

도시유역에서의 레이더 추정강수의 수문학적 정확도 개선

Improvement of Hydrologic Accuracy for Radar-derived Rainfall Estimation in Urban Watershed

윤성심* , 배덕효**

Seong-Sim Yoon, Deg-Hyo Bae

요 지

본 연구에서는 레이더 추정강수를 도시유역의 수문학적 분석에 활용하고자 레이더 추정강수의 정확도를 개선을 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 WPMM(Window Probability Matching Method)과 Least-Square Fitting 방법을 적용하여 2003년 6월 11~12일의 강우사례에 대해 레이더 강수를 산정하였으며, 산정된 결과에 편차보정기법을 적용하여 레이더 추정강수를 보정하였다. 또한 이를 이용하여 도시하천인 중랑천 유역의 시단위 유역평균 강우량을 산정하고, 도시유출 모형인 SWMM모형을 이용하여 수문학적 적용성 및 정확도 개선현황을 살펴보았다. 그 결과, 도시유출해석에 있어서 WPMM 방법을 통해 유출모의를 수행한 결과가 AWS 관측강우를 적용한 것보다 좋은 결과를 보였으며, 특히 실시간 보정된 WPMM의 레이더 추정강수를 이용한 유출모의를 수행한 결과 관측유량과 유사하게 모의를 수행하여 실시간 보정된 레이더 강우의 유출 활용성이 좋은 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 레이더 강수추정, WPMM, 편차보정, SWMM, 유량해석

1. 서 론

오늘날 국내외적으로 산업발달에 따른 도시지역의 무분별한 개발로 불투수면적이 증가하여 침투유량 및 유출용적을 증가시키고 홍수도달시간을 단축시킴으로서 도시배수시스템에 심각한 영향을 주고 있다. 특히 하천 홍수위 상승에 의한 외수피해와 순간적인 집중호우에 의해 도로 노면수의 배수불량에서 기인하는 내수 피해가 겹치는 경우 홍수피해는 더욱 가중되며, 이에 대한 효율적인 조기 대응책을 강구하는 것은 쉬운 일은 아니다. 이러한 집중호우로 인한 홍수의 피해 방지를 위해 고해상도의 시·공간적 탐지능력을 갖고 있어 강수유무 및 강수량 예보의 질적 향상을 도모할 수 있는 레이더 관측자료의 활용성이 부각되고 있다. 이에 본 연구에서는 도시유역에서 레이더 자료의 수문학적 적용성에 대한 정확도를 개선시키기 위해 두가지 레이더 강수산정기법을 비교하였다. 또한 산정된 결과에 편차보정기법을 적용하여 레이더 추정강수를 보정하고, 이를 이용하여 도시하천인 중랑천 유역의 시단위 유역평균 강우량을 산정하고, 대표적인 도시유출 모형인 SWMM모형을 이용하여 수문학적 적용성 및 정확도 개선현황을 살펴보았다.

2. 이 론

2.1 레이더 강수산정기법

본 연구에서는 Z-R 관계식 산출방법에 따라 레이더 강수산정을 위해 두 방법을 적용하였다. 첫 번째 방법은 지상강우계와 대응되는 레이더 격자간의 관계를 선형회귀식을 통해 산정하는 Least-Square Fitting 방법이고, 두 번째 방법은 측정된 강우강도와 강우량계에 근접한 영역에서 얻은 레이더 반사도 자료를 각각 대응시켜 확률밀도함수로 재산정하여 Z-R 관계식을 산출하는 WPMM(Window Probability Matching Method) 방법이다.

* 정회원.세종대학교 토목환경공학과 박사과정-E-mail : lapis@hanmail.net

** 정회원.세종대학교 토목환경공학과 부교수.물자원연구소-E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

Least-Square Fitting 방법은 레이더 반사도와 대응되는 강우량계를 통해서 관측된 강수량과의 관계를 두 값 사이의 오차를 최소화하면서 찾는 방법이다. 레이더 반사도 자료를 강수량으로 변환하는 Z-R 관계식은 Z와 R의 멱급수를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낸다(Marshall and Palmer, 1948).

$$Z = aR^b \quad (1)$$

여기서, Z는 반사도 인자(reflectivity factor)로써 단위는 mm^6/m^3 이고, R은 강우강도(rain rate)로써 단위는 mm/h 이다. Least-Square Fitting 방법은 식 (1)을 다음 식(2)과 같이 1차 선형방정식 형태로 변환하여 계수 a, b를 구할 때 사용된다. 계수 a, b값은 다음 식 (3)의 최소자승 에러 $\chi^2(a, b)$ 가 최소가 되도록 값을 택한다

$$dBZ = 10 \log Z = 10 \log a + 10b \log R \Leftrightarrow Y = aX + b \quad (2)$$

$$\chi^2(a, b) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - a - bx_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3)$$

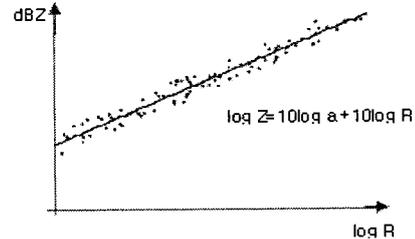


그림 1. Least-Square Fitting

WPMM 방법은 강수량계의 강우강도(mm/hr)와 레이더 반사도의 확률밀도함수의 대응에 근원한다. 강수량계의 강우강도와 레이더 반사도 간의 비교는 각 강우량계의 관측지점에 대응되는 3km 반경이내의 레이더 자료 사이에 최소편차를 갖는 값을 선택하여 수행된다. 이렇게 시공간적으로 일치하는 지점의 자료를 비교함으로써 WPMM의 유효성이 가능해진다. WPMM의 기본 가정인 관측된 반사도 확률밀도함수와 강우량계에서 관측된 확률밀도함수의 적분값이 같다는 것을 조건없는 확률밀도함수(P_0)를 이용하여 표현하면 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다(Rosenfeld et al., 1993).

$$\int_0^{\infty} P_u(Z) dZ = \int_0^{\infty} P_u(R) dR \quad (4)$$

여기서, P_0 는 무조건 확률함수이고 Z와 R은 반사도와 강우강도이다. 그러나 식 (4)에 적합한 자료를 얻는 것은 AWS 측정방법(bucket 크기)이나, 레이더 비강수예코 등에 의해 제약이 있다. 이를 고려하여 유효강수 범위를 설정해야하는데, 강우량자료는 tipping bucket의 크기가 관측할 수 있는 강우량의 최소값 $R_0(0.5\text{mm}/\text{h})$, 레이더에서 관측할 수 있는 반사도의 최소값 $Z_0(10\text{dBZ})$ 으로 설정하였다. 이 관측가능한 임계치 쌍(R_0, Z_0)를 이용해 식 (4)를 식 (5)와 같이 Z-R 관계로 표현할 수 있다. 또한 이를 조건있는 확률밀도함수를 사용하여 다시 식 (6)으로 표현하였다.

$$\phi \int_{Z_0}^{\infty} P_u(Z) dZ = \int_{R_0}^{\infty} P_u(R) dR \quad (5)$$

$$\int_{Z_0}^{\infty} P_c(Z) dZ = \int_{R_0}^{\infty} P_c(R) dR \quad (6)$$

여기서 ϕ 는 Z-R의 확률대응관계를 위한 계수이다. $f(Z)$ 는 레이더 반사도를 강우강도로 환산하는 함수이다. 식 (6)은 레이더 반사도의 누적밀도함수와 강우량계의 누적밀도함수를 규격화 시킨 다음 일대일로 대응시켜 Z-R 관계가 성립되는 함수를 나타낸 것이다. 이를 기본으로 WPMM 방법에서 식 (2)의 선형방정식의 계수 a, b를 산정할 수 있다.

2.2 레이더강수의 편차보정이론

레이더에서의 강우산정은 레이더 반사도로부터 미리 결정된 Z-R 관계식으로 추정할 수 있으나 여러 가지 예러에 의해 자료의 정확도가 떨어진다. 본 연구에서는 강우계와 레이더 추정 강우량과의 편차(bias)에 초점

을 맞추어 강우기간 동안 실시간 편차보정(bias adjustment) 기법을 개발하였다. 본 연구에서 적용한 방법은 Marshall-Palmer의 Z-R 관계식으로부터 레이더 강우를 추정하여 지점 강우계 관측자료와의 편차를 보정하는 방법으로 대상지역의 레이더 강우를 균일하게 보정하였다. 다음 식 (7)는 보정계수를 구하는 방법이며, 여기서 G는 강우계로 관측된 강우량, R은 레이더 강우량을 나타낸다(Kim 등, 2004).

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (7)$$

3. 레이더 강수산정 및 수문학적 적용

본 연구에서는 레이더 강수산정방법의 비교를 위하여 기상청에서 운영 중인 진도(JND), 청주(CJU), 군산(KSN), 부산(PSN), 관악산(KWK), 백령도(BRI), 동해(DHN) 레이더에서 관측된 레이더 반사도 자료(UF 형식)와 전국 581개의 AWS 관측망 자료를 이용하였다. 레이더 강수추정을 위해 선정한 사례기간은 2003년 6월 11일~12일이며, 추정된 레이더 강수를 Marshall-Palmer 관계식을 적용한 결과와 비교하였다. 또한 편차보정 기법을 적용하여 레이더 강수를 보정하고, Marshall-Palmer 관계식 및 WPMM으로 산정한 레이더강수와 보정된 레이더 강수를 SWMM 모형에 이용하여 중랑천 유역에 대한 유출분석을 수행하였다.

3.1 Least-Square Fitting 방법 및 WPMM 적용

본 연구에서의 레이더 강수산정 절차는 다음과 같이 우선 특정시간에 해당되는 10분 레이더 반사도자료와 1분간격으로 관측된 AWS 자료를 NCAR/SPRINT, CEDRIC, TRMM/GSP 알고리즘을 통해 격자화된 레이더 자료와 1분 강우강도로 변환된 AWS 자료를 추출하였다. 그리고 AWS 지점과 그에 대응되는 지점의 레이더 격자자료를 매칭시켜 (Z_i, R_i) 형태의 pair를 구한 후 각 pair들을 이용하여 Least-Square Fitting 방법과 WPMM 방법에 적용하여 각 사이트별로 Z-R 관계식을 산정하였다. 계산된 Z-R 관계식을 적용하여 레이더 강수를 추정하고 위와 같은 절차를 각 사이트 별로 진행한 후 레이더 추정강수를 합성하여 한반도전역에 대한 레이더 강수를 추정하였다.

본 연구에서 적용한 사례기간은 전국적으로 22 mm~80 mm 이내의 약한 강우강도를 나타낸 사례이고, 사례기간에 대한 레이더 반사도 및 AWS 1시간 누적강우는 그림 2와 같다.

두가지 방법에 의해 추정된 레이더 강수를 비교하기 위해 층상우강우의 대표적인 Z-R관계식인 Marshall-Palmer의 $Z=200R^{1.6}$ 을 적용하여 그 결과를 그림 3과 같이 함께 나타내었다. WPMM으로 추정된 레이더 강수가 M&P나 Least-Square Fitting을 적용한 결과보다 그림 2의 AWS 강우강도에 보다 가깝게 추정되었다. 레이더 추정 강우량 자료와 해당 시간에 관측된 AWS 강우자료의 품질을 비교하여 레이더 강수 추정기법의 정확도를 평가한 결과, 정확도의 경우 WPMM의 적용결과가 0.8 이상의 높은 정확성을 나타내었다. 편이의 경우 WPMM이 다른 방법에 비해 다소 과다추정하는 것을 볼 수 있었으며 강수의 탐지확률을 나타내는 POD가 높은 것을 알 수 있었다. 또한 상관계수가 WPMM방법이 다른 방법에 비해 상대적으로 높고 양적인 편차도 적은 것을 알 수 있었다.

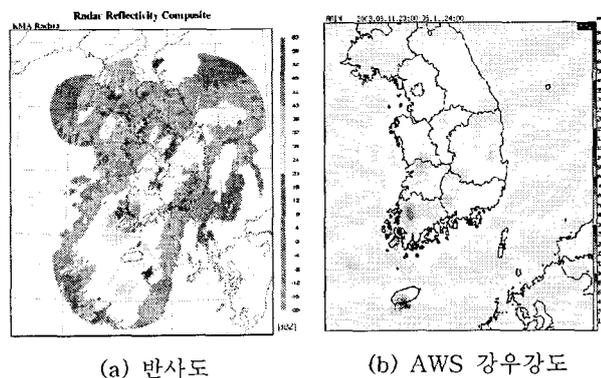


그림 2. 레이더 반사도 및 AWS 강우강도(2003년 6월 11~12일)

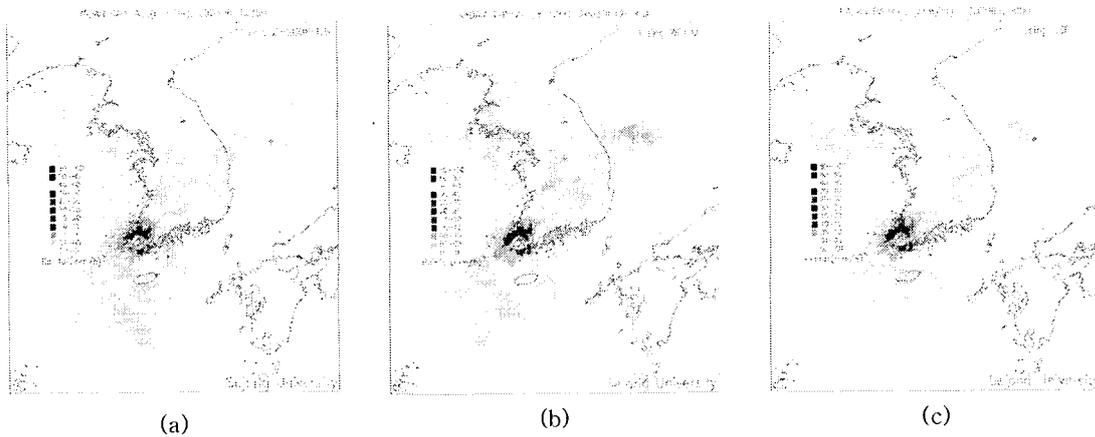


그림 3. 레이더 강수산정 (a) $Z=200R^{1.6}$ (b) WPMM (c) Least-Square fitting

3.2 레이더 추정강수를 이용한 도시유출분석

각 산정방법으로 계산된 레이더 추정강수 중 Mashall-Palmer의 식과 WPMM 방법으로 산정된 레이더 강수를 편차보정하였으며, 이를 중랑천 유역을 대상으로 도시유출모형인 SWMM 모형에 적용하여 도시유출분석의 레이더 추정강수의 활용성을 검토하였다. 우선 SWMM 모형에 적용하기 전 레이더 추정강수를 이용하여 다음 그림 4와 같이 중랑천 유역의 유역면적강우량을 산정하였다.

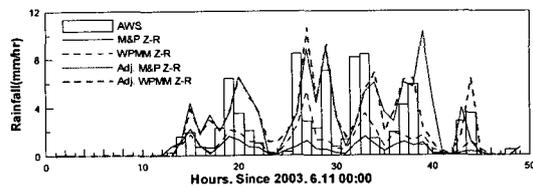


그림 4. 중랑천 유역 레이더 유역면적강우량

AWS 관측강수와 WPMM 과 Marshall-Palmer의 레이더 추정강수를 적용한 유출해석 결과, 레이더 추정강수의 모의결과가 AWS의 모의결과가 관측유량보다 약 70 %로 과소 산정되었다. 그러나 상관계수는 0.93과 0.90로 전체적인 유출모의 경향은 유사하다고 판단되었다(그림 5). 또한 편차보정된 레이더 추정강수의 유출 모의결과가 AWS 관측강수의 결과보다 관측유량과 유사하게 모의되었으며 양적인 차이도 감소하였음을 알 수 있었다(그림6). 특히 표 1의 유출해석 결과를 보면 알 수 있듯이 유출용적과 침투유량의 차이가 보정 전 보다 감소하였다. 이는 실시간 보정을 통한 레이더 강수추정이 유출량 산정 등의 수문학적인 측면에서 상당히 유용하다는 것을 보여주는 것으로 사료된다.

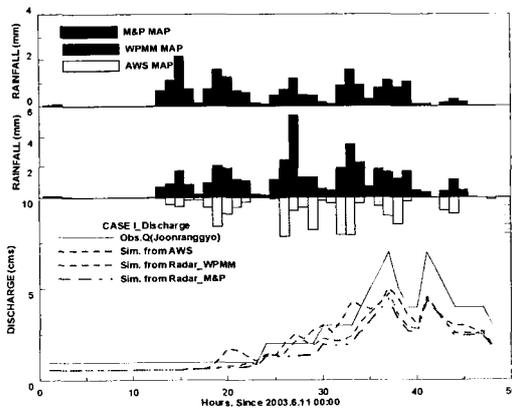


그림 5. 레이더 추정강수와 AWS 강수를 활용한 중랑천 유출분석 결과

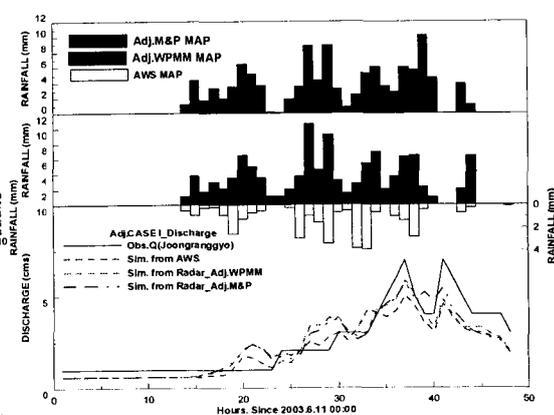


그림 6. 보정된 레이더 추정강수에 대한 유출해석

표 1. 유출해석 결과 비교

	Obs. Q	Sim. AWS	Sim. M&P	Sim. WPMM	Sim. Adj M&P	Sim. Adj WPMM
sum of flow(cms)	119	97.06	76.33	83.35	109.65	108.60
mean flow(cms)	2.48	2.02	1.73	1.73	2.28	2.28
peak flow(cms)	7	5.04	4.42	4.76	5.76	5.76
time to peak(hours)	37	37	37	37	37	37
표준편차	-	1.63	1.29	1.32	1.51	1.51
RMSE	-	0.88	1.11	0.97	0.83	0.82
상관계수	-	0.92	0.93	0.96	0.95	0.95

4. 결론

본 연구에서는 레이더 추정강수를 도시유역의 수문학적 분석에 활용하기 위해 레이더 추정강수의 정확도를 개선하고자 연구를 수행하였다. 이를 위해 WPMM(Window Probability Matching Method)과 Least-Square Fitting 방법을 적용하여 2003년 6월 11~12일의 강우사례에 대해 레이더 강수를 산정하였으며, 산정된 결과에 편차보정기법을 적용하여 레이더 추정강수를 보정하였다. 또한 이를 이용하여 도시하천인 중랑천 유역의 시단위 유역평균 강우량을 산정하고, 도시유출 모형인 SWMM모형을 이용하여 수문학적 적용성 및 정확도 개선현황을 살펴보았다. 그 결과, 도시유출해석에 있어서 WPMM 방법을 통해 유출모의를 수행한 결과가 AWS 관측강우를 적용한 것보다 좋은 결과를 보였으며, 특히 실시간 보정된 WPMM의 레이더 추정강수를 이용한 유출모의를 수행한 결과 관측유량과 유사하게 모의를 수행하여 실시간 보정된 레이더 강우의 유출 활용성이 좋은 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고 문헌

- 기상청 (<http://www.kma.go.kr>).
- Kim, J. H., Jung, I. W., Bae, D. H.(2004). Hydrologic Utilization on the Real-Time Correction of Radar-Rainfall Estimation, International Symposium on Flood Forecasting and Management with GIS and Remote Sensing(FM2S), pp. 45-56.
- Marshall, J.S. and Palmer, W. Mc. (1948). "The distribution of raindrops with size", J. of Meteorology, Vol. 5, pp. 165-166.
- Rosenfeld, D., Wolff, B. D. Atlas, D. (1993). "General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate", Journal of Appl. Meteor., Vol. 32, pp.50-72.