



Reconsideration of evaluating design flood level at Imjin River estuary

Park, Chang Geun^a · Baek, Kyong Oh^{b*}

^aDepartment of Civil Engineering, Catholic Kwandong University

^bDepartment of Civil, Safety, and Environmental Engineering, Hankyong National University

Paper number: 17-050

Received: 9 June 2017; Revised: 9 July 2017 / 24 July 2017; Accepted: 24 July 2017

Abstract

In this study, it was examined that a methodology for evaluating the design flood level reasonably at Imjin River estuary affected by the tide periodically. First of all, the change of the flood level was observed by performing unsteady simulation which can take into account the characteristics of the tidal rivers. And the variations of the flood level was analyzed by change of the Manning's roughness coefficient which is sensitive to the water level calculation. The results were compared with the design flood level at Imjin River estuary announced in the 2011 Imjin River Basic Plan Report. For reference, the design flood level reported in 2011 has been calculated by using a section of a huge riverbed dredging section as input data. From the simulation results, it was found that the flood level evaluated by this study was able to satisfy the freeboard of the levee without the riverbed dredging when the roughness coefficient was assigned to the same value as that of the Han river estuary in the calculation of the flood level, and the unsteady flow simulation was carried out to reflect on the tidal river.

Keywords: Imjin River estuary, Design flood level, Unsteady flow, Roughness coefficient, Riverbed dredging

임진강 하류 감조구간에서 홍수위 산정 재고

박창근^a · 백경오^{b*}

^a가톨릭관동대학교 토목공학과, ^b국립한경대학교 토목안전환경공학과

요 지

본 연구에서는 조석의 영향을 주기적으로 받는 임진강 하류부의 계획홍수위를 보다 합리적으로 산정하는 방안을 검토해 보았다. 우선 감조하천의 특성을 감안할 수 있는 부정류모의를 수행하여 홍수위의 변동을 살펴보고, 수위 계산에 민감한 매개변수인 조도계수를 해당지역의 특성에 맞게 현실화하여 홍수위 변화를 분석하였다. 그 결과를 2011년 임진강하천기본계획보고서에서 고시한 임진강 하구 계획홍수위와 비교하고, 감조구간에서 홍수위 산정시 유의해야 할 점들을 정리하였다. 참고로 2011년에 고시된 계획홍수위는 대규모 하상 준설 단면을 입력자료로 하여 부정류모의를 통해 산정된 바 있다. 본 연구의 결과, 임진강 하구의 경우 홍수위 산정에 있어서 조도계수를 한강하구와 동일한 값으로 할당하고, 하구 조위를 감안할 수 있는 부정류 모의를 수행하면 하상 준설을 하지 않더라도 홍수위가 제방 여유고를 만족함을 알 수 있었다.

핵심용어: 임진강하구, 계획홍수위, 부정류, 조도계수, 하상준설

1. 서 론

하천이 바다와 만나는 하구(河口, estuary)지역은 조위의 영향을 강하게 받아 하천 수위의 낙폭이 크고, 하상(河床)의

변동 또한 심하다. 때문에 이러한 감조구간은 홍수위 산정에 있어서도 일반하천에 비해 보다 세심한 주의가 요구된다. 우리나라 4대강 중 한강을 제외한 3대강은 하구언 설치로 인해 이미 하구로서의 기능을 상실한 상황이다. 반면 한강 하류구간은 북한과의 접경지역이라는 지리적 특수성으로 인해 하구언 설치가 불가능하였기에 지금까지 감조구간 상태를 유지하

*Corresponding Author. Tel: +82-31-670-5141
E-mail: pko@hknu.ac.kr (K. O. Baek)

고 있다. 한강의 지류 중 하나인 임진강은 한강이 서해로 나아가기 직전에 합류하는 하천으로, 한강과 더불어 임진강도 넓은 영역의 하구를 형성하고 있다. 임진강은 전체 유역면적이 8,138.9 km²이고 총 유로연장은 273.5 km로 대유역에 속하는 하천이다. 또한 임진강 유역은 군사분계선을 기준으로 볼 때, 북측이 63%로 전체 유역의 약 2/3를 차지하고 남측은 37%에 불과하다(MOLIT, 2011). 북한과 공유하는 하천 특성상 여타 유역에 비해 지역적 개발이 적은 상태이고 자연환경, 생태계 및 수질이 양호하다는 장점이 있는 반면에 상류 북한측 정보가 부족하여 이수나 치수 측면에서는 하천관리에 어려움이 많다(GRI, 2009). 특히 96, 98, 99년에는 임진강 하류 문산 지역에 대규모 홍수피해가 발생하였고, 이에 대한 대책으로 상류 댐 건설(한탄강댐 및 군남댐), 제방축조, 강변저류지 신설 등 다양한 방안이 시행되어 왔다.

이러한 치수정책이 2000년대 이후 지속적으로 추진되어 왔음에도 불구하고, 임진강 하류부는 여전히 제방 여유고가 계획홍수위를 만족하지 못하여 Fig. 1과 같이 대규모 하상준설 사업이 계획되었다(MOLIT, 2011). 구체적으로 임진강 하류지역 약 12.25 km 구간에 걸친 총 12,351,371 m³의 하도준설이다. 사업구간이 4대강사업에 비해 길지 않아 준설량도 그것에 비할 수는 없지만, 단위 길이당 준설량은 낙동강에 육박할 정도로 대규모이다(Baek, 2014). 문제는 이러한 치수사업을 시행하기 이전에, 고시된 계획홍수위의 타당성을 우선 면

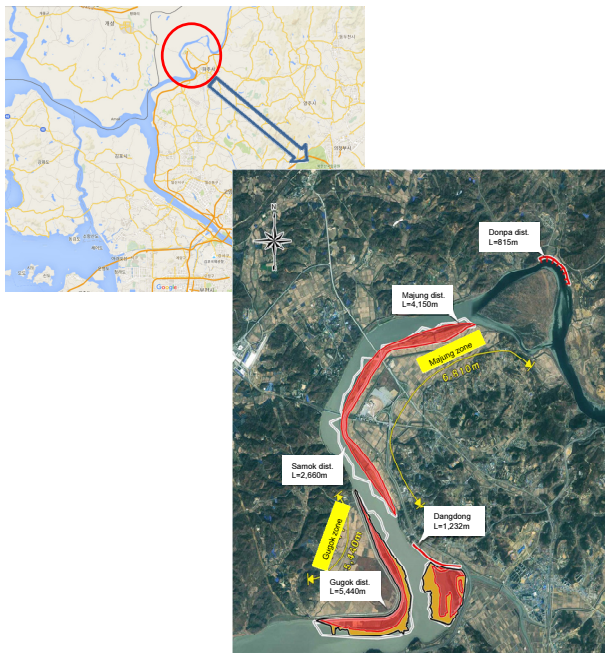


Fig. 1. Plan for river-bed dredge at Limjin River estuary (from MOLIT (2013) and Google Earth)

밀히 검토해 볼 필요성이 있다는 것이다. 그 이유는 앞서 언급하였듯이 임진강 하류부와 같은 감조구간에서는 하상변동이 심하고, 조위의 영향으로 수위의 변동성이 크기 때문이다. 한강 및 임진강 하류부 감조구간에서 수위와 하상변동을 연구한 사례들은 다음과 같다. Kim et al. (2001)은 팔당댐부터 한강 하구 전류지점까지 1차원 수치모형을 적용하고 신곡수중보 지점에서 ADCP를 이용한 유량측정치와 계산결과를 비교한 바 있다. Kim et al. (2003)은 한강 및 임진강에서 서해안의 조위가 평상시 및 홍수시의 흐름에 미치는 영향을 분석하여, 5,000 cms 이하인 유량에서는 조위의 영향이 크다고 주장한 바 있다. 또한 Kim et al. (2005)은 1차원 홍수추적모형인 FLDWAV를 이용하여 팔당댐 방류량과 서해의 조위조건에 따른 신곡수중보에서의 흐름양상을 분석하였다. 2차원으로 감조구간의 흐름특성을 모의한 연구들도 있는데, Yu et al. (2005)은 Saint Venant 방정식에 유한차분법을 적용하여 2차원 수치모형을 개발하고, 이를 잠실수중보로부터 전류지점까지 적용하여 조석에 의한 수위변화를 실측치와 비교하였다. Seo et al. (2008)은 연구영역을 신곡수중보에서 한강의 범정 끝단인 유도까지 확장하고, 국내개발 2차원 모형인 RAMS를 사용하여 조석의 영향을 고려한 부정류 및 염류확산을 모의한 바 있다. Baek and Lim (2011)은 한강대교에서 유도까지 모의구간을 확장하여 신곡수중보 유무에 따른 수위변동을 대조기 동안 부정류 모의를 수행한 바 있다.

이러한 많은 연구들에도 불구하고 지금까지 계획홍수위 산정시 일반하천이든 감조하천이든 간에 그 고유의 특성을 고려하지 않고 정상-부등류(steady-nonuniform flow) 모의를 하는 것이 일반적인 현황이다. 본 연구에서는 조석의 영향을 주기적으로 받는 감조하천의 특성을 감안할 수 있는 부정류(unsteady flow)모의를 수행하여 홍수위의 변동을 검토해 보았다. 또한 수위 산정에 가장 민감한 매개변수인 조도계수를 해당지역의 특성에 맞게 현실화하여 홍수위 변화를 분석하였다. 그 결과를 2011년 임진강하천기본계획보고서(MOLIT, 2011)에서 고시한 임진강 하구 계획홍수위와 비교하고, 감조구간에서 홍수위 산정시 유의해야 할 점들을 검토해 보았다.

2. 기존 홍수위 산정방법 검토

본 연구에서는 감조구간에서 홍수위를 산정할 때 개입될 수 있는 불확실성에 대해 우선 검토해 보았다. 국내에서는 홍수위 산정시 통상적으로 1차원 흐름모형인 HEC-RAS를 사용하는데 여기에 입력자료인 하상자료에 따른 홍수위 차이,

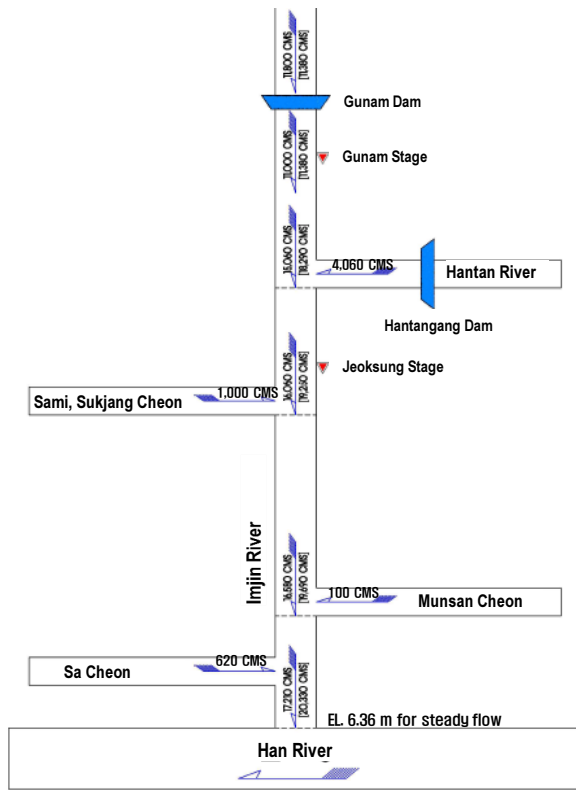


Fig. 2. Schematic diagram of flood distribution at Limjin watershed (from MOLIT, 2011)

매개변수인 조도계수에 따른 홍수위 차이, 흐름 모의조건인 정류(steady flow) 혹은 부정류(unsteady flow)에 따른 홍수위 차이, 이렇게 세 가지 경우에 따라 수위의 차이가 발생할 수 있다. 우선 하상 관측 자료의 경우, 하구에서는 홍수 전후에 따라 단면 형상의 차이가 상당하다고 알려져 있다(MOLIT, 2005). 즉 하상관측시기에 따라 입력 자료로서 하상이 많이 다를 수 있고, 이로 인해 홍수위의 차이도 발생한다(MOLIT, 2005). 하지만 본 연구에서는 불확실성을 하나라도 더 줄이기 위해 하상자료는 2011년 임진강하천기본계획보고서 작성시 측량된 자료(준설을 가정하지 않은 하상자료)를 그대로 적용하였다.

모형의 매개변수인 조도계수의 경우, 감조하천(tidal river)에서는 조위보다 특히 홍수위가 깊어 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Khatibi et al., 2000). 일반적으로 조도계수가 클수록 홍수위도 커지고, 작을수록 작아지는 경향이 있다. 본 연구에서는 임진강 하구지역에 할당된 조도계수치의 적합성을 검토해 보고, 타당한 값이 무엇인지 살펴보기로 한다. 먼저 조도계수를 변화시키면서 기존 보고서(2011년 임진강하천기본계획)의 절차를 따라 정상부동류 모의를 수행하였다. 모형에 입력되는 하상단면자료는 앞서 언급하였듯이 2011년 기본계획수립시 관측된 자료들을 이용하였다. 이때 상류 경계조건에 부여되는 홍수량은 물론 주요 지류의 홍수량은 기본계획보고서를 참고하여 Fig. 2에 도시된 바와 같이 할당하였다. 하류 경계조건은 임진강과 한강 합류점(구좌표 No. -21, 신좌표 No. 0)에 100년 빈도 홍수위에 해당하는 EL. 6.36 m를 부여하였다. 모의 구간은 임진강 하구에서 군남댐까지 약 85 km를 삼았다. 하지만 본 연구에서 주된 관찰구간은 임진강과 한강합류점에서 준설사업이 계획된 구간인 구좌표 No. -21~60까지 약 25 km 이다. 특히 문산천 합류점(구좌표 No. 13) 인근 상하류 구간의 홍수위 변화를 중점적으로 살펴 보았다.

먼저 Table 1에서 보는 바와 같이 2011년 하천기본계획과 동일하게 조도계수를 부여하여 홍수위를 계산하였다. 임진강기본계획보고서(2011)에 의하면 구축점 기준 기점(No. -21)부터 No. 0까지는 조도계수를 0.021로, No. 1 ~ No. 48까지는 0.026로, No. 49 ~ No. 60는 0.04로 할당하였다. No. 49 ~ No. 60 구간의 조도계수를 크게 할당한 이유는 초평도에 수목이 많이 있어 이를 감안하기 위한 조치라고 기본계획보고서는 기술하고 있다. 또한 나머지 상류경계조건까지의 조도계수도 기본계획보고서를 따라 Table 1과 같이 할당하였다. 그 다음 모의 조건으로 No. -21 ~ No. 48 구간은 조도를 0.005씩 감소하여(No. -21 ~ No. 0, $n = 0.016$; No. 1 ~ No. 48, $n = 0.021$) 계산하고, 마지막으로 조도를 0.005씩 증가하여(No. -21 ~ No. 0, $n = 0.026$; No. 1 ~ No. 48, $n = 0.031$) 홍수위를 산정하였다.

Table 1. Assigned roughness coefficient n at Imjin River in previous reports (from MOLIT, 2011)

Reach	(old) Stage number	n	Note
Han River confluence ~ Tanhyen Nakha-ri	No. -21 ~ No. 0	0.021	
Tanhyen Nakha-ri ~ Downstream of Chopyeng-do	No. 0 ~ No. 48	0.025	
Downstream of Chopyeng-do ~ Upstream of Chopyeng-do	No. 48 ~ No. 61	0.040	Chopyeng-do
Upstream of Chopyeng-do ~ Junjin Bridge	No. 61 ~ No. 80	0.028	
Junjin Bridge ~ Libi Bridge	No. 80 ~ No. 98	0.029	
Libi Bridge ~ Starting point of National River	No. 98 ~ No. 296	0.030	

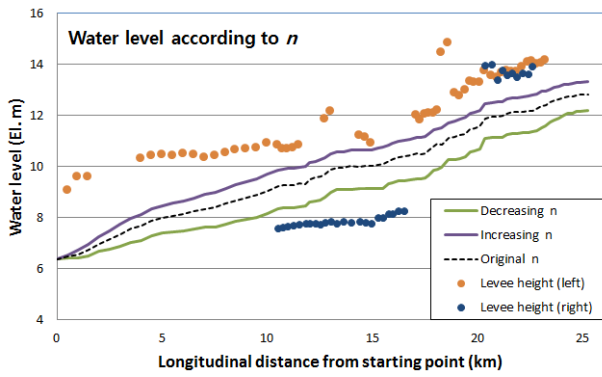


Fig. 3. Flood water level according to variations of roughness coefficients

구간 No. 49 ~ No. 60 의 조도계수는 변화없이 0.04, 나머지 구간도 기본계획보고서대로 할당하였다. 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 조도계수에 따라 홍수위는 매우 민감하게 반응하고 있음을 확인할 수 있다. 조도계수를 0.005 증가시키면 여유고 없이 제방과 거의 일치할 정도로 홍수위가 증가하는 지점이 발생한다. 반면 0.005 감소시키면 하상준설이 필요 없을 만큼 홍수위 + 여유고가 제방고 아래로 계산되었다. 이처럼 홍수위 계산에 있어서 민감한 매개변수는 결정에 있어서 신중한 접근이 필요해 보인다.

조도계수가 홍수위에 민감하게 반응함을 확인하였기에, 다음으로 임진강하천기본계획보고서(2011)에서 홍수위 계산시 할당된 조도계수 값의 타당성을 검토해 볼 필요성이 있다. 이 보고서에 따르면 하도형상 및 하상재료에 의한 추정법, 혼적수위를 이용한 추정법, 수위-유량자료를 이용한 추정법, 기존의 경험공식을 이용한 방법 등 여러 가지 방법들로 계산한 수치를 제시했지만, 결국 기존 하천기본계획(2001년 수립)에서 제시한 값을 그대로 채택했다. 2001년 임진강하천기본계획보고서(MOLIT)에 따르면 “임진강 유역은 96, 98년 등 연달아 계획홍수규모를 초과하는 큰 홍수가 발생하였으므로 당시의 홍수흔적수위 자료를 조사한 후, 현지 조사시 하도상향 및 하상재료에 의해 추정된 조도계수에 의한 홍수위를 이에 적합하도록 조정하여 채택하였다”고 기술되어 있다. 문

제는 이 값이 산정된지 20여년에 가까워 그 신뢰도가 떨어진다는 것이다. 해당 보고서에서도 ‘조도계수는 동일하천 동일구간의 경우에도 경년적으로 변화되는 것으로서 경도가 높은 값을 구하는 것이 상당히 어려운 문제이다.’라고 지적한 바 있다.

더 큰 문제는 이렇게 산정된 값이 유사한 하도 특성을 갖는 한강 하구에 비해 그 값이 크다는 것이다. 임진강이 합류하는 한강하구지역은 홍수위 계산시 임진강 하구와 다르게 Table 2와 같이 상당히 작은 값(0.018)을 조도계수로 사용하여 왔다. 가장 최근 계획인 2002년 한강기본계획보고서(MOLIT)에서도 Table 2와 같이 한강 하구부는 0.02로 할당하여 홍수위를 산정한 바 있다. 임진강 하구부는 하상재료나 수리적 특성이 한강하구부와 거의 일치한다고 알려져 있다(MOLIT, 2005). 그럼에도 불구하고 홍수위 계산시 할당되는 조도계수가 동일하게 입력되지 않고, 임진강의 경우 더 큰 값이 사용되고 있다는 점은 이해하기 어려운 대목이다. 2011년 임진강하천기본계획서에서도 이렇게 채택된 조도계수 값의 불확실성을 인정하여 다음과 같이 언급을 하고 있다. “향후 보다 합리적인 조도계수를 산정하기 위해서 리비교 지점에 수위관측소 설치계획을 수립하였으며(중략)...추가적인 수위관측소의 설치뿐만 아니라 수위관측자료의 관리에 만전을 기하여야 하며, 유량측정사업 등을 통하여 매년 홍수시 홍수흔적측량이 지속적으로 이루어지도록 하여야 한다.”

끝으로 흐름모의 조건의 경우, 감소하천의 특성을 갖는 임진강 하구에서는 어찌면 당연히 수행해야 하는 것이 부정류 모의임에도 불구하고, 실제 하천기본계획 수립때는 정상-부정류 모의를 수행하는 것이 지금까지의 관례였다. 이후 논의에서는 정상류와 부정류 모의간 홍수위 차이를 분석해 보기로 한다.

3. 조도계수 및 모의조건 합리화를 통한 홍수위 재 계산

3.1 부정류 모의 방법

앞서 언급했듯이 국내에서는 통상적으로 계획홍수위는 정

Table 2. Roughness coefficient *n* at Han River (from MOLIT, 2002)

Report	Reach	<i>n</i>
Han River basic plan report (2002)	No. 0 ~ No. 50	0.020
	No. 50 ~ No. 173+273	0.030
Previous reports	Downstream of Junlyu station	0.018
	Upstream of Junlyu station	0.020
	Seoul city	0.030

상·부등류 모의를 통해 홍수위를 계산하게 된다. 그러나 감소 하천의 경우 조석의 영향을 받는 하류단 수위를 하나의 값으로 고정하는 것은 무리가 있다. 임진강 하류의 경우도 약최고만조위인 EL. 4.64 m에 홍수량을 더해 EL. 6.36 m를 부등류 계산시 100년 빈도 홍수량의 기점 수위로 삼았는데, 이것은 약최고만조위시 첨두 홍수량이 동시에 발생하여 서로 중첩이 된다고 가정하는 것이다. 때문에 감소하천의 경우 정상·부등류(steady-nonuniform) 모의보다는 조석을 감안할 수 있는 부정류 모의를 하는 것이 보다 정확히 홍수위 거동을 모사할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 부정류 모의를 수행함에 있어서 임진강 지류의 홍수량까지 부정류로 감안하기 어려워 Fig. 2의 홍수량 배분도처럼 지류로부터 유입되는 홍수량은 하나의 값으로 할당하였다. 대신 분류 상류단 유량과 하류단 수위는 시간에 따른 변화를 갖는 경계조건을 부여하여 부정류 모의를 수행하였다. 우선 상류단 홍수량의 경우, 군남홍수조절지 기본 및 실시설계보고서(MOLIT, 2007)를 참고하여 Fig. 4와 같은 수문곡선을 부여하였다. 하류단 수위의 경우, 한강기본계획보고서

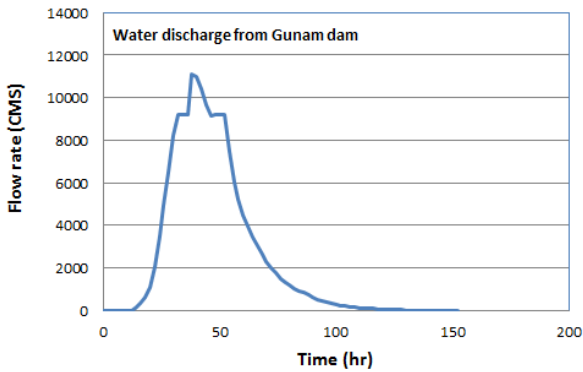


Fig. 4. Upstream boundary condition when modelling unsteady flow (water discharge at Gunam dam)

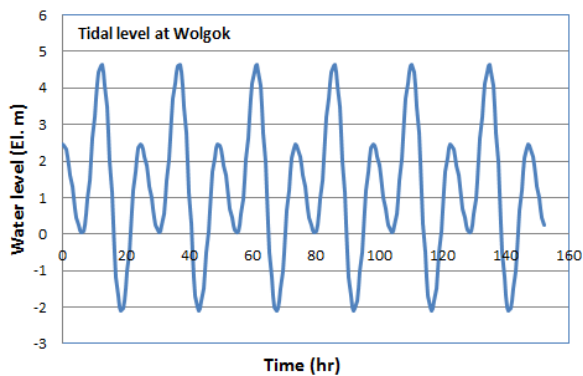


Fig. 5. Downstream boundary condition when modelling unsteady flow (water level at Wolgok station)

(MOLIT, 2002)를 인용하여 Fig. 5와 같이 월곶지점의 조위 48시간을 반복적으로 열흘간 발생시켜 할당하였다.

본 연구에서는 부정류 모의시 상·하류단 경계조건에 민감도를 살펴보기 위해 다음의 세 가지 시나리오로 분리하여 모의하였다. 첫 번째 경우, 상류경계는 하나의 홍수량 값(11,000 cms)으로 고정, 하류경계는 월곶조위를 부여; 두 번째 경우, 상류경계는 군남댐 방류량 곡선, 하류경계는 하나의 수위값(EL. 6.36 m)으로 고정; 세 번째 경우, 상류경계는 군남댐 방류량 곡선, 하류경계는 월곶조위 부여하였다. 이때 매개변수인 조도계수는 임진강하천기본계획보고서(MOLIT, 2011)의 값을 구간별로 그대로 따랐고, 하상자료는 앞의 논의와 동일하게 2011년 관측지형자료(준설을 고려하지 않은 원자료)를 입력하였다. 그 결과를 Fig. 6에 도시하였는데, 그림에서 보듯이 하류단 수위를 조위로 할당할 경우, 그렇지 않는 경우에 비해 기점으로부터 상류 약 10 km 이상 까지 상당한 수위저감효과가 발생하였다. 반면 부정류 모의더라도 상류 유량만 수문곡선으로 할당하고, 하류 수위를 한 값으로 고정한 경우(두 번째 경우)에는 그 결과가 부등류 모의와 거의 차이를 보이지 않고 있다. 주목할 점은 분류 및 지류의 상류경계유량을 한 값으로 할당하고 하류 수위를 조위로 부여할 경우(첫 번째 경우)에는 상하류 둘 다 부정류로 고려한 경우(세 번째 경우)와 거의 수위 차이를 보이지 않고 있다. 특히 상하류단을 모두 부정류로 할당할 경우 계산상 발산할 가능성이 있으므로, 본 결과와 같이 홍수위 차이가 크지 않다면 상류유량경계는 하나의 값으로, 하류수위조건은 조위로 할당하는 방법도 실무 적용성을 높이는 하나의 방안이라 사료된다.

조도계수의 경우, 해당 구간 내에 수위관측소가 있어 임의의 홍수사상시 수위-유량 관계를 관측했다면 그것으로 보다 정확한 조도계수를 산정할 수 있지만, 앞서 살펴보았듯이 그런 자료가 부재하여 정확한 조도계수 값을 본 연구에서도 결정하기는 어려운 실정이다. 대신 본 연구에서는 Table 2를 참

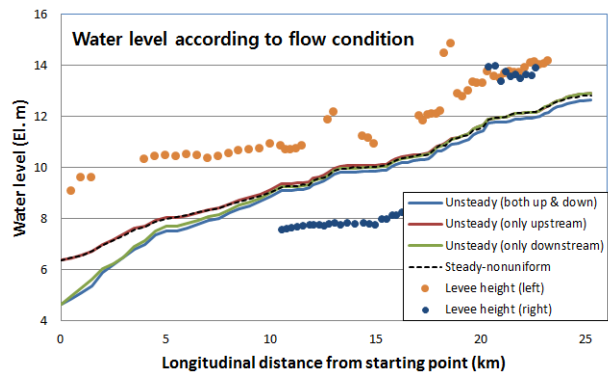


Fig. 6. Flood water level according to flow conditions

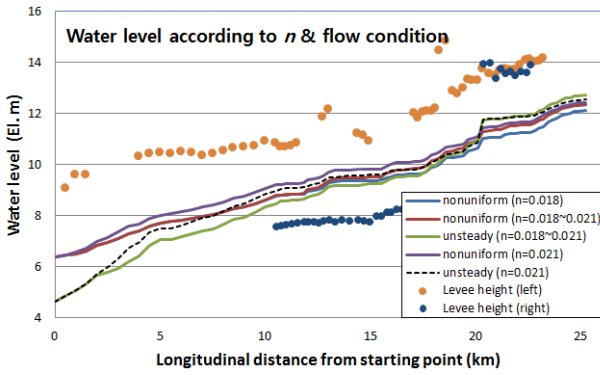


Fig. 7. Flood water level according to variations of roughness coefficients and flow conditions

조하여 한강 하구 홍수위 계산에 적용된 조도계수 값들을 임진강에 적용했을 경우, 홍수위에 어떤 차이가 있는지 분석해보았다. 이를 위해 3가지 경우로 조도계수 값의 차이를 두어 적용하였다. 첫째 해당구간(구좌표 No. -21 ~ No. 48)의 조도계수를 0.018로 일정하게 할당한 경우, 둘째 해당구간을 두 구간으로 나누어 구좌표 No. -21 ~ No. 0까지는 0.018을, No. 0 ~ No. 48까지는 0.021을 할당한 경우, 세 번째로 해당구간의 조도계수를 0.021로 일정하게 할당한 경우이다. 참고로 앞서 기술하였듯이 2011년 임진강하천기본계획보고서에서는 No. -21 ~ No. 0까지는 0.021을, No. 0 ~ No. 48까지는 0.026을 할당하였다(이것으로 계산된 홍수위는 Fig. 3에 기 도시함). 이러한 세 가지 경우의 수를 가지고 정상-부등류 및 부정류 모

의를 각각 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 참고로 No. 48 ~ No. 60 구간은 초평도를 감안, 임진강 하천기본계획보고서에서 사용한 조도계수 0.04를 그대로 사용하였는데, 이 영향으로 인해 Fig. 7에서 보듯이 No. 49(기점으로부터 상류 약 22 km)부터 홍수위가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 물론 No. 60 이후의 구간도 마찬가지로 하천기본계획보고서의 조도계수 값을 그대로 따랐다.

3.2 부정류 모의 결과

Fig. 7에서 보듯이 흐름모의조건(부정류 혹은 부등류)에 상관없이 조도계수가 작을수록 홍수위가 저감됨을 다시금 확인할 수 있다. 보다 정량적인 비교를 위해 각각의 경우로 계산된 홍수위와 기설 제방고간 차이를 Table 3에 기록하였다. 여기서 제방고는 좌, 우안 중 표고가 낮은 제방을 선택하여 홍수위와 비교하였으며, 홍수시 저류지로 월류를 위해 일부러 제방을 낮추어 놓은 장단체는 비교대상에서 제외하였다. 당초 임진강 하구 준설사업이 기획된 연유가 홍수위 + 여유고가 여러 지점들에서 제방고 보다 높게 계산되었기 때문이었다. 만일 계산된 홍수위 + 여유고가 제방고보다 낮다면 굳이 준설사업을 이행할 이유는 없을 것이다. 참고로 하천설계기준에 따르면 임진강 하구의 경우, 계획홍수량이 10,000 m³/s 이상이므로 제방의 여유고를 2 m 이상 두어야 한다(KWRA, 2009). Table 3에서 홍수위와 제방고 간 차이가 여유고 2 m 이상을 만족하지 못하는 지점을 노란색으로 표시하였다.

Table 3. Differences between flood level and levee elevation according to flow conditions and variations of roughness coefficient

Old stage	New stage	n = 0.018		n = 0.018~0.021		n = 0.021		Design flood level (2011)	Note
		non-uniform	unsteady	non-uniform	unsteady	non-uniform	unsteady		
-21	0 + 000	-	-	-	-	-	-	-	
-20	0 + 500	2.63	4.29	2.63	4.22	2.6	4.22	2.29	
-19	1 + 000	3.11	4.68	3.11	4.56	3.04	4.52	2.75	
-18	1 + 500	2.99	4.45	2.99	4.27	2.87	4.26	2.69	
-17	2 + 000	-	-	-	-	-	-	-	
-16	2 + 500	-	-	-	-	-	-	-	
-15	3 + 000	-	-	-	-	-	-	-	
-14	3 + 500	-	-	-	-	-	-	-	
-13	4 + 000	2.92	4.26	2.92	3.89	2.64	3.34	2.94	
-12	4 + 500	2.84	3.77	2.84	3.59	2.55	3.08	2.95	
-11	5 + 000	2.76	3.58	2.76	3.38	2.46	2.95	2.87	
-10	5 + 500	2.66	3.55	2.66	3.35	2.35	2.92	2.74	
-9	6 + 000	2.66	3.57	2.66	3.32	2.33	2.86	2.71	
-8	6 + 500	2.58	3.48	2.58	3.2	2.23	2.72	2.6	
-7	7 + 000	2.35	3.22	2.35	2.93	1.99	2.43	2.37	

Table 3. Differences between flood level and levee elevation according to flow conditions and variations of roughness coefficient (Continue)

Old stage	New stage	$n = 0.018$		$n = 0.018\text{--}0.021$		$n = 0.021$		Design flood level (2011)	Note
		non-uniform	unsteady	non-uniform	unsteady	non-uniform	unsteady		
-6	7 + 500	2.37	3.25	2.37	2.94	1.99	2.41	2.32	
-5	8 + 000	2.37	3.19	2.37	2.87	1.98	2.34	2.32	
-4	8 + 500	2.37	3.11	2.37	2.80	1.97	2.27	2.32	
-3	9 + 000	2.34	3.06	2.34	2.75	1.93	2.21	2.21	
-2	9 + 500	2.27	2.92	2.27	2.61	1.84	2.08	2.09	
-1	10 + 000	2.28	2.86	2.28	2.56	1.85	2.05	2.1	
0	10 + 500	2.09	2.74	2.04	2.38	1.63	1.88	1.95	End of Gugok
1	10 + 730	1.87	2.43	1.87	2.12	1.46	1.63	1.75	
2	10 + 970	1.86	2.39	1.84	2.09	1.43	1.61	1.72	
3	11 + 240	1.90	2.42	1.89	2.12	1.48	1.64	1.75	
4	11 + 510	2.00	2.53	1.99	2.21	1.57	1.74	1.85	
5	11 + 810	-	-	-	-	-	-	-	
6	12 + 020	-	-	-	-	-	-	-	
7	12 + 260	-	-	-	-	-	-	-	
8	12 + 510	-	-	-	-	-	-	-	
9	12 + 720	2.77	3.30	2.67	2.91	2.32	2.52	2.61	
10	12 + 990	2.88	3.44	2.78	3.02	2.45	2.65	2.78	
11	13 + 300	-	-	-	-	-	-	-	
12	13 + 580	-	-	-	-	-	-	-	
13	13 + 960	-	-	-	-	-	-	-	Confluence of Munsan-chen
14	14 + 360	1.85	2.41	1.72	2.01	1.4	1.65	1.72	
15	14 + 650	1.78	2.31	1.64	1.92	1.33	1.56	1.65	
16	14 + 940	1.57	2.05	1.42	1.66	1.10	1.32	1.44	
17	15 + 230	-	-	-	-	-	-	-	
18	15 + 480	-	-	-	-	-	-	-	End of Majung
19	15 + 760	-	-	-	-	-	-	-	
20	15 + 940	-	-	-	-	-	-	-	Start of Gugok
21	16 + 220	-	-	-	-	-	-	-	
22	16 + 500	-	-	-	-	-	-	-	
23	16 + 770	-	-	-	-	-	-	-	
24	17 + 080	2.41	2.95	2.18	2.47	1.91	2.21	2.15	
25	17 + 280	2.22	2.75	1.97	2.28	1.70	2.01	1.96	
26	17 + 500	2.38	2.89	2.16	2.39	1.89	2.15	2.18	
27	17 + 670	2.36	2.89	2.10	2.35	1.85	2.14	2.11	
28	17 + 890	2.20	2.69	1.94	2.13	1.70	1.98	2.05	
29	18 + 080	2.25	2.78	1.98	2.22	1.76	2.06	2.01	
30	18 + 270	4.46	4.93	4.21	4.37	3.99	4.24	4.27	
31	18 + 590	4.60	5.08	4.34	4.50	4.15	4.47	4.55	

Table 3. Differences between flood level and levee elevation according to flow conditions and variations of roughness coefficient (Continue)

Old stage	New stage	$n = 0.018$		$n = 0.018-0.021$		$n = 0.021$		Design flood level (2011)	Note
		non-uniform	unsteady	non-uniform	unsteady	non-uniform	unsteady		
32	18 + 900	2.61	3.10	2.34	2.49	2.15	2.46	2.44	
33	19 + 120	2.46	2.94	2.18	2.32	2.00	2.30	2.31	
34	19 + 390	2.65	3.13	2.36	2.49	2.18	2.48	2.44	
35	19 + 620	2.79	3.22	2.50	2.58	2.33	2.61	2.68	
36	19 + 840	2.72	3.13	2.42	2.47	2.26	2.52	2.61	
37	20 + 080	2.66	3.05	2.36	2.40	2.20	2.45	2.57	Tongil Bridge

이 표에서 보듯이 첫 번째로 구간 No. -21 ~ No. 48의 조도계수를 0.018로 일정하게 할당한 경우, 부정류로 모의했을 때는 모든 구간에서 홍수위가 여유고 2 m 이상을 만족하였다. 즉 하류단에서 조위를 감안하고, 과거 한강하구의 홍수위 계산에 쓰인 0.018을 할당하고 부정류 모의를 수행하여 그 결과값을 계획홍수위로 설정한다면 준설사업을 포함하여 어떠한 치수사업도 시행할 하등의 이유가 없어진다. 같은 조도 조건에서 정상부등류로 모의했을 경우에는 문산천 합류점 직상류 지역과 거곡지구 하류지점에서 여유고가 부족한 지점들이 발생하였다. 그러나 이 경우도 기존 계획홍수위(준설을 가정한 단면으로 계산)보다 여유고가 부족한 지점이 더 적었다. 즉 조도계수를 0.018로 설정하면 부정류모의든 정상부등류 모의건 간에 공히 계획홍수위보다 낮게 홍수위가 계산되었다. 참고로 Table 3을 보면 2011년 하천기본계획을 통해 고시된 계획홍수위(준설을 가정한 단면으로 계산)와 제방고간 차이를 수록하였는데, 회색으로 표시한 지점이 여유고 2 m 이하 지점으로 No. 0~4, No. 14~16, No. 25 등에서 발생하였다.

둘째 해당구간을 두 구간으로 나누어 구좌표 No. -21 ~ No. 0까지는 0.018을, No. 0 ~ No. 48까지는 0.021을 할당한 경우를 보면, 부정류로 모의했을 때는 두 지점(No. 15, 16)에서만 여유고가 부족하였다. 나머지 구간은 모두 홍수위 + 여유고가 제방고 아래에 있어 전제적으로 계획홍수위보다 낮게 계산되었다. 같은 조도 조건에서 정상-부등류 모의했을 때는 여유고 부족 지점이 계획홍수위와 동일한 지점에서 발생하였고, 단지 No. 28~29 구간에서 여유고가 약간(2~6 cm) 부족하였다. 하지만 부정류 모의건 정상부등류 모의건 간에 이상의 조도조건 하에서는 하상준설을 가정하지 않더라도 홍수위가 계획홍수위보다 대체적으로 낮거나 유사하게 계산되었다.

끝으로 구간 No. -21 ~ No. 48의 조도계수를 일정하게 0.021로 할당한 경우, 정상-부등류로 모의하면 여유고를 만족시키지 못하는 지점들이 다수 발생하였다. 반면 같은 조도조건에서 부정류로 모의하면 여유고 부족이 한 지점을 제외하고는

계획홍수위와 정확히 일치하였다(이 경우 No. 28, 계획홍수위는 No. 25). 즉 조도계수를 한강하구 홍수위 계산에 쓰인 값(0.021)과 동일하게 할당한 후 조위를 고려하여 부정류 모의를 수행하면 준설을 하지 않더라도 준설을 가정한 후 계산된 계획홍수위와 거의 일치하는 결과를 보여주었다.

결론적으로 첫 번째 경우(No. -21 ~ No. 48 조도계수 0.018 할당)와 두 번째 경우처럼(조도계수를 No. -21 ~ No. 0까지는 0.018을, No. 0 ~ No. 48까지는 0.021을 할당) 한강 하구의 조도계수와 유사하거나 약간 적은 값으로 임진강 하구에 부여하면 모의 조건에 상관없이 준설을 가정하고 설정된 계획홍수위보다 대체적으로 더 낮게 홍수위가 계산되었다. 세 번째 경우처럼 조도계수를 한강하구와 동일하게(0.021) 할당한 경우에도 부정류 모의 결과가 계획홍수위와 거의 일치하였다. 즉 이 경우 대규모 준설사업 없이 임진강 하구 치수계획을 만족시킬 수 있다.

하천설계기준은 다음과 같은 표현으로 부정류모의를 상황에 따라 적용할 수 있음을 적시한 바 있다. “계획홍수위는 계획하도구간 및 그 상하류의 흐름이 상류 혹은 사류인지를 판별한 후, 등류, 부등류, 부정류 계산 등 하천흐름에 적합한 방법을 사용하여 계산한다.” 앞서 언급했듯이 조석의 영향을 받는 감조하천의 하구부는 조위를 감안하는 부정류 모의가 당연히 합리적인 계산방법임은 의심의 여지가 없다. 조도계수의 산정에 있어서도 자료부족으로 정확한 값을 모른다면, 본류인 한강하구의 값을 따르는 것이 바람직하다고 사료된다. 현재 임진강 하구 계획홍수위 산정에 할당된 조도계수 값은 명확한 이유 없이 크게 설정되어 있다. 따라서 한강 하구 모의와 같은 조도계수를 사용하고, 하류단은 조위를 고려한 부정류 모의를 수행한 홍수위를 계획홍수위로 고시하는 것이 가장 합리적인 대안이라 사료된다. 끝으로 문산천 합류점 직상류에 위치한 당동제는 조도계수 변화와 모의조건에 상관없이 대체적으로 여유고가 부족한 것으로 계산되므로 이 제방의 증고 사업은 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 임진강 하구 감조구간에 고시된 계획홍수위의 타당성과 홍수위 산정에 개입될 수 있는 불확실성을 분석해 보았다. 먼저 1차원 모형의 매개변수인 Manning의 조도계수에 따른 홍수위 차이를 살펴본 결과, 예상대로 조도계수에 매우 민감하게 홍수위가 반응하였다. 두 번째로 조석의 영향을 주기적으로 받는 감조하천의 특성을 감안할 수 있는 부정류모의를 수행하여 홍수위의 변동을 검토해 보았다. 하루 단 기점수위를 조위로 할당할 부정류 모의의 경우, 한 값으로 설정한 부정류 모의결과에 비해 기점에서 상류 10 km 이상 지역까지 현격한 수위저감 효과가 발생하였다. 주목할 점은 본류 및 지류의 상류경계유량을 한 값으로 할당하고, 하루 수위를 조위로 부여할 경우에는 상하류 둘 다 부정류로 고려한 경우와 비교하여 홍수위 차이가 거의 없었다. 특히 상하류단을 모두 부정류로 할당할 경우 계산과정에서 발산할 가능성도 있으므로, 홍수위 차이가 크지 않다면 상류유량경계는 하나의 값으로, 하류수위조건은 조위로 할당하는 방법도 실무 적용성을 높이는 하나의 방안이라 사료된다. 이러한 분석을 바탕으로 본 연구에서는 하구지역 불확실성을 최대한 상쇄할 수 있고, 보다 합리적으로 홍수위를 재계산하는 방법을 제안하였다. 새롭게 계산된 홍수위는 1) 하상준설을 하지 않는 단면을 입력하고, 2) 조도계수를 한강하구와 동일한 값으로 할당하는 것, 3) 하구 조위를 감안할 수 있도록 정류 대신 부정류 모의를 수행하는 것을 원칙으로 하였다. 결론적으로 이 세 가지 조건을 감안하여 계산한 홍수위는 하상준설을 가정하여 2011년 고시된 홍수위와 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 하상준설을 하지 않고도 조도계수의 합리적 조정과 부정류 모의만으로 홍수위 + 여유고가 제방고 이내에 있음을 확인하였다. 이는 임진강 하구 본류에 더 이상의 추가적인 하상준설 사업이 추진되지 않아도 됨을 증명하는 것이다.

이상의 연구결과를 바탕으로 다음과 같은 설계기준의 변경도 고려해 볼 수 있다. 구체적으로 하천설계기준에 조석의 영향을 받는 감조하천의 경우에는 반드시 부정류 모의를 해야 한다고 명시하는 것이다. 물론 현재 하천설계기준에도 다음과 같은 표현으로 부정류모의를 상황에 따라 적용할 수 있음을 적시한 바 있다. “계획홍수위는 계획하도구간 및 그 상하류의 흐름이 상류 혹은 사류인지를 판별한 후, 등류, 부등류, 부정류 계산 등 하천흐름에 적합한 방법을 사용하여 계산한다.” 하지만 의무조항으로 기술되어 있지 않으므로 국내 감조하천 구간에서 부정류 모의를 통해 고시된 계획홍수위는 단 한군데도 없다. 하천설계기준의 개정으로 향후 임진강하천기본계획 변경시 홍수위 산정을 부정류로 산정할 것을 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 (사)대한하천학회의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Baek, K. O. (2015). “Is the flood level mitigated by the dredging of Limjin River estuary?”, *River and Life*, Vol. 3, No. 1, pp. 10-23.
- Baek, K. O., and Lim D. H. (2011). “Flow characteristics induced by shift and modification of submerged weir at Han River estuary.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 31, No. 2B, pp. 109-119.
- Gyeonggi Research Institute (GRI) (2009). *A plan for preventing a disaster by water at Imjin River*.
- Khatibi, R. H., Williams, J. R., and Wormleaton, P. R. (2000). “Friction parameters for flow in nearly flat tidal channels.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 10, pp. 741-749.
- Kim, S. H., Kim, W., and Choi, H. S. (2003). “Analysis of tidal effect on the Han and Imjin River.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 36, No. 2, pp. 301-313.
- Kim, S. H., Kim, W., Lee, E. R., and Choi, K. H. (2005). “Analysis of hydraulic effects of Singok submerged weir in the lower Han River.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 5, pp. 401-413.
- Kim, W., Kim, C. W., Yoon, K. S., and Yoon, T. H. (2001). “The flow characteristics of the Han River flow considering the effect of Shingok submerged weir and tidal motions.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 21, No. 3B, pp. 305-314.
- Korean Water Resources Association (KWRA) (2009). *River design standard*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2001). *Imjin River basic plan report*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2002). *Han River basic plan report*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2005). *Report on riverbed change at Han River estuary*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2007). *Basic and design report on Gunam flood control site*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2011). *Imjin River basic plan report*.
- Seo, I. W., Lee, M. E., and Song, C. G. (2008). “Flow and mixing behavior at the tidal reach of Han River.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 6B, pp. 731-741.
- Yu, J. H., Kim, H. J., Namgung, D., and Cho, Y. S. (2005). “Analysis of tidal effects with two-dimensional numerical model in Han-River.” *Proceedings of KSCE Conference 2005*, pp. 1871-1875.