

VFSMOD-w 모형을 이용한 청미천 유입 비점오염물 저감효율 연구

A Study on Trapping Efficiency of the Non-point Source Pollution in Cheongmi Stream Using VFSMOD-w

손민우*, 변지선*, 윤현덕**, 정태화***

충남대학교 토목공학과*, 명지대학교 토목환경공학과**, 한밭대학교 건설환경공학과***

Minwoo Son(mson@cnu.ac.kr)*, Jisun Byun(jsbyun@cnu.ac.kr)*,
Hyun-Doug Yoon(hdyoon@mju.ac.kr)**, Tae-Hwa Jung(thjung@hanbat.ac.kr)***

요약

본 연구는 VFSMOD-w 모형을 이용하여 비점오염물의 관리를 위한 식생대 설치 시 파종 식물의 종류, 식생대의 길이, 강우 조건이 저감 효율에 미치는 영향을 살펴보는 것을 목적으로 수행되었다. 연구를 위한 대상 지역으로 청미천 유역 내 원부교 부근의 나지를 선정하였다. 수정된 Manning의 조도계수가 동일한 값을 가지는 식물체의 경우 토사 저감 효율이 동일하게 계산되는 결과가 도출되었고, 식생대의 길이 및 식물체의 파종 간격이 토사 저감 효율에 가장 지배적인 영향을 미치는 것이 확인되었다. 동일한 강우 조건에서 식생대의 길이가 약 2배 증가할 때 토사 저감 효율이 많은 차이를 나타내지 않았다. 이러한 결과는 식생대의 길이가 증가할수록 토사 저감 효율이 증가하나, 특정 길이 이상일 경우 대부분의 토사가 포착되는 것을 의미한다. 따라서 식생대의 설치시 식생대 설치지역의 강우 특성을 고려하여 적절한 식물체의 파종 간격 및 식생대 길이를 결정하여야 한다고 판단된다.

■ 중심어 : | 비점오염물질 | VFSMOD-w | 식생대 | 토사 저감 효율 | 강우 조건 |

Abstract

This study aims to investigate the effect of vegetation type, length of vegetative filter strip, and rainfall on trapping efficiency of the non-point source water pollution. Numerical experiments are carried out using VFSMOD-w. It is known from this study that the vegetation having the same value of revised Manning roughness coefficient shows the similar trapping efficiency in VFSMOD-w. When the length of vegetative filter strip increases twice, the trapping efficiency increases negligibly small under the same condition of rainfall. From this finding, it is also known that most of sediment are removed within a certain length of vegetative filter strips. It is concluded that the installation of vegetative filter strip is determined under the consideration of the rainfall characteristics, space of vegetation, and length of vegetative filter strip.

■ keyword : | Non-point Source Water Pollution | VFSMOD-w | Vegetative Filter Strip | Trapping Efficiency | Rainfall Condition |

* 본 논문의 제1저자는 2014년 IHP 8단계-1차연도 연구사업, 제2저자는 2015년 충남대학교 자체연구과제의 지원을 받아 본 연구를 수행하였으며 제3저자는 2014년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 신진연구지원사업 (2014R1A1A1008095)의 지원을 받아 본 연구를 수행하였음.

접수일자 : 2015년 06월 18일

수정일자 : 2015년 07월 17일

심사완료일 : 2015년 08월 07일

교신저자 : 변지선, e-mail : jsbyun@cnu.ac.kr

1. 서론

1. 연구의 배경

비점오염물(Non-point Source Water Pollutant)은 오염원이 명확하지 않은 수질 오염물질을 뜻한다. 비점오염물은 강우시 지표면에 존재하던 오염 물질이 빗물에 씻겨 유출되는 형태로 하천으로 유입되므로 강우량에 비례하여 유출량이 증가하는 특징을 보인다[2]. 또한, 강우시에 특별한 처리 없이 하천에 직접적으로 유입되는 특성으로 인해 우리나라와 같이 계절별 강수량의 차이가 큰 환경에서는 비점오염물의 관리가 더욱 중요하다. 현재 전체 수질오염을 야기하는 물질 중 적게는 42%에서 많게는 69%를 비점오염물이 차지하는 것으로 추정되고 있으며 점점 증가 추세에 있다[11]. 장정렬 등(2004)[9]은 비점오염물 중 하나인 토사 이동 시 토사에 흡착되어 이동하는 질소와 인의 유출에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과, 질소와 인의 이동으로 인해 발생하는 부영양화 문제를 필수적으로 관리하여야 한다고 주장하였다. 비점오염물의 처리는 하천으로의 유입을 최소화 하는 것에 주안점을 두게 되는데, 대표적으로 제시되는 해결책으로 식물체를 통한 영양분 및 토양의 유실을 저감하는 식생대(Vegetative Filter Strip, VFS)의 설치가 있다. 식생대란 내리막 영역의 경계에 위치하여 표면 유출을 차단하기 위해 설치된 식생 밀집 지역을 말하며 토양 유실 감소와 수체로의 오염 물질 확산을 줄이기 위해 설치된다. 식생대는 강우 유출수의 유출 속도를 감소시키며, 물리적으로 오염물 여과 및 흡착작용을 하는 것으로 알려져 있다[7][10].

국내에서 식생대에 관한 연구는 수치 모형인 VFSSMOD-w를 이용한 연구가 활발하다. 조남철 등(2011)[10]은 사료 작물의 재배 과정에서 이용하는 가축 분뇨로 인한 비점오염물의 처리에 관한 연구를 수행하였다. 식생대를 이용한 현장 실험 결과, 식생대의 길이가 일정 길이 이상일 때 오염물이 현저하게 감소하는 것을 확인하였으며 식생대를 통해 오염물의 수계유입 농도를 줄일 수 있다고 주장하였다. 박윤식 등(2008)[5]은 VFSSMOD-w모형과 Soil and Water Assessment Tool(SWAT) 모형을 이용하여 식생대의 토사 저감 효

율에 영향을 주는 인자들을 분석하였다. 그 결과, 식생대의 폭과 시험포로부터의 유출량 영향이 지배적이라고 주장하였다. 따라서 식생대의 폭만 고려 가능한 SWAT 모형은 토사 저감 효율을 모의하는 경우에 한계를 가진다고 주장하였다. 이에 따른 해결책으로 새로운 Web-GIS based VFSSMOD-w 모형을 개발하였으며 개선된 모형을 이용하여 여러 시나리오 모의 결과와 기존 VFSSMOD-w 모형에 의한 결과의 비교를 통해 모형을 검증하였다. 서정훈과 최경숙(2013)[6]은 미국의 환경을 기반으로 개발된 VFSSMOD-w 모형을 우리나라의 일반적인 발경지 특성에 적용하는 경우에 나타나는 결과에 대한 연구를 수행하였다. 농촌진흥청의 농업토양정보시스템에서 제공하는 통계 자료를 수집하여 우리나라 발경지의 일반적인 특성을 분석하였다. 분석 자료를 이용하여 VFSSMOD-w 모형에 적용된 시험포의 규모, 면적의 형상, 경사를 지정하고 식생대의 길이 변화에 따른 토사량 저감효과를 모의하였다. 그 결과, 유출되는 토사의 양이 시험포의 경사가 급격할수록 규모와 형상에 많은 영향을 받는 것을 확인하였다. 또한, 강우량이 증가할수록 토사의 유출량이 급격하게 증가하는 것을 발견하였다. 이에 따라 강우량이 증가할 때 식생대의 길이도 비례하여 증가시켜 조성하는 것이 가장 바람직하나, 현실적으로 어려운 실정을 감안하여 식생대의 면적이 시험포 면적의 최대 20% 이상을 초과하지 않아야 한다고 주장하였다. Park et al. (2011)[21]은 많은 입력 자료를 요구하는 VFSSMOD-w 모형의 단점을 보완하기 위해 SWAT 모형과 VFSSMOD-w 모형을 결합하여 웹에서 이용이 가능하도록 하는 Web GIS-based VFSSMOD 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 우리나라 토지 특성검색이 가장 용이하도록 개발된 모형으로, 모든 토양 특성과 면적은 Google Map으로부터 얻을 수 있도록 설계되었다. 그러나 개발된 Web GIS 기반의 VFSSMOD 모형은 다양한 실제 사례 및 실험을 통해 검증되어야 한다고 주장하였다[21]. 국외에서는 VFSSMOD-w 모형을 이용한 연구 외에도 현장 실험에 기반을 둔 식생대의 효과에 대한 연구 역시 활발하다. Gharabaghi et al. (2006)[16]은 식물체의 종류, 식생대의 폭, 흐름 비율 및 토양의 상태에 따른 식생대의

유효성을 검증하기 위한 연구를 수행하였다. 총 3개 지점에서 현장 실험을 수행하였으며, 입구부와 출구부의 토사량 차이로부터 설치된 식생대에 따른 토사의 저감 효과를 산출하였다. 유사의 크기가 0.5 μm 부터 2.9 μm 의 범위에 해당하는 경우 5 m 내에서 토사 저감 효율이 약 62% 인 것이 확인되었으며, 68 μm 부터 151 μm 의 경우에는 토사가 약 97% 까지 제거되는 것이 확인되었다. 여러 입경 분포별 토사 저감 효율을 평균적으로 살펴보면, 약 2.5 m 이내에서 50% 정도의 토사 저감 효율을 나타내는 것이라 주장하였다. 그러나 토사 입경이 40 μm 보다 작을 경우, 난류 에너지가 작더라도 입자가 충분히 부유 상태를 유지할 수 있기 때문에 식생대를 통한 토사의 저감효과가 감소할 것이라 주장하였다. 또한, 식물체의 파종간격이 좁을수록 저감효과가 증가한다고 주장하였다. 여러 실험 결과들을 종합해볼 때, 실험에서 독립변수로 설정하였던 식생대의 폭, 식물체의 종류, 토양의 입도분포와 같은 요소들이 식생대의 토사 저감효과에 매우 큰 영향을 미치는 중요한 요소라 하였다. 이러한 결과는 많은 연구 결과와도 일치한다 [14][15][23]. Gharabaghi et al. (2006)[16]의 연구에서는 2.5 m 내에서 평균적으로 약 50%에 이르는 토사 저감효과를 보이는 것으로 나타났으며 이는 식생대 설계에 있어 매우 중요한 결과라 판단된다. 이 결과는 식생대 설치에 있어 식생대의 길이(토사 혹은 강수의 흐름 방향 길이)와 저감 효율이 선형적으로 비례하지 않고, 최대 저감 효율을 나타내는 유효 최대 길이는 여러 인자에 따라 결정된다는 연구 결과와도 일치한다[22]. 영향을 주는 인자로는 시험포(Source Area), 지형 특성, 식생대의 수리학적 특성 등이 포함된다. Blanco-Canqui et al. (2004)[13]는 유출, 토사, 영양 물질의 유출 감소에서 식생대를 지팽이풀 장벽(Barrier)과 함께 설치하는 경우 지팽이풀 장벽의 유효성에 대한 연구를 실험실 실험을 통해 수행하였다. 그 결과, 식생대만 설치하였을 때에 비하여 지팽이풀 장벽이 함께 설치될 때 유출에 따른 비점오염물의 감소가 훨씬 더 효율적이라 주장하였다. 장벽이란 경사에 걸쳐 매우 빠르게 식재되어 구성된 식생대를 말한다. 이때, 경사를 따라 하천을 향하는 유출 방향으로 설치되는 식생대와

달리 장벽은 경사를 가로질러 설치된다는 점에서 차이가 있다.

2. 이론적 고찰

과거의 연구 사례들을 살펴본 결과, 비점오염물의 처리를 위해 연구가 활발히 진행되고 있으며, 저감 기법으로서 식생대가 널리 이용되고 있음을 알 수 있다. 환경부[12]에 따르면, 식생대는 비점오염저감 뿐 아니라 녹지경관으로 기능하며 여타의 장치형 시설보다 우수한 것으로 보고되고 있다. 또한, 유지관리 비용이 적게 드는 것으로 확인되고 있다[12]. 식생대에 관한 연구로는 현장 실험이 가장 이상적이나 현실적으로는 어려운 점이 있으며 많은 연구에서 VFSSMOD-w 모형을 이용하여 연구를 수행하였음이 확인된다. 이에 본 연구에서는 우리나라의 청미천 유역을 대상으로 식생대 유무에 따른 비점오염물의 저감효과를 살펴보았다. 청미천은 한강의 제 1지류임에도 불구하고, 기 수행된 연구에서 청미천을 대상으로 하는 연구는 찾아볼 수 없었다. 또한, 식생대 설치구간에서의 강우 유출 특성을 대변할 수 있는 강우의 도달시간을 기준으로 강우 조건을 적용하여 수행한 연구 또한 살펴볼 수 없었다. 이에 본 연구는 VFSSMOD-w 모형을 이용하여 비점오염물의 관리를 위한 식생대 설치 시 파종 식물의 종류, 식생대의 길이, 강우 조건이 토사 저감 효율에 미치는 영향을 살펴보는 것을 목적으로 수행되었다.

II. 연구 방법 및 연구 대상 지역

1. VFSSMOD-w

VFSSMOD-w 모형은 국내외에서 가장 널리 이용되는 식생대 모의 프로그램으로, 시험포(Source Area)에서 침식된 토사가 하천으로 유입될 때 식생대(Vegetative Filter Strip, VFS)를 지나며 발생하는 토사 저감 효율을 모의하는 모형이다[19]. VFSSMOD는 Unit Hydrograph(UH) 모듈과 VFS 모듈로 구성된다. UH 모듈에서 시험포의 유출 특성 및 토사의 특성을 모의한 후, 이를 바탕으로 VFS 모듈에서 시험포로부터

유입되는 유입량, 유출량, 침투량 등을 모의한다[그림 1]. UH 모듈은 미국 자연자원보조국(National Resources Conservation Service, NRCS)에서 제안한 방법을 통해 유출수문곡선을 산출하며, 범용토양유실 공식(Universal Soil Loss Equation, USLE)을 적용하여 토양의 침식량을 계산한다. NRCS방법에서는 호우의 형태를 총 4개로 구분하고 있으며, 지속시간 및 강우량이 결정되면 호우 형태에 따라 강우의 시간 분포가 결정된다. NRCS방법에서는 강우량 및 유역 내 저류량 사이의 실제 및 잠재량의 비가 같다고 가정한다(식 1).

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (1)$$

여기서, F_a 는 유출이 시작된 후 유역에 저류된 추가적인 물의 양 또는 침투량(mm), P_e 는 유효우량(mm), P 는 총 강우량(mm), I_a 는 초기손실(mm)이다. S 는 최대 잠재보유수량(mm)으로 유출곡선지수(Curve Number, CN)을 통해 계산된다. 총 강우량은 유효우량, 초기손실, 침투의 합이므로 위의 가정을 적용하여 정리하면 식 (2)와 같다.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

식 (2)는 NRCS방법에 의해 유효우량 또는 직접유출량을 산정하는 기본식이다. 강우의 초기손실은 차단, 침투, 지면저류 등을 포함하여 유역의 최대잠재보유수량과 밀접한 관계가 있다.

토양의 침식량은 식 (3)에 나타난 USLE를 적용하여 계산한다. USLE는 정상 년의 강우 에너지(R)를 기준으로 연간 토양 침식량(A)을 추정하도록 개발된 모형이다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

여기서, K 는 토양 침식성 인자($\text{kg}\cdot\text{h}/\text{N}\cdot\text{m}^2$), LS 는 지형 인자, C 와 P 는 각각 경작 인자와 토양보전 대책 인

자를 나타낸다. VFS 모듈은 식생대 부분을 모의하는 도구로 Green-Ampt 침투 모형, Kinematic Overland Flow 모형, Sediment Filtrations 모형으로 구성된다. VFS모듈은 Green-Ampt 침투 모형을 통하여 초과 강우량을 산정하고, UH 모듈로부터 산정된 시험포의 유출 특성과 함께 Kinematic Overland Flow 모형을 이용하여 침투층에서의 유출심과 유출량을 모의한다.

Sediment Filtrations Model(GRASSF and SEDIMOT II)은 침투층의 유출심과 유출량, UH 모듈로부터 얻은 시험포의 침투 특성을 이용하여 식생대 내 토사의 이동 및 토사량을 계산한다. VFSSMOD-w 모형의 시험포 및 식생대에 대한 개념도는 [그림 1]에서 나타난다.

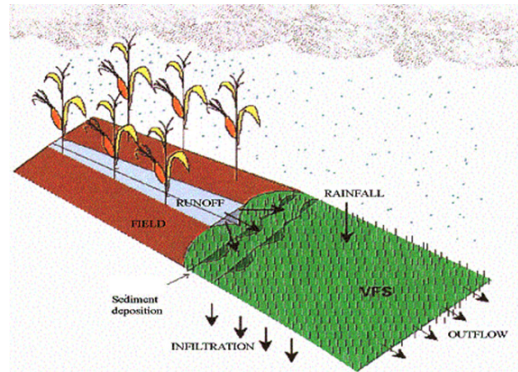


그림 1. 시험포 및 VFS에 대한 개념도[20]

2. 연구 대상 지역

청미천은 한강의 제 1지류로 유로 연장은 60.69 km이며 하천의 총 길이는 1,460.72 km이다. 유역 면적은 595.13 km^2 이며 유역의 평균 경사는 15.46%이다. 청미천 유역은 한강 유역 내 중앙부에 위치하며, 국제수문 프로그램(International Hydrological Program, IHP)의 대상 유역 중 하나로 비교적 장기간의 수문 자료가 구축되어 있다. 유역의 형상과 위치, 토양도, 토지피복도, 수치지도와 같은 각종 지형 정보들 또한 풍부하다. 이러한 장점을 고려하여 청미천 유역을 연구 대상 지역으로 선정하였으며 사전 답사를 통해 식생대 설치를 모의할 지점을 선정하였다. 지점 선정의 첫째 기준은 토지의 이용 상태이다. 수변 지역이 나지로 구성되어 있을

경우, 강우시 하천으로 비점오염물의 즉각적인 유입이 발생한다. 수변 지역과 하천 사이에 도로가 존재할 경우, 도로에서 1차적인 오염물 감소가 예측되므로 나지와 하천이 맞는 곳을 중점적으로 검토하였다. 이러한 곳에 식생대를 설치할 경우 하천 내 오염물 유입 저감

효과가 다른 곳에 비하여 보다 효과적일 것이라 판단된다. 둘째로 배수통관의 유무를 확인하였다. 우수관거 혹은 농수로를 통해 강우가 하천으로 유입될 경우 다량의 유수 및 비점오염물 유입이 발생하므로 식생대 설치가 보다 절실하다. 이러한 기준을 통해 가장 적합하다고 판단된 원부교 우안에 위치한 나지를 모의 지점으로 선정하였으며, [그림 2]에 나타난다. 원부교는 청미천의 주요 수위관측소인 청미 수위관측소가 위치한 교량으로, 나지가 형성되어 있으며 나지 부근에는 배수 통관이 위치하여 식생대 설치를 위한 최적의 장소라 판단된다.

III. 모형의 적용

1. 입력 자료 구축

VFSMOD-w 모형을 통해 식생대를 설계하고 토사 저감 효율을 모의하기 위해서 필요한 자료는 강우자료와 토양 자료로 구분된다. 강우자료는 국토해양부에서 개발한 “한국확률강우량도”를 통해 생성하였으며, 유역의 특성인 도달시간을 기준으로 도달시간보다 짧은 강우와 긴 강우에 대하여 연구를 수행하였다. 도달시간에 이르면 유역 내 저류 공간이 모두 채워져 유역에 내린 강우가 모두 유출에 기여를 하게 된다. 이에 따라 강우가 유출량으로 직결되는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교할 수 있도록 강우의 지속시간을 설정하였다. 이 때, 강우는 이전의 연구사례에서 적용된 바 있는 100년 재현빈도의 강우로 결정하였다. 시험포는 선정 지점과 인접한 주거 지역으로 결정하였으며 시험포의 면적 및 길이는 Arc-GIS를 활용하여 계산하였다. 나지와 맞는 방향의 시험포 폭은 약 125.78 m이다. 즉, 오염물이 배출될 가능성이 있는 시험포의 폭이 125.78 m이므로 이를 고려하여 식생대의 길이와 폭을 변화하며 오염물 저감효율을 분석하였다. 시험포와 맞는 식생대의 길이는 125.78 m보다 약간 작은 100 m로 고정된 값을 적용하였다. 서정훈과 최경숙(2013)[6]의 연구에서는 식생대의 면적이 시험포 면적의 20%를 초과하지 않아야 한다고 주장하였다. 본 연구 역시 서정훈과 최경숙(2013)[6]에 기초하여 식생대의 길이를 설정할 때, 식생



(a) 원부교 우안 나지



(b) 청미 관측소 위치



(c) 나지 부근 우수 관거

그림 2. 원부교 부근 나지 현황

대 면적이 시험포 면적의 20%를 초과하지 않도록 길이를 설정하였다. VFMOD-w 모형에서는 유효우량 산정을 위해 NRCS방법을 이용하고 있으며, 이를 위해 CN값이 결정되어야 한다. 시험포의 주된 토지이용을 살펴본 결과 대부분이 논으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 토양형별 침투능의 크기를 고려하지 않았으며 CN값으로 79를 적용하였다. 강우는 4가지의 호우 형태 중 우리나라의 일반적 호우 형태에 해당하는 속하는 Type II를 적용하였다. 토양은 사양토로 구성되어 있으며, 사양토의 평균 직경으로 알려진 98 μm 를 입자 크기의 대표값으로 설정하였다. USLE 모형의 적용을 위한 강우 침식 인자는 모형 내에서 Williams (1975)[24]가 제시한 수정 강우 침식 인자 모형에 의해 자동으로 계산된다. 경작 인자 및 토양 보전 대책 인자는 시험포에 주거지가 존재하는 경우 각각 0.01, 1.0으로 제시된다[20]. 토양 침식성 인자는 토양 종류 및 유기물 함량으로부터 결정되는 값으로, 흙토람으로부터 얻은 토양 정보(사양토, 유기물 함량 2%)를 근거로 0.24를 적용하였다[18]. 지형 인자는 시험포의 길이 및 경사를 근거로 모형 내에서 자동으로 계산된다. 식물체의 종류는 식생대 설치에 있어 가장 추천되는 큰김의털 (Tall Fescue), 에레모클로아(Centipedegrass), 독보리 (Ryegrass) 등 총 3종류를 선정하였다[17]. 김맹중 등 (2010)[1]은 독보리가 파종이 20 cm 간격으로 줄뿌림 되었을 때 월동률이 높다고 주장하였으며, 이기원 등 (2014)[8]은 큰김의털의 파종간격을 20 cm로 설정하였다. 따라서 큰김의털과 독보리의 파종 간격을 20 cm로 가정하였다. 골프장용 잔디로 흔히 이용되는 에레모클로아의 경우, 잔디를 약 3 cm에서 5 cm 간격으로 파종하는 것에 근거하여 파종 간격을 4 cm로 가정하였다[4].

2. 적용 결과 및 분석

시험포 유역의 도달시간에 따라 강우의 지속시간 (t_D)이 5분인 경우와 20분인 경우로 구분하여 연구를 수행하였다. 강우 강도는 지속시간이 5분일 때와 20분일 때 각각 397.3 mm/hr, 167.3 mm/hr이다. NRCS방법을 이용하여 지속시간 별로 계산된 유출수문곡선은 [그림 3]과 같으며, 강우 조건별로 계산된 주요 인자들은

표 1. 강우 조건별 주요 계산 결과

구분	지속시간 (min)	
	5	20
도달시간 (min)	7.61	
유출량 (mm)	4.42 (104.43 m ³)	16.27 (384.79 m ³)
초기 손실 (mm)	13.50	
최대잠재보유수량 (mm)	67.52	
침투 흡수량 (m ³ /s)	0.032	0.15
침투시간 (hr)	0.70 (약 42분)	0.54 (약 32분)
표면 포화 시간 (hr)	-	0.08
유류 강우의 지속시간 (hr)	0.08 (4.8분)	0.25 (15분)

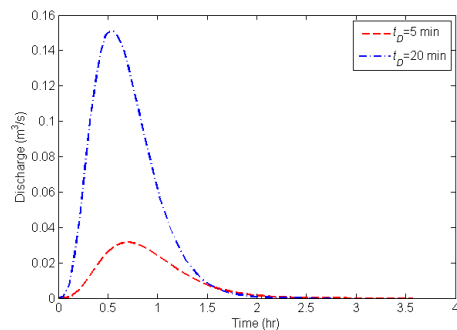
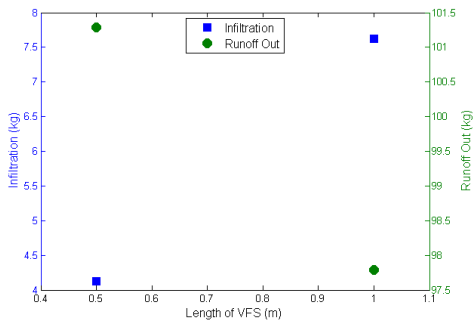


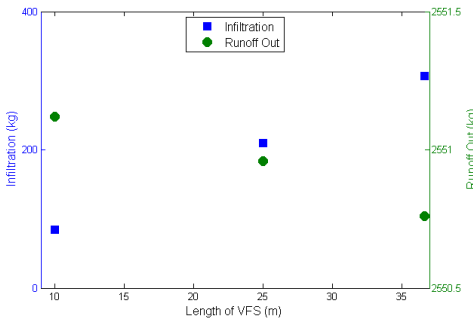
그림 3. NRCS 단위도법을 이용한 유출수문곡선

[표 1]에 나타난다. [그림 3] 및 [표 1]과 같이 UH 모듈로부터 얻어진 강우자료는 VFS 모듈의 입력 자료로 활용된다. VFS 모듈에서는 시험포로부터 흘러 내려와 유출에 포함된 토사의 양, 유입된 토사의 양 중 식생대 내에 퇴적되는 양, 그리고 식생대 밖으로 유출되는 토사의 양을 계산한다. [그림 4]는 지속시간 5분 및 20분의 강우에 대하여 식생대 길이 변화에 따른 수문학적 특성 변화를 나타낸다. 시험포로부터 유출되는 유출의 총량은 모두 식생대로 유입되며, 식생대로의 유입량은 모두 침투와 유출로 빠져나가게 된다. 지속시간 5분의 강우 조건에서는 식생대의 길이에 관계없이 시험포로부터의 유입량이 모두 105.408 kg으로 나타났다. 그러나 식생대의 길이가 0.5 m에서 1.0 m로 증가할 때 식생대로의 침투량이 증가하고 이에 따라 총 유출량이 감소하는 것이 확인된다. 지속시간 5분의 강우 조건에서는 식생대의 길이에 관계없이 시험포로부터의 유입량이 모두 105.408 kg으로 나타났다. 그러나 식생대의 길이가 0.5 m에서 1.0 m로 증가할 때 식생대로의 침투량이 증가하

고 이에 따라 총 유출량이 감소하는 것이 확인된다[그림 4](a). 이러한 경향은 [그림 4](b)에서도 나타나며 지속시간 20분 강우 조건에서의 식생대로의 유입량은 식생대의 길이가 증가할수록 미세하게 감소하는 것이 나타났다. 식생대의 길이가 10 m, 25 m, 36.67 m로 증가할 때 유입량은 2551.56 kg, 2551.39 kg, 2551.16 kg으로 감소하였다. 유입량 감소의 원인은 동일한 시험포로부터의 유출량이 식생대 면적의 증가로 인해 유출심이 감소하였기 때문이라 판단된다. 모형 내 유출량은 유출고를 기준으로 산정된다. 식생대 길이가 0.5 m 정도 변할 경우에는 유출량 산정에 거의 영향이 없으며 약 15 m 이상의 변화가 있을 때 약 0.17 kg 감소하는 것이라 판단된다. [그림 5]은 강우 지속시간 5분 조건하에서 각각 큰김의털, 독보리 및 에레모클로아를 파종하였을 때, 유사 식생대 내에 포착되는 양과 유출되는 유사량을 나타낸다. 강우의 지속시간이 5분일 때, 식생대로 유입되는 유사량은 모두 63.246 kg으로 동일하다. [그림 5](a)



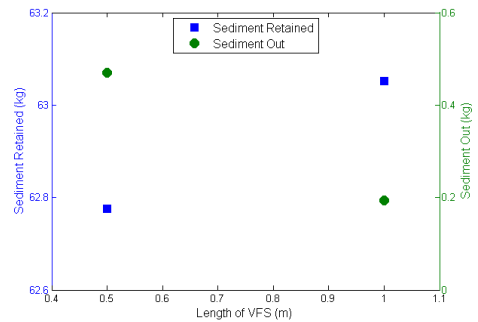
(a) 강우조건 - 지속시간 5분



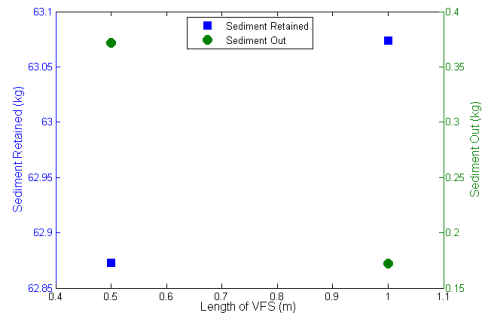
(b) 강우조건 - 지속시간 20분

그림 4. 식생대의 길이에 따른 수문학적 특성

는 큰김의털 및 독보리의 결과이며 [그림 5](b)는 에레모클로아의 결과를 나타낸다. 이 때, 큰김의털 및 독보리의 경우 다른 종류의 식물체임에도 불구하고 동일한 결과가 도출 되는 것이 확인된다[그림 5](a). 이는 두 식물체를 식생대에 파종할 경우 토사 저감 효율에는 큰 차이가 없을 것임을 의미한다. 이러한 결과는 식물체 파종으로 인하여 수정된 Manning의 조도계수가 동일한 값을 가지기 때문이라 판단된다. 식물체의 종류별로는 식생대의 설치 길이와 관계없이 독보리와 큰김의털을 파종하는 경우보다 에레모클로아를 파종할 경우에 배출되는 토사의 양이 눈에 띄게 감소하는 것으로 나타난다. Haan et al. (1994)[17]에 따르면 큰김의털 및 독보리의 경우 수정된 조도계수 값이 0.056이며 에레모클로아의 경우 0.074이다. 토사 저감 효율이 에레모클로아를 파종할 경우에 더 크게 계산되는 것은 수정된 Manning의 조도계수가 더 큰 값을 가져 하상 거칠기의 증가에 따른 결과로 생각해 볼 수 있다. [그림 6]은 강



(a) 큰김의털 및 독보리



(b) 에레모클로아

그림 5. 식생대의 길이에 따른 포착 유사량 모의 결과 - 강우의 지속시간 5분

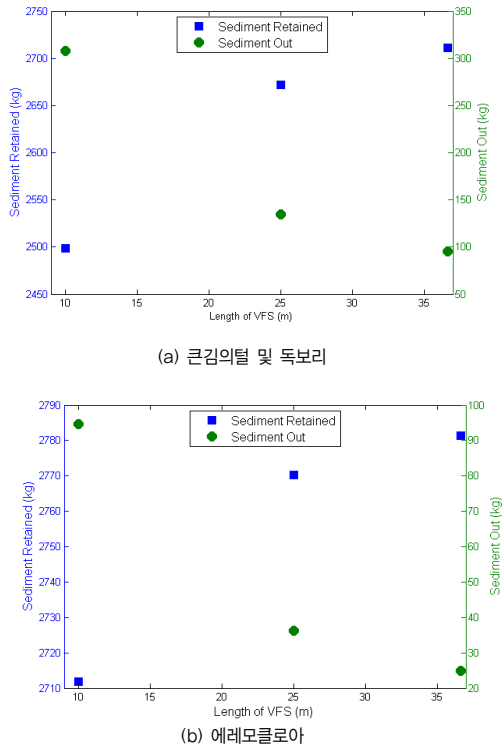


그림 6. 식생대의 길이에 따른 포착 유사량 모의 결과 - 강우의 지속시간 20분

우 지속시간 20분 조건하에서 유사가 식생대 내에 포착되는 양과 하천으로 유출되는 유사량을 나타낸다. [그림 6](a)는 큰김의털 및 독보리의 결과이며 [그림 6](b)는 에레모클로아의 결과를 나타낸다. 식생대의 폭이 일

정할 때 식생대의 길이에 따라 식생대 내에 퇴적되는 유사량이 증가하는 것이 [그림 5] 및 [그림 6] 모두에서 확인된다. [표 2] 및 [표 3]은 강우 형태 및 식생대의 길이에 따른 포착효율을 정리한 것이다. [표 2]는 지속시간 5분의 강우가 내릴 경우의 포착효율 결과이다. 식생대의 폭이 100 m로 고정되어있을 때, 식생대의 길이가 1.0 m 일 때에도 대부분의 토사가 모두 식생대에 퇴적되는 결과가 도출된다. 또한 식생대의 길이가 0.5 m로 1.0 m에 비해 50%가 감소하는 경우에도 토사 저감효율이 99%이상인 것이 확인된다. 지속시간 5분의 강우가 내린 경우에는 시험포로부터 침식되어 식생대로 유입되는 토사의 양이 매우 적기 때문에 지속시간 20분의 강우시에 비해 짧은 길이의 식생대만으로도 충분한 토사 저감 효율을 나타낼 수 있는 것이라 판단된다. [표 3]은 지속시간 20분의 강우가 내릴 경우의 포착효율 결과이다. 비교적 충분한 강우가 내리는 지속시간 20분의 경우 식생대 길이가 최대값인 36.67 m일 때 96% 이상의 저감 효율을 나타낸다. 큰김의털 또는 독보리를 파종할 경우 식생대의 길이가 10 m 이하일 때에는 저감효율이 90% 이하로 감소하는 결과가 도출된다. 그러나 식생대의 길이가 25 m와 36.67 m인 경우를 비교했을 때, 토사 저감 효율이 크게 차이가 나지 않으며 모두 95%이상의 저감 효율을 나타내는 것이 확인된다. 토사 저감 효율의 경우에서도 모든 경우에 독보리와 큰김의털보다는 에레모클로아를 파종하는 경우에 동일한 면적의 식생대 설치에서도 더 높은 효율을 나타낸다.

표 2. 포착효율에 대한 결과 - 강우의 지속시간이 5분인 경우

강우 형태		식물의 종류	식생대의 길이 (m)	
지속 기간 (분)	강우량 (mm)		0.5 m	1.0 m
5	33.12	큰김의털 및 독보리	99.3%	99.6%
		에레모클로아	99.4%	99.7%

표 3. 포착효율에 대한 결과 - 강우의 지속시간이 20분인 경우

강우 형태		식물의 종류	식생대의 길이 (m)		
지속 기간 (분)	강우량 (mm)		10 m	25 m	36.67 m
20	55.77	큰김의털 및 독보리	89.0%	95.2%	96.6%
		에레모클로아	96.6%	98.7%	99.1%

IV. 결론

본 연구는 VFSSMOD-w 모형을 이용하여 비점오염물의 관리를 위한 식생대 설치 시 파종 식물의 종류, 식생대의 길이, 강우 조건이 저감 효율에 미치는 영향을 살펴보는 것을 목적으로 수행되었다. 연구를 위한 대상 지역으로 청미천 유역 내 원부교 부근의 나지를 선정하였다.

본 연구 결과로부터 식생대 길이의 최대값과 설치 가능 폭이 일정할 때, 토사 저감 효율에 식물체의 파종 간격과 식생대의 길이가 가장 지배적인 역할을 하는 것으로 나타났다. 먼저, 식물체의 파종 간격이 좁을수록 저감 효율은 증가한다. 그러나 과도하게 좁은 파종 간격은 식물체의 성장을 저해하므로, 식물체 성장 및 월동률을 고려한 파종 간격의 결정이 요구된다. 또한, VFSSMOD-w 모형에서는 식물체의 종류가 수정된 Manning의 조도 계수만으로 구분되는 것이 확인되었다. 이에 따라, 파종으로 인해 수정된 조도 계수가 동일한 큰김의털과 독보리는 토사 저감 효율이 동일하게 계산되는 것이 확인된다. 모형 내에서는 식생 높이를 고려하고 있으나 결과에 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다. 독보리와 에레모클로아의 경우 동일한 식생 높이를 가정하여 비교한 결과, 수정된 조도계수가 큰 값을 가지는 에레모클로아의 경우가 토사 저감 효율이 더 높게 계산된다. 그러나 에레모클로아의 파종간격이 독보리의 파종간격에 비해 약 20% 정도로 매우 조밀하기 때문에 수정된 조도계수에 따른 결과라 판단하기에는 무리가 있다. 둘째로 효율을 결정하는 가장 지배적인 인자는 식생대의 길이이다. 모든 모의 결과에서 식생대의 길이가 증가할수록 저감 효율이 증가하였다. 그러나 지속시간 5분의 강우가 내리는 경우는 식생대의 길이가 0.5 m 및 1.0 m인 두 경우 모두 99% 이상의 효율을 보이며 크게 차이가 나지 않는다. 이를 통해 식생대의 길이를 길수록 효율은 증가하는 것이 확인된다. 그러나 경제적인 측면을 고려하였을 때 가장 적은 면적의 식생대 설치로 최대 효율을 나타내는 길이를 상황에 따라 설정하여야 함을 알 수 있다. 따라서 식생대의 설치 시 식물체의 종류 이외에도 파종에 따라 수정되는 조도 계

수, 경제적인 파종 간격 및 식생대 길이, 식생대 설치 지역의 강우 특성 등 여러 특성을 고려하여 결정해야 한다고 판단된다.

모형의 적용 결과에서 지속시간이 도달시간 보다 짧은 경우에는 식생대를 모의하는 모듈에서 강우 자체의 양이 나타나지 않는 결과 또한 도출되었다. 이는 강우 지속시간이 짧아지는 경우 식생대 내로의 유출은 존재하나 유효 강우가 존재하지 않는 것으로 가정하는 VFSSMOD-w 모형의 한계에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 강우에 따른 직접적인 유량 공급이 없다고 계산되는 것으로 식생대 내 흐름이 없음을 의미하는 것은 아니다. 모형 내 유출수문곡선 계산 과정에서 10분이 기준 단위로 설정되어있기 때문인 것으로 판단되며, 향후에 보다 나은 결과의 모의를 위해서는 시간 단위를 조정하는 방법에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

- [1] 김맹중, 서성, 김종근, 최기준, 김기용, 이상훈, 장선식, 김태일, 권웅기, 전병수, 최기춘, “내한성 이탈리안 라이그라스 품종별 파종량이 종자생산에 미치는 영향,” 한국초지조사료학회지, 제30권, 제3호, pp.247-256, 2010.
- [2] 국립환경연구원, “하천·호수의 수질보전과 유역 관리에 관한 한·일 공동세미나,” 1997.
- [3] 김진호, 한국현, 이종식, “농촌유역의 강우사상별 농업 비점원오염물질 유출특성,” 한국물환경학회지, 제24권, 제1호, pp.69-77, 2008.
- [4] 남상용, 김경남, 김용선, “골프장 관리조건에서 시비와 토양에 따른 토양산도의 경시적 변화,” 한국잔디학회지, 제16권, 제1호, pp.11-17.
- [5] 박윤식, 김종건, 임경재, 신용철, 안재훈, 김기성, 허성구, “초생대의 유사 저감 효과 모의를 위한 Web GIS VFSSMOD 시스템의 구축,” 2007 공동추계학술발표회 논문집, 대한상하수도학회·한국물환경학회, 단일호, pp.106-107, 2007.
- [6] 서정훈, 최경숙, “우리나라 일반적인 발경지 특성

- 을 고려한 식생대 토사저감효과 분석,” 한국농공학회논문집, 제55권, 제4호, pp.121-131, 2013.
- [7] 안재환, 윤상린, 김석구, 박윤식, 임경재, “VFSMOD를 이용한 경작지의 고형물질 유출 저감효과,” 대한환경공학회지, 제34권, 제12호, pp.792-800, 2012.
- [8] 이기원, 최기준, 김기용, 지희정, 박형수, 이동기, 이상훈, “파종시기가 톨 페스큐 생육특성 및 종자생산성에 미치는 영향,” 한국초지조사료학회지, 제34권, 제2호, pp.103-107, 2014.
- [9] 장정렬, 최선화, 권순국, “포스터발표: 비점오염원 관리; 저수지내 침강지의 수질정화 효과,” 한국물환경학회, 공동춘계학술발표회, 단일호, pp.553-556, 2004.
- [10] 조남철, 김원호, 서성, 윤세형, 이기원, 최기준, “사료작물 재배지에서 초지식생대를 이용한 NO₃-N 저감효과에 관한 연구,” 한국동물자원과학회지, 제53권, 제1호, pp.51-57, 2011.
- [11] 환경부, “물환경관리 기본계획 - 4대강 대권역 수질보전 기본계획(’06 ~ ’15),” 2006.
- [12] 환경부, “비점오염저감시설 설치 및 관리·운영 매뉴얼,” 2014.
- [13] H. Blanco-Canqui, C. J. Gantzer, S. H. Anderson, E. E. Alberts, and A. L. Thompson, “Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss,” Soil Science Society of American Journal, Vol.68, No.5, pp.1670-1678, 2004.
- [14] R. B. Daniels and J. W. Gilliam, “Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters,” Soil Science Society of American Journal, Vol.60, No.1, pp.246-251, 1996.
- [15] T. A. Dillaha, J. H. Sherrard, D. Lee, S. Mostaghimi, and V. O. Shanholtz, “Evaluation of vegetative filter strips as a best management practice for feed lots,” Journal - Water Pollution Control Federation, Vol.60, No.7, pp.1231-1238, 1988.
- [16] B. Gharabaghi, R. P. Rudra, and P. K. Goel, “Effectiveness of Vegetative Filter Strip in Removal of Sediments from Overland Flow,” Water Quality Research journal of Canada, Vol.41, No.3, pp.275-282, 2006.
- [17] C. T. Haan, B. J. Barfield, and J. C. Hayes, *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*, Academic Press, 1994.
- [18] L. W. Mays, *Stormwater Collection Systems Design Handbook*, McGraw-Hill, 2001.
- [19] R. Muñoz-Carpena and J. E. Parsons, “Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips,” Journal of Hydrology, Vol.214, No.1-4, pp.111-129, 1999.
- [20] R. Muñoz-Carpena and J. E. Parsons, *VFSMOD-w Vegetative Filter Strips Modelling System - Model Documentation and User's Manual*, University of Florida, 2014.
- [21] Y. Park, B. A. Engel, Y. Shin, J. Choi, N. W. Kim, S. J. Kim, D. Kong, and K. Lim, “Development of Web GIS-based VFSMOD system with three modules for effective vegetative filter strip design,” Water, Vol.5, No.3, pp.1194-1210, 2013.
- [22] J. E. Parsons, R. B. Daniels, J. W. Gilliam, and T. A. Dillaha, “The effect of vegetation filter strips on sediment and nutrient removal from agricultural runoff,” In Proceeding of the Environmentally Sound Agriculture Conference, ed. A.B. pp.324-332, 1991.
- [23] C. A. Robinson, M. Ghaffarzadeh, and R. M. Cruse, “Vegetative filter strip effects on sediment concentration in cropland runoff,” Journal of Soil Water Conservation, Vol.50, No.3, pp.227-230, 1996.
- [24] J. R. Williams, “Sediment-yield prediction with the Universal equation using runoff energy factor,” In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources,

ARS-S-40. USDA-Agricultural Research Services,
pp.244-252, 1975.

저 자 소 개

손 민 우(Minwoo Son)

정회원



- 1999년 2월 : 서울대학교 토목공학과(공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2009년 12월 : U. of Florida, Civil and Coastal Engineering

Dept. (Ph.D)

- 2011년 8월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 부교수
<관심분야> : 수공학

변 지 선(Jisun Byun)

정회원



- 2013년 8월 : 충남대학교 물리학과(이학사)
- 2013년 8월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 토목공학과(박사과정)

교 대학원 토목공학과(박사과정)

<관심분야> : 수공학

윤 현 덕(Hyun-Doug Yoon)

정회원



- 2000년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부(공학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2011년 9월 : Oregon State Univ., School of Civil and

Construction Eng. (Ph.D)

- 2012년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 조교수

<관심분야> : 유체역학

정 태 화(Tae-Hwa Jung)

정회원



- 2001년 2월 : KAIST 토목공학과(공학사)
- 2003년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학박사)

- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 건설환경공학과 부교수

<관심분야> : 유체역학