

## 공간 분포된 강우를 사용한 유출 매개변수 추정 및 강우오차가 유출계산에 미치는 영향분석

### A Runoff Parameter Estimation Using Spatially Distributed Rainfall and an Analysis of the Effect of Rainfall Errors on Runoff Computation

윤 용 남\* / 김 중 훈\*\* / 유 철 상\*\*\* / 김 상 단\*\*\*\*

Yoon, Yong Nam / Kim, Joong-Hoon / Yoo, Chulsang / Kim, Sangdan

#### Abstract

This study was intended to investigate the rainfall-runoff relationship with spatially distributed rainfall data, and then, to analyze and quantify the uncertainty induced by spatially averaging rainfall data. For constructing spatially distributed rainfall data, several historical rainfall events were extended spatially by simple kriging method based on the semivariogram as a function of the relative distance. Runoff was computed by two models; one was the modified Clark model with spatially distributed rainfall data and the other was the conventional Clark model with spatially averaged rainfall data. Rainfall errors and discharge errors occurred through this process were defined and analyzed with respect to various rain-gage network densities. The following conclusions were derived as the results of this work; 1) The conventional Clark parameters could be appropriate for translating spatially distributed rainfall data. 2) The parameters estimated by the modified Clark model are more stable than those of the conventional Clark model. 3) Rainfall and discharge errors are shown to be reduced exponentially as the density of rain-gage network is increased. 4) It was found that discharge errors were affected largely by rainfall errors as the rain-gage network density was small.

*keywords* : Rainfall-Runoff, Spatially Distributed Rainfall, Modified Clark Model, Rainfall Error, Runoff Error

#### 요 지

본 연구에서는 공간적으로 분포된 강우자료를 바탕으로 한 강우유출관계를 고찰하고, 기존의 공간 평균된 강

- 
- \* 고려대학교 토목환경공학과 교수  
Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea, ynyoon@korea.ac.kr
  - \*\* 고려대학교 토목환경공학과 부교수  
Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea
  - \*\*\* 고려대학교 환경공학과 부교수  
Associate Prof., Dept. of Environmental Eng., Korea Univ., Chungnam 339-700, Korea
  - \*\*\*\* 고려대학교 방재과학기술연구소 연구원  
Research Assistant, ERC for Disaster Prev. Sci. & Tech., Korea Univ., Seoul, 136-701, Korea

우유출모형과 비교하여 유역을 공간 평균함으로써 내재되는 불확실성을 분석하여 이를 정량화시킬 수 있는 방법을 모색하였다. 과거 관측된 호우사상을 단순 크리깅 기법을 이용하여 공간적으로 분포된 강우자료를 구축하였다. 공간 분포된 강우와 공간평균강우의 유출을 비교하기 위하여 공간 분포된 강우를 수정 Clark방법에 의해서 유출계산을 수행한 결과와 지점 강우자료를 추출하여 티센 평탄한 공간평균강우를 Clark방법에 의해서 유출 계산한 결과를 서로 비교하였다. 또한 강우의 관측오차와 이로부터 발생하는 유출오차를 정의한 후, 강우관측소의 밀도를 다양하게 변화시켜가며 모의하여 강우의 관측오차가 유출해석에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 1) 공간 분포된 강우자료가 이용될 경우 기존에 추정된 Clark방법 유출 매개변수의 사용이 가능할 것으로 판단된다. 2) 수정 Clark방법의 경우는 강우의 공간적인 변동성을 고려한 유출 계산이 가능하기 때문에 이에 대한 불확실성이 일부 제거된 상태에서 매개변수 추정이 가능하게 되며, 따라서 전통적인 Clark방법의 경우보다 안정적인 매개변수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 3) 강우오차 및 유출오차는 강우관측소의 밀도가 높아짐에 따라 지수함수적으로 감소하고 있으며, 오차의 범위 또한 밀도가 증가할수록 평균오차 주위로 수렴하는 것으로 보인다. 4) 강우오차는 강우관측소의 밀도가 작을수록 유출에 보다 큰 영향력을 미치고 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 강우유출, 공간 분포된 강우, 수정 Clark방법, 강우오차, 유출오차

## 1. 서 론

강우의 시간적 공간적 분포가 유출수문곡선에 미치는 영향은 여러 연구(Wilson 등, 1979; Nicks, 1982; Hamlin, 1983; 최계운 등, 1992)에서 증명되어 왔으며, 특히 Milly와 Eagleson(1988)은 강우의 공간적 분포와 지속시간을 단순하게 가정하여 비교적 큰 유역의 경우 유출 총량은 강우의 공간적인 분포에 따라 매우 민감하게 반응하는 것으로 결론 내린 바 있다. 그러나 지금까지 범용되고 있는 전통적인 단위도를 이용한 유출해석방법은 유역의 공간 평균된 강우를 입력자료로 사용해왔으며, 이는 일반적으로 특정한 위치의 강우 관측소로부터 관측된 강우자료를 이용할 수밖에 없는 현실적인 문제 때문이었다. 이에 따라 지금까지의 홍수량 계산은 점우량을 면적우량으로 환산하여 계산되어 왔으나, 특히 우리나라와 같이 복잡한 지형에서는 점우량을 면적우량으로 환산하는데 따른 오차를 포함하고 있는 것이 사실이다. 그러나 최근 레이더 관측을 이용한 강우 관측이 활발하게 시행 또는 계획되고 있으며, 따라서 이에 대한 새로운 유출해석의 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 공간 분포된 강우의 적용을 용이하게 하기 위하여 상대적으로 단순한 준 분포형 접근방법인 수정 Clark방법(Full과 Feldman, 1998)을 적용하여 유출해석을 수행하였다. HEC(1995)에 의해 개발된 이 방법은 유수의 전이와 저류로 유출 계산을 수행하는 Clark의 개념적인 유출 모형(Clark, 1945)을 기본적인 모의과정으로 하여 공간적으로 분포된 강우자료의 처리능력을 추가하였으므로 선행적인 강

우유출모형이라 할 수 있다. 분석을 위한 공간적으로 분포된 강우자료를 획득하기 위해서 단순 크리깅 기법을 통하여 공간 분포된 강우자료를 작성하였으며 공간 분포된 강우를 수정 Clark방법에 의해서 유출계산을 수행한 후, 지점 강우자료를 티센 평탄한 강우를 Clark방법에 의해서 유출 계산한 결과와 비교하였다.

## 2. 수정 Clark방법

### 2.1 기본 개념

수정 Clark방법의 개념은 Clark(1945)의 개념적인 강우유출모형에서 사용하고 있는 기본원리를 기초로 하여 공간적으로 분포된 강우자료의 모의기능을 추가한 것이라고 할 수 있다. 수정 Clark방법에서 직접유출은 유수의 전이와 저류로 크게 나누어진다고 볼 수 있다. 유수의 전이효과는 유역진반으로부터 유역출구까지 유수의 도달시간과 관련되어 있으며, 저류효과는 유역의 자연적인 저류에 의한 지체현상으로 설명될 수 있다. 이 방법의 두 가지 대표적인 매개변수는 도달시간  $T$ 와 저류상수  $K$ 이다. 수정 Clark방법을 개념적으로 도식화하여 그림 1에 나타내었다.

수정 Clark방법의 적용을 위해 필요한 유역의 격자 자료는 각각의 격자면적과 해당 격자로부터 유역출구까지의 이동거리이다. 유역출구까지의 도달시간은 각각의 격자마다 고유하게 설정되며, 해당 격자로부터 유역출구까지의 이동거리에 비례한다. 특정 격자의 도달시간은 다음 식과 같이 추정될 수 있다(Kull과 Feldman, 1998).

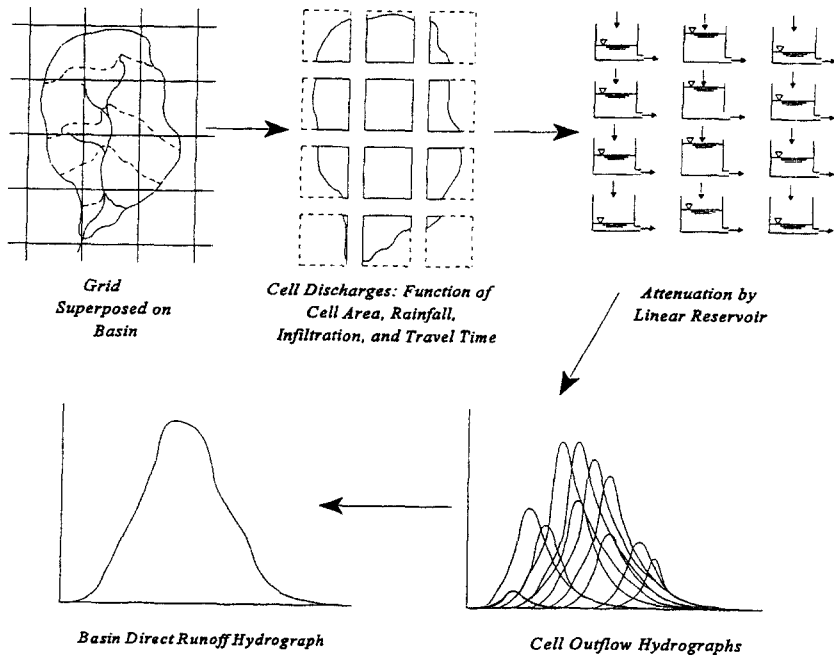


그림 1. 수정 Clark방법의 개념적인 도식화 (Kull과 Feldman, 1998)

$$(travel\ time)_{cell} = T_c \frac{(travel\ distance)_{cell}}{(travel\ distance)_{max}} \quad (1)$$

여기서,  $T_c$ 는 유역 전체의 도달시간,  $(travel\ distance)_{cell}$ 은 해당 격자로부터 유역출구까지의 이동거리이며,  $(travel\ distance)_{max}$ 는 유역출구로부터 이동거리가 가장 긴 격자의 유역출구까지 이동거리를 나타낸다. 또한 각각의 격자로부터 발생하는 유출량은 격자면적에 비례한다고 가정한다. 각각의 격자로부터 지체된 초과우량은 일반적인 Clark방법과 같이 유역 출구에 있는 가상의 선형저수지를 통하여 추적된다.

따라서 유역에 구축된 각각의 격자에 해당하는 도달시간-누가면적관계를 사용하여 순간 단위유효우량으로 인한 전체 유역출구에서의 유출수분곡선을 유도한 후, 전체 유역출구에 1개의 선형저수지가 존재한다고 가정하여 선형 저수지 추적함으로써 유수의 진이효과 및 유역의 저류효과 뿐만 아니라 공간 분포된 강우자료의 처리가 가능하게 된다.

## 2.2 모형구축방법

모형구축방법은 크게 두 가지 과정으로 구분된다. 첫

번째 과정은 공간 분포된 강우자료를 구축하는 과정이며, 두 번째 과정은 공간 분포된 강우자료를 처리하기 위한 유역보형화 과정이다.

### 2.2.1 공간 분포된 강우자료의 구축

#### 가. 강우의 공간분포모형 작성

실제 발생했던 과거 지점 강우를 공간적으로 분포시키기 위하여 본 연구에서는 크리깅(kriging) 기법을 적용하였다. 크리깅 기법은 기지의 값을 통하여 미지의 값을 추정하는 지형통계학적인 방법으로서 해당유역의 경우 11개 지점의 강우량 자료를 바탕으로 나머지 격자의 강우량을 추정할 수 있다. 적용된 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 W_1\gamma(d_{1,1}) + W_2\gamma(d_{1,2}) + \dots + W_{11}\gamma(d_{1,11}) &= \gamma(d_{1,p}) \\
 W_1\gamma(d_{2,1}) + W_2\gamma(d_{2,2}) + \dots + W_{11}\gamma(d_{2,11}) &= \gamma(d_{2,p}) \\
 &\vdots \\
 W_1\gamma(d_{11,1}) + W_2\gamma(d_{11,2}) + \dots + W_{11}\gamma(d_{11,11}) &= \gamma(d_{11,p})
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $W_i$ 는 미지점  $p$ 를 구하기 위한 기지점에서의

가중치이고,  $\gamma(d_{i,j})$ 는 기지점  $i, j$  사이의 거리  $d$ 에 관련된 변동수(semivariance)로서 표본사이의 공간적 의존도를 설명하는 변수를 의미하며, 본 연구에서는 거리에 선형 비례하는 것으로 단순 가정하였다. 또한 해가 편기(bias)되지 않게 하기 위하여 다음과 같은 제약식을 추가하였다.

$$W_1 + W_2 + \dots + W_{11} = 1 \quad (3)$$

위 식 (2)와 (3)에 덧붙여서 최소 가능추정오차를 구하기 위하여 라그랑제(lagrange) 승수  $\lambda$ 를 추가하면 다음과 같은 행렬식이 됨을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \gamma(d_{1,1}) & \gamma(d_{1,2}) & \dots & \gamma(d_{1,11}) & 1 \\ \gamma(d_{2,1}) & \gamma(d_{2,2}) & \dots & \gamma(d_{2,11}) & 1 \\ & & \ddots & & \\ & & & & \\ \gamma(d_{11,1}) & \gamma(d_{11,2}) & \dots & \gamma(d_{11,11}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_{11} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(d_{1,p}) \\ \gamma(d_{2,p}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{11,p}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

위 식 (4)는  $AW=B$ 형태의 연립방정식이므로 이는  $W=A^{-1}B$ 로 간단히 해결할 수 있다. 따라서 미지점  $p$ 에서의 강우량  $\widehat{R}_p$ 은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\widehat{R}_p = W_1R_1 + W_2R_2 + \dots + W_{11}R_{11} \quad (5)$$

여기서,  $R_i$ 는 기지점  $i$ 에서의 강우량으로서 상기 방법으로 각각의 강우사상에 대하여 각 시간별로 공간 분포된 강우자료를 구축할 수 있게 된다.

#### 나. 유효우량 산정

유효우량은 SCS방법을 적용하여 산정하였다. 다만, 격자망으로 구성된 유역자료를 바탕으로 각 격자별 CN 값을 각각 산정하는 방법을 취할 수도 있으나, 연구의 목적이 공간 분포된 강우가 유출에 미치는 영향을 파악하는 것이므로 추정된 CN이 해당 유역내의 모든 격자에 동일하게 적용되는 것으로 가정하였다.

#### 2.2.2 유역모형화

유역모형화 과정은 유역의 격자자료를 구축한 후, 각

격자별로 계산되는 수문곡선을 유역 전체적으로 합성하는 과정으로써 다시 세 단계로 세분된다. 첫 번째 단계는 유역의 수치고도자료를 기초로 하여 흐름방향을 모의할 수 있는 팔방흐름모형 작성단계이며, 두 번째 단계는 각 격자별 도달시간-누가면적관계 작성단계이다. 세 번째 단계는 각 격자에서 계산된 유출수문곡선을 합성하여 선형저수지 추적하는 단계이다.

#### 가. 팔방흐름모형 작성

수정 Clark방법의 매개변수 중에서 각 격자의 도달시간을 결정하기 위하여 전체 유역의 수치고도자료를 작성할 필요가 있다. 수치고도자료는 전체 유역을 일정한 크기의 격자로 세분한 후, 각 격자마다 대표 고도를 취함으로써 구성된다. 일단 수치고도자료가 작성되고 나면 이를 바탕으로 팔방흐름모형을 통하여 해당 유역 내 격자들의 흐름방향을 결정할 수 있다. 팔방흐름모형은 어떤 특정 격자에서 근방 8개의 격자(상하좌우 및 대각선) 중에서 하나의 격자로 흐름방향을 정의하는 역할을 한다. 격자의 이동거리는 흐름누적격자망을 구축함으로써 결정된다. 이것은 특정 격자가 유역출구격자로 배수되기까지 통과해야하는 격자의 개수를 합함으로써 계산할 수 있다.

#### 나. 도달시간-누가면적관계 작성

구축된 팔방흐름모형을 바탕으로 하여 격자별 도달시간-누가면적관계를 구성할 필요가 있다. 각 격자별로 유역 출구까지의 유하 거리를 산정한 후, 그에 따른 각 격자의 도달시간은 식 (1)을 통하여 계산 가능하다. 격자별 도달시간-누가면적관계는 HEC(1998)에서 사용되고 있는 일반적인 유역형상에서 유도된 아래와 같은 합성 도달시간-누가면적곡선 식을 적용하였다.

$$\begin{aligned} AI_i &= 0, \quad T \leq t_{i,i} \\ &= 1.414 \times \left( \frac{T - t_{i,i}}{t_c - t_{i,i}} \right)^{1.5}, \quad t_{i,i} \leq T \leq t_{i,i} + 0.5(t_c - t_{i,i}) \\ &= 1 - 1.414 \times \left( 1 - \frac{T - t_{i,i}}{t_c - t_{i,i}} \right)^{1.5}, \\ &\quad t_{i,i} + 0.5(t_c - t_{i,i}) \leq T \leq t_c \\ &= 0, \quad T > t_c \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $AI_i$ 는 격자  $i$ 의 유역면적에 대한 누가면적비,  $t_{i,i}$ 는 격자  $i$ 에서 처음 직접 유출이 발생하는 시간,  $t_c$ 는 도달시간이다. 이때,  $t_{i,i}$ 는 다음과 같은 식으로 산정할 수 있다.



$$t_{i,i} = \frac{t_c}{TNG} * (NG_i - 1) \quad (7)$$

여기서,  $TNG$ 는 유역 최원격자에서 유역출구까지 유하하는데 거치게 되는 격자 수이며,  $NG_i$ 는 격자  $i$ 에서 유역출구까지 유하하는데 거치게 되는 격자 수이다.

다. 격자별 유출수문곡선의 합성 및 저수지 추적

위에 설명된 방법으로 각 격자별로 작성된 단위도를 사용하여 각 격자별 유출수문곡선을 계산한 후, 이들을 모두 합하여 선형저수지의 유입수문곡선을 작성한다. 그 후에 유입수문곡선을 선형저수지 추적하여 해당 유역의 직접유출수문곡선을 작성한다. 유입수문곡선을 선형저수지 추적하여 유출수문곡선을 작성하는 과정은 Clark 방법과 같은 방법이 사용된다. 이때 기저유량은 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center, 1998)에서 사용하고 있는 세 가지 입력매개변수인 초기유량(STRTQ), 감수부에서 지수함수적으로 감소하는 시점의 유량(QRCSN), 감수상수(RC) 등을 이용하여 산정할 수 있으며, 이를 직접유출수문곡선에 더함으로써 유

역의 총 유출수문곡선을 작성할 수 있다.

### 3. 대상유역의 선정 및 자료조사

대상유역으로는 남한강 상류 IHP대표유역인 평창강 유역을 선정하였다. 대상유역의 선정 이유는 우선 다른 유역과 비교하여 볼 때, 강우관측소의 밀도가 월등히 높으며(57.75km/1개소), 비교적 신뢰할 수 있는 강우유출 자료를 획득할 수 있기 때문이다. 평창강유역도를 그림 2에 나타내었다. 적용유역의 하천지형인자는 1:50,000 지형도에서 구하였으며, 그 결과 수치고도모형, 팔방흐름모형 및 각 격자별 면적을 그림 3~5에 각각 나타내었다. 참고로 그림 4의 팔방흐름모형의 결과는 그림 2와 비교하여 볼 때, 유역의 하천망을 비교적 유사하게 모의하고 있음을 알 수 있다.

### 4. 수정 Clark방법의 매개변수 추정

#### 4.1 공간 분포된 강우자료 작성

크리깅(Kriging) 기법을 이용하여 실제 발생했던 과거 지점 강우를 공간적으로 분포시켰다. 그림 6은 사용

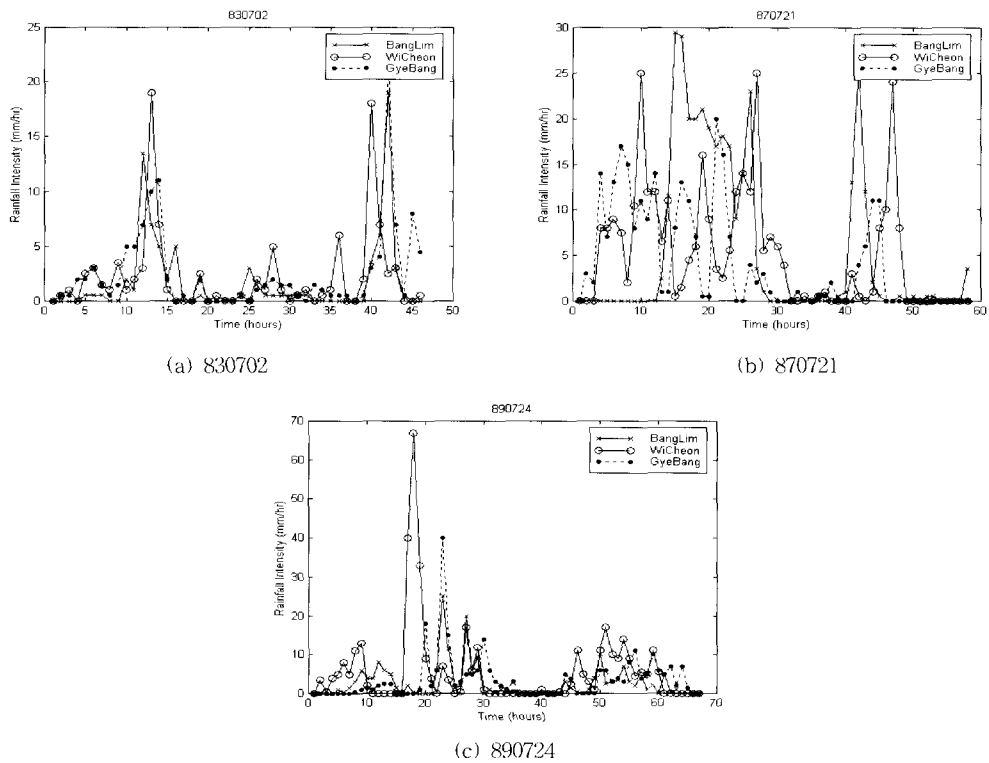
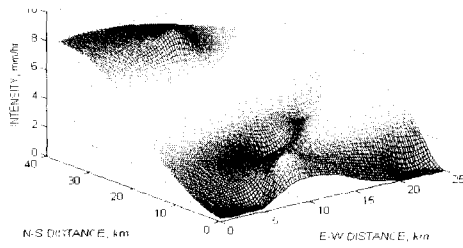
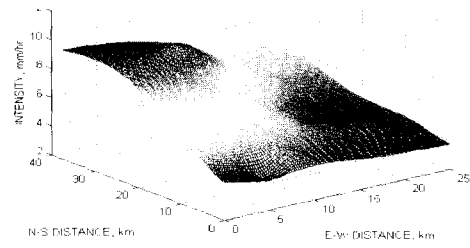


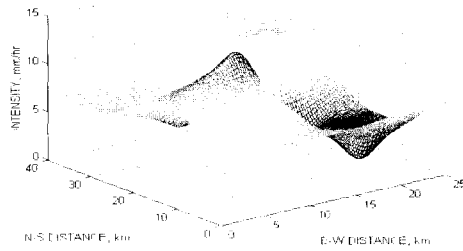
그림 6. 주요호우의 지점별 우량주상도



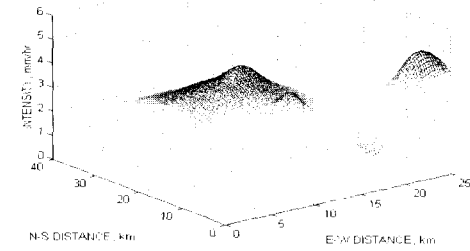
(a) 5~6시간



(b) 10~11시간



(c) 15~16시간



(d) 20~21시간

그림 7. 사상 850513을 크리깅 기법에 의해 공간 분포시킨 결과 (11개 강우관측소 사용)

표 1. Clark 및 수정 Clark방법의 매개변수 추정

강우사상			830702	840702	850513	860718	870721	880712	890724	평균	변동계수
강우량 (mm)	CON	1개소	100.50	344.70	131.00	302.50	302.50	202.00	377.50		
		3개소	99.71	249.49	118.48	286.04	286.04	174.55	283.62		
		11개소	97.16	232.28	105.20	260.58	260.58	169.63	256.77		
	MOD	3개소	101.40	232.29	118.33	283.24	283.24	174.34	285.14		
		11개소	100.57	229.61	108.33	269.69	269.69	172.04	263.35		
도달시간 (hr)	CON	1개소	4.18	3.00	3.19	6.05	6.05	4.50	3.93	4.76	40.51
		3개소	4.00	4.15	3.60	8.50	8.50	4.88	5.88	5.64	36.93
		11개소	4.00	4.50	4.11	5.45	8.50	3.00	8.50	5.87	42.55
	MOD	3개소	7.19	5.75	3.26	4.51	5.45	4.75	8.25	5.75	28.08
		11개소	9.74	7.00	4.12	6.40	4.51	4.62	7.00	6.18	32.02
지류상수 (hr)	CON	1개소	20.00	18.20	8.16	2.62	6.40	8.11	20.00	11.93	60.81
		3개소	20.00	10.87	7.51	2.12	4.26	9.21	13.64	9.66	61.99
		11개소	20.00	10.78	8.13	2.20	4.48	2.00	8.53	8.02	77.92
	MOD	3개소	20.00	12.31	6.65	6.76	7.63	11.19	11.88	10.92	42.92
		11개소	20.00	9.44	8.39	4.75	7.75	8.07	7.79	9.45	51.47
CN값	CON	1개소	77.16	60.00	60.00	80.53	82.56	72.27	71.51	72.00	12.67
		3개소	78.08	69.89	62.65	81.67	77.90	77.96	87.12	76.47	10.43
		11개소	79.17	74.85	67.34	79.49	81.57	63.88	91.79	76.87	12.11
	MOD	3개소	78.43	70.50	60.02	84.50	81.03	79.69	85.15	77.05	11.59
		11개소	81.82	72.39	68.34	82.69	83.39	75.83	88.49	78.99	8.93
목적함수 Z	CON	1개소	24.20	153.87	43.12	89.20	110.29	96.77	214.73	104.60	61.88
		3개소	24.24	39.93	35.26	73.82	110.91	93.29	128.98	72.35	56.08
		11개소	22.91	32.98	25.13	72.69	108.00	42.44	125.71	61.41	67.80
	MOD	3개소	18.56	37.13	35.68	98.51	120.42	82.24	125.83	74.05	58.89
		11개소	12.00	48.99	21.16	74.95	99.46	62.16	97.28	59.43	57.91

된 강우사상에 대한 방림, 위천, 계방지점에서의 우량주 상도이며, 그림 7은 11개 강우관측소를 사용하여 사상 850513을 크리깅 기법에 의해 공간 분포시킨 결과의 일부를 보여주고 있다. 예를 들어, (a) 5~6시간은 강우 시작 후 5시간에서 6시간 사이에 내린 강우량을, (b) 10~11은 강우 시작 후 10시간에서 11시간 사이에 내린 강우량을 의미한다.

#### 4.2 매개변수 추정

유역의 매개변수인 도달시간  $t_c$  및 저류상수  $K$ 를 구하기 위하여 1983~1989년 주요호우를 대상으로 도달시간  $t_c$ , 저류상수  $K$  및 CN값을 결정변수로 취하여 비선형 최적화 방법 중의 하나인 Davidon-Fletcher-Powell법(Mays와 Tung, 1992)을 이용한 매개변수 최적화 과정을 실시하였으며, 이 때 목적함수  $Z$ 는 아래와 같은 식을 적용하였다(HEC, 1998).

$$Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(t) - Q_s(t))^2 + \frac{(Q_o(t) \pm Q_A)}{2Q_A}}{n}} \quad (6)$$

$$Q_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o$$

여기서,  $Z$ 는 목적함수이며,  $Q_o(t)$ 는 시간  $t$ 에서 관측된 유량자료,  $Q_s(t)$ 는 시간  $t$ 에서 계산된 유량이다.

$Q_A$ 는 평균 관측유량이며,  $i$ 는 수문곡선 종거의 개수,  $n$ 은 목적함수를 계산하기 위해 사용되는 종거의 총 수이다. 추정된 결과는 표 1과 같으며, 최종 추정된 매개변수를 사용하여 계산된 유출수문곡선의 일부를 그림 8에 나타내었다.

표 1에서 CON은 전통적인 Clark방법에 의한 매개변수 추정치를, MOD는 수정 Clark방법에 의한 매개변수 추정치를 의미한다. 즉, 전통적인 Clark방법을 사용하여 매개변수를 추정할 때, 3개소의 경우는 유역 내 방림, 위천, 계방 3개 관측소의 티센 평균한 강우자

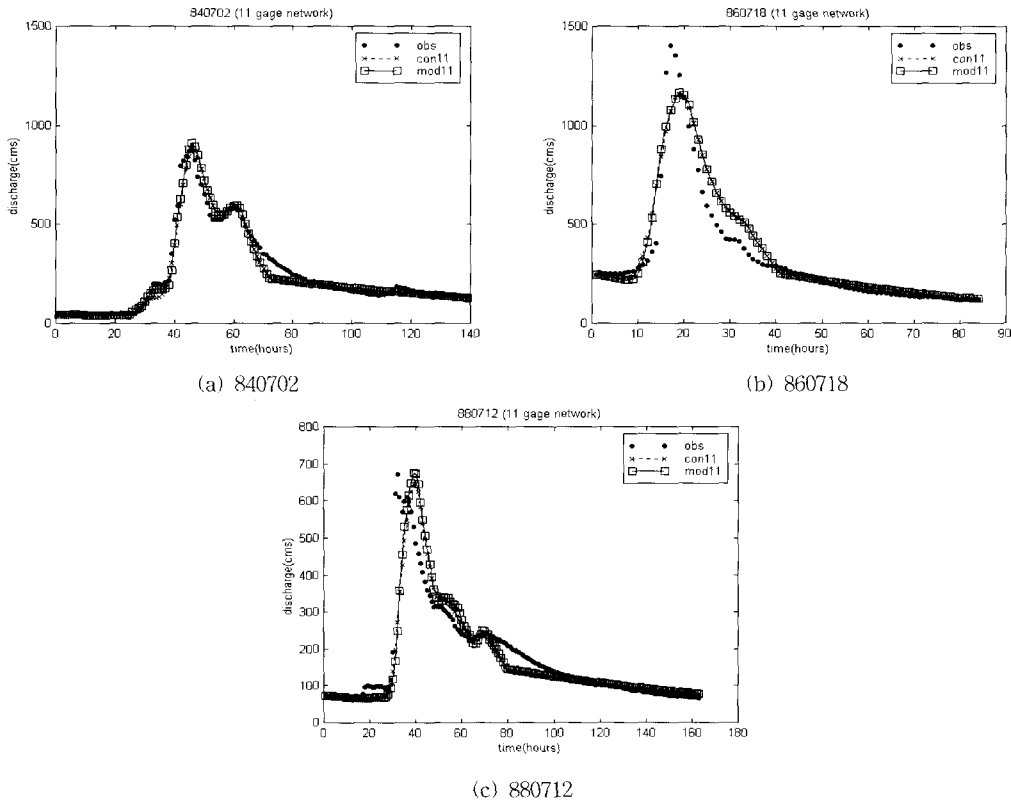


그림 8. 최종 추정된 매개변수를 사용한 유출수문곡선의 계산



료를, 11개소의 경우는 11개 관측소를 모두 사용하여 각각 추정하였으며, 수정 Clark방법을 사용하여 매개변수를 추정할 때는 위에 언급한 3개 관측소 및 11개 관측소를 사용하여 크리깅 기법으로 공간 분포시킨 강우자료를 사용하였다. 3개 관측소를 사용한 별도의 티센망을 구축한 이유는 세계기상기구(WMO)에서 추천하고 있는 수문기상학적 일반목적용을 위한 강우관측망의 최소밀도가 해당유역의 경우 100~250km/개소(윤용남, 1994)임을 감안하여 별도로 선정하였으며, 1개 관측소를 사용한 이유는 보다 열악한 상황에 대한 분석을 해 보고자 함이다. 또한 상기 3개 관측망의 밀도는 우리나라 평균 강우관측망의 밀도와 비슷한 값을 주고 있다.

#### 4.4 결과 분석

표 1에 나타난 바와 같이 분석결과 강우관측소를 1개소만 사용하였을 경우에는 면적평균 강우량에 있어서 11개 강우관측소 자료 모두를 사용한 것에 비해 최대 50%까지 오차가 발생할 수 있는 것으로 계산되었다. 이는 강우관측소 1개가 500km 이상의 면적을 대표할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 3개 강우관측소를 사용하여 추정된 면적평균 강우량은 11개 강우관측소에서 계산된 면적평균 강우량과  $\pm 10\%$  정도의 오차를 보일 수 있는 것으로 계산되었다. 또한 크리깅 기법으로 구한 공간 분포된 강우의 면적평균 강우량과 지점 강우자료의 티센평균강우량은 3개 강우관측소를 사용한 경우  $\pm 7\%$ , 11개 강우관측소를 사용한 경우  $\pm 4\%$  정도의 차이를 보이고 있다. 그러나 이 때의 공간 분포된 강우는 실제 강우장의 공간분포를 표현한 것이 아니라, 단지 사용된 지점 강우량을 바탕으로 하여 상대거리를 기준으로 작성된 강우장이므로 계산된 오차가 실제 강우관측망이 갖고 있는 오차라고 보기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

이 때 주목할 점은 추정된 매개변수가 매 사상별로 얼마나 차이를 갖고 있느냐하는 문제이다. 즉, 목적함수를 매우 작게 하면서 매개변수를 추정하였다할지라도 사상마다 크게 다른 추정값을 준다면 추정에 사용된 사상 이외의 강우사상에 대한 홍수량을 산정할 때에 어떠한 매개변수를 적용해야 하는지에 대해 난감한 문제에 직면할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 표 1에서 관심이 되는 부분은 최적 추정된 도달시간  $t_c$  및 저류상수  $K$ , CN의 변동계수이다. 즉, 각각 추정된 매개변수의 변동계수가 작다면 보다 안정적으로 추정된 매개변수인

을 나타내기 때문이다. 평균적으로 볼 때, 1개 강우관측소를 사용한 경우를 제외한 나머지 경우는 대체로 비슷한 목적함수를 가지며 추정되었다. 도달시간  $t_c$  및 저류상수  $K$ , CN 또한 나머지 4개 경우 모두 유사한 값으로 계산되었다. 그러나, 도달시간  $t_c$  및 저류상수  $K$ , CN의 변동계수는 수정 Clark방법이 전통적인 Clark방법보다 더 작은 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상은 강우의 공간적 변동성으로부터 설명될 수 있다. 즉, 수정 Clark방법의 경우는 강우의 공간적인 변동성을 고려한 유출 계산이 가능하기 때문에 이에 대한 불확실성이 일부 제거된 상태에서 매개변수 추정이 가능하게 되기 때문이다. 전통적인 Clark방법의 경우는 매개변수 자체의 불확실성 뿐만 아니라 강우가 갖고 있는 공간적인 불확실성 또한 매개변수 추정 시 덧붙여지기 때문에 그 만큼의 변동계수가 증가되는 것으로 보여진다.

### 5. 강우관측소 개수에 대한 강우오차가 유출오차에 미치는 영향 분석

대상지역의 강우관측소 밀도별 강우오차를 계산한 후, 계산된 강우오차가 유출해석에 미칠 수 있는 오차의 정도를 파악하기 위하여 앞서 계산한 바와 같이 크리깅 기법을 통한 공간 분포된 강우를 분석에 이용하였다. 공간 분포된 강우와 공간 평균된 강우의 유출을 비교하기 위하여 공간 분포된 강우는 수정 Clark방법에 의해서 유출 계산하였으며, 공간 평균된 강우(티센 면적가중평균)는 Clark방법에 의해서 유출 계산하여, 두 가지 유출 계산결과를 서로 비교하였다. 분석에 앞서 강우오차와 이로부터 발생하는 유출오차를 정의하였다.

#### 5.1 강우오차 및 유출오차의 정의

강우오차문제는 먼저 인공위성을 이용할 경우 넓은 대상지역을 한번에 관측함으로써 공간적으로는 연속이나, 인공위성이 일정 시간 간격으로 대상지역을 방문함으로써 생기는 시간적 불연속이 강우오차를 유발하는 원인이 된다. 이것은 강우관측소를 이용한 지상관측의 경우와는 반대로서 지상에서의 관측자료는 시간적으로는 연속이 되지만 공간적으로는 불연속이 되고 이것이 강우오차의 원인이 되는 것이다(유철상, 1997). 본 연구는 지상관측의 경우에 생기는 강우오차문제를 다루므로 다음과 같은 강우오차  $\epsilon_r$ 를 정의하였다.

$$\epsilon_i = \int_0^{T_d} \frac{t}{\alpha(t)} \int_0^X \int_0^Y xy \cdot |\phi(x, y, t) - \psi_T(t)| dy dx dt \times 100 (\%) \quad (7)$$

여기서,  $\phi(x, y, t)$ 는 시간  $t$  및 위치  $(x, y)$ 에서의 강우강도로 정의되며,  $\psi_T(t)$ 는 시간  $t$ 에서 해당 지역의 특정 티센가중 평균강우강도를 의미한다. 또한  $\alpha(t)$ 는 시간  $t$ 에서 해당지역 강우의 공간적인 표준편차를 의미하며,  $T_d$  및  $X, Y$ 는 각각 강우지속시간 및 해당 지역의 영역을 의미한다. 이에 대응하는 유출오차  $\epsilon_f$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\epsilon_f = \int_0^{T_f} t \cdot \frac{|Q(t) - Q_T(t)|}{Q(t)} dt \times 100 (\%) \quad (8)$$

여기서,  $Q(t)$ 는 공간적으로 분포된 강우로 인한 시간  $t$ 에서의 유출량이며,  $Q_T(t)$ 는 티센가중 평균강우로 인한 시간  $t$ 에서의 유출량을 의미한다. 또한,  $T_f$ 는 유출계산시간을 의미한다.

## 5.2 적용결과

강우관측소의 밀도별 강우오차 및 유출오차를 계산하기 위하여 표 2와 같이 강우관측소의 밀도별 총 7개의 티센망을 구축하여 각각에 대한 강우오차 및 유출오차를 추정하는데 이용하였다.

강우관측소 개수에 대한 강우-유출오차의 관계를 각각 그림 9와 10에 도시하였으며, 강우오차와 유출오차 사이의 상관관계를 회귀분석하여 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서의 각 직선은 강우관측소 개수별로 구

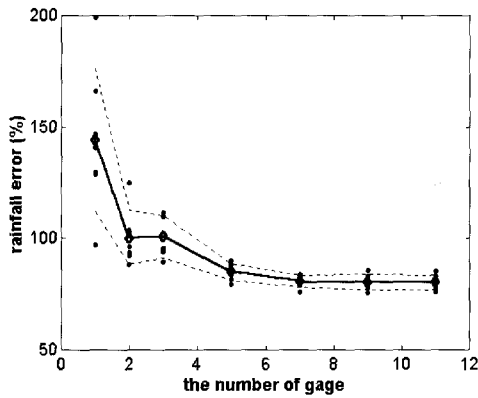


그림 9. 강우관측소 개수에 대한 강우오차

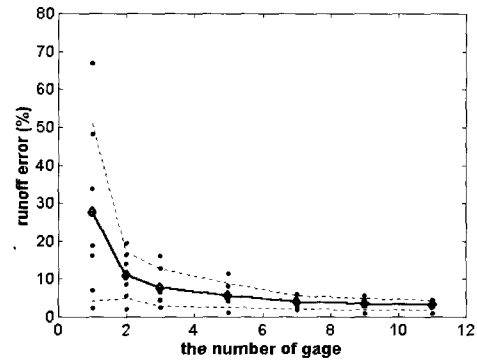


그림 10. 강우관측소 개수에 대한 유출오차

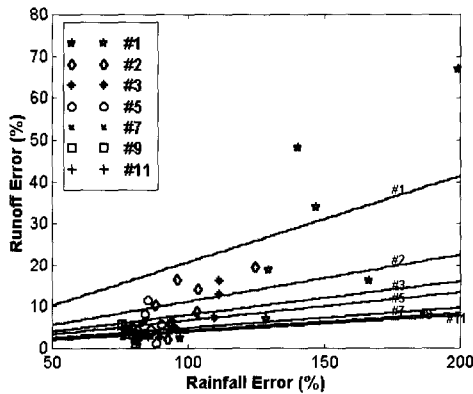


그림 11. 강우계 밀도에 따른 강우오차와 유출오차의 상관관계 변화

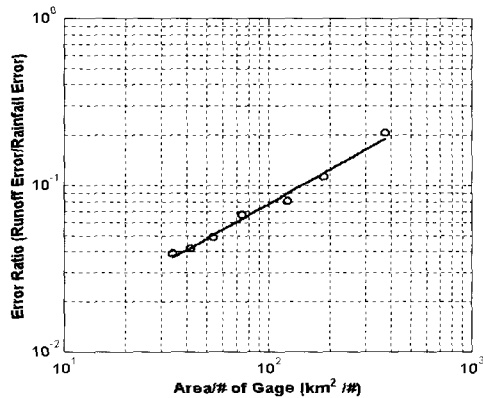


그림 12. 강우관측소 밀도에 대한 강우-유출오차 영향비

표 2. 적용된 티센망

강우관측소 개수	강우관측소 밀도 (km <sup>2</sup> /1개소)	사용된 강우관측소 및 티센가중치 관측소명 (티센가중치)
1	519.78	위천(1.000)
2	259.89	수동(0.473), 계방(0.527)
3	173.26	방림(0.246), 위천(0.418), 계방(0.336)
5	103.96	방림(0.073), 가평(0.200), 등매(0.309), 계방(0.200), 홍정(0.218)
7	74.25	가평(0.136), 계촌(0.055), 신리(0.145), 위천(0.182), 용진(0.145) 계방(0.136), 홍정(0.201)
9	57.75	가평(0.068), 수동(0.049), 대화(0.089), 신리(0.087), 위천(0.107) 등매(0.113), 용진(0.131), 계방(0.147), 홍정(0.209)
11	47.25	방림(0.023), 가평(0.068), 수동(0.026), 계촌(0.007), 대화(0.089) 신리(0.087), 위천(0.100), 등매(0.113), 용진(0.131), 계방(0.147) 홍정(0.209)

한 회귀직선이다. 또한 그림 11의 분석결과를 바탕으로 하여 강우관측소 밀도에 대한 강우-유출오차비의 관계를 그림 12에 도시하였다.

5.2 결과분석

강우관측소의 밀도가 조밀해짐에 따라 강우오차(그림 9)와 유출오차(그림 10)는 모두 지수함수적으로 감소하고 있다. 또한 오차가 발생할 수 있는 범위(95% 신뢰구간으로 추정된 구간으로 그림 9와 10에서 점선으로 표시)는 강우관측소의 밀도가 작은 경우에 오차의 범위가 매우 크며, 관측소의 밀도가 커짐에 따라 오차는 평균적인 값에서 크게 벗어나지 않고 있다. 이러한 현상은 두 가지 측면에서 중요한 정보를 포함하고 있다. 첫 번째는 강우관측소의 밀도가 상대적으로 낮은 유역의 경우 실제 유출량이 예보된 유출량을 훨씬 상회하여 발생할 확률이 더 크다는 것을 의미하며, 두 번째 사항은 관심 유역에 강우관측소의 추가 설치 시 가장 경제적인 강우관측소의 밀도를 추정할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 11은 강우관측소의 밀도에 따른 강우오차와 유출오차 사이의 관계를 보여주는 그림으로 밀도가 증가함에 따라 강우오차가 유출오차에 미치는 영향이 상대적으로 작아지고 있음을 알 수 있으며, 밀도가 어느 한계 이상이 되면 강우오차에 대한 유출오차의 영향비가 상대적으로 수렴하는 것으로 파악되었다. 이는 다시 그림 12에서 확인할 수 있듯이 강우-유출 오차의 비는 강우관측소 밀도와 지수함수적인 관계를 맺고 있음을 파악할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 공간적으로 분포된 강우자료를 바탕으로 한 강우유출관계를 고찰하고 기존의 공간 평균된 강우유출모형과 비교하여 유역을 공간 평균함으로써 내재되는 불확실성을 분석하여 이를 정량화시킬 수 있는 방법을 모색하였다. 과거 관측된 호우사상을 단순 크리깅 기법을 이용하여 공간적으로 분포된 강우자료를 구축하였다. 공간 분포된 강우와 공간평균강우의 유출을 비교하기 위하여 공간 분포된 강우를 수정 Clark방법에 의해서 유출 계산한 결과와 직접 강우자료를 티센 평균한 공간평균강우를 Clark방법에 의해서 유출 계산한 결과를 서로 비교하였다. 또한 강우의 관측오차와 이로부터 발생하는 유출오차를 정의한 후, 강우관측소의 밀도를 다양하게 변화시켜가면서 모의하여 강우의 관측오차가 유출해석에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 공간 분포된 강우자료가 이용될 경우 기존에 추정된 Clark방법 유출 매개변수의 사용이 가능할 것으로 판단된다.
2. 수정 Clark방법의 경우는 강우의 공간적인 변동성을 고려한 유출 계산이 가능하기 때문에 이에 대한 불확실성이 일부 제거된 상태에서 매개변수 추정이 가능하게 되며, 따라서 전통적인 Clark방법의 경우보다 안정적인 매개변수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 강우오차 및 유출오차는 강우관측소의 밀도가 높

- 아짐에 따라 지수함수적으로 감소하고 있으며, 오차의 범위 또한 밀도가 증가할수록 평균 오차 주위로 수렴하는 것으로 보여진다.
4. 강우오차는 강우관측소의 밀도가 작을수록 유출에 보다 큰 영향력을 미치고 있음을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 건설교통부 (1998), **국제수문개발계획(IHP)**.
- 유철상 (1997), 관측오차문제에 대한 다차원 강우모형의 적용, **한국수자원학회논문집**, 제30권, pp. 441-447.
- 윤용남 (1994), **공업수문학**, 청문각, pp. 42-81.
- 최계운, 이희승, 안상진 (1992), 분포형 모델을 이용한 유역 내 이동강우의 유출해석, **한국수자원학회 논문집**, 제25권, pp. 101-109.
- Clark, C. O. (1945), Storage and the Unit Hydrograph. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Hamlin, M. J. (1983). The Significance of Rainfall in the Study of Hydrological Process at Basin Scale, *J. of Hydrology*, Vol. 65, pp. 73-94.
- Hydrologic Engineering Center (1998), HEC-HMS : Hydrologic Modeling System, User's Manual. *U.S. Army Corps of Engineers*, Davis, CA.
- Hydrologic Engineering Center (1995), Modified Clark (ModClark) Runoff Simulation User's Manual. *U.S. Army Corps of Engineers*, Davis, CA.
- Kull, D. W. and Feldman, A. D. (1998), Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *J. of Hydrologic Eng. ASCE*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-19.
- Mays, L. W. and Tung, Y.-K. (1992), Hydro-systems Engineering and Management, *McGraw-Hill, Inc.*, International Editions, pp. 106-163.
- Milly, P. C. D, and Eagleson, P. S. (1988), Effect of Storm Scale on Surface Runoff Volume, *Water Resour. Res.*, Vol. 24, No. 4, pp. 249-260.
- Nicks, A. D. (1982), Space-Time Quantification of Rainfall Inputs for Hydrological Transport Models, *J. of Hydrology*, Vol. 59, pp. 249-260.
- Wilson, C. B., Valdes, J. B., and Rodriguez-Itube, I. (1979), On the Influence of the Spatial Distribution of Rainfall on Storm Runoff, *Water Resour. Res.*, Vol. 15, No. 2, pp. 321-328.

(논문번호:01-028/접수:2001.04.3/심사완료:2001.12.7)