

# 베이지안 기법을 이용한 수자원개발 모델 Water Resources Development Model by Using Bayesian Theory

김 지학\* 배 영주\*\*  
Jee-Hak Kim\*, Young-Ju Bae\*\*

## ABSTRACT

This study deals with the problem of water resources development by using bayesian theory. The purpose of this study is to develop the optimal decision model by applying bayesian theory which determine the optimal alternative in water resources development system. A relevant mathematical model to find an optimal solution formulated and then used in developing an efficient water resources that determine optimal alternative. A numerical example is solved to illustrate the algorithm developed.

---

\* 충주공업전문대학 토목공학과

\*\* 동국대학교 대학원 산업공학과 박사과정

## I. 서 론

자연환경이 인류의 생존과 번영을 위하여 대단히 중요한 것이라는 것은 부언할 필요가 없다. 이에 오늘날 이러한 환경문제가 우리의 상당한 관심을 가져왔다.

특히 생활하수와 산업폐수등에 의해서 오염된 수질을 개선하여 도시하천이 자연하천으로서 기능을 발휘하고 하천 주변환경의 보존을 위해서는 갈수기에도 일정한 하천의 유량을 유지할 수 있도록 새로운 수자원을 개발하여 하천 유지용수를 공급함으로써 항상 깨끗한 환경을 유지해야 할 시점에 이르렀다.

의사결정 이론을 수자원시스템 (Water resources system)에 적용한 연구는 Bechel (1967)이 Texas 수자원관리에 대한 연구가 있고, Maass(1962)는 수자원계획상의 경제성과 연관된 의사결정론에 대한 연구에서 목적함수를 설정하고 의사결정에 대한 기대치를 구하여 Minimax 접근과 비교분석을 시도하였다. Dawdy(1970)는 의사결정론을 수자원에 효과적으로 적용하기 위하여 모델의 매개변수가 목적함수에 따라 변한다는 동적차원의 연구가 수행되었다. Schmidt(1968)는 폭풍과 파도가 심한 호수에 대한 위험도에 관한 연구에서 불확실성에 대한 문제를 처리하는데는 Bayesian 기법을 사용할 것을 제안하였다.

Linsley는 수자원계획에서 의사결정 과정과 의사결정 분석에 사용할 통계의 설정에 대한 연구에서, 특히 의사결정 처리와 동일한 방법으로 구성요소를 부분별로 나누고 불확실성 계수의 확률분포를 구하는 것에 대하여 연구하였다. McGilchirst(1970)는 하천에서 관측한 자료를 사전분포로 재현기간을 구하기 위하여 Bayes rule를 적용하였다. Shane와 Gaver

(1970)는 홍수량 분포의 매개변수를 구하는데는 Bayes 이론을 적용하여, 회귀모델에서 사전정보는 역류의 관측치를 사용하고 사후정보는 사전정보에 추가자료를 도입하였다.

Bayesian 의사결정 방법은 Raiffa와 Schlaifer(1961)에 의해 불확실성하에서의 의사결정분석(analysis of decision under uncertainty)으로 맨 처음 소개되었으며, Pratt (1965)는 이 분야에서 기초적이고 원론적인 연구를 하였으며, Zeller(1971)가 계량경제학에 이 기법을 적용하였는데 이는 수문학에서 사용되는 모델과 매우 유사한 것도 있다.

Lenton(1973)은 Bayesian 관점으로 부터 Markov 모델의 계열 상관계수를 연구하였고 관측기록자료 외에 다른 근거로 부터의 정보가 매개변수의 불확실성을 약화시키는데 사용되었다. Wood(1974)는 관측자료 외에 다른 정보를 사용하여 홍수방제설계문제에 관한 의사결정 과정에 기저변수의 불확실성을 포함시켰다. Vicens(1975)는 하천유량의 모의발생을 위해 매개변수의 불확실성을 고려한 Bayesian 확률분포함수를 사용함으로써 불확실성 제약하에서 더욱 적절한 설계로 유도되는 것을 나타내었다. Valded(1977)는 다변수일차자기회귀모델(Multivariate first order autoregressive model)을 사용하여 연하천유량의 모의발생을 위해 Bayesian 구조를 제시하였다. Tang (1980)은 Bayesian 통계적 접근방법을 사용하여서 예보치와 관련된 불확실성의 척도와 함께 주어진 확률모델에 의해 예보되는 어떤 특정 재현기간에 대응하는 설계치를 예측할 수 있다고 주장하였다. Russell(1982)은 추가되는 정보를 감안하여 Bayes 정리로 합성분포의 가중치를 새롭게 하는 방법을 제시하였다.

본연구에서는 하천의 수질을 개선하기 위한

장래 필요한 수자원을 개발하는 방법에 관하여 Bayesian 이론을 이용하여 의사결정하는 방법의 모형을 제시함으로써 기존의 수자원 개발시스템에 내재되어있는 불확실성을 감소시킬 수 있는 효율적인 수자원개발 시스템의 최적의사결정모형 개발을 제안해 보고자 한다.

## 2. 수자원개발모형의 정립

의사결정론에서 여러 결과들에 대한 대안선택 방법은 목적함수의 기대치의 최대화를 의사결정 기준으로 하는 대부분의 의사결정 모델이나 위험을 내포한 일상의 의사결정 문제들은 불확실한 변수에 대한 확률분포의 추정을 기본적인 선결조건으로 하고있다. 수자원 개발의 문제도 수자원개발 과정을 모델화하는데 있어서의 불확실성과 모델의 매개변수 값을 추론하는데 불확실성을 포함하고 있다. 이러한 수문학적 특성을 고려하여 불확실성하에서의 의사결정에 대해 가장 정확한 결과를 주는 방법으로 알려진 베이지안 의사결정과정을 이용한 수자원 개발모형을 제시해 보고자 한다.

### 1) 사전 확률 분포 (Prior probability distribution)

사전확률분포는 사전정보에 의하여 구할 수 있으며 사전정보로는 대상하천유역의 지형학적 및 수문학적 특성을 회귀분석하여 구한다. 이는 지속기간을 가지는 년 최저치 지형특성인자간의 상관분석을 시행함으로써 저수유량의 특성을 분석한다. 지속기간에 따른 저수유

량의 빈도분석을 실시하여 지속기간에 따른 빈도곡선을 유도하여 식(1)에 의하여 저수유량을 구한다.

$$RQ_{D,T} = CT^{-S} \quad \text{----- (1)}$$

여기서,  $RQ_{D,T}$  : 지속기간 D일에서 재현기간 T년에 해당하는 저수유량( $m^3/s$ )

C : T=1에 해당되는  $RQ_{D,1}$

S : 빈도곡선의 경사

따라서 지속기간 D일에서의 재현기간 T년에 해당하는 저수유량은 식(2)와 같다.

$$RQ_{D,T} = RQ_{D,1} T^{-S} \quad \text{----- (2)}$$

또한 지속기간에 따른 저수유량과 지형인자(유역면적( $A_i, km^2$ ), 하천 총연장( $T_l, km$ ), 1차 하천연장( $L_1, km$ ), 기복량( $H_b, km$ ), 배수밀도( $D_d, km^2$ ))들 사이의 상관관계에서 빈도곡선의 회귀식으로부터 예정된 지속기간별 재현기간의 저수유량을 유역의 체적과 배수능력을 나타내는 지형인자들간의 상관관계를 분석하여 지속기간에 해당하는 저수유량과 지형인자간의 관계식(3),(4)로 부터 사전확률분포를 구한다.

$$RQ_{D,2} = a[(A_i H_b)^{0.5} RQ_{D,1} / 300 S]^b = a A^b \quad \text{--- (3)}$$

$$RQ_{D,2} = c[(A_i H_b)^{0.5} RQ_{D,1} / 1000 S]^b = c B^b \quad \text{--- (4)}$$

### 2) 목적함수(Goal function)의 설정

의사결정자는 각 대안의 이익을 최대화시키는 대안을 최적대안으로 선택하여야 하므로 다음과 같이 목적함수를 설정한다.

$$\text{Maximize } g(a, \theta) = \pi(a, \theta) - \pi(a, c) \quad \text{--- (5)}$$

여기서  $\pi(a, \theta)$  : 유입시 기대이익

$\pi(a,c)$  : 유입시 소요되는 비용  
 $a = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$  : 대안의집합  
 $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n\}$  : 발생가능한 상황  
 $c = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$  : 소요비용의집합

(1) 이익함수(Benefit function)

수자원을 개발하여 필요한 유량을 유입하므로서 기대이익으로는 수질개선, 생공용수, 농업용수, 하천유지용수 등이 있겠으나 각종의 기대이익 중 정량화(Quantitative)가 가능한 것만을 고려하고 정성적(Qualitative)인 것은 척도의(Scale)의 근거가 정당화 될 수 없으므로 이를 고려치 않으면

$$\pi(a, \theta) = c_1 \theta + D \quad \text{----- (6)}$$

여기서  $c_1$  : 유량증가에 따른 이익증가 상수  
 $D$  : 최소유량의 기대이익

(2) 비용함수(Cost function)

수자원 개발 비용으로는 수공구조물 설치시 소요되는 공사비 외에 연간유지비, 연간 운영비 등으로 구분 할 수 있으며, 개발하지 않은 비용요소에 대하여는 일반적으로 고려치 않고 있다. 따라서 비용함수는 개발유량에 비례하므로

$$\pi(a, C) = C_2 \theta + F \quad \text{----- (7)}$$

여기서  $C_2$  : 증가비용에 따른 발생비용 증가액  
 $F$  : 수공구조물의 공사비의 연간 증가액

3) 손실함수(Loss function)

각 대안별 발생가능한 상황에 대한 손실함수는 각 대안을 선택하지 않으므로 발생하는

손실로서 다음과 같이 정의한다.

$$L(a, \theta) = -\{\pi(a, \theta) - \pi(s, C)\} \quad \text{---- (8)}$$

Alternative	State of nature			
	$\theta_1$	$\theta_2$	.....	$\theta_n$
$a_1$	$L_{11}$	$L_{12}$	.....	$L_{1n}$
$a_2$	$L_{21}$	$L_{22}$	.....	$L_{2n}$
.	.	.	.....	.
.	.	.	.....	.
$a_n$	$L_{n1}$	$L_{n2}$	.....	$L_{nn}$

여기서  $L_{ij} = \pi(a_i, \theta_j) - \pi(a_i, C_j)$   
 $i = 1, 2, \dots, n$   
 $j = 1, 2, \dots, n$

4) 사전확률에 의한 기대기회손실(Expected Oppotunity Loss:EOL)

EOL의 계산은 Bayesian 의사결정 이론을 적용한 각 대안별 기대기회손실로서 다음과 같다.

$$EOL(a, \theta) = E[L(a, \theta)] = \int_{-\infty}^{\infty} l(a, \theta) P_{\theta}(\theta) d\theta \quad \text{---- (9)}$$

5) 사후 확률분포(Posterior probability distribution)

사전확률분포에 의한 분석은 사전정보에 의한 사전확률 값이 의사결정자의 주관적 판단에 의한 의사결정이 주관적 판단에서 초래되는 불확실성을 배제하기 위하여 대상유역의 지형인자를 고려한 지속기간 D일간의 회귀관계식을 사전 정보로 하여 이에 적합한 확률값을 부여하므로써 불확실성을 감소시킬 수 있으며, 사후확률분포는 사전확률분포[f'(u, σ

$|I_R]$ 식(10)으로부터,  $u$  및  $\sigma$ 에 대한 모멘트를 식(11)에 의해 구하고 표본정보로부터의 우도함수(Likelihood function)식(12)를 구한다. 식(10)과 (12)를 결합하여 사후확률분포함수  $[f''(u, \sigma | I_R Y)]$ 식(13)을 구하고 식(14)에 의하여 사후확률분포함수의 모멘트를 구한다.

$$f'(u, \sigma | I_R) = f'_{LN}(u | \bar{y}, \sigma / \sqrt{n''}) \cdot f'_{IGZ}(\sigma | S', V') \dots\dots\dots(10)$$

$$\left. \begin{aligned} E[u | I_R] &= \bar{y}' & , v' > 1 \\ V[u | I_R] &= v's'^2 / (n'(v' - 2)) & , v' > 2 \\ E[\sigma^2 | I_R] &= v's'^2 / (v' - 2) & , v' > 2, \\ V[\sigma^2 | I_R] &= 2(v's'^2)^2 / (v' - 2)^2(v' - 4) & , v' > 4 \end{aligned} \right\} (11)$$

$$\left. \begin{aligned} L(\mu, \sigma | Y) &= (2\pi)^{-(1/2)n} \\ &\times \sigma^{-n} \{ \exp[-\sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 / 2\sigma^2] \} \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ S^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \right\} (12)$$

$$f''(\mu, \sigma | I_R) \propto f'(\mu, \sigma | I_R) \cdot L(\mu, \sigma | Y) \dots\dots(13)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}'' &= (n' \bar{y}' + n \bar{y}) / (n' + n) \\ n'' &= n' + n \\ v'' &= v' + v + 1 \\ S'' &= (v's'^2 + n' \bar{y}'^2 + v s^2 + v \bar{y}^2 - n'' \bar{y}''^2) / v'' \\ & \qquad \qquad \qquad v'' > 0 \end{aligned} \right\} (14)$$

6) 기대기회손실의 기대치(Expected Espcted Oppotunity Loss:XXOL)

표본정보의 추가정보를 이용하여 사후 확률 분포함수를 적용한 각 대안별 기대기회손실의 기대치 XXOL은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} XXOL(\theta) &= E[EOL(a, \theta)] = E[E\{l(a, \theta)\}] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} l(a, \theta) P_{\theta; x=x}(\theta) d\theta \quad \dots\dots(15) \end{aligned}$$

7) 최적대안의 선정(Choice of optimal alternative)

기대기회손실의 기대치 XXOL 값이 최소화 되는 대안이 최적대안으로 선택된다.

8) 표본정보의 선정(Expected value of sample information : EVSI)

EVSI는 추가정보를 이용하여 얻은 기대이익으로서 추가정보를 구하기 위하여 소요되는 비용 EVSI 값보다 적다면 추가정보의 취득이 필요하고 크다면 추가정보의 가치가 없으므로 필요치 않으며, 그 값은 다음과 같이 구한다.

$$EVSI(\theta) = EOL(\theta) - XXOL(\theta) \dots\dots\dots(16)$$

3. 수치적용의 예

앞절에서 개발한 모델을 이용하여 사례에 적용하여 보겠다.

적용대상하천의 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 F-river는 상류지점에 E-dam댐을 보유하고 있지만 1일 20만 ton은 G-Area의 공업용수를 공급함으로서 E-Dam 하류 지역에 있는 F<sub>1</sub>F<sub>2</sub>F<sub>3</sub> 지점은 급속한 산업시설의 증가로 말미암아 수자원의 수요는 증가는 반면 공급은 감소하여 하천용지용수는 물론 생활용수, 공업용수 및 환경관리유량이 절대적으로

부족하여 F-river의 수질은 점점 더 악화되고 있다. 본 사례에서는 F지점의 수질을 BOD 3PPM으로 유지하고, 6PPM으로 유지하기 위하여 방류수 처리수질을

(1) Type I ( $F_3$  지역수질 BOD 3PPM 유지하고 방류수 처리 수질기준 BOD를 30PPM으로 한경우

(2) Type II ( $F_3$  지역수질 BOD 3PPM 유지하고 방류수 처리 수질기준 BOD를 20PPM으로 한경우

(1) Type III ( $F_3$  지역수질 BOD 3PPM 유지하고 방류수 처리 수질기준 BOD를 10PPM으로 한경우

(1) Type IV ( $F_3$  지역수질 BOD 6PPM 유지하고 방류수 처리 수질기준 BOD를 30PPM으로 한경우

(1) Type V ( $F_3$  지역수질 BOD 6PPM 유지하고 방류수 처리 수질기준 BOD를 20PPM으로 한경우

이러 하면 아래의 수자원을 개발하여야 할 필요한 유량은 Type-I일 경우 13.6CMS, Type-II일 경우 10.8CMS, Type-III일 경우 7.6CMS, Type-IV일 경우 5.0CMS, Type-V일 경우 1.9CMS로 나타나 이를 개발 수자원으로 한다.

또한 F-river 유역의 수요지역은 대단위 도시와 공업단지로 구성되어 있으므로 1991년부터 2011년까지 5개년을 단위로 하여 수질을 개선하는데 필요한 필요유량 공급에 소요되는 비용은 최소화하고 수자원 공급대안에 따른 이익을 최대화하는 최적대안을 선정하는 사례이며 수자원 공급시스템은 그림 1과 같이 구성하였다. 본 사례에서는 수자원 개발 시스템

에서 실현가능한 대안 3가지를 다음과 같이 제안한다.

$a_1$  : D-river하류에서 유입

$a_2$  : B-Dam에서 유입

$a_3$  : C-Dam을 건설하여 유입

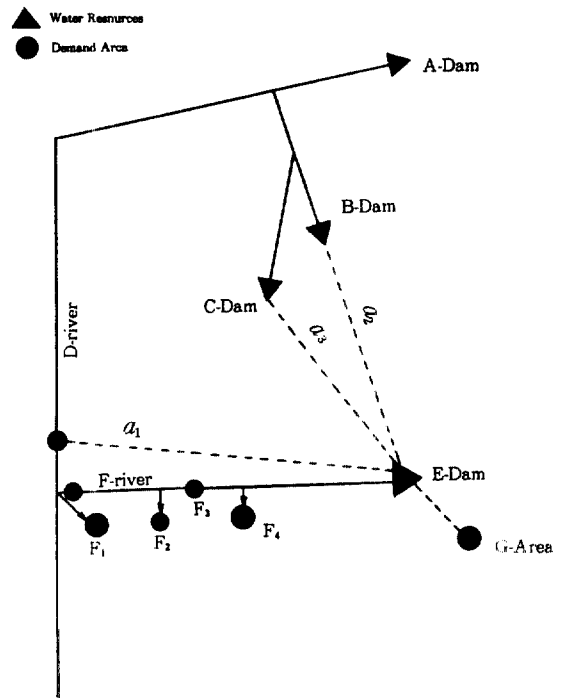


그림 1 Decision System in Study Area

사전정보와 사후정보는 다음과 같이 구분한다.

사전정보로서는 대상유역의 재현기간에 따른 저수유량과 유역의 하천지형학적 인자들과의 상관관계를 분석하여 사용하고자 한다. 한 유역의 저수유량은 유역의 수문학적 인자와 하천 지형학적 인자의 영향을 많이 받으므로 이들간의 상관성을 규명하기 위하여 여러인자들과 지속기간별 재현기간의 2년간 저수유량

( $RQ_{D,2}$ )의 상관분석을 하고 유역의 지형인자로서 유역의 체적을 나타내는 ( $A_1H_b/3$ ) 및 유역의 배수능력을 나타내는 하천 총연장( $T_1$ )과 유역의 기복량( $H_b$ )을 지형인자로 선택하면 하천지형학적 인자들의 조합으로 이루어진 ( $L_1H_b$ ), ( $T_1H_b$ ), ( $T_1\sqrt{H_b}$ ), ( $\sqrt{D_dL_1}$ ), ( $L_1\sqrt{H_b}$ ), ( $\sqrt{D_dT_1}$ ) 등의 변량과  $RQ_{D,2}$ 간의 상관관계를 분석하여 하천 지형학적 변수치를 계산하면 Table 1과 같다.

구하면 Table 2와 같다.

Table 1 Topographical Characteristics of Basins

$L_1H_b$	$T_1H_b$	$T_1\sqrt{H_b}$	$\sqrt{D_dL_1}$	$L_1\sqrt{H_b}$	$\sqrt{D_dT_1}$
3597.1	5619.9	5365.7	5972.8	3434.1	9331.7

지속기간별  $RQ_{D,1}$ 와 지형인자와의 관계식을

구하면 Table 2와 같다.

Table 2 Relationships of  $RQ_{D,TVS,T}$  Topographical Factor each Duration

Topographical Factor	Duration	Regression Equation
$L_1 \cdot H_b$	5	$RQ_{5,2} = 0.11 \times 10^{-3}(L_1H_b)^{1.17}$
	7	$RQ_{7,2} = 0.20 \times 10^{-3}(L_1H_b)^{1.11}$
	10	$RQ_{10,2} = 0.61 \times 10^{-3}(L_1H_b)^{1.03}$
$T_1 \cdot H_b$	5	$RQ_{5,2} = 0.60 \times 10^{-3}(T_1H_b)^{1.19}$
	7	$RQ_{7,2} = 0.11 \times 10^{-3}(T_1H_b)^{1.13}$
	10	$RQ_{10,2} = 0.35 \times 10^{-3}(T_1H_b)^{1.04}$
$T_1 \cdot \sqrt{H_b}$	5	$RQ_{5,2} = 0.42 \times 10^{-4}(T_1 \cdot \sqrt{H_b})^{1.24}$
	7	$RQ_{7,2} = 0.80 \times 10^{-4}(T_1 \cdot \sqrt{H_b})^{1.19}$
	10	$RQ_{10,2} = 0.26 \times 10^{-3}(T_1 \cdot \sqrt{H_b})^{1.09}$
$\sqrt{D_d \cdot L_1}$	5	$RQ_{5,2} = 0.28 \times 10^{-4}(\sqrt{D_d \cdot L_1})^{1.30}$
	7	$RQ_{7,2} = 0.52 \times 10^{-4}(\sqrt{D_d \cdot L_1})^{1.24}$
	10	$RQ_{10,2} = 0.17 \times 10^{-3}(\sqrt{D_d \cdot L_1})^{1.15}$
$L_1 \cdot \sqrt{H_b}$	5	$RQ_{5,2} = 0.82 \times 10^{-4}(L_1\sqrt{H_b})^{1.23}$
	7	$RQ_{7,2} = 0.15 \times 10^{-3}(L_1\sqrt{H_b})^{1.17}$
	10	$RQ_{10,2} = 0.46 \times 10^{-3}(L_1\sqrt{H_b})^{1.08}$
$\sqrt{D_d \cdot T_1}$	5	$RQ_{5,2} = 0.14 \times 10^{-4}(\sqrt{D_dT_1})^{1.31}$
	7	$RQ_{7,2} = 0.26 \times 10^{-4}(\sqrt{D_dT_1})^{1.26}$
	10	$RQ_{10,2} = 0.90 \times 10^{-4}(\sqrt{D_dT_1})^{1.16}$

Table 2에서 저수유량 5,7 및 10일의 회귀 구하면 Table 3과 같다.  
관계식을 이용하여 지형학적 인자의 특성을

Table 3 Prior Information

Duration (day)	(x) Type							
	L <sub>1</sub> H <sub>b</sub>	T <sub>1</sub> H <sub>b</sub>	T <sub>1</sub> H <sub>b</sub>	L <sub>1</sub> D <sub>a</sub>	L <sub>1</sub> H <sub>a</sub>	T <sub>1</sub> D <sub>a</sub>	X	$\sigma_{n-1}$
5	1.59	1.74	1.77	2.27	1.83	2.22	1.90	0.2767
7	1.77	1.90	2.19	2.50	2.06	2.61	2.16	0.3321
10	2.81	2.78	3.02	3.74	3.03	3.63	3.17	0.4141

본 연구에서는 수질 관측시 관측저수유량 (2.15 CMS)에 가장 접근하여 지속기간 7일의 RQ<sub>7.2</sub>을 사전정보로 사용하였다. 사전 및 사후 분석을 식 (2),(3),(4),(5)에 의해 분석한 결과 Table 4와 같이 모멘트를 산정하여 이를 수록하였다.

사전 확률 분포함수  $[f'(v,\sigma;I_R)]$ 의 매개변수는 Table 3의 사전정보로부터 구한 Table 4의 모멘트를 사용하여 식(11), (12), (14)에 의해 구하여 Table 5에 수록하였다. Friver F3지점의 관측자료로부터 매년 일유출량을 지속기간 7일씩 연속으로 합하량이 되므로 전 관측기록년에 대해서 각각의 최저치들을 구한 7일 저수유량의 년 최저치계열을 표본정보로 하였

다. 이 표본정보의 모멘트를 사용하여 식 12에 의해 Likelihood함수  $[L(v,\sigma;Y)]$ 의 매개변수를 Table 5와 같이 구하였다. Bayesian 처리에 의해 사전확률분포 함수와 Likelihood 함수의 매개변수를 구하여 Table 5에 수록하였다. 지속기간 7일의 저수유량에 대하여 평균 및 분산에 대한 Bayesian 모델의 결합 정도를 보기 위해서 사전, 표본 및 사후정보에 대한 Marginal 확률분포 함수를 그림 2및 그림 3에 도시하였다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 Bayesian 모델을 통해 불확실성(Uncertainty)이 감소되는 것을 명확히 알 수 있다. 이의함수 식(6)에 의한 결과는 table 6과 같다.

Table 4 Moment of Prior, sample and Posterior Information

Information	Mean	Standard Deviation
prior	2.16	0.3321
Sample	2.52	0.7634
Posterior	2.41	0.7527



Table 5 Prior to Posterior Analysis.

Information	$E[\nu]$	$V[\nu]$	$E[\sigma^2]$	$V[\sigma^2]$
prior	2.16	0.0306	0.184	0.0676
Sample	2.52	0.0538	0.699	0.1223
Posterior	2.41	0.0335	0.637	0.0538

Table 6 Water Supply Benefit of F-river Basin

(Unit :  $10^9$ won)

Year	1989	1991	1996	2001	2006	2011
Q( $10^3$ t/day)	1083.0	1112.0	1208.0	1238.1	1278.1	1478.1
Q CMS						
3	2.20	2.27	2.47	2.53	2.63	3.03
5	2.90	2.98	3.24	3.33	3.43	3.97
10	5.60	5.76	6.26	6.42	6.62	7.66
12	7.00	7.26	7.89	8.09	8.35	9.66
13	7.90	8.11	8.82	9.04	9.33	10.79
14	8.80	9.13	9.92	10.71	10.49	12.14
15	10.00	10.21	11.15	11.43	11.80	13.65

Table 7은 각 생성가능한 상황별 기대이익을 산정한 결과이다. 여기서  $P(0 \leq \theta \leq 10) = 0$ 이 이익함수식에 대입하여 계산한 결과로서 다. Type-I 에서 필요한 개발유량을  $\theta$ 에 대입하여

Table 7 Expected benefit of each possible situation

(Unit :  $10^9$  won/year)

Expected benefit	Possible Situation			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
$\pi(a, \theta)$	840	760	680	-760

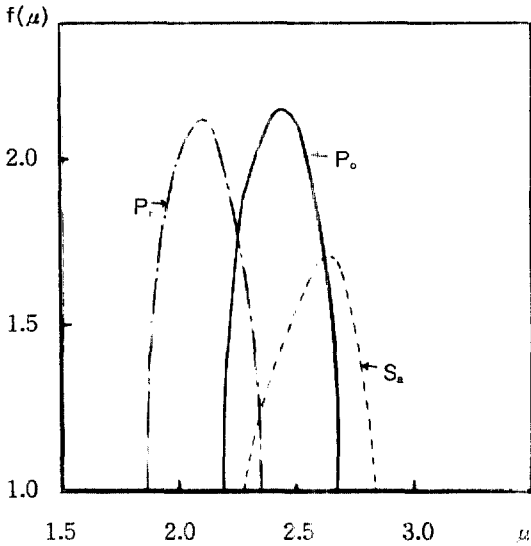


그림 2 Marginal PDF's of the Mean

Pr : Prior Information

Sa : Sample Information

Po : Posterior Information

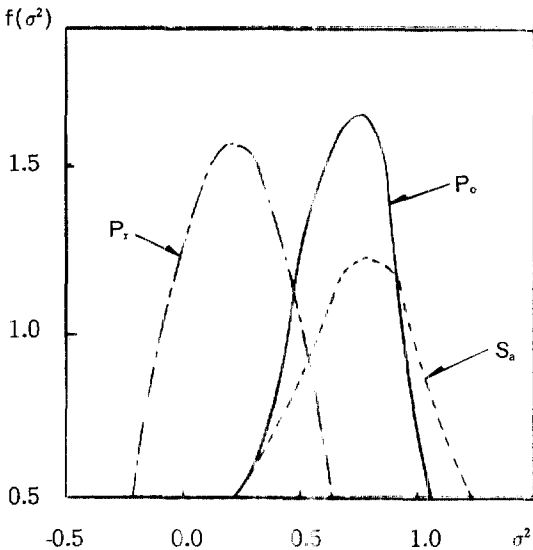


그림 3 Marginal PDF's of the Variance

또한 각 대안에 따른 발생가능한 상황별 기대이익을 산정한 결과 Table 8과 같다.

Table 8 Expected benefit of each alternative

(Unit : 10<sup>9</sup> won/year)

Alternative	Possible Situation			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
a <sub>1</sub>	744	591	427	-744
a <sub>2</sub>	489	381	252	-489
a <sub>3</sub>	668	531	378	-688

의사결정자의 계산 과정을 검토하기 위해 주어진 상태가  $\theta$  일때 대안 a를 선택하므로써 발생하는 손실을 고려하여 대안 a와 주어진 상황(state of nature)의 모든 결합에 대해 정의되는 손실함수 즉  $L(a, \theta)$ 는 기대이익의 (음)의 값이 된다. 따라서 본 사례연구에서의 최적 대안은 a<sub>1</sub>(D-river하류에서 유입)임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수자원 개발시 베이지안 이론을 이용하여 최적 대안을 찾는 문제를 다룸으로서 기존의 수자원 개발시 B/C분석과, 전략적 의사결정에만 의존하던 비효율성을 감소시킬 수 있도록 하였다.

이렇게 개발된 모형과 그 해법은 특히 사전 정보와 사후정보를 이용한 베이지안 과정을 통하여 얻어진 사후확률분포함수의 주변확률 분포함수에서 모수값 추정시 불확실성이 감소되는것을 알 수 있다.

또한 사례에서 제시된 해법은 유사한 수자원 개발을 해결하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 본다.

그리고 이와같이 통계적 이론과 방법은 품질관리 뿐 만 아니라 본 논문에서 다른 수자

원 개발 문제를 포함하여 여러 분야의 문제 해결에 유용하게 활용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Davis, K. R., C. C. Kisiel and L. duckstein ; "Bayesian Decision Theory Applied to Decision to in Hydrology", Water Resources Reserch, 8, feb., 1972.
2. Dvoranchik, W. M. ; "Decision Under Uncertainty Applied to a Hydrologic Problem", Merster's Thesis, Dept. of Syst. Engr., Univ. of Arizona, Tucson, 1971.
3. Lenton, R. L., I. Rodriguez-Inurbe and J. C. Scaake, Jr. ; "A Bayesian Approach to Estimation in Hydrologic Autoregressive Models", Ralph M, Parsons Laboratiry for Water Recources and Hydrodynamics, Report No. 163, Jan., 1973.
4. Maass, Arthur ; "Design jof Water Resource System", Harvard U. Press, Cambridge, Mass, 1962.
5. Russell, S. O. ; "Flood Probability Estimation", Journal of The Hydraulics Div., ASCE, Vol. 198, No. hol, Jan., 1982.
6. Shane, R. M. and D. D. Gaver ; "Statistical decision theory Techniques for the Revision of Mean Flood Flow Regression Estimates", Water Resources Research, b(6), Dec., 1970.
7. Tang, W. H. ; "Bayesian Frequency Analysis", Journal of the Hydraulics div., ASCE, Vol. 106, No. Hy 7, July, 1980.
8. Valdes, J. B., I. Rodriguez-Iturbe and G. J. Vicens ; "Bayesian Generation of Synthetic Streamflow 2. The Multivariare Case", Water Resources Research, 13(2), Apr., 1977.
9. Wood, E. f., I. rodrigueq-Iturbe and J. C. Schaake, Jr, ; "The Methodology of Bayesian Inference and Decision Making Applied to extreme Hydrologic Events", Talph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamic Report No. 178, Jan., 1974.
10. 이 순탁 ; "수문학적 불확실성하의 수자원 시스템에 관한 의사결정론적 분석". 대한토목학회 학술논문집, 1980.
11. 김 지학 ; "수자원개발의 의사결정론적 연구", 영남대학교, 1990.