

GA기반 3D-PTV 개발과 원주 후류계측

도 덕희* · 조 경래** · 조 용범** · 문 지섭** · 편 용범***

Development of Genetic Algorithm based 3D-PTV and its Application to the Measurement of the Wake of a Circular Cylinder

Doh, D. H., Cho, G. R., Cho, Y. B., Moon, J. S., Pyun, Y. B.

Key Words: 3D-PTV(3차원 입자영상유속계), Genetic Algorithm(유전알고리즘), 2-Frame(2프레임), Circular Cylinder(원주).

Abstract

A GA(Genetic Algorithm) based 3D-PTV technique has been developed. The measurement system consists of three CCD cameras, Ar-ion laser, an image grabber and a host computer. The fundamental of the developed technique was based on that one-to-one correspondence is found between two tracer particles selected at two different image frames taking advantage of combinatorial optimization of the genetic algorithm. The fitness function controlling reproductive success in the genetic algorithm was expressed by a kind of continuum theory on the sparsely distributed particles in space. In order to verify the capability of the constructed measurement system, a performance test was made using the LES data set of an impinging jet. The developed 3D-PTV system was applied to the measurement of flow characteristics of the wake of a circular cylinder.

기호설명

x, y : 사진좌표 [pixel]
 Xm, Ym, Zm : 절대좌표 [mm]
 m_x, m_y : 카메라좌표계 원점의 이동량[mm]
 c_x, c_y, k_1, k_2 : 카메라 내부요소
 dis : 카메라중심까지 거리 [mm]
 $\Delta x, \Delta y$: 방사상 렌즈왜곡 [pixel]

1. 서론

유동장의 매질과 동일한 비중의 입자를 투입한 후 이들 입자들의 거동을 해석함으로써 유동장을 해석하는 방법인 PTV(Particle Imaging Velocimetry) 방법⁽¹⁾은 동시다점계측이 가능하므로 非定常유동장의 해석에 유리하다는 장점으로 부터 최근에 각광을 받고 있다. 지금까지는 유적선해석법⁽²⁾, 입자중심추적법⁽³⁾, 상관법⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 등을 이용한 화상해석알고리즘이 개발되어 있다. 이들의 속도계측법에서는 유동장의 특성에 따라서 각각의 적용알고리즘의 장점이 최대한 발휘하게 되지만 경우에 따라서는 알고리즘의 한계로 인하여 얻어지는 속도벡터의 수가 적거나 혹은 얻어진 속도벡터들 중에서 오류벡터를 많이 포함

* 정회원. 한국해양대학교 기계. 정보공학부

** 회원. 한국해양대학교 대학원

*** (주)티엔텍

하는 경우가 있다.

한편, 유전적 알고리즘(Genetic Algorithm, 이하 GA)⁽⁷⁾⁽⁸⁾은 자연세계의 진화 현상인 적자생존(survival of the fittest)에 기초한 최적화 알고리즘으로, 주어진 문제의 탐색공간 내에서 최적화할 목적 함수에 대해 초기 해로부터 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 거쳐 새로운 자손을 인공적으로 만들어 내고, 자연의 생물유전을 모방한 연산자들을 반복적으로 적용하여 적합한 해를 탐색하는 방법으로서 최적화 설계, 인공지능, 시스템 분석 및 예측, 제어 및 로봇틱스 등 많은 분야에서 적용되고 있다. 이와 같은 GA를 PTV에 적용한 연구로서는 Yamada 등⁽⁹⁾, Ohyama 등⁽¹⁰⁾이 있는데, 이들은 모든 입자의 이동거리가 최소가 되도록 적합도를 정의하여 GA에 의한 PTV계측방법을 제시하고 있으나, 2차원 속도분포에 대한 계측에 지나지 않았을 뿐만 아니라 얻어지는 속도벡터의 회복률도 저조하였다(2차원 강제와류에 대한 속도벡터 회복률이 80% 이하). 도덕희 등⁽¹¹⁾은 이동거리가 최소가 되도록 적합도를 정의함과 동시에 PTV의 특성(계산과정에서 참의 입자가 사라지는 경우가 발생함)을 고려하여 쇠퇴되어 가는 염색체의 집단(동일입자후보 집단)을 다음 세대에까지 이어지도록 함으로써 2차원 강제와류에 대하여 속도벡터의 회복률을 100%에 가까이 하는데 성공하였다.

실제 유동장이 3차원성이 강한 점으로부터 PTV를 이용한 3차원 계측의 시도가 있어왔다. Kobayashi 등⁽¹²⁾은 각 카메라영상의 2차원 속도벡터를 구한 뒤, 이들 속도벡터들에 대하여 스테레오 매칭을 실시함으로써 3차원 속도벡터를 얻어내는 시간-공간 탐색법을 제시하였으나, 사용된 모든 이미지 Frame안에 입자가 존재해야 하며 시간간격 또한 일정해야 한다는 제약조건으로 때문에 계측영역에 대하여 상대적으로 높은 속도를 가진 유동장이나 복잡한 유동장의 계측에 있어서는 속도벡터의 회복률이 일회 계측에 있어서 약 100개 이하로 저조했다. 3차원 PTV를 이용하여 유동장의 구조를 파악하기 위해서는 일회 계측에 있어서 대략 700개 정도 이상의 3차원 순시속도벡터가 필요하게 되는데⁽¹³⁾에는 못 미치는 수준이다.

도덕희 등⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾은 3대의 카메라영상에서의 입자상들이 형성하는 3차원 위치를 구한 뒤 시각상에서의 동일입자를 판별함으로써 3차원 속도벡터를 얻

어내는 공간-시간 탐색법을 제시하여 이상적 조건의 가상이미지 시험에서는 매우 높은 속도벡터 회복률을 보였으나 실제 유동장의 계측에 있어서는 입자의 겹침, 입자중심의 위치오차 등의 영향으로 인하여 공간-시간 탐색과정에서 사라지는 입자들이 많아 계측 영역내에서의 입자수가 2,000개 정도일 때 회복률은 500개 정도로 25%정도 수준에 그쳤다. Malik 등⁽¹⁶⁾은 계측영역에 나타난 입자의 수는 불명하지만 약 1,000개 정도의 3차원 속도벡터를 얻어냄으로서 3차원 PTV계측 분야에서 계측의 우수성을 받았지만 유동이 비교적 단순한 채널유동에 대한 것이라는 점에서 아쉬움이 있어왔다.

본 연구에서는 유체의 연속성 개념에 의거하여 전술한 바⁽¹¹⁾와 같이 쇠퇴되어 가는 염색체 집단을 보호함으로써 복잡유동장의 계측에 적용될 수 있는 GA-3D-PTV 계측법을 개발하였다.

유동장의 계측대상으로는 비교적 복잡유동장으로 볼 수 있는 원주 후류로 하였으며, 계측영역내에 약 2,500개 정도의 입자들에 대하여 1,500개 이상의 3차원 순시속도벡터를 얻어냄으로서 평균 약 65%이상의 속도벡터회복을 기할 수 있었다. 이는 3차원 유동구조를 순시에 볼 수 있음을 암시하며 본 연구에서 유동의 순간구조에 대하여 정량적으로 조사하였기에 이에 보고하고자 한다.

2. 3차원 계측의 원리

2.1 표정요소의 정의 및 계산

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다. 이러한 카메라 정보와 카메라로부터 얻은 영상은 카메라 중심점에 대한 투영의 관계가 된다.

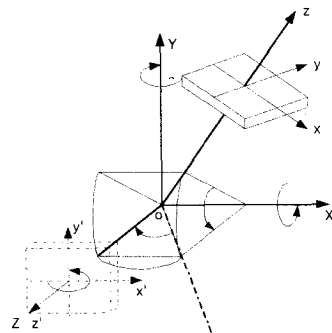


Fig. 1 Absolute and photographic coordinates.

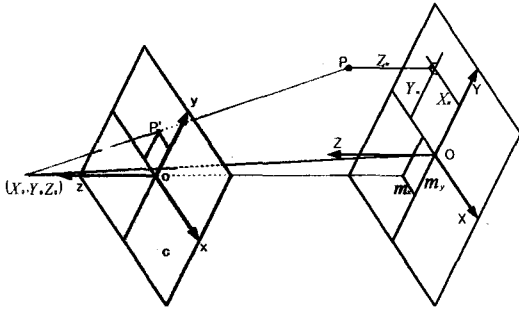


Fig. 2 Projected relations between the absolute and the photographic coordinates.

이러한 원리로부터 Kobayasi 등⁽¹²⁾과 도덕희 등⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾은 외부요소 ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \alpha$)와 내부요소 (c, x_0, y_0, k_1, k_2) 등 11개 요소를 가지는 관측방정식을 사용했다. 그러나, 이러한 표정요소(파라메타)는 카메라 정보를 얻는 과정이 복잡한 여러 가지 과정을 거쳐야 했다. 본 연구에서는 외부요소($dis, \alpha, \beta, \alpha, m_x, m_y$)와 내부요소 (c_x, c_y, k_1, k_2) 등 10개의 요소를 정의하고, 다음과 같은 관측방정식을 사용하였다.

Fig. 1은 절대 좌표계(X, Y, Z)에 대한 카메라 좌표계(x, y, z)의 관계를 나타낸다. dis 는 절대 좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. α, β, α 는 카메라 좌표계와 절대 좌표계와의 X, Y, Z축에 대한 회전각을 의미한다. 회전된 절대 좌표값을 (X_m, Y_m, Z_m)으로 표시하고, 카메라의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치하기 위한 이동량을 m_x, m_y 으로 표시한다. 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식 (1)을 얻을 수 있다.

$$x = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} + \Delta x$$

$$y = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} + \Delta y \quad (1)$$

여기서, c_x, c_y 는 이미지 그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 렌즈중심점과 화면주점간의 거리를 의미한다. $\Delta x, \Delta y$ 는 방사상의 렌즈왜곡을 고려한

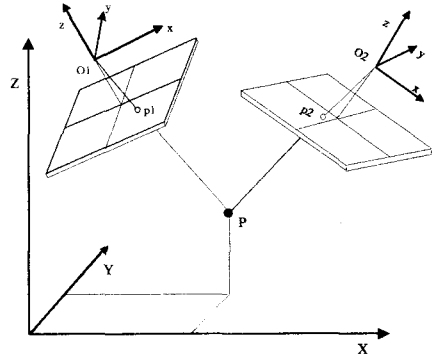


Fig. 3 Definition of 3D positions of particles.

량으로 다음 식 (2)로 정의된다.

$$\Delta x = \frac{x}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad \Delta y = \frac{y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

알고 있는 3차원 기준점좌표에 대하여 수정 Gauss-Newton법⁽¹⁷⁾을 사용함으로써 카메라의 표정요소를 구하였다.

2.2 3차원 위치결정의 원리

각 카메라에 대하여 표정요소가 결정되면 식 (1)의 관측방정식에 각 카메라의 사진좌표 x, y 를 대입하여 X_A, Y_A, Z_A 및 X_B, Y_B 및 Z_B 를 구한 뒤, 이들 점들의 중간 교점의 의미를 나타내는 식 (3)과 같이 구하게 되면 3차원 입자들의 중심이 구해지게 된다.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

각 카메라에 대한 카메라중심(X_0, Y_0, Z_0)과 입자의 중심을 지나는 하나의 공선의 방정식을 구할 수 있으며, 하나의 입자에 대한 두 대 이상의 카메라로부터 구해진 공선들이 서로 교점을 이루는 조건을 이용하여 구하게 된다.

3. 3차원 GA-PTV 측정법

PTV를 위한 GA의 염색체를 정의하는 방법은 참

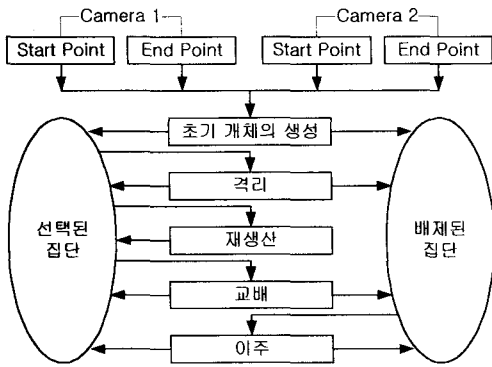


Fig. 4 Definition of operators in GA.

고문헌 (11)에 구체적으로 나와있다.

Fig. 4는 GA의 연산과정을 나타낸다. 즉, GA에서의 연산자는 초기개체의 생성, 격리, 재생산, 교배 및 이주로 볼 수 있다. 각 카메라 1, 2의 시점과 종점의 위치는 열색체의 유전자로 사용되며 적합도는 2단계로 나누어 판정하였다. 제 1단계에서는 각 카메라 1, 2의 공선의 조건식에서 두 직선간의 최단거리(식 4)가 최소로 되는 열색체들을 골라서 배제된 집단으로 소속시키고 제 2단계에서는 연속개념에 의거한⁽¹⁸⁾ 식 (5)가 최소가 되는 열색체들을 골라서 선택된 집단으로 소속시켰다.

$$Distance = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad (4)$$

$$D(i, j, k) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{\min} \right| \quad (5)$$

하나의 열색체는 총 4개의 입자(유전자)가 임의적으로 선택되었고 이들로 구성되는 공간직선간의 최단거리가 어느 일정값 이상이 되면 격리(isolation)를 하게 된다. 즉, 열성인 개체를 격리시켰다. 격리 연산후에는 살아남은 개체들에 대하여 3차원 속도에 대한 연속개념식 (5)를 계산한다. 식 (5)의 값이 어느 일정값 이상이 되면 열성으로 판단하여 이들 유전자(입자의 시점 종점)에 대해서 다시 재생산(reproduction)을 하였다. 이때, 재생산은 각 카메라에 대한 시점을 고정시켜두고 종점에 대한 임의적 선택을 수행하였다. 위의 과정이 끝나면 개체간의 교배(crossover) 과정을 거친다. 교배는 카메라에 대한 2차원 벡터를 고정한 상태에서 카메라들이 이루는 공간직선간의 거리가 일정값 이하로 되는 유전자를 서로

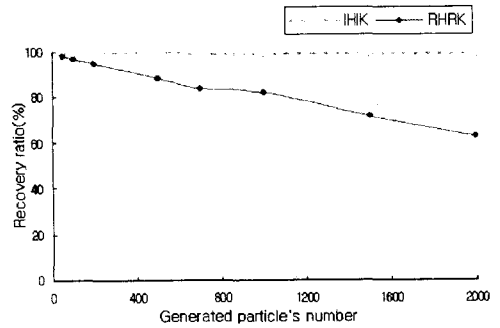


Fig. 5 Recovery ratio vs generated particle number.

교환하고 이상이 되는 유전자는 배제하였다. 위의 과정동안 배제된 데이터들은 다시 초기 개체 생성을 수행하여 집단내부로 되돌려 보내는데 이러한 과정이 이주(migration)연산이다. 본 연구에서는 3차원 최단거리의 한계값을 0.5, 교배율은 10%를 주었으며, 입자의 개수에 따라 10~15세대(반복횟수)를 사용하였다. Fig. 5는 구축된 알고리즘의 성능을 나타내고 있다. 세트유동의 LES 계산결과(<http://www.vsj.or.jp/piv>)를 이용하여 구축한 가상영상을 이용하여 성능을 시험하였다. 2000개의 입자영상에 대하여 약 65% 정도의 속도벡터 회복율을 보였다.

4. 원주 근접후류의 계측

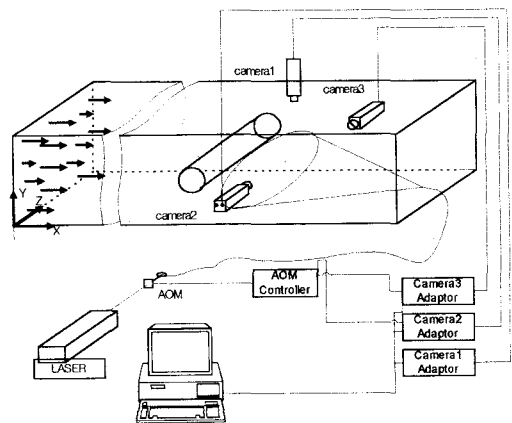


Fig. 6 Experimental system.

Fig. 6은 직경이 30mm인 원주후류에 대하여 본 연구에서 개발한 GA를 이용한 3차원 PTV로 계측하기 위한 시스템을 나타낸다.

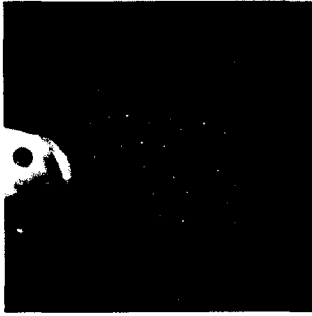


Fig. 7 Calibrator.



Fig. 8 Raw image viewed by camera 3.

3대의 카메라로부터 받아들인 영상은 유동장에 투입된 입자상의 중심을 구하기 위하여 컴퓨터로 보내어진다. 구해진 입자들의 중심으로 전술의 GA계산과정을 거침으로서 3차원 순시속도벡터가 얻어지게 된다. 한편, 유동장을 가시화하기 위하여 사용된 광원은 Ar-ion(500mW)레이저를 사용하였으며 원주직경기준의 레이놀즈수는 약 1,000이다. 카메라의 교정을 위하여는 Fig. 7과 같은 교정기를 사용하였다.

Fig. 8은 카메라 3로 얻어진 원시영상을 나타낸다. Fig. 9는 본 연구에서 개발한 계측법으로 구한 3차원 순시속도벡터를 나타내고 있다. 일회의 계측으로 실험에서 얻어낸 입자영상으로부터 2,000개 이상의 3차원 순시속도벡터를 얻을 수 있었다. Fig. 10은 Fig. 9을 격자상으로 보간하여 나타낸 순간속도벡터들의 분포를 보이고 있다. Fig. 11은 $Z=35\text{mm}$ 인 단면상에서의 3차원 순간속도벡터의 분포를 보이고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 Brede 등⁽¹⁹⁾이 제시한 Fig. 12와 같은 구조를 하고 있음을 추정할 수 있다. 이들에 의하면 Reynolds 수가 300이상일 때는 Fig. 12와 같은 B-mode의 구조가 형성된다고 하는데

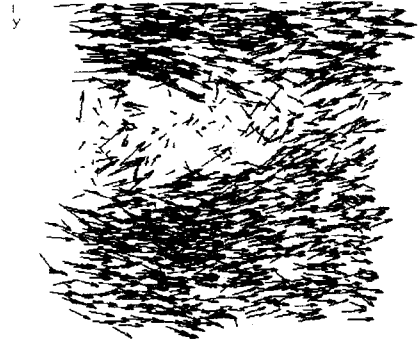


Fig. 9 Instantaneous 3D vectors obtained by 3D-GA-PTV.

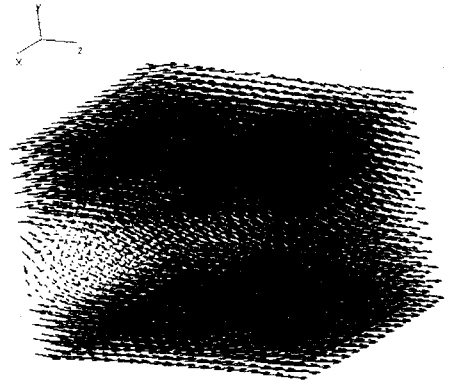


Fig. 10 Instantaneous 3D-velocity vectors.

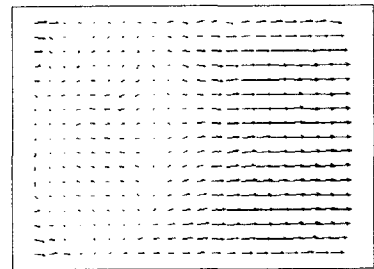


Fig. 11 Instantaneous 3D velocity vectors at X-Y plane at $Z=35\text{mm}$.



Fig. 12 B-mode vortices structure (Brede, 1996).

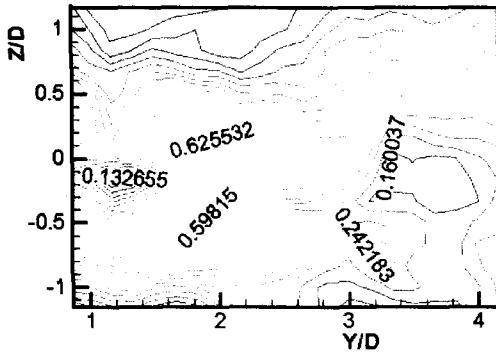


Fig. 13 Turbulent intensity distribution.
 $(T_v = \sqrt{v'^2} / U_0)$ at $X = -1.333D$

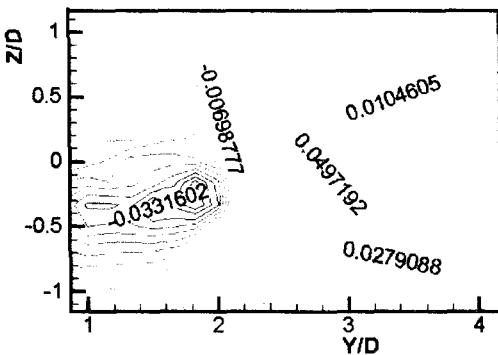


Fig. 14 Reynolds shear stress distribution.
 $(-u'v' / U_0^2)$ at $X = 0.000D$.

Fig. 12의 단면방향으로 잘라 놓고 보면 Fig. 11과 같은 형태의 분포를 가질 것임을 추론할 수 있다.

Fig. 13은 난류강도(v' 성분)의 분포를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 원주 하류방향으로 1D 부근에 난류강도가 강한 지점이 상하로 존재하고 있음이 확인된다 (Fig. 6의 좌표계에 주의).

Fig. 14는 $X=0.0D$ 의 지점, 즉 원주의 중앙단면에서의 Reynolds 응력의 분포를 보이고 있다. 원주 중심으로부터 하류방향으로 2D-3D 사이에 응력의 부호가 서로 상반되면서 최대인 지점이 존재함이 보인다.

5. 결론

유전적 알고리즘을 이용한 3차원 PTV(Particle Imaging Velocimetry: 입자영상유속계)를 개발하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

유전적 알고리즘을 PTV에 적용과정에 있어서 소외되는 입자들을 배제하지 않기 위하여 참조집단(reference group)을 형성함과 동시에, 유체의 연속체 개념에 근거한 적합도를 적용함으로써 계측영역 내의 입자 개수가 약 1,500개일 경우 1,100개 이상의 3차원 순시속도벡터들을 얻어내었다. 제트유동 LES계산결과를 이용한 가상이미지에 대하여 본 연구에서 구축한 계측법으로 적용하여본 결과 속도벡터의 회복률이 65%이상으로 매우 양호함을 알 수 있었다. 이는 기존의 3차원 PTV계측법들보다 회복률보다 약 5배 이상으로 높으며 이는 복잡유동장 난류유동의 구조해명에 지표를 마련할 것으로 사료된다.

본문에서는 설명되지 않았으나 ASME 기준에 의거한 정량적 계측오차 해석을 통하여 얻어낸 결과 본 계측법의 계측오차는 약 1% 정도임을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발된 GA를 이용한 3D-PTV계측법을 원주후류 유동장에 계측을 하여 순시속도분포 난류통계치를 얻어낸 결과와 기존의 연구결과들과의 정성적 비교를 통하여 본 계측법이 유효한 계측법임을 입증하였다.

본 계측법은 저해상도의 CCD카메라로 계측한 결과이므로 고해상도의 카메라를 도입한다면 DNS수준의 계측결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.
- (2) 小林敏雄, 吉武庸裕, 1984, "流跡寫眞自動處理システムの開發", 機械學會論文集(B), Vol. 51, No. 466, pp.162-168.
- (3) Doh, D. H., Kobayashi, T. Saga, T., Segawa, S., 1991, "Velocity measurement behind a rotating propeller using Particle Imaging Velocimetry", Journal of Flow Visualization, The Visualization Society of Japan, Vol.11, No.2, pp.267-272.
- (4) 木村, 高森, 井上, 1986, "相關を利用した流れの畫像計測", 流れの可視化, Vol.6, No.22, pp.105-108.

- (5) 도덕희, 최성환, 홍성대, 백태실, 이연원, 1998, "PIV에 의한 건축물 실내환기 특성 조사법", 공기조화냉동공학회 동계학술대회논문집 (II), pp.474- 481.
- (6) Utami T., Blackwelder R., 1991, "A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization", *Exp. in Fluids*, Vol.10, pp.213-223.
- (7) Goldberg, D. E., 1985, "Optimal initial population size for binary-coded genetic algorithm", TCGA Report No. 85001. University of Alabama.
- (8) 진강규, 하주식, 1997, "최적화기법으로서의 유전알고리즘과 그 응용", 韓國船舶機關學會誌, Vol.21 No.2, pp.108-116.
- (9) Yamada, H., Yamane, K., 1995, "Particle Image Velocimetry Using a Genetic Algorithm", 可視化情報, Vol.15 Suppl. No.1, pp.165-168.
- (10) Ohyama, R., Takagi, T., Tsukiji, T., Nakanishi, S., Kaneko, K., 1993, "Particle Tracking Technique and Velocity Measurement of Visualized Flow Fields by means of Genetic Algorithms", 可視化情報, Vol.13 Suppl. No.1, pp.22-25.
- (11) 도덕희, 조용범, 홍성대, 2000, "유전적 알고리즘에 의한 PIV계측법", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B), 울산대학교, pp.650-654.
- (12) Kobayashi, T., Saga, T., Sekimoto, K., 1989, "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing", ASME FED Vol.85, pp.29-36.
- (13) Nishino, K, Kasagi, N., Hirata, M., 1989, "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing", ASME J. Fluids Eng. Vol.111 No.4, pp.384-391.
- (14) 최성환, 도덕희, 이연원, 1999, "디지털화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 계측법의 개발", 韓國船舶機關學會誌, Vol. 23 No. 2, pp.149-159.
- (15) Doh, D.H., Kim, D.H., Choi, S.H., Hong, S.D., Kobayashi, T. and Saga, T., 2001, "Single-Frame 3-D PTV for high speed flows", *Exp. in Fluids*, Vol. 7, pp.84-95.
- (16) Malik, N. A., Dracos, Th. Papantoniou, D. A., 1993, "Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows", Part 2. Particle tracking. *Exp. In Fluids*. Vol. 15, pp.279-294.
- (17) Doh, D. H., 1995, "A study on three dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal", PhD Thesis., Tokyo Univ.
- (18) 北條, 高島, 1995, "PIVにおける異常ベクトルの検出", 可視化情報, Vol.15, Suppl. No.2, pp.177-180.
- (19) Brede, M., Eckelmann, H. and Rockwell, D., 1996, "On secondary vortices in the cylinder wake", *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2117-2124.