

연속수정법을 이용한 레이더 자료와 지상 강우자료의 합성

Synthesis of Radar Measurements and Ground Measurements using the Successive Correction Method(SCM)

김 경 준* / 최 정 호** / 유 철 상***

Kim, Kyoungjun / Choi, Jeongho / Yoo, Chulsang

Abstract

This study investigated the application of the successive correction method(SCM), a simple data assimilation method, for synthesizing the radar and rain gauge data. First, the number of iteration and influence radius for the SCM application were decided based on their sensitivity analysis. Also, for the evaluation of synthetic rainfall, the distributed rainfall field using the dense rainfall gauge network was assumed to be the true one. The synthetic rainfall field based on the SCM was also compared quantitatively with the one based on the co-Kriging frequently used nowadays. As the results, the SCM, a simple and economical data assimilation method, was found to secure the accuracy and statistical characteristics of the co-Kriging application.

keywords : radar data, rain gauge data, synthetic rainfall field, successive correction method

요 지

본 연구에서는 자료동화 기법의 가장 간단한 방법이라 할 수 있는 연속수정법(successive correction method)을 이용한 레이더 강우자료와 지상 강우자료의 합성방법에 대한 적용성을 검토하였다. 우선 연속수정법의 적용 시 고려해야 할 사항인 반복계산 횟수 및 영향 반경의 규모를 민감도 분석을 통해 결정하였다. 또한 자료 합성에 대한 정량적인 평가를 위해 밀도 있는 지상 강우자료를 공간분포시켜 실제 강우장을 가정하였다. 최근 자료 합성에 많이 이용되고 있는 co-Kriging을 이용하여 두 자료를 합성하여 연속수정법에 의한 자료 합성 결과를 정량적으로 분석하였다. 그 결과 간단하고 경제적인 자료동화 기법인 연속수정법으로도 co-Kriging을 이용하는 경우의 통계적 특성 및 정확도를 확보할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 레이더 강우자료, 지상 강우자료, 합성강우장, 연속수정법

* 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사수료.

Graduate Research Assistant, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
(e-mail: guitar77@korea.ac.kr)

** 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사수료

Graduate Research Assistant, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
(e-mail: justinchoi@korea.ac.kr)

*** 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수.

Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
(e-mail: envchul@korea.ac.kr)

1. 서 론

현재 우리나라에서는 임진강 유역의 특수상황을 고려하여 강우 레이더가 설치되어 운영 중에 있으며, 그 효용성으로 인해 곧 전국적인 레이더 관측망이 설치될 전망이다(염경택 등, 2000; 이명섭, 2000). 그러나 강우 레이더 자체는 강우-유출해석에 직접 이용될 수 있는 정도의 강우자료를 생산해 주지는 못한다. 즉, 단순히 강우 레이더의 도입으로 강우관측의 정확성 또는 강우-유출 해석에 있어서의 효용성을 만족시키지는 못한다. 따라서 레이더 자료의 보다 직접적인 이용을 위해서는 레이더 강우자료의 지상보정, 레이더 강우자료와 지상 강우자료의 합성과 같은 여러 가지 관련 문제를 먼저 해결해야 한다.

이러한 문제들을 좀 더 자세히 살펴보면 먼저, 레이더 강우의 지상보정 문제는 소위 Ground-Truth라고 불리는 문제로서 레이더 강우의 평균 및 공간상관특성을 보정하는 문제이다(Yoo, 2002; Ha *et al.*, 2002). 이러한 목적으로 지상 우량 관측망을 다시 설계하기도 하며, 보정을 위한 적절한 알고리즘을 개발하기도 한다(North *et al.*, 1994). 이는 기본적으로 원격탐사된 강우자료가 그 평균뿐만 아니라 강우장의 시-공간적인 변동성을 정확히 재현하지 못하는 문제점을 극복하기 위한 것이다. 이와 같은 문제의 해결 없이 사용하는 레이더 강우자료는 시각적 효과이상의 가치를 발휘하기 어렵게 된다.

지상 보정된 레이더 강우와 지상의 점 강우자료를 어떻게 합성하느냐의 문제는 레이더 강우의 효용성을 향상시킬 수 있는 또 다른 문제에 속한다. 두 개의 독립적인 방법으로 측정된 자료를 적절히 합성 또는 결합하여 사용하지 못한다면 어느 하나의 관측에 의존하는 결과를 가져올 수밖에 없다. 기껏해야 레이더 강우를 우량계 자료로 보정하는 수준에 머무르게 될 것인데, 이는 강우장의 시-공간적 변동특성을 완벽히 보정할 수 있는 경우에만 유효하다. 따라서 현재 상태에서(즉, 강우장의 시-공간적 변동성을 완벽히 보정하지 못하는 상태) 두 관측 자료의 합성은 매우 중요한 의미를 갖는다. 현재 많이 시도되고 있는 방법은 co-Kriging을 이용하는 것이다(Seo, 1990a; 1990b; 1991). 그러나 홍수예경보 시스템과 같이 신속한 합성결과를 요구하는 경우에 있어서는 보다 효율적인 방법의 개발이 필요한 실정이다. 또한 co-Kriging 방법을 이용하여 강우장을 합성할 경우 성긴 지상 강우관측망으로 인한 반분산합수(semi-variogram) 추정의 문제점 등으로 인하여 여러 가지 Kriging 방법들이 제시되고 있으며, 이를 극복하기 위한 대안들이 현재 활발하게 수행되고 있다(Seo,

1991; Todini, 2001; Sinclair and Pegram; 2005).

최근 자료의 합성을 위해 다양하게 시도되고 있는 방법은 자료동화(data assimilation)기법을 이용하는 것이다(McLaughlin, 2002). 자료동화 기법은 기상학 분야에서 많이 발전되어 온 방법으로 제한적인 정보, 즉 관측자료를 이용하여 대기의 상태를 파악하는데 있어서 이를 잘 나타내는 모형을 이용하여 동화하는 방법이라고 정의할 수 있다(Kalnay, 2003). 여기서 동화(assimilation)란 관측치를 가장 잘 구현하는 모형을 찾아내는 과정이라 할 수 있다. 이러한 자료동화 기법들은 수치예보에 있어서 성긴 관측자료를 모형의 초기장과 동일한 시공간적 해상도의 자료로 보정하기 위해 많이 이용되어 왔다(Kuo *et al.*, 1993; Errico *et al.*, 2000). 여기서 초기 예보자료와 같은 초기장(initial field)을 레이더 강우라고 가정하여 지상 강우자료를 동화시키게 되면 레이더 강우와 지상 강우자료를 합성할 수 있게 된다.

자료동화 기법은 연속수정법(successive correction method; Bergthórsson and Döös, 1955; Cressman, 1957; Barnes, 1964; Brandes, 1975), Nudging(Hoke and Anthes, 1976; Stauffer *et al.*, 1991), Variational method(Grecu and Krajewski, 2001), Kalman Filtering(Caya *et al.*, 2005; Chumchean *et al.*, 2006) 등과 같이 많은 방법들이 개발되고 응용되어 왔으며 최근 수문 분야에서도 그에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Houser *et al.*, 1998; Entekhabi *et al.*, 1999; Crow and Wood; 2003). 본 연구에서는 여러 자료동화 기법 중에서 자료동화 기법의 가장 기본적인 방법이라 할 수 있는 연속수정법을 이용하여 레이더 강우자료와 지상 강우자료를 합성하는 방법에 대한 효율성을 검토하고자 한다. 연속수정법을 적용하는데 있어서 우선 고려해야 할 사항은 반복계산(iteration) 횟수 및 영향 반경(influence radius)을 어떻게 결정하느냐이다. 반복계산 횟수는 계산시간의 영향을 미칠 뿐만 아니라 너무 적은 반복계산 횟수는 관측 자료를 적절히 반영하지 못하는 결과를 제시할 가능성이 있다. 또한 너무 작은 영향반경은 지역적인 강우특성만을 고려할 가능성이 있으며 너무 큰 영향 반경은 강우장 전체를 평활화시킬 가능성과 아울러 연속수정법의 적용 시 많은 계산 시간이 소요될 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 연속수정법의 적용 시에 고려해야 할 반복계산 횟수 및 영향 반경의 적정 규모를 민감도 분석을 통해 결정하고, 이에 따라 레이더 강우자료와 지상 강우자료를 합성하여 그 효율성을 검토하고자 한다. 이를 위해 적절한 방법으로 실제 강우장을 가

정하고, 연속 수정법 및 최근 자료 합성에 많이 이용되고 있는 co-Kriging에 의한 합성강우장과의 정량적인 평가를 실시하고자 한다. 본 연구는 대상 범위를 중부 내륙 지방의 170 km×170 km의 크기를 가지는 임의의 범위로 선정하였으며, 대상 범위에 대한 관악산 레이더 자료와 건설교통부 T/M관측소의 자료를 이용하였다.

2. 배경 이론

2.1 연속수정법 (Successive Correction Method; SCM)

Bergthórsson and Döös(1955), Cressman(1957)에 의하여 제안된 연속수정법은 경험적인(empirical) 자료동화기법의 하나로 수치예보모형(numerical forecasting model)의 초기장(initial field)을 격자화시키기 위해 사용되고 있는 대표적인 방법이다(Kalnay, 2003). 이 방법은 관측값과 추정값의 차이를 이용하여 추정값을 수정하고 새롭게 수정된 장(field)을 새 추정값으로 하여 이와 같은 작업을 반복함으로써 관측값과 가장 근사한 추정장을 구하는 것이다. 연속수정법의 근간이 되는 지배방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$f_i^{n+1} = f_i^n + \frac{\sum_{k=1}^{K_i^n} W_{ik}^n (f_k^o - f_k^n)}{\sum_{k=1}^{K_i^n} W_{ik}^n + \epsilon^2} \quad (1)$$

여기서, K_i^n 은 n 번째 반복계산(iteration)에서 격자점 주변에 존재하는 관측치의 개수, f_i^n 는 격자점에서 n 번째 반복계산에서의 추정치, f_k^o 는 격자점 주변에 존재하는 k 번째 관측치, f_k^n 은 k 번째 관측치에서 산정된 n 번째 반복계산에서의 추정치 그리고, ϵ^2 는 추정치 오차 분산(background error variance)에 대한 관측치 오차 분산(observation error variance)의 비율(ϵ_o/ϵ_e ; ϵ_e 는 추정치 오차 분산, ϵ_o 는 관측치 오차 분산)이다. 일반적으로 추정하고자 하는 값은 미지의 값(unknown value)이기 때문에 큰 오차를 포함하고 있다고 가정할 수 있으며, 이에 따라서 ϵ^2 는 '0'으로 가정된다(Kalnay, 2003). 추정에 사용되는 격자와 관측치 및 영향 반경에 대한 개념적인 그림을 나타내면 Fig. 1과 같다.

연속수정법의 적용 시 사용되는 가중치 W_{ik}^n 는 관측치와 추정치간의 거리의 함수로 나타내어진다. 대표적인 가중 함수인 Cressman(1959)과 Barnes(1964)의 가중 함수(weight function)는 각각 Eqs. (2) and (3)과 같

다(Kalnay, 2003). 본 연구에서는 Brandes(1975)에 의해 레이더 자료와 지상 관측자료의 합성에 이용된 바 있는 Barnes(1964)의 가중함수를 적용하였다. Barnes(1975)의 가중함수는 반복계산에 따라서 $\sqrt{\gamma}$ 의 비율로 영향원의 반경이 감소한다. 이와 같은 영향반경의 변화는 첫 번째 반복계산을 수행할 경우에는 큰 공간적 범위에 대한 자료를 이용하여 격자 값을 수정하고, 점차 계산 횟수가 늘어나면서 더 작은 범위의 공간적 특성으로 격자 값을 수정하기 위함이라 할 수 있다. 일반적으로 너무 작은 γ 는 작은 규모의 특성만을 반영하게 되어 가장 인접한 점의 값에 지배적인 결과를 나타낼 수 있으며, γ 가 1일 경우에는 강우장의 패턴이 평활화되는 경향을 나타내게 되며 더 많은 계산시간이 소요된다.

$$W_{ik}^n = \frac{R_n^2 - r_{ik}^2}{R_n^2 + r_{ik}^2} \quad \text{for } r_{ik}^2 \leq R_n^2 \quad (2)$$

$$W_{ik}^n = e^{-r_{ik}^2/2R_n^2}, \quad R_{n+1}^2 = \gamma R_n^2 \quad (3)$$

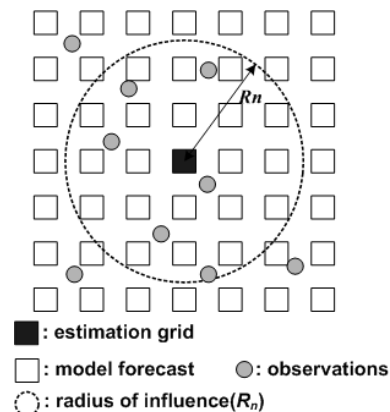


Fig. 1. Schematic of Grid Points, Irregularly Distributed Observations and a Radius of Influence in Successive Correction Method (Kalnay, 2003)

2.2 Co-Kriging

Co-Kriging 방법은 두 개 이상의 변수(주변수, 이차변수)의 선형조합을 통해 알려지지 않은 지점에서의 값을 예측하는 Kriging 기법 중에 하나이다(Journel and Huijbrechts, 1978). 여기서 주변수(primary variable)는 예측하고자 하는 변수로 일반적으로 높은 정확도를 가지고 있다. 또한 이차변수(secondary variable)는 주변수와의 공간상관관계가 존재하는 변수로 비교적 공간적으로 조밀한 분포를 가지게 된다. 따라서 레이더 강우자료와 지상 강우자료와의 합성에 관한 문제에서는 주변수와 이차변수를 각각 지상 강우자료와 레이더 강우

자료로 나타낼 수 있다. Co-Kriging의 지배방정식은 Eq. (4)와 같다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^{n_g} \lambda_g^i z_g^i + \sum_{j=1}^{n_r} \lambda_r^j z_r^j, \quad \sum_{i=1}^{n_g} \lambda_g^i = 1, \quad \sum_{j=1}^{n_r} \lambda_r^j = 0 \quad (4)$$

여기서 z^* 은 co-Kriging 추정치, λ_g^i 는 i 번째 지상 강우 자료에 대한 가중치, z_g^i 는 i 번째 지상 강우자료, λ_r^j 는 j 번째 레이더 강우자료에 대한 가중치, z_r^j 는 j 번째 레이더 자료, 그리고 n_g 와 n_r 은 각각 지상 강우자료 및 레이더 강우자료의 개수를 나타낸다. 또한 $\sum_{i=1}^{n_g} \lambda_g^i = 1$ 와

$\sum_{j=1}^{n_r} \lambda_r^j = 0$ 는 지상 강우자료에 대한 불편추정량을 만족시키기 위한 제약조건이다.

Co-Kriging을 수행하기 위해서는 추정해야 할 가중치인 λ_g^i 와 λ_r^j 은 레이더 강우자료와 지상 강우자료의 반분산함수를 이용하여 추정하게 된다. 레이더 자료의 경우 방대한 자료로 인하여 반분산함수를 구하는데 문제점이 없으나 지상 강우관측치의 경우는 자료가 일반적으로 많지 않기 때문에 지상 강우관측치의 반분산함수 및 레이더 강우와의 교차 반분산함수(cross semi-variogram)을 구하는데에 문제점이 발생하게 된다. 또한 co-Kriging 방법을 적용할 경우 반분산함수를 추정하는 자체뿐만 아니라 레이더 격자수의 두배에 해당하는 행렬의 역함수를 계산하여야 하며 이를 계산하는데 많은 계산시간이 소요된다는 단점이 있다(Seo, 1991; Todini, 2001).

3. 대상 자료

3.1 자료의 범위

본 연구에서 고려하는 대상 자료의 공간적 범위는

관악산 레이더의 관측 반경 중 중부 내륙지방에 해당하는 170 km× 170 km의 구간으로 선정하였다(Fig. 3). 또한 Table 1과 같은 10개의 시간 단위 자료를 대상으로 분석을 실시하였다.

3.2 레이더 강우자료

본 연구에서 사용한 레이더 강우자료는 관악산 레이더(Table 2)의 10분 자료이며 레이더 반사도와 강우강도간의 관계를 나타내는 $Z-R$ 관계식($Z=aR^b$)의 매개변수로는 $a=200$, $b=1.6$ 를 적용하였다. 지상 자료와 동일한 시간 간격을 유지시키기 위해 1시간 단위로 시간평균을 실시하였다. 레이더 자료는 지상보정(ground-truth)을 실시하지 않은 자료이며 따라서 원시 레이더 강우자료를 의미한다.

3.3 지상 강우자료

레이더 자료와 합성을 위해 사용된 자료는 건설교통부 관할 TM 관측소의 시간강우자료이다. 본 연구의 대상 범위(Fig. 2(a)) 내에 존재하는 건설교통부 관할 TM 관측소는 124개로 조사되었다(Fig. 2(b)). 이 중에서 실제로 레이더 자료와의 합성에 이용되는 자료는 비교적 등분포하는 68개의 관측소의 자료를 선택하였다(Fig. 2(c)). 또한 나머지 56개의 관측소 자료(Fig. 2(d))는 합성강우장의 평가를 위해 이용되었다.

3.4 실제 강우장

합성 강우장이 어느 정도 적절하게 실제 강우장을 반영하는지에 대한 평가를 위해서는 실제 강우장 자료를 알아야 한다. 그러나 실제 강우장을 파악하는 것은 불가능하며, 본 연구에서는 대상 범위 내에 존재하는 124개의 모든 건설교통부 관할 TM 관측소(Fig. 2(a)) 자료를 이용하여 block-Kriging(Journel and Huijbrechts, 1978)한 값으로 가정하였다. Block-Kriging을 수행하기 위한 반분산 함수는 Eq. (5)와 같은 구형 모형(spherical model)으로 추정되었다(Fig. 3 and Table 3).

Table 1. Temporal Extent of Data Considered in This Study

Event number	Time (year/month/date/hour, LST)	Storm type	Event number	Time (year/month/date/hour, LST)	Storm type
1	2003/08/19/05	Jangma (Monsoon)	6	2003/08/19/22	Jangma (Monsoon)
2	2003/08/19/08		7	2003/08/20/01	
3	2003/08/19/16		8	2003/08/23/09	
4	2003/08/19/20		9	2003/08/24/15	
5	2003/08/19/21		10	2003/08/24/17	

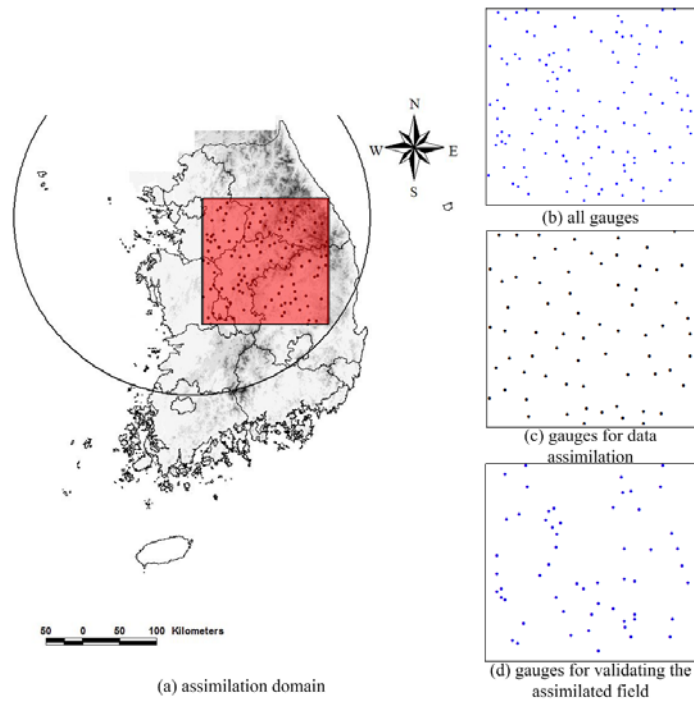


Fig. 2. Spatial Analysis Extent and Spatial Distribution of Rain Gauges

Table 2. Technical Characteristics of Mt. Gwanak Radar (2003)

Radar site		Seoul(Mt. Gwanak)
Launch date		1970. 2
Location		LAT : 37° 26' 38" LON : 126° 57' 50"
Manufacturer		EEC (USA)
System		DWSR-88C
Transmitter	Type	Magnetron
	Band	C band
	Frequency	5,340 MHz
	Peak power	250 KW
	Wave length	5.6 cm
	Pulse recurrence frequency (PRF)	250, 1180 Hz
	Pulse Width (PW)	0.83, 2.0 μs
Receiver	Dynamic range	95 dB
Antenna	Beams width	1.2 °
	Antenna diameter	3.6 m
Signal processor	Gate size	1,000 m
	Nyquist velocity	3.51 m/s

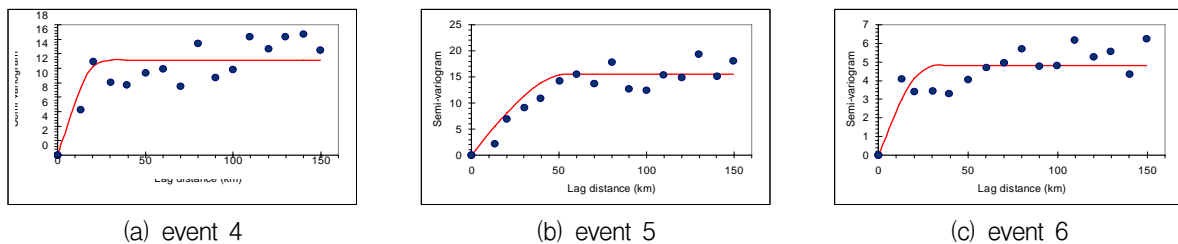


Fig. 3. Semi-variograms of Ground Measurements of 124 Rain Gauges

Table 3. Results of Regression Analysis to Spherical Analytic Variogram

Event number	a	c	R ²	Event number	a	c	R ²
1	32.0	14.9	0.67	6	30.1	4.8	0.77
2	81.0	39.5	0.81	7	109.6	8.4	0.87
3	32.7	6.1	0.36	8	62.0	6.5	0.75
4	25.6	13.1	0.78	9	75.0	16.7	0.63
5	55.2	15.5	0.91	10	23.5	19.6	0.42

$$\gamma(h) = \begin{cases} c[1.5(h/a) - 0.5(h/a)^3], & \text{if } h \leq a \\ c, & \text{if } h \geq a \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $\gamma(h)$ 는 거리 $h(\text{km})$ 에 대한 반분산함수(mm^2), c 는 sill height(mm^2), a 는 actual range(km)이다.

4. 반복계산 횟수 및 영향 반경의 규모에 따른 연속수정법의 적용 결과

4.1 반복계산에 따른 합성 강우장의 변화 특성

연속수정법을 적용함에 있어서 고려해야 할 중요한 사항 중에 하나는 반복계산 횟수를 결정하는 것이다. 반복계산 횟수는 계산 시간에 결정적으로 영향을 미치기 때문에 연속수정법의 효율성과 직결된다. 효율성을 극대화시키기 위해서는 반복계산 횟수를 작게 하는 것이 바람직하지만, 너무 작은 반복계산 횟수는 추정치가 관측치에 도달하지 못하는 경우를 발생시키게 된다. 따라서 반복계산 횟수에 따른 오차의 거동특성을 살펴볼 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 Eq. (5)과 같은 자승오차의 합(sum of square error; SSE)을 반복계산 횟수의 변화에 따라 산정하였다.

$$SSE = \sum_{i=1}^{N_y} (R_{gi} - R_{ri})^2 \quad (5)$$

여기서 SSE 는 자승오차의 합, 그리고 R_{gi} 와 R_{ri} 는 각

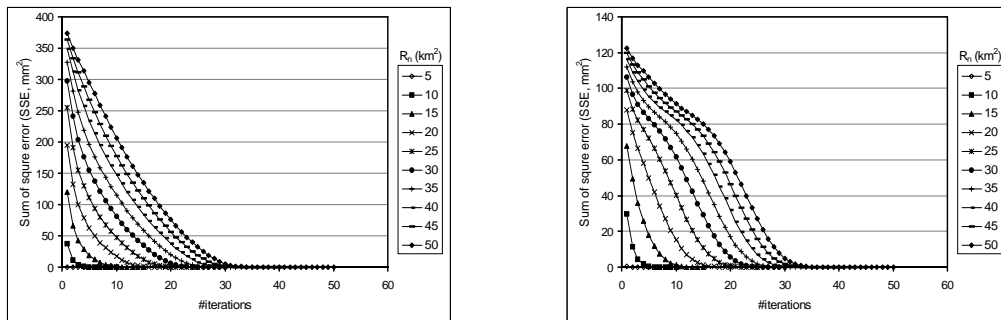
각 i 번째 지상 관측치에 해당하는 격자점에서 지상 강우자료 및 합성 강우 자료를 나타낸다.

Fig. 4와 같이 반복계산 횟수가 증가할수록 자승오차의 합은 감소하게 된다. 또한 어느 정도 수준에 이르게 되면 자승오차의 합은 '0'으로 수렴한다. 현재 우리나라 기상청에서는 일반적으로 2~3회의 반복계산 횟수로 연속수정법을 실시하고 있다(정성화, 2005). 하지만 이와 같은 반복계산 횟수는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 많은 오차를 포함하게 될 가능성이 있다. 따라서 반복계산 횟수는 자승오차의 합이 '0'이 될 때까지 수행하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

Fig. 5는 영향반경 50 km일 경우 event 5에 대하여 반복계산 횟수에 따른 합성 강우장의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 반복계산 횟수가 30회 이상일 경우 변화가 거의 일어나지 않게 된다. 또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 자승오차의 합이 30회 정도에서 '0'으로 수렴하게 된다. 다시 말해서 지상 강우자료가 위치하는 격자점에서 지상 강우자료와 합성 강우자료간의 차이가 '0'이 될 경우 수정되는 값이 없기 때문에 더 이상 합성강우장의 변화는 없게 된다.

4.2 영향원 반경 변화에 따른 합성 강우장의 변화 특성

영향원의 범위는 연속수정법을 적용하는 데 있어서 결정해야 할 또 하나의 중요한 인자이다. 영향원의 범위를 나타내는 영향 반경은 합성 강우장의 공간적인 특성을 결정하게 된다. 즉 너무 작은 영향원 반경은 강우의 지역적인 특성을 반영할 가능성이 있으며 너무 큰



(a) event 5 (b) event 6
Fig. 4. Change of SSE Depending on the Number of Iterations

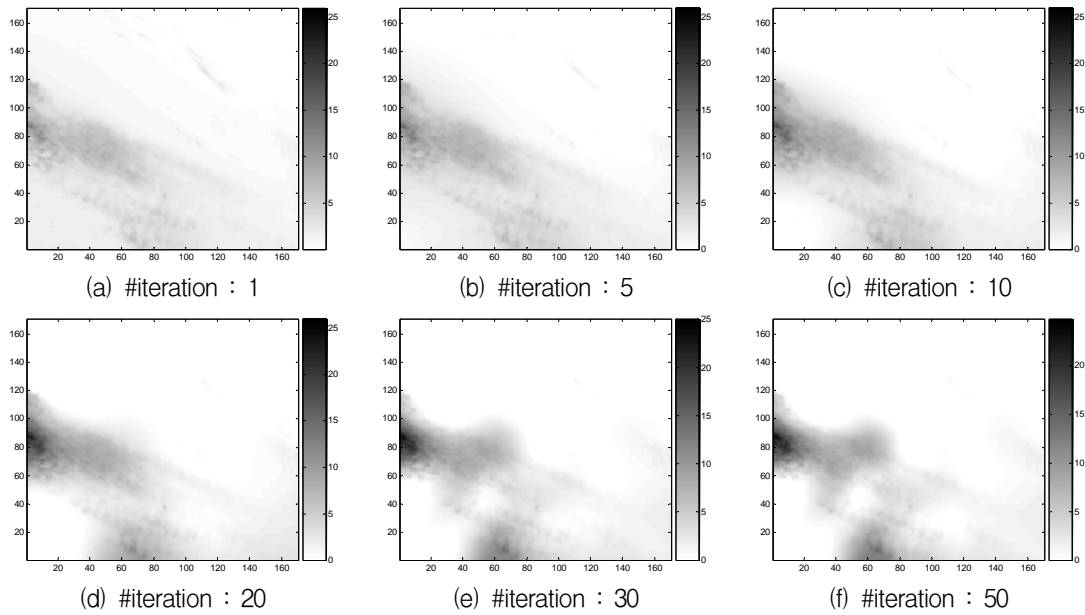


Fig. 5. Variation of Synthetic Rainfall Fields to Number of Iterations (event 5)

영향원 반경은 전체 강우장을 평활화시킬 가능성을 가지게 된다. 현재 기상청에서는 30 km의 영향반경이 적용되고 있으나 이에 대한 근거는 제시되지 않고 있다 (정성화, 2005). 따라서 본 연구에서는 영향원 반경의 변화에 따른 합성 강우장의 변화를 살펴보았다.

Fig. 6은 영향원 반경의 변화에 따른 합성강우장의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 주목할 만한 사항은 영향 반경이 10 km 이상에서 모두 비슷한 결과를 보여주고 있으며 5 km일 경우는 왜곡된 공간분포를 나타낸다는 점이다. 이와 같이 영향원이 5 km 일 경우 왜곡된 결과를 제시하는 이유는 영향원 반경이 작을 경우 영향 반경 내에 존재하는 지상 강우자료가 하나도 존재하지

않을 가능성이 크기 때문이다. 즉 영향원 반경내에 지상 강우자료가 없을 경우는 반복계산이 진행되어도 수정이 이루어지지 않게 된다. 따라서 영향원의 반경 내에 관측소가 존재할 경우만 수정이 진행 되므로 티센 다각형(Thiessen polygon)의 형상으로 합성 강우장이 나타난다.

이와 같이 10 km 미만의 영향 반경에서 왜곡되는 결과를 제시하는 이유는 지상 강우관측망의 밀도와 관련이 있다. 위에서 언급한 바와 같이 영향원 반경 내에 지상 강우자료가 존재하지 않을 확률이 커지게 되는 경우는 강우관측소간 평균거리가 영향원 반경의 두 배 보다 작은 경우이다. 본 연구에서 적용한 사례는 170 km ×

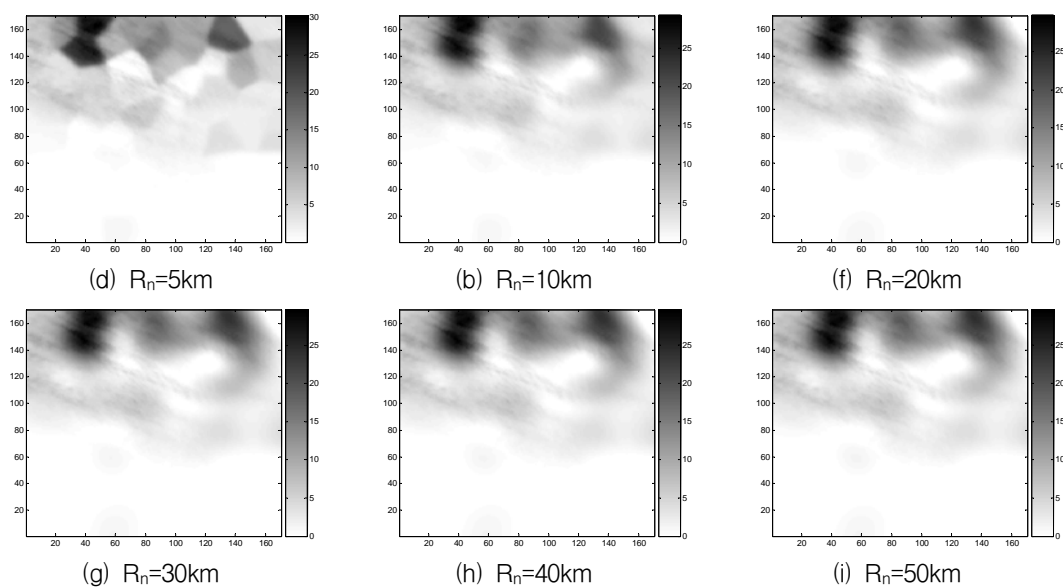


Fig. 6. Change of Synthetic Rainfall Fields Depending on the Influence Radii (event 2)

170 km의 범위에 68개의 강우관측소가 존재하는 경우로 강우 관측망의 밀도는 약 425 km²/개 정도(170 km×170 km/68개)가 된다. 따라서 강우 관측소간 평균 거리는 약 20 km로 나타나며, 이것을 감안한다면 연속수정법을 적용할 경우 10 km 정도 이상의 영향 반경이 되어야 왜곡되지 않은 결과를 제시할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 합성 효율의 평가

Fig. 7은 레이더 강우((a) radar), 68개 및 124개의 강우관측소 자료를 이용한 지상 강우의 block-Kriging 추정치((b) ground, (c) true), co-Kriging 및 연속수정법으로 합성된 강우장의 결과를 비교한 것이다((d), (e)). 연속수정법에서 사용된 영향반경은 4.2절의 결과를 바탕으로 10 km이다. Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 두 방법(co-Kriging 및 연속수정법)에 의한 합성강우장은 모두 레이더 강우자료의 공간적 특성을 적절하게 반영하고 아울러 지상 강우자료의 값을 잘 재현한다는 것을 알 수 있다. 물론 실제 강우장(c)의 좌측 상단부에 위치한 강우대와 같이 레이더 자료 및 합성에 이용된 지상 강우자료만으로 예측이 불가능한 부분도 발생하지만 이것은 단순하게 두 자료의 합성만으로는 개선되기 어려운 부분이라 할 수 있다.

두 방법에 의한 합성강우장이 실제 강우장을 어느 정도 반영하는지를 알기 위해 본 연구에서 가정된 실제

강우장과 합성 강우장간의 산점도를 나타내었다(Fig. 8). Co-Kriging 및 연속수정법을 이용하여 합성된 강우장이 모두 원시 레이더 자료에 비해 실제 강우장의 공간적 특성 및 평균적인 강우량을 우수하게 재현하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 여기서 주목할 만한 사항은 연속수정법과 co-Kriging을 이용한 합성 강우장이 비슷한 결과를 나타내고 있으며, event 6의 경우는 오히려 연속수정법이 더 개선된 결과를 제시하고 있다는 점이다.

합성 효율에 대한 정량적인 평가를 위해 실제 강우장과 레이더 강우자료 및 합성 강우장(co-Kriging 및 연속수정법)간의 통계적 특성치인 CC(Correlation Coefficient), RMSE(Root Mean Square Error), %RMSE(Percent of RMSE), PBIAS(Percent of Bias)를 계산하였다(Table 4). 평균(Mean) 및 표준편차(STDV)는 합성 강우자료가 레이더 강우자료 자체에 비해 실제 강우장과 근접한 결과를 나타내고 있다. 최대값(Max)은 합성강우장 자료가 다소 큰 결과를 제시하고 있는데, 이것은 두 자료간의 합성을 실시할 경우 지상 강우자료의 최대값과 레이더 강우자료의 최대값이 발생하는 위치가 다르기 때문에 나타나는 현상으로 파악된다. 또한 상관계수(CC), RMSE, %RMSE, PBIAS 모두 co-Kriging 및 연속수정법에 의한 합성강우장이 레이더 자료 자체보다 우수한 통계적 특성을 제시하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 실제 강우장에 대한 오차를

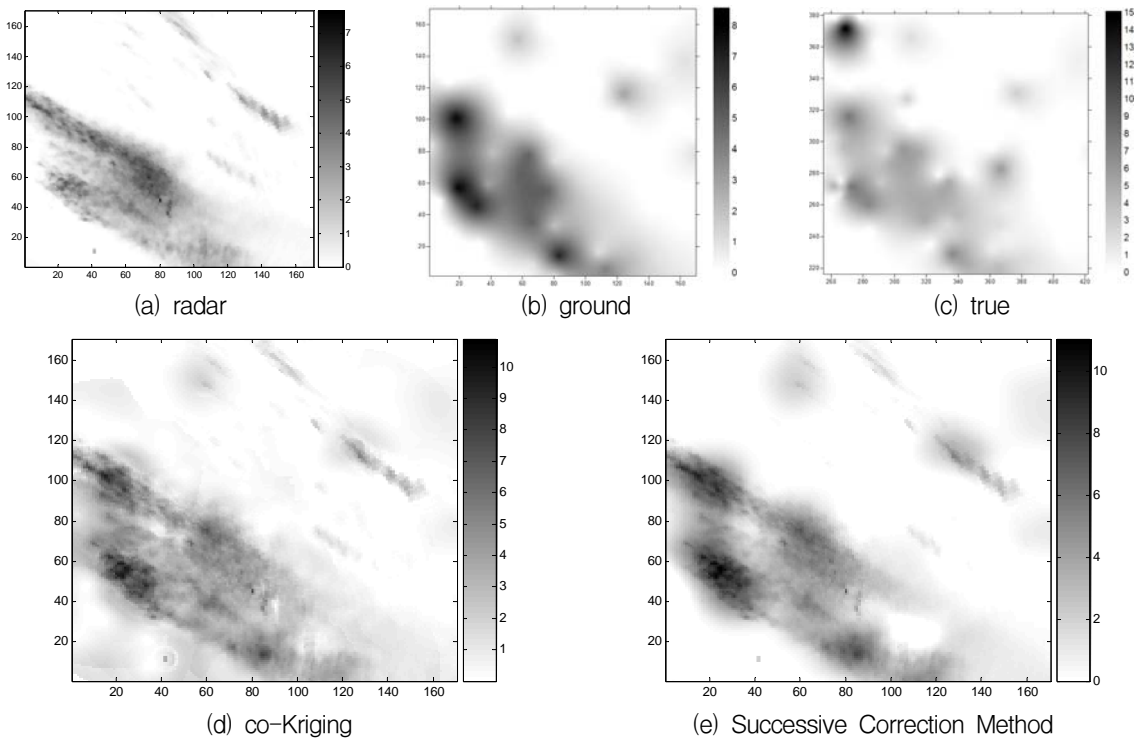


Fig. 7. Comparison of the co-Kriging and SCM (event 6)

Table 4. Statistical Properties of True, Radar, and Synthetic Rainfall Fields

Event	Field	Mean	STDV	Min	Max	CC	RMSE	%RMSE	PBIAS
1	True	1.77	2.62	0.00	19.33	-	-	-	-
	Radar	0.37	0.85	0.00	5.96	0.72	2.52	63.41	78.97
	Co-Kriging	1.71	3.10	0.00	20.20	0.83	1.72	29.42	2.93
	SCM	1.71	3.39	0.00	20.29	0.83	1.88	35.40	3.26
2	True	3.66	4.78	0.00	26.63	-	-	-	-
	Radar	1.72	1.83	0.00	9.20	0.73	4.14	47.37	53.06
	Co-Kriging	3.87	4.78	0.00	29.26	0.89	2.25	14.02	-5.87
	SCM	3.91	5.48	0.00	29.20	0.93	2.03	11.36	-6.83
3	True	1.25	2.06	0.00	15.15	-	-	-	-
	Radar	0.42	0.72	0.00	5.12	0.76	1.79	54.94	65.97
	Co-Kriging	1.13	2.12	0.00	19.85	0.76	1.44	35.93	9.12
	SCM	1.07	2.19	0.00	15.00	0.91	0.95	15.47	13.93
4	True	2.19	2.33	0.00	18.77	-	-	-	-
	Radar	0.77	1.18	0.00	9.87	0.51	2.46	59.08	65.09
	Co-Kriging	2.08	2.57	0.00	23.57	0.79	1.62	25.73	5.02
	SCM	1.86	2.81	0.00	23.42	0.86	1.50	22.00	15.28
5	True	1.72	2.50	0.00	19.81	-	-	-	-
	Radar	0.75	1.35	0.00	11.51	0.82	1.87	37.77	56.49
	Co-Kriging	1.69	3.00	0.00	30.66	0.90	1.34	19.42	1.92
	SCM	1.62	3.01	0.00	25.17	0.94	1.09	12.88	5.76
6	True	1.45	1.70	0.00	14.81	-	-	-	-
	Radar	0.66	1.12	0.00	7.68	0.59	1.59	50.44	54.36
	Co-Kriging	1.32	1.68	0.00	10.00	0.69	1.34	35.70	8.58
	SCM	1.27	1.91	0.00	11.04	0.69	1.46	42.57	12.28
7	True	1.39	2.91	0.00	27.75	-	-	-	-
	Radar	0.29	0.92	0.00	13.08	0.67	2.64	66.85	79.18
	Co-Kriging	1.05	2.22	0.00	25.12	0.75	1.95	36.49	24.56
	SCM	1.07	2.51	0.00	21.19	0.74	2.01	38.88	22.79
8	True	0.71	1.44	0.00	11.19	-	-	-	-
	Radar	0.29	0.86	0.00	12.06	0.59	1.24	59.08	59.30
	Co-Kriging	0.89	1.98	0.00	23.58	0.84	1.11	47.72	-24.69
	SCM	0.87	2.13	0.00	19.34	0.90	1.07	44.50	-22.23
9	True	1.34	2.63	0.00	24.24	-	-	-	-
	Radar	0.58	1.27	0.00	20.20	0.73	2.06	48.80	56.84
	Co-Kriging	1.32	3.09	0.00	42.70	0.81	1.80	37.17	1.22
	SCM	1.23	2.87	0.00	26.00	0.90	1.27	18.36	8.46
10	True	1.67	2.90	0.00	29.53	-	-	-	-
	Radar	0.54	1.17	0.00	17.98	0.53	2.73	66.38	67.67
	Co-Kriging	1.43	2.64	0.00	32.00	0.74	2.02	36.58	14.57
	SCM	1.48	3.94	0.00	34.34	0.83	2.23	44.41	11.67

$$\ast \%RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n R_{true,i}^2\right]}/n} \times 100, PBIAS(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{true,i} - R_{comp,i})}{\sum_{i=1}^n R_{true,i}} \times 100$$

R_{true} : the values of true rainfall field, R_{comp} : the values of synthetic rainfall fields

나타내는 %RMSE를 통해서 두 합성방법 모두 약 30% 정도의 오차를 감소시킬 수 있다는 것을 확인 할 수 있다. 전반적으로 co-Kriging 및 연속수정법을 이용하여 레이더 자료와 지상 강우자료를 합성하게 되면 레이더 강우자료 자체만을 이용하여 강우장을 정량화하는 경우

보다 우수하게 향상된 강우장을 추정할 수 있다는 것을 파악할 수 있다. 또한 위 결과를 통해서 간단하고 경제적인 연속수정법만으로도 co-Kriging을 이용하였을 경우 얻을 수 있는 통계적 특성을 재현할 수 있다는 것을 알 수 있다.

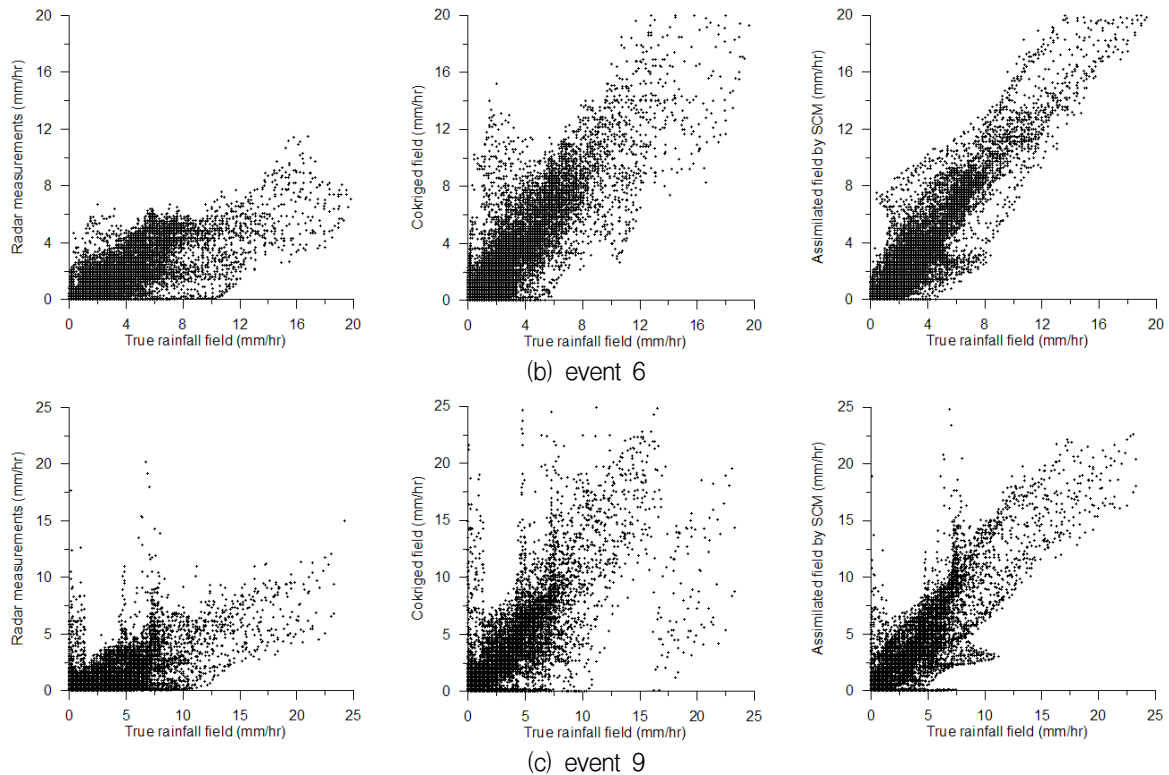


Fig. 8. Scatter Plots of True Field vs. Radar Measurements (left), Cokriged Fields (middle) and SCM Results (right)

6. 결 론

본 연구에서는 자료동화기법의 가장 간단한 방법이라 할 수 있는 연속수정법을 이용하여 레이더 강우자료와 지상 관측자료의 합성에 대한 효율성을 검토하였다. 동화된 자료와의 비교·평가를 위하여 대상 범위 내 존재하는 건설교통부 산하 124개 TM관측소의 자료를 이용하여 block-Kriging한 값을 참값으로 가정하였다. 124개 관측소 중에서 공간적으로 등분포하는 68개의 관측소를 이용하여 연속수정법을 적용하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 연속수정법을 적용할 경우에 중요한 인자인 영향반경은 강우관측소간 평균거리의 반에 해당하는 영향반경 이상에서 비슷한 합성 결과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 계산 시간을 최소화하여 효율성을 제고할 수 있다는 것을 의미한다.
- 2) 연속수정법에 의한 합성강우장은 지상 강우자료의 기본적 통계적 특성(평균, 분산, 최대값, 최소값)을 비교적 우수하게 재현하고 있는 것으로 나타났다. 또한 124개 지점의 지상 강우자료와 그에 대응하는 동화 전후의 값에 대한 산점도의 비교를 통하

여 간단한 연속수정법으로도 우수한 자료 합성을 이룰 수 있다는 것을 알 수 있었다.

- 3) 본 연구에서 가정된 실제 강우장과 연속수정법에 의한 합성강우장간의 상관계수는 0.70~0.90의 분포를 나타내어 공간적인 경향을 우수하게 재현하는 것으로 파악되었다. 또한 실제 강우장에 대하여 약 10%~50%정도의 오차를 포함하는 것으로 나타났으며 이것은 레이더 자료만을 이용하였을 경우보다 약 30%정도의 오차를 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.
- 4) 최근 지상 강우와 레이더 강우에 많이 사용되는 co-Kriging 기법과 연속수정법을 이용하여 합성된 강우장을 비교한 결과 비슷한 규모의 오차를 포함하는 것으로 나타났다. 이것은 연속수정법이 레이더 강우와 지상 강우의 합성에 있어서 co-Kriging을 수행할 경우 가지게 되는 문제점들(variogram의 추정, 계산 시간)을 극복할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있다는 것을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-

참고 문헌

- 염경택, 이충기, 정구열, 정세웅, 김주환, 박우양, 정의용 (2000). “강화수문레이더를 이용한 임진강 유역 홍수예경보시스템 운영현황.” **한국기상학회 가을 학술발표회 논문집**, 한국기상학회, pp. 91-94.
- 이명섭 (2000). “수문레이더를 이용한 임진강유역 홍수예경보시스템 구축.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 58-62.
- 정성화 (2005). **레이더 강우강도의 개선과 면적 강우량의 실시간 추정**, 석사학위논문, 경북대학교.
- Barnes, S. L. (1964). “A technique for maximizing details in numerical weather map analysis.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 3, pp. 396-409.
- Bergthórsson, P., and Döös, B. (1955). “Numerical weather map analysis.” *Tellus*, Vol. 7, No. 3, pp. 329-340.
- Brandes, E.A. (1975). “Optimizing rainfall estimates with the aid of radar.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 1339-1345.
- Caya, A., Sum, J., Snyder, C. (2005). “A comparison between the 4DVAR and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation.” *Monthly Weather Review*, Vol. 133, pp. 3081-3094.
- Chumchean, S., Seed, A., and Sharma, A. (2006). “Correcting of real-time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach.” *Journal of Hydrology*, Vol. 317, pp. 123-137.
- Cressman, G. P. (1957). “An operational objective analysis system.” *Monthly Weather Review*, Vol. 87, pp. 367-374.
- Crow, W.T., and Wood E.F. (2003). “The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using ensemble Kalman filtering: a case study based on ESTAR measurements during SGP97.” *Advances in Water Resources*, Vol. 26, pp. 137-149.
- Entekhabi, D., Asrar, G.R., Betts, A.K., Beven, K.J., Bras, R.L. and Duffy, C.J. (1999). “An agenda for land-surface hydrology and a call for the second international hydrologic decades.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 80, pp. 2043-2058.
- Errico, R., Ohring, G., Derber, J., and Joiner, J. (2000). “NOAA-NASA-DoD Workshop on assimilation of satellite data.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, pp. 2457-2462.
- Greco, M., and Krajewski, W.F. (2001). “Rainfall forecasting using variational assimilation of radar data in numerical cloud model.” *Advanced in Water Resources*, Vol. 24, pp. 213-224.
- Ha, E., North, G.R., Yoo, C., and Ha, K. (2002). “Evaluation of some ground truth designs for satellite estimates of rain rate.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 19, pp. 65-73.
- Hoke, J.E., and Anthes, R.A. (1976). “The initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique.” *Monthly Weather Review*, Vol. 104, pp. 1551-1556.
- Houser, P.R., Shuttleworth, W.J., Famiglietti, J.S., Gupta, H.V., Syed, K.H., and Goodrich, D.C. (1998). “Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation.” Vol. 34, pp. 3405-3420.
- Journel, A.G., and Huijbregts, C.J. (1978). *Mining geostatistics*, Academic Press, San Diego.
- Kalnay, E. (2003). *Atmospherical modeling data assimilation and predictability*, Cambridge university press, Cambridge.
- Kuo, Y.H., Guo, Y.R., and Westwater, E.R. (1993). “Assimilation of precipitable water measurement into a mesoscale numerical model.” *Monthly Weather Review*, Vol. 121, pp. 1215-1238.
- McLaughlin, D. (2002). “An integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing, and filtering.” *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 1275-1286.
- North, G.R., Valdes, J.B., Ha, E., and Shen, S.S.P. (1994). “The ground-truth problem for satellite estimates of rainfall.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 11, pp. 1035-1041.
- Seo, D.J. (1991). “On state estimation using remotely sensed data and ground measurements: An overview of some useful tools.” *Journal of the*

- Korean Society of Remote Sensing*, Vol. 7, pp. 45-67.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F., and Bowles, D.S. (1990a). "Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using cokriging: 1. Design of experiments." *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 469-477.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F., Azimi-Zonooz, A., and Bowles, D.S. (1990b). "Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using cokriging: 2. Results." *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 915-924.
- Sinclair, S., and Pegram, G. (2005). "Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging." *Atmospheric Science Letters*, Vol. 6, pp. 19-22.
- Stauffer, D.R., Seaman, N.L., and Binkowski, F.S. (1991). "Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model part II: Effect of data assimilation within the planetary boundary layer." *Monthly Weather Review*, Vol. 119, pp. 734-754.
- Todini, E. (2001). "A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 5, pp. 187-199.
- Yoo, C. (2002). "A ground validation problem of the remotely sensed soil moisture data." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 16, pp. 175-187.
- (논문번호:07-128/접수:2007.11.13/심사완료:2008.04.24)