

강우 자료 형태에 따른 분포형 유출 모형의 적용성 평가

최용준 · 김주철^{*,†}

충남대학교 토목공학과
*한국수자원공사 수자원연구원

The Assessment of Application of the Distributed Runoff Model in accordance with Rainfall Data Form

Yong Joon Choi · Joo Cheol Kim^{*,†}

Department of Civil Engrg., Chungnam National University

*Korea Institute of Water and Environment

(Received 10 August 2009, Revised 8 February 2010, Accepted 18 February 2010)

Abstract

The point rainfall measurements need to be converted to the areal rainfall by means of mean areal precipitation (MAP) estimation methods. And it is not appropriate to evaluate the areal rainfall with constant drift because of the geomorphological influences to rainfall field. Non-stationarity should be applied to the estimation of the areal rainfall, therefore, to consider these effects. Kriging methods with special functional would be a suitable tool in this case. Generalized covariance Kriging method is the most developed one among different Kriging methods. From this point of view this study performs the analysis of its applicability to distributed runoff model. For these purpose, distributed rainfall was created by Thiessen and Kriging method. And distributed rainfall of each method was applied into HyGIS-GRM. The result of applying, Runoff was different in the rainfall data form. Therefore, To apply Kriging method with physical meaning is that it is the useful method as distributed rainfall-runoff model.

keywords : Generalized covariance, HyGIS-GRM, Kriging method, Spatial correlation

1. 서론

일반적으로 강우로부터 발생된 유역유출은 치수측면에서는 홍수유출의 형태로 나타나게 되고 이수측면에서는 침투나 증발산의 손실과정을 거친 후 각종 용수로서 이용되어진다. 따라서 우리가 궁극적으로 수문량을 분석하기 위해서는 지면에 내린 강우로 인한 유출량이나 침투량, 증발산량 등을 정확히 산정해야 하지만 무엇보다도 대상유역에서의 강우량에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다. 그러나 우량계에 의하여 측정된 우량은 유역의 규모에 독립적인 지점우량이기 때문에 유역 전반에 대한 면적우량을 얻기 위해서는 강우량의 지역적 변화를 반영할 수 있는 적절한 우량관측망의 설치운영이 필요하며, 그로부터 타당한 면적우량산정기법에 의한 환산이 필요하게 된다. 이렇게 강우량의 공간적 불연속분포를 연속화 하는 방법은 티센기법, 역거리 비례법, 역거리 제곱 비례법 등이 일반적으로 적용될 수 있다. 그러나 이러한 방법으로 결정된 연속분포도는 개별적인 관측지들 사이의 공간적인 상관관계가 전혀 고려되지 않은 결과이다. 이를 개선하기 위해서는 관측된 강우량 사

이의 공간적 상관성이 고려되어야 한다. 이러한 경우 적용할 수 있는 기법이 Kriging기법이다. Kriging기법은 광석의 함량평가 문제에 최초로 이 이론을 적용한 Krige의 이름을 따서 명명된 공간 내삽기법의 하나로 수문학 분야에서 Delfiner and Delhomm(1973)은 정상성 평균(stationary drift)의 가정 하에서 총강우량의 평가에 최초로 적용한 바 있다. 면적 강우량을 평가하기 위한 연구로는 Rodriguez-Iturbe and Mejia(1974), Bras and Rodriguez-Iturbe(1976a, 1976b), Lenton(1977)등의 성과를 들 수 있다. Gambolati and Volpi(1979)는 수문학에서 Kriging 기법의 결정론적 해석의 개념을 연구하였으며, Villeneuve 등(1979)은 Stream Sampling Network설계에 Kriging을 적용하였다. Hughes and Lettenmaiere(1981)는 관측망 설계와 강우의 추정을 위한 Kriging기법의 자료에 대한 연구를 하였으며, Chirlin and Wood(1982)는 Kriging기법과 정상상태 추정의 관계에 관해서 연구하였다. Tabios and Salas(1985)는 강우의 공간 변화에 의한 추정기법들의 비교에 관한 연구를 통하여 Kriging기법의 우수성을 확인하였다. Lebel 등(1987)은 면적평균 강우량 추정에 대한 기법별 정확성에 관해 연구하였으며 Abteu 등(1993)은 월강우량의 공간분석을 통해 Kriging기법의 우수성을 증명하였다. Desbarats 등(2002)은 수치고도모형을 이용하여 지하수위 산정에 Kriging기법을

[†] To whom correspondence should be addressed.

kjoocheol@hanmail.net

적용한 바 있다. 또한 Rivest 등(2008)은 여러 가지 Kriging 기법을 이용한 수리학적 수두의 공간분포를 실측치와 비교한 결과 drift를 이용한 Kriging기법의 우수성을 증명하였다. Basistha 등(2008)은 Kriging기법과 타기법과의 강우 결측 보간법에 관해 비교 연구를 수행하였으며, Bargaoui and Chebbi(2009)는 기존의 강우기간과 최대강우강도의 영향을 고려한 Kriging기법과 관측소의 위치, 강우기간 및 강우강도의 영향을 고려한 Kriging기법과의 비교 연구를 수행하여 강우 관측망의 구성에 후자의 기법의 우수성을 증명하였다.

국내에서는 이재형 등(1989)은 인접계측 지점의 상관성을 이용하여 결측지점의 자료를 보완 후 다중상관 기법에 의하여 총강우량의 호우곡면을 구성하였으며, 한국건설기술연구원(1991)은 여러 가지 면적강우 산정기법에 대한 면적강우량을 구해 상대비교를 하였다. 이상일(1993)은 Kriging을 이용하여 면적 평균강우량을 추정함에 있어 Kriging 방식에 나타나는 2중 및 4중 수치적분에 필요한 점들을 대상 지역의 경계만 주어지면 임의로 추출하여 사용하는 방법을 개발하였다. 유철상 등(2002)은 수정 강우의 추정오차와 Clark 방법에 의한 유출계산에 미치는 영향에 관해 연구하였으며, 이재형 등(2002)은 강우관측망의 최적설계를 위한 목적함수의 오차항의 최소화에 Kriging기법을 적용하였다. 최선영 등(2003)은 Kriging기법을 이용하여 연안지역의 해수침투 분포에 관한 연구를 수행하였다. 윤강훈 등(2004)은 Kriging기법을 이용하여 낙동강 유역 홍수강우의 공간해석에 관해 연구하였다. 조홍래와 정종철(2006)은 강우자료에 대한 여러 가지 공간기법에 대한 비교연구를 통해 Kriging 기법의 우수성을 확인하였으며, 경민수 등(2006)은 QUAL2E 모형의 모의 결과를 바탕으로 Kriging기법에 의해 형성된 수질 측정망을 제시하였다. 또한 박노옥과 장동호(2008)는 수치표고모델과 다변량 Kriging기법을 이용한 기온 및 강수 분포도를 작성한 바 있다. 이상에서 보여지듯이 Kriging 기법은 주로 총강우량 평가, 결측치 보완 및 강우관측망 설계에 사용되어 왔으며 최근에 와서야 유출 모형에의 적용에 관한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 유출 모형은 강우의 입력자료의 형태에 따라 크게 면적평균강우량 모형과 분포형 강우 모형으로 나눌 수 있다. 기존에는 전자의 모형이 많이 사용되었으나 최근 컴퓨터 계산능력 및 지리정보체계(GIS)의 발달로 후자의 모형에 관심이 집중되고 있다. 한국건설기술연구원에서 개발된 HyGIS-GRM은 분포형 강우자료와 면적평균강우량을 선택하여 유출을 모의할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 HyGIS-GRM모형을 이용하여 강우 자료의 입력형태에 따른 유출결과를 비교 검토 하여 범용 공분산 Kriging기법의 분포형 유출모형에의 적용성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1. Kriging기법

공간적인 현상을 설명할 수 있는 강우량은 인근지점에서

의 상황이 공간적 의존성이나 상관성을 포함하므로, 공간적으로 완전히 무작위성을 가진다고 할 수 없다. 이러한 특성으로 일부 공간적인 표본자료를 이용하여 지역화 현상(regionalized phenomenon) 및 변동성에 대한 공간적인 패턴 구조를 설명할 수 있다. 특히 대표적인 지형통계 기법인 Kriging기법은 공간상의 추정오차를 최소화하여 미계측 지점의 값을 내삽하는 방법이다(윤강훈 등, 2004). 이러한 공간적 분포를 파악하기 위해서 진영훈 등(2009)은 자기조직화 지도를 이용한 바 있다. Kriging기법은 비정상성(stationary field) 기법과 정상성(stationary) 기법으로 나뉘게 된다. 또한 이러한 각각의 기법은 다시 자료의 구조에 따라서 공분산을 가지는 Kriging과 반분산을 가지는 Kriging으로 나누어지게 된다. 그러나 정상성 기법은 모집단의 평균과 자료의 구조가 확실히 규명되어야만 분석이 가능한 기법으로 관측된 강우자료에서 이러한 조건을 모두 만족시키는 자료의 획득은 매우 어렵다. 이후 이에 대한 보완으로 비정상성 기법인 Universal Kriging이 개발되었다. Universal Kriging은 반복법에 의해 추정값을 계산하는 방법으로 추정값에 대한 객관성 결여 및 유일해를 갖지 못하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결한 기법이 본 연구에서 적용될 범용공분산 Kriging기법이다. Fig. 1은 전술한 Kriging기법의 발달 과정을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보여지듯이 분포형 강우자료의 작성을 위하여 가장 발달된 형태의 Kriging기법이 범용 공분산 Kriging이다.

공간상에서 강우의 분포는 제한된 관측 자료를 표본공간으로 하는 확률과정(random process)으로 취급할 수 있다. 대상이 되는 확률과정을 2차원 공간상의 모든 점에서 정의되는 random field(본 연구에서는 강우량) $Z(u_i)$ 라 하면 임의의 두 지점 사이의 공간상관성은 다음과 같은 공분산(covariance)에 의하여 나타낼 수 있다.

$$Cov(u_1u_2) = E[(Z(u_1)Z(u_2))] - \mu(u_1)\mu(u_2) \quad (1)$$

여기서, $\mu(u_i)$ 는 임의의 지점 i 에서의 평균(Drift)이다.

또한, 지형의 영향을 고려하여 강우량을 추정하기 위해서는 비정상성(non-stationarity)의 개념을 고려하여야 하며 이 경우 특수한 범함수(functional)를 갖는 Kriging기법을 사용하여야 한다. 이러한 기법들 중 가장 발달된 형태가 범용 공분산 Kriging기법으로 Drift는 다음과 같은 k 차 다항식으로 가정된다.

$$\mu_k(u) = \sum_{i=0}^{l(k)} a_i f^i(u) \quad (2)$$

여기에서 a_i 는 계수이고, $f^l(u)$ 및 $l(k)$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$f^l(u) = u_1^{\beta_1} u_2^{\beta_2} u_3^{\beta_3} \dots u_i^{\beta_i} \quad (3)$$

$$l(k) = \frac{(k+1)(k+2) \dots (k+n)}{n!} \quad (4)$$

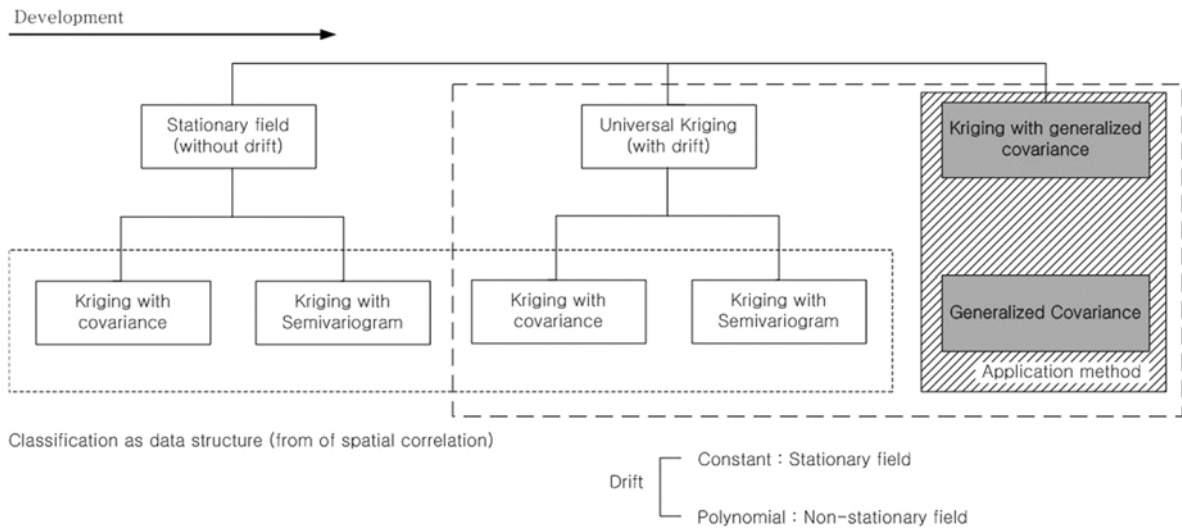


Fig. 1. Classification of Kriging system.

이 때, 범용공분산을 갖는 Kriging 시스템은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j K(u_i - u_j) - \theta_0 - \sum_{l=1}^p \theta_l f^l(u_i) = \frac{1}{A} \int_A K(u_i - u) du \quad (5)$$

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

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f^l(u_i) = \frac{1}{A} \int_A f^l(u) du \quad (7)$$

여기에서 λ_i , $K(\cdot)$, θ 및 A 는 각각 가중계수, 범용 공분산 연산자, Lagrange 승수 및 유역면적을 나타낸다.

Delfiner(1976)는 Drift의 차수 결정에 있어서 $k=0,1,2$ 를 교대로 가정함으로써 몇 개의 기지의 지점들을 추정하기 위하여 $K(v) = -|v|$ 의 관계를 사용할 것을 제안하였다. Matheron(1973)과 Delfiner(1976)는 결정된 차수 k 에 대해 계수 α_p 가 식 (8)과 같은 조건을 만족할 때, 실수 공간 R^n 에 대한 범용공분산을 식 (9)와 같이 제안하였다.

$$\sum_{p=0}^k \alpha_p x^{k-p} \geq 0 \quad \forall x \geq 0 \quad (8)$$

$$K(v) = \sum_{p=0}^k (-1)^{p+1} \frac{\alpha_p}{(2p+1)!} \frac{\Gamma(\frac{n}{2}) p!}{\sqrt{\pi} \Gamma(\frac{2p+n+1}{2})} (v)^{2p+1} \quad (9)$$

식 (9)에서 범용공분산의 계수는 다음 식 (10)을 최소로 해주는 값들이 된다.

$$Q(C, \alpha) = \sum_{i=0}^r w_i^2 \left[Z(\lambda^i)^2 - CT_i^0 - \sum_{p=0}^k \alpha_p T_i^{2p+1} \right]^2 \quad (10)$$

2.2. HyGIS-GRM 모형

HyGIS-GRM은 지표면 유출과 하도 유출의 해석을 위해서 운동과 방정식을 이용하고 있으며, 침투량 산정은 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다. 본 연구에서는 유출 해석을 위해 이상의 HyGIS-GRM 모형을 사용하였으며 주요 지배 방정식은 다음과 같다(최윤석 등, 2008).

2.2.1. 지표 흐름

지표흐름은 지표면 흐름과 하도 흐름으로 구분할 수 있으며, 이에 대한 유출해석을 위해서 운동과 방정식을 적용하고 있다. 지표면 흐름에서의 연속 방정식은 식 (11)과 같고, 하도 흐름에서의 연속방정식은 식 (12)를 적용한다. 식 (12)에서 하도에서의 유효강우량을 측방유입량과 같이 계산하고 있으며, 운동과 모형에서의 운동량 방정식은 식 (13)과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = P_r - IF_r \quad (11)$$

$$\frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = P_r dy + q_L \quad (12)$$

$$S_0 = S_f \quad (13)$$

여기서 q : 단위폭당 유량(=uh), h : 수심, u : 유속, Q : 유량, S_0 : 바닥 경사, S_f : 마찰경사, P_r : 강우강도, IF_r : 침투율, t : 시간, A_x : x방향에 직각인 단면적, q_L : 측방유입량이다.

2.2.2. 침투

HyGIS-GRM에서는 강우강도가 침투율보다 클 때 발생하는 침투초과유출과 토양의 포화시 발생하는 포화초과유출을 모의할 수 있으며, 침투량 산정을 위하여 Green-Ampt

모형을 적용하고 있다. Green-Ampt 모형에서는 식 (14)와 같이 누가침투량을 계산하고 있으며, 침투율은 누가침투량을 이용하여 식 (15)에 의해 계산된다.

$$F(t) = Kt + \Delta\theta\psi \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right) \quad (14)$$

$$f(t) = K\left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1\right) \quad (15)$$

여기서 $F(t)$: t 시간에서의 누가침투량, $f(t)$: t 시간에서의 침투율, $\Delta\theta$: 토양수분함량변화($\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$), S_e : 유효포화도($S_e = (\theta - \theta_r) / (\eta - \theta_r)$), θ : 수분함량($\theta_r \leq \theta \leq \eta$), θ_r : 잔류 수분함량($\theta_r = \eta - \theta_e$), η : 공극율, θ_e : 유효공극율, K : 수리전도도이다.

토양의 유효포화도를 결정하는데 적용되는 초기수분함량(θ)을 제외한 모든 매개변수는 토성에 따라서 미리 정해진 값을 이용하게 된다. 초기수분함량(θ)은 선행강우에 따라서 변화할 수 있으며, 총유출량과 침투유출의 적합을 위해 보정되는 매개변수이다.

2.2.3. 지표하 유출

HyGIS-GRM에서는 침투가 진행되면서 토양이 포화될 경우에 대해서 식 (16)을 이용하여 지표하 유출을 모의하고 있다.

$$Q_s = KD_s \sin(S_u) \quad (16)$$

여기서 Q_s : 지표하 유출, D_s : 불투수층 상부의 포화된 토양 깊이, S_u : 지면의 경사각이다.

HyGIS-GRM 모형에서는 이상의 지배방정식에 대해 유한체적법을 이용하여 이산화 방정식을 유도하고 TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm) 방법을 이용하여 연립방정식의 해를 구하게 된다. 또한 비선형 항에 대해서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 반복 계산함으로써 수렴해를 도출하게 된다.

2.3. 대상유역 및 적용방법

본 연구에서는 대상유역을 Fig. 2와 같이 무성수위표 지점을 출구로 하는 위천으로 선정하였다. 경상북도 중심부에 위치한 위천 유역의 고도중앙치는 EL. 221 m이고 유역면적은 약 472 km²이다. 유역의 우량관측소는 Fig. 2와 같이 11개소가 위치한다. 이 중 균의(남)과 신형(서)는 유역경계 밖에 위치하고 있으며, 인근 우량관측소와의 공간상관성을 고려하기 위하여 두 우량관측소의 관측자료도 분석에 포함하였다. 수문사상은 단순호우사상을 선별한 후 수문곡선의 형상, 강우와 유출 시간과의 관계, 유출률 등의 검토를 통해 Table 1과 같이 1997년 2개 사상, 1998년 1개 사상을 추출하였다. Table 2는 선정된 호우사상에 대한 각 우량관측소 강우량의 최대, 최소, 평균값을 나타낸 것이다.

티센기법에 의한 면적평균강우량은 Fig. 3과 같이 GIS 프로그램인 Arc view에서 티센다각형을 작도하여 면적비를 구한 후 각 지점강우 자료로부터 산정하였다. Kriging기법에 의한 분포형 강우자료는 미국 MIT에서 범용공분산 Kriging 이론을 기반으로 Fortran언어로 개발된 AKRIP 프로그램을 사용하여 산정하였다(Kafritsas and Bras, 1981). Fig. 4와 같이 대상유역을 100 m의 정사각형 형태의 격자로 나누어 적용하였으며 생성된 Ascii file을 HyGIS-GRM의 Grid file로 변환시켜 분포형 강우자료를 작성하였다. Fig. 4는 Event 2의 7월 16일 06시 강우의 Kriging기법에

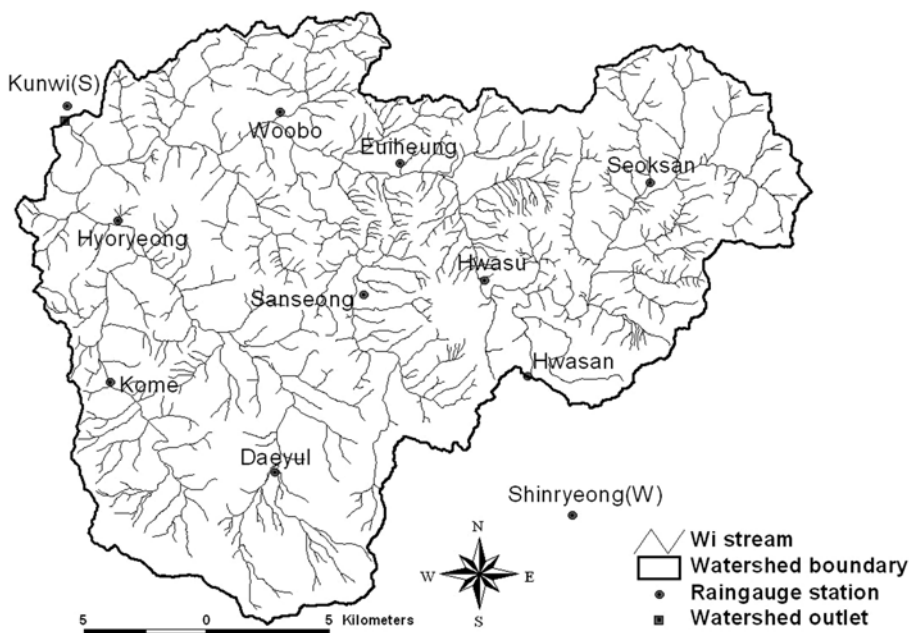


Fig. 2. Drainage basin map of Wi river.

Table 1. Rainfall event and parameters

Event No.	Rainfall period	Roughness coefficient	Initial stream order	Overland flow minimum slope	Minimum slope of channel bed	Initial soil saturation (%)
Event 1	1997/5/12 13:00 - 5/13 23:00	0.045	0	0.0001	0.013	0.81
Event 2	1997/7/15 22:00 - 7/16 15:00					0.96
Event 3	1998/5/10 14:00 - 5/12 06:00					0.98

Table 2. Statistical rainfall data and total rainfall (mm/h)

Raiinguage station	Event 1			Event 2			Event 3		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
Kunwi (S)	22.40	0.00	3.54	30.40	0.00	4.03	12.50	0.00	1.27
Hyoryeong	20.70	0.00	3.33	25.30	0.00	2.76	15.50	0.00	1.21
Daeyul	14.00	0.00	3.26	29.10	0.00	2.79	11.00	0.00	1.10
Kome	2.00	0.00	0.56	13.00	0.00	0.82	10.00	0.00	1.28
Woobo	20.00	0.00	2.92	29.30	0.00	3.32	5.90	0.00	1.17
Sanseong	16.00	0.00	2.63	35.40	0.00	3.40	11.00	0.00	1.02
Shinryeong (W)	20.00	0.00	2.31	15.00	0.00	1.41	11.00	0.00	1.32
Euiheung	15.60	0.00	2.75	28.20	0.00	2.87	15.00	0.00	0.90
Hwasu	12.00	0.00	2.75	13.00	0.00	2.17	9.50	0.00	1.02
Hwasan	17.00	0.00	2.23	13.50	0.00	1.32	17.50	0.00	1.15
Seoksan	14.00	0.00	3.38	31.50	0.00	3.47	17.00	0.00	0.93



Fig. 3. Thiessen polygon of Wi river.

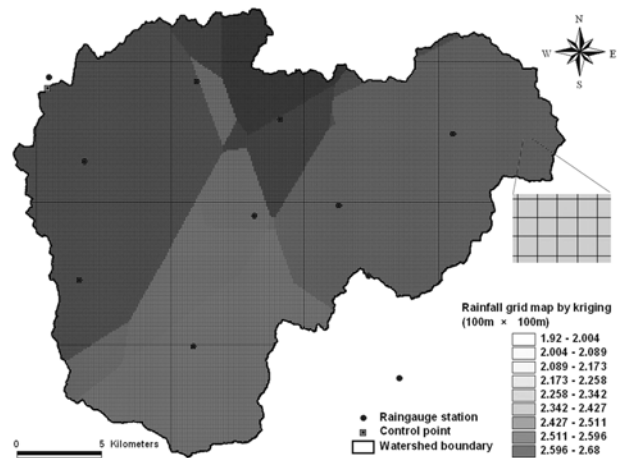


Fig. 4. Grid map of Wi river (100 m × 100 m).

의한 분포를 예로 나타낸 것이다. 이러한 Kriging 기법에 의한 강우 분포는 식 (9)와 (10)에 의해 강우의 공간상관성을 반영하여 매시간 변동하게 된다. 이는 Fig. 3과 같이 시간적인 강우장의 변동성을 고려하지 못하는 티센기법보다 물리적으로 발전된 기법이라 할 수 있다. 또한 티센기법의 경우 관측소지점에 따른 강우의 분포가 균일하므로 전 유역을 하나의 값으로 대표함에 따라 호우의 변동에 대한 고려가 전혀 이루어지지 못한다. 기존의 집중형 유출모형은 유역을 하나로 가정함에 따라 이러한 현상의 모의가 모형 내에서 중요하게 다루어지지 않았다. 그러나 격자 기반의 분포형 모형은 각 격자마다 유출계산이 이루어지게 되므로 호우의 변동 또한 유출모의에 많은 영향을 줄 것으로 판단 된다.

본 연구에서는 Kriging 기법에 의해 산정된 분포형 강우자료와 티센기법에 의한 면적평균강우량 자료를 이용하여 HyGIS-GRM 모형에 적용하였다. 모의된 각 기법별 결과를 관측 유량과 비교하여 강우입력자료에 따른 유출을 비교·분석하였다. HyGIS-GRM 모형은 강우-유출 현상을 물리적으로 해석하는 모형으로 유역경계, 하천망, 토양 및 토지피복에 의해 결정되는 물리적인 특징들은 보정을 하지 않고 그대로 적용하게 된다. 그러나 고정된 매개변수가 아닌 선행 강우에 의해서 결정되는 가변적인 매개변수로서 토양의 초기함수율과 건천차수와 하도 조도계수가 있다. 또한 운동파 모형의 특성상 경사가 매우 작아지게 되면 유속과 유량이 매우 작게 계산되므로 이를 보정하기 위한 지표면과 하도의 최소경사가 있다. 본 연구에서는 이러한 가변적인 매

개변수에 대해 조도계수와 건천차수는 위천 유역에 대한 선행연구사례를 통해 보정된 값을 사용하였으며(최윤석 등, 2008), 지표면과 하도의 최소경사는 위천 유역에 대해 HyGIS-GRM에서 제안한 값을 사용하였다(한국건설기술연구원 등, 2009). 적용된 주요 매개변수는 Table 1과 같다. 이 중 초기함수비는 티센기법에 비해 물리적으로 타당한 Kriging기법에 대해 시행착오법으로 보정한 값을 추정하였으며, 이 값을 티센기법에 의해 산정된 면적평균강우량에 의한 유출에 적용하여 각 기법별 수문곡선을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

각 기법별 HyGIS-GRM에 의한 유출 결과는 Table 3과 같고 각 기법별 강우자료 및 수문곡선은 Figs. 5~10과 같다. Fig. 5, 7, 9에서 Kriging기법에 의한 면적평균 강우량은 추정된 강우량의 평가를 위해서 산정하였을 뿐, 유출모형 적용 시에는 격자 기반의 분포형 강우자료를 입력하였다.

모의 결과 첨두유량은 Event 1의 경우 관측치와의 오차가 Kriging기법은 11.19CMS, 티센기법은 154.7CMS로 각각 3.8%, 52.2%로 나타났으며, Event 2의 경우 13.0CMS, 13.8CMS로 각각 4.4%, 4.7% 오차가 발생했으며 Event 3은 5.96CMS, 71.5CMS로 각각 2.0%, 24.1%로 나타났다. 첨두시간은 Kriging기법과 티센기법 각각 Event 1의 경우 1시간, 5시간, Event 2는 두 기법모두 1시간의 오차를 나타

내었으며 Event 3은 두 기법 모두 관측치와 일치하는 결과를 나타냈다. 이러한 두 기법의 유출량 차이는 Kriging 기법에 의해 보정된 매개변수를 그대로 티센기법에 적용하였기 때문에 나타나는 현상으로 판단되며, 실무에서 많이 적용되고 있는 티센기법에 의한 유출모의 시에는 또 다른 결과를 보일 것으로 예상된다.

Table 3에서 (8)란은 관측된 유출량의 총합을 나타낸 것이며, (9)와 (10)은 각각 Kriging기법과 티센기법에 의해 공간분포된 총 강우량값을 나타낸 것이다. 괄호안의 값은 각 기법에 의해 산정된 총 강우량에 의한 (8)란의 관측 유출량에 대한 유출률을 나타낸다. 유출률은 0.73~0.83으로 두 기법 모두 양호하게 나타났다.

강우자료 형태에 따른 유출현상 분석을 위해 다음과 같은 두 가지 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법은 티센면적비의 규모에 따라 3개의 그룹(AI~AIII)으로 나누어 분석을 실시하였으며, 두 번째 방법은 강우 중심에 따른 유출영향을 분석하기 위해 유출구로부터 관측소까지의 거리에 따라 3개의 그룹(LI~LIII)으로 나누어 강우자료를 분석하였다. Table 4는 분석을 위한 소그룹을 구성한 것이다.

각 기법별 강우량 추정결과 대부분의 시간에서 비슷하게 추정되었지만 주목할 사항은 Event 1이다. Event 1의 경우 각 기법별 수문곡선의 양상이 매우 다르게 나타났기 때문이다. Event 1에서 강우의 시·공간적 분포는 다음과 같이 분석되었다. 총강우량 355.6 mm(시간당 평균 32.3 mm) 중

Table 3. Simulation result

Event No.	Peak discharge (m ³ /sec)			Peak time (hour)			Total runoff [*]	Total rainfall and runoff rate ^{**}	
	Obs	Kriging	Thiessen	Obs	Kriging	Thiessen		Kriging	Thiessen
Event 1	296.11	284.92	141.41	1997/5/13 00:00	1997/5/13 01:00	1997/5/13 05:00	12,511	15,135 (0.83)	17,092 (0.73)
Event 2	721.93	708.97	735.75	1997/7/16 11:00	1997/7/16 12:00	1997/7/16 12:00	20,143	27,083 (0.74)	28,412 (0.71)
Event 3	400.00	394.04	471.49	1998/5/11 10:00	1998/5/11 10:00	1998/5/11 10:00	16,536	21,984 (0.75)	21,005 (0.79)

^{*} Total amount of observation runoff data (×1,000 m³)

^{**} Runoff rate (%) = Total rainfall (×1,000 m³) / Total amount of observation runoff data (×1,000 m³)

Table 4. The separated group for rainfall-runoff analysis

Thiessen area				Length		
Raingguage station	Thiessen area ratio	Group	Summation Thiessen area ratio	Raingguage station	Length (km)	Group
Seoksan	0.176	AI	0.558	Kunwi (S)	0.59	LI (Downstream)
Daeyul	0.168			Hyoryeong	4.62	
Woobo	0.107			Woobo	8.74	
Sanseong	0.107			Kome	10.79	
Hyoryeong	0.099	AII	0.345	Euiheung	13.73	LII (Midstram)
Kome	0.097			Sanseong	14.04	
Euiheung	0.077			Daeyul	16.66	
Hwasu	0.072	AIII	0.097	Hwasu	18.26	LIII (Upstream)
Hwasan	0.069			Hwasan	21.49	
Kunwi (S)	0.028			Seoksan	23.90	
Shinryeong (W)	0.000			Shinryeong (W)	26.14	

'97년 5월12일 15시와 20시에 각각 50.8 mm, 76.2 mm로 강우가 집중되었다. 15시의 경우 AI, AII, AIII 그룹에는 각각 56%, 36%, 8%, 20시의 경우 50%, 44%, 6%로 티센기법의 지배면적이 넓은 지역에 강우가 집중한 것을 알 수 있다. Fig. 5에서 보여 지듯이 지배면적이 큰 지역에 강우가 집중 될 경우 Kriging기법보다 티센기법에 의한 강우량 추정이 과대하게 나타남을 알 수 있다. 또한 공간분포에 따른 유출영향을 분석한 결과 Event 1은 97년 5월 12일 16~17시 사이 전체강우량 355.6 mm 중 121.6 mm가 집중되어 내렸으며 이 중 약 66%가 LIII(상류지역)에 집중되어 분포되었다. 20시의 경우 152.4 mm의 강우가 LIII에 31% LI에 60% 분포되었으며, 21시에는 62.2 mm의 강우가 LII 51%, LI에 32%로 분포되었다. 22시에는 52.00 mm의 강우가 LI에 90% 분포되었다. 따라서 Event 1은 강우중심이 유역의 상류에서 하류방향으로 이동함을 볼 수 있다. 결과적으로 이상의 원인이 복합적으로 발생하여 Fig. 6에서 티센기법에 의한 유출량이 Kriging기법에 의한 유출량 보다 훨씬 작게 모의되는 것으로 판단된다. 즉 격자 기반의 분포형 유출모형에서 티센기법과 Kriging기법의 유출결과가 매우 다르게 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 결과는 강우의 공간분포 및 강우 중심의 이동을 고려할 수 있는 Kriging기법의 우수성을 직접적으로 입증해 주는 것으로 판단된다.

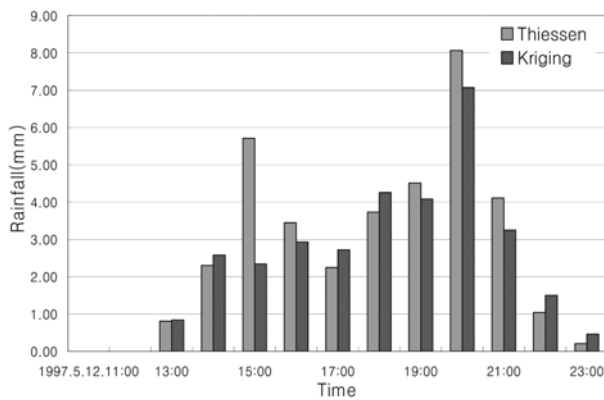


Fig. 5. The estimation of mean areal rainfall (Event 1).

Event 2의 7월 17일 08시에 총강우량 624.15 mm(시간당 평균 34.68 mm) 중 263.7 mm가 강우가 집중되었으며 AI, AII, AIII 그룹에 각각 48%, 30%, 22%로 나타났다. 이러한 강우의 분포로 인해 티센기법이 kiging 기법보다 과대하게 추정되었으며 침투유량 또한 높게 모의되었다.

Event 3의 '98년 5월 10일 07시의 경우 총강우량 452.9 mm(시간당 평균 11.05 mm) 중 72.6 mm가 집중되었으며 AI, AII, AIII 각각 48%, 38%, 13%로 분포되었으며 티센기법이 Kriging기법에 비해 과대 추정되었으며 이로 인해 Fig. 10에서 보여지듯이 침투유량에 영향을 나타낸 것으로 판단된다.

결론적으로 티센기법에 의한 면적평균 강우량은 지배면적에 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 이러한 현상은 강우가 집중되는 시간 및 공간의 변동에 따라 유출에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단된다. 특히 각각의 격자에서 유출량을 계산하는 분포형 강우-유출 모형의 특성상 이러한 오차가 누적되어 나타날 경우 유역출구에서의 유출은 실제와 매우 다르게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 또 한 가지 주목할 사실은 티센기법은 강우의 이동성을 반영하지 못한다는 것이다. 실제로 이상의 원인이 복합적으로 일어날 경우 Event 1과 같이 유출모의 결과가 매우 상이하게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형의 적용 시 강우의 시·공간 상관성을 나타내줄 수 있는 강우자료의 입력이 매우 중요하다 하겠

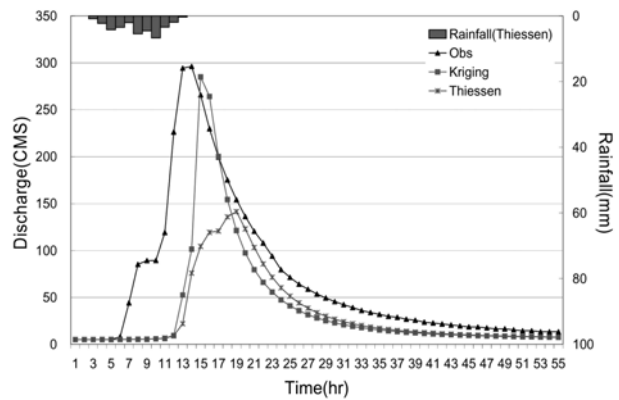


Fig. 6. Simulation result (Event 1).

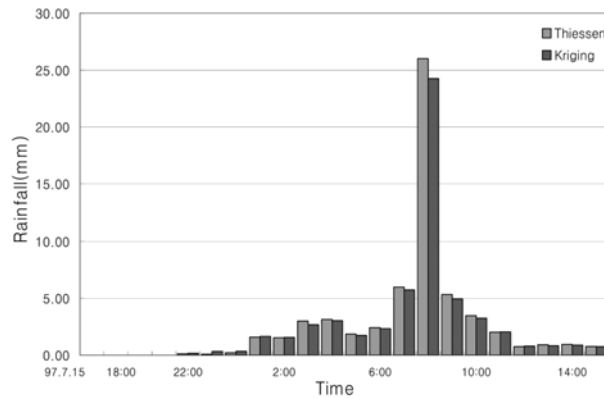


Fig. 7. The estimation of mean areal rainfall (Event 2).

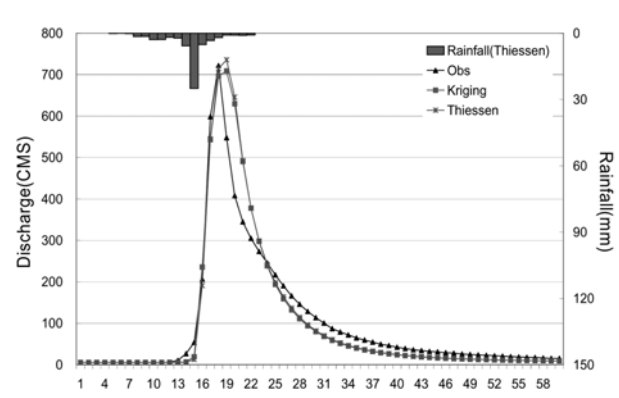


Fig. 8. Simulation result (Event 2).

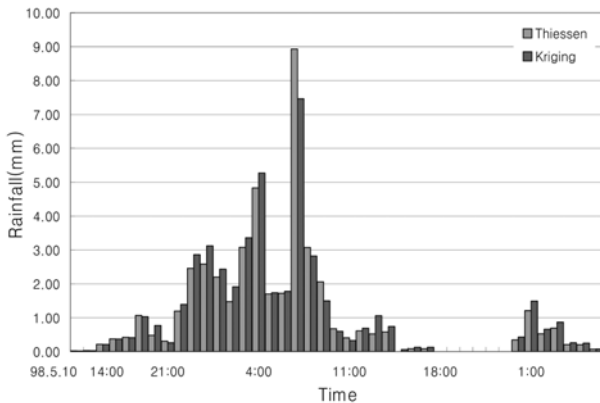


Fig. 9. The estimation of mean areal rainfall (Event 3).

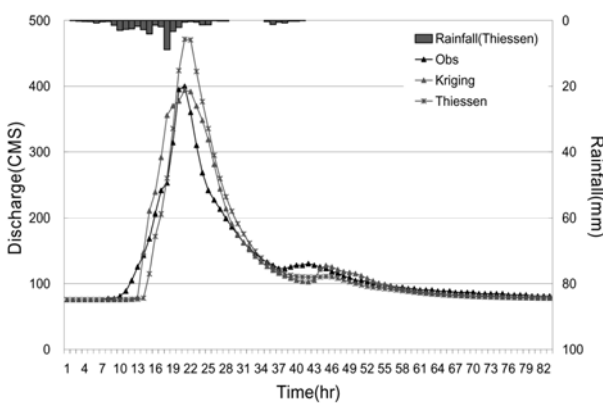


Fig. 10. Simulation result (Event 3).

다. 이를 위해 범용 공분산 Kriging기법은 분포형 모형의 강우자료 산정 시 매우 유용한 방법이 될 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 관측된 강우량 사이의 공간적인 상관성을 고려한 범용 공분산 Kriging기법에 의한 분포형 강우-유출 모형에의 적용성을 검토하기위해 Kriging기법에 의해 보정된 매개변수를 바탕으로 티센기법과의 유출 비교를 실시하였다. 그 결과로 분포형 유출모형의 가장 중요한 입력변수인 강우자료의 형태에 따라 유출수문곡선의 차이를 볼 수 있었다. 물론 티센기법에 의해 매개변수를 보정할 경우 다른 유출모의 결과가 도출될 수 있을 것으로 판단되지만, Kriging기법의 우수성을 증명한 Tabios and Salas(1985)의 선행연구 결과를 바탕으로 전자의 방법론에 의해 연구를 진행하였다. 본 연구의 적용 결과 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형의 강우자료의 작성에 있어서 기존의 산술적 방법 또는 도해적인 방법 등에 의한 영역의 면적 평균 강우량 산정법을 적용하는 것보다는 물리적 공간상관성을 고려한 범용 공분산 Kriging기법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 향후 이러한 범용 공분산 Kriging기법은 GIS를 이용하여 격자 기반의 분포형 유출모형과의 결합으로 실시간 분포형 강우-유출 해석 및 영역의 수질관리 모형에의 적용성이 기대된다.

참고문헌

경민수, 김상단, 김형수, 박석근(2006). 통계적 기법을 이용한 경안천 유역의 수질 측정망 분석. *대한토목학회논문집*, **26**(3B), pp. 291-300.

박노옥, 장동호(2008). 수치표고모델과 다변량 크리깅을 이용한 기온 및 강수 분포도 작성. *대한지리학회지*, **43**(6), pp. 1002-1015.

유철상, 김상단, 윤용남(2002). 면적평균강우의 추정오차와 유출계산에 미치는 영향. *한국수자원학회지*, **35**(3), pp. 307-319.

윤강훈, 서봉철, 신현석(2004). 크리깅 기법을 이용한 낙동강 유역 홍수강우의 공간해석 연구. *한국수자원학회지*, **37**(2), pp. 223-240.

이상일(1993). 임의추출방식 크리깅을 이용한 평균면적우량의 추정. *한국수문학회지*, **26**(2), pp. 79-87.

이재형, 유양규, 정재성(2002). 강우관측망 최적설계 기법 개선에 관한 연구. *대한토목학회논문집*, **22**(5B), pp. 671-677.

이재형, 이동주, 박영기(1989). 호우의 환상스펙트럼 추정. *한국수문학회지*, **22**(2), pp. 201-211.

조홍래, 정종철(2006). 강우자료에 대한 공간보간 기법의 적용. *한국GIS학회*, **14**(1), pp. 29-41.

진영훈, 김용구, 노경범, 박성천(2009). 수질 및 유량자료의 기초통계량 분석에 따른 공간분포 파악을 위한 SOM의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(5), pp. 735-741.

최선영, 고와라, 윤왕중, 황세호, 강문경(2003). 지구통계기법과 GIS를 이용한 연약지역 해수침투 분포 파악. *한국GIS학회지*, **11**(3), pp. 251-260.

최윤석, 김경탁, 이진희(2008). 유한체적법을 이용한 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형 개발. *한국수자원학회지*, **41**(9), pp. 895-905.

한국건설기술연구원(1991). *면적우량과 강우의 공간변화 해석: 면적우량 환산계수를 중심으로*.

한국건설기술연구원, GEOMANIA, LOCUSS (2009). *HyGIS Tutorial*.

Abtew, W., Obeyseker, J., and Shih, G. (1993). Spatial analysis for monthly rainfall in south Florida. *Water Resources Bulletin*, **29**(2), pp. 179-188.

Basistha, A., Arya, D. S., and Goel, N. K. (2008). Spatial Distribution of Rainfall in Indian Himalayas - A Case Study of Uttarakhand Region. *Water Resour. Manage.*, **22**, pp. 1325-1346.

Bargaoui, Z. K. and Chebbi, A. (2009). Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall. *Journal of Hydrology*, **365**, pp. 56-73.

Bras, R. L. and Rodriguez-Iturbe, I. (1976a). Evaluation of Mean Square Error Involved in Approximating the Areal Average of a Rainfall Event by a Discrete Summation. *Water Resources Research*, **12**(2), pp. 181-184.

Bras, R. L. and Rodriguez-Iturbe, I. (1976b). Network design for the Estimation of Areal Mean of Rainfall Events. *Water Resources Research*, **12**(6), pp. 1185-1195.

Chirlin, G. R. and Wood, E. F. (1982). On the Relationship between Kriging and State Estimation. *Water Resources Research*, **18**(2), pp. 432-438.

Delfiner, P. (1976). Linear Estimation of Non-Stationary Spatial Phenomena. *Advanced Geostatistics in the Mining*

- Industry*. M Guarascio et al. (eds.), Dordrecht, Holland: D. Reidel, pp. 49-68.
- Delfiner, P. and Delhomm, J. P. (1973). Optimum Interpolation by Kriging In: Display and analysis of Spatial Data. Davis and McCullagh (eds.), New York: Wiley, pp. 49-68.
- Desbarats, A. J., Logan, C. E., Hinton, M. J., and Sharpe, D. R. (2002). On the Kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. *Journal of Hydrology*, **255**, pp. 25-38.
- Gambolati, G. and Volpi, G. (1979). A Conceptual Deterministic Analysis of the Kriging Technique in Hydrology. *Water Resources Research*, **15**(3), pp. 625-629.
- Hughes, J. P. and Lettenmaier, D. P. (1981). Data Requirements for Kriging Estimation and Network Design. *Water Resources Research*, **17**(6), pp. 1641-1650.
- Kafritsas, J. and Bras, R. L. (1981). The Practice of Kriging. Ralph M. Parsons Laboratory *Department of Civil Engineering Massachusetts Institute of Technology*, Report No. 263.
- Lebel, T., Bsatn, G., Obled, C., and Creutin, J. D. (1987). On the accuracy of areal rainfall estimation: A case study. *Water Resources Research*, **23**(11), pp. 2123-2133.
- Lenton, R. L. (1977). A Multidimensional Model for the Synthesis of Areal Rainfall Averages. *Water Resources Research*, **13**(3), pp. 605-612.
- Matheron, G. (1973). The Intrinsic Random Eunctions and Their Applications. *Adv. Appl. Prob.*, **5**, pp. 439-468.
- Rivest, M., Marcotte, D., and Pasquier, P. (2008). Hydraulic head field estimation using kriging with an external drift: A way to consider conceptual model information. *Journal of Hydrology*, **361**, pp. 349-361.
- Rodriguez-Iturbe, I. and Mejia, J. M. (1974). On the transform of point to areal rainfall. *Water Resources Research*, **10**(4), pp. 713-725.
- Tabios, G. Q. and Salas, J. D. (1985). A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Interpolation of Precipitation. *AWRA Water Resources Bulletin*, **21**(3), pp. 365-380.
- Villeneuve, J. P., Morin, G., Bobée, B., and Leblanc, D. (1979). Kriging in the Design of Streamflow Sampling Networks. *Water Resources Research*, **15**(6), pp. 1833-1840.