

수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량 관계식 작성

Determination of Stage-discharge Relations by Hydraulic Channel Routing and Stage Measurement

이 상 호*

Lee, Sang Ho

Abstract

The research estimated the roughness coefficients for the reach of Hwawon-Goryeong-gyo-Hyeongpung stage stations in the Nakdong River through hydraulic channel routing. The data needed were only stage data from the three stations and river cross section data. Stage-discharge relations were determined from the computed discharges by the channel routing. They are better than the previous stage-discharge relations from direct measurements. Discharge computation errors from stage errors were analyzed and a simple method was suggested to limit reach lengths for prohibiting large errors from lateral inflows.

keywords : hydraulic channel routing, stage-discharge relation, roughness coefficients

요 지

낙동강의 화원-고령교-현풍 수위관측소 구간에 대하여 수리학적 하도추적을 통하여 조도계수를 추정하였다. 세 관측소의 연속 수위자료와 하천 중횡단 측량자료만이 이에 사용되었다. 하도추적에 의해 계산된 유량 자료로부터 수위-유량 관계식을 작성하였으며 이는 기존의 수위-유량 관계식보다 나은 결과를 보였다. 수위측정 오차가 유량계산에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며, 측방유입류를 억제할 수 있도록 하도길이를 제한하는 방법도 제시하였다.

핵심용어 : 수리학적 하도추적, 수위-유량 관계식, 조도계수

* 부경대학교 양과대학 건설공학부 조교수

Assistant Prof., Division of Construction Eng., Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea
(E-mail: peterlcc@pknu.ac.kr)

1. 서론

'수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 하천유량 간접추정' 연구'에서는 수리학적 하도추적에 사용하는 DWOPER의 조도계수 추정과정에 컴플렉스 혼합진화(Shuffled Complex Evolution University Arizona; SCE-UA; Duan, 1991) 진역최적화 기법을 사용하였다. 이를 이용하여 하천의 세 지점 수위자료와 증회단 측량성과만을 이용한 하천구간 조도계수 추정이 가능함을 확인하였다. 또한 수위-수위 경계조건의 수리학적 하도추적에 의하여 하천유량을 적은 오차로 간접 추정할 수 있음을 보였다. 사용된 자료는 미시시피 강의 상류 하도구간 일부에 대한 것이었다.

본 논문에서는 낙동강 본류 구간 중 화원~현풍 구간에 대해서 '99년 9월의 홍수자료를 사용하여 조도계수를 산정한 후 유량을 계산하여 수위-유량식을 작성하였다. 이를 기존의 수위-유량식과 비교하였으며, 두 홍수 자료로부터 검증하였다. 세 지점 수위자료만을 이용하여 계산에 의해 추정된 유량은 수위관측 오차에 영향을 받으므로 화원~현풍 구간에 대하여 오차를 분석하였다. 또한 기존의 연구사례로부터 하도길이와 평균 연최대홍수량의 관계를 수식화한 후, 측방유입류를 무시하였을 때 발생하는 유량오차가 특정 한계 내에 들도록 하도길이를 제한하는 방법을 강구하였다.

2. 낙동강 화원~현풍 구간에 대한 적용

2.1 하도의 선정

동일한 하도의 연속된 세 수위 관측소 사이에는 필연적으로 측방유입류가 유입된다. 본 연구의 주요 가정은 측방유입류가 매우 적어서 수리학적 하도추적에 큰 영향을 미치지 않는다는 점이다. 이러한 전제아래 수리학적 하도추적에서 측방유입류를 무시하고 있다. 그렇지만 대부분의 경우에 수위관측소를 조밀하게 배치하지는 않으므로 측방유입류의 크기가 몇 % 이내로 작은 수위 관측소 세 지점을 찾기는 매우 어렵다. 우리나라의 5대강 수위관측소를 모두 조사한 결과 가정을 만족하는 이상적인 조건을 찾기 어려웠지만, 낙동강 본류의 한 지역에 비교적 적합한 세 관측소를 선정할 수 있었다. 즉, 낙동강의 화원, 고령교, 현풍 수위관측소가 위치한 구간(그림 1)의 하천길이는 20.78 km로 비교적 짧으며 큰 지류가 유입하지 않으므로 이 구간에 논분이 복표로 하는 간접 유량추정법을 적용하였다.

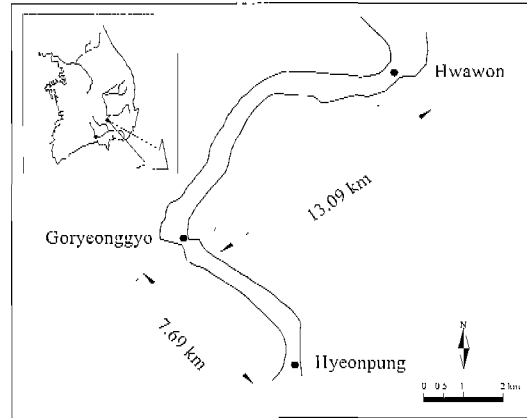


그림 1. 화원~현풍 하도구간

2.2 입력자료 및 기존 수위-유량식

하천의 단면 입력자료로 사용하기 위하여 화원 수위 관측소부터 현풍 관측소 사이에 대한 증회단측량 자료를 수집하였다. 보통의 경우에 하천정비를 위한 증회단측량과 수문자료 취득을 위한 수위관측소 증회단측량이 별도로 이루어지므로 시기가 다른 두 복식의 측량 성과를 수집하여 하천단면 입력자료로 이용하였다. 화원 수위관측소 지점의 단면은 '97년 측량자료(건설교통부 낙동강홍수통제소, 1997)를 사용하였고, 고령교와 현풍 수위관측소 지점의 단면은 '99년 측량자료(건설교통부 낙동강홍수통제소, 1999a)를 사용하였다. 그리고 화원과 현풍 수위관측소 구간사이의 단면은 '93년 측량자료(건설부, 1993a)를 사용하였다. 이들 자료로부터 최소 410 m, 최대 5,200 m의 단면간격으로 14개의 단면을 선정하였다.

사용한 홍수사상은 낙동강홍수예경보(건설교통부 낙동강홍수통제소, 1999b; 2000)에 수록된 세 개의 홍수 자료를 사용하였다(표 1). 그 중 '99년 9월 홍수자료는 조도계수 추정과 유량계산 자료로 사용하였고 '99년 8월 자료와 2000년 9월 자료는 유량계산에 의한 수위-유량 관계식의 검증에 사용하였다.

표 1. 모형의 보정 및 검증을 위한 홍수사상

홍수	기 간	최고수위(m)		
		화원	고령교	현풍
1	99.8. 2 00시~8. 7 23시	8.03	7.37	8.97
2	99.9.19 00시~9.28 23시	11.79	11.03	12.44
3	00.9.12 00시~9.22 23시	10.95	10.08	11.22

새 수위관측소의 수위-유량 관계식은 낙동강홍수통제소의 홍수유량 측정성파로 작성되고 있다. 화원 수위관측소 지점은 '97, '98년, 고령교 수위관측소 지점은 '97년~2000년, 현풍 수위관측소 지점은 '97년, '99년, 2000년 수위-유량 관계식이 수집되었나(표 2).

표 2. 기존의 수위-유량 관계식

지점	연도	수위범위	곡선식 (h=관측수위, H-h+1)
화원	97	$0.86 \leq H \leq 11.20$	$Q = 16.2019(H+0.88)^{2.791}$
	98	$1.1 \leq H \leq 12.54$	$Q = 194.5362(H-0.59)^{1.1777}$
고령교	97	$0.36 \leq H \leq 10.00$	$Q = 140.3282(H+0.12)^{1.9915}$
	98	$0.69 \leq H \leq 12.20$	$Q = 54.2087(H+0.92)^{1.9153}$
	99	$0.17 \leq H \leq 7.37$	$Q = 122.13(H+0.29)^{1.591}$
	00	$7.37 \leq H \leq 12.03$	$Q = 0.09(H+4.22)^{1.266}$
현풍	97	$0.43 \leq H \leq 11.08$	$Q = 66.780(H+0.642)^{1.878}$
	97	$0.17 \leq h \leq 10.72$	$Q = 71.0685(h+0.33)^{1.811}$
	99	$1.61 \leq H \leq 9.754$	$Q = 7.11(H+1.28)^{2.617}$
	00	$9.754 \leq H \leq 13.44$	$Q = 0.52H^{3.907}$
00		$0.70 \leq h \leq 11.21$	$Q = 1.32(h+1.444)^{1.754}$

2.3 수위-수위 경계조건의 조도계수 추정과 유량계산

조도계수 추정과 유량계산을 위해 표 1에서 제시한 홍수사상 2를 사용하였다. 화원 지점의 상류유역면적은 13,640 km²이고, 현풍 지점의 상류유역면적은 14,000 km²이다. 화원~현풍 구간의 유역면적은 360 km²이고, 이것은 화원지점 상류유역면적의 2.4 % 정도이다. 이를 감안하면 화원~현풍 구간에 유입하는 측방유입류를 무시

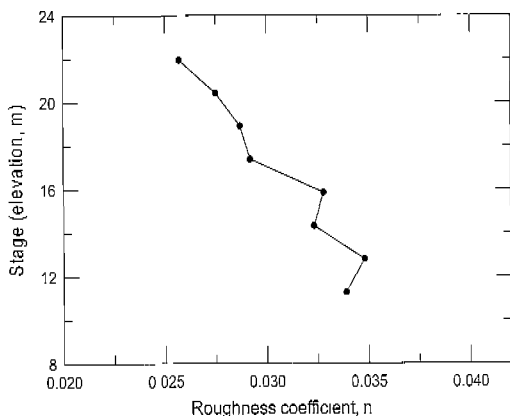


그림 2. 컴플렉스 혼합 진화 기법에 의한 조도계수 추정결과

한 수리학적 하도추적 결과에 비교적 적은 오차가 내게 되리라고 예상할 수 있다. 수리학적 하도추적 모형은 DWOPER(1984)를 이용하였으며, 초기조건으로 하류 경계의 현풍 지점 관측수위 10.91 m(해발수위)를 사용하였고 상류경계의 화원지점 유량 250 m³/s를 사용하였다. 경계조건으로는 화원과 현풍 관측소의 관측수위를 사용하였다.

수리학적 하도추적과 함께 조도계수를 추정하기 위하여 고령교 수위관측소의 계산수위와 관측수위 간의 편차제곱합을 최소로 하는 목적함수로 컴플렉스 혼합 진화 전역최적화 프로그램을 적용하였다. 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Min } \phi = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{M_j} (h_i - h_i')^2 \quad (1)$$

여기서, J는 수위구간의 수, M_j는 j 번째 수위구간에 포함된 수위의 총수, h_i는 계산수위, 그리고 h_i'은 관측수위이다.

전역최적화를 통해 얻은 조도계수는 그림 2에 나타내었다. 화원~현풍 수위관측소 구간의 조도계수는 최대값이 수위 12.80 m에서 0.0348, 최소값이 수위 21.94 m에서 0.0257으로 나타났다. 최적화를 통해 얻은 조도계수는 수위규모가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 결정된 조도계수를 이용하여 계산한 고령교 수위관측소 지점의 계산 및 관측수위 수문곡선을 그림 3에 나타내었다. 고령교 지점의 계산수위와 관측수위는 매우 근접하여 평균제곱오차 평방근(root mean square error)이 0.084 m이었다.

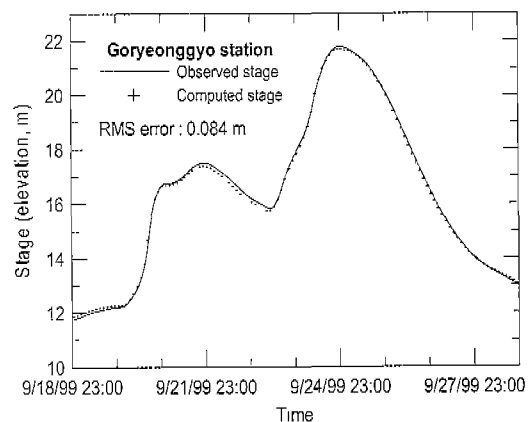


그림 3. 조도계수 추정작업의 고령교 지점 수위비교

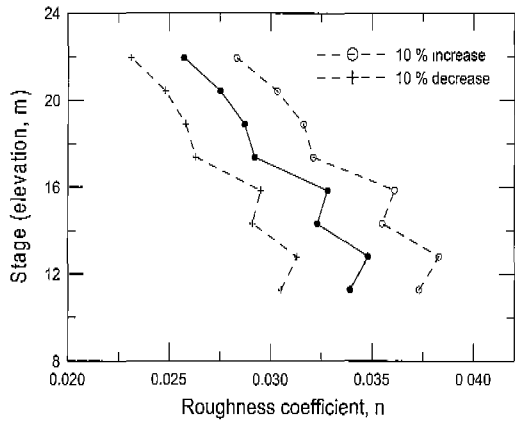


그림 4. $\pm 10\%$ 변화시킨 조도계수

조도계수에 따라 고령교 지점의 수위 계산결과와 유량 계산결과가 달라지는 정도는 다음과 같다. 조도계수를 추정된 값보다 $\pm 10\%$ 증감시켜서(그림 4) 모의한 결과 수위수문곡선은 그림 3과 육안으로 크게 구분되지 않은 정도로 둔감하게 변했으며, 조도계수 증감에 따라 수심의 평균절대편차는 0.259% 증가, 0.325% 감소하였다. 반면에 유량수문곡선은 그림 5와 같이 조도계수 증감에 따라 평균절대편차가 9.08% 감소, 11.03% 증가하였다.

화원, 고령교 수위관측소 지점의 계산유량과 기존의 수위-유량식에 의한 환산유량은 그림 6~9에 나타내었다. 현풍 지점의 환산유량 비교는 고령교와 유사하여 생략하였다. 화원지점의 계산유량은 침두부에서 '98년 환산유량과 근접하였으나 약 4,000 m³/s 이하의 유량에서는 '97년 수위-유량식의 유량과 근접하였다(그림 6).

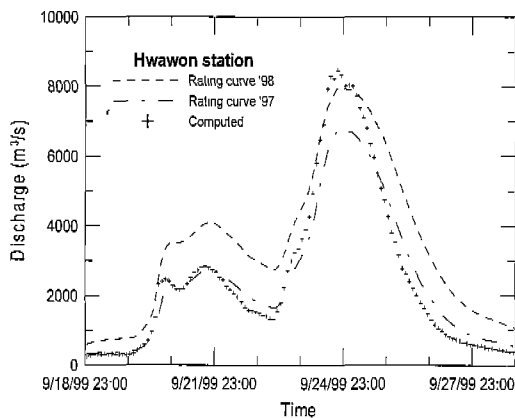


그림 6. 화원 지점의 환산유량과 계산유량

그림 7은 화원 지점의 '98년의 수위-유량 관계식이 약

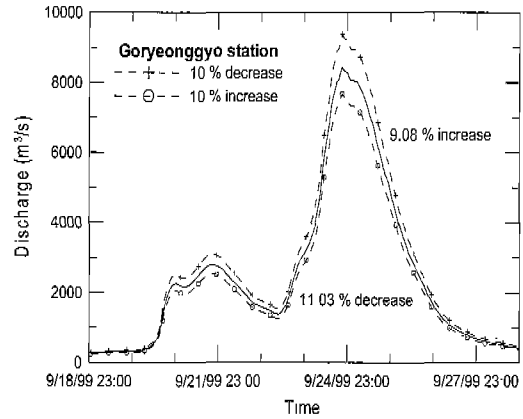


그림 5. 조도계수 변화에 따른 유량수문곡선의 변화

4,000 m³/s 이하의 유량에서는 적합하지 못한 점을 제시하고 있다. 그림은 낙동강 본류의 상류에서 하류에 걸쳐, 여러 수위관측소의 '99년 9월 홍수에 대한 유량수문곡선을 각각의 수위-유량 관계식에 의하여 도시한 것이다. 수문곡선에 기재된 번호는 상류 왜관지점을 (1) 번으로 하고 하류 진봉 지점 (7) 번까지 커지도록 매겼다. '99년 9월 20일 12시를 전후한 수문곡선 상승부를 살펴보면, 다른 유량수문곡선은 하류 지점 값들이 대체로 상류보다 커서 적절함을 알 수 있으나 화원의 유량은 네 개의 하류 지점보다 커서 수위-유량 관계식이 부적절함을 인식할 수 있다. 9월 21일의 유량도 적포교 등 세 하류 지점 유량보다도 큰 것을 볼 수 있다. 즉, '98년 수위-유량 식은 유량 2000 ~ 4000 m³/s 사이에서 적합하지 않음을 알 수 있다. 반면에 계산에 의한

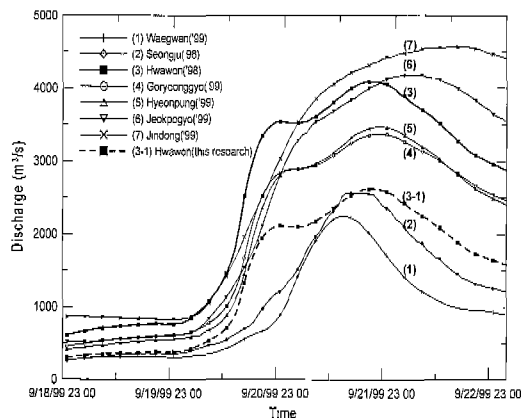


그림 7. 낙동강 본류구간 수위관측소의 유량수문곡선 비교

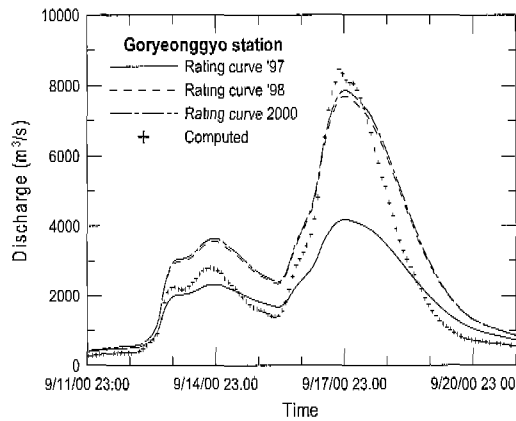


그림 8. 고령교 지점의 환산유량과 계산유량

유량수문곡선(그림 7의 (3-1))은 직상류의 성주 지점 수문곡선과 직하류의 고령교 수문곡선 사이에 위치하고 있다.

고령교 지점의 '97년 수위-유량식에 의한 유량은 저수부에서는 비교적 계산유량과 유사하였으나 침두부에서는 매우 작다(그림 8). 침두부 계산유량만 비교한다면 '98년과 2000년 수위-유량 관계식에 의한 결과와 모두 근접하였다. '99년 수위-유량 관계식에 의한 유량 수문곡선은 그림 8에 함께 도시하지 않고 별도의 그림 9에서 부적합함을 제시하였다. 그림 9에서는 유량과 시간축 이외에 왜관부터의 거리축을 두어 본류 여러 지점의 유량수문곡선을 도시하였다. '99년에 작성된 수위-유량 관계식에 의하면 고령교 지점의 침두유량이 13,180 m³/s로서 각각 45.0 km, 73.1 km 하류의 적포교 유량 9,520 m³/s, 진동 유량 10,080 m³/s 보다 훨씬 크

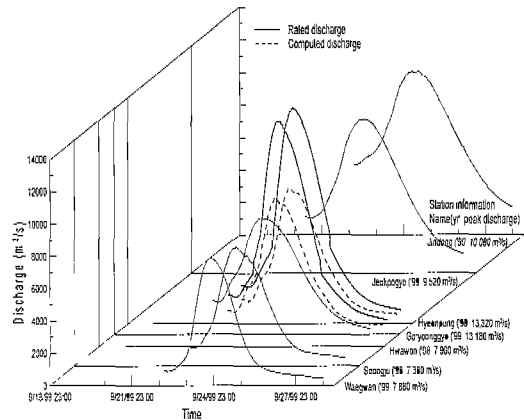


그림 9. 거리에 따른 홍수 유량수문곡선 비교

다. 현풍의 '99년 수위-유량식에 의한 유량수문곡선도 마찬가지로 결과를 보인다. 반면에 계산된 유량수문곡선(그림 9의 파선)은 고령교 지점이나 현풍 지점 모두 침두부가 상류의 성주 지점 크기와 하류의 적포교 지점 크기 사이에 있다. 이와 같은 상대적인 비교로부터 고령교와 현풍의 '99년 수위-유량 관계식은 홍수영역에서 부적합하다는 점을 알 수 있다.

2.4 계산유량을 사용한 수위-유량 관계식 작성

수위자료를 이용한 수리학적 하도추적의 목표는 연속적인 유량자료를 간접 추정하는 것뿐만 아니라 계산된 유량으로 수위-유량식을 작성하는 것이다. 일반적인 지수형 수위-유량 관계식 작성방법에 따라 수위(h)와 유량(Q)과의 관계를 $Q=a(h+b)^n$ 으로 놓고 계산 유량으로부터 수위-유량 관계식을 작성하였다. 화원과 고령교

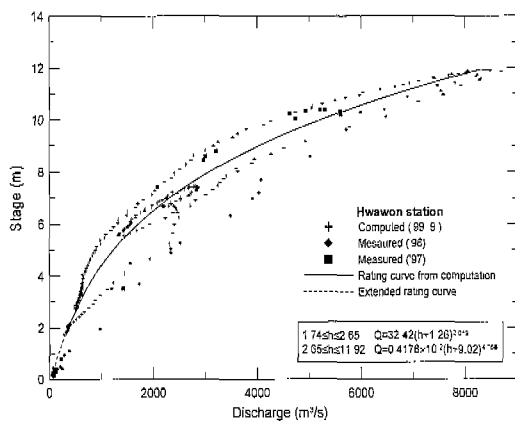


그림 10. 수리학적 하도추적으로부터 작성된 화원 지점 수위-유량 관계곡선

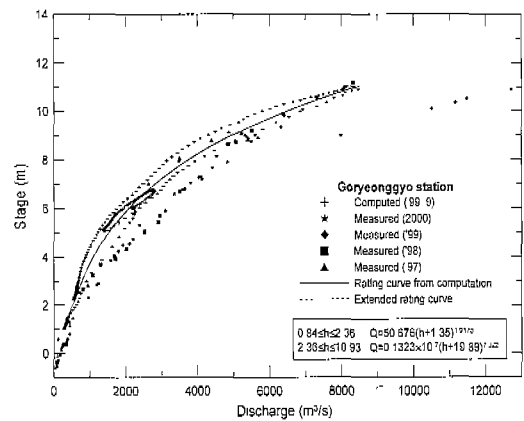


그림 11. 수리학적 하도추적으로부터 작성된 고령교 지점 수위-유량 관계곡선

모두 저수구간과 홍수구간을 구분하여 작성하였다(그림 10, 11).

그림 10은 화원 지점의 '97년과 '98년 유량측정 결과를 새로 작성한 수위-유량 관계곡선과 함께 도시하였다. '97년의 유량측정 결과는 대부분 계산수문곡선의 하강부 유량에 근접하여 도시되었다. '98년의 유량측정 결과는 계산수문곡선의 상승부 유량에 보다 가까웠다. 2 m이하의 저수위 유량은 연장된 수위-유량 관계식 주변에 산포하였다. 고령교 지점의 경우에는 '97년과 '98년, 2000년의 유량측정 결과가 계산유량 또는 그에 의한 수위-유량 관계식에 근접 분포한 반면에, '99년의 유량측정 결과는 수위 8~11 m에서 매우 동떨어져 있다. 이 측정 결과에 의한 '99년 수위-유량 관계식이 적합하지 못하다는 점은 2.3절의 본류 구간 유량수문곡선 상대비교에서 밝힌 바와 같다.

부정류 계산에 의한 수위-유량 관계는 보통의 유량 측정 성과에 의한 수위-유량 관계와 확연히 다름을 그림 10과 11에서 볼 수 있다. 수위의 상승과 하강에 따른 고리(loop)형 수위-유량 관계가 부정류 계산결과로부터 나타나고 있다. 보다 엄밀한 수위-유량 관계를 맺으려면 부정류 효과를 고려한 복합 수위-유량 관계를 유도해야 하지만 이는 현재 연구 중이며 여기서는 단순 수위-유량 관계식만을 유도하였다.

2.5 수위-유량 관계식과 다른 홍수에 대한 계산 유량의 비교

수리학적 하도추적 결과에 의해 작성된 수위-유량 관계식을 다른 홍수 자료에 의한 계산유량과 비교하기

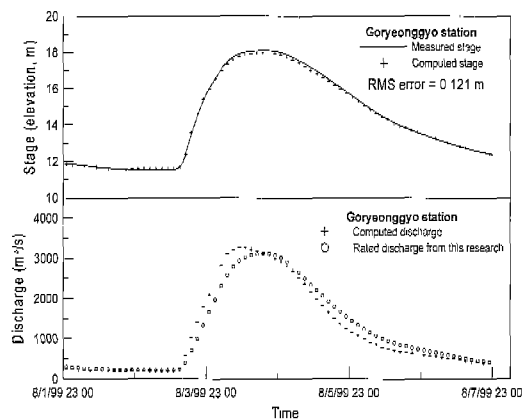


그림 12. '99년 8월 홍수에 대한 고령교 지점의 검증 수문곡선

위하여 표 1의 홍수사상 1을 사용하여 수위-수위 경계 조건으로 수리학적 하도추적을 수행하였다. 하도추적에 의해 계산된 고령교 수위관측소 지점의 수위를 관측수위와 함께 그림 12에 나타내었다. 또한 계산유량으로 작성된 수위-유량 관계식에 의한 환산유량과 모의된 유량도 함께 그림에 도시하였다. 계산수위는 관측수위를 잘 모사하였으며, 평균계급오차의 평방근은 0.121 m이다. 단순 수위-유량 관계식의 환산유량과 수리학적 하도추적에 의한 계산유량을 비교하는 것은 적절하지 못하지만, 홍수가 시작되기 전의 저수유량이나 첨두유량 모두 적은 편차를 보이고 있다. 계산유량에 의한 수위-유량 관계식을 검증계산에서 얻어진 수위-유량 자료쌍과 함께 그림 13에 나타내었다. 급격한 수위 상승에 따라 계산된 수위-유량 자료쌍의 고리폭이 컸으나, 수위-유량 관계식의 진체 형상은 고리의 중앙부를 관통하고 있다.

2000년 9월 홍수(표 1의 홍수사상 3) 자료에 대한 비교결과도 그림 14에 제시하였다. 고령교 지점의 유량 수문곡선은 '99년 8월의 홍수보다 완만하게 상승하였으며 그에 따라 수위-유량 관계식의 환산유량과 계산유량이 상승부에서 적은 차이를 보이고 있다.

두 가지 비교결과를 종합하면 다음과 같다. 단순 수위-유량 관계식의 유량은 수문곡선 상승부에서 수리학적 하도추적에 의한 계산유량보다 작으며 하강부에서는 계산유량보다 크다. 이것은 고리모양 수위-유량 관계를 일정 수위-유량 관계로 단순화하였기 때문에 발생하는 결과이다. 기존의 수위-유량 관계식에 의한 환산결과와 계산유량의 비교(그림 6과 8)에서는 홍수영역과 저수영역 모두 적절하다고 판단되는 수위-유량쌍이 없었다.

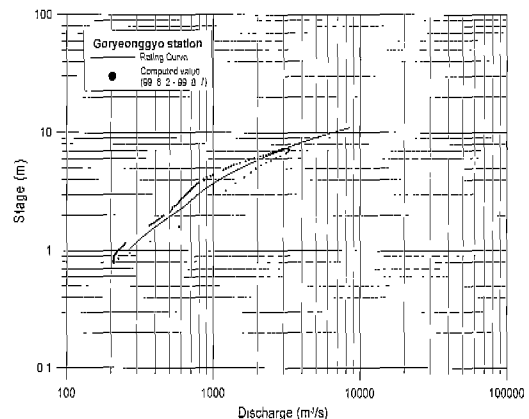


그림 13. 고령교 지점의 검증결과와 수위-유량 곡선의 비교

그렇지만 그림 12와 14의 결과를 보면 새로 작성된 수위-유량 관계식이 전체 수위영역에서 계산유량을 적절히 묘사하는 결과를 보이고 있다.

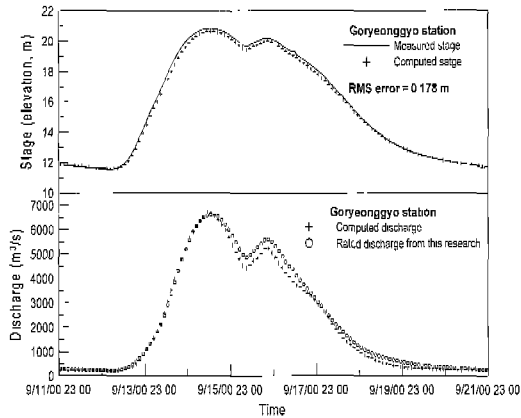


그림 14. 2000년 9월 홍수에 의한 검증

3. 오차분석

수위 경계조건을 사용한 유량계산에는 두 가지 원인의 오차가 삽입된다. 첫 번째 오차원인은 수위관측오차이다. 수위관측오차는 수위관측계기 자체의 오차와 중력파에 의한 오차를 포함한다. 두 번째 오차원인은 관측소 구간 사이에 유입하는 측방유입류 무시에 의한 유량오차이다. 그밖에 관측시설불 관리에 따른 오차나 단면측량의 오차는 정량적으로 평가하기 어려운 관계로 고려하지 않았다.

3.1 화원~현풍 하도구간의 수위관측 오차로 인한 유량오차 추정

수위관측계기의 오차는 국내 수위관측소 수위계의 사양을 구하기 어려워 창민테크 제품의 측정정밀도에서 구하였다. 정밀도가 조금 떨어지는 지상압력식 광학수위계는 수심 10 m에서 ± 10 mm의 정밀도로 수위를 관측할 수 있다. 또한 중력파의 크기한계는 대략 ± 0.1 ft (± 30.48 mm)이다(US Army Corps of Engineers, 1993). 이로부터 수위측정오차의 범위는 관측소별로 ± 40.48 mm로 하였다.

수위관측오차 ε 은 평균이 "0"이고 분산이 σ^2 인 표준정규분포를 따른다고 가정하였고, 표본의 99%가 오차범위에 들도록 하였다. 표준편차 σ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$2.576 \sigma = 40.48 \text{ (mm)}, \sigma = 15.17 \text{ (mm)} \quad (2)$$

상류, 중간, 하류 수위관측소의 관측오차는 각각 독립적으로 발생하므로 무작위로 각 수위관측소에 대한 오차계열을 구성하였다. 이를 위해서 IMSL(1997)의 RNNOA 부프로그램을 사용하였다.

세 관측소의 수위는 오차가 포함된 것이지만 참값을 알 수 없으므로 새로 추가된 오차로 인하여 계산된 유량이 달라지는 정도를 알고자 하였다. 홍수사상 2에 오차를 첨가한 후 유량을 모의한 결과 그 전 보다 평균 절대편차가 0.692% 발생하였고, 최대 2.64%의 편차가 있었다(그림 15). 추정된 조도계수는 수위오차 첨가 이전의 결과(그림 2)와 유효숫자 세 자리 모두 동일하였다. 즉, 조도계수 추정으로 인한 추가오차는 미소하였다.

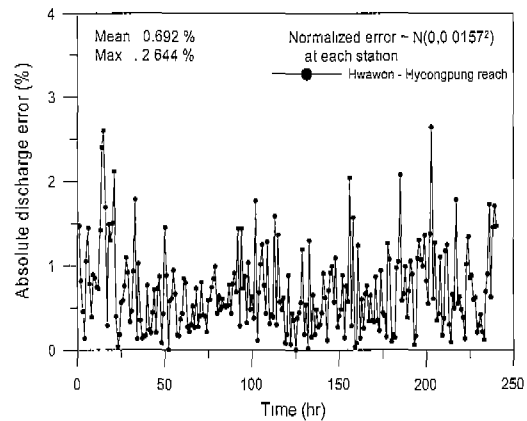


그림 15. 화원~현풍 하도구간의 수위관측 오차로 인한 절대유량오차

3.2 측방유입류 무시 오차를 축소시키기 위한 하도구간 길이의 제한

하천의 유량관측오차는 독일의 경우 5%로 제한되도록 노력하고 있다. 미국 USGS에서는 5%이하 오차를 보이는 유량측정 지점을 우수(excellent)한 관측소로 분류하고 있고 오차가 10%이하인 관측소는 양호(good)한 관측소로 인정한다. 우수 관측소는 미국 내에서도 매우 드문 것으로 알려져 있다(US Army Corps of Engineers, 1993). 본 연구방법을 실제 하도구간에 적용할 경우 대상하도의 길이가 길어짐에 따라 측방유입량이 커지므로 측방유입류 무시로 인한 유량오차를 2~3%정도로 제한할 필요가 있다. 이를 위하여 상·하류단의 하도길이를 제한하기 위한 일반식이 마련되면

배우 유용하다.

본 연구에서는 기존의 연구사례로부터 유역면적(A)과 하도길이(L)의 관계, 유역면적에 대한 평균 연최대홍수량의 관계를 이용하여 평균 연최대홍수량에 따른 하도길이의 관계를 구하였다. 이로부터 유량오차 2, 3%에 해당하는 하도구간 길이를 구하였다.

3.2.1 유역면적, 평균 연최대홍수량, 하도길이의 관계
건설기술연구원에서는 설계홍수추정치침서(건설부, 1993b)를 통하여 5 대강 35개 지점의 평균 연최대홍수량과 유역면적과의 관계를 분석한 아래 식을 제시하였다.

$$q = 11.25A^{-0.25} \quad (3)$$

여기서, A는 유역면적(km), q는 단위면적당 평균 연최대홍수량(m³/s/km)이다. 식 (3)은 섬진강과 한강 지점들에 대해서 더 적합하기 때문에 낙동강 14개 지점의 자료 중 밀양지점의 자료를 제외한 13개 지점의 자료만 가지고 회귀식을 다음과 같이 재작성하였다.

$$q = 15.22A^{-0.383} \quad (4)$$

면적 A에 대한 평균 연최대홍수량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = 15.22A^{0.617} \quad (5)$$

일반적으로 하도길이의 유역면적의 관계는 아래 식과 같이 표현된다.

$$L = aA^b \quad (6)$$

여기서, L은 하도길이, a와 b는 유역에 따라 결정되는 상수이다. 낙동강에 대한 이들 상수는 1968년에 수립된 낙동강유역 수자원계획(UNDP Nakdong River Basin Survey Team, 1968)에서 참조할 수 있으며 a=2.381, b=0.517이다. 이에 따라 하천연장과 유역면적의 관계는 아래와 같이 표현된다.

$$L = 2.381A^{0.517} \quad (7)$$

식 (5)를 식 (7)에 대입하여 A를 소거하면 다음과 같다.

$$L = 0.243Q^{0.517/0.617} \quad (8)$$

모든 크기 유량에 대하여 측방유입류 양을 평가하는 것이 좋으나 평균 연최대홍수량만으로 평가하는 것과

크게 다르지 않으리라는 가정 아래 측방유입류 무시 오차를 분석하였다. 임의의 낙동강본류 지점에 대해 p %의 유량오차가 측방유입류에 의해 발생한다고 가정하면, 이에 해당하는 중간 지점부터 상류지점의 거리 ΔL_{up} 과 하류지점의 거리 ΔL_{down} 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta L_{up} &= 0.243Q^{0.517/0.617} - 0.243\{(1-p/100)Q\}^{0.517/0.617} \\ &= 2.379A^{0.517}\{1-(1-p/100)^{0.838}\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta L_{down} = 2.379A^{0.517}\{(1+p/100)^{0.838} - 1\} \quad (10)$$

3.2.2 고령교 지점의 측방유입류 무시로 인한 유량오차 계산

고령교 지점에 대해 2%와 3%의 유량오차가 측방유입류에 의해 발생한다고 하면 이에 해당하는 상류지점의 거리와 하류지점의 거리는 식 (9)와 (10)에 의해 표 3과 같이 계산된다. 고령교 지점의 상류유역면적은 13,930 km²이다.

표 3. 유량오차 2%, 3% 계산 예

오차 p (%)	상류구간거리 ΔL_{up} (km)	하류구간거리 ΔL_{down} (km)
2	5.56	5.54
3	8.34	8.30

화원~고령교 사이의 하도구간 길이는 위에서 분석한 하도길이보다 길다. 그러나 화원~고령교 사이 구간에 큰 지류의 유입이 없으므로 식 (9)와 (10)의 일반적 관계와 달리 구간의 하도길이가 다소 길어도 측방유입류를 야기하는 유역면적이 작으므로 유량오차가 적을 것으로 생각된다. 다음과 같이 유역면적-유량 관계만을 가지고 측방유입류 무시에 따른 유량오차를 계산하면 이와 같은 생각을 뒷받침할 수 있다. 화원 수위관측소 지점의 상류유역면적은 13,640 km², 고령교 수위관측소 지점은 13,930 km², 그리고 현풍 수위관측소 지점은 14,000 km²이다(건설교통부, 1997, 1999a). 각 수위관측소 지점별 평균 연최대홍수량은 식 (5)를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{\text{화원}} = 5,410 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

$$Q_{\text{고령교}} = 5,490 \text{ m}^3/\text{s} \quad (12)$$

$$Q_{\text{현풍}} = 5,500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (13)$$

화원과 고령교 지점간의 평균 연최대홍수량 차이를 측방유입량으로 가정하면 이 값은 고령교 지점 평균연최대홍수량의 1.46 %이다. 그리고 고령교와 현풍 수위 관측소 지점간의 평균연최대홍수량 차이를 측방유입류라 가정하면, 이 값은 현풍 지점 평균 연최대홍수량의 0.18 %이다. 비록 화원과 고령교 지점간의 구간거리는 13.09 km, 고령교와 현풍 지점간의 구간거리는 7.69 km일지라도 유역면적에 대한 평균 연최대홍수량의 관계에서 구한 측방유입류 오차는 각각 1.46 %, 0.18 %이므로 고령교, 현풍 지점의 측방유입류 무시로 인한 유량오차는 1.46 %, 0.18 %에 가까운 것으로 생각된다.

총력파에 의한 수면 요동과 수위계 자체에서 발생하는 수위관측 오차는 약 ± 40.48 mm 이내로 가정되었다. 이로 인한 고령교 지점 유량계산 오차는 최대 약 2.64 %이었다. 그리고 측방유입류 무시로 인한 오차는 1.46 %에 가까운 것으로 예상된다. 결국 고령교 지점 유량계산 오차는 약 4 %이내로 추정되었다.

하천의 단면적 변화로 인한 계산유량의 변화는 연구되지 못하였다. Westphal 등(1999)이 '93년 미시시피강 중류의 홍수기간에 약 두 달 동안 관측한 비에 의하면, 1~2 일 사이에 보통 1~2 %의 단면적 변화가 관측되었으나 이것이 유량 변화와 상관성을 보이지 않았다고 지적하고 있다. 만일 장기적인 하상변동으로 일정하게 하상이 상승하거나 하강한다면, 수리학적 하도추적에 소요되는 단면 입력자료를 변경하여 유량을 새롭게 추정하고 수위-유량식도 그에 따라 변경하여야 할 것이다.

4. 결론 및 향후과제

낙동강 본류 구간 중 측방유입량이 적고 관측소 사이의 거리가 짧은 화원~현풍 하도구간에 대해서 수위-수위 경계조건을 사용하여 수리학적 하도추적을 수행하고, 콤플렉스 혼합 진화 전역최적화 기법으로 조도계수를 추정하였다. 추정된 조도계수를 사용한 유량계산 결과로부터 화원, 고령교 지점의 수위-유량 관계식을 작성하였으며, 추정된 조도계수와 계산유량의 적절성 여부를 두 개의 홍수사상 자료로부터 검증하였다. 그리고 평균 연최대홍수량 값으로 하도길이를 표현함으로써, 측방유입류 무시로 인한 오차가 너무 커지지 않도록 하도길이를 예비 결정하는 간략한 방법을 강구하였다.

기존 수위-유량 관계식에 의한 환산유량 수문곡선이 계산유량 수문곡선과 홍수영역에서 근접한 경우 저수영

역에서는 큰 차이를 보였다. 반대로 저수영역에서 계산유량 수문곡선과 근접한 기존 수위-유량 관계식은 홍수영역에서 큰 차이를 나타냈다. 또한 '99년의 고령교 수위 유량 관계식은 부적절한 식으로 분석되었다. 그렇지만 계산된 유량에 의해 작성된 수위-유량 관계식은 두 가지 검증모의에서 계산된 유량 수문곡선과 전체 수위영역에서 작은 편차를 보였다. 그리고 3~4 년에 걸친 유량추정 결과도 새로 유도된 수위-유량 관계식 주변에 산포되어 있다. 이와 같은 결과를 볼 때, 수위-수위 경계조건을 사용한 수리학적 하도추적에 의하여 유량을 간접 추정하고 수위-유량 관계식을 작성하는 방법이 최소한의 유용성을 가졌다고 볼 수 있다. 주의하여야 할 사항은 River Hydraulics(US Army Corps of Engineers, 1993)에서 지적하는 비와 같이, 수위 경계조건에 의한 계산유량은 유량추정에 의하여 검증할 필요성이 있는 점이다. 향후 정밀한 유량추정에 의하여 연구결과를 재평가할 필요가 있다.

감사의 글

자료취득에 도움을 주신 낙동강홍수통제소 배한후님께 감사드립니다. 본 연구 내용은 한국과학기술원 해외 Post-Doc 연수 내용 중 일부이며 연수 지원에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

- 건설부 (1993a). 낙동강 하천정비기본계획(보안III).
- 건설부 (1993b). 설계홍수추정치침서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1997). 낙동강수계 홍수량추정조사 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1998). 낙동강수계 홍수량추정조사 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1999a). 낙동강수계 홍수량추정조사 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1999b). 낙동강홍수에 경보 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (2000). 낙동강홍수에 경보 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (2001). 낙동강수계 홍수량추정조사 보고서.
- Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*, Ph.D. dissertation, Dept. of Hydrology and Water Resources, Univ. of

Arizona, Tucson.

Fread, D.L. (1984). *National Weather Service operational dynamic wave model*. National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Md.

IMSL (1997). *IMSL: Fortran subroutines for mathematical applications*. Visual Numerics, Inc.

US Army Corps of Engineers (1993). *River hydraulics*. EM 1110-2-1416.

UNDP Nakdong River Basin Survey Team (1968). *Water resources planning in the Nakdong River basin*, Vol. III.

Westphal, J.A., Thompson, D.B., Stevens Jr., G.T., and Strauser, C.N. (1999). "Stage-discharge relations on the Middle Mississippi River." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 1, pp. 48-53.

(논문번호:01-005/접수:2001.01.26/심사완료:2001.08.23)