

보를 포함한 낙동강 다목적댐 용수공급능력 개선에 관한 연구

장철호* · 김영오**

Jang, Cheol-Ho*, Kim, Young-Oh**

Improvement of Water Supply Capability of the Nakdong River Basin Dams with Weirs

ABSTRACT

This study sought to reevaluate the water supply capacities of the Nakdong river dams, and identify measures to remedy any shortages using weirs, focusing on 5 multipurpose dams and 8 weirs. The reevaluation of the dams was performed by the HEC-5 program using the original design criteria and inflow data recorded for each dam. The results show that the capacities of the 3 dams has decreased to 73~87%. Three simulations were performed to determine the effect of coordinating the dams and weirs. The first simulation was based on individual operation of the dams; the second on coordinated operation of the dams; and the third on coordinated operation of the dams and weirs. To obtain a water supply reliability of 95%, the annual water shortage was calculated for a 20-year period (1992~2011). In addition, long-term runoff simulation data used in the national river basin investigation by the Ministry of Land, Infrastructure and Transportation were used with the dam discharge data, because long-term inflow data for the weirs were not available. The simulations were performed by the HEC-ResSim program, with the reservoir network divided into 2 groups based on the Waegwan water station. The results show that water supply capacity for the 3 simulations to be 2424 Mm³/yr, 2612 Mm³/yr and 2734 Mm³/yr, respectively. This indicates that coordinated operation of the dams and weirs could provide an additional water supply of 122 Mm³/yr.

Key words : Coordinated operations, Dam reevaluation, The nakdong river, Water supply capacity, Weirs

초록

본 연구에서는 낙동강수계 다목적댐의 용수공급능력을 재평가해보고, 감소된 공급능력을 보완하기 위한 방안으로 '보'를 포함한 용수공급능력 과 연계운영 방안을 검토하였다. 연구 대상은 낙동강 5개 다목적댐(안동, 임하, 합천, 남강, 밀양)과 8개 보(상주, 낙단, 구미, 칠곡, 강정고령, 달성, 합천창녕, 창녕함안)로 하였다. 먼저, 기존댐의 용수공급능력 재평가는 각 댐의 설계당시 평가 기준을 준용하여 HEC-5로 모의하였으며, 입력 자료는 준공 이후 각 댐별로 축적된 유입량 자료를 활용하였다. 모의 결과, 3개 댐의 공급능력이 73~87% 수준으로 감소했음을 확인할 수 있었다. 보를 포함한 용수공급능력의 효과를 확인하기 위해서, 각 댐별 모의, 댐간 연계운영 모의, 댐-보 연계운영 모의 등 세가지 case에 대해 HEC-ResSim 모형을 활용하여 비교·검토하였다. 이수안전도 95%를 적용하기 위해 20개년(1992~2011년) 중 1회 물부족을 허용하는 것으로 하였으며, 보는 축적된 유입량 자료가 없어, 전국유역조사(국토교통부)의 장기유출 모의자료(PRMS)에 댐 방류량 자료를 결합하여 활용하였다. 연계운영 모의시 왜관 수위표 지점을 기준으로 낙동강 상·하류를 구분하여 연계운영 네트워크를 구성하였다. 3가지 case에 대한 모의 결과, 댐별 운영시 24억m³/년, 댐간 연계운영시 26억m³, 댐-보 연계운영시 27억m³/년의 용수공급이 가능한 것으로 평가되었다. 즉, 보를 포함하여 용수공급을 할 경우 연간 1.2억m³ 가량의 추가 공급이 가능하여, 댐 설계당시 용수공급 계획량(27억m³/년)과 같은 수준의 공급이 가능할 것으로 판단된다.

검색어 : 연계운영, 댐 재평가, 낙동강, 용수공급능력, 보

* 종신회원·교신저자·한국수자원공사 차장 (Corresponding Author·K-water·cumulus78@kwwater.or.kr)

** 종신회원·서울대학교 공과대학 건설환경공학부 정교수 (Seoul National University·yokim05@snu.ac.kr)

Received February 22, 2016/ revised March 23, 2016/ accepted June 23, 2016

1. 서론

기후변화 등 영향으로 과거에 비해 홍수와 가뭄이 더욱 심해지고 있다. 최근에는 2년에(2014~2015) 걸쳐 지속된 유례없는 가뭄으로 댐 공급량을 최소한으로 줄였음에도 불구하고 저수량이 부족하여, 긴급 도수로를 건설하는 등 특단의 조치가 취해진 사례도 있었다. 또한 4대강 사업을 통해 대규모 보가 건설되는 등 하천 여건도 많이 바뀌게 되었다. 이러한 상황에도 불구하고, 우리나라의 다목적 댐들은 건설 이후 상당기간이 경과한 후에도 설계당시 공급계획량을 그대로 이용하고 있다. 신규댐 건설이 더욱 어려워지고 있는 요즘 상황을 고려할 때, 정확한 용수공급능력 평가와 기존 시설의 활용성을 높이는 방안에 대한 연구가 필요한 시점이다.

따라서 본 연구에서는 그간에 축적된 수문자료와 고도화된 분석 기술을 바탕으로 기존 댐에 대한 용수공급능력의 재평가와 함께 공급계획의 개선방안을 제안하고자 한다.

2. 이론 분석

2.1 용수공급능력

용수공급능력이란 저수지나 수계가 일정 기간 동안 공급할 수 있는 용수의 양으로, 이에 대한 평가는 신규댐 건설 계획과 설계, 기존 댐의 효율적인 운영, 특히 수자원의 장기적인 공급 계획에 필수 불가결하다.

국내에서는 주로 누가곡선분석(Mass Curve Analysis)의 변형된 형태로 저수지의 유효저수용량과 최대 갈수기간 연 유입량의 합으로 용수공급능력을 평가하거나, 저수지 운영 분석을 통한 용수 공급능력 평가기법을 활용하고 있다. 다목적댐의 이론상의 용수공급능력은 저수지의 유효저수용량에 최대 갈수기간 동안에 저수지로 유입되는 유입량을 합한 것이라 할 수 있는데, 유효저수용량은 댐 계획시 저수위(Low Water Level)와 상시만수위(Normal High Water Level) 사이의 활용저수용량을 의미하며, 대부분의 경우 실제 저수지 수위는 상시만수위보다 낮게 운영되므로 기존댐의 용수공급능력은 유효저수용량에 최대 가뭄기간 동안의 저수지 유입량을 합한 것보다는 작게 된다. 따라서 장기간 운영되어 온 기존댐

의 월별 용수공급능력을 평가하기 위해서는 댐의 운영시점에서의 유효저수용량에서 시작하여 월별 저수지 유입량, 증발량, 강수량, 댐 하류 편익공제수량 및 목적별 계획용수 수요량, 홍수시 월류방류량 등을 고려하여 물수지 계산절차에 따라 저수지 모의운영 분석(Reservoir Operation Analysis)을 실시함으로써 저수지의 물 부족량 및 실제공급량(용수공급능력)을 계산하게 된다. 이와 같이 계산된 댐의 연도별 용수공급량 중에서 최소공급량은 최대 가뭄기간 동안에 발생하게 되며, 이것이 바로 댐의 안정공급량 혹은 댐의 실제 용수공급능력이라 할 수 있다.

댐의 용수공급능력은 이수안전도(Water Supply Reliability)를 기준으로 산정할 수도 있는데, 현재 국내 수자원 공급시설 설계시 이수안전도 기준에 대해 공통적으로 명문화된 것은 없지만 댐 설계기준(K-water, 2011)에서 갈수의 발생빈도 혹은 평균 재현기간으로 표시할 때 20년 이상의 빈도 갈수에도 용수수요를 충족시킬 수 있는 공급량 규모의 댐을 설계해야 한다고 제시하고 있다. 그러나 현재까지 우리나라 다목적댐의 용수공급능력을 평가하는데 적용된 방법들은 Table 1에서 나타난 바와 같이 댐별 또는 조사단계별로 상이하며, 평가기준과 방법에 있어서도 일관성이 없어 각 댐에 대한 상대적인 비교가 어렵다. 평가기준은 대체로 기록상 나타난 최악의 갈수시에도 공급이 가능한 보장공급량(Firm Supply) 기준과 전체 계획기간 중에서 일정기간 동안 용수공급의 제한을 수용하여 평가하는 신뢰도(Reliability) 기준으로 대별할 수 있다.

신뢰도 기준은 대체로 1980년대부터 지금까지 사용되고 있으며 충주댐, 보령댐 및 군위댐 등에 적용되었고, 수자원의 효율적인 이용을 위하여 전체 기간 중에서 일정비율 기간 동안의 물 부족을 허용하는 다년 갈수기간 기준의 보장공급량을 용수공급 가능량으로 산정하는 방법이다. 신뢰도만으로 표현할 수 없는 용수공급능력의 확인, 비교를 위해 회복도(Resilience)나 취약도(Vulnerability)를 병행하여 사용하기도 한다(Hashimoto et al., 1982). 그러나 최근 건설된 댐 계획에서는 일정기간의 물부족 사태의 발생을 수용하는 신뢰도 기준으로 평가하는 것이 일반적 추세이다.

$$\text{이수안전도}(\%) = \left(1 - \frac{\text{물부족년수}}{\text{모의기간년수}}\right) \times 100 \quad (1)$$

Table 1. Comparison of Water Supply Reliability Analyses for the Nakdong River Dams (MOCT, 2010)

Name	Year of completion	Water supply capacity (Mm ³)	Analysis period	Water supply reliability
Andong	1977	926	'47~'70	Drought yr. supply ('67~'68)
Hapcheon	1989	599	'69~'81	Firm supply for 13 yrs
Imha	1993	497	'63~'83	Firm supply for 21 yrs
Namgang	1999	573	'72~'87	Firm supply for 16 yrs
Milyang	1999	73	'73~'83	1 year shortage for 15 yrs

2.2 연계운영

Labadie (2004)에 의하면 저수지운영모형에 최적화 기법을 적용한 다양한 연구가 있었는데, 대표적인 것들로 네트워크흐름 최적화(Network Flow Optimization), 선형계획(Linear Programming), 비선형계획(Nonlinear Mathematical Programming), 동적 계획(Dynamic Programming) 모형 등이 있으며, 이수관점에서의 저수지 최적 연계운영방안 도출을 위해 다각적으로 적용되고 있다. 이중 선형계획법은 용수공급과 하천유지용수 등을 고려한 선형문제의 해석에 매우 적합하며, 최적화 기법 중 가장 보편화되고 현재에서 가장 많이 적용되고 있는 기법이다. 주어진 조건에 항상 선형적으로 반응하는 경우인 관개용 저수지, 용수공급 목적 댐 운영 등의 문제에는 매우 효과적인 적용이 가능하다.

수자원 시설물들의 효율적 운영을 위해서 여러 가지 형태의 시뮬레이션 모형과 최적화 모형이 저수지 운영 분석에 이용되어 왔다. 시뮬레이션 모형에 의한 방법은 미리 정해놓은 댐의 운영 규칙과 댐을 포함한 수계 내 다른 시설물들의 물리적 제약을 고려하여 댐의 상태 변화를 모의하는 방법이라고 할 수 있다. 현재 전 세계적으로 통용되고 있는 대표적인 시뮬레이션 모형으로 HEC-5, HEC-ResSim, HYDROSIM, MIKEBASIN 등을 꼽을 수 있다. 이러한 시뮬레이션 모형은 용수공급능력을 평가함에 있어 댐을 포함한 수계 내 다른 시설물들의 상태를 비교적 상세히 표현할 수 있고, 다양한 케이스에 대해 쉽게 모의해 볼 수 있는 장점이 있다.

이중 HEC-ResSim은 미국 육군공병단(US Army Corps of Engineers)의 수자원연구소(Hydrologic Engineering Center)에서 개발된 저수지 모의운영 프로그램으로서, 1973년에 개발된 HEC-5 모형이 그 원형이다. HEC-ResSim에서는 수계 내 직렬 또는 병렬로 연계된 시스템에서 방류량과 방류 우선순위의 결정은 연계된 댐간의 일정한 유효저수율을 유지하도록 하는 Storage Balance Method를 사용한다. 이 방법은 연계된 댐의 유효저수량을 동일하게 맞춰 운영하는 방식으로 시스템 기반의 Implicit Method와 사용자 정의 기반의 Explicit Method가 있다. Implicit System Storage Balance Method는 하나의 지침수위 저수량, 즉 상시만수위 저수량을 고려하는 방법이며, Explicit Method는 연계된 댐 간 최적 운영패턴을 알고 있거나 혹은 이미 결정된 댐 간 운영패턴의 결과를 확인할 때 적합한 방법이다.

3. 연구 방법

연구 내용은 크게 2단계로 나누어 볼 수 있겠다. 먼저, HEC-5 모형을 활용하여 설계당시와 같은 분석방법으로 용수공급능력을 재평가함으로써 기존 용수공급 가능량과의 차이를 확인할 것이다. 기존 댐 용수공급능력조사보고서(MOCT, 1998) 등에 의하면 용수

공급능력이 감소할 것으로 예측된다. 두번째 단계에서는, 공급능력 감소에 따른 대안 마련을 위해 낙동강 본류에 설치된 8개 보(상주, 낙단, 구미, 칠곡, 강정고령, 달성, 합천창녕, 창녕함안보)와 댐을 연계하여 HEC-ResSim 모형으로 모의운영함으로써 추가 확보되는 용수공급능력을 검토할 것이다. 그 결과를 활용하여, 각 댐별로 관리·운영 중인 현 용수공급체계의 대안으로서 여러 개의 댐과 보를 묶어 연계운영 네트워크를 구성하고 그룹단위로 공급계획을 수립하는 새로운 방식의 운영방안을 제안하고자 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기존댐 재평가 사례

용수공급능력 재평가의 필요성을 확인하기 위해 우선 관련 연구 사례들을 확인하였다. 먼저 1996~1998년에 건설교통부와 한국수자원공사가 4대 수계별로 실시한 “기존댐 용수공급능력조사”가 대표적이다. 이 조사는 용수공급 목표를 합리적으로 달성하여 제한된 수자원을 최적으로 이용할 수 있는 방안을 수립하고, 기존댐의 용수공급능력을 재조사하여 한정된 수자원관리를 효율적으로 하기 위해 시행하였다. 이를 위하여 기존댐 용수공급능력평가 및 연계운영 방안 등을 수립하였는데, 기존댐을 재평가함에 있어 기상 및 수문환경의 변화를 반영하여 개별 댐의 용수공급능력을 평가하고, 연계운영 개념을 도입하여 용수공급능력을 산정함으로써, 연계운영에 따른 용수공급능력 평가를 위한 객관적인 분석기준을 제시하였다는 데 그 특징이 있다. 용수공급능력평가 기준은 신뢰도 기준을 택하였으며, 95%의 공급가능량으로 설정하여 분석하였다.

2011년에는 경북·대구권 맑은 물 공급 사업에 대한 예비타당성 조사(한국개발연구원)에서 안동댐, 임하댐의 용수공급능력을 재검토 한 바 있다. 모의운영 모형은 HEC-5를 활용하였으며, 신뢰도 96.7% (30개년 중 1년 부족)와 95% (20개년 중 1년 부족)에 대해 월단위와 연단위로 평가하였다. 유입량 자료는 1979~2008년까지 30개년을 대상으로 했는데, 안동댐은 실측자료를 이용하였고, 1993년에 준공된 임하댐은 1979~1992년까지의 자료에 대해 낙동강유역조사의 일 유출량 자료를 이용하였다.

최근 2012년에는 Lee et al. (2012)이 표준운영룰(Standard Operation Rule)과 HEC-ResSim을 활용하여 안동댐, 임하댐의 용수공급능력을 검토한 바 있다. 역시 1979~2008년까지의 30개년 자료를 활용하여 신뢰도 96.7%, 95%로 연단위, 월단위 평가를 시행하였다.

앞서 언급한 기존댐 용수공급능력조사(1998), 경북·대구권 맑은 물 공급사업 예비타당성 조사(2011), 다목적댐의 용수공급능력 재평가(2012)의 낙동강 댐에 대한 평가결과를 요약 정리하면 Table 2와 같다. 설계당시 이수안전도는 각 댐별로 다소 상이하나, 가장

Table 2. Comparison of Reevaluation Studies for the Nakdong River Dams (Unit : Mm³/yr)

Dam	Designed capacity	Water supply reliability	MOCT ¹⁾ (1998)	KDI ²⁾ (2011)	Lee et al. ³⁾ (2012)
Andong	926	Drought yr (68~69)	867 (-59)	893 (-33)	847 (-79)
Imha	497	21yr 100%	451 (-46)	382 (-115)	359 (-138)
Hapcheon	599	13yr 100%	504 (-95)	-	-
Namgang	573	16yr 100%	628 (+55)	-	-
Simulation model			HEC-5		HEC-ResSim

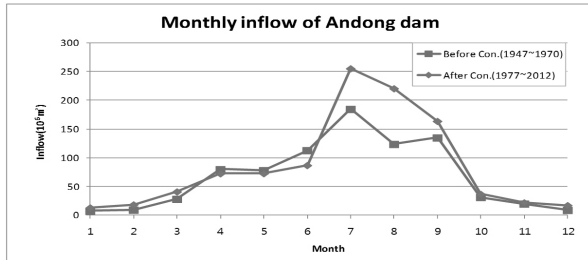
¹⁾Reevaluation of existing dams (MOCT · K-water, 1998)

²⁾Prefeasibility investigation of clean water supply project for Kyongbuk · Daegu (KDI, 2011)

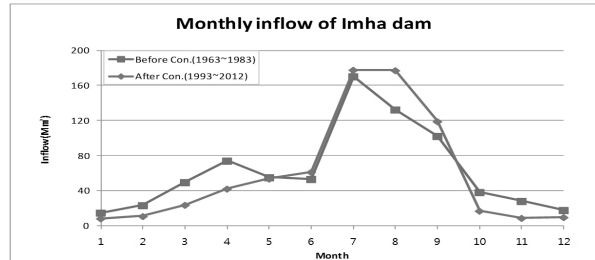
³⁾Reevaluation of multi-purpose reservoir yield (Lee et al., 2012)

Table 3. Comparison of Yearly Inflows of the Nakdong River Dams Before & After Constructions (Unit : Mm³/yr)

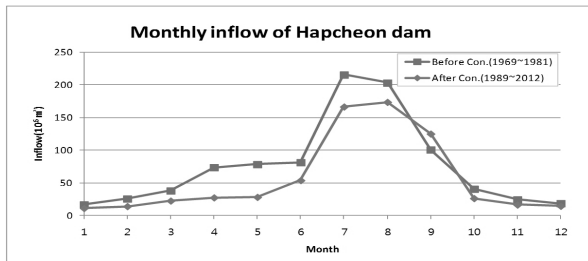
	Andong	Imha	Hapcheon	Namgang
(a) Before construction	819	761	919	1881
Period	1947~1970	1963~1983	1969~1981	1953~1996
(b) After construction	1022	711	682	2616
Period	1977~2012	1993~2012	1989~2012	2000~2012
Difference = (b)-(a)	+202	-50	-236	+734



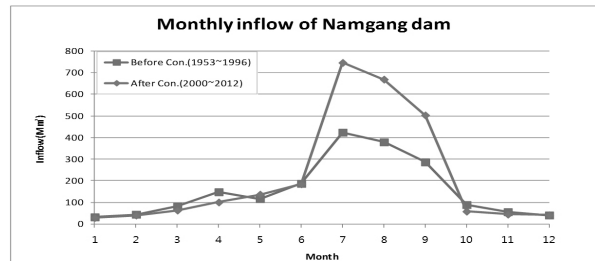
(a) Andong Dam



(b) Imha Dam



(c) Hapcheon Dam



(d) Namgang Dam

Fig. 1. Comparison of Inflows of the Nakdong River Dams Before & After Constructions

근사한 기준으로 판단되는 95% (20개년 중 1년 부족) 신뢰도를 적용하여 비교하였다. Table 2에서 보듯이 남강댐을 제외하고 대체로 설계당시 산정된 공급능력보다 감소한 경향을 확인할 수 있다.

4.2 댐 설계 전·후 유입량 비교

낙동강 수계 5개 댐에 대하여 건설 당시 설계기준으로 활용된 유입량 자료와 준공 이후 실제 유입량 자료를 비교해보았다. Table

3에서 보듯이 댐 건설 당시 활용한 과거 유입량과 실제 유입량을 비교해보면 최근에 건설된 밀양댐을 제외하고는 다소 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 1은 각 댐들의 월평균 유입량을 그래프에 나타낸 것인데, 임하·합천댐의 경우 설계 당시보다 전반적으로 유입량이 감소했음을 확인할 수 있으며, 안동·남강댐의 경우도 총 유입량은 증가했으나 홍수기(7~9월)에 집중되고 있음을 볼 수 있다. 이렇듯 당초 예상과

실제 유입량이 다르다는 사실은 용수공급능력의 재검토가 절실한 상황임을 반증하고 있다.

4.3 설계기준을 적용한 댐 재평가

본 절에서는 각 댐별로 설계 당시와 가급적 동일한 기준을 적용하고 HEC-5를 활용하여 공급능력을 재평가함으로써 당초 공급계획량에 비해 어느 정도 차이가 발생하는지에 대해 확인하고자 한다. 단, 활용되는 유입량 자료는 준공 이후 최근까지 축적된 자료를 활용하였다.

모의 결과는 Table 4와 같다. 안동, 임하, 합천, 남강댐의 경우, 설계 당시 조건과 같은 기간 동안 100% 보장 공급이 가능한 양을 모의하였고, 밀양댐은 16개년 실적 자료가 축적되지 않은 관계로 13개년 중 1회가 부족한 양을 기준으로 하였다. 각 댐별 모의 결과, 1997년과 2009~2010년 전후로 유입량이 작았던 것을 확인

할 수 있었는데, 안동, 임하, 합천댐의 경우 설계당시에 비해 73~87% 수준으로 공급능력이 감소(연간 124~140백만 m^3)하였고, 남강, 밀양댐은 근소한 증가를 보여 설계 기준과는 큰 차이가 없었다. 이러한 차이는 댐 준공 이후 축적된 유입량 자료에 기인한 것임을 다시 한번 강조한다.

4.4 댐보 연계운영 네트워크 및 입력자료 구축

댐간, 댐보간 연계운영 검토를 위해 낙동강 하천연장 및 시설물 현황 등을 고려하여, 왜관 수위표 지점을 기준으로 상하류를 구분하고 연계운영 그룹을 설정하였다. 상류측에는 안동-임하댐과 4개보(상주, 낙단, 구미, 칠곡)가 위치하고 있으며, 하류측에는 합천-남강-밀양댐과 4개보(강정고령, 달성, 합천창녕, 창녕함안)가 자리 잡고 있다. 이러한 시설물들을 HEC-ResSim의 Reservoir Network를 활용하여 Fig. 2와 같이 구성하였다. 용수공급능력을 산정하는

Table 4. Reevaluation of Dam Supply Capacities for the Nakdong River Basin using HEC-5 with Inflow Series After Dam Construction (Unit : Mm^3/yr)

	Andong	Imha	Hapcheon	Namgang	Milyang	Total
(a)Designed capacity	926	497	599	573	73	2668
Reevaluation criteria	1990~2013, 100% supply	1993~2013, 100% supply	2001~2013, 100% supply	1998~2013, 100% supply	2001~2013, 1yr short (92%)	-
(b)Result	802	365	459	588	76	2290
Difference =(b)-(a)	-124	-132	-140	+15	+3	-378
Ratio =(b)/(a)	87%	73%	77%	103%	104%	86%

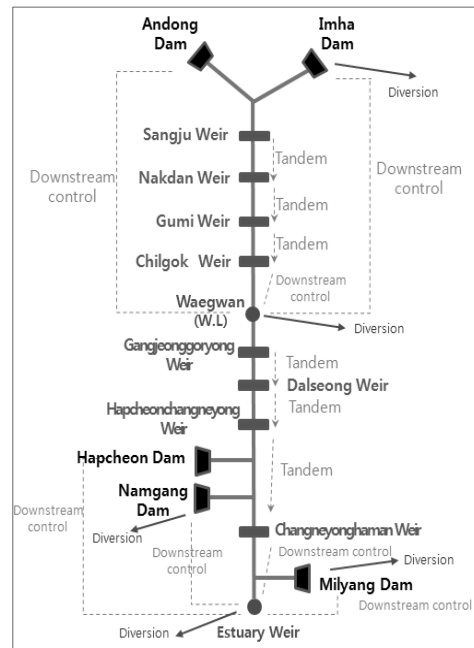
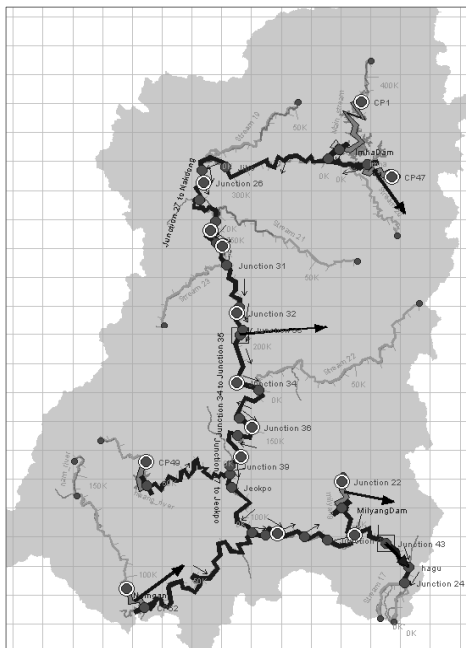


Fig. 2. Reservoir Networks of the HEC-ResSim for the Nakdong River Basin

개념은 3개 댐(입하댐, 남강댐, 밀양댐) 상류의 도수량, 왜관 수위표와 낙동강 하구지점의 도수 가능량 및 하천유지유량을 합산하는 개념이다. 하천내 취수장 등을 통해 공급되는 물의 양이 없다고 가정하고, 왜관 지점과 하구 지점에서 도수 가능한 최대량을 산정하여 이를 공급가능량으로 간주하였다. 또한 하천유지유량으로 산정된 양에 대해서는 댐에서 공급되는 물량만을 고려하기 위해 댐이 없는 유역 자체에서 공급되는 물량을 제외하고 합산하였다.

보의 유입량 자료는 '전국유역조사(국토해양부)'의 장기유출모의(PRMS) 자료를 근간으로 하였는데, 여기에 실제유량과 더욱 가까운 값으로 모의하기 위하여 안동, 임하, 합천, 남강댐 유역에 해당되는 단위유역의 모의 유출량을 각 댐의 방류량 값으로 대체하여 활용하였다. 이러한 방법으로 산정된 주요 지점의 유량은, 수위유량관계 곡선식에 의한 값과 PRMS 모의로 산정된 결과의 중간정도 수준인 것을 확인할 수 있었으며, 특히 갈수기일수록 곡선식 산정 결과와 가깝고, 홍수기일수록 PRMS 모의 결과에 가깝게 산정됨을 확인하였다. 결과적으로 8개 보별 자체 유입량을 산정한 결과는 Table 5와 같다.

4.5 댐보 연계 모의운영 결과

각 case별 모의운영 결과를 요약하면 Table 6과 같다. 우선 (a)와 (b)는 Table 4에 이미 나타난 결과로, (b)의 경우 댐마다 설계당시 상이하게 적용되었던 이수안전도를 그대로 준용하되 댐 준공 이후 축척된 유입량을 활용하여 재평가한 결과이다. 나머지

(c), (d), (e)는 20개년 중 1개년의 물부족을 허용하는 이수안전도 95% 기준으로 분석한 결과로, 용수공급 능력은 댐별 단독운영시 총 2,424백만 m^3 /년, 댐간 연계운영시 2,612백만 m^3 /년, 댐-보간 연계운영시 2,734백만 m^3 /년으로 나타났다.

즉, 댐보간 연계운영을 하는 경우, 수계 전체적으로 설계 계획량 이상 용수공급이 가능하고 댐간 연계운영에 비해서는 약 1.2억 m^3 가량 공급능력이 증가하는 것으로 확인 됐다. 그러나 낙동강 상하류로 구분하여 볼 때, 하류는 설계 계획량에 비해 120백만 m^3 /년 추가 공급이 가능하지만, 상류의 경우는 설계대비 54백만 m^3 /년이 부족한 것으로 나타나, 상류측의 공급계획 보완이 시급한 것으로 판단된다. 결론적으로, 보를 포함한 연계운영을 통해 추가 확보된 용수공급능력은 연간 약 1.2억 m^3 으로 볼 수 있는데, 이는 기존 댐들과 비교해 보면 장흥댐(128백만 m^3 /년), 횡성댐(120백만 m^3 /년) 등과 유사한 수준의 공급능력이라 할 수 있겠다.

5. 결론

낙동강수계 주요 다목적댐 5개소를 대상으로 건설 전의 유입량 전망과 그간의 관측 자료를 비교해 보았고, 설계당시와 유사한 조건으로 용수공급능력도 재평가해 보았다. 분석 결과, 안동, 임하, 합천댐 3개소의 공급능력이 73~87% 수준까지 감소한 것으로 나타나 따라 보다 효율적인 운영방안의 필요성을 확인하였다.

이에 따라 5개 다목적댐과 8개 보에 대하여 이수안전도 95%를

Table 5. Average Inflow From Each Basin of the Nakdong River Weirs (Unit : m^3/s)

Sangui weir	Nakdan weir	Gumi weir	Chilgok weir	Gangjeonggor yeng weir	Dalseong weir	Hapcheonchang neyong weir	Changnyeonghaman weir	Estuary
72.4	34.5	5.3	23.5	9.9	43.8	14.0	54.1	42.5

Table 6. Simulation Results for Various Dam Reevaluation Cases for the Nakdong River Basin (Unit : Mm^3/yr)

Simulation cases		Andong	Imha	Hapcheon	Namgang	Milyang	Total
Water supply reliability on design	(a) original designed capacity	926	497	599	573	73	2668
	(b) reevaluation with HEC-5 using inflow series after dam construction	802	365	459	588	76	2290
	Difference = (b)-(a)	-124	-132	-140	+15	+3	-378
Water supply reliability 95% (HEC-ResSim)	(c) without coordinated operation	856	368	449	707	44	2424
	Difference = (c)-(a)	-70	-129	-150	+134	-29	-244
	(d) with coordinated operation of dams only	1304		1308			2612
	Difference = (d)-(a)	-119		+62			-57
	(e) with coordinated operation of dams & weirs	1369		1365			2734
	Difference = (e)-(a)	-54		+120			66
Difference = (e)-(d)	+65		+57			122	

기준으로 용수공급능력을 분석해 보았다. 최소 20개년의 유입량 자료 확보를 위해 댐의 경우 실적자료를 활용할 수 있었으나, 보는 실제 운영기간이 짧은 이유로 전국유역조사(MLTMA, 2011)의 장기유출 분석(PRMS) 결과와 댐 방류량을 조합한 자료를 생성하여 활용하였다.

HEC-ResSim에 각 시설물의 최신 제원을 입력하여 네트워크를 구축하고 1992~2011년간의 일 자료를 입력, 연단위 분석을 통해 용수공급능력을 평가하였다. 우선 댐별 개별 운영 조건으로 공급능력을 평가하여 합산해 보았고, 다음으로는 낙동강 상하류를 구분하여 그룹단위 운영 방식으로 댐간 연계운영, 댐-보간 연계운영을 모의하였다.

모의운영을 위해 시설물간 병렬연결(Downstream Control Function Rule) 또는 직렬연결(Tandem Operation Rule)을 통해 연계운영 네트워크를 구성하였고, 입하, 남강, 밀양댐의 도수량(Diversion)과 왜관 수위관측소 및 낙동강 하구 지점의 도수 가능량, 하천유지유량을 합산하여 수계 전체의 공급능력을 평가하였다. 단, 왜관과 하구지점의 하천유지유량 중 댐에서 공급된 수량만을 고려해야 하므로 댐이 없는 유역으로부터의 유입량(Local Inflow)은 별도 유황분석 결과를 활용하여 산정하였다.

평가 결과로, 앞 절에 기술하였듯이 남강댐을 제외하고는 설계조건에 비해 공급능력이 감소하였으며, 댐-보간 연계운영을 할 경우 설계 수준의 공급능력 이상으로 회복할 수 있고, 보의 연계운영으로 인한 공급능력의 증가 효과는 연간 약 1.2억³ 수준으로 확인되었다. 단, 낙동강 상류만을 놓고 볼 때 댐보 연계운영을 시행하더라도 설계조건보다 54백만³/년이 부족한 것으로 나타나, 건설 중인 신규댐을 통한 추가적인 공급능력 보완이 시급한 것으로 판단된다.

앞서 언급한 댐보 연계 공급 개념을 실무적으로 활용하기 위해서는, 개별 댐 단위로 계획을 수립하는 대신 댐과 보를 묶어 총 공급량을 계획관리하는 방안이 필요할 것이다. 예를 들어, 낙동강 상류 안동임하댐의 공급계획을 개별 댐 단위가 아닌 2개 댐과 4개 보의 연계 공급계획으로 대체하는 방법이다. 또한 보의 용수를 활용하기 위해서 평상시에는 배분된 공급량만큼 보 방류량을 늘려 수위를 낮추면서 운영하고, 강우 등으로 인해 하천 유량이 일정 기준 이상 증가할 때는 저수량을 확보하는 방식이 적절할 것으로 판단된다. 아울러, 향후 연구과제로서 군위댐, 성덕댐, 보현산댐 등 근래에 완공된 소규모 댐들을 포함한 연계 공급방안을 분석해 보는 것도 의미 있는 내용이 될 것으로 보인다.

References

Alexander, G. N. (1962). "The use of the gamma distribution in estimating regulated output from storages." *Civil Engineering Transactions*, The Institution of Engineers, Australia, Vol. 4, No.

- 1, pp. 29-34.
- Chae, S. I., Kim, J. H. and Kim, S. K. (2012). "A study on evaluation of water supply capacity with coordinated weirs and multi-reservoir operating model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 8, pp. 839-851 (in Korean).
- Cheong, T. S., Kang, S. W., Ko, I. H. and Hwang, M. H. (2007). "Development and validation of KModSim for the decision support system in geum river basin." *Journal of KSCE*, Vol. 27, No. 3B, pp. 319-329 (in Korean).
- David, R. M. (1993). *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill.
- Gong, J. T., Kim, J. H. and Kim, S. K. (2013). "A study on the fundamental comparison of simulation and optimization approaches for water resources systems planning and management." *Journal of Korea Water Resources*, Vol. 46, No. 4, pp. 373-387 (in Korean).
- 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.
- Johnson, W. K., Wurbs, R. A. and Beegle, J. E. (1990). "Opportunity for reservoir-storage reallocation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 4, pp. 550-566.
- Korea Development Institute (KDI) (2011). *Prefeasibility investigation of clean water supply project for Kyongbuk-Daegu*, KDI (in Korean).
- Korea Water Resources Association (KWRA) (2011). *Standards of dam design*, KWRA (in Korean).
- K-water (2013). *Handbook of dam operation*, K-water (in Korean).
- Labadie, J. W. (2004). "Optimal operation of multi reservoir systems: State-of-the-Art Review." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.
- Lee, D. H., Choi, C. W., Yu, M. S. and Yi, J. E. (2012). "Reevaluation of multi-purpose reservoir yield." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 4, pp. 361-371 (in Korean).
- Lund and Guzman (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.
- McMahon, T. A. and Mein, R. G. (1986). *River and Reservoir Yield*, Water Resources Publications, USA.
- Ministry of Construction and Traffic (MOCT) (1998). *Reevaluation of existing dams - Nakdong river*, K-water (in Korean).
- Ministry of Construction and Traffic (MOCT), K-water (2010). *Reevaluation of existing dams and optimum allocation of the capacity*, K-water (in Korean).
- Ministry of Construction and Traffic (MOCT), K-water (2011). *The National River Basin Investigation 2011*, K-water (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA), K-water (2013). *Sourcebook of the 21st World Water Day*, K-water (in Korean).
- Nate, B., Katherine, M. and Jay, L. (2012). "Re-operation of major reservoirs for flood and environmental management." *World Environmental and Water Resources Congress*, ASCE 2012, pp. 2388-2394.
- Ripple, W. (1883). "The capacity of storage reservoirs for water

- supply.” *Proceedings Institution of Civil Engineers*, Vol. 71, pp. 270-278.
- US. Army Corps of Engineers (1998). *HEC-5, Simulation of Flood Control and Conservation Systems, User's Manual*, USACE.
- US. Army Corps of Engineers (2007). *HEC-ResSim, Reservoir System Simulation, User's Manual*, USACE.
- US. Army Corps of Engineers (2010). *Yellowtail Dam Reallocation Study*, USACE.
- Waitt, F. W. F. (1945). “Studies of droughts in the sydney catchment areas.” *Journal of The Institution of Engineers, Australia*, Vol. 17, No. 4-5, pp. 90-97.
- Yoon, G. H. (2011). *Development of downstream control function rule for parallel reservoirs with HEC-ResSim*, Master's Thesis, Kyungpook University (in Korean).