

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

고 수 현·송 인 려·심 창 석^{*}
상주대학교 토목공학과 · 상주대학교 환경공학과
(2003년 11월 28일 접수; 2004년 3월 22일 채택)

A Study on Prediction of Sediment and Riverbed Variation According to Sediment Transportation Functions

Soo-Hyeon Ko, In-Ryeal Song and Chang-Suk Sim^{*}

Dept. of Civil Engineering, Sangju University, Sangju 742-711, Korea

^{*}Dept. of Environmental Engineering, Sangju University, Sangju 742-711, Korea

(Manuscript received 28 November, 2003; accepted 22 March, 2004)

The purpose of this study is to analyze the characteristics of riverbed variation due to the sediment protection weir located on the estuary of the main stream of Taehwa river using 1-D finite difference model, HEC-6 model, and the followings are the results of estimating sediment transport rate, amount of scour or deposition, and accumulated amount of deposit according to before and after of the sediment protection weir removal with various flow rates in the channel.

Ackers-White transport function produced the greatest sediment transport rate while Meyer-Peter showed the smallest sediment transport rate at the most down stream area of the watershed through the sediment transport rate analyses for various flow rates according to the existence or nonexistence of the sediment protection weir. Toffaleti's and Colby transport function were closest to the average value, and the difference among the results of the sediment transport functions showed up to 8~9 times.

Duboy's transport function produced the greatest riverbed variation while Toffaleti's showed the smallest variation through the riverbed variation analyses according to the existence or nonexistence of the sediment protection weir. Yang's was closest to the average value, and the difference among the results of the riverbed variation analyses ranged from 1.4 times to 11 times.

It is thought that a sediment transport function must be selected very carefully with respect to the criteria of sediment yield estimation because the analysis results of the sediment transport rate and riverbed variation according to flow rates showed significant differences among the sediment transport functions, and the differences of sediment transport rate and riverbed variation according to the various sediment transport functions decreased as the flow rate increased.

Key Words : Riverbed variation, HEC-6 model, Sediment transport, Transport functions

1. 서 론

대규모 산사태에 의하여 하도에 토사가 과잉 공급되었을 경우나 저수지 등의 수공구조물 축조로 인하여 하류방향으로의 유송토사가 저지되므로 하도 및 하상은 장기간에 걸쳐 변동하게 된다. 즉

산사태 등과 같은 자연적 환경변화는 물론 하천정비, 댐의 건설, 하구둑의 건설 및 골재채취, 기타 하천시설물의 축조 등의 인위적 환경변화가 발생하면 하천에의 흐름이 변화하게 되고, 유사량이 변화하며 결국 이와 같은 변화는 하천지형의 동적 파괴상태를 초래하게 된다. 하천지형은 하천의 평형상태를 복원하는 과정에서 침식 및 퇴적작용을 겪게되며, 이와 같은 작용의 반복적 결과로서 대규모 하상변동이 유발되는 것이다.

Corresponding Author : Soo-Hyun Ko, Dept. of Civil Engineering, Sangju University, Sangju 742-711, Korea
Phone : +82-54-530-5253
E-mail : shko@sangju.ac.kr

1950년 아인쉬타인의 소류사 합수(Bed Load Function)¹⁾ 발표 이후 입자의 연행 현상에 대해서 많은 이론적, 실험적 연구가 진행되었다. 이러한 연구는 크게 아인쉬타인의 접근 방법과 같이 몇 가지 입자 운동의 가설에 의한 통계적 방법과 입자 궤도(particle trajectory)의 운동학적 접근 방법, 그리고 실험실에서 고성능 카메라 촬영을 통한 실측 방법 등으로 구분 할 수 있다. '80년대 말 사립자의 연행에 대한 이론적 연구로서 일본에서 Asaeda²⁾등의 와류의 수학적 모형을 이용하여 사련(ripple, ripple bed) 하상의 등면(lee-side)에서 와류에 의한 사립자의 연행률을 추정하였다. James³⁾는 비점착성, 비균일 재료의 한계이송과 연행(entrainment) 조건에 대해 이론적인 접근을 시도하였다. 그의 이론적 모형은 한계조건에서 입자에 작용하는 힘의 모멘트 해석에 기초한 것으로, 재료 근처의 흐름 조건, 항력과 양력 등 기본적인 고려 사항뿐만 아니라 입자의 형상과 배열 상태까지 고려되었다. Heizelmann과 Wallisch⁴⁾는 그때까지 이 분야 연구를 종합하여 이른바 수저 하상(水底 河床, benthic bed)의 침식률에 대한 사항을 정성적으로 제시하였다. Garcia and Parker⁵⁾는 하상에서 입자의 연행률(또는 하상층, bedlayer의 놓도)에 관한 기존의 경험식들을 비교 분석하여 Van Rijn의 식과 Smith McLean의 식이 비교적 우수한 것으로 보고하였다. 그들 자신도 기존의 자료를 이용하여 연행률에 대한 경험식을 제시하였다. 한편, Umeyama와 Gerritsen⁶⁾은 새로운 혼합거리 개념을 이용하여 이론적으로 유사 흐름의 속도 분포식을 개발하면서, von Karman 계수는 유사 놓도에 관계 없이 0.4로 일정하다고 주장하였다. Chiew와 Parker⁷⁾는 하상이 수평이 아니고 경사가 진 경우의 한계 이송에 대한 이론적 연구를 시도하였다. 최근에 Ling⁸⁾은 한계 이송에 관한 이론적 연구를 발표하였는데 입자가 움직이는 상태를 구름(rolling)과 들림(lifting)으로 구분하여 한계조건을 보다 명확히 하였다.

국내의 경우에 박정웅⁹⁾은 St. Venant식을 FDM으로 해석하고 유사량공식은 Schocklitsch 공식을 채택한 하상변동 예측모형을 개발하여, 홍수에 의한 한강 하류부의 단기적인 하상변동을 해석하였으며, 박상덕¹⁰⁾은 Preissmann의 4점 음해법을 이용하여 St. Venant방정식을 차분하고, 유사량공식은 Toffaletti 공식으로 채택한 모형을 개발하여 한강 하류부 구간에 적용하여 하상변동을 모의하였다. 유권규와 우호섭¹¹⁾은 HEC-6 모형을 이용하여 시험하천 구간과 팔당댐, 충주댐, 대청댐에 적용하여서 하상변동 예측을 비교 분석하여 하상변동에 관하여 이론적 및 실무적으로 한층 더 발전시킨 계기가 되었다.

이와 같이 자연하천유역에 있어 유사량 산정은

용수공급 및 하천계획을 결정하는데 있어 필수적으로 이루어져야 하는 정량적 분석인자이다. 하지만 국내의 경우에 유사량 산정공식을 이용하여 실제유역에 적용함으로서 산정공식에 대한 각각의 차이점을 연구한 경우는 매우 드물며 이에 대한 기본방향도 제시되고 있지 않은 형편이다. 하천 설계시에 유사량 산정은 하도상의 수공구조물 존재여부, 유량조건 및 산정공식 등에 따라 다양하게 이루어져야 하며, 산정공식에 따라 유사량 및 하상변동에 대한 그 특성을 많은 차이를 나타내게 된다.

따라서, 본 연구에서는 강우, 유출량 및 유사량 등의 수리·수문자료의 실측값을 통한 하상변동을 예측하는 과정에 있어 영향을 미치는 인자들의 주요 민감도를 평가하고, 수공구조물 특성, 유량조건 및 유사량 산정공식 등에 따른 유사 및 하상변동 특성을 해석함으로서 향후 하천유사량 추정기법에 대하여 신뢰성 있는 기본방향을 제시코자 하는데 그 목적이 있다.

2. 모델의 기본이론

본 연구에서는 하도상에 설치된 수공구조물 특성, 유량조건 및 유사량 산정공식 등에 따른 유사 및 하상변동 특성을 해석하고자 HEC-6모형을 적용하였으며 이에 대한 기본이론은 다음과 같다.

2.1. HEC-6모형

본 연구에서 적용된 HEC-6모형은 일정기간에 걸친 세울과 퇴적에 의해 하천의 종단 형태가 변화하는 것을 모의 및 추정하기 위해 개발된 일차원 이동상 개수로 흐름의 수치 모형이다. 연속 수문 자료는 여러 가지 유량과 지속 기간을 지닌 일련의 정상 흐름으로 나누어 적용한다. 각 횡단면별로 에너지 경사, 유속, 수심 등을 계산하며, 이에 따라 각각의 흐름에 대한 수면 곡선을 결정한다. 이 때 각 단면별로 유사 이송 잠재능을 계산한다. 이 운송능과 흐름 사상의 지속 시간을 이용하여 각 구간별로 유사의 부피를 계산한다. 각 횡단면별로 세울과 퇴적량을 계산하여, 이에 따라 횡단면의 형태를 조절한다. 그 다음에는 주어진 일련의 수문 사상의 다음 흐름 사상에 대하여, 앞의 계산에서 수정된 하천 단면을 가지고 위의 과정을 반복한다. 수리 분급과 장갑화를 모의하기 위해 유사량은 입도별로 계산한다. HEC-6의 특징은 하도망 모의가능, 하도의 준설, 다양한 제방이나 하도 잠식 방법, 유사량 공식의 다양성 등을 들 수 있다.

HEC-6모형은 일차원류의 연속방정식과 에너지 방정식을 HEC-2모형과 같이 표준축차법으로 계산하여 각 단면의 수심, 하폭, 에너지경사 등의 기본적

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

인 수리량을 계산한다. 마찰손실은 Manning 공식에 의하며, 단면의 급확대 및 급축소에 의한 손실수도는 손실계수를 이용하여 계산한다. 그 다음 각 단면 별로 유사량을 계산하고 이 값을 유사의 연속방정식에 다음의 Fig. 1 및 식(1)~(2)와 같이 유한차분 형태로 적용하여 하상의 변화량을 구한다.

$$\frac{G_d - G_u}{0.5(L_d + L_u)} + \frac{B_{sp}(Y_{sp} - Y_{sp})}{\Delta t} = 0 \quad (1)$$

$$Y_{sp}' = Y_{sp} - \frac{\Delta t}{0.5B_{sp}} \cdot \frac{G_d - G_u}{L_d + L_u} \quad (2)$$

여기서, B_{sp} 는 P 점에서의 이동상 하폭, G_u , G_d 는 상류와 하류의 유사량, L_u , L_d 는 상류와 하류의 횡단면 사이의 구간 거리, Y_{sp} , Y_{sp}' 는 전후 시간 단계의 P 점에서의 하상 재료의 깊이, 0.5는 상류와 하류의 구간 거리를 가중하는 부피형상 계수이고 Δt 는 계산시간 간격이다.

2.2. 유사량 산정 공식

유사량 산정 공식은 접근방법에 따라 전단응력법, 소류동력법, 통계처리법으로 분류된다. 전단응력법에는 Toffaleti 공식, Duboys 공식, Shields 공식 및 Einstein 공식, Meyer-Peter & Muller 공식, Einstein-Brown 공식 등이 있으며 소류동력법에는 Engelund-Hansan 공식, Ackers-White 공식, Yang 공식 등이 있고 통계처리법에는 Colby 공식 등이 이용되고 있다.

2.2.1. Toffaleti 공식

$$q_s = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} [(S_s - 1)g]^{1/2} d_s^{1.5} \quad (3)$$

여기서, q_s 는 총유사량이며, T는 이송 매개변수, S_s 는 비중, g는 중력가속도, D_* 는 무차원 입경 매개변수이고 d_s 는 유사입경이다.

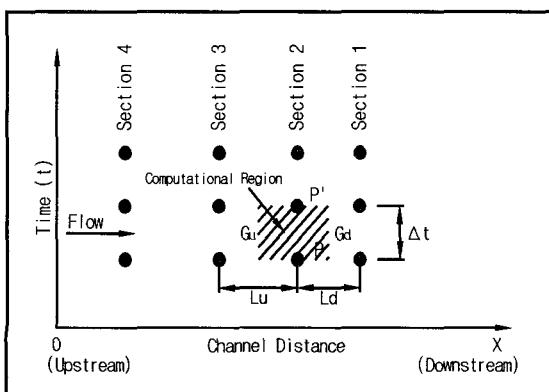


Fig. 1. Grid of Calculation.

2.2.2. Yang 공식

$$\log C_t = .165 - 0.153 \log \frac{\omega D_{50}}{\nu} - 0.0297 \log \frac{u_*}{\omega} + (1.78 - 0.36 \log \frac{\omega D_{50}}{\nu} - 0.48 \log \frac{u_*}{\omega}) \log \frac{VS_f}{\omega} \quad (4)$$

여기서, C_t 는 총유사량 농도이고 ω 는 침강속도, ν 는 동점성계수, u_* 는 하상전단속도, V는 평균유속, S_f 는 경사이고 D_{50} 는 하상토의 중량비가 50%에 해당하는 입경이다.

2.2.3. Duboys 공식

$$q_s = \frac{28.51 \tau_o (\tau_o - \tau_c)}{(D_{50})^{3/4}} \quad (5)$$

여기서, q_s 는 단위폭당 소류사량이며, D_{50} 는 평균입경, τ_c 는 한계소류력, τ_o 는 소류력이다.

2.2.4. Acker & White 공식

$$q_s = C \frac{g d_s}{d} \left(\frac{V}{u_*} \right)^n \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^n \quad (6)$$

여기서, q_s 는 총유사량이며, C는 D_* 의 크기에 따른 상수(≈ 0.25), V는 평균유속, d는 평균수심, F_{gr} 는 입자 이동성 수(전단응력과 입자의 수중무게의 함수), d_s 는 유사입경, A는 F_{gr} 의 한계치 크기, u_* 는 하상 전단속도이고 n은 D_* 의 크기에 따른 상수이다.

2.2.5. Colby 공식

$$q_s = [(S_s - 1)g \cdot d_s^3]^{\frac{1}{2}} \cdot \Phi \quad (7)$$

여기서, q_s 는 총유사량이며, S_s 는 비중, Φ 는 무차원 유사량이고 d_s 는 유사입경이다.

2.2.6. Meyer-Peter & Muller 공식

$$q_s = (54 K^2 R S_f - 4.2 D_m)^{1.5} \quad (8)$$

여기서, q_s 는 총유사량이며, K는 비례상수, V는 유속, R은 경심, S_f 는 경사, D_m 은 하상토 구성비를 가중 평균한 입경이고 D_{90} 은 하상토의 중량비가 90%에 해당하는 입경이다.

3. 적용 대상 유역

3.1. 지형 및 지질현황

태화강유역의 지형특성인자는 홍수유출에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 자연적으로 발달된 산지유역의 수계형상, 하천의 구성 및 치·이수시설 등은

고 수 현·송 인 렐·심 창 석

집중호우시에 홍수유출에 직접적인 영향을 미치게 된다. 분석유역의 대한 수계구성도는 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 태화강 유역내의 주요하천¹²⁾서 수문학적 특성분석에 필요한 지형인자의 조사분석은 각 소유역별로 세분화하여 실시하였으며, 소유역별 지형인자는 유역면적(A), 유로연장(L), 유로중심장(L_c), 지표의 표고차(ΔH_s) 및 수로경사(S_c) 등을 주요조사 대상으로 하였다.

하천수계의 구성은 태화강본류, 둔기천, 대곡천, 척과천 및 동천 등으로 나누었다. 이때 각 하천의 유역에 대한 정확한 수문해석을 실시하기 위하여 소유역으로 분할된 각 소유역에 대한 지형인자는 수치지형도로부터 조사하였으며, 이들 인자는 홍수유출해석에 이용토록 하였다. 각 소유역 및 하도구간별 지형인자를 조사분석한 결과는 Table 1과 같다.

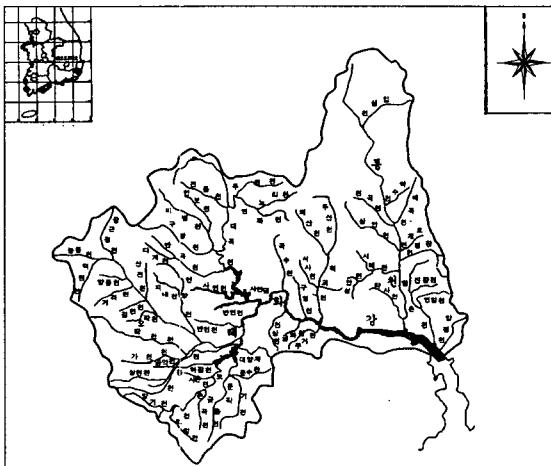


Fig. 2. Study Area(Taehwa river basin).

Table. 1 Topographic characteristics of Taehwa river basin

Basin No.	Station	Area (km ²)	River length (km)	River center length (km)	Elevation difference $\Delta H(m)$	River slope
1	Taehwa upper	132.17	16.34	8.00	1190	0.07283
2	Taehwa river basin	5.16	5.00	2.50	159	0.03180
3	Dungichun	72.83	17.50	8.00	671	0.03834
4	Taehwa river basin	12.26	8.00	3.75	208	0.02600
5	Daegocchun	129.50	24.00	11.00	863	0.03596
6	Taehwa river basin	45.08	12.00	4.50	595	0.04958
7	Chukgoachun	41.36	13.00	7.30	635	0.04885
8	Taehwa river basin	29.34	13.00	6.30	238	0.01831
9	Dongchun upper	99.53	19.10	9.30	540	0.02827
10	Dongchun down	68.47	14.50	7.30	508	0.03503
Total		635.70	44.70	21.20	1240	0.02774

3.2. 수문현황

3.2.1. 강우량 빈도분석

강우량의 빈도분석 방법으로는 도해적 방법과 해석적 방법이 이용되고 있으나 본 분석에서의 일최대 강우량 빈도분석은 확률분포형의 빈도계수를 사용하여 대개 자료치의 크기와 누가생기확률 관계를 수립하는 빈도계수법을 적용하였으며, 확률분포형은 Pearson Type-III분포(PT3), Type-I 극치분포(T1E), Log-Pearson Type-III분포(LP3) 및 2변수대수정규분포(LN2) 등을 사용하였다.

강우관측지점은 태화강유역내의 호계, 순금, 척과, 금곡, 궁근정, 및 울산관측소를 대상으로 1일최대 강우량 자료를 수집하여 빈도분석을 실시하였으며, 강우량의 빈도분석 결과에 대한 적합성 검정결과에서 호계관측소는 T1E분포의 추정값을 사용하고, 나머지 5개관측소(순금, 척과, 금곡, 궁근정, 및 울산관측소)의 경우는 LP3분포의 추정값을 취하도록 하였다. 이를 바탕으로 소유역별 Thiessen 가중치를 사용하여 태화강유역내의 각 소유역별 강우량을 계산한 결과는 Table 2와 같다.

3.2.2. 확률 홍수량 산정

본 연구대상 하도구간은 태화강유역 중하류부에 위치한 도시부의 주요 하도구간으로서 확률년은 대체로 T=100년을 사용하고 있으나 하천연안의 계속적인 개발과 산업발달 그리고 하천시설물의 이용가치 등의 제고에 따라 확률년은 점차 T = 150, 200년으로 상향 조정되고 있는 추세이다. 따라서 각 소유역 및 주요 지점에 대한 기준홍수량 결정을 위하여 본 분석의 하천설계에 적용할 확률년 T = 20, 50, 100 및 200년에 대한 확률홍수량을 분석모델에 따라 Table 3와 같이 비교 분석하였다. 그 결과 CLARK

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

Table. 2 Probable rainfall of each area(1day maximum rainfall) (Unit : mm)

Station No.	Probable year						비 고
	2	10	20	50	100	200	
1	132.4	228.4	269.7	327.3	373.8	423.3	
2	134.3	229.9	270.8	327.8	373.8	422.7	
3	134.3	229.9	270.8	327.8	373.8	422.7	
4	134.3	229.9	270.8	327.8	373.8	422.7	
5	121.8	206.2	242.9	294.6	336.6	381.8	
6	112.2	185.9	218.6	265.1	303.3	344.8	
7	105.1	171.0	200.6	243.0	278.1	316.3	
8	114.6	201.6	241.9	300.6	350.0	404.6	
9	132.1	226.8	260.8	303.4	334.4	364.7	
10	118.2	229.9	275.1	335.9	383.3	432.4	

Table. 3 Comparison of Probable Flood in Taehwa river basin (Unit : m³/sec)

Zone	Model	Return period(year)				'87 River project (T=100)
		20	50	100	200	
Dongchun combination (before)	Rational Eg.	1,850	2,440	2,920	3,310	3,000
	Kajiyama	2,580	2,820	3,030	3,240	
	CLARK	2,270	2,840	3,310	3,810	
	SCS	1,680	2,090	2,430	2,790	
	Choice	2,270	2,840	3,310	3,810	
Dongchun combination (after)	Rational Eg.	2,340	3,090	3,660	4,140	3,970
	Kajiyama	3,130	3,430	3,660	3,920	
	CLARK	3,430	4,690	4,910	5,610	
	SCS	2,500	3,300	3,560	4,060	
	Choice	3,430	4,690	4,910	5,610	

모델에 의해 분석한 첨두홍수량은 비교적 큰 값을 나타내고 있고, Kajiyama식에 의한 분석결과는 CLARK모델의 분석결과와 비슷한 값을 나타내고 있으며 합리식과 SCS모델에 의한 분석결과는 상기의 두 모델에 의해 분석된 홍수량보다 과소한 값으로 분석되었으므로, 본 연구에서는 CLARK모델에 의해 분석한 첨두홍수량을 빙도별 기본홍수량으로 결정하였다.

본 연구에 적용된 계획홍수량은 본 분석하도 구간의 특성을 감안하여 확률년 T=100년의 확률홍수량을 채택토록 하였으며 하도의 통수능 분석을 고려하여 분석에 사용된 계획홍수량은 본 분석대상유역내의 공업용수용량인 사연제와 대암제 등 2개소의 홍수조절용량(220CMS, 건설교통부, 태화강하천 정비 기본계획, 1987. 12)을 감안하여 태화강 동천합류전과 하구의 계획홍수량을 각각 3,000m³/sec 및

3,970m³/sec로 적용하였다.

4. 적용 및 분석

4.1. 유사채취 및 부유사 농도분석

본 연구에서는 태화강 하구지점의 실측 유사유입량 분석을 위하여 태화강 본류하도에서 방사보 상류에 위치한 태화교지점과 지류인 동천 하구의 내황교 지점 및 방사보 상·하류지점에서의 1999년 8월 29일~9월 17일 까지 6회에 걸친 호우시에 대한 수리특성치와 입도분석을 Table 4 및 Table 5와 같이 실시하고, 부유사 채취를 위하여 점적분 부유사 채취기와 하상토 채취기를 사용하였다. 부유사 채취는 부유사의 농도분포와 입경분석을 위하여 수십적분 채취방법으로 각 측정선에 대하여 2회 실시하였으며, 부유사농도의 연직분포를 측정하기 위하여 각 측선의 측점지점에서의 점적분 채취방법으로 부유

고 수 현 · 송 인 렐 · 심 창 석

Table. 4 Observed Data of Hydraulic Characteristics

	Date	Depth (m)	Velocity (m/s)			Mean vel. (m/s)	Q (m ³ /s)	Bridge length (m)
Taehwagyo	99/ 8/31	3.00	1.25	1.05	0.60	0.97	523.15	440
	99/ 9/ 4	0.98	0.07	0.30	0.45	0.27	83.16	
	99/ 9/10	1.60	1.13	0.70	0.97	0.93	177.34	
	99/ 9/17	1.05	0.15	0.26	0.13	0.18	92.03	
Naehwanggyo	99/ 8/31	1.60	1.45	1.26	0.73	1.15	185.18	260
	99/ 9/ 4	0.20	0.48	0.43	0.37	0.43	7.95	
	99/ 9/10	0.60	0.92	0.87	0.73	0.84	47.48	
	99/ 9/17	0.22	0.55	0.52	0.59	0.55	9.84	

Table. 5 Results of Grain Size Analysis

	D35	D50	D65	D90
Taehwagyo	0.67	1.03	1.84	5.92
Naehwanggyo	0.61	0.73	1.11	3.84
Sediment protection weir	Upper	0.34	0.52	0.62
	Down	0.19	0.33	0.47

*D35~D90 등은 통과백분율 35%~90% 등을 나타냄

사를 채취하였으며, 하상토채취는 BM 54의 채취법에 준하였다. 채취된 부유사농도를 측정하는 방법은 증발법과 여과법이 있으나, 본 연구에서는 증발법에 대한 부유사농도를 분석하였다.

본 연구에서는 방사보 존재 유무에 따른 각 공식별 토사이송량 예측을 분석하기 위하여 유량별 유사이송능 및 하상변동 분석을 실시하였다. 태화강 하류부에 설치되어 있는 방사보의 위치 현황과 제원을 Fig. 3~4에서 나타낸 바와같이 기존 설치당시의 깊이 600m를 하도 중심부의 유심방향을 고려하여 1998년도에 45m를 제거하여 현재 555m가 존재되고 있는 실정이므로 본 연구에서는 현상태의 방

사보 제거전후에 따른 수리현상을 HEC-2모형을 이용하여 분석하였다.

4.2. 하상변동 시뮬레이션

4.2.1. 각 유사량 산정공식에 의한 유사이송능의 비교분석

본 연구에서는 수공구조물¹³⁾방사보 존재 유무에 따른 각 공식에 대한 유량별 유사이송능 분석에서 하상재료의 이동, 세굴과 퇴적에 의한 하상변동 등을 검토하기 위하여 하상변동 시뮬레이션 모델인 HEC-6 model을 이용하여 이동상에 대한 하상변동을 분석하였다.

4.2.1.1. 유량별 유사이송능 분석(방사보 존재)

연구 대상유역에서 유사의 이동을 방지하기 위하여 설치된 방사보 상태에 대한 상·하류 하도구간에서 각 단면의 공식별 유사이송 능력을 유량의 크기에 따라 시뮬레이션 하였다. 본 분석에 이용된 유량은 평수기와 홍수기 및 재현기간 100년 빈도(울산시, 1997)를 대상으로 분석하였다.

먼저, 200CMS일 경우 최하구에서 가장 많은 유사이송능을 보인 공식은 Acker & White 공식으로

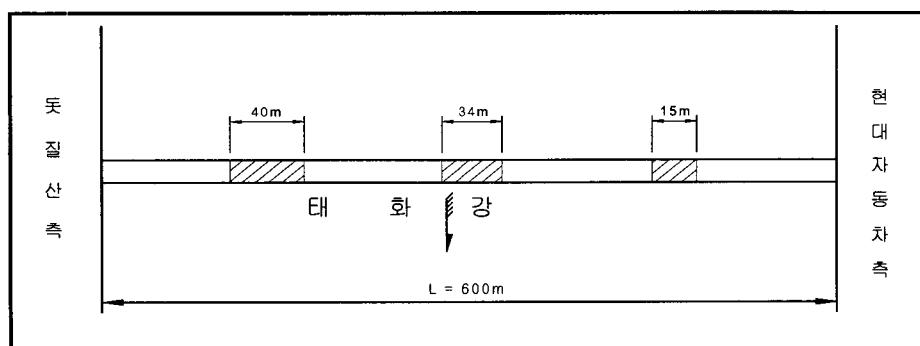


Fig. 3. Location map of sand barrier.

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

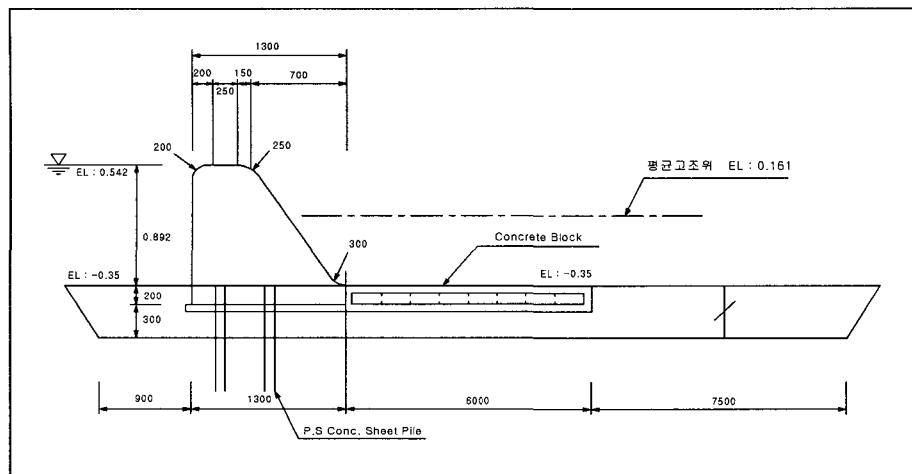


Fig. 4. Geometry and size of sand barrier.

서 3,791,793(tons/day), 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 607,987(tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Toffaleti 공식으로 1,702,225(tons/day)로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 6배 정도의 차이를 나타내었다. 다음으로, 700CMS일 때, 최하구에서 가장 많은 유사이송능을 보인 공식은 Acker & White 공식으로서 13,372,656(tons/day), 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 1,794,570(tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Toffaleti 및 Colby 공식으로 4,864,101 및 4,595,556(tons/day)으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 7.5배 정도의 차이를 나타내었다. 마지막으로, 3,970CMS일 때, 최하구에서 가장

많은 유사이송능을 보인 공식은 역시 Acker & White 공식으로서 73,739,409(tons/day), 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 9,105,014(tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Colby 공식으로 34,330,901(tons/day)로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 8배 정도의 차이를 나타내었다.

따라서, 각 공식별 유사이송능 분석에서 분석결과치의 차이가 6~8배 정도에 이르고 있으며, 유량이 많을수록 그 차이는 더욱 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 다음의 Fig. 5~7은 분석결과치를 도시한 것이다.

4.2.1.2. 유량별 유사이송능 분석(방사보 제거) 연구 대상유역에서 유사의 이동을 방지하기 위하

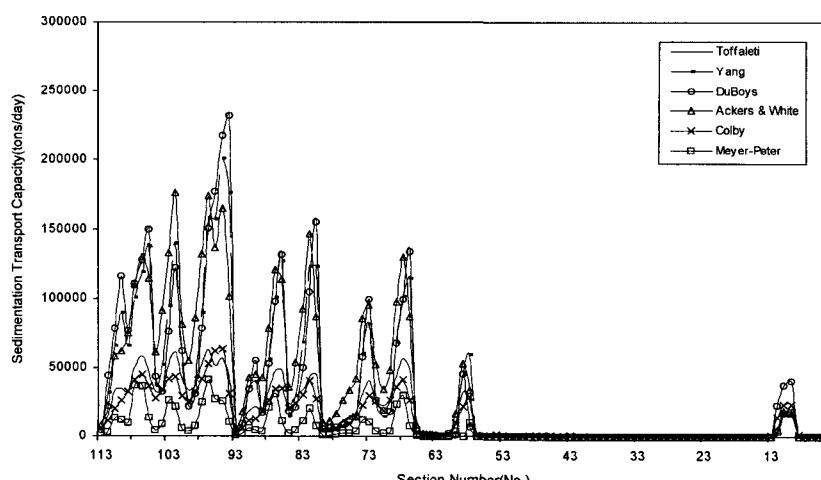


Fig. 5. Changes of sediment transport on the each discharge ($Q=200\text{CMS}$).

고 수 현 · 송 인 렐 · 심 창 석

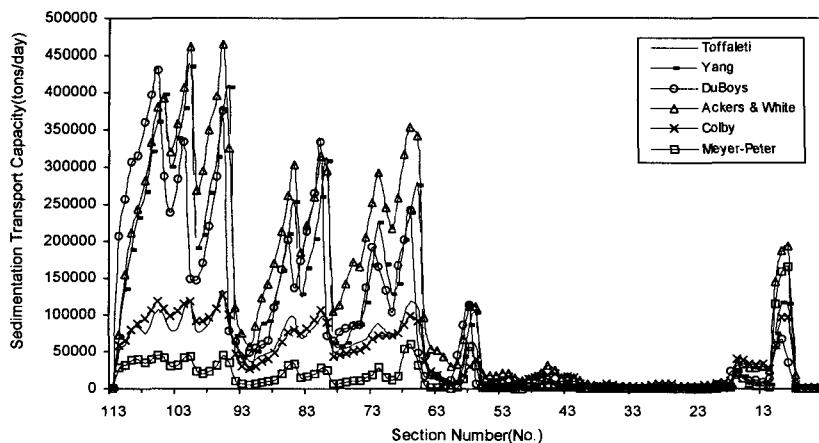


Fig. 6. Changes of sediment transport on the each discharge ($Q=700\text{CMS}$).

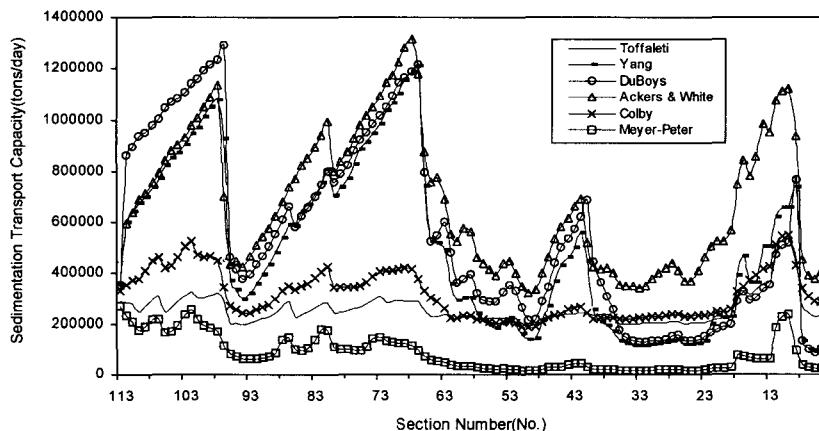


Fig. 7. Changes of sediment transport on the each discharge ($Q=3,970\text{CMS}$).

여 설치된 방사보 제거상태에 대한 상·하류 하도 구간에서 각 단면의 공식별 유사이송 능력을 유량의 크기에 따라 시뮬레이션 하였다. 본 분석에 이용된 유량은 평수기와 홍수기 및 재현기간 100년 빈도 (울산시, 1997)를 대상으로 분석하였다.

먼저, 200CMS일 경우 최하구에서 가장 많은 유사이송능을 보인 공식은 Acker & White 공식으로서 3,760,107(tons/day), 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 615,895(tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Toffaleti 공식으로 1,680,852(tons/day)로 나타나 각 공식에 대한 결과 차이가 약 6배 정도의 차이를 나타내었다. 다음으로, 700CMS일 때, 최하구에서 가장 많은 유사이송능을 보인 공식은 Acker & White 공식으로서 13,896,059(tons/day), 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 1,448,120(tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장

평균에 가까운 공식은 Toffaleti 및 Colby 공식으로 4,839,280 및 4,964,506(tons/day)으로 나타나 각 공식에 대한 결과차가 약 9.6배 정도의 차이를 나타내었다. 마지막으로, 3,970CMS일 때, 최하구에서 가장 많은 유사이송능을 보인 공식은 역시 Acker & White 공식으로서 74,332,043(tons/day), 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 9,372,243(tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Colby 공식으로 34,034,907(tons/day)로 나타나 각 공식에 대한 결과차가 약 7.9배 정도의 차이를 나타내었다.

따라서, 각 공식별 유사이송능 분석에서 분석결과 차의 차이가 6~9.6배 정도에 이르고 있어 방사보 존재시보다 유사이송능의 차이는 크게 나타났으며 방사보 존재유무에 따른 전체 유사량의 크기는 200CMS, 700CMS 및 3,970CMS일 경우에 각각 0.8%, 4% 및 0.8%정도의 차이로 나타났다. 따라서,

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

방사보의 존재 유무에 따른 유사이송능의 변동크기
는 유량이 700CMS 경우에 200CMS 및 3,970CMS

일 경우보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이
는 최소유량의 경우에는 토사이동량이 거의 없고

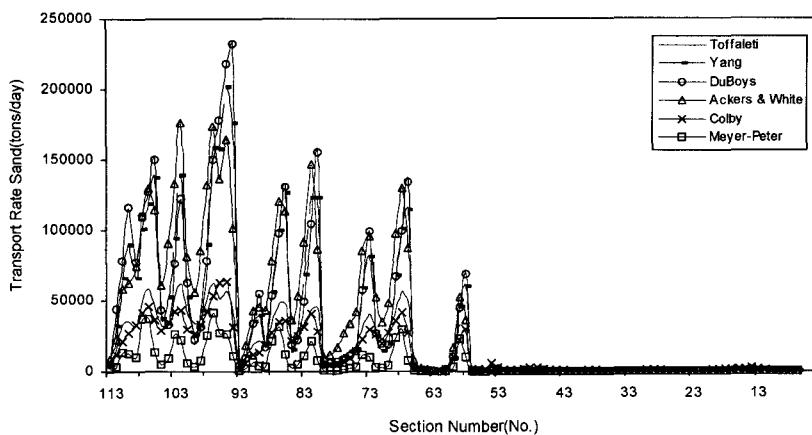


Fig. 8. Changes of sediment transport on the each discharge ($Q=200\text{CMS}$).

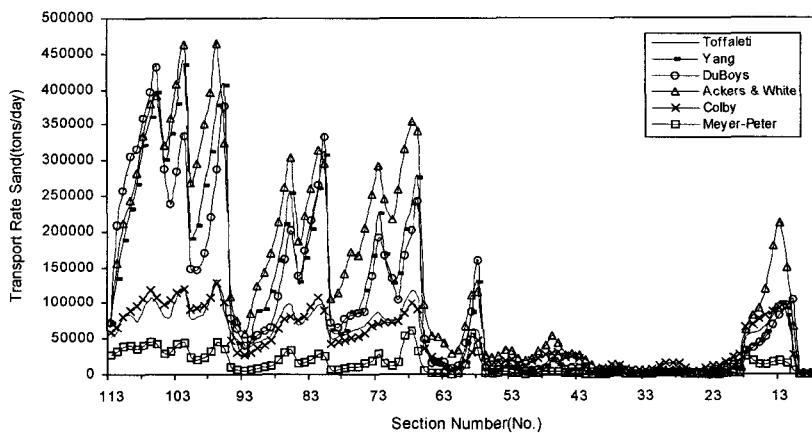


Fig. 9. Changes of sediment transport on the each discharge ($Q=700\text{CMS}$).

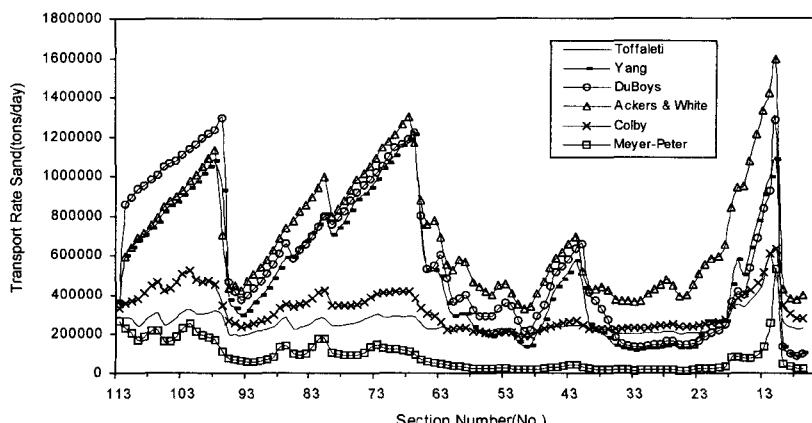


Fig. 10. Changes of sediment transport on the each discharge ($Q=3,970\text{CMS}$).

최대유량의 경우에는 유량 통수능이 비해 방사보의 지배면적이 매우 작기 때문인 것으로 판단된다. 다음의 Fig. 8~10은 분석결과치를 도시한 것이다.

4.2.2. 각 유사량 산정공식에 의한 하상변동의 비교분석

4.2.2.1. 유량별 하상변동 분석(방사보 존재)

연구 대상유역에서 방사보 상태에 대한 상·하류 하도구간에서 각 단면의 공식별 하상변동량을 유량의 크기에 따라 시뮬레이션 하였다. 본 분석에 이용된 유량은 평수기와 홍수기 및 재현기간 100년 빙도(울산시, 1997)를 대상으로 분석하였다.

먼저, 200CMS일 경우 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Duboys 공식으로서 0.33m, 가장 적은 공식은 Toffaleti 공식으로 0.03m정도 세굴되는 것으로 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Yang 공식으로 0.08m정도 세굴되는

것으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 11배 정도의 차이를 나타내었다. 다음으로, 700CMS일 때 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Toffaleti 및 Acker & White 공식으로서 1.51m, 가장 적은 공식은 Colby 공식으로 0.39m정도 세굴되는 것으로 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Yang 공식으로 0.87m정도 세굴되는 것으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 4배 정도의 차이를 나타내었다. 마지막으로, 3,970CMS일 때 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Toffaleti 및 Acker & White 공식으로서 1.51m, 가장 적은 공식은 Colby 공식으로 1.05m정도 세굴되는 것으로 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Yang 공식으로 1.38m정도 세굴되는 것으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 1.4배 정도의 차이를 나타내었다. 따라서, 각 공식별 하상변동 분석에서 분석결과치의 차이가 1.4~11배 정도에

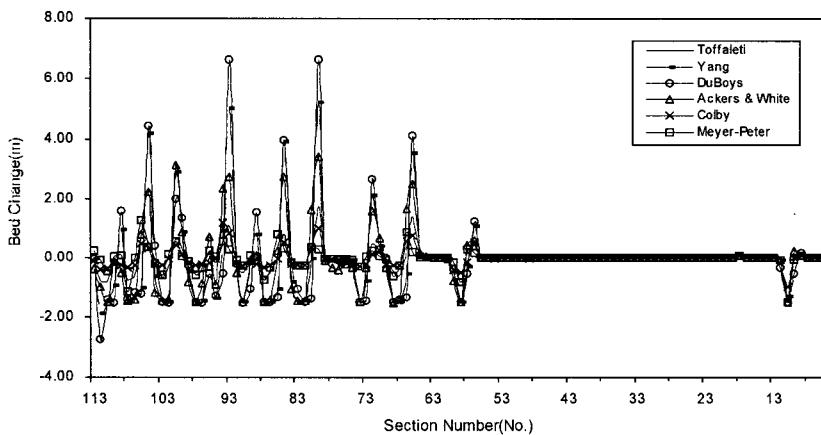


Fig. 11. Analysis of riverbed variation on the each discharge ($Q=200\text{CMS}$).

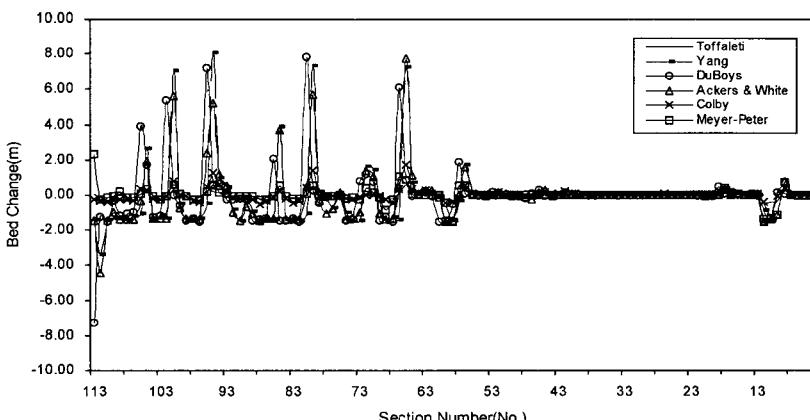


Fig. 12. Analysis of riverbed variation on the each discharge ($Q=700\text{CMS}$).

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

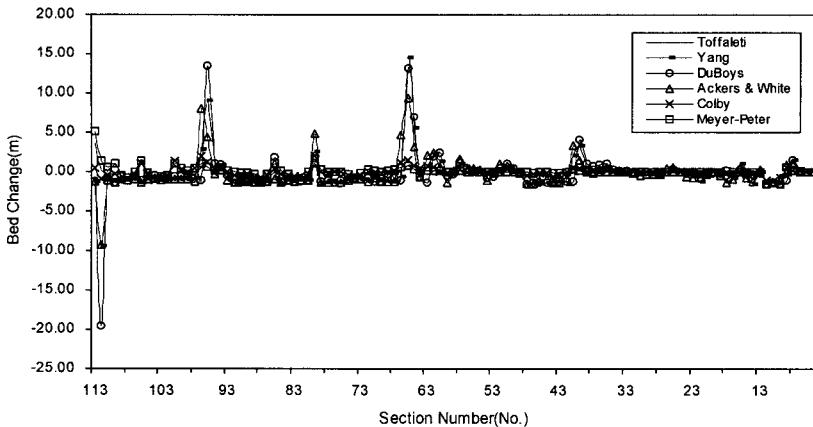


Fig. 13. Analysis of riverbed variation on the each discharge ($Q=3,970\text{CMS}$).

이르고 있으며, 유량이 적을수록 그 차이는 더욱 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 다음의 Fig. 11~13은 분석결과치를 도시한 것이다.

4.2.2.2. 유량별 하상변동 분석(방사보 제거)

연구 대상유역에서 방사보 제거상태에 대한 상·하류 하도구간에서 각 단면의 공식별 하상변동량을 유량의 크기에 따라 시뮬레이션 하였다. 본 분석에 이용된 유량은 평수기와 홍수기 및 재현기간 100년 빈도(울산시, 1997)¹⁴⁾대상으로 분석하였다.

먼저, 200CMS일 경우 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Colby 공식으로서 0.05m, 가장 적은 공식은 Yang 및 Duboys 공식의 0.00m로 침전이 일어나지 않는 것으로 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Toffaleti 공식으로 0.02m정도 침전되는 것으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 5배 정도의 차이를 나타내었다. 다음으

로, 700CMS일 때 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Ackers & White 공식으로 2.53m, 가장 적은 공식은 Toffaleti 공식으로 0.01m 정도 침전되는 것으로 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Yang 공식으로 0.71m정도 침전되는 것으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 250배 정도의 차이를 나타내었다. 마지막으로, 3,970CMS일 때 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Meyer-Peter 공식으로서 4.94m, 가장 적은 공식은 Ackers & White 공식으로 3.68m정도 세굴되는 것으로 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Toffaleti 공식으로 4.59m정도 세굴되는 것으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 1.3배 정도의 차이를 나타내었다. 따라서, 각 공식별 하상변동 분석에서 분석결과치의 차이가 1.3~200배 정도에 이르고 있으며, 유량이 많을수록 그 차이는 더욱 작게 나타나는 것으로 분석되었다. 다음의 Fig. 14~

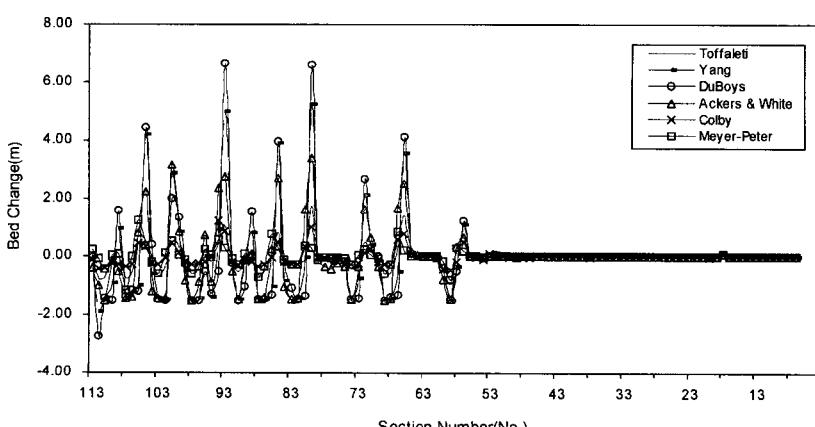


Fig. 14. Analysis of riverbed variation on the each discharge ($Q=200\text{CMS}$).

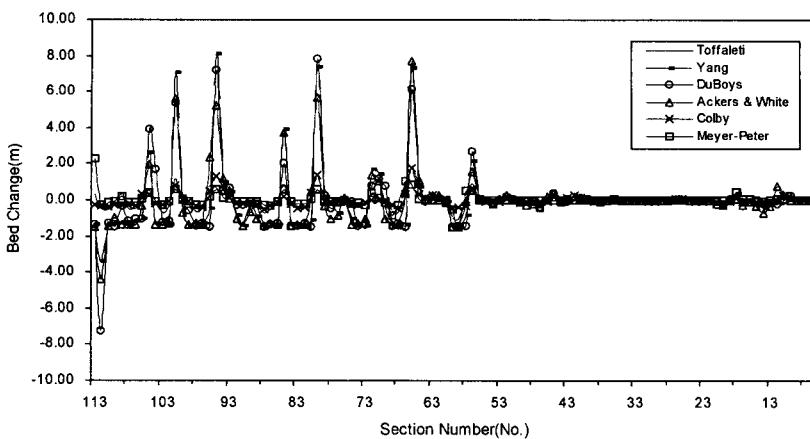


Fig. 15. Analysis of riverbed variation on the each discharge ($Q=700\text{CMS}$).

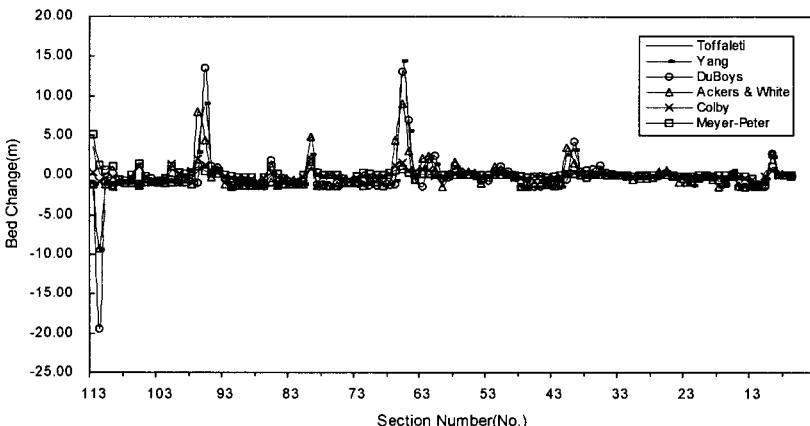


Fig. 16. Analysis of riverbed variation on the each discharge ($Q=3,970\text{CMS}$).

16은 분석 결과치를 도시한 것이다.

따라서, 본 분석결과에서 각 공식에 따른 유량별 유사이송능 및 하상변동량의 차이는 매우 크게 나타나고 있어 유사량 산정기준에 따라 각 공식에 대해 매우 신중하게 적용하여야 할 것으로 판단된다. 하지만 유량이 적을 경우보다 유량이 클수록 각 공식별에 따른 하사이송능 및 하상변동량의 차이는 점차 줄어드는 것으로 분석되었다.

4.3. 비교 및 고찰

4.3.1. 유사이송능

본 연구에서는 하상변동예측에서 중요한 인자인 유사이송능 산정을 위하여 6개 공식을 이용하였으며, 그 결과는 다음의 Table 6과 같다. 유사 유입량은 본류 하도상의 태화교를 기준으로 할 때 Ackers & White 공식에 의해 산정된 값이 일반적으로 크게 분석되었으며, Meyer-Peter 공식이 가장 작게

산정되었다. 그러나 장기간에 걸친 실측유사량 자료가 거의 없는 상황에서 가장 높게 산정된 것이 가장 정도가 높다고는 설명할 수 없으므로, 태화강유역에 가장 적합한 유사량 산정공식을 선정하기에는 난점이 많다. 하지만, 최악의 유사량 조건에 대해서는 Ackers & White 공식을 적용하여야 할 것이며 최적 유사량 조건에서는 기존의 연구 결과를 토대로 비교적 평균치를 나타낸다고 볼 수 있는 Toffaleti 공식에 의해 산정된 값을 방사보 존재 유무에 따른 토사이동예측을 위한 기초자료로 활용해야 할 것으로 판단된다.

4.3.2. 하상변동량

본 연구에서는 태화강 하구부에 위치한 방사보의 영향에 따른 하상변동 예측을 위하여 풍수기 유량($200\text{m}^3/\text{s}$)과 홍수기 유량($700\text{m}^3/\text{s}$) 및 계획홍수량($3,970\text{m}^3/\text{s}$)을 대상으로 방사보의 제거 전·후에 따

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

Table. 6 Results of sediment transport for each flow amount condition before and after removal of the sediment protection weir(each formula)

Distribution	Formula	TRANSPORT RATE SAND(tons/day)	Distribution	Formula	TRANSPORT RATE SAND(tons/day)
Q=200, Sediment protection weir (exist)	Toffaleti	1,702,225	Q=200, Sediment protection weir (removal)	Toffaleti	1,680,852
	Yang	3,298,423		Yang	3,262,648
	DuBoys	3,441,784		DuBoys	3,418,981
	Ackers & White	3,791,793		Ackers & White	3,760,107
	Colby	1,428,004		Colby	1,397,249
	Meyer-Peter	607,987		Meyer-Peter	615,895
Q=700, Sediment protection weir (exist)	Toffaleti	4,864,101	Q=700, Sediment protection weir (removal)	Toffaleti	4,839,280
	Yang	10,164,638		Yang	10,356,830
	DuBoys	9,329,237		DuBoys	9,788,578
	Ackers & White	13,372,656		Ackers & White	13,896,059
	Colby	4,595,556		Colby	4,964,506
	Meyer-Peter	1,794,570		Meyer-Peter	1,448,120
Q=3970, Sediment protection weir (exist)	Toffaleti	28,132,496	Q=3970, Sediment protection weir (removal)	Toffaleti	27,652,114
	Yang	53,600,035		Yang	54,757,583
	DuBoys	60,153,756		DuBoys	61,833,015
	Ackers & White	73,739,409		Ackers & White	74,332,043
	Colby	34,330,901		Colby	34,034,907
	Meyer-Peter	9,105,014		Meyer-Peter	9,372,243

른 상·하류 하도구간에서 각 단면의 하상변동예측을 실시하였다. 하상변동량 산정을 위하여 6개 공식을 이용한 결과는 다음의 Table 7과 같이 나타났다.

각 하도지점의 하상변동폭은 하구부에 설치된 방사보를 제거할 경우 삼호교지점(No. 57)상·하류 하도구간에서는 미소한 퇴적과 세굴이 발생하고 있으나 방사보지점(No.11.120) 직상류 하도구간에서는 하상퇴적이 미소하게 진행되고 있는 것으로 분석되어 전체 하도구간을 분석할 때 방사보의 존재유무에 관계없이 거의 차이가 없는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 1차원 유한차분모형인 HEC-6 모형을 이용하여 태화강 본류하도 하구부에 위치한 방사보의 영향에 따른 하상변동특성을 분석하기 위하여, 하도상의 유하수량 조건에 따른 방사보 제거 전후의 유사이송능 및 유사이동량과 누가퇴적량 등

을 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 방사보 존재시에 따른 각 유량별 유사이송능 분석에서 먼저, 200 및 3970CMS일 경우 최하구에서 가장 많은 유사이송능을 보인 공식은 Acker & White 공식으로서 3,791,793(tons/day) 및 73,739,409 (tons/day)를 나타내었고, 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 607,987(tons/day) 및 9,105,014 (tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Toffaleti 및 Colby 공식으로 1,702,225 (tons/day), 1,428,004(tons/day) 및 28,132,496 (tons/day) 및 34,330,901(tons/day)로 나타나 각 공식에 대한 결과차이가 크게는 약 8배 정도의 차이를 나타내었다.
- 2) 방사보 제거시에 따른 각 유량별 유사이송능 분석에서 먼저, 200 및 3970CMS일 경우 최하구에서 가장 많은 유사이송능을 보인 공식은 Acker & White 공식으로서 3,760,107(tons/day) 및 74,332,043

고 수 현 · 송 인 렐 · 심 창 석

Table. 7 Results of riverbed variation for each flow amount condition before and after removal of the sediment protection weir(each formula)

Distribution	Formula	Bed Change (m)	Distribution	Formula	Bed Change (m)
Q=200, Sediment protection weir (exist)	Toffaleti	-0.03	Q=200, Sediment protection weir (removal)	Toffaleti	0.01
	Yang	-0.08		Yang	0.00
	DuBoys	-0.33		DuBoys	0.00
	Ackers & White	-0.07		Ackers & White	0.00
	Colby	-0.20		Colby	0.02
	Meyer-Peter	-0.05		Meyer-Peter	0.00
Q=700, Sediment protection weir (exist)	Toffaleti	-0.46	Q=700, Sediment protection weir (removal)	Toffaleti	0.00
	Yang	-0.87		Yang	0.22
	DuBoys	-1.49		DuBoys	-0.18
	Ackers & White	-1.51		Ackers & White	0.77
	Colby	-0.39		Colby	-0.02
	Meyer-Peter	-1.42		Meyer-Peter	0.05
Q=3970, Sediment protection weir (exist)	Toffaleti	-1.51	Q=3970, Sediment protection weir (removal)	Toffaleti	-1.40
	Yang	-1.38		Yang	-1.12
	DuBoys	-1.45		DuBoys	-1.16
	Ackers & White	-1.51		Ackers & White	-1.12
	Colby	-1.05		Colby	-1.16
	Meyer-Peter	-1.50		Meyer-Peter	-1.51

(tons/day)를 나타내었고 가장 적은 공식은 Meyer-Peter 공식으로 615,895(tons/day) 및 9,372,243(tons/day)을 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Toffaleti 및 Colby 공식으로 1,680,852(tons/day), 1,397,249(tons/day) 및 27,652,114(tons/day) 및 34,034,907(tons/day)로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 크게는 약 9배 정도의 차이를 나타내었다.

- 3) 방사보 존재에 따른 하상변동량은 200CMS일 경우 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Duboys 공식으로서 0.33m, 가장 적은 공식은 Toffaleti 공식으로 0.03m정도 세굴되는 것으로 나타났으며 3,970CMS일 때 방사보 전에서 가장 많은 하상변동량을 보인 공식은 Toffaleti 및 Ackers & White 공식으로서 1.51m, 가장 적은 공식은 Colby 공식으로 1.05m정도 세굴되는 것으로 나타내었다. 그리고 가장 평균에 가까운 공식은 Yang 공식으로 1.38m정도 세굴되는 것으로

로 나타나 각 공식별 하상변동 분석에서 분석결과치의 차이가 1.4~11배 정도에 이르고 있는 것으로 분석되었다. 방사보 제거에 따른 하상변동량은 200 및 3,970CMS일 경우 방사보 전에서 가장 평균에 가까운 하상변동량을 보인 공식은 Toffaleti 공식으로 0.02m 및 4.59m 정도 침전되는 것으로 나타나 각 공식에 대한 결과치가 약 5배 정도의 차이를 나타내었다.

- 4) 분석에서 각 공식에 따른 유량별 유사이송능 및 하상변동량의 차이는 매우 크게 나타나고 있어 유사량 산정기준에 따라 각 공식에 대해 매우 신중하게 적용하여야 할 것으로 판단되며 유량이 적을 경우보다 유량이 클수록 각 공식별에 따른 유사이송능 및 하상변동량의 차이는 점차 감소하는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

- 1) Einstein, H. A., 1950, The Bed-load fuction

유사량 산정공식에 따른 유사 및 하상변동 예측에 관한 연구

- for sediment transportation in open channel flows, Technical Bulletin 1026, U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C..
- 2) Asaeda, T., M. Nakai, S. K. Manandhar and N. Tamai, 1989, Sediment Entrainment in Channel with Rippled Bed, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(3), 454-466.
 - 3) James, C. S., 1990, Prediction of Entrainment Conditions for Nonuniform, Noncohesive Sediments, Journal of Hydraulic Research, IAHR, 28(1), 125-129.
 - 4) Heizelmann, C. and S. Wallisch, 1991, Benthic Settlement and Bed Erosion, Journal of Hydraulic Research, IAHR, 29(3), 321-335.
 - 5) Garcia, M. and G. Parker, 1991, Entrainment of Bed Sediment into Suspension, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(4), 63-85.
 - 6) Umeyama, M. and F. Gerritsen, 1992, Velocity Distribution in Uniform Sediment-Laden Flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(2), 126-138.
 - 7) Chiew, Y. M. and G. Parker, 1994, Incipient Sediment Motion on Non-horizontal Slopes, Journal of Hydraulic Research, IAHR, 32(5), 199-221.
 - 8) Ling, A., 1995, Turbulent Flows over Smooth Erodible Sand Beds in Flumes, Journal of Hydraulic Research, IAHR, 35(4), 701-709.
 - 9) 박정웅, 1984, 홍수시의 하상변동에 관한 연구, 한양대학교 대학원 박사학위논문, 36-48pp.
 - 10) 박성덕, 1989, 홍수파의 영향을 고려한 하상변동 예측모형, 연세대학교 대학원 박사학위논문, 24-34pp.
 - 11) 유권규, 우호섭, 1992, HEC-6 모형에 의한 대청 다목적댐 하류의 하상변동 예측, 수공학연구 발표회논문집, 34, 366-374.
 - 12) 울산광역시, 1995, 태화강 하천정비계획 분석 및 죽림존재 여부에 대한 조사연구 보고서.
 - 13) 안승섭, 2002, 수공구조물이 하천환경에 미치는 영향에 관한 연구(I), 한국환경과학회지, 11 (3), 191-199.
 - 14) 울산광역시, 1997, 태화강 환경조사 및 보전대책 연구 보고서.