

## 유체기계연구에서의 PIV의 적용 (Application of PIV to Fluid-Machinery Studies)

이 영 호 (한국해양대, 기계공)  
Y. H. Lee (Dept. Mech. Eng., KMU)

**ABSTRACT** : The application of PIV to the studies of fluid-machines, especially focused on turbo-machinery is reviewed by scrutinizing the previous investigation. Owing to the inevitable high-speed analysis of turbo-machinery consisting of rotating impellers, the importance of optical setups to cope with illumination problem is frequently mentioned as main ingredient affecting the PIV performance. And the acquisition of the relative velocity and absolute velocity is determined mainly by the optical recording conditions. A few studies cast satisfactory extension of the PIV data to quantitative pressure estimation and related noise assessment.

**Key words** : PIV, Turbo-machinery, Impeller, Volute, Diffuser, Relative Velocity, High-Speed Flow Measurement

### 1. 서 론

PIV는 유동장의 비정상 속도를 동시다점으로 연속으로 계측할 수 있음으로서 순시의 유동구조를 정량적으로 파악하는데 적합하다. 이 기법은 1980년대 중반에 처음으로 소개되었으며 그 동안 많은 개량을 거쳐 여러 분야에서 다양한 적용례[1]를 보이고 있다. 한편 유체기계의 연구에서도 유동장의 해석에 PIV를 이용하고자 하는 시도가 있어 왔으며 일부의 성과가 발표되고 있다. 이러한 배경으로부터 이 해설에서는 지금까지 행해져 왔던 유체기계의 PIV적용연구를 발표연대순으로 검토하여 보고자 하였으며 그 범위는 회전차의 운동을 동반하는 터어보형 유체기계에 국한하였다.

한편, 터어보기계는 일반적으로 회전차의 고속회전운동을 동반한다. 따라서 광학적인 접근기법이 까다로우며 특히 고속유동에 대응할 수 있는 PIV시스템의 구축에는 고가의 기본장비가 요구되고 있다. 그러나 실험목적상 저속유체를 대상으로 하는 경우에는 비교적 간단한 장치로서도 PIV의 기능을 충분히 발휘할 수가 있다. 이 해설에서는 개개의 연구결과로서 언급되고 있는 유동장의 특성에 관해서는 될 수 있으면 간략하게 소개를 하고자 하며 대신 실험장치의 구성을 포함한 PIV의 하드웨어 시스템에 초점을 맞추어 정리하였다. 따라서 이 내용은 앞으로 PIV를 각종 유체기계의 유동장 해석에 이용하고자 하는 연구자에게 실용적인 관점에서 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

### 2. PIV의 분류

PIV를 분류하는 기준으로서는 여러 가지가 있을 수가 있으며 그림1은 PIV에서의 속도벡터의 획득을 위한 알고리즘에 따른 구분을 하여 본 것이다. 터어보기계에 관련된 종래의 연구를 검토하여 보면 여기에서 언급되고 있는 네 가지의 기법이 모두 이용되고 있다. 따라서 속도벡터의 추출을 위한 알고리즘에는 기법에 따른 제한은 없으며 실험환경에 따른 각 연구자의 선택사항으로 여겨진다. 자세한 내용은 참고문헌[1]을 인용하고자 한다.

한편 터어보기계에서 PIV를 적용하는 경우에 다른 분야와 비교하여 보면 회전체내의 속도벡터를 표시하기 위한 좌표계의 설정이 중요한 문제가 될 수가 있다. 일반적으로 회전차와 함께 회전하는 좌표상에서의 상대속도의 표시가 행해지고 있으나 계측시스템으로서 절대좌표, 즉, 지면에 받

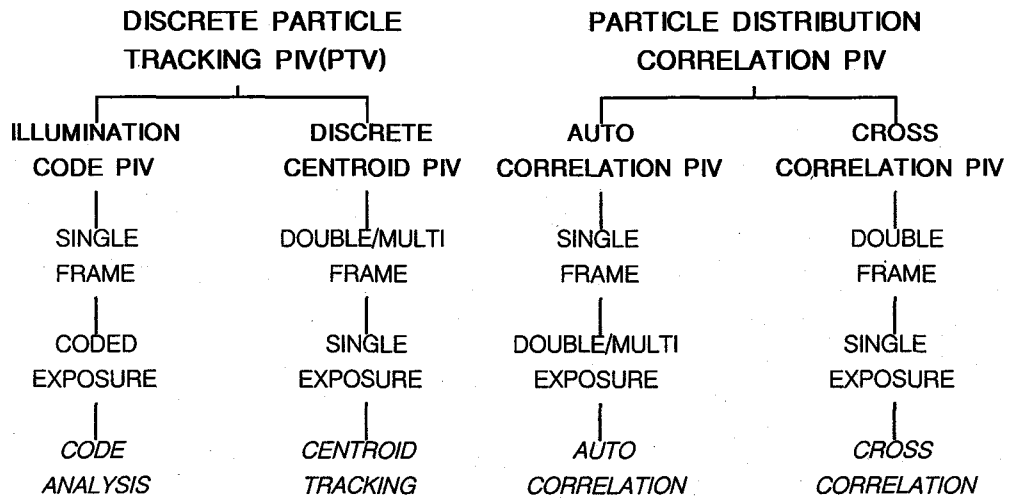


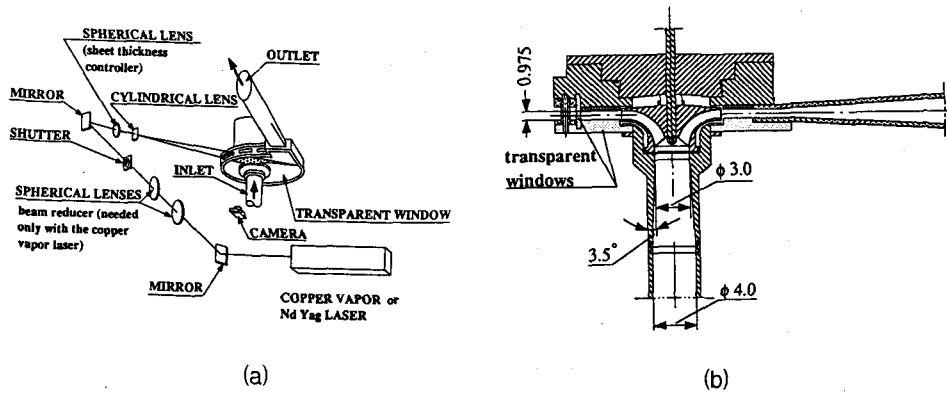
Fig.1 Classification of PIV by Identification Algorithm

침대를 둔 카메라로부터의 영상획득이 이루어지는 경우가 많다. 이러한 때에는 회전차의 모든 속도계측 지점에서의 원주방향 속도를 기지의 회전각속도 및 반경 값으로부터 계산하여 이를 속도 벡터 삼각형에서 감산하여 상대속도를 구하고 있다. 단, 절대속도의 값이 회전차의 반경방향에 따라 커짐으로서 PIV에서의 고속유동 계측을 위한 광학조건이 더욱 까다로워지는 점에 유의하여야 한다. 반면, 유동장의 영상획득을 회전차와 동일한 각속도로 회전하면서 행할 수가 있으면 이 영상으로부터 얻어지는 속도는 곧바로 상대속도분포가 될 수 있음으로서 유동장의 해석이 보다 용이해 질 수가 있다. 또한 원주속도의 증가에 따른 고속유동 계측의 문제점이 크게 경감된다. 따라서 원리적으로는 이와 같이 상대속도를 바로 구하는 것이 유리하나 실제상황에서는 고속회전 카메라의 부착에 따른 기계적인 진동 등의 문제점의 해결이 어려울 수가 있다. 그러나 최근에는 고해상도의 소형 CCD카메라 기술이 크게 발달하여 장래에는 이를 활용하는 방안이 매우 유용할 것으로 기대한다.

### 3. 적용례 및 검토

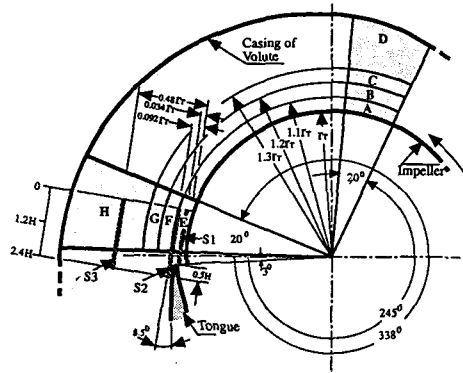
PIV의 유체기계 적용례로서 종래의 연구중 가장 체계적인 내용은 Dong 등이 행한 일련의 실험 결과이다(1992, [2],[3], (1995, [4],[5]). 이들은 2차원의 원심펌프를 대상으로 하여 벌루트케이싱의 내부유동 및 케이싱과 회전차와의 누설을 방지하기 위한 설단(tongue)부와 회전차사이의 상호작용 등에 관하여 논하고 있다. 이 연구에서는 특히 PIV의 속도데이터를 이용하여 난동성분 및 와도를 비롯하여 제반 유체역학적 물리량을 구하고 있으며, 특히 NS방정식을 이용한 순시의 압력 값의 산출 및 실험결과와의 비교 그리고 이를 바탕으로 한 소음특성과의 연계성을 논하고 있는 점이 주목된다.

그림2는 실험장치의 구성을 보여주고 있다. 그림2a는 펌프실험장치의 광학배치를 보이고 있으며 그림2b는 회전차 및 수정된 형상의 벌루트를, 그리고 그림2c는 PIV의 계측대상 영역을 나타내고 있다. 조명용 광원으로서 출력불명의 Nd-Yag 펄스레이저를 이용하여 같은 시간간격(160 $\mu$ s)으로 세 번의 연속펄스조명을 행하여 35mm카메라에 유동장의 추적입자 영상을 기록하고 있다. 또한 입자로서는 작동수와 유사한 밀도를 갖는 30 $\mu$ m이하의 형광염료재질로 만든 자체제조품을 사용하고 있다. 회전차의 회전수는 890rpm이며 직경은 약 250mm이다. 얻어진 사진을 현상하여 이를 CCD카메라로 입력한 다음 영상의 계조치를 대상으로 자기상관계수를 구하여 속도벡터를 구하고 있다. 그림3은 이들이 행한 연구결과의 일부이다. 그림3a는 계측된 시간평균의 속도벡터를 나



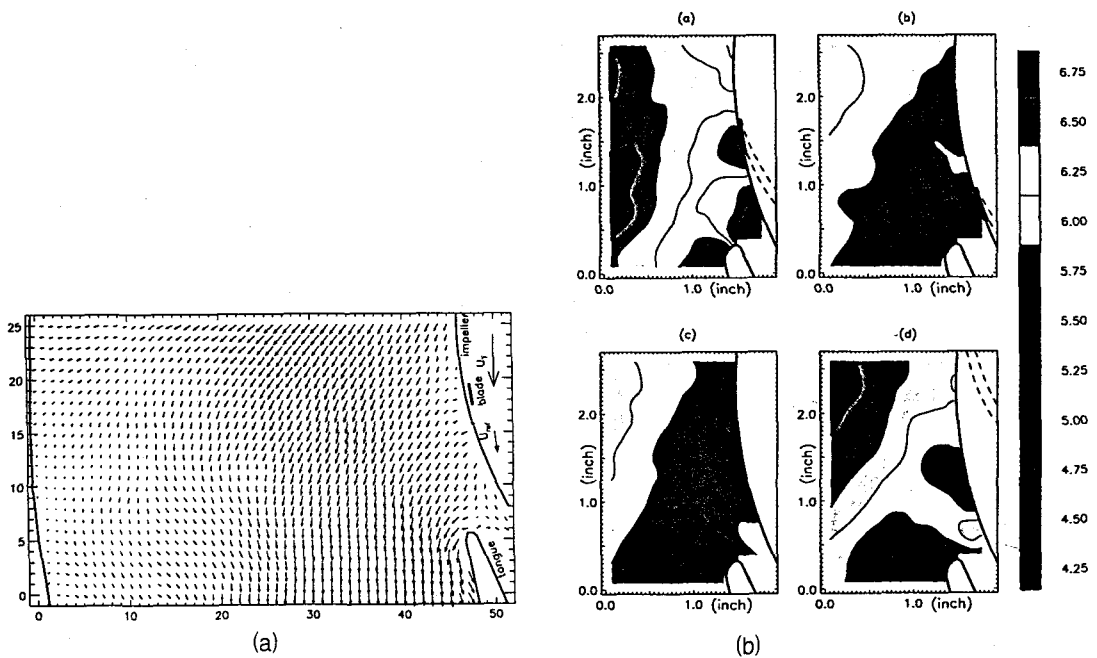
(a)

(b)



(c)

Fig.2 Schematic Arrangement of Experimental System : (a) Optical Setup, (b) Impeller & Volute, (c) Blades and Measuring Sections.



(a)

(b)

Fig.3 Example of PIV Results by Dong et. al. : (a) Phase-averaged Velocity Vectors, (b) Pressure Distribution due to Impeller Rotating Angles

타내고 있으며 그림3b는 회전차의 각도에 따른 설단주변의 압력분포를 보여준다. 그러나 이들의 결과에서는 회전차내부에서의 속도벡터의 계측결과가 결여되어 있는 점이 지적될 수 있다.

Lourenco(1993, [6])는 NACA0012 의 단일익에 대하여 피칭운동시의 비정상 속도계측을 행한 결과를 보고하고 있다. 이중필스레이저 및 35mm카메라를 이용하여 영상을 기록하고 Young의 프린지를 해석하는 자기상관법을 적용하여 순시의 속도벡터 및 와도방출분포를 나타내고 있다. 또한, Massons 등(1993, [7])은 Savonius풍차의 정지익에 대하여 수중에서 저속의 채널유동 실험을 행하고 순시의 속도벡터를 구하였다.

Akin과 Rockwell(1994, [8],[9])은 고밀도영상 자기상관PIV기법을 적용하여 원심펌프의 회전차주변의 디퓨저정익을 포함한 영역에 대하여 순시의 속도벡터를 구하였다. 또한 이 데이터를 이용하여 와도의 분포를 도시하였다. 그림4a는 회전차 및 디퓨저 정익의 배치도를 보여주며 그림4b는 절대좌표계에서의 유선도에 와도분포를 겹쳐서 나타내고 있다. 실험에 이용된 회전차의 내경은 57mm이며 외경은 171mm이다. 회전차내경에서의 접선속도는 0.27m/s이며 입구유입속도는 0.1m/s이다. 조명은 4W의 연속광 Argon이온레이저를 이용하였으며 72면 회전경(rotating mirror) 및 영상전위를 위한 진동경(oscillating mirror)을 채택하여 펄스조명기능을 행하였다. 작동수중의 입자는 12미크론 전후의 금속코오팅재질의 것을 사용하였다. 영상은 35mm카메라에 기록하였으며 이중FFT을 행하여 자기상관계수를 구하였다.

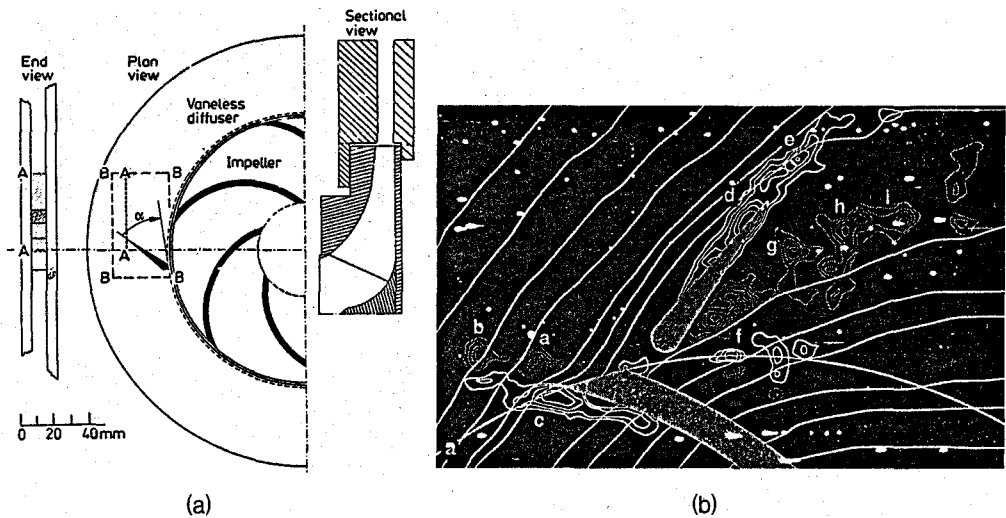


Fig.4 PIV by Akin & Rockwell[8],[9] : (a) Impeller-Diffuser System, (b) Contours of Constant Vorticity

Hanaoka 등(1994, [10])은 익의 개수가 네 개인 저속회전통내의 반응로의 수중 모델실험을 행하고 개별입자 추적기법 중 도심좌표를 이용한 이치화 상호상관법을 적용하여 속도벡터를 구하여 유동특성을 논하였다.

Irabu 등(1994, [11])은 4프레임의 연속입자 도심좌표를 이용하여 속도벡터를 구하는 개별입자 추적기법을 적용하여 원심식 회전체주위의 설단부 및 회전체의 내부유동을 영상처리하여 추적입자의 가시화사진과 함께 순시의 속도벡터를 제시하였다.

Cronmeyer 등(1994, [12])은 유입속도 불명의 축류펌프의 입구정익에 대하여 기포를 추적입자로 하여 속도벡터를 구하였다. 추출알고리즘으로서 neural network를 채택하였으며 조명은 4W의 Argon연속광 레이저를 이용하였고 영상획득에는 CCD카메라 및 PC용 이미지그래버를 사용하였다.

Kawahashi 등(1994, [13],[14]), (1995, [15],[16]), (1996, [17])은 두 종류의 원심식 송풍기의 내부유동에 대한 일련의 PIV 계측결과를 제시하고 있다. 그림5a는 이중빔조명의 원리를 나타내며 그림5b

는 전체의 구성을 보여주고 있다. 반경팬의 경우에는 24매의 평판익으로 구성되어 있으며 내경은 150mm, 외경은 200mm, 익폭은 70mm 그리고 익판두께는 2mm이다. 또한 다익팬의 내경은 122mm, 외경은 152mm, 익폭이 70mm이며 전방향 익수는 42매이다. 고속의 펄스광을 연속으로 공급하기 위하여 고가의 펄스레이저를 사용하는 대신 회전경 및 출력4W의 Argon연속광 레이저를 채택하여 이를 이중빔 스위프(dual beam sweep)법으로 명칭하였다. 추적입자는 직경  $10\mu\text{m}$ 전후의 운모입자이며 영상의 기록은 35mm카메라를 이용하였다. 속도벡터의 획득기법으로는 고영상밀도의 레이저스캐클법을 채택하였고 광 Fourier변환에 의한 Young의 프린지해석을 행하였다. 반경팬의 회전수는 1,000rpm이고 다익팬의 경우에는 2,000rpm이다. 그림5c는 반경팬에서의 실제측정을 보이며 그림5d는 다익팬 내부의 순시속도벡터를 나타내고 있다. 어느 경우에도 계측속도가 10m/s 전후의 고속이며 이 값은 상대속도이므로 실제로는 최대 40m/s정도의 절대속도를 계측하였음을 알 수가 있다. 공기를 대상으로 하여 본격적으로 회전차의 내부유동을 실측한 예가 될 수가 있다. 특히 저출력의 연속광레이저를 이용한 것과 레이저시이트광을 이용한 가사화기법을 동시에 채택한 점 등이 주목할 만하다.

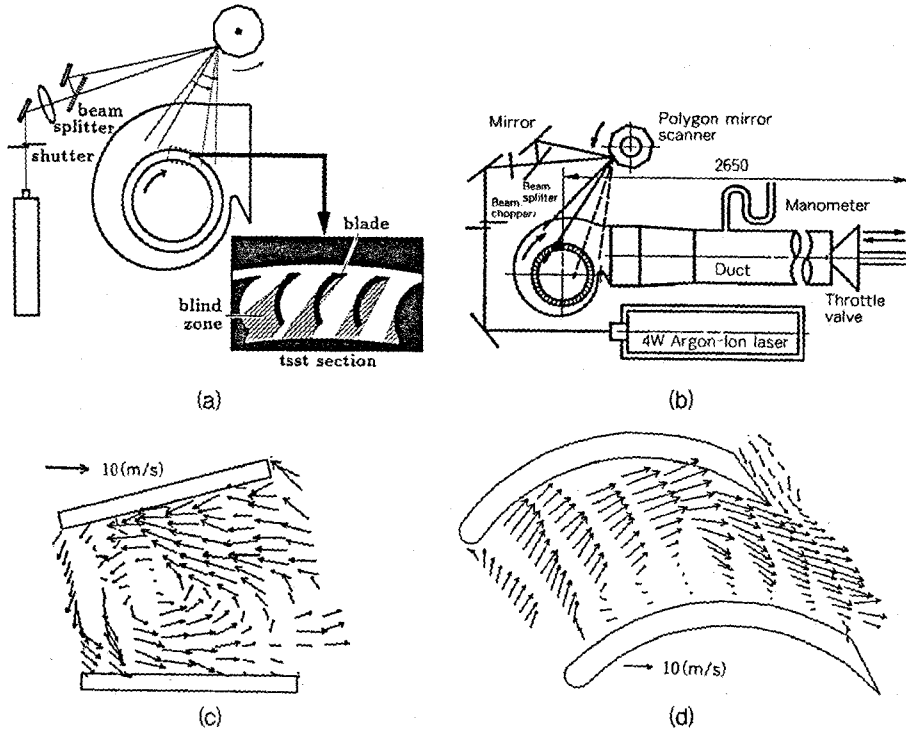


Fig.5 PIV Application to Radial and Multi-Blade Fans(Kawahashi et. al) : (a) Optical Setup, (b) Overall Arrangement, (c) Instantaneous Velocity Vectors of Radial Fan, (d) Example of Multi-Blade Fan

Hayami(1995, [18])는 Francis형의 펌프수차의 내부유동에 계조치 상호상관법을 적용하여 상대속도를 직접계측하였다. 그림6a는 이 때의 실험배치를 보여준다. 여기에서 특기할 만한 것은 비디오 카메라를 회전차의 축에 직접 연결하였으며, 이 축에 설치된 슬립링을 이용하여 외부모니터에서 유동장의 영상확인을 행할 수 있도록 한 점이다. 따라서 비디오카메라에 기록된 영상을 해석하면 회전차내의 상대속도를 바로 얻을 수가 있다. 이 때의 회전차속도는 18-30rpm이다. 또한 조명으로는 300W의 할로젠램프를 12개 사용하여 두께 2mm의 시이트광을 얻고 있다. 추적입자는 농도3 ppm의 알루미늄분말을 사용하고 있다. 따라서 개별입자의 확인이 실용상 불가능하며 미소 시간간격(1/30초)을 갖는 두 유동장영상에서 미소영역내의 계조치의 상관계수값을 비교하여 최대값을 나

타내는 검사영역내의 기하학적 중심위치를 속도벡터의 종점으로 결정하는 기법을 적용하고 있다. 또한 이 연구는 영상을 개선 위하여 간단한 영상강조법을 소개하고 있으며 상호상관계수의 계산 영역에 따른 이상치(outlier)의 발생률을 비교하고 있다. 그림6b는 해석결과 얻어진 회전차내부의 비정상 속도분포의 예를 나타내고 있다.

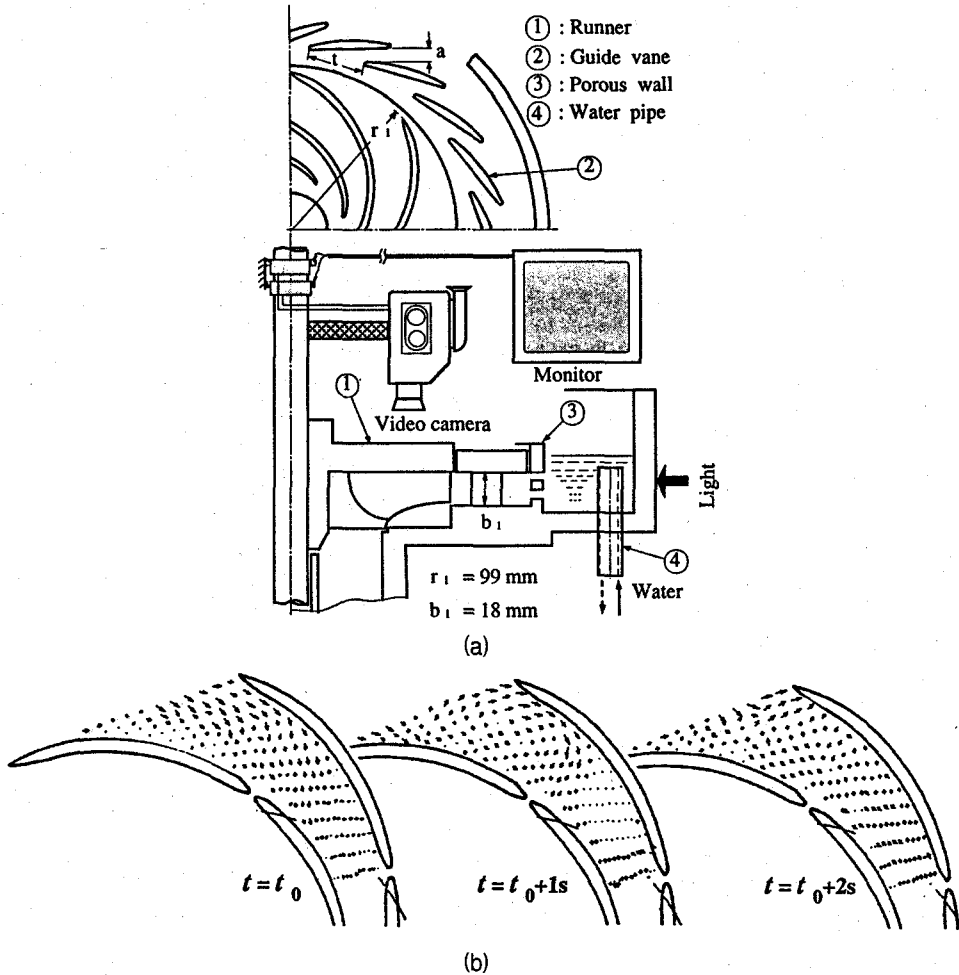


Fig.6 PIV by Hayami[18] : (a) Experimental Apparatus, (b) Example of Unsteady Flow

Yamamoto 등[19]은 연속된 두 프레임의 영상에서의 개별입자의 도심좌표를 구하고 이 위치를 (0, 1) 즉, 입자가 존재하는 픽셀은 1의 값을, 존재하지 않는 픽셀에는 0의 값을 부여하는 이치화 상호상관법을 채택하고 있다. 이들은 이 방법을 자동차용 토오크컨버터의 정지 스테이터 주변의 내부유동계측에 적용하였다.

Casey 등(1995, [20])은 디퓨저베인이 부착된 다단터빈펌프의 디퓨저 내부유동의 계측에 PIV를 적용하여 LDA의 결과와 함께 제시하고 있다. PIV의 추적입자로는 직경이  $60\mu\text{m}$ 인 폴리스티렌 입자가 사용되었으며 추적기법으로는 입자의 궤적에 대한 조명부호법을 채택하고 있다. 회전차의 외경은 350mm이며 회전수는 1000rpm이다. 조명으로서의 출력불명의 Argon이온레이저를 사용하였으며 영상의 기록은 제원불명의 고속도 비디오카메라를 이용하고 있다. 회전차의 회전운동과 카메라입력과의 동기여 의하여 회전차의 각도변화에 따른 디퓨저내부의 비정상유동을 잘 나타내고 있다. 그림7a는 실험장치의 구성을 보여주며 그림7b는 디퓨저내부에서의 비정상 속도분포를 나타내고 있다.

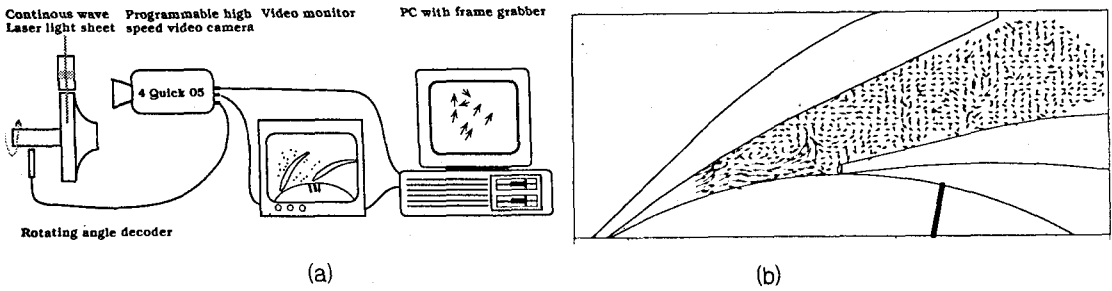


Fig.7 Diffuser Flow Analysis of Turbine Pump(Casey, [20]) : (a) PIV System (b) Instantaneous Velocity Vectors within Diffuser Passage

Kobayashi 등(1996, [21])은 단형용기내의 직경120mm의 4익축류팬 주위의 공기유동을 계측한 결과를 보고하고 있다. 팬의 회전수는 2000rpm이며 추적입자로는 직경 $30\mu\text{m}$ 전후의 마이크로별론을 사용하고 있으며 AOM을 이용한 출력4W의 Argon레이저를 조명으로 이용하였다. 이 때의 펄스폭은 0.2ms, 펄스간격은 0.5ms이다. 속도벡터의 획득에는 네 프레임의 개별도심좌표의 추적을 행하는 기법을 채택하고 있다.

Choi 등(1996, [22])은 2차원의 계조치 상호상관계수의 직접계산법을 적용하여 가정용 냉장고의 증발기실 모델내의 냉기팬 입구유동을 계측한 결과를 제시하고 있다. 추적입자는 알루미늄분말이며 300W의 Argon레이저를 조명으로 이용하였다. 계측영역은  $200\times 200\text{mm}$ 이며 유동장의 영상을 Hi-8mm 캠코더에 기록하여 PC지원 이미지그래버에서 해석을 행하고 있다. 여기에서는 상호상관계수의 계조치의 최대값을 정도높게 구하기 위한 보간기법을 새롭게 제시하고 있으며 순환팬에 접근하는 비정상적인 유동패턴을 도시하고 있다. 그림8a는 팬입구 주변의 형상을 보여주며 그림 8b는 (B)계측영역에서의 순시속도벡터의 분포를 나타내고 있다.

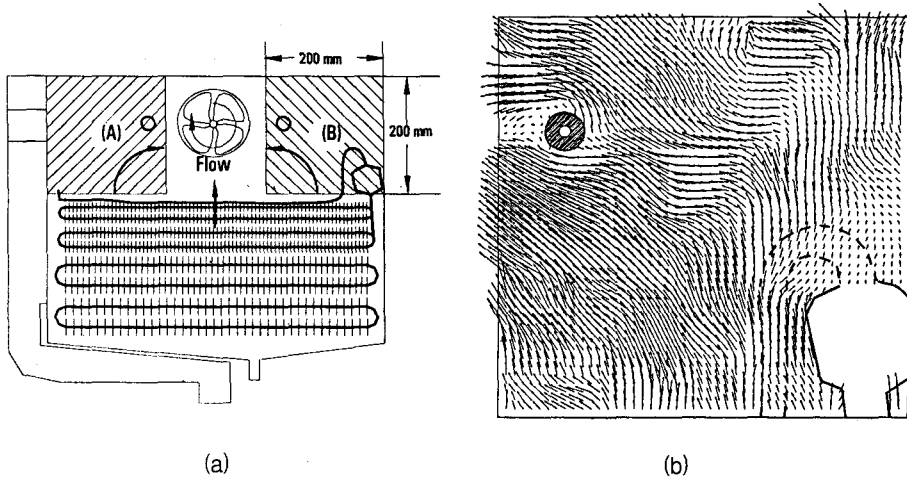


Fig.8 PIV Application of Inlet Region of Evaporator Fan(Choi, [22]) : (a) Definition of Measuring Region, (b) Instantaneous Velocity Distribution of (B) Region

#### 4. 결론

PIV의 터어보기계 적용례를 문헌을 통하여 검토하여 보았다. 그 결과 대부분의 연구는 90년대에 행해졌으며 크게 정의 또는 디퓨저 등과 같은 터어보기계의 정지요소부분에 대한 결과와 회전차내부의 통로에 대한 상대속도의 계측결과로 구분될 수가 있었다. 이 중 PIV에서의 순시속도벡

터를 이용하여 유동장의 압력분포까지를 정량적으로 추산하여 실험결과와 비교하면서, 유체소음과의 연계까지를 논한 결과와 실제의 공기팬을 모델로 하여 회전차내의 고속의 공기유동의 속도 분포까지를 동시다점으로 측정한 결과 등이 주목할 만한 내용으로 평가된다.

향후에는 이와 같은 선행연구결과를 기초로 하여 보다 개선된 PIV기법이 유체기계의 유동장 해석에 적용될 것으로 전망하며 특히 종래와는 다른 간편하고 효율적인 광학적 배치 및 상대속도분포의 직접 획득에 관한 기술의 출현이 크게 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. 이영호, 최장운, 1996, PIV의 분류 및 원리, *대한기계학회지 제36권 제12호*, pp.1146-1162.
2. R.Dong, S.Chu, J.Katz, 1992, Quantitative Visualization of the Flow Within the Volute of a Centrifugal Pump. Part A : Technique, *Trans. ASME, JFE Vol. 114*, pp.390-395.
3. R.Dong, S.Chu, J.Katz, 1992, Quantitative Visualization of the Flow Within the Volute of a Centrifugal Pump. Part A : Results and Analysis, *Trans. ASME, JFE Vol. 114*, pp.396-403.
4. S.Chu, R.Dong, J.Katz, 1995, Relationship between Unsteady Flow, Pressure Fluctuations, and Noise in a Centrifugal Pump-Part A : Use of PDV Data to Compute the Pressure Field, *Trans. ASME, JFE Vol. 117*, pp.24-29.
5. S.Chu, R.Dong, J.Katz, 1995, Relationship between Unsteady Flow, Pressure Fluctuations, and Noise in a Centrifugal Pump-Part B : Effects of Blade-Tongue Interactions, *Trans. ASME, JFE Vol. 117*, pp.30-35.
6. L.Lourenco, 1993, Flow Visualization and Image Analysis ed. by F.T.M. Nieuwstadt : Recent Advances in LSV, PIV and PTV, *Kluwer Academic Pub.*, pp.81-99.
7. J.Massons, Jna.Gavalda, J.Escoda, X.Ruiz and F.Diaz, 1993, Flow Visualization and Image Analysis ed. by F.T.M. Nieuwstadt : Characterization of Savonius Rotor Wake Using Image Processing Techniques, *Kluwer Academic Pub.*, pp.145-157.
8. O.Akin, D.Rockwell, 1994, Interaction of Zones of Flow Separation in a Centrifugal Impeller Stationary Vane System, *Exp. in Fluids Vol. 17*, pp.427-433.
9. O.Akin, D.Rockwell, 1994, Flow Structure in a Radial Flow Pumping System Using High-Image Density Particle Image Velocimetry, *Trans. ASME JFE Vol.116*, pp.538-544.
10. Y.Hanaoka, H.Takahashi and I.Tokura, 1994, A Study on Flow Field in a Rotating Column Type Reactor by Visualized Images, *Proc. of 3rd ASV Symp.* pp.745-750.
11. K.Irabu, E.Yamazato and I. Teruya, 1994, Velocity Measurement of Flow around Volute Tongue of the Vaneless Radial Diffuser, *Proc. of 3rd ASV Symp.*, pp.751-756.
12. J.Cronemeyer, M.Dues, C.Heinzel, M.Helbing, 1994, Image Processing Techniques with Neural Networks for Flow Visualization in Rotating Machinery, *Proc. of FLUCOME'94 Vol.1*, pp.87-93.
13. O.Sekimoto, M.Kawahashi, H.Hirahara, 1994, Visualization of Flow in a Multi-Blade Fan(1st Report), *Proc. of V.S.J. Visualization Symp. Vol.14 Suppl. No.1*, pp.163-166.(Japanese)
14. O.Sekimoto, M.Kawahashi, H.Hirahara, 1994, Visualization of Flow in a Multi-Blade Fan(2nd Report), *Proc. of V.S.J. Visualization Symp. Vol.14 Suppl. No.2*, pp.61-64.(Japanese)
15. M.Suzuki, M.Kawahashi, H.Hirahara, 1995, Visualization and Velocity Measurement of Flow through Impeller of a Multi Blade Fan by Using PIV Technique, *Proc. of V.S.J. Visualization Symp. Vol.14 Suppl. No.1*, pp.163-166.(Japanese)
16. M.Kawahashi, K. Yamamoto, 1995, Speckle Method Using Beam Scanning Techniques, *Proc. of Int. Workshop on PIV-Fukui'95*, pp.155-158.
17. K.Yamamoto, M.Kawahashi, O.Sekimoto, 1996, Analysis of Impeller Flow Field in Centrifugal Fan by Image Processing, *J. Visualization Soc. Japan Vol. 16, No.60*, pp.27-33.(Japanese)
18. H.Hayami, 1995, PIV in Fluid Machinery, *Proc. of Int. Workshop on PIV-Fukui'95*, pp.237-242.
19. F.Yamamoto, M.Iguchi, A.Wada, M.Koketsu, 1995, Mathematical Fundamentals of the Binary Image Cross-Correlation Method for 2-D and 3-D PTV, *Proc. of Int. Workshop on PIV-Fukui'95*, pp.79-90.
20. M.Casey, K.Eisele, Z.Zhang, 1995, Flow Analysis in a Pump Diffuser, Part1 : LDA and PTV Measurements of the Unsteady Flow, *ASME FED-Vol.229 Laser Anemometry*, pp.89-100.
21. T.Kobayashi, T.Saga, S.Segawa, T.G.Kim, J.M.Choi, S.N.Kim, 1996, Image Analysis of an Air Flow around an Axial Flow Fan, *Proc. of V.S.J. Visualization Symp. Vol.16 No.1*, pp.223-226.(Japanese)
22. J.W.Choi, D.H.Doh and Y.H.Lee, 1996, A PIV Application to the Evaporator-Room Flow in Refrigerator, *Proc. of 4th Asian Symp. on Visualization ASV'96*, pp.299-304.