

## 구름 물리학을 토대로한 실시간 강우 예보

(The Real-time Rainfall Forecasting based on the Cloud Physics)

이재형\*, 황만하\*\*, 김운중\*\*\*

### 1. 서론

빈번히 발생하는 재해중의 하나가 호우에 의한 것이며, 호우에 의한 막대한 인명 및 경제적 손실을 경감하기 위해서는 정확한 강우 예보가 절실히 요구된다. 이를 위해 이(1991년) 등은 Geogakakos와 Bras의 일차원 지점 강수량 모형이 전주지점 호우모형으로 적합한지를 검토한 바 있다. 그들에 의하면, 지점 강수 모형에 포함된 매개상수를 조절하여 계산 총강우량과 실측 총강우량의 차이를 만족할 만하게 줄일 수는 있으나 계산 강우를 실측 강우에 접근 시키는 데는 한계가 있다는 점을 지적하였다. 이를 해결하기 위해 우적 분포형이 강우 강도에 미치는 영향을 분석하여 강우 모형에 적절한 우적 분포를 제시하였다. 본 연구는 앞서의 연구 결과를 토대로 지점 강우 모형을 실시간 강우 모형으로 변환하여 실제 강우 예보 모형에 적합한지를 평가하는 데 있다. 그렇게 하기 위하여 2장에서 강수 모형을 실시간 모형으로 변환 하는 과정을 기술하고 이 방정식에 필요한 각 매개 변수들의 특성을 3장에서 기술한다. 4장에서는 적용 예를 통하여 제시한 모형이 강우 예보 모형으로 적합한지를 고찰한다.

### 2. 강우 모형의 구성

지점 강수 모형은 고전 수문학 개념으로 구름의 형성과 발달 그리고 낙하과정을 관측소위 단위 면적당의 구름 기주를 고려하여 이 기주를 물이 응결하는 저수지로 간주하여 모형화하는 것이다. 여기서 수분은 단위 기주내의 운저와 운정을 통하여 유출하고 측면으로의 유출입은 없다고 가정된다. 단위 기주내의 수분질량을 저류량  $X$ 로 나타내어 질량 보존법칙을 적용하면 이 대상 체적의 상

---

\* 전북대학교 토목공학과 부교수, \*\* 전북대학교 토목공학과 시간강사,

\*\*\* 조선대학교 토목공학과 부교수

태 방정식을 다음식으로 얻게된다(이, 1991).

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

여기서,  $X$ 는 기주내의 저류량이며, 비선형 함수  $f(u, a_1)$ 는 수분 유입량이고  $h(u, a_0)$ 는 수분 유출을 나타낸다. 또한 입력 벡터  $u$  및 유출 매개변수  $a_0$ 와 비선형 관계인 함수  $h(u, a_0)$ 와  $\phi(u, a_0)$ 는  $X$ 와 선형 관계이다.

여기서  $u^T$ 는 기상학적 입력벡터로 지상에서 측정된 온도  $T_0$ , 압력  $p_0$ , 이슬점 온도  $T_s$ 이다.  $a_1^T$ 는 유입 매개변수 벡터로 운정기압  $p$ 와 구름층의 평균 상승 기류 속도  $v$ 이다.  $a_0^T$ 는 유출 매개변수 벡터로  $a_1$  성분과 구름층의 평균 우적 직경의 역수값  $c$ 이다.

$$u^T = [T_0, p_0, T_s] \quad (2)$$

$$a_1^T = [p, v] \quad (3)$$

$$a_0^T = [p, v, c] \quad (4)$$

운저를 빠져나온 우적은 증발과정을 통하여 지상에 강우로 떨어진다. 이 강우량 역시 지표면 기상 변수를 이용하여 함수 관계로 나타낸다. 그 결과 강우량은 저류량  $X$ 의 선형 함수가 된다.

$$P = \phi(u, a_0)X \quad (5)$$

여기서,  $P$ 는 지상에 내린 강우량을 나타내며  $\phi(u, a_0)$ 는 지표면 기상변수에 종속된다.

결국 지표면 기상학 입력변수( $T_0, p_0, T_s$ )만의 함수인 식(1), (5)를 해결하면 강우량  $P$ 를 구할 수 있는 결정론적 방정식을 얻을 수 있다. 이 식에서 강우 과정과 입력변수의 관측에 따른 오차를 고려하여 일반적인 추계학적 모형을 다음과 같이 설정한다.

$$\frac{dX(t)}{dt} = f(u, a_1, t) - h(u, a_0, t)X(t) + \Gamma(t)W(t) \quad (6)$$

$$P(k) = \phi(u, a_0, k)X(k) + V(k) \quad (7)$$

여기서  $k$ 는 시간 단계를 나타내며  $t = k\Delta t$ 이다.  $\Gamma(t)W(t)$ 은 평균이 0(zero)이며 분산이  $Q(t)$ 인 다음 식과 같은 추계학적 오차이다.

$$Q(t) \delta(t-\tau) = E[\Gamma(t)W(t) \Gamma(\tau)W(\tau)]$$

여기서  $\delta(t-\tau)$ 는 Dirac delta 함수를 나타낸다. 식(7)에서의 관측에 따른 오차항  $V(k)$ 도 또한 평균이 0(zero)이며 다음 분산을 같다고 가정한다.

$$E[V(k)V(1)] = \begin{matrix} R(k) & k=1 \\ 0 & k \neq 1 \end{matrix}$$

입력 오차 성분  $Q(t)$  및  $R(k)$ 는 입력  $u$ 에 대한 함수  $f(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$ ,  $\phi(\cdot)$ 의 선형화에 의해서 계산할 수 있다. 따라서 추계학적 방정식 (6)과 (7)로부터 연속-이산형 필터 방정식은 다음과 같이 구성할 수 있다(Gelb, 1974).

예측 단계:

$$\frac{d\hat{X}(\tau|t)}{d\tau} = f(u, a_1, \tau) - h(u, a_0, \tau)\hat{X}(\tau|t) \quad (8)$$

$$\frac{d\Sigma(\tau|t)}{d\tau} = h(u, a_0, \tau)\Sigma(\tau|t) + \Sigma(\tau|t)h^T(u, a_0, \tau) + Q(\tau) \quad (9)$$

갱신 단계:

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k) [P(k) - \phi(u, a_0, k)\hat{X}(k|k-1)] \quad (10)$$

$$\Sigma(k|k) = [1 - K(k)\phi(u, a_0, k)]\Sigma(k|k-1) \quad (11)$$

여기서, 칼만 이득  $K(k)$ 는 다음과 같다.

$$K(k) = \Sigma(k|k-1)\phi^T(u, a_0, k) [\phi(u, a_0, k)\Sigma(k|k-1)\phi^T(u, a_0, k) + R(k)]^{-1} \quad (12)$$

식 (8) - (12)을 풀기 위해서는 초기조건인  $X(0|0)$   $\Sigma(0|0)$ 가 필요하다. 방정식에서  $X(\tau|t)$ 는 시각  $t$ 까지의 정보로부터 시각  $\tau$ 에서 상태의 최적 추정치를 나타내며 분산의 추정 또한  $\Sigma(\tau|t)$ 에 의해 같은 방법으로 계산된다. 예측은 이전 시각에서의 상태 추정치로부터 식 (8)에 의해 하게되며, 예측에 따른 분산은 식 (9)에 의해 하게 된다. 식 (8)과 (9)를 풀기 위해서는 지상의 온도 ( $T_0$ ), 압력( $p_0$ ), 이슬점 온도( $T_s$ )의 입력이 필요하며 이들 값은 관측 또는 예측에 의해서 얻어지게 된다. 아울러 식(3), (4)의 매개변수  $a_1$ 와  $a_0$ 를 결정할 필요가 있다.

### 3. 모형의 매개변수

모형에 포함된 기본 물리변수는 함수  $f(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$ ,  $\phi(\cdot)$ 등을 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 매개변수화된다. 그렇게 함으로서 매개변수의 시간에 따른 변동 특성은 기상 변수가 대변하게 되며, 매개 상수는 시간과 독립인 특성치가 된다.

유입함수  $f(\cdot)$ 는 지상 및 운정의 수증기 혼합비  $w_0$ 와  $w_1$ , 운저의 평균 상승 기류 속도  $v$ , 습윤 공기의 평균 밀도  $\rho_a$  등으로 식(13)과 같이 구성된다.

$$f(\cdot) = [w_0 - w_1(T_1, p_1)] \cdot \rho_a \cdot v \quad (13)$$

식(13)에 포함된 기상 변수와 매개변수는 식(14)와 같다.

$$f(\cdot) = F(T_0, T_d, P_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \beta) \quad (14)$$

유출함수  $h(\cdot)$ 를 기상 입력 변수와 매개변수의 항으로 구성하면 다음과 같다.

$$h(\cdot) = F(T_0, T_d, P_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{c,t}) \quad (15)$$

또한 강우량 함수  $\phi(\cdot)$ 를 기상 입력 변수와 매개변수의 항으로 구성하면 다음이 된다.

$$\phi(\cdot) = F(T_0, T_d, P_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \beta, \gamma, k, D_{c,t}) \quad (16)$$

함수  $f(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$ ,  $\phi(\cdot)$ 의 자세한 양해적 표현은 이(1992)등에 나타나있다.

#### 4. 적용예

전술한 모형의 적용 여부를 살펴보기 위하여 전주 측후소의 기상 및 강우 자료를 이용하였다. 선행 연구와의 일관성을 견지하기 위하여 1983년 8월 28일 00시 부터 8월 28일 17시까지의 호우(온대 저기압) 기간을 선택하였다. 대상 호우의 지속시간 17시간이며 총 강우량은 80.0mm이다.

모형의 수행에 필요한 매개변수 값은 이(1991) 등이 연구에서 분석한 값을 이용하였다. 그들의 연구 결과 얻어진 제 변수를 요약하면 다음과 같다.

예보 모형에서 자료의 입력은 1시간 간격으로 하였으며, 이때 입력 변수인 지표면 온도  $T_0$ , 지표면 기압  $p_0$ , 이슬점 온도  $T_d$  값은 그림 (1)-(3)에 나타내었다. 본 연구 모형으로 계산한 매시간 예보 강우량과 실측 강우량을 그림 (4)에 비교하여 나타내었다.

그림 (4)에서 알수 있듯이 실측 강우량과 예보 강우량의 편차는 이(1991) 등이 계산한 표준편차 1.76mm 보다 적은 1.56 mm 이내였다.

#### 5. 결 론

구름 물리학을 바탕으로한 실시간 강우 예보 모형을 구성하여 전주 측후소의 1983년 8월 28일의

표 (1) 1986. 8. 28:00-8. 28:17 호우의 매개변수 및 초기 저류량

매	$\epsilon_1 = 0.830E-02$	$\epsilon_2 = 0.679E+05$
개	$\epsilon_3 = 0.100E+01$	$\epsilon_4 = 0.370E-04$
변	$\gamma = 0.100E+01$	$\beta = 0.353E+00$
수	$k = 0.000E+00$	$D_{c,t} = 0.105E-03$
초기 저류량 $X(0) = 0.100E+01$		
총 관측 강우량 = 80.0mm : 계산 강우량 = 73.9mm		

\* : 이(1991년)의 지점 호우 모형에 의한 계산치

기상 자료에 적용하였다. 본 모형의 적용 결과, 예보 강우와 관측 강우와의 표준편차가 1.56mm 정도로 실측 강우에 잘 부합함을 보였다. 본 모형은 이(1990)등이 제시한 「홍수시 저수지 운영을 위한 시우량 모형」에 비해서 다음과 같은 몇가지 장점이 있다 : ① 강우 시점과 강우 종점의 예측이 가능하다. ② 기상 변동에 신속적으로 대응할 수 있다. ③ 유출모형과 연계하기가 보다 용이하다.

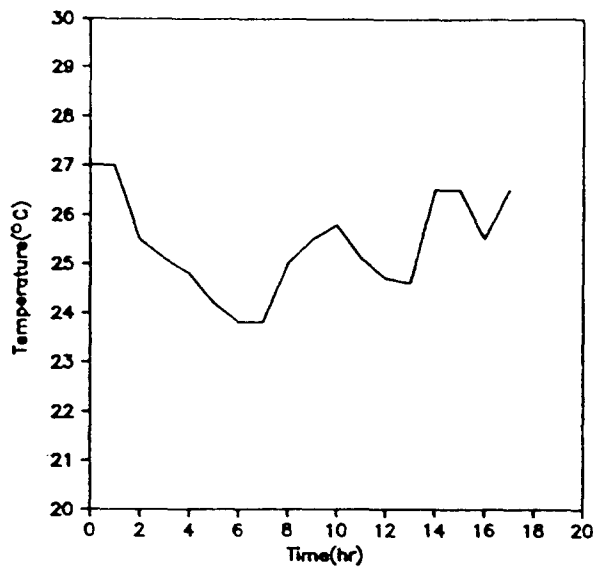


그림 (1) 지표면 온도 T.의 변화

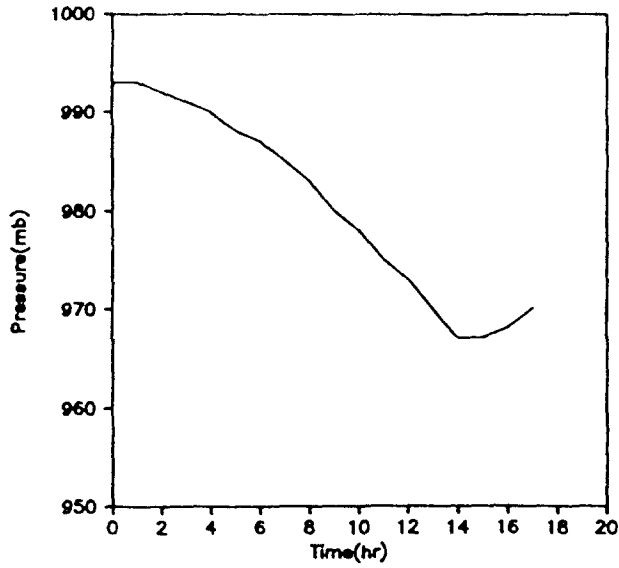


그림 (2) 지표면 기압 p.의 변화

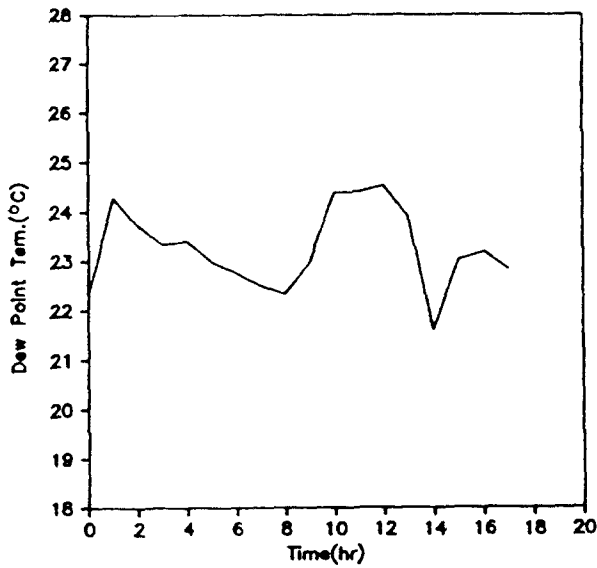


그림 (3) 이슬점 온도 T<sub>d</sub>의 변화

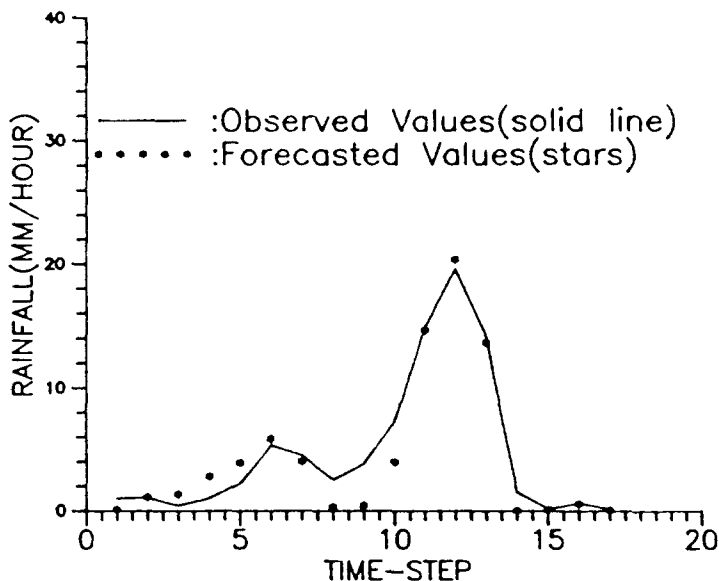


그림 (4) 실측 강우량과 예보 강우량의 비교

### 참 고 문 헌

1. Gelb, A. (Ed.) Applied Optimal Estimation, The M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1974.
2. Fujiwara, M., A cloud structure and the rain efficiency as observed by radars and raindrop recorder, paper presented at International Cloud Physics Conference, Am. Meteorol. Soc., Boulder, Colo, July 26 - 30, 1976.
3. Hooke, R. and T. A. Jeeves., "Direct search solution of numerical and statistical problems", J. Assoc. Comp. Mach., 8, 1961, pp. 212-229.
4. Huff, F. A., "Time distribution of rainfall in heavy storms", Water Resour. Res., Vol. 3, No. 4, 1976, pp. 1007-1019.
5. Georgakakos, K. P. and R. L. Bras., "A hydrologically useful station precipitation model 1. formulation", Water Resour. Res., Vol. 20, No. 11, 1984, pp. 1585-1596.
6. Georgakakos, K. P. and R. L. Bras., "A hydrologically useful station precipitation model 2. Case Studies", Water Resour. Res., Vol. 20, No. 11, 1984, pp. 1957-1610.
7. Georgakakos, K. P., and R. L. Bras A precipitation model and its use in real-time river flow forecasting, Tech. Rep., 286, Ralph M. Parsons Lab., Hydrol. Water Resour. Syst., Dep. Civil Eng., Mass. Inst. Technol., Cambridge, Mass., 1982b.

8. Glahn, H. R., and D. A. Lowry, The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting, *J. Appl. Met.*, 11, 1203-1211, 1972.
9. Johnson, E. R., and R. L. Bras, Multivariate short-term rainfall prediction, *Water Resources Research*, 16(1), 173-185, 1980.
10. Mason, B. J., *The Physics of Clouds*, 2nd ed., Clarendon, Oxford, 1971
11. Georgakakos, K. P. and M. D. Hudlow., "Quantitative precipitation forecast techniques for use in hydrologic forecasting", Bull. Am. Meteorol. Soc., Vol.65, No.11, 1984, pp.1186-1200.
12. Mason, B. J., "The Physics of Clouds", 2nd ed., Clarendon, Oxford, 1971
13. 이재형, 선우중호, 정동국, "홍수시 저수지 운영을 위한 시우량 모형", 한국수문 학회지, 제23권, 3호, 1990, pp.341-350.
14. 이재형, 전일권, 황만하, 장경호, "지점 강우량 모형의 매개변수 동정에 관하여", 대한 토목학회 개요집, 369-372, 1991. 10.
15. 이재형, 선우중호, 전일권, 정재성, "우적 크기 분포형이 강우 강도에 미치는 영향", 한국 수문 학회 개요집, 1992.