

전자파와 수표면 영상을 이용한 산지하천 홍수유량 및 유속 계측 비교 연구

양성기 · 김동수^{1)*} · 류권규²⁾ · 강명수 · 정우열 · 이준호 · 김용석 · 유호준¹⁾
제주대학교 토목환경공학과, ¹⁾단국대학교 토목환경공학과, ²⁾동의대학교 토목환경공학과
(2012년 4월 9일 접수; 2012년 5월 10일 수정; 2012년 6월 11일 채택)

Comparison of Flood Discharge and Velocity Measurements in a Mountain Stream Using Electromagnetic Wave and Surface Image

Sung-kee Yang, Dong-su Kim^{1)*}, Kwon-kyu Yu²⁾, Meyong-su Kang, Woo-yul Jung,
Jun-ho Lee, Yong-seok Kim, Ho-jun You¹⁾

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

¹⁾*Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea*

²⁾*Department of Civil Engineering, Dong-eui University, Busan 614-714, Korea*

(Manuscript received 9 April, 2012; revised 10 May, 2012; accepted 11 June, 2012)

Abstract

Due to the difficulties for measuring flood discharge in the dangerous field conditions, conventional instruments with relatively low accuracy such as float still have been widely utilized for the field survey. It is also limited to use simple stage-discharge relationship for assessment of the flood discharge, since the stage-discharge relationship during the flood becomes complicated loop shape. In recent years, various non-intrusive velocity measurement techniques such as electromagnetic wave or surface images have been developed, which is quite adequate for the flood discharge measurements. However, these new non-intrusive techniques have little tested in the flood condition, though they promised efficiency and accuracy. Throughout the field observations, we evaluated the validity of these techniques by comparing discharge and velocity measurements acquired concurrently during the flood in a mountain stream. As a result, the flood discharge measurements between electromagnetic wave and surface image processing techniques showed high positive relationship, but velocities did not matched very well particularly for the high current speed more 3 m/s. Therefore, it should be noted here that special cares are required when the velocity measurements by those two different techniques are used, for instance, for the validation of the numerical models. In addition, authors assured that, for the more accurate flood discharge measurements, velocity observation as well as stage height is strongly necessary owing that the unsteady flow occurs during the flood.

Key Words : Flood discharge, Surface image velocimetry, Electromagnetic surface current meter, Mountain stream

*Corresponding author : Dong-Su Kim, Assistant Professor,
Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook
University, Yongin 448-701, Korea
Phone: +82-31-8005-3611
E-mail: dongsu-kim@dankook.ac.kr

1. 서론

홍수기 유량은 홍수해석이나 방재 등에 매우 중요한 자료이고 다양한 강우-유출모델의 검보정에 활발하게 활용되어 자료의 확보 및 관측 정확도의 향상이

평시 유량 관측보다 더 중요하다. 그러나, 홍수기의 하천 유속은 매우 빠르고 현장 계측 어려워 일반적인 접촉식 유속계를 활용하는데 많은 한계가 있다. 예를 들어 대표적인 접촉식인 프로펠러 유속계나 높은 유량관측 정확도를 제공하는 초음파도플러 유속계 (ADCP)도 홍수기 유량을 계측하는 데 제한적으로 활용되고 있다 (Le Coz, 2008; Muste 등, 2008). 따라서 현장에서는 여전히 재래식 혹은 개량된 부자를 활용한 홍수 유량 계측이 많이 적용되고 있다 (WMO, 2011; 이 등, 2009). 그 결과 홍수유량 계측의 정확도는 비홍수기 하천에 비해 낮다고 할 수 있다. 그러나, 유속에 비해 수위 관측은 상대적으로 용이하여, 수위-유량관계곡선식을 활용하여 홍수위에 해당하는 유량을 간접 추정하는 방법이 일반적으로 사용된다 (유량조사사업단, 2009). 일반적으로 홍수기 유량이 확보되지 않는 경우 저수위 흐름 영역 (low flow regime)에서 구축된 수위-유량 관계를 외삽하거나 반대로 부자 등 정확도가 낮은 방법으로 확보한 유량을 수위-유량관계곡선식을 구축하는 데 사용하여 전반적으로 정확도가 저하되는 경향이 있다. 또한 수위-유량관계곡선식도 홍수기에는 홍수파나 하상의 변동 등 부정류의 발생으로 단일관계가 아니라 고리형(loop) 관계를 보이거나 이격현상 (shift effect)를 보여 사실상 많은 오차를 수반한다고 할 수 있다 (우, 2001; Kuhnle 등, 1992; Muste 등, 2011; WMO, 2011). 그러므로 홍수기의 유량을 보다 향상된 방법으로 직접 유속을 관측하여 유량관측의 정확도 향상의 필요성이 제기되어왔으나 현장 계측의 어려움으로 여전히 재래식의 부자법이 사용되고 있다 (Muste 등, 2008; 이 등, 2011).

홍수기 유량 관측의 정확도를 향상시키고 현장 관측을 용이하게 하는 비접촉식의 유속 계측방식의 개발은 최근 많은 각광을 받고 있다 (Muste 등, 2012). 새로 등장한 다양한 관측기기들은 전자기파(electromagnetic wave)과 이미지 분석 (image processing) 기법을 디지털 기술과 결합함으로써 측정기기에 발전적으로 적용하여 비접촉식으로 표면의 흐름속도를 계측하는 방식이다. 이러한 방식을 활용한 비접촉식 계측기기는 각각 전자파 표면유속계(electromagnetic surface current meter 또는 Doppler radar)와 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)로 불린다. 이들은 하천

단면의 여러 지점에서 시간평균된 평균유속을 계측할 수 있어, 홍수기 유속 및 유량 계측의 정확도를 향상시킬 수 있고 안전하고 편리하게 홍수유량을 측정할 수 있는 좋은 대안이 되고 있다. 그러나, 이러한 계측기기의 관측정확도에 대한 연구는 매우 드문 상황이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 최신 비접촉식 관측방식들을 홍수기 현장에 동시에 적용하여 홍수유량 및 유속의 관측 정확도를 상호비교 및 평가하고자 한다.

2. 사용된 유량 계측 방식

2.1. 표면영상유속계 (Surface Image Velocimetry)

표면영상유속계 (Surface Image Velocimetry; SIV)는 수표면에 나타난 부유물이나 수면파의 이동을 연속 영상으로 촬영한 뒤, 영상 사이의 상호상관(cross-correlation)을 계산하여 영상 변위를 계산하고 이를 유속으로 환산하는 것이다. 이것은 기존의 실험실에서 사용되는 입자영상유속계(PIV, Particle Image Velocimetry) 기법을 현장으로 확장한 기법으로 2차원 공간에 분포한 수표면 유동장을 동일한 시점에서 비접촉식으로 제공할 수 있는 최신기법이다 (Aya 등, 1995; Fujita 등, 1998; Creutin 등, 2002; 노, 2005; Muste 등, 2008). 표면영상유속계는 비접촉식이므로 홍수시의 접근 위험 지역의 유속장을 안전하게 측정하는 데 장점이 있다. 그리고 직접 유속측정을 통해 유량을 계산해 부정류의 발생으로 인한 수위-유량곡선 방법의 홍수기 적용 한계를 극복할 수 있다. 이 기법은 국내에서도 2000년대 이후에 소개되어 홍수유량 관측에 적용되어 그 정확도를 평가한 바 있다 (노, 2004; 김 등, 2011). Hauet 등(2008)은 표면영상유속계를 계량해 실시간 유량산정방법 (Real-time LSPIV: Large Scale Particle Image Velocimetry)을 개발해 미국 아이오와강에 적용하여 시범운영하였다. 그러나, 표면영상유속계는 수직사진 및 실제 스케일 전환을 위해 별도의 참조점 측정이 필요하고 전체 표면유속장을 산정해야 하므로 횡단면이 넓은 하천의 경우 여러 영상을 동시에 처리해야 하는 등 다소 복잡한 후처리과정이 필요하다 (김 등, 2011). 특히 야간 관측 시 뚜렷한 한계를 보이거나 (Fujita 등, 2011), 적외선 영상이 보편화되면서 극복할 수 있는 가능성은 있다.

본 연구에서는 기존의 순간 유속장을 포착하여 유량을 계산하는 방식 대신 지정된 지점에서 전자파표면유속계의 측정값과 비교를 목적으로 교량에서 수직으로 일반 비디오카메라 (삼성 HMX-S16SD, Fig.1a) 영상을 취득하고, 주어진 지점에서 시간 및 공간에 따른 유속 변화를 평균하여 평균유속을 산정하였다. 따라서 횡단면의 일정한 간격으로 지점 유속을 산정하는 방식이다. 이 방식은 영상과 수표면까지의 수직거리의 측정으로 별도의 참조점이 필요하지 않고, 약 5초간의 순간유속을 평균하여 고속 유동시 발생하는 난류나 오차를 줄여주는 장점이 있다. 그리고 프로펠러 유속계 등 재래식의 지점 유속계측 후 유량산정 방식과 유사하여 현장 실무진에게 익숙한 방식이다. Fig.1b는 교량에서 수직촬영된 영상에서 표면영상유속계를 활용하여 지정된 지점에서의 평균유속을 산정하는 방식을 보여준다. 주어진 좁은 사각형의 영역에서 유속을 지속적으로 관측한 후 시간 및 공간평균을 실시하고, Fig.1b의 'A' 점과 같이 대표유속으로 환산

하였다. 이 방식은 교량이 있을 경우 효과적으로 사용할 수 있으며, 또 하폭에 상관없이 유량을 안정적으로 계산할 수 있는 장점이 있다.

2.2. 전자파표면유속계 (Electromagnetic Surface Current Meter)

전자파표면유속계는 고주파의 마이크로웨이브를 수표면에 일정시간 동안 지속적으로 전송하여 흐름 표면에서 산란되어 반송되는 신호의 도플러 변위를 측정하여 흐름 방향의 표면 유속을 산출하는 방식이다. (Lee와 Julien, 2006). 그리고 측정된 표면유속을 표면유속과 평균유속 보정계수 (일반적으로 0.85)를 적용하여 평균유속을 간접 계산하여 유량 산정에 활용될 수 있다. 이 기기는 비접촉식 유속 측정을 하므로 안전하여, 홍수기 유량관측에 홍수기 등의 유량이나 유속값이 평시보다 매우 클 경우나 야간 관측에 유용하게 활용될 수 있다 (정, 2002). 전자파를 이용해 표면유속산정 방법을 수자원공사에서 실용화를 연구하

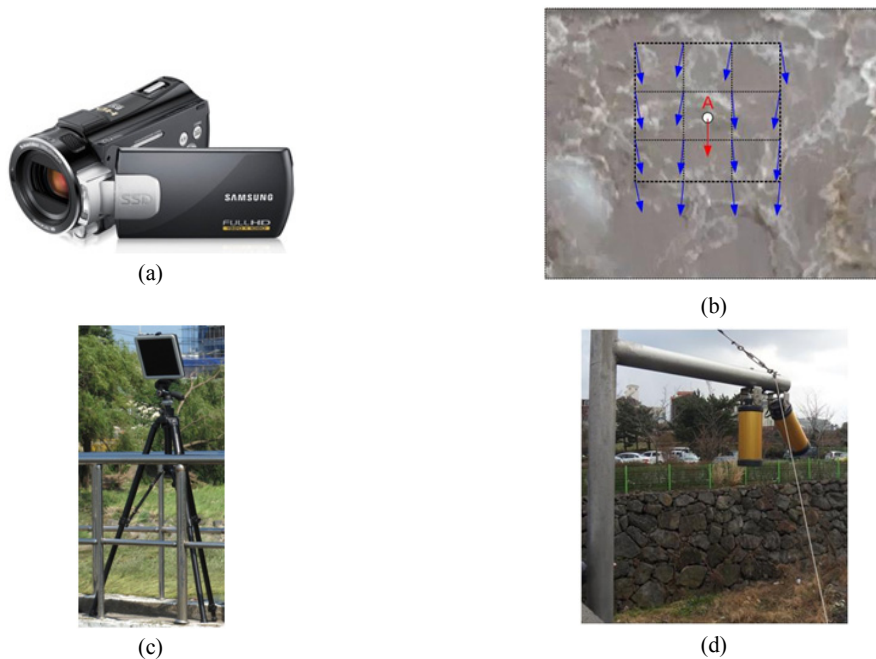


Fig.1. Non-intrusive velocimetry using surface images and electromagnetic wave: a) video camera used for the surface image velocity measurement (Samsung HMX-S16SD); b) a schematic example for spatial and temporal averaging of surface image velocities at a given point; c) movable electromagnetic surface current meter (Mutronics MU2720); d) Fixed point electro-magnetic wave velocity and elevation measurement (Ott Kalesto).

여 성과를 보였고 (한국수자원공사, 1998; 노 등, 2009; 김 등, 2011), 민간 업체에 기술 이전되어 최근 이동형 전자파 표면유속계 (MU2720; Fig.1c)로 25GHz의 극초단파를 사용하며 평갈수기 및 홍수기 유량관측이 가능하도록 성능이 향상되었다 (뮤트로닉스, 2010). 그러나, MU2720의 경우 흐름이 약 0.3 m/s 부근의 저속유동의 경우 관측정확도가 저하된다고 보고된 바 있다 (양 등, 2011). 홍수기의 표면유속이 약 2~4 m/s인 고유속의 경우에는 이 기법의 초기 실용화 연구에서 유량관측오차가 약 2% 정도라고 보고된 바 있다 (이 등, 1997). 본 연구에서도 최근에 개량된 이동형 전자파표면유속계 (MU2720)을 태풍으로 인한 악천후의 고유속 관측 시 적용하였다. 그러나, 이 유속계는 측정 면적(measurement area)이 어디인지 불분명하여, 위치에 따라 유속 분포가 크게 변화하는 유속장에서는 정확한 측정이 어려운 것으로 보인다.

한편 전자파 활용 유속측정 기술은 해외에서도 상

용화된 바 있으며, 본 연구에서는 제주 수자원본부에서 이미 운용중인 고정형 전자파표면유속계인 Ott사의 칼레스토(Kalesto)의 관측결과를 사용하였다 (제주발전연구원, 2009; Ott, 2000, Fig.1d 참조). 칼레스토는 24GHz의 극초단파를 사용하고 유속과 수위를 동시에 관측할 수 있으나 (뮤트로닉스, 2010), 대체로 단면 중앙의 1개 지점에서 표면유속을 계측하므로 단면에 따른 유속의 변위가 커지는 경우 유량산정에 오차를 포함할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 논문은 2011년 8월 태풍 무이파 때 제주도의 한천의 제 2동산교에서 비접촉식의 이동식 전자파표면유속계 (MU2720)와 표면영상유속계 (SIV)를 활용하여 홍수 유량을 시간 단위로 관측한 결과를 분석하였다 (Fig.2a 참조). 또한 접촉식의 자기유속계 (플로우메타, Marsh-McBirney, 1990)도 사용하여 측정 오차

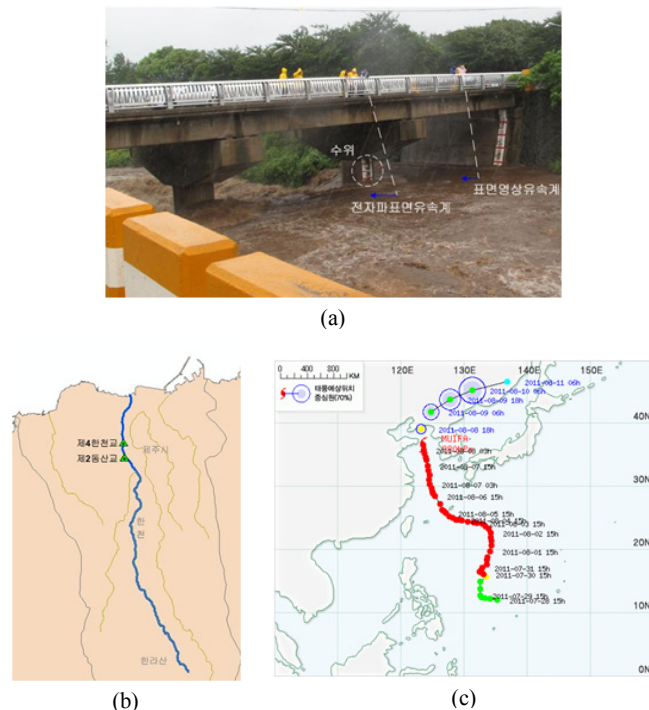


Fig. 2. Field survey during typhoon Muifa: a) velocity measurements using electro-magnetic wave current meter and surface image velocimetry at 2nd Dongsan bridge; b) locations of 2nd Dongsan bridge and 4th Hancheon bridge along the Han stream.

를 함께 점검하였다. 수위는 교각에 부착된 목자판을 읽어 기록하였다. 그리고 제2동산교 직하류에 위치한 제4한천교에 설치된 고정형 전자파표면유속계로 계측된 수위 및 유속자료를 바탕으로 계산된 유량관측값도 비교검증에 활용하였다 (Fig.2b). 이 때 제2동산교와 제4한천교 사이의 거리가 짧고 지류의 유입이 없어 유량은 보존된다고 가정하였다. 고정형 전자파표면유속계 (Fig.1d)의 경우 단면 중심부의 한 지점에서 유속을 측정한다.

제주도를 거쳐 한반도를 통과한 태풍 무이파는 중심기압 965 hPa의 강한 중형급 태풍으로 최대풍속이 38 m/s이고 산간지역 최고 강우량이 626.5 mm이었다 (Fig.2c). 한천은 제주도 중산간에서 발원하여 제주도 북부 해안으로 흐르는 전형적인 산지하천으로 하폭이 약 35 m이고 하천 바닥은 현무암질 암반으로 구성되고 자갈이 다소 분포되어 있다. 하상경사는 약 0.0256으로 상대적으로 급한 자갈 및 암반 지형의 전형적인 산지하천의 형태를 보여주고 있다. 유량을 관측한 지점은 제2동산교로 Fig.2b와 같이 한천 중하류에 위치하고 있으며 시간 단위로 유량을 관측하였다. 제2동산교에서 유출은 8월 7일 오전 6시 경부터 시작되었으며 약 14시간 정도 지속되었다.

Fig.3은 이동형 전자파표면유속계, 표면영상유속계, 고정형 전자파표면유속계 (Kalesto), 그리고 자기유속계 (플로우메타)로 산정한 유량의 시간당 변화를 나타낸다. 자기유속계를 제외한 나머지 3가지 계측방식은 비접촉식으로 산지하천의 홍수기 매우 강한 흐름에 적합한 방식으로 판단되어 본 논문에서 사용되었다. 비교결과 자기유속계를 제외하고 전반적인 유량의 추이를 잘 포착한다고 할 수 있다. 접촉식인 자기유속계는 고유속의 경우 유량 관측의 정밀도가 매우 저하됨을 알 수 있다. 그러나, 하강기인 오후 4시30분 이후 다른 계측방식들도 다소 불일치를 보이고 있다. 이때 유속은 약 3~4 m/s의 고속유동으로 이동형 전자파표면유속계의 경우 표면영상유속계나 고정형 전자파표면유속계 (Kalesto)에 비해 유량이 높게 산정되었다.

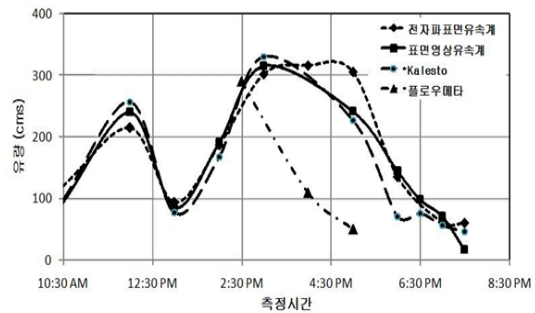


Fig.3. Discharge measurements during the flood using various non-intrusive instruments as well as conventional magnetic velocimetry.

한편, 표면영상유속계와 전자파표면유속계의 횡단면에 따른 속도분포를 비교하면 속도 계측이 상이성은 매우 뚜렷해진다. Fig.4a~f는 시간대별 단면의 5개 지점에서 유속을 보여준다. 이 경우 두 계측방식에서 유량이 유사하게 산정되더라도 유속 측정 결과는 상이하다는 사실을 알 수 있다. 특이할 부분은 오후 5시의 경우 두 계측방식 사이에 유량의 차이와 유속의 차이가 일관된 차이를 나타냈는데 이 때 전자파표면유속계에 비해 표면영상유속계가 전반적으로 과소계측하는 결과를 보여준다. 즉 전자파표면유속계가 전반적으로 4 m/s 이상의 유속을 계측한 반면, 표면영상유속계는 약 80% 수준으로 유속을 관측하였다. 하류단에 위치한 고정식 전자파표면유속계 역시 이 시각 유속이 4 m/s 이상으로 계측된 결과에 미루어볼 때 표면영상유속계가 다소 과소계측하였을 가능성이 있다 (Fig.6참조). 하지만 유량과 마찬가지로 유속도 참값을 알 수 없으므로, 어떤 계측기기가 더 정확하게 유속을 계측할 수 있다고 현단계에서 확실하게 결론지을 수는 없다. 그리고 두 방식 모두 표면유속만을 관측하므로 자갈하상의 산지하천에서 표면유속과 수직유속 혹은 평균유속과의 관계가 명확하게 정의되지 않은 한계가 있어 유량 계산에 오차를 수반할 수 있다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 표면유속-평균유속의 비인 0.85를 사용하였다. 향후 산지하천의 홍수기 흐름의 수직유속분포를 측정하여 표면유속-평균유속간의 관계를 정립할 필요가 있다.

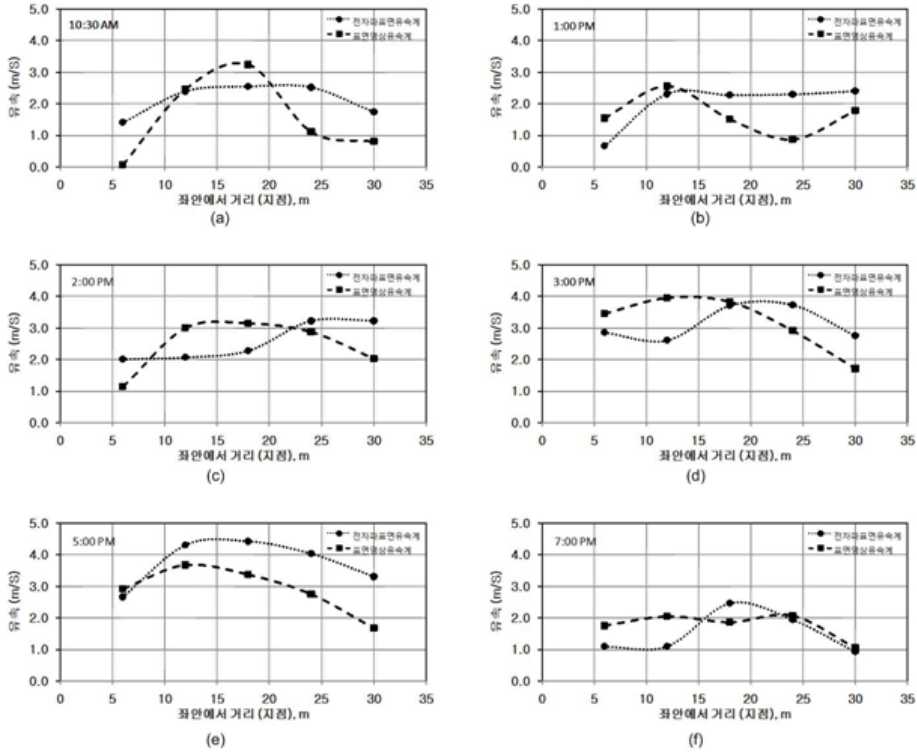


Fig. 4. Comparison of surface velocity measured by both electro-magnetic wave surface velocimetry and surface image velocimetry along the given cross-section over time.

Fig.5a는 Fig.4의 두 계측기간 유속관측값 전체를 비교하였는데 평균제곱근오차(RMSE, 식 (1)참조)가 0.9 m/s로 그 결과가 상당부분 산포되어 있음을 알 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_s(i) - V_t(i))^2} \quad (1)$$

하지만 유량의 경우 유속의 상이한 값이 상쇄되어 일부 지점 (Fig.5b의 쇄선원)을 제외하면 높은 상관도를 나타냈다.

이러한 결과로부터 고속유동에서 두 계측기기의 차이의 원인을 다음과 같이 추정할 수 있다.

첫째, 전자파표면유속계와 표면영상유속계를 사용하여 정확하게 동일한 지점을 관측하지 못한 데 그 원인이 있을 수 있다. 즉 표면영상유속계는 교량에서 거의 수직으로 가까운 지점을 계측한 데 비해, 전자파

면유속계의 경우 자료취득영역 (sampling volume)의 크기와 위치가 명확하지 않아 서로 상이한 지점을 비교하였을 가능성이 있다는 점이다.

둘째, 전자파표면유속계가 고속유동에서 난류로 인한 표면의 불안정 및 짧은 주기의 표면파 발생 등으로 인해 불안정한 계측의 정밀도를 보여줄 수 있다. 측정 당시의 상황은 강한 바람이 있어서 표면에 물보라가 많이 나타난 상황이며, 이런 비산된 물방울들이 전자파의 반사 등에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

셋째, 표면영상유속계의 각 지점당 측정 시간은 최대 10초 이내로 매우 짧은 시간 동안 측정하였기 때문에, 4 m/s 이상의 고속유동의 경우 매우 짧은 주기의 난류의 강도가 강해지거나 표면파의 급속한 발생과 소멸로 영상이 급변할 수 있어 유속산정에 오차를 내포할 가능성이 있다.

그럼에도 불구하고 전반적으로 주지할 사실은 여

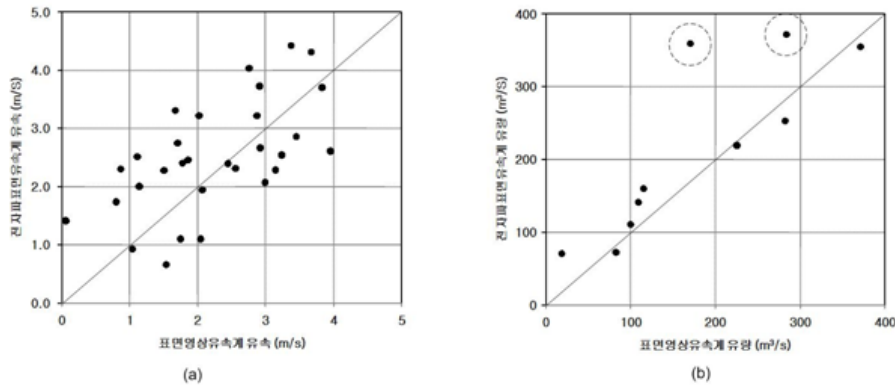


Fig. 5. One-to-One relationships of velocity and discharge measurements between the electro-magnetic wave surface velocimetry and the surface image velocimetry.

전히 두 계측기기로 관측되는 유속의 상호차이가 크 다라는 점이다. 이러한 결과는 비록 유속과 부분 면적 의 곱과 부분유량의 합으로 계산되는 유량의 상호차 이는 작아도 자갈하상의 경사가 급한 산지형 하천에 서 유속계측은 최근 비접촉식으로 홍수유량계측에 활 용의 범위를 넓혀가는 두 계측방식의 차이가 뚜렷하 게 나타남을 알 수 있다. 본 연구에서는 정확한 유속값 을 알 수 없는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서 취 득한 자료만으로는 어떤 계측방식이 보다 정확하다고 결론짓기 힘들다고 할 수 있다. 다만 유량 계측의 경우 상관도가 높아 어느 정도의 오차범위에서 홍수 유량 산정에 이용될 수 있을 것이다. 향후 이들 계측기기의 신뢰성을 엄밀하게 평가하기 위해 비슷한 계측조건에 서의 추가적인 자료를 기반으로 보다 면밀한 분석이 필요하고 실내 실험과 같은 유속을 비교적 정확하게 알고 있는 흐름 조건에서 두 방식을 사용하여 그 결과 를 상호비교하는 작업이 필요하다.

한편 제4한천교에서 사용된 고정식 전자파유속계 의 경우 단면 중앙의 한 지점에서의 유속을 관측하므 로 유량관측의 오차를 보일 수 있다는 사실은 단면의 다지점 유속 관측을 통해 알 수 있다. Fig.4에서 나타 났듯이 유속은 단면에 따라 일정하지 않고 고속유동 일 경우 편차가 커지는 경향을 보인다. 따라서 보다 정 확한 유량측정을 위해 본 연구에서 수행한 방법과 같 이 다지점의 유속계측을 통한 유량 산정이 요구된다. 하지만 Fig.3에서 보듯 전반적인 유량의 경향은 다지

점 유속 관측을 통한 유량과 거의 유사하게 나타나 실 무적으로 사용할 수 있는 범위에 든다고 할 수 있다. 그리고 Fig.6에서처럼 수위와 유속간의 관계식을 볼 때 동일한 수위에서 유속의 차이를 보이는 부정류가 홍수기 유량에서 발생함을 알 수 있다. 예를 들어 수위 2 m에서 유속은 최대 약 1.2 m/s의 변위를 보였고 수위 4 m에서는 약 1.0 m/s의 변위를 보이고 있다. 이는 단 순한 수위-유량 관계곡선식이 단일관계를 보이지 않는 다는 사실을 보여주며 수위 관측만으로 유량을 추정할 수 없음을 시사한다. 따라서 본 연구의 한천의 경우와 같은 산지형 하천의 경우 실제 수위와 유속을 동시에 관측하여 유량을 산정하는 것이 타당하다고 하겠다.

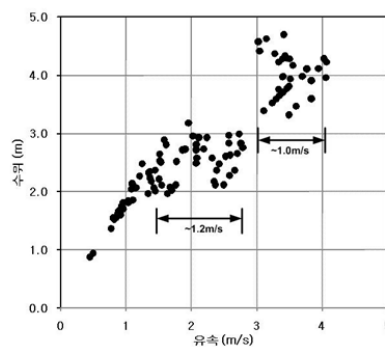


Fig. 6. Unsteadiness of the flood flow from the relationship between water depth and velocity based on the fixed electro-magnetic wave surface velocimetry measurements.

4. 결론

본 연구를 통해 산지형 하천인 제주도 한천에서 표면영상유속계, 이동형 및 고정형 전자파표면유속계, 자기유속계를 적용하여 유량계측을 실시하여 상호 비교해 보았다. 이러한 성과는 현재 국내 현장에서 홍수기 유량관측에 활발하게 활용되고 있는 최신 비접촉식 관측기법들의 결과를 비교 및 평가한 결과로 홍수기 유량을 안전하고 효율적으로 계측할 수 있는 기법들의 효용성을 판단할 수 있는 연구라고 할 수 있다. 유량의 경우 접촉식의 자기유속계를 제외하고 비교적 상호 유사하게 나타나 홍수기 유량관측에 전자파나 영상변위를 활용한 방식이 효율적으로 사용될 수 있음을 보여주고 있다. 하지만 전자파와 영상변위를 통한 유속관측을 직접 비교하였을 경우 일정부분 차이를 보임을 알 수 있었다. 따라서 유속 관측치를 유량 계산 이외에 수치모형 검보정 등에 활용한 경우 본 연구의 결과로 미루어 볼 때 유속의 불확실도가 크다고 하겠다. 본 논문의 결과로는 전자파나 영상변위를 활용하는 방식의 우위를 판단할 수는 없다. 다만 홍수기 산지하천의 매우 빠른 유속에서 접촉식 계측기기를 사용하는 방식이 거의 불가능한 경우 매우 효율적으로 적용될 수 있는 방식이라고 할 수 있다. 향후 유사한 흐름 조건에서의 보다 면밀한 비교 평가가 실시되어 유속별 정확도를 파악해야 할 것이며 가능하면 실내실험을 통해 정확도를 규명하는 작업도 수행되어야 할 것이다. 그리고 이미 설치되어 실시간으로 운용되고 있는 고정형 전자파표면유속계(Kalesto)의 경우 유량 관측은 다 지점에서 유속을 관측한 후 계산한 유량과 비슷한 결과를 도출하였으나 하나의 지점 유속을 관측하는 한계가 있어 본 연구에서와 같이 횡단면의 홍수유속이 다르게 나타날 경우 상당한 오차를 수반할 수도 있음을 알 수 있다. 또한 수위별 유속 관측결과를 비교할 때 홍수파나 하상변동 등으로 인한 부정류가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 유속 관측없이 단일 수위-유량 관계곡선식을 기반으로 수위관측을 통한 유량 계산은 상당한 유량계산 오차를 수반할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통해 태풍의 악조건속에서 홍수기 유량을 시간 단위로 현장에서 비접촉식 최신계측기법을

활용하여 성공적으로 계측할 수 있었다. 이러한 종류의 현장 계측이 매우 드문 상황에서 본 연구의 계측 결과는 향후 유사한 연구에서 참고자료로 활용될 것으로 기대한다. 그리고 전자파와 영상변위를 활용한 유속 관측기법은 여전히 그 정확도를 검증하는 작업이 추가적으로 필요하다고 하겠다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단(10지역기술혁신B02)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김서준, 류권규, 윤병만, 2011, 고정식 표면영상유속계(FSIV)를 이용한 실시간 하천 유량 산정, 수자원학회 논문집, 44(5), 377-388.
- 김영성, 이현석, 2011, 전자파표면유속계의 성능개선 및 실용화, 한국수자원학회 2011년도 학술발표회 논문집, 85-85.
- 노영신, 2005, 영상해석 기술을 이용한 하천 유량 측정 기법 개발, 박사학위논문, 명지대학교.
- 노재경, 이재남, 2009, 비접촉식 유량측정의 현황, 한국수자원학회지, 42(6), 51-57.
- 뮤트로닉스, 2010, 평갈수용 전자파표면유속계, 특허출원 10-2010-89895.
- 양성기, 김동수, 정우열, 류권규, 2011, 다양한 침단 유량 계측기기를 활용한 제주도 하천 유출 비교 분석, 한국환경과학회지, 20(6), 738-788.
- 우효섭, 2001, 하천수리학, 청문각, 280-286.
- 유량조사사업단, 2009, 2008년도 국토해양부 수위-유량 관계곡선식, 발간등록번호 HSC00-C-09-01
- 이상호, 김우구, 김영성, 1997, 전자파 표면 유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성, 한국수자원학회 논문집, 30(6), 671-678.
- 이찬주, 김원, 김치영, 김동구, 2009, 전자부자 시스템을 활용한 자연하천의 유속과 유량측정, 대한토목학회 논문집, 29(4B), 329-337.
- 정성호, 2002, 전자파표면유속계를 이용한 홍수기 유량 측정에 관한 연구, 석사학위논문, 밀양대학교 산업대학원.
- 제주발전연구원, 2009, 제주지역 하천유출수 활용을 위한 수문 및 수질특성 기초연구, 정책연구 2009-11, 3-4.

- 한국수자원공사, 1998, 전자파표면유속계 실용화 연구, WRRI-기획-98-3, 1-2.
- Aya, S., Fujita, I., Yagyu, M., 1995, Field Observation of Flood in a River by Video Image Analysis, Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE, 39, 447-452.
- Creutin, J. D., Muste, M., Li, Z., 2002, Traceless Quantitative Alternatives for Measurements in Natural Streams, Proceedings Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference, Estes Park, CO (CD-ROM).
- Fujita, I., Kunita, Y., 2011, Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera, Journal of Hydro-environment Research, 5(4), 323-331.
- Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., 1998, Large-scale particle image velocimetry flow analysis in hydraulic engineering applications, Journal of Hydraulic Research, 36(3), 397-414.
- Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W. F., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J. D., Wilson, M., 2008, Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method, Journal of Hydrology, 13(2), 105-110.
- Jerome, L. C., 2008, Challenges in Hydrometry: Some Examples from France, Experiences and Advancements in hydrometry, Seoul, Korea.
- Kuhnle, R. A., Bowie, A. J., 1992, Loop Rating Curves from Goodwin Creek, Proceedings of the Hydraulic Engineering sessions at Water Forum '92, Baltimore, Maryland.
- Lee, J. S., Julien, P. Y., 2006, Electromagnetic Wave Surface Velocimetry, Journal of Hydraulic Engineering, 132(2), 146-153.
- Marsh, M., 1990, Flo-Mate Model 2000 Portable Flowmeter Instruction Manual.
- Muste, M., Kim, D., Merwade, V., 2012, Modern Digital Instruments and Techniques for Hydrodynamic and Morphologic Characterization of Streams, Chapter 24 in Gravel Bed Rivers: Processes, Tools, Environments, edited by Ashmore P., Bergeron N., Biron P., Buffin-Bélanger T., Church M., Rennie C. Roy A.M., Wiley, New York, NY.
- Muste, M., Fujita, I., Hauet, A., 2008, Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resources Research, Vol. 44, W00D19.
- Ott, 2000, Radarsensor for contact free measurement of surfacewave level, Kalesto.
- WMO, 2011, Manual on stream gauging, Volume II - Computation of discharge, WMO-No. 1044, 36-37.