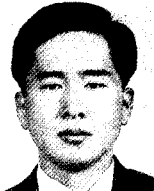


# 4. 신기술소개

## 선박에서 유체기계 및 환기성능평가를 위한 PIV의 적용 Application of PIV to Fluid Machinery and Assessment of Ventilation Performance in Ships



조대환  
D-H Cho

• 목포해양대학교  
기관공학부



이영호  
Y-H Lee

• 한국해양대학교  
기계·정보공학부

### 1. PIV의 기술현황

PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계)는 1980년대 중반부터 본격적으로 사용되기 시작한 새로운 유동장 속도계측기법이다<sup>1)</sup>. 이 방법은 디지털 영상처리기술과 종래의 정성적인 가시화기법을 병용한 것으로서 최근의 비약적인 컴퓨터관련 기술의 발달에 힘입어 매우 효율적으로 비정상 유동장의 속도를 전 영역에 걸쳐 동시 측정 그리고 연속적으로 계측할 수가 있다. 디지털 영상처리분야는 컴퓨터 관련기술과 병행하여 급속하게 발달하여 왔으며 가시화(visualization)에 관련된 연구자들이 이와 같은 기법을 적극적으로 수용하여 유동장의 영상처리를 신속하고도 정도 높게 또한 경제적으로 수행할 수 있게 되었다. 현재에는 레이저의 광학특성과 정지사진을 적용한 초기의 기법에서 크게 발전하여 종래의 PIV성능을 상회하는 우수한 방법들이 다양하게 제안되고 있으며 많은 적용례가 보고되어 있다.

한편, PIV에서 영상으로 기록된 유동장은 언제나 재처리가 가능하여 실험반복에 따른 유동장의 재현성문제로부터 자유로운 특징이 있다. 또한 이 방법은 원리적으로 3성분의 속도를 동시에 전 영역에 걸쳐 연속적으로 계측할 수가 있으며 이 값들을 NS방정식에 대입하여 압력구배향을 공간 적분

하면 벽면의 정압까지를 포함한 순간의 압력장치를 구할 수가 있다. 또한 추적입자로서 온도 감온입자를 이용하면 액체공간에서의 상온범위의 온도분포까지도 동시에 구해진다. 이와 같이 PIV는 5종류의 유체의 물리량을 원리적으로 모두 한꺼번에 측정할 수 있으므로 전선유체역학에 대응할 수 있는 유일한 계측기법으로 인식되고 있다.

그러나, 이와 같은 원리적인 장점을 갖는 PIV를 터보기계의 유동장 해석에 본격적으로 적용하기 시작한 것은 1990년대 초반부터인 것으로 조사되고 있다. 또한 대부분의 결과가 임펠러와 같은 회전동역보다는 정지익에 대한 계측결과가 주류를 이루고 있다. 이것은 일반적으로 터보기계에서와 같은 임펠러의 내부흐름을 대상으로 하는 경우에는 고속회전에 따른 유동계측의 문제, 즉, PIV에 적합한 영상을 얻기에 충분한 조명조건의 확보가 어려운 점과 카메라에 입력되는 입력장치의 시간간격을 매우 짧게 하여 선명한 추적입자의 영상을 얻는 하드웨어기술의 구축이 어려웠기 때문이다. 따라서, PIV를 회전유체기계 내부 유동장의 계측에 적용함에 있어서 발생하는 제반 문제점의 완전한 해결은 아직까지 용이하지 않은 실정이다. 이러한 배경으로부터 현재 2차원의 유동장에 대하여 실용적인 계측성과를 자랑하는 PIV연구자의 관점에서 보면 매우 불만족스러운 것이 현실이다. 그러

나, PIV고유의 계측특성을 최대한 발휘하여, 유체 기계의 회전 내부 유동장을 해석하기 위하여 여러 가지의 관련기법들이 앞으로 개발될 수 있으며, 이 결과는 궁극적으로 CFD분야와의 상호보완에 의하여 유체기계의 성능해석 및 설계기법에 결정적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

선박에 있어서 환기시스템은 하나 또는 다수의 공급원으로부터 필요로 하는 장소에 적정량의 공기를 공급 및 배출시키는 설비이다. 특히 탱커의 화물구역과 같이 필요에 따라 내부전체의 공기를 치환해야하는 구역의 경우 내부에 그물망처럼 연결되어 있는 배관시스템을 이용하게 되며, 국제협약 및 선급에서는 해당구역의 총 용적을 기준으로 하여 시간당 치환되는 유량으로 환기능력을 규정하고 있다. 그러나 환기성능은 선체의 구조에 따른 배관계통의 부적합한 배치와 관로손실 등의 여러 원인으로 인하여 설계용량에 미치지 못하는 경우가 많은 실정이다. 이것은 환기성능의 예측이 공학적으로 가장 실용적인 문제들 중의 하나이지만 대기온도 및 습도의 변화, 차폐비, 형상비, 장애물의 영향 등 고려해야할 변수들이 많기 때문에 실험이나 해석상에 어려움이 있기 때문이다. 지금까지의 연구결과를 보면 상기의 여러 변수의 종합적인 영향으로부터 개별적인 영향을 구별해내고자 하는 연구들이 진행되어왔다. 비접촉의 방식으로 전유동장의 속도분포를 계측할 수 있는 PIV의 적용사례도 덕트와 배관계통을 중심으로 연구가 진행되고 있는 것으로 조사되고 있다. 기체실험에 있어서 공간에 적절하게 추적입자를 분포하는 방법과 낮은 출력의 조명을 PIV에 응용하는 방법들이 개발되고 있어 급기 및 배기에 따른 기류의 속도분포를 보다 쉽게 계측할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 환기성능의 평가는 추적가스의 농도를 분석하여 구하고 PIV기법으로 기류분포를 파악함으로써 환기성능의 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 배경으로부터 이 해설에서는 유체기계와 환기시스템의 고속유동 및 공간에서 기류의 속도분포를 계측하는 PIV의 적용례를 소개하고, 관련분야에서 연구개발에 종사하는 회원 및 전문가에게 필요하다고 판단되는 정보를 요약하여 제공함

을 목적으로 하였다.

## 2. PIV 계측기술의 원리

PIV에서는 해석유동장의 영상정보를 이용하며, 이때에 유동장에는 작동유체와 동일한 미소추적입자가 분포되어 있으며, 다양한 영상입력장치를 이용하여 한순간의 입자분포를 얻게된다. 일반적으로 입력장치로서는 고해상도의 CCD카메라가 이용되거나 고속도 비디오카메라가 채택된다. 현재에는 CCD카메라가 입력장치로서 널리 사용되고 있으며, CCD카메라의 비디오동기신호와 연계된 펄스발생기가 펄스조명의 간격 및 펄스 폭을 정확하게 조정한다. PIV의 발전사를 보면, 초기에는 정지카메라 및 펄스레이저를 이용한 단일 프레임(frame, 카메라로부터의 얻을 수 있는 한 순간의 유동장 정보)의 자기상관PIV가 주류를 이루었으나, 현재에는 미소시간간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상정보를 이용한 상호상관PIV가 각광을 받고 있다. 그림1은 상호상관PIV에서 사용되는 영상정보의 포맷을 보이고 있다. 상호상관PIV에 대한 자세한 원리는 참고문헌<sup>1)</sup>을 참조하기로 한다.

그림2는 CCD카메라에서 채택되고 있는 시간정보의 정의를 나타낸다. 우선, 60Hz에서 작동되는 모든 비디오기기(CCD카메라 포함)는 1초에 30 프레임의 영상이 연속적으로 획득되거나 디스플레이 되도록 되어있다. 그리고 1프레임의 영상정보는 앞서 언급한대로 두 필드(odd, even)의 영상으로 구성된다. 그리고 이들 두 필드간의 시간간격은

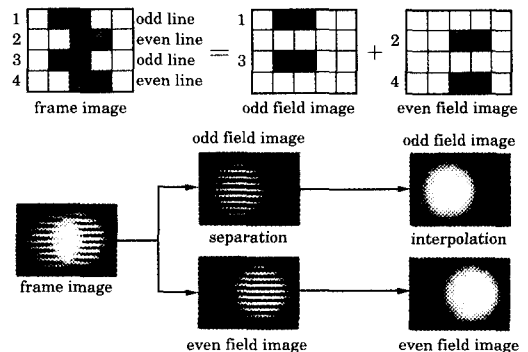


Fig. 1 Arrangement of Video Signal in PIV

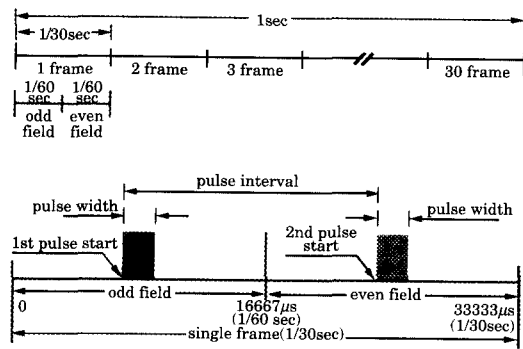


Fig. 2 Video Signal and Pulse Arrangement

1/60초이다. 따라서, 약 0.5m/sec이하의 저속 유동장에서 PIV를 적용하는 경우에는 특별한 펄스 제어 기능이 없어도 1/60초의 시간해상도를 갖는 완벽한 시계열 PIV데이터 처리가 가능해진다.

따라서 이때의 데이터 샘플링 속도는 60Hz가 된다. 그러나, 우리가 경험하는 대개의 유동장, 특히, 고속으로 회전하는 터보유체기계에서는 계측 속도가 수 m/sec에서 수십 m/sec에 이르며, 이러한 상황에서 가장 문제가 되는 것은 카메라로부터 얻어진 영상에서 저속유동장의 경우와 마찬가지로 추적입자의 구별이 뚜렷이 될 수 있도록 하는 적절한 조명의 확보가 관건이 된다. 현재 보편적으로 사용되고 있는 아르곤이온 연속광 레이저의 경우에는 300mW~10W급이 보통이며, Nd-Yag 펄스레이저는 30mJ/pulse~300mJ/pulse급이 주류를 이루고 있다. 많은 문헌을 참조하여 보면, 계측 영역의 크기를 100mm x 100mm로 한 경우에 5W의 연속광레이저-펄스발생기-AOM(Acoustic Optical Modulator) 사용시 10m/sec, AOM대신 게이트기능 영상강화CCD카메라(Gated Image Intensifier CCD)의 사용시 50m/sec정도까지의 계측이 가능하다. 한편, 100mJ/pulse 출력의 Nd-Yag dual 펄스레이저(펄스 폭은 5~10ns로 고정되어 있음)를 이용하는 경우에는 100m/sec~200m/sec범위의 속도계측이 가능하다. 즉, PIV에서는 속도벡터의 검출을 위한 알고리즘이 소프트웨어로서 일단 확보되면, 유동장의 속도에 관계없이 동일하게 적용되며, 단지, 조명을 비롯한 하드웨어의 조건만이 달라진다는 점이다. 이러한 점들 때문에 최근에는

저가이면서 신뢰성 있는 영상정보의 A/D보드가 PC용으로서 공급되면서부터, 많은 연구자들이 PIV에 관심을 갖게된 이유이기도 하다. 다음으로 유동장에 투입되는 입자의 공급문제이다. 물의 경우에는 비중이 1.0에 가까운 고분자화합물의 구형 입자(Nylon12, 폴리스틸렌 또는 PVC입자)가 자주 사용되며 그 크기는 보통 10~100μm범위이다. 공기의 경우에는 금속재질의 수μm의 미소분말(TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 사용될 수 있으며, 전용의 입자발생기를 이용하여 액체미립자를 다량으로 발생시키기도 한다. 고속 유동장에 대응하기 위하여 기술적으로 입자의 대량공급은 가능하나 가장 문제가 되는 것은 유동장 전체에 균일하게 분포되도록 하기 위한 추적입자의 주입방법이다. 이것은 저속 유동장에서도 마찬가지이며, 특히 실험물체의 영향 등으로 입자가 한 영역에 과도하게 모여있거나 반대로 입자가 희박하게 되면 PIV의 처리과정에서 에러백터의 발생을 초래한다. 추적입자의 양은 조명조건, 유동장의 크기, 입자크기, 적용 알고리즘 등에 따라서 시행착오적으로 결정하여야 하며 유동장이 훼손되지 않는 범위에서 조절하여야 한다.

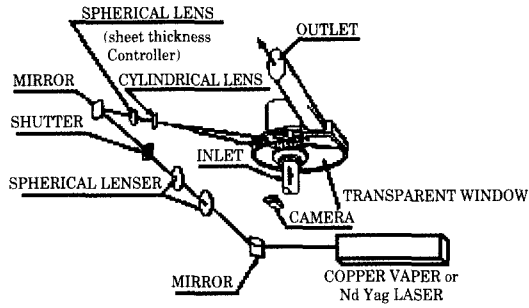
### 3. PIV의 유체기계적응

PIV의 유체기계 적용례로서 종래의 연구 중 가장 체계적인 내용은 Dong 등이 행한 일련의 실험 결과이다<sup>12-14</sup>. 이들은 2차원의 원심펌프를 대상으로 하여 벌루트 케이싱의 내부유동 및 케이싱과 회전차와의 누설을 방지하기 위한 설단(tongue) 부와 회전차 사이의 상호작용 등에 관하여 논하고 있다.

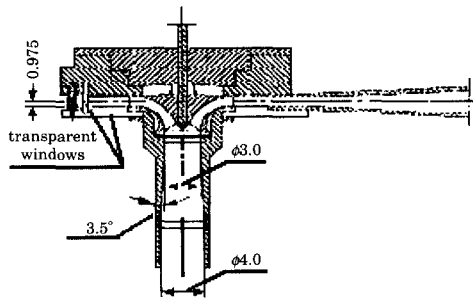
이 연구에서는 특히 PIV의 속도데이터를 이용하여 난동성분 및 와도를 비롯하여 제반 유체역학적 물리량을 구하고 있으며, 특히 NS방정식을 이용한 순시의 압력 값의 산출 및 실험결과와의 비교, 그리고 이를 바탕으로 한 소음특성과의 연계성을 논하고 있는 점이 주목된다. 그림3은 실험장치의 구성을 보여주고 있다. 그림3a는 펌프실험장치의 광학배치를 보이고 있으며 그림3b는 회전차 및 수정된 형상의 벌루트를 나타내고 있다. 조명용 광원으로는 출력불명의 Nd-Yag 펄스레이저를

이용하여 같은 시간간격(160 $\mu$ s)으로 세 번의 연속 펄스조명을 행하여 35mm카메라에 유동장의 추적 입자 영상을 기록하고 있다. 또한 입자로서는 작동수와 유사한 밀도를 갖는 30 $\mu$ m이하의 형광염료재질로 만든 자체제조품을 사용하고 있다. 회전차의 회전수는 890rpm이며 직경은 약 250mm이다. 얻

어진 사진을 현상하여 이를 CCD카메라로 입력한 다음 영상의 계조치를 대상으로 자기상관계수를 구하여 속도벡터를 구하고 있다. 그림4는 이들이

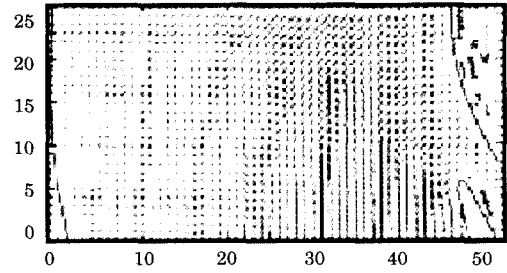


(a) Optical Setup

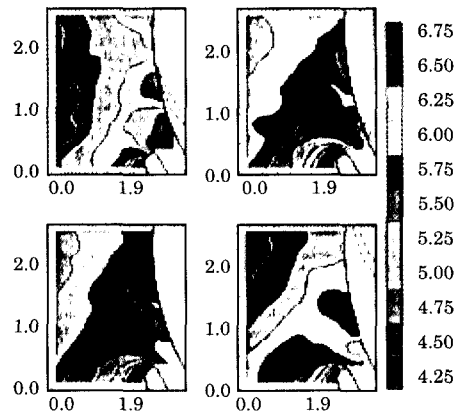


(b) Impeller & Volute

Fig. 3 Schematic Arrangement of Experimental System(Dong et al. 1992)

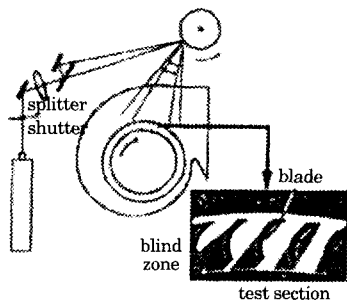


(a) Phase-averaged Velocity Vectors

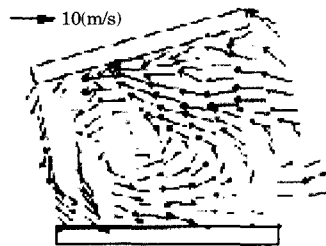


(b) Pressure Distribution due to Impeller Rotating Angles

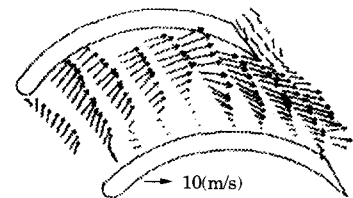
Fig. 4 Example of PIV Results(Dong et al. 1995)



(a) Optical Setup



(b) Instantaneous Velocity Vectors of Radial Fan



(c) Example of Multi-Blade Fan

Fig. 5 PIV Application to Radial and Multi-Blade Fans(Kawahashi, 1996)

행한 연구결과의 일부이다. 그림4a는 계측된 시간 평균의 속도벡터를 나타내고 있으며 그림4b는 회전차의 각도에 따른 설단 주변의 압력분포를 보여준다. 그러나 이들의 결과에서는 회전차 내부에서의 속도벡터의 계측결과가 결여되어 있는 점이 지적될 수 있다.

Akin과 Rockwell<sup>6-7)</sup>은 고밀도 영상 자기상관 PIV기법을 적용하여 원심펌프의 회전차 주변의 디퓨저 정익을 포함한 영역에 대하여 순시의 속도벡터를 구하였다. 또한 이 데이터를 이용하여 와도의 분포를 도시하였다. 실험에 이용된 회전차의 내경은 57mm이며 외경은 171mm이다. 회전차 내경에서의 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 금속코팅 재질의 것을 사용하였다. 영상은 35mm카메라에 기록하였으며 이중FFT를 행하여 자기상관계수를 구하였다.

Kawahashi 등<sup>8)</sup>은 두 종류의 원심식 송풍기의 내부유동에 대한 일련의 PIV 계측결과를 제시하고 있다. 그림5a는 이중빔 조명의 원리를 나타내며 그림5b는 전체의 구성을 보여주고 있다. 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 $\mu$ m전후의 운모입자이며 영상의 기록은 35mm카메라를 이용하였다. 속도벡터의 획득 기법으로는 고영상밀도의 레이저 스펙클법을 채택하였고 광 Fourier변환에 의한 Young의 프린지 해석을 행하였다. 반경팬의 회전수는 1,000rpm이고 다익팬의 경우에는 2,000rpm이다. 그림5c는 반경팬에서의 실제측 예를 보이며 그림5d는 다익팬 내부의 순시속도벡터를 나타내고 있다. 어느 경우에나 계측속도가 10m/s전후의 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 레이저 시이트광을 이용한 가시화 기법을 동시에 채택한 점등이 주목할 만하다.

Hayami<sup>9)</sup>는 Francis형의 펌프수차의 내부유동에 계조치 상호상관법을 적용하여 상대속도를 직접 계측하였다. 그림6a는 이 때의 실험배치를 보여준다. 여기에서 특기할 만한 것은 비디오카메라를 회전차의 축에 직접 연결하였으며, 이 축에 설치된 슬립링을 이용하여 외부모니터에서 유동장의 영상확인을 행할 수 있도록 한 점이다. 따라서 비디오카메라에 기록된 영상을 해석하면 회전차 내의 상대속도를 바로 얻을 수가 있다. 그림6b는 해석결과 얻어진 회전차 내부의 비정상 속도분포의 예이다. 이 등<sup>10-11)</sup>은 디퓨저펌프의 정압 회복용 가이드베인의 입구의 유동장을 중점적으로 계측한 연구결과를 제시하고 있다. 광원으로서는 5W의 아르곤이온 레이저를 이용하였으며, 부족한 광원의 역할을 보강하기 위하여 게이트기능을 갖는 영상강화CCD카메라를 채택하고 있다. 그 결과 펄스폭과 간격을 100 $\mu$ s이하로 하여 2,500rpm으로 회전하는 임펠러의 출구 절대속도를 최대 20m/

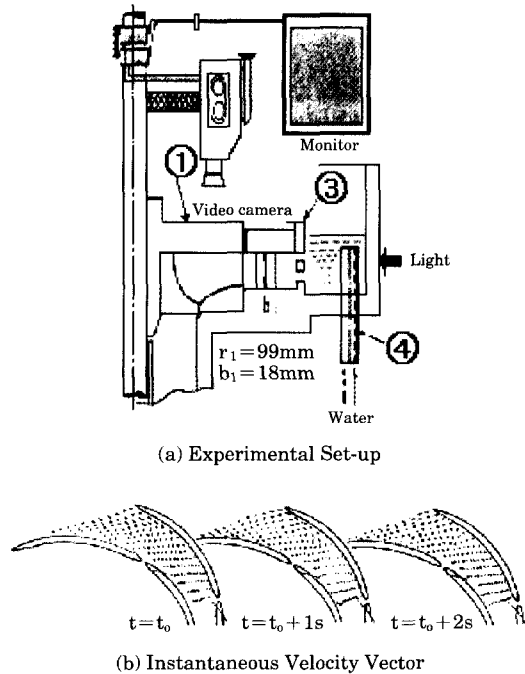


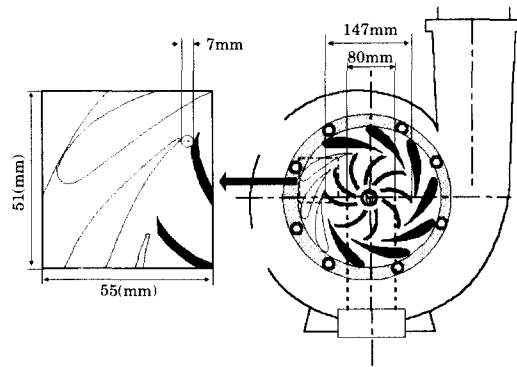
Fig.6 Experimental Apparatus and Example of Unsteady Flow in Turbine(Hayami, 1995)

sec까지 획득하였다. 추적입자로는 직경  $100\mu\text{m}$  전후의 PVC입자를 이용하였다. 그림 7a는 계측영역의 정의이며 그림 7b는 펌프모형을 보여주고 있다. 그림 7c는 2500rpm에서의 순간속도벡터이며, 그림 7d는 이때의 속도분포를 나타낸다.

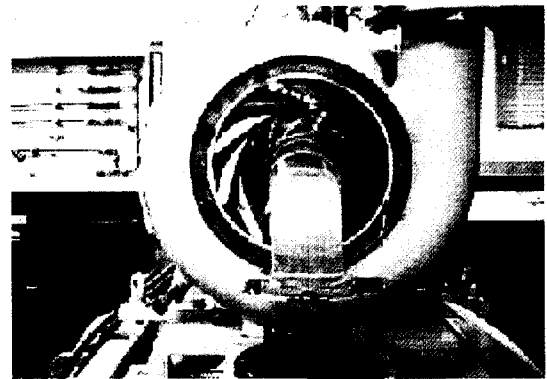
Pederson 등<sup>112)</sup>은 원심펌프의 임펠러 내부를 계측하기 위하여 투명재질로 된 임펠러를 제작하였으며, 펄스레이저를 이용하여 속도벡터의 계측을 행하였다. 사용된 임펠러의 직경은 190mm이며 블레이드수는 6매이다. 계측영역의 크기는  $93\text{mm} \times 94\text{mm}$ 이다. 펌프회전수는 725rpm이며 규정유

량은  $3.05 \text{ l/s}$ 이다. 듀얼펄스레이저는 10Hz급이며, 추적입자로는  $30\mu\text{m}$ 의 평균직경을 갖는 형광로다민B입자를 사용하였다.  $1\text{K} \times 1\text{K}$ 급의 상호상관CCD카메라를 이용하였으며, 탐사영역은  $32 \times 32\text{pixel}$ 이고 오버랩비율은 50%로 하였다. 시간평균을 위하여 2000회의 순간속도벡터를 구하였다. 그림 8a는 실험장치 구성도를 나타낸다. 그림 8b는 정규유량의 1/4에 해당하는 부분유량 운전조건하에서 2000조의 순간벡터로부터 구성된 앙상블평균 속도벡터를 보여주고 있다.

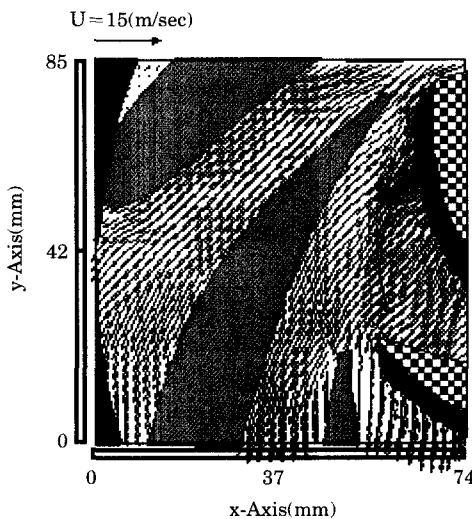
Balzani 등<sup>113)</sup>은 단단 축류압축기의 내부 유동



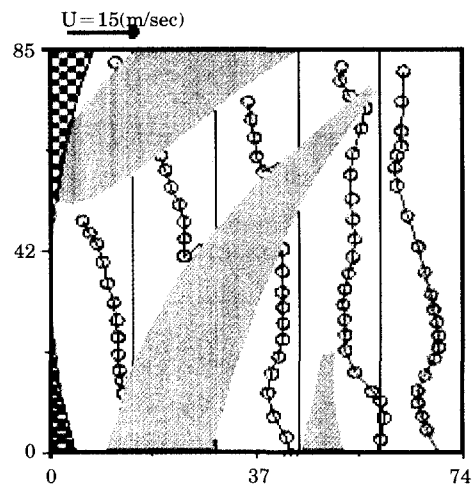
(a) Measuring Region



(b) Diffuser Pump Rig

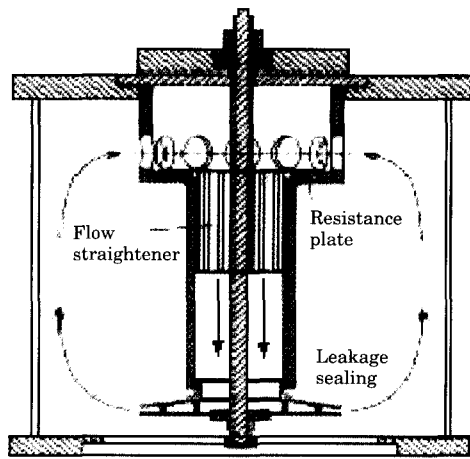


(c) Instantaneous Velocity Vectors

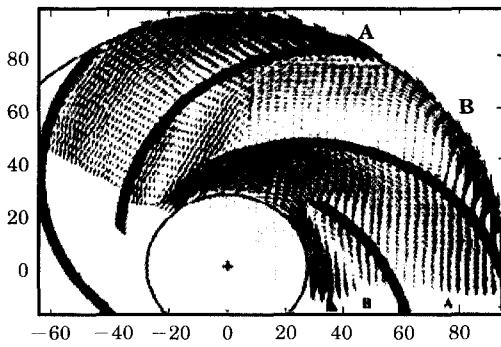


(d) Instantaneous Velocity Profiles

Fig.7 Diffuser Pump Experiment(Y.H. Lee et al., 1999, 2000)



(a) Test Rig

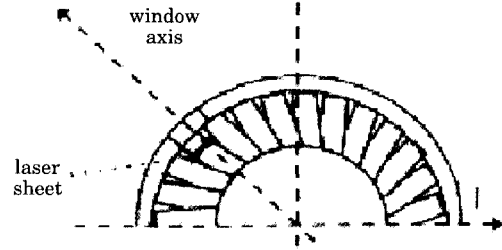


(b) 2000 Ensemble Average Velocity Map at  $0.25 Q_n$

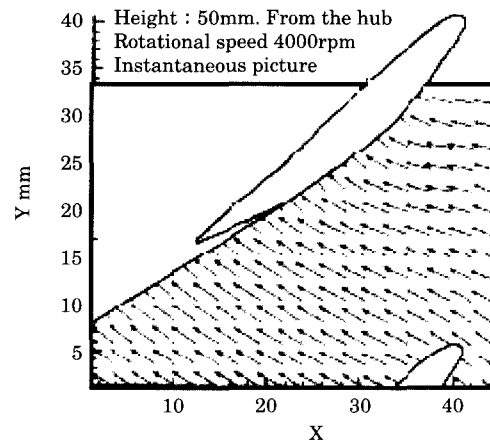
Fig.8 Pump Impeller Measurement(Pederson et al., 2000)

장을 계측하기 위하여 전용의 특수조명장치를 개발하여 적용한 결과를 보고하고 있다. 로터의 선단직경은 400mm이며 허브직경은 200mm이다. 사용된 광원은 200mJ/pulse, 10Hz 펄스 레이저이며 추적입자로는 글리세린 스톱크 증기를 사용하였다. 입력장치로서는 640×480pixel의 상호상관CCD카메라를 이용하였으며, 펄스간격은 25μs로 고정하였으며 회전수는 4000rpm으로 하였다. 추적알고리즘은 상호상관PIV이며, 탐색윈도우의 크기는 32×32pixel이며 오버랩은 75%이다. 그림9a는 실험장치 로터의 절단단면을 나타내며, 9b는 4000rpm에서 순간 절대속도를 나타내고 있다.

FRONT VIEW



(a) Cut Section of Rotor



(b) Instantaneous Absolute Velocity Field

Fig. 9 Axial Compressor Experiment(Balzani et al., 2000)

#### 4. 환기성능의 평가 및 PIV 적용례

환기에 있어서 효율이란 표준적인 환기상태를 기준으로 하여 실제 상황에서의 환기의 효과를 나타낼 수 있어야 한다. Yaglou<sup>14)</sup>는 공기 중에 있는 오염물질의 강도를 나타내는 7단계 척도를 제안하고 인체에서 발생하는 실내 이산화탄소의 농도와 배기구에서의 농도비를 이용하여 환기효율을 최초로 정의하였다. 이 결과를 근거로 Sandberg<sup>15)</sup>는 상대효율, 절대효율, 정상상태효율, 비정상상태 효율 등 여러 가지 형태의 환기효율을 체계적으로

정리하였으며 공기연령의 개념을 이용한 환기효율을 제안하였다. ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)<sup>116)</sup> 와 AIVC(Air Infiltration and Ventilation Centre)<sup>117)</sup> 등은 물론 현재 사용되고 있는 대부분의 환기효율의 개념은 이러한 연구결과에 근거하고 있으며, 환기효율은 신선한 외기가 내부 공간으로 공급될 때까지 소요되는 시간으로 정의되어있다.

그림 10은 연령과 잔여체류시간의 개념을 나타내고 있다. 급기구를 통하여 실내로 유입된 공기가 실내 임의의 점에 도달할 때까지 소요된 시간을 연령(age)이라고 한다. 공기입자는 여러 가지 경로를 통하여 그 지점에 도달할 수 있기 때문에 그 지점에 도달하는 공기입자 연령의 평균값을 국소평균연령(LMA : local mean age)이라 한다. 또한 실내 임의의 점으로부터 배기구까지 빠져나갈 때까지 소요된 시간은 잔여체류시간이라고 하며, 다양한 경로를 통한 입자들의 평균값을 국소평균잔여체류시간(LMR : local mean residual life time)이라고 한다. 따라서 국소평균연령과 국소평균 잔여체류시간의 합은 그 지점을 통과하는 공기입자의 실내체류시간이 된다. 국소평균연령과 국소평균 잔여체류시간이란 신선한 외기가 임의의 점P까지 도달하는 시간과 그 지점으로부터 배기 되는데 소요되는 시간이므로 공급되는 공기의 실내분배 성능 및 배기 성능을 정량화가 가능하다. 실험적 잔여체류시간은 전체공간에 대해 국소잔여체류시간의 평균값과 대상공간에 대한 배출량을 곱하여 구할 수 있으며, 국소평균연령에 대해 같은 방법으로 얻은 실험적연령과 일치한다. 실험적 환기효율(air change effectiveness)은 명목시간상수( $\tau_n$  : 100% 환기되는 시간)과 실험적 잔여체류시간의 비로서 표시되며 환기성능의 평가의 척도로서 이용된다. 환기성능을 평가하기 위한 실험방법은 추적가스를 주입한 후 임의의 점에서 시간에 따른 비정상 농도변화를 측정하는 것이며 추적가스의 주입방법에 따라서 체승(step-up)방법, 체강(step-down)방법 등이 있다. 이는 추적입자를 주입하여 시간에 따른 비정상 속도분포를 측정하는 PIV기법과 실험방법의 측면에서는 유사하므로 영상처리

한 농도분석을 병행하면 기류의 분포상태 및 환기효율의 측정이 가능하다. 식(1)과 식(2)는 실험적 잔여체류시간과 실험적 환기효율을 나타낸다.

$$\langle LMR \rangle = \frac{Q}{V} \int_0^{\infty} t \left(1 - \frac{C_{ex}^p}{C_{\infty}^p}\right) dt \quad (1)$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \tau_n / \langle LMR \rangle = \text{ventilation eff. (Yaglou)} \quad (2)$$

최근에 건조되는 선박에는 원형덕트(Spiral Duct)는 사각덕트에 비해 제작 및 설치가 어려우나 적은 장점 때문에 최근 조선분야에서 많이 채택되고 있다. Cho 등<sup>118)</sup>은 원형덕트 내부에 설치된 댐퍼 주위의 유동을 측정하였다. 이 연구에서는 현장에서 사용되는 실제규격 및 운전조건을 실험조건으로 하였다. 덕트의 공칭 규격은 80A이며 레이놀즈수  $2.4 \times 10^4$ 과  $3.8 \times 10^4$ 에 대해 실제조정각도(전개, 30도, 45도, 60도, 75도)에 따른 순간속도 및 시간평균의 속도분포를 구하고 유량조정성능을 평가한 결과를 제시하고 있다.

Xiong 등<sup>119)</sup>은 두 개의 곡관을 갖는 파이프라인

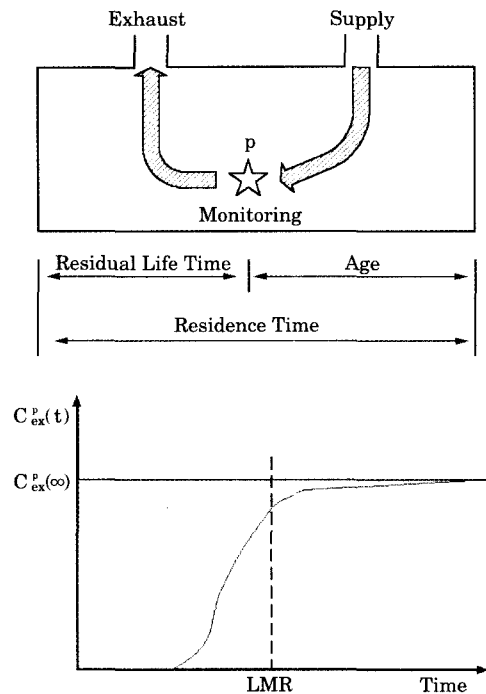


Fig. 10 Concept of Age and Residence Time



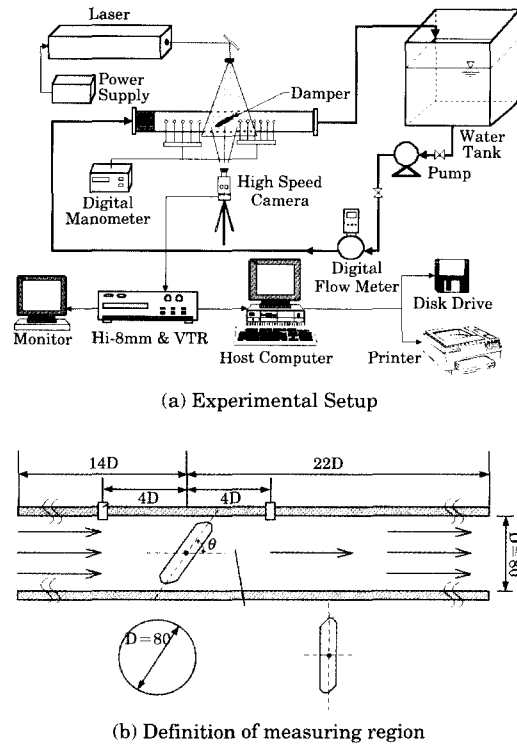


Fig.11 Schematic Arrangement of Experimental System(Cho. et al., 1998)

의 내부에 흐르는 15m/sec의 기류를 계측하였다. 이러한 파이프의 배치는 현장에서 가장 많이 사용되는 구조로서 그림 12a에 파이프라인의 배치를 나타내었다. 그림 12b는 곡관부로부터 직경의 2D 하류에서의 비정상 속도분포의 예이다. 이 연구에서는 오일입자를 공기의 유입구에 혼입하고 펄스 레이저의 시간간격을 수  $\mu$ s에서 1ms까지 조정함으로써 고속기류를 계측하였으며 그 결과 파이프 내부의 속도분포가 설치구조에 따라 달라지는 결과를 제시하였다.

Xu 등<sup>[20]</sup>은 광원의 출력이 약할 경우의 유동장을 계측한 연구결과를 제시하고 있다. 넓은 영역에 시이트 광을 공급하게 되면 계측영역에서 빛의 세기가 저하되게 된다. 이 연구에서는 10 mW 헬륨네온 레이저를 광원으로 사용할 경우 영상강화 CCD 카메라로서 부족한 광원의 역할을 보강할 수 있음을 제시하고 있다.

Gregorio 등<sup>[21]</sup>은 고속(RPM : 8,000)으로 회전

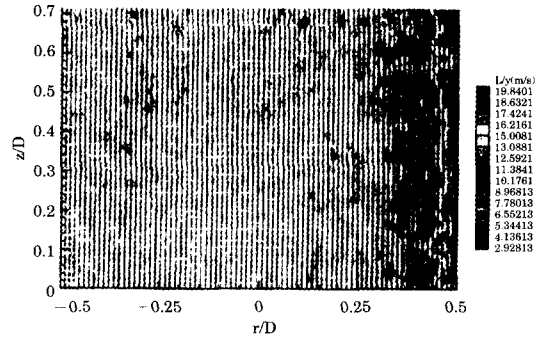
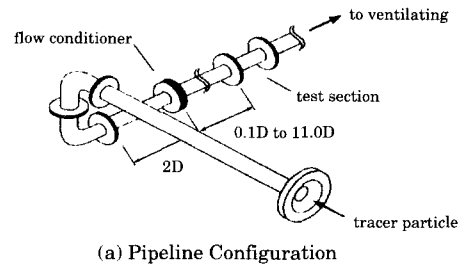


Fig.12 Measurement of Air Flow through a Pipeline(Xiong et al., 1998)

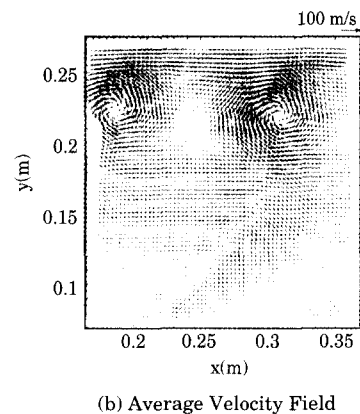
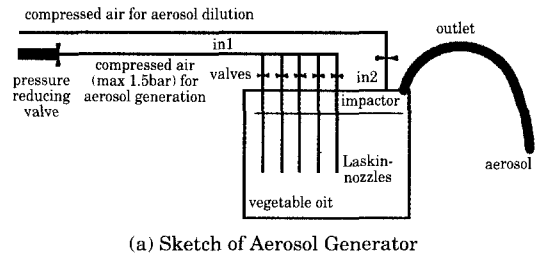


Fig.13 Measurement of High Speed Air Flow (Gregorio et al., 1998)

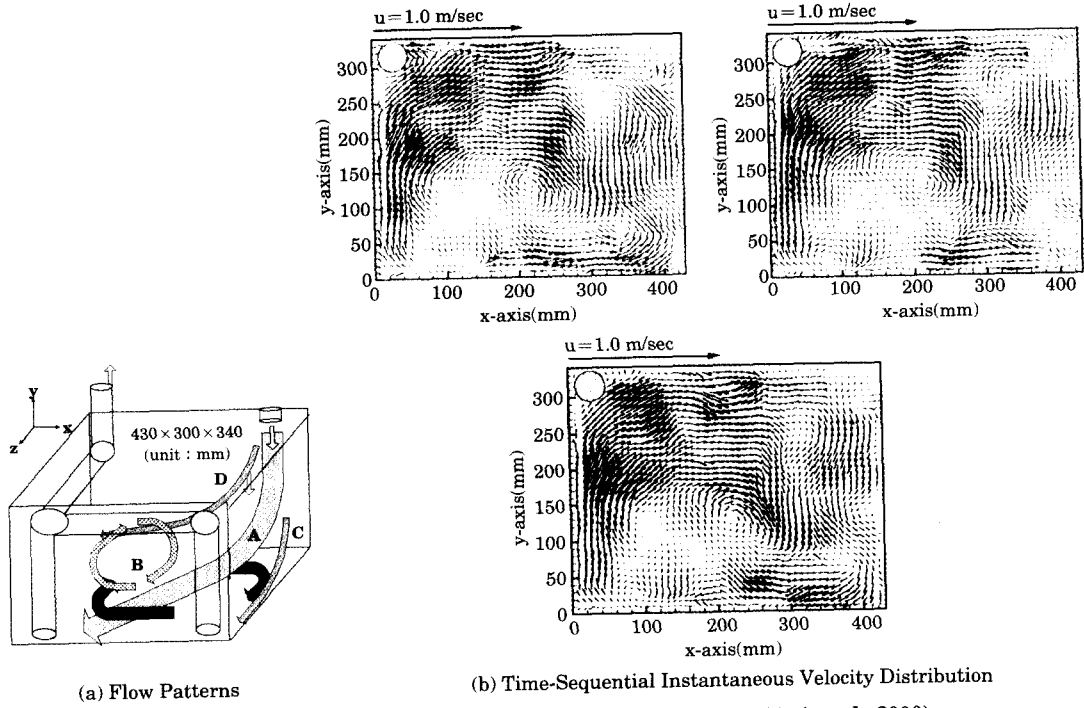


Fig.14 PIV Measurement in Hood Room of LNG Carrier(Choi et al., 2000)

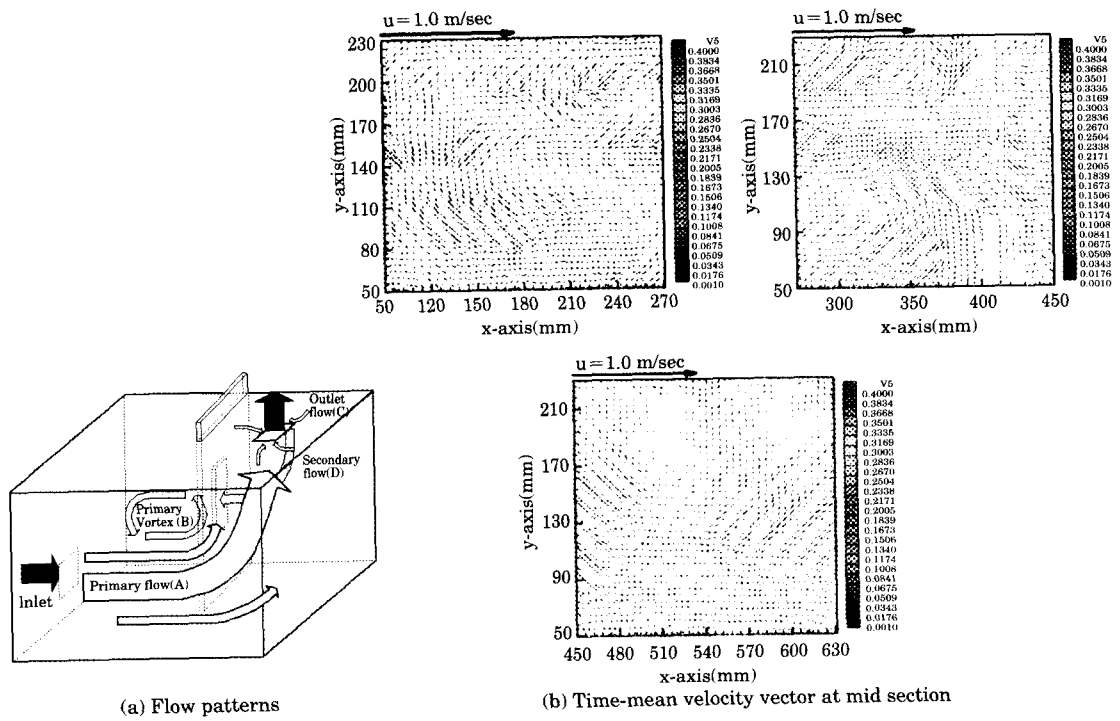


Fig.15 PIV Measurement in Pump Room of Tanker(Kim et al., 2000)

하는 프로펠러 하류에서 중심유속 100m/sec 전후의 고속기류를 계측하였다. 이 문헌은 선박의 동력 환기계통에서 가장 손실이 많은 급기 및 배기 송풍 팬 하류의 소음저하와 유동구조 개선을 연구하는 연구자에게 참고가 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 여기에서는 식물성기름을 원통형의 용기에 넣고 일정압력을 유지하면서 압축공기를 4개의 라스킨노즐을 통해 분사하여 1 $\mu$ m 전후의 에어로졸 입자를 얻어 추적입자로 사용하고 있다. 그림13에서 그림13a는 입자발생기의 원리도와 계측된 비정상 속도분포의 예를 보이고 있다.

Choi 등<sup>22)</sup>은 선박에서 액체화물의 이송을 위한 각종밸브의 개폐 및 펌프의 운전이 주로 이루어지는 화물유 펌프실(Cargo pump room)을 축소모델로 제작하여 내부유동을 계측하고 배기식 동력환기방식에서 덕트의 배치 구조에 따라 환기구조가 크게 달라지는 점을 논의하였다. 펌프실은 IGC code(International code for the construction and equipment of ships carrying liquid gases in bulk)<sup>23)</sup>에서 안전사고의 예방을 위해 환기능력을 구체적으로 규정하고있는 장소이다. 그림15는 펌프실 내부의 유동패턴과 계측된 시계열의 비정상 속도분포이다.

Kim 등<sup>24)</sup>은 LNG가 기화되어 기관실로 가는 경유지로서 가스의 누출 위험이 큰 후드실(vent hood room)의 정체구역을 규명하기 위해 축소모델 실험을 하였다. 고속카메라를 이용하여 영상을 얻었으며 내부의 영역을 12개의 작은 영역으로 분할하여 계측을 하고 각 영역별 속도분포를 이용하여 정체구역을 분석하였다. 그리고 입구의 형상을 변화하여 환기성능을 개선할 수 있음을 제시하였으며 3차원성 흐름의 영향은 수치해석의 결과로서 보완을 하고 있다.

### 참고문헌

- [1] 이영호, 최장운, "해설-PIV의 분류 및 원리," 대한기계학회지, Vol. 36, No. 12, pp. 1146~1162, 1996
- [2] R. Dong, S. Chu and J. Katz, "Quantitative Visualization of the Flow Within the Volute of a Centrifugal Pump. Part A : Technique," Trans. ASME, JFE Vol. 114, pp.390~395, 1992
- [3] R. Dong, S. Chu and J. Katz, "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, 1992
- [4] S. Chu, R. Dong and J. Katz, "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, 1995
- [5] S. Chu, R. Dong and J. Katz, "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, 1995
- [6] O.Akin and D.Rockwell, "Interaction of Zones of Flow Separation in a Centrifugal Impeller Stationary Vane System," Exp. in Fluids Vol. 17, pp.427~433, 1994
- [7] O. Akin and D. Rockwell, "Flow Structure in a Radial Flow Pumping System Using High-Image Density Particle Image Velocimetry," Trans. ASME JFE Vol.116, pp.538~544, 1994
- [8] K. Yamamoto, M. Kawahashi and O. Sekimoto, "Analysis of Impeller Flow Field in Centrifugal Fan by Image Processing," J. Visualization Soc. Japan Vol. 16, No.60, pp.27~33, 1996
- [9] H. Hayami, "PIV in Fluid Machinery," Proc. of Int. Workshop on PIV-Fukui' 95, pp.237~242., 1995
- [10] 임유청, 서민식, 이영호, "PIV를 이용한 터빈펌프의 동·정익 속도장 계측," 유체기계저널, 제2권, 제1호, pp.35~42, 1999
- [11] Y. C. Im, T. Kobayashi, T. Saga, N. Taniguchi and Y. H. Lee, "PIV Measurement of Interaction Region between Stator and Rotor in a Diffuser Pump," Proc. of 9th Int. Symp. on Flow Visualization paper#186, 2000
- [12] N. Pederson and C. B. Jacobson, "PIV Investigation of the Internal Flow Structure in a Centrifugal Pump Impeller," Proc. of 10th Int. Symp. Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon 2000

- [13] N. Balzani, F. Scarano and M. L. Riethmuller, "Experimental Investigation of the Blade-to Blade Flow in a Compressor Rotor by Digital Particle Image Velocimetry," *ASME J. of Turbomachinery* Vol. 122, pp.743~750, 2000
- [14] C. P. Yaglou, and W. N. Witheridge, "Ventilation Requirements", *ASME Trans.*, Vol. 42, pp. 423~436., 1937
- [15] M. Sandberg, "Ventilation Effectiveness and Purging Flow Rate-A Review", *Proc. of Int. Symp. on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness*, pp. 17~27., 1992
- [16] ASHRAE, "ASHRAE Handbook-Fundamentals", American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers., 1997
- [17] AIVC, "A Guide to a Air Change Efficiency", Technical Note AIVC28, Air Infiltration and Ventilation Centre.
- [18] D. H. Cho, S. M. Kim, E. B. Sim and Y. H. Lee, "A Study on PIV Measurement around the Damper of Spiral Duct," *공기조화냉동공조학회 하계학술대회 논문집*, pp.670-675, 1998
- [19] W. Xiong and W. Merzkirch, "Visualization of the Near field Downstream of Flow Conditioners," *Proc. of 8th Int. Symp. on Flow Visualization*, pp.130.1~130.7, Sorrento, 1998
- [20] Y. Xu, H. Tang and Y. Shi, "Using low Power Laser in Digital Particle Image Velocimetry," *Proc. of 8th Int. Symp. on Flow Visualization*, pp.48.1~48.3, Sorrento, 1998
- [21] F. D. Gregorio, J. Kompenhans, C. Willert, B. Brettaufer and M. Raffel, "Investigation of Unsteady Flow Fields on High Speed Propellers by Means of the Particle Image Velocimetry Technique," *Proc. of 8th Int. Symp. on Flow Visualization*, pp.190. 1~190. 11, Sorrento, 1998
- [22] M. S. Choi, D. H. Cho and C. S. Park, "A Study on Ventilation Characteristics of Cargo-oil Pump Room," *Proc. of 4th JSME-KSME Thermal Engineering*, Kobe, 2000
- [23] International code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquid Gases in Bulk
- [24] M. E. Kim, D. C. Kim, D. H. Cho and Y. H. Lee, "Experimental and Numerical Study on Ventilation Characteristics of Hood Room for LNG Carrier," *Proc. of 9th Int. Symp. on Flow Visualization paper#*, 2000