

## 이미지 보오드를 이용한 PIV시스템의 개발

조대환\* · 최장운\* · 도덕희\*\* · 이영호\*\*

### Development of PIV System by Image Board

D. H. Cho · J. W. Choi · D. H. Doh · Y. H. Lee

**Key words** : PIV(입자영상유속계), Image Board(이미지 보오드), Grey-level(계조치), Cross-Correlation(상호상관), Interpolation(보간), Wall Pressure(벽면압력), Refrigerator Evaporator(냉장고 증발기실), Velocity Vector Distribution(속도벡터분포)

### Abstract

A PIV system consisting of an image board slit into personal computer and 2-D sheet light projector is developed and related techniques to improve its performance are discussed. A grey-level cross correlation method capable of overcoming particle seeding limitation is suggested. And a sub-pixel interpolation method in determining the vector terminal is proposed by considering 8-neighbours correlation distributing patterns. Furthermore, pressure estimation from the acquired velocity vectors by applying the Poisson equation is presented with reasonable feasibility. As a practical application of the present system, evaporator flows are analysed and attained instantaneous velocity vectors reveal that the flow phenomena maintain turbulent fluctuation.

### 1. 머릿말

PIV는 유동장의 거시적인 비정상정보를 동시다점으로 획득할 수 있는 측정기법으로서 많은 적용예를 보이고 있다. 그러나 기술수준상 아직까지는 발전단계로 인식되고 있으며 몇 가지의 점들이 보다 개선되어야 한다. 이러한 문제점들 중에서 우선 영상정보를 손쉽게 얻을 수 있는 장치가 필요하며

종래에는 고가의 전용영상처리장치가 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 저가의 이미지보오드를 손쉽게 구할 수 있게 되었으며 이것을 개인용컴퓨터와 연계하여 영상데이터를 빠른 속도로 처리할 수 있게 되었다. 이와 같은 배경으로부터 본 연구에서는 우선 시판의 이미지보오드를 중심으로 PIV시스템을 구성하였다. 다음으로 PIV에서는 속도벡터를 얻기 위하여 여러 가지의 벡터추출 알고리즘

\* 정희원, 한국해양대학교 대학원 박사과정

\*\* 정희원, 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부

이 제안되고 있으며 여기에서는 연속된 두 장의 영상을 이용하여 제조치의 2차원데이터에 의한 상호상관계수의 비교에 의한 기법을 제시하였다. 또한 이 경우에 최대 상호상관계수의 검출에 따르는 공간계측 해상도를 높이기 위하여 서브픽셀내의 보간기법을 새롭게 제시하고 이렇게 얻어진 속도벡터를 이용하여 유동장의 공간 및 벽면압력까지를 예측할 수 있는 원리를 제시하였다. 나아가 이러한 제반 관련기법을 실제유동장에 적용하기 위하여 가정용냉장고의 증발기실내의 속도계측에 적용하여 보았으며 그 결과 효율적으로 속도벡터를 얻을 수가 있었다.

## 2. PIV

### 2.1. 시스템 구성

그림 1은 PIV시스템의 구성예를 보여주고 있다. 유동장의 영상을 기록하기 위하여 고해상도의 캠코우더(SONY Hi-8mm, 수평해상도 400라인 이상)를 이용하였다. 영상의 입력은 캠코우더에 기록된 대상유동장을 자체 재생하거나 별도의 VTR에 기록한 다음 이를 재생하여 이미지보오드에 공급하는 방식을 택하였다. 이미지보오드는 Data Translation사 제품이며 흑백영상에 대하여 512×480픽셀의 공간해상도를 유지한다. 이 보오드는 2개의 LUT와 2개의 이미지 메모리 그리고 입출력을 위한 A/D 및 D/A 컨버터, 외부 트리거

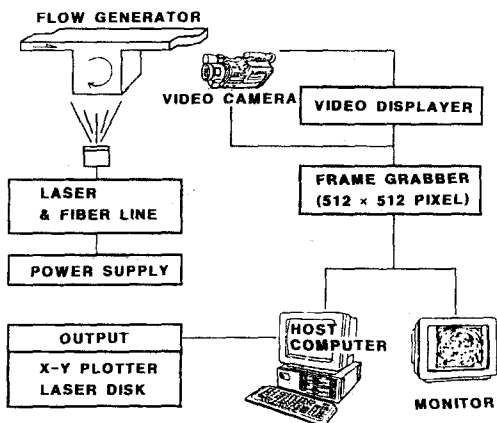


Fig. 1 Schematic Arrangement of 2 - D PIV System

및 외부동기신호를 위한 포트도 구성되어 있다. 입력 영상신호는 고속A/D 변환기를 거쳐 이진화일인 512×480×8비트 용량의 디지털정보로 바뀌며, 두 프레임분의 용량을 갖춘 메모리버퍼, 또는 호스트컴퓨터의 램드라이브에 만들어진 다수의 메모리 버퍼에 순차적으로 저장된다. PIV에서는 일반적으로 가시광레이저를 조명발생장치로서 사용한다. 예를 들어 출력 5W전후의 아르곤이온 레이저가 사용되고 있다. 광섬유 및 실린드릭 렌즈를 이용하여 폭 2mm전후의 시이트라이트를 만들고 3축 트레이버스장치에 의해 임의의 단면을 조명한다. 추적입자는 직경 150 $\mu$ m 전후의 나이론12의 구형입자를 사용하였으며 밀도차는 무시될 수 있다.

### 2.2. 제조치 상호상관법

그림 2는 제조치 상호상관법의 원리를 설명하기 위한 것이다. 미소시간동안 유동장의 제조패턴은 크게 변하지 않는다고 가정하면 제1프레임에서의 상관영역내의 제조치분포와 미소시간후의 제2프레임에서의 제조치분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제1프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 제조치에 대하여 상호상관 계수값을 구하여 비교하면 그중 가장 큰 값을 동일입자의 이동위치로 간주할 수 있다. 컴퓨터상에서 이와 같은 조작을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심입자(속도벡터의 시점)에 대하여 이동벡터의 중점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임간의 상관계수는 다음의 식으로 구한다.

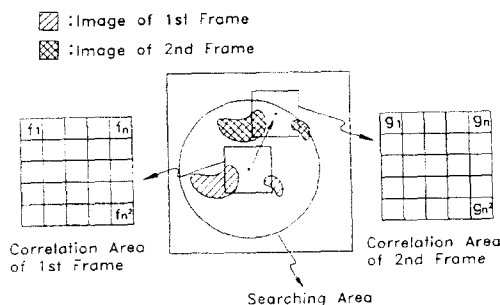


Fig. 2 Principle of Grey - level Cross - Correlation Method

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

단,  $f_i, g_i$ 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며  $\bar{\quad}$ 는 평균을 뜻한다.

계조치상관에 관한 특성을 알아보기 위하여 다음과 같이 실제의 캐비티유동장<sup>1)</sup>의 데이터를 인용하였다. 그림 3은 임의의 상관영역내에서의 추적 입자(나이론12)의 도심좌표의 분포를 보이고 있다. 여기에서는 편의상 도심좌표를 이용하였으나 본격적인 계조치상관법의 적용에서는 이와 같은 입자의 도심계산은 필요하지 않다. ■표시는 제1프레임의 도심좌표를 나타내며, ×표시는 연속된 제2프레임에서의 도심좌표를 보이고 있다. 6의 위치(300, 98)가 상관영역의 중심을 의미하며 상관영역의 크기는 (33×33)픽셀이다. 번호는 이미지보오드의 스캔방향으로 부여한 영역내의 입자도심의 라벨링(labeling)순서이다. 그림 4는 제1프레임의 6의 위치에서 반경 12픽셀이내의 탐사영역내의 모든 픽셀에 대하여 두 프레임간의 상관계수를 구하여 도시한 그림이다. 탐사거리의 대상유동장의 특성속도 및 이미지보오드의 입력 시간간

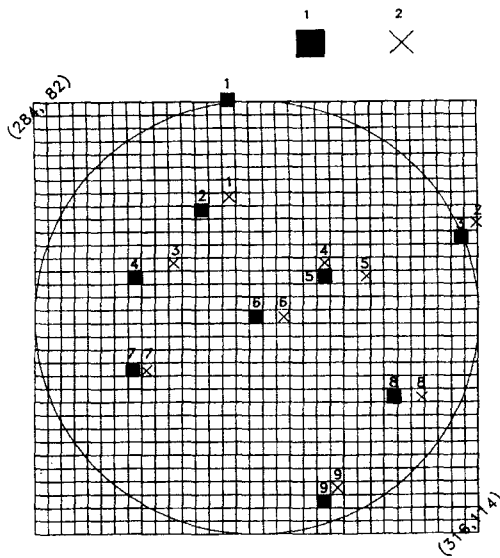


Fig. 3 Distribution of Centroids of Consecutive Two Frames

격을 참조하여 경험적으로 부여하였다. 그림에서 피크의 위치가 제1프레임상의 6의 위치의 이동점을 의미하며 백터의 종점이 된다. 이때의 상관계수의 값은 0.892이다. 이와 같은 상관계수의 분포특성을 2차원의 등고선표시로 나타낸 것이 그림 5이다. 중앙부분에서 등고선이 밀집된 부분이 제2프레임에서의 동일입자 이동백터의 종점이 된다. 그림에서 보면 (13, 13)의 좌표가 제1프레임에서의 6

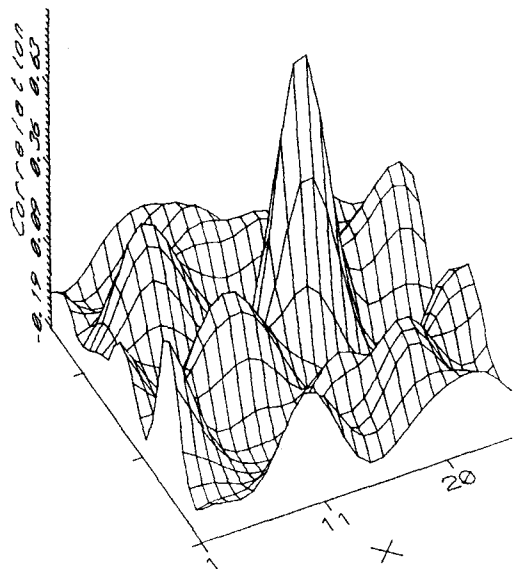


Fig. 4 Cross Correlation Distribution Centering on Position 6 of Fig. 3

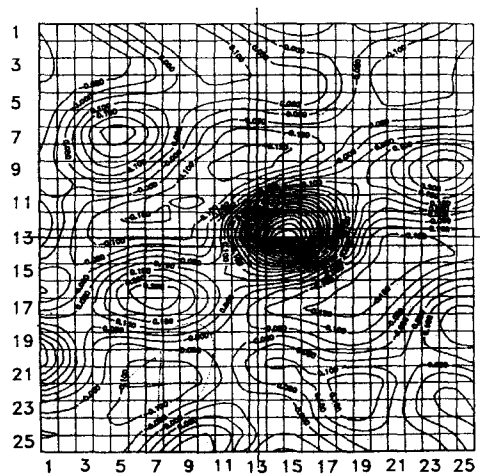
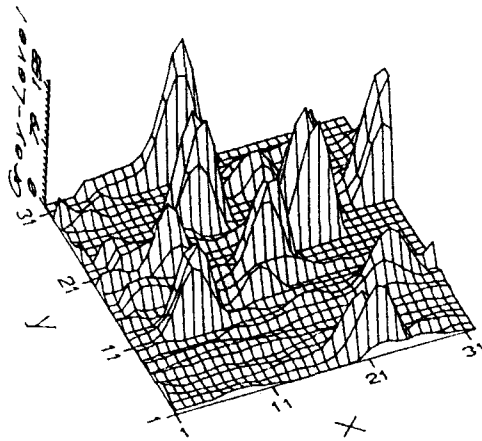
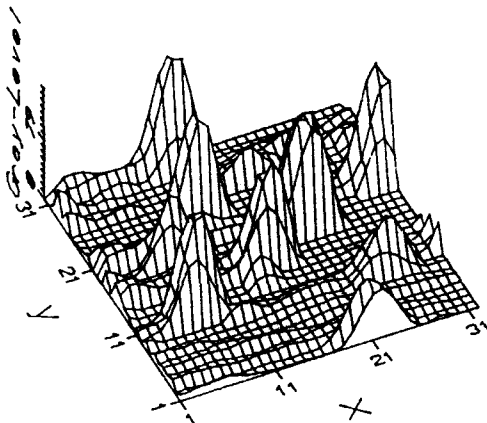


Fig. 5 Contour Map of Fig. 4



#. 상관영역 : 1프레임  
#. 중심점좌표 : (300, 98)  
(A) 1st frame



#. 상관영역 : 2프레임  
#. 중심점좌표 : (300+2, 98-1)  
(B) 2nd frame

**Fig. 6** Distribution of Grey-level at Assumed Vector Origin(A) and Terminal(B)

의 위치를 나타내며, 등고선의 중심을 추적해 보면 우측으로 두 픽셀만큼 이동하였으며, 종방향으로는 이동변화가 없음을 알 수 있다. 그림 6은 제1프레임의 6의 위치(300, 98) 및 그림 4 및 그림 5에서 구한 제2프레임의 최대상관계수의 위치(300+2, 98)를 중심으로 한 계조치의 분포를 보이고 있다. 상관계수의 값이 0.892의 높은 값을 나타냄으로서 두 그림은 매우 유사함을 알 수 있다. 결국 계조치 상관법은 연속된 두 프레임간의 계조치를 이용하

여 최대상관계수를 검출함으로써 속도벡터를 구하는 기법으로 귀착된다. 계조치상관법에서는 이와 같은 동일한 조작을 다수의 도심좌표 또는 가상의 입자위치좌표에 대하여 효율 좋게 적용하여 적은 CPU시간으로 보다 많은 속도벡터를 구하는 것이 매우 중요하다.

### 2. 3. 서브픽셀 보간

다음으로 계조치 상호상관법에서는 최대상관계수의 위치를 정수로 표시되는 픽셀값이하의 정도로 정확하게 구하여야 한다. 즉 PIV의 다이내믹레인지를 증가시키기 위해서는 이와 같은 서브픽셀(sub-pixel)의 해상도문제를 해결하여야 하며 이것은 PIV의 계측성능을 크게 좌우한다. 특히 벡터의 시점과 종점간의 거리가 2-3픽셀이하인 경우에는 얻어진 벡터의 정도에 결정적인 영향을 미치며 이러한 문제를 해결하기 위하여 크게 도심좌표를 구하는 방법 및 2차곡면 최소자승법이 주로 이용되어 왔다. 도심좌표를 이용하는 경우에는 기법의 단순함이 장점으로 거론되고 있으나 오차가 증대하는 결점이 있다. 2차곡면 최소자승법은 이론적으로 가장 우수한 기법으로 평가되어 많이 채택되고 있으나 전제조건으로서 상관계수의 등고선 분포가 정규분포곡선에서와 같이 하나의 주봉을 중심으로 균일한 구배를 가져야 한다. 그러나 실제의 유동장에서는 이와 같은 전제조건을 만족시키는 경우가 드물며 결국 큰 오차를 동반하게 된다. 본 연구에서는 다음과 같은 8근방 2차포물선의 기법을 새롭게 제시한다. 그림 7은 이 기법을 도식적으로 보여주고 있다. (A)에서 "P"의 위치는 식(1)에 의해서 구해진 최대상관계수의 위치이다. 이 픽셀을 중심으로 8근방의 주변 픽셀값에서의 상관분포에 주목한다. 먼저 x방향만을 고려하기로 한다. 우선 1-4-6 및 3-5-8열에서 각각 상관계수의 최대값을 선별한다. 예를 들어 이 그림에서는 6과 3이 선택된다. 다음으로 이들 두개의 값과 P의 값을 임의의 좌표원점에 대한 x방향의 종축값으로서 그림(B)와 같이 도시한다. 그리고 6-P-3을 연결하는 2차원 포물선방정식을 구한 뒤에 간단한 수학적조작을 통해 최대값의 위치를 산출하면 바로 이 위치가 서브픽셀 해상도를 만족하는 x방향의

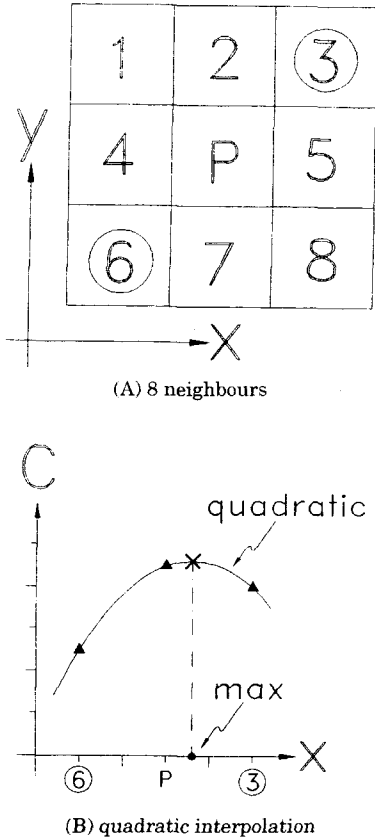


Fig. 7 Principle of 8 Neighbours Quadratic Method for Sub - pixel Interpolation

좌표값으로 평가할 수 있다. y방향에 대하여서도 같은 순서로 최대값의 위치를 구할 수 있다. 문헌2에 보다 상세한 내용이 언급되어 있다.

2. 4. 압력분포 예측

지금까지의 PIV관련 연구결과들은 속도벡터 자체만을 얻는 데에 중점을 두고 있으며, 이를 이용한 압력분포의 획득에 관한 연구는 매우 드물다. Imaichi 등<sup>3)</sup> 및 Massons 등<sup>4)</sup>은 Navier - Stokes 방정식의 차분식에 기초를 두고, 압력구배항을 공간적분하여 압력값을 구한 결과를 제시하고 있다. 그러나 이 경우에도 벽면까지의 압력분포를 구한 결과는 보고되어 있지 않다. 공학적인 관점에서 보면 벽면의 압력특성이 보다 중요하며 PIV기법에서 이 문제를 해결할 수 있다고 한다면 영상처리에 의한 유동장의 제측은 보다 우수한 성능을 발휘할

것으로 예상된다. 한편 CFD의 관점에서 보면 압력에 관한 프와송(Poisson)방정식이 자주 이용되고 있다. 따라서 원리적으로 이 식을 적용하여 물체 또는 벽면을 포함한 전 유동장에 걸친 압력분포를 얻을 수가 있다. PIV에 의해 구해진 속도벡터를 격자보간한 다음 이를 압력에 관한 프와송방정식에 이용하며 이때 압력에 관한 경계조건을 만족시키기 위하여 CFD에서와 같이 가상벽면내에서는 발산을 영으로 하는 기법<sup>5)</sup>을 인용하였다. 적용된 유동장은 2차원 캐비티흐름이었다. 얻어진 결과는 벽면을 포함한 유동장압력분포를 잘 나타내고 있다. 인용된 유동장은 2차원의 벨트구동 캐비티흐름<sup>1)</sup>이다. 레이놀즈수는  $5 \times 10^3$ 이다.  $40 \times 40$ 의 격자크기를 갖는다. 프와송방정식은  $(\phi - \zeta)$ 계를 이용하였으며 다음의 식으로 표기된다.

$$\nabla^2 p = S \tag{2}$$

$$S = 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \tag{3}$$

압력계산에 이용된 속도분포가 그림 8이다. 이 단면은 벨트구동 입방캐비티의 내부흐름중에서 주류방향의 중앙부( $z=0.5$ )이며 캐비티유동장의 속도분포를 비교하는 데 가장 빈번히 인용되는 단면이다. 이 값을 기초로 하여 앞에서 제안된 기법

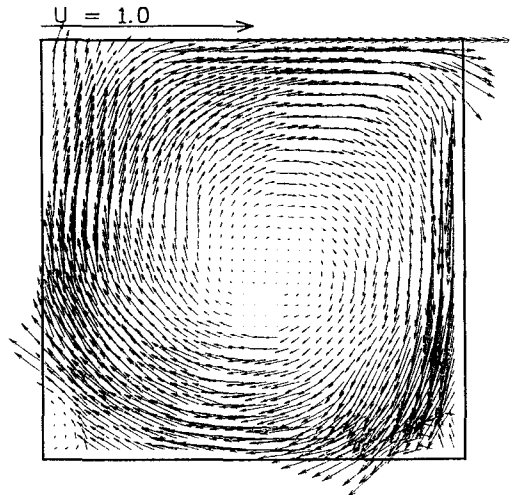


Fig. 8 Interpolated Velocity Vectors for PIV - Poisson Equation

을 적용하여 압력분포를 구한 것이 그림 9이다. 그림 10은 벽면에서의 압력분포의 공간변동 특성을 보이고 있다. 특히 벨트하류부근에서 비교적 낮은 압력증가가 나타나고 있으며 하류측 2차와류 부분 및 상류벽면 중간지점에서 급격한 압력고개(pressure hill)가 나타나고 있음을 알 수가 있다. 이에 관한 유체역학적인 고찰은 본 연구의 범위를 벗어나고 있다. 한편 본 연구에서는 비정상유동을 하는 캐비티흐름의 임의의 한 시각에서만 속도값을 구한 예를 보이고 있다. 또한 프와송방정식에서도 시간항이 생략된 유량함수 - 와도계의 소오스를 이

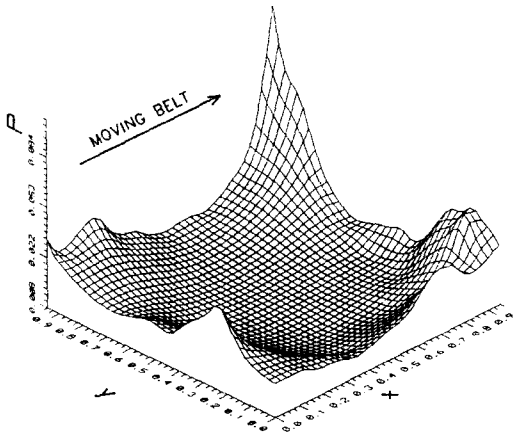


Fig. 9 Pressure Distribution by PIV - Poisson

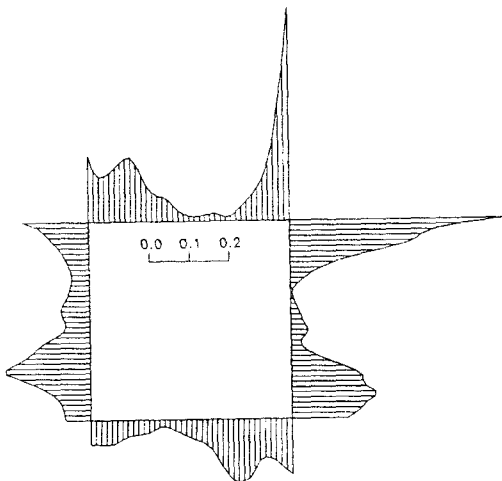


Fig. 10 Estimation of Wall Pressure at  $z=0.5$  Section from PIV - Poisson

용하고 있으나, 속도 - 입력계에 의한 방정식을 채택하여 시간항까지를 고려하면 비정상적인 압력 변동까지를 예측할 수 있을 것으로 보여진다. 차후에는 벽면에서의 정압공에 의한 계측결과와 엄밀한 비교검토가 필요하다.

### 3. 적용 예

그림 11은 실험에 이용된 증발기실 내부의 배치를 나타내고 있다. 냉장실 및 냉동실로 부터 나온 냉기가 증발기실 하부영역에서 수직상방향으로 증발기실에 유입된다. 다음으로 증발관다발 사이를 통과하면서 열교환을 행한 뒤 다시 차가워진 냉기가 증발기실 상부영역으로 상승하여 팬에 접근한다. 시판용 실물냉장고와 동일한 크기를 갖는 냉동실 및 증발기실을 투명아크릴로 제작하였으며 증발기실 내부에 설치된 증발관 다발 및 여기에 부착된 다수의 전열핀까지도 얇은 아크릴판으로 세밀하게 가공하여 가능하면 실물에서와 동일한 실험조건을 확보하였다. 이중탱크를 만들어 증발기실 하부에 냉장실과의 냉기유출 및 유입구를 만들어 냉기를 순환시키는 구조를 택하였으며 이때의 냉기유량은 최대가 되도록 하였다. 작동유체는 실험의 편의상 상온의 수도수를 이용하였으며 등온 상태에서의 유동조건만을 대상으로 하였다. 증발기팬의 블레이드는 실물냉장고에 장착된 것과 동일한 것을 사용하였다. 따라서 팬회전속도 및 팬직

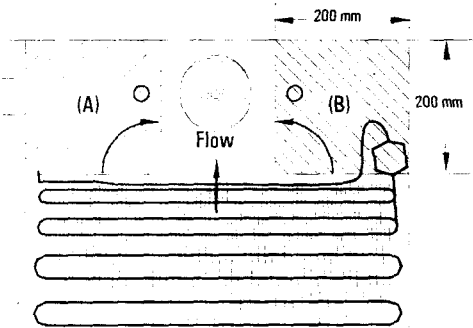


Fig. 11 Evaporator Arrangement within Refrigerator Model

경 그리고 작동유체의 동점성계수로 구해지는 대표레이놀즈수에 의거한 상사법칙을 만족하도록 구동팬의 회전수를 서보모터 및 컨트롤러 그리고 회전계에 의해 조절하는 방식을 택하였으며 상온에서의 회전수는 200rpm 전후이었다.

유동장의 조명을 위해서는 300mW출력의 아르곤이온 레이저 및 실린드리컬렌즈를 이용하여 약 2mm전후의 두께를 갖는 시이트라이트를 그림11의 (A) 및 (B)단면에 공급하였다. 증발기실 상부의 전영역을 동시에 조명하는 것은 구조물의 배치로 인하여 어려웠으며 그림에서와 같이 좌우로 나누어 각각 200mm의 정방형 검사영역을 택하였다. PIV용의 가시화입자로서 나이론12의 구형입자를 사용하면 균일한 입자분포를 얻을 수 있으며 따라서 얻어진 영상도 잡음성분이 감소한 양호한 화질을 제공한다. 그러나 대량이 소요되는 입자의 입수가 어려운 점을 감안하여 시중에서 저가로 구입할 수 있는 알루미늄분말을 이용하였다. 먼저 알루미늄분말 수용액을 만든 다음 이 용액을 증발기실 하부에 설치된 주입공을 통하여 주사기로 주입하면서 대상유동장을 관찰하여 PIV계측에 적합한 농도를 유지하였다. 작동수를 30분이상 순환하도록 하여 전유동장에 걸쳐 충분히 발달한 유동장을 확보하였다.

그림 12는 대상유동장의 한 순간의 영상을 보여

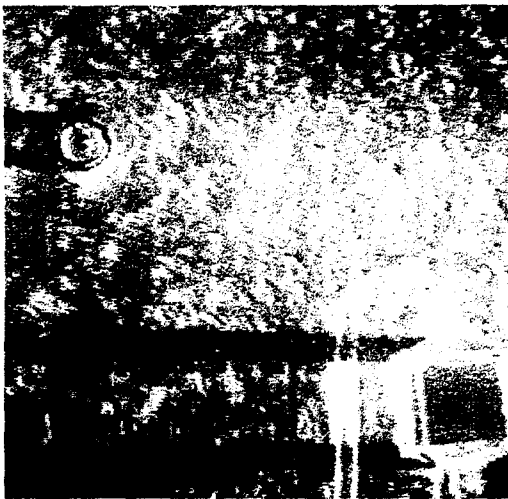


Fig. 12 Original Instantaneous Flow Image of Fig. 11 B Region

준다. 그림에서 오른쪽 하부에 보이는 물체는 냉매 버퍼로서 증발기실로의 냉매의 적정공급에 이용되고 있으며 조명의 통과를 방해하여 영상의 질을 떨어뜨리고 있다. 어느 경우이나 전체적으로 명암이 매우 불규칙하게 분포하고 있으며 영상이 외견상 불량하게 보인다. 이러한 이유는 사용된 레이저의 출력이 낮아서 조명의 원활한 조정이 어려웠기 때문이었다. 그러나 이러한 외견상의 문제점에도 불구하고 속도벡터의 추출에는 큰 어려움이 없었다. 촬영에 필요한 적정광량은 유동장기록용의 캠코우더(삼성Hi-8mm)의 셔터속도 및 레이저의 출력을 조정하여 최적상태를 유지하였다. 200mm×200mm의 크기를 갖는 검은 색의 마스크윈도우를 만들어 계측대상 부분에 부착한 다음 촬영을 행하였으며 카메라는 약 1.5m 떨어진 곳에 설치하였다. 촬영시 줌기능을 이용하였으며 될 수 있으면 전화면에 걸쳐 마스크윈도우가 차지하도록 하였다. 유동장은 캠코우더의 8mm테이프에 기록 저장하였으며 이 테이프를 다시 재생하여 전용의 이미지보오드(DT2853, B&W, 512×480 픽셀)에 입력하였다.

그림 13은 그림 11의 (B)영역에서의 순시의 속도벡터분포를 보여주고 있다. 이 때의 속도벡터를 구하기 위한 격자크기는 50×50이다. 계조치의 상호상관영역의 크기는 40×40픽셀이며 두 프레임간의 최대탐색거리는 4픽셀, 시간간격은 1/60초이

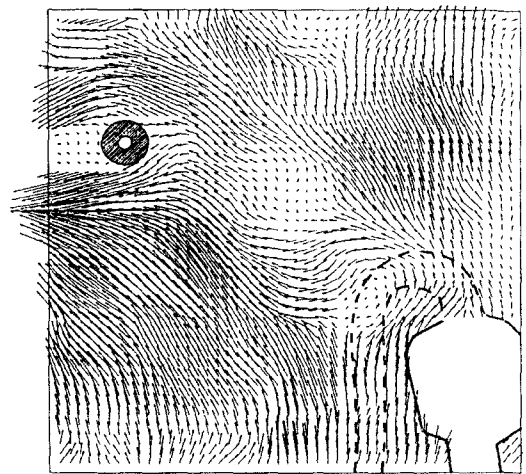


Fig. 13 Instantaneous Velocity Vectors(Grid Size = 50×50)

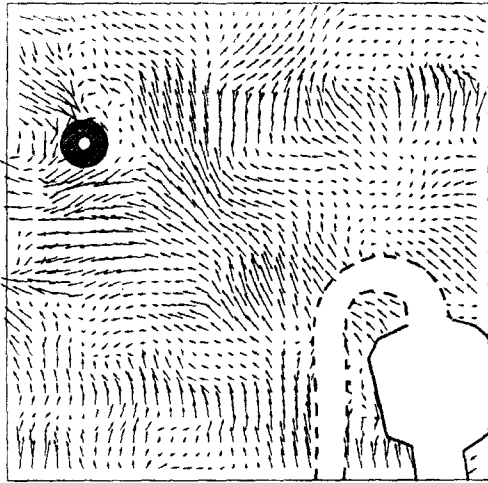


Fig. 14 Instantaneous Fluctuation Components  $v'$

다. 대표길이는 200mm이며 픽셀단위로는 315픽셀이다. 순시의 계측속도에 대한 다이내믹레인지의 예를 계산해 보면 다음과 같다. 수평방향의 속도성분에 대하여 최대 2.790픽셀, 최소 0.037픽셀 즉, 75 : 1이며 수직성분에 대해서는 최대 2.190픽셀, 최소 0.013픽셀, 즉, 168 : 1의 값을 나타내었다. 연산시간은 60MHz의 펜티엄상에서 50×50개의 격자점 속도벡터에 대하여 3분36초가 소요되어 초당 약 11.6개의 속도벡터를 구할 수 있었다. 얻어진 속도벡터에는 이상치(outlier)의 발생이 거의 없었으며 따라서 속도벡터에러의 제거를 위한 별도의 조치는 행하지 않았다. 속도벡터를 보면 비균일한 비정상적의 유동패턴이 크게 발달하고 있음을 알 수 있으며, 특히 우측의 냉매버퍼의 영향으로 이 물체의 후방에서 방출된 불규칙한 와의 거동이 전체유동장의 패턴을 지배하고 있음을 보여주고 있다. 3상환의 구역에 속하는 좌측하부에서는 버퍼의 영향을 크게 받지 않음으로서 비교적 균일한 흐름을 유지하면서 팬으로 유입하고 있다. 그림 14는 앞의 유동장에서의 순시의 속도변동성분을 나타내고 있다. 총 50회분의 순시의 유동장을 해석하여 합산한 결과를 시간평균의 속도벡터 데이터로 이용하였으며 이들 값을 순시의 속도벡터값에서 감산한  $v' = v - \text{avg}(v)$ 의 분포를 보이고 있다. 매우 불규칙한 변동속도분포를 보이고 있으며 전형적인 난류유동장의 특성을 나타내고 있다. 그림

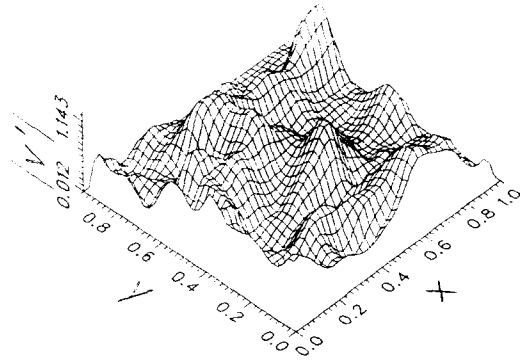


Fig. 15 Distribution of Fluctuation Absolute Component  $|v'|$

15는 순시의 속도변동성분의 절대값을 3차원으로 도시한 결과이며 전 유동장에 걸쳐 매우 불규칙한 분포를 나타내고 있다.

이와 같은 결과로부터 증발기실의 상부영역에서의 유동패턴은 직각의 모서리부 및 장애물의 영향으로 인하여 박리와 혼합현상을 동반하는 3차원의 난류특성을 보이고 있음을 알 수가 있다. 따라서 큰 마찰손실이 예상되며 이를 방지하기 위한 형상의 개선이 필요하다고 판단된다.

#### 4. 맺 음 말

본 연구에서는 시판의 이미지보오드를 이용하여 영상처리에 활용하였으며 조명장치로서는 레이저 및 광섬유 그리고 원통형렌즈로서 2차원의 시이트광을 제공하였다. 속도벡터를 얻기 위한 벡터추출 알고리즘으로서 연속된 두 장의 유동장의 영상으로부터의 2차원 계조치데이터를 이용하여 최대 상호상관계수의 값을 검출하는 기법을 제시하였다. 또한 이 경우에 최대 상호상관계수의 검출에 따르는 공간계측의 해상도를 높이기 위하여 벡터종점에 대한 서브픽셀내의 보간기법을 새롭게 제시하였다. 나아가 이렇게 얻어진 속도벡터를 이용하여 유동장의 공간 및 벽면압력까지를 예측할 수 있는 원리를 제시하였다. 마지막으로 이러한 제반 관련기법을 실제유동장에 적용하기 위하여 가정용냉장고의 증발기실내의 속도계측에 적용하여 보았으며 그 결과 효율적으로 속도벡터를 얻을 수가 있었다.



## 후 기

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었으므로 이에 사의를 포함합니다.

## 참고문헌

- 1) Young - Ho LEE, Y. Matsumoto, T. Kobayashi, T. Saga, Velocity Measurements in a Cavity Flows by PIV, Proc. of 2nd KSME - JSME Fluids Eng. Conference Vol.1, pp. 293 - 298, 1990.
- 2) 최장운, 이영호, PIV에서의 보간방법의 적용, 대한기계학회 추계학술대회논문집(Ⅱ), pp. 49 - 56, 1995.
- 3) K. Imaichi, K. Ohmi, Numerical Processing of Flow - Visualization Pictures - Measurement of Two - Dimensional Vortex Flow, J. Fluid Mech. Vol. 129, pp. 283 - 311, 1983.
- 4) J. Massons, J. Gavalda, F. Diaz, Image Processing of Cylinder Wake Generation, Phys. Fluids A 1(8), pp. 1415 - 1423, 1989.
- 5) F. H. Harlow, J. E. Welch, Numerical Calculation of Time - Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, Phy. Fluids Vol. 8, No. 12, pp. 2182 - 2189, 1965.