

# 감조하천 홍수위 계산의 불확실성과 저감 대안 - 임진강 하류를 대상으로

백경오\* · 권혁원

환경대학교 토목안전환경공학과

(2018. 1. 2. 접수 / 2018. 3. 13. 수정 / 2018. 3. 15. 채택)

## Uncertainty of Evaluating Design Flood and Mitigation Plan at Downstream of Imjin River

Kyong Oh Baek\* · Hyek Won Kwon

Department of Civil, Safety, and Environmental Engineering, Hankyong National University

(Received January 2, 2018 / Revised March 13, 2018 / Accepted March 15, 2018)

**Abstract :** Compared with general rivers, fluctuations of the water level and the river bed are severe in the tidal river. In hydro-dynamic aspect, such fluctuation gives different river-bed data to us according to observing period. The time-dependent river-bed data and pre-estimation of the Manning's roughness coefficient which is the key factor of numerical modelling induces uncertainty of evaluating the design flood level. Thus it is necessary to pay more attention to calculate the flood level at tidal rivers than at general rivers. In this study, downstream of the Imjin River where is affected by tide of the West Sea selected as a study site. From the numerical modelling, it was shown that the unsteady simulation gave considerable mitigation of the water level from the starting point to 15 km upstream compared to the steady simulation. Either making a detention pond or optional dredging was not effective to mitigate the flood level at Gugok - Majung region where is located in the downstream of the Imjin River. Therefore, a more sophisticated approach is required to evaluate the design flood level estimation before constructive measures adopted in general rivers when establishing the flood control plan in a tidal river.

**Key Words :** tidal river, Manning's roughness coefficient, unsteady simulation, design flood level, downstream of Imjin river

### 1. 서론

임진강은 Fig. 1에서 보듯 북한 강원도 문천군에 위치한 마식령에서 발원하여 남쪽으로 유하하면서 황해도를 거쳐 경기도로 유입되어 한탄강과 합류한 후 다시 파주 서측에서 한강과 합류하여 강화만을 통해 서해로 유입된다. 임진강은 국가하천으로서 유역면적은 8,117.5 km<sup>2</sup>이고 총 유로연장은 254.6 km이다. 그 중 군사분계선(DMZ)을 기준으로 볼 때, 남한지역의 유역면적은 3,008.7 km<sup>2</sup>로 전체유역의 약 1/3(37.1%)에 불과하며, 나머지 2/3(62.9%)는 북한지역에 위치하고 있다. 때문에 하류에 위치한 우리나라 입장에서는 임진강의 안전한 관리에 어려움이 많을 수 밖에 없다. 더욱이 96, 98, 99년에는 임진강 하류 문산 지역에 연달아 대규모

홍수피해가 발생하였고, 이에 대한 구조적 대응책으로 본류에 군남댐을, 지류 한탄강에 홍수 조절댐을 건설한 바 있다. 그럼에도 불구하고 임진강하천기본계획보고서<sup>1)</sup>에 따르면 임진강 하류, 특히 바닷물의 영향을 받는 감조구간(Fig. 1의 확대된 부분)은 여전히 계획홍수위가 제방 여유고를 상회하여 추가적인 치수사업이 필요하다고 적시하고 있다. 이 보고서에서는 계획홍수위 저감 방안으로 대규모 하상준설사업(임진강 거곡/마정지구 하상정비사업)을 계획한 바 있다(Table 1 참조). 해당 사업구간이 4대강 사업에 비해 길지 않아 준설량도 그것에 비할 수는 없지만, 단위 길이당 준설량은 4대강 못지 않게 많다<sup>2)</sup>. 그러나 임진강 감조구간에서 하상은 유의할만한 홍수에 의해 하상이 세굴되고, 홍수가 없는 기간 동안 조석에 의해 퇴적되는 동적 평형

\* Corresponding Author : Kyong Oh Baek, Tel : +82-31-670-5141, E-mail : pko@hknu.ac.kr  
Department of Civil, Safety, and Environmental Engineering, Hankyong National University, 327 Joongang-ro, Anseong-si 17577, Korea

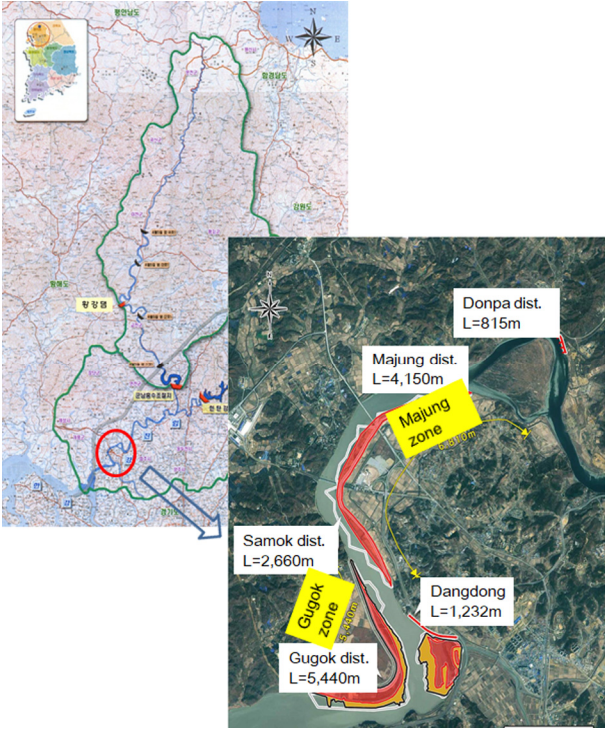


Fig. 1. Imjin river basin.

Table 1. Plan for dredging at imjin river downstream

	Length (km) (A)	Amount (m <sup>3</sup> ) (B)	(B/A) (m <sup>3</sup> )
Gugok	5.44	7,781,371	1,430,399
Majung	4.15	4,570,000	671,072
Samok	2.66		
sum	12.25	12,351,371	1,008,275

상태임이 이미 보고된 바 있다<sup>3)</sup>. 즉 당장의 통수단면적 확보를 위해 하상을 준설하더라도 일정시간이 지나면 조석의 영향으로 되메워지게 될 개연성이 높다는 것이다. 또한 감조구간은 해수와 담수가 섞여 복잡한 흐름 양상을 보이므로 일반하천에 비해 홍수위 계산에 주의 를 기울일 필요성이 있다.

본 연구에서는 임진강하류 감조구간에서 홍수위 계산에 불확실성을 초래할 수 있는 다양한 요인을 검토 하였다. 그리고 이 구간에서 보다 합리적으로 계획홍수위를 계산하는 방안과 홍수위 저감에 필요한 조치들이 무엇인지 파악해 보았다.

## 2. 홍수위계산에 영향을 주는 요인

국내에서는 계획홍수위 산정시 통상적으로 1차원 흐름모형인 HEC-RAS를 사용한다. 본 연구에서는 입력

자료인 하상단면자료 차이에 따른 홍수위, 매개변수인 조도계수의 차이에 따른 홍수위, 흐름 모의조건인 정류 혹은 부정류 모의에 따른 홍수위 변동, 이렇게 세 가지 요인에 따라 홍수위 산정에 미치는 영향을 분석해 보았다.

보다 구체적으로 하상단면 자료의 경우, 앞에서 언급했듯이 임진강 하류와 같은 감조구간에서는 홍수 전 후에 따라 단면 형상의 차이가 상당하다. 즉 하상관측 시기에 따라 입력 자료로서 하상자료가 많은 차이를 보일 수 있다는 것이다. 이로 인해 홍수위의 차이도 발생할 것이므로 본 연구에서는 10년 주기로 계획된 임진강하천기본계획보고서 작성시 사용된 하상자료를 각각 이용하여 홍수위 차이를 분석해 보았다. 모형의 매개변수인 조도계수의 경우, 감조구간에서 조위보다 특히 홍수위가 이 값에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다<sup>4),5)</sup>. 일반적으로 조도계수가 클수록 홍수위도 커지고, 작을수록 작아지는 경향이 있는데, 임진강 하류에서는 그 민감도가 어떠한지 살펴보았다. 끝으로 흐름모의 조건인 경우, 감조하천의 특성을 갖는 임진강 하류에서는 부정-부등류(unsteady-nonuniform flow) 모의를 수행해야함에도 불구하고, 실제 하천기본계획 수립 때는 정상-부등류(steady-nonuniform flow) 모의를 수행하는 것이 지금까지 관례였다. 임진강 하류부에서 정상류와 부정류 모의간 홍수위 차이를 분석해 보았다.

### 2.1 하상단면자료에 따른 홍수위 변동

하상단면 차이에 따른 홍수위 변화를 살펴보기 위해 임진강 하천기본계획보고서<sup>1)</sup> 및 환경영향평가서<sup>6)</sup>에 공히 쓰인 1차원 흐름모형인 HEC-RAS를 사용하였다. 흐름모의조건도 이 보고서들을 따라 정상-부등류 모의를 수행하였다. 모형에 입력되는 하상단면자료는 2001년 임진강기본계획<sup>7)</sup> 수립시 관측된 자료와 2011년 기본계획<sup>1)</sup> 수립시 관측된 자료들을 각각 이용하여 홍수위를 계산한 후 이들 간 차이를 비교하였다. 이때 상류 경계 조건에 부여되는 홍수량은 물론 주요 지류의 홍수량은 2011년 임진강하천기본계획보고서<sup>1)</sup>를 참고하여 그대로 할당하였다. 하류 경계조건은 임진강과 한강 합류점(구좌표 No. -21, 신좌표 No. 0)에 2011년 기본계획을 참고하여 100년 빈도 홍수위에 해당하는 EL. 6.36 m를 부여하였다. 모의 구간은 임진강 하구에서 군남댐까지 약 85 km을 삼았다. 하지만 본 연구에서 주된 관찰구간은 문산지역에 영향을 미치는 감조구간, 구좌표 No. -21 ~ 60까지 약 25 km이다. 특히 문산천 합류점(구좌표 No. 13) 인근 상하류 구간의 홍수위 변화를 중점적으로 살펴보았다. 모형 매개변수인 Manning의 조도계

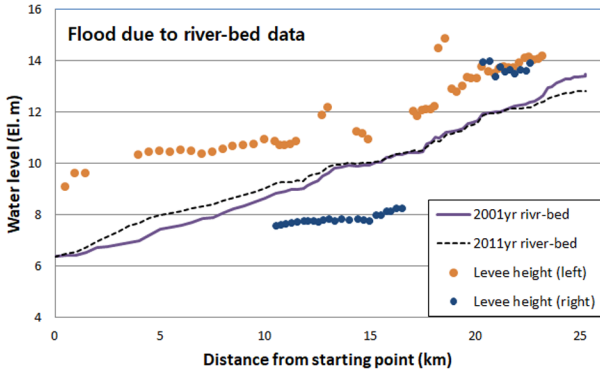


Fig. 2. Water level according to variation of river-bed data.

수는 2011년 기본계획보고서의 값을 그대로 따랐다.

그 계산결과를 Fig. 2에 도시하였다. 이 그림을 보면 01년 하상으로 계산한 홍수위가 11년 하상으로 계산한 것에 비해 기점부터 상류 17 km까지는 더 작았다가 이후에는 더 크게 산정되었다. 두 결과간 홍수위 차이는 최대 70 cm까지 발생하였다. 임진강 거곡/마정지구 하천정비공사 환경영향평가서<sup>6)</sup>에 따르면 하상준설사업으로 인해 저감되는 홍수위의 최대치가 84 cm인데, 하상입력자료 차이로 인한 홍수위 편차가 70 cm라면 상당한 수준이라고 말할 수 있다. 특히 그림에서 보듯이 기점에서 가장 민감한 지역인 문산천 합류점(No. 13, 기점에서 약 14 km) 직상류까지는 01년 하상 기반 홍수위가 11년 기반 홍수위에 비해 지속적으로 작게 계산되었다. 01년 하상자료를 이용한다면 거곡/마정지구의 대규모 준설 사업이 불필요하거나 상당 수준 축소해도 무방해 보인다.

이처럼 임진강과 같이 하상변동이 심한 감조하천에서는 입력자료로 활용되는 하상에 따라 홍수위가 많은 차이를 보인다고 보고된 바 있다. 한강하류부 하상변동조사 연구보고서<sup>3)</sup>가 그 대표적 사례라 할 수 있다. 한강하구의 경우 년도 및 하상 측정시기에 따라 단면 형상이 크게 차이가 났고, 이를 입력자료로 홍수위를 각각 모의한 결과 또한 상당한 차이를 보였다. 따라서 임진강 하구 홍수위 계산에 있어서 하상자료의 불확실성을 늘 염두에 두어야 할 것이다.

## 2.2 조도 및 흐름조건에 따른 홍수위 변동

이번에는 모형 매개변수인 Manning의 조도계수 차이에 의한 홍수위 차이를 분석하였다. 임진강기본계획보고서<sup>1)</sup>에 의하면 구측점 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 초평

도에 수목이 많이 있어 이를 감안하기 위한 조치라고 기본계획보고서는 기술하고 있다. 또한 나머지 상류경계조건까지의 조도계수도 기본계획보고서를 따라 할당하였다. 하상은 2011년 관측자료를 이용하였고, 흐름모의조건은 정상-부등류를 먼저 수행하였다.

그 다음에 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. 구간 No. 49 ~ No. 60의 조도계수는 변화없이 0.04, 나머지 구간도 기본계획보고서 그대로 할당하였다. 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 조도계수에 따라 홍수위는 매우 민감하게 반응함을 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. Fig. 2와 Fig. 3을 비교해 보면 입력 하상자료보다, 매개변수인 조도계수에 홍수위가 상대적으로 더 민감하게 반응함을 확인할 수 있다. 이처럼 홍수위 계산에 있어서 하상자료의 불확실성 뿐만 아니라, 그 보다 더 민감한 매개변수의 결정에 있어서 신중한 접근이 필요해 보인다.

부정류 모의에서도 조도계수에 따라 홍수위가 민감하게 반응할 것이므로 이에 대한 분석을 수행하였다. 먼저 정상-부등류 경우와 동일하게 조도계수를 부여하여 홍수위를 계산하고 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 조도계수에 따라 부정류로 계산된 홍수위는 정상-부등류의 경우에 비해 더욱 민감하게 반응하고 있음을 확인할 수 있다. 조도계수가 증가하는 경우, 기점수위를 얼마 지나지 않는 상류측에서 급격한 수위상승을 보였다. 반면 조도계수가 감소하는

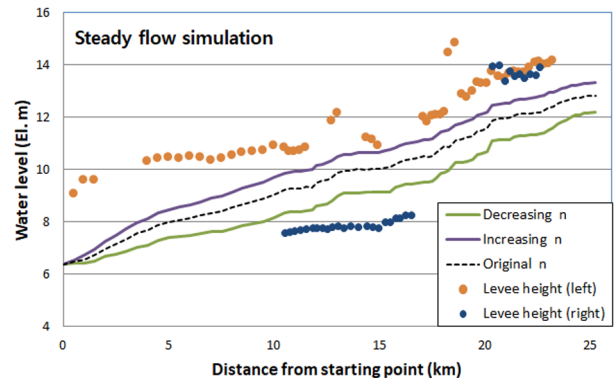


Fig. 3. Water level according to variation of roughness coefficient in steady flow simulation.

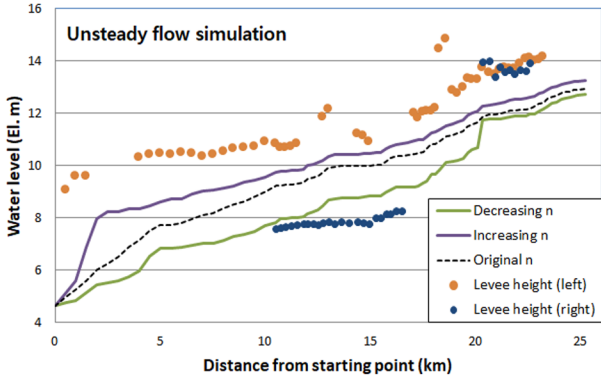


Fig. 4. Water level according to variation of roughness coefficient in unsteady flow simulation.

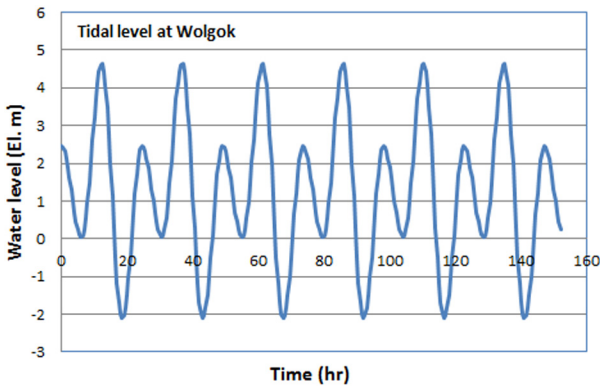


Fig. 5. Downstream boundary condition when modelling unsteady flow.

경우에는 저류지 역할을 하는 장단반도의 제방고(100년 빈도 홍수시 월류가 가능하도록 제방고를 낮추어 놓음)에 근접할 만큼 홍수위가 크게 저감되었다. 특이한 점은 No. 48까지 조도계수를 낮춘 경우, 기점에서 상류 22 km지점부터 급격한 수위상승이 보였다. 이것은 구간면 번호 No. 48부터 초평도를 감안하여 조도계수를 0.04로 큰 값으로 할당되었는데, 이 값이 그전 단면의 두 배에 달해 수위 급상승에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 부정류 모의시 상류단 조건은 정상-부등류 모의와 동일하게 처리하고, 오직 하류단 기점 수위만 한강하천기본계획보고서<sup>8)</sup>를 참고하여 Fig. 5와 같은 조위를 할당하였다.

### 3. 홍수위 저감 대안

본 연구에서는 임진강 하류 구간에서 홍수위 저감에 필요한 조치들이 무엇인지 파악해 보았다. 우선 해당 구간의 대규모 준설 대신 선택적 준설이 효과가 있는지 분석해 보았다. 그리고 강변저류지를 추가했을 경

우의 저감효과도 살펴보았다. 끝으로 이러한 결과를 종합하여 합리적으로 계획홍수위를 계산하는 방안을 제안하였다.

#### 3.1 대규모 준설을 대신할 홍수위 저감 대책

거곡/마정지구에 하천기본계획서상의 대규모 준설 대신 선별적 준설을 한다면 홍수위의 저감에 어떤 영향을 주는가를 살펴보았다. 먼저 지금의 계획처럼 거곡과 마정지구를 모두 준설하는 경우, 그리고 거곡지구만 준설하는 경우, 끝으로 마정지구만 준설하는 경우를 가정하여 홍수위를 계산하였다. 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 여기서 흐름은 정상-부등류로 모의하였으며, 조도계수는 하천기본계획보고서를 그대로 따랐다. 이 그림에서 보듯이 거곡지구만 준설하는 경우, 그 지구내에서는 거곡+마정 모두 준설했을 때의 홍수위와 큰 차이가 없었다. 반면 마정지구만 준설했을 때에는 거곡+마정 모두 준설했을 경우에 비해 홍수위 저감효과가 덜하였다. 마정지구에 비해 거곡지구 준설이 홍수위에 더 민감함을 알 수 있었다. 거곡지구만 준설했을 경우에는 최대 약 45 cm의 홍수위 저감효과가 있었으며, 마정지구만 준설했을 경우에는 최대 33 cm의 홍수위 저감효과가 있었다. 그러나 결과적으로 지역을 선별하여 준설하더라도 어느 지역이 홍수위에 민감한지는 파악할 수 있었으나, 홍수위+여유고가 제방고를 상회하는 경우가 다수 발생하므로 적절한 대안이라고 판단하기 어려웠다.

두 번째 대안으로 장단반도(우안) 맞은편 제방고를 낮춰 인근의 논을 강변저류지로 추가하는 방안을 고려해 보았다. 이를 위해 약 2 km 구간(구좌표 No. -5 ~ -1)의 좌안 제방고를 홍수위보다 낮은 El. 7 m로 낮춘 후 동일한 방법으로 홍수위를 계산하였다. 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 추가된 강변

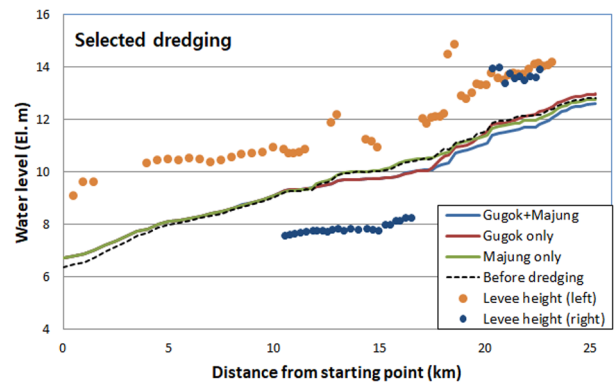


Fig. 6. Water level according to selected dredging region.



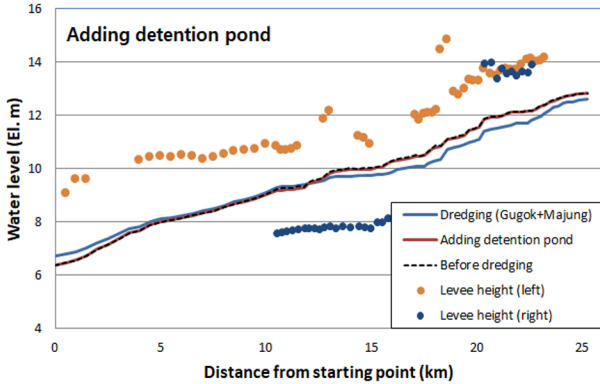


Fig. 7. Water level according to adding detention pond.

저류지가 홍수위저감에 거의 효과가 없음을 알 수 있다. 그 이유는 먼저 강변저류지의 면적을 상대적으로 협소하게 가정했기 때문이라 사료되고, 두 번째로 조석의 영향을 더 강하게 받는 지역이라 만조시 저류지가 하류측 바닷물로 채워지므로 상류측 홍수파의 저감에는 큰 효과가 없는 것으로 사료된다.

### 3.2 합리적인 홍수위 계산방안

이상의 논의에서 선별준설이나 저류지 추가 방안도 계획홍수위 저감에 만족할만한 결과를 제공하지 못했다. 그렇다면 다시 돌아가서 입력자료와 계산방법을 합리적으로 선택하여 홍수위를 재계산하면 구조적 대책(준설 또는 저류지 추가 등) 없이도 ‘임진강 하류부는 홍수에 안전할 수 있느냐’라는 것을 확인할 필요성이 있다. 다시 말해 거곡/마정지구에 하천기본계획서상의 대규모 준설 대신 본래의 하상을 이용하고, 조도계수 값과 흐름모의 방법의 변경만으로 계획홍수위가 현재방고 여유고를 만족하는지 여부를 파악하는 것이다. Park and Back<sup>9)</sup>에 따르면 조도계수를 임진강 하류와 수리 및 하상거동 특성이 유사한 한강 하구값 (한강기

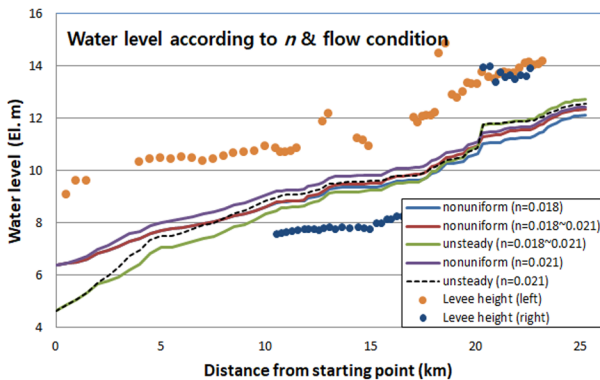


Fig. 8. Water level according to change of roughness coefficient and flow conditions.

본계획수립시 사용된 값)을 차용하고, 흐름모의는 부등류 대신 부정류 모의를 수행하면 그것이 가능함을 보였다. 구체적으로 우선 구간 No. -21 ~ No. 48의 조도계수를 일정하게 0.021로 할당하였다. 그리고 정상부등류로 모의하면 제방 여유고를 만족시키지 못하는 지점들이 다수 발생하였다. 반면 같은 조도조건에서 부정류로 모의하면 한 지점(No. 28)을 제외하고는 여유고가 부족한 지점이 발생하지 않았다(현행 계획홍수위도 한 지점, No. 25에서 여유고 부족함). 이 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 결론적으로 임진강 하류부에서 구조적 대책을 시행하지 않고 합리적으로 홍수위를 계산하는 방안은 첫째, 조도계수를 한강하구와 동일한 값으로 할당하는 것, 둘째, 하구 조위를 감안할 수 있도록 정류 대신 부정류모의를 수행하는 것이다.

## 4. 결론 및 고찰

임진강 하류부는 민물과 바닷물이 교차하는 감조구간으로 안전한 하천관리에 어려움이 많다. 특히 96, 98, 99년에는 임진강의 월류로 문산 지역에 연달아 대규모 홍수피해가 발생한 바 있다. 이에 대한 구조적 대책으로 임진강 본류에 군남댐을, 지류 한탄강에 홍수조절댐을 건설한 바 있다. 그럼에도 불구하고 여전히 계획홍수위가 제방 여유고를 만족하지 못하는 구간들이 여럿 존재하여 대규모 하상준설과 같은 구조적 치수대책들이 계획되어 있다.

하지만 감조구간은 수위 및 하상변동의 역동성이 일반하천에 비해 상당하여, 하상준설이 홍수위 저감에 효과적이지 못하다. 또한 이 역동성은 관측시기마다 상이한 하상자료를 제공하여 이를 기반으로 계산되는 계획홍수위에도 많은 불확실성을 내포하게 만든다. 뿐만 아니라 계획홍수위 계산에 핵심 요소인 매개변수 값의 추정에도 정확도를 떨어뜨리는 요인으로 작용한다.

본 연구에서는 계획홍수위 산정시 하상자료, 매개변수의 선택에 유의해야함을 보였고, 특히 조석의 영향을 고려할 수 있는 부정류 모의가 필요함을 강조하였다. 구조적 대책의 경우, 선별적 하상준설과 강변저류지의 추가 건설도 홍수위 저감에 큰 효과가 없음을 확인하였다. 따라서 임진강 하류부와 같은 감조구간에서 치수계획을 수립할 때는 일반하천에서 통용되는 구조적인 대책을 이식하기 이전에 계획홍수위 산정에서부터 보다 정교한 접근법이 요구되는 실정이다.

**감사의 글:** 이 논문은 한경대학교 자체학술연구비 지원(2017년)에 의하여 연구되었습니다.

## References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Imjin River Basic Plan Report, 2011.
- 2) K. O. Baek, "Is the Flood Level Mitigated by the Dredging of Limjin River Estuary?", *River and Life*, Vol. 3, No. 1, pp. 10-23, 2015.
- 3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Report on Riverbed Change at Han River Estuary, 2005.
- 4) R. H. Khatibi, J. R. Williams and P. R. Wormleaton, "Friction Parameters for Flow in Nearly Flat Tidal Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 10, pp. 741-749, 2000.
- 5) K. O. Baek and D. H. Lim "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, 2011.
- 6) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Report on Environmental Effects due to Dredging at Downstream of Limjin River, 2014.
- 7) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Imjin River Basic Plan Report, 2001.
- 8) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Han River Basic Plan Report, 2002.
- 9) C. G. Park and K. O. Baek, "Reconsideration of Evaluating Design Flood Level at Imjin River estuary", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 9, pp. 617-625, 2017.