

댐 건설로 인한 국지 수문기상환경의 변화 추정

유철상* · 안재현** · 강성규 · 김기욱 · 윤용남***

Estimation of Local Change in Hydrometeorologic Environment due to Dam Construction

Chulsang Yoo* · Jae-Hyun Ahn** · Sung-Kyu Kang · Kee-Wook Kim · Yong-Nam Yoon***

국문요약

본 연구에서는 댐 건설로 인한 대규모 저수지의 수문기상학적 영향에 대한 공간적인 범위를 분석할 수 있는 모형을 구축하였으며, 구축된 모형을 이용하여 섬진강댐, 소양강댐, 안동댐, 충주댐 등의 4개 댐에 대해 분석을 수행하였다. 이러한 분석에는 인공위성 영상을 이용한 토지이용분석과, 아울러 이 결과를 이용한 알베도의 변화 추정이 포함된다. 본 연구에서 수행한 모형화 과정 및 적용 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 댐 건설로 인한 알베도의 공간적 변화는 댐의 규모와 크게 관련이 있으며, 섬진강댐은 댐 주변 10~20km, 소양강댐은 40km, 안동댐은 20~30km, 충주댐은 50km 정도까지 알베도의 변화가 나타나는 것으로 파악되었다. (2) 댐 건설 후 댐 주변에서 재순환계수(전체 가용 수분 중 내부 공급이 차지하는 비율)의 변화가 크며(큰 값), 반대로 대상규모가 커질수록 작아지는 것을 파악하였다. (3) 댐의 격자별로 산정된 알베도와 재순환계수의 상관관계는 아주 높은 것으로 나타났다. 따라서, 댐 건설에 따른 토지이용의 변화가 궁극적으로 수분순환구조에 큰 영향을 미치고 있음을 파악할 수 있었다. (4) 수문기상학적 영향범위를 댐 건설 후 생성되는 수표면적과 비교한 결과, 대략 수표면적이 50km²까지 그 변화의 정도가 민감한 것으로 파악되었다.

주제어 : 댐, 저수지, 수문기상학적 영향, 알베도

* 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과(Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University), 주저자(envchul@korea.ac.kr)

** 서경대학교 이공대학 토목공학과(Department of Civil Engineering, Seokyeong University)

*** 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과(Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University)

**** 본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(2-4-1)에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

ABSTRACT

In this study, a model for analyzing the spatial effect of large dam reservoirs on local hydrometeorology was developed, and then actually applied to the Seomjingang Dam, Soyanggang Dam, Andong Dam, and Chungju Dam. The application included the analysis of land use using the satellite images to derive the change in albedo before and after the dam construction. Summarizing the modeling procedure and its application results are as follows. (1) The change in albedo was found to be closely related with the size of the dam, also the spatial limit of albedo change were estimated to be 10-20km for the Seomjingang Dam, 40km for the Soyanggang Dam, 20-30km for the Andong Dam, and 50km for the Chungju Dam. (2) The change in the coefficient of recycle (ratio of internal supply of moisture to the total available moisture) was found to be big within the narrow boundary of the dam, but become smaller as the boundary becomes larger. (3) The correlation between the albedo and coefficient of recycle was found high. Thus, it could be concluded that the change in land use due to dam construction has much effect on the moisture circulation structure. (4) The spatial range of hydrometeorologic effect was compared with the water surface area of dam reservoir. The result showed that the spatial range sensitively increased up to 50km² of water surface area.

Keywords : Dam, Reservoir, Hydrometeorologic effect, Albedo

I. 서론

댐의 건설은 바다로 유출되는 하천수를 저류함으로써 용수확보율을 제고하고, 아울러 홍수조절 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 반면에, 댐 건설은 댐 주변의 자연환경, 생활환경 및 사회경제학적 환경의 변화를 유발하게 된다는 단점이 있다. 특히, 자연환경의 측면에서 보면, 댐 상류에서는 개발제한에 따른 식생의 발달과 대규모 저수지의 생성에 따른 수표면적의 증가가 있게 되고, 댐 하류에서는 댐의 조절기능에 따른 하류 홍수량의 변화로 인한 하류 하도 및 유황의 변화 등이 발생하게 된다.¹⁾ 이러한 변화는 국지적으로 수문순환과정의 변화를 야기하며, 따라서 안개일수의 증가와 같은 수문기상의 변화가 초래될 가능성이 있다고 판단할 수 있다. 그러나 그 근거는 아직 매우 빈약한 편이다. 이는 기본적으로 관련 연구가 매우 빈약한 때문으로, 상대적으로 영향평가가 어려운 수문기상의 변화보다는 그 영향이 보다 직접적인 생태환경의 변화에 보다 많은 관심을 나타내고 있기 때문이다.²⁾

댐 건설에 따른 영향평가와 관련된 국내의 연구로서는 한국수자원공사(1997)의 '댐 건설 전후의 자연환경 변화에 관한 연구'가 대표적이라 할 수 있다. 이 연구에서는 금강유역에 위치한 대청댐을 대상으로 하여 댐 건설 전후의 식생, 토지이용의 변화 및 이에 따른 유출특성의 변화 등을 분석하고 있다. 그러나 이 연구는 수문환경에 한정되어 기상 및 기후의 변화와 관련된 내용은 포함되어 있지 않다.

댐 건설에 따른 수문기상 변화를 살펴본 연구로는 이종범(1981), 홍성길(1982), 이종범 등(1990), 노용호와 조선형(1990), 소선섭과 양문섭(1993)의 연구를 들 수 있다. 먼저, 이종범(1981)의 연구에서는 춘천지방을 대상으로 주변호수가 춘천지방의 기후변화에 어떠한 영향을 미치고 있는가에 대해 연구하였으며, 이를 위해 기존 시계열 자료를 비교·분석하였다. 이후 홍성길(1982)은 안동호 형성에 따른 안동지방의 안개 발생일수에 대해 연구한 바 있다. 또한, 댐 건설에 따른 수문기상의 변화에 관련된 연구로는 노용호와 조선형(1990), 정광모(1991) 및 소선섭과 양문섭(1993)의 연구를 들 수 있다. 이들의 연구는 모두 충주댐을 대상으로 하고 있으며, 충주댐에 인접해 있는 충주 기상관측소의 자료를 분석하고 있다. 특히, 노용호와 조선형(1990)의 연구에서는 여러 기상 인자의 변화를 정성적으로 나타내 주고 있으며,

1) 한국수자원공사. 1997. 「댐 건설 전후의 자연환경 변화에 관한 연구」

2) ICOLD. 1981. Dams and Environment: Dam Project and Environmental Success, *ICOLD Bulletin* 37.

ICOLD. 1985. Dams and Environment: Notes on Regional Influences, *ICOLD Bulletin* 50.

ICOLD. 1988. Dams and Environment: Case Histories, *ICOLD Bulletin* 65.

ICOLD. 1989. Dams and Environment: The Zuiderzee Damming, *ICOLD Bulletin* 66.

ICOLD. 1992. Dams and Environment: Socio-Economic Impacts, *ICOLD Bulletin* 86.

Goldsmith, E. and Hildyard, N. 1985. *The Social and Environmental Effects of Large Dams*.

소선섭과 양문석(1993)의 연구에서는 안개 발생과 관련된 변화를 기상학적으로 분석하고 있다. 이후에도 남재철 등(1995)과 윤진일 등(1997), 이승호(1998)가 안동호와 주암댐, 충주호 등을 대상으로 댐 건설에 따른 수문기상변화에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이들의 연구는 모두 연구 당시 댐 건설 이전 및 이후의 기록연수가 짧아 통계학적인 분석과 같은 정량적인 분석까지는 시도되지 못했다. 최근에 와서야 유철상 등(2003a, b)에 의해 보다 정량적인 분석이 수행된 바 있다. 이들의 분석에서는 수문기상 시계열상의 어떤 변화 시점이 댐의 건설 시점과 일치하느냐 하는 문제와 댐 인근지점에서의 수문기상 인자의 변화가 댐 건설 전후 통계학적으로 유의하게 다른지, 아울러 이들의 변화가 댐 건설의 영향이 미치지 않는 먼 지점에서의 변화특성과 통계학적으로 유의하게 다른지를 평가하고 있다. 평가결과, 이들의 분석 대상 댐인 충주댐의 건설 전후에는 통계학적으로 유의한 수문기상학적 변화가 있었던 것으로 결론을 내리고 있다.

그러나 댐 건설로 인해 발생한 변화의 유의성을 판단하는 것과 발생 가능한 수문기상학적 변화의 정도를 추정하는 것은 또 다른 차원의 문제이다. 우리나라의 경우 댐의 건설과 관련하여 수행되는 환경영향평가의 항목에 기상평가가 포함되어 있어 그 영향이 정량적으로 평가되게 되어 있다. 그러나 국내뿐만 아니라 국외의 경우에도 이를 위한 보편적인 방법론은 제시되어 있지 않으며, 아울러 관련 연구도 찾아보기 어렵다. 그럼에도 불구하고 우리나라의 댐 관련 환경영향평가서에는 대체로 유사한 방법론이 적용되고 있는데, 이는 아마도 환경영향평가의 적용 초기에 적용되었던 방법론이 이후에도 유사하게 적용되었기 때문인 것으로 추측된다.

예를 들어, 국내 H댐의 경우 수문기상환경의 변화예측은 다음과 같은 절차를 따라 수행되었다. 먼저, 저수지 수질모의모형을 이용하여 저수지의 수온을 예측한다. 이 수온의 영향을 고려하여 저수지 주변 기온변화를 추정하고, 아울러 기온변화에 따른 증발산량의 변화를 추정한다. 증발산량의 변화는 대기 중 상대습도의 변화를 가져오고, 이를 기온의 변화와 함께 고려하여 안개일수와 같은 기상인자의 변화를 추정한다. 국내 M댐 및 Y댐의 경우도 유사한 절차를 따르고 있으며, 단지 적용한 수질모의모형이 다를 뿐이다.

그러나 이러한 방법론의 적용에는 다음과 같은 문제점이 있다. 먼저 댐 건설로 인한 수문기상의 변화는 모두 새로 만들어 지는 저수지의 수온과 대기의 온도 차이에서 시작하게 된다. 그러나 댐의 건설로 인한 변화를 유역 내 또는 댐 주변의 수문순환의 변화를 고려하지 않고는 설명하기 어렵다. 댐 저수지 수온의 예측에 관측자료 없이 임의로 추정된 모형 매개변수를 사용하는 것도 문제점 중의 하나이다. 아울러 기상인자의 변화 추정이 공간적인 규모에 대한 특별한 언급 없이 수행되는 것 또한 오해의 소지가 많다. 특히, 충분한 관측자료가 축적

되지 못하여 절대적인 비교·검증의 대상이 없는 우리 나라의 현실을 고려하면 이와 같은 방법론의 적용에는 많은 한계가 따를 수밖에 없다.

수문기상변화를 추정하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있으나, 가장 간단하면서도 확실한 방법은 물론 장기적인 관측자료에 의존하는 방법이다. 관측된 자료를 이용하여 회귀분석을 수행할 수도 있고, 단일요인 또는 다요인 간섭분석(intervention analysis)을 수행할 수도 있다. 특히, 기상 변화나 기후 변동이 중요한 외력(external force)으로 작용하는 경우 다요인 간섭분석이 중요한 방법론이 될 수 있다. 그 영향 정도는 댐의 규모와 연결지어 설명될 수 있을 것이다. 그러나 이러한 방법은 댐 개발의 역사가 짧은 우리 나라의 경우 한계가 있다. 특히, 신규 댐을 계획하는 단계에서 그 영향을 파악하고자 하는 경우에는 더욱 그러하다. 결국, 댐 건설에 따른 수문기상변화를 예측하기 위해서는 다양한 상황(댐의 규모, 지형, 지질, 식생 등)을 고려할 수 있는 모형화를 통해서만 가능할 것이다. 국내의 경우 이와 관련된 연구로서 안재현 등(2001)을 살펴볼 수 있으며, 이 연구에서는 물수지 방정식을 이용한 대형댐 건설에 따른 수문환경의 변화 분석을 수행한 바 있다. 하지만, 이 연구 역시 수문기상의 변화보다는 수문환경 및 유출 특성 변화에 초점을 맞추고 있는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 댐 건설에 따른 유역특성의 변화를 모형화를 통하여 구현하고, 이를 이용하여 댐 건설 전후의 수문기상변화를 정량화해 보고자 한다. 댐 건설에 따른 수문학적 변화는 먼저 수표면적의 변화로 나타난다. 이에 따른 태양복사의 반사도인 알베도(albedo)에 큰 변화가 있게 되고, 이는 대상지역에서의 에너지 순환에 변화를 유발하게 된다. 아울러, 이러한 변화는 대상지역 내의 증발산에도 영향을 미치게 되고, 궁극적으로 기타 여러 수문기상인자의 변화를 유발하게 된다. 댐 건설로 인한 하천수위 상승 및 이로 인한 지하수위의 변동, 아울러 토양수분 상태의 변화도 댐 주변 좁은 구역 내에서 충분히 가능한 상황이다. 그러나 좀 더 큰 지역을 대상으로 하는 경우 그 영향은 미미할 것으로 판단된다. 전체적으로 보면 댐 인근 좁은 지역을 대상으로 한다면 큰 변화의 예측이 가능하고, 넓은 지역을 대상으로 한다면 보다 완만한 변화가 예측될 것이다. 본 연구에서의 모형화 목적도 이러한 공간적 규모의 영향이 잘 반영될 수 있도록 하는 것이다.

본 연구의 목적을 간단히 요약하면 댐 건설에 따른 수문기상변화의 변화를 공간적으로 분석할 수 있는 모형을 제안하며, 이를 이용해서 댐 건설의 영향을 공간적으로 정량화하고자 하는 것이다. 최종적으로는 댐 건설 시 댐의 규모에 따른 수문기상학적 영향의 범위를 한정하고, 아울러 다양한 수문기상인자의 변화 추정으로 이어지도록 하는 것이다.

II. 모형의 구조

댐 건설에 의한 인근지역의 기후 및 기상변화를 살펴보기 위한 모형화 과정에는 다음과 같은 전제조건이 따른다. 먼저, 모형의 구조가 이해되기 쉬운 간단한 형태이어야 한다. 모형의 구조가 복잡할 경우 필연적으로 많은 매개변수를 요구하게 되고, 따라서 이의 추정이 큰 문제로 대두되게 된다.³⁾ 특히, 관측자료가 부족한 상황에서는 심각한 문제로 대두될 수도 있다. 아울러 모형의 예측결과에 대해서도 그 신뢰성을 확보하기가 쉽지 않다.

두 번째의 조건은 모형의 매개변수가 댐의 건설에 따른 물리적 환경변화를 잘 반영할 수 있어야 한다는 것이다. 예를 들어, 지하수위의 상승과 수표면적의 증가에 따른 알베도의 변화 등이 잘 고려되는 매개변수를 포함하고 있어야 한다. 특히, 이러한 매개변수가 댐 건설의 영향을 직접 반영하는 형태이어야 한다. 마지막으로, 모형의 예측치는 수문기상의 변화를 직접 또는 간접적으로 나타낼 수 있어야 한다. 이는 본 연구의 궁극적 목적이기도 하다. 여기에 별도로 댐의 영향을 공간적으로 살펴볼 수 있는 방안도 필요하다.

위와 같은 전제조건에 따라 본 연구에서 고려하고 있는 모형의 구조 및 특성은 <그림 1>과 같다. 이 모형에서는 댐 건설에 의한 토양층의 토양수분 변화에 대해 고려할 수 있도록 하였는데, 댐 건설에 따른 지하수위의 상승이 토양층의 토양수분량 증가로 이어지기 때문이다. 이러한 토양층의 토양수분량 증가는 수표면적 증가, 삼림 및 초지의 증가 등과 함께 알베도의 변화를 일으킨다. 알베도의 변화는 증발산량의 변화 및 강수량의 변화를 야기할 것이고, 이는 다른 기상인자의 변화와도 무관하지 않다. 댐의 규모는 지하수위의 상승 정도와 수표면적의 증가 정도로 반영되며, 아울러 그 정도는 고려하는 모형의 공간규모와 관련이 있다. 예를 들어, 댐 인접지역의 영향을 살펴보는 경우 상대적으로 지하수위의 상승 정도 및 수표면적의 증가가 크게 나타나고, 반대로 넓은 지역의 영향을 살펴보는 경우 그 정도가 상대적으로 작아지게 될 것이다.

본 연구에서의 모형은 Budyko(1986)의 모형 및 그 해석방법을 응용한 것이다. Ponce 등(1997)의 연구는 Budyko 모형의 좋은 응용사례라 할 수 있다. 그러나 Ponce 등(1997)은 바다의 영향이 직접적으로 고려되는 대륙규모 정도를 고려한 반면, 본 연구에서는 대기와 토양층의 관계를 기본구조로 제한하였다. 그러나 그 기본 개념은 장기간의 물수지 평형을 고려하여 대기 중의 수분 변동을 평가하는 것으로 동일하다. 이러한 모형의 구조에 대해 설명하면 다

3) Brubaker, K.L. and D. Entekhabi. 1995a. "An Analytic Approach to Modeling Land-Atmosphere Interaction: 1. Construct and Equilibrium Behavior." *Water Resources Research* 31(3).

Brubaker, K.L. and D. Entekhabi. 1995b. "An Analytic Approach to Modeling Land-Atmosphere Interaction: 2. Stochastic Formulation." *Water Resources Research* 31(3).

음과 같다.

먼저, 강수량은 내부의 증발로 생성되는 것과 외부로부터 유입되어 생성되는 것으로 분리할 수 있다.⁴⁾

$$P = P_a + P_e \quad (1)$$

식 (1)에서, P_a 는 외부에서 통제용적(control volume) 안으로 유입되는 수분(A)으로 인해 발생하는 강수량(mm)을 의미하며, P_e 는 통제용적 안에서 발생하는 증발(E)로 인해 생성되는 강수량(mm)을 의미한다. 대기순환이 활발하여 대기가 완벽하게 혼합된다고 가정한다면, 외부로부터 유입되어 발생한 강수량 P_a 와 내부의 증발량으로 발생된 강수량 P_e 의 비는 Ω 값으로 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$\frac{P_e}{P_a} = \Omega \quad (2)$$

여기서 Ω 는 재순환계수라 정의되며, 다음 식으로도 결정할 수 있다.

$$\Omega = \frac{EL}{2WU} \quad (3)$$

위 식에서 E 는 실제증발산량[L/T], L 은 통제용적의 범위[L], W 는 가강수량[L], U 는 풍속[L/T]을 나타낸다. 재순환계수 Ω 를 이용하면 식 (4)로부터 P_a 와 P_e 를 분리하는 것이 가능하다. 즉,

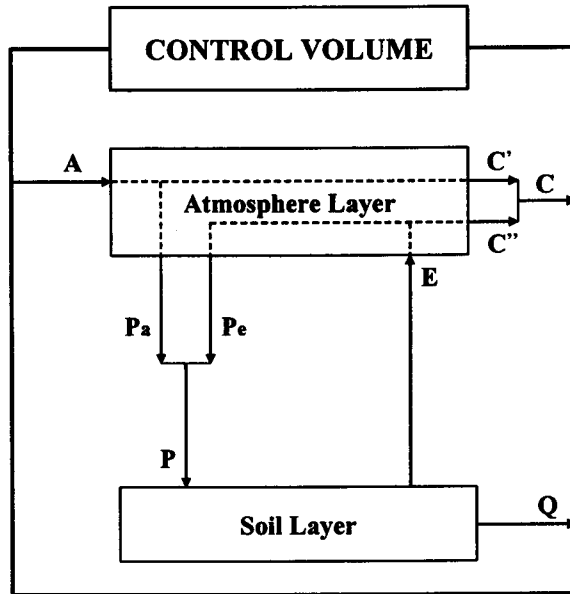
$$\begin{aligned} P_a &= \frac{P}{(1 + \Omega)} \\ P_e &= \frac{\Omega P}{(1 + \Omega)} \end{aligned} \quad (4)$$

4) Budyko, M. 1986. *The Evolution of the Biosphere*.

5) Entekhabi, D., I. Rodriguez-Iturbe, and R.L. Bras. 1992. "Variability in Large-scale Water Balance with and Surface-atmosphere Interaction." *Journal of Climate* 5.

P_a 가 P 에 비해 상대적으로 작을 경우 Ω 값은 증가하며, 이는 수분의 내부순환이 활발해짐을 의미한다. 반면에, P_a 가 상대적으로 커지는 경우 Ω 값은 감소하며, 외부에서 유입되는 수증기로 인해 발생하는 강수량은 증가하게 된다.

<그림 1> 댐 건설로 인한 수문기상인자의 시·공간적 영향 평가를 위한 모형의 구조



III. 대상지역에 대한 입력자료 구축

본 연구에서는 다음과 같은 4개의 대상 댐에 대해 모형을 적용하였다. 섬진강댐은 1965년, 소양강댐은 1973년, 안동댐은 1977년, 충주댐은 1986년에 준공되어 운영되고 있으며, 저수면적은 충주댐이 97km²로 가장 크고 소양강댐(70km²), 안동댐(51.5km²), 섬진강댐(26.5km²)의 순서로 되어있다. 이들 댐의 기본적인 특성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 대상 댐의 제원

구 분	수 계	준공연도	유역면적(km ²)	저수면적(km ²)
섬진강댐	섬진강	1965년	763	26.5
소양강댐	북한강	1973년	2,703	70.0
안 동 댐	낙동강	1977년	1,584	51.5
충 주 댐	남한강	1986년	6,648	97.0

본 연구에서는 대상 댐들의 토지이용상태를 분석하기 위해 Landsat 인공위성영상자료를 이용하였다. 대상 댐들의 유역을 포함하는 영상은 115-034와 115-035 영상이며, 이들 유역이 동시에 촬영된 데이터를 수집하는 것은 어려우므로 비교적 같은 계절 또는 봄과 가을을 포함하는 시기에 해당 지역을 촬영한 영상을 선택하였다(<표 2>). 인공위성 영상의 분석을 위해 Imagine, ER-Mapper, ArcView 등의 소프트웨어가 이용되었으며, 댐 수면을 중심으로 (10km × 10km) - (100km × 100km) 크기로 분석 대상범위를 설정한 후 범위별로 토지이용의 변화를 추정하였다.

<표 2> 토지이용 분석에 사용된 인공위성영상의 제원

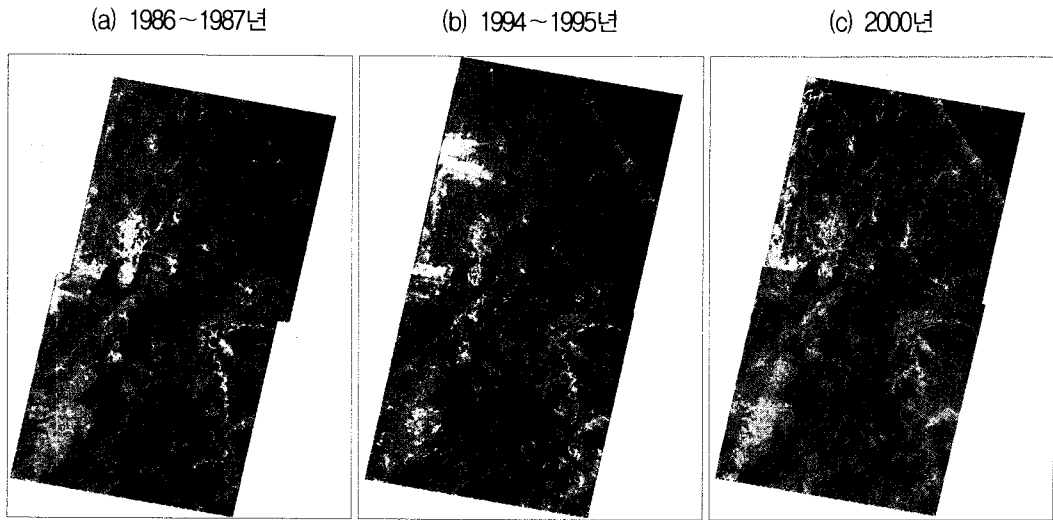
영상종류	촬영일자	Path-Row
Landsat TM	1987년 4월 27일	115-034
	1986년 4월 24일	115-035
	1994년 4월 14일	115-034
	1995년 5월 3일	115-035
	2000년 9월 29일	115-034
	2000년 5월 8일	115-035

분석을 위해 Landsat TM의 전체 밴드 중 열적외선 밴드인 6번 밴드를 제외한 다중분광 밴드 6개를 Imagine에서 사용 가능하도록 변환한 후 영상 취득 일자별로 하나의 파일로 구성(Layer Stack)하였다. 또한, 기하학적 보정 및 영상재배열을 위해 기하보정된 2000년 5월 8일 영상을 이용하여 영상 대 영상(image to image)의 방법을 적용하였으며, 영상 당 10여 개의 지상기준점(GCP)을 설정한 후 RMSE가 0.2화소(6m) 이내가 되도록 작업하였다. 영상의 변환식으로는 일차다항식(first order polynomial)을 사용했으며, 원래 영상이 가지고 있는 화소 값(DN)이 그대로 유지되도록 최근린내삽법(nearest neighbor)을 이용하여 해상도 30m로 재배열하였다. 그 결과는 <그림 2>와 같다. 이 그림에서 1986년은 1986년과 1987년 영상을 합성한 것이며, 1994년 1994년과 1995년을, 2000년은 2000년 봄과 가을의 영상을 합성한 것이다.

이렇게 분류된 토지이용정보를 이용하여 추정한 대상범위별 알베도는 <표 3>과 같다. <표 3>을 보면 알베도는 댐별로 또는 연도별로는 큰 차이를 나타내지는 않는다. 연도별로 조금씩 변화된 값을 보이는 것은 위성영상 촬영 시의 기상조건(수분, 구름, 계절 등)이 반영된 결과로 이해된다. 그러나 분석 대상범위별 변화의 정도는 아주 크게 파악된다. 당연한 결과이지만 대상범위가 작을수록(댐 주변일수록) 알베도가 작아지고 있으며, 반대로 대상범위

가 커지는 경우에는 일정한 값에 수렴하는 형태가 된다. 즉, 댐 주변일수록 댐 건설로 인한 수표면적 증가의 영향으로 알베도가 작다가 대상범위가 커지면서 그 영향이 감소되는 것으로 이해할 수 있다. 대체로, 섬진강댐은 10~20km, 소양강댐은 40km, 안동댐은 20~30km, 충주댐은 50km 정도의 범위에서 일정한 값으로 수렴하는 것으로 파악된다.

<그림 2> 대상연도별 위성영상



<표 3> 댐별 분석 대상범위와 연도에 따른 알베도의 변화

대상 범위	댐별 분석 대상범위와 연도에 따른 알베도											
	섬진강댐			소양강댐			안동댐			충주댐		
	1986년	1994년	2000년	1986년	1994년	2000년	1986년	1994년	2000년	1986년	1994년	2000년
10×10	0.158	0.170	0.157	0.145	0.146	0.142	0.155	0.161	0.160	0.142	0.144	0.139
20×20	0.166	0.175	0.166	0.151	0.151	0.149	0.168	0.165	0.165	0.156	0.155	0.151
30×30	0.167	0.175	0.168	0.157	0.156	0.154	0.168	0.165	0.165	0.161	0.159	0.156
40×40	0.167	0.176	0.169	0.159	0.157	0.155	0.170	0.165	0.164	0.163	0.161	0.159
50×50	0.168	0.178	0.172	0.160	0.157	0.155	0.170	0.165	0.164	0.164	0.163	0.160
60×60	0.170	0.178	0.174	0.159	0.156	0.155	0.171	0.165	0.164	0.164	0.163	0.161
70×70	0.171	0.178	0.175	0.159	0.156	0.155	0.172	0.166	0.165	0.164	0.164	0.161
80×80	0.172	0.178	0.175	0.159	0.156	0.155	0.171	0.167	0.166	0.165	0.165	0.163
90×90	0.171	0.177	0.174	0.159	0.156	0.155	0.170	0.166	0.165	0.166	0.166	0.164
100×100	0.170	0.176	0.173	0.159	0.156	0.156	-	-	-	0.167	0.167	0.165

IV. 댐 건설로 인한 수문기상 변화의 공간적 영향 분석

1. 기상자료

댐별 분석을 위해 <표 4>와 같은 기상청 관할 기상관측소의 기상자료를 이용하였으며, 이용된 기상자료는 강수량, 증발량, 풍속, 이슬점온도 등이다. 증발량의 경우 1991년 이후에는 모든 관측소에서 측정하지 않았으며, 아울러 증발량의 동시 관측이 이루어진 시기가 1973년부터인 점을 고려하여 분석기간을 1973-1990년의 18년으로 설정하였다.

<표 4> 댐별 분석에 이용된 관할 기상관측소

댐	기상관측소	관측개시년	댐	기상관측소	관측개시년
섬진강댐	전주(146)		안 동 댐	영주(272)	1973년
	광주(156)			문경(273)	1973년
	임실(244)	1973년		영덕(277)	1973년
	정읍(245)	1973년		의성(278)	1973년
	남원(247)	1973년		충주(127)	1973년
소양강댐	춘천(101)	1966년	충 주 댐	이천(203)	1973년
	인제(211)	1973년		제천(221)	1973년
	홍천(212)	1973년		영주(272)	1973년
	-	-		문경(273)	1973년

재순환계수(Ω)를 산정하기 위해서는 가강수량값이 필요하나 현재 기상관측소에서는 직접 가강수량을 측정하지 않으며, 몇몇 대표지점에서 고층기상측정을 통해 가강수량을 계산할 수 있는 자료를 제공하고 있다. 따라서 지점별 가강수량의 계산을 위해서는 지상 기상관측소의 이슬점온도와 가강수량 간의 상관관계를 이용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 같은 방법을 적용했으며, 이를 위해 2000년 오산관측소에 측정된 고층기상자료를 이용, 이슬점온도와 가강수량 사이의 회귀식을 다음과 같이 결정하였다.⁶⁾

$$W = 10.906 \times e^{(0.0599838 \times D)} \quad (5)$$

여기서, W 는 가강수량(mm), D 는 이슬점온도(°C)를 의미한다. 위 회귀식의 결정계수는 0.9

6) 유철상·신창진·윤용남. 2004. "가강수량자료의 추정 및 분석." 「대한토목학회논문집」 24(5B).

이상으로 관측 자료를 잘 대표하고 있는 것으로 판단하였다.

2. 댐 건설에 따른 수문순환 변화분석

소양강댐, 안동댐, 충주댐 지역의 기상자료(증발량, 풍속, 이슬점온도에서 계산된 가강수량 등)를 이용하여 재순환계수 Ω 를 산정하였으며, 이로부터 P_e 와 P_a 의 값을 결정하였다. 대상 범위별로 계산된 Ω , P_e , P_a 의 값은 <표 5>와 같다.

<표 5> 댐 건설로 인한 격자별 수문순환의 변화

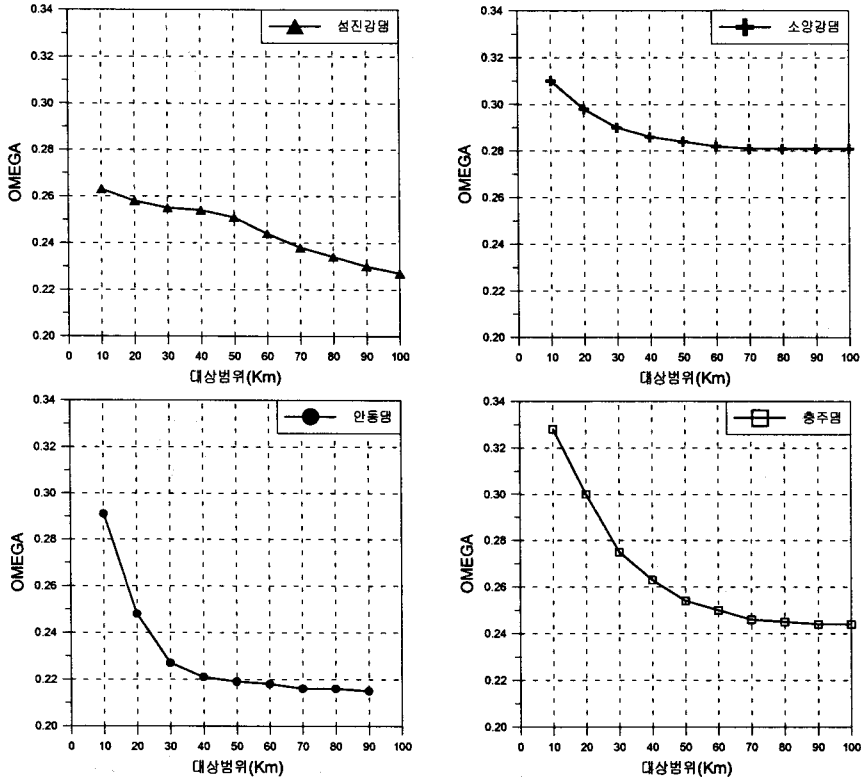
구분 대상 범위(km)	섬진강댐			소양강댐			안 동 댐			충 주 댐		
	Ω	P_e/P	P_a/P	Ω	P_e/P	P_a/P	Ω	P_e/P	P_a/P	Ω	P_e/P	P_a/P
10×10	0.263	0.208	0.792	0.310	0.236	0.764	0.291	0.224	0.776	0.328	0.246	0.754
20×20	0.258	0.205	0.795	0.298	0.229	0.771	0.248	0.198	0.802	0.300	0.230	0.770
30×30	0.255	0.203	0.797	0.290	0.224	0.776	0.227	0.184	0.816	0.275	0.215	0.785
40×40	0.254	0.202	0.798	0.286	0.222	0.778	0.221	0.181	0.819	0.263	0.207	0.793
50×50	0.251	0.201	0.799	0.284	0.221	0.779	0.219	0.179	0.821	0.254	0.202	0.798
60×60	0.244	0.196	0.804	0.282	0.220	0.780	0.218	0.178	0.822	0.250	0.200	0.800
70×70	0.238	0.192	0.808	0.281	0.219	0.781	0.216	0.177	0.823	0.246	0.198	0.803
80×80	0.234	0.189	0.811	0.281	0.219	0.781	0.216	0.177	0.823	0.245	0.196	0.804
90×90	0.230	0.187	0.813	0.281	0.219	0.781	0.215	0.177	0.823	0.244	0.196	0.804
100×100	0.227	0.185	0.815	0.281	0.219	0.781	-	-	-	0.244	0.196	0.804

<표 5>에 정리된 결과를 보면, 재순환계수 Ω 는 댐 주변에서 큰 값을 보이다가 분석범위가 커질수록 작아지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 댐 건설 후 생성된 수표면과 토양수분의 증가로 인해 댐 주변에서는 국지적인 증발하고, 이로 인해 대기순환이 크게 작용하지만, 그 범위가 증가할수록 그 영향이 줄어들면서 외부에서 유입되는 수분에 의한 대기재순환이 점점 증가함을 의미한다.

<그림 3>은 대상규모의 변화에 따른 재순환계수의 변화를 도시한 것으로, 소양강댐의 경우 약 40km의 범위까지는 재순환계수가 급격히 감소하다가 그 이후로는 일정하게 유지되고 있으며, 안동댐은 30~40km, 충주댐은 약 50km의 범위까지 감소하는 것을 파악할 수 있다. 이러한 결과는 댐 건설로 생성된 수표면의 증가 등과 같은 토지이용 상태의 변화로 인한 대기 수문순환의 영향이 대략 이 정도의 범위까지 미칠 수 있음을 의미하는 결과이기도 하다. 재순환계수로부터 계산되어지는 P_a 와 P_e 의 변화도 유사한 결과를 준다. 따라서 이러한 정도의

범위가 실제 댐 건설로 인한 수문기상학적 영향이 미치는 한계 범위일 것으로 판단된다.

〈그림 3〉 재순환계수의 변화



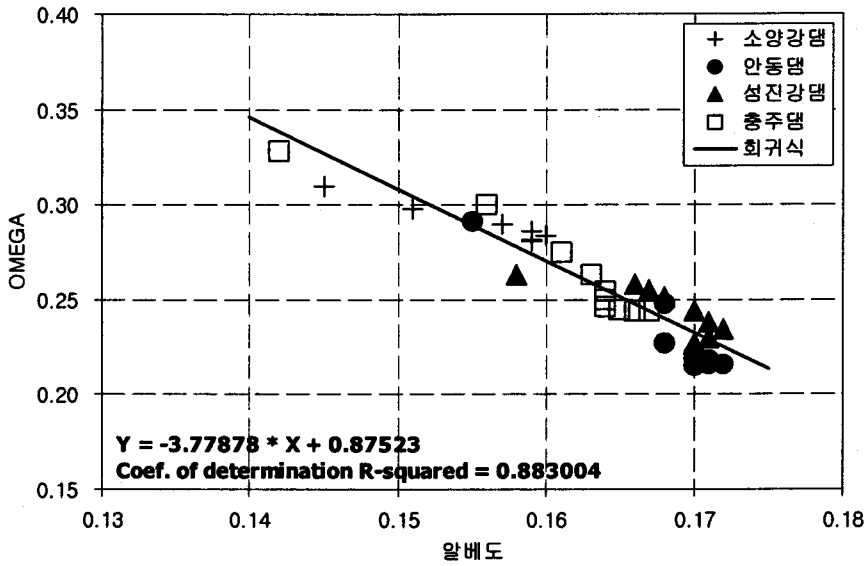
3. 알베도와 재순환계수의 상관관계 분석

위 2에 나타난 결과를 보면 재순환계수는 모두 대상범위가 증가할수록 지속적으로 감소하는 경향을 일관되게 보여준다. 이러한 결과는 댐 건설로 인한 알베도의 변화가 수분의 재순환에 미치는 영향의 상대적 정도를 보여주는 것이기도 하다. 대상범위별로 산정된 알베도와 재순환계수를 비교하면 <그림 4>와 같고, 이로부터 둘 사이에 큰 상관성이 존재함을 확인할 수 있다. 이는 댐 건설에 따른 토지이용의 변화가 궁극적으로 수분의 재순환에 큰 영향을 미치고 있음을 명확히 보여주는 결과라 할 수 있다.

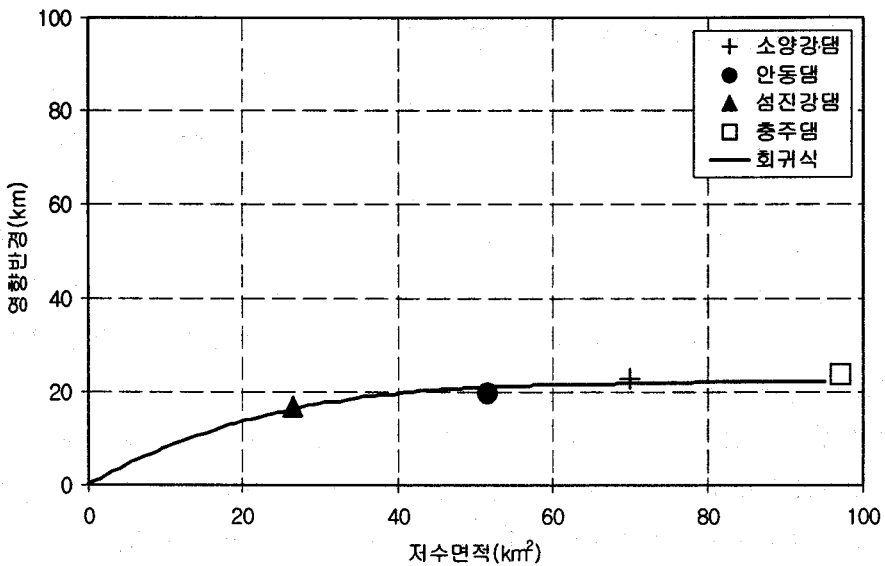
댐 건설 후 생성되는 저수면적과 수문순환 변동의 영향범위를 비교해 보면 <그림 5>와 같다. 저수면적과 비교를 시도한 것을 댐 건설 후 알베도의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것이 결국은 새로 생성되는 저수지의 수면이기 때문이다. 저수면적 26.5km²인 섬진강댐의 영향범위는 약 30km(반경 16.9km), 70km²인 소양강댐은 약 40km(반경 22.6km), 51.5km²인 안동댐은

약 35km(반경 19.7km), 97km²인 충주댐은 약 42km(반경 23.7km)로 분석되어, 그림 5에 반영하였다. 적은 자료 수의 한계가 있기는 하나 대략 수표면적이 50km² 이상에서는 수문기상학적 변화의 정도가 일정하게 나타난다는 결과에 주목할 만하다.

<그림 4> 대상범위에 따른 알베도와 재순환계수의 변화 비교



<그림 5> 댐의 저수면적과 수문기상학적 영향범위(반경)의 비교



4. 충주댐의 건설 영향 예측

<표 5>로 나타난 모형해석 결과와 대기 중 수분량과 다른 기상인자 사이의 회귀결과를 이용하여, 충주댐의 영향 정도를 영향 대상범위별로 추정하여 나타내면 <표 6>과 같다. 이 표에서는 댐의 영향 정도가 월별로 상이하게 나타나므로 가능한 변화의 정도를 하한과 상한의 범위로 나타내었다. 예를 들어 충주댐을 중심으로 10km × 10km 범위에서의 변화 정도는 월 강수일수 최대 0.5일 정도의 증가, 월강수량은 최대 17.5mm 정도의 증가가 있을 수 있는 것으로 예측되었으며, 기온의 경우는 최대 0.5℃ 정도의 증가, 최소습도는 최대 1% 정도의 증가가 가능한 것으로 파악되었다.

<표 6> 충주댐 건설영향 예측 결과

	월강수일수 (day)	월강수량 (mm)	최고기온(℃)	평균기온(℃)	평균습도(%)	최소습도(%)	
정상값	8.038-15.48	54.02-328.5	14.80-34.93	8.379-29.17	70.94-78.40	41.20-56.94	
범위 (L × L km ²)에 따른 증감량	10	0.095-0.474	3.500-17.50	0.622	0.643	0.095-0.476	0.201-1.003
	20	0.063-0.316	2.333-11.67	0.418	0.432	0.063-0.317	0.134-0.669
	30	0.037-0.186	1.373-6.863	0.248	0.256	0.037-0.187	0.079-0.394
	40	0.022-0.112	0.824-4.118	0.149	0.149	0.022-0.112	0.047-0.236
	50	0.011-0.056	0.412-2.059	0.075	0.075	0.011-0.056	0.024-0.118
	60	0.007-0.037	0.275-1.373	0.050	0.050	0.007-0.037	0.016-0.079
	70	0.004-0.019	0.137-0.686	0.025	0.025	0.004-0.019	0.008-0.039
	80	0	0	0	0	0	0

V. 결론

본 연구에서는 댐 건설로 인한 대규모 저수지의 수문기상학적 영향에 대한 공간적인 범위를 분석할 수 있는 모형을 구축하였으며, 구축된 모형을 이용하여 섬진강댐, 소양강댐, 안동댐, 충주댐 등의 4개 댐에 대해 분석을 수행하였다. 이러한 분석에는 인공위성 영상을 이용한 토지이용분석과, 아울러 이 결과를 이용한 알베도의 변화 추정이 포함된다. 본 연구에서 수행한 모형화 과정 및 적용 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 댐 건설 후 알베도의 변화를 분석한 결과 분석대상을 댐 주변으로 한정하는 경우 알베도변화가 크게 나타나고, 반대로 분석 대상범위가 증가할수록 변화가 없는 것으로 추

정되었다. 이러한 공간적 변화 경향은 댐의 규모와 관련이 많은 것으로 파악되었으며, 섬진강댐은 10~20km, 소양강댐은 40km, 안동댐은 20~30km, 충주댐은 50km 정도까지 알베도의 변화가 나타나는 것으로 파악되었다.

- (2) 댐 건설 후 댐 주변에서 재순환계수 Ω 의 변화는 분석 대상공간의 규모에 대해 지수적으로 감소하는 형태가 됨을 파악하였다. 이것은 댐 건설 후 생성된 수표면과 토양수분의 증가로 인해 댐 주변에서는 국지적인 증발로 인해 대기순환이 크게 작용하지만, 그 범위가 증가할수록 그 영향이 줄어들면서 외부에서 유입되는 수분에 의한 대기재순환이 점점 증가함을 의미한다.
- (3) 댐의 격자별로 산정된 알베도와 재순환계수의 상관관계를 분석한 결과 댐 건설 후 격자별 알베도와 재순환계수는 아주 높은 상관을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 댐 건설에 따른 토지이용의 변화가 궁극적으로 수분의 재순환에 큰 영향을 미치고 있음을 파악할 수 있었다.
- (4) 댐 건설에 따른 수문기상학적 영향범위를 댐 건설 후 생성되는 수표면적과 비교한 결과, 대략 수표면적이 50km²까지 그 변화의 정도가 민감한 것으로 파악되었다.
- (5) 마지막으로, 이상의 결과를 충주댐의 건설에 적용한 결과 충주댐의 건설은 댐을 중심으로 10km × 10km 범위에 대해 월 강수일수 최대 0.5일 정도의 증가(년 6일 정도), 월강수량은 최대 17.5mm 정도의 증가, 기온의 경우는 최대 0.5℃ 정도의 증가, 최소습도는 최대 1% 정도의 증가가 가능한 것으로 파악되었다.

참고문헌

- 남재철·신만용·윤진일. 1995. “매시 기상자료에 의한 안동지역 인공호 주변 안개발생 판별.” 『한국기상학회지』 31(4): 393-398.
- 노용호·조선희. 1990. “충주댐 설치 전후의 기상요소 비교분석.” 『과학교육연구소 논문집』 13: 35-72.
- 소선섭·양문석. 1993. “충주댐 건설 전후 충주지방의 안개변화 특성.” 『한국교육연구』 25: 179-199.
- 안재현·유철상·윤용남. 2001. “물수지 방정식을 이용한 대청댐 건설에 따른 수문환경의 변화 분석.” 『한국수자원학회 논문집』 34(3): 217-229.
- 유철상 외. 2003a. “댐 건설에 따른 수문기상 환경의 변화: 1. 변화시점의 파악.” 『대한토목학회논문집』 23(2B): 87-94.
- 유철상·김기욱·윤용남. 2003b. “댐 건설에 따른 수문기상 환경의 변화: 2. 평균적 변화.” 『대한토목학회논문집』 23(2B): 95-103.
- 유철상·신창건·윤용남. 2004. “가강수량자료의 추정 및 분석.” 『대한토목학회논문집』 24(5B): 413-420.
- 윤진일 외. 1997. “주암 다목적댐 건설에 따른 국지기후 변화가 농작물 생산성에 미치는 영향.” 『한국기상학회지』 33(3): 409-427.
- 이승호. 1998. “충주호 주변의 안개 특성.” 『대한지리학회지』 33(2): 1-16.
- 이종범. 1981. “춘천지방의 인공호에 의한 안개 및 운량의 증가.” 『한국기상학회 논문집』 17(1): 18-26.
- 이종범·봉종현·조하만. 1990. “댐 건설에 따른 국지기후의 변화 실태.” 『기상연구논문집』 7(1): 75-81.
- 정광모. 1991. “충주댐 건설에 따른 주요지역의 국지기후 변화양상.” 『대전지방 기상연구』 5: 50-55.
- 한국수자원공사. 1997. 『댐 건설 전후의 자연환경 변화에 관한 연구』 건설부.
- 홍성길. 1982. “안동댐 건설 이후 안동지방의 안개 증가.” 『한국기상학회 논문집』 18(2): 26-32.
- Brubaker, K.L. and D. Entekhabi. 1995a. “An Analytic Approach to Modeling Land-Atmosphere Interaction: 1. Construct and Equilibrium Behavior.” *Water Resources Research* 31(3): 619-632.

- _____. 1995b. "An Analytic Approach to Modeling Land-atmosphere Interaction : 2. Stochastic Formulation." *Water Resources Research* 31(3): 633-643.
- Budyko, M. 1986. *The Evolution of the Biosphere*. Boston: D. Reidel Publishing Co.
- Entekhabi, D., I. Rodriguez-Iturbe. and R.L. Bras. 1992. "Variability in Large-scale Water Balance with and Surface-atmosphere Interaction." *Journal of Climate* 5: 798-813.
- Goldsmith, E. and N. Hildyard. 1985. *The Social and Environmental Effects of Large Dams*. San Francisco.: Sierra Club Books.
- International Committee on Large Dams(ICOLD). 1981. "Dams and Environment: Dam Project and Environmental Success." *ICOLD Bulletin* 37: 1-30.
- _____. 1985. "Dams and Environment: Notes on Regional Influences." *ICOLD Bulletin* 50: 1-91.
- _____. 1988. "Dams and Environment: Case Histories." *ICOLD Bulletin* 65: 1-112.
- _____. 1989. "Dams and Environment: The Zuiderzee Damming." *ICOLD Bulletin* 66: 1-85.
- _____. 1992. "Dams and Environment: Socio-Economic Impacts." *ICOLD Bulletin* 86: 1-43.
- Ponce, V.M., A.K. Lohani, and P.T. Huston. 1997. "Surface Albedo and Water resources: Hydroclimatological Impact of Human Activities." *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE* 2(4): 197-203.