

관측오차문제에 대한 다차원 강우모형의 적용 Application of Multi-Dimensional Precipitation Models to the Sampling Error Problem

유 철 상 *

Yoo, Chulsang

Abstract

Rainfall observation using rain gage networks or satellites includes the sampling error depending on the observation methods or plans. For example, the sampling using rain gages is continuous in time but discontinuous in space, which is nothing but the source of the sampling error. The sampling using satellites is the reverse case that continuous in space and discontinuous in time. The sampling error may be quantified by use of the temporal-spatial characteristics of rainfall and the sampling design. One of recent works on this problem was done by North and Nakamoto (1989), who derived a formulation for estimating the sampling error based on the temporal-spatial rainfall spectrum and the design scheme. The formula enables us to design an optimal rain gage network or a satellite operation plan providing the statistical characteristics of rainfall. In this paper the formula is reviewed and applied for the sampling error problems using several multi-dimensional precipitation models. The results show the limitation of the formulation, which cannot distinguish the model difference in case the model parameters can reproduce similar second order statistics of rainfall. The limitation can be improved by developing a new way to consider the higher order statistics, and eventually the probability density function (PDF) of rainfall.

요 지

강우계측망이나 인공위성을 이용하여 어떤 지역의 강우를 관측할 경우 각 관측방법의 특성에 따라 관측오차가 발생하게 된다. 즉, 강우계측망을 이용할 경우 관측된 강우는 시간적으로 연속이지만 공간적으로는 불연속의 특성을 갖게 되고 인공위성을 이용하는 경우 강우는 공간적으로는 연속이지만 시간적으로 불연속인 특성을 나타내게 된다. 이에 따른 관측오차의 계산은 강우의 시간적-공간적 통계특성과 관측방법에 따라 각각 다르게 정량화 된다. 현재 이 문제와 관련하여 North와 Nakamoto(1989)가 제안한 관측오차의 추정식이 가장 대표적이라고 할 수 있으며, 이 식에서는 강우의 2차원 통계특성과 관측방법에 따른 특성이 고려되어 있다. 이 식은 강우의 특성이 어느 정도 파악되는 경우 적절한 강우관측 계획 수립을 가능할 수 있게 해준다. 본 논문에서는 먼저 관측방법에 따른 관측오차의 계산에 대해 살펴보고, 몇 개의 다차원 강우모형을 이용하여 이 문제에 적용해 보았다. 적용 결과 현재까지의 관측오차 계산에는 강우의 2차원 통계 특성만이 고려되기 때문에 모형의 매개변수들이 이 특성에 맞추어 적절히 추정된 경우, 모형에 따른 관측오차의 차이는 크지 않은 것으로 밝혀졌다. 앞으로 이러한 단점은 2차원 이상의 통계 특성을 고려하는 관측오차의 추정식, 궁극적으로는 강우의 확률밀도함수를 고려할 수 있는 관측오차 추정식의 개발을 통해 개선될 수 있을 것이다.

Keywords: multi-dimensional precipitation model, rain gage network, sampling error

* 고려대학교 자연과학대학 환경공학과 조교수

1. 서 론

인공위성을 이용한 강우관측은 지상에서의 강우관측과는 달리 최대 지구규모까지의 강우자료를 제공해 줄 수 있고, 지상관측으로 파악하기 어려웠던 강우의 공간 분포는 물론 해양에서의 강우까지도 관측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 강우관측도 몇가지 문제점을 포함하고 있는데 그 첫째로 강우가 센서를 통해 간접적으로 관측됨으로서 생기는 beam filling 문제, 둘째로 관측된 강우가 공간적으로는 연속이지만 시간적으로는 불연속이기 때문에 발생하는 관측오차(sampling error) 문제, 마지막으로 관측된 강우와 실제 강우와의 차이를 어떻게 찾아내느냐 하는 ground-truth 문제를 들 수 있다. 이러한 문제들은 강우의 시간적-공간적 통계 특성과 관측 계획에 따라 각각 다르게 정량화 된다.

이 문제들 중에서 beam filling 문제는 강우가 센서를 통해 간접적으로 관측되기 때문에 생기는 문제, 즉 센서에서 받은 에코신호를 선형이 아닌 비선형의 관계 식으로부터 강우강도를 추출함으로써 생기는 문제가 된다. 예를 들면 사등분된 면적의 강우강도가 각각 1, 2, 3, 4 mm/sec라고 할 때 전체면적에 대한 강우강도는 이들의 평균인 2.5 mm/sec가 되어야하나 원격 탐사된 에코자료를 강우강도로 전환할 경우(예를 들어 2차 함수의 경우) 관측된 강우강도는 12, 22, 32, 42의 평균에 제곱근을 취한 값이 되어 결국 면적평균값은 2.74 mm/sec의 값이 된다. 이러한 문제는 원격탐사방법을 이용하는 경우 발생하는 근본적인 문제로서 관측대상에 따라 그 특성이 달라지므로 원격탐사 전에 해결해야 할 중요한 연구분야가 된다.

관측오차문제와 ground-truth 문제는 관측대상의 물리적 특성뿐만 아니라 시간적-공간적 분포 특성까지도 고려해야 한다는 점에서 유사한 문제가 된다. 먼저 관측오차문제는 인공위성을 이용하여 넓은 대상지역(foot print or field of view)을 한번에 관측함으로써 공간적으로 연속이나, 인공위성이 일정 시간 간격으로 대상지역을 방문함으로써 생기는 시간적 불연속이 관측오차를 유발하는 원인이 된다(그림 1a). 이것은 강우계를 이용한 지상관측의 경우와는 반대로서 지상에서의 관측자료는 시간적으로는 연속이 되지만 공간적으로는 불연속이 되고 이것이 관측오차의 원인이 되는 것이다(그림 1b). Ground-truth 문제는 원격 탐사된 자료와 참값사이의 편기(bias)를 찾아내는 문제로서 관측대상이 공간적으로 일정한 값(즉, 상수값) 또는 관측

하려는 자료의 공간적 분산도가 상대적으로 작은 경우는 큰 문제가 되지 않으나 강우와 같이 시간적-공간적 분산도가 큰 경우에는 상당히 어려운 문제가 된다. 예를 들어 North 등(1994)은 이 문제를 GATE(Global Atmospheric Research Program's Atlantic Tropical Experiment) 자료에 적용해 본 결과 편기 값을 찾아내는데 약 1년 이상의 관측(하루 2회의 관측을 기준으로)이 필요하다고 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 문제들 중에서 관측오차문제를 중심으로 어떻게 관측오차가 계산되는지를 소개하고 몇몇 다차원 강우모형을 이용하여 이 문제에 적용해 보고자 한다. 관측오차의 계산은 인공위성을 이용하는 경우와 아울러 지상의 강우계측망을 이용하는 경우로 나누어 살펴보고, 강우모형은 상대적으로 간단한 구조의 모형과 복잡한 모형을 선택하여 모형에 따른 관측오차에의 민감도가 고려되도록 하였다.

2. 관측오차 계산의 이론적 배경

North와 Nakamoto(1989)는 인공위성이나 강우계측망을 이용하여 강우를 관측할 경우에 생기는 오차를 강우의 시간적-공간적 분산도와 강우계측망이나 인공위성의 운영계획에 따른 특성을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다고 밝힌 바 있다.

$$\epsilon^2 = \int \int \int |H(\nu, f)|^2 S(\nu, f) d\nu df d^2\nu \quad (1)$$

여기서 ν 는 파장수(wavenumber), f 는 진동수(frequency), ϵ 는 관측오차, S 는 강우의 스펙트럼, 그리고 H 는 강우계측망이나 인공위성의 운영계획과 관련한 design filter이다. 여기서 design filter는 인공위성을 이용하는 경우, 인공위성이 매 Δt 시간마다 $L \times L$ 의 대상지역을 총 T 시간동안 관측한다고 가정할 때 다음과 같이 표현된다.

$$H(f, \nu_x, \nu_y) = G(\pi\nu_x L)G(\pi\nu_y L)G(\pi f T) \left[1 - \frac{1}{G(\pi f \Delta t)} \right] \quad (2)$$

여기서 $G(x)$ 는 Bartlett Filter로 x 가 0으로 수렴할 때 $G(x)^2$ 은 1에 수렴하게 된다.

$$G(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad (3)$$

따라서 관측면적이 0이 되면($L=0$) 위의 식은 점 관

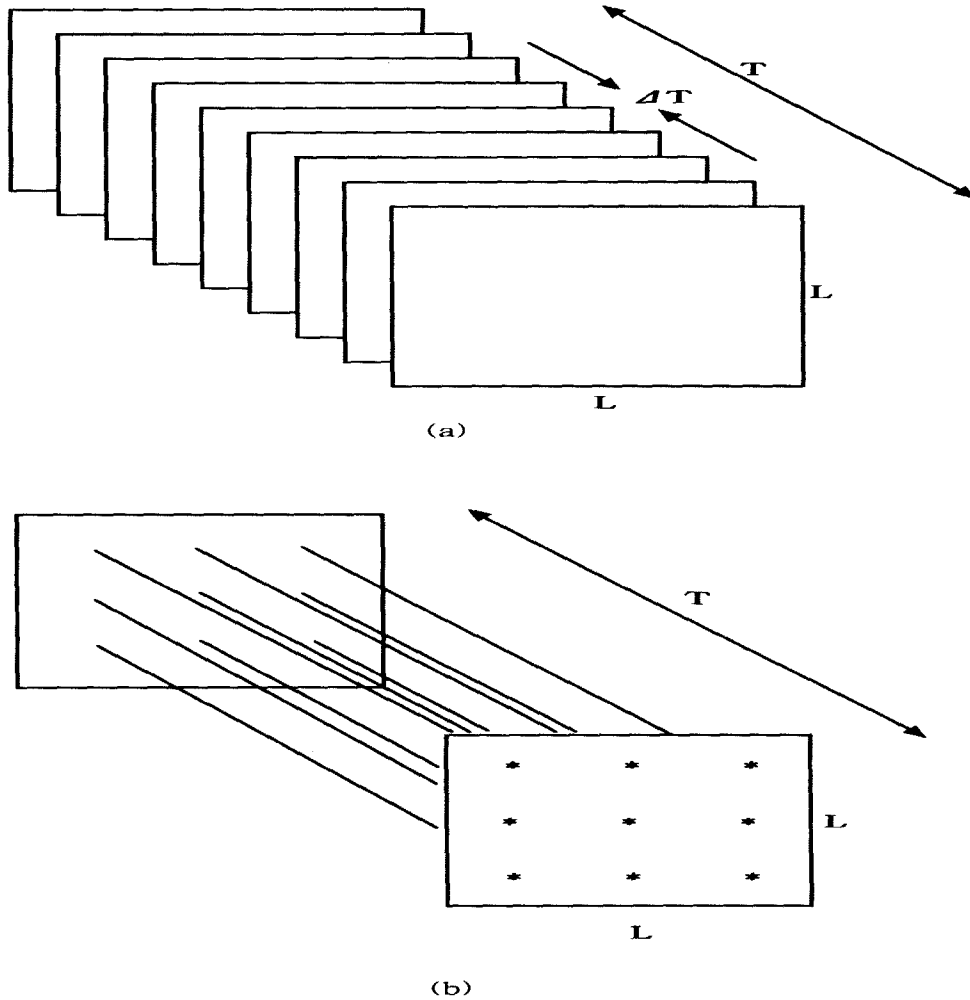


그림 1. 인공위성(a) 및 강우계측망(b)을 이용한 강우관측 (North and Nakamoto, 1989)

측에 대한 오차를 추정하는 식이 된다. 여기서 주목할 만한 또 하나의 사실은 파장수 영역에서 Bartlett filter는 파장수가 $1/L$ 일 때 첫 번째 0값을 갖게되며, $L \rightarrow \infty$ 일 때 강우의 스펙트럼은 0에 수렴하게 되어 위의 적분계산을 수행할 때 3차원 스펙트럼 대신 1차원 스펙트럼인 $S(f, 0, 0)$ 의 사용을 가능하게 한다는 점이다 (North와 Nakamoto, 1989). 이 점을 이용하여 관측 오차는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\epsilon^2 \approx \frac{\sigma^2}{L^2} \frac{1}{N\Delta t} \int \sum_{n \neq 0} \delta(f - \frac{n}{\Delta t}) S(f, 0, 0) df \quad (4)$$

여기서 σ^2 은 강우의 분산(공간적)이며, N 은 총 관측

횟수로서 $N\Delta t = T$ 의 관계로부터 결정한다.

한편 강우계측망을 이용하는 경우의 design filter는 관측지역에 강우계를 매 Δl 마다 일정하게 설치했다고 볼 경우 다음과 같이 표현된다.

$$H(f, \nu_x, \nu_y) = G(\pi \nu_x L) G(\pi \nu_y L) G(\pi f T) \left[1 - \frac{1}{G(\pi \nu_x \Delta l) G(\pi \nu_y \Delta l)} \right] \quad (5)$$

만일 강우계가 충분히 설치되어 있다고 가정하면 ($L/\Delta l \gg 1.0$), 관측오차는 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}\epsilon^2 &\approx \frac{\sigma^2}{L^2} \frac{1}{T} \int \sum_{n_x, n_y \neq 0} S(0, \frac{n_x}{\Delta l}, \frac{n_y}{\Delta l}) df \\ &\approx \frac{\sigma^2}{L^2} \frac{4}{T} \int \sum_{n_x, n_y=1}^{\infty} S(0, \frac{n_x}{\Delta l}, \frac{n_y}{\Delta l}) df \quad (6)\end{aligned}$$

3. 다차원 강우모형

3.1 The Noise-Forced Diffusive 강우모형 (NFD강우모형)

NFD강우모형은 간단한 확산방정식에 기초한 모형으로서 외부에서의 Forcing, F , 즉 강우전선의 도달이나 강우의 생성·소멸을 추계학적으로 모의하고 이를 대상 지역에 확산시키는 형태를 가지고 있으며 North와 Nakamoto(1989)에 의해 제안된 모형이다. 이 모형에서 강우강도 $\Psi(r, t)$ 는 다음과 같은 지배방정식을 따른다.

$$\tau_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \lambda_0^2 \nabla^2 \Psi + \Psi = F \quad (7)$$

여기서 τ_0 와 λ_0 는 각각 시간축척(time scale)과 길이축척(length scale)을 나타내며 주어진 강우장에 대한 고유의 특성치이다. 이 모형의 시간적·공간적 스펙트럼은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$S(\nu, f) = \frac{\gamma}{4\pi^2 \tau_0^2 f^2 + (1 + 4\pi^2 \lambda_0^2 \nu^2)^2} \quad (8)$$

여기서 γ 는 정규화계수(normalization factor)로서 다음 식을 만족시키는 값을 취한다.

$$\int \int S(\nu, f) d^2 \nu df = 1.0 \quad (9)$$

이 강우모형은 적은 수의 매개변수를 가지고 있으며 간단한 확산방정식에 근거하고 있어 상대적으로 다른 목적에 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 이 모형은 관측 강우의 물리적 현상을 충분히 설명해 주고 있지 못하며, 강우의 확률밀도함수도 정규분포가 되어 관측된 강우의 통계적 특성과는 차이가 있다.

3.2 WGR (Waymire-Gupta-Rodriguez-Ilturbe) 강우모형

WGR강우모형은 meso-scale 정도의 강우를 표현하기 위해 개발된 모형이다 (Waymire 등, 1984). 이 모형은 개념적인 모형으로서 대기의 동역학적 특성과 강우의 통계학적 특성이 비교적 잘 반영된 모형이다.

먼저 강우전선의 도달과 강우의 생성·소멸 등을 시간적 및 공간적 포아송 과정 (Poisson process) 등의 추계학적 기법을 이용하여 표현하였고, 아울러 강우의 군집특성 및 이송·확산에 의한 시간·공간적 변화도 잘 고려하고 있는 것으로 알려져 있다. Gupta와 Waymire(1987)는 이 강우모형이 다음과 같이 표현될 수 있다고 밝힌 바 있다.

$$\Psi(t, x) = \int_{-\infty}^t g_1(t-s) Z[s, x - v(t-s)] ds \quad (10)$$

여기서 v 는 강우의 이송속도이고 $Z(t, x)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$Z(t, x) = \int_{R^2} g_2(x-y) X(t, y) dy \quad (11)$$

Waymire 등(1984)은 g_1 과 g_2 가 확정론적 kernel로서 시간적으로는 강우세포의 생명주기를 결정하고 공간적으로는 이 강우세포의 강도를 분포시키는 역할을 하게 된다고 설명하였다. 이 모형의 3차원 스펙트럼은 Valdes 등(1990)에 의해 다음과 같이 유도되었다.

$$\begin{aligned}S(f, \nu_x, \nu_y) &= \theta_1 \frac{\alpha F(D, 0)}{\alpha^2 + \Theta^2} \\ &+ \theta_2 \frac{2\alpha\beta(\beta^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + 4\pi^2 f^2)(\beta^2 + 4\pi^2 f^2)} \delta(\nu_x)\delta(\nu_y) \\ &+ \theta_3 \frac{\alpha\beta(\beta^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + \Theta^2)(\beta^2 + \Theta^2)} \frac{F(D, \sigma)}{4\pi(D^2 + \sigma^2)} \quad (12)\end{aligned}$$

여기서

$$F(D, \sigma) = 8\pi(D^2 + \sigma^2) \exp[-4\pi^2(D^2 + \sigma^2)(\nu_x^2 + \nu_y^2)]$$

$$\Theta = 2\pi(\nu_x u_x + \nu_y u_y + f)$$

$$\theta_1 = \frac{\lambda_m E[\nu] \rho_L \pi D^2 i_0^2}{2\alpha}$$

$$\theta_2 = \frac{2\lambda_m \beta E[\nu]^2 \rho_L^2 \pi^2 D^4 i_0^2}{\alpha(\beta^2 - \alpha^2)}$$

$$\theta_3 = \frac{2\lambda_m \beta E[\nu(\nu-1)] \rho_L \pi^2 D^4 i_0^2}{\alpha(\beta^2 - \alpha^2)} \quad (13)$$

또한 $\delta(x)$ 는 dirac delta function, ν_x 와 ν_y 는 각 방향의 파장수, f 는 진동수이다. WGR 모형의 매개변수(Waymire 등(1984) 참고)는 관측된 강우의 물리적 특성을 잘 나타내고 있으며, 강우의 시간·공간적 통계학

적 특성도 잘 표현하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 이 모형은 최대 18개의 매개변수를 가지며 모형의 구조가 복잡한 비선형성을 가지고 있어 매개변수 추정이 매우 어려운 문제로 남아있다. Islam 등(1988), Valdes 등(1990), 또한 Koepsell과 Valdes(1991)가 각각 다른 지역의 강우에 대해 비선형 최적화 기법을 이용하여 매개변수를 추정하는 예가 있으나 그 자체가 매우 복잡하여 이 모형을 다른 목적으로 이용하는데 문제로 지적되고 있다.

3.3 Yoo 등(1996)의 모형

이 모형은 Yoo 등(1996)에 의해 제안된 것으로 관측된 강우의 스펙트럼을 잘 재현할 수 있고 또한 WGR강우모형보다 그 구조가 간단하여 다른 목적에의 적용이 용이하게 하는 것을 목적으로 하고 있다. 이 모형은 강우 이송·확산의 물리적 특성이 잘 반영되어 있고 강우의 생성, 소멸, 강우전선의 도달 등은 추계학적 forcing항에 의해 조절되는 구조를 가지고 있다. 이 강우모형은 다음의 편미방정식에 근거하고 있다.

$$a \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + b \frac{\partial \psi}{\partial t} + c \nabla^2 \psi + d v \cdot \nabla \psi + \psi = F(r, t) \quad (14)$$

여기서 a, b, c, d 와 v 는 각각 대상 강우장에 따라 결정되는 상수값이다.

이 모형의 스펙트럼은 Fourier 변환을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S(f, \nu) = \frac{\gamma}{4\pi^2 (bf + d\nu \cdot \nu)^2 + (1 - 4\pi^2 af^2 + 4\pi^2 c\nu^2)^2} \quad (15)$$

여기서 γ 는 정규화계수(normalization factor)이다. 이 모형의 매개변수들은 GATE자료에 대해 다음과 같이 각각 결정된 바 있으며(Yoo 등, 1996) 그 값은 각각 $a=16\text{hour}^2$, $b=16\text{ hour}$, $c=1600\text{ km}^2$, $d=9\text{ hour}$ 이다.

4. 인공위성 또는 강우계측망을 이용하는 경우의 관측오차

여기서는 앞에서 언급한 강우모형을 관측오차문제에 적용하여, 인공위성을 이용할 경우와 지상의 강우계측망을 이용할 경우에 각각 어떻게 나타나는지를 살펴보고자 한다. 식 (4)와 NFD 모형의 스펙트럼을 이용하면 관측오차는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon^2 \approx \sigma_A^2 \frac{1}{\pi^2} \frac{\Delta t}{T} \frac{\Delta t}{\tau_0} \quad (16)$$

여기서 σ_A^2 는 강우강도의 면적평균값에 대한 분산이다. 예를 들어 $\Delta t = \tau_0 = 12\text{hrs}$ 이고 총 관측횟수가 60회 ($N=60$)인 경우, 관측오차는 $\epsilon \approx 0.041\sigma_A$ 이 된다.

즉, 관측오차는 면적평균 강우의 표준편차의 약 4.1%가 된다.

Yoo 등(1996)의 모형을 이용하는 경우 관측오차는 다음과 같다.

$$\epsilon^2 \approx \frac{\sigma_A^2}{T} \frac{4b\sqrt{b^2-4a}}{\sqrt{\frac{2a^2}{b^2-2a-b\sqrt{b^2-4a}} - \frac{2a^2}{b^2-2a+b\sqrt{b^2-4a}}}} \times \frac{1}{16\pi^4 a^2 (\frac{1}{\Delta t})^4 + 4\pi^2 (b^2-2a) (\frac{1}{\Delta t})^2 + 1} \quad (17)$$

앞에서와 같은 조건일 경우 관측오차는 약 $\epsilon \approx 0.042\sigma_A$ 이 된다. 이 값은 NFD모형에 의한 경우와 매우 비슷한 값으로 그 차이는 무시할 만한 수준이다.

WGR 모형의 경우 인공위성을 이용한 강우관측시의 관측오차는 Graves 등(1993)에 의해 유도되었다.

$$\epsilon^2 = \frac{1}{L^2 T} \left[\frac{8\pi\theta_1 D^2}{a} \left\langle \frac{a\Delta t}{2} \coth\left(\frac{a\Delta t}{2}\right) - 1 \right\rangle + 2(\theta_2 L^2 + \theta_3) \left\langle \frac{\Delta t}{2} (\beta \coth\left(\frac{a\Delta t}{2}\right) - a \coth\left(\frac{\beta\Delta t}{2}\right)) + \frac{a^2 - \beta^2}{a\beta} \right\rangle \right] \quad (18)$$

여기서 면적평균강우의 분산은 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{L^2} [4\pi D^2 \theta_1 + (\beta - a) \theta_3] + (\beta - a) \theta_2 \quad (19)$$

앞에서와 똑같은 조건하에서 WGR 모형을 이용할 경우의 관측오차는 $\epsilon \approx 0.089\sigma_A$ 이 된다. 여기서 사용된 매개변수는 Valdes 등(1990)에 의해 GATE 지역에 대해 추정된 것을 이용하였다. NFD 모형의 매개변수도 역시 GATE 지역에 대하여 추정된 것을 이용하였다.

위의 결과를 비교해 보면 WGR 모형을 이용한 경우의 관측오차가 NFD 모형이나 Yoo 등의 모형을 이용한 경우보다 약 2배 정도 큰 값을 주는 것으로 나타났다. 그 이유

로서는 무엇보다도 WGR 모형의 매개변수가 적절하게 추정되지 않았다는 점에서 찾을 수 있다. 이것은 이미 Valdes 등(1994)이 관측된 강우의 스펙트럼과 WGR 모형의 스펙트럼을 비교함으로써 밝힌 바 있다. 한편, 본 저자와 Valdes는 WGR 모형 스펙트럼의 구조가 강우의 시간적 공간적 소멸과정과 관계 있다는 점에 착안 매개변수를 다시 추정할 바 있으며, 이 매개변수를 이용할 경우의 관측오차는 $\epsilon \approx 0.046\sigma_A$ 로 작아짐을 확인한 바 있다.

여기서 주목할만한 또 하나의 사실은 적은 관측오차를 주는 모형이 꼭 좋은 모형은 아니라는 점이다. 즉, 관측오차의 비교가 직접적인 모형평가의 척도는 될 수 없는 것이다. 그 이유로서 첫째, 관측오차의 추정에 관측자료의 스펙트럼을 이용하지 않아 실제의 정확한 관측오차가 얼마인지가 밝혀져 있지 않고, 둘째, 모형의 매개변수를 완벽하게 추정하는 것이, 특히 WGR 모형의 경우는 매우 어렵다는 점이다. 즉, 모형의 매개변수 추정에 2차원의 통계특성이 충분히 고려되지 않는기 때문이다. 이 점이 WGR 모형의 적용을 어렵게 하는 단점으로 지적되는 부분이다.

강우계측망을 이용하는 경우의 관측오차도 식 (6)과 강우모형의 스펙트럼을 이용하여 계산할 수 있다. NFD 강우모형의 경우 관측오차는 다음과 같이 표현된다(North와 Nakamoto, 1989).

$$\epsilon^2 \approx \sigma_A^2 \frac{8\tau_0}{T} \sum_{n_x, n_y=1}^{\infty} \frac{1}{[1 + 4\pi^2(\lambda_0/\Delta l)^2(n_x^2 + n_y^2)]^2} \quad (20)$$

Yoo 등(1996)의 모형을 적용한 경우 관측오차는

$$\begin{aligned} \epsilon^2 \approx & \frac{\sigma_A^2}{T} \frac{8b\sqrt{b^2-4a}}{\sqrt{\frac{2a^2}{b^2-2a-b\sqrt{b^2-4a}}}} \frac{1}{\sqrt{\frac{2a^2}{b^2-2a+b\sqrt{b^2-4a}}}} \\ & \times \sum_{n_x, n_y=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{4\pi^2 a^2}{\Delta l^2} (v_x n_x + v_y n_y)^2 + (1 + \frac{4\pi^2 c}{\Delta l^2} (n_x^2 + n_y^2))^2} \end{aligned} \quad (21)$$

WGR 강우모형의 경우는 다음과 같다 (Graves 등, 1993).

$$\begin{aligned} \epsilon^2 = & \frac{4}{TL^2} \\ & \left(8\pi\theta_1 D^2 \alpha \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{\exp[-4\pi^2 D^2 (n^2 + m^2)/\Delta l^2]}{[\alpha^2 + 4\pi^2 \Theta]/\Delta l^2} \right. \\ & \left. + 2\theta_3 \alpha \beta (\beta^2 - \alpha^2) \right) \end{aligned}$$

$$\sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{\exp[-4\pi^2 (D^2 + \sigma^2)(n^2 + m^2)/\Delta l^2]}{[\alpha^2 + 4\pi^2 \Theta^2/\Delta l^2][\beta^2 + 4\pi^2 \Theta^2/\Delta l^2]} \quad (22)$$

여기서 $\Theta = v_x n + v_y m$. 인공위성을 이용한 관측에서와 마찬가지로 한달 동안의 관측으로 약 4.0%의 관측오차를 얻기 위한 관측망의 설계를 예로 들어보면, NFD 강우 모형의 경우 강우계 사이의 간격은 약 108km로 계산된다. 같은 상황에서 Yoo 등의 모형을 적용할 경우 강우계 사이의 간격은 약 102km, WGR 강우모형을 적용한 경우 강우계 사이의 간격은 약 78km로 많은 차이를 나타낸다. 만일 두 개의 방법, 즉 강우계측망과 인공위성을 동시에 사용하게 된다면 관측오차는 각각의 경우의 관측오차를 다음과 같이 조화평균하여 구할 수 있다(Graves 등, 1993).

$$\epsilon^2 \approx \frac{\epsilon_s^2 \epsilon_g^2}{\epsilon_s^2 + \epsilon_g^2} \quad (23)$$

여기서 ϵ_s^2 와 ϵ_g^2 는 각각 인공위성을 이용하는 경우와 지상의 강우계를 이용하는 경우에 대한 관측오차이다.

5. 결 론

본 연구에서는 인공위성으로 강우를 관측하는 경우 생기는 관측오차의 추정방법을 소개하고 세계의 다차원 강우모형을 이용하여 적용해 보았다. 관측오차는 강우의 스펙트럼과 관측계획에 따라 결정된다. 모형의 매개변수가 2차원 통계특성을 충족시키도록 적절히 추정된 경우 모형에 따른 관측오차의 차이는 미미하며, 따라서 강우관측 계획시 WGR모형 같은 복잡한 모형을 이용할 필요는 없을 것으로 보인다. 특별한 경우로서 강우를 하루에 두 번씩 총 한달 간 관측할 경우 관측오차는 먼 적평균 강우의 표준편차의 약 4-5%가 되는 것으로 나타났다. 또한 약 4%의 관측오차에 필요한 지상 강우계측망의 설계에서는 강우계사이의 간격이 각각 102, 108, 78km로 큰 차이를 나타내고 있다. 이 값은 강우장이 균질(homogeneous)하다고 가정할 경우의 값이므로 강우에 미치는 지형적인 영향(oro-graphic effect)이나 시간축에서의 주기성(diurnal cycle, semi-diurnal cycle, seasonality 등)을 고려하면 더욱 커질 수 있다. 관측된 강우의 스펙트럼이 존재하는 경우, 이 스펙트럼은 강우장의 불균질성(heterogeneity)이 이미 고려된 경우이므로 관측오차의 계산에는 문제가 없으나 그렇지 못한 경우 모형을 통한 불균질성의 고려는 어려운

상태이므로 이에 대한 추가의 배려가 있어야 할 것이다. 현재까지의 관측오차 계산은 강우의 2차원 통계특성까지가 고려되어 실제강우의 특성이 충분히 고려되었다고는 볼 수 없다. 즉, 강우모형의 매개변수가 관측된 강우의 2차원 통계특성을 잘 재현할 수 있게 추정된다면 강우모형에 따른 관측오차의 차이는 찾을 수 없고 이를 통한 강우모형의 비교도 어렵게 된다. 따라서 앞으로의 연구는 2차원 이상의 강우특성 나아가 강우의 확률밀도 함수가 고려될 수 있는 관측오차의 계산법 개발에 초점이 맞추어 져야 할 것으로 보인다. 아울러 강우장의 불균질성을 관측오차 계산에 어떻게 고려하느냐도 중요한 연구분야가 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- Graves, C.E., Valdes, J.B., Shen, S.S.P., and North, G.R. (1993). "Evaluation of sampling errors of precipitation from spaceborne and ground sensors." *J. of Appl. Meteorol.*, Vol. 32, pp. 374-384.
- Gupta, V.K., and Waymire, E. (1987). "On Taylor's hypothesis and dissipation in rainfall." *J. Geophys. Res.*, Vol. 92, pp. 9657-9660.
- Islam, S., Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1988). "Multi-dimensional modeling of cumulative rainfall: Parameter estimation and model adequacy through a continuum of scales." *Water Resour. Res.*, Vol. 24, pp. 992-995.
- Koepsell, R.W., and Valdes, J.B. (1991). "Multidimensional rainfall parameter estimation from sparse network." *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 117, pp. 832-850.
- North, G.R., and Nakamoto, S. (1989). "Formalism for comparing rain estimation designs." *J. Atmos. Ocean. Tech.*, Vol. 6, pp. 985-992.
- North, G.R., Valdes, J.B., Ha, E., and Shen, S.S.P. (1994). "The ground truth problem for satellite estimates of rainrate." *J. Atmos. Ocean. Tech.*, Vol. 11, No. 4, pp. 1035-1041.
- Valdes, J.B., Nakamoto, S., Shen, S.S.P., and North, G.R. (1990). "Estimation of multi-dimensional precipitation parameters by areal estimates of oceanic rainfall." *J. Geophys. Res. (Atmos.)*, Vol. 95, No. D3, pp. 2101-2111.
- Valdes, J.B., Ha, E., Yoo, C. and North, G.R. (1994). "Stochastic characterization of space-time precipitation: Implications for remote sensing." *Advances in Water Resources*, Vol. 17, pp. 47-99.
- Waymire, E., Gupta, V.K., and Rodriguez-Iturbe, I. (1984). "Spectral theory of rainfall intensity at the meso- β scale." *Water Resour. Res.*, Vol. 20, No. 10, pp. 1453-1465.
- Yoo, C., Valdes, J.B., and North, G.R. (1996). "Stochastic modeling of multidimensional precipitation fields considering spectral structure." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 7, pp. 2175-2187.

〈최종본 접수일 : 1997년 8월 7일〉