

레이더 예측강우를 활용한 유량해석

The Coupled Radar Rainfall-Streamflow Analysis

김 진 훈* · 김 효 경** · 권 원 태*** · 배 덕 효****

1. 서 론

매년 전세계적으로 기상이변 가운데 집중호우에 의한 돌발홍수 피해가 급증하고 있다. 돌발홍수는 하천을 따라 자연적으로 발생하는 하천홍수와는 달리 느리게 움직이거나 좁고 제한된 영역에서 움직이는 소나기성 호우나 태풍 등에 의한 높은 강도의 집중호우로 인해 야기하므로 댐파괴나 제방붕괴 등 최악의 재해를 발생시킨다. 돌발홍수와 같은 재해를 사전에 방지하기 위해서 기존의 홍수예측 시스템은 강우 실관측치를 모형의 입력자료로 하여 홍수유출을 계산하는데, 돌발홍수의 경우 강우가 관측될 때 이를 이용하여 유출계산을 수행하고 그 결과 위험하다고 판단될 때 홍수예경보를 하기 위해서는 시간이 너무 부족하기 때문에 어느 정도 한계성을 가지고 있다. 이와 같은 상황에서 정확한 강우예보와 이를 활용하여 홍수가 발생하기 이전에 예측할 수 있는 강우-하천유량 통합모델의 개발은 악기상 감시예측기술의 향상과 더불어 재해의 방지차원에서 아주 유용한 대책이 될 것이다. 이에 본 연구에서는 기상레이더의 예측강우를 활용하여 개념적 분포형 모형인 TOPMODEL을 유량해석 모형으로 선택하여 강우-하천유량 통합모형의 기초적 사례연구를 수행하였다.

2. 기상레이더 강우량 산출법

레이더가 탐지하는 반사도 정보를 강수량으로 전환하는 전형적인 식은 $Z=aR^b$ 이며, power law 형태이다. 이 때 상수 a , b 는 강수를 포함하고 있는 구름내 수직의 직경 분포(drop size distribution, DSD)에 따라 달라진다. 이 식은 물리 역학에 기반을 두고 산출된 식으로 수직에 의해 산란되어 되돌아오는 반사도(reflectivity, Z)는 수직 직경의 6승에 비례하는 값을 가지므로 정확한 DSD 측정을 통해 반사도 Z 를 계산하고, 직경에 따른 부피 환산을 통해 강수량 R 을 계산하면 두 변수 Z 와 R 의 관계는 power law의 형태로 나타난다. 그러나 직경분포의 불확실성과 대기에 의한 감쇠 효과로 인해 이론식에 의해 계산된 반사도 Z 는 실제 레이더가 같은 직경 분포에 대해 탐지해 내는 반사도, Z_e (effective reflectivity)와는 차이가 있다.

$Z=aR^b$ 형태의 관계식은 비교적 손쉽게 사용할 수 있는 장점이 있으나, 직경 분포의 불확실성과 레이더 보정(calibration) 등에 민감하게 변동하는 경향이 있으므로 장기간 동안 관측된 자료의 통계적 특성을 이용하여 관계식을 구할 경우 이런 문제를 극복할 수 있다. 레이더 반사도 Z_e 와 강수량 R 이 함수적으로 상관성이 있다면 일정 기간에 대한 레이더 반사도 Z_e 의 확률 분포와 강우강도 R 의 확률 분포 사이에는 어떤 관계가 성립하게 된다. 따라서 레이더 관측 범위 내의 모든 반사도 Z_e 와 우량계로부터 관측된 강수량의 장기적인 확률 분포를 구하여 확률밀도(Probability Density Function, PDF)가 같은 지점들을 대응시킴으로 새로운

* 기상연구소 예보연구실 연구원

** 부경대학교 환경대기공학과 박사과정

*** 기상연구소 기후연구실 실장

**** 창원대학교 토목공학과 부교수

Z_e -R 관계를 추정할 수 있으며, 이 방법을 PMM(Probability Matching Method)라 한다.

PMM의 경우, 두 변수의 확률 분포를 구할 때 레이더 반사도 자료는 레이더 관측 범위에 포함되는 모든 자료로부터 산출되지만 강우강도의 확률 분포는 레이더 관측 영역의 상에서 우량계가 존재하는 몇몇 지점으로부터 산출되므로 우량계가 없는 지점의 레이더 반사도는 확률적으로 불확실성을 포함하게 된다. 따라서 두 변수의 샘플링 공간을 동일하게 규정하기 위해 레이더 반사도 추출도 지상에 우량계가 있는 지점을 기준으로 작은 창을 선정하고 이 창 내의 상층 레이더 반사도, Z_e 만을 사용하여 확률 분포를 추정하였다. 이 기법을 WPMM(Window Probability Matching Method)이라 하며 WPMM은 PMM에 비해 레이더 반사도 Z_e 의 샘플 개수는 상대적으로 감소하지만 안정된 Z_e -R 관계식을 얻을 수 있다. 또 확률분포를 이용해 레이더 강수량 추정식을 구할 경우에는 단지 변수 Z와 R의 장기적인 확률분포만을 취하므로 동일시간의 레이더 반사도와 우량계 자료를 필요로 하는 방법에 비해 시간적 제약에서 벗어날 수 있는 장점이 있다(기상연구소, 2000).

3. TOPMODEL

TOPMODEL의 기본 요소는 지형지수(topographic index)의 산정, 토양수분의 변화 및 지표유출 등으로 구성되어 있다. 이 모형은 소유역내 강우유입에 따라 지표유출이 형성되는 포화면적을 유역의 지형특성 및 토양특성으로부터 결정할 수 있는 모형으로써 세 가지 기본가정사항으로부터 식 (1)과 같이 유역내 특정지점의 지하수면 깊이 z_i (m)를 산정할 수 있고, 이를 유역전체에 적용하여 산정한 유역평균 지하수면 깊이 \bar{z} 와의 관계를 나타내는 식 (2)를 유도할 수 있다.

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln \left(\frac{ra}{T_0 \tan \beta} \right) \quad (1)$$

$$f(\bar{z} - z_i) = \left[\ln \frac{a}{\tan \beta} - \frac{1}{A} \sum_i \ln \frac{a}{\tan \beta} \right] - \left[\ln T_0 - \frac{1}{A} \sum_i \ln T_0 \right] \quad (2)$$

여기서, $f(m^{-1})$ 는 측면 전도계수(lateral transmissivity)의 감쇠율을 나타내는 모형 매개변수, $T_0(m^2/h)$ 는 토양이 포화되었을 때 측면 전도계수, $\tan \beta$ 는 지표면 경사, $r(m/h)$ 는 특정 시간동안 유역전체에 균일하게 지하수면으로 유입되는 양, $a(m^2)$ 는 점 i 를 통해 유출되는 단위 등고선 길이당 사면의 면적을 나타낸다. 식 (2)의 우변 첫 번째 항 $\ln(a/\tan \beta)$ 는 지형지수(topographic index)라 하고, 두 번째 항은 유역평균 지형지수(λ), 네 번째 항은 유역평균 전도계수($\ln T_e$)를 나타낸다. 따라서 유역내 각 지점에서의 전도계수 및 지형지수를 알면 유역평균 지하수면 및 특정지점의 지하수위를 산정할 수 있다. 만약 지표로부터 지하수면 깊이를 나타내는 z_i 가 0이되는 지역은 토양이 완전히 포화되어 유입되는 강수는 전부 지표유출을 하게 되는데(이를 기여면적 contributing area라 함) 기저유출량을 합하여 전체 유출량을 산정하게 된다. 보다 상세한 모형개념 및 기본이론은 다음의 참고문헌을 참고하기 바란다(Beven과 Kirkby, 1979; Beven 등, 1994; 배덕호 등, 2000).

4. 사례연구

레이더 강우량을 산출하기 위해 기상청 관악산 기상레이더(C 밴드, $126.57^\circ E$, $36.26^\circ N$)의 원시자료를 사용하였다. 그럼 1과 같은 관악산 기상레이더는 EDGE 시스템으로 10분 간격으로 4개 고도각의 볼륨 자료를 생산하며 관측 반경은 240 km 이다. 레이더 반사도를 이용하여 강수량을 추정할 경우 거리에 따른 감쇠

효과가 크므로 레이더 지점을 중심으로 반경 150 km 이내의 자료만을 이용하였고, 최저 고도각의 반사도를 통해 레이더 강수량을 산출하였다.

유출량 산출모형인 TOPMODEL을 적용하기 위한 연구대상 유역으로는 2,703 km²의 유역면적을 갖는 소양강 덤 상류유역을 선정하였다(그림 1). 소양강은 총 유로연장은 166.2 km이고, 북한강 합류지점에서 12 km 떨어진 소양강 계곡에 위치한 소양강댐은 높이 123 m, 댐 길이 530 m, 체적 약 9,600,000 m³의 사력댐으로서 홍수기에 자연 유하량을 저류하여 갈수기에 서서히 유하시킬 수 있는 홍수조절 능력을 갖추고 있다. 한편, 본 연구대상 유역에는 한국수자원공사에서 운영하는 서화, 원통, 현리, 청춘, 인제, 추양, 용대, 군량, 삼남, 신풍 등 12개의 자기 우량관측소가 있으며 원통 및 내리천, 소양강댐 수위 관측소가 있다. 또한 증발자료는 인근 춘천 및 인제 측후소의 증발접시 증발량 자료를 이용할 수 있다.

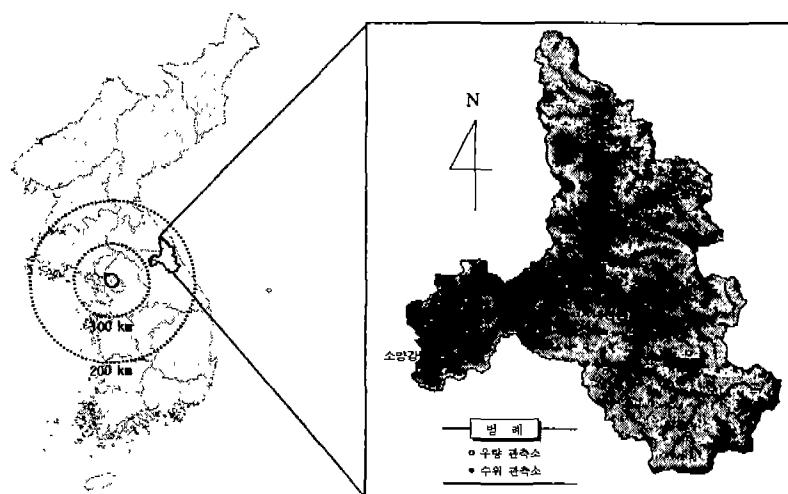


그림 1. 기상레이더 사이트 및 소양강 대상유역

본 연구에서는 이상과 같은 기초자료를 바탕으로 98년 여름 호우기간인 98.08.01.01 ~ 98.08.09.24 동안의 사례연구를 수행하였으며 기상레이더의 강우량 및 이를 활용한 유출량 산출결과는 다음과 같다.

4.1 기상레이더 강우량 산출결과

그림 2는 98.8.5.12 ~ 98.8.6.06 기간동안의 호우사례에 대하여 6시간 간격의 레이더 예측강우대를 나타낸 것으로서 강우대는 경기 북부 지방에 집중되는 것을 볼 수 있으며, 98.8.6.06 시간대의 경우는 경기 이남지역으로 분포된 것을 살펴 볼 수 있다.

본 연구에서는 레이더의 반사도를 이용하여 강수량을 추정할 경우 거리에 따른 감쇠 효과를 고려하여 레이더 지점의 150 km 이내인 임진강 유역의 연천, 문산, 포천, 양주 지점의 기상청 AWS(Auto Weather Station) 관측자료와 그 지점에서 추출된 강우량을 정량적으로 비교·분석하였다. 표 1은 대상기간동안에 강우량 용적오차를 나타낸 것으로 연천 및 문산 지점에서는 상대오차가 각각 1.5%, 13.7%의 차이를 보이고, 포천 및 양주 지점에서는 각각 -54.7%, -63.6%의 차이로 2배 이상의 편차를 보이고 있다. 이것은 앞선 언급에서와 같이 레이더가 거리에 따른 감쇠 효과를 초래하기 때문이며 이러한 결과는 그림 3의 AWS 및 예측강우의 시간적 변동성에서 살펴 볼 수 있다.

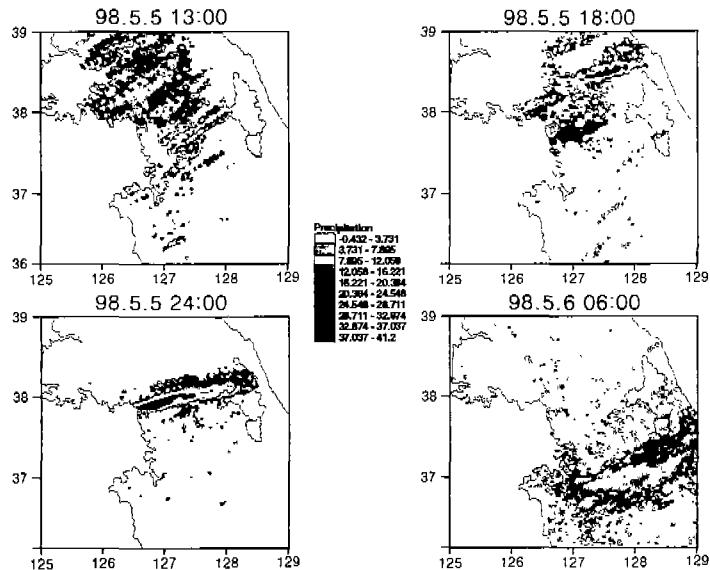


그림 2. 6시간 간격의 레이더 예측강우

표 1. 기상레이더 및 AWS 강우량 용적오차

지점	기간		상대오차(%)
	AWS(mm)	RADAR(mm)	
연 천	200	203	1.5
포 천	828	375	-54.7
문 산	293	333	13.7
양 주	777	283	-63.6

4.2 TOPMODEL 유량해석

본 절에서는 앞절에서 산출된 레이더 강우량을 활용하여 TOPMODEL의 유량해석을 수행하였다. 이를 위해 소양강 유역을 대상으로 3" 단위 DEM 자료로부터 100 m 정방형 격자의 DEM을 생성하였으며, 지형지수 산정알고리즘으로는 MFD(Multiple Flow Direction) 방법을 사용하였다. 그림 4는 대상기간동안 한국수자원공사에서 운영하는 12개 지점의 관측강우량 및 소양강댐 유입유량을 이용하여 계산된 유출량으로 여기에 사용된 매개변수는 표 2와 같고, 관측유량과 비교한 통계특성치는 표 3과 같다.

그림 5는 레이더 예측강우를 활용한 유량해석 결과로써 표 3에서와 같이 관측강우량에 비해 매우 과소 산출된 것으로 나타났다. 이것은 레이더 반사도의 거리에 따른 감쇠 효과로 관측 기상레이더와 다소 먼 거리에 위치하는 소양강 유역의 레이더 예측강우가 정성적으로는 비교적 유사한 평가가 이루어 졌지만 정량적으로 과소산출되었기 때문이다. 이러한 오차를 최대한 줄이기 위해 현재 레이더 예측강우에 대한 연구가 활발히 진행중이므로 발표회 때 보다 향상된 결과를 제시하고자 한다.

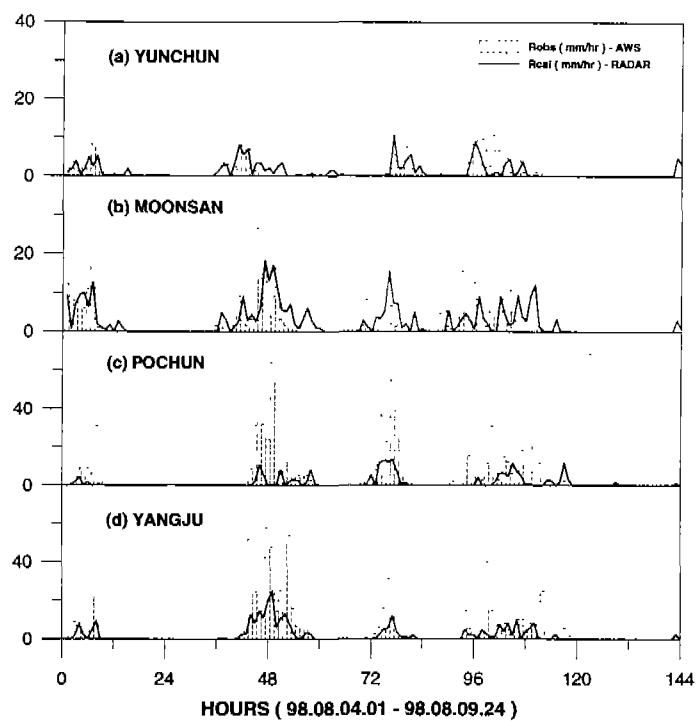


그림 3. 선택지점의 AWS 및 레이더 강우량

표 2. TOPMODEL 매개변수

기 호	설 명	단위	추정치
m	지수형 전도계수 감소상수	m	0.04
T ₀	포화상태의 측면 전도계수	ln(m ² /h)	0.01
SRmax	식생영역 최대 저류고	m	0.053
SR ₀	식생영역 초기 저류고	m	0.001
t _d	불포화영역 시간지체 상수	hour	50.
Chv, Rv	주하천 및 유역 하도내 유속	m/hour	9600

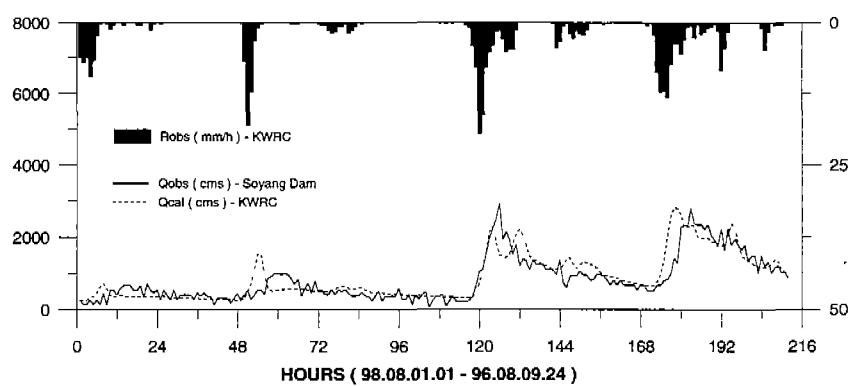


그림 4. 관측강우량을 이용한 유량해석

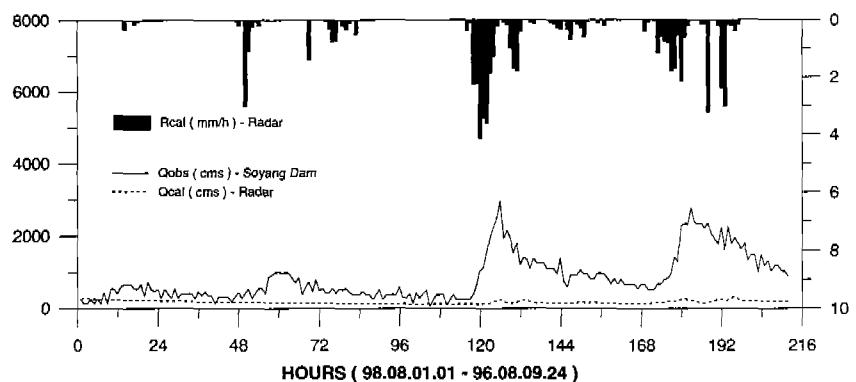


그림 5. 레이더 예측강우를 활용한 유량해석

표 3. 관측 및 레이더 예측강우에 따른 유량 통계 특성치

통계치 강우유형	첨두유량 상대오차(%)	유출용적오차 (%)	평균잔차	평균제곱오차	상관계수
관측강우	-22.15	7.07	58.49	347.74	0.85
레이더 예측강우	-91.92	-79.10	-654.26	891.39	0.27

5. 결 론

본 연구에서는 강우-하천유량 통합모델 기초연구로 레이더 예측강우를 활용하여 하천유량 모델인 TOPMODEL과 결합한 결과 예측강우의 정량적 과소산출로 인하여 유출결과 또한 매우 과소평가되었다. 강우-하천유량 통합모델의 실용적 적용을 위해서는 예측강우의 정확도가 유량예측에 절대적 영향을 미치므로 예측강우에 대한 보다 세밀한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 향후 지상 및 원격탐사(레이더, 인공위성)자료가 혼합된 통합모델이 개발되어 악기상 감시·예측의 보다 효과적인 대응책이 마련되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다(2000-J-ND-01-B-11).

참고문헌

- 기상연구소 (2000). 악시강 감시·예측 및 재해대응 기술 개발, 과학기술부, MR001C13, p. 44
- 배덕효, 김진훈, 권원태 (2000). “TOPMODEL의 단일유역 홍수예보능에 관한 연구”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-97.
- Beven, K., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., Fisher, J. and Lamb, R. (1994). *TOPMODEL and GRIDATB, A Users Guide to the Distribution Versions(94.03)*, CRES Technical Report TR110/94, Lancaster University, Lancaster, UK.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) "A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology", *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, No. 1, pp. 43~69.