

적합함수 기반의 3D-PTV에 의한 원주후류 측정 해석

도덕희* · 조효재† · 백태실**

Measurements of the Cylinder Wake with a Hybrid-Fitness Function based 3D-PTV

Deog Hee Doh, Hyo Jae Jo and Tae Sil Baek

Abstract. A new 3D-PTV algorithm (a Volume PTV) based upon a hybrid fitness function has been constructed. A coherency fitness function is introduced using the information of space and time to sort out the correct particle pairs between the two camera images. The measurement system consists of two-high-definition-cameras(1k×1k), a Nd-Yag laser and a host computer. The developed algorithm has been employed to investigate the flow features of the cylinder wake. The Reynolds numbers with the cylinder diameter ($d=10$ mm) are 360, 540, 720, 900, 1080 and 1260. Two-dimensional displacements of the particles of each camera's image and neighbouring constraints were introduced to reduce the calculation loads. More than 10,000 instantaneous 3D vectors have been obtained by the constructed algorithm. The constructed algorithm could recover more than 80~90% of the particle numbers in the image. condition.

Key Words: High-Density 3D-PTV(고밀도 3차원입자영상유속계), Cylinder Wake(원주후류)

1. 서 론

유동장의 매질과 동일한 비중의 입자를 투입한 후 이들 입자들의 거동을 해석함으로써 유동장을 해석하는 방법인 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 방법⁽¹⁾은 동시다점측정이 가능하므로 非定常유동장의 해석에 유리하다는 장점으로부터 최근에 각광을 받고 있다. 지금까지는 유적선해석법⁽²⁾ 입자중심추적법⁽³⁾, 상관법⁽⁴⁾ 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 오류 벡터를 많이 포함하는 경우가 있다. 도 등⁽⁵⁾은 유전알고리즘(Genetic Algorithm)기반의 3D-PTV알고리즘을 개발하여 원주후류를 측정함으로써 대규모 와구조에

대한 상세한 보고를 한 바 있다. 이들 연구에서는 순간에 얻어지는 벡터수가 3000개 전후이어서 소규모와구조의 거동에 대한 설명이 어려웠다.

본 연구에서는 하이브리드 함수기반(S-type Sigmoid function)의 Volume PTV알고리즘을 개발함으로써 순간에 얻을 수 있는 3차원 벡터의 수가 10,000개 이상 가능하게 하였으며 이를 활용하여 원주후류의 외동의 거동구조를 조사하였다.

2. Volume PTV

2.1 카메라 파라미터 계산

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대에 대한 절대좌표계상에서의 상대적 위치와 자세를 구하였다. 본 연구에서는 도 등⁽⁵⁾의 10파라미터법을 적용하였다. 식(1)은 Fig. 1과 2에 나타나 있는 바와 같이 외부요소($dis, \alpha, \beta, \kappa, m_x, m_y$)와 내부요소 (c_x, c_y, R_1, R_2)을 구하는데 사용된 관측방정식을 나타낸다. 절대 좌표계(X, Y, Z)와 카메라 좌표계(x, y, z)의 관계를 나타내며 dis 는 절대 좌표계 $O(0,$

* 한국해양대학교 기계정보공학부

† 한국해양대학교 조선해양시스템공학부

** 포항대학 자동차공학과

0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. α, β, κ 는 카메라 좌표계와 절대 좌표계와의 X, Y, Z 축에 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.

$$\begin{aligned} x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} + \Delta x \\ y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} + \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

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

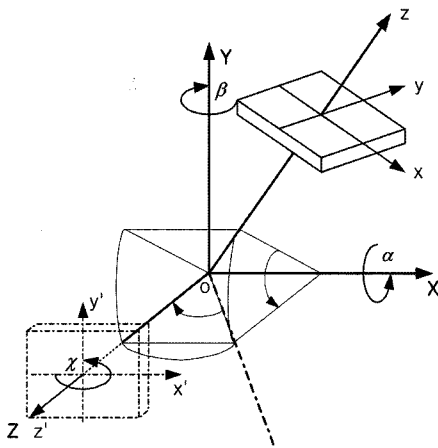


Fig. 1. Absolute and photographic coordinates

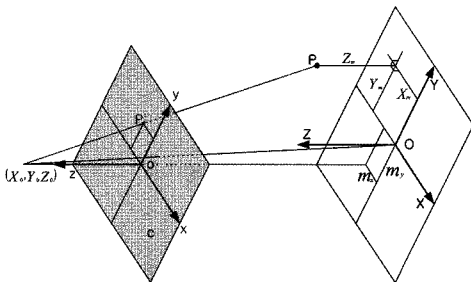


Fig. 2. Projected relations between the absolute and the photographic coordinates

음 식 (2)로 정의된다.

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

알고 있는 3차원 기준점좌표를 이용하여 반복계산에 의하여 10개의 카메라 파라미터를 구하였다.

2.2 3차원 입자위치 계산

각 카메라에 대하여 표정요소가 결정되면 식 (1)의 관측방정식에 각 카메라의 사진좌표 x, y를 대입하여 X_A, Y_A, Z_A 및 X_B, Y_B, 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. 본 연구에서 구한 카메라파라미터를 이용하여 기준점좌표의 3차원위치를 계산해 본 결과 그 오차는 X, Y, Z방향 각각 0.24 mm, 0.25 mm 및 0.4 mm였으며 이들은 Bias 오차로 볼 수 있다.

2.3 3차원 매칭 알고리즘

2대의 카메라에서 획득된 2차원 영상을 이용하여 3차원 공간상의 좌표계를 획득하기 위해서는 먼저 정화

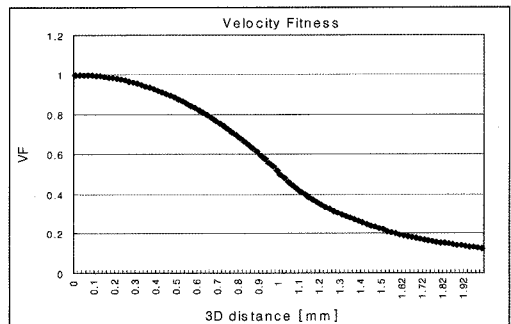


Fig. 3. Fitness function

한 입자쌍을 매칭해야 하며, 매칭된 입자는 상기의 과정을 거쳐 3차원 공간상에 정확한 입자위치계산과 이동량을 구할 수 있게 된다. 3차원 공간상의 입자를 먼저 추적한 다음, 3차원 매칭을 실시하고 최종적자신의 쌍으로 결정한 다음 3차원 속도벡터를 구하였다.

본 연구에서는 주위 유동특성을 고려한 매칭알고리즘(Flow based Particle Pair Matching Algorithm)을 새로 개발하여 실린더 후류를 계속하였다. 주위 유동을 고려하기 위하여 적합도 함수로 “S” 형태의 시그모이드(Sigmoid) 함수를 사용하였으나, 시그모이드 함수의 경우 지수함수를 근간으로 함으로써, 추적입자들이 증가함에 따른 입자쌍 매칭에 있어 연산시간이 상당히 증가됨을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 입자쌍의 증가에 따른 연산시간을 줄이기 위하여 식 (4)와 같은 2개의 2차 함수를 이용하여 시그모이드 함수와 유사한 형태의 적합도 함수(Fig. 3)를 만들어 사용하였다.

$$f(x) = \begin{cases} -0.5x^2 + 1, & (0 \leq x \leq 1) \\ 0.5 \frac{1}{x^2}, & (1 \geq x) \end{cases} \quad (4)$$

본 알고리즘에서는 첫째, 선택된 입자와 이웃하는 입자들의 유동은 초기 입력되어지는 입자의 2차원 이동거리(PM : Particle Movement, 단위는 pixel)를 벗어날 수 없으며, 둘째 선택된 입자와 이를 포함하는 이웃영역(PN : Particle Neighborhood, 단위는 mm)내에 존재하는 입자들의 유동은 유사한 형태를 가지게 되는 전제를 바탕으로 하고 있다. Fig. 4는 알고리즘의 개요도를 나타낸다.

$$Velocity\ Fitness[VF] = \frac{\sum |u_i - u_d|}{\sum u_i} \quad (5)$$

위와 같은 가정으로 식 (5)와 같은 유동함수[VF: Velocity Fitness]를 사용하여 이웃하는 입자들과 선택된 입자간의 상대속도차에 기인한 유동의 불일치 정도를 판별하였다. 이 때, 이웃하는 입자들과 선택된 입자간의 상대속도차가 클수록 유동의 불일치 정도는 높아지며, 이에 따른 유동의 적합도는 낮아진다. 반대로 상대속도차가 작을수록 불일치 정도는 낮아지며, 유동함수에 기인한 적합도는 높아진다. 본 연구에서는 PM=8 pixel, PN=5 mm, VF=0.3으로 하여 계산을 수행하였다.

선택된 입자와 이웃하는 입자들 간에 주어진 PF를

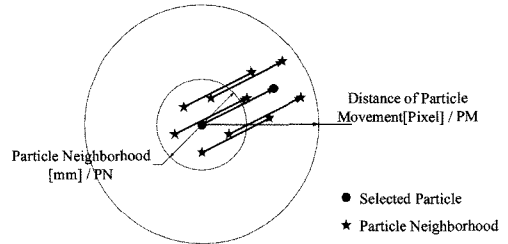


Fig. 4. Schematic of Flow based Particle Pair Matching Algorithm

바탕으로 반복연산수행을 통하여 입자쌍을 구하였다. 이로써 3차원 공간 위치 및 3차원 속도벡터를 구할 수 있게 된다.

3. 실험장치, 방법 및 결과

구축한 Volume PTV 알고리즘에 의한 실린더 후류의 유동장을 측정하기 위한 시스템은 Fig. 5에 나타나 있다.

수는 360, 540, 720, 900, 1080, 1260로 설정하였다. 실린더 후류의 측정영역은 X방향으로 6D, Y방향으로 6.8D, Z방향으로 1.5D이며, Main stream 방향은 X, span wise 방향은 Y, Normal 방향은 Z이다.

Fig. 6은 Re = 360에서의 각각 카메라에서 획득한 실험영상을 나타낸 것이다. 이러한 실험영상은 가우시안 마스크법을 이용하여 입자들의 도심을 추측하게 된다. 본 연구에서는 각각 12000개 정도의 입자를 추출하여 구축한 알고리즘으로 3차원 속도벡터를 구하였다. 획

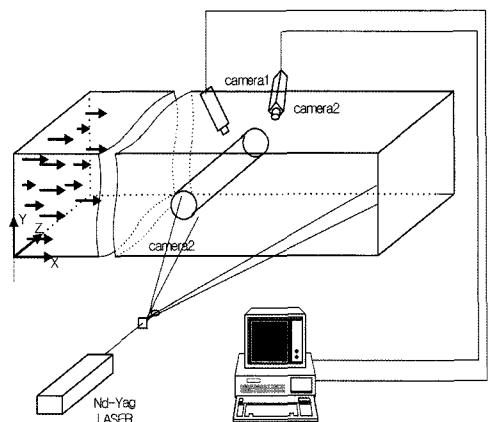


Fig. 5. Experimental apparatus

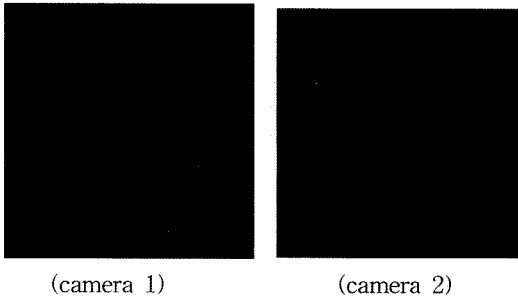


Fig. 6. Raw images

득되어진 순간의 3차원 벡터는 약 9800~11000개 정도 이었다. 이 정도의 개수는 도 등⁽⁵⁾에 의하여 구한 유전 알고리즘기반 3D-PTV법보다 약 4배의 속도벡터 추출 성능에 해당된다.

Fig. 7(a), (b), (c), (d)는 각각 Re수가 360일 때의 순시 속도벡터, Gaussian Window법에 의한 보간된 속도 벡터(30×35×9), xy 단면 속도벡터분포 및 xz단면 속도 분포를 나타낸다. 실린더 후류에서의 Karman와의 영향으로 xz단면에서의 속도분포가 Re에 관계없이 사인 형태를 이루는 것을 확인할 수 있다. 또한, 해당 Re에 따른 속도의 차이가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 8(a), (b)는 각각 Re수가 1080일 때의 보간 속도 벡터, xy 단면 속도벡터분포를 나타낸다. Re수가 360일 때의 유동구조는 streamwise유동모드를 보이기 보다는 spanwise유동모드를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 이는 Brede 등⁽⁶⁾의 결과와 일치한다.

Fig. 9는 Re 540일 때의 Primary vortex를 해당 시간별로 나타낸다. 여기서 $\omega_y > 0$ 인 경우는 옅은 청색으로, $\omega_y < 0$ 인 경우는 진한 청색으로 나타내었다. 일정 주기를 가지고 와동이 일어남을 확인할 수 있다. 여기서 Primary vortex의 기준은 식 (6)으로 정의하였다.

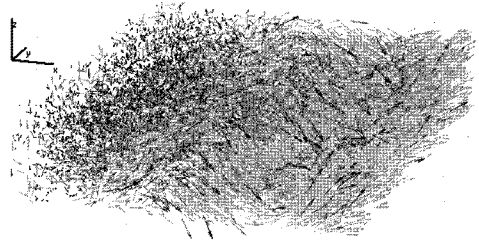
Primary vortex:

$$\omega_y^2 > \omega_x^2 + \omega_z^2, \omega_y > 0 \text{ or } \omega_y < 0$$

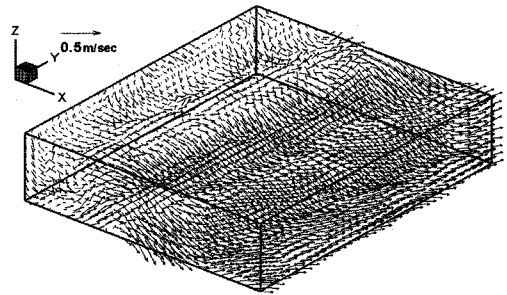
Secondary vortex:

$$\omega_y^2 < \omega_x^2 + \omega_z^2, \omega_x > 0 \text{ or } \omega_x < 0 \quad (6)$$

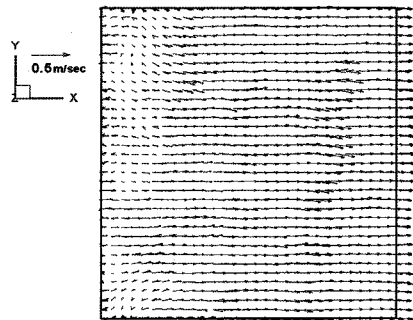
Vortices $\omega_y > 0$ 와 Vortices $\omega_y < 0$ 사이의 거리는 실린더 후면으로부터 약 1D 떨어진 곳에서 1.0D 간격으로 교번으로 x/D축을 따라 흘러간다. 그 다음의 와간격은 1.5D를 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 1.0D~2.0사이에 있는 Primary vortex는 6/30초 이후에는 ω_y 값이



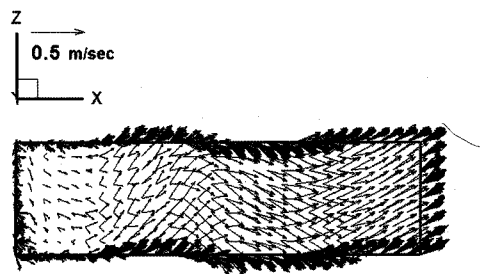
(a) Instantaneous 3D vectors (No.=10,000)



(b) 3D grid vectors

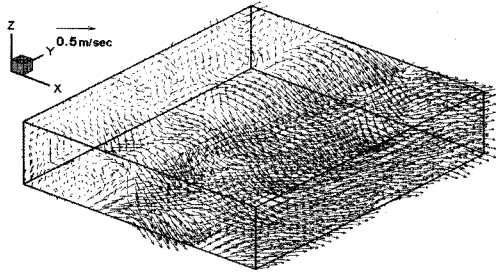


(c) Vector distribution at xy-plane

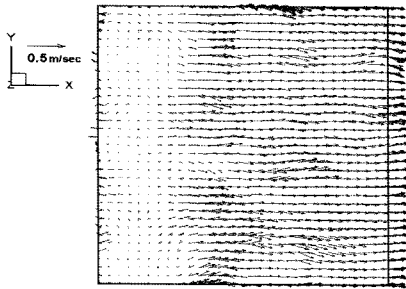


(d) Vector distribution at xz-plane

Fig. 7. Obtained results (Re=360)



(a) 3D grid vectors



(b) Vector distribution at xy-plane

Fig. 8. Obtained results (Re=1080)

서로 반대로 되어 있음을 알 수 있는데 이는 spanwise 방향으로 뻗어 있는 와구조가 상호결합을 한 다음 반대방향의 값을 가지게 됨을 의미한다.

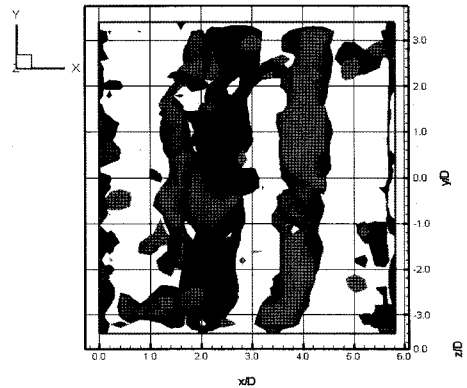
5. 결 론

새로운 Volume PTV알고리즘의 구축과 이를 이용한 원주후류에 대한 측정을 통하여 다음과 같이 요약할 수 있었다.

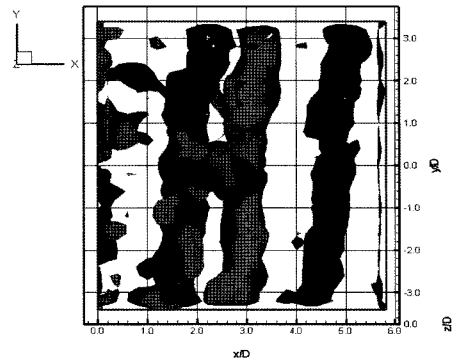
본 연구에서 구축된 적합함수기반의 3D-PTV법에서의 최적변수는 PM=8 pixel, PN=5 mm, VF=0.3이었다.

기존의 3D-PTV알고리즘보다 4배 이상 높은 밀도의 순간 3차원 속도벡터를 구할 수 있었다. 구축된 측정 알고리즘으로 실린더 후류를 측정하였으며 기존의 연구 성과에 비하여 매우 상세한 유동의 거동구조를 파악할 수 있었다.

6종류의 레이놀즈수에서의 실험을 통하여, 유동의 양상이 각각 특징적으로 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 특히, spanwise방향의 vortex구조의 결합은 ω_y 에 의한 영향이 크음을 알 수 있었다.



(a) time $t=t_0$



(b) time $t=t_0 + 6/30\text{sec}$

Fig. 9. Obtained vorticities (Re=540)

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업 (KOSEF, R0A-2008-000-20069-0)과 Sea Grant사업(국토해양부)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.
- 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.
- 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) Utami T., Blackwelder R., 1991, “A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization”, *Exp. in Fluids*, Vol.10, pp.213-223.
- 5) Doh, D.H. Kim, D.H. Cho, K.R. Cho, Cho, Y.B., Saga, T., Kobayashi, T., 2002, Development of GA based 3D-PTV Technique, *Journal of Visualization*, Vol.5, No.3, pp.243-254.
- 6) Brede, M., Eckelmann, H. and Rockwell, D., 1996, “On secondary vortices in the cylinder wake”, *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2117-2124.