

# 상관법에 의한 PIV계측에 관한 연구

김영환<sup>1)</sup>, 이영호<sup>2)</sup>

## A Study on PIV Measurement by Correlation Method

kim Young-Hwan, Lee Young-Ho

### Abstract

General methods used 2 consecutive-frame in PIV(Particle Image Velocimetry) are binary correlation method, gray level correlation method, and FFT(Fast Fourier Transformation) correlation method. This paper investigates characteristics of these three methods. In addition, the results from the lgray level correlation and FFT correlation are compared with each other.

First, numerically created particle images are used for the simulation in ideal state to investigate accuracies for each method. The particles, which assumed to have elliptical shapes, are distributed on imaginary rectangular area with specified scales.

Second, three methods are applied to obtain velocity distributions from visualized images of two dimensional flow for cavity flow, refrigerator and air flow. The visulized cross section of three dimensional flow illuminated by laser sheet was recorded by a video camera or a CCD camera.

As a result gray level correlation method may be prefered because the calculating time is relatively shorten than other methods and it's reliability is comparatively.

### 1. 서론

오늘날 급속한 전자기술의 진보로 인한 영상매체 발달과 컴퓨터의 보급은 원리적으로만 제시되어온 가시화(visualization)한 유동상으로 부터 얻은 화상에서 속도계측을 가능하게 하였다. 아직까지 공식적인 명칭은 규약되지 않았으나 편의상 이러한 계측방법을 총칭하여 PIV(Particle Image Velocimetry)라 부른다.

PIV의 원리는 미소 시간간격동안 유체의 거동은 유사하다는 원리를 적용한 것이다. 본 논문에는 기록된 동화상으로 부터 미소한 시간간격을 갖는 두 프레임의 화상으로부터 속도를 얻어내는 대표적인 방법인 이진상관법과 계조치(階調值,gray level) 패턴상관법 및

1) 한국해양대학교 대학원 기계공학과 석사과정 기계공학 전공

2) 한국해양대학교 이공대학 기계공학과 교수

FFT(Fast Fourier Transformation)에 의한 상관법이 갖는 장점과 단점 및 성능에 관한 연구를 하였다. 이를 위하여 실험외에 화상시물레이션을 하였다. 실험적 방법으로 얻어진 속도벡터는 실제의 속도벡터와 차이를 비교하기 어려우나 화상시물레이션은 양자간의 비교가 가능하기 때문이다.

화상시물레이션은 1 화소(pixel)미만인 저속인 영역과 속도구배가 큰 영역에서 세 가지 상관법으로 얻어진 속도벡터의 정확도를 비교평가하며 오차가 적은 속도벡터를 얻을 수 있는 화상의 상태도 살펴보았다. 실험에 의한 방법으로 이진상관법, 계조치 패턴상관법 및 FFT에 의한 상관법이 적용될 수 있는 유동장의 범위를 평가하기 위해서 작동유체가 물과 공기인 경우에 대하여 속도를 계측하였다.

## 2. PIV의 계측방법

이진상관법과 계조치 패턴상관법 및 FFT에 의한 상관법에서 상관값을 구하기 위한 상관영역을 선택하는 방법은 유사하며 Fig. 2.1과 같다.

### 2.1 이진상관법

이진상관법은 개개의 입자에 대한 추적을 하며 속도벡터를 얻기 전의 화상에 대한 이진화(binuarization)가 포함된다.

우선 전처리과정으로 화상의 이진화를 행한다. 화상에 대하여 동일한 임의의 계조값을 기준으로 화상의 전 영역에 걸쳐 이 계조값 이상인 영역은 1로 미만인 영역은 0으로 함으로써 화상을 이진화하여 입자와 배경을 분리한다. 이러한 이진화 화상을 만들기 위한 기준 계조값을 역치(thresholding value)라 한다. 각각의 입자에 대하여 배경과 입자의 경계부분을 검출하여 입자의 도심을 식(2.1)로 구한다.<sup>(1)</sup>

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.1)$$

단,  $A_i$ ,  $A_j$ 는 화소의 면적이며  $x_i, y_i$ 는 화소의 좌표

동일입자를 찾기 위하여 제 1 프레임상의 하나의 입자도심을 속도벡터의 시점으로 하고 이를 중심으로 적절한  $M \times N$ 의 상관영역을 설정하고 제 1 프레임과 동일한 위치의 제 2 프레임상에서 미리 예측한 입자의 최대이동거리이내의 전 입자의 도심을 중심으로 제 1 프레임과 같은 크기의 상관영역을 설정하고 제 1 프레임과 제 2 프레임의 상관영역으로 상관식(2.2)를 이용하여 최대값을 가지는 제 2 프레임의 입자의 도심을 속도벡터의 종점으로 한다.<sup>(2)</sup> 이러한 과정을 제 1 프레임상의 모든 입자에 대하여 동일입자를 추적한다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L f(i, j)g(i+P, j+Q)}{\sqrt{\sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L f(i, j)^2 \cdot \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L g(i+P, j+Q)^2}} \quad (2.2)$$

$$\text{단, } K = (M - 1)/2, L = (N - 1)/2$$

이진상관법의 거리 불규칙성은 Fig. 2.2에 있다. 이진상관법은 얻어진 화상으로 부터 입자와 배경을 분리하여야 화상에서 입자의 인식이 가능하므로 가시화에 사용되는 입자는 상대적으로 계조치 패턴상관법과 FFT에 의한 상관법의 입자보다 보다 크다. 상관식(2.2)에서  $f(i, j)$ ,  $g(i+P, j+Q)$ 는 계조치이고  $C_{fg}$ 는 상관계수로 0~1의 값을 가진다.  $P, Q$ 는 제 2 프레임의 중심이 이동한 거리로 최대이동거리이내의 값을 가진다.  $M, N$ 은 상관영역의 크기이며 홀수이다.

## 2.2 계조치 패턴상관법

계조치 패턴상관법은 이진상관법과 달리 상관영역의 중심이 화소이며 최대이동거리이내의 모든 화소에 대하여 화소에 대하여 제 1 프레임과 제 2 프레임에서 선정한  $M \times N$ 의 크기의 상관영역을 설정하여 식(2.3)으로 상관계수의 절대값이 최대치가 되는 화소를 속도벡터의 중심으로 한다.<sup>5,4</sup> 이와 같은 과정을 제 1 프레임상에서 선정한 화소에 대하여 같은 과정을 되풀이한다.  $C_{fg}$ 는 상관계수로써 -1과 1사이의 값을 갖는다.  $\bar{f}, \bar{g}$ 는 상관영역내의 계조평균치이다. 계조치 패턴상관법의 계산과정을 Fig. 2.3에 나타내었다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L (f(i, j) - \bar{f})(g(i+P, j+Q) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L (f(i, j) - \bar{f})^2 \cdot \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L (g(i+P, j+Q) - \bar{g})^2}} \quad (2.3)$$

$$\text{단, } K = (M - 1)/2, L = (N - 1)/2$$

## 2.3 FFT에 의한 상관법

제 1 프레임상의 한 화소의 적절한  $M \times N$ 의 상관영역을 설정하여 식(2.4)로 FFT를 행하여 제 1 프레임의 화상의 데이터를 공간주파수 영역으로 변환시킨다. 실제의 계산에는 식(2.4)와 식(2.5)를 1차원으로 분리가 가능하므로 식(2.6)과 식(2.7)을 이용하여 계산한다.<sup>5,6)</sup> 최대이동거리내의 화소에 대하여 제 1 프레임과 같은 크기의 상관영역을 설정하여 FFT를 행하여 공간주파수 영역으로 전환한다. 이 두 개의 공간주파수 영역으로 변환된 데이터를 식(2.8)로 정의된 상관식을 이용하여 상관계수를 구한다. 이와 같은 과정을 제 2 프레임의 최대이동거리이내의 모든 화소에 대하여 계산을 하여 상관계수가 최대인 화소를 찾는다.

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux/M + vy/N)] \quad (2.4)$$

$$\text{단, } u = 0, 1, 2, \dots, M-1, v = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad y = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp[ j 2 \pi (ux/M + vy/N) ] \quad (2.5)$$

$$F(u) = \sum_{r=0}^{N/2-1} f(2r) W_{N/2}^{ur} + W_N^u \sum_{r=0}^{N/2-1} f(2r+1) W_{N/2}^{ur} \quad (2.6)$$

$$f(x) = \sum_{r=0}^{N/2-1} F(2r) W_{N/2}^{-ur} + W_N^{-u} \sum_{r=0}^{N/2-1} F(2r+1) W_{N/2}^{-ur} \quad (2.7)$$

$$C_{fg} = IFFT\{ FFT[ f(x, y) ] * \cdot FFT[ g(x, y) ] \} \quad (2.8)$$

계산하는 순서는 계조치 패턴상관법과 동일하며 상관계수를 구하는 과정이 다를 뿐이다. 단, FFT의 데이터는 2의 승수이어야 한다. 식(2.8)의 첨자 \*는 켈레복소수를 의미하고 IFFT는 역변환 FFT이다.

### 3. 화상시물레이션

2차원 오리피스 수치해석의 속도벡터를 이용하여 화상시물레이션을 하였다.<sup>(7)</sup> 화상의 크기는  $182 \times 159$  화소로 입자의 최대이동거리는 6.87 화소이고 최소이동거리 0.0002567 화소이다. 화상시물레이션영역과 수치해석으로 얻은 속도벡터를 Fig. 3.1과 Fig. 3.2에 나타내었다. 화상을 만드는데 있어 입자는 지수함수의 형태를 갖는다고 가정하여 식(3.1)을 이용하여 생성하였다. 입자의 생성은 난수를 이용하여 발생하였다.

$$e(x, y) = I e^{-\frac{x^2+y^2}{R^2}} \quad (3.1)$$

단,  $I$ 는 입자의 최고 계조치이며  $x, y$ 는 입자의 위치이고  
 $R$ 은 Gaussian 강도의 표준편차

이진상관법은 입자수를 60~100범위로 발생하였고 식(3.1)의  $R$ 을 2.5~4.0으로 난수를 이용하여 발생하였다. 역치는 90으로 하였다. 계조치 패턴상관법과 FFT에 의한 상관법은 입자수 250~10000까지 발생하였고 식(3.1)의  $R$ 을 3.0~4.0으로 난수를 이용하여 발생하였다.

Fig. 3.3에 이진상관법으로 입자수가 500일때 상관영역을  $21 \times 21$  화소로 할 때의 오류(誤謬, error)벡터를 제거하기 전후의 결과를 보여주고있다. 계산시간은 대략 7초이다. 속도벡터가 작은 영역에서 다수의 오류벡터가 발생하나 속도구배가 큰 영역에서 최종적으로 얻어진 속도벡터는 큰 오차가 없다.

계조치 패턴상관법의 경우는 상관영역이  $25 \times 25$  화소인 경우와  $35 \times 35$  화소인 경우에 양호한 결과를 보여주고 있다. Fig. 3.4에 입자수가 500인 경우에서 상관영역을  $25 \times 25$

화소로 계산한 결과를 보여주고 있으며 계산시간은 8분 54초이며 속도벡터가 작은 지역에서도 비교적 좋은 결과를 보여 주고 있다. 속도벡터의 종점에 채워진 화살표는 1화소 이상 오차가 발생한 경우를 나타내고 있다. 속도벡터가 큰 곳에서 1화소 이상 오차가 나는 속도벡터가 주로 분포하고 주위의 속도벡터를 참조하더라도 오류속도벡터로 취급하기 힘들다.

FFT에 의한 상관법의 경우는 입자수가 4000이상에서부터 얻어진 속도벡터에서 오류벡터가 증대하는 결과를 얻었다. 특히 속도벡터가 작은 지역에서는 계조치 패턴상관법과 비교할 때 좋지 못한 결과를 보이며 전체적인 속도벡터의 방향이 경직되어있고 평균오차도 계조치 패턴상관법보다 큼이 확인되었다. 또한 계조치 패턴상관법에서는 입자수가 1000~8000인 화상에서 비교적 양호한 속도벡터를 얻을 수 있다. FFT에 의한 상관법은 10000보다 입자가 1000부터 4000이하인 경우가 양호하다는 것은 화상으로 부터 입자가 보다 명확히 구분되는 화상이 보다 유리하다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 FFT 상관식은 두 데이터의 곱셈만을 말하나 계조치 패턴상관법은 계조치가 큰 영역은 상관영역의 화소가 가지는 계조치평균의 감산으로 인하여 계조분포를 바꾸어 계산하므로 비교적 안정된 계산이 된다. 특히, FFT는 두어진 데이터가 가지는 주파수의 절반만을 표현할 수 있으므로 동일한 화상데이터에 대하여 계조치 패턴상관법보다 불리하다.<sup>15)</sup> Fig. 3.5에 상관영역이 32×32 화소인 경우에서 얻어진 속도벡터를 나타내었으며 1시간 10분이 소요된다.

#### 4. PIV의 속도계측

##### 4.1 실험장치의 구성 및 가시화 방법

정방형 캐비티와 냉상고 증발기주위 및 공기가시화 실험장치는 모두 투명한 아크릴로 구성되었다. 캐비티유동장은 길이 100mm의 정방형으로 작동유체는 증류수로서 가시화입자는 대략 직경 150 $\mu$ m전후의 구형 나일론입자이다. 상부의 벽은 벨트로 구동되며 캐비티 내부에 전단력을 공급하도록 구성되었다.<sup>16)</sup> 실험장치는 Fig. 4.1에 있다.

냉상고의 증발기주위의 속도를 계측하기 위해 알루미늄분말을 이용하여 가시화 하였으며 크기는 5 $\mu$ m전후이며 팬의 속도는 90rpm전후이다. 실제의 작동유체는 공기이나 수도수로 사용하였고 90rpm은 공기의 160rpm에 해당된다. 실험장치는 Fig. 4.2에 있다.

공기유동장의 가시화를 위하여 높이 900mm, 폭 33mm, 길이 200mm인 아크릴로 제작된 직사각형의 기둥내에 직경 70mm의 원주주위의 공기를 연기로 가시화하여 화상을 얻었다. 실험장치는 Fig. 4.3에 있다.

##### 4.2 정방형 캐비티의 PIV계측

###### 4.2.1 이진상관법

역치를 70으로 하고 최대이동거리를 32화소로 하였을 때 상관영역을 71×71 화소인 경

우를 Fig. 4.4에 나타내었다. 계산시간은 대략 37초이며 상관영역이  $71 \times 71$  화소이상으로 하여도 동일입자로 확인된 입자는 증가하지 못한다. 유체내에 주입된 입자는 물분자 보다 크므로 항력의 증가인하여 캐비티의 구성은 입자수가 매우 작다.

#### 4.2.2 계조치 패턴상관법

이진상관법을 적용하기 위한 화상은 입자와 배경을 분리하기 위해 비교적 큰 입자를 사용하나 계조치 패턴상관법은 비교적 작은 입자를 사용한다. 따라서 이진상관법으로 가시화한 캐비티를 계조치 패턴상관법으로 속도를 계측하는 것은 매우 불리한 상황이다. 이진상관법으로 구한 개개의 입자중심에 대하여 계조치 패턴상관법으로 구하여 이진상관법으로 계산한 결과와의 차이는 평균 1.86화소로 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 계조치 패턴상관법은 화상에서 입자가 나타나는 정도에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 말한다.

Fig. 4.5 (A)에 최대이동거리를 13화소로 하고 상관영역  $33 \times 33$  화소로 입자의 중심에 대하여 계산한 경우를 나타내었고 계산시간은 8분 48초이다. 그리고 Fig. 4.5 (B)에 정방형의 격자점에 대하여 계산한 결과를 보여주고 있으며 상관영역은  $33 \times 33$  화소로 캐비티 모서리부분에서는 이진상관법으로 얻을 수 없는 좋은 결과를 보여주고 있다.

#### 4.2.3 FFT에 의한 상관법

FFT에 의한 상관법을 캐비티 유동장의 개개의 입자중심에 대하여 상관영역을  $32 \times 32$  화소로 계산할 경우 Fig. 4.6 (A)와 같은 결과를 보여주고 있다. 그러나 이진상관법의 결과와 비교할 때 평균 2.5화소로 계조치 패턴상관법의 경우보다 약간 크나 화상에서 입자가 나타나는 정도에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 말한다. 계산시간은 3시간 29분으로 최대이동거리를 13화소로 하였다. 정방형의 격자점에 대하여 상관영역을  $64 \times 64$  화소로 계산한 결과를 Fig. 4.6 (B)에 보여주고 있다.

### 4.3 냉장고 증발기주위의 PIV계측

Fig. 4.2에서 빗금친 부분에 대하여 계조치패턴상관과 FFT에 의한 상관법을 적용하였다. 이진상관법은 얻을 수 있는 속도벡터수가 작으므로 팬에 의해 3차원성이 큰 유동장에서 적용하기 어려웠다. 측정단면에 대하여 비정상적인 와의 유입과 유출에 의해 상대적으로 2차원의 계측단면은 속도구배가 커지므로 계조치 패턴상관법과 FFT에 의한 상관법은 상대적으로 단순한 유동에 비해 오차가 많은 것으로 본다.

최대이동거리를 7화소로하여 Fig. 4.7에는 상관영역  $65 \times 65$  화소로 최대이동거리를 7화소로 하였을 때 계조치 패턴상관법으로 얻어진 결과를 보여주고 있다. 팬에 의한 강제대류와 증발기쪽에 의해 흐름은 3차원성이 강한 흐름의 형태를 하고 있음이 가시화작업에 의해 확인되었다. Fig. 4.8에 FFT에 의한 상관법으로 계산하여 얻은 속도벡터를 보여 주



고 있다. 상관영역은  $128 \times 128$  화소로 계산되었다. 그 이하의 상관영역에서는 얻어진 속도벡터가 양호하지 못하였다. 그 이유는 비정상적인 와의 생성과 소멸은 입자의 분포에 많은 영향을 주는 것으로 생각되며 그러한 결과로 입자의 분포가 매우 불균일하며 큰 입자 형태로 분포하기 때문에 큰 상관영역으로 계산되어야 한다고 생각된다. 또한 화상에서 미원추식방법적으로 화상의 상태가 양호하지 못한 것도 영향이 있으리라고 본다. 계산시간은 게조치 패턴상관법은 1시간 26분이며 FFT에 의한 상관법은 5일이상 소요된다.

#### 4.4 공기유동상의 PIV계측

Fig. 4.9에 게조치 패턴상관법으로 계산한 결과를 보여주고있다. 상관영역  $65 \times 65$  화소로 계산시간은 1시간 57분이 소요된다. 최대이동거리는 7화소로 하였고 공기의 흐름은 상방향으로 흐르고 있다. 원주의 우주에서 레이저를 주사하므로 원주의 좌측부분은 그늘이 지기 때문에 속도벡터를 얻기 어려운 화상상태 보이고 있다.

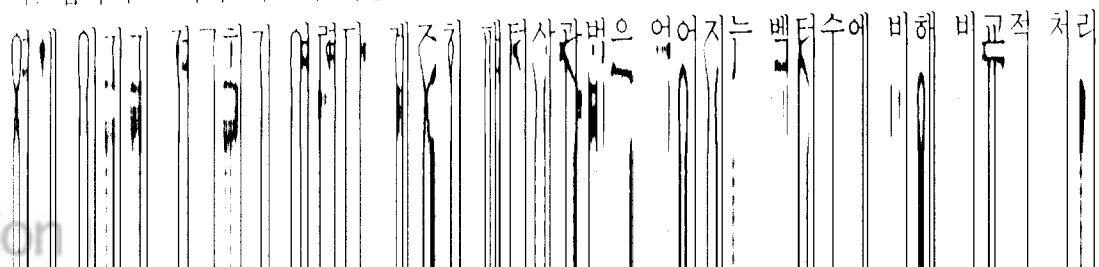
FFT에 의한 상관법은 상관영역의 변화에 무관하게 공기유동장에서 속도벡터를 얻을 수 없었다. 그 이유는 FFT 상관식이 갖는 의미는 두 데이터간의 겹쳐진 영역을 의미한다. 따라서 한 데이터가 다른 데이터보다 큰 값으로 넓은 영역은 상관값이 크기 때문이다. 또한 FFT는 주어진 데이터가 가지는 주파수의 절반만을 표현할 수 있기 때문에 화상의 계조분포를 이용하는 게조치 패턴상관법보다 동일한 해상도에서는 불리하다. 또한 게조치 패턴상관법의 상관영역내의 게조평균치를 감산하는 계산이 속도벡터의 오차를 줄이는 데 매우 유리하다. FFT에 의한 상관법은 공기유동장에서 가시화한 화상에서는 게조치분포가 크며 그 크기가 큰 지역으로 속도벡터가 모이는 결과를 보이며 Fig. 4.10에 상관영역이  $64 \times 64$  화소로 계산시간은 1일 1시간이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 이전상관법, 게조치 패턴상관법 및 FFT에 의한 상관법으로 얻어진 속도벡터의 정확도를 비교 평가하며 양호한 속도벡터를 얻을 수 있는 화상의 상태도 살펴보기 위하여 오퍼레이터의 수치해석으로 얻어진 속도벡터를 이용하여 화상시물레이션을 하였다. 실험에 의해 얻어진 속도벡터는 실제의 속도와 비교하기 어려우나 화상시물레이션은 상관법이 갖는 정확도를 평가하기 용이하기 때문이다. 입자는 Gaussian 분포라고 가정하여 입자수를 변경하면서 다른 화상을 생성하였다.

또한, 실험으로 속도계측을 하여 세 가지 상관법적용이 적용될 수 있는 유동장의 범위를 평가할 목적으로 작동유체가 물과 공기인 경우에 대하여 적용하여 보았다.

이전상관법은 입자와 배경을 분리하여 개개의 입자에 대한 추적을 하므로 처리 속도가 빠르며 속도구배의 변화가 큰 경우에서 가장 양호한 결과를 보이고 있다. 그러나 얻을 수 있는 속도벡터수가 작고 속도가 대략 0.4 화소 이하의 지역에서는 속도벡터를 얻기 힘들다. 입자의 크기가 비교적 직동유체의 분자보다 항력이 크므로 속도가 크게 감소하는 지



도벡터를 얻을 수 있는 화상의 범위가 크다. 또한, 속도가 작은 영역에서도 얻어진 속도 벡터가 가장 양호하다. 그러나, 속도구배가 큰 영역에서 오차가 커지는 단점이 있다. FFT에 의한 상관법은 입자에 의해 가시화된 화상에 적절하다. 그러나, 계산시간이 가장 길며 상관영역이 2의 승수로 제약을 받기 때문에 속도구배의 차가 큰 유동장에서는 속도 벡터의 스므딩현상이 발생한다. 특히 입자가 화상에 나타나는 크기에 민감하다. 속도구배가 큰 영역에서 계조치 패턴상관법과 같이 오차가 증대하는 단점이 있으며 화상에서 계조치가 크고 넓은 벽면부근에서 발생하는 노이즈에 매우 취약하다. 특히 FFT는 주어진 데이터가 가지는 주파수의 반만을 나타내므로 상대적으로 화상의 계조치분포를 이용하는 계조치 패턴상관법보다 불리하다. 그리고, 계조치 패턴상관법의 상관식에서 상관영역내의 계조치평균값의 감소는 계조치가 크고 넓은 벽면부근의 노이즈에 대하여 FFT에 의한 상관법보다 오차가 적은 속도벡터를 얻을 수 있다.

이상과 같은 각각의 상관법이 갖는 특징을 종합하여 보면 실용적 측면에서 계조치 패턴





고 있다. 상관영역은  $128 \times 128$  화소로 계산되었다. 그 이하의 상관영역에서는 얻어진 속도벡터가 양호하지 못하였다. 그 이유는 비정상적인 와의 생성과 소멸은 입자의 분포에 많은 영향을 주므로 생각되며 그러한 결과로 입자의 분포가 매우 불균일하며 큰 입자형태로 분포하기 때문에 큰 상관영역으로 계산되어야 한다고 생각된다. 또한 화상에서 비원주자방식으로 화상의 상태가 양호하지 못한 것도 영향이 있으리라고 본다. 계산시간은 게조치 패턴상관법은 1시간 26분이며 FFT에 의한 상관법은 5일이상 소요된다.

#### 4.4 공기유동상의 PIV계측

Fig. 4.9에 게조치 패턴상관법으로 계산한 결과를 보여주고있다. 상관영역  $65 \times 65$  화소로 계산시간은 1시간 57분이 소요된다. 최대이동거리는 7화소로 하였고 공기의 흐름은 상방향으로 흐르고 있다. 원주의 후측에서 레이저를 조사하므로 원주의 좌측부분은 그늘이 지기 때문에 속도벡터를 얻기 어려운 화상상태 보이고 있다.

FFT에 의한 상관법은 상관영역의 변화에 무관하게 공기유동장에서 속도벡터를 얻을 수 없었다. 그 이유는 FFT 상관식이 갖는 의미는 두 데이터간의 겹쳐진 영역을 의미한다. 따라서 한 데이터가 다른 데이터보다 큰 값으로 넓은 영역은 상관값이 크기 때문이다. 또한 FFT는 주어진 데이터가 가지는 주파수의 절반만을 표현할 수 있기 때문에 화상의 게조분포를 이용하는 게조치 패턴상관법보다 동일한 해상도에서는 불리하다. 또한 게조치 패턴상관법의 상관영역내의 게조평균치를 감산하는 계산이 속도벡터의 오차를 줄이는 데 매우 유리하다. FFT에 의한 상관법은 공기유동장에서 가시화한 화상에서는 게조치분포가 크며 그 크기가 큰 지역으로 속도벡터가 모이는 결과를 보이며 Fig. 4.10에 상관영역이  $64 \times 64$  화소로 계산시간은 1일 1시간이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 이전상관법, 게조치 패턴상관법 및 FFT에 의한 상관법으로 얻어진 속도벡터의 정확도를 비교 평가하며 양호한 속도벡터를 얻을 수 있는 화상의 상태도 살펴보기 위하여 오리피스에 수차해석으로 얻어진 속도벡터를 이용하여 화상시물레이션을 하였다. 실험에 의해 얻어진 속도벡터는 실제의 속도와 비교하기 어려우나 화상시물레이션은 상관법이 갖는 정확도를 평가하기 용이하기 때문이다. 입자는 Gaussian 분포라고 가정하여 입자수를 변경하면서 다른 화상을 생성하였다.

또한, 실험으로 속도계측을 하여 세 가지 상관법적용이 적용될 수 있는 유동장의 범위를 평가할 목적으로 작동유체가 물과 공기인 경우에 대하여 적용하여 보았다.

이전상관법은 입자와 배경을 분리하여 개개의 입자에 대한 추적을 하므로 처리 속도가 빠르며 속도구배의 변화가 큰 경우에서 가장 양호한 결과를 보이고 있다. 그러나 얻을 수 있는 속도벡터수가 작고 속도가 대략 0.4 화소 이하의 지역에서는 속도벡터를 얻기 힘들다. 입자의 크기가 비교적 작동유체의 분자보다 항력이 크므로 속도가 크게 감소하는 지역에 입자가 접근하기 어렵다. 게조치 패턴상관법은 얻어지는 벡터수에 비해 비교적 처리 속도가 빠르다. 공기유동상의 속도검출이 가능하며 작동유체가 물인 경우에서 양호한 속

도벡터를 얻을 수 있는 화상의 범위가 크다. 또한, 속도가 작은 영역에서도 얻어진 속도 벡터가 가장 양호하다. 그러나, 속도구배가 큰 영역에서 오차가 커지는 단점이 있다. FFT에 의한 상관법은 입자에 의해 가시화된 화상에 적절하다. 그러나, 계산시간이 가장 길며 상관영역이 2의 승수로 제약을 받기 때문에 속도구배의 차가 큰 유동장에서는 속도 벡터의 스모딩현상이 발생한다. 특히 입자가 화상에 나타나는 크기에 민감하다. 속도구배가 큰 영역에서 계조치 패턴상관법과 같이 오차가 증대하는 단점이 있으며 화상에서 계조치가 크고 넓은 벽면부근에서 발생하는 노이즈에 매우 취약하다. 특히 FFT는 주어진 데이터가 가지는 주파수의 반만을 나타내므로 상대적으로 화상의 계조치분포를 이용하는 계조치 패턴상관법보다 불리하다. 그리고, 계조치 패턴상관법의 상관관에서 상관영역내의 계조치평균값의 감산은 계조치가 크고 넓은 벽면부근의 노이즈에 대하여 FFT에 의한 상관법보다 오차가 적은 속도벡터를 얻을 수 있다.

이상과 같은 각각의 상관법이 갖는 특징을 종합하여 보면 실용적 측면에서 계조치 패턴 상관법이 바람직하다. FFT에 의한 상관법은 계산시간의 장시간을 요구하는 점에서 FFT를 고속화하기 위한 하드웨어나 어셈블러와 같은 저급언어를 이용하지 않는 한 실용적이지 못하고 속도벡터의 정확도에서 계조치 패턴상관법보다 오차가 크다. 이진상관법은 속도구배가 큰 영역에서 정확도가 가장 좋으나 입자가 크기 때문에 입자의 항력이 크므로 속도가 크게 감소하는 지역에 입자수가 작게 되며 속도벡터수가 작으므로 구조가 복잡한 형상에서 적용하기 어렵다. 그러나, 단순한 형태의 2차원인 경우에는 높은 정확도를 가지리라 예상된다.

보다 구체적인 각각의 상관법이 갖는 성능을 평가하기 위해서는 속도구배의 크기에 따른 상관법의 성능을 평가하여야 하며 속도계측이 가능한 최대속도 역시 평가하여야 한다. 이를 위하여 다양한 조건의 유동장에 대한 연구가 요구된다. 또한, 양호한 속도벡터를 얻을 수 있는 화상을 얻기 위하여 입자의 선택 및 입자의 크기에 대한 연구는 차후의 과제로 남긴다.

## 6. 참고문헌

- (1) 安居院 猛, " Turbo Pascal 映像處理의 實際", 工學社, 1988, pp. 157~185.
- (2) F. Yamamoto, M. Ibuchi, A. Wada, M. Koketsu, " Mathematical fundamentals of binary image cross-correlation method for 2-D and 3-D PTV", PIV-Fukui '95, 1995, pp. 79~90.
- (3) H. T. Huhang, H. E. Filder, J. J. Wang, " Limitation and improvement of PIV, Experiments in Fluids", 15, 1993, pp. 263~273.
- (4) I. Fujita, S. Komura, Flow Visualization VI, " On accuracy of the correlation method", 1993, pp. 856~862.
- (5) R. C. Gonzalez, " Digital image processing", Addison Wesley, 1992, pp. 81~100.

- (6) 안순현, " 터보 C로 구현한 과학기술 프로그래밍 ", 가남사, 1992, pp. 373~417.
- (7) 최상운, " PIV 및 CFD에 의한 오리피스 제트유동에 관한 연구 ", 한국해양대학교 석사학위논문, 1995.
- (8) 李英誌, " PIVによる3次元キルビチ流れの流動特性に関する研究 ", 東京大學博士學位論文, 1991.

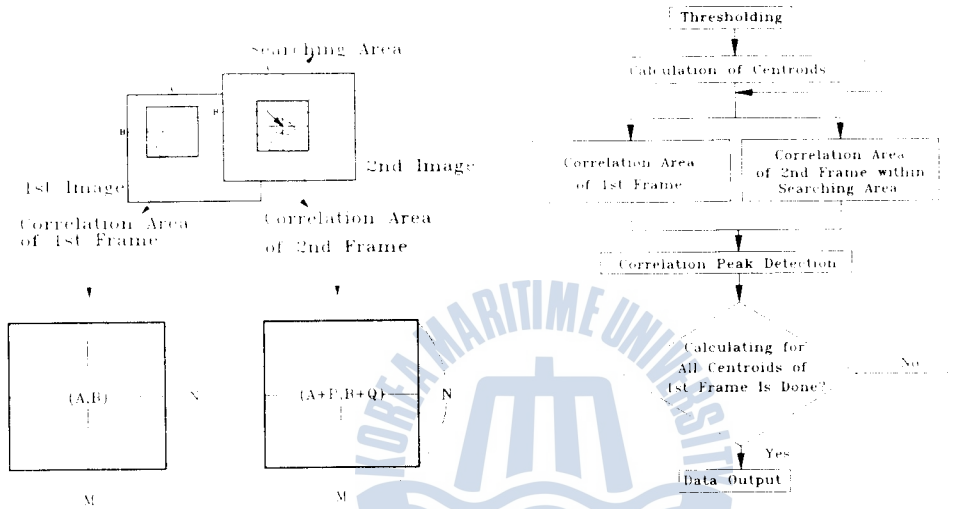


Fig. 2.1 Principle Diagram of Correlation Area

Fig. 2.2 Binary Correlation Flow Chart

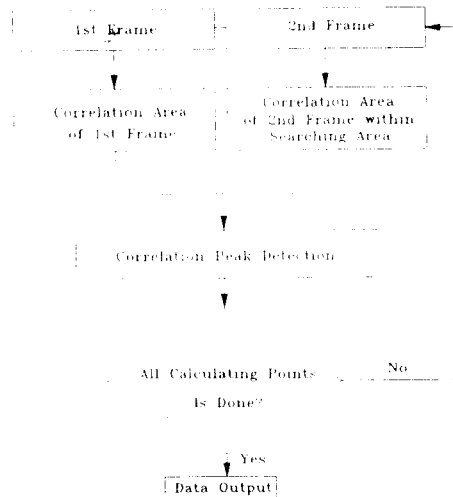


Fig. 2.3 Gray Level Correlation Flow Chart

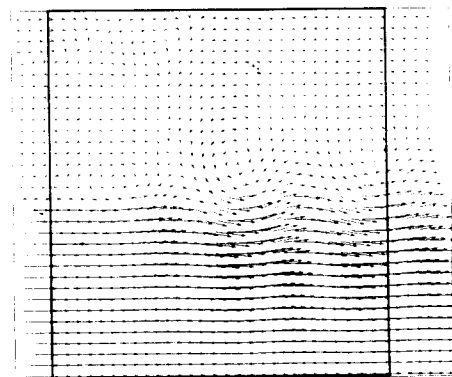


Fig. 3.1 Simulation Area

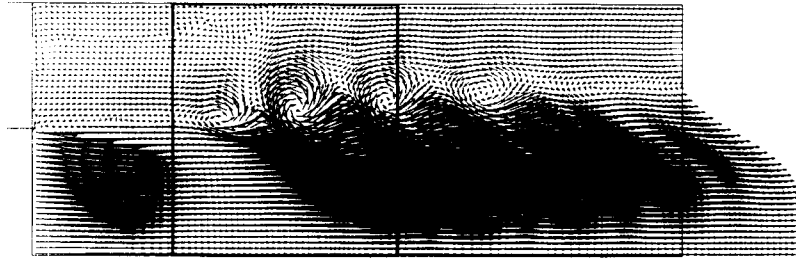
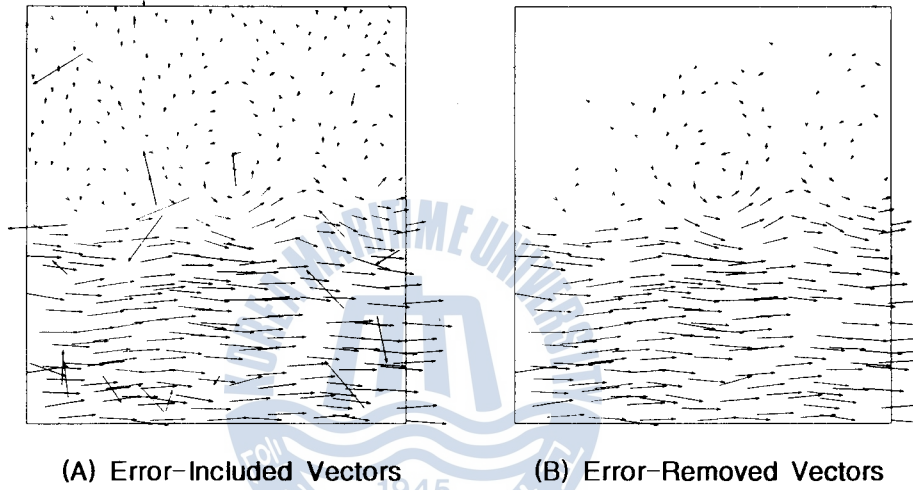


Fig. 3.2 Orifice-Jet Flow by CFD



(A) Error-Included Vectors

(B) Error-Removed Vectors

Fig. 3.3 Binary Correlation

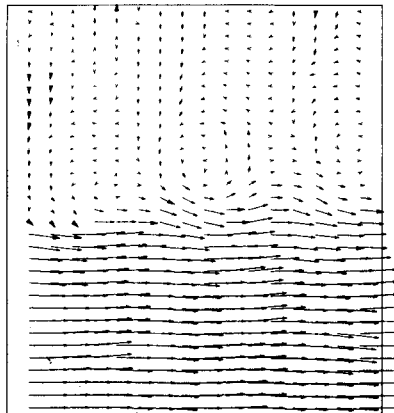


Fig. 3.4 Gray Level Correlation

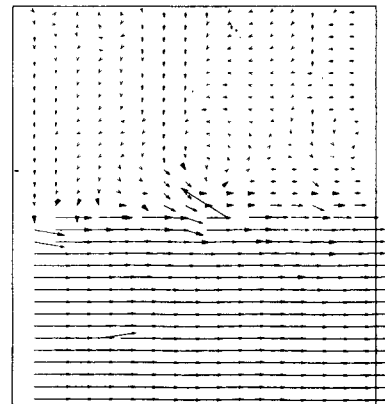


Fig. 3.5 FFT Correlation

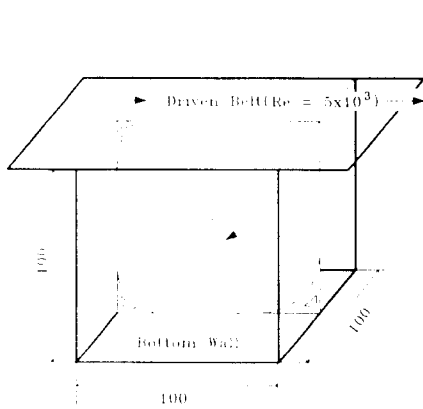


Fig. 4.1 Experimental Apparatus

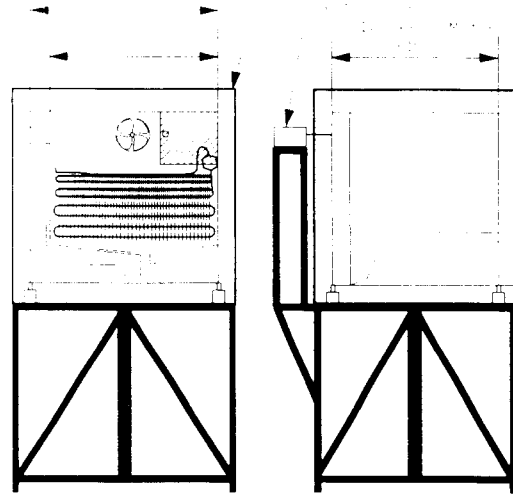


Fig. 4.2 Experimental Apparatus

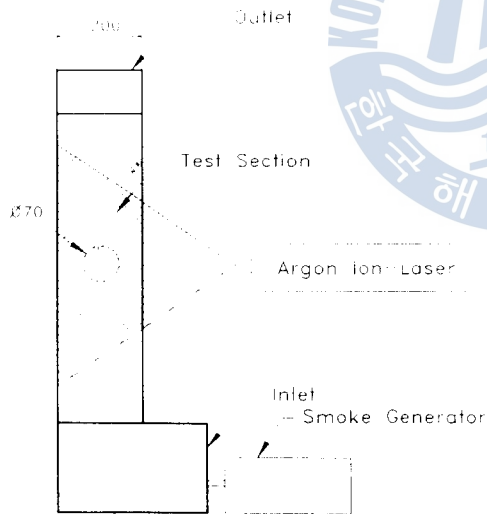


Fig. 4.3 Experimental Apparatus

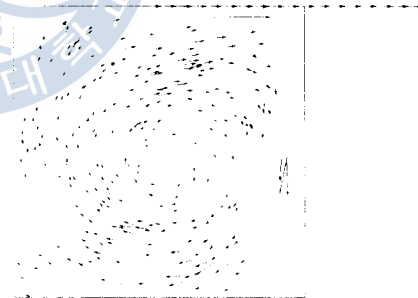
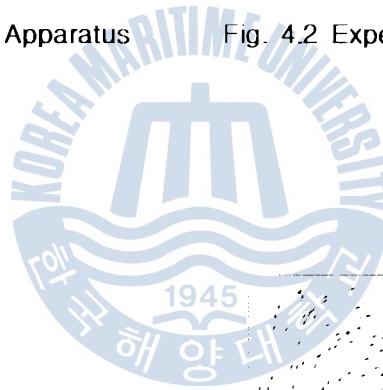


Fig. 4.4 Binary Correlation

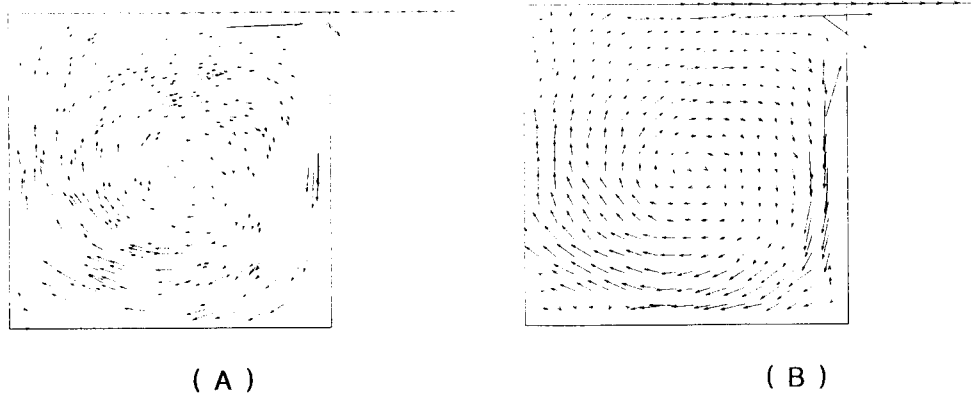


Fig. 4.5 Gray Level Correlation

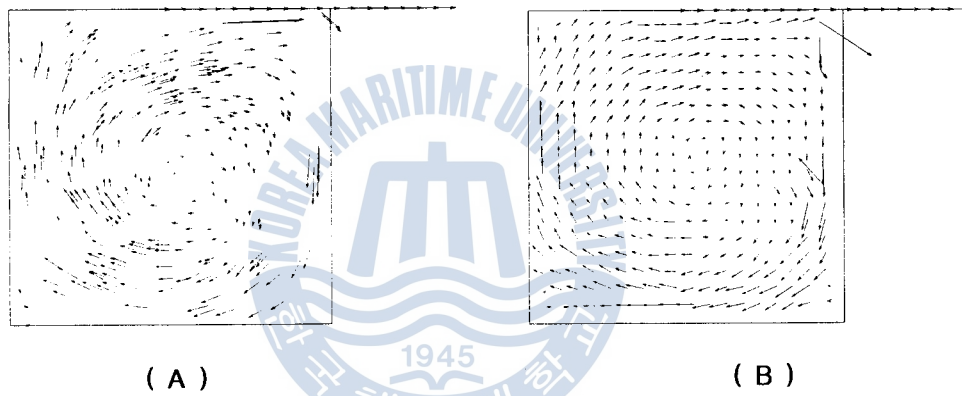


Fig. 4.6 FFT Correlation

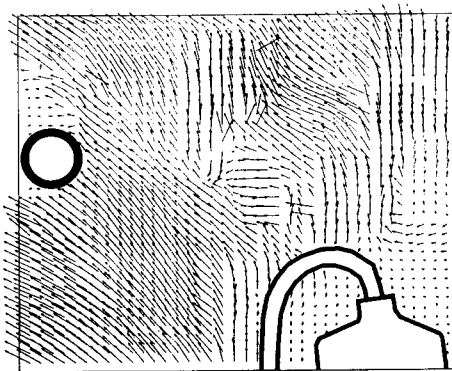


Fig. 4.7 Gray Level Correlation

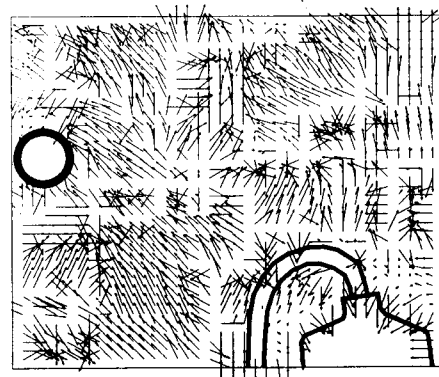


Fig. 4.8 FFT Correlation

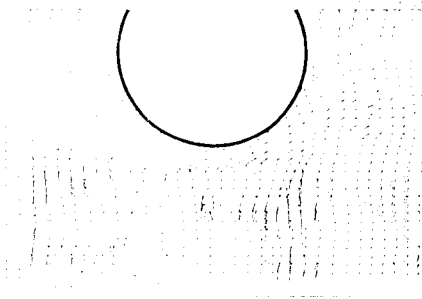


Fig. 4.9 Gray Level Correlation

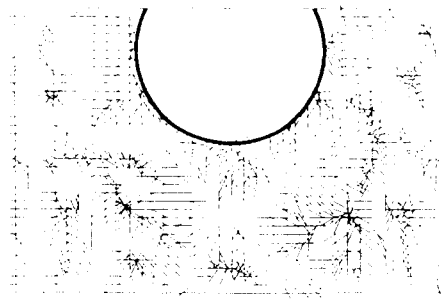


Fig. 4.10 FFT Correlation





