

자연형 수로 내 식생흐름 분석을 위한 실험적 연구

류용욱* · 김지현** · 지 운*** · 강준구****

Ryu, Yong-Uk*, Kim, Jihyun**, Ji, Un***, Kang, Joongu****

Experimental Study of Vegetated Flows in the Stream-scale Natural Channel

ABSTRACT

This study experimentally investigated the effects of high and low densities of vegetation patches on the flow characteristics in a stream-scale outdoor experimental channel with rooted willows. Stream-scale experiments on vegetated flows were carried out for an emergent condition of vegetation. Vegetation patches were arranged by alternate bar formation and the flows in vegetated and non-vegetated sections were compared. Three-dimensional flow structure was measured by ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) and the vertical distributions of longitudinal velocity were mainly analyzed from the measurements at various points. Flow velocities show different patterns depending on the density of vegetation patches. The difference in flow velocity between in the vegetated and non-vegetated sections appear to large in the dense patches and the flow becomes complicated at the downstream edge of the patch. Despite the upstream flow disturbed by the first patch, the flows over the second patch show the similar pattern.

Key words : Flow velocity, Vegetation, Stream-scale experiment, ADV

초록

하천 내 흐름에 대한 식생 밀도의 영향을 조사하기 위해 버드나무가 활착된 하천 규모의 자연형 수로에서 유동 측정 실험을 수행하였다. 식생 내 흐름에 대한 하천 규모 실험은 식생의 반 잠김 조건에 대해 수행되었다. 수로 내 식생대(vegetation patch)는 교차로 형성된 사주의 형상으로 배열되었고 식생 구간과 비식생 구간에서의 흐름을 비교하였다. 3차원 유동 구조는 초음파 유속계(Acoustic Doppler Velocimeter)에 의해 측정되었고 종방향 속도의 연직 분포는 다양한 지점에서의 측정값으로부터 분석되었다. 유속은 식생대의 밀도에 따라 다른 양상을 보여 주는데, 식생 구간과 비식생 구간에서의 흐름 속도의 차이는 밀집된 식생대 주변에서 크게 나타나며 흐름 분포의 형태는 식생대의 하류방향 하단에서 복잡한 모습을 나타낸다. 하류에 위치한 식생대 주변의 흐름은 상류에 설치된 식생대에 의해 교란된 흐름에도 불구하고 유사한 분포를 보여준다.

검색어 : 유속, 식생, 하천 규모 실험, 초음파 유속계

1. 서론

식생은 하천의 형태를 형성하는 과정에 영향을 미치는 주요인자 중 하나이다(Jang and Shimizu, 2007; Van Oorschot et al., 2015). 특히 작은 개울 규모에서 식생은 침식과 퇴적 과정에 상당한 영향을 주기 때문에 본류에 의한 하상 형태에 중대한 변화를

* 부경대학교 해양공학과 조교수 (Pukyong National University · yuryu@pknu.ac.kr)

** 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jihyunkim@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jiun@kict.re.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jgkang02@kict.re.kr)

Received August 9, 2019/ revised August 28, 2019/ accepted August 29, 2019

일으킬 수 있다. 국내의 홍천강을 포함한 여러 하천에서 식생에 의한 형태학적 변화의 많은 예를 확인할 수 있다(Fig. 1).

식생의 조도는 하천 내 흐름에 줄 수 있는 영향 때문에 항상 중요한 문제로 인식되어왔다. 예를 들어, 하천의 홍수터에 식물이 자라 안정화되면 홍수기 등 하천 유량이 높은 기간에서 흐름 저항을 유발하여 흐름 진행을 방해한다(Tsujimoto, 1999). 만약 식생을 고려하지 않은 홍수 대비 안전 조건에 의해 하천이 관리되고 있다면 예상하지 않았던 식생은 하천에 인접한 지역의 사람들과 경작지에 범람을 통해 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 식생이 활착한 수로 내 흐름 조도를 반영한 적절한 모델링 및 예측은 실질적으로 매우 중요하다. 식생은 하천 내 국부적인 조도를 증가시켜 흐름 강도와 하상에서의 전단 응력을 감소시키고 이에 의해 국부적 퇴적이 증가한다. 하천 내 조도 변화에 의한 영향은 매우 중요한 만큼 하천 내 모의 및 예측에서 식생은 중요한 고려 대상이다. 일반적으로 하천 모델링에서 식생은 변수화되어 하천 조도에 반영된다. 식생 홍수터의 경우, 조도계수의 공간 분포를 구성하기 위해 경관생태도(ecotope map)를 기반으로 할 수 있다(Straatsma et al., 2013). 경관생태도에 의한 정보를 조도계수로 적절히 변환하기 위해 경험식이 제안되며 식물 종에 의한 관계식이 주를 이룬다. 하지만, 식생에 의한 조도는 단순히 식생대의 식물 종 뿐만 아니라 식생대의 밀도, 계절에 따른 식물학적 변동성, 식생대 형성, 덩불의 유무, 식물 성장 단계 등 다양한 요소에 의해 변화된다. 따라서, 식생에 의한 조도는 하천 모델링에서 가장 불확실한 측면 중 하나로 간주된

다(Warmink et al., 2011). 수리학적 하천 모델링의 정확성과 신뢰성은 일반적으로 보정 및 검증의 과정을 통해 향상된다. 수리학적 조도는 에너지 손실 과정에서 정량화가 불가능하거나 고려할 수 없는 다양한 요소를 포함하고 있기 때문에 모델링 보정의 주된 대상이다. 현장 또는 실험 연구를 통해 식생에 의한 흐름 데이터를 수집하여 얻어진 흐름과 식생 간의 상호작용에 대한 결과는 모델링에서 보정 과정을 감소시킬 수 있기 때문에 그 자체적인 결과의 중요성과 함께 모델링 향상에도 큰 가치를 갖는다.

한편, 국내의적으로 하천 내 식생에 대한 실험적 연구는 지속적으로 수행되어왔다(Baptist, 2005; Baptist et al., 2007; Morvan et al., 2008; Crosato and Saleh, 2011; Camporeale et al., 2013; van Dijk et al., 2013; Vargas-Luna et al., 2015). 현장 측정 및 실험실 규모의 실험 연구를 통해 흐름 저항과 식생의 존재 및 공간 분포 사이의 상관관계를 도출하여 경험식으로 제안되기도 하였다. 하지만, 현장 측정의 경우 수리조건 및 식생조건을 연구 목표에 부합되게 조절이 불가능하여 측정 조건의 부합성 등 연구수행의 어려움을 내재하고 있다. 실험실 규모의 연구는 상대적으로 실험 조건을 조절할 수 있어 인자의 변수화가 가능하지만, 인공 실험체를 사용하여 생태학적 특성 반영이 어렵거나 자연 식생의 성장이 적절하게 이루어지지 않을 수 있다. 특히, 식생의 생체 역학적 특성은 규모를 축소하기가 매우 어렵기 때문에 실험실 규모의 연구 결과를 실규모로 해석하는데 한계를 나타낸다(Thomas et al., 2014; Paul et al., 2013). 모델링의 경우 이와 같은 문제점으로 인해 식생에 대한 현장 측정이나 실험실 규모의 연구결과로 보정을 수행함에 있어 제한적으로 적용된다.

본 연구는 버드나무가 활착된 소형 하천 규모의 자연형 하천 수로에서의 흐름을 측정된 결과를 제시하였다. 식생 밀도를 조절하여 조성된 식생대의 주변에서 측정된 유속 자료를 토대로 식생에 의한 흐름 변화를 검토하였다. 수리적 조건은 반 잠김 상태를 대상으로 하였으며 식생대의 상류단, 중간부, 하류단에서의 유속 분포를 통해 흐름 변동성을 검토하였다. 식생 영역의 결과는 비식생 영역에서의 유속 비교를 통해 흐름 차이를 확인하였고, 시주 분포 형태와 같은 식생대 분포 조건으로부터 교차식으로 위치한 식생대에서의 흐름 분포를 비교하였다.

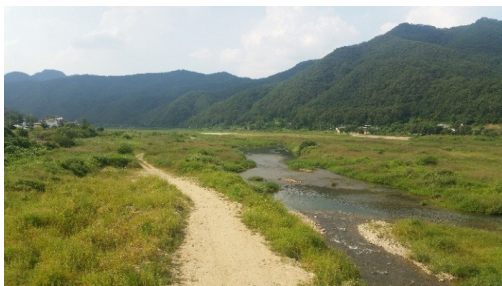
2. 실험실 실험

2.1 자연형 수로 및 식생대

본 실험실 실험은 한국건설기술연구원 하천실험센터 내 실험실 자연형 수로에서 수행되었다. 실험실 자연형 수로는 길이 600 m이고 하단 너비는 3 m, 상단 너비 11 m의 하폭을 가지고 있으며 최대 유량이 10 m³/s가 가능한 수로이다. 수로의 하상 경사는



(a) 1998



(b) 2015

Fig. 1. Vegetation Development in the Hongcheon River in Korea



Fig. 2. Vegetation Experiment Channel

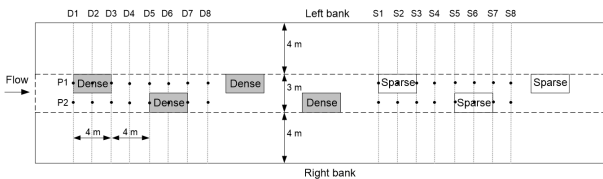


Fig. 3. Formation of the Vegetation Patches and Measurement Points

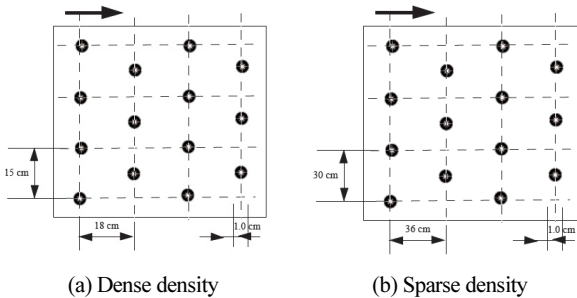


Fig. 4. Density of the Vegetation Patches

1/1,000이며 재료는 사질토이고 중간크기(d_{50})는 약 0.8 mm이다. 실험 구간은 직선 구간을 형성하는 위치로서 상류의 흐름이 안정화된 구간에 식생대를 조성하였다(Fig. 2).

식생대는 실험시점을 기준으로 약 1년 전에 버드나무 묘목을 심어 조성하였으며, 각 식생대의 크기는 4 m 길이와 1.5 m 너비를 갖는다. 실험 구간에는 7개의 식생대가 조성되었으며, 식생대의 배치는 하천 사주의 배치 형상을 대상 모형으로 하여 교차형(alternate)으로 형성하였다(Fig. 3). 식생대의 밀도는 2가지로 조성하였으며 상류 측에 4개의 고밀도 식생대를, 하류 측에는 3개의 저밀도 식생대를 활착시켰다. 식생대의 버드나무는 초기 약 1 cm의 직경을 갖는 묘목을 심었으며, 고밀도의 경우 종방향으로 18 cm의 간격과 횡방향으로 15 cm의 간격으로, 저밀도의 경우 종방향으로 36 cm, 횡방향으로 30 cm의 간격으로 배치하였다(Fig. 4). 4.0 m 길이와 1.5 m 너비를 갖는 식생대에 해당하는 고밀도 식생대의 밀도는 38 stems/m²이고 저밀도 식생대의 밀도는 10 stems/m²이다.

2.2 실험조건

약 1년간의 성장과정을 통해 식생대의 버드나무는 1.0 m 보다 큰 높이를 갖게 되었다. 각 식생대의 밀도는 초기 설계와 크게 다르지 않게 유지되었으며 자연적인 생태학적 특성으로 각 식생대 별로 다른 식물적 특성을 가졌다. Table 1은 측정에 사용된 식생대 별 버드나무의 크기를 측정한 값의 평균값을 제시하였다.

본 실험의 흐름은 반잠김 조건(emergent condition)이다(Table 2). 반잠김 조건은 하천 내 활착한 식생이 성장하고 수위가 높지 않을 때 발생하는 조건이다. 식생 높이의 절반에 해당하는 수심을 갖는 흐름을 발생시키기 위해 유량을 조절하여 Table 2에 제시된 유량을 방류하였으며, 식생대 구간과 비식생대 구간에서 유속 측정을 수행하였다. 유속 측정은 초음파 유속계(Acoustic Doppler Velocimeter, ADV)를 이용하여 수행하였으며, 식생대의 상류단, 중간부, 하류단에서 종방향 기준으로 식생대 및 비식생 구간의 중앙지점을 측정하였다(Fig. 3). 측정 지점에서 ADV를 수면에서부터 하상저면까지 0.5 cm의 간격으로 측정을 수행하여 연직방향의 유속분포를 검토하고자 하였다. ADV는 수로의 횡방향으로 설치된 대차에 설치하였으며, 높이 조절은 연직방향으로 조절이 가능한 설치대에 부착하여 측정 간격을 유지하였다(Fig. 5). 각 점에서 측정된 유속값은 25 Hz의 측정률로 2분 동안 측정된 값을 시간평균하여 분석하였다. 측정시간은 식생대 및 비식생대 구간에서 수행한 예비 실험을 통해 평균값이 수렴하는 양상이 명확한 기간으로 결정하였다.

Table 1. Vegetation Condition

Section	Dense 1	Dense 2	Sparse 1	Sparse 2
Vegetation height (m)	1.15	1.29	1.25	1.38

Table 2. Hydraulic Condition

Flow-vegetation condition	Water depth	Flow discharge
Emergent	0.6 m	0.5 m ³ /s



Fig. 5. Flow Measurements with ADV

3. 실험 결과

본 연구에서 식생흐름의 비교 분석은 전체 식생대 중 각 식생 밀도 조건 별로 상류 측 2개 식생대에서 측정된 결과를 검토하였다. 각 유속 지점은 횡방향을 기준으로 식생대 및 비식생대의 중간지점을 선정하여 유속값을 측정하였고, 종방향을 기준으로 식생대의 상류단, 중간지점, 하류단을 선정하여 식생대 구간의 위치에 따른 유속값을 비교하였다.

Fig. 6은 고밀도 식생대에서의 유속분포를 보여준다. 측정단면인 D1~D4까지는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 상류 기준으로 첫 번째 식생대 주변의 유속이고, D5~D8의 결과는 두 번째 식생대 주변의 유속분포이다. 8개 단면 중 D4와 D8은 Fig. 3에 제시된 바와 같이 식생대 사이구간으로서 전체 수로 폭에 식생대가 존재하지 않는다. Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 상류단부터 식생대와 비식생대의 유속은 차이를 보여준다. 상대적으로 작았던 유속 분포의 차이는 중간부를 거쳐 하단부로 가면서 커져 가는데, 식생대 내의 유속은 계속 감소하는 반면 상대적으로 비식생대 구간에서는 유속이 증가하는 경향을 나타낸다. 식생에 의한 흐름저항이 커질수록

감소하는 유속만큼 식생이 없는 구간으로 흐름이 집중되며 유속이 증가하는 양상으로 보여진다. 식생대의 사이구간인 Fig. 6(d)의 D4에서 식생대 선상의 유속이 다시 증가하나 여전히 큰 차이를 보여주는데 강한 유속은 교차로 위치한 다음 식생대의 상류단에 도달할 때까지 유지되어 두 번째 식생대 전면부에서는 비식생대 구간보다 식생대 구간에서 유속이 크게 나타난다. 하지만, 식생에 의한 흐름 저항으로 유속은 급속히 감소하며 첫 번째 식생대 구간에서 나타났던 유사한 흐름 양상이 나타난다.

Fig. 7은 저밀도 식생대에서의 유속분포를 보여준다. 그림에 제시된 측정단면은 Fig. 6에 제시된 순서 및 특성이 동일하며, S4와 S8은 고밀도 식생대와 유사한 식생대 사이구간이다. 다만, 저밀도 식생대는 7개 교차형 식생대 중 하류부에 설치되어 상류에서 이미 교란된 흐름이 도달하기 때문에 그 조건은 두 번째 고밀도 식생대와 조건이 유사하다. 따라서, Fig. 6(e)에서 제시된 바와 유사하게 식생대 상류부에서 유속이 크게 나타나는 현상이 발생한다. 하지만, 식생대 구간을 지나면서 유속은 감소하여 비식생대 구간의 유속이 더 커지는 양상이 나타난다. Figs. 7(e)~7(h)에 제시된 두 번째 저밀도 식생대에서도 유속이 역전하는 양상은

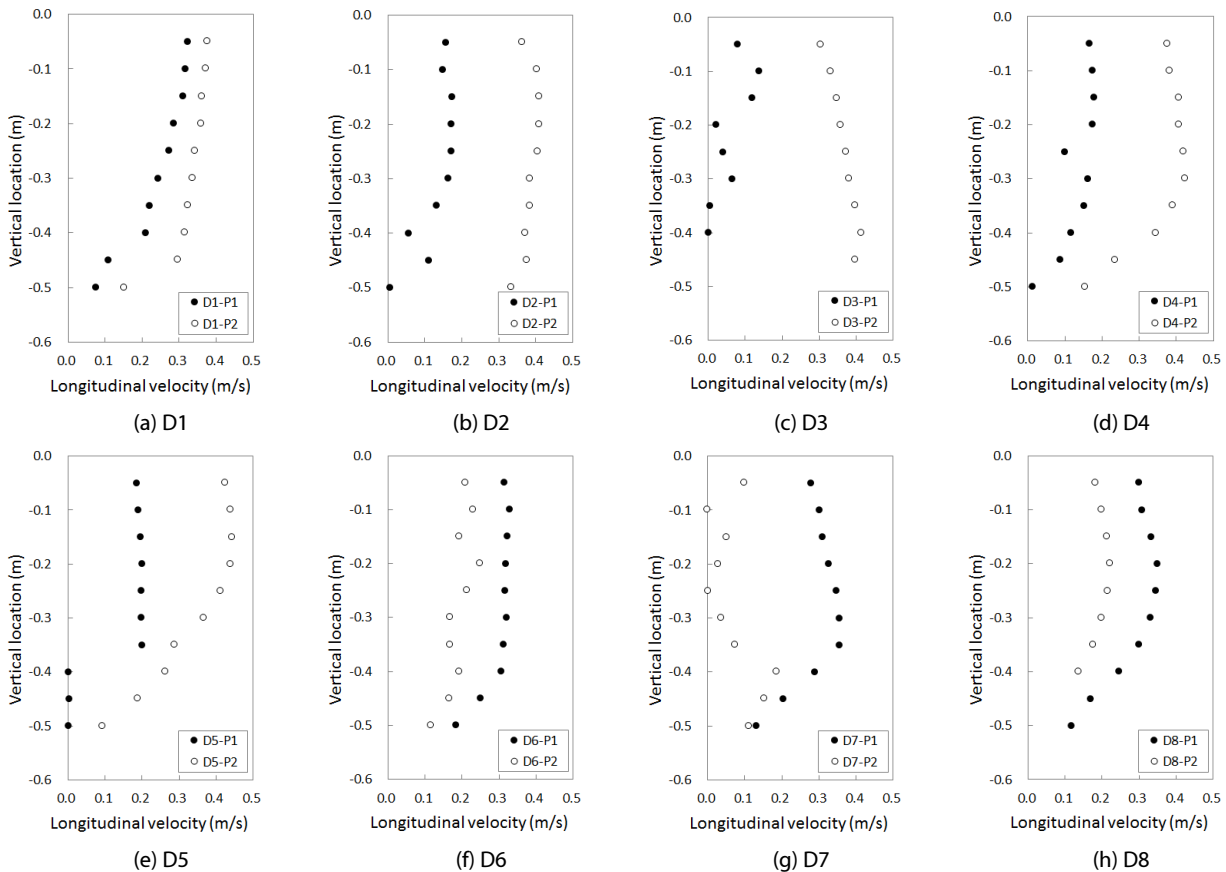


Fig. 6. Vertical Distribution of Longitudinal Velocity over the Dense Patches

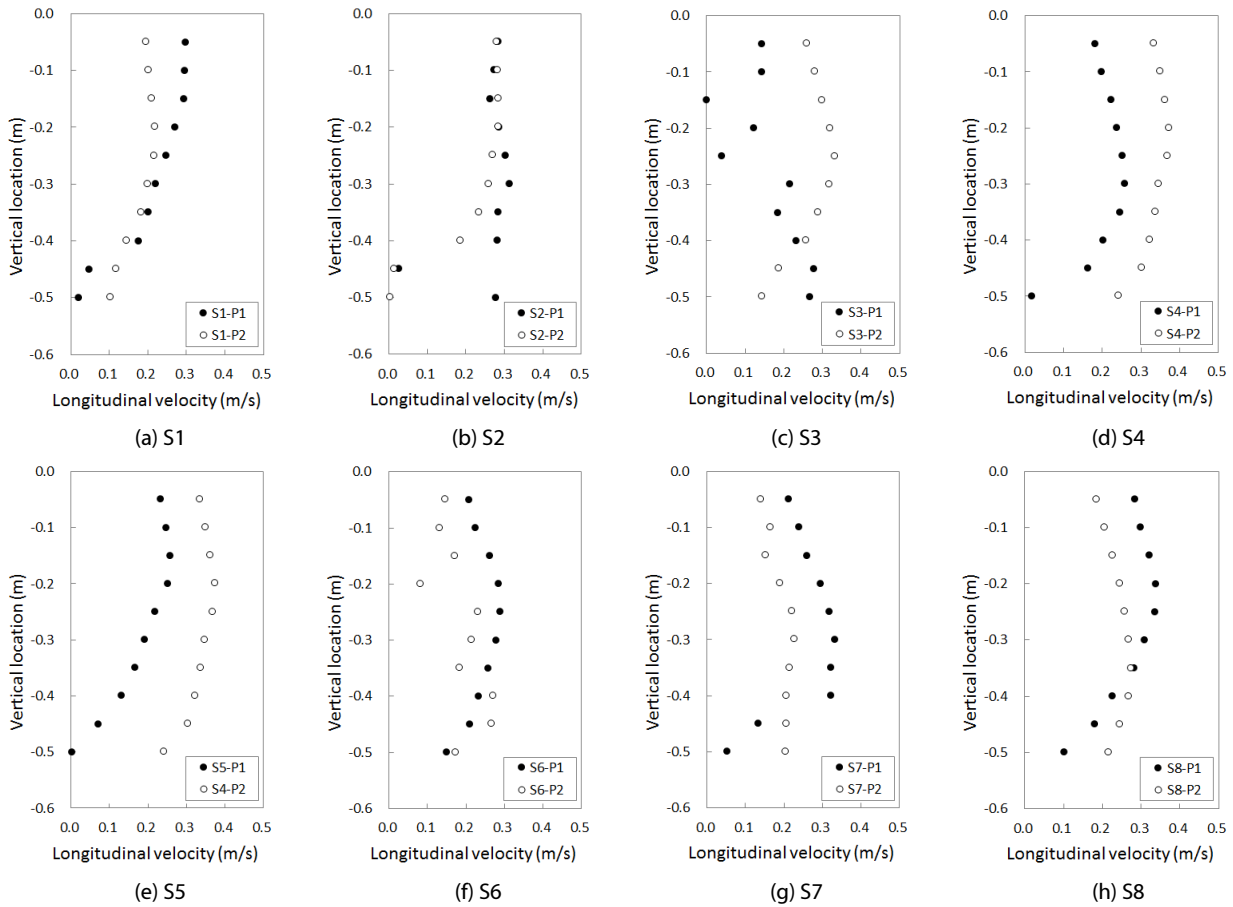


Fig. 7. Vertical Distribution of Longitudinal Velocity over the Sparse Patches

동일하게 발생한다. 다만, 고밀도 식생대 구간에 비해 식생대와 비식생대의 유속 차이는 상대적으로 작다.

Figs. 8 and 9에 제시된 결과는 식생 영역과 비식생 영역 별로 구분하여 동일한 조건에 해당하는 유속분포를 비교하였다. 그림 내 단면 번호는 작은 수는 상류를 큰 수는 하류를 의미한다. Fig. 8에 도시한 첫 번째 식생대에서의 유속분포는 비식생 영역에서 상호 유사한 흐름을 나타내는 반면(Fig. 8(b)) 식생 영역에서는 급격한 감소를 보이는데, 하류단의 경우 많은 지점에서 평균유속이 0에 가까운 값을 보인다. 이후 식생대를 벗어나며 유속이 다시 상승하나 전반적으로 식생 영역을 따라 발생하는 유속은 큰 변화 양상을 나타낸다. Fig. 9에 도시한 두 번째 식생대 구간에서는 앞에서 언급한 바와 같이 식생 영역의 상류단의 유속이 크다. 식생에 의한 감소폭은 첫 번째 식생대보다도 더 크며 식생 영역에서의 유속은 분포 및 크기가 유사함을 알 수 있다. 비식생 영역의 유속분포는 상류단에서의 유속을 제외하면 모두 유사한 전형적인 전단 분포를 보여준다. 첫 번째 식생대에 비해 상대적으로 하상 저면부에서 전단 구간이 더 높은 곳까지 형성되는 것을 알 수 있는데 교차로

반복되는 식생대의 배치로 인해 와류의 형성이 심화되고 이에 따라 흐름이 복잡한 분포 양상을 보이는 것으로 판단된다. 또한, 교란 및 저항으로 비식생 영역에서의 흐름 강도는 두 번째 식생대에서 약해지는 양상을 보인다.

저밀도 식생대에서의 유속분포는 Figs. 10 and 11에 제시되었다. 전반적으로 고밀도 식생대에서의 분포에 비해 완만한 상승 및 하강의 양상을 나타내는데 이는 저밀도 식생분포로 인해 식생 영역에서 흐름 저항이 크지 않아 흐름 변화에 대한 영향이 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 하류단에서 유속 감소 또한 고밀도에 비해서 미미한데, 고밀도의 경우는 식생대를 지나면서 급격한 감소가 나타나는 반면 저밀도의 경우 감소 경향은 나타나나 완만한 감소 후 상승하는 양상이 나타난다. 따라서 고밀도의 경우는 유속 분포가 중첩에 유사할 정도로 크기가 유사한 단면이 많은 반면, 저밀도의 경우는 중첩의 양상이 아닌 크기가 점진적으로 하강 및 상승하는 양상이 나타난다. 식생 영역에서는 비식생 영역에 비해 하상 저면에서의 전단 분포가 두드러지지 않는 모습을 보인다. 고밀도의 경우는 식생 영역에서도 하상 저면 부근에서 유속 감소가

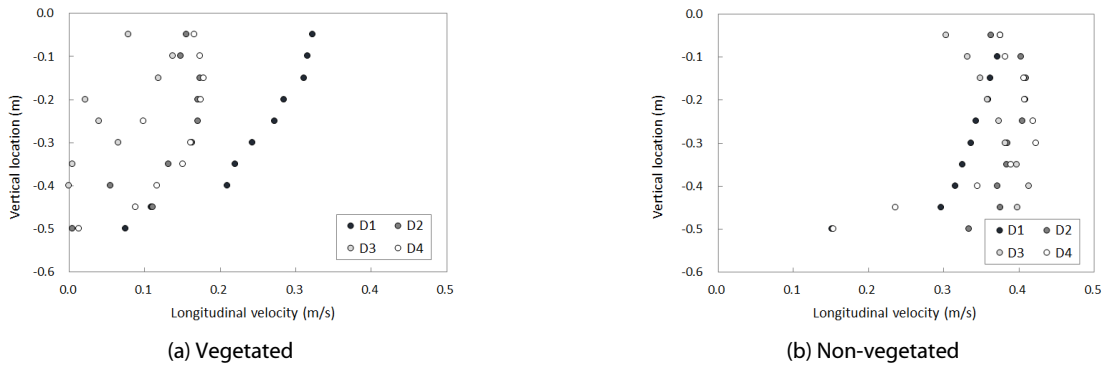


Fig. 8. Longitudinal Velocity Distribution of the Vegetated and Non-vegetated Flows of the First Dense Vegetation Patch

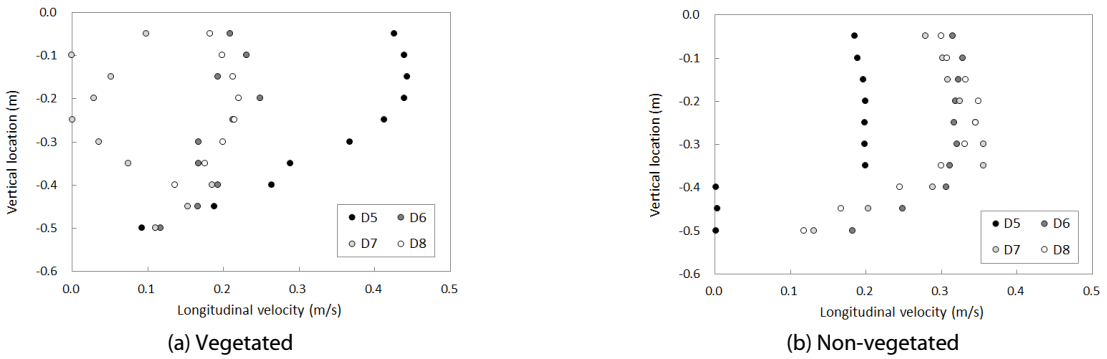


Fig. 9. Longitudinal Velocity Distribution of the Vegetated and Non-vegetated Flows of the Second Dense Vegetation Patch

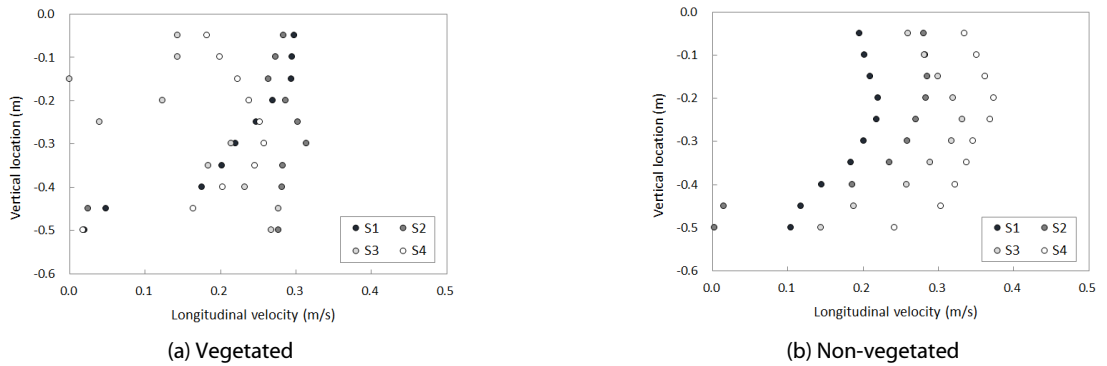


Fig. 10. Longitudinal Velocity Distribution of the Vegetated and Non-vegetated Flows of the First Sparse Vegetation Patch

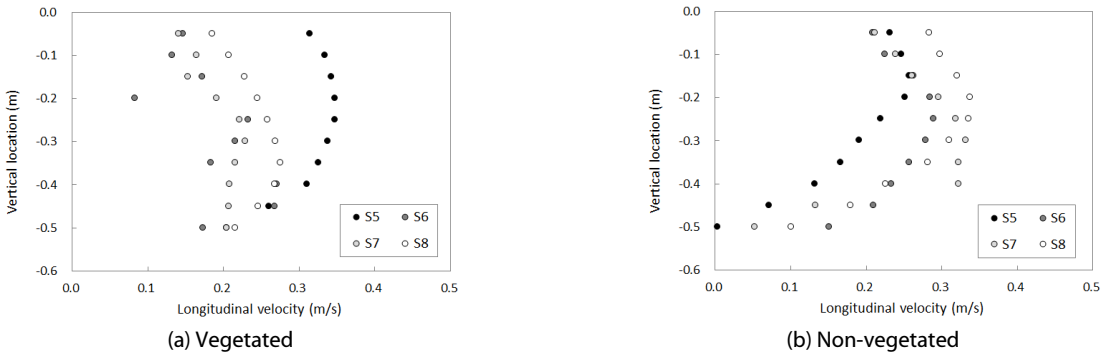


Fig. 11. Longitudinal Velocity Distribution of the Vegetated and Non-vegetated Flows of the Second Sparse Vegetation Patch

확인되나 상대적으로 저밀도의 경우는 오히려 저면에서 유속이 큰 분포로 나타난다. 밀도 상태로만 보면 저밀도는 고밀도와 비식생 영역의 사이에 존재하여 두 양단의 분포의 중간 정도 형태가 나타날 것이라는 예상과 달리 바닥 저항에 의한 전단 현상이 미미하였다. 이로부터 추정 가능한 것은 적절한 식생 밀도는 상부부터 하부까지 혼합류를 유발하여 연직방향으로 유사한 흐름 강도를 발생시킬 수 있다는 것인데 이는 다른 수리 조건에서도 검토가 필요한 부분이다.

각 측정지점에서의 유속을 대표값으로 비교하고자 각 지점의 유속을 수심평균하여 그 값을 Fig. 12에 제시하였다. 그림은 각 단면에서 식생 영역과 비식생 영역에서 수심평균 유속과 두 값의 평균값을 도시하였다. 고밀도 식생대(Fig. 12(a)) 내 식생 영역과 비식생 영역 간 유속차이는 저밀도 구간(Fig. 12(b)) 내 유속 차에 비해 상대적으로 크다. 식생대의 밀도는 저항의 강도를 의미하므로 예상한 결과에 부합된다. 두 값의 차이는 전반적으로 식생대에서의 하류단(D3, D7, S3, S7)에서 크게 나타나며 이후 다시 감소한다. 교차식으로 배치된 식생대의 특성으로 인해 첫 번째 식생대를 제외하고는 모두 식생대의 상류단에서 식생 영역에서 큰 유속을

갖는데 식생 영역의 상류지역이 이전 식생대의 비식생 영역으로서 강한 흐름이 하류로 직접 전달되기 때문이다. 최종 평균값은 연속방정식 원리에 근거하여 수심의 변화가 미미할 경우 유사한 값을 보일 것으로 예상할 수 있다. 두 값의 평균값인 전체 유속은 0.2-0.3 m/s의 크기를 보이며 변동된 값을 나타내고 이를 통해 실험의 신뢰도를 검증할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 버드나무가 활착된 하천 규모의 자연형 수로에서 유동 측정 실험을 수행하여 하천 내 흐름에 대한 식생 밀도의 영향을 검토하였다. 자연형 수로 내 식생 밀도를 달리하여 조성된 식생대의 식생 영역과 비식생 영역에서의 흐름을 비교하였다. 유속은 조음과 유속계(ADV)에 의해 측정되었고 종 방향 유속의 연직 분포는 다양한 지점에서의 측정결과로부터 분석되었다.

고밀도 식생대에서의 유속은 강한 흐름 저항으로 인해 식생 영역과 비식생 영역에서 큰 흐름의 차이를 보여준다. 식생대를 통과하면서 식생 영역에서 급격한 유속 감소가 나타나는데 상대적으로 비식생 영역에서 강한 흐름이 발생하였고 유속크기는 최대 2배의 차이를 보였다. 저밀도 식생대에서는 약한 흐름 저항을 보여주는데 급격한 흐름 강도의 변화없이 완만하게 상승 혹은 하강하는 양상을 보여주었다. 식생 영역과 비식생 영역의 유속크기는 최대 1.5배 정도로서 고밀도 식생대에 비해 작은 차이를 보였다. 특히, 저밀도 식생대의 경우 하상 저면에 의한 전단 현상이 미미하게 나타났으며 이는 저밀도의 식생이 흐름의 혼합을 유도하여 상부와 하부의 흐름의 차이가 작아졌다고 판단된다. 연직방향으로 분포된 유속값을 수심평균하여 비교하였으며 이로부터 식생 밀도에 따른 식생 및 비식생 영역의 유속 특성을 쉽게 확인할 수 있었다. 더불어 작은 변동성을 갖는 단 대표 평균값의 비교로부터 본 연구에서 수행된 실험의 신뢰도를 검증할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 부경대학교 지원을 받아 수행된 연구임 (2017-1499).

References

Baptist, M. J. (2005). *Modelling floodplains biogeomorphology*, Ph.D thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Section Hydraulic Engineering, Delft.
 Baptist, M. J., Babovic, V., Rodriguez Uthurburu, J., Keijzer, M., Uittenbogaard, R. E., Mynett, A. and Verwey, A. (2007). "On

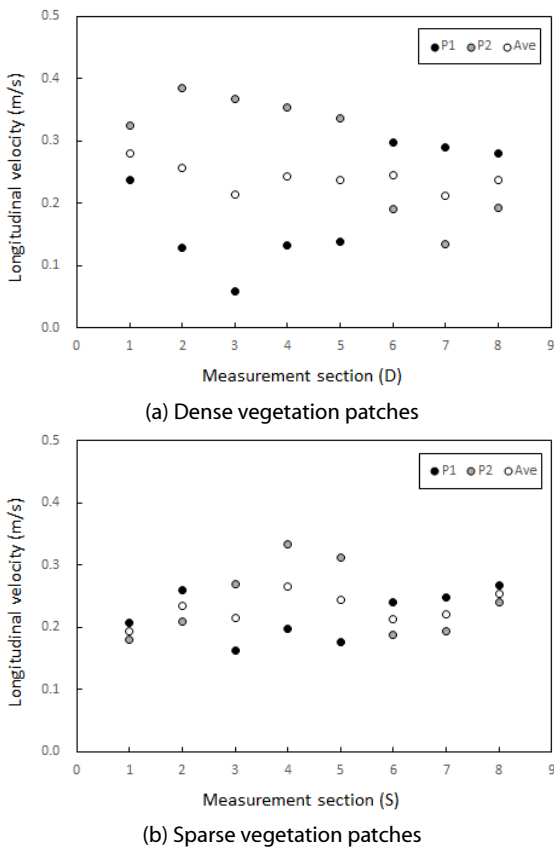


Fig. 12. Depth Averaged Longitudinal Velocity at the Measurement Sections

- inducing equations for vegetation resistance.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. 4, pp. 435-450.
- Camporeale, C., Perucca, E., Ridolfi, L. and Gurnell, A. M. (2013). “Modeling the interactions between river morphodynamics and riparian vegetation.” *American Geophysical Union, Review of Geophysics*, Vol. 51, No. 3, pp. 379-414.
- Crosato, A. and Saleh, M. S. (2011). “Numerical study on the effects of floodplain vegetation on river planform style.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 36, No. 6, pp. 711-720.
- Jang, C. L. and Shimizu, Y. (2007). “Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. 6, pp. 763-772.
- Morvan, H., Wright, N., Tang, X. and Crossley, A. (2008). “The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 2, pp. 191-208.
- Paul, M., Henry, P. Y. T. and Thomas, R. E. (2013). “Geometrical and mechanical properties of four species of northern European brown macroalgae.” *Coastal Engineering*, Vol. 84, pp. 73-80.
- Straatsma, M., van der Perk, M., Schipper, A. M., de Nooij, R. J. W., Leuven, R. S. E. W., Huthoff, F. and Middelkoop, H. (2013). “Uncertainty in hydromorphological and ecological modelling of lowland river floodplains from land cover classification errors.” *Environmental Modelling & Software*, Vol. 42, pp. 17-29.
- Thomas, R. E., Johnson, M. F., Frostick, L. E., Parsons, D. R., Bouma, T. J., Dijkstra, J. T., Eiff, O., Gobert, S., Henry, P. Y., Kemp, P., McLelland, S. J., Moulin, F. Y., Myrhaug, D., Neyts, A., Paul, M., Penning, W. E., Puijalon, S., Rice, S. P., Stanica, A., Tagliapietra, D., Tal, M., Tørum, A. and Voudoukas, M. I., (2014). “Physical modelling of water, fauna and flora: knowledge gaps, avenues for future research and infrastructural needs.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 52, No. 3, pp. 311-325.
- Tsujimoto, T. (1999). “Fluvial processes in streams with vegetation.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 789-803.
- van Dijk, W. M., Teske, R., van de Lageweg, W. I. and Kleinhans, M. G. (2013). “Effects of vegetation distribution on experimental river channel dynamics.” *WRR*, Vol. 49, No. 11, pp. 7558-7574.
- Van Oorschot, M., Kleinhans, M., Geerling, G. and Middelkoop, H. (2015). “Distinct patterns of interaction between vegetation and morphodynamics.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 41, No. 6, pp. 791-808.
- Vargas-Luna A., Crosato, A. and Uijttewaal, W. S. J. (2015). “Effects of vegetation on flow and sediment transport: comparative analyses and validation of predicting models.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40, No. 2, pp. 157-176.
- Warmink, J. J., van der Klis, H., Booij, M. J. and Hulscher, S. J. M. H. (2011). “Identification and quantification of uncertainties in a hydrodynamic river model using expert opinions.” *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 2, pp. 601-622.