

CASC2D 모델의 소개

Distributed Hydrologic Model CASC2D

김 성 준*
Kim, Sung-Jun

1. 머리말

CASC2D는 강우분포도를 입력자료로 하여 유역의 수문학적인 반응을 모의하는 물리적인 분포형 매개변수를 가지는 격자 (정사각형)기반의 2차원 부정류 및 초과침투(Hortonian)를 고려하는 수문모델이다.

모델은 ① 연속적인 토양수분 추적, ② 강우 차단 및 저류, ③ 침투, ④ 지표 및 하천유출 추적적으로 구성되어 있다. 초기 CASC2D모델은 Green and Ampt 침투, 확산파(Diffusive-wave) 지표 및 하천흐름의 추적을 포함하였다 (Julien et al., 1995). 가장 최근의 CASC2D 모델은 연속적인 토양수분 추적 및 유역규모의 유사운송 등을 포함하여 다양한 요소들이 추가되었다. CASC2D는 모델이 발표된 이후로, 미 공병단 (U.S. Army Corps of Engineers)과 군 연구소 (U.S. Army Research Office)의 지원 하에 많은 발전을 이루어 왔다. 현재 진행되고 있는 내용으로는 2차원 지하수 모델과의 연계, 수질항목을 받아들일 수 있도록 호수, 습지, 저류지를 포함하는 과정, 그리고 알고리즘의 지속적인 향상 등이다.

실질적으로, CASC2D는 하천의 수문동력학적 부정류를 모의하기 위하여 연계된 물리적인 기반의 과정모듈들로 구성되어 있다. CASC2D와 미공병단의 HEC-1, HEC-HMS와 같은 범용적인 다른 모델간의 주요한 차이

점은 유출의 개념적인 접근(예, 단위유량도)이 없다는 것이다. 이는 CASC2D가 다른 모델들보다 뛰어나다는 것이 아니라, 전혀 새로운 방법으로 접근하고 있다는 것을 의미한다. CASC2D는 주어진 강우자료를 대상으로 유역의 유출을 평가하기 위하여, 질량 및 에너지 보존방정식, 선형모멘트 방정식을 사용한다. CASC2D는 사용자가 지정하는 해상도 (격자크기)에 맞추어 공간적으로 해석이 가능하므로, HEC-1, HEC-HMS보다는 훨씬 많은 입력자료를 요구하고 있다. CASC2D에서의 전형적인 격자크기의 범위는 30m - 150m이다. 공간적인 분포형 모델링은 과거의 접근방법보다는 훨씬 많은 입력자료를 이용하여 유역내 어느 격자점에서든지 원하는 수문학적 변수값을 결정할 수 있는 능력을 제공한다. CASC2D는 공간적으로 변화하는 유역 매개변수 또는 강우자료를 받아들일도록 구성되어 있다.

초기 CASC2D의 실행은 매우 많은 입력과 출력조건을 가지는 복잡한 과정을 거치도록 되어 있었다. Brigham Young 대학의 컴퓨터그래픽공학연구실에 의하여 개발된 미 국방성 WMS (Watershed Modeling System) 인터페이스는 이러한 CASC2D의 어려운 점을 해결하였다. 이 인터페이스는 사용자가 입력파일을 작성하는데 발생하는 어려운 점들을 해결하는 한편, 모델의 실행과정을 단계적으로 도와주도록 설계되어 있어 매우 높게 평가되고 있

*건국대학교 지역건설환경공학과 (kimsj@konkuk.ac.kr)

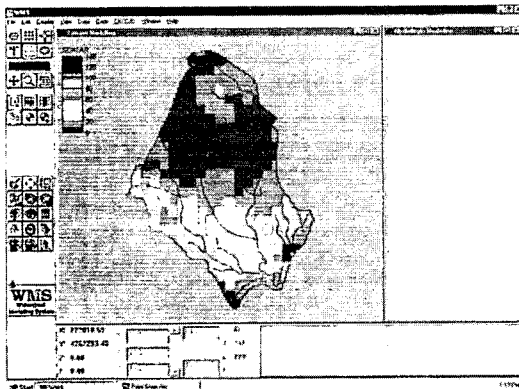
다. WMS는 GIS의 전체 기능을 가지거나, 또는 가지도록 개발된 것이 아니다. WMS 인터페이스는 ARC/INFO와 GRASS GIS 시스템으로부터 직접 자료를 받아들여 CASC2D로 보낼 수 있도록 한 것이다. 특히 공개소프트웨어인 GRASS GIS는 CASC2D의 입력자료를 준비하는데 매우 도움이 된다. CASC2D는 모든 공간분포변수들을 저장하는데 GRASS ASCII 자료 파일형태를 취하고 있다.

다음 절에서는 현재 CASC2D의 다양한 면(모델의 구성, 요구 입력자료, 출력조건)들을 설명하고자 한다.

2. 강우자료

CASC2D는 주어진 기간동안에 공간적으로 균일한 강우에 대하여 적용하거나, 지점강우로부터 공간분포도를 작성하여 적용할 수도 있다. 두 번째 조건은 강우관측지점의 좌표와 지점별 강우강도를 포함하는 입력파일의 생성이 요구되며, 지점의 개수는 제한이 없다. 티센망 또는 역거리 강우내삽에 의한 강우분포도의 작성이 가능하다. 강우의 시간간격은 1분단위로 할 수도 있으며, 모의기간에 맞추어 조정이 가능하다. 이러한 특징은 레이더 관측의 시간간격이 불규칙하므로, 레이더 강우자료의 사용을 쉽게 해준다.

CASC2D는 기상 및 레이더 강우의 평가를



〈그림-1〉 CASC2D에서 레이더강우 분포도

위하여 사용되어 왔다. 〈그림-1〉은 버지니아주의 Rapidan River 유역 (300 km²)을 대상으로 한 레이더 강우자료 (mm/h)를 1km 해상도로 보여주는 그림이다. CASC2D는 모의기간동안에 다양한 모델관련 변수들을 출력할 수 있다. 예를 들어, CASC2D는 WMS의 GUI (Graphic User Interface)를 이용하면 시계열 강우분포도를 출력할 수 있다.

3. 연속모의 능력

CASC2D는 사용자의 조정에 따라, 단일강우사상 또는 장기연속모의가 가능하다. 연속모의 능력 (Ogden and Senarath, 1997)은 1시간 간격으로 강우사상간의 토양수분 변화를 추정하는 Penman-Monteith 증발산량(ET)의 추정방법에 의존하고 있다.

Penman-Monteith 증발산량(ET)은 공간적으로 분포하는 입력자료를 요구하고 있다: 지표면 단파복사량 알베도, 지표면 조도높이, 피복평균 기공저항, 피복 단파복사량 전달계수 또한 시간단위의 기상자료가 필요하다: 온도, 상대습도, 풍속, 운량, 단파복사속은 직접 입력이 가능하기도 하지만, 복사량 자료가 없다면 Bras(1990)의 표준방법을 이용하여 모의가 가능하다. 지중 토양온도는 Deardorff(1978)가 제시한 유사한 방법으로 추정하도록 되어 있다. 연장기간의 자료에 대한 CASC2D의 보정은 모델의 검정을 향상시키기 위하여 수행되어 왔다.

4. 강우 차단(Interception) 및 지면 저류

식생에 의하여 공간적으로 변화하는 강우차단은 두 개의 매개변수를 이용하여 모의하도록 되어 있다. 첫 번째 매개변수는 강우가 지표면으로 도달하기 전에 발생하는 초기강우차단량이다. 두 번째는 초기차단이 채워진 후에 지표면에 도달한 강우의 일부이다. 이 두 매개변수들이 공간분포도로 CASC2D의 입력

자료로 제공된다. 지면 저류심의 분포도는 지표면에서 미세 지형을 고려하기 위하여 지표 흐름이 시작되기 전에 도달하여야만 하는 깊이로 입력된다.

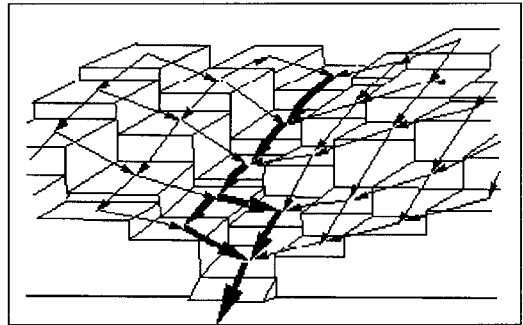
5. 토양 침투

현재 CASC2D에는 2가지 침투 계산방법이 적용되고 있다. 첫째는 최초의 Green & Ampt 방법이다. 이 방법의 적용을 위해서는 토양 공극률, 포화투수계수, 습윤선단 모관수두, 초기 토양수분에 대한 분포도가 필요하다. 두 번째 방법은 강우와 강우사이에 발생하는 토양수의 재분배 과정을 추가한 Green & Ampt 방법이다. 이 방법은 Ogden and Saghafian (1997)이 자세히 설명하고 있다. 토양수 재분배는 두 가지 분포도를 추가적으로 요구하고 있다: 공극분포지수 및 잔여포화도에서의 토양수분함량. 이 두 방법은 모두 토양특성 및 초기 토양 수분의 깊이에 대해서는 균일하다고 가정하고 있다. 이는 고운 토양구성과 지하수가 꽤 깊은 유역 또는 건조 및 반건조지역에서의 모의에 적합하다는 것을 말한다. 결론적으로, CASC2D는 사질토양이 많은 유역이나, 유출해석에서 지하수의 역할이 큰 유역에서는 적합하지 않은 모델이다.

6. 지표흐름 추적

CASC2D에서는 지표흐름의 추적을 위하여 확산파(Diffusive wave)에 대하여 2차원 양해법 수치해석을 적용하고 있다(Julien et al., 1995). 지표흐름 추적방법은 꽤 높은 해상도의 DEM(Digital Elevation Model)을 요구하고 있다. GIS를 이용하면 이와 같은 수치지도의 생성이 가능하다. 지표흐름에 대한 유속을 계산하기 위하여 Manning 공식이 사용되며, 이를 위해서는 Manning 조도계수 n에 대한 공간분포도가 필요하다.

확산파 추적은 배수효과의 고려가 가능하고, 역경사에서의 흐름을 가능하게 하므로 운동파(Kinematic wave) 추적보다 뛰어나다. 배수효과를 모의하는 능력은 평평한 지역에서는 역흐름이 흔하게 발생하기 때문에, 불규칙한 지형에서의 부정류 모의를 위해서는 필수적이다. 하천흐름 추적이 중요하지 않은 작은 유역에서는, 유역출구의 위치와 경사를 지정하여 주변 하천흐름의 추적 없이 CASC2D의 실행이 가능하다. 지표흐름추적을 개념적으로 도식화하면 <그림-2>와 같다.



<그림-2> CASC2D에서 지표흐름추적 개념도

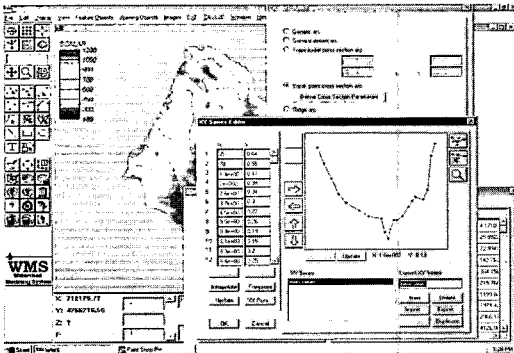
7. 하천흐름 추적

CASC2D에서는 하천흐름의 추적을 수행하기 위하여 2가지 방법을 수용하고 있다. 첫 번째 방법은 상류(Headwater) 유역에 대한 모의에 적합한 1차원 양해법 확산파 추적이다. 이 양해법 추적은 모의의 안정성을 위하여 짧은 시간간격이 요구된다. 일반적으로 이 방법은 Courant 수가 약 2.0 이하의 조건에서 높은 천이유량도를 모의하게 된다. 양해 추적 알고리즘은 이러한 조건을 만족하기 위하여 시간간격을 순차적으로 반감시킨다. 이 방법에 의한 양해 하천흐름 추적은 모든 범위의 Froude 수에 대해서는 안정적이지만, 도수(Hydraulic jump)는 모의하지 못한다.

두 번째 방법은 Preissmann 4점 음해법(Holly et al, 1990; Ogden, 1994)을 이용하

여 1차원 Navier-Stokes 방정식으로 추적하는 것이다. Preissmann 방법은 하천경사가 일반적으로 0.3%를 넘지 않는 평평한 대유역에 가장 적합하며, 동력학적 효과가 보다 중요한 것으로 알려져 있다. Preissmann 방법은 Froude수가 1에 가까워 질수록 불안정해진다(Meselhe and Holly, 1997). 하천단면에 대한 다양한 내용도 CASC2D에서 처리될 수 있도록 되어 있다. 자유유향류 또한 지원되며, 현재는 암거와 다리를 지나가는 경우에 대한 수리학적 내용들도 추가·개발하고 있다.

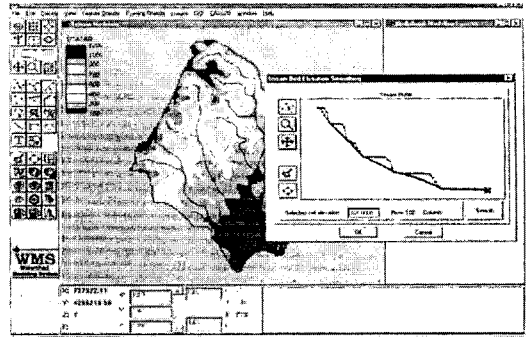
CASC2D에서 사다리꼴과 불규칙 단면(x, z)이 가장 많이 활용되고 있다. WMS는 하천흐름 추적을 위한 입력자료를 생성시키는 도구로 사용되고 있다. <그림-3>은 WMS에서 하천단면 편집기를 보여주고 있다.



〈그림-3〉 WMS CASC2D에서의 하천단면 편집기

GIS 모듈은 DEM에 하천을 위치시키는데 특히 유용하다. TOPAZ 모듈(Garbrecht and Martz, 1997)은 이러한 목적을 위하여 WMS 내에서 사용된다. DEM에서의 오차는 하천의 수리학적 계산을 수행하는데 심각한 영향을 미치게 된다. 이러한 이유로 하천의 종단면을 수작업으로 편집하는 모듈이 WMS내에 있다. <그림-4>는 그 예를 보여주고 있다.

<그림-4>에서 계단형태의 하천 바닥표고는 원래의 DEM에서 추출된 것이다. 부드럽게 다듬어진 하천 종단면은 Ogden et al.(1994)이 제시한 자동화과정을 거쳐서 결정된 것이다.



〈그림-4〉 CASC2D에서의 하천종단 편집기

DEM은 종종 지형이 오목한 지역에서의 표고는 정확하게 표현하지 못하게 된다. WMS의 하천종단면 편집기는 DEM에서 발생하는 오차를 수작업으로 고칠 수 있기 때문에 매우 유용하다.

8. 모델의 수행

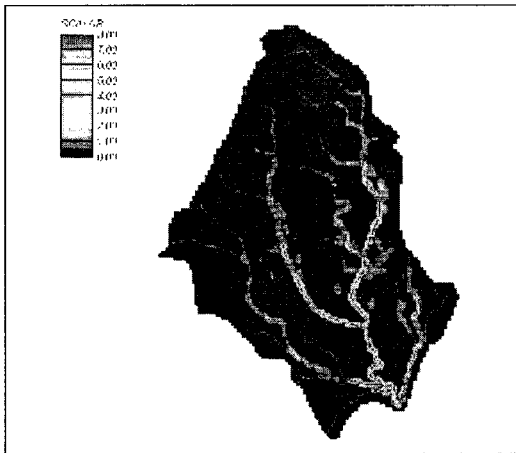
많은 연구자들의 연구에 의하여 CASC2D에 GIS기법으로 인공위성 및 레이더자료를 활용할 수 있도록 큰 발전이 있어 왔다(Julien et al., 1995; Saghafian et al., 1995; Ogden et al., 1995; Saghafian and Julien, 1995; and Doe et al., 1996). 이 연구들은 또한 유역특성의 공간적 변화, 강우의 이동을 포함한 강우의 시·공간적 변화가 유출에 미치는 효과를 파악할 수 있도록 확장되어 왔다(Ogden, 1992; Ogden and Julien, 1993, 1994).

CASC2D는 여러 유역에서 성공적으로 적용되어 왔다. 초과침투(Hortonian)에 의한 유출을 모의하기 위한 지역에서, CASC2D는 유역내의 다지점에서 유출을 꽤 정확하게 모의하였다(Johnson et al., 1993; Ogden and Senarath, 1997). CASC2D의 연속모의 능력은 초기 토양수분상태에 대한 불확실성을 줄이는데, 그리고 보정의 일관성을 향상시키는데 특히 기여한 것으로 평가받고 있다(Ogden and Senarath, 1997). CASC2D는 또한 홍수사상을 연구하는데 그 가치를 발휘하여 왔다. 이 모델은 지형변화의 평가를 목적으로 VA

Rapidan강에서 1995년 6월 27일에 발생한 홍수(Smith et al., 1996a), 그리고 치수대책을 목적으로 NJ Trenton의 도시홍수를 연구하는데 적용된 바 있다. CASC2D는 또한 1997년에 콜로라도 Fort Collins에서 발생한 대홍수에 대하여 도시유역을 대상으로 강우와 유역특성의 불확실성이 유출에 미치는 영향을 검토한 바 있다(Ogden et al., 1999).

9. CASC2D 출력

CASC2D는 사용자가 지정하는 시간 간격으로 대부분의 수문변수들을 수치지도로 출력할 수 있다. CASC2D는 유역출구에서의 유량도 뿐만 아니라, 유역내 임의지점에서의 수문곡선도 지정하면 작성이 가능하다. 다소 복잡한 WMS 수문모델 인터페이스가 다음의 시계열 수치지도를 읽어들인 후, 디스플레이 목적으로 동영상을 작성할 수 있도록 되어 있다: 강우, 침투율, 침투깊이, 토양수분, 유출심, 유출속도. <그림-5>는 시험유역의 유출심을 보여주고 있다.



<그림-5> CASC2D 유출심 분포도의 예 (단위: m)

10. 결론

물리적인 기반의 2차원 분포형 수문모델인 CASC2D는 유역특성을 공간적으로 고려하는

격자(Square-grid)를 이용한다. 이러한 접근은 수문모델과 GIS를 아주 밀접하게 연결시켜 준다. CASC2D를 이용한 지금까지의 연구들로 미루어 볼 때, 이 모델은 HEC-1이나 TR20과 같은 기존의 전형적인 수문모델들보다 생존력을 가지고 앞으로 대체할만한 모델로 평가받고 있다. CASC2D는 짧은 시간간격(1~30초)으로 주어진 지역을 격자(30~150m)로 구성하여 연속적으로 운영된다. CASC2D는 사용자로 하여금 유역내 어느 지점이든지 원하는 지점의 수문반응을 질의할 수 있도록 되어 있다. 이러한 능력은 강우 및 유역에 대한 공간적인 입력자료들을 준비하였기 때문에 가능하다.

미공병단의 지원에 의하여 개발된 CASC2D의 미국방성 WMS 인터페이스는 사용자가 모델의 준비, 후처리 및 출력자료의 가시화를 도와준다. WMS는 GIS환경에서 CASC2D의 입력파일로 작성하고, 출력자료를 처리하고 전달하는 능력을 제공하고 있다.

CASC2D는 전형적인 집중형-개념적인 수문모델링보다는 다음과 같은 세가지 장점을 제공하고 있다. 첫째는 모델의 모든 과정이 물리적인 기반의 모델을 이용하여 모의가 된다는 것이다. 따라서, 모든 입력자료들의 현장측정이 가능하다는 것이다. 둘째는 정방형의 격자구성은 격자기반의 GIS와 맞아 떨어져서, CASC2D는 GIS기반의 자료저장, 처리 및 수문모델화를 위한 장점을 최대한 살릴 수 있다. 셋째로는 CASC2D의 공간적인 특성이 이전의 전형적인 모델링으로는 어렵거나 불가능한 공간적인 유역의 변화를 고려할 수 있다는 것이다.

참고문헌

1. Bras, R. L. 1990. Hydrology: An Introduction to Hydrologic Sciences, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
2. Deardorff, J.W. 1978. Efficient Prediction of

- Ground Surface Temperature and Moisture, With Inclusion of a Layer of Vegetation, *J. Geophys. Res.*, 83, pp.1889~1903.
3. Doe, W.W.III, B. Saghafian, and P.Y. Julien, 1996. Land-use impact on watershed response: the integration of two-dimensional hydrologic modeling and Geographic Information Systems, *J. Hydrol. Processes*, 10: pp.1503~1511.
 4. Garbrecht, J., and L.W. Martz. 1997. TOPAZ: An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershed Segmentation and Subcatchment Parameterization; TOPAZ Overview. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grazinglands Research Laboratory, El Reno, Oklahoma, USA, ARS Publication No. GRL 97~2, p21., 1997.
 5. Holly, F. M.Jr., J. C. Yang, P. Schwarz, J. Schaefer, S.H. Hsu, and R. Einhellig, 1990. CHARIMA-Connected Networks of Mobile-Bed Channels, IIHR Report No. 343, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa City, IA 52242.
 6. Johnson, B. E., N. K. Raphael, and J.C. Willis, 1993. Verification of Hydrologic Modeling Systems, Proc. Federal Water Agency Workshop on Hydrologic Modeling-Demands for the 90's, USGS Water Resources Investigations Report 93~4018, June 6~9, 1993. Sec. 8.9~20.
 7. Julien, P. Y., Saghafian, B., and Ogden, F. L. 1995. Raster-based Hydrological Modeling of Spatially-varied Surface Runoff, *Water Resources Bulletin*, AWRA, Vol. 31, No. 3, June 1995, pp.523~536.
 8. Meselhe, E. A. and F. M. Holly Jr. 1997. Invalidity of the Preissmann Scheme for Transcritical Flow, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE 123(7).
 9. Ogden, F. L., 1992. Two-dimensional runoff modeling with weather radar data, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, p208.
 10. Ogden, F. L., and Julien, P. Y. 1993. Runoff Sensitivity to Temporal and Spatial Rainfall Variability at Runoff Plane and Small Basin Scales, *Water Resour. Res.*, Vol 29, No. 8, pp.2589~2598.
 11. Ogden, F. L. 1994. de St. Venant Channel Routing in Distributed Hydrologic Modeling, Proc. ASCE Hydraulic Engineering Specialty Conference, Buffalo, N.Y., August 1~5.
 12. Ogden, F. L., and Julien, P. Y. 1994. "Runoff Model Sensitivity to Radar-Rainfall Resolution, *J. of Hydrology*, 158, pp.1~18.
 13. Ogden, F.L., B. Saghafian, and W.F. Krahwski. 1994. "GIS-Based Channel Extraction and Smoothing Algorithm for Distributed Hydrologic Modeling", Proc. ASCE Hydraulics Division Specialty Conference, August 1~5, Buffalo, N.Y., pp. 237~241.
 14. Ogden, F. L., J. R. Richardson, and P. Y. Julien. 1995. Similarity in catchment response 2. Moving rainstorms, *Water Resour. Res.*, AGU., Vol. 31, No. 6, pp. 1543~1547.
 15. Ogden, F. L., and S. U. S. Senarath, 1997. Continuous Distributed Parameter Hydrologic Modeling with CASC2D, Proc. XXVII Congress, International Association of Hydraulic Research, San Francisco, CA, Aug. 10~15.
 16. Ogden, F. L., H. O. Sharif, S. U. S. Senarath, J. A. Smith, M. L. Baeck, and J. R. Richardson, 1999. Hydrologic Analysis of the Fort Collins Flood Flash of 1997, Submitted to *J. Hydrology*.
 17. Saghafian, G. and P. Y. Julien. 1995. Time to equilibrium for spatially variable watersheds, *Journal of Hydrology*, 172, pp.231~245.
 18. Saghafian, G., P. Y. Julien and F. L. Ogden, 1995. Similarity in catchment response 1. Stationary rainstorms, *Water Resources Research*, AGU, Vol. 31, No. 6, pp.1533~1541.
 19. Smith, J. A., D. J. Seo, M. L. Baeck, and M. D. Hudlow. 1996. An intercomparison study of NEXRAD precipitation estimates. *Water Resources Research*, Vol. 32, pp.2035~2045.