

레이더 강우량 자료의 홍수예경보시스템에의 활용

(II. 레이더-홍수예경보 시스템에 효과적 레이더 자료의 활용)

윤강훈 (한국건설기술연구원, 공학박사)

이충기 (주영메테크(주) 대표이사)

1. 서론

지난 호에서는 레이더 강우량 자료의 홍수예경보 시스템에의 활용 중 I 편으로 레이더 강우량 측정에 대한 제반 원리들과 방법론 및 문제점들을 살펴보았다. 이번 호에서는 레이더 자료를 이용하여 홍수예경보 업무를 수행할 때 어떻게 하면 홍수예경보 모델에 레이더 자료를 효율적으로 사용 할 수 있는냐 하는 내용을 다루어 보고자 한다. 레이더로 강우를 포함한 기상현상을 관측한 이래 레이더로부터 관측된 격자형의 강우분포를 홍수예경보 관련 업무에 활용하는 많은 연구가 이루어져 왔고 현재도 진행 중이다. 지상 우량계는 임의 지점의 강우량은 잘 표현해 주지만 샘플링 방법과 설치상의 한계로 인하여 공간 강우분포에 대한 정보는 취약한 상태이다. 반면 레이더는 넓은 영역을 짧은 시간에 관측하여 레이더 관측영내의 공간강우분포 정보를 높은 시공간 해상도로 제공하기 때문에 수문학적 활용에 매우 각광을 받아오고 있다.

신뢰성 있는 홍수예경보 업무를 수행하기 위해서는 유역에 대한 공간강우정보, 지형정보, 토양정보 및 향후 강우량 예측이 필수 요건이다. 이중 현재 공간강우분포와 향후 예측 강우량 정보는 홍수예경보 시스템의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미친다. 수문레이더 자료가 홍수예보에 얼마나 유용하게 사용될 수 있는냐와 그 효용성이 어느 정도까지 향상될 수

있는냐를 고려해보기 위해서는 현존 홍수예보 절차의 주요 단점 및 결점들을 이해하는 것이 중요하다. 여러 가지 다른 구조의 홍수예보 모델을 비교해 보면 어떤 것이 우수하고 다른 것보다 성능이 앞선다는 것을 명확하게 말하기는 어렵다. 모델 성능의 평가는 강우-유출모델의 범위 안에서 이루어 질 수 있다. 이러한 모델 성능의 우수성에 대한 열쇠는 어떻게 하면 면적 강우량을 잘 산출하느냐 하는데 있는 것 같다. 이러한 의미에서 수문레이더와 같은 자료는 선행적(priori)인 기본 자료로 활용하는 데 매우 유용하다.

수문레이더 자료를 사용한 모델 개선 작업의 범위는, 많은 강우-유출 모델에 개괄적(lumped)인 입력자료로 사용되는 소유역 별 평균 면적 강우량을 산출하는 작업과 수문레이더가 제공하는 공간강우량 분포 정보를 이용하는 작업으로 볼 수 있다. 그렇지만 먼저, 홍수예보를 위한 공간강우량분포를 사용하는 것은 이러한 자료에 포함되어 있는 강우량의 공간변동 정보를 효율적으로 사용할 수 있는 강우-유출 모델의 개발이 필요하다. 이러한 모델 개발 시 고려해야 할 사항들을 본고에서 주요 주제로 다루고자 하였으며, 단순기하분포 모델을 강우사상을 유역에 대한 확률분포변수로 취급하는 새로운 강우-유출 모델을 개괄적으로 설명하고자 한다.

2. 강우-유출모델(Rainfall-Runoff model) 예보에 대한 강우량 오차의 영향

오차를 포함하고 있는 강우 측정량이 강우-유출 모델 작동에 미치는 영향을 고려하기 위해서는 먼저 지점 관측치의 오차 형태로든, 강우의 분포의 오차 형태로든 모델에서 고려하여야 한다. 이렇게 함으로 홍수예보에 대한 레이더 산출 강우량 정확도나, 강우-유출 모델 설계에 대한 그들의 오차 유발 특성을 명확히 할 수 있다. 만약 레이더 강우 분포 자료의 정확도를 평가해야 한다면 강우-유출 모델 성능에 대한 이들 오차의 영향을 이해하는 것이 중요하다. 다음에서 입력 강우량 오차와 모델과의 관계, 그리고 개략적(lumped)인 강우량, 면적평균 강우량, 지점 강우량력에 대한 오차 발생을 원인을 검토해 보았다.

가. 모델의 구조적 형태의 효과(Effect)

강우-유출 모델의 입력치로 사용되는 강우량 관측치의 오차에 의한 영향은 모델의 구조적인 형식에 의존한다. Singh와 Woolhiser(1976)은 비선형 강우-유출 모델이 어떻게 오차를 증폭하는가를 설명하면서 정확한 강우량 자료를 사용하더라도 비선형 모델이 선형 모델보다 더 오차를 발생시킨다고 주장하였다. Singh(1977)는 심지어 강우량을 정확히 안다 할 지라도 초과 강우량으로의 변환 시 발생하는 오차는 선형 하도 추적 모델이 비선형 모델을 능가한다는 것을 의미한다고 설명했다. Singh와 Woolhiser의 모의 결과는 선형 모델에 대한 설득력 있는 이유를 제공한다. 그러나 실제 자료를 사용한 많은 경험들로부터 여러 경우에 비선형 모델이 개선된 성능을 제공한다는 것을 볼 수 있는데 이는 아마도 비선형 모델에 의한 오차의 증폭은 비선형적인 강우-유출 과정을 표현하는데 선형모델보다 더 유리한 것 같다. 그러나 수문레이더가 정량적인

강우 관측치를 항상 신뢰성 있게 제공하지는 않는다는 것과 일관된 홍수 예보에 대한 필요성은, 어떤 경우는 선형 모델이 비선형 모델보다 유리 할 수도 있다.

나. 개략적(lumped), 면적평균 강우량, 지점 강우량의 효과

단일 우량계 관측에 의한 유역 평균 강우량 또는 적은 수의 우량계로부터의 관측치의 평균은 유역내의 무한 개 점에 대한 평균 강우량보다 더 큰 분산 값을 가진다. 우량계 관측망으로 산출한 유역 평균 강우량과 관련된 오차는 공간-샘플링 오차라고 명명될 수 있으며 유출 예측의 주요한 편의(bias)의 원인이다(Troutman, 1982, 1983). 이 효과로 인해 강우-유출 모델은 강한 강우사상에 대해서는 과소 추정, 약한 사상에 대해서는 과대 추정하게 하는 경향을 보인다. 실제적으로 이 편의는 우량계 관측망을 이용한 면적 강우량 추정치를 사용한 최소승법에 의한 강우-유출 모델의 보정에 의해 보상된다. 그렇지만, 만약 모델이 이러한 방법으로 보정된 후, 레이더로 구한 면적 평균 강우량을 사용하여 홍수예보에 현업적으로 사용된다면, 레이더 강우량의 약한 변동성 때문에 강한 강우사상에 대해서는 과소추정, 약한 사상에 대해서는 과대추정하게 하는 경향을 보인다. 이는 실제로 사용될 자료를 이용하여 강우-유출 모델을 보정해야 한다는 것의 중요성을 강조한다. 따라서 수문 레이더가 작동하지 않을 경우 우량계 자료를 사용하도록 전환되어야 하며 강우-유출 모델은 이 자료들을 이용하여 명확하게 보정되어야 한다. 원론적으로 홍수예경보시스템은 우량계 및 레이더 강우량 각각의 가능한 모든 경우에 모두 적합하도록 보정될 수 있어야 하며 모든 가능한 자료를 사용할 수 있어야 한다.

3. 강우레이더 자료의 잠재적 가치

Moore(1977)는 다중입력 전달함수 모델(multiple-input transfer function model)의 입력 자료로 임의 유역 내부와 그 근처에 설치된 몇 개의 우량계 자료를 사용할 때의 효과를 조사하였다. 여기서는 영국 North Wales의 작은 Hirnant 유역(33.9km²) 근처에 있는 최대 6개의 우량계로부터의 자료가 이용되었다. 2개 이상의 우량계를 포함한 경우에는, 각각의 자료를 입력하던지 아니면 하나의 평균값을 입력하던지 간에 관계없이 시간별 유량 예측을 향상시키지 못했다. 이로부터 하나의 우량계 또는 우량계 군집은 그것이 유역 평균 강우량을 얼마나 잘 추정하는가 하는 의미에서 홍수 예측에 사용되어서는 안되며, 단지 그것이 관측된 강의 유량과 얼마나 밀접한 관련성을 가지고 있느냐 하는 것으로 사용되어야 한다는 논쟁이 있었다. 폭우가 직접 영향을 미치는 지역(예를 들면 유역의 출구 근처) 주변에 단 한 개의 우량계를 설치하는 것이, 유역의 평균 강우량을 잘 추정하도록 설계된 조밀한 우량 관측망보다 홍수 첨두치를 예측하는데 더 우수할 수 있다. 이 논쟁으로부터 홍수 수문곡선의 상승 limb과 첨두(peak)에 기여하는 영역에 위치한 레이더 격자로부터의 추정 강우량만이 홍수 예보에 사용되어야 한다는 착상을 이끌어 낼 수 있게 된다. 관측된 유량은 하강 limb에 대한 예측 오차를 보정하기 위한 예측 최신화(updating) 알고리즘에 사용될 수 있는데, 여기서 유량은 유역의 아주 먼 곳에 떨어진 강우로부터 유래한다. 여러 연구들을 종합해 볼 때, 실시간 홍수예보시스템을 위한 강우량 관측 요건으로 레이더 및 우량계 강우 관측치의 상호 보정이 중요하다.

가. 폭풍우의 이동

수문 레이더 자료의 가치는 폭풍우가 임의 유역

을 통과하며 홍수수문곡선에 매우 큰 영향을 미칠 때 최고조에 이른다. Hamlin(1983)은 가상의 폭풍우 세포를 유역을 가로질러 이동시켜 폭풍우 수문곡선을 모의한 Bramley의 연구 결과를 발표하였다. 이 연구에서 지점 우량관측소의 개수를 변화시켜 가며 폭풍우 세포로부터 채취되는 강우량의 변화 효과를 조사하였는데, 그 결과 수문곡선의 첨두의 시간과 크기에 매우 큰 오차가 나타났다. 이러한 상황에서 수문레이더로부터 취득된 강우 유형은 희박한 우량계 관측망에 의한 강우분포의 부적절한 샘플링 때문에 발생하는 오차를 개선하는데 매우 유용하다. 그러나, 이는 수문 레이더 자료를 충분히 활용할 수 있는 분포형 강우-유출 모델의 가용성과 레이더 자료의 정확도에 의존한다. Ngirane-Katashaya와 Wheeler(1985) 또한 도시 농촌 혼합지역 유역에 대한 모의 실험을 통하여 홍수 첨두 발생에 대한 폭풍우 이동의 중요성을 설명하였다. Niemczynowicz(1984)는 강우의 지역 및 동역학적인 특성과 유출량 형성에 대한 영향에 대한 포괄적인 조사연구에서, 폭풍우 이동방향에 상대적인 유역의 형상과 방향의 중요성을 설명하였다. 그는 길고 폭이 좁은 유역의 방향을 따라 폭풍우가 이동할 때 더 큰 유출량의 첨두가 발생한다고 밝혔다. 따라서 수문레이더 자료는 그러한 유역에 대해, 잘 설계된 분포형 모델의 입력자료로 사용된다면 매우 큰 가치를 가진다고 기대 할 수 있다. 다음에서 그러한 모델 개발을 논의해 보자.

4. 격자형 기상 레이더 자료를 사용하는 실시간 홍수예보를 위한 분포형 모델

홍수예경보의 현업에 사용하기 위한 레이더 강우량 자료의 가용성 증가와 함께, 수문학자는 실시간 구현이 가능한 분포형 모델의 개발을 통하여 그러한 자료를 최대한으로 활용해야 하는 책임을 맡게 된다.

그러한 모델은 이미 논의한 바와 같이 강우의 공간 분포가 균일하지 않거나 폭풍우 이동이 중요한 상황 하에서 개략형 강우-유출 모델의 빈약한 성능을 극복하게 하는 잠재력을 가진다. 물리적 모델들 (Abbott 등, 1978; Morris, 1980)이 Richards와 Boussinesq 방정식 해를 통하여 모델링 되는 침투량의 변화가 3차원으로 분포되는 반면, 침투량 높이가 개괄적으로 나타나는 - 예를 들면 토양깊이로 그리고 지하수량으로 나타내어지는 - 단순 분포형 모델이 있다. 이러한 모델들은 연속적인 형태로 실시간적으로 구현이 가능해야 하며 동시에 분포형 레이더 강우 자료를 더 잘 사용할 수 있어야 한다. 가장 일반적인 접근은 유역을 소유역과 하도 단편으로 분할하는 것이며 그리고 소유역의 유량을 예보하기 위해 개략적 강우-유출 모델을 사용하는 것이다. 이러한 접근은 Dee Weather Radar Project (Central Water Planning Unit, 1977)에 일부 적용하였다. 그림 1. 은 레이더 격자 자료로부터 소유역 평균 강우량을 구하기 위하여 소유역이 어떻게 2km 레이더 격자에 의해 도식화 되는가를 보여준다. 공간 변동성에 대한 상당량의 정보손실이 소유역의 상대적인 크기와 레이더 격자 크기, 그리고 소유역을 통해 일어나는 강우량의 변동 정도에 의존하여 발생할 수 있다. 다소 단순하고 대체 가능한 전략은 각각의 레이더 격자를 어떤 형태의 전달 함수 또는 비선형 저류(storage) 모델로 표현하고, 유역의 출구로부터 격자들의 거리까지 적절한 시간 관계로 이동을 시킨 후, 각 격자들 각각의 응답을 조합하여 유역 흐름의 응답을 얻는다(여기서 가능하면 이동 시간을 더 잘 표현하기 위하여 토지 경사 정보를 이용할 수 있다). 비슷한 방법을 하도추적모델의 유입량 예보에 사용할 수 있다. 레이더 자료와 함께 격자자승모델(grid square model)을 사용한 예를 Anderl 등(1976)이 발표하였다. 여기서는 각 격자점에서 효과적인 강우량 분리와

시간 이동이 일어나고 그 후에 두개의 다른 저수지로 조합된 흐름이 진행된다. 이 모델은 규칙적인 우량계 관측망으로부터의 자료를 이용하여 공간적으로 내삽한 추정치를 입력값으로 사용하는 것보다 레이더 자료를 입력치로 사용하는 것이 더 높은 정확도를 제공한다는 것을 보여준다. 더 상세한 분포형 모델을 채택할 때의 가치는 아마도 유역내에 포함된 레이더 격자의 수에 의존하는 것 같고, 또한 매우 넓은 유역에 대한 홍수 예보를 요구할 때 더 큰 가치를 발휘한다고 기대할 수 있다.

가. 강우의 확률-분포 모델과 기상레이더 자료를 이용한 유출량 산출

유역 유출에 대한 기하학적 분포모델을 개발을 대체하거나, 강우의 공간분포를 정의하기 위하여, 수문레이더에 의해 제공되는 강우의 공간 변동성 정보를 이용하고 이를 강우-유출 모델에 통합하는 방안이 있다. 개략모델(lumped model)에서 사용된 평균 강우량은 공간강우분포로 대체된다. 이제 어떻게 이 공간 빈도(frequency) 정보가 강우-유출 모델에 병합되는 지를 살펴보자.

임의 한 점에서 유출량은 단순한 과잉구조(excess mechanism)에 의해 제어되고 주어진 값을 넘는 강우량은 유출 된다고 가정하자. 이 과잉구조은 토양이 어느 최대값(흡수능) 이상의 물을 흡수하지 못하는 것과, 또는 토양이 한정된 양의 물만을 저장할 수 있는 능력(저장능)에 의한 것이다. 수학적으로 이것은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} q &= p - c & p > c \\ q &= 0 & p \leq c \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 c 는 문지방능(threshold capacity), p 는 강우량, 그리고 q 는 유출량이다. 강우의 공간 변동과 유역에 대한 문지방능은 2변수 확률밀도함수

$f(p,c)$ 로 고려될 수 있으며, $f(p,c)dpdc$ 는 유역내의 임의 점에서 강우량과 저장능이 각각 $(p, p+dc)$ 및 $(c, c+dc)$ 범위 내에 있을 확률을 나타낸다. 이 때 p 와 c 는 각각 밀도함수 $f_p(p)$ 와 $f_c(c)$ 를 가진 서로 독립적인 임의 변수이며 $f(p,c) = f_p(p) f_c(c)$ 라는 가정은 합당하다. 또한 p 와 c 는 각각 평균 강우량(p 의 기대치)과 평균 저장능을 나타내는데 사용된다.

식(1)로 규정지어지는 유출량 생성의 지점 표현에 따르면 유역 전체로부터의 생성 유출량은 다음과 같이 주어진다. 즉

$$Q = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (p-c) f_p(p) f_c(c) dpdc \quad (2)$$

몇 번의 계산을 거치면 다음 식에 다다른다.

$$Q = p - \int_0^{\infty} (a - F_p(p))(1 - F_c(p)) dp \quad (3)$$

여기서 $F_p(p)$ 는 강우의 분포함수인데, 강우량이 p 보다 적은 유역의 비율을 나타내고, $F_c(p)$ 는 저장능의 분포함수인데, 유역 중 토양의 불함유량이 p 보다 적은 능력을 갖는 부분의 비율을 나타낸다. 설명을 쉽게하기 위하여 밀도함수가 지수함수라고 가정하자. 즉,

$$F_p(p) = 1 - \exp(-p/p) \quad (4a)$$

$$F_c(p) = 1 - \exp(-p/c) \quad (4b)$$

그러면

$$Q = p - \int_0^{\infty} \exp\left\{-p\left\{\frac{1}{p} + \frac{1}{c}\right\}\right\} dp \quad (5)$$

이것은 다음과 같은 간단한 관계식으로 귀결된다. 즉

$$Q = \frac{\bar{p}^2}{\bar{p} + \bar{c}} \quad (6)$$

이 결과는 강우량과 저장능의 변동이 전 유역을 통하여 지수함수라는 가정하에서, 유역의 유출이 어떻게 주어진 토양 흡수능과 평균강우량과 함께 변화되는가를 보여 준다. 그림 2.는 이 관계식의 양상을 보여주며, 특히 강우량과 저장능이 전 유역을 통하여 더 이상 상수가 아니고($Q = p - c$ 일때) 단지 지수함수적으로 변한다고($Q = p^2 / (p+c)$)가 정할 때, 유역의 유출이 어떻게 증가되는가를 보여 준다. 이 접근은 여러 가지 이론적 배경에서 새로운 형태의 강우-유출 모델을 만들기 위해 더 개발될 수 있다. 강우 변동성을 위의 모델 개발에 포함하는 것은 확률분포형 강우-유출 모델에 새로운 개선을 보여주었다. (Moore, 1985)

이 새로운 접근은 레이더로부터 구한격자점 강우량 자료를 밀도함수 $f_p(p)$ 에 대한 적합한 매개변수형을 확증하기 위하여 사용하며, 또한 각각의 시간 단계에서 격자 자료를 함수의 매개변수를 추정하기 위하여 사용한다. 예를 들면, 평균 격자점값은 평균 유역 강우량 p 를 추정하여 지수함수형 밀도함수, $f_p(p) = p^{-1} \exp(-p/p)$ 를 구체화하기 위해 사용된다. p 의 새로운 추정치는 각각의 시간 단계에서 유역의 유출량을 계산하기 위해 취득된다. 연구결과 단순 지수함수형 밀도 함수가 실제로 적합하다는 것이 입증되었다.

균등 분할된 작은 세포 영역에 떨어지는 강우량이 지수함수적인 분포를 가진다는 것에 대한 이론적인 증명은 Matsubayashi 등(1984)에 의해 주어지며, 경험적인 확증의 증거는 일본 나고야시 근처의 조밀한 우량계 관측망의 사용으로부터 제공된다. 격자 세포의 크기가 증가함에 따라, 분포함수는 감마(gamma) 또는 가우시안(Gaussian) 형태로 변화되어 감을 볼 수 있다.

강우 확률분포형 모델과 토양 물 저장능은, 강우-유출모델의 기하학적 분포의 복잡성에 의존함 없이 공간적으로 분포된 수문레이더 자료를 최대한

으로 사용할 수 있게 해주는 우아한 방법을 제공한다. 그러나 그의 실제적인 효용성에 대해서는 더 평가해야 할 부분이 많이 남아있다.

5. 홍수하도추적 모델에서 레이더 강우량 자료의 가치

2개 또는 그 이상의 유량 관측소의 하류 어느 지점에서 홍수 경보를 제공해야하는 상황에서 홍수 예경보 모델은 보통 하도추적 및 강우-유출의 두가지 파트로 구성된다. 그림 3(a)에 도시된 바와 같은 간단한 하천 유역에 대한 유출 예측 전략을 구성하는 문제를 고려해보자. 단순하고 직접적인 접근 방법은 시간 t 에서 하류의 유량 q_t^d 를 두개의 구성성분의 합과 관련지우는 모델을 구성하는 것인데, 두 성분 중 하나는 상류에서의 유량 q_t^u 에 의한 영향을 설명하고 또 다른 하나는 중간 유역으로부터 수평적으로 유입되는 흐름들의 영향을 설명한다. 그림 3(b)는 모델 구조의 개략도를 보여주는데, 여기서 수평 유입영역 전체에 대한 강우량 p_t 는 희박한 우량 관측망으로부터 산출된다고 가정한다. 수평적 지류들의 영향으로부터 산출되는 유량 예측 구성성분은, 우량계로부터 구한 면적 강우량 추정치의 오차와, 하도추적 과정을 모델링하는 것에 비해 강우-유출 과정을 모델링하는 것이 훨씬 더 어렵다는 이유로 인해 예보 전체에 걸친 오차의 대부분을 설명한다고 기대할 수 있다. 실제로 향상된 예보는 강우량 자료를 모두 누락시키고 대신 상류의 흐름 q_t^u 을 하도추적 모델의 입력치로 사용하는 경우에 얻을 수 있다. 이러한 모델은 연속성을 유지하지 않고 상류의 유량을 증폭하여 하류의 유량으로 예측한다. 이것은 관측치가 없는 수평 지류들로부터의 유입량은 오차를 포함하고 있는 강우량 관측자료를 사용한 강우-유출 모델로부터의 예측치 보다 상류의 흐름에 의해 저 잘 표현된다는 믿음에 의해서 받아들

여 진다.

우량계 자료를 포함하고 있는 모델로부터의 예측이 평균적인 의미에서 더 우수하다고 할지라도, 그것의 약한 강직성(robustness) 때문에 일반적으로 선호되지는 않는다. 여기서 모델이 강직하지 않다는 것은 자료의 오차 때문에 매우 이상한 예측결과가 가끔 발생할 경우를 지칭하며, 현재의 경우에는 면적 강우량을 산출하기 위하여 지점 관측자료를 사용했기 때문에 발생한 것이다. 그러한 상황에서는 희박한 우량 관측망으로부터 얻어지는 예측보다

레이더 자료를 사용한 강우-유출 모델로부터의 예측이 더 강직(robust)하다고 기대할 수 있는데, 특히 강우의 공간 변동이 심한 지역에서는 더 그렇다. 강직성의 부족에 기초한 논쟁으로 인해 열대 지방에 위치한 저수지로 유입되는 유량을 예측하기 위해 개발된 절차로부터 우량계 관측치들을 제외하게 되었는데, 열대 지방에서는 강우의 공간 변동성이 매우 크고 우량계 관측소도 적다. 이러한 상황에서 하류의 홍수를 사전에 방지하기 위한 댐 수위조절을 위해서는 강직한(robust) 예측이 필요하게 된다. 그러한 경우에서 레이더로 산출한 강우량 자료는 지류들로부터의 수평적 유입량 변동치를 제공하는데 있어서 지점 우량계 관측값 보다 더 강직한 정보를 제공한다고 기대할 수 있다.

6. 강우량 오차 보정에서 최신화(updating) 방법의 역할

오차를 포함한 강우량 입력 자료에 의한 강우-유출 모델의 성능 저하는, 예측 지점에서 현재의 유량 관측치를 포함하여 최신화 하는 기법을 통하여 실시간으로 보정될 수 있다. 최신화는 다음과 같은 절차를 따라 수행된다. 즉 (1) 오차 예측, 여기서 모델 오차의 시간적 지속성은 미래의 오차를 예측하는데 사용된다. (2) 매개변수 조정. (3) 상태 조정, 여기

서 지하 저장 수량을 관측된 유량과 일치시키기 위한 수정이 이루어 진다. 이러한 기법들의 검토가 Reed(1984)와 Moore(1983)에 의해 수행되었다. 오차 예측은 이제 확립된 기법으로 간주되며 이를 구현하기는 매우 쉽다(Moore, 1982; Jones and Moore, 1980). 그렇지만 그의 효용성은 수문곡선의 침투 부근에서 종종 감소가 되는데, 여기서는 모델 오차가 최소의 시간적 연속성을 나타낸다. 매개 변수 조정은 일반적으로 Kalman 필터(Jazwinski, 1970)에 기초한 방법으로 수행되는데, 실시간 응용을 위한 방법으로는 덜 매력적인 것으로 보이는데 이유는 매개변수의 변동이 일반적으로 부적합한 모델 구조를 반영하기 때문이다. 이 모델 구조는 비실시간 연구로 개선될 수 있다. 상태 조정은 향후 연구분야로 아주 기대되는 영역으로 보이며, 오차를 포함한 강우량 관측의 문제에 가장 밀접한 부분이다. 전통적으로 상태의 최신화는 Kalman 필터를 통하여 이루어 지는데, 그런 반면 불규칙적인 변동이 비 가우시안(non-Gaussian)일 때 이 것은 선형 시스템에 대해 정확한 해를 제공한다. 그러나 비선형 개념적 강우-유출 모델에 대해서는 근사적인 해만 얻을 수 있다. 경험적 상태 최신화 채택 개발의 범위는 상당히 넓은데, 이는 수문학자가 현재 돌아와 있는 물리적 기작(mechanism)에 대해 얼마만큼의 이해를 하는가를 나타낸다. 이러한 채택들은 모델 오차 ϵ 를 사용하여 모델의 저장 요소(상태 변수)들을 조정한다. 예를 들면, 토양 수분 저장 요소, S1, 지하수 저장 요소 S2 등이다. 선택된 조정은 다음과 같은 친근한 Kalman 필터형이다. 즉

$$S^*_i = S_i + K_i \epsilon \quad I = 1, 2 \quad (7)$$

그러나 이득 K1 및 K2는 최적화를 통해서 경험적으로 구해진다. K1 및 K2의 측정된 방류량 또는 모델 흐름 요소에의 의존성 역시 이 경험적 상태 최

신화 채택에 물리적으로 의미있게 병합될 수 있다.

7. 레이더로 구한 예측 강우량의 수문학적 사용

홍수 예보를 위한 강우-유출 모델의 가장 심각한 결점은 아마도 유역의 자연적인 지연 시간을 넘어 어느 선행시간을 가지고 흐름을 예측하기 위해서는 가용한 강우량 예측치에 크게 의존한다는 것이다. 넓은 공간을 통해 강우 유형을 쉽게 파악해 내고 또, 관심 대상의 폭풍우가 이동하고 발달하는 것을 감시하는 레이더의 능력은 강우량 예보에 대해 레이더 가치가 매우 높다는 기대를 불러 일으킨다. 기상레이더를 이용한 강우량 예측을 위해 개발된 여러 가지 방법들은 레이더 격자 자료의 시간상 이동에 대한 높은 상관성에 기초하고 있다. 즉 이동상관법에 의한 강우량 예측이 주류를 이루고 있다. 예들 들면 미국에서는 Austin과 Bellon(1974)이며, 영국에서는 Hill 등(1977), 그리고 일본에서는 Yoshino(1985)이다. 수문학자들은 여전히 이러한 방법들이 개선되기를 기다리고 있으며, 홍수 경보에 대한 그들의 가치 평가를 연구하고 있고 현업적 홍수예경보와 저수지 조절 방안에 대한 그들의 해결책을 연구하고 있다.

8. 홍수예측을 위한 레이더 산출 강우량의 평가

수문레이더가 홍수 예경보 업무에 더욱더 효율적으로 사용될 수 있는 여러 가지 방법들을 논의해 보면서, 전통적인 우량계 관측망에 대해 상대적으로 레이더가 가지고 있는 잇점들을 평가 해 볼 필요성이 있다. 홍수 예경보를 위한 레이더 산출 강우량 자료의 가치를 음미하는 평가들은 다음과 같은 두 가지 형태를 취하고 있다. 간접적인 접근방법은 면적 평균 강우량을 추정하는 레이더의 능력을 평가하는 것인데, 이 추정량은 강우-유출 모델의 입력

자료로 필요한 것이다. 이 형태의 평가는 참 관측값 (ground truth)의 알수 없는 대 문제가 있다. 레이더 면적 강우량의 추정값과 특별히 고안된 조밀한 우량계 관측망으로부터의 추정치를 비교해보는 고비용의 실험들이 행해졌다. 한 예로 Dee Weather Radar Project (Central Water Planning Unit, 1977; Harrold 등, 1974)를 들 수 있다. 홍수예경보에 대한 레이더의 구체적인 가치라는 의미에서 더 만족할 만한 평가는, 여러 가지 다양한 구성의 우량계 관측망으로부터 얻어진 자료를 사용할 때와 비교해서 레이더 자료를 이용하여 예측할 때의 성능을 직접적으로 평가하는 것이다. 이미 앞에서 논의했던 강우-유출 모델의 성능에 대한 입력 강우량의 영향을 공정하게 비교를 하기 위하여 두 가지 자료원을 이용한 모델의 캘리브레이션이 필요하다. 또한 사용할 강우-유출 모델의 구조에 대해서도 특별한 관심을 기울여야 하는데 이는 이러한 것이 최종 결과에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 레이더 산출 강우량 자료의 공간적인 특성을 충분히 활용하는 모델을 사용하여야 한다. 우량계 관측망으로부터 구해진 강우량 자료와 공정한 비교를 수행하기 위해서는, 평가시 모델에 사용되는 격자 자료를 산정하기 위하여 적절한 공간 내삽 기법이 있어야 한다.(Anderl 등, 1976; Bastin 등, 1984). 평가 결과가 신뢰성을 가지기 위해서는, 합리적으로 많은 양의 홍수 사례가 캘리브레이션을 위해 필요하다. 또한 평가는 수문학적 특성들을 다양하게 변화시켜가며 수행해야 하는데 이렇게 함으로 여러 가지 수문상황에 대한 레이더의 효용성을 점검해 볼

수 있다.

9. 결론

2회에 걸쳐 수문레이더 자료를 이용한 홍수예경보시스템의 활용에 관하여 살펴보았다. 현재 미국, 영국, 일본 등에서는 수문레이더 자료를 이용한 홍수예경보 모델이 현업에 사용되고 있으며, 연구 단계의 모델들도 다양하게 존재한다. 그러나 선진 외국에서 20여년 이상 레이더 자료를 홍수예경보시스템에 활용하는 연구를 수행하고 있지만 아직 뚜렷한 범용 모델의 없는 실정이다. 이는 강우 자체가 공간 변동성이 심하고 레이더 자료가 이 변동성을 잘 표현해 주지만 이러한 레이더 자료의 공간분포를 잘 소화해내는 분포형 홍수예경보모델이 아직 개발되지 못했기 때문이다. 강우의 공간분포와 변동성 및 규모(scale)에 대한 특성을 잘 소화하고 또 지리정보시스템과의 연계한 분포형 모델을 현재 선진 각국에서 개발 중에 있다.

우리나라에도 임진강 유역에 강우레이더를 설치하여 임진강홍수예경보시스템을 운영중에 있다. 그러나 아직 초기 단계로 이므로 유역의 레이더 특성을 고려한 모델을 현재 개발 중에 있다. 외국의 사례에서도 볼 수 있는 바와 같이 이러한 모델은 하루 아침에 만들어 지는 것은 아니나, 현재 건설교통부 수자원국과 한국건설기술연구원에서는 신규 모델개발에 착수하였으므로, 가까운 장래에 우리 실정에 적합한 레이더 홍수예경보시스템이 탄생할 것으로 기대하고 있다.

참고 문헌

- Abbott, M. B., Clarke, R. T., and Preissman, A. (1978). Logistics and benefits of the European Hydrologic System. Proc. Int. Symp. on Logistics and Benefits of using Mathematical Models of Hydrologic and Water Resource Systems, Pisa, Italy.
- Anderl, B., Attmannspacher, W., and Schultz, G. A. (1976). Accuracy of reservoir in flow forecasts based on radar rainfall measurements. Water Resource Research, 12(2), 217-23.
- Austin, G. L., and Bellon, A. (1974). The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting. Quart. J. R. Met. Soc., 100, 658-64
- Bastin, G., Lorent, B., Duque, C., and Gevers, M. (1984). Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of raingauge locations. Water Resources Research, 20(4), 463-70.
- Central Water Planning Unit (1977). Dee weather radar and real-time hydrological forecasting project. Report by the Steering Committee. 172 pp.
- Collier, C. G. (1984). The operational performance in estimating surface rainfall of a raingauge-calibrated radar system. 22nd Conf. on Radar Meteorology, Zurich, Switzerland. Am. Met. Soc., Boston, Mass. USA, pp. 257-62.
- Collier, C. G., Rouke, P. R., and May, B. R. (1983). A weather radar correction procedure for real-time estimation of surface rainfall. Quart. J. R. Met. Soc., 109, 589-608.
- Hamlin, M. J. (1983). The significance of rainfall in the study of hydrological processes at basin scale. J. Hydrology, 65(1/3), 73-94.
- Harrold, T. W., English, E. J., and Nicholass, C. A. (1974). The accuracy of radar-derived rainfall measurements in hilly terrain. Quart. J. R. Met. Soc., 100, 331-50.
- Hill, F. F., Whyte, K. W., and Browning, K. A. (1977). The contribution of a weather radar network to forecasting frontal precipitation: a case study. Meteorol. Mag. 106(1256), 69-89.
- Jazwinski, A. H. (1970). Stochastic Processes and filtering Theory. Academic Press, 376pp.
- Jones, D. A., and Moore, R. J. (1980). A simple channel flow routing model for real time use, Hydrological Forecasting, Proc. Oxford Symp., IAHS-AISH publ. no. 129, pp. 397-408.
- Matsubayashi, O., Takagi, F., and Tonomura, A. (1984). The probability density function of areal average rainfall. J. Hydrosoci. Hydraulic Eng 2(1), 63-71.
- Moore, R. J. (1977). Raingauge network requirements for real-time flow forecasting. In O'Connell, P. E., Beran, M. A., Gurney, R. J., Jones, D. A., and Moore, R. J. Methods for evaluating the UK raingauge network. Institute of Hydrology Report No.40, pp.168-182, 190-205.
- Moore, R. J. (1982). Transfer function, noise predictors and the forecasting of flood events in real-time. In Singh, V. P. (ed.), Statistical Analysis of Rainfall and Runoff, Water Resources Publications, Colorado, pp.229-50.
- Moore, R. J. (1983). Flood forecasting techniques. WMO/UNDP Regional Seminar on Flood Forecasting, Bangkok, Thailand, 37 pp.
- Moore, R. J. (1985). The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. Hydrol. Sc. J. 30(2), 273-97.
- Morris, E. M. (1980). Forecasting flood flows in grassy and forested basins using a deterministic distributed mathematical model. Hydrological Forecasting. Proc. Oxford Symp., IAHS-AISH publ. no. 129, pp. 247-55.
- Ngirane-Katshaya, G. G., and Wheeler, H. S. (1985). Hydrograph sensitivity to storm kinematics. Water Resources Research, 21(3), 337-45.
- Niemczynowicz, J. (1984). An investigation of the areal and dynamic properties of rainfall and its influence on runoff generating processes. Report no. 1005, Dept. of Water Resources Engineering,

Lunds Institute of Technology/University of Lund, 215 pp.

Reed, D. W.(1984). A review of British flood forecasting practice. Institute of Hydrology Report No. 90, 113 pp.

Singh, V. P.(1977). Sensitivity of some runoff models to errors in rainfall excess. *J. Hydrol.* 33, 301-318.

Singh, V. P., and Woolhiser, D.A.(1976). Sensitivity of linear and nonlinear surface runoff models to input errors. *J. Hydrol.* 29, 243-249.

Troutman, B. M.(1982). An analysis of input errors

in precipitation-runoff models using regression with errors in the independent variables. *Water Resources Research* 18(4), 947-64.

Troutman, B. M.(1983). Runoff prediction errors and bias in parameter estimation induced by spatial variability of precipitation. *Water Resources Research* 19(3), 791-810.

Yoshino, F.(1985). Study on short-term forecasting of rainfall using radar raingauge. Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan, 20 pp.

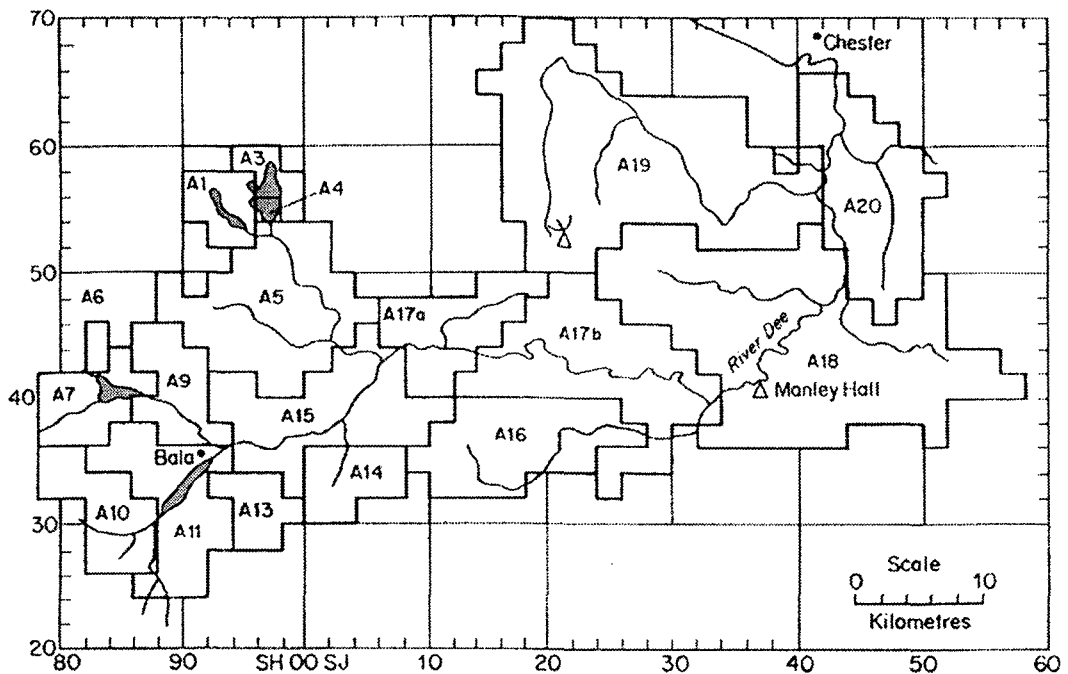


Fig. 1. Grid square representation of the River Dee subcatchments used for radar purposes(each grid is 4km² in area)

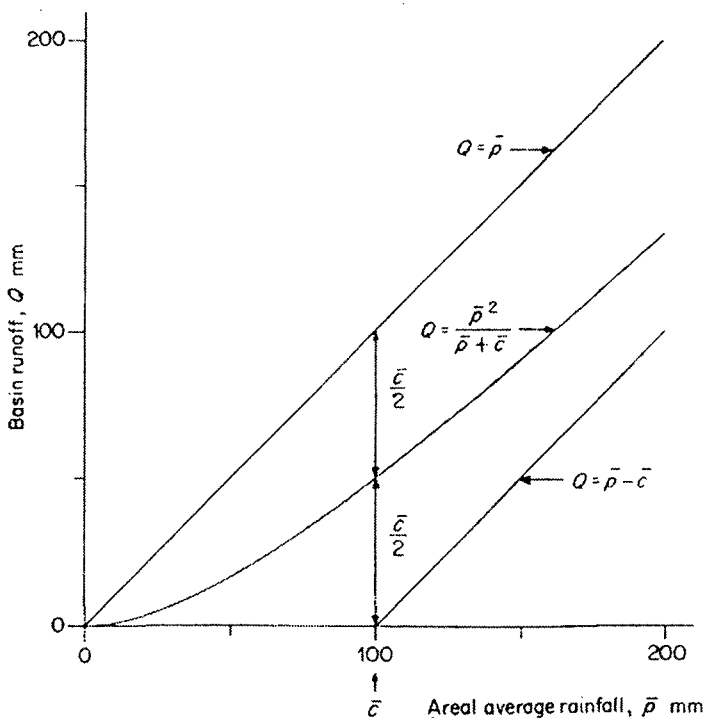


Fig. 2. Rainfall-runoff relationship for the probability-distributed model of rainfall and runoff production

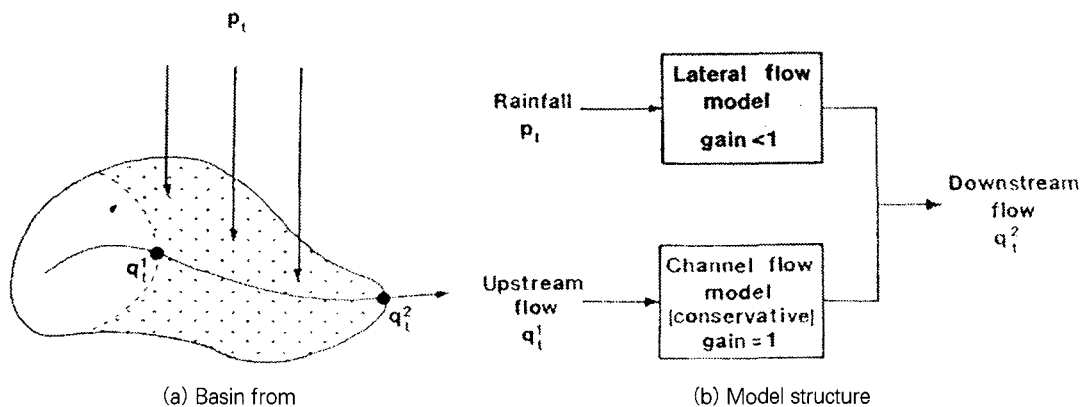


Fig 3. A flood forecasting model incorporating a continuity-preserving channel flow routing model and a rainfall-lateral inflow model