



Development of a real-time surface image velocimeter using an android smartphone

Yu, Kwonlyu^{a*} · Hwang, Jeong-Geun^a

^aDept. of Civil Engrg., Dong-eui University, 176 Eomwhang-no Busanjin-gu Busan 614-714, Korea

Paper number: 16-021

Received: 22 February 2016; Revised: 18 March 2016 / 21 March 2016; Accepted: 21 March 2016

Abstract

The present study aims to develop a real-time surface image velocimeter (SIV) using an Android smartphone. It can measure river surface velocity by using its built-in sensors and processors. At first the SIV system figures out the location of the site using the GPS of the phone. It also measures the angles (pitch and roll) of the device by using its orientation sensors to determine the coordinate transform from the real world coordinates to image coordinates. The only parameter to be entered is the height of the phone from the water surface. After setting, the camera of the phone takes a series of images. With the help of OpenCV, and open source computer vision library, we split the frames of the video and analyzed the image frames to get the water surface velocity field. The image processing algorithm, similar to the traditional STIV (Spatio-Temporal Image Velocimeter), was based on a correlation analysis of spatio-temporal images. The SIV system can measure instantaneous velocity field (1 second averaged velocity field) once every 11 seconds. Averaging this instantaneous velocity measurement for sufficient amount of time, we can get an average velocity field. A series of tests performed in an experimental flume showed that the measurement system developed was greatly effective and convenient. The measured results by the system showed a maximum error of 13.9 % and average error less than 10 %, when we compared with the measurements by a traditional propeller velocimeter.

Keywords: velocity measurement, surface image velocimeter, image processing, smartphone, Android

스마트폰을 이용한 실시간 표면영상유속계 개발

류권규^{a*} · 황정근^a

^a동의대학교 공과대학 토목공학과

요 지

본 연구는 안드로이드 기반의 스마트폰을 이용한 실시간 표면영상유속계를 개발하는 것이다. 스마트폰이 내장한 카메라, GPS, 방향 센서, CPU를 활용하여, 실시간으로 현장에서 하천의 표면유속을 측정하는 것이다. 먼저, 스마트폰의 GPS를 이용하여 측정 현장의 위치를 파악하고, 경사계(방향 센서)를 활용하여 카메라와 촬영면의 기하적인 관계를 설정한다. 이 때 입력해야 할 유일한 변수는 수면과 카메라의 연직 높이뿐이다. 내장된 카메라로 정해진 시간만큼 동영상을 촬영한다. 촬영된 동영상을 개방 소스의 영상처리 라이브러리인 OpenCV를 이용하여 프레임별로 분할하고, 이를 시간간 영상 분석하여 하천 표면의 2차원 유속장을 추정한다. 시판되는 안드로이드 스마트폰에 적용하여 현장 시험한 결과 약 11초에 1회의 순간유속 측정(1초간의 평균유속 측정)을 할 수 있어, 현장에서 즉각적으로 하천 수표면의 표면유속을 측정할 수 있었다. 또한 이 순간유속을 수십회 반복한 뒤 평균하여 시간평균유속을 구할 수 있었다. 개발된 시스템을 실험 수로에서 시험한 결과, 측정이 매우 효과적이며 편리하였다. 측정된 결과를 프로펠러 유속계에 의한 측정값과 비교한 결과, 최대 오차 13.9%, 평균적으로 10 % 이내의 오차로 실험 수로의 표면 유속을 측정할 수 있었다.

핵심용어: 유속측정, 표면영상유속계, 영상처리, 스마트폰, 안드로이드

*Corresponding Author. Tel: +82-51-890-1631
E-mail: pururumi@deu.ac.kr (K. Yu)

1. 서론

홍수시 유속 측정은 매우 어려운 일이다. 현재 우리나라의 유속 측정은 평수시는 프로펠러 유속계나 ADCP, 홍수시는 봉부자에 의존하고 있다(Korean Water Resources Association, 2009). 이러한 유속 측정 작업은 노력과 경비가 많이 들며, 때로는 위험을 동반한다. 홍수시 유속 측정이 어려운 이유는 다음과 같이 네 가지로 요약할 수 있다(Fujita, 2013). 첫째, 계측 환경이 매우 열악하다. 즉, 홍수류를 계측하는 환경은 바람이나 비 등의 자연 조건에 완전히 노출된 상태에서 수행해야만 한다. 둘째, 계측 작업에 상당한 시간을 요한다. 이것은 대상이 되는 하천의 물리 척도가 수 m부터 수백 m의 규모 등으로 매우 크기 때문이다. 셋째, 홍수류는 대소의 자갈 혼합의 부유사를 대량으로 포함하는 고액혼상류이며, 실험실에서 이용하는 탐침 형태의 계측 장치는 사용할 수 없다. 마지막으로, 홍수류 계측에는 여러 가지 위험을 동반한다는 점이다. 즉, 홍수시의 초기에는 특히 대량의 유목이나 쓰레기 등이 흘러오는 경우가 많기 때문에, 보트 등을 이용하여 계측하는 데는 위험이 동반되는 점을 들 수 있다.

따라서 보다 효율적이고 안전한 측정을 위하여 여러 가지 대안들이 제시되고 있다. 비접촉식 유속 측정법으로 제시된 대안은 크게 전자파(초음파나 극초단파)를 이용하는 전자파 표면유속 측정법(Yamaguchi and Niizato, 1994; K-Water, 1994; K-Water, 2010; Kim et al., 2011)과 표면영상유속 측정법(Kim et al., 2014)을 들 수 있다.

표면영상유속 측정법(surface image velocimetry)은 비접촉식 측정법이므로 안전하며, 한 지점의 유속이 아닌 표면 유속장 전체를 한꺼번에 측정할 수 있다는 장점이 있다(Yu et al., 2014). 또한 영상을 취득하는 장비의 구성에 따라 필름 카메라(Kinoshita, 1964)부터 시작하여, 디지털 카메라(Kim et al., 2011), 상용 캠코더(Aya et al., 1995), CCTV(Fujita et al., 2002), 열영상 카메라(Fujita, 2013; Yu et al., 2015) 등 다양한 시스템(표면영상유속계) 구성이 가능하다.

그러나 종래의 대부분의 표면영상유속계(SIV; Surface Image Velocimeter)는 비디오 카메라(통상 캠코더라 부름)나 디지털 카메라로 하천 표면의 동영상 촬영한 후, 이를 PC로 옮겨서 분석하는 두 단계로 구성되어 있다. 따라서 현장에서 실시간으로 유속을 측정하기가 어렵다. 물론 노트북 PC를 이용하여 즉석에서 유속을 분석할 수 있으나, 유속을 측정하는 현장의 상황이 노트북을 이용하기 어려운 상황이 벌어지기도 한다. 또한 실제 영상 분석을 할 때는 경사지

계 촬영된 영상을 정사영으로 변환하는 좌표 변환과정을 거쳐야 한다(Fujita and Komura, 1994; Roh, 2005). 좌표 변환을 위해서는 보통 4개 이상의 참조점이 필요하며, 이 참조점은 사전 또는 사후에 측량을 해야 하는 번거로움이 있다.

본 연구는 기존 표면영상유속 측정법이 지닌 위의 두 가지 문제인 (1) 두 단계 영상 처리와 (2) 참조점을 활용한 좌표 변환 문제를 해결하고자 한 것이다. 이 문제를 해결하기 위해, 스마트폰을 활용하여 실시간 유속 측정이 가능한 표면영상 유속계 시스템을 구축하고자 한 것이다. 즉, 스마트폰이 지니고 있는 카메라, GPS, 방향 센서, CPU를 활용하여, 실시간으로 현장에서 하천의 표면유속을 측정하는 것이다. 스마트폰을 이용한 표면영상유속계를 구현하려는 연구는 Yu and Cho (2014)와 Tsubaki et al. (2015)의 연구에서 이미 시도되었다. Yu and Cho (2014)의 연구에서는 스마트폰에 표면영상유속 측정 기법을 도입하는 시도였으며, 이 때도 좌표 변환 과정은 여전히 참조점에 의존하였다. Tsubaki et al. (2015)의 연구는 iPhone을 이용하며, 영상분석 방법도 여전히 상호상관분석법을 이용하고 있다.

다만, 스마트폰 표면영상유속계를 개발하는 데는 몇 가지 한계가 있다. 우선, 스마트폰의 중앙연산처리장치(CPU; Central Processing Unit)가 이러한 영상 처리에 특화된 것이 아니기 때문에 실시간이라고 하더라도 진정한 의미의 실시간 구현에는 어려움이 있다는 점이다. 또한 촬영된 수표면 전체의 유속 분포를 분석해 낼 수 있을 정도의 연산능력을 갖고 있지 않다. 따라서 스마트폰 표면영상유속계는 현장에서 준실시간으로 수표면의 유속을 파악하고, 실제 유속은 저장된 영상을 후처리하여 구하는 것이 타당할 것이다.

2. 표면영상유속 측정법

2.1 종래 연구

표면영상유속 측정법(surface image velocimetry)은 Ettema et al. (1997)이 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)라고 이름 붙였듯이, 입자영상유속 측정법(PIV; Particle Image Velocimetry)에서 유래하였다. 따라서, 표면영상유속 측정법을 이해하기 위해서는 PIV의 기본 개념을 이해해야 한다. PIV는 유동장 정보를 눈으로 볼 수 있게 하는 유동의 가시화(flow visualization) 기술과 깊은 관련을 가지고 있다. 유동의 가시화는 유체의 수송 현상(transport phenomena)을 눈으로 볼 수 있도록 하는 것으로, 유체 안에 적절한 입자나 염료기포 등을 투입하여 속도, 압력, 밀도 및

온도와 같이 우리 눈에 직접 보이지 않는 유동 정보의 공간 분포를 어떤 범위의 시간과 공간에서 눈에 보이도록 하는 실험 방법이다. PIV는 이렇게 가시화된 유동장을 영상(사진이나 비디오 등)으로 만들어 속도 분포를 측정하는 방법이다 (Raffel et al., 2007). PIV는 이용하는 레이저광의 조사 방법, 카메라의 구성에 따라 매우 다양한 조합이 가능하다. 현재, 연구 중 또는 실용화되어 있는 PIV로는 양안 PIV (Stereo PIV), 3차원 PIV, 고속 PIV, Micro PIV 등이 있다. 이들 중에서 현재 가장 보편적인 것은 2차원 PIV이다(Raffel et al., 2007).

표면영상유속측정법은 PIV기법을 하천 수표면에 적용하여, 하천의 표면유속을 측정하는 것이다. 표면영상유속 측정법을 직접 하천에 적용한 최초의 사례는 Kinoshita (1964)의 연구라고 볼 수 있다. Kinoshita (1964)는 홍수시 하천 표면을 촬영한 2매의 항공사진을 카메론 효과(입체시)를 이용하여 표면유속을 산정하였다. 그러나 본격적인 표면영상유속 측정은 Fujita and Komura (1994)의 연구로 보는 것이 타당하다. 이들은 캠코더를 이용하여 하천의 표면 영상을 촬영하고, 이를 디지털화하여 PC로 옮겨서 디지털 영상처리를 하는 기본적인 표면영상유속측정법의 기초를 완성하였다. 이 때, 기술어져 촬영된 영상을 4개 이상의 참조점을 이용하여 수직영상으로 변환(8-변수 사영변환)하는 영상 왜곡 보정기술이 이용되었다. Fujita and Komura (1994)의 연구에서 개발된 표면영상유속측정법은 Iowa 수리연구소의 대규모 수리모형실험에 적용되었으며, 이 때 LSPIV라는 이름이 붙여졌다(Ettema et al., 1997). 이 때의 표면영상유속계측법의 기본적인 구조는 캠코더로 수표면 영상을 촬영하고 이를 A/D 변환기판 등을 이용하여 PC로 전송한 뒤 영상 분석을 하는 구조이다. 영상 분석은 PIV에서 통상 이용되는 방법과 같은 상호상관분석법(cross-correlation analysis)을 이용하였다.

표면영상계측법은 이용하는 영상을 촬영하는 장비와 분석하는 방법을 바꾸면서 발전을 거듭하였다. 촬영 장비에 따른 변화를 살펴보면, 다음과 같다. 앞서 언급한 것처럼, Fujita and Komura (1994) 이전의 연구에서는 필름 카메라를 이용하여 2매의 연속된 사진을 촬영하였다. Aya et al (1995)의 연구에서 처음으로 비디오 카메라(캠코더)를 이용하였으며, Kim (2007)의 연구에서는 디지털 카메라를 이용하기도 하였다. 또한 Fujita et al. (2002)의 연구에서는 ITV (Industrial Television)라고 하는 일본의 일급 하천에 설치된 하천 감시용 CCTV를 이용하고자 추진한 바 있다. 국내에서도 Kim et al. (2014)가 재난감시용 하천 CCTV를 이용하여

홍수유출량을 산정한 바 있다. 또한 표면영상유속계측법을 야간에는 적용하기 힘들다는 점을 고려하여 이를 극복하고자 하는 연구로, 적외선 카메라(Etoh et al., 2002; Kim et al., 2010), 열영상 카메라(Fujita, 2013; Fujita et al., 2013; Yu et al., 2015), 스마트폰 (Yu and Cho, 2014; Tsubaki et al., 2015)으로 발전하였다.

또한 영상분석기법은 전통적인 상호상관분석법을 벗어나서, 시공간영상분석법(Fujita and Tsubaki, 2002; Yu et al., 2014, 2015a)과 Ishikawa et al. (2001)에 의한 광류(optical flow) 등으로 발전하였다.

응용면에서는 2011년에 Journal of Hydro-environment Research에서 Dramais et al. (2010), Fujita and Kunita (2011), Muste et al. (2011) 등 10편의 표면영상유속측정법의 사례 연구를 게재한 바 있으며, 이런 면에서 표면영상계측법은 이제 실용화의 단계에 이른 것으로 보인다. 그러나 기술적인 면에서 해결해야 할 문제들은 여전히 많이 남아 있으며, 본 연구는 실시간 유속 측정에 초점을 맞춘 것이다.

2.2 표면영상유속계의 기본 구조

총래의 표면영상유속계의 기본 과정은 영상 촬영, 영상 보정, 영상 분석, 후처리의 네 단계로 이루어진다.

먼저, 영상 촬영을 위한 촬영 장비가 필요하다. 촬영 장비로는 Fujita and Komura (1994)의 연구 이후에는 비디오 카메라가 가장 일반적인 장비이다. 시중에서 판매되는 상용 캠코더의 경우 NTSC 표준의 640×480 화소의 해상도 영상을 초당 30 프레임씩 녹화한다. 2000년대 들어 디지털 캠코더가 등장하면서 기본적으로 720×480 화소를 지원하며, 이 경우 화소가 정사각형이 아닌 직사각형이 되므로 영상 처리에서는 주의가 필요하다. 그 밖의 촬영 장비로는 디지털 카메라 (Kim et al., 2011), CCTV (Fujita et al., 2002; Kim et al., 2014), 적외선 카메라(Etoh et al., 2002; Kim et al., 2011), 열영상 카메라(Fujita, 2013; Fujita et al., 2013; Yu et al., 2015b)를 사용할 수 있다. 그러나 이들은 모두 촬영된 영상을 PC나 노트북 컴퓨터로 전송한 후 영상 분석을 수행하는 2단계 구조로 되어 있다. 이에 반해 Yu and Cho (2014)나 Tsubaki et al. (2015)의 연구에서 이용한 스마트폰은 내장된 카메라를 이용하여 영상을 촬영하고 내장된 CPU로 직접 영상을 분석하는 단단계 구조로 되어 있다.

2.3 영상 보정

일반적인 PIV에서는 레이저 광면과 수직으로 영상을 촬영된 영상을 사용한다. 따라서 영상의 기하왜곡이 없으며,

이에 대한 보정이 필요없다. 반면 표면영상유속측정에서는 일반적으로 제방, 교량, 고층 건물 등에서 하천의 표면 영상을 촬영하므로 수직영상을 얻기 힘들다. 이 경우 영상의 축척이 알기 어렵다. 따라서 Fig. 1과 같이 왜곡 영상을 정사영(수직영상)으로 보정하는 과정을 거쳐야 한다. 이 과정은 일반적으로 사영변환(perspective transform)이라 하여 8 개의 변수를 갖는다.

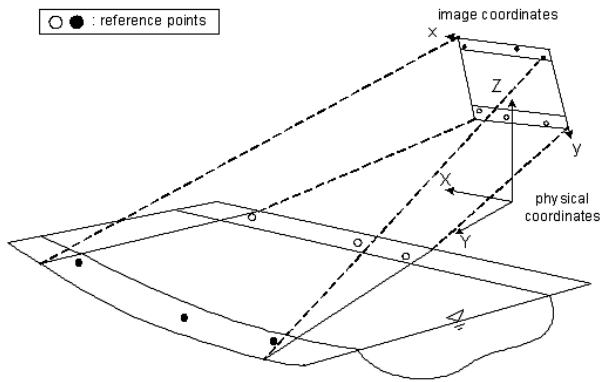


Fig. 1. Reference points for image coordinate transform (Fujita et al., 1994)

실세계 좌표를 (X, Y, Z) 라 하고, 영상좌표를 (x, y) 라 하면, 두 좌표 사이의 변환식은 다음 식과 같이 주어진다 (Fujita and Komura, 1994). 단, 이 때 수표면은 $Z=0$ 인 평면으로 가정한다.

$$x = \frac{c_1 X + c_2 Y + c_3}{c_7 X + c_8 Y + 1} \tag{1.a}$$

$$y = \frac{c_4 X + c_5 Y + c_6}{c_7 X + c_8 Y + 1} \tag{1.b}$$

여기서 $(=1,2,\dots,8)$ 는 두 좌표계간의 좌표보정을 위한 8개의 사상 계수이다. 식 (1)은 기준점 각각에 대해 성립하며 8개의 미지수를 갖기 때문에 최소 4개의 기준점을 필요로 한다.

2.4 영상 분석 방법

표면영상유속계의 유속 측정 방법을 좀 더 살펴보면 일반적으로 표면영상유속계는 PIV 기법에서 사용하고 있는 상호상관분석법을 이용한다. 상호상관분석법의 경우 두 장의 영상(사진)만을 이용하여 유속을 산정한다. 이 짧은 시간간격의 유속분포 측정에는 장점을 갖고 있다. 그러나 측정 시간이 짧기 때문에 순

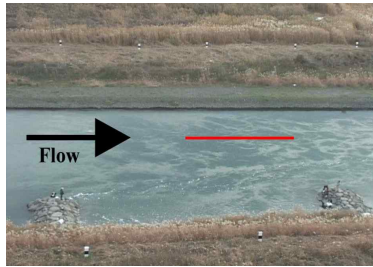
간적인 잡음이나 추적입자 부족 때문에 측정의 불확도가 증가하고, 평균적인 유속 분포를 알기 위해서는 시간평균을 하므로 분석에 상당 시간을 소요한다는 문제를 안고 있다(Kim et al., 2011).

이를 해결하기 위한 방법으로 Fujita and Tsubaki (2002)는 시공간영상 유속계측법(STIV, Space-Time Image Velocimetry)을 개발하였다. 먼저 Fig. 2(a)와 같은 하천의 표면 영상이 여러 장(보통은 동영상의 형태로) 있다고 하자. 이 여러 장의 영상을 한 장씩 읽어 들여서, Fig. 2(a)에 표시된 붉은 선과 같이 한 줄의 영상줄(화소들로 이루어진 줄)을 잘라내어, 영상 배열의 첫 행에 저장하고, 다음 영상에서 다시 같은 위치에서 또 한 줄의 영상줄을 잘라내어 영상배열의 그 다음 행에 저장하는 과정을 수십 매의 영상에 대해 시행하면, Fig. 2(b)와 같은 영상이 만들어 진다. 이를 시공간 영상(STI, Spatio-Temporal Image)이라 한다. 즉, 시공간 영상은 한 축은 공간, 다른 한 축은 시간으로 이루어진 영상이다(Jähne, 1993; Bigun, 2006). 다시 말하자면, 시공간 영상 분석법은 여러 매의 연속된 영상을 한꺼번에 분석하여 그 시간 동안의 평균 유속을 분석하는 방법이다. 예를 들어 초당 30장의 영상을 촬영하는 일반 캠코더를 이용할 경우, 일반적인 상호상관법으로 분석을 하면 하나의 측정점에 대하여 29개의 유속벡터 시계열이 측정되지만 시공간 영상 분석법으로 분석을 하게 되면 30장의 영상을 이용하여 1개의 유속 벡터값을 산정하게 된다. 이와 같이 연속된 여러 매의 영상을 이용하기 때문에 영상 내 입자 부족과 노이즈에 따른 불확도를 줄여서 유속 측정 정확도를 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 이 때, 일련의 영상에서 하나의 유속벡터만 산정하기 때문에 시간해상도가 낮아지는 단점이 있다. 그러나 일반적으로 하천의 유량을 산정할 경우 시간 평균 유속을 사용하여도 큰 오차를 포함하지 않기 때문에, 이 단점은 큰 문제가 되지 않으며, 시공간 영상 분석법이 기존의 상호상관법보다 실용성이 높다고 할 수 있다(Fujita et al., 2002; Yu et al., 2014).

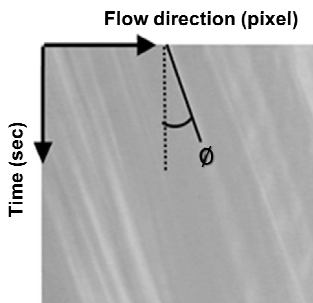
그러나 Fujita의 시공간 영상분석법은 계측 대상의 주 흐름 방향 성분만을 측정할 수 있다는 한계가 있다(Fujita and Tsubaki, 2002; Fujita et al., 2005; Fujita et al., 2009). Fujita and Tsubaki (2002)에서는 주흐름 방향을 수평 또는 연직 중 한 방향으로 고정

하였고, Fujita et al. (2009)에서는 경사 방향으로도 계측이 가능하도록 수정하였지만, 여전히 주 흐름 방향만을 분석한다는 데는 변함이 없다. 즉 종래의 시공간 영상 유속계측법은 영상 휘도의 편미분 분석만을 고려하고 있기 때문에 주 흐름 방향 성분만 분석할 수 있는 단점이 있다. 이 경우, 측정자가 주 흐름 방향과 정확히 맞추어서 영상을 분석해야 한다는 문제가 있으며, 구조물 주변이나 만곡이 있는 경우의 2차원 흐름 측정은 불가능하다.

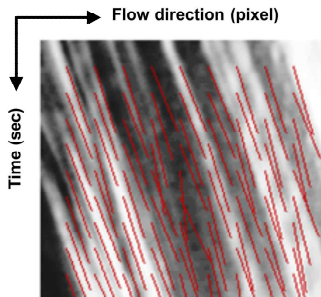
이를 극복하기 위해 Yu et al. (2014, 2015a)는 시공간 영상을 상호상관분석하는 새로운 방법을 제안하고, 이를 CASTI (Cross-correlation Analysis for Spatio-Temporal Image)라 이름하였다. 본 연구에서 사용하는 하천 표면영상 분석의 기본적인 구조는 Yu et al. (2014)에 기반하고 있으며, Fig. 3과 같다.



(a) image of the river



(b) spatio-temporal image of one line segment



(c) orientation vectors

Fig. 2. Measurement of Velocity using spatio-temporal image (Fujita et al., 2005)

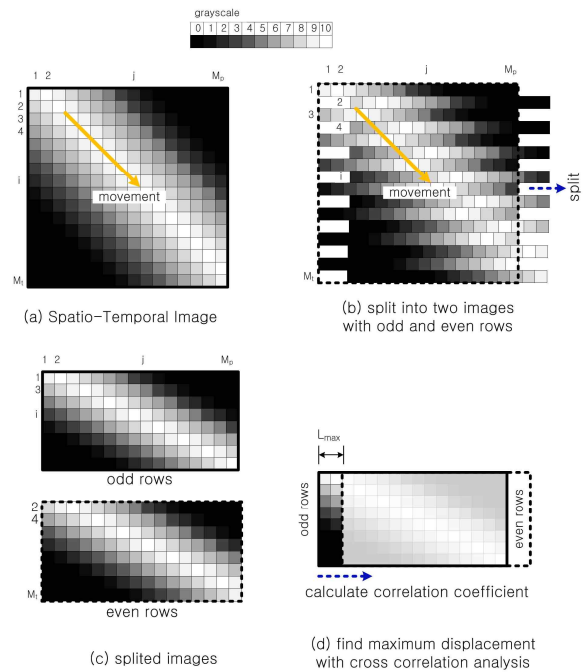


Fig. 3. Concept of CASTI (Yu et al., 2014)

Yu et al. (2014, 2015a)은 CASTI의 정확도에 대해 자세한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구들에서는 시공간 영상 분석법의 정확도를 검증하기 위해 공동 흐름의 인공영상을 이용하여 오차 분석을 수행하였다. 그 결과 2차원 유속분포의 흐름방향을 비교적 정확하게 분석하는 것으로 나타났고, 2차원 유속분포의 전체 오차를 정량적으로 평가한 결과, 보통 5% 이내이며, 공동흐름의 급격한 2차원 방향 전환이 발생하는 지점에서도 최대 10% 이내의 오차를 보여 상당히 정확한 2차원 유속분포 측정이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구에서도 CASTI 방법을 Android용 코드로 변환하여 사용하였다.

2.5 표면영상유속계의 장점과 한계

표면영상유속계는 앞서 제시한 홍수시 유속 및 유량 측정의 문제를 해결할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다. 첫째, 장비가 간단하며 자동화가 가능하기 때문에 열악한 환경에 대처하기가 용이하다. 둘째, 1회 측정에 소요되는 시간이 매우 짧다는 점이다. 보통 하폭 100여 m인 하천의 홍수시 유량 측정에는 수십 분이 소요되지만, 표면영상 유속측정을 할 경우 수분 내에 전체 하천을 측정할 수 있다. 또한 계측 대상 하천이 매우 넓은 경우에도, 이에 따라 측정 시간이 늘어나는 것이 아니라, 여러 대의 카메라를 이용하여 동시에 측정할 수 있어 전체 측정에 소요되는 시간이 매우 짧다. 표면영상유속계측법은 비접촉식이므로 서론에서 언급한 셋째(입수형 탐침 사용 곤란)

와 넷째(부유물과의 충돌)의 난점에 대해서도 충분히 대처할 수 있다. 아울러 Fujita (2013)에 따르면 내수 범람 등 때문에 관측 현장에 대한 접근이 교통 규제 등에 의해 제한된 경우, 부자를 투입하는 교량 그 자체가 수몰된 경우, 측량 작업 공간이 범람되는 경우, 또는 격한 흐름이나 세굴 등의 영향으로 수위계가 파손 및 손실되는 경우 등, 하천에 직접 접근할 수 없는 경우에도 표면영상유속 측정이 훌륭한 대안이 되었다고 한다.

3. 스마트폰을 활용한 표면영상유속계

3.1 안드로이드 운영체제와 스마트폰

스마트폰은 자체 운영체제와 CPU를 가지고 있어 사용자가 프로그램을 작성하여 실행할 수 있는 휴대전화를 말한다. 즉 PC와 휴대전화가 결합된 것이라 볼 수 있다. 이 때문에 스마트폰은 일반적으로 사용하는 운영체제에 따라 iOS를 기반으로 하는 Apple사의 iPhone, Android를 기반으로 하는 Android폰, Windows CE를 기반으로 하는 Windows폰으로 나눈다. 최초의 스마트폰은 Apple사가 2007년에 발표한 iPhone이라 볼 수 있으며, 그 뒤를 이어 Windows를 기반으로 한 Windows폰, Android를 기반으로 한 Android폰이 나왔다.

안드로이드 운영체제는 2007년에 처음 발표되었다. 첫 번째 상용판인 안드로이드 1.0은 2008년 9월에 출시되었으며, 2014년 7월 현재는 4.4.2판(KitKat)이 가장 최신판이다. 안드로이드는 대표적인 스마트폰의 운영체제로서, 2015년 7월 현재 전세계 스마트폰 운영체제의 80% 이상을 점유하고 있다. 이런 사정은 국내에서도 마찬가지이며, 2010년 무렵부터 삼성전자와 LG전자 등에서 안드로이드폰을 출시하여, 2015년 8월 현재 스마트폰 시장의 80 % 정도를 점하고 있다 (<https://namu.wiki/>).

본 연구에서 적용한 스마트폰은 Samsung Galaxy S4 Active, SHV-E250A이며, Android 4.2 Jellybean을 탑재하였다. 이 기기는 방수와 내충격성을 가지고 있어 현장에서 사용할 때 발생할 수 있는 문제를 사전에 최소화시킬 수 있다.

3.2 스마트폰 표면영상유속계의 개발

3.2.1 기본 구조

스마트폰 표면영상유속계는 하드웨어로는 Samsung Galaxy S4 Active, SHV-E250A, 소프트웨어는 저자들이 제작한 Surface Image Velocimeter 프로그램(약자로 SIV)이다. SIV의 기본 흐름은 Fig. 4와 같다. 이 시스템은 크게 (1)

기본 변수 설정, (2) 수표면 영상 촬영, (3) 시공간 영상 분석, (4) 유속 산정 결과 도시로 나눌 수 있다. 분석 프로그램은 Java 언어(JDK 1.8.0)로 작성되었으며, Android Studio 1.4에서 컴파일하였다. 카메라에서 영상을 취득하고 이를 동영상으로 저장하거나 읽어들이기 위해서 영상처리 공개 라이브러리인 OpenCV 3.0을 이용하였다.

개발한 스마트폰 표면영상유속계 앱은 PC와 연결된 상태에서 apk 확장자 형태로 스마트폰에 설치된다. 상용화 단계에서는 PlayStore 등 앱시장을 통해 보급할 것이다. 또한, 현재는 장비(Samsung Galaxy S4 Active SHV-E250A)의 화면 해상도(1920×1080)와 동영상 해상도(720×480)에 맞도록 설정되어 있으나, 이 설정을 변경하면 다른 안드로이드 스마트폰에서도 작동될 것으로 기대한다.

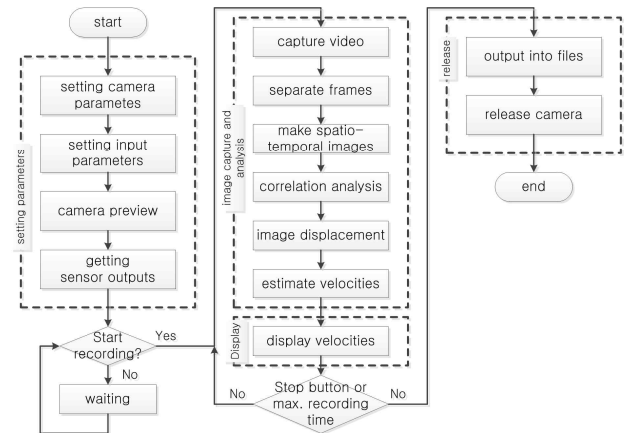


Fig. 4. Calculation flow of surface image velocimetry

3.2.2 기본 변수 선정

스마트폰 표면영상유속계에서 기본적으로 설정해야 할 변수는 측정 위치에 대한 정보이다. 즉, 측정 지점의 지점명, 지점 번호, 측정단면 번호 등을 입력해 주어야 한다. 이 정보들은 영상 분석에서 측정 자료를 구분하도록 하는 주요 정보이다. 분석에 필요한 나머지 정보들, 위치는 GPS 센서에서, 방향은 방향 센서에서 직접 받아들이도록 하였다. 사용자가 입력해야 할 주요 정보는 수면에서 카메라까지의 연직 높이뿐이다.

이 때 화면에는 바닥면부터 카메라의 높이(Z_0)와 방향센서에서 얻은 전후각(φ)과 좌우각(θ), 수표면과 바닥면 사이의 높이(h)를 이용하여 측정선과 측정점을 표시한다.

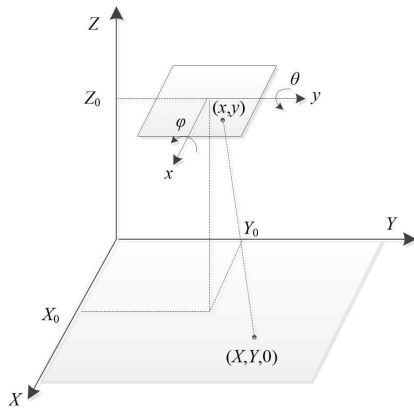
3.2.3 영상 취득

스마트폰에 내장된 카메라를 활용하여, 초당 30매의 720×480 화소의 영상을 촬영하여 메모리에 저장하고, 한편으로는 동영상 파일로 기록한다. 동영상은 보통 3초 정도를

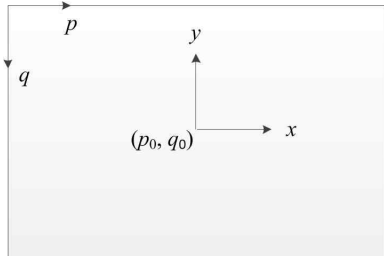
취득하며, 파일 이름에 촬영된 시각과 그 때의 카메라 경사 등의 정보를 기입해 둔다. 촬영된 일련의 영상을 개방 소스 영상 처리 라이브러리인 OpenCV를 활용하여 동영상으로 저장하고, 메모리에 저장된 영상들은 Mat 클래스의 배열로 만든 뒤 적절한 루틴에 전달하여 유속 측정점의 시공간영상을 만든다(Yu and Cho, 2014).

3.2.4 영상 좌표 변환

영상 좌표를 물리좌표로 변경하는 데는 방향 센서에서 측정된 기기의 경사와 이용자가 입력한 카메라 내부변수를 이용한 다음과 같은 식을 이용한다.



(a) world coordinates and normalized image coordinates



(b) normalized image coordinates and pixel coordinates

Fig. 5. Coordinate system

먼저 Fig. 5와 같이 세계좌표(world coordinates)를, 정규 영상좌표(normalized image coordinates)는, 화소 좌표(pixel coordinates)를 로 나타내기로 하자. 우선 정규영상좌표(단위 m)와 화소좌표(단위 화소)의 관계를 동차좌표계(homogeneous coordinate system)를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & p_c \\ 0 & -f_y & q_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서는 영상 중심점의 좌표(화소), 와는 각각 와 방향의 카메라의 초점거리와 배율을 합성한 계수(화소/m)이며, 영상 화소의 종횡비가 1.0이 아닌 경우(직사각형)를 표현한 것이며, 종횡비가 1.0(정사각형)일 경우는 로 표현할 수 있다. 식 (2)에서 주의할 것은 정규영상좌표의 축은 윗방향이 양인데 반해, 화소좌표의 축은 아랫방향이 양이라는 점이다.

한편, 정규영상좌표와 세계좌표 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다. 이 관계는 Duda and Hart (1973)나 Pratt (2007)에 제시된 카메라 기하학에서 유도한 것이다.

$$x = f_x \frac{(X - X_0) \cos\theta + (Y - Y_0) \sin\theta}{-(X - X_0) \cos\varphi \sin\theta + (Y - Y_0) \cos\varphi \cos\theta + (Z - Z_0) \sin\varphi} \quad (3.a)$$

$$y = f_y \frac{(X - X_0) \sin\varphi \sin\theta - (Y - Y_0) \sin\varphi \cos\theta + (Z - Z_0) \cos\varphi}{-(X - X_0) \cos\varphi \sin\theta + (Y - Y_0) \cos\varphi \cos\theta + (Z - Z_0) \sin\varphi} \quad (3.b)$$

여기서 (X_0, Y_0, Z_0) 는 카메라의 위치 (m), f_x 와 f_y 는 카메라의 초점거리와 배율을 합성한 계수(화소/m), φ 와 θ 는 각각 카메라의 전후각(pitch)과 좌우각(roll)이다.

$$X = X_0 + \frac{(Z - Z_0) x \cos\theta + (y \sin\varphi - f \cos\varphi)(Z - Z_0) \sin\theta}{y \cos\varphi + f \sin\varphi} \quad (4.a)$$

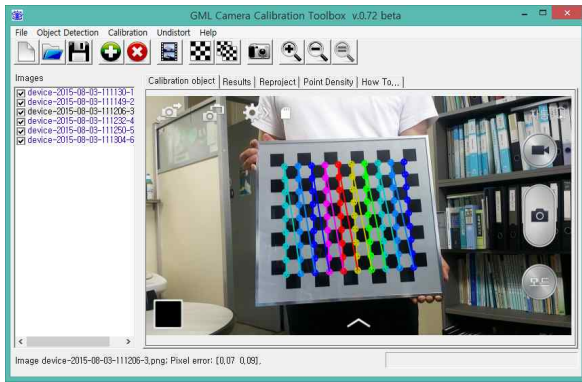
$$Y = Y_0 + \frac{(Z - Z_0) x \sin\theta - (y \sin\varphi - f \cos\varphi)(Z - Z_0) \cos\theta}{y \cos\varphi + f \sin\varphi} \quad (4.b)$$

식 (4)를 이용하면, 카메라 자세(전후각 φ , 좌우각 θ)와 카메라 위치(평면위치 $(0,0)$, 높이 $Z_0 = h$), 카메라 내부변수(초점거리와 배율의 곱 f_x, f_y , 영상의 중심점 (p_c, q_c))의 총 9개의 변수에서 영상내 물체의 실세계 좌표를 구할 수 있다.

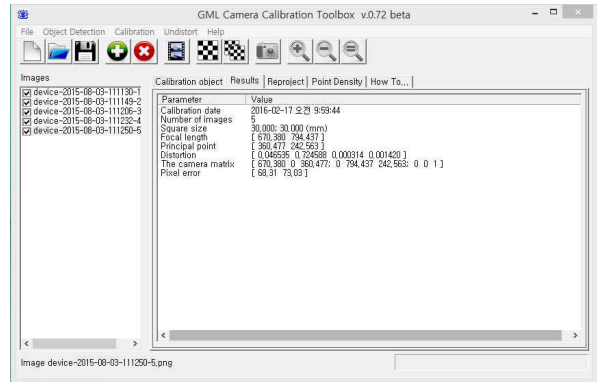
3.2.5 카메라 보정

스마트폰 표면영상유속계에서 보정할 항목은 카메라의 내부변수인 f_x, f_y, p_c 와 q_c 의 4개 항목이다. 내부변수의 보정은 GML C++ Camera Calibration Toolbox, Ver. 0.73을 이용하여, Fig. 6과 같이 수행하였다.

보정결과에서는 $f_x = 670.4$ (화소/m), $f_y = 794.4$ (화소/m), $p_c = 360.5$ (화소), $q_c = 242.6$ (화소)이었다. 영상을 취득할 때, 720×480 (화소)로 설정하였으므로, 자연스럽게 (p_c, q_c) 는 (360,240)이 되어야 하나, 카메라 조립 과정의 약간의 오차가 수반된 것으로 보인다. 유속계를 적용할 때는 $f_x = 670.4$ (화소/m), $f_y = 794.4$ (화소/m), $p_c = 360.0$ (화소), $q_c = 240.0$ (화소)으로 적용하였다.



(a) camera calibration



(b) calibration results

Fig. 6. Coordinate system

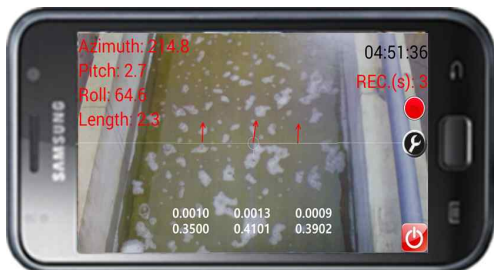
3.2.6 영상 분석과 결과 표시

제작된 표면영상유속계 프로그램은 Fig. 7(a)와 같다. 스마트폰 CPU의 계산능력의 한계를 고려하여 영상은 1초간 촬영하고, 측정점은 중앙과 좌우 일정 거리 떨어진 한 점씩, 총 3개 지점의 유속을 분석하도록 하였다. 이 분석에 소요되는 시간은 촬영 시간 1초, 영상 저장 및 프레임 분리 3초, 영상 분석 7초 등 총 11초 정도가 소요된다. 즉, 11초에 1회의 측정이 이루어진다. 이 측정 시간은 영상 저장과 프레임 분리 방법의 변경과 영상 분석 루틴 개선 등으로 7~8초 정도로 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

결과는 Fig. 7(b)와 같이 화면에 유속 벡터를 나타내는 화살표와 수치로 나타낸다.



(a) initial screen



(b) measurement results

Fig. 7. Surface image velocimetry based on a Android smartphone

3.2.7 스마트폰 표면영상유속계의 장점과 한계

스마트폰을 이용하여 표면영상유속계를 구성할 경우 다음과 같은 점들이 새로 장점으로 더해진다.

첫째, 실시간 유속 측정이 가능하다. 즉 스마트폰의 카메라로 영상을 촬영하고 곧바로 내장된 CPU로 영상 분석을 하므로, 모든 처리 과정이 거의 실시간으로 이루어진다. 이 때문에 사용자가 현장에서 유속을 즉시 알 수 있다.

둘째, 영상 변환을 위한 참조점이 필요없다.

셋째, 어떤 유속 측정 방법보다 그 기기가 간단하다. 필요한 장비로는 스마트폰과 이를 고정시키기 위한 거치대와 삼각대 뿐이다.

넷째, 통신을 통하여 분석 소프트웨어의 수정과 갱신이 간편하다.

다섯째, 스마트폰의 통신 기능을 활용하여 여러 대를 연계한 동시 측정이 가능하다. 또한 측정된 자료를 통신으로 간편하게 서버로 전송할 수 있다.

여섯째, 영상 취득 프로그램에 시간을 설정해 두면, 측정 작업을 예약하여 시행하거나 자동화할 수 있다. 또한 여러 대의 단말기를 이용할 경우에도 미리 예약을 해 두면 자동으로 동시에 측정이 가능하다는 장점이 있다.

마지막으로, 표면영상유속측정법은 영상을 이용하므로, 현장에서의 직접 측정뿐만 아니라 촬영된 영상을 이용하여 추후에 여러 변수들을 변경하면서 추가적인 분석도 할 수 있다. 이것은 일반적인 측정기기로는 불가능한 표면영상유속 측정법만의 특징이라 할 수 있다.

그러나, 스마트폰을 이용한 표면영상유속측정법은 다음과 같은 단점도 지니고 있다.

첫째, 야간이나 안개, 악천후시의 측정이 어렵다는 것이다. 강우중일 경우, 시계 확보가 어려운 정도의 집중호우라면 수

표면 영상을 취득하기 어려울 수도 있다.

둘째, 저속 흐름의 하천에서 강풍이 부는 경우, 수면파가 발생하여 흐름에 의한 수면파의 이동과 바람에 의한 수면파의 이동이 섞여서 정확한 유속 측정이 곤란하다. 바람이 표면유속에 미치는 영향에 대해서는 Negishi et al. (2014)가 자세히 검토한 바 있다.

셋째, 저속 흐름, 특히 부유물이 거의 없는 청정 하천에서 느리게 흐르는 흐름의 경우 유속을 분석해내기 힘들다. 이 경우는 인위적으로 추적입자를 투여해 줄 필요가 있다. 이 때문에 표면영상유속계는 홍수류와 같이 유속이 빠르고 추적자(부유 쓰레기, 유사, 기포 등)가 많은 경우를 주 대상으로 하고 있으며, 측정자가 현장 상황에 맞게 적용한다면 해결할 수 있는 문제라 생각한다.

넷째, 표면영상유속측정법은 어디까지나 수표면의 유속을 측정하는 것이므로, 유량을 산정하기 위해서는 평균유속으로 환산해 주어야 한다. 현재 많은 경우 보정계수로 0.85를 이용하고 있으나, 이 값에 대해서는 여러 가지 논의의 여지가 있다(Negishi et al., 2014).

다섯째, 스마트폰의 CPU는 데스크탑 PC나 노트북 PC에 비해서는 처리 능력이 현저하게 떨어진다. 따라서 실제로 영상을 취득하고 여기서 표면유속을 산정하는 데도 그 능력이 떨어지므로, 실시간에 가깝게 영상을 분석하기 위해서는 영상의 극히 일부분에 대한 분석만 가능하다.

3.3 스마트폰 표면영상유속계 시험

개발된 표면영상유속계를 명지대 야외실험장에 제작한 폭 0.8 m, 길이 10.0 m의 콘크리트 수로에서 실험하였다. 실험 사례는 Table 1에 보인 것처럼 평균 유속 0.80 m/s, 0.47 m/s, 0.085 m/s의 세 가지 경우로 하고, 수심은 유속에 따라 다르며 0.1~0.2 m이었다. 추적자로는 무입자, 비누거품, 쌀튀밥의 세 경우를 선택하였다. 표면영상유속계에 의한 유속측정은 앞서 언급한 것처럼 CPU 한계 때문에 1회 측정에 1초의 영상을 이용한다. 즉 순간유속은 1초 영상에서 산정된 유속이다. 기존 유속계와의 비교를 위해 이 측정을 20회 반복하고 평균 유속을 산정하였다. 또, 실제 유속계에서 Fig. 10(b)와 같이 화면 중앙(좌안에서 40 cm), 좌측(좌안에서 20 cm), 우측(좌안에서 60 cm)의 세 점을 이용하였다. 비교를 위해 표면유속을 소형 프로펠러 유속계(프로펠러 지름 2.0 cm)를 이용하여 좌안부터 10 cm 간격으로 표면 유속(수면에서 1.0 cm 깊이)을 20 초간 3회 측정하여 평균하였다. Table 1의 영상에는 각 경우에 1초간 촬영된 영상에서 분석한 순간 유속을 보이며, 여기서 알 수 있듯이 순간 유속은 변동이 상당히 커서, 평균 유속을 얻기 위해서는 반드시 수십 회의 반복 측정이 필요함을 알 수 있었다. 또한, Table 1의 그림에서 알 수 있듯이 추적 입자가 수표면 전체에 퍼져 있는 것이 아니라 군데군데 추적입자가 없는 경우가 있으며, 만일 측정점 내에 주어진 시간 내에 추적 입자가 들어오지 않는다면, 순간유속이 매우 작은 값이 될 수도 있다.

Table 1. Experiment cases










$V = 0.085$ (m/s)	$V = 0.47$ (m/s)	$V = 0.80$ (m/s)
		
(a) R01. slow, no tracer	(b) R02. medium, no tracer	(c) R03. fast, no tracer
		
(d) R04. slow, soap bubble	(e) R05. medium, soap bubble	(f) R06. fast, soap bubble
		
(g) R07. slow, popped rice	(h) R08. medium, popped rice	(i) R09. fast, popped rice

Table 1에 예시된 사례에 대한 분석 결과는 Fig. 8과 같다. 다만, 앞서 언급한 것처럼 Fig.8의 결과는 스마트폰에서 직접 출력된 것(순간유속)이 아니라 추후 PC에서 후처리를 거친 것(평균유속)이며, 이 때문에 Table 1의 결과보다 나은 결과를 보인다. 이 때, PC에서의 후처리는 분석 시간을 절약하기 위해 수행한 것이며, 반드시 PC로 후처리를 해야 한다는 의미는 아니다.

비교 분석 결과를 살펴보면, 먼저 추적자가 없는 경우는 평균유속에 관계없이 유속 측정이 거의 불가능하였다. R01인 경우는 유속이 워낙 느리고 수표면의 움직임이 거의 볼 수 없으므로, SIV에 의한 유속 측정 자체가 불가능하였다. 또 R02와 R03인 경우는 수면에 물결이 생겼으나, 이 물결 무늬는 측벽에 의한 수면파이며 유속과 상관이 없기 때문에 실제 유속과는 전혀 다른 결과를 보였다. 추적자가 없는 경우에 표면영상유속계가 유속 측정이 어렵다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 표면영상유속계가 대상으로 하는 흐름이 추적자(부유 쓰레기, 유사, 기포 등)가 많은 홍수류라는 점을 고려한다면, 심각한 결점이라기보다는 장비의 한계라 이해할 수 있을 것이다.

반면, 비누거품(R04~R06)과 쌀튀밥(R07~R09)을 이용한 경우, SIV에 의해 산정한 유속은 프로펠러 유속계로 측정된 유속과 매우 근사한 결과를 보였다. 비누거품과 쌀튀밥은 거의 같은 결과를 보이나, 곳곳에 약간의 차이를 보이며, 이 차이는 앞서 언급한 것처럼 영상 촬영시간동안 추적자가 측정점을 통과하지 않은 데 기인한 것으로 보인다. 비누거품(R04~R06)와 쌀튀밥(R07~R09)에 대한 오차의 정도를 살펴보자. $V = 0.085(m/s)$ 일 때의 최대 오차는 Fig. 8(a)에 보인 것처럼 좌안 0.2 m 지점에서 추적자가 쌀튀밥인 경우에 +13.9%의 오차를 보였다. 이 때의 다른 지점의 오차는 모두 $\pm 5\%$ 이내이다. $V = 0.47 (m/s)$ 일 때의 최대 오차는 Fig. 8(b)에 보인 것처럼 우안 0.6 m 지점에서 추적자가 비누거품인 경우로 -11.1%의 오차를 보였다. 이 때는 쌀튀밥도 -10.6%의 오차로 두 측정값이 매우 유사한 데도 프로펠러 측정값과 상당한 차이를 보였다. 이 때도 다른 지점들은 모두 $\pm 5\%$ 이내의 오차를 보였다. $V = 0.80 (m/s)$ 로 비교적 고속일 때의 최대 오차는 Fig. 8(c)에 보인 것처럼 우안 0.6 m 지점에서 추적자가 비누거

품인 경우로 -6.2%이며, 같은 경우에 쌀튀밥 추적자는 -5.2%의 오차를 보였다. 이 때 다른 지점들의 오차는 $\pm 2\%$ 이내의 오차를 보였다.

결과적으로 보면 고속일수록 유속 측정의 오차가 감소하는 경향을 보인다. 그러나 측정 정확도에 대해서는 보다 상세한 실험과 이론적인 검토가 필요한 것으로 보인다. 현재 추론할 수 있는 점은, Yu et al. (2014, 2015a)에서 언급한 것처럼, 표면영상유속측정법의 영상분석 기법에 자체의 오차는 약 5% 내외이므로, 추가적인 오차는 추적자 분포의 불균일성에 따른 오차인 것으로 추정된다.

또한, 스마트폰 표면영상유속계의 기본적인 목표가 현장에서 실시간으로 유속을 파악할 수 있다는 점을 상기한다면, 본 유속계의 기본적인 성능은 충분히 만족스러운 것으로 보인다.

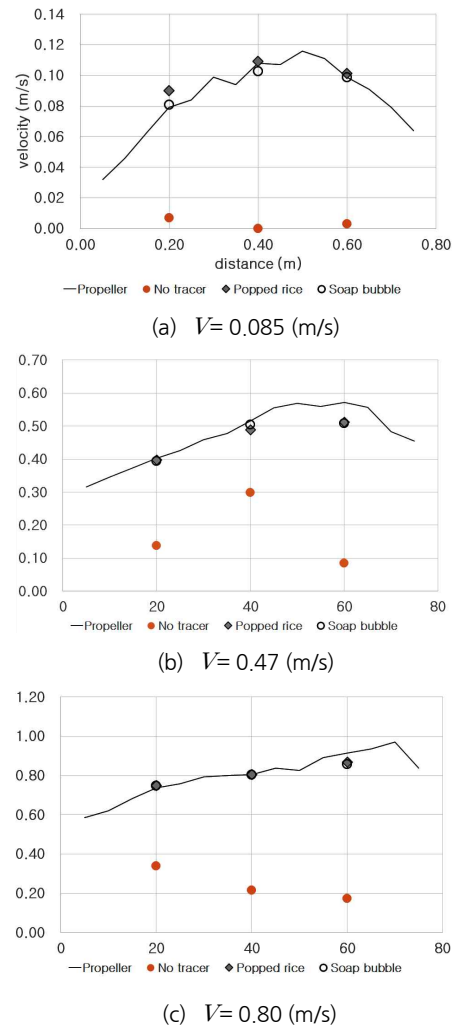


Fig. 8. Comparison of measurement velocity profiles

4. 결과 및 고찰

본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 안드로이드 기반의 스마트폰의 카메라, 방향 센서, CPU 등을 활용하여 실시간으로 하천의 표면 유속을 측정할 수 있는 실시간 표면영상유속계 시스템을 개발하였다.

(2) 스마트폰을 이용한 표면영상유속계는 약 11초에 1회의 순간유속 측정(1초간의 평균유속 측정)을 할 수 있어, 현장에서 즉각적으로 하천 수표면의 표면유속을 측정할 수 있었다. 또한 이 순간유속을 수십회 반복한 뒤 평균하여 시간평균유속을 구할 수 있었다.

(3) 개발된 시스템을 실험 수로에서 시험한 결과 최대 오차 13.9%, 평균적으로 10 % 이내의 오차로 실험 수로의 표면 유속을 측정할 수 있었다. 다만, 통상의 표면영상유속계와 마찬가지로 추적자가 부족한 상태에서는 표면유속을 적절히 측정할 수 없었다. 또한 측정 정확도에 대해서는 추가적인 실험과 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11 기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Aya, S., Fujita, I. and Yagyū, M. (1995). "Field-observation of flood in a river by video image analysis", *Proc. of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.39, pp.447-452. (in Japanese)
- Bigun, J. (2006). *Vision with Direction, a Systematic Introduction to Image Processing and Computer Vision*, Springer.
- Dramais, G., Coz, J.L., Camenen, B., and Hauet, A. (2011). "Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage discharge curves", *J. of Hydro-environmental Research*, Vol.5, No.4, pp.301 - 312.
- Duda, R. O. and Hart, P. E. (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis*, A Wiley Interscience Publication.
- Etoh, G., Takehara, K., Takano, Y., Fujita, I., Sakai, N., Aya, S., Tamai, M., Miyamoto, H., and Muto, Y. (2002). "Infrared particle tracking velocimetry for applications to measurements of surface velocity fields of rivers." *J. of River Technology*, Vol. 8, pp. 465-470. (in Japanese)
- Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1997). "Particle-image velocimetry for whole-field measurement of ice velocities." *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 26, pp. 97-112.
- Fujita, I. (2013). "Utilization of far-infrared-ray camera for image-based measurement of river flow and discharge", *Nagare*, Vol.32, pp.347-352. (in Japanese)
- Fujita, I., Ando, T., Tsutsumi, S., and Okabe, T. (2009). "Flood flow measurements using STIV in worse imaging conditions", *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.53, pp.1003-1008.(in Japanese)
- Fujita, I. and Komura, S. (1994). "Application of video image analysis for measurements of river-surface flows", *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.38, pp.733-738. (in Japanese)
- Fujita, I., Kosaka, Y., Yorozyua, A. and Motonaga, Y. (2013). "Surface flow measurement of snow melt flood by using a far infrared camera", *J. of JSCE*, B1 (Water Resources Engineering), Vol.69, No.4, pp.I_703-I_708. (in Japanese)
- Fujita, I., Takehara, K., Aya, S., Sakai, N., Tamai, M., Takano, Y. and Miyamoto, H. (2002). "Measurement of river flow by ITV video camera", *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.8, pp.459-464. (in Japanese)
- Fujita, I., and Tsubaki, R. (2002). "A novel free-surface velocity measurement method using spatio-temporal images." *Proc. of Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, on CDROM.
- Fujita, I., Watanabe, H., and Tsubaki, R. (2005). "Efficient image analysis method for river flow measurement using space-time images." *Proc. of XXXI IAHR Congress*, pp. 422-428.
- Ishikawa, T., Osumi, K. and Mitome, H. (2001). "Water flow discharge measurement using optical flow technique", *Proc. of the Techniques and Research*, Hokuriku Regional Development Bureau, pp.249-252. (in Japanese)
- Jähne, B. (1993). *Spatio-Temporal Image Processing*, Springer, pp. 150-152.
- Kim, Y., Yang, S., Yu, K., and Kim, D.S. (2014) "Flood Runoff Calculation using Disaster Monitoring CCTV System", *J. of Environmental Science International*, Vol.23, No.4, pp.571-584. (in Korean)
- Kim, S., Yu, K. and Yoon, B. (2010) "Development of a Velocity Measurement Method at Night Time using an Infrared Camera", *Proc. of KWRA Annual Conference*, pp.478-482. (in Korean)
- Kim, S., Yu, K. and Yoon, B., (2011). "Real-time discharge measurement of the river using fixed-type surface image velocimetry." *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, pp. 377-388. (in Korean)
- Kinoshita, R. (1967). "An analysis of the movement of flood

- waters by aerial photography concerning characteristics of turbulence and surface flow,” *J. of the Japan Society of Photogrammetry*, Vol.6, No.1, pp.1 – 17. (in Japanese)
- Korean Water Resources Association (2009) *Design Standard of River Works*. (in Korean)
- K-Water (1994). *Development of Measurement Facilities for Stream Discharge (Development of a Microwave Surface Velocity Meter and Supersonic Correlation Current Meter)*, WRR-94-1. (in Korean)
- K-Water (2010). *Improvement of Accuracy on Discharge Measurement Using Surface Velocity*, KWI-WR- 10-01. (in Korean)
- Negishi, D., Nihei, Y., Katayama, N. and Kashiwada, J. (2014) “Accuracy of velocity and discharge measurement by using radio current meter”, *J. of Japan Society of Civil Engineers, B1(Water Resource Engineering)*, Vol.70, No.4, pp.1_625-I_630. (in Japanese)
- Pratt, W. K. (2007) *Digital Image Processing*, 4th ed., Wiley-Interscience.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., and Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry, a Practical Guide*, 2nd ed., Springer.
- Roh, Y.S. (2005). *Development of River Discharge Measurement Technique using Image Analysis*, Ph.D. thesis, Myongji University. (in Korean)
- Tsubaki, R., Fujita, I., Yu, K. and Muste, M. (2015) “Large-scale particle image velocimetry (LSPIV) implementation on smartphone”, *Proc. of 36th IAHR Congress*, Delft, The Hague, the Netherlands.
- Yamaguchi, T., and Niizato, K. (1994). “Flood discharge observation using radio current meter.” *J. of Japan Society of Civil Engineers*, No. 497/II-28, pp. 41-50. (in Japanese)
- Yu, K. and Cho, W.S. (2014). Real-time surface image velocimeter using a smartphone, *Proc. of 19th IAHR-APD Congress*, pp.210-211.
- Yu, K., Kim, S., and Yoon, B. (2014). “Measurement of two-dimensional velocity distribution of spatio- temporal image velocimeter using cross-correlation analysis.” *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 537-546. (in Korean)
- Yu, K., Kim, S., and Kim, D. (2015a) “Correlation analysis of spatio-temporal images for estimating two-dimensional flow velocity field in a rotating flow condition”, *J. of Hydrology*, Vol. 529, pp.1810-1822.
- Yu, K., Kim, S., Yoo, B., and Bae, I. (2015b) “A test of a far infrared camera for development of new surface image velocimeter for day and night measurement”, *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 659-672. (in Korean)