

물수지 분석을 위한 불확실성 정량화 Quantifying Uncertainty for the Water Balance Analysis

이 승 옥* / 김 영 오** / 이 동 루***

Lee, Seung Uk / Kim, Young Oh / Lee, Dong Ryul

Abstract

The water balance analysis for the long-term water resources plan is a simple calculation that compares water demands with possible water supplies. For a watershed being considered the reports on the performance of the water balance analysis, however, have shown inconsistent results and thus have not earned credibility due to the uncertainty of the data acquired and models used. In this research, uncertainties in the water scarcity estimate were assessed through probability representation based on the Monte Carlo simulation using Latin Hypercube Sampling (LHS). The natural flow, municipal demand, industrial demand, agricultural demand, and return flow rate were selected as representative input variables for the water balance analysis, and their distributions were set based on the linear regression and the entropy theory. The statistical properties of the output variable samples were analyzed in comparison with a deterministic estimate of the water scarcity of an existing study. Application of LHS to three sub-basins of the Geum river basin showed the deterministic estimate could be overestimated or underestimated. The sensitivity analysis as well as the uncertainty analysis found that the return flow rate of the agricultural water is the most uncertain but is rarely sensitive to the output of the water balance analysis.

keywords : water balance analysis, uncertainty, Monte Carlo simulation, Latin Hypercube sampling, sensitivity analysis

요 지

수자원장기종합계획에서는 물의 과부족 또는 가용한 물을 정량적으로 평가하기 위해 물수지 분석을 실시한다. 물수지 분석은 미래 예측되는 용수수요량과 공급가능량을 비교하는 단순한 과정이지만, 분석 과정에 포함되어 있는 자료와 모형의 불확실성으로 인하여 물수지 분석을 실시한 각종 보고서마다 서로 다른 결과를 보여주고 있어 국민의 신뢰를 얻지 못한 실정이다. 본 연구에서는 Monte Carlo simulation 기법 중 Latin Hypercube sampling에 기반한 확률적 모사로 물수지 분석에서의 불확실성을 표현하고 분석하였다. 대표 물수지 입력변수로 자연유량, 생공용수, 농업용수, 회귀율을 선정하여 이를 선형회귀와 entropy 이론으로 분포를 설정하였고, 불확실성 분석을 통하여 물부족량에 대한 불확실성의 범위와 위치를 규명하였다. 금강수계 3개의 소유역에 대해 불확실성 분석을 한

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사졸업
Former Master Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: lsu0102@snu.ac.kr)

** 교신저자, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수
Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang, Gyeonggi, Korea
(e-mail: dryi@kict.re.kr)

결과, 기존의 물수지 분석에서의 단일 물부족량이 과소 및 과대 추정될 수 있음을 보였고, 또한 민감도 분석을 통해 농업회귀율이 입력변수들 중 가장 큰 불확실성을 가지고 있으나 결과에는 거의 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 물수지 분석, 불확실성, Monte Carlo simulation, Latin Hypercube sampling, 민감도 분석

1. 서 론

물수지 분석은 수자원장기종합계획을 위한 기본적인 분석과정으로, 장래 안정된 용수수급 전망을 검토하고, 댐 및 저수지 등의 새로운 수원개발을 계획하는데 중요한 역할을 한다. 이는 용수수요량과 공급가능량을 비교하는 단순한 과정이지만, 자연의 한 부분인 물의 순환을 다루기 때문에 많은 불확실성을 내포하고 있다. 즉, 회귀유량, 자연유량, 용수수요량 등에 많은 불확실성이 존재할 뿐만 아니라 우리나라의 경우 관측자료의 오차 또한 매우 크다. 이러한 불확실성들로 인하여 물수지 분석을 실시한 각종 보고서마다 서로 다른 상이한 결과를 보여주고 있어 국민적 공감대를 얻고 있지 못한 실정이다. 기존의 물수지 분석방법은 기본 가정이 많아 제한적이고 각 변수들의 변동 가능성을 무시함으로써 정해진 흐름도의 결과변수인 물부족량의 단일값만을 제시하고 있다. 이러한 방법은 문제를 단순화시켜 이해가 쉽도록 하며 결과를 나타내는데 드는 노력을 줄여주지만, 입력변수들의 자연적 변동성 또는 정확하게 알려지지 않는 불확실성의 존재로 발생할 수 있는 다양한 결과에 대한 고려가 불가능하다.

일반적으로 예측기간이 길어지면 불확실성들은 더욱 증폭되기 때문에 10년 앞을 내다보는 수자원장기종합계획은 불확실할 수밖에 없으므로 이에 대한 고려가 필수적이다. 그러나 우리나라에서는 김남원과 원유승(2001)이 물수지 분석에서의 불확실성을 처음으로 인위적인 형태와 자연적인 형태 그리고 시스템의 형태로 나누어 낙동강 유역에 대하여 분석한 것이 유일하다. 반면 수자원 분야에 있어 선진국의 연구를 살펴보면 Marholein 등(2002)은 기후변화의 영향을 고려하기 위해 TARGET 모형을 이용하여 네덜란드 남부지역에 대해 물순환 흐름을 분석하였고, Asselt (2000)은 기후 변화, 사회 변화, 경제적 변화, 환경적 변화, 수자원 변화 등을 고려한 다양한 시나리오 접근방법인 PRIMA (Pluralistic fRamework for Integrated uncertainty Management and Risk Analysis)를 제시하였다. 또한 네덜란드의 연구기관인 RIVM (Research for Man and Environment)에서는 불확실성의 이론적 체계를 정립하여 수자원 정책에 따른 다양한 불확실성 평가를 시행하

고 있다(Asselt 등, 2001).

본 연구에서는 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)의 물수지 분석에서 적용된 자료와 기본이론을 바탕으로 물수지 분석모형을 금강수계 301, 309, 316 소유역에 대해 다시 구축하였고 이를 '수정수장기'라 칭하였다. 여기에 불확실성을 고려하기 위해 Latin Hypercube Sampling 기법을 선택하여 물부족량 추정의 변동 가능성을 정량화하였다. 이를 통하여 앞으로 수립될 수자원장기종합계획에서 물부족량의 새로운 표현방안을 제안하였다.

2. 수정수장기 물수지 분석

수정수장기 물수지 분석모형의 기본가정은 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)에서 제시한 가정들을 그대로 따랐다. 그러나 기존의 반순별 분석을 월별로 전환하여 분석하였고, 목표저수량 대신 20년 빈도의 갈수 유입량을 고려하는 적정확보수위와 최소확보수위를 고려하였다. 기존의 물수지 분석에서 고려한 생공용수 전용댐 이용량, 농업용댐 이용량, 유역별 용수의 절감량 및 중수도 이용량은 고려하지 않았다. 본 연구에서 적용한 금강수계는 전체 16개 소유역으로 나뉘어져 있으며, 여기서 분류는 308, 310, 313, 314, 316 소유역으로 저수지 운영의 영향을 받는 지역이고, 나머지 소유역은 지류지역으로 저수지 운영의 영향을 받지 않는다. 저수지 운영에서 댐의 월방류량 결정은 최소확보수위와 적정확보수위를 기준으로, 현재수위가 상시만수위보다 높을 경우에는 최대발전방류와 여수로방류를 하도록 하며, 현재수위가 상시만수위와 적정확보수위 사이에 있을 경우에는 최대발전방류를, 적정확보수위와 최소확보수위 사이에 있을 경우에는 기본계획방류를, 최소확보수위와 사수위 사이에 있을 경우에는 우선순위(1.유지용수 2.생공용수 3.농업용수)에 따라 차등 공급하도록 하였다. 물부족량 산정은 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)에서와 동일한 방법을 사용하였는데 본류에서는 자연유량과 더불어 댐 공급량도 고려하였다.

3. Latin Hypercube Sampling

일반적으로 불확실성 해석을 하기 위해 광범위하게

사용되는 접근법인 Monte Carlo simulation은 오랫동안 성공적으로 사용되어 왔다. 이는 불확실한 입력변수의 표본추출과 모형수행을 반복하여 실행함으로써 결정론적 문제를 확률적 문제로 전환하는 모의기법이다. 본 연구에서는 표본추출기법으로 Latin Hypercube Sampling (LHS)을 선택하였다. McKay 등(1979)이 처음 제안한 LHS는 전체집합 S에서 n개의 점이 골고루 추출되도록 고안된 표본추출방법이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 입력변수 X를 n개의 등확률로 나눈 후 각 구간에서 하나씩 표본을 추출하는 방법이다. 즉 입력변수의 개수가 k개이고 각 입력변수에서 n개의 표본을 추출할 때 전체적으로 nk개의 표본을 얻는 비복원 추출기법이다. 예를 들어 그림 1은 입력변수의 확률분포를 5개의 구간으로 나누고 1/5의 확률을 갖는 각 구간에서 표본을 하나씩 추출하는 것을 보여주고 있다. LHS는 낮은 확률의 분포까지 강제적으로 모의실험의 표본추출에 포함시키기 때문에 낮은 확률에서 결과변수에 미치는 영향까지 고루 반영할 수 있다. 또한 입력변수의 자료가 충분히 크거나 많을 때는 random sampling을 사용하는 것이 더 효과적이지만 자료가 크지 않고 입력변수가 많을 때는 LHS가 훨씬 효과적인 결과를 나타낸다고 알려져 있다 (Iman, 1981).

수자원 분야에서는 국내의 경우 신현석과 윤용남 (1997)이 LHS와 random sampling을 이용하여 저수지 퇴사량 산정에 적용하였고, 권현한 등(2004)은 LHS를 이용하여 강우-유출 모형의 불확실성 분석을 시행하였다. 국외에서는 Thompson 등(1997)이 남미지역 댐 붕괴 위험도 평가를 LHS를 이용하여 분석하였고, Salas과 Shin (1999)은 북미 Colorado 주의 White 강에 대해 저수지 침전에 대한 불확실성 평가에 이를 적용하였다. 또 Lian과 Yen (2003)은 암거 설계에 따른 위험도 평가를 LHS와 first-order second-moment method를 이용하여 비교 분석하였으며 이밖에도 소방안전, 생명공학 등 다양한 분야에서 불확실성 평가기법으로 LHS는 널리 사용되고 있다.

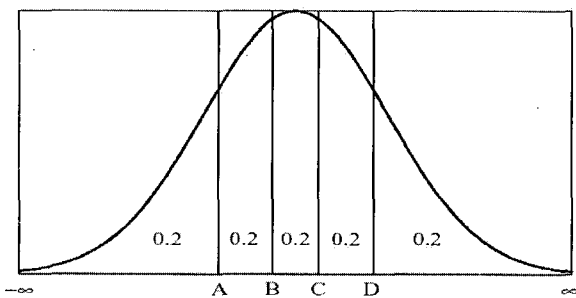


그림 1. Latin Hypercube sampling의 등확률 분할 사례

4. 입력변수의 분포 설정

본 연구에서는 수많은 물수지 분석 입력자료 중 물수지에 가장 큰 영향을 주는 자연유량, 생활용수, 공업용수, 농업용수, 회귀율을 대표 입력변수로 선정하였다. 이들에 대한 적절한 분포를 설정하고 LHS를 통해 표본을 추출한 후 물수지 분석 모형에 입력하여 물부족량의 불확실성을 평가하고자 한다.

자연유량은 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)에서 탱크모형으로 산정한 자연유량 32개년(1966년 10월~1998년 9월) 시나리오가 존재하므로 자료의 다양한 특성이 반영되도록 분포를 따로 선정하지 않고 시나리오를 그대로 사용하였다.

다음으로 생공용수는 1966년부터 1998년까지의 과거 연수요량 자료를 시간에 대하여 도시해 보니 모든 소유역에서 결정계수(R^2)가 90% 이상으로 선형회귀식을 잘 따랐다. 그러므로 목표연도 2011년에 대하여 생공용수의 분포 설정은 선형회귀 이론을 사용하였다. 선형회귀의 기본가정으로 선형회귀의 오차는 정규분포를 따른다. 즉 $e_t \sim N(0, \sigma_e^2)$ 이며 어떤 특정한 시점 t에 대해 종속변수 Y_t 는 $N(\mu_t, \sigma_e^2)$ 를 따른다. 여기서 μ_t 는 시점 t에 해당하는 수요량의 선형회귀식 추정값, e_t 는 오차항, σ_e^2 는 오차항의 분산이다. 이를 이용하면 목표연도 2011년의 생공용수가 정규분포, 즉 $N(\mu_{2011}, \sigma_e^2)$ 를 따른다고 할 수 있다. 생공용수와 다음에 나오는 농업용수의 분포로부터 나온 표본은 년별 용수 수요량을 나타내므로 이를 다시 월별로 변환하여 분석하여야 한다. 각 용수별 월별 보정계수는 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)에서 제시한 값들을 사용하였다.

농업용수는 생공용수와는 달리 과거자료의 선형회귀 결정계수가 높지 않았다. 같은 유역이라 하더라도 자료의 특성으로 인해 지역에서 재배되는 농작물의 성장속도, 경작의 변화율 등에 의해서 월별 변화가 매우 크고 연간 변화도 무작위로 변하기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 농업용수의 분포를 설정하기 위하여 maximum entropy theory를 활용하였다. 즉, 불확실성의 양을 나타내는 entropy를 이용하여 주어진 제약조건에 따라 entropy를 최대화시킬 수 있는 분포를 표 1과 같이 제시한 이론이다. 따라서 농업용수의 경우 과거자료 즉, 32개년(1968년~1998년)의 농업용수 수요량의 과거 최대값, 과거 최소값, 그리고 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)에서 예측한 2011년 농업용수 수요 추정량을 최빈값으로 두어 삼각분포로 설정하였다.

표 1. Maximum Entropy Theory

주어진 조건	최적 분포
최대값, 최소값	균일분포
평균, 표준편차	정규분포
최소값, 최대값, 최빈값	삼각분포
평균, 최대값, 최소값, 표준편차	베타분포

표 2. 입력변수별 적정 분포 및 모수

소유역	입력 변수	생활용수 (MCM)	공업용수 (MCM)	농업용수 (MCM)	생활용수 회귀율	공업용수 회귀율	농업용수 회귀율
	설정 분포	정규분포	정규분포	삼각분포	삼각분포	삼각분포	삼각분포
301	평균: 5.31 분산: 0.17	평균: 0.052 분산: 0.003	최소값: 7.03 최빈값: 104.77 최대값: 128.20	최소값: 0.60 최빈값: 0.65 최대값: 0.75	최소값: 0.60 최빈값: 0.65 최대값: 0.75	최소값: 0.05 최빈값: 0.35 최대값: 0.60	
309	평균: 153.79 분산: 8.34	평균: 82.45 분산: 3.00	최소값: 323.70 최빈값: 452.51 최대값: 546.30				
316	평균: 11.21 분산: 0.23	평균: 6.16 분산: 0.23	최소값: 191.30 최빈값: 210.40 최대값: 283.00				

현재 우리나라의 물수지 분석에서 사용되는 생공용수, 농업용수들의 회귀율은 각각 65%, 35%로 사용되고 있다. 이러한 회귀율에 대해서도 앞서 언급한 entropy theory를 적용하여 그 분포를 설정하고 범위를 규명하였다. 먼저 생공용수의 회귀율은 Linsley 등(1979)에 의하면 일반적으로 60~70%에 해당한다고 제시되고 있어 이를 최대값, 최소값으로 두고 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)에서 사용된 65%를 최빈값으로 두어 삼각분포로 설정하였다. 농업용수 회귀율의 경우 농촌용수 수요량 조사 종합보고서(농림부, 1999) 등 기존 연구 사례를 바탕으로 그 범위를 5~65%로 설정하고 수자원장기종합계획(건설교통부, 2000)에서 사용한 35%를 최빈값으로 정하여 이 또한 삼각분포로 설정하였다. 따라서 3개 소유역에 대한 입력변수의 설정된 분포는 표 2와 같다.

5. 불확실성 분석 및 민감도 분석

불확실성 평가 모식도는 그림 2와 같다. 목표연도 2011년에 해당하는 소유역별 6개 입력변수의 분포를 설정한 후 32개년 자연유량의 시나리오 각각에 대해 설정된 분포로부터 4개씩 표본을 추출하여 LHS 분석을 시행하였다. 따라서 32개년에 대해 4096(=4⁶)의 년자료료를 발생하였다. 불확실성 분석으로, 1개년 자연유량 시나리오에 대해 수정수장기의 단일값과 LHS 분석을

통해 나타난 결과값의 평균을 비교하였고, 또한 각 시나리오에 대해 나타난 결과의 95% 신뢰구간에 대해서도 비교하였다. 다음으로 전체 32개년에 대한 merged CDF를 구하여 수정수장기의 단일값(즉, 30년회 가뭄)의 위치를 규명하고, 수정수장기에서의 물공급 신뢰도를 구하여 이를 LHS분석의 신뢰도와 비교하였다. 여기서 merged CDF는 각 시나리오별 CDF의 평균으로 구한다. merged CDF(CDF_{mrg})는 식 (1a)과 같이 나타낼 수 있으며 그에 따른 평균(μ_{mrg})과 분산(σ_{mrg}^2)은 식 (1b)과 (1c)가 된다(Magnusson 등, 1996).

$$CDF_{mrg} = \sum_{i=1}^l p_i CDF_i \quad (1a)$$

$$\mu_{mrg} = \sum_{i=1}^l p_i \sum_{k=1}^m \frac{y_{i,k}}{m} = \sum_{i=1}^l p_i \mu_i \quad (1b)$$

$$\sigma_{mrg}^2 = \sum_{i=1}^l p_i \sum_{k=1}^m \frac{(y_{i,k} - \mu_{mrg})^2}{m} \quad (1c)$$

$$= \sum_{i=1}^l p_i \sum_{k=1}^m \frac{[(y_{i,k} - \mu_i) + (\mu_i - \mu_{mrg})]^2}{m}$$

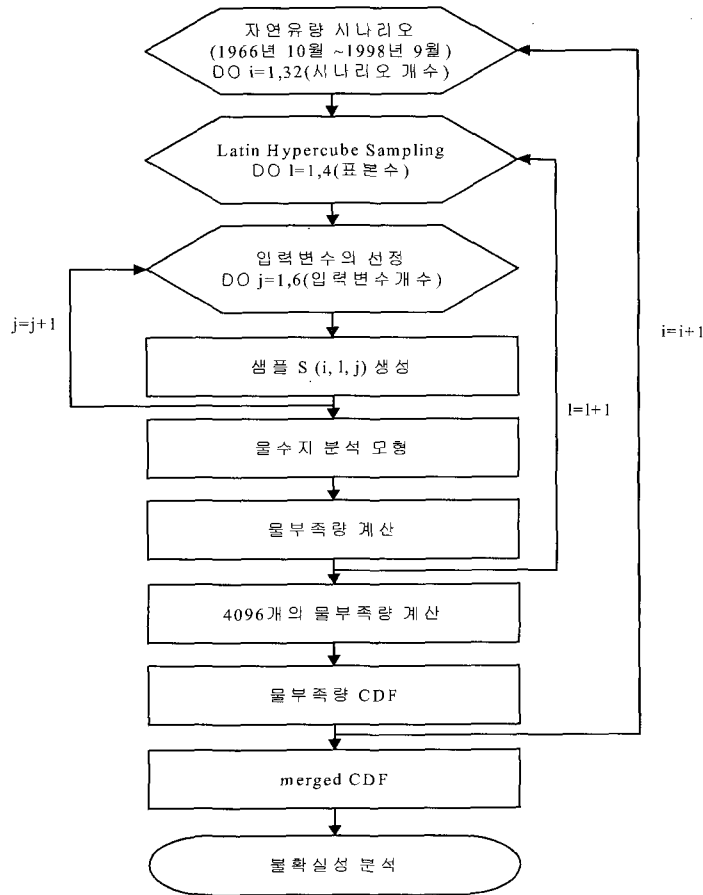


그림 2. 불확실성 분석 모식도

$$= \sum_{i=1}^l p_i \sum_{k=1}^m \frac{(y_{i,k} - \mu_i)^2 + 2(y_{i,k} - \mu_i)(\mu_i - \mu_{mrg}) + (\mu_i - \mu_{mrg})^2}{m}$$

$$= \sum_{i=1}^l p_i [\sigma_i^2 + (\mu_i - \mu_{mrg})^2]$$

여기서 l 는 총 시나리오 개수(본 연구에서는 32개)를, m 은 LHS분석 결과 생성된 결과변수 표본의 총 개수(본 연구에서는 4096개), p_i 는 시나리오 i 에 대한 확률(본 연구에서는 등확률로 $1/l$), $y_{i,k}$ 는 시나리오 i 에 대한 LHS 분석 k 번째 결과를 의미한다. 또한 μ_i 와 σ_i 는 시나리오 i 에 대한 LHS 분석 결과값들의 평균과 표준편차를 각각 말하고, CDF_i 는 각 시나리오 i 에 대한 LHS 분석 결과값의 CDF를 의미한다.

불확실성 분석과 더불어 본 연구에서는 물수지 분석의 입력변수에 대한 결과값의 민감도를 분석함으로써 결과값에 가장 큰 영향을 미치는 입력변수를 확인하고 그 영향을 정량화하였다. 민감도 분석은 회귀분석에 기본을 둔 표준화회귀계수와 부분상관계수를 이용하였다

(Iman, 1981). 표준화회귀계수는 측정단위의 영향을 배제하기 위해 입력변수와 결과변수 모두 평균 0, 표준편차 1로 표준화한 후 구한 회귀계수를 말하며, 부분상관계수는 입력변수가 여러 개인 다중회귀모형에서 다른 입력변수들끼리의 상관성을 배제한 상태에서의 나머지 한 개의 입력변수와 결과변수의 상관계수를 의미한다. 예를 들어 두 개의 입력변수 X_1, X_2 가 있을 때, 식 (2)과 같은 두 개의 선형회귀식을 설정할 수 있다.

$$\hat{Y} = c_1 + c_2 X_2 \quad (2a)$$

$$\hat{X}_1 = c_1 + c_2 X_2 \quad (2b)$$

이 두개 모형의 결과값들로 인해 X_2 가 Y 및 X_1 에 미치는 선형효과를 배제시킨 새로운 변수 $\hat{Y}-Y$ 와 \hat{X}_1-X_1 를 정의할 수 있고, 새로운 변수 $\hat{Y}-Y$ 와 \hat{X}_1-X_1 사이의 상관계수를 X_1 과 Y 의 부분상관계수라 한다.

민감도의 지표로 종종 사용되는 표준화회귀계수와 부분상관계수는 다음과 같은 특성을 가지고 있다. 독립

변수 X와 결과변수 Y인 단순회귀모형($Y = \beta_0 + \beta_1 X$)에서 회귀계수(β_1)와 절편(β_0)은 다음과 같다.

$$\beta_0 = \bar{Y} - \beta_1 \bar{X} \quad (3a)$$

$$\beta_1 = \frac{s_{XY}}{s_X^2} \quad (3b)$$

여기서, s_{XY} 는 C와 Y의 표본 공분산, \bar{X} , \bar{Y} 는 각각 X와 Y의 표본 평균, s_X^2 , s_Y^2 는 각각 X와 Y의 표본 분산이다. 식 (3a)의 β_0 를 단순회귀모형($Y = \beta_0 + \beta_1 X$)에 대입하면,

$$Y - \bar{Y} = \beta_1 (X - \bar{X}) \quad (4)$$

이며, 표준화된 두 변수 X^* 와 Y^* , 즉

$$X = X^* s_X + \bar{X}, \quad Y = Y^* s_Y + \bar{Y} \quad (5)$$

를 이용하여 식 (4)에 대입하여 정리하면

$$Y^* = \beta_1 \left(\frac{s_X}{s_Y} \right) X^* = \beta_1^* X^* \quad (6)$$

를 얻게 된다. 여기서 나타난 식 (6)의 회귀계수를 표준화회귀계수(β_1^*)라고 하며, 이는 X와 Y의 상관계수(γ_{XY})와 같음을 알 수 있다.

$$\beta_1^* = \beta_1 \left(\frac{s_X}{s_Y} \right) \quad (7)$$

$$\gamma_{XY} = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y} = \beta_1 \left(\frac{s_X}{s_Y} \right) = \beta_1^* \quad (8)$$

따라서 입력변수가 1개인 단순회귀모형에서 표준화회귀계수와 부분상관계수는 같은 값을 보이고 민감도의 지표로써 같은 결과를 나타낸다. 다음으로 입력변수 X_1 , X_2 2개로 다중회귀모형을 고려해 볼 때 회귀계수(β_1), 표준화회귀계수(β_1^*), X_1 과 Y의 부분상관계수($\gamma_{X_1 Y}$)는 다음과 같다.

$$\beta_1 = \left(\frac{s_Y}{s_{X_1}} \right) \frac{\gamma_{X_1 Y} - \gamma_{X_2 Y} \gamma_{X_1 X_2}}{1 - \gamma_{X_1 X_2}^2} \quad (9a)$$

$$\beta_1^* = \left(\frac{s_Y}{s_{X_1}} \right) \beta_1 = \frac{\gamma_{X_1 Y} - \gamma_{X_2 Y} \gamma_{X_1 X_2}}{1 - \gamma_{X_1 X_2}^2} \quad (9b)$$

$$\gamma_{X_1 Y}^* = \frac{\gamma_{X_1 Y} - \gamma_{X_2 Y} \gamma_{X_1 X_2}}{\sqrt{1 - \gamma_{X_2 Y}^2} \sqrt{1 - \gamma_{X_1 X_2}^2}} \quad (10)$$

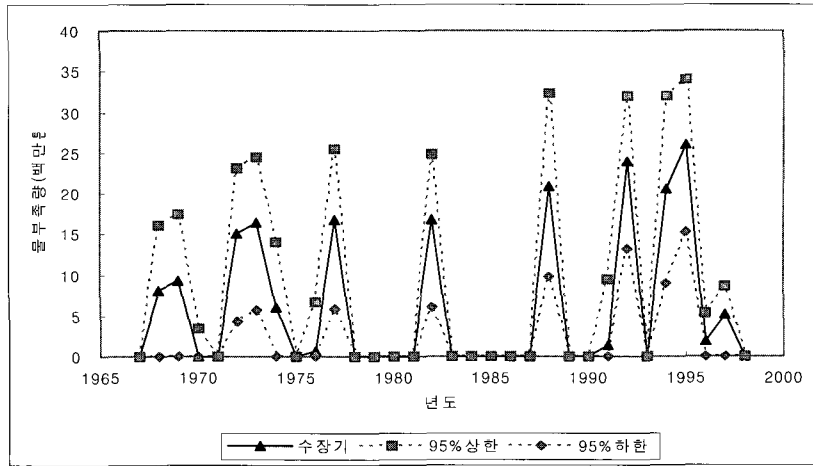
식 (9)과 (10)에서 보는 바와 같이 부분상관계수와 표준화회귀계수는 같은 분자를 가지고 있음을 알 수 있고, 이들은 항상 같은 부호를 가지며 크기에 있어서 비슷한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다(장상희, 2000). 이처럼 부분상관계수와 표준화회귀계수는 각각의 입력변수에 대해 서로 다른 값을 보일지라도 그 절대값에 근거한 변수 중요성의 순서는 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 본 연구에서는 LHS 분석 결과에 대해 다중회귀 분석을 적용한 부분상관계수와 표준화회귀계수로 결과물부족량에 끼치는 주요 입력변수들의 민감도를 분석하였고, 이를 이용하여 입력변수들에 대한 중요 우선순위를 제시하였다.

6. 결과 분석

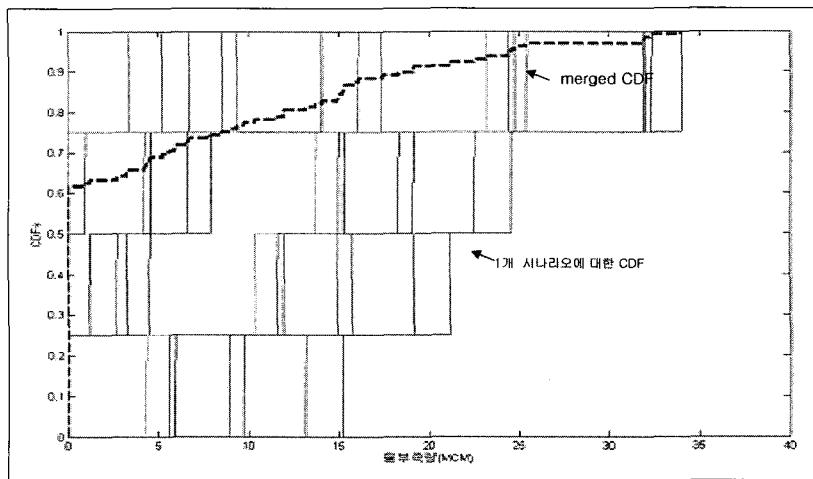
6.1 불확실성 분석 결과

각 소유역별 불확실성 분석 결과를 그림 3-5에 제시하였다. 또한 표 3에서는 물부족의 발생빈도를 고려하여 수정수장기에서의 물공급 신뢰도와 불확실성 분석에서의 물공급 신뢰도를 merged CDF에서 구하여 비교분석하였다. 수정수장기에서 소유역별 물부족량 계산은 소유역별 32개년 자연유량 시나리오별로 나타난 32개의 물부족량에 대하여 30년에 1회 발생할 수 있는 가뭄량으로 산정하였다.

301 소유역의 경우 전체 32개년 자연유량 시나리오 중 수정수장기 물부족량의 단일값이 해당하는 년도의 4096개 LHS 분석 물부족량의 평균값보다 큰 경우는 13개년, 같은 결과인 경우는 17개년, 적은 경우는 2개년으로 나타났다. 또한 32개년에 대해 수정수장기의 단일 물부족량들은 대체로 LHS 분석 물부족량의 95% 신뢰구간에 포함되었다. 특히하게 1970년도의 경우 수정수장기에서는 물부족이 발생하지 않는 것으로 나타났으나 LHS 분석에서는 물부족량 평균값이 0.83 MCM으로 나타났다. 이로 인해 물공급 신뢰도 측면에서 수정수장기에서는 총 32개년 중에서 물부족이 발생하지 않은 년도가 17개년으로 53%의 신뢰도를 나타냈으나, LHS 분석에서는 총 32개년의 각 4096개 표본에 대한 결과로 61%의 물공급 신뢰도를 나타냈다. 수정수장기에서의



(a) 95% 신뢰구간 비교



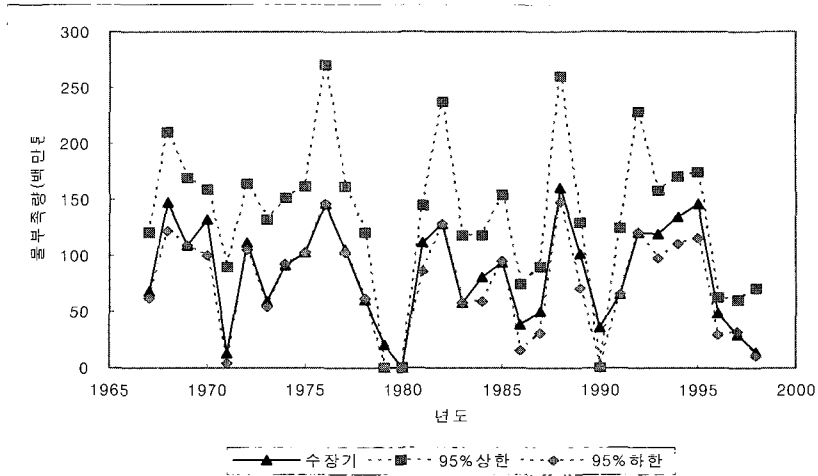
(b) merged CDF

그림 3. 301 소유역 불확실성 분석 결과

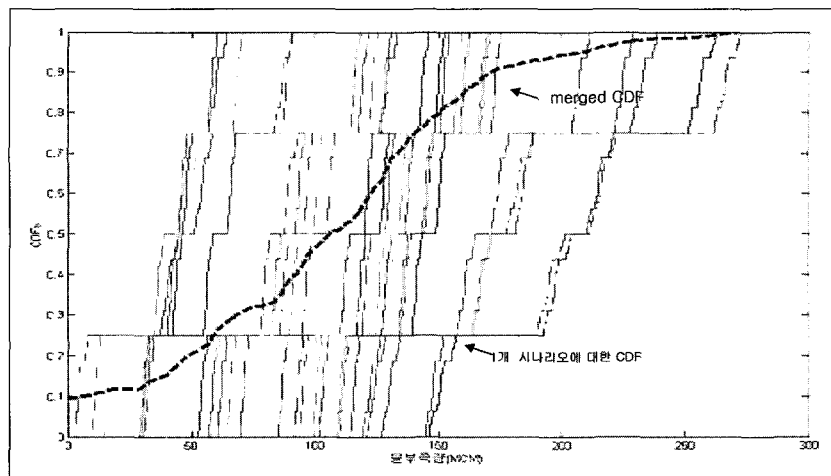
30년1회 가뭄에 해당하는 물부족량의 값(25.95 MCM)은 merged CDF의 96.7%(즉, 재현기간 약 30년)에 해당하였다.

309 소유역의 경우 전체 32개 자연유량 시나리오 중 수정수장기 물부족량의 단일값이 해당하는 년도의 4096개 LHS 분석 물부족량의 평균값보다 큰 경우는 4개년, 같은 결과인 경우는 3개년, 적은 경우는 25개년으로 나타났다. 또한 32개년에 대해 수정수장기의 단일 물부족량들은 대체로 95% 신뢰구간 하한선 가까이에 값들이 위치하였다. 309 소유역의 물공급 신뢰도는 수정수장기와 LHS 분석의 결과가 같은 9%의 신뢰도를 나타냈고, 301 소유역에 비해 상당히 큰 물부족 위험도를 나타냈다. 수정수장기에서의 30년1회 가뭄에 해당하는 물부족량의 값(160.81 MCM)은 merged CDF의 86%(즉, 재현기간 약 7년)에 해당하였다.

316 소유역의 경우 전체 32개년별 자연유량 시나리오 중 수정수장기 물부족량의 단일값이 해당하는 년도의 4096개 LHS 분석 물부족량의 평균값보다 큰 경우는 4개년, 같은 결과인 경우는 25개년, 적은 경우는 3개년으로 나타났다. 32개년에 대해 수정수장기의 단일 물부족량들은 대체로 LHS 분석 물부족량의 95% 신뢰구간의 상한선의 값들과 비슷한 결과를 나타냈고, 이는 위의 309 소유역과는 상반된 결과를 보였다. 또한 1995년의 경우 수정수장기의 값은 95%의 상한선보다 더 큰 값으로 나타났다. 316 소유역 역시 309 소유역과 마찬가지로 물공급 신뢰도 부분에서는 수정수장기와 LHS 분석과 같은 78%의 신뢰도를 나타냈으며, 이는 세 개의 소유역 중에서 가장 큰 신뢰도를 나타냈다. 수정수장기에서의 30년1회 가뭄에 해당하는 물부족량의 값(140.48 MCM)은 merged CDF의 96%(즉, 재현기간 약 25년)에 해당하였다.



(a) 95% 신뢰구간 비교

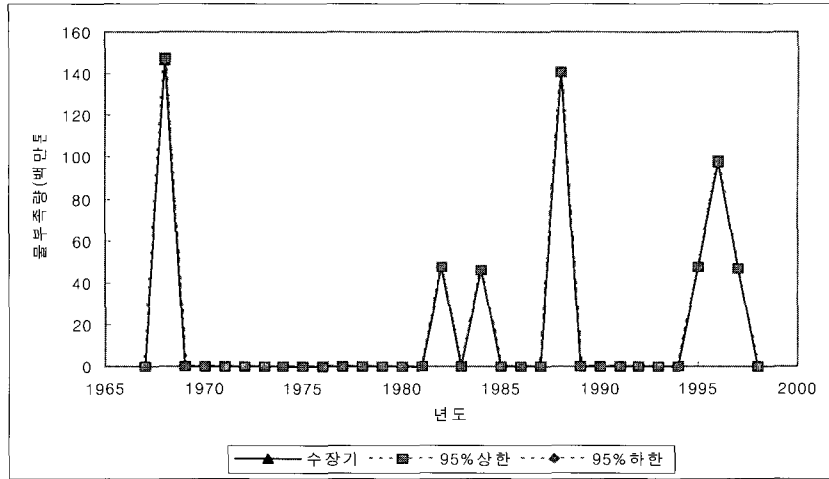


(b) merged CDF

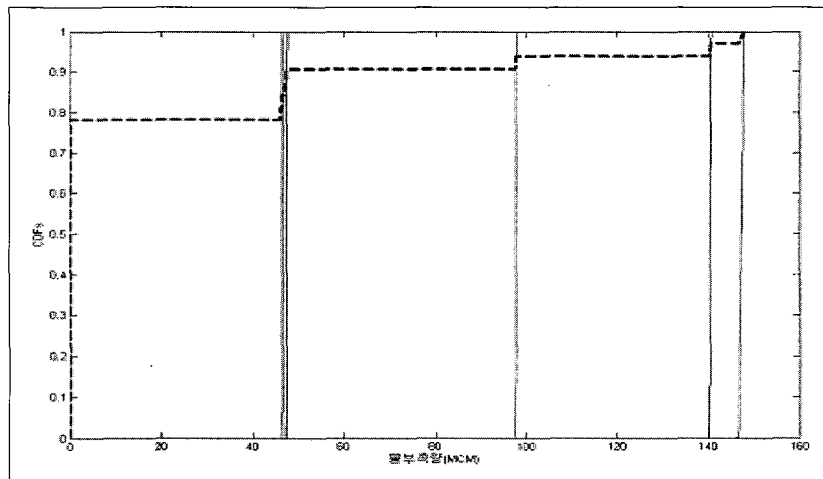
그림 4. 309 소유역 불확실성 분석 결과

표 3. 3개 소유역 불확실성 분석 결과 비교

소유역	301	309	316	
수정수장기 물부족량 > LHS 평균	13 scenarios	4 scenarios	4 scenarios	
수정수장기 물부족량 = LHS 평균	17 scenarios	3 scenarios	25 scenarios	
수정수장기 물부족량 < LHS 평균	2 scenarios	25 scenarios	3 scenarios	
95%신뢰구간 만족도	대체적으로 중간에 위치	대체적으로 하한선에 위치	대체적으로 상한선에 위치	
수정수장기 30년 회 가뭄에 해당하는 재현기간 (누가확률, 30년 회 가뭄)	30년 (96.7%, 25.96MCM)	7년 (86%, 160.81MCM)	25년 (96%, 140.48MCM)	
불공급 신뢰도	수정수장기	53%	9%	78%
	merged CDF	61%	9%	78%



(a) 95% 신뢰구간 비교



(b) merged CDF

그림 5. 316 소유역 불확실성 분석 결과

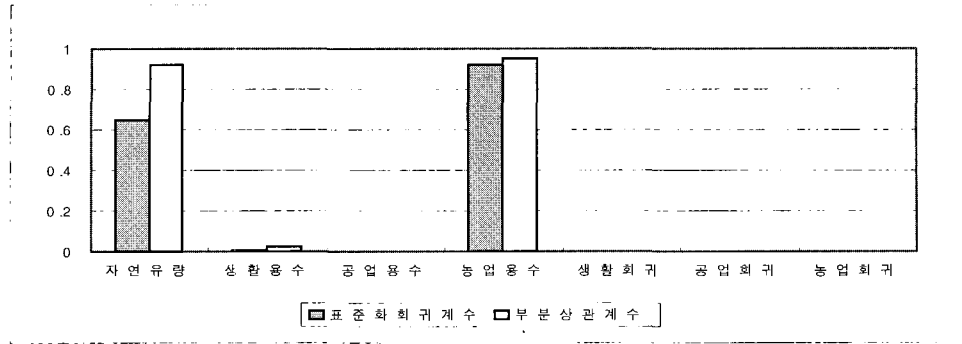
6.2 민감도 분석 결과

각 소유역별 입력변수 자연유량, 생활용수, 공업용수, 농업용수, 회귀율에 대한 민감도 분석 결과를 그림 6에 제시하였다. 각 입력변수들의 표준화회귀계수와 부분상관계수를 구함으로써 입력변수들의 민감도를 알 수 있고, 입력변수들의 불확실성으로 인해 결과값에 미치는 영향도를 나타내는 지표로 제시할 수 있다. 민감도 분석 결과 301, 309 소유역에서는 농업용수가 가장 큰 민감도를 나타냈으며, 316 소유역에서는 자연유량이 가장 큰 민감도를 나타냈다. 반면 3개의 소유역 전체에서 회귀율에 대한 민감도는 0의 값을 나타냈다. 이는 다른 입력변수들에 비해 회귀율은 물수지 분석에서 결과변수인 물부족량에 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 또한 309, 316 소유역에서 자연유량을 제외한 나머지 입력변수는 물부족량과 양의 상관관계를 나타냈고, 301

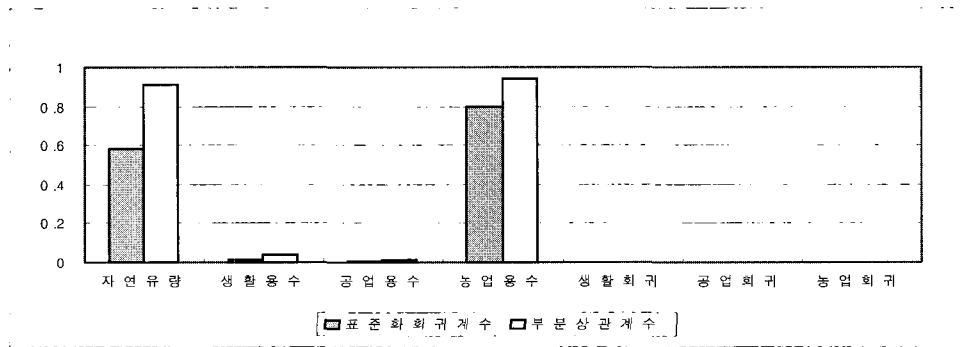
소유역에서는 자연유량과 생활용수가 물부족량과 음의 상관관계를 보였다. 316 소유역에서는 부분상관계수의 경우 물부족량에 대해 자연유량, 생활용수, 공업용수, 농업용수에 대해 거의 1에 가까운 값을 나타냈으나, 표준화회귀계수에서는 그들의 값이 현저히 차이가 났다. 이처럼 표준화회귀계수와 부분상관계수는 절대값에 있어 개개의 입력변수에 대해 매우 다른 값을 보이지만 그들의 절대값을 크기순으로 나열하면 변수 중요성의 순서는 같은 결과를 보였다.

6.3 불확실성과 민감도 순위 비교 결과

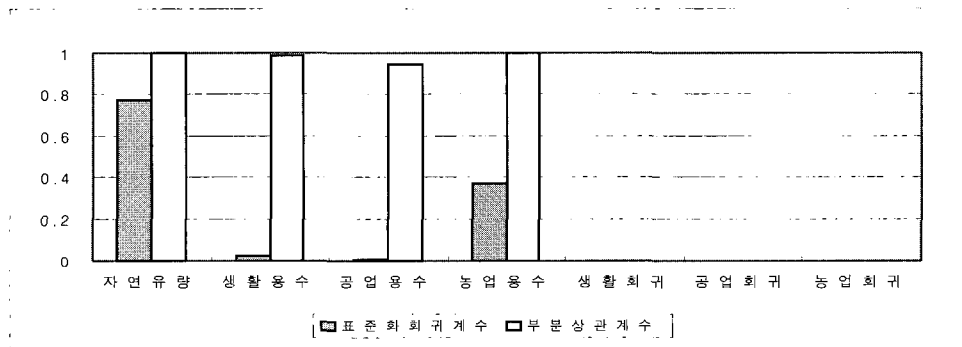
앞서 제시한 민감도 분석으로 주요 입력변수들이 물부족량의 불확실성에 끼치는 영향의 중요도를 나타내었다. 민감도의 크기는 입력변수들 자체의 불확실성과는 달리 결과값에 끼치는 영향력만을 의미한다. 큰 불확실성을 가진 입력변수라 할지라도 결과에 미치는 민감도



(a) 301 소유역



(b) 309 소유역



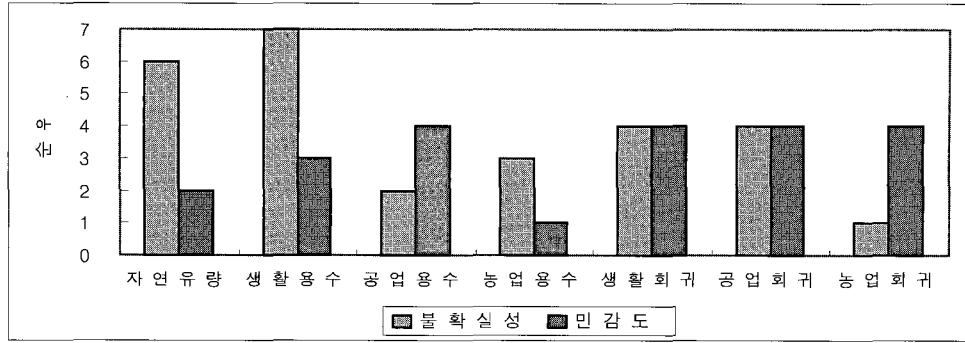
(c) 316 소유역

그림 6. 소유역별 민감도 분석 결과

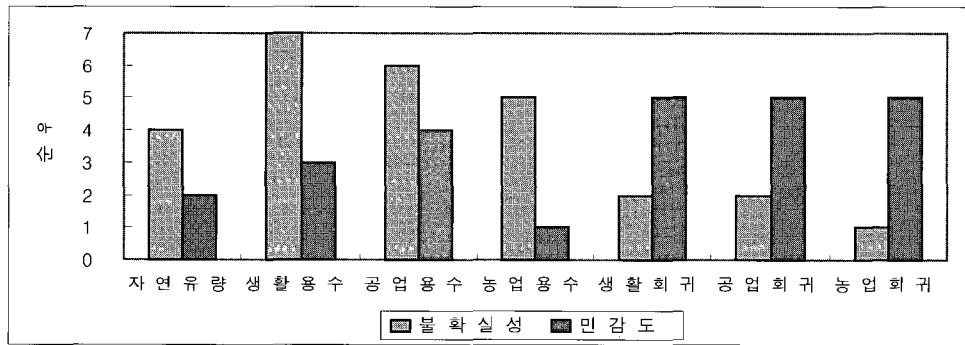
가 작을 수도 있고, 클 수도 있다. 이에 물수지 분석에서 가장 큰 영향을 끼치는 입력변수들 자체의 불확실성과 이들이 결과값에 미치는 민감도에 대한 관계를 규명함으로써 수자원 정책 수립시 투자 우선순위의 지표로 제시할 수 있다. 따라서 이러한 불확실성과 민감도의 관계가 어떻게 물수지 분석에서 나타나며 입력변수들간의 중요도를 이들의 관계로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 정량화된 입력변수의 불확실성의 크기를 상대적으로 비교하여 우선순위로 나타내었고 이를 민감도 분석의 결과와 비교하였다.

우선 입력변수 불확실성의 상대적 크기 비교가 필요

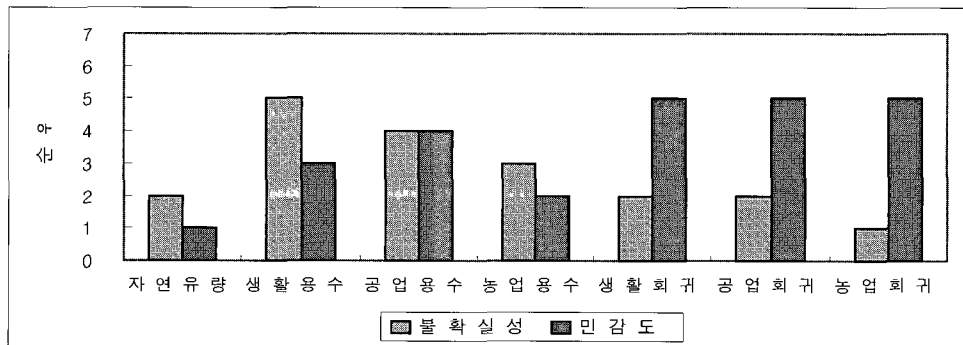
하여, 본 연구에서는 소유역별 입력변수의 변동계수와 [95% 신뢰구간/평균]을 지표로 선정하여 분석하였으며 이를 그림 7에서와 같이 민감도 순위와 비교하여 나타내었다. 비교결과 농업회귀율의 경우 3개의 소유역 모두 입력변수들 사이에서 가장 큰 불확실성을 보였으나 결과값에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났고, 민감도가 가장 큰 농업용수 수요량은 불확실성의 크기가 전반적으로 작은 편으로 나타났다. 이처럼 농업용수 회귀율은 물수지 분석시 불확실성이 크고 측정이 어려운 입력변수임에는 분명하나 결과에는 거의 영향을 미치지 못하고 있음을 의미한다.



(a) 301 소유역



(b) 309 소유역



(c) 316 소유역

그림 7. 소유역별 불확실성과 민감도 순위
(순위가 작을수록 불확실성과 민감도는 큼)

7. 결 론

금강수계 301, 309, 316 소유역에 대해서 불확실성 분석결과, 수정수장기에서 계산한 물부족 단일값은 95% 신뢰구간에서 소유역별로 서로 다른 위치에 근사하게 도시되었고, 특히 309 소유역과 316 소유역은 수정수장기에서 단일값의 추정이 각각 과소 및 과대 추정될 수 있음을 보여주고 있다. 각 입력변수들에 대한 민감도 분석에서는 농업용수와 자연유량의 민감도가 가장 크게 나타났으며, 회귀율의 민감도는 0에 가까운 값을 나타냈다. 또한 입력변수들의 불확실성과 민감도를 비교해 본 결과, 농업회귀율의 경우 입력변수들 사이에서 가장

큰 불확실성을 보였으나 결과값에 미치는 영향, 즉 민감도는 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 물수지 분석시 가장 변동 가능성이 크고 측정이 어려운 입력변수임에는 분명하나 결과에는 거의 영향을 미치지 못하고 있음을 의미한다.

10년 앞을 전망하는 수자원장기종합계획은 완벽할 수 없으며, 그 핵심사항인 물부족량을 하나의 단정적인 값으로 100% 정확히 예측하기란 자연의 속성상 불가능하다. 우리나라와 같이 자료가 열악한 국가에서는 더더욱 그러하다. 그러나 지금도 정부와 시민단체는 물부족량 예측값의 신빙성에 대해 감론을박을 계속하고 있다. 이제 양쪽 모두 불확실성을 인정하여야 하며, 이것이

인간 지식의 한계를 인정하고 자연에 순응하는 길이다. 이제 우리나라도 예보와 전망에 있어 불확실성을 덮어 두기보다는 능동적으로 고려하고 홍보하여도 될 만큼 국민 의식수준이 도달해 있다고 본다. 이미 오래 전부터 일간지에 보고하고 있는 강우의 확률예보는 이러한 가능성을 뒷받침 해주고 있다. 특히 상당수의 국민들이 전문가 이상의 관심을 보이고 있는 물문제에 있어서는 더욱 그러하다. 본 연구에서는 이에 대한 방법론을 제시하였고 앞으로 기후변화 등 더 많은 불확실성이 존재할 미래 수자원장기종합계획에서는 본 연구의 방법론을 적극적으로 고려하길 기대한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 유역 통합 물수지 분석 및 수자원 계획기술 개발 과제(1-5-1)와 서울대학교 공학 연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2000). **수자원장기종합계획**, 건설교통부, 한국수자원공사.
- 권현한, 박대영, 문영일 (2004). "단일사상 강우-유출 모형의 불확실성 분석을 통한 홍수빈도곡선 유도(I)-강우유출 모형 불확실성 분석-" **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권, 38호, pp. 229-239.
- 김남원, 원유승 (2001). "물수지 분석의 불확실성 및 범위" **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, pp. 607-612.
- 농림부 (1999). **농촌용수 수요량조사 종합보고서**, 농림부, 농어촌진흥공사.
- 신현석, 윤용남 (1997). "MCS와 LHS 법에 의한 연저수지 퇴사량 산정에 있어서의 불확실성 및 민감도 분석." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제18권, II-2호 pp. 141-151.
- 장상희 (2000). **사회통계학**, 박용사.
- Asselt, V. (2000). *Perspectives on Uncertainty and Risk: The PRIMA Approach to Decision Support*, Kulwer, Netherland.
- Asselt, V., Langendonck, R., Asten, V.A., Giessen, V.D., and Janssen, P.H.M. (2001). *Uncertainty and RIVM's Environmental Outlooks Documenting a Learning Process*, RIVM, Maastricht.
- Iman, R.L. (1981). "An Approach to Sensitivity Analysis of Computer Models." *Journal of Quality Technology*, Vol. 13, pp. 174-183.
- Lain, Y., and Yen, B.C. (2003). "Comparison of Risk Calculation Methods for a Culvert." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, pp. 140-152.
- Linsley, R.K., Franzini, J., and Joseph, B. (1979). *Water Resources Engineering*. 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- Magnusson, S.E., Hakan, F., and Kazunori H. (1996). "Fire Safety Design Based on Calculations: Uncertainty Analysis and Safety Verification." *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 305-334.
- Marholein, B.A., Asselt, V., and Rotmans, J. (2002). "Uncertainty in Integrated Assessment Modeling." *Climate Change*, Vol. 54, pp.75-105.
- Mckay, M.D., Beckman, R.J., and Conover, W.J. (1979). "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code." *Technometrics*, Vol. 21, No. 2, pp. 239-245.
- Salas, J.D., and Shin, H.S. (1999). "Uncertainty Analysis of Reservoir Sedimentation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, pp. 339-350.
- Thompson, K.D., Stendinger, J.R. and David, C.H. (1997). "Evaluation and Presentation of Dam Failure and Flood Risks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, pp. 216-226.

(논문번호:04-79/접수:2004.08.16/심사완료:2005.03.25)