

수변 식생대 조성에 따른 생태수문학적 특성 분석

김남원 · 김지태[†] · 정일문 · 이정우

한국건설기술연구원 수자원 환경연구본부 수자원연구실

Analysis of Ecohydrologic Characteristics based on Development of Riparian Zone

Nam Won Kim · Jitae Kim[†] · Il Moon Chung · Jeongwoo Lee

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology
(Received 20 July 2009, Revised 17 September 2009, Accepted 29 September 2009)

Abstract

The ecohydrologic characteristics according to planting in riparian zone for the riparian restoration are analyzed in this research. The ecohydrologic components due to land use change in riparian zone from existing land cover to planted area such as pasture and wildrye are simulated in the test basin with the integrated SWAT-MODFLOW model. After analysis of change of the hydrologic properties such as surface flow, lateral flow, transpiration and soil water in riparian zone, it is revealed that soil water is one of the key factors and planting of wildrye can increase soil water in riparian zone. The simulation performance of the SWAT-MODFLOW model is validated in this study and it is expected that this model can be used to evaluate various riparian restoration scenarios.

keywords : Ecohydrologic components, Planting in riparian zone, Riparian restoration, SWAT-MODFLOW

1. 서론

개발의 논리에 맞추어 하천을 도시개발의 일환으로 정비하면서 우리나라의 하천은 인위적인 모습으로 변경되어 왔다. 그러나 최근 이러한 하천을 자연의 상태로 되돌리기 위한 하천 복원 사업이 진행되고 있으며, 특히 생태학적 요소를 중요시하는 생태학적 복원이 하천 복원의 키워드로 떠오르고 있다. 생태학적 하천 복원의 과정에서 고려되는 사항은 수변지역에 식생대를 조성하는 것이며, 이때 식생의 종류 및 특성 등 식생 자체에 관한 분석이 필수적이지만, 이에 못지않게 중요한 것은 식생의 생장에 필수적인 영향을 미치는 하천의 수문학적 특성에 대한 분석이다. 현재까지의 연구는 주로 식생대 조성에 따른 유사량 변화 또는 비점오염원 저감효과 등을 유역단위에서 논의하는 연구가 주를 이루고 있다. 방법론으로는 유역단위 오염 해석에 장점을 갖고 있는 SWAT 모형을 이용한 연구가 대표적이다.

김익재 등(2007)은 식생완충지대의 비점오염원 저감효과를 SWAT 모형을 이용하여 실시하였는데, 교목 및 잔디지대의 식생을 토지 피복도 변화의 방법으로 정자천 소유역에 대하여 모의한 결과 유사농도는 28.7%의 저감효과를 보였으나, T-N, T-P의 농도는 증가하였다는 결과를 제시하였고, 향후에는 지하수 수위, 식생 성장변화 등 다양한 설

계인자를 고려하고 정확한 모형 DB를 개발해야 할 것을 제안하였다. 한건연 등(2007)은 낙동강의 5개댐 유역에 수변녹지를 조성하는 경우 T-N, T-P 등 비점오염원이 감소하며 수변구역의 범위가 증가함에 따라 감소범위가 더욱 커지는 연구결과를 제시하였다. 최대규 등(2008)은 수변완충지대 설치에 따른 유역단위의 토사유출량 저감 효과 분석을 위해 SWAT 모형의 filter strip 기능을 적용하였으며, 그 결과 공간적으로는 유역출구와 가까운 소유역에서 저감효과가 가장 크며, 수변완충지대의 폭에 따른 저감효과도의 결과 수변완충지대를 5~10 m로 하는 경우 저감효율이 가장 크다는 결과를 도출하였다.

최근에는 SWAT 모형에서 고려할 수 없었던 문제들을 해결하고자 하는 노력이 진행되어 다른 모형과의 연계에 관한 연구가 진행되고 있다. 박윤식 등(2008)은 수변완충지대의 폭만을 고려할 수 있는 SWAT 모형의 한계를 극복하고자 VFSMOD-W 모형을 이용하여 폭 이외에도 강우에 따른 유출, 식생에 관한 인자 등에 의한 유사저감 효과를 모의할 수 있도록 개선하였다. 임경재 등(2008)은 SWAT과 REMM 모형을 연계한 prototype 버전의 SWAT-REMM(Liu et al., 2007) 시스템을 개선하여 하천 일부 구간에 수변림을 조성하는 경우 유사저감효과를 평가하였다.

이와 같이 식생대 조성에 따른 유역 단위의 비점오염원 및 유사 등에 관한 총량적인 저감효과 모의에 대한 연구는 비교적 활발히 진행되고 있는 반면, 식생대 조성 지점에서 지표 및 지하의 물 이동에 대한 생태수문학적인 접근에 대한 연구 분야는 초기 단계에 있으며, 특히 지표수-지하수

[†] To whom correspondence should be addressed.
jtkim@kict.re.kr

상호작용 모의 및 분석에 관한 부분은 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 하천변 식생대 조성에 따른 생태수문학적 특성 변화를 식생대 조성지점에서 분석하고자 한다.

2. 연구방법

생태하천 복원을 위해 수변 식생대를 조성하는 경우 발생하게 되는 생태수문학적 특성 변화를 식생대 조성 지점에서 분석하기 위해 완전연동형 지표수-지하수 결합모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 이용하여 적용 가능성을 확인하고, 토지이용 변경 전·후의 생태수문학적 특성 변화를 모의하였다. 이를 위해 시험유역 하천변의 기존 토지이용도가 초지(pasture), 갯버들(wildrye) 등의 식생이 식재된 토지로 변경된 경우로 가정하여 모의·분석을 실시하였다.

2.1. 적용모형

SWAT-MODFLOW 모형은 미 농무성에서 개발한 SWAT (Arnold et al., 1993) 모형과 지하수 해석에 많이 적용되고 있는 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988) 모형을 완전연동시킨 것이다. 기존에 Sophocleous 등(1997)이 분포된 수리지질 매개변수를 가진 대수층과 변화하는 양수량을 모의할 수 있는 통합지표수/지하수 모형인 SWATMOD를 개발한 바 있으나, 김남원 등(2004a, 2004b)이 SWATMOD의 안정성과 순차적 연계라는 한계를 극복하기 위해 SWAT으로 부터 시공간적으로 변동하는 함양량을 MODFLOW의 분포형 셀(cell)에 입력하고 MODFLOW의 RIVER패키지를 이용, 지표수-지하수의 수두차이에 따른 물 교환량을 반영할 수 있는 완전 연동형 지표수-지하수 통합모의 모형을 개발하여 그 적용성을 검증한 바 있다(Kim et al., 2008). 그러나 아직까지 본 모형이 식생대 조성에 따른 수문특성 변화 분석에 적용된 적은 없어, 본 연구에서는 생태수문학적 분석에 대한 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 모형의 적용가능성을 확인하고자 하였다.

2.2. 모형의 적용

본 연구에서는 북한강수계의 공지천 유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 공지천은 지방2급 하천이며, 상류로부터 역시 지방2급 하천인 학곡천, 신춘천, 퇴계천 및 소하천 등의 지류와 연결되어 있다. 본 연구에서는 공지천 유역 중 유량관측자료를 확보한 남춘천교를 유역의 출구점으로 하여 그 상류부 46.7 km²를 면적으로 하는 유역을 대상유역으로 선정하였다. 모형의 계산시간, 모형결과의 정확도 등을 판단하여 30 m 공간해상도를 가지는 DEM을 사용하였는데 그림에서 보는 바와 같이 대상유역은 동쪽과 남쪽의 산악지역으로부터 발원하여 북서방향으로 유하하는 지형적 특성을 보이고 있다(Fig. 1). 토지이용은 다양한 토지이용상태를 반영할 수 있도록 환경부에서 제공한 증분류 토지이용도(1:25,000)를 사용하였다. Fig. 2는 토지이용도를 DEM의 공간해상도인 30 m로 가공한 것을 나타낸 것인데, 대상유역은 주로 산림, 임야로 구성되어 있고, 하류부는 도시지역

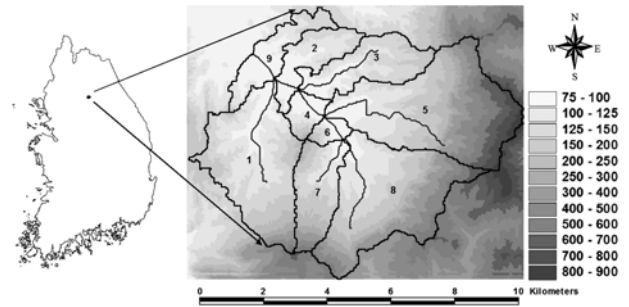


Fig. 1. Study area and DEM.

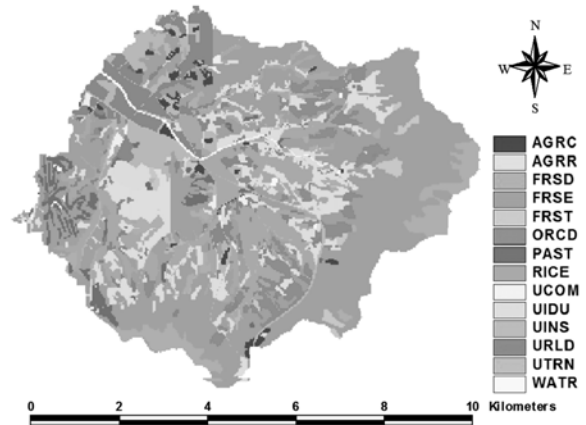


Fig. 2. Land use map.

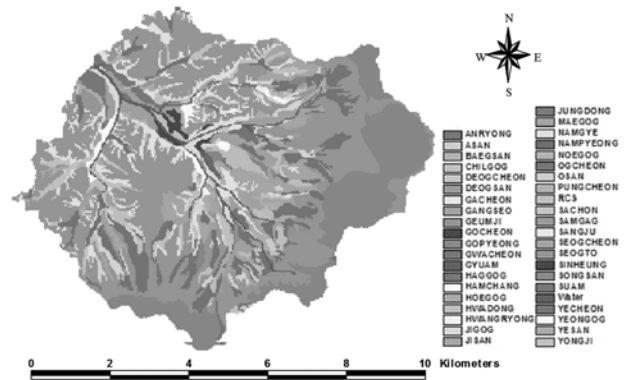


Fig. 3. Soil type map.

으로 구성되어 있다. 토양도는 Fig. 3에 표시한 바와 같이 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다.

대상유역에 대하여 2000년부터 2007년까지 기간에 대하여 SWAT-MODFLOW 모형을 적용한 모의를 실시하였으며, 2000년과 2001년은 위밍업기간으로 제외하고 2002년부터 2007년까지 6년간의 모의결과를 대상으로 분석하였다.

Fig. 4에는 모형의 검보정 결과를 나타내었다. 침투유량에서 다소 차이가 나는 것을 제외하고는 비교적 관측값(춘천시, 2008)과 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5와 Fig. 6에는 지하수 함양량의 분포와 지하수위 분포를 도시하였다. 그림에서 나타낸 바와 같이 SWAT-MOD-

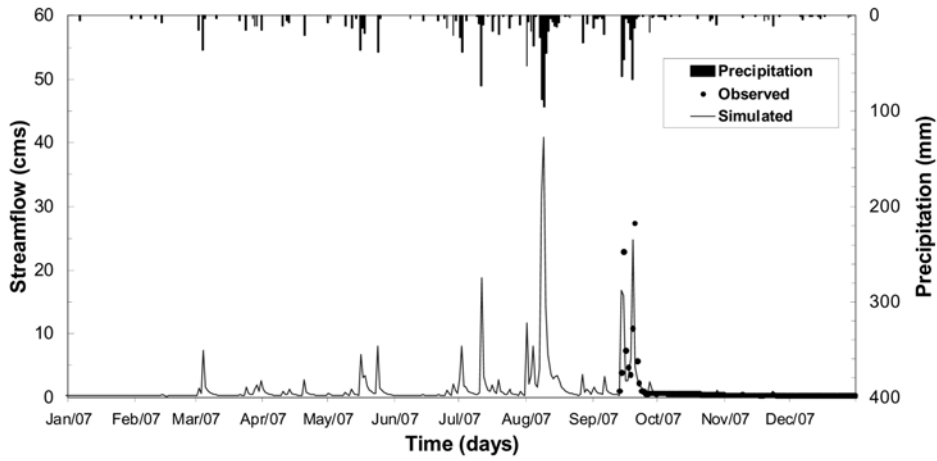


Fig. 4. Streamflow hydrograph.

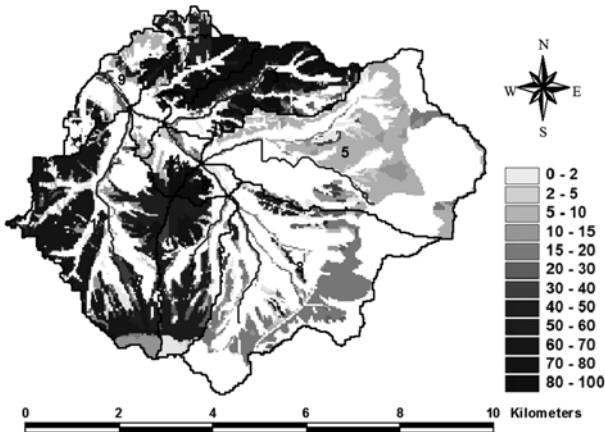


Fig. 5. Groundwater recharge distribution (August, 2002).

FLOW 모형은 지하수 함양량 및 지하수의 시공간 분포를 모의할 수 있는 장점을 갖고 있어 지하수 함양 및 이에 따른 지하수 유동을 입체적으로 분석할 수 있다.

Fig. 7에는 유역의 하류부에서 지표수와 지하수의 교환량

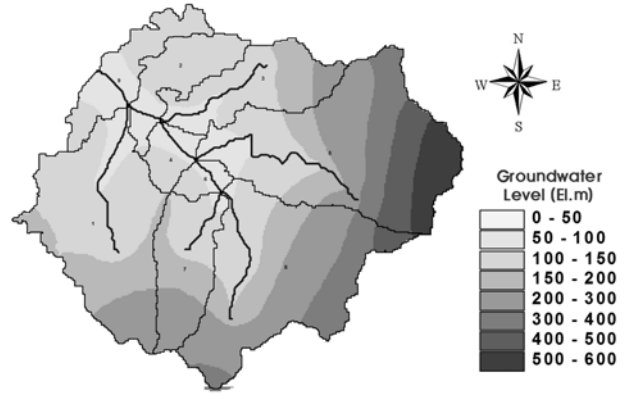


Fig. 6. Groundwater level distribution (August 8, 2002).

을 도시하였다. 그림에서 교환량이 음의 값인 경우는 지하수가 하천으로 유입되는 경우를, 양의 값은 하천에서 지하수로 유입이 발생하는 경우를 나타내는데 대상유역은 주로 지하수가 하천으로 유입되는 이득하천인 것을 알 수 있다.

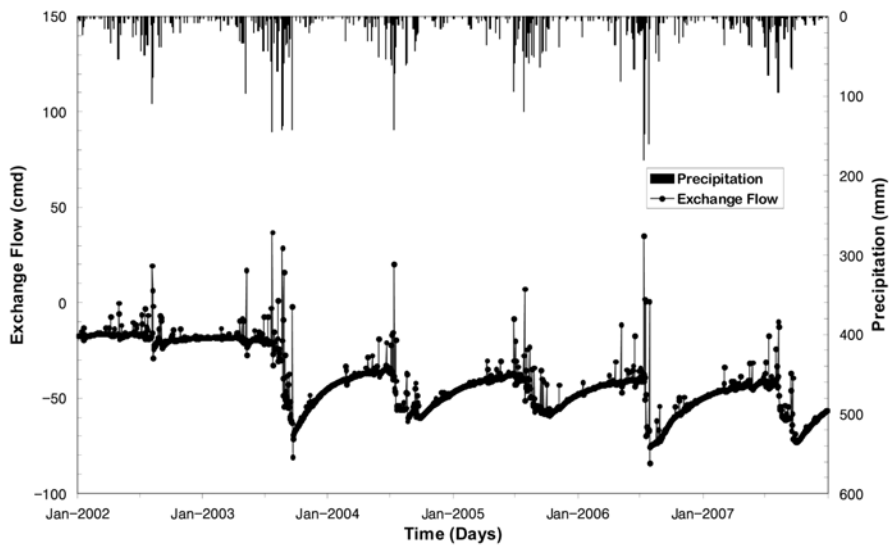


Fig. 7. Surface-groundwater exchange.

3. 결과 및 고찰

식생대 조성에 따른 생태수문학적 특성 변화를 분석하기 위해 대상유역의 하천 주변에 식생대를 조성하는 경우를 모의하였다(Fig. 8). 식생은 초지와 갯버들의 두 종류를 대상으로 하였으며, 유역 내 두 지점을 선정하여(P1, P2) 그 결과를 비교하였다. 생태수문학적 특성 변화 분석을 위해 식생대 조성에 따른 각 지점의 지표유출, 중간유출, 증산 및 토양수분 등의 성분 변화를 분석하였다.

P1, P2 지점의 식생대 조성 전 기존 토양피복 상태는 각각 농경지(Agricultural Land-Row Crops, AGRR) 및 논(RICE)으로, 식생대 조성에 따라 농경지에서 초지 및 갯버들로, 논에서 초지 및 갯버들로 토지이용이 변화하는 경우 수문특성 변화를 분석하였다. 두 지점의 특성변화 현황을 Table 1에 나타내었다.

수변 식생대를 조성한 하천 복원 전/후의 수문특성 변화를 살펴보기 위해 지표유출, 중간유출, 증산 및 토양수분의 변화율을 무차원으로 도시하였다(Fig. 9, Fig. 12). 이 중에서 증산의 경우 본 연구에서는 식생에 의한 수문학적 특성 변화 분석에 초점을 맞추었으므로 증발산에서 식생에 의한 증산만을 분리하여 분석하였다. 각 성분의 변화양상을 파악하기 위해 식생대 조성 전, 즉 기존상태의 각 성분량을 기준으로 하여 초지 및 갯버들을 각각 식재한 경우의 성분량의 변화율을 표시하였다. 즉, 각 성분량에서 변화율이 1보다 작은 경우는 기존의 상태에 비해 감소한 경우를, 1보다 큰 경우는 증가한 경우를 나타낸다.

Fig. 9의 (a)에 나타낸 바와 같이 P1 지점에서 지표유출(surface flow)은 기존의 토지피복인 농경지에 비해 초지 및 갯버들을 조성하는 경우 모두 감소하는 경향을 보이고 있으며(초지 약 30%, 갯버들 약 28% 감소), 중간유출(lateral flow)은 모두 증가하는 양상을 보이고 있다(Fig. 9(b), 초지 약

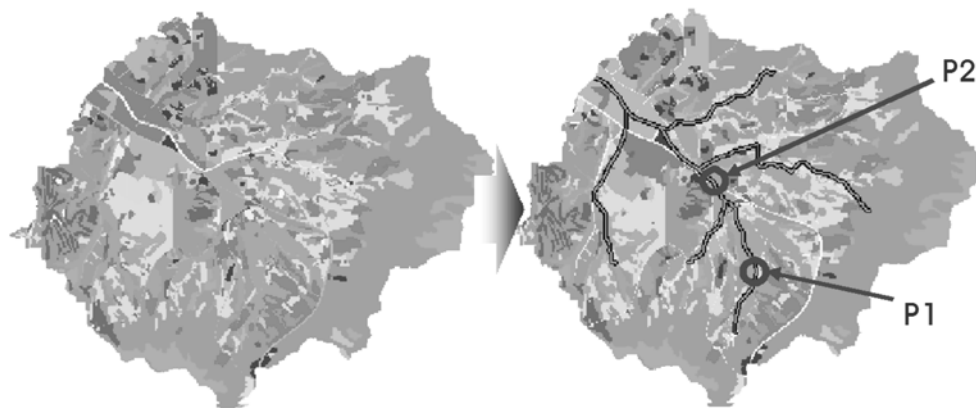


Fig. 8. Simulation of riparian restoration: to Pasture/Wildrye.

Table 1. Hydrologic components changes from agricultural land to pasture and wildrye

Location	P1			P2		
	Before (AGRR)	Pasture	Wildrye	Before (RICE)	Pasture	Wildrye
CN2	93	87	80	92	92	87
Soil type	Namgye			Geumji		

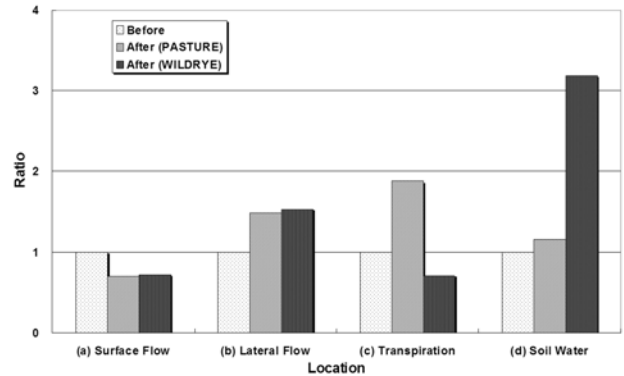


Fig. 9. Ratio of hydrologic properties before/after restoration (at P1).

49%, 갯버들 약 53% 증가). 이는 토지피복이 변경되면서 유출곡선지수 CN이 감소한 데 기인하는 것으로 판단된다.

SWAT에서는 토지피복 및 수문학적 토양군별로 미리 정해진 CN2(선형함수조건 : 보통)값을 초기 입력값으로 하여 CN1(건조)과 CN3(습윤)를 계산하고, 이 값들과 포장용수량, 위조점, 포화수분량 등의 토양물리적 특성값으로부터 토양수분량과 CN 간의 관계를 유도하여 토양수분량에 따른 CN을 일별로 계산하게 된다. 본 연구에서는 이러한 CN의 일별 변화를 분석하기 위해 SWAT 모형 중 서브루틴 Surface.f에서 일별 CN값을 출력하도록 하여 그 결과를 비교하였다.

Fig. 10에는 2004년의 일 유출곡선지수 변화를 도시하였는데, 초지 및 갯버들을 식재하는 경우 CN이 감소하여 지표유출이 감소하는 것을 알 수 있다. 이에 따라 지표유출량이 기존 토양에 비해 감소하게 되어 더 많은 양의 물이 토양으로 침투되어 중간유출이 증가하게 되는 것으로 판단된다. 초지와 갯버들을 비교하면 초지의 CN2가 87인 반면 갯버들의 CN2는 80으로 초지가 높으므로, Fig. 10에서

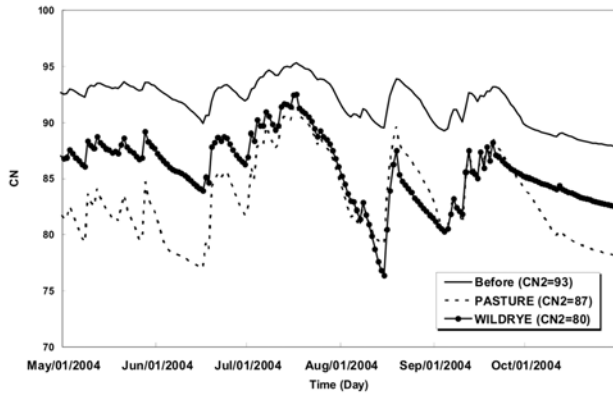


Fig. 10. Time variation of CN (at P1, 2004).

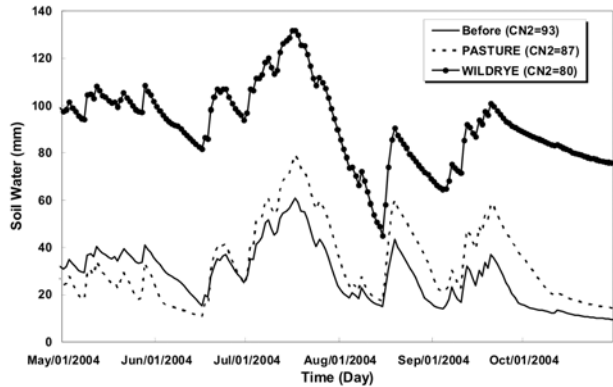


Fig. 11. Time variation of soil water (at P1, 2004).

초지의 일별 CN이 높게 도시될 것으로 예측되었으나 갯버들의 값이 더 크게 모의된 것을 확인할 수 있다. 이는 토양수분의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 9(c)에서 증산량(transpiration)은 초지를 식재하는 경우 약 87% 증가하며 갯버들을 조성하는 경우 약 29% 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 피복조건에 따른 생장 정도의 차이에서 기인하는 것으로, 특히 갯버들의 경우 엽면적지수가 상대적으로 작아 증산량이 작게 모의되는 것으로 판단된다. SWAT에서 모의되는 초지의 최대 엽면적지수(potential maximum leaf area index)는 4.0이며 갯버들은 3.0이다.

Fig. 9의 성분 중 (d) 토양수(soil water)는 초지의 경우 다소 증가(약 16%), 갯버들의 경우에는 약 3배 이상 증가하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 기존 토양피복인 농경지에 비해 CN값의 감소로 침투량이 증가하였으며 증산이 초지에 비해 작아 세 가지 토지피복 유형 중 가장 높은 토양수량을 보유하는 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 Fig. 11에 도시한 바와 같이 토양수의 일별 변화에서도 확인할 수 있다. 갯버들 식재시 이와 같이 토양수량이 상대적으로 매우 크기 때문에 Fig. 10에서 갯버들의 CN2가 초지보다 낮음에도 불구하고 일별 CN이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 SWAT모형에서 CN이 토양수분량에 따라 일별로 변화하기 때문이다.

Fig. 12에는 P2 지점에서의 수문특성 변화를 도시하였다. P2 지점의 지표유출은 P1 지점에서 초지 및 갯버들 식재

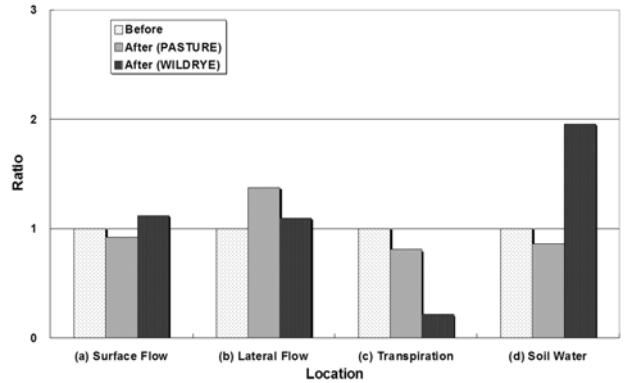


Fig. 12. Ratio of hydrologic properties before/after restoration (at P2).

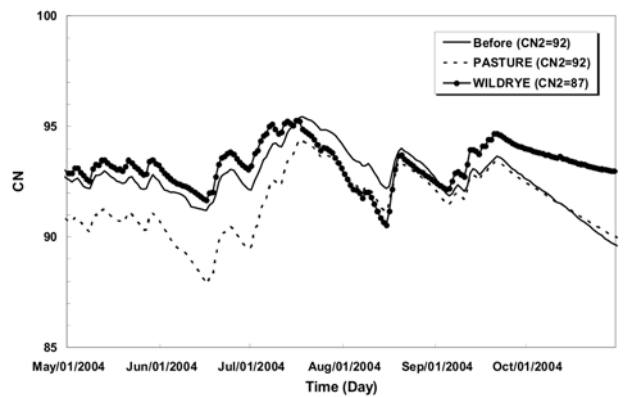


Fig. 13. Time variation of CN (at P2, 2004).

시 모두 기존 토지피복(농경지)에 비해 지표유출이 감소한데 비해 초지는 다소 감소(약 18%)하는 반면 갯버들은 다소 증가(약 12%)하는 경향을 보이고 있으며 그 변동폭은 P1 지점에 비해 작다. P1 지점의 경우 기존 토지피복인 농경지의 CN2는 93, 초지 및 갯버들은 각각 87 및 80인 반면 P2 지점의 경우 기존 토지피복인 논 CN2는 92, 초지 및 갯버들은 각각 92 및 87로 P1 지점에 비해 높으며 따라서 기존 토양피복과 식생 조성시 CN2의 차이가 P1 지점에 비해 P2 지점이 작아 지표유출의 변동폭이 P2에서 P1에 비해 상대적으로 작게 모의된 것으로 보인다. P2에서 초지 및 갯버들의 CN2가 P1에 비해 크게 입력된 것은 P1과 P2 지점의 토양통이 상이한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 13에는 P2 지점에서 일별 CN을 도시하였다. 기존 토지이용인 논과 초지의 CN2가 동일함에도 불구하고 일별 CN은 초지가 더 작게 모의되고 있는데 이는 토양수가 논에 비해 감소한데 원인이 있는 것으로 판단된다. 갯버들의 경우 CN2가 상대적으로 가장 작지만 토양수가 가장 많아서 일별 CN이 다른 토지이용의 CN을 상회하는 것으로 모의되고 있으며 이에 따라 지표유출이 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 12(b)에서 중간유출 성분을 살펴보면 초지를 식재하는 경우 약 38% 증가하였으며 갯버들은 약 9% 증가하는 것으로 나타나고 있다. 초지의 경우는 지표유출 감소로 침투량이 증가하여 토양수량이 증가한 것으로 보인다. 갯버들

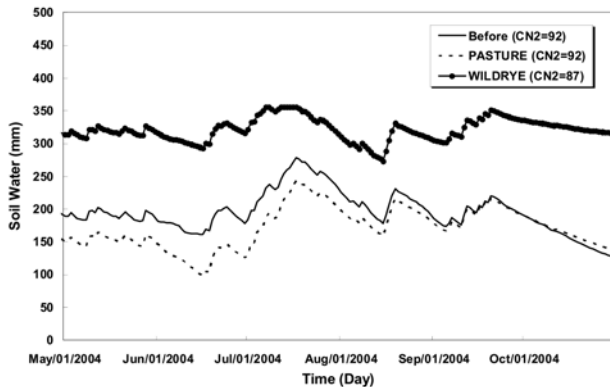


Fig. 14. Time variation of soil water (at P2, 2004).

의 경우는 지표유출 증가로 침투량이 감소하여 중간유출이 기존의 토지피복인 논에 비해 감소할 것으로 예상하였으나 갯버들의 증산량이 매우 작아 토양수가 상대적으로 높게 유지되어 중간유출이 다소 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 12(c)의 증산량은 초지 및 갯버들 모두 기본 토지피복인 논에 비해 감소한 것으로 나타났는데 이는 피복조건별 성장정도의 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 12(d) 토양수의 경우 초지는 약 14% 감소한 반면 갯버들은 약 95%가 증가한 것으로 모의되었다. 갯버들의 토양수가 이렇게 증가한 것은 P1 지점과 마찬가지로 증산으로 손실되는 수분이 적음으로 인해 다른 피복조건에 비해 토양수량이 상당량 증가한 것으로 판단된다. 초지의 경우 중간유출로 빠져나간 토양수량이 커서 전반적으로 토양수가 감소한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 토양수의 일별 분포를 도시한 Fig. 14에서도 확인할 수 있다. P2 지점에서 2004년의 토양수 분포를 살펴보면 전체적으로 갯버들의 토양수분이 가장 높으며 기존 토양 및 초지의 순으로 분포하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 토양수분이 높아지면 지표수-지하수 교환량에도 영향을 미쳐 보다 활발한 상호작용 형성에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

SWAT-MODFLOW 모형을 이용하여 하천변 식생대 조성에 따른 생태수문학적 특성 변화를 분석하기 위하여 초지 및 갯버들을 식재하는 경우 지표유출, 중간유출, 증산, 토양수 등의 성분 변화를 모의·분석하였다.

지표유출, 중간유출, 증산, 토양수 등의 성분은 서로 밀접한 연계성을 갖고 있으며 식생대 조성에 따라 그 특성이 변화하는 것으로 확인되었다. 이 중에서 가장 중요한 영향을 미치는 성분은 토양수로서 토양수의 함량에 따라 CN에 영향을 주고 이에 따라 지표유출 및 중간유출 성분이 영향을 받게 되는 것을 알 수 있었다. 또한 토양수량에 영향을 주는 요소는 증산인데 증산량은 식생의 종류에 따른 고유한 특성으로서 엽면적지수, 근근역 등에 의해 영향을 받으며 본 연구에서 적용한 식생 중에서는 갯버들의 증산량이 상대적으로 작아 많은 토양수를 유지할 수 있는 것으로 확인되었다.

이와 같이 SWAT-MODFLOW는 수변 식생에 중요한 요소인 생태수문 특성 분석에 효과적으로 활용될 수 있으며, 향후 생태하천 복원 등의 계획 수립 및 설계 시 중요한 요소기술로도 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단의 “자연하안창출 및 하안변화 유도기술 개발(과제번호 : 07-I-3)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김남원, 정일문, 원유승(2004a). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발. *한국수자원학회논문집*, 37(6), pp. 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승(2004b). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용. *한국수자원학회논문집*, 37(6), pp. 509-515.
- 김익재, 손경호, 김정곤(2007). SWAT 모델을 이용한 수변 완충지역에서 비점오염원 저감효율 평가. *학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 1819-1823.
- 박윤식, 김종건, 김남원, 박준호, 장원석, 최중대, 임경재(2008). VFSSMOD-W 모형을 이용한 SWAT 모형의 초생대 유사 저감 효율 모듈 개선. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(4), pp. 473-479.
- 임경재, 조재필, 김익재, 김남원, 최중대(2008). 하천 일부 구간에서의 수변림 조성에 따른 수질 개선 효과 모의를 위한 SWAT-REMM ArcView GIS 시스템의 개선 및 평가. *학술발표회논문집*, 한국수자원학회, pp. 1290-1294.
- 최대규, 박무중, 김재철, 김상단(2008). SWAT 모형을 이용한 수변완충지대 설정에 따른 토사유출량 저감 효과분석. *한국방재학회논문집*, 8(4), pp. 111-118.
- 춘천시(2008). *공지천 수질개선 기본계획*.
- 한건연, 김동일, 박경옥(2007). SWAT을 이용한 수변구역 조성에 따른 낙동강유역의 비점오염원 저감효과 분석. *학술발표회논문집*, 한국수자원학회, pp. 597-601.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., and Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142, pp. 47-69.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G. (2008). Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, 356, pp. 1-16.
- Liu, Y., Yang, W., and Wang, X. (2007). GIS-based integration of SWAT and REMM for estimating water quality benefits of riparian buffers in agricultural watersheds. *Transactions of the ASABE*, 50(5), pp. 1549-1563.
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6*, Chapter A1, p. 528.
- Sophocleous, M. S., Perkins, S. P., Stadnyk, N. G., and Kaushal, R. S. (1997). Lower Republican stream-aquifer Project, Final Report. Kansas Geological Survey Open File Report 97-8, 1930 Constant Avenue, University of Kansas, Lawrence, KS 66047-3726.