

ModClark 모형을 이용한 유출 해석

Runoff Analysis using ModClark Model

안 상 진* / 윤 석 환**

Ahn, Sang Jin / Yoon, Seok Hwan

Abstract

The purpose of the present study is examining the changes of runoff characteristics and extracting hydrologic parameters by applying ModClark model on grid divided watershed. Bocheong stream basin in Geum River system, one of the representative watersheds of IHP projects, is selected. Hydrology-based topographical informations are calculated using GIS data in the HEC-GeoHMS V1.1 extension in Arcview 3.2. The ModClark model requires precipitation data in a gridded format. The gridded data must be recorded in the HEC Data Storage System file format. Therefore, kriging method was used to interpolate the point values to create a grid that gives each cell over the entire watershed a precipitation value. Hec-DSSVue program was used to create DSS file for the rain gage data. The completed HEC-HMS model was calibrated for use in simulating three measured storm events and cell size of 10000m, 5000m, 2000m, 1000m was chosen for the application. As the result of applying distributed rainfall-runoff model to analyze relatively good agreement for peak discharge, runoff volume and peak time.

keywords : ModClark model, gridded precipitation, runoff analysis

요 지

본 연구에서는 격자로 분할된 유역에 ModClark 모형을 적용하여 수문모형의 매개변수를 산정하고 격자분할에 따른 유출변화에 대해서 검토하였다. 연구대상 유역은 IHP (국제수문개발계획)의 대표유역의 하나인 금강수계의 보청천 유역으로 하였다. 유역의 수문지형정보들은 HEC-GeoHMS를 이용하여 계산하였다. ModClark 모형은 격자형태의 강우자료를 요구하며 이 자료들은 HEC-DSS 파일 형태로 기록되어져 있어야 한다. 따라서 크리깅 방법을 이용하여 지점우량을 전체유역에 대한 격자 강우를 생성하였으며, Hec-DSSVue 프로그램을 이용하여 강우 입력자료를 DSS 파일로 생성하였다. 격자 크기 10000m, 5000m, 2000m 및 1000m에 대한 3가지 유출사상에 대해 모의하였으며, 모의 결과 첨두 홍수량, 유출체적, 첨두홍수 도달시간에 대해 실측수문곡선과 비교적 양호한 결과를 나타내었다.

핵심용어 : ModClark 모형, 격자강우, 유출해석

1. 서 론

최근 몇 년간 집중호우로 인한 홍수피해가 심각한 수준으로 발생하였고, 하천 유역의 유출을 해석하고

예측하기 위해서는 유역 내에서 발생하는 수문기상학적 요소와 유역의 특성인자들의 정확한 상호 연관성의 규명과 수문변수의 공간적 변동성에 대한 해석은 수자원 계획 및 관리를 위해 중요한 관심사가 되고 있다.

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungbuk Univ., Cheongju 361-763, Korea
(e-mail: hydrosys@chungbuk.ac.kr)

** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Chungbuk Univ., Cheongju.

지금까지 사용되고 있는 집중형 모형들에 의한 유출해석은 지상에 설치된 강우관측소 우량 자료를 공간적으로 평균한 강우를 입력자료로 사용하여 왔으나, 이것은 그 한계성을 나타내고 있어 정확한 홍수 예·경보 운영에 문제점을 내포하고 있는 실정이다. 강우관측소의 설치밀도가 조밀하지 못할 경우 강우의 수평분포를 정확하게 파악하기 어렵기 때문에 산정된 강우량도 많은 오차를 포함하게 되어있다. 강우관측소 설치 밀도를 높이는 것은 시설 설치 및 유지, 보수등과 같은 경제적인 측면을 고려할 때 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 방안으로 최근 레이더 관측을 이용한 강우관측이 활발히 시행 또는 계획되고 있으며, 유역내의 공간강우 분포특성 및 유역 공간강우량 산정을 위한 크리깅 기법을 적용하고 있는 실정이다.

본 연구를 수행하기 위해 선택된 크리깅 기법은 과거 지점 강우량 분석, 설계강우의 공간 분석 및 강우관측망의 설계에 적용되고 있다. Chua and Bras (1982)는 산지효과에 영향을 받는 강우현상의 분석에 크리깅 기법을 적용하였다. Campling 등(2001)은 과거 지점 강우량의 공간분석 및 최적강우관측망 설계를 위해 크리깅 기법을 적용하였으며, Cheng 등(2003)은 크리깅 기법을 설계강우의 공간분포에 적용하였다. 고덕구 등(1998)은 GIS의 공간추정기법을 이용하여 관측된 지점의 강우량을 시·공간적으로 분포시킬 수 있는 방법을 연구하였다. 김홍태 등(2003)은 낙동강 유역의 공간분포 특성 및 유역 평균 강우량을 크리깅 기법을 이용하여 제시하였다. 공간분포된 강우 및 기상레이더 강우 자료를 이용하여 강우-유출해석에 관한 연구는 Johnson 등(1999)은 미국 서부지역을 대상으로 지상의 강우관측소 자료를 이용한 Thiessen 다각형법과 NEXRAD 기상레이더 자료를 이용한 유역의 평균 강우량을 산정하였다. 대상유역의 월별 유출량을 산정하여 유출량이 관측치와 편차가 5%이내인 안정된 결과를 도출하였다. Sun 등(2000)은 Australia Darwin 지방을 대상으로 지상의 강우관측소 자료를 Kriging 기법을 통해 산정한 강우량과 레이더 강우량 자료를 이용하여 RORB유출모형에 적용하여 Darwin 지방의 유출특성을 분석하였다. Emerson (2003)은 지점강우량을 역거리법을 이용하여 지점강우를 공간분포시켜 ModClark모형을 적용하였다. 최계운 등(1992)은 유역내 시간적 공간적 특성을 가진 이동강우를 해석하기 위해 지표면 흐름과 하천망 흐름으로 나누어 유출을 해석한 분포형 모델을 개발하였다. 윤용남 등(2002)은 공간적으로 분포된 강우자료를 바탕으로 한 강우-유출관계를 고찰하고, 기존의 공간평균된 강우유출모형과 비교하였다.

공간적으로 구성된 격자강우를 이용한 유출해석의 필요성이 요구되고 있으므로 본 연구에서는 공간적으로 분포된 강우자료를 격자크기별로 크리깅 기법을 이용하여 산정하였으며, HEC-GeoHMS (2003) 모형을 이용하여 대상유역의 지형자료, 수문매개변수를 공간적으로 분포시켰다. 유출해석은 공간분포된 강우의 적용을 용이하게 하기 위하여 상대적으로 단순한 준 분포형 접근 방법인 Modified Clark 모형(Kull과 Feldman, 1998)을 적용하였다. 격자크기에 따른 유출해석을 수행한 결과를 토대로 지점강우량을 공간분포 시킬 경우의 적정 격자 해상도 및 공간분포된 수문자료의 적용성을 높이는 데 목적이 있다.

2. 기본이론

2.1 Modified Clark(ModClark)

ModClark 모형의 개념은 Clark의 개념적인 강우-유출 모형에서 사용하고 있는 기본원리를 기초로 하여 공간적으로 분포된 강우자료의 모의 기능을 추가한 것이다. ModClark 모형에서 직접유출은 유수의 전이와 저류로 크게 나누어진다고 볼 수 있다. 유수의 전이효과는 유역전반으로부터 유역출구까지 유수의 도달시간과 관련되어 있으며, 저류효과는 유역의 자연적인 저류에 의한 지체현상으로 설명될 수 있다. ModClark 모형의 매개변수는 도달시간 T_c 와 저류상수 K 이다. 도달시간 T_c 는 초과우량이 유역의 최원점에서 유역출구까지 이동하는데 걸리는 시간이다. 저류상수 K 는 유역의 자연적인 저류효과를 나타내는 상수이며 선형저수지의 저류량-유출량 관계에서의 기울기로서 정의된다. 도달시간 T_c 와 마찬가지로 저류상수 K 역시 시간의 차원을 갖고 있다. ModClark 모형을 개념적으로 도식화하여 그림 1에 나타내었다. 그림 1과 같이 대상유역을 포함할 수 있는 격자 형태로 구분하며, 지점강우량을 크리깅 기법을 적용하여 각 격자점 마다 강우량을 공간적으로 분포시킨다. 공간적으로 분포된 강우량 및 유역의 격자자료를 이용하여 유출을 수행하게 된다.

ModClark 모형의 적용을 위해 필요한 유역의 격자 자료는 각각의 격자면적과 해당 격자로부터 유역출구까지의 이동거리이다. 유역출구까지의 도달시간은 각각의 격자마다 고유하게 설명되며, 해당격자로부터 유역출구까지의 이동거리에 비례한다. 특정 격자의 도달시간은 다음 식 (1)과 같이 추정될 수 있다.

$$t_{cell} = T_c \frac{d_{cell}}{d_{max}} \quad (1)$$

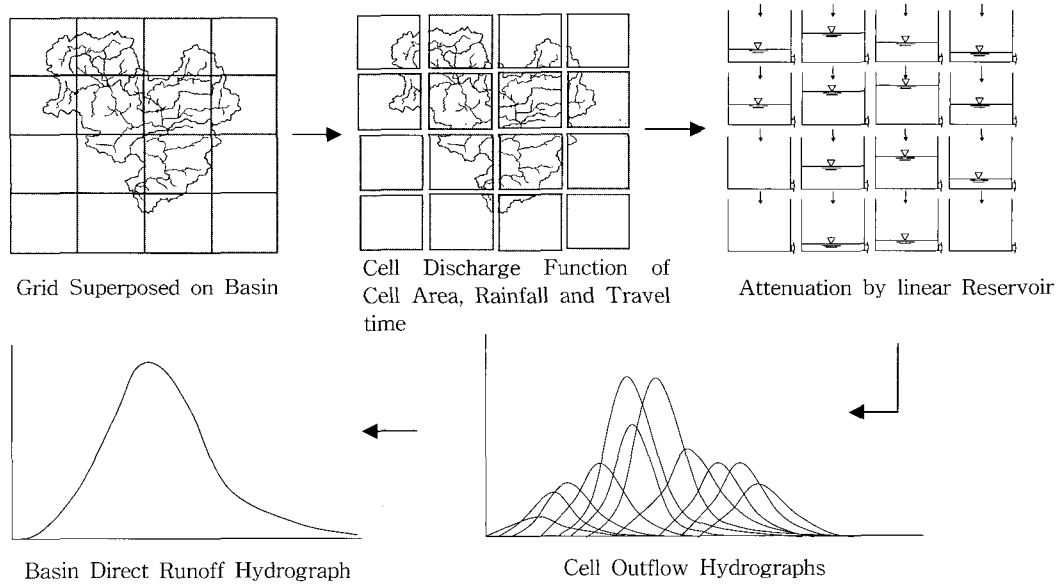


그림 1. ModClark 단위도법의 개념도

여기서 T_c 는 유역 전체의 도달시간, t_{cell} 은 해당 격자로부터 유역출구까지의 도달시간, d_{max} 는 유역출구로부터 이동거리가 가장 긴 격자의 유역출구까지 이동거리를 나타낸다.

ModClark 모형과 Clark 모형의 차이점은 각 격자마다의 도달시간을 계산함으로써 유역의 모든 영역으로부터 유역출구의 도달시간의 변동에 대해 정확하게 계산할 수 있다는 것이다. 또한, 각각의 격자로부터 발생하는 유출량은 격자면적에 비례한다고 가정한다. 각각의 격자로부터 지체된 초과우량은 다음식과 함께 선형저수지를 통하여 추적된다.

$$O_i = \left[\frac{\Delta t}{K+0.5\Delta t} \right] I_{avg} + \left[1 - \frac{\Delta t}{K+0.5\Delta t} \right] O_{i-1} \quad (2)$$

여기서 O_i 는 시간 i 에서의 직접유출, K 는 저류상수, I_{avg} 는 시간 $i-1$ 에서 i 사이의 평균유입량이며, Δt 는 시간구간이다.

본 연구에서 사용된 HEC-HMS 모형은 유역에 구축된 각각의 격자에 해당하는 도달시간-누가면적관계를 사용하여 순간 단위유효우량으로 인하여 직접유출수문곡선을 유도한 후, 전체 유역출구에 1개의 선형저수지가 존재한다고 가정하여 선형저수지 추적함으로써 해당 유역의 직접유출 수문곡선을 얻게 된다.

2.2 크리깅

본 연구에서는 지점강우를 공간적으로 분포시키기 위해 크리깅의 추정식이 편향되지 않으면서 오차분산을

최소로 하는 가중치를 구하여 미지의 값을 예측하는 크리깅(kriging) 방법을 적용하였다.

이미 알고 있는 n 개의 자료값을 이용하여 크리깅에 의한 지점 x 에서 미지의 값의 예측은 식 (3)과 같이 표시되고 오차분산은 식 (4)와 같이 표시할 수 있으며 이를 최소로 하는 가중치를 결정한다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (3)$$

$$\sigma_k^2 = E[(z - z^*)^2] \quad (4)$$

여기서 z 는 예측하고자 하는 참값, z^* 는 크리깅에 의한 예측값, n 은 사용한 자료의 총수이다.

식 (4)의 오차 분산은 참값과 예측값의 차이의 제곱에 대한 기대값으로 정의되며 가중치의 함수임을 알 수 있다. 식 (4)를 전개하여 분산과 공분산의 관계식으로 표시하여 식 (3)을 대입하여 정리하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_k^2 &= E(z^2) - 2E(z z^*) + E(z^{*2}) \\ &= E(z^2) - m^2 - 2E(z z^*) + 2m^2 + E(z^{*2}) - m^2 \\ &= \text{Var}(z) - 2\text{Cov}(z, z^*) + \text{Var}(z^*) \\ &= \text{Cov}(x_0, x_0) - 2\text{Cov}(z, \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i) + \text{Var}(\sum_{i=1}^n \lambda_i z_i) \\ &= \text{Cov}(x_0, x_0) - 2\sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}(x_0, x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov}(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (5)$$

본 연구에서 사용된 크리깅 방법은 식 (6)의 제약조

건하에서 식 (5)로 주어진 오차분산을 최소화되게 하는 가중치를 구하고 이들 가중치를 이용하여 알려진 값들의 선형조합으로 미지의 값을 예측하는 기법으로 식 (6)의 조건을 첨부하기 위해 Lagrange 목적함수 (Lagrange objective function)를 고려하면 다음식 (7)과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (6)$$

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \mu) \\ = Cov(x_0, x_0) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i Cov(x_0, x_i) \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j Cov(x_i, x_j) - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \quad (7)$$

식 (7)을 λ 와 μ 에 대하여 편미분을 하여 정리하면 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = 1 - 2Cov(x_0, x_i) + 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j Cov(x_i, x_j) + 2\mu = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 2 \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) = 0 \quad (8)$$

식 (8)을 정리하면 크리깅 방정식을 구할 수 있으며 이것을 행렬 방정식으로 표현하면 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \dots & \sigma_{1n}^2 & 1 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2n}^2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \dots & \sigma_{nm}^2 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{01}^2 \\ \sigma_{02}^2 \\ \dots \\ \sigma_{0n}^2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. 대상유역 및 전처리과정

3.1 대상유역

국내의 여러 유역 중 수문자료의 계측기간이 오래되었고, 관리가 비교적 양호한 국제수문개발계획(IHP)의 대표유역인 보청천 유역을 연구 대상유역으로 선정하였다. 보청천 유역은 금강수계의 동부에 위치하고 있으며 유역면적은 476.5km², 하천연장 49km의 중소유역으로, 건설교통부에서 설치한 12개의 우량관측소와 5개의 수위관측소가 설치되어 자료의 습득이 용이하다. 현재 12개 우량관측소중 안내, 능월, 이원 및 5개의 수위관측소중 이평, 탄부, 기대지점은 T/M으로 변경되어 운영되고 있다. 대상유역의 우량관측소와 수문관측소는 그림 2와 같다.

3.2 전처리과정

지리정보를 정보시스템으로 구축함으로써 공간문제를 해결하기 위해 개발된 GIS (Geographic Information System)를 이용하였다. 강우-유출해석에서 GIS는 수문현상에 영향을 미치는 기상학적 요소, 토양, 토지이용도, 배수유역의 형태 식생피복 등 수문정보를 획득하기 위한 수단으로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 시간과 노력이 많이 소요되는 기존의 자료 취득 방법과는 달리 유역의 지형학적, 기상학적 특성을 시간과 인력을 절약하여 효율적으로 산정할 수 있다.

GIS상에서 공간정보를 가지고 있는 수치지도를 이용하여 수문모형내 입력인자의 계산, 수문변수의 산출, 유역지표면 특성의 재현을 모의하고, 사용자로 하여금 유역분수계의 여러 특성들을 종합하여, 공간 분석을 수행할 수 있는 HEC-GeoHMS모형을 이용하여 대상유역의 유역모델 및 유출모형의 매개변수를 산정하였다. GIS를

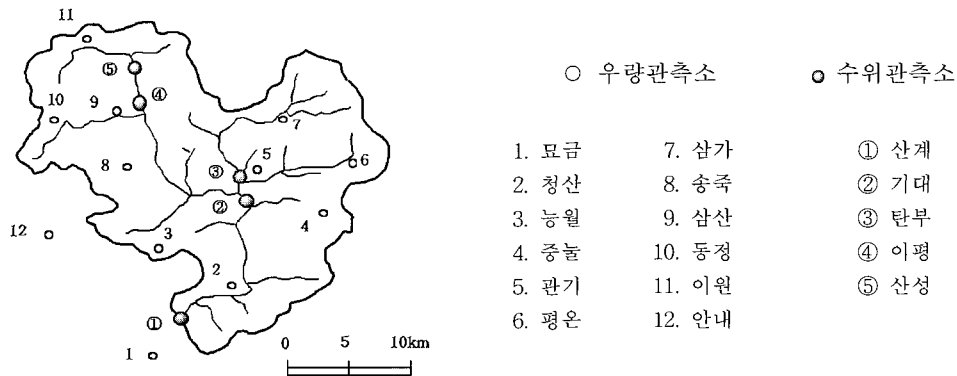


그림 2. 대상유역의 수위관측소와 우량관측소

이용하여 유역의 수문학적 특성인자를 추출하는 HEC-GeoHMS모형을 구축하기 위해 1 : 25,000의 수치지도를 이용하였다. 그림 3은 대상유역의 DEM을 이용하여 대상유역의 자료를 조합하는 자료처리의 결과로 대상유역의 연속적인 기복의 변화를 수치적으로 표현하는 수치고도를 나타내고 있다.

지형처리단계에서는 유로길이, 유로경사, 유역 경계 등 유역의 각종 수문학적 특성 정보를 산정하였다. 하천이 형성되는 과정은 DEM 데이터가 주위의 고도값보다 낮은 곳으로 물이 유하하게 되며, 유하하지 않는 sink는 일관적인 흐름방향이 산정될 때까지 반복 연산을 통하여 이러한 sink를 채워서 자동으로 보정하는 과

정을 통해 고도값에 대한 보정이 이루어지면 대상유역의 고도차에 의해 흐름이 그림 4와 같이 생성한다. 발생한 흐름방향을 8개의 방위로 나타내어 흐름의 방향을 결정하게 된다. 흐름방향으로부터 상류 유역에서 유입되는 셀들을 누적하여 흐름이 합류되는 형태를 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림 6은 흐름방향과 흐름누적으로 형성된 하천망을 이용하여 각 하천 요소에 대한 유역을 형성한 후 HEC-GeoHMS에서 제공되는 유역자료처리과정을 거쳐 대상유역을 5개의 소유역으로 분류한 형태를 나타내고 있다. 유효강우량 산정은 그림 7과 8의 정밀토양도와 토지이용도를 이용하여 각 격자크기별 SCS CN계수를 산정하였다.

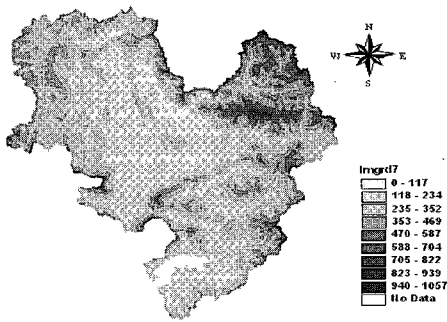


그림 3. 대상유역의 DEM

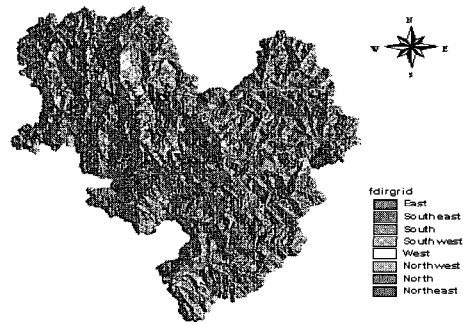


그림 4. 흐름방향도

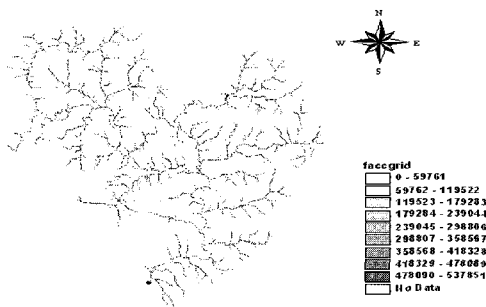


그림 5. 흐름누적도



그림 6. 대상유역의 분할

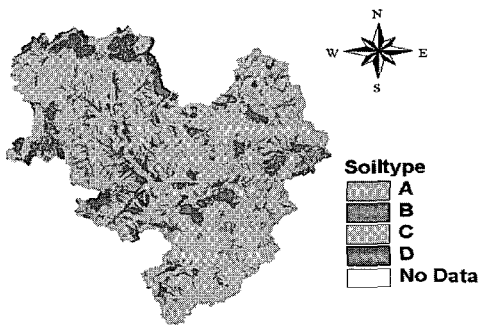


그림 7. 토양도

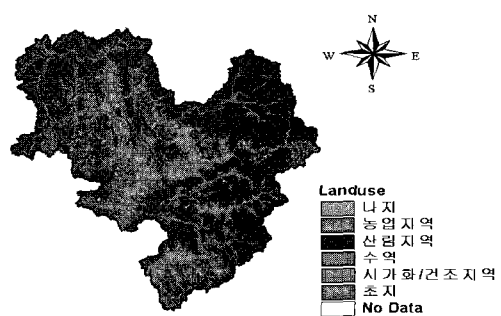


그림 8. 토지이용도

3.3 ModClark 매개변수 산정

ModClark 방법의 적용을 위해 필요한 유역의 격자 자료는 각각의 격자면적, 해당 격자로부터 유역출구까지의 이동거리, 격자의 좌표 및 유출곡선지수이다. 유역 출구까지의 도달시간은 각각의 격자마다 고유하게 설명되며, 해당격자로부터 유역출구까지의 이동거리에 비례한다. HEC-GeoHMS로부터 계산된 자료를 이용하여 도달시간은 kirpich 경험식, 유역저류상수는 Sobol 경험식을 초기치로 사용하였으며 이 두 변수에 대해서 HMS모형내의 최적화 기법을 이용하여 결정하였다.

본 연구에서는 Grid-cell 파일을 생성하기 위해 투영 체계는 SHG (Standard Hydrologic Grid)방법을 사용하였다. 격자 크기에 따른 공간분포된 강우량의 차이와 이 자료를 이용하여 유역평균강우량 및 유출해석 결과를 토대로 유역의 적정 격자 해상도를 제안하기 위해 격자크기는 각각 10000m, 5000m, 2000m, 1000m를 사용하였다. 그림 9는 대상유역을 격자에 따라 분리한 모습이다.

표 1은 Grid-cell 파일에서 생성되는 인자들을 나타내고 있으며, 표 2는 격자 셀 크기 2000m인 경우에서 생성된 매개변수이다.

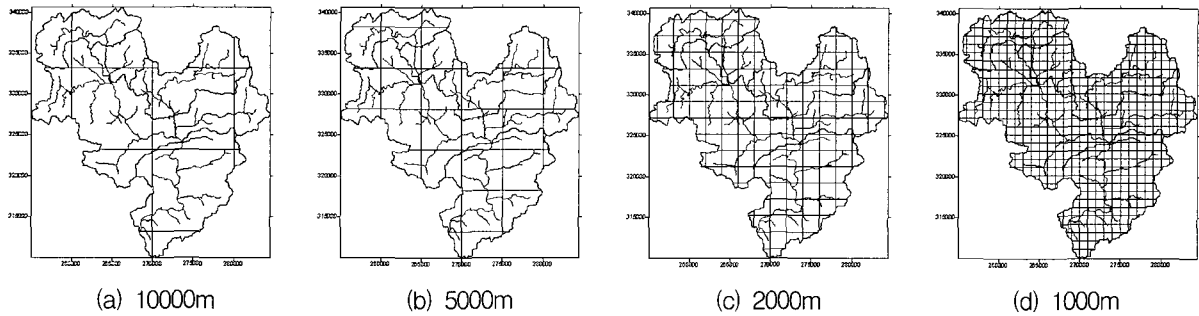


그림 9. 격자크기에 따른 유역 분할

표 1. 매개변수의 정의 및 생성인자

매개변수	정의
X 좌표(X Coord)	격자의 좌측하단부분의 X 좌표
Y 좌표(Y Coord)	격자의 좌측하단부분의 Y 좌표
이동거리(Travel Length)	유역출구로부터 이동거리가 가장 긴 격자의 유역출구까지의 이동거리
면적(Area)	소유역에 포함된 격자의 유역면적
유출곡선지수(SCS CN)	격자의 유출곡선지수

표 2. Grid-cell 매개변수(격자크기 2000m)

소유역	X 좌표	Y 좌표	이동거리	면적	유출곡선지수	소유역	X 좌표	Y 좌표	이동거리	면적	유출곡선지수
산성	127	166	16.15	0.11	74	기대	127	162	32.30	0.31	71
	127	166	15.69	0.08	75		127	163	32.02	0.93	69
	128	167	14.17	4.00	75		128	166	28.62	0.09	73
	128	168	12.52	2.75	69		129	162	28.84	0.02	85
	...	...	...	...	...		129	162	28.69	0.47	77
이평	131	165	1.12	0.13	48	산계	129	163	27.36	3.95	73
	131	166	3.67	1.79	47		129	167	23.63	0.92	37
	133	165	3.60	2.63	48		...	...	...	...	...
	133	166	3.84	4.00	57		133	156	2.37	0.49	54
	...	...	...	...	...		133	157	3.05	0.33	43
탄부	133	164	7.63	0.70	42	...	134	154	4.49	0.61	43
	133	165	8.04	0.60	52		134	155	2.57	2.24	54
	134	162	6.43	0.04	34		134	156	1.97	3.78	73
	135	165	7.90	3.05	71		134	159	16.84	3.22	48

4. 유출해석

4.1 크리깅 기법을 이용한 강우공간분포

ModClark 모형의 강우입력자료의 생성은 크리깅 기법을 이용하여 실제 발생했던 지점강우를 이용하여 공간적으로 분포시켰으며, 표 3에 적용된 강우사상을 나타내었다. 공간분포 강우의 추정에 앞서 선정된 강우사상에 대한 시간적, 공간적 변동성을 분석하기 위해 관측소별, 사상별 평균, 분산 그리고 변동계수를 산정하여 표 4에 나타내었다. 표 4에서 보듯이 1999.6.23일 강우사상과 2000.6.26일 강우사상이 각각 최소, 최대의 공간적 변동성을 보이고 있다.

선정된 강우사상에 대한 각 시간대별 강우량을 이용하여 각 격자크기별로 크리깅 기법을 수행하였으며 그 결과의 일부를 그림 10과 11에 나타내었다.

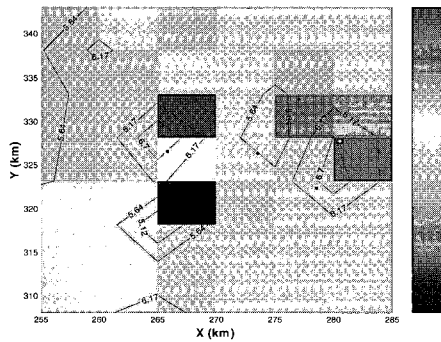
크리깅 기법의 적용결과는 크리깅을 통하여 예측된 자료만을 이용하여 본래의 자료값을 다시 예측함으로써 크리깅 방법의 타당성을 검증하는 교차검증(cross validation)방법을 이용하였으며 통계지표는 표 5에 나타내었다. 표 6에서와 같이 ME, MSE, MSSE 및 MRE의 통계지표가 격자크기가 작아 질수록 좋은 결과를 나타내었다. 본 연구에서 채택된 격자크기 중 1000m의 격자크기가 좋은 결과를 나타내었고, 실제 지점 모의 자료에 근사한 값을 가지고 공간적으로 분포됨을 알 수 있었다.

표 3. 적용사상의 개요

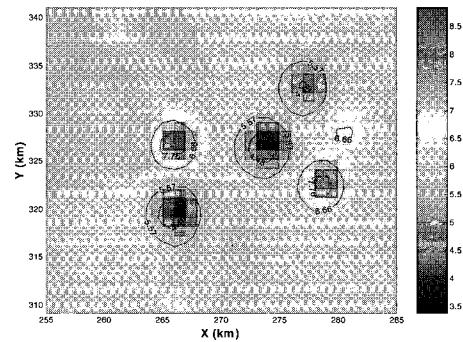
강우일시	강우지속기간(hr)	최대강우량(mm/hr)
1999.6.23 07:00 ~ 6.24 12:00	30	20.5 (No.11)
2000.6.26 11:00 ~ 6.28 03:00	41	40.0 (No.11)
2000.8.24 01:00 ~ 8.27 13:00	85	24.0 (No.9)

표 4. 적용사상의 통계분석결과

	1999.6.23			2000.6.26			2000.8.24		
	평균	분산	변동계수	평균	분산	변동계수	평균	분산	변동계수
No.1	2.90	14.89	1.33	2.43	18.01	1.75	2.20	8.45	1.32
No.2	3.08	16.31	1.31	2.56	20.18	1.75	1.88	7.95	1.50
No.3	2.93	12.69	1.21	3.37	24.34	1.47	2.78	12.66	1.28
No.4	2.80	14.34	1.35	3.00	33.45	1.93	1.96	6.86	1.33
No.5	2.77	12.50	1.28	2.79	26.02	1.83	2.31	8.40	1.25
No.6	3.18	17.96	1.33	3.54	36.20	1.70	2.05	7.37	1.33
No.7	3.58	21.59	1.30	3.17	24.03	1.55	2.72	13.44	1.35
No.8	3.88	24.18	1.27	4.67	76.46	1.87	4.70	39.17	1.33
No.9	3.77	24.60	1.32	2.49	20.62	1.83	2.96	17.29	1.41
No.10	3.93	28.00	1.35	1.80	19.02	2.42	2.27	2.55	0.70
No.11	4.25	34.88	1.39	2.39	21.01	1.92	3.05	14.00	1.31
No.12	3.72	20.89	1.23	3.37	24.34	1.47	3.07	17.66	1.37

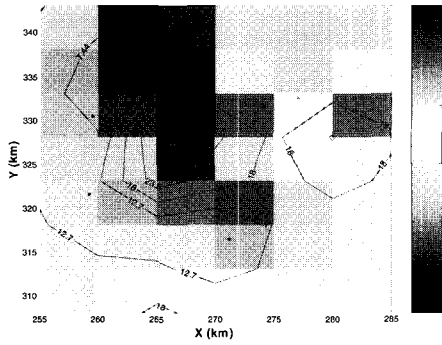


(a) 격자크기 5000m

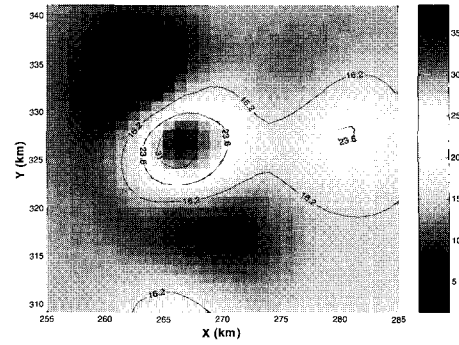


(b) 격자크기 1000m

그림 10. 크리깅기법 적용 결과(1999.6.23 14:00)



(a) 격자크기 5000m



(b) 격자크기 1000m

그림 11. 크리깅기법 적용 결과(2000.6.27 02:00)

표 5. 교차검증을 위한 통계분석방법

구 분	통계치
Mean error (ME)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i) - z(x_i)^*$
Mean squared error (MSE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x_i)^*)^2$
Mean standardized square error(MSSE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(z(x_i) - z(x_i)^*)^2}{\sigma_i^2}$
Mean reduced errors(MRE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z(x_i) - z(x_i)^*}{\sqrt{\sigma_i^2}}$

표 6. 교차검증 결과

강우사상	격자크기	ME	MSE	MSSE	MRE
1999.6.23	10000m	0.080	0.071	0.015	0.021
	5000m	-0.005	0.010	0.002	0.005
	2000m	0.018	0.008	0.002	0.012
	1000m	0.005	0.005	0.003	-0.002
2000.6.26	10000m	-0.041	0.054	0.008	0.011
	5000m	0.037	0.100	0.017	0.003
	2000m	-0.028	0.014	0.011	-0.034
	1000m	-0.013	0.004	0.010	-0.016
2000.8.24	10000m	0.163	0.350	0.046	0.048
	5000m	0.067	0.176	0.462	-0.091
	2000m	0.003	0.008	0.012	-0.015
	1000m	0.007	0.004	0.010	0.013

격자크기 1000m인 경우에는 셀 격자가 33×31(1023개), 2000m인 경우에는 17×17(289개)의 격자로 구분되어진다. HEC-HMS모형에서의 격자강우의 입력형태는 HEC-DSS 파일형태를 요구하므로 그림 12와 같이 각 시간대별로 분포된 격자강우를 DSS 파일로 변환후 HecDSSVue 프로그램을 이용하여 모의 강우기간에 대한 강우자료를 완성하였다.

4.2 유역평균 강우량 비교

공간적으로 분포된 강우량자료를 이용하여 유역평균 강우량을 산정한 결과를 Thiessen 다각형법에 의한 결과와 비교하여 그림 13~15에 나타내었다. 그림에서 보듯이 선택된 격자 크기에 따른 시간별 유역평균강우량의 그래프는 비슷한 경향으로 나타났으나 정량적인 면

File Name: D:\02-rainfall2000\MC 2000\ds2120062824.dss
 Pathnames Shown: 62 Pathnames Selected: 0 Pathnames in File: 62 File Size: 82-KB

Number	A part	B part	C part	D part/range	E part	F part
53	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:1800	28JUN2000:1800	KRIGING
54	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:1800	28JUN2000:1700	KRIGING
55	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:1700	28JUN2000:1800	KRIGING
56	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:1800	28JUN2000:1900	KRIGING
57	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:1900	28JUN2000:2000	KRIGING
58	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:2000	28JUN2000:2100	KRIGING
59	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:2100	28JUN2000:2200	KRIGING
60	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:2200	28JUN2000:2300	KRIGING
61	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:2300	28JUN2000:2400	KRIGING
62	MC2000	BASIN	PRRECIP	28JUN2000:0000	28JUN2000:0100	KRIGING

그림 12. 공간분포된 강우자료의 DSS file

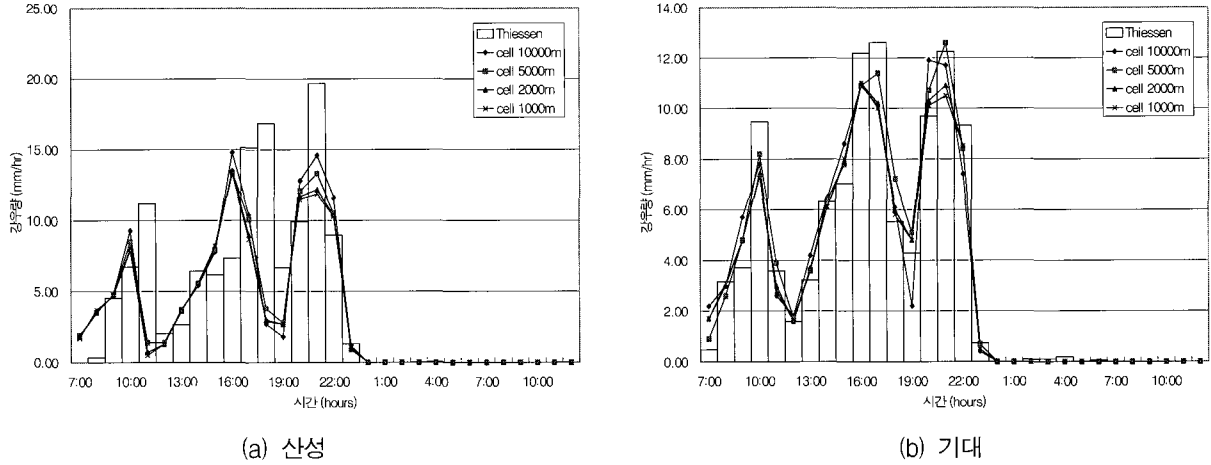


그림 13. 유역별 평균강우량(1993.9.16)

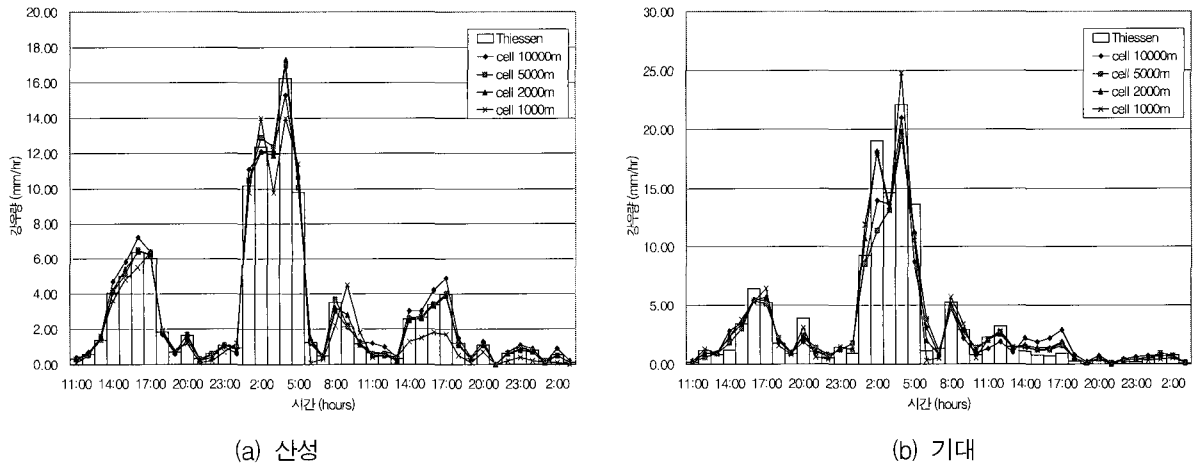


그림 14. 유역별 평균강우량(2000.6.23)

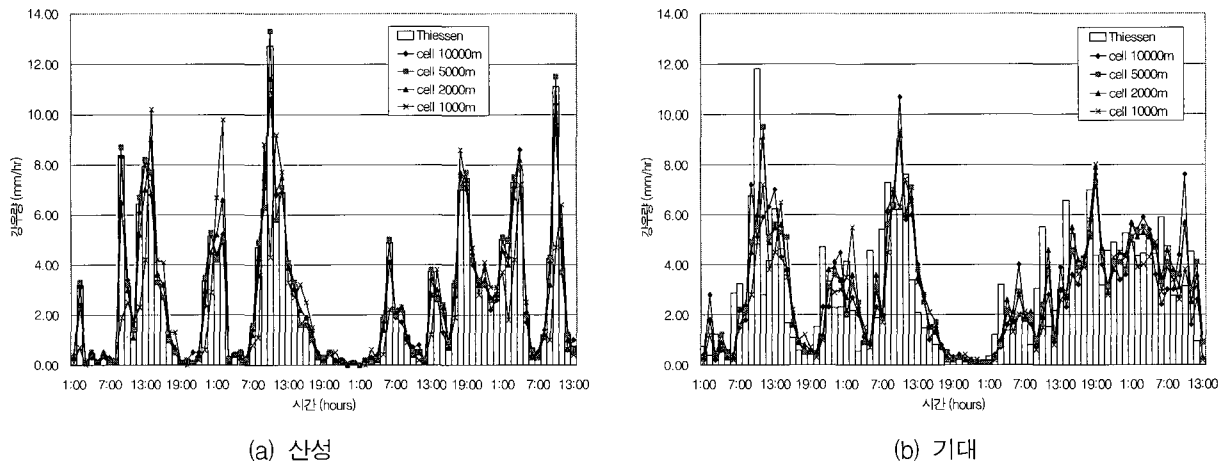


그림 15. 유역별 평균강우량(2000.8.24)

에서는 차이를 보이고 있다. 격자크기에 따른 유역평균 강우량의 비교를 위해 표 7에서 보듯이 격자크기별 유역평균강우량의 총합은 3개 사상 대부분 격자크기가 작아질수록 적은 값을 나타내고 있다. 또한 상대적인 산포의 측정에 이용되는 변동계수를 이용하여 Thiessen 다각형법과 비교해보면 크리깅을 이용하여 공간적으로 분포된 자료를 이용한 방법이 적은 변동계수 값을 보이고 있으며 각 격자크기별 변동계수는 전반적으로 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 시간적 공간적 변동이 있는 2000년 사상에서 1000m의 격자크기는 다른 격자크기보다 강우량값의 차이가 많이 발생하였다.

4.3 Modclark 단위도법에 따른 유출해석

유출해석을 실시하기 위해 강우입력자료는 크리깅 기법에 의해 격자크기별로 공간적으로 분포된 강우를

사용하였으며, HEC-GeoHMS 모형에 의해 산정된 유역의 격자자료인 격자면적, 각 격자로부터 유역출구까지의 이동거리, 격자의 좌표 및 유출곡선지수를 이용하여 HEC-HMS모형을 구성하였다. 유역의 하도홍수추적 방법에는 유입수문곡선과 하도의 물리적 특성을 기초로 수문곡선의 확산을 고려하는 Muskingum-Cunge방법을 사용하였다. 또한 기저유출로 분리하는 방법에는 지수 함수적 감소방법을 채택하였다. 모의된 홍수사상은 다음 표 8과 같다.

그림 16~18은 소유역별로 적용된 유출해석 결과를 나타낸 것이고, 표 9에 격자크기에 따른 침투유량, 침투 시간, 총유출량에 대한 유출모의 결과를 나타내었다. 모형에 의한 모의 결과와 실측자료를 결정계수(R^2), 상관 계수(CC), 평균제곱오차(RMSE)의 통계적 검증방법을 통하여 유출모의 결과를 분석하여 표 10에 나타내었다.

표 7. 유역평균강우량의 통계치

강우일시	방 법	산 성		이 평		탄 부		기 대		산 계	
		합계	변동계수	합계	변동계수	합계	변동계수	합계	변동계수	합계	변동계수
1999.6.23	10000m	108.2	1.35	101.7	1.29	89.8	1.22	103.1	1.20	107.2	1.29
	5000m	105.5	1.28	98.8	1.20	91.5	1.17	106.9	1.19	113.0	1.24
	2000m	101.0	1.29	94.3	1.20	85.7	1.17	101.4	1.17	106.8	1.21
	1000m	99.6	1.29	93.0	1.21	84.6	1.17	100.2	1.17	105.4	1.21
	Thiessen	126.1	1.35	113.6	1.31	102.3	1.24	105.7	1.23	88.5	1.13
2000.6.26	10000m	126.8	1.27	126.7	1.39	125.4	1.53	125.1	1.43	120.4	1.31
	5000m	123.2	1.35	125.4	1.43	124.6	1.55	120.5	1.39	126.1	1.31
	2000m	121.8	1.36	120.3	1.46	121.9	1.59	130.0	1.49	127.9	1.36
	1000m	106.4	1.49	111.0	1.67	129.9	1.45	133.2	1.62	114.0	1.38
	Thiessen	95.8	1.76	101.8	1.77	125.1	1.53	132.4	1.61	113.3	1.71
2000.8.24	10000m	224.6	1.44	232.2	1.39	228.9	1.18	243.8	1.17	258.4	1.24
	5000m	229.0	1.47	247.6	1.33	218.5	1.17	249.7	1.13	249.9	1.34
	2000m	218.6	1.44	217.8	1.50	189.6	1.32	253.3	1.14	240.8	1.32
	1000m	190.9	1.56	162.7	1.69	229.7	1.33	231.4	1.13	211.1	1.24
	Thiessen	252.3	1.62	251.8	1.80	228.7	1.48	254.4	1.16	169.6	1.52

표 8. 수위표 지점별 홍수사상

지 점	홍수기간	침투유량(m ³ /sec)	유출체적(m ³)	침투발생시간
기대(No.2)	1999. 6. 23. 07:00 ~ 6. 26. 24:00	513.45	44637	6. 23 24:00
	2000. 6. 26. 11:00 ~ 6. 28. 24:00	282.38	16402	6. 27 07:00
	2000. 8. 24. 01:00 ~ 8. 29. 06:00	324.46	48655	8. 27 13:00
탄부(No.3)	1999. 6. 23. 07:00 ~ 6. 26. 24:00	35.77	3361	6. 23 23:00
	2000. 6. 26. 11:00 ~ 6. 28. 24:00	33.22	2200	6. 27 07:00
	2000. 8. 24. 01:00 ~ 8. 29. 06:00	43.81	6046	8. 26 23:00
이평(No.4)	1999. 6. 23. 07:00 ~ 6. 26. 24:00	115.83	6373	6. 23 22:00
	2000. 6. 26. 11:00 ~ 6. 28. 24:00	69.64	5595	6. 27 07:00
	2000. 8. 24. 01:00 ~ 8. 29. 06:00	117.91	24830	8. 27 13:00
산성(No.5)	1999. 6. 23. 07:00 ~ 6. 26. 24:00	54.41	4592	6. 23 22:00
	2000. 6. 26. 11:00 ~ 6. 28. 24:00	40.75	3874	6. 27 07:00
	2000. 8. 24. 01:00 ~ 8. 29. 06:00	56.21	12503	8. 25 15:00

표 9. 유출 모의 결과

지점	Duration	침투유량(m ³ /sec)				유출체적(m ³)				침투발생시간			
		1000m	2000m	5000m	10000m	1000m	2000m	5000m	10000m	1000m	2000m	5000m	10000m
기대	1999. 6. 23	505.66	516.53	560.07	537.14	41373	41748	43889	43404	6.23 24:00			
	2000. 6. 26	283.03	255.20	221.33	226.67	16237	15907	14636	15232	6.27 07:00		6.27 08:00	
	2000. 8. 24	280.74	307.23	318.89	313.48	45689	49482	51374	50153	8.27 11:00			09:00
탄부	1999. 6. 23	34.957	35.36	38.550	37.867	2652.5	2658.8	2763.2	2736.9	6.23 23:00			
	2000. 6. 26	32.365	32.708	29.882	32.352	2316.2	2089.2	2064.9	2073.9	6.27 07:00			
	2000. 8. 24	56.372	41.595	49.877	51.727	8617.3	6637.0	8105.5	8668.8	11:00	06:00	07:00	02:00
이평	1999. 6. 23	107.28	109.21	118.25	123.37	6298.4	6378.8	7320.5	7509.1	6.23 23:00			
	2000. 6. 26	59.498	64.459	61.249	59.608	4676.4	5163.1	5220.6	5351.5	6.27 07:00			
	2000. 8. 24	63.848	82.02	89.04	86.578	12224	14579	15727	16024	8.27 05:00			
산성	1999. 6. 23	57.402	58.458	64.271	66.908	4156.5	4200	5012.6	5123.7	6.23 23:00			
	2000. 6. 26	45.810	51.168	49.925	49.243	3160.3	3568.7	3591.5	3722.7	6.27 06:00			
	2000. 8. 24	42.805	51.20	54.178	52.588	7494	8718.3	9184.0	9002.4	8.27 04:00			

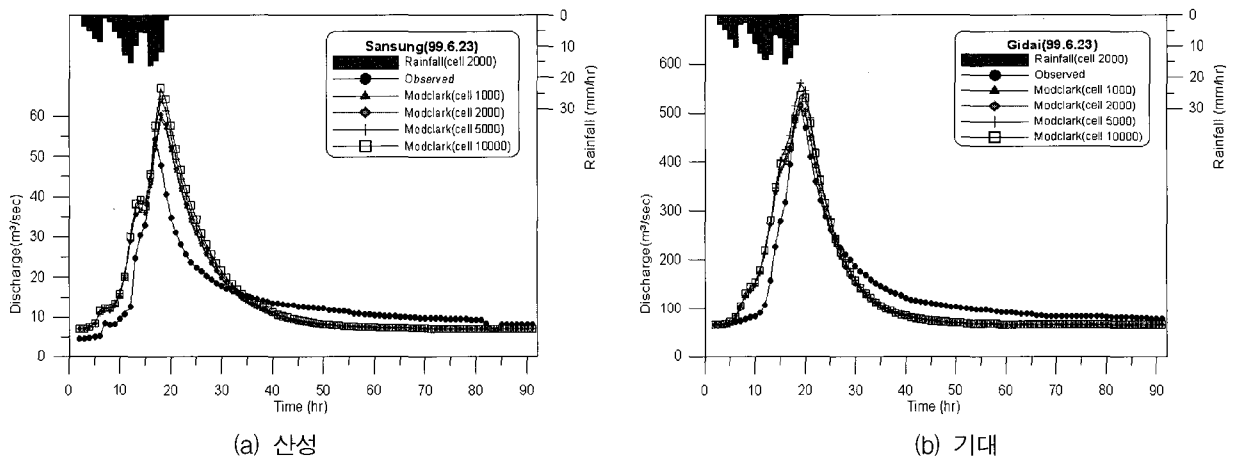


그림 16. 유출모의 결과(1999. 6. 23 사상)

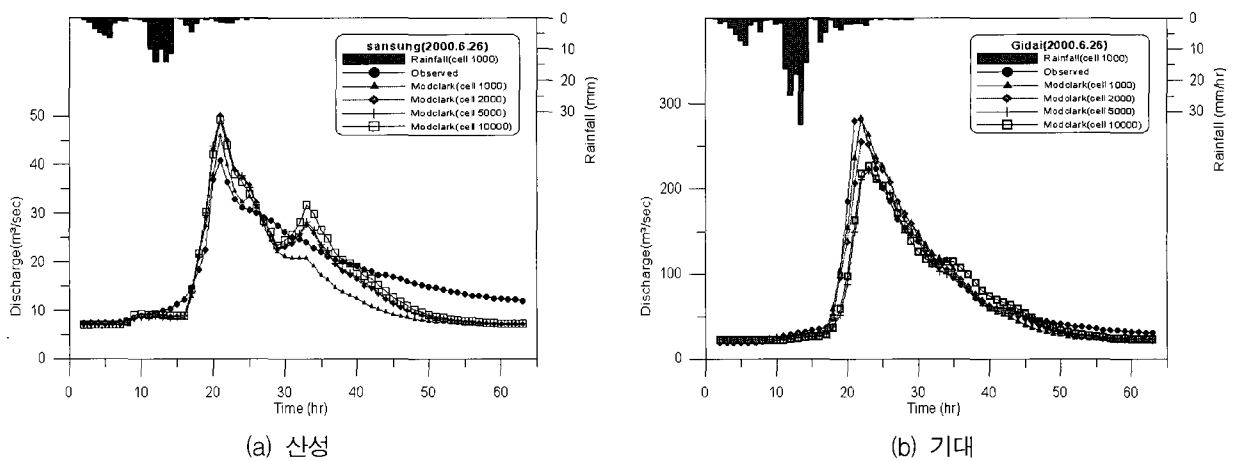
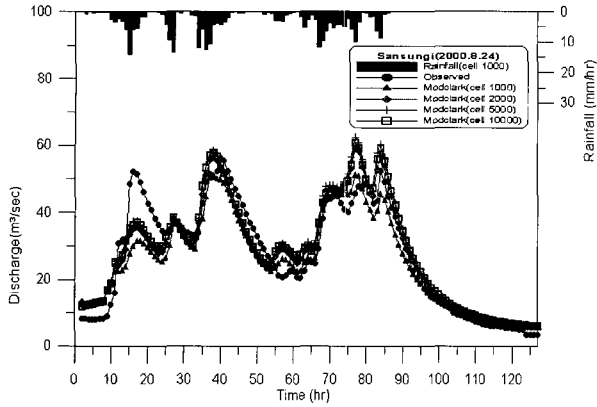
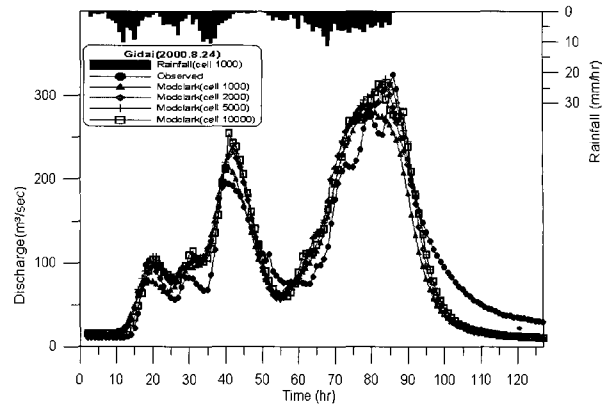


그림 17. 유출모의 결과(2000. 6. 26 사상)



(a) 산성



(b) 기대

그림 18. 유출모의 결과(2000. 8. 24 사상)

표 10. 홍수사상별 통계분석결과

지점	격자크기	1999.6.23 사상			2000.6.26 사상			2000.8.24 사상		
		CC	R ²	RMSE	CC	R ²	RMSE	CC	R ²	RMSE
산성	10000m	0.93	0.46	6.94	0.95	0.75	4.12	0.94	0.88	5.54
	5000m	0.94	0.55	6.32	0.96	0.72	4.33	0.94	0.86	5.96
	2000m	0.94	0.65	5.56	0.96	0.72	4.30	0.94	0.88	5.47
	1000m	0.93	0.67	5.37	0.94	0.65	4.12	0.94	0.86	8.33
이 평	10000m	0.94	0.73	11.25	0.95	0.89	4.61	0.82	0.67	15.40
	5000m	0.94	0.78	10.19	0.96	0.90	4.35	0.82	0.67	15.35
	2000m	0.94	0.82	9.12	0.96	0.89	4.56	0.82	0.67	15.63
	1000m	0.94	0.83	8.88	0.96	0.83	8.01	0.77	0.50	26.82
탄 부	10000m	0.99	0.85	2.53	0.96	0.79	1.96	0.76	0.64	11.53
	5000m	0.99	0.85	2.56	0.97	0.94	1.78	0.76	0.64	10.52
	2000m	0.99	0.85	2.57	0.97	0.93	1.68	0.76	0.64	7.90
	1000m	0.99	0.85	2.58	0.91	0.91	4.28	0.73	0.61	16.30
기대	10000m	0.95	0.83	40.63	0.88	0.95	22.89	0.95	0.87	29.01
	5000m	0.96	0.82	41.84	0.87	0.94	24.64	0.96	0.86	30.20
	2000m	0.95	0.85	38.16	0.96	0.98	14.09	0.95	0.85	30.59
	1000m	0.95	0.86	37.50	0.97	0.99	16.28	0.94	0.86	42.31

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 공간적으로 분포된 강우자료를 격자크기별로 크리깅 기법을 이용하여 산정하였으며, HEC-GeoHMS모형을 이용하여 대상유역의 지형자료, 수문매개변수를 공간적으로 분포시켰다. 유출해석은 공간분포된 강우의 적용을 용이하게 하기 위하여 상대적으로 단순한 준 분포형 접근방법인 Modified Clark 모형을 적용하였다. 격자크기에 따른 유출해석을 수행한 결과를 토대로 지점강우량을 공간분포 시킬 경우의 적정 격자 해상도 및 공간분포된 수문자료의 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실측된 지점강우량을 이용하여 크리깅 기법을 통해 각 격자크기별로 공간분포 시킨 결과를 교차검정을 통해 분석하였다. 분석 결과 격자크기 1000m인 경우가 통계치인 ME, MSE, MSSE, MRE 모두 좋은 결과를 나타내었고 실제 지점 모의 자료에 근사한 값을 가지고 공간적으로 분포됨을 알 수 있었다.
2. 격자크기별로 공간분포시킨 결과를 토대로 소유역별 유역평균강우량을 산정하였다. 각 크기별로 산정된 강우량의 패턴은 어느 정도 일치성을 보이거나 양적인 측면에서는 차이를 보이고 있다. 격자크기가 작아질수록 총강우량은 작아지는 경향을 나타

냈으며, Thiessen 다각형 법과는 그 차이가 큰 것으로 나타났다. 시간적 공간적 변동이 있는 2000년 사상에서는 1000m의 격자크기와 다른 격자사이의 강우량값의 차이가 크게 발생했으며 이것은 유출특성에도 영향을 미치고 있다.

3. HEC-GeoHMS 모형을 이용하여 각 격자별 매개변수 값을 산정하여 ModClark 모형을 적용한 결과 침투유출량과 침투시간은 비교적 관측치와 부합됨을 확인하였다. 또한 크리깅 공간분포 결과와 유출모의 결과를 통해 ModClark 모형 적용시 2000m의 격자크기가 양호한 결과를 나타냈다.

참 고 문 헌

고덕구, 박노혁 (1998). "GIS에 의한 강우의 시공간 분석", **한국수자원학회 학술발표논문집**, pp. 690-695.

김홍태, 신현석, 박용운 (2003). "크리깅 기법을 이용한 유역평균강우량 산정 방법에 관한 연구-낙동강 유역을 중심으로-", **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 2148-2152.

윤용남, 김중훈, 유철상, 김상단 (2002). "공간분포된 강우를 사용한 유출 매개변수 추정 및 강우오차가 유출계산에 미치는 영향분석", **한국수자원학회논문집**, 제35권, 제1호, pp. 1-12.

최계운, 이희승, 안상진 (1992). "분포형 모델을 이용한 유역내 이동강우의 유출해석", **한국수자원학회논문집**, 제 25권, 제 1호, pp. 101-109.

Campling, P., Gobin, A., and Feyen, J. (2001). "Temporal and spatial rainfall analysis across a humid tropical catchment.", *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 359-375.

Chua, S.H., Bras, R.L. (1982). "Optimal Estimators of

Mean Areal Precipitation in Regions of Orographic Influence.", *Journal of Hydrology*, Vol. 57, pp. 23-48.

Cheng, K.S., Chiang, W., Cheng, Y.B., and Yeh, H.C. (2003). "Effect of spatial variation characteristics on contouring of design storm depth.", *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 1755-1769.

Emerson, C.H. (2003). Evaluation of the Additive Effects of Stormwater Detention Basins of the Watershed. Univ. of Drexel, Philadelphia.

Hydrologic Engineering Center(2000). HEC-HMS : Hydrologic Modeling System, User's Manual. *U.S. Army Corps of Engineers*, Davis, CA.

Hydrologic Engineering Center(2003). HEC-GeoHMS : Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual. *U.S. Army Corps of Engineers*, Davis, CA.

Johnson, D., Smith, M., Koren, V., and Finnerty, B. (1999). "Comparing Mean Areal Precipitation Estimates from NEXRAD and Rain Gauge Networks.", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, pp. 117-124.

Kull, D. W., and Feldman, A. D. (1998). "Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff.", *Journal of Hydrologic Engineers*. ASCE, Vol. 3, No. 1, pp. 9-19.

Sun, S., Mein, R.G., Keenan, T.D., and Elliott, J.F. (2000). "Flood Estimation using Radar and Raingage Data.", *Journal of Hydrology*, Vol. 239, pp. 4~18.

(논문번호:04-110/접수:2004.12.08/심사완료:2005.02.28)