

개수로 실험장치를 이용한 LSPIV(large scale particle image velocimetry)기법의 검증

노영신¹⁾, 윤병만²⁾, 김영근³⁾, 유권규⁴⁾

1. 서론

최근 하천 수리학 분야에서는 PIV(particle image velocimetry) 및 PTV(particle tracking velocimetry) 등 최신의 영상측정기법을 적용하여 경제적이고 효율적으로 유속을 측정하기 위한 연구가 진행되어 왔다. LSPIV는 기록된 영상 내의 입자를 추적하여 대상영역의 유속 벡터를 산출하는 기존의 PIV기법을 좀 더 넓은 범위로 확대하여 실제 하천에도 적용할 수 있도록 한 기법이다. LSPIV기법은 PIV기법과는 달리 대략 4~45,000m²의 넓은 범위에 적용되기 때문에 카메라의 촬영각도에 따른 영상의 왜곡에 대한 보정 작업이 필요하다는 차이가 있다.

영상을 이용한 유동장의 해석은 Leese(1971)에 의해 최초로 시도되었으며, Adrian(1991)에 의해 영상처리 기술이 도입되었다. 이러한 영상분석을 통한 실제하천에서의 적용은 한쌍의 항공사진을 이용하여 하천의 유속을 측정하는 연구가 Kinoshita(1984), Fujita 등(1990)에 시도되었다. 그러나 항공사진에 의한 분석은 많은 비용이 소모되고, 홍수사상 전체의 시간적 분포를 측정하기가 불가능할 뿐만 아니라 기상조건 등에 의한 제약을 받기 때문에 Fujita 등(1994), Aya 등(1995)은 비스듬한 각도로 촬영된 비디오 영상을 분석하기 위한 기법을 개발하였다.

본 연구에서는 이러한 LSPIV기법을 이용하여 유량을 측정하기 위한 연구의 일환으로 PIV기법과의 차이점인 영상내의 왜곡을 수정하기 위한 방법을 개발하고 개수로 실험장치를 이용 표면유속을 측정하여 LSPIV기법을 검증하는데 그 목적이 있다.

2. LSPIV의 원리

PIV는 영상기법을 이용하여 유체 흐름내 입자의 이동을 촬영하여 입자의 이동거리를 촬영시간 간격으로 나누어 유속을 측정하는 기법이다. 이와는 달리 LSPIV는 실제 하천내 유하하는 부유물질 또는 유송잡물의 이동을 촬영하여 유속을 측정하는 기법으로 비스듬한 촬영각에 따른 영상왜곡을 보정해 주어야 한다. 따라서 LSPIV의 분석과정은 크게 영상의 획득, 획득된 영상의 처리 및 왜곡보정과정 그리고 분석을 통한 유속산정과정으로 나눌 수 있으며, 표면유속을 산정하기 위한

1 명지대학교 토목공학과 박사과정

2 명지대학교 토목공학과 부교수

3 명지대학교 토목공학과 석사과정

4 Univ. of Iowa, Dept. of Civil & Environment 박사과정

이러한 일련의 과정 중에서 영상왜곡 보정을 제외하면 PIV의 분석과정과 거의 동일하다. LSPIV 기법의 적용에 대한 분석절차 및 시스템 구성은 그림 1과 같다. 먼저 촬영장치로부터 촬영된 영상은 frame-grab을 통해 PC가 인식할 수 있도록 디지털화된 후 영상에 대한 보정을 수행하여 최종적인 유속을 산정하게 된다.

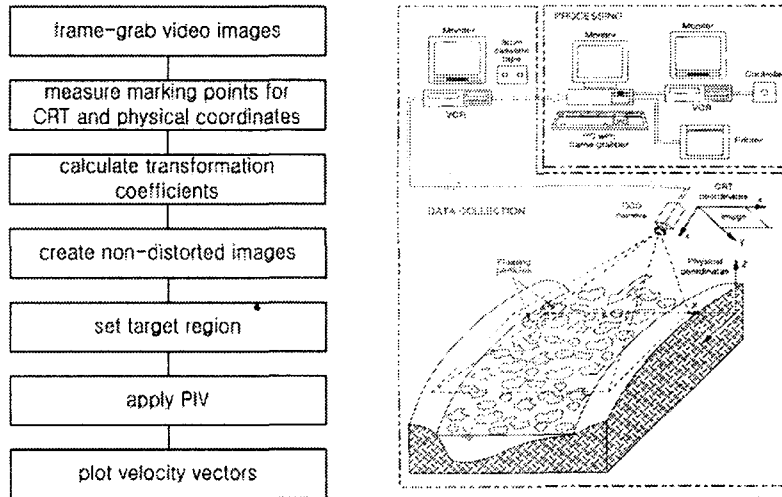


그림 1. LSPIV 분석절차 및 시스템의 구성(Fujita et al, 1997)

2.1 영상왜곡의 보정

LSPIV 왜곡보정의 개론적인 원리를 살펴보면 그림 2와 같다. LSPIV기법은 영상기법을 이용하여 유속을 측정하는 PIV 기법을 실제 하천에서의 유속측정을 위해 확대 응용한 유속측정방법으로, PIV 기법과의 차이는 카메라의 촬영각도 등에 의한 영상의 왜곡이 발생하기 때문에 추출된 정지영상에 대한 분석을 수행하기 전에 영상의 왜곡에 대한 보정을 해주어야 한다.

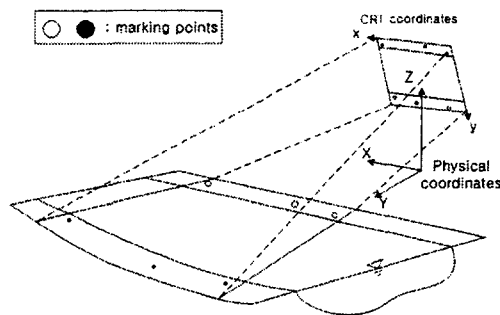


그림 0. LSPIV의 왜곡보정 원리(Fujita et al, 1997)

2차원 평면에 대한 왜곡보정 방법으로는 4개 이상의 marking point를 이용하여 8개의 mapping계수를 산정하는 2차원 투영좌표 변환법(2-D projective coord. transformation or 8-parameter transformation)을 이용하였으며, 실제좌표계와 CRT(cathode ray tube)좌표계 즉 영상내 좌표계간의 관계식은 식(1)과 같다.

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1}, \quad Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad (1)$$

여기서 $b_i (i=1 \sim 8)$ 는 mapping 계수이며, 기지의 marking point로부터 8개의 mapping 계수를 계산하고, mapping 계수로부터 식(1)을 이용, 나머지 좌표에 대한 반복적인 계산을 통해 실제 좌표로의 변환을 계산할 수 있다.

2.2 유속산정과정

LSPIV의 유속산정과정은 연속되는 두 영상간의 입자군에 대해 흐름형태가 가장 흡사한 입자군을 선별하여 유속을 산정하는 PIV기법과 동일하다. 영상내의 입자의 밀도가 큰 경우 일정한 영역(interrogation area)내의 입자군의 grey-level intensity를 비교하는 cross-correlation 기법(Stevens and Coates, 1994)은 다음 식(2)로 정의되는 cross-correlation 계수 R_{ab} 의 최대값을 갖는 interrogation area를 동일한 입자군으로 인식하고 유속을 계산한다.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} [(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})]}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right]^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 MX 와 MY 는 interrogation area의 크기를 나타내며, a_{ij} , b_{ij} 는 각각 dt 시간간격의 연속되는 두 영상내 interrogation area의 grey scale intensity를 나타낸다.

3. LSPIV기법의 수리실험 적용

3.1 실험조건 및 방법

본 연구에서는 LSPIV기법의 현지적용에 앞서 수리실험을 통해 현지적용을 위한 적용성 여부를 검토하였다. 실험은 길이 25m 폭 0.8m의 개수로 실험장치를 이용하였으며 수로 유입부와 유출부의 영향을 배제하기 위하여 실제 측정은 하류쪽으로 1/3 길이 정도인 단면에서 실행하였으며, 유량 $Q = 30 \text{ l/s}$, 수심 $d = 0.30 \text{ m}$ 의 실험조건하에서 수행하였다. 실험에 사용된 추적입자로는 주위에서 흔히 구할 수 있는 스티로폼을 사용하였고, 촬영도구로서는 디지털 6mm 캠코더를 사용하였다. 영상획득은 동일한 실험조건하에서 10회로 나누어 1분간의 영상을 촬영하고 분석하였다. 또한 분석된 유속값을 비교하기 위해 NORTEK사의 ADV 유속계를 이용하여 표면으로부터 1/3지점의 유속을 측정하여 비교하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

(1) 영상처리과정

촬영된 영상은 분석을 위해 frame-grab을 통해 $640 \times 480 \text{ pixel}$ 로 디지털화한 후 그림 4에서 보는 바와 같이 grey scale로 변환하였고 그림 5에서 보는 바와 같이 변환된 영상의 왜곡을 영상을 수정하였다.

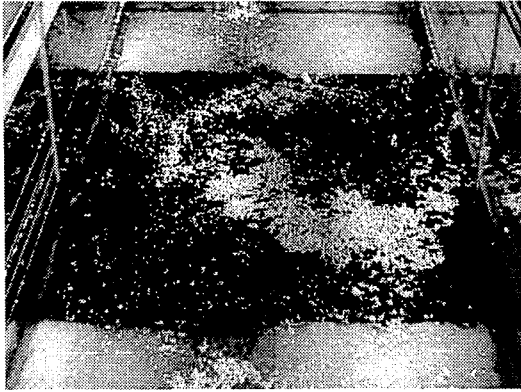


그림 4. 디지털화 및 grey scale로 변환



그림 5. 변환된 영상의 왜곡수정

왜곡수정을 거친 영상에 대한 유속을 산정하기 위해 그림 6에서 보는 바와 같이 20×20의 분석 영역(interrogation area)을 설정하고 설정된 각 영역에 대해 산정된 유속벡터는 그림 7에서 보는 바와 같다.

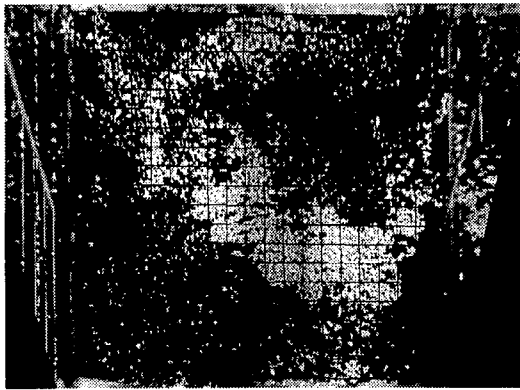


그림 6. 분석영역(interrogation area)의 설정

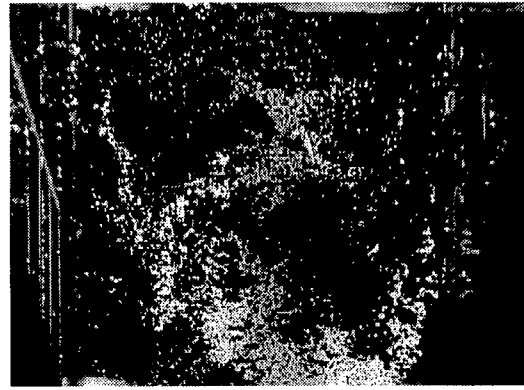


그림 7. 산정된 유속벡터

(2) 실험결과 분석

본 실험에서는 ADV에 의해 측정된 층별 유속과 LSPIV에 측정된 표면유속으로부터 유속분포를 산정하여 기존의 유속분포식과 비교하였다. 무차원계수 $U^+ \equiv U/U_*$ 와 $y^+ \equiv yU_*/\nu$ 의 관계로부터 개수로에서의 유속분포는 식(3)과 식(4)로 정의된다.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + A, \quad \text{for } 30 < y^+ \leq 0.2R_* \quad (3)$$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + A + w(y/h) \quad \text{for } y^+ > 0.6, \text{ free surface region} \quad (4)$$

여기서 von Karman 상수 $\kappa=0.41$, 적분상수 $A=5.29$ 를 적용하였으며, wake function $w(y/h)$ 는 Coles(1956)가 제안한 다음 식(5)를 이용하였다.

$$w(y/h) = \frac{2H}{x} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \quad (5)$$

ADV를 이용하여 수심에 대해 일정한 간격으로 유속을 측정 후 각 층별 Reynolds 응력을 계산하여 식(6)에 의해 그림 8에서 보는 바와 같이 직선의 기울기로부터 마찰속도 U_* 를 산정하였다.

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_*^2} = 1 - \frac{y}{h} \quad (6)$$

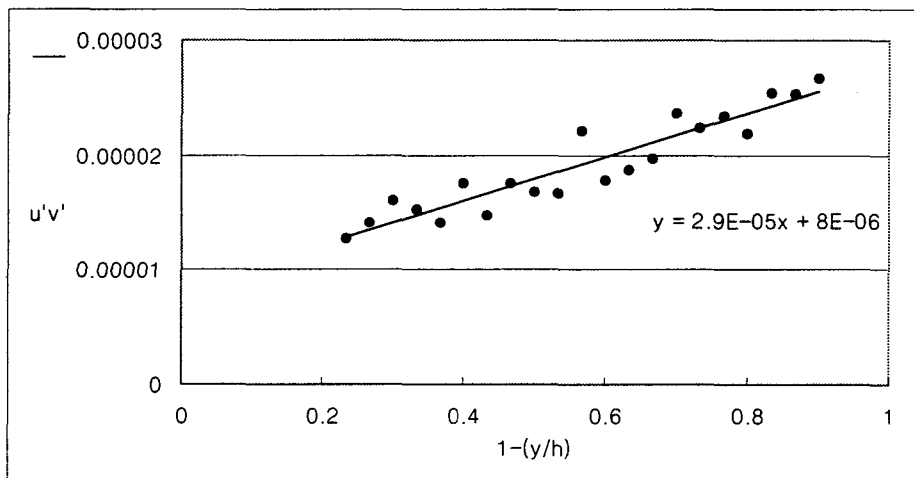


그림 8. Reynolds 응력분포

그림 9는 실험결과에 의한 유속분포를 나타낸 것이며, 식(3)의 분포와 잘 일치하는 것으로 나타났다. LSPIV에 의해 측정된 표면유속을 비교하기 위해 자유표면영역(free surface region)에 대한 식(4)로부터 표면유속에 대한 연장선을 작성 LSPIV 결과와 비교하였다.

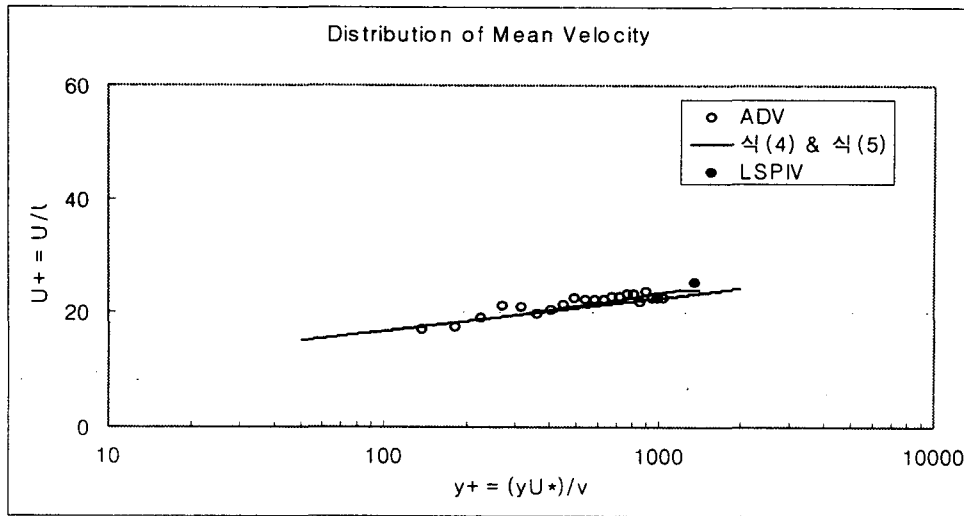


그림 9. 평균유속분포

그림 9에서 보는 바와 같이 LSPIV에 의해 측정된 표면유속과 식(4)에 의한 평균유속분포와 비교하였을 때 약 5%의 오차를 보여 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 최종적으로 LSPIV기법을 적용하여 유량을 측정하기 위한 것으로, 1차적으로 표면유속을 산출하기 위한 기법의 기본적인 이론의 적용과 왜곡보정 등의 과정을 위한 기법을 개발하여 기초 수리실험을 수행하였다. 수리실험은 실제 하천에의 적용을 위한 초기단계로서 좀더 다양한 실험조건에의 적용을 통해 적용성 여부를 검증해야 할 것으로 생각되며, 좀더 정확한 결과를 얻기 위해서는 filtering 과정을 통해 영상처리과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화해야 할 것으로 생각된다. 또한 실제 하천에 적용하기 위해서는 야간촬영 및 악천후시 촬영문제, 환경적으로 문제가 없는 추적입자의 선정 등에 대한 향후 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- Coles, D., 1956, "The law of the wake in the turbulent boundary layer", Jr. of Fluid Mech., 1 191-226.
- Fujita, I., and Komura, S. 1994, "Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flow," Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.38, 733-738
- Fujita, I. and Komura, S., 1994, Application of video image analysis for measurement of river-surface flows, Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.38, pp.733-738
- Fujita, I., 1994, "Surface flow measurement of flood by image correlation", Third Asian Symposium on Visualization, 669
- Fujita, I., Aya, S., and Deguchi, T. 1997, " Surface Velocimetry Measurement of River Flow Using Video Images of an Oblique Angle," Proceedings XXVIIth IAHR

Conference, Theme B, Vol. I, San Francisco, CA, pp.227-232

Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A., 1998, "Large-Scale Particle Image Velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering application", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.36, No.3, 397

Leese, L.A., Novak, C.S., and Clark, B.B.,(1971). "An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation", Jr. of Appl. Meteorol., 10, pp. 118-132

Stevens, C. and Coates, M., (1994). "Application of a maximized cross-correlation technique for resolving velocity fields in laboratory experiments", Jr. of Hydraulic research, 32(2), 195-212