인공위성을 이용한 강우관측과 관측오차

Sampling Error Problem on Rainfall Observation Using Satellite

유철상

요지

인공위성을 이용한 강우관측은 지상에서의 강우관측과는 달리 넓은 지역의 관측을 가능하게 하고 또한 해양에서의 강우까지도 관측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 강우관측도 몇가지 문제점을 포함하고 있는데 그 하나로서 관측오차 문제를 들 수 있다. 이것은 관측된 강우가 공간적으로는 연속이지만 시간적으론 불연속이기 때문에 발생하는 구조적인 문제로서 강우의 시간적-공간적 통계특성과 관측계획에 따라 각각 다르게 정량화 된다. 본 논문에서는 인공위성을 이용한 강우 관측시 발생하는 관측오차의 추정식을 소개하고 두 개의 다차원 강우모형을 사용하여 적용해 보았다. 현재까지의 관측오차 추정은 강우의 2차원 통계특성만을 고려하기 때문에 모형의 매개변수들이 이 특성에 맞추어 적절히 추정된 경우, 모델에 따른 차이는 크지 않은 것으로 밝혀졌다. 앞으로 이러한 단점은 2차원 이상의 통계특성을 고려하는, 궁극적으로는 강우의 확률밀도함수를 고려할 수 있는 관측오차 추정식의 개발을 통해 개선될 수 있을 것이다.

1. 서론

인공위성을 이용한 강우관측은 지상에서의 강우관측과는 달리 최대 지구규모까지의 강우자료를 제공해 줄 수 있고, 지상관측으로 파악하기 어려웠던 강우의 공간분포는 물론 해양에서의 강우까지도 관측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 강우관측도 몇가지 문제점을 포함하고 있는데 그 첫째로 강우가 센서를 통해 간접적으로 관측됨으로서 생기는 Beam Filling문제, 둘째로 관측된 강우가 공간적으로는 연속이지만 시간적으론 불연속이기 때문에 발생하는 관측오차(Sampling Error)문제, 마지막으로 관측된 강우와 실제 강우와의 차이를 어떻게 찾아내느냐 하는 Ground-Truth문제를 들 수 있다. 이러한 문제들은 강우의 시간적-공간적 통계특성과 관측계획에 따라 각각 다르게 정량화 된다.

본 연구에서는 이러한 문제들 중에서 관측오차문제를 중심으로 어떻게 관측오차가 계산되는지를 소개하고 두개의 다차원 강우모형을 이용하여 이 문제에 적용해 보고자 한다. 강우모형은 상대

고려대학교 자연과학대학 환경공학과

적으로 간단한 구조의 모형과 복잡한 모형을 선택하여 모형에 따른 관측오차에의 민감도가 고려되도록 하였다.

2. 관측오차의 추정

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

$$\varepsilon^2 = \int\int\int |H(\nu, f)|^2 S(\nu, f) d^2 f d\nu \tag{1}$$

여기서 ε는 관측오차, S는 강우의 스펙트럼, 그리고 H는 인공위성의 운영계획과 관련한 Design Filter이다. 여기서 Design Filter는 인공위성을 이용하는 경우, 인공위성이 매 dt시간마다 LxL의 대상지역을 총 T시간동안 관측한다고 가정할 때 다음과 같이 표현된다.

$$H(f, \nu_x, \nu_y) = G(\pi\nu_x L)G(\pi\nu_y L)G(\pi f T)[1 - \frac{1}{G(\pi f \mathrm{dt})}] \tag{2}$$

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

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

따라서 관측면적이 0이 되면(L=0) 위의 식은 점관측(point measurement)에 대한 오차를 추정하는 식이 된다. 여기서 주목할 만한 또 하나의 사실은 파장수가 $1/L$일 때 Bartlett Filter는 첫번째 0값을 갖게되며, $L \to \infty$일 때 강우의 스펙트럼은 0값에 수렴하게 되어 위의 적분계산을 수행할때 3차원 스펙트럼 대신 1차원 스펙트럼인 $S(f, 0, 0)$의 사용을 가능하게 한다는 점이다(North와 Nakamoto, 1989). 이 점을 이용하여 관측오차는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\varepsilon^2 \approx \frac{\sigma^2}{L^2} \frac{1}{Ndt} \int \sum_{n \neq 0} \delta(f - \frac{n}{dt}) S(f, 0, 0) df \tag{4}$$

여기서, σ^2은 강우의 분산(공간적)이며, N은 총 관측횟수로서 Ndt=T의 관계로부터 결정한다.

3. 다차원 강우모형

3.1 The Noise-Forced Diffusive Precipitation Model (NFD강우모형)

NFD강우모형은 간단한 확산방정식에 기초한 모형으로서 외부에서의 Forcing, F, 즉 강우전선의 도달이나 강우의 생성을 추계학적으로 모의하고 이를 대상지역에 확산시키는 형태를 가지고 있으며 North와 Nakamoto(1989)에 의해 제안된 모형이다. 즉 이 모형은 강우강도 $\Psi(r, t)$의 지배방정식을 다음과 같이 가정한다.

$$\tau_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \lambda_0^2 \nabla^2 \Psi + \Psi = F \tag{5}$$

여기서, τ_0와 λ_0는 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.

$$S(\nu, \omega) = \frac{\gamma}{4\pi^2 \tau_0^2 \omega^2 + (1 + 4\pi^2 \lambda_0^2 \nu^2)^2} \tag{6}$$

여기서, γ는 정규화계수(normalization factor)로서 다음식을 만족시키는 값을 취한다.

$$\int\int\int S(\nu, \omega) d^2\nu d\omega = 1.0 \tag{7}$$

이 강우모형은 적은 수의 매개변수를 가지고 있으며 또 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 WGR강우모형

WGR강우모형은 Meso-scale정도의 강우를 표현하기 위해 개발된 모형이다(Waymire - Gupta - Rodriguez-Iturbe, 1984). 이 모형은 개념적인 모형으로서 대기의 동역학적 특성과 강우의 통계학적 특성이 비교적 잘 반영된 모형이다. 먼저 강우전선의 도달과 강우의 생성・소멸 등을 시간적 공간적 Poisson Prosses 등의 추계학적 기법을 이용하여 표현하였고, 아우러 강우의 군집특성 및 이송・확산에 의한 시간・공간적 변화도 잘 고려되어 있는 것으로 알려져 있다. Gupta와 Waymire(1987)는 이 강우모형이 다음과 같이 표현될 수 있다는 것을 밝힌 바 있다.

$$\Psi(t, x) = \int_{-\infty}^{t} g_1(t-s) Z[s, x - v(t-s)] ds \tag{8}$$

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

$$Z(t, x) = \int_{R^2} g_2(x-y) X(t, y) dy \tag{9}$$

Waymire 등(1984)은 g_1과 g_2가 확정론적 kernel로서 시간적으로는 강우세포(rain cell)의 생명주기를 결정하고 공간적으로는 이 강우세포의 강도를 분포시키는 역할을 하게된다고 설명하였다. 이 모형의 3차원 스펙트럼은 Valdes 등(1990)에 의해 다음과 같이 유도되었다.

$$S(f, \nu_x, \nu_y) = \theta_1 \frac{\alpha F(D, 0)}{\alpha^2 + \Theta^2} + \theta_2 \frac{2\alpha\beta(\beta^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + 4\pi^2 f^2)(\beta^2 + 4\pi^2 f^2)} \delta(\nu_x)\delta(\nu_y)$$

$$+\theta_3 \frac{\alpha\beta(\beta^2-\alpha^2)}{(\alpha^2+\Theta^2)(\beta^2+\Theta^2)} \frac{F(D,\sigma)}{4\pi(D^2+\sigma^2} \tag{10}$$

여기서,

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

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

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

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

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

또한 $\delta(x)$는 *dirac delta function*, ν_x와 ν_y는 각방향의 파장수, f는 진동수이다. WGR 모형의 매개변수는 관측된 강우의 물리적 특성을 잘 나타내고 있으며, 강우의 시간·공간적 통계학적 특성도 잘 표현하고 있는 것으로 알려져 있다(Valdes등, 1994). 그러나 이 모형은 최대 18개의 매개변수를 가지며 모형의 구조가 복잡한 비선형성을 가지고 있어 매개변수 추정이 매우 어려운 문제가 된다. Islam 등(1988), Valdes 등(1990), 또한 Koepsell과 Valdes(1991)가 각각 다른 지역의 강우에 대해 비선형 최적화기법을 이용 이 매개변수를 추정한 예가 있으나 그 자체가 매우 복잡하여 이 모형을 다른목적으로 이용하는데 문제로 지적되고 있다.

4. 적용예

여기서는 앞에서 언급한 강우모형을 관측오차문제에 적용하고 인공위성의 운영계획을 가정하여 관측오차가 얼마나 되는지를 계산해 보고자 한다. 식 (4)와 NFD 모형의 스펙트럼을 이용하면 관측오차는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon^2 \approx \sigma_A^2 \frac{1}{\pi^2} \frac{\mathrm{dt}}{T} \frac{\mathrm{dt}}{\tau_0} \tag{11}$$

여기서 σ_A^2는 강우강도의 면적평균값에 대한 분산이다. 예를 들어 $\mathrm{dt}=\tau_0=12hrs$이고 총 관측횟수가 60회(N=60)인 경우, 관측오차는 $\varepsilon \approx 0.041\sigma_A$이 된다. 즉, 관측오차는 면적평균 강우의 표준편차의 약 4.1%가 된다.

WGR모형의 경우 인공위성을 이용항 강우관측시의 관측오차는 Graves 등(1993)에 의해 유도되었다.

$$\varepsilon^2=\frac{1}{L^2T}[\frac{8\pi\theta_1 D^2}{\alpha}\langle\frac{\alpha\mathrm{dt}}{2}\coth(\frac{\alpha\mathrm{dt}}{2})-1\rangle$$

$$+2(\theta_2 L^2+\theta_3)\langle \frac{dt}{2}(\beta\coth(\frac{\alpha dt}{2})-\alpha\coth(\frac{\beta dt}{2}))+\frac{\alpha^2-\beta^2}{\alpha\beta}\rangle] \quad (12)$$

여기서, 면적평균강우의 분산은 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_A^2=\frac{1}{L^2}[4\pi D^2\theta_1+(\beta-\alpha)\theta_3]+(\beta-\alpha)\theta_2 \quad (13)$$

앞에서와 똑같은 조건하에서 WGR모형을 이용할 경우의 관측오차는 $\varepsilon\approx0.089\sigma_A$이 된다. 여기서 사용된 매개변수는 Valdes 등(1990)에 의해 GATE지역에 대해 추정한 것을 이용하였다. NFD모형의 매개변수도 역시 GATE지역에 대하여 추정된 것을 이용하였다.

두 개의 결과를 비교해 보면 WGR모형을 이용한 경우의 관측오차가 NFD모형을 이요한 경우보다 약 두배 정도 큰 값을 주는 것으로 나타났다. 그 이유로서는 무엇보다도 WGR모형의 매개변수가 적절하게 추정되지 않았다는 점에서 찾을 수 있다. 이것은 이미 Valdes 등(1994)이 관측된 강우의 스펙트럼과 WGR모형의 스펙트럼을 비교함으로서 밝혀진 바 있다. 또한, Yoo 등(1996)은 WGR모형 스펙트럼의 구조가 강우의 시간적 공간적 소멸과정과 관계있다는 점에 착안 매개변수를 다시 추정하였으며, 이 매개변수를 이용할 경우의 관측오차는 $\varepsilon\approx0.046\sigma_A$이 됨을 보인 바 있다.

여기서 주목할만한 또하나의 사실은 작은 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 WGR모형의 경우는 매우 어렵다는 점이다. 즉, 모형의 매개변수 추정에 2차원의 통계특성이 충분히 고려되지는 않기 때문이다. 이 점이 WGR모형의 적용을 어렵게 하는 단점으로 지적되는 부분이다.

5. 결론

본 연구에서는 인공위성으로 강우를 관측하는 경우 생기는 관측오차의 추정방법을 소개하고 두 개의 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 WGR모형같은 복잡한 모형을 이용할 필요는 없을 것으로 보인다. 특별한 경우로서 강우를 하루에 두 번씩 총 한달간 관측할 경우 관측오차는 면적평균 강우의 표준편차의 약 4-5%가 되는 것으로 나타났다. 이 값은 강우장이 균질(homogeneous)하다고 가정한 경우의 값이므로 강우에 미치는 지형적인 영향(orographic effect 등)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 고려가 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 추정 된다면 강우모형에 따른 관측오차의 차이는 찾을 수 없고 이를 통한 강우모형의 비교도 어렵게 된다. 따라서 앞으로의 연구는 2차원 이상의 강우특성 나아가 강우의 확률밀도함수가 고려될 수 있는 관측오차의 계산법 개발에 초점이 맞추어 져야 할 것으로 보인다. 아울러 강우장의 불균질성을 관측오차 계산에 어떻게 고려하느냐도 중요한 연구의 분야가 될 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

Gupta, V.K. and E. Waymire, On Taylor's Hypothesis and Dissipation in Rainfall, *J. Geophys. Res.*, 92, 9657-9660, 1987.

Islam, S., R.L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe, Multi-dimensional Modeling of Cumulative Rainfall: Parameter Estimation and Model Adequacy through a Continuum of Scales, *Water Resour. Res.*, 24, 992-995, 1988.

Koepsell, R.W. and J.B. Valdes, Multi-dimensional Rainfall Parameter Estimation from Sparse Network, *ASCE J. Hydraulic Eng.*, 117, 832-850, 1991.

North, G. R. and S. Nakamoto, Formalism for Comparing Rain Estimation Designs, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 6, 985-992, 1989.

Valdes, J. B., S. Nakamoto, S. S. P. Shen, and G. R. North, Estimation of Multi-dimensional Precipitation Parameters by Areal Estimates of Oceanic Rainfall, *J. Geophys. Res.(Atmos.)*, 95(D3), 2101-2111, 1990.

Valdes, J. B., E. Ha, C. Yoo, and G. R. North, Stochastic Characterization of Space-Time Precipitation: Implications for Remote Sensing, *Advances in Water Resources*, 17, 47-99, 1994.

Waymire, E., V. K. Gupta, and I. Rodriguez-Iturbe, Spectral Theory of Rainfall Intensity at the Meso-β Scale, *Water Resour. Res.*, 20(10), 1453-1465, 1984.

Yoo, C., J. B. Valdes, G. R. North, Stochastic Modeling of Multi-dimensional Precipitation Fields Considering Spectral Structure, *Water Resour. Res.*, 32(7), 2175-2187, 1996