

MLSPIV를 이용한 유속산정시 오차요인 규명 및 실내실험을 통한 유속산정오차 분석

Identification of Factors Affecting Errors of Velocity Calculation on Application of MLSPIV and Analysys of its Errors through Labortory Experiment

김 영 성* / 이 현 석**

Kim, Youngsung / Lee, Hyun-Seok

Abstract

Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) is an extension of particle image velocimetry (PIV) for measurement of flows spanning large areas in laboratory or field conditions. LSPIV is composed of six elements - seeding, illumination, recording, image transformation, image processing, post-processing - based on PIV. Possible error elements at each step of Mobile LSPIV (MLSPIV), which is a mobile version of LSPIV, in field applications are identified and summarized the effect of the errors which were quantified in the previous studies. The total number of elemental errors is 27, and five error sources were evaluated previously, seven elemental errors are not effective to the current MLSPIV system. Among 15 elemental errors, four errors - sampling time, image resolution, tracer, and wind - are investigated through an experiment at a laboratory to figure out how those errors affect to velocity calculation. The analysis to figure out the effect of the number of images used for image processing on the velocity calculation error shows that if over 50 images or more are used, the error due to it goes below 1 %. The effect of the image resolution on velocity calculation was investigated through various image resolution using digital camera. Low resolution image set made 3 % of velocity calculation error comparing with high resolution image set as a reference. For the effect of tracers and wind, the wind effect on tracer is decreasing remarkably with increasing the flume bulk velocity. To minimize the velocity evaluation error due to wind, tracers with high specific gravity is favorable.

Keywords : MLSPIV, Elemental Errors, Number of Images, Image Resolution, Tracer, Wind

요 지

Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)는 Particle Image Velocimetry (PIV)를 실험실내의 비교적 규모가 큰 흐름이나 하천에서의 표면유속장의 측정 등 넓은 영역에 적용할 수 있도록 확장시킨 것이다. LSPIV는 PIV의 구성요소를 포함하여 추적자 투하, 조명, 촬영, 이미지 변환, 이미지 처리 및 후처리의 여섯 단계로 구성된다. 본 연구에서는 LSPIV의 모바일 버전인 MLSPIV를 이용하여 하천에서의 유속측정시 각 단계별로 발생가능한 오차성분을 정의하였고, 기존의 연구 결과를 바탕으로 오차의 영향이 정량적으로 밝혀진 것을 정리하였다. 각 단계별로 오차

* 교신저자, 한국수자원공사 K-water연구원, 책임연구원, 공학박사
Corresponding Author, Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea
(e-mail: yskim@kwater.or.kr)

** 한국수자원공사 K-water연구원, 위촉선임연구원, 공학박사
Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

발생요인을 조사한 결과 27개의 성분오차성분을 파악하였다. 이 중에서 5개의 오차요소는 기존에 연구가 진행되었고, 7개의 오차요소는 본 논문에서 적용시의 MLSPIV에는 그 효과가 미치지 않는 것으로 파악하였다. 나머지 15개의 오차성분 중 4가지 오차성분- 샘플링시간, 이미지 해상도, 추적자의 성질, 바람-에 대해서 유속산정시 미치는 영향을 파악하기 위하여 개수로 실험장치를 이용한 실내시험을 실시하였다. 이미지 프로세싱에 이용한 이미지수로부터 나타나는 유속계산 오차를 조사한 결과 이미지의 개수가 50매 이상인 경우는 이로 인한 오차가 1 % 이하로 감소함을 파악하였다. 촬영된 이미지의 해상도가 유속계산시 미치는 영향을 조사하기 위해 세 가지 이미지 해상도로 변화시키면서 유속측정 오차를 분석한 결과 저해상도의 이미지를 이용한 경우 고해상도 이미지를 이용한 경우와 비교하여 3 % 가량의 차이를 나타내었다. 추적자의 성질과 바람의 영향에 대해서는 흐름의 평균유속이 큰 경우에는 바람이 추적자에 미치는 영향이 현저히 줄어들음을 보이고 있다. 즉, 유속이 증가함에 따라 바람의 영향은 감소하나, 바람의 영향을 최소화시키기 위해서는 가급적 비중이 큰 물질($0.5 < SG < 1.0$)을 이용하는 것이 바람직하다.

핵심용어 : MLSPIV, 성분오차, 이미지 개수, 이미지 해상도, 추적자, 바람

1. 서 론

최근 30여 년간 흐름의 유속측정을 위한 이미지 해석 기술이 개발되어 왔다. 이미지 해석 기술의 기본이론은 연속촬영된 두 장의 영상에서 물에 있는 패턴의 이동에 대한 통계적 추정이다. PIV (Particle Image Velocimetry)로 통칭되는 이미지 해석에 의한 유속측정 기술은 실험실에서 다양한 크기의 흐름장(flow field)에 대한 전체유속 벡터의 정량적인 측정 및 가시화를 도모하기 위해서 광학, 레이저, 전자, 비디오, 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어를 이용한 것이다 (Adrian, 1991; Raffael *et al.*, 1998). 이러한 전통적인 PIV 기술에 기초하며 일반 하천 및 대규모 수리모형 실험장 등 규모가 큰 흐름에 적용하기 위해서 개발된 기술이 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) 이다. LSPIV의 이미지 프로세싱과 데이터 프로세싱 알고리즘은 PIV와 거의 동일하나 LSPIV는 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 추적자 투하(seeding)의 경우 PIV 적용시에는 실험실에서 최상의 조건으로 조정이 가능하나 LSPIV는 주어진 자연조건하에서 적용해야 하기 때문에 이에 대한 조정이 필요하다. 이 중에서도 seeding에 사용되는 물체는 물표면에 떠서 흘러가므로 바람의 영향을 직접적으로 받고 또 이러한 현상은 표면유속측정의 오차와도 밀접한 상관성이 있다. PIV 적용시 관련되는 오차성분에 대한 연구는 이미지 프로세싱관련 오차성분에 대한 연구가 이루어졌으며(Raffael *et al.*, 1998), LSPIV의 적용시 관련되는 오차에 대해서는 원근감을 제거한 이미지로의 변환시의 오차에 관한 연구가

Muste *et al.* (2000)에 의해서 이루어졌다.

MLSPIV (Mobile Large Scale Particle Image Velocimetry)는 LSPIV를 일반 하천에서 적용시 유속 측정이 신속히 완료될 수 있도록 기동력과 독립성을 갖도록 관련되는 모든 설비가 트럭에 장착된 시스템으로 이는 미국 Iowa 대학교의 IIHR-Hydroscience & Engineering (IIHR)에서 개발하였다. 본 논문에서는 MLSPIV의 현장적용시 발생가능한 모든 오차성분을 정의하고, 이 중에서 기존의 연구에서 그 오차의 크기가 규명된 것은 정리하고, 실내실험실에서 규명가능한 오차성분에 대해서 실험을 통하여 그 크기를 정량화하고자 한다.

2. PIV, LSPIV 및 MLSPIV

2.1 PIV와 LSPIV

이미지 해석에 의한 유속장 측정방법은 PIV(Particle Image Velocimetry)로 통칭되고 있으며, PIV는 추적자 투하(seeding), 조명(illumination), 촬영(recording), 및 이미지처리(image processing)의 네 가지 요소로 구성된다. 추적자 투하는 유체를 따라 흐를수 있는 작은 입자를 유체에 투하하는 것이다. 유체를 따라 흐르는 입자들의 선명한 이미지를 얻기 위해서 조명이 필요하다. PIV를 이용하여 흐름을 해석하기 위한 조명은 일반적으로 이중펄스 레이저가 이용된다. 이렇게 유속장 해석을 하려는 유체에 대하여 추적자와 조명이 준비되면 카메라를 이용하여 흐름을 촬영한다. 이미지처리는 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.

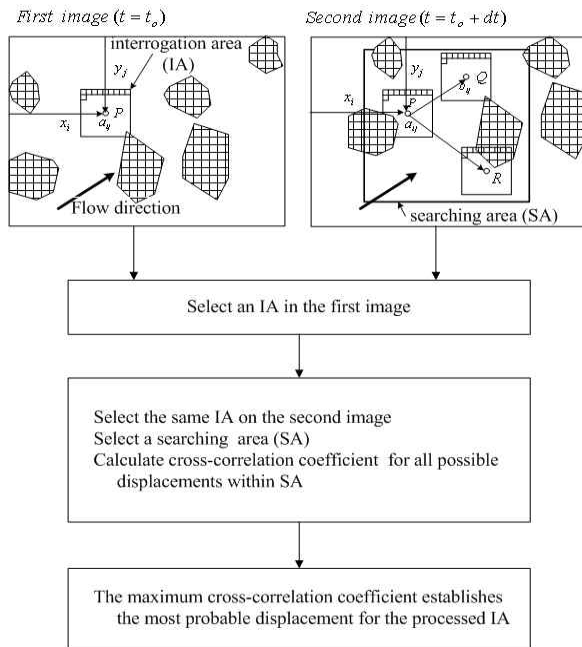


Fig. 1. PIV Algorithm

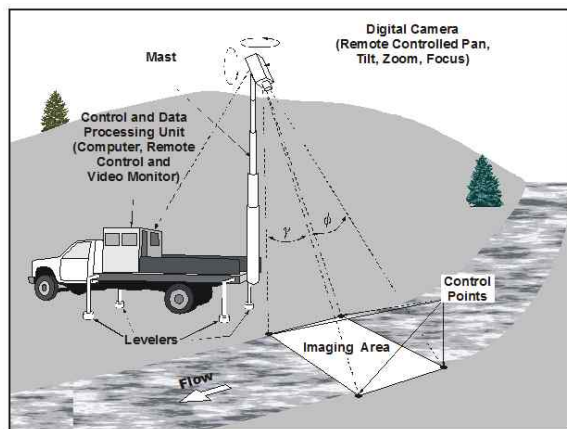


Fig. 2. Schematic Diagram of MLSPIV

LSPIV (Large Scale PIV)는 PIV의 기본원리를 근거로 하여 기존의 PIV에 비하여 실험실 내에서의 수리모형실험이나 일반 하천에서의 유속측정과 같은 큰 규모 ($4 \text{ m}^2 \sim 45,000 \text{ m}^2$)의 흐름해석을 할 수 있도록 Fujita and Komura (1994) 와 Aya *et al.* (1995)이 확장시킨 것이다. PIV와 비교시 LSPIV의 다른 점은 넓은 흐름표면적을 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 있

다. PIV의 네가지 단계를 포함하여 LSPIV의 각 단계를 구분하면, 추적자 투하, 조명, 촬영, 이미지 변환, 이미지 처리 및 후처리의 여섯 단계로 나뉘어진다(Li, 2002).

2.2 MLSPIV

LSPIV의 확장 버전으로서 MLSPIV는 미국 Iowa 대학의 IIHR에서 개발한 시스템으로, 일반하천 현장에서 신속하게 유속측정을 할 수 있도록 구성된 모바일 시스템이다. MLSPIV는 넓은 영역을 촬영하기 위하여 지상에서 원하는 상공까지 승강될 수 있는 마스트 위에 장착되는 원격으로 조종되는 비디오카메라나 디지털카메라를 적용하였다. 카메라의 위치 및 촬영각도 제어, 이미지 프로세싱은 트럭에 장착된 노트북컴퓨터의 인터페이스를 통하여 이루어진다.

MLSPIV는 기동성을 위하여 소형 트럭에 LSPIV 관련 모든 기기-매스트, 발전기, 무정전 전원공급장치(UPS), 및 배터리가 장착되었다. 매스트는 다양한 크기의 하천에 LSPIV를 적용할 수 있도록 지상에서 5 m에서 14 m 상공에 이를 수 있도록 제작 및 설치되었다. 2개의 배터리를 설치하여 하나는 매스트의 승강에, 다른 하나는 UPS를 통하여 다른 장치-노트북 컴퓨터, PTU (pan-tilt unit), 및 비디오카메라나 디지털 카메라에 전원공급을 한다. 매스트의 흔들림을 방지하기 위하여 세 개의 버팀줄이 설치되어져 있다.

이미지 촬영을 위한 부분은 PTU와 디지털 카메라로 구성된다. PTU는 매스트의 성단에 고정되며, 수직각 및 수평각 조절에 의하여 원하는 영역이 이미지에 들어올 수 있도록 카메라의 촬영각도를 조절한다. MLSPIV는 Olympus C730 Ultra Zoom 디지털카메라를 채택하였고, 디지털카메라는 미리 설정된 시간간격으로 촬영된다.

MLSPIV의 운용을 위하여 IIHR에서 두 가지 프로그램을 개발하였는데, 하나는 카메라의 촬영변수설정과 위치설정을 위한 PTU프로그램(Trivedi, 2004)이고, 다른 하나는 LSPIV 프로그램(Hauet *et al.*, 2005)으로 이를 이용하여 촬영된 이미지를 이용한 이미지 프로세싱을 실시한다.

3. 성분오차 (elemental errors)

본 논문에서는 MLSPIV를 적용하여 표면유속 측정시, 각 단계에서 발생할 수 있는 유속산정 오차요인을 정의하고, 문헌연구를 통해 현재까지 밝혀진 오차를 정리하였다. MLSPIV의 적용시 성분오차는 유속을 산정하는 전체 과정 즉, 여섯단계 - 추적자 투하, 조명, 촬

영, 이미지 변환, 이미지 처리 및 후처리 - 에서 발생된다. 각 단계에서 발생하는 각 오차요인은 MLSPIV의 적용결과에 미치는 영향의 정도에 따라서 세 가지 종류로 구분하였다. 먼저 입자의 오차가 이미지상에서 전체 영역에 걸쳐 동일하게 영향을 미치고 산정되는 모든 유속벡터에 영향을 미치면 이를 전역오차 (global error, G)로 분류하였다. 입자의 오차가 계산격자에 따라서 국부적으로 변화를 한다면 지역오차(local error, L)로 분류한다. 현재의 MLSPIV상에서 유효하지 않는 오차성분은 비영향오차(no active error, N/A)로 분류하였다.

3.1 조명(illumination) 관련 오차

a) 전역 조명(global illumination), u_{i1} (Global)

MLSPIV를 일반 자연하천에서 적용시 자연 채광을 조명으로 이용한다. 따라서 촬영된 이미지의 전반적인 밝기는 촬영시의 전반적인 조명의 조건 즉, 태양의 밝기의 변화 - 맑음, 가끔 흐림, 흐림 -에 따라 유속장 해석에 절대적으로 영향을 받는다. 한 예로 야간에는 특별한 장치가 없이는 LSPIV에 의한 유속장 측정은 불가능하다.

b) 국부조명 비균일성(local illumination non-uniformity), u_{i2} (Local)

촬영 대상지역의 주변에 있는 건물이나 나무들의 그림자에 의한 물표면에 국부적인 밝기 차이에 의하여 표면유속 산정시 오차를 유발할 수 있다.

3.2 추적자 투입(seeding) 관련 오차

a) 입자의 군집(grouping of seeding), u_{s1} (Local)

입자들 사이에 작용하는 정전기력이 입자들의 군집을 유발할 수 있다. 실제 개수로서의 실험 중에 관찰한 바에 의하면 에코폼(Ecofoam)이나 폴리스티렌(polystyrene beads)의 경우, 흐름과는 달리 정전기력에 의해 입자들이 군집하는 것이 확인되었다.

b) 추적 오차(tracing error), u_{s2} (Local)

입자들이 물표면의 실제 유속과 달리 움직이기 때문에 발생한다. 이러한 속도 차이는 물표면에 바람의 영향으로 발생한다. LSPIV적용시 사용되는 입자는 입자의 비중에 따라 입자가 물에 잠기는 정도가 다르다. 입자의 비중이 작아서 잠기는 정도가 작으면, 바람에 의한 항력(drag force)의 영향을 많이 받아 흐름 그 자체의 거동을 표현하지 못한다.

3.3 이미지 촬영 (recording) 관련 오차

a) 이미지 해상도(image resolution), u_{r1} (Global)

이미지의 해상도는 물표면의 이미지 패턴을 촬영시

중요한 역할을 하는 인자이다. 만약 촬영시 설정된 이미지 해상도가 높으면 높을수록, 촬영된 이미지는 훨씬 더 상세한 물표면의 정보를 가지게 된다. 즉 고해상도 이미지를 이용하여 LSPIV로 유속을 산정하면 유속장에서의 유속의 미세한 차이를 구분할 수 있게 된다.

b) 연속된 두 이미지의 촬영시간 간격, u_{r2} (Global)

두 개의 연속된 이미지 사이의 시간 간격은 유속측정시의 오차에 직접적인 영향을 주는 주요한 매개변수이다. 비디오 캠코더를 이용하여 이미지를 촬영하였을 경우 30 frame/sec로 촬영하므로 연속하는 두 이미지 사이의 시간은 0.0333초로써 일정하다. 하지만 디지털 카메라의 경우에는 각 제조사가 연속촬영시 두 이미지 사이의 시간을 대략적으로 제시하고 있어, 유속측정시 오차를 파악하기 위해서는 이에 대한 정밀한 측정을 해야 한다. 본 논문에서 이용한 MLSPIV는 디지털 카메라로 Olympus Ultra Zoom 730을 채택하였고, 이 카메라는 연속촬영시에 약 0.8 sec/frame의 시간간격으로 촬영한다.

c) 샘플링 시간(sampling time) (=이미지 개수), u_{r3} (Global)

촬영시 샘플링 시간을 증가시키면 이미지 처리에 이용할 수 있는 이미지의 수가 증가한다. 이미지의 수가 증가할 경우 유속의 순간적인 불규칙한 변화로 인한 미치는 영향을 줄여 안정적인 유속값을 산정할 수 있다. 반면 늘어난 이미지의 개수에 비례하여 이미지 프로세싱에 소요되는 시간은 늘어나게 된다.

d) 카메라의 흔들림 (camera movement), u_{r4} (Global)

MLSPIV는 하천현장에서 운용되기 때문에 바람과 자체 전원공급시스템의 진동에 의한 이미지의 흔들림이 발생할 수 있다. 이러한 이미지의 흔들림은 입자들의 이동과는 별개의 것이지만 촬영된 이미지 해석에 있어서는 이것 또한 입자의 이동으로 간주되기 때문에 유속 측정시의 오차를 유발시킨다.

3.4 이미지 변환(image transformation) 관련 오차

a) 거리측량 오차(distance error), u_{t1} (Global)

LSPIV의 적용을 위해서는 최소한 4개의 GRP (ground reference points, 지상기준점)의 좌표가 있어야 한다. 이들 GRP의 좌표값 결정을 위해서는 좌표측량을 해야 하는데, 측량 기기의 오차, 측정자에 따른 편차 등에 의해 유발된 거리측량 오차가 발생하고 이는 유속산정시 오차를 유발시킨다. 일반적으로 측량기기의 오차는 제작사에 의해서 주어진다. 하지만 측량시 실무자의 오차는 우연오차로 측정하는 사람마다 다르게 나타난다.

b) 표식 식별 오차(marker point identification), u_2 (Global)

GRP의 이미지상 좌표값을 인식하는 과정에서 발생하는 오차로 이미지 좌표와 물리좌표 사이의 변환계수(transformation coefficients)를 계산시 이는 이미지 변환식을 통하여 전파된다. 표식 식별 오차의 정도는 사용된 카메라의 이미지 해상도에 좌우된다.

c) 이미지의 밝기 할당 오차(brightness allocation), u_3 (Local)

MLSPIV에서 취득하는 원시 이미지는 원근감있는 왜곡된 이미지이기 때문에 PIV 분석을 하기 위해서 이를 정사투영한 이미지로 변환하여야 한다. 이를 위하여 이미지 변환식을 이용하여 원래 이미지의 왜곡을 제거한 정사투영 이미지로 변환하는데, 이미지 각 pixel의 밝기를 큐빅컨벌루션보간법(cubic convolution interpolation)을 이용하여 계산하여 이미지의 왜곡을 수정하여 재구성한다. 이러한 과정에 각 격자점에서 계산된 픽셀의 밝기값(brightness)은 왜곡된 원시 이미지의 픽셀 밝기값과는 차이가 생기게 된다.

d) 카메라의 촬영 위치와 방향 오차(camera positioning and orientation), u_4 (N/A)

이미지 변환 방법에는 양해이미지변환법(explicit image transformation)과 음해이미지변환법(implicit image transformation) 방법이 있고, 카메라의 위치와 방향은 음해이미지변환법에서 이를 외부변수로 취급하고, 이미지 변환시 사용된다. 카메라의 위치와 방향에 따라서 계산영역의 왜곡 정도가 다르기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 만약 카메라의 광축과 물표면 사이의 화각이 너무 작을 때에는 촬영된 이미지의 왜곡 정도가 증가한다.

e) 배율 오차(magnification), u_5 (N/A)

배율이라는 함은 물체의 이미지 좌표와 물리 좌표 사이의 비로, 이를 이용하여 왜곡을 제거한 이미지 생성시 이미지의 크기를 정하게 된다. MLSPIV에서는 이미지 생성시 이미지 좌표와 물리좌표에 관련된 오차에 대한 고려없이 원시 이미지와 같은 크기로 생성될 수 있도록 시행착오를 통하여 임의로 선정한다. 따라서 배율로 인한 오차는 MLSPIV 적용시 LSPIV 프로그램에서 오차없는 계수로 간주된다.

3.5. 이미지 프로세싱 (processing) 관련 오차

a) 첨두탐색 오차 (peak finding error), u_{p1} (Global)

첨두탐색 오차는 PIV 알고리즘 적용시 픽셀단위 이하의 상관계수 첨두값 탐색 알고리즘에 관련된 것이다. 픽셀단위 이하의 상관계수 첨두값 탐색 알고리즘에는

중심법(centroid method), 포물선형 첨두탐색법(parabolic peak fit), 가우스 첨두탐색법(gaussian peak fit), 제로패딩법(zero padding), 및 Whittaker의 재구성법(reconstruction)이 있다(Lourenco and Krothapalli, 1995). MLSPIV에서는 포물선형 첨두탐색법을 채택하였고, 이 방법은 픽셀단위 이하의 상관계수 첨두값 탐색 오차는 0.1 pixel 이다(Fujita *et al.*, 1998).

b) 배경 잡음으로 인한 오차 (background noise), u_{p2} (Global)

이미지의 배경은 완벽하게 균일하게 나타날 수는 없고 불가피한 잡음이 항상 존재하게 된다 (Joseph, 2003). 배경의 비균일성(non-uniformity)은 CCD 배열과 관련한 촬영 잡음이거나 혹은 광원에 기인한 잡음으로, 이로 인해 이미지의 명암대비를 저하시킨다. 배경잡음이 5, 10, 25, 50 %로 증가함에 따라 입자의 이동거리 산정시 오차는 각각 0.03, 0.03, 0.05, 0.1 pixel 발생하는 것으로 나타나고 있다(Raffel *et al.*, 1998).

c) 유속경사 오차(velocity gradient error), u_{p3} (Local)

PIV 알고리즘 적용시, 질의구역(interrogation area, IA) 이내에 속도구배가 있는 경우에는 유속산정시 오차가 발생한다(Forliti *et al.*, 2000). IA 내에서 큰 변위를 가지는 입자는 IA의 크기로 인하여 두 이미지상에서 쌍을 이루는 입자가 IA영역에서 벗어날 가능성이 커지기 때문에 입자들의 이동거리 산정값은 이동거리가 작은 값을 가지는 경향이 있다.

d) 질의구역(Interrogation Area, IA), u_{p4} (Global)

IA의 크기는 입자 혹은 패턴의 크기를 고려하여 선택한다. 만일 IA의 크기가 너무 작아 입자나 패턴의 형상을 인식하지 못하면 유속계산시 오차를 유발하게 된다. 따라서 입자의 크기와 IA의 크기의 관계가 먼저 설정되어야 한다. 그다음 현장에서 이용가능한 특정의 입자의 크기에 적합한 IA의 크기가 결정되어질 수 있다. Forliti *et al.* (2000)에 따르면, 상관계수 첨두값 탐색 알고리즘의 편기오차(bias error)가 IA의 크기에 의해 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

e) 탐색영역(Searching Area, SA), u_{p5} (N/A)

탐색영역은 예상되는 입자의 이동거리와 같은 정도로 설정되어야 정확한 유속벡터를 산정할 수 있다. 만약 입자의 이동거리가 SA의 설정값을 초과하면 상관계수의 첨두탐색 알고리즘(peak finding algorithm)이 정확한 첨두값을 계산할 수 없다. 입자의 이동거리보다 충분히 크도록 탐색영역을 설정해야만 이로 인한 오차를 피할 수 있다. 따라서 탐색영역을 입자의 이동거리보다 충분히 크도록 설정함으로써 이로 인한 오차를 LSPIV 프로그램에서 무효화시킨다.

f) 윈도우 오프셋 오차(window offset error), u_{p6} (N/A)
 단일노출 디지털 이미지쌍의 상호상관(cross-correlation) 분석에 있어 입자 이동거리의 정수부분을 이용한 질의영역의 차감은 비교적 간단하다. 따라서 이동거리의 나머지 부분은 pixel 단위의 소수부분뿐이고, 이는 항상 1/2 pixel보다 작다. 결과적으로 윈도우 오프셋을 적용하지 않은 PIV분석에 비해 훨씬 정확한 결과를 산출한다. MLSPIV에서는 windows offset은 적용되지 않았기 때문에 이로 인한 오차는 고려대상에서 제외된다.

g) 관측평면이탈 오차(out of plane motion error), u_{p7} (N/A)
 관측평면이탈 오차는 심하게 유동하는 3차원 흐름에서 발생하는 것으로, 일반적으로 유량측정하는 하천에서 표면의 흐름은 2차원으로 간주할 수 있다. 따라서 MLSPIV의 적용시 관측평면이탈 오차는 고려대상에서 제외된다.

h) 영상이동오차(image displacement error), u_{p8} (Global)
 대부분 입자의 이동에 있어서, 동일평면을 촬영한 두 장의 이미지에서 입자의 손실로 인한 이동거리 산정의 불확실성은 선형관계를 보이는 0.5 pixel 이하를 제외하고는 거의 일정하다(Raffel *et al.*, 1998; Xiong, 2000).

i) 이미지 양자화 오차(image quantization error), u_{p9} (Global)
 이미지 양자화 오차는 이미지 양자화 수준의 변동에 의해 발생하는 것이다. 이미지 양자화는 픽셀당 비트수의 비(bit/pixels ratio)로 표시된다. MLSPIV의 LSPIV 프로그램에서 이용하는 8 bit 이미지의 경우, 이미지 양자화 오차로 기인한 이동거리 산정시 최대 불확실성은 0.03 pixel이다(Raffel *et al.*, 1998).

j) 입자 이미지 밀도(seeding density), u_{p10} (Global)
 촬영시 물표면에 뿌려진 입자들은 이미지 패턴을 형성한다. 이러한 이미지 패턴은 유속벡터 산정을 위하여 두 연속된 이미지의 상호상관계수를 산정하는데 이용된다. 입자 이미지 밀도는 계산하는 이미지 영역에서 입자들이 점유하고 있는 pixel의 수와 그 이미지 영역의 전체 pixel 수 사이의 비로 정의된다. PIV의 적용시 경험적으로 하나의 질의영역에 10개 입자쌍이 필요한 것으로 제시되고 있다(TSI, 1999). 또한 Meselhe *et al.* (2004)의 경험법칙에 따르면, 흐름표면의 10~30 % 내외의 입자 이미지 밀도가 LSPIV의 현장 적용시 사용가능한 간단한 지침이다.

k) 입자 크기(seed size), u_{p11} (Global)
 입자의 크기는 이미지 해상도와 이미지 배율에 관련

되는 것으로서, 물리적인 크기가 같더라도 이미지상의 입자크기가 측정 정확도에 영향을 미치게 된다. 입자의 크기에 대한 PIV의 적용상의 경험법칙에 따르면, 입자나 이미지 패턴이 이미지상에서 3~6 pixel을 점유해야 한다(TSI, 1999).

l) 입자 명암대비(seed brightness & contrast), u_{p12} (Global)
 이미지의 명암대비는 이미지의 밝기강도의 차이로 정의되고, 이는 색상과 입자 및 배경의 밝기에 관련된다. 이미지 패턴의 고명암대비는 PIV 분석에 있어 이미지 패턴 인식을 유리하게 한다. 반면 저명암대비는 패턴인식이 힘들어 오차를 유발한다.

3.6. post-processing

후처리의 목적은 이미지 프로세싱을 통해 산정한 유속 중에서 잘못 산정된 속도벡터를 교정하기 위함이다. 이러한 오차는 잘못 계산된 유속벡터에 대한 LSPIV 프로그램 사용자의 경험에 의존하는 것이다.

a) 유속 필터링(velocity filtering), u_{pp1}
 계산된 유속장은 국부 유속의 연속성의 측면에서 비합리적인 유속 벡터인 오류 벡터를 내재하고 있을 수가 있다. 이들 오류 벡터는 이미지 프로세싱 과정에서 이미지 패턴을 제대로 매칭시키지 못함에서 기인한다. 이들은 Fujita and Kaizu (1995)가 사용한 흐름의 국부 연속성에 근거한 방법으로 수정이 가능하다. Fujita *et al.* (1998)에 따르면 국부 속도벡터의 필터링에 의한 전반적인 추정에 있어 3 %의 정도의 오차가 있음을 제시하였다.

b) 최소 상관관계수 (minimum correlation), u_{pp2}
 평균유속장은 다수의 순간유속장을 평균함으로써 산정한다. 이때 추가적인 필터로 최소 상관관계수가 이용된다. 즉 대상흐름에 대해 유속을 계산하기 위해 사용된 상관관계수의 최소 하한값을 설정하여, 이 최소치 이하의 상관관계수로부터 결정된 유속은 평균유속 산정시 제외하는 것이다.

3.7. MLSPIV 관련 오차의 규명 현황

MLSPIV를 이용한 하천에서의 유속측정에 있어 전체 이미지 프로세싱 단계별 관련되는 오차성분을 분석한 결과 27개의 성분오차를 나열하였다. 지금까지의 연구에서는 다섯가지의 오차 성분 - 침투탐색, 배경잡음, 영상이동, 이미지 양자화, 입자 크기- 에 대한 연구가 진행되나 있다. 또한 27개의 오차성분 중에서 이중 5항목의 오차요소들(카메라 촬영위치와 방향, 배율, 탐색구간, 윈도우 오프셋, 관측평면이탈)은 본 MLSPIV 시스

템 상에서 유효하지 않은 것으로 파악되었다. 후처리관련 오차요소(속도필터링, 최소상관계수)는 측정시의 여건 및 PIV 프로세싱 알고리즘과는 직접적으로 관련이 없는 것으로 이들 두 오차성분 역시 MLSPIV의 구성요소인 LSPIV 프로세싱에 있어 유효하지 않은 것으로 판단된다.

4. MLSPIV 적용시 유속산정 오차분석을 위한 개수로 실험

MLSPIV의 현장적용시 유속산정 오차발생 요인으로 파악된 인자 중에서 개수로 실험실에서 파악이 가능한 인자 - a) 샘플링 시간(= 샘플 이미지의 수), b) 이미지 해상도, c) 추적자(tracer)의 물리적 특성, d) 바람 - 에 대해서 그 영향의 정도를 파악하고자 하였다.

4.1 실험장치의 구성

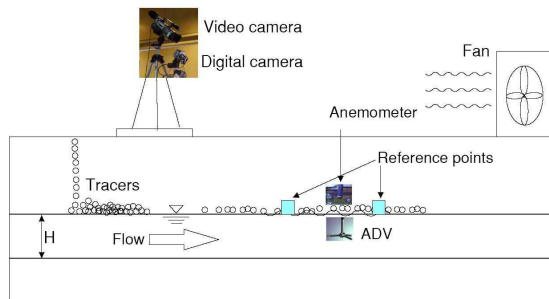
MLSPIV의 적용시 사용되는 이미지의 수, 이미지의 해상도 및 추적자와 바람으로 인한 유속산정시 오차의 발생정도를 파악하기 위하여 미국 Iowa 대학교 IIHR의 폭 60 cm 개수로 실험장치를 이용하였다. 이미지의 촬영은 개수로 위에 설치된 비디오카메라(Sony DCR-TRV320)와 디지털카메라(Olympus Ultra Zoom 730)로 촬영되었으며, 카메라가 개수로의 상류측에서 하류측의 시험단면을 촬영하도록 설치하였다(Fig. 4). 비디오카메라는 초당 30 frame의 이미지를 얻을 수 있어 1분간 측정을 하게되면 1800 frame을 얻을 수 있다. 따라서 측정시간을 길게하면 할수록 많은 이미지를 얻을 수 있으나 그로 인해서 이미지 프로세싱의 시간 또한 증가함에 따라 신속하게 유속을 계산할 수가 없다. 이에 측정시간(혹은 이미지 수)와 유속측정 오차 사이의 관계를 파악하고자 하였다. 개수로의 폭수심비(aspect ratio, b/h)를 1.905로 하였고 수로의 평균유속을 0.224 m/s로 유지한 상태에서 초당 30 frame으로 측정된 이미지로부터 0.2초간마다 한 frame의 이미지를 추출하

여 전체 455 frame의 이미지 셋을 준비하였다. 이로부터 455 이미지 프레임에 이용하여 평균유속장을 계산하였다.

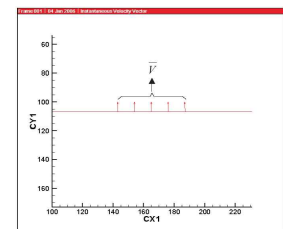
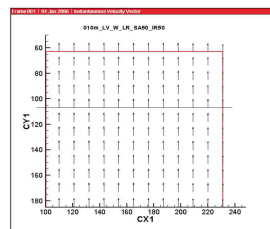
이미지 해상도에 따른 유속측정 오차의 파악을 위해 여러가지 해상도로 이미지 촬영이 가능한 디지털카메라를 이용하여 640*480, 1280*960, 2048*1536 pixel의 저, 중, 고해상도 이미지를 이용하였다. 비디오카메라의 경우에는 촬영시간을 길게 하면 이용가능한 이미지 개수를 늘릴 수 있지만 동영상으로부터 정지화상을 추출하면 640*480 pixel의 저해상도 이미지만을 얻을 수 있기 때문에 디지털 카메라를 이용하였다. 촬영당시의 흐름 조건으로 폭수심비는 1.905이며, 수로의 평균유속은 0.165 m/s 이다.

개수로 실험장치의 물표면에 바람의 세기가 미치는 영향을 검토하기 위해서, 여러 가지의 풍속을 발생시킬 수 있는 팬을 LSPIV 프로세싱 영역의 중심으로부터 2 m 하류측에 설치하였다(Fig. 4). 표면유속 측정시 추적자의 종류에 따른 바람의 영향의 정도를 파악하기 위하여 물리적 특성이 다른 세 가지의 추적자 즉, 백색 폴리스티렌(white polystyrene, W), 검정색 폴리프로필렌(black polypropylene, B) 및 에코폼(Ecofoam, E)을 추적자투하에 이용하였다(Fig. 3, Table 1). 각각의 크기는 백색 폴리스티렌이 2~3 mm, 검정색 폴리프로필렌이 3~5 mm, 그리고 에코폼이 30~50 mm이다. 개수로에서 두 가지 수위- 0.158 m (폭수심비=3.846)과 0.320 m (폭수심비=1.905) - 에서 펌프의 효율을 조정하여 각각 세 가지의 평균유속을 발생시켰다. 두 가지 수위에 대해 펌프의 효율을 동일하게 하여도 유속이 약간씩 차이가 나서 결국에는 여섯 가지의 다른 평균유속을 발생시킨 결과가 되었다.

여러 가지 추적자를 사용시 풍속에 따른 속도측정의 오차를 조사하기 위하여 각 개수로의 흐름조건에 대하여 세 가지 빠르기의 풍속을 상업용 팬으로 발생시키면서 세 가지의 추적자를 적용시키었다. 회전수 조정가능



(a) Schematic Diagram of Setup



(b) Surface Velocity Field (c) Average Surface Velocity

Fig. 3. Experimental Setup and Procedure of Calculation of Average Surface Velocity

Table 1. Physical Characteristics of Tracers

	Polystyrene	Polypropylene	Ecofoam
Color	white	black	white
Shape	sphere	sphere	bar
Length or Diameter (mm)	2~3	3~5	30~50
Width (mm)	-	-	10~15
Height (mm)	-	-	10~15
Density (kg/m ³) (Specific gravity, SG)	12.5 (0.0125)	920 (0.92)	6.5 (0.0065)

한 팬으로 세 가지 회전수로 바람을 발생시킨 후 상류단의 두 개의 표식으로부터 0.3556 m 하류측으로 떨어진 지점의 개수로 중심의 물표면에 최대한 근접해서 풍향 풍속계를 이용하여 풍속을 측정하였다. 팬의 회전수가 같은 경우에도 두 개의 수위에서 팬으로부터 물표면까지의 거리가 다름에 따라 풍속이 다르게 나타났다.

두 가지 카메라를 이용하여 촬영시 60 cm * 60 cm 면적의 LSPIV 프로세싱 영역 중심은 카메라로부터 1 m 하류측에 위치되었다. 네 개의 기준점으로 둘러싸인 영역(Fig. 3)에 대해서 이미지 프로세싱을 실시하였고, 전체 유속벡터중에서 상류측 두개의 기준점으로부터 0.3556 m 하류 횡단면상의 표면유속을 추출한 후 이 중에서 No. 5부터 No. 9까지의 다섯 개의 유속벡터를 평균함으로써 개수로의 벽면의 아크릴판상에 반사되는 추적자의 이미지로부터 유발되는 오차를 배제하고자 하였다.

4.2 개수로 실험결과

4.2.1 이미지 개수에 따른 유속측정 오차

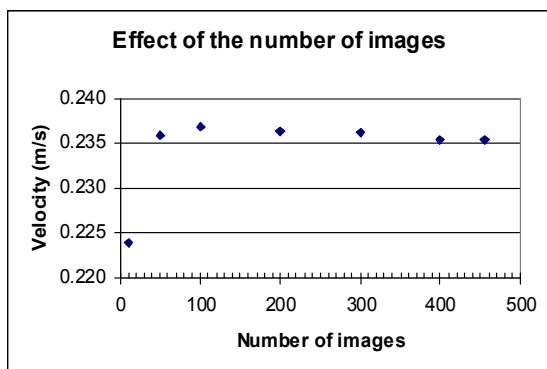
60 cm 폭의 개수로 폭수심비를 1.905로 하였고 수로

의 평균유속을 0.224 m/s로 유지한 상태에서 0.2초 간격의 455 frame의 이미지를 이용하여 표면유속을 계산한 후 이를 기준값으로 놓고, 이미지의 갯수를 10, 50, 100, 200, 300, 400으로 늘렸을 때의 표면유속의 오차를 계산하였다.

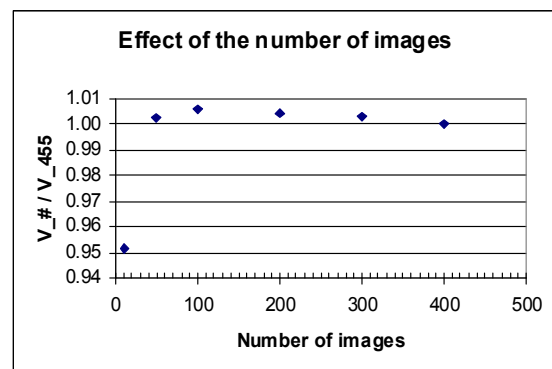
이미지의 개수가 10 frame일 경우 계산된 표면유속은 455 frame의 이미지를 이용하여 계산한 표면유속에 비하여 4.86 % 작게 계산 되었다. 하지만 그 외의 경우 즉 이미지의 개수가 50이상이 경우에는 기준 표면유속에 비하여 0.6 % 이내의 오차를 보였으며 이미지의 개수가 증가할수록 오차는 저하됨을 보이고 있다(Fig. 4).

4.2.2 이미지 해상도에 따른 유속측정 오차

이미지의 해상도가 유속측정시에 미치는 오차를 조사하기 위해서 디지털카메라로 해상도별 -640*480, 1280*960, 2048*1536 pixel- 로 촬영한 11개의 이미지를 이용하였다. 11개의 이미지를 택한 이유는 촬영을 하였던 디지털 카메라가 고해상도 (2048*1536 pixel) 이미지의 경우에는 11개의 이미지가 연속촬영으로 촬영 가능

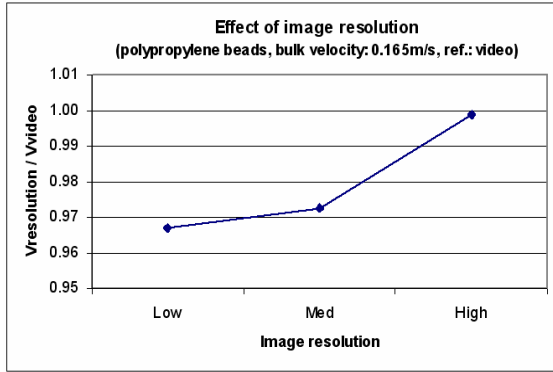


(a) Surface Velocity

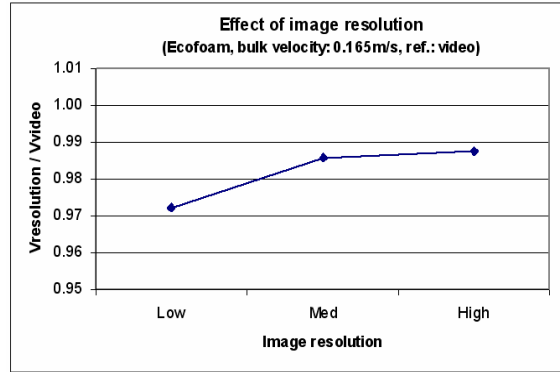


(b) Normalized Surface Velocity

Fig. 4. Effect of the Number of Images (Aspect Ratio=1.905, Bulk Velocity=0.224 m/s)



(a) Normalized Velocity: Polypropylene Beads



(b) Normalized Velocity: Ecofoam

Fig. 5. Effect of Image Resolution (Aspect Ratio=1.905, Bulk Velocity=0.165 m/s)

한 최대의 이미지가었기 때문이다. 따라서 중해상도 및 저해상도의 경우는 연속 촬영가능한 이미지의 숫자가 약 30 매 및 약 140 매이나, 동일한 이미지의 숫자를 이용하기 위해서 11개의 이미지를 이용하여 표면유속장을 계산하고 이로부터 개수로 중앙부의 평균표면유속을 계산하였다. 이때 측정된 속도의 비교를 위한 기준유속으로는 비디오카메라로촬영하여 추출한 523개의 저해상도의 이미지를 이용하여 계산한 유속을 이용하였다. 이미지 해상도에 따른 유속측정오차를 분석하기 위한 시험 당시의 흐름조건은 폭수심비는 1.905로 이었고 수로의 평균유속을 0.165 m/s 이었다. 추적자로는 검정색 폴리프로필렌과 에코폼을 이용하였다. 검정색 폴리프로필렌의 경우, 디지털카메라의 이미지의 해상도가 저해상도→중해상도→고해상도로 높아짐에 따라 기준값에 대한 오차가 -3.288 → -2.725 → -0.099%로 작아지고 있었다. 에코폼을 이용하였을 경우 -2.802 → -1.441 → -1.237%로 역시 해상도가 높아짐에 따라 기준값에 대한 오차는 줄어들고 있음을 파악하였다(Fig. 5).

4.2.3 추적자와 바람으로 인한 유속측정시 오차

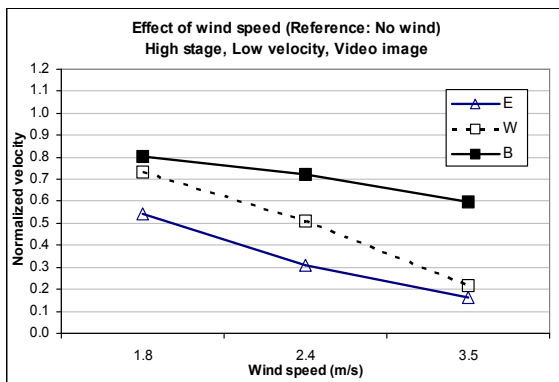
추적자와 바람으로 인해서 표면유속에 미치는 영향을 분석하기 위하여 6가지의 평균유속과 3가지의 풍속 조건하에서 세 가지 추적자를 이용하여 실험하였다. 여섯가지 흐름조건에 대해, 바람이 없는 조건에서 백색 폴리스티렌과 에코폼을 이용하여 측정된 표면유속이 검정색 폴리프로필렌을 이용한 경우보다 $\pm 6\%$ 이내의 차이를 나타냈다(Table 2). 바람의 세기를 증가시키에 따라 이들 두 추적자를 이용하여 측정된 표면유속과 검정색 폴리프로필렌을 이용하여 측정된 표면유속 사이의 차이가 커졌다. 수로의 평균유속이 0.165 m/s인 경우, 에코폼을 이용한 경우의 표면유속이 검정색 폴리프로필

렌을 이용한 경우와 비교시 -2.7 ~ -73.3%로 나타나고 있다. 동일한 흐름조건에서 백색 폴리스티렌을 이용한 경우의 표면유속이 검정색 폴리프로필렌을 이용한 경우와 비교시 +0.4% ~ -63.6%로 나타나고 있다. 두 가지의 추적자의 경우 바람의 세기가 빨라짐에 따라 그 차이가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이러한 이유는 추적자의 물질적 특성에서 기인한다. 즉 검정색 폴리프로필렌의 경우 표면적의 60% 이상이 물에 잠겨있어 바람의 영향을 적게 받는 반면, 백색 폴리스티렌과 에코폼은 무게가 가벼워서 검정색 폴리프로필렌보다 훨씬 많은 부분이 공기 중에 노출되어 있어 바람의 영향을 받기 쉽다. 둘 중에서도 에코폼이 물위에 떠있는 부분의 비율이 크고 표면적이 백색 폴리스티렌보다 상대적으로 커서 바람의 영향을 더 많이 받는다.

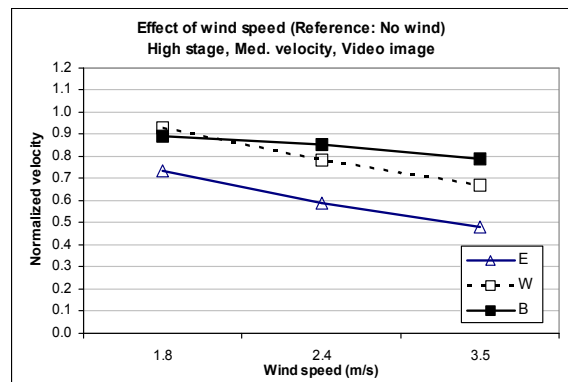
각 추적자에 대한 바람 세기의 영향을 세밀히 조사하기 위해서 각 추적자의 적용시 바람이 없는 상황에서 측정된 표면유속을 기준으로 놓고 이를 이용하여 바람의 세기가 다른 세 가지 실험조건에서 측정된 표면유속을 무차원화하였다. 수로의 평균유속이 0.165 m/s인 조건에서, 바람의 세기를 증가함에 따라 무차원 표면유속이 에코폼의 경우 0.54→0.31→0.16으로 감소하였고, 백색 폴리스티렌의 경우는 0.73→0.51→0.21로 감소하였으며, 검정색 폴리프로필렌의 경우에는 0.81→0.72→0.60으로 그 감소하는 정도가 완화된 양상을 보였다. 수로의 평균유속을 0.558 m/s로 증가시킨 경우, 바람의 세기를 증가함에 따라 무차원 표면유속이 에코폼의 경우 0.89→0.81→0.76으로 감소하였고, 백색 폴리스티렌의 경우는 0.96→0.93→0.90로 감소하였으며, 검정색 폴리프로필렌의 경우에는 0.95→0.93→0.90으로 감소하였다(Fig. 6).

Table 2. Velocity Calculation Results Under Six Flow Conditions

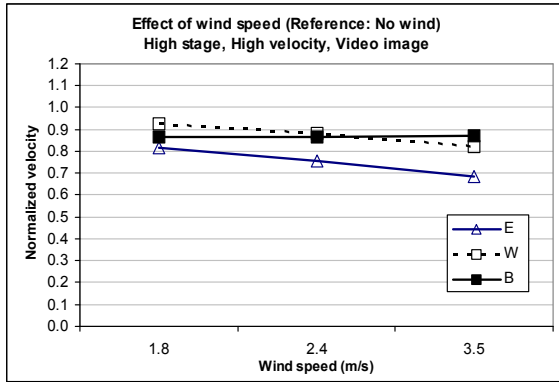
Aspect Ratio	Bulk Velocity (m/s)	Wind(m/s)	Tracers (Video)			Error from Black (%)		Error from Wind 0.0 m/s Video, B
			E	W	B	E	W	
1.905	0.165	0.0	0.1763	0.1820	0.1812	-2.7	0.4	-19.5 -27.9 -40.3
		1.8	0.0956	0.1332	0.1460	-34.5	-8.8	
		2.4	0.0547	0.0930	0.1306	-58.1	-28.8	
		3.5	0.0289	0.0394	0.1082	-73.3	-63.6	
	0.224	0.0	0.2326	0.2351	0.2354	-1.2	-0.1	-10.7 -14.5 -21.0
		1.8	0.1711	0.2190	0.2105	-18.7	4.1	
		2.4	0.1366	0.1843	0.2016	-32.3	-8.6	
		3.5	0.1121	0.1582	0.1862	-39.8	-15.1	
	0.338	0.0	0.3378	0.3374	0.3583	-5.7	-5.8	-13.7 -13.2 -13.0
		1.8	0.2764	0.3125	0.3093	-10.6	1.0	
		2.4	0.2550	0.2981	0.3110	-18.0	-4.2	
		3.5	0.2322	0.2774	0.3117	-25.5	-11.0	
3.846	0.281	0.0	0.3189	0.3194	0.3214	-0.8	-0.6	-8.0 -14.2 -15.3
		1.9	0.2444	0.2893	0.2956	-17.3	-2.1	
		2.2	0.2131	0.2579	0.2756	-22.7	-6.4	
		3.1	0.1759	0.2434	0.2721	-35.4	-10.5	
	0.388	0.0	0.4315	0.4307	0.4430	-2.6	-2.8	-4.9 -8.5 -11.4
		1.9	0.3459	0.3942	0.4211	-17.9	-6.4	
		2.2	0.3227	0.3810	0.4052	-20.4	-6.0	
		3.1	0.2826	0.3531	0.3924	-28.0	-10.0	
	0.558	0.0	0.6167	0.6031	0.5978	3.2	0.9	-4.6 -6.6 -9.5
		1.9	0.5510	0.5784	0.5700	-3.3	1.5	
		2.2	0.5011	0.5603	0.5582	-10.2	0.4	
		3.1	0.4689	0.5399	0.5409	-13.3	-0.2	



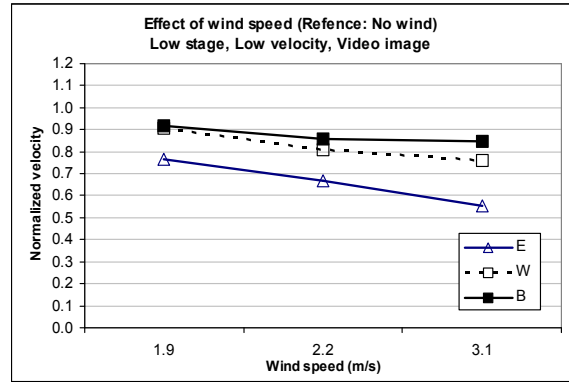
(a) Bulk Velocity: 0.165 m/s



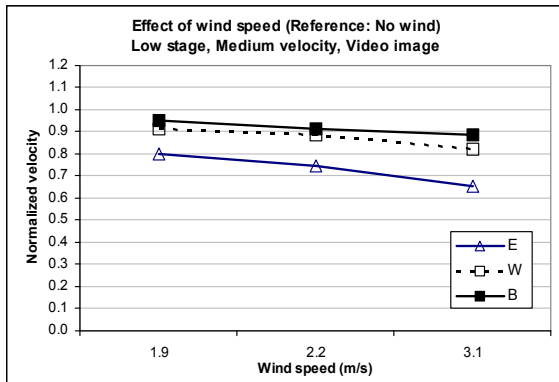
(b) Bulk Velocity: 0.224 m/s



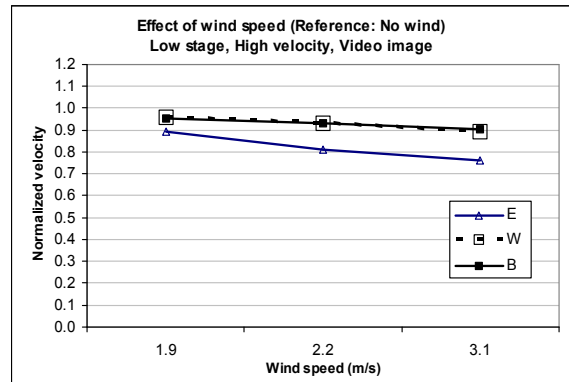
(c) Bulk Velocity: 0.338 m/s



(d) Bulk Velocity: 0.281 m/s



(e) Bulk Velocity: 0.388 m/s



(f) Bulk Velocity: 0.558 m/s

Fig. 6. Surface Velocities due to Wind Speeds for Six Flow Conditions

5. 결론

본 연구에서는 LSPIV의 모바일버전인 미국 Iowa대학교의 IIHR에서 개발한 MLSPIV의 현장 적용시 발생 가능한 오차요인을 적용단계별로 규명하고, 이중에서 개수로 실험을 통하여 그 영향을 파악할 수 있는 오차 성분 즉 샘플링 시간, 이미지 해상도, 추적자 및 바람으로 인한 유속산정시 영향을 파악하였다.

MLSPIV는 LSPIV의 모든 속성을 가지고 있는 것으로서, LSPIV의 적용 6단계 - 추적자 투하, 조명, 촬영, 이미지 변환, 이미지 처리 및 후처리 - 의 과정에서 발생하는 오차성분에 현장에서 적용시 발생하는 오차요인을 포함하여 총 27개의 오차발생 요인이 있다. 27개의 오차성분 중에서 다섯가지 오차성분에 대해서는 기존에 연구가 이루어졌고, 7가지 오차성분은 현재의 MLSPIV 시스템과는 직접적인 관련이 없다. 따라서 15가지 오차 발생 요인에 대한 면밀한 고찰이 필요하다. MLSPIV 기법을 이용해서 하천에서 유속을 측정할 때 이미지 촬영 영상 중요한 인자는 이미지의 수와 이미지 해상도이다. 이미지 수가 많으면 많을수록 더 정확한 표면유속장을 계산할 수 있지만 이렇게 이미지가 많아지면 이미지 프로세싱에 많은 시간이 소요된다. 이에 이미지 개수에

따른 유속측정 오차의 정도를 파악하고자 하였다. 또한 이미지의 수가 같을 경우 이미지의 해상도의 고저로 인한 유속측정 오차도 검토하였다.

이미지의 갯수가 유속계산시 미치는 오차의 영향의 정도를 조사하기 위해서 초당 30 frame을 촬영할 수 있는 비디오카메라를 이용하여 91초 동안 촬영된 이미지로부터 매 5번째의 이미지를 추출하여 455개의 이미지를 준비하였고 이로부터 이미지수를 10, 50, 100, 200, 300, 400의 순서로 증가시키면서 이미지 개수로부터 나타나는 유속계산 오차를 조사한 결과 이미지의 개수가 50매 이상인 경우는 이로 인한 오차가 1% 이하로 감소함을 파악하였다. 촬영된 이미지의 해상도가 유속계산시 미치는 영향을 조사하기 위해 디지털카메라를 적용하여 세 가지 이미지 해상도(640*480, 1280*960, 2048*1536 pixel)로 변화시키면서 유속측정 오차를 분석한 결과 저해상도의 이미지를 이용한 경우, 고해상도 이미지를 이용한 경우와 비교하여 3% 가량의 차이를 나타내었다. 비디오카메라를 이용하여 영상을 촬영할 때는 다수의 저해상도의 정지화상만 얻을 수 있는 단점이 있는 반면, 디지털 카메라는 고해상도의 이미지를 얻을 수 있고 또한 관련분야의 기술이 하루가 다르게 변화하고 있어 고해상도의 다수의 이미지 취득이 가능해지면 이

로부터 유발되는 오차는 줄어들 것으로 전망한다. 또한 60 cm * 60 cm의 개수로에서 0.10 m/s의 유속은 640 * 480 pixel의 이미지에서 가로방향을 흐름방향으로 취한 경우 - 1 pixel은 0.09375 cm를 표시 - 106.7 pixel/sec에 해당한다. 이는 일반하천의 경우, 예를 들어 60 m * 60 m의 현장에서 0.1 m/s의 유속에 대해 동일한 분해능으로 산정을 위해서는 64,000 * 48,000 pixel의 이미지가 필요하므로 현실적으로 불가능하다. 따라서 실내실험에서 이용한 것과 같은 해상도(640 * 480 pixel)의 이미지로 현장에서 LSPIV 분석시 픽셀당 분해능으로 기인한 오차는 감안하여야 한다.

MLSPIV의 적용시 추적자 및 바람으로 인한 유속측정에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 개수로 실험장치를 이용하여 두 가지의 수위조건에서 평균유속을 변경시키고 바람의 세기는 팬을 이용하여 조정하면서 세 가지의 추적자 - 백색 폴리스티렌, 검정색 폴리프로필렌, 에코폼 - 을 이용하여 유속 측정을 실시하였다. 바람이 없는 흐름조건에서는 세 가지 추적자 모두 거의 일치하는 유속을 보이고 있다. 하지만 바람의 영향을 흐름에 인위적으로 발생시켰을 때 평균유속이 0.165 m/s인 경우, 바람의 세기를 증가시키면서 측정된 표면유속을 바람이 없는 경우 측정된 표면유속으로 무차원화한 유속이 백색 폴리스티렌과 에코폼이 검정색 폴리프로필렌보다 현저하게 감소되었다. 흐름의 평균유속이 0.165 m/s의 저유속인 경우 바람의 세기에 의한 영향이 물표면에 미치는 영향이 상대적으로 커지고 있었고, 더불어 추적자의 비중이 큰 것, 즉 검정색 폴리프로필렌은 물속에 잠기는 비율이 60% 정도로 다른 두 재료에 비해서 흐름과 일체되어 흘러 바람의 영향을 상대적으로 덜 받는다. 수로의 유속을 증가시킨 경우, 바람의 영향이 저유속인 경우보다 줄어들어 무차원유속의 감소되는 정도가 완화되었고, 그 경우에도 물위로 노출된 표면적이 큰 에코폼(비중이 상대적으로 작음)이 바람의 영향을 많이 받아 바람의 세기가 증가함에 따라 무차원유속이 훨씬 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과로 바람의 영향을 받는 측정 조건하에서는 가급적 비중이 큰 재료 즉, 비중 0.5 이상 1.0 이하의 재료가 표면유속 측정시의 오차를 줄일 수 있다는 사실을 알 수 있다.

참 고 문 헌

Adrian, R.J. (1991). "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics." *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, pp. 261-304.

Aya, S., Fujita, I. and Yagy, M. (1995). "Field-observation of flood in a river by video image

analysis." *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 39, pp. 447-452.

Forliti, D.J., Strykowski, P.J., and Debatin, K. (2000). "Bias and precision errors of digital particle image velocimetry." *Experiments in Fluids*, 28, 436-447.

Fujita, I., and Kaizu, T. (1995). "Correction method of erroneous vectors in PIV." *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2, pp. 173-185.

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.

Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998). "Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic applications." *Journal of Hydraulic Research*, 36, pp. 397-414.

Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W.F., Bradley, A., Muste, M., and Wilson, M. (2005). *Real-time estimation of discharge of the Iowa river using image-based method - user's manual*. IIHR-Hydroscience and Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA.

Joseph, S. (2003). *Uncertainty Analysis of a Particle Tracking Algorithm: Developed for Super-resolution Particle Image Velocimetry*, Master of Science Thesis, The University of Saskatchewan, Canada.

Li, Z. (2002). *Large scale image velocimetry without seeding*, Master thesis, The University of Iowa, Iowa City, IA, USA.

Lourenco, A., and Krothapalli, A. (1995). "On the accuracy of velocity and vorticity measurements with PIV." *Experiments in Fluids*, 18, pp. 421-428.

Meselhe, E.A., Peeva, T., and Muste, M. (2004). "Large scale particle image velocimetry for low velocity and shallow water flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 9, pp. 937 - 940.

Muste, M., Xiong, Z., Bradley, A., and Kruger, A. (2000). "Large-scale particle image velocimetry - a reliable tool for physical modeling." *ASCE 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*, Minneapolis, Minnesota.

Raffel, M., Willert, C., and Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry: A practical guide*,

Springer, New York.

Trivedi, N. (2004). *PTU user's manual*, Internal Report, IIHR-Hydroscience and Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA.

TSI Incorporated. (1999). *Particle image velocimetry (PIV): operation manual*, Shoreview, Minn., <<http://www.tsi.com>>.

Xiong, Z. (2000). *Practical aspect of large-scale image velocimetry Implementation for analysis of free surface flow*, Master thesis, The University of Iowa, Iowa City, IA.

논문번호: 09-116	접수: 2009.10.13
수정일자: 2009.11.20/12.24	심사완료: 2009.12.24