

지표 및 위성자료를 토대로한 호우모형에 관한 연구

李 在 炯* · 金 靈 中**

1. 서 론

우리 나라의 강우형태는 6~9월에 2/3가 편중되어 있어 수자원을 효율적으로 활용하는데 어려움이 많다. 홍수로 인한 피해를 줄이고 수자원을 확보하기 위하여 댐으로의 정확한 홍수 유입량을 예측하여 적절한 수문 조작을 하는 것이 매우 중요하다. 국내의 홍수 유입량 예측은 유출 계산에 도움이 될 정도로 섬세하지 못한 기상청의 호우예보에 의존하고 있는 실정이다. 복잡한 물리과정의 이해 부족뿐만 아니라 모형의 불확실성, 관측에서 발생하는 입력자료의 불확실성, 모형변수의 불확실성 등에 의해 실제 현상의 현실성을 충족시키지 못한다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 최근 외국에서는 기상 변동의 물리적인 여건이 반영되는 호우-유출 모형을 제안하여 검증 중에 있다. 국내에서는 전(1994)의 연구에 의해 국내 호우사상에 적합한 호우모형이 개발되었다. 그러나 지상 변수들만의 함수로 모형을 구성함으로써 상층의 기상 변화에 대한 고려가 미흡하다. 따라서 이러한 최근의 연구를 바탕으로 지점 호우 예측 모형을 개발하기 위하여 정지 기상 위성(GMS)의 적외선 자료로부터 획득한 운정온도(TBB)와 지상자료인 온도, 압력, 이슬점온도의 기상자료들을 이용한 호우모형을 구성한다. 모형으로 계산된 값과 우량계 자료와 비교하여 오차를 검증할 수 있는 것으로 가정했다. 이러한 연구는 홍수에 의한 재해 방지는 물론 수자원을 효율적으로 이용하는데 큰 기여가 되리라 기대한다.

2. 강우모형

2.1. 호우 과정과 유입수분질량

운주의 운저로 유입하는 수분 질량 $I(t)$ 는 운저로 유입하는 기류 속에 포함되어 있다. 상승 응결 고도(LCL) 아래에서의 기단은 단열 상승(adiabatic updraft)하고 LCL을 넘어서 상승하는 기단은 위단열 상승(pseudo-adiabatic updraft)하며 상승하는 동안 기단이 가지고 있는 열은 보존되는 것으로 가정한다. Georgakakos와 Bras(1984a)는 상승기류 속도를 보다 구체적으로 상승기류 속도 분포를 제안하였다. 그들은 이 모형이 관측 결과와 흡사하며 운정과 운저의 속도 V_β 는 평균 상승 기류 속도 V 에 비례한다고 가정하였다.

$$V_\beta = \beta \cdot V \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, β 는 매개변수이다. 최대 상승 기류 속도 V_{\max} 는 운주의 중간 고도에서 발생하고 평균

* 전북대학교 공과대학 토목공학과 교 수

** 조선대학교 공과대학 토목공학과 부교수

상승 기류 속도를 갖는 고도의 기압 P' 는 운정과 중심, 운저와 중심사이를 선형으로 가정한다. 기온 T_o , 기압 P_o , 이슬점 온도 T_d 를 갖는 기단의 단위 질량당 응결 수분 질량을 알아야 운주로 유입하는 수분 질량을 산정할 수 있다. 단위 gram당 초기 혼합비(initial mixing rate) W_o 는 입력 변수로부터 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$W_o = W_s(T_d, P_o) = \varepsilon \cdot \frac{e_s(T_d)}{P_o - e_s(T_d)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $\varepsilon=0.622$ 이고, $W_s(T_d, P_o)$ 는 이슬점 온도 T_d , 압력 P_o 를 갖는 기단의 포화 혼합비(saturation mixing ratio)이며 $e_s(T_d)$ 는 순수한 물 표면에 대한 포화 증기압이다.

$P_o \gg e_s(T_d)$ 임으로 혼합비는 다음과 같이 단순화시켜 기온 T_o 에서 포화된 기단이 기압 P_o 를 가질 때의 혼합비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_s(T_o, P_o) = \varepsilon \cdot \frac{A_1 \cdot (T_o - 223.15)^{3.5}}{P_o} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$T_d < T_o$ 이면 기단은 포화되어 있지 않고 $W_o < W_s(T_o, P_o)$ 이다. 이 경우 기단이 초기 온도 T_o , 초기 기압 P_o 를 갖고 있다면 단열 상승하며 기단이 포화되었을 경우에는 위단열 상승하게 된다. 기단이 포화되어 $T_d = T_o$ 가 되면 $W_o = W_s(T_o, P_o)$ 이다. 단열 상승하는 동안 기단의 온도 θ 는 Poisson's 방정식으로 주어지는 일정한 값을 갖는다(Wallace와 Hobbs, 1977). 따라서 온도 θ 를 사용하여 기단이 단열 상승하는 동안 기온 T 와 기압 P 를 알 수 있다.

$$\theta = T_o \cdot \left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{R/c_p} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서, $P_n = 10^5 [kg/(m \cdot sec^2)]$ 이고 $R/c_p = 0.286$ 이다. 이를 다시 압력 변화에 따른 기온의 변화를 산정할 수 있는 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$T = \left(\frac{1}{P_n^{0.286}} \right) \cdot \theta \cdot P^{0.286} \quad \dots\dots\dots (5)$$

단열 상승은 기단이 포화될 때까지 연속적으로 계속된다. 기단이 포화되는 곳 (T_s, P_s)에 대하여 풀면 식 (6)이 된다.

$$T - 223.15 = \left(\frac{W_o \cdot P}{A_1 \cdot \varepsilon} \right)^{0.286} \quad \dots\dots\dots (6)$$

식 (5)와 (6)을 조합하여 식 (7)을 얻는다.

$$\left(\frac{P_s}{P_n} \right)^{0.286} \cdot \left[\theta - \left(\frac{P_n \cdot W_o}{A_1 \cdot \varepsilon} \right)^{0.286} \right] = 223.15 \quad \dots\dots\dots (7)$$

식 (7)의 []항은 0이 되어서는 아니된다. 이 항을 풀기 위하여 기상 변수의 함수로 식 (8)과 같이 택한다.

$$f_1(T_o, P_o, T_d) = \theta - \left(\frac{P_n \cdot W_o}{A_1 \cdot \varepsilon} \right)^{0.286} \quad \dots\dots\dots (8)$$

식 (2)과 식 (4)를 사용하여 식 (9)을 구한다.

$$\left(\frac{P_n \cdot W_o}{A_1 \cdot \varepsilon} \right)^{0.286} = \theta - 223.15 \quad \dots\dots\dots (9)$$

식 (9)와 온위식을 식 (8)에 대입하여 식 (10)를 구한다.

$$f_1(T_o, P_o, T_d) = T_o \left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{0.286} - (T_d - 223.15) \cdot \left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{0.286} \\ = \left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{0.286} \cdot (T_o - T_d + 223.15) \quad \dots\dots\dots (10)$$

식 (10)를 식 (7)에 대입하여 식 (11)을 얻는다.

$$\left(\frac{P_s}{P_o} \right)^{0.286} = \frac{1}{\frac{T_o - T_d}{223.15} + 1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

따라서 식 (11)에 의하여 운저의 기압 P_s 는 식 (12)와 같다.

$$P_s = \left[\frac{1}{\frac{T_o - T_d}{223.15} + 1} \right]^{3.5} \cdot P_o \quad \dots\dots\dots (12)$$

또한 Poisson's 방정식에서 $\left(\frac{T_s}{T_o} \right) = \left(\frac{P_s}{P_o} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$

임으로 운저의 기온 T_s 는 다음과 같이 주어진다.

$$T_s = \left[\frac{1}{\frac{T_o - T_d}{223.15} + 1} \right] \cdot T_o \quad \dots\dots\dots (14)$$

운저 위로 상승하는 기단은 그 속에 함유되어 있는 수분이 응결하기 시작한다. 이 기단은 응결 잠열의 방출에 의하여 기온이 상승할 것이다. 따라서 더 이상의 상승은 단열적이지 않다. 방출된 잠열은 기구를 빠져 나가지 않는다고 가정한다. 그러나 잠열은 기단이 함유하고 있는 열량보다 극히 작기 때문에 잠열 방출로 인한 기단의 온도 변동은 고려 대상이 아니다. 위의 가정에서 상당 온위 θ_e 는 다음과 같다(Wallace와 Hobbs, 1977).

$$\theta_e = \theta \cdot \exp \left[\frac{L(T_s) \cdot W_s(T_s, P_s)}{c_p \cdot T_s} \right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

여기서, $L(T)$ 는 온도 T 에서의 잠열이다. $L(T)$ 는 선형 함수로 다음과 같다(Eagleson, 1970).

$$L(T) = A - B(T - 273.15) \quad \dots\dots\dots (16)$$

여기서, $A = 2.5 \times 10^6 (Jkg^{-1})$, $B = 2.38 \times 10^{-3} (Jkg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1})$ 이다. 온위 θ 를 식 (17)에 대입하고 상당 온위 θ_e 를 사용하여 위단열 상승 과정의 기온 T 와 기압 P 를 알 수 있다. 식 (15)에 T_s 대신 T_t 를 대입하고 이항정리하여 P_t 를 구하면 다음 식 (17)과 같다.

$$P_t = \frac{\varepsilon A_1 (T_t - 223.15)^{3.5} \{A - B(T_t - 273.15)\}}{c_p T_t \ln \left(\frac{\theta_e}{\theta} \right)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

또한 운정의 포화 혼합비 $W_s(T_t, P_t)$ 는 식 (3)를 사용하여 구한다. 단위 질량의 습윤 기단이 위단열 상승하는 동안에 응결함으로서 발생한 혼합비의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta W = W_o - W_s(T_t, P_t) \quad \dots\dots\dots (18)$$

연직 방향 단위 면적 운주에 공급되는 수분 질량은 운주를 통하여 상승하는 유입 기단 속에 포함되어 있다. 이 과정에서 기단은 에너지 보존이 성립하며 주변과 열 교환이 없다고 가정한다.

또한 운저를 통하여 유입하는 기단에 포함되어 있는 수분 질량은 단위 면적 운저의 측면으로 流入하지 않는다고 가정하고 수분 질량 유입율은 다음 식으로 정의한다(Georgak. 와 Bras, 1984a).

$$I = \Delta W \rho_m V dA \quad \dots\dots\dots (19)$$

여기서, ρ_m 은 운주내 수분 기단의 평균 밀도, V 는 운주 내의 평균 상승 기류 속도, dA 는 단위 면적, ΔW 는 운정과 운저의 비습도 차이이다. 식 (19)를 입력 변수의 함수로 요약하면 다음과 같다.

$$I = f(u, a_I) \quad \dots\dots\dots (20)$$

여기서, u 는 입력 변수이며 a_I 는 매개변수로 다음과 같다.

$$u^T = [T_o, P_o, T_d] \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$a_I^T = [P_b, V] \quad \dots\dots\dots (22)$$

여기서, 위 첨자 T 는 행렬 벡터의 전치(transpose)를 나타낸다.

2.2. 모형의 개념과 수분 저류량

수분은 단위 운저의 운저와 운정을 통하여 유출하고 측면으로의 유출입은 없다고 본다. 단위 운주내의 개념적 수분 질량을 저류량 X 로 나타내어 질량 보존 법칙을 적용하면 이 대상 체적의 상태 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{dX}{dt} = I(t) - O_i(t) - O_b(t) \quad \dots\dots\dots (23)$$

여기서, $I(t)$ 는 시각 t 에서 운저의 운저로 유입하는 수분 질량이다. $O_i(t)$ 와 $O_b(t)$ 는 운저의 운정과 운저를 통하여 대상 체적을 빠져 나가는 수분 질량이다. 단위 면적 운저의 수분 저류량 X 는 수운적 최소 직경 0에서 ∞ 까지 갖는 모든 수운적의 수분량을 합한 것이다.

$$X = \int_0^{\infty} \rho_w N(D) \frac{\pi}{6} D^3 dD \quad \dots\dots\dots (24)$$

수분 저류량 X 는 HSD에 종속이다. MIEHSD에 대해서는 Georgakakos와 Bras (1984a,b)가 유도한 바 있으며 전의 연구에서는 다음과 같은 식으로 정리하였다.

$$N_o = \frac{12c^3 \cdot X}{\pi \rho_w Z_c \delta_1 \exp(4.5 \ln^2 \sigma)} \quad \dots\dots\dots (25)$$

운정을 통하여 빠져 나가는 수분 질량 O_i 는 운정에서 유출하는 기류 속에 포함되어 있는 수분 질량이다. 이 유출 수분 질량은 운정 상승 기류 속도 V_β 와 수운적 낙하 속도 $\alpha \cdot D$, 수운적 크기 분포 $N(D)$ 등을 사용하여 O_i 와 O_b 를 구할 수 있다.

2.3. 지표 도달 강우량

운주 이하의 고도에서 수운적은 낙하하는 동안에 증발 과정을 겪기 때문에 지표면에서 관측할 수 있는 강우량은 운저를 빠져 나온 수분량 O_b 의 일부로 정의할 수 있다. 증발 등의 수분

질량 손실과 운저의 상승 기류 속도 등을 고려하여 지표면에 도달하는 강우량 R_a 는 식 (26)과 같이 정의된다.

$$R_a = \int_{D_L}^{+\infty} \frac{\pi}{6} \rho_w D^3 \xi(D) (v_t(D) - V_\beta) N(D) dD \quad \dots\dots\dots (26)$$

강우량 R_a 는 N_v 와 N_d 의 조건에 따라 다르다. 즉, $N_v > N_d$ 이면 지면에 도달하는 최소 수운적 직경 D_L 은 D_c 이고, $N_v < N_d$ 이면 지면에 도달하는 최소 수운적의 크기는 D' 이기 때문이다. 또한 MSSHSD를 토대로 한 경우에 D_L 이 D_∞ 보다 클 것인가 작을 것인가에 따라 운저를 빠져 나오는 HSD가 다르기 때문에 강우량 R_a 도 변한다.

3. 모형의 매개변수 추정

본 연구에서 호우 모형의 매개변수는 운정 압력 P_t , 수운적 직경의 역수 c , 상승 기류 속도 V , 운정과 운저의 상승 기류 속도 추정을 위한 β 와 수운적 크기와 관련한 D_∞ 등이다. 상승 기류 속도 V 를 Sulakvelidze(1969)는 다음과 같이 제안하였다.

$$V = \varepsilon_1 (c_p \cdot \Delta T)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (27)$$

여기서, ε_1 은 매개상수, c_p 는 정압 비열, $\Delta T = T_m - T_s'$ 이다. T_m 은 기압 P' (평균 상승 기류 속도 갖는 고도)를 나타내는 고도의 운주내 기온, T_s' 는 동일 고도의 운주 외부의 기온이다. T_s' 와 T_m 은 Poisson's 방정식과 상당 온위식인 식 (15)를 사용하여 구하면 식 (28)과 같다.

$$T_s' = \frac{T_o}{P_o^{0.286}} \left(\frac{3}{4} P_s + \frac{1}{4} P_t \right)^{0.286} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\theta_e = T_m \left(\frac{P_n}{P'} \right)^{0.286} \exp \left(\frac{L(T_m) W_s(T_m, P')}{c_p \cdot T_m} \right) \quad \dots\dots\dots (29)$$

상승 기류 속도가 크면 구름계(cloud system)의 발달이 왕성하고 운정의 압력이 낮아진다. 반대로 상승 기류 속도가 작으면 구름계의 발달은 완만하고 운정의 압력은 높다. 또한 운정의 압력은 구름계가 대상 지점에 도달하기 전의 기상 상황에 영향을 받는다. 운정 기압 P_t 와 평균 상승 기류 속도 V 의 관계를 조절하여 수운적 평균 직경을 다음과 같이 매개상수화 한다.

$$\frac{1}{c} = \varepsilon_4 \cdot V^n \quad \dots\dots\dots (30)$$

표 1. 매개변수

Case Para.	1(90.6.19.13:00 ~ 6.20.01:00)	2(92.7.16.22:00 ~7.17.12:00)	3(93.6.28.06:00 ~6.29.09:00)	4(93.7.12.01:00 ~7.12.12:00)
ε_1	.109120E-1	.275105E-1	.370371E-1	.295797E-1
ε_4	.476494E-3	.387458E-3	.292440E-4	.955893E-4
β	.253483E+0	.850306E-2	.868635E-2	.290022E-1
관측치(mm)	82.7	176.1	198.1	89.5
계산치(mm)	83.6	146.9	146.9	90.6

여기서, n 과 ε_4 는 매개상수로 각각 무차원과 $\text{sec}^m m^{(1-m)}$ 의 차원을 갖는다. 전주지점에 대한 1989년 이후 연속강우 50mm이상인 4개의 호우사상에 대하여 Case별 호우사상에 대하여 추정된 매개변수와 총 강우량에 대한 실측치와 계산치는 표 1.과 같다.

4. 결 론

지상의 기상자료인 기온, 이슬점 온도, 기압과 위성자료인 TBB 값을 활용하여 전주 지점의 호우예보 모형을 개발하여 본 결과는 다음과 같다.

1. 위성에서 획득한 운정온도를 입력자료로 사용하므로써 모형의 계산식을 간소화 할 수 있다.
2. 본 연구의 모형은 운정온도를 입력자료로 사용하므로써, 기존의 지상 기상변수만을 입력자료로 한 모형에 비하여 호우이동성이 고려된다.
3. 본 연구의 모형은 호우기간동안 총 강우량에 대하여는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으나 각 시간대의 강우강도는 RMSE를 평균강우강도 MRI로 나눈 값이 0.62~0.83 정도이다.
4. 기존의 포화증기압에 관한 회귀식은 운정온도가 223.15 °K 이상에서 만 적용할 수 있게 되어 있으나 위성자료 사용을 위해서는 이 식의 검토 및 수정이 요구된다.

참 고 문 헌

1. 과학기술처(1992), "위성 및 레이더를 이용한 단시간 강우 예보 시스템 개발 연구(III)", 기상연구, pp.1270. ~270.
2. 이재형, 선우중호, 전일권, 정재성(1992b), "구름 물리학을 토대로 한 지점 호우 모형 개발", 한국수문학회지, 제25권, 제4호, pp.51~59.
3. 이재형, 전일권, 조대현(1992a), "지점 호우 모형의 매개상수 동정에 관한 기초 연구", 대한토목학회 논문집, 제25권, 제4호, pp.123~130.
4. 전일권(1994), "강수의 물리과정에 입각한 호우 예측모형에 관한 연구", 전북대학교 박사학위논문, pp.1~117.
5. Bras, R.L.(1990) "Hydrology, An Introduction to Hydrologic Science", Mass. Ins. of Technology.
6. Bras, R.L. and Rodriguez-itrub(1975) "Rainfall - Runoff as Spacial Stochastic Process Data Collection and Synthesis", M.I.T. Rep. 196
7. Georgakakos, K. P. and R. L. Bras(1984a) "A Hydrologically Useful Station Precipitation Model 1. Formulation", W.R.R., Vol. 20, No.11, pp.1585-1596.
8. Georgakakos, K. P. and R. L. Bras(1984b) "A Hydrologically Useful Station Precipitation Model 2. Case studies", W.R.R., Vol. 20, No.11, pp.1597-1610.
9. Sulakvelidze, G.K.(1969) "Rainstorms and Hail", translated from Russian by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
10. Wallace, J. M. and P. V. Hobbs(1977) "Atmospheric Science", An Introductory Survey, Academic Press, New York.