

주야간 검용 표면영상유속계 개발을 위한 원적외선 카메라의 적용성 검토

A Test of a Far Infrared Camera for Development of New Surface Image Velocimeter for Day and Night Measurement

류 권 규* / 김 서 준** / 유 병 남*** / 배 인 혁****

Yu, Kwonkyu / Kim, Seojun / Yoo, Byeongnam / Bae, Inhyuk

Abstract

In flow velocity measurement of natural rivers, taking images with proper image quality is the fundamental and the most important step. Since flood peaks generally occur in night time, it is very difficult to capture proper images in that time. The present study aims to test a far infra-red camera as a adequate alternative to resolve the various problems in measuring flood discharges. The far infra-red cameras are able to capture images in night time without help of any extra illuminations. Futhermore they are not affected by fog nor smoke, hence they can be adapted for a fixed-type surface image velocimeters. For comparison, a commercial camcorder and a near infra-red cameras were used together. The test images were taken at a day time and a night time, and the image acquisition work were performed at an artificial flow channel of the Andong River Experiment Station. The analyzed results showed that the far infra-red camera would be a good instrument for surface image velocimeters, since they were able to capture regardless light condition. There are, however, a few minor problems in their accuracy of the analyzed results. About their accuracy a more study would be required.

Keywords : velocity measurement, far infra-red camera, near infra-red camera, surface image velocimeter

요 지

홍수시 하천의 유속 측정을 위한 표면영상유속계에서 가장 기본이 되는 단계는 적절한 영상을 취득하는 것이다. 하지만 영상 획득에 있어 야간에 발생하는 홍수 흐름을 촬영하는 것은 매우 어렵다. 이에 본 연구에서는 표면영상 유속계의 야간 영상 획득 장치로 원적외선 카메라를 이용하는 방안을 검토하였다. 원적외선 카메라는 별도의 조명을 필요로 하지 않으므로, 주야간 모두 영상을 획득할 수 있는 장점이 있다. 또한 안개나 연기의 영향을 받지 않아서 고정식 표면영상유속계를 구성하는 좋은 대안이 될 수 있다. 원적외선 영상을 이용한 유속 산정의 결과를 비교하기 위해, 보통의 가시광 카메라와 근적외선 카메라를 이용한 동시 촬영을 하여 영상을 분석하였다. 아울러 소형 프로펠러 유속계에 의한 유속 측정 자료와 비교하였다. 정확도 분석 결과 원적외선의 주간 영상을 이용할 경우 최소 -9%에서 최대 -19%의 오차를 나타냈고, 야간 영상을 이용할 경우 최소 -10%에서 최대 -23%의 오차를 나타냈다. 또한 일반캠코더를 이용한 경우와 비교하여 최대 10% 이내의 차이를 보였기 때문에 주야간 유속 측정에 원적외선 카메라의 적용이 가능한 것을 확인하였다. 다만 주간 영상에 비해 야간 영상이 약간 흐려지는 경향이 있기 때문에, 이러한 영상을 적절히 분석하기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각한다.

핵심용어 : 유속 측정, 원적외선 카메라, 적외선 카메라, 표면영상유속계

* 동의대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: pururumi@deu.ac.kr, Tel: 82-51-890-1631)

Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Dong-eui University, 176 Eomkwang-no Busanjin-gu, Busan 614-714, Korea,

** 교신저자, 단국대학교 토목환경공학과 연구전담 조교수 (e-mail: seojuny@paran.com)

Corresponding Author, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

*** 동의대학교 토목공학과 석사과정 (e-mail: myqudska@nate.com)

Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Dong-eui University, 176 Eomkwang-no Busanjin-gu Busan 614-714, Korea

**** 명지대학교 토목공학과 석사과정 (e-mail: hydraulic.bae@gmail.com)

Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

1. 서 론

하천의 유속 및 유량 측정은 수자원 계획, 하천 계획 등에서 가장 중요한 기본 사항 중 하나이다. 평수시 유속은 프로펠러 유속계, 전자기 유속계, 초음파 유속계, ADCP와 같은 각종 첨단 장비를 이용하여 측정하고 있지만, 홍수시에는 대부분의 유속 측정을 봉부자에 의존하고 있다. 이는 홍수시 유속 및 유량 측정이 유체 계측 중에서도 가장 어려운 계측 중 하나이기 때문이다. 그 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 고액혼상류이기 때문에 실험실에서 이용하는 탐침 형태의 계측 장치의 사용이 제한된다. 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.

최근 이와 같은 문제들을 해결하기 위한 대안으로 여러 가지 비접촉식 유속 측정방법들이 제안되고 있다. 비접촉식 유속 측정은 전파의 도플러 천이 원리를 이용하는 전파 유속계와 하천 표면 영상을 이용하는 표면영상유속계로 나눌 수 있다. 이 두 가지 방법은 모두 수면에 발생하는 수면파문이나 부유물을 추적 대상으로 한다. 수면 파문은 이른바 하천 난류에 의해 생기는 것이며, 레이놀즈수가 10^6 정도에 달하는 거친 수면의 난류장에서, 압력 변동이나 박리상승과 등의 영향이 수면파로 나타난 것이다. 중력파와는 달리 방향성이 없기 때문에 국소적으로 보면 추적 입자적인 운동은 하지 않지만, 다양한 연구에서 수면 파문이 수면의 표면 유속과 거의 같은 속도로 이루어진다고 확인되었다(Miyamoto, 2007; Fujita, et al., 2011; Hara and Fujita, 2010).

전파 유속계는 일본(Yamaguchi and Niizato, 1994)과 한국(K-Water, 1994, 2008, 2010; Kim, et al., 2014)에서 모두 개발되어 있으며, 이들의 성능은 매우 유사하다. 전파 유속계는 파문의 이류를 도플러 천이의 효과를 이용하여 계측한다. 계측 성능은 최소 유속 0.5m/s 정도이며 최대 유속에는 제한이 없다. 사용하기가 매우 간편하다는 점이 최대 장점이다. 다만, 측정 면적이 넓어서 공간 해상

도의 제한이 있으며, 계측시에는 홍수류의 흐름방향과 평행하게 측정하여야 하는 한계가 있다.

표면영상유속측정법은 입자영상유속측정법(PIV, Particle Image Velocimetry)의 유속 산정 원리를 기초로, 한 쌍의 영상을 이용하여 하천 표면의 2차원 유속 분포를 계측하는 방법이다(Raffel et al., 2007). 이 방법은 PIV 기법을 하천 표면이라는 큰 규모에 적용했다는 의미에서 Ettema et al. (1997)이 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)라고 이름을 붙였다. 국내에서는 장치의 특성인 표면 영상을 이용하여 유속을 측정한다는 의미에 보다 충실하기 위해 표면영상유속측정법(Surface Image Velocimetry)이라 하고, 이 기법으로 유속을 측정하는 장비를 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimeter)로 부르고 있다(Kim et al., 2011). 표면영상유속계는 앞서 제시한 홍수시 유속 및 유량 측정의 문제를 해결할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다. 첫째, 측정을 위한 장비가 간단하며 자동화가 가능하기 때문에 열악한 환경에 대처하기가 용이하다. 둘째, 1회 측정에 소요되는 시간이 매우 짧다는 점이다. 보통 하폭 100m인 하천의 홍수 시 유량 측정에는 수십분이 소요되지만, 표면영상유속계측법은 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. 표면영상유속측정법은 비접촉식이므로 앞서 언급한 셋째와 넷째의 난점에 대해서도 충분히 대처할 수 있다. 아울러 Fujita (2013)에 따르면 내수 범람으로 인해 관측 현장에 대한 접근이 교통 규제 등으로 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 경우에 표면영상유속측정법은 훌륭한 대안이 되었다고 한다.

이와 같이 표면영상유속측정법이 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 아직까지 측정 방법에 대한 표준화된 기준이 마련되지 못하여 활발하게 현장 적용이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 특히 야간의 경우 밝은 조명이 없이는 표면영상유속측정법을 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 국내 기후 환경에서는 야간에 큰 홍수가 발생할 확률이 높기 때문에 야간 유속 측정이 어렵다는 것은 아주 치명적인 한계라고 할 수 있다. 따라서 야간에도 주간과 비슷한 수준의 질 좋은 영상을 획득할 수 있는 방법에 대한 연구는 표면영상유속측정법의 적용성을 높이기 위해 반드시 필요할 것이다.

이에 본 연구에서는 표면영상유속측정법을 이용하여 야간의 하천 유속 측정을 위해 원적외선 카메라를 적용한 영상의 적용성을 검토하고자 한다. 이를 위해 실규모 하천 수로에서 일반캠코더로 촬영한 주간 영상과 야간에 촬영한 근적외선 영상과 원적외선 영상을 비교하였고, 영상 유속계측법을 이용하여 산정한 표면유속을 비교 분석하였다. 또한 실제로 소형 프로펠러 유속계로 측정된 표면 유속과 비교하여 원적외선 카메라를 이용한 야간 하천 유속 측정 방법의 적용성을 검토하였다.

2. 표면영상유속계를 이용한 야간의 하천 유속 측정

표면영상유속계를 이용한 하천 유속 측정에서 가장 어려운 문제는 야간의 영상 취득하는 것이다(Fujita, 2013). 일반 캠코더를 이용하는 경우 약 100 lux 이상의 조도가 확보되어야 영상 분석이 적절하게 된다고 알려져 있다(Kim, et al. 2011). 하천에서 조명을 이용하여 100 lux 이상의 조도를 확보한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히 소규모 하천인 경우 조명에 별 문제가 없지만, 대하천에서 의도대로 하천 표면을 충분히 밝게 조명하기는 매우 어렵다. 특히 야간의 경우 가로등과 건물의 배경광 등으로 인해 역효과를 내는 경우도 있기 때문에 주간 영상 획득과 비교하여 매우 열악한 환경임에는 틀림이 없다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 오래전부터 적외선 카메라를 이용하는 방안이 제시되었다.

야간의 하천 표면 촬영에 근적외선 카메라(통상 적외선 카메라라고 부르는 것이며, 본고에서는 나중에 설명할 원적외선 카메라와 구분하기 위해 근적외선 카메라라고 부른다)를 이용한 연구로는 Etoh et al. (2002), Hara et al. (2010), Kim et al. (2010), Fujita et al. (2011), Kim et al. (2015) 등이 있다. 이들이 이용한 장비는 주간에는 통상적인 가시광 카메라 모드로 촬영을 하고, 야간은 근적외선 모드로 전환하여 촬영을 하는 것이었다. 이 중에서 Fujita et al. (2011)은 실제적으로 근적외선 카메라를 현장에 성공적으로 적용한 바 있다. 이들은 고베(神戸)시내의 중소 하천인 스미요시천(住吉川)에서의 야간 관측과 유량 계측에 성공하였다. 단, 적외선의 조사 거리에는 한계가 있기 때문에, 하폭이 큰 경우에는 하천 표면의 일부만을 측정점으로 조사하였다. 스미요시천(住吉川)의 경우는 하폭이 20 m 정도이기 때문에, 이런 종류의 카메라로도 양호한 관측을 수행할 수 있었다고 한다. 국내에서는 Kim et al. (2015)이 제주도 천미천을 대상으로 2013년 집중호우 시 조명을 이용하여 야간에 표면영상유속계를 성공적으로

적용한 바 있다. 이 당시 사용한 조명은 자연광에 가까운 150 lux 이상의 1000 W 조명장치를 설치하고 근적외선카메라를 이용하여 영상을 획득하였다. 근적외선 카메라를 이용한 유속분포 측정이 가능했던 이유는 제주도 하천의 특성상 하폭이 작기 때문이라고 하였다. 이와 같이 근적외선 카메라를 이용할 경우 영상 촬영 범위의 제한이 있기 때문에 실제 하천 유속분포 측정에 어려움이 있는 것이 사실이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 새로 제안된 방법이 원적외선 카메라를 이용하는 방법이다. 원적외선 카메라는 열적외선 카메라 또는 열영상 카메라라고도 불리며, 영상 감시에 다양한 용도로 이용되어 왔다(Saito et al., 2007; Fujita et al., 2013a, 2013b).

원적외선(FIR, far infrared)의 파장은 일반적으로는 4.0 ~ 1,000.0 μm 이지만, 원적외선 카메라로 포착하는 원적외선의 파장 범위는 대략 9.0~14.0 μm 정도이다. 이것은 상온에서 물체가 방사 에너지의 형태로 발하는 적외선의 파장 범위에 해당된다. 원적외선은 방사 에너지에 더해 열(온도)도 포착하기 때문에, 원적외선 카메라를 이용하여 물체의 온도 분포 등을 구할 수 있다(Fujita, 2013). 단, 촬영 범위 내의 하천수의 온도는 거의 일정하기 때문에, 온도 변화만으로는 수면 파문을 파악하는데 한계가 있을 수 있다. 하지만 적외선은 매우 반사되기 쉬운 성질을 가지기 때문에, 물체 표면의 상태나 보는 각도에 따라서도 방사 에너지가 변화한다. 이 점이 하천 모니터링에서 가장 중요하며, 이 성질을 이용하여 수면의 미묘한 요철 형상을 영상화할 수 있다. 원적외선의 또 다른 이점은 가시광에 비해 파장이 길어 산란되기 어려운 성질을 가지기 때문에, 연기나 안개의 영향을 잘 받지 않는 점이다. 전술한 것처럼 적외선 카메라의 적용에서 문제가 되는 가시광의 직사에 따른 영향도 전혀 받지 않는 점도 범용성이라고 하는 점에서 중요한 이점이다. 따라서 원적외선 카메라를 이용하여 야간의 하천 영상 획득한다면 기존의 표면영상유속계의 한계였던 야간 유속측정의 어려움을 어느 정도 해결해줄 수 있을 것으로 생각한다.

3. 상호상관법을 이용한 시공간 영상 유속 측정 방법

원적외선 영상은 일반 캠코더 영상과 비교하여 영상 내 배경잡음(background noise)이 상대적으로 많은 것이 단점이다. 즉, 영상내 수표면과 추적자의 움직임 분석함에 있어 기존의 상호상관법을 이용할 경우 영상내 잡음으로 인해 상관계수가 작게 산정될 수밖에 없다는 한계가 있다. 좀 더 구체적으로 표면영상유속계의 유속 측정 방법

을 살펴보면 일반적으로 표면영상유속계는 PIV 기법에서 사용하고 있는 상호상관법(cross-correlation method)을 이용한다. 상호상관법의 경우 두 장의 영상만을 이용하여 유속을 산정하기 때문에 짧은 시간간격의 유속분포 측정에는 장점을 갖고 있지만 흐름특성과 촬영조건 및 분석방법에 따라 유속 측정 결과가 달라지기 때문에 불확도(uncertainty)를 포함할 수 있다는 한계가 있다(Kim et al., 2011).

이를 해결하기 위한 방법으로 Fujita and Tsubaki (2002) 와 Fujita et al. (2005)은 시공간영상 유속계측법(STIV, Spatio-Temporal Image Velocimetry)을 개발하였다. 시공간 영상(STI, Spatio-Temporal Image)이란 연속된 영상 시계열로부터 한 영상에서 한 줄씩 영상줄을 잘라내고, 이를 시간에 따라 연속적으로 연결하여 만든 영상을 말한다. 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 이용하였을 경우, 일반적인 상호상관법으로 분석을 하게 되면 하나의 측정점에 대하여 29개의 유속벡터 시계열이 측정되지만 시공간 영상 분석법으로 분석을 하게 되면 30장의 영상을 이용하여 1개의 유속 벡터를 산정하게 된다. 이와 같이 연속된 영상을 이용하기 때문에 영상 내 입자 부족과 잡음에 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., 2005; Yu et al., 2014).

그러나 Fujita의 시공간 영상 분석법은 계측 대상의 주 흐름 방향 성분만을 측정할 수 있다는 한계가 있다(Fujita and Tsubaki, 2002; Fujita et al., 2005). 즉, 종래의 시공간 영상 유속계측법은 영상 휘도의 편미분 분석만을 고려하고 있기 때문에 주흐름 방향 성분만 분석할 수 있는 단점이 있다. 이 경우, 측정자가 주흐름 방향과 정확히 맞추어서 영상을 분석해야 한다는 문제가 있으며, 구조물 주변이나 만곡이 있는 경우의 2차원 흐름 측정은 불가능하다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 Yu et al. (2014)은 시공간 영상을 상호상관분석하는 새로운 방법을 제안하

고, 이를 CASTI (Cross-correlation Analysis for Spatio-Temporal Image)라 하였다. 본 연구에서 사용하는 하천 표면영상 분석의 기본적인 구조는 Yu et al. (2014)에 기반하고 있다.

CASTI를 이용한 영상 분석을 위해서는 우선 획득한 영상을 이용하여 시공간영상으로 변화하는 과정이 필요하다. 하천 흐름의 수표면 영상을 동영상으로 촬영한 뒤, 여기에 측정점 (p, q) 을 지정하고, 흐름과 평행한 직선과 수직한 측정선을 긋고, 이 측정선을 따라 한 프레임에서 한 줄의 영상 자료를 얻어내고, 이를 시간에 따라 연속적으로 연결하여 Fig. 1(a)와 같이 시공간 영상을 제작한다. 그리고 Fig. 1(b)와 같이 시간축을 기준으로 홀수행과 짝수행을 각각 뽑아내고 Fig. 1(c)와 같이 이를 각각 시간순으로 연결하여 두 장의 시공간 영상을 만든다. 이와 같이 제작한 두 장의 영상을 이용하여 Fig. 2와 같이 t 방향 행의 수인 M_t 보다 하나 작은 M_t-1 개의 쌍에 대한 영상 변위(L)의 상관 계수(R_L)를 Eq. (1)을 이용하여 계산한다.

$$R_L = \frac{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-L} (I_{i,j-L} - \bar{I})(I_{i+1,j} - \bar{I}_L)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-L} (I_{i,j-L} - \bar{I})^2 \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-L} (I_{i+1,j} - \bar{I}_L)^2}}, \quad (L < 0) \quad (1.a)$$

$$R_L = \frac{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-L} (I_{i,j} - \bar{I})(I_{i+1,j+L} - \bar{I}_L)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-L} (I_{i,j} - \bar{I})^2 \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-L} (I_{i+1,j+L} - \bar{I}_L)^2}}, \quad (L \geq 0) \quad (1.a)$$

여기서, \bar{I} 는 원영상의 명암값 평균이며, \bar{I}_L 은 I 영상을 시간적으로 1, 공간적으로 L 만큼 이동한 영상의 명암값 평균이다. 즉, Eq. (1)은 시공간 영상의 자기상관(auto-correlation)의 성격을 갖는다.

시공간 영상의 i 번째 행과 $i+1$ 번째 행의 쌍, 즉 M_t-1 개의 쌍에 대해 각 변위별 상관 계수의 시간 평균을 한꺼번에 구할 수 있다. 다음으로 여러 영상변위 L 에 대한 상관계수 중에서 가장 큰 값인 최대 상관계수($R_{L_{\max}}$)를 갖는 변위(L_{\max})를 구한 후 다음 Eq. (2)를 이용하여 줄무늬의 기울기를 계산한다.

$$\tan \phi = \frac{L_{\max}}{\Delta t} \quad (2)$$

계산한 줄무늬의 기울기($\tan \phi$)를 그대로 적용하면, 이산화된 유속을 얻게 된다. 따라서 PIV 기법에서 이용하는 부화소법(sub-pixel method)을 이용하여 보간하는 작업이 필요하다(Raffel et al., 2007). 다음 Eq. (3)과 같이 이차점두형 보간법을 이용하면 최종적으로 오른쪽 방향 변

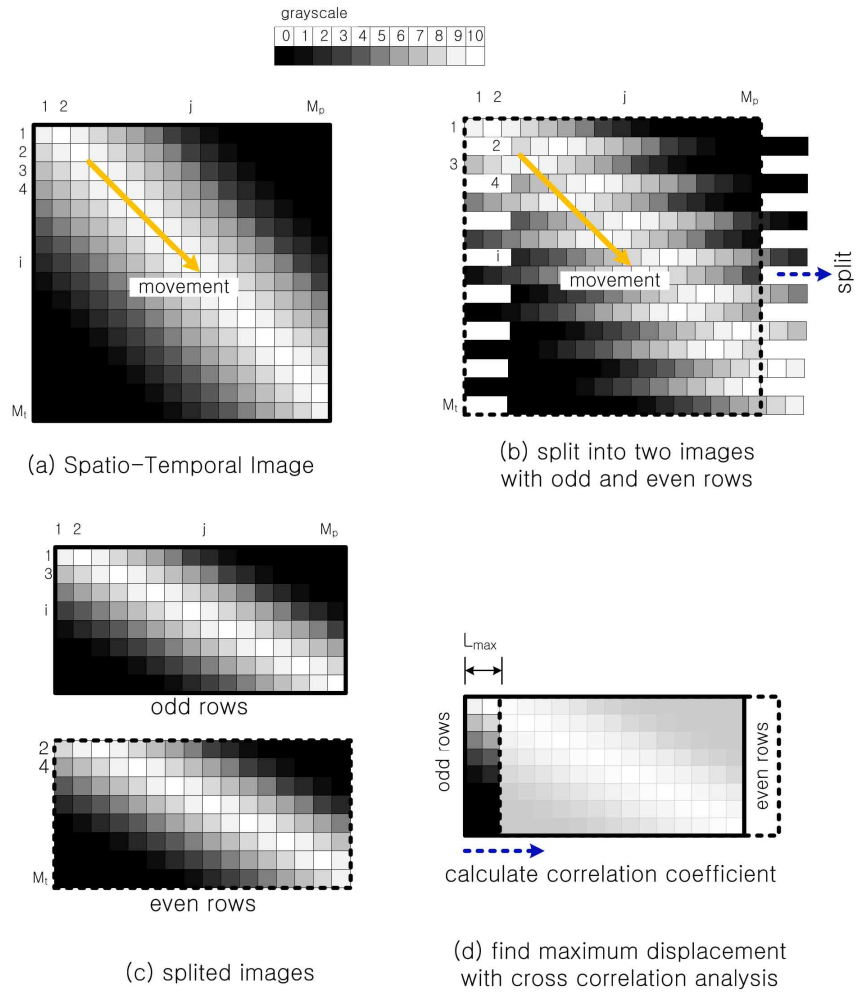


Fig. 1. Concept of CASTI

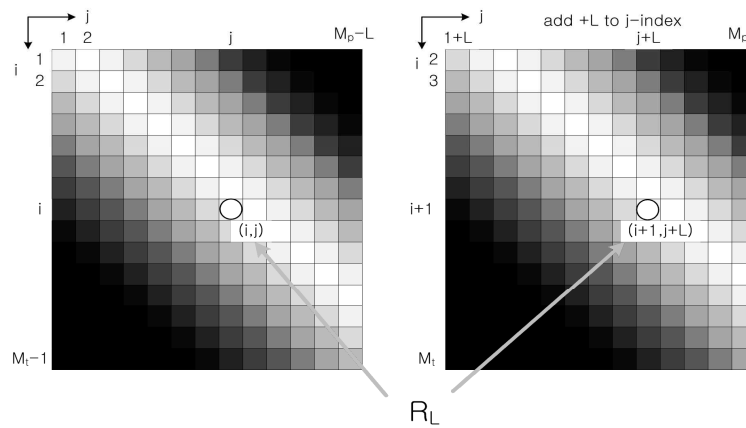


Fig. 2. Cross-correlation Analysis (Yu et al., 2014)

위(L_e)를 구할 수 있다.

$$L_e = L_{\max} + \frac{R_{L_{\max}-1} - R_{L_{\max}+1}}{2R_{L_{\max}-1} - 4R_{L_{\max}} + 2R_{L_{\max}+1}} \quad (3)$$

또한 p 방향 변위와 q 방향 변위는 화소 단위이기 때문에 실제 유속을 계산하기 위해서는 화소단위를 실제 거리 단위로 환산해주어야 한다. 즉, 영상 좌표 (p, q) 는 전체 분

석 시간 t 동안 $(p+L_p, q+L_q)$ 로 이동할 것이다. 따라서 영상 좌표 (p, q) 와 $(p+L_p, q+L_q)$ 를 실제 좌표 (x, y) 와 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 로 변환하여야 한다. 이 때 왜곡된 영상을 보정하기 위하여 8점 변환을 이용한 좌표 변환을 실시하여 $(p+L_p, q+L_q)$ 와 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 의 관계를 다음 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x + \Delta x = \frac{b_1(p + \Delta p) + b_2(q + \Delta q) + b_3}{b_4(p + \Delta p) + b_5(q + \Delta q) + 1} \quad (4.a)$$

$$y + \Delta y = \frac{b_6(p + \Delta p) + b_7(q + \Delta q) + b_8}{b_4(p + \Delta p) + b_5(q + \Delta q) + 1} \quad (4.b)$$

이와 같이 변환된 (x, y) 와 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 를 이용하여 유속 (u, v) 를 다음 Eq. (5)와 같이 구할 수 있다.

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (5)$$

4. 실규모 하천 실험

4.1 실규모 하천 실험 개요

원적외선 카메라의 적용성을 평가하기 위해서는 실제 하천의 온도와 방사에너지 상황과 동일한 조건에서 영상을 획득하여야 한다. 실내수로에서는 태양광보다는 조명의 영향으로 인해 실제 하천에서의 적용성을 검토하기에 부족함이 있다. 또한 실제 하천에서는 흐름특성을 일정하게 유지하기 어렵기 때문에 유량 조절이 가능한 실외 수로에서 적용성 검토를 실시하는 것이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 안동 하천실험센터의 실규모 직선수로에서 실험을 수행하였다. 직선수로의 연장은 490m이고, 하상경사는 약 1/800이다. 하상재료는 Fig. 3과 같이 대부분 모래로 구성되어 있으며 어느 정도 식생이 활착되어 있어 일반적인 중소규모 하천과 거의 유사한 규모와 특징을 갖고 있다. 실험은 흐름의 안정을 확보하기 위해 수로 최상단에서 약 300m 하류 지점에서 실시하였다.

한편 영상 획득을 위해 사용한 카메라는 Fig. 4와 같이 일반캠코더와 근적외선 카메라 및 원적외선 카메라를 같은 장소에 설치하여 동시간 촬영이 가능하도록 하였다. 주간 영상은 15시 정도에 촬영하였고, 야간 영상은 18시 정도에 촬영하였다. 또한 주간과 야간 영상 획득에 있어 수로 내 흐름특성의 변화를 최소화하기 위해 공급유량과 수위를 일정하게 유지하였다.



Fig. 3. Bedform of Straight Channel

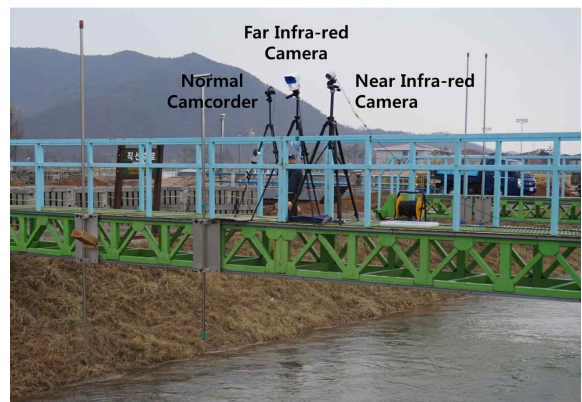


Fig. 4. Setup of Cameras

4.2 영상 획득 장비

영상 획득을 위한 카메라의 특징은 Table 1과 같다 (Fujita, 2013). 일반캠코더의 경우 화면 해상도가 1920 × 1080인 Full HD 영상 촬영이 가능하고 프레임률은 30 fps인 장비를 이용하였다. 근적외선 카메라의 경우 일반적으로 CCTV (closed circuit television)로 사용하고 있는 주간 촬영이 가능한 장비를 이용하였다. 근적외선 카메라의 경우 화면 해상도가 640 × 480인 VGA (video graphics array) 영상 촬영이 가능하고 프레임률은 30 fps이다. 원적외선 카메라는 이상이엔티사의 TSM-72를 사용하였다. 이 카메라는 비냉각 마이크로 홀로메타에 의해 원적외선 (열영상)을 검출하는 것이며, 온도 분해능은 0.04°C이다. 해상도는 720 × 576 화소, 프레임률은 25 fps, 20mm의 고정초점을 사용하며, 흑백 영상이 출력된다. 이 장비는 Fujita (2013)가 사용한 장비보다 성능이 향상된 것이며, 프레임률은 하천흐름 동영상의 해석을 수행하는 데 적절한 정도이다.

4.3 영상 획득 결과

영상 획득을 위하여 3대의 카메라를 주간과 야간에 촬영하였으며, 야간에는 조명 유무에 따라 각각 촬영을 실시하였다(Table 2). 일반 캠코더는 주간과 야간의 경우 가장 선명한 영상을 획득할 수 있는 반면 야간의 경우 조명없이 수표면 영상을 획득할 수 없었다. 또한 조명을 비출 경우

에는 수표면의 파문은 촬영이 안 되었고, 적절한 추적자(본 연구에서는 팝콘을 이용)가 있는 경우에만 유속 측정이 가능하였다. 근적외선 카메라의 경우 주간에는 일반 캠코더와 동일하게 수표면의 움직임을 촬영할 수 있었으나 야간의 경우에는 렌즈 주위에 적외선 조광용 LED 전구를 이용하여 수표면을 촬영한 결과 어느 정도 하천의 형상은 확인이 가능하나, 실제 수표면의 움직임을 확인하

Table 1. Cameras Tested for Surface Image Velocimeters (modified from Fujita, 2013)













Type	Normal Camcorder	Near Infra-red Camera	Far Infra-red Camera
Model	SONY DCR-SR65 	PC13030N 	TSM-72 
Wavelength(μm)	0.4~0.8	0.8~1.7	8.0~14.0
Color Mode	Color	Grayscale	Grayscale
Basic Principle	Natural light or reflective light of objects	Natural light or reflective light of objects	Heat or radiative energy from objects
Image Capturing in Night	Need illumination	Need illumination	Need not illumination
Recognition of ripples	Depends on direction of sunlight	Depends on range of illumination	Always
Affection of rainfall	△	×	△
Affection of fog	×	×	○

Table 2. Sample Images Capture by Various Cameras

	Normal Camcorder	Near Infrared Camera	Far Infrared Camera
Day time 14:39			
Night time (without illumination) 18:16			
Night time (with illumination) 18:20			

기 어려웠다. 또한 조명장치를 이용하여 수표면을 비추는 방법으로 수표면의 빛의 밝기를 강제적으로 높인 결과 수표면의 움직임과 추적자의 움직임을 촬영할 수 있었다. 즉, 근적외선 카메라만으로는 야간에 수표면의 움직임을 촬영하는 것은 쉽지 않았고, 조명을 추가로 사용해야함을 확인하였다. 또한 근적외선 영상만의 특징 중 하나는 야간에는 벌레나 비산 먼지, 낙엽 등에 의해 큰 잡음이 생기는 한계가 있었다. Fig. 5는 근적외선 영상에 잡힌 벌레의 이동 모습이다. 이런 잡음은 대부분의 경우 매우 짧은 시간 동안 화면에 나타났다가 사라지기 때문에 전체적인 유속 분석에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되나, 많은 양이 나타날 경우 수표면을 가리기 때문에 큰 오차를 일으킬 수 있다. 마지막으로 원적외선 카메라를 이용한 영상 획득 결과 주야간의 영상이 크게 차이가 나지 않음을 확인하였다. 그 이유는 원적외선 카메라가 열을 감지하기 때문에 주간과 야간의 영상 촬영에 있어 수표면의 온도 차이가 크게 달라지지 않았기 때문으로 생각한다. 이처럼 원적외선 카메라를 이용하면 야간에 수표면의 움직임을 영상에 담을 수 있어 표면영상유속계를 이용한 유속 측정의 가능성을 확인하였다.

5. 원적외선 영상을 이용한 표면유속 산정 결과의 정확도 분석

5.1 원적외선 영상을 이용한 표면유속 산정

앞서 획득한 총 9 case에 대하여 획득한 10초 동안의 영상을 이용하여 표면유속을 산정하였다. 이를 위해 우선 10초 동안의 영상을 300장의 정지영상으로 변환하였고, 영상의 왜곡 보정을 위해 Fig. 6과 같이 주간과 야간에 모든 카메라에서 식별이 가능하도록 흰색 핫팩을 이용하였다. 일반 캠코더를 이용할 경우 참조점 식별자로 색 차이를 이용하지만, 원적외선 카메라는 온도 차이를 이용하기 때문에 핫팩을 참조점으로 이용하는 것이 적합하다. 또한 유속 측정은 0.25 m 간격으로 총 21개 지점을 선정하였다.

본 연구에서는 다양한 촬영 방법을 통해 획득된 영상들을 이용하여 유속을 산정하였다. 유속 산정 방법은 최근 개발된 CASTI (Yu et al., 2014)를 이용하였으며 유속 산정 과정은 다음과 같다. 첫 번째로 공간축에 해당하는 상관영역 길이를 각 측정점의 가로 및 세로 방향의 길이는 31화소(반경 15화소)로 하였다. 즉, 흐름방향과 흐름에 직각 방향에 대하여 각각 31화소 조각을 선택하였다. 두 번



Fig. 5. Noise Images Due to Bugs or Flying Debris in Near Infrared Camera Images

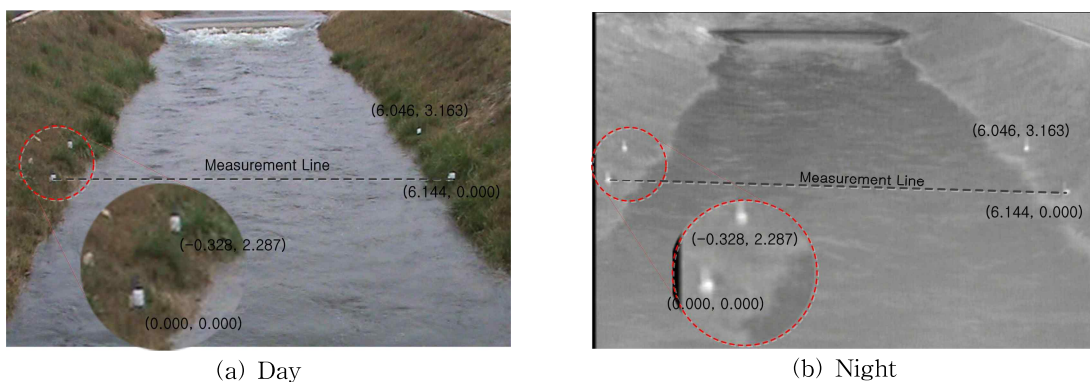


Fig. 6. Reference Points for Coordinate Transform

제로 유속 산정을 위한 시간을 10초로 결정하여 총 300장의 영상에 대하여 31화소 조각들을 추출한 후 Table 3과 같이 시간순으로 홀수 영상과 짝수 영상을 분리한 후 이어 붙여 시공간 영상을 제작하였다. 세 번째로 Eq. (1)을 이용하여 상관계수를 계산하고, 네 번째로 최대 상관계수를 갖는 지점까지의 변위를 구한 후 Eq. (2)를 이용하여 줄무늬의 기울기를 계산하였다. 다섯 번째로 Eq. (3)의 부화소법을 이용하여 산정한 변위를 상세화시켰다. 마지막으로 실제 변위로 환산하기 위하여 Eq. (4)를 이용하여 좌표 변환을 실시하였다. 이와 같은 과정을 통해 각각의 축점에 해당하는 유속을 산정하였다.

한편, 세 종류의 카메라에 의해 획득한 9 case의 영상을 이용하여 유속을 산정한 결과는 Table 4와 같다. 영상 획득 결과에서 예상한 바와 같이 세 종류의 카메라 모두 주간에는 어느 정도 유속 산정이 가능한 것으로 나타났으며, 야간의 경우는 일반캠코더와 근적외선 카메라의 영상은 유속 산정이 어려운 것으로 나타났다. 원적외선 카메라의 경우는 유속 산정이 가능하였지만 주간영상 결과 보다는 유속이 조금 작게 산정되었다. 또한 야간에 조명을

비추었을 경우 일반 캠코더의 영상은 유속 산정이 어려웠으며, 근적외선 카메라 영상은 비교적 주간 유속 산정 결과와 유사한 경향을 보였다. 마지막으로 원적외선 카메라 영상의 경우는 주간 보다는 유속이 조금 작게 산정되는 경향을 나타냈다.

3대의 카메라를 이용하여 획득한 주간과 야간 영상을 이용하여 표면유속을 산정한 결과 주간에는 모두 적용이 가능한 것을 확인하였고, 야간의 경우는 원적외선 카메라만 적용이 가능하였다. 또한 야간에 조명을 비출 경우에는 근적외선 카메라의 적용이 가능했으나, 하도 내 조명 밝기가 일정하지 않기 때문에 전체 유속장 산정에 어려움이 있을 것으로 생각된다. 한편, 원적외선 카메라의 적용도 가능한 것으로 나타났다. 단, 주간과 비교하여 수표면의 움직임이 흐리게 촬영되는 경향이 있기 때문에 유속 산정 결과에 대한 정확도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5.2 표면유속 측정 결과의 정확도 분석

앞서 9가지 경우에 대하여 유속 산정 가능성을 확인하였다면 좀 더 구체적으로 CASTI 기법으로 분석한 유속 산정

Table 3. Spatio-Temporal Images

	Normal Camcorder		Near Infrared Camera		Far Infrared Camera	
Day time 14:39						
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Night time (without illumination) 18:16						
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Night time (with illumination) 18:20						
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical

All the STIs are shown for about 3 second length only, since 10 second images are too long.



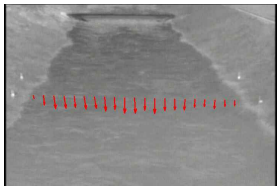
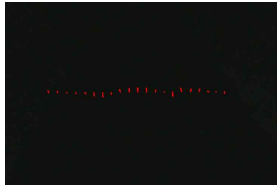

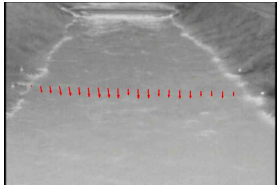
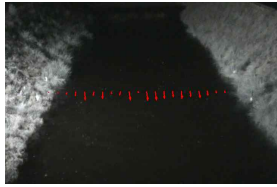

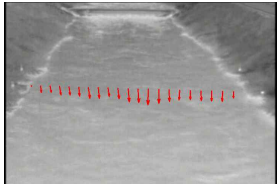
결과의 정확도를 분석하였다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 음향 도플러 유속계(이하 ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler)와 소형 프로펠러 유속계를 이용하여 CASTI 기법으로 유속 측정을 실시한 측정점과 동일한 지점에서 표면유속을 측정하였다. ADCP와 회전식 유속계 모두 수표면의 유속을 정확하게 측정하지는 못하지만 어느 정도의 근사값을 확보할 수 있기 때문에 본 연구에서 목표한 원적외선 카메라 영상의 적용성을 검토하는 데는 큰 문제가 없을 것으로 생각한다.

ADCP는 수표면에 센서를 잠기도록 하여 유속을 측정하기 때문에 수표면 근처의 유속을 측정하지 못한다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 ADCP를 이용한 유속 측정 결과는 대략적인 수표면 유속 범위를 제시하기 위한

것이다. ADCP를 이용하여 횡단면의 흐름방향 유속분포를 측정한 결과 Fig. 8과 같이 우안측의 유속이 좀 더 빠르게 나타나는 결과를 보였으며 수표면에서 약 10cm 떨어진 지점의 유속이 대략 0.45~0.65m/s의 범위를 보임을 확인하였다. 단, ADCP의 경우 양쪽 제방측의 유속 측정이 어렵기 때문에 양쪽 제방에서 약 0.5m 떨어진 지점부터 유속 측정을 할 수밖에 없는 한계가 있었다.

CASTI 기법으로 분석한 표면유속 결과의 정확도를 검토하기 위해 본 연구에서는 소형 프로펠러 유속계로 흐름방향 표면 유속을 0.5m 간격으로 측정하였다. 소형 프로펠러 유속계의 경우 프로펠러 직경이 약 2cm 정도이기 때문에 수표면에 프로펠러만 잠기게 하여 유속을 측정하게 되면 수표면을 기준으로 약 2cm 아래의 유속을 측정

Table 4. Results of Velocity Measurement Using the Image

	Normal Camcorder	Near Infrared Camera	Far Infrared Camera
Day time 14:39			
Night time (without illumination) 18:16			
Night time (with illumination) 18:20			



(a) Measurement using ADCP



(b) Measurement using micro velocimeter

Fig. 7. Velocity Measurement for Comparison

할 수 있다. 이와 같이 측정된 유속을 이용하여 Fig. 9와 Table 5와 같이 소형 프로펠러 유속계로 측정된 유속과 주간에 일반캠코더를 사용하여 분석한 유속과 원적외선 카메라의 주간과 야간 영상을 이용하여 산정한 유속을 비교하여 원적외선 카메라의 정확도를 분석하였다.

주간에 획득한 일반 캠코더 영상과 주간과 야간에 획득한 원적외선 카메라 영상을 이용하여 산정한 표면유속을

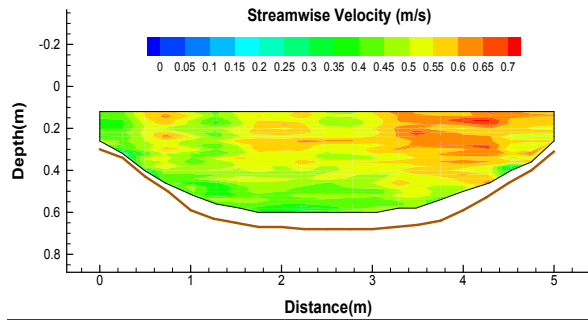


Fig. 8. Result of Velocity Measurement using ADCP

소형 프로펠러 유속계로 측정된 유속과 비교하여 정확도를 분석한 결과 일반캠코더와 원적외선 카메라의 영상으로 산정한 유속이 소형 프로펠러 유속계로 측정된 유속보다 전체적으로 작게 산정되는 경향을 보였다. 그 이유는 소형 프로펠러 유속계가 정확하게 수표면의 유속을 측정하지 못하기 때문에 실제 수표면 유속보다는 다소 큰 값

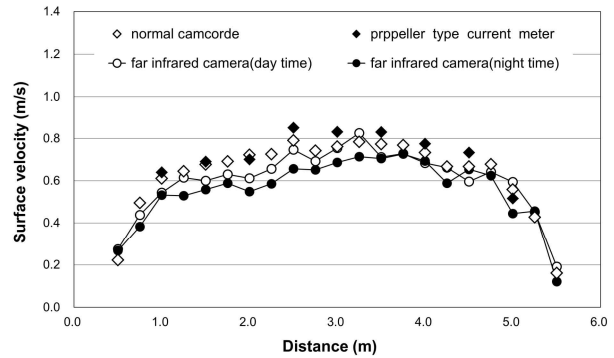


Fig. 9. Comparison of the Results of the Surface Velocity Measurement

Table 5. Comparison of the Results of the Surface Velocity

Distance (m)	propeller type current meter (m/s)	Normal Camcorder		Near Infrared Camera		Far Infrared Camera	
		velocity (m/s)	error (%)	velocity (m/s)	error (%)	velocity (m/s)	error (%)
0.50		0.22		0.27		0.27	
0.75		0.50		0.44		0.38	
1.00	0.64	0.61	-4.46	0.54	-14.93	0.53	-16.81
1.25		0.65		0.62		0.53	
1.50	0.69	0.68	-1.88	0.60	-13.04	0.56	-19.13
1.75		0.69		0.63		0.59	
2.00	0.70	0.72	3.14	0.61	-12.70	0.55	-21.68
2.25		0.73		0.66		0.59	
2.50	0.85	0.79	-7.05	0.75	-12.22	0.66	-22.91
2.75		0.74		0.69		0.65	
3.00	0.83	0.76	-8.42	0.76	-9.15	0.69	-17.33
3.25		0.78		0.83		0.71	
3.50	0.83	0.77	-6.92	0.71	-14.27	0.71	-15.11
3.75		0.77		0.73		0.73	
4.00	0.78	0.73	-5.48	0.68	-11.80	0.69	-10.64
4.25		0.67		0.66		0.59	
4.50	0.73	0.67	-9.07	0.60	-18.75	0.65	-10.84
4.75		0.68		0.64		0.62	
5.00	0.52	0.56	7.93	0.59	14.89	0.45	-13.93
5.25		0.43		0.45		0.46	
5.50		0.16		0.19		0.12	

이 측정되기 때문으로 생각된다. 하지만 현재의 센서 기술로는 수표면의 유속을 정확하게 측정할 수 있는 방법이 없기 때문에 소형 프로펠러 유속계가 유속을 다소 크게 산정되기는 하지만 적용성을 검토하기 위한 목적으로는 최선이라 생각한다.

우선 주간에 획득한 일반캠코더 영상으로 산정한 유속 산정 결과의 오차는 최대 -10% 정도의 오차를 나타내어 기존의 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) 연구 결과들에서 제시한 결과와 유사한 정확도를 나타내었다. 특히 본 연구에서는 수표면에 추적자를 뿌리지 않고 수면파문만으로 유속을 산정한 결과이기 때문에 CASTI 기법의 활용함에 있어 긍정적인 평가를 내릴 수 있다. 또한 주간에 획득한 원적외선 카메라 영상으로 산정한 유속 결과의 오차는 최소 -9%에서 최대 -19%까지의 오차 범위를 나타냈다. 전체적으로 일반캠코더 영상으로 산정한 유속보다 작게 산정되는 경향을 보였으며, 하도 중앙부분 보다는 호안 근처로 가면서 정확도가 떨어지는 경향을 나타냈다. 하지만 일반캠코더를 이용한 경우와 비교하여 최대 10% 이내의 차이를 보였기 때문에 주간 유속 측정에 원적외선 카메라의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 얼음과 같이 온도 차이가 크게 날 수 있는 추적자를 사용한다면 정확도는 좀 더 향상될 수 있을 것으로 생각한다.

한편 야간에 획득한 원적외선 카메라 영상으로 산정한 유속 결과의 오차는 최소 -10%에서 최대 -23%까지의 오차 범위를 나타냈다. 전체적으로 일반캠코더 영상과 주간 촬영한 원적외선 카메라 영상으로 산정한 유속보다 작게 산정되는 경향을 보였으며, 주간 영상과는 달리 오차 분포가 경향을 나타내지는 못하였다. 즉, 원적외선 카메라를 적용함에 있어 주간보다는 야간의 유속 산정 결과가 오차를 좀 더 크게 나타내었다. 그 이유는 주간의 복사에너지가 야간에는 작아지면서 주간에 명확하게 표현되던 수면파문이 야간에는 약간 흐려지는 경향을 갖기 때문으로 생각된다. 즉, 야간의 경우 원적외선 영상을 바로 사용하기 보다는 영상의 전반적인 색 보정 등을 통한 사전 영상처리에 대한 개선 연구가 필요할 것으로 생각된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 표면영상유속측정법을 이용하여 야간의 하천 유속 측정을 위해 원적외선 카메라를 적용한 영상의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 실규모 하천 수로에서 일반캠코더로 촬영한 주간 영상과 야간에 촬영한 근적외

선 영상과 원적외선 영상을 비교하였고, CASTI 기법을 이용하여 산정한 표면유속을 소형 프로펠러 유속계로 측정한 유속과 비교하여 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 빛이 없는 야간에는 일반캠코더 영상은 수표면의 움직임을 확인하기 어려웠고, 근적외선 카메라 영상도 제방과 수면의 구분은 되었지만 수표면의 움직임을 확인하기는 쉽지 않았다. 또한 조명을 설치하여 강제 빛의 밝기를 밝게 한 경우에는 일반캠코더 영상은 제방과 수면의 구분은 되었지만 수표면의 움직임을 확인하기는 어려웠고, 근적외선 카메라 영상은 수표면의 추적자의 식별이 어느 정도 가능했다. 그러나 근적외선 영상의 경우 야간에는 별레나 비산 먼지, 낙엽 등에 의해 큰 잡음이 생기는 한계가 있었다. 한편 원적외선 카메라를 이용한 영상 획득 결과 주간 영상의 영상이 크게 차이가 나지 않음을 확인하였다. 따라서 야간의 수표면 영상 획득에 있어 원적외선 영상의 적용 가능성을 확인하였다. 단, 주간의 복사에너지가 야간에 비해 높기 때문에 주간 영상에 비해 야간 영상의 선명도가 약해지는 경향을 나타냈다.
- 2) 일반캠코더, 근적외선 카메라 및 원적외선 카메라를 이용하여 획득한 주간과 야간 영상을 이용하여 표면 유속을 산정한 결과 주간에는 모두 적용이 가능하지만, 야간의 경우는 원적외선 카메라만 적용이 가능하였다. 또한 야간에 조명을 비출 경우에는 근적외선 카메라의 적용이 가능했으나, 하도 내 조명 밝기가 일정하지 않기 때문에 전체 유속장 산정에 어려움이 있었다. 반면, 원적외선 카메라는 조명에 관계없이 적용할 수 있었으나, 야간 영상은 주간과 비교하여 수표면의 움직임이 흐리게 촬영되어 수표면 움직임이 왜곡될 수 있기 때문에 유속 산정 결과에 대한 정확도 분석이 필요할 것으로 생각한다.
- 3) 소형 프로펠러 유속계로 측정한 표면유속과 비교하여 원적외선 카메라를 이용한 야간 하천 유속 측정 방법의 정확도를 평가한 결과 주간에 획득한 원적외선 카메라 영상으로 산정한 유속 결과의 오차는 최소 -9%에서 최대 -19%까지의 오차 범위를 나타냈고, 야간에 획득한 원적외선 카메라 영상으로 산정한 유속 결과의 오차는 최소 -10%에서 최대 -23%까지의 오차 범위를 나타내었다. 전체적으로 일반캠코더 영상으로 산정한 유속보다 작게 산정되는 경향을 보였으며, 하도 중앙부분 보다는 호안 근처로 가면서 정확도가 떨어지는 경향을 나타냈다. 하지만

일반캠코더를 이용한 경우와 비교하여 최대 10% 이내의 차이를 보였기 때문에 주야간 유속 측정에 원격외선 카메라의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

- 4) 원격외선 카메라를 적용함에 있어 주간보다는 야간의 유속 산정 결과가 오차를 좀 더 크게 나타내었다. 그 이유는 주간의 복사에너지가 야간에는 작아지면서 주간에 명확하게 표현되던 수면파문이 야간에는 약간 흐려지는 경향을 갖기 때문으로 생각된다. 즉, 야간의 경우 원격외선 영상을 바로 이용하기 보다는 영상의 전반적인 색 보정이나 영상 강화 등을 통한 사전 영상처리에 대한 개선 연구가 필요할 것으로 생각한다.

본 연구를 통해 원격외선 영상을 이용한 야간 표면유속 측정 방법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 다양한 야간 흐름 조건에서의 적용을 통해 좀 더 정밀한 정확도 분석 연구가 필요하고, 주간과 야간의 원격외선 영상 내 명암값 분포 차이를 해결하기 위한 영상 처리 기법을 개발하기 위한 추가적으로 연구가 필요할 것으로 생각한다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 한국연구재단의 중견연구자지원사업(NRF-2014R1A2A2A04006578)의 지원을 받아 수행되었으며, 본 연구를 위해 많은 협조를 해 준 여흥구 센터장과 강준구 박사를 비롯한 한국건설기술연구원 안동 하천 실험센터 관계자분들께 감사의 마음을 전합니다.

References

- Bigun, J. (2006). *Vision with direction, a systematic introduction to image processing and computer vision*, Springer.
- 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." *Journal 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., 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., Hara, H., and Yorozyua, A. (2011). "Measurement accuracy of non-contact discharge measurement method using river monitoring movie and development of quasi real time measurement system." *Annual Journal of Hydraulic Engineering, Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 55, pp. S1177-S1182. (in Japanese).
- Fujita, I., Kosaka, Y., Honda, M., Yorozyua, A., and Motonaga, Y. (2013a). "Day and night measurements of snow melt floods by STIV with a far infrared camera." *Proceedings of 2013 IAHR Congress*.
- Fujita, I., Kosaka, Y., Yorozyua, A., and Motonaga, Y. (2013b). "Surface flow measurement of snow melt flood by using a far infrared camera." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, B1, Vol. 69, No. 4, pp. I_703-I_708. (in Japanese)
- 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.
- Hara, H., and Fujita, I. (2010). "Application of two dimensional Fast Fourier Transform to river surface flow measurement with space time image." *Annual Journal of Hydraulic Engineering, Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 54, pp. 1105-1110. (in Japanese)
- Jähne, B. (1993). *Spatio-Temporal Image Processing*, Springer, pp. 150-152.
- Kim, S., Yu, K. and Yoon, B., (2011). "Real-time discharge measurement of the river using fixed-type surface image velocimetry." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, pp. 377-388. (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 2010 Annual Conference, KWRA*. (in Korean)
- Kim, Y., Noh, J. and Choi, K. (2014) "Development of microwave water surface current meter for general

- use to increase efficiency of measurements of river discharges,” *Journal of the Korean Society of Limnology*, Vol. 47, No. 3, pp. 225-231 (in Korean)
- Kim, Y., Yang, S., Yu, K., and Kim, D. (2015). “Comparative Analysis of Day and Night Time Video Accuracy to Calculate the Flood Runoff Using Surface Image Velocimeter (SIV).” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 24, No. 4, pp. 359-369. (in Korean)
- K-Water (1994). *Development of measurement facilities for stream discharge (Development of a microwave surface velocity meter and supersonic correlation current meter)*. WRRRI-WR-94-1. (in Korean)
- K-Water (2008). *Development of All-time Discharge Measuring System Using Microwave Water Surface Current Meter (2nd yr)*. KIWE-HRC-08-01. (in Korean)
- K-Water (2010). *Improvement of Accuracy on Discharge Measurement Using Surface Velocity*, KWI-WR-10-01. (in Korean)
- Miyamoto, H. (2007). “Basic performance evaluation of water-surface ripples as a visualization tracer for the local remote sensing of river flows.” *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. B63, No. 4, pp. 357-367. (in Japanese)
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., and Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry, a practical guide*, Springer.
- Saito, H., Hagihara, T., Hatanaka, K., and Sawai, T. (2007). “Development of pedestrian detection system using far-infrared-ray (FIR) camera.” *SEI Technical Review*, Vol. 171, pp. 80-85.
- Yamaguchi, T., and Niizato, K. (1994). “Flood discharge observation using radio current meter.” *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 497/II-28, pp. 41-50. (in Japanese)
- Yu, K., Kim, S., and Yoon, B. (2014). “Measurement of two-dimensional velocity distribution of spatio-temporal image velocimeter using cross-correlation analysis.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 537-546. (in Korean)

paper number : 15-026

Received : 20 March 2015

Revised : 18 June 2015 / 7 July 2015

Accepted : 7 July 2015