

부정류에서의 비평형유사이동에 관한 수치모델 연구

A Study on the Numerical Model of Non-Equilibrium
Sediment Transport in Unsteady Flow

이 승 호
LEE Sung Ho

Abstract : This study presents a research on numerical modelling of non-equilibrium sediment transport in unsteady flow. This model is applied to Belley reservoir of the Rhone river in France. At first hydraulic model which is applicable to the natural river with confluence and divergence (looped network) system is created. And the simulations by this hydraulic model give good results in comparison with the measured data. The fully coupled sediment transport model is created adding conservation equation of the mass in suspension and the mass of bed to St. Venant equations, which model is also applicable to the looped network system. Manning roughness coefficient considering the bed form (ripple and dune) by van Rijn method is calculated at each time steps. Applying this fully coupled sediment transport model to Belley reservoir, $D = 5 \mu\text{m}$ is almost transported to the downstream and $D = 30 \mu\text{m}$ is nearly deposited in this reservoir. Total desposition ratio (= deposit/entering = 0.4) gives good result comparing with the measuring (= deposit/entering = 0.49). This model can be used to the prediction of unsteady flow with looped network, sediment transport discharge (bed load, suspended load), bed level variation (deposit, erosion), Manning or Chezy coefficient in natural river and especially the sediment discharge in case of non-equilibrium conditions.

요 지 : 이 논문은 하천의 부정류 흐름에서의 부유사 및 소류사 이동에 대한 수치모델에 관한 연구이며, 프랑스 Rhone강의 Belley지구에 적용하였다. 먼저 자연하천의 지형에 맞는 분기, 합류 혹은 섬이 있을 경우 모의시험이 가능한 수리학적 모델을 만들어서 실측치와 비교하여 좋은 결과를 얻었다.

* 농어촌진흥공사 농공기술연구소 환경연구실 공학박사

유사이동모델은 수리학적 모델에 유사보존방정식 2개를 첨가하여 4개의 방정식이 완전 couple 화되어 부유사 및 소류사 모의시험이 가능하며, 이 모델에서도 분기, 합류현상을 고려한 looped network가 가능하도록 되어있다. Manning계수는 하상형태를 고려할수 있는 van Rijn의 방법에 의해서 매 Δt 마다 이 값이 계산되도록 하였다. 이 모델을 Belley지구에 적용한 결과 입경 $D=5 \mu\text{m}$ 는 거의 퇴적되지 않고 하류로 운반되었으며, 입경 $D=30 \mu\text{m}$ 는 거의 하상에 퇴적되었다. 전체적인 퇴적율(퇴적량/유입량=0.4)은 실측치(퇴적량/유입량=0.49, 1990년 실측)와 비교해서 만족할만한 결과를 얻었다. 그리고 이 모델로써 자연하천에서의 분기 및 합류 현상에 대한 부정류의 수리학적 현상 예측, 수로 및 하천에서 유사이동량 (부유사량, 소류사량) 추정과 하상변동 (침식, 퇴적) 예측, 일반하천에서의 조도계수 (Manning, Chezy) 예측 및 하상토 입경분포의 D_{50} 과 유입유사 입경분포의 D_{50} 가 다른경우 유입유사에 따른 퇴적량 예측 등이 가능하다.

1. 서론

본 연구는 하천의 부정류 흐름에서의 유사 (부유사: Suspended load, 소류사 : Bed load) 이동에 관한 수치해석 모델에 대한 연구이며, 이 모델을 스위스 제네바의 레만호수에서 지중해까지 흐르는 Rhone 강의 Belley 지구에 적용하여 만족할만한 결과를 얻었다.

Belley 지구는 Rhone 강의 상류부에 위치해 있으며, 그 상류에는 Verbois 댐, Chancy-Pougny 댐이 스위스 쪽에 위치하여 있으며, Genissiat 댐, Seyssel 댐 및 Chautagne 댐이 프랑스 쪽에 위치해 있다.

최상류에 위치한 Verbois 댐, Chancy-Pougny 댐에서 퇴적되는 퇴적물을 배제하기 위해서 매 3년마다 급방류 작업이 실시되고 있으며, 이 기회를 이용하여 프랑스 당국에서도 스위스 쪽에서 방류되는 고농도 퇴적물이 하류 댐에 퇴적되지 않게하기 위하여 급방류 작업이 실시되는 동안 이 물질들이 가능한 한 하류쪽으로 흘러내려 가도록 조치를 취하고 있다.

그리고 이 급방류 작업이 실시되기 전후의 강바닥 표고를 측정한 결과 연장 18 km 인 Belley 지구 내에 약 600,000 m^3 의 유사 퇴적 되었음이 판명되었다. (1990년 급방류 작업후 측정치 임)

이러한 이유로 Belley 지구의 하상변동, 저수량 감소, 유지관리 및 홍수이동을 위한 물흐름 및 유사 이동량을 추정할수 있는 수치모델의 필요성이 대두되었다.

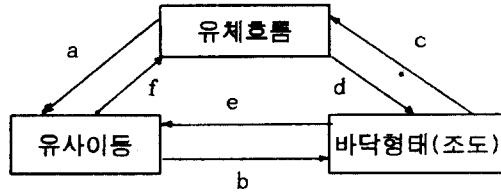
이 논문은 국립 Rhone강 관리소와의 협조에 의해 수행 되었으며, 유속, 유량 및 입도분석자료는 이 관리소에 의해 제공되었다.

2. 본론

유사의 침식, 이동 및 퇴적 진행 과정은 매우 복잡하다. 소류 및 이동은 입자의 특성 (입자의 비중, 크기 및 표면형태)과 유체의 움직임 (흐름의 형태, 유속 및 액체비중)에 좌우된다.

강에서의 유사의 움직임은 유체, 유사이동, 하상형태 및 조도에 상호 영향을 받는다. 이 상호 영향은 하천형상의 변화예측에서 Chezy 혹은 Manning 계수로 표현된다. 이 계수를 확정시키기 위

한 주된 어려운 점은 강바닥의 특성과 조도가 유체의 흐름 (특히 유속, 수심 및 손실수두)과 유사이동에 의존된다는 점에 기인한다. 역으로 유체의 흐름은 하상형태 및 유사이동에 의존된다. (그림 2.1 참조)



a: 유사이동 b: 바닥의 변형 c: 바닥변형에 따른 조도 d: 손실수두의 변형
e: 바닥 전단력의 변형 f: 난류 및 유사이동 능력의 변형

그림 2.1 유체, 유사이동 및 바닥형태와의 관계

만일 유체의 흐름이 매우 약하면, 입자는 구름, 미끄럼 및 도약에 의하여 운반되고 이것이 더 강해지면 바닥에서 파상사군(ripples), 사구(dune) 등이 발생된다.

위에서 언급된 바닥의 형태는 각자의 조도를 갖는다. 평평한 바닥의 조도는 입자의 크기(D_{90})이며, 파상사군 및 사구에서의 흐름에 대한 전체저항력은 2 부분으로 구성된다. (입자의 조도 및 바닥형태의 조도)

본 논문의 모델에서는 매 계산시 유체흐름, 유사이동 및 바닥형태의 상호작용을 고려한 Chezy 혹은 Manning계수를 계산하기 위하여 바닥의 유효조도 개념을 도입하였다.

2.1 Belley 관리유역 개요

Belley 관리유역은 길이 약 18 km 정도이고, 다음과 같은 시설물들이 있다 (그림 2.2 참조) :

가. 상류 4.5 km 구간은 자연하천 임 :

A. 우안은 잠기지 않은 독이 설치 되었음

B. 좌안은 2.5 km 구간이 잠기지 않은 독이고 2 km 구간은 잠기는 독임

나. 방류언제는 Savieres 수로 맞은 편 Rhone 강의 좌측편에 위치

다. 도수로의 길이는 약 13.5 km 이며, Cressin 호 및 Bart 호를 포함하고 있음

Cressin 호 내에서 유체흐름이 호수 내의 섬까지 연결된 수중언제에 의하여 2 갈래로 갈라진다. 이 2 갈래의 수로에서는 유속이 아주다르다 (즉, 유사이동 능력이 다름). 이러한 이유 때문에 본 논문에서는 분기 및 합류의 문제를 다루었다.

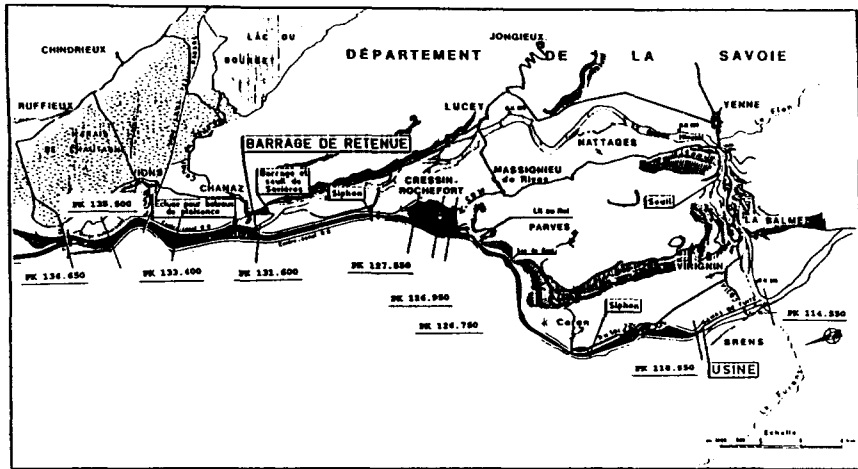


그림 2.2 Belley 유역 현황도 및 측정점

급방류 작업시 이동되는 물질들은 입자가 아주 작다. (90% 이상이 0-200 μm 이며, D_{50} 은 15-25 μm 임, 1987 측정자료 임)

이러한 사유로 인하여 본 논문에서는 부유사, 소류사, 침강, 부상 및 유효조도 등을 고려하였으며, 부유사 및 소류사를 위하여 van Rijn 식을 사용하였다.

2.2 유사이동 현상 개요

유사이동 현상은 다음 그림 2.3과 같이 두께 "a"의 바닥층 (소류사가 일어남)과 두께 "h-a"의 표면층 (부유사가 일어남)으로 모델화 하였다.

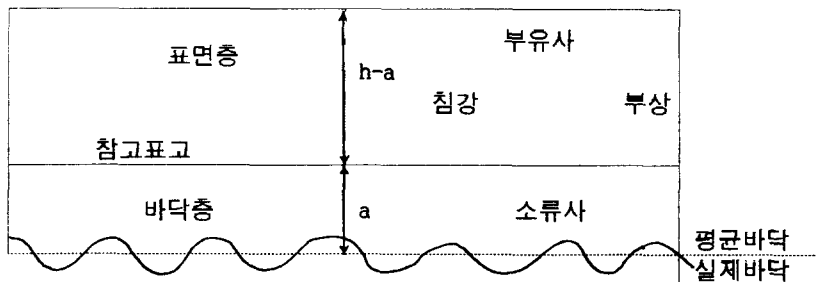


그림 2.3 유사이동 현상도

2.3 모델을 위해 사용된 미분방정식

고려된 방정식은 다음과 같다 :

- 가. 유체 연속방정식
- 나. 운동량방정식
- 다. 부유사 보존방정식
- 라. 소류사 보존방정식
- 마. 유사량 공식
 - A. 소류사량 공식 B. 부유사량 공식
- 바. 마찰저항공식
- 사. 바다와 표면층 사이의 교환공식

위 방정식들을 해석하기 위하여 Preissmann의 Implicit 해법을 썼으며, 분기 및 합류의 현상에 대해서도 double sweep 이론을 사용하였다.

위 고려된 방정식을 자세히 기술해보면 다음과 같다.

- 가. 유체 연속방정식

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = B - \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2.1)$$

- 나. 운동량방정식

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q^2}{\partial x} - \left(\beta - \frac{Q^2}{A}\right) + \frac{Q^2}{K^2} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{K_e}{2g} \frac{\partial(Q/A)^2}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

- 다. 부유사 보존방정식

$$\frac{\partial CA}{\partial t} + \frac{\partial Qs}{\partial x} = S - qC \quad (2.3)$$

- 라. 소류사 보존방정식

$$(1-p) \frac{\partial Ab}{\partial t} + \frac{\partial Qb}{\partial x} + S = 0 \quad (2.4)$$

- 마. 유사량 공식 (van Rijn, 1984, ASCE)

- A. 부유사량 공식

$$Q_s = 0.012[(V-V_{cr})/\{(s-1)gD_{50}\}^{0.5}]^{2.4}D_{50}D_*^{-0.6}VB \quad (2.5)$$

여기서 V_{cr} 은 평균 한계유속이며,

$$V_{cr} = 0.19 D_{50}^{0.1} \log(12R/3D_{90}) \quad , \quad 100 < D_{50} < 500 \mu m$$

$$V_{cr} = 8.5 D_{50}^{0.6} \log(12R/3D_{90}) \quad , \quad 500 < D_{50} < 2000 \mu m$$

B. 소류사량 공식

$$Q_b = 0.005[(V-V_{cr})/\{(s-1)gD_{50}\}^{0.5}]^{2.4}D_{50}^{1.2}VB \quad (2.6)$$

바. 마찰저항공식

A. 입자변수

$$D_* = D_{50}\{(s-1)g/v^2\}^{1/3} \quad (2.7)$$

여기서, s : 비중 v : 동점성계수

B. 이동변수

$$T = \frac{(V_*')^2 - (V_{*, cr})^2}{(V_{*, cr})^2} \quad (2.8)$$

여기서,

V_*' : 입자의 전단속도 $(= (g^{0.5}/C')V)$

C' : 입자의 Chezy 조도 $(= 18 \log(12R/3D_{90}))$

$V_{*, cr}$: 입자의 한계 전단속도 $(= \{\theta_{cr}(s-1)gD_{50}\}^{0.5})$

θ_{cr} : Shields 곡선에 따른 입자의 한계이동 변수

C. 사구나 파상사군의 높이와 길이

$$\Delta r = 0.02h(1 - e^{-0.1T})(10 - T) \quad 1 < D_* < 10 \quad (2.9)$$

$$\lambda r = 0.5h \quad (2.10)$$

여기서, Δr : 파상사군의 높이, λr : 파상사군의 길이, h : 수심

D. 바닥형태의 심도

$$\phi r = \Delta r / \lambda r \quad (2.11)$$

E. 유효조도

$$K_s = 3D_{90} + 20\Delta r\phi r \quad (2.12)$$

F. Chezy 계수 및 Manning 계수

$$C = 18 \log(12R/Ks) \quad (2.13)$$

$$n = R^{1/6}/C \quad (2.14)$$

사. 바닥과 표면층 사이의 교환공식

$$S = (Qse - Qs)/L^* \quad (2.15)$$

여기서;

S : 바닥과 표면층 사이의 교환항, Qse : 평형 부유사량 (m^3/s)

Qs : 실제 부유사량 (m^3/s), L* : 교환특성길이

$$L^* = (hV/W)[a/h + (1-a/h)\exp\{-1.5(a/h)^{-1/6}(W/V^*)\}] \quad (2.16)$$

$$a = 33h \exp[-\{1 + K(C/\sqrt{g})\}] \quad (2.17)$$

여기서, a : 바닥층의 두께, K : von karman 상수

2.4 경계조건

모델에 사용된 경계조건은 다음 그림과 같다.

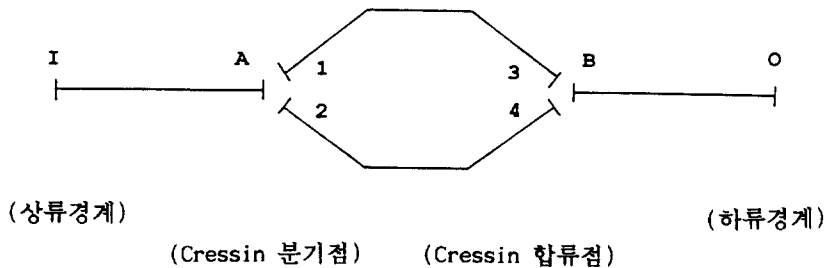


그림 2.4 모델에 사용된 상하류 경계조건 및 분기, 합류점

3. 비교고찰

먼저 유사이동 현상을 Simulation 하기전 부정류에 대한 수리학적 계수 (Z:수심, Q:유량)를 Manning 계수와 Boussinesq계수 (β)를 사용하여 현장에서의 실측치와 비교 검증 하였다.

본 연구에서는 유사이동공식을 위해서 van Rijn 3T (= 부유사량 공식 Rijn 3S + 소류사량 공식 Rijn 3B) 공식을 선택하였다.

유사이동모델의 적용하기 위해서 Manning 계수를 초기에는 S.C.S. 방법으로 추정하고 일정한 시간이 지난 후 매 계산시마다 van Rijn 방법으로 계산하여 η_{base} 값을 얻었으며, 여기에다 η_{sup} 값을 추가하여 η_{total} 값을 사용하였다. 이 값에 의해서 다시 수면변화를 계산하여 실측치와 비교 하였으며, 여기서도 최대오차는 5 cm 정도로 이 방법이 총적하천에서 적용가능한 방법임이 증명되었다. (그림 2.5 참조)

바다시료 채취 (91년 9월 시행) 및 부유사 채취 (93년 6월)에 의하여 다음과 같은 입자분포특성을 얻었다.

소류사 입자 특성 :

$$D_{16} = 0.034 \text{ mm}, \quad D_{50} = 0.150 \text{ mm}, \quad D_{84} = 0.288 \text{ mm}, \quad D_{90} = 0.375 \text{ mm}$$

부유사 입자특성 :

$$D_{16} = 3.4 \text{ } \mu\text{m}, \quad D_{50} = 11.5 \text{ } \mu\text{m}, \quad D_{84} = 28.0 \text{ } \mu\text{m}, \quad D_{90} = 36.0 \text{ } \mu\text{m}$$

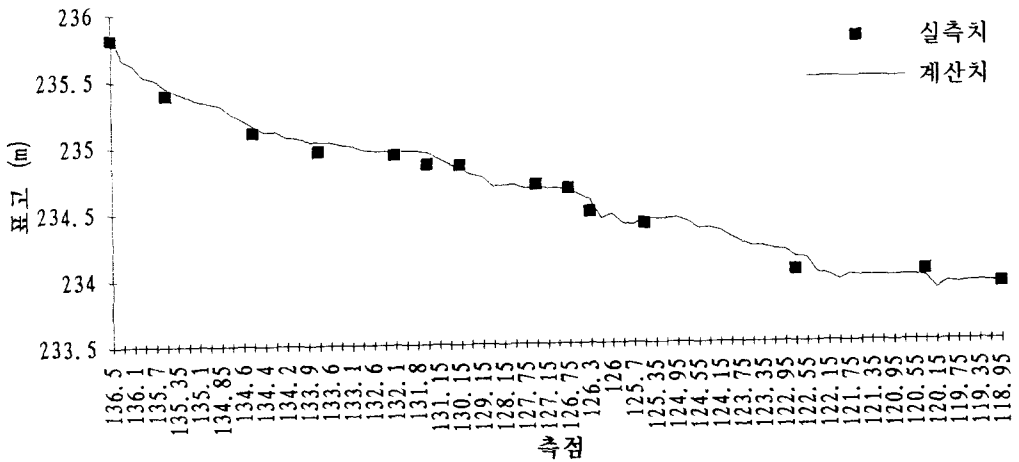


그림 2.5 수면고 비교(Q= 716 m³/s, Z= 233.93 m)

본 모델을 완성한 후 24 시간동안 $\Delta t = 5$ 분, $D = 11.5 \mu\text{m}$ 에 대하여 $Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z = 233.93 \text{ m}$, $Z_b = 225 \text{ m}$, 및 $C = 10 \text{ g/l}$ 를 사용하여 하상변화를 관측하였다. (그림 2.6 참조)

그리고 같은 수리학적 조건에서 C 값을 상류경계조건으로 변화시켰으며, 이에 따라 방수로부근 (PK 131.600), Cressin호 (PK 126.950), Cressin호 하류 (PK 122.750) 및 모델의 최말단 (PK 118.950)의 C 값의 변화가 그림 2.7에 나타나 있다.

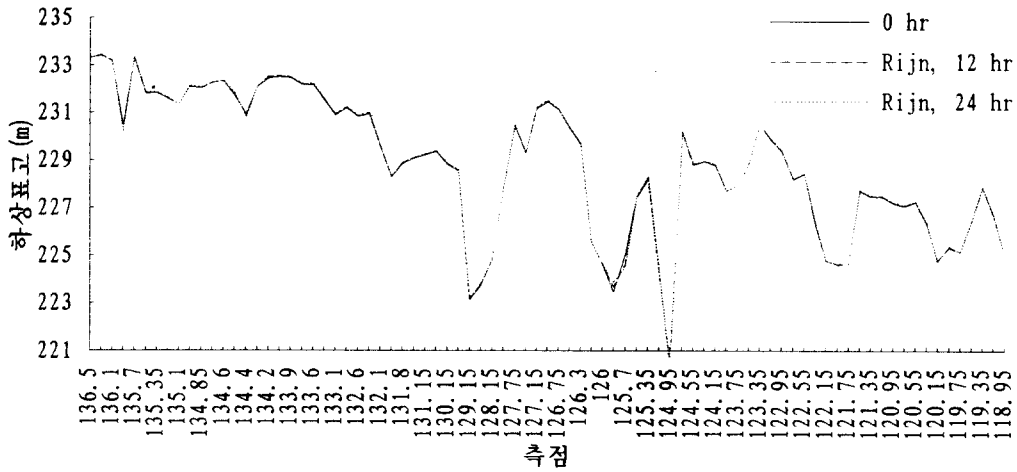


그림 2.6 하상변화 ($Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$, $C = 10 \text{ g/L}$)

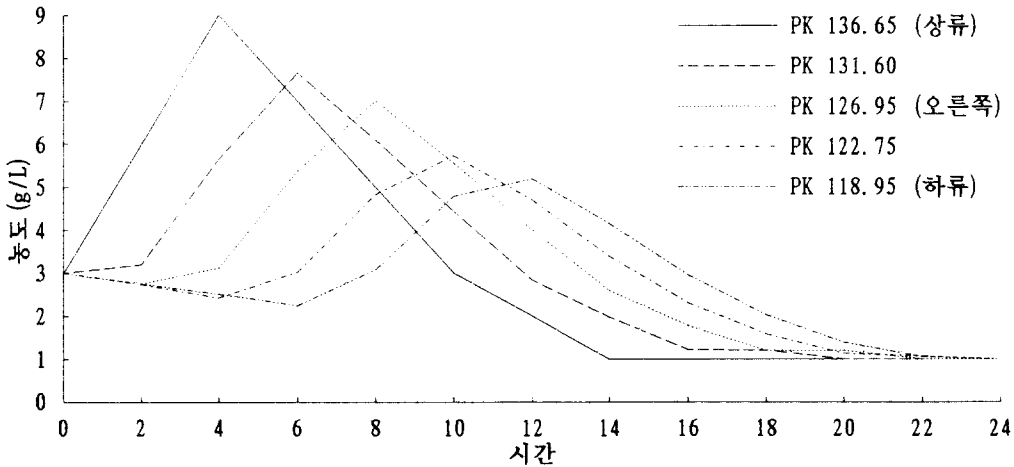


그림 2.7 측정점별 농도 변화

그리고 다시 상류경계조건(유량 및 농도)을 90 년 급방류시 관측된 값을 사용하여 simulation 하였다. (그림 2.8 참조)

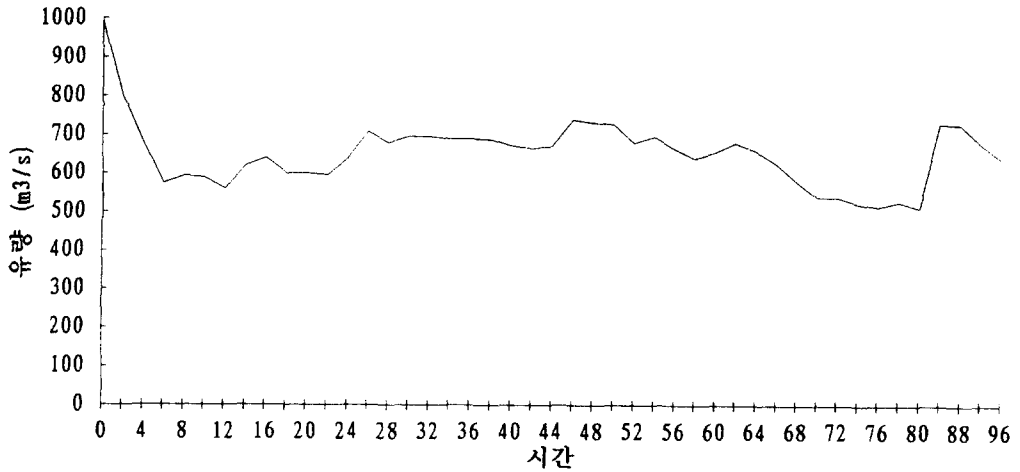


그림 2.8 유량변화 (Vions지점, 1990년 측정치)

이 급방류작업은 4일간 지속되었고 최대농도가 9 g/l 이었으며, 5 μ m, 11.5 μ m, 20 μ m, 30 μ m 에 대하여 퇴적량을 산출하였다. (그림 2.9 및 표 1 참조)

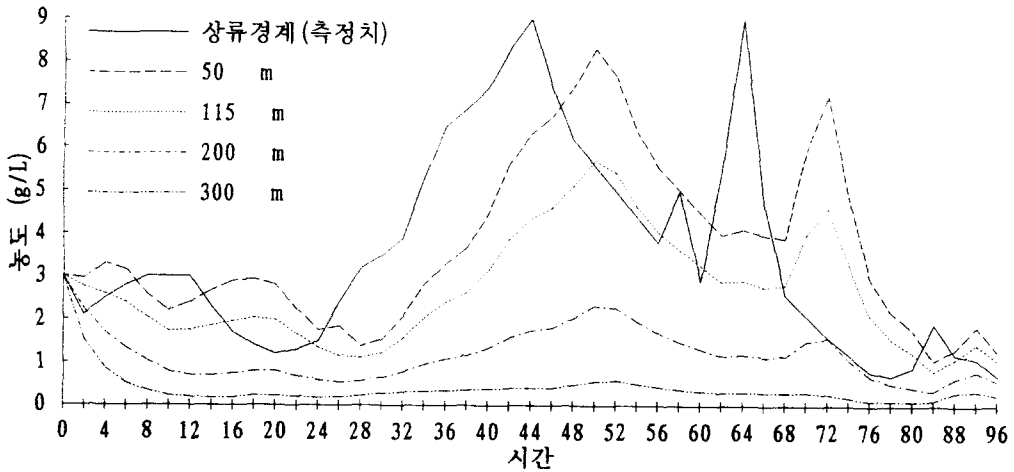


그림 2.9 하류경계에서의 입경 D에 의한 농도변화

표 1. 입경별 퇴적비

입경 (μm)	유입량 (m^3)	유출량 (m^3)	퇴적량 (m^3)	퇴적량/유입량 (%)
5	295,000	292,000	3,000	1
11.5	295,000	211,000	84,000	28
20	295,000	94,000	201,000	68
30	295,000	31,000	284,000	89

이 표에 의하면 입경 5 μm 은 거의 다 유출되었고 입경 30 μm 은 거의 다 퇴적되었다.
 만일 유입량이 295,000 m^3 이고, 각 입자의 %를 부유류사 입자분포곡선에 따라서 다음과 같이 가정하면 :

$$D = 5 \mu\text{m} : 30 \%, D = 11.5 \mu\text{m} : 30 \%, D = 20 \mu\text{m} : 20 \%, D = 30 \mu\text{m} : 20 \%$$

그리고 이 전체 입자분포 곡선에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

$$\text{퇴적비} = \text{퇴적량}/\text{유입량} = 119,000/295,000 = 40 \% = 0.4$$

4. 결론

본 논문에서는 분기 및 합류현상을 포함하는 부정류에서의 비평형 유사이동 현상을 완전 couple화 하여 수치모델을 만들었다. Cressin 호의 분기 및 합류조건, 적절한 초기 및 경계조건, 부유사층과 소류사층의 교환방정식 등을 고려하였고, Manning 계수는 van Rijn의 방법에 의해 각 계산 단계마다 다시 이 계수를 계산하였다.

본 Belley 지구의 경우 D_{16} 의 경우 유입량 거의 전부가 유출되었고 D_{84} 의 경우 유입량의 대부분이 퇴적되었다. 모델의 계산 결과 퇴적비 = 퇴적량/유입량 = 0.40 으로서 이 결과는 실측치 (1990 년, 퇴적비 = 0.49)와 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다.

그리고 이 모델로써 하천에서의 분기 및 합류 현상에 대한 부정류의 수리학적 현상 예측, 수로 및 하천에서 유사이동량 (부유사량, 소류사량) 추정과 하상변동 (침식, 퇴적) 예측, 일반하천에서의 조도계수 (Manning, Chezy) 예측 및 하상토 입경분포의 D_{50} 과 유입유사 입경분포의 D_{50} 가 다른경우 유입유사에 따른 퇴적량 예측 등이 가능하다.

5. 참고문헌

1. Abott M.B. (1980), "Computational Hydraulics", Pitman
2. Armanini A. and Di Silvio G. (1988), "A One-Dimensional Model for the Transport of a Sediment Mixture in Non-Equilibrium Condition", JHR, Vol.26, No.3, pp.276-286
3. Bell R.G. and Sutherland A.J. (1983), "Nonequilibrium Bed Load Transport by Steady Flows", ASCE, Vol.109, No.3
4. Celik I. and Rodi W. (1991), "Suspended Sediment-Transport Capacity for Open-Channel Flow", ASCE, Vol.117, No.2
5. Cunge J.A., Holly Jr. F.M., Verwey A. (1980), "Practical Aspects of Computational River Hydraulics", Pitman
6. Cunge J.A. and Perdreau N. (1973), "Mobile Bed Fluvial Mathematical Models", La Houille Blanche, No.7
7. Galappatti G. and Vreugdenhil C.B. (1985), "A Depth-Integrated Model for Suspended Sediment Transport", JHR, Vol.23, No.4
8. Holly Jr. F.M. and Rahuel J.L. (1990), "New Numerical/Physical Framework for Mobile-Bed Modelling", JHR, Vol.28, No.4, pp. 404-411
9. Samaga B.R., Ranga Raju K.G. and Garde R.J., (1988), "Suspended Load Transport of Sediment Mixtures", ASCE, Vol.112, No.11
10. Samaga B.R., Ranga Raju K.G. and Garde R.J. (1988), "Bed Load Transport of Sediment Mixtures", ASCE, Vol.112, No.11
11. van der Berg J.A. and van Gelder A. (1993), "Prediction of Suspended Bed Material Transport in Flows Over Silt and Very Fine Sand", Water Resources Research, Vol.29, No.5, pp. 1401-1403
12. Vanoni V.A. (1977), "Sedimentation Engineering", ASCE Task Committee, pp. 152-230
13. Van Rijn L.C. (1984), "Sediment Transport, Part I : Bed Load Transport", ASCE, Vol.110, No.10, pp. 1431-1452
14. Van Rijn L.C. (1984), "Sediment Transport, Part II : Suspended Load Transport " ASCE, Vol.110, No.11, pp. 1613-1638
15. Van Rijn L.C. (1984), "Sediment Transport, Part III : Bed Forms and Alluvial Roughness", ASCE, Vol.110, No.12, pp. 1749-1754
16. Van Rijn L.C. (1988), "Application of Sediment Pick-Up Function", ASCE, Vol.112, No.9, pp. 1749-1754
17. Woo H.S., Julien P.Y. and Richardson E.V. (1988), "Suspension of Large Concentration of Sand", ASCE, Vol.114, No.8, pp. 888-891
18. Yang C.T. and Molinas A. (1982), "Sediment Transport and Unit Stream Power Function", ASCE, Vol.108, No.HY6