

농경유역 중소하천에서 유량과 총유사량의 관계식 유도방법

Derivation Method of Rating Curve and Relationships for Flow Discharge-Total Sediment at Small-Medium Streams in Agrarian Basin

이종석*, 김치곤**, 유의근**
한밭대학교 건설환경공학과*, 한밭대학교 대학원 토목공학과

Jong-Seok Lee(ljs96@hanbat.ac.kr)*, Chi-Gon Kim(kcg1026@paran.com)**,
Eui-Geen You(egyou@pec.kr)**

요약

본 연구는 농경유역 중소하천의 주요 지점에서 실측된 현장자료를 사용하여 유량과 총유사량 관계곡선과 이들 간의 관계식을 유도한다. 실측치 총유사량 자료는 수심평균농도와 하상에서 각각의 부유사와 소류사 채취기(DH-48, D-74 및 BLH-84, BL-84)에 의해 채집된 시료를 건조 또는 여과법, 체분석에 의한 입도분포곡선을 통해 얻은 부유사량에 소류사량을 합하여 얻었다. 이들 현장자료는 농경유역 논산수계 내 4개 대상하천의 국가-지방하천 수로구간 7개 측정에서 2012년 8월부터 2014년 9월까지 측정되었다. 그 결과, 유량과 총유사량에 대한 관계곡선과 관계식은 현장측정 자료군의 분포특성을 분석함으로써 멱함수 형태로 유도하였으며, 이들 관계식은 수공 유사공학의 이론적 연구뿐만 아니라 실무적 응용에 있어 세굴, 퇴적 및 이송을 해석하는데 유용한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

■ 중심어 : | 수공 유사공학 | 이송 | 총유사량 | 입경분포곡선 | 농경유역 |

Abstract

This study aims to derive of the relationship and rating curve for the flow discharge-total sediment using the measured field data from the main points of small-medium stream reaches in agrarian basin. The total sediment of measured data are obtained by bed load added to suspended load which analyzed using the particle size distribution curve of sieve test and the dry or the filtration method from the collected samples by samplers (DH-48, D-74 and BLH-84, BL-84) at the stream bed and the depth-averaged concentration, respectively. These field data had been collected from August 2012 to September 2014 at the seven measuring stations of the national-local channel reaches of the four study streams in the Nonsan river systems of agrarian basin. As a result, the relationships and the rating curve for the flow discharge-total sediment are derived as a function pattern of power law by analyzing on a distribution characteristic of the database set and it will be used as a useful tool to analyze erosion, deposition, and transportation in theoretical research as well as in practical application of the hydraulic sedimentation engineering.

■ keyword : | Hydraulic Sedimentation Engineering | Transportation | Total Load | Particle Size Distribution Curve | Agrarian Basin |

* 본 논문은 한국콘텐츠학회 2015 춘계 종합학술대회 우수논문입니다.

접수일자 : 2015년 07월 10일

수정일자 : 2015년 08월 07일

심사완료일 : 2015년 08월 07일

교신저자 : 이종석, e-mail : ljs96@hanbat.ac.kr

1. 서론

한 유역의 토사는 비바람에 의해 표토가 침식되거나 산지 붕괴 등에 의해 새로이 나오는 생산 토사, 이 생산 토사가 수류에 의해 생산지를 떠나 하류의 어느 한 지점을 통과하는 유출 토사 및 하천 흐름에 의해 하도 내에서 소류, 부유의 형태로 이송되는 유송 토사로 구분된다[2]. 또한 토사의 이동형태는 크게 세 가지로 나누는데, 소류사 또는 하상유사는 수로바닥 위를 미끄러지거나 굴러서 이동하는 경우로 대체로 굵은 입자의 토사이고, 도약유사는 수로바닥으로부터 일단 이탈한 토사 입자가 다시 바닥에 가라앉는 현상이 반복되는 상태로 토사가 이동하는 것을 말하며, 부유사는 유수의 난류기류로 인해 수로바닥을 완전히 이탈하여 수중에 부유하면서 토사가 이동하는 것을 말한다. 그러나 실질적으로는 소류사와 부유사로 나누는 것이 보편적이다.

유사이송에 관한 연구는 과거로부터 현재까지 국내 외적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 이들 연구내용을 함축적으로 정리한 것 중의 하나로 미국토목학회(ASCE)는 이들 많은 연구결과를 유사공학이란 이름의 책으로 정리하여 1975년 책자로 발간한 바 있다[31]. Stevens(1985)[30]는 수정 Einstein 방법을 이용하여 총유사량을 계산하는 프로그램을 개발하였고, Ferguson(1986)[14]은 유량-유사량 관계곡선에 의한 과도예측되는 하천의 유사량에 대해 연구하였으며, Dallas와 Glysson(1987)[11]은 유사-이송곡선은 서로 다른 변수로 유사농도나 유사량의 관계곡선을 만들기 위해 유량에 대한 유사량의 도식적 해석방법 등에 관해 연구하였다. John(1988)[18]은 총유사량을 점적분법에 의해 측정된 부유사 자료를 이용해 측정하는 방법을 제안하였고, Woo와 Julien(1990)[32]은 부유사에 관해 불균일 유사 혼합류 난류에서의 전단응력 관계를 연구하였으며, McLean(1991)[28]은 수심적분에 의한 부유사량의 산정에 대해 연구하였다. Carolyn과 Charles(2000)[10]은 미국 Carolina 북쪽 Tennessee 강 상류지점의 Emory 호수로 유입되는 세 개 지류에서의 부유사와 소류사에 대한 연구를 수행하였고, Marwan과 Richard(2004)[27]는 산림 속 자갈하상에서의 장애물로 형성된 웅덩이 내 소

류사 이송에 관한 연구를 수행하였으며, Garcia(2008)[15]는 Vanoni(1975)[31]의 연구 후 30여년의 연구결과를 추가하여 같은 이름에 부제를 달아 2008년에 책자로 정리·발간하였다.

John 등(2009)[19]은 자갈하천에서 소류사량을 계산하기 위한 프로그램(BAGS)을 이용하여 소류사 이송량을 산정하는 프로그램을 개발하였고, Kamel 등(2010)[21]은 Algeria 내 저수지로 유입되는 유사량을 예측하기 위해 월유하 하천유량에 대한 회귀식을 제안하였다. Abdolhossein 등(2013)[7]은 Iran의 Golestan 지역 내 Gorgan-Roud 강 수로구간 몇 개의 관측점에서 측정된 유량과 유사량을 분석에 관한 연구하였고, Arman 등(2013)[9]은 하상재료의 입경분포곡선을 사용하여 소류사량을 산정하는 방정식을 제안하였으며, Amin과 Mehdi(2014)[8]는 Iran의 Behbahan 내 Marun 댐에 대한 사례 연구를 통해 유사관계곡선의 개선에 관해 연구하였다.

국내에서는 Yu와 Woo(1990)[33]가 몇 개의 유사이송 공식을 선정하고 이를 이용하여 산정된 유사량을 비교 연구하였으며, Kim(2009)[22]은 설마천 시험유역에서 유량-부유사량의 관계식을 유도하였다. Jeong(2013)[17]은 금강수계내 중소규모 하천을 대상으로 유사량을 분석하였고, Lee 등(2013a, b)[25][26]은 중소하천에서 평갈수기 동안 부유사량의 측정과 분석을 중심으로 연구하였으며, 이종석(2013)[3]은 논산천-강경천-노성천 권역의 하천기본계획 수립을 위한 유량 및 유사량의 측정조사 용역 수행을 통해 각각 이 분야의 관련 연구를 추가하였다. 그 결과의 일부를 이종석과 김치곤(2015)[4]은 유량-부유사량의 현장측정을 통한 수리특성 분석과 관계곡선 유도에 관해 발표한 바 있고, 그 나머지 부분을 종합한 유량-총유사량에 대한 관계식을 도출하여 본 학회 학술대회 논문으로 발표하였다[5].

현장에서 유사량의 직접 측정은 필요한 무거운 장비의 운반·설치 및 측정인력의 다수 동원 등 자료의 수집이 매우 어렵다. 특히 홍수기 자료측정은 대부분 비가 내리는 가운데 장비를 이동시키고, 측정값을 기록해야 하는 등의 어려움이 너무 많으므로 해당지역을 선정해 유량-총유사량의 관계식을 유도하고 이를 이용해 유사

량을 예측할 수 있다. 이러한 실무적 필요성 때문에 유량-총유사량의 관계식은 처음에 작성하기는 어렵지만 일단 작성해 놓으면 이를 이용하여 해당 지역의 토사 유출량의 추정 등에 매우 유익하게 활용할 수 있다. 그러므로 중소하천 농경지역의 측정이 비교적 용이한 유량을 측정하여 이를 먹함수로 하는 유량-총유사량의 관계식을 유도함으로써 수공실무에 편리성을 제공할 뿐만 아니라 치수관리에도 유익한 정보를 수 있을 것이다.

본 연구는 논산천 수계내 국가-지방하천을 대상으로 현장에서 실측된 유량, 부유사량과 소류사량의 분포특성을 측정하고 이들 특성을 분석한다. 현장자료 측정에는 수심적분형 또는 수면의 부유사 채취기를 사용하고, 채취된 시료는 건조나 여과법을 통해 분석하며, 소류사 채취기를 이용해 하상에서 측정된 소류사는 체분석을 통한 입도분석으로 산정하였다. 그런 후 이들 두 값을 합하여 총유사량으로 산정하였다. 이들 자료는 논산천 수계내 4개의 국가하천 및 지방하천 7개 측정점을 대상으로 2012년 8월부터 2014년 9월까지 측정하였다. 이들 자료를 이용하여 본 연구에서는 유량-총유사량 관계식을 먹함수 형(power law)으로 유도함으로써 수공 유사공학의 이론적 연구 및 실무적 응용에 유용한 도구로 사용하는데 기여한다.

II. 이론적 배경

하천에서 유량-총유사량의 관계곡선과 관계식을 유도하려면 현장으로부터의 기초자료 측정이 중요하다. 유량자료는 하천규모와 강수량의 크기에 따라 수심측정으로부터 유속측정을 통해 구하게 된다. 총유사량은 소류사 시료 채취기와 부유사 시료 채취기를 사용하여 얻은 시료를 분석하여 두 값의 합으로 구한다.

1. 유량 측정

하천에서 유속분포는 수심의 크기에 따라 대수적 연속분포로부터 계산하는 것이 보통이다. 이를 평균유속으로 사용하고자할 때 점유속을 측정하는 각종 장비를

이용하는 것이 일반적인 방법이다. 이러한 장비에는 프로펠러나 컵형 또는 마그네틱센서, 음파를 이용한 일반 유속계가 사용되며, 이는 수면 아래 물속에 센서를 담가서 측정하는 점측식 유속계이다. 이들 평균유속은 경제성을 고려하여 수면으로부터의 20%, 80% 수심의 산술평균 또는 60%의 수심에서 계산된 유속을 사용한다. 비점측식 유속계인 전자파 표면 유속계[24][23]는 홍수기에 제방 또는 교량 위에 장비를 위치시켜 발전기로부터 생성된 발전주파수와 반사주파수의 차에 의한 Doppler 효과를 적용해 표면의 유속을 측정하고, 이를 수심평균유속 환산계수를 이용해 평균유속을 구한다.

유량은 측정 수로 수면폭의 약 10% 크기로 분할된 소단면의 평균유속에 소단면적을 곱하고 이를 합산하여 계산한다. 이는 하천의 횡단면을 단위시간에 통과하는 물의 용적으로 평균유량은 1년을 통하여 185일은 이보다 저하되지 않는 유량이며, 일평균유량은 1일을 통하여 1시부터 24시까지 매시 수위에 대응하는 유량의 합을 24로 나눈 유량이며, 연평균유량은 1년을 통하여 일평균유량의 합을 당해 연도의 일수로 나눈 유량이다 [23].

이들 유량의 측정방법은 하천규모와 유량의 크기에 따라 [표 1][6][23]과 같이 구분한다.

표 1. 하천 규모와 유량별 유량측정 방법

하천 규모 \ 측정 방법	유 량	유량 측정방법
중소 하천	갈수저수	유속계법, 위어 측정법
	평수	희석법, 유속계법
	홍수	부자법
대하천	갈수저수	유속계법, 희석법, 이동 조음파 유속계법
	평수	유속계법
	홍수	부자법, 전자파 표면 유속계법

2. 총유사량 측정

총유사량은 흐름과 유사량간의 관계를 구명하기 위해 부유사와 소류사로 구분하고, 이들은 각각 현장측정 시료를 기초로 하여 해석적, 경험적으로 근거에 의한 공식을 이용해 산정한다. 하천의 총유사량 산정은 소류사가 지배적인 하천, 부유사가 지배적인 하천, 소류사와

부유사가 같이 있는 하천 등으로 구분하여 수행한다.

2.1 부유사량

부유사량은 Karman의 우주상수가 일정한 값을 가질 때 침강속도에 비례하고, 전단속도에 반비례하는 Rouse 수에 따른 각 수심에서의 유속과 부유사농도를 곱해 적분하여 계산한다. 체적평균 농도인 현장측정 자료는 D-74에 의한 수심적분 또는 D-48에 의한 표면 채취 시료로 건조 나 여과법을 통해 분석함으로써 얻는다.

본 연구에서 부유사 농도분포에 대한 지배방정식은 중력에 의한 침강입자와 난류 와 운동에 의한 상향 입자간의 단위면적당 질량이송율의 평형상태에서 유도된 다음과 같은 확산 방정식이 사용된다[16][20].

유사의 부유는 부차류, 장애물, 입자 충격과 같은 다른 요소도 있지만 주로 난류에 의해 발생된다. 부유사량을 계산하기 위하여 하천을 흐르는 연직 단면 내 유속분포, 유사농도, 전단응력, 유사확산계수의 분포는 [그림 1]과 같이 표시할 수 있다.

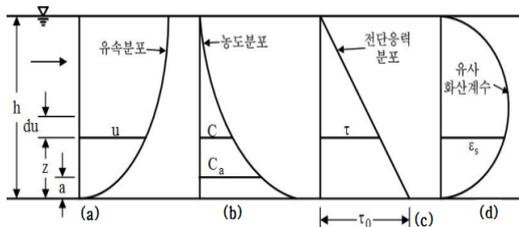


그림 1. 부유사 해석을 위한 도식적 정의

부유사 농도분포는 평형상태에서 중력에 의한 침강 입자율 wC 와 난류의 와 운동에 의해 다시 위쪽으로 움직이는 입자율 $\epsilon_m (\partial C / \partial z)$ 사이에 평형관계가 유지되므로 다음과 같이 확산 방정식으로 쓸 수 있다.

$$wC + \epsilon_m \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

여기서 w =유사입자의 침강속도이고, C =유사농도이며, ϵ_m =와운동에 의한 연직방향 질량이송 변환계수이다.

부유사량은 식 (1)의 해를 구해 산정할 수 있는데, 이는 다음과 같은 유체 전단응력 관계식과 대수형의 연직

유속분포식인 Karman-Prandtl 방정식을 사용하여 전단응력과 유속분포를 수심에 관해 적분하면 임의 수심에 대한 전단응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau = \tau_0 \frac{(h-z)}{h} = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \tag{2}$$

[그림 1](d)의 유사확산계수 ϵ_m 에 대한 연직분포를 구해 확산 방정식에 대입하고 풀 후 변수 분리하여 미분 방정식으로 정리, 이를 [그림 1](b)의 농도분포를 기준높이 a 에서 임의 수심 z 까지 적분하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{C_z}{C_a} = \left[\left(\frac{h-z}{z} \right) \left(\frac{a}{h-a} \right) \right]^{R_o} \tag{3}$$

여기서 $R_o = w / (u_* \kappa) = \text{Rouse 수}$ 로 상대농도(= C_z / C_a)의 연직분포는 R_o 값에 따라 다르게 분포하며, 이를 이용해 부유사 농도의 연직분포를 예측할 수 있다.

단위폭당 부유사량은 수심 dz 에 대해 다음과 같이 적분하여 얻는다.

$$q_{sv} = \int_a^h C_z u dz \tag{4}$$

Einstein(1950)[13]은 식 (4)를 다음과 같은 적분식으로 표시하여 단위폭당의 부유사량(q_{sv})을 산정하였다.

$$q_{sv} = \int_a^h C_a \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{R_o} 5.75 u_*' \log \left(\frac{30.2z}{\Delta} \right) dz \tag{5a}$$

$$q_{sv} = 11.6 u_*' C_a \left[2.303 \log \left(\frac{30.2h}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right] \tag{5b}$$

$$I_1 = 0.216 \frac{\eta_a^{R_o-1}}{(1-\eta_a)^{R_o}} \int_{\eta_a}^1 \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right)^{R_o} d\eta \tag{5c}$$

$$I_2 = 0.216 \frac{\eta_a^{R_o-1}}{(1-\eta_a)^{R_o}} \int_{\eta_a}^1 \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right)^{R_o} \ln \eta d\eta \tag{5d}$$

여기서 $\eta (= z/h)$ 와 $\eta_a (= 2d_s/h)$ =무차원 변수이고, u_*' =사립자 마찰속도이며, $\Delta (= k_s' / x)$ =비례항, k_s' = 입자 조도이다.

2.2 소류사량

소류사량은 19세기 말에 DuBoys(1879)[12]가 간단한 소류력 관계로 모의한 이래 1930년대 이전에는 유럽을 중심으로 소류사 이송 연구가 주를 이루다가 잠시 주춤

했다. 1970년대 이후에는 하상에서 모래 입자와 물의 상호작용에 관한 연구와 더불어 소류사 연구가 재개 되었으며, 1990년대 들어 고속 카메라와 전자기술의 발전에 힘입어 하상에서 입자 하나의 운동을 관찰하는 것이 가능해졌다. 하상 근처에서 모래 입자와 물의 상호작용을 이해하는 것은 결국 하상형태의 변화와 그에 따른 흐름저항의 변화, 하천의 안정과 나아가 소류사를 결정하는 데 있어 기본적으로 중요하다[1].

이를 기본이론과 접근방법에 따라 분류하면 크게 소류력과 관계, 유량과의 관계, 사립자들의 운동을 통계적으로 고려한 관계, 회귀식에 의한 순수한 경험적 관계 등으로 나눌 수 있다.

Meyer-Peter-Müller(1948)[29]는 하상입자의 중앙입경에 기초한 복잡한 공식을, Einstein과 Brown은 입자는 입자의 크기에 비례하여 단계적으로 이동한다는 개념을 제안하였다[2].

이상과 같이 부유사량과 소류량으로부터 총유사량을 얻고, 이를 같은 측정에서 얻은 유량과 연관시켜 함수 관계식을 유도함으로써 해당 유역에 다음과 같은 유량-총유사량의 멱함수 관계식을 유도하여 실무에 사용한다.

$$Q_{st} = kQ^n \quad (6)$$

여기서 Q_{st} =부유사량이고, Q =유량이며, k , n =부유사 입경과 흐름특성에 관계되는 계수와 지수이다.

III. 측정 및 분석

본 연구에서 사용된 현장자료는 [그림 2]와 같이 농경유역인 논산천 수계 내 4개 하천의 국가-지방하천 수로구간 7개 측정점을 대상으로 하여 2012년 8월부터 2014년 9월까지 측정되었다.

1. 현장 실측

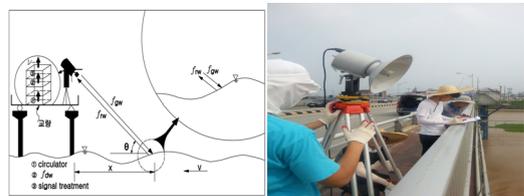
유량측정은 [표 1]과 같이 홍수, 평수, 갈수기로 나누어 수심과 유속측정을 병행하여 실시하되 평갈수기는 점속식유속계를 사용하고, 홍수기는 전자파 표면유속계를 이용한다. 총유사량 측정은 부유사량과 소류사량

으로 측정하는데, 부유사량은 수심평균농도를 평갈수기에 DH-48를, 홍수기는 D-74로 시료를 채취하며, 소류사량은 평갈수기 BLH-84, 홍수기는 BL-84를 각각 이용한다.



그림 2. 농경유역의 4개 하천 7개 측정 위치도

특히, 홍수기의 유량측정은 [그림 3]과 같이 전자파 표면유속계를 이용하며, 부유사량 측정은 [그림 4](a), 소류사 측정은 [그림 4](b)와 같이 측정 장비가 상당히 무거우므로 주의가 필요하다.



(a) 측정원리 (b) 전자파 표면 유속계

그림 3. 홍수기 비접촉식 유속계 이용 유량측정



(a) 부유사 채취기(D-48) (b) 소류사 채취기(BL-84)

그림 4. 홍수기의 유사량 현장측정

2. 자료 분석

2.1 유량자료

[그림 2]와 같이 논산·노성·강경·왕덕천 유량·유사량 측정결과에서 논산천 강경대교의 경우는 금강 하구둑 수문조절의 영향을 받고, 노성천 개성교의 경우는 측점 하류에 취수용 보가 설치되어 있어 평수와 갈수 시 야 주 유속이 느리거나 정체로 인해 수심의 변화가 심한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Box-Whisker 분석에 의한 흐름조건의 수리특성을 분석하였으며, 그 결과는 수심과 유속 및 유량에 대한 분포범위는 [그림 5]와 같이 나타났다. 이 분석에 의한 각 시기별 수심과 유속 및 유량의 최대, 최소, 평균값은 각각 [표 2]와 같다.

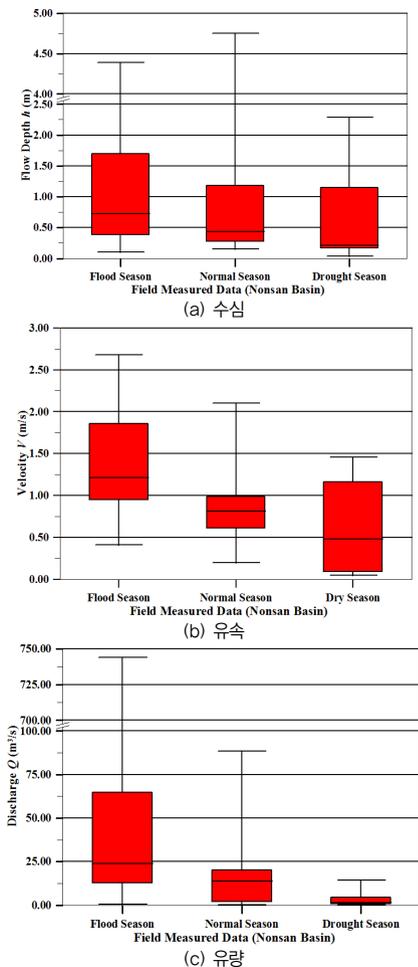


그림 5. 실측대상 4개 하천의 수리특성 분포

표 2. 주요 현장 실측자료의 수리량 분포특성

특성	시기(자료수)	범위	홍수(22)	평수(24)	갈수(10)
		최소	최대	평균	갈수(10)
수심 (m)	최소	0.10	0.15	0.04	
	최대	4.39	4.75	2.29	
	평균	1.26	0.97	0.67	
유속 (m/s)	최소	0.41	0.20	0.06	
	최대	2.68	2.10	1.46	
	평균	1.40	0.92	0.62	
유량 (m ³ /s)	최소	0.381	0.263	0.048	
	최대	744.029	88.479	14.412	
	평균	87.256	17.573	3.300	

유량측정은 평수 및 갈수 시에 도섭이 가능한 측정지 점은 프로펠러식 유속계를 이용하였고, 평수와 갈수 시 에도 수심이 깊어 도섭이 불가능 하거나 홍수 시에는 전자과 표면 유속계와 마그네틱 유속계를 이용하였다. 홍수기 3회 및 평수기 3회, 갈수기 2회의 각 측정시기별 4개 하천 7개 지점에 대한 유량측정 자료의 요약 결과 는 별도로 정리하였다.

2.2 총유사량 자료

부유사의 농도분석은 사전 실험을 통하여 전체 시료 의 농도가 10,000ppm을 초과하지 않아 여과법을 적용 하였다. 실측 부유사량은 구분단면별로 측정된 유량과 유사농도를 곱하고 이를 모두 합하여 산정되었다[2]. 채 취시료의 분석으로부터 산정된 실측 부유사량의 시기 별 분포특성은 [그림 6] 및 [표 3]과 같이 나타났다.

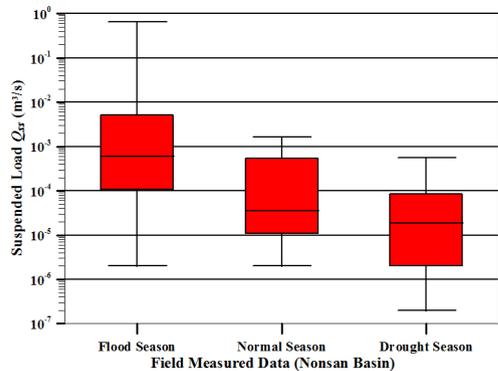


그림 6. 시기별 부유사량 분포특성

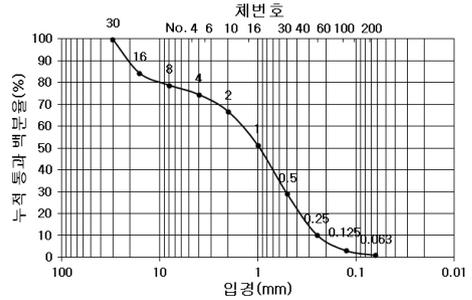
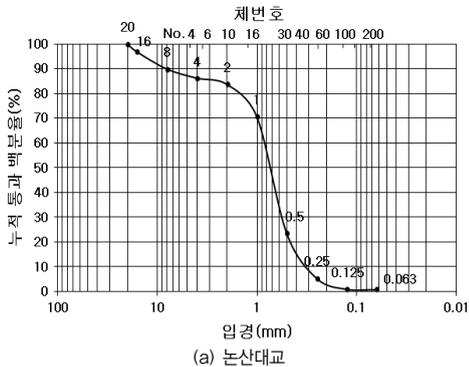
표 3. 부유사량의 분포특성

범위 (m ³ /s)	시기(수)		
	홍수(22)	평수(24)	갈수(10)
최소	2.0×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁷
최대	0.6×10 ⁻¹	1.6×10 ⁻³	5.6×10 ⁻⁴
평균	3.7×10 ⁻²	2.6×10 ⁻⁴	8.2×10 ⁻⁵

소류사량은 하상재료의 입도분석을 통해 산정하는 방법을 적용하여 수정 Einstein 방법에서 필요한 자료 중 하나이다. 하상재료 채취는 가급적 부유사량 측정 지점과 동일한 지점에서 채취하였으며, 하상의 교란을 피해 바닥에서 약 10cm 아래에서 실시하였다. 하상재료 입도분포는 체분석을 통해 입경별 누적통과 백분율을 반대수지 상에 도시한 후 분석 하였다. 7개의 측정지점의 입도분포 분석 결과는 [표 4] 및 [그림 7]과 같이 나타났다.

표 4. 유사량 측정지점의 하상재료 누적통과 백분율

측점	입경 (mm)	누적 통과 백분율(%)							
		0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8
강경대교	0.4	2.1	17.1	45.5	65.6	80.4	87.6	96.6	97.4
논산대교	0.8	1.0	5.3	23.4	70.6	83.7	86.2	89.8	96.8
양암교	0.1	0.2	0.5	3.6	21.0	53.8	79.0	90.1	96.5
꽃개다리	5.7	6.4	11.2	30.8	60.8	77.4	87.3	92.2	100
개성교	0.6	0.9	2.1	6.9	20.8	41.8	58.4	80.4	97.5
용기교	7.1	10.3	15.3	21.4	31.7	40.0	48.8	70.1	96.1
오산교	1	3.1	10.4	29.1	51.5	66.9	74.7	78.9	84.5



(b) 오산교

그림 7. 측정지점의 하상재료 입도분포 곡선

총유사량은 수정 Einstein 방법을 개발한 프로그램인 적용하여 만든 MODEIN[30][1]을 사용해 산정하였으며, 실측한 부유사의 농도, 하상재료의 입도분포, 유량, 유속 등이 프로그램의 입력자료로 사용되었다. 채취시료의 분석으로부터 산정된 7개 지점의 실측 부유사량의 시기별 분포특성은 [그림 8] 및 [표 5]와 같으며, 4개 하천과 국가·지방하천 및 7개 측정지점의 시기별 유량과의 상관관계 비교결과는 [그림 9][그림 10]과 같이 나타났다.

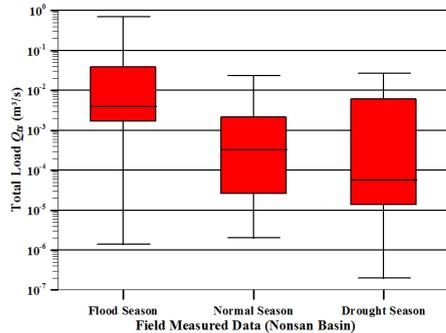
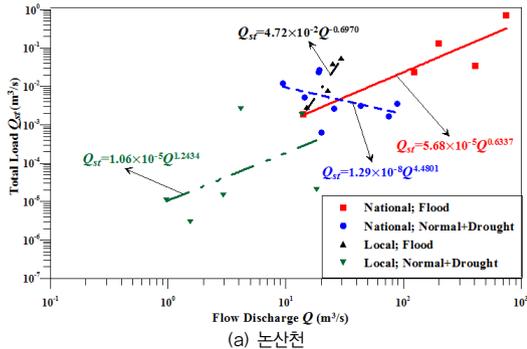


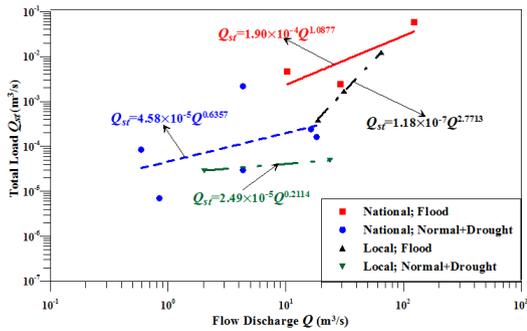
그림 8. 시기별 총유사량 분포특성

표 5. 총유사량의 분포특성

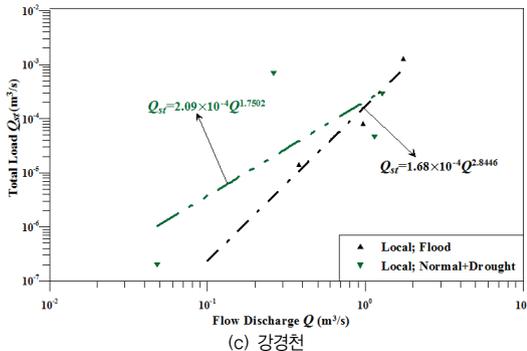
범위 (m ³ /s)	시기(수)		
	홍수(22)	평수(24)	갈수(10)
최소	1.4×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁶
최대	7.0×10 ⁻¹	2.3×10 ⁻²	2.6×10 ⁻²
평균	5.9×10 ⁻²	1.9×10 ⁻³	4.5×10 ⁻³



(a) 논산천

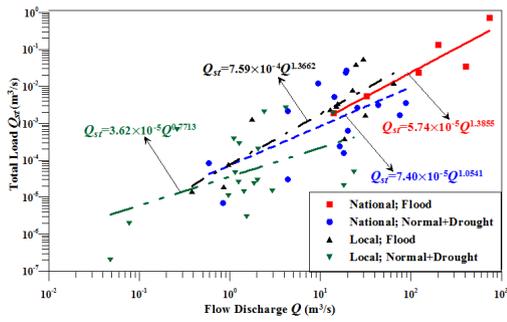


(b) 노성천

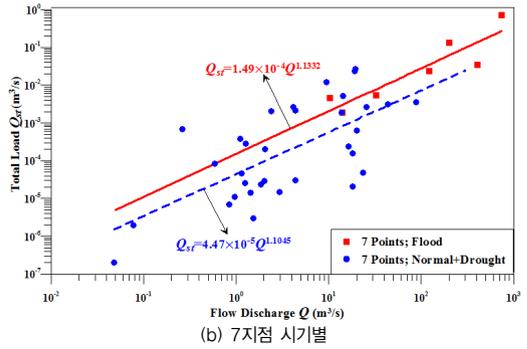


(c) 강경천

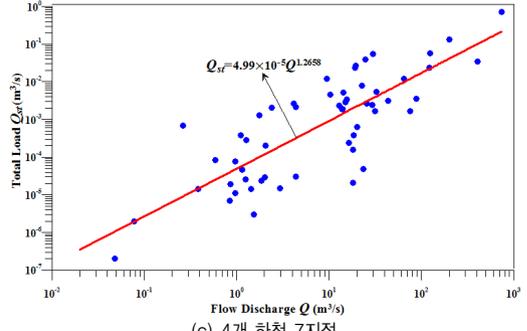
그림 9. 논산천 수계 총유사량 비교결과



(a) 하천구분 · 시기별



(b) 7지점 시기별



(c) 4개 하천 7지점

그림 10. 논산천 수계의 유량-총유사량 관계 분석결과

3. 분석 및 고찰

본 연구는 논산천 수계 4개 하천을 대상으로 국가하천 수로구간 3개, 지방하천 수로구간 4개 측정점으로 구성된 총 7개 측정점으로 이루어졌다. 이들 측정점에서 홍수기와 평수기는 각각 3회, 갈수기는 2회의 유량과 유사량을 측정하여 그 결과를 분석하고 이들 측정 현장자료로부터 부유사량과 소류량을 각각 얻어 합산함으로써 총유사량을 얻고, 이를 같은 측정에서 얻은 유량과 연관시킴으로써 식 (6)과 같은 형식의 함수 관계적인 유량-총유사량 관계식(flow discharge-total sediment rating curve)을 유도하였다.

[표 2]와 같이 실측된 현장자료는 홍수기 22개, 평수기 24개 및 갈수기 10개 총 56개 자료를 Box-Whisker 분석방법에 분석한 결과, 수심은 홍수기에 최소 1.0m, 최대 4.39m, 평균 1.26m로 나타났고, 평수기 및 갈수기는 각각 최소 0.15 및 0.04m, 최대 4.75 및 2.29m, 평균 0.97 및 0.67m로 나타났다.

유속은 홍수기에 최소 0.41m/s, 최대 2.68m/s, 평균

1.40m/s로 나타났고, 평수기 및 갈수기에는 각각 최소 0.20 및 0.06m/s, 최대 2.10 및 1.46m/s, 평균 0.92 및 0.62m/s를 나타냈다. 유량은 홍수기에 최소 0.381m³/s, 최대 744.029m³/s, 평균 87.256m³/s로, 평수기 및 갈수기는 각각 최소 0.263 및 0.048m³/s, 최대 88.479 및 14.412m³/s, 평균 17.573 및 3.300m³/s로 나타났다.

실측된 유수량 자료는 [표 3-5]와 같이 홍수기 22, 평수기 24개 및 갈수기 10개 총 56개 자료를 Box-Whisker 분석 및 입도분석 방법에 의해 분석하였다. 그 결과, 부유수량은 [표 3]과 같이 홍수기 22, 평수기 24개 및 갈수기 10개 총 56개 자료를 Box-Whisker 방법에 의해 분석하였다. 홍수기는 최소 2.0×10⁶m³/s, 최대 0.6×10¹ m³/s, 평균 3.7×10²m³/s로 나타났고, 평수기 및 갈수기는 각각 최소 2.0×10⁶ 및 2.0×10⁷m³/s, 최대 1.6×10⁻³ 및 5.6×10⁻⁴m³/s, 평균 2.6×10⁻⁴ 및 8.2×10⁻⁵m³/s로 나타났다. 소류수량은 [표 4]와 같이 각 측정지점으로부터 하상재료를 채취하여 입도분석하고 그 결과를 총유수량 산정에 이용하였다. 논산천의 국가하천 강경대교와 논산대교 지점 하상재료는 입경 2.000~0.125mm 굵은 모래부터 잔모래가 하상재료로, 지방하천 양입교는 입경 4.0~0.5mm 잔자갈부터 잔모래가 하상을 이루고 있다. 노성천 국가하천 지점인 뚝개다리는 입경 1.00~0.25mm의 굵은 모래와 중간 모래, 노성천 지방하천의 개성교는 8.0~0.5mm 잔자갈부터 중간모래가 하상을 형성하고 있다. 강경천 용기교 지점은 입경 8.0~4.0mm의 잔자갈, 왕덕천 오산교 지점은 입경 1.00~0.25mm의 굵은 모래와 중간모래가 하상을 이루고 있다(이종석, 2013).

총유수량은 [표 5]와 같이 홍수기 22, 평수기 24개 및 갈수기 10개 총 56개 자료를 Box-Whisker 방법에 의해 분석하였다. 홍수기는 최소 1.4×10⁶m³/s, 최대 7.0×10⁻¹ m³/s, 평균 5.9×10⁻²m³/s로 나타났고, 평수기 및 갈수기에는 각각 최소 2.0×10⁶ 및 2.0×10⁶m³/s, 최대 2.3×10⁻² 및 2.6×10⁻²m³/s, 평균 1.9×10⁻³ 및 4.5×10⁻³m³/s로 나타났다.

4. 관계식 유도

실측된 수리특성자료를 이용하여 유량과 총유수량에

관한 관계식을 멱함수(power law) 형으로 유도하였다. 이 관계식은 현장에서 유사량의 직접 측정이 어려우므로 측정이 비교적 용이한 유량을 측정하여 이를 멱함수로 하는 관계식을 유도함으로써 수공실무에 편리성을 제공한다. 이들 관계는 국가·지방하천의 측정 시기별, 4개 하천 및 7개 측정지점의 시기별로 구분하여 관계식을 각각 유도하였다.

[그림 9][그림 10]과 같이 논산천 수계 내 논산천, 노성천, 강경천 하천에서 홍수기 및 평갈수기, 국가·지방하천의 홍수기 및 평갈수기, 7개 측정점에 대한 시기별, 이들 전체 자료에 대한 유량-총유수량 관계식을 유도한 결과는 [표 6][표 7]과 같다.

[표 6]과 같이 논산천 유역 4개 하천의 홍수기 국가·지방하천에서 측정된 자료로부터 유도된 멱법칙형 유량-총유수량 간의 다음 관계식은 이 지역의 수공실무에 활용할 수 있을 것이다.

표 6. 4개 하천의 유량-총유수량 관계식

하천 구분	시기별	유도식	결정 계수	비고
국가	홍수기	$Q_{st,N} = 5.74 \times 10^{-5} Q^{1.3855}$	0.85	사용 가능
	평갈수기	$Q_{st} = 7.40 \times 10^{-4} Q^{1.0541}$	0.38	사용 불가
지방	홍수기	$Q_{st,L} = 7.59 \times 10^{-4} Q^{1.3662}$	0.74	사용 가능
	평갈수기	$Q_{st} = 3.62 \times 10^{-5} Q^{0.7713}$	0.23	사용 불가

$$Q_{st,N} = 5.74 \times 10^{-5} Q^{1.3855} \quad (R^2=0.85) \quad (7a)$$

$$Q_{st,L} = 7.59 \times 10^{-4} Q^{1.3662} \quad (R^2=0.74) \quad (7b)$$

표 7. 4개 하천 7개 지점의 유량-총유수량 관계식

하천 구분	시기별	유도식	결정 계수	비고
4개 하천 (7지점)	홍수기	$Q_{st,F} = 1.49 \times 10^{-4} Q^{1.1332}$	0.82	사용 가능
	평갈수기	$Q_{st} = 4.47 \times 10^{-5} Q^{1.1045}$	0.45	사용 관련
	전기간	$Q_{st,A} = 4.49 \times 10^{-5} Q^{1.2658}$	0.65	사용 가능

[표 7]과 같이 논산천 유역 4개 하천의 7개 지점에서 홍수기, 전 기간 자료로부터 유도된 멱법칙형 유량-총유수량 간의 다음 관계식은 이 지역의 수공실무에 활용

할 수 있을 것이다.

$$Q_{stF} = 1.49 \times 10^{-4} Q^{1.1332} \quad (R^2=0.82) \quad (8a)$$

$$Q_{stA} = 4.49 \times 10^{-5} Q^{1.2658} \quad (R^2=0.65) \quad (8b)$$

[표 6][표 7] 및 식 (7), (8)에서와 같이 유량과-총유사량 간의 관계는 홍수가 발생하여 유량이 많은 경우에 그에 비례하여 유사 이송량이 상당량 발생하게 되므로 그 관련식도 결정계수가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 측정자료가 축적되어 통계의 정확성이 확보된다면 더 유익한 정보제공이 가능할 것인 바, 차후 연구에서 더 좋은 관계식을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 수행으로 추출된 국가-지방하천의 홍수기, 7개 측정의 홍수기 및 평·갈수기, 전 자료에 대한 유량-총유사량 관계 식 (7), (8)은 논산천 수계의 유사이송 분석 등 수공실무 수행에 유익하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서 수행된 농경구역의 논산천 수계 내 4개 하천 7개 지점을 대상으로 홍수기와 평갈수기에 측정된 유량과 총유사량을 분석하여 수리특성분포, 관계곡선 및 관계식을 유도하였다. 이 관계식은 현장에서 유사량의 직접 측정이 어려우므로 측정이 비교적 용이한 유량을 측정하여 이를 멱함수로 하는 관계식을 유도함으로써 수공실무에 편리성을 제공할 수 있을 것이다. 본 연구 결과로부터 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 유량측정 결과에서 수심은 홍수기 1.0~4.39m, 평갈수기 0.15~4.75m 및 0.04~2.29m로, 유속은 홍수기 최소 0.41m/s~최대 2.68m/s, 평균 1.40m/s로 나타났고, 평·갈수기에는 각각 최소 0.20 및 0.06m/s, 최대 2.10, 1.46m/s, 평균 0.92 및 0.62m/s로 나타났다. 유량은 홍수기 최소 0.381m³/s~최대 744.029m³/s, 평균 87.256m³/s로 나타났고, 평·갈수기에는 각각 최소 0.263, 0.048m³/s, 최대 88.479 및 14.412m³/s, 평균 17.573 및 3.300m³/s로 나타났다.

2. 총유사량의 실측된 현장자료는 홍수기 22, 평수기 24개 및 갈수기 10개 총 56개 자료를 Box-Whisker 분석방법에 의하여 분석한 결과, 홍수기에는 최소 1.4×10⁻⁶m³/s에서 최대 7.0×10⁻¹m³/s, 평균 5.9×10⁻²m³/s로 나타났고, 평수기 및 갈수기에는 각각 최소 2.0×10⁻⁶ 및 2.0×10⁻⁶m³/s, 최대 2.3×10⁻² 및 2.6×10⁻⁶m³/s, 평균 1.9×10⁻³ 및 4.5×10⁻³m³/s로 나타났다.
3. 연구대상 4개 하천의 홍수기 국가하천과 지방하천에서 측정된 자료로부터 유도된 멱법칙형 유량-총유사량 간의 관계식은 식 (7)과 같이 유도되었으며, 논산천 수계 4개 하천의 7개 지점에서 홍수기, 전 기간 자료로부터 유도된 멱법칙형 유량-총유사량 간의 관계식은 식 (8)과 같이 유도되었다.
4. 수위-유량 관계곡선으로부터 유량을 간접적으로 산정함으로써 직접적인 측정이 수위측정보다 어려운 유량을 얻고, 이를 이용해 유사량을 산정하기 위한 유량-총유사량 간의 멱함수 관계식 유도는 중소하천 농경구역의 치수관리에 유익한 정보를 제공해 줄 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 우효섭, *하천수리학*, 청문각, 2007.
- [2] 이종석, *기초수리학 및 실험*, 도서출판 새론, 2012.
- [3] 이종석, *논산 강경·노성천권역 하천기본계획 하천 유량 유사량 조사용역*, 한밭대학교 건설안전기술연구소, 2013.
- [4] 이종석, 김치곤, "논산유역 중소하천의 유량-부유사량 현장측정분석", 한국방재학회 논문집, 제15권, 제1호, pp.291-296, 2015.
- [5] 이종석, 김치곤, 유의근, 이효원, "농경구역 중소하천의 유량-총유사량 관계식 유도", 2015 콘텐츠학회 춘계학술대회, pp.369-370, 2015.
- [6] 한국수자원학회, *하천설계기준 해설*, 2009.
- [7] Abdolhossein Arami, Behnam Faridgiglo, and Abazar Esmaliouri, "Assessment of Variations

- in River Discharge and Sediment at Some Stations of Gorgan-Roud River, Golestan Province, Iran," *International J. of Agriculture and Crop Sciences*, Vol.5, No.12, pp.1351-1357, 2013.
- [8] Amin Bordbar and Mehdi Fuladipannah, "Sediment Rating Curve Modification (Case Study: Marun Dam, Behbahan, Iran)," *Indian J. of Fundamental and Applied Life Sciences*, Vol.4(S4), pp.2345-2351, 2014.
- [9] Arman Haddadchi, Mohammad H. Omid, and Amir A. Dehghani, "Bedload Equation Analysis Using Bed Load-Material Grain Size," *J. Hydrol. Hydromech.*, Vol.61, No.3, pp.241-249, 2013.
- [10] Carolyn J. Oblinger and Charles G. Groat, *Suspended Sediment and Bed Load in Three Tributaries to Lake Emory in the Upper Little Tennessee River Basin, North Carolina*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03 - 4194, 2000.
- [11] Dallas L. Peck and Glysson G. Douglas, *Sediment-Transport Curve*, U.S. Geological Survey, Open-File Report 87-218, Reston, Virginia, 1987.
- [12] M. P. DuBoys, "Etudes du regime du Rhone et de l'action exercee par les eaux sur un lit a fond de graviers indefiniment affouillable," *Ann. Ponts et Chaussees*, ser. 5, Vol.18, pp.141-195, 1879.
- [13] H. A. Einstein, *The Bed Load Function of Sediment Transportation in Open Channel Flows*, Technical Bulletin 1026, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950.
- [14] R. I. Ferguson, "River Loads Underestimated by Rating Curves," *Water Resources Research*, Vol.22, No.1, pp.74-76, 1986.
- [15] M. H. Garcia, ed., *Sedimentation Engineering, Processes, Measurement, Modeling, and Practice*, ASCE Manual and Reports on Engineering Practice, No.110, pp.107-123, 2008.
- [16] W. H. Graf, *Fluvial Hydraulics, Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry*, John Wiley & Sons, 2003.
- [17] J. H. Jeong, *Analysis of Sediment Discharge in Small-Medium River of Geum River System*, Master Thesis in Hanbat National University, 2013.
- [18] John J. Ingram, *Total Sediment Load Measurement Using Point-Source Suspended-Sediment Data*, Hydraulics Laboratory, Department Of The Army, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, 1988.
- [19] John Pitlick, Yantao Cui, and Peter Wilcock, *Manual for Computing Bed Load Transport Using BAGS (Bedload Assessment for Gravel-bed Streams) Software*, United States Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-223, 2009.
- [20] P. Y. Julien, *Erosion and Sedimentation, 2nd ed.*, Cambridge University Press, pp.229-239, 2010.
- [21] Kamel Khanchoul, Mohamed Benslama, and Boualem Remini, "Regressions on Monthly Stream Discharge to Predict Sediment Inflow to a Reservoir in Algeria," *J. of Geography and Geology*, Vol.2, No.1, pp.36-47, 2010.
- [22] D. P. Kim, "Development of Discharge-Suspended Sediment Discharge Relation Curve of the Seolma-Choen Experimental Catchment," *Proceedings of KSCE*, pp.3362-3365, 2009.
- [23] J. S. Lee, *River Engineering and Design*, SaeRon Publish Inc., 2010.
- [24] J. S. Lee and Y. J. Pierre, "Electromagnetic

Wave Surface Velocimetry," J. Hydra. Engineering, ASCE, Vol.136, No.2, pp.146-153, 2006.

[25] J. S. Lee, J. H. Jeong, and D. C. Lee, "Suspended Load During Normal and Dry Seasons in Small-Medium Rivers," Proceeding of The First Jeju Conference on Converged Content, 2013a.

[26] J. S. Lee, D. C. Lee, and T. W. Lee, "Analysis for Flow Discharge and Suspended Load of National-Local Streams in Nonsan River Systems," Proceedings of The International Conference on Convergence Content, International Hybrid Contents 2013(ICCC 2013), Vol.11, No.2, pp.172-174, 2013b.

[27] Marwan A. Hassana and Richard D. Woodsmith, "Bed Load Transport in an Obstruction-Formed Pool in a Forest, Gravel Bed Stream," Geomorphology, Vol.58, pp.203-221, 2004.

[28] S. R. McLean, "Depth-Integrated Suspended -Load Calculations," J. Hydra. Eng. ASCE, Vol.117, No.11, pp.1440-1458, 1991.

[29] E. Meyer-Peter and R. Muller, "Formulas for Bed-Load Transport," Proc. IAHR, Third Annual Conference, Stockholm, Sweden, pp.39-64, 1948.

[30] H. H. Stevens, *Computer Program for the Computation of Total Sediment Discharge by the Modified Einstein Procedure*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4047, 1985.

[31] V. A. Vanoni, ed., *Sedimentation Engineering, ASCE Manual and Reports on Engineering -Practice*, 54, New York, p.18, 1975.

[32] H. S. Woo and P. Y. Julien, "Turbulent Shear Stress in Heterogeneous Sediment-Laden Flows," J. Hydra. Eng. ASCE, Vol.116, No.11,

pp.1416-1421, 1990.

[33] K. K. Yu and H. S. Woo, "Comparative Evaluation of Some Selected Sediment Transport Formulas," KSCE, Vol.10, No.4, pp.67-75, 1990.

저 자 소 개

이 종 석(Jong-Seok Lee)

중신회원



- 1987년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학석사)
- 1989년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학박사)

• 1996년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 건설환경학과 교수
<관심분야> : 수리·수문, 하천·생태환경

김 치 곤(Chi-Gon Kim)

정회원



- 2007년 2월 : 한밭대학교 토목공학과(공학사)
- 2009년 2월 : 한밭대학교 토목공학과(공학석사)
- 2014년 3월 : 한밭대학교 대학원 토목공학과 박사과정

• 2008년 2월 ~ 현재 : 오성측량설계공사 대표
<관심분야> : 수리·수문, 하천·생태환경

유 의 근(Eui-Geun You)

정회원



- 1986년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한밭대학교 토목공학과 대학원 석사과정
- 2014년 8월 ~ 현재 : (주)평화엔지니어링 부사장

<관심분야> : 수리·수문, 하천·생태환경