

LSPIV를 이용한 표면유속 측정기법의 검증 및 적용

Verification and Application of Surface-Velocity Measurement Method Using LSPIV

김 영 근* / 노 영 신** / 윤 병 만***

Kim Younggeun / Roh Youngsin / Yoon Byungman

.....

Abstract

The purpose of this study is to verify LSPIV technique. Verification was made using moving cart with known velocity. The difference of velocity values obtained using these methods are within 5%, which means that LSPIV can be used in the field with reasonable accuracy.

After verification, LSPIV was applied to the river. The Neungwon stream and the Gonjiam stream, tributaries of the Kyungan stream, were selected as the test sites for application. The results of the test application were compared with those obtained by 3-D electromagnetic current meter and electron-wave surface velocity meter. Results show that the velocity values obtained using LSPIV coincide well with those obtained using conventional devices with maximum difference of 8%.

Keywords : LSPIV, surface velocity

.....

요 지

본 연구에서는 LSPIV기법의 효율성과 적용성을 검증하기 위해 유속검정용 전동기계를 이용한 검증실험을 통하여 LSPIV기법을 검증하였다. 검증을 실시한 후에 LSPIV기법을 실제하천에 적용하였다. 대상하천으로는 경안천의 지류인 능원천과 곤지암천을 선택하였으며, 3차원 유속계 및 기존의 표면유속 측정에 사용해 왔던 전자파 표면유속계의 측정결과와 비교하였다.

본 연구를 통해 나타난 결과를 살펴보면 검증실험에 사용된 전동차의 결과값과 비교했을 때 LSPIV기법의 측정값은 5%이내의 오차로 잘 일치하는 경향을 나타냈으며, 실제하천에 적용하여 기존의 측정장치와 비교하였을 때에도 최대 8% 이내의 오차로 잘 일치 하였다.

핵심용어 : LSPIV, 표면유속

* 명지대학교 토목·환경공학과 연구원
Investigator., Dept. of Civil Engrg., Myong-Ji Univ., San 38-2, Nam-dong, Yongin-si, Kyunggi-do, 449-728 Korea
(E-mail: k09258@hanmail.net)

** 명지대학교 토목·환경공학과 박사 수료
Doctoral Candidate, Dept. of Civil Engrg., Myong-Ji Univ., San 38-2, Nam-dong, Yongin-si, Kyunggi-do, 449-728 Korea
(E-mail: rohys@mju.ac.kr)

*** 명지대학교 토목·환경공학과 교수 Pfor., Dept. of Civil Engrg., Myong-Ji Univ., San 38-2, Nam-dong, Yongin-si, Kyunggi-do, 449-728 Korea
(E-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

1. 서론

최근 유체의 유속측정을 측정하기 위한 기법으로 영상처리기술을 이용한 PIV(Particle Image velocimetry) 및 PTV(Paricle Tracking Velocimetry)에 대한 관심이 높아지고 기존의 방식으로는 측정이 곤란한 흐름특성을 파악하기 위해 영상기법을 적용한 연구가 점차 증가하고 있다. LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)기법은 일정한 시간간격의 정지화상을 추출하여 일련의 영상처리 과정을 거친 후 영상내의 추적입자 이동거리를 정지화상의 시간간격으로 나누어 최종적으로 유속장의 속도분포를 계산하는 유속측정기법인 PIV기법을 실제 하천에 적용하여 표면유속을 측정하기 위한 새로운 영상측정기법의 하나이다. 디지털 영상처리기술은 최근 컴퓨터 관련 기술과 병행하여 급속도로 발전하여 왔으며, 유동장의 영상처리를 신속하고도, 정도 높게 그리고 경제적으로 수행할 수 있게 되었다.

영상을 이용한 유동장의 해석은 Leesé(1971)에 의해 최초로 시도되었으며, Adrian(1991)에 의해 PIV에 영상처리 기술이 도입되었다. 영상분석을 통한 실제하천에서의 적용은 한쌍의 항공사진을 이용하여 하천의 유속을 측정하는 연구가 Kinoshita(1984), Fujita 등(1990)에 시도되었으나 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 위해 영상의 왜곡을 보정하기 위한 기법을 개발하였다. 이러한 연구는 90년대 후반에 들어서는 Muste (1998)등에 의해 여러 가지 하천과 모형실험에 적용되었다. 특히 Fujita (1998)등은 추적입자를 사용함에 있어서 입자의 환경분해성에 대해 관심을 갖기 시작했으며 최근에는 Muste 등(2002)이 추적입자의 크기와 입자분포의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서는 김미영 (1999)등이 해류표면의 속도계측을 위한 연구를 하였으나 기술소개와 오차수정을 위한 영상변환 등의 방법제시 및 이에 대한 검증만을 실시하였고 윤병만 등(2002)은 LSPIV를 이용하여 곤지암천의 유속장을 성공적으로 추출하였다.

LSPIV기법은 PIV기법과는 달리 실제 현장에 적용되어 넓은 영역을 대상으로 하기 때문에 왜곡보정에 따른 측정값의 정확도와 실제하천에 적용시 현장조건 및 촬영조건에 따른 적용성에 대한 검증이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실험실 실험을 통해 LSPIV기법으로 측정된 표면유속을 검증하고 이를 실제하천에 적용하여 타 계측기와 비교하여 봄으로써 LSPIV의 적용성에 대해 알아보았다.

2. LSPIV의 기본원리 및 분석방법

PIV는 영상기법을 이용하여 유체 흐름내 입자의 이동을 촬영하여 입자의 이동거리를 촬영시간간격으로 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 그림 1에서 보는 바와 같이 LSPIV의 분석과정은 크게 영상의 획득, 획득된 영상의 처리 및 왜곡보정과정 그리고 분석을 통한 유속산정과정으로 나눌 수 있다.

2.1 영상의 획득 및 영상처리

LSPIV기법은 유속장을 산정하기 위해 그림 2에서 보는 바와 같이 홍수시 유하하는 부유물질과 같은 추적입자가 필요하다. 본 연구에서는 평수시 측정에 적용하였기 때문에 그림 3에서 보는 바와 같이 추적입자를 투여하여 영상을 촬영하였다. 또한 왜곡보정을 수행하기 위해 그림 3의 원안에 나타나 있는 기준점에 대한 좌표를 측정하였다. 기준점은 보통 하천 양안에 최소 4개 이상의 점을 선정하여 정하게 된다.

획득된 영상은 PC에서 인식할 수 있도록 디지털 처리를 거치며, 분석을 위해 grey scale로 변환된다. 디지털화된 정지영상은 컬러로 구성되어 있으며, 일반적으로 컴퓨터 그래픽 시스템들은 RGB컬러 모형을 사용한다. RGB컬러는 삼원색인 빨강(red), 초록(green), 파랑(blue)로 구성된다. 이러한 세 컬러의 분광 요소들이 부가적으로 복합되어 결과적인 컬러를 만들어낸다.

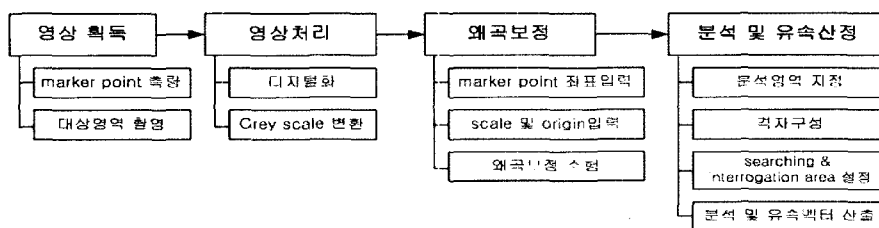


그림 1. LSPIV의 분석과정

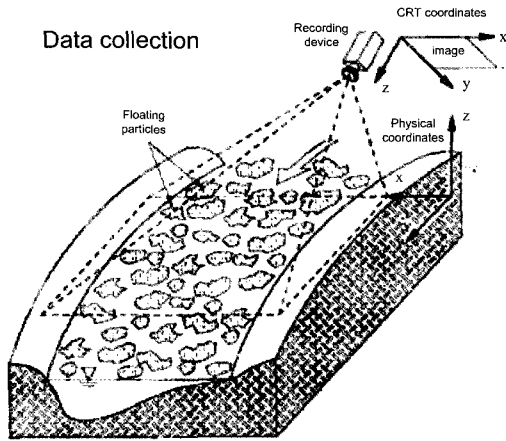


그림 2. 영상획득과정

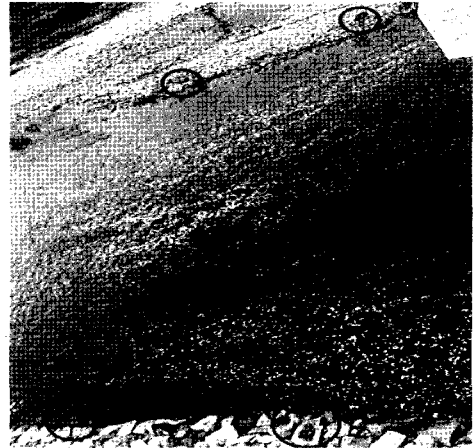


그림 3. 촬영된 영상 및 기준점

LSPIV기법에서는 이러한 컬러영상을 해석하는데 있어서 많은 시간이 소요되고 고용량의 저장장치가 필요하기 때문에 효율적인 분석을 위해서 이러한 컬러 시스템을 gray-scale level로 변환하여 분석하였다. 영상을 RGB컬러에서 명암도 등급으로 변환하기 위해서는 다음과 같은 식(1)을 사용한다(Randy, 1997).

$$\text{gray-scale level} = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

여기서 R, G, B는 각각 밝기 정보값이며, 식(1)은 gray-scale level에 대한 NTSC(national television system committee) 표준에서 비롯된 것이다.

2.2 영상왜곡의 보정

LSPIV 기법은 하천을 2차원 평면 형태로 가정하고 영상을 기록하므로 이에 대한 왜곡은 카메라의 촬영각도에 의한 원근상의 왜곡이라 할 수 있다. 이것은 실제로는 동일한 거리라 할지라도 촬영영상 내에서는 촬영

각도 및 촬영위치에 따라 원거리의 지점은 짧게, 근거리의 지점은 더 길게 나타나는 것을 알 수 있다. LSPIV 왜곡보정 및 marking point에 대한 개론적인 원리를 살펴보면 그림 4와 같다. LSPIV 기법은 하천내 유하하는 유송잡물 등의 이동을 촬영, 이를 분석하여 유속을 측정하는 기법이므로 실제좌표(physical coordinates)와 CRT좌표(cathode-ray tube coordinates) 간의 관계를 이용하여 영상에 대한 왜곡을 수정해주어야 한다.

본 연구에서는 정지화상의 왜곡도가 비교적 크기 때문에 2차원 평면에 대한 왜곡보정 방법으로 4개 이상의 marking point를 이용하여 8개의 mapping계수를 산정하는 2차원 투영좌표 변환법(2-D projective coordinate transformation or 8-parameter transformation)을 이용하였으며, 실제좌표계(physical coordinate)와 CRT(cathode ray tube)좌표계 즉 영상내 좌표계간의 관계식은 식(2)과 같다.

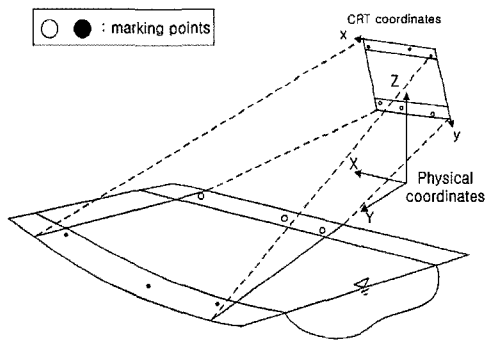


그림 4. 왜곡보정 원리(Fujita 등, 1997)

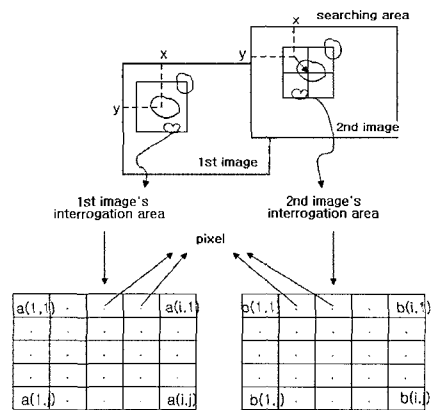


그림 5. PIV기법의 유속산정 원리

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1}, Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad (2)$$

여기서 $b_i(i=1\sim8)$ 는 mapping 계수이며, 기지의 marking point로부터 8개의 mapping 계수를 계산하고, mapping 계수로부터 식(2)을 이용, 나머지 좌표에 대한 반복적인 계산을 통해 실제 좌표로의 변환을 계산할 수 있다. mapping 계수는 이미 알고 있는 N개의 기준점 $(x_1, y_1)(X_1, Y_1), \dots, (x_N, y_N)(X_N, Y_N)$ 를 이용하여 최소자승법에 의해 결정된다.

2.3 속도벡터 추출원리

LSPIV의 유속산정과정은 그림 5에서 보는 바와 같이 연속되는 두 영상간의 입자군에 대해 흐름형태가 가장 흡사한 입자군을 선별하여 유속을 산정하는 PIV기법과 동일하다. 영상내의 입자의 밀도가 큰 경우 일정한 영역(interrogation area)의 입자군의 grey-level intensity를 비교하여 cross-correlation 기법(Stevens and Coates, 1994)으로부터 식(3)로 정의되는 cross-correlation 계수 R_{ab} 의 최대값을 갖는 검색영역(searching area)범위 내의 interrogation area를 동일한 입자군으로 인식하고 유속을 계산한다.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} [(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})]}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

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.

interrogation area와 searching area의 설정은 pixel 면적으로 입력되며, 분석 image의 간격 및 대상영역의

유속분포에 따라 적절한 값을 입력한다. 이러한 interrogation area와 searching area의 설정과 image 간격에 따라 측정가능한 유속분포의 범위가 정해지며, 평균 및 홍수시의 유속측정이 가능하여 분석시 적절한 설정값을 선택하면 유속측정 범위의 제한을 받지 않는다.

3. LSPIV 기법의 검증

3.1 실험조건

본 연구에서는 LSPIV 기법의 현지적용에 앞서 수리 실험을 통해 적용성 여부를 검토하였다. 먼저 입자를 수로의 바닥에 투여하여 고정시키고 그림 6에서 보는 바와 같이 촬영장치를 약 30° 각도로 전동차에 설치한 후, 일정한 속도로 이동시켜 촬영한 후 획득된 영상을 분석하여 산정된 유속값과 촬영장치의 이동속도와 비교하여 검증을 수행하였다.

실험은 전동차의 속도를 0.123~1.282 m/s로 변화시켜가며 분석된 LSPIV의 분석결과와 비교하였으며, 모두 13개 case의 실험을 수행하였다. 또한 전동차의 이동속도는 초기 이동시 구동력에 의한 속도차가 발생할 우려가 있기 때문에 구동시점으로부터 4m 간격을 두고 촬영을 수행하였으며, 전동차의 이동거리 6m에 대해 시간 평균하여 전동차의 이동속도를 산정하였다.

3.2 검증결과

앞서 언급했듯이 실험은 전동차의 이동속도를 0.123~1.282m/s 범위로 변화시켜 13개의 case로 수행하였으며 LSPIV로 측정된 유속은 영상내 분석영역에 걸쳐 평균하여 산정하였다. 전동차의 이동속도와 LSPIV 분석결과와의 비교는 그림 7 및 표 1과 같다. 실험결과를 통해서 알 수 있듯이 LSPIV기법을 이용하여 산정된 유속값은 비교적 정확한 것으로 나타났으며, 발생한 미소한 오차도 전동차 이동시 발생하는 진동에 의해 촬영된 영상의 흔들림에 의한 것으로 판단된다.

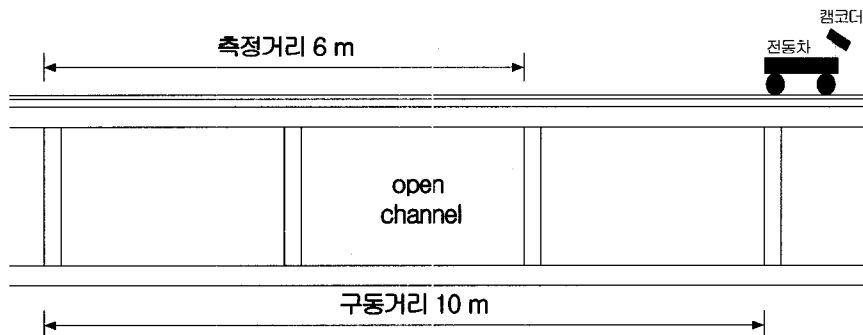


그림 6. 검증 실험의 개요

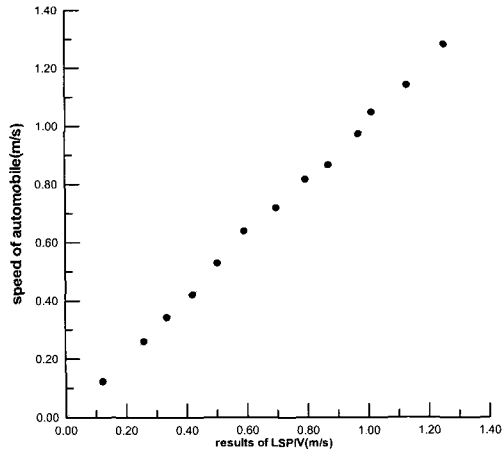


그림 7. 전동차 이동속도와 LSPIV 분석결과와의 비교

4. LSPIV기법의 현장적용

LSPIV기법을 현장에 적용하기 위해 경안천 지류인 곤지암천과 능원천의 경안천 합류지점을 대상지점으로 선정하였다. 영상획득은 곤지암천은 지월교와 능원천은 우안 고수부지에서 촬영을 실시하였고 좌우 저수호안 부근에 기준점을 설치하여 왜곡보정의 입력자료로 이용하였다. 또한 본 연구에서는 환경 분해성인 옥수수콘 추적입자를 투여하여 영상을 촬영하였다.

4.1 기법의 적용방법 및 분석과정

촬영된 영상은 PC에서 인식할 수 있도록 디지털 처리를 거치며 동일 입자군의 인식을 위해 그림 8과 같이 grey-scale level로 변화된다. 이렇게 변화된 영상은 왜곡의 보정을 수행하여 본래의 영상으로 수정되는데, 측량된 marking point를 이용하여 왜곡이 보정된 영상은 그림 9와 같다.

grey-level scale로의 변환과 왜곡보정이 완료되면 유속산정 분석을 위한 영역의 설정과 격자구성 및 분석 조건을 입력하여 유속산정을 위한 분석을 수행한다. 유

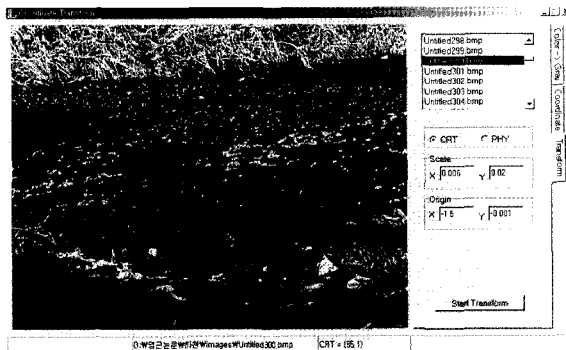


그림 8. 왜곡보정전 grey-scale로 변환된 영상

표 1. LSPIV 검증결과

	전동기계(m/s)	LSPIV(m/s)	error(%)
case 1	0.123	0.121	1.6
case 2	0.260	0.259	0.4
case 3	0.343	0.335	2.3
case 4	0.421	0.419	0.5
case 5	0.529	0.502	5.3
case 6	0.639	0.590	7.1
case 7	0.719	0.696	3.1
case 8	0.817	0.794	2.9
case 9	0.867	0.870	0.3
case10	0.974	0.968	6.2
case11	1.048	1.010	3.6
case12	1.142	1.128	0.9
case13	1.282	1.250	2.5

속산정을 위한 grid 구성화면은 그림 10과 같다. grid가 구성되면 interrogation area와 searching area 등 분석 입력조건을 선정하여 입력해야 한다. interrogation area는 식(3)으로 정의되는 두 영상간의 상관계수 R_{ab} 의 값을 비교하기 위한 영역을 의미하고 searching area는 이러한 interrogation area간의 탐색영역을 의미한다. 입력조건은 대상영역의 유속값과 입자의 분포에 따라 적정한 pixel값을 고려하여 입력해야 한다. 분석을 수행하여 유속벡터를 산정한 결과는 그림 11과 같다.

4.2 적용결과

LSPIV기법을 적용하여 각 대상지점의 표면유속을 산정한 결과는 그림 12에서 보는 바와 같다. 곤지암천의 측정결과(그림 12(a))를 살펴보면 우안측 흐름에서 신뢰성이 의심되는 유속벡터가 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 투여입자의 분포가 고르지 못해 발생하는 것으로 판단되며 입자의 투여가 고른 곤지암천 중앙부 및 우안과 능원천 지점의 분석결과(그림 12(b))는 비교적 표면유속의 분포를 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다.

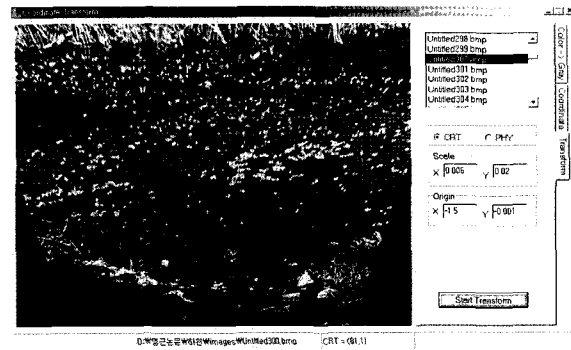


그림 9. 왜곡이 보정된 영상

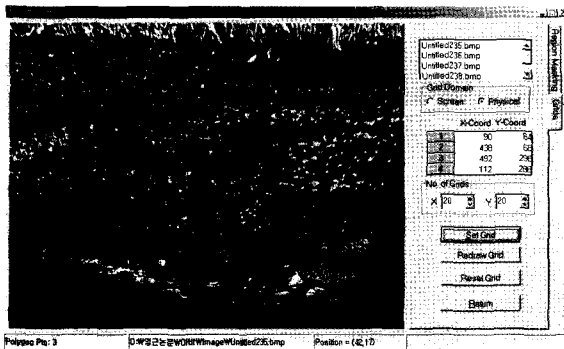


그림 10. grid 구성화면(20×30)

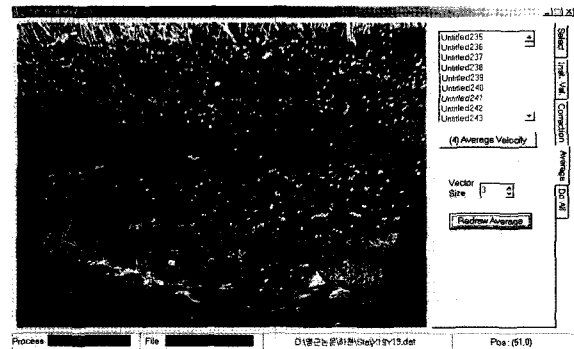
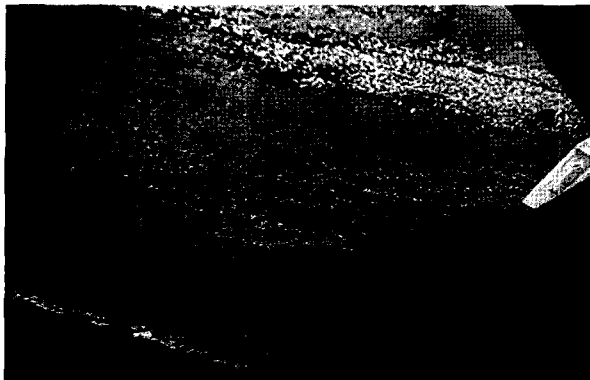
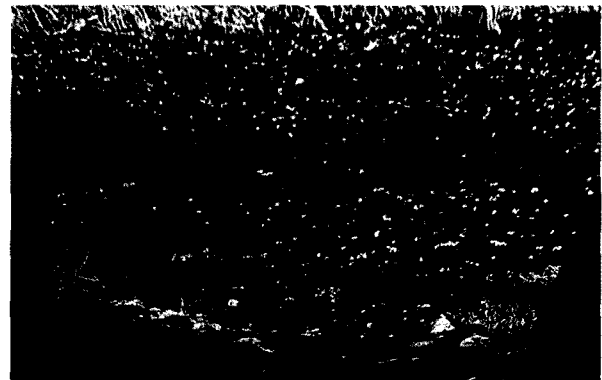


그림 11. 유속벡터 산정

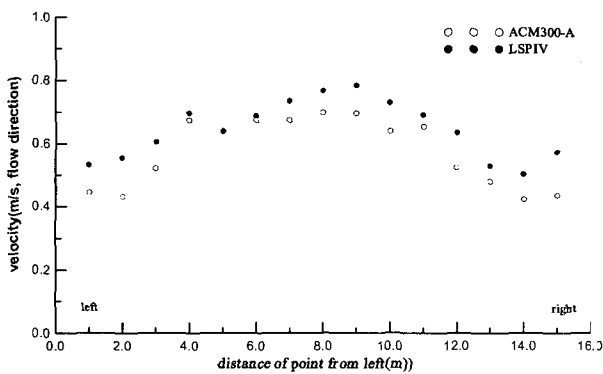


(a) 곤지암천 표면유속 분포

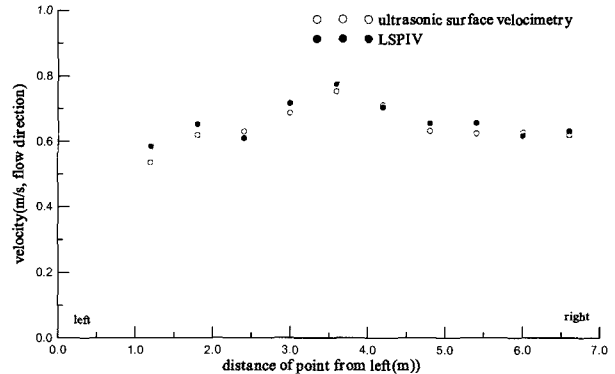


(b) 능원천 표면유속 분포

그림 12. LSPIV 분석결과



(a) LSPIV와 전자유속계 측정결과비교
(곤지암천)



(b) LSPIV와 전자파 표면유속계 측정결과
(능원천)

그림 13. 기존 유속계와의 비교

LSPIV기법을 적용한 표면유속측정결과를 비교하기 위해 곤지암천 지점은 ACM-300A 3차원 유속계, 능원천 지점은 전자파 표면유속계를 이용하여 영상촬영과 동시에 측정을 수행하였다. ACM-300A 유속계 측정시에는 측정센서가 최대한 수표면에 위치하도록 하였다.

기존 유속계와 LSPIV 횡단유속분포에 대한 분석결과와의 비교는 그림 13과 같다. 그림 13에서 보는 바와 같이 곤지암천의 경우 ACM-300A의 센서를 정확히 수표

면에 위치하기가 곤란하기 때문에 LSPIV 분석결과와는 일정한 오차를 보이는 것으로 나타났으며, 능원천의 경우 전자파 표면유속계의 측정결과와 비교했을 때 8% 이내의 오차로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천에서의 표면유속을 산출을 위해 개발된 LSPIV 기법을 검증하고 이를 실제하천에 적용

하여 표면유속을 측정하였다. 전동차를 이용한 검증결과와 LSPIV를 이용하여 표면의 유속분포를 정확하게 측정할 수 있을 것으로 나타났다. 실제 하천에서의 적용은 홍수 및 평저수시 적용을 위한 초기단계로서 소규모 하천에 적용하였으며 기존의 유속계와의 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 단지, 기존 유속계의 표면유속 측정에 따른 다소 어려움이 있어 이에 따라 어느 정도의 오차가 발생하였다. 따라서 실제하천에서의 측정결과 검증은 다양한 조건하에서 좀더 정확한 표면유속 측정이 가능한 유속계와의 비교를 통해 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 실제 하천에 적용하기 위해서는 야간촬영 및 악천후시 촬영문제, 대상영역의 범위에 따른 오차 그리고 입자의 조밀도에 따른 오차 등의 문제점들을 향후 다양한 실험 및 적용을 실시하여 개선해 나가면, LSPIV의 실용성을 더욱 높일 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김미영, 이영호, 서민식 (1999). "해류표면의 속도계측을 위한 SF-PIV의 개발." **1999년 춘계학술대회 논문집**, 한국해양환경공학회, pp. 155-160.

윤병만, 노영신, 김영근, 유권규 (2002). "개수로실험장치를 이용한 LSPIV기법의 검증." **2002 수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 982-988.

Adrian, R. J. (1991). "Particle Image Techniques for Experimental Fluid Mechanics." *Annual Rev. Fluid Mech*, Vol. 23, pp. 261-304.

Aya, S., Fujita, I. and Yagyu, M. (1995). "Field-observation of flood in a river by video image analysis." *Annual Jr. of Hydraulic Eng.*, JSCE, Vol. 39, pp. 447-452.

Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. (1998). "Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Applications." *Jr. of Hydraulic Research*, 36(3), pp. 397-414.

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.

Kinoshita, R. (1984). "Present status and future prospects of river flow analysis by aerial photograph." *Proc. of JSCE*, No.345/II-1, pp. 1-19.

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.*, Vol. 10, pp. 118-132.

Muste, M., Fujita, A. and Kruger A. (1998). "Experimental comparison of two laser-based velocimeters for flows with alluvial sand." *Experiments in Fluids*, Vol. 24, pp. 273-284.

Randy, C. (1997). *A simplified approach to image processing*. Prentice Hall.

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), pp. 195-212.

(논문번호:03-84/접수:2003.10.06/심사완료:2004.01.31)