

기상 자료 미계측 지점의 강우 예보 모형

A Rainfall Forecasting Model for the Ungaged
Point of Meteorological Data

이재형* · 전일권**

Lee, Jae Hyoung · Jeon, Ir Kweon

Abstract

The rainfall forecasting model of the short term is improved at the point where meteorological data is not gaged. In this study, the adopted model is based on the assumptions for simulation model of rainfall process, meteorological homogeneousness, prediction and estimation of meteorological data. A Kalman Filter technique is used for rainfall forecasting. In the existing models, the equation of the model is non-linear type with regard to rainfall rate, because hydrometer size distribution (HSD) depends on rainfall intensity. The equation is linearized about rainfall rate as HSD is formulated by the function of the water storage in the cloud. And meteorological input variables are predicted by empirical model. It is applied to the storm events over Taech'ong Dam area. The results show that root mean square error between the forecasted and the observed rainfall intensity is varying from 0.3 to 1.01 mm/hr. It is suggested that the assumptions of this study be reasonable and our model is useful for the short term rainfall forecasting at the ungaged point of the meteorological data.

요 지

기상 자료 미계측 지점의 단기 강우 예보 모형을 개발하였다. 본 연구 모형은 강우 모의 모형, 기상학적 동질성, 그리고 기상 변수 예측 및 추정에 관한 몇 가지 가정을 전제로 하였으며 강우의 예보에는 칼만 필터 기법을 사용하였다. 기존 모형의 방정식은 수운적 크기 분포(HSD)가 강우 강도에 종속이므로 강우량에 대하여 비선형이다. 본 연구 모형의 방정식은 HSD를 구름층 저류량의 함수로 구성함으로써 강우량에 대하여 선형화되었다. 또한 기상 입력 변수는 경험 모형에 의하여 예측되었다. 본 연구 모형을 대청댐 유역의 호우 사상에 적용하였다. 그 결과 예보 및 실측 강우 강도간의 평균 자승 오차는 0.30~1.01 mm/hr였다. 이 결과로 미루어 볼 때, 본 연구 모형에 수반된 가정은 합리적이며 본 연구 모형은 기상 자료 미계측 지점에서 강우를 단기 예보하는데 유용하다고 판단된다.

* 정희원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과, 교수

** 정희원 · 전북대학교 대학원 토목공학과, 박사과정 수료

1. 서론

우리나라 기상청의 강우 예보의 종류는 단기 예보, 중기 예보, 장기 예보가 있다. 이중 유출 계산에 활용할 수 있는 예보는 단기 예보이다. 단기 예보는 24시간 누가 강우량이며 한반도의 내륙을 12개, 해상을 14개 권역으로 나누어서 권역별로 실시하고 있다. 단기 예보 대상인 각 권역은 유출 계산 대상 유역보다 광역이다. 또 기상 예보 구역과 하천 유역이 일치하지 않음으로 해서 한 유역에 몇 개의 예보 구역이 겹치게 될 뿐만 아니라 강우의 時·空間 분포는 예보되지 않는다. 따라서 대상 유역 평균 강우량을 현실성 있게 추정하기는 어렵다. 유역 평균 강우량을 추산했다 하더라도 시간 분포가 예보되지 않기 때문에 유출 계산의 입력인 우량 추상도를 얻을 수 없다. 기상청의 단기 예보는 강우 정보를 수문 현업에 사용할 수 있는 수준은 아니다. 한편, 수문학 분야에서 우량 계측 자료를 토대로 수문 현업에 사용할 수 있는 강우 예보 방법이 제안되고 있다. 강우 예보 방법을 편의상 우량 자료와 기상 자료를 사용한 것으로 분류하여 개괄한다. 우량계의 계측 자료를 이용한 모형은 1976년 Bras 등,⁽¹⁾ 1980년 Creutin 등,⁽²⁾ 1980년 Johnson 등,⁽³⁾ 그리고 1990년 李 등⁽⁴⁾ 등에 의하여 제안되었다. 레이더와 우량계를 사용한 강우 모형은 1976년 Elvander,⁽⁵⁾ 1978년 Bellon과 Austin,⁽⁶⁾ 1982년 Browning 등,⁽⁷⁾ 1986년 Walton과 Johnson,⁽⁸⁾ 그리고 1990년 Einfalt 등⁽⁹⁾ 등에 의하여 제안되었다. 이들의 모형에 의한 강우 예보는 기상 변동의 물리적인 여건이 반영되지 않는 단점이 있다. 기상 레이더와 기상 자료를 사용하여 기상 변동의 물리적 여건과 통계적 성분이 고려된 강우 모형이 1992년 Seo 등⁽¹⁰⁾에 의하여 제안되었다. 그러나 이 모형은 레이더 하드웨어, Z-R (Battan⁽¹¹⁾) 변환 기법, 오차 제거 기법 등의 문제가 해결되어야 수문 현업에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 지표면 기상 자료만을 입력 자료로 하여 기상 변동의 물리적 여건을 반영한 강우 모형이 1984년 Georgakakos 등⁽¹²⁾에 의하여 제안되었다. 李 등⁽¹³⁾은 이들의 모형이 우리 나라의 호우 사상을 구현하지 못한다고 하였다. 1992년 李 등⁽¹⁴⁾은 Georgakakos 등⁽¹²⁾의 모형을 수정하여 실측 호우에 더욱 부합하는 지점 호우 모형을 제안하였다. 이 모형은

기상 변동의 물리적 여건이 반영되지만 기상 자료가 계속되지 않는 지점의 강우를 예보할 수는 없다. 본 연구는 李 등⁽¹⁴⁾이 제안한 강우 모형과 미계측 지점의 기상 자료 보간을 토대로 대상 유역의 강우를 예보할 수 있는 모형을 구성하고, 그 모형의 유용성을 검토하고자 한다. 이를 위하여 2장에서는 강우모형과 그 모형에 포함된 매개상수, 그리고 미계측 지점의 기상 변수 예측 및 보간 등에 관한 가정을 한다. 3장에서는 입력 변수인 기상 자료 보간 절차를 소개하고 4장에서는 강우 예보 모형을 구성한다. 5장에서는 사례 연구를 통하여 본 연구 모형의 적용성을 논의하고 6장에서 본 연구 결과를 요약 정리한다.

2. 몇 가지 가정

李 등⁽¹⁴⁾의 모형은 강우 과정을 모식화한 것이다. 임의 지점에 대하여 강우 과정을 모의하는데 이 모형이 효력이 있다 하더라도 모식화 과정에서 포함된 매개상수와 이 모형이 필요로 하는 기상 변수가 문제이다. 특정의 기상 환경에서 얻어진 매개상수 값이 대상 지점의 강우 모의 모형에 적용되기 위해서는 기상학적 동질성이 전제되어야 한다. 또한 대상 지점의 기상 변수값이 인근의 측후소에서 계측된 자료로부터 추정될 수 있어야 하며 그 방법은 적정성이 인정되어야 한다. 미계측 지점에 대하여 강우 예보 모형을 구성하기 위해서는 이러한 일련의 眞·僞 가설이 필요하다. 이 가설은 예보 결과를 실측 강우에 의하여 검증할 수 있는 것으로 간주했다.

2.1 강우 모형에 관한 가정

관측소 위 단위 면적 당의 구름 기주를 고려하고 이 대상 체적에 수분 질량 보존 법칙을 적용하여 수분 저류량 X 와 관측소에 낙하하는 강우량 R_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다고 가정한다(李 등⁽¹⁴⁾).

$$\frac{dX}{dt} = f(u, a_1) - h(u, a_0)X \quad (1)$$

$$R_i = \phi(u, a_0)X \quad (2)$$

여기서 u 는 기상학적 입력 변수이며 지상 기온(T_s), 지상 기압(p_s), 지상 이슬점 온도(T_d) 등으로 구성

되는 벡터량이다. a_1 와 a_0 는 대상 체적에 流·出入하는 수분 질량에 관계되는 매개상수이다. $f(u, a_1)$ 는 대상 체적에 유입하는 수분 질량이고 $h(u, a_0)X$ 는 대상 체적을 빠져나가는 수분 질량이다. 또한 R_f 는 강우량이고 ϕ 는 지표면 기상 변수에 종속인 비선형 함수이다.

2.2 기상학적 동질성에 관한 가정

구름은 그의 발달과 성장, 쇠퇴와 소멸에 이르기까지 물리적인 기구(mechanism)를 갖고 진행한다(Bras⁽¹⁸⁾). 이러한 물리적인 기구를李 등⁽¹⁴⁾은 구름물리학 이론과 관측 자료에 의해 확립된 관계식을 토대로 단순하게 매개상수화하였다. ϵ_1 은 구름층으로 유입하는 수분 질량, ϵ_2 와 ϵ_3 는 운정(cloud top) 기압, ϵ_4 와 k 는 구름층내의 평균 수운적(hydrometeors) 크기, β 는 평균 상승 기류 속도(hight-averaged updraft velocity), γ 는 운정과 운저의 평균 수운적 크기 분포의 비, D_{cc} 는 구름층의 수운적 크기 분포와 관련된 매개상수이다. 그들이 제안한 모형을 매개상수와 입력 변수의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dX}{dt} = f(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, T_0, p_0, T_d) - h(\epsilon_4, \beta, g, k, D_{cc}, T_0, p_0, T_d)X \quad (3)$$

$$R_f = \phi(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_0, p_0, T_d)X \quad (4)$$

이들 매개상수는 미계측 지점에서 추정할 수 없다. 同一流域내에서는 기상학적 동질성이 확보되어 이들 매개상수는 모든 점에서 같은 값을 갖는다고 가정한다.

2.3 기상 변수 예측에 관한 가정

Δt 시간 이후의 대상 지점 강우량을 예보하기 위하여 그 시각의 기상 변수가 필요하다. 지상에서 측정되는 기상 변수(강우량, 기압, 기온, 이슬점 온도, 상대 습도)는 상호 상관이 양호한 것으로 알려졌다(Georgakakos 등⁽¹²⁾). 이를 근간으로 본 연구에서는 한 관측 지점에서 한 단계 후의 기상 변수는 현재 기상 변수의 회귀식으로 예측할 수 있다고 다음과 같이 가정한다.

$$T_d(k) = A_0 + A_1 \cdot R_f(k-1) + A_2 \cdot T_0(k-1) + A_3 \cdot p_0(k-1) + A_4 \cdot RH(k-1) + A_5 \cdot T_d(k-1) \quad (5)$$

$$p_0(k) = A_0 + A_1 \cdot R_f(k-1) + A_2 \cdot T_0(k-1) + A_3 \cdot p_0(k-1) + A_4 \cdot RH(k-1) + A_5 \cdot T_d(k-1) \quad (6)$$

$$T_0(k) = A_0 + A_1 \cdot R_f(k-1) + A_2 \cdot T_0(k-1) + A_3 \cdot p_0(k-1) + A_4 \cdot RH(k-1) + A_5 \cdot T_d(k-1) \quad (7)$$

여기서, $A_0 \sim A_5$ 는 계수이고 R_f 는 강우량, T_0 는 기온, p_0 는 기압, T_d 는 이슬점 온도이다. RH는 상대 습도이며, k 는 시간 단계(time step)이다. 식 (5)~(7)로 강우를 예보하고자 하는 시간 간격의 기상 변수를 예측할 수 없는 경우는 식 (8)과 같이 평균한 값이라고 가정한다.

$$u(t) = u(k-1) + \left(\frac{t - k\Delta t}{\Delta t} \right) (u(k) - u(k-1)) \quad (8)$$

여기서 $u(t)$ 는 구하고자 하는 시각의 기상 변수이고 $(k-1)\Delta t \leq t \leq k\Delta t$ 이다. $u(k-1)$ 은 현 단계의 기상 변수이고 $u(k)$ 는 다음 단계의 예측 기상 변수이다.

2.4 기상 변수 추정에 관한 가정

미계측 지점의 기상 변수를 추정할 수 있는 방법으로는 1) 과거 자료로부터 기상 자료의 변동 특성을 분석하여 보간 하는 방법, 2) 기상 위성 자료를 사용하여 보간하는 방법, 3) 인근 기상 자료 관측 값을 사용하여 보간 하는 방법, 등을 고려해 볼 수 있다. 1)의 방법은 대기 요동(disturbance)의 빠른 통과 때문에 기상 변수 값이 장시간 평균될 뿐만 아니라 요동 거동(disturbance movement; 예를들어 전선)의 방향 함수이므로 기상 변수 추정에 도움이 되지 못한다(Georgakakos⁽¹⁵⁾). 2)의 방법은 운정과 925 mb에서 계속되는 기상 변수를 사용하는 것이다. 이 방법은 분해능이 낮아 정확도가 실측치에 비해 떨어지기 때문에 개략적인 경향 파악에 역점을 두는 것이 좋다(과학기술처⁽¹⁶⁾). 어떤 방법이 본 연구에 부합되는지 검토의 여지가 있으나 선행 연구(Georgakakos⁽¹⁵⁾, Seo 등⁽¹⁰⁾)에서 3)의 방법을 추천하고 있고 대청댐 유역에 적용된 바(한국수자원공사⁽¹⁷⁾)도 있다. 1)과 2)의 방법이 전문한 내용의 단점을 가지고 있어 선행 연구에서 추천 대상에서 제외

되었으며 3)의 방법은 선행 연구에서 기상 변수 추정
 정에 만족할 만한 성과를 거두었다. 따라서 본 연
 구에서도 이들의 추천과 경험을 토대로 인근 기상청
 측후소의 자료와 지형의 기록, 대기의 온도 감율
 그리고 대기 요동 성분을 고려하여 보간될 수 있다고
 가정한다. 이 보간 절차는 3장에서 소개된다.

3. 기상 자료 보간

본 장에서는 지상의 기온 T_0 , 기압 p_0 , 이슬점 온도
 T_d 의 공간 보간 방법을 기술한다. 미세측 지점의
 기상 변수는 기상청 측후소의 기상 변수와 식 (9)~
 (11)을 사용하여 예측한다. 이 값을 토대로 공간에
 대하여 보간 하여 미세측 지점의 기상 변수를 확
 득한다. 미세측 지점의 기상 자료는 지형 특성과
 대기 요동에 의하여 결정되는 것으로 다음과 같이
 가정한다.

$$u = u_i(z) + u_a \quad (9)$$

여기서 u 는 입력 자료(T_0 , p_0 , T_d)를 나타내고, z 는
 고도, $u_i(z)$ 는 고도에 따라 좌우되는 지형 성분, u_a 는
 대기 성분이다.

3.1 입력 자료의 지형 성분

대상 유역의 가장 낮은 위치에서 상승한 기단은
 지형 기록의 영향을 받는다. 기단의 압력과 온도는
 가장 낮은 위치에서의 그 초기 성질과 비포화된
 주변의 단열 상승(adiabatic ascent) 또는 포화된
 주변의 위단열 상승(pseudoadiabatic ascent)으로부
 터 결정된다. 이용 가능한 방정식은 다음과 같다
 (Wallace 등⁽¹⁹⁾). 먼저 측고 방정식(hypsometric
 equation)과 건조 단열 감율(dry adiabatic lapse
 rate) 방정식은 다음과 같다.

$$z - z_1 = \frac{RT_{av}}{g} \ln\left(\frac{p_1}{p}\right) \quad (10)$$

$$(dT/dz)_{dry \text{ parcel}} = -g/c_p \quad (11)$$

또한 고도 z_1 에서 T_1 이 주어지면 온도 T 는 다음과
 같다.

$$T = -\frac{g}{c_p} (z - z_1) + T_1 \quad (12)$$

한편, 위단열 상승에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\theta_e = T \left(\frac{p_n}{p} \right)^{0.286} \exp\left[\frac{L(T) w_s(T, p)}{c_p T} \right] \quad (13)$$

식 (10)~(13)에서 첨자 1은 대상 유역의 가장 낮은
 곳에서의 양을 나타낸다. g 는 중력(m/sec^2), c_p 는
 기단의 정압비열($J Kg^{-1} K^{-1}$), T 는 기온($^{\circ}K$)이다.
 θ_e 는 상당온위(equivalent potential temperature ;
 $^{\circ}K$)이고 p 는 기압($m^{-1}s^{-2}$), $w_s(\cdot)$ 는 포화 혼합비
 (saturation mixing ratio), $L(\cdot)$ 는 응결 잠열(latent
 heat of condensation ; $J Kg^{-1}$)이다. p_n 는 표준 대
 기압으로 $10^5 m^{-1}s^{-2}$ 이고 R 는 기체 상수($J Kg^{-1} K^{-1}$)
 이다. T_{av} 는 고도 z 와 z_1 사이 층에서 평균 온도이다.
 지형학적 영향을 제거하기 위한 방법은 먼저 대상
 유역의 가장 낮은 점에서 온도 T_{0i} , 기압 p_{0i} , 이슬점
 온도 T_{di} 를 기록한다. 이때 관측치가 존재하는 가장
 낮은 지점의 온도가 이슬점 온도와 같고 기상 자료를
 보간 하고자 하는 지점이 그 관측 지점의 고도보다
 더 낮으면 기상 변수의 보간이 불가능함을 유의해야
 한다. 이는 상승 응결 고도(LCL ; lifting condensa-
 tion level)의 추정이 불가능하기 때문이다. 기단의
 포화 정도는 $T_{0i} > T_{di}$ 이면 비포화, $T_{0i} = T_{di}$ 이면 포화
 로 결정한다. $T_{0i} > T_{di}$ 이면 LCL 아래에서 비포화로
 단열 상승하여 그 곳에서 포화되는 기단의 온도를
 결정하기 위하여 식 (12)를 사용한다. 지표면 기상
 자료에 의하여 p_s 와 T_s 가 결정되고, $p = p_s$, $T_{av} =$
 $(T_s + T_{0i})/2$ 로 주어지면 고도 z_1 은 식 (10)으로부터
 산정된다. $z > z_1$ 이면, 기단은 T_s 와 p_s 로 시작하여
 위단열 상승할 것이다. 그러므로 식 (10)과 식 (13)은
 z , p_{0i} , T_{0i} , 그리고 θ_e 가 주어지면 p 와 T 에 대하여
 동시에 해결한다. 설명한 절차를 이용하여, 고도 z 에
 대해 지표 온도 $T_i(z)$ 의 지형학적 성분을 산정한다.
 지표 기압 입력 자료 $p_i(z)$ 의 지형학적 성분을 얻기
 위하여 식 (10)을 p 에 대하여 풀어 다음식을 구한다.

$$p = p_{0i} \exp\left(-\frac{(z - z_1)g}{T_{av} R} \right) \quad (14)$$

$z \leq z_1$ 이면, 상승 기단의 이슬점 온도 $T_{di}(z)$ 는 T_{di} 과
 같고 z_1 고도 위의 기단은 포화되어 있으므로 이때의
 이슬점 온도 $T_{di}(z)$ 는 $T_i(z)$ 이다. $T_{0i} = T_{di}$ 이면, LCL은
 가장 낮은 점이다. 이 경우는 $z \geq z_1$ 인 경우와 같이
 수행한다. 대상 지점이 관측 가능한 가장 낮은 점

보다 위에 있다면, 전술한 방법을 그대로 이용한다. 또한 가장 낮은 관측 지점보다 고도가 더 낮은 점이 대상이 되고 관측장소가 불포화 조건($T_{oi} > T_{di}$)이면, 지형 성분을 결정하기 위하여 식 (10)과 식 (12)를 사용하며 이때 이슬점 온도는 $z \leq z_L$ 인 경우의 조건을 사용한다.

3.2 입력 자료의 대기 요동 성분

유역의 모든 대상 지점에 대하여 기상 입력 자료 u 의 u_a 성분을 결정한다. 대상 지점으로부터 관측소 N 개가 있다고 가정한다. 먼저 $T_i(z)$, $p_i(z)$ 와 $T_{di}(z)$ 값은 모든 위치 자료에서 동일 고도 관측 값을 감한다. $i=1, \dots, N$ 에 대하여 T_i , p_i , T_{di} 를 보간한다. 실제 적용에 있어서, 대상 유역은 10^4 km^2 정도이거나 또는 그보다 작으며 보통 N 수가 적다. 따라서, Kriging 형태의 보간 절차는 배제한다. 대상 지점의 T_a , p_a , T_{da} 값은 이동 평균 형태의 간단한 보간 절차에 거리에 따라 가중값을 갖는 T_i , p_i , T_{di} ($i=1, \dots, N$)의 가중 평균치를 이용한다. 거리를 나타내는 D 와 매개상수 r 을 갖는 D^{-r} 형태의 가중치가 제안되며 이동 평균 기법에 이용한다(Ripley⁽²⁰⁾). 가중치를 $W(D_i)$ 로 나타내면, i 번째 위치로부터($i=1, \dots, N$) 거리 D_i 인 점에서 대기 요동 성분 u_a 는 다음으로 주어진다.

$$u_a = \sum_{i=1}^N W(D_i) u_i \quad (15)$$

여기서, 가중치의 합은 1이며 u_i 는 각각의 주변 기상 변수 관측소로부터 미계측 지점에 대해 지형 성분을 보간하였을 경우 대기 성분 때문에 발생하는 변수 값의 차이이다. u_a 성분은 각각의 대상 지점에 대하여 결정하며, 입력 자료 u 는 식 (9)를 토대로 결정한다. 이것을 강우 모형의 입력 자료로 사용한다.

3.3 기상 자료의 예측 및 보간 사례

대청댐 유역의 기상청 측후소의 기상 변수 및 강우 자료를 사용하여 본 연구의 기상 변수 예측 및 보간에 관한 가정을 검증하였다. 대청댐 유역 및 인근의 기상청 측후소는 대전 등 5개소이고 본 연구에서 소유역을 대표할 수 있는 미계측 지점으로 선정한 지점은 군북 등 9개소이다. 그림 1에 측후소와 미계측 지점의 위치를 도시하였다. 그림 1의 등고선은 지형의 기복을 나타내며 종축 및 횡축의

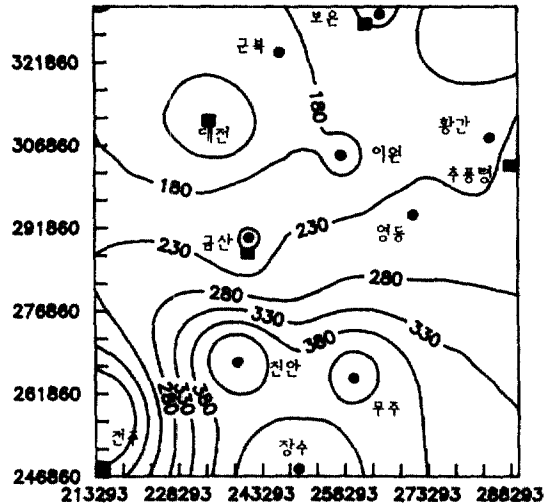


그림 1. 대청댐 유역 측후소 및 미계측 지점의 위치(■: 측후소, ●: 미계측 지점).

좌표는 위도 $36^{\circ}00'00''$, 경도 $127^{\circ}00'00''$ 의 좌표를 278068.0 m와 199739.0 m로 하여 Gauss 등각 이중투영법으로 산정한 상대 좌표이다. 기상청 측후소의 기상 자료 보유 시간 간격은 금산 및 보은이 6시간, 나머지는 3시간이며 미계측 지점의 강우량 관측 시간 간격은 1시간이다.

대청댐 유역에서 1983년~1990년 동안에 발생한 호우 사상을 분석 대상 호우로 선정하였다. 호우의 선정 기준 및 방법 등은 선행 연구(李 등⁽¹³⁾)에 기술되어 있다. 모형의 매개상수는 선행 연구(李 등⁽²¹⁾)에서 분석한 값을 사용하였다. 본 연구 유역 기상청 측후소(대전, 전주, 추풍령)의 기상 변수는 선정된 호우 사상을 토대로 식 (5)~(7)의 계수 값을 산정하여 예측하였다. 각 측후소의 기상 변수 예측식의 계수값은 표 1에 게재하였다. 표 1의 RMSE(root mean square error)는 실측 및 예측 기상 변수 간의 평균 자승 오차이다. 기상 변수 예측식의 기온, 기압, 이슬점 온도에 관한 실측 및 예측 기상 변수의 평균 자승 오차 범위는 각각 $0.38 \sim 0.55^{\circ} \text{K}$, $0.24 \sim 0.58 \text{ mb}$, $0.52 \sim 0.62^{\circ} \text{K}$ 이다. 이들 값은 측후소에서 현재 사용되고 있는 기상 자료 계측기기의 분해능과 같은 차수이다(이 등⁽¹³⁾). 기상 변수 예측식은 가용 자료가 3시간 간격으로 기록되어 있으므로 다음 단계의 보간 자료는 현 단계보다 3시간 이후의 값이 예측된다. 미계측 지점의 기상 변수를 1시간 간격으로

표 1. 기상 변수 예측 모형 계수

지 점	변 수	계 수						RMSE	
		A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅		단 위
전 주	P _o	27.7569	-0.00445	0.52249	0.95722	0.13580	-0.51575	0.29	mb
	T _d	12.4732	0.01459	0.52401	0.01600	0.04290	0.36139	0.52	°K
	T _o	16.8799	0.01210	-0.26462	0.01311	-0.21430	1.23491	0.55	°K
대 전	P _o	17.5038	+0.00630	0.32250	0.97104	0.05794	-0.30317	0.24	mb
	T _d	48.0374	0.00192	-0.03320	-0.00895	-0.02662	0.90804	0.30	°K
	T _o	13.5973	0.00045	0.88599	-0.01338	0.06642	0.09225	0.62	°K
추풍령	P _o	-47.353	0.00702	1.41481	0.99046	0.23348	-1.30114	0.58	mb
	T _d	64.6127	0.01008	-0.32129	-0.00431	-0.03721	1.12704	0.60	°K
	T _o	114.791	0.00382	-0.84007	-0.03257	-0.24563	1.64163	0.38	°K

표 2. 보간 및 실측 기상 변수로 계산한 강우량의 특성

호 우 발 생 일	실측총 강우량 mm	평균강 우강도 mm/hr	계 산 총 강우량		RMSE mm/hr			RMSE/평균강우량		
			A	B	A	B	C	A	B	C
'93. 6. 29	104.8	11.6	108.5	108.4	2.65	2.05	0.02	0.22	0.17	0.001
'93. 7. 12	88.0	8.0	89.2	89.2	2.03	2.06	0.05	0.25	0.26	0.006

구하고자 하므로 식 (8)을 사용한다. 식 (8) 사용의 적합성은 실측 및 식 (8)로 보간한 기상 변수간의 평균 자승 오차 분석과 실측 및 식 (8)로 획득한 기상 변수를 결정론적 강우 모형의 입력 변수로 사용하여 계산한 강우량을 토대로 검증되었다. 검증 기간은 93년 6월 26일과 7월 12일에 전주 측후소 지점의 호우 사상이다. 실측 및 보간한 기상 변수간의 기온, 기압, 이슬점 온도 각각에 대한 평균 자승 오차의 범위는 0.01~0.18 °K, 0.44~0.48 mb, 0.28~0.31 °K이고 강우량의 계산 결과는 표 2에 게재하였다. 표 2의 A는 실측 기상 변수로, B는 식 (8)로 보간하여 계산한 경우이다. 실측 및 계산치간의 평균 자승 오차를 A와 B로 나타내었으며 C는 A와 B간의 평균 자승 오차이다.

표 2에서 알 수 있듯이 실측 및 식 (8)로 보간하여 획득한 기상 변수로 계산한 총 강우량의 차이는 0.1 mm 이내이다. 계산 및 실측 강우량 간의 평균 자승 오차는 0.02~0.05 mm이며 실측 평균 강우량에 대한

평균 자승 오차의 비는 0.001~0.006이다. 표 1의 계수 값을 사용하여 식 (5)~(7)로 예측한 기상 변수를 토대로 지형 성분과 대기 요동 성분을 고려하여 각 미세측 지점의 기상 자료를 보간 한다. 보간 자료의 검증을 위하여 6시간 간격의 기상 실측 자료를 보유하고 있는 금산과 보은 측후소의 기상 변수를 사용한다. 금산과 보은 측후소의 기상 자료를 보간하여 보간치와 실측치의 관계를 표 3에 게재하였다. 이때 대기 성분의 가중치는 D⁻¹ 형태를 취하였다. 표 3의 RMSE는 실측 및 보간 기상 변수간의 평균 자승 오차이고 r은 대기 성분 보간 매개상수이다.

표 3에서 알 수 있듯이 금산 및 보은 지점에 대한 기온, 기압, 이슬점 온도의 실측 및 예측치간의 평균 자승 오차 범위는 각각 0.70~0.72 °K, 0.89 mb, 0.62~0.81 °K이다.

4. 강우 예보 모형

기상 자료 미세측 지점의 강우 예보 모형은 수

표 3. 기상 변수 실측 및 보간치 관계

지점	금 산				보 은			
	T _o	P _o	T _d	r	T _o	P _o	T _d	r
단위	°K	mb	°K	무차원	°K	mb	°K	무차원
RMSE	0.70	0.89	0.81	3.15	0.72	0.89	0.62	3.85

분질량보존을 토대로 구성된 지점 강우 모형을 대상 유역 내의 기상 자료 미계측 지점에 적용한 것이다. 지점 강우 모형의 강우량 방정식과 입력 변수는 오차를 포함하고 있다고 가정한다. 이러한 부가적인 오차를 취하고 강우 과정과 입력 변수의 관측에 따른 오차를 고려하여 지점 강우 모형의 추계학적 방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{dX}{dt} = f(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, T_o, p_o, T_d, t) - h(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_o, p_o, T_d, t)X(t) + \Gamma(t)W(t) \quad (16)$$

$$R_f(k) = \phi(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_o, p_o, T_d, k)X(k) + V(k) \quad (17)$$

여기서 k는 이산-시간 지수(discrete-time index)이고 t=kΔt이다. Γ(t)W(t)는 평균이 0(zero)이며 분산 Q(t)가 다음 식과 같은 추계학적 오차(stochastic error)이다(Gelb⁽²²⁾).

$$Q(t)\delta(t-\tau) = E[(\Gamma(t)W(t))(\Gamma(\tau)W(\tau))^T] \quad (18)$$

여기서 δ(t-τ)는 Dirac delta 함수를 나타낸다. 식 (17)에서 관측에 따른 오차항 V(k) 또한 평균이 0(zero)인 다음과 같은 분산을 갖는다고 가정한다.

$$E[V(k)V(l)] = \begin{cases} R(k) & k=l \\ 0 & k \neq l \end{cases}$$

추계학적 방정식 식 (16)과 식 (17)로부터 예보 단계와 갱신(update) 단계의 연속-이산형(continuous-discrete) 칼만 필터 방정식은 다음으로 주어진다(Gelb⁽²²⁾).

$$\text{예보} \quad \hat{X}(k|k-1) = F(k-1)\hat{X}(k-1|k-1) \quad (19)$$

$$\Sigma(k|k-1) = F(k-1)\Sigma(k-1|k-1) + F^T(k-1)Q(k-1) \quad (20)$$

갱신

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)[R_o(k) - \phi(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_o, p_o, p_o, T_d, k)\hat{X}(k|k-1)] \quad (21)$$

$$\Sigma(k|k) = [I - K(k)\phi(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_o, p_o, T_d, k)]\Sigma(k|k-1) \quad (22)$$

$$K(k) = \Sigma(k|k-1)\phi^T(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_o, p_o, T_d, k) [\phi(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_o, p_o, T_d, k)\Sigma(k|k-1)\phi^T(\epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}, T_o, p_o, T_d, k) + R(k)]^{-1} \quad (23)$$

여기서, R_o(k)는 관측 강우, K(k)는 칼만 이득(Kalman gain)이고 F(k-1)은 매개상수와 대상 체적 수분 유출입의 비선형 함수이다. 식 (19)~(20)을 풀기 위해서는 초기 조건 Σ(0|0)과 X̂(0|0)가 필요하다. 방정식에서 X̂(k|t)는 시각 t까지의 정보로부터 시각 τ상태의 최적 추정을 나타내며 분산의 추정 또한 Σ(τ|t)에 의해 같은 방법으로 계산된다. 예보치와 분산은 식 (19)와 식 (20)에 의하여 산정된다. 결국 식 (19)~(23)은 매개상수가 주어지고 현 단계의 기상 변수만 입수되면 강우량을 예보할 수 있는 모형이라 할 수 있다.

5. 사례 연구

본 연구에서 제안한 강우 예보 절차를 요약하면 1) 인근 기상청 측후소의 기상 변수 입력, 2) 1시간 후의 미계측 지점 기상 변수 보간, 3) 칼만 필터 예측 모형에 의하여 미계측 지점 강우 예보, 4) 예보하고자 하는 시각까지 1) 3)반복이다. 미계측 지점의 기상 변수는 다음과 같이 획득하였다. 먼저 인근

표 4. 대청댐 강우 관측지점의 실측 및 예보 강우

년월일시	1991.9.5.4-9.5.18						1991.9.27.7-8.27.18						
	총강우량(mm)			RMSE	Rom	Rom	총강우량 (mm)			RMSE	Rom	Rom	
	실측	예보	A				실측	예보	A				RMSE
군 북	33.0	33.5	0.5	0.88	2.36	0.37	39.0	36.1	2.9	1.01	3.55	0.28	
보 은	28.0	32.6	4.6	0.39	2.00	0.19	22.0	25.3	3.3	0.31	2.00	0.15	
이 원	35.0	35.6	0.6	0.86	2.50	0.34	25.0	27.7	2.7	0.38	2.27	0.17	
황 간	34.0	38.3	4.3	0.42	2.43	0.17	32.0	34.8	2.8	0.34	2.91	0.12	
금 산	32.0	35.2	3.2	0.44	2.29	0.19	27.0	29.6	2.6	0.33	2.45	0.13	
영 동	49.0	51.6	2.6	0.44	3.50	0.12	26.0	29.1	3.1	0.32	2.36	0.13	
진 안	63.0	62.3	0.7	0.47	4.50	0.10	21.0	23.8	2.8	0.30	1.91	0.16	
무 주	64.0	63.0	1.0	0.74	4.57	0.16	36.0	37.5	1.5	0.41	3.27	0.12	
장 수	95.0	90.4	3.6	0.93	6.79	0.13	25.0	27.5	2.5	0.28	2.27	0.12	
평 균			2.3	0.62	3.44	0.18			2.6	0.40	2.56	0.16	

기상청 측후소인 대전, 전주, 추풍령 지점의 현시각 기상 자료를 얻었다. 기상 변수 예측식 식 (5)~(8)을 사용하여 1시간 이후의 각 측후소 기상 변수를 예측했다. 이 값을 근간으로 3장에서 소개한 절차에 의해 지형 성분과 대기 성분을 고려하여 미계측 지점의 기상 변수를 보간하였다. 이 값을 4장에서 구성한 강우 예보 모형의 입력 자료로 사용하였다. 모형의 매개상수는 선행 연구(이 등⁽¹⁴⁾)에서 분석한 값을 사용하였다. 예보 모형의 초기 조건 상태인 $\hat{X}(0|0)$ 와 분산 $\Sigma(0|0)$ 은 Georgakakos 등⁽¹²⁾의 연구 성과를 참고하여 1.0 kg/m^2 과 $0.01(\text{kg/m}^2)^2$ 을 백하였다. 2장에서 가정한 몇 가지 가정이 합리적인지를 판단하기 위하여 3장의 기상 변수 예측식의 계수 추정이나 선행 연구(李 등^(14,21))에서 강우 모형의 매개상수 추정에 포함된 기간이 아닌 기간에 대하여 본 연구 모형을 적용하였다. 이 기간이 아닌 1991년에 대청댐 유역에서 발생한 호우 2개를 임의로 선정하여 1시간 간격의 실시간 강우 예보를 수행하였다. 이 결과를 표 4에 수록하였다. 표 4의 RMSE는 기상 자료 미계측 지점의 실측 및 예보 강우량 간의 평균 자승 오차이고 Rom은 호우 지속

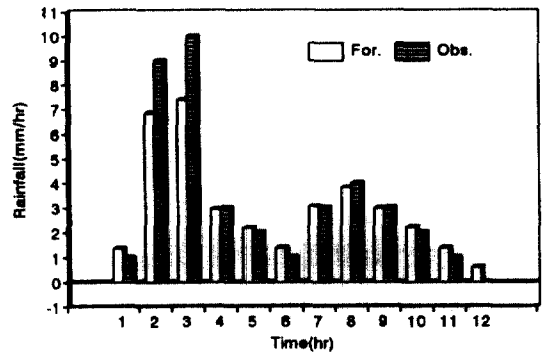


그림 2. 군북 지점의 실측 및 예보 강우 강도.

기간의 실측 평균 강우 강도이고 A는 실측치와 예보치의 총 강우량 차이이다. 그림 2는 91년 9월 27일 호우 중 평균 자승 오차가 가장 크게 나타난 군북 지점의 각 시각별 실측 및 예보 강우 강도를 도시한 것이다.

표 4에서 알 수 있듯이 91년 9월 5일과 91년 9월 27일에 발생한 호우의 경우, 실측치와 예보치의 총 강우량 차를 평균한 값은 각각 2.3 mm와 2.6 mm 이고 그 평균은 2.45 mm이다. 실측 및 예보 강우량

간의 평균 자승 오차는 각각 0.62 mm/hr와 0.41 mm/hr이고 그 평균은 0.51 mm/hr이다. 또한 실측 평균 강우량에 대한 미계측 지점의 평균 자승 오차비의 범위는 0.1~0.37이다.

6. 결 론

인근 기상청 측후소의 기상 자료를 토대로 대청댐 유역 기상 자료 미계측 지점의 기상 자료를 보간하였다. 이를 본 연구 모형의 입력 자료로 사용하여 미계측 지점에 칼만 필터 예보 모형의 적용성을 검증하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기상 변수 예측 및 보간을 수행한 결과 실측치와 예측치간의 평균 자승 오차는 현재 계측 지점에서 사용하고 있는 기상 변수 측정 기기의 분해능과 같은 차수로 보간 및 예측치가 실측치에 근접한다.

2. 대청댐 유역 기상 자료 미계측 지점의 강우량을 예보한 결과 실측치와 예보치 간의 평균 자승 오차 범위는 0.30~1.01 mm/hr이며 이의 평균 강우량에 대한 비는 0.1~0.37로 각 예보 시각의 예보 강우 강도 오차는 평균 강우 강도의 10~37%이다.

이상의 결과를 종합하여 보면 본 연구 모형에 수반된 가정은 합리적이며 본 연구 모형은 기상 자료 미계측 지점에서 강우를 단기 예보하는데 유용한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 본 연구가 가능하도록 지원해 준 것에 대하여 깊은 감사를 표한다.

참고문헌

1. Bras, R.L. and Rodriguez-Iturbe, I., "Rainfall Generation A Non Stationary Time Varing Multidimensional Model", *W.R.R.*, Vol. 12, No. 3, 1976, pp. 450-456.
2. Creutin, J.D. and Ch. Obled, "Modeling Spatial and Temporal Characteristics of Rainfall as Input to a Flood Forecasting Model", In Hydrological

Forecasting, 1980.

3. Johnson, E.R. and Bras, R.L., "Multivariate Short-Term Rainfall Prediction", *W.R.R.*, Vol. 16, No. 1, 1980, pp. 173-185.
4. 이재형, 선우중호, 정동국, "홍수시 저수지 운영을 위한 시우량 모형", *한국수문학회지*, 제 22권, 제 3호, 1990, pp. 341-350.
5. Elvander, R.C., "An Evaluation of the Relative Performance of Three Weather Ezech Forecasting Techniques", In *Preprint. Vol. 17, Conf. on Rader Meterology, Seattle*, Ams, Boston, 1976, pp. 526-532.
6. Bellon, A. and Austin, G.L., "The Evaluation of Two Years of Real-time Operation of a Short-Term Precipitation Forecasting Procedure (SHARP)", *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 17, 1978, pp. 1778-1787.
7. Browning, K.A., Collier, C.G., Larke, P.R., Menmuir, P., Monk, G.A. and Owens, R.G., "On the Forecasting of Frontal Rain Using a Wather Rader Network", *Weather Rev.*, Vol. 110, 1982, pp. 534-552.
8. Walton, M.L. and Johnson, E.R., "Proposed On-Site Flash Flood Potential System for NEXRAD", *Preprints, 6th Conf. on Hydrometeorology*, AMS, Boston, 1986, pp. 122-129.
9. Einfalt, T., Denolux, T. and Jacquet, G., "A Rader Rainfall Foracasting Method Designed for Hydrological Purpose", *J. Hydrol.*, Vol. 114, 1986, pp. 229-244.
10. Seo, D.J. and Smith, J.A., "Radar-Based Short-Term Rainfall Prediction", *J. Hydrol.*, Vol. 131, 1992, pp. 341-367.
11. Battan, L.J., *Rader Observation of the Atmosphere*, Univ. of Chicago Press, Illinois.
12. Georgakakos, K.P. and Bras, R.L., "A Hydrologically Useful Station Precipitation Model 1. Formulation and 2. Case studies", *W.R.R.*, Vol. 20, No. 11, 1984, pp. 1585-1610.
13. 이재형, 전일권, 조대현, "지점 호우 모형의 매개 상수 동정에 관한 기초 연구", *대한토목학회 논문집*, 제 12권, 제 2호, 1992, pp. 123-130.
14. 이재형, 선우중호, 전일권, 정재성, "구름 물리학을 토대로한 지점 호우 모형 개발", *한국수문학회지*, 제 25권, 제 4호, 1992, pp. 51-59.
15. Georgakakos, K.P., "A Generalized Stochastic Hydrometeorological Model for Flood and Flash-Flood Forecasting 1. Formulation and 2. Case Studies", *W.R.R.*, Vol. 22, No. 13, 1986, pp. 2083-

- 2106.
16. 과학기술처, 위성 및 레이더를 이용한 단시간 강우예보 시스템 개발연구(II), 과학기술처, 1992.
 17. 한국수자원공사, 다목적댐의 홍수조절을 위한 예비방류 대책 연구, 한국수자원공사, 1992.
 18. Bras, R.L., "Hydrology: an introduction to hydrologic science", Massachusetts Institute of Technology, 1990.
 19. Wallace, J.M. and Hobbs, P.V., *Atmospheric Science, An Introductory Survey*, Academic Press, New York, 1977.
 20. Ripley, B.D., *Spatial Statistics*, John Wiley, New York, 1981.
 21. 이재형, 심명필, 전일권, "대청댐 예비 방류를 위한 홍수예보", **한국수문학회지**, 제 26권, 제 2호, 1993, pp. 99-105.
 22. Gelb, A.(Ed.), *Applied Optimal Estimation*, The M. I.T. Press, Cambridge, Mass. 1974.

(接受 : 1993. 9. 14)