韓國水資源學會誌 論文
第28卷 第5號·1995年 10月
pp. 219~233

狀態벡터 模型에 의한 서울지역의 降雨豫測

Rainfall Prediction of Seoul Area by the State-Vector Model

朱 澈*
Chu, Chul

Abstract

A non-stationary multivariate model is selected in which the mean and variance of rainfall are not temporally or spatially constant. And the rainfall prediction system is constructed which uses the recursive estimation algorithm, Kalman filter, to estimate system states and parameters of rainfall model simultaneously. The on-line, real-time, multivariate short-term, rainfall prediction for multi-stations and lead-times is carried out through the estimation of non-stationary mean and variance by the storm counter method, the normalized residual covariance and rainfall speed. The results of rainfall prediction system model agree with those generated by non-stationary multivariate model. The longer the lead time is, the larger the root mean square error becomes and the further the model efficiency decreases from 1. Thus, the accuracy of the rainfall prediction decreases as the lead time gets longer. Also it shows that the mean obtained by storm counter method constitutes the most significant part of the rainfall structure.

요 지

강우의 平均과 分散이 시 공간적으로 변하는 非定常 多變量 模型을 강우모형으로 선정하였다. 그리고 강우모형의 狀態 및 媒介變數의 추정을 위해 非定常 多變量 模型의 殘差項에 Kalman Filter 循環推定 알고리즘을 적용하여 강우예측모형 시스템을 구성하였다. 그후 反應時間이 짧은 도시지역에 설치된 T/M 강우관측소에 입력되는 매 시간(10분간격) 강우자료를 사용하여 豪雨個數方法에 의한 非定常(Non-stationary) 平均과 分散의 추정 그리고 호우속도 추정을 통한 正規殘差 共分散을 추정하여 다수의 지점들 및 先行時間들의 實時間 多變量 短期 降雨豫測 (On-line, Real-time, Multivariate Short-term, Rainfall Prediction)을 하였다. 강우예측시스템 모형에 의한 결과와 非定常 多變量 模型에 의한 강우모의 결과가 잘 일치하였다. 그리고 예측정도를 측정하는 방법인 제곱 평균 제곱근 오차(RMSE)와 模型 效率性 係數(ME)를 분석한 결과, 강우 예측시간 즉 先行時間이 길수록 제곱 평균 제곱근 오차가 커지고 模型 效率性 係數가 1로부터 점차 작아지는 것으로 보아 강우예측 정도가 떨어지는 것을 알

* (주)금호엔지니어링, 상무이사, 공학박사

수 있었다. 또한 豪雨個數方法으로 구한 平均이 호우구조의 많은 부분을 차지하고 있음을 알 수 있었다.

.....

1. 序 論

최근 약 20년 동안 水文學분야에서 강우예측에 대한 推計學的 강우모형(Stochastic Rainfall Model)의 개발이 이루어졌다. 그러나 모형의 不確實性(Model Uncertainty), 입력자료의 不確實性(Input Uncertainty), 媒介變數의 不確實性(Parameter Uncertainty) 및 시스템의 初期狀態 등에 의해 강우예측 모형의 계산결과와 실측자료가 일치되지 않기 때문에 강우모형을 예측업무에 적용하기에는 어려움이 따른다. 현재까지 국내의 강우량 산정 및 예측업무는 과거에 발생한 자료들을 수집하여 모형의 구조와 媒介變數들을 추정하는 Off-line System으로 시행되고 있기 때문에 강우현상의 현실성을 충족시키지 못하고 있다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 외국에서는 강우모형에 Kalman Filter 알고리즘과 같은 여러가지 循環推定 알고리즘(Recursive Estimation Algorithm)을 적용하여 새로운 자료가 발생하는 즉시 이전의 模型 媒介變數들을 시간에 따라 수정하면서 시스템의 狀態變化를 결정하거나 예측하는 방법인 On-line System이 시행되고 있다.

본고에서는 강우모형의 狀態 및 媒介變數의 동시추정을 위해 Kalman Filter 循環推定 알고리즘을 적용한 강우예측모형 시스템을 구성한 후 反應時間이 짧은 도시지역에 설치된 T/M 강우관측소에 입력되는 매 시간(5분 혹은 10분) 강우자료를 사용하여 非定常(Non-stationary)平均과 分散의 추정 및 殘差共分散(Residual Covariance)과 호우속도의 媒介變數 推定을 통해 서울시 유역의 다수의 지점들 및 先行時間들의 實時間 多變量 短期 降雨豫測(On-line, Real-time, Multi- variate Short-term, Rainfall Prediction)을 하고자 한다.

2. 狀態벡터 模型에 의한 降雨豫測模型의 樹立

강우모형은 다음과 같이 강우의 平均과 分散이 시 공간적으로 변하는 非定常 多變量模型(Nonstationary Multivariate Model)으로 선정하였다.

$$i(t)=m(t)+r(t) \tag{1}$$

여기서 i(t)는 시간단계(Time Step) t에서 N개 지점들$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots\cdots, (x_n, y_n)$의 강우량 벡터, m(t)는 시간단계 t에서 N개 지점들의 강우량 평균 벡터, r(t)는 시간단계 t에서 殘差들의 벡터이며 N은 豫測體系에서의 강우관측소들의 수이다.

편의상 $\Sigma(t)$를 식 (2)와 같은 형태의 對角線 標準偏差行列(Diagonal Standard Deviation Matrix)로 정의하면 r(t)는 식 (3)과 같이 된다.

$$\Sigma(t)=\begin{bmatrix} \sigma(x_1, y_1, t) & \cdots\cdots & \\ & \sigma(x_2, y_2, t)\cdots\cdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ & \cdots\cdots\sigma(x_N, y_N, t) & \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$r(t)=\Sigma(t)\ \varepsilon(t) \tag{3}$$

여기서, $\sigma(x, y, t)$는 시간단계 t에서 강우량의 標準偏差이고 $\varepsilon(t)$는 平均이 0이고 分散이 1인 無作爲 벡터 過程(Random Vector Process)이다.

현재와 미래시간들에 대해 시간에 따라 변하는 평균벡터 m(t)와 標準偏差行列 $\Sigma(t)$는 3.2절에서 서술할 평균과 분산의 추정인 식 (21)과 (22)로부터 추정할 수 있기 때문에 이 장에서 논의되어야 할 사항은 殘差項 r(t)의 동적현상이다. 殘差 r(t)는 다음과 같은 非定常 Markov 模型의 형태를 갖

고 시간에 따라 전개된다고 가정한다.

$$r(t+\tau)=A(t,\tau)r(t)+B(t,\tau)w(t,\tau) \qquad (4)$$

여기서 $A(t,\tau)$는 미래에 있어 轉移 段階들에 대한 시간단계 t에서의 N×N 狀態 轉移行列, $B(t,\tau)$는 시간단계 $t+\tau$의 殘差에 영향을 주는 시간단계 t에서의 雜音項(Noise Term)의 N×N 行列이며 $w(t,\tau)$은 平均값이 0인 N×1 攪亂 벡터(Disturbance Vector)이다.

狀態雜音(State Noise)은 시간 및 測定雜音(Measurement Noise)과 무관하며 測定雜音은 시간과는 상관이 없다는 가정을 하여 예측지점들의 測定方程式을 다음과 같이 구하였다.

$$y(t)=q(t)-m(t)=r(t)+v(t) \qquad (5)$$

여기서 y(t)는 測定殘差의 N×1 벡터, q(t)는 觀測降雨量의 N×1 벡터, m(t)는 平均값의 N×1 벡터, r(t)는 實際殘差값의 N×1 벡터이며 v(t)는 測定誤差의 N×1 벡터이다.

식 (4)와 (5)는 離散型 Kalman Filter의 전형적인 형태이다. 여기서 고려하여야 하는 사항은 多變先行豫測이다. 1段階 선행 (One-step Lead)에 관한 Filter 방정식들은 다음과 같다.

$$\hat{r}(t+1\mid t)=A(t,1)\,\hat{r}(t\mid t) \qquad (6)$$

$$\begin{aligned}P(t+1\mid t)&=A(t,1)\,P(t\mid t)A^{T}(t,1)+\\&\quad B(t,1)E[w(t,1)w^{T}(t,1)\cdot B^{T}(t,1)]\\&=A(t,1)P(t\mid t)A^{T}(t,1)+Q(t,1)\end{aligned} \qquad (7)$$

$$\begin{aligned}K(t)=P(t\mid t-1)\{&P(t\mid t-1)\\&+E[v(t)v^{T}(t)]\}^{-1}\end{aligned} \qquad (8)$$

$$\hat{r}(t\mid t)=\hat{r}(t\mid t-1)+K(t)\{y(t)-\hat{r}(t\mid t-1)\} \qquad (9)$$

$$P(t\mid t)=\{I-K(t)\}P(t\mid t-1) \qquad (10)$$

여기서 $\hat{r}(t_1\mid t_2)$은 시간단계 t_1까지의 가능한 모든 정보를 근거로 한 실제 殘差벡터 $r(t_2)$의 線形最小 分散(Linear Minimum Variance)推定을 의미한다. 즉 t_1 시간단계까지의 정보를 갖고 t_2 시간의 線形最小分散을 예측한다. 그리고

$$\begin{aligned}P(t_2\mid t_1)=E[&\{\hat{r}(t_2\mid t_1)-r(t_2)\}\\&\{\hat{r}(t_2\mid t_1)-r(t_2)\}^{T}]\end{aligned} \qquad (11)$$

말하자면 $P(t_2\mid t_1)$은 시간단계 t_1에서 만들어진 $r(t_2)$의 추정에 대한 誤差共分散行列(Error Covariance Matrix)이며 K(t)는 Kalman Gain Matrix라고 불리운다.

부언하여 初期條件 $P(o\mid o)$와 $\hat{r}(o\mid o)$를 정의하는 것이 필요하다. 初期 狀態 推定(Initial State Estimate)은 강우시작전 관측으로 행해진다. 그러므로 殘差의 初期推定 $\hat{r}(o\mid o)$는 觀測誤差와 동등한 初期狀態誤差 즉 $P(o\mid o)=E[v(o)v^{T}(o)]$에 선행하여 0이다.

식 (5)~(9)는 現在殘差의 最小分散 推定(식 (8)), 現在殘差의 誤差 共分散 行列(식 (9)), 현재로부터 한 시간단계후의 殘差의 最大分散 線形豫測(식 (5)) 및 한 시간단계 豫測의 誤差 共分散行列(식 (6))이다. 이 식들은 循環的으로 작동한다. 말하자면 이 식들은 한번에 관측의 한 시간단계를 계산한다.

높은 先行들에 대한 예측들은 아래에 서술된 두 개의 새로운 식들을 필요로 한다.

$$\hat{r}(t+\tau\mid t)=A(t,\tau)\,\hat{r}(t\mid t) \qquad (12)$$

$$\begin{aligned}P(t+\tau\mid t)=A(t,\tau)&P(t\mid t)A^{T}(t,\tau)\\&+Q(t,\tau)\end{aligned} \qquad (13)$$

어떤 미래시간 $t+\tau$에서의 강우예측은 다음과 같다.

$$\hat{i}(t+\tau\mid t)=m(t+\tau)+\hat{r}(t+\tau\mid t) \qquad (14)$$

식 (8)의 $\{y(t)-\hat{r}(t\mid t-1)\}$은 쇄신벡터 (Innovation Vector)로 불리우며 測定殘差와 그 豫測殘差값의 차로써 정의된다. 쇄신벡터표현을 확장하

면 다음과 같다.

$$\{y(t)-\hat{r}(t \mid t-1)\}=\{q(t)-m(t)-\hat{r}(t \mid t-1)\} \tag{15}$$

식 (15)는 시간에 따라 변하는 평균벡터 m(t)에 의존한다. 뒤의 3.2절에 서술한 바와 같이 m(t)는 Filtering 알고리즘에서 외생적으로 추정된다.

3. 媒介變數 推定

3.1 狀態 轉移行列 推定

2장의 예측시스템을 수행하기 위해서는 각 시간단계와 선행단계에서 降雨殘差들의 동적현상을 서술하는 두개의 行列들인 $A(t, \tau)$와 $Q(t, \tau)$의 추정과 각 시간단계에서의 平均과 分散의 추정이 필요하다.

식 (13)의 양변에 $r^T(t)$를 곱하고 기대값을 취하면 $A(t, \tau)$은 다음과 같다.

$$A(t, \tau)=\Sigma(t, \tau)E[\varepsilon(t, \tau)\ \varepsilon^T(t)]\cdot \{E[\varepsilon(t)\ \varepsilon^T(t)]\}^{-1}\Sigma(t)^{-1} \tag{16}$$

正規殘差들의 共分散에 식 (17)과 같은 표기를 사용하면 식 (16)은 식 (18)과 같이 된다.

$$D(t_1, t_2)=E[\varepsilon(t_1)\varepsilon^T(t_2)] \tag{17}$$

$$A(t, \tau)=\Sigma(t+\tau)D(t+\tau, t)D(t, t)^{-1}\Sigma(t)^{-1} \tag{18}$$

$D(t, t)$의 추정절차는 뒤의 3.3절에서 서술되며 逆行列이 존재한다.

식 (4)에 自體轉置(Self Transpose)를 곱하고 기대값을 취한 다음 $Q(t, \tau)$에 대해 전개하면 다음과 같다.

$$Q(t, \tau)=\Sigma(t+\tau)D(t+\tau, t+\tau)\Sigma^T(t+\tau) -A(t, \tau)\cdot\Sigma(t)D(t, t)\cdot\Sigma^T(t)A^T(t, \tau) \tag{19}$$

식 (19)에 식 (18)을 대입하고 對稱行列로부터 轉置(Transpose)를 생략하면 다음과 같다.

$$Q(t, \tau)=\Sigma(t, \tau)\{D(t+\tau, t+\tau)-D(t+\tau, t)\cdot D(t, t)^{-1}D^T(t+\tau, t)\}\Sigma(t+\tau) \tag{20}$$

3.2 平均과 分散의 推定

어떤 위치에 호우가 도착하는 시간과 관련하여 平均과 分散의 時間沿革(Time History)은 모든 위치들에서 같다는 것을 기본가정으로 하는 호우갯수방법(Storm Counter Method)으로 추정하였다.

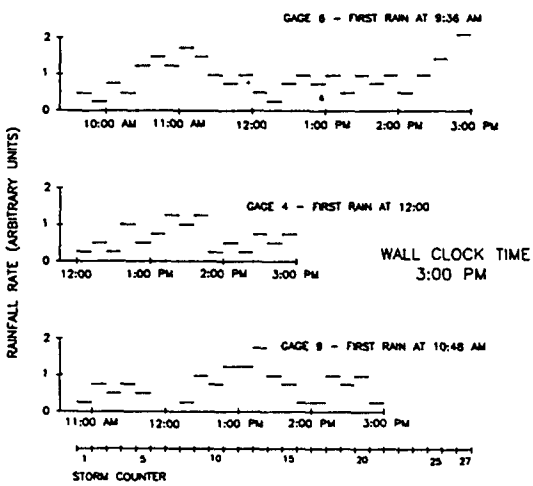


Fig. 1. Illustration of Storm Counter Method (After Johnson and Bras, 1980)

豪雨個數方法에 의해 非定常平均과 分散을 구하는 절차는 다음과 같다.

강우관측소들의 자료는 이산형 시간단계들로 기록되며 豪雨個數(Storm Counter)는 각 관측소에서 降雨始作 이후로부터 시간단계들(Time Steps)의 수로 계산한다. 豪雨個數를 정하는 절차는 Fig. 1과 같다.자료는 매 12분 간격으로 수집되며 오후 3시까지 3개의 강우관측소들(Gage 4, Gage 6 및 Gage 9)에서 비가 오고 있다. 6번 관측소에서는 오전 9시 36분, 4번 관측소에서는 12시, 9번 관

측소에서는 오전 10시 48분부터 비가 오기 시작하였기 때문에 오후 3시 현재 6번, 4번 및 9번 관측소들에 대한 호우갯수는 27, 15 및 21이다.

평균과 분산은 식 (21)과 (22)의 標本平均과 分散에 대한 일반적인 통계적 표현을 사용하여 각 호우갯수에 대해 추정된다.

$$\hat{m}(s)=\frac{1}{n(s)}\sum_{\substack{i=1\\ t(i,\,s)\neq 0}}^{N} q_i[t(i,s)] \qquad (21)$$

여기서 $\hat{m}(s)$는 豪雨個數 s에 대한 강우량의 平均 推定値, n(s)은 최소호우갯수 s 이상의 호우갯수를 갖는 관측소들의 수(호우갯수 s 이상의 標本크기), t(i,s)은 관측소 i에서 호우수 s에 대한 시간단계의 指標函數(만일 관측소 i에서 호우갯수가 없다면 t(i,s)=0), $q_i(t)$는 관측소 i에서 시간단계 t의 강우량 측정치이며, N은 강우관측망에서 강우관측소의 수이다.

$$\hat{\sigma}^2(s)=\frac{1}{n(s)-1}\sum_{\substack{i=1\\ t(i,\,s)\neq 0}}^{N}[q_i\{t(i,s)\}-\hat{m}(s)^2] \qquad (22)$$

여기서 $\hat{\sigma}^2(s)$는 호우갯수 s에 대한 강우량의 分散 推定値이다.

3.3 正規殘差 共分散 函數의 媒介 變數 推定

3.3.1 正規殘差 共分散 函數(Normalized Residual Covariance Function)

Off-line해석에서 두 강우관측 위치들 사이의 殘差 共分散은 아래와 같이 正規 殘·差 推定 $\hat{\varepsilon}$를 사용하여 통계적으로 추정된다.

$$\hat{\varepsilon}_{it}=(q_{it}-\hat{m}_{it})/\hat{\sigma}_{it} \qquad (23)$$

여기서 $\hat{m}_{it}$는 豪雨個數方法으로 구한 시간단계 t와 관측소 j에서 강우량의 平均推定値, $\hat{\sigma}_{it}$는 豪雨個數方法으로 구한 시간단계 t에서 관측소 j의 標準偏差 推定値이며, q_{it}는 시간단계 t에서 관측소 j의 測定 降雨量이다.

그러나 예측을 위한 실시간 해석은 표본값(ε)이 없을 때의 殘差 共分散推定을 필요로 한다. 결과적으로 殘差 共分散에 대한 函數形態를 가정하는 것이 필요하다.

時間遲延(Time Lag) τ에 대해 잔차 共分散이 特定 始作(Offset)[$\Delta x_{max}(\tau)$, $\Delta y_{max}(\tau)$]에서 최대값을 갖는다고 가정하면 遲延 0에 대해 $\Delta x_{max}=\Delta y_{max}=0$이다. 즉 원점에서 共分散 函數는 최대이다. 만일 호우가 이동한다면 호우와 함께 이동하는 좌표계보다 지상에 고정된 좌표계가 더 많이 변하게 된다. 이것은 相對最大(Relative Maxima)가 직선이 될 것이라는 것을 의미한다. 즉

$$\Delta x_{amx}(\tau)=U_x\tau \text{ and } \Delta y_{max}(\tau)=U_y\tau \qquad (24)$$

여기서 U_x는 호우속도의 x방향 요소이며, U_y는 호우속도의 y방향 요소이다.

식 (24)는 Zawadzki(1973)와 Marshall (1975)에 의해 증명되었으며 호우속도 요소가 일정하다고 가정하였다. 만일 호우속도가 시간에 따라 변한다면 공분산에 미치는 영향은 매우 복잡하다.

만일 共分散이 식 (24)에 의해 정의된 최대값으로부터 모든 방향으로 균등하게 감소된다면 호우이동에 따른 좌표계에서는 等方性(Isotropy)을 가질 것이다. 移動座標系에서의 等方性은 호우의 이동을 갖는 固定座標系에서는 異方性(Anisotropy)을 내포하고 있다는 것을 인식하는 것이 중요하다. 식 (24)의 최대로부터 거리는 豪雨距離 d로 측정되며 정의는 다음과 같다.

$$d(x_i,\,y_i,\,t_1;\,x_j,\,y_j,\,t_2)=[\{(x_i-U_xt_1)(x_j-U_xt_2)\}^2+\{(y_i-U_yt_1)(y_j-U_yt_2)\}^2]^{1/2}=[\{\Delta x_{ij}-U_x\tau_{12}\}^2+\{\Delta y_{ij}-U_y\tau_{12}\}^2]^{1/2}=d_{ij\tau} \qquad (25)$$

여기서, $\Delta x_{ij}=x_i-x_j$, $\Delta y_{ij}=y_i-y_j$, $\tau_{12}=t_1-t_2$이다.

본질적으로 豪雨距離의 사용은 推定次元(Dimensionality of Estimation)을 줄인다. 이 논문에서 사용되는 共分散 函數는 指數型으로서 다음과 같다.

$$E[\varepsilon(x_i, y_i, t+\tau)\ \varepsilon(x_j, y_j, t)] = \alpha_\tau \exp(-\beta_\tau d_{ij\tau}) \quad (26)$$

각 선행 τ에서 두개의 媒介變數 α_τ 와 β_τ 그리고 호우속도 요소인 U_x와 U_y가 추정 되어져야 한다. 이상적인 접근은 1次 豫測 선행값을 갖는 강우예측 시스템에 대해서는 共分散 媒介變數 들인 U_x, U_y, α_0, β_0, α_1 그리고 β_1이 동시에 추정되어져야 하며 多變先行 豫測形態에서는 다른 높은 그리고 낮은 遲延 媒介變數들이 부가되어야 한다. 이것을 실시간으로 해결하려고 하면 6개의 媒介變數(혹은 8-10개) 非線形 推定問題를 피할 수 없게 된다. 그러나 이 문제는 Ux와 Uy의 獨立推定이 가능하면 매우 간단해진다. 호우속도의 추정은 3.4절에서 논의될 것이며 Ux와 Uy값을 안다는 가정하에 共分散 媒介變數들(α_τ과 β_τ)을 각 지연 τ에 대해 각각 추정할 수 있다. 다음 制約(Constraints)들 $\alpha_\tau \geq 0$, $\alpha_\tau \leq \alpha_0$, $\beta_\tau \geq 0$가 식 (26)의 타당성(Validity)을 확고히 하기 위해 α_τ, β_τ에 부가되어야 한다. 다음 절에서는 共分散 函數의 媒介變數들인 α_τ와 β_τ를 추정하는데 사용된 절차를 서술하고자 한다.

3.3.2 共分散 函數의 媒介變數 推定

共分散 函數의 媒介變數를 추정하는데에 있어 첫번째 단계는 標本 共分散값들을 산출하는 것이다. 標本 共分散값들은 다음 식으로 추정한다.

$$\hat{C}_{ij\tau} = \frac{1}{T_1(i, j)} \sum_{t=T_2(i, j, \tau)}^{T_3(i, j, \tau)} \hat{\varepsilon}_{it+\tau} \hat{\varepsilon}_{jt} \quad (27)$$

여기서 $\hat{C}_{ij\tau}$는 遲延 τ에서 관측소 i와 j사이의 共分散 推定, $\hat{\varepsilon}_{it}$는 시간단계 t에서 관측소 i의 正規殘差 推定(식 (23)참조), $T_1(i, j)$는 관측소 i 혹은 j에서 가장 짧은 기록치의 길이, 즉 어떤 遲延 τ에서 $C_{ij\tau}$ 안에 포함된 자료값들의 최대수이며, T_2 (i, j, τ)와 T_3(i, j, τ)는 식 (27)안에 있는 모든 $\hat{\varepsilon}_{it+\tau}$와 $\hat{\varepsilon}_{jt}$이 존재하기 위한 시작과 끝시간단계이다.

T_3-T_2의 양은 特定 推定値 $\hat{C}_{ij\tau}$에 포함되는 자료값들의 수로서 다음과 같이 정의한다.

$$n_{ij\tau} = T_3(i, j, \tau) - T_2(i, j, \tau) \quad (28)$$

식 (27)은 일반적인 標本 共分散 推定($\hat{\varepsilon}_{it}$의 평균은 0)으로서 指數 共分散 函數를 사용하면 식 (29)와 같다.

$$\hat{C}_{ij\tau} = \hat{\alpha}_\tau \exp(-\hat{\beta}_\tau d_{ij\tau}) + \hat{\eta}_{ij\tau} \quad (29)$$

여기서 $\hat{\eta}_{ij\tau}$는 식 (27)을 사용하여 $\hat{C}_{ij\tau}$ 를 추정하는데 생기는 誤差 $+\hat{\alpha}_\tau$ 와 $\hat{\beta}_\tau$ 를 추정하는데 생기는 誤差, $\hat{\alpha}_\tau$는 α_τ의 추정값 이며, $\hat{\beta}_\tau$는 β_τ의 추정값이다.

여기서 문제는 誤差項 $\eta_{ij\tau}$이 가장 작은 α_τ 와 β_τ를 추정하는 것이다. 일반적으로 $n_{ij\tau}$의 값이 클수록 $\hat{C}_{ij\tau}$의 값이 더 정확하기 때문에 α_τ 와 β_τ 를 추정하는데 사용되는 절차에 있어 더 높은 加重을 받는다. 加重自乘合(Weighted Sum of Squares)은 식 (30)과 같으며 $\hat{\alpha}_\tau$, $\hat{\beta}_\tau$ 의 값들은 식 (31)과 같이 정의된다.

$$\phi(\hat{\alpha}_\tau, \hat{\beta}_\tau) = \sum_{\substack{\text{all } i, \\ \text{all } j \pm \tau}} \eta_{ij\tau} [\hat{C}_{ij\tau} - \hat{\alpha}_\tau \exp(-\hat{\beta}_\tau d_{ij\tau})]^2 \quad (30)$$

$$\hat{\alpha}_\tau, \hat{\beta}_\tau = \underset{\hat{\alpha}_\tau, \hat{\beta}_\tau}{\text{Min}}\ \phi(\hat{\alpha}_\tau, \hat{\beta}_\tau) \quad (31)$$

3.4 豪雨速度의 回歸推定

點資料(Point Data)로 호우속도를 추정하는 것은 어렵다. 또한 交叉共分散 最大 (Cross-covariance Maxima)를 찾으려는 시도는 高次 非線形 媒介變數 추정문제를 가져온다. 강우관측소 자료를 갖고 정확히 호우형태를 추적하는 공간적인 해를 구하기에는 역부족이기때문에 강우관측소의 상세한 시간기록(공간기록이 아님)에 의존하는 線形推定方法으로 해석을 하고자 한다.

線形回歸로 호우속도를 추정하는 것은 가능하다. 이 방법은 Marshall(1975)에 의해 처음 사용되었으며 여러 사람들(Shearman, 1977a)에 의하여 적용되었다.

Fig. 2로부터 d만큼 떨어진 두개의 강우관측소 i,j를 생각해 보자. 즉, 속도 V를 갖고 θ방향으로 이동하는 호우는 호우 이동방향에 있는 i와 j사이를 이동하는 시간 t_{ij}를 생각할 수 있다.

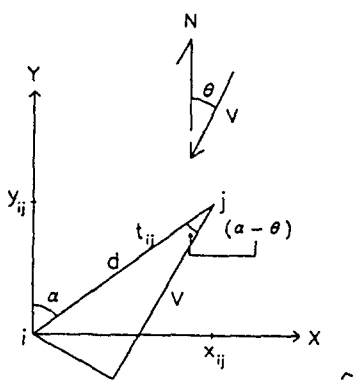


Fig. 2. Storm Passing over Gages i and j (After Marshall, 1975)

$$t_{ij}=d\cos(\alpha-\theta)/V \tag{32}$$

$$=(\cos\theta/V)d\cos\alpha+(\sin\theta/V)d\sin\alpha$$

$$=(\cos\theta/V)y_{ij}+(\sin\theta/V)x_{ij}=b_1y_{ij}+b_2x_{ij} \tag{33}$$

여기서 x_{ij}는 관측소 i와 j사이의 x방향 거리, y_{ij}는 관측소 i와 j사이의 y방향 거리, V는 호우속도 크기이며 θ는 호우이동 방향이다.

만일 강우관측소 자료를 갖고 t_{ij}를 추정할 수 있으면 식 (33)의 媒介變數들을 線形回歸로 추정할 수 있다. 推定 媒介變數 $\hat{b}_1$ 과 $\hat{b}_2$ 로 부터 V와 θ를 추정한다.

결국 두개의 호우속도 요소들을 추정할 수 있다.

$$\hat{V}=(\hat{b}_1^2+\hat{b}_2^2)^{-1/2} \tag{34}$$

$$\hat{\theta}=\tan^{-1}(\hat{b}_2/\hat{b}_1) \tag{35}$$

결국 두개의 호우속도 요소들을 추정할 수 있다.

$$\hat{U}_x=-\hat{V}\sin\theta \tag{36}$$

$$\hat{U}_y=\hat{V}\cos\theta \tag{37}$$

여기서 t_{ij}를 추정하기 위한 기본적인 구상은 관측소 i와 j의 강우기록치들 사이에서 가장 좋은 짝(Match)을 찾아내는 것이다. 가장 좋은 짝을 주는 時間遲延(Time-lag)이 t_{ij}를 추정하는데 사용된다. Marshall(1975)은 짝기준(Matching Criterion)으로 交叉相關函數(Cross-correlation Function)을 사용하였으나 본 고에서는 식 (38)과 같은 방법으로 시간지연 t_{ij}를 구하였다(Johnson and Bras, 1978).

$$\hat{t}'_{ij}=\underset{\hat{t}'_{ij}}{\text{Min}}\frac{1}{T-\hat{t}'_{ij}}\sum_{t=1}^{T-\hat{t}'_{ij}}|\hat{q}'_i(t+t_{ij})-q_j(t)| \tag{38}$$

여기서 $\hat{t}'_{ij}$는 시간단계들에서 측정된 짝점(Match Point)의 時間遲延(Time-lag), $q_i(t)$는 시간단계 t에서 관측소 i의 測定 降雨量이며 T는 현재까지의 호우의 시간단계 수이다.

그러면

$$\hat{t}_{ij}=\hat{t}'_{ij}\,\Delta t \tag{39}$$

여기서 Δt는 시간단계 길이(Time Step Length)이다.

4. 實際流域에의 適用

4.1 入力資料

본 연구에 적용하는 강우예측모형의 대상지점들은 Fig. 3에서 보는 바와 같은 서울지역의 22개 구청 및 기상청이다.

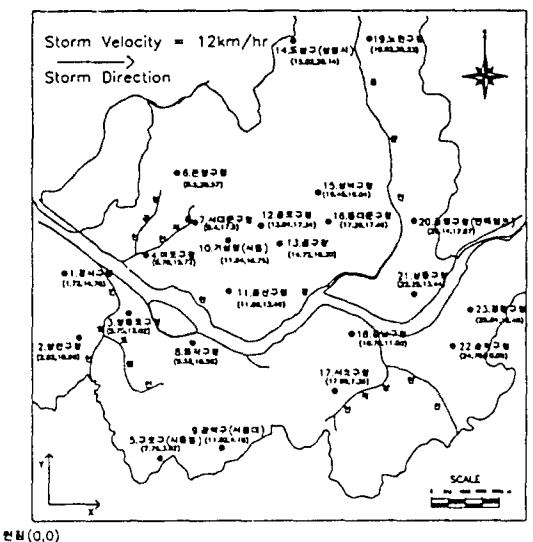


Fig. 3. Gage Locations

본 연구는 도심지역의 강우예측에 관한 연구로서 호우가 관측소간을 이동하는데 걸리는 시간이 10분이내로 추정되어지기 때문에 실제자료의 경우 최대 10분단위의 강우량이 필요하다. 따라서 기상청의 강우자료는 이용할 수 있지만 22개 구청의 강우자료는 분실되었거나 판독이 불가능하기 때문에 본고에서는 식 (1)의 非定常 時間變化 多次元 模型(Non-stationary Time-varing Multidimensional Model)으로 강우를 발생시킨 후 媒介變數의 추정을 통해 實時間 短期 降雨豫測을 하고자 한다. 그러나 서울시 각 구청에 설치된 전자식 강우기록계로부터 정확한 강우자료가 입력되면 이 자료를 이용하여 實時間 短期 降雨豫測을 시행할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 降雨豫測

正規殘差 共分散 및 豪雨個數方法으로 非定常 平均과 分散을 추정한 후 2장의 강우 예측 시스템에 적용하여 時間遲延別로 강우를 예측하였다.

추정된 호우속도, 호우진행방향 및 指數 共分散函數의 時間遲延에 대한 α_τ 와 β_τ 그리고 각 관측소의 遲延時間에 대한 시간별 예측 강우량은 Table 1 및 2와 같다.

Table 1의 時間遲延 2, 3, 4, 5, 6에서 $D(t+\tau, t)$의 α_τ 와 β_τ 의 값이 작아진것은 식(27)의 標本 共分散값을 추정할 때 時間遲延에 따른 강우자료들의 부족으로 인해 정확한 標本 共分散값을 추정하지 못하였기 때문이다.

Table 2로부터 시간지연 1인 경우에는 관측소 번호 6에서부터 23까지 시간별로 강우예측을 할 수 있으나 時間遲延 2인 경우는 6, 7, 8, 時間遲延 3인 경우는 6, 7, 8, 9, 10, 11, 時間遲延 4인 경우는 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 時間遲延 5인 경우는 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 時間遲延 6인 경우는 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17번 관측소에 대하여 강우예측을 할 수 없음을 알 수 있다. 이 이유는 해당 관측소에서 時間遲延에 대한 平均값 즉 $m(t+\tau)$, $\tau = 2, 3, 4, 5, 6$ 을 구할 수 없기 때문이다. 그러므로 예측지점들의 시간지연별에 대한 강우예측을 하고자 할 경우에는 예측지점 주변들에 많은 관측소들이 설치되어야 한다.

Table 1. Storm Velocity, Storm Direction and α_τ, β_τ of Exponential Covariance-function

Duration (min)	Storm Velocity (km/min)	Storm Direction (Degree)	$\alpha\tau$ and $\beta\tau$ of $D(t+\tau, t)$			$\alpha\tau$ and $\beta\tau$ of $D(t+\tau, t+\tau)$		
			Time-lag	$\alpha\tau$	$\beta\tau$	Time-lag	$\alpha\tau$	$\beta\tau$
300	0.436	-82.399	0	0.911E+00	0.704E+00	0	0.911E+00	0.704E+00
			1	0.911E+00	0.725E+00	1	0.908E+00	0.704E+00
			2	0.250E-03	0.910E-03	2	0.888E+00	0.766E+00
			3	0.125E-03	0.141E-02	3	0.911E+00	0.722E+00
			4	0.999E-03	0.969E-03	4	0.898E+00	0.604E+00
			5	0.277E+00	0.000E+00	5	0.904E+00	0.543E+00
			6	0.291E+00	0.140E-03	6	0.911E+00	0.370E+00

4.3 結果에 대한 分析 및 考察

모형에 의한 예측의 정확성을 파악하기 위하여 우선적으로 豫測 水文曲線과 實測 水文曲線을 한 그림으로 나타내는 도식적인 방법을 적용하며, 豫測 水文曲線과 實測 水文曲線에 여러 통계적 기준을 적용하여 모형의 정확성을 定性적이고 定量的인 판단을 하게 된다. 統計的方法에는 Weighted Pearson Moment 相關係數, 模型 效率性 係數(ME), 제곱 평균 제곱근 오차(RMSE), 標準 推定 誤差(PEE), 換算 推定 誤差(REE), 尖頭流量의 % 誤差(PEP), 流出容積의 % 誤差(PEV) 및 平均流量의 % 誤差(PEM)등이 있는데 본고에서는 제곱 평균 제곱근 오차(RMSE)와 模型 效率性 係數(ME)를 사용하였다.

(1) **제곱 평균 제곱근 오차(RMSE)**

제곱 평균 제곱근 오차(RMSE)는 Patry와 Marino(1983)가 水文模型의 適合度 기준으로 사용한 指標로서, 식(40)과 같다.

$$RMSE=\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[q_0(i)-q_s(i)]^2\right]^{1/2} \qquad (40)$$

여기서 $q_0(i)$는 實測 水文曲線의 縱距, $q_s(i)$는 豫測 水文曲線의 縱距이며 N은 시간단계들의 수이다.

(2) **模型 效率性 係數**

模型 效率性 係數(ME)는 Nash와 Sutcliffe (1970)가 제안한 통계적 기준으로 편기를 줄일 수 있는 無次元 係數로서, 모의발생된 수문곡선의 適合度가 점차적으로 개선되어 그의 값이 1로 증가하는 단순성이 있다. ME 값이 음수이면, 모형 예측값이 실측된 값의 평균을 사용하는 것보다 좋지 못하다는 결과를 나타낸다.

ME 계수는 다음과 같다.

Table 2. Rainfall Prediction by Kalman Filter Algorithm in Gage Stations(Duration : 300min)

(a) For Time-lag, 1

	Station No.																	
Time	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
100	2.67	2.67	2.67	1.80	1.80	1.80	1.20	1.07	1.07	1.08	1.08	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110	2.34	2.41	2.88	2.58	2.50	3.53	1.12	0.19	1.17	0.06	1.04	1.14	1.53	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00
120	3.58	3.60	3.62	2.64	2.73	2.79	3.18	2.16	1.80	1.21	1.12	1.25	1.14	1.29	0.00	0.00	0.00	0.00
130	4.10	4.08	4.06	2.79	2.73	2.72	2.17	2.75	2.95	1.77	1.84	1.76	1.13	1.25	0.97	1.11	0.00	0.00
140	6.74	6.71	6.99	3.81	3.61	4.02	2.61	2.14	2.25	2.58	2.44	2.81	1.98	1.53	1.06	1.04	1.05	1.04
150	6.04	6.04	6.04	6.22	6.25	6.27	3.86	2.93	2.88	2.50	2.47	2.54	2.98	3.03	1.08	1.17	1.10	1.14
160	10.04	10.04	10.04	5.81	5.81	5.80	6.62	3.82	3.79	2.88	2.90	2.86	2.49	2.49	1.96	1.99	1.20	1.21
170	3.30	3.30	3.30	8.96	8.94	8.94	5.58	6.38	6.45	4.01	3.98	4.05	3.00	2.96	2.80	2.80	2.03	.02
180	3.62	3.62	3.62	3.43	3.39	3.39	7.09	5.65	5.82	6.05	5.98	6.21	4.19	4.04	2.36	2.34	2.60	2.49
190	4.21	4.22	4.22	3.45	3.53	3.54	4.44	8.79	7.63	6.66	6.64	6.45	6.91	7.59	3.54	3.35	2.53	2.57
200	3.24	3.25	3.24	3.78	3.78	3.78	3.84	3.94	3.88	7.48	7.90	7.13	6.61	6.59	4.62	4.39	3.33	3.38
210	6.91	6.92	6.89	4.01	4.12	4.08	4.02	4.11	3.87	4.50	4.85	4.08	7.10	8.01	7.22	6.96	5.14	5.36
220	4.70	4.70	4.70	6.03	5.98	5.93	3.64	3.47	3.61	3.65	3.45	3.81	4.11	3.57	6.71	6.44	6.47	6.50
230	6.01	6.02	6.00	4.72	4.77	4.76	6.26	4.08	3.97	3.77	3.82	3.70	3.93	4.06	6.47	6.60	6.97	6.91
240	3.96	3.95	3.97	5.65	5.60	5.64	4.86	5.94	6.02	4.03	3.98	4.11	3.78	3.66	4.08	4.12	5.56	5.58
250	5.19	5.19	5.18	4.28	4.30	4.29	5.29	5.13	5.12	5.96	5.95	5.94	4.26	4.27	3.82	3.86	4.21	4.19
260	3.79	3.80	3.79	4.87	4.97	4.96	4.80	6.24	5.67	5.54	5.64	5.32	5.96	6.22	4.14	4.09	4.12	4.24
270	2.92	2.91	2.92	3.49	3.42	3.44	3.91	4.40	4.60	5.22	5.31	5.38	5.44	5.35	4.51	4.39	3.86	3.81
280	2.76	2.76	2.76	3.52	3.51	3.51	3.63	4.19	4.27	3.94	3.76	4.10	5.54	5.49	5.65	5.67	4.68	4.67
290	1.58	1.58	1.58	2.48	2.48	2.49	3.66	3.79	3.75	4.61	4.71	4.51	4.11	4.17	4.89	5.15	5.66	5.68
300	0.97	0.97	0.97	1.61	1.58	1.59	2.43	3.24	3.35	3.76	3.70	3.84	4.47	4.48	5.60	5.46	5.30	5.30
310	1.20	1.19	1.19	1.17	1.15	1.15	1.60	2.33	2.43	3.10	2.97	3.27	3.56	3.50	3.88	4.09	5.40	5.39
320	1.67	1.67	1.67	1.24	1.20	1.21	1.20	1.56	1.66	2.03	1.91	2.21	3.12	2.92	4.10	4.28	4.14	4.15
330	1.59	1.59	1.59	1.50	1.51	1.51	1.60	1.25	1.21	1.79	1.79	1.79	2.19	2.28	3.35	3.55	4.24	4.22
340	1.52	1.52	1.52	1.61	1.61	1.62	1.38	1.57	1.54	1.23	1.26	1.20	1.75	1.78	3.44	3.39	3.60	3.61

(b) For Time-lag, 2

Time	Station No. 9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
110	2.67	2.67	2.67	1.80	1.20	1.20	1.07	1.07	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.50	2.50	2.50	2.56	1.73	1.73	1.17	1.17	1.17	1.05	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00
130	3.54	3.54	3.54	2.63	2.90	2.90	1.76	1.76	1.76	1.18	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00
140	4.10	4.10	4.10	2.85	2.33	2.33	2.94	2.94	2.94	1.85	1.85	1.06	1.06	0.00	0.00
150	6.79	6.79	6.79	3.77	2.94	2.94	2.28	2.28	2.28	2.79	2.79	1.14	1.14	1.06	1.06
160	6.03	6.03	6.03	6.21	3.79	3.79	2.87	2.87	2.87	2.51	2.51	1.99	1.99	1.14	1.14
170	10.05	10.05	10.05	5.81	6.61	6.61	3.79	3.79	3.79	2.86	2.86	2.83	2.83	1.99	1.99
180	3.31	3.31	3.31	8.97	5.62	5.62	6.46	6.46	6.46	4.07	4.07	2.43	2.43	2.83	2.83
190	3.63	3.63	3.63	3.45	7.51	7.51	5.84	5.84	5.84	6.29	6.29	3.12	3.12	2.43	2.43
200	4.17	4.17	4.17	3.43	3.96	3.96	7.52	7.52	7.52	6.26	6.26	4.28	4.28	3.12	3.12
210	3.25	3.25	3.25	3.78	3.83	3.83	3.88	3.88	3.88	7.13	7.13	6.61	6.61	4.27	4.27
220	6.87	6.87	6.87	3.96	3.78	3.78	3.85	3.85	3.85	4.01	4.01	6.67	6.67	6.61	6.61
230	4.75	4.75	4.75	6.08	3.80	3.80	3.66	3.66	3.66	3.86	3.86	6.36	6.36	6.66	6.66
240	5.98	5.98	5.98	4.70	6.09	6.09	3.94	3.94	3.94	3.66	3.66	4.28	4.28	6.36	6.36
250	3.98	3.98	3.98	5.68	5.01	5.01	6.04	6.04	6.04	4.16	4.16	3.85	3.85	4.27	4.27
260	5.18	5.18	5.18	4.28	5.20	5.20	5.11	5.11	5.11	5.94	5.94	3.95	3.95	3.85	3.85
270	3.77	3.77	3.77	4.85	4.51	4.51	5.63	5.63	5.63	5.21	5.21	4.50	4.50	3.95	3.95
280	2.94	2.94	2.94	3.50	4.27	4.27	4.61	4.61	4.61	5.49	5.49	5.75	5.75	4.49	4.49
290	2.76	2.76	2.76	3.52	3.65	3.65	4.28	4.28	4.28	4.12	4.12	5.16	5.16	5.75	5.75
300	1.58	1.58	1.58	2.48	3.65	3.65	3.75	3.75	3.75	4.50	4.50	5.53	5.53	5.16	5.16
310	0.98	0.98	0.98	1.61	2.52	2.52	3.36	3.36	3.36	3.87	3.87	4.18	4.18	5.53	5.53
320	1.20	1.20	1.20	1.17	1.65	1.65	2.43	2.43	2.43	3.30	3.30	4.36	4.36	4.18	4.18
330	1.69	1.69	1.69	1.24	1.31	1.31	1.67	1.67	1.67	2.24	2.24	3.54	3.54	4.36	4.36
340	1.59	1.59	1.59	1.49	1.55	1.55	1.21	1.21	1.21	1.77	1.77	3.37	3.37	3.54	3.54
350	1.52	1.52	1.52	1.61	1.36	1.36	1.54	1.54	1.54	1.19	1.19	2.25	2.25	3.37	3.37

(c) For Time-lag, 3

Time	Station No. 12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
120	2.67	1.80	1.80	1.20	1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
130	2.50	2.56	2.56	1.72	1.72	1.72	1.17	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00
140	3.54	2.63	2.63	2.90	2.90	2.90	1.75	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00
150	4.10	2.85	2.85	2.33	2.33	2.33	2.94	2.94	1.15	1.15	0.00	0.00
160	6.79	3.77	3.77	2.94	2.94	2.94	2.28	2.28	1.99	1.99	1.14	1.14
170	6.03	6.21	6.21	3.79	3.79	3.79	2.87	2.87	2.95	2.95	1.19	1.19
180	10.05	5.81	5.81	6.61	6.61	6.61	3.79	3.79	2.49	2.49	2.83	2.83
190	3.31	8.97	8.97	5.62	5.62	5.62	6.46	6.46	3.02	3.02	2.43	2.43
200	3.63	3.45	3.45	7.51	7.51	7.51	5.84	5.84	4.26	4.26	3.12	3.12
210	4.17	3.43	3.43	3.96	3.96	3.96	7.51	7.51	6.62	6.62	4.27	4.27
220	3.25	3.78	3.78	3.83	3.83	3.83	3.88	3.88	6.57	6.57	6.61	6.61
230	6.87	3.96	3.96	3.78	3.78	3.78	3.85	3.85	6.89	6.89	6.67	6.67
240	4.75	6.08	6.08	3.80	3.80	3.80	3.66	3.66	4.20	4.20	6.36	6.36
250	5.98	4.70	4.70	6.09	6.09	6.09	3.94	3.94	3.90	3.90	4.28	4.28
260	3.98	5.68	5.68	5.01	5.01	5.01	6.04	6.04	3.81	3.81	3.85	3.85
270	5.18	4.28	4.28	5.20	5.20	5.20	5.11	5.11	4.25	4.25	3.95	3.95
280	3.77	4.84	4.84	4.50	4.50	4.50	5.63	5.63	5.82	5.82	4.49	4.49
290	2.94	3.50	3.50	4.27	4.27	4.27	4.62	4.62	5.51	5.51	5.75	5.75
300	2.76	3.52	3.52	3.65	3.65	3.65	4.28	4.28	5.58	5.58	5.16	5.16
310	1.58	2.48	2.48	3.65	3.65	3.65	3.75	3.75	4.11	4.11	5.53	5.53
320	0.98	1.61	1.61	2.52	2.52	2.52	3.36	3.36	4.50	4.50	4.18	4.18
330	1.20	1.17	1.17	1.65	1.65	1.65	2.43	2.43	3.60	3.60	4.36	4.36
340	1.69	1.24	1.24	1.31	1.31	1.31	1.67	1.67	3.19	3.19	3.54	3.54
350	1.59	1.49	1.49	1.55	1.55	1.55	1.21	1.21	2.18	2.18	3.37	3.37
360	1.52	1.61	1.61	1.36	1.36	1.36	1.54	1.54	1.75	1.75	2.25	

(d) For Time-lag, 4

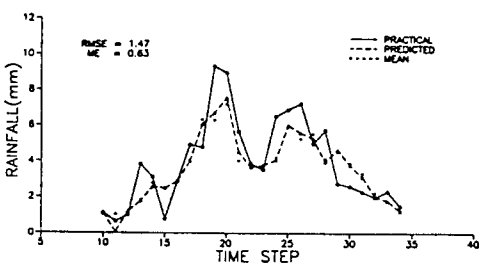
	Station No.										
Time	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
130	2.67	2.67	1.80	1.80	1.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
140	2.51	2.51	2.57	2.57	2.57	1.74	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00
150	3.55	3.55	2.63	2.63	2.63	2.91	2.91	0.00	0.00	0.00	0.00
160	4.09	4.09	2.85	2.85	2.85	2.32	2.32	1.85	1.85	0.00	0.00
170	6.79	6.79	3.77	3.77	3.77	2.93	2.93	2.79	2.79	1.99	1.99
180	6.04	6.04	6.21	6.21	6.21	3.79	3.79	2.51	2.51	2.95	2.95
190	10.05	10.05	5.81	5.81	5.81	6.61	6.61	2.86	2.86	2.49	2.49
200	3.30	3.30	8.97	8.97	8.97	5.62	5.62	4.07	4.07	3.01	3.01
210	3.63	3.63	3.44	3.44	3.44	7.49	7.49	6.28	6.28	4.25	4.25
220	4.18	4.18	3.43	3.43	3.43	3.97	3.97	6.27	6.27	6.64	6.64
230	3.25	3.25	3.78	3.78	3.78	3.83	3.83	7.13	7.13	6.58	6.58
240	6.88	6.88	3.97	3.97	3.97	3.79	3.79	4.02	4.02	6.91	6.91
250	4.74	4.74	6.07	6.07	6.07	3.80	3.80	3.86	3.86	4.19	4.19
260	5.99	5.99	4.70	4.70	4.70	6.10	6.10	3.66	3.66	3.30	3.30
270	3.97	3.97	5.67	5.67	5.67	5.00	5.00	4.16	4.16	3.81	3.81
280	5.18	5.18	4.28	4.28	4.28	5.20	5.20	5.94	5.94	4.25	4.25
290	3.77	3.77	4.85	4.85	4.85	4.51	4.51	5.22	5.22	5.84	5.84
300	2.94	2.94	3.50	3.50	3.50	4.26	4.26	5.48	5.48	5.50	5.50
310	2.76	2.76	3.52	3.52	3.52	3.65	3.65	4.12	4.12	5.58	5.58
320	1.58	1.58	2.48	2.48	2.48	3.65	3.65	4.50	4.50	4.11	4.11
330	0.97	0.97	1.61	1.61	1.61	2.52	2.52	3.87	3.87	4.50	4.50
340	1.20	1.20	1.17	1.17	1.17	1.64	1.64	3.30	3.30	3.60	3.60
350	1.68	1.68	1.24	1.24	1.24	1.31	1.31	2.24	2.24	3.19	3.19
360	1.59	1.59	1.49	1.49	1.49	1.55	1.55	1.77	1.77	2.18	2.18
370	1.52	1.52	1.61	1.61	1.61	1.36	1.36	1.19	1.19	1.75	1.75

(e) For Time-lag, 5

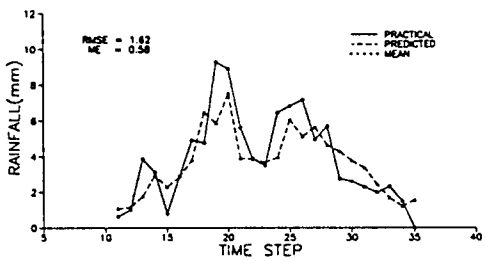
	Station No.										
Time	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
140			2.67	2.67	2.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150			6.33	6.33	6.33	5.71	5.71	0.00	0.00	0.00	0.00
160			6.05	6.05	6.05	3.99	3.99	0.00	0.00	0.00	0.00
170			2.67	2.67	2.67	1.31	1.31	2.11	2.11	0.00	0.00
180			5.72	5.72	5.72	3.09	3.09	2.02	2.02	2.49	2.49
190			6.54	6.54	6.54	7.88	7.88	3.70	3.70	3.10	3.10
200			10.05	10.05	10.05	5.81	5.81	3.79	3.79	2.86	2.86
210			2.64	2.64	2.64	7.74	7.74	5.34	5.34	3.25	3.25
220			2.88	2.88	2.88	1.97	1.97	3.59	3.59	3.40	3.40
230			6.43	6.43	6.43	5.03	5.03	16.24	16.24	11.16	11.16
240			4.12	4.12	4.12	4.36	4.36	4.62	4.62	9.10	9.10
250			10.02	10.02	10.02	7.47	7.47	5.61	5.61	6.56	6.56
260			2.03	2.03	2.03	3.24	3.24	2.08	2.08	2.72	2.72
270			8.11	8.11	8.11	6.18	6.18	5.18	5.18	4.50	4.50
280			2.24	2.24	2.24	3.46	3.46	4.57	4.57	2.84	2.84
290			5.29	5.29	5.29	4.38	4.38	5.22	5.22	6.04	6.04
300			5.54	5.54	5.54	7.48	7.48	10.48	10.48	8.49	8.49
310			1.94	1.94	1.94	2.55	2.55	3.20	3.20	2.99	2.99
320			2.29	2.29	2.29	3.05	3.05	3.66	3.66	3.42	3.42
330			1.60	1.60	1.60	2.51	2.51	3.78	3.78	4.55	4.55
340			0.67	0.67	0.67	1.29	1.29	2.62	2.62	3.29	3.29
350			0.83	0.83	0.83	0.78	0.78	1.86	1.86	2.33	2.33
360			0.77	0.77	0.77	0.58	0.58	1.01	1.01	1.09	1.09
370			1.70	1.70	1.70	1.66	1.66	1.37	1.37	1.92	1.92
380			1.80	1.80	1.80	1.82	1.82	1.79	1.79	1.41	1.41

(f) For Time-lag, 6

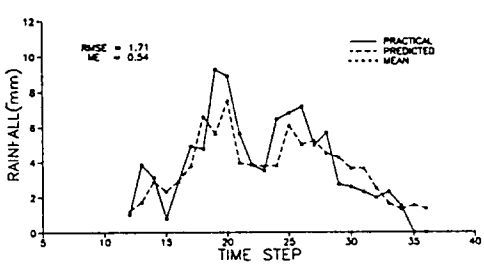
Time	Station No. 18	19	20	21	22	23
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
160	6.51	6.51	0.00	0.00	0.00	0.00
170	6.17	6.17	0.00	0.00	0.00	0.00
180	2.60	2.60	1.54	1.54	0.00	0.00
190	5.67	5.67	2.44	2.44	2.01	2.01
200	6.56	6.56	4.90	4.90	3.74	3.74
210	10.05	10.05	6.61	6.61	3.79	3.79
220	2.60	2.60	4.79	4.79	5.28	5.28
230	2.85	2.85	2.74	2.74	3.48	3.48
240	6.54	6.54	7.37	7.37	16.67	16.67
250	4.16	4.16	4.36	4.36	4.66	4.66
260	10.17	10.17	6.11	6.11	5.69	5.69
270	1.90	1.90	1.56	1.56	2.00	2.00
280	8.21	8.21	7.63	7.63	5.24	5.24
290	2.16	2.16	3.34	3.34	4.50	4.50
300	5.30	5.30	5.36	5.36	5.23	5.23
310	5.62	5.62	7.22	7.22	10.71	10.71
320	1.89	1.89	2.53	2.53	3.13	3.13
330	2.27	2.27	3.30	3.30	3.64	3.64
340	1.60	1.60	3.68	3.68	3.78	3.78
350	0.65	0.65	2.04	2.04	2.58	2.58
360	0.81	0.81	1.27	1.27	1.83	1.83
370	0.73	0.73	0.58	0.58	0.97	0.97
380	1.71	1.71	1.74	1.74	1.37	1.37
390	1.81	1.81	1.59	1.59	1.80	1.80



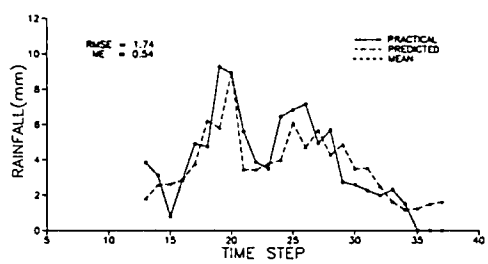
(a) Gage Station No. 15 Lead 1 (Duration : 300min)



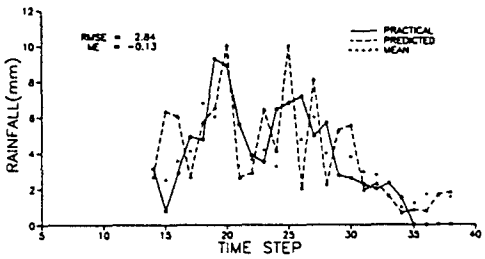
(b) Gage Station No. 15 Lead 2 (Duration : 300min)



(c) Gage Station No. 15 Lead 3 (Duration : 300min)



(d) Gage Station No. 15 Lead 4 (Duration : 300min)



(e) Gage Station No. 15 Lead 5 (Duration : 300min)

Fig. 4. Practical and Predicted Rainfall

$$ME=\frac{F_0^2-F^2}{F_0^2} \tag{41}$$

여기서

$$F^2=\sum_{i=1}^{N}[q_0(i)-q_s(i)]^2 \tag{42}$$

$$F_0^2=\sum_{i=1}^{N}[q_0(i)-\bar{q}_s(i)]^2 \tag{43}$$

$\bar{q}_s(i)$는 實測水文曲線 縱距의 平均이다.

예측강우량을 時間遲延別로 표시한 Fig. 4와 Table 1을 분석한 결과 다음과 같은 점을 관찰할 수 있었다.

1. Fig. 4로부터 3.2절의 豪雨個數方法으로 구한 平均값들이 호우구조의 많은 부분을 捕 捉하고 있으며 時間遲延이 길수록 예측정도가 떨어지고 있다.

2. Fig. 4의 시간단계 20에서 23로부터 이 모형은 極값과 極값에서 下降하는 단계의 값 들을 잘 예측하고 있다.

3. Table 1로부터 Marshall이 제안한 回歸推定方法은 호우속도보다는 호우진행방향을 잘 추정하고 있다.

5. 結 論

이상의 연구결과로부터 모형의 구성과 狀態 및 媒介變數 추정을 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

선행시간이 짧을 때 강우예측 시스템 모형에 의한 결과와 非定常 多變量 模型에 의한 模擬結果가 잘 일치하였다. 또한 豪雨個數方法으로 구한 非定常 平均이 호우구조의 상당부분을 포착하였다. 또한 예측정도를 측정하는 방법인 제곱 평균 제곱근 오차(RMSE)와 模型 效率性 係數(ME)를 분석한 결과, 강우 예측시간 즉 先行時間이 길수록 제곱 평균 제곱근 오차가 커지고 模型 效率性 係數가 1로부터 점차 작아지는 것으로 보아 강우예측 정도가 떨어지는 것을 알 수 있었다. 즉 짧은 時間遲延外에는 변하는 강우구조를 捕捉한다는 것은 매우 어렵다. 큰 時間遲延들에서는 共分散이 급작스럽게 감소하여 예측 殘差값들이 "0" 으로 되기 때문에 非定常 平均이 예측구조를 결정하게 된다. 그러므로 非定常 平均이 호우구조를 잘 捕捉하여야 예측정도를 높일수 있게 된다.

본 연구와 관련하여 보다 정확한 강우예측을 하기 위해서는 狀態 및 變數의 初期推定과 시스템 및 觀測雜音에 의한 狀態와 變數의 共分散 推定 및 共分散 構造에 영향을 주는 媒介變數인 강우의 호우속도 추정에 관한 연구가 추가되어야 한다. 또한 Radar 및 강우관측소 자료를 이용한 강우예측, 서울시의 실측자료를 이용한 강우예측, 본 강우예측 모형과 유출모형을 결합한 降雨-流出 模型 및 도시지역뿐만 아니라 농촌지역에 관한 강우예측 연구가 병행되어야 한다.

참 고 문 헌

이재형, 전일권 (1994). "氣象資料 未計測 地點의 降雨 豫報 模型." 大韓土木學會 論文集, 第14卷, 第2號, pp. 307-316.

貯水池 水門操作을 위한 洪水 流入量의 豫測模型開發 硏究報告書. (1990). 韓國水資源公社.

Bras, R.L., and Rodirguez-Iturbe, I. (1976). "Rainfall generation: A nonstationary time-varying multidimensional model." *Water Resour. Res.*, Vol. 12, No. 3, pp. 450-456.

Foufoula-Georgiou, E., and Georgakakos, K. P. (1991). "Hydrologic advances in space-time precipitation modeling and forecasting," Chapter 3 in *Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems*, D.S. Bowels, and P.E. O' Connel eds., Kluwer Academic Publishers.

Foufoula-Georgiou, E., and Guttorp, P. (1986). "Compatibility of continuous rainfall occurrence models with discrete rainfall observations." *Water Resour. Res.*, Vol. 22, No. 8, pp. 1316-1322.

Gelb, A. (1974). *Applied optimal estimation.* MIT Press, Cambridge, Mass.

Jazwinski, A.H. (1970). *Stochastic processes and filtering theory.* Academic Press.

Johnson, E.R., and Bras, R.R. (1980). "Multivariate short-term rainfall prediction." *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 1, pp. 173-185.

Kavvas, M.L., and Herd, K.R. (1985). "A rader-based stochastic model for short-time-increment rainfall." *Water Resour. Res.*, Vol. 21, No. 9, pp. 1437-1455.

Kuo, B.C. (1978). *Automatic control.* 3rd ed., McGraw-Hill.

Marshall, R.J. (1975). "The Estimation and distribution of storm movement and storm structure, using a correlation analysis technique and raingauge data." *Journal of Hydrology*, Vol. 48, pp. 19-39.

Mejia, J.M., and Rodriguez-Iturbe, I. (1974). "On the synthesis of random field sampling from the spectrum: An application to the generation of hydrologic spatial processes." *Water Resour. Res.*, Vol. 10, No. 4, pp. 705-711.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.

Niemczynowicz, J. (1984a). "Areal rain- fall:An improved input for modeling of runoff." *Proc. of the Third International Conference on Urban Storm Drainage*, Gothenburg, Sweden, pp. 335-353.

Niemczynowicz, J. (1984b). "Inverstigation of the influence of rainfall movement on runoff hydrograph: Part 1. Simulations on conceptual catchment." *Nordic Hydrology*, Vol. 15, No. 2, pp. 57-70.

Niemczynowicz, J. (1984c). "Investigation of the influence of rainfall movement on runoff hydrograph: Part 2. Simulations on real catchment in Lund." *Nordic Hydrology*, Vol. 15, No. 2, pp. 71-84.

Niemczynowicz, J., and Dahlblom, P. (1984). "Dynamic properties of rainfall in Lund." *Nordic Hydrology*, Vol. 15, No. 1, pp. 9-24.

Party, G.G., and Marino, M.A. (1983). "Nonlinear runoff modelling: Parameter identification." *J. Hydraul. Div., ASCE*, pp. 865-880.

Pawitan, H. (1980). "Synthetic gener- ation of rainfall fields in northern California," M.S. thesis, College of Engineering, University of California, Davis.

Rodriguez-Iturbe, I. (1986). "Scale of fluctuation of rainfall models." *Water Resour. Res.*, Vol. 22, No. 9, pp. 155-375.

Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., and Isham, V. (1987). "Some models for rainfall based on stochastic point process." *Proc. R. Soc. Lond.*, A, Vol. 410, pp. 269-288.

Shearman, J.R. (1977a). "The speed and direction of movement of storm rainfall patterns."

Report No. UDC551.513.43, Meteorological Office, Braknell, Berkshire, UK, pp. 1-53.

Shearman, J.R. (1977b). "The speed and direction of movement of storm rainfall patterns with reference to urban storm sewer design." *Hydro, Sci. Bull.*, Vol. 22, No. 3.

Sieker, F. (1980). "A statistical model for short-term forecasting of space and time-varying rainfall." *Int. Symp. on Urban Storm Runoff*, Univ. of Kentucky, Lexington, pp. 43-47.

Sivapalan, M., and Wood, E.F. (1987). "A multidimensional model of nonsta- tionary space-time rainfall at the catchment scale." *Water Resour. Res.*, Vol. 23, No. 7, pp. 1289-1299.

Smith, J.A., and Karr, A.F. (1985)."Parmeter estimation for a model of space-time rainfall." *Water Resour. Res.*, Vol. 21, No. 8, pp. 1251-1257.

Smith, J.A., and Krajewski, W.F. (1987). "Statistical modeling of space-time rainfall using radar and rain gage observations." *Water Resour. Res.*, Vol. 10, pp. 1893-1900.

Zawadzki, I.I. (1973). "Statistical properties of precipitation patterns." *J. App. Meteorol.*, Vol. 12, pp. 459-472.

〈접수 : 1995년 8월 10일〉