

레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립

II. Cokriging을 이용한 2차원 정량강우 산정

Development of a Flood Runoff and Inundation Analysis System Associated With 2-D Rainfall Data Generated Using Radar II. 2-D Quantitative Rainfall Estimation Using Cokriging

최규현* / 한건연** / 김광섭*** / 이창희****

Choi, Kyu Hyun / Han, Kun Yeun / Kim, Gwang Seob / Lee, Chang Hee

Abstract

Among various input data to hydrologic models, rainfall measurements arguably have the most critical influence on the performance of hydrologic model. Traditionally, hydrologic models have relied on point gauge measurements to provide the area-averaged rainfall information. However, rainfall estimates from gauges become inadequate due to their poor representation of areal rainfall, especially in situations with sparse gauge network. Alternatively, radar that covers much larger areas has become an attractive instrument for providing area-averaged precipitation information.

Despite of the limitation of the QPE(Quantitative Precipitation Estimation) using radar, we can get the better information of spatial variability of rainfall fields. Also, rain-gauges give us the better quantitative information of rainfall field. Therefore, in this study, we developed improved methodologies to estimate rainfall fields using an ordinary cokriging technique which optimally merges radar reflectivity data into rain-gauges data.

keywords : radar, rain gauge, cokriging, QPE

요 지

수문모형의 많은 입력자료 가운데 강우 관측자료가 모의결과에 가장 주요한 원인을 가진다. 과거부터 수문모형은 유역에서의 평균강우량 자료를 한 지점에서의 강우량 자료에 의존해 왔다. 그러나, 지점에서 측정된 강우량 자료를 유역을 대표하는 평균강우량 산정에 이용할 경우 부적절한 경우가 발생할 수 있으며, 특히 그 계측망이 조밀하지 못할 경우 더욱 그러하다. 레이더의 경우 보다 넓은 유역 전체를 관측하기 때문에 유역에서의 평균강우량을 제공함에 있어 좋은 관측장비라 할 수 있다.

- * 정회원, 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 토목연구사 · 공학박사
Researcher, River Information Center, Han River Flood Control Office, MOCT, Seoul, 137-649, Korea.
(e-mail: khchoi@moct.go.kr)
- ** 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사
Professor, Dept. of Civil. Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea.
(e-mail: kshanj@knu.ac.kr)
- *** 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사
Professor, Dept. of Civil. Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea.
(e-mail: kings@knu.ac.kr)
- **** 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 강사 · 공학박사
(e-mail: changheel@gmail.com)

레이더를 이용하여 강우를 관측할 경우 직접적인 강우관측이 아니기 때문에 QPE에서 몇몇 한계가 있을 수 있으나, 강우자료의 공간변화도에 대한 좋은 정보를 제공해 준다. 또한 지상의 강우관측소에서 강우측정자료는 지점에서의 강우량에 대한 정확한 정보를 제공해 준다. 따라서, 본 연구의 목적은 지상의 강우관측소에서 관측된 강우량 자료와 레이더를 이용하여 관측된 자료, 즉 두 가지 관측자료를 Ordinary cokriging 보간을 이용하여 통합함으로써 개선된 강우량 추정방법을 개발한다.

핵심용어 : 레이더, 강우관측소, cokriging, QPE

1. 서 론

강우의 시공간적 분포양상을 파악하는 것은 지구의 강우-유출해석, 홍수예측 등 수문 사이클을 이해하는데 있어 가장 중요한 요소 중 하나라고 하겠다. 그러므로 2차원 정량강우의 산출은 수문 및 기상 연구자 및 실무자들에게 있어 중요한 관심 분야이다. 그럼에도 불구하고 관심 있는 시공간적 스케일에 대하여 충분한 관측체계를 확보하는 것은 어려운 일이다. 수자원 실무에 있어 강우 관측을 위한 전형적인 접근법은 강우계를 이용하는 방법이다. 강우계는 상대적으로 저렴할 뿐 아니라 특정 지점에 대한 비교적 정확하면서 직접적인 관측치를 제공하며 유지관리도 용이하다는 장점을 가지고 있다. 국내에서는 공간 분해능이 좋은(약 16 km) 자동 기상 관측망을 가지고 있음에도 불구하고 강우의 정확한 공간적 분포양상을 나타내기에는 한계를 가진다고 하겠다. 그리고 선형회귀분석, spline, kriging 등의 기법을 사용한 2차원 면적강우의 산정에는 자료를 평활화한다는 단점을 내포하고 있다. 또한 목적하는 공간 분해능이 높아질수록 비용의 증가와 관리 측면에서 심각한 문제를 야기하며 이와 같은 이유로 인해 레이더에 의한 2차원 정량강우 산정의 필요성이 대두되고 있다.

레이더를 이용한 강우량 추정에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔는데, 레이더를 이용한 강우량 산정 과정에서 레이더에 의해 측정된 반사도 자료(dBZ)는 실제 강수량 자료와 깊은 관계가 있지만 지표에 떨어지는 강수와는 동일하지 않는 간접 측정치로서 레이더 빔의 강우에 의한 감쇄는 레이더 강우관측의 정확도를 낮추는 결과를 초래함을 여러 문헌을 통해 확인할 수 있다(Austin, 1987; Joss and Waldvogel, 1990; Smith, 1990). Wilson and Brandes(1979), 그리고 Woodley et al.(1975)은 $Z-R$ 관계식을 통한 강수량 추정은 지상의 강우자료와 오차가 있음을 연구하였으며, Wilson and Brandes(1979)는 레이더의 반사도 측정자료와 지상의 강우관측소에서의 강우량 자료를 연계한 $Z-R$ 관계식을 이용하여 레이더 자료의 공간적 분포

를 정량적 강수량으로 변환한 연구를 수행하였다. 최근에는 레이더에서 측정된 반사도 자료를 지상의 강우관측소에서의 강우량 자료와 확률적으로 대응시키는 WPMM(Window Probability Matching Method) 방법이 많이 연구되고 있다(Rosenfeld et al., 1993; 1994; Zawadski, 1975). Rosenfeld et al.(1995) and Steiner et al.(1995)은 강수 형태에 따른 확률론적인 방법으로 강수유형을 층운형과 적운형으로 분류하여 WPMM 방법을 변형한 CWPM(Classified WPMM) 방법을 이용하여 강수량을 환산하였다.

레이더와 수자원을 연계한 연구가 최근 많이 수행되어 왔는데, Krajewski et al.(1991), Ogden and Julien (1994), Michaud and Sorooshian(1994), Faures et al.(1995), 그리고 Winchell et al.(1998)은 레이더 측정자료의 시·공간적 표본추출에 따른 유역에서의 유출영향을 분석하였으며, Bedient 등(2000)은 레이더를 이용한 유역에서의 홍수량 예측에서 지상의 강우자료만큼 레이더 자료가 정확성을 가짐을 보였다. 레이더 자료를 이용한 강수량 산정을 위해 통계적 처리를 통한 지상의 강우계 자료와 연계한 연구가 다수 수행되었는데, Krajewski(1987), Seo et al.(1990), Cassirage and Gomez-Hernandez(1996), 그리고 Sun et al.(2000)은 geostatistical interpolation 기법을 이용하여 정량강우량을 산정하였다.

국내의 강수에 관한 기상학적 연구는 주로 한반도에서의 종관규모의 관측자료를 이용한 중규모 연구가 다수 수행되었다(하중철, 1999; Hong, 1992). 기상연구소에서는 '90년대부터 레이더를 이용한 기상예보 및 강수량 추정에 관한 연구를 꾸준히 수행하여 왔으며, 기상연구소(1996)는 레이더 자료를 이용한 강수량 추정을 위해서 레이더 자료의 품질검사 과정에 관한 연구를 실시한 바 있다. 안상진과 김진국(2003)은 레이더 자료의 활용을 위해 레이더 반사강도와 강우강도 사이의 레이더 관계식을 산정하였고, 김효경 등(2002)은 1998년 여름철 레이더와 레이더 주위의 고밀도 우량계 관측자료를 이용하여 $Ze-R$ 관계식을 산출하기 위하여 관악산

레이더 자료와 강우강도 자료의 확률밀도함수를 이용한 WPMM 방법을 연구하였다.

레이더의 보편화 등 원격측정기술의 발달은 강우의 공간분포 및 정량적 강우 산출에 새로운 가능성을 제시 하였음에도 불구하고 국내 주된 관측 레이더인 C-band 레이더에 의한 강우산출에 있어서는 특히 호우 시 감쇄 등 여러 가지 원인에 의하여 실제 강우량보다 적은 강우량이 산출되는 문제점을 내포하고 있다. 이는 국내에서 레이더에 의하여 산출되는 면적강우를 실무에 직접 적용함에 있어 문제점을 가진다. 따라서 여러 기기에 의하여 획득된 정보를 사용하여 최적의 강우를 환산하는 것이 중요한 극복 과제인 것이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고 보다 정확한 공간분포와 강우량을 얻기 위한 기법을 제시하고자 한다. 레이더는 광역에 대하여 비교적 정확한 강우분포양상과 시간적 강우 진행과정을 제시함에도 불구하고 제시된 강우량은 간접적인 관측치로 레이더 반사도로부터 측정된 값이다. 그러므로 지상보정을 통하여 내포된 오차를 교정하는 것이 필요하다. 이를 위해서 레이더의 반사도 측정 자료와 강우관측소에서의 강우량 관측자료의 지형통계학적 분석을 실시하고, 이들 자료를 이용하여 최적의 강우량을 산정하기 위해서 cokriging 기법을 적용하였다. Cokriging 기법을 통해 강우의 공간적 분포양상 및 강우의 경계를 정확하게 묘사할 수 있는 레이더 자료와 한 지점에서 좋은 정확도를 가지는 강우량 자료를 조합함으로써 개선된 2차원 정량강우를 산정할 수 있었다. 개선된 2차원 정량강우의 산출 결과는 강우-유출 해

석, 홍수예측 및 수자원관리 전반에 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

2. 레이더 자료와 연계한 정량적 강우 산출

2.1 Cokriging 기법에 의한 자료의 최적화

강우량 자료(G , Gauge)는 일정한 시간간격(Δt)에 대한 점우량을 나타내는 반면, 레이더 반사도 자료(R , Radar)는 일정한 시간간격(Δt)과 전체 계산영역(Ω)에 대한 자료를 표현할 수 있다. Fig. 1은 N 개의 강우량 점자료(dot)와 계산영역 전체(Ω)에 걸친 레이더 자료(square)의 구성을 나타내고 있다.

이들 두 개의 자료를 이용하여 면적 강우량을 추정하는 과정은 각각의 자료가 가지는 오차의 정량화에서부터 시작될 수 있다. 즉 일정한 시간간격(Δt) 동안 누적된 2차원 강우량을 $Z(u)$, $u \in R^2$ 라 한다면, 레이더 자료(R_{ij}) 및 강우량 자료(G_k)는 식 (1), (2)로 표현될 수 있다.

$$R_{ij} = \frac{1}{|A_R| \int_{A_R} Z(u_{ij}) du + \epsilon_{R_{ij}}} \quad (1)$$

$$G_k = Z(u_k) + \epsilon_{G_k} \quad (2)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, N_x$ 로서 계산 영역에서의 x 좌표, $j = 1, 2, \dots, N_y$ 로서 계산 영역에서의

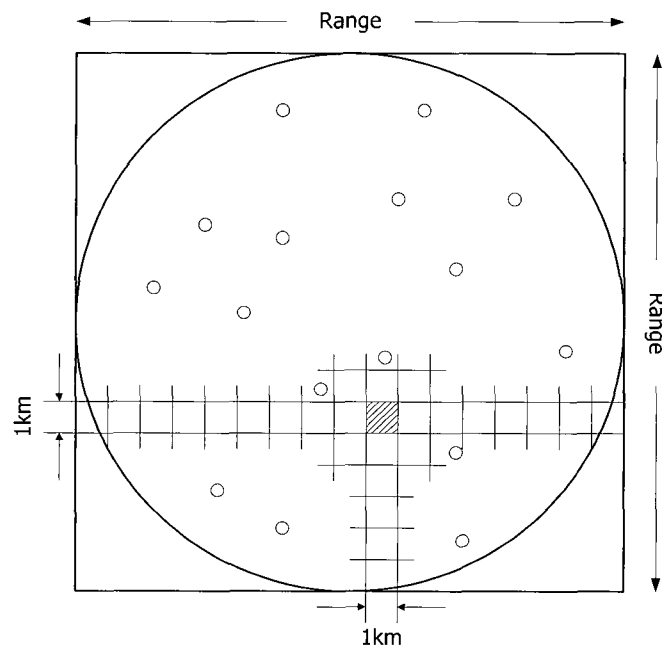


Fig. 1. Radar reflectivity and rainfall point data at full domain

y 좌표, $k = 1, 2, \dots, N$, $A_R = \in \Omega$ 로서 계산 영역의 전체 면적, $\epsilon_{R_i} = (i, j)$ 계산요소에서 레이더 자료와 관련된 오차, $\epsilon_{G_k} = k$ 번째 강우 측정자료와 관련된 오차를 나타낸다.

Eq. (1)에서의 레이더 반사도자료는 3차원 volume 자료(구형 좌표계)를 2차원 공간인 R^2 에 투영한 합성 CAPPI 자료를 이용한 값을 나타낸다. Eq. (1), (2)에서 레이더 자료와 강우량 자료를 이용한 추정방법은 Eq. (3)으로 나타낼 수 있다.

$$V(u_0) = \frac{1}{|A|} \int_A Z(u_0) du, \quad |A| \equiv |A_R| \quad (3)$$

여기서, $V(u_0)$ 는 강우량 추정치이며 이는 최적의 강우량 추정값인 $V^*(u_0)$ 를 구하기 위해 이용된다. $V^*(u_0)$ 를 구하기 위해서 본 연구에서는 Eq. (4)와 같은 선형모형을 이용하였다.

$$V^*(u_0) = \sum_{i=1}^{N_G} \lambda_{G_i} G_i(u_i) + \sum_{i=1}^{N_R} \lambda_{R_i} R_i(u_i) \quad (4)$$

여기서, N_G = 전체 계산영역의 격자수(N)보다 작은 값으로서 지점 u_0 의 인근에 위치한 강우측정지점의 수, N_R = 지점 u_0 를 둘러싸고 있는 레이더 격자의 수, λ_{G_i} , λ_{R_i} = 강우량 추정에 이용되는 가중계수를 나타내고 있다.

본 연구에서 강우량 $Z(u)$ 는 전체 계산영역(Ω)에 대해서 에르고딕성(ergodicity, 임의의 확률 과정에서 충분히 긴 계열의 어떤 부분도 동일한 확률적 성질을 지닌 경우 시간 평균이 집합 평균과 같게 되는 성질)한 것으로 가정하고, 또한 2차 정상(stationary, 시간에 따라 통계적 특성이 변하지 않는)인 것으로 가정하였다. 또한 강우량 자료의 관측오차는 평균이 "0", 분산 $\sigma_{\epsilon_G}^2$ 이며, 공간적으로 상관관계를 가지지 않는 것으로 가정하였다. 레이더 자료의 관측오차는 평균이 m_{ϵ_R} 이고, 계산영역에 대한 공분산을 $Cov_{\epsilon_R}(u)$ 로 가정하였다. 이러한 두 가지 가정은 실제 자료를 바탕으로 한 다양한 실험들에 기초하였다. 가중계수 λ_{G_i} , λ_{R_i} 는 다음 Eq. (5)에 나타난 바와 같이 추정하고자 하는 분산값을 최소로 하는 계산과정을 통해서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_v^2 = E\{[V - V^*]^2\} &= \frac{1}{|A|^2} \iint_A Cov_v(u-v) du dv \\ &- 2 \sum_{i=1}^{N_G} \lambda_{G_i} \frac{1}{|A|} \int_A Cov_{GV}(u-u_i) du \\ &- 2 \sum_{j=1}^{N_R} \lambda_{R_j} Cov_{RV}(u_0-u_j) \\ &+ \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_R} \lambda_{G_i} \lambda_{R_j} Cov_{GR}(u_i-u_j) \\ &+ \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_G} \lambda_{G_i} \lambda_{G_j} Cov_{GG}(u_i-u_j) \\ &+ 2 \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_R} \lambda_{R_i} \lambda_{R_j} Cov_{RR}(u_i-u_j) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, u_0 = 계산영역 면적 A 의 중심 좌표값, u, v = 계산영역 면적 A 내에 있는 또 다른 좌표값, $Cov_v()$ = 실제 면적평균 강우량 추정과정의 공분산, $Cov_{Gv}()$ = 강우 측정자료와 강우추정자료간의 공분산, $Cov_{Rv}()$ = 레이더 관측자료와 강우추정자료간의 공분산, $Cov_{GG}()$ = 강우 측정자료간의 공분산, $Cov_{GR}()$ = 강우 측정자료와 레이더 관측자료간의 상호 공분산, $Cov_{RR}()$ = 레이더 관측자료간의 공분산을 나타내고 있다.

최종 추정값이 편향되지 않은 값을 나타내기 위해서는 Eq. (6)의 조건이 만족되어야 하며, 전체 계산영역(Ω)에 대한 ergodicity와 2차 stationary의 가정은 Eq. (7) 및 Eq. (8)로 표현할 수 있다.

$$E\{V^*\} = E\{V\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} \lambda_{G_i} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{N_R} \lambda_{R_i} = 0 \quad (8)$$

그러나, 만약 레이더 자료의 관측오차 평균 m_{ϵ_R} 이 "0"라면, 레이더 관측자료는 편향되지 않으며 Eq. (7), (8)은 Eq. (9)로 다시 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{N_G} \lambda_{G_i} + \sum_{j=1}^{N_R} \lambda_{R_j} = 1 \quad (9)$$

편향되지 않는 조건에 대한 σ_v^2 의 최적화를 계산하기 위해서 Lagrange multiplier가 이용되었다. Lagrangian 함수의 최소값을 찾는 문제는 Eq. (10)과 같은 선형함수의 구성으로 가능하다.

$$\begin{bmatrix} Cov_{RR} & Cov_{RG} & 1 & 0 \\ Cov_{GR} & Cov_{GG} & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_R \\ \lambda_G \\ \mu_R \\ \mu_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cov_{VG} \\ Cov_{VR} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$Cov_{RR} = \begin{bmatrix} Cov_{RR}(u_{R_1}, u_{R_1}) & \cdot & \cdot & \cdot & Cov_{RR}(u_{RN_R}, u_{R_1}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Cov_{RR}(u_{RN_R}, u_{R_1}) & \cdot & \cdot & \cdot & Cov_{RR}(u_{RN_R}, u_{R_R}) \end{bmatrix}$$

$$Cov_{RG} = \begin{bmatrix} Cov_{RG}(u_{R_1}, u_{G_1}) & \cdot & \cdot & \cdot & Cov_{RG}(u_{RN_R}, u_{G_1}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Cov_{RG}(u_{RN_R}, u_{G_1}) & \cdot & \cdot & \cdot & Cov_{RG}(u_{RN_R}, u_{GN_R}) \end{bmatrix}$$

$$Cov_{GG} = \begin{bmatrix} Cov_{GG}(u_{G_1}, u_{G_1}) & \cdot & \cdot & \cdot & Cov_{GG}(u_{GN_R}, u_{G_1}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Cov_{GG}(u_{GN_R}, u_{G_1}) & \cdot & \cdot & \cdot & Cov_{GG}(u_{GN_R}, u_{GN_R}) \end{bmatrix}$$

$$Cov_{GR} = [Cov_{GR}]^T$$

$$Cov_{VR} = \langle Cov_{VR}(u_0, u_{R_1}), \dots, Cov_{VR}(u_0, u_{RN_R}) \rangle^T$$

$$Cov_{VG} = \left\langle \frac{1}{|A|} \int_A Cov_{GG}(u, u_{G_1}) du, \dots, \frac{1}{|A|} \int_A Cov_{GG}(u, u_{GN_C}) du \right\rangle^T$$

$$\lambda_R = \langle \lambda_{R_1}, \dots, \lambda_{RN_R} \rangle^T$$

$$\lambda_G = \langle \lambda_{G_1}, \dots, \lambda_{GN_C} \rangle^T$$

μ_G, μ_R = scalar Lagrangian multipliers

2.2 지형통계학적 분석을 통한 정량강우량 산출

공분산에 대한 매트릭스의 계산은 Eq. (10)을 통해서 계산됨을 알 수 있었다. 그러나 강우 측정지점은 불규칙한 형태로 배치되어 있으므로 각 지점에 대한 해석이 필요하며, 적절한 함수모형에 의해서 Cov_{GG} 및 Cov_{RG} 매트릭스에 대한 근사값을 구하여야 한다. 또한 레이더 측정 지점의 상대적인 배치형태와 측정 자료의 수가 일정하더라도 Cov_{RR} 매트릭스에 대한 명확한 값을 얻기 위해서는 근사값을 구할 필요가 있다.

Eq. (10)에서 전체 계산영역(Ω)에 대한 모든 지점에서의 값을 찾는 과정은 계산 시간과 비용면에서 큰 희생이 따르게 되므로, 본 연구에서는 수정된 알고리즘을 도입하였다. 우선, 강우 측정자료를 레이더 측정위치와 동일한 지점위로 보간시킨다. 이러한 과정은 block kriging(Journel과 Huijbregts, 1978)으로 수행되었다. 그 이후 앞서 언급된 알고리즘에 의해서 두 개의 자료(레이더 측정자료와 block kriging에 의해 산출된 강우

측정자료)에 대한 cokriging을 수행하였다. 이러한 과정을 거침으로서 각각의 자료와 두 자료들간의 상대적인 공간적 변화양상은 전체 계산영역(Ω)에 대해서 일정한 값을 가지게 되었다. 따라서, Eq. (10)은 단 한번의 수행만으로 해석이 가능하게 되며, 이는 다른 지점들에 대해서도 동일한 가중계수값을 적용하여 해석을 수행할 수 있다. 매트릭스 Cov_{GG} , Cov_{RG} 및 Cov_{RR} 은 몇몇 실험적인 모형에 의해서 간단히 근사화 시킬 수 있었다. 본 연구에서 적용한 레이더 정량강우량 산출 알고리즘을 요약하면 다음과 같다.

- ① 강우관측소의 강우량 자료와 레이더에 의해 측정된 반사도 자료에 대한 공분산 및 상호 공분산 매트릭스를 산정하기 위해서 이들의 실험적 모형(experimental model)을 이용하여 이론적 모형(theoretical model)을 선정한다. 본 연구에서는 구형 이방성 모형(spherical anisotropy model)에 의한 반 베리오그램(semivariogram)과 교차 반 베리오그램(cross-semivariogram)을 이용하였다.

② 선정된 모형을 통해서 Cov_{GG} 및 Cov_{RR} 공분산 매트릭스와 Cov_{RG} 상호 공분산 매트릭스의 값을 추정한다.

③ 앞서 언급된 선형모형에 의해서 선형 최소 분산 불편추정량을 산정함으로써 개선된 2차원 정량강우량을 산정한다.

주어진 자료들을 이용하여 최적값을 추정하기 위해서 먼저 자료들의 공간적 상호관계 및 연속성을 파악하여야 한다. 그에 대한 척도에는 상관도표(correlogram), 공변동도(covariogram), 마도그램(madogram), 베리오그램(variogram) 등 여러 가지 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 variogram을 이용하였다. Variogram은 일정한 거리만큼 떨어진 자료들의 유사성 정도를 나타내는 지표로 공분산의 계산과 kriging 가중치를 계산하기 위해서는 반드시 필요하다. Variogram은 Eq. (11)과 같이 정의된다.

$$2\gamma(h) = E\{[R(x) - R(x+h)]^2\} \quad (11)$$

여기서, h 는 분리거리(lag distance)라 하며 두 자료간의 떨어져있는 거리를 말한다. 만약 $R(x)$ 과 $R(x+h)$ 가 계산영역 Ω 에서 h 만큼 떨어져 있는 x 와 $x+h$ 에서의 어떤 물리량의 값이라 하면 두 점간의 experimental semivariogram($\gamma(h)$)은 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [R(X_i) - R(X_i+h)]^2 \quad (12)$$

여기서, $N(h)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 자료쌍의 개수이다. 또한 두 개의 다른 변수간의 상호 변화도를 나타내는 cross-semivariogram은 Eq. (13)과 같다.

주어진 자료로부터 계산된 variogram을 특히 실험적 베리오그램(experimental variogram)이라고 하며, 이를 바탕으로 이론적 베리오그램(theoretical variogram)을 선정하는 일은 매우 중요하다. 왜냐하면 이 과정이 예측의 최종결과에 직접적인 영향을 미치고 또 주관적인 판단의 영향을 받기 때문이다. 이러한 모델링이 성공적으로 수행된다면 그 다음은 큰 어려움이나 주관적인 판단 없이 그 과정을 체계적으로 수행할 수 있다(최종근, 2002). 대표적인 theoretical model로는 선형모형(linear

model), 구형모형(spherical model), 지수모형(exponential model), 가우스모형(Gauss model), 너겟모형(nugget model) 등이 있으며, 본 연구에서는 Eq. (12), (13)의 experimental model에 의한 계산수행 시간에 대한 자료의 분석결과 spherical model에 의한 theoretical model이 가장 잘 주어진 자료를 반영하는 것으로 판단 되었으므로(Fig. 6 참조), 자료들의 방향성을 고려한 공간적인 변화도의 척도로서 구형 비등방성 모형(spherical anisotropy model)을 이용하여 Cov_{GG} 및 Cov_{RR} 공분산 매트릭스와 Cov_{RG} 상호 공분산 매트릭스의 값을 추정하였다. 이렇게 추정된 값들을 최종적으로 Eq. (10)을 이용하여 각 격자점에서의 레이더 정량강우량을 산정하였다.

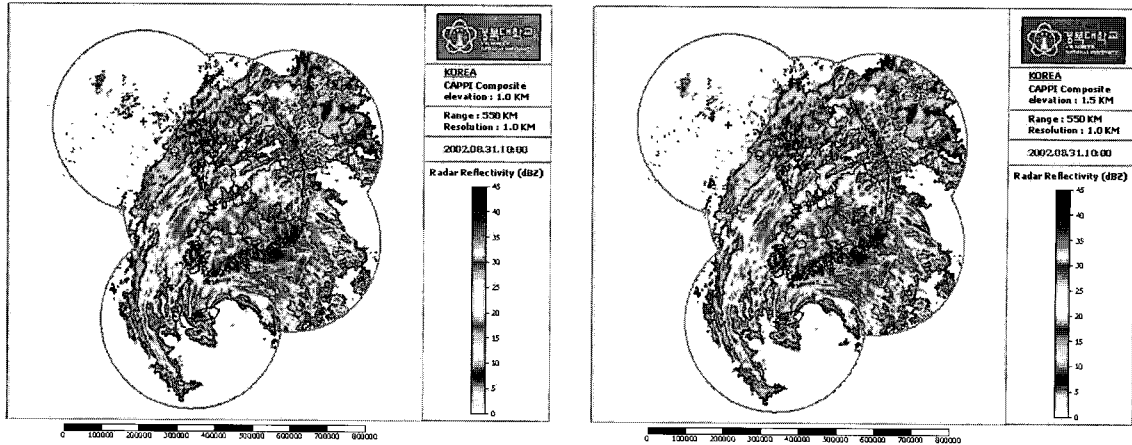
3. 실제유역에 대한 적용

본 연구에서는 태풍 루사시 8월 31일 01:00~9월 1일 06:00 기간동안의 감천 유역에서의 범람홍수모형의 적용을 위해서 루사로 인한 강우량을 지상 강우관측소의 강우량 자료와 레이더의 반사도 자료를 연계하여 개선된 2차원 강우량을 산정하였다. 이를 위해서 대상유역 내의 강우관측소의 강우량 자료의 수집과 합성 CAPPI의 산출과정이 선행되었다. C-band 레이더 6지점(관악산, 제주, 부산, 동해, 군산, 백령도)에 대한 PPI 및 CAPPI 자료를 산출하였으며, 또한 이들 6지점의 CAPPI 영상을 레이더 빔의 감쇄를 고려한 합성 CAPPI 영상으로 합성하였다. Fig. 2는 우리나라 전체 영역에 8월 31일 10:00에 대한 1.0 km 및 1.5 km에서의 합성 CAPPI 영상 표출을 보여주고 있다. 품질검사를 수행하였다.

레이더를 이용한 개선된 강우량 자료의 산출을 위해 홍수량 산정을 위한 감천 유역을 충분히 포함하면서 전반적인 강우관측소 및 레이더 자료에 대한 지형통계학적 분석에 대한 영향을 고려하여 유역을 선정하였다. Fig. 3(a)는 우리나라 전 영역에 대한 강우량 산정 대상 유역의 위치를 나타내고 있으며, Fig. 3(b)는 홍수량 산정 유역에 대한 강우량 산정 유역의 비교 그림을 나타내고 있다.

Fig. 3에 나타나 있는 강우량 산정 대상유역 내에서 운영되고 있는 강우관측소는 기상청(KMA)에서 운영하는 21개 지점과 건설교통부(MOCT)에서 운영하는 30개 지점, 그리고 한국수자원공사(KOWACO)에서 운영하는

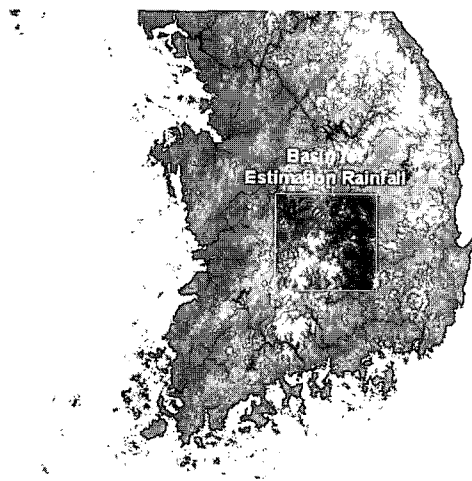
$$\gamma_{RR'} = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [R(X_i) - R(X_i+h)] [R'(X_i) - R'(X_i+h)] \quad (13)$$



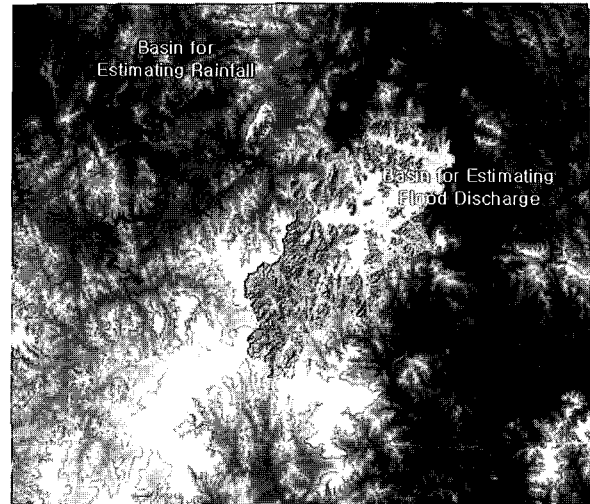
(a) Altitude 1.0 km

(b) Altitude 1.5 km

Fig. 2. CAPPI composite computation results(2002.8.31.10:00)



(a) The target watershed for rainfall estimation



(b) The target watershed for flood discharge estimation

Fig. 3. Topography of the target watershed

22개 지점의 강우관측소가 위치해 있다. 이들 73지점의 강우관측소 중 본 연구에서 이용한 강우관측소 자료는 52개 지점 자료로서, 이는 기상청에서 운영하고 있는 자동기상관측소는 모두 해당 기간에 대한 자료가 가용하여 21개 지점의 자료를 모두 이용하였으나, 건설교통부와 한국수자원공사에서 운영되고 있는 강우관측소는 각각 16개 및 15개 지점의 자료만이 태풍 루사가 한반도를 내습한 기간 동안 자료가 유효하였기 때문이다.

Table 1은 모의에서 이용된 52개 지점의 기상청, 건설교통부 및 수자원공사에서 운영하고 있는 강우관측소의 현황을 담고 있으며, Fig. 4는 대상 유역 내 52개 강우관측소 지점중 주요 지점에 대한 태풍 루사 시 8월 31일 01:00~9월 1일 06:00까지의 강우우량추상도를 나타내고 있다.

레이더를 이용한 개선된 정량강우량을 산출하기 위해서 레이더에 의한 반사도 자료와 강우관측소에서의 강우량 자료를 이용하였으며, 이를 위해서 이들 두 자료들의 지형통계학적 분석을 통한 ordinary cokriging 작업을 수행하였다. 레이더의 반사도 자료는 기 산정된 합성 CAPPI 자료를 이용하였다. 지상 강우관측소의 강우량 자료와 레이더 반사도 자료의 오차가 정확히 알려져 있지 않으므로, 레이더 반사도 자료와 강우관측소 강우량 자료의 공분산에 대한 지형통계적 매개변수를 구하는 과정이 선행되었다. 지상의 강우량 관측자료와 레이더의 레이더 반사도 측정자료에 대한 공분산(covariance) 및 상호 공분산(cross-covariance) 매트릭스를 산정하기 위해서 이들 두 자료에 실험적 베리오그램을 계산하였고, 계산된 실험적 베리오그램 자료를 바

Table 1. RainGauge current situation within target area.

No.	Site Name	Government Service	No.	Site Name	Government Service
01	Gayasan	KMA	27	Sunsan	MOCT
02	Deogyubong	KMA	28	Gimcheon	MOCT
03	Ockcheon	KMA	29	Angye	MOCT
04	Youngdong	KMA	30	Nakdong	MOCT
05	Cheongsan	KMA	31	Goryeonggyo	MOCT
06	Secheon	KMA	32	Gumi	MOCT
07	Gagok	KMA	33	Isungyo	MOCT
08	Muju	KMA	34	Baegun	MOCT
09	Deogyusan	KMA	35	Ungyang	MOCT
10	Donghyang	KMA	36	Buhang 1	MOCT
11	Sunsan	KMA	37	Muju	MOCT
12	Daedeok	KMA	38	Jisan	KOWACO
13	Seongju	KMA	39	Gabuk	KOWACO
14	Goryeong	KMA	40	Geochang 1	KOWACO
15	Oksan	KMA	41	Buksang	KOWACO
16	Gimcheon	KMA	42	Gunbuk	KOWACO
17	Yangmok	KMA	43	Daesungsan	KOWACO
18	Hyunpung	KMA	44	Annam	KOWACO
19	Angye	KMA	45	Iwon	KOWACO
20	Daebyoung	KMA	46	Hwanggan	KOWACO
21	Buksang	KMA	47	Sangchon	KOWACO
22	Goryeong	MOCT	48	Youngdong	KOWACO
23	Hyunpung	MOCT	49	Geumsan	KOWACO
24	Daega	MOCT	50	Moseo 2	KOWACO
25	Waegwan	MOCT	51	Seolcheon	KOWACO
26	Jangcheon	MOCT	52	Mupung	KOWACO

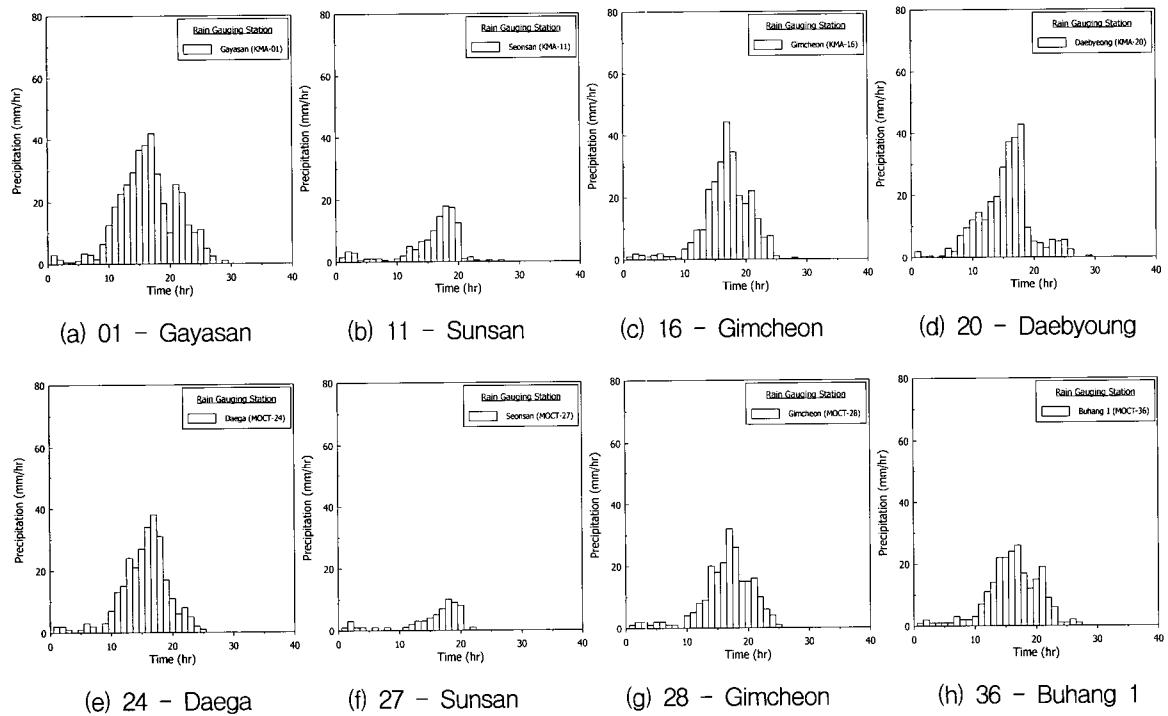


Fig. 4. The rainfall hyetograph of main points within target area(continued)

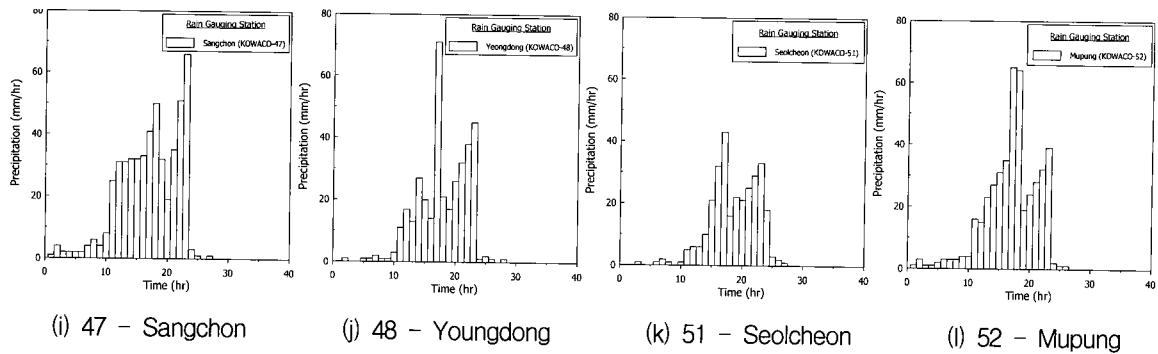


Fig. 4. The rainfall hyetograph of main points within target area

탕으로 이론적 베리오그램을 산출하였다. 베리오그램 산출과정에서 자료들의 방향성을 고려하기 위한 방향각과 허용한계 각의 크기는 모형의 수행자가 임의로 선정할 수 있지만 너무 작게 잡으면 계산의 양이 많아지고 분리거리 이내에 속하는 자료의 개수는 줄어들어 계산된 베리오그램이 불안정해지는 경우가 발생할 수 있다 (최종근, 2002). 따라서 본 연구에서는 자료의 이방성에 따른 변화도를 고려하는 과정에서 전방향(omni-directional), 남북방향(NS±22.5°), 동서방향(EW±22.5°)에 대한 변화도를 모두 고려하여 이론적 베리오그램을 산출하였다. 최종적인 이론적 베리오그램 모형으로는 spherical anisotropy model을 이용하였으며, 이를 바탕으로 Cov_{GC} (지상 강우량자료) 및 Cov_{RR} (레이더 반사도 자료) 공분산 매트릭스와 Cov_{RC} (강우량 및 반사도 자료) 상호 공분산 매트릭스의 값을 추정하였다.

Fig. 5는 8월 31일 10:00에서의 레이더 반사도 측정자료와 지상 강우량 관측자료에 대한 공분산 매트릭스와 이들 두 자료들의 상호 공분산 매트릭스에 대한 spherical anisotropy model 결과를 보여주고 있으며, Table 2는 전체 시간에 대한 spherical anisotropy

model의 주요 매개변수 결과값을 나타내고 있다. 구분 기호 ㉑ 및 ㉒는 강우 관측자료 및 레이더 관측자료에 대한 반 베리오그램을 나타내고 있으며, ㉓는 두 자료에 대한 교차 반 베리오그램을 나타내고 있다.

Spherical anisotropy model에 의해 산정된 전체 모의시간에 대한 매개변수는 각 자료들에 대한 시간별 지형통계학적 특성들을 잘 나타내고 있으며, 이러한 값들을 이용하여 강우 관측자료에 대한 kriging 작업을 수행하였다. 또한 kriging 결과와 레이더 자료의 지형통계학적 특성값들을 이용하여 최종적인 cokriging 작업을 수행함으로써 전체 자료에 대한 개선된 정량 강우량 값을 산정할 수 있었다.

Fig. 6(a)는 대상유역에 위치한 강우관측소를 이용한 Thiessen 망을 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 8월 31일 10:00에 대한 레이더 반사도 자료를 나타내고 있다. Fig. 6(c)는 cokriging을 이용한 정량강우량 산정 결과인데 강우량 자료와 레이더 자료 모두를 이용하여 추정된 강우량은 지점에 대한 점강우량과 공간적인 분포 및 경계에 있어서 개선된 결과를 나타내고 있음을 Fig. 6을 통해서 확인할 수 있다.

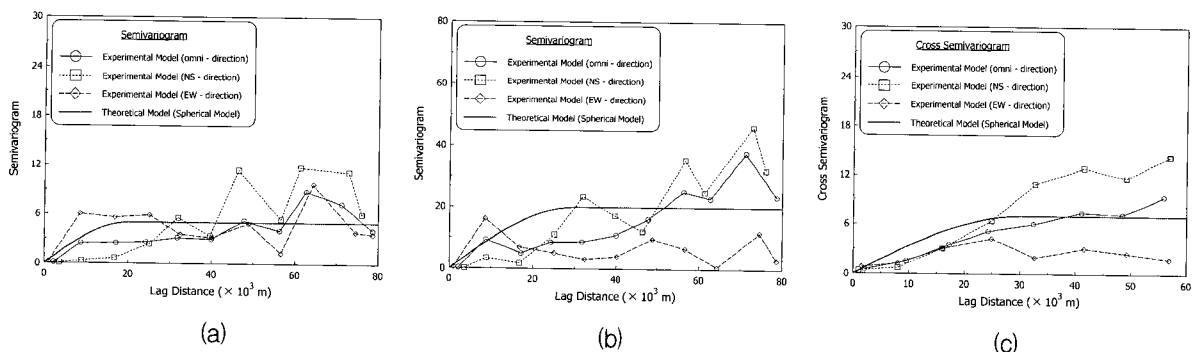


Fig. 5. (a) sample experimental semivariogram and best fit estimate of semivariogram for radar reflectivity, (b) sample experimental semivariogram and best fit estimate of semivariogram for rain gauge data, (c) sample experimental cross-semivariogram and best fit estimate of cross-semivariogram between radar reflectivity and rain gauge data (10:00 a.m., August 31, 2002)

Table 2. The parameter estimation results of spherical anisotropy model

Date		nugget value	sill value	actual range	Date		nugget value	sill value	actual range
08.31.01:00	(a)	0.01	1.00	10.0	08.31.16:00	(a)	0.01	100.00	20.0
	(b)	0.01	8.50	10.0		(b)	0.01	12.00	10.0
	(c)	0.01	2.00	40.0		(c)	0.01	10.00	30.0
08.31.02:00	(a)	0.01	1.30	30.0	08.31.17:00	(a)	0.01	100.00	20.0
	(b)	0.01	3.00	20.0		(b)	0.01	19.00	10.0
	(c)	0.01	0.50	15.0		(c)	0.01	10.00	30.0
08.31.03:00	(a)	0.01	0.80	20.0	08.31.18:00	(a)	0.01	80.00	20.0
	(b)	0.01	0.90	30.0		(b)	0.01	20.00	10.0
	(c)	0.01	0.15	10.0		(c)	0.01	5.00	30.0
08.31.04:00	(a)	0.01	0.30	20.0	08.31.19:00	(a)	0.01	50.00	30.0
	(b)	0.01	5.00	20.0		(b)	0.01	20.00	30.0
	(c)	0.01	0.20	25.0		(c)	0.01	7.00	20.0
08.31.05:00	(a)	0.01	0.60	20.0	08.31.20:00	(a)	0.01	45.00	20.0
	(b)	0.01	2.20	30.0		(b)	0.01	12.00	20.0
	(c)	0.01	0.15	20.0		(c)	0.01	7.00	30.0
08.31.06:00	(a)	0.01	1.20	10.0	08.31.21:00	(a)	0.01	70.00	20.0
	(b)	0.01	8.00	20.0		(b)	0.01	20.00	10.0
	(c)	0.01	0.50	30.0		(c)	0.01	20.00	25.0
08.31.07:00	(a)	0.01	0.80	10.0	08.31.22:00	(a)	0.01	30.00	10.0
	(b)	0.01	2.00	10.0		(b)	0.01	7.00	20.0
	(c)	0.01	0.35	20.0		(c)	0.01	5.00	20.0
08.31.08:00	(a)	0.01	1.20	20.0	08.31.23:00	(a)	0.01	13.00	20.0
	(b)	0.01	3.00	30.0		(b)	0.01	5.00	40.0
	(c)	0.01	0.15	25.0		(c)	0.01	0.30	10.0
08.31.09:00	(a)	0.01	8.00	30.0	09.01.00:00	(a)	0.01	18.00	20.0
	(b)	0.01	8.00	40.0		(b)	0.01	1.00	30.0
	(c)	0.01	5.00	50.0		(c)	0.01	0.40	20.0
08.31.10:00	(a)	0.01	20.00	30.0	09.01.01:00	(a)	0.01	7.00	10.0
	(b)	0.01	5.00	20.0		(b)	0.01	0.08	40.0
	(c)	0.01	4.00	40.0		(c)	0.01	0.70	40.0
08.31.11:00	(a)	0.01	22.00	20.0	09.01.02:00	(a)	0.01	1.60	10.0
	(b)	0.01	9.00	30.0		(b)	0.01	6.00	10.0
	(c)	0.01	7.00	30.0		(c)	0.01	1.10	10.0
08.31.12:00	(a)	0.01	30.00	30.0	09.01.03:00	(a)	0.01	0.60	10.0
	(b)	0.01	3.00	20.0		(b)	0.01	0.07	10.0
	(c)	0.01	5.00	20.0		(c)	0.01	0.03	10.0
08.31.13:00	(a)	0.01	40.00	20.0	09.01.04:00	(a)	0.01	0.40	10.0
	(b)	0.01	7.00	20.0		(b)	0.01	1.20	10.0
	(c)	0.01	8.00	25.0		(c)	0.001	0.01	25.0
08.31.14:00	(a)	0.01	60.00	20.0	09.01.05:00	(a)	0.01	0.05	10.0
	(b)	0.01	6.00	40.0		(b)	0.001	0.005	10.0
	(c)	0.01	4.00	25.0		(c)	0.01	0.06	15.0
08.31.15:00	(a)	0.01	80.00	20.0	09.01.06:00	(a)	0.01	0.035	20.0
	(b)	0.01	17.00	40.0		(b)	0.001	0.0025	20.0
	(c)	0.01	8.00	20.0		(c)	0.00001	0.00005	10.0

현재의 강우량 측정장비시설 보유현황 및 기술로는 유역에서의 평균강우량을 정확하게 산정하기가 불가능하다. 따라서 지상의 강우관측소에서 측정된 지점에서의 강우량값을 이용하여 Thiessen 망에 의한 유역에서의 평균강우량을 측정된 결과와 레이더와 지상 강우관측소값을 이용하여 산정한 유역 평균강우량을 정량적으로

로 비교할 수는 없다. 하지만, 기존의 Thiessen 망에 의한 유역 평균강우량 산정방법은 강우관측소 위치에 따라서 일정면적이 동일한 강우량값을 가지는 것으로 계산이 된다. 이러한 문제점은 강우특성이 급격히 변화하는 국지성 호우나 산지의 영향을 많이 받고 있는 국내의 지형에 많은 문제점을 포함할 수도 있다. 또한 강

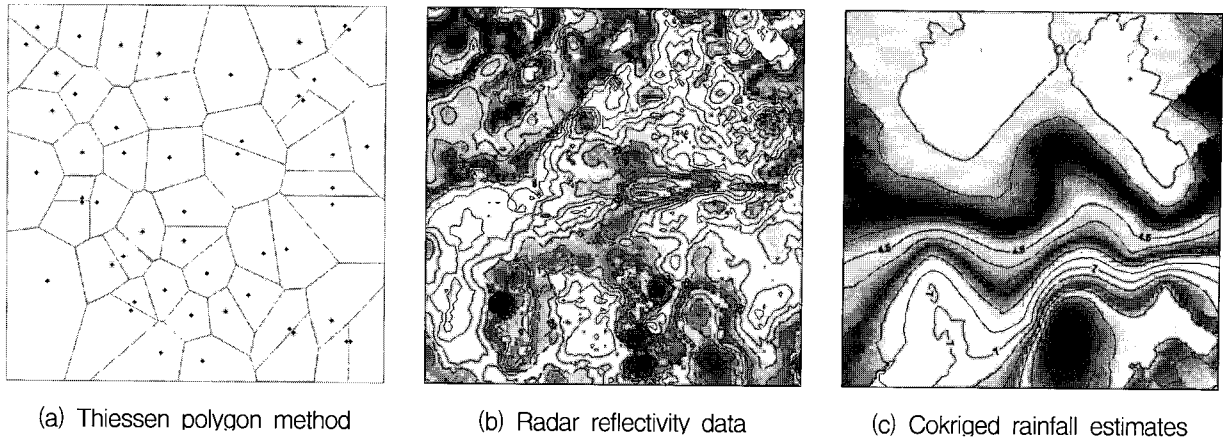


Fig. 6. Quantitative rainfall estimation results(2002.8.31.10:00)

우량 산정 유역에 대한 정확한 강우의 경계를 표현하기가 불가능하다. 이와 같은 점들로 인해 본 연구에서 이용된 지점 강우량(지상 강우관측소 강우량측정값)과 강우의 공간분포(레이더 관측값)를 조합한(ordinary cokriging에 의한) 유역 평균강우량 산정방법은 기존의 방법들보다 향상된 방법론을 제시한다고 할 수 있다. 즉, 지점에서의 정확한 강우량은 지상의 강우관측소 값을 이용하면서 강우의 공간분포형은 레이더에서 측정된 값에 기초하고 있으므로 강우의 특성을 Thiessen 망을 이용한 방법보다 정확히 반영할 수 있으며, 강우의 경계를 좀 더 정확히 확정지을 수 있으므로 유역에서의 평균강우량을 좀 더 정확히 예측할 수 있는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 범람해석을 위한 기본자료 구축을 위해서 지상의 강우관측소와 레이더를 연계하여 개선된 정량강우량을 산정하였다. 지상의 강우관측소 자료의 경우 특정 지점에 대한 비교적 정확하면서 직접적인 관측치를 제공하는 반면 강우의 공간구조를 정확하게 나타내는데 취약하다. 반면 강우의 공간분포를 잘 나타내는 레이더 자료는 강우에 대한 간접 관측치이면서 특히 호우 시 각 지점에 대한 정량강우산정에 취약한 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 정확한 홍수 예측 및 수자원 관리에 필요한 2차원 정량강우 산정을 위하여 각 관측기기의 장단점을 파악하고 장점을 통합하기 위하여 cokriging 기법을 사용한 2차원 정량강우의 산출기법을 제시하였다. 이를 위해서 레이더 반사도 측정자료와 강우관측소에서의 강우량 관측자료의 지형 통계학적 분석을 실시함으로써 cokriging에 필요한 주요 매개변수를 산정할 수 있었다. Cokriging 기법을 통해 강우의 공간적 분포양상 및 강우의 경계를 정확하게

묘사할 수 있는 레이더 자료와 한 지점에서 좋은 정확도를 가지는 강우량 자료를 조합함으로써 개선된 2차원 정량강우를 산정할 수 있었다. 모형에 의하여 산정된 2차원 강우자료는 개선된 결과를 보였으며 본 모형의 결과는 강우-유출 해석, 홍수예측 및 수자원관리 전반에 큰 도움을 줄 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 한국과학재단에서 위탁시행한 2004년도 특정연구개발사업중 웹기반 홍수 정보 시스템 Prototype 개발사업(과제번호 : M1-0402-02-0002-04-002-02-000-00)에 의한 연구로서 관계당국에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 기상연구소 (1996). 레이더를 이용한 유역강우 산정 기법 연구(II).
- 김효경, 이동인, 유철환, 권원태 (2002). "WPMM 방법을 이용한 레이더 강수량 추정: 1. 1998년 여름철 관악산 DWSR-88C를 위한 Z_e -R 관계식 산출." 한국수자원학회논문집, 제35권, 제1호, pp. 25-36.
- 안상진, 김진극 (2003). "레이더 반사강도와 강우강도의 Z-R 관계식 산정." 한국수자원학회논문집, 제36권, 제1호, pp. 13-21.
- 최종근 (2002). 공간정보 모델링.
- 하중철 (1999). "한반도 집중 호우 시 중관 배경의 역학 연구." 석사학위 논문, 서울대학교, p. 92.
- Austin, P. (1987). "Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall." *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 1053-1070.
- Bedient, P.B., Hoblit, B.C., Gladwell, D.C., and Vieux,

- B.E. (2000). "NEXRAD radar for flood prediction in Houston." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 3, pp. 269-277.
- Cassirage, E.F., and Gomez-Hernandez, J.J. (1996). "Improved rainfall estimation by integration of radar data." *A geostatistical approach in First European Conference on Geostatistics for Environmental Applications*, Lisboa, Portugal.
- Faures, J.M., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., and Sorooshian, S. (1995). "Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 173, pp. 309-326.
- Hong, S.Y. (1992). "Numerical simulation of a heavy rainfall event occurred over Korea." *Ph. D. Thesis, Seoul National University*, pp. 246.
- Joss, J., and Waldvogel, A. (1990). "Precipitation measurements and hydrology." *Radar in Meteorology*, Atlas, D., Ed., American Meteorological Society, pp. 448-451.
- Journel, A.G., and Huijbregts, A.T. (1978). *Mining Geostatistics*, Academic, Orlando, Florida.
- Krajewski, W.F. (1987). "Cokriging radar-rainfall and rain-gauge data." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, pp. 9571-9580.
- Krajewski, W.F., Lakshmi, V., Georgakakos, K.P., and Jain, S.C. (1991). "A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 119-128.
- Michaud, J.D., and Sorooshian, S. (1994). "Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized, semiarid watershed." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 3, pp. 593-605.
- Ogden, F.L., and Julien, P.Y. (1994). "Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 1-18.
- Rosenfeld, D., Wolff, B.D., and Atlas, D. (1993). "General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 50-72.
- Rosenfeld, D., Wolff, B.D., and Amitai, E. (1994). "The window probability matching method for rainfall measurements with radar." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, pp. 682-693.
- Rosenfeld, D., Amitai, E., and Wolff, B.D. (1995). "Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, pp. 198-211.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F., Azimi-Zonooz, A., and Bowles, D.S. (1990). "Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using cokriging. II: Results." *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 915-924.
- Smith, P.L. (1990). "Precipitation measurements and hydrology." Panel report, *Radar in Meteorology*, Atlas, D., Ed., American Meteorological Society, pp. 607-618.
- Steiner, M., Houze, R.A., and Yuter, S.E. (1995). "Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gauge Data." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, pp. 1978-2004.
- Sun, S., Mein, R.G., Keenan, T.D., and Elliott, J.F. (2000). "Flood estimation using radar and raingauge data." *Journal of Hydrology*, Vol. 239, pp. 4-18.
- Wilson, J.W., and Brandes, E.A. (1979). "Radar measurement of rainfall - a summary." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 60, pp. 1048-1060.
- Winchell, M., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. (1998). "On the simulation of infiltration and saturation excess runoff using radar-based estimates: Effects of algorithm uncertainty and pixel aggregation." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 10, pp. 2655-2670.
- Woodley, W.L., Olsen, A.R., Herndon, A., and Wiggert, V. (1975). "Comparison of gage and radar methods for convective rain measurement." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 909-928.
- Zawadzki, I.I. (1975). "On radar-rain gauge comparison." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 1487-1509.

(논문번호:05-22/접수:2005.02.07/심사완료:2006.03.06)