

HPG로 산정한 합류부 배수영향 구간의 유량 평가

김지성* · 김 원**

Kim, Ji-Sung* · Kim, Won**

An Evaluation of River Discharge Estimates in a Junction with Backwater effect using Interpolated Hydraulic Performance Graph

ABSTRACT

This paper presents a method to estimate the flow discharge in a backwater affected river junction. First, unsteady HEC-RAS model was simulated and calibrated using 2 recent real flood and then HPG (Hydraulic Performance Graph) was created by plotting the relationship between upstream and downstream stages and discharge in the reach and performing kriging interpolation. During a flood, the discharge through the reach can be estimated based on the stages at its ends and the developed HPG. These discharge data were in good agreement with the automatic discharge measurements such as ADVN. This study could provide an economical and practical method for estimating discharge in a junction with a high hysteresis of stage-discharge relationships.

Key words : Backwater, Junction, Stage-discharge relationship, Automatic discharge measurement, HPG

초록

본 논문에서는 합류부 배수영향을 받는 지점에서 유량을 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 먼저, 최근 2개의 홍수사상에 대한 HEC-RAS 부정류 모의를 수행하여 모형을 보정하였으며, 관심구간 상하류 수위와 유량과의 관계 그래프를 작성하고 크리깅 보간을 수행함으로써 HPG (Hydraulic Performance Graph)를 작성하였다. 대상 홍수기간 동안 HPG와 상하류 연속 수위 자료를 이용하여 구간 유량을 산정하였고, ADVN 같은 자동유량측정 자료와 비교하여 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구결과는 수위-유량 관계곡선의 이력현상이 큰 배수영향 구간에서 유량을 산정하는데 경제적이고 실용적인 방법을 제공할 것이다.

검색어 : 배수영향, 합류부, 수위-유량관계, 자동유량측정, HPG

1. 서론

하천유량은 이수 측면에서 댐 및 저수지 운영, 수자원 공급량 산정을 통한 물수지 평가, 치수 측면에서 하천시설물의 설계 및 홍수예보, 환경 측면에서 수생태계 보전 계획 수립 등 물관리 업무 전반에 걸쳐 기초가 되는 자료로서(Hidayat et al., 2011), 연속 측정된 수위 자료와 관심지점에서의 수위-유량관계곡선을 이용하여 산정된다. 그러나, 조위영향 또는 배수영향을 받는 구간에서는 수위-유량관계의 설정이 어려우므로 자동유량측정시설을 설치하여 실시간 유량자료를 생산할 수 있다. 2010~2019 수문조사기본계획(MLTM, 2008)에 따르면 2019년까지 유량산정 지점을 334개소까지 확대 필요함을 제시하고 있으며, 이를 위하여 자동유량측정시설은 2008년 11개

* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jisungk@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · wonkim@kict.re.kr)

Received October 27, 2018/ revised November 15, 2018/ accepted November 18, 2018

지점에서 2019년 88개 지점까지 점차 설치 확대하는 것으로 계획하였다. 한편 국가수문조사 전담기관인 한국수자원조사기술원의 수문자료 보유 현황을 살펴보면, 2010년부터 2015년까지 154개 소~203개소 수준으로 유량측정이 실시되었으며 자동유량측정시설은 2015년 6월 현재 전국 52개소가 설치·운영되고 있음을 알 수 있다. 이는 계획(2015년 목표: 유량측정 257개소, 자동유량측정시설 65개소) 대비 70~80 % 수준으로 목표 달성에 다소 미흡한 실정이며, 그 원인으로 시설 설치 및 유지관리에 소요되는 인력·예산이 주요 원인인 것으로 판단된다.

유량산정 실무에서는 일반적으로 수위와 유량이 일대일로 대응하는 단일 수위-유량관계곡선식을 이용한다. 이러한 방법은 정상류 상태의 하천흐름이나 부정류 상태에서도 다소 급한 하상경사(> 10^{-3})를 가진 하천흐름일 경우에 충분히 적용될 수 있다(Dottori et al., 2009). 그러나 이러한 경우를 제외한 실제 하천에서는 주로 동역학적 거동을 보이는 부정류 상태로 단일 수위-유량관계가 아닌 고리(loop)형 수위-유량관계곡선을 형성하며(Chow, 1958; Fread, 1975; Dottori et al., 2009; Kim et al., 2012), 이는 하천의 상하류의 조건 상황에 따라 계속 변화되므로 하나의 관계식을 설정하는 것이 곤란하다. 특히 본류와 지류가 만나는 합류부에서는 두 흐름의 상호작용으로 흐름정체가 빈번하게 발생되고 있으며, 본류에 비해서 상대적으로 홍수량 규모가 작은 지류에서는 배수영향에 의한 유속저하와 수위상승이 발생하여(Choi et al., 2010; Kim et al., 2014), 단일 수위-유량관계의 설정이 불가능하다. 이는 유량이 수위뿐만 아니라 하상경사, 수면경사, 유속의 사공간 변화율 등의 함수로 정의되기 때문이다(Kim et al., 2005). 따라서 단일 수위-유량관계곡선을 실제 하천 합류부에 적용하면, 산정된 유량에 심각한 오차를 발생시킬 수 있다.

배수영향 구간에서 수위-유량관계곡선의 이러한 문제를 극복하기 위하여 몇 가지 방법들이 제안되었다(e.g. Jones, 1915; Chow, 1958; Henderson, 1966; Fread, 1975; Rantz, 1982; Herschy, 1995; Fenton and Keller, 2001). 이들은 대부분 실험적인 자료를 이용하여 유도된 경험적인 방법으로 수위-유량관계곡선을 보정하거나, 혹은 특정 흐름조건과 제한된 하상의 기하학적 구조에서 적용될 수 있는 단순화된 동역학과방정식을 이용하고 있기 때문에 실무적인 적용성이 떨어진다고(Schmidt and Yen, 2002; Dottori et al., 2009).

HPG (Hydraulic Performance Graph)는 발생 가능한 모든 흐름조건에 대한 수면곡선을 이용하여, 임의 하도구간의 배수영향 특성을 유량과 상하류 수위(또는 수심)의 관계로 표시한 그래프이다. Yen and Gonzalez-Castro(1994)는 미국 일리노이(Illinois)주에 위치한 Boneyard Creek의 수리학적 통수능을 결정하기 위하여 HPG를 제안하였다. 이후 Gonzalez-Castro and Yen(2000)은

개수로 부정류 흐름추적에 대해서도 HPG의 적용성을 평가하였다. Seo et al.(2014)은 낙동강 중류구간(낙단보~왜관) 91개 측선에 90개의 HPG를 작성하고, 실제 홍수사상을 적용하여 실측 홍수위와 비교하였고, 상대적으로 짧은 구간에서 상류 유량과 하류 수위가 주어질 경우 상류 수위의 예측정도가 크게 향상됨을 확인하였다.

HPG를 이용하여 유량을 산정하는 연구도 수행되었다. Gonzalez-Castro and Ansar(2003)은 하상경사 없는 평평한 운하 수로에서 HPG로 산정된 유량과 ADCP로 측정한 유량을 비교하였으며, 수위의 계측오차로 인하여 유량산정의 불확실성이 증가할 수 있음을 제시하였다. Kwon et al.(2008)은 가상하도에서 작성된 HPG로부터 등류상태의 기준 수위-유량관계를 설정하고 배수영향이 있는 경우에 기준 수위-유량관계를 보정하는 방법을 시도하였다. 그러나 두 연구 모두 균일한 가상하도에 적용되어 불규칙한 지형조건의 자연하도에서 유량 산정에 활용된 사례는 전무한 실정이다.

본 연구의 목적은 합류부 배수영향을 받는 지류구간의 유량을 산정하기 위한 방법을 개발하는 것이다. 이를 위하여 먼저 HEC-RAS 모형을 구축하고, 부정류 모의로 구축된 모형을 보정하였다. 보정된 모형을 이용하여 발생 가능한 범위의 하천 유량조건에 대하여 배수영향 수면곡선을 요약한 HPG를 작성하였고, HPG로부터 유량 자료의 독취가 용이하도록 크리깅(kriging) 보간을 수행하였다. 이렇게 보간된 HPG와 두 수위관측소에서 계측된 수위를 이용하여 배수영향 구간의 유량을 산정하였으며, 그 결과를 구간 내 자동유량 측정자료와 비교함으로써 개발된 방법의 정확성을 검토하였다.

2. 대상구간 및 수리학적 모형 구축

본 연구는 낙동강 제1지류인 금호강을 대상으로 수행되었다. 금호강은 유로연장 114.6 km, 유역면적 2,087.9 km²로서 낙동강 전체 유역면적 23,326.3 km²의 약 9 %에 해당한다. 금호강 유역의 유출량을 산정하기 위하여 1962년부터 낙동강 합류부 인근 성서 수위관측소를 설치·운영하고 있으며, 2008년에는 자동유량측정 시설을 설치하고 안정화 과정을 거쳐 현재까지 연속 유량자료를 제공하고 있다.

금호강 수리학적 모형 구축 대상구간으로 상류단 경계는 동촌 수위관측소, 하류단 경계는 낙동강 합류부를 선정하였다. 동촌 수위관측소는 낙동강 합류부로부터 26.9 km 상류에 위치하여 낙동강으로 인한 배수영향을 받지 않는다. HEC-RAS 모형의 상류단 경계조건으로 동촌 수위관측소의 유량자료를 사용하였고, 하류단 경계조건은 합류부에서 상류방향으로 0.887 km 떨어져 있는 강정고령보 직하류에서 측정된 수위자료를 사용하였다. 대상구간 내에는 주요 지류로 동화천과 신천이 유입되고 있으므로 동화천은 동변 수위관측소, 신천은 침산 수위관측소의 유량자료를 금호강의

측방유입조건으로 고려하였다(Fig. 1 참조). 그리고, 금호강 단면자료는 하천기본계획 수립시 시행된 2009년 측량자료를 활용하였다.

모형 보정을 위하여 최근 가장 큰 홍수였던 2012. 09. 17 06:00~2012. 09. 18 22:00 (40 hr) 사상과 2014. 08. 18 03:00~2014. 08. 19 19:00 (40 hr)을 이용하였다. Fig. 2는 보정 사상의 경계조건을 나타내며, Fig. 3은 성서와 산격 지점에서 관측 수위와 계산 수위를 비교한 것이다.

2012년 사상의 경우 산격과 성서의 침두수위 오차(관측계산)는 각각 -0.10 m, 0.12 m로 나타났으며, 2014년 사상에서는 -0.08 m, 0.07 m로 나타나 모형이 비교적 잘 보정되었음을 알 수 있다. 산격 지점의 경우, 두 사상 모두 자유량 구간에서 수위계산 오차가 크게 나타나는데 이는 수위관측소 하류 약 600 m에 위치한 무태가동보의 운영과 더불어 2011년 개량된 보 체원 및 지형의 변화를 충분히 반영하지 못한 원인으로 판단된다. Table 1은 모형 보정의 결과물인 구간별 유량규모에 따른 조도계수를 나타낸다.

3. HPG 작성 및 유량 산정 방법

HPG는 정상부등류 방정식의 해로부터 작성된다. 본 연구에서는 실제 홍수사상에 대한 HEC-RAS 부정류 모의를 수행하여 모형 매개변수인 대상구간의 조도계수를 보정하고, 보정된 모형을 이용하여 다양한 유량규모의 정상류 해석을 수행함으로써 HPG를 작성하였다.

HEC-RAS 모형을 이용하여 배수영향 구간의 HPG를 작성하는 과정은 다음과 같다.

1. 먼저 해당 하도구간의 유량규모의 범위를 결정한다. 본 연구에서는 HPG를 이용한 유량산정의 적용성을 평가하기 위하여 200 m³/s에서 4,500 m³/s까지 유량(12개 유량조건)의 점진적인 증가를 고려하였다.
2. HEC-RAS 부정류 모의를 수행할 때, 다양한 크기의 유량을 상류 경계조건으로 지정하고, 하류 경계조건은 한계수심을 지정한다.

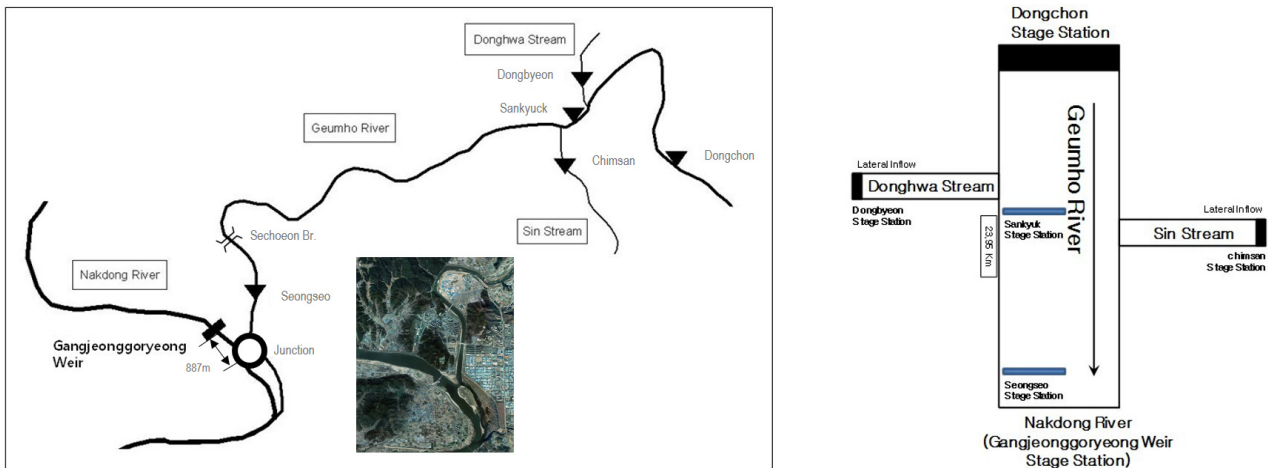


Fig. 1. Study Area

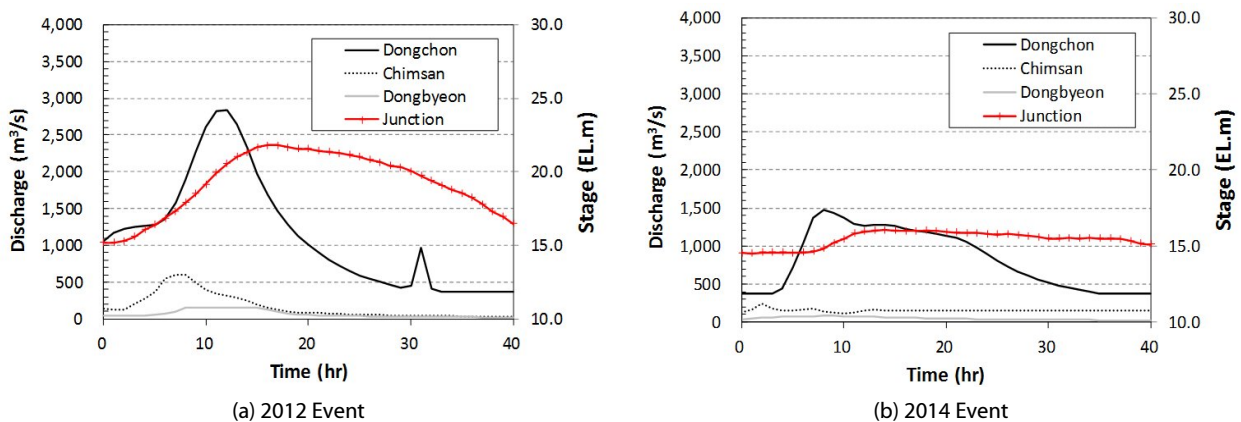


Fig. 2. Boundary Condition

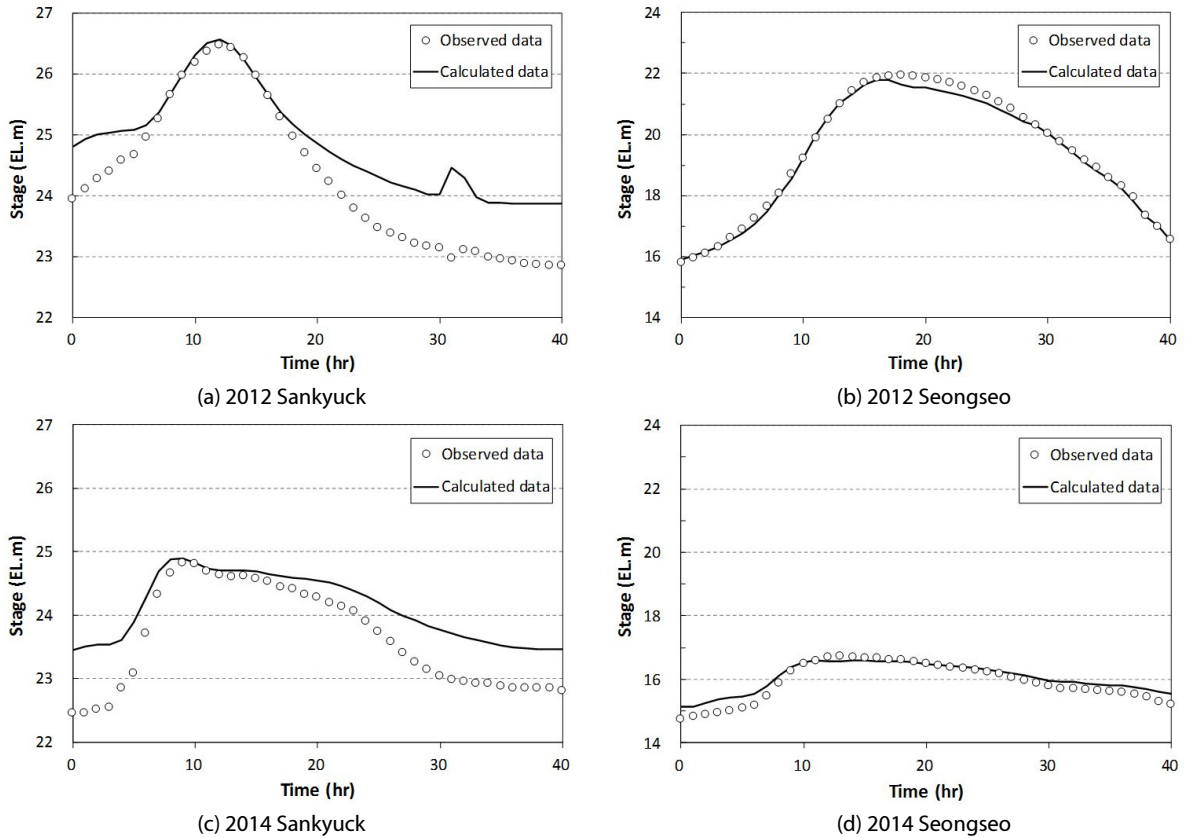


Fig. 3. Results of Model Calibration

Table 1. Calibrated Roughness Coefficient

Discharge (m ³ /s)	Dongchon~Mutae Br.	Mutae Br.~Weir	Weir~Paldal Br.	Paldal Br.~Geumho Br.	Geumho Br. ~Junction
0~100	0.027~0.034	0.017~0.022	0.023~0.030	0.022~0.028	0.028~0.030
100~500	0.024~0.027	0.016~0.017	0.021~0.023	0.020~0.022	0.028~0.028
500~1,000	0.020~0.024	0.013~0.016	0.018~0.021	0.016~0.020	0.027~0.028
1,000~1,500	0.014~0.020	0.009~0.013	0.012~0.018	0.011~0.016	0.026~0.027
1,500~1,800	0.014~0.016	0.009~0.010	0.012~0.014	0.011~0.013	0.026
1,800~	0.016	0.010	0.014	0.013	0.026

3. 각 유량규모에서 계산된 배수영향 구간 상류단 수위와 하류단 수위(한계수심)를 연결하여 Fig. 4의 C_d-curve를 작성한다.
4. 이어서 Q₁, Q₂, Q₃ 등 하나의 유량 조건에서 하류단 한계수심으로부터 점진적으로 증가되는 수심(0.5 m 간격으로 14가지 수위조건)을 부여하고 이에 대한 상류 수심을 계산하면, Fig. 4와 같은 각 유량 규모의 HPG 작성이 가능하다. 이때 하류단 수위의 최대치는 하류단 단면의 지형조건과 HPG 작성에 고려한 최대 유량규모를 반영하여 설정하였다.
5. 한편, 해당구간에 유량이 0인 경우는 하류단과 상류간의 수위가 같을 것이다. 따라서 Fig. 4의 Z-line은 해당구간에 흐름이 없는 경우를 의미한다.

본 연구에서 HPG로 산정한 유량의 검증을 위하여 비교할 금호강 성서 수위관측소 지점은 합류부의 배수영향을 크게 받는 곳이다. 즉, 본류인 낙동강의 수위가 높아지면 성서지점의 유량과 무관하게 수위가 상승하게 되며, Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 배수영향이 없는 지점에서 나타나는 단일 수위-유량관계곡선을 기대할 수 없다. 실제로 2012년 9월 홍수기간 동안 자동유량측정시설로 실측된 유량과 수위 자료로부터 수위-유량관계를 그려보면 고리형 수위-유량관계곡선(Loop Rating Curve)이 작성된다.

Fig. 4와 같이 HPG는 정상상태의 구간 유량(Q)과 상하류 수위 (Y_u, Y_d)의 관계를 나타낸 것이다. 따라서, HPG를 이용하여 유량을 산정하고자 한다면, 먼저 관심구간의 상하류 수위를 계속하여야

한다. 이후 HPG에서 두 계측 수위가 만나는 점을 읽으면, 그 구간의 유량을 알 수 있다. 이 때 산정된 유량의 불확실성을 낮추기 위하여 중요하게 고려해야 할 점은 상하류 수위 계측 구간 길이의 결정이다. 두 수위 간 거리가 가까워 유량변화에 따른 수위차의 변화가 크지 않을 경우, HPG로부터 유량을 산정하는 것이 곤란하기 때문이다.

우선 금호강 합류점에서 1.6 km 상류에 위치한 성서 수위관측소 지점을 대상으로 합류부 수위와 연계하여 Fig. 6(a)과 같이 HPG를 작성하였다. Fig. 5에 나타난 성서 수위관측소 지점 수위가 19.6 EL.m일 경우를 Fig. 6(a)에서 살펴보면, 유량 500~2,500 m³/s에서 합류부 수위가 19.4~19.6 EL.m까지 변화됨을 알 수 있다. 이는 합류부 수위의 계측 오차 1 cm가 평균 100 m³/s의 오차를 나타낼 수 있음을 의미한다. 만약 실제 유량이 500 m³/s일 경우, 유량 산정 오차는 20 %에 해당된다. 따라서 본 연구에서는 HEC-RAS 모형을 이용한 해석결과인 합류점 상류 3.13 km 지점의 세천교 수위를

이용하여 Fig. 6(b)와 같이 HPG를 작성하고, 동일한 유량 규모에서 유량산정의 불확실성을 검토하였다. 합류부-세천교 HPG에서는 세천교의 수위가 19.6 EL.m일 경우 합류부 수위가 17.0~19.5 EL.m 까지 변화되며, 이는 합류부 수위 계측 오차가 1 cm인 경우에도 평균 8 m³/s의 유량 산정오차를 나타낸다.

여기서, 성서 지점과 세천교 지점의 수위-유량 관계 비교를 위하여 2012년 사상을 모의한 결과(Fig. 7)를 확인하면, 세천교 또한 합류부의 배수영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6와 같은 HPG에서 상하류 수위조건에 만족하는 유량을 산정하기 위해서는 각 유량의 거동곡선을 보간할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 크리깅 기법을 활용하였고, 보간된 셀의 크기는 수위 측정값의 유효 자리수를 고려하여 0.01 m로 지정하였다. 낙동강 합류부 그리고 세천교의 수위자료와 이 구간의 유량자료를 크리깅 보간한 HPG 결과는 Fig. 8과 같다.

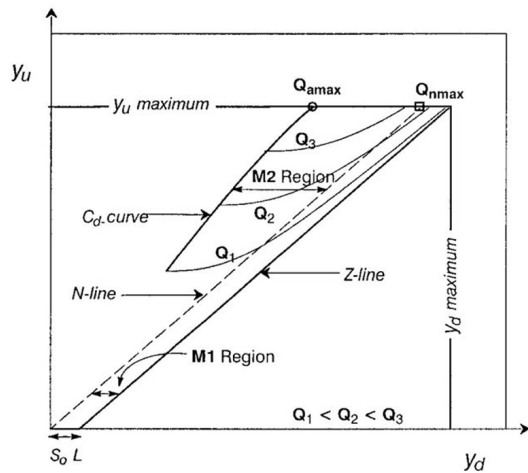


Fig. 4. HPG in Subcritical Flow (Yen and Gonzalez-Castro, 2000)

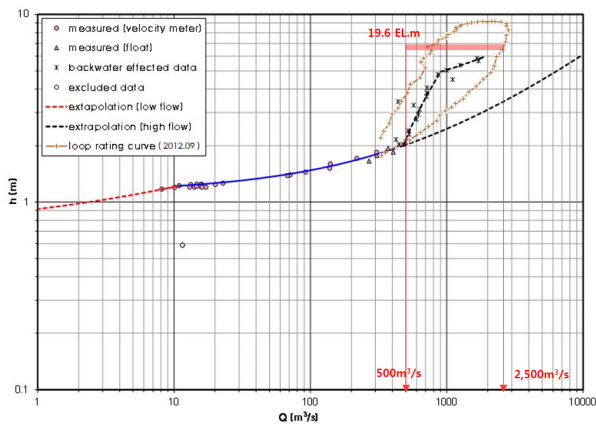
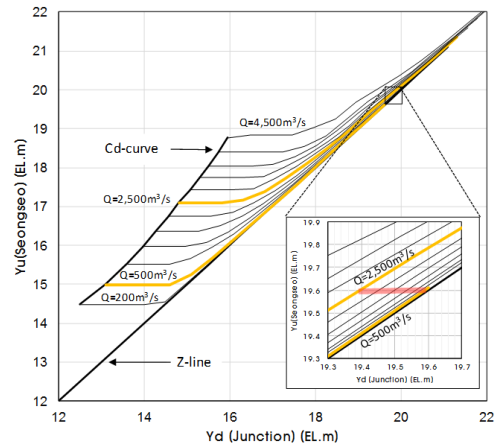
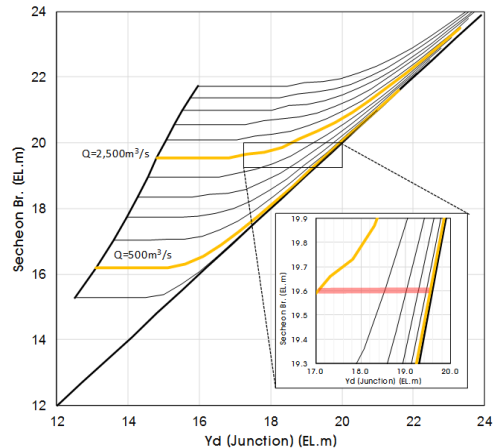


Fig. 5. Stage-Discharge Relation at Seongseo Station



(a) Seongseo-Junction HPG



(b) Secheon Br.-junction HPG

Fig. 6. Comparison of HPGs in Kumho River Downstream

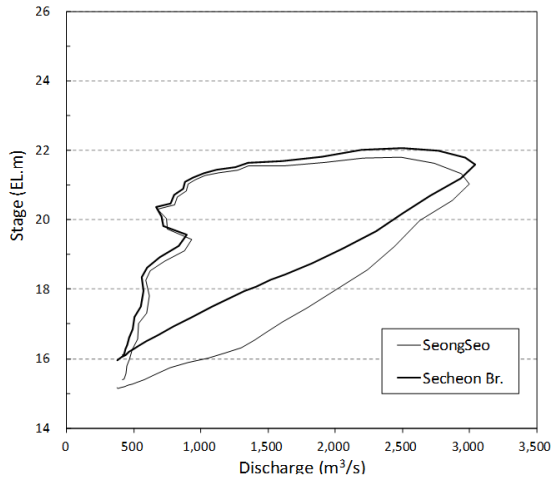


Fig. 7. HEC-RAS Model Results of 2012 Event

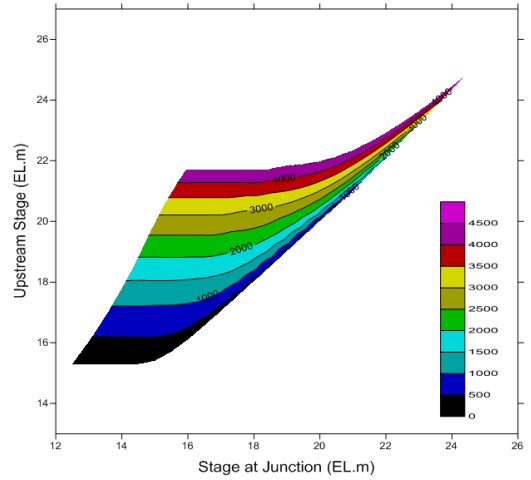


Fig. 8. Kriging-interpolated HPG

4. 배수영향 구간의 HPG 산정 유량 평가

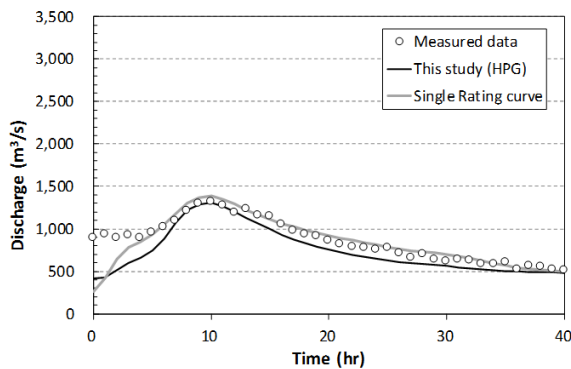
개발된 HPG와 낙동강 합류부, 세천교 수위 자료를 이용하여 2개의 모형 보정사상에 2012년 8월, 2013년 7월 사상을 추가하여 금호강 하류구간의 유량을 산정하였다. 그리고 HPG로 산정된 유량을 성서 자동유량측정자료와 기존 단일 수위-유량관계곡선 (Fig. 5)에 의해 산정된 유량과 함께 Fig. 9에 비교하였다.

비교결과, 상대적으로 대상구역의 홍수 규모가 크지 않아 낙동강의 배수영향이 작은 사상(Fig. 9(a), (b), (d))에서는 기존 단일 수위-유량관계, HPG, 자동유량측정 방법을 이용한 유량산정 결과의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 자동유량측정 자료를 기준으로, HPG를 이용할 경우 총 체적은 85~100 %, 침투 유량은 96~111 %로 산정되었고, 기존 단일 수위-유량관계를 이용할 경우는 총 체적 98~106 %, 침투 유량은 95~106 % 산정되어 두 가지 방법 모두 자동유량측정 자료와 비교하여 ±10 % 내외의 차이를

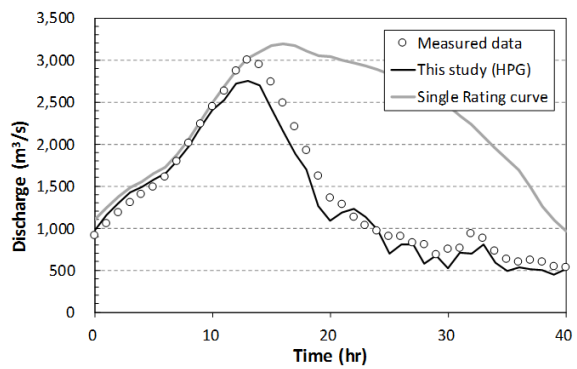
나타내었다. 그러나 금호강 유역의 강우가 소강상태에 접어든 시점에서 낙동강 본류의 유량이 컸던 2012년 9월 사상(Fig. 9 (b))의 경우, 단일 수위-유량관계를 이용한 방법은 홍수기 하강부, 낙동강 본류 수위가 천천히 하강함에 따라 발생된 배수영향을 반영하지 못하고 실측된 유량수문곡선과 다른 양상을 나타낸다. 그 결과 홍수 전기간 동안 총 체적은 약 60 % 크게 산정되었고, 침투홍수량 또한 10 % 이상 크게 산정되었다. 본 연구에서 개발된 방법에 의한 유량 산정결과는 자동유량측정 결과와 큰 차이를 나타내지 않았으며, 총량 및 침투홍수량의 오차가 각각 7 %, 3 %로 감소하여 단일 수위-유량관계를 이용한 방법 대비 크게 개선된 결과를 나타내었다(Fig. 10).

5. 결론 및 고찰

신뢰성 있는 하천유량 자료는 수자원 배분, 주운, 홍수 또는

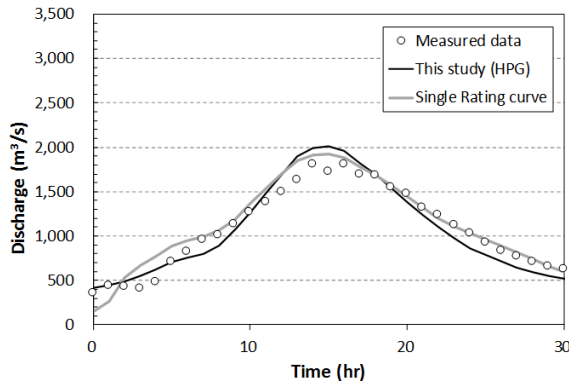


(a) 2012. 8. 23~2012. 8. 25

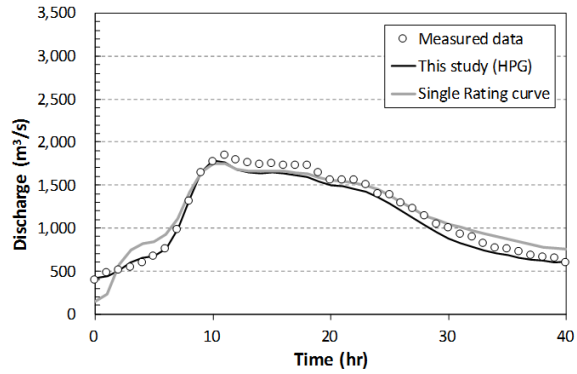


(b) 2012. 9. 17~2012. 9. 18

Fig. 9. Comparison of Measured and Calculated Data



(c) 2013. 7. 5~2013. 7. 6



(d) 2014. 8. 18~2014. 8. 19

Fig. 9. Comparison of Measured and Calculated Data (Continue)

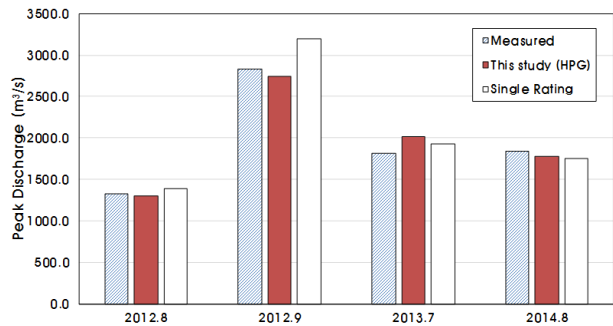
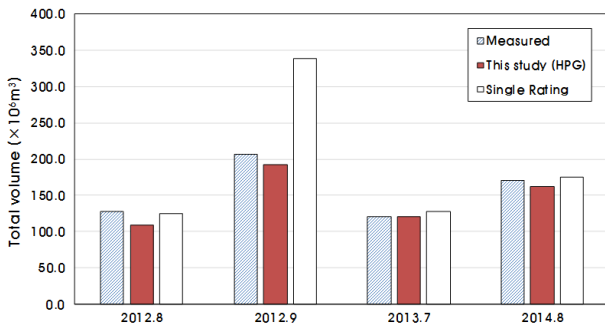


Fig. 10. Comparison of Methods for Computing Discharge at the Seongseo Stage Gauging Station

가뭄의 예측을 포함한 물 관리에 관련된 다양한 연구에 필수적인 요소이며, 유역 규모의 물수지 분석에도 매우 중요하다. 또한 강우-유출 모형 등 수문학적 모형의 보정과 검증에도 연속적인 유량자료가 필요하다. 일반적으로 지류 하천에서는 유역 유출량 산정을 위하여 합류점에서 멀리 떨어지지 않은 곳에 수위관측소가 위치하게 된다. 그러나 배수영향을 크게 받는 합류부 구간에서는 단일 수위-유량관계가 나타나지 않으므로 유량 산정이 불가능한 상황이 발생한다. 이러한 문제점은 지류의 유량산정 자체의 문제뿐만 아니라, 본류의 홍수예측 정확도를 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, HPG (Hydraulic Performance Graph)를 이용한 유량산정 방법을 검토하였고, 금호강에 적용한 결과 성서 자동유량측정결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 금호강 하류구간인 동촌 수위관측소에서 합류점까지 수리학적 모형을 구축하였다. 모형 보정을 위하여 공간적으로 5개 구간, 유량 규모는 6개 구간으로 나누었고, 각 공간-유량규모 구간에서 적절한 조도계수를 시행착오적으로 선정하였다. 금호강 산격 지점의 경우, 하류에 위치한 보 운영의 영향으로 저수위

재현이 곤란하여 보가 완전히 잠식되어 저항요인의 변화가 사라질 것으로 예상되는 침두수위의 재현으로 모형 보정결과를 확인하였다.

(2) 실제 홍수사상으로 보정된 모형을 이용하여 시나리오 기반의 HPG를 작성하였다. 금호강의 경우, 성서 수위관측소는 합류부에 인접하여 수리적 거동을 명확히 분석하는데 한계가 있는 것으로 나타났다. 또한 미세측 지점인 낙동강-금호강 합류점 수위 대신 합류점에서 0.887 m 상류의 실측 수위를 사용한 한계가 있다. HPG를 이용할 경우, 1 cm의 수위오차도 유량 산정에 크게 영향을 미칠 수 있으므로 주의가 필요하며, 본 연구에서는 합류점 상류 3.13 km 지점의 세천교 수위자료를 활용함으로써 발생할 수 있는 유량의 오차를 보완하였다. 세천교 지점 또한 합류부 배수영향을 크게 받는 지점이지만, 작성된 HPG로부터 자동유량측정 결과에 준하는 유량자료 생산이 가능하였다.

성공적인 HPG 작성을 위해서는 적절한 구간거리 선정에 대한 연구가 필요하다. 따라서 하상경사를 비롯한 하천 단면형상과 조도계수, 그리고 상하류 수위 자료 취득을 위한 구간 거리 등이 HPG를

이용한 유량산정에 미치는 영향을 분석하여야 한다. 또한 배수영향으로 단일 수위-유량관계 설정이 곤란한 수위관측소를 대상으로 보다 많은 적용도 필요하다. 지속적인 연구와 경험이 축적된다면, 고리형 수위-유량 관계곡선이 불가피한 배수영향 구간에서 유량을 산정할 때, HPG가 경제적이고 실용적인 방법을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 물관리연구사업의 연구비지원(18AWMP-B127568-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, G. W., Chae, S. A., Chang, Y. G. and Hwang, Y. M. (2010). "An experimental study on the change of hydraulic characteristics by the training wall." *Proceedings in KWRA*, Korea Water Resources Association, pp. 561-564 (in Korean).
- Chow, V. T. (1958). *Open Channel Hydraulics*, McGraw Hill, Tokyo, Japan.
- Dottori, F., Martina, M. L. V. and Todini, E. (2009). "A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 13, pp. 847-863.
- Fenton, J. D. and Keller, R. J. (2001). "The calculation of stream flow from measurements of stage." *Technical Report 01/6*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Melbourne, Australia, p. 84.
- Fread, D. L. (1975). "Computation stage-discharge relationship affected by unsteady flow." *Water Resources Bulletin*, Vol. 11, No. 2, pp. 429-442.
- Gonzalez-Castro, J. A. and Ansar, M. (2003). "Applicability of hydraulic performance graph for flow estimation in open channels." *Proceedings in World Water & Environmental Resources Congress 2003*, ASCE, Philadelphia, Pennsylvania, doi: 10.1061/40685(2003)188.
- Gonzalez-Castro, J. A. and Yen, B. C. (2000). "Applicability of hydraulic performance graph for unsteady flow routing." *Hydraulic Engineering Series No. 64*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 199p.
- Henderson, F. M. (1966). "Open channel flow." *Macmillian Series in Civil Engineering*, Macmillian eds., New York, USA, p. 522.
- Herschy, R. W. (1995). *Streamflow Measurement (2nd edition)*, E & FN Spon, London, U.K.
- Hidayat, H., Vermeulen, B., Sassi, M. G., Torfs, P. J. J. F. and Hoitink, A. J. F. (2011). "Discharge estimation in a backwater affected meandering river." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 8, pp. 2717-2728.
- Jones, B. E. (1915). "A method of correcting river discharge for a changing stage." *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 375-E, pp. 117-130.
- Kim, D., Yang, S. K. and Yu, K. (2012). "Analysis of loop-rating curve in a gravel and rock-bed mountain stream." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 853-860 (in Korean).
- Kim, S. H., Hyun, J. S., Kim, J. S. and Jun, K. S. (2014). "Real-time flood stage forecasting of tributary junctions in Namhan River." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 561-572 (in Korean).
- Kim, W., Kim, C. Y., Kim, D. G., Lee, C. J. and Hwang, S. H. (2005). "Determination of stage-discharge relationship using the numerical model." *Proceedings in KWRA*, Korea Water Resources Association, pp. 319-323 (in Korean).
- Kwon, S. I., Kim, W., Kim, D. G., Kim, C. Y. and Lee, C. J. (2008). "Discharge estimation in backwater reach of river using hydraulic performance graph." *Proceedings of 2008 Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2008). *2010-2019 Master Plan for Hydrological Survey* (in Korean).
- Rantz, S. E. (1982). "Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of Discharge." *U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2175*, pp. 390-438.
- Schmidt, A. R. and Yen, B. C. (2002). "Stage-discharge rating curves revisited." *In Hydraulic measurements and experimental methods 2002*, pp. 1-10.
- Seo, Y., Seo, I. W. and Shin, J. (2014). "Development of the hydraulic performance graph model and its application." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 5, pp. 1373-1382.
- Yen, B. C. and Gonzalez-Castro, J. A. (1994). "Determination of boneyard creek flow capacity by hydraulic performance graph." *WRC Research Report No. 219*, Water Resources Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- Yen, B. C. and Gonzalez-Castro, J. A. (2000). "Open-channel capacity determination using hydraulic performance graph." *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 2, pp. 112-122.