

추계학적 레이더 강수산정에 관한 연구

A Study on Stochastic Radar Rainfall Estimation

김진훈* , 배덕효**
Jin-Hoon Kim, Deg-Hyo Bae

요 지

본 연구에서는 칼만필터(Kalman filter) 개념을 도입한 추계학적 편차보정 기법을 활용하여 실시간으로 레이더 및 관측강우에 대한 불확실성을 줄일 수 있는 레이더 최적강수 산정기법 개발에 관한 연구를 수행하였다. 개발된 레이더 강우량 추정기법은 한강유역을 대상으로 적용되었으며, 여기서 사용된 레이더 자료는 기상청에서 수집한 레이더 합성 CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator) 자료이다. 자료기간은 2004년 7월 및 2006년 7월의 각 한달치 10분 간격의 레이더 자료가 사용되었고, 본 기간에 대응하는 약 130여개 지점의 기상청 AWS(Automatic Weather Station) 강우 관측자료가 편차보정을 위해 사용되었다. 매개변수별 편차추정 분석을 수행한 결과, 한강유역의 주어진 자료기간에 대한 적절한 편차추정을 위해 $N=10$, $i_t=2\text{mm/h}$ 의 매개변수를 선정하여 레이더 강수추정 오차에 대한 편차를 계산하여 개발 보정기법을 적용하였다. 그 결과 본 연구에서 개발한 추계동역학적 편차보정 기법은 Marshall-Palmer 기법의 높은 편차를 1에 가깝게 줄일 수 있는 것으로 나타났고, 홍수기 급박한 재해상황에서 보다 신속히 레이더 강수장을 제공할 수 있는 현업적 보정기법으로써의 유용성이 매우 높은 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 레이더 강수, 추계학적, 칼만필터, 한강유역

1. 서 론

최근 고해상도 레이더 강수자료의 수문학적 활용성이 고조되어가고 있는 가운데 레이더 추정강수의 정확도를 보다 높일 수 있는 다양한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 그 대표적인 것이 레이더 반사도 인자(Z)와 강우강도(R)의 $Z-R$ 관계에 관한 연구이다(Marshall and Palmer, 1948). 국내에서는 김효경 등(2002)이 WPMM(Window Probability Matching Method) 방법을 이용하여 $Z-R$ 관계식 추정에 관한 연구를 수행하였고, 남경엽 등(2003)은 연구용 도플러 기상 레이더 자료로 CWPMM(Classified Window Probability Matching Method) 기법을 활용하여 대류형 및 층운형 강우에 대한 $Z-R$ 관계식을 도출하였다. 그러나 이에 대한 연구들은 레이더 및 관측 강우에 대한 불확실성(uncertainty)을 실시간 개념에서 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 칼만필터(Kalman filter) 개념을 도입한 추계학적 편차보정 기법을 활용하여 실시간으로 레이더 및 관측강우에 대한 불확실성을 줄일 수 있는 레이더 최적강수 산정기법 개발에 관한 연구를 수행하고자 한다.

2. 이 론

2.1 레이더 방정식 및 $Z-R$ 관계식

레이더 방정식은 Probert-Jones(1960)에 의해 (a) 목표물의 입자는 완전구형이다(등방산란); (b) 입자의 크기는 레이더 파장에 비해 매우 작다(Rayleigh 산란); (c) 강수입자들은 레이더 빔 내에서 균일하게 분포한다는 가정하에 유도되었다. 이러한 레이더 방정식은 안테나에 수신되는 평균전력(\overline{P}_r)이 송신 첨두전력(\overline{P}_t), 목표물까지의 거리(r), 안테나의 단면적(A_e) 및 목표물의 특성($|K|^2$) 등에 좌우되며, 이들의 관계를 나타낸 레이더 방정식을 간략히 나타내면 식 (1)과 같다(염원근, 1995).

* 정회원·세종대학교 토목환경공학과 BK21 박사후 연구원·E-mail : jhcnu@sju.ac.kr
** 정회원·세종대학교·물자원연구소·토목환경공학과 부교수·E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

$$\overline{P_r} = \frac{C|K|^2}{r^2} Z \quad (1)$$

여기서,

$$C = \frac{\pi^3 P_t \Theta \Phi h G^2}{1024 \lambda^2 \ln 2} : \text{레이더 상수}$$

Z : 반사인자(mm^6/m^3) 단위부피(m^3) 내에 존재하는 산란체인 물방울의 직경과 개수에 직접 관련된 값($\sum D_i^6$)

레이더 상수(C)는 포함된 변수인 안테나의 수평, 수직 빔폭(Θ, Φ), 펄스폭(h), 안테나 이득계수(G), 및 레이더 파장(λ) 등에 따라 고정된 값을 사용한다.

식 (1)을 이용하여 강수량과 반사계수, 즉 Z - R 관계식을 유도하면 다음 식 (2)와 같다(Battan, 1973).

$$R = \left(\frac{1420\pi N_0 \Gamma(4.5)}{6} \right) \left(\frac{Z}{720N_0} \right)^{4.5/7} \quad (2a)$$

$$Z = \text{constant} \cdot R^{1.6} (= A \cdot R^b) \quad (2b)$$

여기서, Z 와 R 의 단위는 각각 mm^3/m^3 , mm/h 이다. Marshall and Palmer(1948)는 물방울의 분포수 0.08-4cm에 대한 $Z=200R^{1.6}$ 을 구한 바 있으며, 이것은 기상 레이더의 신호 처리기의 제작 시 보편적으로 사용되는 Z - R 관계식으로 알려져 있다. 현재 우리나라 기상청에서는 Marshall-Palmer의 Z - R 관계식을 사용하고 있으며(김효경 등, 2002), 본 관계식은 중위도 층상운의 직경분포를 관측하여 상수 $A=200$, $b=1.6$ 을 구해 낸 것으로서, 우리나라에서 관측된 레이더 반사도를 대입해 레이더 강우를 산출해 보면 실제 관측강우보다 과소평가되는 특성을 보이고 있다(기상연구소, 1989).

2.2 추계학적 편차보정 기법

편차 제거를 위한 추계 동역학적 기법의 기본 개념은 우선적으로 대상 시간에 대한 가용 강우계 값의 합과 이에 대응하는 레이더 픽셀 강우의 합산한 값을 비교하여 미래 시간의 레이더 강우량 자료를 수정하고 그들의 편차를 제거할 수 있는 보정계수를 산정한다. 이러한 합산 계산에서 유강수 값의 수가 통계학적으로 현저하게 많을 수 있도록 그 대상 기간을 충분히 잡는 것이 중요하다. 본 연산에 필요한 또 다른 매개변수는 편차산정에서 강수를 포함하는 강우계의 최소수와 유강수를 정의하는데 사용되는 최소 강수의 임계값이다. 레이더 강우와 강우계 자료의 통계학적 특성으로 인해 대수(logarithmic) 편차를 계산하였고, 편차의 분산(variance) 분석이 동시에 이루어진다. 추계학적 대수 편차모델은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, 이에 대한 관측 방정식(observation equation)은 식 (4), 대수 편차 β_t 는 식 (5)와 같다.

$$\beta_{t+1} = \beta_t + w_{t+1} \quad (3)$$

$$z_{t+1} = \beta_{t+1} + v_{t+1} \quad (4)$$

$$\beta_t = \ln \left[\frac{\sum_{j=0}^{N_g} R_g(t, j)}{\sum_{j=0}^{N_r} R_r(t, j)} \right] \quad (5)$$

여기서, R_g 와 R_r 은 강우계 강우량과 이에 대응하는 레이더 픽셀 강우량을 의미하고, N_g 는 시간 t 에서 사용되는 강우계-레이더 픽셀 쌍(pair)의 수이다.

식 (3) 및 (4)에서 w_{t+1} 와 v_{t+1} 는 대수 편차모델에서 모델 및 관측의 오차항을 나타낸다. 이들 오차항들은 평균(Q)과 분산(R)이 0인 독립적 백색잡음(white noise)으로 작용한다. 오차항을 최소화하기 위한 실시간 β_t 의 산정은 매개변수 Q 와 R 를 산정할 수 있는 보완된 칼만필터(Kalman Filter) 연산으로 수행된다.

본 추계학적 연산은 로그-편차 연산모델로 생산된 여러 간차의 실제 통계치와 이론적 통계치들 사이의 일관성을 주입한다(Georgakakos, 1984). 사전에 선정된 연속적 간차값의 총 쌍은 매개변수 Q 와 R 에서 임의 변화를 생산하기 위해 적응적(adaptive) 알고리즘을 필요로 한다.

로그-편차 모델에서 칼만필터 기법으로 생산된 로그-편차 요소의 통계치는 레이더 영역에 걸친 레이더 강우량을 보정하기 위해 편차요소의 평균 및 표준편차로 변환되는 식 (6) 및 (7)과 같은 관계식이 유도되었다(Anagnostou et al., 1998).

$$\hat{B}_{t+1}^- = \exp \{ \hat{\beta}_{t+1}^- + 0.5 P_{t+1}^- \} \quad (6)$$

$$\sum_{t+1}^- = (\hat{B}_{t+1}^-)^2 (\exp \{ P_{t+1}^- \} - 1) \quad (7)$$

여기서, \hat{B}_{t+1}^- 와 \sum_{t+1}^- 는 시간 $t+1$ 에서 주어진 관측값으로 계산된 편차보정 계수의 예측 평균과 분산을 나타낸다. $\hat{\beta}_{t+1}^-$ 와 P_{t+1}^- 는 시간 $t+1$ 에서 칼만필터에 의한 대수편차의 예측 평균과 분산을 나타낸다. 레이더 픽셀 강우량의 갱신연산은 편차 \hat{B}_{t+1}^- 를 곱함으로써 수행된다.

3. 사례연구

전절에서 상술한 바와 같이 추계 동역학적 칼만필터 기법의 레이더 강우량 추정기법이 한강유역을 대상으로 적용되었다. 레이더 자료는 기상청에서 수집한 레이더 합성 CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator) 자료로써 기본적 하드웨어 보정 및 오자료가 제거된 반사도(reflectivity)를 이용하였다. 자료기간은 2004년 7월 및 2006년 7월의 각 한달치 10분 간격의 레이더 자료가 사용되었고, 본 기간에 대응하는 약 130여개 지점의 기상청 AWS(Automatic Weather Station) 강우 관측자료(Fig. 1)가 편차보정을 위해 사용되었다.

이상과 같은 레이더 및 AWS 자료를 바탕으로 편차보정 기법을 적용하기 위해 자료 전처리 과정을 수행한 결과 다수 AWS 관측지점에서 강우관측에 대한 오자료가 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 한강유역을 대상으로 제시된 사례기간 동안 로그형 레이더 편차를 계산하기 위한 레이더 및 AWS 유효강우 쌍(pair, N)에 대한 분석이 이루어졌고, 강우 크기별 강우한계치(i_j) 분석이 수행되었다. 본 분석에서 사용된 레이더 강수는 Marshall-Palmer 관계식(M-P 관계식)으로 산정되었으며, AWS와의 유효강우 쌍의 수는 5, 10, 15, 20, 25, 30개이고, 강우한계치는 0.7, 2.0, 5.0mm/h이다.

이러한 매개변수별 편차추정 분석을 수행한 결과, 낮은 수의 N 과 작은 값의 i_j 는 잦은 편차보정과 높은 추정분산을 생산하는 것으로 나타났고, 높은 N 과 i_j 값은 보다 안정된 연산을 수행할 수 있으나 본 연구의 2개월간의 사례기간에서는 극히 작은 기간에 제한적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 한강유역의 주어진 자료기간에 대한 적절한 편차추정을 위해 $N=10$, $i_j=2\text{mm/h}$ 의 매개변수를 선정하여 레이더 강수추정 오차에 대한 편차를 계산하였다. Fig. 2는 2004년 7월 사례기간에서 추정된 레이더 강수편차 추정결과 중 일부를 나타낸 것으로 $i_j=2\text{mm/h}$ 에 대한 변화하는 N 값들의 결과이다. 이 중 $N=10$ 일 때의 로그-편차가 추계동역학적 칼만기법에 적용되어 한강유역의 최적 레이더 강우를 추정하게 된다.

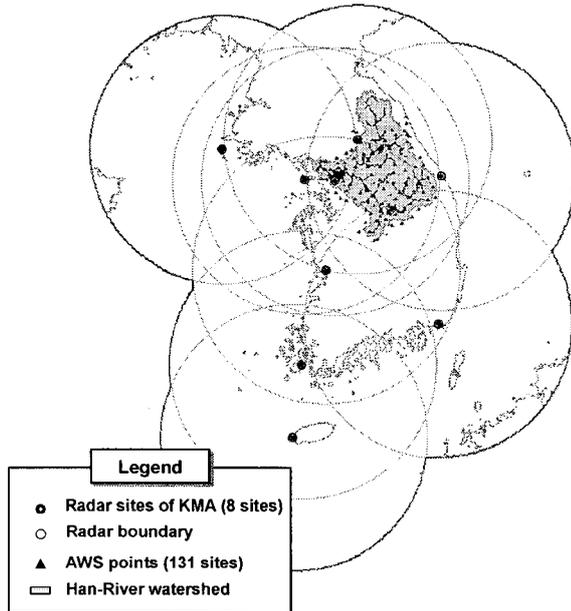


Fig. 1. Composite boundary of KMA's radar sites and AWS distribution.

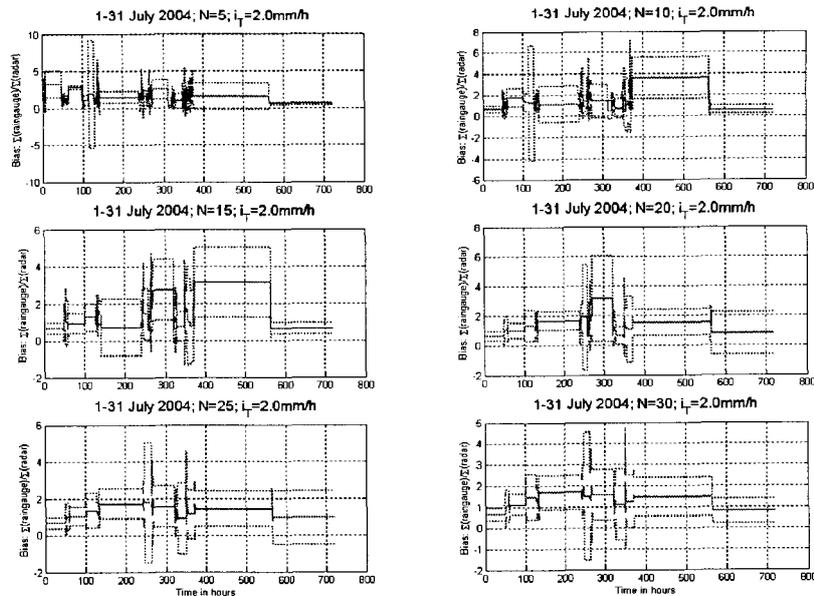


Fig. 2. Bias time series (red lines) and associated 1- σ bounds (blue lines) for 2/00 – 31/23 July 2004. The rainfall threshold (i_r) is 2.0 mm/h in all cases, while the minimum number of pairs (N) is varying from 5 to 30 every 5 pairs. Hourly data is shown.

Fig. 2와 같이 분석된 M-P 관계식의 레이더 강수는 기상연구소(1989)의 연구에서와 같이 과소추정하는 경향을 보인다. 따라서 이러한 레이더 강수의 편차를 보정하기 위해 본 연구에서 개발한 추계학적 편차보정 기법(SKF 기법)과 현시간의 G/R(Gage/Radar)의 단순보정기법(GRT 기법)을 적용하여 레이더 강수산정에 대한 정확도를 분석하였다. Fig. 3은 실제 각 유효쌍에 대한 전 사례기간의 평균 편차를 나타낸 것으로, SKF 및 GRT 기법 공히 사례기간 전체의 N별 G/R 편차 평균값이 M-P 관계식의 평균보다 양호하게 감소하는 것으로 나타났으나, 국지적으로는 N=10일 때 레이더 강수의 과다추정이 이루어지는 구간도 존재하는 것으로 나타났다. 또한, M-P 관계식에 의한 레이더 강수의 과소추정은 잘 알려져 있는 사실이지만 현재 기상청 현업에서는 레이더 스캔 직후 1차적으로 M-P 레이더 강수를 생산하고 있으므로, 그 정확도를 평가하여 상대적 비교를 수행하는 것도 큰 의미를 가지는 것으로 판단된다. 이러한 조건하에서 현시간 보정 기법인 GRT와 추계학적 현업보정(+1 보정) 기법인 SKF를 비교한다면, G-R 유강수 쌍이 가장 작은 N=5일 때 다소 과소추정되는 경우를 제외하고는 GRT 기법이 비교적 정확한 결과를 제시하지만, SKF 기법 또한 현업보정임에도 불구하고 GRT 기법에 못지않은 결과를 제시하므로, 본 연구에서 개발한 SKF 편차보정 기법의 유용성을 검토할 수 있다.

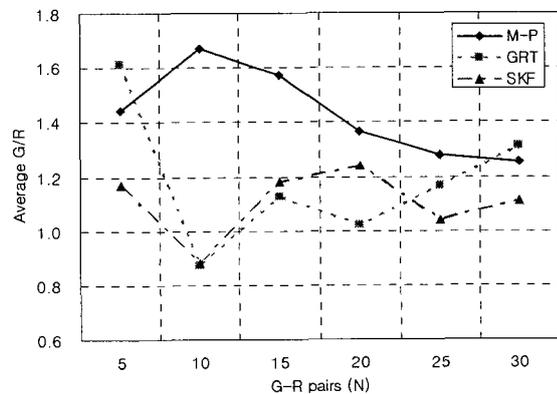


Fig. 3. Average bias according to the G-R pairs for all event period, July 2004.

이들 결과의 통계치를 계산한 결과 Table 1과 같이 M-P 관계식으로 계산된 레이더 추정강수의 편차 전체평균이 1.32로 계산되었으나, GRT 및 SKF 기법의 편차보정 기법 적용결과 각각 1.04 및 1.09로 감소함을 알 수 있고, 전체 표준편차도 2.66에서 각각 2.13 및 2.24로 감소하였다. 지금까지의 결과를 평가하면 본 연구에서 개발한 추계학적 편차보정 기법은 M-P 기법의 높은 편차를 1에 가깝게 줄일 수 있는 것으로 나타났고, GRT 기법이 SKF 기법보다 비교적 우

수한 결과를 제시하지만 상술한 바와 같이 SKF 기법이 현업보정 기법이기에 때문에 홍수기 급박한 시기에 보다 신속히 레이다 강수장을 제공할 수 있으므로 그 유용성 또한 높은 것으로 사료된다.

Table 1. Bias statistics for each radar rainfall during July 2004.

Cases	Bias from M-P relationship	Adjusted bias from GRT	Adjusted bias from SKF
Number of gauges	131	131	131
Event duration (hours)	720	720	720
Total mean of G/R	1.3233	1.0417	1.0919
Total standard deviation of G/R	2.6556	2.1279	2.2435

4. 결론

본 연구에서는 시-공간적 고해상도 레이다 강수자료의 수문학적 활용을 위해 칼만필터 개념을 도입한 추계학적 편차보정 기법에 대한 연구를 수행하였다. 한강유역을 대상으로 기상청 CAPPI 합성 레이다 자료를 활용한 유효 강우쌍 Λ 에 대한 강우 임계치별 편차분석에서 2mm/h의 강우 임계치에 대한 $\Lambda=10$ 일 때의 로그-편차가 가장 적절한 보정조건으로 나타났다. 본 보정조건으로 두가지의 편차분석 기법(SKF 및 GRT 기법)을 적용한 결과, M-P 관계식으로 계산된 레이다 추정강우의 편차 전체평균이 1.32로 계산되었으나, GRT 및 SKF 기법의 편차보정 기법 적용결과 각각 1.04 및 1.09로 감소함을 알 수 있고, 전체 표준편차도 2.66에서 각각 2.13 및 2.24로 감소하였다. 본 연구에서 개발한 추계학적 편차보정 기법은 M-P 기법의 높은 편차를 1에 가깝게 줄일 수 있는 것으로 나타났고, GRT 기법이 SKF 기법보다 비교적 우수한 결과를 제시하지만 상술한 바와 같이 SKF 기법이 현업보정 기법이기에 때문에 홍수기 급박한 시기에 보다 신속히 레이다 강수장을 제공할 수 있으므로 그 유용성 또한 높은 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고 문헌

Anagnostou, E.N., Krajewski, W.F., Seo, D.-J., and Johnson, E.R. (1998). "Mean field rainfall bias studies for WSR-88D." *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3(3), pp. 149-159.

Georgakakos, K. P. (1984). "Model-Error Adaptive Parameter Determination of a Conceptual Rainfall Prediction Model." *Proceedings of the Sixteenth Southeastern Symposium on System Theory*, Mississippi State, Mississippi, IEEE Computer Society Press, pp. 111-115.

Marshall, J.S., and Palmer, W. Mc. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Atmos. Sci.*, Vol. 5, pp. 165-166.