

저류함수모형 매개변수 산정 개선방법의 한강유역 적용

Improved Parameter Computation Method Applications of Storage Function Model for the Han River Basin

정동국* · 전용운** · 이범희***

Jeong, Dong Kug · Jeon, Yong Woon · Lee, Beum Hee

Abstract

The parameters of each basin, required for the accurate analysis of flood runoff using Storage Function Model, are estimated. Prior to the estimation, sensitivity analysis and extraction of new regional topographic factors for Han River basin are conducted. Based on the result, the outflow constant of basin model is calculated through regression analysis in relation with pre-flood runoff depth. The storage constant of basin model is derived by the optimum storage constant equation, according to the flood event of each basin. The model using the mentioned parameters was compared with K-Water model of Korea Water Resources Corporation and the model of Han River Flood Control Office, and proved to correspond to the observed hydrograph more.

Key words : The Storage Function Method, Parameter, Sensitivity Analysis, Pre-flood Runoff Depth, Han River Basin

요 지

본 연구에서는 저류함수모형을 이용한 홍수유출분석의 시행에서 좀 더 정확한 모의가 가능할 수 있도록 유역에 대한 매개변수를 재 산정하였다. 매개변수의 산정을 위해 민감도분석을 실시하고, 한강유역을 대상으로 각 유역별 지형인자를 새로 추출하였으며, 이를 기준으로 홍수 모의를 통해 유역모형의 유출상수를 홍수직전유출고와의 관계로 회귀분석 하였다. 유역모형의 저류상수는 유역별 홍수사상에 따른 최적의 저류상수식으로 도출하였으며, 산정된 매개변수를 이용한 모형의 수행 결과를 한국수자원공사의 K-Water(기준상수) 모형 및 한강홍수통제소 모형과 비교하여 본 연구의 결과가 관측 수문곡선과 더 유사함을 제시하였다.

핵심용어 : 저류함수모형, 매개변수, 민감도분석, 홍수직전유출고, 한강 유역

1. 서 론

하천 수계의 홍수 유출을 예측하기 위해서는 시간 및 공간적으로 변동하는 수문 기상 요소와 유역의 특성 인자들에 대한 정확한 상호 관련성의 규명이 필요하다. 유역의 유출 과정은 토지 이용과 선행 수문사상에 따라 유출조건이 복잡하고, 유역의 강우-유출 관계가 비선형성을 내포하고 있어서 유역 유출의 정확한 예측은 매우 어려운 문제이다. 홍수로 인한 피해를 줄이기 위해서는 댐 건설이나 하천제방 축조 등과 같은 직접적인 홍수대책 외에 비구조물에 의한 대책의 하나인 홍수예경보의 정확성을 높여서 홍수재난에 미리 대처하는 것도 그 피해를 경감시키는 적절한 방법 중의 하나이다. 따라서 홍수예경보의 정확성을 높이는 방법의 일환으로 수계단위의 강우-유출 분석이 선행되어야 한다. 현재 우리나라 주요 하천 수계에서 홍수예경보는 1974년 한강홍수통제소가 개

소된 이후 5대강 유역을 중심으로 운영되고 있으며, 홍수에 보를 위한 모형으로는 저류함수모형(Storage Function Model: SFM)이 사용되고 있다. 이 모형은 계산절차가 간편하고 홍수 유출의 비선형성을 고려해 주는 방법이므로 선형모형보다는 합리적인 것으로 알려져 있어 유역 및 하도에 공히 사용되고 있다. 이와 같은 저류함수모형은 효율적인 홍수예보를 위해 초기 구축단계보다는 그 동안 많은 개선방안이 제시되어 왔으나 지역화된 매개변수의 산정 문제가 여전히 요구되고 있는 실정이다.

저류함수모형은 木村(1961)에 의해 제안되었으며, 지체개념이 도입된 저류함수와 유효강우의 개념을 이용한 강우-유출 모형으로서 일본에서의 다양한 연구를 통해 개선되어 왔다. 국내의 연구에서는 확률홍수량산정과 지역홍수빈도해석에 저류함수모형을 이용한바 있으며, 남궁달(1985)은 저류함수모형과 운동과모형의 유사성으로부터 유역의 수문인자 및 지형인

*정희원 · 한남대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (E-mail:dkjeong@hnu.kr)

**동부엔지니어링 수자원부

***정희원 · 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과 부교수

자와 매개변수의 관계를 규명하고자 하였다. 심순보 등(1992)은 최적화 기법을 이용하여 저류함수법의 매개변수를 자동으로 보정할 수 있는 방법을, 이정규와 김한섭(2000)은 유역모형과 하도모형을 하나의 단일모형으로 하는 통합저류함수모형을 제안하였다.

본 연구에서는 저류함수모형을 이용하여 홍수유출분석을 좀더 정확하게 모의하기 위해 선행되어야 하는 유역에 대한 매개변수를 재 산정하였다. 우선 대상지역인 한강 유역에 대한 지형인자를 새로이 구하고, 저류함수모형에 내재되어 있는 각 매개변수들의 민감도분석을 실시하고, 이를 기준으로 호우사상에 대한 모의를 통해 유역모형의 유출상수를 홍수직전유출고와의 관계로 회귀분석하며, 유역모형의 저류상수를 유역별 호우사상에 따른 최적의 저류상수식을 도출하으로써 호우의 특성 및 유역에 대한 물리적인 특성을 반영한 매개변수를 산정하였다.

2. 저류함수 모형의 이론

2.1 유역의 저류함수모형

홍수유출 계산을 위한 저류함수법(Storage Function Method)은 유역과 하도에서의 유출량과 저류량의 관계를 표시하는 저류함수를 홍수파의 운동방정식에 대입하여 홍수파의 연속방정식을 계산함으로써 홍수유출량을 결정하는 방법으로 1961년 기무라에 의해 제안되었다. 이 방법은 일본에서 널리 사용되어 왔으며, 국내에서는 한강 홍수예경보 업무 초기부터 사용되어 왔고, 1987년부터는 낙동강 홍수예경보에도 이 방법이 이용되고 있다. 유역에 대한 운동방정식과 연속방정식, 지체효과를 기술하면 다음과 같다.

$$S_t = KQ^P(t+T_1) \quad (1)$$

$$\frac{1}{3.6} f \cdot r_{ave} \cdot A - Q(t+T_1) = \frac{dS_t}{dt} \quad (2)$$

S_t 은 유역 내의 실제 저류량(m^3), f 는 평균유입계수(혹은 유입률)이며, r_{ave} 는 시간당 유역평균강우량(mm/hr), A 는 유역면적(km^2), $Q(t+T_1)$ 은 유역의 지체시간 T_1 을 고려한 유역으로부터의 직접유출량(m^3/sec)이다.

유역의 유출량을 계산하기 위해서는 유입계수 f 를 시간에 따라 변형시킴으로써 유효우량을 산정하여야 한다. 여기서 f 는 강우량 r_{ave} 에 대한 계수가 아니라 유역면적 A 에 대한 계수를 뜻한다. 그림 1과 같이 유출점 이후 강우는 1차유출면적과 전유출면적의 비 f_1 (1차 유출률) 비율로 직접유출에 기여하는 것으로 가정하므로 $f = f_1$ 이 된다. 포화점에 도달한 후의 유출면적은 전유출면적에 접근하므로 $f \approx 1$ 로 가정하고 이를 포화유출률로 정의한다. 즉 포화우량에 도달하면 침투역에서도 유출이 일어난다. 유출역과 침투역으로부터 유출계산은 전체 홍수기간에 대하여 분리시켜서 수행되며 유출고를 사용하여 1차유출수와 포화유출수는 다음과 같이 정리된다.

$$q_1 = f_1 \cdot r_{ave} \quad \sum r_{ave,i}(t) \leq R_{sa} \quad (3)$$

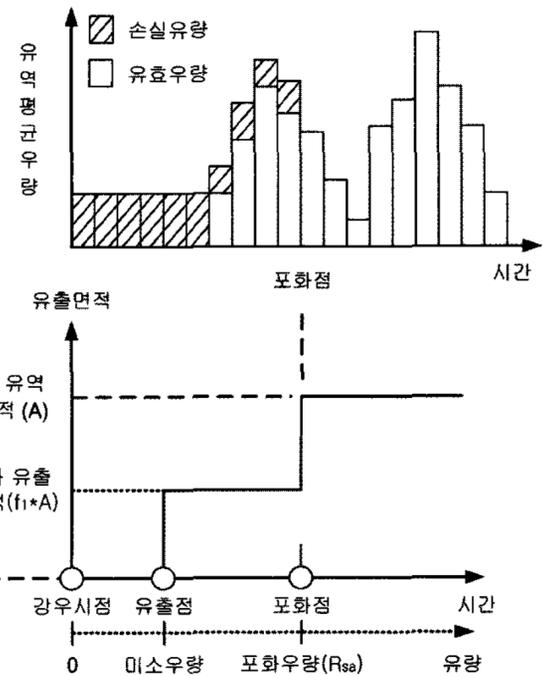


그림 1. 저류함수 모형의 수문학적 손실

$$q_{sa} \doteq f_1 \cdot r_{ave} + (1-f_1) \cdot r_{ave} \quad \sum r_{ave,i}(t) > R_{sa} \quad (4)$$

여기서 R_{sa} 는 포화우량으로 정의되는 매개변수이다.

유역의 총유출량 $Q_T(t)$ (m^3/sec)는 $Q(t)$ 에 기저유출 Q_i 를 더하여 다음과 같이 된다.

$$Q_T(t) = Q(t) + Q_i \quad (5)$$

$$\frac{A}{3.6} [f_1 \cdot r_{ave} + (1-f_1) \cdot r_{ave}] + Q_i - Q(t+T_1) = \frac{dS_t}{dt} \quad (6)$$

2.2 하도의 저류함수모형

하도의 저류함수법에서 사용하는 운동방정식과 연속방정식, 지체효과는 다음과 같다.

$$S_t = KQ^P(t-T_1) - T_1 Q(t+T_1) \quad (7)$$

$$\left(\sum_{j=1}^n I_j \right) - Q(t+T_1) = \frac{dS_t}{dt} \quad (8)$$

여기서 $Q(t+T_1)$ 은 유출점까지 도달시간이 T_1 이 되는 하도 내부 지점의 유량, I_j 는 유역 또는 상류하도로부터 유입되는 유입량(m^3/sec)이다.

3. 매개변수의 민감도분석

매개변수에 관한 민감도분석은 유출상수의 추정 및 모형구조의 해석에 중요한 역할을 담당한다. 즉, 변수 조정시 우선 순위와 조정폭을 결정하는데 지침이 되며, 이에 따라 민감한 변수의 추정에는 많은 노력을 기울여 정확을 기하여야 하는 반면 민감하지 않은 변수는 경우에 따라 고정상수로 취급하여도 무방하다. 민감도분석은 시스템 구성요소, 입력값, 목적함수를 포함하는 매개변수의 변화 속에서 최적해를 조사하는 것으로 다른 요소에 영향을 주는 하나의 요소의 변화 비율 또한 포함한다. 수문모형에서 민감도분석은 매개변수의 변화에 따른 수문곡선의 변화를 저류효과에 대해서는 RE_Q , 지

체효과에 대해서는 E_T , 그리고 전체적인 형상에 대해서는 적용 홍수 크기별 오차의 상대적 크기를 비교하기 위하여 상대 오차 RE_V 의 변화로 나타낸다.

$$RE_Q = \frac{Q_p - Q_{peak}}{Q_p} \quad (9)$$

$$E_T = T_p - T_{peak} \quad (10)$$

$$RE_V = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{cal})^2}{\sum (X_{obs})^2}} \quad (11)$$

여기에서, Q_p = 관측 침투유량, Q_{peak} = 계산 침투유량, T_p = 관측 침투시간, T_{peak} = 계산 침투시간, X_{cal} = 계산 유출량, X_{obs} = 관측 유출량이다.

본 연구에서는 매개변수에 대한 민감도 분석을 크게 유역 모형의 변수에 대한 것과 하도모형의 변수에 대하여 실시하였으며, 각 변수들의 기준값에서 분석대상 변수를 단일변량으로 했을 때와 다변량(2개의 변수로 구성)으로 구성하였을 때로 구분하여 민감도 분석을 실시하였다. 그림 2는 유역모형의 매개변수인 K 와 P 를 동시에 변화시켰을 때 기준 변수에 대한 Q_p 변화와 Q_{peak} 의 변화율을 나타낸 것이다.

기존의 홍수분석모형에서 저류상수는 경험공식인 다음 식 (12) 및 식 (13)과 같은 이근천식을 이용하여 추정하고 있으며, 이근천(利根川)식을 이용하여(木村, 1961) 저류상수를 추정할 경우 K 는 주하천의 평균경사가 커짐에 따라 증가하는 반면 P 는 주하천의 평균경사가 증가함에 따라 감소하는 서로 반비례관계를 가지게 된다.

$$K = 118.84 \cdot (1/i)^{-0.3} \quad (12)$$

$$P = 0.175 \cdot (1/i)^{0.235} \quad (13)$$

단, 여기서 i 는 주하천 경사이다.

그러나, 그림 2에서 보는 바와 같이 저류상수 K 와 P 의 민감도는 상호 반응 양상이 같으므로 이근천식을 이용한 매개변수 K 와 P 의 결정은 많은 문제점을 안고 있다. 또한, 이근천식을 이용할 경우 유역의 매개변수인 K 와 P 를 조정하는데

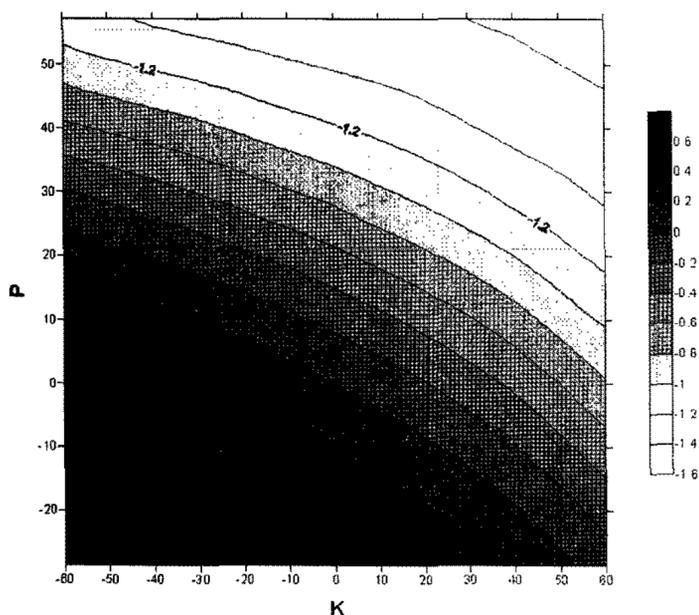


그림 2. K - P 변화에 따른 $(Q_p - Q_{peak})/Q_p$

있어 유역의 특성인자가 아닌 하도의 특성인자인 주하천 경사가 사용됨에 따라 유역의 특성을 반영한 매개변수를 추정할 수 없을 것이다. 특히, 이근천식은 일본의 Tone River를 대상으로 산정된 경험공식으로 이 식을 유역특성이 상이한 우리나라의 유역에 적용하는 것은 적절하지 못할 것이다. 따라서 본 연구에서는 연구대상유역에 대한 유역의 특성이 반영된 저류상수 추정식을 새로이 개발하였다.

4. 매개변수의 산정절차

본 연구에서 수행한 매개변수의 산정절차는 다음과 같다(그림 3).

첫 번째, 과거의 홍수자료로부터 강우사상을 추출하여 유역별 기저유량을 결정하고, 홍수직전 유출고(q_A) 산정하였다. 두 번째, 유역의 유출상수(f_1, R_{sa})를 산정하기 위해서는 저류상수(K, P, T)는 고정시킨 상태에서 유출상수 f_1 과 R_{sa} 만을 변화시켜 계산 및 관측 유출수문곡선과의 오차가 가장 적은 유출상수를 분석대상 호우의 유출상수로 결정하였으며, 이를 바탕으로 유출상수와 홍수직전 유출고와의 관계식을 유도하였다. 세 번째, 유역의 저류상수(K, P)산정은 유도된 유출상수와 홍수직전 유출고와의 관계식으로부터 분석대상 호우에 대한 유출상수 고정시킨 상태에서 분석대상 호우별로 유역의 저류상수를 추정하고, 유역의 특성을 고려한 매개변수 산정식을 개발하였다. 마지막으로, 개선된 매개변수를 이용하여 강

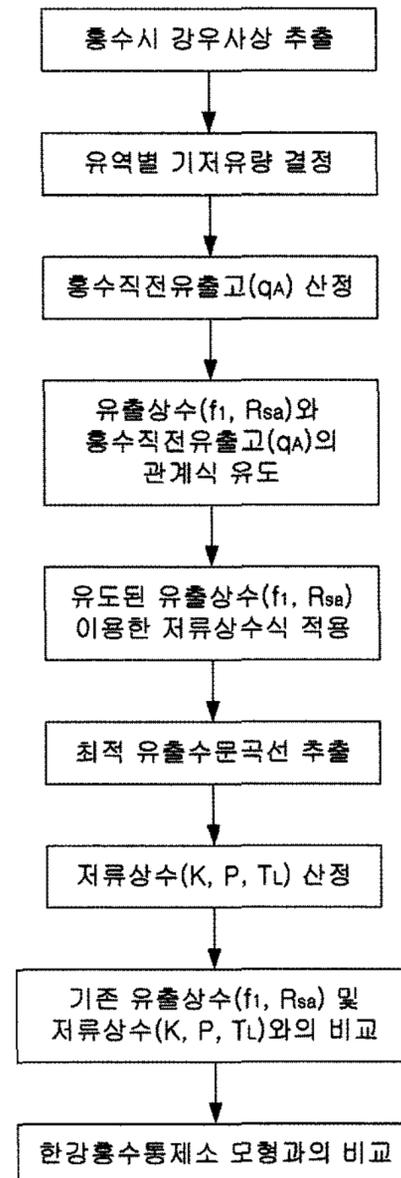


그림 3. 매개변수 산정 흐름도

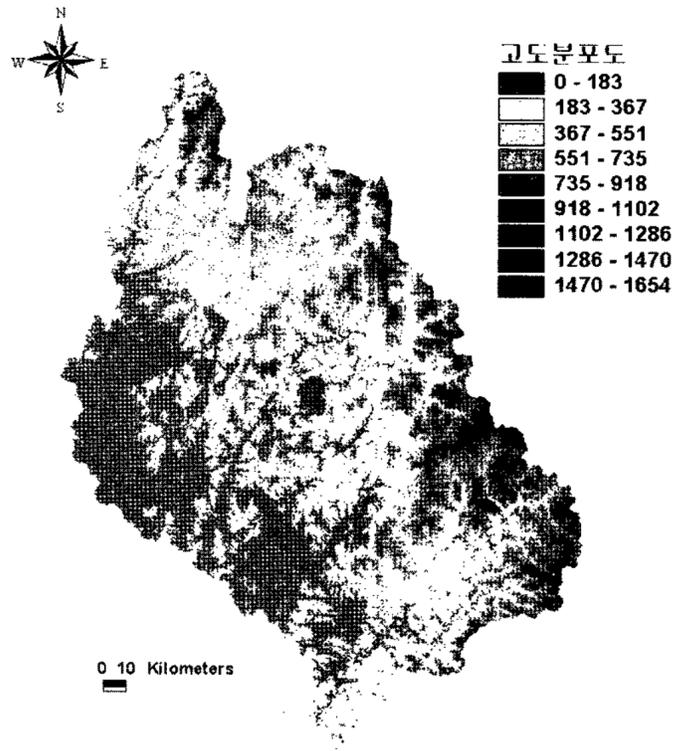


그림 4. 한강 유역 고도분포도(임진강 포함)

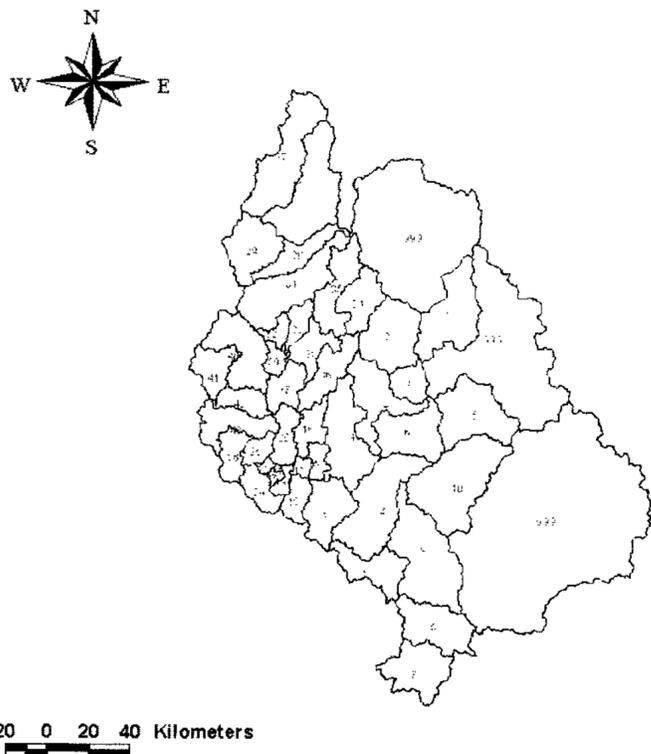


그림 5. 한강 유역 분할도(임진강 포함)

우-유출분석과 기존의 모형과 비교 검증을 실시하였다.

4.1 모형의 매개변수 산정 및 적용

연구의 대상 지역으로는 한강 전체 유역(그림 4, 5)을 택 하였으며 유역면적은 26,218 km²(임진강 포함 34,473 km²), 유로연장 481.7 km, 유역평균폭 54.4 km, 유역형상계수 0.111인 남한 제 1의 하천으로 하천형상은 우상(featherlike form)과 선상(fanshape form)이 혼합된 복합상 유역으로 전국토면적의 약 26.4%를 차지하고 있다. 유출계산모형의 구성은 상류구간으로 소양강댐(유역면적: 2703 km²), 충주댐(유역면적: 6648 km²), 황성댐 유역(유역면적: 209 km²)을 그 밖의 구간을 하류구간으로 설정하였으며 각 유역의 분할도는 그림 6~8과 같다. 상류구간의 소양강댐 유역은 9개의 소유역과 7개의 하도구간으로, 충주댐 유역은 22개의 소유역과 15개의 하도구간, 황성댐 유역은 3개의 소유역과 1개의 하도구간으로 구성하였으며, 하류구간은 26개 소유역, 31개 하도 구간으

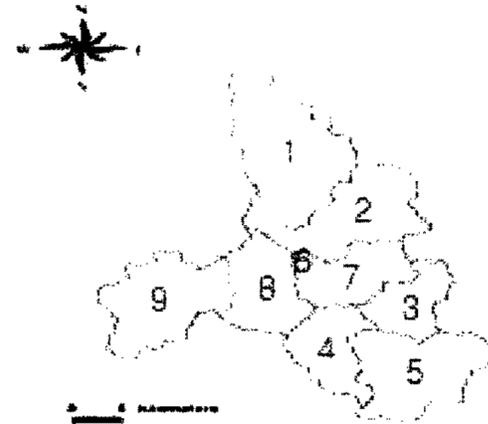


그림 6. 소양강댐 유역 분할도

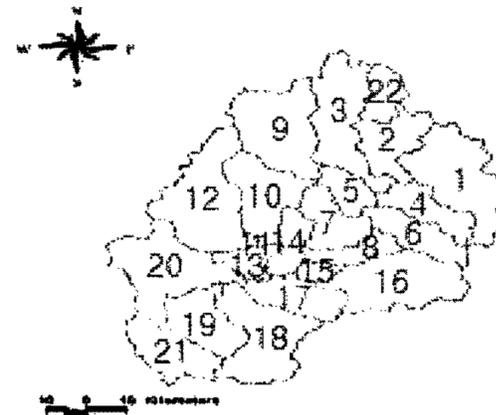


그림 7. 충주댐 유역 분할도

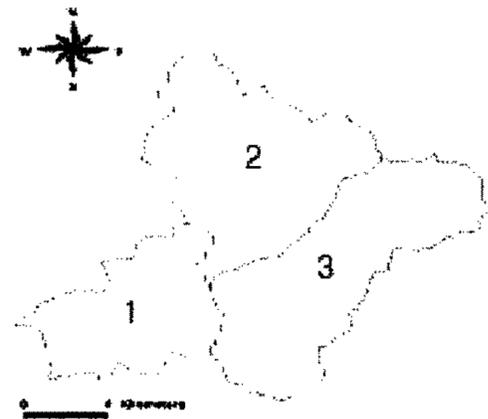


그림 8. 황성댐 유역 분할도

로 되어 있다. 홍수자료는 1997년 이후 한강홍수통제소에 수집된 시간별(T/M)자료를 사용하였다.

각 소유역 및 하도에 관한 지형특성인자는 홍수분석모형의 매개변수 산정시 유역의 특성을 반영하기 위한 중요한자이다. 따라서 본 연구대상 유역인 한강수계에 대하여 ArcView 3.2a 프로그램을 이용하여 DEM자료로부터 유역 및 하도에 대한 지형특성인자를 추출하였다. 지금까지 경험에 의하면 저류함수로서 충분한 정확도를 가지는 유출계산을 하기 위한 유역면적과 유로구간연장의 범위는 각각 10~1,000 km² 및 10~100 km으로 알려져 있는데 한강 유역에 대한 소유역 면적 및 유로연장이 저류함수 모형으로 충분한 정확도를 가질 수 있는 범위 내에 들어있다고 판단된다.

4.2 유역의 유출상수(f_1 , R_{sa}) 산정

유역의 유출상수를 결정하는 방법으로는 f_1 값을 가정하여 R_{sa} 를 계산하는 방법, 누가곡선에 의한 방법, 그리고 과거 홍수의 총강우량, 총유출량으로부터 추정하는 방법 등이 있다. 그러나 유출상수를 앞에서 언급한 방법 등으로 결정할 경우,

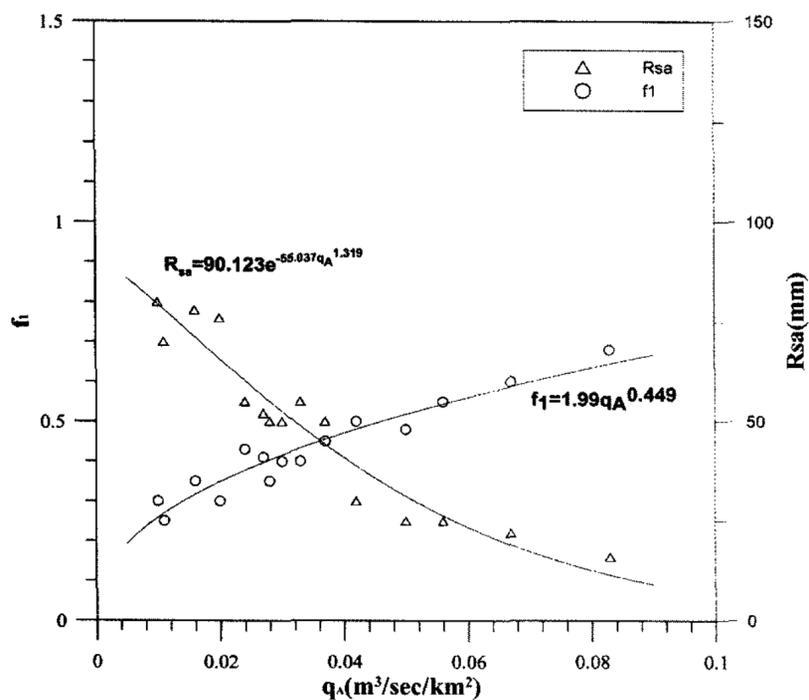


그림 9. 유역 유출상수의 회귀분석 결과

과거의 한정된 자료로부터 전기무강우일수, 전기총강우량 및 전기강우강도 등 유역의 초기 토양습윤상태와 유출상수간의 일정한 관계를 나타내기가 용이하지 않을 뿐만 아니라 중유역별로 유역형태를 대표하는데 따른 문제점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 유출비($q_A=Q/R$, Q : 총유출량, R : 총강우량)와 홍수직전 유출량(Q_A) 및 전기강우등과의 관계로부터 유출상수(f_i, R_{sa})를 산정 하였다. 그러나, 전기강우와 유출상수의 관련성을 찾을 수 없었으므로, 여기서는 홍수직전 유출고($q_A=Q_A/A$)와 유출상수의 관계로부터 유출상수를 추정하였으며, 관측 자료로는 한국건설기술연구원 (1993)과 한국수자원공사(2003a,b,c)의 자료들을 사용하였다.

본 연구대상 유역의 유출상수를 추정하기 위해 과거 16개의 홍수자료를 이용하였으며, 유출상수와 홍수직전 유출고와의 관계는 표 1과 같다.

모형의 유출상수를 산정하기 위해 그림 9와 같이 유출상수

와 홍수직전 유출고간의 관계를 이용하여 다음 식 (14) 및 (15)와 같은 회귀식을 산출하였으며, 그에 따른 RE_V 는 표 2와 같다.

$$f_i = 1.99 q_A^{0.449}, r^2 = 0.914 \quad (14)$$

$$R_{sa} = 90.123 e^{-55.037 q_A^{1.319}}, r^2 = 0.914 \quad (15)$$

여기서, $q_A(\text{m}^3/\text{sec}/\text{km}^2)$ 는 홍수직전 유출고이다.

표 2에서 보는 바와 같이 개선된 유출상수를 이용하여 모의된 유출수문곡선은 관측 유출수문곡선의 침투시간 및 침투유량과 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 총 유입량 역시 평균 RE_V 가 0.4로써 비교적 정확히 모의되는 것으로 나타났다.

4.3 유역의 저류상수(K, P, T_i) 산정

저류상수(K, P, T_i)는 유역의 특성을 반영하는 것으로 유역 특성 인자와 상관시켜 추정하는 것이 바람직할 것이다. 기존의 저류함수 모형의 저류상수는 이근천식과 같은 경험공식을 이용하여 추정하며, 이근천식에서 저류상수와 관련된 매개변수는 주 하천의 평균경사와 같은 유역의 특성인자와 상관시켜 매개변수를 추정하고 있다.

그러나 3절에서 언급한 바와 같이 이근천식을 이용하여 유역의 저류상수 K, P 를 산정하여 적용시킨다는 것은 부적당할 것이다. 그리고 K-Water 모형에 적용한 유역의 주하천 평균경사를 보면, 소양강댐 유역은 유역경사, 충주댐과 황성댐 유역은 주하천경사로 볼 수 있다. 또 기무라가 소유역에 적용한 경험식에 사용한 유역인자는 주하천 평균경사가 아니라 유역경사이다.

따라서, 본 연구에서는 앞 절에서 산정한 유출상수를 고정값으로 하여 유역의 저류상수 K, P 를 추정하였으며, 추정된 매개변수에 대한 식을 새로이 유도하였다. 새로이 유도된 저

표 1 유출상수(f_i, R_{sa})와 홍수직전 유출고(q_A)의 관계

댐명	분석년도	분석기간	f_i	R_{sa}	q_A	기저유량(CMS)
소양강	2002	0803-0812	0.40	55.00	0.033	87.91
		0829-0907	0.40	50.00	0.030	77.84
	2003	0720-0729	0.45	50.00	0.037	99.36
	2004	0710-0719	0.55	25.00	0.056	150.23
		0815-0824	0.40	55.00	0.033	98.48
충주	1999	0801-0809	0.68	16.00	0.083	554.31
	2000	0823-0901	0.48	25.00	0.050	330
	2002	0803-0812	0.35	78.00	0.016	108.89
		0829-0907	0.43	55.00	0.024	161.35
	2003	0708-0717	0.41	52.00	0.027	182.23
		0722-0731	0.60	22.00	0.067	443.23
황성	2002	0721-0730	0.35	50.00	0.028	5.84
		0829-0907	0.30	80.00	0.010	2.1
	2003	0707-0716	0.25	70.00	0.011	2.5
	2004	0617-0626	0.30	76.00	0.020	4.1
		0711-0720	0.50	30.00	0.042	8.8

표 2. 개선된 유출상수(f_1, R_{sa})에 따른 RMSE

분석기간		침투시간(hr)			침투유량(CMS)			총 유입량($10^6 m^3$)		
		관측	계산	오차	관측	계산	오차	관측	계산	RE_V
소양강										
2002년	0803-0812	8/06-11시	8/06-09시	2	6322.70	5071.90	0.2	863.14	751.07	0.1910
	0829-0907	9/01-05시	9/01-04시	1	4766.4	6431.90	-0.35	274.08	365.65	0.4980
2003년	0720-0729	7/23-07시	7/23-03시	4	1928.10	2781.6	-0.44	277.63	366.25	0.6319
2004년	0710-0719	7/13-10시	7/13-11시	-1	4514.10	4563.80	-0.01	727.21	817.70	0.2497
	0815-0824	8/19-09시	8/19-18시	-9	2176.10	2064.60	0.05	384.00	359.40	0.2105
충주										
1999년	0801-0809	8/03-12시	8/03-11시	1	9804.70	80311.0	-0.08	1437.67	1405.23	0.1907
2000년	0823-0901	8/27-13시	8/27-16시	-3	3027.20	3062.80	-0.01	775.03	780.17	0.3399
2002년	0803-0812	8/07-17시	8/07-18시	-1	17879.4	20438.3	-0.14	1989.19	2469.84	0.2241
	0829-0907	9/01-06시	9/01-11시	-4	9300.0	11270.8	-0.21	703.69	898.65	0.3587
2003년	0708-0717	7/10-07시	7/10-13시	-6	992.3	2049.8	-1.07	213.96	243.16	0.6622
	0722-0731	7/25-07시	7/25-06시	1	4422.50	5519.90	-0.25	893.91	939.28	0.5060
횡성										
2002년	0721-0730	7/23-15시	7/23-10시	5	50.80	78.90	-0.55	6.42	9.38	0.6465
	0829-0907	9/01-13시	9/01-08시	5	22.51	72.50	-0.69	4.31	8.06	0.6610
2003년	0707-0716	7/09-19시	7/09-17시	2	31.78	67.37	-0.53	5.93	6.40	0.4950
2004년	0617-0626	6/21-07시	6/21-06시	1	135.10	83.00	0.39	22.83	15.69	0.4012
	0711-0720	7/13-07시	7/13-08시	-1	452.4	481.1	-0.06	34.86	37.46	0.2277

표 3. 댐상류유역에 대한 저류상수 재산정 결과

소유역 번호	유역면적 (km^2)	유역경사 (I)	하천장 (km)	이근천식		재산정식		소유역 번호	유역면적 (km^2)	유역경사 (I)	하천장 (km)	이근천식		재산정식			
				K	P	K	P					K	P	K	P		
소양강 댐	1	536.50	0.278	41.268	76.29	0.124	69.364	0.232	충주 댐	9	535.80	0.391	25.196	34.34	0.066	65.941	0.219
	2	403.20	0.346	21.625	77.21	0.125	67.142	0.224		10	343.30	0.422	26.268	37.01	0.070	65.207	0.217
	3	403.50	0.333	28.411	86.31	0.136	67.527	0.225		11	4.80	0.228	1.982	29.10	0.058	71.456	0.239
	4	194.50	0.335	20.911	88.04	0.138	67.480	0.225		12	519.50	0.370	38.589	43.06	0.079	66.490	0.221
	5	236.20	0.302	29.839	85.76	0.136	68.533	0.229		13	121.70	0.290	6.446	19.98	0.043	68.954	0.230
	6	233.50	0.305	16.625	85.42	0.135	68.437	0.228		14	156.40	0.402	6.089	16.59	0.037	65.676	0.218
	7	16.70	0.361	7.161	91.57	0.143	66.732	0.222		15	53.60	0.460	4.839	17.74	0.039	64.362	0.214
	8	276.70	0.301	19.482	82.99	0.132	68.553	0.229		16	511.50	0.501	26.625	40.76	0.076	63.561	0.211
	9	402.30	0.313	27.875	67.53	0.112	68.160	0.227		17	253.50	0.460	8.589	18.32	0.040	64.375	0.214
충주 댐	1	547.90	0.421	35.018	36.22	0.069	65.217	0.217	18	633.60	0.429	22.161	24.52	0.051	65.038	0.216	
	2	276.80	0.467	22.875	36.82	0.070	64.226	0.213	19	149.90	0.358	7.339	17.10	0.038	66.803	0.222	
	3	492.20	0.443	32.875	39.48	0.074	64.734	0.215	20	543.00	0.348	22.518	37.77	0.071	67.108	0.224	
	4	228.80	0.490	20.554	44.04	0.080	63.756	0.212	21	378.00	0.424	6.268	57.79	0.099	65.160	0.217	
	5	142.60	0.493	9.661	21.75	0.046	63.702	0.211	22	144.90	0.314	22.875	36.82	0.070	68.123	0.227	
	6	223.50	0.481	21.446	44.37	0.081	63.929	0.212	횡성 댐	1	81.30	0.384	12.339	40.42	0.075	66.114	0.220
	7	226.50	0.481	18.232	20.19	0.044	63.942	0.212		2	78.20	0.448	19.839	40.09	0.075	64.612	0.215
	160.20	0.447	15.018	50.85	0.090	64.648	0.215	3		49.50	0.325	16.268	36.86	0.070	67.788	0.226	

류상수식은 다음 식 (16), (17)과 같다.

$$K = 51.375I^{-0.1308} \quad (16)$$

$$P = 0.155I^{-0.1308} \quad (17)$$

여기서, I 는 유역경사이다.

앞에서 추정된 저류상수식을 이용하여 연구대상 유역인 한강유역에 대하여 소유역별 저류상수 K, P 를 재산정한 결과는 표 3 및 표 4와 같다.

표 4. 하류유역에 대한 저류상수 재 산정 결과

소유역 번호	면적(km ²)	유역경사(I)	연장(km)	이근천식		재산정식	
				K	P	K	P
1	865.0	0.383	63.57	40.93	0.403	66.140	0.220
2	795.0	0.404	47.46	34.54	0.461	65.632	0.218
3	283.7	0.254	21.05	26.91	0.560	70.338	0.235
4	719.6	0.391	64.56	31.43	0.496	65.946	0.219
5	904.8	0.391	66.70	32.67	0.481	65.951	0.219
6	705.4	0.357	77.07	29.61	0.520	66.830	0.223
7	676.3	0.354	68.87	30.82	0.504	66.935	0.223
8	705.9	0.320	57.33	33.67	0.470	67.939	0.227
9	1275.6	0.240	68.78	19.56	0.719	70.906	0.237
10	1147.6	0.335	70.98	31.79	0.492	67.469	0.225
11	520.3	0.159	28.22	31.59	0.494	75.435	0.253
12	1145.7	0.190	47.60	32.47	0.484	73.427	0.246
13	591.5	0.259	41.25	19.46	0.722	70.110	0.234
14	882.8	0.327	65.74	30.24	0.511	67.728	0.226
15	148.8	0.221	16.98	17.19	0.796	71.814	0.240
16	288.9	0.236	37.98	28.14	0.541	71.086	0.238
17	79.1	0.083	10.33	20.39	0.696	83.059	0.281
18	235.8	0.182	26.43	21.54	0.667	73.874	0.248
19	92.0	0.164	18.79	24.02	0.612	75.086	0.252
20	309.4	0.165	35.69	19.55	0.720	75.013	0.252
21	11.7	0.084	4.24	14.96	0.887	82.852	0.280
22	40.1	0.100	2.35	14.96	0.887	80.758	0.272
23	48.7	0.066	8.66	14.96	0.887	86.048	0.291
24	281.9	0.152	31.39	27.91	0.544	75.902	0.255
25	174.7	0.158	20.86	26.77	0.563	75.473	0.253
26	289.8	0.052	13.59	14.96	0.887	89.008	0.302

4.4 K-Water(기준상수)모형과의 비교분석

K-Water 모형의 기준상수(유역상수 $f_1 = 0.50$, $R_{sa} = 20.0$ 으로, 저류상수는 이근천식을 이용)를 이용하여 수행된 결과와

새로이 산정한 유역상수(f_1 , R_{sa})와 저류상수(K , P)를 이용한 저류함수 모형의 수행 결과를 비교해보았다.

대상 지역은 상류부터 팔당댐까지이며, 분석기간은 2002년

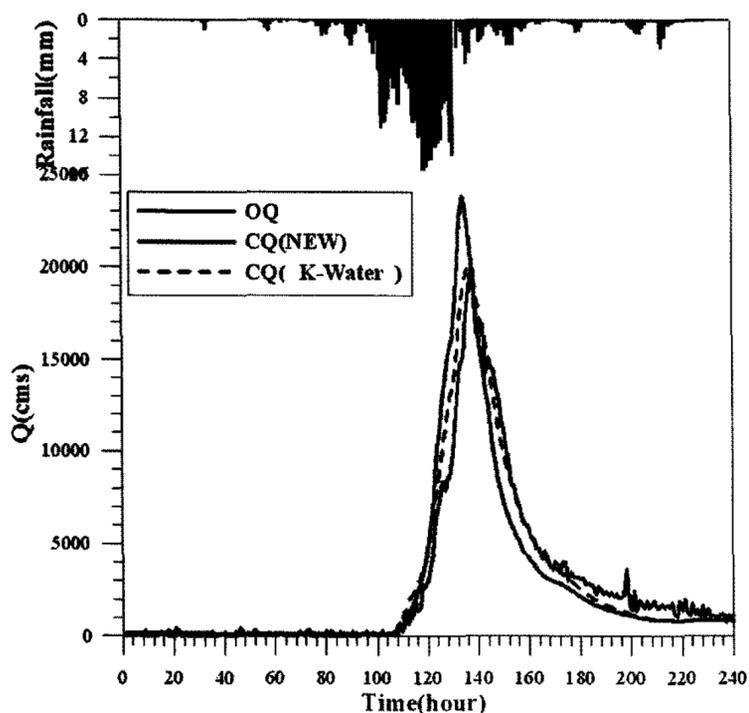


그림 10. 충주댐의 유출수문곡선 비교 (2002.08.02~08.11)

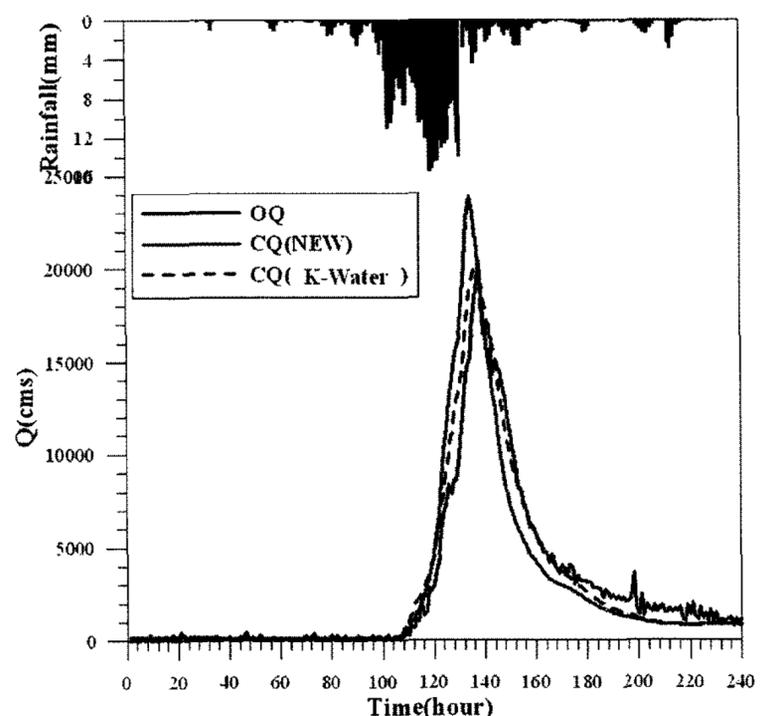


그림 11. 소양강댐의 유출수문곡선 비교 (2004.07.10~07.19)

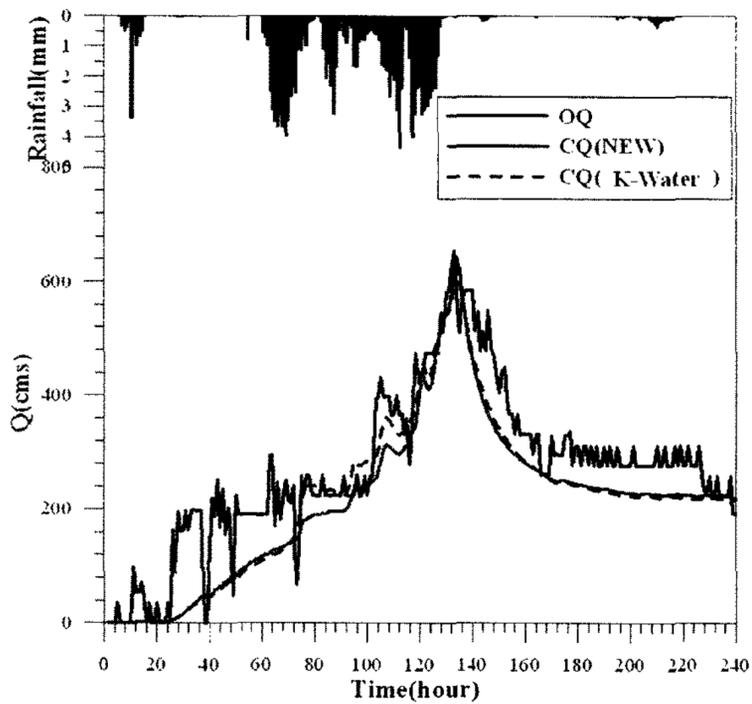


그림 12. 춘천댐의 유출수문곡선 비교 (2004.08.14~08.23)

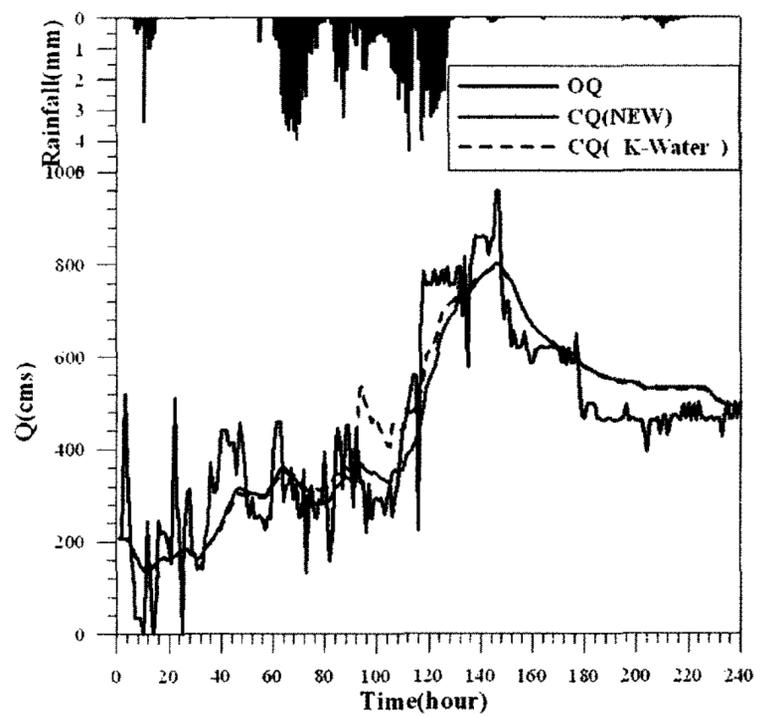


그림 13. 의암댐의 유출수문곡선 비교 (2004.08.14~08.23)

표 5. 개선된 저류함수 모형과 K-Water(기준상수) 모형에 따른 RE_V

분석 대상	분석기간	분석모형	침투시간(hr)			침투유량(CMS)			총 유입량($10^6 m^3$)		
			관측	계산	오차	관측	계산	오차	관측	계산	RE_V
충주댐	20020802~20020811	개선모형	8/07/18시	8/07/14시	4	20438.3	23918.6	-0.17	2399.08	2340.12	0.3459
		K-Water	8/07/18시	8/07/16시	2	20438.3	19932.1	0.02	2399.08	2386.85	0.1700
영월1	20020802~20020811	개선모형	8/07/15시	8/07/12시	3	7686.3	6796.6	0.12	663.94	540.28	0.3540
		K-Water	8/07/15시	8/07/13시	2	7686.3	5296.3	0.31	663.94	549.51	0.3178
소양강댐	20020829~20020907	개선모형	9/01/04시	9/01/05시	-1	6431.9	5435.8	0.15	437.10	373.07	0.2858
		K-Water	9/01/04시	9/01/06시	-2	6431.9	4223.9	0.34	437.10	360.93	0.4388
소양강댐	20040710~20040719	개선모형	7/13/11시	7/13/10시	1	4563.8	5058.3	-0.11	817.70	760.37	0.1882
		K-Water	7/13/11시	7/13/10시	1	4563.8	4379.0	0.04	817.70	743.64	0.2088
충주댐	20040814~20040823	개선모형	8/19/13시	8/19/15시	-2	5259.0	5308.0	-0.01	831.11	968.35	0.2659
		K-Water	8/19/13시	8/19/10시	3	5259.0	7273.3	-0.38	831.11	968.35	0.7417
영월2	20040814~20040823	개선모형	8/19/10시	8/19/10시	0	2902.4	2726.7	-0.06	385.01	369.42	0.1315
		K-Water	8/19/10시	8/19/08시	2	2902.4	3509.5	-0.21	385.01	510.62	0.4139
영월1	20040814~20040823	개선모형	8/19/10시	8/19/08시	2	1353.4	1739.9	-0.28	210.49	256.46	0.2950
		K-Water	8/19/10시	8/19/08시	2	1353.4	1972.7	-0.46	210.49	345.03	0.8307
의암댐	20040814~20040823	개선모형	8/20/02시	8/20/02시	0	958.0	800.0	0.16	384.47	385.46	0.1926
		K-Water	8/20/02시	8/20/02시	0	958.0	794.0	0.17	384.47	397.95	0.2008
춘천댐	20040814~20040823	개선모형	8/19/13시	8/19/14시	-1	656.0	644.0	0.02	233.35	184.95	0.2492
		K-Water	8/19/13시	8/19/14시	-1	656.0	620.0	0.05	233.35	190.94	0.2418

8월 2일, 2002년 8월 29일, 2004년 7월 10일, 2004년 8월 14일부터 10일이다. 그림 10~그림 13은 해당 기간에 대한 새로이 수행된 저류함수 모형과 K-Water 모형의 기준상수를 이용한 분석결과를 그래프로 나타낸 것이고, 표 5는 두 모형의 RE_V 를 나타낸 것이다. 그림 10~그림 13과 표 5에서 보는 바와 같이 K-Water 모형의 기준상수를 이용한 경우보다 새로이 산정한 유출 및 저류상수를 이용한 저류함수 모형의 결과가 많은 경우에 있어서 좀 더 정확히 모의되고 있음을 알 수 있었다.

4.5 한강홍수통제소 모형과의 비교분석

앞장에서 산정한 유역상수(f_1, R_{sa})와 저류상수(K, P, T)를

이용한 저류함수 모형의 수행 결과와 한강홍수통제소 모형과의 비교를 해보았다. 대상 지역은 소양강댐과 충주댐 유역이고, 분석기간은 2003년 8월 19일, 2004년 7월 10일, 2004년 8월 14일부터 10일이다.

그림 14~그림 17은 해당 기간에 대한 저류함수 모형과 한강홍수통제소 모형의 분석결과를 그래프로 나타낸 것이고, 표 6은 두 모형의 RE_V 를 나타낸 것이다.

그림들과 표에서 두 모형의 관측치가 조금씩 차이를 보이는 것은 본 연구의 저류함수 모형은 1시간 단위 자료를 사용하였으나 한강홍수통제소 모형에서는 30분 단위 자료를 사용하였기 때문이다. 저류함수 모형을 이용한 분석결과 RE_V

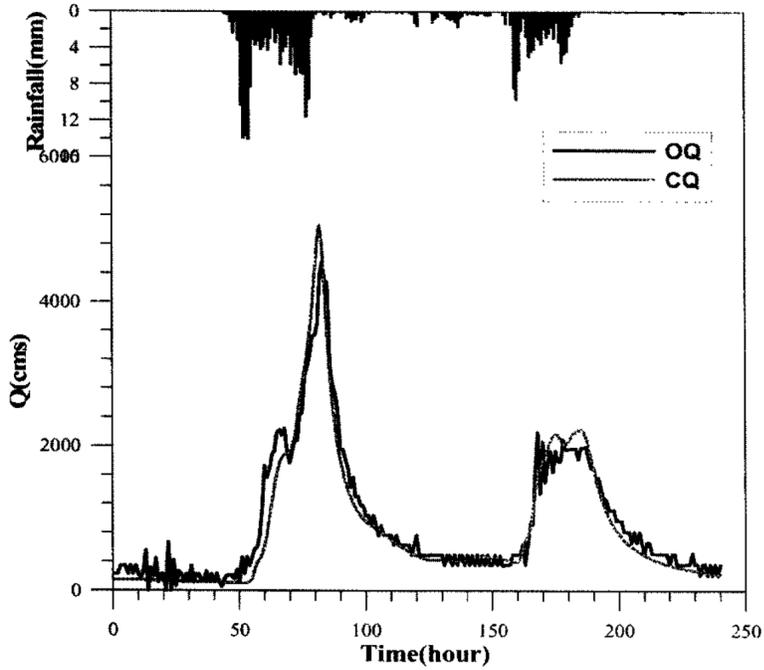


그림 14. 개선모형의 소양강댐 유출수문곡선 (2004.07.10~07.19)

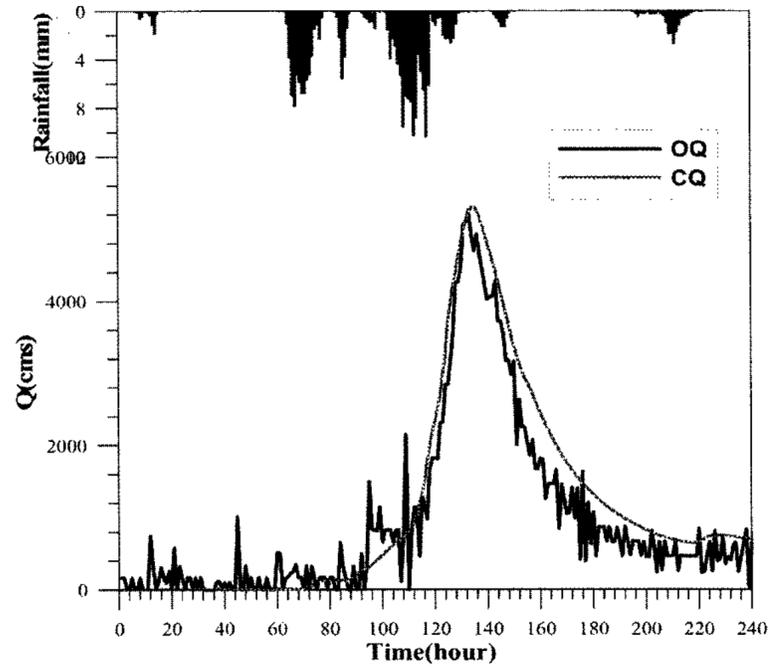


그림 16. 개선모형의 충주댐 유출수문곡선 (2004.08.14~08.23)

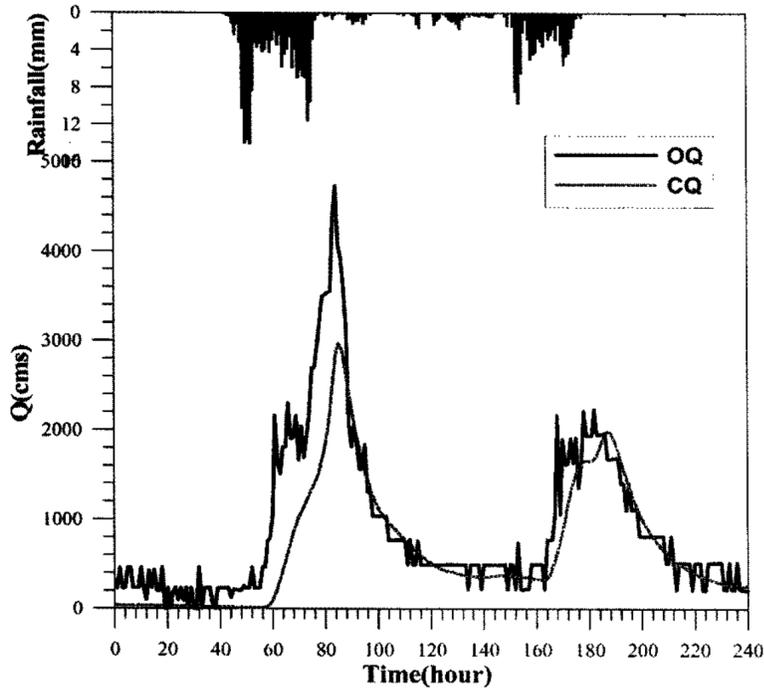


그림 15. 한강홍수통제소 모형의 소양강댐 유출수문곡선 (2004. 07.10~07.19)

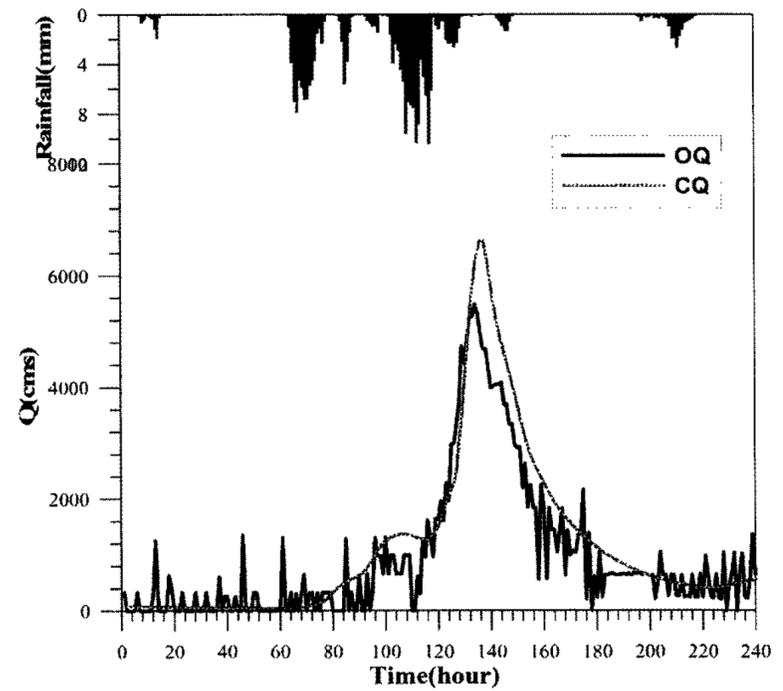


그림 17. 한강홍수통제소 모형의 충주댐 유출수문곡선 (2004. 08.14~08.23)

표 6 개선된 저류함수 모형과 한강홍수통제소 모형에 따른 RE_v

대상 지역	분석기간	분석 모형	침투시간(hr)			침투유량(CMS)			총 유입량(10 ⁶ m ³)		
			관측	계산	오차	관측	계산	오차	관측	계산	RE _v
소양강댐	20030819~20030828	개선모형	8/25/6시	8/25/7시	-1	4621.6	5323.8	-0.15	780.96	935.85	0.3089
		한강홍수통제소	8/25/6시	8/25/9시	-3	4587.0	4013.0	0.13	808.12	793.89	0.3323
	20040710~20040719	개선모형	7/13/11시	7/13/10시	1	4563.8	5058.3	-0.11	817.70	760.37	0.1882
		한강홍수통제소	7/13/11시	7/13/12시	-1	4740.0	2971.7	0.37	812.99	586.94	0.4084
	20040814~20040823	개선모형	8/19/18시	8/19/13시	5	2064.6	2801.5	-0.36	355.30	535.88	0.6329
		한강홍수통제소	8/19/18시	8/19/19시	-1	2184.0	1226.7	0.44	370.53	232.13	0.4540
충주댐	20030819~20030828	개선모형	8/25/19시	8/25/19시	0	4504.0	4594.1	-0.02	787.13	997.90	0.4358
		한강홍수통제소	8/25/19시	8/26/7시	-11	4448.0	4663.7	-0.05	755.83	893.77	0.5477
	20040710~20040719	개선모형	7/17/08시	7/17/12시	-4	5741.8	6383.6	-0.11	1850.66	1887.71	0.2383
		한강홍수통제소	7/17/7.5시	7/17/18시	-10.5	5870.0	5626.4	0.04	1842.86	1499.86	0.3287
	20040814~20040823	개선모형	8/19/13시	8/19/13시	0	5259.0	5308.0	-0.01	831.11	968.27	0.2660
		한강홍수통제소	8/19/13시	8/19/15.5시	-2.5	5476.0	6652.3	-0.21	875.80	1043.31	0.3628

가 더 작은 것으로 보아 저류함수 모형이 좀 더 정확히 모의되고 있음 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 강우-유출 분석의 정확성을 높이기 위해 홍수예경보를 위한 모형인 저류함수모형의 매개변수를 산정하였다. 모형의 매개변수 산정에 앞서 각 매개변수의 민감도 분석을 실시하였으며, 대상 유역에 대한 지형인자를 새로이 계산하여 적용하였다. 한강 유역을 대상으로 소양강댐, 충주댐, 황성댐 상류구간의 34개 소유역 및 23개 하도, 하류구간의 26개 소유역과 31개 하도로 구분하고, 한강홍수통제소에 수집된 1997년 이후로 수집된 시간별(T/M) 자료를 이용하여 저류함수모형의 매개변수를 산정하였고, 그 결과를 한국수자원공사의 K-Water(기준상수) 모형과 한강홍수통제소 모형과의 비교분석 하였다. 저류함수모형에 사용되는 매개변수로 유역모형의 유출상수 f_1 , R_{sa} 저류상수 K , P , T_1 하도모형의 저류상수 K , P , T_1 들에 대한 민감도분석을 하였다. 유출상수 f_1 , R_{sa} 는 초기유출에 해당되며 유역 및 하도모형의 저류상수, K , P , T_1 에 비해 덜 민감하며, K , P 가 T_1 에 비해 크게 민감하고 K , P , 두 변수 중에는 P 가 더 민감하므로 가장 중요한 변수임을 보였다. 한강 유역에 대한 지형인자를 새로 구하고, 과거 유출 자료를 사용하여 유역의 유출상수 f_1 , R_{sa} 를 홍수 직전유출고와의 관계로 회귀식을 도출하였으며, 유역모형의 저류상수 K , P 를 조정하여 지역화된 식을 얻었다. 새로 산정한 지형인자 및 매개변수들의 회귀식과 지역화된 식을 이용하여 각 유역에 대한 매개변수를 계산하고, 이를 바탕으로 개선된 모형의 수행 결과를 기존의 한국수자원공사의 K-Water(기준상수) 모형 및 한강홍수통제소 모형과 비교분석 하였다. 개선된 모형의 결과가 두 기관의 모형 결과보다 첨두유량 차이 RE_Q , 첨두유량 발생시각 차이 E_T , RE_P 에서 작게 나옴으로써 관측 유출수문곡선과 더 잘 일치함을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 강인주, 김중훈, 윤용남 (1994) 저류함수법에 의한 설계 홍수량 산정에 관한 연구. **대한토목학회 학술발표논문집**, 대한토목학회, No. 2, pp. 189-192.
- 건설부 한강 홍수통제소 (1985) **충주다목적댐 건설에 따른 한강홍수예경보 프로그램 개선 보고서**.
- 김만식, 연구방, 박노혁, 김동필 (2000) 소유역에서의 실시간 홍수예측을 위한 강우-유출모형 비교. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, No. 3, pp. 521-524.
- 남궁달 (1985) 저류함수법에 의한 강우-유출모형의 변수추정. **한국수문학지**, 한국수문학지, 제18권, 제2호, pp. 175-185.
- 심순보, 김만식 (1999) 유입량 예측을 위한 신경망 모형과 저류함수 모형의 비교. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, Vol. 19, No. 2(1), pp. 79-90.
- 윤강훈, 서봉철 (2004) 댐방류량을 이용한 한강 유역 신경망 유출 예측모형에 관한 연구. **대한토목학회논문집B**, 대한토목학회, Vol. 24, No. 1, pp. 47-53.
- 이정규, 김한섭 (2000) 홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지 제어(I). **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 33, No. 6, pp. 689-699.
- 정동국 (1989) 저류함수법에 의한 홍수추적의 매개변수 추정. **한남대학교논문집**, Vol. 19, pp. 309-322.
- 한국건설기술연구원 (1993) 수문모형 평가에 관한 연구.
- 한국수자원공사 (2003a) **수문유출해석**.
- 한국수자원공사 (2003b) **한강홍수예보**.
- 한국수자원공사 (2003c) **KOWACO 홍수분석모형 개발 보고서**.
- 木村俊晃 (1961) **貯留函数による 洪水流出追跡法**. 日本建設省 土木研究所.

- ◎ 논문접수일 : 2008년 01월 13일
◎ 심사의뢰일 : 2008년 01월 14일
◎ 심사완료일 : 2008년 02월 19일