

Jet Flow 발생지역에서의 퇴사 거동

A Study on the Movement of Sediment in Jet Flow Zone

정병건* · 이관수** · 이영석***

Jeong, Byoung Keon · Lee, Kwan Soo · Lee, Young Seok

Abstract

Taken from the entrance of Juam Dam to 11km long as survey, this study predicted the bed change according to the movement of sediment in jet flow zone. The result of applying compound model and jet model turned out to be satisfactory, though the latter was the better. The jet constant of Juam Dam could be controlled between 0.5 and 0.65. In the jet flow zone of the dam, the prediction of the bed change by the numerical model showed almost the same to the observed data.

1. 서 론

하천의 하상정비나 준설공사를 할 때 발생하는 부유물질은 하천을 따라 저수지나 해안으로 유입되어 그 유역의 수질 및 여러 가지 환경인자에 영향을 주고 있다. 또한, 광산에서 흘러나온 여러 가지 광물질을 함유한 부유물질이 넓은유역으로 유입될 때는 유속의 현격한 감소로 인하여 비중이 큰 광물질들이 침강하여 퇴적한다. 또한, 홍수기에 큰 강우로 인하여 하천상류에서 침식된 부유물질은 하천수를 따라 하천하류, 저수지 및 해안으로 유입되어 침강하게되며 부유미립자는 감소된 유속이나 탁도 의해 형성된 밀도류에 의하여 하류 깊숙히 이

송되어 장시간동안 이토로 침강한다. 그리고 오염물질이나 부유물질이 하천을 따라 넓은 유역으로 유입될 때 발생된 확산현상은 대부분이 jet flow(분류)에 의한 확산이라 할 수 있다. 분류는 오리피스를 통하여 방출하면 완전한 난류가 되고 난류의 특성에 의해서 주위의 유체와 혼합된다. 분류는 유하 하면서 그 확산폭이 증가하고 유속을 감소시킨다. 유속의 감소로 인하여 부유물질중 비중이 큰 입자부터 침강하게 되고 하류로 갈수록 작은입자의 침강이 이뤄진다.

본 연구는 저수지에서 분류가 발생하는 지역의 퇴사거동을 추정하기 위해 2차원 jet model 과 수로의 compound model를 이용하였다. 수치모형은 먼저 유량의 연속방정식과 운동량방정식을 double-sweep method를 적용하여 수위와 유량의 변동량을 계산하고, 수위 및 유량의 변동량을 유사의 연속방정식에 적용하여 퇴사의 거동으로 인한 하상변화를 예측하였다.

* 순천공업전문대학 환경공입과 조교수

** 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수

***광주대학교 공과대학 토목공학과 부교수

2. 수치모형

2.1 부정류의 기본방정식

하천의 수학적 해석은 유량의 연속방정식과 운동방정식에 근거를 두며, 하상의 수학적 조건은 시간과 공간에 따라 변하므로 이러한 부정류는 유량의 연속방정식과 운동량방정식 그리고 유사의 연속방정식으로 표현할 수 있다.

유량 연속방정식은 다음과 같다.

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

여기서 Q 는 유량, A 는 수로의 단면적, A_d 는 하상의 세굴층이나 퇴적층의 단면적, q_l 는 단위 길이에 대한 측방유입량, x 는 흐름방향의 하상 거리, t 는 시간이다.

유량 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho\beta QV)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} + gA \frac{d(\rho h)}{dx} = \rho gA(S_0 - S_f) + \rho q_l v_l \quad (2)$$

여기서 V 는 평균유속, j 는 수심, g 는 중력가속도, ρ 는 물의 밀도, β 는 운동량보정계수, S_0 는 하상경사, S_f 는 마찰경사, v_l 는 측방유입수의 유속이다.

유사의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + P \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial(AC_s)}{\partial t} - q_{s_l} = 0 \quad (3)$$

여기서 Q_s 는 총유사량, P 는 퇴적층의 단위체적에 대한 퇴적입사체적, C_s 는 각 단면의 평균 유사농도, q_{s_l} 는 측방유사유입량 이다.

2.2 유량추적

$\frac{\partial A_d}{\partial t} \ll \frac{\partial A}{\partial t}$ 의 조건하에 유량의 연속방정식 (1)과 운동량방정식 (2)는 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + T \frac{\partial y}{\partial t} - q_l = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\beta QV)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = \rho gA(S_0 - S_f) + \rho q_l v_l \quad (5)$$

여기서 $T = \partial A / \partial h$ 이며 h 는 수심이다. 이 방정식의 해석은 모든 단면 $j = 1, \dots, j_{max}$ 에서 미지수인 Q, h 를 산출하기 위하여 하천과 저수지를 하나의 수로로 가정한다.

2.3 Jet Model

분류(jet flow)는 오리피스를 통하여 자유분류 또는 수중분류의 형태로 넓은 유역으로 배출되는 것이기 때문에 하천수가 호수, 만, 대양으로 분출할 때 반드시 존재하게 된다. 분류는 3가지 영역으로 구분된다. 첫째는 되돌이 흐름(return flow)의 형성영역이다. 이는 저수지 경계와 분류 경계사이에서 발생한다. 둘째는 분류의 형성영역이다. 유량은 jet의 가속력이 되돌이 흐름에 의해서 평형이 되기 때문에 유도 이동된다. 마지막으로는 분류의 확립영역이다. 이 영역에서 jet의 횡방향 확장은 jet의 경계가 저수지의 경계와 교차하기 때문에 제한을 받게 된다. 분류폭의 경계선이 포물선이라 가정하면 분류폭(W)은 다음과 같다.

$$W = a\sqrt{x + B_0} \quad (6)$$

여기서 a 는 jet상수, x 는 종방향거리, B_0 는 slot폭을 나타낸다. 그리고 이 상수들은 하천-저수지계의 특성에 의존한다. 특히 jet상수(a)는 수치모형에 미지수로 입력하고 수치해의 수정절차를 통하여 값을 구한다.

분류의 발생시점부터 분류의 형성영역의 종점까지의 거리인 x_0 는 다음과 같다.

$$x_0 = \left(\frac{B_0}{a}\right)^2 \quad (7)$$

분류의 형성영역에서의 유속분포는 다음과 같다.

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{a\sqrt{x + B_0} - 2w}{2a\sqrt{x}} \quad (8)$$

여기서 V_0 는 등류유속, V_x 는 종방향유속, w 는 분류의 횡방향 거리이다. 그리고 분류의 확립영역에서의 유속분포는 다음과 같다.

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{2B_0}{(a\sqrt{x} + B_0)^2} (a\sqrt{x} + B_0 - 2w) \quad (9)$$

2.4 Compound Model

저수지에서 흐름의 조건은 하천수로와 홍수터사이의 수리학적 저항과 단면적 차이에 의해서 복잡할 수 밖에 없다. 저수지내의 동일한 단면에서 유사의 퇴적형태가 일정하지 않기 때문에 저수지를 몇 개의 수로로 가정하여 모형화 했다. 그리고 유량과 유사를 추적하기 위한 합성모형은 식 (1)-(3)의 1차 미분방정식을 기초로 하였으며 유사입자의 크기와 시간에 따른 유사의 단위중량의 변화를 계산하기 위하여 수정된 합성모형을 저수지에 적용하였다. 저수지의 단면 j 의 통수능을 k_j 라하고 각 단면을 종방향으로 몇개의 소단면으로 구분하였을 경우 소단면 m, j 에서의 통수능을 $k_{m,j}$ 라 하면 소단면의 유량 $Q_{m,j}$ 은 다음과 같다.

$$Q_{m,j} = \frac{Q_j k_{m,j}}{k_j} \quad (10a)$$

$$k_j = \sum_{m=1}^{m_{max}} k_{m,j} \quad (10b)$$

2.5. 유사추적

유사를 추적하기 위해서는 식 (3)의 유사의 연속방정식으로 저수지의 각 지점별 소단면에 대해 A_d 를 계산하기 위하여 다음과 같은 수정식이 필요하다.

$$\frac{\partial Q_{s_m}}{\partial x} + \gamma_{d_m} \frac{\partial A_{d_m}}{\partial t} + \gamma_{s_m} \frac{\partial (AC_s)_m}{\partial t} - q_{s_m} + q_{s_{m-1}} = 0 \quad (11)$$

여기서 r_{d_m} 는 퇴사의 단위중량, r_{s_m} 는 유사입자의 단위중량이다.

3. 기본방정식의 수치해석

본 연구는 유량의 연속방정식과 운동량방정식 (1), (2)를 유한차분의 Preissmann 음해법으로 해석하였으며 유사연속방정식 (3)은 양해

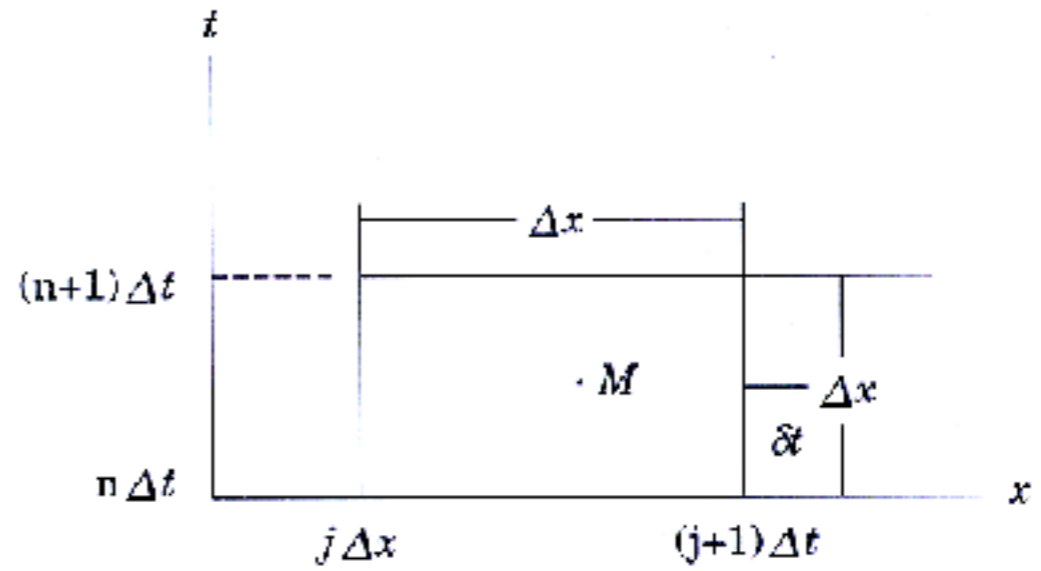


그림 1. 유한차분의 음해법 격자망

법으로 해석하였다.

$$f(x,t)|_M = \theta (\Delta f_{j+1} + \Delta f_j) + \frac{1}{2} (f_{j+1}^n + f_j^n) \quad (12a)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}|_M = \frac{\partial}{\Delta x} (\Delta f_{j+1} - \Delta f_j) + \frac{1}{\Delta x} (f_{j+1}^n - f_j^n) \quad (12b)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t}|_M = \frac{1}{2\Delta t} (\Delta f_{j+1} + \Delta f_j) \quad (12c)$$

여기서, θ 는 가중계수로서 $0 \leq \theta \leq 1$ 이다.

식 (12)는 식 (1), (2)를 차분화하기 위해서 이용되며, 유사추적에 대한 유한차분의 양해법은 다음과 같다.

$$f(x,t) = \frac{1}{4} (f_{j-1}^{n+1} + f_{j-1}^n + f_j^{n+1} + f_j^n) \quad (13a)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_j^{n+1} - f_{j-1}^{n+1} + f_j^n - f_{j-1}^n}{\Delta x} \right) \quad (13b)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_j^{n+1} - f_j^n}{\Delta t} \quad (13c)$$

4. 수치모형의 경계조건

수치모형을 적용하기 위해서는 하천의 상류 경계조건과 저수지 하류의 경계조건이 필요하다. 그리고 유량을 추적하기 위한 상류의 경계조건은 유량곡선이 필요하고 하류경계조건은 저수지운영에 따른 수위곡선이 필요하다. 또한, 유사를 추적하기 위해서는 하천상류에 유입한 부유사이송곡선과 소류사이송곡선이 필

요하며 하천상류의 하상입도곡선이 필요하다.

5. 수치모형의 적용

본 연구의 대상구역은 주암댐 입구에서 주암댐의 상류지역인 봉정교까지 약 11km을 선정하였으며 저수지의 구간을 6개 종단면(No. 8~No. 13)으로 나누고 각 단면을 다시 1~3(중심수로 = 2)의 소단면으로 나누었다(그림 2). 주암댐으로 유입되는 부유사를 입도분

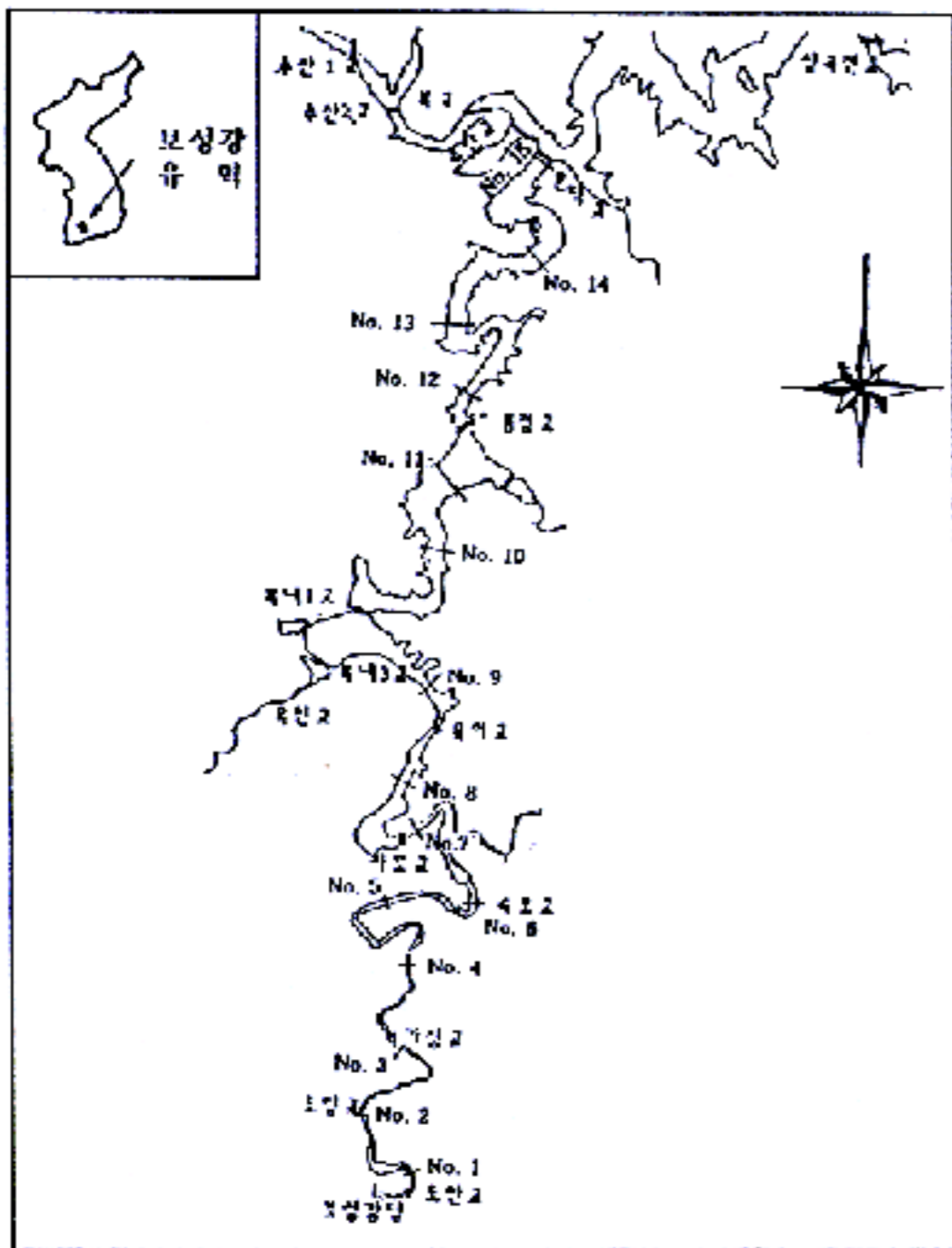


그림 2. 연구 대상구역

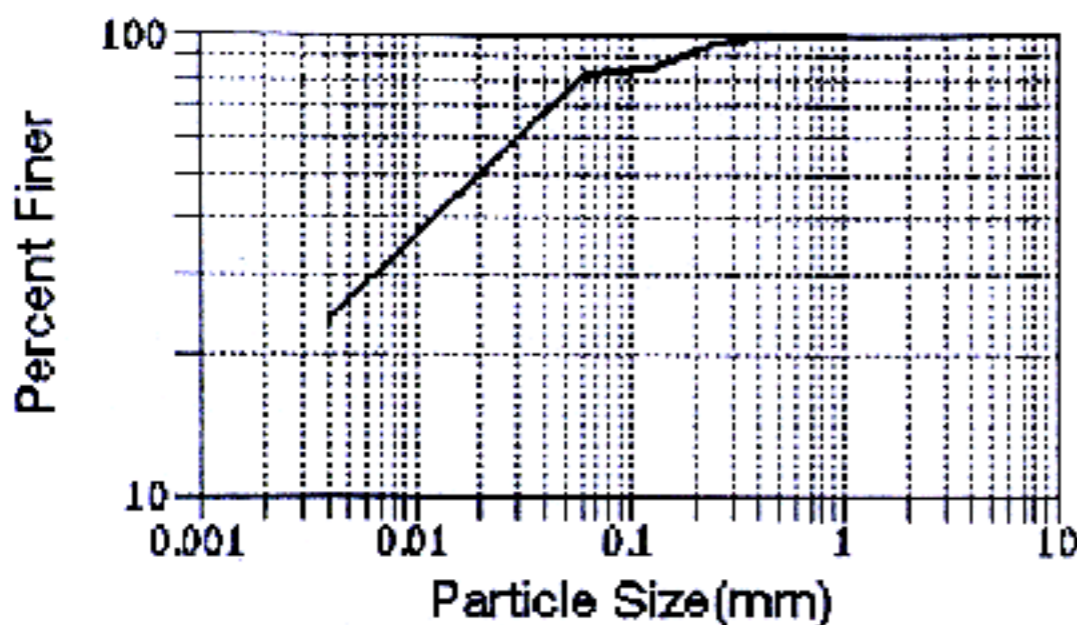


그림 3. 부유사 입도분포곡선(No. 1)

석(그림 3)을 하였으며 상류부근에서 하상토를 입도분석(그림 4)을 실시 하였다. 유량곡선(그림 5)은 보성강댐에서 방류되는 일평균 방류량이며 하류의 수위곡선(그림 6)은 주암댐의 수위로 유량을 추적하기 위한 경계조건으로 하였다.

유사를 추적하기 위한 경계조건은 부유사이송곡선과 소류사이송곡선이 필요하다. 부유사

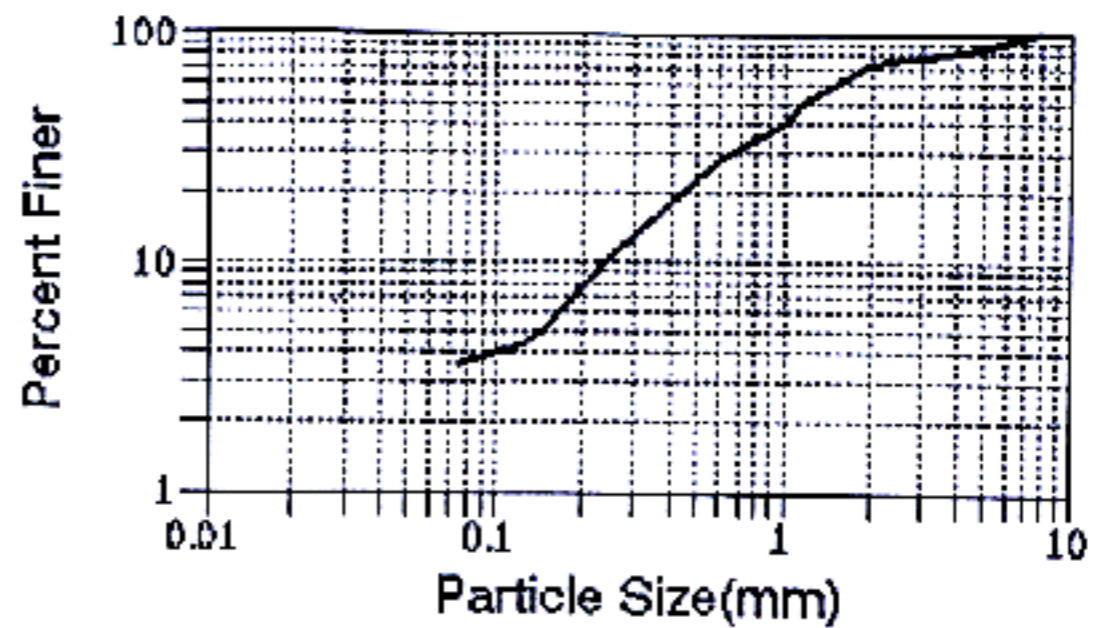


그림 4. 하상 입도분포곡선(No. 1)

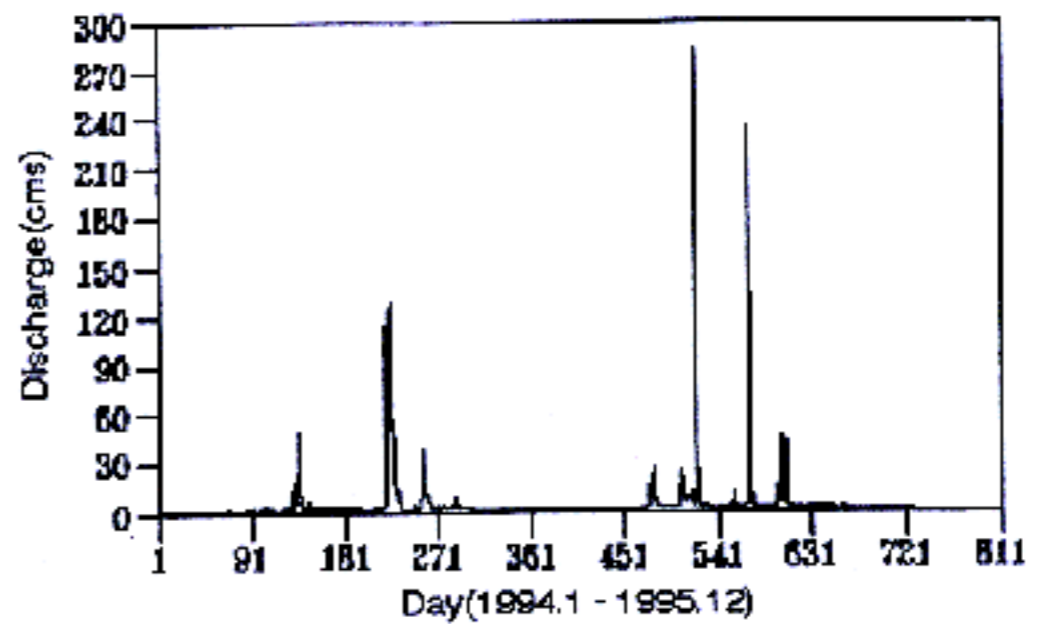


그림 5. 일별 평균유량곡선(1994-1995)

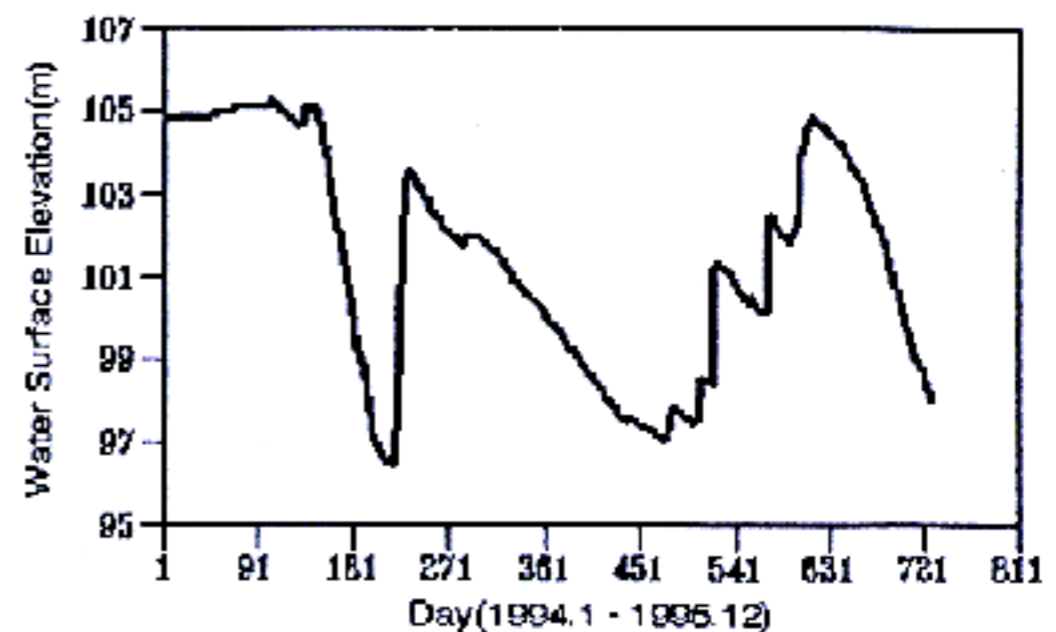


그림 6. 주암댐의 수위곡선(1994-1995)

량을 계산하기 위한 유사이송곡선은 (그림 7)에 나타냈으며 입경별 소류사 이송곡선은 (그림 8)에서 보여주고 있다. 유사이송곡선과 소류사 이송곡선은 부유사의 실측치와 하상입경분포(그림 4)를 이용하여 수정아인슈타인 방법으로 계산하였다. 부유사량을 계산하기 위하여 부유사이송곡선(그림 7)을 다음과 같은 곡선식으로 나타냈다.

$$Q_{sj} = 1310.94V^{2.49} (t/day) \quad (14)$$

모형의 적용에 있어 우선 적절한 초기의 흐름조건을 만드는 것이 선행되어야 한다. 즉, 조도계수와 수위 및 하상고가 먼저 계산되어야 한다. 조도계수 n 은 수위변화에 따라 변화하지만 약 0.034~0.022에서 조정이 가능하였다. 또한, 원활한 수치모형을 적용하기 위하여 최저 방류량을 20m³/sec로 하였다. 그리고 평균 수로의 하상경사는 9.81×10^{-4} 이다.

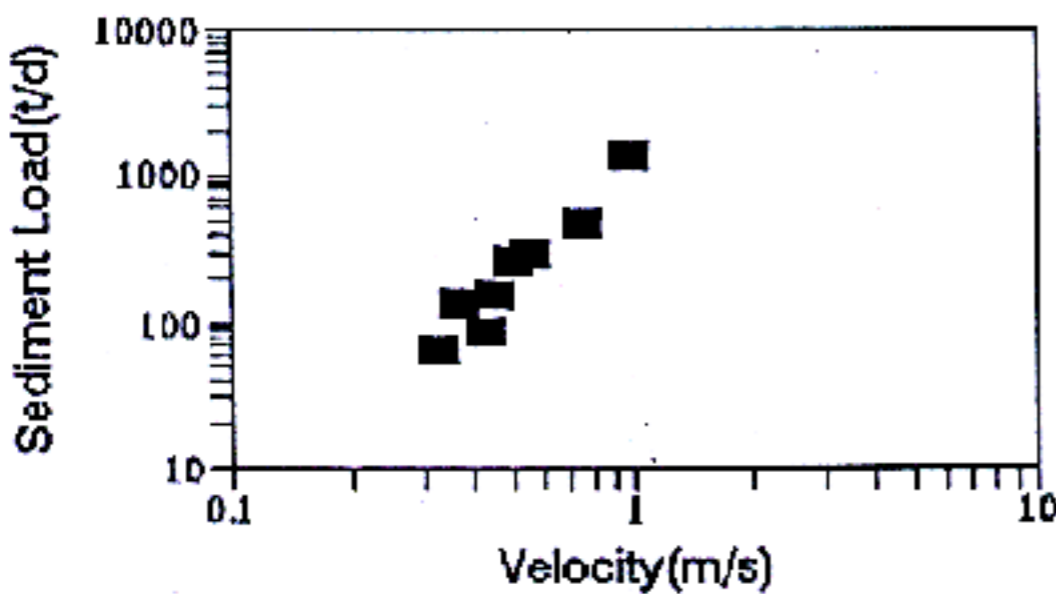


그림 7. 부유사 이송곡선(No. 1)

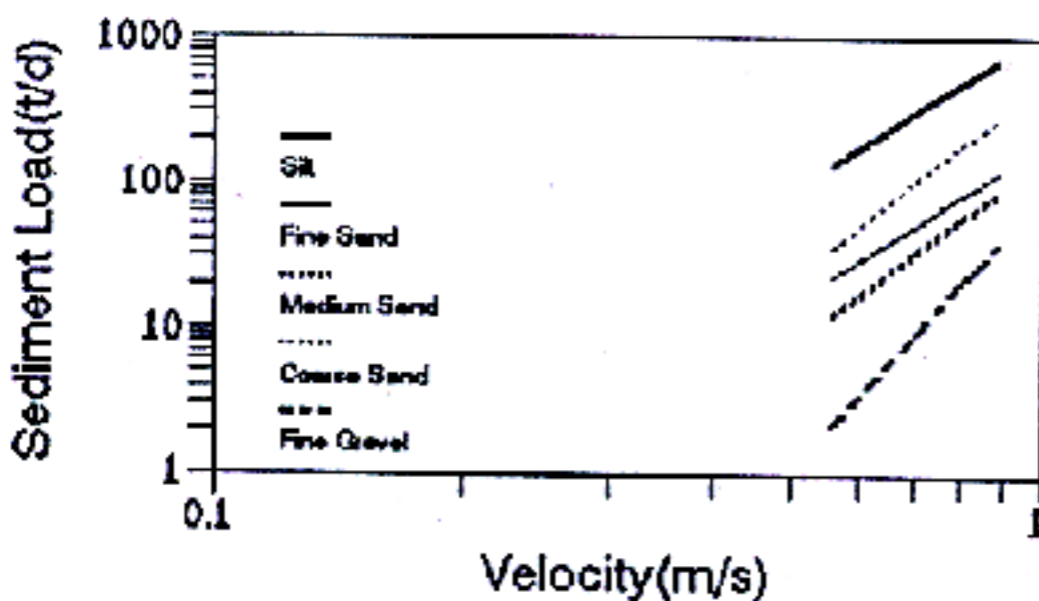


그림 8. 소류사 이송곡선(No. 1)

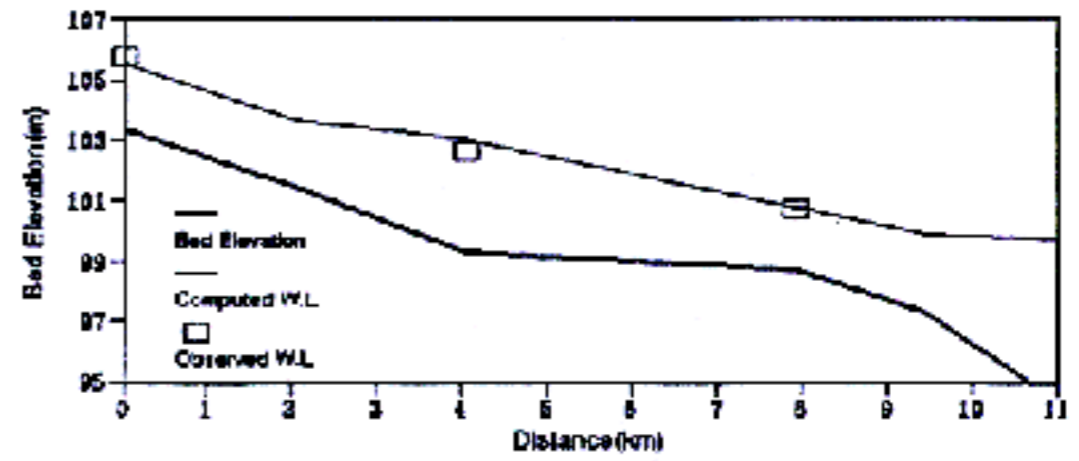


그림 9. 보성댐-주암댐의 수면곡선

수리학적 계산을 검증하기 위하여 수치모형에 의해서 계산된 수위를 실측된 수면고와 비교한 결과를 그림 9에 나타냈다.

본 연구는 저수지 유입부의 퇴사량 거동을 추정하기 위하여 수치모형에 분류모형을 적용하였다. 분류는 유입단면에서 포물선형태를 하면서 하류로 확산할 것으로 가정하였다. 포물선 확산의 경계를 결정하는 분류상수 a 는 상당한 수정절차에 의해서 결정 하는데 분류 유입구의 크기와 델타의 형상에 따라 분류상수가 조절되어야 한다. 분류는 저수지 입구인 No. 8~No. 9, No. 11~No. 13등에서 유량의 정도에 따라 발생하였다. 그림 10은 jet상수 a 의 효과에 따른 퇴적고의 변화를 보여주고 있다. 델타의 최고점 지점은 $a = 0.5$ 미만인 경우는 2km(No. 8)지점에서 발생했지만 $a = 0.5$ 이상인 경우는 4km(No. 9)지점에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 분류상수 a 가 약 0.4인 경우에는 유속이 증가하여 평탄한 델타를 만들며 유사퇴적이 점점 더 하류로 이동되지만 분류상수 a 가 0.6인 경우에는 유속이 감소하여

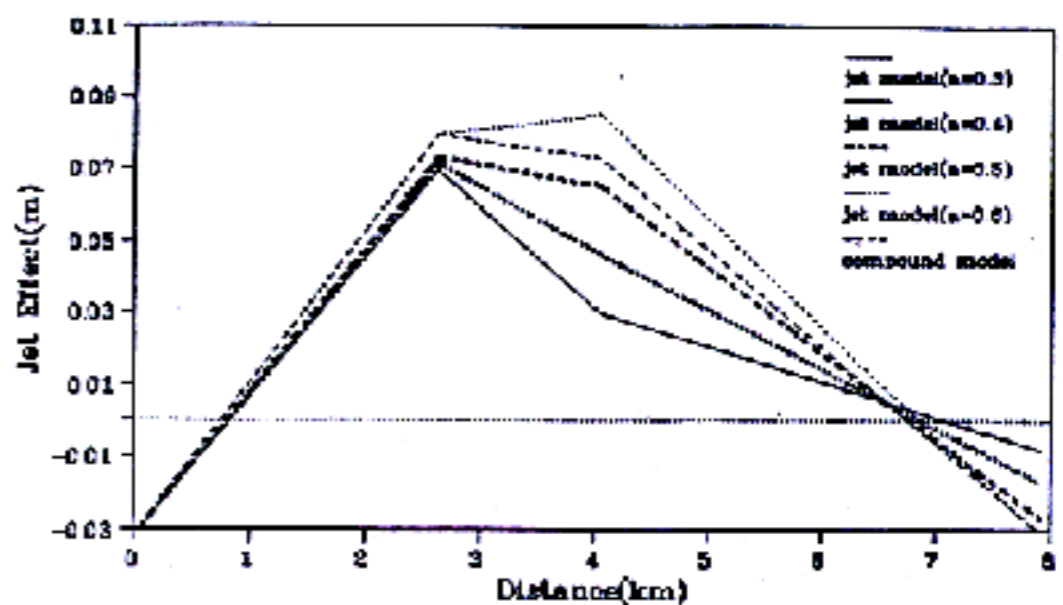
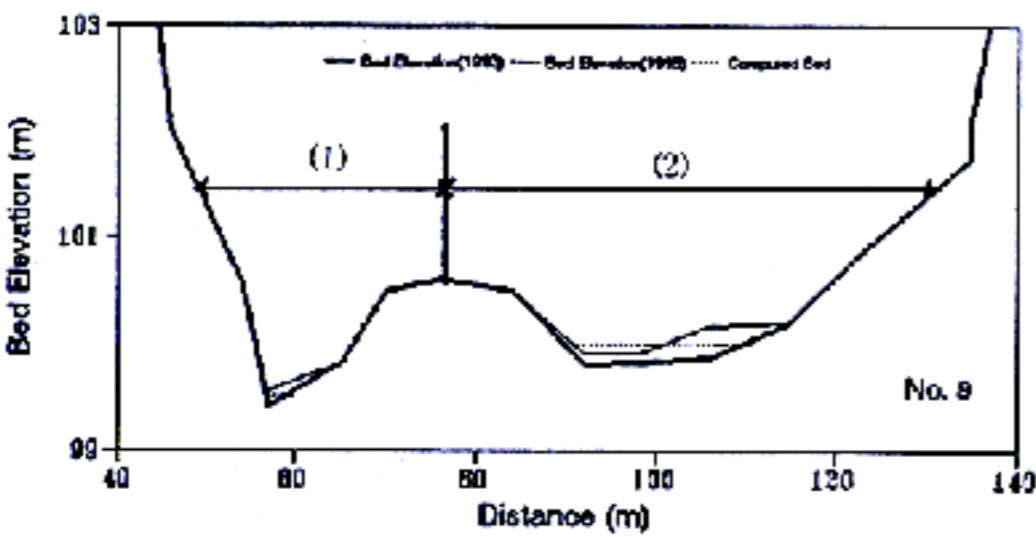


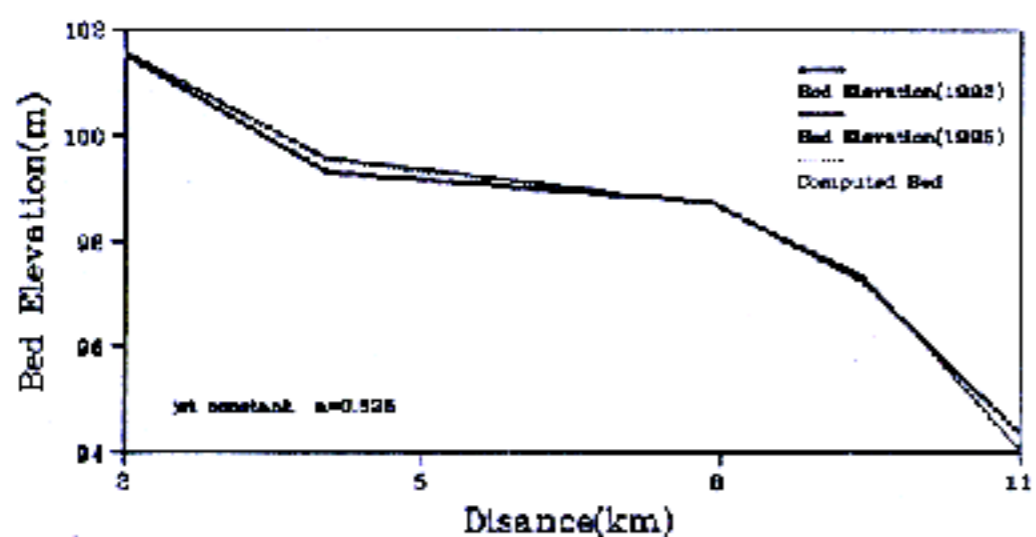
그림 10. 분류상수의 효과

유사퇴적을 하류로 충분히 이동시키지 못하고 있음을 보여주고 있다. 하상변화는 분류상수 a 가 0.5이상에서 jet model로 예측한 하상변화와 compound model로 예측한 하상변화가 거의 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 1993년 11월부터 1995년 12월까지 약 2년간의 주암댐상류의 하상변화를 예측한 결과를 보여주고 있다. 전 구간은 1~3(중심수로 2)의 수로로 나누어 수로의 compound model과 jet model을 적용하였다(그림 11의 횡단면도). 분류가 발생하는 지점의 jet 상수 a 은 No.8~No.9구간을 중심으로 약 0.5~0.65정도에서 조정이 가능하였고 0.625에서 가장 좋은 효과를 나타냈다. 댐 상류는 하상이 상당히 퇴적되고 있는 지점으로 실측치와 수치모형의 결과치가 거의 같은 양상의 결과를 보여주고 있다. 즉, 종단면도에서 8km(No.11)이하의 측정점을 제외하고는 실측치와 거의 같은 경향의 하상변화를 보여주고 있다.



(a) 횡단면도



(b) 종단면도

그림 11. 주암댐의 하상단면

6. 결 론

본 연구는 저수지 유입부의 퇴사기동을 연구하기 위하여 저수지의 횡단면을 종방향으로 몇 개의 소단면으로 나누어 수로의 합성모형과 2차원 분류모형을 이용하였다.

수치모형은 유량의 연속방정식과 운동량방정식을 double sweep method로 유량과 수위의 변동량을 구한 후, 이를 유사의 연속방정식에 적용하여 유사를 추적하도록 구성하였다. 이 수치모형으로 저수지 유입부의 퇴사기동에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 저수지 유입부의 퇴사기동을 파악하기 위해서는 저수지 유입부의 흐름특성상 compound model보다 jet model이 적합한 것으로 나타났다.
2. 주암댐 유입부의 분류상수 a 는 0.5~0.65정도에서 조정이 가능하였고, 분류상수 a 가 0.625일 때 가장 좋은 결과를 얻었다.
3. 수치모형을 이용하여 저수지 유입부의 하상변화를 예측한 결과는 전반적으로 실측치와 거의 같은 양상의 하상변화를 나타냈다.
4. 이 수치모형은 분류가 발생하는 하천, 저수지등에서 부유사 퇴적 및 오염물질의 확산을 예측하는데 가능한 모형이라고 판단된다.

참고문헌

1. 이관수 (1993). "우리나라저수지의 퇴사량예측 및 공간적 분포특성." 국제수문개발계획(IHP)연구보고서, 건설부, pp.3.1-3.40
2. 우효섭등 (1991). "하상변동 예측모형의 비교분석." 연구보고서, 건기연 91-WR-112, 한국건설기술연구원.
3. 우효섭등(1990). "수정 아인슈타인 방법의 한국 하천에의 적용." 연구보고서, 건기연 90-WR-112, 한국건설기술연구원.
4. 한국수문조사연보. (1994-1995). 건설부
5. Rudy Slingerland., John W.Harbaugh., Kevin Furlog. (1994). "Simulating clastic sedimentary basins." PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs.

- N.J, pp. 93-107.
6. Chen, Y.H. (1978). "Mathematical Modeling of Water and Sediment Routing in Natural Channels." PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins Colorado.
 7. Dass, P.G., Simons, D. B. (1976). "Mathematical Model to Simulate Channel Deformation." Proceedings, 3rd Annual Symposium of the Waterways, Harbors and Costal Engineering Division, ASCE, pp. 1-15
 8. Lopez, J.L. (1978). "Mathematical Modeling of Sediment Deposition in Reservoirs." Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, No.95.
 9. Rane, S.A. (1971). "Sediment Sorting in Alluvial Channels." M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
 10. Strelkoff, T. (1970). "Numerical Solution of Saint-Venant Equations." Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No. HY1, pp. 223-252
 11. Young Hai Chen (1977). "Water and Sediment Routing in Rivers." Modeling of Rivers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp. 10.1-10.97.
 12. Ruh-Ming Li (1977). "Water and Sediment Routing from Watersheds", Modeling of Rivers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp. 9.1-9.88.
 13. Chen, Y.H., Holly, F. M., Mahmood, K., Simons, D. B. (1975). "Transport of Material by Unsteady Flow." Unsteady Flow in Open Channels, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp. 313-365.
 14. Liggett, J.A., Cunge, J. A. (1975). "Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations." Unsteady Flow in Open Channels, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp. 89-178.
 15. Vanoni, V.A. (1975). "Sedimentation Engineering." prepared by the Task Committee for the preparation of the Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division, ASCE, New York, N.Y., pp. 278-285.