

자갈 및 암반 하상 산지하천의 고리형 수위-유량 관계 분석 Analysis of Loop-Rating Curve in a Gravel and Rock-bed Mountain Stream

김 동 수* / 양 성 기** / 류 권 규***

Kim, Dongsu / Yang, Sung-Kee / Yu, Kwonkyu

Abstract

It is well-known that loop effect of the stage-discharge relationship is formulated based on many field observations especially for the sand rivers. Theoretical understandings of the loop effect for the sand rivers have been widely provided, based on the facts that it is driven by the flood wave propagation and bed form changes over the given flood period. However, very few theoretical studies or field observations associated with loop-rating curves in the gravel or rock-bed mountain streams have been attempted so far, due particularly to the difficulties in the accurate discharge measurement during the flood in such field conditions. The present paper aims to report a unique loop-rating curve measured at a gravel and rock-bed mountain stream based on the flood discharge observation acquired during the typhoon, Muifa that passed nearby Jeju Island in summer of 2011. As velocity instrumentation, a non-intrusive Surface Velocity Doppler Radar to be suitable for the flood discharge measurement was utilized, and discharges were consecutively measured for every hour. Interestingly, the authors found that the hysteresis of the loop-rating curve was adverse compared to the typical trend of the sand bed streams, which means that the discharge of the rising limb is smaller than the falling limb at the same stage. We carefully speculate that the adverse trend of the loop-rating curve in the gravel bed was caused by the bed resistance change that works differently from the sand bed case.

Keywords : stage-discharge relationship, loop-rating curve, mountain stream, gravel-bed, hysteresis

요 지

홍수 발생 시 모래하천의 수위-유량 관계가 고리형을 이룬다는 것은 많은 현장 계측을 통해 보고되어 왔다. 또한, 홍수와 해석이나 사면에서 사구로 변동되는 하상해석을 통해 고리형 수위-유량 관계의 원인이 규명되어서 고리의 형태나 진행 방향 등에 대해서는 이론적으로도 상당부분 입증되어 있다. 그러나 경사가 급한 자갈 및 암반으로 구성된 산지하천의 경우, 현장유량계측의 어려움과 관측 정확도의 문제로 고리형 수위-유량 관계에 대한 연구가 매우 드물었다. 본 논문은 자갈 및 암반 지형의 산지하천인 제주도 한천에서 2011년 태풍 무이파 때 계측한 홍수 유량을 바탕으로 수위-유량 관계를 구축하고, 자갈하천에서 형성되는 고리형 수위-유량 곡선을 분석하고자 한다. 유량계측 방식으로는 홍수기에 적합한 비접촉식인 전자파 표면유속계를 사용하여, 홍수의 상승기와 하강기의 유량을 시간 단위로 계측하는 데 성공했다. 계측결과 수위-유량관계에서 뚜렷한 고리 형상을 확인할 수 있었다. 그리고 고리의 이력이 모래하천과 정반대로 동일수위에서 상승기의 유량이 하강기의 유량보다 작은, 고리 경로의 역전 현상을 발견하였다. 이러한 역전현상은 자갈하천의 조도의 변화가 모래하천의 경우와 반대로 발생하는 데 기인하는 것으로 추정한다.

* 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (e-mail: dongsu-kim@dankook.ac.kr)

Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, Gyeonggi, Korea

** 교신저자, 제주대학교 토목공학과 교수 (e-mail: skyang@jejunu.ac.kr, Tel: 064-754-3451)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

*** 동의대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: pururumi@deu.ac.kr)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Dong-eui University, Busan, Korea

1. 서 론

수위-유량 관계곡선식은 수위관측만으로 간접적인 유량 산정이 용이하기 때문에 국내의 대부분의 자동유량관측에 활용되고 있다(유량조사사업단, 2009). 일반적으로 직접 유량 관측은 지속적인 유량조사에 활용되기 보다는 해당 지점의 수위별 유량을 선별적으로 관측하여 수위-유량관계식을 구축하는 데 이용된다. 재래식의 프로펠러 유속계나 봉부자, 그리고 최근에 이용범위가 확대되고 있는 ADCP, 전자파표면유속계가 직접유량 관측에 활용되고 있다(Muste 등, 2007). 최근에는 직접관측에 의한 실시간 유량관측은 표면영상유속계를 활용하여 실시되고 있다(Fujita 등, 1998; 노영신, 2005; Hauet 등, 2008; Muste 등, 2011). 수위관측에 의한 유량산정을 목적의 수위-유량 관계곡선식은 운동파 모형(Kinematic wave model)에 기반한 단일 관계식으로 구성되어 있다(유량조사사업단, 2009). 그러나 홍수기 유량의 경우 홍수파와 하상변동 등의 발생으로 부정류가 형성되어 수위-유량 관계곡선식이 단일관계가 아니라 고리형으로 형성이 되는 경향이 있다(우효섭, 2001; Kuhnle 등, 1992; Muste 등, 2011). 충적 하천(alluvial channel)의 경우 일반적으로 수위 상승부(rising limb)에서 홍수 유량은 같은 하상경사의 등류 유량보다 커지고 수위 하강 시(falling limb)에는 반대로 등류유량보다 작아진다(Simons 등, 1962; Henderson, 1966). 즉 동일한 수위에서 수위 상승 시가 수위 하강 시보다 유량이 커지는 경향을 보인다. 이처럼 고리를 이루는 현상은 물리적인 면에서는 이력 현상(hysteresis; Muste 등, 2011)의 일종으로 많은 홍수 유량 관측에서 보고되어 왔으며, 철두 전후 홍수파로 인한 마찰경사의 변화(우효섭, 2001) 및 하상변동의 관점에서 이론적인 해석도 수행되어 왔다(Julien, 1998). 또한 홍수유량이 저수류 영역(lower-flow regime)에서 고수류 영역(upper-flow regime)으로 변화하는 경우 하상 변동으로 관계곡선의 이격현상(shift effect)이 나타나기도 한다(Julien, 1998; WMO, 2010). 고리 및 이격현상은 홍수유량의 강도와 하상의 상태변화에 따라 매 시기 다른 형태로 나타날 수 있기 때문에 실무에 적용하는 데 어려움이 있어, 일반적으로 실무에서는 여전히 단일 수위-유량 관계곡선식을 유지 및 개발하고 있는 실정이다. 하지만 기계적으로 단일관계를 적용하여 회귀식

을 구성할 경우 결정계수가 매우 낮은 산포된 형태로 나타나 수위에 의한 유량관측의 정확도를 저하시키는 문제점이 있다(WMO, 2010).

지금까지 수위-유량관계에서의 고리현상에 대한 해석도 대부분 경사가 완만한 모래 하천의 하상 성질과 관측 자료에 기반하여 적용되어 왔으며, 암반이나 자갈로 구성되고 경사가 상대적으로 급한 산지하천의 경우 그 사례가 보고된 바가 매우 드물다. 본 논문에서는 자갈 및 암반으로 구성된 산지하천 홍수유량을 관측하여 수위-유량관계를 구성하여 자갈 및 암반하상에서 발생하는 고리 특성을 파악하고자 한다.

2. 고리형 수위-유량관계식의 이론적 배경

2.1. 홍수파에 의한 해석

모래 하천의 경우 수위 상승부에서 동일한 수위에서 홍수 유량이 수위 하강 시보다 작아지는 현상은 홍수파에 의한 마찰경사의 변화를 고려하여 해석되어 왔다(우효섭, 2001). 홍수파에 의한 고리 현상의 발생을 해석하는 방식을 요약하면 다음과 같다. 부정류의 경우 사용되는 Manning의 식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (1)$$

여기서, Q=유량, n=조도계수, A=단면적, R=동수반경, S_f=마찰경사이다. 그리고 홍수파가 발생하지 않는 등류 조건에서의 Manning의 식은 다음과 같다.

$$Q_0 = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \quad (2)$$

여기서, Q₀는 등류유량, S₀는 하상경사이다. Saint-Venant 방정식의 운동량방정식에서 홍수파가 발생하는 부정류의 경우 마찰경사를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, x=하류방향 길이, y=수심, V=단면평균유속이다. 우측의 차례대로 하상경사, 수심경사, 이송가속도, 그리고 국부가속도에 의한 항이다. 따라서 부정류 유량 계산은

다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}} \quad (4)$$

등류조건을 가정하고 진행방향으로 수심의 경사가 매우 작으며 가속되지 않는 경우 운동파 모형(kinematic wave model)인 $S_f = S_0$ 을 사용할 수 있다. 현재 국내의 수위-유량 관계곡선식은 대부분 운동파 모형, 즉 등류 조건을 가정하여 마찰경사와 하상경사를 동일하게 보아, 단일 관계식으로 구성되어 있다. 그러나 홍수 유량 발생 시 수위 상승기와 수위 하강기에서는 부정류의 발생으로 수위-유량 관계가 단일 관계가 아니라 고리형 수위-유량곡선이 형성된다(Fig. 1). 이 경우 수위 상승부에서 홍수 유량은 같은 하상경사의 등류 유량보다 커지고, 수위 하강 시에는 반대로 등류유량보다 작아진다. 즉 동일한 수위에서 상승 시가 하강 시보다 유량이 커진다. 이는 홍수파에 의한 수위상승시에 Eq. (4)의 제곱근 내의 수심과 이송가속도의 하류방향의 기울기가 음이 되어 부정류 유량이 등류유량에 비해 커지기 때문에 발생한다. 물론 속도는 시간에 따라 증가하여 부정류 유량을 줄이는 역할을 하나, Kim et al. (1996)에 의하면 이 성분은 나머지 성분에 비해 상대적으로 매우 작다고 할 수 있다. Handerson (1966)은 하상경사가 비교적 급하고 파속이 빠른 홍수파의 경우 하상경사의 기여도가 다른 항보다 지배적으로 사실상 하상 경사가 홍수파에서의 마찰경사에 지배적이라고 보고하고 있다.

2.2. 하상 조도 변화에 의한 해석

홍수파에 의한 고리 현상의 해석은 상승기와 하강기의 동

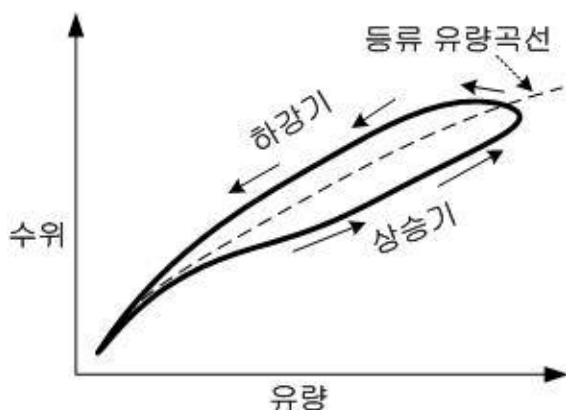


Fig. 1. Typical Loop-rating Curve for the Sand-bed Streams Considering the Flood Wave Propagation(우효섭, 2001)

일한 수위에서 하상의 형태가 일정하게 유지되어 Manning의 조도계수가 동일하게 유지된다고 가정한다. 그러나 홍수 발생 중 하상의 조도는 변화하여 수위와 유속에 영향을 미친다. 일반적으로 동일한 유량조건에서 조도계수가 감소할 경우 수심이 감소하고 평균유속은 증가하고 반대인 경우 수심이 증가하고 평균유속은 감소한다(Julien, 1998). 만약 마찰경사와 유량이 동일했을 때 조도계수의 증가는 수위의 증가를 수반함을 Eq. (2)를 통해 확인할 수 있다.

Julien (1998)은 모래하천인 미국 Meuse 강의 홍수 사례에서 동일한 유량에서 사구의 높이와 폭이 상승기에서 작게 나타나며 하강기에서 바닥마찰이 상대적으로 증가하여 수위가 증가하는 현상을 보고하고 있다. 이는 상승기에 걸쳐 사륜으로부터 발달된 사구가 하강기에 다시 사륜으로 복귀하지 않거나 복귀하는 시간이 상대적으로 길기 때문이다. 따라서 모래하천의 홍수기 수위-유량 관계곡선식의 고리 현상은 상승기가 하강기에 비해 하상의 마찰이 작아 낮은 수위에서 동일한 유량이 관측된다고 하겠다. 이러한 결과는 홍수파의 경우와 동일한 양상으로 모래하천의 고리 현상을 보다 강화하는 역할을 할 수 있다는 사실을 보여준다. 특히 하상경사가 비교적 급하고 파속이 빠른 홍수파의 경우 하상경사가 마찰경사와 거의 동일한 크기로 작용하는 경우(Handerson, 1966), 홍수파에 의한 고리 현상이 경미할 수 있으나 하상변동으로 인해 보다 뚜렷한 형태의 일반적인 고리현상을 보일 수 있다는 점을 시사한다.

한편, 모래하천에 대한 수위-유량 관계곡선식에 대한 연구가 활발하게 수행되어온 것에 비해 자갈 및 암반으로 구성된 산지하천의 수문곡선의 상승기와 하강기에 하상의 마찰력의 변화 등을 고려한 수위-유량관계에 대한 이론 및 실험적 연구는 매우 드물다. 현재 모래 하천에 비해 산지하천의 경우 마찰계수에 대한 정확하게 검증된 공식이 존재하지 않는다고 알려졌다(Wohl, 2000; Ferguson, 2007). 따라서 산지하천의 하상변동을 고려한 수위-유량 관계곡선식의 고리현상의 경향과 분석도 거의 알려지지 않았다. 다만 Davies and Griffiths (1996)는 뉴질랜드의 Waimakariri 협곡의 자갈 하천을 대상으로 직접관측 대신 수리 모형을 구축하여 수위-유량 관계곡선식을 도출한 결과 일반적인 모래하천 고리 형성 경향과 반대방향으로 나타남을 보고하고 있다. 이들은 자갈하상에서 홍수기에 세굴과 퇴적현상 등의 유사이동을 홍수파에 의한 영향과 함께 고려하여 이론 모형도 함께 구축하여 상승부의 홍수 유량은 같은 하상경사의 등류 유량보다 작아지고 수위

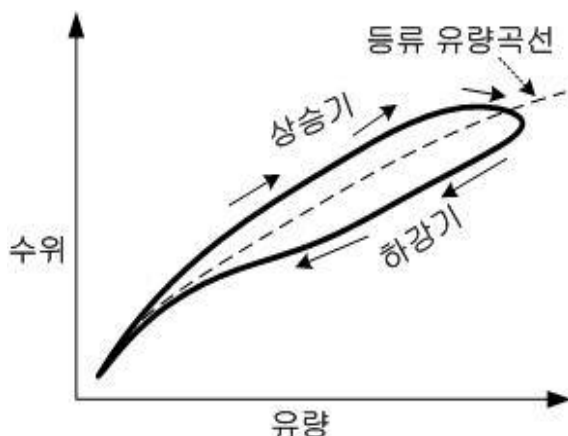


Fig. 2. Modeled Loop Effect for the Gravel-bed Streams Considering the Bed Roughness Effect (Davies and Griffiths, 1996)

하강 시에는 반대로 등류유량보다 커지는 현상을 모형화 하였다(Fig. 2). 드물게 모래하천에서도 고리의 역전이 보고된 바 있다. Kuhnle and Bowie (1992)는 미시시피주의 Goodwin Creek에서 홍수기에 유량이 저수류에서 고수류로 증가할 경우 고리의 역전 현상을 관측하였다. 이들은 이런 현상은 이전 홍수기에 형성된 사구 등의 높은 조도가 수문곡선의 상승기에 작용하다 첨두유량 부근에서 대부분의 유실되어 조도가 감소하기 때문에 발생한다고 설명하였다. 따라서 자갈 및 암반 하상의 마찰력이 모래하상의 경우보다 높으므로 일반적인 홍수파만 고려한 고리 현상 해석을 하상변동을 함께 고려하거나 아니면 Davies and Griffiths (1996)의 결과와 같이 고리의 역전이 나타날 수 있다고 예상될 때, 자갈 및 암반하천의 경우 홍수파보다 하상변동에 의한 조도의 변화가 지배적일 수 있다고 추정할 수 있다. 그러나 산지하천의 경우 현장유량계측의 어려움으로 접촉식 계측방식은 매우 어렵다. 특히 야간관측까지 해야 되는 경우 관측요원들의 안전에 문제가 있어 주로 부자 등을 활용하여 유속 등의 관측 정확도가 대부분 떨어지는 경향이 있다(Davies and Griffiths, 1996). 따라서 자갈이나 암반으로 구성된 산지하천의 홍수기 수문곡선을 직접 유량계측을 통해 획득하는 것은 매우 어려워 지금까지 실제 관측사례를 통해 비교적 정확한 수위-유량관계식의 고리현상이 확인된 경우는 매우 드물다.

3. 홍수유량 관측

본 연구에서는 2011년 8월 태풍 무이파 때 제주도의 한

천의 홍수 유량을 관측한(Fig. 3c) 결과, 수위-유량관계의 고리 현상을 포착하였다. 제주도를 거쳐 한반도를 통과한 태풍 무이파는 중심기압 965hPa의 강한 중형급 태풍으로 최대풍속이 38 m/s이고, 제주 산간지역의 최고 강우량이 626.5 mm이었다. 한천은 제주도 중산간에서 발원하여 제주도 북부 해안으로 흐르는 전형적인 산지하천으로 하폭이 약 35 m이고 하천 바닥은 현무암질 암반으로 구성되고 자갈이 다소 분포되어 있다(Fig. 3a). 하상경사는 약 0.0256으로 상대적으로 급한 자갈 및 암반 지형의 전형적인 산지하천의 형태를 보여주고 있다. 유량을 관측한 지점은 제2동산교이며, Fig. 3b와 같이 한천 중하류에 위치하고 있다. 제 2동산교에서 유출은 8월 7일 오전 6시 경부터 시작되었으며 약 14시간 정도 지속되었다. 유량은 시간 단위로 관측하였으며, 수위는 교각에 설치된 수위표를 30분 단위로 직접 목측하여 기록하였다.

유속은 교각을 횡단하며 5개의 지점(6 m 간격)에서 교각 직상류의 표면유속을 관측하였다. 표면 유속의 관측은 비접촉식이고 최근에 개발된 전자파표면유속계(Surface Velocity Doppler Radar, MU2720)를 사용하였다(뮤트로닉스, 2010; Fig. 3d). 이 장비는 25 GHz의 극초단파를 일정시간 지속적으로 수표면에 방사하고 흐름 표면에서 산란되어 반송되는 신호의 도플러 변위를 측정하여 흐름 방향의 표면 유속을 관측하여 평균유속을 산출한다(Lee and Julien, 2006). 가능 측정 유속범위는 0.03~20.0 m/s이며, 유속이 0.5 m/s 이상에서 0.03 m/s의 오차를 보인다고 한다(뮤트로닉스, 2010). 이 계측기기는 홍수기에 안전하고 정확한 유량 계측을 위해 한국수자원공사에서 개발되었다(노재경 등, 2009; 김영성 등, 2011). 이상호 등(1997)은 표면 유속이 약 2~4 m/s인 경우 유량관측 오차가 2%로 비교적 안정된 수치를 보인다고 보고한 바 있다.

본 연구에서는 전자파표면유속계의 수평편각은 0, 수직편각은 약 15도 정도로 하여 1회 유량관측시 횡단면의 5개지점에서 관측하였고, 동시각의 수위와 사전 측정된 단면 자료를 바탕으로 유량을 계산하였다. 이 때 수심평균 유속 환산계수로 0.85를 사용하였고(Costa et al., 2000), 유량계산방식으로는 중앙단면법(Mid-Section Method; 이종형 등, 2010)을 적용하였다. 수심평균 유속환산계수는 이차류 발생 등 흐름 및 하상의 조건에 따라 변화할 수 있어 유량 산정 결과 영향을 줄 수 있으나(이종석 등, 2002; 노영신, 2005), 본 논문에서 파악하고자 하는 고리형 수위-유량관계의 경향을 분석하는 목적에는 영향을 미치지 않는다.



(a) Gravel and rock-bed mountain stream of the test site



(b) Location of the test site



(c) Flood discharge and stage height measurement during the flood



(d) Surface Velocity Doppler Radar used for this study

Fig. 3. Measurement of the Flood Discharge in the Han-cheon Using Surface Velocity Doppler Radar

4. 수위-유량 관계곡선식 분석

Fig. 4는 시간대 별 수위와 유량의 변동량을 보여주고 있다. 침투유량 시 표면유속은 최대 3.8m/s 정도로 매우 빠른 흐름을 보였다. 수문곡선 상에서 약 오후 3시 이전까지는 수위와 유량이 일정한 관계로 변화하다가 오후 4시의 침투유량을 기점으로 수위는 감소하나 유량은 유지가 되는 현상을 보였다.

Fig. 5는 Fig. 4를 재구성하여 수위-유량관계로 나타낸 것이며, 뚜렷하게 고리 형상을 나타남을 알 수 있다. Froude 수는 최대 0.74로 대부분 저수류 영역(lower-flow regime)에 위치했다(우효섭, 2001). 물론 모래하천과 같이 자갈하천의 수위-유량관계식에서 고수류에서 나타나는 이격현상을 보이지 않아 자갈하천도 저수류 영역에서는

이격현상을 보이지 않는다고 추정할 수 있다. 또한 Fig. 2의 경우와 유사하게 모래하천의 경우와 반대로 상승기와 하강기의 경향이 역전되는 결과가 나타났다. 이는 매우 흥미로운 결과로 Davies and Griffiths (1996)이 모의한 대로 산악지역의 자갈하천의 경우 홍수의 하강기에 낮은 수위에서 높은 유량이 형성되었음을 알 수 있다. 실제 비슷한 수위의 Fig. 5의 4번(상승기)과 7번(하강기)을 비교하면 약 4m의 수위에서 약 140m³/s의 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 우효섭(2001)이 제시한 홍수파에 의한 부정류 발생으로 제시된 접근법으로는 설명이 되지 않는다. Davies and Griffiths (1996)는 홍수파의 통과 시 부정류와 하상이동을 고려한 모델링으로 이러한 역전현상을 설명하고 있다. 그러나 우효섭(2001)이 제시한 상승기와 하강기에 상이한 홍수파의 경사에 의해 발생하는 일

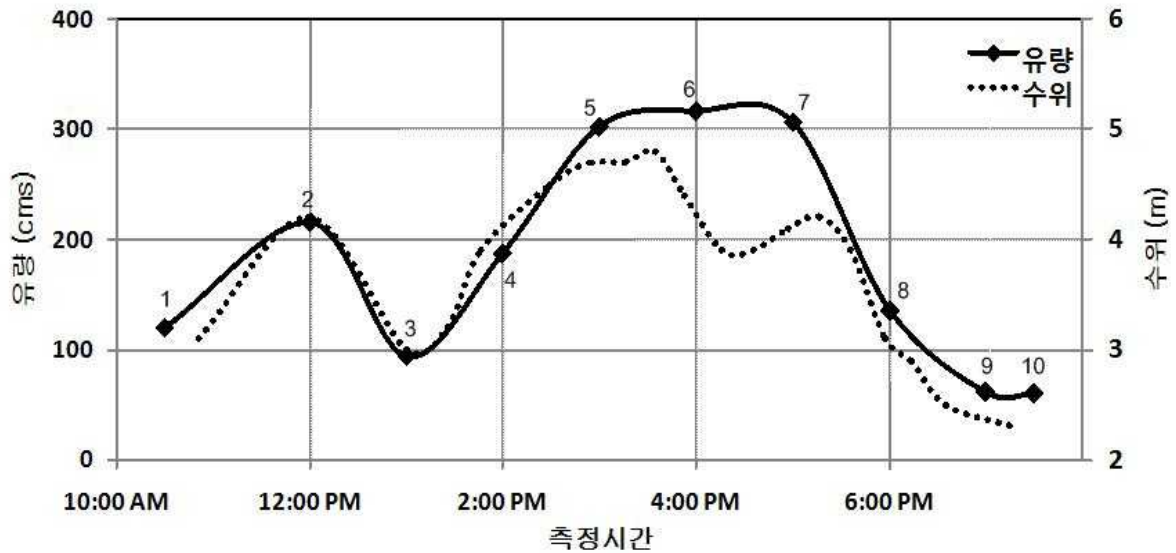


Fig. 4. Discharge and Stage Measurements During the Flood in the Han-cheon, Jeju

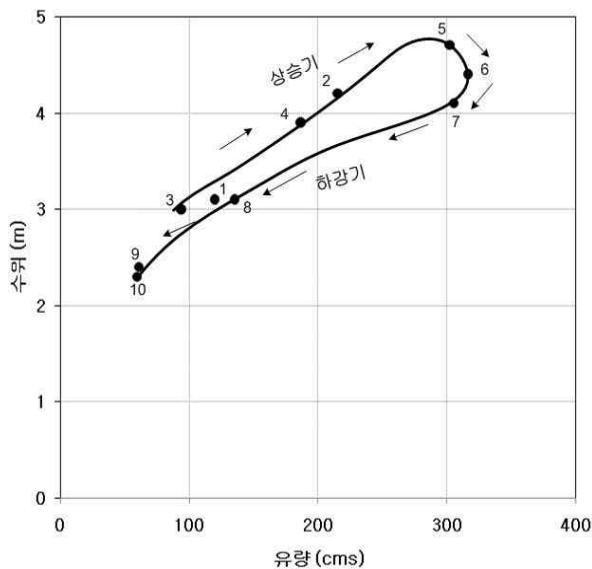


Fig. 5. Loop Rating-curve for the Han-cheon, Jeju

반적인 고리현상의 경향이 자갈하천의 경우 모래하천과 반대로 상승기에 높은 조도가 침두를 거치면서 낮아지면서 발생하는 기여도가 상대적으로 높아 역전현상을 발생시킬 수 있다고 생각할 수 있다. 그러나 Wohl (2000) and Ferguson (2007)이 지적한 대로 자갈하천의 마찰에 대한 이론이 아직 정립되지 않았고 강한 흐름에서 자갈 하상 변화의 실측이 매우 어려워 향후 유사한 사례를 통한 비교분석과 이러한 현상에 대한 심도있는 논의가 필요하다고 하겠다.

5. 결론 및 향후과제

본 논문은 산지하천의 자갈 및 암반 하상에서 홍수유량을 상승기와 하강기에 걸쳐 전자파표면유속계를 통해 관측하여 수위-유량곡선의 고리 현상을 포착하였다. 이전 약천후와 홍수 시 유량의 현장계측의 어려움을 극복하고 횡단면의 여러 지점에서 측정된 평균유속을 활용하여 일반적으로 부자 등을 활용한 한 지점 유속 측정에 기반한 유량계측에 비해 보다 정확한 유량을 산출하였다고 할 수 있다. 그러나 전자파표면유속계의 오측에 의한 결과일 가능성도 있어 복수의 관측결과 및 상이한 계측기법을 복합적으로 고려한 추후 검토가 필요하다. 본 논문에서 계측한 자갈하천에서의 고리현상 해석에 일반적으로 적용되는 홍수파에 의한 상승기와 하강기의 마찰경사 변화를 통한 해석으로는 설명되지 않는다. 이러한 역전현상은 모래하천에서 사면에서 사구로 변화하여 조도가 상승기에서 하강기로 접어들 때 증가하는 현상과 반대의 경우로 오히려 조도가 감소되는 것에 기인한다고 추정할 수 있으나 이 또한 아직 이론 및 실험적으로 밝혀지지 않아 추후 연구가 필요한 부분이다.

본 유량 관측에서 도출된 자갈 및 암반 하천에서 고리현상의 역전은 지금까지 이러한 조건에서 거의 관측되지 못한 새로운 결과라고 할 수 있으나 전자파표면유속계의 유량관측의 오차, 교량 직하류에 위치한 통제 단면(control section)의 영향, 관측지점 직상류에 위치한 만곡의 효과,

횡단면 하상 조도의 불균일성 등이 일정 정도 본 관측의 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본고에서 제시한 고리형 수위-유량관계의 역전현상은 향후 유사한 조건에서의 관측결과와 비교 검토되어야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 자갈하천에서의 고리 경로의 역전은 매우 드문 사례로 보고될 수 있고 향후 관련 사례에 대한 다각도의 논의를 수반할 수 있다고 사료된다. 그리고 본 연구의 결과로부터 산지하천의 홍수유량 관측에 단순한 수위-유량 관계곡선식으로는 상당한 유량계측의 오차를 수반할 수 있음을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단(E0801)”의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 현장 계측을 함께 수행한 제주대학교 토목공학과 대학원생인 정우열, 강명수, 김준호 등에게 감사의 말을 전합니다.

참고문헌

김영성, 이현석 (2011). 전자파표면유속계의 성능개선 및 실용화. **한국수자원학회 2011년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 85-85.

노영신 (2005). 영상해석 기술을 이용한 하천 유량 측정 기법 개발, 명지대학교 박사학위논문.

노재경, 이재남 (2009). “비접촉식 유량측정의 현황.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, Vol. 42, No. 6, pp. 51-57.

뮤트로닉스 (2010). 평갈수용 전자파표면유속계, 특허출원 10-2010-89895.

유량조사사업단 (2009). 2008년도 국토해양부 수위-유량 관계곡선식, 발간등록번호 HSC00-C-09-01.

우효섭 (2001). 하천수리학, 청문각, pp. 280-286.

이상호, 김우구, 김영성 (1997). “전자파 표면 유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 30, No. 6, pp. 671-678.

이종석, 이완호 (2002). “수공실무의 활용을 위한 수심평균 유속 환산계수의 결정.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, Vol. 22, No. 4-B, pp. 469-484.

이종형, 정재성, 한운우, 황병기 (2010). 최신 하천공학, 구미서관.

Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Peter, H.F., Melcher, N.B., and Thurman, M.E. (2000). “Measuring

stream discharge by noncontact methods: A proof of concept experiment.” *Geophysical Research Letter*, Vol. 27, No. 4, pp. 553-556.

Davies, T.R., and Griffiths, G.A. (1996). “Physical model study of stage-discharge relationships in a gorge of a braided river.” *Journal of Hydrology*, Vol. 32, No. 11, pp. 239-258.

Ferguson, R. (2007). “Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams.” *Water Resources Research*, Vol. 43, W05427, doi:10.1029/2006WR005422.

Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998). “Large-scale particle image velocimetry flow analysis in hydraulic engineering applications.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 397-414.

Handerson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*, McMillan, New York.

Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W.F., Bradly, A., Muste, M., Creutin, J.D., and Wilson, M. (2008). “Experimental system for real-time Discharge Estimation Using an Image-based method.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 105-110.

Julien, P.Y. (1998). *Erosion and Sedimentation*, Cambridge University Press, pp. 134-156.

Kim, W., Kim, Y.S., and Woo, H. (1996). “Analysis of Flood Flow Characteristics of the Han River Using 1-D St. Venant Equation.” Proceedings of 10th Congress of the IAHR-APD August 26-29, Malaysia.

Kuhnle, R.A., and 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., and Julien, P.Y. (2006). “Electromagnetic Wave Surface Velocimetry.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 146-153.

Muste, M., Ho, H.-C., and Kim, D. (2011). “Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs.” *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 289-300.

Muste, M., Vermeyen, T., Hotchkiss, R., and Oberg, K. (2007). “Acoustic Velocimetry for Riverine Environments.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, pp. 925-936.

Simons, D.B., Richardson, E.V., and Haushild, W.L. (1962).
 “Depth-discharge relations in alluvial channels.” *Journal
 of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 88, No. 5, pp. 57-72.
 WMO (2010). Manual on stream gauging, Volume II-
 Computation of discharge, WMO-No. 1044, pp. 36-37.

Wohl, E. (2000). Mountain rivers, AGU Water Resources
 Monograph, 14, Washington D.C.

논문번호: 12-034	접수: 2012.03.27
수정일자: 2012.05.29/05.30	심사완료: 2012.05.30