

동역학적 수치모형을 이용한 합류부 홍수위 분석

Analysis of Flood Stage in a Confluence using the Dynamic Numerical Model

김지성* · 김극수** · 김 원*** · 김상호****

Kim, Ji Sung · Kim, Keuk Soo · Kim, Won · Kim, Sang Ho

Abstract

In this study, a dynamic numerical model, FLDWAV, is used for analyzing the backwater effect of flood stage in YeongWeol station, which is located on the confluence upstream where Pyeongchang river joins Han river. Given various inflow discharges of both main stream and tributary, the feasible stage-discharge relationships at the YeongWeol station and the upstream range of the backwater effect were computed. The results show that the relationships are completely different according to each of the inflow discharges from tributary and the maximum difference of stage is about 4.0 m. Therefore, the development of a single relationship of stage and discharge is very difficult problem in the zone of backwater effect. The increase of stage in the junction due to the lateral inflow has an effect on upstream stage up to about 8.0 km. The well-calibrated and verified dynamic wave routing model will be a useful tool for the flood forecast in the zone of backwater effect rather than conventional hydrological routing model.

Keywords : lateral inflow, confluence, backwater effect, flood forecast

요 지

본 연구에서는 한강과 평창강이 만나는 합류부 상류, 특히 영월지점에서 발생하는 홍수위의 배수영향을 분석하기 위하여, 최근 홍수사상들에 대한 적절한 경계조건을 사용하고 조도계수를 보정함으로써 동역학적 흐름해석 모형을 구축하였다. 구축된 모형을 사용하여 본류 및 지류의 다양한 유입량 조건이 발생할 경우, 영월지점에서 발생 가능한 수위-유량 관계곡선의 변화를 살펴보고, 지류 유입에 따른 홍수위의 영향범위를 분석하였다. 분석결과, 영월지역에서는 지류유입 조건에 따라 매우 다른 수위-유량관계곡선들이 작성되었고, 지류 유입으로 인하여 동일한 유량에서 약 4.0 m정도 수위차이가 발생하였다. 따라서 영월 지점과 같이 지류 합류에 의한 배수영향을 크게 받는 지점에서는 단일 수위-유량관계를 결정하는 것이 매우 어려움을 보였고, 지류 유입으로 인한 홍수위 변화는 합류점 상류 약 8.0 km까지 미치는 것으로 분석되었다. 향후 합류부 배수영향을 크게 받는 지점의 홍수위 예측을 위해서는 기존 수문학적 모형보다 잘 보정되고 검증된 완전한 동역학적 모형이 활용되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지류 유입, 합류점, 배수영향, 홍수예보

1. 서 론

한강과 평창강이 합류하는 지점으로 홍수에 취약한 조건을 가지고 있는 영월지역은 2002년 집중호우, 태풍 ‘루사’, 2003년 태풍 ‘매미’ 등으로 반복적인 피해를 입었으며, 2006년에도 수위상승으로 주민들이 대피하는 일이 발생하였다. 최근 이상기후에 따른 집중호우가 빈발함에 따라 2003년부터 매년 영월지점의 유량을 실측하여 수위-유량관계곡선을 작성하고 있으며, 2007년 4월 영월지점을 홍수예보지점으로 추가하여 홍수예보업무가 수행되고 있다. 합류점을 기준으로 평창강과 한강의 유역면적은 각각 1,773 km²와

2,448 km²로 차이가 크지 않으며, 실제 홍수사상에서도 동일 지점의 한강 유량보다 평창강의 유량이 큰 경우가 발생하여 한강 본류에 위치한 영월 지점은 지류에 의한 역류 또는 지체가 발생할 가능성이 높고, 이로 인한 배수영향은 영월지역의 수위상승과 밀접한 관계가 있을 것이다.

합류부 흐름해석과 관련된 국내외 연구는 국부적으로 발생하는 순환영역의 형성, 이에 따른 세굴 및 퇴적 문제, 그리고 순환영역에 의한 흐름단면적 감소로 발생하는 상류방향의 배수영향 등에 집중되어 있으며, 이를 위하여 다양한 수리실험 및 2차원 수치실험이 수행되었다. 합류부에서 발생하는 흐름의 2차원적 효과는 지류에서 유입되는 운동량에 지

*정회원 · 한국건설기술연구원 하천해양환경연구실 박사후연구원 (E-mail : jisungk@kict.re.kr)

**한국건설기술연구원 하천해양환경연구실 박사후연구원 (E-mail : keuksookim@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 하천해양환경연구실 책임연구원 (E-mail : wonkim@kict.re.kr)

****정회원 · 교신저자 · 삼지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 부교수 (E-mail : kimsh@sangji.ac.kr)

배를 받으므로 본류 및 지류의 유량비와 두 흐름이 만나는 각도가 지배적인 매개변수가 된다(윤태훈 등, 1998; 최계운 등, 2004; Hager, 1989; Ramamyrthy 등, 1988; Hsu 등, 1998(a)). 그러므로 합류부의 동역학적 흐름변화를 1차원 해석에서 완벽히 재현하는 것은 매우 어려우며, 기존 실험결과를 이용하여 다양한 이론적 관계식이 개발되어 있을 따름이다(Hsu 등, 1998(b); Gurram 등, 1998; Shabayek 등, 2002).

한편 1차원 수리학적 모형을 이용한 합류부 해석에서 실무적으로 사용되는 방법은 에너지방정식의 적용이다. 이는 근본적으로 상류흐름조건과 합류지점 전후의 본류상류, 본류하류, 그리고 지류의 수위가 동일함을 가정한다. 최근에 Kesserwani 등(2008)은 기존의 수리실험 자료와 동역학적 방법에 근거한 이론식들을 비교하여 각 이론식과 에너지방정식의 적용성을 검토하였고, 상류조건 중에서도 특히 Froude 수가 0.35보다 작을 경우에 한정하여 에너지방정식이 합리적으로 적용될 수 있음을 보였다.

국내에서 1차원 수리학적 모형 구축을 통한 흐름해석 사례를 살펴보면, 대규모 하천에서의 수리학적 홍수추적, 하류부 조위에 의한 배수영향 분석, 댐 붕괴로 인한 붕괴과 전파양상 및 홍수범람지도 작성, 하도 내에 위치한 보와 같은 수공구조물의 영향 분석 등이 있다. 이을래 등(2005)은 DWOPER 모형(Fread, 1987)을 이용하여 팔당댐에서 한강하구(월곶)까지 수리학적 모형을 구축하고 계산 홍수위의 변화에 영향을 주는 수리학적 요인을 구분하였고, 각 인자에 의한 홍수위 변화량을 분석하였다. 이종태 등(1993)과 김상호와 김원(2002)은 서해안 조위가 한강본류에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였고, 김지성 등(2009)은 조위영향을 받는 한강대교에서 자동 실측된 ADVM 자료를 이용하여 수리학적 해석결과를 검증하고 조위영향에 의해 발생하는 고리형 수위-유량관계를 분석하였다. 박선중 등(2007)은 HEC-RAS 모형(UASCE, 2002)을 이용하여 영산강 하류부에서 수리학적 모형을 구축함으로써 하류측 친변저지대의 저류효과가 본류수위에 미치는 영향을 검토하였다. 한건연 등(2005)은 미치는 북한강 수계에서 DAMBRK 모형(Fread, 1988)을 이용하여 댐의 영향을 고려한 홍수추적 방법으로 상류댐 및 중간댐의 붕괴로 발생하는 극한 홍수위의 해석 및 주영향별 홍수위, 침투유량 및 홍수와 도달시간 등을 산출하였고, 전경수 등(2007)은 출하였고, 전경수 등잠실 및 신곡수중보의 영향을 적절히 모의할 수 있도록 고정보와 가동보 부분으로 구분하고 FLDWAV 모형(Fread와 Lewis, 1988)을 개선하였다. 지금까지 다양한 목적으로 수리학적 모형을 구축구분된 부분의 연구들은 계산 정확도 및 적용성에서 타당성과 실무 적용성을 검증하였으나, 1차원 모형영향제로 인하여 지류 유입에 따른 본류의 배수영향 등 합류부 홍수위 변화분석에는 활용된 적이 없다.

본 연구에서는 한강과 평창강의 합류점 직상류에 위치하는 영월지점에서 실측된 유량 자료가 부족하여 흐름특성을 명확히 규명할 수 없었던 한계를 인식하고, 유량자료를 간접적으로 충분히 산정하기 위하여 완전한 동역학적 모형을 구축하였으며, 실측 수위와의 비교를 통한 조도계수 보정을 수행하였다. 보정된 결과는 영월지점에서 측정된 유량과의 비교

와 다른 홍수사상의 적용으로 검증되었다. 이를 통하여 합류점 배수영향을 받는 영월지점의 수위-유량관계를 분석하고, 한강과 평창강의 다양한 유입량 조건이 발생할 경우 영월지점에서 발생 가능한 홍수위 변화를 검토하였으며, 홍수예보 측면에서도 기존 수문모형보다 정확하고 안정적으로 해석될 수 있음을 확인하였다.

2. 수리학적 모형 구축

2.1 수리학적 흐름해석 모형

하폭에 비하여 하천연장이 상대적으로 긴 하천에서 수리학적 홍수해석을 위해서는 1차원 모형을 이용하는 것이 합리적이므로, 본 연구에서는 국내의 하천홍수위 해석에 성공적으로 수행된 바 있는 NWS(미국 국립기상청)의 FLDWAV 모형을 선정하였다. 선정된 모형의 지배방정식은 Saint-Venant 방정식으로 식 (1), (2)로 표현된다.

$$\frac{\partial(s(A+A_o))}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(sQ)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L = 0 \quad (2)$$

여기서, A 와 A_o 는 흐름단면적과 저류단면적이며, H 는 수위, Q 는 유량, q 는 단위폭당 측방유입량, s 는 사형계수이며, β 는 운동량 보정계수, g 는 중력가속도, S_e 와 S_f 는 각각 단면 확대·축소에 의한 손실경사와 마찰경사이다. 그리고 L 은 측방유입량의 운동량 영향으로 단위폭당 측방유입량 q 와 본류 흐름방향 속도성분인 v_x 의 곱으로 계산된다.

FLDWAV 모형에서는 식 (1), (2)의 비선형 쌍곡선형 편미분방정식을 4점 가중 음해법(Fread, 1987)을 이용한 유한차분기법으로 전개하였으며, 차분된 비선형 연립방정식의 해는 반복해석기법의 하나인 Newton-Raphson 기법을 적용하여 구해진다.

1차원 수리해석에서 지류를 고려하여 수치해석하는 방법은 본류와 지류를 하나의 행렬로 구축하여 해석하는 방법과 본류구간과 지류구간을 분리하여 해석하는 방법으로 구분된다. 본류와 지류를 하나의 계수 행렬에 모두 포함하기 위해서는 합류부의 유량과 수위의 연속성을 가정한 내부경계조건을 사용함으로써 희소행렬(sparse matrix)를 구축하고 해석한다. 한편 본류와 지류를 분리하여 해석하는 방법은 희소행렬 해석의 복잡함 및 광대한 변수 저장공간으로 인한 계산의 비효율성을 극복하기 위하여 단순화된 방법이다(최계운, 1994; USACE, 2002).

본 연구에서 사용한 FLDWAV 모형은 수지상 하천의 해석을 위하여 Relaxation 알고리즘에 의한 효율적인 계산방법을 사용하고 있다. Relaxation 알고리즘은 먼저 본류구간을 해석한 후, 지류구간을 분리하여 해석하는 기법이다. 즉, 본류구간 해석에는 각 합류점의 지류 유입량을 측방유입량으로 처리하며, 지류구간 해석에는 각 지류의 상류단 경계조건과 합류점에서의 본류 수위를 하류단 경계조건으로 사용하여 해석한다. 지류유입에 의한 합류부의 수위 계산을 위해서 우선 알아야 하는 값이 합류점에서의 지류 유입량이다. 그러나 지류를 포함하여 구축된 시스템에서 합류점의 수위 및 유량은 미지수이므로 반복해법을 사용하는 기법이 필요하며,

이를 위한 Relaxation 알고리즘은 식 (3)과 같다(Fread와 Lewis, 1998).

$$q^* = \alpha q + (1 - \alpha)q^{**} \quad (3)$$

여기서 q 는 지류구간 해석시 계산된 합류점의 지류 유량이고, q^{**} 는 본류구간 해석시 이전 반복단계에서 추정된 측방 유입량이며, q^* 는 새롭게 추정된 측방유입량이다. α 는 하천 상황에 따라 변화되는 가중계수로 0에서 1사이 값을 사용자가 지정할 수 있다. 지류 유량 q 와 측방유입량 q^{**} 는 서로 같은 값이어야 하므로, $|q^* - q^{**}|$ 가 허용오차보다 작을 경우 반복해법이 중지된다.

Relaxation 알고리즘은 지류 계산을 위하여 본류의 수위를 하류단 경계조건으로 사용한다는 점에서 에너지방정식에 의한 합류부 해석이 수행됨을 알 수 있으며, 1장에서 검토된 바와 같이 이 알고리즘을 실무에 적용할 때는 합류부 Froude 수의 검토가 반드시 필요하다. 한편 지류가 ω_i 의 각도로 유입할 경우, 본류구간의 운동량보존을 위하여 측방유입량의 방향을 고려하여야 하며, 지류 계산이전에 수행되는 본류 해석에 있어 측방유입량의 유속은 $v_x = (Q/A)_N \cos \omega_i$ 와 같이 본류의 흐름방향(x direction) 성분으로 변환된다.

Barkau(1985)는 Relaxation 알고리즘이 반복해법을 사용함으로써 인하여 고차의 지류가 포함된 복잡한 수지상 하천에서는 비효율적이며 해가 수렴되지 않는 문제가 발생할 수도 있다고 하였으며, 지류에서의 유입유량을 측방유입량으로 가정함으로써 반복해법 없이 합류부를 모의하는 방법을 개발하였다. 그러나 Barkau의 이러한 가정은 지류로 인한 운동량과 유량의 변화가 크지 않은 경우로 제한된다(최계운, 1994).

2.2 단면자료 구축 및 경계조건 검토

평창강과 한강의 합류점에서 약 1 km 상류에 위치한 영월지점의 수위영향을 평가하기 위하여 영월2 수위관측소에서 충주댐까지 113.136 km 구간에 단면간격 100~600 m로 449개의 단면자료를 구축하였고, 대상구간의 주요지류인 평창강은 영월1 수위관측소에서 합류점까지 11.3 km 구간에 단면간격 90~280 m로 68개의 단면자료를 구축하였다. 충주댐 상류 한강의 국가하천 구간은 1991년과 2007년 측량자료를 사용하였고, 지방하천 구간은 1991년 측량자료를 주로 사용하였으며, 영춘 수위관측소에서 삼육교 구간에서는 2004



그림 1. 대상구간 현황

년 측량자료를 사용하였다. 그리고 평창강 구간에서는 2004년 측량자료를 사용함으로써 한강 및 평창강에서 가용한 최신 자료를 모두 사용하여 하도단면자료를 구축하였다. 구축된 단면자료의 출처는 국토해양부(2009)를 참조할 수 있다. 합류부 하류에 유입하는 옥동천과 옥동천 하류구간의 측방 유입량은 관심지점인 영월수위에 미치는 영향과 옥동 수위 관측소 지점의 수위-유량 관계곡선이 개발되어 있지 않은 점을 고려하여 대상구간에 포함하지 않았다. 그림 1은 대상구간 현황을 나타내며, 구축된 모형을 보정하고 검증하기 위하여 영월, 영춘, 청풍 수위관측소 자료가 사용될 수 있음을 보여준다.

수리학적 모형의 구축을 위하여 단면자료 구축과 더불어 적절한 경계조건의 지정이 필요하다. 따라서 대상구간의 상류에는 영월2(한강) 지점과 영월1(평창강) 지점의 유량수문곡선을 지정하였고, 하류에는 충주댐 저수위수문곡선을 지정하였다. 일반적으로 상류단 경계조건으로 실측된 유량수문곡선이 없는 경우, 각 지점에서 개발된 수위-유량관계곡선식을 사용한다. 그러나 수위-유량관계곡선은 곡선식 작성에 사용되는 실측자료의 불확실성, 측정된 자료의 가용성, 곡선식의 물리적 의미 부족, 대수축 사용에 따른 고수위 자료의 유량 편차, 보고서 작성 시 발생할 수 있는 곡선식의 오판 등 여러 가지 원인으로 불확실성을 포함하고 있으므로, 반드시 산술축에 도시하여 수위-유량 관계식의 적용성을 검토하여야 한다. 영월1과 영월2 수위관측소는 모두 수자원공사에서 관할하고 있으며, 비교적 최근에 작성된 수위-유량관계곡선과 유량실측성과는 한국수문조사연보 유량편(건설교통부, 2006;

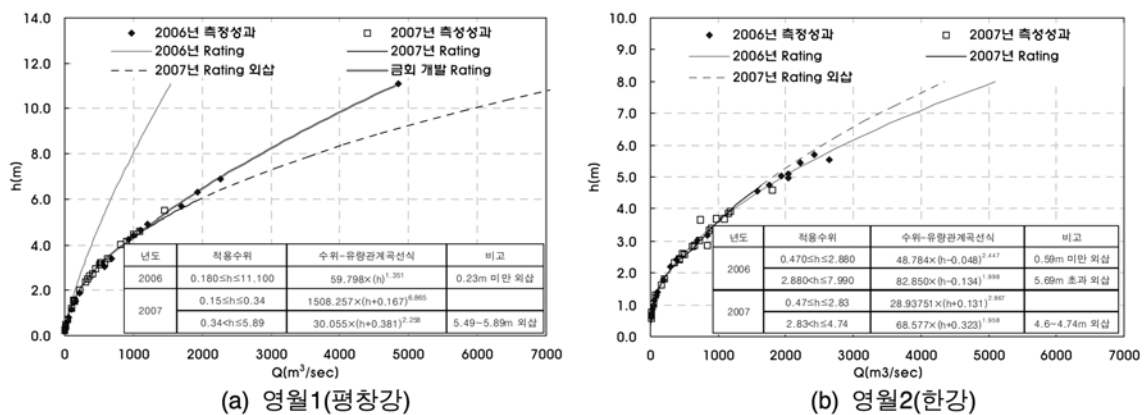


그림 2. 상류단 경계의 수위-유량관계곡선

표 1. 조도계수 산정 결과

유량 (m ³ /sec)	조도계수			
	영월2~ 평창강합류	평창강합류~ 옥동천합류	옥동천합류~ 하일천합류	하일천합류~ 충주댐
0~50	0.180~0.150	0.210~0.180	0.198~0.198	0.160~0.150
50~200	0.150~0.072	0.180~0.150	0.198~0.120	0.150~0.120
200~800	0.072~0.056	0.150~0.072	0.120~0.078	0.120~0.065
800~1,500	0.056~0.046	0.072~0.056	0.078~0.063	0.065~0.060
1,500~3,000	0.046~0.037	0.056~0.046	0.063~0.054	0.060~0.060
3,000~5,000	0.037~0.034	0.046~0.048	0.054~0.057	0.060~0.058
5,000~8,000	0.034~0.032	0.048~0.050	0.057~0.053	0.058~0.050
8,000~1,0000	0.032~0.030	0.050~0.050	0.053~0.053	0.050~0.040
10,000~13,000	0.030~0.020	0.050~0.035	0.053~0.052	0.040~0.030

표 2. 대상 홍수사상

순번	선정 홍수사상 기간	침투홍수량(m ³ /s)			비고
		한강 상류[영월2]	평창강 상류[영월1]	충주댐하류[충주댐]	
1	2003.09.07~2003.09.22	2,998	893	2,677	조도계수 검증
2	2004.07.12~2004.07.22	2,558	1,361	2,097	조도계수 검증
3	2006.07.12~2006.07.24	7,067	5,056	9,106	조도계수 보정
4	2007.09.15~2007.09.21	1,752	1,064	3,513	조도계수 검증
5	2008.07.24~2008.07.31	3,088	2,110	699	조도계수 보정

국토해양부, 2007)에 수록되어 있다. 2006년과 2007년에 작성된 영월1 수위관측소의 수위-유량관계곡선과 실측성과를 산술축에 도시하면 그림 2(a)와 같다.

영월1 지점의 분석결과, 2006년 수위-유량관계곡선식은 실측성과와 큰 차이를 나타내고 있어 상류단 경계지점의 수위-유량관계곡선으로서 활용성이 부족한 것으로 판단된다. 그리고 2007년 작성된 수위-유량관계곡선식은 2006년 고수위에서 실측된 값보다 매우 큰 유량을 추정하므로 본 연구에서는 2006년, 2007년 실측성과의 회귀분석 결과로부터 수위-유량관계식을 작성하였으며, 그 결과는 그림 2(a)에 함께 나타내었다. 그림 2(b)의 영월2 지점에서는 2006년, 2007년 수위-유량관계곡선식이 비교적 실측성과와 잘 일치하고 있다. 그러나 영월1 지점과 마찬가지로 2007년 고수위 실측자료가 부족하며 2006년 실측값보다 다소 작은 유량을 추정하고 있다. 따라서 조도계수 보정 및 검증을 위하여 영월1 지점에는 금회 개발된 식을 사용하였고, 영월2 지점에는 2006년 식을 사용하였다.

3. 최적 조도계수 산정 및 검증

정확하면서 안정적인 수리학적 모형의 구축을 위하여 조도계수의 보정은 반드시 필요하다. 조도계수는 동일한 지점에서 유량규모에 따른 흐름저항요소의 변화와 하상재료, 단면형상, 단면의 축소 및 확대, 구조물 유무, 식생대의 변화, 사행도, 배수영향 등 흐름저항 크기의 변화로 시간과 공간에서 변화되는 매개변수이다. 본 연구에서는 기존 현장조사 결과(국토해양부, 2009) 및 그림 1의 영월, 영춘, 청풍 수위관측소를 고려하여 4개의 조도계수 구간을 설정하였고, 계산의

정확성 및 효율성을 고려하여 표 1과 같이 유량구간을 분류하였다. 여기서 조도계수 산정을 위한 유량구간의 수는 대상 하천의 지형적 요인, 흐름장애 요인 등 유량 또는 수위에 따른 흐름저항 요인의 검토 후 결정되어질 수 있다. 본 연구대상구간에서는 저유량 규모에서 여울, 식생, 사행 등 다양한 흐름저항 요인이 존재하여 비교적 상당히 큰 조도계수가 지정되어야 하며, 고유량 규모에서는 이러한 요인들의 잠식, 사행의 소멸 등으로 조도계수가 감소할 개연성이 있다.

각 구간과 유량등급의 조도계수를 보정·검증하고, 합류점 수위-유량 관계 분석을 검토하기 위하여 영월지점 실측 유량자료가 있는 최근 홍수사상을 선택하였으며, 최근 발생한 홍수사상 가운데 유량규모가 가장 큰 홍수인 2006년 사상과 비교적 작은 유량규모의 2008년 사상을 조도계수 보정에 사용하였다. 본 연구에서는 과거 홍수사상에 의한 보정과정을 통하여 조도계수의 유량 규모 및 크기를 산정하였으며, 보정 결과 3,000 m³/s 이하에서 조도계수의 크기가 크게 변화함으로써 3,000 m³/s 이하 구간을 이분하면서 5개의 유량구간을 선정하였고, 3,000 m³/s 이상 계획홍수량 규모까지는 조도계수가 크게 변화하지 않았기 때문에 4개의 유량구간을 선정하였다. 이로써 본 연구대상구간의 유량구간은 표 1과 같이 9등급으로 구성되었다. 대상 홍수사상은 표 2와 같으며, 보정에 사용되지 않은 나머지 사상은 보정된 매개변수를 검증하기 위하여 사용하였다.

조도계수 보정에 사용된 2006년과 2008년 사상의 상하류단 경계조건을 그림 3에 나타내었다.

그림 3(a)의 2006년 상류단 유량수문곡선의 경우, 7월 15일에서 18일 사이에 상이한 유형을 보였다. 즉, 평창강에서는 2번의 침투가 명확히 나타나고 있으나, 한강에서는 첫

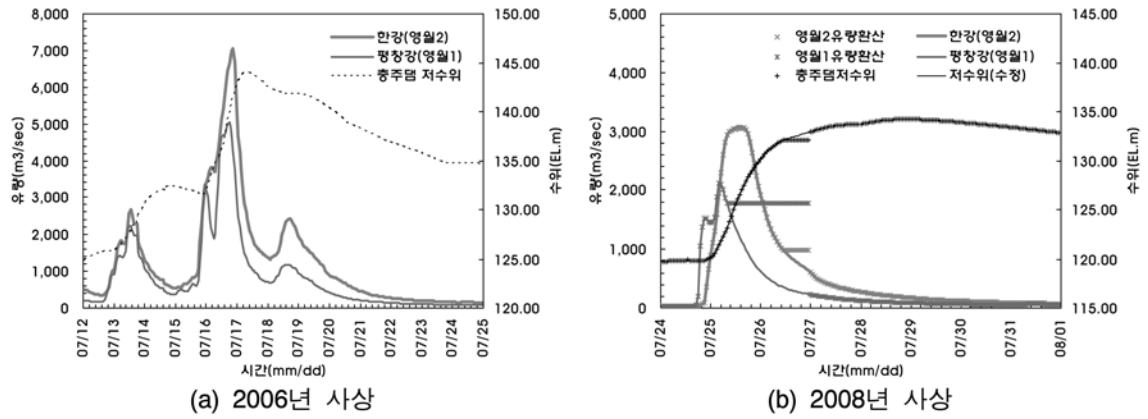


그림 3. 조도계수 보정 사상의 경계조건

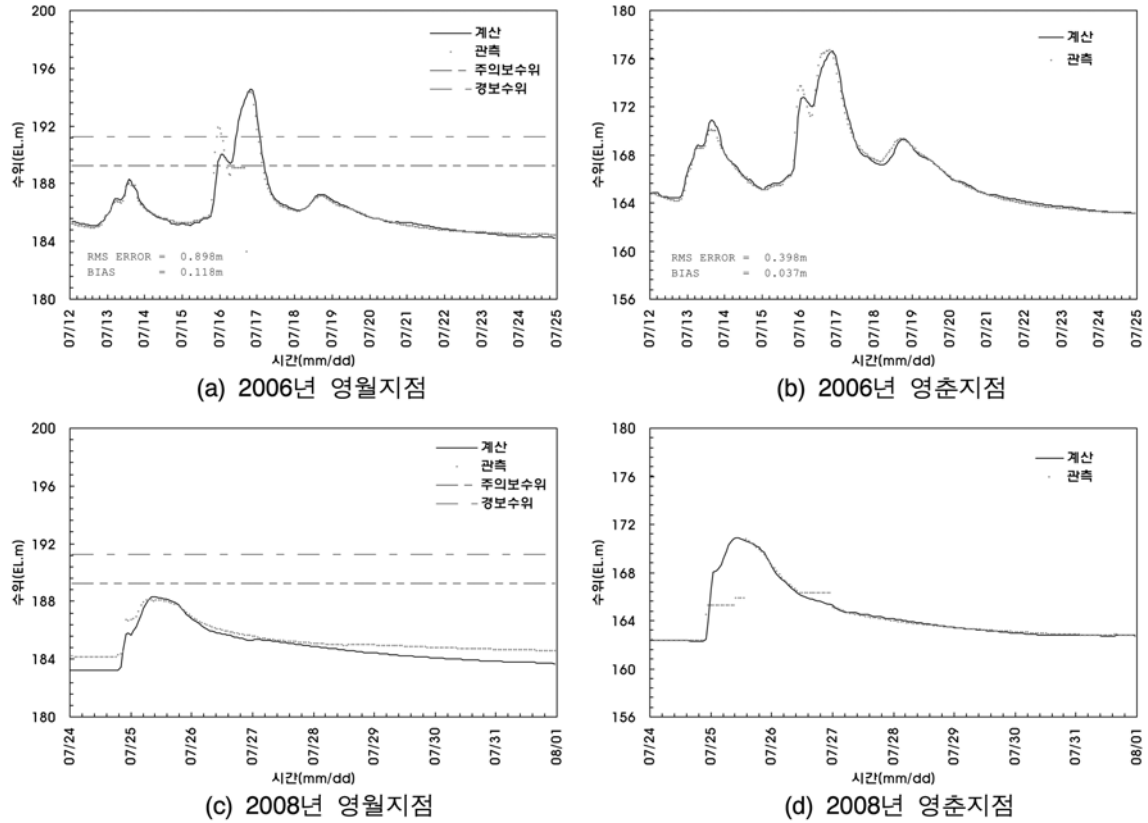


그림 4. 모형 보정결과

번째 침투가 거의 나타나지 않았다. 따라서 두 유역의 강우자료 분석 및 강우-유출 해석을 통한 유량수문곡선의 검토가 필요하다. 그림 3(b)의 2008년 사상에서는 상하류단 경계조건에 오측자료가 포함되었다. 그러므로 대상구간 내 다른 실측 수위자료들과 비교하여 그림 3(b)와 같이 적절히 수정되었다.

계산수위와 실측수위의 비교를 위한 지점 중 청포 지점은 충주댐 저수위의 배수영향을 직접 받으므로 조도계수를 보정한 결과의 확인을 위하여 미흡하며, 본 연구에서는 영월 및 영춘 지점의 모형 보정결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4(a)의 2006년 사상에서는 영월 지점의 보정결과가 7월 16일 0시경 경보수위를 초과하는 수위를 재현하지 못하였다. 이는 영월지점의 상류인 영월2 수위기록에 이상이 있는 것으로 판단되며, 전반적으로 관측치와 계산결과가 잘 일치하고 있다. 그림 4(c)의 2008년 영월 지점의 관측수위를 살펴보면, 그림 3(b)의 영월2 유량수문곡선은 부드럽게 상승되고 있는 것에 비하여 24일 23시경 수위가 갑자기 상승하

고 있는데, 이는 평창강의 유입으로 인한 합류점 수위상승의 배수효과를 잘 보여주고 있다. 전반적인 계산결과는 관측수위에 비하여 낮은 수위를 나타내고 있으나, 이는 영월 지점(영월대교) 하류 약 300에 위치한 동강대교 제가설 공사에 사용되는 가물막이 등 지형변화를 반영하지 못한 원인으로 판단되며, 홍수위가 상승하면서 점차적으로 가물막이의 영향이 줄어들어 침투홍수위를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 매개변수 보정 및 검증에 사용된 모든 홍수사상의 계산결과와 관측자료를 비교한 RMS 오차는 표 3과 같다.

모형의 보정결과 중 2008년 영월에서 RMS 오차가 약 0.6 m로 다소 크게 나타나는 것은 하천공사로 인한 지형변화를 반영하지 못했기 때문이고, 그림 4(a)와 (d)에 나타나듯 관측 수위기록에 오측이 포함된 경우 오측자료를 제외하고 계산된 RMS 오차로부터 합리적인 보정이 수행되었음을 알 수 있으며, 검증결과에서도 보정결과와 유사한 RMS 오차를 보이고 있다. 그러나 2003년 사상의 경우, 최고수위차가 영

표 3. 모형의 보정 및 검증결과

대상 홍수사상 (순번)	비고	영월					영춘				
		최고수위			RMS 오차 (m)		최고수위			RMS 오차 (m)	
		관측 (EL.m)	계산 (EL.m)	수위차 (m)	오측 포함	오측 미포함	관측 (EL.m)	계산 (EL.m)	수위차 (m)	오측 포함	오측 미포함
2006년 (3)	보정	194.36	194.52	-0.16	0.898	0.363	176.69	176.61	0.08	0.398	-
2008년 (5)		188.11	188.34	-0.23	0.618	-	170.83	170.86	-0.03	1.186	0.093
2003년 (1)	검증	190.55	187.84	2.71	0.415	-	172.86	169.62	3.24	0.614	-
2004년 (2)		187.18	187.39	-0.21	0.190	-	169.03	169.21	-0.18	0.346	-
2007년 (4)		187.18	186.65	0.53	0.431	-	168.82	168.04	0.78	0.565	-

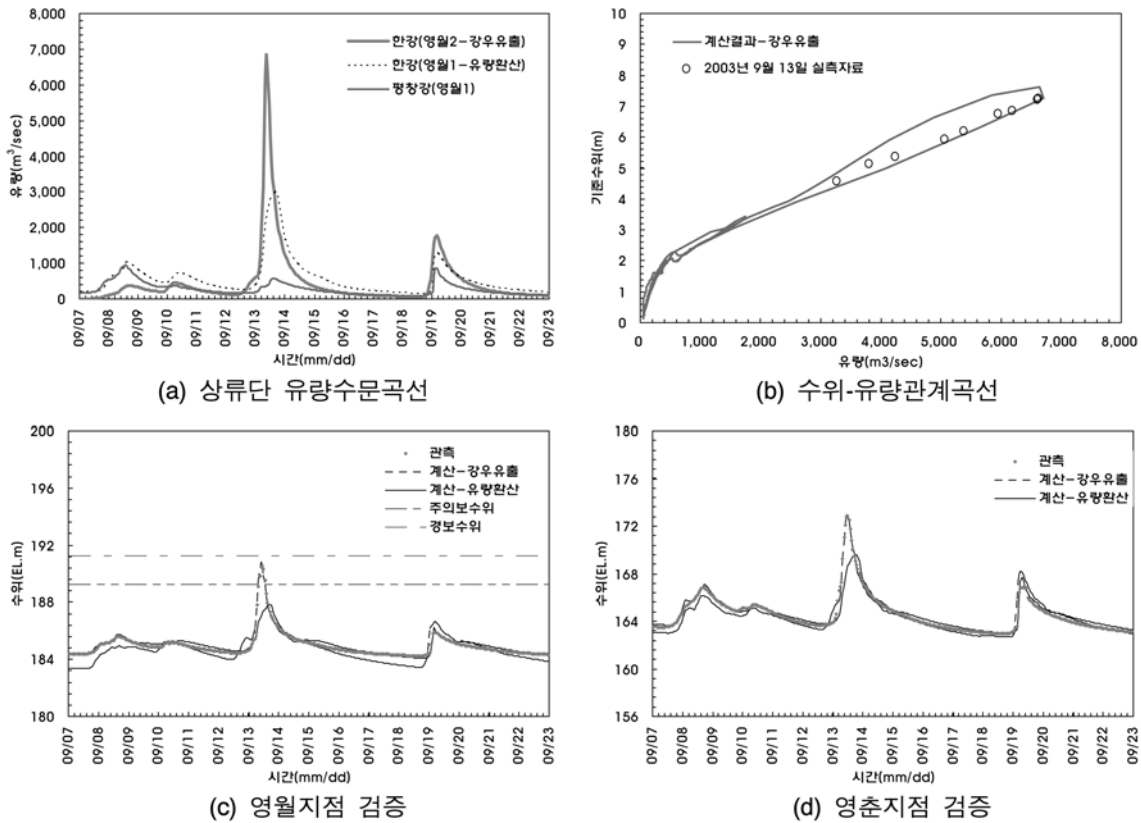


그림 5. 2003년 홍수사상 검증

월과 영춘에서 약 3.0 m를 보이고 있다. 이는 2006년의 경우와 마찬가지로 영월2 수위기록에 이상이 있는 것으로 판단된다. 따라서 영월2 지점 상류 유역에 대하여 한강홍수통제소에 구축되어 있는 통합홍수예측시스템(국토해양부, 2009)을 이용한 강우-유출 해석을 실시하였으며, 영월2 수위기록과 수위-유량관계식을 이용하여 계산된 유량을 상류단 경계로 사용한 경우와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그리고 강우유출해석결과의 검증을 위하여 영월지점에서 실측된 수위-유량자료(건설교통부, 2003)와 계산된 고리형 수위-유량관계곡선을 그림 5에 함께 나타내었다.

그림 5(a)의 강우-유출 해석에 의한 상류단 유량수문곡선은 초기 손실부에 대한 검토가 부족한 관계로 9월 7일에서 13일 사이 다소 작은 유량으로 계산되었다. 그러나 9월 13일 유량은 수위기록을 사용하여 환산한 유량에 비하여 약 3,800 m³/s 크게 계산되었으며, 이러한 결과는 동일 시기에 실측된 영월 및 영춘 수위자료와 비교하여 합리적으로 분석되었음을 알 수 있다. 강우-유출 해석결과를 사용한 2003년

사상 검증결과는 최고수위 절대편차가 영월지점에서 0.28 m, 영춘지점에서 0.10 m로 계산되었다.

4. 지류유입에 따른 합류부 홍수위 영향

4.1 합류부 수위-유량관계 분석

1차원 모형에서 에너지방정식을 이용한 합류부 해석은 합류부의 Froude 수가 0.35 이하인 경우로 제한된다. 따라서 본 연구에서 분석한 5개 사상 중 침투홍수량이 큰 2003년, 2006년 사상의 계산결과를 검토하여 합류부 분류 및 지류에서 계산된 Froude 수를 그림 6에 나타내었다. 분석결과 두 사상 모두 합류부의 Froude 수가 0.20 이하로 계산되어 본 연구결과를 활용한 합류부 홍수위 영향 검토의 타당성을 확인할 수 있다.

조도계수의 검증 및 합류부 해석결과의 타당성이 확인된 모형을 이용하여 다양한 분류 및 지류의 유입량 조건에서 영월지점에 발생 가능한 수위-유량 관계곡선의 변화를 살펴

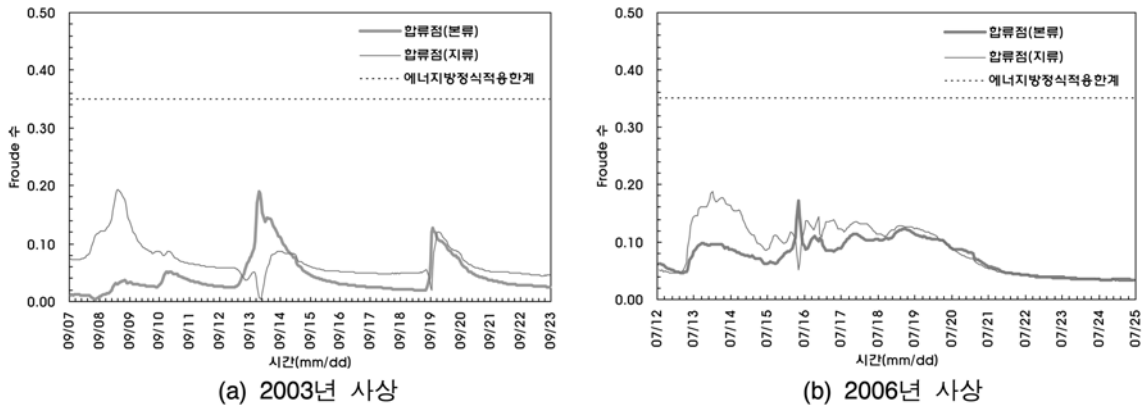


그림 6. 합류부 에너지방정식 적용의 타당성

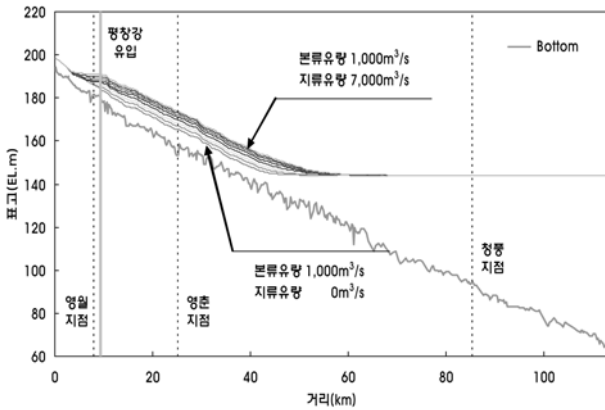


그림 7. 평창강 유입에 따른 한강분류 수위변화

보고, 지류 유입에 따른 홍수위의 영향범위를 분석하였다. 이를 위하여 본류인 한강의 유량은 1,000 m³/s에서 9,000 m³/s까지 1,000 m³/s 간격으로 9개의 유량규모를 고려하였고, 지류인 평창강은 0 m³/s에서 7,000 m³/s까지 1,000 m³/s 간격으로 8개의 유량규모를 고려함으로써 72개 조건을 검토하였으며, 계산의 효율성을 위하여 지류인 평창강은 측방유입량으로 고려하였다.

72개의 조건 가운데 한강분류 상류에 1,000 m³/s가 지정되고, 평창강의 각 유량규모로 계산된 수면곡선은 그림 7과 같다. 그림 7에서 알 수 있듯이 합류부에서 약 1 km 상류에 위치한 영월지점은 평창강 유입유량의 크기에 따라 동일한 유량규모에서도 수위의 변화가 큼을 알 수 있으며, 이 경우 지류 유입으로 인한 홍수위 변화는 합류점 상류 약 8

km까지 미치는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 고려된 모든 경우의 영월지점 계산 수위-유량 관계곡선은 지류 유입량에 따라 8개의 관계가 작성되며, 회색점선(···)으로 그림 8(a)에 나타내었다.

분석결과 영월지점은 평창강의 유입으로 인하여 동일한 유량에서 약 4.0 m정도 수위차이가 발생하였으며, 본류 유량이 약 6,000 m³/s이상일 경우 지류 유입의 영향이 점차 감소함을 알 수 있다. 그림 8의 파선(---)은 본류 및 지류의 유입량의 비율이 1:1인 경우이며, 직선(—)은 지류 유입량이 본류의 1/2인 경우를 나타낸다. 그림 8(a)에는 그림 3(a)와 그림 5(a)에서 알 수 있듯이 영월2 지점의 침투홍수량이 약 7,000였던 2003년과 2006년의 수위-유량관계곡선을 함께 나타내었다. 두 사상은 영월2 지점의 침투홍수량이 비슷했던 것에 비하여 평창강 유입유량에서 큰 차이를 보였으며, 지류 유입량의 차이로 인하여 영월지점에 계산된 수위-유량관계는 큰 차이를 보이고 있다. 한편, 그림 8(b)에는 두 사상보다 비교적 침투홍수량이 작았던 사상들의 수위-유량관계곡선을 나타내었다. 평창강 침투홍수량이 약 1,000 m³/s였던 2004년과 2007년의 수위-유량관계곡선은 다른 사상에 비하여 고리형 관계가 거의 나타나지 않았고, 평창강 유입이 약 2,000 m³/s까지 상승하였던 2008년 수위-유량관계곡선은 분명한 고리형 수위-유량관계를 보이고 있으며, 실측된 값(유량조사사업단, 2009)과 비교하여 적절한 계산이 수행되었음을 알 수 있다.

4.2 기존 단일 수위-유량관계 검토

본 연구에서 분석된 각 홍수사상마다 영월지점에서 계산된

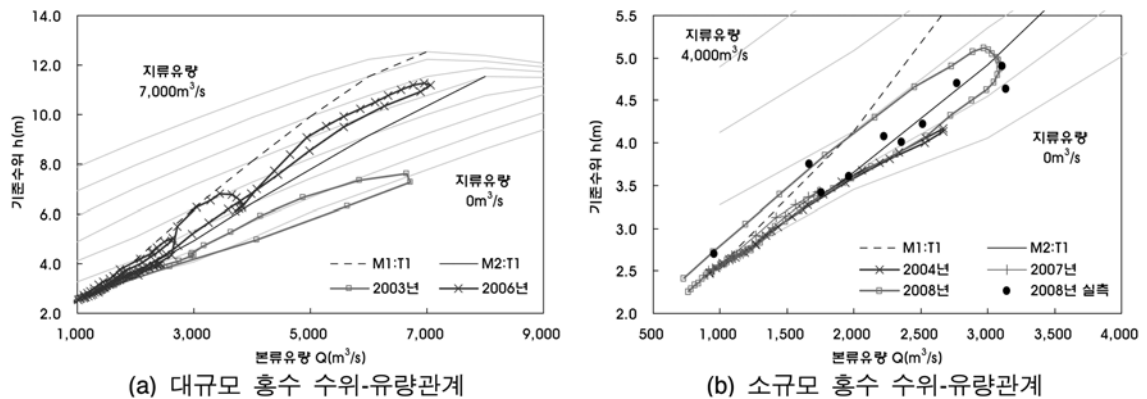
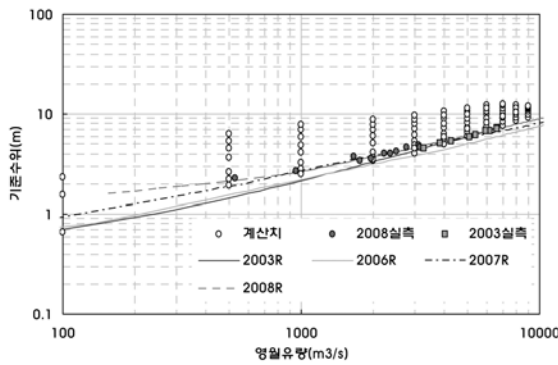
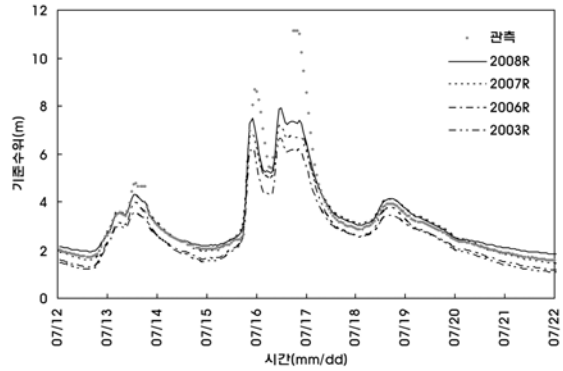


그림 8. 지류유입에 따른 영월지점의 수위-유량 관계변화



(a) 영월지점 기준 수위-유량관계식



(b) 수위-유량관계에 의한 수위환산

그림 9. 기존 수위-유량관계식의 적용성 검토

수위-유량관계는 모두 상이하였다. 이는 본류에서 유입되는 유량이 거의 비슷한 규모라도 지류에서 유입되는 유량의 규모가 큰 차이를 보였기 때문이며, 이와 같이 지류의 유입에 의한 영향을 받는 합류부에서는 단일 수위-유량관계가 나타나지 않음을 알 수 있다. 그림 9(a)는 본 연구에서 검토된 72개 조건으로 계산된 영월 지점 수위-유량 자료 및 실측 자료를 2003년부터 개발된 영월지점 수위-유량관계식과 함께 나타낸 것이다. 비교결과, 기존의 수위-유량관계식들은 평창강의 유입이 본류의 유량에 비하여 비교적 작은 경우로 작성되었음을 알 수 있으며, 합류부 배수영향을 받는 지점에서 기존의 단일 수위-유량관계곡선은 실제 수위상승을 재현할 수 없음을 알 수 있다. 그림 9(b)는 2006년 홍수사상에 대하여 통합홍수예측시스템을 이용한 강우-유출 해석결과를 영월지점의 기존 단일 수위-유량관계곡선으로 환산한 수위수문곡선으로 7월 17일 발생한 약 11 m인 침두수위를 재현할 수 없었다.

5. 결 론

본 연구에서는 합류부 배수영향을 받는 영월지점의 흐름특성을 검토하기 위하여 완전한 동역학적 모형을 이용한 보정을 수행하였고, 충분한 관측수위자료에 비하여 상당히 부족한 실측유량자료를 보완하기 위해서 동역학적 모형에 의한 간접 추정된 유량자료를 활용하였다. 다양한 본류 및 지류의 유입량 조건에서 영월지점에 발생 가능한 수위-유량 관계곡선의 변화를 살펴보고, 지류 유입에 따른 홍수위의 영향범위를 분석하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 한강과 평창강의 합류점 직상류에 위치한 영월지점의 흐름특성을 분석하기 위해서 한강(영월2)과 평창강(영월1)을 상류단 경계로 지정하고 충주댐을 하류단 경계로 수리학적 모형을 구축하였다. 최근 발생한 홍수사상 중 저수부와 고수부의 조도계수를 보정하기 위하여 2006년과 2008년 사상이 사용되었고, 그 밖의 3개 홍수사상에 대하여 조도계수 검증을 수행하였다. 보정 및 검증결과 중 상류단 경계에 대한 검토가 필요했던 2007년 사상을 제외한다면, 영월지점의 최대수위치는 0.28 m이고 영춘지점은 0.10 m로 계산되어 구축된 모형의 적용성을 확인하였다.
2. 상류단 경계조건으로 유량수문곡선을 사용할 경우, 수위-유량관계곡선에 의한 유량 산정은 수위-유량관계식의 불확

실성, 연속 수위기록의 오측 및 결측 등으로 불확실한 요소를 포함하고 있으므로, 사용에 주의가 요구된다. 본 연구에서는 기존 개발된 수위-유량관계식과 실측 자료를 비교 검토하였으며, 인접 지역에서 기록된 수위수문곡선과의 경향을 비교함으로써 수위기록의 타당성을 검토하였다. 검토결과 수위-유량관계식에 의하여 산정된 유량을 사용할 수 없을 경우, 강우-유출해석에 의한 결과를 검토하였고 2003년 홍수사상의 경우, 영월 지점에서 계산된 최대수위의 오차가 2.71 m에서 0.28 m로 크게 개선되었다.

3. 평창강 유입에 의한 영월 지점 홍수위 변화를 분석한 결과, 지류유입량에 따라 크게 다른 수위-유량관계곡선들이 작성되었고, 동일한 유량규모에서 최대 약 4.0 m정도 수위차가 발생하였으며, 지류 유입으로 인한 홍수위 변화는 합류점 상류 약 8 km까지 미치는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 정상상태를 가정하고 평창강을 측방유입량으로 고려한 한계가 있으나, 실제 홍수사상에서 발생한 영월 지점 고리형 수위-유량관계곡선과 비교하여 계산결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 또한 본류에서 발생한 침두 홍수량 크기가 유사한 홍수사상들 사이의 비교에서도 지류 유입량의 크기에 따라 고리의 크기 및 형태가 상이한 수위-유량관계곡선이 계산됨을 알 수 있었다.
4. 홍수예측을 위하여 주로 사용되는 수문모형의 경우, 강우-유출 해석에 의하여 유량을 산정하고 주요 지점에서 개발된 수위-유량관계로부터 수위를 예측하는데, 합류부 흐름특성의 영향을 받는 지점에서는 단일 수위-유량관계를 결정하는 것이 매우 어려움을 보였고, 2006년 사상의 홍수위를 예측한 결과 실제 발생한 11 m 이상의 침두홍수위를 전혀 재현할 수 없었다. 향후 합류부 배수영향을 크게 받는 지점의 홍수위 예측을 위해서는 기존 수문학적 모형보다 잘 보정되고 검증된 완전한 동역학적 모형이 활용되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(NEMA-09-01, 제방붕괴에 따른 피해 및 경제적 손실예측모형 개발)의 연구비 지원으로 일부 수행되었으며, 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단

의 연구비 지원에 의해 일부 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2003) 한국수문조사연보(유량편).
- 건설교통부(2006) 한국수문조사연보(유량편).
- 국토해양부(2007) 한국수문조사연보(유량편).
- 국토해양부(2009) 충주댐 상하류 수리학적 홍수예측모형 개발, 11-1611492-000005-01.
- 김상호, 김원(2002) 한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 485-500.
- 김지성, 김원, 김동구, 김치영(2009) 수치모형을 이용한 고리형 수위-유량 관계 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제29호, 제1B호, pp. 1-9.
- 박선중, 김대근, 안순섭, 강주환(2007) 조석의 영향을 받는 영산강 하류부의 수리학적 홍수추적, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27호, 제2B호, pp. 201-209.
- 이을래, 김원, 김상호(2005) 수리학적 인지에 의한 한강에서의 홍수위 영향 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제2호, pp. 121-131.
- 이종태, 한건연, 서병하(1993) 한강의 홍수규모에 따른 인도교 수위의 조석영향 분석, 한국수문학회지, 한국수문학회, 제26권, 제2호, pp. 67-77.
- 유량조사사업단(2009) 2008년 국토해양부 수위-유량관계곡선식, HSC00-C-09-01.
- 윤태훈, 정의택, 박종석(1998) 2차원 수치모형에 의한 합류흐름 해석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제5호, pp. 529-538.
- 전경수, 김진수, 이상호(2007) 한강 본류에의 적용을 위한 FLDWAV 모형의 개선, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제40권, 제2호, pp. 135-146.
- 최계운(1994) 수지형 하천에서의 부정류 흐름의 해석 알고리즘, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제14호, 제4호, pp. 839-846.
- 최계운, 박용섭, 한만신, 김영규(2004) 수리모형실험을 통한 합류부에서의 수리학적 특성분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제10호, pp. 881-888.
- 한건연, 최규현, 김원, 김동현(2005) 한강수계에서의 댐의 영향을 고려한 홍수추적, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 747-760.
- Fread, D.L. (1987) *National Weather service Operational Dynamic Wave Model*, National Weather Service, Silver Springs, MD.
- Fread, D.L. (1988) *The NWS DAMBRK model : Theoretical background and users documentation*, Hydrologic Research Lab., Office of Hydrology, National Weather service, NOAA, Silver Springs, MD.
- Fread, D.L. and Lewis, J.M. (1998) *NWS FLDWAV MODEL : Theoretical Description and User Documentation*, Hydrologic Research Laboratory Office of Hydrology, National Weather Service, NOAA.
- Gurram, S.K., Karki, K.S., and Hager, W.H. (1997) Subcritical junction flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 447-455.
- Hager, W.H. (1989) Transitional flow in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp. 243-259.
- Hsu, C.C., Lee, W.J., and Chang, C.H. (1998a) Subcritical open-channel junction flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 8, pp. 847-855.
- Hsu, C.C., Wu, F.S., and Lee, W.J. (1998b) Flow at 90° equal-width open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 186-191.
- Kesserwani, G., Ghostine, R., Vazquez, J., Mose, R., Abdallah, M., and Ghenaim, A. (2008) Simulation of subcritical flow at open-channel junction. *Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 31, No. 2, pp. 287-297.
- Ramamurthy, A.S., Carballada, L.B., and Tran, D.M. (1988) Combining open channel flow at right angled junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 12, pp. 1449-1460.
- Shabayek, S., Steffler, P., and Hicks, F. (2002) Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 9, pp. 821-828.
- U.S. Army Corps of Engineering (2002). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual*, CPD-69, Version 3.1, HEC, Davis, Calif.

(접수일: 2009.6.26/심사일: 2009.8.10/심사완료일: 2009.8.25)