

# 다지점 실시간 강우 예측

이 재형\* 전 일권\*\*

## 1. 서론

매년 우리나라에서는 각종 강우로 인하여 많은 인명과 재산상의 손실이 발생하고 있다. 이의 경감을 위해서는 정확한 강우 예보가 절실히 요구된다. 그동안 수문과정의 시공간 규모에 적절하고 신뢰할만한 강수모델의 부재로 유출을 모의하는데 어려움을 주고 있었으나 최근 시공간 규모에 적절하고 현실적인 강수모델이 이(1992a, 1992b) 등에 의하여 연구되어왔다. 그들의 모형은 지상에서 측정할 수 있는 지상의 기온, 기압, 이슬점 온도등의 기상변수를 이용하여 지점 강우모형을 구성함으로써 기상변화에 신속적으로 대응할 수 있게 하였다. 이 모형은 지점 강우모형이므로 대상구역의 면적 강우량을 예측하기 위해서는 면적 강우모형으로의 전환이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 강우량은 계속이 되고 있으나 기상변수가 미계측되는 지점의 지표면 기상변수를 보간하고, 이 모형을 토대로 구역내 기상변수 미계측 지점의 강우량을 예측한다. 기상자료 미계측 지점의 기상자료는 구역의 특성인 지형의 기록과 공간에 따른 기상변동 특성을 고려하여 보간한다. 본 연구는 이(1992b) 등이 제안한 강우모형과 입력자료인 기상자료의 보간을 토대로 기상자료 미계측 지점의 실시간 강우 예측 모형을 구성하여 그 모형의 유용성을 검토하고자한다.

## 2. 강우 예측 모형

기상자료 미계측 지점의 강우 예측 모형은 수분 질량 보존을 토대로 구성한 지점 강우 모형을 대상 구역내의 기상자료 미계측 지점에 적용한것이다. 모형의 입력자료는 지표면 기상변수인 기온  $T_0$ , 기압  $P_0$ , 이슬점온도  $T_d$ 이다. 이 모형의 적용에서 문제가 되는것은 모형의 매개상수 와 입력자료인 각 지점의 기상변수이다. 대개의 경우 대상 구역내의 강우량 계

---

\* 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수. \*\* 전북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

측 지점은 기상변수 계측이 이루어 지지 않고있다. 본 연구에서 기상변수 미계측지점의 기상 변수는 유역내와 유역 인근의 기상청 관측소에서 계측한 기상변수를 토대로 유역특성과 기상 변동 특성을 보간하여 획득한다. 이 보간 절차는 3장에 기술한다. 지점 강우 모형의 강우량 방정식과 입력변수는 오차를 포함하고 있다고 가정한다. 이러한 부가적인 오차를 취하고 강 우 과정과 입력변수의 관측에 따른 오차를 고려하여 지점 강우 모형의 추계학적 방정식을 다 음과 같이 정의한다(Georgakakos, 1986).

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

$$R(k) = \phi(u, a_0, k)X(k) + V(k) \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 이산-시간 지수(discrete-time index)를 나타내며  $t=k\Delta t$ 이다.  $\Gamma(t)W(t)$ 은 평균이 0(zero)이며 분산이  $Q(t)$ 인 다음 식과 같은 추계학적 오차(stochastic error)이다.

$$Q(t)\delta(t-\tau) = E[(\Gamma(t)W(t))(\Gamma(\tau)W(\tau))^T] \quad (3)$$

여기서  $\delta(t-\tau)$ 는 Dirac delta 함수를 나타낸다. 식(2)에서의 관측에 따른 오차항  $V(k)$  또한 평균 0(zero)인 다음 분산을 갖는다고 가정한다.

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

추계학적 방정식 (1)과 (2)로 부터 예측단계와 갱신(update)단계의 연속-이산형 필터 방정식 은 다음으로 주어진다(Gelb, 1974).

예측

$$\frac{d\hat{X}(\tau|t)}{d\tau} = f(u, a_1, \tau) - h(u, a_0, \tau)\hat{X}(\tau|t) \quad (4)$$

$$\frac{d\Sigma(\tau|t)}{d\tau} = f(u, a_0, \tau)\Sigma(\tau|t) + \Sigma(\tau|t)h^T(u, a_0, \tau) + Q(\tau) \quad (5)$$

갱신

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)[R(k) - \phi(u, a_0, k)\hat{X}(k|k-1)] \quad (6)$$

$$\Sigma(k|k) = [I - K(k)\phi(u, a_0, k)]\Sigma(k|k-1) \quad (7)$$

$$K(k) = \Sigma(k|k-1)\phi^T(u, a_0, k)[\phi(u, a_0, k)\Sigma(k|k-1)\phi^T(u, a_0, k) + R(k)]^{-1} \quad (8)$$

여기서,  $K(k)$ 는 칼만 이득(Kalman gain)이다. 식(4)~(8)을 풀기 위해서는 초기조건  $\Sigma(1|0)$  과  $\hat{X}(1|0)$ 가 필요하다. 방정식에서  $\hat{X}(\tau|t)$ 는 시각  $t$ 까지의 정보로 부터 시각  $\tau$  상태의 최적

추정을 나타내며 분산의 추정또한  $\Sigma(\tau|t)$ 에 의해 같은 방법으로 계산된다. 예측치과 분산은 식(6)과 식(7)에 의하여 산정된다. 식(4)과 식(5)을 풀기 위해서는 지상의 기상 입력변수와 모형의 매개상수를 결정할 필요가 있다.

모형에 포함된 주요 물리변수는 함수  $f(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$ ,  $\phi(\cdot)$ 를 계산하기 위한 평균 상승 기류 속도, 운정 기압, 운적 크기 분포 등의 유입 및 유출 매개변수이다. 이들 변수는 구름 물리학 이론과 관측 자료에 의해 확립된 관계식을 토대로 매개상수화 하였다(이재형 등, 1992a, 1992b). 그렇게 함으로서 매개변수의 시간에 따른 변동 특성은 기상 변수가 대변하게 되며, 매개 상수는 시간과 독립인 특성치가 된다. 모형의 함수  $f(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$ ,  $\phi(\cdot)$ 를 기상 변수와 매개상수의 항으로 구성하면 다음과 같다(이재형 등, 1992b).

$$f(\cdot) = F(T_0, T_d, P_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \beta) \quad (9)$$

$$h(\cdot) = F(T_0, T_d, P_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}) \quad (10)$$

$$\phi(\cdot) = F(T_0, T_d, P_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{cc}) \quad (11)$$

식(9)~(11)을 모형 방정식에 대입하고 적절한 매개상수 값들이 주어지면 이들식에 의하여 지상에서 실측한 기압, 기온, 이슬점온도 등으로부터 강우량을 산정할 수 있다. 결국 기상변수가 예측되면 강우 예측이 가능하다. Georgegokakos와 Bras(1984)에 의하면 기상변수  $T_0, P_0, T_d$ 등은 상호 상관이 양호하다. 그들의 연구 결과를 토대로 본 연구에서는 기상변수 예측 모형을 다음과 같이 정의한다.

$$T_d(k+1) = A_0 + A_1 \cdot R(k) + A_2 \cdot T_0(k) + A_3 \cdot P_0(k) + A_4 \cdot RH(k) + A_5 \cdot T_d(k) \quad (12)$$

$$P_0(k+1) = A_0 + A_1 \cdot R(k) + A_2 \cdot T_0(k) + A_3 \cdot P_0(k) + A_4 \cdot RH(k) + A_5 \cdot T_d(k) \quad (13)$$

$$T_0(k+1) = A_0 + A_1 \cdot R(k) + A_2 \cdot T_0(k) + A_3 \cdot P_0(k) + A_4 \cdot RH(k) + A_5 \cdot T_d(k) \quad (14)$$

여기서,  $A_0 \sim A_5$ 는 계수이고  $R$ 은 강우량,  $T_0$ 는 기온,  $P_0$ 는 기압,  $T_d$ 는 이슬점 온도를 나타낸다.  $RH$ 는 상대습도이며,  $k$ 는 시간 단계(Time step)이다. 기상변수 예측 모형과 강우모형을 토대로 현 단계의 기상변수만 입수되면 다음 단계의 강우량과 기상변수를 예측할 수 있다.

### 3. 기상자료 보간

대개의 경우 유역의 기상자료 관측망(지점간 평균거리 약 몇백Km 정도)이 있으며, 강우량 관측이 있는 곳에서 기상자료의 관측치가 존재하지 않는곳이 있다. 이때 지표 기상자료의 기상학적 보간이 필요하다. 본 절에서 기온  $T_0$ , 기압  $p_0$ , 이슬점온도  $T_d$ 의 공간 보간을 다룬다. 지표의 기상학적 입력자료는 지형과 대기 요동에 의하여 결정되는 것으로 가정한다.

입력자료는 다음과 같이  $u_t(z)$  와  $u_a$  로 구성된다.

$$u = u_t(z) + u_a \quad (15)$$

여기서  $u$ 는 입력자료( $T_o$ ,  $p_o$ ,  $T_d$ )를 나타내고,  $z$ 는 고도,  $u_t(z)$ 는 고도에 따라 좌우되는 지형성분,  $u_a$ 는 대기성분이다. 각 성분의 보간 방법 다음과 같다.

입력자료의 지형성분 : 대상구역의 가장 낮은 위치에서 상승한 기단은 지형 기록의 영향을 받는다. 기단의 압력과 온도는 가장 낮은 위치에서의 그 초기 성질과 비포화된 주변의 단열상승 또는 포화된 주변의 위단열상승으로부터 결정된다. 이용 가능한 방정식은 다음과 같다(Wallace 와 Hobbs, 1977). 먼저 축고 방정식과 건조 단열감을 방정식은

$$z - z_1 = \frac{RT_{av}}{g} \ln\left(\frac{p_1}{p}\right) \quad (16)$$

$$(dT/dz)_{dry\ parcel} = -g/C_p \quad (17)$$

또한 고도  $z_1$ 에서 초기조건  $T_1$ 이 주어지면

$$T = -\frac{g}{C_p}(z - z_1) + T_1 \quad (18)$$

위단열 상승에 관한 방정식은

$$\theta_e = T\left(\frac{p_n}{p}\right)^{0.286} \exp\left[\frac{L(T) w_s(T, p)}{c_p T}\right] \quad (19)$$

상기 식에서 첨자 1은 대상구역의 가장 낮은곳에서의 양을 나타낸다. 또한  $T_{av}$ 는 고도  $z$ 와  $z_1$  사이층에서 평균온도이다. 지형학적 영향을 제거하기 위한 방법을 다음으로 요약하였다.

1) 대상구역의 가장 낮은점에서 온도  $T_{o1}$ , 기압  $p_{o1}$ , 이슬점온도  $T_{d1}$ 을 기록한다. 기단의 포화 정도는  $T_{o1} > T_{d1}$ 이면 비포화,  $T_{o1} = T_{d1}$ 이면 포화로 결정한다.

2)  $T_{o1} > T_{d1}$  이면, 상승응결고도  $z_L$  아래에서 비포화로 단열 상승하여 그곳에서 포화되는 기단의 온도를 결정하기 위하여 식(18)을 이용한다. 고도  $z_L$ 은 각각  $p_s$ 와  $T_s$ 가 식(20)과 식(21)로 주어지고  $p = p_s$ ,  $T_{av} = (T_s + T_{o1})/2$ 로 주어지면 식(16)으로 정의된다.

$$p_s = \left(\frac{1}{\frac{T_o - T_d}{223.15} + 1}\right)^{3.5} \cdot p_o \quad (20)$$

$$T_s = \left(\frac{1}{\frac{T_o - T_d}{223.15} + 1}\right) \cdot T_o \quad (21)$$

①  $z > z_L$  이면, 기단은  $T_s$  와  $p_s$ 로 시작하여 위단열 상승할 것이다. 그러므로 식(16)과 식

(19)는  $z$ ,  $p_{01}$ ,  $T_{01}$  과  $\theta_e$ 가 주어지면  $p$  와  $T$ 에 대하여 동시에 해결 한다. 설명한 절차를 이용하여, 고도  $z$ 에 대해 지표온도  $T_t(z)$ 의 지형학적 성분을 얻는다. 이때 다음을 이용한다.

$$T_{av} = (T_{01} + T_t(z))/2.$$

지표압력 입력자료  $p_t(z)$ 의 지형학적 성분을 얻기 위하여 식(16)을  $p$ 에 대하여 풀어 다음을 구한다.

$$p = p_{01} \exp\left(-\frac{(z - z_1)g}{T_{av} R}\right) \quad (22)$$

②)  $z \leq z_L$ 이면, 상승기단의 이슬점 온도는 가장 낮은곳에서와 같다. 즉,

$$T_{d1}(z) = T_{d1} \quad z \leq z_L \quad (23)$$

$z_L$  고도위의 상승기단에 대하여, 공기는 포화되어 있다. 그러므로

$$T_{dt}(z) = T_t(z) \quad z \geq z_L \quad (24)$$

3)  $T_{01} = T_{d1}$  이면, 상승응결고도는 가장 낮은점이다.  $z \geq z_L$ 인 경우 2)를 수행한다.

제안된 방법에서 중요한 것은 대상구역의 가장 낮은곳에서  $T_{01}$ ,  $p_{01}$ ,  $T_{d1}$ 의 관측치이다. 대상 지점이 관측 가능한 가장 낮은점 보다 위에 있다면, 제안된 방법을 그대로 이용한다. 또한 가장 낮은 관측 지점보다 고도가 더 낮은점이 대상인 경우와 관측장소가 불포화조건( $T_{01} > T_{d1}$ )이면, 지형성분을 결정하기 위하여 식(16)과 식(23) 그리고 단열 하강식 (18)을 이용한다.

입력자료의 대기요동 성분 : 구역의 모든 대상지점에 대하여 기상학적 입력자료  $u$ 의  $u_a$ 성분을 결정한다. 대상구역으로부터 합리적인 거리(약 200km이하)내에 관측위치  $N$ 개가 있다고 생각하자. 첫째,  $T_t(z)$ ,  $p_t(z)$  와  $T_{dt}(z)$ 의 현장값은 모든 위치자료에서 동일고도 관측값을 뺀다.  $i = 1, \dots, N$ 에 대하여  $T_i$ ,  $p_i$ ,  $T_{di}$ 를 보간하는 것이다. 실제 적용에 있어서, 대상구역은 104km<sup>2</sup> 또는 그보다 작으며  $N$ 수가 적다. 보통  $N$ 은 10개 이하이며 종종 5개 이하인 곳도있다. 따라서, 자료의 성질은 Kriging 형태의 보간 절차는 배제한다. 과거 자료로부터 결정한 변수로 지표자료의 경향을 결정하는 가정은 특별히 도움이 되지 않는다. 이것은 대기 자료가 대기요동의 빠른 통과때문에 하나 이상의 여러개가 장기간 평균된 것이기 때문이다. 게다가, 지표 자료에서 그 경향은 상이한 요동사이에서 변화가 예상되는 요동거동 (Disturbance Movement; 즉 전선)의 방향함수이다.

앞의 논의에서 어떤 지점의  $T_a$ ,  $p_a$ ,  $T_{da}$  값은 이동평균형태의 간단한 보간 절차에 거리에 따라 가중값을 갖는  $T_i$ ,  $p_i$ ,  $T_{di}$  ( $i=1, \dots, N$ )의 가중평균치를 이용한다. 따라서 거리를 나타내는  $D$ 와 매개변수  $r$ 을 갖는  $D^{-r}$ ,  $e^{-rD^{**2}}$  와 유사한 가중치가 제안되며 이동평균기법에

이용한다(Ripley, (1981)). 가중치를  $W(D_i)$ 로 나타내면,  $i$  번째 위치로부터( $i=1, \dots, N$ ) 거리  $D_i$ 인 점에서 대기요동성분  $u_a$ 는 다음으로 주어진다.

$$u_a = \sum_{i=1}^N W(D_i) u_i \quad (25)$$

$u_a$ 는  $T_a, p_a, T_{da}$  값에 하나의 값이 존재하며  $T_i, p_i, T_{di}$  ( $i=1, \dots, N$ ) 값에 따라  $u_i$ 가 존재한다. 또한 다음을 주목하라.

$$\sum_{i=1}^N W(D_i) = 1$$

$u_a$  성분은 대상 지점에 대하여 결정하며, 입력자료  $u$ 는 식(9)를 토대로 결정한다. 이것을 강우모형의 입력자료로 이용한다.

#### 4. 적용 및 고찰

전술한 모형의 적용성을 검증하기 위하여 대청댐 유역 기상관측소와 강우 계측소의 기상 및 강우 자료를 이용하였다. 선행 연구와의 일관성을 견지하기 위하여 1983년-1990년 동안 발생한 호우사상을 선정하였다(이재형등, 1992b). 호우의 선정 기준 및 방법 등은 선행 연구(이재형등, 1992a)에 기술되어 있다. 모형의 매개상수는 선행연구(이재형등, 1992a, 1992b)에서 분석한 값을 이용하였다. 기상청 관측소의 기상변수는 선정된 호우사상을 토대로 식(17)~식(19)의 계수값을 산정하여 예측하였으며(표 4.1참조) 이 값을 토대로 지형성분과 대기 요동성분을 고려하여 각 강우 관측지점의 기상자료를 보간하였다. 표 4.1에서 RMSE(root mean square error)는 실측 강우강도와 예측 강우강도와의 평균 자승오차이다.

표 4.1 기상변수 예측 모형 계수

| 지점  | 변수             | 계 수            |                |                |                |                |                | RMSE |    |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|----|
|     |                | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | A <sub>4</sub> | A <sub>5</sub> |      | 단위 |
| 전주  | P <sub>o</sub> | 27.7569        | -0.00445       | 0.52249        | 0.95722        | 0.13580        | -0.51575       | 0.29 | mb |
|     | T <sub>d</sub> | 12.4732        | 0.01459        | 0.52401        | 0.01600        | 0.04290        | 0.36139        | 0.52 | °K |
|     | T <sub>o</sub> | 16.8799        | 0.01210        | -0.26462       | 0.01311        | -0.21430       | 1.23491        | 0.55 | °K |
| 대전  | P <sub>o</sub> | 17.5038        | -0.00630       | 0.32250        | 0.97104        | 0.05794        | -0.30317       | 0.24 | mb |
|     | T <sub>d</sub> | 48.0374        | 0.00192        | -0.03320       | -0.00895       | -0.02662       | 0.90804        | 0.30 | °K |
|     | T <sub>o</sub> | 13.5973        | 0.00045        | 0.88599        | -0.01338       | 0.06642        | 0.09225        | 0.62 | °K |
| 추풍령 | P <sub>o</sub> | -47.353        | 0.00702        | 1.41481        | 0.99046        | 0.23348        | -1.30114       | 0.58 | mb |
|     | T <sub>d</sub> | 64.6127        | 0.01008        | -0.32129       | -0.00431       | -0.03721       | 1.12704        | 0.60 | °K |
|     | T <sub>o</sub> | 114.791        | 0.00382        | -0.84007       | -0.03257       | -0.24563       | 1.64163        | 0.38 | °K |

본 연구에서 채택한 대청댐 유역의 강우 관측소는 군북동 9개소이다. 이 강우관측소들의 기상자료 보간은 전주, 대전, 추풍령의 기상청 측후소의 기상자료를 토대로 전술한 절차에 의하여 보간 하였다. 모형 입력 자료는 보간을 통하여 산정한 각지점의 1시간 간격 기상 변수이다. 이 기상자료를 토대로 1시간 간격의 강우강도를 예측하였다. 표 4.2는 임의로 선정된 2개의 호우사상에 대하여 대청댐 유역 강우관측 지점의 강우 예측치와 실측치와의 관계를 수록한것이다.

표 4.2 대청댐 강우 관측지점의 실측 및 예측 강우

| 년월일시 | 1985. 7. 7. 4 - 7. 7. 22 |      |     |      | 1989. 7. 27. 4 - 7. 28. 15 |       |     |      |
|------|--------------------------|------|-----|------|----------------------------|-------|-----|------|
|      | 총강우량 (mm)                |      |     | RMSE | 총강우량 (mm)                  |       |     | RMSE |
|      | 실측                       | 예측   | A   |      | 실측                         | 예측    | A   |      |
| 군 북  | 26.0                     | 28.4 | 2.4 | 0.25 | 51.0                       | 53.1  | 2.1 | 0.41 |
| 보 은  | 18.0                     | 20.6 | 2.6 | 0.18 | 84.0                       | 86.3  | 2.3 | 0.20 |
| 이 원  | 35.0                     | 36.8 | 1.8 | 0.30 | 196.0                      | 188.2 | 7.8 | 1.14 |
| 황 간  | 25.0                     | 27.5 | 2.5 | 0.19 | 52.0                       | 45.4  | 6.6 | 1.04 |
| 금 산  | 52.0                     | 53.0 | 1.0 | 0.27 | 74.0                       | 75.9  | 1.9 | 0.24 |
| 영 동  | 51.0                     | 50.8 | 0.2 | 0.36 | 50.0                       | 51.7  | 1.7 | 0.30 |
| 진 안  | 67.0                     | 66.6 | 0.4 | 0.44 | 58.0                       | 60.5  | 1.5 | 0.18 |
| 무 주  | 63.0                     | 62.7 | 0.3 | 0.38 | 39.0                       | 42.6  | 3.6 | 0.15 |
| 장 수  | 44.0                     | 45.3 | 1.3 | 0.29 | 38.0                       | 41.3  | 3.3 | 0.13 |
| 평 균  |                          |      | 1.4 | 0.29 |                            |       | 3.4 | 0.42 |

\* : A 열의 값은 예보치와 실측치의 절대값 차이임

표 4.2에서 알 수 있듯이 85년 7월 4일과 89년 7월 27일의 경우의 총강우량에 있어서 실측치와 예측치의 차를 평균한 값은 각각 1.4mm와 3.4mm이고 실측 및 예측 강우의 RMSE는 각각 0.29mm/hr와 0.42mm/hr이다.

#### 참 고 문 헌

1. 이재형, 전일권, 조대현(1992a) 지점 호우 모형의 매개변수 동정에 관한 기초연구, 대한 토목학회 논문집, 제 12권 제 2호, pp123-130
2. 이재형, 선우중호, 전일권, 정재성(1992b) 구름 물리학을 토대로한 지점 호우모형 개발, 한국 수문학회지 제 25권 제 4호, pp51-59
3. Georgakakos, K. P. and R. L. Bras.(1984) A hydrologically useful station precipitation model 1. formulation and 2. Case studies formulation, Water Resour.

Res. , Vol.20, No.11, 1984, pp. 1585-1610.

4. Georgakakos, K. P.(1986) A Generalized Stochastic Hydrometeorological Model for Flood and Flash-Flood Forecasting 1. formulation and 2. Case studies, Water Resour. Res. , Vol.22, No.13, 1986, pp. 2083-2106.