학술기사

장기 강우 - 유출 모형의 비교

김 현 준 | 선임연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구부
hjkim@kict.re.kr

장 철 희 | 연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구부
chjang@kict.re.kr

김 남 원 | 수석연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구부
nwkim@kict.re.kr

1. 머리말

스탠포드 유역 모형(SWM; Stanford Watershed Model, Linsley and Crawford, 1966) 이래로 수많은 수문모형이 개발되어 왔다. 이처럼 수문모형의 종류가 많아지게 된 이유는 각 모형이 개발된 지역의 환경(지형, 기후, 자료 등)과 모형으로부터 얻고자 하는 결과에 따라서 다양한 형태로 모형이 개발되어 왔기 때문이다.

21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구과제 중에서 지표수수문성분해석기술개발(과제번호 2-2-1)은 유역단위의 자연적인 물순환과 도시개발 및 기후변화에 따른 물순환의 변동특성을 보다 정확하게 해석할 수 있는 기술을 확보하기 위하여 수행되고 있다.

이러한 해석기술을 확보하기 위해서는 기존에 개발되어 사용되고 있거나 현재 개발되고 있는 장기 강우-유출모형 중에서 적정 모형을 선정하거나 새로운 모형에 대한 개발 방향을 설정하여야 한다. 이를 위해서, 1차년도의 연구에서는 모형의 선정 기준과 각종 모형을 수집하여 구조를 분석하였으며, 본 고에서는 현재 진행중인 연구 결과 중 모형의 상호 비교에 대한 부분을 간략하게 소개하고자 한다.

2. 장기 강우-유출 모형의 선정기준 조사

수문모형의 선택에 있어서 개인적인 편견이나 선입관을 전혀 배제할 수는 없다. 수많은 수문모형 중에서 적절한 모형을 선정하는 것은 결코 쉬운 일이 아니며, 모형을 선정할 때는 이미 모형을 적용한 사례들의 결과를 참고하거나, 각 모형들에 대해 비교 검토한 선행연구를 참조할 수밖에 없다.

세계기상기구(World Meteorological Organization)는 각 수문모형들에 대한 비교 연구를 수행하여 왔다. 첫 번째 작업은 수문예측에 사용된 집중형 모형에 대한 것이었고(WMO, 1975), 두 번째 작업은 융설을 포함한 유출 모의를 위한 모형의 비교 연구(WMO, 1986)였으며, 세번째 작업은 실시간 예보를 위해 사용되는 모형에 대한 연구(WMO, 1992)였다.

이 외에도 여러 개의 수문모형을 동일한 유역에 적용하여 그 결과를 비교하는 개별적인 연구들이 수행되어 왔다(김현준, 2001; Chiew et al., 1995; Franchini et al., 1991; Loagued와 Freeze, 1985).

적절한 모형을 선정하는 방법으로는 Chiew 등(1993)과 Ragab 등(1999)이 수행한 바와 같이, 고려대상의 모든 모형을 특정 유역에 적용하여, 그 결과를 비교하고 관측유출량에 더욱 적합한 모의유출량을 제공하는 것으로써 판단할 수 있다. 그러나, 모든 모형을 대상유역에 적용하여 유출량을 모의한다는 것은

많은 시간과 인력 및 비용의 투입을 의미한다. 따라서, 제한된 여건에서는 모형구조 및 모형이 필요로 하는 자료의 정도와 모형으로부터 얻을 수 있는 결과물들을 비교 검토함으로써 적합한 모형을 일차적으로 선정하는 것이 바람직한 방법이라고 할 수 있다.

Jackson(1982)이 조사한 바에 의하면, 모형 선정 기준에 대한 연구는 1970년대 초부터 활발하게 수행되었다. 이들은 수집 가능한 모형들을 정리하고 모형 구성성분을 표로 작성하고 요약하였다.

이들의 연구 외에도 모형 선정절차에 대한 연구들(Jennings et al., 1976; Baker and Carder, 1976; Devo and Lumb, 1975; McCuen et al., 1977)이 수행되기도 하였다. Baker와 Carder(1976)는 "사용편의성, 자료의 유용성, 모형의 유용성, 산림관리의 적용성, 광범위한 적용성, 예측의 정확성" 등을 기준으로 하여 모형 선정에 대한 절차를 제안하였으며, McCuen(1977)은 세가지의 기준을 제시하였는데, "정확성, 재현성, 실용성" 등이었다.

Ragab 등(1999)은 수문관측자료와 수문모형을 결합하여 다목적 저수지의 관리를 개선하고자 이에 적합한 수문모형을 조사하였는데, 모형의 선정기준으로는 관측유출량과 모의유출량의 적합도에 의해 판단하였다. 사용된 적합성 판정 기준은 Nash-Sutcliffe의 모형효율이었다. 그들은 36개의 집중형 모형을 선정하여 유럽과 미국 등지의 429개 유역에 적용한 결과 GR4, GRHUM, IHACRES, TOPMODEL 등이 프로젝트(AIMWATER)의 목적에 부합한다고 하였으나, 제시된 36개 모형들의 적용 결과를 볼 때는 이들 모형이 다른 모형들보다 관측 유출량을 월등하게 잘 재현하고 있다고 볼 수는 없다.

표 1. 미국 텍사스 주의 TMDL 모형 선정 결과(Ward et al., 1999)

	TIME RESOLUTION			
WATERCOURSE TYPE	*steady state*	*slow time variation*	*continous time variation*	*storm event*
field or lumped catchment	**GLEAMS**		**SWAT**	**ANSWERS, SWAT***
wateshed		**HSPF, SWAT, PRMS**	**HSPF, SWAT, PRMS**	**HSPF, PRMS, SWMM, ANSWERS**
stream/river	**QUALTX**	**DYNHYD/WASP**		
reservoir, unstratified	**QUALTX**	**DYNHYD/WASP**		
reservoir, stratified		**CE-QUALTX-W2**		
estuary reach, longitude	**QUALTX**	**DYNHYD/WASP**		
estuary reach, stratified	**CE-QUALTX-W2**	**CE-QUALTX-W2**		
coastal embayment, vertically averaged			**TXBLEND. POM, EFDC**	
coastal embayment, 3-dimensional			**POM, EFDC**	

** average condition over long simulatioin period*

Ward 등(1999)은 미국 텍사스주의 오염총량규제를 위해 적합한 모형을 선정하기 위한 방안으로서 48개의 관련된 모형들을 조사하고, 4단계의 세부 선정기준에 의해 모형을 평가한 다음에 HSPF, PRMS, SWAT 등을 선정하기도 하였다(표 1).

3. 장기 강우-유출 모형의 조사

최초의 모형 비교는 Renard(1982)에 의해 수행되었는데, 미국에서 이용되고 있는 모형들에 대해서 비교하였으며, 이와 유사한 작업들이 Singh(1989),

표 2. 장기유출모형 조사 사례

저 자	조사된 장기유출 모의모형	비 고
Renard(1982)	SSAM, BOUGHTON, SWPM, TWM, HSP, NPS, ARM, HYDSM, USDAHL, HLAND, TEHM, ORNL, KWM, UBC, LUM-OD, WBMODEL, LANDRUN, SACRAMENTO, MONASH, SSARR, HYDROSIM, KWBM, CONIFER, STROM	미국내에서 개발된 75개의 모형을 조사하고 5줄 이내로 간단하게 소개
Singh(1989)	SWM, KWM, OPSET, OSUM, NWSRFS, SSARR, API, TWM, HSP, USDA, TANK, HBV, SHE, CEQUEAU, MC, SCM, SRBM, UBCWM, MRRM, HYSIM, ARBM, BM, HHM, TVAM, USUWSM	연속하천모의모형을 간략하게 소개하고 각 모형에 포함된 수문해석 성분을 비교
USBR HMI(1991)	CREAMS, GLEAMS, PRMS, SSARR,	기후변화프로그램의 일환으로 수문모형을 조사하고 간단하게 소개
Wurbs(1994)	PRMS, SHE, SSARR, SWM-IV, HSPF, SWRRB, SWAT,	수요예측모형, 물배분모형, 지하수모형, 유역유출모형, 하천수리모형, 수질모형, 저수지운영모형 등으로 구분하여 각 모형들을 개략 소개
Ward(1999)	ANSWERS2000, CREAMS, EPIC, GLEAMS, HSPF, MIKE-SHE, PRMS, SWAT, SWRRB, WMS	미국 텍사스주의 오염총량규제를 위해 적합한 모형을 선정하기 위한 조사로서 모형조사와 모형선정기준을 제시하고 HSPF, PRMS, SWAT 등 선정
Ragab(1999)	ABCD, ARNO, BOOB, BOOC, SFB, BUCKET, CATPRO, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GEOR, GR4, GR5J, GRHUM, HAAN, HMS,IHACRES, IHLM, MARTINE, MHR, MODALP, MODGLO, MODHYDROLOG, NAM, ODON, PDM, SACRAMENTO, SDI, SIXPAR, SMAR, TANK, TMWAM, TOPMODEL, WAGENINGEN, XINANJIANG	유럽의 "AIMWATER" 프로젝트의 일환으로 다목적댐 운영에 적합한 수문모형을 선정하기 위한 조사로서 36개 모형을 429개 유역(호주, 브라질, 프랑스, 아이보리코스트, 미국)에 적용하여 결과를 비교하고 GR4, GRHUM, IHACRES, TOPMODEL 등 선정
USBR HMI(1999/2000)	AGNPS98, ARNO, ARC/EGMO- HYDROLOGIC, BOCHUM, CEQUEAU, CLS, EPIC, HMS, LBRM, LASCAM, MIKE11, MIKE-BASIN, MIKE-SHE, PARCHED-MRST, SHETRAN, SIMHYD, SPWA-II, TOPKAPI	인터넷을 통해 수문모형을 비교적 상세하게 소개하고 있으며, 계속 추가되고 있음
WMO HOMS(2000)	TANK, SRM, HBV, NWSRFS-SACSMA, SSARR, IHACRES	세계기상기구에서 제공하는 14개 항목에 걸친 수문관련 자료 소개
USGS SMIC(2002)	HSPF, MIKE-SHE, PRMS, TOPMODEL	미국 지질조사국에서 지표수 및 수질 모형을 위한 클리어링하우스 운영

Wurbs(1994), USBR(1991), USBR(1999/2000), Ward(1999), Ragab(1999), USGS(2002) 등에 의해 수행되었다. 이들의 작업에서는 장기 강우-유출 모형뿐만 아니라, 홍수사상모형, 하천흐름모형, 저수지운영모형, 수요예측모형들도 포함하고 있으나 본 연구에서는 장기 강우-유출 모형에 대해서만 조사하였다. 조사된 내용은 표 2에 정리하여 제시하였다.

4. 장기 강우-유출 모형의 비교

수문학적 모의를 수행하는 데 있어 수문학자들과 공학자들은 다음과 같은 질문에 대한 대답을 필요로 한다. "어떤 수문모형이 사용될 것인가?" 이러한 질문에 대한 해답을 찾기 위해서 그들은 첫 번째로 "어떤 수문모형이 유용한가?"라는 의문을 갖게 된다.

수문모형을 선택하는데 있어서 유용성을 알아보기 위한 목록을 정리하여 구축하는 것은 수문학자들과 공학자들에게 있어 매우 중요한 일이다. 이러한 유용성의 판단기준이 되는 목록들에는 주요 수문순환 과정이 포함된다. 이러한 목록을 작성하는데 있어서 중요한 것은 간결하고 읽기 쉬운 형태로 각 모형에 대한 적절한 정보를 요약하는 것이며, 간결하고 읽기 쉬운 형태는 사용자들에게 각 모형의 제약성과 수행능력에 대해 친숙해지도록 도움을 줄 수 있고 추가적인 정보를 획득하기 위해서는 무엇이 필요하며 누구에게, 어떤 기관에 문의를 할 수 있는지를 결정할 수 있도록 한다.

본 연구에서는 유럽의 여러 기관과 미국의 USBR(U. S. Bureau of Reclamation)의 유용성 판단기준 목록들을 참고로 하여 AnnAGNPS, ANSWERS2000, ARNO, CLEAMS, EPIC, GLEAMS, HBV96, HSPF, Mike-SHE, MODHYDROLOG, NAM, NWS-PC, PRMS, SFB, SLURP, SSARR, SWAT, UBC, XINANJIANG 등 19개 모형을 선정하여 각 모형에 대한 유용성 판단기준 목록을 구축하였다. 목록을 살펴보면, 모형의 이름 및 유형, 모형의 사용목적, 모형 구조, 입·출력 자료, 사용자 매뉴얼 및 컴퓨터 요구사양, 모형의 적용범위, 의문사항이 있을 경우의 접촉기관 등의 정보를 포함하고 있다(표 3 참조). 또한 모형의 구성성분에 대하여 단계별로 간결한 설명을 나타냄으로써 모형의 특성을 파악할 수 있도록 하였다. 기존의 목록들과 큰 차이점은 각 목록에 유출 해석과정에 대한 개념도를 제시하여 모형의 구조를 쉽게 이해할 수 있도록 한 것이다.

앞에서 조사된 19개 모형에 대해서 각 모형의 유출해석 성분을 상호 비교하기 위하여 표로 제시하고자 하였다. 표 4에서 보는 바와 같이, 모형의 유출해석 성분 외에도 개발기관, 매개변수 최적화 모듈의 존재여부, 토지이용 변화에 따른 모의 가능 여부, GIS/RS와 연계된 인터페이스를 제공하는지의 여부, 모델 유형 등에 대한 추가적인 사항들을 나타내어 모형을 이해하는데 도움을 주고자 하였다.

5. 맺음말

최근 유역의 물순환 해석에 대한 필요성이 점점 증대되고 있다. 이는 도시화에 의한 유역의 급격한 변화, 산림 벌채의 영향, 기후변화의 영향, 하천환경에 대한 사회적 요구의 증가, 하천수질관리, 도시하천의 복원에 따른 하천수와 지하수의 상호작용 등을 기술적으로 분석하여야 하는데, 이는 모두 유역의 물순환을 이해하여야만 가능한 일들이다.

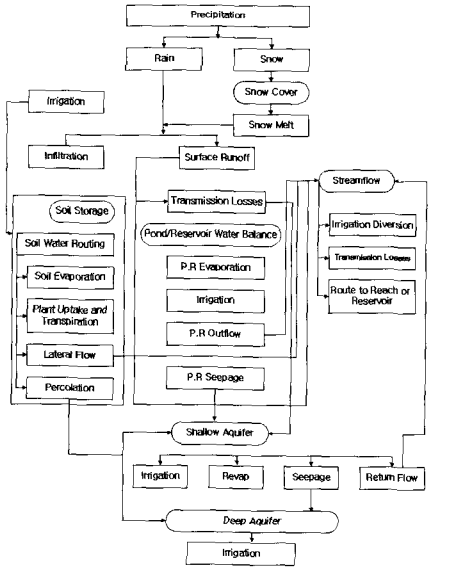
이러한 유역 물순환을 해석하기 위해서는 수문모형을 도구로 사용할 수밖에 없다. 이미 선진국에서는 수문학 및 수리학적 이론에 바탕을 두고 사용자 편의성을 높인 수문 모형들이 개발되어 활용되고 있으며, 이러한 모형의 국내 적용성과 국내 수문환경에 적합하도록 수정이 필요하다. 이를 위해서 프론티어 연구과제의 일환으로 "지표수수문성분해석기술개발(과제번호 2-2-1)"이 수행중이며, 유역단위의 물순환을 보다 정확하게 해석할 수 있는 기술의 확보가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

표 3. 장기 강우-유출 모형 분석 목록 사례

Short Name	- SWAT
Long Name	- Soil and Water Assessment Tool
Model Type	- 물리적 기반의 준분포형 모형
Model Objectives	- 복합 토지이용상태 및 토양 특성을 갖는 유역에 대한 장기간에 걸친 오염총량을 추정하고, 최적관리기법에 따른 관리대안을 제시
Model Structure	- 잠재증발산량은 Penman-Monteith Eq,. Hargreaves Eq., Pristley-Taylor Eq.을 이용하여 산정한다. - 실제증발산량은 토양잠재증발산량에 대한 토지피복지수의 함수이다. - 유출량은 SCS 유출곡선지수를 이용하며, 지표면 경사에 따른 CN을 조정할 수 있다. - 침투량은 Green & Ampt 공식을 이용한다. - 중간유출은 Kinematic Storage 모델에 의해 산정한다. - 선형저류함수에 의해 추적 - 저류층은 차단저류와 토양수분저류, 연못수분저류, 얕은 대수층저류, 심층 대수층저류의 5개로 구성된다.
Model Input	- 유역자료, 기상자료, 소유역 특성자료, 하천특성자료, 토양자료, 작물관리자료, 지하수자료
Model Output	- 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 격자별 출력자료와 도형자료인 유역경계도로 구분된 소유역별 자료, 그리고 각 하도추적 구간별 결과치
Documentation	- SWAT users manual(version 2000) : S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams. April, 2001
Computer Requirements	- IBM-compatible PC
Model Application	- 현재 미국 내의 다양한 농업유역 및 브라질의 Joanes River 유역 등에서 활발하게 적용됨 - HUMUS(Hydrologic Unit Modeling for the United States)의 수문 모델로 채택 - 독일의 유역에 적합하게 수정하여 적용 SWAT-G
Other Comments	- 수문반응단위별(Hydrologic Response Unit) 토지이용변화에 따른 유출모의
Contact Organization	- Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service 808 east blackland road, temple, Texas 76502 URL : http://www.brc.tamus.edu/swat/



참/고/문/헌

한국건설기술연구원(2002), 지표수 수문성분 해석기술개발 연구 보고서(과제번호 2-2-1), 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단.

표 4. 장기 강우-유출 모형의 비교

Items \ Model	AnnAGNPS	ANSWERS 2000	ARNO	CREAMS	EPIC
Agency	- USDA(US)	- Virginia Tech.(US)	- IHC(Italy)	- USDA(US)	- USDA(US)
Rainfall	- 지점우량 - 기상관측소와 각 격자 사이의 고도차에 따른 강우 보정	- 지점우량	- 지점우량 - 유역평균우량	- 지점우량 - 유역평균우량	- 지점우량
Interception	—	- 최대 잠재 차단량(PIT)과 강우량의 관계	—	- 식생피복에 의한 강우의 차단	—
Evapotranspiration	- Penman Eq. - 실제 증발산은 토양수분의 함수	- Penman Eq. - 토양증발량 : Ritchie Eq. · 토양수분량에 따라 실제증발산량 계산 · 엽면적지수(LAI) - 작물증산량 : Borg-Williams Eq.	- Thornthwaite ~ Mather Eq. (월 잠재증발산) - 온도를 고려한 기준증발산량 경험식	- Priestly-Taylor Eq. - Ritchie Eq. · 엽면적지수(LAI)	- Penman Eq. - Priestly-Taylor Eq. - Penman-Monteith Eq. - Hargreaves and Samani Eq. - Ritchie Eq · 엽면적지수(LAI)
Runoff	- SCS 유출곡선지수 $Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S}$ $S = \frac{25400}{CN} - 254$ - 측방유출량 : Darcy's Eq. - 배수암거유출량 : Hooudt Eq. - 저류층(2) · 상층저류(경작층) · 하층저류(경작층에서 불투수층까지의 층)	- 표면저류 (Surface Detention) - 침투량 : Green-Ampt Eq. - 강우량에서 침투되고 남은 부분이 직접유출 - 통제토양역의 토양수분 함양함수 - 저류층(2) · 차단저류 · 표면지연저류	- 지표면유출은 Zhao (1977)의 토양수분 공간분포함수 (투수지역, 불투수지역) - 중간유출은 토양수분에 의한 비선형 함수 - 지하수유출은 2변수 선형 저수지 - 저류층(2) · 토양수분저류 · 지하수저류	- SCS 유출곡선지수 - 저류층(3) · 차단저류 · 상층저류 · 하층저류	- SCS 유출곡선 지수(경사를 고려한 CN) - 저류추적 · 침루 · 측방유출량 - 저류층(3) · 토양수분저류 · 상층저류 · 하층저류
Routing	- 각 격자 및 하도의 흐름해석 - Manning Eq.	- 연속방정식 $I - O = \frac{ds}{dt}$ - Manning Eq.	- linear parabolic model	—	—
Parameter Optimization	—	—	—	—	—
Landuse Change	- CN은 토지이용과 토양종류 및 수문학적 토양 특성에 좌우	- 격자별 토지이용, 토양 특성 등반영	- 토지이용변화에 따른 지하수 변동 등 모의	- CN에 의한 토지이용의 변화 모의 가능	- CN에 의한 토지이용의 변화 모의 가능
GIS/RS Interface	- Arc/View, GRASS	- Arc/View, Map Object	—	—	—
URL	- http://www.sedlab.olemiss.edu/agnps.html	- http://dillaha.bse.vt.edu/answers/index.htm	—	- http://www.nps.ars.usda.gov/	- http:// www.brc.tamus.edu
Model Type	- 분포형(distributed)	- 분포형(distributed)	- 준분포형(semi-distributed)	- 집중형(lumped)	- 집중형(lumped)
Remark	- 공개모형 - 관개시스템 고려 - 임의 일의 유출량은 다음날에 대한 유출계산 이전에 유역출구지점에 도달한다. - 강우사상모형인 AGNPS를 연속유출 모의모형으로 수정 - 격자 단위의 물리적 매개변수	- 공개모형 - 현재 개발중인 모형 - 사용자 매뉴얼 없음 - 작물의 근군역 이하의 모의 과정없어 지하수층에 대한 모의가 어려움 - 강우 사상모형인 ANSWERS를 연속유출 모의모형으로 수정	- 비공개모형 - 이탈리아의 ARNO 강에 적용	- 공개모형 - 포장단위의 소규모지구 적용	- 공개모형 - 작물성장 고려 - 포장단위의 소규모지구 적용

표 4. 장기 강우-유출 모형의 비교(계속)

Items \ Model	GLEAMS	HBV96	HSPF	Mike-SHE	MODHYDROLOGY
Agency	- USDA	- SMHI(Sweden)	- EPA, USGS(US)	- DHI(Denmark)	- Melbourne Univ.(Australia)
Rainfall	- 지점우량 - 면적평균강우로 환산하여 입력	- 지점우량 - 고도에 따른 강우분포를 고려	- 지점우량 - 소유역 별 유역평균우량	- 지점우량	- 지점우량
Interception	- 엽면적지수 이용	- 산림지역에 차단저류 고려	- 식생피복에 의한 차단능 고려	- 차단저류 고려 · Rutter model · K-J model	- 차단저류 고려
Evapotranspiration	- Penman-Monteith Eq. - Priestly-Taylor Eq. - Ritchie Eq. · 엽면적지수(LAI)	- Penman Eq. - Thornthwaite Eq. - Prestly-Taylor Eq. - 토양수분함수에 의해 실제 증발산량 산정	- Class A Pan Evaporation - 잠재증발산량을 이용하여 5개의 저류층(기저유출, 강우차단, 토양상층, 지하수, 토양하층)에 의해 실제 증발산량 산정	- Penman-Monteith Eq. - The Kristensen-Jensen Eq. - 실제증발산량 · 엽면적지수(LAI), 토양수분함수 · 식물에 의한 증산 · 토양 증발 · 차단저류 증발 · 수면 증발	- 잠재증발산량 입력 - 실제증발산량 · 토양수분의 함수
Runoff	- SCS 유출곡선지수 - 3~12개의 토양층을 사용자가 구분 - 토양 층별 토양수분추적 - 저류층(3) · 차단저류 · 상층저류(경작층) · 하층저류	- 2개의 토양저류층 구분 - 상부토양저류층에서 직접/중간유출(토양저류량의 함수) - 하부저류층에서 기저유출 - 저류층(3) · 차단저류 · 상층저류 · 하층저류	- 투수지역, 불투수지역 구분 - 경사와 사면길이 등을 이용하여 Chezy-Manning Eq. 과 경험식으로부터 산정 - 중간유출 저류량, 감수계수, 유입량의 선형함수 - 저류층(4) · 차단저류 · 요지저류(depression storage) · 토양수분저류 · 지하수저류	- 지표면경사를 고려 - Saint Venant Eq. - Richards Eq.(1-D) - 지하대수층의 3차원 흐름해석 - 저류층(3) · 차단저류 · 불포화층저류 · 포화층저류	- 요지저류로부터 지표면유출 - 토양수분저류에서 중간유출 - 지하수저류에서 기저유출 - 저류층(5) · 차단저류 · 요지저류 (depression storage) · 토양수분저류 · 하도저류 · 지하수저류
Routing	—	- 비선형 전이함수	- 하도 및 저수지의 흐름해석 - 가중계수를 이용한 경험식	- Saint Venant Eq.	- 비선형 저류함수
Parameter Optimization	—	- 수동시행착오법 - Harlin method	- HSPEXP - HSPFParm	—	—
Landuse Change	- CN에 의한 토지이용의 변화 모의 가능	- 고도의 분포에 따른 수문학적 소유역의 반응단위에 의한 토지이용 변화 모의	- 소유역의 토지이용별 지형특성 인자들을 사용함으로써 토지이용 변화에 의한 유출모의	- 지표면경사, 토지이용에 따른 유출변화 모의	—
GIS/RS Interface	—	—	- BASINS(Arc/View)	- Mike-GIS(Arc/View)	—
URL	- http://www.nps.ars.usda.gov/	- http://www.smhi.se/en/index.htm	- http://water.usgs.gov/spftware/hspf.html - http://www.epa.gov/ceampubl/hspf.htm	- http://www.dhigroup.com	- http://www.civag.unimelb.edu.au/ceah/ceah.index.shtml
Model Type	- 집중형(lumped)	- 집중형(lumped)	- 준분포형(semi-distributed)	- 분포형(distributed)	- 집중형(lumped)
Remark	- 공개모형 - 포장규모에서 장기유출 및 화학물질 수지 해석 - CREAMS 보다 근역을 세분화	- 비공개모형 - HBV(1972)에서는 상층저류층에서 2개의 유출공에 의해 유출을 모의한 반면, HBV96에서는 상층저류층의 유출공을 1개로 해서 비선형 해석	- 공개모형	- 비공개모형 - 하천과 대수층의 흐름해석 - 격자 단위의 물리적 매개변수	- 비공개모형 - 하천으로부터의 재충전(하도저류에서 지하수저류로의 재충전)을 고려 - 지하수 하부로의 침투 고려

표 4. 장기 강우-유출 모형의 비교(계속)

Items \ Model	NAM	NWS-PC	PRMS	SFB	SLURP
Agency	- Denmark Univ.(Denmark)	- USNWS(US)	- USGS(US)	- Melbourne Univ.(Australilia)	- Hydrologic-Solutions(UK)
Rainfall	- 지점우량	- 지점우량 - 면적평균강우량	- 지점우량 - 지점 일 우량에 수분반응단위별 보정계수를 적용	- 지점우량	- 지점우량 - 고도에 따른 강우보정
Interception	—	—	- 식생피복밀도와 수분반응단위의 저류가능량 함수	—	- 최대차단저류능 - 엽면적지수(LAI)와 식생피복의 함수
Evapotranspiration	- 잠재증발산량 입력 - 실제증발산량 · 토양수분의 함수	- 잠재증발산량 입력 - Pan Evaporation - 실제증발산량 · 토양 상부층과 하부층의 흡착수가 증발에 관여	- Pan Evaporation, 월 단위의 보정 계수 - Hamon Eq. - 수정 Jensen-Haise Eq. - Zahner method(토양수분의 함수) - Priestley - Taylor Eq.	- Priestly-Taylor Eq. - 지표저류층의 비배수저류량과 일 최대증발산량의 함수 - 지하수저류층의 증발산 고려	- CRAE method - Granger Eq. - Penman-Monteith Eq. - Linacre Eq. - 엽면적지수(LAI) - 신속 저류층과 지연 저류층의 저류량
Runoff	- 지표면저류층에서 직접/중간유출 - 하부저류층(근권)에서의 토양수분에 의해 기저유출 - 저류층(3) · 표면저류 · 하층저류 · 지하수저류	- 투수/불투수 구역의 분리 - 불투수 구역의 유출은 직접유출로 분리 - 상부토양층의 자유수 저류공간이 포화되거나, 강우강도가 침투율을 초과할 때 발생 - 상부토양층의 저류된 자유수의 횡방향 배수에 의한 중간유출 - 기본 기저유출 - 보조 기저유출 - 저류층(2) · 상층저류 - 토습수와 자유수 · 하층저류 - 토습수와 자유수	- 투수구역에 대한 유출은 유출기여 면적 개념을 이용 (토양의 선행함수비와 강우의 총량의 함수)한 선형·비선형 함수 - 불투수구역의 유출은 일총강우 이용 - 선형·비선형 저류함수 - Groundwater Sink는 지하수 저류함수와 선형 추적계수로 계산 - 저류층(5) · 차단저류 · 불투수층저류 · 하층저류 · 지표하저류 · 지하수저류	- 지표저류층이 채워진 후 강우에서 침투량을 감하여 계산 - Q = P-Ftanh(P/F) - 기저유출은 하부저류량과 감소계수에 의해 산정 - 저류층(3) · 표면저류(배수/비배수) · 하층저류 · 지하수저류	- 지표면유출은 신속 저류층을 초과하면 발생 - 중간유출은 신속 저류층에서 포장용수량 보다 큰 저류량에 의해 계산 - 기저유출은 지연 저류층의 저류량과 저류계수 - 저류층(3) · 차단저류 · 신속저류 · 지연저류
Routing	- 직접유출/중간유출은 2개의 선형저수지 - 기저유출은 1개의 선형저수지	- kinematic wave method - Unitgraph-Muskingum method	- 선형저류방정식 - Modified-Plus Routing	—	- ASA 및 하천에서 흐름해석 · ASA : 하도까지의 거리 분포 및 Manning Eq. · 하천 : Muskingum, Muskingum-Chunge
Parameter Optimization	· ACGA(Accelerated Convergence Genetic Algorithm) · NPOC(New Process Oriented Automa-tic Calibration)	- Rosenbrock method	- Rosenbrock method - Gauss-Newton method	- SA 알고리즘과 심플렉스 방법의 조합	- SCE-UA
Landuse Change	—	- 토지이용, 식생 등의 변화에 의한 유출모의	- 수문 반응단위(HRU)별로 토지이용 변화에 대한 모의 가능	—	- 격자 형태의 지형학적 분석 프로그램을 이용한 토지이용 변화의 모의가 가능
GIS/RS Interface	—	—	- Weasel(Arc/Info)	—	- IDRISI - TOPAZ(SLURPAZ)
URL	- http://search.dhi.dk	- http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/	- http://water.usgs.gov/software/prms.html	—	- http://www.hydrologic-solutions.com/slurp.htm
Model Type	- 집중형(lumped)	- 준분포형(semi-distributed)	- 준분포형(semi-distributed)	- 집중형(lumped)	- 준분포형(semi-distributed)
Remark	- 비공개모형 - MIKE11/NAM에서 최적화 모듈이 제공됨 - 지하수저류로부터의 펌핑을 고려	- 공개모형 - 식생에 따라 토양하부층의 흡착 저류량 변화	- 공개모형 - 유역을 소유역으로 구분하고, 구분된 소유역을 경사(slope), 주향 (aspect), 표고(elevation), 토지이용(land use), 토양형태(soil type), 식생(vegetation) 등에 따라 수문반응 단위유역(HRU)으로 다시 세분화 - UNIX 기반	- 비공개모형	- 비공개모형 - 유역을 소유역으로 구분하고, 구분된 소유역을 경사, 주향, 표고, 토지이용, 토양, 식생 등에 따라 집합 모의지역(ASA)으로 세분. - ASA(Aggregated Simulation Area) · Kouwen's GRU, Krysanova's Hydrotop, PRMS/SWAT의 HRU와 같은 개념

표 4. 장기 강우-유출 모형의 비교(계속)

Items \ Model	SSARR	SWAT	UBC	XINANJIANG
Agency	- USACE(US)	- EPA, USDA(US)	- Univ. of British Columbia(Canada)	- Ho-Hai Univ.(China)
Rainfall	- 지점우량 및 가중계수	- 지점우량	- 지점우량 - 고도를 고려	- 유역평균우량
Interception	- 식생피복에 의한 차단저류능	- 차단저류능	—	—
Evapotranspiration	- Pan Evaporation - Thornthwaite Eq. - 토양수분의 함수	- Penman-Monteith Eq. - Hargreaves Eq. - Pristley-Taylor Eq. - 토양잠재증발산량에 대한 토지피복지수의 함수	- 온도, 계절계수, 고도 등의 함수 - 잠재증발산과 토양수분 부족량의 함수	- Pan Evaporation - 잠재증발산과 토양수분보유능의 함수
Runoff	- 토양수분지수(SMI)와 유출비율 인자(ROP)에 의해 유출계산 - 저류층(4) · 차단저류 · 표면저류 · 지표하저류(중간대수층저류) · 하층저류	- SCS 유출곡선지수 - 지표면 경사에 따라 CN 보정 - Green - Ampt Eq.에 의해 침투량 산정 - 중간유출은 Kinematic Storage Model에 의해 산정 - 저류층(5) · 차단저류 · 토양수분저류 · 연못수분저류(ponds water) · 얕은대수층저류 · 심층대수층저류	- 투수/불투수 구역의 구분 - Fast Runoff - 토양수분부족량을 채운 후 직접유출에 기여 - 지하수 침루의 한계값을 초과한 과잉수의 유출 - 기저유출은 상층/하층 지하수 저류층과 저류계수에 의해 선형적으로 산정 - 중간유출은 중간저류층과 저류계수에 의해 산정 - 저류층(2) · 상층저류 · 하층저류	- 투수/불투수 구역의 구분 - 자유수분저류량과 저류능의 함수 - 중간유출과 기저유출은 자유수분 저류량과 계수에 의해 산정 - 저류층(3) · 상층저류 · 하층저류 · 심층저류
Routing	- 유역추적 : 선형 저수지 - 하도추적 : 비선형 저수지	- 선형저류함수	- 선형저류방정식 · Fast, Medium - 계단식 저류(Nash Model) · Groundwater - 단순선형저류	- Muskingum
Parameter Optimization	—	- 토양 및 토지이용에 따른 매개변수 데이터베이스	—	—
Landuse Change	—	- 수문반응단위 별 토지 이용 변화에 의한 유출모의	—	- 토지이용 변화에 따른 매개변수의 재산정 곤란
GIS/RS Interface	—	- GRASS - Arc/View(AVSWAT) - BASINS	—	—
URL	- http://www.nwd-wc.usace.army.mil/report/ssarr.htm	- http://www.brc.tamus.edu/swat/	- http://www.civil.ubc.ca/home/ubcmodel	—
Model Type	- 준분포형(semi-distributed)	- 준분포형(semi-distributed)	- 집중형(lumped)	- 집중형(lumped)
Remark	- 공개모형 - 저수지 운영에 활용	- 공개모형	- 비공개모형	- 비공개모형 - NWSRFS 부프로그램으로 활용