한강본류의 하상변동을 고려한 안정하도에 관한 연구

A Study on Stable Alluvial Channels Based on Bed Evolution in Main Channel of the Han River

백중철* · 조원철** · 허준행***

1. 서론

한강본류의 경우 팔당댐의 건설 이후 홍수시 상류로부터의 유사유입차단과 저수로 정비사업, 교량가설 및 도시개발에 소요되는 골재채취 그리고 평형하상을 이루기 위한 수류의 역학적 작용 등으로 인하여 현저히 하상이 저하되었으며, 한편 현재 이용되고 있는 한강의 계획하상고는 기본 가정에 내재되어 있는 불확실성 및 구조상의 문제점이 제기된 바 있는[6] Aki Koichi공식에 의한 것이므로 한강본류의 하도를 안정하게 관리하기 위한 연구가 필요하다고 본다. 본 연구에서는 다지하천에서 부정류상태의 물과 유사의 이송, 하상변동을 수치모의하는 1차원 모형 CHARIMA를 한강본류에 적용하여 장래 하상변동을 예측하고, 안정된 하도형상 결정에 있어서 유사이송 및 동적평형(dynamic equilibrium) 관계에 근거를 두고 Chang[7]이 개발한 합리식법(rational method)을 이용하여 안정하도의 형상을 산정해 보았다.

2 하상변동 예측

CHARIMA은 1990년 미국의 Iowa대학에서 Holly 등[8]이 개발한 1차원 모형으로 주요 특징은 다음과 같다.

① 1차원 부정류 모형
② 수리계산과 유사계산의 준결합 모형
③ 다지 및 망상하천에서의 유사이송 모의
④ 하상의 장갑효과(armoring effect) 분석 가능
⑤ 유사량 계산은 수정TLTM법, 수정Ackers-White법, Engelund-Hansen법, 멱법칙법을 이용

2.1 지배방정식

유체의 연속방정식

---

* 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
** 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교 수
*** 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 조 교 수

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha \frac{Q^2}{A}) + gA\frac{\partial y}{\partial x} + gA\frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \tag{2}$$

유사량 추측변수

$$F_1(Q_s, D_{50}, Q, A, d, S_f, ACF) = 0 \tag{3}$$

마찰계수 추측변수

$$F_2(Q, A, D_{50}, S_f, d, ACF) = 0 \tag{4}$$

유사연속방정식

$$(1-p)B\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

수로의 단면

$$A = A(d; x) \tag{6}$$
$$B = B(d; x) \tag{7}$$

하상토의 수리학적 분류

$$D_{50}^{n} \rightarrow D_{50}^{n+1} \tag{8}$$

하상표면의 장갑화(armoring)

$$ACF^{n} \rightarrow ACF^{n+1} \tag{9}$$

여기서, y : 수면고, S_f : 에너지 경사, α : 운동량 보정계수, z : 하상고, Q_s : 유사량, D_{50} : 하상토의 중앙입경, B : 하폭, ACF : 장갑화계수, p : 공극률, K : 통수능, d :수심, g : 중력가속도, A : 유수단면적, Q : 유량이다.

2.2 유사량 공식

본 수치실험에서 이용한 수정 TLTM법은 1982년 Karim과 Kennedy가 개발한 TLTM법을 수정하여 각 유사입경별로 유사량을 계산하도록 한 방법으로 다음과 같다.

$$\mathrm{Log}\left(\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}\right) = a_0 + a_1 \log V_1 + a_2 \log V_1 \log V_3 + a_3 \log V_2 \log V_3 \tag{10}$$

여기서, $V_1 = \frac{U}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}}$, $V_2 = \frac{d}{D_{50}}$, $V_3 = \frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}}$ 이며 U : 평균속도, d : 평균수심, u_* : 마찰속도, u_{*c} : 한계마찰속도, q_s : 단위폭당 유사량, s : 유사의 비중이고 a_0=-2.278 , a_1=2.972 , a_2=1.06 , a_3=0.299[8]이며 유사입경별 유사량(q_{sj})은 다음과 같다.

$$q_{sj} = q_s(D_j)W_j P_{tj} \tag{11}$$

여기서 q_{sj}는 입경 j에 대한 유사량 ; $q_s(D_j)$는 D_{50}대신 D_j를 이용해서 계산한 유사량 ; P_{tj}는 하상토중 입경 j부분의 비율 ; W_j은 보정계수로서 식(12)와 같다.

$$W_j = b_1\left(\frac{D_j}{D_u}\right)^{b_2} \tag{12}$$

여기서 b_1과 b_2는 검증 상수이며, D_u는 하상토의 대표입경으로 보통 D_{50}을 이용한다.

2.3 하상변동량 계산

본 수치모의 실험의 대상구간은 한강본류 왕숙천유입부 하류지점으로부터 인도교 수위표 지점에 이르는 약 23km구간으로, 지형자료는 한강본류에 위치하고 있는 광장, 고안, 뚝도, 인도교 수위표를 중심으로 4개의 절점을 택하고 3개의 연결부에 대해서 계산단면을 총 42개의 단면으로 나누었다. 이 구간에는 고안, 광장, 뚝도, 인도교수위표가 각각 위치하고 있으며, 그림 1과 같다.

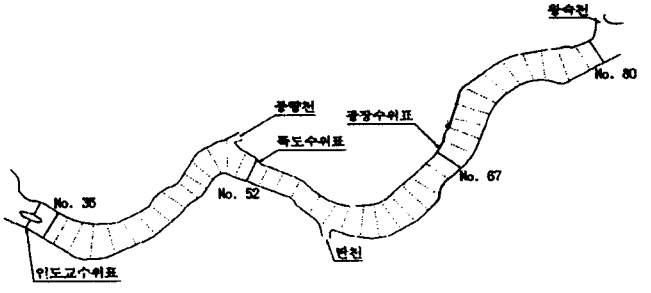

그림 1. 한강본류에 대한 하상변동예측모형의 적용구간

모형적용구간의 하천단면자료는 93년도 한강저수로정비감리 및 골재관리용역 보고서[5]를 이용하였다. 1987년부터 1993년까지의 실측자료를 토대로 김포대교에서 강동대교까지의 최심하상고의 변동을 도시하면 그림 2와 같다. 그림에서와 같이 한강의 하상은 세굴·퇴적현상이 반복, 교호되면서 발생되고 있으며 전반적으로 세굴현상이 우세하게 나타나고 있다. 이러한 현상의 주원인으로는 저수로정비사업 및 골재채취 등 인위적인 요인과 수류의 역학적 작용을 들 수 있다.[3], [6]

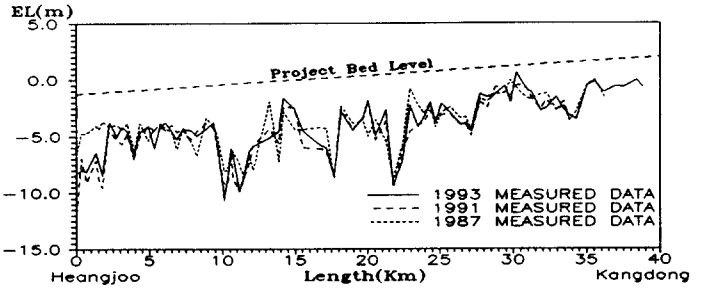

그림 2. 행주대교-강동대교 구간의 최심하상고 변화(1987~1993)

하상토 자료는 1993년 한강저수로정비감리 및 골재관리용역 보고서[5]를 이용하였다. 모형에 필요한 수문자료는 하류단에서의 수위와 상류단에서의 유입유량과 유사량이다. 본 수치실험에서는 지류를 통해 유입되는 유량과 유사량을 배제하였다. 하류단의 수위자료는 최근 5년간(1988~1992)의 인도교 수위자료를 이용하였으며, 상류단의 유입유량으로는 인도교지점의 수위-유량관계식[4] 식 (13)을 이용하여 계산한 유량을 이용하였다.

$$Q = 721.1257(H + 0.12)^{1.5496}, \quad 0.80 < H < 11.20 \tag{13}$$

3. 안정하도형상 산정

합리식법(rational method)는 동적평형하에서 흐름과 유사이론을 고려하므로써 안정하도의 형상을 합리적으로 산정한다는 이점이 있다.[2], [7] 이 방법에서 수로의 형상은 폭(수면폭 B 또는 평균폭 $\overline{B}$), 수심 D, 수로의 경사 S 그리고 측면경사 z 만으로 정의되는 제형(梯形)수로로 근사화 된다. 전형적인 설계도표에는 폭, 수심, 경사, 유량, 하상토의 입경, 유사량이 상호 연계되어 있다. 합리식법의 계산단계는 다음과 같다.

1) 입력변수로서 유량(Q), 유사량(Q_s), 유사중앙입경(d)를 선정한다.

2) 각 하폭(B)에 대해서 수심(h)를 계산하고 수로의 경사는 저수로 폭 b에서의 소류사이송에 대한 Du Boys관계식 식(14)를 이용해서 계산한다.

$$Q_s = q_s b = \frac{0.173}{d^{3/4}} \gamma RS(\gamma RS - \tau_c)b \tag{14}$$

이 식을 S에 대한 정리하면

$$S = \frac{c_2 + (c_2^2 + 4c_1c_3)^{1/2}}{2c_1} \tag{15}$$

여기서 $c_1 = \gamma^2 R^2$, $c_2 = \gamma R \tau_c$, $c_3 = \frac{Q_s d^{3/4}}{0.173b}$ 이며 τ_c는 하상전단응력이다.

3) 서로 다른 하폭에 대해서 계산한 경사를 비교하고 계산된 경사중 최소 경사를 선택한다. 안정수심과 하폭은 최소 경사에서의 하폭과 수심으로부터 구한다.

한편, Froude 數가 큰 경우 수로는 제방침식과 굽이진 유심선을 갖는 사행하천이 되는 경향이 있으므로 수로는 Froude No.가 0.3보다 적도록 설계된다[7].

4. 결과분석

CHARIMA모형을 이용하여 1993년의 하상단면자료, 하상토자료 그리고 기타 수문자료를 입력하여 1998년까지의 하상변동량을 계산하였다. 그림 3은 계산결과를 비교하기 위하여 1993년에 대한 실측 하상고와 모의한 하상고를 도시한 것이다.

한강본류 적용구간의 장래 하상변동 예측을 위한 수치실험 결과 반포대교 상류구간, 영동대교 부근 그리고 광진교 상류구간이 부분적으로 0.7~1m정도 상승하고, 탄천상류 2km구간이 0.6m정도 그리고 왕숙천 하류 3km 구간이 1m정도 하상이 저하할 것으로 나타났다. 그러나 장래하상변동에 대해서 전 구간을 대상으로 분석해 보면 대체로 하상은 안정할 것이다.

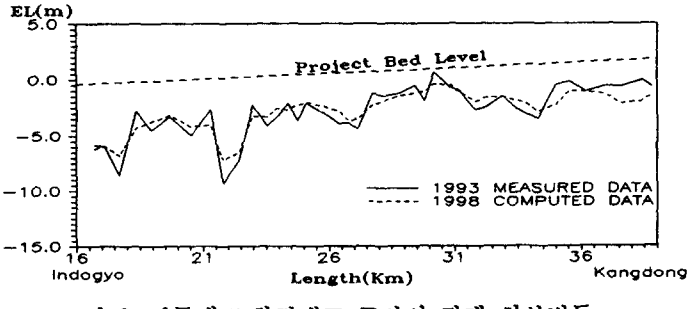

그림 3. 강동대교-한강대교 구간의 장래 하상변동

유량 37000cms, 유사량 2.0cms, 유사의 중앙입경 0.5mm, 제방경사 1.5를 토대로 합리식법을 이용하여 500~1000 m 하폭에 대한 하천의 수심, 유속, 평형하상경사의 관계를 도시하면 그림 4와 같다. 그림을 분석해 보면, 큰 하폭의 경우 어느 정도까지 하폭이 감소하면 하상경사가 감소함을 볼 수 있다. 이것은 흐름농도가 유사효율을 증가시켜 주어진 유량과 유사량이 보다 적은 경사에서 이송되기 때문이다. 그러나 하폭감소에 따른 이송율의 증가는 어느 하폭 이하에서는 낮은 전단응력때문에 제방에 의해 상반되는 작용을 받는다.[7] 이러한 상반되는 두가지 영향하에서 하천은 최소하상경사와 일치하는 하폭으로 발전하게 된다.

표 1은 현재 이용되고 있는 평형하상경사를 산정할 당시의 하폭, 저수로폭, 유수단면적을 기준으로 합리식법에 의해 각 유량과 유사량별로 산정한 평형하상경사를 현 평형하상경사[1]와 함께 나타낸 것이다. 합리식법에 의해서 산정한 평형하상경사는 각 측점의 저수로폭에 민감한 것으로 나타났으며, 각 측점의 유사량과 유사중앙입경 값에도 민감한 결과값을 보이고 있다. 그리고 주어진 하폭과 저수로폭에 대해서 산정한 하상경사가 2.0×10^{-4}보다 큰 경우 Froude No.가 0.3보다 크게 나타나므로 저수로폭의 확대로 하상경사는 감소시킬 필요가 있는 것으로 나타났다.

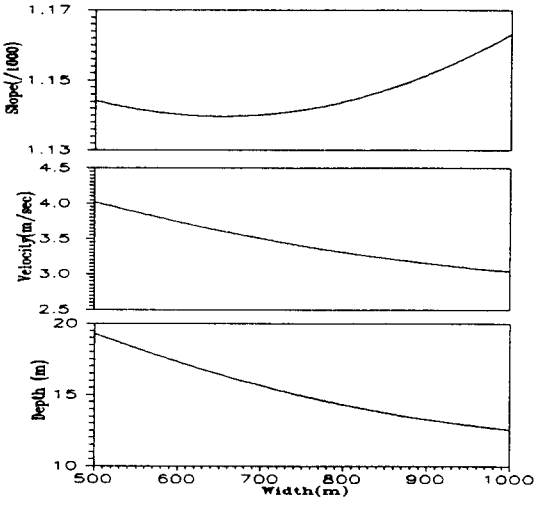

그림 4. 하폭에 따른 하도형상의 변화

5. 결 론

안정하천을 유지하기 위해 실시한 장기하상변동 수치실험과 안정하천형상을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 장래하상변동 수치실험의 대상구간에 대해서 전반적으로 분석해 보면, 대체로 하상은 안정될 것이며 구조물설치, 골재채취, 저수로 정비사업 등이 하상변동의 주 요인이다.

2. 유사이송, 흐름저항 그리고 동적평형의 물리적인 관계에 근거를 둔 합리식법에 의해 산정한 평형하상경사는 기존의 평형하상경사에 비해서 각 측점의 저수로폭, 유사량, 유사중앙입경에 지배

적인 영향을 받는 것으로 나타났다.

3. 안정하도의 유지는 각 지점의 보다 정확한 유사량과 유사중앙입경을 고려하여 안정하도의 형상을 결정한 후, 실제로 변경이 어려운 하폭보다는 저수로 정비사업 등을 통해서 저수로폭 또는 하상경사를 조정하는 것이 보다 용이할 것이다.

표 1. 기존 평형하상경사와 합리식법에 의한 평형하상경사

측점 No.	하상경사 ($\times 10^{-4}$)				
	기존	유사량 = 1.0cms		유사량 = 1.5cms	
		d_{50} = 0.5mm	d_{50} = 1.0mm	d_{50} = 0.5mm	d_{50} = 1.0mm
36	1.120	.97	1.31	1.27	1.71
38	1.123	1.17	1.58	1.54	2.08
40	1.126	.82	1.11	1.07	1.45
42	1.129	1.00	1.35	1.31	1.77
44	1.132	.81	1.10	1.07	1.44
46	1.136	.89	1.20	1.17	1.57
48	1.139	.85	1.14	1.11	1.50
50	1.117	.87	1.18	1.14	1.55
52	1.147	.85	1.14	1.11	1.50
54	1.178	.80	1.08	1.05	1.41
56	1.209	1.01	1.37	1.33	1.80
58	1.241	1.05	1.43	1.38	1.86
60	1.273	.89	1.20	1.17	1.58
62	1.306	1.16	1.57	1.53	2.06
64	1.339	.85	1.15	1.11	1.50
66	1.372	.99	1.33	1.30	1.75
68	1.407	1.04	1.40	1.36	1.84
70	1.441	.96	1.30	1.26	1.70
72	1.476	.91	1.23	1.19	1.61
74	1.511	1.08	1.46	1.42	1.91
76	1.547	1.02	1.38	1.34	1.80
78	1.583	.95	1.28	1.24	1.67
80	1.620	1.05	1.42	1.39	1.87

<참고문헌>

1. 건설부, "한강 하천정비기본계획", 1978.
2. 吉川秀夫, "河川工學", 朝倉書店, pp. 135～145, 1980.
3. 백중철, "CHARIMA모형을 이용한 한강본류의 하상변동 예측", 연세대 석사학위논문, 1995.
4. 이원환, 조원철, 허준행, 서규우, "한강 인도교지점에서의 이상홍수 해석", 연세대 산업기술연구소 논문집, 제 26 집 제 1 권, pp. 29～38, 1994, 6.
5. 한강관리사업소, "한강저수로 정비감리 및 골재관리용역 보고서", 1993.
6. 한국건설기술연구원, "하상변동 예측모형의 비교분석", 건기연 91-WR-112, 1991.
7. Chang, H. H. "Fluvial Processing in River Engineering", John Wiely & Sons, Inc., pp 225～297, 1988.
8. Holly, F. M., Jr., Yang, J. C., Schwarz, P., Schaefer, J., Hsu, S. H. and Einhelling, R., "CHARIMA, Numerical Simulation of Unsteady Water and Sediment Movement in Multiply Connected Networks of Mobile-Bed Channels", Iowa Institute of Hydraulic Research, Report No. 343, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, 1990.