

운하건설을 위한 수리학적 검토

- 수심확보와 유사이동을 중심으로 -



한 건 연 ▶▶

경북대학교 건축토목공학부 교수
kshanj@knu.ac.kr



손 광 익 ▶▶

영남대학교 건설환경공학부 교수
kison@yu.ac.kr



김 광 섭 ▶▶

경북대학교 건축토목공학부 부교수
kings@knu.ac.kr

수량의 시간 분포 특성은 여름철에 집중되어 매우 큰 유출량의 계절변동성을 가지며 이로 인하여 이수·치수가 매우 어려운 특성을 가지고 있다. 이를 개선하기 위하여 하천에서 댐을 이용하면 하상계수(최대유량/최소유량의 비)가 낮아지는데, 운하를 건설하면 하상계수를 더욱 낮출 수 있다. 한강을 예로 보면 댐건설 전에 390이던 하상계수가 댐 건설 후에 90으로 낮아졌다. 한강에 운하를 건설한다면 이 하상계수를 50이하로 낮추는 것이 가능해진다. 낙동강의 경우 댐건설 전의 하상계수가 372였지만 댐 건설 후 260으로 낮아졌으며 운하를 건설할 경우 100이하로까지 낮추는 것이 가능할 것으로 사료된다. 운하를 건설할 경우, 다량의 물을 저류할 수 있어 수량이 증가하고, 체류시간이 증가하므로 수질에 대한 영향을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 운하건설 시 반드시 고려해야 할 여러 가지 하천 수리학적 검토사항을 전문가적 차원에서 분석하고 추후 더 심도 있게 검토해야 할 사항들을 제안하고자 한다. 특별히 본고에서는 주운을 위한 보의 건설과 하도준설에 따른 수심확보 가능성 및 제방의 여유고 등 하도의 안정성 그리고 유사 이동에 의한 제방침식 및 퇴사의 영향 등에 대한 기초적 분석을 수행하였다.

1. 서론

최근 우리나라 전국은 대운하에 대한 찬반의 열풍에 휩싸여 있다. 현재까지 한반도 대운하에서 예상하고 있는 운하란 하천이라는 물길을 이용하여 전체 하천 중에서 200~300m 내외를 선박 항해를 위해 활용하고자 하는 것이다. 즉, 하천의 기본기능인 이수, 치수, 환경생태, 위락친수, 역사문화공간 등에 주운(물류)의 기능을 더해 하천의 기능을 발휘하도록 구상하고자 하는 것이다.

운하건설과 관련한 여러 장점 및 필요성에도 불구하고, 여러분야에서 해결해야 할 문제점을 내포하고 있다. 특히 수리·수문학적 측면에서 볼 때 우리나라 강

2. 일반적 검토사항 및 연구내용

주운에 필요한 절대적인 기준이 있는 것은 아니나 본 연구에서는 하천 수리학적 관점에서 간과해서는 안 되는 주요 요소를 검토하였다. 선박과 주운건설방식은 운하의 모든 제원 및 설계 시 고려사항을 결정짓는 주요 변수로 본 연구에서는 한반도대운하연구회(2007)

에서 제안한 대로 현재 존재하는 수로를 주운이 가능하도록 개수하고 갑문과 댐을 이용하여 선박 항행이 가능한 수심을 확보하는 방법을 선정하였다. 이상과 같은 가정 하에 검토되어야 할 하천의 수리학적 특성은 다음과 같다.

- 하도특성 : 수로 수심 및 횡단면, 평면적 유로 선형
- 하천의 수문특성 : 계획 홍수위 및 유출량, 유사 이동
- 갑문 및 보 특성 : 보와 갑문제원, 갑문 조작기준, 홍수 시 보의 운영기준

하도내 주운건설을 위해서는 다음과 같은 하천의 조건들이 만족되어야 한다.

- ① 연 중 상당기간동안 주운에 필요한 충분한 유량이 있어야 한다.
- ② 개수 후 현대화된 동력선이나 바지선이 운용될 수 있도록 충분한 하도단면이 확보되어야 한다.
- ③ 과도한 만곡부가 없는 평탄한 직선부로 구성되어야 한다.
- ④ 하도경사는 선박 항행이 가능한 유속을 유지할 수 있도록 충분히 평탄하여야 한다.
- ⑤ 하상이나 제방 구성재료는 안정하도를 유지할 수 있어야 한다.

특히 주운목적의 개수는 유량을 조절할 수 있는 각종 시설물에 대한 검토가 필요하며 주운개발을 위하여 댐이나 갑문을 건설할 경우 유사에 의한 수로단면의 축소 등에 대한 대책수립이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 운하건설에 대한 수리학적 검토를 위한 기초적 연구를 수행하였으며 그 내용은 다음과 같다.

- ① 주운수로 수심 및 홍수위 검토
- ② 종·횡단적 하상변화 특성분석
- ③ 유로변경(직강화) 영향분석

3. 주운수로 수심 및 홍수위 분석

주운건설을 위해 가장 기본적으로 검토되어야 할 것들 중 하나는 하천의 주운 수심 확보 방안과 이로 인해 발생할 수 있는 하천 수위 영향 분석 및 유사유입량의 확인 및 처리방안이다. 본 절에서는 낙동강을 대상으로 다양하게 제시된 수심 확보 방안에 대해 수리학적 분석 및 타당성 검토를 위해 기존의 낙동강 하천단면을 검토하여 주운 수심 확보와 유심부를 중심으로 주운에 필요한 하폭을 확보할 수 있도록 하도단면을 설계하였다. 또한 이 하도단면을 통한 각종 유량조건(계획홍수량, 평수기, 갈수기)에 대한 수면형 및 수심 등 수리학적 특성을 낙동강 본류 전체에 대하여 1차원적으로 해석하였다. 뿐만 아니라 사문진 보가 건설될 예상지점에 대한 2차원적 수치해석을 실행하였다.

(가) 하천준설로 인한 단면의 변화

주운수심 확보를 위해서 가장 중요한 변수는 주운수심 확보를 위한 하천구조물(주운보) 설치로 인한 수위변화를 최소화 하면서도 주운에 필요한 안정적인 수심을 확보하는 방안의 개발이다. 본 연구팀에서 사용한 방법은 그림 1.과 같이 기존 하상 중 최심부분을 기준으로 지점에 따라 하폭 300m와 200m, 수심 6.1m를 확보할 수 있도록 하상을 굴착하는 것으로 가정하였다. 굴착 시 하상 종단경사는 구간에 따라 1/13,000에서 1/20,000까지로 가정하였다. 이와 같은 가정은 한반도 대운하 연구회에서 출판한 「한반도 대운하는 부강한 나라를 만드는 물길이다」에서 제시한 기준을 따른 것이며, 분석을 위해 낙동강 및 영강의 최근 하천측량단면을 사용하였다. 주운 수심 확보방안 수위변화 계산 등을 위해서 미육군 공병단의 HEC-RAS 프로그램을 사용하였다. 그림 2.는 하상 준설에 대한 종단면의 변화를 보여주고 있다.

(나) 하천준설 및 보 설치 전·후 평수기, 저수기, 갈수기 시의 흐름 비교

「한반도 대운하는 부강한 나라를 만드는 물길이다」

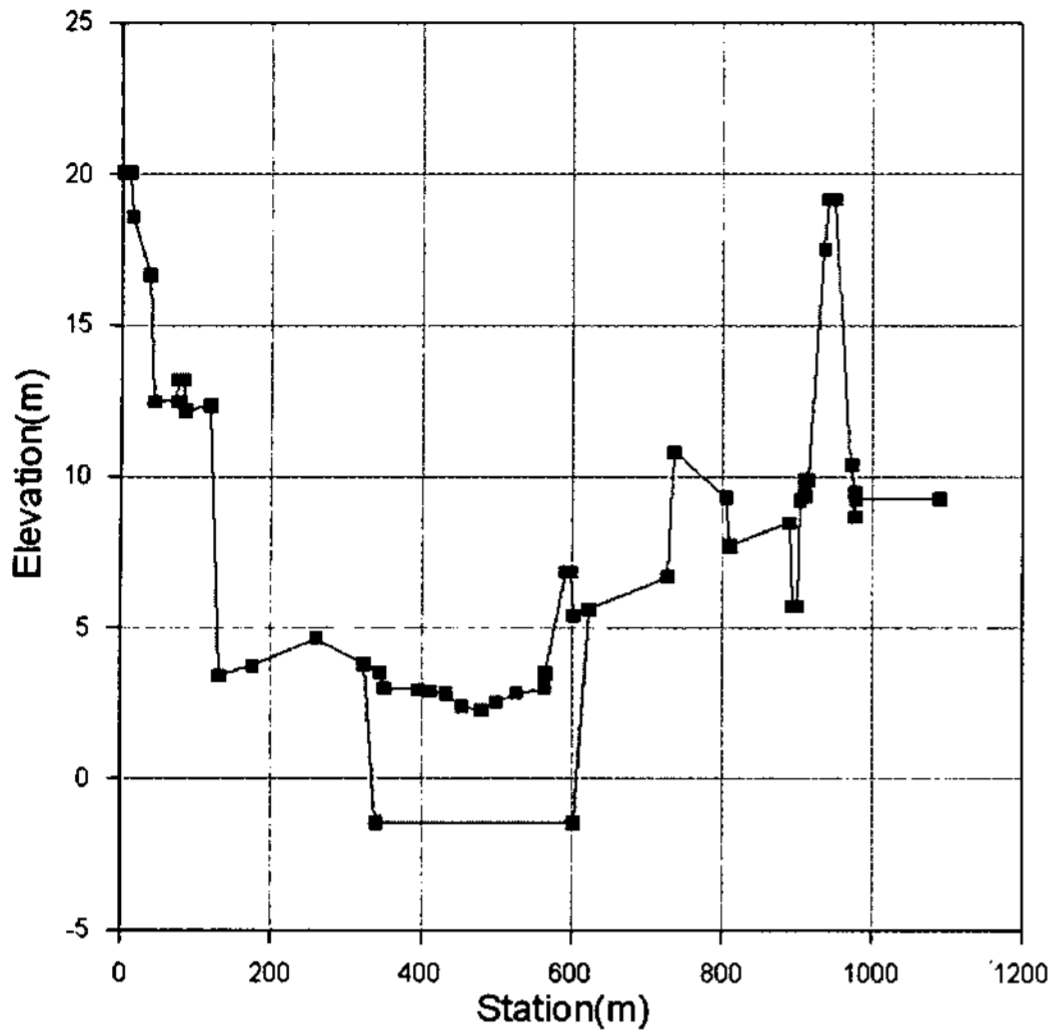


그림 1. 주운수심 확보를 위한 준설방안

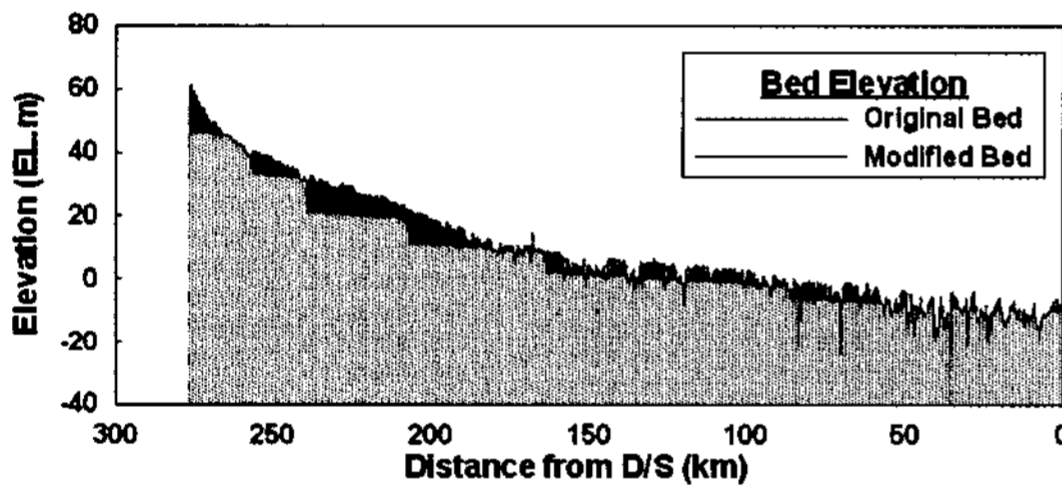


그림 2. 하상준설 후 종단면의 변화

에 제시된 위치와 동일하게 낙동강 구간에 5개의 주운보를 설치하여 보 설치 전후의 평수기, 저수기, 갈수기 시 흐름에 대해 분석하였다. 이를 위해 낙동강 대상 구간 내 평수량, 저수량, 갈수량을 조사하였으며, 이를 HEC-RAS 모형에 입력하여 주운 시설 전후의 흐름을 분석하였다.

갑문의 영향은 고려하지 않았으며, 주운확보용 보를 월류하는 흐름으로 가정하였다. 그림 3과 그림 4는 보 설치 및 하상준설 전후의 모의 결과를 보여준다.

그림에서 보여주는 바와 같이 낙동강 구간에 대해 5개의 주운보를 설치하여 선박이 운항할 수 있는 최소 수심 6.1m를 확보할 수 있고, 주운보와 갑문의 적절한 형식 및 운영방식에 의해 선박의 운항을 제어할 수 있어야 할 것이다. 또한 주운보의 수문은 개폐가 확실하

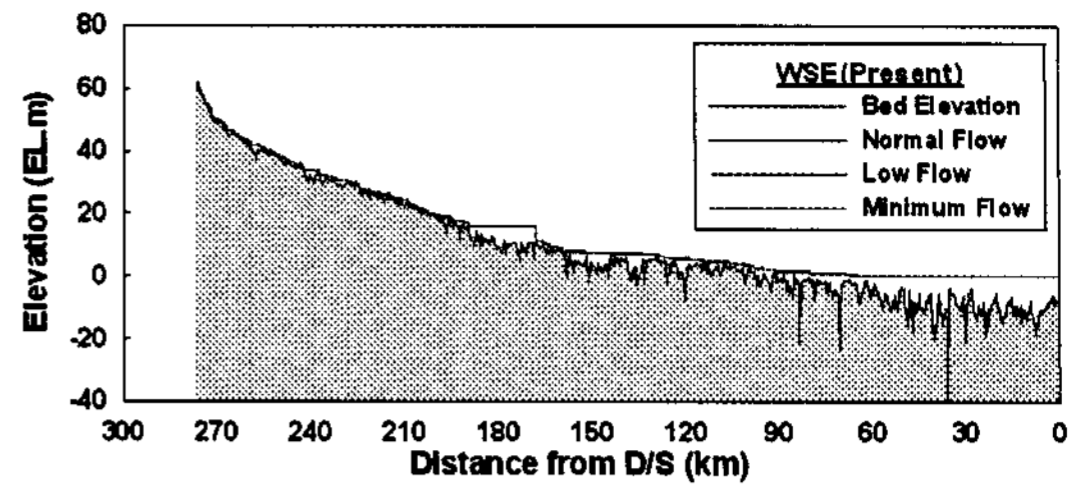


그림 3. 하천 준설 및 보설치 전 평수기, 저수기, 갈수기 시 흐름

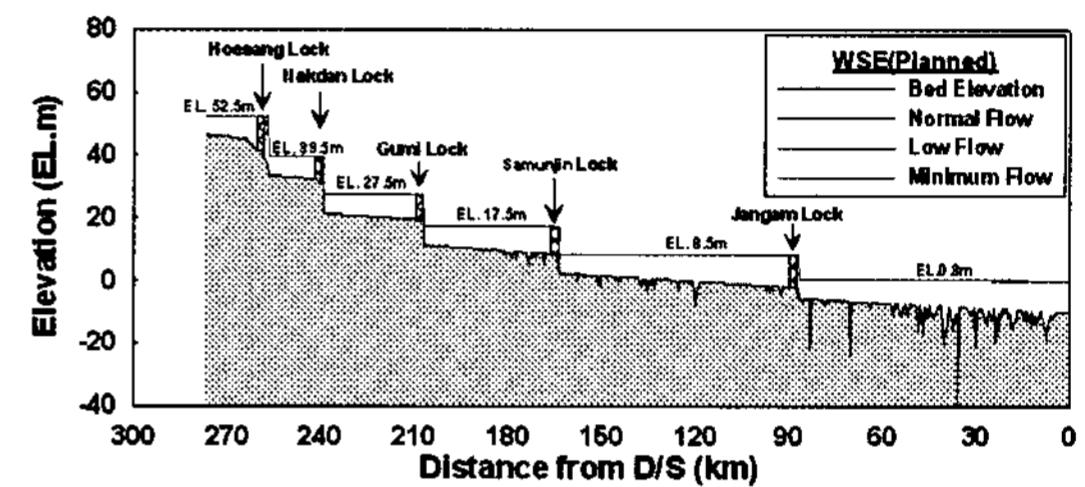


그림 4. 하천 준설 및 보설치 후 평수기, 저수기, 갈수기 시 흐름

고 완전한 수밀성과 내구성을 가지며 홍수소통에 지장을 주지 않는 구조가 되도록 해야 할 것이다.

(다) 하천준설 및 보 설치 전·후 홍수기 시의 흐름 비교

홍수위 영향 평가 역시 우리나라에서 하천정비기본계획의 수립을 위해 표준적인 모형으로 사용하고 있는 HEC-RAS 모형을 사용하여 분석하였다. 본류의 홍수량은 하천정비기본계획의 값을 그대로 사용하였고, 홍수 시 중요한 매개변수인 조도계수 역시 하천정비기본계획의 값을 사용하였다. 갑문의 영향을 고려하지 않은 경우와 갑문의 영향을 고려하여 홍수 시 수위를 조절하는 경우를 모두 모의하였다.

그림 5와 그림 6은 하천준설 및 보 설치 전후의 홍수기 흐름을 보여주고 있고 그림 7은 하천준설 및 보 설치 전후의 홍수 시 수위를 비교한 그림이다.

그림 7에서 보여주는 바와 같이 수문 조작 없이 평수기의 주운보 높이를 위어로 가정하여 모의했음에도 불구하고 낙단보 상류부 일부 구간 및 회상보 상류부 일부구간을 제외한 대부분의 구간에서 홍수위가 낮아

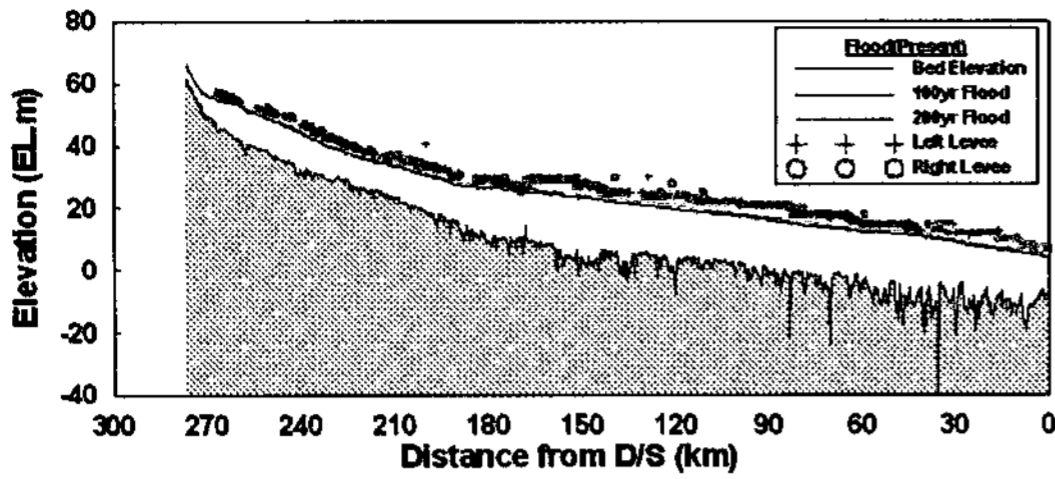


그림 5. 하천준설 및 보 설치 전 홍수기 흐름

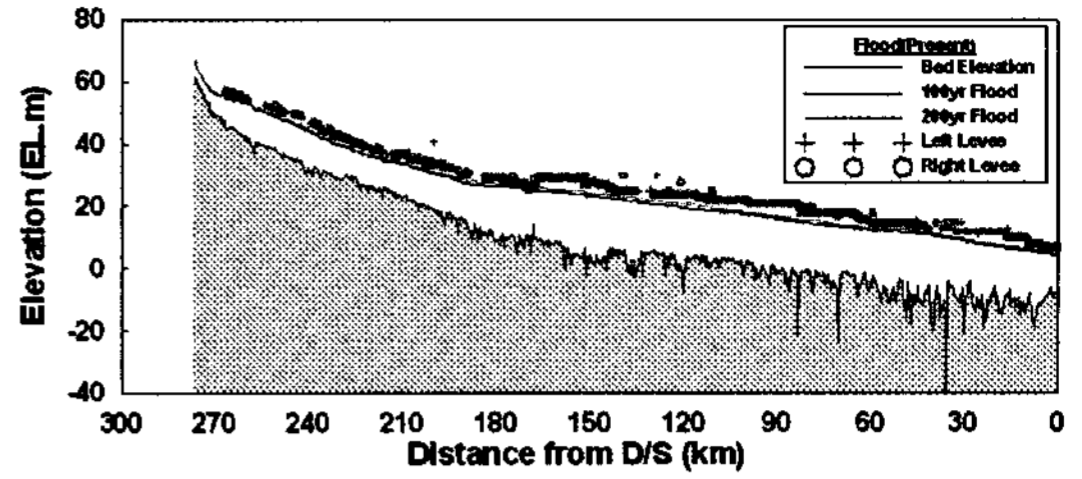


그림 6. 하천준설 및 보 설치 후 홍수기 흐름

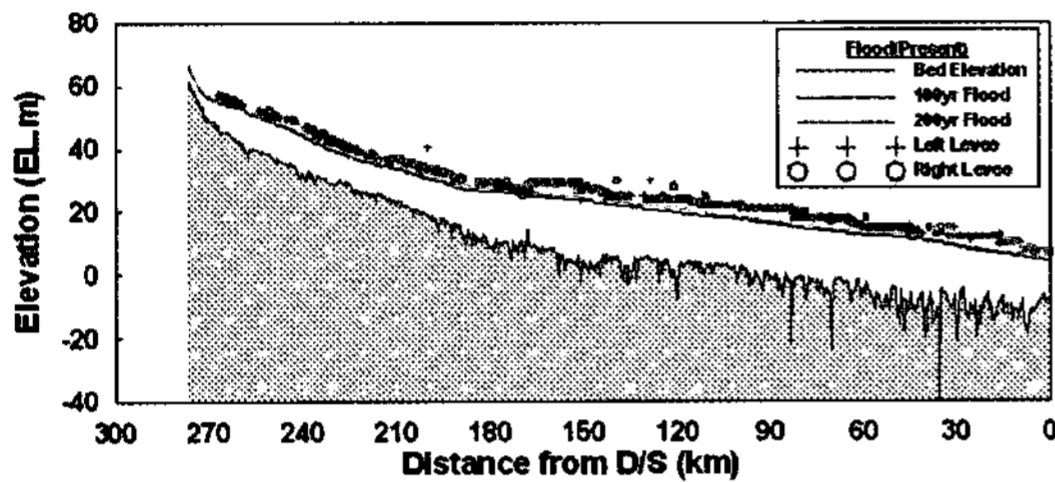


그림 7. 하천준설 및 보 설치 전후의 홍수 시 수위 비교

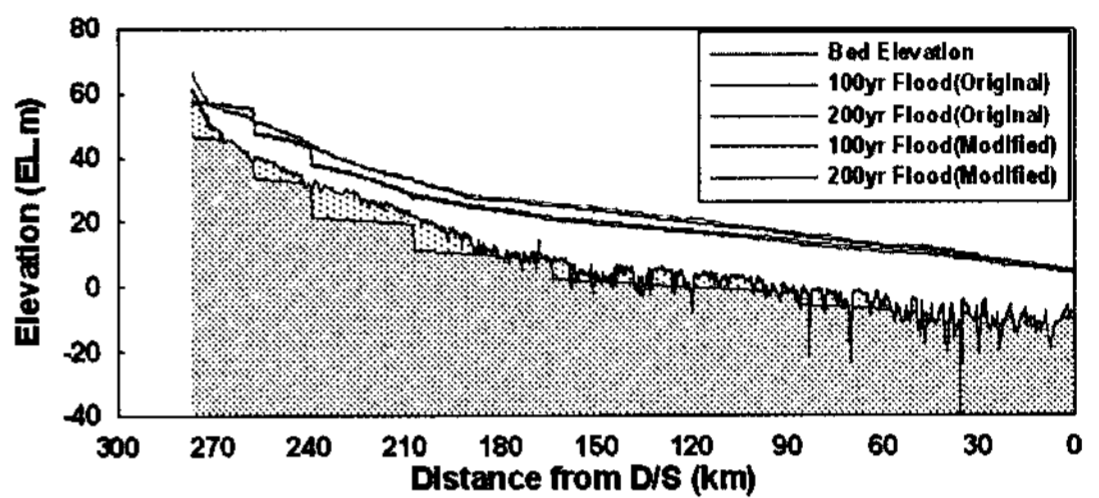


그림 8. 하천준설 및 보 설치 전후의 홍수 시 수위 비교 (수문조작 운영 시)

지는 현상을 보여주며, 낙단보 상류 일부 구간에서 홍수위는 높아졌지만 높아진 홍수위가 기존 제방고를 범람하지는 않는 것으로 보여준다. 다만 회상보 상류 일부구간에서 기존 제방고를 범람하는 양상을 보여주고 있으나 적절한 수문 운영 및 치수대책이 수립된다면 이를 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 8은 홍수기에 수문 조작을 통해 수위조절이 실시된다는 가정하의 홍수 시 수위를 비교한 그림이다. 거의 대부분의 구간에서 홍수위가 낮아진 모습을 보여주고 있고, 이는 하천 준설로 인한 하천 통수능의 증가로 인한 영향으로 인한 결과이다.

4. 종 · 횡단적 하상변화 특성분석

본 연구에서는 낙동강 본류 전체에 걸친 하상변화를 예측하고자 하였다. 또한 주운보 주변영역에서의 흐름 및 유사이동의 양상을 파악하기 위해 2차원 수치모의를 실시하였다. 그러나 이상의 하상변화는 보와 갑문의 운영기준에 따라 민감하게 변하는 특성을 지니고 있어 본 연구에서는 보와 댐의 건설에 따른 상류의

1차원적 하상변화 특성과 함께 특정지점에 대한 유량-유사량 관계로부터 홍수 후 예상되는 퇴적규모를 산정하여 준설규모를 검토하였다. 또한 배사시설이 있는 댐 상류의 일반적 하도횡단 변화양상을 검토하였으며 보의 설치가 예상되는 한 개 지점에 대해서는 2차원적 하상변동을 수치모의를 실시하였다.

4.1 종단 하상변동 예측

종단 하상변동은 갑문과 보를 통한 유사의 유출량을 지배하는 보의 형식에 따라 달라진다. 따라서 보와 갑문의 설계가 우선되어야 하나 일반적으로 갑문은 평상시 배의 갑문 통과 시 작동되며 이 때 필요한 운영수량은 최소한의 유량만을 사용하는 방식을 택하게 될 것이다. 즉, 갑문을 통한 배사는 거의 없을 것으로 판단된다. 그러나 수로 내의 토사퇴적 최소화를 위해서는 가능한 한 보를 통한 토사배출을 극대화 하는 것이 가장 경제적인 운영방법이며 이를 위해서는 보의 형태는 주 수로구간은 완전 가동보와 같은 형식이 필수적일 것이다.

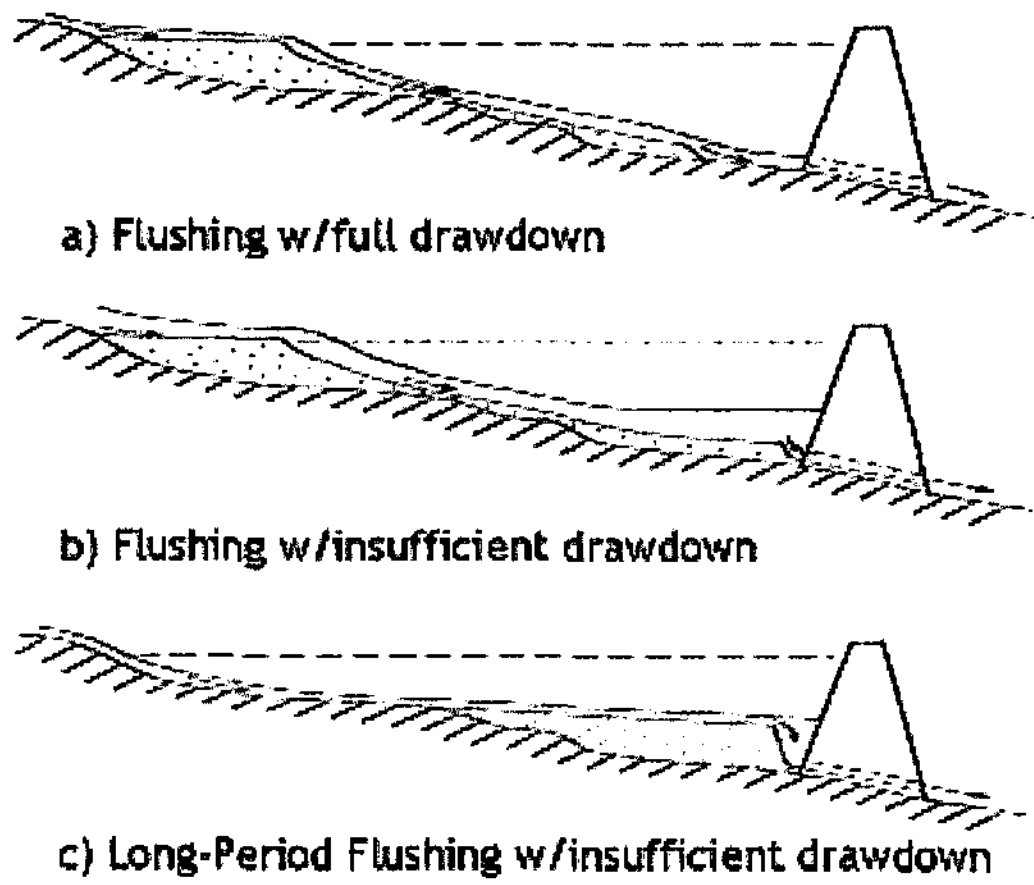


그림 9. 배사조건에 따른 종단변화

이때 보 상류의 하상종단은 배사를 위한 방류량과 보의 최고수위에 따라 달라진다. 그림 9은 방류량에 따른 하상종단의 변화를 보여준다. 그림 a)는 완전 방류의 경우 최대수위에 상응하는 하상표고 지점까지 배사가 이루어지며 그 상류는 퇴적이 되는 경우이다. 그림 b)는 방류량이 불충분하여 보의 직상류까지 퇴적이 발생하는 경우이다. 이 경우가 장기간 지속될 경우 그림 c)와 같이 보의 직상류에서의 퇴적이 최대가 된다. 우리나라에 운하가 건설된다면 우리나라의 강우 및 유출특성에 의해 여름에는 그림 a)와 같은 운영이 그리고 평수기와 갈수기에는 그림 c)와 같은 보의 운영이 이루어 질 것으로 예상된다.

4.2 주운 보 주변 영역에서의 2차원 하상변동 모의

본 연구에서는 주운보 주변영역에서의 흐름 및 유사이송의 양상을 파악하기 위해 2차원 수치모의를 실시하였다. 흐름 및 유사이송의 2차원 수치모의를 위해 SMS모형을 적용하였다. SMS모형은 2차원 유한요소 모형으로서 혼합보간기법을 적용하며, Galerkin 방법에 의해 그 해를 구한다. SMS 모형은 미국, 유럽국가들의 많은 유역에서 사용되어 그 적용성을 인정받은 범용 수치해석 모형이다.

본 연구에서는 사문진보 상류부 약 10km 가량을

모의구간으로 설정하였고 하류부 경계는 사문진보로 설정하였다. 하류부 경계를 수문조절부 및 감실부로 구성하여 평상시 및 홍수 시 흐름과 유사이송의 양상을 파악하였고, 홍수 시에는 수문조절이 이루어진다고 가정하여 모의를 실시하였다. 주운보 주위의 흐름 및 유사이송 현상을 더 자세하게 관찰하기 위하여 보 주위의 격자를 좀 더 세밀하게 구성하였다.

(가) 초기조건 및 경계조건

본 연구에서 적용된 SMS모형은 동수역학적 모형과 유사이송모형을 구성되어 있다. 동수역학적 모형은 수심평균치를 취한 2차원 연속방정식과 운동방정식을 이용하여 x와 y 방향의 유속과 수심을 결정하며, 유사이송모형은 동수역학적 모형에서 계산된 자료를 기초로 하여 수심평균치를 취한 2차원 이송-확산방정식을 해석하여 대상지점에서의 유사특성을 모의한다.

대상 하도구간에 대한 2차원 동수역학적 해석을 위하여 평수기의 유량조건과 100년 빈도 홍수량 조건에 대해서 검토하였다. 낙동강 본류의 모의대상구간에 포함되는 수위표 지점과 금호강 합류부의 평수기 유황분석자료 및 100년 빈도 홍수유량을 유량조건으로 사용하였다.

하류단 수위조건은 평수기의 경우「한반도 대운하는 부강한 나라를 만드는 물길이다」에서 제시된 사문진보의 관리수위로 적용하였고, 홍수기의 경우 수문운영이 이루어진다는 가정하의 1차원 흐름모의에 의한 홍수위를 하류단 경계수위로 적용하였다.

(나) 유입유사의 조건

유입유사량의 조건은 낙동강 하천정비 기본계획 보고서에 기술된 바와 같은 식 (1)의 유량-유사량 조건식을 적용하였고, 유사 입경조건 보고서에서 제시된 바와 같은 유사입경 측정치를 적용하였다.

$$Q_s = 0.1953Q^{1.7174} \quad (1)$$

여기서, Q_s 는 일유사량(ton/day), Q 는 유량(m³/sec)

이다.

유사입자의 평균적인 침강속도의 계산은 식 (2)와 식 (3)과 같이 기술되는 Rubey의 공식(1993)을 적용하였다.

$$v = F \left[dg \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd^3(\gamma_s/\gamma - 1)} \right]^{1/2} - \left[\frac{36\nu^2}{gd^3(\gamma_s/\gamma - 1)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서, w 는 침강속도(ft/sec), d 는 입자의 직경(ft), ν 는 동점성계수(ft^2/sec), γ 는 물의 단위중량(lb/ft^3), γ_s 는 토사입자의 단위중량(lb/ft^3), g 는 중력가속도(ft/sec^2)이다.

(다) 흐름 및 하상변동의 2차원 수치모의 결과

대상유역에 대한 유량규모별 동수역학적 해석을 위해서 SMS 모형을 이용하여 2차원 흐름 및 하상변동의 모의 수행을 실시하였다. 2차원 모의수행을 통한 2차원 유속 및 수심 분포를 계산하였고, 해석구간에 대한 2차원 유속벡터, 등수심도 등을 계산하였다. 그림 10에서 그림 12는 평수기 시의 유속벡터도 및 등수심도, 유사 침식 및 퇴적도를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 최대유속은 0.07를 나타내고 있고, 주운수로에서 선박이 운항할 수 있는 최소수심인 6.1m를 만족하는 것으로 나타났다. 유사이동의 경우 주운보 주위에서 퇴적현상이 주로 나타나고 있으며 유속이 상대적으로 빠른 구간에 대해서는 침식현상이 나타나는 것을 보여주고 있다.

홍수기에 대해서 2차원 수치모의를 실시하였다. 그림 13에서 그림 15은 홍수기 시의 유속벡터도 및 등수심도, 유사변화도를 각각 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 나타나고 있고, 유사이동의 경우 평수기와 마찬가지로 주운보 주위에서 퇴적현상이 주로 나타나고 있으며 유속이 상대적으로 빠른 구간에 대해서는 침식현상이 나타나는 것을 보여주고 있다. 이러한 결과는 항공측량사진 및 위성영상 등을 통해 사문진보

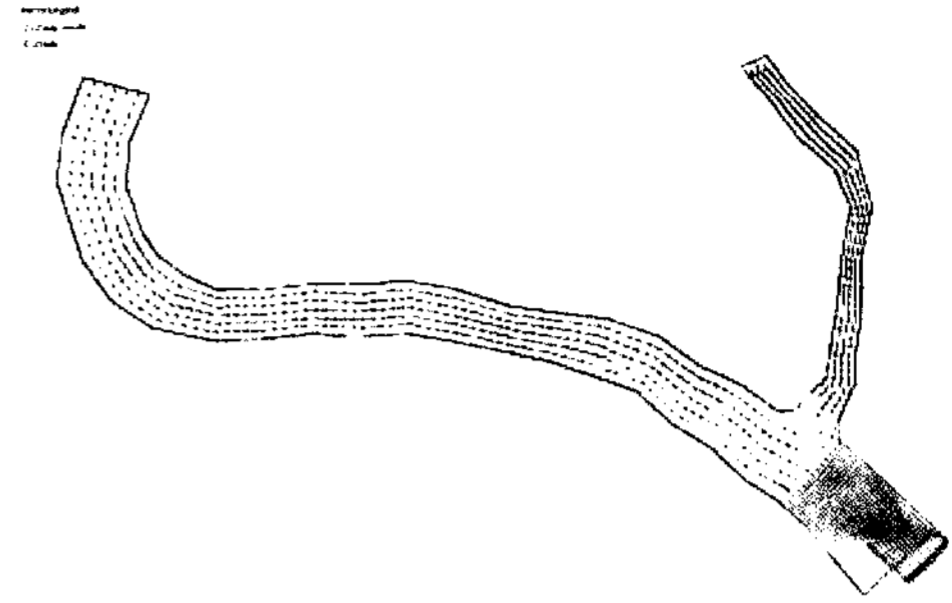


그림 10. 평수기 시의 유속 분포도

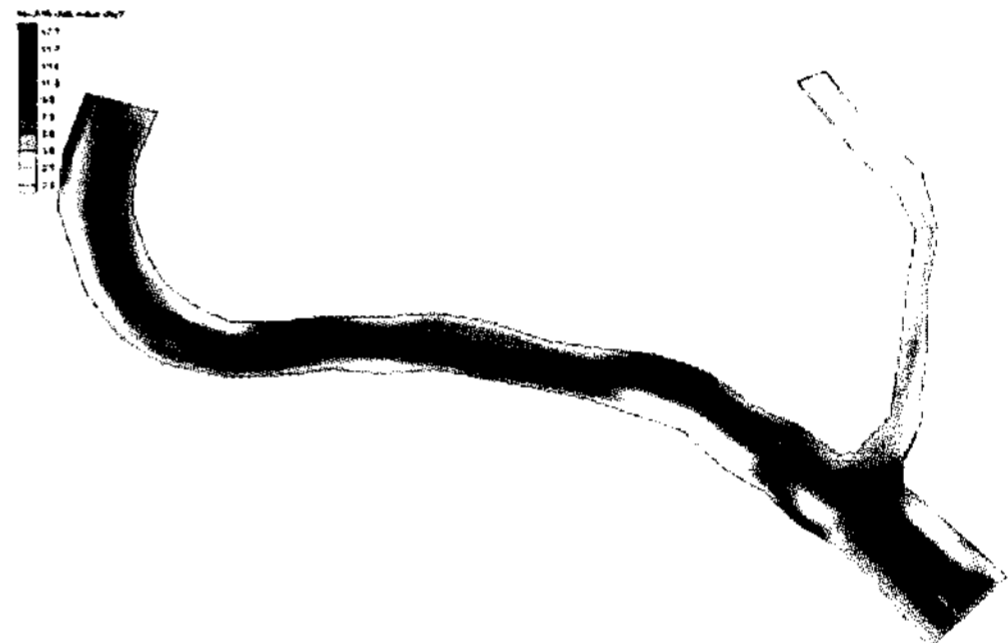


그림 11. 평수기 시의 수심 분포도

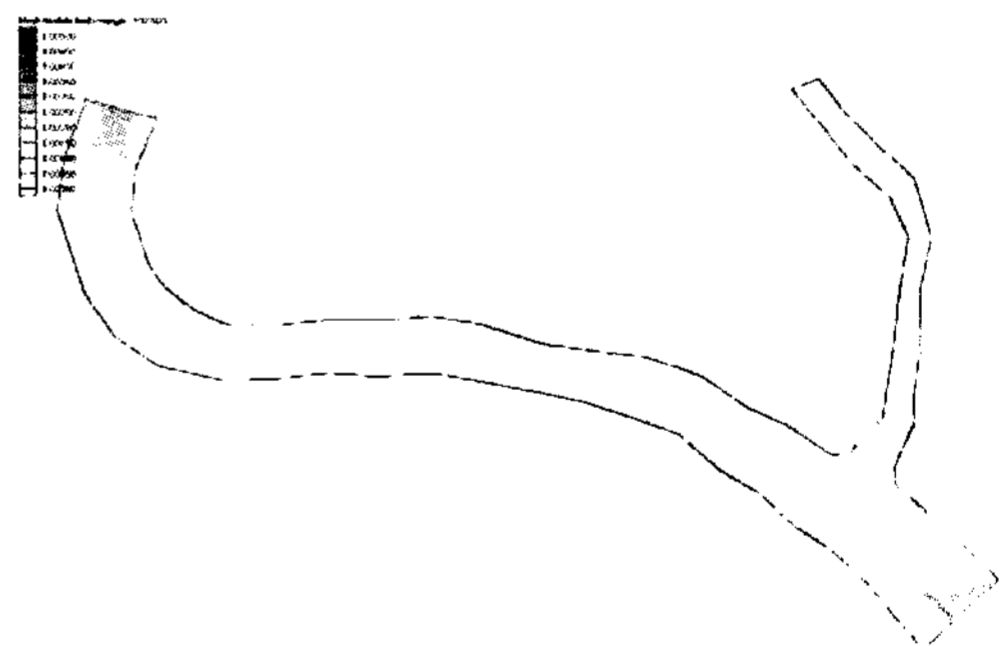


그림 12. 평수기 시의 하상변동 양상

상류부의 현재의 상황과도 비슷한 양상을 띠는 것을 확인할 수 있다.

5. 주운건설에 따른 평면적 하도변화

주운건설은 하도의 일부 직강화를 요구하게 된다. 따라서 본 절에서는 하도의 직강화에 따른 영향을 검

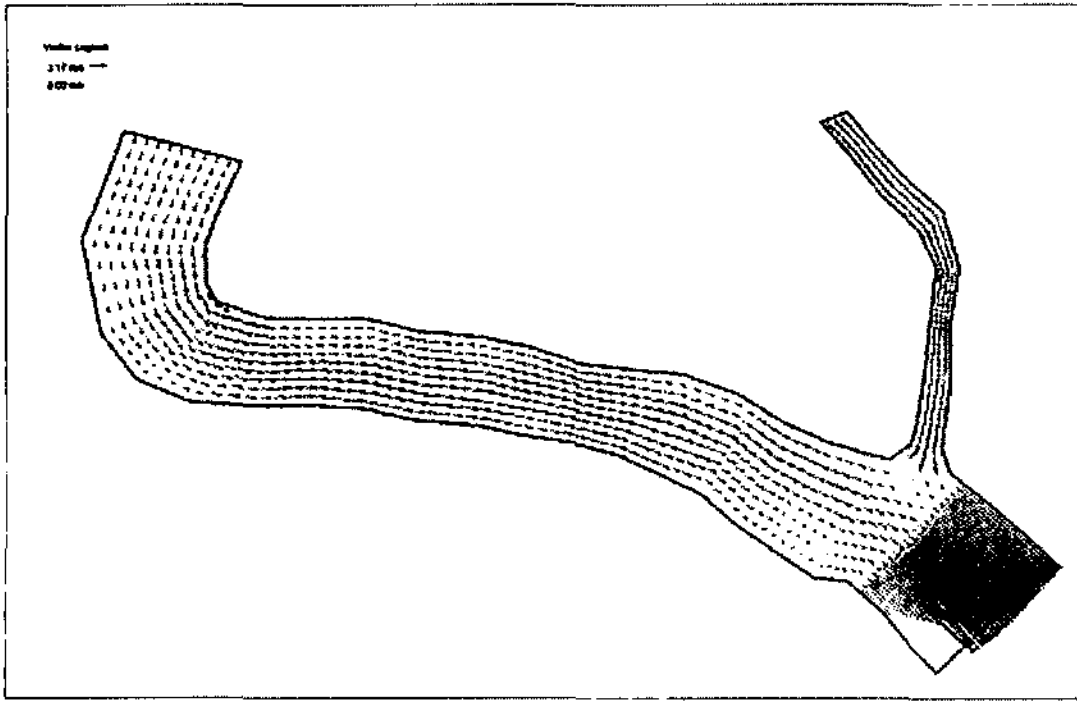


그림 13. 홍수기 시의 유속분포도

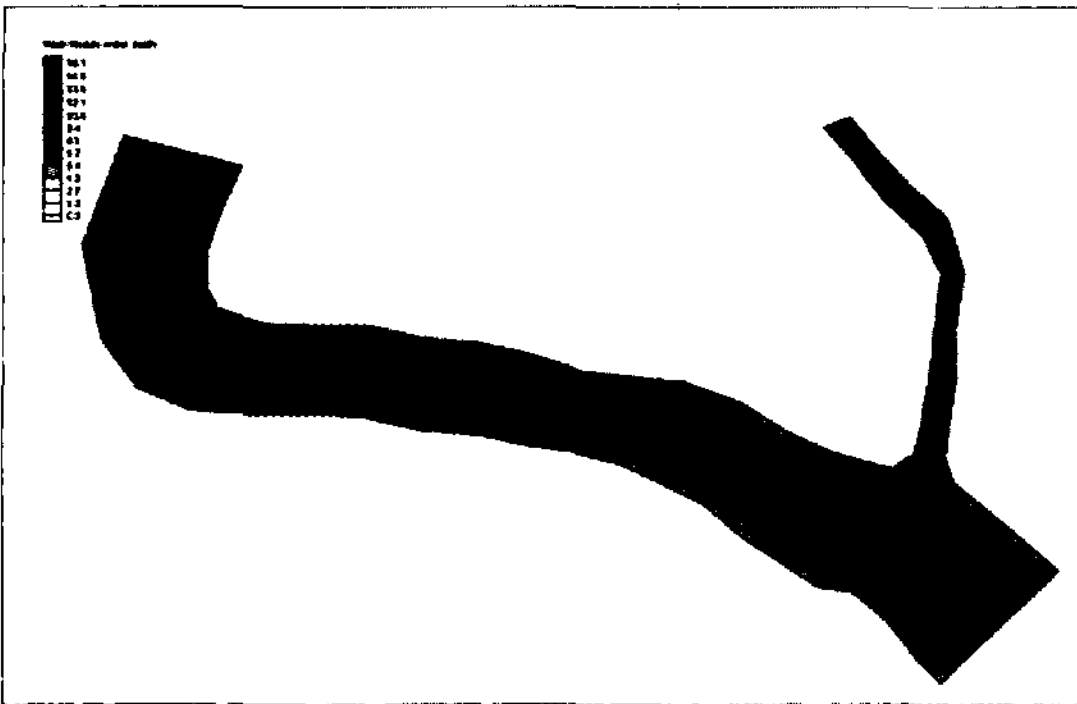


그림 14. 홍수기 시의 수심 분포도

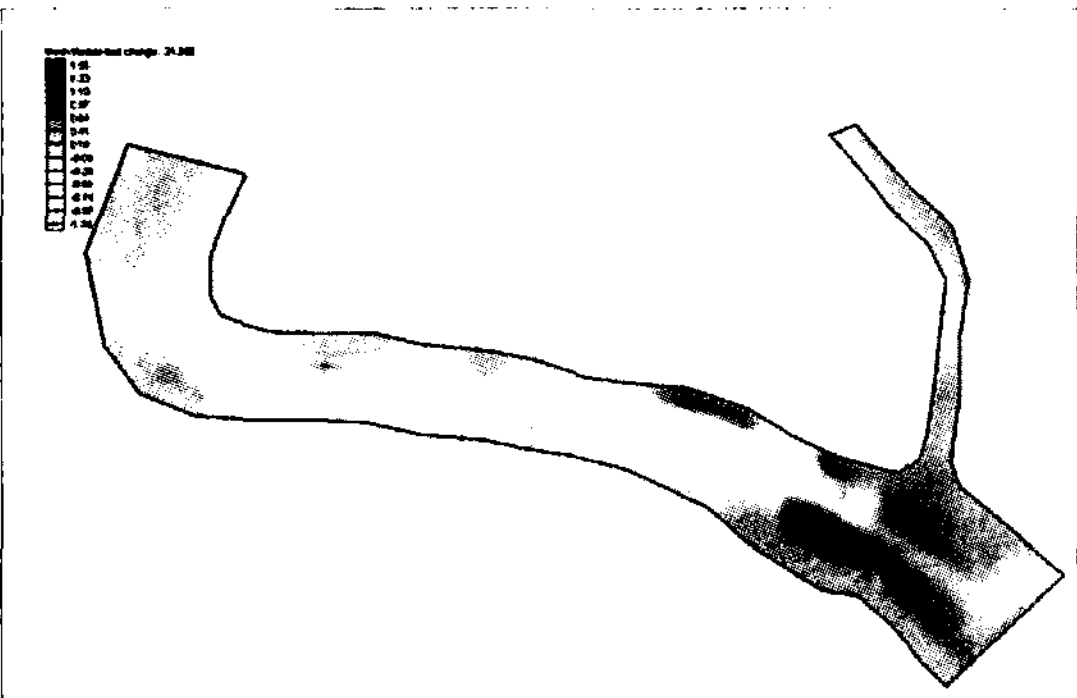


그림 15. 홍수기 시의 하상변동 양상

토하였다. 그림 16의 B점과 C1 지점을 연결하는 원래 하도로부터 주운을 위해 B점과 C2 지점을 연결하는 하도의 직강화는 B점과 C2점을 연결함으로써 하상경사가 커지게 된다. 이때 B점에 두부침식(headcut)현상이 발생되고 이 두부침식은 상류로 전파된다. 또한 이로 인하여 하도의 폭이 넓어지는 현상이 발생하며 이 때 침식된 토사는 직강화 된 하도구간에 퇴적되게

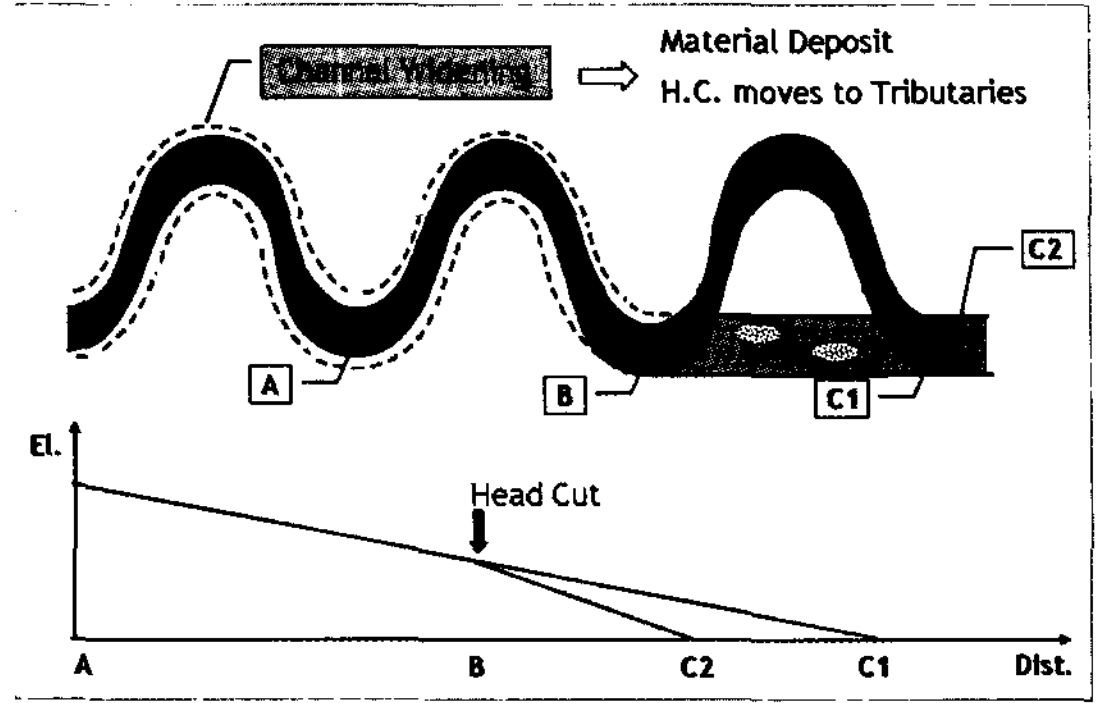


그림 16. 하도 직강화에 따른 평면적 하도변화

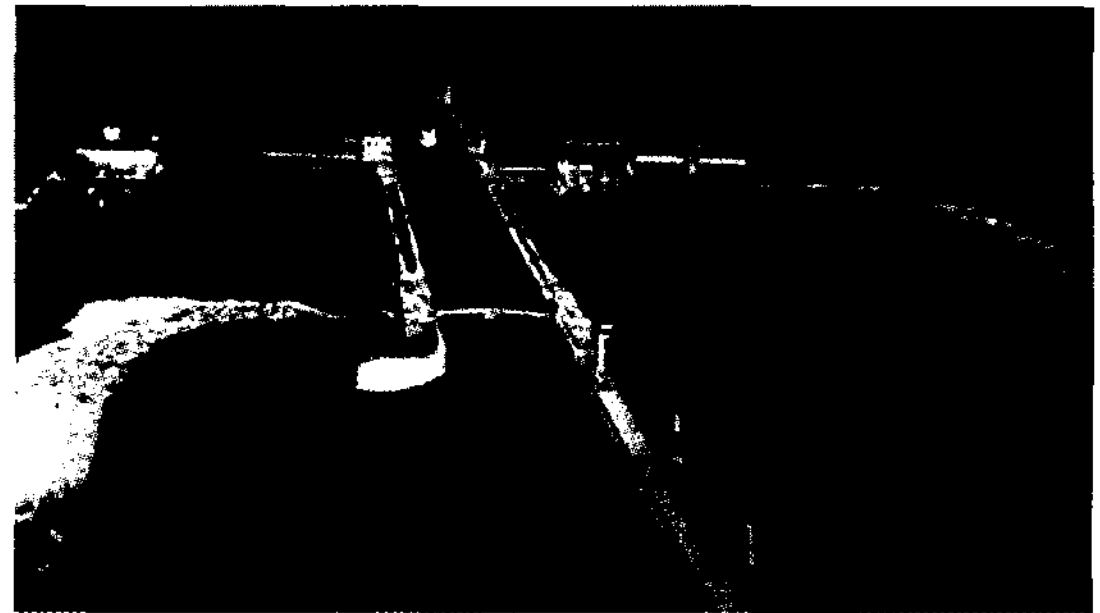


그림 17. Kasky Lock 전경



그림 18. Kaskaskia River 하도 직강화

된다. 두부침식은 본류뿐만 아니라 지류에 까지 전파되어 하천시스템 전체에 그 영향을 미치게 된다. 특별히 하상재료가 모래와 같이 가는 재료의 경우 그 영향은 수십 년에 걸쳐 서서히 나타나는 것을 알려져 있다.

이러한 하도 직강화에 따른 영향의 예는 1974년 완공된 미국의 Kaskaskia River Navigation Project에서 찾아볼 수 있다. 이 하천의 배수면적은 3,800mi²이며 Kasky Lock에서의 침투유량은 50,300 cfs, 하천의 길이는 95mile이다. 이 주운사업은 주변의 도로와 철도를 연계한 물류이송의 첨단화 사업의 일환으로 수심 9ft, 주운하폭 300ft의 주운이 52miles에 걸쳐 직강화가 추진되어 전체적으로 하도의 길이가 16 miles나 줄어들었다.

그 결과 두부침식이 Fayetteville 로부터 시작되어 상류로 전파되면서 하상경사가 증가하였으며 1972년부터 1982년까지 Fayetteville와 New Athens 사이 6 mile 구간에 걸쳐 토사퇴적이 유발되었다.

6. 결론

본 연구에서는 수심확보와 유사이동을 중심으로 운하건설에 대한 수리학적 고찰을 실시하였다. 낙동강 대상 구간 내 평수량, 저수량, 갈수량 시기에 대한 운하건설 전후의 흐름을 분석하였고, 각 재현 빈도에 대한 홍수위 변화를 분석하여 운하건설로 인한 홍수위 상승 방지를 위한 건설 방안제시를 가능케 하였다. 주운보 주변영역에서의 흐름 및 유사이동의 양상을 파악하기 위해 2차원 수치모의를 실시하여 평수기와 홍수기에 대한 유사특성을 분석하였으며 특정 구간에 대하여 주운보 주위에서 퇴적현상이 주로 나타나고 유속이 상대적으로 빠른 구간에 대해서는 침식현상이 나타나는 하상변화 양상을 제시하였다.

본 연구 결과는 현재 가용한 정보와 자료에 기초하여 예상되는 각종 시나리오에 대한 결과로서, 주운보 설치 위치, 주운보 양식, 주운에 사용될 선박 양식, 주운수로 규모, 지류영향 고려 등 다양한 수리·수문학적 불확실성을 가진 사안들이 결정되면 보다 상세한 정밀 모의를 통한 분석을 필요로 한다.

운하의 건설은 21세기에 적합한 “종합적인 국토계획 및 통합유역관리”의 측면에서 접근해야 하며 부처

간 긴밀한 연계 및 협조를 필요로 한다. 특히 국토해양부의 “유역종합치수계획(낙동강, 한강)”수립 및 환경부의 “물환경기본계획”수립과도 연계되어야 할 것으로 판단된다.

운하건설의 공학적, 경제적 타당성 판단의 여부는 정치적인 공방, 비전문가 등의 논란은 이제는 접어두고, 관련분야 전문가의 의견을 바탕으로 운하건설의 목적 및 타당성 여부를 다양한 측면에서 종합적으로 검토할 시기가 된 것으로 판단된다.

참고문헌

- 건설교통부 (2004). 낙동강유역종합치수계획 보고서.
 한국수자원공사(2006). 우리가람 길라잡이.
 한반도대운하연구회(2007). 한반도 대운하는 부강한 나라를 만드는 물길이다. 경덕출판사.
 환경부(2006). 물 환경관리 기본계획.
 Herbich, J.B. (1992). Handbook of Dredging Engineering, McGraw-Hill.
 Linsley, R.K (1992). Water Resources Engineering, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.
 Yang, C.T. (1996). Sediment Transport, McGraw-Hill. ☞