

하이브리드 PTV-PIV알고리즘에 의한 고정밀 와도 추정

도덕희* · 조경래† · 이재민**

Precise Estimations on Vorticities using a Hybrid PTV-PIV Algorithm

Deog Hee Doh, Gyong Rae Cho and Jae Min Lee

Abstract. A PTV algorithm was constructed using a linear transformation, in which the merits of the conventional PIV and PTV were adopted. In PIV calculations, the obtained velocity vectors are affected by the filtering effects by its calculation principle. PTV techniques are widely used for their excellences of measuring small scaled flows, such as nano and bio flows. However, PTVs produce vector errors due to interpolation process. To overcome these problems, a hybrid PTV algorithm was constructed by combining PTVs' and PIVs' benefits using a linear transformation. The Taylor-Green vortex flows were generated for the tests of vorticity calculations. The conventional gray-level cross-correlation PIV technique and 2-Frame PTV technique were tested for the same flows for comparisons with those obtained by the constructed hybrid algorithm. The excellence of the constructed hybrid algorithm was validated through an actual experiment on the cylinder wake.

Key Words: PIV(입자영상유속계), PTV(입자추적유속계), Hybrid Algorithm(하이브리드알고리즘), Cylinder Wake(실린더후류), Vorticity(와도)

1. 서 론

유동장 해석에 있어서의 와도 분포를 보다 정확하게 추정하는 것은 국소변동압력 분포추정, 나아가서 난류 특성의 정량화에 기여를 하게 된다. 정량적 유동가시 화기법에 해당되는 PIV⁽¹⁾, PTV⁽²⁾법은 유동장 전체에 대한 정보를 제공하는 관계로 비정상(unsteady)유동 해석에 많이 적용된다. 그런데, PIV법에서는 2시각분의 영상사이에 계산영역(상관영역이라고도 함)내의 입자의 밝기정보의 상관도를 이용하여 속도벡터를 구하게 되므로 이 계산영역보다 작은 크기의 와(vortex)에 대해서는 필터링 효과에 의하여 측정이 불가능하게 된다. 한편, PTV법에서는 2시각분의 영상사이에 입자중심의 정보를 이용하여 속도벡터를 얻어내는 관계로 측정원리상 난류유동의 가장 작은 스케일에 해당되는

Kolmogrov스케일까지 측정이 가능하게 된다. 그러나, PTV는 보간을 하는 과정에서 얻어진 Kolmogrov스케 일에 대한 측정결과로부터 얻어지는 난류통계량이 PIV와 같이 보간 필터링 효과에 의하여 사라지게 된다. 따라서 이를 고려하여 보간을 사용하지 않고 난류의 특성 치 추출에 근간이 되는 고정밀의 와동까지(vortex flows) 추정할 수 있는 유동의 변형이론을 기반으로 한 하이브리드 PTV-PIV기법의 구축 및 이의 와도 추정 성능을 평가하는 것을 본 연구의 목적으로 삼고 있다.

2. 하이브리드 PTV-PIV알고리즘

가시화영상에는 유체유동의 회전변형, 전단변형, 신 축변형, 이동 등이 모두 포함되어 있으며 짧은 시각차 를 가진 두 장의 가시화영상 사이에는 이들 변형과 이 동을 나타내는 식(1)과 같이 기하학적 선형 변환(linear transformation)의 관계가 적용될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (1)$$

†한국해양대 해양과학기술연구소

E-mail : doh@hhu.ac.kr

*한국해양대 기계정보공학부

**한국해양대 대학원

여기서 x' , y' 는 변형후(제2시각) 영상좌표이며 x , y 는 제1시각 영상좌표이다.

이 식에서, 정해진 아주 짧은 시간 안의 유체의 유동을 선형으로 가정하면, 주어진 격자점의 2차원면적은 위의 식을 만족하게 되므로 3개 이상의 입자 쌍의 위치정보를 이용하여 최소자승법으로 미지수($a_{11}\sim a_{23}$)를 구하였다. 입자 쌍을 구하기 위하여 확률일치법 PTV 알고리즘⁽³⁾⁽⁴⁾을 적용하였으며, 이로부터 얻어진 벡터 쌍으로부터 최소자승법을 사용하여 행렬을 풀어 격자점 주위 입자의 평균 이동거리인 속도 u 와 v 를 구하였다.

3. 와도 계산 및 평가

와도추정의 성능을 평가하기 위하여 강한 회전성을 보이며 유체의 식 (2)와 같이 연속성 및 Navier-Stokes 방정식을 만족하는 Taylor-Green의 와유동⁽⁵⁾을 사용하였다.

$$\begin{aligned} u &= W_{\sin}(2\pi k/L)_{\cos}(2\pi k/L) \\ v &= -W_{\cos}(2\pi k/L)_{\sin}(2\pi k/L) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 u 와 v 는 각각 x 와 y 방향의 속도성분을 나타내고 W 는 최대 속도성분의 크기를 나타내며 k 는 파수(wave number)를, L 은 와의 크기를 나타낸다. 유동장의 영상으로서 가상영상 작성법⁽⁶⁾에 의거 작성하였으며 그 크기는 640×480 pixels로 하였다.

Fig. 1은 $k=1.0$, 와의 크기로서 x , y 좌표상에서 각각 160과 120 pixel로 설정하였을 때의 속도벡터장을 나타낸다. W 는 2~12 pixel까지 2픽셀씩 증가시키면서 총 6가지 경우에 대하여 와도 추정의 성능을 평가하였다.

와도추정의 성능평가를 비교하기 위하여 3가지 알

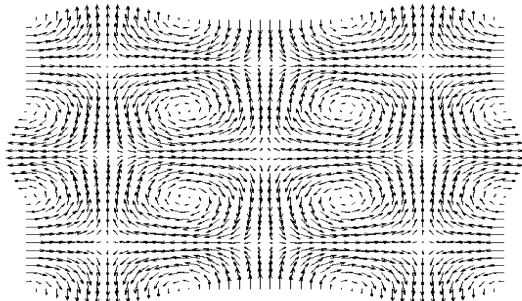


Fig. 1. Taylor-Green vortex flow.

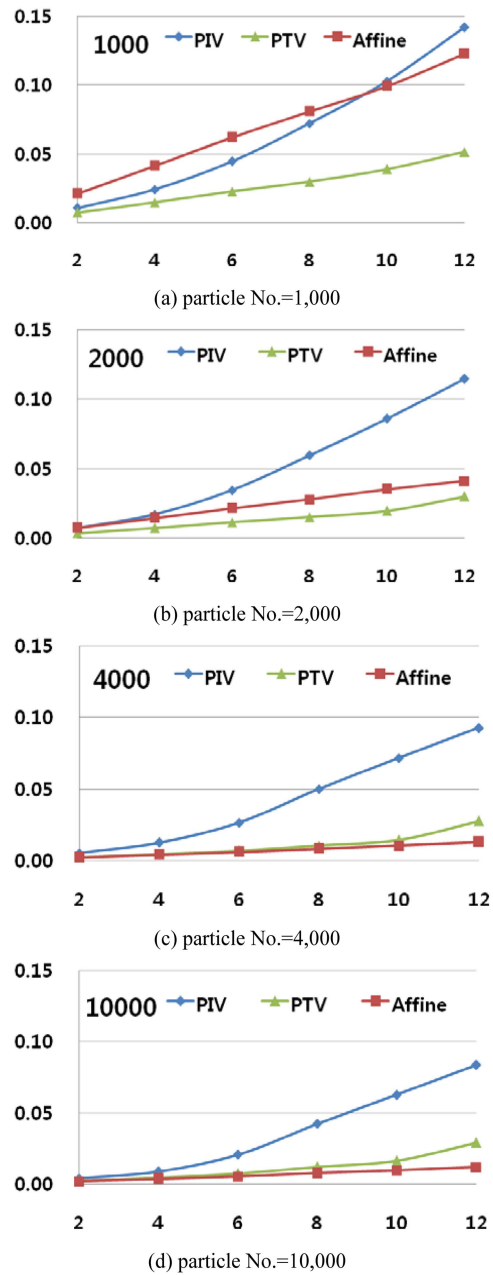


Fig. 2. Calculation errors on the vorticity with particle numbers.

고리들을 적용하였다. 즉, 계조치상호상관PIV⁽¹⁾, 확률일치PTV법⁽³⁾, 그리고 본 연구에서 구축한 하이브리드 PTV-PIV알고리즘을 적용하였다. PIV계산과 PTV계산

에 있어서는 각각 49×49 pixel의 상관영역과 탐색영역을 설정하였다. Fig. 2는 가상영상에서의 입자수가 1,000개에서부터 10,000개 일 때까지의 와도추정 오차를 pixel단위로 보이고 있다. 이때, x축은 최대속도크기의 성분을 pixel로 나타낸 것이다. 입자수가 1,000개 일 때는 확률일치 PTV법⁽³⁾이 가장 우수한 와도추정 성능을 보이나 입자수가 2,000개 이상에서부터는 하이브리드 알고리즘과 확률일치 PTV법에 의한 오차는 거의 차이를 보이고 있지 않으며 입자수가 4,000개 이상에서부터는 확률일치 PTV법에 의한 오차는 최대이동거리가 10픽셀 이상이 되면 오차가 증가하는 경향을 보이나 하이브리드 알고리즘에 의한 결과는 거의 증가하지 않음을 알 수 있다.

4. 원주후류 와도 계산성능 비교

Fig. 3은 Re수가 300일 때의 원주후류에 대하여 계조치상호상관법⁽¹⁾, 확률일치 PTV법⁽³⁾, 그리고 본 연구에서 구축한 하이브리드 PTV-PIV 알고리즘을 적용하여 얻어진 속도장의 결과를 보이고 있다. PIV에 의한 결과는 점선타원 부분에 표시하였듯이 2차와가 여전히 강한 와를 형성하고 있는 반면에 확률일치 PTV법은 비교적 약한 와를 형성하고 있으며 하이브리드 알고리즘에 의한 결과는 와가 길게 늘어선(elongated) 형태를 이루고 있음을 알 수 있는데 이는 기존의 연구성과⁽⁷⁾와 정성적으로 같은 경향을 나타내고 있는 것으로 보아 하이브리드 알고리즘에 의한 속도장이 실 유동장에 근접하고 있음이 추론될 수 있다.

Fig. 4는 Re수가 300일 때의 와도분포를 보이고 있다. (a), (b), (c) 모두 와도의 표시스케일과 등고선(contour)의 개수를 50으로 고정시켰을 때의 결과를 나타내므로 와도분포의 상대적 비교가 가능하다. 그림에서 알 수 있듯이 PIV에 의한 결과는 원주후류의 와도가 큰 부분과 약한 부분이 명확하게 구분지어져 나타나 있는 것을 알 수 있다. 이는 PIV 알고리즘 자체가 필터링 효과에 의한 것으로 판단된다. 전술한 바와 같이 2차와에 의한 와도의 분포가 유동방향(x방향)으로 넓게 확장되어 나타나 있음을 알 수 있다. 반면에 하이브리드 알고리즘에 의한 와도는 실린더로부터 떨어져 나온 박리와(separated vortex)의 전단층과 연결되어 길게(elongated) 늘어져 있음이 보인다. 이는 Kim 등⁽⁷⁾의 연구성과와 정성적으로 일치하는 결과이다. 아울러 동일한 등고선 개

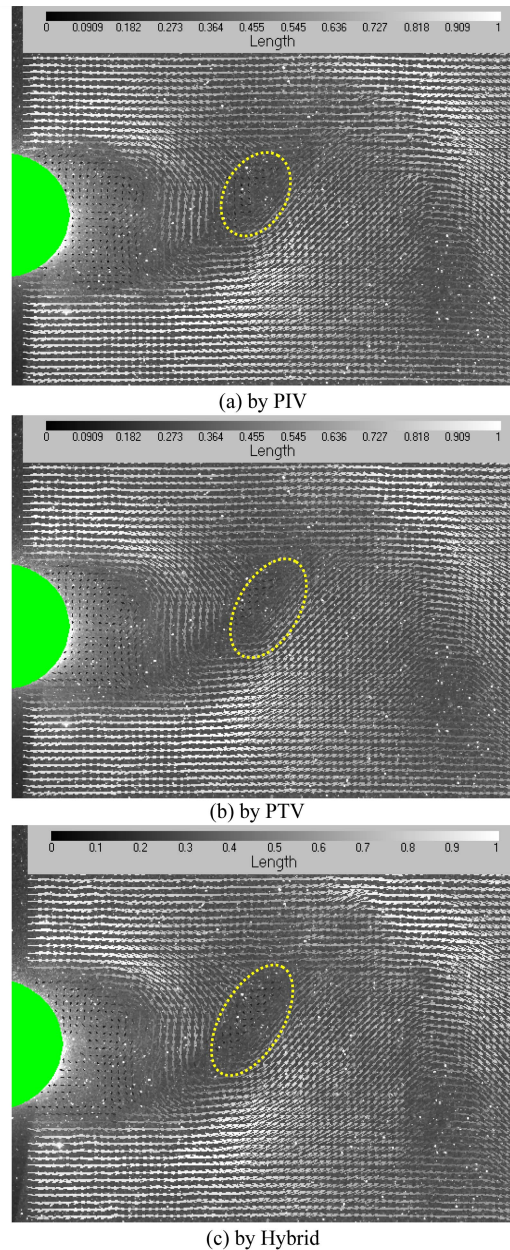


Fig. 3. Velocity vectors obtained by the three algorithms.

수로 계산하였음에도 불구하고 매우 정밀한 와도의 분포를 잘 나타내고 있다. 이는 물리적으로 합당한 결과로 볼 수 있다. 한편, 확률일치 PTV법에 의한 와도분포는 격자의 보간효과로 인하여 와도분포가 필요이상으로 필터링되는 효과가 있음이 보인다.

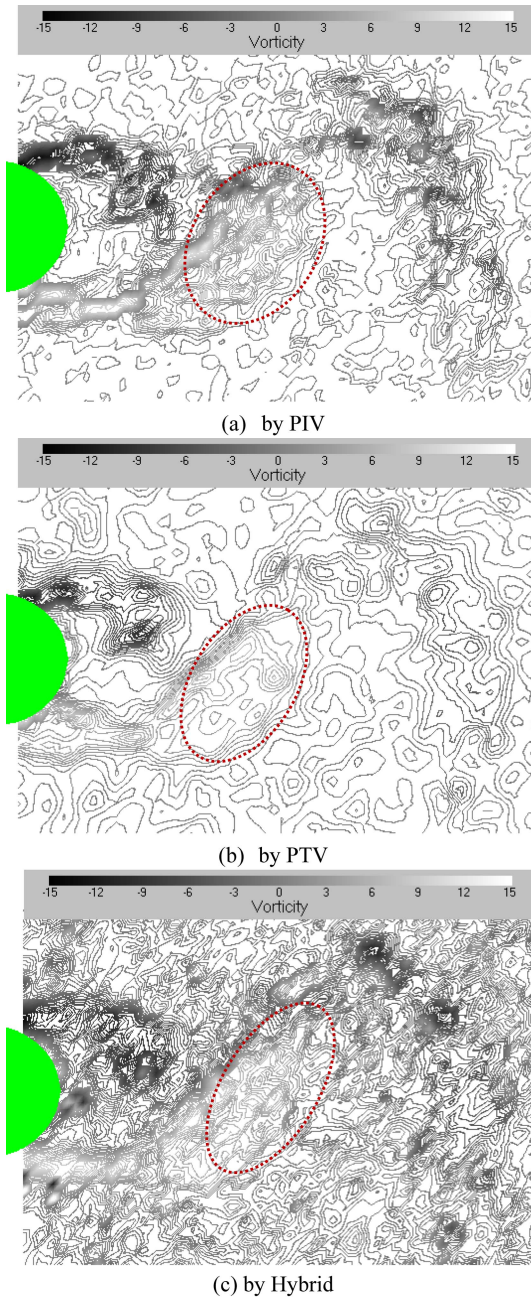


Fig. 4. Vorticity contour distributions obtained by the three algorithms.

5. 결 론

새로이 구축한 하이브리드 PTV-PIV알고리즘과 PIV

및 확률일치PTV법으로 Taylor-Green의 와유동에 대한 와도 추정 성능을 정량적으로 평가해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실험영상에 나타난 입자의 개수가 2,000개 이상일 때는 이동량이 적은 경우에서부터 큰 범위에까지 속도 벡터 크기오차에 있어서 어파인변환기반 하이브리드 PTV-PIV 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보였다.

하이브리드 PTV-PIV알고리즘에 의하여 얻어진 와도분포는 계조치상호상관PIV법 및 확률일치PTV법에 의한 것보다 유동장 전체에 걸쳐서 세밀한 와구조를 보이고 있음을 알 수 있었다.

계조치상호상관PIV법 및 확률일치PTV법으로 구한 와도는 속도벡터장으로부터 계산을 하게 되므로 속도 벡터 계산과정에서의 오차와 보간오차 등이 전파되는 관계로 그 값에 있어서 상대적으로 정확도가 떨어진다고 할 수 있다.

하이브리드 PTV-PIV알고리즘에 의하여 얻어진 속도장과 와도장으로부터 추론된 원주후류 구조는 기존의 연구성과와 같이 난류의 근간인 와구조를 잘 재현하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 도약과제(R0A-2008-000-20069-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Ann. Rev. J. Fluid Mech.", JFM, Vol. 23, pp. 261-304.
- 2) Doh D. H., 2002, "Current state of PTV and its developments", Journal of KSME, Vol. 42(5), pp. 36-40.
- 3) Baek S. J., Lee S. J., 1995, "Development of a new 2-frame particle tracking algorithm using match probability, KSME(B)", Vol. 19(7), pp. 1741-1748.
- 4) Doh D. H., Kim D. H., Cho K. R., Cho Y. B., Saga T., Kobayashi T., 2002, "Development of genetic algorithm based 3D-PTV technique", J. of Visualization, Vol. 5(3), pp. 243-254.
- 5) Song X., Yamamoto F., Iguchi M., Murai Y., 1999, "A new tracking algorithm of PIV and removal of

- spurious vectors using Delaunay tessellation”, *Exp. Fluids* Vol. 26, pp. 371-380.
- 6) Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T., Kobayashi, T., Saga, T., 2000, “Standard images for Particle Imaging Velocimetry”, *Measurement Science and Tech.*, Vol. 11(6), pp.685-692.
- 7) Kim, W. T., Sung, J. Y., Yoo, J. Y., Lee, M. H., 2004, “High-definition PIV analysis on vortex shedding in the cylinder wake”, Vol. 7(1), pp. 17-24.