한국해양공학회 2001년도 추계학술대회 논문집 PP. 213~219

PTV를 이용한 수직관 내 슬러리유동의 고체입자 속도계측 연구

양찬규 · 최종수 · 홍섭
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

A PTV Applied to Measuring the Solid Particle Velocity of Slurry Flow in a Vertical Pipe

Chan-Kyu Yang, Jongsu Choi, Sup Hong
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering/KORDI, Yusung P.O. BOX 23, Taejon, 305-600, Korea

KEY WORDS: slurry flow, particle tracking velocimetry, sphere-shaped glass, free falling velocity,

ABSTRACT: *In this paper, particle velocity of slurry flow, a kind of solid-particle two phase flow, was measured by using a particle tracking velocimetry. Particles are modeled by sphere-shaped glass whose diameters are 3mm, 5mm, and 7mm. At first, a particle which is falling in the water is captured and analyzed to give their free falling velocity. The falling velocity was very high up to about 4m/sec in the air, which needs special algorithm for the accurate measurement. For the upwelling slurry flow in the straight duct, there are some noises caused by cavity. However, the effect was so small that it does not affect the measurement of large particles.*

From the preliminary study of applying the PTV to measurement of particle movement in slurry flow, we could find out the optimum value of parameters; threshold value,, searching area radius and correlation area size.

1. 서 론

고-액 이상유체에서 유동장의 변화 및 고체의 운동은 각각의 상호작용에 의해 발생하는 것이므로, 구분되어서 동시에 계측되어야 서로의 상관관계를 정확하게 이해할 수 있다. 하지만, 기존의 접촉식 측정방법이나 Electro-magnetic 유량계와 같은 측정방법으로는 유동장과 고체의 운동을 동시에 구분하여 측정하는데 있어서 가능성을 찾기 힘들다. 즉, 접촉식 측정방법을 사용하면 유동장이나 고체운동의 일부분의 특성을 파악하는데 어려움이 없지만 전체적인 특성파악은 불가능하다. Electro-magnetic 유량계를 사용하면 고체-액체를 통합한 슬러리 유동의 특성값을 알 수 있지만, 각 상의 특성을 파악하기 힘들다. 이런 경우 카메라에 의해 촬영된 영상을 처리하여 입자의 속도와 유동장을 동시에 계측하는 비접촉식 계측시스템을 사용할 수 있다[1].

본 연구에서는 수직관에 일정 유량의 슬러리 유동이 형성될 때, 고체 입자의 이동속도를 계측하기 위해 영상처리기법의 하나인 PTV를 적용하였다[2]. 물론, 액체 중에 비중이 액체와 비슷하고, 미세한 입자를 주입하여 유동장의 계측도 가능하겠지만, 본 연구에서는 PTV 기법을 통하여 관내에서 약 3m/sec - 4m/sec 정도의 고속 고체 입자 운동을 일반 CCD 및, 연속광원을 통하여 계측할 수 있는지에 대한 여부와 에러벡터를 줄이기 위해서 Threshold 값, SAR(Searching Area Radius), CAS(Correlation Area Size) 등과 같은 파라메터의 최적화[3]를 수행하는 데 초점을 맞추었다.

슬러리 내의 입자는 구형의 유리구슬로 모사되었고, 입자의 반경은 3mm, 5mm, 7mm를 사용하였다. 입자의 체적밀도는 최대 10% 정도이므로, PIV에 의한 속도추적 보다는 PTV 알고리즘을 사용하였다. PTV 알고리즘의 가용성을 증명하기 위해, 물이 찬 수직관 및 공기중에서의 자유낙하되는 입자의 낙하속도를 측정하였다. 펌프에 의해 상승하는 슬러리 유동내의 입자 운동을 계측함으로써, 미량의 캐비티들에 의하 잡음성분의 특성을 파악하고, 파라메터를 최적화하였다.

2. PTV 이론

유동장에 유체와 비중이 같고 유동에 영향을 주지 않을 정도의 작은 입자를 투입하여 그 입자의 거동을 해석함으로써 유속을 계측하는 비접촉식 계측방법을 일반적으로 PIV(particle image velocimetry)라고 한다. PIV의 알고리즘은 검사영역 내의 입자군 분포에 대한 상관관계로부터 속도벡터를 검출해

내는 입자분포 상관법(Particle Distribution Correlation, PDC)을 이용하게 된다. 하지만, 입자의 밀도가 너무 낮아 검사영역 내에 입자가 분포하지 않는 경우는 상호상관계수가 적어져 오류벡터의 수가 증가하게 되므로, DPT(Discrete Particle Tracking)을 이용하여 각각의 입자들에게 번지를 부여하고, 이 입자들이 매 프레임에서 어떠한 경로로 움직이는가를 추적하여 유속을 결정하게 된다. 일반적인 PTV의 영상에서는 입자들이 각각 구별되므로 Fig.1에서 보인 바와 같이 t_1시각에서의 입자 중심이 $t=t_2$시각에서 어디에 가 있는지를 밝히면 다음 식에 의해 속도벡터가 얻어진다[2].

$$\vec{v}=\left(\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1},\frac{y_2-y_1}{t_2-t_1}\right) \quad (1)$$

따라서, 두 시각에서의 영상에 나타난 수 많은 입자들 간의 동일한 입자를 판정하는 것이 가장 중요하게 된다. 동일입자를 추적하기 위한 다양한 알고리즘이 있으나 현재 나와 있는 동일입자 판별법은 4프레임법, 3프레임법, 2프레임법이 있으나 이에 대한 자세한 설명은 생략하겠다.

영상의 획득에는 Camcoder나 CCD Camera가 사용된다. 일반 CCD의 해상도는 640×480정도이지만 최근에 고해상도 CCD인 1K×1K 및 2K×2K가 나와 실험의 정도 및 속도범위를 늘릴 수 있다. Fig.2에서 보이고 있는 바와 같이 일반적으로 CCD의 한 프레임은 1/30 sec의 시간간격을 갖고 그 한 프레임을 2등분하여, 기수영역과 우수영역으로 구분되어 각각 1/60초의 시간간격을 갖는다. 따라서 기수영역(odd field)과 우수영역(even field)는 결국 1/60초의 시간간격을 갖게 된다. 구분된 우수영역과 기수영역은 Fig.3과 같이 내삽을 통하여 완전한 640×480 크기의 영상으로 생성되게 된다.

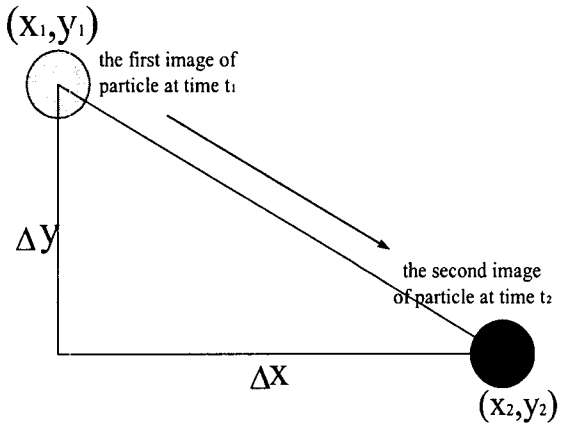


Fig.1 A Schematic Diagram of Calculating Velocity of a Particle

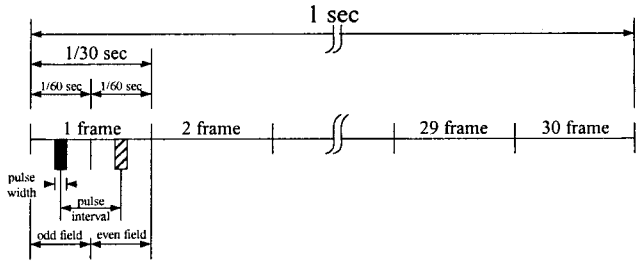


Fig.2 An Exemplified Pulse Arrangement in Video Signal

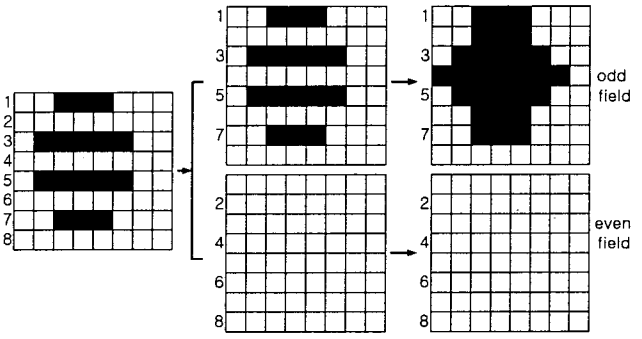


Fig.3 Separation of a Frame Image into Odd and Even Field

3. 실험방법

실험은 2m 높이의 직관에 물을 채우고 윗쪽에서 유리로 제작된 입자를 낙하시켜 그 낙하속도를 계측하는 것과 펌프로 물을 수직으로 이동시킬 때, 관내 입자운동을 계측하는 것으로 이루어져 있다. 자유낙하속도 계측을 위한 실험 시설은 Fig.4와 같이 내경 50mm의 아크릴 직관을 높이 약 2m 가량 수직으로 세워 놓은 것이다. 펌프에 의한 슬러리의 수직 상승을 위한 실험장치는 Fig.5와 같고, 그 도식은 Fig.6과 같다. 입자와 물을 적당량 교반한 슬러리를 펌프를 이용해 밑에서 위로 이동시키고, 그 뒤에 입자를 걸러 내어 다시 교반장치로 보내지는 과정을 겪으며 정상상태에 도달할 때까지 슬러리에서 유체-입자 혼합비를 같게 한다. 입자의 크기 및 체적밀도가 변화함에 따라 Threshold 값, SAR 및 CAS의 최적값을 찾아 해석함으로써 오류벡터를 최소화 하였다. 본 실험에서는 체적밀도가 높아져도 PTV로 해석이 가능한가 하는 것과, 어느 정도 정도를 갖는 결과를 줄 수 있는가에 대해 살펴보았다. 실 스케일과 캡쳐된 프레임의 pixel과의 비례관계를 살펴보기 위해 촬영 대상 위치에 약 40cm의 자를 붙여 계측한 결과 상단부 및 하단부에서 1cm = 16pixel이었고, 중앙부에서는 15pixel이었다. 따라서 화상의 왜곡에 의해 1cm 당 최대 1pixel의 오차가 생기는 것을 확인할 수 있었다. 시간 간격이 1/60초이면 2.5m/sec의 입자 운동을 가정하였을 때, 한 프레임에 약 4cm를 이동하게 되고 약 한 pixel의 오차가 생기므로, 유리관의 상, 중, 하단부에서 속도는 약 1%의 오차율을

갖게 된다.

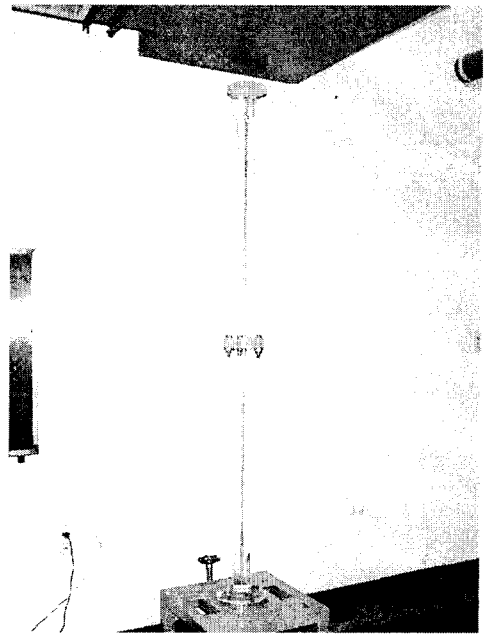


Fig.4 A Configuration of the Facility for Free Falling Test

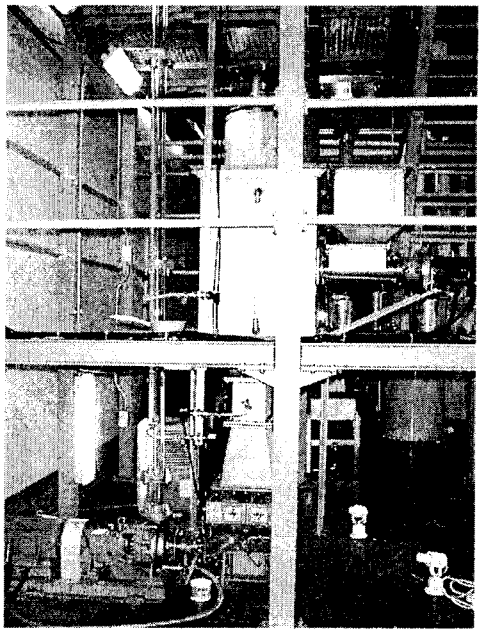


Fig.5 A Configuration of the Facility for Upwellng Slurry Flow by Pumping

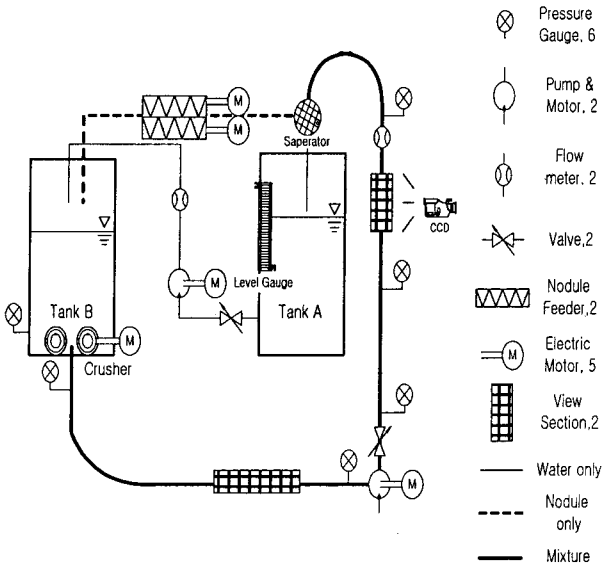


Fig.6 A Schematic Diagram of the Slurry Pumping System

4. 실험결과 및 토론

4.1 수중 자유낙하

우선 Fig.4의 장치에서, 수직 직관부에 물을 채우고, 직관부의 윗쪽에서 입자를 자유낙하 시킨 후에 낙하속도를 PTV를 이용하여 계측하였다. 이때, 구형입자를 사용하였으며, 직경은 3mm, 5mm, 7mm이다.

a) 직경 3mm - 수중 자유낙하

직경 3mm의 입자가 수중에서 떨어지는 낙하속도를 계측하였다. 우선 Fig.7과 같은 원시영상을 캡쳐하여 Fig.8과 같이 기수영상과 우수영상으로 나누어 각각 입자의 면적중심(centroid)을 찾아 움직인 거리를 구하여 두 영상 사이의 시간간격 1/60초로 나누어주면 앞에서 언급한 바와 같이 입자의 속도가 얻어지게 된다. 그 결과 임의의 한 시간에서 입자의 속도를 벡터로 표시하면 Fig.9와 같고 매 프레임에 대한 입자 운동속도의 최대, 최소, 평균값을 Fig.10과 같이 나타낼 수 있다. 이 중 평균값의 평균을 취해보면 입자의 평균 이동속도를 알 수 있고, 이 경우 입자의 평균 이동속도는 0.2870 m/sec가 된다.

Fig.7 An Exemplified Raw Image Captured by CCD Camera
(Particle Diameter = 3mm)

(a) Odd Field

(b) Even Field
Fig.8 Even and Odd Field Separated from the Raw Image

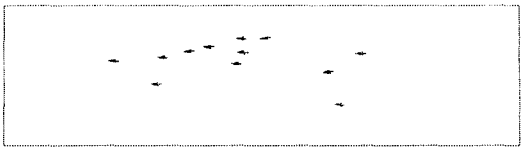


Fig.9 A Final Vector of Moving Particle at a Time Step
(Particle Diameter of 3mm)

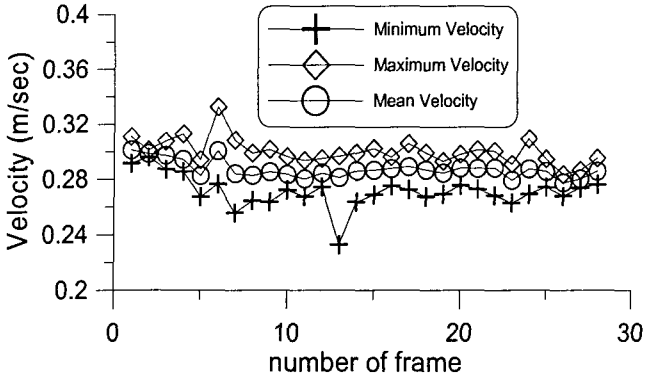


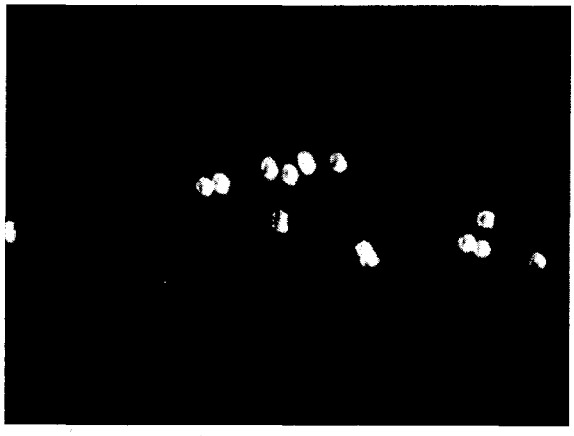
Fig.10 A Time History of Particle Velocity of Diameter 3mm

b) 직경 7mm - 수중 자유낙하

다음으로 직경 7mm 입자에 대한 실험결과이다. 입자의 크기가 커서 Fig.11과 같이 3mm 입자보다는 선명한 화상을 얻을 수 있었다. 이를 기수영상 및 우수영상으로 구분한 결과는 Fig.11과 같고, 이 두 프레임을 처리하여 구한 속도 벡터는 Fig.12와 같다. 이러한 속도장을 매 프레임 마다 구하여 시간에 따른 속도의 변화를 Fig.12에 도시하여 보았다. 3mm 입자의 경우에 비해 최소 및 최대값의 변동이 조금 심하지만 평균속도의 변화는 상당히 완만함을 알 수 있다. 입자의 평균 낙하속도는 0.489m/sec로 계산되었다.

Fig.11 An Exemplified Raw Image Captured by CCD
- Free Falling of Particles of Diameter 7mm

(a) Odd Field



(b) Even Field

Fig.12 Even and Odd Field Separated from the Raw Image

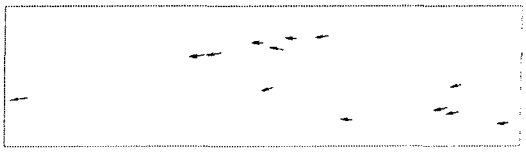


Fig.13 A Final Vector of Moving Particle at a Time Step
(Particle Diameter of 7mm)

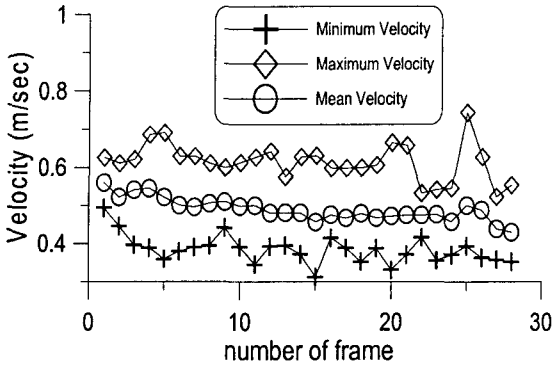


Fig.14 A Time History of Particle Velocity of Diameter 7mm

4.2 공기 중 자유낙하

직경 7mm인 입자의 공기중 자유낙하 실험을 수행하였다. 공기중 자유낙하는 그 속도가 빠르기 때문에 몇 프레임 밖에 잡을 수 없었고, 각 프레임에서 입자의 이동 거리가 현저하게 멀어 프레임과 프레임을 shift 시키는 알고리즘을 적용하여 동일 입자를 보다 쉽게 추적하게 된다. 이러한 기법은 입자의 이동 방향이 예측 가능 할 때 사용되는 방법으로 계측결과의 정도를 높여줄 뿐만 아니라 처리 시간도 상당히 단축시켜준다.

Table 2에 3개의 프레임에서 최소, 최대, 평균 속도를 보이고 있다. 이 결과를 도시하면 Fig.13과 같다. 결국 평균값은 4.46856m/sec의 값을 주었고, 두 개의 이미지를 통해 육안으로 관측한 결과와 비교하면 Table 3과 같이 그 오차가 상당히 작은 것을 알 수 있다.

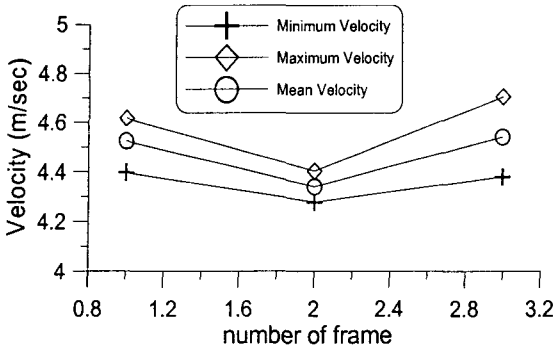


Fig.15 A Time History of Particle Velocity of Diameter 7mm

Table 3 Comparison of the Free Falling Velocity by PTV with the Manual Measurement

	Manually Measured	PTV	Error
Falling Velocity (m/sec)	4.48 m/sec	4.47 m/sec	0.01 m/sec

4.3 펌핑에 의한 수직상승

실제 펌프에 의해 유동이 생겼을 때, 입자의 운동을 계측하기 위한 실험을 수행하였다. 펌프가 관내 물을 수직방향으로 끌어올리고, 입자가 투입되어 유동에 의한 양력을 받아 lifting 되는 경우이다. 이러한 경우는 관내의 유속 분포가 중심부가 크고 관의 내벽쪽으로 가면서 작아지므로, Fig.14와 같이 입자들이 매그너스(Magnus) 효과에 의해 관의 중앙으로 몰리는 경향이 있다. 펌프의 블레이드에서 생긴 캐비티(cavity)나 외부에서 aeration에 의해 유입된 기포들이 잡음(noise)로 작용할 수 있으나, 다행히 큰 영향은 없었다. Fig.15는 Fig.14를 odd field 와 even field 로 나누어 놓은 것이다. 이 영상을 이용하여 Fig.16과 같이 각 프레임에서 속도를 구하였고, 이를 프레임 별로 표시면 Table 4와 같다. Fig.17은 Table 4를 그래프로 도시한 것인데, 속도의 최대 및 최소 값은 프레임별로 변동이 심한 반면에 평균 속도는 변동이 많지 않은 것을 볼 수 있고, 이 것은 자유낙하 하는 경우와 동일한 결과이다. 이 경우의 관내 평균 유속이 2.5m/sec이고, 입자의 평균 속도가 2.29m/sec 이므로, 평균 슬립은 약 0.21m/sec 로 볼 수 있다. 그러나 입자의 대부분이 유속이 가장 높은 관의 중앙에 몰려 있으므로, 실제 슬립은 보다 높을 것으로 예상할 수 있다.

Fig.14 An Exemplified Raw Image Captured by CCD
- Lifting of Particles of Diameter 7mm

(a) Odd Field

(b) Even Field

Fig.15 Even and Odd Field Separated from the Raw Image in Fig14

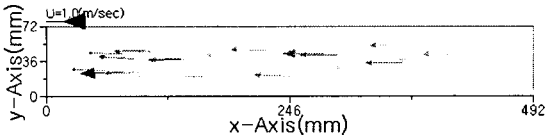


Fig.16 A Final Vector of Moving Particle at a Time Step
(Particle Diameter of 7mm)

5. 결 론

유체 중 입자의 운동을 계측하기 위하여 PTV 기법을 적용하였고, 수중 및 공기중에서 입자의 크기를 서로 달리하여 낙하속도를 계측하였으며, 펌프로 물을 수직으로 이송시켰을 때 유동에 의해 야기되는 입자의 운동을 계측하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

① 입자 추적을 용이하고 정도를 높일 수 있는 Threshold 값 및 searching area 등의 파라메터를 구할 수 있었다.

② 여러개의 입자가 낙하하는 경우, 최소 및 최대속도의 변동이 심하고 오류벡터가 증가하지만, 평균 낙하속도의 변동은 그리 심하지 않으며, 오류벡터는 자동처리하여 평균 속도의 측정에 있어서 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

③ 공기 중에서 낙하하는 경우 입자의 속도가 커서 한 프레임 당 이동하는 거리가 멀기 때문에 프레임을 원하는 픽셀 수 많큼 shifting 시키는 알고리즘을 채택하여, 실제 육안으로 계측된 값과 거의 같은 값을 얻음으로써, 고속 운동의 입자에 대한 속도를 계측할 수 있다는 가능성을 얻었다.

④ PTV를 이용하여 관내부의 고속 슬러리 운동을 계측할 수 있음을 확인하였고, 상당히 정도있는 결과를 줄 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 속도의 한계에 대한 보다 엄밀한 연구는 차후 이루어져야 할 것이며, 입자의 속도가 보다 고속이며, 입자수가 많아졌을 때, 계측장비 및 알고리즘의 upgrade가 병행하여 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1]M.Raffel, C.Willert and J.Kompenhans, 1997, Particle Image Velocimetry, Springer.

2](주)IIT, 1999, "Reference Manual of Cactus2000".

3]N.Kiritsis,1989,"Statistical Investigation of Errors in Particle Image Velocimetry",Thesis of M.S. Degree in Ohio State University.