

하상변동의 예측기법의 개발

박정웅*

1. 서론

국토개발사업, 공업단지조성사업 등 공공토목사업의 급진적인 확대에 따라 하천에서의 골재채취량은 토사이송량을 훨씬 초과하고 있다. 이로 인한 하상저하는 호안이나 교각 등에 피해가 예상되고 있다. 그러나 이와 같은 하상저하는 홍수의 유통능력증대와 천정천의 해소 및 내수배제의 촉진 등의 이익을 초래하는 면도 있다. 일반적으로 하천은 모두 토사를 수반하고 있기 때문에 강물이 흐르는 부분에 퇴적되거나 세굴되어진다. 이러한 현상때문에 공사기간내에 예상했던 바의 목적을 달성하지 못하게 되므로 치수공정은 퇴적물 문제를 고려해야 한다. 비록 지금까지는 퇴적물과 물흐름간의 역학관계가 완전히 밝혀지지는 않았으나, 만약 특정하천에 대하여 유효한 퇴적물 관측통계치가 있으면 만족할 만한 수리특성과 퇴적물 이송량과의 관계를 얻을 수 있다. 한편 적절한 유사이송공식이 정립되고 퇴적물 문제를 고려할 수 있을 때 하천구조물설계에 있어서 하천수가 흘러 충전하는 문제의 해결이 가능해 진다. 하천에서의 유수의 흐름은 부정류이므로 부정류과정중의 퇴적물 이송현상을 해석하고자 할때는 하천의 하상변동모형을 이용하여야 하는데 이는크게 물리모형(physical model)과 수치모형(mathematical model)으로 나눌 수 있다.

이동상수로를 이용한 모형실험은 주요한 물리모형의 하나이다. 그러나 물리모형을 갖추므로써 비교적 정확한 하상지형의 국부변화를 예견할 수 있으나 적절한 모형척도는 결정하기가 매우 어렵다. 그 뿐만 아니라 서로 다른 하도 및 퇴적물은 각기 별개의 모형을 만들어야 하므로 상당한 시간이 걸리며 번거롭다. 부정류의 수치모형은 지형변화와 하도구간변경으로 인한 상이한 통계자료의 적용 이외에는 모두 동일한 모형을 사용할 수 있으므로 응용에 있어서 비교적 편리하다.

1)하천의 퇴적물 이송현상에 관하여는 과거 여러 학자들에 의해 활발히 연구 되어져 왔으나, 한국하천에 대하여는 한강, 금강, 낙동강 등 주요 하천에서 하상측량에 의한

* 서울산업대학교 토목공학과 교수

하상변동 실태가 주로 조사되었다. 한편 한강종합개발사업을 효율적으로 추진하기 위하여 1970년대 초부터 조사되어 온 것을 1982년도에 다시 물리모형으로서 고정상실험을 실시하여 계획하도의 평면법선에 대한 타당성을 검토한 바 있으며, 또한 1983년도에는 계획하도에 대한 하상변동을 예측하기 위하여 한강종합개발사업구간인 암사동에서 김포대교까지 36Km의 계획하도에 대하여 치수적인 측면(5,000CMS~25,000CMS)에서 하상의 변동을 정성적으로 연구한 바가 있다. 그러나 하천유출과 퇴적물의 역학을 규명하는 유사이송의 정량적인 연구는 아직 초기단계에 있다. 그래서 본 연구는 하상변동에 대한 수치해석방법으로 종전에 이용한 정류개념보다는 점변부정류(gradually varied unsteady flow)개념을 적용하여 수치해석의 정도를 높이고 실용화함으로서 자연현상과의 오차를 줄일 수 있는 토사 이송현상 및 하상변동에 대한 주요특성 유사이송모형으로서 해석하고자 한다.

본 연구에서는 하상변동에 대한 수치해석을 하기 위하여 점변부정류의 개념을 충적하천(alluvial channel)에 적용하였으며 편미분방정식으로 표현되는 점변부정류 기본방정식을 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 해석하였으며 단일홍수사상까지도 처리하기 위하여 입력자료는 일단위가 아닌 시간단위자료를 처리할 수 있도록 하였다. 유사이송에 대한 해석을 위해서는 민감도분석(sensitivity analysis), 가상자료에 의한 분석과 실측자료에 의한 분석, 등을 통하여 여러 공식들을 비교분석한 최근의 연구(하천유사량 산정방법의 선정기준 개발, 건기연, 1989)에서 우수하다고 평가된 Acker & White공식, Engelund & Hansen공식과 Rijn공식을 비롯하여 한강의 유사이송에 적합한 것으로 국내업계에 알려진 Brown공식과, 본 연구 초기부터 검토되었던 Vanoni - Schocklitsch공식 등을 사용토록 하였다.

이같은 내용을 토대로 하상변동을 정량적으로 예측하기 위한 모형(computer model)을 개발하고, 만들어진 모형의 검증을 위하여 국립건설시험소에서 실시한 한강하류부 수리실험결과 (한강하류부 수리모형실험 보고서, 서울특별시, 1990)와 비교분석하고 하상변동 예측을 위한 적용타당성을 위하여는 한강본류인 고안지점부터 인도교지점까지의 실제 하천에 적용하여 그 결과를 평가하고자 한다.

2. 기본이론

하천에서의 점변부정류(gradually varied unsteady flow)의 기본방정식은 다음과 같다.

흐름의 연속방정식

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Ad}{\partial t} - q_L = 0 \quad (2.1)$$

흐름의 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho Q)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta \rho QV)}{\partial x} + \frac{gA \partial (\rho y)}{\partial x} \\ + \frac{\rho gA \partial z}{\partial x} + \rho gAS_f = \rho gLV_L \end{aligned} \quad (2.2)$$

유사의 연속방정식

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\rho \partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} - q_s = 0 \quad (2.3)$$

유사량공식

$$g_s = f(\rho_w, \nu, \rho_s, d_g, \delta_g, W, g, B, y, Q) \quad (2.4)$$

3. 수치해석

수로해석에 사용되는 수치계산방법은 다음과 같다.

하천의 점변부정류를 해석하기 위하여 사용된 기본방정식과 유사방정식의 수치해법은 기본적으로 모두 유한차분법을 사용한다. 즉 차분법을 응용한 것으로 미분방정식중의 도함수를 사용하여 얻은 차분방정식에서 해를 구한다. 이 유사방정식의 수치해법은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 특성법이고 다른 하나는 유한차분법이다.

본 연구를 수행하기 위하여 사용한 유사이송공식으로는 ① Vanoni - Schochlich 공식 ② Engelund공식 ③ Brown공식 ④ Rijin공식 ⑤ Aclcers & White공식을 사용하였다.

4. 모형의 검증

컴퓨터모형의 검증을 위한 입력자료로서 실험수로의 하상단면도를 이용하여 30개 단면의 좌표를 입력하였으며 조도계수는 $n = 0.035$ 를 기준으로 실험보고서에 나타난 사

항을 참고하여 조도계수를 0.25~0.45범위에서 일부구간에 대하여 보정하였다. 조도계수를 0.40 이상으로 증가시킨 구간들은 모두 교량의 교각들이 설치되어 있는 구간들로서 통수단면을 교각설치를 감안하여 20~30m 폭 범위에서 감소시키고 조도계수도 증가시킴으로서 실제 교각에서 발생하는 에너지손실을 반영할 수 있도록 하였다. 그런데 실험보고서의 실험결과를 살펴보면 유량을 계속적으로 변화시켜나가는 실질적인 연속홍수에 대한 실험이 아니고 $Q = 12,000\text{CMS}$, $25,000\text{CMS}$, 또는 $32,000\text{CMS}$ 에서 일정기간동안 정류상태로 통수시킨후 최초하상과의 변동량으로서 실험 결과로 제시한것을 감안할 때 실험결과를 세부분으로 나누어 검토하는 것이 타당하다고 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 상기한 세가지 유량이 일정시간 흐르는 3가지 별도의 경우로 나누어 시뮬레이션한 후 실험결과와 비교하는 것으로 하였다.

컴퓨터모형과 실험수로에서 측정된 유속과 수위를 각 유량별로 비교하면 그림3.1~그림3.3에 나타난 바와 같다.

위의 그림에 나타난 바와 같이 유속분포의 예측치와 실측치가 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 $Q = 12,000\text{CMS}$ 에서 영동대교 상단의 유속계산치가 실측치보다 0.2m/sec 정도 작은 값을 나타내고 있고 마지막 하류경계점에서 계산된 유속이 실측치보다 0.27m/sec 정도 과도하게 나타났다.

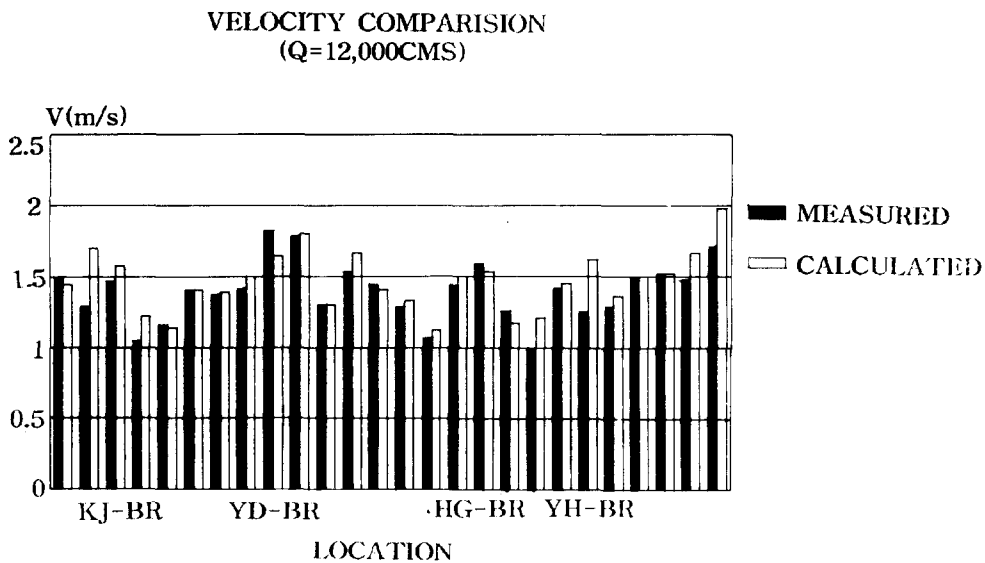


그림 3.1 $Q=12,000\text{CMS}$ 에서의 유속비교

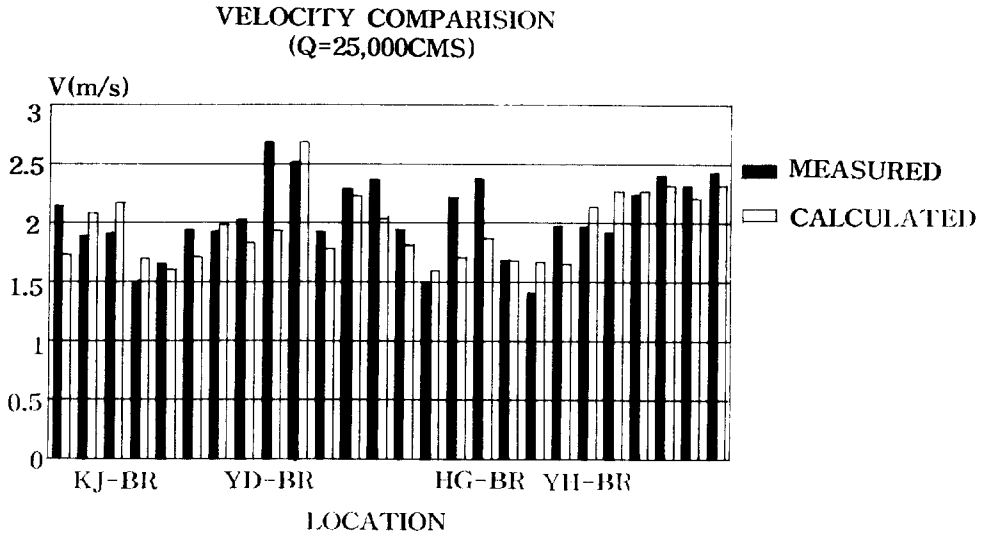


그림 3.2 Q=25,000CMS 에서의 유속비교

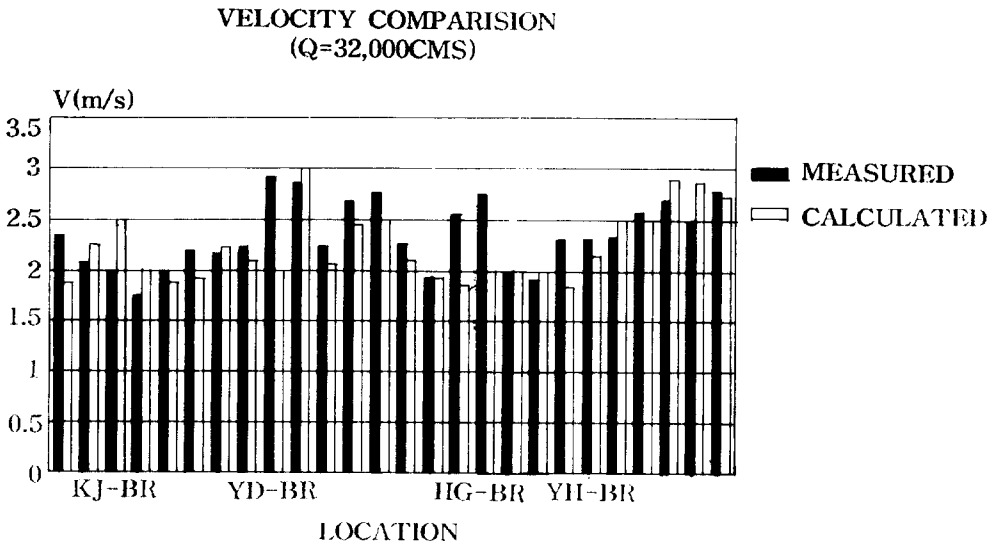


그림 3.3 Q=32,000CMS 에서의 유속비교

5. 모형의 적용

하상변동 예측모형 UNSTRAN을 실제 하천에 적용하기 위하여는 대상하천의 단면 측정자료, 대상구간의 시작점과 마지막 지점에서의 수위-시간자료 또는 유량-시간자료가 필요한 뿐만 아니라 조도계수와 고려하는 단면 구간 마다에 대한 하상토의 조도구성에 관한 자료 등이 필요하다. 또한 하상이 변화되는 정도를 비교 분석하기 위해서는 모의 기간 후의 단면도도 필요하다. 그러나 이와 같은 자료를 모두 손쉽게 구할 수 있는 하천구간을 우리 주변에서는 찾을 수 없다. 하천정비 기본계획 및 하상변동조사 수립현황 표에서 알 수 있듯이 같은 구간에 대한 하천단면의 측정이 70~90년대에 두번 이루어진 곳이 많지않은 실정이다. 이들 중복 관측지점도 해당 기간에 대한 이용 가능한 수문자료와 수리자료를 얻을 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 UNSTRAN이 최초로 대상구간으로 정하였던 구간을 다시 선택하기로 하였다. 특히 이 구간은 우리의 관심이 많은 한강 본류구간으로 1978년에 하천정비 기본계획에 의하여 하천단면이 측정되었고 1981년의 하상변동 조사시에 하천단면이 다시 측정된 바 있다. 불행하게도 1981년 이후에는 10여년 동안 하천단면의 측정이나 하상토에 대한 조사가 없었고 1978~1981년 사이에도 하천이 자연적으로 변화된 것이 아니라 건설분과 맞물려 골재채취가 활발히 이루어진 기간일 뿐만 아니라 골재채취가 어느곳에서 어느기간에 얼마만큼 이루어졌는가에 대한 기록도 찾아보기 어렵다. 그러나 한강 본류는 우리나라 인구의 1/4이 밀집되어 있는 수도 서울을 흐르는 구간으로 관심의 대상이 되고 있어 모형을 적용하여 자연적인 영향이 얼마나 될 것인가를 알아보는 것은 큰 의의가 있으리라 본다.

연구에서는 한강 본류중 고안수위표 지점에서 인도교수위표 지점까지의 34.4Km에 이르는 하도를 조사구간으로 하여 다수의 홍수기간 동안의 퇴적물 이송현상 및 하상변동 상황 등의 주요 특성을 검토하였다.

6. 결론

하천의 형태와 하상은 유수에 의하여 끊임없이 변화하며, 흐름 또한 하천형태와 하상에 따라 변화한다. 하상변동에 대한 예측은 하천구역내의 수리구조물의 설계 및 유지관리, 하천개수 및 하도의 안정, 수자원의 계획, 개발 및 관리를 비롯한 합리적인 하천계획수립과 효율적인 하천관리를 위해 반드시 고려해야할 사항이다.

이같은 관점에서 본 연구에서는 점변부정류 및 유사이송현상의 기본이론에 음차분법의 수치해석기법을 적용하여 하상변동을 예측하기 위한 모의모형을 개발하였다. 개발된 모형을 하상변동에 대한 수리모형실험구간에 적용하여 모형을 검증하고 한강 본류구간 중 고안과 인도교 구간에 적용하여 실무 적용성을 검토하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 수리모형실험에 의한 실험치와 모의된 값은 대체로 잘 일치한다.
- 2) 실제하천에 적용한 장기하상변동 예측값은 타당한 것으로 판단된다.
- 3) 홍수기간중 하상변동은 수문곡선의 상승기에 대부분의 하상퇴적 및 세굴이 진행되고 상류보다는 하류부분에서 더 많은 세굴이 나타났다.
- 4) 하상변동은 유량변동과 지속시간에 따라 유사이송에 많은 영향을 받으므로 실제 홍수의 시간자료를 사용함이 타당하다.
- 5) 하상변동 예측모형을 적용하여 홍수사상별 하상변동량이나 장기간의 하상변동량을 예측할 수 있다.
- 6) 보다 좋은 모의 결과를 얻기 위해서는 하상토의 적절한 분석이 절실히 요구된다.
- 7) 홍수기간 전후에 하천단면을 측정하므로써 모의모형의 괄목할 만한 개선이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. Amein, M. and Chu, H.L. "Implicit Numerical Modeling of Unsteady Flow", J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol.102, No. HY6 June, 1975.
2. Becker, L., Yeh, W. W-G., "The Identification of Multiple Reach Channel Parameter", Water Resource Research, Vol.9, No. 2, pp.326-335, Apr. 1973.
3. Bhallamudi, S.M. and Chaudhry, M.H., "Numerical Modeling of Aggradation and Degradation in Alluvial Channels," J. of Hyd. Div., ASCE, Vol.117, No.9, 1991
4. Chang, F.F.M. "Ripple Concentration and Friction Factor", J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 96, No. HY2, pp. 417-430
5. Chang, F.F.M. and Richards, L.D., "Deposition of Sediment in Transient Flow", J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 97, No. HY6, pp. 837-849, June, 1971.
6. Chang, H.H. and Hill, J.C., "Computer Modeling of Erodible Flood Channels and Deltas", J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 102, No. HY10, pp. 1461-1477, Oct. 1976.
7. Chang, H.H. and Hill, J.C. "Minimum Stream Power for River and Deltas", J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 103, No. HY12, Dec. 1977.
8. Chow, V.T., Open-Channel Hydraulics McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1959.
9. Chow, V.T., Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, N.Y., 1964.
10. Chung. T.J., Finite Element Analysis in Fluid Dynamics, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 1978.
11. Dawdy, D.R. and Vanoni, V.A., "Modeling Alluvial Channels," Water Resources Research, Vol.22, No.9, 1986
12. Egiazaroff, I.V., "Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations", . of Hydraulic Division, ASCE, No. HY4, pp. 225-246, July 1965.