

〈論 文〉

홍수시 저수지운영을 위한 시우량 모형

Hyetograph model for Reservoir operation during Flash flood)

이 재 형\* · 선 우 중 호\*\* · 정 동 국\*\*\*  
 Lee, Jae Hyoung Sonu, Jung Ho Chung, Dong Kug

Abstract

Precise run-off forecasting depends on the ability to predict quantitative rainfall intensity. This study suggests a stochastic model for 1 hour order rainfall prediction. The model simultaneously predicts rainfall intensity at all telemetered rain-gauge locations. All model parameters, velocity and direction of storm movement, radial spectrum, dimensionless time distribution of rainfall, are estimated from telemetered and historical data for the basin being predicted. Also the estimated parameters are based on the previous study. The results are the influence of dimensionless time distributions on the prediction and the model on run-off.

요 지

정확한 유출수문곡선의 예보는 강우강도의 예측능력에 좌우된다. 1시간 정도의 단기 강우예측을 위한 추계학적인 강우모형을 개발하여 제시하는 것이 연구과제이다. 개발하고자 하는 모형은 다지점에서 동시에 강우강도를 예상 또는 예측할 수 있는 능력이 있다. 모형에 필요한 매개변수는 TM자료를 비롯하여 과거에 축적된 자료들로 부터 평가된 값을 이용한다. 모형은 강우진행속도, 환상스펙트럼, 무차원 시간분포 등이 선행연구 결과를 토대로 한다. 선택한 무차원 시간분포가 예측에 미치는 영향과 예측모형이 유출수문곡선에 미치는 영향을 분석한다.

1. 모형의 선정

홍수기의 실시간 강우예보에 대해서는 두 측면이 있다. 하나는 기상학적측면이고 또 하나는 수문학적인 측면이다. 수문학적인 방법은 강우량

시계열의 합성에는 강한 반면 예보에는 미약하여 단기예보에 한정된다. 이와는 반대로 기상학적인 방법은 양적인 예보에 취약하나 장기예보가 가능하다. 본 연구에서는 강우총량예보는 기상대에 의존하고 수문학적인 접근법을 토대로 시우량모

\* 전북대학교 토목공학과 부 교수 이 재 형  
 \*\* 서울대학교 토목공학과 교수 선 우 중 호  
 \*\*\*한남대학교 토목공학과 전임강사 정 동 국

형 선정을 모색하려 한다.

수문학적 방법의 범주에 들어가는 강우 예보법을 대별하면 시계열법, 조건부 확률법, 공분산법 등이 있다. Jamieson과 Wilkinson<sup>6</sup> (1972)은 1차 AR의 단기예보 모형을 제안했는데 이 모형이 우량 시계열의 45% 정도밖에 대변할 수 없다는 것을 시인했다. MA모형, Box & Jenkins<sup>7</sup>의 ARIMA 모형등이 가능하지만 이러한 시계열 모형은 강우도래 시각등의 외양이나 호우사상의 내부구조에 대한 별도의 모형을 필요로 할뿐 아니라 실제조건을 대표하는 매개변수가 포함되어 있지 못하다는 것이다. 설사 어떤 호우 도래 이전의 상세한 강우기록이 충분하더라도 평가된 매개변수의 통계적 의미란 보잘것 없다.

Billuart and Tourasse<sup>1</sup>가 보고한 것처럼 실시간 홍수예보를 위한 개념모형을 개발하거나 운영하려 할때 두가지 난제에 직면하게 된다. 첫째는 텔레미터로 전송되는 강우자료 계측지점이 조밀하지 못하다는 점이다. 두번째는 실패할만한 단기예보 부족에 기인한 것이다. 두번째 문제의 해결은 J.D. Creutin<sup>2</sup> 등이 어느 정도 성과를 거두었다.

그에 의하면 강우합성 모형을 가동하는동안 다가올 시각에 어떤 호우가 발생할 것인가를 예측하려고 한다면 현재까지의 과제로부터 합성모델형을 추정하는 대신 현재까지의 발생을 전제로한 조건부 추계학적 호우모델을 설정한다는 것이다. 이전의 모든 강우상황이 시스템내에 기억되고 모든 통계적 특징치들이 과거와 현재를 참조로 하여 추정되며 이 모형에 의하여 미래의 값들이 예측된다.

Creutin<sup>2</sup> 등이 제안한 모형의 단점은 한지점에 대해서는 신뢰할 만한 결과를 줄수있으나 호우의 공간구조를 반영할 수 없는 취약점이 있다. 이러한 결점을 보완해주는 방법은 과거자료의 공간공분산 구조가 보존되도록 하는 모형이다. 대상지역의 모든 지점의 강우 현상을 특징짓도록 발생시키려는 노력의 결과 공간-다차원 모형을 제

안하게 되었다고 할 수 있는데 이러한 호우 합성 방법은 Croley<sup>3</sup>가 Raltson Creek 유역에 적용한 바 있다.

위의 첫번째 문제는 Johnson<sup>4</sup> 등이 관심을 가지고 연구하고 있다. 그들은 대기 경계층내의 물리적여건을 고려치않고, 비구름의 노령화도 고려치않은 모형을 제안하였다. 시공상에서 1차통계치가 보존되는 비정상, 다차원 강우 발생모델을 설정함에 있어, 그들은 합리적인 물리적 가정들을 토대로 하였다. 다시말하면 추계학적 모형에 물리적의미를 부여하였으며, Morkov형 상태 방정식과 계측방정식을 이용해서 Kalman 예측모형을 구성하였다.

Creutin이 제안한 방법은 지점 강우량을 예측하는데는 매력적인 힘을 가지고 있으나 다지점 계측 시스템에서는 상호관계 규정이 어렵다. 이러한 취약점을 보완한것이 Bras(1976)가 제안한 방법이라고 할 수 있는데, 아직 실행상의 문제점들이 많다. 본 연구에서는 Creutin 방법과 Bras의 방법을 절충하는 모형을 선택했다.

## 2. 예보모형 개요

어떤 확률 구조를 갖는 무작위 변수를 창출하는 것을 발생이라고 정의하면 강우발생은 강우사상이 갖는 확률구조를 설정하는 것이 호우를 발생함에 있어서 선결과제라고 할 수 있다. Bras<sup>5</sup> 등은 공간개념을 기준으로 기존강우량 모형을 지점 우량모형, 다변수 우량모형, 공간-다차원 우량모형으로 대별하였다. 지점 우량모형은 한지점에서 강우강도 시계열을 발생시키는데 목적이 있으며, 우량관측소군을 고려하여 과거자료군의 공분산구조가 보존되도록 발생시키는것은 다변수 우량모형이 추구하는 바이다.

대상지역에서 모든지점의 강우현상이 특징지어지도록 발생시키려는 노력의 결과 공간-다차원 모형을 제안하게 되었다고 할 수 있다. 또 시간 개념을 중심으로 호우발생시각, 총 강우량,

호우공간분포 및 강우지속기간 등 호우의 외형을 규정하는 외부모형과 호우진행 절차를 구체적으로 나타내는 호우시간분포, 호우진행속도 및 진행방향등을 규정하는 내부모형으로 구분하기도 한다.

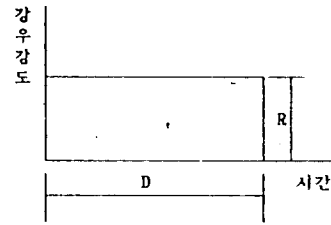
본 연구대상은 공간다차원 호우모형과 내부모형인데, 호우의 내부모형은 비구름의 운동과 밀접한 관계를 갖는다. 강수물리 과정과 비구름의 운동결과를 나타내는 호우는 그속에 내재해 있는 복잡한 요소들 때문에 그 하나하나를 모두 모형에 포함시키는 것은 어렵다. 따라서 어느 정도의 오차를 감수하는 가정이 수반되게 마련이다. 호우의 거동을 포함한 모형을 기술함에 있어서 다음의 가정과 기초지식에 입각하여 모형전개를 실시한다.

ㄱ) 각 호우는 어떤 궤도를 따라 평균  $u$ 의 속도로 진행하고, 개별기상 요란은 같은 속도로 진행한다. ㄴ) 어느시각에 낙하하는 비방울은 그 이전시각의 것과만 상관관계를 갖는다. ㄷ) 임의의 강우는 공간상관을 갖는다. ㄸ) 공간 및 시간상관은 분리될 수 없고 독립도 아니다. ㄹ) 호우는 비정상 확률과정이어서 평균과 분산이 모든 지점에서 시시각각 변한다. ㄺ) 비구름의 노령화는 고려하지 않는다.

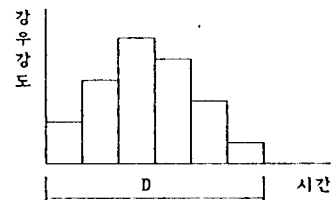
이상의 전제하에 주어진 지속기간의 총 강우량 그림 (2-1a)은 다음의 내부모형 그림 (2-1b)으로 정식화할 수 있다.

$$i(\underline{x}_i, t) = i_u(\underline{x}_i, t) + \eta(\underline{x}_i, t) \quad (2-1)$$

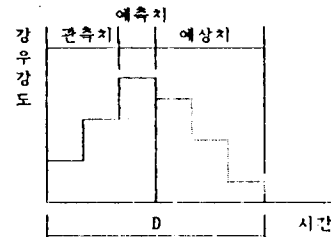
여기서,  $i(\underline{x}_i, t)$ 는 시각  $t$ , 좌표벡터  $\underline{x}_i$ 에서의 강우강도이고,  $i_u(\underline{x}_i, t)$ 는 평균 강우강도이며,  $\eta(\underline{x}_i, t)$ 는 어떤 시공간의 공분산 구조를 따르는 잡음이다. 평균 강우강도와 잡음은 기왕의 기록 자료로부터 평가할 수 있다. 기왕의 자료가 호우사상의 모집단을 구성하고 있다고 하면, 식(2-1)의 장치로 발생하는 호우의 내부구조를 가능한 한 실현이라고 할 수 있다.



(a) 총강우량 및 지속시간



(b) 예상 우량주상도



(c) 관측치의 반영 시간

그림 2-1 호우예보 모형

이러한 가상의 내부구조는 계측과 동시에 현실과의 차이를 발견하게 되고, 미래에 계측하게될 값과 차이가 나지 않도록 조정하기위한 모형 (그림 2-1c)을 필요로한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 모형을 설정한다.

$$\hat{i}(\underline{x}_i, t) = i(\underline{x}_i, t) + r(\underline{x}_i, t) \quad (2-2)$$

여기서,  $\hat{i}(\underline{x}_i, t)$ 는 확률성분  $r(\underline{x}_i, t)$ 등을 고려한 예상 호우강도라고 할 수 있다. 식 (2-1)과 식 (2-2)의 차이는 확률변수  $\eta$ 와  $r$ 의 평가방법등 편의 성에 있다. 식 (2-1)에 의해 예상호우패턴

이 주어지면, 잔차강우강도  $r(\underline{x}_i, t)$ 의 모형으로부터 잔차를 예보하여 계측치와 비교하고, 여기서 발생한 오차는 다음 잔차예보에 반영한다.

### 3. 강우발생 모형

한 유역을 대표할 수 있는 무차원 우량곡면을 구했다면 유역의 모든 점에서 우량주상도는 같은 패턴을 따를 것이다. 이는  $i_u(\underline{x}_i, t)$ 가  $i_a(t)$  (그림 3-1)로 대치된다는 뜻이다. 이때 모든 관측 지점에서의 강우 지속기간도 같다는 가정이 내포되어 있다. 그렇다면 동시에 모든 관측소를 나타내기 위해서 절대시간 크기가 유역내에서 정의되게 된다. 시작시각은 이동호우가 해당유역의 첫번째 지점을 스치는 시각이다.

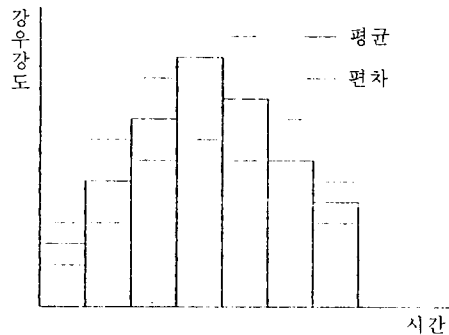


그림 3-1 평균 시우량 거동

그림 (3-1)형의 자료는 호우 이동방향으로 원점에서 다음계측소까지 거리에 대한 절대시간만큼 이동한 것이 된다. 호우 진행peed를 x축으로 잡는다. 이러한 사실을 토대로 한다면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$i_u(\underline{x}_i, t) = i_a(t - \underline{x}_i/u) \quad (3-1)$$

여기서,  $i_a(t)$ 는 주어진 점에서 현재 비가 내리고 있는 시각 t에서의 평균강우강도이고, u는 x 방향의 강우의 이동속도이다. 또는  $x_i$ 는 임의 원점에서 부터의 거리이다. 다음의 절차는 잡음의

공분산 구조에 대한 가설을 세우는 일이다. 즉 다음과 같이 표현될 수 있다고 하자.

$$E[\eta(\underline{x}_i, t') \eta(\underline{x}_j, t'')] = \sigma(\underline{x}_i, t) \sigma(\underline{x}_j, t'') r_c(\underline{x}_i, t'; \underline{x}_j, t'')$$

여기서 E는 기대치 연산자이며,  $\sigma$ 는 좌표  $\underline{x}_i$ , 시각 t에서 강우강도의 표준편차이고,  $r_c(\underline{x}_i, t'; \underline{x}_j, t'')$ 는 정규 공분산 함수이다.

윗식의 표준편차에 대해서도 평균에서와 같은 논리로

$$\sigma(\underline{x}_i, t) = \sigma_a(t - \underline{x}_i/u) \quad (3-2)$$

결국 식(2-1)은 다음과 같이 재구성 될수 있다.

$$i(\underline{x}_i, t) = i_a(t - (\underline{x}_i/u)) + R(\underline{x}_i, t) \sigma_a(t - \underline{x}_i/u) \quad (3-3)$$

여기서  $R(\underline{x}_i, t)$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 좌표  $\underline{x}_i$ , 시각 t에서의 잔차이다.

정규잔차 공분산 함수  $r(\underline{x}_i, t'; \underline{x}_j, t'')$ 를 좀더 구체적으로 정의 하기 위해서는 두 가정을 토대로 한다. 하나는 시간상관과 공간상관이 등가라고 하는 Taylor<sup>11)</sup> 가정이고 다른 하나는 상관함수가 등방성이라는 가정이다. 즉,

$$r_c(\underline{x}_i, t'; \underline{x}_j, t'') = 1 / (\sqrt{(y_j - y_i)^2 + ((\underline{x}_j + ut'') - (\underline{x}_i + ut'))^2}) \quad (3-4)$$

식 (3-4)를 강우지속기간에 대해서 적분해도 공간상관은 보존된다. 즉,

$$r_c(U) = \int_D^D \int_D^D r(\sqrt{(y_j - y_i)^2 + ((\underline{x}_j + ut'') - (\underline{x}_i + ut'))^2}) dt' dt'' \quad (3-5)$$

여기서 D는 지속기간이다.

식 (3-5)의 함수형으로는 단순지수형, 2차 지수형, Bessel형 등이 통용되고 있고, 이에 상응하는 환상스펙트럼 밀도와 분포함수도 정의된다. 예를들면 단순지수형의 환상스펙트럼 식은

$$G(w) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-w^2/\lambda^2}} \quad (3-6)$$

위의 환상스펙트럼 특성을 갖는 무작위 변수 발생의 예를 들어보면 다음과 같다. 식 (3-6)에서 w에 대해서 역변환하면

$$w = \lambda \left( \frac{1}{1-G(w)} - 1 \right)^{1/2} \quad (3-7)$$

식 (3-7)에서 G(w)가 0과 1사이에서 등분포(uniform distribution)하므로 무작위로 G를 발생시켜 w로 변환하면 된다. 전술한 상호관계로 부터 무작위장(random field)을 합성하기 위한 기법이 필요하다. 2차원 무작위장<sup>4)</sup>은 다음식으로 나타낼수 있다.

$$\epsilon(\underline{x}) = /2/N \sum_{i=1}^N \text{COS}[\underline{x} \cdot \underline{y}_i] w_i + \theta_i \quad (3-8)$$

여기서 x는 (x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>)좌표벡터이고, y<sub>i</sub>는 단위 반경을 갖는 원에서 등분포의 2차원 무작위 변수(y<sub>i1</sub>, y<sub>i2</sub>)이다. 또 N은 유한개의 조화함수이다. w<sub>i</sub>는 분포가 등방상관함수에 대응하는 환상스펙트럼 분포함수 G(w)의 무작위 변수이다. θ<sub>i</sub>는 0과 2π 사이에 등분포된 무작위 위상각이다.

Mejia and Rodriguez-Iturbe<sup>10)</sup>은 위의 확률과정이 등질(Homogeneous)이고 등방(Isotropic)이며, N→∞에 대해서 에르고드성이고 다변수 가우스과정이라고 했다. 또한 ε(·)은 평균이 0이고 분산이 1이며 N→∞에 대해서 G(w)에 상응하는 상관함수를 갖는다. Bras<sup>11)</sup>에 의하면 N을 50이상으로 취했을때 크

게 취함에 따라 강우합성에 미치는 영향은 사소하다. 식 (2-17)을 이용 해 잔차를 발생시킬 수 있다. 이때 x는 좌표벡터이고 y<sub>i</sub>는 단위 원상에 등 분포하는 무작위변수이므로 식 (3-8)은

$$\epsilon(x_1, x_2) = /2/N \sum_{i=1}^N \text{COS}[w_i(x_1 \text{COS } \lambda_i + x_2 \text{SIN } \lambda_i) + \theta_i] \quad (3-9)$$

가 된다. 이때 λ<sub>i</sub>와 θ<sub>i</sub>는 독립된 등분포 확률 변수이고, w<sub>i</sub>는 식 (2-11)의 G(w)를 분포함수로 하는 무작위 변수이다. 식 (3-3)의 R(x<sub>i</sub>, t)은 정규잔차인데, 이상의 가정과 절차에 따라 무작위장 ε(x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>)로 변환되었다. 식 (3-9)에서 무작위 발생된 변수 조합으로 얻어지는 무작위장은 지점이동평균 우량주상도 및 표준편차와 함께 강우장을 합성할 수 있게 된다.

#### 4. 강우예측모형

예상되는 강우의 시간및 공간분포를 얻었으면. 그러면 현재 진행되고 있는 시간별 계측자료를 활용해서 예상 강우패턴을 어떻게 보완해갈 것인가가 이 절의 관심사이다. 시시각각 입수되는 정보를 예상강우 패턴을 쉽게 변경하기 위해서는 예측 모형자체가 단순해야 하며 그러면서도 주요인자를 충분히 반영할수 있어야 한다. 이러한 요구조건에 부합하는 확률과정의 표현은 벡터형 Markov모형이다. 즉 어느시각에 낙하하는 빗방울이 바로 이전시각에 낙하한 비방울에만 상관되고, 각 관측소에서 어느 시각의 계측 우량은 공간상관을 갖는다.

또 현재 진행되고 있는 강우상태가 Markov 모형으로 하면, 평가된 상태는 계측치와 어떤 관계를 갖어야한다. 이상의 개념을 정리하여 강우현상을 지배하는 선형상태방정식과 예측되는 상태는 얼마후에 계측치와 비교하기 위해서 구성한 출력식으로 시스템을 구성할수있다.

점(x, y)는 2차원 평면상에서 임의로 정의된 것이다. 즉,  $i(x, y, t)$ 는 유역내의 임의의점(x, y)에서 시각 t의 강우강도를 의미한다. 그러나 실제관측 가능한 지점수 N은 한정되어 있고 또 측정 장소에 계측소가 설치되어 있으므로  $i(x, y, t)$ ,  $m(x, y, t)$ ,  $\sigma(x, y, t)$ ,  $\epsilon(x, y, t)$  등은  $i(x_1, y_1, t)$ ,  $i(x_2, y_2, t)$ , ...,  $i(x_n, y_n, t)$ 의 유한요소를 갖는다. 따라서 표기상의 편의성을 생각하여  $i(t) = \{i(x_1, y_1, t), i(x_2, y_2, t), \dots, i(x_n, y_n, t)\}$ ,  $m(t) = \{m(x_1, y_1, t), m(x_2, y_2, t), \dots, m(x_n, y_n, t)\}$  등으로 표기하기로 하면 식 (2-2)는 다음과 같이 벡터식이 된다. 이때  $m(t)$ 는 식 (2-1)의  $i(x_i, t)$ 로 정의할 수 있다.

$$i(t) = m(t) + r(t) \quad (4-1)$$

또 잔차 r(t)의 대각선 표준편차 행렬(diagonal standard deviation matrix)  $\Sigma(t)$ 를 이용하여 잔차를 달리 표현하면

$$r(t) = \epsilon(t) + \epsilon(t) \quad (4-2)$$

여기서

$$\Sigma(r) = \begin{bmatrix} \sigma(x, y, t) & & \\ & \sigma(x_2, y_2, t) & 0 \\ 0 & & \sigma(x_n, y_n, t) \end{bmatrix}$$

식 (4-2)의 정의를 빌어 식 (4-1)의 잔차를 정의할 수 있다. 즉 강우를

$$\begin{aligned} r(t) &= i(t) - m(t) \\ &= \Sigma(t) \epsilon(t) \end{aligned} \quad (4-3)$$

시간간격 t를 단위로해서 한구간을 한단계, 2구간을 두단계로 표시하기로 하면 단계후의 잔차  $r(t + \tau)$ 는 앞에서 전제한 바에 따라 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} r(t + \tau) &= A(t, \tau)r(t) + B(t, \tau)W(t, \tau) \end{aligned} \quad (4-4)$$

여기서  $A(t, \tau)$ 는 시각 t에서  $\tau$ 단계후의 시각으로의 천이행렬(NXN)이다.  $W(t, \tau)$ 는 평균이 0인  $N \times 1$  요란(disturbance)이며,  $B(t, \tau)$ 는  $\tau$ 단계후의 시각 t +  $\tau$ 에 미치게될 시각 t에서의 잡음항의 효과를 나타내는  $N \times N$  행렬이다.

구간 크기를 의미하는 시간  $\Delta t$ 와 단계를 나타내는 t를 곱하면 실제시각이되는데,  $\Delta t = 1$ 로 했을때는 실제 시각을 t로 대표할 수 있어서 t와 t-1은 한시간 전후의 시각을 의미한다. 따라서 본 논문에서 취급하는 강우강도는 시간크기  $\Delta t$ 에 대한 평균의 의미를 가지고 있다. 다시말하면 순간의 크기를  $\Delta t$ 로 취했으며, 그 구간에서는 시각에 따라 강도가 변하지 않는다. 식 (4-4)에서  $\tau = 1$ . 즉, 한단계 후의 잔차벡터에 대해서 쓰면

$$\begin{aligned} r(t+1) &= A(t, 1)r(t) + B(t, 1)W(t, 1) \end{aligned} \quad (4-5)$$

이제 계측기에서 계측한 실측강우량 q(t)와 잔차 r(t)의 관계를 알아볼 필요가 있다. 예보지점에 대한 추정방정식은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} z(t) &= q(t) - m(t) \\ &= r(t) + V(t) \end{aligned} \quad (4-6)$$

여기서 q(t)는 실제 계측한 시각 t에서  $N \times 1$  개의 강우강도 벡터이고, r(t)는 식 (4-3)에서 정의한 변수이며, V(t)는  $N \times 1$ 의 계측오차 벡터이다. 식 (4-5) 및 식 (4-6)에서 다음과 같은 가정을 할 수 있다.

$$E[W(t, 1)W^T(s, 1)] = 0 \quad t \neq s \text{ 일때} \quad (4-7)$$

$$E[W(t, 1)V^T(s)] = 0 \quad \text{모든 } t, s \text{에 대하여}$$

$$E[V(t)V^T(s)] = 0 \quad t \neq s \text{ 일때} \quad (4-9)$$

$$E[V(t)V^T(s)] = 0 \quad t \neq s \text{ 일때} \quad (4-9)$$

식 (4-4)~(4-9)의 의미는 상태잡음과 측정오차는 무관하며, 그 관계가 시간의 지배를 받지 않는다는 것이다. 식 (4-4)~(4-9)는 비정상 확률과 정의 Kalman filter 형식이다. Kalman filter 형식의 예측모형은 현시각에서의 상태를 추정하는 일이다. 추정된 상태는 천이행렬에 의해서 미래로 보내진다. 현상태의 추정치는 전단계에서 평가한 현재의 추정치와 계측치의 차이에 계인을 가해서 얻어진 값으로 보완해가는 방식이다. 즉,

$$\hat{r}(t+1|t) = A(t,1)\hat{r}(t|t) \quad (4-10)$$

$$P(t+1|t) = A(t,1)P(t|t)A^T(t,1) + B(t,1)B^T(t,1) \quad (4-11)$$

$$= A(t,1)P(t|t)A^T(t,1) + Q(t,1)$$

$$K(t) = P(t|t-1) \{P(t|t-1) + E[V(t)V^T(t)]\}^{-1} \quad (4-12)$$

$$\hat{r}(t|t) = \hat{r}(t|t-1) + K(t) \{z(t) - \hat{r}(t|t-1)\} \quad (4-13)$$

$$P(t|t) = [I - K(t)]P(t|t-1) \quad (4-14)$$

여기서  $\hat{r}(t|t)$ 는 잔차벡터의 최소분산 추정치이다. 식 (4-10)에서 식 (4-14)까지의 계산과정은 초기치를 필요로한다. 즉  $p(0|0)$ 와  $r(0|0)$ 의 정의가 필요하다.  $r(0|0)$ 은 강우가 시작되기전의 잔차이므로  $r(0|0)=0$ 이다. 또  $P(0|0)=E[V(0)V^T(0)]$ 도 강우시작전의 계측오차의 분산을 의미하므로 0이다. 특히 윗식에서  $\{z(t)-\hat{r}(t|t-1)\}$ 은 갱신(innovation)해야할 양이다. 식 (4-10)~식 (4-14)에서  $A(t,1)$ ,  $B(t,1)$ ,  $E[W(t,1)W^T(t,1)]$ ,  $E[V(t)V^T(t)]$ 등만 정의되면 회선적인 방법으로 잔차를 예보할 수 있다.

### 5. 매개변수 평가

강우발생모형에서 시간변수인 평균을 평가

하는 방법은 2가지가 있다. 첫째는 비구름의 이동 속도를 고려하여 어느 시각에 유역내 관측소에서 발생하고 있거나 발생할 강우량은 같은 자료집단으로 하여 공간 평균하는 방법이고, 둘째는 과거 자료를 분석하여 주어진 총강우량이 지속기간 동안 어떤형태를 보일 것인가를 평가하는 방법이다. 첫번째 방법은 강우관측 자료로부터 비구름의 이동 상황이 면밀히 검측되어야 하므로 관측망이 조밀해야 하고, 짧은 순간자료를 필요로 한다. 실제 가능, 한 자료는 1시간 누가우량이며 관측점간의 거리가 너무 멀으면 비구름의 이동이 검측되기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 두번째 방법을 채택했으며, 유역평균 무차원 시간분포와 표준편차<sup>2)</sup> (Brass 1976)를 이용할 수 있다.

강우예측 모형에서 평균강우량  $m(t)$ 는 예상 강우량으로 강우발생 모형에서 구한 값이다. 오차 공분산  $E[V(t)V^T(t)]$ 는 관측 장비의 측정 정도에 달려 있으므로 현지 사정을 감안하여 설정할 수 밖에 없다. 강우잔차 예측모형의 계수행렬  $A(t)$ 와  $B(t)$ 의 추정법은 두가지가 있다. 즉 실시간 자료의 공분산을 이용하는 방법과 과거자료의 공분산을 이용하는 방법인 것이다.

전자는 우량계의 밀도가 높아서 호우셀이 모두 검출되거나 레이다 관측망이 구축되어 있는 경우 가능하다. 후자는 기상 자료들의 축적치만 있으면 추정이 가능하다. 본 연구에서는 후자의 방법을 택하였다. 즉,

$$A(t) = S(t, t-1)S^{-1}(t-1, t-1) \quad (5-1)$$

$$B(t)B(t) = S(t, t) - S(t, t-1)S^{-1}(t-1, t-1)S(t-1, t) \quad (5-2)$$

여기서

$$S(t, t) = E[r(t)r^T(t)]$$

$$S(t, t-1) = E[r(t)r^T(t-1)]$$

이때 공분산 함수 S는 다음과 같이 취할 수 있다.

$$S(x_i, t-1 : x_j, t) = \sigma(t-1) \sigma(t) f_c(v)$$

$$v = \frac{1}{2} [(y_j - y_i)^2 + ((x_j + u(t)) - (x_i + u(t-1)))^2]^{1/2} \quad (5-3)$$

여기서  $\sigma(t)$ 는 식 (3-2)에서 정의하였으며,  $f_c(v)$ 는 기존 연구결과<sup>12)</sup>에서 제안된 정규 공분산 함수를 이용할 수 있다. 이미 산정된 각구역의 함수  $f_c(v)$ 를 이용하여 계수행렬을 구성하는 경우 실행상 어려움이 있을수 있으므로, 다음과 같은 단순 지수형인 함수를 추천하고 있다. 즉,

$$f_c(v) = e^{-cv} \quad (5-4)$$

여기서 상수 c값은 표본공분산 S로부터 산정한 계수값이다. 강우발생 과정에서 제시된 표준편차와 정규 공분산 자료를 가지고 S(t), S(t, t-1)가 구성되며, 이를 토대로 식 (5-1)과 식(5-2)에 의하여 계수행렬 A(t)와 B(t)를 구할 수 있다.

### 6. 적용예

앞에서 기술한 내용을 대청댐 상류유역인 남대천유역에 적용하였다. 남대천유역은 전북 무주군의 상류지역으로서 동경 127°50' 북위 35°55'에 위치하고 있다. 이 유역은 유역경사가 1/30(Horton방법)정도로서 비교적 급한 산지유역이다. 남대천 하류부에 위치한 무주읍은 홍수피해가 예상되는 지역으로, 각 면소재지에서 자기우량기로 우량관측을 실시하고 있다. 유역내의 우량관측소는 무주군내에 8개소가 있으며, 유역내에는 5개소가 있다. 유량관측소는 유역의 본류인 남대천 하류부의 무주대교에 위치하고 있다(그림 6-1). 8개의 우량관

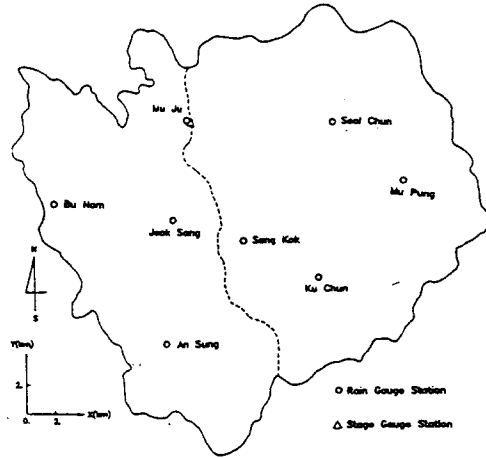


그림 6-1 남대천유역 수문관측소

측소의 위치를 표 6-1에 게재했다.

본 논문에서 제시한 시우량 예측모형의 적합성은 두가지 관점에서 평가하였다. 무차원 시간분포의 선정에 따라 각 시점에서 실측강우량과의 표준편차가 어느정도인가 하는점이 그하나이고, 모형과정의 3 단계인 무차원 시간분포에 의해서 배분된 우량주상도, 매시간 예측 우량주상도 등과 기상대 예보우량이 유출에 미치는 효과가 다른 하나이다.

표 6-1 무주군내 우량관측소

지점 좌표	X(km)	Y(km)	비 고
무주	106.782	112.522	원점 : 동경 127°34'2" 북위 35°51'37"
무풍	119.478	109.043	
실천	115.652	112.522	
적상	106.609	106.956	X=100km Y=100km
안성	106.434	100.000	
부남	100.000	107.826	
구천	114.608	103.478	
상곡	110.609	105.913	

위 수치실험에 들어가기 전에 유출응답을 분석해 두어야 하는데, 호우의 분포와 진행특성을 잘 반영할 수 있는 유출모형이 선결과제이다. 현재 산지유역에 대한 유출계산법은 무수히 많으나,



그중에서 본연구에 적합한 분산정수계 기법은 사용상 어려움이 많고, 관심이 유출응답에 있지 않으며, 상대적인 유출결과에 주목하는 것이므로, 유하시간-유역면적 관계를 이용하였다. 이때 발생하는 유역의 손실 및 지체효과를 무시하기 위하여 유역이 완전히 포화된것으로 간주할 수 있는 1989년 7월 28일 호우를 선택했다.

우수의 유하와 강우의 진행등의 개념이 반영되도록 하기 위해 유역을 0.667km×0.667km의 정방형 격자로 분할하였다. 또 무주지점 우량주상도가 260°방향과 12km/hr 속도로 진행하는 것으로 했다. 등시선도는 기존조사 결과<sup>11)</sup>를 격자화해서 사용하였다. 이상을 바탕으로 산출한 유출수문곡선과 관측유출수문곡선을 그림 (6-2)에 도시하였다.

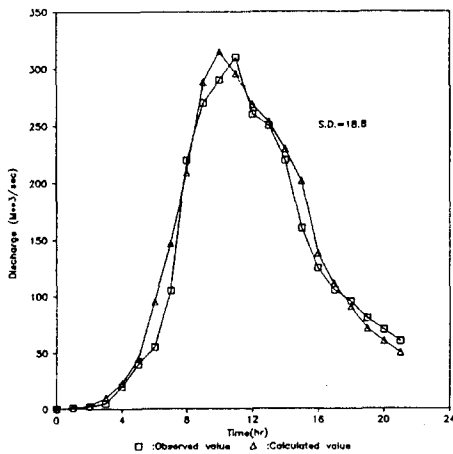


그림 6-2 1989년 7월 28일 수문곡선

모의예측 결과를 비교해 보기위하여 기존의 관측치인 1989년 7월 28일 호우에 대해 강우속도, 진행방향을 분석한결과<sup>13)</sup> 각각 3.8km/hr, N73°E로 나타났으며, 모의예측에 필요한 제반 상수들은 기존 대청댐유역 분석자료를 이용하였다.<sup>15)</sup> 홍수기의 선택호우의 지속기간은 10시간이며 총강우량은 40mm이다. 예보오차가 발생하지 않는다는 전제하에 기상대 예보강우강도를 4mm/hr로 취하여 4개의 무차원 시간분포형별로 호우예측을

실시하였다. 각시점과 무차원 시간분포별 표준편차는 표 6-2에 개제하였다.

표 6-2 실강우량과 시간분포 유형별 모형강우량의 표준편차

시간 구간	제1구간	제2구간	제3구간	제4구간
1	4.666	3.738	4.835	5.822
2	4.544	3.632	4.674	5.636
3	4.134	3.364	4.425	5.326
4	3.528	2.919	4.305	5.200
5	2.997	2.662	4.080	4.970
6	3.036	2.557	3.736	4.650
7	2.400	2.494	2.799	2.652
8	1.771	1.938	2.039	1.834
9	1.352	1.374	1.400	1.436
10	0.208	0.205	0.205	0.227
11	0.000	0.000	0.000	0.000
평균	2.603	2.262	2.954	3.432

수치실험 결과 제 2구간에 호우가 집중되어 있다고 예상했을때의 평균표준편차는 2.262mm/hr로써 제일 적었고, 제 4구간이라고 예상하는 경우 평균표준편차는 3.432mm/hr로 가장 컸다.

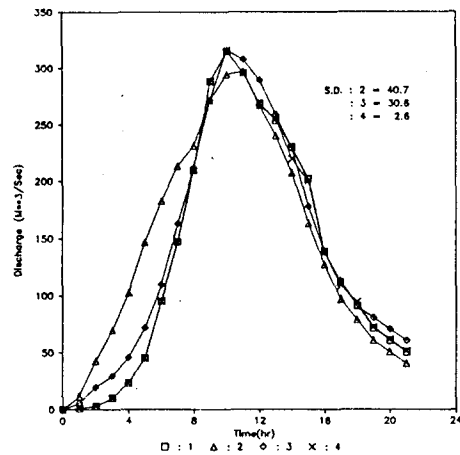


그림 6-3 우량주상도별 유출수문곡선의 비교

표준편차를 많이 보이는 제 3구간에 집중되어 있는 무차원시간분포형을 취하여 앞에서 제시한 방법에 의하여 예측호우 주상도<sup>1)</sup>, 무차원 시간분

포형을 이용하여 분배한 호우주상도<sup>3</sup>, 관상대 호우예보주상도<sup>2</sup> 등에 상응하는 유출수문곡선을 구하여 비교하여 보았다(그림 6-3). 실 강우량에 상응하는 유출수문곡선에 대한 표준편차는 관상대 예보인 경우 40.7m<sup>3</sup>/sec로 가장 크고, 예측의 경우가 20.1~2.6 까지 변화하며 평균 11.7m<sup>3</sup>/sec로 가장적이며, 무차원 시간분포에 따라 분배만 하는 경우는 중간정도인 30.6m<sup>3</sup>/sec 이다.

### 參考文獻

1. Billuart, M. and Tourasse, M., *Telemetry and Simulation Techniques for a Complete Real Time Flood Forecasting System*. In Hydrological Forecasting, 1980.
2. Box, G.E. P., and G.M. Jenkins, *Time Series Analysis-Forecasting and Control*. Holden-Day, San Fransisco, 1970.
3. Bras, R.L., and I. Rodriguez-Iturbe, *Rainfall-Runoff as Spatial Stochastic Processes Data Collection and Synthesis*, M.I.T. Rep. 196, 1975.
4. Bras, R.L. and Ignacio R.I., *Rainfall Generation A Non-stationary Time-Varying Multidimensional Model*. Water Resour. Res. 12(3) p.450-456, 1976.
5. Creutin J.D. and Ch. Obled, *Modeling Spatial and Temporal Characteristics of Rainfall as Input to a Flood Forecasting Model*. In Hydrological Forecasting, 1980.
6. Croley, T.E., Eli, R.N. and Cryer, J.D., *Raltson Creek Hourly Precipitation Model*. Water Resour. Res. 14(3), p.485-490, 1978.
7. Eagleson, P.S., *Dynamic Hydrology*. M-H, New York, 1970.
8. Jamieson, D.G., and J.C. Wilkinson, *River Dee Research Program 3, A Short Term Control Strategy for Multi-Purpose Reservoir Systems*. Water Resour. Res. 8(4)p.911-920, 1972.
9. Johnson, E.R. and Bras R.L. *Multivariate Short-Term Rainfall Prediction*, Water Resour. Res. 16(1), p.173-185, 1980.
10. Mejia, J.M., and I. Rodriguez-Iturbe, *on the Synthesis of Random Field Sampling from Spectrum An Application in the Generation of Hydrologic Spatial Processes*, Water Resour. Res. 10(4) p.705-711, 1974.
11. Taylor, G.I., *Statistical Theory of Turbulence*, Proc. Roy. Society Sera., 151, 1937.
12. 이재형, 이동주, 박영기, 호우의 환상스펙트럼 추정, 한국수문학회지, 22(2), 1989.
13. 한국 수자원공사, 저수지 수문조작을 위한 홍수 유입량의 예측모형 개발연구 보고서 1990년 4월.
14. 이재형 전북무주군청 남대천 수해예방 학술용역 1989년 10월.