

WEPP 모형을 이용한 골프장 잔디 관리에 따른 유출특성 모의

최재완 · 신민환* · 류지철* · 금동혁* · 강현우* · 천세억 · 신동석 · 임경재*†

국립환경과학원 수질총량연구과

*강원대학교 지역건설공학과

Evaluation of Runoff Prediction from Managed Golf Course using WEPP Watershed Model

Jaewan Choi · Min Hwan Shin* · Ji Chul Ryu* · Donghyuk Kum* · Hyunwoo Kang* ·
Se Uk Cheon · Dong Seok Shin · Kyoung Jae Lim*†

National Institute of Environmental Research

*Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

(Received 5 July 2011, Revised 15 November 2011, Accepted 17 November 2011)

Abstract

It has been known that Golf course could impose negative impacts on water-ecosystem if pollutant-laden runoff is not treated well. It is important to control non-point source and re-use treated wastewater from the golf course to secure water quality of receiving waterbodies. At golf courses, the rainfall-runoff is affected by various practices to manage grasses. In many hydrological modelings, especially in simple rainfall-runoff modeling, effects on runoff of plant growth and cutting are not considered. In the study, the water erosion prediction project (WEPP), capable of simulating plant growth and various management, was evaluated for its runoff prediction from golf course under grass cutting and irrigation. The %Difference, R^2 and the NSE for runoff comparisons were 1.15%, 0.93 and 0.92 for calibration, and 18.12%, 0.82 and 0.88 for validation period, respectively. In grass cutting scenario, grass height was managed to be 18 ~ 25 mm. The estimated runoff was decreased by 27%. The difference in estimated total runoff was 11.8% depending on irrigation. As shown in this study, if grass management and irrigation are well-controlled, water quality of downstream areas could be obtained.

keywords : Cover degree, Forest, GeoWEPP, Golf course, Runoff

1. 서론

최근 수년간 골프의 인기가 급증함에 따라 소수 계층만이 즐기던 스포츠가 일반 대중들에게 보편화 되고 있다. 골프산업은 매년 증가추세에 있으며, 이에 따라 국내 골프장 수도 늘어나고 있다(서천범, 2006). 일각에서는 고질화, 악성화, 광역화되고 있는 환경문제의 심각성을 염두에 두고 자연환경의 이용을 전제로 하고 있는 골프가 장애가 아닌 현 시점에서 인간과 사회, 그리고 국가적으로 많은 혜택을 제공한다는 주장이 점차적으로 늘어나고 있다(이정식과 구분일, 2002). 골프장은 농약사용으로 인한 유기화합물의 유출로 수생태계에 악영향을 미칠 수 있는데, 이는 주로 강우유출수로부터 발생된다. 강우유출수 분석 및 예측은 비점 오염원 제어에 필요한 중요한 요소 중 하나이며, 골프장이 점차적으로 증가함에 따라 골프장에서 발생하는 강우유출수의 특성을 파악하는 것이 시급하다. 또한 골프장에서 발생하는 강우유출수는 저류지를 이용해 한 곳으로 모아 잔

디의 관수로 사용되므로 골프장 운영 측면에서도 특성을 파악하는 것이 중요하다. 그동안 유출 특성 예측을 위해 전 세계적으로 미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Service: SCS), 현재 미국 자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service: NRCS)에서 제안한 유출곡선지수를 이용한 유출량 산정방식이 널리 사용되고 있다(SCS, 1972). 그러나 유출곡선지수를 이용한 유출량 산정방식은 일강수를 이용하므로 강우강도를 반영할 수 없다. 또한 강우유출수 특성을 분석하기 위해서는 작물의 성장 및 관개배수 등 작물관리에 대한 측면을 고려해야하는데, 이를 단순한 작물관련인자로 사용하여 유출특성을 분석 및 예측하는 경우가 대부분이다. 미국 농무성 농업연구센터(USDA) Agricultural Research Service (ARS), Forest Service, NRCS 연구자들에 의해서 개발된 물리적 기반 모델인 Water Erosion Prediction Project (WEPP; Flanagan and Livingston, 1995) 모형은 연속적인 모의가 가능하며 분단위 강수, 단일 강우사상에 대해서도 유출 특성 예측이 가능하다. 또한 WEPP 모형은 EPIC crop model (Williams et al., 1989)을 적용하여 작물의 성장 및 관리에 대한 모의가 가능하다. 골프장과 같이 연중 작물관리가 이루어지는 토지피복의 경우 일반

† To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

초지와 유사하게 강우유출수 특성을 분석하는 것이 아닌 골프장만의 유출 특성을 파악하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구의 목표는 1) WEPP 모형을 이용하여 골프장 잔디성장을 고려한 강우유출수 특성을 평가하는데 있으며, 2) 예초 및 관수에 따른 잔디성장과 강우유출수 예측을 통하여 비점오염원 저감기법 개발 및 골프장 운영에 기초자료를 제시하고자 한다.

1.1 WEPP 모형

1.1.1. WEPP모형의 개요

WEPP 모형은 여러 개의 부모형들로 구성되어 있는데 이들을 살펴보면 다음과 같다. 1) 기상 생성 부모형(Weather Generation Component), 2) 강설-용설 부모형(Winter process Component), 3) 관개 부모형(Irrigation Component), 4) 지표수문학 부모형(Surface Hydraulics Component), 5) 물수지 부모형(Water Balance Component), 6) 작물성장 부모형(Plant Growth Component), 7) 잔류물질분해 부모형(Residue Decomposition Component), 8) 토양인자 부모형(Soil Parameters Component), 9) 사면침식과 퇴적 부모형(Hillslope Erosion and Deposition Component), 10) 유역수문학 및 침식과정 부모형(Watershed Channel Hydrology and Erosion Processes Component), 11) 수공구조물 부모형(Water Impoundment Component)등 이상의 여러 독립적인 부모형으로 이루어져 있다(Flanagan and Livingston, 1995). Fig. 1은 WEPP 모형의 연산과정을 나타낸 차트이다.

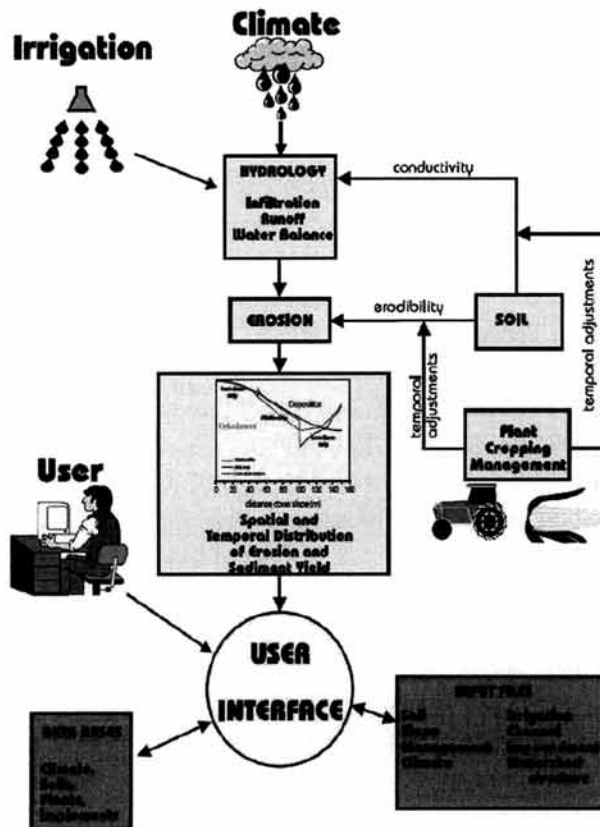


Fig. 1. Flow chart for the WEPP model (Flanagan and Livingston, 1995).

1.1.2. WEPP 모형의 주요 이론

WEPP 모형에서 지표유출은 침투(infiltration), 초과강우(rainfall excess), 요지저류(depression storage), 그리고 침투유량(peak discharge)의 순서로 계산된다. 침투의 강우는 비정상 간헐 강우(unsteady intermittent rainfall)을 위한 Green-Ampt Mein-Larson (GAML) 모형을 이용해 계산하며, 초과강우의 경우 WEPP 모형에서 지표유출은 강우강도가 침투율을 초과할 경우 발생하며, Kinematic wave 방정식을 사용하여 계산한다. 물수지와 침투는 기상, 침투, 근구역의 토양수분량과 증발산에 의한 손실량을 계산하기 위한 작물생육과정을 고려하여 24시간 단위로 계산한다. 물수지는 SWRRB model을 위해 개발된 알고리즘을 이용한다.

$$\Theta = \Theta_{in} + (P - I) \pm S - Q - ET - D - Q_d \quad (1)$$

여기서, Θ 는 근구역에서의 토양 수분량(m), Θ_{in} 은 근구역에서의 초기 토양수분량(m), P 는 누가 강수량(m), I 는 작물에 의한 강수의 차단(m), S 는 강설량(m), Q 는 누가지표 유출(m), D 는 근구역 이하의 누가 침투량(m), 그리고 Q_d 는 배수로로 흐르는 지하 측방 유동이다.

작물성장은 EPIC 모형을 바탕으로 작물성장, 생체량 측정 등을 계산한다. 열단위(heat unit)를 일별로 계산하여 축적한 결과와 작물성장에 필요한 잠재적인 열단위와의 비에 의해서 작물성장상태를 모의하며, 작물의 일별 열단위(HU_i)는 식 (2)와 같다.

$$HU_i = \frac{T_{mx} + T_{mn}}{2} - T_{b,j} \quad (2)$$

여기서, T_{mx} , T_{mn} 은 각각 일 최대 온도와 최저 온도, T_b 는 작물이 성장하지 않는 최저 온도를 나타낸다. 작물성장상태를 모의하기 위한 일별 열단위지수(HUI)는 식 (3)과 같다.

$$HUI_i = \frac{\sum_{k=1}^i HU_k}{PHU_j} \quad (3)$$

여기서, PHU_j 는 작물 j 의 성장에 필요한 잠재적인 열단위를 나타낸다.

1.1.3. WEPP 모형의 입력 DB

WEPP 모형의 기상자료는 최대 및 최소기온, 태양복사량, 풍속, 및 풍향, 이슬점 온도 등의 기후자료와 강우량, 지속 시간, 5분 최대 강우강도 및 시간 등의 강우자료로 구분될 수 있다. WEPP 모형의 기상자료는 크게 일별모의를 위한 일별 강우자료와, 강우사상별 모의를 위한 시간대별 강우자료를 입력하는 Break point 방법이 있다. 기상자료는 실측자료로부터 모의자료까지 다양하게 이용할 수 있다(Flanagan and Livingston, 1995). WEPP 모형은 CLIGEN이라는 기상 생성 부모형을 이용해 일 기상자료를 생성하지만 이를 이

용할 경우 특별한 형식으로 이루어진 월단위의 통계자료가 필요하다. 현재 미국전역에 대해서는 CLIGEN 입력 데이터베이스가 제공되지만, 그 밖의 국가에서는 입력 데이터베이스 부재로 인해 CLIGEN을 이용하는데 한계가 있다. 따라서 직접 관측된 기상자료 값을 이용하여야 하며 이를 위해서는 함께 제공되는 Breakpoint Climate Data Generator (BPCDG) 프로그램을 이용하여 관측된 기상자료 값을 WEPP 모형에서 필요한 입력 자료로 생성해줘야 한다(Gete et al., 2000). 지형자료는 경사장의 길이, 폭, 경사도에 관련된 자료이며, 실제 측량 성과나 지형도를 이용하여 입력한다. 단일 경사지에서 토성이나 작부체계가 다르면 몇 개의 지표 유출요소(Overland Flow Element: OFE)로 구분하여 지형자료를 입력한다. 토양자료는 모래, 점토, 유기물, 암석파편 함유율, 이온치환능(Cation Exchange Capacity: CEC) 등의 토양조성에 관련된 자료와 세류간, 세류 침식능, 한계전단 응력 등의 토양침식능에 관련된 자료, 토양의 유효수리전도도 등의 자료이다. 작물 및 재배관리 자료는 경운장비 및 일시, 작물재배 기간, 재배작물 종류, 수확일시, 잔류물 처리 등에 관련된 포장운영에 대한 정보를 포함한다. WEPP 모형에서는 재배작물에 관련된 주요 매개변수를 데이터베이스화하여 제공하고 있으며, 이들 작물에 관련된 매개변수는 평균수준의 수확량으로 재배되는 경우에 적용되는 값들이다(손정호, 2002; Flanagan and Livingston, 1995).

2. 연구방법

2.1. 연구 대상 지역의 선정

본 연구에서는 충청북도 청원군 부용면에 위치한 골프장을 연구지역으로 선정하였으며, 18개 홀 중 2개(5번, 6번) 홀에서 발생하는 강우유출수를 조사하였다. 연구지역의 면적은 5.5 ha이고, 표고는 110~180 m, 경사는 60° 이하, 토성은 사양토로 조사되었다. Fig. 2, 3은 골프장 구역 내의 등고선과 배수로를 나타낸 것이며, Fig. 4, 5는 강우유출수 측정을 위한 90° weir의 모습이다(금강물환경연구소, 2009).

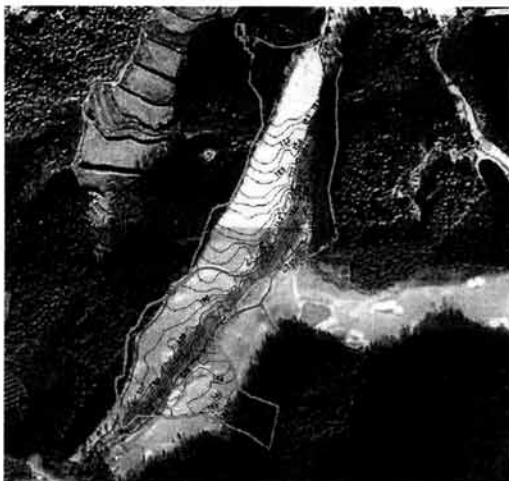


Fig. 2. Contour line of golf course (Geum-river Environment Research Center (GERC), 2009).

2.2. 현장 모니터링 및 결과

골프장 구역에 GeoWEPP 모형을 적용하기 위해서 금강물환경연구소(2009)가 청원골프장에서 측정한 강우유출수 자료를 이용하였다. 금강물환경연구소(2009)는 2009년 3월부터 11월까지 총 20번의 강우사상에 대하여 조사하였다. 골프장은 산림이나 밭 지역과는 다르게 강우가 발생하였을 때 골프장에서 발생하는 강우유출수를 빠르게 배수 되도록 설계되어 있기 때문에 적은 양의 강우가 발생하여도 유출이 발생하였다. Fig. 4는 골프장 구역의 최종배출구, Fig. 5는 90° V-notch weir이다. 금강물환경연구소(2009)는 90° V-notch weir에서 수위를 측정하여 이를 유출량으로 환산하였다. 환산식은 식 (4)를 이용하였으며, 유출량 환산 결과는 Table 1과 같다.

$$Q = (1.227 \times 10^{-5}) \times ((H \times 0.1 + 0.7529)^{2.6605} \times 3600 / 29.0) \quad (4)$$

여기서 Q 는 유출량, H 는 수위를 나타낸다.

2.3. GeoWEPP 기상 DB 구축

본 연구에서는 WEPP 을 이용하여 골프장에서 발생하는 강우유출수를 분석하기 위하여 현지에서 실측한 자료와 기상청의 지역별 상세 관측자료(AWS)를 이용하여 기상자료를 구축하였다. 기상 자료는 최대 및 최소기온, 태양복사량, 풍속, 풍향, 이슬점 온도 등 일별 기후자료와 시간당 강우량을 이용하여 구축하였다.

2.4. GeoWEPP 지형, 토양, 식생/관리 DB 구축

2.4.1. 지형자료 입력

WEPP watershed version에서 골프장 구역의 지형을 구축할 수 있으나, 그 방식이 복잡하고 구역의 면적 및 경사를 구분하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 GIS를 이용하여 만든 DEM (Digital Elevation Model)을 이용하여 GeoWEPP을 이용하여 지형자료를 구축하였다. DEM 구축



Fig. 3. Duct line in golf course (GERC, 2009).



Fig. 4. Outlet of golf course watershed (GERC, 2009).

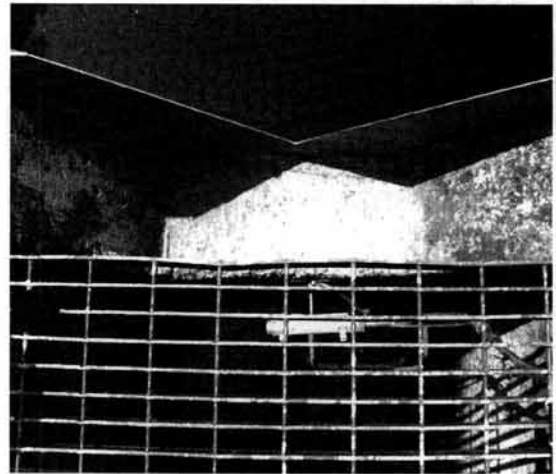


Fig. 5. 90° V-notch weir (GERC, 2009).

Table 1. Rainfall, antecedent dry days, rainfall duration, rainfall intensity and runoff for 2009 (GERC, 2009)

Date	Rainfall (mm)	Antecedent dry days (day)	Rainfall duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Runoff (m ³)
3.13	19.2	7	15	1.28	25.4
4.20	20.6	5	14	1.47	47.3
5.16 ~ 5.17	50.5	3	29	1.74	847.9
5.21 ~ 5.22	32.2	4	14	2.30	28.2
6.3	9.0	11	2	4.50	69.5
6.9 ~ 6.10	28.5	3	14	2.04	65.2
6.20 ~ 6.21	14.5	6	7	2.07	53.2
6.29	11.5	4	14	0.82	8.8
7.2	6.5	4	2	3.25	6.6
7.7 ~ 7.8	39.0	5	6	4.50	375.7
7.9 ~ 7.10	82.0	2	17	4.82	2082.3
7.11 ~ 7.13	67.5	1	22	3.07	1599.7
7.13 ~ 7.14	5.0	0	7	0.71	87.0
7.14 ~ 7.16	65.5	0	11	5.96	1440.4
7.17 ~ 7.18	11.5	0	6	1.92	148.3
7.19	16.0	0	8	2.00	71.1
8.11 ~ 8.12	32.6	3	13	2.51	125.5
8.12 ~ 8.13	36.4	1	18	2.02	839.5
8.27 ~ 8.29	41.2	7	9	4.58	725.6
10.17	13.8	4	6	2.30	15.3

시 골프장 건설 당시 측정된 등고선도를 이용하였다. Fig. 6은 DEM, Sub-catchments, 하천도를 나타낸다. Fig. 7은 GeoWEPP에서 구축된 골프장 유역을 WEPP 모형으로 불러들인 것이다. 하천도는 C1에서 C5까지 WEPP 모형에 나타나있고, Sub-catchments는 Hillslope으로 H1부터 H12까지 나타나 있다. 하천도는 WEPP 모형에서 배수로로 인식되므로 C1에서 C5까지 연결된 배수로가 되는 것이다. 각 배수로(C1~C5)에는 2~3개의 필지(H1~H12)가 생성되며 각 필지로부터 강우유출수가 발생되면 이를 배수로에서 routing하게 된다. 각각의 하천과 Hillslope은 서로 다른 속성을 입력할 수 있으며, Hillslope은 insert break 기능을 이용해 다양하게 구분할 수 있다.

2.4.2. 토양자료 입력

WEPP 모형의 입력 자료로 사용되는 토양자료는 한국토

양정보시스템(2005)의 자료를 이용하여 구축하였다. 토양 입력 자료에는 토양분류, Albedo, 초기 포화도, 세류간 침식능, 세류 침식능, 한계 수리전단용력, 유효수리전도도, 토양(모래, 점토, 유기물, 양이온 치환능, 암석)비율 등이 포함된다. 본 연구지역의 토양은 구릉지와 산악지에 주로 분포하는 삼각통으로서 토양배수가 매우 양호하고, 투수성은 빠르며, 유거는 경사에 따라 매우 빠르다. Fig. 8은 토양속성 자료를 만들거나 수정할 수 있는 editor를 나타내며, Fig. 9는 골프장 유역의 토양도를 나타낸다. 골프장 유역의 토양통은 주로 배수가 매우 양호하고 투수성이 빠른 SgD2, SmE3, SgE2, SmE2로 구성되어있다.

2.4.3. 식생·관리자료 입력

WEPP 모형에서 식생 매개변수는 6가지(식물 성장과 수확 매개변수, 온도와 태양복사 매개변수, 엽면적지수와 뿌



Fig. 6. Generated golf course watershed.

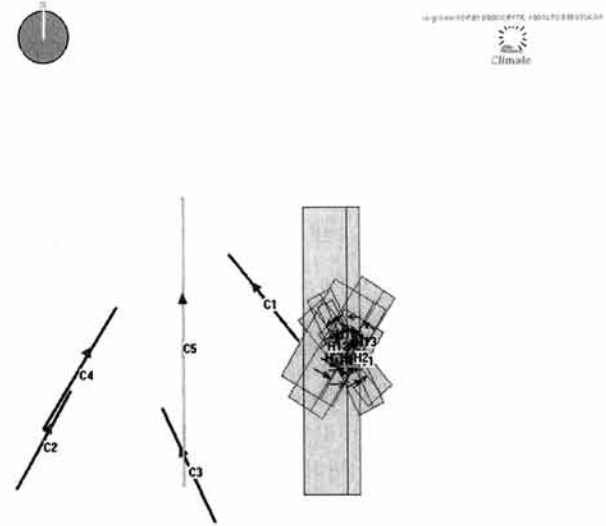


Fig. 7. Reading the WEPP model.

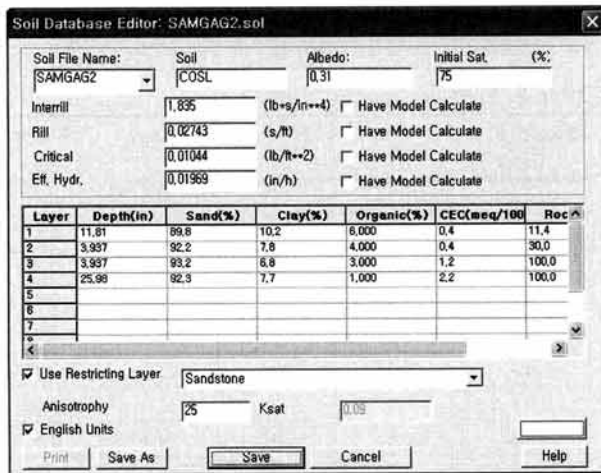


Fig. 8. Soil database.

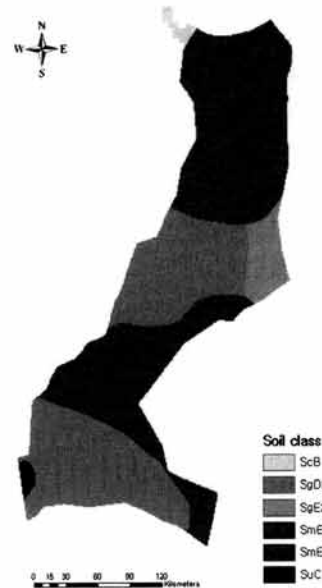


Fig. 9. Soil map (GERC, 2009).

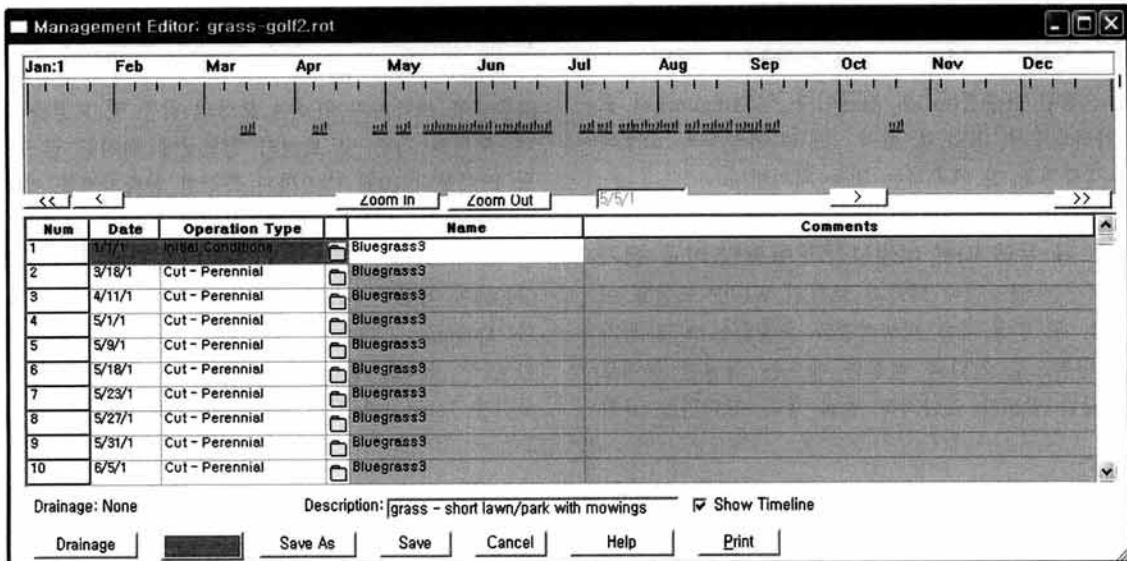


Fig. 10. Management database.

리 매개변수, 노화 매개변수, 잔류물 매개변수 그리고 기타 매개변수)로 구성되어있다. 또한 식생관리를 위하여 초기조건, 식생성장, 경작활동, 관개, 배수 등의 정보를 입력하여 모형의 정확성을 높이고, 다양한 환경조건에서 유출수 모의를 할 수 있다. Fig. 10은 식생 매개변수와 관리 정보를 입력할 수 있는 editor를 나타낸다. 본 연구에서는 식생자료는 bluegrass를 이용하였고, 식생의 높이가 18~25 cm 사이에서 관리되도록 구축하였다.

2.5. WEPP 모형의 골프장 유출 정확성 평가

Pandey et al. (2008)은 세류간 침식능, 세류 침식능, 한계전단응력, 유효수리전도도와 같은 토양 매개변수를 이용하여 모델 보정 및 매개변수 변화에 따른 민감도 분석을 하였다. 토양속성에서 세류간 침식능과 세류 침식능은 토양침식을 산정하기 위한 매개변수이고, 한계전단응력과 유효수리전도도는 유출량을 산정하기 위한 매개변수이다. 따라서 본 연구에서도 토양 매개변수 중 한계전단응력과 유효수리전도도를 이용하였으며, 2009년 3월 13일부터 2009년 10월 17일까지 실측한 유출량을 GeoWEPP 모형의 결과와 비교하여 정확성 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 앞서 기술된 WEPP 모형의 입력 DB를 구축한 후 실측 유출량을 측정된 기간에 대해 보정된 GeoWEPP 모형을 이용하여 유출량을 평가하였다. GeoWEPP 모델 비교시 % Difference (ASCE, 1993), 평가시 결정계수(R^2)와 유효지수(Effective Index)를 이용하였다. 유효지수산정은 Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970)를 이용하였다. 식 (5)는 %Difference 산정 공식이며, 식 (6)은 NSE 산정 공식이다.

$$\% Diff. = \left| \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right| \times 100 \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (6)$$

여기서 O_i 는 각 이벤트 별로 산정된 유출량(m^3)이고, P_i 는 모델에서 예측된 각 이벤트 별 유출량(m^3)이고, \bar{O}_i 는 모든 이벤트의 산정된 유출량(m^3)의 평균이다. %Difference의 값이 0에 가까울수록, NSE의 값이 1에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다.

2.6. 예초 유·무에 따른 식생성장과 유출량 비교·평가

본 연구에서는 골프장에 대해서 보정된 WEPP 모형을 이용하여 예초 유·무에 따른 식생성장과 유출량을 비교·평가하였다. 일반적으로 잔디의 적절한 예초는 적절한 높이로 계속 유지되면 밀도가 높아지고 품질 좋은 잔디면을 균일

하게 형성하며 잔디가 강해져 병해나 잡초의 발생이 억제된다. 골프장에서 가장 많은 면적을 차지하는 페어웨이의 예고관리는 보통 4월 중순에 14~15 mm로 예초를 시작하며, 7월 초순경에 2 mm 정도를 상향조정하며 8월 중순경에 2 mm 정도를 상향조정하고 9월 중순경에 3 mm 정도 상향 조정하여 깎아준다(NAMUNET, 2010). 본 연구에서는 평균적으로 페어웨이의 예고를 18~25 mm 정도로 보고 유출특성을 모의하였다.

2.7. 관수에 따른 식생성장 및 유출량 비교·평가

수분은 식물세포 구성요소 가운데 가장 중요한 것으로서 생체중의 약 80% 정도를 점유하며 식물의 생육단계 즉, 발아과정, 조직형성, 양분의 흡수 및 탄소동화작용에 관여한다. 따라서 식물성장에는 물론 생명의 유지를 위해서도 수분의 흡수를 계속하여 식물체내의 수분함량을 일정수분 이상으로 유지하여야 한다. 본 연구에서는 골프장 잔디의 생육이 가장 왕성한 4월 10일부터 9월 8일까지 관수하는 것으로 모의하였다. 모의시 Sprinkler는 Rotator로 하였으며, 관수 유·무에 따른 식생성장 및 유출량을 산정하였다.

Table 2. Sprinkler rotators characteristic

Nozzle diam. (mm)	Flow (L/s)	Pressure (kPa)	Energy (J/kg)	Nozzle factor
4.8	0.24	103	24.4	0.92
4.8	0.34	207	21.3	0.81
6.4	0.43	103	23.2	0.88
6.4	0.62	207	20.6	0.78
4.8	0.24	103	19.3	0.73
4.8	0.34	207	13.8	0.52
6.8	0.43	103	17.9	0.68
6.8	0.62	207	14.4	0.55
9.5	1.36	207	15.4	0.58

3. 결과 및 고찰

3.1. WEPP 모형 유출량 정확성 평가

본 연구에서는 WEPP 모형이 골프장에서 발생하는 강우 유출수를 예측하기 위하여 모형의 검증 및 보정을 수행하였다. 모형의 검증 및 보정시 청원군에 위치한 골프장에서 3월 13일부터 10월 17일까지 측정된 실측자료를 이용하였다. WEPP 모형 보정시 한계전단응력은 0.5 Pa, 유효수리전도도는 0.5 mm/h를 사용하였다. 유출량 정확성 평가시 Donigian (2000)이 제안한 %Difference와 NSE의 기준을 토대로 하였다. Donigian (2000)은 과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 일반적인 모델효율의 범위와 신뢰구간을 Table 3과 같이 제시하였다(Donigian, 2000).

Table 3. General simulation targets or tolerances for model application (Donigian, 2000)

		Very good	Good	Fair	Poor
%Diff.	Water flow	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25	-
NSE		0.90 ~ 0.80	0.80 ~ 0.70	0.70 ~ 0.60	0.60 ~ 0.50

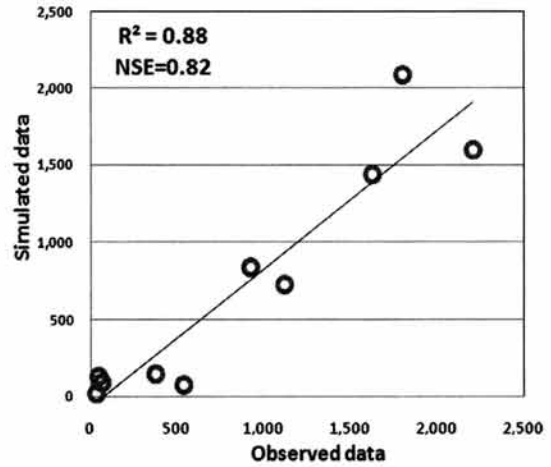
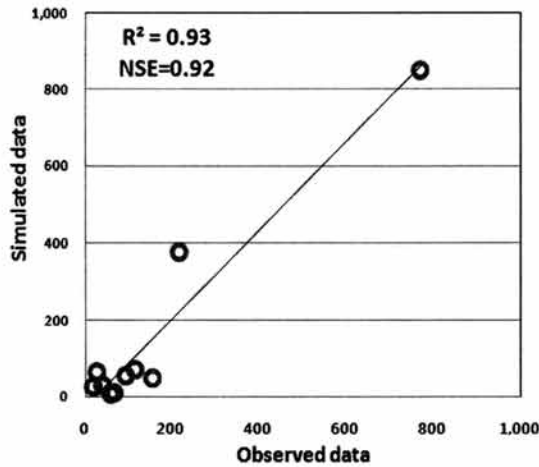


Fig. 11. Calibration- R^2 and Nash - Sutcliffe of runoff estimation. Fig. 12. Validation- R^2 and Nash - Sutcliffe of runoff estimation.

Table 4. Comparison of measured and simulated runoff

Calibration			Validation		
Date	Measured runoff (m ³)	Simulated runoff (m ³)	Date	Measured runoff (m ³)	Simulated runoff (m ³)
3.13	25.4	22.1	7.9 ~ 7.10	2082.3	1860.7
4.20	47.3	158.2	7.11 ~ 7.13	1599.7	1684.6
5.16 ~ 5.17	847.9	852.7	7.13 ~ 7.14	87.0	88.3
5.21 ~ 5.22	28.2	35.0	7.14 ~ 7.16	1440.4	1348.9
6.3	69.5	135.3	7.17 ~ 7.18	148.3	296.5
6.9 ~ 6.10	65.2	32.4	7.19	71.1	463.8
6.20 ~ 6.21	53.2	112.7	8.11 ~ 8.12	125.5	44.4
6.29	8.8	9.2	8.12 ~ 8.13	839.5	1033.1
7.2	6.6	92.8	8.27 ~ 8.29	725.6	1121.8
7.7 ~ 7.8	375.7	287.9	10.17	15.3	165.5

WEPP 모형의 유출 정확성 평가 결과는 Table 4와 같으며, 보정시 %Difference는 1.15%, NSE는 0.92, R^2 는 0.93으로 산정되었고(Fig. 11), 검증 시 %Difference는 18.12%, NSE는 0.82, R^2 는 0.88로 산정되었다(Fig. 12). Donigian (2000)의 기준으로 검증시 %Difference를 제외하고는 모두 “Very good”에 해당되어 모델이 골프장에서 발생하는 강우 유출수를 적절히 예측할 수 있는 것으로 판단되었다.

3.2. 예초에 따른 식생성장과 유출량 비교

본 연구에서는 WEPP 모형을 이용하여 예초에 유·무에 따른 식생성장과 유출량을 비교하였다. 잔디의 초기 높이는 23 mm, 예초로 인한 잔디관리 높이는 18~25 mm, 자연적으로 성장하는 잔디의 높이를 60 mm로 설정하였다. Fig. 13은 연중 예초 유·무에 따른 잔디의 높이를 나타낸다. 3월 중순까지 동일하게 성장하다가 자연 상태의 잔디는 8월 이후 60 mm에서 성장을 멈추었고, 예초가 이루어지는 잔디는 10월 중순 이후부터 성장을 멈추게 된다. 7월 1일 전·후로 잔디의 성장이 약간 둔화되는 것을 볼 수 있는데 이는 강우로 인한 태양복사량의 감소가 원인으로 판단된다. 연간 예초 횟수는 총 26회이고, 주로 5월부터 9월 초순까지 예초를 이용한 잔디관리가 이루어지는 것을 볼 수 있다. 예초 유·무에 따른 유출량 예측 결과 총 2774.5 m³이 차이 나는 것으로 나타났으며, 이는 예초를 한 경우보다

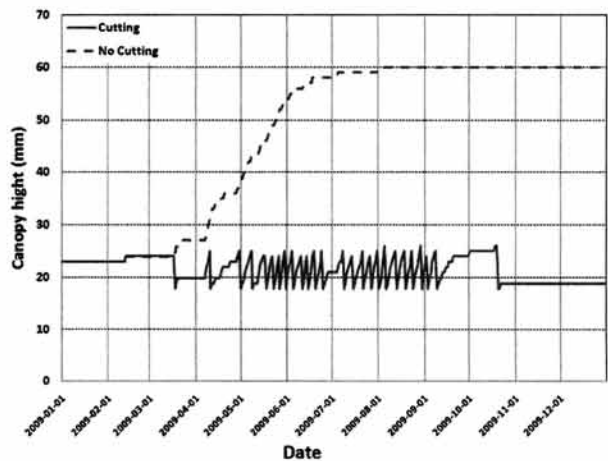


Fig. 13. Comparison of canopy height under grass cutting condition.

예초를 안한 경우에 27% 유출이 감소하는 것이다(Fig. 14). 또한 선행무강우일수가 짧을수록 예초 유·무에 따른 유출량 차이가 점점 감소하는 것으로 나타났다.

3.3. 관수에 따른 식생성장과 유출량 비교

본 연구에서는 관수 유·무에 따른 식생성장과 유출량을 비교하였다. Fig. 15는 관수에 따른 골프장 잔디의 생육을 모의한 것이고, Fig. 16은 관수에 따른 골프장에서 발생하

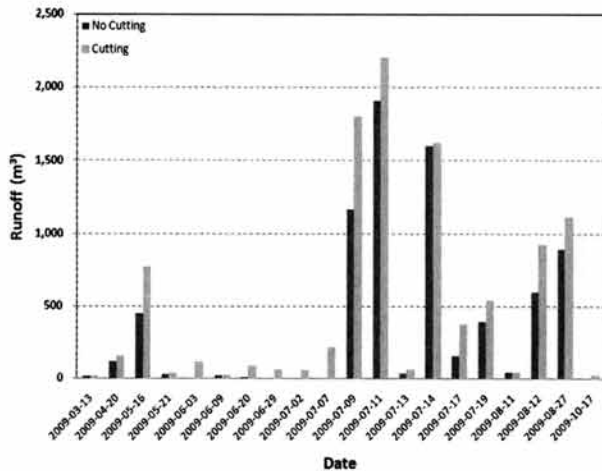


Fig. 14. Comparison of runoff under grass cutting condition.

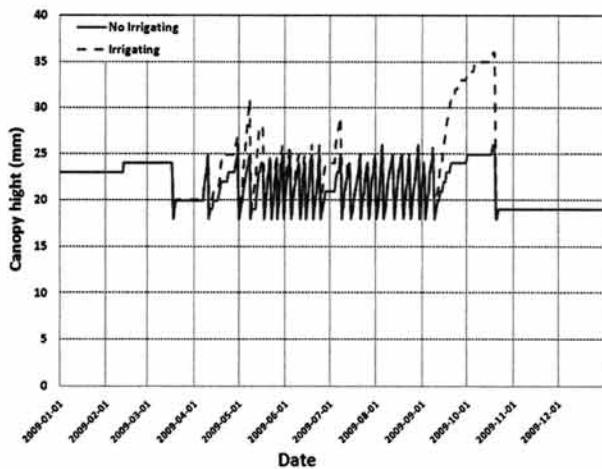


Fig. 15. Comparison of canopy height under irrigating condition.

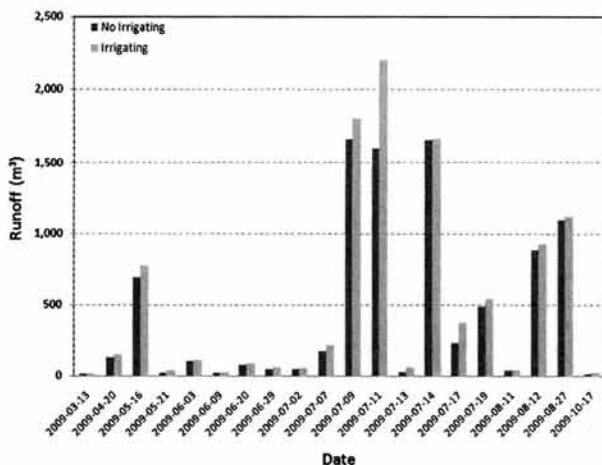


Fig. 16. Comparison of runoff under irrigating condition.

는 강우유출수를 비교한 것이다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이 관수는 잔디의 생육에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 봄, 가을에 많은 영향을 주어 잔디의 생육을 촉진시킨다. 관수 유·무에 따른 유출량은 총 11.8% 차이가 나는 것으로 나타났으며, 가장 차이가 많이 나는 경우 27.4% 정도로 나타났다. 관수는 잔디의 생육뿐만 아니라 습도 및 토양의 함수율을 높여 유출이 크게 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구의 목적은 잔디 관리에 따른 유출 특성 평가가 가능한 WEPP 모형을 이용하여 정확성을 평가하고, 잔디의 예초 유·무로 인한 생육과 유출특성, 그리고 관수 유·무로 인한 생육과 유출 특성을 비교·분석하는데 있다.

본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 연구 대상 지역인 골프장의 유출 정확성을 평가한 결과 %Difference, R², NSE가 보정시 1.15%, 0.93, 0.92로 나타났고, 검증시 18.12%, 0.88, 0.82로 나타났다. Donigan (2000)이 제시한 기준에 따라 WEPP 모형이 골프장의 유출 특성을 잘 반영하는 것으로 판단되었다.
 - 2) 정확성이 평가된 WEPP 모형을 이용하여 예초에 따른 생육과 유출특성을 비교·분석하였다. 예초가 적용된 경우 잔디의 높이는 18~25 mm로 관리되었고, 자연적으로 성장하도록 모의한 경우 8월 이후부터 60 mm에서 성장을 멈추었다. 예초 유·무에 따른 유출량 예측결과 총 2774.5 m³이 차이 나는 것으로 나타났으며, 이는 예초를 한 경우보다 예초를 안한 경우에 27% 유출이 감소하는 것이다.
 - 3) WEPP 모형을 이용하여 관수에 따른 골프장 잔디의 생육과 유출특성을 비교·분석하였다. 관수를 하는 경우 잔디의 생육을 촉진시키는 것으로 나타나 수질관리를 위해 골프장에서 농약사용을 줄이고 적절한 관개배수를 통해 잔디의 성장을 촉진시키는 것이 바람직하다. 관수 유·무에 따른 유출량은 총 11.8% 차이가 나는 것으로 나타났으며, 가장 차이가 많이 나는 경우 27.4% 정도로 나타났다. 강우유출수는 골프장에서 사용하는 물의 상당 부분을 차지하고 있으므로 관수량을 적절히 조절하여 골프장을 효율적으로 운영할 수 있을 것으로 판단된다.
- 본 연구에서는 WEPP 모형을 이용해 골프장에서 발생하는 강우유출수를 비교·평가를 하였다. 연구 결과에서 볼 수 있듯이 WEPP 모형은 식생의 성장 및 관리에 따른 유출 특성 모의가 가능하기 때문에 식생관리가 필요한 농업, 골프장뿐만 아니라 나아가 비점오염원 제어 및 관리 기법 개발에도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 금강물환경연구소(주요 비점오염원 유출 장기 모니터링), 환경부 Eco-Star Project (과제번호:EW32-07-10, 부담(생태호 조성기술 및 생태복원 기술개발)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

금강물환경연구소(GERC) (2009). 주요 비점오염원 유출 장기 모니터링 및 저감기법연구, pp. 34-39.
서천범(2006). 레저백서, 한국레저산업연구소, pp. 2.

- 손정호(2002). *WEPP 모형을 이용한 토양유실량 추정*, 석사 학위논문, 서울대학교, pp. 6.
- 이정식, 구본일(2002). 골프장의 자연환경 폐해문제와 친환경적 대처방안, *한국체육철학회지*, 10(2), pp. 1-31.
- 한국토양정보시스템(2005). <http://asis.rda.go.kr/>.
- ASCE (1993). ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models, Criteria for Evaluation of Watershed Models, *Irrigation Drainage Engineering*, 119(3), pp. 429-442.
- Donigian, Jr., A. S. (2000). *HSPT Training Workshop Handbook and CD*. Lecture # 19, Calibration and Verification Issues, Presented and Prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C., pp. 10-11.
- Flanagan, D. C. and Livingston, S. J. (1995). *WEPP User Summary*, NSERL Report 11, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, pp. 10.
- Gete, Z., Winter, T., and Flanagan, D. (2000). BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP Using Observed Standard Weather Data Sets. <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/BPCDG.html/>.
- NAMUNET (2010). <http://www.namunet.co.kr/>.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models. Part I: A discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- Pandey, A., Chowdary, V. M., Mal, B. C., and Billib, M. (2008). Runoff and Sediment Yield Modeling from a Small Agricultural Watershed in India Using the WEPP Model, *Journal of Hydrology*, 348, pp. 305-319.
- Soil Conservation Service (1972). *National Engineering Handbook*, Section 4. Hydrology. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D. C., pp. 7-11.
- Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., and Spaniel, D. A. (1989). The EPIC Crop Growth Model. *Transactions of the ASABE*, 32(2), pp. 497-511.