



An application of image processing technique for bed materials analysis in gravel bed stream: focusing Namgang

Kim, Ki Heung^{a*} · Jung, Hea Reyn^a

^aDepartment of Civil Engineering, Gyeongsang National University of Science and Technology

Paper number: 18-019

Received: 28 February 2018; Revised: 11 May 2018 / 15 May 2018; Accepted: 15 May 2018

Abstract

The riverbed material survey is to investigate the particle size distribution, specific gravity, porosity, etc. as basic data necessary for river channel plan such as calculation of sediment transport and change of river bed. In principle, the survey spots are 1 km interval in the longitudinal direction of the river and 3 points or more in the 1 cross section. Therefore, depending on longitudinal length of the river to be investigated, the number of surveyed sites is very large, and the time and cost for the investigation are correspondingly required. This study is to compare the particle size analysis method with the volumetric method and the image analysis method in work efficiency and cost and to examine the applicability of the image analysis method. It was confirmed that the diameter of the equivalent circle converted by the image analysis method can be applied to the analysis of bed material particle size. In the gravel stream with a particle size of less than 10 cm and a large shape factor, the analytical result of the bed material by the image analysis method is accurate. However, when the shape factor decreases as the particle size increases, the error increases. In addition, analysis results of the work efficiency and cost of the volume method and the image analysis method showed a reduction of about 80%.

Keywords: Bed materials, Particle size distribution, Sediment transport, Volumetric method, Work efficiency

자갈하천의 하상재료분석을 위한 화상해석법 적용: 남강을 중심으로

김기흥^{a*} · 정혜련^a

^a경남과학기술대학교 토목공학과

요 지

하상재료 조사는 유수량 계산 및 하상변동과 같은 하도 계획에 필요한 기초 자료로서 입도분포, 비중, 다공성 등을 조사하는 것이다. 원칙적으로, 조사 지점은 하천 종단 방향으로 1 km 간격이고 하나의 횡단면에 3 개 이상이다. 따라서 조사 대상 하천의 종단 길이에 따라 조사 지점이 아주 많아 지기 때문에 조사에 소요되는 시간과 비용이 상당히 증가한다. 본 연구는 입도분석법인 체적법과 화상해석법의 작업 효율성과 비용을 비교하고, 화상해석법의 적용 가능성을 검토하였다. 화상해석법에 의하여 환산된 등가원의 직경이 하상재료 입도분석에 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한, 체적법과 화상해석법의 작업효율성과 비용을 분석한 결과 약 80%의 절감효과가 있음을 입증하였다.

핵심용어: 하상재료, 입도분포, 유수수송, 체적법, 작업 효율성

*Corresponding Author. Tel: +82-55-751-3294
E-mail: khkim@gntech.ac.kr (K. H. Kim)

1. 서론

하상재료 조사는 유사 이동량이나 하상변동 계산 등 하도의 계획·설계에 필요한 하도특성의 나타내는 자료로서 입도 분포, 비중 및 공극률 등의 조사를 수행하는 것이다. 하상재료의 입도 특성 자료를 확보하기 위해서는 현지 조사, 시료 채취, 운반, 건조 및 실험실에서 체분석까지 상당한 비용과 시간을 필요로 하는 작업이다. 또한 접근이 어려운 산지하천의 하상재료 입도분포 조사는 상상을 초월하는 어려운 작업이며, 다수 지점에서의 정확한 입도 조성을 구하는 것은 극히 어려운 일이다. 하천사업과 관련된 계획 및 설계에서는 하상재료 조사를 수행하고 있으나 일반적으로 체분석 방법에만 의존하고 있다. 따라서 하상재료의 종단적 분포특성을 고려하지 않고 체분석이 가능한 지점의 하상재료를 채취하여 분석함으로써 수리계산에서 적용되는 조도계수와 하상재료 분석결과가 불일치하거나 하상변동예측 결과의 신뢰성도 저하되는 것이 현실이다.

자갈 이상의 굵은 하상재료는 면적격자와 선격자 중 현장 조건에 맞는 방법을 택한다. 면격자 방법은 일정한 크기의 눈금 망으로 된 사각형 틀을 하상에 임의로 놓고 사진을 찍어 그 격자망의 눈금에 걸리는 자갈들의 입경을 분석하는 방법이다 (KWRA, 2009).

하상재료 조사지점은 원칙적으로 하천의 종단방향에 대하여 1 km 간격으로 단면 1개소에 3개 지점 이상이므로 조사대상 하천의 연장이 긴 하천에서는 조사지점 수가 많이 늘어나게 되고, 한 번에 채취하는 시료의 양 $M(kg) = 0.082 D_b^{1.5}$ (D_b 는 시료 중 최대 입자의 중간축 직경(mm)로 산정하며, 시료 채취는 표면 시료만 채취하면 되지 않고 충분히 깊은 부분까지 채취한다(KWRA, 2009).

일반적으로 자갈은 2~64 mm의 입경범위를 가지는데 이것은 2~8 mm를 잔자갈(fine gravel), 8~16 mm를 중간자갈 (medium gravel) 및 16~64 mm를 굵은 자갈(coarse gravel)로 분류하며, 호박돌(cobble)의 입경은 64~256 mm의 범위로서 64~128 mm의 잔 호박돌과 128~256 mm의 굵은 호박돌로 분류한다. 또한 전석(boulder)은 256~4,096 mm의 범위에서 256~512 mm를 작은 전석(small boulder), 512~1,024 mm를 중간 전석 (medium boulder) 및 1,024~4,096 mm를 큰 전석 (very large boulder)으로 분류한다(Lane, 1947). 자갈 이상의 하상재료 입도분석을 수행하기 위해서는 일정 두께의 하상을 굴착한 후 채취하여 운반해야 하는 시료량은 최소 0.23 kg (직경 2 mm), 42 kg (64 mm) 및 336 kg (직경 256 mm) 범위로 채취 및 운반 작업이 어렵고, 직경 100 mm 이상인 하상재료는

실험실에서의 체분석은 더욱 곤란한 경우가 많다. 자갈의 입경분포 해석을 위한 체분석은 여러 가지 측면에서 한계가 있으므로 면적격자(1 m × 1 m)와 화상해석법을 이용할 경우 이러한 문제점들을 해소할 수 있다.

하상재료 조사는 자갈 이상, 모래, 실트 이하로 나누어 각기 시료 채취 방법과 분석 방법을 달리하며, 현장에서 적절한 방법으로 시료를 채취하고, 실험실에서 분석한 후, 그 결과를 일목요연하게 정리하는 사항으로 구분한다(KWRA, 2009). 자갈하천의 하상재료조사법은 용적샘플링법과 표층샘플링의 2가지로 분류할 수 있으며, 호박돌(64~256 mm)과 같이 큰 입경이 혼합 분포하는 하상에서 용적샘플링법은 재료채취의 관점에서 적절한 방법이라고 할 수 없으므로 표층샘플링법이 이용되고 있다. 표층샘플링법은 면적격자법, 선격자법, 평면 채취법 및 사진측정법으로 분류되며, 실제적으로는 면적격자법과 선격자법이 이용되는 데 그 차이는 주로 격자 설정방법이다(Kristin *et al.*, 2001). 또한, 표층샘플링에서는 입도분포가 연직방향으로 균일하다는 것을 가정하고 있다. 면적격자법, 선격자법으로서 조사한 결과는 개수(個數)밀도를 누가하는 것으로서 용적샘플링법에 있어서 입경누가곡선에 일치하지만 그 점에 관해서는 연직방향의 불균일성은 검정되지 않고 있다.

하상재료 채취방법 중 자갈하상에 적용하는 방법으로 하상의 일정면적에 분사페인트로 표시하고 페인트가 묻은 시료를 채취하는 면적채취 방법(Lane and Carlsaaon, 1953)과 임의로 걸거나 손 뺀치기에 의한 시료채취 방법(Wolman, 1954; Leopold, 1970), 사진 촬영방법(Litter, 1969; John, 1979) 그리고 일정한 크기의 격자 틀을 놓고 격자점 아래에 걸리는 자갈을 채취하는 면적격자 시료채취 방법(Kellerhals and Bray, 1970)과 면적격자법·선격자법 및 화상해석법을 병용하는 방법(Lucas *et al.*, 2007; Butler *et al.*, 2001; Rubin, 2004; Graham *et al.*, 2005) 등이 있다. Butler *et al.* (2001)은 디지털 이미지에서 입경 데이터를 자동으로 추출하여 경사 및 기복 등 기하학적 왜곡을 보정한 후 2차원 평면 타원의 입경을 추정하고 체분석 결과와 비교하여 그 적용성을 검증하였다. Lucas *et al.* (2007)은 디지털 이미지를 이용한 AGS (Automated Grain Sizing)을 입경표준격자법(standard grid)과 무작위 자갈계수법(random-walk pebble counts)을 비교하여 디지털 이미지해석법이 타당함을 입증하였고, 디지털 이미지해석법의 문제점인 3차원 입자를 2차원으로 해석함에 있어 현장에 따라 다소의 차이는 있겠지만 입자의 단축이 80% 이상 하상에 수직으로 배치된다는 사실을 확인하여 단축이 이미지에 수직이라는 가정의 타당성을 입증하였다.

국내에서는 2005년 이후 조립토 및 골재의 입자 형상분석 및 입경분포를 위하여 디지털 이미지 처리기법에 대한 연구를 수행하였고(Hwang *et al.*, 2005, 2007, 2010), 이미지 처리 공개 소프트웨어인 ImageJ를 활용하여 자갈하상의 입경분포를 수행하는 연구를 수행한 바 있다(Cho, 2014; Yoo, 2016).

이와 같이 2000년 이후부터 하상재료의 입경분석을 위하여 디지털 이미지 처리기법이 다양하게 개발되고 보완되었으며, 최근에는 공개된 소프트웨어를 활용할 수 있으므로 실무에서의 쉽게 적용할 수 있도록 해야 한다.

본 연구는 하상재료 분석 시 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있는 디지털 이미지 처리기법을 실무적으로 적용하기 위한 방법을 검토한 것이며, 실험실에서 체분석에 의한 입도 분석이 곤란한 평균입경 100 mm 이상의 자갈 하천을 대상으로 공개 소프트웨어인 ImageJ를 이용하여 하상재료의 입경 분포 특성을 분석하였다. 특히, 하상재료 조사의 효율향상, 비용절감을 위한 방안으로 디지털 이미지 처리기법에 의한 입도 분석 방법의 가능성에 대해서 검토하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 실험실에서 체분석에 의한 입도분석이 곤란한 자갈 하천을 대상으로 면적격자법과 화상해석법을 병용하여 하상재료 특성을 분석하였다. Fig. 1은 본 연구에서 이용한 면적격자 화상해석에 의한 하상재료조사(이하 화상해석법이라 칭함)의 수순을 나타낸 것이다. 지금까지의 하상재료 조사와 큰 차이점은 하상재료를 채취하지 않고 현장에서 하상에 설치한 면적격자내에 분포하는 하상재료의 사진을 촬영하고, 화상해석법을 이용하여 반자동적으로 입경가적곡선 및 대표입경을 구하는 것이다. Table 1은 화상해석법의 적용에 사용된 장비와 소프트웨어를 나타낸 것이다.

하상재료 조사는 하천기본계획의 수립 시 조도계수 추정 및 하상변동 예측과 하천(복원)사업의 실시설계에서 하천환경의 물리조사 또는 모니터링 수행 시에 반드시 조사되고 분석되어야 한다. 그러나 현실적으로 자갈 이상의 하천에 대한 하상재료 조사 및 분석은 체분석을 적용해야 한다는 고정관념으로 인하여 하도의 현황과 다른 체분석이 가능한 시료를 채취하여 분석하고, 자료를 제시함으로써 하천조사 자체를 왜곡시키고 있다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위해서 앞에서 언급한 선행연구들은 체분석이 불가능한 자갈 이상의 하천에 대한 하상재료 조사 및 분석기법으로서 화상해석법의 적용성을 검증하였다. 본 연구에서는 자갈하천인 남강 12개

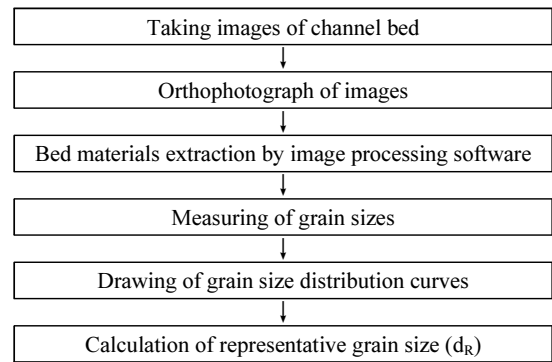


Fig. 1. Flow chart for application of image processing technique

Table 1. Survey equipment and analysis software

Equipment	Specification	
Camera	Model	Mobile phone camera (Galaxy Note-II)
	Resolution	8,000,000 pixels
Standard grid	Material	Stainless steel frame
	Dimension	1000 × 1000 × 200 mm
Software for image analysis	Software name	Image J
	Version	Windows
	Feature	8,000,000 pixels

지점, 왕피천 9개 지점 및 섬진강 2개 지점을 선정하고 하상재료 분석 절차에 따라 수행함에 있어서 소요되는 인력 및 시간을 기준으로 실무 적용성을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 사진촬영과 화상해석법

3.1.1 하상의 사진촬영

하상의 사진촬영은 800만 화소 이상의 전용카메라 또는 스마트폰 카메라를 활용할 수 있으며, 사진촬영면의 범위를 결정하기 위하여 가장자리를 스테인리스 각재로 용접된 1 m × 1 m 면적격자를 사용한다(Fig. 2(a)).

3.1.2 촬영화상의 보정

촬영한 사진은 Fig. 2(a)와 같이 비스듬히 촬영되기 때문에 스케일의 왜곡을 화상처리 소프트웨어를 사용하여 Fig. 2(b)와 같이 정방향으로 정사하여 촬영시의 왜곡을 보정한다. 왜곡을 보정한 사진을 화상해석법을 이용하여 처리하면 Fig. 2(b)의 우측의 이미지가 생성된다(Kim *et al.*, 2016).

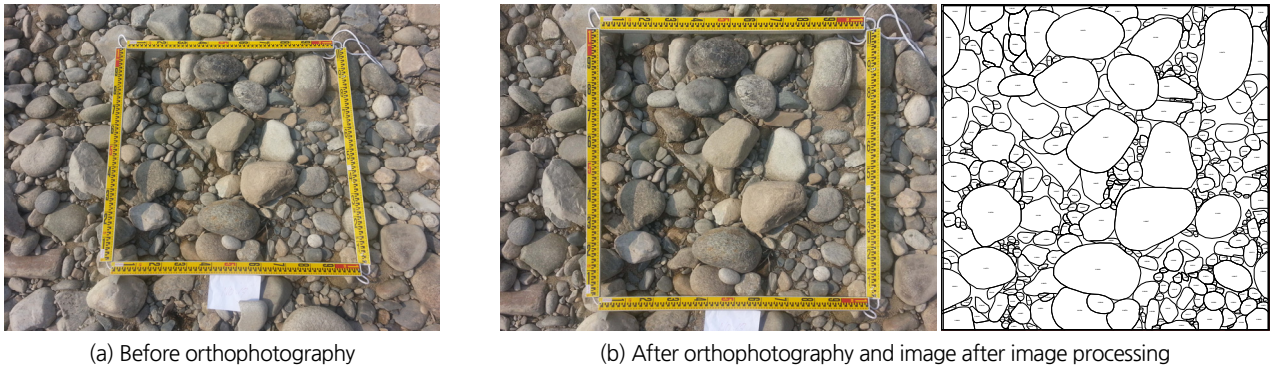


Fig. 2. Photographs of image processing

3.1.3 화상해석 소프트웨어에 의한 하상재료의 추출

「3.1.2 촬영화상의 보정」에서 얻어진 하상재료의 가장자리(edge)를 강조한 화상으로부터 하상재료의 각 입자의 윤곽을 추적하여, 각각의 측정대상을 검출한다(Fig. 2(b)). 검출된 하상재료에는 자동적으로 고유번호가 부여된다. 하상재료의 윤곽상에서 명암 차이가 강한 점(point)(예를 들면 하상재료의 음영이나 다른 하상재료와 접하는 점)은 화상 노이즈(noise)로 되어 올바른 추적을 곤란하게 하는 경우가 있다. 이러한 경우는 정사사진과 화상처리 화상을 확인하여 작업자가 수동으로 보정하여야 한다(Takuya *et al.*, 2000).

3.1.4 입경의 추정

추출된 하상재료의 각 입자에 대하여, 평균입경, 최대입경, 최소입경을 자동 계측한다. 또한, 화상해석 소프트웨어에서는 그 외의 항목으로서 면적, 원상률(circularity) 및 환률(roundness) 등도 계측이 가능하다. 화상해석기법의 장점은 입도분포의 특성을 나타내는 균등비, 균등계수 및 곡률계수 등도 산정할 수 있다.

또한 입경가적곡선을 작성하기 위해서는 하상재료의 체적과 무게가 필요하다. 그래서 일반적인 하상재료의 형상을 회전타원체로 간주하여 회전축방향의 직경은 계측된 최대입경, 회전축에 직각방향의 직경은 계측된 최소입경으로 가정하고, 각 하상재료의 체적을 추정할 수 있다.

Kumara *et al.* (2012)은 2차원 화상에서 타원, 직사각형, 원과 같은 다른 모양의 영향을 자갈의 입도곡선(gradation curve)으로서 기술했으며, 체분석을 통해 타원 형상이 대표 입도곡선을 제공한다는 것을 발견했다. 따라서 이 논문에서 수행된 화상 분석에서 입도곡선은 입자에 대한 타원형을 사용하여 결정하였다.

또한, Fig. 3과 같은 회전타원체의 체적 V 는 Eq. (1)과 같다.

$$V = \frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{a}{2}\right) \times \left(\frac{b}{2}\right) \times \left(\frac{c}{2}\right) \tag{1}$$

여기서, a 는 회전축방향의 장축 직경이고, b 는 회전축의 직각방향의 중축 직경이다.

타원의 면적(장축과 중축으로 형성되는) 입자의 표면적 A 는 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있으므로 체적 V 는 Eq. (3)으로 나타낼 수 있으며, 화상해석에서 단축 직경 c 는 직접 측정할 수 없다.

$$A = \pi \times \left(\frac{a}{2}\right) \times \left(\frac{b}{2}\right) \tag{2}$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{3}$$

모든 입자가 동일한 화상에 있기 때문에, 입자의 형상 특성이 동일하다고 가정할 수 있을 것이다. 그러므로 등가원의 직경 d 는 Eq. (3) 같이 결정될 수 있으며, 평균입경은 $\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}$ 에 의하여 산정할 수 있다. 화상해석법에 의한 하상재료 분석

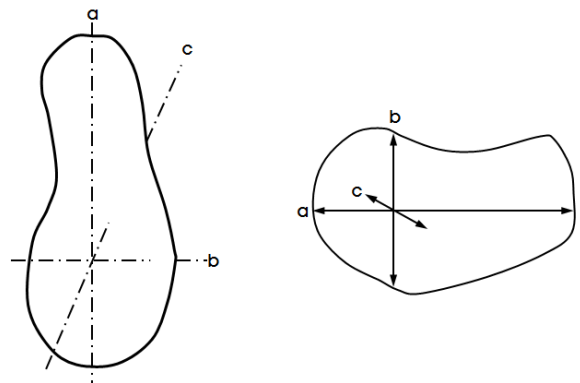


Fig. 3. Definition of particle axes

Table 2. Characteristics of samples (191 samples)

Long axis (mm)			Middle axis (mm)			Short axis (mm)			Weight (g)			Shape factor		
Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min	Mean	Max.	Min	Mean	Max.
10	111	530	7.0	80	480	3	51	250	1.89	2958	64,160	0.21	0.55	0.92

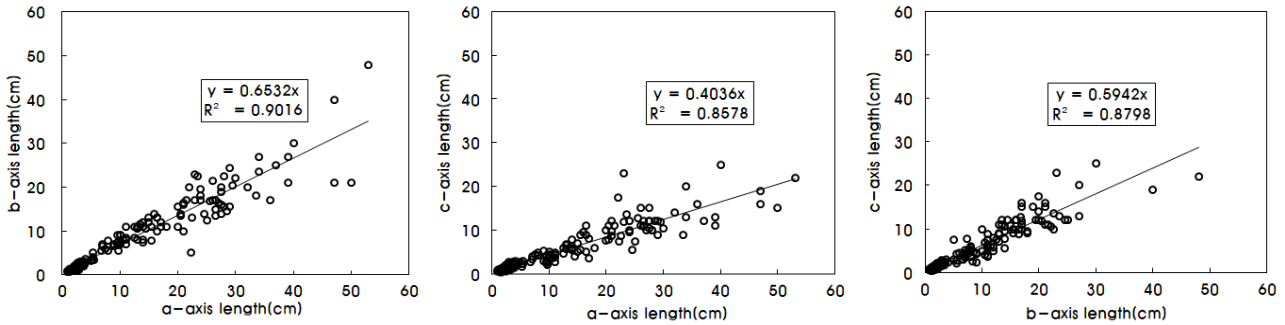


Fig. 4. Relationship between a-axis, b-axis and c-axis length

시 가장 어려운 점은 평면 2차원 정보는 얻을 수 있으나 3차원 정보를 완성시키는 1축 정보를 얻을 수 없다는 점이다. 따라서 Eq. (2)에 의하여 하상재료의 표면적을 산정하고 그 결과로부터 Eq. (3)으로 등가원의 직경을 계산하는 방법을 적용하였으며, 평균입경은 $\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}$ 으로 산정하였다.

Table 2는 하상재료 입도곡선 작성을 위한 기초자료 분석으로서 1m × 1m의 면적격자 내에서 채취한 191개 시료(남강)에 대하여 측정된 장축(a), 중축(b), 단축(c)의 길이, 중량 및 형상계수에 대한 통계적 특성값이며, 특히 형상계수 평균 0.55로서 자갈의 특성을 반영하고 있으나 최대값 0.92는 시료 중에서 2 mm 이하의 모래에 가까운 재료가 포함되어 있음을 나타내고 있다.

Fig. 4는 시료 191개에 대한 a-축, b-축 및 c-축에 대한 상관관계를 분석한 것이다. b-축 길이는 a-축 길이의 약 65%, c-축 길이는 a-축 길이의 약 40%와 b-축의 약 59%인 것으로 분석되었다. a-축, b-축 및 c-축 길이의 상관관계는 약 0.86~0.90 범위인 것으로 나타났으며, 특히 20 cm 이하의 범위에서는 명확한 상관관계를 보이고 있다. 그러나 각 축의 길이가 호박돌의 입경에 근접하는 25 cm를 초과하게 되면 그 상관성이 다소 떨어짐을 확인하였다. 이러한 원인은 자갈하천에서 체분석을 적용할 경우 한 개의 시료 중량이 전체 중량의 1%를 초과하지 않아야 한다는 기준(Church *et al.*, 1987)을 고려할 경우 191개의 시료의 한계 평균입경은 약 19 cm로서 이 기준과 일치하며, 약 93%인 177개의 시료가 포함된다.

Fig. 5는 표면 평균입경과 c-축 길이의 관계를 도시한 것으로서 c-축은 표면 평균입경의 약 50%인 것으로 분석되었으며, 상관계수는 0.89로서 높게 나타났다. Fig. 6은 3차원 입체

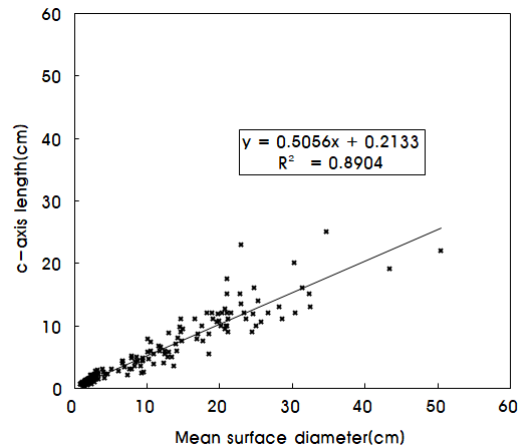


Fig. 5. Relationship between mean surface diameter and c-axis diameter

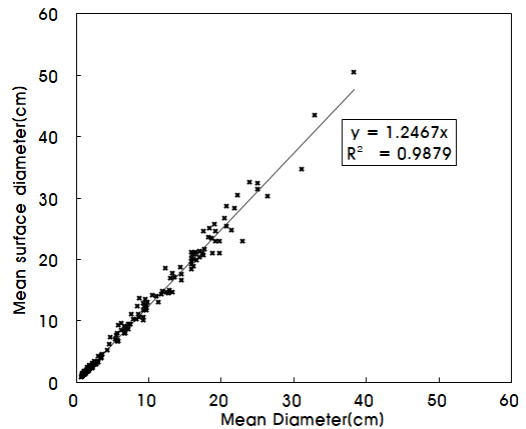


Fig. 6. Relationship between mean diameter and mean surface diameter

평균입경과 2차원 표면 평균입경의 상관관계를 나타낸 것으로서 표면 평균입경이 입체 평균입경에 비하여 약 125% 큰 것으로 분석되었으며 상관계수는 약 0.99로서 아주 높게 나타났다. 이러한 결과는 평균입경 측정 시에 c-축이 미치는 영향이 아주 크다는 것을 입증하는 것이다.

그러나 현실적으로 화상에서 하상재료를 회전 타원체로 간주하고 장축, 중축 및 단축 중 1축을 측정할 수 없을 뿐 아니라 화상에서 식별할 수 있는 타원체에 대한 장축과 중축의 측정도 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서 하상재료의 표면적을 추출하여 등가원의 면적으로 환산한 후 직경을 산정한다. 화상의 하상재료는 소류력에 의하여 가장 안정한 형태로 하상에 위치하기 때문에 장축과 중축으로 이루어진 표면이 촬영된 것으로 가정한다. 따라서 화상에서 하상재료의 윤곽선으로 이루어진 폐곡선에서 측정된 면적으로부터 하상재료의 표면적과 같은 등가원의 직경을 산정하였다.

Fig. 7은 3차원 입체 평균입경에 대한 측정중량과 계산중량의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 8은 측정중량과 계산중량의 관계를 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 전체 시료중량의

1%인 시료의 한계입경인 약 20 cm 범위 내에서는 상관성이 아주 높게 나타났다. 측정측량에 비하여 계산중량이 약 114%로 분석된 결과는 입경이 굵은 자갈 이상의 시료에서 형상계수가 감소함에 따라 나타나는 현상이며, 평균입경 10 cm 이내의 범위에서는 측정측량과 계산중량이 거의 일치하는 것으로 분석되었다.

Fig. 9는 Eq. (2)에 의하여 산정된 시료 하상재료의 표면적과 중량의 상관관계를 나타낸 것이며, Fig. 10은 산정된 표면적을 등가원의 환산한 직경과 중량의 관계를 나타낸 것으로서 명백한 상관관계를 보인다. 특히, 직경 20 cm 이하의 범위에서는 양호한 상관성을 보이지만, 다소 산포가 발생하는 원인은 장축과 중축만으로 표면적을 산정함으로써 정확한 표면적이 추출되지 못하기 때문에 발생하는 것으로 보인다.

3.1.5 입경가적곡선의 작성

Fig. 11은 남강의 하상에 1 m × 1 m 면적격자를 설치하고 격자 내에서 채취한 191개의 시료에 대한 입경분포를 분석하여 입경분포곡선을 작성한 것이다. Fig. 11(a)는 입도분포곡선

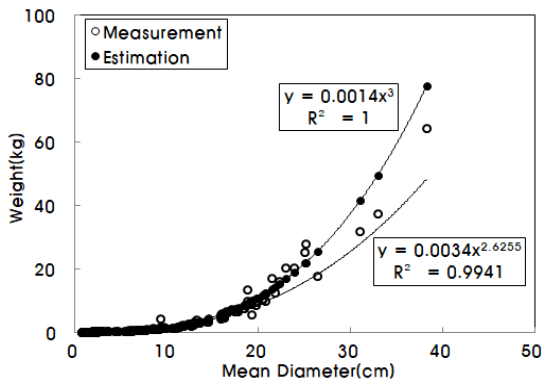


Fig. 7. Relationship between mean diameter and weight

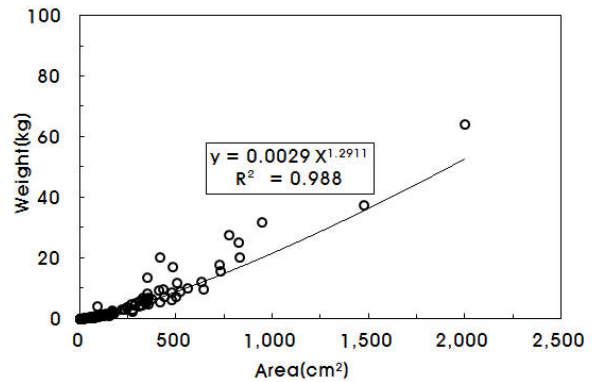


Fig. 9. Relationship between area and weight

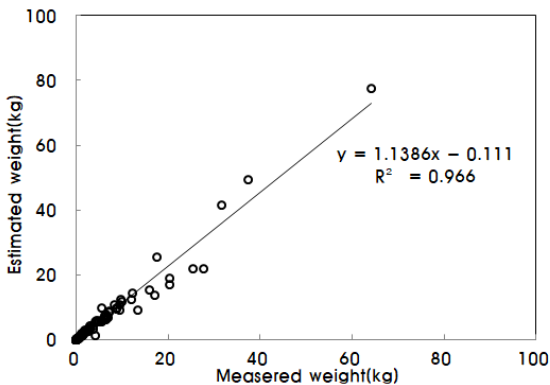


Fig. 8. Relationship between measured weight and estimated weight

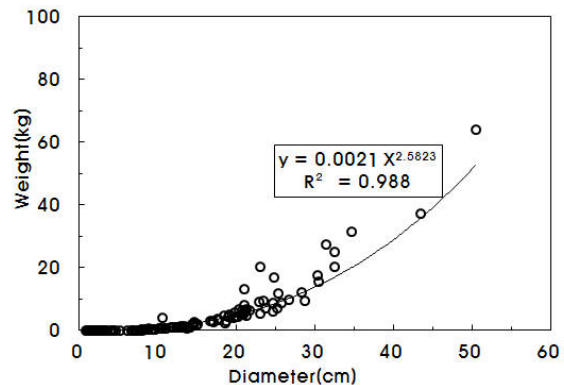


Fig. 10. Relationship between diameter and weight

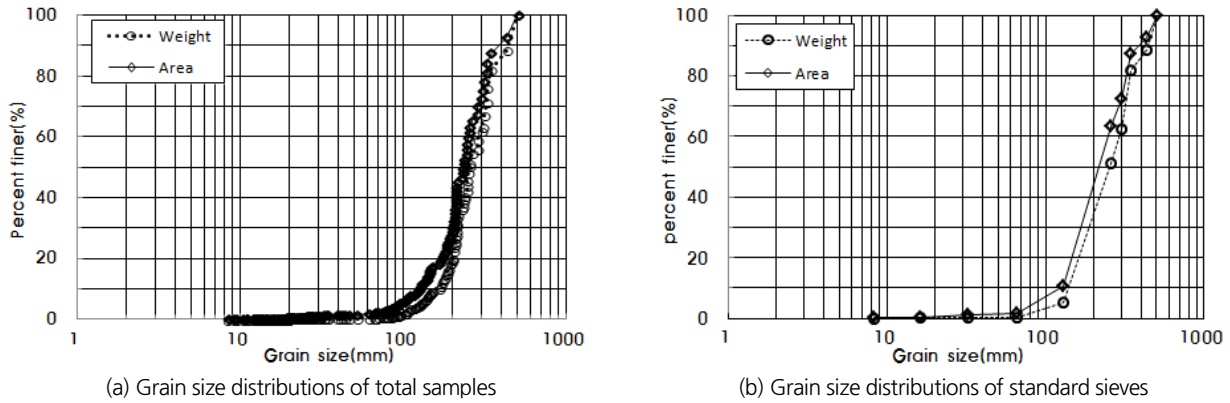


Fig. 11. Grain size distributions of samples

이며, Fig. 11(b)는 각 입자의 하상재료 분류입경 기준(AGU)에 의해 작성된 입경분포곡선이다. 분석결과 중량 기준의 통과백분율에 의한 대표입경(d_R)($d_{50} = 253$ mm)과 표면적 기준의 통과백분율에 의한 대표입경(d_R)($d_{50} = 235$ mm)을 산정한 결과 약 7%의 차이를 보이지만, 중량과 표면적 기준의 입도분포곡선은 거의 유사한 분포특성을 보인다.

3.2 기존의 하상재료 조사방법과의 비교

최근에는 수서동물의 서식환경 등 생태계에 친화적 하천환경조성이 중요한 과제로 대두됨에 따라 하천의 물리환경을 구성하는 중요한 요소의 하나인 하상의 입도분포 자료의 중요성이 증가되고 있다. 또한 유역전체의 유출 토사관리함에 있어서 유출 토사의 양뿐만 아니라 입경에 대해서도 파악하는 것이 요구되고 있다. 따라서 자갈 하천의 입도분포 측정을 간편, 신속, 저렴하게 시행하는 것이 초미의 과제가 되고 있다.

일반적으로 체분석 방법은 현장에서 하상재료를 채취하여 실험실로 운반한 후 실내 작업으로 체분석에 의하여 입도분포곡선을 작성한다. 입경이 큰 자갈의 경우 입도분석 실험에서 체질하는 시간이 부족하거나, 장경과 단경의 차이가 커서 구(球)의 형상에서 크게 벗어나게 되면 본래 체의 눈을 통과할 수 있는 자갈이 체에 남아 버린다. 이 현상은 오래 전부터 지적되어 온 문제로서, 체분석에서는 구형(球形) 근사를 전제로 하고 있지만, 자갈 입경이 커짐에 따라 구형과는 동떨어진 형상이 되어 체 눈에 걸림이 발생하기 쉬워지기 때문에 작은 입자는 과소 평가되고 큰 자갈은 과대 평가되는 경향을 나타낸다. 체분석 방법의 가장 큰 문제점은 자갈 하천의 경우 시료 채취량이 많고 접근이 힘든 지점이 많아 시료채취와 운반은 힘든 노동이 되기 때문에 하상재료 조사 실무자들은 하상특성을 반영할 수 없는 지점에서 체분석이 가능한 시료를 채취하고 그 시료를 분석한 결과를 제시하는 경우가 대부분이다.

한편, 면적격자법과 화상처리법은 하상표면에 면적격자를 설치하고 800만 화소 이상의 카메라로 사진을 촬영하여 이미지 처리기법으로 입도분포를 분석하기 때문에 시료채취 및 운반과정이 없으므로 소요인력, 소요시간 및 접근성의 측면에서 큰 장점이 있다. 화상처리에 의한 분석방법의 가장 큰 특징은 자갈의 투영면적이 차지하는 화소 수에서 동수의 화소 수의 원(圓)으로 환산하여 직경을 계산하고 표면적을 기준으로 통과백분율을 산정할 수 있다. 화상해석법을 적용하기 위한 사진촬영은 사진상에 입자의 그림자를 최소화할 수 있는 시기 즉, 하지(6월 22일)경의 12~14시 사이가 최적시간이며, 동지(12월 22일)경은 태양의 남중고도가 낮아져 입자의 그림자가 가장 많이 발생하므로 가급적 피해야 한다.

기존의 체분석은 임의두께로 채취한 재료의 입도분포를 구하는 것이며, 여기에서 제안하는 이미지 분석 기술은 표면에 보이는 재료의 입도 분포를 구하는 것이지만, 양자는 상관이 있다는 가설을 전제로 하는 것이다. Masato *et al.* (2005)은 100 mm 이하의 입경이 분포하는 하상에서 현장시험을 실시한 결과, 화상해석법이 기존의 체분석 방법과 비슷하거나 어떤 면에서는 더 이상의 정확도로 하상재료의 입도분포 측정이 가능하다는 것을 제시했다.

따라서 현지작업의 경감과 단축, 체분석 작업의 저감, 체분석과 동등 이상의 분석 정밀도, 작은 입자에서 큰 입자까지 분석의 연속성, 산악지역에서 계측의 용이성 및 경제성을 고려할 때 화상해석법에 의한 입도분포 분석기법은 여러 가지 장점이 있다. Table 3은 수자원개발 표준품셈(KECA, 2008)과 입도시험(www.kcmic.or.kr)을 기준으로 용적법(현장 채취 및 체분석)과 화상해석법의 작업 효율과 비용을 비교한 것으로서 경제성과 작업 효율성 측면에서 화상해석법은 큰 장점이 있다.

Table 3. Comparison of work efficiency and cost for volumetric method and image analysis in gravel stream

		Volumetric method (local sampling)	Image analysis
Field works	Work contents	Excavating 30 cm under the river bed surface of 50 cm square and collecting samples of GL -30~60 cm. Gravel of 10 cm or more weigh the size and weight at the site and bring the remainder to the laboratory	A scene is placed on the surface layer of the riverbed surface, and a photograph is taken from directly above
	Working time (1 sample)	Working for about 6.4 hours in 2 people per site	Working for about 0.5 hours in 2 people per site
	Cost (1 sample)	About 36,000 won	About 3,000 won
Laboratory works	Work contents	Got about 40 kg in field, and enforce the KS F 2302 (Granularity test of soil) in the laboratory	Image analysis (1 image: 1 m × 1 m)
	Working time (1 sample)	About 3 hours (time required for grain size test of soil)	About 1 hours (time required for analysis)
	Cost (1 sample)	About 130,000 won (1 kg)	About 20,000 won (1 m × 1 m)
Total	Cost (1 sample)	About 166,000 won (1 kg)	About 23,000 won (1 m × 1 m)
	Working time (1 sample)	About 9.4 hours	About 1.5 hours

3.3 현장적용

자갈 하천에서는 하상표면을 구성하는 재료의 입도분포를 파악하는 것이 아주 중요하기 때문에 3개 하천 23개 지점에 대하여 각 지점에서 1 m × 1 m 면적격자에 대한 하상표면을 디지털 카메라로 촬영하여 화상해석을 수행하였으며, 화상을 정사한 후 화상해석법으로 하상재료의 경계를 설정하여

확인한 후 경계가 불확실한 부분에 대해서는 사진을 중첩시켜 인위적으로 분할하였다. 사진의 해상도 때문에 1 mm 정도 이하인 모래 등의 하상재료는 판정할 수 없지만, 자갈 하천 구간에서는 잔모래가 거의 관계되지 않기 때문에 제외시켜도 문제가 없을 것으로 판단된다(Butler *et al.*, 2001).

Table 4는 남강, 왕피천 및 섬진강의 3개 하천의 대표지점

Table 4. Orthophotography, image after image processing and curve of grain size distribution

Stream [location]	Orthophotography	Image after image processing	Curve of grain size distributions	Grain size
Namgang [7.7 km (No. 247)]				No. 247 d ₅₀ = 162 mm d ₆₀ = 177 mm d _{max} = 336 mm 13 sites d ₅₀ = 85~166 mm d ₆₀ = 94~195 mm d _{max} = 176~339 mm
Wangpicheon [28.41 km (No. 285)]				No. 285 d ₅₀ = 30 mm d ₆₀ = 41 mm d _{max} = 277 mm 8 sites d ₅₀ = 19~59 mm d ₆₀ = 21~75 mm d _{max} = 114~419 mm
Sumjingang [30.5 km (No. 30+560)]				No. 30+560 d ₅₀ = 14 mm d ₆₀ = 51 mm d _{max} = 133 mm 2 sites d ₅₀ = 14~51 mm d ₆₀ = 20~70 mm d _{max} = 133~371 mm

에서의 화상해석법에 의한 적용과정과 하상재료 분석결과로서 대표입경과 입도분포곡선을 나타낸 것이며, 각 하천의 종단방향 위치에 따라 입도분포곡선을 잘 나타내고 있다.

3.4 고찰

기존의 하상재료 조사는 급류인 자갈 이상의 하천, 완류인 모래 하천 등에서 하상형태나 하상재료에 구별 없이 표면으로부터 30 cm 이상의 표층을 걷어내고 그 아래에 있는 하상재료를 채취하여 입도분석을 시행하고 있다. 실제의 하천은 하상표면이 장갑화(amoring)에 의하여 비교적 큰 입경의 하상재료가 피복되어 있는 경우가 많으므로 하상의 평균적인 입도분포를 얻기 위하여 표층을 걷어낼 필요가 있으며, 하상재료의 분포상태가 표준적인 지점을 선정하여 시료를 채취하고 있다. 이와 같은 전통적인 하상재료 분석방법으로 얻은 결과는 홍수시 실제 하상면에 작용하는 소류력과 하상재료의 상관관계를 반영한 것으로 보기에는 논리적으로 부족하다. 또한, 하천생태의 기반이 되는 서식처 환경을 평가할 때 어류, 무척추동물 등에 관계되는 서식환경은 하상표면의 하상재료에 의하여 형성되는 유효서식처(공극) 및 하상매몰도가 지배적인 변수이므로 하상표면의 하상재료 특성을 조사하는 것이 중요하다.

일반적으로 800만 화소 이상의 디지털 화상을 화상해석법으로 적용할 경우 입경 1 mm 이상의 입자에 대하여 추출이 가능하고, 하천설계기준에서 제시하고 있는 1 km 간격으로 1개 횡단면에서 3개 지점 이상에서 하상재료 조사를 실시하는 기준을 쉽게 만족시킬 수 있으며 특히, 자갈 하천에서는 기존 방법보다는 화상해석법을 적용하는 것이 타당할 것이다.

본 연구에서 시료를 분석한 결과에 따르면, 평균입경 10 cm 이하의 범위에서 형상계수가 클 경우는 측정중량과 계산중량이 거의 일치하는 것으로 분석되었으므로 화상해석법의 적용이 가능하지만, 입경이 증가하여 형상계수가 작아지면 화상해석법에 의한 입경분석의 오차가 증가함을 확인할 수 있었다.

또한 3차원 입경, 표면적, 평균입경 및 중량 등의 변수들은 입경 20 cm 이내의 범위에서는 상관관계가 명확하기 때문에 입경의 편차가 크지 않는 경우 화상해석법의 적용범위를 더욱 확장할 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구에서는 면적격자법과 화상해석법을 이용함으로써 직접 하상면에 접촉하지 않고 대표입경까지 산정하는 것이 가능하고, 작업상 안전성, 경제성 및 하천환경의 배려 등을 고려할 수 있는 방법이라는 것을 확인했다. 또한, 동일 하상재료를 사용하여 작성한 중량 및 표면적 기준의 입도분포곡선을 작성하고 대표입경을 산출한 결과 대표입경에 큰 차이는 없었기 때문에 화상해석법의 활용 가능성을 확인하였다. 따라서

자갈하천의 경우 실무에서 발생하는 문제점을 고려하여 기존의 중량 기준의 입경분석법 보다는 표면적 기준의 입경분석법을 적용하는 것을 제안한다.

4. 결론

본 연구는 자갈하천의 하상재료 조사법을 개선하기 위하여 면적격자법과 화상해석법을 병용하는 하상재료 조사법의 적용성을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

입경이 10 cm 이하이고 형상계수가 큰 자갈하천에서는 화상해석법에 의한 하상재료의 분석결과가 정확하지만 입경이 증가할수록 형상계수가 감소하는 경우는 오차가 증가하므로 적용에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

시료의 표면적-중량 및 등가원 입경-중량의 상관관계를 분석한 결과 아주 높은 상관성을 보였으며, 화상해석법에 의하여 추출된 표면적을 등가원으로 환산하여 산정한 하상재료 입경분석에 적용할 수 있음을 확인하였다.

현재 실무에서 적용하는 하천기본계획 및 유역의 조사비 산정 기준에 따르면 기존의 체적법(체분석법)과 화상해석법의 작업효율성과 비용을 분석한 결과 약 80%의 절감효과가 있음을 확인하였다.

또한, 화상해석 소프트웨어는 공개버전(open version)을 사용할 수 있으므로 프로그램 구입에 추가비용이 발생하지 않으며, 사진 자료를 데이터베이스로 구축하면 하상특성 및 하상재료의 경년적 변화를 분석할 수 있는 장점이 있다.

현재 하천의 조사, 설계 및 계획에 관련된 하상재료 조사 및 분석은 흙의 입도시험을 기준으로 하고 있기 때문에 실무자들은 실제의 하상재료와 다른 체분석에 의한 흙의 입도시험이 가능한 하상재료를 채취하고 분석함으로써 하상재료 특성 조사결과를 왜곡시키는 것이 현실이다. 향후 면적격자와 화상해석법이 해당하천 고유의 하상특성을 조사하는 데 활용되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

References

- Butler, J. B., Lane, S. N., and Chandler, J. H. (2001). "Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 5, pp. 519-529.
- Cho, W. S. (2014). *Analysis of grain-size distribution of gravel river bed using digital image processing*. Master's thesis, dissertation, Dong-ehi University, pp. 43-71.
- Church, M. A., McLean, D. G., and Wolcott, J. F. (1987). "River bed gravels: sampling and analysis." *Sediment transport in gravel-bed rivers*, Edited by Thorne, C. R., Bathurst, J. C., and Hey, R. D., John Wiley & Sons, Chichester, pp. 43-78.
- Hwang, T. J., Jin, C. S., Min, T. K., and Kim, C. Y. (2005). "Particle size distribution analysis for granular material using digital image processing." *Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, No. 4c, pp. 259-266.
- Hwang, T. J. (2007). *A study on the particle size distribution analysis for large aggregate using digital image processing*. Ph.D. dissertation, Pusan National University, pp. 106-128.
- Hwang, T. J., Cho, J. Y., and Lee, K. H. (2010). "Gradation curve of aggregate using digital image process." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 2, pp. 31-37.
- John, A. (1979). "Gravel size analysis from photographs." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 105, No. 10, pp. 1247-1255
- Kellerhals, R., and Bray, D. I. (1970). "Sampling procedures for coarse fluvial sediment." *Proceedings Hydraulic Division Specialty Conference*, ASCE, Minneapolis, p. 31.
- Kim, K. H., Lee, H. R., and Jung, H. R. (2016). "An analysis on geomorphic and hydraulic characteristics of dominant discharge in Nam river." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 49, No. 1, pp. 83-94. (in Korean with English summary).
- Korea Construction Materials Inspection Company (2017). Test method for particle size distribution of soils (KS F 2302). accessed 11 May 2018, <<http://www.kcmic.or.kr/rb/b/data/60/info.hwp>>.
- Korea Engineering & Consulting Association (KECA)(2008). *Standard of water-resources development estimate (River)*, *Standard of estimate*, Vol. 11, pp. 25-30.
- Korea Water Resources Association (KWRA)(2009). *River design criteria*, pp. 88-89.
- Kristin, B., and Steven R. A. (2001). *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. General Technical Report RMRS-GTR-74, USDA.
- Lane, E. W. (1947). "Report of the subcommittee on sediment terminology, transactions." *American Geophysical Union*, Vol. 28, No. 6, pp. 936-938.
- Lane, E. W., and Carlson, E. J. (1953). "Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials." *Proceedings Minnesota, International Hydraulic Convention*, IAHR, pp. 37-48.
- Leopold, L. B. (1970). "An improved method for size distribution of stream bed gravel." *Water Resources Research*, Vol. 6, No. 5, pp. 1357-1366 .
- Litter (1969). *Photographic science and engineering*.
- Lucas, H. J., and Strom, K. B. (2007). *Comparison of automated grain sizing of gravel beds using digital images to standard grid and random-walk pebble counts*.
- Masato U., Hajime, N., Toyooki S., Koji, Y., Mitsuaki, U., and Yoshinori, F. (2005). "Development of a measuring system for particle size distribution in gravel-bed rivers by using an image processing technique." *Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 58, No. 2, pp. 26-31.
- Rubin, D. M. (2004). "A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment." *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 74, No. 1, pp. 160-165.
- Takuya, O., Noriyuki, K., Hidehiro, K., Yasunori, H., Masaru, K., Tsuyoshi, A., and Takeshi, Y. (2000). "Possibility of bed material investigation using image analysis." *Advances in River Engineering*, No. 6, pp. 351-356 (in Japanese).
- Tiago, F., and Wayne, R. (2012). *ImageJ user guide*. <http://fiji.sc/guide.git>.
- Wolmon, M. G. (1954). "A method of sampling coarse river-bed material." *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 35, No. 6, pp. 951-956.
- Yoo, B. N. (2016). *Automated grain sizing of river gravels using image processing*. Master's thesis, dissertation, Dong-ehi University, pp. 27-53.