

만곡하천의 자갈하상재료 분포에 따른 한계수류력 평가

Estimating Critical Stream Power by the Distribution of Gravel-bed Materials in the Meandering River

신 승 숙* / 박 상 덕** / 이 승 규*** / 지 민 규****

Shin, Seung Sook / Park, Sang Deok / Lee, Seung Kyu / Ji, Min Gyu

Abstract

The distribution of gravel-bed materials in mountainous river is formed by the process of deposition and transportation of sediment responding to stream power of the latest flood that is over the certain scale. The particle size of bed material was surveyed in the longitudinal points of river and detail points of a specific meandering section and used to estimate the critical velocity and stream power. Yang's critical unit stream power and Bagnold's critical stream power for gravel-bed materials increased with the distance from downstream to upstream. Dimensionless shear stress based on the designed flood discharge in Shields diagram was evaluated that the gravel-bed materials in most survey points may be transported as form of bedload. The mean diameter in the meandering section was the biggest size in first water impingement point of inflow water from upstream and the second big size in second water impingement point by reflection flow. The mean diameters were relatively the small sizes in points right after water impingement. The range of mean critical velocity was 0.77~2.60 m/s and critical unit stream power was big greatly in first water impingement point. The distribution of critical stream power, range of 7~171 W/m², was shown that variation in longitudinal section was more obvious than that of cross section and estimated that critical stream power may be affected greatly in first and second water impingement point.

Keywords : critical stream power, meandering river, gravel-bed, water impingement

요 지

산지하천의 자갈하상재료 분포는 최근 특정규모 홍수의 수류력에 의한 유사 이송 및 퇴적 과정에 의해 형성되며, 장갑화된 하천에서 한계수류력을 평가하는 것은 안정하도설계를 위해 중요하다. 자갈하상 하천 종단지점과 만곡부 일정구간의 세부지점에 대한 하상재료의 입도 분포를 조사하고, 한계유속 및 한계수류력을 평가하였다. 자갈하상 재료에 대한 Yang의 한계단위수류력과 Bagnold의 한계수류력은 상류로 갈수록 급격히 증가했다. 계획홍수량에 근거한 무차원 전단응력은 Shields 도표에서 대부분 조사지점의 자갈하상재료가 소류사 형태로 이동하는 것으로 평가되었다. 만곡부에 대한 평균입경은 상류 유입수의 1차 수충지점에서 가장 컸으며, 반사흐름에 의한 2차 수충지점에서 두 번째로 큰 입경을 보였다. 수충직하류 지점들에서 상대적으로 작은 평균입경을 보였다. 만곡부의 평균한계유속 범위는 0.77~2.60 m/s의 범위이며, 한계단

* 교신저자, 강릉원주대학교 방재연구소 전임연구원(USDA-ARS NWRC 교환연구원) (e-mail: cewsook@hanmail.net)

Corresponding Author, Associate Researcher Institute for Disaster Prevention, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea.

** 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (e-mail: sdpark@gwnu.ac.kr)

Prof. Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

*** 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정 (e-mail: ef2377@nate.com)

Ph.D. Student Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

**** 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 (e-mail: yshinje@hanmail.net)

Graduated Student Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

위수류력은 경사가 급한 1차 수층부에서는 상당히 컸다. 한계수류력의 분포는 7~171 W/m²의 범위로 하천 횡단보다는 종단에 따른 변화가 뚜렷했고, 만곡 외측 1차 수층지점과 반사흐름 2차 수층지점에서 크게 작용하는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 한계수류력, 만곡하천, 자갈하상, 수층부

1. 서 론

산지하천이란 산지지역에 포함되어 있는 하천을 말하며, 하천경사가 급하고, 하상재료 변화폭이 크며, 하상조도 및 하천형태에 따른 유수저항이 큰 것이 특징이다(박상덕과 신승숙, 2011). 산지유역의 지형적인 특성을 반영하고 있는 산지하천 하상재료는 미립토사부터 모래, 자갈, 호박돌, 암반에 이르기까지 매우 다양한 구성요소를 이루고 있으며, 특히 대부분이 자갈, 조약돌, 호박돌로 이루어져 있다. 이들 하상재료는 홍수시에 수심과 흐름에 상당한 영향을 미치며, 부유하거나 소류하여 하상변화를 일으킨다. 대부분 자갈하상 하천(gravel-bed river)의 하상은 유사이송의 특성, 흐름양상, 하도의 일반적인 지형적 특징에 의해 결정된다(Hassan and Church, 2000).

충적수로 내의 유사분급은 경사진 상류로부터 이송되는 유사의 공급(de Jong and Ergenzinger, 1995), 구간별 하상재료의 공급, 지류로부터의 공급(Rice and Church, 1996) 등 선택적 유입에 의해 이루어진다(Powell, 1998). 유사분급의 세부적인 양상은 흐름능력의 구간별 차이(Powell, 1998)와 유사 공급율의 변화(Buffington and Montgomery, 1999)에 대한 조직적인 반응이다. 만곡부 흐름과 유사이송 특성은 횡단방향으로 유사이송, 굴곡진 하상형태, 주요흐름의 왜곡분포 그리고 이차류의 형성 등이다. 하상변동은 만곡부 바깥쪽에서 안쪽으로 작용하는 이차류에 따른 하상 소류력과 하상이 안쪽에서 바깥쪽으로 내려감에 따른 중력과 맞물려서 곡률반경 선상 한 곳에서 두 힘이 균형을 이루게 된다. 그리고 하천 단면의 단위폭당 유량 변화에 따른 유사량 변화를 일으킨다(Yeh and Kennedy, 1993). 특히 구간별 흐름 특성의 변화가 활발한 산지하천의 만곡부에서는 원심력에 의하여 하천횡단방향으로 흐름이 강해진다. 하도경사가 급하고, 만곡의 곡률이 크면서, 유량이 증가하면, 이러한 현상은 커지고(Maynard, 1993), 만곡 외측에서의 유사이송이 활발하여, 세굴현상이 나타난다. 이러한 세굴현상은 만곡 외측에 설치된 수공구조물에 피해를 가한다.

유사이송에 관련된 설계에 있어서 기초적인 자료는 한계조건이다. 소류력은 하상을 쓸어내리는 소류력이 하상

재료의 운동에 관련된다고 보는 것으로 Shields(1936)에 의해 처음 제시되었다. 수류력은 흐름 에너지 소모율에 따른 유사이송의 일률 관계로부터 출발하며, 단위면적의 하상에 작용하는 수류력(Bagnold, 1966)과 유사를 이송시키는 데 필요한 단위 무게당 유체의 일률(Yang, 1973)로 크게 나뉜다(Yang, 2003). Bagnold(1977)는 소류사 이송을 평가하기 위해 한계수류력에 대해 처음으로 소개하였다. 하천 수로의 패턴과 만곡변화를 고려하였고(Ferguson, 1981; Bravard, 1991), 인간의 간섭에 따른 하천의 적응과 가능한 반응(Brooke, 1988)과 같은 하천의 동적인 면을 이해하기 위한 응용분야에서 이들 연구가 이루어졌다.

흐름은 하상에서 우선적으로 작은 입자들을 세굴시키고, 큰 입자들은 그 자리에 남긴다. 이에 하상표면은 큰 입자들로만 덮이게 되고 작은 입자들은 큰 입자들 밑에 숨어 흐름의 소류력으로부터 보호를 받는다(우효섭, 2001). 장창래와 우효섭(2009)은 댐 하류에 설치한 유사채집상자에 포착된 유사를 분석하여 댐 방류에 따른 장갑화 및 수직분급 현상을 확인하였다. 산지하천의 경우 홍수 시 구간별 하상 표층이 자갈, 조약돌, 호박돌 등의 큰 입자로 장갑화 되는 경향이 크다. 이러한 장갑화 하상이 견딜 수 없는 큰 흐름이 발생하면, 모래 하상을 보호하던 장갑층이 파괴되고 다량의 유사이송이 발생한다.

하천의 안정하상설계를 위한 유사량 산정공식과 하상변동 모형 개발에 앞서 실제 하천 하상재료의 한계조건 이상의 흐름에 대한 유사량 측정이 이루어져야한다. 이를 위해 자갈 추적, 소류사 채집기, 소류사 채취기 등의 방법을 이용한다. 홍수시 실시간 변화하는 소류력 및 수류력에 의한 이송 유사를 정확하게 파악하기 위해서는 소류사 채취기 측정방법이 최적이지만, 유속이 빠르고 하상재료 입경이 큰 산지하천 상류부나 만곡구간에서 소류사의 이동을 파악하기란 용이하지 않다. 특히 국내 산지하천 자갈하상의 소류사 측정 사례는 전무한 상태이다.

현재상태의 자갈하상재료 분포는 수류력이 큰 특정규모 홍수시 유사의 이송과 퇴적과정에 의해 형성되었기 때문에 하천의 하상재료분포를 통해 최근 홍수상에 의해 하천구간에 작용했던 한계조건을 역으로 추정하는 것이 가능하다. 또한 현재 하상재료의 한계소류력 이상의 힘이

작용하여야 세굴구간의 침식 및 이송이 발생하게 된다. 따라서 장갑화된 산지하천 하상재료에 대한 한계조건을 평가하는 것은 산지하천 구조물의 안전설계를 위한 기초 자료로 활용 가능하다. 그러므로 비교적 측정이 용이한 하상표면 재료의 입도분포를 정량적으로 평가하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 만곡부를 포함하는 산지하천의 종단·횡단별 자갈하상재료에 대해 격자 틀 방법에 의한 면적비 평균입경을 조사하고, 하천종단 및 만곡부 횡단구간의 하상재료 입도분포 특성에 따른 한계유속, 한계소류력, 한계 단위수류력, 한계수류력 등을 평가함으로써 산지하천의 유사이송 및 하상변동 예측을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 한계운동

한계운동(incipient motion)은 흐름에 의한 하상과 제방을 구성하는 사립자들이 움직이기 시작하는 상태를 말하며, 이때의 흐름 한계조건은 안정하도나 수로설계의 기준이 된다. 한계유속, 한계전단응력, 한계단위수류력, 한계수류력 등은 하상재료 입자의 거동 시작을 알리는 지배인자들이다.

한계유속(critical velocity)은 수로 설계에서 허용유속(permissible velocity)이라는 개념으로 사립자의 입경별 침식되지 않는 최대유속을 의미한다(Fortier and Scobey, 1926). 모래 이상의 하상재료에 대해 Mavis and Laushey (1949)는 한계바닥유속을 계산하기 위한 다음 식을 제시하였다.

$$u_{oc} = 0.153 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/2} D^{4/9} \quad (1)$$

여기서, u_{oc} 는 한계바닥유속(m/s)이고, D 는 사립자의 직경(mm)이다. Mavis and Laushey의 관계는 Shields 조건보다 한계유속을 상당히 낮게 추정하고 있으며, 한계유속 조건은 한계소류력 조건보다 불확실성도 높아서 한계조건의 검토에서 가능하면 유속조건보다는 소류력 조건을 이용하는 것이 바람직하다(우효섭, 2001).

Shields (1936)의 한계소류력(critical tractive force)에 대한 개념은 사립자에 작용하는 흐름의 항력이 사립자의 마찰 저항력을 넘는 임계를 한계조건으로 본다. 한계운동 결정의 주요인자들을 경계 Reynolds 수(Re_*)와 무차원 전단응력(τ_*)으로 무차원화 시켜서 다음과 같이 표현한다.

$$Re_* = \frac{Du_*}{\nu} \quad (2)$$

$$\tau_* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)g} \quad (3)$$

여기서, D 는 자갈입자의 직경(m), u_* 는 전단속도(m/s), ν 는 동점성계수(m²/s), τ_c 는 초기운동에서의 한계 전단응력(kg/m²), γ_s 는 유사(砂)의 단위중량(kg/m³), γ 는 유체의 단위중량(kg/m³), g 는 중력가속도(m/s²)이다. Shields 조건은 사립자 입경과 마찰속도가 양쪽에 모두 있어 시행착오법에 의해 변수를 계산해야하는 불편함이 있다.

Yang (1973)은 조도함수를 포함하는 무차원 한계유속의 기본방정식을 제시하였다. 조도함수는 수로 바닥의 경계가 수리학적(水理的)으로 매끄러운 하상, 친이(親)하상, 완전거친 하상인지에 따라 결정된다. 무차원 한계유속과 흐름 상태에 따른 레이놀즈수의 관계에서 전단속도 레이놀즈 수가 70 이상인 완전거친 하상의 난류(亂流)마찰에 의해 영향을 받는 흐름에서 상수인 평균 한계유속(mean critical velocity)을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{V_c}{w} = 2.05 \quad (4)$$

여기서, V_c 는 평균 한계유속(m/s)이고, w 는 종말침강속도(m/s)이다. Rubey (1933)는 자갈, 모래, 실트 입자의 침강속도 계산식을 제안하였다. 입경이 2mm보다 큰 경우 수온 16°C의 물속에서 침강속도는 근사적으로 다음과 같이 표시한다.

$$w = 3.32 D^{1/2} \quad (5)$$

그러므로 하상재료 입경 2mm 이상의 완전거친 하상에 대한 평균 한계유속은 다음과 같이 산정 가능하다.

$$V_c = 2.05 w = 6.806 D^{1/2} \quad (6)$$

Talapatra and Ghosh (1983)는 완전거친 하상의 난류 흐름에 대한 Yang의 기준을 실험적 결과로 입증하였다. 결론적으로 Yang의 한계단위수류력(critical unit stream power)은 평균한계유속과 경사의 함수($V_c S$)이다.

자갈하상 하천에서의 소류사(砂)이송의 발달 흐름은 하천 흐름의 확실한 한계수준에 도달할 때 발생한다고 일반적으로 가정한다. 소류사 이송을 예측하기 위해 사용되는 흐름변수는 Meyer-Peter and Müller (1948)의 식으로 잘 알려진 전단응력(shear stress)이다. 등류(等流)흐름에서 수로 단면을 평균한 평균전단응력으로 이는 수심과 경사에 의

존한다.

$$\tau = \gamma h S \quad (7)$$

여기서, τ 는 전단응력(kg/m²), h 는 수심(m), S 는 하상, 수면 또는 에너지 경사(m/m)이다.

Bagnold (1977)은 소류사 이송을 예측하기 위해 Eq. (8)과 같이 단위 하상면적당 수류력(W/m²)의 평균치를 제안했다.

$$W = (\gamma QS)/b = \tau V \quad (8)$$

여기서, Q 는 유량(m³/s), b 는 수면폭(m), V 는 하천단면 평균유속(m/s)이다. 총 전단응력은 소류사의 이동과 이송에서 고려하는 입자의 저항에 의한 전단응력과 하상형태의 저항에 따른 전단응력의 합이다. Bagnold (1980)은 유사가 이동하기 시작하는 것을 결정하기 위해 한계 이동속도와 Shields의 무차원 한계 조건에 따른 한계전단응력에 의해 한계수류력을 제안했으며, 수심과 이동입자 크기의 함수임을 보였다. 그러나 많은 연구자들은 큰 입자의 돌들을 이송시키는 급한 경사의 하천에서는 수심을 고려하지 않고, 한계수류력을 이동입자 크기만의 함수로 제시하였다(Costa, 1983; Williams, 1983; Jacob, 2003; Gob et al., 2003).

$$W_c = aD_i^b \quad (9)$$

여기서, W_c 는 한계수류력(W/m²)이고, D_i 는 이동 입자의 크기(mm)이다.

Petit et al. (2005)은 자갈하상 하천에서 한계수류력을 평가한 결과 유역의 크기가 40~500 km² 범위인 중규모 하천에서 한계수류력이 크며, 이것은 하상형태의 큰 저항 때문으로 보였다. 유역크기 및 하상재료 크기가 다양한 유역들 중에서 입경에 따른 한계수류력의 관계가 비교적 작은 분산을 보였던 유역은 중간규모 하천인 Höegne (Deroanne, 1995)과 Mehaigne (Perpinien, 1998) 이었다. 이들 하천에 대한 입경에 따른 한계수류력의 관계를 하나의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$W_c = 0.130 D_i^{1.438} \quad (10)$$

이동 사립자의 평균입경 범위는 20~230 mm이며, 유역면적은 40~500 km²인 하천에 적용 가능한 식이다. Ferguson (2005)은 산지하천에서 하상조도와 형상저항이 한계수류력 산정에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 제시했다. 또한 한계수류력은 평탄지(reach) 내보다는 평탄지를 사이의 입자 크기에 보다 민감하게 반응함을 확인하였다.

한계운동 조건에 대한 한계수류력(critical tractive force)은 Bagnold의 하상면적당 수류력에 관한 Eq. (8)로부터 Yang의 평균한계유속 Eq. (6)과 Petit에 의한 한계수류력 Eq. (10)을 대입함으로써 다음 Eq. (11)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\tau_c = W_c/V_c = 0.0191D^{0.938} \quad (11)$$

따라서 본 연구는 급경사 산지하천의 자갈하상재료 한계운동에 대한 한계유속, 한계수류력 및 한계수류력은 자갈 입경 크기에 전적으로 의존한다는 가정 하에 기술하고자 하였다.

3. 하상재료 조사

3.1 대상하천 하도특성

하상재료 조사 대상범위는 양양남대천 본류의 후천 합류부에서 양양군 현북면 법수치리 구간으로 급경사 만곡형태의 산지하천이다. 시험유역의 유역면적은 196.25 km², 유로연장은 48.74 km, 하천밀도는 0.230이다. 만곡도는 사행하천 기준 1.5보다 큰 1.7로 사행하천에 속한다. 하류부 하상재료는 중립질 모래와 자갈로 구성되어 있으며, 상류부는 대부분 자갈과 호박돌이 혼재되어 있는 전형적인 자갈하천(gravel river) 형태를 보인다. Fig. 1과 같이 양양남대천 하천 종단별 12개(No.1~No.12)의 하상재료 조사 지점을 선정하였고, 지점 No.11을 포함하는 일부 만곡부 구간에 세부적인 조사지점을 선정하였다. 후천 합류부(No.1)에서 면옥치천 합류부(No.9)까지 주요 조사지점의 하천전경을 제시하였다(Fig. 1). 양양남대천의 후천 합류부를 기준으로 상류 이동거리에 따른 최심하상고의 변화와 수로 폭의 변화를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 경사는 상류로 갈수록 증가하고, 기준점부터 상류 28.5 km 지점까지의 하천 평균하상경사는 0.0073 ± 0.0059이었다. 본류경사가 0.002이상인 하천을 산지하천으로 본 Jarrett (1992)의 정의에 따르면, 시험유역은 산지하천에 속한다. 그러나 미시적인 관점에서 하천은 일부 구간에 완경사 및 역경사가 존재한다. Wohl (2000)은 거시적인 관점에서 산지하천 특성을 나타내는 어떤 지점의 상류 전체를 산지하천으로 보았다. 따라서 하천 본류의 하류에서 상류 이동거리에 따른 하상고도 관계식에서 접경사치가 산지하천 평가 경사치를 초과하는 지점의 상류전체를 산지하천이라 정의하는 것이 합리적이다. 상류이동 거리에 따른 최심하상고의 관계식을 미분하여 접경사를 산정한 결과 0.002를 초과하는 지점은 기준점(No. 1)으로부터 2.5 km 지점에 해당한다.

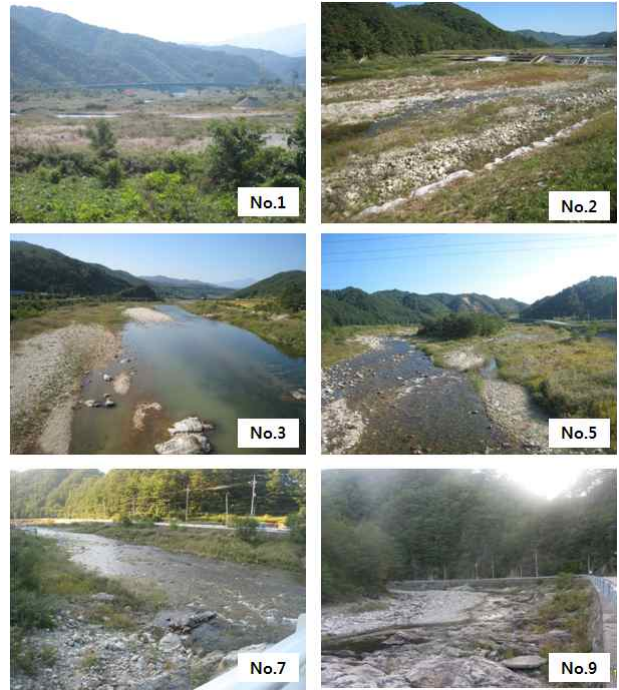
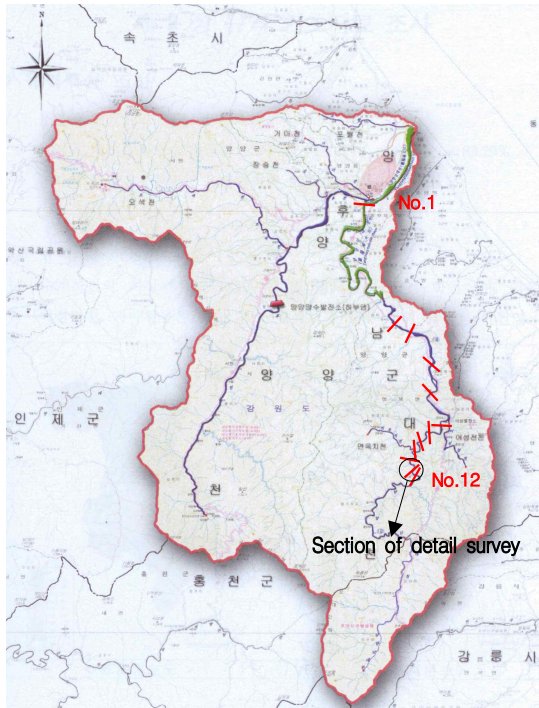


Fig. 1. Location Map and Images of Survey Points in Yangyang Namde River

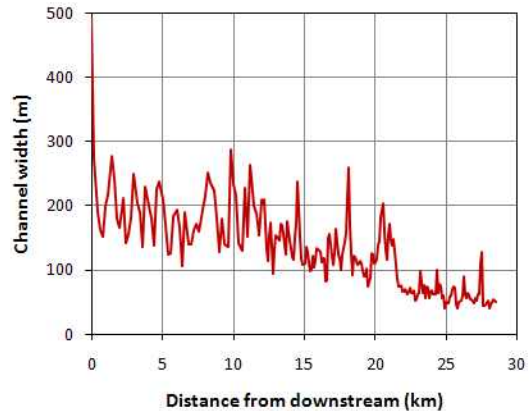
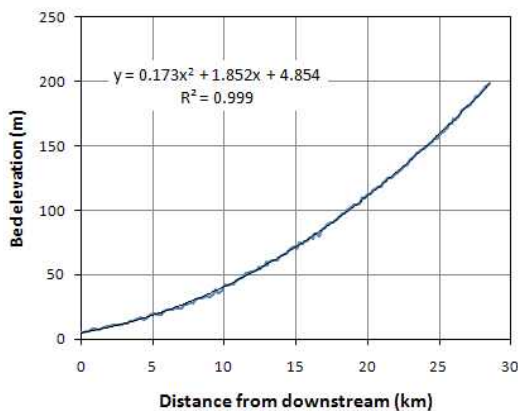


Fig. 2. Longitudinal Bed Elevation and Channel width according to Distance from the Junction of Hoo River and Yangyang Namde River to the Upper Stream in 2002

다. 이 시점을 기준으로 한 상류전체를 산지하천으로 분류했다. 수로 폭은 40~493m의 범위로 상류이동거리에 따라 감소하였다. 양양남대천 유역종합치수계획 보고서(건설교통부 원주지방국토관리청, 2007)에서는 2002년 태풍루사 강우를 고려하여 계획홍수량을 산정하였다. 하천조사 구간내의 합류부 지점별 설계빈도에 따른 홍수량을 Table 1에 제시하였다. 후천부터 어성전천 합류부 전까지는 100년 빈도 계획홍수량을 따르며, 면옥치천과 가잔동지천 합류부 전까지는 80년 빈도의 계획홍수량을 따른다. 만곡부 세부조사 지점은 일정 간격으로 12개(Sec.1~Sec.12) 구간으로 나누고, 각 단면별 횡단방향으로 3~6개소 조사지점을 선정하여 하상재료의 입도를 조사하였다

(Fig. 3). 시험구간 만곡부의 총 종단길이는 500m이고, 세부 구간별 평균 거리는 40.1 ± 16.2 m 범위이며, 횡단 조사 지점 평균거리는 12.1 ± 4.6 m이었다. 만곡부 외측제방 곡률반경은 약 166m 크기였다. 홍수기와 갈수기 현장 조사를 통한 흐름패턴과 하상단면을 살펴본 결과 만곡부 하천 주 흐름 방향은 Fig. 3의 위성영상에 표시한 것과 같았다.

3.2 하상재료 입도

산지하천의 하상재료는 중간 자갈보다 큰 입경으로 이루어져 체분석을 수행하기 어렵기 때문에 격자틀 방법을 이용하였다. 체분석의 경우 누가빈도곡선(cumulative frequency curve)을 이용하여 통과중량 무게에 의한 누가빈

Table 1. The Designed Flood Discharge in Main Channel of Yangyang Namde River

Point of Junction	Longitudinal point	Basin area (km ²)	River length (km)	Design frequency (year)	Flood discharge (m ³ /sec)
Junction of Hoo river	No.1	196.25	48.74	100	1,740
Junction of Jangri stream	No.3~4	144.85	33.96	100	1,410
Junction of Goagy stream	No.4~5	134.42	30.52	100	1,350
Junction of Asungjun stream	No.5~6	109.56	26.71	100	1,130
Junction of Myunoukchi stream	No.9~10	88.06	22.93	80	905
Junction of Gajandonggy stream	No.12~	76.36	19.91	80	800

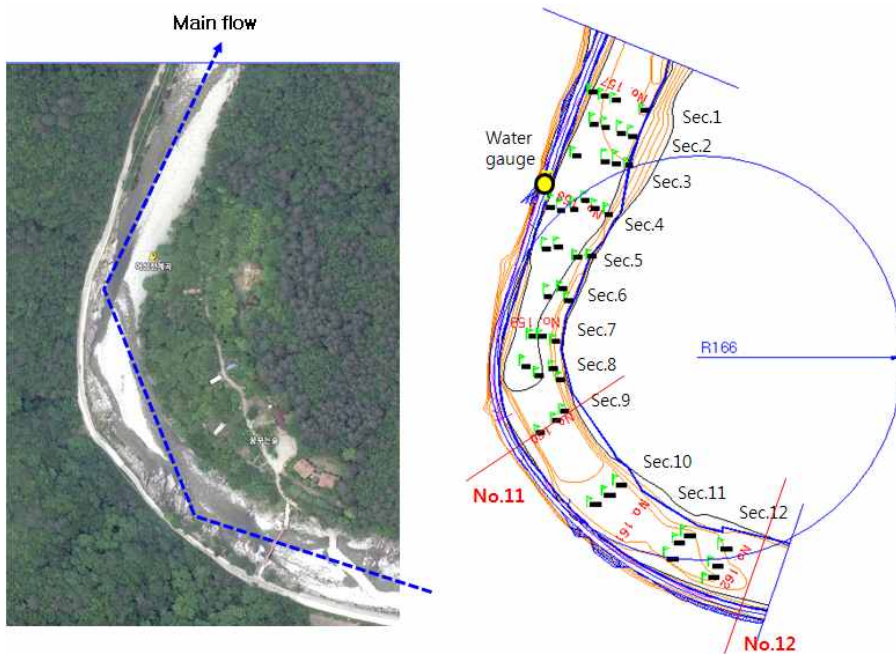


Fig. 3. The Image of Main Flow and Survey Points of Ved Materials in Detail Sections for the Bend of River

도를 고려하는 것이 보편적이거나, 본 연구에서는 격자의 면적에 의한 누가빈도를 고려한다. 크기 1×1 m의 방형틀 내에 5 cm 간격의 줄눈이 있는 격자망을 하상재료 위에 올려놓고 수직 촬영하고, 캐드를 이용하여 각 사립자 크기 등급별로 해치하였다. 사립자 크기는 512~256 mm의 작은 전석(small boulders), 256~128 mm의 큰 호박돌(large cobbles), 128~64 mm의 작은 호박돌(small cobbles), 64~32 mm의 매우 굵은 자갈(very coarse gravel), 32~8 mm의 굵거나 중간 자갈(coarse or medium gravel)로 총 다섯 등급으로 분류하였다. 자갈하상의 소류사에 초점을 두고 있기 때문에 이송 형태가 상이한 8 mm 이하의 입자에 대해서는 고려하지 않는다. 하천종단 하상재료분포를 조사하기 위해 양양남대천과 후천 합류부 지점을 시점(No.1)

으로 상류 27.2 km 지점(No.12)까지 총 12개 종단지점을 측정하였다. Fig. 4는 기준점(No.1)부터 하천 상류거리(L) 14 km, 22 km, 27 km 지점에 대한 하상재료의 입도분포 곡선을 나타낸 것으로 상류로 갈수록 입경이 크게 증가하였다.

만곡부를 포함하는 일정구간에 대한 세부적인 하상재료 분포 조사 또한 위에서 제시한 격자틀 방법에 의해 이루어졌다. 만곡부의 하천 주흐름 분포를 보면, 만곡부 조사지점인 Sec.6~7과 Sec.10~11 두 구간에서 수충흐름(impingement flow)과 반사흐름(reflection flow)이 발생했을 것으로 추정된다. Fig. 5는 만곡부 외측조사 지점 중 집중 흐름이 유도되는 Sec.7-1과 Sec.11-1의 하상재료와 Sec.9-1의 하상재료를 비교하기 위해, 하상재료 영상

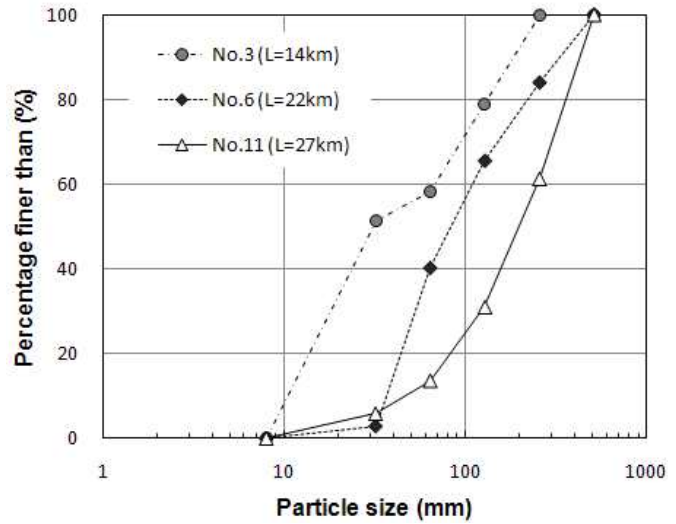
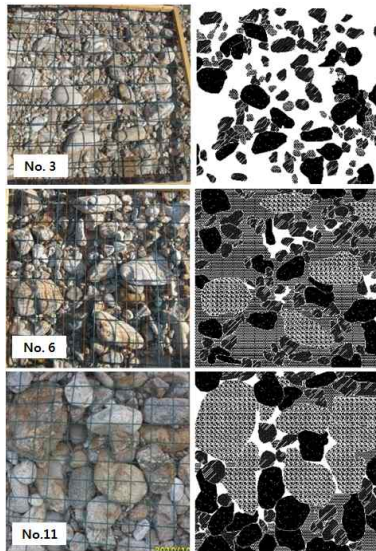


Fig. 4. Grain Size Distribution and Hatch of Bed Materials Surveyed in Longitudinal Points of No.3, No.6, and No.11

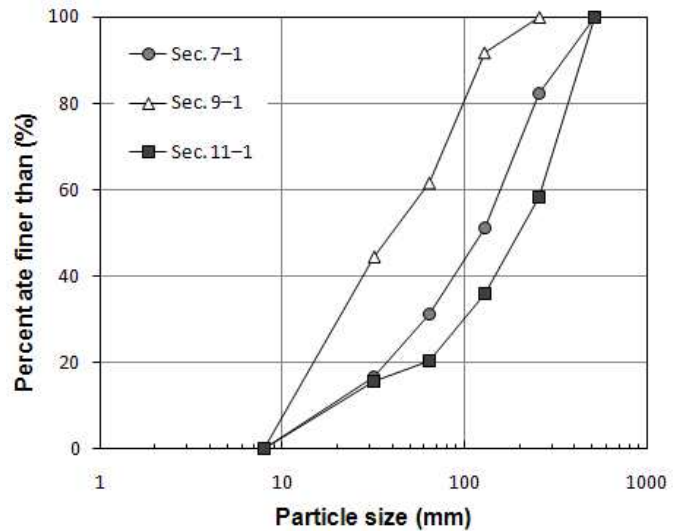
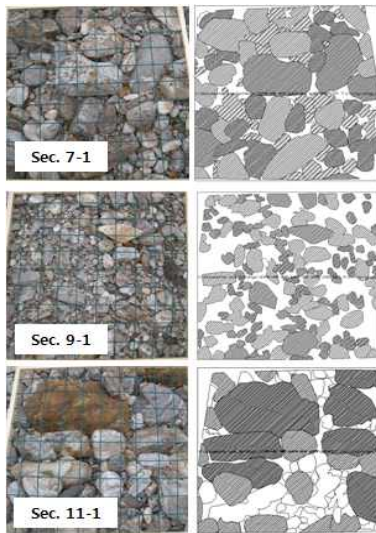


Fig. 5. Grain Size Distribution and Hatch of Bed Materials Surveyed in Outside Points of Meandering Section Such as Sec.7-1, Sec.9-1, and Sec.11-1

과 입도분포곡선을 제시한 것으로 짧은 구간이지만 입도 변화가 큼을 알 수 있다.

4. 하상분포특성

4.1 종단하상분포

하천 종단지점별 자갈 하상재료의 평균입경은 각 입경 등급별 면적비를 가중 평균한 산술평균 방법으로 산정하였다. Table 2는 각 조사지점의 거리, 하상고, 하폭 및 수

로경사에 따른 하상재료의 중앙입경(D_{50}), 평균입경(D_m) 및 등급계수를 나타낸 것이다. 전 구간에 대한 평균입경 범위는 46.4~180.8mm이고, 평균한 결과는 95.2 ± 43.0 mm이었다. 누가면적백분율 50%에 해당하는 입경인 중앙입경치는 각 입경 등급별 면적비를 가중한 평균입경치보다 상대적으로 컸다. 등급계수의 평균치는 2.65로 하도 경사, 하폭 등에 대한 상관관계가 높지 않았다. 실제 하천 종단 구간별 지형적 특성과 구조물 및 암반 등에 의해 소와 여울이 비균일하게 반복적으로 나타나기 때문에 이는

Table 2. Median Diameter, Mean Diameter and Gradation Coefficient according to Distance from Downstream, Bed Elevation, Channel width, and Channel Slope

Point No.	Distance from downstream (km)	Bed elevation (m)	Channel width (m)	Channel slope (m/m)	Median diameter (mm)	Mean diameter (mm)	Gradation coefficient
No. 1	0.0	5.2	493	0.00080	57	52	1.71
No. 2	13.0	57.5	154	0.01300	56	51	1.70
No. 3	14.0	65.0	147	0.00385	30	46	3.28
No. 4	17.0	86.0	108	0.00655	71	56	1.64
No. 5	19.0	104.6	110	0.00920	128	107	2.26
No. 6	22.0	128.6	66	0.00525	82	93	2.59
No. 7	23.0	139.6	62	0.01335	95	93	4.69
No. 8	24.0	148.8	69	0.01130	89	82	2.11
No. 9	25.0	158.7	51	0.01545	180	136	3.25
No. 10	26.0	171.5	52	0.01700	197	152	2.38
No. 11	27.0	180.5	57	0.00915	92	93	3.41
No. 12	27.2	183.4	63	0.01410	280	181	2.78

짧은 중단 거리에도 상이한 입도분포를 보인다. 그러나 전체적으로 하천경사(S)가 증가함에 따라 평균입경은 지수함수($D_m = 46.48 e^{63.01S}$, $R^2 = 0.489$)로 증가하는 관계를 보였고, 하폭(B)은 평균입경과의 회귀식에서 멱함수($D_m = 829.7 B^{-0.499}$, $R^2 = 0.530$) 형태로 감소하였다.

조사한 자갈 하상재료 평균입경을 이용해서 산정한 한계바닥유속의 범위는 1.08~1.98 m/s로 평균 1.47 ± 0.31 m/s이었다. Yang에 의한 완전거친 하상에 대한 평균한계유속은 1.47~2.89 m/s로 평균치는 2.07 ± 0.49 m/s이었으며, 이는 한계바닥유속의 140%정도 크기이다. 하천 구간별 하상경사에 따른 한계바닥유속과 평균한계유속을 Fig. 6과 같이 제시하였다. Yang에 의한 한계단위수류력과 Bagnold의 개념에 따른 자갈하상에 대한 한계수류력을 Fig. 7과 같이 나타내보면, 상류로 갈수록 이들 값은 급격히 증가한다. 한계단위수류력의 범위는 0.0013~0.0451 m/s이고, 평균치는 0.0219 ± 0.0141 이었다. 한계수류력의 범위는 32.4~229.0 W/m²이고, 평균치는 96.3 ± 62.0 W/m²이었다. Shields (1936)의 한계소류력 평가를 위해 2007년 유역종합치수계획 계획홍수량에 근거하여 무차원 소류력과 유사 입경에 대한 레이놀즈수를 산정하였다. Fig. 8에 제시한 Shield 곡선을 보면, 경계 레이놀즈수 대부분이 10,000 이상으로 하상재료가 이송하는 것으로 확인되었다. 그러나 산지하천이 아닌 평지하천에 해당하는 후천

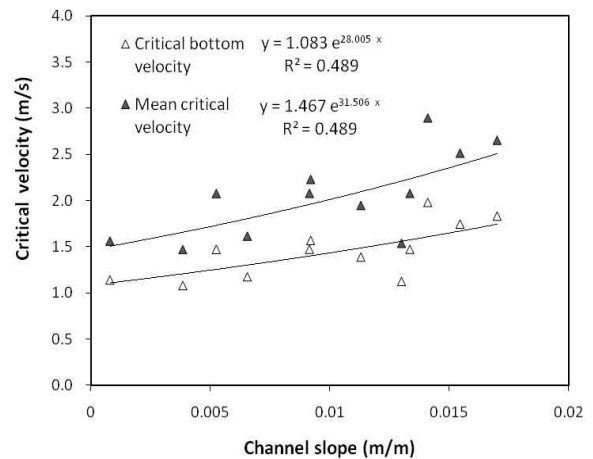


Fig. 6. Distribution of Critical Bottom Velocity (Mavis and Laushey, 1949) and Mean Critical Velocity (Yang, 1973) according to Channel Slope

합류부 지점은 무차원 소류력이 작아 소류사이송이 발생하지 않을 것으로 평가되었다.

4.2 만곡부 하상재료분포

만곡부 세부구간의 12개 중단면에 대한 하상재료의 평균입경을 산정하여 하류기준점부터 상류 이동거리에 따라 나타내었다(Fig. 9(a)). 상류 유입수의 처음 수충부 직상류 지점에 위치하는 Sec.11에서 평균입경이 122.6 ± 29.2

mm로 가장 컸으며, 반사흐름에 의한 2차 수충부 직상류 지점인 Sec.7에서 평균입경 91.6 ± 15.3 mm로 두 번째로 큰 입경을 보였다. 또한 수충부 직하류 지점인 Sec.10과 Sec.5에서 상대적으로 작은 평균입경 크기를 보였다. 이는 수충 직전의 강한 흐름이 만곡의 외측 벽과 충돌하면서 수류력이 급격히 하강하기 때문으로 판단된다. 또한 Sec.10에서 평균입경 표준편차가 상대적으로 가장 컸으며, Sec.6에서는 두 번째로 표준편차가 크게 나타났다. 만곡 외측에서 침식이 활발한 반면, 만곡 내측에는 작은 입경의 토사가 쌓이기 때문에 수충부 직하류에 위치한 횡단면 하상 입경 편차가 컸던 것으로 보인다. 장창래 등 (2004)이 제시한 평지하천 하상재료의 공간적 입도분포 예측 결과에서처럼 내측보다 외측 입경이 상대적으로 컸으며, 하천형태의 공간적 변화가 크고, 경사가 급한 산지

하천 특성 때문에 평지하천보다는 입경분포 패턴이 복잡하고, 상대적인 입경차이는 더 큰 것으로 나타났다. 평균 한계유속을 평균입경으로 산정한 결과 Sec.5에서 1.166 m/s로 가장 작았으며, Sec.11에서 2.383 m/s로 가장 컸다. 유사이송 평가에 있어서 한계소류력보다 한계수류력이 유용한 것이 사실이며, 세부 구간별 한계수류력의 변화는 한계소류력 변화보다 크게 나타났다. Sec.11의 한계수류력은 Sec.10보다 2.67배 그리고 Sec.7은 Sec.5보다 5.14배 컸으며, 약 500 m의 짧은 만곡구간임에도 수충 여부에 따라 한계수류력의 편차가 확연했다(Fig. 9(b)).

공간적인 하상재료 분포를 평가하기 위해, ArcView GIS 3.2를 이용하였다. 종·횡단별 44개 지점의 평균입경 자료를 활용하였다. 횡단 최소 거리를 고려하여 셀 크기는 5.0 m로 하였고, 종단 최대거리를 고려하여 IDW 방법

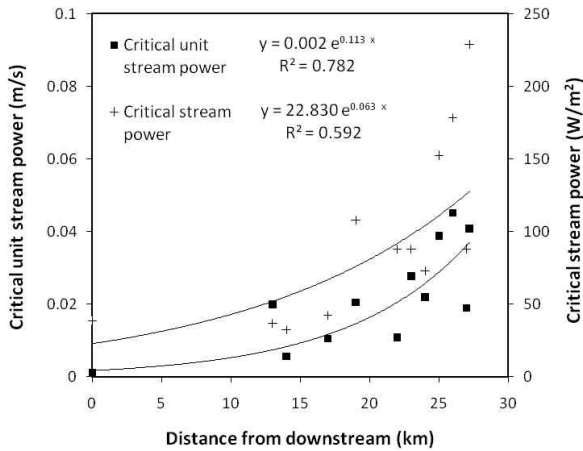


Fig. 7. Critical Unit Stream Power (Yang, 1973) and Critical Stream Power (Petit et al., 2005) for Gravel-bed River according to Distance from Downstream

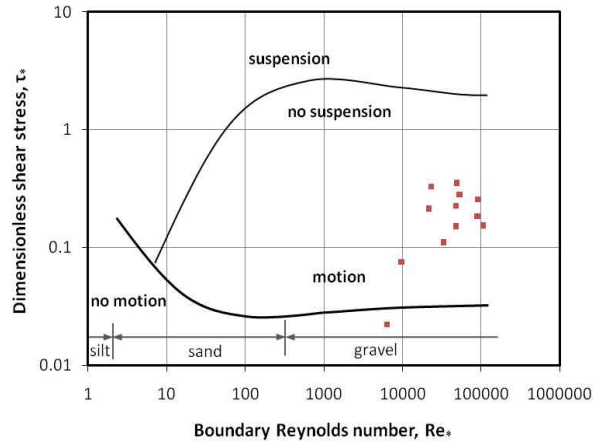
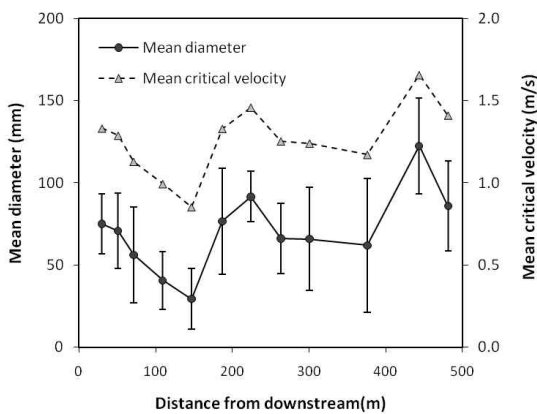
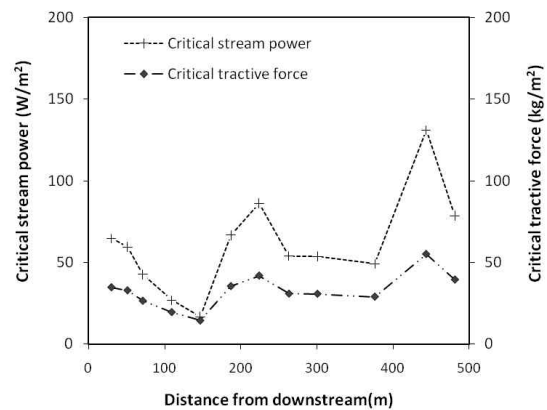


Fig. 8. Shield's Diagram (Shields, 1936) for Gravel Bedload Motion Following Dimensionless Shear Stress Estimated by the Designed Flood Discharge



(a) Mean diameter and mean critical velocity



(b) Critical stream power and critical tractive force

Fig. 9. Changes of Mean Diameter, Mean Critical Velocity, Critical Stream Power, and Critical Tractive Force according to Distance from Downstream

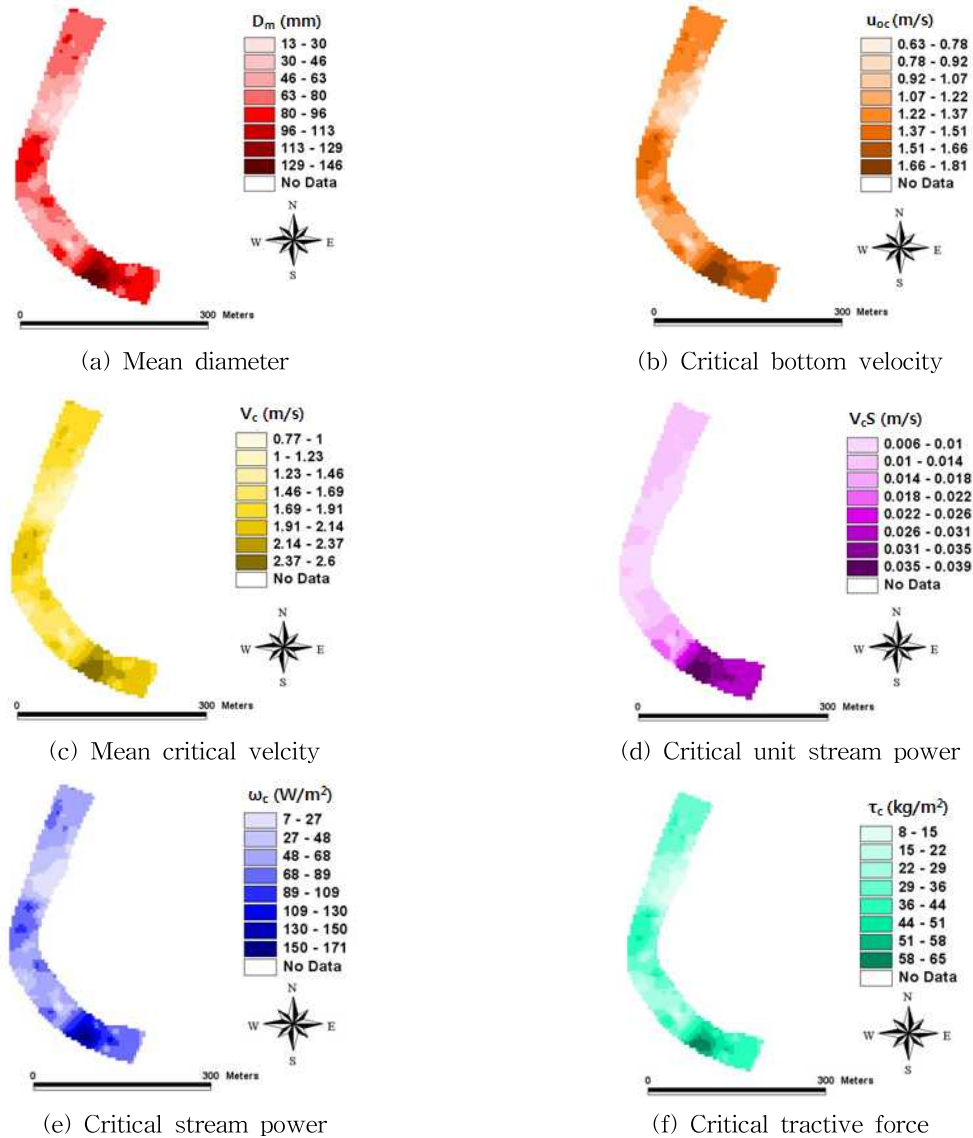


Fig. 10. Distributions of Mean Diameter, Critical Bottom Velocity in the Bend of River, Mean Critical Velocity, Critical Unit Stream Power in the Bend of River, Critical Stream Power, and Critical Tractive Force in the Bend of River

에 의해 고정반경 50m로 보간하였다. Sec.10인 단면에서 하상재료 입경이 크게 나타났다. 1차 수충부 지점이면서, 암반노출에 의한 하천단면 축소로 소류력이 크게 작용했을 것으로 보인다. 또한 수충 흐름 직후 입경크기가 급격히 작아짐을 확인할 수 있었다(Fig. 10(a)). 한계바닥유속 분포도 평균입경 분포와 비슷한 결과를 제시했다(Fig. 10(b)). 평균한계유속은 최소 0.77 m/s에서 최대 2.60 m/s의 범위였으며, 평균한계유속과 경사의 곱에 의해 산정되는 한계단위수류력은 경사가 급한 1차 수충부 지점에서 유난히 큰 분포를 보였다(Fig. 10(c), (d)). 한계수류력 및 한계소류력은 만곡부 수충 지점에서 최대 171 W/m²와 65 kg/

m²의 값을 갖는다(Fig. 10(e), (f)). 하상재료의 평균입경 및 한계수류력은 하천 횡단보다는 종단에 따른 변화가 뚜렷했다. 위성영상(Fig. 3)의 주요 흐름 패턴과 마찬가지로 만곡부 외측 1차 수충지점과 반사흐름 2차 수충지점에서 한계수류력이 크게 작용하는 것으로 평가되었다. Deroanne (1995)은 유역면적이 219 km²이고, 경사는 0.0170이며, 유사 입경이 70~230 mm인 Höegne 하천에서 만수 위시 한계수류력이 160 W/m²임을 제시하였다. 또한 유역면적이 354 km², 경사는 0.0021이며, 유사입경이 25~70 mm 범위인 Mehaigne 하천에 대해서는 41 W/m²의 한계수류력이 발생하였다(Perpinien, 1998). 양양 남대천 하도



Fig. 11. The Rough Flow by Flood of Heavy Rain in Experimental Section of the Meandering River (June/09/2009)

경사와 하상재료 입경을 고려해 보았을 때, 자갈 하상재료 분포에 따른 한계수류력의 범위는 유역면적이 비슷한 Höegne 하천의 범주와 비슷했다. 본 하천의 한계수류력을 평가하기 위해 Petit et al. (2005)이 제시한 중간크기의 하천인 Höegne-Mehaigne의 입경에 따른 한계수류력 산정식을 이용한 것은 타당한 것으로 평가되었다.

5. 고찰

강원지역 영동 및 영서의 대표 산지하천 시험유역은 우량, 수위, 유속 및 유량 등의 기초 수문자료를 장기적으로 구축하기 위해, 우량관측소 및 수위관측소들이 설치 운영되고 있으며, 지속적인 관측 자료의 관리가 이루어지고 있다(최홍식 등, 2011). 양양남대천 시험유역의 만곡부 세부조사 구간인 법수치 철교에서 2009년 7월 9일에 발생한 집중호우에 의한 최대 유속을 측정하였다. 조사 구간에 설치한 우량계에서 측정된 일강우량은 194.0 mm이었고, 1시간 최대강우강도는 33.5 mm/hr이었다. 이는 속초지역 확률강우강도(건설교통부, 2000) 3년 빈도에 해당하는 규모이다. 침두유량은 316.4 m³/s, 평균유속은 5.37 m/s로 최대수류력을 산정한 결과 906 W/m²이었다. 이는 하상 평균입경에 따른 수층부의 최대 평균한계유속이 2.6 m/s라는 점을 감안할 때, 두 배 이상의 유속이며, 최대 한계수류력 171 W/m²의 다섯 배 이상의 수치였다. 실제 홍수 시에 촬영한 만곡부 구간의 영상을 보면, 특히 만곡 외측에서 난류에 의해 거친 흐름이 발생하였다(Fig. 11). 또한 빠른 유속의 하천흐름은 유사 이송과 하상형태 저항에 의해 에너지 손실이 크게 발생하여 흐름소음이 대단히 컸다. 강한 난류흐름은 실제 하상재료의 한계조건에 따른 움직임의 효율을 증가시키며 물과 유사의 혼합흐름을 만드는데

더욱 기여했을 것이다. Table 1에서 제시한 먼옥치천과 가잔동지천 합류부의 80년 빈도의 계획홍수량과 고려해보면, 이 당시의 홍수량은 37%의 규모에 해당하였다. 만약 설계빈도의 강우가 발생한다면, 만곡부 수층지점의 하상세굴과 인접도로의 홍수범람은 불가피 했을 것으로 보인다.

6. 결론

자갈하상으로 이루어진 산지하천 종단 구간에 대한 하상재료의 평균입경을 조사하였다. 또한 만곡부를 포함하는 일정구간에 대해 중·횡단별 세부 하상재료 분포에 따른 한계수류력을 평가하였다. 비균일 하상 재료의 만곡부에서 부정류에 의한 하상형태 변화와 재료의 분급 현상에 대한 기존 연구결과와 마찬가지로 하상재료의 공간적 분포특성을 통해 만곡부 내측의 퇴적과 외측의 지속적인 침식으로 입자가 굵어짐을 확인하였다. 또한 만곡부 외측의 수층지점을 중심으로 하상 입경의 크기가 급변함을 확인할 수 있었다. 조사 및 분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 산지하천 종단 지점에 대한 자갈하상재료 평균입경에 따른 Yang의 한계단위수류력과 Bagnold의 한계수류력은 상류로 갈수록 급격히 증가했다.
- 2) 계획홍수량 자료에 근거하여 Shield's 도표 무차원 전단응력을 산정한 결과 최하류 지점을 제외한 나머지 조사지점에서 하상재료가 소류사 형태로 이동할 것으로 평가되었다.
- 3) 만곡부를 포함하는 일정구간에 대한 평균입경은 상류 유입수의 처음 수층부 직상류 지점에서 122.6 ± 29.2 mm로 가장 컸으며, 반사흐름에 의한 2차 수층부 직상류 지점에서 평균입경 91.6 ± 15.3 mm로 두

번째 컸다.

- 4) 수층부 직하류 지점들에서 상대적으로 작은 평균입경을 보였는데, 이는 수층 직전의 강한 흐름이 만곡 외측벽과 충돌하면서 수류력이 급격히 저하되기 때문이다.
- 5) 일정구간 만곡부의 평균한계유속 분포는 최소 0.77 m/s에서 최대 2.60 m/s의 범위를 보이며, 한계단위 수류력 분포는 경사가 급한 1차 수층부 지점에서 유난히 큰 값을 보였다.
- 6) 한계수류력 분포는 유사입경 20~230 mm이면서 유역면적 40~500 km²인 하천에서 평가한 범위에 해당하는 7~171 W/m²를 값을 보였으며, 만곡 외측 수층부에서 상대적으로 큰 분포를 보였다.

만곡부의 하상재료 입도분포에 따른 한계조건에 대한 유속, 소류력, 수류력의 정량적인 결과와 공간상 상대적 비교를 통해 파악한 한계운동의 분포특성은 유사이송 및 하상변동 예측모형의 기초 자료로 사용 가능하며, 실제 국내 산지하천 소류사 이송 특성에 관한 연구와 모형 개발에 있어서 비교 검토 가능한 자료로 활용될 것이라 사료된다. 추후 다양한 유량변화에 따른 소류사 이송특성을 제대로 파악하기 위해서는 홍수 시에 직접적으로 소류사를 측정하는 것이 필요하다. 따라서 소류사를 정량적으로 안전하게 측정하기 위한 방법을 개발하고, 실제 하천에 적용함으로써 국내 산지하천 유사이송 특성을 파악하기 위한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호# '08 지역기술혁신 B-01)의 지원에 의하여 이루어진 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부(2000). 한국 확률 강우강도 작성.
 건설교통부 원주지방국토관리청(2007). 양양남대천수계 유역종합치수계획 보고서.
 박상덕, 신승숙(2011). "산지하천 만곡수층부의 특성과 편수위 저감방안." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제44권, 제11호, pp. 24-30.
 우효섭(2001). 하천수리학. 청문각.
 장창래, 정관수, 김재한(2004). "혼합사로 구성된 하천에서 하상변동 및 유사의 입도분포 계산을 위한 수치모형 개발."

한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 387-395.
 장창래, 우효섭(2009). "대청댐에서 증가방류에 의한 하상토의 변화 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제10호, pp. 845-855.
 최홍식, 이승규, 지민규, 김시훈(2011). "산지하천 시험유역(영동·영서)." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제44권, 제11호, pp. 12-17.
 Bagnold, R.A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics*. U.S., Geological Survey Professional Paper, 422-J.
 Bagnold, R.A. (1980). "An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers." *Proceedings of the Royal Society of London, A* 372, pp. 453-473.
 Bagnold, R.A., (1977). "Bedload transport by natural rivers." *Water Resources Research*, Vol. 13, pp. 303-312.
 Bravard, J.P. (1991). *La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux: quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières?* Vol. 7, La Houille Blanche, pp. 515-521.
 Brookes, A., (1988). *Channelized Rivers: Perspectives for Environmental Management*. Wiley, Chichester, p. 326.
 Buffington, J.M., and Montgomery, D.R. (1999). "Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 11, pp. 3507-3521.
 Costa, J.E. (1983). "Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front range." *Geological Society of American Bulletin*, Vol. 94, pp. 986-1004.
 de Jong, C., and Ergenzinger, P. (1995). *Interrelations between mountain valley form and river bed arrangement*. (Ed) O. Hickin, River Geomorphology, J. Wiley & Sons, Ch. 4, pp. 55-91.
 Deroanne, C. (1995). *Dynamique fluviale de la Hoëgne. Evaluation longitudinale des caractéristiques sédimentologiques du lit et des paramètres de mobilisation de la charge de fond*. Mémoire de Licence en Sciences géographiques, Univ. Liège, p. 155.
 Ferguson, R.I. (1981). *Channel forms and channel changes*.

- In: Lewin, J. (Ed.), *British Rivers*, G. Allen & Unwin, London, pp. 90-125.
- Ferguson, R.I. (2005) "Estimating critical stream power for bedload transport calculations in gravel-bed rivers." *Geomorphology*, Vol. 70, pp. 33-41.
- Fortier, S., and Scobey, F.C. (1926). "Permissible Canal Velocities." *Transactions*, ASCE, Vol. 89, No. 1, pp. 940-956.
- Gob, F., Petit, G., Bravard, J.-P., Ozer, A., and Gob, A. (2003). "Lichenometric application to historical and subrecent dynamics and sediment transport of a Corsican stream (Figarella River-France)." *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, pp. 2111-2124.
- Hassan, M.A., and Church, M. (2000). "Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 7, pp. 1885-1895.
- Jacob, N., (2003). *Les vallées en gorges de la Cévenne vivaraise, Montagne de sable et château d'eau*. Thèse de Doctorat, Univ. Paris IV Sorbonne, p. 460.
- Jarrett, R.D. (1992). Hydraulics of mountain river, in Yen, B.C. ed., *Channel flow resistance-centennial of Manning's formula: International conference for the centennial of Manning's and Kuichling's rational formula*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp. 287-298.
- Mavis, F.T., and Laushey, L.M. (1949). "Formula for velocity at beginning of bed-load movement is reappraised." *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 19, No. 1, pp. 38-39 and 72.
- Maynard, S.T. (1993). *Flow Impingement, Snake River, Wyoming*, Technical Reports, HL-TR-93-9.
- Meyer-Peter, E., and Müller, R. (1948). *Formulas for bed-load transport*. Proc. 3rd Meeting of IAHR, Stockholm, pp. 39-64.
- Perpinien, G. (1998). *Dynamique fluviale de la Meuse: morphométrie, transports en solution et suspension, mobilisation de la charge de fond*. Mémoire de Licence en Sciences Géographiques, Univ. Liège., p. 128.
- Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G., and Assani, A.A. (2005). "Critical specific stream power in gravel-bed rivers." *Geomorphology*, Vol. 69, pp. 92-101.
- Powell, D.M., (1998). "Patterns and processes of sediment sorting in gravel-bed rivers." *Progress in Physical Geography*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-32.
- Rice, S.P., and Church, M. (1996). "Sampling fluvial gravels: bootstrapping and the precision of size distribution percentile estimates." *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 66, pp. 654-665.
- Rubey, W.W. (1933). "Setting Velocities of Gravel, Sand, and Silt Particles." *American Journal of Science*, Vol. 25, pp. 325-338.
- Shields, I.A. (1936). *Anwendung der ahnlichkeitmechanik und der turbulenzforschung auf die gescheibebewegung*, Mitt. Preuss. Ver.-Anst., 26, Berlin, Germany.
- Talapatra, S.C., and Ghosh, S.N. (1983). "Incipient Motion Criteria for Flow Over a Mobile Bed Sill." *Proceedings of the 2nd International Symposium on River Sedimentation*, Nanjing, China, pp. 459-471.
- Williams, G.P. (1983). "Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments." *Geografiska Annaler*, Vol. 65A, pp. 227-243.
- Wohl, E. (2000). "Mountain Rivers." *American Geophysical Union, Water Resources Monograph*, Vol. 14, p. 320.
- Yang, C.T. (1973). "Incipient Motion and Sediment Transport." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 10, pp. 1679-1704.
- Yang, C.T. (2003) *Sediment transport theory and practice*. Kireper. publishing company Malabar, Florida.
- Yeh, K.C., and Kennedy, J.F. (1993). "Moment Model of Nonuniform Channel-Bend Flow. II : Erodible Beds." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 7, pp. 796-815.

논문번호: 11-065	접수: 2011.06.16
수정일자: 2011.10.06/11.26	심사완료: 2011.11.26