

1차원 St. Venant 방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성 분석

Analysis of Flood Flow Characteristics of the Han River using 1-Dimensional St. Venant Equations

김 원* · 우 호 섭** · 김 양 수***
Kim, Won · Woo, Hyo Seop · Kim, Yang Su

Abstract

Flood flow characteristics of the Han River (from Goan to Indo Bridge) are analyzed using 1-dimensional St. Venant equations. NETWORK, a finite difference model, is used to calculate each term (local acceleration term, convective acceleration term, pressure force term, gravity force term, and friction force term) of the momentum equation and to analyze the flow characteristics. By the result of the study, as the general characteristics of flow in a channel that acceleration terms are very small and the other three terms are much greater is presented, three terms (pressure force term, gravity force term, friction force term) are to be main terms which decide the characteristics of flow. Specially in this region the acceleration term is noted so large that it cannot be ignored according to the shape of hydrograph and the region.

요 지

본 연구에서는 일차원 St. Venant 방정식을 이용하여 한강 하류부(고안-인도교 구간)의 홍수류 특성을 분석하였다. 유한차분 모형인 NETWORK 모형을 이용하여 운동량 방정식의 각 항(국부가속도항, 대류가속도항, 압력항, 중력항, 마찰항)의 절대적 크기와 상대적 크기를 비교 분석하였다. 분석결과 국부가속도항과 대류가속도항이 작게 나타나고 중력항, 압력항, 마찰항 등이 대부분의 구간에서 크게 나타나서 이 세 항이 흐름을 결정하는 주요 항임을 확인할 수 있었으며 수문곡선의 상태와 하도구간에 따라서는 국부가속도항과 대류가속도항의 상대적인 비율이 무시할 수 없을 정도로 크게 나타나서 이 구간에서는 동역학적 모형이 적절한 것으로 나타났다.

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원
** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수자원연구실장
*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원

1. 서 론

하천의 흐름을 해석하기 위해 사용하는 지배방정식은 St. Venant 방정식으로 하천흐름의 해석시에 기초가 된다. 1차원 St. Venant 방정식은 질량 보존을 나타내는 연속방정식과 운동량 보존을 나타내는 운동량 방정식으로 구성된다. 운동량 방정식은 시간과 공간에 따른 운동량의 변화를 나타내는 국부 가속도항과 대류 가속도항, 거리에 따른 압력의 변화를 나타내는 압력항, 중력을 나타내는 중력항(하상경사항), 하상과 물의 마찰을 나타내는 마찰항(마찰경사항) 등으로 구성된다. 하천흐름을 해석하기 위해서는 이들 각 항의 상대적 크기를 분석하여 흐름을 결정하는 주요 항이 어떤 항인지 파악하는 것이 해석의 효율성을 위해 필요하다.

하천의 흐름을 수치적으로 해석하기 위해 이제까지 많은 모형이 개발되었는데 어떠한 형태의 지배방정식을 사용하느냐에 따라 운동과 모형(kinematic wave model), 확산과 모형(diffusion wave model), 그리고 동역학적 모형(dynamic wave model) 등으로 구분된다. 가장 간단한 모형은 운동과 모형으로 하상경사가 급하여 가속도항이나 압력항의 크기가 상대적으로 작아서 마찰항과 중력항만이 흐름에 영향을 미치는 것으로 가정하여 흐름을 해석한다. 확산과 모형은 가속도항은 작고 압력항, 중력항, 마찰항이 주로 영향을 미치는 것으로 가정하여 흐름을 해석한다. 동역학적 모형은 모든 항의 크기를 고려하여 흐름을 해석하는 것으로 완전한 형태의 St. Venant 방정식을 해석한다.

이와 같은 여러 가지 수치모형중에서 대상 하천에 효율적인 모형을 선정하기 위해서는 운동량 방정식의 각 항의 상대적 크기를 아는 것이 중요하다. 이러한 연구는 오래 전에 외국에서 실시되었을 뿐 국내에서는 아직까지 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 St. Venant 방정식에 기초를 둔 일차원 유한차분모형인 NETWORK 모형을 이용하여 한강 하류부 구간(고안-인도교 구간)에 대해 운동량 방정식의 각 항의 절대적 크기와 상대적 크기를 구하여 비교 분석하였으며 이를 통해 이 구간에 적합한 모형의 선정에 대하여 검토하였다.

2. 관련 연구

하천의 흐름을 나타내는 1차원 지배방정식은 연속방정식(식 (1))과 운동량 방정식(식 (2))으로 구성되는 다음과 같은 St. Venant 방정식이다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f = 0 \quad (2)$$

여기서, Q 는 유량, A 는 흐름 단면적, x 는 거리, t 는 시간, y 는 수심, g 는 중력가속도, S_0 는 하상경사, S_f 는 마찰경사이다.

식 (2)의 첫번째 항은 국부가속도항이며 두번째 항은 대류가속도항, 세번째 항은 압력항, 네번째 항은 중력항, 다섯번째 항은 마찰항이다.

식 (1)과 (2)로 구성되는 흐름의 지배방정식은 하천 흐름 해석의 기본이 된다. 식 (2)로 나타나는 운동량 방정식은 비선형 항들을 포함하고 있기 때문에 실제 흐름해석에 이 식을 적용하기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 그에 따라 오래 전부터 계산의 복잡성을 피하면서도 정확하고 물리적으로 타당한 결과를 얻기 위해 여러 연구자들은 운동량 방정식의 각 항의 크기를 비교하여 상대적으로 크기가 작은 항들을 생략한 여러 가지 간략화된 모형을 제시한 바 있다. 그러나 이러한 연구는 1960년대와 1970년대에 몇몇 연구자들이 연구를 수행하였을 뿐 그 이후로는 대부분의 연구자들이 많은 관심을 가지지 않은 분야이다.

가장 널리 알려진 것은 Henderson(1966)의 연구 결과로 급경사의 총적층 하도에서 급격하게 상승하는 홍수파의 경우에 운동량방정식 각 항의 크기는 다음과 같다고 밝히고 있다.

그러나 하상경사가 매우 완만한 경우 압력항의 크기는 하상경사항의 크기와 비슷하게 되고 Froude수는 매우 작게 된다고 밝히고 있다.

Schaake(1965)에 의하면 측구와 지표류 흐름(gutter and overland flow)에 대한 각 항의 크

표 1. Henderson의 연구 결과에 의한 각 항의 크기(Henderson, 1966)

구 분 \ 항		S_0	$\frac{\partial y}{\partial x}$	$\frac{v \partial v}{g \partial x}$	$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$
크기	(ft/mile)	26	1/2	1/8-1/4	1/20
	(ft/ft)	0.00492	0.00009	0.00002-0.00005	0.00001
비율 (%)		97	1.9	0.5-0.9	0.2

표 2. Schaake의 연구 결과에 의한 각 항의 크기(Schaake, 1965)

구 분 \ 항		S_0	$\frac{\partial y}{\partial x}$	$\frac{v \partial v}{g \partial x}$	$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$
측구 흐름	(ft/mile)	182	9.8	4.9	4.9
	(ft/ft)	0.03447	0.00186	0.00093	0.00093
	비율 (%)	90.3	4.9	2.4	2.4
지표류	(ft/mile)	212	16.4	1.64	1.64
	(ft/ft)	0.04015	0.00311	0.00031	0.00031
	비율 (%)	91.5	7.1	0.7	0.7

기는 다음과 같다.

Harder와 Armacost(1966)는 Missouri 강에서 유량이 24,000 cfs (680 cms)에서 104,000 cfs (2,940 cms)로 거의 동시에 상승하는 경우 수마 일 하류에서 가속도항의 크기는 마찰항의 5%에 지나지 않는다고 밝힌 바 있다. 또 미국 Los Angeles 근처의 활주로에서 유출측정결과 두 가속도항과 압력항의 크기는 바닥경사항과 마찰경사항의 크기의 각각 1/100보다 작다고 결론 내린 바 있다.

일본 Kitakami 강의 실제 홍수를 분석한 Iwasaki(1967)에 따르면 가속도항은 압력항의 1.5% 정도가 된다고 하였다. Ragan(1965)은 지류 유입이 전체 하천유하량의 상당한 부분을 차지할 경우 대류가속도항을 무시하면 전체 계산의 정확도가 상당히 떨어진다고 하였다.

Ponce 등(1978)은 운동파 모형과 확산파 모형의 적용범위를 연구하였다. 연구결과에 의하면 모형의 선정을 위해 중요한 변수는 하상경사와 홍수파의 주기로서 운동파 모형을 적용하기 위해서는 완만한 경사의 하도에서는 홍수파의 주기가 매우 길어야 하지만 지표류 흐름과 같이 경사가 큰 하도에서는 홍수파의 주기가 짧아도 가능한 것으로 나타나 있다. 또 확산파 모형은 운동파 모형보다 더 넓은 범위의 하상경사와 홍수파의 주기에 적용할

수 있다고 밝히고 있다.

국내에서는 여러 가지 수리학적 모형이 실제 하천에 적용된 적이 있다. 한강수계유출프로그램 개선방안(1991)에서는 북한강 저수지 구간은 Muskingum 모형, 남한강 하도구간은 DWOPER 모형과 Muskingum-Cunge 모형을 이용하여 모의한 바 있으며 안성천 홍수예경보 프로그램 개발(1994)과 형산강 홍수예경보 프로그램 개발(1994)에서는 안성천과 형산강의 홍수예경보를 위해 하도구간에 운동파모형을 적용한 바 있다. 또한 금강유역에서도 동역학적 모형인 DWOPER 모형에 의한 홍수예경보시스템이 구축된 적이 있다(금강(I)지구 홍수예경보 프로그램 개발, 1990). 박기호 등(1995)은 St. Venant 방정식의 근사해에 의한 Wave Routing 모형을 낙동강의 위천유역에 적용한 바 있다.

최계운 등(1994)은 운동파 및 확산파 방정식을 가진 유한차분모델의 적용신뢰범위에 대하여 수치모의실험을 이용해 연구하였는데 동역학적 방정식을 무차원화하여 무차원화된 항들의 상대적인 크기를 비교하여 신뢰성있는 적용범위를 결정한 바 있다. 그러나 아직까지 실제 하천에서 운동량 방정식 각 항의 크기를 산정하여 비교 분석한 연구는 없었다.

3. 수치모의

하천흐름을 모의하기 위해 개발된 일차원 수치모형은 사용하는 지배방정식의 형태, 수치기법 등에 따라 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 운동량 방정식의 각 항의 크기를 구하기 위해 4점 음해 유한차분법을 사용하여 지배방정식을 풀이하는 NETWORK(DWOPER) 모형을 이용하였다.

NETWORK 모형은 미국 기상청(NWS, National Weather Service)에서 개발한 일차원 하천흐름해석 모형으로 세계적으로 여러 지역에서 하천흐름해석을 위해 사용된 바 있다(Unver 등, 1987; Husain 등, 1988; Fahmy와 Morel-Seytoux, 1994). NETWORK 모형에서는 식 (1)과 식 (2)로 표현되는 지배방정식을 4점 음해 유한차분법(4-point implicit finite difference method)을 이용하여 차분하며 Newton-Raphson 방법에 의해 해를 구한다. 단일하도 뿐만 아니라 복잡한 하도망에도 적용할 수 있으며 동역학적 모형에 기반을 두고 있기 때문에 하상경사가 완만하고 배수영향이 큰 하천에도 적용할 수 있다. 또한 바람의 영향, 교량의 영향, 사수역의 영향 등도 고려할 수 있고 구간별, 유량 또는 수위별로 최적 조도계수를 구할 수 있는 장점도 가지고 있다.

3.1 단면자료 및 단면간격의 결정

본 연구의 대상구간은 고안에서 인도교까지로서 구간별로 다음과 같이 최근의 측량결과를 수집하였다.

- 고안-왕숙천 유입부: 1986년 측량 결과 (경기지구 한강종합개발계획 보고서, 1987)
- 왕숙천 유입부-인도교: 1992년 측량 결과 (서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수 종합대책 수립, 1992)

NETWORK 모형에서는 단면자료가 표고-하폭의 형태로 입력된다. 하도 횡단면을 표현하는데 필요한 표고-하폭 관계 수는 한 단면에서 8개 정도면 충분한 것으로 알려져 있고(Fread, 1985), 수집된 단면자료의 분석 결과에서도 8개 정도의 표고-하폭 관계이면 단면을 충분히 재현할 수 있

다고 판단되어 한 단면내의 표고-하폭 관계 수를 8개로 결정하였다. 표고-하폭 관계는 하폭의 변화가 큰 지점을 선택하여 한 단면에서 8개가 되도록 결정하였다.

단면간격은 계산결과에 큰 영향을 미치는데 단면간격이 너무 크면 지배방정식의 차분시에 발생하는 절단오차(truncation error)가 커지게 되므로 주의해서 결정해야 한다. 절단오차가 커지면 비현실적인 음의 값의 수위가 계산될 수도 있고, 계산된 수문곡선의 상승부와 하강부가 매우 불규칙한 형태로 될 수도 있다(Fread, 1988). 따라서 하상경사, 단면적, 계산 시간간격 등을 고려하여 적절하게 단면간격을 결정해야 한다. 양해법에서는 고정된 단면간격이 사용되어야 하지만, NETWORK 모형에서 사용하고 있는 음해법에서는 임의의 단면간격이 사용될 수 있다. 일반적으로 단면간격은 수위관측소 지점, 단면이 급격하게 변하는 지점, 큰 지류가 유입되는 지점, 하상경사가 급격하게 변하는 지점 등이 포함되도록 결정되어야 하며 수십 미터에서 수 킬로미터까지 가능하다.

단면간격을 결정하기 위해서 다음과 같은 두가지 방법을 사용할 수 있다.

(1) 단면적의 변화를 고려하는 방법

단면적의 변화가 급격한 곳에서는 단면간격을 작게 선정해야 한다. 일반적인 단면적(A)의 변화기 준은 다음 식과 같다(Fread, 1988).

$$0.635 < A_{i+1}/A_i < 1.576 \quad (3)$$

여기서, A_i 는 한 지점의 단면적을 나타내고 A_{i+1} 은 인접한 다음 지점의 단면적을 나타낸다. Basco (1987)는 위 식을 다음과 같이 수정하여 제시한 바 있다(Fread, 1988).

$$0.70 < A_{i+1}/A_i < 2.00 \quad (4)$$

DAMBRK 모형 내에서는 단면간격이 다음 식에 의해 결정된다.

$$\Delta x_m < \frac{L}{M} \quad (5)$$

여기서, $M=1+2 | A_i-A_{i+1}/\hat{A}$ 이며 $\hat{A} = A_{i+1}$ (단면이 축소되는 경우) 또는 $\hat{A} = A_i$ (단면이 확대되는 경우)이다. \hat{L} 는 원래의 단면간격이고 Δx_m 는 새롭게 결정되어야 하는 단면간격이다. 또 M은 원래 단면간격 내에서 새롭게 나누어져야 하는 단면 간격의 수로서 정수값이다.

(2) 하상경사를 고려하는 방법

하상경사(S_0)가 급한 곳에서 단면간격을 크게 하면 지배방정식을 풀거나 초기 수위를 계산할 때 많은 어려움이 발생하므로(Fread, 1988) 다음 기준에 의해 단면간격을 결정해야 한다.

$$S_{0i}(ft/mi) > 30, \text{ 그리고 } S_{0i}/S_{0i+1} > 2 \text{ 일때는}$$

$$\Delta x_m = S_{0i+1}/S_{0i} \quad (6)$$

$$S_{0i}(ft/mi) < 30, S_{0i+1} > 30,$$

$$\text{ 그리고 } S_{0i+1}/S_{0i} > 2 \text{ 일때는}$$

$$\Delta x_m = S_{0i}/S_{0i+1} \quad (7)$$

여기서, S_{0i} 는 한 단면간격내의 하상경사이고 S_{0i+1} 은 다음 단면간격의 하상경사이다.

본 연구의 대상구간인 고안에서 인도교까지의 중심 하상고를 살펴보면 하상경사가 매우 불규칙함을 알 수 있다. 따라서 하상경사가 급격하게 변하는 곳에서는 가능한 많은 단면을 포함시켜 단면간격을 줄여야 한다. 본 연구에서는 단면적을 고려하는 방법과 하상경사를 고려하는 방법을 이용하여 단면간격을 결정하였는데 최소 117m, 최대 2,040m의 단면간격으로 모두 87개의 단면을 구성하였다.

3.2 조도계수

조도계수의 원래 의미는 하상의 조도(roughness)를 나타내는 척도로서, 하상재료 및 하상표면의 특성에 의해 결정되지만 실제 흐름계산에서는 하천구조물, 사행도, 단면 형태, 단면 변화양상 등 하도의 상황 뿐만 아니라 유량이나 수위에 의해서도 변화하기 때문에 이론적으로 조도계수를 정확하게 계산하는 것은 불가능하다. 이에 따라 흐름계산시 조도계수를 산정하기 위해서는 많은 경험과 실험을 통해 제시된 하상 특성별 조도계수를 이용하는 것이 일반적이다.

는 것이 일반적이다.

홍수자료관리시스템 구축(1994)에서는 NETWORK 모형을 이용해서 표 3과 같이 고안-인도교 구간에서 Manning의 조도계수를 산정한 바 있는데 본 연구에서는 이 결과를 그대로 이용하였다.

3.3 잠실수증보의 모의

팔당댐 하류의 한강 본류에 대하여 수리학적 모형을 적용할 때 특별히 주의를 기울여야 할 부분이 잠실수증보상의 흐름해석이다. 잠실수증보는 고정보와 가동보로 나누어져 있고 홍수시에 홍수량의 크기에 따라 가동보를 개방하기 때문에 실제 상황을 수치모형에서 재현하기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 수증보만을 자세하게 수치적으로 모의하는 것보다는 각 시간별로 전 구간의 수위 종단도를 작성하고 수증보 상하류의 수위를 현실성있게 모의하는 것이 목적이기 때문에 가동보를 고려하지 않고 전 하쪽에 거쳐 EL.6.2m의 고정보가 있는 것으로 가정하였다. 현재 잠실수증보 상류측에는 수문 조작을 위해 수위탑이 설치되어 있고, 매시간 수위가 관리인들에 의해 운영일지에 기록되고 있다. 이중 기록이 남아 있는 1990년 이후의 수위자료(수증보 운영일지, 1990-1993)를 서울특별시 한강관리사업소로부터 입수하여 분석에 이용하였다.

수증보에서의 흐름을 살펴보면 평상시에는 보 상하류에 수위차가 수미터정도 발생하여 보 정상에서는 한계류가 발생하지만 유량이 증가하면 상하류의 수위가 모두 증가하고 상하류의 수위차는 점점 줄어들어 상하류의 수위는 거의 같게 되고 보 정상에서만 약간의 수위저하가 발생하게 된다. 이 때의 흐름은 자유월류형 흐름에서 수중웨어형 흐름으로 바뀌는 상태이다. 계속해서 유량이 증가하여 13,000 cms 정도 이상이 되면 수위차는 거의 발생하지 않게 되고 흐름은 수중웨어형 흐름이 된다. 즉 수증보에서의 월류흐름은 유량에 따라 흐름의 유형이 바뀌게 된다. 이와 같은 수증보에서의 흐름을 수치적으로 정확하게 모의하는 것은 일반 하도구간에 비해 매우 복잡하다. 유량에 관계없이 자유월류형 흐름만 발생한다면 한계수심의 계산에 의해 흐름을 모의할 수 있지만 흐름상태가 유량에 따라 변

표 3. 한강 하류부 구간의 조도계수

고안-광장 구간		잠수교-인도교 구간	
유량 (cms)	조도계수 (n)	유량 (cms)	조도계수 (n)
1,700	0.088	1,000	0.051
2,100	0.077	2,500	0.035
2,900	0.068	4,000	0.028
4,000	0.059	5,000	0.025
5,000	0.054	6,700	0.022
7,000	0.047	12,000	0.020
15,000	0.041	30,000	0.020
30,000	0.040	-	-

화하는 경우에는 별도의 모의방법이 필요한 것이다.

본 연구에서는 보에서의 흐름을 모의하기 위해 내부경계조건으로 수위-유량 관계를 사용하였다. 보가 설치된 지점에 대한 유량 측정성과가 있으면 수위-유량 관계곡선을 구할 수 있고 이를 이용하면 흐름상태에 관계없이 흐름을 모의할 수 있다. 그러나 잠실수중보 지점에는 현재 수위-유량 관계가 개발되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 잠실수중보상의 흐름을 자유월류형 흐름과 수중웨어형 흐름으로 구분한 후 자유월류형 흐름에 대해서는 임의로 선정된 몇개의 유량에 대한 한계수심을 계산하였다. 또 수중웨어형 흐름에 대해서는 과거 홍수자료를 이용하여 수위-유량 관계를 산정하였다. 이렇게 작성된 수위-유량 관계곡선을 모형에 적용하여 잠실수중보의 수위를 계산한 후 이 수위가 실제 수위에 근접하도록 수위-유량 관계 곡선을 조정하여 최종 수위-유량 관계 곡선을 구하였다. 이와 같이 수위-유량 관계곡선을 이용하면 자유월류형 흐름에 대해서는 큰 문제가 없지만 수중웨어형 흐름을 모의하기 위해서는 수중보 하류측 수위가 더 하류쪽의 영향을 받지 않아서 특정한 상류측 수위에 대해서는 상하류의 수위차가 항상 동일해야 한다. 그렇지 않으면 수위-유량 관계곡선이 아니라 수위차-유량 관계곡선을 사용해야 한다. 잠실수중보는 유량이 평상시와 같이 작은 경우에는 조석의 영향이 어느 정도 미치지지만 이 때에는 자유월류형 흐름이기 때문에 문제가 없고 홍수시와 같이 유량이 큰 경우에는 조석의 영향이 미치지 않고 지류에

의한 배수영향도 크지 않기 때문에 본 연구에서와 같이 수위-유량 관계곡선을 사용해도 이러한 측면에서는 무방하리라고 사료된다. 하지만 이렇게 구한 수위-유량 관계곡선은 실측에 의하지 않고 계산된 것이므로 실제 적용시에는 어느 정도 오차가 있을 수 있으며 단일 수위-유량 관계곡선을 사용함으로써 발생하는 오차도 있을 것으로 생각된다.

1990년의 6개 홍수사상과 1991년의 1개 홍수사상에 대해 앞에서 구한 수위-유량 관계를 적용하여 모의를 실시한 결과 90/06/23, 90/07/17, 90/07/23, 90/08/31 등의 홍수사상에서는 식 (8)과 같은 실측치와 계산치의 평방자승근(rms ; root mean square) 오차가 각각 0.120m, 0.234m, 0.137m, 0.277m로 비교적 작게 나타났다. 그러나 90/06/20, 90/09/09, 91/07/24 등의 홍수사상에서는 평방자승근 오차가 각각 0.560m, 0.361m, 0.376m로 상대적으로 크게 나타나고 있다.

$$\text{rms오차} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (HC_i - HM_i)^2}{n}} \quad (8)$$

여기서, HC_i 는 계산된 수위, HM_i 는 실측된 수위, n 은 자료의 수이다.

이렇게 몇몇 홍수사상에서 오차가 상대적으로 크게 나타나는 것은 수문조작과 관련된 것으로 판단된다. 잠실수중보에는 5개의 수문이 복단에 설치되어 있어 수위유지나 홍수소통의 목적에 따라 자동 또는 수동으로 조작되고 있다. 이와 같이 실제에서

는 수위에 따라 수문을 조작하지만 모형에서는 수문조작의 효과를 무시하고 고정보만 설치되어 있는 것으로 가정하여 수위-유량 관계곡선을 내부경계 조건으로 사용하였기 때문에 모형의 계산 결과에 어느 정도 오차가 있을 것으로 여겨진다. 이와 같은 오차를 해결하기 위해서는 수문조작의 영향을 고려하여 보에서의 흐름을 모의할 수 있는 연구가 필요하나 이는 차후의 과제로 미루기로 한다.

4. 한강 하류부의 흐름 특성

연구 대상구간인 고안-인도교 구간의 최심하상고는 그림 1과 같이 매우 불규칙하다. 이와 같이 불규칙한 최심하상고를 그대로 모형에 입력하여 구한 운동량 방정식의 각 항의 크기는 편향된 값을 나타낼 수 있다. 즉 이와 같이 불규칙하고 역경사와 순경사가 반복되는 최심하상고의 변화양상은 주로 중력항과 압력항에 큰 영향을 미쳐 다른 항들의 값보다 매우 크게 나타나게 한다.

따라서 이와 같은 하상경사를 그대로 사용하면 비정상적인 결과가 도출될 수 있으므로 평균 하상경사를 구하여 이 구간의 흐름특성을 왜곡하지 않는 범위내에서 전체 최심하상고가 완만하게 변화하도록 조정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 필요에 의해 최심하상고를 기준으로 고안-인도교 구간을 5개 구간으로 분리하고 이 구간의 하상

경사를 eye-fitting에 의해 그림 1과 같이 가정하였다.

이러한 하상경사의 가정은 최심하상고를 기준으로 역경사가 발생하지 않으면서 전체적으로 부드러운 하상경사가 되도록 조정하였고 조정된 하상경사로 인해 제외된 최심하상고 이하의 부분은 면적으로 처리하여 실제 계산에 반영될 수 있도록 하였기 때문에 이 구간의 흐름특성을 왜곡하지는 않을 것으로 판단된다.

또 이렇게 조정된 단면을 이용하여 홍수자료관리 시스템 구축(1994)에서 사용한 방법과 동일한 방법으로 조도계수를 산정한 결과도 원래의 단면을 이용하여 산정한 조도계수와 거의 차이가 없게 나타나서 하상경사의 조정으로 인한 이 구간의 물리적 특성도 크게 변하지 않았다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 각 구간의 조정된 하상경사를 표 4에 나타내었다.

표 4. 한강 하류부 하도의 조정된 하상경사

구간	하상경사
제 1 구간	0.00008
제 2 구간	0.00037
제 3 구간	0.00008
제 4 구간	0.00046
제 5 구간	0.00009

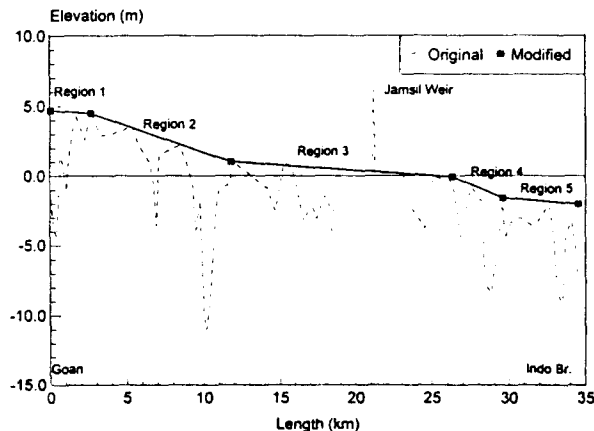


그림 1. 한강 하류부 하도의 최심하상고

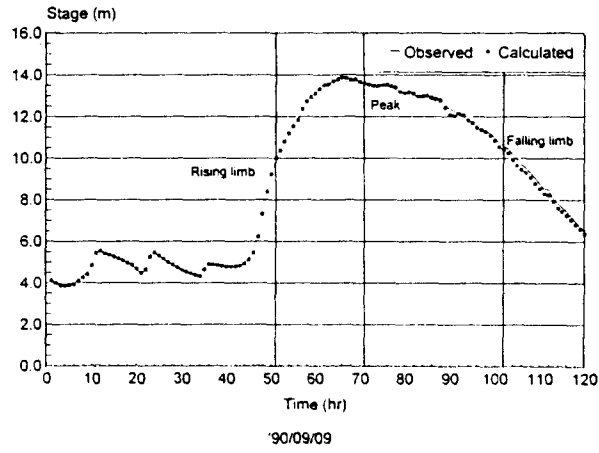


그림 2. 잠수교 지점의 계산수위와 실측수위 비교 ('90/09/09 홍수사상)

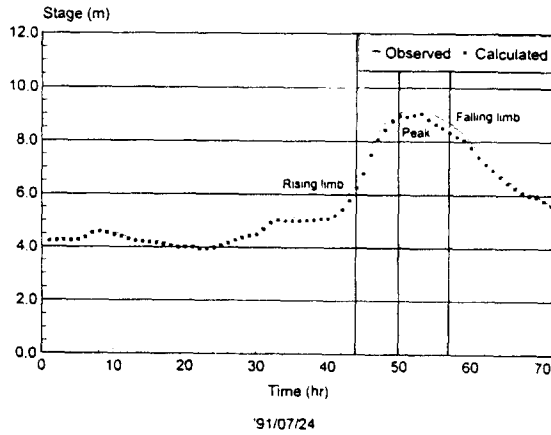


그림 3. 잠수교 지점의 계산수위와 실측수위 비교 ('91/07/24 홍수사상)

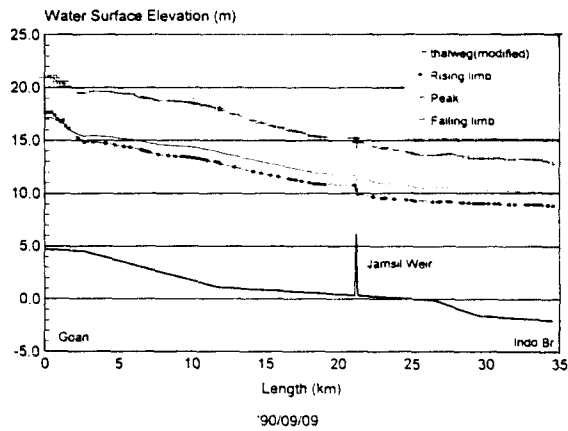


그림 4. 대상구간의 수위종단도 ('90/09/09 홍수사상)

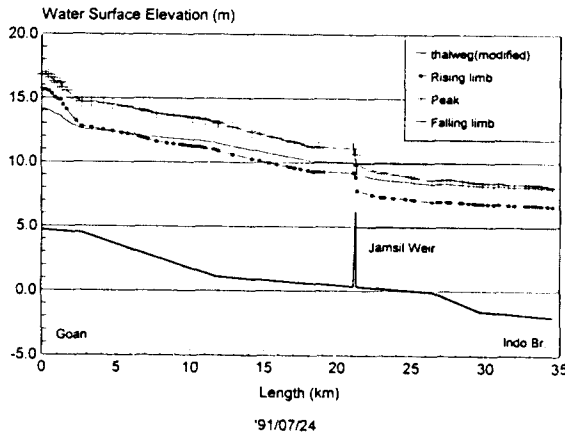


그림 5. 대상구간의 수위종단도 ('91/07/24 홍수사상)

모의를 위해 사용한 홍수사상은 1990년 9월 9일 홍수사상과 1991년 7월 24일 홍수사상이다. 두개의 홍수사상 전체를 모의한 후 수문곡선의 상승과 하강에 따른 운동량 방정식의 각 항의 크기를 비교하기 위해 수문곡선의 상승부, 첨두부, 하강부에서 각각 대표적인 하나의 시각을 채택하였다. 1990년 9월 홍수사상에서 상승부는 9월 11일 01시, 첨두부는 9월 11일 23시, 하강부는 9월 13일 06시를 나타내며 1991년 7월 홍수사상에서 상승부는 7월 25일 20시, 첨두부는 7월 25일 26시, 하강부는 7월 26일 09시를 나타낸다. 그림 2와 그림 3은 상승부, 첨두부, 하강부의 위치와 두 홍수사상의 모의결과 얻어진 잠수고 지점의 계산수위와 실측수위의 비교를 나타내고 있으며 그림 4와 5는 상승부, 첨두부, 하강부에서의 수위종단도이다. 이 때 사용된 상하류경계조건은 각각 고안지점과 인도교 지점의 수위이며 계산 시간간격은 1시간이다.

제 1구간(고안-팔당대교 구간)은 다른 구간보다 수면경사가 급하게 나타났는데 이것은 이 구간의 하폭이 다른 구간에 비해 많이 좁기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 제 3구간은 잠실수중보가 있는 구간인데(그림 1 참조) 잠실수중보에서의 수위변화도 이 그림에서 확인할 수 있다. 유량이 작은 '91년 홍수사상에서는 '90년 홍수사상에서 보다 잠실수중보에서의 수위차가 크게 발생하고 유량이 증가함에 따라 수위차가 줄어드는 것을 알 수

있다.

각 구간에서 구한 운동량 방정식의 각 항의 크기를 분석하기 위해 각 구간별로 계산된 값들을 평균하여 그 구간내에서는 동일한 것으로 가정하였다. 그중 제 3구간에는 잠실수중보가 위치하고 있는데 이를 모의하기 위해 수위-유량 관계곡선을 사용하였기 때문에 이 단면의 값은 제외하고 제 3구간의 평균값을 계산하였다.

4.1 국부가속도항의 크기

국부가속도항은 시간에 따른 유량의 변화를 나타내는 것으로 지형적인 특성보다는 홍수의 시간적 변화특성을 나타내는 항이다. 따라서 수위나 유량의 변화가 작은 경우에는 이 항의 값은 작게 나타나고 수위나 유량의 변화가 큰 경우에는 이 항의 값은 크게 나타나게 된다.

그림 6은 1990년 홍수사상에 대한 수문곡선의 상승부, 첨두부, 하강부에서 국부가속도항의 크기를 나타낸 것이다. 국부가속도항은 수위나 유량의 시간에 따른 변화에 의해 결정되는데 이 홍수사상의 경우에는 -0.00002 부터 0.00005 까지의 값을 나타내고 있다.

전체적인 국부가속도항의 변화를 살펴보면 수문곡선의 상태와 하도 구간에 따라 많은 차이를 나타내고 있다. 수문곡선의 상태에 따른 변화를 살펴보면 상승부의 경우에는 국부가속도항의 값이 모두

양의 값으로 나타나서 전 구간에 걸쳐 수위나 유량이 전 시간보다 상승했음을 나타내 주고 있으며 침투부에서는 수위나 유량이 거의 변화가 없기 때문에 전구간의 국부가속도항의 값이 거의 영으로 나타나고 있다. 반면에 수문곡선의 하강부에서는 전구간의 국부가속도항의 값이 음의 값으로 나타나서 전 시간에 비해 수위나 유량이 감소했음을 나타내고 있다.

국부가속도항의 구간에 따른 변화를 살펴보면 제 1구간에서는 다른 구간에 비해 상당히 크게 나타나고 이 구간을 제외한 다른 구간에서는 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 이것은 이 구간에서의 시간에 따른 수위나 유량의 변화가 다른 구간에 비해 크게 나타나는 것을 의미하는데 이 구간이 상류경계(고안 지점 직하류)인 것을 감안하면 상류경계에서 발생한 변화가 이 구간에 가장 빨리 전파되기 때문인 것을 알 수 있다.

1991년 7월 홍수사상의 경우에는 국부가속도항의 크기가 -0.00001 에서 0.00003 로 1990년 9월 홍수사상에 비해 조금 작게 나타났으나 수문곡선의 상태나 구간에 따른 변화양상은 거의 유사하게 나타났다.

4.2 대류가속도항의 크기

대류가속도항은 어느 순간의 유량의 거리에 따른 가속도 변화를 나타내는 것으로 하도특성의 변화를 반영하는 항이다. 즉 수위나 유량, 유속 등의 하도종단에 따른 가속도 변화를 나타내는 항으로서 수위나 유량, 유속의 거리에 따른 가속도 변화가 큰 구간에서는 이 항의 절대값이 크게 나타난다.

그림 7은 1990년 9월 홍수사상에 대한 수문곡선의 상태와 거리에 따른 대류가속도항의 변화를 나타내고 있는데 이 홍수사상의 경우에는 -0.00068 에서 0.00007 정도의 값을 보여 국부가속도항보다 상당히 크게 나타났다.

구간에 따른 대류가속도항의 변화를 살펴보면 제 1구간의 절대값이 가장 크게 나타났고 수문곡선의 상태에 따른 변화도 크게 나타났는데 이것은 제 1구간에서의 거리에 따른 수위나 유량의 변화가 크기 때문이다. 이것은 이 구간의 하도특성을 반영하

는 결과인데 고안에서 팔당대교까지의 하도는 폭이 300-400미터 정도로서 그 하류구간의 9,000-1,300미터에 비해 매우 좁기 때문에 하폭이 갑자기 넓어지면서 수위가 급격히 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 또 이 구간은 상류경계이기 때문에 홍수시에는 팔당댐에서 방류된 물이 안정되지 않은 상태에서 빠른 속도로 유하하기 때문에 거리에 따른 수위의 변화는 크게 나타나는 것으로 판단된다.

1991년 7월 홍수사상에 대한 대류가속도항의 크기는 -0.00029 에서 0.00003 정도로 1990년 9월 홍수사상보다 작게 나타났으나 구간이나 수문곡선의 형태에 따른 변화는 두 홍수사상이 매우 유사하게 나타났다.

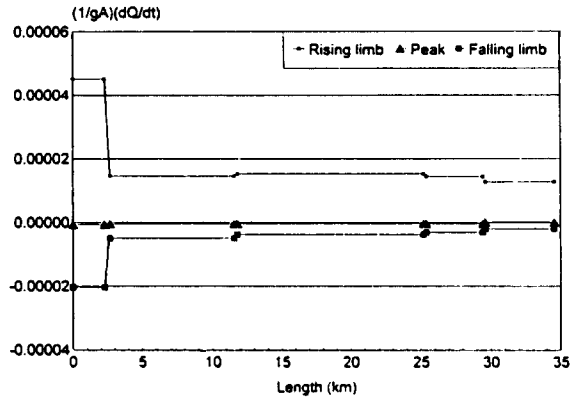
4.3 마찰항의 크기

마찰항은 하상재료나 단면 크기의 변화, 하천구조물 등에 의해 나타나는 흐름과 하상과의 마찰을 반영하는 항이다. 일반적으로 운동량방정식의 각 항중에서 다른 항에 비해 크게 나타나는 항으로 알려져 있으며 중력항과 함께 흐름의 특성을 결정짓는 중요한 요소로 알려져 있다.

그림 8은 1990년 9월 홍수사상에 대한 수문곡선의 상태와 구간에 따른 마찰항의 변화를 나타낸 것이다. 마찰항의 값들은 모두 양의 값으로 나타나고 있는데 이 홍수사상의 경우에는 0.00003 에서 0.00141 정도의 값을 나타내고 있다.

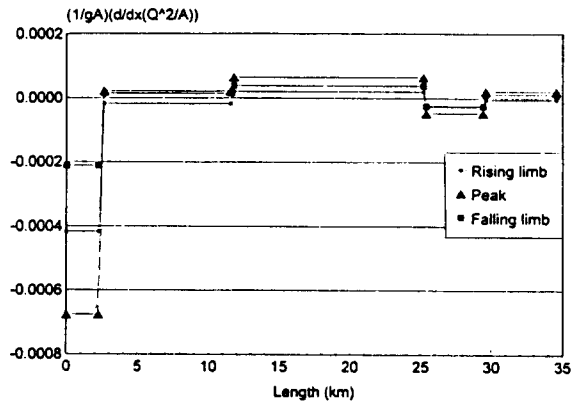
마찰항의 크기를 구간별로 살펴보면 제 1구간에서는 0.0008 에서 0.00141 로 다른 구간에 비해 값도 크고 수문곡선의 상태에 따른 변화도 크게 나타난다. 다른 구간에서는 대부분 0.0001 에서 0.0002 의 값을 보이고 있어서 수문곡선의 상태나 구간에 따른 변화가 매우 작은 편이다. 이와 같은 결과도 역시 앞의 항들과 마찬가지로 하도특성에 따른 영향으로서 제 1구간이 다른 구간에 비해 독특한 하도특성을 지니고 있음을 나타내는 것이다.

1991년 7월 홍수사상에서 나타나는 마찰항의 크기는 제 1구간에서 $0.00069-0.00110$, 다른 구간에서 $0.00004-0.00021$ 로서 1990년 9월 홍수사상과 유사하고 수문곡선의 상태나 구간에 따른 변화도 거의 유사한 편이다.



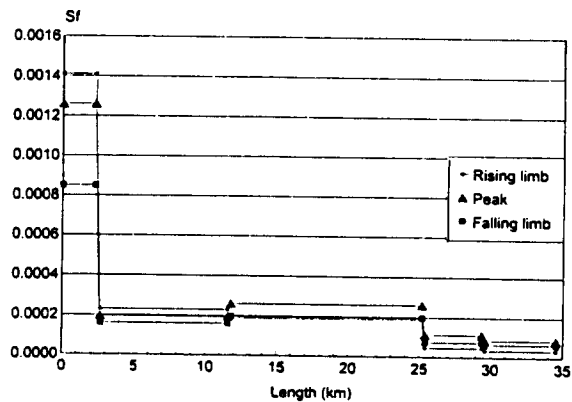
'90/09/09

그림 6. 국부가속도항의 크기 변화('90/09/09 홍수사상)



'90/09/09

그림 7. 대류가속도항의 크기 변화('90/09/09 홍수사상)



'90/09/09

그림 8. 마찰항의 크기 변화('90/09/09 홍수사상)

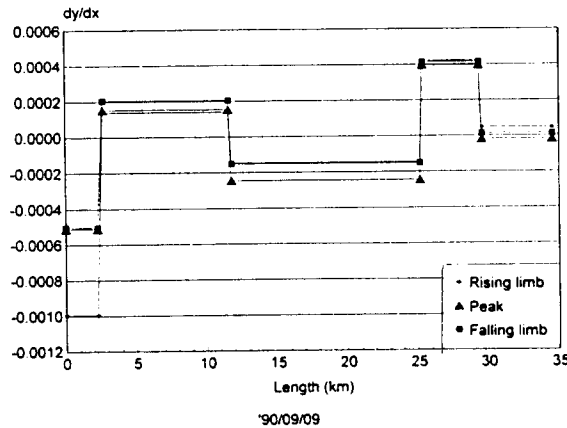


그림 9. 압력항의 크기 변화('90/09/09 홍수사상)

4.4 압력항의 크기

압력항은 거리에 따른 수심의 변화, 즉 단면구간 내의 압력의 변화를 나타내는 항으로서 구간별 수심변화를 직접적으로 반영하는 항이다. 이 항은 수면표고가 아니라 수심의 거리에 따른 변화를 나타내기 때문에 수면 종단도와 최심하상고의 상대적인 증감에 의해 크기가 결정된다.

그림 9는 1990년 9월 홍수사상에 대한 압력항의 변화를 나타내고 있다. 이 홍수사상에서는 -0.00099에서 0.00042까지의 값을 나타내고 있다.

압력항의 크기는 구간별로 수면표고와 최심하상고에 의해 결정되기 때문에 각 구간의 최심하상고에 크게 영향을 받게 된다. 제 1구간의 최심하상고의 변화는 매우 완만한 반면 수면표고의 변화는 크기 때문에 이 구간에서 압력항의 절대값은 크게 나타나며 제 2구간, 제 3구간, 제 5구간 등에서는 하상경사와 수면표고 모두 완만하기 때문에 압력항의 절대값이 작게 나타나고 있다. 또 제 4구간에서는 수면표고는 완만한 반면 최심하상고의 변화가 크기 때문에 압력항의 절대값이 크게 나타나고 있다.

1991년 7월 홍수사상에서도 압력항의 크기가 -0.00097에서 0.00043으로 1990년 9월 홍수사상과 거의 유사하며 수문곡선의 상태나 구간별 변화도 거의 동일하다.

4.5 기존 연구 결과와의 비교

본 연구에서 구한 각 항의 크기를 기존의 연구결과와 비교하면 표 5와 같다. 각 연구에서 대상으로 한 하도의 하상경사가 다르기 때문에 각 항의 값을 직접적으로 비교할 수는 없으나 전반적인 값의 범위는 비교할 수 있다. Schaake의 연구에서 대상으로 한 하도는 하상경사가 0.01-0.03 정도로 매우 급하고 Henderson의 연구에서 대상으로 한 하도도 하상경사가 0.00492로 역시 급한 편이나 본 연구에서 대상으로 한 한강 하류부는 하상경사가 0.00008-0.00046으로 매우 완만하다. 이와 같은 하상경사의 차이는 다른 항의 값에 결정적인 영향을 미친다.

본 연구와 Henderson의 연구에서 구한 국부가속도항의 크기는 유사하지만 Schaake의 연구 결과에서는 다른 두 연구보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 대류가속도항의 크기를 살펴보면 Henderson의 결과와 Schaake의 결과가 모두 본 연구에서 구한 값의 범위에 포함되고 있다. 압력항의 크기에 있어서는 Henderson의 결과가 가장 작고 Schaake의 결과가 가장 크게 나타나고 있다. 이와 같이 각 연구의 결과가 차이가 나는 것은 일차적으로 하상경사가 크게 다르기 때문이며 그 외에도 하도의 지형적 특성과 홍수특성에 의해서도 각 항의 크기가 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

표 5. 운동량 방정식 각 항의 크기 비교

항		국부가속도항	대류가속도항	마찰항	압력항	중력항
연구자						
본 연구	'90/09/09	-0.00002 ~ 0.00005	-0.00068 ~ 0.00007	0.00003 ~ 0.00141	-0.00099 ~ 0.00042	0.00008 ~ 0.00046
	'91/07/24	-0.00001 ~ 0.00003	-0.00029 ~ 0.00003	0.00004 ~ 0.00110	-0.00097 ~ 0.00043	0.00009 ~ 0.00046
Henderson(1966)		0.00001	0.00002 ~ 0.00005	-	0.00009	0.00492
Schaake (1965)	측구흐름	0.00093	0.00093	-	0.00186	0.03447
	지표류	0.00031	0.00031	-	0.00311	0.01015

5. 결과의 비교 및 분석

본 절에서는 운동량 방정식의 각 항의 상대적 크기를 비율로 나타내었다. 여기에서 고려해야 할 하나의 사항은 수치해석시 발생하는 수치오차(numerical error)이다. 이론적으로 운동량 방정식의 각 항을 모두 합하면 완전하게 영이 되어야 하지만 실제 계산된 각 항을 모두 합하면 완전하게 영이 되지 않는 경우가 많이 있다. 이것은 수치해석시 발생하는 오차로서 각 항의 절대값이 커질수록 이 값도 커진다. 본 연구에서는 이러한 수치오차의 상대적 크기도 비율로 함께 나타내었다.

수문곡선의 상승부에서 나타나는 결과가 홍수사상별로 그림 10, 그림 11에 나타나 있으며 수문곡선의 첨두부에서 나타나는 결과가 그림 12, 그림 13, 수문곡선의 하강부에 나타나는 결과가 그림 14, 그림 15에 각각 나타나 있다. 그림에서 dt는 국부가속도항, dx는 대류가속도항, Sf는 마찰항, dy/dx는 압력항, So는 중력항, error는 수치오차를 나타낸다.

그림에서 각 항의 전체적인 구성비율을 살펴보면 홍수사상이나 수문곡선의 상태에 관계없이 구간별로 대부분 거의 유사한 형태를 갖고 있음을 알 수 있다.

우선 제 1구간에서는 마찰항이 45-50% 정도이고 그 다음으로 압력항과 대류가속도항이 각각 20-40%, 6-27% 정도를 차지하고 있으며 중력항은 3-6%, 국부가속도항은 0-2% 정도로 나타나고 있

다. 이 구간은 하상경사에 비해 수위의 변화가 심한 구간으로 다른 구간에 비해 대류가속도항이 크게 나타나고 있으며 중력항은 매우 작게 나타나고 있다. 1991년 7월 홍수사상의 상승부에서 나타나는 제 1구간의 수치오차는 다른 경우에 비해 특이하게 4% 정도로 크게 나타나고 있다. 이는 각 항의 절대값이 커짐에 따라 수치오차가 커짐으로 인해 나타나는 결과로 판단된다.

제 2구간에서는 수문곡선의 상태에 관계없이 중력항이 50% 정도로 나타나고 있다. 수문곡선의 상승부와 첨두부에서는 마찰항과 압력항이 각각 25-30%, 17-24% 정도로 나타나는 반면 수문곡선의 하강부에서는 압력항과 마찰항이 각각 27-33%, 16-21% 정도로 나타나서 조금 다른 양상을 보이고 있다. 국부가속도항과 대류가속도항은 0-3% 정도로 나타나고 있다.

제 3구간에서는 마찰항이 40-44%로 가장 크게 나타나고 있으며 압력항과 중력항이 각각 26-38%, 12-23% 정도의 값을 나타내고 있다. 대류가속도항과 국부가속도항은 각각 3-10%, 0-3% 정도로 작은 값을 보이고 있다.

제 4구간에서는 중력항이 45-48%, 압력항이 38-44%로 두 항이 대부분을 차지하고 있다. 마찰항은 5-11%, 대류가속도항은 2-5%, 국부가속도항은 0-1% 정도를 차지하고 있다.

제 5구간에서는 중력항이 41-49%로 가장 크고 마찰항과 압력항이 각각 18-39%, 7-26%로 나타나서 이 세항이 대부분을 차지하고 있다. 대류가속도항과 국부가속도항은 각각 0-10%, 0-7% 정도

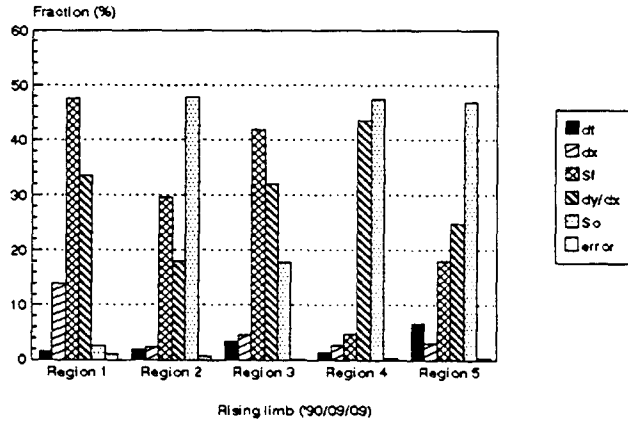


그림 10. 수문곡선의 상승부에서의 각 항의 비율 ('90/09/09 홍수사상)

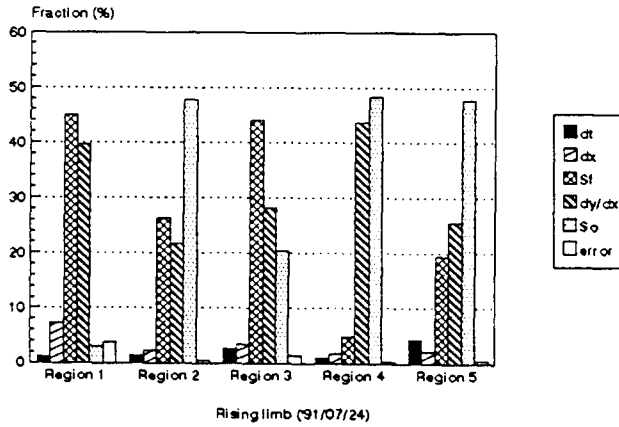


그림 11. 수문곡선의 상승부에서의 각 항의 비율 ('91/07/24 홍수사상)

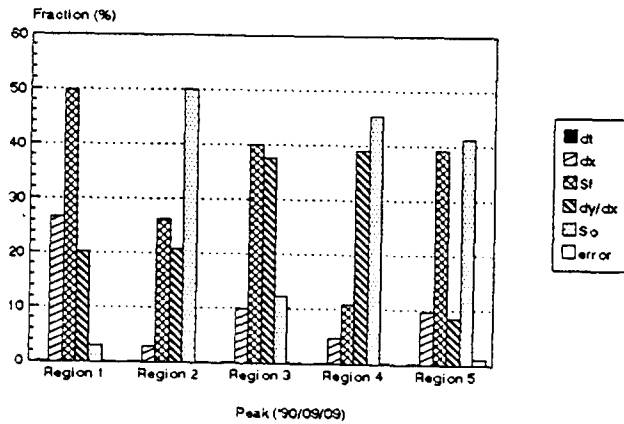


그림 12. 수문곡선의 첨두부에서의 각 항의 비율 ('90/09/09 홍수사상)

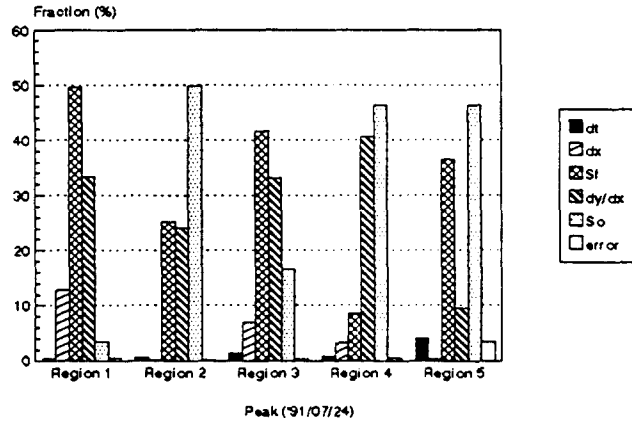


그림 13. 수문곡선의 첨두부에서의 각 항의 비율('91/07/24 홍수사상)

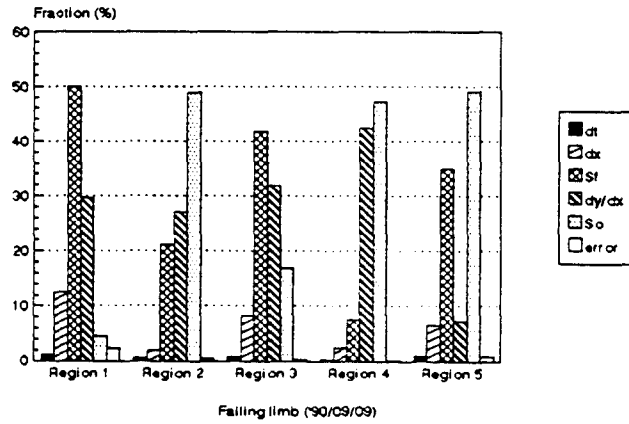


그림 14. 수문곡선의 하강부에서의 각 항의 비율('90/09/09 홍수사상)

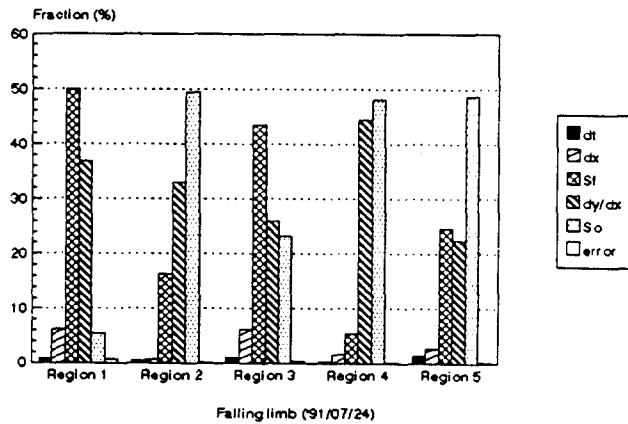


그림 15. 수문곡선의 하강부에서의 각 항의 비율('91/07/24 홍수사상)

로 나타났다.

위의 결과를 정리하면 제 1구간, 제 3구간, 제 4구간 등은 홍수사상이나 수문곡선의 상태에 관계없이 각 구간별로 각 항의 구성형태가 거의 유사하며 제 2구간과 제 5구간도 각 구간별로 구성형태가 크게 다르지는 않다. 이와 같이 각 항의 절대값은 홍수특성에 따라 다르지만 구간별로 각 항의 구성형태가 거의 유사한 것은 각 항의 절대값은 홍수특성에 의해 결정되지만 각 항의 구성비율은 홍수특성보다는 하도특성에 의해 결정되기 때문인 것으로 판단된다.

수문곡선의 상태에 따른 각 항의 구성비율을 살펴보면 수문곡선의 상승부에서 특이한 사항을 확인할 수 있는데 국부가속도항이 침두부나 하강부에 비해 상대적으로 크게 나타나서 상승부에서 급격하게 상승하는 홍수의 특성을 잘 반영하고 있다.

전체적으로 국부가속도항과 대류가속도항이 작게 나타나고 중력항, 압력항, 마찰항 등이 대부분의 구간에서 크게 나타나서 이 세항이 흐름을 결정하는 주요 항임을 알 수 있다. 그러나 제 1구간에서처럼 중력항보다 대류가속도항이 커지는 경우가 있음을 주목할 필요가 있다.

기존의 연구결과에 의하면 중력항과 마찰항이 다른 항들에 비해 매우 크게 나타난다는 것이 일반적이고 하상경사가 완만한 경우에는 압력항의 크기도 커져서 중력항과 유사하게 되는 것으로 나타나 있는데(Henderson, 1966) 이러한 결과는 본 연구의 결과와도 일치한다. 그러나 가속도항의 크기에 대해서는 기존의 연구결과와 차이가 있다. 기존의 연구결과들에 의하면 국부가속도항과 대류가속도항의 크기는 마찰항의 5%(Harder와 Armacost, 1966), 압력항의 1.5%(Iwasaki, 1967)라고 되어 있는 반면에 본 연구의 결과에 의하면 가속도항의 크기가 구간별로 차이가 있긴 하지만 제 1구간의 대류가속도항이 전체 항에 대해 최대 27%로 나타나는 경우가 있다. 이와 같은 가속도 항의 크기 차이는 이 구간의 하도특성, 즉 하상경사가 매우 완만하고 하폭이 급격하게 넓어지는 구간이기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 제 1구간을 제외한 나머지 구간에서의 대류가속도항의 비율도 0-10% 정도로 기존의 연구 결과보다 크게 나타나고 있다.

이와 같이 한강 하류부 구간에서는 하상경사가 매우 완만하기 때문에 운동량 방정식에서 마찰항, 중력항외에도 압력항이 큰 비중을 차지하고 있으며 수문곡선의 상태와 구간특성에 따라 국부가속도항과 대류가속도항도 무시할 수 없을 정도로 크게 나타나는 경우가 많이 있다. 따라서 이 구간의 흐름을 해석하기 위해서 운동량방정식의 일부 항을 무시하고 해석하는 단순화된 모형을 사용하면 많은 오차를 내포하게 될 것으로 판단된다. 특히 제 1구간과 같이 하상경사가 매우 완만하면서도 흐름이 안정되지 않고 급격한 단면변화로 인해 흐름이 변화하는 구간에서는 대류가속도항이 매우 크게 나타나고 있다. 또 수문곡선의 상승부에서 홍수가 급격하게 상승하는 경우에는 국부가속도항이 무시할 수 없을 정도로 나타나기도 한다. 따라서 이 구간에서는 단순화된 모형보다는 동역학적 모형을 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 1차원 유한차분모형인 NET-WORK 모형을 이용하여 고안과 인도교 사이의 한강하류부에 대한 St. Venant 방정식의 각 항의 크기를 1990년 9월과 1991년 7월 등 두개의 홍수사상에 대해 구하여 비교 분석하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 운동량방정식의 각 항의 상대적인 구성비율은 수문곡선의 상태(상승부, 침두부, 하강부)나 홍수사상에 관계없이 동일 하도구간내에서는 대부분 유사하게 나타났다. 이것은 각 항의 상대적인 크기가 수문곡선의 상태보다는 하상경사, 하도평면형 등 하도의 지형적 특성에 의해 결정되기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 일반적으로 국부가속도항과 대류가속도항이 작게 나타나고 중력항, 압력항, 마찰항 등이 대부분의 구간에서 크게 나타났다.

(3) 한강 하류부(고안-인도교 구간)에서는 수문곡선의 상태와 하도구간에 따라 국부가속도항과 대류가속도항의 상대적인 비율이 무시할 수 없을 정도로 큰 경우가 있으므로 동역학적 모형을 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

(4) 한강 하류부와 같이 하상경사가 완만한 지역의 흐름해석에 운동과 모형 등 단순화된 하천흐름 해석모형을 사용하면 많은 오차가 포함될 수 있으므로 하천의 지형적 특성과 홍수특성을 충분히 고려하여 적절한 모형을 선정해야 한다.

참 고 문 헌

- 경기지구 한강종합개발계획 보고서. (1987). 경기도.
- 금강 (I) 지구 홍수예경보 프로그램 개발. (1990). 농어촌진흥공사.
- 박기호, 조현경, 지홍기, 이순탁 (1995). “자연수로의 수리학적 홍수추적.” 한국수자원학회지, 제28권, 제3호, pp. 113-122.
- 서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수종합대책 수립. (1992). 연구보고서, 서울특별시.
- 수중보 운영일지. (1990-1993). 한강관리사업소.
- 안성천 홍수예경보 프로그램 개발. (1994). 연구보고서, 건설부 한강홍수통제소.
- 최계운, 안경수, 안상진 (1994). “하천흐름해석에서 단순화된 운동방정식을 사용한 유한차분모델의 신뢰성있는 적용범위.” 한국수문학회지, 제27권, 제4호, pp. 123-133.
- 한강수계유출프로그램 개선방안. (1991). 연구보고서, 건설부 한강홍수통제소.
- 형산강 홍수예경보 프로그램 개발. (1994). 연구보고서, 건설부 한강홍수통제소.
- 홍수자료관리시스템 구축. (1994). 연구보고서, 건설부 한강홍수통제소.
- Basco, D.R. (1987). “Improved robustness of the NWS DAMBRK algorithm.” *Hydraulic Engineering (Proc. of the 1987 National Conference on Hydraulic Engineering)*, ASCE, New York, pp. 776-781.
- Fahmy, H., and Morel-Seytoux, H.J. (1994). “Hybrid noninertia and statistical model versus hydrodynamic routing.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 706-721.
- Fread, D.L. (1985). “Channel routing.” *Hydrological forecasting*, M.G. Anderson and T.P. Burt, eds., John Wiley & Sons, pp. 437-503.
- Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK model: Theoretical background/user documentation*. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Spring, Md.
- Harder, J.A., and Armacost, L.V. (1966). “Wave propagation in rivers.” *Report No. 1, Ser. 8*, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan, New York.
- Husain, T., Abderrahman, W.A., Khan, H.U., Khan, S.M., Khan, A.U., and Eqnaibi, B.S. (1988). “Flow simulation using channel network model.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 3, pp. 424-441.
- Iwasaki, T. (1967). “Flood forecasting in the river Kitakami.” *Proc. International Hydrology Symposium*, Fort Collins, Colorado, Vol. 1, pp. 103-112.
- Ponce, V.M., Li, R.M., and Simons, D.B. (1978). “Applicability of kinematic and diffusion models.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 104, No. 3, pp. 353-360.
- Ragan, R.M. (1965). “Synthesis of hydrographs and water surface profiles for unsteady open channel flow with lateral inflows,” Ph.D dissertation, Cornell University Water Resources Center, New York.
- Schaake, J.C. (1965). “Synthesis of inlet hydrograph,” Ph.D dissertation, Johns Hopkins University.
- Unver, O., Mays, W.M., and Lansey, K. (1987). “Real-time flood management model for highland lake system.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 620-638.

〈접수: 1995년 8월 5일〉