研 究 動 向

# 河川流砂의 硏究動向

禹 孝 燮*

1. 序言
2. 河床 형태(Bed Forms)
3. 總流砂量(Total Sediment Discharge)
4. 結言

## 1. 序言

河川에서의 流砂현상(Sedimentation)은 흐르는 물에 의한 流砂(Sediment)의 浸蝕(erosion), 移送(transportation) 및 堆積(deposition) 과정을 말한다. 沖積하천에서의 流砂현상의 공학적인 중요성은 河床변동, 제방의 침식, 하천의 안정성, 저수지 內의 堆砂등 광범위하게 걸쳐있다. 따라서 한 沖積하천 유역에 수력발전, 관개·배수, 상수취수, 홍수조절시설, 주운 등 수자원 프로젝트를 계획하는 경우 流砂문제는 필수적으로 고려되어야 한다.

하천流砂현상의 체계적인 연구는 20세기 초 미국의 Gilbert(1914)의 연구부터라 할 수 있다. 그 이후 歐美에서 많은 이론적, 실험적 연구가 진행되어 왔으며 그 결과 總流砂量 산정, 수위-유량 관계, 局地洗堀, 하상의 상승(aggradation) 및 저하(degradation), armoring 등 하천공학의 중요한 제문제들에 대해 부분적이나마 실용적인 답을 얻을 수 있게 되었다. 최근 하천流砂 관계의 권위자인 미국의 Vanoi교수(1984)는 ASCE 수리학 논문지를 통하여 지난 50년간의 流砂연구의 발전에 대해 요약을 하여 그 결론으로 하천에서의 流砂量 및 유송속도의 예측이라는 기본문제는 하상에서의 流水-流砂의 상호작용에 그 해결열쇠가 있다고 하였다.

본고에서는 歐美를 중심으로 한 최근의 流砂연구경향을 1)하상형태, 2)총유사량 산정을 중심으로 논하고자 한다. 상기 두 분야는 하천流砂연구의 중심과제이며 기본이 된다.

## 2. 하상형태(Bed Forms)

충적하천의 流水는 하상을 변화시키고 그에 따라 하상粗度를 변화시키며 그 달라진 하상조도에 따라 水流자신도 변하다. 하상형태의 공학적 중요성은 1914년 Gilbert의 고전적 流砂연구에서 처음 제기되었다. 水文學者들은 홍수의 통과時 수위-유량 곡선이 단일곡선으로 되지 않고 Loop 형태로 되거나 끊어지는 현상을 많이 관찰해 왔다. 그러나 1958년 Brooks의 하상형태와 조도에 관한 혁신적인 연구발표 전에는 그러한 현상들을 단지 홍수터 內로의 홍수의 유입, 유출이나 막연히 하상조도의 변화에 기인한다고 생각하였다. Brooks의 연구 이후 ripple-dune-plane bed-antidune-chute로 이어지는 하상형태의 변화는 하천의 조도에 직접 영향을 주며 때로는 形狀조도(form roughness)가 砂粒조도(grain roughness)의 몇배가 된다는 것 등이 여러 연구가들의 실제 하천조사에서 밝혀졌다.

60년代 초 미국의 Simons-Richardson(1961, 1966)은 주로 실험에 의한 자료를 사용하여 하상형태를 Lower Flow Regime, Transition, Upper Flow Regime으로 구분하였다. Lower Flow Reigme에는 plane bed, ripple, dune 등이 포함되며 Transition Regime을 지나 Upper Flow Reg-

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

ime에는 다시 plane bed, antidune, chute 등이 포함된다. 한편 Engelund(1967)은 2개의 무차원량으로 표시되는 새로운 하상형태 예측도표를 발표하였으며 최근에 Van Rijn(1984b)은 하천및 실험자료를 사용하여 또 다른 하상형태 예측도표를 발표하였다.

하상형태에 관한 이론적인 연구는 1950년 代부터 시작되었으며 그 중 Kennedy(1963)의 연구가 괄목할 만하다. 그는 Potential Flow 이론과 Lag Distance의 개념을 사용하여 이론적인 방법으로 하상형태를 예측하였다. 최근까지 Potential Flow 이론에 기초를 둔 하상형태 연구는 이 Lag Distance의 해석적, 실험적 결정에 촛점을 맞추어 왔다. 이에 반해 Smith(1970)나 Engelund(1980)등은 Real Fluid Flow에 기초를 둔 하상형태 예측모델을 발표하였다. Engelund의 연구는 이동하상의 확률적 해석에 기초를 두었으며 Kennedy의 Lag Distance의 개념이 사용되지 않았다.

하상형태의 임의성과 불규칙성은 통계학적 방법에 의한 하상형태 연구를 촉진시키어 Nordin-Algert(1966)는 dune 하상을 묘사하기 위한 2차 Markov 모델을 제안하였다. 그 이후 연구가들은 하상의 변화를 2차나 3차의 임의운동으로 예측하려 하였으나 이 분야의 연구는 이용할 적절한 자료의 부족으로 불완전한 해답을 얻었을 뿐이다.

流水의 온도는 물의 점성에 직접적 영향을 주며 이에 따라 流砂量 및 하상변화에 영향을 준다. 하상에 對한 온도효과 연구는 1940년대 말 특히 미국을 중심으로 계속되어 왔으며 이러한 연구결과에 의하며 하상은 일반적으로 겨울철에 비해 여름철에 진폭이 훨씬 더 크게 변화한다는 것이다. Colby-Scott(1965)의 연구와 미 공병단 오마하지역(1969)의 연구는 이러한 효과를 단적으로 보여주었다.

### 3. 總流砂量(Total Sediment Discharge)

하천流砂 문제중 가장 기본적인 과제의 하나는 하천의 수리학적, 流砂的 함수로서 총유사량을 산정하는 것이다. 지금까지 많은 총유사량 산정방법들이 발표되고 부분적으로 사용되어 왔으나 그 중 어느 하나도 광범위한 인정을 받지 못하고 있다.

기존 총유사량 산정공식들은 그 각각의 공식의 수립방법에 따라 몇개의 '카테고리'로 구분할 수 있다. 그 첫번째는 확산형 (Advection Dffusion Type) 모델이다. 이 모델은 첫째 砂粒子(Sediment particle)가 하상에서 구르거나(rolling), 미끄러지거나(sliding), 또는 도약(saltating)하며 이송되는 하상층(Bedlayer)과; 둘째 砂粒子가 난류에 의해 확산되어 떠가며 이송되는 부유층(Suspension Zone)으로 구성되어 있다. 잘 알려진 Einstein의 Bedload Function(1950), Toffaleti(1968), Karim-Kennedy (1983), 그리고 Van Rijn(1984a)공식등이 이 카테고리에 속한다.

두번째는 에너지형(Energy Type) 모델이다. 이 모델의 기본 가정은 난류에서 砂粒子를 이송시키는 데 사용된 일률은 水流의 에너지 소비율에 직접 관련되어 있다는 것이다. 1966년 영국의 Bagnold에 의해 이 개념이 처음 소개된 이래 Engelund-Hansen(1967), Yang(1973, 1979), Ackers-White(1973), Holtorff(1983) 등이 이 개념에 근거하여 총유사량 산정공식들을 수립하였다.

세번째는 회귀분석이나 도표등에 의한 경험적 방법이다. 이 방법의 장점은 그 공식의 구조적 간단성에 있으며 Colby의 도표방법(1964), Shen-Hung의 회귀식(1971)이나 최근의 Ranga Raju(1981) 등의 방법을 들 수 있다. 이 중 Shen-Hung의 총유사량 산정방법에 대한 언급이 흥미롭다. 그들의 주장은 현재로서는 충적하천의 총유사량 산정문제는 너무 복잡하여 몇개의 수리학적, 流砂的 변수들에 의한 해석적 방법은 불가능하며 따라서 경험적인 회귀식으로 표시하는 것이 최선이라는 것이다.

마지막으로 기존공식의 변형식을 들 수 있다. 이 범주에 드는 것은 Colby-Hembree(1955)의

Modified Einstein Method와 Shen-Hung(1983)의 Remodifed Einstein Method 등을 들 수 있다. 특히 Colby-Hembree의 방법은 미 지질조사국(USGS)의 표준방법으로 이는 하천에서의 부유사량의 실측 (Sampled Load)과 Einstein방법에 의한 Unsampled Load의 계산을 合하는 방법이다.

상기한 여러 공식들의 상대적 우열도는 하천에서의 총유사량 실측치와 직접 비교함으로써 연구되어 왔다.(White, et al., 1973; Yang-Molinas, 1982). 이들의 연구결과에 의하면, 일반적으로 공통적인 결론은 에너지 개념에 기초를 둔 공식들이 다른 공식들에 비해 상대적으로 우월하다는 것이다. 이 에너지형 공식의 가장 큰 장점은 확산형 모델보다 그 공식 구성이 간단하다는 것이다. 예로서 Einstein의 방법은 총유사량 계산시 수십단계를 요하지만 Yang의 공식은 불과 몇 단계만 필요로 한다. 그러나, 하천에서 한 연직선상의 유사량의 분포를 알고자 할 때는 확산형 모델이 단연 우수하며 반면 에너지 모델은 하천단면에서의 유속및 유사량의 평균치만을 보여준다. 따라서, 다음은 확산형 모델을 중심으로 그 모델의 형성에 관계되는 몇 개의 중요 변수(parameter)들에 대한 연구업적과 동향을 알아본다.

하천의 한 단면에서의 유사농도의 연직분포(y축)는 다음과 같이 Rouse의 식(1937)으로 표시할 수 있다.

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{a}{d-a}\,\frac{d-y}{y}\right)^{Z};\ Z = \frac{w}{\beta \kappa u_*} \qquad (1)$$

윗 식에서 C와 $C_a$는 각각 한 점에서의 流砂농도 및 하상가까이 참고점(reference point)에서의 농도를 표시하며; d와 a는 각각 수심및 참고점 높이를; w와 $u_*$는 각각 砂粒子의 침강속도 및 流水의 전단속도(Shear velocity)를; 그리고 $\beta$와 $\kappa$는 각각 sediment diffusivity와 fluid momentum diffusivity의 比 및 von Kármán 상수를 나타낸다. 윗 식에서 Z는 무차원량으로 Rouse의 유사연구에 관한 업적을 기념하여 Rouse Number라고도 불리운다. 확산형 모델에서는 하천 단위폭당의 총유사량 $q_t$는 掃流砂量 $q_b$와 浮遊砂量 $q_s$의 합이며 다음과 같이 표시된다.

$$qt = qb + qs = \int_a^d cudy \qquad (2)$$

여기서 $q_s$ = 이며 u는 하천단면 한점에서의 유속이다. 따라서 단위폭당 총유사량 $q_t$를 算定하기 위해서는 $q_b$, a, d, $C_a$ w, $\beta$, $\kappa$, $u_*$및 $u_s$등의 산정이 필요하며 본고에서는 이들 중 특히 학자들 간에 논쟁이 되고 있는 변수들, $C_a$, $\beta$및 $\kappa$에 대해 중점적으로 알아본다.

확산방적식을 적분하여 얻은 대부분의 부유사농도 분포식들은 (1)식과 같이 단지 상대적 농도분포를 나타내며 그 값 C는 참고점 높이 a에서의 부유사 농도 $C_a$를 알아야 구해진다. 이 참고농도를 산정하기 위하여서 두께 a의 하상층 내에서는 소류사의 연직농도분포는 일정하며 그 이송속도는 $U_a$라고 가정하여 다음과 같은 식이 사용된다.

$$Ca = \frac{q_b}{U_a \cdot a} \qquad (3)$$

윗 식에서 $U_a$의 값은 많은 연구가들에 의해 실험적, 경험적으로 추정되었다(Einsten, 1950; Van Rijn, 1984a; Karim-Kennedy, 1983; Engelund-Fredsøe, 1976). 그러나 최근에 Murphy-Aguirre(1985) 등에 의해 (3)식의 적절성에 대한 의문이 제기되었다. 그들의 주장은 소류사와 부유사 이송현상은 물리적으로 서로 다르며 (3)식에서 구한 $C_a$값은 다만 가상적인 하상층 내의 평균 소류사농도이며 부유사농도가 될 수 없다는 것이다. (2)식에 의한 총유사량 산정이 $C_a$값에 매우 민감한 점을 고려하면 물리적으로 타당한 $C_a$값을 산정하는 것은 확산형모델의 중요과제 중 하나이다.

계수 $\beta$의 물리적 의미는 Reynolds Analogy에 기초를 두고 있다. Reynolds Analogy는 수식으로 다음과 같이 표시된다.

$$\varepsilon_s = \beta\ \varepsilon_m \qquad (4)$$

윗 식에서 $\varepsilon_s$는 sediment diffusivity이며 $\varepsilon_m$은 fluid momentum diffusivity이다. Vanoni (1946)등에 의해 제안된 계수 $\beta$는 실험적, 이론

적으로 계속 연구되어 왔으며 서로 상반된 두가지 견해가 있다. Jobson-Sayre(1970)는 난류의 와운동(eddy motion)을 회전운동성분과 관성운동성분으로 나누어 해석함으로써 이두가지 상반된 주장을 포괄하여 설명하려 하였다. 최근에 Van Rijn(1984a)은 $\beta$값과 수리학적, 流砂的 변수들과의 경험적인 관계식을 제시하였던 바 그의 관계식은 Coleman(1970)의 실험자료에 기초를 두고 있다.

현재까지 Reynolds Analogy는 sediment diffusivity의 예측에 합리적 방법으로 인정되 왔으나 $\beta$값에 대한 이론적 타당성이 확립되기 전에는 부유사연구에 확산이론을 적용하는 데는 한계가 있다. 이 점에서, 부유사연구에 확산이론의 적용성및 한계에 관한 Antsyferov-Kosyan(1980)의 연구가 주목된다.

계수는 $\kappa$는 Von Kármán 상수라 불리우며 일반적으로 流水중 부유사 농도가 증가할 수록 감소하는 것으로 알려져 있다.(Einstein-Chien, 1955; Wang, 1981, 기타 다수), 그러나, 최근에 Coleman(1981)은 Wake Flow Function에 기초를 두고 이와 상반된 주장을 하였다. Coleman의 주장은 개수로의 난류는 바닥에 가까운 쪽의 전통적인 對數법칙이 적용되는 구간과(두께 0.1~0.2d) 그 위 관성력이 지배적인, 따라서 Wake Flow Function이 적용되는 구간으로 되어 있다는 것이다. 따라서 난류에 의한 마찰이 지배적이고 對數법칙이 적용되는 구간에서의 $\kappa$값 만을 고려하면 그 값은 부유사 농도와 관계없이 대략 일정하다는 것이다.

## 4. 結言

충적하천에서의 하상형태에 관한 연구는 지난 50년대 Brooks의 혁신적인 연구 이후 짧은 기간동안 많은 발전을 가져왔다. 그러나 현재까지 하천에서의 하상형태나 하상마찰 등을 양호하게 추정할 수 있는 일반적인 방법은 알려져 있지 않다. 하상형태에 관한 연구로는 Simons-Richardson, Kennedy, Engelund, Van Rijn등의 연구가 중요한 업적에 속한다. 하상형태의 장차 연구로는 流水의 온도, 하상에서의 침투, 부유微粒子의 농도등이 하상형태에 미치는 영향 등을 들 수있다.

확산형 모델이 에너지형 모델보다 총유사량 예측이 일반적으로 불량한 이유 중 하나는 전자에 관련된 각 변수의 산정방법의 불확실성 때문이다. 따라서 현재 사용되는 확산형 모델의 각 변수의 산정방법은 다시 연구될 필요가 있다. 또한, 보다 양호한 확산형 모델의 총유사량 공식의 개발을 위해서는 특히 참고농도, 참고점 높이 및 Rouse Z의 산정에 관한 획기적인 연구가 요구된다.

최근의 유사연구에서 주목되고 있는 분야는 過濃度流(hyperconcentrated flow)에 관한 연구이다. Hyperconcentrated Flow는 건조지역이나 준건조지역에 폭우가 오는 경우 흔히 발생하며 부유사의 고농도성(~600,000ppm) 때문에 기존 유사관계식들이 성립되지 않으며 새로운 유사관계식의 정립이 요구된다. 이 분야의 연구는 미국의 Colorado대학과 지역적 특성 때문에 특히 중국등지에서 활발히 진행되고 있다. 또한 특기할 만한 연구는 하천에서의 Ice Engineering이다. 온•한대에 위치한 많은 강들은 겨울철에 결빙되며 이 경우 개수로의 해석은 더 이상 적용될 수 없게 된다. 수면이 결빙된 경우의 유속 및 유사량 분포는 자유수면을 가진 개수로의 그것과는 상이하게 된다. 이 분야의 연구는 미국의 Iowa 대학과 유럽의 Hungary 등지에서 활발히 수행되고 있다.

한국에서의 流砂연구는 다른 분야에 비해 비교적 미진해 왔다. 그 주된 이유 중 하나는 한국에서의 하천유사 문제는 미국, 중국, 기타 지역에 비해 상대적으로 호조건에 있기 때문이다. 그러나, 河床移動率이 크건 작건 충적하천은 이동상 하천이며 따라서 하천공학적인 제문제는 궁극적으로 Mobile Boundary 혹은 Loose Boundary의 개념에서 연구되어야 할 것이다. 따라서 필자는 이번 기회에 한국에서 하천유사 연구가 관심을 받기를 기대하며 무엇보다도 그 연구의 기본이

되는 하천 총유사량 실측의 체도적 수행을 촉구하는 바이다.

## 참 고 문 헌


Ackers, P., and White, W.R., "Sediment Transport : New Approach and Analysis," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE,* Vol. 99, No. HY11, Nov., 1973.

Antsyferov, S.M., and Kos'yan, R.D., "Sediments Suspended in Stream Flow," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE,* Vol. 106, No. HY2, Feb., 1980.

Bagnold, R.A., "An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics," *Professional Paper 422-I, USGS,* Washington, D.C., 1966.

Brooks, N.H., "Mechanics of Streams with Moveable Beds of Fine Sand," *Transaction, ASCE,* Vol. 123, 1958.

Coleman, N.L., "Flume Studies of the Sediment Transfer Coefficient," *Water Resources Res. 6,* No. 3, 1970.

Coleman, N.L., "Velocity Profiles with Suspended Sediment," *Journal of Hydraulic Research, 19,* No. 3, 1981.

Colby, B.R., "Discharge of Sands and Mean Velocity Relationships in Sand-Bed Streams," *Professional Paper 462-A, USGS, Washington,* D.C. 1964.

Colby, B.R., and Hembree, C.H., "Computations of Total Sediment Discharge Niobrara River near Cody, Nebraska," *Water-Supply Paper 1357, USGS,* Washington, D.C., 1955.

Colby, B.R., and Scott, C.H., "Eeffect of Water Temperature on the Discharge of Bed Material," *Professional Paper 462-G, USGS,* 1965.

Einstein, H.A., "The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channels," *Techical Bulletin 1026, U.S. Department of Agriculture, SCS, Washington, D.C., 1950.*

Einstein, H.A., and Chien, N., "Effects of Hevey Sediment Concentration near the Bed on Velocity and Sediment Distribution," MRD Series No. 8, University of California, *Institute of Engineering Research and United States Army Engineering Division, Missouri River, Corps of Engineers,* Omaha, Nebr., Aug., 1955.

Engelund, F., "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams," *Journal of the Hydraulic Division, ASCE,* Vol. 93, No. HY4, July, 1967.

Engelund, F., "Instability of Erodible Beds," *Journal of Fluid Mechanics,* Vol. 42, 1980.

Engelund, F., and Hansen, E., "A Monograph on Sediment Transport to Alluvial Streams," Teknish Forlag, *Technical Press, Copenhagen, Denmark,* 1967.

Engelund, F., and Fredsøe, J., "A Sediment Transport Model for Straight Alluvial channels," *Nordic Hydrology,* No. 7, 1976.

Gilbert, G.K., "Transportation of Debris by Running Water," *Professional Paper No. 86, USGS,* 1914.

Holtorff, G., "Steady Bed Material Transport in Alluvial Channels," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 109,* No. 3, Mar., 1983.

Jobson, H.E., and Sayre, W.W., "Vertical Transfer in Open Channel Flow," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 96, No. HY3, Mar., 1970.*

Karim, F., and Kennedy, J.F., "Missouri River Computer-Based Predictors for Sediment Discharges and Friction Factors of Alluvial Streams," MRD Sediment Series, No. 29, *U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division, July,* 1983.

Kennedy, J.F., "Mechanics of Dunes and Antidunes in Erodible-Bed Channels," *Journal of Fluid Mechanics, Vol.* 16, No. 4, 1963.

Murphy, P.J., and Aguirre, E.J., "Bed Load or Suspended Load," *Journal of the Hydraulics Divi-*

*sion, ASCE, Vol. 111, No. 1, Jan, 1985.*

Nordin, C.F., Jr., and Algert, J.H., "Spectral Analysis of Sand Waves," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 92, HY5, 1966.*

Ranga Raju, K.G., Garde, R.J., and Bhardwaj, R.C., "Total Load Transport in Alluvial Channels," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, No. HY2, Feb., 1981.*

Rouse, H., "Modern Conceptions of the Mechanics of Fluid Tubulence," *Trans., ASCE, Vol. 102, Paper No. 1965, 1937.*

Shen, H.W., and Hung, C.S., "Remodified Einstein Procedure for Sediment Load," *Journal of the Hydraulics Division, Vol. 109, No. 4, Apr., 1983.*

Shen, H.W., and Hung C.S., "An Engineering Approach to Total Bed Material Load by Regression Analysis," *Proceedings, Sedimentation Symposium, Berkeley, California, 1971.*

Simons, D.B., and Richardson, E.V., "Form of Bed Roughness in Alluvial Channels," *Proc., ASCE, Vol. 87, No. HY3, 1961.*

Simons, D.B., and Richardson, E.V., "Resistance to Flow in Alluvial Channels," *Professional Paper 422-J, USGS, Washington, D.C.*, 1966.

Smith, J.D., "Stability of a Sand Bed Subjected to a Shear Flow of Low Froude Number," *Journal of Geophysical Research, Vol. 75,* 1970

Toffaleti, F.B., "A Procedure for Computation of the Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface," *Technical Report No. 5, Committee on Channel Stabilization, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, Nov., 1968.*

U.S. Army Corps of Engineers, "Missouri River Channel Regime Studies, Omaha District," *MRD Sediment Series, No. 13B, Nov. 1969.*

Vanoni, V.A., "Transportation of Suspended Sediment by Water," *Trans. ASCE, Vol. III, Paper No. 2267, 1946.*

Vanoni, V.A., "Fifty Years of Sedimentation," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 110, No. 8,* Aug., 1984.

Van Rijn, L.C., "Sediment Transport, Part II : Suspended Load Transport," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 110, No. 11, Nov., 1984a.*

Van Rijn, L.C., "Sediment Transport, Part III : Bed Forms and Alluvial Roughness," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 110, No. 12, Dec.*, 1984b.

Wang, S., "Variation of Kármán Constant in Sediment-Laden Flow," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, HY4, Apr., 1981.*

White, W.R., Milli, M., and Crabbe, A.D., "Sediment Transport : An Appraisal of Available Methods," Vol. 2, *Report INT 119, Hydraulics Research Station, Wallingford, England, 1973.*

→385페이지 "國際會議"에서 계속

**for transport and dispersion, Cambridge, U.S.A., mid August 1990**

MIT, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.

IAHR Section on Experimental methods and physical modelling.

This will be the fourth symposium on scale effects in physical modelling. Goal: to bring together researchers who can, collectively, summarize the strengths and weeknesses of physical models pertaining to transport and dispersion in surface waters.

Prof. G.E. Hecker - President - Alden Research Laboratory Inc. - HOLDEN - Massachusetts 01520-U.S.A.