충주 다목적댐의 기후변화 대응을 위한 ICT 기반 편익 증대 방안 연구

A Study on the ICT-based Benefit Improvement of the Chung-ju Multipurpose Dam for Climate Change

배창용* · 장암*

Chang-young Bae* · Am Jang*

성균관대학교 수자원전문대학원 · *한국수자원공사

Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University · *K-water

(Received June 8, 2018; Revised July 12, 2018; Accepted July 30, 2018)

Abstract : Recently, due to the climate change, weather disasters, such as floods, droughts, cold weather and heavy snow, have frequently been occurring, and its frequency is expected to further accelerate around the globe. In Korea, if greenhouse gases continue to be released as the current trend without efforts to mitigate climate change (RCP 8.5), the average temperature will rise 5.7°C in the second half of the 21st century (2071-2100). Also, annual average precipitation is expected to increase 17.6% compared to current average precipitation, which means more specialized water management is required to protect people and property from the increased risk of flooding and drought. Therefore, in this study, the scientific management technology of water resources facilities (multi-purpose dams) using the latest ICT and the hydrologic stability of changing hydrologic conditions were secured to effectively respond to climate changes. It also examines the types of revenue (water supply, hydro-electric power) that operators of multi-purpose dams can expect from their facility operations, as well as the sales procedures and profit structures. We analyzed the operation cases of the Chung-ju multi-purpose dam and came up with realistic measures to increase our profits. In particular, we were able to predict annual power sales revenue of Chung-ju multi-purpose dam by forecasting the prices in the electricity market in 2018, and to improve profits without increasing power generation volume by operating power generation at the time where market prices are relatively high.

Key Words : Climate Change, ICT, Multi-Purpose Dams, Benefits, Hydroelectric Power

요약 : 최근 기후변화로 인한 홍수, 가뭄, 한파, 폭설 등의 기상재해가 빈번하게 발생하고 있으며, 이러한 현상은 전 지구적으로 더욱 가속화 될 것으로 전망되고 있어 종합적인 대책 마련이 요구된다. 우리나라의 경우 기후변화를 완화하기 위한 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출한다면(RCP 8.5) 21세기 후반기(2071년~2100년)에는 평균 기온이 현재 보다 5.7°C 상승한 16.7°C 정도로 예상되며, 연평균 강수량 또한 현재 대비 17.6% 증가하는 것으로 예측되어 홍수, 가뭄 등 증가하는 자연재해의 위험으로부터 인명과 재산을 보호하기 위해 보다 전문적인 물관리가 필요한 시점이다. 이에 본 연구에서는 기후변화에 효과적으로 대응하기 위하여 최신 ICT를 활용한 수자원이 시설(다목적댐)의 과학적인 운영관리 기술과 변화하는 수문상황에 맞춰 수문학적 안정성을 확보하기 위한 충주 다목적댐의 치수 능력 증대 사례를 조사하였다. 또한, 다목적댐의 관리자가 시설운영을 통해 기대할 수 있는 운영수익(용수공급, 수력발전)의 종류와 판매절차 등 수익구조에 대해 살펴보고, 충주 다목적댐의 운영사례를 분석하여 수익을 증대시킬 수 있는 현실적인 방안을 도출하였다. 특히, 2018년도 전력시장의 거래가격 예측을 통해 충주 다목적댐의 연간 전력판매 수익을 전망하고, 시장거래가격이 높은 시간대 발전운영을 통해 발전량의 증가 없이 수익을 향상시킬 수 있는 방안과 그 효과를 계량적으로 제시하였다.

주제어 : 기후변화, ICT, 다목적댐, 편익, 수력발전

1. 서론

1.1. 우리나라 수자원의 특성

국제인구행동연구소(Population Action International, PAI)에서 2003년 발표한 자료에 의하면, 우리나라는 국가별로 기본적인 수자원 여건을 판단할 수 있는 ‘1인당 이용 가능한 수자원량(Renewable Water Resources)’이 1,453 m³(세계 153개 국가 중 129위)으로 ‘물스트레스(Water Stress, PAI 기준 1,700 m³ 이하) 국가’로 분류되어 있다.^{1,2)} 이것은 강수량은 풍부하나 좁은 국토에 많은 인구가 살고 있어 수자원 여건이 아주 열악하다는 것을 의미한다. 또한, 우리나라

의 경우 계절별 강수량의 편차가 심하고 하천유역에는 산지가 많아 홍수기에 집중되는 강우를 모아 갈수기 동안 사용할 수 있는 합리적인 방안을 모색할 필요가 있다.

한편, 최근 기후변화로 인한 홍수, 가뭄, 한파, 폭설 등의 기상재해가 빈번하게 발생하고 있으며 이러한 현상은 전 지구적으로 더욱 가속화 될 것으로 전망되고 있어 종합적인 대책 마련이 요구된다. 하지만, 우리나라의 경우 신규댐 건설을 위한 장소가 부족하고 지역주민과 비정부기구(NGO) 등의 반대로 사업추진이 용이치 않아 홍수, 가뭄 등 기상재해로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 전문적인 물관리가 시급한 현실이다.

* Corresponding author E-mail: amjang@skku.edu Tel: 031-290-7526 Fax: 031-290-7549

1.2. 기후변화가 수자원에 미치는 영향

기후변화의 일반적인 정의는 인간의 활동에 의한 온실효과 등의 ‘인위적인 요인’과 화산폭발, 성층권 에어로졸의 증가 등의 ‘자연적 요인’에 의한 효과를 포함하는 전체 자연의 평균 기후변동을 말하며, 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 기후변화를 장기간에 걸친 시간(수십년 또는 그 이상)동안 지속되면서, 기후의 평균상태나 그 변동 속에서 통계적으로 의미 있는 변동 즉 ‘인간 행위로 인한 것’이든 ‘자연적인 변동’이든 시간의 경과에 따른 기후의 변화를 포괄하는 개념으로 정의하고 있다.

특히, 2000년~2010년 기간 동안 인간의 활동으로 인해 온실가스 배출량은 연평균 2.2% 증가하였으며, 이 중에서 이산화탄소(CO₂)가 온실가스 배출량 증가의 78%를 차지하고 있다.³⁾ 이러한 인위적인 온실가스 배출이 기온 및 해수면 상승 등 기후변화의 주요한 원인으로 지목되고 있다.

우리나라 연평균 기온은 지난 30년간(1981년~2010년) 1.2℃ 상승하였으며, 모든 계절에서 기온이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 우리나라 강수량은 지난 30년간(1981년~2010년) 연별 변동의 폭이 커서 통계적으로 유의한 추세를 감지할 수는 없지만 78 mm 정도로 약하게 증가한 것으로 나타났다.⁴⁾ 만약, 기후변화를 완화하기 위한 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출한다면(RCP 8.5) 21세기 후반기(2071년~2100년)의 우리나라 평균 기온은 현재보다 5.7℃ 상승한 16.7℃ 정도로 예상되며, 연평균 강수량은 현재 대비 17.6% 증가하는 것으로 전망된다.⁵⁾

기후변화로 인해 우리나라의 홍수 위험성은 1일 강수량 100 mm 이상의 집중호우 발생 횟수가 과거에 비해 2.7배 이상 증가하고, 100년 빈도 홍수량이 20% 증가해 현재 100년 및 200년 빈도의 홍수에 견딜 수 있도록 설계된 제방의 홍수방어 능력이 1/2로 감소되며, 집중호우로 인한 토석류와 산사태 등 토사재해 발생도 증가할 것으로 예측된다. 또한, 기후변화로 인한 홍수와 가뭄이 빈번해지겠으며, 특히 가뭄은 봄철과 겨울철에 심화될 것으로 전망된다.⁶⁾

이러한 기후변화에 대응하기 위해 우리나라는 「저탄소 녹색성장 기본법」을 제정(2010) 하고, Post 2020 신기후체제 근간이 되는 파리기후변화 협정에 비준 동의(2015) 하는 등 범지구적 노력에 적극 참여하고 있는 중이다.⁷⁾

이에 본 연구는 기후변화에 효과적으로 대응하기 위한 최신 정보통신기술(Information & Communication Technology, ICT) 기반의 물관리 시스템과 수자원시설의 수문학적 안정성 확보 사례에 대해 살펴보고, 다목적댐의 실질적인 편익(용수판매, 수력발전)을 증대하기 위한 효과적인 방안을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구의 목적을 효과적으로 달성하기 위하여 기후변화

Fig. 1. Study flow chart.

의 정의와 기후변화가 수자원시설에 미치는 영향을 파악하고자 관련문헌에 대한 조사와 검토를 진행하였으며, 충주 다목적댐을 실제 운영하고 있는 한국수자원공사(이하 ‘K-water’)의 실무담당자 및 관계자를 대상으로 한 자료수집과 본연구의 효용성을 높이기 위한 의견 수렴을 추진하였다. 또한, 과학적인 홍수조절(용수공급)과 효율적인 발전시설 운영을 지원하는 시스템을 구축하고 활용 중인 K-water 사례를 통해 최신 ICT 기반의 다목적댐 운영 기술을 소개하였다.

이와 함께, 하천 및 댐과 관련된 우리나라의 법과 규정(기준)에 대한 조사와 실제 충주 다목적댐의 수문운영 및 발전 운영 자료(1995년~2017년)에 대한 분석을 수행하였으며, 이 상기에 대응한 안정적인 댐용수 공급 방안과 전력시장 거래가격 예측을 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하는 등 충주 다목적댐의 운영수익을 증대할 수 있는 객관적이고도 구체적인 개선방안을 도출하였다(Fig. 1).

2.1. 정보통신기술(ICT)을 활용한 다목적댐 운영 기술

기후변화로 인해 과거 댐 자료를 기초로 한 홍수의 분석과 상황 예측 등 시스템적인 수자원시설(댐, 보 등)의 운영은 점점 어려워지고 있으며, 신속한 의사결정과 즉각적인 상황 대응이 가능한 물관리 시스템에 대한 요구가 날로 증가하고 있다. 이를 위해 최신 ICT 기반의 다목적댐 운영 기술이 적용된 K-water의 실시간 수자원정보시스템과 ‘실시간 발전통합운영시스템’에 대해 살펴보고 안정적인 시설운영 환경을 기반으로 최적화된 용수공급과 수력발전 등을 통해 댐의 운영수익 향상에 적극 활용할 필요가 있다.

2.1.1. 실시간 수자원정보시스템

실시간 수자원정보시스템(Real-Time Hydrological Data Acquisition and Processing System, RHDAPS)은 전국 21개 다목적댐과 14개 용수전용댐, 4개 홍수조절용댐 및 16개 다기능 보의 수문자료를 실시간으로 모니터링할 수 있도록 K-water에서 구축하여 운영하고 있는 웹 기반의 물관리 지원시스템이다(Fig. 2).

Fig. 2. RHDAPS main screen.

현장에서 취득된 수위, 우량, 수질, 기상 자료는 Remote Terminal Unit (RTU)이라고 불리는 데이터 로거에 저장되어, 주망인 위성통신망을 통해 댐 제어국 원격호출제어서버로 전송된다. 원격호출제어서버에 저장된 수문 자료는 K-water 사내망을 통해 본사로 수문자료가 전송된다. 본사로 전송된 다목적댐, 용수전용댐, 홍수조절용댐 및 다기능보의 강수량, 유량, 댐수위, 저수량, 공용량, 상당유량, 유역면적 등의 수문자료는 RHDAPS를 통해 웹에서 실시간으로 확인할 수 있으며, 또한 수문 자료는 해당 유역 홍수통제소로 전송이 되어 유사 시 공동 재난 대응을 위해 활용되고 있다.

2.1.2. 실시간 발전통합운영시스템

발전통합운영시스템(Generation Integrated Operation System, GIOS)은 전국 각지에 산재해 있는 수력발전소의 효율적 운영 및 관리를 위해서 최신 ICT기술로 개발된 국내 최

초의 원격 발전통합운영시스템으로 수력발전 및 수문설비를 K-water 권역물관리센터(한강, 낙동강, 금강·영산강·섬진강)에서 24시간 원격으로 감시·제어할 수 있다. 또한, 종합적인 발전운영 현황 및 통계자료 제공을 통해 효율적인 물 관리 의사결정을 지원한다.

- 발전통합운영시스템(GIOS) 구축 및 운영대상 시설 (K-water가 운영하는 수력발전소)
 - 다목적댐 9개소(설비용량: 1,000.6 MW)
 - : 소양강, 충주, 대청, 안동, 합천, 주암, 임하, 남강, 용담
 - 4대강보 16개소(설비용량: 50.77 MW)
 - : 강천, 여주, 이포, 세종, 공주, 백제, 승촌, 죽산, 상주, 낙단, 구미, 칠곡, 강정고령, 달성, 합천창녕, 창녕함안
 - 기타 수력발전소(설비용량: 27.89 MW)

GIOS는 전국 단위의 발전을 감시 및 제어하는 통합제

Fig. 3. GIOS operation screen.

어센터(Head Office Control Center, HOCC)와 현장 설비의 데이터 취득 및 감시·제어를 담당하는 현장제어센터(Remote Data Acquisition & Control, RDAC), 두 부분을 연결하는 네트워크 시스템의 3부분으로 구성되어 통합제어센터에 장애가 발생하더라도 현장제어센터에서 발전기 감시·제어가 가능하도록 구축되어 있다(Fig. 3).

2.2. 전력시장 거래가격(SMP) 변화

발전전력량에 대한 전력시장의 거래기준가격으로 적용되는 계통한계가격(SMP)은 매시간 별로 수요에 대한 전력공급을 위해서 발전계획에 반영된 발전기들 중 변동비가 가장 높은 발전기의 변동비로 결정되며, 우리나라 전력수요와 에너지가격, 입찰기준 예비율 등의 변화에 실시간으로 영향을 받게 된다.

2017년도 계통한계가격(SMP)의 변화를 살펴보면, SMP 평균은 80.38원/kWh이고, SMP 최대는 93.42원/kWh (3월)

Table 1. Monthly SMP changes in 2017

	2017 monthly SMP (won/kWh)			
	Max.	Avg.	Min.	Diff. (Max.-Min.)
JAN	88.09	85.32	82.27	5.82
FEB	92.68	90.55	87.86	4.82
MAR	93.42	91.43	86.61	6.81
APR	76.54	74.55	70.82	5.72
MAY	84.84	77.85	66.27	18.57
JUN	86.19	81.63	72.22	13.97
JUL	82.16	75.10	60.75	21.41
AUG	83.13	74.76	57.52	25.61
SEP	81.40	71.63	55.11	26.29
OCT	77.46	70.82	60.29	17.17
NOV	83.32	80.72	74.75	8.57
DEC	92.74	90.14	86.55	6.19

Table 2. SMP changes (2013~2017)

		2013	2014	2015	2016	2017
SMP	Forecast	146.31	146.39	128.5	109.97	87.15
	Reality	165.13	152.24	111.46	82.94	91.72
	Error factor	+12.86%	+3.99%	-13.26%	-24.57%	+5.24%

이며, SMP 최대는 55.11원/kWh (9월)이다. 또한, 연중 SMP 차이는 최대 38.31원/kWh으로 SMP 평균 대비 +16.23% ~ -31.43% 범위 내에서 변화하였다(Table 1).

계통한계가격(SMP)은 수요가 적고 예비율이 높아지는 봄(4월~5월)과 가을(9월~10월)에 낮게 형성되며, 냉난방 부하의 변화가 현저한 여름(6월~8월) 및 겨울(11월~3월)에 높게 나타난다. 또한, 시간대 별로 살펴보면 산업용 전력수요가 증가하는 오전 9시부터 증가하여 11시에서 12시 사이에 SMP가 가장 높게 나타나며, 주말 및 휴일은 산업용 전력수요가 감소함에 따라 평일 → 일요일 → 토요일 → 휴일 순으로 SMP가 낮아지는 것을 알 수 있다(Fig. 4).

계통한계가격(SMP)의 변화 특성을 이해하고 정확한 예측을 통해 수력발전의 운영시간대 결정에 활용한다면 같은 발전량으로도 발전수익을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 사회·경제적 요소와 일기변화, 급변하는 에너지가격 등이 정확한 예측을 어렵게 하고 있다(Table 2).

2.3. 전력시장 거래가격(SMP) 예측

계통한계가격(SMP)을 예측하기 위해 한국전력거래소 및 한국전력공사에서 사용하고 있는 「전력시장가격 전망 상용 프로그램(Korea Electric Power Trading Analyzer, KEPTA)」을 활용하였으며, 산업통상자원부가 고시한 ‘제8차 전력수급기본계획’(2017.12)을 바탕으로 2018년도 전력수요를 전망하고 발전소 신규 건설 및 폐지 등 신정부정책을 반영한 전력공급 전망과 최근 국제유가 및 열량단가 등을 반영해 2018년도 계통한계가격(SMP)을 예측하였다(Fig. 5, Table 3).

Fig. 4. SMP changes by 2017 time zone.

Fig. 5. SMP forecasting procedures using KEPTA.

Table 3. Value of KEPTA simulation input for forecasting SMP in 2018

	Category	Input Value
Basic data	Company	K-water
	Plant name	Chung-ju Hydro power plant
	Fuel	Hydroelectric power
Demand data	Forecast period	2018.01.01.~2018.12.31. <2018>
	Demand reference	2016 (50%), 2017 (50%) <KEPTA DB>
	Demand model	Korea 8th Target demand <KEPTA DB>
Operation data	Systematic constraints	Total demand & Spare <default value>
	Transmission constraints	Power flow control <default value>
	Fuel data	Hydro power = 0
	Technical characteristics	Facility capacity, efficiency... <412 MW>
	Etc.	Preventive maintenance... <default value>
Simulation condition	Operation plan	Operation plan <default value>

3. 다목적댐 편익 및 수익구조

3.1. 다목적댐의 편익

다목적댐은 홍수기에 홍수조절을 통해 물로 인한 재해를 막고, 평·갈수기 및 가뭄 때에는 물을 안정적으로 방류하여 생활용수, 농업용수, 농업용수, 하천유지용수 등을 공급하며,

Table 4. Benefits and costs of multi-purpose dam

	Benefit	Cost
Direct	• Water supply living, industrial, agricultural, river maintenance	• Compensation expenses • Construction cost • Maintenance cost
	• Flood control	
	• Hydroelectric power	
	• Recreation	
	• Emergency water supply	
	• Inland waterway	
Indirect	• Increase land use	• Water conservation cost • Environmental improvement cost • Local aid expenses
	• Efficient use of water resources	
	• Fishing and fish farms	
	• Effect of replacing oil for power generation	
	• Effect of associated industries	

수력발전을 통해 청정에너지를 생산한다. 또한, 부수적으로 수변공간을 제공하여 지역경제 발전에 기여한다(Table 4).⁸⁾

다목적댐 건설로 인해 예상되는 편익과 비용은 해당 용도에 따라서 다를 수는 있으나 본 연구에서는 다목적댐의 직접 편익 중 댐관리자가 시설운동을 통해 실제 수익으로 발생하는 용수(생활, 농업, 하천유지, 발전)의 가치만을 연구(분석) 대상으로 하였다(※우리나라 정부가 부담하는 댐의 운영관리비용 제외).

3.2. 댐용수 공급 및 요금제도

다목적댐의 댐용수 공급 사업은 댐관리자가 댐운동을 통해 기대할 수 있는 수익 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 우기에 집중되는 강우를 댐에 저류하고 필요한 시기에 공급하여 이를 사용하는 자와 댐용수 사용계약을 체결하고 취수량에 따라 요금을 징수하는 것을 말한다.

다목적댐의 건설에는 막대한 비용이 소요되므로 전액 국고조달 방식으로서는 필요한 재원의 확보가 어려워 일반인으로 하여금 발전용수, 생활용수 등의 용도로 댐사용권(투자비회수 보장)을 부여하는 대신에 그에 상응하는 댐 건설비를 분담시키고 있으며, 댐 건설로 혜택을 보는 자는 댐하류 지역에 사는 도시민 등 특정인으로 제한되어 있으므로 비용 부담의 형평을 도모하기 위하여 수익자 부담 원칙으로 도입되었다.⁹⁾

댐용수는 편익에 대한 부담의 형평성, 지역사회의 균형발전, 국토의 균형 개발을 위하여 전국에 걸쳐 동일한 요금을 적용 중에 있으며, 댐용수의 요금은 물을 공급하는데 소요되는 총괄원가를 보상하는 수준에서 결정되고 있다.

3.3. 수력발전 및 요금제도

우리나라 전력시장은 2001년도에 이루어진 전력산업 구조개편에 따라 발전부문만 시장에 참여하는 경쟁체제이며, 전력시장에 참여한 발전기들의 변동비를 기준으로 시장가격을 결정하는 변동비반영 전력시장(Cost Based Pool, CBP)이다.

시장거래가격의 결정은 매시간별 수요를 충족시킨 발전기 중 가장 비싼 운전비용을 사용한 발전기의 원가(SMP)와, 고정비 보상차원에서 매시간 입찰결과 낙찰 유무에 관계없이 발전가능하다고 신고한 발전기의 공급가능 용량에 대해 용량요금(CP) 및 전력계통의 신뢰성, 안정성을 유지하고 전기 품질을 위해 발전사가 제공하는 보조서비스에 대한 요금

(ASP)의 합이 ‘시장거래 가격’이 된다.

- 시장거래가격 = 계통한계가격(SMP) + 용량요금(CP) + 보조서비스요금(ASP)

4. 결과 및 고찰

4.1. 충주 다목적댐 홍수기말 수문운영 최적화

홍수기(6월~9월) 댐 운영은 치수적 측면이 중시되는 단기적 운영으로 댐의 홍수조절용량을 최대한 이용하여 댐 하류 홍수피해를 최소화하는 목표를 달성하여야 한다. 홍수조절에 관한 의사결정을 위해서는 기상학, 수문학, 하천수리학 등 고도의 전문기술이 종합적으로 동원되어야 하며, 기상정보를 수집해 댐유역의 정량적인 강우량을 예측하고 강우-유출모형을 이용한 수문분석과 하류유황분석을 실시한 후 댐의 방류규모, 시기 등을 결정하고 홍수통제소의 승인을 받아 최종 방류를 시행하게 된다.¹⁰⁾

충주 다목적댐의 경우 홍수기 운영 목표는 소양강-충주 댐 간 연계운을 통해 댐 하류 홍수량을 최소화 하고, 최대발전 및 적정 예비방류를 통해 사전 공용량을 확보하며, 안정적인 용수공급을 위해 댐내 저수량을 최대 확보하는 것이다. 이를 위해 홍수기 전에는 댐의 정상적인 용수공급을 통해 적정 홍수조절용량 확보하고, 홍수기 중에는 댐 수위를 ‘정상용수공급 수위’ ~ ‘홍수기제한수위’ 범위내 유지하며 홍수기 말에는 9월말까지 홍수기 목표수위가 확보되도록 운영을 계획하고 있다(전반기 적극 저류, 후반기 유지)(Table 5).

통상적으로 홍수기 기간 중 수문방류시 댐 수위는 ‘홍수기제한수위(RWL)’에서 ‘상시만수위(NHWL)’ 사이에서 이루어지고 있지만, 1995년 이후 충주 다목적댐의 수문방류(총 24회)는 댐수위가 RWL 이상에서 19회, 댐수위가 RWL 이하에서 5회 실시되었으며, 댐수위가 RWL 이하에서의 수문방류량은 635.2 백만 m^3 로 전체 수문방류량의 6.1%를 차지하고 있다.

홍수기말이라는 가정 하에 가뭄 대비 댐용수 확보를 위해서는 홍수조절용량(RWL~FWL)을 최대한 활용할 필요가 있으며, 댐수위가 RWL 아래에서 방류하지 않고 RWL을 초과하는 시점에서 수문방류를 시행한다면 추가적인 저수량 확보가 가능하다고 판단된다. 이렇게 확보한 추가 저수량을

Table 5. Operation water level of Chung-ju multi-purpose dam

Operation water level during flood period	July	129.5 EL.m ~ 138.0 EL.m
	August	134.3 EL.m ~ 138.0 EL.m
	September	138.0 EL.m
Restricted water level (RWL)		138.0 EL.m
Normal high water level (NHWL)		141.0 EL.m
Flood water level (RWL)		145.0 EL.m
Maximum water level recorded in the past		146.03 EL.m

Table 6. Floodgate discharge of Chung-ju multi-purpose dam (at below RWL)

	Floodgate discharge (at below RWL)				Total (million m^3)
	2003	2004	2012		
Dam water level (EL.m)	134.7	135.4	132.1	134.2	-
Water storage capacity (million m^3)	1723.2	1775.82	1536.78	1686.25	-
Volume of discharge (million m^3)	140.4	422	45.5	27.3	635.2
Volume of additional water storage (million m^3)	257.32	204.7	443.74	294.27	1200.03

* Water storage capacity at RWL(EL. 138.0 m): 1,980.52 million m^3

* Additional water storage capacity : [RWL] - [Water level at discharge time]

Water level (EL.m)	119~125	126~130	131~135	136~140	141~145
Water storage difference per 1 cm (ton)	500,000	600,000	700,000	800,000	900,000

갈수기에 용수공급과 전력판매를 통해 추가 수익을 기대할 수 있을 것이다(단, 기상 및 수문상황에 따라 불가피한 경우 제외)(Table 6).

4.2. 충주 다목적댐 치수능력 증대

충주 다목적댐은 한강수계의 수자원을 고도로 개발하여 수도권을 비롯한 댐 하류 지역에 관개, 생활 및 공업용수를 공급하는 동시에 발전 및 홍수조절을 목적으로 수행된 사업으로 1978년 6월 진입로 공사를 착공하여 1985년 12월에 준공되었다(Table 7).

충주 다목적댐이 완공된 이후 약 30년이 지난 현시점에서 볼 때 그동안 기후변화로 인한 이상홍수 발생 등으로 수문 상황이 크게 변화하였다. 특히 2002년 강릉지역에 발생한 태풍 ‘루사’로 인한 집중호우는 기존의 가능최대강수량 규모를 초과하는 사상 초유의 24시간 최대 강수량을 기록하였으며, 1990년 대홍수시 충주댐의 최대유입량은 22,164 m^3/s 로 댐 설계시의 계획홍수량인 16,000 m^3/s 를 초과하였고, 최대방류량은 14,000 m^3/s 로 설계방류량 14,200 m^3/s 에 거의 근접하였다(Table 8).

Table 7. Facility resources for Chung-ju multi-purpose dam

Dam	Type	Concrete gravity dam
	Crest elevation	147.5 EL.m
	Height/Length	97.5 m / 447.0 m
Spillway	Type	Over-flow type open channel
	Weir height/Length	126.0 EL.m / 200.0 m
	Floodgate	(B)15.5 × (H)17.9 × 6
	Energy dissipator	Stilling basin

Table 8. Maximum water level and maximum volume of inflow and discharge at Chung-ju multi-purpose dam during a heavy flood in 1990

Maximum water level		Maximum inflow		Maximum discharge	
Water level (EL,m)	Occurrence time	Water flow (CMS)	Occurrence time	Water flow (CMS)	Occurrence time
146.03	9.12 13:00	22,164	9.12 01:00	14,000	9.12 13:00

Table 9. Improvement of water management for Chung-ju multi-purpose dam

	Non-structural measures	Structural measures
Method	Change dam operation method (SRC ROM → Rigid ROM)	Install additional auxiliary spillway (Tunnel D16.3 m × L1,541 m × 3)
Reason for application	Optimal flood management	Enhance dam stability

또한, 댐 설계홍수량(Design Flood Discharge)에 대한 설계기준이 빈도별 홍수량에서 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, PMF)으로 강화되었으며, 최근의 주요 호우사상을 고려하여 산정한 충주 다목적댐 유역의 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation, PMP)이 설계 당시보다 증가됨에 따라 PMF 유입시 댐 안정성 확보가 필요한 것으로 평가되었다.

기술적 및 경제적 사항에 대한 종합적인 검토 결과, 충주 다목적댐의 안정성 확보를 위해 적용 가능한 구조적 대책으로는 댐 최고수위 상승시 수몰지 발생으로 인한 사회적 문제 등으로 보조여수로를 신설하는 것이 최적의 방안이며, 비구조물적 대책으로는 하류 홍수피해 저감 및 홍수조절용량을 최대로 활용 가능한 일정률-일정량 방식을 적용하는 것이 타당하다고 결정되었다(Table 9).¹¹⁾

현재 충주 다목적댐의 안정성 확보를 위한 구조물적 대책으로 보조여수로를 설치(2013년~2018년) 중에 있으며, 설

치가 완료되는 데로 댐의 운영방식을 변경하여 관리할 계획에 있다.

4.3. 충주 다목적댐 수력발전 편익 증대

4.3.1. 충주 다목적댐 수력발전 현황

충주 다목적댐 수력발전소의 연간 기준발전량은 844.1 GWh으로 1985년도에 상업발전을 개시하여 2017년도까지 누적 발전량 24,289.3 GWh을 달성한 국내 최대 규모의 수력발전소이다.

수력발전소는 본댐 우안(시설용량 400 MW)과 본댐으로부터 약 20 km 하류에 건설된 조정지댐 좌안(시설용량 12 MW)에 각각 위치하고 있으며, K-water 한강물관리센터(과천)에서 원격으로 운영되고 있다(Table 10).

상업발전 개시(1985년) 이후 2017년도까지의 연평균 발전량은 736 GWh이며, 연평균 발전매출은 539.4억 원이다. 또한 지금까지 연간 최대 발전량은 1,084.7 GWh (1987년)이며, 연간 최소 발전량은 189.8 GWh (2015년)이다(Fig. 6).¹²⁾

발전량에 영향을 미치는 요소는 댐의 방류량(유입량), 설비효율(전수비), 발전제약사항(예방정비) 등이 있으나, 우리나라의 기후 특성상 방류량이 많은 홍수기(6월~9월)에 발전량이 집중된다.

2011년도를 제외하면 충주 다목적댐의 연평균 강우량이 점차 감소하는 추세이며, 이에 따라 강우량 감소 → 유입량 감소 → 방류량 감소 → 발전방류량 감소 → 발전량 감소로 이어지고 있다(Fig. 7).

Table 10. Facility status of Chung-ju multi-purpose dam hydro-electric power plant

	Main dam	Re-regulation dam
Generator capacity	100 MW × 4	6 MW × 2
Base generation	844.1 GWh/year	
Rated head	57.5 m	9.2 m
Rated water flow	197/788 m ³ /sec	75.3/150.6 m ³ /sec
Turbine type	Francis	Tubular

Fig. 6. Chung-ju multi-purpose dam rainfall and volume of power generation (1995-2017).

Fig. 7. Changes in Chung-ju multi-purpose dam's rainfall, inflow volume, discharge volume, power generation. (1995-2017).

4.3.2. 전력시장 거래가격(SMP) 예측 결과

2018년도 계통한계가격(SMP) 예측 결과 SMP 평균은 83.28 원/kWh으로 2017년도에 비해 약 1.2% 증가(2.9 /kWh)하는 것

으로 전망되었으며, 연중 SMP 최대는 103.54원/kWh (3월)이고, SMP 최소는 53.81원/kWh (9월)으로 연중 SMP의 변동폭은 평균값에서 +24.3%~ -35.3% 수준인 것으로 나타났다(Table 11).

Table 11. Forecasted SMP in 2018 (KEPTA simulation results)

SMP	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1 h	89.26	86.60	99.48	87.11	86.58	82.80	70.31	69.89	59.28	62.79	72.74	75.13
2 h	87.07	84.29	96.41	83.82	82.28	78.07	63.82	63.38	55.83	59.40	64.95	66.79
3 h	84.73	81.93	91.84	79.44	77.32	73.18	59.88	57.79	54.18	54.77	58.91	62.03
4 h	82.96	79.66	89.91	78.14	73.74	68.56	55.10	54.88	53.82	53.97	55.59	56.64
5 h	84.59	81.00	93.90	81.63	77.90	68.05	54.83	54.59	53.81	54.54	58.16	59.19
6 h	87.11	83.57	97.12	85.00	82.67	74.05	56.05	55.61	54.31	57.75	65.25	64.04
7 h	90.27	85.18	99.67	86.48	86.42	77.71	63.98	61.79	57.03	63.60	74.17	70.76
8 h	91.32	86.49	101.72	87.65	86.35	83.93	77.49	75.63	68.05	73.36	80.38	78.35
9 h	93.88	88.81	103.20	89.29	89.03	86.23	83.81	83.51	76.72	80.00	84.42	80.49
10 h	94.06	89.08	103.54	89.14	90.30	88.20	87.88	88.03	80.63	80.78	85.03	81.34
11 h	94.07	89.27	103.25	89.30	90.77	89.13	90.25	91.03	81.90	81.44	84.33	81.06
12 h	93.22	88.13	102.25	88.34	89.84	87.90	90.12	90.52	79.91	79.67	83.04	79.66
13 h	90.34	85.20	99.05	84.64	85.12	86.07	88.48	89.10	78.01	73.02	72.58	70.15
14 h	91.54	87.56	101.05	87.25	89.84	88.52	90.65	91.41	80.93	80.96	82.39	77.72
15 h	91.20	87.36	100.71	87.37	90.27	89.82	92.03	93.04	82.46	82.13	83.29	79.27
16 h	91.42	87.31	101.00	88.14	90.68	90.41	91.25	92.50	82.64	82.64	84.26	79.52
17 h	92.56	88.04	101.28	88.56	91.21	90.46	92.28	92.93	84.02	83.13	85.41	81.54
18 h	93.69	88.99	101.32	89.27	90.52	89.62	90.68	91.91	82.83	83.08	86.15	85.73
19 h	94.45	90.04	102.46	91.29	91.87	90.28	90.63	91.85	84.73	85.98	88.58	86.47
20 h	93.58	89.80	102.29	91.01	92.50	90.88	91.07	92.14	86.96	87.55	88.22	85.20
21 h	92.71	88.11	102.03	91.10	92.17	91.12	90.84	91.14	85.15	85.49	86.66	83.25
22 h	92.13	88.03	100.89	89.90	90.81	89.78	88.23	88.22	82.18	82.24	84.60	80.01
23 h	92.56	88.76	101.08	89.82	89.45	87.61	85.68	85.65	76.12	80.27	84.24	81.53
24 h	93.17	89.46	101.61	89.02	88.62	86.33	82.48	82.42	71.48	77.28	84.88	84.73
Max.	94.45	90.04	103.54	91.29	92.50	91.12	92.28	93.04	86.96	87.55	88.58	86.47
Avg.	90.91	86.78	99.88	87.20	87.34	84.53	80.33	80.37	73.04	74.41	78.26	76.28
Min.	82.96	79.66	89.91	78.14	73.74	68.05	54.83	54.59	53.81	53.97	55.59	56.64

Table 12. Forecasted Chung-ju multi-purpose dam's power generation return in 2018

	SMP(kWh)			Generation (GWh)	Generation Return (million won)		
	Max.	Avg.	Min.		Max.	Avg.	Min.
JAN	94.45	90.91	82.96	29	2,739	2,636	2,405
FEB	90.04	86.78	79.66	26.2	2,359	2,273	2,087
MAR	103.54	99.88	89.91	29	3,002	2,896	2,607
APR	91.29	87.20	78.14	37.4	3,414	3,261	2,922
MAY	92.50	87.34	73.74	48.3	4,467	4,218	3,561
JUN	91.12	84.53	68.05	46.8	4,264	3,956	3,184
JUL	92.28	80.33	54.83	57.5	5,306	4,618	3,152
AUG	93.04	80.37	54.59	60.3	5,610	4,846	3,291
SEP	86.96	73.04	53.81	52.2	4,539	3,812	2,808
OCT	87.55	74.41	53.97	33.8	2,959	2,515	1,824
NOV	88.58	78.26	55.59	28.1	2,489	2,199	1,562
DEC	86.47	76.28	56.64	29	2,507	2,212	1,642
Total				477.6	43,655	39,442	31,045

2018년도 계통한계가격(SMP) 예측 결과를 활용해 충주 다목적댐의 발전 수익을 산출해 보면 연간 최소 310.4억 원에서 최대 436.5억 원의 발전 수익이 예상된다. 또한 SMP 평균 적용시 예상할 수 있는 발전 수익은 394.4억 원이다(※기타 용량요금(CP)과 보조서비스요금(ASP) 제외)(Table 12).

연중 SMP 변동에 따라 예상 가능한 발전수익은 최대 126.1억 원의 차이가 발생할 수 있으며, 발전수익을 높이기 위해 SMP가 높은 시간대에 적극적으로 전력을 생산·판매할 필요가 있다.

Table 13. Forecasted daily average SMP in 2018

1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h
78.50	73.84	69.67	66.91	68.52	71.88	76.42	82.56	86.62	88.17	88.82	87.72
13 h	14 h	15 h	16 h	17 h	18 h	19 h	20 h	21 h	22 h	23 h	24 h
83.48	87.48	88.25	88.48	89.29	89.48	90.72	90.93	89.98	88.08	86.90	85.96

Fig. 8. Monthly difference in power generation return due to change in operation hours.

Table 14. Difference in power generation return due to change in operation hours

Profit	Result of six-hours power generation operations per day		
	SMP Low Time (01 h~06 h)	SMP Average Time	SMP High Time (09 h~11 h, 18 h~20 h)
	332.88 billion won	394.42 billion won	424.31 billion won
	Difference (High-Low)		Difference (High-Average)
	91.43 billion won (27.46% ↑)		29.89 billion won (7.57% ↑)

4.3.3. 전력시장 거래가격(SMP) 최고 시간대 수력발전

일반적으로 다목적댐의 수력발전기는 하루 방류량을 고려하여 일평균 6~7시간 발전하도록 설계에 적용하고 있으며, 충주 다목적댐 수력발전소의 경우 일평균 운영(가동)시간은 5.46시간(본댐 발전기 기준)이다. 하루 평균 6시간 발전기 가동을 기준으로 충주 다목적댐의 발전소 운영을 계획한다면, 2018년도 시간대별 계통한계가격(SMP) 예측 결과를 통해 하루 중 SMP가 높은 시간대인 오전(09시~11시)과 저녁(18시~20시)에 전력을 생산·판매하는 것이 유리하며, SMP가 낮은 새벽(01시~06시)에는 가급적 발전을 피해야 한다는 것을 알 수 있다(Table 13). SMP 최소 시간대(01~06시) 선택 발전을 통해 기대할 수 있는 연간 수익은 332.8억 원이며, SMP 최대 시간대(09~11시, 18~20시) 선택 발전을 통해 기대할 수 있는 연간 수익은 424.3억 원으로 SMP 최소 시간대 대비 91.4억 원(27.46%)의 수익을 추가로 기대할 수 있으며, SMP 평균과 비교해서도 29.8억 원의 추가 수익을 얻을 수 있는 것으로 분석되었다(Table 14, Fig. 8).

Table 15. Forecasted weekly average SMP in 2018

		SMP (won/kWh)				Power Generation (kWh/day)	Profit difference (won/day)
		Avg.	Max.	Min.	Diff.		
MAR	3,05~3,09	102,40					
	3,12~3,16	101,06					
	3,19~3,23	100,40	102,40	100,24	2,16	935,483 (29 GWh)	2,020,643
	3,26~3,30	100,24					
APR	4,02~4,06	90,22					
	4,09~4,13	88,76	90,22	87,38	2,84	1,246,666 (37,4 GWh)	3,540,531
	4,16~4,20	89,38					
	4,23~4,27	87,38					
MAY	4,30~5,04	85,37					
	5,07~5,11	88,27					
	5,14~5,18	89,46	90,40	85,37	5,03	1,558,064 (48,3 GWh)	7,837,061
	5,21~5,25	90,40					
OCT	5,28~6,01	88,21					
	10,01~10,05	75,36					
	10,08~10,12	74,07					
	10,15~10,19	81,25	81,25	74,07	7,18	1,090,322 (33,8 GWh)	7,828,511
NOV	10,22~10,26	79,15					
	10,29~11,02	79,82					
	11,05~11,09	79,35					
	11,12~11,16	81,14	83,42	79,35	4,07	936,666 (28,1 GWh)	3,812,230
DEC	11,19~11,23	83,17					
	11,26~11,30	83,42					
	12,03~12,07	80,56					
	12,10~12,14	81,02	81,20	77,43	3,77	935,483 (29 GWh)	3,526,770
	12,17~12,21	81,20					
	12,24~12,28	77,43					

4.3.4. 전력시장 거래가격(SMP) 최적 시간대 예방정비

충주 다목적댐 수력발전소의 경우 100 MW × 4대(본댐 기준)로 구성되어 예방정비(1~2대)를 실시하더라도 계획된 연중 일일발전물량의 소화가 가능하여 SMP를 고려한 예방정비 일정조정이 반드시 필요하지는 않으나, 갑작스런 호우 등으로 전체 발전설비의 가동이 필요한 경우를 대비하여 연간 예방정비 계획 수립 및 조정에 SMP 예측 자료를 적극 활용할 필요가 있다(Table 15).

2018년도 계통한계가격(SMP) 예측 결과를 보면, 월별 주간 SMP 차이가 최소 2.16원/kWh에서 최대 7.18원/kWh으로 예방정비 일정 조정을 통해 2,020,643원/일에서 7,837,061원/일까지 추가 수익을 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 기후변화에 효과적으로 대응하기 위한 최신 ICT 기반의 물관리 지원시스템과 수자원시설의 수문학

적 안정성 확보 사례에 대해 살펴보았으며, 다목적댐의 홍수기말 수문운영 최적화 및 전력시장의 거래가격 예측을 통해 충주다목적댐의 편익(용수판매, 수력발전)을 증대하기 위한 구체적인 방안을 도출하였다.

① 충주 다목적댐 댐용수 판매수익 증대 방안

- 가뭄대비 댐용수 확보를 위한 홍수기 말 최적 수문운영 : 홍수기말이라는 가정하에 가뭄 대비 댐용수 확보를 위해서 홍수조절용량(RWL~FWL)을 최대한 활용할 필요가 있으며, 댐수위가 홍수기제한수위(RWL) 아래에서 방류하지 않고 홍수기제한수위를 초과하는 시점에서 수문방류를 시행한다면 추가적인 저수량 확보가 가능하다고 판단된다.(기상 및 수문상황에 따라 불가피한 경우 제외) 또한, 이렇게 확보한 저수량을 활용하여 갈수기에 용수공급과 전력판매 수익을 추가로 기대할 수 있을 것이다.

② 충주 다목적댐 발전전력(수력) 판매수익 증대 방안

- 계통한계가격(SMP) 예측을 통한 발전전력 판매수익 극대화 : 2018년도 시간대별 계통한계가격(SMP) 예측 결과를 활용하여 SMP 최소 시간대(01~06시) 선택 발전을 통해 기대할 수 있는 연간 수익은 332.8억 원이며, SMP 최대 시간대(09~11시, 18~20시) 선택 발전을 통해 기대할 수 있는 연간 수익은 424.3억 원으로 SMP 최소 시간대 대비 91.4억 원(27.46%)의 수익을 추가로 기대할 수 있다.
- 계통한계가격(SMP) 최저 시기를 선택 예방정비(발전정지) 실시 : 연간 예방정비 계획 수립 및 조정시에 계통한계가격(SMP) 예측 자료를 활용한다면 예방정비 기간 중 주간 SMP 차이를 통해 추가 수익을 기대할 수 있으며, 2018년도 계통한계가격(SMP) 예측 결과에 따르면 월별 주간 SMP가 최소 2.16원/kWh에서 최대 7.18원/kWh으로 예방정비 일정 조정을 통해 2,020,643원/일에서 7,837,061원/일까지 추가 수익을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 다목적댐의 편익 중 수력발전에 대한 수익을 대상으로 구체적인 방안과 효과를 제시하였지만, 향후 최적 수문운영에 대한 방안과 정량적인 효과 분석에 대한 연구가 진행 된다면 댐관리자에게 더욱 실질적인 도움이 될 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 18IFIP-B088091-05)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. PAI, "The security demographic and civil conflict after the cold war," pp. 56~61(2003).
2. The nations world water development report, "Water for people water for life, pp. 67~74(2003).
3. Korea Government, "1st Framework plan for climate change," p. 9(2016).
4. Korea Meteorological Administration, "Report on the climate change on the Korea peninsula," pp. 64~67(2012).
5. Korea Meteorological Administration, "Report on the climate change on the Korea peninsula," pp. 69~87(2012).
6. K-water, "Water and the future," p. 40(2017).
7. Park, S. H. and Han, S. J. and Wee, J. H., "Analysis of Energy Savings and CO₂ Emission Reductions via Application of Smart Grid System," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(6), 356~357(2017).
8. K-water, "Standard guidelines for preliminary feasibility study of water resources sector (3rd edition)," pp. 63~65(2003).
9. K-water, "Application operation manual of dam water supply business," pp. 1~20(2017).
10. K-water, "Operation manual for dam," pp. I-5~I-10, I-66~I-136, I-146~I-227(2016).
11. Chae, K. J. and Kim, D. S. and Cheon, K. H. and Kim, W. K. and Kim, J. Y. and Lee, C. H. and Park, W. S., "Micro-Hydropower System with a Semi-Kaplan Turbine for Sewage Treatment Plant Application : Kiheung Respia Case Study," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(5), 365~368(2013).
12. K-water, "Basic plan for Chung-ju multi-purpose dam flood control," pp. 6-11~6-43(2013).