

LSPIV를 이용한 홍수파의 거동 추적

Tracing of the Behavior of Flood Wave Propagation Using LSPIV

김영성*

Youngsung Kim

요 지

유량 환산에 이용되는 수위-유량 관계곡선식은 하천의 흐름을 정상 등류상태로 가정하고 유속계를 하천에 투입하여 연간 정해진 횡수의 유량측정을 실시하여 이로부터 갱신하여 작성하고 있다. 평수기에는 이렇게 기기를 이용하여 유량측정이 가능하지만 홍수기나 갈수기에는 접촉식 유속계를 이용한 하천유량 측정이 불가능한 실정이다. 홍수기에는 기기 손상과 관측자의 안전이 위협받는 실정이고, 갈수기에는 유속이 너무 느려서 (0.1 m/s 이하) 프로펠러 유속계의 경우 유속의 정확한 관측이 힘들다. 또한 전지구적 빈번한 이상기후의 현실정에서 가장 중요한 기초 수문자료인 홍수량의 정확한 측정 자료는 많지 않다. 홍수유량을 측정하기 위해서 현재에도 기존의 봉부자를 이용하거나 유비쿼터스 센서를 장착한 봉부자를 이용하는 유량측정 기법이 향해지고 계속적으로 소개되고 있는 실정이지만 봉부자의 특성상 정확한 유량을 계산하기에는 어려움이 많다. 현재 선진국에서는 흐름과 비접촉식 방법을 이용한 하천유량측정 방법이 지난 10 여년간 꾸준히 연구되어 왔다. 그중 대표적인 것이 전자파를 이용한 방법과 영상해석에 의한 방법이다. 전자의 경우 국내에서는 수자원공사에서 10년 이상 연구 개발하여 상품화 시킨바 현업에서 이를 이용하여 홍수유량측정을 실시하고 있다. 후자의 방법은 유체역학 분야에서 흐름해석에 주로 이용되어지던 PIV(particle image velocimetry) 기법을 하천과 같이 대규모의 흐름영역에 적용가능하도록 개발된 기술로 LSPIV (large-casle particle image velocimetry)라 불리우는 기술이다. 본 연구에서는 미국 Iowa 대학에서 개발한 LSPIV를 이용하여 홍수파의 진행시 수위와 유량의 두 변수 사이에 나타나는 Loop rating curve의 이론적인 관계를 하천현장에서 일정시간 간격으로 실측을 통하여 파악하고자 하였다.

현장실험을 위한 대상지점으로 미국 Iowa주 Coralville 시내 Clear Creek의 USGS (US Geological Survey) 수위관측소 지점을 선택하여 본 연구에서 실시한 유량측정 결과의 비교가 가능토록 하였다. LSPIV는 그 특성상 야간에는 적용하는데 어려움이 있어 아침시간부터 해가 지기 직전까지의 자연채광 조건의 영상취득이 가능한 시간대에서 표면유속을 측정하였고 이에 수심평균유속환산계수를 적용하여 유량을 계산하였다.

강우의 발생으로 인한 홍수파의 진행시 총 43회의 유량을 측정하였는바 이를 이용하여 이 지점의 수위-유량 관계식과 비교한 결과 거의 일치하는 결과를 나타냈다. 특히 홍수파의 진행시 고수위 영역에서의 측정된 결과는 수위의 상승기에는 최고로 7.5% 까지 측정유량이 수위-유량관계식에서 계산한 유량보다 컸으며, 수위의 하강기에는 반대로 최고 5.4% 정도까지 측정유량이 수위-유량관계식에서 계산한 유량보다 작게 나타났다. 또한 최대유량의 발생시기는 최고수위 발생직전의 수위라는 것이 파악되었다. 이러한 경향은 수위-유량 관계곡선의 이론과 잘 일치하는 것이다.

핵심용어: PIV, LSPIV, Loop rating curve, 수위-유량 관계식, 유량측정, 비접촉식 방법

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

1. 서 론

하천에의 유량환산에 이용되는 수위유량관계곡선은 일반적으로 정상등류상태의 흐름상황에서 유속계를 흐름에 직접 투입하여 유속을 측정하고 이로부터 유량을 계산하고 있으며 이렇게 계산된 여러개의 유량과 수위를 이용하여 작성이 된다. 갈수기나 홍수기의 경우 일반 유속계의 투입이 어려운 시기에는 이용가능한 수위와 유량의 자료로부터 수위유량관계곡선을 외삽하여 유량을 계산한다. 홍수기의 경우 유량측정시 상존하는 인명피해와 기기 손상의 위험으로 인하여 유량측정이 어려워 유량측정자료가 빈약하고 부자를 이용한 유량측정이 시행되어 유량측정자료가 있기는 하지만 유속계를 이용한 측정결과에 비해서 정확도가 낮은 편이다. 또한 홍수기에는 홍수파의 진행으로 인하여 등류흐름영역과는 다른 양상으로 수위유량의 관계가 진행되어 고리형 수위유량 곡선 효과(loop-rating curve effect)가 나타난다(Henderson, 1966).

극심한 홍수사상을 포함한 정확한 하천유량의 관측은 이와 관련하여 발생하는 치명적인 사회·경제적 충격을 예방하는데 절대적으로 중요하다. 현재 미국내 8,000여 수위관측소에서 유량측정을 위해 이용되고 있는 재래식 방법(부자, 재래식 유속계)은 구식이고, 측정하는 환경여건에 지배를 받아 부정확할 뿐만아니라 많은 시간과 비용이 소요된다. 미국내에서의 일반적인 수위-유량관계곡선 갱신을 위한 측정주기는 연간 8회 정도이다(Hersch와 Costa, 2004). 재래식 방법이 적용가능한 지점에서는 고수위에서 재래식 방법을 이용한 직접 유량측정이 실시되어 이를 이용하여 수위유량곡선이 갱신되고 있다. 유량측정 결과의 정확성은 측정기기의 정확성뿐만 아니라 한 지점에서 유량측정을 완료하는데 소요되는 시간에 의해서도 영향을 받는다. 만약 한회의 유량측정을 마치는데 소요되는 시간이 1시간 이상 소요되는 경우, 측정지점의 횡단면에 대한 수위와 유속 분포가 홍수파가 진행됨에 바뀌게 될 것이고 이는 유량 계산에 오차를 유발하게 된다. 따라서 유량측정의 정확성을 개선하기 위하여 하나의 횡단면 전체에 대해서 유속측정을 신속히 할 수 있는 기술이 절대적으로 필요하다.

따라서 본 연구에서는 한 지점에서 단시간내에 하천 횡단면 전구간의 표면유속을 측정을 완료할 수 있는 장점을 가진 LSPIV (large scale particle image velocimetry)를 이용하여 홍수파의 진행시 연속적인 측정을 통하여, LSPIV가 홍수파의 진행에 따른 고리형 수위유량 곡선을 관측할 수 있는지의 여부를 파악하고자 하였다. 또한 홍수파의 진행시 연속 유량 측정을 통하여 수위의 상승 및 하강시 유량이 수위유량관계식과 어떠한 양상을 보이는지를 파악하고자 하였다.

2. Loop rating curve

홍수시와 같이 극도로 심한 강우 사상의 발생에 따른 홍수파의 진행시 기존의 유속계나 ADCP 등은 적용이 불가능하여 등류흐름상에서 측정된 값을 이용한 외삽법이 아직도 실행되고 있는 실정이다. 그런데 이러한 외삽법은 홍수파의 진행에 따른 수위와 유량의 관계를 설명할 수가 없어 수위유량관계곡선 작성에 있어 오차를 유발하게 된다. 특히 수위가 증가하는 경우 하천수면의 경사가 하상의 경사보다 가파르게 되어 흐름을 가속시키게 되고 더많은 유량을 흘려보내게 된다. 이와는 반대로 수위의 저하시에는 수면경사와 유량이 감소된다. 이러한 현상은 St. Venant 방정식에 의해서 설명이 되어진다. St. Venant 방정식의 운동량방정식

$$\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial X} = S_0 - S_f$$

(1)

은 가속도항을 무시하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_f = S_0 - \frac{\partial V}{\partial X}$$

(2)

식 (2)가 수리학적 홍수추적의 diffusion wave 방법이다. Manning 공식과 같은 등류공식을 이용하여 S_f 를 근사시키면 다음과 같다.

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} = \left(\frac{Q}{K}\right)^2$$

(3)

여기서 $K = \frac{1}{n} AR^{2/3} =$ 통수능

식 (3)을 식(2)에 대입하면

$$\frac{Q^2}{K^2} = S_0 - \frac{\partial Y}{\partial X}$$

(4)

가 되고 이로부터 유량 Q는 다음과 같이 표현된다.

$$Q = K \sqrt{S_0 - \frac{\partial Y}{\partial X}}$$

(5)

식 (5)의 $\partial Y / \partial X$ 이 수위 강하시에는 (+)이고, 수위 상승시에는 (-)이므로 주어진 수심에서 유량은 수위상승기가 하강기보다 크게 나타나고, 이로 인해서 수위-유량 관계곡선은 그림1과 같은 loop-rating curve가 된다.

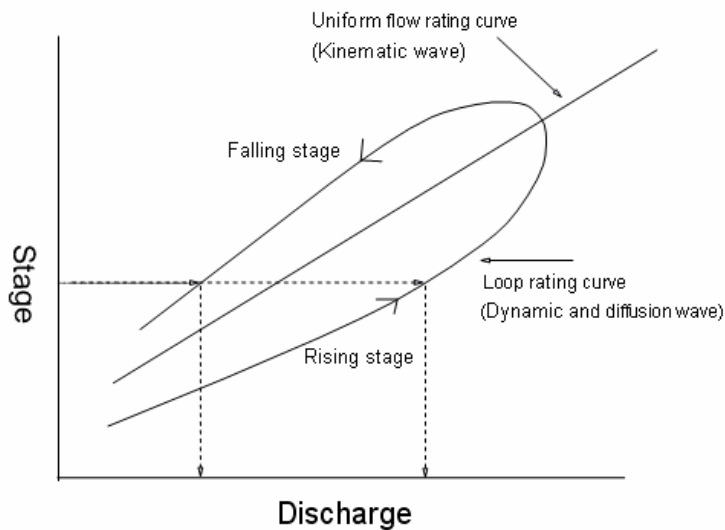


그림 1. Loop rating curve (Kim, 2006)

3. 현장 실시간 연속유량측정

본 실험에서 이용한 LSPIV는 트럭탑재형으로 MLSPIV (mobile LSPIV)로 불린다(그림 2). 이로 인해서 차량의 통행이 많고 도로의 폭이 좁은 지점에서는 현실적으로 그의 적용이 제약된다. MLSPIV는 이동성이 좋아 유량측정이 필요한 지점까지 빨리 이동할 수 있고 모든 필요한 장비가 트럭에 설치되어 있어 단시간내(5분 이내)에 한 지점에서 횡단면 전체의 유속표면분포를 측정할 수 있다.

홍수파의 진행시 수위와 유량간의ダイナミック한 관계를 파악하고자 미국 Iowa주에 있는 몇몇 유량측정지점 중 LSPIV를 적용할 수 있는 지점을 검토하였다. 우선 강우 발생시 홍수파의 진행시 수위-유량 관계를 보다 정확히 파악하기 위하여 10분이내에 도달할 수 있는 거리에 위치해 있고 하폭은 20 m 이내의 USGS 수위관 측소가 있는 지점을 검토대상으로 하였다. 그 결과 Iowa주의 Coralville에 위치한 Clear Creek의 USGS 수위

관측소(USGS gaging station number: 05454300)를 선정하게 되었다. USGS의 수위-유량관계식은 LSPIV로 실측한 유량에 대한 기준값으로 이용하였다. 이지점은 평수기 최대수심은 30 cm 정도이다. 이 지점에서의 현장 실시간 연속유량측정은 2006년 3월 5일부터 3월 24일까지 43회 실시하였다. 강우의 발생으로 인한 홍수과의 진행초기와 같이 수위가 급변할 경우에는 한 시간 간격으로 측정하였고 강우가 시작되기 전이나, 강우가 멈추어 수위의 감소가 0.05 ft 이하인 경우에는 1일 1회 혹은 2회 유량을 측정하였다 (그림 3). LSPIV는 다른 특수한 조명장치가 별도로 설치되지 않는 한 야간에 이를 이용한 유량측정을 할 수 없는 한계점으로 인하여 수위의 급상승 및 급하강시 주간에만 이를 이용한 측정을 할 수 있었다. 이로 인하여 이렇게 수위가 급변할 때 상당부분 결측이 되었고 측정당시가 초봄이었던 관계로 오전 9시부터 오후 5시까지만 매시간 유량을 측정할 수 있었다. 전체 43회 유량측정값중에서 3월8일부터 3월 10일까지 3일간의 고수위의 유량측정 성과를 수위유량관계곡선에 의한 환산유량과 비교하였다(그림 4). LSPIV의 야간측정의 한계로 인하여 수위 상승부의 상당한 부분이 결측되었지만, 측정값들이 전반적으로 Loop rating curve를 이루고 있음을 확인할 수 있다. 수위가 가장 고수위인 구간인 3월 9일에는 LSPIV를 이용한 유량실측값을 수위유량 관계곡선과 비교시 +7.5~ -5.4 %의 차이를 보이고 있었다. 이러한 차이가 발생하는 수위구간을 살펴본 결과, 실측유량이 7.5 % 까지 클때의 수위는 수위가 상승기였으며, 반대로 실측유량이 5.4 %까지 작을때는 수위가 하강기에 해당하는 구간에서 실측한 유량으로 파악되었다. 이러한 수위의 상승기와 하강기의 유량의 차이는 St. Venant 방정식의 diffusion wave 방식에 의한 홍수추적이론과 잘 일치하는 결과이다. 실측유량을 수위와 같이 도시한 그림 4에 의하면 최대유량은 최고수위가 발생하기 한 시간 전에 발생하는 것으로 나타나고 있다.

4. 결론

한 지점에서 단시간내에 하천 횡단면 전구간의 표면유속을 측정할 수 있는 장점을 가진 LSPIV를 이용하여 홍수과의 진행시 하천에서의 연속적인 유속측정을 하여 유량을 산정하고, LSPIV가 홍수과의 진행에 따른 고리형 수위유량 곡선을 관측할 수 있는지의 여부를 파악하고자 현장시험을 실시하였다. 전체 측정된 43회의 유량측정 결과 중에서 수위가 급격히 상승 및 하강하는 18회의 유량측정 결과를 수위유량관계곡선과 같이 도시한 결과 수위 상승기에는 측정된 유량이 수위유량관계곡선보다 큰 유량을 보였고, 수위 하강기에는 이와 반대의 현상을 보임이 파악되었다. 또한 한시간 단위로 측정한 수위 및 유량 실측자료에 의하면 최대유량의 발생은 최고수위가 발생하기 한 시간 전에 발생함을 알 수 있다. 이러한 수위-유량 사이의 다이내믹하게 변화하는 결과를 더 정확하게 파악하기 위해서는 1시간단위의 측정보다 더 측정주기를 줄여 측정할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

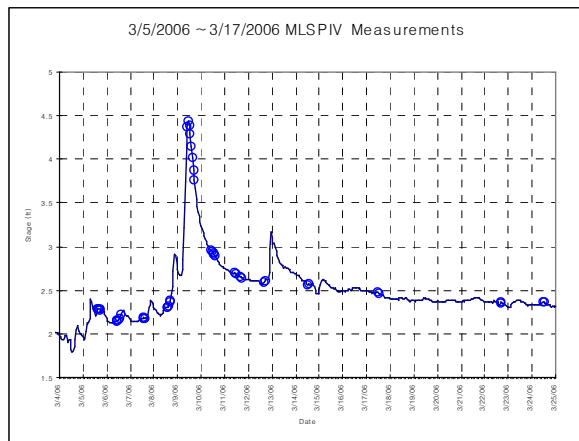


그림 2. 미국 Coralville시 Clear Creek의 유량측정 지점 (USGS 수위관측소 No. 05454300) 그림 3. MLSPIV를 이용한 43회 실시간 연속 유량측정 결과

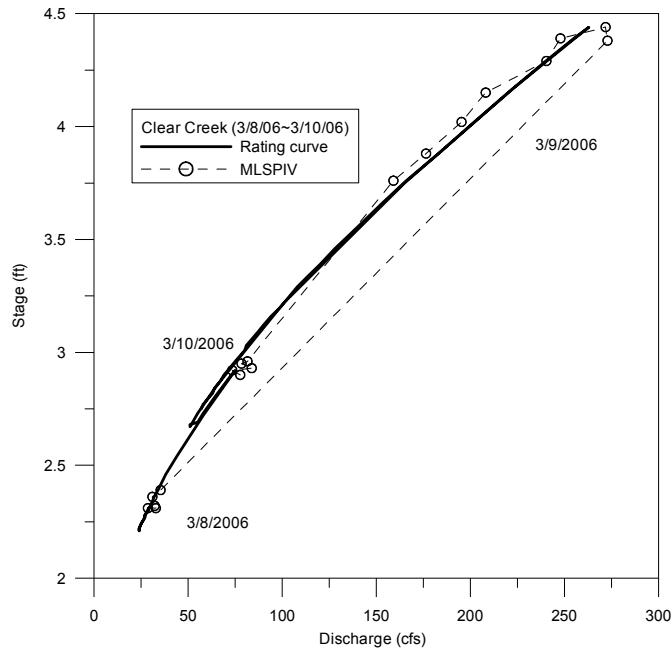


그림 4. 고수위 기간의 수위유량 관계곡선과 실측유량의 비교 (3/8/2006~3/10/2006)

참고문헌

1. Henderson, F. M. (1966). Open Channel Flow, The Macmillan Company, New-York, NY.
2. Hirsch, R. M., and Costa, J. E. (2004). "US Stream Flow Measurement and Data Dissemination Improve." EOS, 85(21), 197-203.
3. Kim, Y. (2006). Uncertainty Analysis for Non-intrusive Measurement of River Discharge Using Image Velocimetry, PhD Thesis, The University of Iowa, Iowa City, IA.