

LSPIV에 의한 하천 표면유속장의 관측

Measurement of the Flow Field in a River

김영성*, 양재린**

Youngsung Kim, Jaerheon Yang

요 지

이미지 해석에 의한 유속장 측정방법은 유체역학분야에서 지난 30 여년 동안 많이 활용되어온 속도측정 기법으로 오늘날에는 이를 수공학 분야에서 이를 유량측정 등 수리현상 해석에 활용하려는 시도가 다각적으로 이루어지고 있다. 이에 본 연구에서는 이미지 해석에 의한 유속장 측정방법을 용담댐 시험유역에 적용하여 그의 자연하천에서의 적용성을 검토하고자 한다.

이미지 해석에 의한 유속장 측정방법은 PIV(Particle Image Velocimetry)로 통칭되고 있으며, PIV는 seeding, illumination, recording, 및 image processing의 네 가지 요소로 구성된다. seeding을 위해서 유체를 따라 흐를수 있는 작은 입자를 유체에 첨가한다. 유체를 따라 흐르는 입자들의 선명한 이미지를 얻기 위해서 illumination이 필요하다. PIV를 이용하여 흐름을 해석하기 위한 illumination은 일반적으로 이중펄스 레이저가 이용된다. 이렇게 유속장 해석을 하려는 유체에 대하여 seeding 및 illumination이 준비되면 단일노출-다중 프레임법, 혹은 다중노출-단일 프레임법으로 흐름을 recording을 한다. image processing은 이미지를 다운로드하고, 디지털이징 및 화질향상을 하는 전처리(pre-processing), 상관계수의 산정에 의한 유속 벡터의 결정 및 에러 벡터를 제거하고 유속장을 그래프화하는 후처리(post-processing) 과정으로 구성된다.

LSPIV(Large Scale PIV)는 PIV의 기본원리를 근거로 하여 기존의 PIV에 비하여 실험실 내에서의 수리 모형실험이나 일반 하천에서의 유속측정과 같은 큰 규모(4m²~45,000m²)의 흐름해석을 할 수 있도록 Fujita et al.(1994)와 Aya et al.(1995)이 확장시킨 것이다. PIV와 비교시 LSPIV의 다른 점은 넓은 흐름 표면적을 포함하기 위하여 촬영시에 카메라의 광축과 흐름 사이의 각도가 PIV에서 이용하는 수직이 아닌 경사각을 이용하였고 이에 따라 발생하는 이미지의 왜곡을 제거하기 위하여 이미지 변환기법을 적용하여 왜곡이 없는 정사촬영 이미지로 변환시킨다. 이후부터는 PIV의 이미지 처리 방법이 적용되어 표면유속을 산정한다. 다만 이미지 변환을 PIV 이미지 처리 전에 하느냐 후에 하느냐에 따라 유속장 해석결과에 차이가 있다. PIV의 네 가지 단계를 포함하여 LSPIV의 각 단계를 구분하면, seeding, illumination, recording, image transformation, image processing 및 post-processing의 여섯 단계로 나뉘어진다 (Li, 2002).

LSPIV를 적용시 물표면 입자의 Tracing을 위하여 자연하천에서 사용하기에 적합한 환경친화적인 seeding 재료인 Wood Mulch를 사용하여 유속을 측정하였다. 적용지점은 용담댐 상류의 동향수위관측소 지점으로 이 지점은 한국수자원공사의 수자원시험유역이 위치하고 있다. 이미지의 촬영은 가정용 비디오 캠코더 (Sony DCR-PC 350)을 이용하여 두 줄기의 흐름에 대하여 각각 약 5분 동안의 영상을 촬영한후 이 중에서 seeding의 분포가 잘 이루어진 약 1분간을 추출한후 이를 이용하여 PIV 분석에 이용하였다. 대체적으로 유속장의 계산이 무난하게 이루어졌으나 비교적 수질 상태가 양호하고, 수심이 낮고, 하상재료가 자갈로 이루어져 있어 비슷한 색상의 seeding 재료를 추적하기 어려운 구간이 발생한 부분에서는 유속의 계산이 정확히 이루어지지 않았다.

핵심용어: PIV, LSPIV, 자연하천, 표면유속, seeding

* 김영성, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 yskim@kwater.or.kr

** 양재린, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 jyang@kwater.or.kr

1. 서론

최근 30여년간 흐름의 유속측정을 위한 이미지 해석기술이 개발되어 왔다. 이미지 해석기술의 기본이론은 흐름장에 대하여 임의의 시간차이를 두고 연속촬영한 두개의 이미지로부터 유체표면의 패턴의 이동을 통계적 추정하여 유속을 계산하는 것이다. PIV (Particle Image Velocimetry)로 통칭되는 이미지 해석에 의한 유속측정기술은 다양한 실험실 규모의 흐름장(flow field)에 대한 전체 유속벡터의 정량적인 측정 및 가시화를 도모하기 위해서 광학, 레이저, 전자, 비디오, 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어를 이용한 것이다 (Adrian, 1991; Raffael 등, 1998). 이러한 전통적인 PIV 기술에 기초하며 일반 하천 및 대규모 수리모형 실험장 등 $4 \text{ m}^2 \sim 45,000 \text{ m}^2$ 정도의 규모가 큰 흐름(예: 하천, 수리구조물 등)에 적용하기 위해서 새로이 개발된 기술이 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) 이다. LSPIV는 여러 가지의 수공학 분야에서 물표면의 전체 유속장을 측정하고, 유량측정 및 큰 규모의 흐름구조에 대한 mapping 등에 이용되어져 왔다. 여수로 모형에서의 가스 이동 프로세스, 하천합류 모형실험에서의 얼음조각의 이동, 그리고 실물크기의 하천에의 LSPIV 적용 ((Fujita and Komura, 1994; Fujita et al., 1998; Ettema et al., 1997) 등이 적용 예이다. 이뿐만 아니라 일반 하천에서 LSPIV를 이용한 유속 및 유량 측정을 위하여 지속적으로 적용되어져오고 있다 (Bradley, Cruetin, Kim).

일반적으로 LSPIV의 이미지 프로세싱 알고리즘은 PIV와 거의 동일하나 LSPIV는 이의 적용 대상이 주로 일반 하천이기 때문에 PIV의 적용시와 같이 최적의 실험조건을 만들기가 힘들다. 따라서 LSPIV의 적용시에는 몇 가지 사항에 대한 고려가 필요하다. 일반하천에서 대규모 흐름장의 해석을 하는 경우 정사투영에 의한 이미지 촬영이 불가능하므로 비정사투영에 의해 이미지를 촬영하게 되는데 이때 원근감에 의해 이미지가 왜곡되어 촬영되므로 이러한 왜곡을 제거하는 절차가 추가되며, 조명(illumination)과 입자뿌리기(seeding)의 경우 PIV 적용시에는 실내조건에서 최상의 조건으로 조정이 가능하나 LSPIV는 주어진 자연조건하에서 적용해야 하기 때문에 이에 대한 조정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 이러한 제약을 받는 일반 자연하천 환경하에서 LSPIV를 적용함으로써 일반하천에서의 적용성을 파악하고자 하였다.

2. PIV와 LSPIV

이미지 해석에 의한 유속장 측정방법은 PIV(Particle Image Velocimetry)로 통칭되고 있으며, PIV는 seeding, illumination, recording, 및 image processing의 네 가지 요소로 구성된다. seeding을 위해서 유체를 따라 흐를수 있는 작은 입자를 유체에 첨가한다. 유체를 따라 흐르는 입자들의 선명한 이미지를 얻기 위해서 illumination이 필요하다. PIV를 이용하여 흐름을 해석하기 위한 illumination은 일반적으로 이중펄스 레이저가 이용된다. 이렇게 유속장 해석을 하려는 유체에 대하여 seeding 및 illumination이 준비되면 단일노출-다중 프레임법 혹은 다중노출-단일 프레임법으로 흐름을 recording을 한다. image processing은 이미지를 다운로드하고, 디지털이징 및 화질향상을 하는 전처리(pre-processing), 상관계수의 산정에 의한 유속 벡터의 결정 및 에러 벡터를 제거하고 유속장을 그래프화하는 후처리(post-processing) 과정으로 구성된다.

LSPIV(Large Scale PIV)는 PIV의 기본원리를 근거로 하여 기존의 PIV에 비하여 실험실 내에서의 수리 모형실험이나 일반 하천에서의 유속측정과 같은 큰 규모($4 \text{ m}^2 \sim 45,000 \text{ m}^2$)의 흐름해석을 할 수 있도록 Fujita et al.(1994)와 Aya et al.(1995)이 확장시킨 것이다. PIV와 비교시 LSPIV의 다른 점은 넓은 흐름 표면적을 포함하기 위하여 촬영시에 카메라의 광축과 흐름 사이의 각도가 PIV에서 이용하는 수직이 아닌 경사각을 이용하였고 이에 따라 발생하는 이미지의 왜곡을 제거하기 위하여 이미지 변환기법을 적용하여 왜곡이 없는 정사촬영 이미지로 변환시킨다. LSPIV는 현장에서 적용시 illumination으로는 자연 채광을 이용하기 때문에 야간이 아닌 경우에는 별다른 조명 설비는 필요하지 않다. 또한 seeding의 경우 하천에서 자연발생되는 foam이 LSPIV의 이미지 프로세싱을 할수 있도록 충분한 경우를 제외하고는 인공적으로 seeding 실시한다. 이렇게 하여 seeding 및 illumination이 LSPIV를 적용하기에 충분하고 촬영된 이미지의 왜곡을 제거하기 위한 절차가 완료되면 이후부터는 PIV의 이미지 처리 방법이 적용되어 표면유속을 산정한다. 다만 이미지 변환을 PIV 이미지 프로세싱 전에 하느냐 후에 하느냐에 따라 유속장 해석결과에 차이가 있다. 일반적으로는 이미지 변환을 먼저 실시하고 PIV 알고리즘을 적용하여 유속장을 해석하는 방법을 많이 이용한다. PIV의 네가지 단계를 포함하여 LSPIV의 각 단계를 구분하면, seeding, illumination, recording, image transformation,

image processing 및 post-processing의 여섯 단계로 나뉘어진다(Li, 2002).

3. LSPIV의 적용

일반 자연하천에서 LSPIV를 적용하여 표면유속장 측정에 있어서 그의 적용성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 자연하천을 대상으로 삼았고, 선정된 대상지점으로는 한국수자원공사에서 수자원시험유역으로 운영하고 있는 용담댐 상류의 동향지점이다. 이 지점에는 갈수기 유량측정을 위한 파살플룸이 설치되어 운영중에 있으며, 홍수기 실시간 유량측정을 위하여 3대의 고정식 전자파표면유속계를 이용한 실시간 홍수유량측정시스템이 설치되어 시험운영되고 있다 (한국수자원공사, 2007).

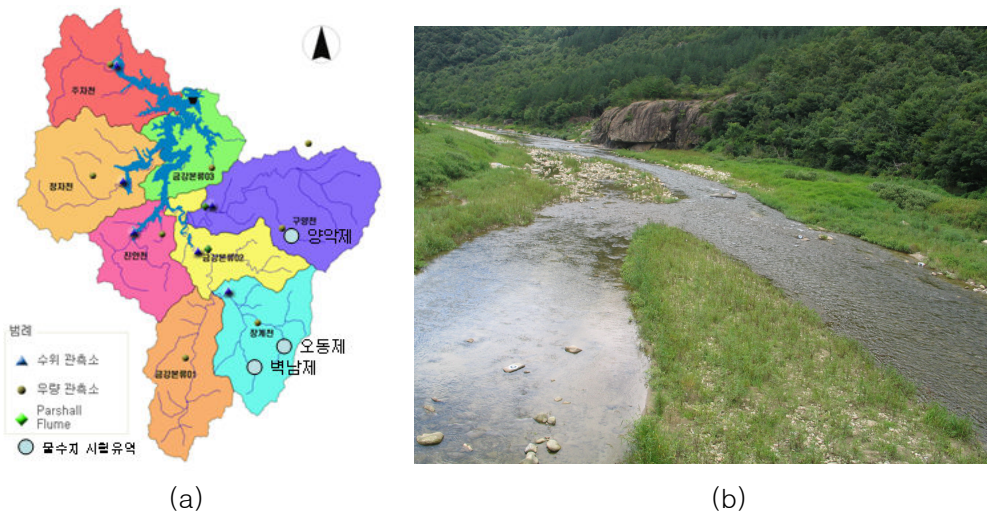


그림 1. LSPIV 적용대상 지점: (a) 동향수위표지점 지도상 위치 (b) 지점 전경

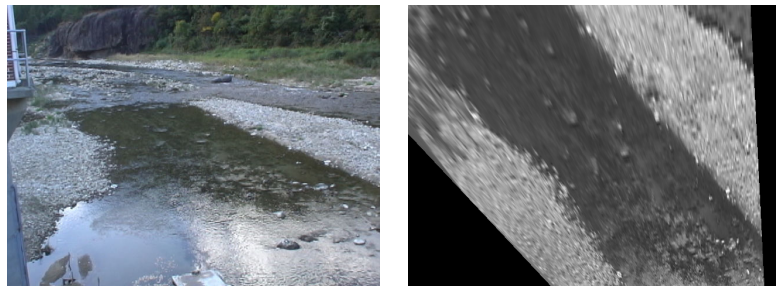
동향지점은 그림 1과 같이 갈수기에는 흐름이 두 갈래로 형성되었다가 하류 약 100 m 지점에서는 다시 합류되는 양상을 보이고 있다. 따라서 이 지점에서의 표면유속장을 측정하기 위하여 좌우의 흐름에 대하여 각각 6개의 GRPs (ground reference points)를 설치하고 이를 이용하여 이미지의 왜곡을 제거하는데 이용하였다 (그림 2).

LSPIV의 적용을 위하여 물표면의 거동을 표시하기에 적절한 seeding 재료를 물색하였다. 일반 하천에서 LSPIV 적용시에는 흐름을 잘 표현해 줄 수 있는 추적자로서 seeding은 필수적이다. 자연발생적인 seeding이 없거나 충분하지 않는 곳에서는 인위적으로 seeding 재료를 산포하여 이를 추적해야만 한다. seeding 재료의 선택시 주의할 점은 저유속에서 LSPIV의 적용시 바람에 의해 seeding 재료가 영향 받을 수 있으므로 물에 50 % 가량 잠기어서 흘러내려 갈 수 있는 재료가 가장 적절하다. 이러한 조건을 만족시키는 재료는 wood mulch로서 이는 나뭇가지를 3~10 cm로 잘라 주로 정원의 양분을 공급하는데 이용하는 것이다. 나무의 비중은 보통 0.4~0.7로 물에 띄웠을 경우 50 % 내외가 물에 잠기어 seeding 재료로 적합하다. 하천표면의 흐름을 촬영을 시작하기 전에 seeding 재료로서 wood mulch를 적절히 산포시키어 촬영되는 이미지 상에서 이의 움직임이 나타날 수 있게 하였다.

LSPIV를 이용한 표면유속장의 계산을 위한 이미지의 촬영은 가정용 비디오 캠코더 (Sony DCR-PC 350)을 이용하여 두 줄기의 흐름에 대하여 각각 약 5분 동안의 영상을 촬영한후 이 중에서 seeding의 분포가 잘 이루어진 약 1분간을 추출한후 이를 이용하여 PIV 분석에 이용하였다.

LSPIV를 이용한 표면유속장의 측정 결과는 그림 3과 같다. 좌측흐름의 경우 그림 3 (a)와 같이 실제의 흐름구조 - 우안측의 하상이 높아 수심이 얇고 유속이 느림 - 를 잘 반영할 수 있도록 tracers의 산포가 알맞게 이루어진 상태에서 표면유속장을 측정할 것으로비교적 흐름구조를 정확히 측정할 결과를 보여주고 있다. 표면유속의 분포는 유속이 가장 빠른 구간이 0.35 m/s 내외의 유속을 보이고 있고 좌측 및 우측의 유속

이 느린 구간에서는 측정된 유속이 0.1 m/s 이하를 나타내고 있다. 또한 좌안측의 경우 표면유속을 계산하는 영역에 대해 물표면에서 빛이 반사되는 현상(Specular reflection, 이 구간에서는 유속계산이 안됨)이 제거될 수 있도록 카메라의 설치위치를 변경하면서 적절한 지점의 물색이 가능하였기에 물표면에서 빛의 반사로 인한 에러백터의 발생을 줄일 수 있었다. 우측흐름의 경우 그림 3 (b)와 같이 실제의 흐름의 특성을 잘 반영하지 못한 유속장이 계산되었다. 즉 우안측의 유속이 더 빠르게 계산되고 있고 흐름의 방향 또한 실제 흐름과는 상이한 결과를 나타낸다. 이러한 이유로는 하천의 깊이가 얇고 유속이 빨라 물표면의 교란이 심하여 tracers가 이미지상에서 구별이 잘 되지 않아 추적에 있어 오류로 작용을 한 것으로 판단된다.

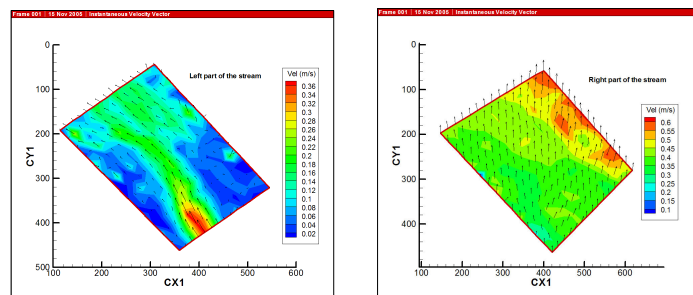


(a) 좌측흐름의 촬영된 이미지와 변환된 이미지



(b) 우측흐름의 촬영된 이미지와 변환된 이미지

그림 2. 동향지점에서 좌우 흐름에 대한 이미지왜곡 제거



(a) 좌측 흐름

(b) 우측 흐름

그림 3 LSPIV 적용 결과: 동향지점

5. 결론

LSPIV는 일반 하천과 같이 비교적 규모가 큰 흐름영역의 해석을 위해서 사각으로 이미지 촬영시의 이미지 왜곡을 제거하고 PIV의 기법을 적용한 것이다. 평·갈수기 하천의 유속이 저유속인 상황에서 기존의 다른 어떤 방법보다 정확한 측정이 가능한 것으로 알려진 외국의 LSPIV 기술을 시험유역의 동향지점에 적용하여 그 적용성을 파악한 결과 LSIV의 하천 적용시에 유속측정의 정확성을 결정짓는 중요한 인자는 seeding 재료의 이미지상에서의 추적가능 여부로 확인되었다. 동향지점에 대한 LSPIV의 적용에 있어, 좌측흐름의 경

우, seeding이 고르게 이루어졌고 우측흐름보다 물표면이 잔잔하게 흐르고 있어 측정된 유속분포가 흐름구조를 잘 반영하고 있다. 하지만 우측흐름의 경우, 하천의 수심이 작고 하상재료가 자갈로 이루어지고 유속이 빨라 물표면에서 교란이 심하여 seeding 재료가 물표면의 교란과 혼합되어 추적을 불가능하게 하는 조건을 형성하였다. 이로 인하여 물표면에서 seeding 재료가 이루는 패턴의 이동을 정확히 추적하지 못하는 결과를 보였다. 또한 물표면에 빛이 반사되는 경우에도 tracers의 추적이 불가능하였는데 이는 카메라의 설치 위치를 적절히 변경함으로써 촬영되는 영역에서 빛의 반사를 제거할 수 있어 극복이 가능하다. 하천의 상류에서 LSPIV의 적용시에는 하상재료로 인한 물의 교란에 대해 물표면의 패턴의 이동을 잘 나타낼 수 있는 seeding 재료의 선정이 중요함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Bradley, A. A., Kruger, A., Meselhe, E. A., and Muste, V. I. M. (2002). "Flow measurement in streams using video imagery, *Water Resources Research*, 38(12), 1315-1322.
2. Adrian, R. J. (1991). "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics." *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 261-304.
3. Creutin, J. D., Muste, M., and Li, Z. (2001). Cowlitz River USGS experiment on MAY, 2001: PIV analysis of video images, A short note, IIHR.
4. Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., Kruger, A. (1997). "Particle-Image Velocimetry for Whole-Field Measurement of Ice Velocities," *Cold Regions Science and Technology Journal*, 26(2), pp. 97-112.
5. Fujita, I., and Komura, S. (1994). "Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flows," *Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE*, 38, pp. 733-738 (in Japanese).
6. Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. (1998). "Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Applications," *J. Hydr. Res.*, 36(3), pp. 397-414.
7. Kim, Y., Muste, M., Kruger, A., Krajewski, W., Bradley, A., and Weber, L. (2005). "Real-Time Stream Monitoring Using Mobile Large-Scale Particle Image Velocimetry," *Proceedings of the XXXI IAHR Congress*, Seoul, South Korea.
8. Li, Z. (2002). Large scale image velocimetry without seeding, Master Thesis, The University of Iowa, Iowa City, IA.
9. Raffel, M., Willert, C., and Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry: A practical guide*, Springer, New York.
10. 한국수자원공사 (2007). 전자과표면유속계와 LSPIV를 이용한 상시유량측정 시스템 개발(1차년도), 한국수자원공사.