

## 소하천 유역에서의 유출해석모형 비교

### Comparison of Runoff Models for Small River Basins

강 인 식\*

Kang, In Shik

---

#### Abstract

It may be difficult to make exact estimates of peak discharge or runoff depth of a flood and to establish the proper measurement for the flood protection since water stages or discharges have been rarely measured at small river basins in Korea. Three small catchments in the Su-Young river basin in Pusan were selected for the study areas. Various runoff parameters for the study areas were determined, and runoff analyses were performed using three different runoff models available in literatures; the storage function method, the discrete, linear, input-output model, and the linear reservoir model. The hydrographs calculated by three different methods showed good agreement with the observed flood hydrographs, indicating that the models selected are all capable of successfully modeling the flood events for small watersheds. The storage function method gave the best results in spite of its weakness that it could not be applicable to small floods, while the linear reservoir model was found to provide relatively good results with less parameters. The capabilities of simulating flood hydrographs were also evaluated based on the effective rainfall from the storage function parameters, the  $\phi$ -index method, and the constant percentage method. For the On-Cheon stream watershed, the storage function parameters provided better estimates of effective rainfall for regenerating flood hydrographs than any others considered in the study. The  $\phi$ -index method, however, resulted in better estimates of effective rainfall for the other two study areas.

---

#### 요 지

우리나라 대부분의 소하천 유역은 수위나 유량의 관측이 행해지지 않은 미계측 유역으로 방치되어 있어 홍수시 정확한 유출량의 추정이나 홍수피해 경감을 위한 적절한 대책수립이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 부산지방 수영강 수계 중 3개 소하천 유역을 연구대상유역으로 선정하여 측정된 수문자료를 근거로 각종 유출 매개변수를 추정하였다. 또한 기존의 유출 해석 모형 중 저류함수법과 선형 이산화 입력-출력 모형 및 선형저수지 모형을 채택하여 유

---

\* 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원

출해석을 실시하였다. 각 모형에 의한 계산 수문곡선은 실측 수문곡선과 잘 일치하였으며, 이들 모형은 소유역의 홍수사상을 성공적으로 나타낼 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 채택한 모형 중 저류함수법은 크기가 작은 홍수에는 적용하기 어렵다는 문제점에도 불구하고 가장 양호한 결과를 제공하였으며, 선형저수지 모형은 적은 수의 매개변수로도 비교적 양호한 결과를 준다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 저류함수법 매개변수를 이용한 방법,  $\phi$ -index법 및 일정비손실법 등 세 가지 방법의 유효강우 산정법에 따른 모형의 재현성을 평가하였다. 온천천 유역의 경우에는 저류함수법 매개변수를 이용한 방법이 가장 양호한 결과를 나타내었으나, 다른 두 연구대상유역의 경우에는  $\phi$ -index법이 더 나은 결과를 제공하였다.

## 1. 서 론

우리나라의 한강, 낙동강 등 대하천에는 홍수통제소가 설치되어 있고 다목적 댐의 건설과 함께 우량관측소 및 수위관측소 등이 설치되어 있기 때문에 각종 수문자료를 수집, 분석하며 이를 토대로 홍수에경보를 시행하고 있다. 그러나 중소하천 유역의 경우에는 1965년부터 1974년까지 계속되었던 국제수문개발 10개년계획(International Hydrological Decade; IHD)과 1975년 이후 현재까지 계속되고 있는 국제수문개발계획(International Hydrological Program; IHP) 사업의 일환으로 대하천 수계 내에 포함된 수 개의 대표시험 유역에서만 각종 수문자료가 수집, 정리되고 있을 뿐, 대부분의 중소하천 유역은 수위나 유량 등의 관측이 거의 행해지지 않은 미계측 유역으로 방치되어 있는 상태이다.

이 때문에 중소하천 유역에서는 홍수시 정확한 유출량의 추정, 홍수피해 경감을 위한 적절한 대책 수립 및 수공구조물의 건설에 필요한 계획홍수량의 산정 등이 극히 어려운 실정이다. 특히 한국의 동남단에 위치한 부산지방은 해마다 장마전선과 수차례에 걸친 태풍의 직간접적 영향으로 많은 피해를 입고 있으며, 1991년 8월 22일과 23일에 발생 하였던 태풍 글래디스(Gladys)의 영향으로 수영강 연변의 넓은 지역이 침수되어 1,300억원 이상의 막대한 피해를 입은 바 있다.

따라서 본 연구에서는 수영강 수계 내의 3개 소하천 유역을 연구대상으로 선정하였으며, 비교를 위한 유출해석 모형으로는 지금까지 주로 우리나라

의 중유역이나 대유역에 많이 적용되었던 저류함수법, 선형 이산화 입력-출력 모형 및 선형저수지 모형을 채택하였다. 본 연구에서는 측정자료를 근거로 유역의 유출특성을 분석하고, 모형의 매개변수를 결정하며 홍수사상을 재현함으로써 채택한 모형의 소유역에의 적용가능성을 확인하고, 이들 모형의 비교, 분석을 통해 연구대상유역에 보다 적합한 유출해석 모형을 선택하도록 한다. 또한 저류함수법 매개변수를 이용한 방법과  $\phi$ -index법 및 일정비손실법을 사용하여 유효강우량을 산정함으로써 유효강우의 산정방법에 따른 유출해석 결과를 비교, 검토하고 이를 통해 연구대상유역에 적합한 유효강우량 산정법을 결정한다.

## 2. 유출해석 모형

### 2.1 저류함수법

저류함수법(storage function method; S.F. M.)은 유역의 저류함수식으로부터 수학적으로 유출량을 산정하는 방법으로서, 유출현상의 비선형성을 나타내기 위하여 강우-유출의 변환 과정에 유역저류 과정을 도입하여 저류량과 유출량의 관계식을 만들고, 이로부터 유출량을 순차적으로 계산해 가는 기법이다(Kimura, 1960).

저류함수법에서는 다음과 같은 비선형의 저류량 S와 유출량 Q의 관계를 사용한다.

$$S_t = K \cdot Q_t^p \quad (1)$$

여기서  $K$ 와  $P$ 는 유역에 대한 상수,  $S_i$ 은 지체를 고려한 유역의 저류량이며,  $Q_i$ 은 지체를 고려한 유역의 직접유출량이다.

유역에 대한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dS_i}{dt} = \alpha \cdot f \cdot R \cdot A - Q_i \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 평균유입계수,  $R$ 은 단위 지속기간 동안의 유역 내 평균강우량(mm),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>)이며,  $\alpha$ 는 단위 환산계수이다.

저류함수법에서는 강우 초기에는 유역의 전지역에서 침투가 발생하여 강우로 인한 유출은 없고, 강우량이 증가하여 유출점에 이르게 되면 유출역이라고 하는 유역의 일부에서만 유출이 발생하며, 강우량이 계속 증가하여 그 누가량이 포화점에 이르게 되면 전유역에서 유출이 발생하는 것으로 가정한다. 전유역에 대한 유출역의 비를  $f_1$ 이라 하면 이는 1차 유출물에 해당한다. 한편 포화점 이후에 전유역이 유출에 기여한다 하더라도 침투가 일정한 값을 가지므로 이때의 유출률  $f_{in}$ 은 1보다 작게 된다. 따라서 기저유출  $Q_B$ 를 포함한 유역의 총유출량  $Q$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = A3.6\{f_1 \cdot q_1 + (f_{in} - f_1) \cdot q_{in,t}\} + Q_B \quad (3)$$

여기서  $q_1$ 은 총강우에 의한 단위유출고(mm)이며,  $q_{in,t}$ 은 포화점 이후의 강우에 의한 단위유출고(mm)이다.

## 2.2 선형 이산화 입력-출력 모형

선형 이산화 입력-출력 모형은 고려하고 있는 물리적 과정을 상세히 나타내지 않고 두 개 이상의 관측된 현상 간의 인과관계만을 확립하려고 하는 일종의 black-box 모형이다. 강우-유출 과정의 연속선형계에서 시간의존인 입력  $I(t)$ 와 출력  $Q(t)$ 의 관계는 다음과 같은 미분방정식으로 표시된다.

$$\left(1 + \sum_{i=1}^p \alpha_i D^i\right) Q(t) = \left(\sum_{j=0}^q \beta_j D^j\right) I(t) \quad (4)$$

여기서  $D^i$ 는 시간  $t$ 에 대한  $i$ 계의 미분연산자이며,  $\alpha_i$  및  $\beta_j$ 는 추정하고자 하는 시간불변 매개변수이다. 수문학적 응용에서  $p$ 와  $q$ 의 값은 모형의 식별을 통해서 선택해야 하지만 Chow(1972)는  $Q(t)$  및  $I(t)$ 에 대한 3계 이상의 도함수는 모형의 계산 결과에 큰 영향을 주지 않는다는 점을 밝혔다.

Box와 Jenkins(1976)는 식 (4)의 이산화식을 다음과 같이 나타내었다.

$$(1 - a_1 B - a_2 B^2 - \dots - a_p B^p) Q(t) = (b_0 + b_1 B + b_2 B^2 + \dots + b_q B^q) I(t) \quad (5)$$

여기서  $B$ 는 시간에 대한 후진의 shift operator이다. 결국 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q(t) = \frac{\theta(B)}{\phi(B)} I(t) \quad (6)$$

여기서

$$\phi(B) = 1 - a_1 B - a_2 B^2 - \dots - a_p B^p \quad (7)$$

$$\theta(B) = b_0 + b_1 B + b_2 B^2 + \dots + b_q B^q \quad (8)$$

식 (6)의 연산자  $\theta(B)/\phi(B)$ 를 전달함수(transfer function)라 하며 입력을 출력으로 변환시켜주는 역할을 한다.

## 2.3 선형저수지 모형

선형저수지는 저류량  $S$ 가 유출량  $Q$ 의 선형함수가 되는 저수지로서 저류량과 유출량의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = k \cdot Q \quad (9)$$

여기서  $k$ 는 저류상수이다.

또한 유역에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (10)$$

식 (9)와 (10)을 연립하면 선형 미분방정식이 얻어지며 그 해는 다음과 같다.

$$Q = e^{-t/k} \int \frac{1}{k} e^{t/k} I(t) dt \quad (11)$$

식 (11)에서  $I(t)$ 를 Dirac delta 함수  $\delta(t)$ 로 치환하면 식 (12)와 같은 선형저수지의 순간단위유량도(instantaneous unit hydrograph; IUH)가 구해진다.

$$h(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-t/k} \quad (12)$$

Nash(1957)는  $n$ 개의 균등한 선형저수지를 계단식으로 나열하여 유역의 IUH를 저류상수  $k$ 의 함수로 나타내었으며  $n$ 번째 저수지로부터의 IUH는 다음과 같다.

$$h_n(t) = \frac{1}{k} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \frac{e^{-t/k}}{\Gamma(n)} \quad (13)$$

식 (13)은  $n$ 과  $k$ 를 매개변수로 갖는 gamma distribution이라는 점에 주목한다.

### 3. 유출해석 모형의 적용

#### 3.1 연구대상유역

본 연구에서는 경상남도 양산군의 중앙남단과 부산직할시의 동남단에 걸쳐 위치한 수영강(유역면적 198.1 km<sup>2</sup>, 하천연장 28.50 km) 수계 내의 온천천 유역 중 세병교 상류유역과 석대천 유역 및 회동수원지 상류유역 등 3개 유역을 유출해석 모형의 시험과 평가를 위한 연구대상유역으로 선택하였으며, 대상유역의 유역도는 강우 및 유량의 측정 지점과 함께 Fig. 1에 나타내었다. 또한 본 연구에서 1/25000 및 1/50000 축척의 지형도와 국부적으로 1/1200 축척의 항축도를 이용하여 분석한 수

영강 유역과 연구대상유역에 대한 지형학적 인자는 Table 1에 요약하였다.

온천천은 수영만으로부터 약 3.1 km 상류지점에서 수영강의 우안으로 유입하는 수영강 제1의 지천으로서, 유역면적은 55.0 km<sup>2</sup>, 유로연장은 14.44 km에 달하며 고지대를 제외한 대부분의 지역이 도시화되어 있다. 온천천 유역 중 연구의 대상이 되는 세병교 상류유역의 면적은 38.7 km<sup>2</sup>이다.

석대천은 수영강 하구로부터 약 6.2 km 지점에서 수영강의 좌안으로 유입하는 준용하천으로서 유역면적은 22.0 km<sup>2</sup>, 유로연장은 9.41 km이며, 중하류부 해운대구 반송동 일대의 밀집 주거지역을 제외한 대부분의 지역은 거의 개발이 되지 않은 상태이다.

수영강 유역의 중앙부에 위치한 회동댐을 유역의 하류단으로 갖는 회동수원지 상류유역은 유역면적이 99.8 km<sup>2</sup>로서 수영강 유역 전체 면적의 약 50%를 차지하며, 대부분이 수원보호구역으로 개발이 제한된 자연상태의 하천유역이다. 이 유역은 수림이 울창(울창)한 산지로 구성되어 있고, 하천 연변의 비교적 표고가 낮은 지역은 농경지 및 주거지로 이용되고 있다.

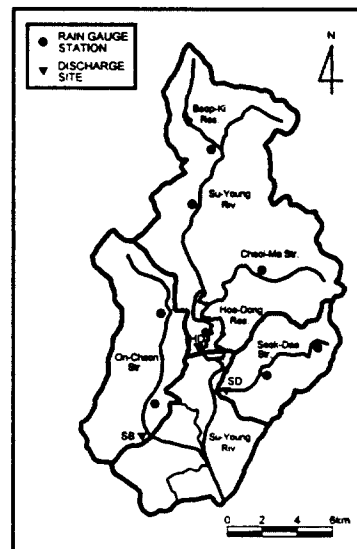


Fig. 1. A Map showing the Su-Young River Basin including the Study Areas

Table 1. Characteristics of Watershed for the Study Areas

Watershed	Area A(km <sup>2</sup> )	Channel Length L(km)	Watershed Slope S <sub>w</sub>	Channel Slope S <sub>c</sub>	Mean Width A/L(km)	Form Ratio A/L <sup>2</sup>
Su-Young Riv.	198.1	28.5	0.024	0.016	6.89	0.240
On-Cheon Str. Se-Byung (Entire)	38.7 (55.0)	11.01 (14.44)	0.058 (0.047)	0.024 (0.019)	3.52 (3.81)	0.319 (0.264)
Seok-Dae Str.	22.0	9.41	0.038	0.030	2.34	0.248
Hoe-Dong Res.	99.8	18.92	0.034	0.024	5.27	0.279

곽기석 등(1994)은 1993년 6월부터 은천천의 세병교 지점에서 유량을 측정하였으며, 강인식(1995)은 은천천 세병교 지점을 포함하여 석대천의 석대 제2호교 지점 및 회동댐 지점 등 3개 지점에서 각 유역의 유량을 측정하였다. 연구대상유역에 대한 유출량의 측정시 은천천과 석대천의 경우에는 하천측량과 관측 자료를 근거로 작성된 수위-유량곡선(강인식, 1995)을 이용하였다. 한편 회동댐은 홍수조절용 수문이 없기 때문에 홍수시댐의 천단부를 월류하는 경우에만 유량이 수영강의 하류로 유입하게 된다. 따라서 회동댐 지점의 경우에는 수리모형실험 결과(회동수원지 댐 안전진단 보고서, 1985)를 근거로 표고-유량관계를 작성하였으며(강인식, 1995) 이를 사용해서 회동수원지 상류유역의 유량을 추정하였다.

### 3.1 유효강우의 산정

본 연구에서는 저류함수법 매개변수에 의한 방법,  $\phi$ -index법 및 일정비손실법(constant percentage method)을 사용하여 직접유출을 유발하는 유효강우를 산정한다. 직접유출을 구하기 위해서는 먼저 총유출수문곡선으로부터 기저유량을 분리해야 할 필요가 있으며, 본 연구에서는 각 홍수가 시작하기 직전의 유량을 그 홍수사상에 대한 기저유량으로 채택하였다. 또한 기저유량은 각 홍수사상에 대해 일정한 값을 갖는다고 가정하였다.

#### 3.2.1 저류함수법 매개변수에 의한 유효강우의 산정

분석 대상이 되는 각 홍수사상에 대한 실측 누가 유출고와 전 유역을 유출역으로 가정하였을 때의 계산 누가유출고를 각각 종측과 횡측에 도시한 후 그 기울기와 기울기가 변화하는 점으로부터 저류함수법에서의 매개변수인 1차유출률  $f_1$ , 포화유출률  $f_{\infty}$  및 포화우량  $R_{\infty}$ 을 결정할 수 있다. 각 홍수사상에 대해 이들 매개변수가 결정되면 이를 사용하여 다음 식으로부터 유효강우량을 산정한다(Sukegawa와 Kitagawa, 1992).

$$\Sigma R < R_{\infty} : ER = f_1 \cdot R \quad (14a)$$

$$\Sigma R \geq R_{\infty} : ER = f_{\infty} \cdot R \quad (14b)$$

여기서  $R$ 은 단위 지속기간 동안의 강우량(mm)이며,  $ER$ 은 유효강우량(mm)이다.

#### 3.2.2 $\phi$ -index법

$\phi$ -index란 침투능이 시간에 따라 일정하다고 가정하는 평균침투능으로서, 손실에 해당하는 직접유출과 총강우의 체적차를 강우의 지속기간으로 나누어 그 값을 구하게 된다. 만일 구해진  $\phi$ -index의 값이 특정한 시간기간 동안 강우보다 큰 경우에는 음의 값이 생기게 되므로 시산(trial and error)에 의해  $\phi$ -index의 값을 반복계산하여 직접유출과 유효강우의 체적이 동일해지도록 한다. 일단  $\phi$ -index의 값이 결정되면 다음과 같이 매시간별 강우로부터 그 값을 제하여 유효강우를 결정한다.

$$R > \phi : ER = R - \phi \quad (15a)$$

$$R \leq \phi : ER = 0.0 \quad (15b)$$

여기서  $\phi$ 는 직접유출과 유효강우의 체적이 동일해 지도록 결정된  $\phi$ -index의 값(mm)이다.

### 3.2.3 일정비손실법

일정비손실법(constant percentage method)에 서는 손실이 강우강도에 비례한다고 가정한다. 손 실에 기여하는 강우의 율을  $\epsilon$ 이라고 한다면 유출 에 기여하는 율은  $(1-\epsilon)$ 이 되므로 유효강우는 다 음과 같이 구할 수 있다.

$$ER = (1-\epsilon) \cdot R = \frac{Q_D}{R_i} \cdot R \quad (16)$$

결국 총강우와 직접유출의 체적을 구한 후, 이들의 체적비를 강우주상도에 곱함으로써 매 시간간격에 대한 유효강우를 결정하게 된다. 또한 이 방법에 의한 유효강우의 시간분포는 총강우의 시간분포와 유사하게 된다는 점에 주목한다.

## 3.3 유출해석

본 연구의 대상유역은 그 면적이 100 km<sup>2</sup> 이하 의 소유역으로서 강우에 대한 유역의 응답이 민감 할 것이 예상되어 유출계산을 위한 시간간격은 20 분으로 결정하였다. 본 연구에서 채택한 유량자료 는 20분의 시간간격을 갖고 있었기 때문에 구해진 자료를 직접 적용할 수 있었다. 한편 유역 내 강우 관측소로부터 구한 강우자료는 1시간의 시간간격 을 갖고 있었기 때문에 매시간의 강우강도를 3으 로 나누어 채택한 시간간격 20분에 대한 강우의 크기를 결정하였다.

### 3.3.1 저류함수법 매개변수의 결정

연구대상유역에 대한 저류함수법 지체시간을 결 정하기 위하여 온천천 세병교 상류유역과 석대천 유역의 경우에는 비교적 큰 홍수를 나타내었던 1993년 7월 29일과 1993년 8월 10일의 홍수사상

을, 회동수원지 상류유역의 경우에는 1993년 8월 10일의 홍수사상을 채택하였다. 채택된 홍수사상 에 대하여 강우를 한 시간간격씩 지체시키면서 매 지체시간에 대해서 저류고와 유출고를 계산하고 이 를 대수지상에 도시하여 직선에 가장 가까운 때의 값을 유역에 대한 저류함수법 지체시간으로 결정하 였다. 온천천 세병교 상류유역에 대한 저류함수법 지체시간은 2개의 홍수사상 모두가 20분으로 나타 났으나, 석대천 유역의 경우는 1993년 7월 29일 홍수사상과 1993년 8월 10일 홍수사상이 각각 20 분과 0분의 서로 다른 저류함수법 지체시간을 나 타내었다. 따라서 보다 큰 홍수이고 단순수문곡선 에 더 가까운 1993년 8월 10일 자료로부터의 0분 을 석대천 유역에 대한 저류함수법 지체시간으로 결정하였다. 회동수원지 상류유역의 경우 저류함수 법 지체시간은 20분으로 결정되었다.

이상과 같이 결정된 각 유역의 저류함수법 지체 시간에 해당하는 저류량과 유출량의 관계를 도시하 였으며, 최소자승법을 사용하여 상수  $K$ 와  $P$ 를 결 정하였다.  $K$ 와  $P$ 는 유역의 특성에 따라 결정되는 상수로서 동일한 유역에서는 항상 일정한 값을 갖 는 것으로 가정하지만, 온천천 세병교 상류유역과 석대천 유역의 경우 홍수사상별로 상수의 값이 다 르게 나타났기 때문에, 본 연구에서는 강인식 등 (1993)의 방법과 마찬가지로 매개변수 결정을 위 해 사용한 2개 홍수사상의 자료를 함께 도시한 후 최소자승법을 적용하였으며, 연구대상유역에 대한 유역저류함수는 다음과 같이 결정되었다.

$$\text{온천천 } S = 16.841 \cdot Q^0.526 \quad (17)$$

$$\text{석대천 } S = 23.054 \cdot Q^0.495 \quad (18)$$

$$\text{회동댐 } S = 36.136 \cdot Q^0.569 \quad (19)$$

한편 1차유출률  $f_1$ , 포화유출률  $f_{\infty}$  그리고 포화 우량  $R_{\infty}$ 는 실측 누가유출고와 전 유역이 유출역이 라고 가정한 계산 누가유출고를 각각 종측과 횡측 에 도시하여 결정하였으며, 연구대상유역의 홍수사 상별로 추정된 저류함수법 매개변수는 Table 2에 요약하였다.

Table 2. The Estimated Parameters of the Storage Function

Watershed	Event	$f_1$	$f_u$	$R_{u_2}(mm)$
On-Cheon	93.6.29	0.230	0.440	22.5
	93.7.29	0.514	0.699	73.5
	93.8.10	0.335	0.820	15.5
	93.8.26	0.500	0.590	41.5
Seok-Dae	93.7.29	0.347	0.564	73.5
	93.8.10	0.579	0.860	36.8
	93.8.26	0.350	0.730	46.5
Hoe-Dong	93.8.10	0.809	0.880	166.0

### 3.3.2 전달함수의 매개변수 추정

수치자료에 수학적 모형을 fit시키는 방법은 많은 참고문헌에 제시되어 있으며(Gelb, 1974; Box 와 Jenkins,1976), Wang과 Yu(1986)는 선형 이산화 입력-출력 모형의 매개변수를 4가지의 다른 방법으로 추정할 바 있다. 본 연구에서는 최소자승법(least squares method; LSM) 및 상관함수법(correlation function method; CFM)에 의해 연구대상유역에 대한 전달함수 매개변수를 추정하고

자 하였으며, 광기석 등(1994)이 행한 온천천 유역에 대한 연구에서와 마찬가지로 6개의 매개변수를 갖는 이산화 모형을 선택하였다.

$$(1-a_1B-a_2B^2-a_3B^3)Q(t) = (b_0+b_1B+b_2B^2)I(t) \quad (20)$$

저류함수법 매개변수에 의한 방법과  $\phi$ -index법 및 일정비손실법으로 구한 유효강우량과 실측 직접 유출량자료를 식 (20)에 대입하여 분석에 사용된 각 홍수사상에 대한 전달함수 매개변수를 구하였다. 또한 홍수사상별로 계산된 전달함수를 분석대상이 되는 모든 홍수사상에 적용하여 유출계산을 수행한 후 재현성이 가장 높은 매개변수를 유역의 대표적인 매개변수로 채택하였다. 그 결과 온천천 세병교 상류유역과 회동수원지 상류유역의 경우에는 1993년 8월 10일 자료로부터의 전달함수가, 석대천 유역의 경우에는 1993년 7월 29일 홍수사상으로부터의 전달함수가 각각 해당 유역의 대표적인 전달함수로 채택되었으며, 유효강우량 산정방법별, 매개변수 추정방법별 전달함수 매개변수의 값

Table 3. A Summary of Estimated Parameters for Each Transfer Function Depending on Study Area

Watershed	ER	Method	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_0$	$b_1$	$b_2$
On-Cheon 93.8.10	sf	LSM	0.70074	0.02899	0.07734	0.12906	-0.10870	0.17968
		CFM	0.70514	0.01829	0.08185	0.12904	-0.10900	0.18121
	pi	LSM	0.72722	0.01833	0.08200	0.11180	-0.09165	0.15156
		CFM	0.73197	0.00784	0.08620	0.11188	-0.09198	0.15271
	cp	LSM	0.71893	0.03282	0.06277	0.13193	-0.11446	0.18274
		CFM	0.72288	0.02192	0.06787	0.13194	-0.11472	0.18435
Seok-Dae 93.7.29	sf	LSM	0.72469	-0.00976	0.13842	0.06527	0.06203	0.04068
		CFM	0.72954	-0.01222	0.13592	0.06590	0.06135	0.04047
	pi	LSM	0.60763	0.00977	0.26682	0.02682	0.04832	0.04850
		CFM	0.61748	0.00724	0.25991	0.02758	0.04757	0.04761
	cp	LSM	0.68155	-0.02426	0.21353	0.01849	0.07704	0.06501
		CFM	0.68845	-0.02657	0.20913	0.01962	0.07610	0.06413
Hoe-Dong 93.8.10	sf	LSM	1.55413	-0.38151	-0.18651	0.01278	-0.00094	0.00174
		CFM	1.21909	0.01099	-0.25383	0.01355	0.00267	0.00876
	pi	LSM	1.73932	-0.68781	-0.05946	0.00593	-0.00098	0.00154
		CFM	1.27556	-0.02089	-0.26871	0.00803	0.00050	0.00478
	cp	LSM	1.55531	-0.38939	-0.17984	0.01252	-0.00107	0.00338
		CFM	1.22321	0.01126	-0.25744	0.01363	0.00221	0.01039

은 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 sf, pi 및 cp는 각각 저류함수법 매개변수,  $\phi$ -index법, 일정비손실법에 의한 유효강우 산정법을 나타낸다.

### 3.3.3 선형저수지 모형의 매개변수 결정

선형저수지 모형은 유역의 출구에 가상의 저수지가 1개 혹은  $n$ 개 존재한다고 가정하고, 이 가상저수지를 통해 유입량을 추적시킴으로써 유출량을 구하게 된다. 단일 선형저수지의 저류상수  $k$ 는 Sarma 등(1969)이 밝힌 바와 같이 유역의 평균지체시간과 동일하다고 가정하였다.

$$k = t_L \quad (21)$$

여기서  $t_L$ 은 유역의 평균 지체시간이다.

또한 균등한  $n$ 개의 선형저수지를 직렬로 연결한 Nash 모형의 경우에는  $n$ 개 저수지 각각의 지체시간의 합이 유역의 평균 지체시간과 동일해야 하므로  $n$ 개 저수지 각각의 저류상수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_n = \frac{t_L}{n} \quad (22)$$

여기서  $n$ 은 Nash 모형의 선형저수지의 갯수이며,  $k_n$ 은  $n$ 개 선형저수지 각각의 저류상수이다.

유역의 지체시간에 대해서는 많은 연구자에 의한 여러가지 정의가 있지만(Singh, 1988), 본 연구에서는 유효강우와 직접유출수문곡선 질량중심 간의 시간을 채택하였으며, 분석에 사용한 유역평균 강우주상도와 홍수수문곡선으로부터 유효강우 산정법별로 추정된 연구대상유역의 지체시간은 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 온천천 세병교 상류유역, 석대천 유역 및 회동수원지 상류유역에 대한 지체시간의 전체 평균은 각각 138분, 220분 및 332분으로 나타났지만, 온천천의 경우에는 1993년 8월 10일의 홍수수문곡선이 가장 단순수문곡선에 가깝고 유효강우량을 저류함수법 매개변수에 의해 산정했을 때  $\phi$ -index법으로 산정했을 때 재현성이 가장 높은 것으로 나타났기 때문에

이들 두 값을 평균한 120.0분을 평균 지체시간으로 결정하였다. 석대천의 경우에는 단순수문곡선에 가까운 수문곡선이 거의 없고 홍수사상에 따라 지체시간의 변동이 다소 크게 나타났기 때문에 분석자료 중 가장 큰 홍수를 나타내었던 1993년 7월 29일과 1993년 8월 10일에 대한 유효강우량 산정법별 지체시간의 값을 평균하여 160.0분을 평균 지체시간으로 결정하였으며, 회동수원지 상류유역의 경우에는 지체시간의 평균치인 330.0분을 유역에 대한 평균 지체시간으로 결정하였다.

Table 4. Lags for Each Study Area Depending on Effective Rainfall Estimations

Watershed	Event	Lag (min)			
		sf	pi	cp	Mean Value
On-Cheon	93.6.12	-	144.8	113.3	129.1
	93.6.29	137.4	170.4	188.4	165.4
	93.7.14	65.9	114.9	100.3	93.7
	93.7.29	166.5	240.8	196.9	201.4
	93.8.10	119.1	121.5	142.3	127.6
	93.8.26	134.1	165.9	142.4	147.5
	94.8.01	-	104.0	93.4	98.7
Seok-Dae	93.6.29	-	298.3	316.6	310.5
	93.7.29	177.7	255.0	226.1	219.6
	93.8.10	114.1	98.4	132.6	115.0
	93.8.26	207.0	258.8	243.6	236.5
Hoe-Dong	93.8.10	332.7	328.0	333.7	331.5

또다른 매개변수인 선형저수지의 갯수  $n$ 을 결정하기 위하여 Sukegawa와 Kitagawa(1992)와 같은 방법으로  $n = 1, 2, 3, 4$ 인 경우 각각에 대하여 유출해석을 수행하였다. 이 때 저류상수  $k$ 는 유역에 대한 평균 지체시간과 같은 120.0분이었으며,  $n$ 이 2, 3, 및 4인 경우 각 저수지의 저류상수  $k_n$ 은 식 (22)를 사용하여 결정하였다. 각각의  $n$ 값에 따라 결정된 저류상수  $k_n$ 과  $n$ 의 값을 식 (13)에 대입하여 Nash 모형의 IUH를 구한 후 이를 회선적분(convolution)함으로써 직접유출수문곡선을 계산하고, 기저유량을 더하여 총유출수문곡선을 구하였다.  $n$ 값에 따른 재현성의 평가기준으로서는 Sarma 등(1973)이 제시한 측정치와 계산치 간의 상관계수(correlation coefficient), 적분자승오차



(integral square error), 및 특수 상관계수(special correlation coefficient) 등의 통계량을 사용하였으며, 이들 통계량의 계산결과로부터 실측 홍수사상을 가장 잘 재현한 경우의  $n$ 값을 선형저수지의 갯수로 채택하였다.

### 3.4 유출해석 결과

전 절에서는 각 연구대상유역별로 특정한 홍수사상을 채택하여 모형의 매개변수를 산정하였다. 먼저 산정된 매개변수의 타당성과 모형의 적용가능 여부를 살펴보기 위하여 온천천 세병교 상류유역의 경우에는 1993년 8월 10일 홍수사상을, 석대천의 경우에는 1993년 7월 29일의 홍수사상을, 회동수원지 상류유역의 경우에는 1993년 8월 10일 홍수사상을 사용하여 모형을 검정(calibration)하였으며, 연구대상유역별 모형의 검정결과는 각각 Fig. 2 ~ 4에 나타내었다.

Fig. 2는 온천천 세병교 상류유역의 모형 검정 결과로서, 수문곡선의 형상은 단순수문곡선에 가깝다. 저류함수법에 의한 계산결과는 첨두부의 형상이 약간 다르며, 선형 이산화 입력-출력 모형이 첨두부에서 진동을 나타내고 있다는 점을 제외하면 3개 유출해석 모형의 결과는 모두 측정치와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 석대천 유역에 대한 1993년 7월 29일 홍수사상으로서 저류함수법은 측정 수문곡선과 매우 잘 일치하는 결과를 주고 있다. 이에 반해 선형 이산화 입력-출력 모형은 수문곡선의 상승부가 측정치보다 크게 나타나며, 선형저수지 모형은 두 개의 첨예한 첨두부에서 잘 일치하지 않는 것으로 나타나고 있다. Fig. 4는 회동댐 지점에서의 모형의 검정결과를 나타낸다. 저류함수법의 경우 최대홍수량의 크기는 측정 수문곡선보다 다소 크지만 수문곡선의 상승부와 하강부는 매우 잘 일치하고 있다. 선형 이산화 입력-출력 모형은 첨두유량의 50%에서 수문곡선의 폭이 실측치보다 약간 큰 수문곡선의 폭을 나타내지만 최대홍수량과 그 발생시각은 실측치와 매우 잘 일치하고 있다. 선형저수지 모형은 약간 작은 최대홍수량의 크기를 나타내지만 전체적으로 매우 만족스러운 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

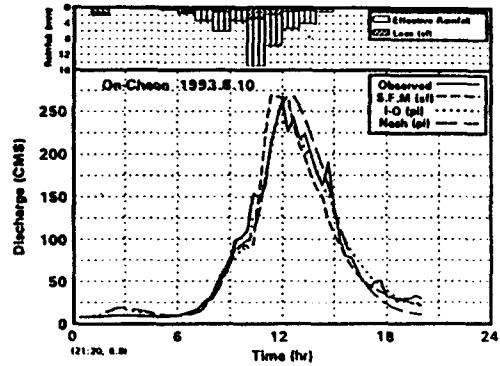


Fig. 2. Model Calibration for the On-Cheon Stream (August 10, 1993)

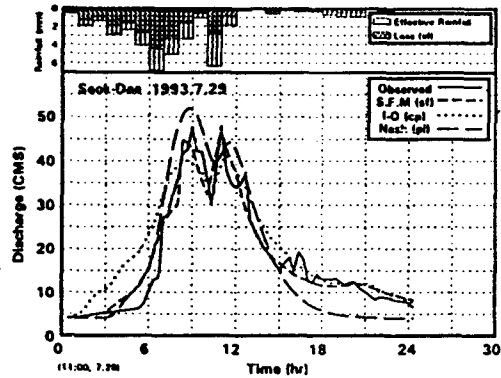


Fig. 3. Model Calibration for the Seok-Dae Stream (July 29, 1993)

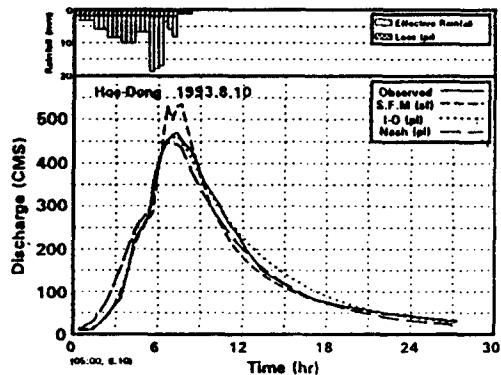


Fig. 4. Model Calibration for the Hoe-Dong Reservoir (August 10, 1993)

이상과 같은 모형의 검정결과로부터 각 연구대상 유역에 대해 산정된 매개변수가 타당하다는 것과

본 연구에서 채택한 3개 유출해석 모형이 소유역의 홍수사상을 적절히 나타낼 수 있다는 것을 확인하였다. 연구대상유역에 대한 모형의 검정이 성공적이라고 판단되었기 때문에 채택한 모형의 검증 (verification)을 위하여 전 절에서 산정된 매개변수를 사용하여 3개 연구대상유역, 12개 홍수사상에 대해 유출해석을 실시하였으며, 온천천 세병교 상류유역에 대한 유출해석 결과 중 비교적 큰 홍수를 나타내었던 1993년 6월 29일, 7월 29일, 및 8월 26일 홍수사상에 대한 유출해석 결과는 Fig. 5 ~ Fig. 7에, 석대천 유역에 대한 유출해석 결과 중 1993년 8월 10일과 8월 26일 홍수사상은 Fig. 8 ~ Fig. 9에 나타내었다. 한편 회독수원지 상류유역의 경우에는 모형의 검정에 사용된 1993년 8

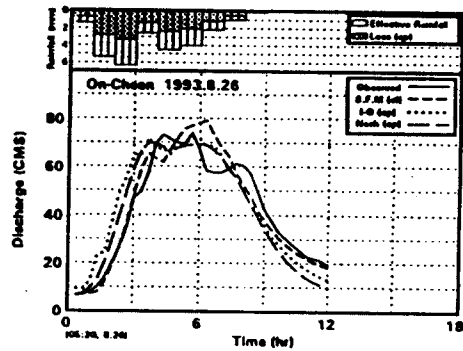


Fig. 7. A Comparison of Observed Hydrograph with Calculated Hydrographs (August 26, 1993, On-Cheon Stream)

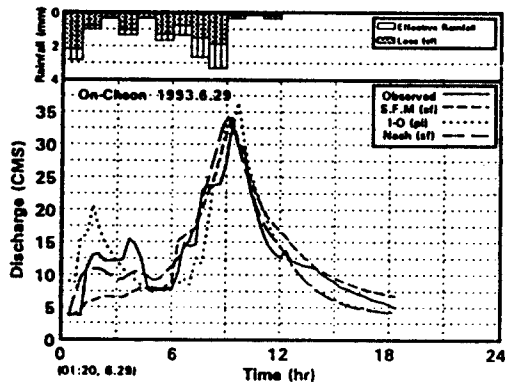


Fig. 5. A Comparison of Observed Hydrograph with Calculated Hydrographs (June 29, 1993, On-Cheon Stream)

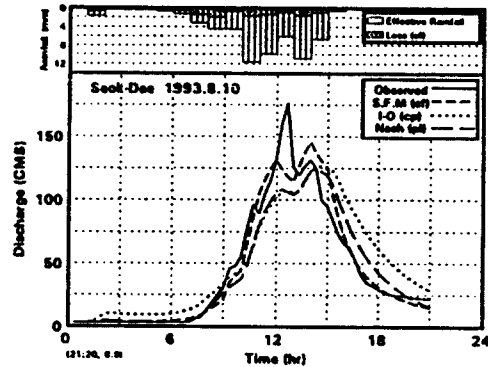


Fig. 8. A Comparison of Observed Hydrograph with Calculated Hydrographs (August 10, 1993, Seok-Dae Stream)

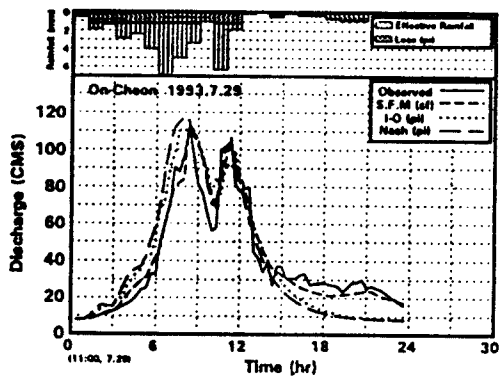


Fig. 6. A Comparison of Observed Hydrograph with Calculated Hydrographs (July 29, 1993, On-Cheon Stream)

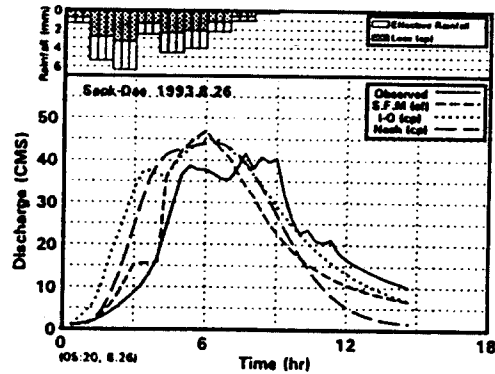


Fig. 9. A Comparison of Observed Hydrograph with Calculated Hydrographs (August 26, 1993, Seok-Dae Stream)

월 10일 홍수사상 이외의 자료를 구할 수 없었기 때문에 별도의 모형 검증은 할 수 없었다. 또한 선형 이산화 입력-출력 모형의 경우에는 최소자승법과 상관함수법에 의한 유출해석 결과가 큰 차이가 없었기 때문에 최소자승법에 의한 계산결과만을 나타내었다.

Fig. 5는 온천천 세병교 상류유역에 대한 1993년 6월 29일의 홍수사상으로서 저류함수법은 침두의 크기와 그 발생시각, 전체적인 수문곡선의 형상을 매우 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 선형 이산화 입력-출력 모형도 측정 수문곡선과 비교적 잘 일치하는 결과를 주고 있으나 침두부에서 약간의 진동을 보이고 있다. 선형저수지 모형의 계산결과는 실측치보다 약간 큰 최대홍수량의 값을 주고 있으나 비교적 만족스러운 결과를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 6은 온천천 세병교 상류유역에 대한 1993년 7월 29일 홍수사상으로서 참여한 두 개의 침두를 갖고 있다. 저류함수법은 두 개 침두의 크기도 측정 수문곡선과 잘 일치할 뿐만 아니라 그 발생시각도 정확하게 일치하는 결과를 나타내고 있다. 선형 이산화 입력-출력 모형도 측정 수문곡선과 비교적 잘 일치하는 결과를 나타내고 있으나, 두 개의 침두부에서 진동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 선형저수지 모형은 다른 모형에 비해 다소 평활(smooth)한 계산결과를 나타내고 있으며 첫번째 침두의 크기가 측정치에 비해 약간 큰 값을 보이고 있다. 또한  $\phi$ -index법에 의한 유효강우로 인하여 수문곡선의 끝 부분이 측정치보다 작은 값을 나타내고 있다.

Fig. 7은 온천천 세병교 상류유역에 대한 1993년 8월 26일 홍수사상에 대한 유출해석 결과이다. 3개 모형으로부터의 결과는 최대홍수량의 크기에 있어서는 큰 차를 보이지 않으나 그 발생시각은 측정치와 다소 다른 것으로 나타나고 있다. 특히 선형 이산화 입력-출력 모형과 선형저수지 모형은 측정치에 비해 빠른 상승을 보이고 있다는 점에 주목한다.

Fig. 8은 석대천 유역에 대한 1993년 8월 10일 홍수사상으로서 3개 유출해석 모형은 모두 측정치에 비해 다소 작은 최대홍수량의 값을 주고 있으며

그 발생시각도 100분 정도 늦은 것으로 나타나고 있어 만족스럽지 못한 결과이다. 그러나 3개 모형으로부터의 계산결과는 서로 비교적 잘 일치하고 있다는 점에 주목한다.

Fig. 9는 석대천 유역에 대한 1993년 8월 26일 수문곡선을 나타내고 있다. 저류함수법은 실측치에 비해 다소 큰 최대홍수량을 나타내며 그 발생시각도 측정치와 다른 것으로 나타나고 있어 그다지 만족스럽지 못한 결과이다. 선형 이산화 입력-출력 모형은 실측치와 비슷한 최대홍수량의 값을 주고 있지만 전체적인 수문곡선의 상승이 실측 수문곡선보다 빠른 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 선형저수지 모형은 매우 평활한 결과를 주고 있으며 다른 모형과 마찬가지로 실측치에 비해 다소간 빠른 상승을 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 유출해석 결과에 대한 고찰

저류함수법, 선형 이산화 입력-출력 모형 및 선형저수지 모형 등 3개의 유출해석 모형을 채택하여 수영강 수계 내 3개 연구대상유역, 12개 홍수사상에 대하여 유출해석을 수행하였으며, 수문곡선의 주된 특성을 나타내는 직접유출고  $Q_0$ (mm), 침두유량  $Q_p$ (cms), 침두발생시각  $T_p$ (hr), 최대홍수량 50 % 및 75 %에서의 수문곡선의 폭  $T_{0.50}$ (hr) 및  $T_{0.750}$ (hr)의 측정치에 대한 상대오차를 Table 5에 요약하였다. Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 채택한 3개 모형은 모두 대상유역에 관계없이 직접유출고를 가장 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 시간의 단위를 갖는 최대홍수량 75 %에서의 수문곡선 폭은 그 재현성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

본 연구에서 채택한 모형의 전체적인 재현성을 평가하기 위하여 유역별로 분석한 자료수에 대해 가중평균한 매개변수의 상대오차를 Table 5에 함께 나타내었다. 상대오차의 평균을 살펴보면 수문곡선의 특성을 나타내는 매개변수에 대해 저류함수법이 가장 양호한 결과를 주고 있으며, 그 다음으로는 선형저수지 모형과 선형 이산화 입력-출력 모형의 순으로 양호한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 연구대상유역별 홍수수문곡선 침두부의 재현

성은 온천천 세병교 상류유역과 석대천의 경우에는 저류함수법이, 회동수원지 상류유역의 경우에는 선형 이산화 입력-출력 모형이 가장 높은 것으로 나타났다. 한편 수문곡선의 폭을 나타내는 두 매개변수의 경우에는 선형저수지 모형이 가장 양호한 결과를 주는 것을 나타났다.

한편 유출해석에 적용된 홍수사상의 갯수는 저류함수법, 선형 이산화 입력-출력 모형 및 선형저수지 모형이 각각 8개, 12개 및 12개로서 저류함수법의 경우가 가장 작다. 저류함수법을 적용하지 못한 홍수사상은 비교적 작은 홍수를 나타냈던 경우로서, 이는 홍수의 규모가 작은 경우에는 저류함수법을 적용하기가 어렵다는 것을 가리킨다. 유효강우 산정에 있어서 저류함수법은 3개의 매개변수를 갖는 식 (14)만을 적용하게 되며, 이는 다른 모형에 비해 그 적용에 있어서의 유연성이 부족하다는 것을 의미한다. 또한 매개변수의 추정방법이 다른 방법에 비해 복잡하며 그 추정에 있어서 어느 정도의 주관이 필요하다는 것도 문제점 중의 하나이다. 결국 계측유역에 대해서는 높은 재현성을 기대할 수 있으나, 미계측 유역의 경우에는 이러한 문제점으로 인하여 그 적용성이 다소간 낮아질 수도 있을 것으로 예상할 수 있다.

선형 이산화 입력-출력 모형은 홍수수문곡선의 첨두부를 비교적 양호하게 재현하고 있지만 계산결과가 진동을 보이고 있다. 선형 이산화 입력-출력 모형의 매개변수는 동일한 홍수사상에 대해서는 변수추정 방법에는 관계없이 유사한 값을 나타내지만, 동일한 유역의 경우에도 서로 독립된 홍수사상에 대해서는 크게 다른 값을 나타내고 있다. 이는 어떤 주어진 유역에 대한 평균 매개변수 추정방법의 개선이 필요하다는 것을 가리킨다. 또한 이들 매개변수는 유역의 특성과 관련지을 수 있는 물리량이 아니라 강우와 유출자료에 의해서만 결정되는 값이므로, 본 연구에서 채택한 다른 모형에 비해 미계측 지역의 적용이 다소간 어려울 것으로 예상된다.

선형저수지 모형은 다른 모형에 비해 평활(smooth)한 수문곡선을 나타내며, 모형 매개변수의 갯수가 2개뿐이면서도 비교적 양호한 결과를 준다는 점에서 적용이 쉽다는 장점을 갖는다. 더우

기 유역의 특성으로부터 간접적으로 매개변수를 추정할 수 있으므로 본 연구에서 채택한 다른 모형에 비해 미계측 유역에의 적용이 비교적 용이하다는 것도 또다른 장점이다. 그러나 강우에 대한 유역의 응답이 예민한 소유역에 적용되는 모형임에도 불구하고 2개 이상의 첨예한 첨두부를 갖는 홍수사상에 대한 재현성은 다소 낮은 것으로 나타났다.

Table-5. A Summary of Relative Errors for Hydrograph Parameters Depending on Runoff Models

(unit; %)

Model	Parameter	Watershed			Mean Value
		On-Cheon	Seok-Dae	Hoe-Dong	
Storage Function Method	$Q_0$	1.9	6.5	2.5	3.7
	$Q_p$	2.8	9.7	14.0	6.7
	$T_p$	3.4	9.0	4.6	5.8
	$T_{0.50}$	16.1	8.4	12.5	12.8
	$T_{0.750}$	13.0	40.4	11.8	23.8
Discrete, Linear, Input-Output Model	$Q_0$	5.7	10.6	9.3	7.2
	$Q_p$	11.9	19.4	0.5	13.5
	$T_p$	6.6	10.5	0.0	7.4
	$T_{0.50}$	10.3	19.9	10.6	13.5
	$T_{0.750}$	37.5	37.7	4.2	34.5
Linear Reservoir Model	$Q_0$	4.7	3.3	1.7	4.0
	$Q_p$	13.7	23.3	6.0	16.2
	$T_p$	9.2	10.4	9.0	9.6
	$T_{0.50}$	8.1	10.7	1.9	8.4
	$T_{0.750}$	27.2	22.8	19.7	25.2

## 5. 결 론

본 연구에서는 저류함수법, 선형 이산화 입력-출력 모형 및 선형저수지 모형 등 3개의 유출해석 모형을 채택하여 수영강 수계 내 온천천 세병교 상류유역, 석대천 및 회동수원지 상류유역 등 3개 연구대상유역에 대하여 유출해석을 수행하였으며, 그 결과 및 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 채택한 3가지 모형은 실측 수문곡선을 비교적 잘 재현하고 있다. 따라서 소하천 유역에 대한 이들 모형의 적용은 가능하다.

(2) 실측 홍수사상에 대한 재현성은 저류함수

법, 선형저수지 모형, 선형 이산화 입력-출력 모형의 순으로 나타났다. 그러나 적용성은 선형저수지 모형이 가장 높은 것으로 나타났다.

(3) 선형 이산화 입력-출력 모형과 선형저수지 모형에 대하여 3가지 방법으로 산정된 유효강우량을 사용하여 유출해석을 수행한 결과 온천천의 경우에는 저류함수법 매개변수를 사용했을 때가, 석대천과 회동수원지 상류유역의 경우에는  $\Phi$ -index 법이 가장 양호한 결과를 준다는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 강인식 (1995). "소유역의 강우-유출 해석에 관한 연구," 박사학위논문, 부산대학교.
- 강인식, 이봉재, 강주복 (1993). "저류함수법에 의한 도시 소유역의 유출해석." 부산대학교 공과대학 공대논문집, 제46집, pp. 91 - 100.
- 곽기석, 강인식, 정연태, 강주복 (1994). "선형 이산화 입력-출력 모형에 의한 유출해석." 대한토목학회 논문집, 제14권, 제4호, pp. 859 - 866.
- 회동수원지 댐 안전진단 보고서. (1985). 부산직할시.
- Box, G.E.P., and Jenkins, G.M. (1976). *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden-Day, San Francisco.
- Chow, V.T. (1972). "Hydrologic modeling." *The Seventh John R. Freeman Memorial Lecture, Proc., Boston Society of Civil Engineering*, Pub. 60, Vol. 5, pp. 1-27.
- Gelb, A. (1974). *Applied optimal estimation*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Kimura, T. (1960). "Flood runoff routing by storage function method." *Report*, Public Work Research Institute, Ministry of Construction, Japan.
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *Pub. 45*, IASH, Vol. 3, pp. 114-121.
- Sarma, P.B.S., Delleur, J.W., and Rao, A.R. (1969). "A program in urban hydrology: Part II. An evaluation of rainfall-runoff models for small watersheds and the effects of urbanization on runoff." *Purdue University Water Resources Research Technical Report No. 9*, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Sarma, P.B.S., Delleur, J.W., and Rao, A.R. (1973). "Comparison of rainfall-runoff models for urban areas." *J. of Hydrology*, Vol. 18, pp. 329-348.
- Singh, V.P. (1988). *Hydrologic systems: Vol. 1. Rainfall-runoff modeling*. Prentice Hall.
- Sukegawa, N., and Kitagawa, Y. (1992). "Flood runoff model for small urban watershed with detention basins." *JSCE*, Vol. II-18, No. 443, pp. 1-8.
- Wang, G.T., and Yu, Y.S. (1986). "Estimation of parameters of the discrete, linear, input-output model." *J. of Hydrology*, Vol. 85, pp. 15-30.

(접수: 1996년 5월 14일)