농업용 저수지에서의 환경용수 방류 능력 평가

Potential Release of Environmental Flow through Irrigation Reservoir

김상민* · 김성재** · 김용완** · 박태양** · 김성민** · 박기욱*** · 장민원*†

Kim, Sang Min · Kim, Sung Jae · Kim, Yong Wan · Park, Tae Yang · Kim, Sung Min · Park, Ki Wook · Jang, Min Won

ABSTRACT

The purpose of this study was to establish the methodology for providing the environmental flows from irrigation reservoir. Reservoir water budget for study area was analyzed to simulate the water supply scenarios for environmental flows. Bonghyun and Hi reservoirs area, located in Gyeongnam, Gosung-gun, Hi-myeon, were selected for study watersheds and streams for this study. Reservoir operation was simulated to determine the environmental flows supply amount from March to October with the constraint that environmental flow supply was restrained when the storage of reservoir were below the half or one-third of effective storage. The simulated results indicated that the supply of environmental flows with the amount of 200 ton/day and 600 ton/day resulted in up to 15 mm and 29 mm of runoff depth increase in the downstream, respectively. The effect of environmental flows supply from existing irrigation reservoir was not significant because the irrigation reservoir was not designed to supply the environmental flows. It is necessary to remodel the irrigation reservoir and develop the reservoir operation technique, to meet the need for the environmental flows.

Keywords: Environmental flow; irrigation reservoir; water balance

1. 서 론

환경용수는 농촌지역의 생활용수, 공업용수, 농업용수, 수산용수 등과 함께 농촌용수의 범주에 포함되며, 농촌지역의 하천생태계 보전을 위한 최소한의 하천기능유지는 물론 환경개선 의미를 포함하고 있어 환경과 하천 유지용수를 동시에 만족시키는 용수를 뜻한다. 또한 환경용수는 생태계와 생태계의 편익을 유지하기 위하여 하나의 강, 습지, 또는 연안 내에서 제공되는 물 체제로서 과거에는 하천에 최소한 유지해야 할 유량인 기저유량(base flow)으로 인식되었으나 최근에는 자연유량의 변이성에 대한 인식과 동태적 의미로 총체적인 유향을 의미한다(Arthington et al., 2006). 기존의 환경용수는 도시지역 내에서 자연적 유역단위의 접근 보다는 도시를 관통하는 하천의 휴식공간으로의 활용을 목표로 두고 있다. 현행법에서 환경용수의

개념은 하천유지용수와 구분이 모호하고 국토 환경의 핵심인 농촌지역에서의 환경용수 문제는 그 필요성과 기술적 연구에 대한 관심과 투자가 상대적으로 크지 않았다.

KARICO (1998)는 환경용수를 유역의 평균갈수량과 집단마을 하수처리를 위한 희석수 중 큰 값으로 한다고 정하였다. 신규저수지를 설계하거나 기존저수지를 승상할 경우에 현지여건을 감안하여 저수지 유효 용수량 산정에 반영하여야 할 수량으로 저수지 지점의 기준갈수량 또는 관개구역내 중심마을 하수처리 희석수량 등 농촌환경보전에 필요한 수량 중 큰 값을 사용한다(DRCMA, 1999, KICT, 1995). 즉 농촌지역의 하천생태계보전을 위한 최소한의 하천기능유지와 환경개선을 포함하여 환경과 하천유지용수를 동시에 만족시키는 최소한의 하천유량을 의미한다. 농촌용수개발사업에서 환경용수는 농어촌정비법 시행령 제2조에 농어촌 지역의 환경오염 방지를 위한 용수로 정의되어 있어 현재 농업용 댐 계획시에는 하류하천의 건천화 방지와 주변 환경유지 및 보전을 위한 최소한의 용수(하천의 갈수량 기준)를 확보하여 공급하는 하천유지용수로 계획하게 된다(KRCC, 2005). 대부분이 농촌지역에 위치한 소하천의 경우 환경용수는 갈수기 하천의 건천화를 방지하여 하천생태계를 유지하고, 경관을 개선하여 시민의 정서를 함양하기 위한 친수공간 확보차원에서 하천유지용수로 취급할 수 있다(Ko et al., 2008b). 일

* 경상대학교 지역환경기반공학과(농업생명과학연구원)

** 경상대학교 대학원 농공학과

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원

† Corresponding author Tel.: +82-55-772-1933

Fax: +82-55-772-1939

E-mail: mwjang@gnu.ac.kr

2011년 9월 6일 투고

2011년 10월 31일 심사완료

2011년 11월 7일 게재확정

본의 경우, 관개용수로 그 지역의 관개용수와 음용수, 잡용수 공급은 물론, 소방용수, 생활 잡배수 처리, 지하수함양과 더불어, 물놀이, 만남의 장소, 자연 동·식물의 서식처 등 가능한 한 다목적으로 이용하여 자연정화 기능과 친수공간을 제공할 수 있도록 활용하고 있다. 환경용수는 농촌지역내 하천 및 용·배수로의 생태계보전, 경관유지, 수질보전, 지하수위 유지 등 하천과 시설물의 정상적인 기능을 수행하는데 필요한 최소한의 유지유량과 농업용수 관개구역내 중심 마을에서 방류한 하수를 희석 처리 하기 위한 희석수수량 등 농촌환경보전을 위하여 확보하여야 할 수량이다. 호주는 환경용수지침 (ACT Government, 1999)에서 환경용수를 하천과 강에서 수생 생태계를 유지하기 위해 필요한 수량으로 정의하는데 Bendora 댐과 Cotter 댐 사이의 Cotter river유역의 사례를 살펴보면 생태학적 목표를 멸종위기에 처한 어종 Macquarie Perch를 보호하는 것으로, 표준 모니터링 과정에서 40마리 이상의 물고기가 잡히는 것을 이 목표 달성의 성공 여부를 가늠하는 지표로 삼고 있다 (Kim et al., 2007). 미국의 경우 하천내에서 물의 가치와 이용을 허용수준 이상으로 유지하기 위해 필요한 유량으로 정의하는데 하천내 물의 가치 (instream value)와 이용이란 어류 및 야생동물, 위락, 시미, 수질, 수력발전, 수운, 그리고 하구/하천변 식생과 홍수터 습지 등에서의 생태계 유지 등을 의미한다. 영국 수자원법 (Water Resource Act)에는 우리나라 하천유지유량의 개념과 유사한 최소허용유량 (Minimum Acceptable Flows, MAF)이라는 개념이 있어 하천환경 차원에서 고려한 항목은 어류, 낚시, 수생 생태, 육상 생태, 에메니티 (amenity), 그리고 여가활동이고, 이 항목에 대해 설문자의 점수를 부여하고 더한 값 (Environmental Weighting, EW)을 계산하여 최소허용 하천유량에 반영하였다. 국내에서도 하천에 대한 생태학적 고려를 시도하는 노력이 시작되었는데 Ko et al. (2008a)는 금강유역에 대해 물리 및 생물화학적 모델링 기법을 적용하여 유역물수지분석과 하천생태 환경분석 모형을 연계한 하천관리기법을 마련하였다.

우리나라의 경우 원래 환경용수를 확보해야 할 가장 중요한 고려인자의 하나인 수생물의 서식처 제공이나 하천생태계의 유지에 필요한 유량에 대한 적정성, 확보된 유량에 대한 모니터링을 통한 평가가 이루어지지 않거나 축적된 자료가 많지 않은 실정이다. 수자원관리 차원에서 주요 하천과 시설의 유량이 관측되고는 있지만 그 역사가 길지 않고 농촌지역에 많은 소하천의 경우는 사실상 거의 계측이 이뤄지지 않고 있다. 미계측 지역인 경우에는 물리적 모델에 의존할 수도 있으나 유역의 크기가 작은 만큼 검증이 어려워 그 결과에 대한 신뢰도가 낮다. 더욱이 생태계 환경에 대한 이해와 하천 흐름이 생태계에 미치는 영향을 분석함으로써 환경용수의 산정과 관리가 가능함에도 불구하고 농촌용수 관리에서 생태학적 관리 기술이 반영되거나 관

련 전문인력 양성은 매우 저조한 형편이기 때문에 형식적인 환경용수 산정에서 벗어나지 못하는 한계를 갖고 있다. 그리고 국내 물관리 사업의 특성상 단기간에 이뤄지는 연구와 사업이 대부분인지라 해외 선진국의 사례와 같이 장기간에 걸친 조직적인 모니터링과 분석 및 대안 도출을 기대할 수 없는 실정도 환경용수 결정의 걸림돌이라 할 수 있다 (KRCC, 2010). 한편 우리나라는 농경지의 감소 등으로 농업용수의 공급기능을 상실한 농업용 저수지가 2000년 이후만을 보더라도 매년 적게는 28개소, 많게는 83개의 저수지가 용도 폐기되고 있는 실정이다. 농업용으로 건설된 보의 경우도 매년 많게는 298개 정도가 용도 폐기되고 있다. 농업용 저수지에 대한 적극적인 활용방안을 마련하지 않을 경우에는 용도 폐기되는 저수지의 수는 계속 증가할 전망이므로 농촌지역에 산재한 농업용 저수지의 적극적 활용을 위해서는 관개용수에 국한시킬 것이 아니라 농촌지역의 생활 환경개선 차원에서 농촌 환경용수의 확보 및 공급이라는 측면도 고려할만 하다 (Kim et al., 2007).

농촌지역에서 환경용수는 주로 저수지나 보에서 확보된 물을 공급하는 것인데 설계상 환경용수에 대한 고려가 없이 준공된 수원이므로 하류에 필요한 환경용수를 공급할 때는 시설의 보강이나 미묘한 물관리 기술 개발이 선행되어야 한다. 그리고 대부분의 농업용 수리시설이 규모가 크지 않기 때문에 시기적으로나 양적으로 유효한 관리가 어려운 문제도 안고 있다. 이에 본 연구는 농어촌 유역의 환경용수 적용 방안을 제시하기 위하여 대상유역을 선정하여 물수지 모니터링 체계를 구축하고 저수지 물수지 모델링을 위한 모형을 제안하고자 하였다. 대상지구에 대한 장기간의 저수지 물수지 분석을 통해 환경용수 방류에 따른 하루 농촌 소하천의 수리학적 영향을 고려하여 농업용 저수지가 갖는 환경용수 방류 능력을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 모형의 구성

기왕 농업용 저수지의 환경용수 방류 능력은 관개용수 공급 이외의 추가 공급 능력을 평가함으로써 농업용 저수지 본래의 기능에 실패하지 않을 최대 방류규모를 결정한다. 본 연구에서는 농업용 저수지의 원래 저수능력의 변경 없이 저수지 상류 유출이나 하류 관개지역의 여건 변화가 있을 때 발생할 수 있는 여유 저수량을 환경용수로 이용하는 것을 목표로 하였다. 환경용수 수요에 맞추는 새로운 기능을 부여하는 것이 아니라 농업용수 공급의 여유분을 활용하는 수동적 입장에서 접근하였다. 농업용 저수지의 개발 역사만큼 설계 당시의 여건과 현재의 여건은 차이가 클 수밖에 없고 특히 전작, 시설재배, 휴경 등에 의

Fig. 1 Modeling of reservoir release for environmental flow

한 관개지역의 감소에 의해 평상시 저수지 저수량에 여유가 발생할 수 있다. 이 크기를 추정하여 농업용수 공급이라는 본래 기능을 저해하지 않는 수준에서 가능한 방류량을 찾을 수 있도록 모형을 구성하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 모형은 크게 저수지 물수지 모의 모형과 환경용수 방류 모의 모형의 두 단계로 구분된다. 그리고 저수지 물수지 모의 모형은 다시 저수지 일유출 모형과 논 일물수지 모형으로 구성하였고, 환경용수 방류 모의 모형에선 방류 시나리오에 따라 저수지 저수량의 변화를 모의할 수 있도록 하였다.

가. 저수지 물수지 모의 모형

관개용수 공급 이외에 추가 공급을 통하여 하루 하천에서의 환경용수 수요를 맞추기를 위한 기왕 농업용 저수지의 방류 능력을 평가하기 위하여 우선 본래의 농업용수 공급 기능을 고려한 저수지 물수지 모형을 구성하고 방류량을 조절함으로써 저수지 이수 안전도를 평가할 수 있도록 모형을 구성하였다. 저수지 물수지 분석에 의한 일저수량 추정은 기존의 설계와 연구에서 사용된 개념을 따르는데 Fig. 1에서 보는 바와 같이 저수지 유역의 일유출량은 수정 3단 TANK모형을 이용하고 저수지 하류의 관개지역에서의 일 필요수량은 Penman-Monteith 공식과 Yoo

et al. (2008)이 제안한 논벼의 순별 작물계수를 적용하였다 (Choi et al., 2003; Jang et al. 2004; Lee & Noh, 2010; Noh, 2004).

1) 논물수지분석 모형

논물수지분석은 포장내로 공급되는 용수와 증발산, 침투, 배수량의 대수적 관계로부터 일별 필요수량 및 담수심을 모의한다. 계측하기 어렵고 정의하기 힘든 지표유입량, 지하형유입/출량 등을 제외하면 논의 일물수지는 식 (1)과 같이 정리된다.

$$IR(t) + PP(t) = ET_a(t) + DP(t) + SFO(t) + \Delta D(t) \quad (1)$$

여기서, $IR(t)$ 는 t 일의 관개량 (mm/day), $PP(t)$ 는 t 일의 강우량 (mm/day), $ET_a(t)$ 는 t 일의 작물증발산량 (mm), $PD(t)$ 는 t 일의 강하침투량 (mm), $SFO(t)$ 는 지표유출량 (mm/day), $\Delta D(t)$ 는 t 일의 담수심과 $(t-1)$ 일의 담수심의 차이이다.

t 일의 담수심 $D(t)$ 는 식 (2)로 계산되며 $\Delta D(t)$ 는 식 (3)과 같다.

$$D(t) = D(t-1) - ET_a(t) - DP(t) - SFO(t) + IR(t) + PP(t) \quad (2)$$

$$\Delta D(t) = D(t) - D(t-1) \quad (3)$$

이때 $IR(t) = 0$ 으로 산정하여 담수심을 계산하고, 후에 지역용수공급능력에 따라 결정된 관개량을 사용한다. 일별 물수지식 으로부터 논의 필요수량 ($REQ(t)$)은 식 (2)의 $D(t)$ 가 0보다 작은 값을 갖게 될 때 발생하며 유효수량 ($ER(t)$)을 고려하여 식 (4)와 같이 계산한다.

$$REQ(t) = ET_a(t) + DP(t) + SFO(t) - PP(t) - D(t-1) \\ = ET_a(t) + DP(t) - ER(t) - D(t-1) \quad (4)$$

$$ER(t) = PP(t) - SFO(t-1)$$

논에서의 일증발산량 ($ET_a(t)$)은 FAO Penman-Monteith 방법을 이용하여 계산하고 이때 사용된 순별 작물계수는 Yoo et al. (2008)이 발표한 것을 사용하였다. 강하침투량 ($DP(t)$)은 토양의 성질, 토양수분조건 등에 따라 달라지지만 평균적으로 약 4.0~6.0 mm/day값을 사용하는 것이 일반적이다. 지표 유출량은 물고높이 (H)에 따라 결정되는데, 본 연구에서는 농업개발연구소와 농촌진흥청 등에서 제시한 생육기별 적정담수심을 사용하지 않고 물고높이를 60 mm로 고정하였다. 다만 6월 하순의 중간낙수 기간에는 담수심을 0으로 설정하였다. 유

효율량 ($ER(t)$)은 강우량에서 포장에 직접 저류되는 양으로서, 식 (5)에서와 같이 포장의 물고높이 (H)와 강우 전 담수심 조건에 따라 결정한다.

$$RD(t) = H - D(t-1) + ET_a(t) + DP(t) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{if } RD(t) \leq PP(t), \quad & ER(t) = RD(t) \\ \text{else} \quad & ER(t) = PP(t) \end{aligned}$$

전체 벼 재배 기간 중 못자리기간과 이앙기는 농업용수 이용에 있어 가장 중요하게 고려해야 할 기간이다. 지역에 따라 차이가 있을 수 있으나 기본적으로 못자리용수는 4월 하순부터 5월 상순까지, 이앙은 5월 하순부터 6월 상순까지 각 20여 일 동안 등면적관개를 하는 것으로 설정한다. 못자리와 이앙기간의 필요수량을 고려하기 위하여 4월 하순부터 9월 상순까지를 관개기간으로 설정하였다.

2) 일 저수지물수지 모형

저수지 물수지는 식 (6)과 같이 연속방정식으로 나타낼 수 있다.

$$RS(t) = RS(t-1) + RI(t) + RP(t) + RU(t) - [RL(t) + RO(t) + RE(t) + RG(t)] \quad (6)$$

여기서, $RS(t)$ 는 t 일의 저수량, $RS(t-1)$ 는 $(t-1)$ 일의 저수량, $RI(t)$ 는 t 일의 저수지 유입량, $RP(t)$ 는 t 일의 저수지 수면강수량, $RU(t)$ 는 t 일의 지하수 유입량, $RL(t)$ 는 t 일의 방류량, $RO(t)$ 는 t 일의 물넘이 월류량, $RE(t)$ 는 t 일의 저수지수면증발량, $RG(t)$ 는 t 일의 지중침투량을 나타낸다.

정량화하기 곤란한 지하수 유입량 ($RU(t)$)과 지중침투량 ($RG(t)$) 등은 고려하지 않는 것으로 하고, 현재저수량과 사수량의 차로 가용저수량을 정의하여 식 (6)을 정리하면 식 (7)과 같다.

$$AS(t) = AS(t-1) + RI(t-1) + RI(t) + RP(t) - [RL(t) + RO(t) + RE(t)] \quad (7)$$

여기서, $AS(t)$ 는 t 일의 가용저수량 (m^3), $AS(t-1)$ 는 $(t-1)$ 일의 가용저수량 (m^3)을 의미한다.

가용저수량 (Available Storage, $AS(t)$)은 현재 저수량 ($RS(t)$)과 사수량 (RS_d)과의 차이이며 최대가용저수량 (AS_{max})은 저수지의 유효저수량과 같고, 최저가용저수량 (AS_{min})은 사수량 (RS_d)으로 정의한다. 만약 저수량이 사수량보다 작게 되면 가용저수량 ($AS(t)$)은 (-)의 값을 갖게 되어 부족수량이 발생하는 것으로 정의한다.

저수지 방류모의 단계에선 저수지 물수지 모형을 바탕으로 저수지 환경용수 방류량과 시기에 대한 시나리오를 만들고 각 시나리오에 따른 저수지 저수량의 변화와 관개지구의 물수지를 해석한다. 이것은 하류 하천에서의 수리학적 흐름 해석과 수질 예측에 연계되고, 농업용 저수지의 본래 기능인 농업용수 공급의 실패 위험, 생태계와 수질 수준 등 환경용수 수요의 충족 여부 등의 검토를 통하여 최종적으로 해당 저수지와 하천의 적정 환경용수 방류 방안을 결정한다. 환경용수 방류에 의한 생태계 영향의 고려는 원칙적으로 장기간의 현장 생태계 모니터링과 모델, 생태계 전문가의 판단이 필요하지만 현실적으로 인력이나 기술이 부족하기 때문에 현재 수준에서는 유량과 수질만으로 판단할 수 있는 지표를 작성하는 것으로 대체할 수 있다.

나. 저수지 방류 모의

저수지의 환경용수 방류 능력은 농업용 저수지 설계의 본래 목적을 달성할 수 있는가를 판단함으로서 결정한다. 농업용 저수지로부터 농어촌 환경용수를 공급하기 위해서는 기존에 운영되는 농업용 저수지의 물수지 분석을 통해 관개기간과 비관개기간에 대한 공급 가능 농어촌 환경용수량을 분석할 필요가 있다. 대상 저수지에 대한 장기간의 물수지 분석을 통해 농업용 저수지의 저수율을 분석하고, 풍수년, 평수년, 갈수년 등에 대한 저수율을 산정하여 각각에 해당하는 시기별 공급 가능 농어촌 환경용수량을 추정할 수 있다. 농업용 저수지를 이용하여 농어촌 환경용수를 공급하는 것은 본래의 농업용수 공급 기능의 저하나 실패를 벗어나지 않는 범위에서만 허용될 수 있다. 농업용 저수지의 설계에 반영되지 않은 새로운 수요는 설계시의 유역, 관개지구, 기상 등의 여건이 바뀌어 수문과 농업수리학적 영향이 농업용수 공급을 저해하지 않을 경우에만 고려되어야 한다. 최근 관개면적의 축소와 이상기상의 영향으로 일부 농업용 저수지가 용도폐기되거나 다른 목적으로 전용되는 경우가 있고 농업용수 수요에 비하여 저수지 용량이 과하다는 평가를 받는 경우가 있어 소수력발전이나 환경용수와 같이 물공급의 다각화로 수자원 이용의 효율화를 꾀하려고 한다. 여유가 있는 수리시설과 수자원을 여가, 환경, 생태 등의 유지와 개선에 이용하려는 의도는 바람직한 방향인데 이를 위해서는 우선 지금의 농업 수리시설이 농업용수 공급의 안정성을 확보하고 다른 용도로 전용될 수 있는 여력이 어느 정도인지를 알아야 한다. 그리고 다른 용도로 물공급을 할 경우에 수리시설의 운영 방법은 어떻게 할 것인지, 농업용수 공급 실패의 위험성이 허용할 수준인지, 새로운 물공급에 따른 영향 평가는 어떻게 할 것인지 등이 준비되어야 한다.

환경용수 수요에 맞춰 수리시설에서 취수한 물량을 공급하는 것이 이상적이지만 기존 농업용 저수지의 대부분이 환경용수를

고려한 설계가 아니므로 그 수요를 온전히 맞추어 수요자 중심으로 방류량을 결정하는 것보다는 공급자 중심에서 방류할 수 있는 여유만큼만 취수하는 방향으로 환경용수 방류 기준이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 먼저 매일 일정량 (m^3/day)을 방류하고, 유효저수량의 1/3 혹은 1/2 수준에서 방류를 제한하며, 동절기 (11월~익년 2월)에는 방류를 하지 않고, 기존의 최대 가뭄대응능력을 만족하는 수준에서 환경용수 방류량 결정하는 방안을 평가하였다.

2. 시험지역 선정

환경용수 적용을 위해 경상남도 고성군 하이면 와룡리에 위치해 있는 하이저수지를 시험유역으로 선정하였다. 시험유역의 선정을 위해 경상남도 남부지역에 있는 농업용 저수지를 대상

Fig. 2 Location of a pilot site

으로 후보지를 선정하고, 저수지의 용량, 저수지 관련 자료 구축 현황, 저수지 물공급체계, 인접 소하천의 실태, 접근성 등을 고려하여 시험유역을 선정하였다 (Fig. 2).

하이저수지는 경남 고성군 하이면 와룡리에 위치해 있으며 1977년 완공된 농업용 저수지로 사통으로 취수를 하고 있다. 하이저수지의 총저수량은 2,593.9천 m^3 이며 유역면적 1,342 ha, 만수면적 24.2 ha, 수혜면적은 166.7 ha이다. 하이저수지의 기상자료는 진주관측소의 1970년부터 2010년까지의 일자료를 수집하였고, 강수량, 상대습도, 기온, 풍속, 일조시간 등을 작물증발산량, 유역유출량, 그리고 필요수량 산정과 저수지 홍수추적 등에 활용하였다. 진주 기상관측소의 연평균 강수량은 우리나라 연평균 보다 높은 1,503 mm이고, 최고치는 1989년에 2,193 mm, 최저치는 1994년 784.9 mm의 기록이 남아 있다 (Fig. 3).

3. 하천단면 조사

하천 건천화 실태를 파악하고 환경용수 관리를 위한 기준 구간과 시기 등의 결정을 위해서 시험지역의 하천을 균일한 간격으

Fig. 3 Annual precipitation during irrigation period (May to Oct.) and non-irrigation period (Nov. to Apr.) at the study area

(a) Jun.

(b) Oct.

Fig. 4 Change in vegetation cover inside the Sukji stream

로 나누어 단면측량과 피복변화 관측을 실시하였다. 하이저수지에서 시작되는 석지천은 1,200 m까지는 300 m 그 후론 500 m 간격으로 2,600 m 지점까지 조사하였다. 이양전인 5월부터 추수 후 10월까지 관측기간 중에 하천관리가 수행되지 않은 상태에서 일부 구간은 하천 흐름이 보이지 않을 정도로 수풀이 우거졌으며, 식생이 없이 자갈로 피복된 구간에서도 흐름이 단절된 듯 유량을 확인할 수 없는 경우도 있었다. 흐름이 수풀이 가려진 것 이외에도 하천 바닥 지하로 침투되어 손실되거나 과밀한 식생에 의해 소비되는 물이 상당함을 추정할 수 있었다 (Fig. 4). 석지천과 합류하는 주변 봉현천은 하이저수지의 관개지구를 관통하여 흐르는데 식생은 수로폭이 좁고 유량이 적은 상류가 하류보다 더 발달되었고 하류에는 바닥이 그대로 드러난 상태를 나타내었다. 석지천의 경우 건기에 자갈로 채워진 구간이 우기에는 식생이 활발하여 상대적으로 봉현천보다 식생의 영향이 크게 나타나는 것으로 조사되었다.

III. 결과 및 고찰

1. 저수지 방류 모의

하이저수지의 저수량 변화를 환경용수 방류량 규모와 방류제한 수준에 따라 일별 모의하였다. 현행 물관리 방법과 같은 환경용수 무방류 조건과 매 200 m³/day씩 환경용수 방류를 증가시키는 조건으로 저수량 일변화를 비교하면, 방류제한을 유효저수량의 1/3과 1/2 수준일 때 각각 Fig. 5와 Fig. 6과 같다. 방류제한 조건에 상관없이 방류량 수준이 클수록 저수량이 빨리 감소하고 다시 회복하는 속도는 느리며 전반적으로 저수량이 낮게 유지되는 양상을 보였다. 또 이수안전을 고려하여 방류제한

Fig. 5 Daily simulated reservoir storage by environmental flow releases (release restricted at less than one third of effective storage)

Fig. 6 Daily simulated reservoir storage by environmental flow releases (release restricted at less than half effective storage)

을 1/2 수준으로 하는 시나리오보다 1/3 수준으로 여유를 크게 한 시나리오에서 저수량 고갈 위험이 더 높고 방류량 규모별 저수량의 편차가 크게 나타났다. 1994~1995년의 경우처럼 극심한 가뭄의 지속으로 저수량이 평년 수준으로 회복되지 못하고 저수위에 장기간 머문 시기에서는 환경용수 방류량 규모나 방류제한 수준에 상관없이 저수량 변화가 동일하였다.

2. 환경용수 방류량 결정

저수지 저수량 모의 결과로부터 시나리오별로 저수량의 연최소치 계열을 정리하면 방류제한 1/3 수준과 1/2 수준에서 각각 Table 1과 Table 2와 같다. 두 개 방류제한 시나리오 모두 현행 저수지 운영 기준에 따라 환경용수를 방류를 하지 않는 경우는 가뭄기록이 있는 1994~1995년에 저수지가 고갈되는 모의 결과를 보여주었다. 최근에 발생한 2008~2009년 가뭄에서는 저수지가 고갈될 정도의 저수량 저하가 발생하지 않았고 매일 1,000 m³의 물을 취수하여 하천에 방류하더라도 저수량이 사수량 이하로 내려가지 않는 것으로 모의되었다.

환경용수 방류량은 앞서의 전제조건에 따라 저수지의 기존 농업용수 공급 기능을 저해하지 않는 한도까지만 허용하여 결정된다. 환경용수 방류가 없는 기존 저수지 운영의 결과는 Table 1과 Table 2에서 방류량 0 m³/day 일 경우이며 저수량이 사수량 이하로 내려가는 용수공급 실패는 1994년부터 1997년까지만 일어나는 것으로 모의되었다. 따라서 환경용수가 방류되더라도 1994년부터 1997년 이외에는 용수공급 실패가 일어나지 않는 최대 방류량 조건을 찾았다. 저수지가 농업용수 취수 기능을 계속할 수 있는 최대 방류량에서의 연도별 최소 저수량을 Table 1과 Table 2에 각각 굵은 글씨로 구분하였다.

환경용수 방류제한 1/3 조건에서 하루 200 m³을 방류하는 경우는 방류하지 않을 경우와 같이 1994~1997년만 용수공급 실패가 추정된 반면 하루 400 m³을 방류하면 1993년에도 사수량 밑으로 떨어지는 결과를 보였고, 결국 가장 안전한 조건은 1994~1997년의 경우만 제외하고 다른 가뭄해에는 견딜 수 있는 수준인 하루 200 m³의 환경용수 방류가 가능한 것으로 결론지어진다. 만약에 방류제한을 유효저수량의 1/2 수준에서 저수지

를 운영한다면 Table 2에서 보듯이 하루 환경용수 공급량을 600 m³ 규모로 정할 수 있었고 그 이상 방류할 경우에는 점차적으로 1993년, 1988~1989년, 1992년, 2008~2009년 그리고 2002년 가뭄해에는 용수공급 실패가 일어날 수 있는 것으로 분석되었다. 시험대상인 하이저수지의 경우 환경용수 방류제한의 수준에 따라 유효저수량의 50 %를 방류제한으로 정할 경우가 1/3 방류제한에서의 200 m³/day보다 3배 많은 하루 600

Table 1 Time-series of annual minimum reservoir storage ($\times 10^4$ m³) by the release scenarios of environmental flow (release restricted at less than one third of effective storage)

Year	Release of environmental flow (m ³ /day)								
	0	200	400	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600
1980	213	212	211	210	209	208	207	206	205
1981	194	193	191	189	186	182	178	173	168
1982	150	143	134	126	116	106	95	85	76
1983	107	95	81	69	57	46	34	23	17
1984	95	79	62	46	33	26	21	12	6
1985	126	104	83	67	56	50	45	40	33
1986	169	140	112	88	72	61	52	43	35
1987	144	111	79	54	40	34	27	18	10
1988	86	46	10	0	0	0	0	0	0
1989	84	44	9	0	0	0	0	0	0
1990	155	107	67	54	49	44	39	34	30
1991	161	110	70	58	52	47	45	40	36
1992	98	63	19	3	0	0	0	0	0
1993	71	36	0	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	28	28	28	28	28	28	28	28	28
1999	107	103	99	95	91	87	84	80	76
2000	144	134	124	114	104	94	85	76	70
2001	145	128	111	94	77	62	47	34	26
2002	114	93	72	53	35	24	13	2	0
2003	210	187	163	143	123	109	97	88	88
2004	181	179	177	175	174	169	148	130	121
2005	160	151	142	133	124	111	85	65	53
2006	159	148	136	125	113	99	75	62	50
2007	136	118	100	82	66	49	22	10	7
2008	120	97	73	50	29	8	0	0	0
2009	92	66	43	22	1	0	0	0	0
2010	130	99	73	50	32	30	29	28	27

Table 2 Time-series of annual minimum reservoir storage ($\times 10^4$ m³) by the release scenarios of environmental flow (release restricted at less than half effective storage)

Year	Release of environmental flow (m ³ /day)								
	0	200	400	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600
1980	213	212	210	210	209	208	207	206	205
1981	194	193	189	189	186	182	178	173	168
1982	150	143	126	126	118	110	104	96	89
1983	107	96	75	75	67	58	54	47	41
1984	95	81	64	64	56	47	43	36	29
1985	126	109	91	91	84	76	72	66	60
1986	169	145	115	115	104	91	84	76	70
1987	144	117	85	85	77	66	59	51	45
1988	86	53	18	18	13	7	0	0	0
1989	84	52	17	17	12	6	0	0	0
1990	155	116	77	77	70	63	55	53	52
1991	161	120	83	83	76	69	62	60	58
1992	98	74	30	30	19	9	3	1	0
1993	71	47	3	3	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	28	28	28	28	28	28	28	28	28
1999	107	106	103	103	102	100	99	98	96
2000	144	137	125	125	118	113	108	102	97
2001	145	131	106	106	94	83	75	68	61
2002	114	97	71	71	60	51	43	37	30
2003	210	191	160	160	148	138	132	131	126
2004	181	179	175	175	174	172	170	168	159
2005	160	151	133	133	127	120	112	105	92
2006	159	148	125	125	121	115	109	101	90
2007	136	118	86	86	77	67	58	54	50
2008	120	98	57	57	44	30	20	14	9
2009	92	70	29	29	16	2	0	0	0
2010	130	105	65	65	54	40	38	38	38

Table 3 Annual reservoir release according to environmental flows

Release of environmental flow (m ³ /day)		0	200*	600*
Rainfall (mm/year)		1586.4		
Irrigation requirement (10 ³ m ³ /year)	Max.	2023.6	2023.6	2023.6
	Min.	1339.3	1339.3	1339.3
	Avg.	1665.9	1665.9	1665.9
Release for agricultural use (10 ³ m ³ /year)	Max.	2403.7	2403.7	2403.7
	Min.	1569.5	1569.5	1569.5
	Avg.	1988.4	1988.4	1988.4
Release for environmental flow (10 ³ m ³ /year)	Max.	0.0	55.0	165.0
	Min.	0.0	17.2	0.0
	Avg.	0.0	49.8	93.4

* environmental flow release restricted at less than 1/3 of effective storage

** environmental flow release restricted at less than 1/2 of effective storage

m³의 환경용수 방류 능력이 있음이 추정되었다.

기존 저수지 운영기준에 따라 모의된 결과에서 저수지 고갈이 나타난 1994년부터 1997년까지를 제외하고 환경용수 방류 수준에 따른 연간 필요수량과 농업용수 방류량, 환경용수 방류량을 정리하면 Table 3과 같다. 저수지의 농업용수 방류는 환경용수 방류를 고려하지 않았을 때와 동일하게 연평균 1,988.4 천m³로 환경용수 방류로 기존 농업용수 이용에 문제가 없는 것으로 모의되었다. 유효저수량의 50 % 방류 제한 기준에서 600 m³/day 방류시 연평균 93.4 m³을 이용할 수 있는 것으로 추정되었다.

한편 농업용 저수지의 기능적 측면에서 환경용수 방류가능량이 제시되면 그 양이 하루 하천에 미치는 영향을 고려하여 최종적으로 환경용수 규모를 결정한다. 만약 방류 규모가 너무 작거나 시기적으로 적절하지 않은 경우에는 하천 생태계에 미치는 영향이 미미하기 때문에 사실상 무효방류가 된다. Fig. 7에서와 같이 석지천의 경우에 방류량에 따라 각 구간별 수심을 살펴보면 하루 3,000 m³ 정도는 방류가 되어야 하천 전 구간에서의 흐름 수심이 50 mm 이상 될 것으로 계산된다. 앞에서 구해진 하이저수지의 환경용수 방류 능력 600 m³/day를 적용한 경우엔 전체 구간의 평균수심이 약 20 mm 정도에 그치는데 이것은 흐름 중간의 침투, 누수손실과 증발산손실 등으로 사실상 무효방류가 될 가능성이 큰 것으로 추정된다. 결국 현재 기준에서 대상저수지의 환경용수 공급 기능은 거의 무시할 수 있을 정도로 낮은 것을 알 수 있고, 이것은 대상저수지가 설계 단계에서 환경용수 공급을 고려하지 않은 농업용 저수지라는 점에서 예상된 결과로 판단된다. 한편 구간별 수심은 조사된 하천단면과 방류량을 Manning 평균유속공식에 적용하여 구하였다 (Table 4). 이때 하천은 잡초가 우거진 흙수로 자연하천으로 가정하여 Manning의 조도계수를 0.08로 하였다.

Table 4 Cross-section width along Suckji stream

Distance from a reservoir outlet (m)	300	600	900	1,200	1,700	2,200
Stream width (m)	13.8	8.5	11.9	20.2	17.2	18.6

Fig. 7 Water profile along the Sukji stream by environmental flow releases

IV. 요약 및 결론

본 연구는 농업용저수지를 이용한 환경용수 공급 방안을 제시하기 위하여 저수지 물수지와 환경용수 방류 시나리오 작성 기준을 만들고 경남 고성군의 하이저수지에 시험 적용하였다. 하이저수지 하류의 석지천에 적용한 결과, 3월부터 10월 사이에 매일 일정량을 유효저수량의 1/3과 1/2 수준 이하에선 방류제한 하는 방법으로 저수지 운영을 모의했을 때 각각 200 m³/day와 600 m³/day의 방류가능량이 결정되었다. 그리고 방류량 규모에 따라 하루 하천 구간별 흐름 단면을 분석한 결과 200 m³/day, 600 m³/day 규모에서 하천구간에 따라 각각 최대 15 mm, 29 mm의 수심이 추정되었고, 최대 50 mm 이상의 흐름을 이루기 위해서는 약 3,000 m³/day의 이상의 저수지 방류가 필요한 것으로 추정되었다. 시험적용의 결과가 보여주듯 농업용 저수지의 목적상 환경용수 방류 기능은 매우 미약하며 기능의 추가와 수요에 맞게 저수지의 리모델링이 요구되었다. 하루 하천에 유효한 환경용수 공급을 위해서는 적절한 수요 산정 기준에 따라 결정된 환경용수 방류 요구량에 맞춰 기 저수지의 증고 등 물리적인 저수용량 확대 조치가 필요함을 확인할 수 있었다.

최근 경제성장과 더불어 청정한 환경에서 안정된 생활을 영위하고자 하는 국민들의 욕구가 증가함에 따라 환경의 보전 및 복원에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 하천의 경우 시민들의 레저 활동 및 휴식을 위한 공간으로 활용되고 있어 청정한 환경 유지를 위한 노력이 계속되고 있다. 그러나 대부분의 농업용 저수지는 설계 단계에서부터 하천의 생태유량을 고려하지 않기 때문

에 늘어나는 환경용수 수요에도 불구하고 기여를 못하고 있다. 따라서 적절한 환경용수 수요를 알 수 있는 기준 마련과 저수지 운영 기술에 대한 진지한 고민과 투자가 절실하게 요구되고 있다.

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원 (발간등록번호: 11-1541000-000352-10) 및 교육과학기술부 한국연구재단의 기초연구사업 일반연구지원사업 (과제번호: 20100013499)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Arthington, A. H., S. E. Bunn, N. L. Poff, and R. J. Naiman, 2006. The Challenges of Providing Environmental Flow Rules to Sustain River Ecosystem. *Ecological Applications* 16: 1311-1318.
2. ACT Government, 1999. Environmental Flow Guidelines. Australia.
3. Choi, J. K., J. G. Son, J. W. Koo, and Y. J. Kim, 2003. Storage Estimation of Irrigation Reservoir by Water Balance Analysis. *Journal of Korean Society of Rural Planning* 9(4): 1-7 (in Korean).
4. DaeJeon Regional Construction and Management Administration (DRCMA), 1999. Survey of Water Intake and Determination of Instream Flow in Geum River. Ministry of Construction and Transportation (in Korean).
5. Jang, M. W., H. W. Chung, Choi, J. Y., K. W. Park, and S. J. Bae, 2004. Development of A Single Reservoir Agricultural Drought Evaluation Model for Paddy. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(3): 17-30 (in Korean).
6. Kim, C. W., C. H. Kim, W. B. Shim, and D. G. Han, 2007. Policy Issues on the Role of Central and Local Government for the Environmental Flows. Korea Research Institute for Human Settlements (in Korean).
7. Ko, I. H., S. Y. Park, and J. K. Kim, 2008a. Ecological and Hydrologic Evaluation of River. *Magazine of Korea Water Resources Association* 41(10): 24-29 (in Korean).
8. Ko, I. H., S. Y. Yoon, and J. H. Noh, 2008b. Instream Flow for the Improvement of Natural and Social Environment. *Magazine of Korea Water Resources Association* 41(4): 10-14 (in Korean).
9. Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (KARICO), 1998. Comprehensive Use Plan of Agriculture Rural Water. Ministry of Agriculture and Forestry (in Korean).
10. Korea Institute of Construction Technology (KICT), 1995. Development of a Method for Determining the Instream Flow and Its Application. IPD-95-2. Korea Water Resources Corporation (K-water). 247-264 (in Korean).
11. Korea Rural Community Corporation (KRCC), 2005. A Study on Supply and Maintenance of Instream Flow in Rural Streams. Rural Research Institute (in Korean).
12. Korea Rural Community Corporation (KRCC). 2010. The Study for Estimation of Environmental Flows in Rural Area. Rural Research Institute (in Korean).
13. Lee, J. N. and J. K. Noh, 2010. Evaluation of Supplying Instream Flow by Operation Rule Curve for Heightening Irrigation Reservoir. *Journal of Agricultural Science* 37(3): 481-490 (in Korean).
14. Noh, J. K., 2004. A System for Estimating Daily Paddy Irrigation Water Requirements in Simulating Daily Streamflow. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(7): 71-80 (in Korean).
15. Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2008. Estimation of Design Water Requirement using FAO Penman-Monteith and Optimal Probability Distribution Function in South Korea. *Agricultural Water Management* 95(2008): 845-853.