

안동-임하댐 연계운동을 통한 미래 기후변화 대응 Coping with Climage Change through Coordinated Operations of the Andong & Imha Dams

박 준 형* / 김 영 오**

Park, Junehyeong / Kim, Young-Oh

Abstract

A number of studies have been performed to analyze climate change impacts of water resources system. In this study, a coordinated dam operation is compared with an existing operation strategy for coping with projected future runoff scenarios. GCMs (Global Circulation Models) and the LARS-WG downscaling method was used to project future climate scenarios. The water balance model called *abcd* was employed to estimate future runoff scenarios. The existing dam operation comes from the national dam construction guideline, which is called the “level-operation method.” The alternative coordinated dam operation are constructed as a linear programming using New York City rule for refill and drawdown seasons. The results of annual total inflow in future is projected to decrease to 72.81% for Andong dam basin and 65.65% for Imha dam basin. As a result of applying future runoff scenarios into the dam operation model, the reliability of coordinated dam operation, 62.22%, is higher than the reliability of single dam operation, 46.55%. Especially, the difference gets larger as the reliability is low because of lack of water. Therefore, the coordinated operation in the Andong & Imha dams are identified as more appropriate alternative than the existing single operation to respond to water-level change caused by climate change.

Keywords : correspondence to climate change, coordinated dam operation, LARS-WG, level-operation method, modified space rule

요 지

최근에 이르러 기후변화에 따른 급격한 지구온난화에 대비하기 위해 많은 연구가 수행되고 있으며, 본 연구에서는 임하-안동댐 유역을 대상으로 미래 유량 변화에 대응하기 위한 다목적댐 운영 전략에 관하여 연구하였다. 미래 유량 전망결과를 이용하여 댐군을 연계운영하고 그 영향을 단독 댐 운영방법과 비교하여 평가하였다. 먼저 기후변화의 불확실성을 고려하기 위해 GCM와 통계학적 축소화 기법인 일기발생기 LARS-WG, 유출전망 모형 *abcd*에 적용하여 미래 전망 댐 유입량을 산정하였다. 수위운영방법이 기존 댐 운영방법에 대한 모의로 선정되었으며, 대안으로서 New York City rule을 적용한 선형계획법의 댐군 연계운영 모형을 적용하였다. 미래 유입량 전망결과를 과거의 연 총 유입량에 비하여 안동댐에서 평균 72.81%, 임하댐에서 평균 65.65% 감소하였다. 미래 유입량 전망자료를 댐 운영모형에 적용한 결과, 연계운영한 결과의 신뢰도가 평균 62.22%로 단독 운영 결과의 신뢰도 47.55%에 비해 GCM 종류에 상관없이 전반적으로 높았다. 특히 수량 부족으로 인해 신뢰도가 낮은 경우, 편차는 더 크게 나타났다. 따라서 안동-임하 댐군에 연계운동을 적용하는 것이 상대적으로 기후변화에 따른 수량의 변화에 더 효율적으로 대응할 수 있음을 확인하였다.

* 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (e-mail: sai0259@snu.ac.kr)

Ph.D., Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-744, Korea

** 교신저자, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (e-mail: yokim05@snu.ac.kr, Tel: 02-880-8916)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-744, Korea

1. 서 론

지난 20여 년 동안 우리나라에서도 기후변화가 수문현상에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되어오고 있다. Ahn et al. (2001)은 대청댐 유역을 대상으로 기후변화 영향에 의한 수문환경 변화를 검토하였다. Lee et al. (2004)은 기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, Kim et al. (2004)은 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, Ministry of Environment (2006)는 기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향을 평가하고자 기후모형인 SNURCM을 개발하였으며, Ministry of Science and Technology (2007)는 21세기 프론티어 연구개발사업을 통해 기후변화에 의한 수자원 영향 평가체계를 구축하였다. Bae et al. (2007)은 SRES A2 시나리오를 이용하여 기후변화에 따른 우리나라의 수자원 시공간 변화를 평가하였고, Hwang et al. (2007)은 금강유역을 대상으로 기후변화 영향을 평가하기 위하여 물수지 모형을 검토하고 국내 다목적댐들의 관측유량을 이용한 매개변수 추정으로 *abcd* 모형의 적용성을 확인하였고, Ahn et al. (2008)은 기후변화 뿐 아니라 미래 토지이용 변화를 함께 고려하여 유출분석을 실시하였으며, 김병식 등은 기후변화와 토지피복변화를 고려한 한강 유역의 수자원 영향평가를 실시하였다. Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning (2012)은 대표 시나리오 작성, 미래 수자원 전망 기술의 표준화 및 개발, 경제성 평가 및 수자원 정책 수립 등을 통합적으로 수행하였다. 그러나 대부분 영향평가에 그치고 있으며, 수자원 분야에서 기후변화에 어떻게 적응해야 할지에 대한 연구는 시작단계에 있는 실정이다.

낙동강 최상류에는 안동댐과 임하댐이 병렬로 위치하고 있는데, 안동댐은 수량이 풍부하여 용수공급에 문제가 없는 반면 임하댐은 상대적으로 유입량이 부족하고 댐 용량이 작아 용수공급계획에 항상 어려움을 겪고 있다. 더욱이 안동댐 유역과 달리 임하댐은 세로로 긴 형태의 유역임에도 동쪽에서부터 서쪽으로 유량이 흘러내려오기 때문에 도달 시간이 짧으며, 그로 인해 홍수기에는 오히려 불필요한 방류량이 발생한다. 한반도는 미래 기후변화에 의해 총 유량은 증가하고 계절별 편차가 증가할 것으로 전망되고 있는데, 이는 임하댐 유역에서의 수자원 관리가 더욱 어려

워질 가능성을 내포한다. 따라서 이 지역은 미래 기후변화의 영향에 대한 적응이 필요하며, 상대적으로 문제로부터 자유로운 안동댐을 잘 활용하는 노력이 필요하다.

본 연구에서는 우선 현재의 댐 운영방법을 모의하여 임하댐과 안동댐에 적용할 경우 미래 기후변화에 이수안전도가 얼마나 취약한지 정량적으로 살펴보고자 한다. 현재 이들 두 댐은 댐 설계기준(Ministry of Science and Technology, 2011)에 근거하는 댐 수위별 방류를 개별 댐에서 지키는 선에서 운영되고 있어 특별한 경우를 제외하고는 효율적인 연계 운영이 이뤄지지 않고 있다. 따라서 안동-임하 댐군을 연계운영 할 수 있다면 기후변화로 인한 유량의 변화에 효율적으로 대응할 수 있을 것이다. 단독 댐 운영결과 대비 연계운영 효과를 이수안전도를 통해 상대적으로 검토하였다.

기후변화 영향평가에서 한 걸음 더 나아가 적응전략을 연구한 논문은 해외에서도 아직 그리 많지 않다. 특히 기후변화에 대응하기 위해 댐 운영을 연구한 사례를 살펴보면 다음과 같다. Vicuna et al. (2007)은 기후변화 시나리오를 적용하여 21세기 캘리포니아 유역의 물수급 전망을 통해 저수지 저수용량 및 물 수요 충족량으로부터 물 공급 신뢰도를 산정하였으며, Minville et al. (2009)은 페리본카강 유역에서 지역기후모형을 사용하여 해당 유역 저수지의 전력 생산량 및 방류량 변화량을 모의하여 이수 측면의 미래 물수급 전망을 예측하였으며, Minville et al. (2010)은 페리본카강 유역을 대상으로 ResSim 모형에 10개의 다양한 기후변화 시나리오를 적용하여 시나리오별 저수지들의 물 공급 신뢰도 및 취약도를 산정하여 기후변화의 불확실성을 비교하였다. Raje et al. (2010)은 마한디강 유역에 9개 시나리오를 선정하여 SOP (Standard Operating Policy)에 따른 물수급 분석과 SDP (Stochastic Dynamic Programming)에 의한 최적운영률을 적용한 물수급 결과를 신뢰도, 회복도, 취약도로 비교하여 미래 저수지 물수급 전망을 나타내었다. 국내에서는 Kim (1998)이 월별 유입량의 증가를 가정된 상태에서 추계학적동적계획법을 이용해 댐 최적 운영률을 산정하였고, Seo et al. (2000)이 한국과학기술원(KIST)에서 제공한 GCM(Global Circulation Model) 자료를 이용하여 대청댐 유역의 저수지 운영모의를 실시하였으며, Kang (2007)이 표본추계학적동적계획법에 SNURCM과 GCM에서 발생시킨 유량을 적용하여 미래의 이수기간

에 발생할 수자원 영향평가를 하였다.

본 연구에서는 앞선 국내 연구와는 달리 IPCC 제 4차 보고서에서 제시한 GCM 시나리오들을 보다 포괄적으로 검토한 후 연구를 수행할 수 있었다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 기후변화로 취약해질 미래 이수안전도의 악화를 연계운영으로 어느 정도까지 극복할 수 있을지 정량적으로 파악한 최초의 연구라 할 수 있다.

2. 연구방법

미래기간의 기후변화에 대해 취약할 것으로 예상되는 낙동강 유역의 안동댐과 임하댐을 댐군으로 묶어, 예측 가능한 미래의 물 공급 실패를 감쇠시킬 수 있는 댐 운영 기법의 개발을 시도하였다. 먼저 미래 유량 전망 패턴을 확인하기 위해 GCM을 선정하고, 이에 추계학적 축소화 모형, 유출전망모형을 적용하여 미래 유량을 전망하였다. 이에 기존 운영의 모의로써 각 댐의 개별운영은 수위운영 방법을 채택하였으며, 댐군 연계운영의 경우 Paredes and Lund (2006)의 선형계획법을 적용하였다.

2.1 GCM 선정

GCM은 지구를 다수의 격자로 표현하여, 각 격자에서의 미래 대기 순환을 모의한 모형이다. 이산화탄소 배출 시나리오를 적용하여 각 격자의 대기 순환 및 기후를 결정하고, 이를 동역학적 혹은 추계학적 축소화기법을 이용하여 공간적으로 작은 유역 크기, 시간적으로는 일단위 등으로 구체화하여 미래 기후 전망에 활용하게 된다.

적은 수의 GCM을 적용하면서도 모든 GCM을 적용하였을 때와 동일한 효과를 내는 것이 본 연구에서의 GCM 선정의 핵심이라 할 수 있다. 다시 말하면 모든 GCM을 적용했을 때와 비슷한 수준의 범위를 표현할 수 있도록 GCM을 선정하여 불확실성의 범위를 유지하는 것이 중요하다. Lee et al. (2011)은 한반도에 적합한 불확실성을 유지하도록 GCM을 선정하기 위한 GCM 선정 방법론을 제

안하였다. IPCC DDC (Data Distribution Centre)에서 제공되는 A와 B 배출 시나리오(A1B, A2, B1)의 51개 GCM에 대하여 적용한 결과로 한반도에 맞는 대표 시나리오가 Lee et al. (2011)에 의해 Table 1과 같이 선정되었다.

Table 1의 GCM 선정 결과 중 통계학적 축소화기법인 LARS-WG (Long Ashton Research Station-Weather Generator)에서 적용 가능한 GCM을 음영으로 표시하였다. GCM 선정 방법론의 목적에 따르면 각 배출시나리오 별로 선정된 5개 GCM들이 가능한 동시에 적용되어야 불확실성 범위를 보존할 수 있다. 그러나 현재 Table 1에 표시된 LARS-WG 모형의 축소화 가능한 GCM들을 살펴보면, A1B 배출 시나리오에서 2개, A2 배출 시나리오에서 2개, B1 배출 시나리오에서 4개의 GCM만이 가능한 것으로 확인된다. 이와 같은 상황에서 A1B의 2개 GCM이나 A2의 2개 GCM을 이용할 경우, 불확실성 범위를 보존하지 못하는 무의미한 선정이 되고 만다. 따라서 가능한 불확실성 범위를 보존할 수 있는 B1 배출 시나리오의 CSIRO-Mk3.0, IPSL-CM4, LASG-FGOALS, UKMO-HadCM3의 4개 GCM을 선정하였다.

2.2 상세화 기법: LARS-WG

최근 기후변화와 관련하여 가장 활발하게 사용되고 있는 축소화 모형은 Racsco er al. (1991)에 의해 개발된 일기발생기로 현재에는 LARS-WG로 발전하였다. Semenov et al. (1998)에서 LARS-WG가 “Richardson-type”의 일기발생기보다 월 평균 온도나 강수량을 더 잘 모의함을 확인하였으나, 월 평균의 연간 변동성이나 계절적 변화를 재현하는데 한계를 나타낸다(Semenov, 1999). 본 모형은 일 단위 강우, 최고기온, 최저기온, 반사도의 시계열 자료를 이용하여 각각에 해당하는 미래의 일 단위 기상자료를 발생시킨다. LARS-WG와 SDSM (Statistical DownScaling Model)은 과거 관측자료의 통계적 특성을 재현할 수 있는 일기발생기 모형 중 무료로 배포하는 일기발생기 모형으로 적용이 간편하고 여러 국내외 연구들을 통해 적합성도

Table 1. The Results of GCM Selection (Lee et al., 2011)

A1B	A2	B1
BCC-BCCM	BCCM-BCM	CSIRO-Mk3.0
GISS-E-H	MRI-M-CGCM232	MRI-M-CGCM232
IPSL-CM4	CNRM-CM3	IPSL-CM4
LASG-FGOALS	CSIRO-Mk3.0	LASG-FGOALS
NIES-MROC32 medres	UKMO-HadCM3	UKMO-HadCM3

* Shaded GCMs can be used in LARS-WG, the statistical downscaling model.

검증되었다는 장점이 있다(Anwar et al., 2012; Elsgaard et al., 2012; Hashmi et al., 2012; Hoglind et al., 2012; Madsen et al., 2012; Rahman, et al., 2012; Yoo et al., 2012). 그 중 SDSM은 CGCM2, CGCM3, HadCM3 외에 다른 GCM을 적용할 수 없는데 반해 LARS-WG는 배출 시나리오 A2에 대하여 15가지, A1B에 대하여 10가지, B1에 대하여 10가지로 총 35가지 GCM을 이용할 수 있다.

LARS-WG는 반경험적 분포(semi-empirical distribution)를 사용하여 습윤일과 건조일의 기간, 일강우량과 일 단위 일사량을 결정하는데, 이 반경험적 분포의 변수 범위를 10개의 구간으로 나눈 후 그 중 한 구간을 단일 분포로 사용하게 된다. 이러한 반경험적 분포의 활용은 그 유연성으로 인해 폭넓은 다양성을 확보할 수 있지만, 그 대신 21개의 매개변수를 필요로 하게 된다. 이 중 10개는 각 구간의 사상 수를 나타내며, 나머지 11개는 구간의 크기를 나타낸다. 각 구간의 크기는 기상 변수의 기대 성분을 기본으로 다음과 같이 결정된다. 일사량의 경우 각 구간을 관측 자료의 월 단위 평균으로 최대, 최소값 사이에 동일한 공간으로 나눈다. 그 반면 다른 기상 요소인 습윤일, 건조일과 강우자료를 기본으로 한 성분의 경우 구간 순서가 증가할수록 각각의 구간 크기는 증가한다. 이 경우 모의 방법은 습윤과 건조의 경우로 나타내고, 강우의 분포는 건조 기간의 길이를 조절하면서 강우량을 조절할 수 있다. 이는 선행강수 조건을 활용하여 월 단위를 기준으로 기상요소의 변화량을 조절해 강우량을 할당한다 (Semenov et al., 1998).

본 연구에서는 보다 많은 GCM을 적용할 수 있는 LARS-WG를 상세화 기법으로 선정하였다.

2.3 유출전망모형: *abcd* 모형

최근 기후변화와 관련한 연구에서는 수십 년을 장기모의해야 하는 특성상, 월 단위 이상의 수문모형이 쓰이고 있다(McCabe and Ayers, 1989; Arnell, 1992; Dehn et al., 2000; Guo et al., 2002; Jiang et al., 2007; Trabucco et al., 2008). Hwang et al. (2007)은 이러한 월 단위 이상의 장기유출모형 중 물수지 모형을 이용하는 것이 기후변화의 연구에 적합하다고 결론지었다. Gleick (1986)에 따르면 수자원의 기후변화 영향분석을 위해 다양한 모형들을 비교한 결과 물수지 모형이 다른 모형들보다 유연하며, 사용하기 쉽고, 정확성도 높았다. 또한 Arnell (1992)은 기후변화 연구시 물리적 모형을 사용할 경우 높은 해상도의 기후자료가 필요하다는 점과 많은 매개변수로 인한 불확실성으로 인해 문제가 발생한다고 설명하였다.

본 연구에서는 모형 구축을 위한 관측자료 및 유역 특성자료가 없는 상황에서의 모형 적용을 위해 기후변화 연구에서 널리 이용되고 있는 유출전망 모형으로 물수지 모형 중 하나인 *abcd* 모형을 적용하였다. *abcd* 모형은 1981년 H.A. Thomas에 의하여 제시된 후 물수지 모형 중 가장 많이 사용되고 있으며, 수자원 분야에서 다양한 연구에 활용되어 왔다. 특히 개념적인 모형으로서 적용성이 높고, 불확실한 미래 기후에서도 총 수자원량을 바탕으로 한 분배를 목적으로 하는 기본 개념에 의해서 유출 전망의 안정성이 확보된다.

W_t 는 가용수량(available water), P_t 는 t 기간 동안 내린 강수량, S_{t-1} 은 t 월초의 토양수분량을 나타낸다.

$$W_t = P_t + S_{t-1}$$

기회증발산량(evapotranspiration opportunity) Y_t 는 유역에서 증발산량으로 사라지는 물을 의미하는 것으로, E_t 는 t 기간 동안 실제 증발산량을 나타내며, S_t 는 t 월말의 토양수분량을 의미한다.

$$Y_t = E_t + S_t$$

기회증발산량 Y_t 는 가용수량 W_t 의 비선형함수로 가정되며, 아래와 같이 정의된다.

$$Y_t(W_t) = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t b}{a}}$$

여기서, 첫 번째 매개변수 a 는 토양이 완전히 포화되어 있을 경우 유출이 일어나는 경향을 나타내며, 두 번째 매개변수 b 는 증발산량과 토양수분량 합 상의 한계치를 의미한다.

토양수분량은 이번 달의 기회증발산량과 잠재증발산량을 사용하여 아래 식과 같이 구한다. S_t 는 t 월말 토양수분량, PE_t 는 t 월의 잠재증발산량이다.

$$S_t = Y_t \exp(-PE_t/b)$$

abcd 모형은 가용수량 W_t 와 기회증발산량 Y_t 를 사용하여 유출량을 아래와 같이 구하게 된다. 여기서 G_t 는 t 월말 지하수함량을 의미한다.

$$R_t = (1 - c)(W_t - Y_t) + dG_t$$

$$G_t = [c(W_t - Y_t) + G_{t-1}]/(1 + d)$$

안동-임하 유역에 대한 월 물수지 모형의 보정(calibration) 및 검증(verification)을 수행하였다. 보정기간의 경

우 안동댐 유역은 1991년 1월~2007년 12월, 임하댐 유역은 1992년 1월~2007년 12월이며, 검정기간의 경우 두 유역 모두 2008년 1월~2010년 12월로, 월단위로 모의하였다. 두 댐 모두 티센망으로 면적평균한 기상자료를 모형에 적용하여 매개변수를 추정, 관측 댐 유입량에 비교하여 모의정확성을 확인하여 매개변수 최적화를 하였다. *abcd* 모형은 매개변수가 4개로 많지 않아 MSE를 최소화하는 시행착오법을 이용하였다. 최종적으로 추정된 매개변수는 Table 2와 같으며, 모의정확성 결과는 Table 3, 그에 따른 수문곡선은 Fig. 1과 같다.

Table 3에서 *abcd* 모형의 보정과 검정에 사용된 모의 정확성 지표로는 계통오차(systematic error)를 나타내는 Relative Bias (R-bias), 무작위오차(random error)를 나타내는 Relative Root Variance ($R-\sqrt{Var}$), 계통오차와 무작위오차를 함께 나타내는 Relative Root Mean Squared Error (R-RMSE), 마지막으로 수문모형의 모의정확성 지표로 많이 사용하고 있는 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 효율성계수(Model Efficiency, ME)를 사용하였다. Hwang (2005)이 *abcd* 모형을 전국 다목적댐에 유역에 구축하였을 때에 비하여, 대부분의 지표에서 본 연구의 검정결과가 비슷하거나 더 좋았으며, 이는 당시보다 더 오랫동안 축적된 자료를 활용할 수 있었기 때문으로 해석된다. 따라서 본 연구의 모형은 모의정확성이 적용할만한 수준인

것으로 판단된다.

2.4 댐 운영모형

본 연구에서는 미래 유량 전망 시나리오를 적용했을 때 예상되는 용수공급 문제에 대해 댐 운영으로 대비를 시도함으로써, 기후변화에 적응하는 연구를 수행하였다. 기존 운영의 모의로써 각 댐의 개별운영은 수위운영방법을 채택하였으며, 댐군 연계운영의 경우 Paredes and Lund (2006)의 선형계획법을 수정하여 적용하였다.

2.4.1 수위운영방법

수위운영방법은 기존의 댐 운영 시 수위에 따라 방류량을 결정하여 방류하는 방법을 개념화한 것으로, 댐 설계 기준(Ministry of Science and Technology, 2011)에서 수위별 산정방법과 운영방법에 대해 제시한 기준에 근거한다. 이수목적의 운영은 범위를 저수위(LWL)와 상시만수위(NHWL)의 저수량을 대상으로 하는 등, 수위에 따라 운영 기준이 달라진다. 실측 유입량자료가 있을 경우는 일 또는 순별로 하는 것이 신뢰도가 높으며, 저수지 조작 기간은 장기간일수록 신뢰성이 높아지며 100년 이상이 바람직하고 최소 20년 이상의 자료를 이용하여 분석해야 한다.

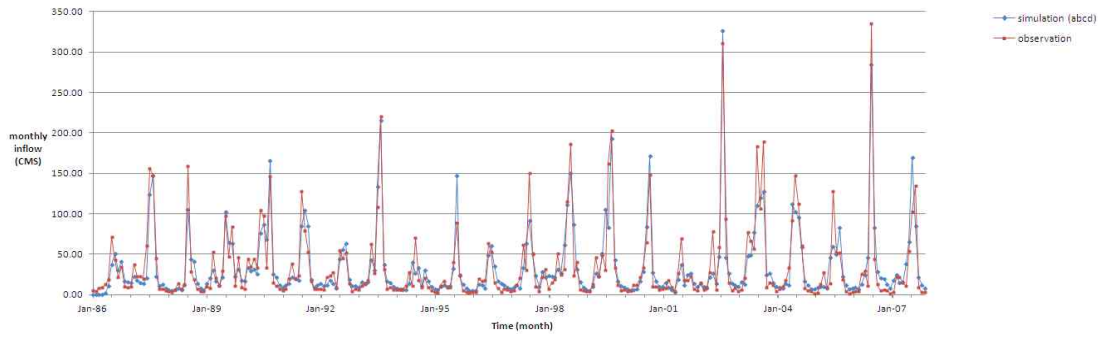
개별 댐에 대한 기본적인 물수지는 지난 단위시간 말 저

Table 2. Calculated Parameters of *abcd* Model

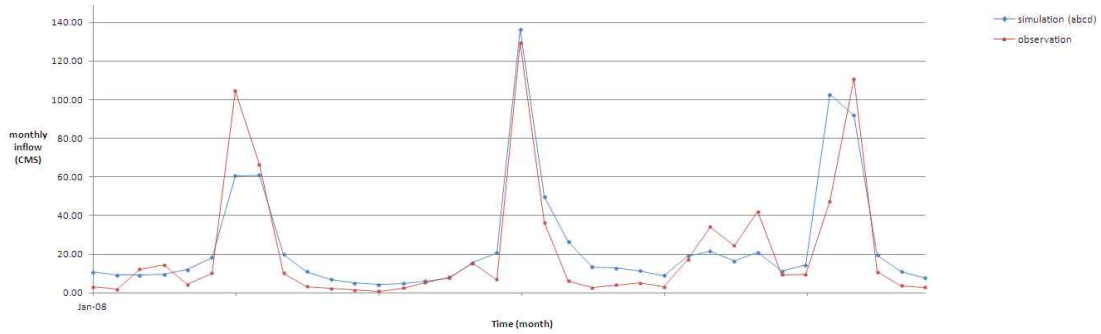
	Basin	Data	Parameters			
			a	b	c	d
Hwang (2005)	Andong dam	1977.1~2001.12	0.95	232	0.25	0.57
	Imha dam	1993.1~2001.12	0.97	268	0.01	0.51
In this research	Andong dam	1991.1~2011.12	0.94	400	0.00	0.00
	Imha dam	1992.1~2011.12	0.98	252	0.10	0.02

Table 3. Accuracy of *abcd* Model

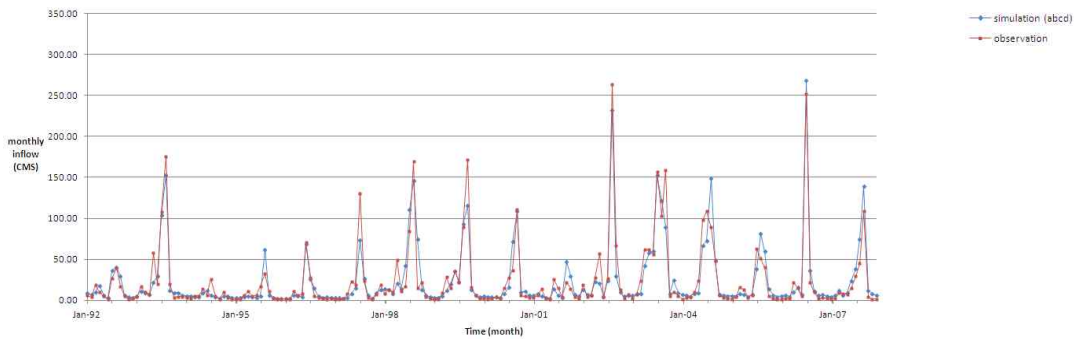
Basin	Data	Results of accuracy			
		ME (%)	R-RMSE	$R-\sqrt{Var}$	R-Bias
Andong dam	Calculation: 1991.1~2007.12	-0.0212	0.5988	0.5992	83.7571
	Calibration: 2008.1~2011.12	-0.1500	0.6796	0.6861	81.5662
Imha dam	Calculation: 1992.1~2007.12	0.0075	0.6138	0.6138	87.7719
	Calibration: 2008.1~2011.12	-0.2169	0.7382	0.7286	86.6216



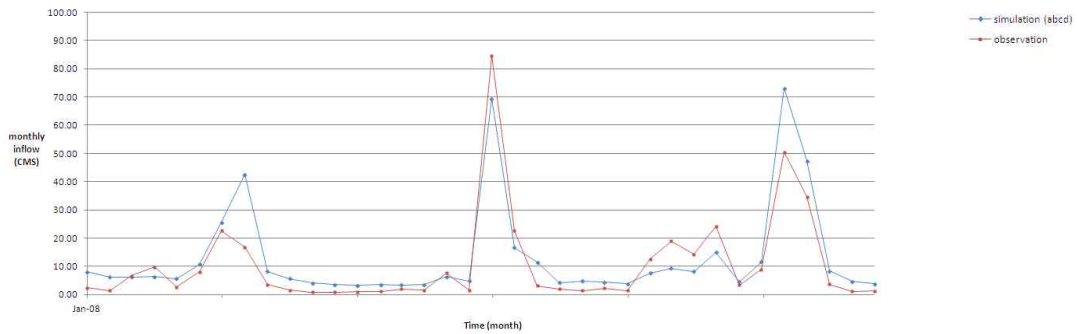
(a) Calculation of inflow for Andong dam basin (Obs (86.1-07.12), Sim (*abcd*))



(b) Calculation of inflow for Andong dam basin (Obs (08.1-10.12), Sim (*abcd*))



(c) Calculation of inflow for Imha dam basin (Obs (92.1-07.12), Sim (*abcd*))



(d) Calculation of inflow for Imha dam basin (Obs (92.1-07.12), Sim (*abcd*))

Fig. 1. Calculation and Calibration of Monthly Inflow Model (*abcd*) for Andong Dam, Imha Dam Basin

수량에서 유입량을 더한 총량에 계획된 방류량, 증발 및 누수, 홍수로 인한 여수로 방류량을 제한 것이 이번 단위 시간의 말 저수량이며 동시에 다음 단위시간 초의 저수량이다.

$$DS_{i,t} = DS_{i,t-1} + DQ_{i,t} - RL_{i,t} - (Ev_{i,t} + Sp_{i,t}) - X_{i,t}$$

식에서 $DS_{i,t}$ 는 댐 i 의 단위시간 t 의 말 저수량, $DQ_{i,t}$

는 단위시간 t 동안 댐 i 의 유입량, $RL_{i,t}$ 는 단위시간 t 동안 댐 i 의 방류량, $Ev_{i,t}$, $Sp_{i,t}$ 는 각각 단위시간 t 동안 댐 i 의 수면증발손실량, 누수량, $X_{i,t}$ 은 단위시간 t 동안 댐 i 에서의 여수로 방류량이다.

홍수에 의한 피해 혹은 전기 생산의 편익을 고려하지 않고 물순환 과정만을 고려하여 댐 운영을 결정할 경우, 수위별 방류량은 다음과 같다. 지난 단위시간 말 저수량이 사수위보다 낮은 경우 0이며, 최저수위보다 낮으나 사수위보다 높은 경우 이론상으로는 용수공급계획 중 우선하는 것을 선택해야 하나 실제로는 지자체와 계약한 사항을 먼저 방류하는 것이 일반적이다. 최저수위 이상의 수위에서는 계약량을 그대로 방류한다.

2.4.2 Space Rule

본 연구에서 적용하는 안동-임하댐과 같은 병렬 댐군에 대한 이론에는 대표적으로 New York City rule (NYC rule) (Clark, 1950), space rule (Bower et al., 1966)을 선형계획법의 형태로 구축한 LP-NYC rule (Lund and Guzman, 1999) 등이 있다. 선형계획법은 다른 계획기법에 비해서 변수의 추가와 제거가 쉽기 때문에 개념적인 모형의 개발에 용이하므로, 본 연구에서는 선형계획법을 이용하였다.

먼저 수량이 풍부한 기간으로, 유입량이 부족할 기간에 용수공급부족량이 발생하지 않도록 대비하기 위하여 댐의 저수량을 채우는 기간을 refill season이라고 정의한다. NYC rule (Clark, 1950), space rule (Bower et al., 1966)은 이 refill season에 저수량이 댐의 용량을 넘으면서 발생하는 불필요한 방류량을 병렬 댐군 운영으로써 최소화하는데 목적이 있고, Johnson et al. (1991), Lund and Guzman (1999)은 이와 같은 NYC rule과 space Rule을 LP의 형태로 구축하여 이를 LP-NYC라 하였다. Paredes and Lund (2006)은 이를 수량과 수질의 두 가지 측면, 그리고 refill season과 drawdown season의 두 종류의 기간에 연속성을 갖도록 하였다. 목적함수는 현재 단위시간부터 refill season이 끝날 때 까지, refill season 유입량에 대해 총 여수로 방류량의 기댓값을 최소화하기 위해 단위시간마다 계산한다. 다시 말하면, 병렬 댐군 내 모든 댐들의 총 대상기간동안 여수로 방류량을 최소화하도록 하였다.

위의 refill season이 끝난 후, 유입량이 부족한 기간을 drawdown season이라 한다. Paredes and Lund (2006)에 의해 제안된 drawdown season rule은 refill season rule과 함께 선형계획법으로 작성되어 모형의 작성에는 용이하나, 실제 작성했을 때 몇 가지 문제가 있다. 먼저 용수공급 계획량에 부족분이 발생하지 않는다는 수식의 가정에 의

한 문제이다. 그 부족분을 계산하고 줄여나가는데 목적이 있는 중장기 용수공급에 따른 물수급을 위한 모의운영에 있어 문제가 있다. 두 번째로 여수로 방류가 발생하지 않는다는 가정 또한 현실적인 모의운영의 관점에서 위배된다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 Johnson et al. (1991)에서의 drawdown season rule을 선형계획법 기반의 모형이 아닌 단순한 모의모형으로 수정하였다. 이 방법은 물수지 방정식에 의해 한 쪽 댐의 목표저수량이 제한조건을 초과함으로써 절삭될 경우 다른 쪽 댐의 방류량이 변하는 식의 연동이 되므로 양쪽 댐이 모두 용수공급부족에 빠지거나 여수로 방류를 하지 않는 이상 가정에 위배되지 않는다. 또한 가정에 위배되는 두 댐에서 동시에 용수공급부족 혹은 여수로 방류가 발생하는 경우에는 해당 단위기간을 보정하여 다시 모형을 운영할 수 있다.

3. 적용 결과

3.1 대상 유역

안동댐 유역은 낙동강 최상류단에 위치하고 있으며, 유역면적은 1,628.68 km², 유로연장은 170.12 km, 주하천길이는 114.80 km이다. 임하댐의 유역면적은 1,975.77 km², 유로연장은 112.75 km, 주하천길이는 35.21 km이다. Fig. 2의 유역도를 통해서도 확인할 수 있는데, 안동댐은 하천 방향으로 유역이 길게 형성되어 있는 반면, 임하댐은 보다 넓은 면적에도 불구하고 유역형상의 특징에 따라 하천연장은 더 짧다. 이와 같은 이유로 임하댐에서는 풍수기의 경우 같은 양의 강우라도 임하댐에서는 더 큰 홍수유출이 발생하며, 강수기의 경우 용수공급에 차질이 발생하게 된다.

임하댐 유역 내에 존재하는 주요 하천인 운곡천은 봉화군 춘양면 석벽리에서 발원하여 남동쪽으로 유하하다가 방향을 남쪽으로 바꾸어 봉화군 명호면 풍호리에서 낙동강 본류와 합류하는 유로연장 31.0 km, 유역면적 232.6 km²인 낙동강 제 1지류이다. 임하댐 유역에 위치한 반변천의 유역면적은 1,376.3 km²로서 낙동강 전체 유역면적 23,393.7 km²의 약 5.8%를 차지하고 있다. 또한 유로연장이 75.0 km로서 영양군 일월면 문암리에서 시작하여 남하하다가 임하댐을 거쳐 낙동강 본류에 합류하게 된다. Fig. 2의 유역도에 따르면 안동댐의 하류와 임하댐의 하류는 다른 자연유출에 거의 간섭받지 않은 채로 만나기 때문에 단순 병렬 연계운영을 하기에 적합하며, 이를 적용함으로써 안동댐의 풍부하고 안정적인 수량을 바탕으로 임하댐에서 발생하는 용수공급부족량 발생 등의 문제를 해결할 수 있다.

안동댐 유역의 연평균 강우량은 1,150.1 mm이며, 월별 강우량은 7월에 258.7 mm로 최대, 12월에 16.1 mm로 최소이다. 안동댐의 연 유입량은 평균 $12.2040 \times 10^9 \text{ m}^3$ 이며, 그 중 71.83%가 6월에서 9월에 집중되어 있다. 임하댐 유역은 연평균 강우량이 1022.1 mm이며, 월별 강우량은 8월

에 226.6 mm로 최대, 12월에 15.1 mm로 최소이다. 임하댐의 연 유입량은 $8.2782 \times 10^9 \text{ m}^3$ 이며, 그 중 76.02%가 6월에서 9월에 집중되어 있다. 본 연구에서 활용한 기상관측소와 해당 유역에 대한 티센계수는 안동댐 유역의 경우 태백(0.5253), 안동(0.3609), 울진(0.0807), 영주(0.0331), 임하댐 유역의 경우 영덕(0.4549), 의성(0.3987), 영천(0.0626), 울진(0.0538) 관측소이다. 이는 관측자료년수가 20년을 넘으면서 해당 유역에 대한 티센계수가 0.01 이상인 기상관측소만을 선정한 결과이다.

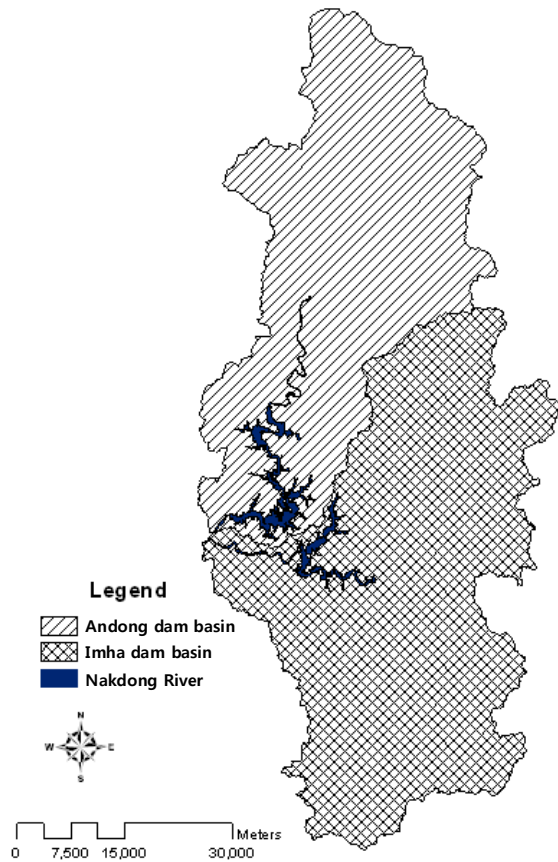


Fig. 2. Andong Dam, Imha Dam Basin

3.2 미래 유량 시나리오의 생성 결과

안동-임하 유역에 대해 생성한 미래 유량 전망의 연 유입량은 Table 4와 같다. 이에 따르면 미래 유량이 과거 유량에 비하여 안동댐의 경우 64.43~81.06%, 임하댐의 경우 54.73~75.68%로서 대체적으로 적게 전망되었다.

과거 및 미래 전망 유량의 월별 평균은 Fig. 3, Table 5이다. 각 GCM들은 서로 다른 국가의 기상청 및 연구소에서 작성된 것이며, 따라서 한 지점에 대한 모의 결과들을 비교했을 때 그림에서와 같이 서로 다르게 나타난다. 안동댐에서는 과거 대비 미래 전망 유량이 7월에 55.16%로 가장 크게 감소하고, 1월에 151.48%로 가장 크게 증가한다. 임하댐에서는 과거 대비 미래 전망 유량이 5월에 33.96%로 가장 크게 감소하고, 2월에 124.27%로 가장 크게 증가한다. 유량이 적은 1, 2월 겨울철의 미세한 증가가 비율로 봤을 때 부풀려지면서 과장된 점이 있긴 하지만, 미래 전망 유량의 계절별 편차는 줄어들었다. 다만 이러한 변화가 갈수기 유량의 증가보다 풍수기 유량의 감소로 인해 나타난 현상이기 때문에, 오히려 이수측면의 대책마련은 더욱 필요해지게 되었다.

Table 4. Increased Rate of Future Annual Amount of Water Against Observed Annual Amount of Water

Basin		Andong dam		Imha dam	
		Sim.	Obs.	Sim.	Obs.
Observed annual averaged amount of water (10^8 m^3)		10.4	10.3	6.63	6.88
Future, annual averaged amount of water (10^8 m^3)	Mk3.0	6.71		3.77	
	FGOALS	7.11		3.69	
	HadCM3	8.16		4.94	
	CM4	8.35		5.02	
	Average	7.58		4.36	
Increased rate of future annual amount of water against observed annual amount of water (%)	Mk3.0	64.43	65.15	56.77	54.73
	FGOALS	68.25	69.01	55.71	53.71
	HadCM3	78.41	79.28	74.44	71.77
	CM4	80.16	81.06	75.68	72.96
	Average	72.81	73.63	65.65	63.29

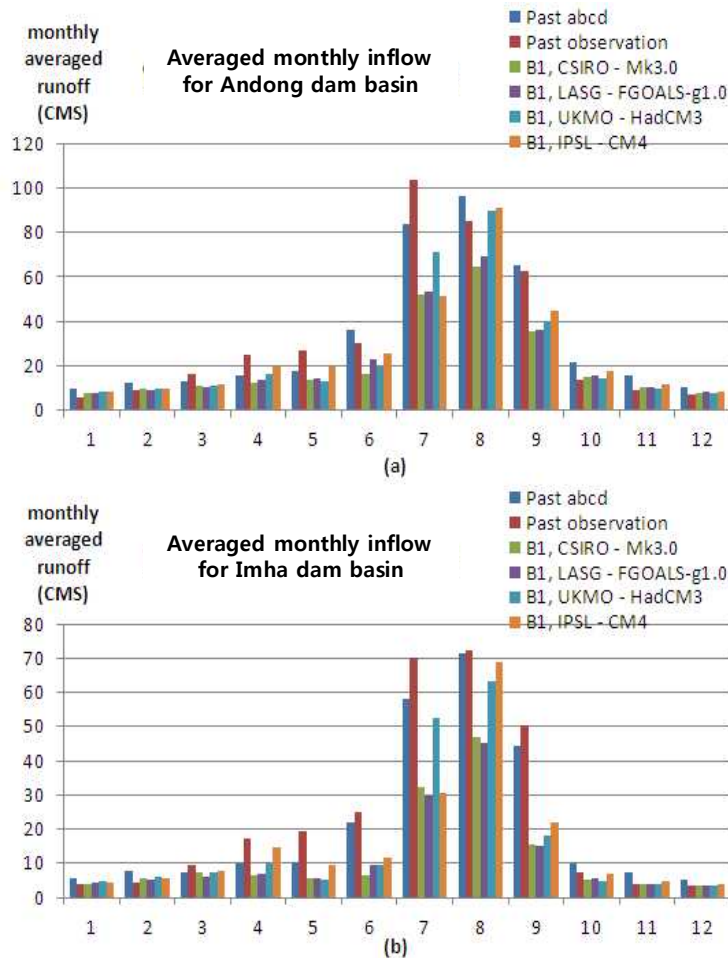


Fig. 3. Averaged Monthly Inflow (observed data, simulated data by GCMs) (a) Andong Dam Basin (b) Imha Dam Basin

Table 5. Observed Inflow, Simulated Future Inflow and Increased Rate

Month	Andong dam			Imha dam		
	Observed inflow (CMS)	Future inflow simulated by GCM (CMS)	Increased rate (%)	Observed inflow (CMS)	Future inflow simulated by GCM (CMS)	Increased rate (%)
1	5.28	8.00	151.48	3.75	4.28	114.11
2	8.87	9.55	107.59	4.50	5.59	124.27
3	16.51	11.01	66.67	9.41	7.07	75.08
4	24.69	15.38	62.28	17.13	9.47	55.31
5	26.72	15.10	56.53	19.40	6.59	33.96
6	29.90	20.92	69.97	25.02	9.29	37.12
7	103.38	57.02	55.16	70.06	36.33	51.86
8	84.99	78.64	92.53	72.23	56.00	77.53
9	62.60	39.08	62.42	50.53	17.74	35.10
10	13.36	15.35	114.82	7.37	5.54	75.13
11	8.89	10.53	118.42	3.84	4.17	108.38
12	6.60	7.89	119.57	3.65	3.62	99.06

3.3 댐군 연계운동을 통한 미래 기후변화 대응

이수안전도는 수자원 공급시설이 용수수요를 충족시킬 수 있는 물 공급의 안정성 정도를 표시한다. 이수안전도 기준으로는 계획기준년 갈수의 발생빈도, 물부족의 발생 빈도에 의한 신뢰도, 물부족의 크기를 나타내는 취약도 및 물부족의 지속기간과 회복기간을 나타내는 회복도 등이 있다. 본 논문에서는 그 중 Hashimoto et al. (1982)에서 소개되어 모의운영의 표준 지표로 활용되고 있는 신뢰도, 회복도, 취약도를 이용하였다. 또한 절대평가의 기준이 되는 공급량 결정기준을 함께 확인해보았다. 모의운영 결과의 평가는 과거, 미래 유량을 적용했을 때의 단독 댐 운영, 댐군 연계운동을 비교하여 상대평가 한다.

각 댐의 공급량 결정 기준은 안동댐의 경우 '67~'68 기준갈수와 예비저류량 35%, 임하댐의 경우 14개년 1회 부족, 93% 보장공급으로 두 댐 모두 보장공급량을 따르고 있다. 그러나 이는 관측 자료가 충분하지 않았던 때의 기본계획 당시 사정이 반영된 것이며, 따라서 본 논문에서는 최근 건설된 다목적댐들이 취하고 있는 95% 신뢰도를 절대평가의 기준으로 하였다.

과거 1992년 1월~2010년 12월까지 관측한 유입량, 같은 기간 동안 두 댐 유역에 대해 모의한 유량, 그리고 미래 유량 전망결과를 단독 댐 모형에 입력하여 얻은 신뢰도, 회복도, 취약도 결과는 Table 6, Fig. 4와 같다. 두 댐 운영 모형에서 모두 2010년까지의 과거 유입량에 대한 신뢰도에 비해 미래 유량 전망에 대한 신뢰도가 심하게 낮은 경향이 있으며, 이는 편이보정이 이뤄지지 않은데서 오는 오차로 보인다. 그러나 본 연구에서는 과거와 미래 유입량의 패턴에 따라 단독 댐, 댐군 모의운영에서 보이는 개선 효과를 보려 하는 것이기 때문에, 신뢰도의 절대값보다 상대평가에 주안점을 두었다.

Fig. 4의 (a)는 신뢰도 결과를 비교한 것이다. 단독 댐 운영에서 신뢰도가 과거 관측 유입량에서 82.02%, 과거 모의 유량에서 84.33%로 절대 평가의 기준인 95%에 미치는 못하는 결과를 나타내었다. 그러나 실제로 안동댐은 97.9%, 임하댐은 91.9%의 신뢰도로 용수공급을 하고 있다(Lee et al., 2010). 이는 수위운영방법이 설정된 수위에 따른 몇 가지 가정만으로 구축된 가상적인 모형이기 때문에 실제 운영에 비해 비효율적인 모의를 하게 된 것으로 해석된다.

Table 6. Comparison of Results for Singular and Coordinated Operations

Operation	Data		Reliability	Resiliency	Vulnerability (108 m3)
Singular operation	Past	Observed (1992.1~2010.12)	0.8202	0.1707	2.0136
		Simulated (1992.1~2010.12)	0.8433	0.2340	1.1704
		Average	0.8318	0.2024	1.5920
	Future	CSIRO, Mk3.0	0.2556	0.1095	4.4759
		LASG, FGOALS-g1.0	0.2806	0.1145	4.1107
		UKMO, HadCM3	0.6648	0.2099	2.2802
		IPSL, CM4	0.7009	0.3344	1.2292
		Minimum	0.2556	0.1095	1.1704
		Maximum	0.8433	0.3344	4.4759
		Average	0.4755	0.1921	3.0240
Coordinated operation	Past	Observed (1992.1~2010.12)	0.9474	0.1667	3.7900
		Simulated (1992.1~2010.12)	0.9667	0.2000	3.0473
		Average	0.9571	0.1834	3.4187
	Future	CSIRO, Mk3.0	0.4713	0.1506	4.6728
		LASG, FGOALS-g1.0	0.4833	0.1541	4.3412
		UKMO, HadCM3	0.7713	0.2308	3.1250
		IPSL, CM4	0.7630	0.3281	1.6857
		Minimum	0.4713	0.1506	1.6857
		Maximum	0.9667	0.3281	4.6728
		Average	0.6222	0.2159	3.4562

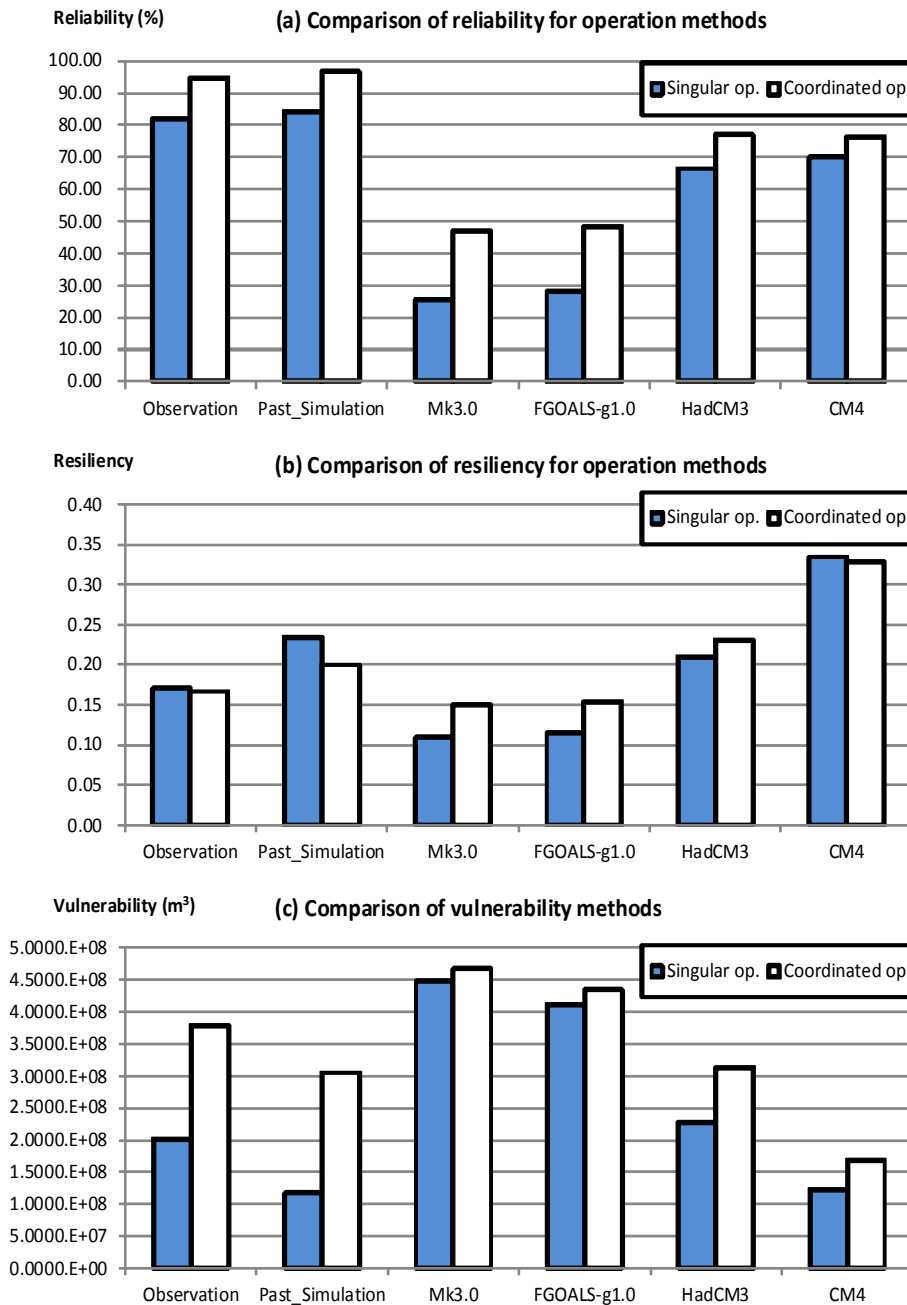


Fig. 4. Comparison of Singular and Coordinated Dam Operation (a) Reliability (b) Resiliency (c) Vulnerability

미래 유량 전망에서도 Mk3.0에서 25.55%, FGOALS-g1.0에서 28.05%, HadCM3에서 55.48%, CM4에서 70.09%로 매우 낮게 나타났다. 이는 과거 관측과 GCM을 이용한 미래 전망간의 비정상성을 해결하기 위해 필요한 보정 단계를 본 연구에서 고려하지 않았기 때문으로 해석된다. 그러나 본 연구에서는 미래 구간에서의 절대적인 전망값보다 운영방법에 따른 결과 차이를 보고자 하기 때문에, 상대적인 비교에 중점을 두었다.

댐군 연계운영과의 비교를 하면, 과거와 미래를 구분

할 것 없이 연계운영에서 더 높은 신뢰도를 확인할 수 있으며, 이는 용수공급 실패횟수를 줄이는데 연계운영이 효율적이라는 사실과 맞닿아있다. 미래 전망을 단독 댐 운영에 적용한 경우 신뢰도가 평균 47.55%이지만, 댐군 연계운영에 적용한 경우에는 평균 62.22%로서 단독 댐 운영 대비 130.85%로 증가함을 볼 수 있다. 특히 Mk3.0과 FGOALS-g1.0과 같이 신뢰도가 낮은 경우에는 댐군 연계운영을 적용했을 때 신뢰도가 47.13%, 48.33%로, 단독 댐 운영 결과 25.56%, 28.06% 대비 각각 184.39%, 172.24%로

증가함으로써 상승하는 신뢰도의 폭이 매우 크다는 점 또한 운영모형의 선정에 있어 시사하는 바가 있다.

Fig. 4의 (b)는 회복도 결과를 비교한 것이다. 시스템의 회복도는 실패상태에서 회복할 수 있는 평균적인 확률을 의미하는데, 예를 들면 회복도가 1인 경우 실패한 바로 다음 달에 회복하는 것을, 0.5인 경우 그 다음 달에 회복하는 것을 의미한다. 과거 관측과 모의 유량 시나리오에서는 단독 댐 운영 결과가 0.17, 0.23으로 댐군 연계운영 결과 0.17, 0.20 대비 각각 102.40%, 117.00%로 높았다. 그러나 미래 전망 유량 시나리오에서는 댐군 연계운영 결과가 평균 0.22로 단독 댐 운영의 0.19 대비 112.39% 높았다. 서로 큰 차이가 없는 CM4를 제외한 모든 GCM에서 댐군 연계운영에 의한 회복도가 더 높은 결과를 보이는 것을 확인하였는데, 특히 Mk3.0의 경우 단독 댐 운영의 0.11 대비 댐군 연계운영의 0.15가 137.53%로 증가했다. 이는 과거 유량 시나리오와 상이한 AR4에 따른 미래 전망 유량 시나리오의 특징에 있어, 댐군 연계운영 시 회복도가 더 높게 나타날 수 있음을 보인다.

Fig. 4의 (c)는 취약도 결과를 비교한 것이다. 신뢰도에 실패횟수가 줄어드는 대신 취약도 결과에서 1회 실패당 공급하지 못한 양이 커지는 것을 볼 수 있다. 과거 관측과 모의 유량 시나리오에서 단독 댐 운영 시 평균 $1.5920 \times 10^8 \text{ m}^3$, 댐군 연계운영 시 평균 $3.4187 \times 10^8 \text{ m}^3$ 으로, 댐군 연계운영을 했을 때 214.74%로 증가하였다. 연구 결과에서 신뢰도가 높아지는 구간마다 취약도가 커지는 것을 봤을 때, Fig. 4의 (c)를 통해 댐군 연계운영의 효과는 총 공급 실패 용량을 줄이는 것보다 실패횟수를 줄이는 것으로 나타남을 알 수 있다. 미래 전망에서는 단독 댐 운영 시 평균 $3.0240 \times 10^8 \text{ m}^3$ 로, 댐군 연계운영을 적용하게 되면 $3.4562 \times 10^8 \text{ m}^3$ 가 되어 114.29%로 증가한다. 특히 CM4의 경우 $1.2292 \times 10^8 \text{ m}^3$ 에서 $1.6857 \times 10^8 \text{ m}^3$ 가 되어 137.14%로 증가한다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 먼저 미래 유량 전망의 패턴이 계절별 가용수자원량의 편차가 증가하는 것을 확인하고, 이러한 위기의식을 바탕으로 하여 댐군 연계운영을 통한 이수 목적의 다목적댐 운영 효율화를 꾀하는 것이다.

유량이 적은 겨울철 유량이 과거 대비 최대 151.48% 증가하는 등 미래 전망 유량의 계절별 편차는 줄어들었으나, 풍수기(6~9월) 유량의 감소폭이 안동댐에서 평균 70.02%, 임하댐에서 50.40%로 감소하는 등 오히려 이수측면의 대

책마련은 더욱 필요해지게 되었다. 이는 댐의 추가 건설 혹은 댐 운영을 비롯한 수자원 관리의 고효율화가 필요한 상황으로 판단된다.

댐군 연계운영은 신뢰도와 취약도에서 단독 댐 운영과 차별된 결과를 보인다. 미래 전망 시나리오에서 신뢰도가 평균 47.55%에서 62.22%로 증가하는 등 실패횟수를 줄이는 효과를 얻을 수 있으나, 취약도는 그와 반비례하여 $3.0240 \times 10^8 \text{ m}^3$ 에서 $3.4562 \times 10^8 \text{ m}^3$ 로 악화되는 것을 봤을 때 총 공급 실패 용량을 줄이는 데까지는 역할을 기대할 수 없음을 알 수 있다. 이는 댐의 증고 혹은 신규 댐 건설을 하지 않는 이상 물부족량의 총합에 큰 변화를 줄 수 없기 때문으로 해석할 수 있다. 따라서 각 댐의 지리상, 물 공급 계획 관계상 연계운영이 가능한 댐군을 가능한 탐색하여 미래 유량 전망 결과에 대비한 물 공급 시스템의 효율화를 준하는 것이 바람직하다.

최근 '4대강 사업'으로 지칭되는 대규모의 하천 정비 및 수자원 확보 사업이 막바지에 이르고 있다. 이 사업의 일환으로, 안동댐과 임하댐의 저수지간 짧은 물리적 거리(연장 1.8km)를 이용한 연결공사가 진행되고 있다. 4대강 살리기사업본부에서 연결효과를 검토한 바로는 낙동강 본류 뿐 아니라 수질문제가 발생하고 있는 금호강에 용수를 공급할 수도 있으며, 용수공급능력이 증대하고 그에 따른 경제성을 확보할 수 있다고 한다. 완공된 후 자세한 제원을 확보하여 이에 대한 모의를 수행한다면 새로운 형태의 댐군에 대한 모의로써 가치가 있을 것이며, 또한 대규모의 사업으로 기후변화에 대응하는 사례로써 그 효용과 앞으로의 운영 전략 등을 논할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 [기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망(09-기술혁신C01)]과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, J.H., Yoo, C., and Yoon, Y.N. (2001). An analysis of hydrologic changes in Dacheong Dam basin using GCM simulation results due to global warming. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 4, pp. 335-345.
- Ahn, S.R., Lee, Y.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2008).

- Analysis of future land use and climate change impact on stream discharge. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 2B, pp. 215-224.
- Anwer, S., Yu, B., and Nabi, G. (2012). "Application of weather generator for environmental parameters estimation for upper indus basin." *Soil Environ*, Vol. 31, No. 1, pp. 11-20.
- Arnell, N.W. (1992). "Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment." *Journal of Hydrology*, Vol. 20, No. 8, pp. 321-342.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lee, B.J. (2007). Outlook on variation of water resources in Korea under SRES A2 scenario. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 12, pp. 921-930.
- Bower, B.T., Hufschmidt, M.M., and Reedy, W.H. (1962). "Operating procedures: Their role in the design and implementation of water resource systems by simulation analysis." in *Design of Water Resources System*, chap. 11, edited by A. Maass et al., Harvard University Press, Cambridge, Mass., pp. 443-458.
- Clark, E.J. (1950). "New York control curves." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 42, No. 9, pp. 823-827.
- Dehn, M., Burger, G., Buma, J., and Gasparetto, P. (2000). "Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling." *Engineering Geology*, Vol. 55, No. 3, pp. 193-204.
- Elsgaard, L., Borgesen, C.D., Olesen, J.E., Siebert, Ewert, S.F., Peltonen-Sainio, P., Rotter, R.P., and Skjelva, A.O. (2012). "Shifts in comparative advantages for maize, oat and wheat cropping under climate change in Europe." *Food Additives & Contaminants: Part A*, Vol. 29, No. 10, pp. 1514-1526.
- Gleick, P.H. (1986). "Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes." *Journal of Hydrology*, Vol. 88, pp. 97-116.
- Guo, S., Wang, J., Xiong, L., Ying, A., and Li, D. (2002). "A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China." *Journal of Hydrology*, Vol. 268, pp. 1-15.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982). "Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., and Melville, B.W. (2012). "Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed." *Stoch Environ Res Risk Assess*, Vol. 25, pp. 475-484.
- Hoglund, M., Thorsen, S.M., Semenov, M.A. (2012). "Assessing uncertainties in impact of climate change on grass production in Northern Europe using ensembles of global climate models." *Agricultural and Forest Meteorology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.02.010>
- Hwang, J.S. (2005). Investigating Applicability of Monthly Water Balance Models for Climate Change Impact Assessment, Master thesis, Seoul National University.
- Hwang, J.S., Jeong, D.I., Lee, J.K., and Kim, Y.O. (2007). Application of monthly water balance models for the climate change impact assessment. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 2, pp. 147-158.
- Jiang, T., Y. D. Chen, C. Xu, X. Chen, X. Chen, V., and Singh, P. (2007). "Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China." *Journal of Hydrology*, Vol. 336, pp. 316-333.
- Johnson, S.A., Stedinger, J.R., and Staschus, K. (1991). "Heuristic Operating Policies for Reservoir System Simulation." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 673-685.
- Kang, D.H. (2007). An Impact Assessment of Climate Change of Water Resources for the Geum River Basin, Master thesis, Seoul National University.
- Kim, B.S., Kim, H.S., Seoh, B.H., and Kim, N.W. (2004). Impact of climate change on Yongdam Dam basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 2, pp. 185-193.
- Kim, B.S., Kim, S.J., Kim, H.S., and Jun, H.D. (2010) An impact assessment of climate and landuse change on water resources in the Han River. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 3, pp. 309-323.

- Kim, Y.O. (1998). Incorporating climate change scenarios into water resources management. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No. 4, pp. 407-413.
- Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning (2012). Climate Change Assessment & Projection for Hydrology in Korea, Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning.
- Lee, D.R., Kim, U.T., and Yoo, C. (2004). Climate change impacts on meteorological drought and flood. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 4, pp. 315-328.
- Lee, G.M., Lee, S.Y., and Lee, E.R. (2010). Water supply and reliability increment by dams connection, 2010 KWRA Academic Conference, pp. 317-321.
- Lee, J.K., and Kim, Y.O. (2011). Evaluation of the uncertainty of GCM scenarios: Application of maximum entropy, 2011 KSCCR Academic Conference, pp. 46-47.
- Lund, J.R., and Guzman, J. (1999). "Some Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 3, pp. 143-153.
- Madsen, M.S., Maule, C.F., Mackellar, N., Olesen, J.E., and Christensen, J.H. (2012). "Selection of climate change scenario data for impact modelling." *Food Additives & Contaminants: Part A*, Vol. 29, No. 10, pp. 1502-1513.
- McCabe, Jr., G.J., and Ayers, M.A. (1989). "Hydrologic effects of climate change in the Delaware river basin." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 25, No. 6, pp. 1231-1242.
- Ministry of Environment (2006). Prediction and impact assessment of water cycle with climate change.
- Ministry of Science and Technology (2011). The Criteria of Dam Design, Ministry of Science and Technology.
- Ministry of Science and Technology (2007). Technology for climate change impact assessment on water resources, Ministry of Science and Technology.
- Minville, M., Brissette, F., Krau, S., and Leconte, R. (2009). "Adaptation to Climate Change in the Management of a Canadian Water-Resources System Exploited for Hydropower." *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 2965-2986.
- Minville, M., Brissette, F., Krau, S., and Leconte, R. (2010). "Impacts and Uncertainty of Climate Change on Water Resource Management of the Peribonka River System (Canada)." *Journal of Water Resources Planning Management*, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5462.0000041, pp. 376-385.
- Paredes, J., and Lund, J.R. (2006). "Refill and Drawdown Rules for Parallel Reservoirs: Quantity and Quality." *Water Resources Management*, Vol. 20, pp. 359-376.
- Park, K.S. (2009). Scenario-based Effect Analysis of Alternatives for Integrated Watershed Management Considering Climate and Landuse Changes, Master thesis, Seoul National University.
- Racsko, P., Szeidl, L., and Semenov, M.A. (1991). "A serial approach to local stochastic weather models." *Ecological Modelling*, Vol. 57, No. 1-2, pp. 27-41.
- Rahman, M., Bolisetti, T., and Balachandar, R. (2012). "Hydrologic modelling to assess the climate change impacts in a Southern Ontario watershed." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 91-103.
- Raje, D., and Mujumdar, P.P. (2010). "Reservoir Performance under Uncertainty in Hydrologic Impacts of Climate Change." *Advanced in Water Resources*, Vol. 33, pp. 312-326.
- Rietveld, M.R. (1978). "A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine." *Agricultural Meteorology*, Vol. 19, No. 2-3, pp. 243-252.
- Semenov, M.A., and Brooks, R.J. (1999). "Spatial interpolation of the LARS-WG weather generator in Great Britain." *Climate Research*, Vol. 11, pp. 137-148.
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M., and Richardson, C.W. (1998). "Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates." *Climate Research*, Vol. 10, pp. 95-107.
- Seo, Y.W., Lee, S.H., Kim, Y.O., and Lee, D.R. (2000). "Climate Change Assessment for Reservoir Operations of Dae-Chung Dam." 2000 KSCE Academic Conference, pp. 427-430.
- Thomas, H.A. (1981). Improved Methods for National Water Assessment. Report, WR15249270, U.S. Water

Resource. Council, Washinton, D.C.

Trabucco, A., Zomer, R.J., Bossio, D.A., Straaten, O.V., and Verchot, L.V. (2008). "Climatechange mitigation through afforestation/reforestation: A global analysis of hydrologic impacts with four case studies." *Agriculture, Ecosystem & Environment*, Vol. 126, pp. 81-97.

Vicuna, S., Maurer, E.P., Joyce, B., Dracup, J.A., and Purkey, D. (2007). "The Sensitivity of California Water Resources to Climate Change Scenarios." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 43,

No. 2, pp. 482-498.

Yoo, S.H., Choi, J.Y., Nam, W.H., and Hong, E. (2012). "Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea." *Agricultural Water Management*, Vol. 112, pp. 33-42.

논문번호: 12-127	접수: 2012.12.20
수정일자: 2013.05.31/10.17	심사완료: 2013.10.17