

토양-식생기반의 수문모델 BAGLUVA를 적용한 토지이용별 물수지 분석 방법론[†]

권경호

(재)한국먹는물안전연구원 도시물순환연구센터

Landuse oriented Water Balance Analysis Method by the Hydrological Model BAGLUVA based on Soil and Vegetation

Kwon, Kyung Ho

Urban Water Cycle Research Center, Korea Institute of Safe Drinking Water Research

ABSTRACT

Urban environmental problems such as flooding, depletion of ground water, pollution of urban streams and the heat island effect caused by urban development and climate change can be mitigated by the improvement of the urban water cycle.

For the effective planning of water cycle management it is necessary to establish aerial Hydrotope Maps, with which we can estimate the status and change of the water allowance for any site. The structure of the German water balance model BAGLUVA, which is based on soil and vegetation, was analyzed and the input data and boundary condition of the model was compared with Korean data and research results. The BAGLUVA Model consists of 5 Input categories (climate, land use, topography, soil hydrology and irrigation). The structure and interconnection of these categories are analyzed and new concepts and implementation methods of topographic factor, maximum evapotranspiration ratio, effective rooting depth and Bagrov n parameter was compared and analyzed. The relation of real evapotranspiration (ET_a)-maximum evapotranspiration (ET_{max}) - precipitation (P) was via Bagrov n factor represented. The aerial and land use oriented Hydrotope Map can help us to investigate the water balance of small catchment areas and to set goals for volume of rainwater management and LID facilities effectively in the city. Further, this map is a useful tool for implementing water resource management within landscape and urban planning.

Key Words: LID, Decentral Rainwater Management, Evapotranspiration, Bagrov Factor, Hydrotope Map

국문초록

도시개발과 기후변화로 인해 증가하는 도시침수, 지하수 고갈, 하천오염 그리고 도시 열섬 현상 등의 환경문제는 도시 물순환 회복을 통해 경감시킬 수 있다. 효과적인 물순환 회복 계획수립을 위해서는 개별 사업이나 소규모 시설에

[†]: 본 연구는 2015년도 환경부 차세대 에코이노베이션 기술 개발사업의 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 416-111-014).
Corresponding author: Kyung Ho Kwon, Urban Water Cycle Research Center, Korea Institute of Safe Drinking Water Research, Anyang 14059, Korea. Tel.: +82-31-478-0790, E-mail: kwonkh@kisd.re.kr

대해 물수지 현황과 변화를 면적으로 나타낼 수 있는 지도형태의 분석틀이 필요하다. 이를 위해, 토양-식생 기반의 물수지 모델 BAGLUVA의 구조를 분석하고, BAGLUVA 모델의 수문요소와 입력자료와 관련된 우리나라 관련 연구결과에 대해 조사하였다. BAGLUVA 모델은 기후, 토지이용, 지형, 토양수문 그리고 관개 등의 5가지 부문으로 구성된다. 5가지 구성요소의 상호 연계 구조와 개별 입력데이터 그리고 지형 계수, 최대증발산 비율, 유효근권 등의 개념과 적용 방법을 비교 분석하였다. 그리고, 실제 증발산량-잠재증발산량-강수량 간의 관계를 매개하는 Bagrov 계수의 산정 방식을 나타내었다. 면적단위의 토지이용별 물순환지도(Hydrotope Map)를 통해, 임의의 소규모 지역 물수지 현황을 효과적으로 파악할 수 있다. 그리고, 물순환 보전 및 관리를 위한 분산형 빗물관리, 저영향개발(LID) 시설의 계획 설계 상의 목표량 설정을 공정하고 용이하게 수행할 수 있다. 또한, 수자원 관리를 조경 및 도시계획에 통합시키는 유용한 도구이다.

주제어: 저영향개발, 분산형 빗물관리, 증발산량, Bagrov 계수, 물순환지도

1. 서론

1. 연구 배경과 필요성

자연 물순환을 구성하는 핵심 요소 중의 하나인 증발산은 생태계 내의 물과 에너지 흐름을 이해하고, 물수지와 열수지의 상호작용을 파악하는 데 중요한 역할을 한다. 또한, 효과적인 수자원 관리 및 관개용수 공급 최적화를 위해서는 정확한 증발산량의 산출이 반드시 필요하다. 이를 위해 대규모 하천 유역 단위의 강우-유출 모형과 농경지 작물 관개요구량 등 증발산량에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다.

아울러, 증발산은 도시 물순환 회복의 중요한 지표이며, 정량적으로 큰 비중을 차지한다. 도시화로 인해 불투수면이 확대되고, 기후변화에 따른 강우 강도가 증가함에 따라 강우의 표면유출량이 늘어나며, 침투량과 증발산량은 감소하고 있다. 도시홍수, 합류식 하수관거 월류수(CSOs) 유입 횟수 증가, 비점오염물질 유입에 따른 하천 수질오염, 도시열섬 현상 그리고 지하수위 하강 등 다양한 도시환경 문제가 발생한다(Marsalek *et al.*, 2008; Novotny and Brown, 2007).

최근에는 빗물을 소규모로 분산하여 저류, 침투 그리고 증발산시켜 건강한 자연 물순환을 회복하려는 도시물관리 패러다임의 전환이 일어나고 있다(Novotny *et al.*, 2010). 우리나라도 이를 실현하기 위해 그린인프라(Green Infrastructure), 저영향개발(Low Impact Development)에 대한 사회적 관심이 높아지고 있으며, 정책 반영을 위한 법제화가 진행되고 있다.

한국토지주택공사는 아산탕정 물순환 시범지구를 대상으로 SWMM 5모형의 LID 모듈을 적용하여 개발 전·후의 유출 저감효과와 LID 시설 설치에 따른 물순환 개선효과를 분석하였다. 물순환 시설 적용할 경우, 그렇지 않은 것보다 개발 후의 지표면 유출은 약 20% 감소한 반면, 침투와 증발산은 각각 18%와 8% 증가하는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2014).

서울특별시는 물순환 회복을 도시 물관리 정책으로 수립 후 선도적으로 추진해 나가는 도시 중의 하나이다. 서울특별시의

물수지는 1962년과 2010년을 기준으로 증발산량은 43.3%에서 25%로 줄었고, 표면유출은 10.6%에서 51.9%로 증가하였다(Seoul Metropolitan Government, 2013). 이로 인해 발생하는 도시환경 문제의 해결을 위해 빗물의 자연 침투능력을 보전하고, 빗물의 표면유출 억제를 위한 “서울특별시 물순환 회복 및 저영향개발 기본조례”를 수립하였다. 목표연도 1962년 당시의 물순환 회복을 위해 “저영향개발 사전협의 제도”를 2014년부터 시행하고, 토지이용별 빗물분담량에 해당하는 물순환시설 설치를 유도하고 있다.

개발 전 단계의 물순환 상태를 회복하려면, 궁극적으로 도달하고자 하는 표면유출량, 침투량 그리고 증발산량 등의 물수지 값을 목표량으로 정해야 한다. 그러나 이러한 물순환 회복 목표량을 보편 타당하고, 공정하게 정하는 것은 쉽지 않다. 회복 시점에 따라 해당 지역은 도시화 초기 단계, 농경지 그리고 더 과거 시점에서는 자연녹지 상태일 수 있다. 그리고 이 때의 물수지 계산을 위해 사용하는 컴퓨터 시뮬레이션의 토양과 식생, 지형과 지하수위, 강수량 관련 수문모델 입력계수에 따라 산출되는 증발산량, 침투량 그리고 표면유출량 등은 크게 달라진다.

우리나라 국토 전체 면적에 대해 토지이용별로 물수지 값이 표시되어 있는 물순환 지도(Hydrotope Map)가 있다면, 토지이용 변화에 따라 달라지는 물수지 값을 미리 예측할 수 있고, 도시개발 및 환경영향평가 등의 계획 단계에서 물순환 보전 및 회복방안을 보다 용이하게 수립할 수 있을 것이다(Kwon and Diestel, 2009; Diestel *et al.*, 1994). 이는 마치 도시 생태지도인 비오톱 맵(Biotope Map)을 작성하여 도시생태 현황을 효과적으로 관리하고, 도시계획에 반영하는 것과 유사하다.

2. 연구 목적과 방법

독일 연방 환경-자연보전-원자력안전부(BMU: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)에 의해 2003년 구축된 독일 「국가 물수지 분석체계도」(Hydrologischer Atlas von Deutschland)는 「수문-생태-인간」이라는 제목 아래

다양한 연방정부 기관들과 연구소들 그리고 주정부 물관리 연구연합이 참여하였다. 이 체계도에는 하천, 수문, 기상, 표면수, 토양수문, 지하수 그리고 물수지 등이 분야별로 주제도 형식으로 작성되어 있다. 독일 지역 전체의 토지이용별 연평균 증발산량과 연평균 총유출량이 지도에 표현되어 있으며, 이때 사용된 물수지 모델이 BAGLUVA이다.

토양-식생을 기반으로 하는 BAGLUVA 모델의 구조와 입력 데이터 그리고 증발산량 산정을 위한 물수지 분석 방법을 고찰하고, 우리나라의 기후여건과 연구결과 그리고 기존 물관리 정보시스템 등과 비교한다. 그리고 산림지나 농경지, 초지 등 자연지역과 도시 지역에서의 물수지 분석 연구현황을 조사하여, 분석 방법과 연구 결과를 정리한다. 분산형 빗물관리나 저영향개발 등을 적용하기 위한 물순환 목표설정 사례와 수문 분석에 따른 기대효과 관련 연구 현황을 조사한다. 그리고 이를 바탕으로 물순환 지도 작성을 위해 추가적으로 고려되어야 할 사항과 앞으로의 연구방향 등을 제시하는 것이 이 연구의 목적이다.

II. 이론 고찰 및 현황 분석

1. 물수지 분석 현황

Rim(2008)는 FAO Penman-Monteith(FAO P-M) 식을 기준으로 우리나라 21개 기상관측 지점의 값을 Penman 식, Makkink 식, Priestley-Taylor 식과 Hargreaves 식 등으로 계산하여 비교하였고, Lee and Park(2008)은 기상 자료가 부족하거나, 결측인 지역에서 Penman-Monteith 식을 사용할 수 없을 경우, 기준 증발산량 산정을 위해서 Hargreaves 공식의 매개변수를 우리나라의 여건에 맞게 조정하였다. 또한, 실제 대상지에서의 수문 모형 구축 시에도 기준 증발산량의 입력값으로 Penman-Monteith 식을 사용하고 있다(Ahn *et al.*, 2013; Kim and Lee, 2013; Lee *et al.*, 2014).

기준 증발산량과는 달리 실제 증발산량은 기준증발산량을 바탕으로 식생이나 작물의 종류와 토양의 수분 함량 변화에서 미치는 영향이 반영된 값이다(Allen *et al.*, 1996). 우리나라에서도 실제 증발산량을 추정 및 측정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 산림지역에 대해서는, 양수땀에서 측정된 유출량과 강수량을 분석하여, 인공침엽수 유령림, 천연 활엽수 장령림 그리고 혼효 사방 복구림에서 증발산량이 각각 679mm, 580mm, 368mm인 것으로 추정하였다(Kim and Jeong, 2006). Kim and Lee(2013)은 복제주의 환천유역을 대상으로 SWAT-K 모형을 이용하여 연평균 강수량이 증가함에 따라 잠재 증발산량은 감소하나, 실제 증발산량은 증가하는 경향을 확인하였다. Lee *et al.*(2014)은 산림지의 혼효림을 유역으로 하는 설마천과 농경

지의 논을 유역으로 하는 청미천에서 초음파 풍향·풍속계를 이용한 에디 공분산 방식으로 증발산 특성을 분석하였다. 산림지의 경우, 연강수량 대비 증발산 비율이 평균 25.5%, 논 유역의 경우 39.4%로 제시하였다. Kwon *et al.*(2009)은 혼효림의 증발산은 성장기(5~7월)에는 평균 2.2mm/day, 비성장기인 겨울에는 0.5mm/day로 측정하였다. 그리고 2007/08년 한 해 동안의 총증발산량은 약 581mm로 연 강수량 1,997mm의 약 1/3을 차지한다고 하였다. 설마천 유역의 90%는 수령 20~30년의 혼효림이며, 표토는 얇다고 하였고, 대상지 분석을 위해 사용한 SWAT 모형의 토양 조건 입력 시 토양층의 깊이를 100mm로 하였다(Ahn *et al.*, 2013).

Jung(2011)은 미국토목공학회에서 기준 ASCE-Penman Monteith 공식으로부터 유도한 ASCE-ET 공식을 이용하여, 경남 밀양 지역 토지이용별 기준증발산량을 산정하였다. 작물의 유형과 알베도 차이 등을 공식에 반영하여 산출했으며, 지하수면의 깊이, 지형경사 토양 특성 등이 고려된 증발산량 산정 기법 개발에 대한 추가 연구가 필요하다고 하였다. Choi *et al.*(2011)은 유역 물수지 모의를 위한 토양수분 모형 개발에서 산출된 실제 기화량 자료와 기상자료를 이용하여 산출된 잠재증발산량과 실제 증발산량 그리고 강수량 자료 사이의 경험적인 관계공식을 구성하여 연별 실제 증발산량 자료를 추정하였다. 토양 내 습윤량과 증발산량은 식생과 유역 물수지를 연결하는 주요한 역할을 한다고 하였다.

다양한 지형, 토양, 식생 그리고 지하수위 등의 수문요소들이 모두 포함되어 있는 비교적 넓은 유역단위에서의 분석과 모의에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 반면, 개별적 수문요소가 유역 수문현상에 미치는 영향을 연구한 사례는 상대적으로 많지 않았다.

BAGLUVA 모델을 이용한 토지이용별 면적(面的) 물수지 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. 독일 북부지역 Mecklenburg Vorpommern 주(州)는 지하수 보전 계획 및 관리를 위하여 BAGLUVA 모델을 바탕으로 지역별 연간 지하수 생성량을 나타내는 지도를 작성하였다(Landesamt fuer Umwel Naturschutz und Geologie, 2012). 노르트라인 베스트팔렌 주의 지하수 함양 효과 모의를 위한 GROWA 모델에서, 지하수의 영향을 받는 지역에서의 증발산량 산정 시 BAGLUVA 모형을 적용하였다(Bogena *et al.*, 2005). Messer *et al.*(2011)은 기후 변화에 따른 엠서 유역 지하수 함양 변화를 예측하기 위하여 BAGLUVA 모형을 바탕으로 토지이용별 실제 증발산량을 산정하였다. Neumann(2009)은 독일 전역을 격자로 나눈 후, 지하수 함양에 관한 지도를 작성하였으며, 기저유출량의 검증을 통해 모델의 타당성을 확인하였다.

지형, 토양, 식생 그리고 지하수위 등 대상지 자연 여건과 관개용수량 등을 고려하여 수문량을 면적(面的)으로 표시함으로

써 임의의 소규모 지역에서의 물순환 변화를 추이하는데 더욱 효과적이다. 특정 지역에 국한된 물수지 분석이 아니라, 다양한 요소가 복합되어 있는 국토 전체에 대한 물수지 현황을 지도의 형태로 나타내려면, 개별 수문요소에 대한 연구뿐만 아니라, 요소간의 상관관계에 대한 연구도 필요하다.

2. 물순환 관련 정보시스템 현황

우리나라에 구축된 국가 규모의 물관련 정보제공 및 의사결정 지원시스템은 Table 1과 같다. 목적에 따라 주무부서가 나뉘어져 있고, 해당 내용은 인터넷으로 일반인들에게도 일부 지원되고 있다.

국가수자원관리 종합정보시스템 상의 “수자원단위지도”는 국가 차원의 수자원 개발계획 및 관리를 보다 효율적으로 추진하기 위하여 관계부처(건교부, 농림부, 환경부) 합동으로 1999년 개발되었고, 2002년 변경된 유역단위 표준지도이다. 지형공간 상에 대권역 21개, 중권역 117개, 표준유역 850개로 구성된 수자원단위지도(Ver3.0)는 인공구조물(제방, 도로 등) 및 수자원관련 시설물 등 여러 가지의 수자원 관련 정보를 표준적으로 사용할 수 있도록 하는 자료이다(국가수자원관리종합정보시스템, <http://www.wamis.go.kr/>). 이 지도는 자연물순환 체계에 기반한 물수지에 관한 것이라기보다는 용수공급 계획과 수요 관리를 위한 수자원 계획을 위한 지도에 더 가깝다.

서울시의 “도시생태현황도”는 8개의 주제도를 바탕으로 비

옴 유형을 평가하고 관리하는 체계를 갖고 있다. 평가와 관리의 대상이 다르기는 하지만, 지표면 자료를 도면화 하고, 도시관리 계획에 활용한다는 측면에서는 동일한 맥락의 정보시스템이라 할 수 있다. 그리고 환경부의 생태면적률 제도는 생태적 가치를 면적으로 정량화 하여, 추후 목표로 하는 생태적 가치에 부합하도록 단위개발 사업을 유도하는 계획도구라는 점에서 물순환지도의 활용 방향을 잘 나타낸다. 서울시의 “물순환통합관리시스템”은 최근에 시작된 정보지원시스템으로 “지역향개발 사전협의 제도”를 통해 반영된 물순환 시설의 위치와 규모 등을 나타내는 정보지원체계이다.

우리나라에는 국가 규모에서 토지이용별로 임의의 대상지에 대한 물수지 값을 면적 단위의 지도 형태로 나타내는 정보시스템은 아직 구축되어 있지 않다. 하지만, 물순환 지도 작성을 위해 필요한 많은 정보들은 기 구축된 시스템의 DB를 통해 획득 가능할 것으로 보인다.

III. 토양-식생 기반의 물수지 모델 BAGLIVA

1. 모델 개요와 기본 구조

BAGLIVA 물수지 모델은 Bagrov(1954)에 의해 최초 제시된 강수량-잠재증발산량-실제증발산량 간의 관계 모델이 보완 발전된 것이다(Glugla *et al.*, 2003). 이 모델에서의 실제 증발산량은 최대 증발산량과의 상대적 비율에 의해 산출되는데, 이

Table 1. Nation-wide water information and decision support system

Information system	Contents	Organization
① WAMIS: Water Resources Management Information System	Information about the hydrological and meteorological data, watershed, river, dams and underground water, environment and ecosystem, natural disasters, geological space and water resources	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
② Water Information System	Water quality measuring network for river, lakes, irrigation water, and urban streams. Providing serial data for river ecosystem and watershed management	Ministry of Environment
③ RAWRIS: Rural Agricultural Water Resource Information System	Integrated information system for rural water network, support and rural water conservation management	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs
④ SIS: Korean Soil Information System	Characteristics of the soil, agricultural soil information database, farming crop growers, soil information internet system	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs
⑤ Integrated Ground Water Information Service	Ground water amount and quality information, the status of the public ground water collection and use, management information service	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
⑥ Water Cycle Integration System	Low impact development projects arrangements, details and location	Seoul Metropolitan Gov.
⑦ FGIS: Forest Geospatial Information System	Forest soils, age, level, location data, satellite images, aerial photographs operating services integrated forest administration	Korea Forest Service
⑧ Urban Biotope Map	Land use, vegetation map, urban ecosystem evaluation, biotope type, existing impervious pavement, evaluation of urban ecosystem, evaluation considering biotope type, map of amphibians, bird, reptiles	Seoul Metropolitan Gov.
⑨ National Climate Data Service System	Climate data measurement and support such as rainfall, wind, temperature, solar radiation	Korea Meteorological Administration
⑩ EGIS: Environmental Geographic Information Service	Land coverage map, ecological zoning map according to their cover classification, ecological value, nature, landscape values	Ministry of Environment

비율을 나타내는 방법으로 Bagrov가 제시한 방법을 기반으로 한다. 기존 Bagrov 모델에 차단손실과 토양특성, 유효근권 그리고 모세관 상승고 등이 추가적으로 반영되었다(Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., 1996). 또한, 강수량 보정계수, 강설 영향 그리고 토지이용별 열수지를 반영하는 최대 증발산량, 경사와 향에 따른 물수지 변화 등이 통합된 후, 이 모델은 독일 전 지역으로 확대 적용되었다.

이 모델은 기후, 토지이용, 지형, 토양수문 그리고 관개 등의 5가지 부문으로 구성된다(Figure 1 참조). 기후 데이터는 강수량과 기준 증발산량으로 구성되고, 눈위 증발량과 수면 증발량도 반영한다. 수치지형도를 바탕으로 경사와 향에 따른 최대 증발산량 가중치를 나타내고, 토성에 따른 유효근권, 유효수분 그리고 지하수 모세관 상승이 포함되어 있다. 또한, 농업 활동에서 나타나는 관개에 의한 물공급량도 반영되어 있다. 토지이용 유형은 크게 7가지로 나뉘며, 수면, 불투수면, 침엽수림, 활엽수림, 농경지, 초지 그리고 나지 등이다. 이러한 토지이용 유형별 물수지 산출을 바탕으로 대한 면적(面的) 물수지 분석이 가능하게 된다(Glugla *et al.*, 2003).

이 모델은 크게 3단계로 구성되는데, 기존 물리적 기후데이터에 기반한 기준증발산량을 토지이용 유형과 연결시키는 최

대 증발산계수 (f)를 구한다(STEP I). Bagrov 계수(n) 값은 토양과 식생의 특성, 지하수위에 의한 모세관 상승이나 관개용수 공급 등에 따라 정해지는 Bagrov 계수(n) 값을 산정한다(STEP II). Bagrov 보정계수(n_k)를 연평균강수량-연평균 최대증발산량-연평균 실제 증발산량 관계식에 대입하여 임의의 토지이용에 대한 연평균 증발산량과 연평균 유출량을 추정할 수 있다(STEP III). Figure 1에는 BAGLUVA 물수지 모델 수립에 필요한 항목들과 관련하여, II, 2장에 기술된 기존 물순환 정보시스템을 원문자로 표시하였다.

2. 부문별 입력데이터와 계수

1) 기후

(1) 강수량

최근 10년 동안의 기상청 자료를 바탕으로 연평균 총강수량과 여름강수량을 살펴보면, Figure 2와 같다. 총 강수량에서 여름 강수량이 차지하는 비율이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 이러한 강수 특성은 연평균 증발산량과 유출량에 영향을 미치며, 이를 물수지 산정에 반영하기 위해 BAGLUVA 모형에서는 Bagrov

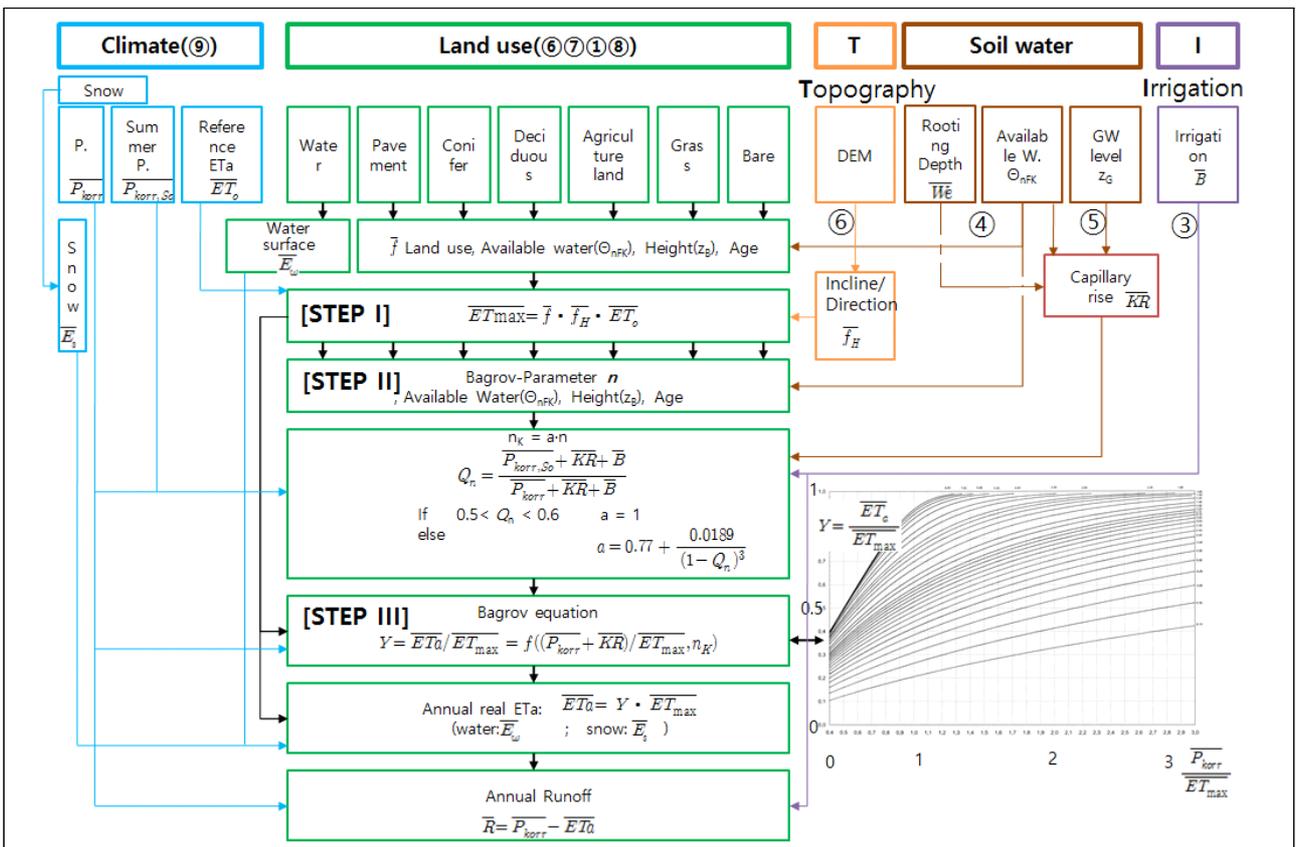


Figure 1. Structure of BAGLUVA model
Source: Glugla *et al.*, 2003: 73. modified by Author

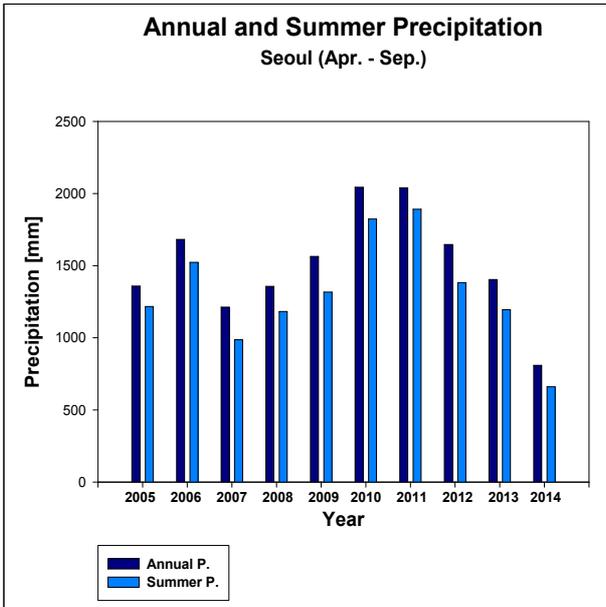


Figure 2. Annual and summer precipitation in Seoul

계수 n 을 보정하는 방법을 사용한다.

(2) 기준 증발산량

FAO(Food and Agriculture Organization)는 기준 증발산량을 산정하기 위한 표준식(식 1)으로 다음과 같이 제시하였다 (Allen *et al.*, 1996).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Q_n - Q_g) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{식 1})$$

ET_o : 기준증발산량 (mm/day)

T_a : 2m 높이에서 일평균기온 (°C)

u_2 : 지상 2m 높이에서 풍속 (m/sec)

Q_n : 순방사 (MJ/m²/day)

Q_g : 토양열 유동밀도 (MJ/m²/day)

e_s : 포화증기압 (kPa) e_a : 실제증기압 (kPa)

$e_s - e_a$: 대기의 포화증기압 부족량 (kPa)

Δ : 포화증기압과 온도곡선의 기울기 (kPa/°C)

γ : 건습계 상수 (kPa/°C)

기준 증발산량은 높이 0.12m, Albedo 0.23, 공기표면저항 70 sm⁻¹인 잔디를 기준작물로 하고, 토양수분 공급이 충분한 상태를 가정 한 후, 주어진 기후 여건에 의해 결정되는 증발산량을 의미한다(Allen *et al.*, 1996). FAO의 계산 프로그램 CROPWAT을 사용해서 서울지역의 최근 10년 동안의 FAO Penman-Monteith 기준 증발산량 ET_o 값을 계산하였다. 연평균 강수량 중에서 연평균 증발산량이 차지하는 비율과 10년 동안의 일강우 분포는 Figure 3과 같다. 기준 증발산량은 주어진 기후 조건에 의해 산정되는 잠재적인 증발산량에 해당하며, 강수량의 많고 적음을 반영하지는 않는다. 서울지역 최근 10년 동안의 일 증발산량은 여름철 약 2mm/day~5mm/day를 나타내며, 한여름에 증발산량이 작게 나타나는 날은 강우로 인한 온도, 상대습도, 일조량의 변화에 기인한 것이다.

2) 토지이용

(1) 최대 증발산량

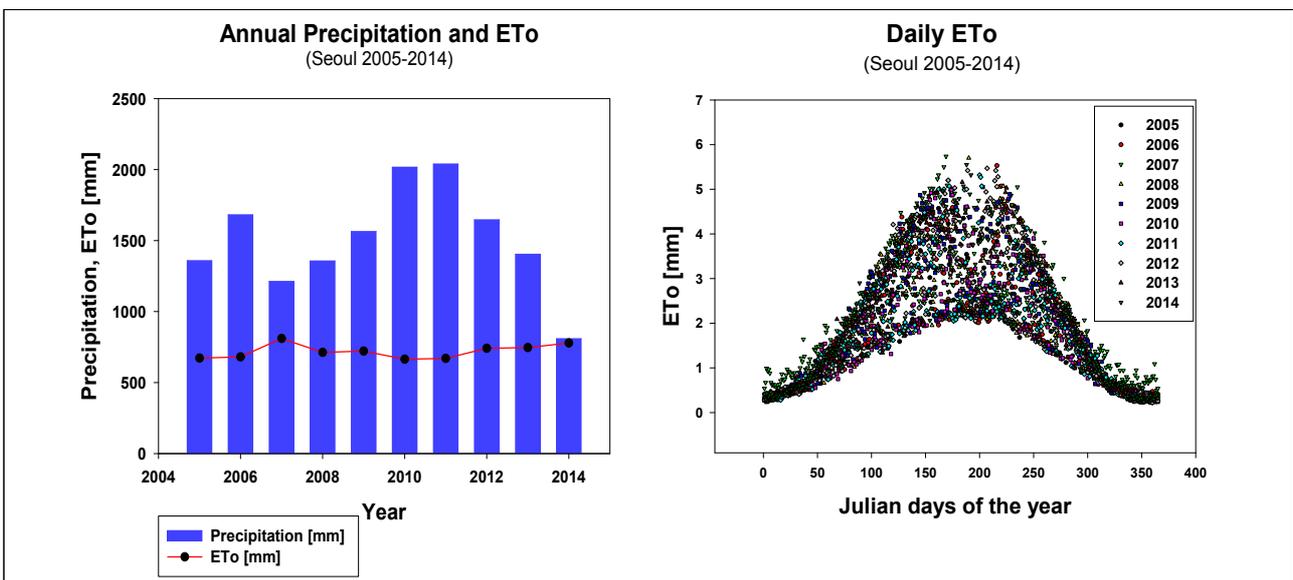


Figure 3. Annual precipitation, reference evapotranspiration(left) and daily reference precipitation

기후요소에 의해 결정되는 기준 증발산량은 Penman-Monteith 방정식과 기상대에서 측정된 기후값을 이용해서 산정 가능하다(Figure 3 참조). 이 값에 Table 2와 같이 최대 증발산 계수 \bar{f} 값을 도입함으로써 토양과 식생 그리고 지형에 따른 차이를 반영할 수 있다.

$$\overline{ET_{max}} = \bar{f} \cdot \overline{f_H} \cdot \overline{ET_o} \quad (\text{식 2})$$

$\overline{ET_{max}}$: 최대증발산량, $\overline{ET_o}$: 기준증발산량

\bar{f} : 최대증발산 계수, $\overline{f_H}$: 지형 계수

Glugla *et al.*(2003)는 나지와 12cm 높이 잔디, 초장별 초지, 농경지 그리고 활엽수림과 침엽수림에서의 최대증발산 계수 값을 제시하였다. 모든 토지이용 유형에서 동일하게, 유효수분 증가에 따라 최대증발산 비율이 약 0.8에서 1.1까지 증가함을 알 수 있다. 초지의 경우, 초장에 따라 그 값의 차이가 크기 때문에, 잔디 12cm 기준값을 바탕으로 계수를 곱하여 산정한다(Figure 4 참조).

Table 2. Max. evapotranspiration factor by land use type

Land use type	Max. evapotranspiration factor \bar{f}
Grassland (mean height 12cm)	$\Theta_{nFK} \leq 11 \text{ Vol.}\% \rightarrow$ $\bar{f}_{12cm} = 0.0125 \cdot \Theta_{nFK} + 0.7108$ $\Theta_{nFK} > 11 \text{ Vol.}\% \rightarrow$ $\bar{f}_{12cm} = 0.2866 \cdot \ln(\Theta_{nFK}) + 0.1614$
Grassland	$\bar{f} = \bar{f}_k(z_B) \cdot \bar{f}_{12cm}$ $5cm < z_B \leq 20cm \rightarrow$ $\bar{f}_k = 0.0676 \cdot \ln(z_B) + 0.8321$ $z_B > 20cm \rightarrow$ $\bar{f}_k = -0.7 \cdot 10^{-5} \cdot z_B^2 + 0.37 \cdot 10^{-2} \cdot z_B + 0.9661$

Source: Glugla *et al.*, 2003: 99

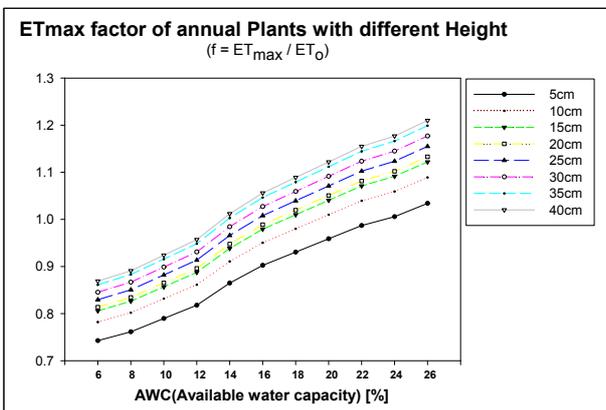


Figure 4. ET_{max} factor of annual plants with different height
Source: Glugla *et al.*, 2003: 99, plotted by author to the equation

활엽수림과 침엽수림에 대한 산정식을 도시하면 Figure 5와 같다. 임상과 수령 그리고 유효수분 함량에 따라라도 최대증발산 비율이 나뉘어졌다. 동일한 활엽수라 하더라도, 유효수분 16%를 초과하면 훨씬 큰 값을 나타내었고, 수령 30년까지는 증가폭이 크다가 그 이후 완만하게 증가하고 있다. 침엽수는 활엽수보다 전체적으로 최대 증발산 비율이 크게 나타나고 있으며, 수령 40~50년 이후에 완만한 곡선을 나타내면서 다소 줄어드는 경향을 보인다.

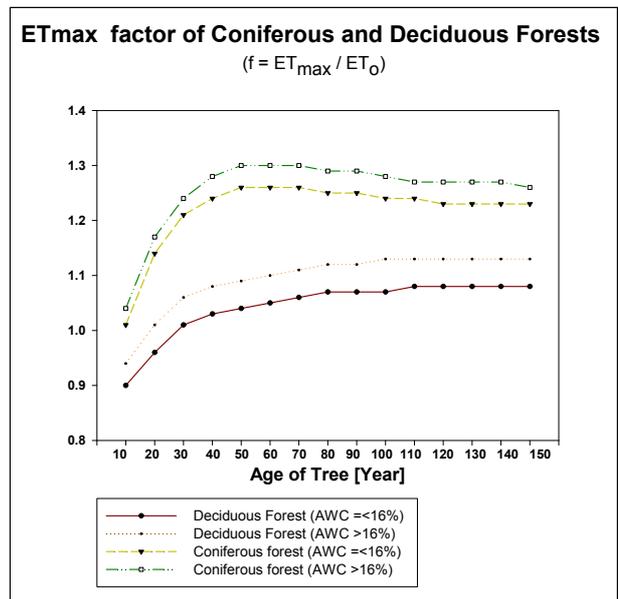


Figure 5. ET_{max} factor of coniferous and deciduous forest
Source: Glugla *et al.*, 2003: 99, plotted by author according to the equation

3) 지형

경사면에서의 태양 복사에너지는 수평면에 도달하는 복사에너지의 상대적 비율로 표현할 수 있으며, 수평면 복사에너지는 직달일사량과 산란일사량 그리고 지표면 반사 일사량의 합으로 구해진다(Klein, 1977).

$$\overline{H_T} = \overline{R} \overline{H}$$

$$\overline{R} = \left(1 - \frac{\overline{H_d}}{H}\right) \overline{R_b} + \frac{H_d}{H} (1 + \cos s) / 2 + \rho (1 - \cos s) / 2 \quad (\text{식 3})$$

$\overline{H_T}$: 경사면 일평균 일사량, \overline{H} : 수평면 일평균 일사량
 \overline{R} : 수평면에 대한 경사면 일평균 일사량비,
 $\overline{H_d}$: 산란 일사량, H_d : 산란 일사량,
 $\overline{R_b}$: 총일사량 중에서 경사면 직달일사량이 차지하는 비율,
 s : 수평면과 경사면이 이루는 각, ρ : 지면반사율

직달 일사량 \overline{R}_b 에는 경사면이 이루는 표면 방위각(γ)이 반영된다.

$$\overline{R}_b = \frac{\begin{Bmatrix} [\cos s \sin \delta \sin \phi] \pi / 180 [\omega_{ss} - \omega_{sr}] \\ - [\sin \delta \cos \phi \sin s \cos \gamma] \pi / 180 [\omega_{ss} - \omega_{sr}] \\ + [\cos \phi \cos \delta \cos s] [\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}] \\ + [\cos \delta \cos \gamma \sin \phi \sin s] [\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}] \\ - [\cos \delta \sin s \sin \gamma] [\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr}] \end{Bmatrix}}{2[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \pi / 180 \omega_s \sin \phi \sin \delta]} \quad (\text{식 4})$$

δ : 일적위, ϕ : 해당지방의 위도, γ : 표면방위각,
 ω_s : 수평면 일몰 시간각, ω_{sr} : 경사면 일출 시간각,
 ω_{ss} : 경사면 일몰 시간각

Jo *et al.*(2001)은 방위별 경사면 일사량 측정을 통해, 태양광 발전 효율 최적의 경사각의 범위를 제시하였고, Yu *et al.*(2007)은 측정된 자료를 바탕으로 임의의 지역에서의 값을 산출할 수 있는 모의 프로그램을 개발하였다. 향과 경사에 따른 일사량 차이를 바탕으로 Penman-Monteith 기준식에 입력되는 일사량의 값을 지형의 향, 경사 특성에 따른 영향계수를 산정할 수 있다.

4) 토양 수문

(1) 토양 유효수분

토양이 건조하여 수분량이 감소하면 토양의 결합력이 증가하고, 식물의 뿌리가 이것을 흡수하기 곤란하게 되어 결국 식물이 마르기 시작한다. 이 마르기 시작하는 때의 수분결합력, 즉 위조점(萎凋點) 이하의 결합력(pF<4.2)으로 토양에 보유되어 있는 수분 중에서 중력에 의해 내려가지 않는 수분을 유효수분이라 한다. 이 유효수분은 식물이 활용가능한 수분이며, 연평균 증발산량의 시계열적 변화에 영향을 준다. BAGLUBA 모형에서 사용된 토성별 유효수분 값은 Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005)에 의해서 정리된 값을 기초로 하며, 그 일부를 나타내면 Table 3과 같다. 우리나라에서는 미국 농무성 토양토성 분류체계를 바탕으로 토성별 유효수분함량 평균치를 나타내었다(Jung *et al.*, 1990).

(2) 식생 유효근권

유효 근권이란 식물 개체가 자신이 필요로 하는 수분의 90% 이상을 뿌리 조직으로부터 흡수할 수 있는 범위로서 지면으로의 깊이로 나타내며, 라이지미터(Lysimeter)를 통해 측정 가능하다(ATV-DVWK, 2002). 유효근권과 지하수 이격거리, 침투와 모세관 상승의 상관관계를 모식적으로 나타내면 Figure 6과 같다.

토양에 의해 결정되는 유효수분이 클수록 식생의 유효근권 범위는 Figure 7과 같이 깊어지는 것을 알 수 있으며(Glugla *et al.*, 2003), 유효수분량(%)과 유효근권(dm)의 곱을 통해 산출되는 활용가능 수분량은 식생의 연평균 증발산량의 차이를 나타내는 직접적인 요인이 된다(Federer *et al.*, 2003).

Table 3. Available soil water and porosity

Soil texture	Component ratio[%]		Total porosity [%]	Large pore [%]	Available soil water [%]	Field capacity [%]	Hygroscopic water [%]
	Silt	Clay		Pore>50µm pF<1.8	0.2µm<Pore<50µm 1.8≤pF<4.2	Pore<50µm pF≥1.8	Pore<0.2µm pF≥4.2
St2	0~10	5~17	42	20	16	22	6
St3	0~15	17~25	44	14	15	30	15
Su2	10~25	0~5	44	21	18	23	5
Su3	25~40	0~8	43	14	21	29	8
Su4	40~50	0~8	43	11	23	32	9
Ls2	40~50	17~25	43	9	16	34	18
Ls3	30~40	17~25	42	9	16	33	17
Ls4	15~30	17~25	43	11	16	32	16
Lt2	30~50	25~35	43	7	14	36	22
Lt3	30~50	35~45	44	5	12	39	27
Lts	15~30	25~45	43	6	14	37	23
Lu	50~65	17~30	43	7	17	36	19
Uu	80~100	0~8	45	7	26	38	12
Uls	50~65	8~17	43	8	22	35	13
Us	50~80	0~8	44	9	25	35	10

Source: Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005: 344, modified by Author

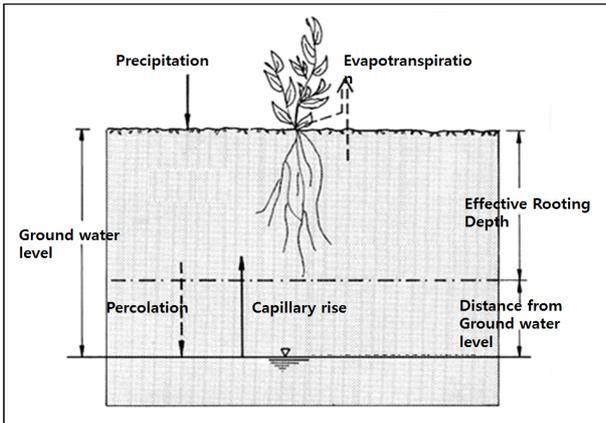


Figure 6. Concept of effective rooting depth

우리나라에서는 이와 유사한 개념으로 수목 식생과 관련하여 생육(생존) 최소심도라는 표현이 있고, 농작물의 생육과 관련해서는 유효토심이 통용되고 있다. 한국조경학회(2008)에서는 식생의 종류에 따라 정상적으로 생육할 수 있는 토양의 깊이를 생존 최소토심, 식물이 생존할 수 있는 최소 깊이를 생존 최소심도로 규정하고 있다. 양질의 사질토를 기준으로 하여 잔디, 초본류는 0.3m(0.15m), 소관목 0.45m(0.3m), 대관목 0.6m(0.45m), 천근성 교목 0.9m(0.6m), 심근성 교목 1.5m(0.9m)가 생육(생존) 최소심도이다. BAGLUBA 모델에서의 유효근권

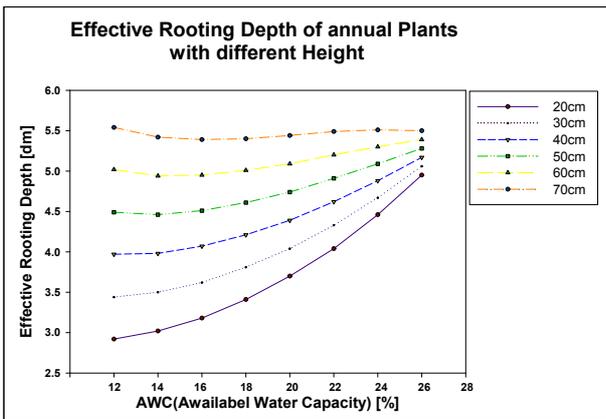


Figure 7. Effective rooting depth of annual plants with different height, plotted by author according to the equation

개념과 생육(생존)최소심도의 의미가 직접적으로 일치하지는 않지만, 토양의 토성과 식생의 종류에 따라 심도를 규정한다는 측면에서는 일맥상통하다.

농업 분야에서 유효토심은, 작물의 뿌리가 쉽게 신장할 수 있는 토층으로 정의하고 있다. 유효토심이 깊을수록 뿌리의 양이 많고, 수분 및 양분의 보존기능이 증가함에 따라 농산물 생산량이 증가한다. 여기서, 뿌리의 신장은 토양의 수분함량뿐만 아니라, 치밀도, 통기성, 온도 등의 물리적 성질과 pH, 비옥도, 염농도 등의 화학적 특성에 영향을 받는다(Hyun *et al.*, 2008)는 점에서 이 모델에서 의미하는 유효근권의 개념보다 더 포괄적인 정의라고 할 수 있다. 임의의 지역 토양이 작물 재배나 수목 생육의 관점에서 적합한 토심의 깊이가 얼마나 되는가에 초점을 맞춘 것이라 할 수 있다. 이와 달리 유효근권은 개별작물이나 식생의 입장에서 수분 공급을 위해 필요한 최소한의 토심은 어느 정도인가에 중점을 둔다.

Zhang *et al.*(2013)은, 우리나라에서는 아직 작물별로 유효근권의 적정 깊이가 설정되어 있지는 않으며, 콩의 생육실험을 통해 다양한 토심에서 뿌리신장 최대 깊이를 측정된 결과, 최대 61cm 이상 깊어지지 않는 것을 확인하였고, 이를 바탕으로 콩의 적정 토심 깊이를 60cm로 제한하였다. 이 연구에서 사용된 유효근권의 개념은 BAGLUBA 모델에서 의미하는 유효근권의 개념이라기보다는 기존 유효토심에 더 가까운 개념이라고 판단된다.

매우 얇음(0~20cm), 얇음(20~50cm), 보통(50~100cm), 깊음(100cm 이상)으로 구분되는 유효토심 분포에서 우리나라 하천 대원역 유효토심별 토양도 현황은 Table 4와 같다. 다양한 토심 분포와 아울러, 해당 토심에서 자라는 식생의 종류에 따라 유효근권은 달라질 것이며, 그에 따른 증발산량의 변화도 상이할 것으로 판단된다.

Seo *et al.*(2012)은 농경지에서 일 기상자료와 관계이력으로 물수지 및 토양수분 함량을 일단위로 추정하기 위한 토양물수지 및 수분추정 모형 AFKAE 0.5를 개발하였다. 이 모형에서 기준이 되는 대상 토양층의 깊이를 300mm로 하였고, 이 깊이 내의 토양은 균질한 토성을 갖고, 수분포텐셜에 따라 대상 토양층을 중심으로 수분이 상하 이동을 하는 것으로 가정하였다.

Table 4. Available soil depth distribution at river basin (Unit: km²)

	Very deep	Very deep ~deep	Deep (>100cm)	Deep ~normal	Normal (50~100cm)	Normal ~shallow	Shallow (20~50cm)	Very shallow (0~20cm)
Hangang	262.3	761.14	1,982.14	460.41	3,554.35	732.56	14,171.46	315.69
Nagdonggang	158.58	961.36	858.53	639.33	3,311.41	62.45	14,471.79	1,011.28
Seomjingang	65.28	126.41	225.74	174.44	677.87	0.13	3,210.90	105.15
Geumgang	206.57	658.98	1,557.58	159.3	1,676.10	8.65	4,994.28	218.65

Source: Water Resources Management Information System, <http://www.wamis.go.kr/>

이 때 기준이 된 300mm 토양층 깊이는 BAGLUVA 모형에서 의미하는 유효근권에 부합된다고 할 수 있다.

Figure 7은 초지의 초장별 유효수분에 따른 유효근권의 변화 추이를 나타내고 있다. 이 그래프의 값을 우리나라에 그대로 적용하는 데에는 다소 무리가 있을 수 있지만, 그 경향성을 파악하는 데에는 용이하다.

(3) 지하수위와 모세관 상승

유효 근권과 지하수 이격 거리의 관계를 바탕으로, 일정 대 상지의 식생과 토양 그리고 지하수위 데이터를 통해 일 최대 모세관상승률을 나타낼 수 있다.

Oh *et al.*(1997)은 수리전도도를 기초로 토양 모세관수의 정 상류 이동에 필요한 토양수분 장력의 수직분포 수식을 유도하여 수치해석 프로그램을 통해 임의의 지하수위에 대해서 토 성별 모세관 상승율을 계산하였다. 지하수위가 100cm일 때, 양 질계 토성에서는 약 5~10mm/일, 사질계에서는 1~5mm/일, 식질계에서는 0.1~1.7mm/일의 상승이 가능하다고 하였다.

Table 5는 BAGLUVA 모델에서 기준값으로 사용한 토성별 모세관 상승률 값의 일부를 발췌한 것이다. 우리나라의 모세관 상승률 계산값과 비교하여 독일의 연구결과값은, 지하수위까지 의 이격 거리의 기준을 유효근권에 두고 있다. 유효근권과 지 하수면까지의 이격 거리를 기준으로 할 경우, 식생의 종류에 따른 유효근권의 차이를 지하수 모세관 상승률에 반영할 수 있 다. 식생별 유효 근권은 라이지미터(Lysimeter) 등의 계측기를 사용하여 산정 가능하다.

3. Bagrov 계수와 물수지 산정

1) Bagrov 방정식

매우 건조한 기후에서는 강수량 자체가 증발산량을 결정하 는 변수가 되고, 매우 습한 기후에서는 증발산 가능한 물은 충 분하므로, 증발산을 유발하는 복사에너지, 바람, 상대습도 등의 기후 조건이 증발산량이 결정된다. 이러한 전제를 바탕으로 강 수량-잠재증발산량-실제 증발산량의 상관관계를 경험식으로 나 타내었다(Schreiber, 1904; Budyko and Miller, 1974; Zhang *et al.*, 2001). 이 경험식들을 통해 식 5와 같이 실제증발산량과 강

수량의 비는 잠재증발산량과 강수량의 비의 함수관계로 나타 낼 수 있다고 하였다.

$$ET/P = f(PET/P) \tag{식 5}$$

Choi *et al.*(2011)은 이 함수관계에 우리나라 댐에서의 실측 자료를 적용 후 적합한 계수값을 추정하였고, Park *et al.*(2014) 는 식생의 영향을 반영하기 위해 산림이 있는 지역과 없는 지 역으로 구분한 산림율을 Choi *et al.*(2011)과 Zhang *et al.*(2001) 식에 포함시키는 방안을 제시하였다.

Bagrov 방정식은 임의의 지역에서의 강수량이 무한히 증가 하면, 잠재 증발산량과 실제 증발산량의 크기는 같게 되고, 잠 재 증발산량이 무한히 커지면 실제 증발산량은 강수량에 수렴 할 것이라는 기본 전제를 바탕으로 한다(Bagrov, 1954; Glugla and Tiemer, 1971; Bonta and Mueller, 2009).

$$P \rightarrow \infty \text{이면, } E_a \rightarrow E_p$$

$$E_p \rightarrow \infty \text{ 이면, } E_a \rightarrow P$$

P : 연평균 강수량, E_a : 연평균 실제증발산량,
 E_p : 연평균 잠재증발산량

$$\frac{dE_a}{dP} = 1 - \left(\frac{E_a}{E_p} \right)^n \tag{식 6}$$

식 6은 E_a/E_p 값이 상대적으로 큰 습윤 지역에서는 강수량 의 증가에 대한 실제 증발산량의 변화가 작게 나타나는 반면, E_a/E_p 값이 작은 건조 지역에서는 강수량이 증가함에 따라 실 제 증발산량의 값의 변화도 크게 나타난다. 이때, 연평균 잠재 증발산량(E_p)은 최대증발산량(ET_{max})으로 대체하여 위의 Bagrov 방정식을 적분 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$P = \int_0^{ET_a} \frac{dET_a}{1 - (ET_a/ET_{max})^n} \tag{식 7}$$

Table 5. Capillary rise of various soil texture

Soil texture	Capillary rise[mm/day]										
	Distance between effective rooting depth and ground water level[dm]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Su2	>5	>5	>5	4	2.2	1.3	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1
Ut2	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	4.4	3.6
Tu2	5	3.2	1.3	0.7	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	

Source: Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005: 353

이 식을 수치해석적으로 풀이하여 도시하여 나타내면, 강수량 (P)과 잠재증발산량(ET_{max})의 비율은 Bagrov 계수 n 값을 매 개로 실제증발산량(ET_a)과 잠재증발산량(ET_{max})의 비로 나타 낼 수 있다(Figure 8 참조).

Bagrov n 값은 0.2~5까지 분포하며, n 값이 클수록 P/ET_{max} 에 대한 ET_a/ET_{max} 값의 기울기가 $P/ET_{max}=1$ 이 될 때 까지 급하게 증가 후 완만해지는 경향을 나타낸다. 이 때, Bagrov n 값을 토양의 유효수분과 식생 특성 등에 따라 정하면, 최대 증발산량에 대한 실제 증발산량의 비율을 통해 실제 증발산량을 추정할 수 있다. 만일 측정된 연평균 강수량과 기후값에 의해 산출된 연평균 최대증발산량의 비율(P/ET_{max})이 2이고, Bagrov 계수 n 이 0.6이라면, 그래프의 화살표에 해당하는 값 0.73은 실제 증발산량/최대증발산량의 상대적 비율이 된다(Figure 8 참조).

또한 우리나라의 증발산량에 부합할 것으로 추정되는 $ET_a/$

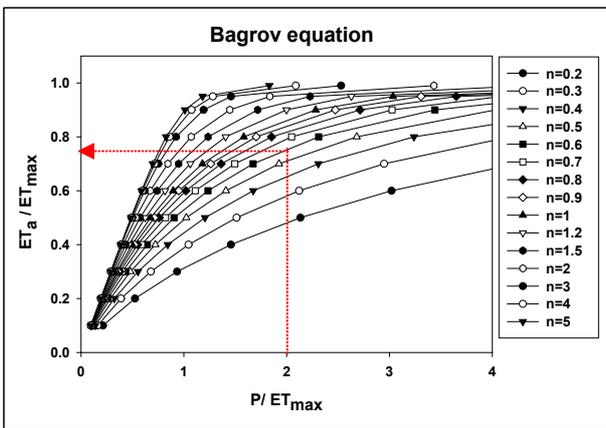


Figure 8. Numerical analysis results of Bagrov equation

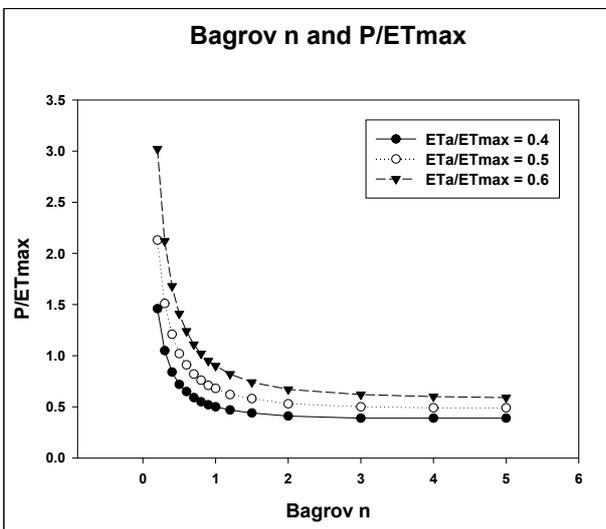


Figure 9. Relationship between Bagrov n and P/ET_{max} Ratio

$ET_{max}=0.4, 0.5, 0.6$ 에서 Bagrov n 값이 0과 1 사이에서 P/ET_{max} 값은 급격한 감소를 보이며, 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다(Figure 9 참조).

2) 토지이용별 Bagrov 계수 n

Glugla *et al.*(2003)은 불투수면, 나지, 잔디 12cm, 초지, 농경지, 활엽수림 그리고 침엽수림 등에서의 Bagrov n 값을 제시 하였다. Figure 10은 나지, 잔디 12cm, 초지 그리고 농경지 등의 값을 나타내고 있다.

3가지 지표면 유형 모두 토양의 유효수분이 증가함에 따라 Bagrov 계수는 증가하고 있음을 알 수 있고, 지표면 식생과 토양 조건이 반영되어 증발산량이 결정될 수 있는 프로세스를 보여준다(Table 6 참조).

또한, 식 9는 여름철 강수량 비율, 모세관 상승량 그리고 관개용수 공급량 등의 외적 요인을 Bagrov n 값의 가중치로 반영할 수 있음을 나타낸다. Q_n 의 범위에 따른 a 값을 다르게 하여, 지역에 따른 강수특성, 지하수위, 토양 그리고 작물재배를 위한 관개 등이 실제 증발산량의 차이를 나타낼 수 있도록 하였다.

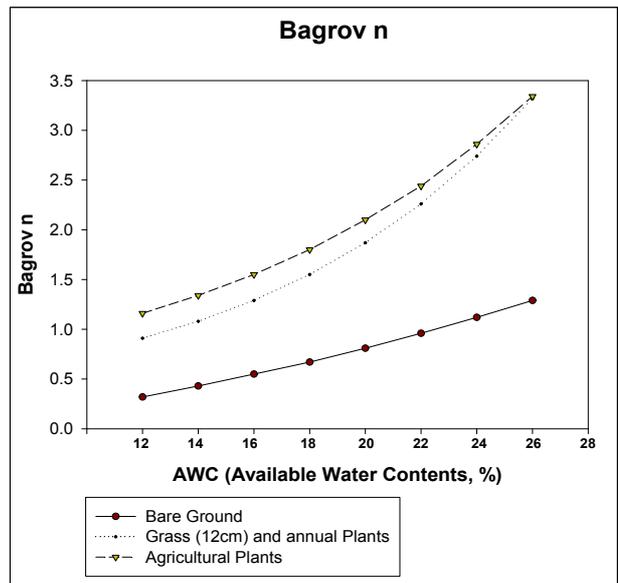


Figure 10. Bagrov n by various land use types, plotted by author according to the equation

Table 6. Bagrov n by land use types

Land use	Bagrov n (θ_{nFK} : Available soil water)
Bare	$n = 0.0013 \cdot \theta_{nFK}^2 + 0.101$
Grassland (mean height 12cm)	$n_{12cm} = 0.21904 \cdot e^{0.0197\theta_{nFK}} + 0.16$
Agricultural land	$n = 0.63805 \cdot e^{0.0957\theta_{nFK}} + 0.16$

Source: Glugla *et al.*, 2003: 101

$$n_k = a \cdot n \quad (\text{식 } 8)$$

$$Q_n = \frac{\overline{P_{korr,So}} + \overline{KR} + \overline{B}}{\overline{P_{korr}} + \overline{KR} + \overline{B}} \quad (\text{식 } 9)$$

$$0.5 < Q_n < 0.6 \quad a = 1 \quad (\text{식 } 10)$$

$$\text{else} \quad a = 0.77 + \frac{0.0189}{(1 - Q_n)^3}$$

n_k : 보정된 Bagrov n , a : 보정계수, n : Bagrov 계수
 $\overline{P_{korr}}$: 연평균 강수량, $\overline{P_{korr,So}}$: 여름철 연평균 강수량
 \overline{KR} : 모세관 상승률, \overline{B} : 관개수량, Q_n : 매개변수

우리나라의 여름 강우특성과 논토양에서의 관개용수 공급량과 증발산량 등에 대한 자료를 참고하여 반영하여야 한다.

3) 물수지 산정

식 9와 식 10을 토대로 a 값을 구한 후 식 8에 대입하여 Bagrov n 보정값 n_k 를 산출한 후, 이 값을 Figure 8의 그래프나 관계식에 대입하여 실제증발산량/최대증발산량 비율 Y 값을 산정한다.

$$Y = \overline{ET_a} / \overline{ET_{max}} = f((\overline{P_{korr}} + \overline{KR}) / \overline{ET_{max}}, n_k) \quad (\text{식 } 11)$$

$$\overline{ET_a} = Y \cdot \overline{ET_{max}} \quad (\text{식 } 12)$$

$$\overline{R} = \overline{P_{korr}} - \overline{ET_a} \quad (\text{식 } 13)$$

$\overline{P_{korr}}$: 연평균 강수량, $\overline{ET_a}$: 연평균 실제 증발산량,
 $\overline{ET_{max}}$: 연평균 최대 증발산량, \overline{R} : 연평균 유출량

이 Y 값을 통해 실제 증발산량 $\overline{ET_a}$ 값을 추정할 수 있다. 그리고 강수량과 실제 증발산량 간의 차이는 연평균 유출량에 해당하며, 이 모델에서는 연평균 유출량을 표면 유출량과 중간, 기저 유출량으로 구분하여 산정하고 있지 않으므로, 표면 유출량을 분리하여 산출하는 강우-유출 모형의 적용이 추가적으로 요청된다.

IV. 결론

도시개발과 기후변화로 인해 증가하는 도시침수, 지하수 고갈, 하천오염 그리고 도시 열섬 현상 등의 환경문제는 도시 물

순환 회복을 통해 경감시킬 수 있다. 물순환 회복의 목표량 설정은 증발산량, 침투량 그리고 유출량 등 물수지 구성요소의 정량화를 통해 가능하다. 그러나 이러한 정량화는 기존 대규모 하천 유역 단위의 강우-유출 분석보다는 소규모 개발 및 재정비 사업 등에 적용할 수 있는 지도 형태의 면적(面的) 분석들이 필요하다. 자연 상태 또는 변화된 토지 이용 형태에 대한 물수지 값이 예측 가능한 형태로 일관성 있게 국토 전체에 표기될 수 있다면, 사업 초기 단계에 물순환 보전 및 회복 계획을 용이하게 반영할 수 있고, 환경영향 평가나 사전재해 영향성 검토 등의 기준값으로 활용이 가능하다.

현재 산림과 농경지를 중심으로 단위 유역에 대한 많은 물수지 분석 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 실제 증발산량-잠재 증발산량-강수량 간의 관계를 통한 실제 증발산량 추정 연구가 최근 국내외에서 이루어졌으며, 이러한 접근 방법의 타당성을 잘 나타내고 있다. 그러나 토양과 지표면 식생별 특성을 체계적으로 반영할 수 있는 방안이 제시되어 있지는 못하였다. 또한, 우리나라에는 다양한 물관련 의사결정을 위한 정보시스템이 다양한 목적을 위해 개발, 운영되고 있지만, 물순환 계획 관리를 위해 개별 면적(面的) 단위지도 형태의 정보시스템은 아직 없다.

물수지 모델 BAGLUVA의 구조를 분석하고, 이를 바탕으로 우리나라 적용 방안을 위해 조사한 결과를 항목별로 요약하여 나타내면 아래와 같다.

첫째, 기상청의 강수량 및 기후 데이터를 바탕으로 기준 증발산량(ET_0), 눈위 증발량, 수면 증발량 등을 산정할 수 있으며, BAGLUVA 모델에서 사용된 Penman-Monteith 식은 우리나라에서 보편적으로 널리 사용되는 검증된 증발산 산정 모델이다.

둘째, 토지이용 형태 구분은 기존 정보시스템을 활용할 수 있다. 물순환 정보시스템 구축을 위해 필요한 기초 자료를 상당히 갖추고 있어서, 추후 개발 시에 시간과 비용이 크게 절감될 수 있다.

셋째, 우리나라는 경작지 중에서 논(밭)의 비율이 매우 높고, 다른 경작지와 뚜렷하게 구별되는 물수지 특성을 갖고 있으므로, 추가적으로 반영해야 할 필요가 있다.

넷째, 수치 지형도와 태양복사 에너지 수지를 바탕으로 경사와 향에서의 증발산량 비율을 산출하여야 한다.

다섯째, 유효근권과 지하수위 데이터를 통해 일평균 모세관 상승률을 추정할 수 있다. 유효근권은 토양의 토성에 의해 정해지는 유효수분과 식생 유형에 의해 정해지며, 이를 통해 토양과 식생이 모세관 상승에 미치는 영향을 반영한다. 국내외 연구 사례를 바탕으로 대표적 작물과 식생에 대한 실증적 연구와 정리가 요청된다.

여섯째, 관개용수는 위의 모세관 상승수와 함께 Bagrov n 값

을 보장하는 계수로 활용된다. 이 두 가지 모세관 상승수와 관개용수는 강수량 이외의 증발산 수원(水源)에 해당하기 때문이다.

일곱째, 유역 실측자료와 라이시미터(Lysimeter)에 의한 개별 실험 등을 통해 식생별 실제 증발산량-잠재증발산량-강수량 간의 관계에 관한 Bagrov n 값에 대한 연구가 필요하다. 기존 국내 연구가 유역의 실측값을 활용하여, 산림과 비산림 비율로 단순화하여 따른 실제 증발산량-잠재증발산량-강수량 관계를 추론하였는데, 보다 광범위하고 체계적인 접근이 필요할 것으로 판단된다.

끝으로, 물순환 지도는 단순히 물수지 현황에 대한 분석들의 역할뿐만 아니라, 다양한 분산형 빗물관리나 저영향개발(LID) 계획으로 인해 변화되는 물수지를 예측하고 나타내는 기능을 함께 가져야 한다. 이를 통해서, 공간 환경계획과 물순환, 물관리 계획이 통합될 수 있을 것이다.

모델의 부분별 입력데이터와 계수에 대한 객관적 타당성을 확보하는 것은 쉽지 않은 일이다. 우선 자연환경의 차이에 크게 영향을 받지 않는 보편적인 수문 요소와 현상에 기반을 둔 데이터와 계수는 최소한의 실험과 문헌 조사를 통해 기존 연구 결과를 준용할 수 있을 것이다. 예를 들면, 기준증발산량, 태양 복사에너지, 토양수분 특성 등이 그러하다. 최대 증발산량, 유효근권, Bagrov n 등은 기 측정된 유역 수문자료와 모델링 결과값 그리고 라이시미터와 에디공분산 타워시설의 연계를 통해 보다 세밀한 연구와 실험이 이루어져야 할 것이다.

이 연구를 통해 국내의 물순환 관련 연구 현황과 물순환 지도 작성의 필요성 그리고 BAGLUVA 모델의 구조를 고찰하였다. 지난 10여 년 전 도입된 도시생태현황도(Biotope Map) 작성기법과 생태면적률(Biotop Area Factor) 제도는, 현재 우리나라 도시생태의 보전 및 관리 계획 수립의 근간이 되고 있다. 이 연구에서 제시된 토양 및 식생을 기반으로 한 면적단위의 물순환지도(Hydrotope Map) 작성은, 효과적인 수자원 관리 및 생태계 보전을 위한 공간계획 기법의 하나로 발전시킬 수 있는 중요한 도구가 될 수 있다는 점에서, 극심한 가뭄과 홍수가 반복되는 우리나라 현실에 비추어 볼 때, 시사하는 바가 크다고 사료된다.

References

- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden(2005) Bodenkundliche Kartieranleitung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten.
- Ahn, So-Ra, Geun-Ae Park, Cheol-Hee Jang and Seong-Joon Kim (2013) Assessment of climate change impact on evapo- transpiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT model, J. Korea Water Resources Association 46(6): 569-583.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith(1996) Crop evapo- transpiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome.
- ATV-DVWK (2002) Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden, Hennef: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bagrov, N. A.(1954) Ueber die Berechnung der Verdunstung von der Oberflaeche des Festlandes, Meteorologia i Gidrologia 2: 12-18.
- Bogena, H., R. Kunkela, T. Schoebelb, H. P. Schreyb, and F. Wendlanda (2005) Distributed modeling of groundwater recharge at the macroscale, Ecological Modelling 187: 15 - 26.
- Bonta, J. V. and M. Mueller(1999) Evaluation of the Glugla method for estimating evapotranspiration and groundwater recharge, Hydrological Sciences Journal 44(5): 743-761.
- Budyko, M. I., and D. H. Miller(1974) Climate and Life, New York/London: Academic Press.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit(2003) Hydrologischer Atlas von Deutschland, Bonn/Berlin.
- Choi, Dae-Gyu, Jeong-Seok Yang, Gun-Hui Chung and Sangdan Kim (2011) A conceptual soil water model of catchment water balance: Which hydrologic components are needed to calibrate the model? KSCE Journal of Civil Engineering 31(3B): 211-220.
- Chung, Sang-Yong(2011) Determination of evapotranspiration in Miryang City of Gyeongnam province using ASCE-ET in combination with land use ratio, Journal of the Geological Society of Korea 47(3): 289-298.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.(1996) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Hennef: Fraunhofer IRB Verlag.
- Diestel, H., V. Bekurts, C. Bismuth, N. Markwardt, M. Schmidt, M. Hape, B. Hasch and R. Wolf(1994) Hydrotop-Kennzeichnung als Grundlage fuer die Planung von Massnahmen zum Gewaesserschutz auf landwirtschaftlich genutzten Flaechen, Technische Universitaet Berlin, Bericht im Auftrag des Ministeriums fuer Umwelt, Naturschutz und Raumordnung Brandenburgs.
- Federer, C. A., C. Voeroesmarty and B. Fekete(2003) Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity, Journal of Hydrometeorology 4: 1276-1290.
- Glugla, G. and K. Tiemer(1971) Ein verbessertes Verfahren zur Berechnung der Grundwasseumbildung, Wasseerwirtschaft und Wassertechnik 20(10): 349-353.
- Glugla, G., P. Jankiewicz, C. Rachimow, K. Lojek, K. Richter, G. Fürtig, and P. Krahe(2003) BAGLUVA - Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses, Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht.
- Hyun, Byung-Keun, Sang-Kyu Rim, Sug-Jae Jung, Yeon-Kyu Sonn, Kwan-Cheol Song, Dae-Cheol Noh, Heob-Seung Lee, Geun-Soo Hyun, Yong-Seon Zhang, Suk-Young Hong, Chan-Won Park, Lee-Hyun Kim, Eun-Young Chol, and Byeong-Chun Jang(2008) The study on the limiting factor to determine available soil depth in Korea, Korean J. Soil Sci. Fert. 41(5): 293-302.
- Jo, D. K, I. S. Chun, M. S. Jeon, Y. H. Kang and C. M. Auh(2001) A study on the analysis of solar radiation on inclined surfaces, J. of the Korean Solar Energy Society 21(3): 19-24.
- Jung, Suk-Jae, Joon Moon, Tai-Soon Kim, Geun-Soo Hyeon and Chang-Seo Park(1990) Available soil water for textural class of Korean soils, Korean J. Soil Sci. Fert. 23(3): 167-172.
- Kim, Kyong-Ha and Yong-Ho Jeong(2006) Variations of annual evapo- transpiration and discharge in three different forest-Type catchments, Gyeonggido, South Korea, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 8(3): 174-182.
- Kim, Nam-Won and Jeong-Eun Lee(2013) Assessment of actual evapo- transpiration in the Hancheon watershed, Jeju Island, Journal of Environmental Science International 22(5): 533-542.
- Klein, S. A.(1977) Calculation of monthly average insolation on tilted

- surfaces, Solar Energy 19: 325-329.
23. Kwon, Hyo-Jung, Jung-Hoon Lee, Yeon-Kil Lee, Jin-Won Lee, Sung-Won Jung and Joon Kim(2009) Seasonal variations of evapotranspiration observed in a mixed forest in the Seolmacheon catchment, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 11(1): 39-47.
 24. Kwon, Kyung Ho and Heiko Diestel(2009) A new instrument for decentral rain water management in cities: Mapping of actual and potential urban hydrotopes, The 2th IWA-RWHM Conference Proceedings, Tokyo, Japan, pp. 569-570.
 25. Landesamt fuer Umwel Naturschutz und Geologie(2012) Grundwasserressourcen Mecklenburg Vorpommern Kurzerlaeuchterung zur Karte, Mecklenburg Vorpommern.
 26. Lee, Jeong-Woo, Nam-Won Kim and Jeong-Eun Lee(2014) Estimation of actual evapotranspiration and storage change for the Bokahcheon upper-middle watershed, J. Korea Water Resources Association 47(7): 615-628.
 27. Lee, Jung-Min, Yun-Sang Lee and Jong-Soo Choi(2014) Analysis of water cycle effect according to application of LID techniques, Journal of Wetland Research 16(3): 411-421.
 28. Lee, Khil-Ha and Jae-Hyeon Park(2008) Calibration of the hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation on a nation-wide scale, KSCE Journal of Civil Engineering 28(6B): 675-681.
 29. Lee, Yeon-Kil, Sung-Won Jung, Chang-Hyun Baek and Hyo-Seob Cho (2014) Characteristics of evapotranspiration at the forest and agricultural land(Rice Paddy), Water For Future 47(4): 26-33.
 30. Marsalek, J., B. J. Cisneros, M. Karamouz, P.-A. Malmquist, J. A. Goldenfum and B. Chocat(2008) Urban Water Cycle Processes and Interactions: Urban Water Series-UNESCO-IHP, CRC Press.
 31. Messer, J., M. Getta and R. Ohlenbusch(2011) Entwicklung eines instationaeren Werkzeugs zur Berechnung der Klimawandelwirkungen auf die Grundwasserneubildung Korrespondenz Wasserwirtschaft 4(11): 608-616.
 32. Neumann, Joerg(2009) Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland-Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu.
 33. Novotny, V. and P. R. Brown(2007) Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management, Racine: IWA publishing.
 34. Novotny, V., J. Ahern and P. Brown(2010) Water Centric Sustainable Communities: Planning, Retrofitting, and Building the Next Urban Environment, Hoboken: John Wiley and Sons.
 35. Oh, Yong-Taeg, Kwan-Cheol Song, Dong-Shig Oh, Ki-Cheol Eom, Chong-Woon Hong, Yeong-Sang Jung and Sun-Ho Yoo(1997) Interrelation of ground water table with vertical steady flow of soil moisture and the distribution of its suction head in soil, J. Agro-Envir. Sci, 39(1): 1-8.
 36. Park, Yoon-Kyung, Seon-Ju Cho, Moo-Jong Park and Sang-Dan Kim (2014) Development and application of annual evapo-transpiration estimation model considering vegetation effect, J. Korean Soc. Hazard Mitig, 14(2): 363-372.
 37. Rim, Chang-Soo(2008) Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop, Journal of Korea Water Resources Association 41(2): 212-228.
 38. Schreiber, P.(1904) Ueber die Beziehung zwischen dem Niederschlag und der Wasserfuehrung der Fluesse in Mitteleuropa, Z. Meteorologie 21(10): 441-452.
 39. Seo, Myung-Chul, Seung-Oh Hur, Yeon-Kyu Sonn, Hyeon-Suk Cho, Weon-Tai Jeon, Min-Kyeong Kim and Min-Tae Kim(2012) The development of estimation model (AFKAE0.5) for water balance and soil water content using daily weather data, Korean J. Soil Sci. Fert, 45(6): 1203-1210.
 40. Seoul Metropolitan Government(2013) Rainwater Management General Plan, Seoul Metropolitan Government, Seoul.
 41. The Korean Insititute of Landscape Architecture(2008) Landscape Construction Standard Specification, Mun-Un-Dang, Seoul.
 42. Yu, Gwon-Jong, Yo-Han Lee, Jung-Hun So, Se-Jin Seong and Byung-Gyu Yu(2007) The study on optimum installation angle of photovoltaic arrays using the expert system, J. of the Korean Solar Energy Society 27(3): 107-115.
 43. Zhang, L., W. R. Dawes and G. R. Walker(2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale, Water Resources Research 37(3): 701-708.
 44. Zhang, Yong-Seon, Kyung-Hwa Han, Hee-Rae Cho and Kang-Ho Jung (2013) Effect of soil depths on soybean (*Glycine max* L.) root elongation and yield, Spring Conference of Korean Society of Soil Science and Fertilizer 2013(5): 141.

Received : 30 June, 2015

Revised : 5 August, 2015 (1st)

21 August, 2015 (2nd)

Accepted : 21 August, 2015

3인익명 심사필