

# HEC-6 모형을 이용한 임진강 하상변동 예측에 관한 연구

## A Study on Prediction of Bed Changes in the Imjin River Using the HEC-6 Model

이남주\*, 황승용\*\*, 이삼희\*\*\*

Nam Joo Lee, Seung-Yong Hwang, Samhee Lee

### 요 지

이 연구는 하상변동 수치모형을 적용하여 임진강의 장기간 하상변동과 그에 따른 하천 수위 변화의 예측, 안정하상 검토, 하상변동이 계획홍수위에 미치는 영향, 그리고 하상준설이 수위 및 하상변동에 미치는 영향의 검토를 통해 해당 하천에서 하상변동 특성의 파악에 필요한 자료 및 중·장기 수방대책 수립을 위한 기본 자료를 제공할 목적으로 수행하였다.

임진강 하상변동의 예측에 적절한 일차원 정상 하상변동모형으로 HEC-6 모형을 선정하였다. 모형적용을 위한 현황분석으로 하상토 특성 자료를 수집·분석하였으며, 지형자료에 대한 분석도 수행하였다. 그리고 모형의 적용영역 내에 위치한 각 수위표 지점의 수리·수문자료를 수집하여 분석하였다. HEC-6 모형의 보정을 고정상 보정과 이동상 보정으로 구분하여 수행하였다. 고정상 보정에서는 설정한 조건에 적합한 Manning 계수의 결정이 곤란하여 하천의 지형자료와 하상토 자료 등을 고려하여 구간별로 적정한 Manning 계수 값을 선정하였다. 이동상 보정을 통해 HEC-6 모형에서 사용하는 유사량 산정공식 중 하류경계에서 상류로 약 8 km 구간에 대한 하상상승 현상을 가장 잘 보여주는 유사량 공식인 Madden(1963)이 수정한 Laursen(1958) 공식을 선택하였다.

하천망 유사이동 수치모형인 HEC-6 모형을 사용하여 20년간의 장기하상변동을 수치모의하였다. 임진강의 최심하상고 변동량 예측결과 상류경계로부터 약 52 km까지는 하상저하가 지배적이며, 중·하류는 하상상승이 지배적인 것으로 나타났다. 연구 대상구간에서 대체로 퇴적에 의한 하상상승이 예상되었다.

**핵심용어:** 임진강, HEC-6, 하상변동, 보정, 유사량공식

### 1. 서론

최근 홍수가 연례적으로 발생하는 임진강 유역은 수방대책 수립 및 수자원의 집중적인 관리가 무엇보다 절실히 요구되는 곳이다. 특히 홍수 조절 및 방재를 위한 중·장기 대책으로 하천제방의 보수, 제방고 조정, 준설을 통한 하도정비 등이 필요한 상황이다. 이와 같은 수방대책 수립을 위해서는 하상변동 및 이에 따른 수리학적 제반 여건의 변화, 특히 수위 변동 등을 정확히 파악할 필요가 있으며, 준설이 필요한 지점 및 준설량에 대한 검토가 절실히 요망되는 상황이다. 이 연구의 목적은 적절한 하상변동 수치모형을 적용하여 임진강과 문산천에 대해 장기간의 하상변동과 그에 따른 하천수위의 변화 예측, 안정하상 검토, 하상변동이 계획홍수위에 미치는 영향 및 하상준설이 수위 및 하상변동에 미치는 영향 검토를 통해 해당 하천의 하상변동 특성의 파악에 필요한 자료 및 하천의 중·장기 수방대책 수립을 위한 기본 자료를 제공하는 것이다.

\* 정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 부교수 · E-mail : njlee@ks.ac.kr  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : syhwang@kict.re.kr  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : samhee.lee@kict.re.kr

## 2. HEC-6 모형

하천과 저수지에서의 하상변동 계산을 위한 일차원 수치모형인 HEC-6 모형(HEC, 1993)은 미국 공병단의 수문연구센터(U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center)의 W. A. Thomas 등에 의해 1973년에 개발되어 현재 Ver. 4.1까지 개선된 모형이다. 배수위 계산은 주로 미 공병단에서 개발한 하천의 배수곡선 계산방법 II(USACE, 1959)를 사용한다. HEC-6 모형의 지배방정식은 일차원 연속방정식과 에너지 방정식을 사용한다.

$$\frac{dQ}{dx} = q_l \quad (1)$$

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2)$$

여기에서,  $x$ 는 하천을 따른 거리,  $Q$ 는 단면의 유량,  $q_l$ 은 단위폭당 측방 유입유량,  $g$ 는 중력가속도,  $h_e$ 는 에너지 손실,  $V_1$ ,  $V_2$ 는 각각 구간 하류와 상류의 단면평균유속,  $WS_1$ ,  $WS_2$ 는 각각 구간 하류와 상류의 수위,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 는 각각 구간 하류와 상류의 에너지 보정계수이다. 수면형상은 표준축차법으로 구하며, 수리량 자료는 각 시간 단계에서 횡단면별로 계산된다. 하상변화를 모의하기 위한 기본방정식은 유사재료의 연속방정식(Exner 방정식)이다.

$$\frac{\partial G}{\partial x} + B_o \cdot \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

여기에서,  $B_o$ 는 이동상 하폭,  $t$ 는 시간,  $G$ 는 시간간격  $\Delta t$  동안의 평균 유사량,  $Y_s$ 는 검사체적 내의 유사의 깊이이다.

## 3. 대상구간의 현황

HEC-6 모형을 적용할 영역은 경기도 연천군 왕등면 군사분계선에서 한강 합류점까지 74.0 km의 임진강 국가하천 구간이다. 적용구간의 주요 지천은 한탄강, 사미천, 문산천이 있으며, 수위관측소는 군남수위표, 적성수위표, 통일대교수위표가 있다. 상류경계와 지류의 유입유량의 결정은 적성수위표의 자료를 활용하였다. 한국수자원공사(1997)는 연천댐 지점에서 다음과 같은 일유황곡선식을 추정하였다.

$$\log_e Q_{YC} = 4.553 - 0.00998 \times (\text{day}) \quad (4)$$

한국건설기술연구원에서 2001년도에 수행한 임진강 현장조사에서 암반노출 구간으로 추정되는 구간은 No. 92 ~ 100, No. 109 ~ 113, 그리고 No. 131 ~ 44 등이다. 이 조사결과는 고무보트로 이동하면서 관측한 것이며 정확한 결과는 구체적인 지질조사를 수행해야 할 것으로 판단된다. 암반 위에 자갈 사주가 형성된 곳도 빈번하게 발견되는 등 난침식 구간이라고는 하지만 측량 횡단면 전체를 암반으로 보는 것은 곤란할 수도 있다. 임진강 본류에서 조사된 하상토 입도분포곡선(서울지방국토관리청, 2001)을 이용하여 HEC-6 모형의 하상토 입도분포로 변환하여 사용하였다.

## 4. HEC-6 모형의 보정

Chow(1959)는 바위의 노출과 식생이 없고 규칙적인 단면의 대하천에 대해 최소한 0.025를, 단면이 불규칙한 경우 0.035값을 추천하고 있다. HEC-6 모형의 보정지침에 따르면, 보정을 위한 유량은 최소유량, 최대유량, 만제유량을 사용하며, 적성수위표의 관측치를 기준으로 하여 HEC-6 모형의 보정에 필요한 유량을 결정하였다. 만제유량은 최대유량과 최소유량의 기하평균에 가까운 값을 사용할 수도 있다(우효섭과 유권규, 1991). 이 연구에서는 만제유량을 최대유량과 최소유량의 기하평균에 가까운 유량으로 간주하여 1997. 5. 30 일 관측한 값을 사용하였다. 고정상 보정을 위한 유량과 이에 따른 적성수위표 지점의 수위 및 유량 측정치, 그리고 이를 기준으로 유역면적비에 의해 산정한 상류경계 및 지류의 유입유량을 정리하면 표 1과 같다.

Manning  $n$  값의 변화에 따른 적성수위표의 수위를 고정상 모형으로 예측하였다. 보정은 2001년 지형자료를 사용하여 수행하였으며, 표 2의 조건을 적용하여 적성수위표 지점의 수위를 계산한 결과, 최대유량의 경우를 제외하고는 실측치에 근접하는 결과를 찾을 수 없었다. 이것은 감소하천인 임진강의 흐름을 HEC-6 모형에서는 표준측차법을 사용하여 정상류로 모의하기 때문 것으로 생각되며, 이 외에도 지형자료를 비롯한 여러 자료의 불확실성에서 기인된 것으로 판단된다. 따라서 수치모의에 사용할  $n$  값을 하천의 지형자료와 하상도 자료 등을 고려하여 0.027 ~ 0.045의 범위에서 단면별로 결정하였다.

임진강 하구는 조석의 영향을 받는 감소하천 구간이지만, HEC-6 모형은 조석의 영향을 고려하지 못한다. 조석현상이 모형수행에 미치는 영향을 줄이기 위해 적용구간 하류단에 21개의 추가단면을 사용하였으며, 계획홍수량의 경우를 제외한 모형적용구간 하류경계에서의 수위는 한국해양연구원과 건설기술연구원(2001)의 연구결과를 감안하여 EL 5.5 m를 사용하였다. HEC-6 모형의 안정 계산간격에 대한 우효섭과 유권규(1991)의 분석결과는 남한강 수계의 경우 54.3 m<sup>3</sup>/s-50일, 217.8 m<sup>3</sup>/s-20일, 1,046.4 m<sup>3</sup>/s-7일, 그리고 15,411.0 m<sup>3</sup>/s-2일을 제시한 바 있다.

HEC-6 모형에서 유사량을 계산하는 방법은 14가지가 있다. 표 2의 유량구간별 유하기간을 사용하여 HEC-6 모형을 수행한 결과 Toffaleti(1966) 공식, Toffaleti(1966) 공식과 Schokiltsch(1930) 공식을 조합한 공식, Toffaleti(1966) 공식과 Mayer-Peter and Muller(1948) 공식을 조합한 공식의 경우는 수렴되지 않았다. 임진강에서 하상변동이 가장 많이 발생한 영역은 하류경계에서 약 8 km까지의 구간으로 하상상승 현상이 지배적으로 나타나고 있으며, 13 m 이상 퇴적이 발생한 단면도 있다. 이와 같은 현상을 가장 잘 보여주는 유사량 공식은 Madden(1963)이 수정한 Laursen(1958) 공식이었다.

표 1. 고정상 보정용 유량

구분	최소유량	만계유량	최대유량	
일자	96/12/19	97/5/30	97/5/14	
적성수위표 수위(EL. m)	7.863	8.603	9.453	
적성수위표 유량(m <sup>3</sup> /s)	23.62	183.80	1003.62	
산정 유량 (m <sup>3</sup> /s)	상류경계	14.90	115.95	633.12
	한탄강	8.72	67.85	370.5
	사미천	1.63	12.66	69.13
	문산천	0.66	5.15	28.13
하류경계 수위(EL. m)	2.0 ~ 4.0	2.0 ~ 4.0	4.0 ~ 13.0	

표 2. 유량구간별 유하기간

대표유량 (m <sup>3</sup> /s)	하류경계 수위	지속일수 (day)
3900	EL 5.5 m	1
3500	EL 5.5 m	16
2500	EL 5.5 m	25
1500	EL 5.5 m	43
500	EL 5.5 m	280

## 5. HEC-6 모형의 적용

HEC-6 모형을 사용하여 20년간의 하상변동을 예측하였다. 그림 1과 2는 각각 임진강의 최심하상고 및 변동량 예측결과를 5년 간격으로 도시한 것이다. 임진강에서 20년 후에 침식이 가장 많이 발생한 단면은 296번 단면으로 1.59 m의 하상저하가 예측되었다. 이 단면은 상류경계에 위치한 지점으로 상류의 유사유입량과 하상도 입력자료의 불확실성으로 인해 침식이 지속적으로 발생한 단면이다. 퇴적이 가장 많이 발생한 단면은 150번, 136번, 148번, 134번 단면으로 각각 3.37 m, 2.92 m, 2.83 m, 2.64 m의 하상상승이 예측되었다. 임진강의 전반적인 하상변동 경향은 상류경계로부터 약 62.5 km까지는 하상저하가 지배적이며, 중·하류는 하상상승이 지배적인 것으로 나타났다. 임진강은 전체적으로 퇴적에 의한 하상상승현상이 예상된다.

하도정비가 하상변동에 미치는 영향을 검토하고자 계획홍수위 저하를 위해 현대엔지니어링에서 계획한 확폭단면을 사용하여 20년간의 하상변동을 수치모의하였다. 확폭단면은 3번 단면부터 72번 단면까지의 구간에서 63개의 단면을 확폭·준설하는 것으로 계획되어 있다.

임진강 개수전과 개수후의 경우에 대해 50년간의 장기 하상변동을 수치모의하였고, 이 결과를 사용하여 하천 지형의 동적평형상태를 분석하였다. 동적평형상태는 임진강과 문산천의 하상변동 총부피를 사용하여 파악하였다. 하상변동 총부피는 다음과 같은 식을 사용하여 계산한다.

$$V_b = \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{\Delta z_i B_i + \Delta z_{i+1} B_{i+1}}{2} L_{i+1} \right| \quad (5)$$

여기서  $V_b$ 는 연도별 하상변동량을 하상변동 총부피,  $N$ 은 단면의 개수,  $\Delta z_i$ 는  $i$ 번째 단면의 연도별 최심하상고 변동량,  $B_i$ 는  $i$ 번째 단면의 하상변동 가능폭,  $L_{i+1}$ 는  $i$ 번째 단면과  $i+1$ 번째 단면의 거리이다.

그림 3은 개수전 및 개수후의 임진강 본류의 연도별 하상변동 총부피를 도시한 것이다. 그림에서 임진강의 경우 약 30년이 지나면 동적평형상태에 도달하는 것으로 판단할 수 있으며, 개수후가 개수전보다 하상변동량의 변화가 큰 것으로 나타났다.

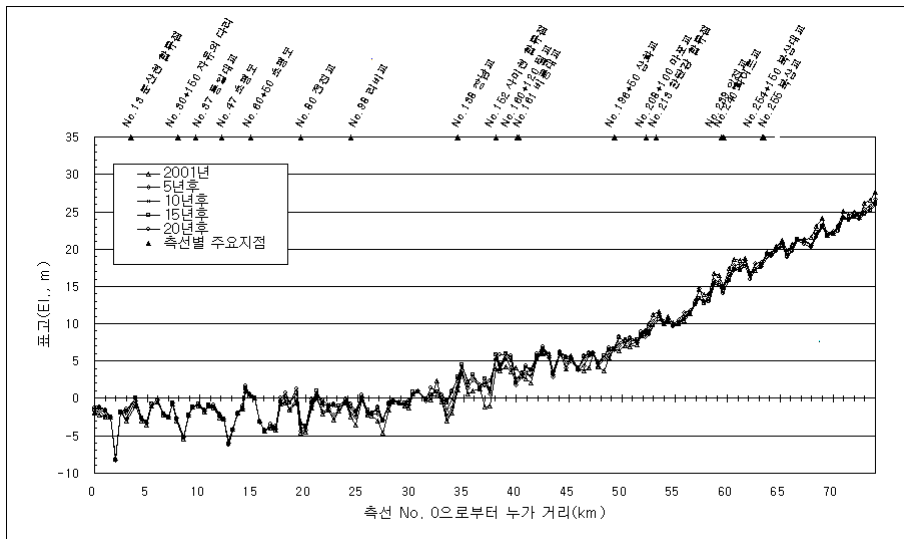


그림 1. 임진강 최심하상고 예측결과

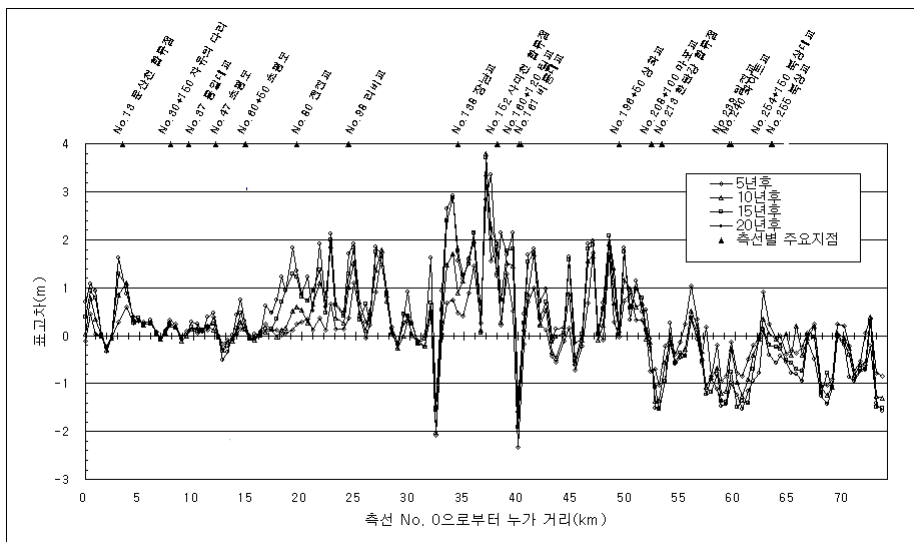


그림 2. 임진강 최심하상고 변동량 예측결과

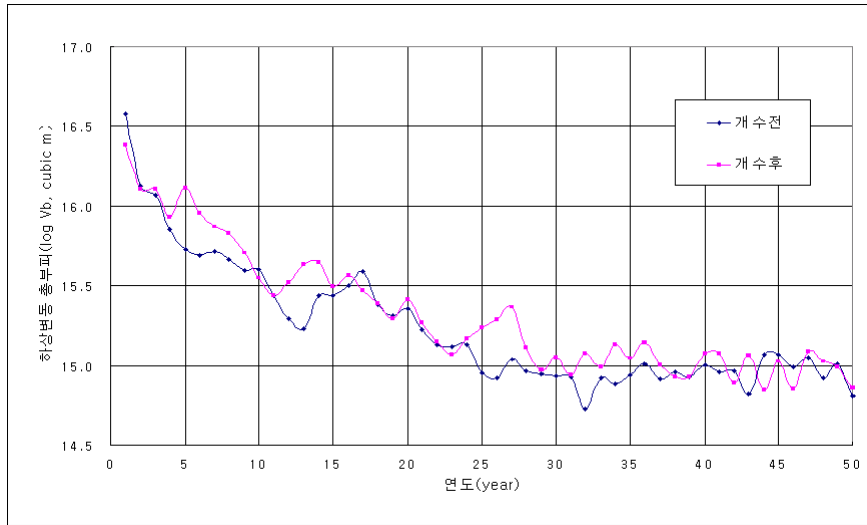


그림 3. 임진강의 연도별 하상변동 총부피

## 6. 결론

이 연구는 적절한 하상변동 수치모형을 사용하여 임진강의 장기 하상변동과 그에 따른 하천수위의 변화 예측, 안정하상 검토, 하상변동이 계획홍수위에 미치는 영향 및 하상준설이 수위 및 하상변동에 미치는 영향 검토를 통해 해당 하천의 하상변동 특성의 파악에 필요한 자료 및 하천의 중단기 수방대책 수립을 위한 기본 자료를 제공할 목적으로 수행하였다.

일차원 하상변동모형인 HEC-6 모형의 보정을 고정상 보정과 이동상 보정으로 구분하여 수행하였다. 고정상 보정시 설정한 조건에 적합한 Manning 계수의 결정이 곤란하여 하천의 지형자료와 하상토 자료 등을 고려하여 구간별로 적절한 Manning 계수 값을 선정하였다. 이동상 보정을 통해 HEC-6 모형에서 사용하는 유사량 산정공식 중 하류경계에서 약 8 km까지의 구간에서 하상상승 현상을 가장 잘 보여주는 유사량공식인 Madden(1963)이 수정한 Laursen(1958) 공식을 선택하였다.

하천망 유사이동 수치모형 HEC-6 모형을 사용하여 20년간의 장기하상변동을 수치모의하였다. 임진강의 최심하상고 변동량 예측결과 상류경계로부터 약 52 km까지는 하상저하가 지배적이며, 중·하류는 하상상승이 지배적인 것으로 나타났다. 이 연구의 대상구간은 전체적으로 퇴적에 의한 하상상승현상이 예상된다. 임진강 합류점에서 약 4.5 km까지의 문산천 하류부는 퇴적현상이 지배적으로 나타나고 있으며, 약 5.5 km 이상 상류부는 퇴적이 지배적이기는 하나 지점에 따라 침식도 발생할 것으로 예측되었다.

## 참 고 문 헌

1. 서울지방국토관리청 (2001), 임진강-문산천 하상변동조사보고서. 건설교통부.
2. 우효섭, 유권규 (1991), 하상변동 예측모형의 비교분석, 건기연91-WR-112, 건설기술연구원.
3. 한국해양연구원, 건설기술연구원 (2001), 한강-임진강 유역에 대한 조위영향 연구, 해양수산부.
4. 한국수자원공사 (1997), 임진강 유역조사 최종보고서. 건설교통부.
5. Chow, V. T. (1959), Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill.
6. HEC (1993), HEC-6 Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs User's Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
7. USACE (1959), Backwater Curves in Open Channels, EM1110-2-1409.