

자연하안조성을 위한 SWAT-K 모의치 기반 유황 분석

김남원 · 이정우 · 정일문* · 김지태

한국건설기술연구원 수자원연구소

(2011년 9월 22일 접수; 2011년 11월 7일 수정; 2011년 11월 21일 채택)

Analysis of Flow Duration Based on SWAT-K Simulation for Construction of Natural Riparian

Nam-Won Kim, Jeongwoo Lee, Il-Moon Chung*, Jitae Kim

Department of Korea Institute of Construction Technology, Water Resources Research,
Gyeonggi-do 411-712, Korea

(Manuscript received 22 September, 2011; revised 7 November, 2011; accepted 21 November, 2011)

Abstract

In this study, the method of estimating hydrologic information (water depth, submerged period etc.) on the proper selection of construction point and scale as well as vegetation type suggested for the design of natural riparian rehabilitation structure. Long-term comprehensive watershed model SWAT-K(Korea) was applied to this purpose. Flow duration analysis was conducted to analyze the hydrologic characteristics of Pyungchang watershed at which the 'bangtul' construction method was tested. For this purpose 20 years (1989-2008) rainfall runoff analysis was carried out. Based on the simulated daily streamflow data, flow duration curve was made to analyze the flow characteristics, and the water depth hydrograph was made to analyze the water depth distribution at the cross section. Finally, the information for the selection of proper vegetation according to the submerged period is suggested.

Key Words : SWAT-K, Natural riparian rehabilitation, Flow duration analysis, Vegetation

1. 서론

최근 우리나라에서는 하천의 수생태계 복원을 위해서 하안에 설치된 호안블럭과 같은 인공구조물을 제거하고 자연석과 식재를 조성하거나 인공구조물을 최소화하고 구조물과 식생이 혼합된 구조로 개조하는 등 자연에 가까운 형태와 구조로 만드는 자연하안조

성사업이 시행되고 있다(<http://www.ecowater.re.kr>). 이렇게 생태하천 조성을 위해서는 하안에 조성될 식생의 종류와 분포 및 적용 공법에 관한 정보 뿐만 아니라, 기본적으로 복원하고자 하는 하천 구간에 흐르는 유량특성에 관한 정보가 필요하다. 하천수량이 연중 풍부한 구간인지, 홍수시에 간헐적으로 흐르는 구간인지, 지하수 유출량이 많아 평상시에도 충분한 수량이 공급되는 구간인지 등을 파악하여 생태하천을 조성하는데 필요한 유량이 공급될 수 있는지를 우선적으로 평가해야 한다. 따라서 복원 하천에 대한 장기적인 수문관측자료를 근거로 한 유황분석자료를 필요로 한다. 그러나 복원하천구간의 위치적 임의성 때문에

*Corresponding author : Il-Moon Chung, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do 411-712, Korea
Phone: +82-31-910-0334
E-mail: imchung@kict.re.kr

※ 본 논문의 일부는 2010 한국수자원학회 학술발표회에 소개되었습니다.

관측자료가 없거나, 있더라도 유황분석을 할 만큼 충분한 기록치가 없는 경우가 대부분이다. 따라서 복원 하천의 유황특성 등 수문정보를 추정 또는 생성할 수 있는 방법이 요구된다. 특히, 하안 식생대의 식물군락은 침수기간에 따라 적정 서식영역이 존재하므로 유황분석에 따른 하천수량 평가는 하안에 조성될 식물종을 결정하는데 중요한 지표가 되므로 정교한 수문정보생성기술이 필요하다. 한편, 자연하안을 조성하기 위해 다양한 공법들이 적용되고 있는데 이러한 공법들이 효율적으로 기능을 발휘하기 위해서는 대상하천의 수문학적 특성에 대한 분석이 수행되어야 한다(김 등, 2010). 자연하안 조성을 위한 공법 설계시 공법의 적용 위치, 규모, 제원 등을 선정하기 위해서는 대상 하천의 유량, 수심 등에 대한 수문학적 정보가 필요하다. 그러나 이러한 정보를 정량적으로 분석·제공할 수 있는 기법에 대한 연구는 아직까지 초기 단계에 머무르고 있으며, 실제로 자연형 하천공법을 적용할 때 수문학적 정보가 충분하게 반영되고 있지 못하고 있는 실정이다.

생태와 수문학의 관련 연구는 1960년대부터 이루

어졌으며, 생태학자들과 수문학자들의 초기 공동연구로서 댐 하류의 하천유량 관리를 위해 어류의 필요유량에 대한 연구가 1970년대에 시작되었다. 이와 같은 연구의 일환으로 하천유량 증분 방법(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM)과 물리적 서식지 모의 시스템(Physical HABitat SIMulation system, PHABSIM) 등이 미국 어류 야생동물관리국(US Fish and Wildlife Service)에 의해서 개발되었다(Bovee, 1982). PHABSIM은 수리학적 모형과 결합되는데, 이는 비유량에 대한 하도의 가중 가용면적(Weighted Usable Area; WUA)을 산출하기 위한 특정 종(species), 서식단계(life stage)에 대한 수심, 유속, 유량, 서식지 최적 환경 정보의 현장 측정자료에 의해 보정된다. 따라서, 다양한 유량에 대해서 분석하는 것이 하천 관리를 위한 정보제공에 유리하게 적용될 수 있다. 우리나라에서는 수변식생대 조성에 따른 하안의 수문성분 분포에 대한 연구가 수행된 바 있다(김 등, 2009).

본 연구에서 검토하고자 하는 방틀은 평창강 상안미 수위관측소 상류 1 km지점에 자연하안을 유도하고 습지를 조성하기 위한 목적으로 시공되었다(Fig. 1).



Fig. 1. Cross section and the current status of the target stream.

방틀이 설치된 지점으로 하천수가 소통되어 자연적인 하안 선형을 유도하고 방틀과 방틀 사이에 습지를 조성하고자 한 것이다. 이렇게 조성된 습지를 유지하기 위해 지하저류조를 별도로 설치하여 방틀에 지속적으로 물을 공급하는 것이 기본 원리이다. 이를 위해서는 방틀 및 저류조의 설치 위치 위로 하천수가 흘러야 하며, 하안을 유도하고 습지를 조성·유지하기 위해서 어느 정도의 기간 동안 방틀 및 저류조가 침수되어야 하는지, 어느 정도의 유량이 필요한지 등에 관한 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 한국형 유역수문 모형 SWAT-K(Kim 등, 2009)를 이용하여 장기유출 정보를 모의하고 이를 바탕으로 유황 분석을 실시하여 적용 방틀공법의 수문학적 적절성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 유역

본 연구에서 시험 적용하고 있는 방틀에 대한 수문학적 특성을 분석하기 위해 방틀이 설치되어 있는 지점의 상류 유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 2). Fig. 2에서 ‘시험지점’은 방틀이 설치된 지점, ‘수위관측소’는 모형에서 계산된 유량을 검보정하기 위한 수

위관측지점을 나타낸다. 분석을 위하여 전체 유역을 33개의 소유역으로 구분하였다.

2.2. 입력자료 구축

SWAT-K 모형을 적용하기 위해서는 크게 강수량, 일사량, 풍속, 상대습도, 기온 등의 수문기상자료와 수치고도모형(DEM), 토지이용도, 토양도 등의 공간특성자료가 필요하다. 본 연구에서는 대상유역내에 기상관측소가 위치하고 있지 않기 때문에 주변 기상관측소인 대관령, 원주, 영월, 홍천, 제천의 기상자료를 구축하여 모델 구동에 이용하였다. 기상관측이 개시된 최근 20년간의 각 관측소 별 월평균 일사량, 월평균, 기온, 월평균 상대습도, 월평균 풍속을 이용하였다. 대관령관측소의 연평균 일사량은 13.9 MJ/m²이며, 연평균 기온은 6.8℃, 연평균 상대습도는 73.7%이며, 연평균 풍속은 4.3 m/s로 나타났다. 또 다른 관측소인 원주, 영월, 홍천, 제천의 연평균 일사량은 각각 13.7 MJ/m², 14.2 MJ/m², 13.9 MJ/m², 14.5 MJ/m²이며, 연평균 기온은 11.6℃, 10.8℃, 10.4℃, 10.3℃, 연평균 상대습도는 69.5%, 68.2%, 68.2%, 69.7%, 연평균 풍속은 1.1 m/s, 1.5 m/s, 1.0 m/s, 1.4 m/s로 나타났다.

대상유역에 영향을 미치는 강우관측소는 유천, 흥정, 용전, 등매, 대화, 신리, 수동, 계춘, 방림, 방림1, 계방, 가평(강) 관측소가 해당되는 것으로 조사되었다. 아울러 유출모형의 보정과 검증, 모의 결과에 대한 평가를 위해 하천유량자료를 수집하였다.

2.2.1. 공간특성자료

SWAT-K는 유역의 형상을 나타내는 수치표고모형(Digital Elevation Model; 이하 DEM), 유역내 토지이용상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필요로 한다. 본 연구에서 구축한 DEM, 토지이용도, 토양도는 다음과 같다.

① 수치표고모형(DEM)

DEM은 일반적으로 격자형태로 만들어져 있으며 각 격자에는 표고값이 입력되어 있다. DEM은 수치지도를 이용하여 구축할 수 있으며, 현대에 들어와서 인공위성영상의 활용도가 높아지면서 위성영상을 활용하여 구축할 수도 있다. 본 연구에서는 모형의 계산시간, 모형결과의 정확도 등을 판단하여 30 m 공간해상

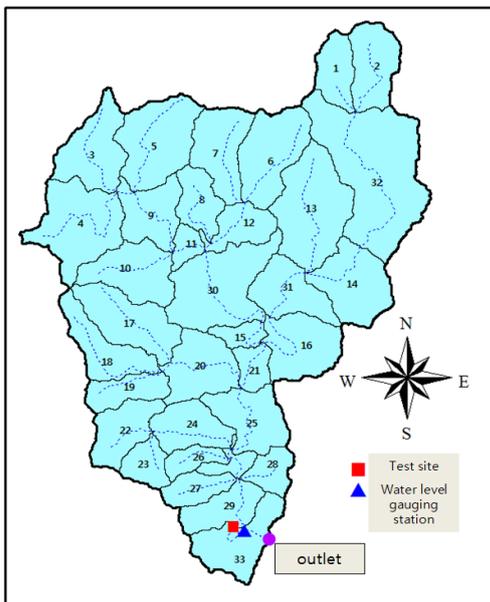


Fig. 2. Subbasin delineation.

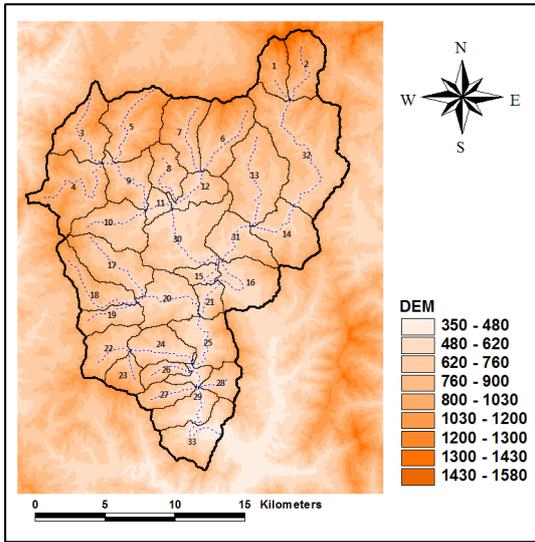


Fig. 3. The DEM for Pyungchang watershed.

도를 가지는 DEM을 300 m 공간해상도로 가공하여 사용하였으며, 대상유역에 대한 DEM은 Fig. 3과 같다.

② 토지이용도

환경부에서 제공하는 중분류(1:25,000) 토지이용도를 사용하였다. Table 1은 평창강 전 유역의 토지이용을 살피기 위해 각 토지이용항목에 대한 면적비율을 나타낸 것으로 낙엽수와 상록수 등이 분포하는 산림지역이 약 76% 이내로 가장 큰 면적비율을 차지하고 있다.

Table 1. Land use

Name	Description	Area(km ²)	Portion(%)
AGRC	Agricultural Land-Close-grown	2.07	0.53
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	27.19	6.90
FRSD	Forest-deciduous	130.01	33.00
FRSE	Forest-Evergreen	168.92	42.88
FRST	Forest-Mixed	46.34	11.76
ORCD	Orchard	0.13	0.03
PAST	Pasture	2.47	0.63
RICE	Rice	10.77	2.73
UCOM	Commercial	0.93	0.24
UIDU	Industrial	0.03	0.01
UINS	institutional	0.14	0.04
URLD	Residential-Low Density	0.75	0.19
UTRN	Transportation	2.32	0.59
WATR	Water	1.77	0.45
WETL	Wetlands-Mixed	0.13	0.03

③ 토양도

토양도는 농업과학원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 구축된 1:25,000축척의 정밀토양도를 사용하였다. Fig. 4는 평창강 전 유역에 대한 정밀토양도로 토양통의 종류는 39개가 분포하며 그 중에서 오대 토양통이 36%, 월정 토양통이 38%를 차지하는 대표 토양통으로 나타났다.

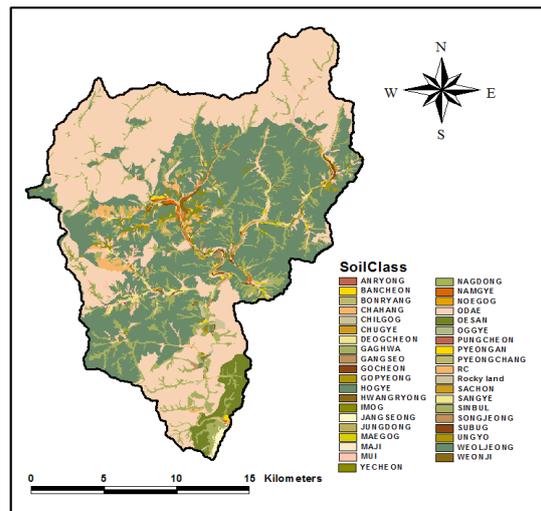


Fig. 4. The soil map for Pyungchang watershed.

3. SWAT-K 모형

3.1. 모형의 개요

미국 농무성에서 수십년에 걸쳐 개발된 SWAT (Arnold 등, 1993)은 토양과 토지이용 관리 조건의 변화에 따른 대규모 복잡한 유역에서 물, 유사, 농업화학 물질의 장기간 부하량을 예측하는 모형이다. SWAT은 CREAMS (Knisel, 1980), GLEAMS (Leonard 등, 1987)등을 통합한 SWRRB (Arnold와 Williams, 1987) 모형을 근간으로 하고 있으며, 여기에 하도내 유출 및 유사 추적을 모의하는 모형인 ROTO (Arnold 등, 1995; Neitsch 등, 2005)가 결합된 구조를 가지고 있다. SWAT모형의 개발 연혁과 동향에 대해서는 Gassman 등(2007)이 매우 자세히 기술한 바 있다. 한편, 모형 개발 국가인 미국과 국내유역특성이 상이하어 그 사용이 제한되고 어렵게 적용되고 있는 점을 극복하고자 SWAT을 국내 현실에 맞게 개선한 SWAT-K가 개발되었다(교육과학기술부, 2007). SWAT-K는 인위적, 자연적인 물순환구조 변화와 지표수-지하수 연계해석, 국내 산림지역, 농업지역, 도시지역에서의 물순환해석 방법을 개선하여 강우, 증발산, 토양수분, 지표수, 지하수 등의 시공간적 분포를 정량적으로 산정할 수 있으며, 유출 해석의 정확성은 물론, 유사 및 비점오염물질의 모의 신뢰성을 제고시킨 한국형 유역통합 해석 모형이다. 특히 국내 토양통 DB를 자체적으로 구축하고 유출 구조를 개선한 한국형 모형이라고 할 수 있다.

3.2. 모형의 연산 구조

SWAT 모형은 지표유출, 중간유출, 지하수유출, 증발산 등의 수문성분별 모의를 위해서 전체 유역을 소유역으로 구분하고 각각의 소유역에 대해 동일한 토지피복과 토양형을 갖는 수문응답단위인 HRU(Hydrologic Response Unit)별로 물수지를 계산하게 된다. 각 소유역내 HRU별 수문성분량은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 유입되며 하도추적 과정을 거쳐 유출량이 산정된다.

SWAT으로 모의할 수 있는 주요 성분요소는 수문, 기상, 유사, 토양온도, 작물성장, 영양물질, 살충제, 농업관리 등이며, 이 중 수문성분 모의 절차는 강수차단, 지표유출 및 침투, 증발 및 증산, 중간유출 및 침투, 함

양, 지하수유출 순으로 이루어지며, Eq. 1과 같이 토양수분 변화량에 따른 물수지 방정식을 기본으로 하고 있다.

$$\Delta SW = P - Q - ET - DP - QR \quad (1)$$

여기서, ΔSW 는 토양층의 수분변화량, P 는 강수량, Q 는 지표유출량, ET 는 증발산량, DP 는 침투량, QR 은 하천으로의 회귀수를 나타낸다. 지표유출량은 토양수분량에 따라 CN 을 계산하는 수정 SCS 유출곡선지수법을 근간으로 산정되며, 이 외에 Green-Ampt 방식에 의해서도 산정될 수 있다. 잠재증발산량은 Penman-Montieth, Priestley-Taylor, Hargreaves 방식의 3가지 중 하나를 선택하여 계산할 수 있다. 중간유출량은 토양층의 포화수리전도도, 경사장 및 경사 등의 함수인 운동학적 저류모델(kinematic storage model)로 계산되며, 연직하향으로의 침투량은 저류추적법(storage routing method)을 이용하여 중간유출량과 동시에 계산된다. 토양층 최하단부를 통과한 물이 얇은 대수층까지 도달하는 지하수 함양량은 시간적 지체를 고려하기 위해서 지수형 감쇠 가중함수로 나타내고 있으며, 지하수 유출량 역시 감쇠 가중함수를 사용하여 금일 배출량과 지연배출량의 가중합으로 계산된다. 상기 절차에 따라 계산된 각 소유역내 HRU별 지표유출, 중간유출, 지하수 유출량은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 보내지고 Muskingum 또는 변동저류법에 의해 하도추적이 이루어진다.

SWAT-K 모형에서는 유출 프로세스 및 수질모의의 물리적 재현성과 정확도를 높이기 위해서 계산 구조를 국내 여건에 맞게 개선한 유출 및 수질 계산 모듈을 포함하고 있다. SWAT 원 버전으로 모델링을 수행할 경우에 유출수문곡선의 침투부가 과소하게 모의되는 문제, 경사가 급한 유역의 경우 중간유출 성분이 매우 과다하게 산정되는 문제, 하도유출추적 과정의 불안정성 등 유출모의 능력의 한계를 보이는데, 이를 극복하기 위해서 SWAT-K에서는 시간 가중평균 유출곡선지수를 이용한 지표유출량 계산모듈(Kim과 Lee, 2008), 비선형 저류방정식을 이용한 하도추적 모듈(Kim과 Lee, 2010) 등 개선된 형태의 유출 계산 모듈로 구성되어있다. 또한 지하수 해석에 있어서 약점을

가지는 SWAT 모형을 보완하고자 3차원 지하수유동 해석모형 MODFLOW를 완전연동형으로 SWAT에 결합한 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW (Kim 등, 2008), 도시유출해석 기능 강화를 위해서 미국 EPA에서 개발한 도시유출해석모형 SWMM이 결합된 SWAT-SWMM(Kim 등, 2011), 농경지 및 산림지역에서 물순환 구조를 개선한 SWAT- AGRIMAN과 SWAT-EVT 등도 탑재되어있다(Kim 등, 2009).

4. 결과 및 고찰

4.1. 모형의 검보정

상안미 수위관측에서는 1990년부터 수위관측을 실시하고 있으나, 관측이 연속적으로 이루어지지 않은 관계로 본 연구에서는 1997년부터 2001년까지 5개년의 관측유량자료에 대해 모형의 검보정을 실시하였다. 그 결과 Fig. 5에 제시한 바와 같이 2001년의 일부 저수량 구간을 제외하고는 전체적으로 모형의 산정결과가 관측값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

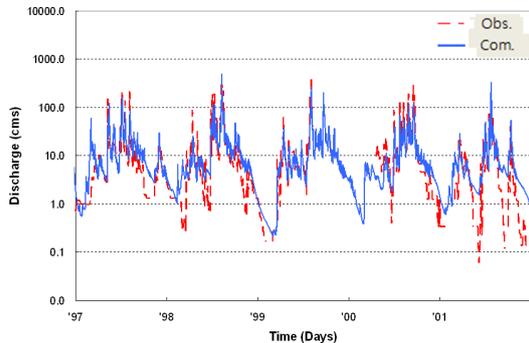


Fig. 5. Performance of model calibration on total runoff.

4.2. 유황분석 결과

방틀이 설치된 지점의 유황을 분석하기 위해 1989년부터 2008년까지 대상구역의 유출량을 산정하고, 대상기간 20년 동안의 유출량과 대상지점의 수심에 대한 유황곡선을 도시하였다. 1989년부터 2008년까지 대상구역의 유출분석을 실시한 결과 방틀이 설치된 지점에서 20년간의 유량에 대한 유황곡선은 다음 Fig. 6과 같이 도시되었다. 유황곡선은 연평균으로 일정 유량에 일년중 발생할 확률을 도시하는 것으로서

그림에서 y축은 유량을, x축은 해당 유량이 일년중 몇 일 이상 발생하는지를 나타낸다. Fig. 6에서, 즉 방틀이 설치된 지점에서 유량은 지난 20년 자료를 분석했을 때 약 0.1 m³/s의 유량은 거의 일년 내내 발생하며, 10 m³/s의 유량은 1년중 약 120일 정도 발생한 것을 나타낸다.

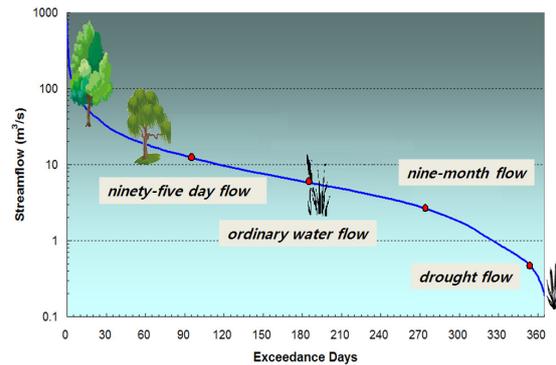


Fig. 6. Flow duration curve at the test site.

이와 같이 산정된 유량을 기초로 공법 설치 단면의 수심을 산정한 결과 매년 여름 홍수기에는 방틀이 물에 잠기는 것으로 확인되었다(Fig. 7).

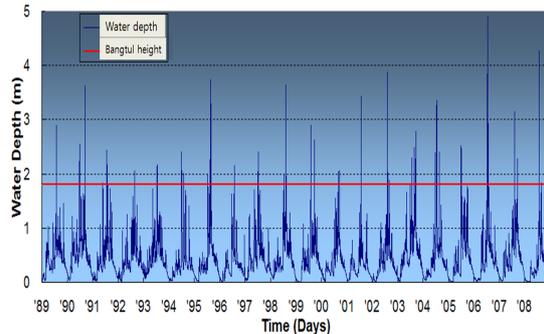


Fig. 7. Water depth hydrograph at the test site.

수심 곡선 분석 결과 방틀상단고의 연평균 침수기간은 1년 중 약 6일, 방틀 하단고의 침수기간은 약 352일로 분석되었다(Fig. 8). 홍수시 유속이 빠를때 하안선을 유도하고 방틀 사이에 소규모 인공습지를 유도하기 위한 방틀의 설치 목적을 충족시킬 수 있을 것으

로 판단되며, 방틀이 하상바닥으로 충분히 깊이(약 1.8 m) 시공되어 있어 홍수가 지난 후에도 방틀내에 물이 유지되될 수 있고, 상단부 저류조에서 지속적으로 물공급이 가능하도록 설계하였으므로 방틀의 기능을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

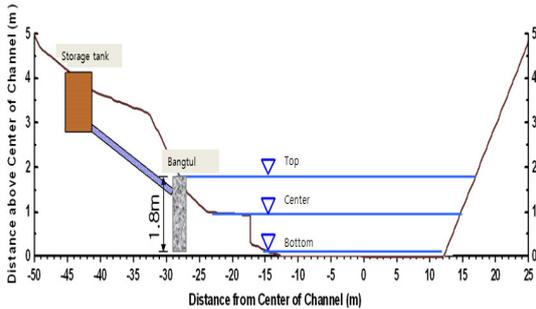


Fig. 8. Annual averaged submerged period.

또한 대상 단면의 하안을 침수기간별로 구분하여 하안의 높이에 따라 적절한 식생의 종류를 선정할 수 있는 자료를 생성하였다(Fig. 9). 이와 같은 정보의 제공은 공법 설계에 필수적으로서 본 해석기술의 주요한 성과 및 활용성이라고 판단된다.

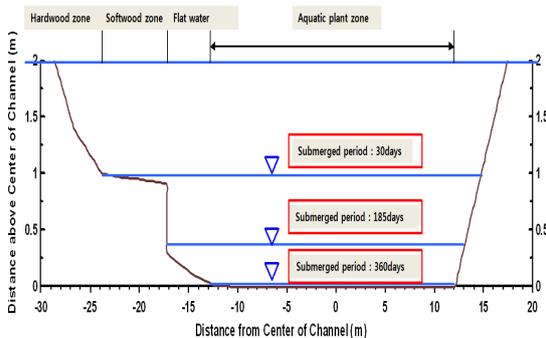


Fig. 9. Proper vegetations for appropriate submerged periods.

5. 결론

본 연구에서는 자연하천 복원 공법 설계시 공법의 적용 위치, 규모, 제원 등을 선정하기 위한 수문학적 정보 및 하천의 수문학적 특성에 적합한 식생을 선정하기 위한 수심, 침수기간 정보를 제공하기 위한 기법

을 제시하고 평창강 상안리 수위표 지점에 대해 시험 적용을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 수심 곡선 분석 결과 방틀상단고의 연평균 침수 기간은 1년 중 약 6일, 방틀 중심고의 경우는 약 94일, 방틀 하단고의 침수기간은 약 352일로 분석되었다.
- 2) 홍수시 유속이 빠를때 하안선을 유도하고 방틀 사이에 소규모 인공습지를 유도하기 위한 방틀의 설치 목적을 충족시킬 수 있을 것으로 판단되며, 방틀이 하상바닥으로 충분히 깊이(약 1.8 m) 시공되어 있어 홍수가 지난 후에도 방틀내에 물이 유지되될 수 있고, 상단부 저류조에서 지속적으로 물공급이 가능하도록 설계하였으므로 방틀의 기능을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 본 수치모의에 의한 결과를 바탕으로 식재 기준을 정하게 되면 침수기간이 360일에 해당하는 구간에 대해서는 수생식물역, 침수기간이 185일에 해당하는 경우는 정수역, 침수기간이 30일인 경우는 연수목 구역으로 설정할 수 있을 것이다.

이러한 정보 및 기술의 제공으로 본 해석기법은 자연하안 조성을 위한 공법 설계시 공법의 최적설계(위치, 규모, 유지관리 방안 등)를 가능하게 하고, 다양한 조건을 설계단계에서 시뮬레이션 함으로써 최적의 설계를 실시할 수 있는 첨단기술을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 수생태복원사업단의 “자연하안 창출 및 하안변화 유도기술 개발(과제번호 :07-I-3)” 과 한국건설기술연구원의 “(11주요) 기획 및 정책연구사업_고효율 침단 수자원 관리 기술 개발 기획 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

교육과학기술부, 2007, 지표수 수문성분 해석시스템 개발, 21세기 프론티어 연구사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업 2단계 연구보고서(2-2-2).

- 김남원, 정일문, 김지태, 이정우, 2010, 자연하안 조성 공법 설계를 위한 유황분석, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 1365-1369.
- 김남원, 김지태, 정일문, 이정우, 2009, 수변 식생대 조성에 따른 생태수문학적 특성 분석, 한국물환경학회지, 25(6), 910-915.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., 1987, SWRRB-A watershed scale model for soil and water resources management In V.P. Singh(ed) Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publications, 847-908.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Maidment, D. R., 1995, "Continuous time water and sediment routing model for large basins", Journal of Hydraulic Engineering, 121(2), 171-183.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., Bernhardt, G., 1993, A comprehensive surface- groundwater flow model, *Journal of Hydrology*, 142, 47-69.
- Bovee, K. K., 1982, A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. US Fish and Wildlife Service FWS/OBS-82/26. Department of the Interior, Washington DC, USA.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, J. G., Arnold, J. G., 2007, The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 50(4), 1211-1250.
- Kim, N. W., Won, Y. S., Lee, J., Lee, J. E., Jeong, J., 2011, Hydrological Impacts of Urban Imperviousness in White Rock Creek Watershed, Transactions of the ASABE, 54(5) (In Press).
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y.S., Arnold, J. G., 2008, Development and application of the integrated SWAT - MODFLOW model, *Journal of Hydrology*, 356, 1-16.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Kim, C., Lee, J., Lee, J. E., 2009, Development and applications of SWAT-K (Korea). In: Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications (Eds. J. Arnold et al.), Special Publication No. 4, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, Thailand.
- Kim, N. W., Lee, J., 2008, Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation, *Hydrological Processes*, 22, 4936-4948.
- Kim, N. W., Lee, J., 2010, Enhancement of the channel routing module in SWAT, *Hydrological Processes*, 24, 96-107.
- Knisel, W. G., 1980, CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, USDA Conservation Research Report, 26.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., Still, D. A., 1987, "GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems", *Trans. ASAE*, 30(5), 1403-1428.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., 2005, Soil and Water Assessment Tool: the theoretical documentation (version 2005), U.S. Agricultural Research Service.
<http://www.ecowater.re.kr/>.