

# 이수기 연속유출모형의 적용

맹승진\*, 고덕구\*\*

충북대학교 지역건설공학과\*, 한국수자원공사 수자원연구원\*\*  
maeng@chungbuk.ac.kr\*

## Application of Continuous Runoff Model During Low Flow

Seung-Jin Maeng\*, Deok-Ku Koh\*\*

Department of Agricultural & Rural Engineering, Chungbuk  
National University\*  
Korea Institute of Water And Environment, Korea Water  
Resources Corporation\*\*

### 요 약

현재까지 이수관리를 목적으로 저수지 또는 저수지군의 최적(연계)운영모형 개발에 관한 연구들을 다수 수행한 바 있는데 그 예를 들면, 한강, 금강, 낙동강 수계에서 Hydro-scheduling 모형과 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model for Han River Basin)을 적용하였고 특히 낙동강 수계에 대해서는 저수관리시스템을 개발하여 적용하였다. 그러나 이러한 적용 사례에도 불구하고 이수 물관리의 근간이 되는 수계 저수유출을 모의할 수 있는 모형은 정립되어 있지 못한 실정이다. 본 연구에서는 수계별 한정된 수자원의 효율적 관리를 위한 기존댐의 연계운영과 병행하여 댐 상·하류 유출을 고려한 종합적인 수자원관리방안 수립의 필요성이 대두됨에 따라, 저수기 댐 상·하류의 수계 주요지점에 대한 하천유출상황을 모의할 수 있는 모형을 개발하였다.

### 1. 서론

물관리는 개발된 수자원 시설물의 목적에 적합하게 이루어져야 한다. 다목적댐과 같은 수자원 시설물을 증장기적으로 운영하기 위해서는 댐 건설시에 작성해 놓은 운영율에 따르는 것이 원칙이기는 하나, 댐이 건설되고 난 후 시간이 경과함에 따라 유역의 수문 기상 조건이 변화되고, 용수수요 등 사회, 경제적 여건이 변화하여 초기에 작성된 운영율에만 의존하는 것이 적절치 못할 수도 있다. 또한, 지금까지의 댐운영은 단일 댐위주로, 그리고 댐 상류 유역의 수문학적 조건에 따라 온 것이 사실이지만, 점차 수계 전체를 고려하고 수계 내 댐들을 연계 운영할 필요성이 증대되고 있는 현실이다. 이러한 모형과 시스템은 수자원의 부족이 예상되는 21세기에 더욱 효율적인 댐운영의 지침을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 그럼에도 불구하고 이수 물관리의 근간이 되

는 수계 저수유출을 모의할 수 있는 모형은 정립되어 있지 못한 실정이다. 이수관리모형을 적용하기 위해서는 유역 유출량의 파악이 선행되어야 한다. 그러나 지금까지의 많은 연구에서 지적되어 왔듯이, 우리나라에서는 기초수문조사, 특히 유량관측의 미비로 말미암아, 이수관리모형의 주요 입력자료인 유출량 자료의 확보가 어려운 상황이다. 이를 극복하기 위한 방안이 수문모형을 이용한 유출량 모의발생이다. 수문모형을 이용하면 비교적 자료기간이 길고 관측밀도가 높은 강우량으로부터 유출량을 모의 산정할 수 있다. 이수관리를 위해서는 일단위, 또는 주간, 순간, 월간 및 연단위의 유출을 연속적으로 모의하여야 하며, 이와 같은 목적의 수문모형이 개발되고 적용되어야 할 것이다. 본 연구에서는 한강유역을 대상으로 연속유출모형을 적용하여 이수기 물관리모형을 개발하고자 한다.

## 2. 대상유역 및 사용관측소

대상유역으로는 한강유역으로 하였으며 유역유출을 분석하기 위해 한강수계를 22개의 소유역으로 분할하였다. 한강유역에내 강우관측소는 총 166개소로서 건설교통부 관할 105개소, 기상청관할 11개소, 그리고 한국수자원공사 관할이 50개소 등이다. 본 연구에 사용된 강우관측소는 이들 강우관측소에서 131개의 강우관측소만을 선정하였다. 유역의 유출특성을 파악하기 위한 분석지점은 「기존댐 용수공급능력조사(한강수계)」에서 개발된 CoMOM 모형에 유출자료가 입력되는 주요 조절점인 충주댐, 여주 수위표, 화천댐, 소양댐, 청평댐, 팔당댐으로 선정하였다.

## 3. 연속유출모형의 선정

본 연구의 대상수계인 한강수계에 적용하기 위한 연속유출 모형은 한국의 주요 수계에 적용되어 현재 실무부서인 한국수자원공사 물관리센터에서 사용하고 있는 SSARR 모형을 선정하였다. SSARR 모형은 미국 공병단의 북태평양지부에서 수자원시스템의 계획, 설계 및 관리를 위한 수문모형으로 1956년 처음 개발된 이래, 1975년 유역 및 하도 추적에 대한 기본 골격을 갖추었으며, 이후 integrated Snowband 유역모형과 운영예보 기능이 추가되어 현재에 이르고 있다.

## 4. 입력자료의 선정

수문모형에서 설정되는 매개변수는 크게 물리적 매개변수(physical parameter)와 수문기상 매개변수(hydrometeorologic parameter) 및 내부처리 매개변수(process parameter)로 구분될 수 있다(Fleming, 1977). SSARR모형에서 결정되어야 할 매개변수를 다음과 같이 설정하였다.

### 4.1 물리적 매개변수

한강수계의 유역을 24개 소유역으로 분할하였으며 강우 관측소는 131개소를 선정하였다. 각 소유역별 Thiessen계수를 산장하여 입력자료로 활용하였다.

한 개의 소유역을 여러개의 밴드로 분할하는 IS 유역모형에는 고도별 면적비가 입력되어야 하는데 고도별 유역면적과 고도별 면적비를 산정하여 입력자료로 하였다. SSARR의 저수지 조작 기능 중 방류량이 설정되는 경우에 대해서만 모의하였는데 한강수계에서 수문이 있어 저수지 조작이 가능하고 방류량 자료가 있는 충주댐, 화천댐, 소양강댐, 청평댐 4

개 댐의 방류량을 입력하였다.

### 4.2 수문기상 매개변수

유역의 고도에 따라 강우량이 다소 차이가 나는 것이 일반적인 현상이다. 그러나 Thiessen방법에 의해 산정된 유역평균 강우량은 유역을 단순한 평면으로 간주하여 산정된 것이므로 고도별 강우 가중치를 부여하여 이러한 가정을 보완할 수 있다. 본 연구에서는 “낙동강 홍수예경보 및 저수관리 프로그램 개발(저수관리부문)”에서 적용한 방법과 동일한 방법을 사용하였다. 이 방법에 의해 전체 소유역을 충주댐 권역, 소양댐권역 및 여주권역 3개 권역으로 나누어 각 권역별 고도 보정계수를 하절기 및 동절기로 나누어 구하였다. 강우강도별 ETI 가중치(EKE), 기온별 증발산 지수(ETP), SMI별 ETI 가중치(DKE), 고도별 ETI 가중치(ETEL), 월별 ETI 가중치(ETM), 최대 차단량(TINTMX), 기온자료를 입력자료로 하였다.

### 4.3 내부처리 매개변수

SSARR모형에서 가장 민감한 변수 중 하나인 토양 습윤상태별 유출율(SMI-ROP) 도표를 유역별로 산정하기 위하여 우선 초기치로서 GIS Tool인 Arcinfo 7.2.1을 이용하여 유역별 SMI-ROP 도표를 결정하였다. 즉, 총 22개 소유역의 CN값에 따라 3개의 중유역으로 나누어 CN값이 69인 1번 소유역에서 8번 소유역까지는 SMI-a, CN값이 71인 9번, 10번, 11번 21번 소유역은 SMI-b, 그리고 CN값이 70인 나머지 소유역은 SMI-c 곡선을 각각 적용하였다. 침투량별 지하수 유입률(BII-BFP) 역시 GIS Tool인 Arcinfo 7.2.1을 사용하여 SMI와 동일하게 전체 소유역을 3개로 나누어 각각 BII-a, BII-b, BII-c 곡선을 적용하였다. 지표수와 복류수 분리(S-SS) 도표 역시 SMI와 BII 경우와 동일하게 산정하였다. BII의 저류시간(BIITS)의 범위는 대략 30 hr ~ 60 hr이며(SSARR Manual p. 22 참조) 40 hr로 취하였다. 최대 BII(BIIMX)와 최대 지하수유출율(BFLIM)은 SSARR Manual pp. 21 ~ 22를 참조하여 BIIMX는 3 cm/일로 취하였고, 계산시간간격과 밀접한 관계가 있는 매개변수인 BFLIM은 계산시간간격이 커질수록 작아지는 경향을 보이게 되며 일유출 모의시의 전형적인 값은 0.13 cm/hr 정도의 값을 갖는다. 지하수 중 회귀지하수가 차지하는 비율(PBLZ) 및 이의 최대값(DGWLIM)은 통상 50% 정도로 하며

DGWLIM 값은 0.1 cm/hr로 취하였다. 유역추적 매개변수는 지표수, 복류수 및 지하수 각각에 대한 추적 및 IS유역모형에서 추가되는 회귀지하수 등 4가지 흐름장에 대한 추적이 독립적으로 이루어지게 된다. 각 흐름장은 여러개의 가상적인 선형저수지로 구성되어 있다고 가정하고 이에 대한 저수지 추적을 시행하게 되는 것이다. 각 흐름장에서의 매개변수는 가상저수지의 수효와 저류시간이 있으며 각 매개변수는 유역면적과 유로연장 및 도달시간 등을 참고하여 산정하였다. 하도추적 매개변수는 유역추적과 마찬가지로 연속된 가상저수지의 추적 방법이 사용되는 바, 가상저수지의 수효와 저류시간이 매개변수가 된다.

### 5. SSARR 모형의 적용

#### 5.1 모형의 보정

모형의 보정에 앞서 결정된 매개변수에 따른 SSARR모형의 계산결과를 분석하였다. 강우자료의 결측이 가장 적은 1993년과 1994년을 분석기간으로 선정하였는데 1994년은 가뭄이 심했던 해이다. 두 해에 대해서 각각 1월 1일부터 12월 31일까지를 SSARR모형으로 모의하였으며 여러가지 초기조건은 적절하게 가정하여 부여하였다. 변수보정을 위해서는 각 소유역에서 유출량의 계산치와 관측치 자료로부터 유역별 매개변수가 결정되어야 하지만 몇 개소의 제어지점을 제외한 대부분의 관측자료가 부실하거나 수위-유량곡선의 신빙성이 다소 결여되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 소유역별 매개변수의 독립적 산정은 차후로 미루고 6개 제어지점 즉 충주댐, 여주수위관측소, 화천댐, 소양강댐, 청평댐 및 팔당댐에서의 결과만으로 변수를 보정하였다.

#### 5.2 민감도분석

한강수계에 대한 모형 적용에 앞서 SSARR모형의 매개변수의 민감도분석을 실시하였다. SSARR 모형의 매개변수 중에서 토양습윤상태별 유출률(SMI-ROP)는 고수와 저수를 막론하고 가장 민감한 변수로 분석 되었으며 침투량별 지하수 유입률(BII-BFP), 지표수와 복류수 분리(S-SS) 및 지하수 중 회귀지하수가 차지하는 비율(PBLZ)은 고수시 민감도보다 저수시 민감도가 크게 나타났다. BII의 저류시간(BIITS), 최대BII(BIIMX)와 최대지하수유출률(BFLIM)의 분석결과 고수시는 물론이고 저수시에도 상대적으로 둔감한 결과를 나타내었다.

충주댐('93)

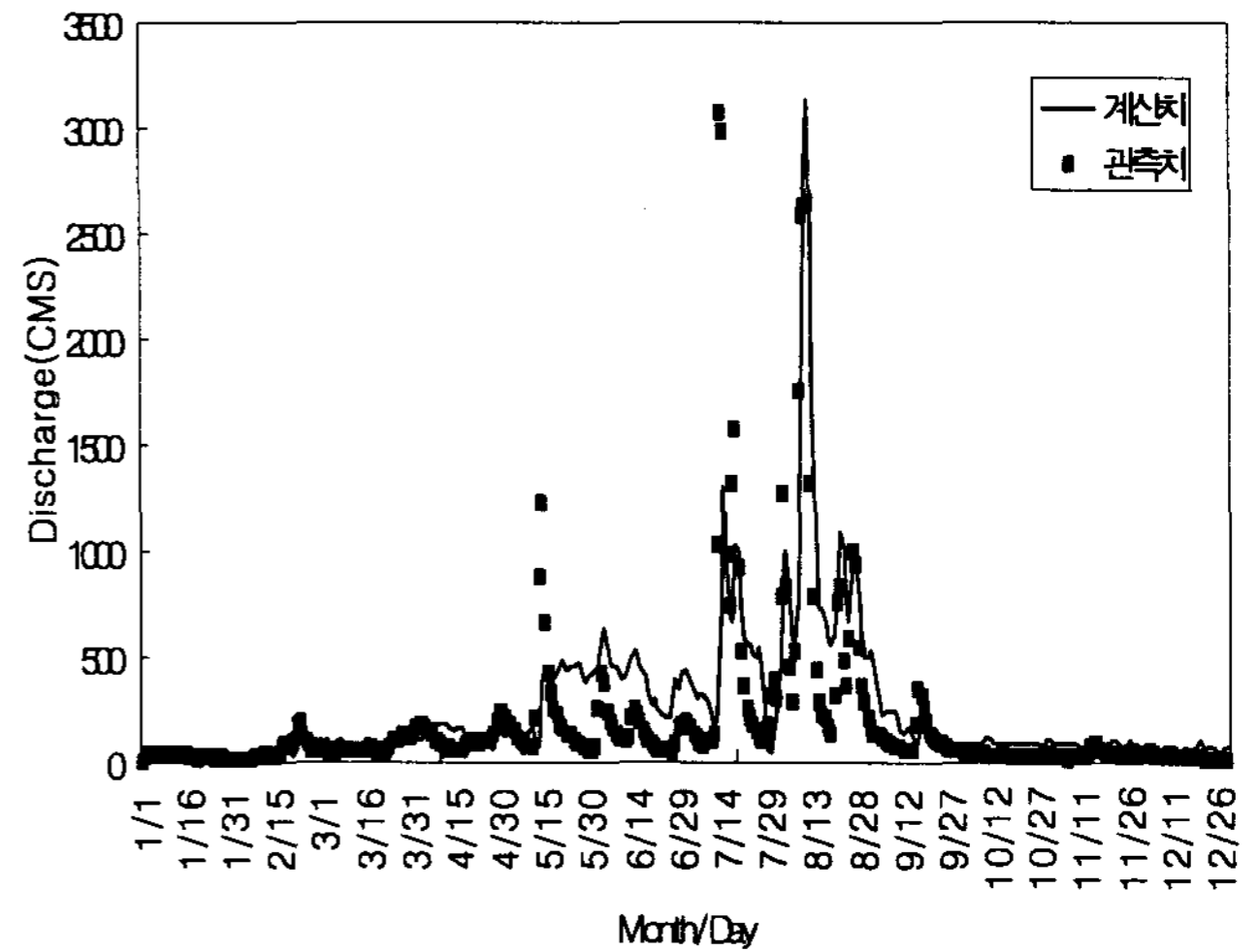


그림 1. SSARR 모형의 보정전 결과

매개변수의 민감도 분석결과를 바탕으로 적정매개변수를 결정하기 위한 요소로서 관측 유출량과 모의 유출량의 오차를 최소화하여야 한다. 그러나 모형에서 유량이 큰 홍수기의 오차를 감소시킬 목적으로 매개변수를 결정하게 되면 저수시의 정확도가 저하될 수 있으며, 반대로 저수시 위주로 매개변수를 결정하게 되면 고수시 유량을 전혀 반영하지 못할 소지가 있다.

따라서 고수시와 저수시로 분리하여 각각에 대해 민감한 변화를 보이는 매개변수를 각각의 목적함수로 선정하여 SSARR모형 수행을 위한 최종 매개변수를 산정하였다. 최종 매개변수 추정시 이용된 관측유출량자료는 전절에서 언급한 각 지점별 수위-유량관계곡선식으로 환산된 유량이다.

#### 5.3 모형의 검증

모형의 검증을 위하여 보정을 통해 결정된 매개변수 값을 이용해 타해년도의 유출을 모의하였다. 1998년을 검증대상으로 선정하여 6개 제어지점에서 유량의 계산치와 관측치를 비교하였다.

고수시 검증결과에 따르면 상대오차의 평균값이 보정자료에 비해 매우 오차가 작게 나타남으로써 고수시 검증결과는 만족스럽다고 할 수 있다. 저수시 검증결과도 보정자료에 비해 절대오차가 그리 크지 않으며, 청평과 팔당지점에서의 절대오차는 보정 자료에 비해 월등히 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 한강유역 6개 지점의 고수 및 저수시의 검증 결과는

대체적으로 만족스런 결과를 보이고 있다.

표 1. 모형의 검증결과

지점	고수시 오차			저수시 오차 (CMS)
	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	
충주댐	4,508	4,158	7.8	26.8
여주	5,803	5,402	6.9	92.6
화천댐	1,379	1,686	22.3	4.9
소양강댐	1,480	1,012	31.6	13.2
청평댐	4,760	6,634	39.4	17.7
팔당댐	11,815	17,483	48.0	86.0
평균			26.0	40.2

충주댐('99)

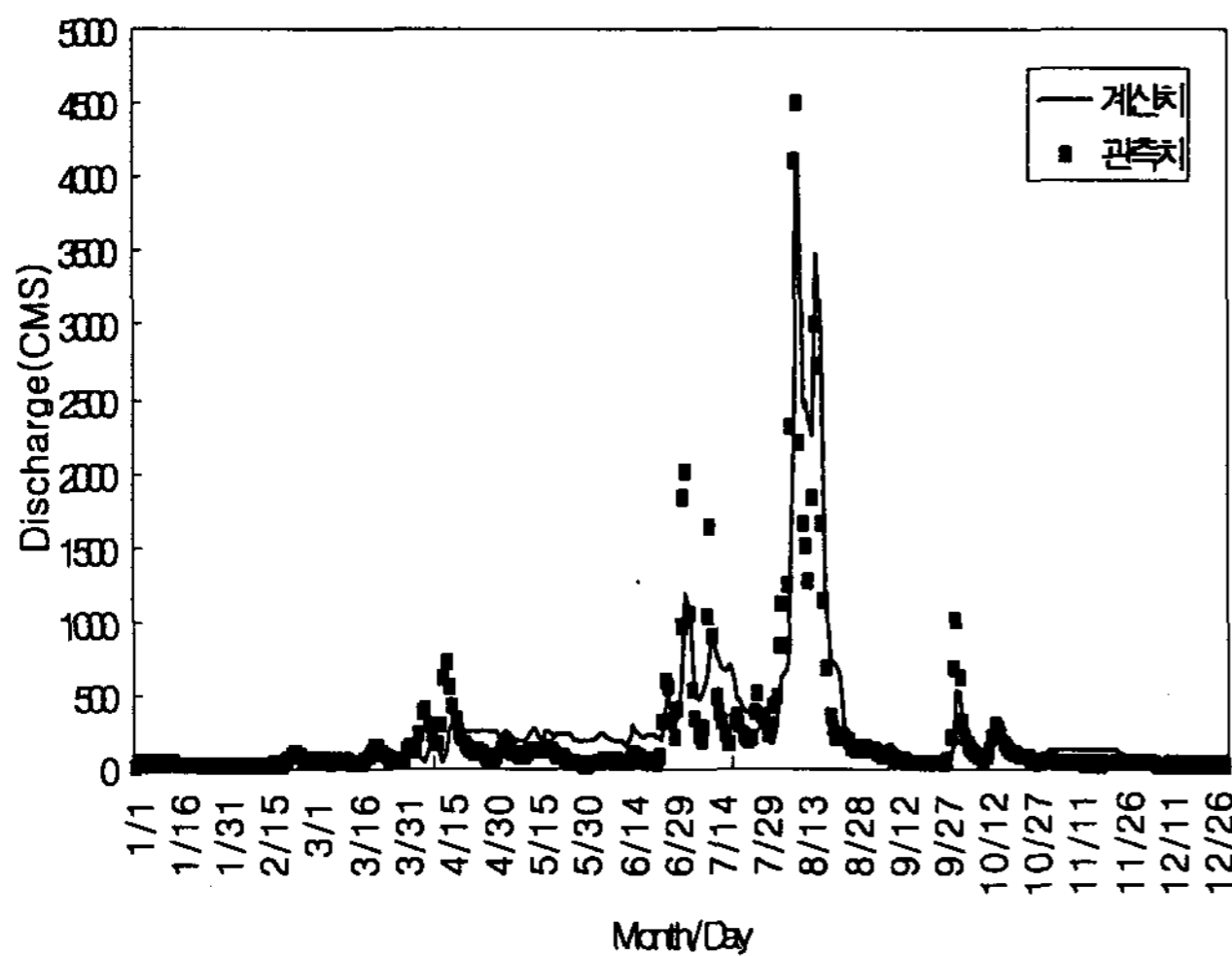


그림 2. SSARR 모형의 검증 결과

본 연구에 적용된 SSARR모형은 최신버전(2000)으로서 IS(integrated snowband) 유역모형을 적용하였다. IS유역모형은 장기간의 유출해석에 대한 기능을 대폭 보완시킨 것으로서 차단에 대한 모의기능과 장기적 회귀지하수 추적기능 및 증발산 모의기능을 개선시킨 것이다. 또한 추후 저수관리시스템에 갖추어야 할 대화식 구동방식인 Interactive(IA)방식이 도입되어 키보드를 통한 기존방식인 Batch(BA)방식과 서로 병행하여 사용할 수 있게 하였다.

또한 SSARR모형에서 제공되는 물수지 분석에 관한 출력자료를 1993년 모의결과에 대하여 정리한 결과 1993년의 총 강우량 1095.7mm에서 총 강우량의 24.4%와 17.3%가 각각 차단과 증발산에 의해 손실

되고 있으며 직접유출량은 40.4%, 기저유출량은 13.2%를 각각 차지하고 있다.

### 6. 결론

적용대상 유역은 한강수계로 하였으며 소유역 분할은 총 22개로 하였다. 강우관측소의 선정과 Thiessen 계수의 산정은 최근에 한국수자원공사에서 새로 추가한 강우관측소를 위주로 131개 강우관측소를 대상으로 하였으며, 강우자료의 결측치는 RDS 방법을 사용하여 보완하였다. 유역의 유출특성을 파악하기 위한 분석지점은 충주댐, 여주 수위표, 화천댐, 소양댐, 청평댐, 팔당댐으로 총 6개 지점을 선정하였다. 각각의 댐 지점은 실측된 일유입량과 일방류량 자료가 있으며, 수위 관측소가 있는 여주 수위표 지점의 '93년과 '94년의 수위-유량 관계는 「기존댐 용수공급능력조사(한강수계)」에서 검토 개발된 것을 사용하고 '98년의 수위-유량 관계식은 「남한강 유역 유량측정 보고서(1998)」에서 개발된 것을 사용하였다. 적용 모형은 SSARR 모형으로 선정하였다. SSARR 모형의 입력자료를 물리적 매개변수, 수문기상 매개변수 및 내부처리 매개변수로 구분하여 구축하였고 강우자료의 결측치가 비교적 많지 않은 1993년과 1994년의 자료를 이용하여 매개변수의 민감도분석과 함께 모형의 보정을 실시하고 1998년도 자료를 이용하여 모형의 검정을 실시하였다. 민감도 분석 결과, 유역유출과 관련된 매개변수에서는 고수시와 저수시의 경우 지표수와 복류수의 분리하는 매개변수에서 민감도가 크게 나타났다. 저수시의 경우 지하수 중 회귀지하수가 차지하는 비율이 크게 나타났고, 지표수, 복류수, 지하수 및 회귀지하수의 저류시간에서 비교적 큰 민감도를 나타내었다. 모형의 보정결과 고수시 오차는 1993년과 1994년에서 감소되었으나 저수시 오차에서 1994년 자료에 있어서는 다소 감소되었으나 1993년 자료에 있어서는 증가하였다. 모형의 검증결과 고수시에는 상대오차의 평균값이 보정자료에 비해 매우 오차가 작게 나타남으로써 고수시 검증결과는 만족스럽다고 할 수 있다. 저수시 검증결과도 보정자료에 비해 절대오차가 그리 크지 않으며, 청평과 팔당지점에서의 절대오차는 보정 자료에 비해 월등히 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 한강유역 6개 지점의 고수 및 저수시의 검증 결과는 대체적으로 만족스런 결과를 보이고 있다.