

지점 호우 모형의 매개상수 동정에 관한 기초 연구

The Fundamental Study on the Parameter Identification of Station Storm Model

이재형* · 전일권** · 조대현***

Lee, Jae Hyoung · Ceon, Ir Kweon · Cho, Dae Hyun

Abstract

We check up on whether the one-dimensional station precipitation model of Geogakakos and Bras is suitable to the storm model for Chonju station or not. The fundamental variables of the physically based model consists of the pressure at the cloud top, the hight-averaged updraft velocity (HAUV), and the inverse of the average diameter of the hydrometeors(ADH) at cloud base. And they are parameterized by input variables. The parameters are eastimated by the direct search algorithm of Hooke and Jeeves in this paper. The results show that HAUV and ADH are dominant factors to minimize root mean square error between the calculated and the observed rainfall. In this numerical analysis, the deviation between the calculated and the total observed rainfall is small, otherwise the gap for the time distribution is quite big.

요 지

Geogakakos와 Bras의 일차원 지점 강수량 모형이 전주지점 호우모형으로 적합한지를 검토하였다. 구름 물리학을 토대로 한 이 모형의 기본변수는 운정의 압력, 평균 상승 기류 속도, 운저의 평균 운적 직경의 역수값 등인데, 입력변수에 의하여 매개상수화 된다. 매개상수는 Hooke와 Jeeves의 직접 탐색 알고리즘에 의하여 평가되었다. 그 결과 계산 강우량과 실측 강우량과의 평균 자승 오차를 최소화 하는데 평균 상승 기류 속도와 운저 운적직경에 관계된 매개상수가 크게 기여하였다. 이러한 수치실험에서, 계산 총강우량과 실측 총강우량의 편차는 크지 않았으나 시간분포는 상당한 차이를 보였다.

1. 서 언

기상 재해중 가장 빈번히 발생하는 재해중의 하나가 집중호우에 의한 것이다. 집중호우의 시간과 공간에 따른 특성을 예측 하기란 대단히 어려우나

막대한 인명, 재산 피해를 초래하므로 정확한 예측이 절실히 요구된다. 수문학자들은 이에 대한 해결책의 하나로 강수모형을 구성하여 호우 피해를 줄이고자 노력하고 있다.

강수모형은 수문 통계학에 바탕을 둔 것과 수문 기상학에 바탕을 둔 모형으로 대별된다. 전자는 기상변동 자체를 수용할 수 없고 기상대의 예보에 따라 그 정확성이 좌우되는데, 현재의 기상 예보는 유출

* 정희원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과 부교수

** 정희원 · 전북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 정희원 · 전북 산업대학교 토목공학과 부교수

계산에 도움이 될 정도로 섬세하지 못하다.⁽¹³⁾ 수문 기상학에 바탕을 둔 강우모형 이론은 많은 학자^(2,9,10,12)들이 제안한 바 있으며, 일차원 강우모형을 Srivastava⁽¹¹⁾가 발표한 후, 근래에 들어서 Geogakakos와 Bras⁽⁵⁾는 구름계를 물이 응결하는 저수지로 간주하여 이에 구름 물리학을 적용한 강수모형(GBPM)을 제안하였다. 그들은 지상에서 측정할 수 있는 지상 기온, 지상기압, 이슬점 온도 등의 기상 변수를 이용하여 지점 강수모형을 구성함으로써 기상변화에 신속적으로 대응할 수 있게 했다. Geogalakos와 Hudlow⁽⁷⁾는 이 연구가 수문 과정의 시공간 규모에 적절하며 현실적이고 융통성있는 강수모형 개발에 상당한 진전을 가져왔다고 평한 바 있다. 그러나, 이 모형이 모든 강수형태에 대하여 신속적인 가늠 검증되지 않았다. 따라서, 본 연구는 전주 측후소의 자료를 이용하여 GBPM이 지점 호우모형의 열개로 적합한지를 평가하는 데 있다. 그렇게 하기 위하여 2장에서 모형 방정식을 기술하고 이 방정식을 토대로 3장에서 각 변수들의 매개상수화 및 상수 특성을 개발한다. 4장에서는 수치실험을 하기 위하여 모형 방정식을 차별화하고, 모형 방정식의 매개상수를 동정하는 기법은 5장에서 기술한다. 6장에서는 대상지점의 자료를 선택하고, 앞에서 제시한 모형이 전주 측후소의 호우 열개로 적합한지를 7장에서 고찰한다.

2. 모형 방정식

기류가 수렴하면 상승하게 되고 단열 냉각되어 포화에 이르게 된다. 계속 더 상승하면 습윤 단열 냉각된다. 이 기류내 수증기의 일부는 응결핵 또는 빙정핵과 같은 에어로졸의 도움으로 운적(cloud droplets)이 된다. 운적의 주위에 과포화가 형성되면 운적 표면에 확산-응결(diffusion-condensation)하여 운적은 성장한다. 이렇게 성장한 운적은 낙하도중 충돌-병합(collision-coalescence)과정에 의해 우적 크기로 성장한다. 우적(droplets)이 어느 정도 커지면 우적내의 유체역학적 불안정 때문에 자연적으로 분리하여 여러 개가 되는 분열과정을 겪는다.⁽¹⁴⁾ 위와 같은 강수과정이 일어나는 지상 관측소 위의 단위 면적당의 구름 기주(cloud column)를 고려한다. 고전 수문학 개념으로 이 기주를 응결된 수분의 저수지로

간주할 수 있다. Geogakakos와 Bras^(5,6)는 이러한 개념 모형을 정식화 하였다. 그림 1은 이러한 개념 모형을 보다 구체적으로 설명하기 위한 것이다. I는 모형으로 유입하는 수분질량이고, $O_b(t)$ 와 $O_t(t)$ 는 운저(cloud base)와 운정(cloud top)을 통하여 모형에서 유출하는 수분질량이다. X는 기주 내부에 저류되어 있는 수분의 질량이다. 구름층의 두께는 운저(Z_b)에서 운정(Z_t) 까지이다. 운저와 운정의 압력과 온도는 각각 p_b, p_t, T_b, T_t 이다. 지표면 기상상태는 지상기온(T_0), 지상압력(p_0), 지상 이슬점온도(T_d) 등으로 나타낸다. 그림 1에서 정의한 대상 체적에 수분의 질량보존 원리를 적용하면 다음 식이 된다.

$$\frac{dX}{dt} = I(t) - O_t(t) - O_b(t) \quad (1)$$

Geogakakos와 Bras에 의하면 구름 물리학을 응용하여 이 저수지 모형의 수분 질량 거동을 지표면 온도, 압력, 이슬점 온도 등의 함수로 나타내었다. 운저를 통한 수분 유입 질량 I는 평균 상승 기류 속도와 운저와 운정의 비습도 차, 기주 내부의 습도 평균 밀도 그리고 기주 단면적 등의 함수이다. 운저와 운정을 통한 유출 수분량 O_b 와 O_t 는 수분 저류량 X의 선형 함수로 나타 내었다. 이상의 함수

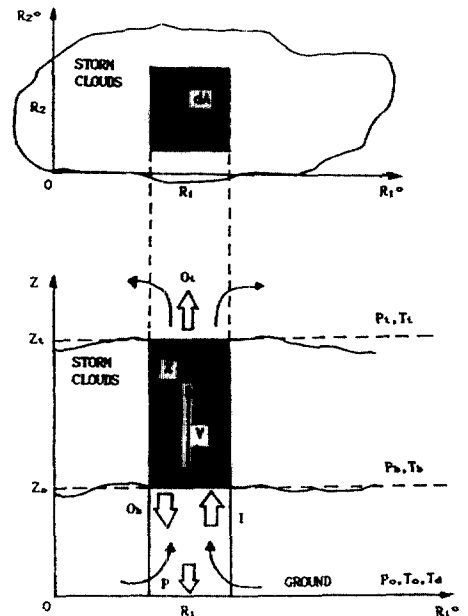


그림 1. 단위면적 기주의 구름계 모형구성도⁽⁵⁾

관계를 고려하여, 수분 질량보존 상태 방정식 (1)을 다음과 같이 규정할 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = f(u, a_1) - h(u, a_0) \cdot X \quad (2)$$

여기서, $f(u, a_1)$ 는 유입 수분질량을, $h(u, a_0) \cdot X$ 는 기주 내를 떠나는 수분질량을 지표면 기상 변수와 매개 변수의 함수로 나타낸 것이다.⁽⁵⁾ 변수 u 는 지표면 기온 T_0 , 기압 p_0 , 이슬점온도 T_d 이다. a_1 는 유입매개변수로 운정기압 p_1 과 구름층의 평균 상승 기류 속도(hight-averaged updraft velocity) v 이다. a_0 는 유출 매개변수로 그 성분은 a_1 의 성분과 구름층의 평균 운적직경의 역수값 c , 운정과 운저의 운적 직경의 비 γ 이다.⁽⁵⁾

운저를 빠져나온 우적은 증발과정을 겪으면서 지상에 강우로 떨어진다. 이 강우량 역시 지표면 기상변수를 이용하여 함수 관계로 나타낼 수 있다. 그 결과 강우량은 저류량 X 의 선형 함수가 된다.

$$R = \phi(u, a_0) \cdot X \quad (3)$$

여기서, R 는 지상에 내린 강우량을 나타내며 ϕ 는 지표면 기상변수에 종속되며 비선형 함수이다. 식 (2)와 식 (3)에서 유입 매개변수 a_1 와 유출 매개변수 a_0 만을 제외 하고는 독립변수는 기상 변수 뿐이다.

3. 매개변수의 매개상수화

모형에 포함된 기본 물리변수는 평균 상승 기류 속도, 운정 기압, 운적 크기 분포 등의 유입 및 유출 매개변수이다. 구름 물리학 이론과 관측 자료에 의해 확립된 관계식을 토대로 이 매개변수를 매개상수화 할 필요가 있다. 그렇게 함으로서 매개변수의 시간에 따른 변동 특성은 기상 변수가 대변하게 되며, 매개 상수는 시간과 독립인 특성치가 된다.

3.1 평균 상승 기류 속도

수렴한 기류는 연속 법칙에 의해 상승한다. 상승한 기류는 운저에서 잠열의 방출, 구름층내에서 강수 입자의 낙하 및 운정 까지의 단열 냉각, 운정에서 방출된 운적의 증발 등의 과정을 겪으므로 그 속도 변화가 있게 된다.⁽¹⁴⁾ 관측치를 토대로 기상학자⁽¹¹⁾

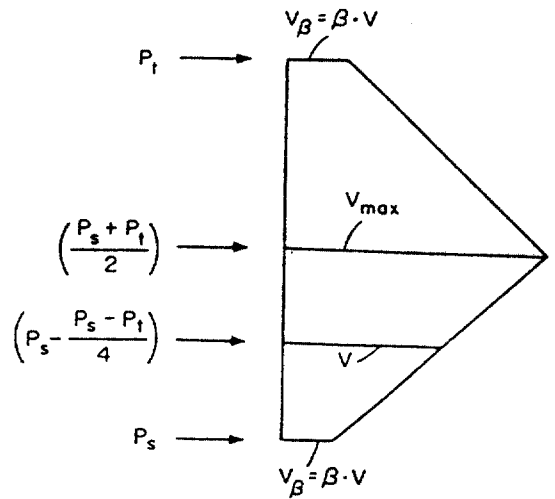


그림 2. 압력 고도와 상승 기류 속도 분포⁽⁵⁾

들은 고도에 따른 기류상승속도 분포를 제시한 바 있다. 그들에 의하면 상승 기류 속도 분포가 운저와 지상 약 9-10 Km 부근에서 속도가 0에 가깝고 그 중간 부근에서 최대가 되는 포물선 형태를 갖는다는 것이다. 한편, Geogakakos와 Bras는 그림 2와 같이 보다 구체적으로 상승 기류 속도 분포모형을 제안 하였다. 그들은 이 모형이 관측 결과와 흡사하며 운정과 운저의 속도 v 가 평균 상승 기류 속도 v_β 에 비해 한다고 하였다.

$$v_\beta = \beta \cdot v \quad (4)$$

Harris⁽⁸⁾는 기주내의 수분량과 강우량, 공기 입자 부력의 함수로 평균 상승 기류 속도 v 를 정의한 바 있다. 그의 연구 결과는 앞 장에서 알 수 있는 바와 같이 저류량과 강우량이 종속 변수로 되어 있어 본 연구에는 도움이 되지 못한다. 한편, Sulakvelidze⁽¹²⁾는 상승 기류 속도 v 가 부력의 원인이 되는 기주 내외의 온도차 ΔT 와 정압비열 c_p 의 적의 평방근에 비례한다고 하였다.

$$v = \epsilon_1(c_p \cdot \Delta T)^{0.5} \quad (5)$$

윗 식에서, 비례상수 ϵ_1 은 무차원이다. 온도차 ΔT 는 기상변수 벡터 u 에 의하여 결정된다.^(5,6) 평균 기류 상승 속도 v 는 기상 변동 특성에 지배된다.

3.2 운정기압

상승 기류 속도가 크면 구름계의 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. Geogakakos와 Bras에 의하면 발달하는 구름계의 관측 자료를 토대로 운정기압 p_t 를 기류 상승 속도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{p - p_t}{e_2 - p_t} = \frac{1}{1 + \epsilon_3 \cdot v} \quad (6)$$

여기서, p_t 는 운정 기압 p_t 를 얻을 수 있는 가장 낮은 기압으로 200 mb로 가정했다. 한편 e_2 는 구름계가 대상 지점에 도달하기 전의 대상지점 기상 상황을 반영한 매개상수로 압력의 차원을 갖는다. ϵ_3 는 속도의 역수 차원을 가지며 운정 기압 p_t 와 평균 상승 기류 속도 v 의 관계를 조절하게 된다. 식 (6)은 평균 상승 기류 속도 v 가 0이면 운정 기압 p_t 는 e_2 가 되는 경향이 있으며, 평균 상승 기류 속도 v 가 강해지면 상기식 만큼 운정 기압 p_t 는 p_t 이 되는 경향이 있다.

3.3 운적 크기 분포

운적은 응결, 충돌, 병합 과정을 거치면서 그 직경의 변화가 있게 된다. 운적의 고도에 따른 평균 직경 크기는 운정에서 비교적 작고 운저에서 크다. 따라서, 기주내의 수분량은 고도에 따라 다르다. 이러한 운적 크기 분포 모형은 Mason⁽⁹⁾, Pruppacher와 Klett⁽¹⁰⁾ 등에 의해 제시된 바 있다. 그들은 기주의 단위 체적당 운적의 수가 최대치에 빠르게 증가하였다가 느리게 감소하는 특성을 이용하여 지수 함수를 채용하였다.

$$N(D) = N_0 \cdot \exp(-cD) \quad (7)$$

여기서, N_0 는 지표면 기상변수의 함수로 표시되는 매개변수이다. D 는 운적 직경, c 는 주어진 고도에서 운적 직경의 역수이다. 이 c 의 분포를 측정 자료로부터 규정하기란 쉽지 않다. Geogakakos와 Bras에 의하면 c 를 고도의 선형 함수로 가정할 수 있다.

$$c(z) = c_1 + \frac{Z}{Z_c} (c_u - c_1) \quad (8)$$

$$c_u = \gamma \cdot c_1 \quad (\gamma \geq 1) \quad (9)$$

여기서, γ 는 비례상수 이고 c_u 와 c_1 은 각각 운정과 운저에서 운적 직경의 역수이다. Z 는 운저에서부터 임의의 고도이고 Z_c 는 구름층 두께이다.

한편, Pruppacher와 Klett⁽¹⁰⁾에 의하면 상승 기류 속도가 강하면 강할수록 운저에서 반경이 큰 운적 수가 증가한다. 이는 상승 기류 속도가 크면 클수록 운적 평균직경이 커짐을 나타낸다.

$$\frac{1}{c_1} = \epsilon_4 \cdot v_k \quad (10)$$

여기서, k 는 매개변수로서 무차원 수이고 ϵ_4 는 $\text{sec}^k \text{m}^{(1-k)}$ 차원을 갖는다.

4. 모형의 차별화

강우의 개념 모형은 대상 표면에서 유입 및 유출하는 수분에 관련한 변수들을 포함하고 있고, 변수들을 지상의 기상 변수에 의해 매개상수화했다. 결국 저류 상태 방정식 (2)는 지상의 기상 변수를 입력으로 하는 미지 상수형 모형으로 변환 될 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = f_1(u; \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) - h_1(u; \epsilon_4, k, \gamma, \beta) \cdot X \quad (11)$$

윗 식에서, 기주내 저류량 X 와 지상 기상 변수 u 를 제외한 나머지는 상수이다. 함수 f_1 과 h_1 이 시간 t 에 대하여 양해적으로 표현되지 않기 때문에 이 미분 방정식의 해를 해석적으로 구하는데는 어려움이 있다. 대상 체적내의 구름 물리과정을 손상시키지 않는 범위내에서 차분법을 그 대안으로 채용할 수 있다. 식 (11)을 전향 차분법 (forward difference method)으로 차분하면 다음이 된다.

$$X(t) = X(t-1) + [f_1(u(t-1); \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) - h_1(u(t-1); \epsilon_4, k, \gamma, \beta) \cdot X(t-1)] \Delta t + 0 \quad (12)$$

$$X(0) = X_0 \quad (13)$$

여기서, 0는 차분으로 발생하는 오차이다. 초기 저류량 X 가 주어지면 식 (12)에 의하여 순차적으로 저류량 X 를 구할 수 있다. 시각 $t-1$ 에서의 저류

량이 구해지면, 시각 t에서의 강우량은 식 (3)에 의하여 계산할 수 있다.

$$R_c(t) = (u(t-1); \epsilon_4, k\gamma, \beta) \{X(t-1) + [(f_1(u(t-1), a_1) - h_1(u(t-1), a_0))X(t-1)]\Delta t\} \quad (14)$$

시각 t에서의 강우량 $R_c(t)$ 는 시각 t-1에서의 입력 변수와 매개상수들만의 함수임을 알 수 있다.

$$R_c(t) = F(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, k, \gamma, \beta, u(t-1), X(t-1)) \quad (15)$$

상기 식에서 알 수 있는 바와 같이 적절한 매개상수 값들이 주어지면 지상에서 실측한 기압, 기온, 이슬점 온도 등으로 부터 강우량을 계산할 수 있다. 역으로 모형의 출력인 계산 강우량과 실측 강우량의 차이를 줄일 수 있도록 매개상수를 동정할 수도 있다.

5. 매개상수 동정기법

강수 모형이 강수 과정을 적절하게 설명한다고 하면, 계산 강우량이 관측 강우량에 접근해야 하고 그러한 매개상수가 존재해야 한다. 그러한 사실을 확인하기 위하여 각 계산 시각에서 계산 강우량과 실측 강우량과의 차이를 최소화 하도록 매개상수를 평가해 볼 수 있다. 식 (15)의 F는 비선형 함수이다. 따라서, 각 계산 시각에서 계산 강우량 R_c 와 실측 강우량 R_o 와의 평균 자승 오차 G를 줄이려면 비선형 계획법의 범주에 들어가는 최적화 기법을 응용해야 한다. 본 연구에서는 Hooke and Jeeves⁽³⁾가 제안한 직접 탐색 알고리즘을 이용하였다. 그 절차는 다음과 같다. 모형식의 목적함수를 다음과 같이 설정한다

$$\text{Min } G(Y) = \text{Min} \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [R_c(y, \Delta t \cdot i) - R_o(\Delta t \cdot i)]^2 \right\}^{1/2} \quad (16)$$

여기서, R_c 와 R_o 는 계산 강우량과 실측 강우량이다. y는 동정 하고자 하는 매개상수($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, k, \gamma, \beta$)

• Y이다. Δt 는 시간 간격이다. 즉, i=0 은 강우의 개시 시점을 나타내며 i=m은 강우의 종료 시점이다. 목적함수 식 (16)을 최소로 하는 매개상수를 찾기 위해서는 우선 각 상수의 명목값(nominal value)을 적절히 선택하여 목적함수 값을 계산한다. 식 (17)과 같은 형태로 y값을 진행폭 만큼 변화시켜 목적함수 값이 줄어드는지를 검사한다.

$$y_j^{i+1} = y_j^{i+1} + \omega(y_j^{i+1} - y_j^i) \quad (17)$$

여기서, j는 반복지수, o는 일시적인 값을 나타내며, ω 는 가중치이다. 만일 감소되지 않았을 경우에는 진행폭을 줄이고 다시 추적한다. 감소되었다면 이전의 값을 이용하여 y 값을 동정해 간다. 이와 같은 절차로 j와 j+1에서 y값의 증감량이 허용범위 내에 들 때까지 반복한다.

6. 대상지점 및 자료의 선정

설정된 모형이 전주 측후소의 호우모형으로 적합한지의 검증을 실시한다. 호우모형이 호우과정의 열개로서 적절하다고 하면 식 (16)에서 정의한 목적함수 G값이 충분히 작게되는 매개상수가 존재해야 한다. 검증 대상 지점인 전주 측후소는 1919년 1월 1일부터 기상 관측을 시작하였다. 그 위치는 북위 35° 49', 동경 127°09'이며 평균 해면상 고도는 51.3 m이다. 전주 측후소의 강우량 계측기의 성능은 표 1에 나타난 바와 같다.

기록 방법상의 일관성을 견지하기 위하여 1980-1990년을 검증 기간으로 선정하였다. 이 기간 동안의 강우 중에서 호우사상 후보 조건은 1)실무에서 기준으로 삼고 있는 80 mm 이상의 독립호우 일것; 2) 무강우 지속시간은 Huff⁽⁴⁾가 제안한 6시간을 기준으로 하되, 강우의 시작과 끝에서 1 mm 이하의 강우가 2-3시간 지속되는 경우는 무강우 기간으로 간주한다 등이다. 이상의 기준에 의하여 선정한 자료는 표 2와 같다.

표 1. 기상관측 기구와 분해능

명 칭	관측기구	분해능	명 칭	관측기구	분해능
강우량	싸이펀식 자기우량계	± 0.2 mm	지표기압	자기 기압계	± 1.0 mb
지표온도	바이메탈 자기온도계	± 0.5°C	이슬점온도	바이메탈자기 온도계	± 0.5°C

표 2. 호우 사상 목록

순서	강 우		총강우량	기온		이슬점온도		현지기압		호우 원인
	시점시각	종점시각		최대	최소	최대	최소	최대	최소	
1	1980년		163.0	28.8	22.2	23.5	19.2	999.2	992.5	PA
	7.28:17:10	7.30:05:10								
2	1981년		80.0	30.5	23.9	25.9	22.7	1007.0	995.6	CL
	8. 2:15:20	8. 4:06:10								
3	8.29:12:10	8.30:22:30	182.0	26.6	23.1	23.5	21.7	1003.4	998.0	CL
4	1983년		106.0	23.9	22.0	22.0	19.8	999.5	994.9	CL
	7.21:18:20	7.22:13:50								
5	1984년		167.0	27.7	21.0	23.3	18.7	1004.7	999.2	PA
	7. 4:09:00	7. 5:13:20								
6	7. 6:21:50	7. 7:17:40	127.0	25.3	22.0	22.3	20.4	1003.9	1001.0	PA
7	1985년		121.0	24.9	20.6	22.5	19.0	1003.0	998.9	PA
	7. 6:10:30	7. 7:18:40								
8	1986년		145.0	23.0	21.9	21.8	19.0	1003.5	993.7	TL
	6.24:08:00	6.25:08:00								
9	8.28:00:30	8.29:06:50	122.0	27.3	19.4	24.0	18.8	993.0	966.2	TL
10	1987년		126.0	28.0	20.4	24.9	17.9	1001.6	996.1	TL
	7.22:04:20	7.23:18:50								
11	8. 4:07:00	8. 4:23:30	102.0	28.3	24.9	24.0	23.5	997.9	992.7	CL
12	8.28:04:30	8.28:20:10	104.0	28.5	22.8	23.9	19.7	1000.7	996.3	TL
13	1990년		112.0	26.9	21.1	21.9	19.4	1003.7	999.2	CL
	6.19:12:20	6.20:21:00								

* 강우량:(mm), 온도:(°C), PA:장마전선, TL:열대저기압, CL:온대저기압

선정된 자료를 호우별로 대별해 보면 온대 저기압에 의한 것이 5회 장마전선과 태풍에 의한 것이 각각 4회로 그 빈도는 거의 비슷하다.

7. 수치 실험

선택한 호우에 대하여 GBPM이 전주 측후소 호우모형으로 적합한지를 판단하기 위하여 수치 실험을 실시하였다. 수치 실험에 이용한 저류 방정식 (12)는 오차를 포함하고 있다. 즉, Δt 를 크게 취하면 해가 발산하고 Δt 를 작게 취하면 해가 잘 수렴 하지만 계산량이 많아진다. 또한 Δt 를 너무 작게 취하면 계산기의 절삭 오차 때문에 오히려 해가 발산할 수 있다. 매개상수 평가를 실시하기 전에 적절한 시간 간격 Δt 를 결정하기 위하여 명목 매개상수에 대하여

저류량 $X(t)$ 에 포함된 오차 동향을 관찰하였다. 이는 장마전선, 온대 저기압, 열대 저기압 각각의 호우 원인에 대하여 수행하였다. 모형에 포함된 매개상수의 명목값은 Geogakakos와 Bras가 제시한 대표값을 이용하였다. 오차 동향결과 기록지의 최소 눈금 간격인 10분으로 저류량 $X(t)$ 를 정밀하게 계산할 수 있어서 이 값을 Δt 값으로 채택하였다. 비교 기준으로 사용되는 실측 강우라고 하는 단일 사상에 비해서 동정해야 하는 매개상수는 8개이다. 여기서, 우려되는 것은 물리적으로 비현실적인 값이 얻어질 수 있다는 점이다. 이러한 정보 전이현상을 줄이기 위하여 모형에 포함된 모든 매개상수의 동정을 동시에 수행하지 않았다. 하나씩 순차적으로 실시하여 하여 목적함수 G 값을 최소로 하는데 지배적인 상수를 식별해냈다. 그림 3에 그 결과만을 도시하였다.

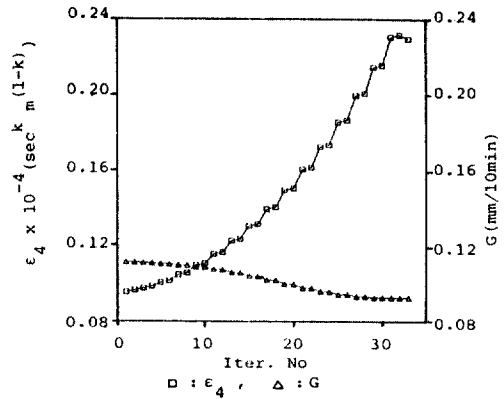
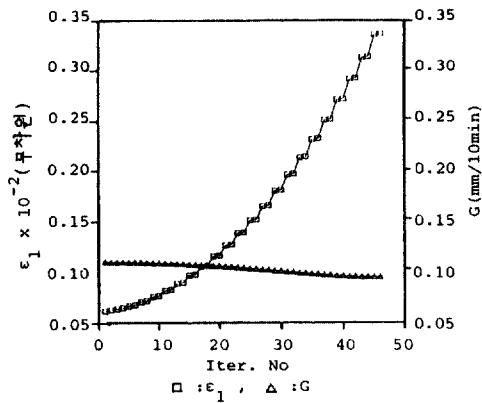


그림 3. ϵ_1 및 ϵ_4 의 변동에 따른 최소 자승 오차

표 3. 매개상수 동정값(ϵ_1 : 무차원, ϵ_4 : $\text{sec}^k \cdot \text{m}^{(1-k)}$, X_0 : kg/m^3)

호우번호	매개상수 초기치			① 평균강우 강도 mm/10 min	② 평균자승 오차 mm/10 min	③ ①-② mm/10 min	④ 총실측 강우량 mm	⑤ 총계산 강우량 mm	④-⑤ mm	호우원인
	ϵ_1 $\times 10^{-3}$	ϵ_4 $\times 10^{-5}$	X_0							
1	3.95	8.45	0.2	0.075	0.135	-0.060	163.0	153.0	10.0	PA
2	3.91	9.02	0.2	0.098	0.243	-0.145	167.0	142.0	25.0	PA
3	4.94	10.49	0.2	0.100	0.233	-0.133	127.0	140.0	-13.0	PA
4	3.90	8.90	0.2	0.100	0.143	-0.043	121.0	138.0	-17.0	PA
1	3.19	7.24	0.3	0.034	0.161	-0.127	80.0	89.0	-9.0	CL
2	5.09	8.67	0.3	0.088	0.194	-0.106	182.0	184.0	-2.0	CL
3	5.15	9.30	0.3	0.090	0.025	0.065	106.0	123.0	-17.0	CL
4	6.16	6.95	0.3	0.100	0.283	-0.198	102.0	103.0	-1.0	CL
5	6.04	5.24	0.3	0.057	0.091	-0.034	112.0	127.0	-15.0	CL
1	5.23	6.10	0.6	0.100	0.087	0.013	145.0	149.0	-4.0	TL
2	3.81	8.36	0.6	0.100	0.105	-0.005	122.0	142.0	-20.0	TL
3	4.15	8.55	0.6	0.100	0.089	0.011	126.0	151.0	-25.0	TL
4	7.14	8.49	0.6	0.110	0.267	-0.157	104.0	95.0	9.0	TL

*PA:장마전선, TL:열대저기압, CL:온대저기압

상승 기류 속도 매개상수인 ϵ_1 과 운저 운적 직경 매개상수 ϵ_4 를 제외한 다른 매개상수의 변화는 목적함수에 거의 영향을 미치지 못하였다. 이 상수값들을 Geogakakos와 Bras의 연구 결과를 참조하여 상수로 고정하고 평균 상승 기류 속도 매개상수인 ϵ_1 과 운저 운적 직경 매개상수 ϵ_4 만을 대상으로 다시

동정 하였다. 이상의 계산 절차를 각호우에 대하여 실시한 결과를 표 3에 나타 내었다.

본 수치실험 결과로 얻은 평균 상승 기류 속도 매개상수인 ϵ_1 값의 변동 범위($3.19-7.14 \times 10^{-3}$)는 Geogakakos와 Bras가 계산한 변동 범위($1.5-2.5 \times 10^{-3}$)와 차수가 같고, 운저의 운적 매개상수인 ϵ_4 값의

변동 범위($5.24-10.49 \times 10^{-5}$) 역시 Geogakakos와 Bras가 계산한 범위($3.0-5.5 \times 10^{-5}$)와 차수가 같다. 각 계산 시각에서 계산한 강우량과 실측 강우량과의 평균 자승 오차를 호우의 발생 원인별로 보면 장마전선의 경우가 0.19 mm/10 min, 온대 저기압의 경우가 0.15 mm/10 min, 태풍의 경우가 0.14 mm/10 min 정도로 그 값의 차이는 미소 하다.

8. 결 론

GBPM이 전주 측후소의 호우 모형으로 적합한지를 파악하기 위하여 매개상수의 평가 실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 본 모형의 주요 매개상수는 ϵ_1 과 ϵ_4 이며 그 범위는 각각 $3.19-7.14 \times 10^{-3}$ 와 $5.24-10.2 \times 10^{-5}$ 이다.

2) 평균 자승 오차의 호우 원인별 차이가 뚜렷하지 않은 것으로 부터 본 모형이 호우 원인과 독립이라고 추론할 수 있다.

3) 본 모형은 매개상수를 조절하여 계산 총강우량과 실측 총강우량의 차이를 10 mm 정도로 줄일 수 있다. 그러나 매개상수 조정으로 계산 강우강도와 관측 강우강도와의 평균 자승 오차가 평균 강우 강도 차수 이하로 감소되지는 않았다. 따라서, GBPM은 전주 지점 호우 모형의 열개로는 미흡한 것으로 판단할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Battan, L. J. and J. B. Theiss., "Observation of vertical motions and particle sizes in a thunderstorm", *J. Atmos. Sci.* 23, 1966, pp. 78-87.
2. Braham, R.R., "Meteorological bases for precipitation development", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 49,

- 1968, pp. 343-353.
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. Geogakakos, 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. Geogakakos, 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. Geogakakos, 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.
8. Harris, F.L., "Further studies of the effects of precipitation on convection", *McGill University, Stormy Weather Group Rep.* MW-60, 1969, pp. 25.
9. Mason, B. J., "The Physics of Clouds", 2nd ed., Clarendon, Oxford, 1971
10. Pruppacher, H. R. and J. D. Klett., "Microphysics of Clouds and Precipitation", D. Reidal, Boston, Mass., 1978.
11. Srivastava, R. C., "A study of the effect of precipitation on cumulus dynamics", *J. Atmos. Sci.* 24, 1967, pp. 36-45.
12. Sulakvelized, G.K., "Rainstorm and Hail", *Translated from Russian by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.* 1969.
13. 이재형, 선우중호, 정동국, "홍수시 저수지 운영을 위한 시우량 모형", *한국수문학회지*, 제 23권, 3호, 1990, pp. 341-350.
14. 이승만, "비의형성과정", *한국수문학회지*, 제 29회 수공학 연구발표회 특별초청강의, 1987.

(接受 : 1992. 3. 5)