

〈論 文〉

섬진강 하류부에서의 수위-유량관계에 관한 연구 A Study on the Stage-Discharge Relationship in the Lower Reach of the Sumjin River

이 재 형*, 황 만 하**

LEE Jea Hyoung and HWANG Man Ha

Abstract □ In tidal rivers, the water level is affected by a tidal wave. The latter creates higher flood stages that enlarge the flood plain areas and increase potential damages. In such rivers, the water level is not solely a function of the flow discharge but rather a joint function of both the discharge and tidal phenomena. This paper attempts at formulating a relation between tidal water level and river flow discharge that can be used for the predictions of water level in coastal rivers. Numerical applications were performed on the HaDong and the SongJung Station in Sumjin river with satisfactory results. The correlation coefficients between the tide(M) and the water stage(Z) at the HaDong Station is 0.558, and SongJung is 0.016. From this result, the water level at HaDong Station is greatly affected by a tide, whereas SongJung is not.

요 지 : 감조하천의 수위는 조석과 上流의 유출량과의 상호작용에 의해 변화하며, 특히 만조상태에서는 홍수위가 증가하여 재해의 원인이 된다. 이러한 감조하천에서 수위는 유량만의 함수라기 보다는 유량과 조석과의 결합에 의한 함수이다. 본 논문은 조위와 하천 유량사이의 관계를 정식화하여 감조하천에서의 수위를 예측할 수 있도록 하는 것이다. 제시된 이론의 검증은 섬진강의 감조하천내에 있는 송정 및 하동수위표에 적용하였다. 적용 결과, 송정수위표에서는 수위에 대한 조위의 상관관계가 0.016으로 조위의 영향이 작으나, 하동수위표에서는 0.558로 조위의 영향이 크게 나타났다.

1. 서 언

하천과 하구의 수위 변동은 물을 이용하는 사람이나 수공학자의 주요 관심 대상이다. 일반적으로 하구에서의 밀물은 홍수위를 증가시킨다. 이러한 홍수위는 범람지역을 발생하게 되며 결과적으로 재해의 원인이 된다. Georges와 Simon(1984)에 의하면 하구에서의 조석은 대부분 주기적인 경향을 잃게된다. 따라서, 이러한 하구에서의 수위관측자료를 평활화(Smoothing)하여 얻어진 수위-유량관계는 실제 홍수예보에 이용할 수 없다. 그러므로

하구의 수위를 예측하기 위해서는 하천유량과 조석과의 상호영향을 고려한 다변수 함수가 필요하다(Godin,1985).

본 논문은 조석과 하천유량으로 부터 수위를 산정할 수 있는 다변수 함수를 개발하고 이를 적용할 수 있는지의 여부를 검토하는 것이다. 적용 이론의 검증을 위해 섬진강 하류부에 위치한 송정 및 하동 관측소를 대상으로 분석한다.

2. 이론적 배경

하천 유량은 유역의 강수에 따른 수문학적 응답

* 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 전북대학교 공과대학 토목공학과 강사

의 결과이며 이는 유역의 수문학적인 또는 지형학적인 영향을 받는다. 따라서 하천유량은 유역의 수문학적인 收支關係에 따라 변하게 되나, 유출지점의 시간에 따른 수위 변동은 유량이 통과하는 단면의 기하학적 형상에 따라 주로 변하게 된다.

일반하천의 수위관측소에서는 수위와 유속을 측정하여 이로부터 다음과 같은 수위-유량관계를 설정한다.

$$Z=f_1(Q) \quad (2.1)$$

여기서 Q는 하천유량, Z는 수위이다. 이와 같은 관계는 수위표 지점의 하천 지형이 변하지 않거나 변화가 거의 없는 곳에서 설정되는 관계식이다. 또한 하천의 수면경사는 흐름 형태에 관계없이 실제적으로 일정하다고 가정한다. 그러나 홍수파가 발생하는 경우에는 하천 유량의 변동에 따라 수면경사가 변화하며, 결과적으로 위와 같은 수위-유량관계를 벗어나게 된다.

Dickinson(1967)는 수위-유량관계식의 부정확성의 요인을 다음과 같이 제시하였다.

① 수위관측소 지점에서 조절단면의 불안정성. 수위관측소는 그 지점에 대한 장기간의 수위-유량관계가 변화하지 않을때 안정하다고 말할 수 있다. 비록 조절단면이 변화 한다 할지라도 이 관계는 좋은 정확성을 갖는다. 폭이 넓은 얇은 하상의 경우에서 하상 변화는 불안정한 수위관측소의 원인이 된다.

② 수위-유량관계에 영향을 줄 수 있는 식생 등으로 인한 계절적인 변화의 영향.

③ 홍수파의 급상승과 급하강에 따른 지연효과(Hysteresis Effects). 여기서 유량은 수위와 단면의 기하뿐만 아니라 수면경사와 단면의 조도계수에 따라서도 변한다.

④ 마지막으로 조석작용으로 인한 흐름의 변화로 하구에서의 발생한 일련의 조석파는 상류로 진행하면서 단파(Bore) 등을 형성하기도 한다. 이와 같은 상황에서는 수위-유량 관계를 수정할 필요가 있다. 이를 위해 (2.1)식을 다음과 같이 수정한다.

$$Z=f_2(M,Q) \quad (2.2)$$

여기서 M은 조위이다. 식(2.1)에 의한 분석 결과는 ① 고조(High Tide)에서 유량의 과대 추정이 발생할 수 있으며, ② 저조에서(Low Tide) 유량이 과소하게 추정된다. 따라서 감조하천의 수위-유량관계에서는 조석에 의한 영향을 검토하는 것이 필요하다.

식(2.2)를 풀기 위해서는 가정이 필요하다. 먼저 3개의 무작위 변수(Random Variables) 즉, 조위(M)와 유량(Q), 수위(Z)는 다음 회귀방정식(Regression Equation)과 같은 선형결합을 만족하는 것으로 가정한다.

$$Z=b_0+b_1M+b_2Q+\epsilon \quad (2.3)$$

여기서 b_0 과 b_1 , b_2 는 회귀계수, ϵ 는 잔차(Residual)이다. 두번째로 조위(M)와 하천유량(Q)에는 측정 오차가 없다고 가정한다. 이는 실제 상황과는 약간 다를 수도 있다. 일반적으로 수문 변수의 측정에서는 기계적인 특성이나 인간의 착오에 의한 불확실성이 내포될 수 있기 때문이다.

식(2.3)으로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$E(Z)=b_0+b_1M+b_2Q+E(\epsilon) \quad (2.4)$$

그리고,

$$\text{Var}(Z)=\text{Var}(\epsilon) \quad (2.5)$$

여기서 $E(Z)$ 과 $E(\epsilon)$ 는 각각 Z와 ϵ 의 기대치이고 $\text{Var}(Z)$ 와 $\text{Var}(\epsilon)$ 는 각각 Z와 ϵ 의 분산(Variances)이다.

계수 $b_i(i=0,1,2)$ 는 최소자승법(Least Squares Method)을 이용하여 산정할 수 있다. 결과적으로 잔차의 평균 $E(\epsilon)$ 과 분산 $\text{Var}(\epsilon)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$E(\epsilon)=\frac{\sum \epsilon_i}{n}=0 \quad (2.6)$$

$$\text{Var}(\epsilon)=\frac{\sum \epsilon_i^2}{n-3}=\sigma^2 \quad (2.7)$$

여기서 잔차는 평균이 0이고 분산이 σ^2 을 갖는 정규분포로 가정한다. 그러면 독립변수 $Z=f_2(M, Q)$ 는 평균(μ)이 $(b_0+b_1M+b_2Q)$ 이고 분산(σ^2) 이 잔차의 분산과 같은 정규분포에 접근한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Z \sim N(b_0 + b_1M + b_2Q, \sigma^2) \quad (2.8)$$

3. 적용 예

섬진강은 우리나라 4대강의 하나로서 전북 장수에서 발원하여 압록, 구례, 하동을 거쳐 남해안으로 유입하는 유로연장 225.25km의 하천이다. 그림 3.1에 나타낸 바와 같이 섬진강 유역내에는 상류부에 섬진강 다목적댐과 하류부에 동북댐 및 보성강댐을 포함하는 주암다목적댐이 건설되어 있으며 이들의 유역면적은 1773.0km²로 섬진강 유역면적

4896.5km²의 36% 정도를 차지한다(한국수자원공사, 1987).

섬진강 본류부의 수위관측소중 섬진강 홍수통제소에 TM자료로 수신되는 수위관측소는 5개소이며 이들에 대한 각 유역면적과 위치, 조석의 영향 유무 등은 표 3.1에 게재하였다(건설부, 1989, 섬진강홍수통제소, 1993). 표 3.1에 나타난 바와 같이 남해안의 조석과는 하동 및 송정 수위관측소가 지 영향을 미친다. 따라서 수위-유량관계 분석 대상 지점으로는 하동과 송정 수위관측소를 선택하였다. 분석에 필요한 관측 자료는 93년도 섬진강 유역 유량측정보고서의 측정자료를 이용하였으며 이를 표 3.2에 게재하였다. 또한 섬진강 하구에 가장 인접한 광양조위관측소의 관측조위로부터 해당시각의 관측조위를 게재하였다. 분석과정에서 다변수 함수의 분석은 통계분석 프로그램인 SAE(Wesley, 1988)를 이용하였다.

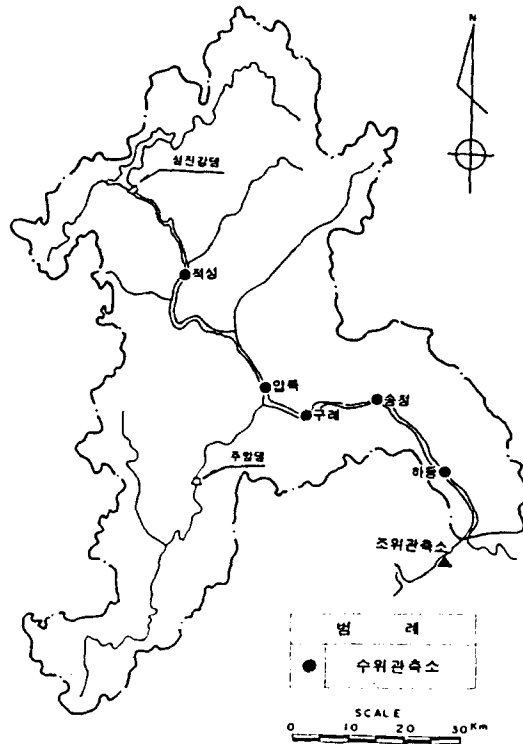


그림 3.1 섬진강 유역도

표 3.1 섬진강 본류의 주요 수위관측소

관측소명	관측종류	유역면적(km ²)*	하구로부터거리(km)	조석영향유무	위 치	
					위도	경도
적성	수위	1,350.8	107.90	무	35-23-47N	127-13-19E
압록	수위	2,447.5	63.00	무	35-11-42N	127-22-36E
구례	수위	3,805.4	54.50	무	35-09-44N	127-27-20E
송정	수위	4,255.7	39.60	유	35-11-13N	127-33-32E
하동	수위	4,603.2	13.60	유	35-04-00N	127-34-35E
광양	조위	-	-	유	34-57-57N	127-45-39E

* 섬진강댐 유역면적 763.0km²와 주암댐 유역면적 1010.0km² 포함.

표 3.2 송정 및 하동 지점의 관측 수위와 조위에 따른 유량

송정 수위표				하동 수위표							
관측번호	수위(m)	유량(m ³ /sec)	조위(m)	관측번호	수위(m)	유량(m ³ /sec)	조위(m)	관측번호	수위(m)	유량(m ³ /sec)	조위(m)
1	1.73	447.30	1.19	1	.84	158.10	1.39	28	2.25	1102.57	1.52
2	1.88	479.90	2.35	2	.85	130.16	1.11	29	2.15	968.30	1.62
3	1.96	503.90	2.07	3	.55	116.55	1.00	30	2.10	860.11	2.06
4	2.53	618.60	2.60	4	.60	236.16	1.15	31	2.35	948.41	2.72
5	3.08	879.20	2.76	5	1.65	533.27	2.07	32	2.41	1031.86	2.80
6	3.50	890.10	2.73	6	2.05	521.08	2.56	33	2.30	990.43	2.70
7	4.00	1136.20	2.56	7	2.35	587.45	2.58	34	3.40	1223.41	2.99
8	4.71	1429.50	2.30	8	1.80	712.68	1.48	35	3.15	1184.51	2.40
9	5.38	1734.10	2.07	9	1.75	688.22	1.40	36	2.92	1209.34	1.93
10	5.83	1916.60	1.85	10	1.82	705.26	1.61	37	2.78	1012.31	2.61
11	6.42	2089.10	1.76	11	2.47	1134.04	2.99	38	2.85	1044.19	2.66
12	6.38	2123.90	1.79	12	2.60	1263.53	1.98	39	3.10	1809.97	.80
13	6.32	1955.00	1.88	13	2.80	1707.12	1.76	40	3.20	1795.20	1.08
14	6.01	1773.70	2.25	14	3.10	1953.67	1.74	41	3.45	1667.00	3.20
15	5.38	1427.10	2.46	15	3.20	1896.20	1.86	42	3.65	1576.28	3.79
16	4.50	1119.10	1.59	16	3.30	2135.88	1.97	43	3.85	1556.14	4.00
17	4.55	1113.80	2.07	17	3.40	2288.90	2.20	44	3.60	1603.58	3.00
18	4.44	1059.10	2.63	18	3.48	2376.84	2.22	45	3.00	1383.77	1.79
19	4.19	980.20	3.11	19	3.55	2459.15	2.41	46	2.83	1340.50	1.17
20	3.96	850.50	2.96	20	3.57	2325.84	2.55	47	2.62	1250.36	.71
21	2.31	421.60	2.02	21	3.51	2243.01	2.79				
22	2.09	333.20	1.29	22	3.41	1953.14	2.81				
23	4.88	1610.00	3.75	23	3.29	2019.00	2.69				
24	5.20	1716.30	3.28	24	3.10	1765.57	2.45				
25	5.42	1757.90	2.49	25	2.90	1768.67	2.19				
26	5.50	1618.10	1.86	26	2.48	1215.92	1.67				
27	5.48	1623.70	1.24	27	2.36	1142.49	1.53				

표 3.3 각 수위표 지점의 조위 및 유량과 수위에 대한 상관계수

(수위-유량관계식: $Z=b_0+b_1M+b_2Q/1000$)

지 점	하동 수위표			송정 수위표		
	조 위	유 량	수 위	조 위	유 량	수 위
조 위	1.000	0.305	0.558	1.000	0.014	0.016
유 량	0.305	1.000	0.884	0.014	1.000	0.969
수 위	0.558	0.884	1.000	0.016	0.969	1.000

표 3.4 수위-유량관계식의 회귀계수 결정

Coe.	Station-Ha dong				Station-Song Jung			
	Value	Std. Dev.	t	Prob > t	Value	Std. Dev.	t	Prob > t
b ₀	0.543	0.146	3.730	3.69E-04	1.118	0.326	3.434	0.001
b ₁	0.352	0.062	5.636	5.14E-05	0.008	0.121	0.065	0.474
b ₂	1.039	0.075	13.925	5.00E-05	2.588	0.134	19.323	5.00E-05
F	150.7345				186.7368			
Statistic	2 and 44 Degrees of Freedom				2 and 24 Degrees of Freedom			

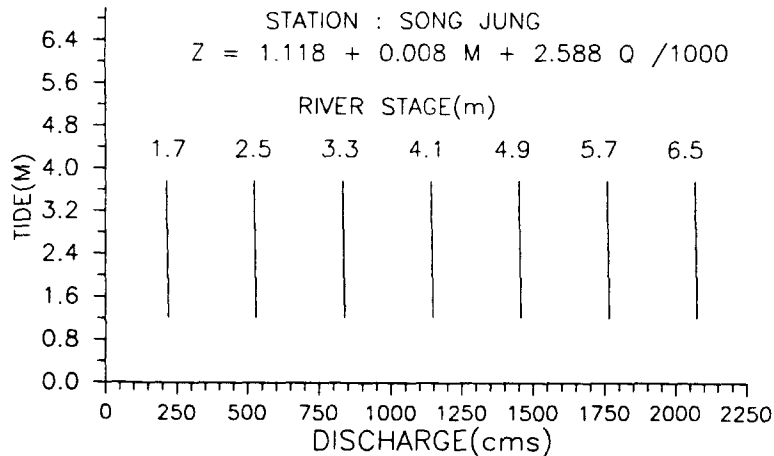


그림 3.2 송정지점의 수위-유량관계 ($Z=b_0+b_1M+b_2Q$)

먼저 각 지점에 대한 수위와 유량 및 조위에 대한 각각의 상관 정도를 파악하기 위해 상관분석(Correlation Analysys)을 실시한 결과는 표 3.3과 같다. 분석결과, 송정 수위표의 수위에 대한 조위와 유량의 상관계수는 각각 0.016, 0.969으로 유량의 상관성이 매우 크게 나타나고 있으며 상대적으로 조위의 영향은 작게 나타났다. 한편 하동 수위표에서의 이들에 대한 상관계수는 각각 0.558,0.864로 상대적으로 조위의 상관성이 크게 나타나고 있다.

상관성 분석 결과를 토대로 식(2.3)의 회귀계수와 각 회귀계수의 검정을 실시한 결과는 표 3.4에 게재하였으며 이 결과에 의한 수위-유량관계은 그림 3.2-3에 도시하였다. 결과에서 나타난 바와 같이 보다 上流에 위치하는 송정 수위관측소의 수위-유량관계식에서 조위에 대한 계수(b₁)는 0.008로 하동 수위관측소의 0.352보다 작은 반면, 유량에 대한 계수(b₂)는 2.588로 하동의 1.039보다 크다. 또한 계수 b₀는 두 관측소 모두 양수(+)로 나타

났으며 표에서 보는 바와 같이 상류쪽의 값이 보다 크게 나타났다. 이는 상류로 갈수록 조위의 영향이 작아지며, 유량의 영향은 커짐을 의미한다. 계수의 검정결과에서는 송정수위표의 조위에 대한 계수(b_1)를 제외하고는 모두 통계적으로 만족하고 있다. 이는 송정수위표의 수위-유량관계분석에서는 조위의 영향을 무시할 수 있음을 의미한다.

또한 조위의 영향이 현저한 하동수위표지점에 대

해서는 기존의 수위-유량관계식에서 수위와 유량간의 지수관계를 토대로 유량을 대수로 취하여 분석한 결과를 그림 3.4에 나타내었다. 이로부터 각각의 수위-유량관계식의 적용에 따른 오차의 정도를 파악하기 위하여 각 수위-유량관계식에 의한 계산수위와 관측수위간의 차이로 부터 표준편차(Standard Deviation)를 구하여 표 3.5에 게재하였다. 표에 나타난 바와 같이 송정수위표지점에서

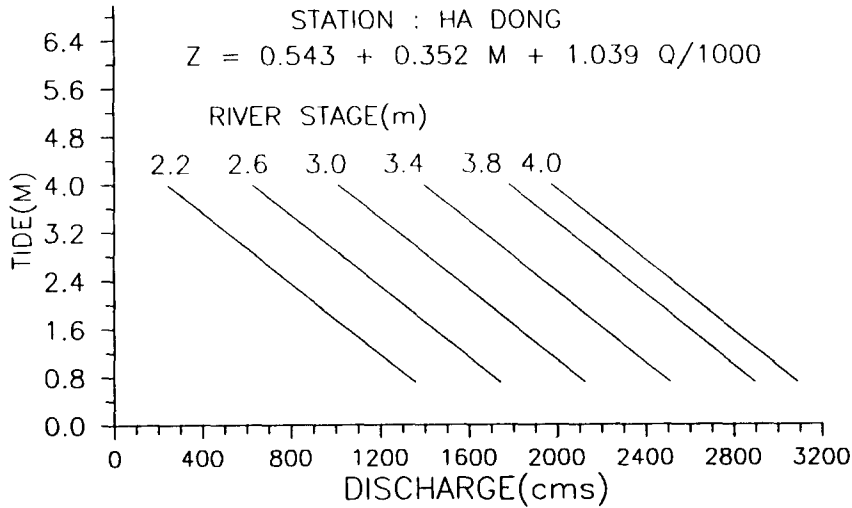


그림 3.3 하동지점의 수위-유량관계($Z=b_0+b_1M+b_2Q$)

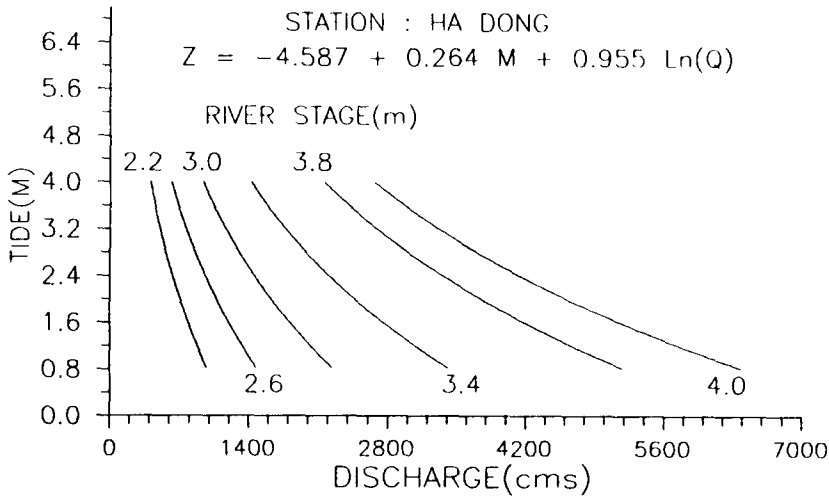


그림 3.4 하동지점의 수위-유량관계($Z=b_0+b_1M+b_2 \text{Ln } Q$)

표 3.5 기존 수위-유량 관계식과의 비교

지 점	수 위 - 유 량 관 계 식	편 차
송 정	$Q^* = 4.8523(H + 1.64)^{2.6104} - 1.10 < h < 8.64$ $H = h + 2$ $Z = 1.118 + 0.008M + 2.588Q/1000$	S.D. = 0.3820 S.D. = 0.3676
하 동	$Q^* = 125.417(H + 0.456823)^{1.99329} 0.55 < H < 3.85$ $Z = 0.543 + 0.352M + 1.039Q/1000$ $Z = -4.587 + 0.264M + 0.955 \ln(Q)$	S.D. = 0.3348 S.D. = 0.2964 S.D. = 0.2487

* : 섬진강홍수통제소, 섬진강 유역 유량측정보고서, 1993

는 기존의 수위-유량관계식의 표준편차가 0.3820이며 조위를 고려한 관계식의 경우에는 0.3676으로 그 차이는 미미하다. 하동수위표 지점에서는 0.3348에서 0.2964으로 오차의 정도가 크게 감소하고 있음을 알 수 있으며, 대수 결합에 의한 관계식의 경우에는 0.2487로 이들 관계식중 오차가 제일 작다. 따라서 송정수위표 지점의 수위-유량관계식은 기존의 관계식이 이용이 가능하나 하동수위표 지점의 수위-유량관계식은 조위의 영향을 고려하는 것이 필수적이다.

4. 결 론

본 연구에서는 조석과의 영향을 받는 하천에서의 수위-유량관계를 분석하였다. 제시된 이론의 적용성은 섬진강 하류부의 하동 및 송정 수위관측소의 수위-유량관계 분석을 실시하여 검토하였다. 분석 결과, 송정수위표 지점에서는 조위의 영향이 미미하여 기존의 수위-유량관계식의 이용이 가능하나 하동수위표 지점에서는 조위의 영향이 매우 강하게 나타났다. 따라서 하동수위표 지점에서는 조위의 영향을 고려한 수위-유량관계식의 이용이 요구된다.

본 연구에서는 측정자료의 한계로 홍수기간에 측정된 자료에 한정하였다. 수위-유량관계식의 회귀

계수를 보다 정확히 결정하기 위해서는 보다 장기간의 관측자료의 분석이 요구된다. 또한 이론에서 언급된 가정의 영향을 최소화하기 위해서는 조위(M)와 하천유량(Q)은 어떤 오차 없이 측정되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 수자원관리기법개발연구보고서 제1권 별책부록, 한국수문관측소일람, 1989.12
2. 한국수자원공사, 섬진강 유역 조사보고서, 1987.12
3. 섬진강홍수통제소, 섬진강 유역 유량측정보고서, 1993
4. 한국해양과학기술, 93년도 남해안(T-5) 조위관측자료, 미발간자료, 1993
5. Dickinson, W.T. "Accuracy of discharge determination." Hydrology paper no.20, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., 1967
6. Dronkers, J.J. Tidal computation in rivers and coastal waters, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands. 1964
7. Godin, G., "Modification of river tides by the discharge.", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, III(2), p.257-275, 1985
8. Statistical Analysis for Engineers J. Wesley Barnes, Prentice Hall, Inc. 1988

〈접수 : 6.22〉