

ASM-IV를 이용한 부유사농도 연직분포의 측정

Measurements of Vertical Profiles in Suspended-Load Concentration Using the ASM-IV

이 종 석* / 맹 봉 재** / 차 영 기***
Lee, Jong-Seok / Myeng, Bong-Jae / Cha, Young-Kee

Abstract

This study aims to analysis of suspended-load concentration in related to those data by measuring vertical sediments distribution with rainfall using the ASM (Argus Surface Meter)-IV at the channel reach of a upstream and a downstream in small river. The watershed, small river basin where had taken for experimental study was selected, which is a drainage area lied at Walha in Yunkee-Gun, Chungnam Province. Measured data of suspended-load concentration consists of two groups with 2,145 data during 1hr 11min 30sec and 1,216 data during 40min 32sec for measuring time of 2 second in the study reaches at river, respectively. In order to analyze of the vertical concentration distribution, using the data sets are selected the measuring time 16 sets one of these data by random in the study reaches. As a results, the Rouse number of a measured and a calculated value show that a rang of 0.00129~0.02394, averaged value of 0.01129 and, a rang of 0.00118~0.00822, averaged value of 0.00436 in upstream reaches, and also a rang of 0.065115~0.065295, averaged value of 0.06521, and a rang of 0.057315~0.059109, averaged value of 0.05795 in downstream reaches, respectively. These difference show that measured Rouse number compared with downstream reach errors of less than in upstream reach, but between measured and calculated of the Rouse number compared with downstream reach errors of more than in upstream reach, respectively. It seems to will be included one of the occurrence errors of variable estimations when Rouse number of calculated value to be made computed by the fall velocity with a high temperature of water using equation of empirical kinematic viscosity was derived in this study.

key words : ASM(Argus Surface Meter)-IV, suspended-load concentration profiles, Rouse number equation of empirical kinematic viscosity, fall velocity

요 지

본 연구는 강우시 소하천 수로구간에서 유사농도의 연직분포를 유사량 측정기 (ASM-IV)로 실측하여 그 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 충남 연기군 서면에 위치한 월하천 시점부분의 수로구간을 연구대상으로 선정하였다. 실측된 부유사농도의 분석자료는 상하류구간에서 각각 1시간 11분 30초 및 40분 32초 동안에 2초 간격으로 측정된 2,145개 및 1,216개중 16개씩의 시간구간 자료가 사용되었다. 분석한 결과, 상류구간의 실측치 Rouse 수는 0.00129~0.02394로 분포하고, 평균값은 0.01129로 나타났으며, 하류구간에서는 0.00118~

* 정희원 · 한밭대학교 토목공학과 부교수 (e-mail : ljs96@hanbat.ac.kr)

** 단국대학교 토목환경공학과 박사과정

*** 단국대학교 토목환경공학과 교수

0.00822, 평균값은 0.00436으로 하류의 값이 상류의 값보다는 훨씬 작게 분포하는 것으로 나타났다. 계산치 Rouse 수는 상류구간의 경우 0.065115~0.065295, 평균값은 0.06521로 나타났고, 하류구간의 경우에는 0.057315~0.059109, 평균값은 0.05795로 하류구간이 상류구간보다 약간 작은 값을 갖으나, 실측치 비교에서의 차이보다는 적게 나타났다. 그러나 실측치와 계산치의 비교에서는 상류구간보다 하류구간에서 더 큰 차이를 갖는 것으로 나타났는데, 이 오차는 하류구간의 침강속도 산정시 높은 수온에 대한 동점성계수 값을 본 연구에서 유도한 경험식으로 계산한 것도 원인중의 하나에 포함될 것이다.

핵심용어 : 유사량 측정기(ASM-IV), 부유사 농도분포, Rouse 수, 동점성계수 경험식, 침강속도

1. 서 론

유역내 강수와 유수에 의해 생성되는 지표면과 하안침식, 흐름에 의한 유송 및 퇴적현상은 수공기술자들이 실제 문제에서 경험하게 되는 어려운 문제중의 하나이다. 이중 유역 및 하천수로에서의 침식현상은 강우의 빗방울에 의한 충격력과 유수에 의한 소류력 때문에 생기고, 유사공급원이 되기도 하며, 하천제방이나 수공구조물의 안전 및 농경지의 비옥한 토양의 유실 등 각종 피해를 준다. 유사는 생성요인에 따라 비와 바람에 의해 지표면의 표토가 침식되거나 산지 붕괴 등에 의해 새로이 만들어져 흐름과 중력 등에 의해 하류로 이동이 가능한 생산토사와 유역의 생산토사가 흐름에 의해 생산지를 떠나 하류의 어느 한 지점을 통과하는 유출토사 및 하천의 흐름에 의해 하도 내에서 소류·부유의 형태로 이송되는 유송토사 등으로 구분된다.

하천 수로구간에서 유사의 이송현상은 강수로 인한 유역 상류로부터의 유사생산에서 비롯되어 세굴과 이송 및 퇴적의 반복작용을 일으킴으로써 하상변화를 가져온다. 흐르는 물에 의한 유사입자의 이송구조에 있어 고행입자는 주로 유체의 난류성 때문에 부유상태로 이동된다. 부유된 유사의 분포는 난류유속 분포와 밀접한 관련이 있다. 하천에서 부유사량을 측정하기 위해 사용되는 이론적 기초는 주로 이송확산 방정식이 사용되는데, 이에 근거한 부유사량 산정 공식은 Einstein(1950)에 의해 제안되었다. 하상을 기준으로 하여 측정되는 수심의 크기에 따른 부유사농도와 난류 유속분포의 시간평균값을 적분하여 구하는 부유사량의 계산은 확산방정식을 기초로 Rouse(1937)가 상대농도를 상대수심의 관계로부터 계산할 수 있는 이른바 Rouse 방정식을 제안하였다. 이후 Aziz(1996)은 Einstein의 부유사량 산정방법에 대한 오차를 산정하는 연구를 하는 등 많은 연구가 계속되어 오고 있다. 또한 Yang(1996), Gue 등(1999), Wu 등(2000), Wright 등(2004), Wu 등(2004)의 여러 연구자들이 시험자료와 현장실측자료들을 사용한 해석 등을 통하

여 보다 정확한 부유사량을 예측하려는 모형개발에 대한 노력이 계속되어오고 있다. 그렇지만 이들 많은 노력에도 불구하고 각 지역에 따라 다양하고 광범위하게 분포하는 자연하천에서의 부유사량 산정은 아직까지 실제의 흐름현상을 정확하게 이론적으로 예측하기는 쉽지 않은 실정이다. 미육군 공병단 수로연구소에서 HEC-6(User's Manual, 1993)가 개발된 이래 오늘날까지 하천 및 저수지 등의 유사예측에 널리 사용되고 있다.

한편, 유권규 등(1990)은 하천 유사량 공식들을 비교 평가하였고, 이길성 등(1992)는 유사량 산정 공식을 비교 연구하였으며, 윤세의 등(1993)은 소유역에서의 유출 및 유사량 산정모형에 대해 연구하였다. 차영기 등(1995)은 하천의 만곡구간에 있어 유사이송과 흐름특성에 관한 실험적 연구를 하였으며, 이종석 등(1996)은 총유사량 산정을 위한 유사농도식의 도출에 대해 연구 한 바 있다. 박한기 등(2001)은 수정 Rouse 식을 이용한 유사량 산정방법 개발에 대해 연구하였고, 손광익(2001)은 해외 토사유출량 산정공식의 국내 적용성을 검토하였다. 송부호(2003)와 임영수(2003)는 총적하천의 수로구간 및 저수지 상류역 특성에 따른 유사분포 및 이송특성을 현장측정을 통해 연구하였으나, 국내의 부유사에 관한 연구는 최근 실측 장비구입 등의 어려움과 여러 가지 불리한 현장여건 때문에 현장실험 및 실측 연구가 활발하지는 못한 실정이다.

본 연구에서는 충청남도 연기군 서면에 위치한 용암저수지 상류부 월하천 유역을 연구대상 하천으로 선정하고, 최근 영국에서 개발된 ASM-IV(Argus Surface Meter)(Argus, 2004) 유사량 측정기를 이용해 수심 크기별 부유사 농도의 연직분포를 실측하였다. 측정된 부유사 농도의 자료는 2002년 8월 7일 오후~8월 8일 오후까지의 강우시 상류 수로구간에서 13:30:00~14:41:30초까지 1시간 11분 30초 동안에 2초 간격으로 측정된 2,145개 자료와 하류 수로구간에서 11:20:00~12:00:32초까지 40분 32초 동안에 2초 간격으로 측정된 1,216개 자료를 얻었다. 이

들 자료중 각각 16개 시간구간의 부유사 농도분포 자료를 선정하고, 하상으로부터 임의의 수심에 대한 부유사농도의 연직분포 특성을 Rouse 방정식에 기초해 실측치와 계산치를 비교 분석하며, 그 결과를 실무에 활용에 하고자 한다.

2. 이론적 배경

유사입자에 작용된 수리학적 힘이 운동의 한계조건을 초과함으로써 거친 유사입자는 하상과 접촉하면서 이동되며, 가는 입자들은 난류유속 변화가 하상과 접촉 없이 유체의 질량간의 입자를 유지하기 위해 충분히 클 때 부유하여 이동된다. 유사농도에 대한 가장 일반적인 단위는 물과 유사가 혼합된 용적에 대한 유사입자의 질량비로 정의되는 mg/l이다. 유사농도는 시간과 공간에 따라 변화하므로 채취시간에 대해 적분된 시간평균농도와 용적에 대해 적분된 공간평균농도 및 주어진 유수단면을 통과하는 이송질량유량인 총유량으로 곱할 때의 유량평균농도로 구분된다.

2.1 이송-확산 방정식

질량보존 방정식은 유사 연속성 관계식을 유도하기 위한 미소 3차원 통제용적을 적용할 수 있는데, 단위 용적당 질량변화율 $\partial C/\partial t$ 는 통제체적의 면을 횡단하는 질량 흐름률의 차와 같으므로 다음과 같이 쓸 수 있다(Julien, 1995).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial \widehat{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \widehat{q}_z}{\partial z} = \dot{C} \quad (1)$$

여기서 C 는 유한통제 체적내의 공간 평균유사농도이고, \widehat{q}_x , \widehat{q}_y , \widehat{q}_z 는 통제용적의 x , y , z 표면을 통과하는 질량 흐름률이며, \dot{C} 는 외부로부터 공급된 단위용적당 유사율이다.

통제체적의 표면을 통과하는 질량 흐름률은 이송 흐름률(advective fluxes), 확산 흐름률(diffusive fluxes), 혼합 흐름률(mixing fluxes)로서 이들의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\widehat{q}_x = v_x C - (D + \epsilon_x) \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2a)$$

$$\widehat{q}_y = v_y C - (D + \epsilon_y) \frac{\partial C}{\partial y} \quad (2b)$$

$$\widehat{q}_z = v_z C - (D + \epsilon_z) \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2c)$$

식 (2)의 이송 흐름률은 유속성분에 의해 전달된 유사의 이동을 나타내고, 이송에 의해 운반된 단위면적당 질량 이송률은 유사농도와 각각 유속성분 v_x , v_y , v_z 의 곱으로 얻는다.

부가적인 확산과 혼합 흐름률은 유사이송에서 고려되어야 하고, 분자확산(molecular diffusion)은 무작위 분자운동에 의한 유사입자의 분산과 관계되며, 난류확산(turbulent diffusion)은 난류 유체운동에 의한 유사입자의 분산을 일으킨다. 이들 두 흐름률에 대한 유사 이송률은 농도경사에 비례하고, 층류의 확산에 대한 비례상수 D 는 분자 확산계수로서 L^2/T 의 차원을 갖으며, 난류의 혼합에 대한 난류 혼합계수 ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z 는 난류확산의 크기를 결정한다. 난류의 질량이송 또한 농도경사에 비례하며, 분자확산계수 D 는 난류의 난류혼합계수 ϵ 보다 훨씬 작은 크기를 갖는다.

점유사원에 따른 계수 D , ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z 가 일정한 확산과 혼합 및 이송에 지배를 받는 유사의 부유가 적은 비압축성에 대한 질량보존법칙을 표시하는 일반식은 식 (1)에 식 (2)를 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial v_x C}{\partial x} + \frac{\partial v_y C}{\partial y} + \frac{\partial v_z C}{\partial z} \\ &= \dot{C} + (D + \epsilon_x) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (D + \epsilon_y) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + (D + \epsilon_z) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 독립변수 C 의 선형성 때문에 쉽게 풀 수 있으며, 이 식은 개수로내 오염물질이송(contaminant transport)과 유사의 장내 대부분에 적용할 수 있다.

낮은 유사농도에서 비압축성 유체에 대한 유체질량보존법칙에 의하면 이송-확산 관계식은 다음과 같이 바뀌어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} \\ &= \dot{C} + (D + \epsilon_x) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (D + \epsilon_y) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + (D + \epsilon_z) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (4)$$

층류의 경우 난류혼합계수는 무시되고, 반대로 난류의 경우 분자확산계수는 난류확산계수와 비교하여 무시할 수 있다.

2.2 유속 및 전단응력 분포

입자조도높이 k_s' 와 층류저층의 두께 δ 간에 $k_s' \gg \delta$ 인 거친 경계의 난류에서 유속분포는 다음 식과 같다 (Simons, 1992).

$$\frac{v_x}{u_*} = \frac{2.3}{\kappa} \log\left(\frac{z}{k_s'}\right) + 8.5 = 5.75 \log\left(\frac{30z}{k_s'}\right) \quad (5)$$

여기서 v_x 는 흐름방향의 유속이고, κ 는 Karman 상수이며, u_* 는 전단속도, k_s' 는 입자조도높이이다.

수로벽부근의 전단응력 τ_x 는 경계전단응력 τ_o 와 같으므로 난류영역에서의 전단속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{\tau_o}{\rho_m}\right)^{1/2} = u_* = \kappa z \left(\frac{dv_x}{dz}\right) \quad (6)$$

또한, 전단응력분포 τ_x 는 등류수심 h_n 에서 다음과 같다.

$$\tau_x = \rho_m g (h_n - z) \sin \theta \quad (7)$$

여기서 g 는 중력 가속도이고, ρ_m 은 물과 모래 혼합체의 밀도이다.

2.3 부유사 농도분포

유사입자의 초기운동은 단위시간당 질량이 쯤인 즉, 임의 내적 유사원(internal sediment source)이 없는 광폭 사각형수로 정상상태의 난류에서 입자와 주위 유체간 밀도 차이에 기인한 유사입자의 퇴적은 하향입자 침전 흐름물을 유발시킨다. 식 (3)과 (4)의 모든 항들은 연직방향의 유사 흐름물을 표시하는 항들을 제외하고는 무시할 수 있으므로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$v_z \frac{\partial C}{\partial z} = \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (8)$$

식 (8)은 z 에 관해 적분할 수 있으며, 순 연직유속이 쯤일도 유사입자의 하향 침강속도는 $v_z = -w$ 이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$wC + \varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

식 (9)에서 입자의 침강속도 w 와 ε_z 이 일정하게 주어질 때 만들어지는 농도분포는 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$C = C_o e^{-\frac{wz}{\varepsilon_z}} \quad (10)$$

식 (10)은 $wz < \varepsilon_z$ 이면 농도분포는 점진적으로 일정해지는 반면에, 유사 대부분은 $wz > \varepsilon_z$ 일 때 하상 부근에 집중된다.

매개변수가 변화하는 가장 일반적인 경우 유사 난류혼합계수 ε_z 는 해석적으로 운동량교환계수 (momentum exchange coefficient) ε_m 으로 다음과 같이 해석적으로 쓸 수 있다.

$$\varepsilon_z = \beta_s \varepsilon_m = \beta_s \frac{\tau}{\rho_m} \frac{dz}{dw_x} \quad (11)$$

여기서 β_s 는 운동량교환계수에 대한 유사 난류혼합계수의 비로서 이 계수는 실제 응용의 경우 충분히 1에 가깝다.

연직유사농도는 식 (11)에 난류유속분포 식 (6)과 전단응력분포 식 (7)을 대입한 후 관계식을 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_z = \beta_s \kappa u_* \frac{z}{h} (h - z) \quad (12)$$

식 (12)의 혼합계수 ε_z 는 z 에 따라 변화하고, 최댓값은 $\beta_s = 1$, $\kappa = 0.4$ 일 때 생기며, 이는 수심의 중간 위치인 $z = 0.5h$ 에서 $\varepsilon_z = 0.1 u_* h$ 와 같다. 식 (12)를 식 (9)에 대입하고 변수 C 와 z 를 분리한 후 풀면 다음 식을 얻을 수 있다. (Rouse, 1937; Vanoni, 1977; Woo 등, 1988; Julien, 1995; Aziz, 1996)

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a}\right)^{R_o} \quad (13)$$

여기서 C_a 는 부유사가 생기지 않는 하상저층 (bed layer)으로 입경의 2배인 기준높이 a 에서의 기준유사 농도이고, C 는 전수심 h 에 좌우되는 하상위 거리 z 에서의 유사농도이며, $R_o = w/(\beta_s \kappa u_*)$ 는 흐름의 수리학적 특성에 대한 유사특성의 비에 영향을 받는 Rouse 수이다.

식 (13)의 지수에서 $\beta_s \approx 1$ 과 $\kappa \approx 0.4$ 를 값을 갖

는다면 Rouse 수는 전단속도에 대한 침강속도의 비로 간략화할 수 있고, 이때의 Rouse 수는 그림 1과 같이 분포된다. 유사입자가 매우 작은 경우 그림 1의 유사농도분포는 Rouse 수가 영에 가까울수록 점진적으로 일정하게 되고, 반대로 유사입자 농도는 입경의 증가에 따라 하상부근에서 크게 증가하게 된다.

정상동류에 대한 부유사 농도 C 는 수심 h 와 하상위의 거리 z 에 따라 변화되는데, 이들 관계는 양대수 지상 C 와 $(h-z)/z$ 간 그래프에서 직선의 기울기로 정의되는 Rouse 수의 실측이다.

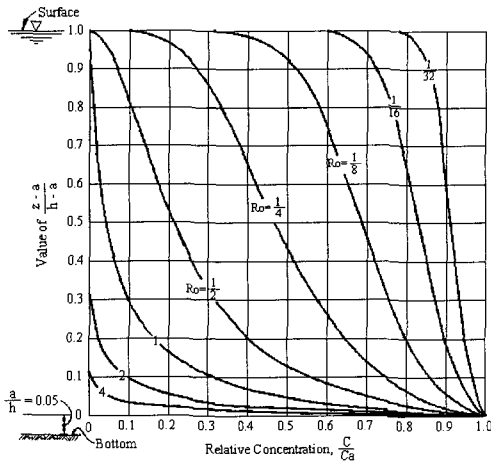


그림 1. $a/h=0.05$ 에 대한 평형유사농도 분포

2.4 부유사량

자연하천이나 인공수로의 단위 부유사량 q_s 는 $z > a$ 인 바닥층 위 유사의 수심적분 이송 흐름률 Cv_x 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$q_s = \int_a^h C v_x dz \quad (14)$$

총 부유사량 Q_s 는 수로 폭 B 에 대한 단위부유사량의 적분으로부터 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$Q_s = \int_B q_s dB \quad (15)$$

임의 시간 t 에 대한 유수단면을 부유해 통과하는 유사량으로 정의되는 부유사 L_s 는 다음과 같다.

$$L_s = \int_t Q_s dt \quad (16)$$

부유사로부터 소류사의 비교는 유사이송의 형태가

우세한 것을 나타내며, 단위부유사량 q_s 는 유속분포 식 (5)의 v_x 와 식 (13)으로부터 C 를 대입한 후 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q_s = \int_{z=2d_s}^h C_a \frac{u_*}{\kappa} \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^{\frac{w}{\beta_s \kappa u_*}} \ln \frac{30z}{k_s'} dz \quad (17)$$

같은 방법으로 단위총유사량은 $z=(k_s'/30)$ 에서 자유수면 $z=h$ 까지 적분함으로써 다음 식을 얻을 수 있다.

$$q_t = \int_{z=(k_s'/30)}^h C_a \frac{u_*}{\kappa} \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^{\frac{w}{\beta_s \kappa u_*}} \ln \frac{30z}{k_s'} dz \quad (18)$$

총 단위유사량에 대한 부유사량의 비는 유사이송의 대부분이 부유 또는 소류상태로 발생되는지를 나타낸다.

$\beta_s=1$ 과 $\kappa=0.4$ 및 $k_s'=d_s$ 로 대치한 후 식 (17)과 (18)로부터 q_s/q_t 는 C_a 와 u_* 와 무관하게 되고, 침강속도에 대한 전단속도 비(u_*/w) 및 상대 잠수비(h/d_s)의 함수로서 변화된다. 유사이송은 이송의 지배형태(dominant mode)에 따라 소류사와 혼합유사 및 부유사로 구분되는데, 거친 경계를 위의 난류에 대한 초기운동은 $u_*/w=0.2$ 에 상당하는 것으로 알려져 있다. Julien(1995)에 의하면, 소류사는 약 0.4보다 작은 u_*/w 값에서 지배적이고, 혼합영역으로 불리는 천이영역은 소류사와 부유사가 총유사에 기여하는 $0.4 < u_*/w < 2.5$ 에서 나타나며, 부유사는 $u_*/w > 2.5$ 일 때 지배적인 것으로 알려져 있다.

2.5 침강속도

부유사에서 침강속도는 유사이송의 문제해결에 중요한 변수중 하나로서 식 (13)의 Rouse 수 및 부유사량 산정에 큰 오류를 가져올 수 있다. 그럼에도 불구하고 실제의 자연하천에서의 값을 얻는 것이 거의 불가능하여 대개의 경우에는 경험적 공식이나 실험 및 현장자료로부터 제안된 공식이 사용된다. Jiménez(2003)는 자연하천 유사의 침강속도 산정을 단순한 공식을 Graf(1971), Dietrich(1982), Julien(1995), Cheng(1997), Ahrens(2000) 등의 연구결과와 비교하여 다음과 같이 제안하였다.

$$w_* = \frac{w}{\sqrt{(S-1)gd_n}} = \left(A + \frac{B}{S_*} \right)^{-1} \quad (19)$$

$$S_* = \frac{d_n}{4v} \sqrt{(S-1)gd_n} \quad (20)$$

여기서 u_* 는 무차원 침강속도이고, d_n 는 입자의 공칭직경이며, S 는 비중, g 는 중력가속도이다. 또한 A 와 B 는 식 (19) 의 회귀상수로서 입자형상에 영향을 받는 항력계수와 Reynolds 수가 포함되는 Corey의 형상계수 및 입자조도를 포함시켜 유도되었으며, 상세한 내용은 Jiménez(2003)의 연구결과를 참고할 수 있다.

3. 현장측정

3.1 유역 개요

본 연구에서는 그림 2(a)와 같이 충남 연기군 서면에 위치한 용암저수지 상류부 월하천 유역을 연구대상 하천으로 선정하였으며, 월하천은 금강 제2의 지류로서 조치원읍 서남방에 위치한 미호천교 하류 약 4.5 km 지점에서 금강 제1지류인 미호천 우안으로 유입되는 2급 지방하천이다. 유역면적이 36.97 km²이고, 유로길이가 14.05 km인 월하천 유역은 북쪽에 위치한 오봉산과 솔치고개에서 이어지는 분수령을 경계로

하여 해발 40~350 m의 구릉지가 전유역을 병풍처럼 둘러싸고 있는 산지유역으로 구성되어 있다.

본 연구대상하천의 유역면적은 연기군 서면 23개 행정 리중 고북 1리 외 4개리를 포함한 11.30 km²이고, 유로길이는 4.10 km이며, 하상재료는 표 1 및 그림 2(b)와 같이 점토, 실트(silt) 및 모래, 자갈로 구성되어 있다. 또한 수로경사는 월하천 상류시점에서 약 2.24 km 하류 쌍류천 합류지점까지 약 1/60 정도이며, 이후부터 4.10 km 하류지점까지 약 1/90 정도로 비교적 급한 경사를 갖는다(충청남도, 1998).

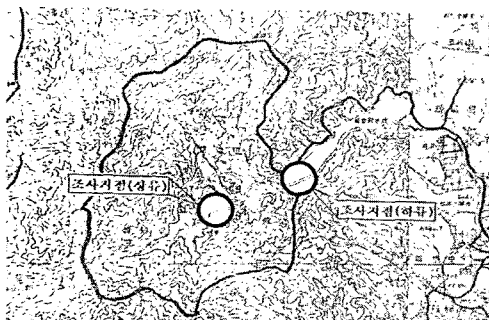
3.2 측정방법 및 장비

본 연구에서는 2002년 8월 7일 오후~8월 8일 오후까지 117.9 mm의 24시간 강우로 인해 표 1과 같은 수리특성 값을 가질 때, 2002년 8월 8일 11:20:00~12:00:32 및 13:30:00~14:41:30까지 각각 40분 32초 및 1시간 11분 30초 동안 2초 간격으로 현장 실측하여 1,216개 및 2,145개의 유사농도 분포자료를 얻었다.

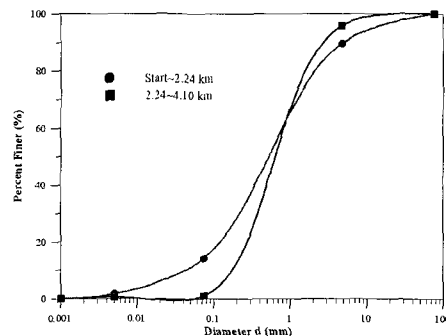
부유사 농도의 연직분포를 측정하기 위해 대상하천 상하류구간에서 수심과 유속측정은 수로구간을 대표하고 측정장비의 운용을 고려하여 교량부근의 위치에

표 1. 대상하천의 하상구성재료 및 수리특성

하천명	위 치		입도 분포(%)					
			점토(clay) (<0.004 mm)	실트(silt) (0.004~0.062 mm)	모래(sand) (0.062~2mm)	자갈(gravel) (2~64 mm)		
월하천	상류(시점~2.24 km 지점)		1.70	12.57	75.39	10.34		
	하류(2.24 km~4.10 km 지점)		0.57	0.56	94.58	4.29		
측정 시각			평균값					
			수온(℃)	하폭(m)	수심(m)	유수단면적(m ²)	유속(m/s)	유량(m ³ /s)
2002.8. 8	상류	13:30:00-14:41:30	21.3	13.20	1.44	19.008	1.03	19.578
	하류	11:20:00-12:00:30	34.6	25.57	1.16	29.661	0.85	25.211



(a) 유역위치 및 수로구간



(b) 입경 가적곡선

그림 2. 연구 대상하천의 위치 및 하상재료 분포

서 이루어졌다. 수심측정은 수심의 크기에 따라 폴과 스타프를 이용하고, 유속측정에는 프로펠러 1차원 유속계와 마그네틱 2차원 유속계 및 전자파 표면 유속계를 이용하였으며, 수심이 60 cm 이상일 때는 2점법, 60 cm 미만일 때는 1점법을 적용하였다. 상하류 수로구간의 일정시간 간격 및 수심크기에 따른 유사농도분포 측정은 그림 3과 같은 유사량 측정기(ASM-IV)(Argus, 2004)가 사용되었고, 측정된 자료는 해석 프로그램인 ASMA를 이용해 유사농도의 분포특성 해석할 수 있다. 이 유사량 측정기는 그림 3과 같이 60 mm 지름의 헤드부(head unit)와 30 mm 지름의 센서부(sensor rod)로 구성되었고, 유사의 농도는 5~50,000 mg/l의 모래($d_{50}=250\mu\text{m}$)와 5~5,000 mg/l의 점토($d_{50}=20\mu\text{m}$)를 $\pm 10\%$, 수압은 0~5,000 hPa_{abs}을 $\pm 0.3\%$, 수온은 $-10\sim 45^\circ\text{C}$ 를 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 오차 범위내에서 측정할 수 있다(Argus,

2004). 센서부는 폭 15 mm인 전자판에 10 mm 간격으로 센서가 부착되어 있고, 이는 그림 3(b)와 같이 각 센서가 적외선 레이저 송신기(infrared laser transmitter)와 검출기(detector)로 구성되어 있다. ASM-IV를 교량에서 견인줄을 이용하여 센서부 전면이 유수의 흐름 방향과 수직이 되도록 하천바닥에 고정시킨 후 측정하고, 유사농도 분포 외에도 수압 및 수온 등을 측정할 수 있다.

4. 결과 및 분석

4.1 실측 결과

ASM-IV를 이용하여 측정된 분석자료는 표 2와 같이 수심의 크기에 따른 부유사 농도의 연직분포 특성을 해석하기 위해 상하류 수로구간에서 각각 2초 간

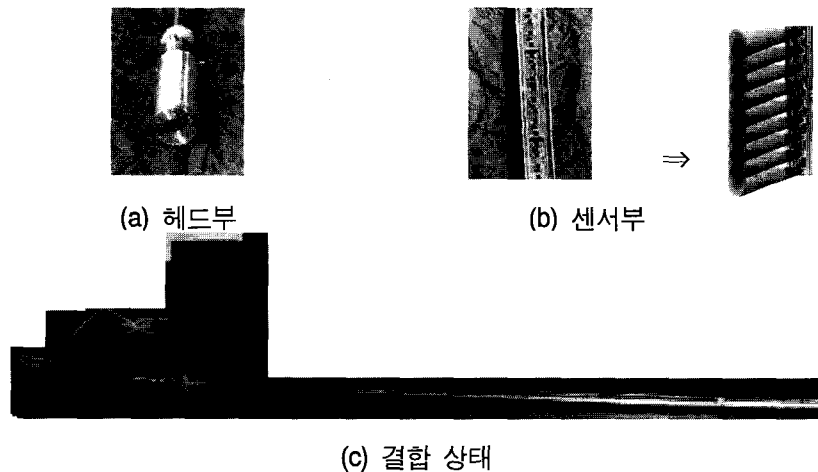


그림 3. 유사량 측정기(ASM-IV)

표 2. 상하류 수로구간의 시간구간별 분석자료

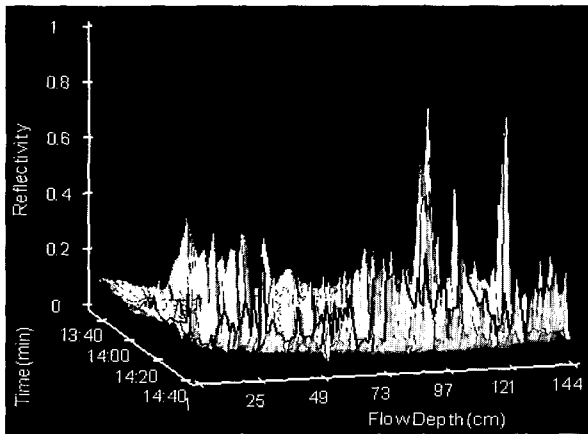
측정번호	수로구간	상류(13:30:00~14:41:30)	하류(11:20:00~12:00:32)
No. 1		13:30:00~13:30:02	11:20:00~11:20:02
No. 2		13:36:22~13:36:24	11:22:36~11:22:38
No. 3		13:42:22~13:42:24	11:25:16~11:25:18
No. 4		13:48:20~13:48:22	11:28:04~11:28:06
No. 5		13:54:42~13:54:44	11:30:48~11:30:50
No. 6		14:00:14~14:00:16	11:34:14~11:34:16
No. 7		14:06:46~14:06:48	11:36:58~11:37:00
No. 8		14:09:34~14:09:36	11:38:22~11:38:24
No. 9		14:23:06~14:23:08	11:41:08~11:41:10
No. 10		14:25:34~14:25:36	11:43:54~11:43:56
No. 11		14:30:26~14:30:28	11:46:42~11:46:44
No. 12		14:31:36~14:31:38	11:49:30~11:49:32
No. 13		14:34:20~14:34:22	11:52:14~11:52:16
No. 14		14:37:10~14:37:12	11:56:04~11:56:06
No. 15		14:39:32~14:39:34	11:57:46~11:57:48
No. 16		14:41:28~14:41:30	12:00:30~12:00:32

격으로 측정된 2,145개 및 1,216개중 16개 시간구간을 무작위성으로 선정하였다. 또한, 부유사 농도의 시공간적 변화특성을 분석하기 위해 상하류 수로구간 및 시간구간으로 구분하였으며, 이들 16개 시간구간별 자료의 해석 결과는 각각 그림 4~9와 같다.

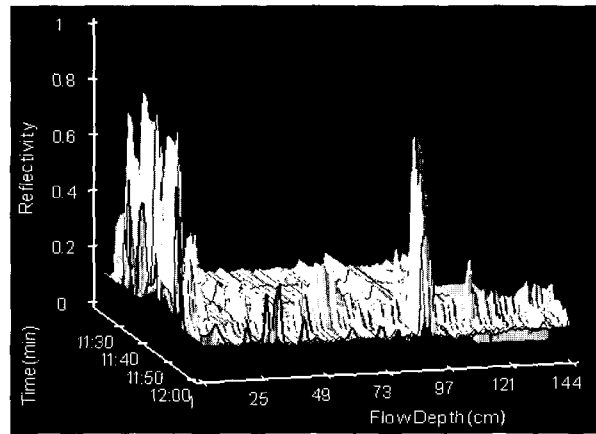
그림 4는 상하류 수로구간의 전시간(13:30:00-14:41:30) 및 (11:20:00-12:00:32)에 대한 수심별 유사농도분포를 반사성(reflectivity)으로 표시하였다. 여기서 반사성은 유사농도가 측정 전시간 동안에 각각 수심 및 측정 시간구간에서의 크기변화를 개략적으로 표시한다. 이는 그림 5와 같이 평면으로 전시간에 대한 수심별 변화성(variability)으로 표시하여 분석할 수 있으며, 수심크기에 따른 지점별 유사농도의 연직분포는 이들 자료를 ASCII로 변환시켜

각각 상하류 수로구간에서 2초 간격으로 측정된 시간구간별이다.

그림 6은 상류 수로구간의 측정 시점과 종점, 시·중·점에서인 측정시간 No.1, No.16 및 No.1, No.9, No.16에서의 Rouse 수를 비교한 것이며, 그림 7은 연속되는 4개 측정시간 No.1~No.4, No.5~No.8, No.9~No.12, No.12~No.16에 대한 4개의 시간구간에 대한 Rouse 수를 각각 비교한 것이다. 또한 그림 8은 하류 수로구간의 측정 시점과 종점, 시·중·점에서인 측정시간 No.1, No.16 및 No.1, No.9, No.16에서의 Rouse 수를 비교한 것이며, 그림 9는 연속되는 4개 측정시간 No.1~No.4, No.5~No.8, No.9~No.12, No.12~No.16에 대한 4개의 시간구간에 대한 Rouse 수를 각각 비교한 것이다.

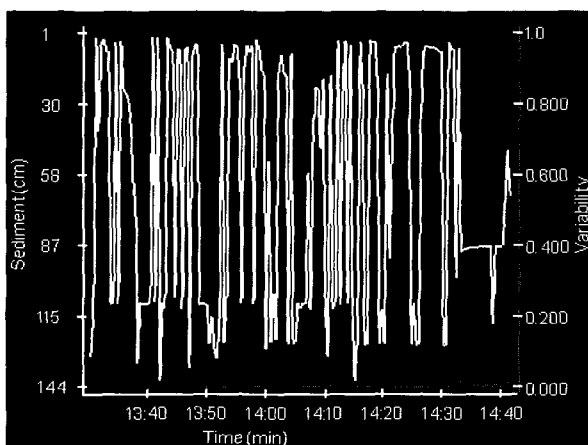


(a) 상류 전시간(13:30:00-14:41:30)

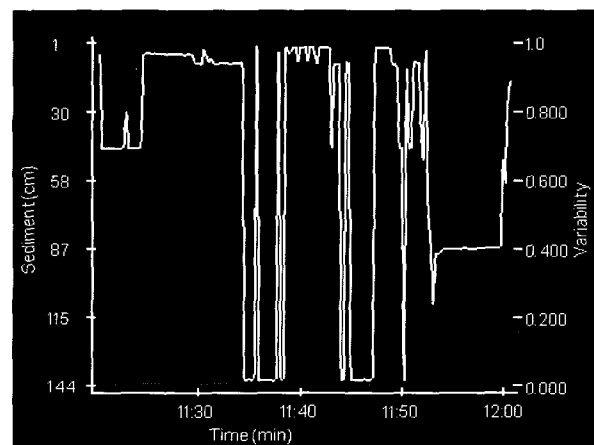


(b) 하류 전시간(11:20:00-12:00:32)

그림 4. 수로구간별 유사분포와 반사성 비교

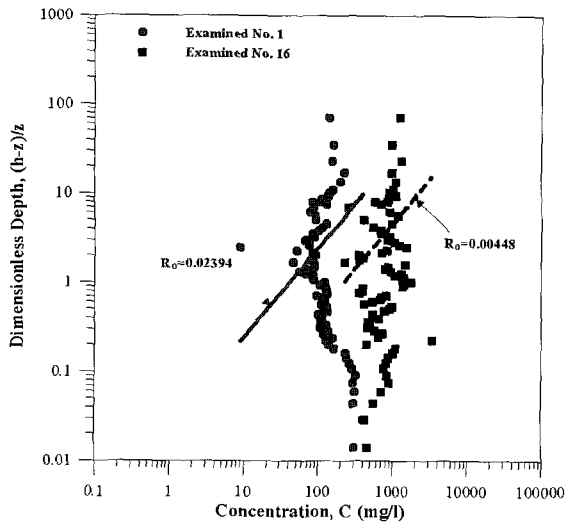


(a) 상류 전시간(13:30:00-14:41:30)

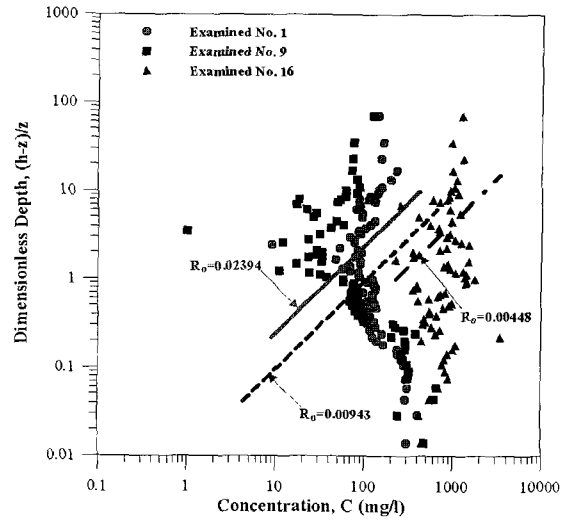


(b) 하류 전시간(11:20:00-12:00:32)

그림 5. 수로구간별 수심과 시간에 따른 유사의 변화성 비교

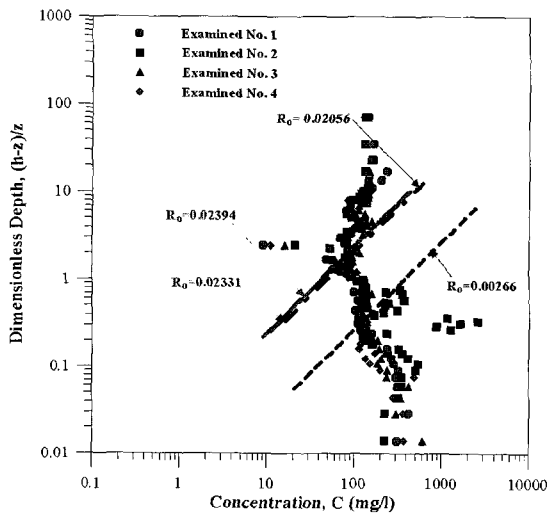


(a) 측정 시점시간과 종점시간

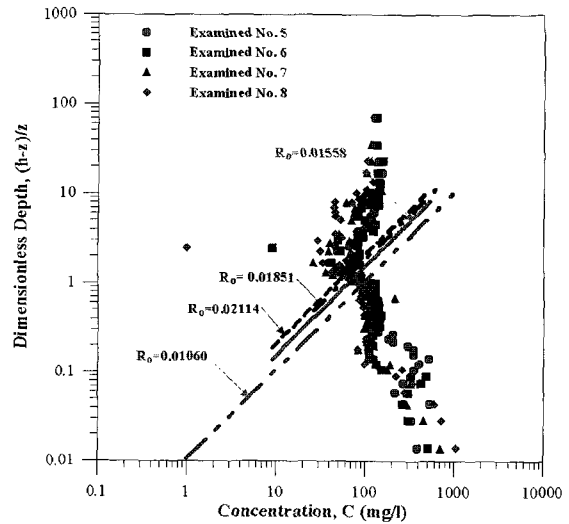


(b) 측정 시·중·종점시간

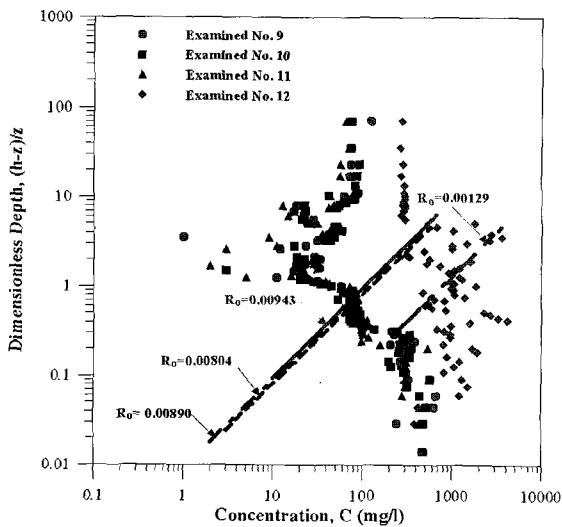
그림 6. 상류구간의 시·중 및 시·중·중 측정시간에서 Rouse 수 관계



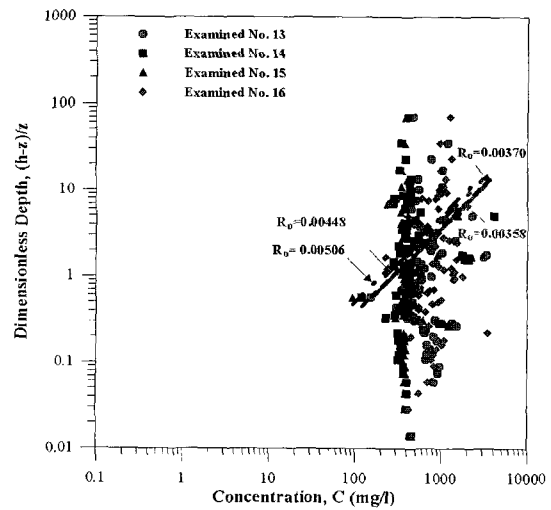
(a) 측정시간 No.1~No.4



(b) 측정시간 No.5~No.8

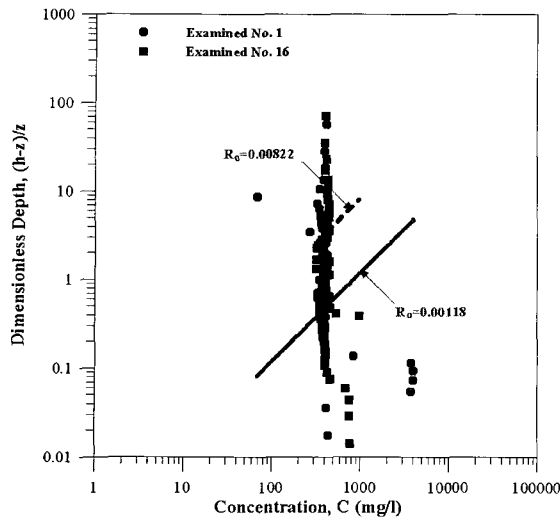


(c) 측정시간 No.9~No.12

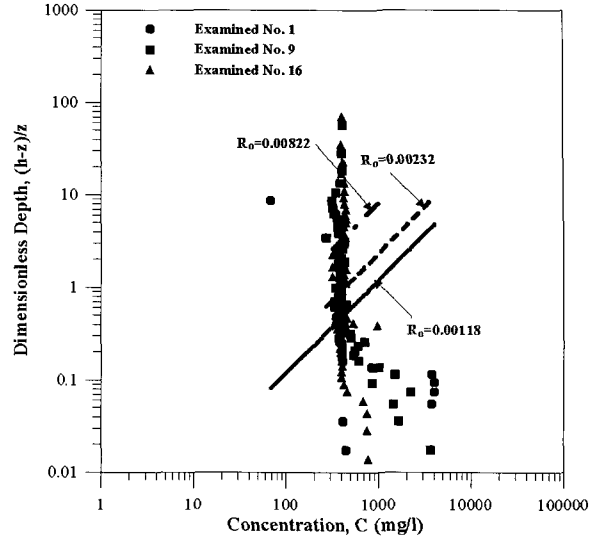


(d) 측정시간 No.13~No.16

그림 7. 상류구간에서 연속 4측정 시간별 Rouse 수의 비교

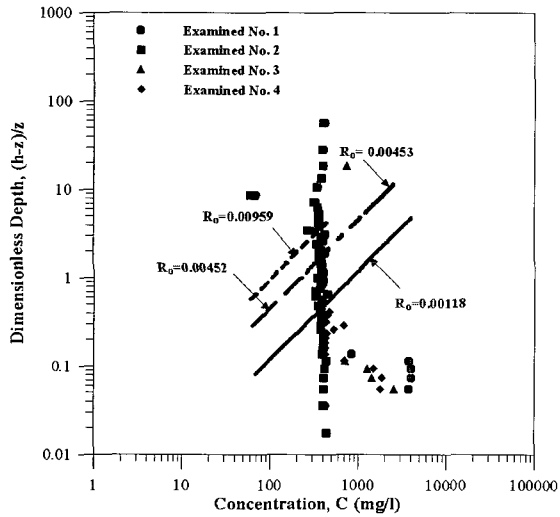


(a) 측정 시점시간과 종점시간

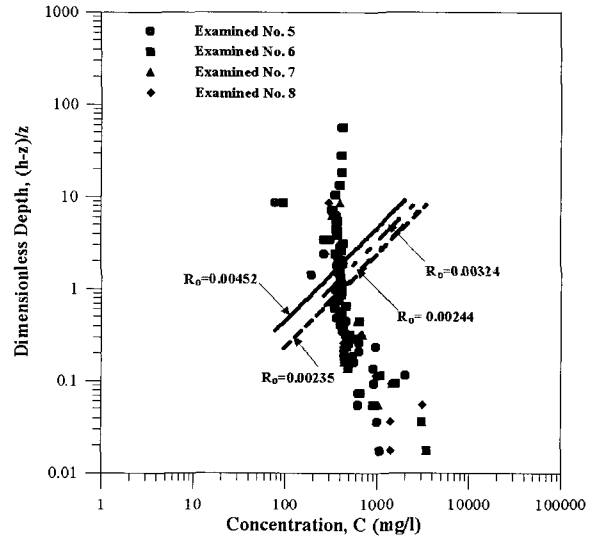


(b) 측정 시·중·종점시간

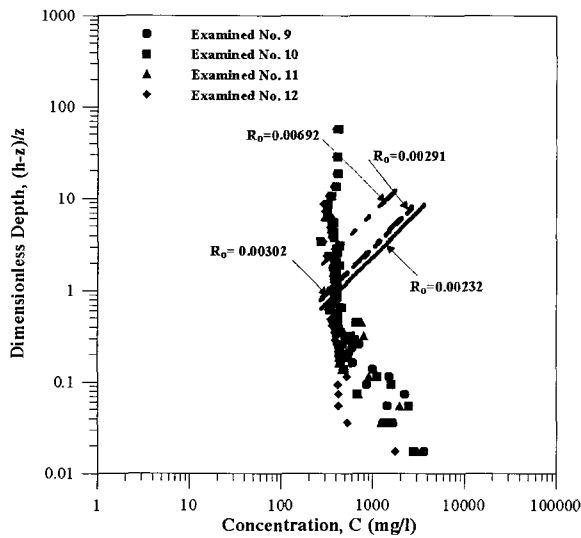
그림 8. 하류구간의 시·중 및 시·중·종 측정시간에서 Rouse 수 관계



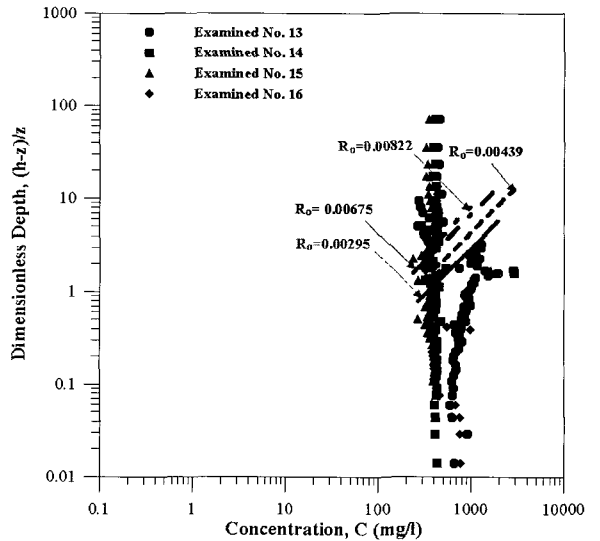
(a) 측정시간 No.1~No.4



(b) 측정시간 No.5~No.8



(c) 측정시간 No.9~No.12



(d) 측정시간 No.13~No.16

그림 9. 하류구간에서 연속 4측정 시간별 Rouse 수의 비교

표 3. 상하류 수로구간의 시간구간별 분석자료

측정번호	상류(13:30:00~14:41:30)		하류(11:20:00~12:00:32)	
	실측치 Rouse 수	계산치 Rouse 수	실측치 Rouse 수	계산치 Rouse 수
No. 1	0.02394	0.06525	0.00118	0.057539
No. 2	0.00266	0.06519	0.00959	0.057389
No. 3	0.02056	0.06516	0.00453	0.057315
No. 4	0.02331	0.065115	0.00452	0.057389
No. 5	0.01558	0.065115	0.00452	0.057464
No. 6	0.02114	0.06516	0.00235	0.057763
No. 7	0.01851	0.06519	0.00244	0.057838
No. 8	0.01060	0.06519	0.00324	0.057913
No. 9	0.00943	0.06522	0.00232	0.057988
No. 10	0.00804	0.06522	0.00291	0.057988
No. 11	0.00890	0.06522	0.00302	0.058137
No. 12	0.00129	0.06522	0.00692	0.058137
No. 13	0.00358	0.06525	0.00295	0.058137
No. 14	0.00370	0.065295	0.00439	0.058436
No. 15	0.00506	0.065295	0.00675	0.058735
No. 16	0.00448	0.065295	0.00822	0.059109

4.2 분석 및 고찰

표 2와 같이 상하류 수로구간에서 2초 간격으로 측정된 분석자료중 16개의 자료가 수심크기별 부유사농도분포의 특성분석에 사용되었다. 또한 그림 4~9와 같이 16개 상하류 수로구간의 시간구간별 자료로부터 실측치 Rouse 수를 얻을 수 있었으며, 이들 값은 식 (13)의 지수인 Rouse 수를 간략화식에 의해 계산한 표 3의 계산치 Rouse와 비교되었다.

작은 값의 Rouse 수 R_o 에서는 수심이 크기에 따라 거의 균일한 농도분포 경향을 보이고, 큰 값의 R_o 에서의 유사농도분포는 수면부근에서 적고, 바닥부근에서는 상대적으로 크다. 주어진 시간에서 흐름내 R_o 는 침강속도에 비례하고 전단속도에는 반비례하므로 작은 입경에서는 작은 값의 R_o 를 갖고, 상대적으로 수심하천의 수심에 대해 균등하게 분포되며, 큰 값의 R_o 를 갖는 거친 입자는 바닥부근에 집중된다. 식 (13)은 실험 및 현장자료를 적용하여 구했음에도 불구하고 R_o 는 실측치 R_{om} 와 계산치 R_{oc} 값이 다르게 나타난다. 이는 R_o 값이 유체질량 확산계수와 고체입자 확산계수의 비인 β_s 를 약 1.0으로 계산하였기에 즉, 두 확산계수를 같은 값으로 취급하였기 때문에 그림 6~9의 직선 기울기로 정의되는 R_{om} 과 R_{oc} 가 다른 값을 갖는 것이다.

R_{om} 값은 식 (20)에서와 같이 수온의 크기에 따라

동점성계수 값이 다르며, 수로경사의 영향을 크게 받는 전단속도의 크기 및 Karman 상수 κ 의 값에 따라 다르게 분포된다. 특히 κ 는 유사가 없는 개수로에서 대수분포형 유속분포의 경우는 0.4이나 유사가 존재하는 하천흐름에서는 부유사의 증가에 따라 0.4보다 작은 값으로 감소하는 경향을 갖는데, 이를 0.4로 보고 계산하므로 R_{om} 과 R_{oc} 값에는 오차가 생기게 된다. 또한 수온의 변화에 따른 동점성계수 값은 수온 30℃까지는 기존의 표(이중석, 2004)에 제시된 값을 이용할 수 있으나 그 이상의 수온에 대해서는 주어진 값이 없어 0~30℃까지 0.1℃ 범위의 기존 자료 289개를 회귀분석 하여 얻은 식 $\nu = 0.017202 e^{-0.02087 t}$ (결정계수 $R^2 = 0.9945$)를 이용하였다.

그 결과는 그림 10에서와 같이 상류에서의 R_{om} 은 최소 0.00129로부터 최대 0.02394까지 광범위하게 분포하는 것으로 나타났으며, 평균값은 0.01129로 나타났다. 하류의 경우는 최소 0.00118에서부터 최대 0.00822, 평균값은 0.00436으로 상류의 경우 보다는 훨씬 낮게 분포하는 것으로 나타났다. R_{oc} 는 상류의 경우 0.065115~0.065295로 평균값은 0.06521로 나타났고, 하류의 경우에는 0.057315~0.059109로 평균값은 0.05795로 계산치에서는 실측치 보다는 차이가 작은 것으로 나타났지만, 상하류의 비교에서는 차이가 큰 것으로 나타났다.

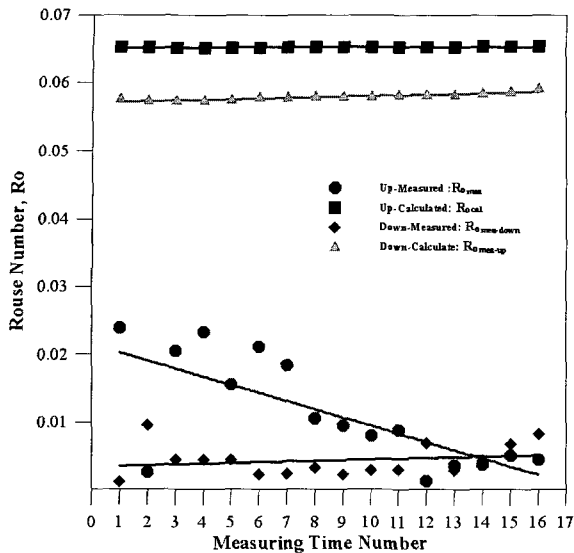


그림 10. 측정시간별 Rouse 수의 측정치와 계산치 비교

5. 결론

본 연구에서는 소하천에서 부유사 농도의 연직분포 특성을 분석하기 위해 충남 연기군 서면에 위치한 월하천의 약 4.1 km 수로구간을 대상으로 강우시에 유사량 측정기(ASM-IV)를 이용, 연구 수로구간을 상류부와 하류부로 나누어 각 구간에서 2초 간격으로 측정하여 얻은 2,145개 및 1,216개의 부유사농도 분포자료를 16개의 시간구간으로 구분하고 Rouse 방정식에 기초하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상류구간에서의 실측치 Rouse 수는 최소 0.00129로부터 최대 0.02394까지 광범위하게 분포하는 것으로 나타났으며, 평균값은 0.01129로 나타났다. 하류구간의 경우는 최소 0.00118에서부터 최대 0.00822로 나타났으며, 평균값은 0.00436으로 나타났다. 이들 실측값은 하류에서의 값이 상류에서의 값보다는 훨씬 낮게 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 평형유사농도 분포와 비교할 때 작은 값의 Rouse 수에서 수심의 크기에 따라 거의 균일한 농도분포 갖는 경향과 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.
2. 실측치 Rouse 수를 양대수지상의 부유사 농도 분포에 대한 상대수심 분포간 직선 기술기로 결정된 값과 유체질량 확산계수와 고체입자 확산계수의 비를 동일한 값으로 하고 Karman 상수

를 0.4로 계산하여 얻은 계산치 Rouse 간의 비교에서는 계산치가 상류구간의 경우 0.065115~0.065295, 평균값은 0.06521로 나타났고, 하류구간에서는 0.057315~0.059109, 평균값은 0.05795로 상하류구간 실측치 비교에서의 차이보다는 적게 나타났다. 그러나 실측치와 계산치의 상하류구간 비교에서는 상류구간에서보다 하류구간에서 보다 더 큰 차이를 갖는 것으로 나타났는데, 이러한 차이는 하류구간에서 침강속도 계산시 수온이 34.4~36.5℃까지 분포하여 이 범위의 동점성계수는 30℃까지의 값을 이용해 본 연구에서 도출한 경험식으로 계산한 것에도 기인하는 것으로 생각된다.

3. 본 연구는 유역이 비교적 제한적인 소하천에서의 부유사 농도분포를 실측하여 분석한 것으로서 Rouse 수의 실측치와 계산치의 보다 더 정확한 비교가 이루어지기 위해서는 실시간적으로 자료측정이 가능하고 농도분포와 수온 등을 자동적으로 측정할 수 있는 유사량 측정기를 적극 활용함은 물론, 대상유역을 확대하여 더 많은 연구자료를 확보하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았으며, 이에 감사를 드립니다. 아울러 심사위원들께도 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 박한기, 민병형 (2001). 수정 Rouse 식을 이용한 유사량 산정방법 개발. 대한토목학회 논문집, 제21권, 제4-B호, pp. 427-434.
- 손광익 (2001). 해외 토사유출량 산정공식의 국내 적용성 검토(I, II). 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제3호, pp. 199-216.
- 송부호 (2003). 충적하천의 수로구간에 따른 유사분포 및 이송특성 분석, 석사학위논문, 한밭대학교.
- 윤세의, 이종태, 정재욱 (1993). 소유역에서의 유출 및 유사량 산정모형. 대한토목학회 1993년도 학술 발표회 개요집(II), pp. 169-172.
- 유권규, 우효섭 (1990). 하천 유사량 공식들의 비교 평가. 대한토목학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 67-75.

- 이길성, 이남주 (1992). 유사량 산정 공식의 비교 연구. 대한토목학회 1992년도 학술발표회 개요집(II), pp. 121-124.
- 이종석 (2004). 수리학 실험. 도서출판 새론.
- 이종석, 차영기, 김진규 (1996) 총유사량 산정을 위한 유사농도식의 도출. 한국수자원학회지, 제29권, 제1호, pp. 181-190.
- 임영수 (2003). 저수지의 상류역 특성에 따른 유사이송 기구의 분석, 석사학위논문, 한밭대학교.
- 차영기, 이종석, 이대철 (1995). 하천의 만곡구간에 있어 유사이송과 흐름특성에 관한 실험적 연구. 대한토목학회 논문집, 제15권, 제5호, pp. 1333-1341.
- 충청남도 (1998). 월하천 하천정비기본계획 · 부록.
- Ahrens, J.P. (2000) The Fall-Velocity Equation. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 126, No. 2, pp. 99-102.
- Argus Ltd. (2004). *ASM-IV (Argus Surface Meter)*. Manual, Version 4.1, United Kingdom (Taekwang Electronics Corporation).
- Aziz, N.M. (1996). Error Estimate in Einstein's Suspended Sediment Load Method. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 122, No. 15, pp. 282-285.
- Cheng, N.S. (1997). Simplified Settling Velocity Formulas for Sediment Particle. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 123, No. 2, pp. 149-1152.
- Dietrich, W.E. (1982). Settling Velocity of Natural Particles. *Water Resources Reaches*, Vol. 18, No. 6, pp. 1615-1626.
- Einstein, H.A. (1950). The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows. *USDA Tech. Bull.* No. 1026, U.S. Dept. of Agric., Washington, D.C.
- Graf, W.H. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw-Hill, New York.
- Guo, Q.C., and Jin, Y.C. (1999). Modeling Sediment Transport Using Depth-Averaged and Moment Equations. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 125, No. 12, pp. 1262-1269.
- Jiménez, J.A., and Madson, O.S. (2003). A Simple Formula to estimate Settling Velocity of Natural Sediments. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 129, No. 2, pp. 70-78.
- Julien, P.Y. (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press.
- Rouse, H. (1937). Modern Conceptions of the Mechanics of Fluid Turbulence. *Trans. ASCE*, Vol. 102, pp. 463-505.
- Simons, D.B., and Fuat, S. (1992). *Sediment Transport Technology*. Water and Sediment Dynamic, Water Resources Publications.
- User's Manual (1993). *HEC-6 Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif.
- Vanoni, V.A. (1977). *Sedimentation Engineering, The Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division, ASCE*.
- Woo, H.S. Julien, P.Y., and Richardson, E.V. (1988). Suspension of Large Concentrations of Sands. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 888-898.
- Wright, S., and Parker, G. (2004). Flow resistance and Suspended Load in Sand-Bed Rivers : Simplified Stractification Model. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 130, No. 8, pp. 796-805.
- Wu, B.S., Molinas, A., and Pierre, Y.J. (2004). Bed-Material Load Computations for Nonuniform Sediments. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 130, No. 10, pp. 1002-1012.
- Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2000). Nonuniform Sediment Transport in Alluvial Rivers. *J. Hydr. Res.*, Vol. 38, No. 6, pp. 427-434.
- Yang, C.T. (1996). *Sediment Transport. Theory and Practice*, The McGraw-Hill Companies, Inc.

© 논문접수일 : 2005년 12월 19일
 © 심사의뢰일 : 2005년 12월 20일
 © 심사완료일 : 2006년 03월 17일