

안동-임하 연결도수로 설치에 따른 가용 수자원량에 관한 연구

추연문^{1*}, 지홍기¹, 권기대¹, 김철영²

¹영남대학교 건설시스템공학과, ²K-water 복합도시처

Study on Potential Water Resources of Andong-Imha Dam by Diversion Tunnel

Choo, Yeon Moon^{1*}, Jee, Hong Kee¹, Kwon, Ki Dae¹ and Kim, Chul Young²

¹Department of Civil Engineering, Yeungnam University

²Division of Complex City, K-water

요 약 도시화 및 산업화에 따른 온실가스의 증가로 전 세계적인 이상기후 현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 국내에서도 이러한 현상의 하나로 홍수와 가뭄의 영향이 지속적으로 심화되고 있다. 기후변화는 이수, 치수, 환경 등 다양한 측면에서 물 관리 전반에 걸쳐 복잡성을 가중시키고 불확실성을 확대시키는 등 많은 영향을 초래한다. 또한 과거와는 달리 하천유지수량, 환경용수량 등 다양한 용수수요의 증가에 따라 제한된 가용수자원의 추가적인 확보를 위한 분석과 연구가 필요하다. 본 연구에서는 안동댐과 임하댐 유역을 대상으로 기후변화 시나리오와 토양수분 저류구조 Tank 모형을 이용하여 장기 유출량을 산정하였고, 연결도수를 통해 병렬 연결된 안동댐과 임하댐의 저수지 연결모의운영을 수행하여 임하댐에서 안동댐으로 전환되는 추가 가용 수자원량을 분석, 비교함으로써 미래 기후변화가 가용수자원 확보에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 대표농도경로 기후변화 시나리오 중 RCP 6.0과 RCP 8.5를 이용하여 대상유역의 상세 수문자료를 생산하여 과거 유역의 관측 강수량 자료와 경향성을 분석한 결과 시나리오별 모두 5%~9%의 범위로 강수량이 증가하는 것으로 분석되었으며, 목적함수를 이용한 민감도 분석을 통해 가장 높은 적합도를 나타낸 개체군의 크기는 1000 이었으며 교차비율은 80% 이었다. 본 연구의 결과를 이용하여 미래 기후변화에 대응한 물 관리 측면에서 저수지 운영의 효과를 극대화하고 장기적으로 안정적이고 풍부한 용수공급 계획을 수립하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

Abstract World is experiencing abnormal weather caused by urbanization and industrialization increasing greenhouse gas and one of these phenomenon domestically happening is flood and drought. The increase of green-house gases is due to urbanization and industrialization acceleration which are causing abnormal climate changes such as the El Nino and a La Nina phenomenon. It is expected that there will be many difficulties in water management, especially considering the topography and seasonal circumstances in Korea. Unlike in the past, a variety of water conservation initiatives have been undertaken like the river-management flow and water capacity expansion projects. To meet the increasing demand for water resources, new environmentally-friendly small and medium-sized dams have been built. Therefore, the development of a new paradigm for water resources management is essential. This study shows that additional security is needed for potential water resources through diversion tunnels and is very important to consider for future water supplies and situations. Using RCP 6.0 and RCP 8.5 in representative concentration pathway climate change scenario, specific hydrologic data of study basin was produced to analyze past observed basin rainfall tendency which showed both scenario 5%~9% range increase in rainfall. Through sensitivity analysis using objective function, population in highest goodness was 1000 and cross rate was 80%. In conclusion, it is expected that the results from this study will help to make long-term and stable water supply plans by using the potential water resource evaluation model which was applied in this study.

Key Words : Genetic Algorithms, Parallel Operation, Representative Concentration Pathway

본 연구는 “2011~2012년 영남대학교 산학연구치의 교비 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사한다.”

*Corresponding Author : Choo, Yeon Moon(Yeungnam Univ.)

Tel: +82-2-3290-4722 email: chooyean@naver.com

Received January 17, 2014

Revised February 4, 2014

Accepted February 5, 2014

1. 서론

도시화 및 산업화에 따른 온실가스의 증가로 전 세계적인 이상기후 현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 국내에서도 이러한 현상의 하나로 홍수와 가뭄의 영향이 지속적으로 심화되고 있다. 특히 기후변화 영향에 따른 수문상황의 변화가 물 관리여건 등 가용수자원에 미치는 영향이 큰 것으로 제시되고 있다. 이러한 기후변화에 대한 대응의 일환으로 범정부간 협의체인 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 제5차 기후변화 평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5) [1]에서 적용하기 위해 인간의 활동이 대기에 미치는 영향으로 인한 복사량 변화의 정도로 온실가스 농도를 정의한 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 새로운 온실가스 발생 대표 시나리오로 확정하고 세계 각국에서는 지형적, 기후학적인 특성을 고려하여 대표농도경로(RCP)에 기반을 둔 기후변화 시나리오를 생산하고 있다. 또한 기존에는 크게 고려되지 않았던 다양한 용도의 이수용량 수요 증가에 따라 중소규모의 신규댐 건설에 대한 필요성은 지속적으로 제기되고 있으나 댐 개발 적지의 감소와 과거 개발위주의 논리에 반대하는 환경 보존·보전 론의 대두로 신규 댐 개발은 어려워지고 있는 실정으로 더 이상 수자원확보의 패러다임을 신규 댐 개발에만 치중해서는 안 되며 기존 댐의 재개발과 댐 군 연계운 영기법의 개발 및 개선 그리고 물리적 또는 비물리적 방법을 이용한 유역전환 방식의 가용수자원 최적 활용방안 등 다양한 방법론들에 대한 연구를 통해 새로운 이·치수기 저수지 운영방안의 제시가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 안동댐과 임하댐을 대상유역으로 연결도수로 통한 전환 유량을 고려한 저수지 모의운영을 통해 임하댐의 잉여 수자원의 활용으로 가용수자원의 추가 확보량을 과거 관측 수문자료와 미래 기후변화에 대응한 대표농도경로 기후변화 시나리오를 이용하여 정량적으로 분석하고 평가하였다.

2. 적용이론

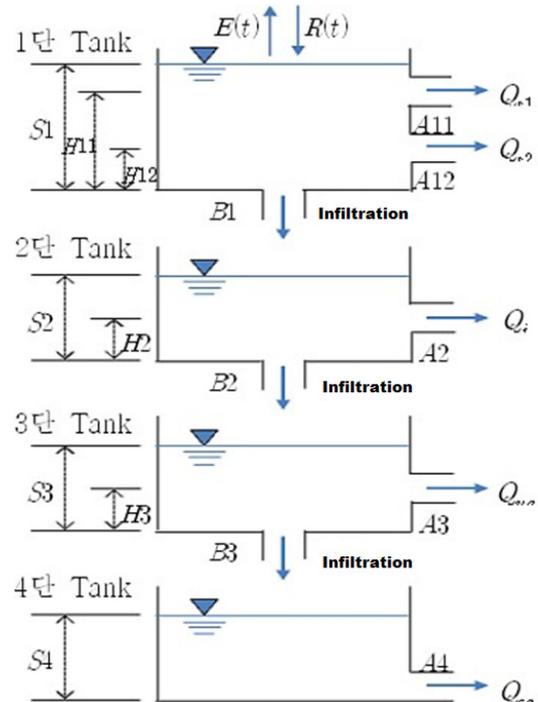
2.1 Tank 모형

장기 유출모형 중 하나인 Tank 모형은 Sugawara (1961) [2]가 처음 개발한 모형으로 주로 일본과 동남아 각국에서 널리 이용되고 있는 상용화 모형이다. 이 모형은 임의의 집수유역을 여러 개의 저류형 Tank로 가정하

여 자연계에서 일어나는 유출과정을 모형화한 것으로 유역 내 유출과 관련된 일종의 개념적 수문모형인 동시에 집중형(Lumped)모형이다.

Tank 모형은 복잡한 유출현상을 계산하는 알고리즘이 다른 유출 모형에 비해 간단하지만 비교적 정확한 유출 모의를 하는 장점을 가지고 있다(Yokoo et al, 2001) [3]. 유역에 따라 직렬 또는 병렬로 연결하여 유역반응을 표현하며, 홍수기의 유출과 갈수기의 유출을 동시에 재현할 수 있고 세계기상기구(WMO)의 모형 비교프로그램에서 비교 및 검토되어, 국내에서는 낙동강 저수관리에 사용되었다. Tank 모형은 $m \times n$ Tank 모형과 직렬 탱크모형 등이 있으며, 홍수사상 모의 시에는 직렬3단, 장기 유출분석 시에는 직렬 4단, 건기와 우기가 뚜렷이 구별되는 지역에서는 $m \times n$ Tank 모형이 일반적으로 사용된다. 여기서 $m \times n$ 은 대상유역을 고저 차에 따른 지대(S_1, S_2, \dots)로 구분하였을 때 m 은 지대의 수를 나타내며, n 은 상부 및 측면 지대에서 받아들이는 각 Tank 단수를 의미한다. 또한 어떠한 유역이 건기 및 우기의 구분이 확실하여 건기에는 고지대부터 건조해지며 하천부근 일부지역만이 습윤한 상태로 있다가 우기에는 하천에 접한 부분부터 습윤하게 되는 유역에서 $m \times n$ Tank 모형이 사용된다.

Tank 모형의 계산과정 자체는 단순선형 계산이지만



[Fig. 1] Concept of four tank model

각 단의 여러 유출공에 의한 유출이 시간차를 두고 조합되므로 결과적으로는 비선형적인 물수지 계산이라고 할 수 있으며, 일반적으로 홍수유출분석에는 3단 Tank 모형이 사 갈수 유출분석에는 4단 Tank 모형이 사용된다. Fig. 1에서는 본 연구에서 적용한 4단 Tank 모형의 개념도를 나타내었으며, Eq. (1)은 Tank 모형의 계산 알고리즘을 나타낸 것이다.

$$Q(t) = (Q_{s1}(t) + Q_{s2}(t) + Q_i(t) + Q_{ug}(t) + Q_{cg}(t)) \times \frac{\text{유역면적 (km}^2\text{)}}{86.4} \quad (1)$$

여기서, S : 각 단의 저류고(mm), Q : 유출고(mm/day), I : 침투공에 대한 침투고(mm/day), H : 각 단의 유출공의 높이(mm), A : 유출공 계수, B : 침투공 계수를 나타내며 Tank 모형의 각 단의 유출성분은 다음 Table. 1과 같다.

[Table 1] Runoff characteristics of the tank model

Classify		Runoff Component	Note
1Step Tank	Initial Abstraction	Surface Storage, Evapotranspiration, Infiltration	$E(t)$, Q_{s2}
	Surface Runoff	Stream Flow, Surface Runoff	Q_{s1}
2Step Tank	Interflow	Subsurface Runoff	Q_i
3Step Tank	Ground-water Runoff	Unconfined Runoff	Q_{ug}
4Step Tank	Ground-water Runoff	Confined Runoff	Q_{cg}

Tank 모형은 복잡한 유출 현상을 비교적 단순한 알고리즘으로 계산해 다른 모형에 비해 간단하지만 초기 입력조건인 16개의 매개변수의 설정해 주어야하며 설정 값이 결과 값에 미치는 영향은 크지만 이러한 매개변수는 모형 내부에서 서로 영향을 미치고 있어 추정이 어려운 단점이 있으며 이러한 매개변수의 추정을 위해 시행착오법(Try and Error Method)과 같은 경험적인 방법과 Powell방법, SCE-UA 알고리즘, 유전자 알고리즘과 같은 다양한 최적화방법이 사용되고 있다.

[Table 2] Input parameters of the Tank model

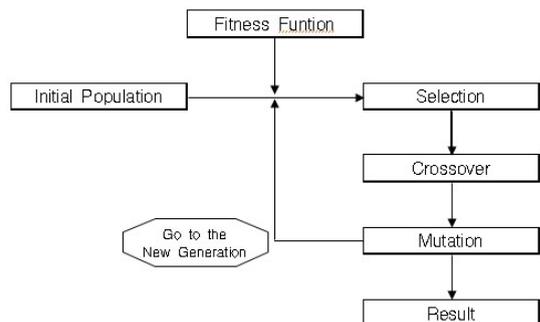
Classify	1 Step Tank	2 Step Tank	3 Step Tank	4 Step Tank
Initial Storage Head	S1	S2	S3	S4
Runoff Coefficient Height	H11, H12	H2	H3	-
Runoff Coefficient	A11, A12	A2	A3	A4
Infiltration Coefficient	B1	B2	B3	-

2.2 유전자 알고리즘

유전자알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 1960년대에 John Holland에 의하여 창안되었고 Holland와 그의 학생 및 동료들에 의하여 1960년대와 1970년대 미시간대학에서 학문으로서의 체계가 정립되었다(Holland, 1975 [4]; Goldberg, 1989 [5]). 유전자알고리즘이란 자연계의 진화 현상인 유전적 진화와 적자생존이라는 개념을 모델링한 최적화 탐색방법이다.

유전자 알고리즘에서는 각각의 해를 하나의 개체로 보고 이들의 집합을 개체군 또는 개체집단이라고 하며, 하나의 개체는 한 개 또는 여러 개의 염색체로 구성되어 진다. 이러한 염색체를 변형하여 좀 더 우수한 개체를 생성하는 역할을 하는 수학적 연산자들을 유전연산자(Genetic Operators)라고 한다.

이러한 유전자 알고리즘이 다른 최적화 기법들과 구분되는 특징은 파라미터를 코딩한 것을 직접 이용하여 점(Point)이 아닌 다점(Multipoints) 군(Population) 탐색을 하여 확률적 연산자를 사용하므로 다른 탐색 또는 최적화 방법 중 하나인 계산에 의한 방법에 비해 최적 해를 도출할 가능성이 높다. 유전자 알고리즘의 기본적인 연산 과정은 다음 Fig. 2와 같다.



[Fig. 2] Operational structure of the genetic algorithm

자연계에서 생물학적인 복제는 부모 개체를 통해 자식 개체로 이루어진다. 이러한 과정은 적합도가 높은 개체일 수록 다음 세대에 더 많은 자손을 가질 확률이 높다는 것을 의미하며, 이는 자연계의 적자생존의 자연선택의 원리를 의미한다. 유전자 알고리즘에서의 복제(Reproduction)는 각각의 개체의 스트링이 가지는 적합도에 따라 그 스트링을 복제하는 과정이라고 정의할 수 있으며, 이를 위한 공통적인 연산자는 선택(Selection), 교차(Crossover), 돌연변이(Mutation)의 세 가지이며 알고리즘은 이와 같은 연산자들을 이용하여 최적화 문제에서 전역적인 최적 해를 구한다.

선택은 Charls Darwin의 적자생존 또는 자연도태의 현상을 적용하는 연산자이다. 이는 개체집단을 주어진 환경에 가장 적합하고 강하게 해주는 특징을 가지고 있어 연산의 반복에 따라 세대수가 증가할수록 더 우수한 개체집단을 형성하게 된다.

Holland는 선택되는 부모개체의 최적화를 위해 상대적 적합성에 따라 비례선택(Proportional selection)의 필요성을 주장하였다. 한세대의 n개의 염색체들 중 특정한 염색체 k가 선택될 가능성(P_s)을 수식으로 나타내면 Eq. (2)과 같다.

$$P_s(k) = \frac{f_k}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (2)$$

여기서, f_k 는 다른 염색체들과의 상대비교에 의한 적합도이며, Goldberg는 적합도에 따라 가중치를 두는 룰렛 휠 선택(Roulette wheel selection)을 제안하였다. [5] 이 방법은 주어진 환경에서 적합한 염색체는 더 넓은 Biased Roulette Wheel의 면적을 가지며 또한 더 많은 선택의 기회를 갖게 된다는 원리이다. 룰렛 휠 선택방법 외 알고리즘으로 선택을 구현하는 방법은 토너먼트선택(Tournament selection), 순위에 기초한 선택(Ranking-based selection) 등이 있다. 교차는 부모세대의 염색체를 조합하여 새로운 자손세대의 염색체를 만드는 유전학적인 기법의 하나이다. 자연계에서 자손은 부모 세대로부터 유전자를 이어받으면서도 부모와는 전혀 다른 형질을 가지듯이 유전자 알고리즘에서도 이 과정을 모방화한 것이 교배이다. 이는 개체간의 정보를 교환하고 스트링의 좋은 부분을 결합하는 효과적인 수단이다. 선택 과정으로 얻어진 모집단에 있는 부모개체 중 Eq. (3)으로 이루어진 한 쌍의 염색체가 무작위로 추출되어 교차과정을

거치게 된다.

$$\vec{g}_s(t) = (g_{s1}, \dots, g_{sL}) \quad (3)$$

$$\vec{g}_v(t) = (g_{v1}, \dots, g_{vL})$$

선택된 염색체가 재결합하기 위한 교차위치는 무작위로 선택되며, 교차 이후 Eq. (4)와 같은 새로운 자손을 형성한다.

$$\vec{g}_s'(t) = (g_{s1}, \dots, g_{v, \chi+1}, g_{s\chi}, g_{v, \chi+1}, \dots, g_{sL}) \quad (4)$$

$$\vec{g}_v'(t) = (g_{v1}, \dots, g_{v, \chi+1}, g_{v\chi}, g_{s, \chi+1}, \dots, g_{vL})$$

여기서, $\chi \in \{1, \dots, L\}$ 은 교차위치를 나타내는 난수로 균등분포를 따르며 교차에 의해 생성된 자손은 그들의 부모 개체를 대신하여 새로운 개체를 형성한다.

돌연변이는 유전자를 일정한 확률로 변화시키는 조작이다. 기존의 다른 탐색방법들은 탐색공간에서 최적 값을 찾기도 전에 국소 최적 해에 빠질 위험이 있지만, 돌연변이 연산을 통해 유전자 알고리즘은 해가 될 가능성이 있는 개체집단을 유지하면서 그들 모두가 동시에 최적 값을 찾아나가기 때문에 국소 최적 해에 빠질 위험을 어느 정도 방지할 수 있다. 선택과 교차 과정을 통해 새로이 만들어진 자손 개체에 대해 돌연변이 과정을 거치게 되며, 모든 염색체의 유전자마다 돌연변이 발생여부를 난수를 발생시켜 판단하게 된다. 이 때 주어진 돌연변이 확률(p_m)보다 낮은 값의 난수가 발생되면 염색체의 해당 유전자가 돌연변이로 인하여 반전된다.

돌연변이 연산자는 다른 연산자에 비해 그 중요성이 다소 떨어지므로 부 연산자(Background Operator)로 생각되고 있으며, 돌연변이 확률을 너무 크게 잡으면 최적해 탐색 시 방향성을 잃어버릴 수 있고 너무 적으면 국소 최적 해에서 벗어날 수 없으므로, Goldberg(1987)는 돌연변이의 발생확률을 0.01로 제안 [6] 한 바 있으며, 일반적인 돌연변이 확률 p_m 은 다음 Eq. (5)와 같다.

$$P_m = \frac{N_C}{N_S} \times 100(\%) \quad (5)$$

여기서, N_C 는 변화하고자 하는 염색체의 수이며 N_S

는 초기 모집단의 총 염색체 수를 의미한다.

다른 일반적인 최적화 문제와 마찬가지로 유전자 알고리즘에서도 실측값에 대한 모의결과의 정확도를 평가하기 위한 목적함수의 설정이 필요하다. 목적함수는 모형거동의 기준 역할을 하며, 목적함수의 결과 값은 실측치에 대한 모의치의 근접정도를 나타낸다. 하지만 특정 목적함수가 다른 목적함수 보다 모형보정에 더 적절하다고는 할 수 없으며 선택한 목적함수에 따라서는 대상유역의 매개변수 최적 해를 찾을 수 없는 경우도 있으므로 적절한 목적함수의 선택이 필요하다.

본 연구에서는 장기간 전체적인 수문패턴이나 모의 전체기간 동안의 총 유출량 등 매개변수를 통한 모형의 적합도 평가를 위해 상관계수(CORrelation Coefficient, CORR-C), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 그리고 Nash and Sutcliffe(1970) [7]이 제안한 모형효율성 계수(Model Efficiency, ME)를 목적함수로 사용하였으며 다음 Eq. (6)에서 Eq. (8)과 같다.

$$CORR - C = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) \times Q_{cal}(i))}{SD1 \times SD2} \quad (6)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i)]^2}{n}} \quad (7)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}}]^2 - \sum_{i=1}^n [Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}}]^2} \quad (8)$$

여기서,

$$SD1 = \sqrt{\left| \frac{\sum (Q_{obs}(i))^2}{n} - \left(\frac{\sum Q_{obs}(i)}{n} \right)^2 \right|}$$

$$SD2 = \sqrt{\left| \frac{\sum (Q_{cal}(i))^2}{n} - \left(\frac{\sum Q_{cal}(i)}{n} \right)^2 \right|} \quad \text{이며,}$$

Q_{obs} 는 관측유량(m³/s), Q_{cal} 는 계산유량(m³/s), $\overline{Q_{obs}}$ 는 평균관측유량(m³/s), n은 관측 또는 계산된 데이터의 개수

이다.

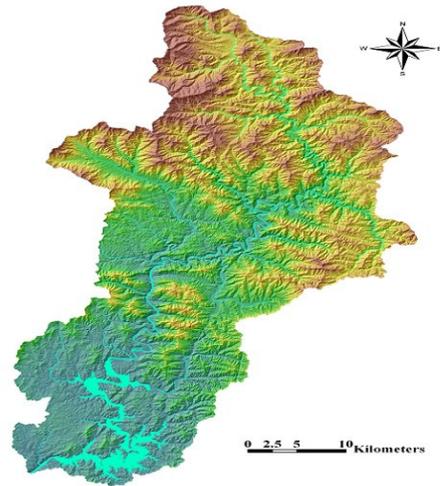
Eq. 6은 상관계수(CORR-C)이며 -1과 +1 사이의 값을 가지는 무차원계수로 표준편차 비율을 이용, 모의치와 실측치의 수문곡선의 크기와 모양의 일치정도를 동시에 파악할 수 있으며, 값이 -1과 +1에 가까울수록 모의 수문곡선이 실측 수문곡선에 일치한다고 평가된다. Eq. 7은 평균제곱근 오차(RMSE)로 데이터의 개수에는 무관하며 모의결과가 평균적으로 어느 정도의 오차로 발생하는지를 나타내는 일종의 평균치 분석방법으로 오차정도가 낮을수록 높은 적합도를 가진다고 평가된다. Eq. 8는 모형효율성 계수(ME)이며 무차원계수 값이다. 모의된 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치하면 1에 가까워지는 단순명료한 특성이 있으며, 이 값이 음수이면 실측값의 평균을 사용하는 것이 모형에 의해 예측된 값을 사용하는 것보다 좋다는 것을 의미한다.

3. 가용수자원 분석을 위한 자료 구축

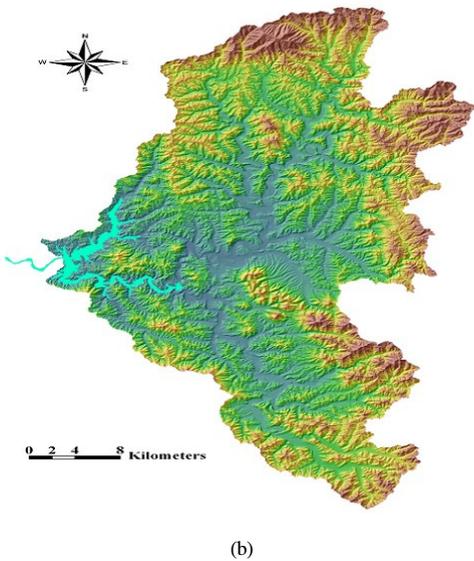
3.1 대상유역

유역의 수문학적 특성은 지형학적인 요소와 기상학적 특성에 따라 많은 영향을 받으며 대상유역의 결정은 지형학적·기상학적인 자료가 충분히 축적된 곳을 선택하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 홍수와 갈수 시 연결운영방식으로 유역변경을 통한 전환(Switching)기법을 적용하기 위해 현재 4대강 사업의 물 확보 계획의 일환으로 연결도수로 설치를 진행하고 있는 안동댐과 임하댐 유역을 연구대상 유역으로 선정하였다.



(a)



[Fig. 3] Dam Watershed Map
(a) Andong Dam (b)Imha Dam

[Table 3] Geomorphological characteristics factor of Andong and Imha-dam Watershed

Classify	Watershed Area (km ²)	River Length (km)	Watershed Average Width (km)	Shape Factor (A/L ²)	Average Elevation (EL.m)	Average Slope(%)
Andong Dam	1,584	172.0	9.21	0.05	557.3	42.39
Imha Dam	1,361	98.1	13.87	0.14	394.6	40.47

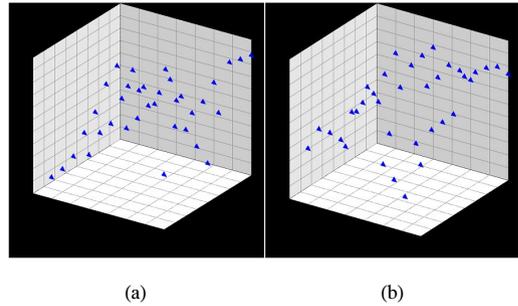
* Dam operation Manual, 2012, K-Water and Nakdong Basin Reserach, 2009, MoLIT

3.2 Tank 모형의 매개변수 최적화

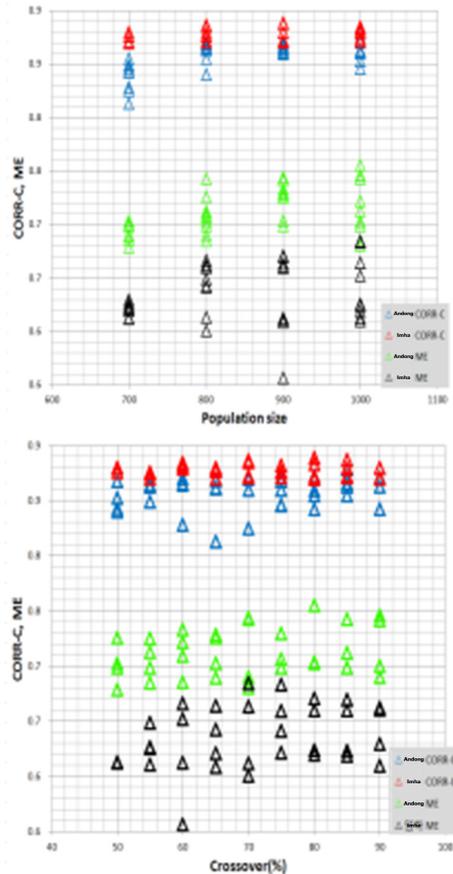
본 연구에서는 Tank 모형의 매개변수의 최적화를 위해 유전자알고리즘을 사용하였다. 최적값을 도출하기 위해 Tank 모형과 유전자알고리즘을 결합하고 다양한 수문 사상을 모의하여 매개변수의 추정치가 가능하도록 목적함수를 결정하였다. 유전자알고리즘은 초기 조건인 개체수 (Population Size), 교차비율(Crossover Ratio)와 같은 제어 파라메터에 따라 최적화 결과에 미치는 영향이 크기 때문에 개체수와 교차비율을 변화시키며 민감도 분석을 통해 적합도가 가장 높은 파라메터 값을 이용하여 매개변수의 최적화를 수행하였다.

다음 Fig. 4에서는 각각 안동댐과 임하댐의 관측 수문 자료를 이용한 계산결과에 대한 적합도 평가를 위해 목적함수 중 RMSE에 의한 매개변수 최적화를 수행하여 개체수와 교차비율에 따른 변화를 도시하였다. 아래 그림에서

세로축은 목적함수인 RMSE를 나타내며, 삼각형의 표지들은 개체군의 크기와 교차비율에 따른 목적함수의 값을 나타낸다. 개체군의 크기는 700개체에서 1,000개체까지 순차적으로 변화시켰으며, 교차비율은 50%에서 90%사이의 값을 변화시키며 목적함수의 민감도를 분석하였다.



[Fig. 4] According to the size of the population and the cross ratio of the change in the objective function
(a) Andong Dam (b)Imha Dam



[Fig. 5] The goodness of fit of the objective function
(a) Population Size (b)Cross Ratio

개체군의 크기와 교차비율에 따라 나타나는 영향을 상관계수와 모형효율화 계수를 사용하여 나타나는 적합도의 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 목적함수를 이용한 민감도 분석결과 개체군의 크기는 커질수록 증가하는 경향으로 나타났으나, 교차비율의 경우 80%를 초과하면 전반적인 적합도가 감소하는 것으로 분석되었다. 민감도 분석결과에 따라 결정된 개체군의 크기(1000), 교차비율(80%)을 적용하여 유전자 알고리즘 연산을 수행하였으며, 최적 제어 파라미터에 대한 목적함수 적합도는 다음 Table. 4와 같다.

[Table 4] The goodness of fit of the objective function of the optimal control parameters

Objective Function	Andong Dam			Imha Dam		
	CORR-C	RMSE	ME	CORR-C	RMSE	ME
Godness of Fit	0.8721	49.6824	0.7550	0.8849	49.5642	0.6844

3.3 미래 상세 수문데이터의 생산

미래 수문상황 변화에 따른 가용 수자원량 평가를 위해 유역의 강수량 및 증발산량 산정을 위해 강수 및 기온 자료는 기상청(KMA)에서 제공받은 대표농도경로(RCP) 남한상세 기후변화 시나리오(1km 격자) 중 2021년~2050년까지 30개년의 RCP 6.0과 RCP 8.5 시나리오를 사용하였다. RCP 6.0 시나리오는 온실가스 저감정책이 어느 정도 실현되는 경우를 가정한 것으로 미래 사회에 가장 잘 부합된다고 판단하여 사용하였으며, RCP 8.5 시나리오는 현재 추세로 온실가스가 배출되는 무감축 시나리오로 RCP 6.0 시나리오와의 비교를 위해 선정하였다.

기후변화 시나리오를 이용하여 미래 상세 수문데이터를 생산하기 위해 안동댐과 임하댐 대상유역의 강수관측소(안동댐 21개소, 임하댐 20개소)의 TM좌표에 해당하는 격자점의 일 강수자료를 추출하였으며, 추출된 강수량 자료를 관측소별 지배 면적비(Thiessen 계수)를 적용하여 유역 평균 강수량을 산정하였다. 다음 Table. 5에서는 분

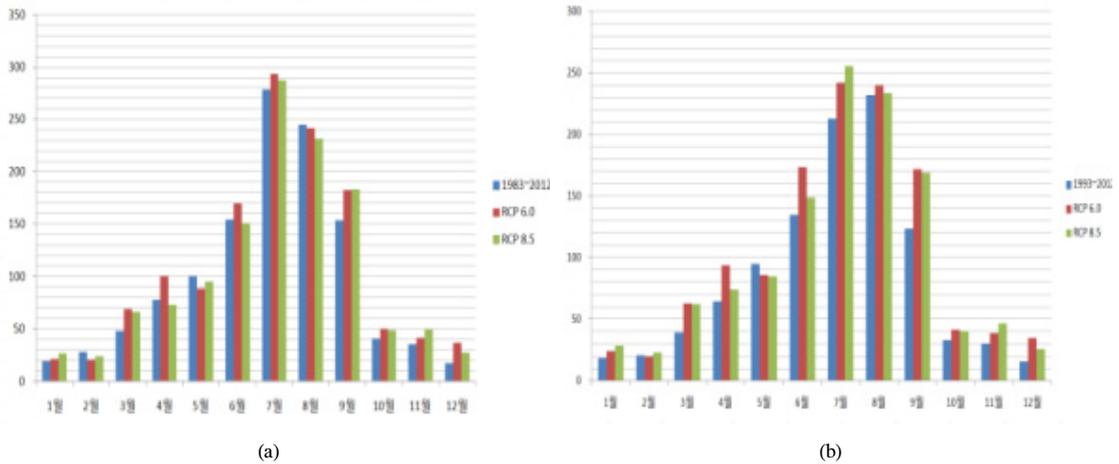
[Table 5] Precipitation Forecast For Andong and Imha Dams

Year	RCP 6.0 Rainfall(mm)		RCP 8.5 Rainfall(mm)		Year	RCP 6.0 Rainfall(mm)		RCP 8.5 Rainfall(mm)	
	Andong	Imha	Andong	Imha		Andong	Imha	Andong	Imha
2021	1,038.8	1,037.4	1,039.4	935.5	2036	1,330.0	1,279.8	1,242.4	1,263.2
2022	1,298.8	1,197.0	1,365.3	1,426.6	2037	1,103.7	1,041.5	1,512.4	1,512.5
2023	1,089.8	1,048.9	1,528.0	1,444.5	2038	900.9	809.8	1,051.4	973.4
2024	1,272.8	1,186.4	929.3	891.0	2039	1,172.5	1,058.3	958.3	855.4
2025	1,746.7	1,377.9	1,466.9	1,434.4	2040	1,414.9	1,307.1	1,548.2	1,593.6
2026	1,276.9	1,209.5	1,282.4	1,278.2	2041	1,534.0	1,492.3	1,326.3	1,170.4
2027	1,132.5	1,064.9	1,217.6	1,153.5	2042	1,414.6	1,105.2	903.0	920.9
2028	899.4	849.5	1,269.7	1,156.5	2043	1,203.4	1,083.9	1,251.7	1,135.0
2029	1,460.7	1,398.5	1,670.3	1,523.6	2044	1,145.2	971.3	1,153.4	1,183.1
2030	1,258.2	1,131.1	1,071.3	916.6	2045	1,186.8	1,119.9	1,412.2	1,358.5
2031	2,136.0	2,186.5	1,375.1	1,036.4	2046	1,069.3	1,097.5	1,044.7	1,026.0
2032	2,177.7	1,969.4	1,435.0	1,277.6	2047	2,028.2	2,041.4	1,121.7	1,133.1
2033	1,365.8	1,282.1	1,300.0	1,291.3	2048	1,050.7	965.7	1,110.6	1,023.6
2034	1,296.4	1,271.1	1,271.5	1,116.9	2049	1,075.4	1,049.1	1,049.4	964.9
2035	1,291.5	1,231.1	1,107.7	1,115.4	2050	1,104.4	989.6	1,928.8	1,632.8

* Climate Change Scenario Data: KMA Climate Change Information Center(www.climate.go.kr) [8].

[Table 6] Monthly rainfall scenarios of Andong and Imha-dam Watershed

Classify (Month)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Andong Dam	'83-'12	19.5	27.8	47.9	77.5	100.6	154.0	278.7	244.8	153.9	40.9	35.6	17.2
	RCP 6.0	21.4	20.4	69.2	100.3	88.5	169.8	293.3	241.5	182.6	50.4	41.7	36.9
	RCP 8.5	26.5	24.2	66.1	73.3	95.4	151.1	287.0	231.8	183.3	48.7	49.8	27.4
Imha Dam	'93-'12	18.6	20.5	39.2	64.6	94.8	134.9	212.9	231.9	123.8	33.0	30.3	15.5
	RCP 6.0	24.1	19.9	62.9	93.7	85.9	173.4	241.8	239.9	171.8	41.6	38.8	34.6
	RCP 8.5	28.5	23.0	62.2	73.9	84.5	149.1	255.5	233.5	168.7	40.2	46.6	25.7



[Fig. 6] Monthly rainfall scenarios of Andong and Imha-dam Watershed
(a) Andong Dam (b) Imha Dam

석한 미래 기간의 연도별 강우량을 나타내었다.

안동댐과 임하댐의 기후변화 시나리오에 따른 미래 강수량과 과거 관측 월평균 강수량을 살펴보면 다음 Fig. 6과 Table. 6과 같이 홍수기인 6월~9월 사이에 집중되어 나타났으며, 연평균 강수량은 과거 강수량보다 모두 증가하는 것으로 나타났다. 특히 미래 강수량의 3월~5월 월평균 강수량이 과거대비 두드러지게 증가되어 나타났다.

Tank 모형의 입력자료 중 증발산량을 추정하기 위한 상대습도, 풍속, 일조시간, 기온 등 기후자료는 대상유역에서 가장 인접한 안동기상대의 1994년~2012년까지의 관측 값을 사용하였으며, 미래 장기 유출계산을 위해 기후변화에 따른 유역의 미래 기온자료는 기후변화 시나리오의 2021년~2050년간의 일 자료를 추출하여 사용하였다. 유역의 잠재증발산량 산정은 여러 가지 방법 중 가장 많이 사용되고 있는 에너지 수지방법을 이용한 수정 Penman(Penman FAO-24)방법 [9]으로 분석하였으며, 과거 관측 자료를 이용한 분석결과와 미래 기후변화 시나리오별 분석결과를 다음 Table. 7에 나타내었다.

3.4 미래 장기유출 계산

안동댐과 임하댐의 기후변화에 따른 미래 유출량을 예측하기 위해 대표농도경로(RCP)기후변화 시나리오를 이용해 추출한 2021년~2050년까지의 일 강수량자료를 이용하여 유출계산을 수행하였다. 미래 장기 유출계산을 위한 Tank 매개변수는 과거 실측 수문자료와의 비교 검증으로 유전자알고리즘 연산을 통해 최적화된 매개변수를 사용하였으며, 증발산량은 기후변화에 대한 변동성을 반영하기 위해 기후변화 시나리오의 미래 기온자료를 이용해 Penman FAO-24 방법으로 산출한 결과를 입력 자료로 사용하였다.

미래 기후변화에 따른 각 시나리오별 장기 유출계산 결과에서 기간별 강수량과 유출량의 변동성을 파악하기 위해 10년 주기별 평균 강수량과 유출량을 다음 Table. 8에 나타내었으며, 10년 주기 기간별 미래 유출계산 결과를 보면 RCP 6.0 시나리오의 2031년~2040년 사이의 유출량이 안동댐과 임하댐 모두 가장 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

[Table 7] Targeted watershed evapotranspiration modeling results (Penman FAO-24)

Classify (Month)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
'94~'12	16.3	22.3	35.4	58.3	74.5	90.3	99.6	95.6	67.8	29.0	19.7	14.0	
Andong Dam	RCP 6.0	17.8	18.4	49.6	69.3	70.1	96.1	101.9	95.7	71.6	37.9	27.8	23.3
	RCP 8.5	20.6	20.9	48.3	59.4	74.3	92.8	102.3	96.0	72.9	37.5	30.5	20.3
Imha Dam	RCP 6.0	19.2	18.0	47.2	67.1	68.8	96.8	97.8	95.5	70.6	33.9	26.9	22.7
	RCP 8.5	21.4	20.2	46.7	59.8	69.1	92.3	99.8	96.2	71.5	33.4	29.6	19.6

[Table 8] Future period average rainfall and runoff calculations

Period	RCP 6.0		RCP 8.5		
	Rainfall (mm)	Runoff (million m ³)	Rainfall (mm)	Runoff (million m ³)	
Andong	2021~2030	1,247.5	945.0	1,284.0	1,020.8
	2031~2040	1,418.9	1,202.5	1,280.2	1,009.0
	2041~2050	1,281.2	979.3	1,230.2	929.8
Imha	2021~2030	1,150.1	695.8	1,216.0	754.4
	2031~2040	1,343.7	985.1	1,203.6	728.8
	2041~2050	1,191.6	777.9	1,154.8	675.7

미래 기후변화 시나리오에 의한 장기 유출계산 결과에 의한 월 평균 유출량과 과거 실측 평균 유출량을 Table. 10에 나타내었다. 시나리오별 계산결과와 과거 실측 유출량을 비교한 결과 안동댐은 RCP 6.0 시나리오에서 연 평균 유출량이 과거 대비 101.3%로 13.3백만m³이 증가하였으며, RCP 8.5 시나리오에서는 96.0%로 54.2백만m³이 감소하였다. 임하댐의 경우 RCP 6.0 시나리오 연 평균 유출량이 과거 대비 106.9%로 106.9백만m³의 유출량이 증가하였으며, RCP 8.5 시나리오에서는 101.1%로 7.6백만m³이 증가하였다. 이와 같이 안동댐과 임하댐의 유역 모두 RCP 8.5 시나리오 보다 RCP 6.0 시나리오에서 과거 대비 유출량이 더 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

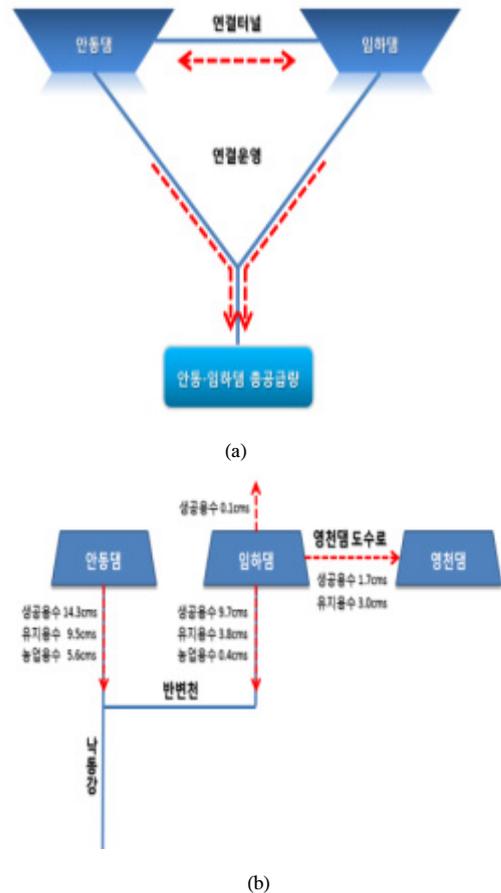
3. 연결도수로를 고려한 가용 수자원량 분석

3.1 저수지 모의운영의 기준 및 분석흐름

저수지 운영은 운영되는 댐 간의 연계성에 따라 단일 댐 운영 시 단독운영, 두 개 이상의 복수 댐 운영 시 연계 운영으로 구분되며, 연결도수로 등을 이용해 댐 간의 양방향 전환유량을 고려하여 일종의 유역변경방식의 단일 댐과 같이 운영이 가능할 경우 연결운영으로 구분할 수

있으며, 연결운영은 기본적인 용수공급 분담의 방식에서 연계운영에 포함된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 안동댐과 임하댐의 연결도수로를 통한 연결운영의 방법으로 저수지 운영 시스템을 구성하였다.

본 연구에서는 저수지 연결운영을 통한 저수지 모의운영을 위해 공급 입력 자료로 안동댐과 임하댐의 계획공급량 자료를 이용하였다. 양 댐의 연결운영 시스템과 용수공급 모식도는 Fig. 7과 같다.



[Fig. 7] Schematic Diagram
(a) Parallel Operation System (b) Water supply Diagram

[Table 9] Comparison of average monthly runoff calculations of Andong and Imha-dam Watershed

(Unit : Million m³)

Classify (Month)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Andong Dam	'83~'12	13.1	18.9	41.1	65.8	76.4	81.6	261.3	224.3	164.3	37.9	21.9	17.5	1023.9
	RCP 6.0	12.0	9.9	36.7	52.5	56.0	104.1	276.0	176.1	203.1	41.5	39.6	29.5	1,037.2
	RCP 8.5	17.7	10.2	25.7	43.8	51.3	102.7	267.1	186.4	179.2	37.3	39.9	21.6	983.0
Imha Dam	'93~'12	8.4	10.9	23.8	42.3	53.7	61.5	177.9	177.4	119.2	17.1	8.9	9.8	710.9
	RCP 6.0	25.1	18.6	33.5	44.6	47.0	88.6	163.1	121.7	144.8	48.2	44.2	38.5	817.8
	RCP 8.5	22.4	14.7	23.9	33.2	36.4	69.1	162.5	124.3	130.6	37.8	38.1	25.5	718.5

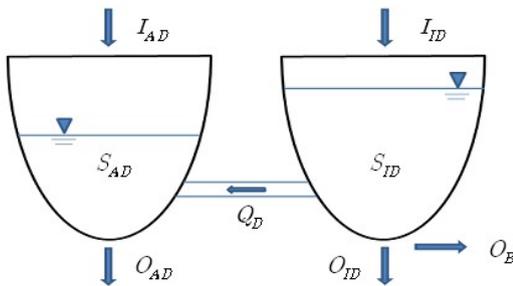
저수지의 단독운영방법은 계획공급량을 물 부족이 발생할 때까지 공급하게 되나, 연계운영이나 연결운영에서는 각 댐의 총 공급량 기준으로 댐 간 연계공급을 하게 되므로 댐 간 저수량 비율에 따라 공급량을 배분하여야 한다. 본 연구에서는 병렬로 연결된 안동댐과 임하댐의 총 계획공급량을 기준으로 각 댐들의 유효저수용량을 같은 비율로 조절하는 Balancing Rule방법으로 Eq. (9)와 같이 분배하였다.

$$S_{AD} = RT_{AD} \times TS_{ADID} \quad (9)$$

$$S_{ID} = RT_{ID} \times TS_{ADID}$$

여기서, S_{AD} 는 안동댐 공급량이며 S_{ID} 는 임하댐 공급량이다. 또한 RT_{AD} 는 안동댐 저수량 비율, RT_{ID} 는 임하댐 저수량 비율, TS_{ADID} 는 안동댐 및 임하댐 총 계획공급량을 나타낸다.

본 연구에서는 안동-임하 연결도수로를 통한 기본적인 운영방법으로 저수지 내로의 유입량, 상·하류 용수 수요처에 대한 계획공급량, 발전유량, 여수로를 통한 무효방류량 및 연결터널을 통한 전환수량 등의 관계를 다음 Eq. (10)과 같이 물수지방정식을 이용하여 모의하였으며, 물수지분석을 위한 저수지의 구성은 다음 Fig. 8과 같다.



[Fig. 8] Configuring a reservoir for water budget analysis

$$I_{AD} - O_{AD} = \frac{dS_{AD}}{dt} \quad (10)$$

$$I_{ID} - O_{ID} - O_B = \frac{dS_{ID}}{dt}$$

$$\left[I_{AD} - O_{AD} - \frac{dS_{AD}}{dt} \right] - \left[I_{ID} - O_{ID} - O_B - \frac{dS_{ID}}{dt} \right] = Q_D$$

여기서, I_{AD} , I_{ID} : 안동댐, 임하댐 유입량 (m³/s)이며,

O_{AD} , O_{ID} , O_B 은 안동댐, 임하댐 공급량 (m³/s), S_{AD} , S_{ID} 은 안동댐, 임하댐 저류량 (m³), Q_D 은 연결도수로를 통한 전환유량 (m³/s)을 나타낸다.

연결도수로를 통한 전환은 양방향 도수가 가능하나, 실제 저수지 운영 시 유역대비 저수용량이 적은 임하댐의 수위가 높게 유지되는 일수가 많으며, 연결도수로 설치 목적이 무효방류량의 저감효과를 극대화하여 가용 수자원의 추가확보를 위한 것이므로 임하댐에서 안동댐으로만 전환되는 것으로 가정하여 모의하였다.

임하댐에서 안동댐으로 연결도수로를 통한 수위 차에 의한 전환유량은 「안동-임하댐 연결공사 실시설계 보고서(2012)」의 연결터널 설계제원을 기준하였다.

4.2 저수지 연결 모의운영을 통한 가용수자원량 분석

저수지 모의운영은 상시만수위(N.H.W.L)과 저수위(L.W.L)사이에서 용수공급이 이루어지도록 하였으며, 임하댐의 경우 홍수기에는 홍수기 제한수위(R.W.L)를 기준하고 있어, 제한수위 이하로 운영되도록 상·하한 제약조건을 부여하였다. 또한 연결도수로를 통해 양 댐 간의 수위 차에 의한 도수 이후 상시만수위 이상 유입되는 물량은 전량 방류하는 Auto ROM방법을 적용하였다. 모의운영 기간은 안동댐과 임하댐 모두 관측 수문자료가 있는 1993년~2012년의 과거 기간과 미래 기후변화 시나리오에 대한 2021년~2050년 기간으로 하였다. 연결운영을 위한 기간 및 유출 자료에 대한 모의방법별 구분은 다음 Table. 11과 같다.

[Table 10] How to connect the simulated reservoir operation

Classify	Test Year	Funoff Data	Analyzed Unit
CASE 1	1993년~2012년	Observed Data	Daily Unit Analysis
CASE 2	1993년~2012년	Discharge Calculation Data	Daily Unit Analysis
CASE 3	2021년~2050년	Long Discharge Calculation Data(RCP6.0)	Daily Unit Analysis
CASE 4	2021년~2050년	Long Discharge Calculation Data(RCP8.5)	Daily Unit Analysis

1) CASE 1, 2 : 과거 관측 자료 및 유출 계산결과를 이용한 연결운영 모의

연결운영 모의결과 모의기간동안 연결도수로를 통한 댐 간 전환 유량은 다음 Table. 12와 같이 모의되었다. CASE 1의 경우 전체 모의기간 중 54.1%(3,951일)의 기

[Table 11] Flow conversion through the connection link canal (CASE1, 2)

Classify	Andong	Imha	Imha→Andong			Test Day
	Average Inflow (millionm ³ /yr)	Average Inflow (millionm ³ /yr)	Switch Day	Average Switch Discharge (millionm ³ /yr)	Average Switch Discharge (cms/day)	
CASE 1	1,059.5	711.0	3,951	188.9	5.99	7,305
CASE 2	1,027.9	681.1	4,393	187.8	5.95	7,305

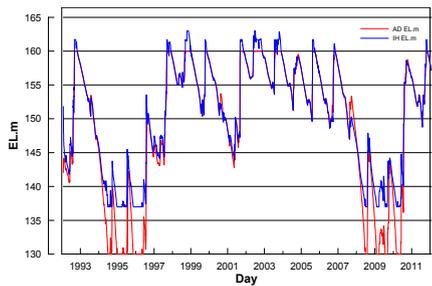
[Table 12] Flow conversion through the connection link canal (CASE3, 4)

Classify	Andong	Imha	Andong→Imha			Test Day
	Average Inflow (millionm ³ /yr)	Average Inflow (millionm ³ /yr)	Switch Day	Average Switch Discharge (millionm ³ /yr)	Average Switch Discharge (cms/day)	
CASE 3	1,038.5	817.6	8,926	276.4	8.76	1,0957
CASE 4	982.1	717.8	8,556	272.5	8.63	1,0957

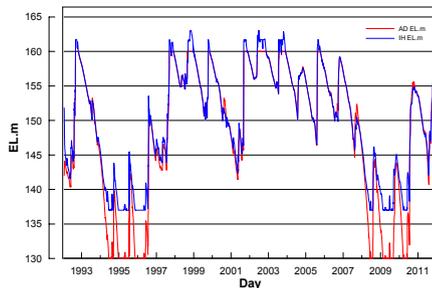
간 동안 임하댐에서 안동댐으로 유량 전환이 발생하는 것으로 분석되었으며, 임하댐 연평균 유입량의 26.6% (188.9백만m³)가 안동댐으로 전환되는 것으로 모의되었다. CASE 2의 경우 전체 모의기간 중 60.1%(4,393일)의 기간 동안 임하댐에서 안동댐으로 유량 전환이 발생하는 것으로 분석되었으며 임하댐 연평균 유입량의 27.5% (187.8백만m³)가 안동댐으로 전환되는 것으로 모의되었다.

2) CASE 3, 4 : 미래 유출 계산결과를 이용한 연결운영 모의 (RCP 6/0. RCP 8.5)

기후변화 시나리오(RCP 6.0)를 이용한 댐의 장기 유출 계산 결과를 이용하여 저수지 연결운영 모의를 수행하였다. 모의결과 모의기간동안 연결도수로를 통한 댐 간 전환 수문량은 다음 Table. 13과 같이 분석되었으며, CASE 3의 경우 전체 모의기간 중 81.4%(8,926일)의 기간 동안 임하댐에서 안동댐으로 유량 전환이 발생하는 것으로 분석되었다.

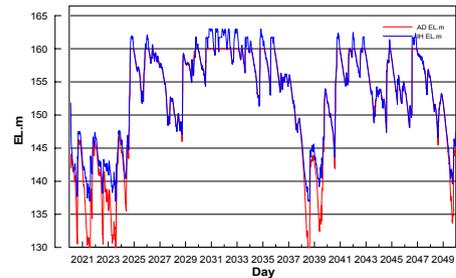


(a)

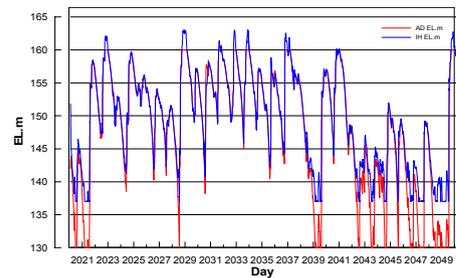


(b)

[Fig. 9] Andong - Imha Dam's water level change by Connecting simulation
(a) CASE1 (b) CASE2



(a)



(b)

[Fig. 10] Andong - Imha Dam's water level change by Connecting simulation
(a) CASE3 (b) CASE4

[Table 13] Analysis of the flow conversion by Reservoir connection Simulated operation

Classify	Test Day	Switch Discharge (Imha→Andong)				Note
		Daily Average (cms/day)	Yearly Average (millionm ³ /yr)	Total Switch (millionm ³)	Switch Rate (%)	
CASE 1	1993~2012	5.99	188.9	3,778.2	26.6	Measured Flow
CASE 2	1993~2012	5.95	187.8	3,755.9	27.5	Calculated Flow
CASE 3	2021~2050	8.76	276.4	8,292.4	33.8	RCP 6.0 Calculated Flow
CASE 4	2021~2050	8.63	272.5	8,173.7	37.9	RCP 8.5 Calculated Flow

또한 연평균 임하댐 유입량의 33.8%(276.4백만m³)가 안동댐으로 전환되는 것으로 모의되었다. CASE 4의 경우 전체 모의기간 중 78.1%(8,556일)의 기간 동안 임하댐에서 안동댐으로 유량 전환이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 연평균 임하댐 유입량의 37.9%(272.5백만m³)가 안동댐으로 전환되는 것으로 모의되었다.

4.3 분석결과와 검토 및 고찰

각 분석 CASE별 연결운영에 의한 임하댐에서 안동댐으로의 전환 유량은 다음 Table. 14와 같으며, 분석결과 저수지 연결운영에 대한 CASE별 분석결과, 과거 관측 수문자료를 이용한 모의결과에 의한 전환 유량보다 미래 기후변화 시나리오에 의한 전환 유량이 최대 46.3% 더 높게 나타나는 것으로 분석되어 기후변화에 따른 수문상황 변화에 따라 연결도수로를 이용한 유역전환을 통해 임하댐의 무효방류량 등의 잉여수자원을 가용 수자원으로 추가확보 및 생·공용수, 하천유지용수 등으로의 활용성이 증대될 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 안동-임하댐의 연결도수로를 통한 임하댐의 잉여수자원 활용 가능량을 분석하기 위하여 과거 관측 수문자료를 이용하여 저수지 연결 모의운영을 수행하였으며, 미래 기후변화에 대응한 연결도수로의 효과를 대표농도경로(RCP) 기후변화 시나리오 중 RCP 6.0, RCP 8.5 시나리오로 생산한 미래 상계 수문데이터를 이용하여 저수지 연결 모의운영을 통해 정량적으로 분석하였다. 또한 대상 유역의 신뢰도 높은 미래 장기 유출분석을 위해 유전자 알고리즘 연산으로 최적화된 매개변수를 적용한 Tank 모형을 사용하였다. 위와 같은 연구과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 대상 유역의 장기 유출량 계산을 위해 Tank 모형을 이용하였으며 실제 유출현상과 가장 근접하게 모의하기

위해 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수 최적화를 수행하였다. 평균제곱근오차(RMSE), 상관계수 등의 목적함수를 사용하여 개체군의 크기, 돌연변이 확률을 일정 비율로 변화시키며 민감도 분석을 시행하였다. 민감도 분석결과 개체군의 크기 1000, 교차비율 80%에서 가장 높은 적합도를 나타내었다.

2) 과거 관측 기후자료와 기후변화 시나리오를 이용해 생산된 일단위 기온자료를 이용하여 잠재 증발산량 산정 방법 중 에너지 수지방법인 수정 Penman FAO-24으로 과거 및 미래 잠재 증발산량을 산정하였으며 앞서 생산된 대상유역의 일 단위 강수자료와 최적화된 매개변수를 입력자료로 하여 안동댐과 임하댐 유역의 2021년부터 2050년까지 장기 미래 유출 계산을 수행하였다. 계산결과 안동댐과 임하댐 모두 RCP 6.0 시나리오의 유출이 크게 분석되었다. 기간별로는 2031년~2040년의 유출량이 가장 크게 계산되었으며, RCP 8.5 시나리오의 경우 2021년~2030년 기간의 유출이 가장 크게 계산되었다.

3) 과거 관측자료 및 장기 유출 계산 자료와 미래 유출 계산 결과를 이용해 연결도수로를 통한 전환 유량을 고려하여 일 단위 저수지 연결운영 모의를 수행하였다. 모의결과 과거 1993년에서 2012년 기간 동안의 임하댐에서 안동댐으로 전환되는 유량은 임하댐의 연평균 유입량의 26.6%가 전환되는 것으로 나타나 임하댐의 홍수기 무효방류 등으로 발생하는 잉여수자원을 가용 수자원으로의 추가 확보가 가능한 것으로 분석되었다. 미래 기후변화 시나리오에 의한 전환유량은 모든 시나리오에서 증가하는 추세로 분석되었으며, 특히 RCP 6.0 시나리오에서는 과거 관측 자료를 이용한 모의운영 결과 대비 최대 46.3% 더 높게 나타나는 것으로 분석되어 기후변화 시나리오에 의한 미래 수문상황 변화에 따라 연결도수로를 통한 가용수자원의 추가확보와 활용성이 더욱 증대되는 것으로 분석되었다.

4) 대상 유역에 위치하고 있는 안동댐과 임하댐의 과거 관측자료 및 장기 유출 계산 자료와 미래 유출계산 결과를 이용해 연결도수로를 통한 전환 유량을 고려하여

일 단위 저수지 연결운영 모의를 수행하였다. 모의결과 과거 1993년에서 2012년 기간 동안의 임하댐에서 안동댐으로 전환되는 유량은 임하댐의 연평균 유입량의 26.6%가 전환되는 것으로 나타나 임하댐의 홍수기 무효방류 등으로 발생하는 잉여수자원을 가용 수자원으로의 추가 확보가 가능한 것으로 분석되었다. 미래 기후변화 시나리오에 의한 전환유량은 모든 시나리오에서 증가하는 추세로 분석되었으며, 특히 RCP 6.0 시나리오에서는 과거 관측 자료를 이용한 모의운영 결과 대비 최대 46.3% 더 높게 나타나는 것으로 분석되어 기후변화 시나리오에 의한 미래 수문상황 변화에 따라 연결도수로를 통한 가용수자원의 추가확보와 활용성이 더욱 증대되는 것으로 분석되었다.

본 연구는 현재까지 가장 높은 해상도의 PRISM 모형을 이용하여 통계적 상세화 기법을 통해 생산된 기후변화 시나리오인 대표농도경로 중 RCP 6.0, RCP 8.5 시나리오 분석결과를 기반으로 하여 실측 자료를 이용한 모의결과와의 비교를 통해 안동댐과 임하댐의 연결도수로를 이용한 추가 가용 수자원 확보 여부를 평가하기 위한 목적으로 수행하였다. 기후변화는 온실가스 배출량의 증가에 따른 기온 및 강수량의 변화 외에도 여러 가지 사회, 기후학적인 요인들이 상호 복합적인 연관성을 가지고 발생하는 것으로 기후변화의 예측은 기본적인 불확실성을 내포하고 있다.

따라서 가용 수자원 분석을 위해 사용한 가용 수자원 평가 모형의 결과에 대해서도 기후변화 시나리오에 의해 생산된 상세 수문자료의 불확실성으로 인해 신뢰도 높은 객관성은 담보할 수 없지만 향후 기후변화 시나리오와 저수지 운영방법에 대한 추가적인 연구와 보완이 지속적으로 이루어진다면 특정유역에 대한 신뢰도 높은 미래 유출량을 예측으로 장기적인 저수지 운영계획에 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 낙동강 수계의 물 관리 측면에서 미래 기후변화에 대응하여 안동댐과 임하댐의 연결도수로를 활용한 저수지 운영의 효과를 최대화하고 장기적으로 안정적이고 풍부한 용수공급 계획을 수립하는데 본 연구결과가 도움이 될 것으로 기대된다.

References

[1] IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers, 2007
 [2] M. Sugawara, "Automatic callibration of tank model", *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*,

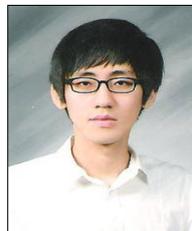
Vol. 24, No.3, pp. 375-388, 1961.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491876>

- [3] Y. Yokoo et al, "Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression." *Journal of Hydrology*, Vol. 246(1-4), pp. 209-222, 2001.
 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00372-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00372-9)
- [4] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [5] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms and Walsh functions: Part 2, deception and its analysis", *complex syst.* 3, pp. 153-171, 1989.
- [6] D. E. Goldberg, "Simple genetic algorithms and the minimal deceptive problem, in: Genetic Algorithms and Simulated Annealing" L. Davis, ed., chapter 6, pp. 74 - 88, Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1987.
- [7] J. E. Nash, J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles", *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282 - 290, 1970.
 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- [8] CCIC(Climate Change Information Center), (www.climate.go.kr)
- [9] H. L. Penman, "Vegetation and hydrology". Tech. Comm. No.53. Harpenden, U.K.: Commonwealth Bureau of Soils, 1963.

추 연 문(Choo Yeon Moon)

[정회원]



- 2011년 8월 : 서울과학기술대학교 토목공학과 (공학사)
- 2013년 8월 : 영남대학교 대학원 토목공학과 수자원환경공학 (공학석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과 수자원공학전공 박사과정

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

지 흥 기(Jee Hong Kee)

[정회원]



- 1972년 2월 : 영남대학교 토목공학과 (공학사)
- 1977년 2월 : 영남대학교 대학원 토목공학과 수자원공학전공 (공학석사)
- 1990년 8월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 수자원공학전공(공학박사)

• 1981년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

권 기 대(Kwon Ki Dae)

[정회원]



- 2012년 2월 : 영남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 토목공학과 수자원환경공학 석사과정

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

김 철 영(Kim Chul Young)

[정회원]



- 2005년 2월 : 영남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2013년 8월 : 영남대학교 대학원 토목공학과 수자원환경공학 (공학석사)
- 2005년 6월 ~ 현재 : 한국수자원공사 재직

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학