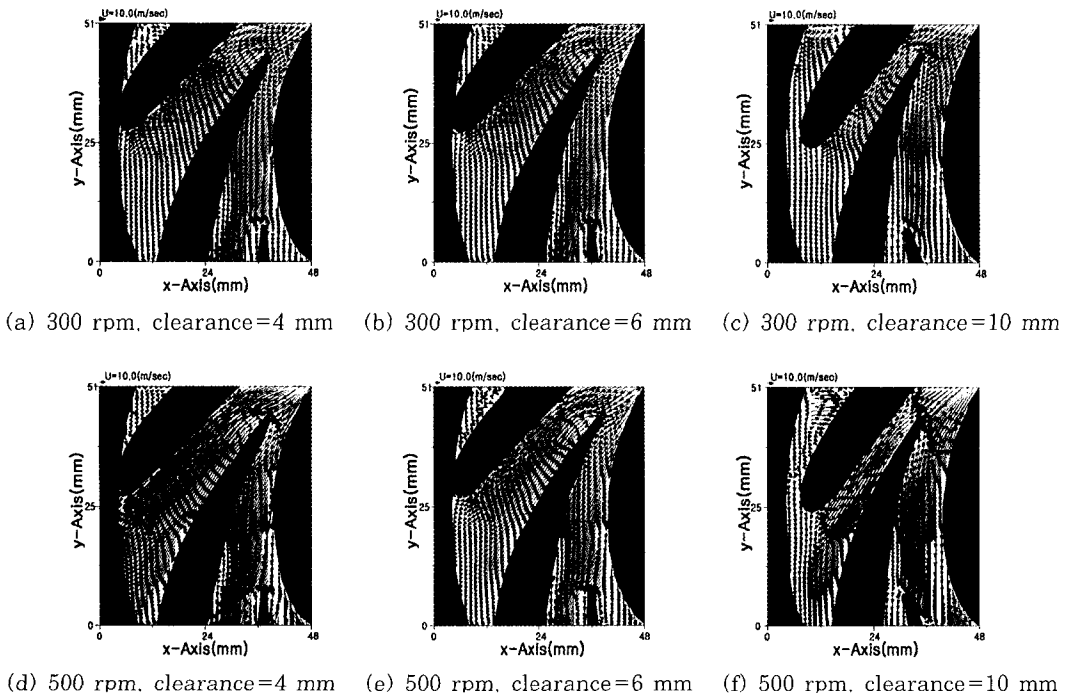


Fig. 4 Time-Averaged Velocity Distribution

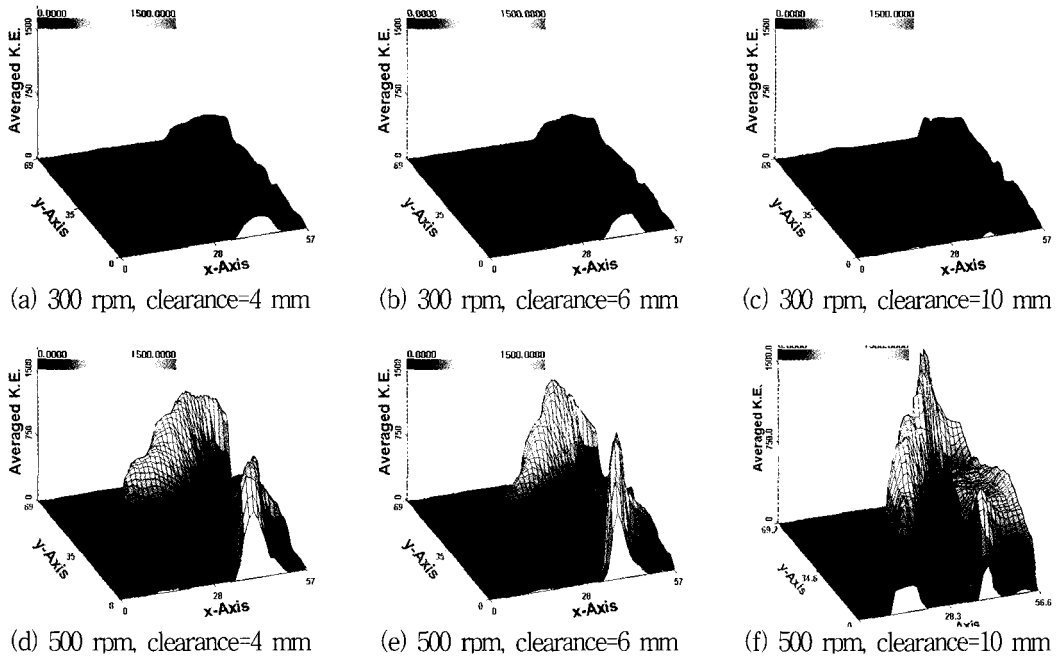


Fig. 5 Distributions of kinetic energy

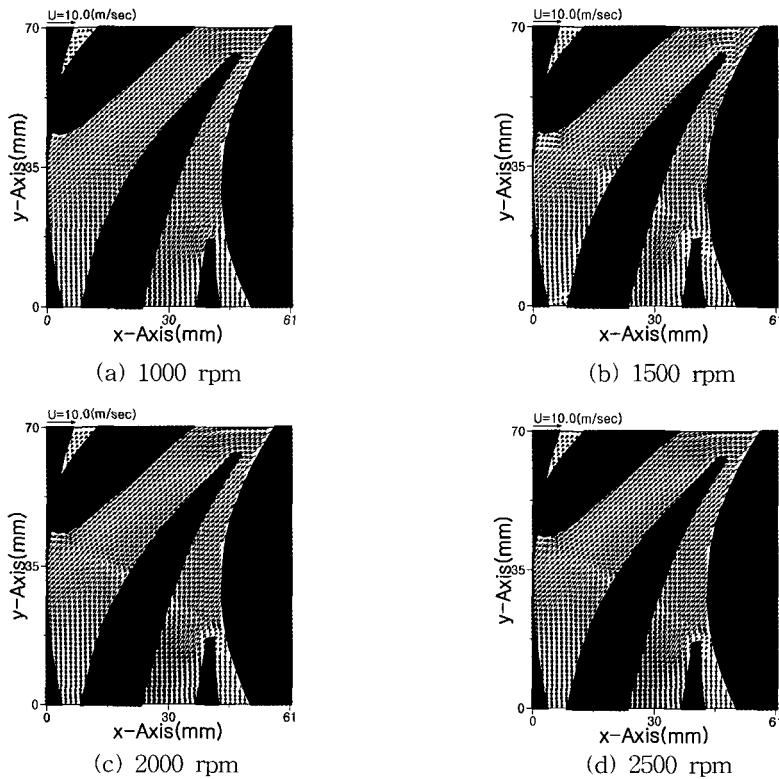
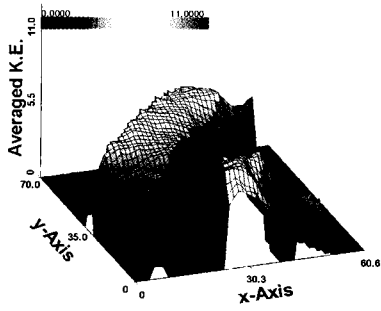
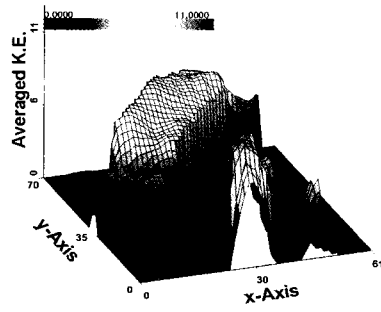


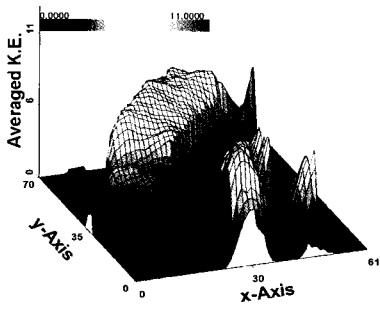
Fig. 6 Time-averaged velocity distribution



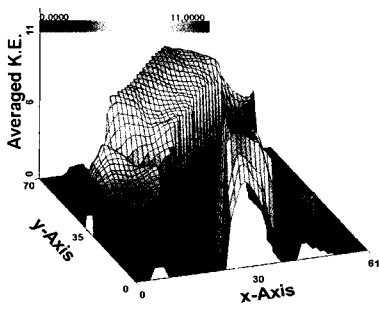
(a) 1000 rpm



(b) 1500 rpm

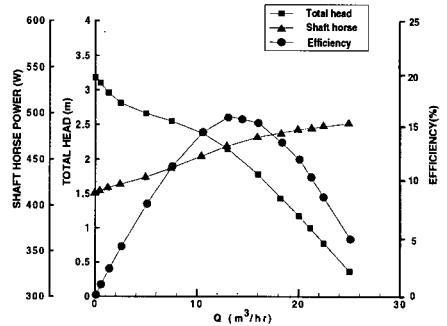


(c) 2000 rpm

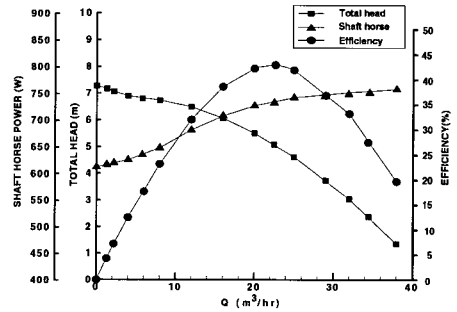


(d) 2500 rpm

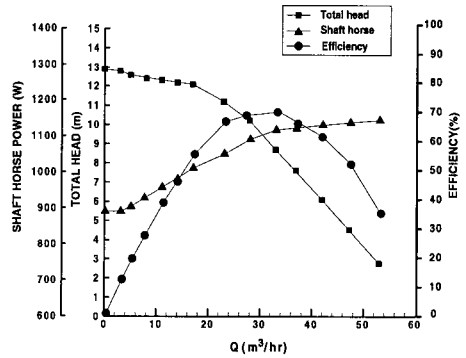
Fig. 7 Distributions of kinetic energy



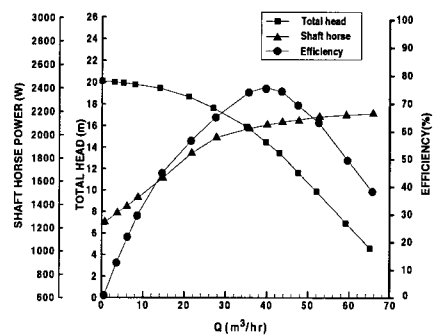
(a) 1000 rpm



(b) 1500 rpm



(c) 2000 rpm



(d) 2500 rpm

Fig. 8 Characteristic curve of diffuser pump

Fig. 6과 Fig. 7은 각각의 회전속도에 대해서 시간평균 속도벡터와 운동에너지를 나타낸 것이다. 각각의 경우에 대해서 속도벡터를 관찰해보면 임펠러의 회전속도가 증가할수록 안내깃 입구측의 속도벡터는 빨라지고 이로 인해서 회전속도가 커질수록 운동에너지는 점점 더 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 운동에너지는 임펠러부근에서 높게 나타날 것이라는 예상과는 달리 안내깃 입구에서 가장 높게 나타나고 있다.

Fig. 8은 측정결과를 나타낸 디퓨저 펌프의 특성 곡선도이다. 펌프의 특성을 표시하기 위해서 임펠러의 회전속도를 일정하게 두고 횡축에 유량, 종축에 양정, 축동력, 효율을 잡아 각각 특성곡선을 도시하였다. 최고 효율점은 2500rpm일 때 유량이 $40 \text{ m}^3/\text{hr}$ 에서 73%로 나타났으며 $H \sim Q$ 가 만나는 점, 즉 $Q=0$ 일 때의 체절양정(shut off head)은 20.1 m 이다. 또한 유량이 증가함에 따라 양정이 감소하는 하강특성곡선을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속유동장에 대응할 수 있는 PIV시스템을 우선 구성하고자 하였으며, 이를 이용하여 원심 디퓨저 펌프의 안내깃 입구영역을 대상으로 속도벡터의 계측을 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PIV 계측결과 임펠러 구동에 의해 회전속도가 빨라질수록 그리고 틈새가 커질수록 임펠러의 구동에 의해 안내깃입구측에 들어오는 유체의 최대속도는 증가하나 유동패턴은 비슷한 양상을 나타낸다.
2. 틈새가 커지면 커질수록 디퓨저펌프의 축동력은 증가하고 전양정과 효율은 감소한다.
3. 다양한 회전속도에서 디퓨저 펌프의 효율은 유량이 증가할수록 증가하고 일정한 유량에서부터 효율이 감소하고 있으며, 회전속도 2500rpm일 때 유량이 $40 \text{ m}^3/\text{hr}$ 에서 최고 효율을 나타내었다.

참고문헌

- [1] F.A.Muggli, K. Eisele, M.V. Casey, "Flow Analysis in a Pump Diffuser", Part2 : Validation and Limitations of CFD, Trans. ASME, JFE Vol. 119, 1997, pp.979-984.
- [2] W. Qin, H. Tsukamoto, "Theoretical Study of Pressure Fluctuations Downstream of a Diffuser Pump Impeller", Part 2 : Effects of Volute, Flow Rate and Radial Gap, Trans. ASME, JFE Vol. 119, 1997, pp.653-658.
- [3] 이영호, "PIV의 분류 및 원리", 대한기계학회지, 36권 제12호 (1996), pp. 1146~1162.
- [4] 최장운, 이영호, "PIV에 있어서의 입자추적기법의 개선", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권 (1995), pp. 360~463.
- [5] W. Merzkirch, "Flow Visualization", 2nd ed., Academic Press Inc., 1987.
- [6] R. C. Gonzalez, "Digital Image Processing", Addison Wesley Press, 1987.
- [7] K. Nishino, N. Kasagi and M. Hirata, "Three-dimensional Particle Tracking Velocimetry Based on Automated Digital Image Processing", ASME J. Fluids Eng., Vol. 111, No. 4, pp. 384~391, 1989.
- [8] 이영호, 최장운, "PIV에서의 계조치 상호상관법개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권 (1996), pp. 396~400.

저 자 소 개



김정환 (金貞煥)

1968년 2월생, 1998년 부경대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2002년~2003년 일본큐슈공업대학 기계시스템공학과 특별연수생(일본학술진흥재단 지원), 2003년 8월 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 당회회 정회원. 관심분야 : PIV, CFD, 풍력발전, 파력발전, 유체기계



김범석 (金範錫)

1975년 11월생. 2001년 한국해양대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2003년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국해양대학교 대학원 박사과정 재학중. 당학회 정회원. 관심분야 : PIV, CFD, 풍력발전, 유체기계



김진구 (金鎭九)

1957년 12월생, 1982년 한국해양대학교 기관공학과 (공학사) 졸업, 1991년 한국해양대학교 선박기계공학과 (공학석사) 졸업, 1997년 한국해양대학교 기관공학과(공학박사) 졸업, 1986-1998년 사단법인 한국선급 기관검사원, 1998년 현재 도립 충북과학대학 컴퓨터응용 기계과 교수, 당학회 정회원



함승덕 (咸承德)

1956년 1월생, 1980년 충남대학교 정밀기계공학과(공학사) 졸업, 1982년 경희대학교 기계공학과 (공학석사) 졸업, 1993년 충남대학교 기계공학과 (공학박사) 졸업, 1987-1995년 대양특수제강(주)기술이사, 책임연구원, 2003년 현재 도립 충북과학대학 컴퓨터응용 기계과 교수, 당학회 정회원



이영호 (李英浩)

1958년 2월생. 1980년 한국해양대학기 관학과 졸업. 1986~1989년 일본동경대학 기계공학과(공학박사), 1980~현재, 한국해양대학교근무(기계·정보공학부, 교수), 2003. 3~현재, 조선·해양기자재 연구센터 소장, 2001. 5~현재, (재)부산테크노파크 분소장(운영위원), 관심분야 : PIV, CFD, 환경 에너지, 유체기계