



## Generation of radar rainfall data for hydrological and meteorological application (II) : radar rainfall ensemble

Kim, Tae-Jeong<sup>a</sup> · Lee, Dong-Ryul<sup>b</sup> · Jang, Sang-Min<sup>c</sup> · Kwon, Hyun-Han<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

<sup>b</sup>Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>c</sup>Climate Application Team, APEC Climate Center

Paper number: 16-095

Received: 1 November 2016; Revised: 22 November 2016; Accepted: 22 November 2016

### Abstract

A recent increase in extreme weather events and flash floods associated with the enhanced climate variability results in an increase in climate-related disasters. For these reasons, various studies based on a high resolution weather radar system have been carried out. The weather radar can provide estimates of precipitation in real-time over a wide area, while ground-based rain gauges only provides a point estimate in space. Weather radar is thus capable of identifying changes in rainfall structure as it moves through an ungauged basin. However, the advantage of the weather radar rainfall estimates has been limited by a variety of sources of uncertainty in the radar reflectivity process, including systematic and random errors. In this study, we developed an ensemble radar rainfall estimation scheme using the multivariate copula method. The results presented in this study confirmed that the proposed ensemble technique can effectively reproduce the rainfall statistics such as mean, variance and skewness (more importantly the extremes) as well as the spatio-temporal structure of rainfall fields.

**Keywords:** Weather Radar, Radar Rainfall, Copula, Rainfall Ensemble

## 수문기상학적 활용을 위한 레이더 강우자료 생산(II) : 레이더 강우앙상블

김태정<sup>a</sup> · 이동률<sup>b</sup> · 장상민<sup>c</sup> · 권현한<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>전북대학교 토목공학과, 방재연구센터, <sup>b</sup>한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, <sup>c</sup>APEC 기후센터, 응용사업본부, 응용사업팀

### 요지

최근 국지성 집중호우 및 돌발홍수와 같은 급격한 기상변화로 인한 기상재해의 발생빈도가 증가함에 따라 고해상도의 기상레이더 강우자료를 사용한 수문학 분야의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 기상레이더는 넓은 지역에 걸쳐 실시간으로 강우현상 감시가 가능하며 지상우량계로는 파악이 불가능한 미계측유역을 통과하는 강우장의 이동 및 변동성 파악이 가능한 장점이 있지만 대기 중 존재하는 수상체로부터 반사되는 반사도를 사용하여 강우량을 산정하므로 시공간적 오차가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다변량 Copula 함수를 활용하여 레이더 강우에 존재하는 시공간적 오차를 규명하고 레이더 강우앙상블 생산기법을 개발하였다. 개발된 모형으로부터 생산된 레이더 강우앙상블은 통계적 효율기준 분석결과 우수한 모형성능을 확인하였으며 추가적으로 극치호우 및 강우시계열 패턴 분석결과 지상강우의 특성을 효과적으로 재현하는 것을 확인하였다.

**핵심용어:** 기상레이더, 레이더 강우, Copula, 강우앙상블

\*Corresponding Author. Tel: +82-63-270-2426  
E-mail: hkwon@jbnu.ac.kr (H.-H. Kwon)

## 1. 서론

최근의 강우특성은 과거에 비해 시공간적으로 매우 불규칙하며 짧은 지속시간 동안에 국지적으로 높은 강우강도의 특성을 나타내는 강우현상의 발생빈도가 증가하고 있다. 이러한 추세로 인하여 기상레이더를 활용한 강우관측은 다양한 지역에서 홍수예보, 수해경감 및 수자원관리 등의 중요한 역할을 수행하고 있다. 국내에서 레이더를 이용한 기상관측은 기상청뿐만 아니라 미공군, 국토교통부, 국방부, 한국건설기술연구원 등에서 이용하고 있으며, 점차 수문기상학적으로 그 활용성을 증대하고자 각 기관에서 보유하고 있는 레이더 네트워크의 공동 활용을 통하여 타 기관 레이더 관측망의 단점을 상호 보완하여 종합적인 관측능력을 향상시키고 있다. 하지만 레이더 강우자료를 응용기상 및 수자원분야에서 직접적으로 활용하는데 많은 한계점이 존재한다. 이는 레이더의 특성상 강우량을 직접 추정하지 않고 대기에 존재하는 강우세 포에서 반사되는 반사도의 강도를 이용하여 강우강도를 추정하는 과정에서 불가피하게 발생하는 다양한 오차가 다수 포함되기 때문이다(Krajewski and Smith, 2002; Kim et al., 2014; Lee et al., 2015).

최근 선진국을 중심으로 보편적으로 사용되던 레이더 강우자료 보정기법을 확장하기 위한 방법으로서 대표적인 이변량 분석기법인 Copula 기법을 활용한 레이더 강우추정 및 불확실성 평가연구가 수행되고 있다. Villarini et al. (2008)은 결합핵밀도함수 방법과 Copula 함수 방법을 활용하여 C-band 레이더 강우와 지상강우의 조건부함수를 추정한 결과 결합핵밀도함수 방법은 자료에 종속성(dependence)이 높게 추정되는 문제점을 확인되었다. 반면 Copula 함수 방법은 전역적인 규모로 구축될 수 있을 뿐만 아니라 레이더 강우를 보정하고 예측하는데 있어서 우수함을 확인하였다. AghaKouchak et al. (2010)은 Elliptical Copula 분포형에 속하는 Gaussian Copula 분포와 t-Copula 분포를 결합하여 레이더 강우모의를 수행하였다. 극치강우모의를 하는데 있어 t-Copula 분포를 적용하고 그 외의 강우에는 Gaussian Copula 분포를 적용하여 모의한 결과 지상강우와 유사한 특성을 가지는 레이더 강우를 생산하였다. Vogl et al. (2012)는 Copula 기법을 활용하여 레이더 강우와 지상강우의 종속성을 규명하여 레이더 강우의 공간적 해상도를 유지하는 지상강우량 상세화(downscaling) 연구를 수행하였다. Dai et al. (2014)은 Elliptical Copula와 Archimedean Copula 함수를 사용하여 레이더 강우와 지상강우의 오차를 조건부분포에 기초하여 결정론적(deterministic) 및 무작위 오차(random error)의 불확실성을 정량화 할 수 있는

강우추정 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 영국 유역에 적용한 결과 지상강우의 시공간적 상관성을 확보하였으며 레이더 강우의 불확실성을 통계적으로 정량화하여 수문분석을 수행하는데 있어서 중요한 입력인자로 활용성을 제안하였다.

최근에 기후변동성 증가로 인해서 수문분석시에 불확실성 정량화를 위한 앙상블 기반의 예측결과를 배포하여 실무자의 의사결정을 지원하고 있다(Molteni et al., 1996; Hewitt and Griggs, 2004). 앙상블 기법은 발생확률은 낮지만 큰 결과를 동반할 수 있는 경우를 포함하여 넓은 범위에서 발생가능성을 고려할 수 있는 장점이 있다. Germann et al. (2009)은 산악지역의 수문해석을 위하여 실시간 레이더 강우앙상블 생산기법을 개발하여 준분포형 강우-유출 모형에 적용하여 돌발홍수 해석을 제안하였으며, Kober et al. (2012)은 고해상도 레이더 강우와 수치예보기법을 합성할 수 있는 앙상블 형태의 예측기법을 개발하여 기존의 초단기 강우예측기법에 비하여 우수한 연구결과를 확인하였다.

본 연구에서는 수문학적으로 레이더 강우자료를 활용하기 위하여 정량적으로 레이더 강우를 추정하는 QPE 기법에 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 즉, 레이더 강우자료 편의보정 및 앙상블 생산결과와 장점을 고려하여 불확실성 평가에 실용적으로 활용 가능한 레이더 강우앙상블 생산기법을 개발하였다. 이를 위해 두 개의 연속논문으로 구성하였으며, 본 논문은 후속 논문으로서 분위회귀 분석기법을 적용하여 레이더 강우자료 편의보정을 수행한 후 무작위 오차에서 나타나는 시공간적 오차를 보다 명확히 규명하고자 다변량 Copula 기법을 활용한 레이더 강우앙상블 생산기법을 개발하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다변량 Copula 함수를 이용한 레이더 강우앙상블 생산기법을 서술하고 3장에서는 및 본 연구에서 제안하는 무작위 오차의 시공간적 종속성을 고려한 레이더 강우앙상블 생산기법의 적용결과를 나타내었다. 마지막으로 4장에서는 이를 토대로 결론 및 향후 진행될 연구에 대해 정리하였다. Fig. 1은 본 연구의 수행 절차를 나타내는 것으로 본 논문의 내용은 Step 4~5에 해당한다.

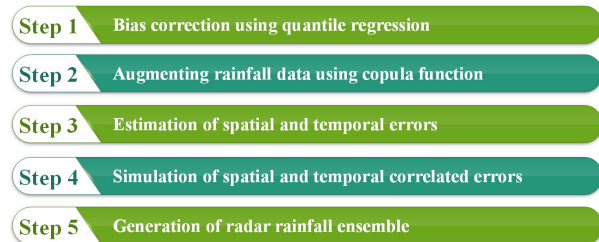


Fig. 1. A flow chart for ensemble radar rainfall simulation technique

## 2. 연구방법

### 2.1 다변량 Copula 기법을 레이더 강우양상블 생산기법

본질적으로 레이더 강우양상블 생산기법은 레이더 강우의 결정론적 왜곡성분에 무작위 오차를 반영하여 발생가능성이 있는 강우사상을 생산하는 것으로 귀결된다. 즉, 일반적으로 안테나가 회전하면서 발사한 반사파로부터 강우속성을 산출하기 때문에 지구통계학(geostatistical)에 근거하여 레이더 강우는 자연적으로 오차에 대한 시공간적 상관성을 가지게 된다. 하지만 레이더 자료연한의 부족 및 강우강도가 증가함에 따라 발생하는 극치자료 부족의 문제로 인하여 신뢰성을 확보하면서 레이더 강우자료의 오차특성을 규명하는 것은 한계가 있다. 따라서 선행연구로부터 확충된 강우자료를 대상으로 주변분포에서부터 난수발생을 통하여 발생 가능한 시공간적 상관성을 가지는 오차생산이 가능하다. 최종적으로 발생 가능한 시공간적 상관성을 가지는 오차를 편의보정 레이더 강우자료에 중첩(superimpose)하게 됨으로써 레이더 강우양상블을 생산할 수 있다.

본 연구에서는 레이더 강우자료에 나타나는 시공간적 오차의 상관관계를 규명하고자 변량들의 상관관계를 설명함과 동시에 각각의 변량의 특성을 유지할 수 있는 다변량 Copula 함수를 활용하였다. Copula 함수는 복잡한 종속성 구조(dependence structure)를 고려하면서 다변량 누적분포함수를 추정하는데 유용하여 다변량 분포함수와 단변량 주변분포를 연결하는 결합분포함수를 의미하며 자료의 종속성 구조를 고려하여 모형화함으로써 자료의 추정과 모의에 용이하다(Sklar, 1959).

$n$ 개의 변량을 보유하는  $n$ -변량 Copula 함수는 균등분포  $(0, 1)$ 를 따른다고 가정하면  $n$ 개의 다변량 확률변수들을 각각  $U_1, U_2, \dots, U_n$ 로 가정하면 Copula 함수는 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$C(u_1, \dots, u_n) = \Pr(U_1 \leq u_1, \dots, U_n \leq u_n) \quad (1)$$

Eq. (1)를 확장하여  $F_i(x_i)$ 가  $i$ 번째 확률변수의 누적확률분포이고  $F$ 가 주변분포함수  $F_1, F_2, \dots, F_n$ 를 갖는 분포함수로 가정하면 Eq. (2)를 만족하는 Copula 함수  $C$ 가 유일하게 존재한다.

$$F(x_1, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)) \quad (2a)$$

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = F(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_n^{-1}(u_n)) \quad (2b)$$

여기서,  $u_i \in [0, 1]$  이고  $F_i^{-1}(i=1, 2, \dots, n)$ 은  $F_i$ 의 역함수이다.

Copula 함수의 종류에 따라 다양한 결합분포함수를 산정할 수 있으며 궁극적으로 변량간의 종속성 구조로 분리하여 다변량 확률분포를 구현할 수 있다. 예를 들어, 지점별로 레이더 강우자료의 무작위 오차를 확률변수로 가정하여 Copula 함수를 적용하면 지점간의 시공간적 종속성의 복원이 가능하다. 즉, 다변량 확률변수에 대해서 각각의 주변분포와 Copula 함수가 주어진다면 무작위 오차에 대한 시공간적 종속성을 고려한 해석이 가능하다. 앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 레이더 강우양상블을 생산하기 위해서 무작위 오차에 대한 시공간적 구조를 모의할 수 있는 기법 개발이 필요하다. 이러한 점에서 본 연구에서는 다변량 Copula 기법 중 Elliptical Copula 계열의 Gaussian Copula와 t-Copula를 적용하여 강우자료의 무작위오차 성분을 추정하였다. 이후 레이더 강우양상블을 생산하여 적합성을 평가하였다.

Gaussian Copula는 t-Copula와 함께 Elliptical Copula에 해당하는 함수로  $n$ 개의 변량을 갖는 경우  $u = (u_1, \dots, u_n) \in [0, 1]^n$ 에 대하여 Gaussian Copula는 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$C(u_1, \dots, u_n; CM) = \Phi_{CM}(\Phi^{-1}(u_1), \dots, \Phi^{-1}(u_n)) \quad (3)$$

여기서,  $CM$ 은  $n \times n$ 의 상관행렬(correlation matrix)이며  $\Phi$ 는 표준정규분포를 의미한다.  $\Phi_{CM}$ 는 상관행렬  $CM$ 과 표준정규분포의 역함수  $\Phi^{-1}$ 로 이루어진  $n$ 개의 표준정규분포의 확률변수의 결합확률분포로 Eq. (4)로 정리할 수 있다.

$$\Phi_{CM}(x_1, \dots, x_n) = \int_{-\infty}^{x_n} \int_{-\infty}^{x_{n-1}} \dots \int_{-\infty}^{x_1} \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |CM|}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{x}^T CM^{-1} \mathbf{x}\right) \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ 이며, Eq. (2)에 의하여  $u_1 = \Phi_1(x_1), \dots, u_n = \Phi_n(x_n)$ 로 고려하면 Eq. (5)와 같은  $n$ 변량 표준정규분포의 누가분포함수를 얻을 수 있다.

$$C(\Phi_1(x_1), \dots, \Phi_n(x_n)) = \Phi_{CM}(x_1, \dots, x_n) \quad (5)$$

Gaussian Copula와 동일하게 상관행렬  $CM$ 과 자유도(degrees of freedom)  $\nu$ 를 가지는 t-Copula는 Eq. (6)과 같이 정의된다.

$$C(u_1, \dots, u_n; CM, \nu) = t_{CM, \nu}(\mathbf{t}_\nu^{-1}(u_1), \dots, \mathbf{t}_\nu^{-1}(u_n)) \quad (6)$$

여기서,  $t_\nu^{-1}$ 은 t-Copula의 역함수를 의미하며,  $t_{CM,\nu}$ 는 t-Copula 확률벡터의 결합분포함수로서  $n$ 개의 변량을 가지는 경우 Eq. (7)과 같이 정의된다.

$$t_{CM,\nu}(x_1, \dots, x_n) = \int_{-\infty}^{x_n} \int_{-\infty}^{x_{n-1}} \dots \int_{-\infty}^{x_1} \frac{\Gamma((\nu+n)/2)}{\Gamma(\nu/2)(\nu\pi)^{n/2} CM^{0.5}} \cdot (1 + \mathbf{x}^T CM^{-1} \mathbf{x})^{-(\nu+n)/2} dx_1 \dots dx_{n-1} \quad (7)$$

여기서,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ 이며, Eq. (6)에서  $u_1 = \mathbf{t}_1(x_1), \dots, u_n = \mathbf{t}_n(x_n)$ 로 고려하면 Eq. (8)과 같은  $n$ 변량 표준정규분포의 누가분포함수를 얻을 수 있다.

$$C(\mathbf{t}_1(x_1), \dots, \mathbf{t}_n(x_n)) = t_{CM,\nu}(x_1, \dots, x_n) \quad (8)$$

Elliptical Copula 함수에 속하는 Gaussian Copula와 t-Copula의 가장 큰 차이점은 결합분포함수의 꼬리부분 종속성 반영의 유무로 언급할 수 있으며 Gaussian Copula는 꼬리부분의 종속성을 고려하지 않으며 t-Copula의 경우 꼬리부분의 종속성을 고려한다. 무작위 오차의 시공간적 종속성을 고려하기 위하여 Gaussian Copula와 t-Copula를 활용한 레이더 강우양상불 생산과정은 다음과 같이 정리될 수 있다.

선행논문에서 분위회귀 분석기법을 통하여 높은 상관성을 기반으로 확충된 지상강우 및 편의보정 레이더 강우자료를 활용함으로써 계통적 오차(systematic error)를 최소화하였다. 보정된 강우자료를 대상으로 레이더 강우양상불 생산하기 위해서는 시공간적으로 상관성을 가지는 무작위 오차에 대한 양상불을 도출하는 과정이 필요하다. 정리하면 편의보정 레이더 강우자료가 주어지는 경우 주변분포로부터 얻어지는 누가확률밀도함수로부터 발생 가능한 난수추출 후 얻어진 확률변수를 통하여 무작위 오차의 시공간적 종속성을 추정하여 발생 가능한 레이더 강우양상불을 생산할 수 있다.

우선 추정된 매개변수를 활용하여 변량  $\mathbf{U}(U_1, \dots, U_n)$  ( $U_i \in [0, 1]$ )의 누가분포함수(cumulative distribution function, CDF)를 나타내며 시공간적 상관구조를 갖는 주변확률변수  $\mathbf{u}_t(u_{t,1}, \dots, u_{t,n})$ 을 생성하고 적분변환(integral transform)에 의하여 무작위 오차를 발생시킨다(Salvadori *et al.*, 2007).

$$u_{t,i} = G^{-1}(\widehat{u}_{t,i}|u_{t,1}, \dots, u_{t,i-1}) \quad (9a)$$

$$G(\widehat{u}_{t,i}|u_{t,1}, \dots, u_{t,i-1}) = \frac{\partial_{u_{t,1}, \dots, u_{t,i-1}} C(u_{t,1}, \dots, u_{t,i})}{\partial_{u_{t,1}, \dots, u_{t,i-1}} C(u_{t,1}, \dots, u_{t,i-1})} \quad (9b)$$

$$\varepsilon_{t,i} = F^{-1}(u_{t,i}) \quad (9c)$$

여기서,  $G(\cdot|u_1)$ 은  $u_1$ 의 조건부 분포를 의미하고  $F^{-1}$ 은 무작위 오차의 역함수(inverse function)를 나타낸다.

추가적으로 본 연구에서는 무작위 오차에 대한 시간적인 종속성을 고려하기 위해서 자기회귀 모형(Autoregressive, AR) Filter를 적용하였다. 동일 시계열상에 하나 또는 그 이상의 관측 자료와 상관성을 갖는 기본적인 가정에 근거한 AR 모형은 가장 적합한 예측인자로서 동일 시계열상의 이전 관측치를 이용하는 것이다. 본 연구에서는 편리하게 강우시계열의 연계성을 근접하게 파악할 수 있는 Priestley (1981)의 2차 자기회귀 모형을 적용하였다. 2차 자기회귀 모형의 기본 개념은 지체-1 및 지체-2의 자기 상관계수를 활용하는 것으로 Eq. (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{t,i} = \varepsilon_{t,i} - \alpha_1 \varepsilon_{t-1,i} - \alpha_2 \varepsilon_{t-2,i} \quad (10a)$$

$$\varepsilon_{t,i} = \beta \varepsilon'_{t,i} \quad (10b)$$

여기서,  $\alpha_1, \alpha_2$  그리고  $\beta$ 는 2차 자기회귀 모형의 매개변수이며, 매시간 간격에 대하여 강우의 특성을 반영하여 변화하게 된다. 그러나 일반적으로 실시간 응용구현을 위하여  $\alpha_1, \alpha_2$  그리고  $\beta$ 는 고정적인 값을 사용하게 되는데 Eq. (11)과 같이 산정된다.

$$\alpha_1 = r_1 \frac{r_2 - 1}{1 - (r_1)^2} \quad (11a)$$

$$\alpha_2 = \frac{(r_1)^2 - r_2}{1 - (r_1)^2} \quad (11b)$$

$$\beta = \left[ \frac{1 + \alpha_2}{(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_1 + \alpha_2)(1 + \alpha_1 + \alpha_2)} \right]^{-0.5} \quad (11c)$$

여기서,  $r_1, r_2$ 는 지체시간 -1, -2의 지체상관계수를 의미한다.

선행논문에서 서술한바와 같이 지상강우와 레이더 강우자료의 오차관계는 Eq. (12)와 같다.

$$G_s = R_{t,s} + DE_{t,s}(R_{t,s}) + RE_{t,s}(R_{t,s}) \quad (12)$$

여기서, 지상강우  $G_s$ 는 계통적 오차가 제거된 레이더 강우자료  $R_{t,s}$ 와 결정론적 왜곡성분(deterministic error,  $DE$ ) 및 무작위 오차(random error,  $RE$ )의 합으로 정의될 수 있다. 여기서, 결정론적 오차와 무작위 오차를 멱함수 형태로 정리하면 Eq. (13)과 같다.

$$h(x,y) = \alpha_h R(x,y)^{\beta_h} \tag{13a}$$

$$\sigma_\varepsilon(x,y) = \gamma_\varepsilon R(x,y)^{\delta_\varepsilon} \tag{13b}$$

여기서,  $h(x,y)$ ,  $R(x,y)$ 는 주어진 공간격자  $x, y$ 의 지상강우 및 레이더 강우를 의미한다.  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 지점별로 결정되는 멱함수의 회귀계수를 나타낸다.

앞서 기술한 내용을 정리하면 선행연구를 통하여 계통적 오차가 보정된 레이더 강우와 지상강우를 Copula 함수를 활용하여 강우자료를 확충한 후, 이들 자료를 활용하여 결정론

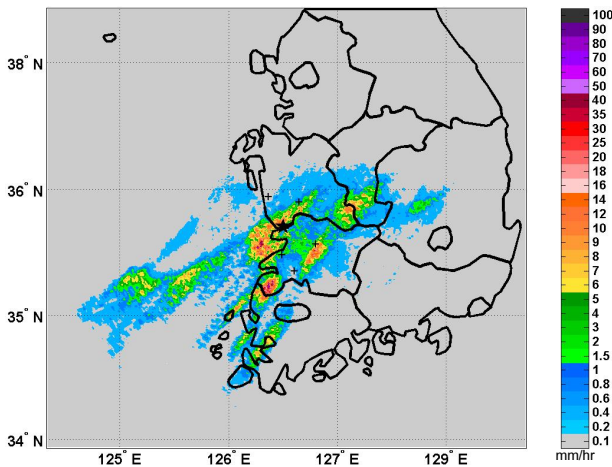


Fig. 2. The location of the oseongsan radar and AWS weather stations used in this study

적 왜곡성분의 특성을 규명하였다. 최종적으로 무작위 오차의 시공간적 상관특성을 고려하고자 Elliptical Copula 함수를 활용하여 결합분포함수를 추정함으로써 시공간적으로 고려된 레이더 강우양상틀을 산정하게 된다. 본 연구에서 사용한 레이더 강우자료는 군산 오상산 S-band 기상레이더 자료로서 Fig. 2는 오성산 기상레이더의 위치(★) 및 분석에 사용된 지상관측소(+ )를 표시한 것이며 강우사상은 본 연구에서 개발된 연구방법의 검증에 위해 사용한 2011년 8월 9일 06~07시의 누적 CAPPI 반사도를 표출한 것이다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 결정론적 왜곡성분과 무작위 오차 산정결과

선행연구에서 서술한바와 같이 레이더 강우자료는 관측과 정에서 시공간적으로 종속성이 있는 결정론적 왜곡성분과 무작위오차가 포함되어 있다. 따라서 앞서 서술한 다변량 Copula 함수로부터 결합 확률(joint probability)을 산정하여 확률적으로 발생 가능한 시공간적 오차 성분을 고려할 수 있다. 이를 위하여 확충된 강우자료를 활용하였으며 Eq. (12)에 대입될 수 있는 결정론적 왜곡성분의 매개변수와 무작위 오차의 매개변수를 멱함수를 활용하여 적합하였다.

Table 1은 기존의 강우자료와 확충된 강우자료의 기초 통계분석 결과로 ‘R’은 레이더 강우를 의미하고 ‘G’는 지상강우를 의미한다. Copula 함수를 이용한 확충된 자료의 경우 기존의 강우자료의 통계적 특성을 매우 현실적으로 재현하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 선행연구에서 생산한 확충된 강우자료를 적합하기 위한 사용가능성을 확인하였으며, 향후 진행되는 강우양상틀 생산기법의 신뢰성 있는 입력 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다. 선행논문을 통하여 확충된 강우자료를 활용하여 산정한 결정론적 왜곡성분 매개변수와

Table 1. A comparison of basic statistics between original data and augmenting data

Station Name	Mean				Standard deviation				Skewness			
	Raw Data		Augmented Data		Raw Data		Augmented Data		Raw Data		Augmented Data	
Rainfall Type	R	G	R	G	R	G	R	G	R	G	R	G
Gunsan	5.306	5.325	5.299	5.324	10.339	13.554	10.390	13.556	3.427	5.066	3.404	5.067
Buan	3.951	3.944	3.937	3.930	6.779	8.993	7.810	10.031	3.027	4.546	3.563	5.093
Jeonju	2.725	2.733	2.744	2.753	5.043	6.329	5.714	6.960	2.829	4.620	3.849	5.052
Jeongeup	3.810	3.819	3.740	3.745	6.870	9.178	7.869	9.951	2.615	4.835	3.252	5.343
Buyeo	3.374	3.381	3.355	3.357	5.363	7.484	5.426	8.178	2.303	4.448	2.251	4.879
Boryeong	3.520	3.517	3.469	3.463	8.036	8.202	8.338	8.786	5.412	4.657	5.927	5.069

**Table 2.** The regression coefficients for deterministic and random errors using power law functions

Parameter	Deterministic component		Random error	
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Gunsan	0.974686	1.000488	1.748043	0.376307
Buan	0.733263	1.096334	1.658463	0.504952
Jeonju	0.795820	1.073015	1.642871	0.471507
Jeongeup	0.759665	1.076331	1.668885	0.492676
Buyeo	0.784063	1.079849	1.364200	0.492726
Boryeong	0.763742	1.080940	1.956784	0.379122

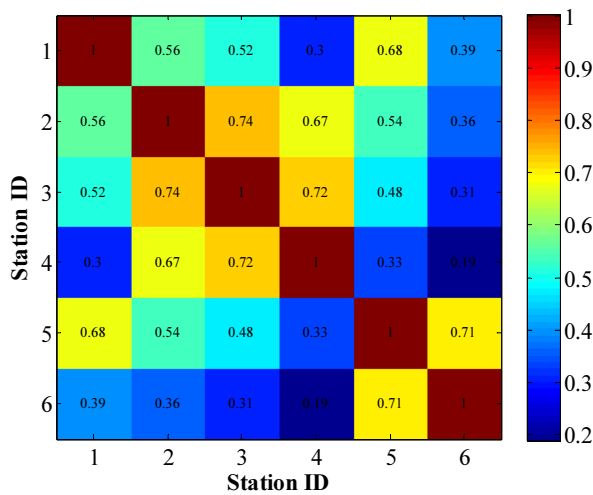
무작위 오차 매개변수의 적합결과는 Table 2와 같으며, 향후 레이더 강우의 관측기간이 연장됨에 따라서 각 지점의 결정론적 왜곡성분과 무작위 오차에 대한 신뢰성 있는 지역화 식 (regionalized equation)의 개발이 가능할 것으로 사료된다.

다변량 Copula 기법의 적용에 앞서 대상유역에 존재하는 강우관측소의 지상강우와 레이더 강우자료의 무작위 오차 성분에 대한 상관분석 및 주변분포의 결정과정의 필요하다. Eq. (12)에 의하여 결정되는 레이더 강우의 무작위 오차는 일반적으로 시공간적으로 상관성을 가지게 된다. 결정론적 왜곡성분에 대한 정확성이 확보된다면 무작위 오차는 원칙적으로 자료 자체의 자기상관성 뿐만 아니라 공간적으로도 타 지점과 상관성을 갖지 않는다. 그러나 적용되는 결정론적 왜곡성분 보정방법이 완벽하지 않기 때문에 무작위 오차에 대한 시공간적 상관성이 존재하게 된다. 따라서 레이더 강우를 효과적으로 모의하기 위해서는 무작위 오차에 대한 복원시 시공간적인

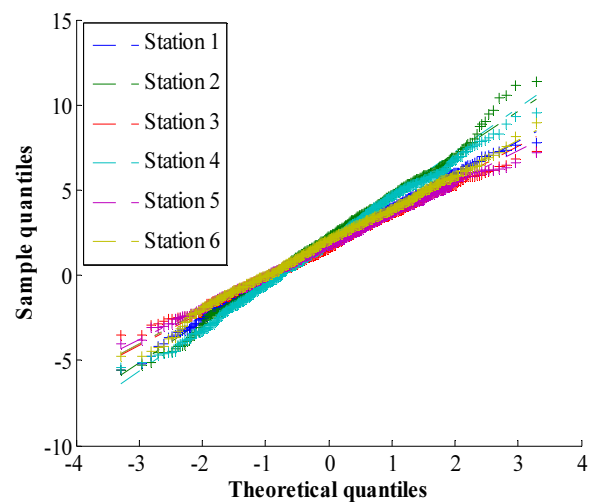
상관성을 고려하는 것이 필수적으로 요구된다. 이러한 점에서 본 연구에서는 다변량 Copula 기법을 적용하여 무작위 오차의 시공간적 구조특성을 복원하고자 한다. 모형적용에 앞서 레이더 강우의 무작위 오차 상관성을 분석하였다. 또한 다변량 Copula 기법을 적용하기 위해서는 앞서 서술한 바와 같이 레이더 강우의 무작위 오차 성분에 대한 주변분포를 결정하였다.

Fig. 3(a)은 선행연구의 적합결과를 바탕으로 무작위 오차의 상관성을 평가한 결과 군산지점과 부안지점은 0.56으로 확인되었으며 무작위 오차의 상관성이 가장 높은 지점은 부안지점과 전주지점으로 0.72로 확인되었다. 전반적으로 관측지점의 무작위 오차는 상관특성을 나타내고 있으므로 무작위 오차를 반영한 레이더 강우양상불을 생산하기 위하여 다변량 Copula 기법의 활용은 적합성을 갖는 것으로 사료된다. 추가적으로 다변량 Copula 기법을 적용하기 앞서 정규분포의 적합성을 평가하기 위하여 Q-Q 플롯을 활용하였다. Fig. 3(b)를 통하여 무작위 오차 성분의 정규분포 적합성을 확인결과 정규분포의 이론적인 특성에 우수하게 적합 되는 것을 확인하였다. 따라서 다변량 Copula 기법을 적용하는데 있어 무작위 오차 성분을 정규분포로 가정하는데 문제가 없을 것으로 사료된다.

앞서 서술한 바와 같이 레이더 강우자료의 관측과정에서 발생하는 무작위 오차는 시공간적 상관특성을 포함하고 있으므로 다변량 Copula 기법을 활용하여 시공간적 오차의 종속성을 파악하였다. Fig. 4는 다변량 Copula 기법을 활용하여 무작위 오차의 공간적 종속성과 시간적 종속성을 분석한 결과이다. 예를 들어, t-Copula를 적용한 경우 군산지점(Station



(a) Correlation matrix of random error



(b) Q-Q plot of random error

**Fig. 3.** A correlation matrix of random errors and their normal Q-Q plots

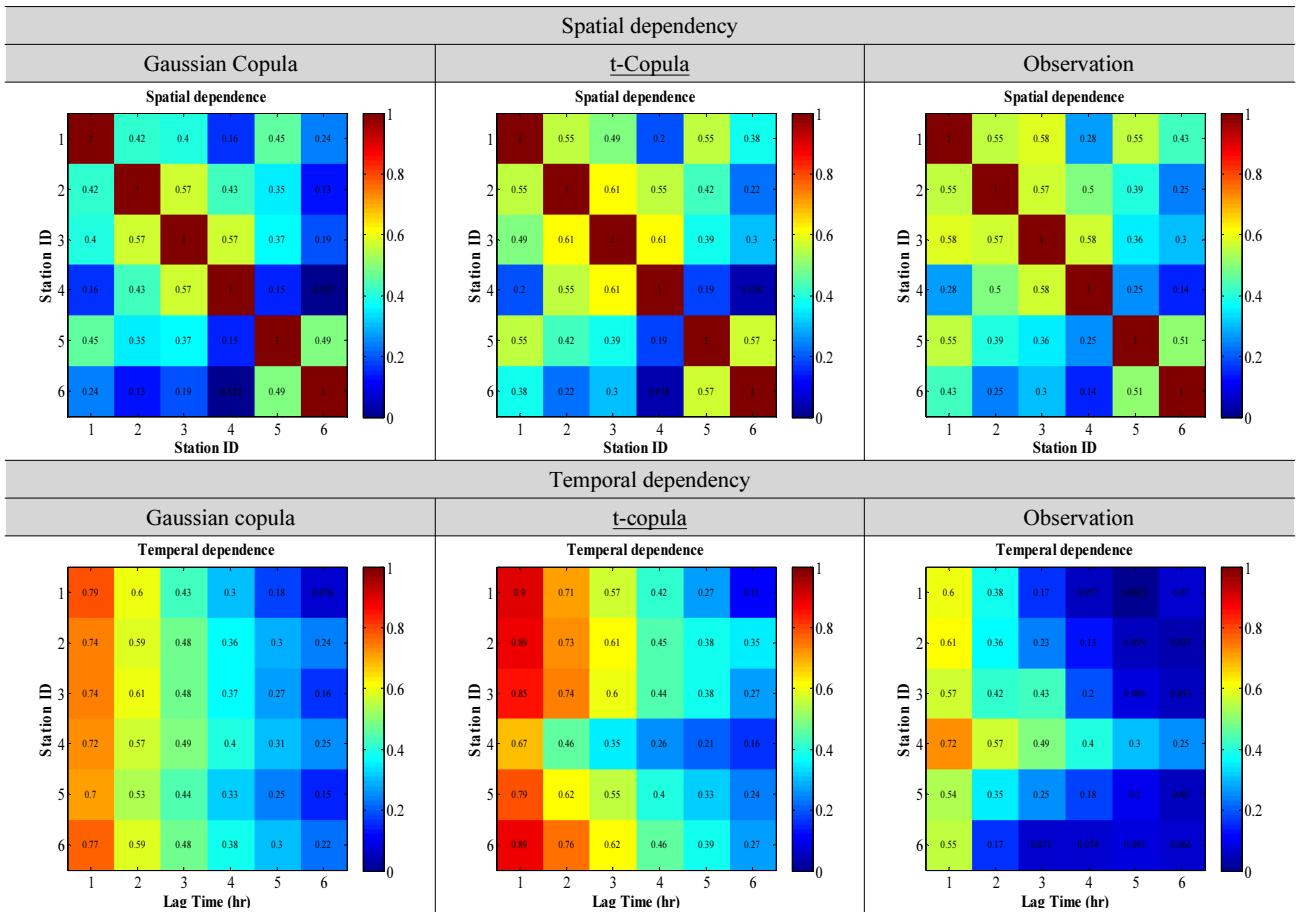


Fig. 4. The correction matrices based on augmenting data

ID: 1)과 부안지점(Station ID: 2)의 무작위 오차의 공간적 종속성은 0.55이며 시간적 종속성은 0.71인 것을 확인하였다. 또한 Gaussian Copula 함수를 사용하는 경우보다 t-Copula 함수를 사용하는 경우 시공간적 종속성을 복원하는데 있어 개선된 결과를 확인할 수 있다. 이는 t-Copula의 경우 분포형의 꼬리부분의 종속성을 고려하지 못하는 Gaussian Copula에 비하여 꼬리부분에 해당하는 극치강우의 특성을 보다 우수하게 반영하는 특성으로(Joe, 1997; Schmidt, 2002; Melchiori, 2003; Dai et al., 2013) 사료된다. 따라서 상관행렬과 자유도의 2가지 매개변수를 활용한 t-Copula 함수가 상관행렬만을 매개변수로 활용하는 Gaussian Copula 보다 시공간적 상관성을 가지는 무작위 오차 복원에 유리할 것으로 사료된다.

### 3.2 다변량 Copula 함수를 통한 레이더강우 앙상블 생산결과

3.1절에서 산정한 무작위 오차의 시공간적 오차의 상관특성을 반영하여 레이더 강우앙상블을 생산하였다. 논문의 지

면관계상 레이더 강우자료의 시공간적 오차종속성을 보다 우수하게 반영하는 t-Copula 함수를 사용하여 레이더 강우앙상블을 생산하였으며 생산된 레이더 강우앙상블의 적합성을 평가하기 위하여 선행연구와 동일하게 Eq. (14)로 산정되는 다양한 통계적 효율기준인 상관계수(CC), Nash-Sutcliffe 계수(NS), 평균제곱오차(Root Mean Square Error, RMSE), 일치계수(Index of Agreement, IoA) 및 편의(Bias)를 사용하였다.

$$CC = \frac{\sum_{n=1}^N (R_{Gauge_n} - \overline{R_{Gauge}})(R_{ensemble_n} - \overline{R_{ensemble}})}{\sqrt{(\sum_{n=1}^N (R_{Gauge_n} - \overline{R_{Gauge}})^2)(\sum_{n=1}^N (R_{ensemble_n} - \overline{R_{ensemble}})^2)}} \quad (14a)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (R_{Gauge_n} - R_{ensemble_n})^2}{\sum_{n=1}^N (R_{Gauge_n} - \overline{R_{Gauge}})^2} \quad (14b)$$

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (R_{Gauge_n} - R_{ensemble_n})^2}{\sum_{n=1}^N (|R_{Gauge_n} - \overline{R_{Gauge}}| + |R_{ensemble_n} - \overline{R_{ensemble}}|)^2} \quad (14c)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (R_{Gauge_n} - R_{ensemble_n}) \quad (14d)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (R_{Gauge_n} - R_{ensemble_n})^2} \quad (14e)$$

여기서,  $R_{Gauge}$  는 지상강우를 의미하고  $R_{ensemble}$  는 레이더 강우양상블을 의미한다. 각 모형성능의 최적 값은  $R$ ,  $NS$  및  $IoA$  는 ‘1’,  $Bias$ 와  $RMSE$ 는 ‘0’이다.

Tables 3~4는 레이더 강우양상블 모형의 재현 성능과 기초 통계분석을 비교한 결과이다. 상관계수의 경우 0.88~0.96을 나타내고 있으며 관측강우량의 강우총량과 레이더 강우양상블의 강우총량은 현실성 있게 재현되는 것을 확인하였다. RMSE의 경우에도 0.27~0.47의 범위에 속하고 있다. 기초 통계분석 결과에서 확인할 수 있듯이 강우계열의 평균, 분산뿐만 아니라 왜곡도 및 첨예도와 같은 고차 모멘트(high-order moment) 재현성도 우수한 것을 확인하였다.

Table 2의 결정론적 왜곡성분 및 무작위 오차의 매개변수를 사용하여 6개 관측지점의 레이더 강우양상블을 생산결과를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5에서 회색으로 음영처리가 이루어진 부분은 강우양상블의 불확실성 구간(uncertainty band)이며 붉은 실선은 지상강우를 의미하고 파란 실선은 선행논문에서 도출한 편의보정 레이더 강우를 의미한다. 마지막으로 녹색 실선은 레이더 강우양상블의 평균값(mean)을 의미한다. 극치강우사상에 대하여 본 연구에서 개발한 레이더 강우양상블 생산기법의 적용결과는 지상강우와 유사한 경향성으로 반응하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에서 정읍, 전주 및 보령지점의 경우 기타지점에 비하여 불확실성 범위가 높게 나타나고 있는 특징을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 오성산 레이더 관측소와 해당지점간의 떨어진 거리에 의한 결과로 사료된다. 즉, 지상관측지점이 레이더 관측반경에 포함되지만 거리가 멀어질수록 반영되는 불확실성 요소가 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 레이더 강우자료와 지상강우를 활용하는 수문기상학적 분석을 수행함에 있어 관측반경에 포함되더라도 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 적절한 이격거리를 선택하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

생산된 레이더 강우양상블 결과를 바탕으로 대상유역의 시공간적 강우네트워크 복원성능을 평가하기 위해서 6개 관측지점의 자기상관계수 및 시공간적 상관행렬을 산정하여 Figs. 6~7에 도시하였다. 자기상관계수는 지체시간(lag time)이 증가함에 따라서 감소하는 지상강우의 특성이 불확실성 구간에 적합하게 위치하고 있으며 레이더 강우양상블 평균값과 지상강우의 자기상관계수는 거의 유사하게 재현하는 것을

생산된 레이더 강우양상블 결과를 바탕으로 대상유역의 시공간적 강우네트워크 복원성능을 평가하기 위해서 6개 관측지점의 자기상관계수 및 시공간적 상관행렬을 산정하여 Figs. 6~7에 도시하였다. 자기상관계수는 지체시간(lag time)이 증가함에 따라서 감소하는 지상강우의 특성이 불확실성 구간에 적합하게 위치하고 있으며 레이더 강우양상블 평균값과 지상강우의 자기상관계수는 거의 유사하게 재현하는 것을

Table 3. A comparison of model performance between observation and ensemble mean

Station Name	CC	NS	IoA	RMSE (mm/hr)	Bias
Gunsan	0.9615	0.9243	0.9803	0.2748	0.0258
Buan	0.9282	0.8574	0.9581	0.3771	0.0649
Jeonju	0.8834	0.7791	0.9338	0.4694	0.0726
Jeongeup	0.9377	0.8706	0.9610	0.3593	0.0608
Buyeo	0.9254	0.8519	0.9609	0.3843	0.0564
Boryeong	0.8854	0.7714	0.9392	0.4775	0.0446

Table 4. A comparison of statistics between observation and ensemble scenarios

Station Name	Amount		Mean		Median		Standard deviation		Skewness		Max intensity	
	Gauge	Ensemble	Gauge	Ensemble	Gauge	Ensemble	Gauge	Ensemble	Gauge	Ensemble	Gauge	Ensemble
Gunsan	2,029.6	2,000.0	5.30	5.16	0.50	0.49	10.39	10.07	3.40	3.43	81.0	79.2
Buan	1,508.0	1,453.7	3.94	3.68	0.50	0.46	7.81	6.82	3.56	3.48	70.5	63.6
Jeonju	1,051.0	1,023.3	2.74	2.54	0.50	0.24	5.71	4.99	3.85	3.05	45.0	34.3
Jeongeup	1,432.5	1,388.2	3.74	3.51	0.00	0.22	7.87	6.68	3.25	2.85	58.0	44.9
Buyeo	1,285.0	1,238.6	3.36	3.17	0.50	0.48	5.43	5.33	2.25	2.54	33.5	34.8
Boryeong	1,328.5	1,322.7	3.47	3.31	0.50	0.36	8.34	8.30	5.93	5.98	93.0	83.4



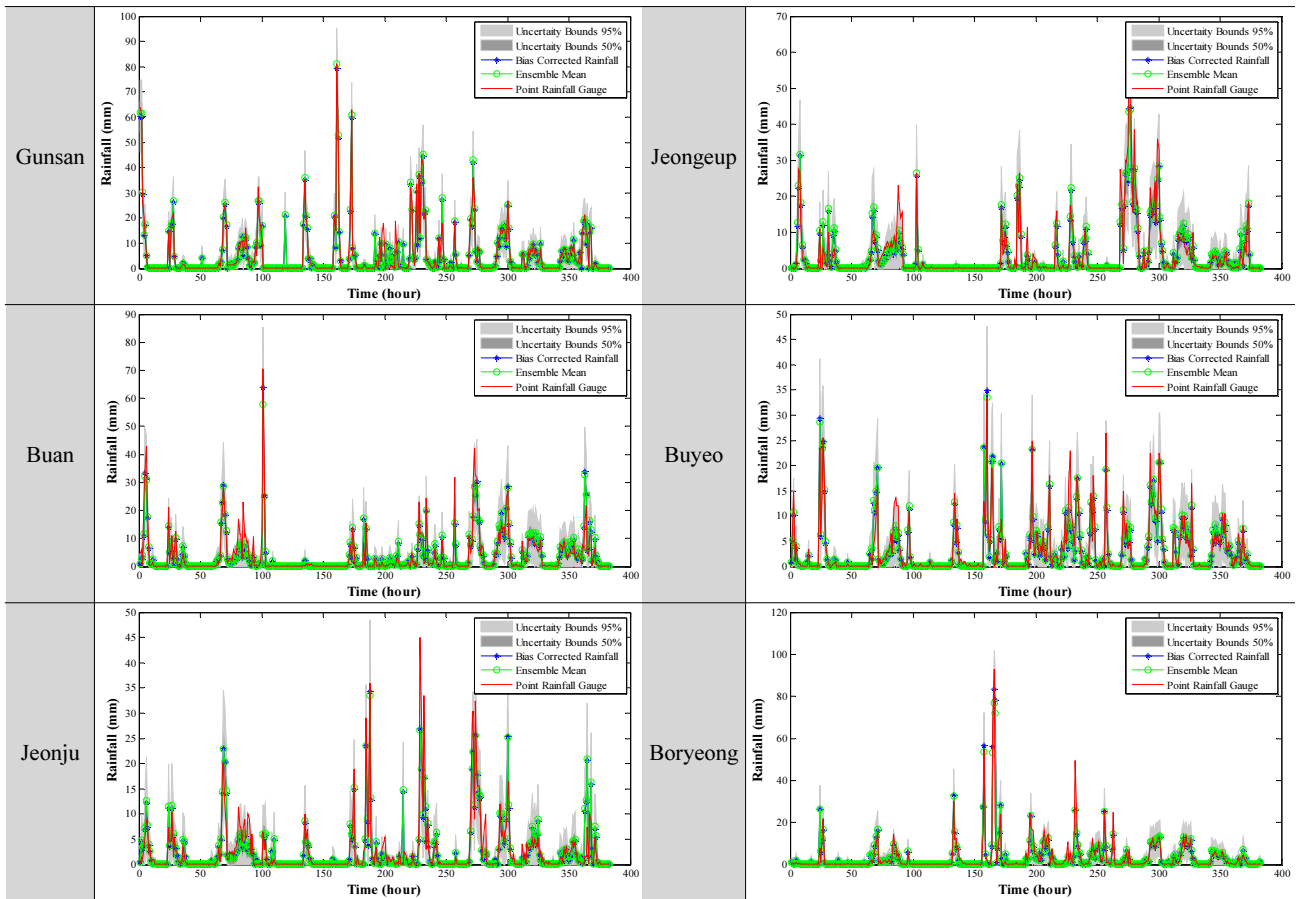


Fig. 5. A comparison between time series of rainfall observed and ensemble

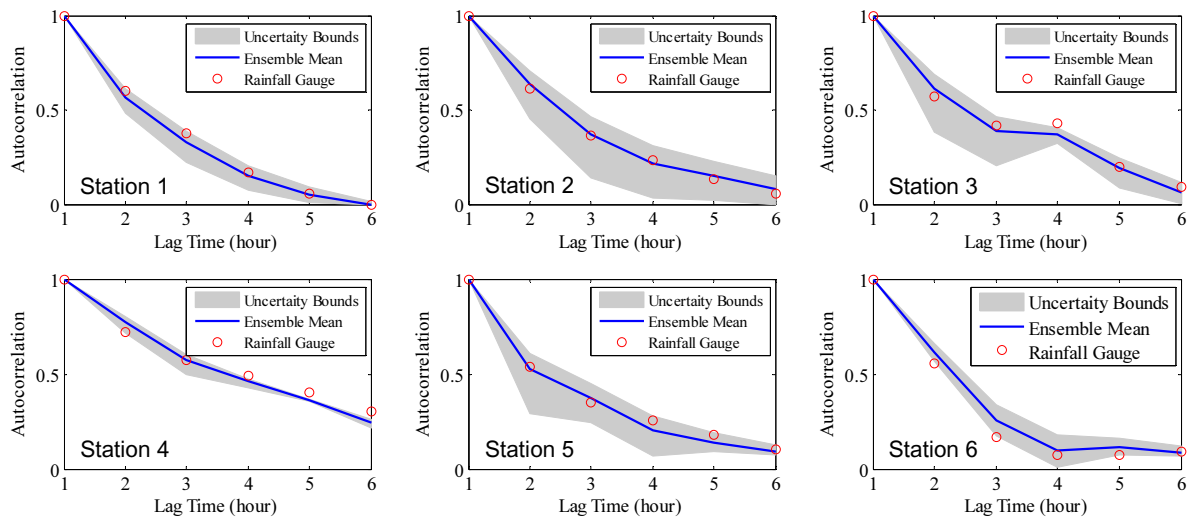


Fig. 6. A comparison of autocorrelation of rainfall between observed and ensemble

확인하였다. 이러한 점에서 본 연구를 통해 개발된 강우양상 불 생산기법을 유역단위 수문해석의 입력 자료로 활용성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 레이더 강우양상 불 평균값

과 지상강우의 상관계수를 비교한 결과 레이더 강우양상 불과 지상강우의 상관성 오차가 가장 크게 발생하는 지점은 군산지점과 부여지점이며 대략 -0.08의 차이를 나타내고 있다. 전체

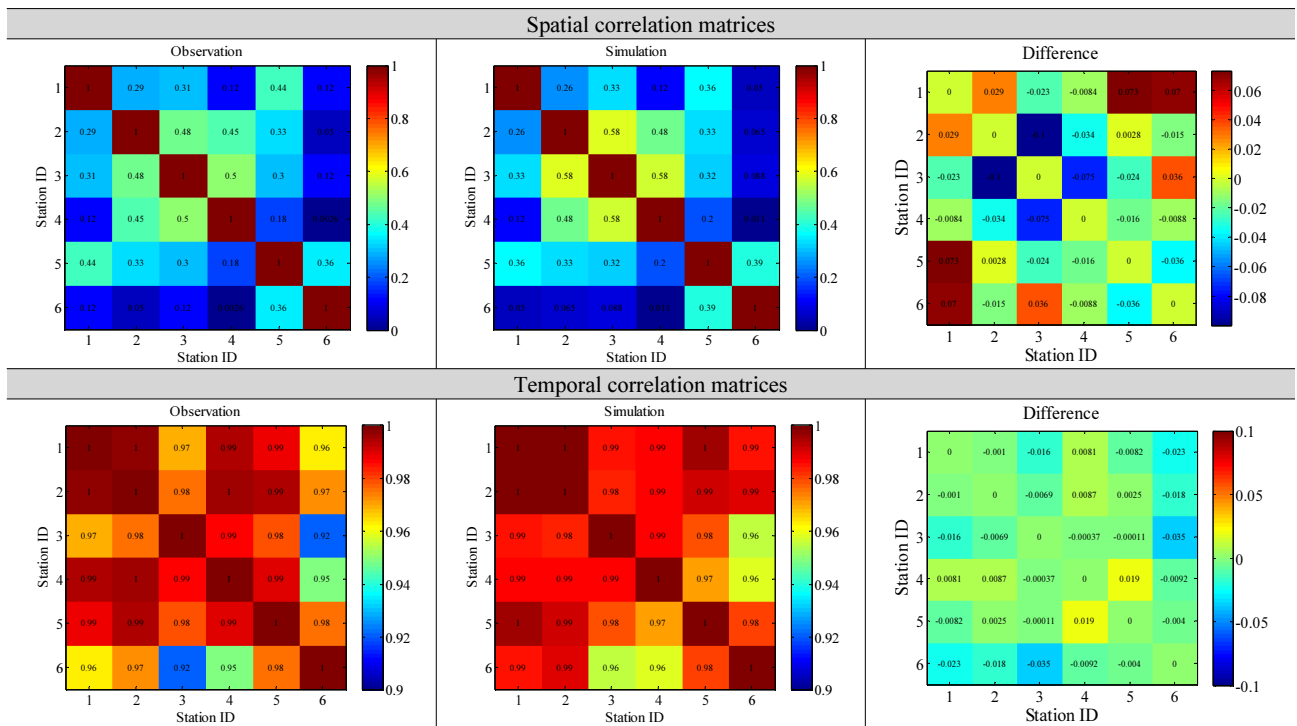


Fig. 7. A comparison of correlation matrices of Rainfall between observed and ensemble mean

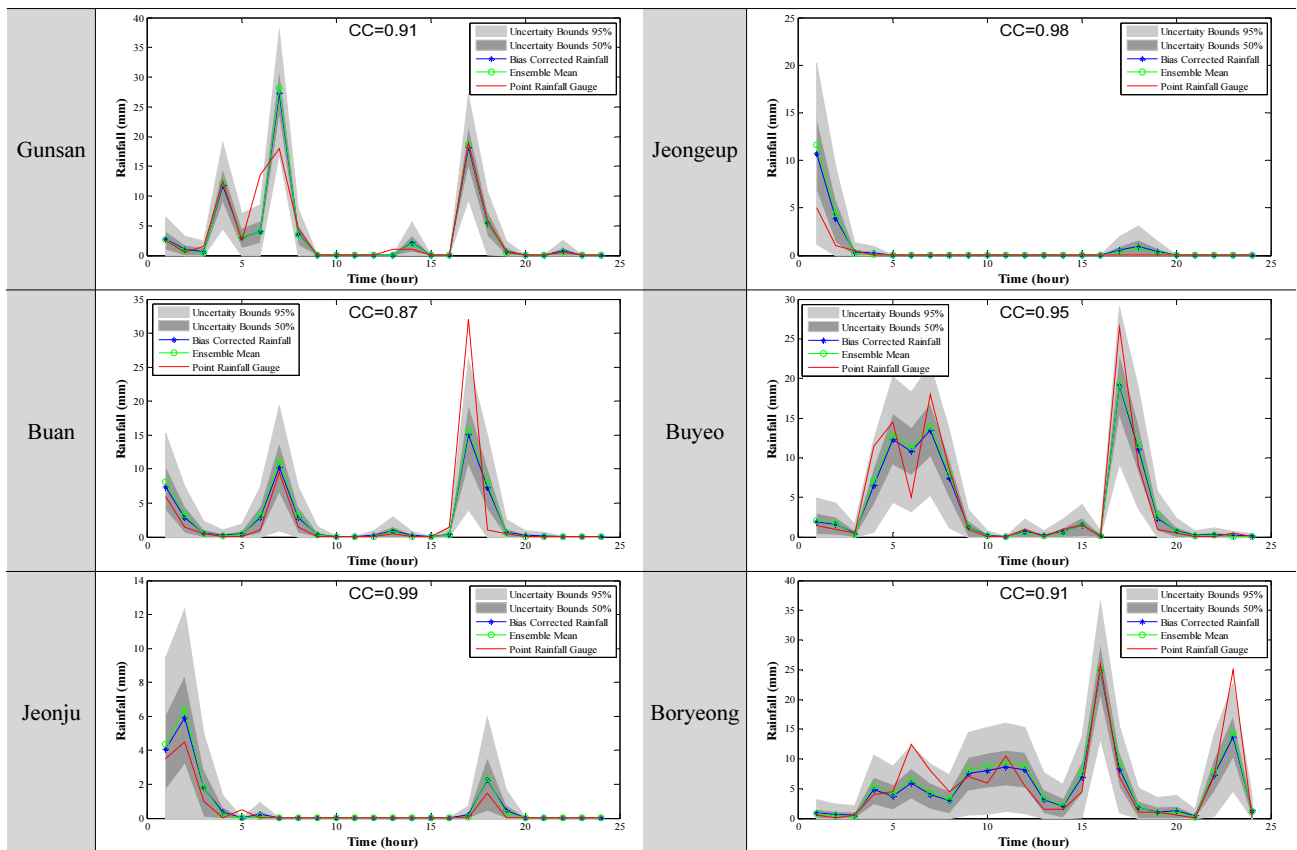


Fig. 8. Time series plots of cross validation rainfall event

지점에 대하여 생산된 레이더 강우양상블은 지상강우 특성을 매우 유사하게 모의하면서 강우네트워크의 유역상관성을 효과적으로 복원하는 것을 확인하였다. 각 지점별 자기상관계수의 상관성을 비교한 결과는 정읍지점과 부여지점이 시간적 상관성의 차이가 가장 큰 지점으로 확인되었다.

레이더 강우양상블 생산기법을 검증하고자 선행연구에서 선정된 16개의 강우사상 중 6개 관측 지점에 비교적 큰 호우를 동시에 유발한 강우사상을 검증강우사상으로 선정하였다. 모형검증을 위하여 검증강우사상을 제외한 강우사상에 대하여 선행연구에서 수행한 편의보정 및 자료 확충기법을 적용하여 편의보정 레이더 강우자료를 도출하였다. 그 후 다변량 Copula 기법을 적용하여 시공간적 오차특성을 산정하여 레이더 강우양상블을 생산한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8을 살펴보면 기존에 생산된 강우양상블과 동일하게 지상강우의 발생 및 극치강우 특성의 상관성이 0.87~0.99로 매우 효과적으로 강우사상을 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 기준으로 판단해보면, 보다 다양한 특성을 가지는 강우사상을 기준으로 모형의 매개변수를 결정한다면 향후 초단기 레이더 강우예측 기법과 연계하여 유출량 산정 시 불확실성을 반영한 돌발홍수에 예측 등에 활용이 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

최근 상대적으로 지역적으로 편중된 폭우와 같은 위험기상 현상이 빈번하게 발생하고 있으나, 이를 효과적으로 관측하고 대비하기 위한 기상관측은 아직 요원한 상태이다. 이러한 점에서 기존 지상강우관측의 한계점을 보완하기 위한 방안으로서 시공간적인 강우장의 분포를 파악할 수 있는 기상레이더의 활용성이 중요시되고 있다. 그러나 레이더로부터 관측된 강우자료는 가용자료의 자료연한이 짧으며 극치강우사상의 경우 과소 추정되는 기본적인 문제 이외에도 지구통계학적으로 발생하는 시공간적 오차가 포함되어 있어 수문모형의 입력 자료로 활용하는데 다양한 어려움이 존재한다. 이러한 레이더 강우자료를 활용하는데 있어서 다양한 편의보정 기법을 통하여 보정이 수행되고 있지만 여전히 레이더 강우시계열을 생산하는데 있어 다양한 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 레이더 강우자료의 시공간적 오차구조를 규명함과 동시에 오차구조의 종속성을 Copula 기법을 통하여 모의할 수 있는 레이더 강우양상블 생산기법을 개발하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 레이더 강우자료의 활용성을 강화하기 위해서는 단일 강우지점이 아닌 유역 내 다지점 강우네트워크에 적용이 가능해야 하며, 유역 내 각 관측지점에 존재하는 시공간적 상관성 또한 고려해야 한다. 본 연구에서는 다변량 t-Copula 기반의 시공간적 상관성 재현 방안을 도입하였으며, 이를 통해 유역 내 레이더 강우자료의 편의 보정뿐만 아니라 무작위 오차의 시공간적 구조를 재현할 수 있었다.
- 2) 다변량 Copula 기법을 적용하여 지상강우와 레이더 강우의 주변분포로부터 유도된 시공간적 오차특성이 규명된 무작위 오차를 반영하여 레이더 강우양상블을 생산한 결과 지상강우의 시공간적 특성 및 통계적 특성을 효과적으로 재현하는 것을 확인하였다. 따라서 우리나라와 같이 지형적으로 도달시간이 짧은 강우특성을 고려한다면 돌발홍수와 같은 신속한 유역단위의 수문해석이 필요한 경우 활용성이 있을 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구를 통해서 생산된 레이더 강우양상블은 극치강우량, 강우시계열의 유역상관성 및 자기상관성을 효과적으로 복원하는 것을 확인하였다. 이러한 점에서 유역단위 면적강우량을 추정하는데 활용이 가능할 것으로 판단되며, 강우의 공간적인 정보를 활용하는 분포형 강우-유출 모형의 입력 자료로도 활용이 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 다변화되는 기상현상으로 인하여 의사결정을 위해 단일 값의 예측결과 보다는 확률론적 기반으로 제시되는 강우양상블 형태의 결과는 통계적 특성을 유지하는 범위에서 발생가능성이 있는 강우사상을 표현하기 때문에 본 연구를 통하여 개발된 레이더 강우양상블 생산기법은 수자원 분야 뿐만 아니라 다양한 응용기상 분야에 널리 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의연구비지원(16RDRP-B076564-03)에 의해 수행되었습니다. 저자들은 전북대학교 방재연구센터 및 한국건설기술연구원 수문레이더 재해연구·데이터 센터에 소속되어 연구를 수행하였습니다.

#### References

- AghaKouchak, A., Bardossy, A., and Habib, E. (2010). "Copula-based uncertainty modelling: application to multisensor precipitation

- estimates." *Hydrological Processes*, Vol. 24, No. 15, pp. 2111-2124.
- Dai, Q., Han, D., Rico-Ramirez, M. A., and Islam, T. (2013). "Impact of rain drop drift in three-dimensional wind field on radar – gauge rainfall comparison." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, No. 21, pp. 7739-7760.
- Dai, Q., Han, D., Rico-Ramirez, M. A., and Islam, T. (2014). "Modelling radar-rainfall estimation uncertainties using elliptical and Archimedean copulas with different marginal distributions." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 59, No. 11, pp. 1992-2008.
- Germann, U., Berenguer, M., Sempere-Torres, D., and Zappa, M. (2009). "Real-ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 135, No. 639, pp. 445-456.
- Hewitt, C. D., and Griggs, D. J. (2004). "Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts (ENSEMBLES)." *Eos*, Vol. 85, No. 52, p. 566.
- Joe, H. (1997). "Multivariate models and dependence concepts." Chapman Hall, London.
- Kim, S. J., Noh, H. S., Kang, N. R., Lee, K. H., Kim, Y. S., Lim, S. H., Lee, D. R., and Kim, H. S. (2014). "Noise reduction analysis of radar rainfall using chaotic dynamics and filtering techniques." *Advances in Meteorology*, Vol. 2014.
- Kober, K., Craig, G. C., Keil, C., and Dörnbrack, A. (2012). "Blending a probabilistic nowcasting method with a high-resolution numerical weather prediction ensemble for convective precipitation forecasts." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 138, No. 664, pp. 755-768.
- Krajewski, W. F., and Smith, J. A. (2002). "Radar hydrology: rainfall estimation." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 8, pp. 1387-1394.
- Lee, K. H., Lim, S. H., Jang, B. J., and Lee, D. R. (2015). "Quantitative rainfall estimation for S-band dual polarization radar using distributed specific differential phase." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 57-67 (in Korean).
- Melchiori, M. R. (2003). "Which Archimedean copula is the right one?" *Yield Curve*, October.
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., and Petroliagis, T. (1996). "The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 122, No. 529, pp. 73-119.
- Priestley, M. B. (1981). "Spectral analysis and time series."
- Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N. T., and Rosso, R. (2007). "Extremes in nature: an approach using copulas." *Springer Science & Business Media*, Vol. 56.
- Schmidt, R. (2002). "Tail dependence for elliptically contoured distributions." *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 55, No. 2, pp. 301-327.
- Sklar, M. (1959). "Fonctions de repartition a n dimensions et leurs marges." Universite Paris 8.
- Villarini, G., Serinaldi, F., and Krajewski, W. F. (2008). "Modeling radar-rainfall estimation uncertainties using parametric and non-parametric approaches." *Advances in Water Resources*, Vol. 31, No. 12, pp. 1674-1686.
- Vogl, S., Laux, P., Qiu, W., Mao, G., and Kunstmann, H. (2012). "Copula-based assimilation of radar and gauge information to derive bias-corrected precipitation fields." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 7, pp. 2311-2328.