

최적제어 이론을 이용한 댐 토사관리방안 : 이집트 아스완 댐 사례

이 윤¹⁾·김동엽²⁾*

An Optimal Control Theory on Economic Benefits of Dam Management:
A Case of Aswan High Dam in Egypt

Yoon Lee and Dong-Yeub Kim

1) 한국환경정책·평가연구원(Korea Environment Institute)

2) 경희대학교 무역학과(Department of International Business and Trade, Kyung Hee University)

제 출 : 2010년 3월 11일

승 인 : 2010년 6월 11일

국 문 요 약

댐은 사회전반에 걸쳐 많은 편익을 제공하고 있다. 이를 위해서는 일정수준 이상의 저수용량 확보가 필수적이다. 그러나 상류의 토사 유입으로 인하여 댐의 저수용량은 줄어들고 있는 실정이다. 전 세계적으로 5조 톤의 토사가 매년 댐 뒤에 쌓이는 실정이다. 강이 여러 지역에 걸쳐 흐르는 경우 상류의 농업에서 발생하는 토사는 장시간에 걸쳐서 지속적으로 발생하기 때문에 상류 농업종사자들은 관리를 소홀히 하는 경향이 있다. 특히 토사는 댐의 저수용량을 지속적으로 줄여 궁극적으로는 댐의 경제적 가치를 소멸시키는 효과가 있다. 따라서 상류 지역의 토사저감 노력과 함께 댐의 저수용량 확보가 급선무이다. 실증분석으로 나일강 상류의 수단 농업지역과 하류의 이집트 Aswan High Dam을 분석하였다. 실증분석 결과 상류 농업부문의 토사저감 노력과 댐의 토사제거 방안이 사회전체의 경제적 편익을 극대화하는 것으로 나타났다. 동태적 최적제어이론을 이용한 유역토사관리 모형에서 댐의 경제적 편익을 포함한 사회전체의 편익은 크기는 약 1,510억 달러로 추산되었다.

■ 주제어 ■ 최적제어 이론, 댐관리, 지속가능성, 토사관리

Abstract

This paper analyzes optimal watershed management focusing on reservoir-level sediment removal techniques. Although dams and reservoirs provide several benefits, sedimentation may reduce their storage capacity. As of today, the Aswan High Dam (AHD) in Egypt faces approximately 76% reduced life of the reservoir. Since the AHD is the major fresh water source in Egypt, sustainable use of this resource is extremely important. A model is developed to simultaneously determine optimal sediment removal strategies for upstream soil conservation efforts and reservoir-level sediment control. Two sediment removal techniques are considered: mechanical dredging and hydro-suction sediment removal

* 교신저자 : dykim@khu.ac.kr

** 본 논문은 2010년 경제학공동학술대회 자원경제학 분과에서 발표한 내용을 보완·수정한 것임.

system (HSRS). Moreover, different levels of upstream soil conservation efforts have introduced to control soil erosion, which is a major contributor of reservoir storage capacity reduction. We compare a baseline case, which implies no management alternative, to non-cooperative and social planners' solution. Our empirical results indicate that the socially optimal sediment removal technique is a mechanical dredging with unconstrained amount with providing a sustainable life of the reservoir. From the empirical results, we find that social welfare can be as high as \$151.01 billion, and is sensitive to interest rates and agricultural soil loss.

▣ **Keywords** ▣ Optimal Control, Dam Management, Sustainability, Sedimentation

I. 서 론

강을 이용한 경제활동은 인간에게 여러 가지 효용을 제공하는 측면이 있으나 반대로 환경이나 사회경제적으로 외부효과를 불러 일으켜 손실을 주기도 한다. 대표적인 예로 농경지 경작과 댐 건설을 들 수 있다. 인구증가와 소득수준의 향상으로 인하여 농작물에 대한 수요는 계속 증가하기 때문에 안정적인 수자원 확보를 위한 댐 건설은 필수 불가결한 사항이다. 상류에 댐이 위치하여 하류의 농경지에 지속적으로 물을 공급하는 것이 일반적이거나 강이 여러 지역에 걸쳐있는 경우는 상류의 경작지가 하류의 댐 저수량에 영향을 준다. 이는 농경지 증가에 따른 토사 유실로 하류 댐의 저수용량을 줄이는 부정적인 효과를 가져오기 때문이다. 전 세계적으로 매년 5조 톤의 토사가 댐에 쌓이고 있고 아시아의 경우는 토사로 인한 댐의 저수능력 감소로 경제적인 손실이 연간 75억에서 160억 달러 발생하는 것으로 추산되고 있다(Barbier, 1996). 또한 Ribaudo and Johansson(2006)의 연구에서 밝힌 것과 같이 농업에서의 토사 유입이 댐에 막대한 영향을 주고 있고 댐 저수지의 수질에까지 영향을 주고 있는 실정이다. 다목적 댐의 경우 저수능력의 상실은 물 공급뿐만 아니라 홍수 조절과 수력발전 능력의 저하를 가지고 올 수 있는데 아직까지 이 분야에 대해서 활발한 연구가 이루어지고 있지 않는 실정이다. 우리나라의 경우 강우시 토사로 인하여 하천의 탁도가 높아진다는 보고는 많으나 댐의 저수능력과 상관계에 대한 연구는 미미한 실정이다.

대표적인 연구인 Palmieri et al.(2003)와 Kawashima et al.(2003)의 세계은행(World Bank) 보고서에서 보듯이 댐의 토사 준설은 경제적인 가치가 있을 뿐만 아니라 지속 가능한 댐의 이용에 있어서도 상당한 기여를 하는 것으로 나타났다. 그러나 Southgate and Macke(1989)가 언급한 것과 같이 댐의 토사 준설보다는 상류에서의 토사 유실 감소 노력

이 더 경제적이고 효과적이라는 의견도 있다. Pattanapanchai(2005)는 이 두 가지 의견을 반영하여 통합적인 댐 관리 모형을 중국의 삼협댐(Three Gorges Dam)과 인도네시아의 Wonogiri Dam에 적용하여 분석하였다. 이 연구에서 댐 수준의 토사제거 기술 중 Flushing의 경우는 토사를 방류하기 위한 별도의 시설을 설치하여야 하기 때문에, 설계 단계에서 Flushing이 고려되지 않으면 댐이 완공된 이후에는 이 기술을 적용하는 데는 기술적인 한계가 있어 모든 다목적 댐에 적용하는 것은 무리가 있는 것으로 보고 있다. 또한 다목적 댐이 가지고 있는 수력발전에 대한 효용은 연중 하천유지 용수를 위해서 방류할 때 자연적으로 발생한다고 판단하여 댐의 경제적 수명 및 steady-state 조건을 달성하기 위한 요소에 별다른 영향을 주지 않기 때문에 분석의 편의상 제외하였다. Kawashima (2007)는 확률적인 접근을 통하여 강에 여러 개의 댐이 존재할 때 상류 댐에서의 토사 관리가 하류 댐에 미치는 영향을 분석하여, 상류 댐이 수명 연장을 위해서 토사를 방류하는 것이 하류 댐의 경제적 수명에 외부효과를 주기 때문에 정책결정자 입장에서는 상류와 하류 댐을 동시에 고려한 토사 방류 계획을 수립해야 한다고 밝혔다.

현재까지 전 세계적으로 15미터 이상의 대규모 다목적 댐은 45,000개가 존재하고 앞으로 도 이용 가능한 수자원 확보를 위해서 계속 건설될 전망이다(World Commission of Dams, 2000). 따라서 댐 관리뿐만 아니라 유역관리의 중요성은 증대되고 있는 실정이다. 상류에서 유입되는 토사를 관리하지 않을 경우 댐의 저수 용량은 지속적으로 감소할 것이다.

수자원은 재생 불가능한(nonrenewable) 자원으로 보고 최적제어 이론(Optimal Control Theory)을 이용하여 동태적인 수자원 이용 가능량을 추정할 수 있다. 따라서 본 연구는 최적제어 이론을 바탕으로 댐의 토사 관리 방안을 실증분석하였다. 국내 토사자료의 한계성 때문에 이집트의 Aswan High Dam(AHD)의 경우를 분석하였다.

연구의 구성은 제Ⅱ장에서 동태적 최적 모형을 설명하고 제Ⅲ장에서는 AHD의 경제적 변수 및 수리적 변수를 설명하고 추정된 생산함수 및 비용변수를 제시하였다. 그리고 제Ⅳ장에서는 실증분석 결과를 설명하였다. 마지막으로 본 연구의 결론 및 정책적 시사점과 연구의 한계점에 대해서 언급하였다.

Ⅱ. 모형

동태적 최적제어 모형(Dynamic Optimization)은 자원경제학에서 재생 불가능한 자원의

이용에 있어 외부의 요인 등으로 인하여 자원의 양이 시간에 따라 감소할 경우에 일반적으로 사용된다. 댐의 저수용량 또한 이와 마찬가지로 토사관리를 하지 않을 경우, 그 용량이 지속적으로 감소하는데, 토사 제거량의 최적점을 분석하기 위해서는 동태적 최적제어 모형 설정이 필수적이다. 동태적 최적제어 모형의 기본 구성은 상류의 농업편익과 하류 댐의 저수용량 편익으로 구분하였다. 본 연구는 하류 댐의 지속 가능한 저수용량의 정상상태 (steady-state) 조건을 찾는 것에 있다.

1. 상류 농업의 순편익

농업의 순편익 산정을 위해서 다음과 같은 가정을 하였다. 상류의 농민은 곡물만을 생산한다. 곡물생산함수뿐만 아니라 비용 함수를 고려해야 순편익을 산정할 수 있기 때문에, 비료비용과 토지 경작에 따른 토사 유실 방지 비용을 고려하였다. 토사 유실은 표토의 영양분을 제거하는 효과가 있어 농업 종사자는 토사 유실 방지 노력을 할 것이다. 따라서 본 모형에서는 McConnell(1983)의 방법론을 기초로 하여 곡물의 생산량을 표토의 두께와 토사 유실 방지 노력, 그리고 생산요소의 함수로 다음 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$(1) \quad \underset{E, F}{\text{Max}} \quad NBUF = \int_{t=0}^{T_1} \eta_1 \cdot NR_t(P_c, C_t, D_t, E_t, F_t, Z_t) e^{-rt} dt + \eta_1 \cdot SV_L e^{-rT_1}$$

$$\text{subject to:} \quad \frac{dD}{dt} = \dot{D} = -L_t = -(\bar{L} - E_t)$$

$$0 \leq D \leq A$$

여기서 NBUF는 상류 농업종사자들의 평생의 순편익이고, η_1 는 총경작면적이고, NR는 정보당 총이익함수로서(= $P_c \cdot Y(D, E, F, Z) - C_e \cdot E - C_f \cdot F - C_z \cdot Z$)이며¹⁾, P_c 는 곡물의 평균 가격이다. Y 는 정보당 곡물의 생산량이고, F 와 Z 는 각각 비료와 생산투입 요소의 사용량을 나타낸다. C_e 는 연간 토사유실저감 노력 비용이고, C_f 와 C_z 는 각각 비료와 생산투입요소의 가격이고, L 과 \bar{L} 는 각각 정보당 연간 총토사 유실량과 그 최대값이다. E

1) 생산량은 다음과 같이 반응한다고 가정한다. $\frac{dY}{dD} > 0, \frac{dY}{dE} \geq 0, \frac{dY}{dF} \geq 0$

는 토사유실저감 노력을 나타내며, D 는 표토의 두께이고, SV_L 는 표토가 완전히 유실될 때의 농장의 잔존가치, A 는 초기의 토양 깊이를 말하고, T_1 는 상류 농업의 최종 연한이다.

2. 댐의 저수용량 편익

댐의 저수용량은 이용 가능한 저수량(reliable water yield)과 현재 이용되고 있는 저수량(active storage capacity)의 관계를 보여주는 Gould-gamma식을 이용하여 산정하였다(Kawashima et al., 2003). 본 모형에서는 댐의 편익은 용수 공급편익과 수력 발전편익으로 구성하였다. 따라서 물의 가격은 농업용수 가격과 수력발전 이용가격으로 보고 다음과 같이 댐의 총편익을 표현하였다.

$$(2) \quad \text{Max}_X \text{ ADB} = \int_{t=0}^{T_2} \{P_w \cdot W_t(S_t) - C_x \cdot X_t - \text{OMC}\} e^{-rt} dt + SV e^{-rT_2} - IC$$

$$\text{subject to: } M_t = M_1 + M_2$$

$$\frac{dS}{dt} = \dot{S} = -M_t + X$$

$$S_0 = \bar{S}$$

$$S_{T_2} = 0$$

$$0 \leq X_t \leq X_{\max}$$

여기서 ADB는 댐의 총편익이고, P_w 는 농업용수 및 수력발전 공급가격이며, $W_t(\cdot)$ 는 댐의 활용 가능한 저수용량 관계식을, S_t 는 t 시점의 댐의 남아있는 저수용량, C_x 는 톤당 토사제거 비용, X_t 는 토사제거 용량, OMC는 연간 댐 운영비용, r 은 할인율, SV 는 댐의 잔존 비용을 각각 나타낸다. 그리고 IC 는 댐의 건설비용이나, 기존 댐일 경우는 이 비용이 0이 된다. M 은 연간 총 토사퇴적량이며 이를 상류 농업에서 발생하는 토사(M_1)와 자연적으로 발생하는 토사(M_2)로 구분할 수 있다. X_{\max} 는 최대 토사제거량이 된다. 만일 준설(dredging)을 통하여 토사를 제거한다면 $X_{\max} < M$ 일 경우는 댐의 수명은 지속적일 수 없다. 이는 T_2 시점에서 결정된다. 그러나 $X_{\max} \geq M$ 일 경우 T_2 시점은 안정성에 문제가 없다면 무한대로 증가할 수 있다. 마지막으로 \bar{S} 는 분석시점에서의 댐의 활용 가능한 저수용량이다.

3. 최적제어 모형

앞에서 설명한 상류 농업종사자의 경우는 농업이익을 극대화하기 위해서 토사저감 노력을 하더라도 하류 댐의 저수용량 감소를 고려하지 않은 경작을 할 것이다. 즉 상류농업은 하류 댐에 토사유출이라는 외부경제효과를 발생시킬 것이다. 그러나 사회 전체의 입장에서는 상류의 농업이익뿐만 아니라 하류 댐의 저수용량까지도 고려해야 한다. 최적제어 모형을 도출하기 위해서 상류 농업생산자의 총편익 식 (1)과 댐의 총편익 식 (2)를 동시에 고려하여 사회총편익 함수를 구성하고 제약식으로 식 (1)과 식 (2)의 운동방정식(equation of motion)을 이용하여 다음과 같은 식 (3)을 도출한다.

$$(3) \quad \begin{aligned} \text{Max}_{E, X, F} SB = & \int_{t=0}^{T_1} \eta_1 NR_t(D_t, E_t, F_t) e^{-rt} dt + \int_{t=0}^{T_2} \{P_w W_t(S_t) - C_x X_t - OMC + \} e^{-rt} dt \\ & + \eta_1 \cdot SV_L(D_T) e^{-rT_1} + SV e^{-rT_2} - IC \end{aligned}$$

$$\text{subject to: } \frac{dD}{dt} = \dot{D} = E_t - \bar{L}$$

$$0 \leq D \leq A$$

$$M_t = M_1(E_t) + M_2 \quad (\partial M_t / \partial E_t \leq 0)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \dot{S} = -M(E_t) + X_t$$

$$S_0 = \bar{S}$$

$$S_T = 0$$

$$0 \leq X_t \leq X_{max}$$

연구모형은 사회 전체의 효용을 극대화하는 것이고 이를 위한 Hamiltonian 함수는 다음 식 (4)와 같이 정리된다.

$$(4) \quad \begin{aligned} H = e^{-rt} \{ & P_w \cdot W_t(S_t) - C_x \cdot X_t - OMC + \eta_1 \cdot NR_t(D_t, E_t, F_t) \} \\ & + \lambda(-M + X_t) + \tau(E - L_{max}) \end{aligned}$$

식 (4)는 X 에 대해서 일차선형함수이므로 제1차 미분방정식은 다음과 같이 도출된다.

$$H_X = \frac{dH(t)}{dX(t)} = -C_x e^{-rt} + \lambda > 0, \text{ then } X_t = X_{\max}$$

$$H_X = \frac{dH(t)}{dX(t)} = -C_x e^{-rt} + \lambda = 0, \text{ then } 0 < X_t < X_{\max}$$

$$H_X = \frac{dH(t)}{dX(t)} = -C_x e^{-rt} + \lambda < 0, \text{ then } X_t = 0$$

또한 E 에 대한 제1차 미분방정식과 공동변수(co-state variable)는 다음과 같이 도출된다.

$$H_E = \frac{\partial H(t)}{\partial E(t)} = e^{-rt} \eta_1 \{P_c \cdot Y_E - C_e\} - \tau = 0$$

$$H_E = \frac{dH(t)}{dE(t)} = e^{-rt} \eta_1 P_c \cdot Y_E - C_e - \tau = 0$$

$$H_S = \frac{dH(t)}{dS(t)} = \dot{\lambda} = e^{-rt} P_w \cdot W_s(S)$$

$$H_D = \frac{dH(t)}{dD(t)} = -\dot{\tau} = e^{-rt} \eta_1 P_c \cdot Y_D$$

Ⅲ. 자료 및 변수

앞에서 설명한 최적제어 모형의 실증분석을 위해서 국내 토사자료의 한계로 인하여 이집트의 Aswan High Dam(AHD)을 분석하였다. AHD는 이집트 나일 강에 위치한 다목적 댐으로서 이집트 물 사용량의 95%를 공급하고 있으며 수단과 이집트에 걸친 총 496Km에 이르는 세계에서 가장 큰 댐 중 하나이다. 1976년부터 정상 가동되기 시작한 AHD는 건설 당시 500년의 내구연한으로 건축되었으나, 연간 2,000억 톤의 토사가 수단 상류에서 발생하여 99% 이상의 퇴적이 AHD에서 일어나 경제적인 댐의 수명은 179년으로 추산되고 있다(Jobin, 1999).

수단에서 발생하는 토사의 위치가 정확하게 파악되지 않기 때문에 AHD에 유입되는 토사총량에 농업부문의 기여도(60%)와 농업유실토사의 자연침전율(50%)을 고려한 Pattanapanchai의 방법론을 이용하여 수단 농업의 토사 발생량(범위)을 설정하였다.²⁾ 또한 이집트의 농업용수 공급가격은 농민에 한하여 무상으로 제공하고 있어 잠재가격(shadow price)기법을 통해서 추정된 Aly et al.(2005)의 자료를 활용하였다. 댐의 토사제거기법은 준설(dredging)과 흡착토사제거방법(Hydro-suction Sediment Removal System, HSRS)을 고려하였고 제약조건은 연간 토사제거 최대량으로 하였다.³⁾ 흡착토사제거방법은 댐의 저수지에 직여 2m에서 5m 정도의 관을 매설하여 유입되는 토사를 댐 아래로 방류하는 방식인데, 이는 한번 설치하면 시설유지보수를 통해서 영구적으로 유입되는 토사를 방류할 수 있어 더 이상 하상에 토사가 퇴적되는 것을 방지할 수 있다. 또한 설계시 토사제거방법이 고려되지 않은 댐의 경우에도 적용이 가능하여 적용 가능성이 높다. 하지만 저수지가 큰 경우는 적용시 관의 길이에 제약을 받기 때문에 본 연구에서는 HSRS 적용시 저수지의 용량이 임계시 (11.5 BCM)까지 도달할 때 HSRS를 적용하는 것을 가정한다.

표 1 분석에 사용한 자료와 출처

Characteristics	AHD	Source
Water level (m)	160~180	International Lake Environment Committee
Length (km)	495.8	
Surface area (km ²)	6,216	
Total storage capacity (km ³)	162	
Designed Storage capacity (km ³)	90	
Flood control capacity (km ³)	41	
Dead capacity rate (%)	19.5	
Annual deposition (m ³)	200 million	
Mean water inflow (m ³)	80 billion	
Trap efficiency rate (%)	99%	
Remaining storage capacity (km ³)	31.6	
Economic Parameters	Value	Source
Price of water (\$/m ³)	0.05	Aly et al. (2005)
Discount rate (%)	5	Arbitrary
Cost of dredging (\$/m ³)	0.3	Malik (2004)
Cost of hydro-suction (million \$)	200	Kawashima et al. (2003)
Annual management costs (million \$)	8	Calculated
Annual operation costs (million \$)	10	

2) 자세한 내용은 Pattanapanchai(2005)를 참조.

3) 자세한 내용은 Morris and Fan(1998)을 참조할 것.

대규모 다목적 댐의 경우는 준설비용에 대한 자료가 충분하지 않지만, 중국의 삼협댐 (Three Gorges Dam)의 경우를 연구한 Malik(2004)의 준설비용 추정치는 톤당 0.3달러이며 Palmieri et al.(2003)에서는 다목적 댐의 경우 준설비용이 톤당 2달러에서 2.5달러 수준으로 결정된다고 했으나 삼협댐이나 AHD처럼 대규모댐일 경우는 규모의 경제에 의해서 그 가격이 내려갈 것이라 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 AHD와 규모가 비슷한 중국의 삼협댐의 준설비용 톤당 0.3달러를 적용하기로 하였다. <표 1>은 AHD의 경제적 변수와 수리적 변수의 출처를 제시하였다.

농업편익을 추정하기 위해서 UN의 FAO에서 발표한 이집트의 대표곡물 5가지를 고려하여 그 평균값을 사용하였고, 가격은 FAOSTAT에서 1970년부터 2004년까지 취합된 자료를 사용하였다. <표 2>는 본 연구에서 사용된 수단 농업의 경제적 변수와 출처이다.

표 2 수단 농업에 대한 자료와 출처

Description	Value	Unit	Source
Average Price of Crop	215	\$/ton	FAOSTAT
Cost of Fertilizer	160	\$/ton	
Total upstream watershed area	4,000,000	ha	
Annual soil loss	30	ton/ha	Calculated
-Agriculture contribution	60	%	Arbitrary
Conservation cost	6	\$/ha/ton	Pimentel et al. (1995)

수단 농업의 생산성에 관한 연구가 부족하나, 5년간 수단을 포함한 아프리카 10개국의 농업 생산성을 연구한 Lal(1981)의 연구를 바탕으로 다음 식 (5)와 같은 수단 농업의 생산함수를 도출하였다.⁴⁾

$$(5) Y = 6.7 \cdot \exp(-0.003 \cdot ASL) + F^{0.67}$$

여기서 Y는 밀, 옥수수, 귀리, 땅콩 등의 주요 경작물의 추정값이고, ASL은 D의 지표로 사용할 수 있는 연간 누적된 토사 유실량이고, F는 정보당 인 비료의 사용량을 톤으로 표시

4) 물론 Lal(1981)의 연구가 상당히 오래된 연구인 것은 사실이나 아프리카의 농업생산성 및 농업기술의 진보가 20년 동안 획기적으로 변하지 않은 사실을 고려하면, 수단의 토사유실률과 농업생산성에 대한 공간자료 획득이 어려운 시점에서는 충분히 고려할 만한 연구이며, Jobin(1999)의 연구에서 밝힌 수단의 농업생산량과 상당히 유사한 값을 보이므로 본 연구에 적용하는 것이 무리가 없을 것으로 판단된다.

한 것이다. 식 (5)는 어떠한 비료 사용이나 토사유실 방지 노력이 없더라도 주요 경작물은 약 6.7톤 정도씩 생산할 수 있다는 것을 의미하고 이는 실제 수단의 생산량과 유사한 값이다(Jobin, 1999).

본 연구의 공간적인 범위는 이집트 남부에 위치한 아스완 댐(Aswan High Dam)과 나일 강을 농업수원으로 사용하는 수단 북부의 농업지역을 대상으로 하였다. 나일 강은 남에서 북으로 수단을 거쳐 이집트로 흐르고 있으며 대부분의 수단 농업지역은 나일 강 상류인 Dongola, Napata 등에 위치해 있다. <그림 1>은 본 연구의 공간적 범위를 보여주고 있다.

그림 1 연구의 공간적 범위



IV. 분석결과

본 연구의 식 (3), 즉 최적제어 모형을 Matlab을 사용하여 Dynamic Hamiltonian을 이용한 수치해석(numerical solution)을 통하여 사회 전체의 총편익을 산정하였다. 정책 대안을 비교하기 위해서 각각의 다른 시나리오를 설정하였다. 기준 시나리오 I은 어떠한 관리방안도 없는 경우를, 시나리오 II는 상류 농업종사자가 토사저감 노력을 하지 않고 댐의 토사

를 제거하는 경우를, 시나리오 III은 모든 동원 가능한 토사저감 노력과 토사제거방법을 사용하는 경우로 설정하였다. 또한 시나리오 II와 시나리오 III에서는 댐 수준의 토사제거방법의 효율성을 보기 위해서 준설(dredging)과 흡착토사준설방식(HSRS)을 구분하여 분석하였다.

표 3 실증분석 결과

Management Alternatives (Unit: Billion \$)		Agriculture NPV	Reservoir NPV	Combined NPV	Reservoir Lifetime
시나리오 I		74.44	56.97	131.41	159
시나리오 II	(a) Dredging	74.44	58.05	132.49	300
	(b) HSRS	74.44	58.19	134.99	300
시나리오 III	(a) Dredging	93.70	57.20	150.90	500
	(b) HSRS	93.70	57.31	151.01	500

<표 3>에서와 같이 시나리오 I의 경우는 AHD의 수명은 159년으로 나타나고 총 사회편익은 댐의 수명 동안 약 1,314억 달러로 추산되며 그 중 농업 종사자의 편익은 약 744억 달러이고 댐의 편익은 약 570억 달러로 추산된다. 시나리오 II에서 농업부문에서 토사저감 노력을 하지 않을 경우는 농업의 편익은 변화가 없으나 댐 편익은 각각의 토사제거방법에 따라 약 2% 증가하는 것으로 나타났다. 준설보다 HSRS가 약 20억 달러 정도 높은 총편익을 보이고 있고, 농업 편익에서는 토사제거방식이 어떠한 영향도 미치지 않고 있으나 댐 편익에서는 약 1.4억 달러 높은 편익을 HSRS가 보이고 있다. 이는 준설의 경우는 지속적인 투자가 필요한 방식이나 HSRS의 경우는 초기투자 비용이 높고 유지비용이 적어 지속적인 사용에는 준설보다 유리하다. 하지만 HSRS의 경우 유입되는 토사만 처리하기 때문에 준설보다는 저수용량이 덜 확보되는 경향이 있다. 그러나 시나리오 II에서 분석된 것과 같이 비용의 효율성이 저수용량 확보에 따른 편익보다 크므로 HSRS가 준설보다 높은 편익을 제공한다. 하지만 시나리오 I에 비해서 시나리오 II의 NPV의 증가는 미미하게 나타나는데 이는 댐의 운영기간이 159년에서 300년으로 증가하였으나 적용된 할인율(5%)에 의해서 길어진 운영기간에 대한 편익 증가분이 크지 않게 나타난다.

시나리오 III에서 보는 바와 같이 상류에서의 토사저감 노력은 농업부문의 편익을 10% 증가시키는 효과가 있지만 댐 편익은 시나리오 II와 비교해서는 약간 감소하는 것으로 추정

되었다. 이는 상류에서의 토사저감 노력에 의해서 댐으로 유입되는 토사의 양이 줄어드는 효과가 있으므로 댐 수준의 토사제거 시기가 늦어지는 효과를 수반한다. 따라서 저수용량은 시나리오 II보다는 적게 되어 댐 편익이 낮게 나온 것으로 추정된다. 사회 전체의 총편익을 극대화하기 위해서 상류의 토사저감 노력을 극대화하고 댐의 토사제거를 최대한 늦추는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 또한 댐 수준의 토사제거 방법에 따른 편익은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 상류에서의 토사저감 노력이 없다면 댐의 수명은 300년까지 존속할 것으로 나타났고 모든 관리방안을 도입하면 그 수명은 경제적으로 500년까지 유효한 것으로 나타났다. 시나리오 III의 연구결과에서 나타나듯이 농업 편익 증가를 위해서는 농업 종사자들이 토사저감 노력을 하여 댐의 저수용량 저감 등의 외부효과까지 상쇄할 수 있다. 하지만 농업의 특성상 장기적인 안목에서의 투자가 이루어지기 쉽지 않고 일반적으로 근시안적인 방법으로만 경작된다고 가정할 수 있기 때문에 정책입안자 입장에서는 토사저감 노력의 확산을 위해 투자할 필요가 있다. 이는 댐의 경제적인 수명을 연장시키는 것과는 직결될 수 있다.

V. 결론 및 시사점

본 연구에서 동태적 최적제어 모형은 상류의 농업부문과 하류의 댐의 관계에 있어 상류에서 발생하는 토사의 외부효과를 고려하여 전체 수역의 편익을 최대화하는 것이다. 자료의 제약 때문에 나일 강에 위치한 상류의 수단 농업지역과 하류의 이집트 Aswan High Dam을 분석하였다.

연구 결과, 이집트 정부와 수단 정부 간의 상호 협력적인 대안을 다음과 같이 제시할 수 있다. 첫째, 현재 수단 농업종사자들은 토사저감 노력을 통하여 농업생산성 향상뿐만 아니라 상류 토사로 인한 AHD의 저수용량 감소 현상을 완화시킬 수 있다. 이를 위해서는 상류의 토사저감 노력과 함께 댐 수준의 적극적인 토사제거방안이 수반되어야 한다. 이를 통해 댐의 경제적 수명을 연장함과 동시에 상류에 위치한 수단 농업의 생산성을 극대화할 수 있다. 둘째, 이러한 결과는 강을 사이에 둔 두 나라의 경우뿐만 아니라 강이 여러 행정구역에 위치한 지역간의 문제에서 대안으로 활용될 수 있다. 본 연구는 자료 수집의 한계로 인하여 기존에 출판된 논문들을 참조하였으나, 보다 정확한 공간자료를 이용하면 연구결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 또한 곡물가격을 외생변수(exogenous variable)로 취급하지 않

고 내생변수(endogenous variable)로 하여 가격결정 모형을 이용한 시장수용함수를 도출하는 것도 연구결과의 정확성을 높일 수 있을 것이다.

셋째, 본 연구에서는 댐 수준의 토사제거방법에 따라 그 결과를 도출하였으나 준설이나 HSRs가 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 HSRs는 댐 아래의 하류에 다른 형태의 외부효과, 즉 하천의 탁도 증가 등의 영향을 줄 수 있는데 이에 대한 연구는 보다 수공학적 접근이 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 본 연구는 외국 사례를 중심으로 실증연구가 이루어졌는데 아직까지 국내에서는 낙동강 수계 주변의 다목적 댐 등 토사 유입이 의심되는 댐들에 관한 토사 자료가 존재하지 않아 본 연구의 방법론을 적용하는 데 한계가 있다. 연구결과에서 언급되어 있는 것과 같이 댐 운영의 효율성을 증대시키기 위해서 준설만이 토사 문제를 해결하는 유일한 방법은 아니다. 본 연구에서 사용된 방법론을 국내에 적용하기 위해 국내 댐들의 토사퇴적률과 토사유입량 그리고 낙동강 등 비교적 긴 수계를 가지고 있는 하천의 농업지역의 토사기여도에 관한 자료가 구축된다면 수리학적으로만 접근되던 다목적 댐 운영에 관한 연구에 경제학적 접근이 이루어질 수 있어 연구접근 방법론의 다양성에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Aly, I., R. Zein, and H. Abou-Saad. 2005. "Irrigation Water Pricing". *Minufiy Journal of Agriculture Resource*, 30: 817-833.
- Barbier, E. 1996. *The Economics of Soil Erosion". Theory, Methodology, and Example*. York: University of York.
- FAOSTAT. 2006. Fertilizer Use by Crop in the Sudan. Rome: the United Nations. <http://www.faostat.org>
- International Lake Environmental Committee. 2008. Aswan High Dam Reservoir Database. http://wldb.ilec.or.jp/data/databook_html/afr/afr-19.html
- Jobin, W. 1999. *Dams and Disease: Ecological Design and Health Impacts of Large Dams, Canals, and Irrigation System*. London: Taylor & Francis Group.
- Kawashima, S. et al. 2003. *Reservoir Conservation: Vol II: RESCON Model and User Manual*. Washington, DC.: World Bank.
- _____. 2007. "Conserving Reservoir Water Storage: An Economic Appraisal". *Water Resources Research*, 43: 1-9.
- Lal, R. 1981. "Soil Erosion Problems on Alfisols in Western Nigeria, 6: effects of erosion on experimental plots". *Geoderma*, 25(3): 215-230.
- Malik, S. 2004. "The Three Gorges Dam: A Comprehensive Case Study". Unpublished Doctoral Dissertation, University of Texas at Austin.
- McConnell, K. 1983. "An Economic Model of Soil Conservation". *American Journal of Agricultural Economics*, 65: 83-89.
- Morris, G. and J. Fan. 1988. *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*. New York: McGraw-Hill Professional.
- Palmieri, A., F. Shah, G. Annandale, and A. Dinar. 2003. *Reservoir Conservation: The RESCON Approach: Volume 1*. Washington, DC.: World Bank.
- Pattanapanchai, M. 2005. "Economics of Renewable Resource Management: An Application to Multipurpose Dams". Unpublished Doctoral Dissertation, University of Connecticut.
- Pimentel, D., C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, and R. Saffouri. 1995. "Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits". *Science*, 267(5201): 1117-1123.

Southgate, D. and R. Macke. 1989. "Downstream Benefits of Soil Conservation in Third World Hydroelectric Watersheds". *Land Economics*, 65: 38-48.

World Commission of Dams. 2001. *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. London and Sterling, VA: Earthscan Publications.