



## Estimation of the value of dam flushing by using Bayesian analysis - the case of Chungju dam

Lee, Joo-Suk<sup>a</sup> · Choi, Han-Joo<sup>b</sup> · Yoo, Seung-Hoon<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Division of International Trade and Economics, Korea Maritime and Ocean University

<sup>b</sup>Research Center for Water Policy and Economy, K-water Institute

<sup>c</sup>Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology

Paper number: 17-024

Received: 2 March 2017; Revised: 28 April 2017 / 24 May 2017; Accepted: 24 May 2017

### Abstract

Recently as algae phenomenon has been intensified, the need for additional dam flushing has been raised. To establish the more rational policies concerning the dam flushing, it is necessary to evaluate the dam flushing. This paper attempts to examine households' willingness to pay (WTP) for dam flushing by using a contingent valuation (CV). Especially, unlike other CV studies which used maximum likelihood estimation (MLE), this study employed Bayesian approach. This study surveyed a randomly selected sample of 1,000 households nation-widely, and asked respondents questions in person-to-person interviews about how they would be willing to pay for the additional dam flushing. Respondents overall accepted the contingent market and were willing to contribute a significant amount (1,909.4 won), on average, per household per year. The aggregate value amounts to approximately 35.7 billion won per year.

**Keywords:** Dam flushing, Contingent valuation, Bayesian approach, Willingness to pay

## 베이시안 추정법을 활용한 댐 추가방류수의 경제적 가치 추정 - 충주댐 사례

이주석<sup>a</sup> · 최한주<sup>b</sup> · 유승훈<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>한국해양대학교 국제무역경제학부, <sup>b</sup>한국수자원공사 K-water 연구원 정책경제연구소, <sup>c</sup>서울과학기술대학교 에너지환경대학원

### 요 지

최근 녹조현상이 심화되면서 이를 해결하기 위한 방안으로 댐의 추가방류에 대한 필요성이 제기되고 있다. 따라서 보다 합리적인 댐 추가방류와 관련된 정책 수립을 위해서 댐의 추가방류수에 대한 경제적 가치 측정의 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 논문에서는 녹조 저감과 수질개선을 위한 댐의 추가방류에 대한 경제적 가치를 도출하기 위하여 일반가구의 지불의사액을 분석하고자 한다. 한편 연구방법론적인 측면에서 조건부 가치측정법(CVM)을 적용하되, 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 이용하는 기존의 CVM 연구와 달리 베이시안(Bayesian) 추정법을 적용하였다. 본 연구는 전국의 1,000가구를 대상으로 충주댐의 추가방류를 현재보다 200% 증가시켰을 경우를 가정하여 댐 추가방류의 사회적 편익 즉, 조류저감 효과를 산정하였다. 분석결과 가구당 연간 WTP는 1,909.3원으로 이를 연간 총편익으로 계산하면 357.1억 원, 10.56원/m<sup>3</sup>이다.

**핵심용어:** 댐 추가방류, 조건부 가치측정법, 지불의사액, 베이시안 추정법

### 1. 서 론

매년 수온이 상승하는 봄철이 되면 하천에 조류가 발생하

는데 최근 녹조현상이 심화되면서 이로 인한 직·간접적인 피해가 증가하고 있다. 한편 녹조 피해를 저감하고 상수원의 수질을 개선하기 위해서 환경부에서는 댐의 추가방류 즉, 댐 플러싱(flushing)을 한국수자원공사에 지속적으로 요청하고 있는 상황이다. 실제로 2012년 8월에는 환경부 한강유역환경청의 요청으로 한강 상수원 수질개선을 위해 충주댐의 방류량

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-6802  
E-mail: shyoo@seoultech.ac.kr (S.-H. Yoo)

을 110 m<sup>3</sup>/s에서 500 m<sup>3</sup>/s로 추가방류를 시행한 결과 팔당취수장의 조류농도가 약 37.4% 개선되는 효과가 나타났다. 한편 현행 댐용수의 공급 체계상 한국수자원공사가 댐 추가방류로 공급할 수 있는 용수는 지방자치단체 등과 계약을 체결하여 연중 안정적으로 공급해야하는 생·공용수와 국가를 대신하여 공급하는 하천유지용수 및 관개용수로 구분되는데, 하천유지용수와 관개용수는 연간 계획 배분량이 전량 방류되고 있기 때문에 댐의 추가방류수는 생·공용수 여유분을 활용할 수밖에 없다. 따라서 한국수자원공사에서는 녹조피해 및 수질개선을 위한 댐의 추가방류수에 대하여 적절한 대가(代價) 지불이 필수적인 것으로 판단하고 있다. 이를 위해서는 우선적으로 댐의 추가방류수에 대한 가치를 산정하는 것이 우선이다. 댐의 추가방류수에 대한 가치는 하천의 수질개선으로 인한 용수활용과 관련된 사용가치 뿐만 아니라 심미적인 가치 등 비사용가치를 포괄한다.

댐의 추가방류수에 대한 가치는 추가방류를 통한 녹조피해 저감과 수질개선인데 이를 화폐단위로 산정하기 위해서는 기존의 수질개선 편익추정에 널리 활용되는 조건부 가치추정법(Contingent Valuation Method, CVM)의 활용이 적절하다. CVM은 특정 시나리오를 활용하여 추가방류로 인한 녹조피해의 저감 또는 수질개선 효과에 대한 지불의사액(willingness to pay, WTP)를 측정하는 것이다. WTP는 특정 재화나 서비스를 공급받기 위한 소비자의 지불의사이기 때문에 경제학적으로는 재화나 서비스에 대한 가치를 의미한다. 이에 본 연구에서는 남한강에 위치한 충주댐을 대상으로 댐 추가방류로 인한 녹조의 저감 및 수질개선 효과를 분석한 후 이를 바탕으로 댐 추가방류의 가치를 구하고자 한다. 한편 본 연구는 최우 추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 이용하는 기존의 CVM 연구와 달리 베이지안(Bayesian) 추정법을 적용하였다. 전통적인 MLE는 관측된 표본을 바탕으로 모수

를 추정하는 방법이라면 베이지안 추정법은 관측된 자료와 함께 모수에 대한 사전 지식 및 경험과 같은 주관적 사전정보를 활용하는 방법으로 분석 접근법 자체가 MLE와는 상이하다고 볼 수 있다.

본 논문은 제Ⅱ장에서 충주댐의 추가방류로 인한 녹조저감 및 수질개선효과에 대하여 논의하고, 제Ⅲ장에서는 충주댐의 추가방류로 인한 WTP 추정을 위한 실증분석절차 및 분석방법에 대하여 설명하며, 제Ⅳ장에서는 주요 분석결과에 대해 논의하며 마지막 장은 연구결과의 정책적 시사점과 향후 연구전망에 대해 논의한다.

## 2. 충주댐의 추가방류 효과

충주댐은남한강 수계에 건설된 국내 최대의 콘크리트 중력식댐으로 높이 97.5 m, 길이 447 m, 저수용량 27억 5천만 m<sup>3</sup>, 유역면적 6,648 km<sup>2</sup>에 이른다. 충주댐이 위치한 남한강은 태백산맥 내의 한강 최극단에서 발원하며 유역면적은 약 12,514 km<sup>2</sup>, 유로연장 375 km에 달하는 큰 하천으로 서울 동쪽 약 20 km 지점에서 북한강과 합류하여 한강 본류를 형성한다.

녹조저감과 댐 방류량 간의 관계를 살펴보기 위하여 충주댐과 남한강 하류의 강상, 팔당호 지점의 2005년 1월부터 2015년 5월까지의 댐 방류량과 클로로필-a 농도 자료간의 연관관계를 회귀분석한 결과는 다음과 같다. 팔당댐 지점에서 2005년 1월부터 2015년 5월까지 강우량에 따른 수문방류 및 집중강우가 있었던 월은 제외한 평균 클로로필-a 농도 값은 13.441 mg/m<sup>3</sup>이며, 강상지점은 15.621 mg/m<sup>3</sup>로 각각 수질 등급은 ‘약간 좋음’, ‘보통’ 단계이다. 남한강 하류인 강상지점의 경우 충주댐의 방류량을 평균 대비 20% 증가시키면 수질 등급이 ‘보통’에서 ‘약간 좋음’ 단계로 개선되며, 방류량을 평

Table 1. The relation between chlorophyll-a and dam flushing

	Quantity of dam flushing (m <sup>3</sup> /s)	Chlorophyll-a (mg/m <sup>3</sup> )		Improvement effect (%)		Level of water quality standard	
		Paldang dam	Kangsang	Paldang dam	Kangsang	Paldang dam	Kangsang
Average (2005~2015)	93.571	13.441	15.621	-	-	Little good	Middle
10% increase	98.250	13.263	14.482	2.5% (√0.35)	7.3% (√1.14)	Little good	Middle
20% increase	112.285	13.119	13.615	4.6% (√0.63)	12.8% (√2.01)	Little good	Little good
50% increase	140.357	12.807	11.873	8.9% (√1.23)	24.0% (√3.75)	Little good	Little good
100% increase	187.142	12.475	10.232	13.4% (√1.84)	34.5% (√5.39)	Little good	Little good
150% increase	233.928	12.251	9.234	16.4% (√2.25)	40.9% (√6.39)	Little good	Little good
200% increase	280.713	12.083	8.537	18.6% (√2.55)	45.3% (√7.08)	Little good	Good
300% increase	374.284	10.736	7.595	18.6% (√2.55)	51.4% (√8.03)	Little good	Good

균 대비 200% 증가시키면 ‘ 좋음 ’ 단계로 개선된다. 반면에 팔당댐의 경우 충주댐 하류 남한강을 제외한 북한강, 경안천 등 다른 지류들의 영향을 배제하여 분석하였기 때문에 개선효과가 강상지점보다 미비한 것으로 나타났다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 충주댐의 추가방류량을 2005년부터 2015년 평균 방류량 대비 200% 증가되었을 때를 기준으로 댐 추가방류를 위한 WTP를 조사하였다. 이는 일반인을 대상으로 설문조사를 시행하는 CVM의 특성상 수질등급의 변화와 같이 일반인들이 쉽게 인식할 수 있도록 수질개선 수준이 제시되어야 하기 때문이다. 충주댐에 대한 추가방류를 현재 수준(초당 93.6 m<sup>3</sup>)에서 200% 증가된 초당 280.7 m<sup>3</sup>으로 증가시켰을 경우 북한강과 합류하기 바로 직전인 남한강 하류(강상면)에서는 조류농도가 조류주의보 수준(레크리에이션 활동이 가능하며, 식수로 사용할 경우 냉장 보관 또는 끓여서 음용) 이하로 개선되고 수질등급도 ‘ 보통 ’ 수준에서 ‘ 좋음 ’ 수준으로 개선되며, 또한 수도권 주민들의 식수원으로 활용되는 팔당호의 조류농도도 개선된다.

### 3. 조건부 가치측정법(CVM)

#### 3.1 연구방법론의 선정

댐 추가방류의 조류저감 효과의 편익산정과 관련된 연구 사례는 없지만 이와 유사한 수질개선편익과 관련된 다양한 연구사례들이 존재한다. 우선적으로 국비 300억 원 이상 또는 사업비 500억 원 이상 소요되는 재정사업에 대하여 시행되는 예비타당성조사 사례들을 살펴보면 낙동강 살리기 동촌지구 사업(KDI, 2011), 영산강 살리기 합평지구 사업(KDI, 2011) 등 수질개선의 편익산정을 위해 CVM을 적용하였다. 또한 수질개선편익을 추정할 기존의 국내외 연구사례들을 살펴보면 해외의 경우 Raje et al. (2002), Brox et al. (2003), Akins et al. (2007) and Genius et al. (2008) 등이 있으며, 국내의 경우 Shin (1997)은 한강 수질을 연구하였고, Lee et al. (2007)은 낙동강 연구하였는데 동 연구들은 모두 CVM을 적용하였다.

#### 3.2 지불의사 수단과 지불의사유도방법 및 제시금액의 설정

WTP 도출을 위해서는 응답자가 지불의사를 쉽게 밝힐 수

있으면서 현실성이 있는 지불수단의 설정이 중요하다. 댐의 추가방류로 인한 녹조 저감 및 수질개선의 효과는 일반인들에게 직접적인 혜택뿐만 아니라 심미적인 가치를 포함한 비사용 가치를 포괄하고 있기 때문에 이를 대표할 수 있는 지불수단의 선정이 쉽지 않다. 이에 본 연구에서는 응답자들에게 친숙하며 가장 대표적인 조세항목 중 하나인 소득세를 지불수단으로 선정하였으며, 지불기간과 지불회수는 가구당 연간 1회 5년간으로 설정하였다.

한편 지불의사유도방법은 현실시장에서 소비자들의 행동을 결정하는 유형과 유사한 양분선택형 질문법(dichotomous choice)을 사용했다. 양분선택형 질문법은 미리 설정된 제시금액을 “공공재 공급의 대가로 지불할 용의가 있는가”라고 물어보면, 응답자가 “예/아니오”로 한번만 대답하는 방식이다. 양분 연구에서는 「예비타당성조사를 위한 CVM 분석지침 개선 연구」(KDI, 2012)에 근거하여 설문은 특정 제시금액에 대하여 “예/아니오”를 응답한 후 “예”라고 응답한 경우에는 제시금액의 2배, “아니오”라고 응답한 경우에는 제시금액의 1/2배를 다시 질문하는 이중경계모형으로 작성한 후 최종적인 분석은 단일경계모형을 활용하였다.

양분선택형 질문에서는 제시금액의 설정이 중요하다. 제시금액은 최종적으로 얻고자 하는 WTP의 평균값에 민감한 영향을 미칠 수 있으므로 세심한 주의를 기울여 결정하여야 한다. 본 연구에서는 실제 설문조사에 들어가기 전에 30명을 대상으로 사전조사(pretest)와 CVM을 적용하여 하천수질개선편익을 산정한 기존 연구사례들을 바탕으로 1,000원/2,000원/3,000원/4,000원/6,000원/8,000원/10,000원 총 7개의 초기 제시금액을 세심하게 결정하였다. 이렇게 결정된 금액을 전체 응답자를 무작위로 구분한 7개 그룹에 각각 할당하였다.

#### 3.3 설문방법 및 표본의 설정

본 연구는 댐 추가방류와 이로 인한 녹조저감 및 수질개선을 내용으로 담고 있기 때문에 일반 응답자들이 쉽게 이해하기 어려울 수 있다. 이에 본 연구에서는 전문적인 설문조사기관에 의뢰하여 조사원이 조사대상 가구를 직접 방문해 대인면접(Face to Face Interview)방식으로 설문조사를 시행하였다. 조사원은 설문지와 피면접원의 이해를 돕기 위한 ‘설명 및 보기카드’를 이용해, 지시된 순서에 따라 직접 조사를 진행하는 것을 원칙으로 세웠다.

또한 설문조사 대상지역은 전국을 대상으로 각 시·도별 인구와 가구 구성비를 고려하여 각 나이의 비율에 맞게 표본 수를 할당하였다. 그리고 무작위 추출된 총 1,000가구의 설문결과를 얻을 수 있었다. 설문조사는 제주도를 제외한 전국 15개 광

1) 평균 클로로필-a 계산 시 댐 방류수 외의 추가적인 요인을 제외하기 위하여 집중강우 사상을 제외하였으며, 방류시점에 따른 수질 개선효과의 편차를 최소화하기 위하여 2005년 이후 10년간의 자료를 활용하였다.

역지방자치단체 지역에 대해 2015년 10월에 전문조사업체의 주관으로 실시되었다. 책임 있는 가구의 의견에 대한 정보를 도출하기 위해 조사대상은 소득이 있는 가구 중에서 만 20세 이상 65세 이하의 세대주 또는 세대주의 배우자로 한정하였다.

### 3.4 베이지안 추정법을 통한 WTP 모형

본 연구의 분석방법인 베이지안 추정법은 통상적인 MLE와 근본적 차이를 갖는다. 베이지안 접근에서는 확률을 지식이나 개인적인 믿음의 정도를 나타내는 것으로 본다. 반면 전통적인 관점에서 확률은 어떤 사건의 발생 빈도를 나타낸다. 베이지안 접근에서는 모수를 주관적인 확률변수로 보기 때문에, 모수는 고정된 값이 아니라 확률이다. 반면 전통적 분석에서는 모수는 고정된 미지수이다. 베이지안 접근에서 주된 관심은 모수의 사후적 분포에 있으나, 전통적 방법론에서는 추정치의 불편성(unbias), 일치성(consistency) 등에 관심이 높다.

베이지안 분석은 미지의 모수에 대한 사후적 결합분포에서 개별 모수의 사후 분포를 얻어내야 한다. 그러나 미지의 모수들의 결합분포가 복잡하여 사후 분포를 도출하기 어려울 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 깁스 샘플링(Gibbs Sampling, GS) 방법을 활용하여 모수의 사후 분포를 도출하고자 한다. GS 방법론은 모수들의 사후적 결합분포에서 랜덤샘플을 생성하기 어려울 때, 각 모수의 조건부확률분포로부터 랜덤샘플을 반복적으로 생성하는 방법이다. 이를 통해 추출된 랜덤샘플이 충분히 많을 경우, 이를 활용하여 각 모수의 사후 분포의 평균 및 모수들 간의 분산-공분산을 쉽게 산정할 수 있다. 한편 연속변수인 WTP가 CVM에서는 구간자료로 관측되는데 이 경우 Tanner and Wong (1987)이 제안한 자료확장(Data Augmentation, DA) 방식을 이용하여 구간변수를 처리하였다.

GS 방법론을 활용한 베이지안 추정법의 적용절차는 다음과 같다. 먼저 잠재변수인 각 응답자의 WTP를  $Z = (z_1, \dots, z_n)'$ 로 정의한다. 이 변수들은 관측 불가하지만 시뮬레이션 과정을 통해 필요한 자료들을 확장해 낼 수 있다. 제시금액에 대하여 예/아니오로 응답한 결과를  $Y = (y_1, \dots, y_n)'$ 라 하고 WTP식의 추정계수들을  $\theta = (\beta, \sigma^2)$ 로 정의하는 경우, 여기에 사용되는 사후적 확률  $\pi(\theta | Y, Z)$ 와 잠재 WTP의 조건부 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)인  $f(z_i | Y, \theta)$ 로 표현된다. 모형 내 모수들이 독립적이라면  $\theta$ 의 분포는 다음 Eq. (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \beta | \sigma^2 &\sim N(\beta_0, \Sigma_0) \\ \sigma | \beta^2 &\sim IG(v_0/2, \delta_0/2) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $N$ 과  $IG$ 는 각각 정규분포와 역감마분포(inverted gamma distribution)를 의미한다. GS는 다음과 같이 진행된다. 통상적인 WTP 추정식  $z_i = x_i\beta + u_i$ 로부터 정규분포를 따르는 잠재변수  $z_i$ 를 얻어낼 수 있으며,  $z_i \sim N(x_i\beta, \sigma^2)$ 로 정의된다. 여기서  $x_i$ 는 공변량 벡터를 의미한다.

CVM 모델에서의 GS 추출물은 다음 Eq. (2)를 통해 정의된다.

$$f(z_i | Y, \theta) = \begin{cases} f_N(z_i | x_i' \beta, \sigma^2) I(B_i, \infty), & \text{if } y_i = 1 \\ f_N(z_i | x_i' \beta, \sigma^2) I(0, B_i), & \text{if } y_i = 0 \\ 0 & \text{if } WTP = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\pi(\beta | Y, Z, \sigma^2) = f_N(\beta | \hat{\beta}_z, V)$$

$$\pi(\sigma | Y, Z, \beta) = f_{IG}(\sigma | v_1/2, \delta_1/2)$$

여기서  $I[a, b]$ 는  $z_i$ 가 구간  $[a, b]$ 의 내부에 있는지 여부를 나타내는 지시함수(indicator function)이며,  $f_N(\cdot | \mu, \sigma^2) I[a, b]$ 는 구간  $[a, b]$ 에 대해 절단된 정규분포 PDF를 의미한다. 그리고  $f_{IG}$ 는 역감마분포의 PDF를 의미한다.

한편  $\Sigma_1 = \sigma^2 (X'X)^{-1}$ ,  $\beta_1 = (X'X)^{-1} X'Z$ ,  $X = (x_1, \dots, x_n)'$  일 때, 사후적 평균과 분산행렬은  $\hat{\beta}_Z = (\Sigma_0^{-1} + \Sigma_1^{-1})^{-1} (\Sigma_0^{-1}\beta_0 + \Sigma_1^{-1}\beta_1)$ 과  $V = (\Sigma_0^{-1} + \Sigma_1^{-1})^{-1}$ 이 되며,  $v_1 = v_0 + n$ ,  $\delta_1 = \delta_0 + (Z - X\beta)'(Z - X\beta)$ 이 성립한다.  $\theta$ 의 초기값을  $\theta^{(0)} = (\beta^{(0)}, \sigma^{2(0)})$ 라 하면, CVM 모델의 GS 알고리즘은 다음 3개 시뮬레이션을 통해 정의된다.

$$\begin{aligned} Z^{(1)} &\text{ from } f(z_i | Y, \beta^{(0)}, \sigma^{2(0)}) \\ \beta^{(1)} &\text{ from } f(\beta | Y, \sigma^{2(0)}, Z^{(1)}) \\ \sigma^{2(1)} &\text{ from } f(\sigma^2 | Y, Z^{(1)}, \beta^{(1)}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $Z^{(1)}$ 은 시뮬레이트된  $z_i$ 로 이루어진  $n \times 1$  벡터이며, 이를 시뮬레이트 하기 위해 본 연구에서는 Geweke (1991)이 제시한 Accept-rejection method를 이용하였다. 또한 Eq. (3)으로 이루어진 행렬의 추출을  $t$ 번 반복하면, 결합분포  $(Z, \beta, \sigma^2 | Y)$ 로부터 1개의 시뮬레이션 추출물  $(Z^{(t)}, \beta^{(t)}, \sigma^{2(t)})$ 을 얻을 수 있다. 이렇게  $t$ 번 반복한 후에 다시  $G$ 번을 반복하면 사후적 분포로부터  $G$ 개의 추출행렬  $\{Z_g^{(t)}, \beta_g^{(t)}, \sigma_g^{2(t)}\}_{g=1}^G$ 을 얻게 된다. 이  $G$ 개의 결과에 근거하여 표본평균과 신뢰구간을 계산할 수 있다. 즉, 앞에서  $t$ 번 반복한 결과는 버리고 뒤에서  $G$ 번 반복한 결과만 취한다. 예를 들어,  $\theta$ 의 추정치  $\theta^*$ 를 다음 Eq. (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta^* = (\beta^*, \sigma^{2*}) = \left( \sum_{g=1}^G \beta_g^{(t)} / G, \sum_{g=1}^G \sigma_g^{2(t)} / G \right) \quad (4)$$

평균 WTP는 다음 Eq. (5)를 통해 구할 수 있다.

$$\overline{WTP} = \frac{1}{G \times N} \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^N z_{ig}^{(t)} \quad (5)$$

## 4. 분석 결과

### 4.1 WTP의 추정결과

분석에 앞서 응답자의 사회·경제적 특성에 대한 통계적 특성을 제시하였다. 응답가구의 월평균 소득은 414.5만원이고 응답자의 교육수준은 전문대졸 이상, 연령은 45.4세로 나타났다. 한편 전체 응답가구의 53%가 수도권에 거주하는 것으로 나타났다.

CVM과 관련된 대부분의 실증연구에서는  $\theta$ 에 대한 정보를 얻기가 어렵다. 이 경우 통상 ‘무정보 사전분포(noninformative prior)’를 가정한다. 본 연구에서는 무정보 사전분포인  $(\beta_0, \Sigma_0) = (0, 10^7 I_5)$ 와  $(v_0, \delta_0) = (0, 0)$ 을 이용한다. 여기서  $I_5$ 는 5차원 항등행렬을 의미한다.  $\theta$ 의 초기값이 주어져 있을 때, 한 사이클의 GS 알고리즘은 식(2)로부터  $Z$ 와  $\theta$ 를 만들어 낸다.  $\theta$ 에 대한 초기값  $\theta^{(0)}$ 로는 ML 추정치를 설정하였다. 그리고 초기값의 영향을 배제하기 위해 처음 5,000번의 시물

레이션 결과는 사용하지 않았다. 즉, GS 추출물  $\{\theta_g^{(t)}\}_{g=1}^G$ 는  $G=10,000, t=5,000$ 로 상정하였다.

그 결과 댐방류수를 위한 응답자들의 WTP의 사후평균은 약 1,909원으로 산출되었다. 평균 WTP의 95% 신용구간(credible region)은 1,833.2원에서 1,972.5원으로 나타나 본 연구의 추정치가 이 구간 내 있을 확률은 95%로 볼 수 있다.

한편 Table 3에서 보는 바와 같이, 응답자의 사회·경제적 변수들은 소득과 서울, 경기변수를 제외한 다른 변수들의 경우 95% 신용구간에 0이 포함(overlap)되는 것으로 나타났다. 이는 이들 변수들의 추정치가 사후평균 근방에 있을 확률이 95% 미만임을 의미한다. 그리고 이는 전통적인 방식의 추정 결과 해석 경우라면, 5% 수준에서 통계적으로 유의하지 않은 것과 유사하게 해석될 수 있다. 또한 소득과 서울·경기지역의 응답자의 경우 사후평균이 양수로 도출되었고, 95% 신용구간에 0이 포함되지 않으므로, 소득이 높은 응답자일수록, 서울·경기지역의 응답자일수록 댐의 추가방류에 평균적으로 더 높은 WTP를 보이는 것으로 해석할 수 있다.

Eq. (3)을 통해 생성된 랜덤샘플들에 대한 Trace Plot을 살펴보면 각 변수들의 사후분포에서 추출된 샘플들은 빠른 속도로 평균값들을 중심으로 생성되기 시작하여 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 즉, Table 3에 제시된 평균값들을 중심으로 각 변수들의 샘플들은 수렴한 것을 알 수 있다. 특히, 소득, 서울 및 경기,  $\sigma$ , 평균 WTP는 평균값을 중심으로 모두 양수에서 추출되었으며, 상수항의 경우 거의 대부분의 샘플들이 양수에서 추출되었다.

Table 2. Statistics of respondents' socio-economic variables

Variables	Definition of variable	Mean	Standard deviation
Income	Household income per month (Unit: 10,000 won)	414.54	185.16
Education	Educational level of respondents (Unit: year)	14.08	2.33
Age	Age of respondents (Unit: year)	45.42	9.70
Seoul and Gyeonggi	Dummy for living in Seoul and Gyeonggi-do (1 = yes, 0 = no)	0.53	0.50

Table 3. The estimation results

Variable	Posterior mean	Standard deviation	95% credible region
Constant	717.8487	307.8942	[120.4352 - 1,324.5621]
Income	1.2998	0.1849	[0.9490 - 1.6721]
Education	15.5978	15.4276	[-14.7489 - 46.0199]
Age	-6.1876	3.5949	[-13.2352 - 0.8164]
Seoul and Gyeonggi	1,337.6695	65.0339	[1,207.7683 - 1,469.5673]
$\sigma$	2,786.436	78.8692	[2,638.0001 - 2,943.1982]
Mean WTP	1,909.3620	36.5558	[1,833.1882 - 1,972.4943]

한편 본 연구에서는 기존 CVM 연구에서 적용하는 MLE 추정을 통해 평균 WTP를 추정하였다. 그 결과 가구당 평균 WTP는 3,350.6원으로 도출되었으며, 95% 신뢰구간의 하한은 2,882.6원, 상한은 3,882.8원으로 도출되었다. 이는 본 연구에서 베이지안 방법론을 활용하여 산정한 평균 WTP보다 크며, 95% 신뢰구간 역시 본 연구에서 산정한 WTP의 신뢰구간과 겹치지 않는다. 따라서 본 연구에서 산정한 평균 WTP는 방법론에 따라 통계적으로 유의하게 다른 것으로 간주할 수 있다.

CVM 연구는 설문조사를 통해 응답자의 선호를 유추하는 방식이기 때문에 다양한 편익(bias)가 존재한다. 따라서 WTP 추정에 있어서 보수적인 접근이 필요하며, WTP 추정 방법론을 보다 유연하게 적용할 필요가 있다(Boman et al., 1999; Lee and Choi, 2013). 이러한 관점에서 보수적인 WTP 추정치를 제공하는 베이지안 방법론을 통해 추정된 평균 WTP가 전통적인 MLE 추정방식으로 추정된 평균 WTP보다 정책적으로 보다 적절한 추정치라 할 수 있다.

#### 4.2 모집단으로의 확장

본 연구는 설문전문기관을 통하여 모집단인 전국의 가구를 대표할 수 있도록 정교하게 표본을 설정하였기 때문에 표본을 대상으로 도출된 충주댐 추가방류의 가구당 연간 WTP 추정치에 설문시점의 전국 가구 수(18,705,004가구)를 곱해 주면 충주댐 추가방류를 통한 조류저감 효과의 연간 총편익을 측정할 수 있다. 전국의 가구 수는 통계청 홈페이지의 통계데이터베이스인 KOSIS의 2015년 추계치를 활용하였다. 이렇게 우리나라 전체가구로 확장한 결과는 충주댐 추가방류의 경제적 가치는 연간 357.1억 원에 달한다. 한편 이렇게 도출된 연간 총편익을  $m^3$ 당 편익으로 환산하게 되면 충주댐 추가방류( $187.1 m^3/s$ )에 대한 편익은 6.05원/ $m^3$ 이다.

## 5. 결론

본 연구는 전국의 1,000가구를 대상으로 충주댐의 추가방류를 현재보다 200% 증가시켰을 경우를 가정하여 댐 추가방류의 사회적 편익 즉, 조류저감 효과를 산정하였다. 분석결과 가구당 연간 WTP는 1,909.4원으로 이를 연간 총편익으로 계산하면 357.1억 원, 6.05원/ $m^3$ 이다.

본 연구의 결과는 정책적 측면과 학술적 측면에서 다음과 같은 시사점을 제공한다. 우선 정책적 측면에서 충주댐을 추가방류하게 되면 이로 인해 남한강과 남한강 하류 이하의 한

강에서 발생하는 조류가 저감되고 수질개선의 효과를 기대할 수 있다. 이러한 댐 추가방류의 사회적 편익은 한강수계에서 용수를 활용하는 지역주민에게 사용가치의 측면에서 만족도를 개선시킬 뿐만 아니라 비지역주민에게도 비사용가치의 측면에서 만족도를 개선시킬 수 있음을 의미한다. 이러한 분석 결과는 댐의 추가방류를 위해 소요되는 제반 비용 대비 그 효과의 크기를 분석하는데 정량적인 자료를 제공한다는 점에서 의의가 있다. 특히 댐 추가방류의 효과를 직접적인 사용가치만 반영한 것이 아니라 비사용가치를 포함한 사회적 편익을 산정하였다는 측면에서 의의가 있다.

한편 이 분석결과는 충주댐에 한하여 방류량을 현재 연평균 방류수준의 200% 수준으로 증가시켰을 경우에 근거하기 때문에 충주댐의 방류량을 200% 수준보다 많이 증가시킬 경우 다른 댐에서 방류할 경우 그 효과가 상이하기 때문에 조건이 다를 경우 댐 추가방류의 가치는 상이할 수 있다.

또한 학술적 측면에서 본 연구는 기존 CVM 연구문헌들과 달리 베이지안 추정법을 활용하였다. 베이지안 추정법은 MLE와 근본적인 차이가 있다. 고전적인 접근법인 MLE는 객관적이며 상대적인 빈도에 대한 극한값의 관점에서 확률을 정의하지만 베이지안 분석법은 추정해야 할 모수(parameter)를 확률변수로 간주하며 이 확률이 주관적임을 가정한다. 따라서 베이지안 추정법의 분석접근방법과 체계는 고전적인 MLE와 근본적으로 상이하다. 그러나 분석과정의 복잡함으로 베이지안 추정법을 활용한 연구가 많지 않은 상황이다. 이러한 관점에서 향후 베이지안 접근법을 활용한 CVM 분석에 본 연구가 기여할 것으로 기대된다.

## References

- Arrow, K., Solow, R., Portney, P. R., Leamer, E. E., Radner, R., and Schuman, H. (1993). "Report of the NOAA panel on contingent valuation." *Federal Register*, Vol. 58, pp. 4601-4614.
- Atkins, J. P., Burdon, D., and Allen, J. H. (2007). "An application of contingent valuation and decision tree analysis to water quality improvements." *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 55, pp. 591-602.
- Brox, J. A., Kumer, R. C., and Stollery, K. R. (2003). "Estimating willingness to pay for improved water quality in the presence of non-response bias." *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 85, No. 2, pp. 414-428.
- Gelfand, A. E., Hills, S. E., Racine-Poon, A., and Smith, A. F. (1990). "Illustration of Bayesian inference in normal data models using Gibbs sampling." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 85, No. 412, pp. 972-985.
- Genius, M., Hatzaki, E., Kouromichelaki, E. M., Kouvakis, G., and

- Nikiforaki, S. (2008). "Evaluating consumers' willingness to pay for improved potable water quality and quantity." *Water Resources Management*, Vol. 22, No. 12, pp. 1825-834.
- Geweke, J. (1991). "Efficient simulation from the multivariate normal and student-t distributions subject to linear constraints and the evaluation of constraint probabilities." *In Computing science and statistics: Proceedings of the 23rd symposium on the interface*, pp. 571-578.
- Hanemann, W. M. (1984). "Welfare evaluations in contingent valuation experiments with discrete responses." *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 66, pp. 332-341.
- Hanemann, W. M., and Kanninen, B. J. (1999). "The statistical analysis of discrete-response CV data", in Bateman, I. J., and Willis, K. E. (Eds.), *Valuing Environmental Preferences: Theory and Practice of the Contingent Valuation Method in the US, EU, and Developing Countries*. Oxford, Oxford University Press.
- Korea Development Institute (2012). Guideline of Contingent Valuation Method for Preliminary Feasibility Studies, Public and Private Infrastructure Investment Management Center.
- Krinsky, I., and Robb, A. L. (1986). "On approximating the statistical properties of elasticities." *Review of Economics and Statistics*, Vol. 68, pp. 715-719.
- Krström, B. (1997). "Spike models in contingent valuation." *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 79, pp. 1013-1023.
- Lee, J. S., Yoo, S. H., and Kwak, S. J. (2007). "Measuring the economic benefits of water quality improvement of Nakdong-river -using one one-half bound dichotomous choice model." *Economic Review*, Vol. 25, No. 2, pp. 111-129 (in Korean).
- Lee, S. B. (2002). "An empirical study on the environmental facilities management utilizing the water quality improvement value." *The Korea Spatial Planning Review*, Vol. 34, pp. 45-60 (in Korean).
- Raje, D. V., Dhobe, P. S., and Deshpande, A. W. (2002). Consumer's willingness to pay for municipal supplied water: a case study." *Ecological Economics*, Vol. 42, pp. 391-400.
- Shin, Y. C. (1997). "Measuring the benefits of water quality improvement in Han River using CV data from a DCF Questionnaire." *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 6, No. 1, pp. 33-39 (in Korean).
- Tanner, M. A., and Wong, W. H. (1987). "The calculation of posterior distributions by data augmentation." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 82, No. 398, pp. 528-540.
- Yoo, S. H. (2002). "Using bayesian estimation technique to analyze a dichotomous choice contingent valuation data." *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 11, No. 1, Vol. 99-120 (in Korean).