

LSPIV 적용시 Tracers에 따른 바람의 영향

Effects of Wind Depending on Tracers in an Application of LSPIV

김영성*, 양재린**

Youngsung Kim, Jaerheen Yang

요 지

Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)는 Particle Image Velocimetry (PIV)를 자연하천이나 실험실에서 넓은 영역($4\text{m}^2 \sim 45,000\text{m}^2$)에 적용할 수 있도록 확장시킨 것으로 지난 10여년 이상 세계적으로 널리 이에 대한 연구가 진행되고 있다. PIV는 seeding, illumination, recording 그리고 image processing으로 구성된다. LSPIV(Large Scale PIV)는 PIV의 기본원리를 근거로 하여 기존의 PIV에 비하여 실험실 내에서의 수리모형실험이나 일반 하천에서의 유속측정과 같은 큰 규모의 흐름해석을 할 수 있도록 seeding, illumination에 대한 조정이 필요하고, 촬영된 image에 대한 왜곡을 없애는 작업이 필요하다. LSPIV는 PIV의 네가지 단계를 포함하여 seeding, illumination, recording, image transformation, image processing 및 post-processing의 여섯 단계로 구성되어진다 (Li, 2002).

LSPIV를 일반 하천에 적용시, 자연발생적인 tracers - 난류로 인한 표면 교란, 부유물, 수공구조물로 인해 발생하는 자연 발생되는 거품 - 가 풍부해서 seeding이 불필요한 경우를 제외하고는 정확한 유속장의 해석을 위하여 인공적인 seeding를 필요로 한다. 일반적으로 Seeding 재료로 많이 이용되는 것은 wood mulch, Ecofoam, grain-straw 등이다. 하천에서 자연발생적 혹은 인위적 seeding을 하였을 때 이를 tracers의 물리적인 속성으로 바람에 쉽게 영향을 받고 이로 인하여 실제의 물표면유속을 대표하지 못하는 경우가 있다. 이에 실험실의 개수로에서 여러 가지 이용 가능한 tracers에 대하여 바람에 의한 오차 발생의 정도를 조사하였다. 실험에 사용된 seeding 재료로는 black polypropylene, Ecofoam, white polystyrene의 세가지를 이용하였다. black polypropylene ($\text{SG}=0.92$)과 white polystyrene ($\text{SG}=0.0125$)은 폭 1 m 이내의 개수로 실험장치에서 유속장의 해석에 많이 이용되고 Ecofoam ($\text{SG}=0.0065$)은 수리 모형실험에서 많이 이용된다. seeding 물질에 따른 바람의 영향을 분석하기 위해서 폭 60cm의 개수로에서 seeding 물질을 변경하면서 펌프의 조작에 의해 3가지 단면평균유속을 발생시키고, 각 평균유속조건에 대해 4가지의 바람세기 - 바람이 없을 때와 팬의 바람세기를 1단, 2단, 3단으로 조정 - 를 발생시켰으며, 개수로위에서 촬영한 이미지의 상류측 기준점으로부터 0.3556m 하류 지점을 횡단하는 단면의 표면유속을 측정하여 비교하였고, 그 단면의 중앙에서 물표면 바로 위 지점의 풍속을 측정하였다. 각 Seeding 물질에 대해 팬을 켜지 않았을 때, 즉 바람의 영향이 없을 때 측정한 표면유속을 바람의 세기가 변한 경우의 기준 표면유속으로 이용하였다.

본 연구의 결과 비중이 0.01 내외인 Ecofoam과 white polystyrene에 비해 비중이 0.92인 black polypropylene은 대부분이 물속에 잠겨 있어 흐름과 거의 일치하여 움직임을 알 수 있었다. 또한 흐름의 평균유속이 0.165 m/s 의 저유속에서 바람이 tracers에 미치는 영향이 평균유속 0.558 m/s 인 경우보다 커서, 바람의 세기의 증가에 따라 표면유속 측정값이 급속히 감소되었다. 흐름의 평균유속이 큰 경우에는 바람이 tracer에 미치는 영향이 현격히 줄어듬을 보이고 있다. 결론적으로 유속이 증가함에 따라 바람의 영향은 감소하나, 바람의 영향을 최소화시키기 위해서는 가급적 비중이 큰 물질($0.5 < \text{SG} < 1.0$)을 이용하는 것이 바람직하다.

핵심용어: 평균유속, 표면유속, 바람, 비중, seeding, tracers, LSPIV, PIV

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

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

1. 서 론

최근 30여년간 흐름의 유속측정을 위한 이미지 해석 기술이 개발되어 왔다. 이미지 해석 기술의 기본이론은 연속 촬영된 두 장의 영상에서 물에 있는 페턴의 이동에 대한 통계적 추정이다. PIV (Particle Image Velocimetry)로 통칭되는 이미지 해석에 의한 유속측정기술은 다양한 실험실 규모 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 등, 1998). 이러한 전통적인 PIV 기술에 기초하며 일반 하천 및 대규모 수리모형 실험장 등 규모가 큰 흐름(예: 하천,)에 적용하기 위해서 새로이 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 입자뿌리기(seeding)의 경우 PIV 적용시에는 실내조건에서 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. 이에 본 연구에서는 LSPIV의 적용시, 바람의 세기와 seeding 재료가 표면유속 측정에 미치는 영향을 조사하였다.

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 흘수 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, 디지타이징 및 화질향상을 하는 전처리(pre-processing), 상관계수의 산정에 의한 유속 벡터의 결정 및 여러 벡터를 제거하고 유속장을 그래프화하는 후처리(post-processing) 과정으로 구성된다.

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 와 Komura (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 네가지 단계를 포함하여 LSPIV의 각 단계를 구분하면, seeding, illumination, recording, image transformation, image processing 및 post-processing의 여섯 단계로 나뉘어진다(Li, 2002). LSPIV가 일반하천에서 많이 적용됨을 고려할 때 바람의 영향 아래에서 tracer의 종류에 따른 표면유속 측정오차를 검토하여 보다 정확한 표면유속의 측정을 할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

3. 바람의 영향을 위한 개수로 실험

LSPIV의 적용시 사용된 seeding 재료의 성질과 바람의 세기가 표면유속측정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 미국 Iowa 대학교 IIHR Hydro- Science & Engineering (이하 IIHR)의 2 ft 개수로 실험장치를 이용하였다. 이미지는 개수로 위에 설치된 비디오카메라로 촬영되었으며, 카메라가 개수로의 상류측의 시험단면을 촬영하도록 설치하였다. 2ft * 2ft의 LSPIV 프로세싱 영역의 중심은 카메라로부터 1 m 하류측에 위치되었다. 개수로 물표면유속에 의 바람의 세기가 미치는 영향을 검토하기 위해서, 여러 가지의 풍속을 발생할 수 있는 팬을 LSPIV 프로세싱 영역의 중심으로부터 2m 하류측에 설치하였다(그림 1). 표면유속

측정시 Tracer의 종류에 따른 바람의 영향의 정도를 파악하기 위하여 세 가지의 tracer 즉, white polystyrene, black polypropylene 및 Ecofoam을 seeding에 이용하였다(그림 2, 표 1). 각각의 크기는 white polystyrene이 2~3 mm, black polypropylene이 3~5mm, 그리고 Ecofoam이 30~50mm이다. 개수로에서 두 가지 수위- 0.158m (aspect ratio=3.846)과 0.320m (aspect ratio=1.905) -에서 펌프의 효율을 조정하여 각각 세 가지의 평균속도를 발생시키었다. 두 가지 수위에 대해 펌프의 효율을 동일하게 하여도 유속이 약간씩 차이가 나서 결국에는 여섯 가지의 다른 평균유속을 발생시킨 결과가 되었다.

여러 가지 tracers를 사용시 풍속에 따른 속도측정의 오차를 조사하기 위하여 각 개수로의 흐름조건에 대하여 세 가지 빠르기의 풍속을 상업용 팬으로 발생시키면서 세 가지의 tracer를 적용시키었다. 팬으로 조정 가능한 세 가지 rpm에 대하여 상류단의 두 개의 표식으로부터 0.3556m 하류측으로 떨어진 지점의 개수로 중심의 물표면에 최대한 근접해서 풍향풍속계를 이용하여 풍속을 측정하였다. 같은 rpm인 경우에도 두 가지 다른 개수로 수위에서 팬으로부터 물표면까지의 거리가 다름에 따라 풍속이 다르게 나타났다.

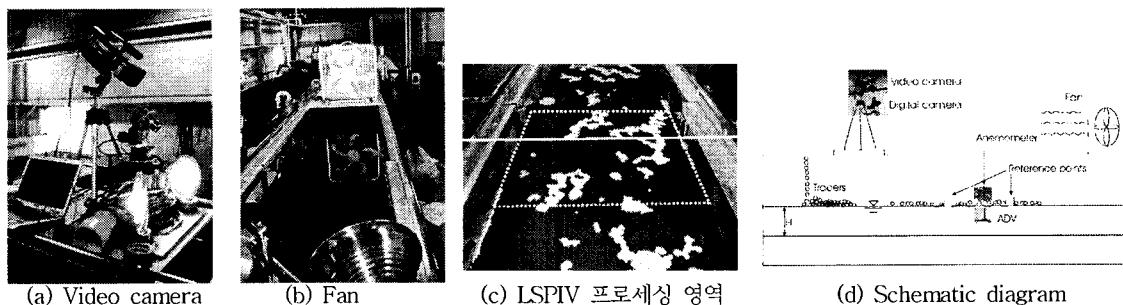


그림 1. 개수로 실험 장치 설정

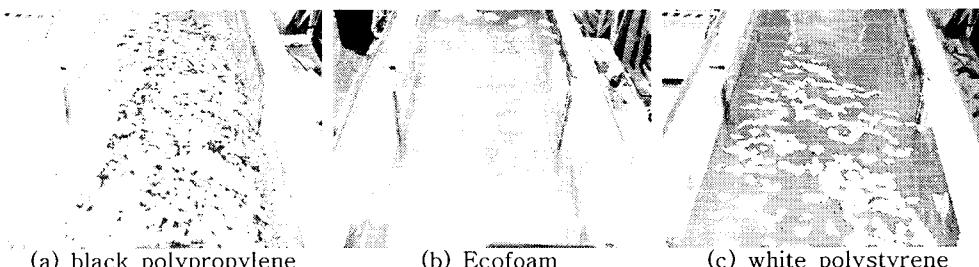


그림 2. 여러 가지 tracers

표 1. 실험에 사용된 tracers의 특징

	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)

4. 실험 결과

Tracers와 바람의 세기가 표면유속에 미치는 영향을 분석하기 위하여 6가지의 평균유속과 3가지의 풍속 조건하에서 세 가지 tracers를 이용하여 실험하였다. 여섯가지 흐름조건에 대해, 바람이 없는 조건에서 white polystyrene beads과 Ecofoam을 이용하여 측정한 표면유속이 black polypropylene을 이용한 경우보다 $\pm 6\%$ 이내의 차이를 나타냈다(표 2). 바람의 세기를 증가시킴에 따라 이들 두 tracer를 이용하여 측정한 표면유속과 black polypropylene을 이용하여 측정한 표면유속 사이의 차이가 커졌다. 수로의 평균유속이 0.165 m/s인 경우, Ecofoam을 이용한 경우의 표면유속이 black polypropylene을 이용한 경우와 비교시 $-2.7 \sim -73.3\%$ 로 나타나고 있다. 동일한 흐름조건에서 white polystyrene을 이용한 경우의 표면유속이 black polypropylene을 이용한 경우와 비교시 $+0.4\% \sim -63.6\%$ 로 나타나고 있다. 두 가지의 tracer의 경우 바람의 세기가 빨라짐에 따라 그 차이가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이러한 이유는 tracer의 물질적 특성에서 기인한다. 즉 black polypropylene의 경우 표면적의 60% 이상이 물에 잠겨있어 바람의 영향을 적게 받는 반면, white polystyrene과 Ecofoam은 무게가 가벼워서 black polypropylene보다 훨씬 많은 부분이 공기 중에 노출되어 있어 바람의 영향을 받기 쉽다. 둘 중에서도 Ecofoam이 물위에 떠있는 부분의 비율이 크고 표면적이 white polystyrene보다 상대적으로 커서 바람의 영향을 더 많이 받는다.

표 2. 여러가지 평균유속하에서의 바람의 세기에 따른 표면유속 측정결과

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

*B: black polypropylene, E: Ecofoam, W: white polystyrene; Aspect ratio=width/depth

각 tracers에 대한 바람 세기의 영향을 세밀히 조사하기 위해서 각 tracer의 적용시 바람이 없는 상황에서 측정한 표면유속을 기준으로 놓고 이를 이용하여 바람의 세기가 다른 세 가지 실험조건에서 측정한 표면유속을 무차원화하였다. 수로의 평균유속이 0.165m/s인 조건에서, 바람의 세기를 증가함에 따라 무차원표면유속이 Ecofoam의 경우 $0.54 \rightarrow 0.31 \rightarrow 0.16$ 으로 감소하였고, white polystyrene의 경우는 $0.73 \rightarrow 0.51 \rightarrow 0.21$ 로 감소하였으며, black polypropylene의 경우에는 $0.81 \rightarrow 0.72 \rightarrow 0.60$ 으로 그 감소하는 정도가 완화된 양상을 보였다.

수로의 평균유속을 0.558m/s로 증가시킨 경우, 바람의 세기를 증가함에 따라 무차원표면유속이 Ecofoam의 경우 $0.89 \rightarrow 0.81 \rightarrow 0.76$ 으로 감소하였고, white polystyrene의 경우는 $0.96 \rightarrow 0.93 \rightarrow 0.90$ 로 감소하였으며, black polypropylene의 경우에는 $0.95 \rightarrow 0.93 \rightarrow 0.90$ 으로 감소하였다 (그림 3).

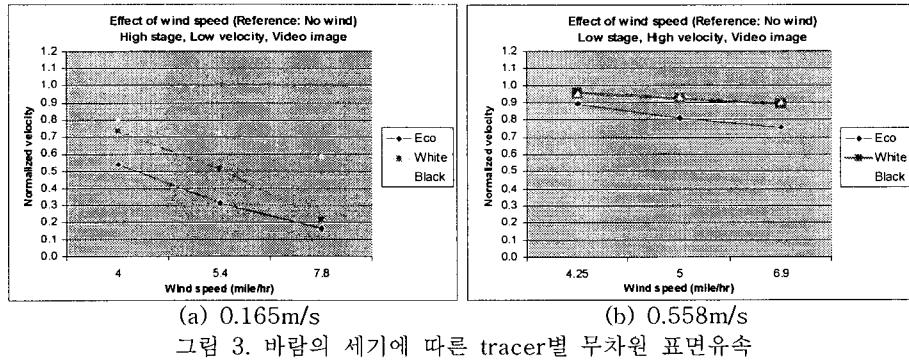


그림 3. 바람의 세기에 따른 tracer별 무차원 표면유속

5. 결 론

LSPIV의 적용시 바람의 세기에 seeding 재료가 유속측정에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 실험실의 개수로에서 두 가지의 수위조건에서 평균유속을 변경시키고 바람의 세기는 팬을 이용하여 조정하면서 세 가지의 seeding 재료- white polystyrene, Ecofoam, black polypropylene -을 이용하였다. 바람의 영향이 없는 흐름조건에서는 세 가지 tracers 모두 거의 일치하는 유속을 보이고 있다. 하지만 바람의 영향을 흐름에 인위적으로 발생시켰을 때 평균유속이 0.165 m/s인 경우, 바람의 세기를 증가시키면서 측정한 표면유속을 바람이 없는 경우 측정한 표면유속으로 무차원화한 유속이 white polystyrene과 Ecofoam이 black polypropylene보다 현저하게 감소되었다. 흐름의 평균유속이 0.165 m/s 정도의 저유속인 경우 바람의 세기에 의한 영향이 물표면에 미치는 영향이 상대적으로 커지고 있었고, 더불어 seeding 재료의 비중이 큰 재료, 즉 black polypropylene은 물속에 잠기는 비율이 60% 정도로 다른 두 재료에 비해서 흐름과 일체되어 흐르는 것을 알 수 있다. 평균유속을 증가시킨 경우, 바람의 영향이 저유속인 경우보다 줄어들어 무차원유속의 감소되는 정도가 완화되었고, 그 경우에도 물위로 노출된 표면적이 큰 Ecofoam (비중이 상대적으로 작은)이 바람의 영향을 많이 받아 바람의 세기가 증가함에 따라 무차원유속이 훨씬 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과로 바람의 영향을 받는 측정 조건에서는 가급적 비중이 큰 재료 예컨대 비중 0.5 이상 1.0이하의 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, 261-304.
- Aya, S., Fujita, I. and Yagyu, M. (1995). "Field-Observation of Flood in a River by Video Image Analysis." *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 39, 447-452.
- Fujita, I., and Komura, S. (1994). "Application of Video Image Analysis for Measurements of River Surface Flows." *Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE*, 38, 733-738.
- Li, Z. (2002). *Large scale image velocimetry without seeding*, Master Thesis, The University of Iowa, Iowa City, IA.
- Raffel, M., Willert, C., and Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry: A practical guide*, Springer, New York.