



Evaluation of flexible criteria for river flow management with consideration of spatio-temporal flow variation

Park, Jung Eun^a · Kim, Han Na^a · Ryoo, Kyong Sik^a · Lee, Eul Rae^{a*}

^aK-water Institute

Paper number: 16-047

Received: 18 May 2016; Revised: 28 June 2016 / 1 July 2016; Accepted: 1 July 2016

Abstract

An Idea to estimate flexible criteria for river water use permits was proposed that takes the spatio-temporal flow variation along the river into account, which was applied to the Keumho River, one of the tributary of the Nakdong River in Korea. This idea implies the temporal division of four periods with different criteria, combining flood/non-flood seasons and irrigation/non-irrigation periods, while a single one has been applied throughout the year in the current practice. Through flow regime analysis of daily natural flow simulations at Dongchon and Seongseo, the control points of the study area, Q355 and 1Q10 for non-flood and non-irrigation period, Q275 for non-flood and irrigation period, Q185 for flood and irrigation period were suggested respectively. So, those values that subtract instream flow were determined as the flexible criteria in each season. From the comparison of current practice and the proposed method, it was estimated that 10.6 million m³/year is available for more water use permits without additional development of water storage. Therefore, it is conceived that flexible criteria for river water use permission suggested in this study can contribute to improve the national policies for more efficient water resources management in the future.

Keywords: Flow Criteria for River Water Use Permits, Flexible Criteria, Available Water, Flow Regime Analysis, Water Right

시·공간적 유량 변화를 고려한 탄력적 하천관리 기준유량 산정 및 평가

박정은^a · 김한나^a · 류경식^a · 이을래^{a*}

^aK-water연구원

요 지

시·공간적 유량변화를 반영한 탄력적인 하천수 사용허가 기준유량 설정 방법을 개발하고 이를 금호강 유역에 적용하여 현재 관리방식과 비교·평가하였다. 홍수기/이수기, 관개기/비관개기를 고려하여 4개의 시기로 구분하고, SWAT모형의 10년간 일별 모의 자연유량을 활용하여 유역내 주요지점인 동춘과 성서 수위관측지점에서 각 기간별 안정적으로 흐르는 유량(기준갈수량, 저수량, 평수량, 평균갈수량)을 판단하였다. 금호강 19개 표준유역의 4개 시기별 안정적으로 흐르는 유량에서 하천유지유량을 제외한 값을 시기별 허가기준유량으로 설정하고 하천수 허가량과 회귀량을 고려하여 가용유량을 산정하였다. 현재 연중 일정하게 적용되는 하천수 사용허가 기준유량(기준갈수량에서 유지유량을 제외한 값)과 본 연구에서 제시한 탄력적 기준유량을 적용하였을 때를 비교한 결과, 추가적인 수자원 확보시설을 건설하지 않고도 10.6 백만m³/년의 가용수량을 확보할 수 있을 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구에서 개발된 시·공간적 유량변화를 고려한 탄력적 하천관리 기준유량 산정 방안은 효율적인 물이용을 위한 정책 개선에 활용할 수 있을 것이다.

핵심용어: 하천수 사용허가 기준유량, 탄력적 기준, 가용유량, 유황분석, 수리권

*Corresponding Author. Tel: +82-42-870-7433
E-mail: erlee@kwater.or.kr (E. R. Lee)

1. 서론

우리나라는 계절별 유량변동이 커서 물관리에 불리한 자연조건을 가지고 있으므로 이를 극복하여 안정적으로 용수를 공급하고자 댐 중심의 물관리 체계를 이루어 왔으며, 하천수 사용 관리 역시 공급의 안정성을 보장하고자 보수적인 관리체계를 이루어왔다. 이는 하천유량의 변동에도 최대 용수수요를 만족할 수 있게끔 관리하기 위한 것으로, 최대 사용량일 때의 물의 과부족을 계산하여 하천수 사용허가 여부를 결정한다. 이때 물의 과부족을 결정하는 기준이 되는 유량을 하천수 사용허가 기준유량이라 하며, 하천유지유량이 고시되지 않은 지점은 10년 빈도의 갈수량인 기준갈수량과 같고, 유지유량이 고시된 지점은 기준갈수량에서 유지유량을 감한 양이다. 우리나라에서는 타인의 권리나 공익을 침해하지 않고 물관리에 지장이 없는 범위 내에서 하천수를 사용할 수 있도록 이와 같이 하천유지유량을 고려한 기준갈수량을 기준으로 가용유량 여부를 판단하고, 부족할 경우 상류 수원(댐 또는 저수지)의 용수계약을 통해 안정적인 용수공급이 이루어지도록 관리하고 있다. 또한 이미 허가를 득하여 하천수를 사용하고 있는 기득하천사용자의 동의에 의한 허가수량의 조정을 통하여 하천수가 확보된 경우에도 허가가 가능하다. 그러나 하천수 사용에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있는데 반해 하천수 사용허가의 기준이 되는 기준갈수량은 고정되어 있어 신규 하천수 사용허가가 어려운 실정이다. 현재 대부분의 낙동강 본류에서는 하천수 사용허가의 기준이 되는 기준갈수량이 하천유지유량보다 작게 설정되어 신규 허가가 어려워 댐용수계약을 통한 하천수 허가가 이루어지고 있다(Nakdong Flood Control Office, 2014). 또한 전국적으로 다수의 미등록된 하천수 취수시설이 위치하고 있어, 이를 허가량으로 전환할 경우 가용수량이 더욱 부족하게 될 것으로 예상된다. 따라서 365일 안정적인 용수공급과 동시에 하천의 정상적인 기능을 유지하기 위해 하천내 유량을 보전해야 하는 서로 상반되는 목적의 조화와 균형을 이루어 수요자간의 합리적인 물 배분을 통해서도 공존할 수 있는 하천유량관리가 이루어지도록 다양한 개선방안 마련이 필요하다. ‘낙동강수계 효율적인 하천유량 관리에 관한 연구(Nakdong River Flood Control Office, 2014)’에서는 하천수 사용허가제도를 올바르게 유지하고 관리하기 위해서는, 첫째로 4대강 사업 이후 변화된 하천의 유량을 조사분석하여 기준갈수량과 유지유량을 재산정함으로써 보다 정확한 기준유량을 확보하는 작업이 필요하며, 두 번째로 농업용수는 관행수리권으로 하천수 사용허가를 득하지 않음에도 사용을 인정하기 때문에 올바른 물관리를 위한 법·제

도권 편입과 물 사용에 따른 실적보고가 원활하게 이루어지도록 노력할 필요가 있다고 언급하고 있다. 또한 발전용수나 환경개선용수와 같이 회귀율이 100%에 가깝고 손실이 거의 발생하지 않는 경우의 하천수 사용허가를 허가기준유량에 의한 물수지분석으로 허가를 시행하는 방법을 적용하는 것은 불합리한 것으로 판단되므로 이에 대한 법적 근거를 마련하는 것이 바람직하다고 제시하였다.

이와 같은 다양한 수리권 개선 방안 중, 본 연구에서는 연중 일정하게 설정되어 있는 하천수 사용허가기준에서 벗어나 시공간적 유량 변화를 고려한 시기별 기준유량, 즉 탄력적 하천관리 기준유량 산정 방안을 제시하고, 이를 금호강에 적용하여 미래 기후변화에 따른 유량의 변동에도 하천수 사용이 영향을 받는지를 검토하여 본 연구를 통해 제시한 방법의 타당성을 입증하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 연중 일정하게 설정되어 추가적인 가용유량 확보가 어려웠던 기존 관리방식에서 벗어나 시기별 유량 패턴을 고려할 수 있게 됨으로써 하천수 가용수량을 탄력적으로 확보하여 하천유지유량 및 비상용수로 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 특히, 마른장마와 태풍 없는 여름을 경험하면서 효율적인 물 분배와 사용의 극대화가 중요한 물관리 과제로 대두됨에 따라 미래 환경 변화에 대비한 탄력적인 물관리 패러다임을 위한 기준 마련이 시급해지므로, 본 연구결과가 이에 대한 기초연구로 활용되어 지역적인 공평성과 형평성을 고려한 효율적인 하천관리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 국내·외 하천수 사용허가 기준유량 설정 방법 검토

2.1 국내 하천수 사용허가 기준유량 설정방법

하천수 사용 허가 검토시 기준으로 사용되는 유량은 기준갈수량에서 하천유지유량을 감산하여 적용하고 있다. 여기에서 기준갈수량을 사용하는 이유는, 유수사용이 매년 지속적으로 이루어진다고 가정할 경우 평수시와 홍수시의 유량을 기준으로 허가한다면 1년 중 특정기간 동안은 물부족이 발생하게 되기 때문이다. 따라서 하천수 사용허가는 갈수시의 유량을 기준으로 해야 하며 이러한 갈수량은 유형분석을 통해서 산정될 수 있다. 그러나 동일한 지점의 갈수량이라 하더라도 매년 다르게 산정되므로 이를 하천수 사용의 기준으로 삼는다면 매년 하천수 사용허가를 재검토해야 하는 문제가 있으므로 기준갈수년의 갈수량을 하천수 사용의 기준으로 삼는 것이다. 여기서 기준갈수란 10년 빈도의 갈수로서, 연갈수량 계열을 작성하고 빈도해석을 통하여 10년 빈도에 해당하는 갈수

량을 구함으로써 얻을 수 있다. 그러나 실무에서는 자료 획득이나 기후 변화 등을 고려하여 최근 10년간 갈수량 자료에서 최하위에 해당하는 유량을 채택하여 기준갈수량으로 삼고 있다. 그러나 최근 10년간의 갈수량 자료의 최하위 유량도 매해 달라질 수 있으며 유량이 달라짐으로 인하여 하천수 사용허가를 모두 재검토해야 하는 결과가 발생하므로 하천수 사용허가의 기준으로서의 기준갈수량은 각 하천에 대한 하천정비기본계획을 통해 고시하여 그 효력을 나타낸다(Han River Flood Control Office, 2005). 기준갈수량은 원칙적으로 수자원장기종합계획(MLTM, 2011)의 일자연유량을 빈도분석하여 산정한 10년 빈도 갈수량으로, 해당 하천의 여건 변화 등으로 재산정한 경우 보완해서 사용하고 있다(MLTM, 2009b).

2.2 국외 하천수 사용허가 기준유량 설정방법

각 나라마다 사용되는 이수관리 지표는 갈수의 지속기간과 재현기간에 따라 다양하다. 일본은 ‘새로운 물 사용은 다른 하천 사용과의 조절이 적절하게 이루어지고 하천유수의 정상적인 기능을 유지하는데 지장이 없도록 해야 한다’는 기본개념을 바탕으로, 하천수 사용허가의 기준유량에서 하천유지유량을 공제하고 기존의 하천수 사용량 및 이수유량을 제외한 후 남은 수량이 새로운 취수 신청이 가능한지 확인하도록 하고 있다. 이때, 하천수 사용허가의 기준유량은 10년간 1위 수준의 갈수량(기준갈수량)으로 정하고 있으며, 유지유량과 수리(水利)유량을 합한 정상유량(定常流量)이라고 하는 하천관리유량의 개념을 이용하고 있다는 점에서 우리와 크게 차이가 없다. 단, 우리나라에서는 자연유량을 바탕으로 하천수 사용허가의 기준유량을 산정하고 있으나 일본에서는 관측유량을 사용하고 있다(Han River Flood Control Office, 2009).

미국은 하천 내에서 물의 가치와 이용을 허용수준 이상으로 유지하기 위해 필요한 유량인 하천유지유량(Instream Flow 또는 Minimum Flow)을 산정하고 있으며, 일반적으로 10년 빈도 7일 갈수량을 기준으로 삼아 가용유량을 결정한다.

2.3 시기별 목적에 따른 탄력적 하천관리 기준유량 설정 사례

시기별 하천관리유량 설정에 관한 국외 연구로는 환경유량(Environmental Flow) 설정방법을 예로 들 수 있다. 200여 가지가 넘는 환경유량 설정방법 중(Tharme, 2003), Holistic Approach의 일종인 Building Block Methodology (BBM)은 하천의 흐름영역(Flow Regime)은 여러 가지 수생태계 환경요소별로 구분할 수 있고 이는 유량의 발생 시기, 지속기간, 빈도, 크기 등으로 표현될 수 있다는 점에 기초한 방법으로

(King and Louw, 1998; King et al., 2008), 해당 하천을 둘러싼 다양한 분야의 전문가들이 모인 패널을 구성하여 워크숍을 개최하고 여기에서 하천의 생태계 보전을 위한 평년 및 가뭄년도의 홍수기/비홍수기/갈수기의 필요유량을 산정하게 된다. DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations), Benchmarking Methodology 및 ELOHA (Ecological Limits of Hydrologic Alteration) 등도 시기별로 하천생태계에 필요한 유량을 산정할 수 있는 방법론으로(Arthington et al., 2003; King et al., 2003; Brizga et al., 2001; Poff et al., 2010), 대안별 시나리오에 따른 하류의 반응을 고려하거나 하천지형이나 생태학적 위험을 나타내는 주요 유량지표를 도출하고 하천유황의 인위적인 변경범위를 조정함으로써 환경유량을 결정한다. 즉, 시기별로 유량이 변화하고 이에 따라 하천생태계에 영향을 미치게 되기 때문에 시기별로 어떻게 환경유량을 산정할 수 있는지에 대하여 다양한 방법들이 제시되고 있다.

국내에서 평상시 하천수 사용허가관리는 2.1절에 제시된 방법으로 관리되고 있으나, 가뭄이 매우 심한 상황에서는 댐저수 현황 및 하천관리유량의 부족 여부를 판단하여 갈수예보를 실시하고 있다. 갈수예보는 관심, 주의, 경계, 심각한 4단계로 갈수 대응 단계를 발령하고 하천수조정협의회에서 하천수 사용용도를 고려하여 취수량 제한 및 제한기간 등을 협의하게 된다. 예를 들어, 심각단계에서는 이수유량 공급이 부족하고 하천유지유량이 고갈된 상황으로 경제단계보다 생·공용수와 농업용수의 취수 제한이 강화된 상태를 의미한다. 이와 같이 심각한 갈수기에는 생활용수, 공업용수, 농업용수, 그 밖의 용수 순서로 용수 배분의 우선순위가 이루어진다.

또한 댐 관리에 있어서는 다목적댐 홍수조절능력 증대를 위한 홍수기의 댐수위 조절방안의 일환으로, ‘가변제한수위’를 2005년부터 3년간 시범적으로 실시한 바 있다. 이는 홍수기 동안 고정적으로 유지·관리해 온 제한수위 운영방식에서 탈피하여 이상홍수에 대한 댐의 안정성을 보장하면서도 용수공급에 지장이 최소화되는 범위 내에서 시기별로 제한수위를 탄력적으로 운용하는 것으로, 홍수기 초에는 제한수위를 낮게 설정하고 홍수기가 경과함에 따라 이를 높여 운영함으로써 홍수조절과 안정적인 용수공급능력을 증대시킬 수 있는 운영방안으로 평가된 바 있다.

2014년도 낙동강 수계에서는 홍수기간 동안 관리지점의 유량이 평수량 이상으로 유지될 경우 댐의 하천유지용수공급을 감량하여 댐 저수량을 확보함으로써 가뭄에 대응하는 운영방안을 시범 적용한 바 있으며 2015년도에 한강수계로 확대 운영한 바 있는데(Choi, 2015; Kim and Choi, 2016), 이러한

관리방안 역시 시기별 수문상황을 고려한 탄력적인 하천관리 방안의 일종이라고 할 수 있을 것이다.

3. 탄력적 하천관리 기준유량 설정 방법

앞 절에서 언급된 국내의 탄력적 물관리 방안이 주로 홍수 기의 댐 운영관리를 통해 댐 저수량을 확보하고자 하는 것이라면, 본 연구에서는 시·공간적 유량변화를 고려한 탄력적인 관리기준 설정을 통해 하천에서의 물관리 효율성을 높여 가용 수량을 확보하기 위한 것으로, 본 절에서는 이에 대한 기본 논리와 방법을 설명하였다.

3.1 시기 구분

하천유량 관리시기는 유황 및 용수수요가 변화되는 시기를 고려하여 구분하고자 우리나라 용수공급량의 50% 이상을 차지하는 다목적댐 운영시기와 용도별 사용량이 가장 많고 시기별 변화가 큰 농업용수 사용 시기를 기준으로 삼았다. 즉, ‘다목적댐 관리규정’에 따른 홍수기(매년 6월 21일~9월 20일)와 이수기를 구분하고, 관개기(4~9월)와 비관개기(10~3월)로 구분하게 되면 10월 1일~3월 31일은 이수기-비관개기, 4월 1일~6월 20일은 이수기-관개기, 6월 21일~9월 20일은 홍수기-관개기, 9월 21일~9월 30일은 이수기-관개기로 구분된다. 그러나 관개기/비관개기 구분은 작물의 종류 및 재배지역에 따라 차이가 있을 수 있고 9월 21일~9월 30일의 기간은 관개기 후기에 속하므로 분석의 편의상 이수기-비관개기에 속하는 것으로 하였다. 또한 이수기-비관개기에 해당하는 10월 1일~3월 31일은 10월 1일~12월 31일과 1월 1일~3월 31일로 구분하여 계절에 따른 유량 변화를 추가적으로 고려할 수 있도록 하였다. 일반적으로 우리나라의 수자원양(유출량)은 월별 또는 계절별로 현황을 파악하여 관리가 이루어지므로 위와 같이 시기를 구분해도 무방할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 시기별 유황 특성을 고려하여 1월 1일~3월 31

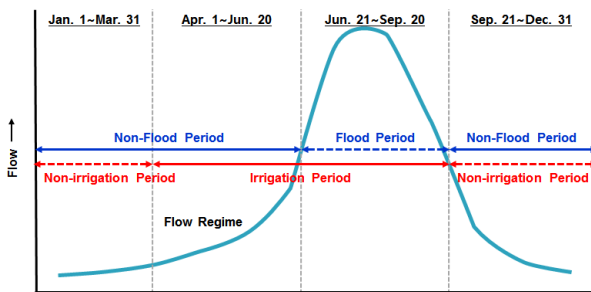


Fig. 1. Period Classification for Resilient River Flow Management

일, 4월 1일~6월 20일, 6월 21일~9월 20일, 9월 21일~12월 31일의 4개 시기로 구분하였으며 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

3.2 시기별 기준유량 설정방법 및 유황분석지점 선정

현재의 하천수 사용허가 기준유량은 연중 하천에 안정적으로 흐를 것으로 기대되는 유량인 자연상태의 기준갈수량에서 하천유지유량을 제외한 값으로 설정되어 있다. 따라서 이러한 개념을 본 연구에 적용해본다면, 위 절에서 구분된 각 시기동안 안정적으로 흐르는 유량에서 하천유지유량을 제외한 값을 하천수 사용허가 기준유량으로 설정할 수 있을 것이다. 예를 들어, 6월 21일~9월 20일(홍수기-관개기)의 유량이 항상 평수량(Q185)을 만족한다면 해당 기간의 하천수 사용허가 기준유량은 평수량에서 유지유량을 제외한 값으로 설정될 수 있다. 그러므로 사용허가 기준유량에서 기존의 하천수 사용허가량을 제외하면 시기별 가용유량을 산정할 수 있게 된다. 기준갈수량이 10년 빈도로 연간 355일 이상, 즉, 약 97.3%를 초과하는 기간동안 유지되는 유량임을 감안한다면 각 기간 동안 이 정도로 만족하는 유량을 기준유량으로 설정하면 된다.

현재 우리나라의 이수관리는 하천에 물이 많은 시기일지라도 추가적인 하천수 사용은 허가하지 않으며, 하천유지유량도 최소유량 개념으로 관리하고 있으므로 하천의 관리유량은 연중 일정하다. 그래서 홍수기에 더 많은 물을 사용할 수 있음에도 불구하고 기준이 결정되지 않아 유황의 다양성을 고려하지 못하고 있다(Kang et al., 2016). 위에서 제시한 논리에 따라 시기별로 사용이 가능한 물의 양을 설정하면 효율적

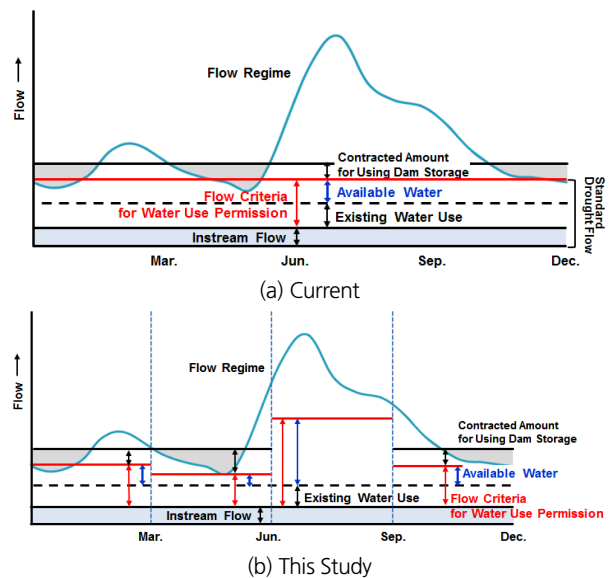


Fig. 2. Resilient River Management for Efficient River Water Use

인 하천수 이용과 관리가 가능하게 될 뿐만 아니라 추가적으로 인프라를 구축하지 않아도 가용유량을 확보할 수 있게 된다. Fig. 2에 현재의 하천유량 관리와 본 연구에서 제시된 탄력적인 관리 방안을 비교하여 개념적으로 도시하였다.

유황분석을 수행하기 위한 유역의 대표지점 선정은 ‘하천 유지유량 산정요령(MLTM, 2009a)’을 참고하였다. 유황이나 하천환경의 특성을 바탕으로 몇 개의 구간으로 구분하고 각 구간에 대하여 해당 상황을 대표할 수 있는 지점을 선정하였다. 따라서 구간의 대표지점은 수문 관측자료가 충분하고 유량관리의 기준이 될 수 있는 지점이 선택되도록 하였다.

4. 적용 및 결과

4.1 대상 유역의 대표지점 선정

금호강은 유역면적 2,092.42 km², 유로연장 116 km으로 1개의 중권역과 19개의 표준유역으로 구성되어 있으며, 토지 이용은 시가지 8.5%, 농경지 21.8%, 산지 63.5%, 기타 6.2%로 이루어져 있다. 또한 금호강은 낙동강 수계로 합류되는 제1지류로, 대구광역시 및 경상북도의 4개시와 4개의 군이 본 유역에 포함되어 있으며 낙동강 유역면적의 약 8.8%를 차지하고 있다. 상류에는 용수공급을 위한 영천댐과 보현산 다목적댐이 위치하고 있으며 총 16개의 수위관측소가 있다.

본 연구에서는 금호강 본류의 하천유지유량 설정을 위한 기준지점 선정 방법을 참고하여 금호강 상류~동촌 수위관측지점과 동촌 수위관측지점~금호강 하류의 2개 구간으로 구분하였으며, 각 구간의 대표지점은 하천유지유량 기준지점인 동촌과 성서 지점으로 선정하였다. 유지유량 고시지점은 가용유량 판단 및 이수관리(또는 갈수예보) 기준으로 수리행

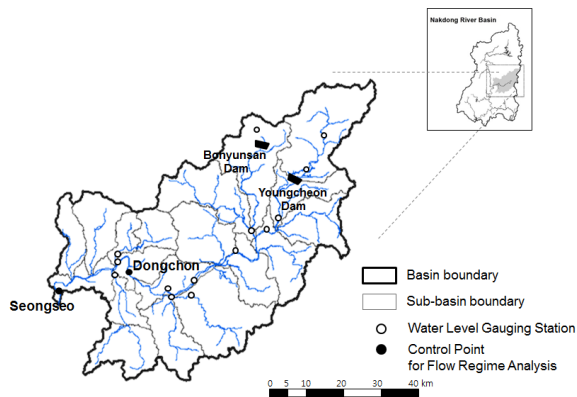


Fig. 3. Representative Control Points in the Study Area for Flow Regime Analysis

정에 활용되므로 본 연구의 대표지점과 동일하게 설정해도 무방할 것으로 판단된다. 금호강 유역의 개략적인 현황과 하도 구분 및 대표지점은 Fig. 3과 같다.

4.2 금호강의 시기별 기준유량 설정

4.2.1 SWAT모형의 적용성 평가

본 연구에서 사용된 금호강의 일단위 자연유출량 자료는 Kim et al. (2015)이 수행한 SWAT모형의 모의결과를 활용하였다. 1997~2014년까지의 기상자료와 중분류 토지이용도, 정밀토양도 등을 SWAT모형의 입력 자료로 사용하여 모형을 구축하였다. Kim et al. (2015)에서 언급된 것처럼 금호강 유역은 SWAT모형의 적용성을 평가하는데 몇 가지 한계가 있다. 첫째로, 자연유량은 인위적 통제를 배제한 유량으로 유역에서 실측자료와 비교할 수 있는 관측지점이 없으며, 또한 영천댐 유역의 실측자료(댐유입량 자료)가 존재하나 영천도 수로를 통한 도수량이 일정하지 않아 자연유량 산정결과를 비교할 수 없다. 따라서 부득이하게 연구대상유역 인근의 실측자료가 존재하고 인위적인 유량통제가 거의 없는 임하댐 상류유역에 SWAT모형을 구축하고 매개변수 보정을 수행하

Table 1. SWAT Parameters for Calibration

Parameter	Calibration Value
Evaporation Compensation Factor	0.05
Plant Uptake Compensation Factor	1
Surface Runoff Lag Coefficient	0.5
Baseflow Alpha Factor (day)	0.07
Channel Hydraulic Conductivity (mm/hr)	25
Threshold Depth of Water in the Shallow Aquifer for Evaporation or Percolation (mm H ₂ O)	10
Available Water Capacity of the Soil Layer (mm H ₂ O/mm Soil)	0.14
Groundwater Delay Time (day)	0.033

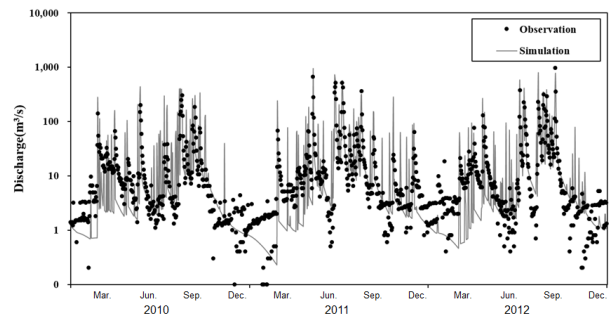


Fig. 4. Model Calibration

였다. 매개변수에 대한 민감도 분석 수행 후, 적용범위 내에서 시행착오법으로 매개변수를 보정하여 그 결과를 Table 1에 제시하였으며 2010~2012년 임하댐 유입량 자료와 SWAT 모의값을 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 구축된 모형의 적용성을 평가하기 위한 상관계수와 Nash-Sutcliffe 효율계수는 각각 0.734, 0.700으로 산정되었다. 이 계수들은 1에 가까울수록 보정이 잘 되었음을 의미하며 여기서 보정된 매개변수를 금호강 유역에 적용하였다.

4.2.2 시기별 유황분석

보정된 모형을 바탕으로, 금호강 대표지점으로 선정된 동춘과 성서 수위관측지점에 대하여 2005~2014년의 10년간 일 단위 자연유량의 변동 범위를 시기별로 분석하였다. 먼저 3.1절에서 제시된 시기 구분이 타당하지 확인하고자 동춘과 성서 지점의 시기별 10년치 모의 유량에 대한 T-test를 실시하였다. 즉, 각 시기별 유황 특성이 다르다는 것을 통계적으로 확인하여 시기를 적절하게 구분하였음을 검증하기 위함이다. 시기별 자료의 크기는 800개 이상이므로 정규성이 있다고 판단되었으며, 서로 인접한 시기간 분석한 결과, Table 2에 제시한 바와 같이 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 5와 같이 시기별 평균유량이 높은 순서대로 동춘과 성서지점의 유황분석 결과를 살펴보면 홍수기인 6월 21일~9월 20일은 평수량(Q185) 이상을 나타내는 자료의 비율이 두 지

점 모두 92.8%를 차지하고 있으며, 4월 1일~6월 20일은 저수량(Q275) 이상이 각각 93.7%와 93.5%로 나타났다. 이 시기이며 비관개기인 9월 21일~12월 31일 동안 평균갈수량(Q355) 이상의 자료는 동춘 지점에서 98.7%, 성서 지점에서는 99.9% 이상을 보여주었다. 가장 자연유량 값이 적은 1월 1일~3월 31일에는 기준갈수량(1Q10)보다 높은 유량을 나타내는 자료가 동춘과 성서 각각 98.7%, 98.1%의 결과를 보여주고 있다. 따라서 이 유량들이 각 해당기간동안 안정적으로 흐르는 유량이라고 해도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 현재 하천수 사용허가 기준으로 설정되어 있는 기준갈수량은 연중 유량의 97.3% 이상을 설명해주고 있고 위에 제시된 유량이 97.3%보다 약 5% 정도 낮은 수치를 나타내는 시기도 있으나 충분히 안정적인 유량이라고 판단된다.

4.3 기후변화에 따른 영향 분석

위에서 제시된 방법론이 미래 기후변화에 따른 유황 변동에도 영향을 받는지를 검토하여 본 연구에서 제시된 기준유량 설정방법의 타당성을 입증하고자 Kim et al. (2015)이 수행한 기후변화 시나리오에 따른 금호강의 자연유출량 결과를 활용하여 시기별 유황분석을 수행하였다. 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM)의 과거 30년(1976~2005년) 기온과 강수량 자료를 선형편의 보정한 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 SWAT모형에 적용하여 2011~2099년의 유량을 예측하고, 모의결과를 활용하여

Table 2. Statistical Analysis of Flow Regime between Two Adjoining Periods

Representative Station	p-value			
	Jan. 1~Mar. 31 & Apr. 1~Jun. 20	Apr. 1~Jun. 20 & Jun. 21~Sep. 20	Jun. 21~Sep. 20 & Sep. 21~Dec. 31	Sep. 21~Dec. 31 & Jan. 1~Mar. 31
Dongchon	1.88×10 ⁻⁶	1.28×10 ⁻²⁰	3.62×10 ⁻³³	0.31
Seongseo	1.21×10 ⁻⁷	1.48×10 ⁻²²	7.39×10 ⁻³⁴	0.06

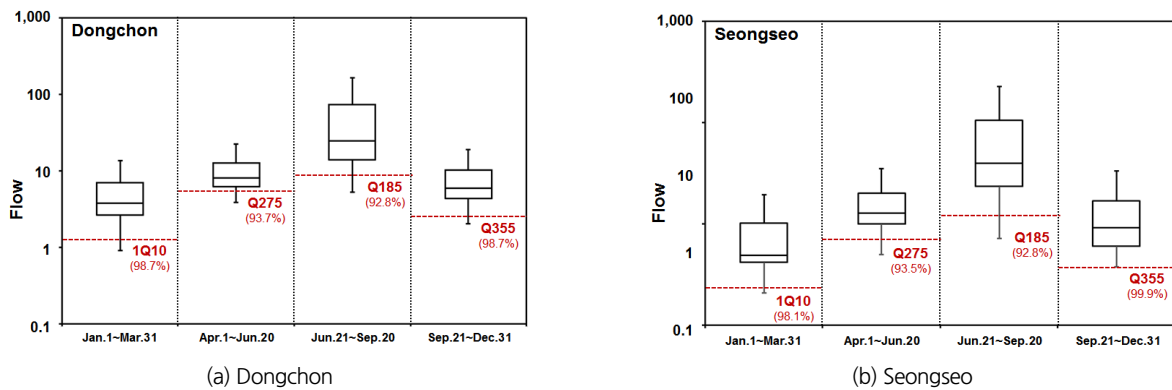


Fig. 5. Flow Regime Analysis of Representative Control Points in Each Temporal Period

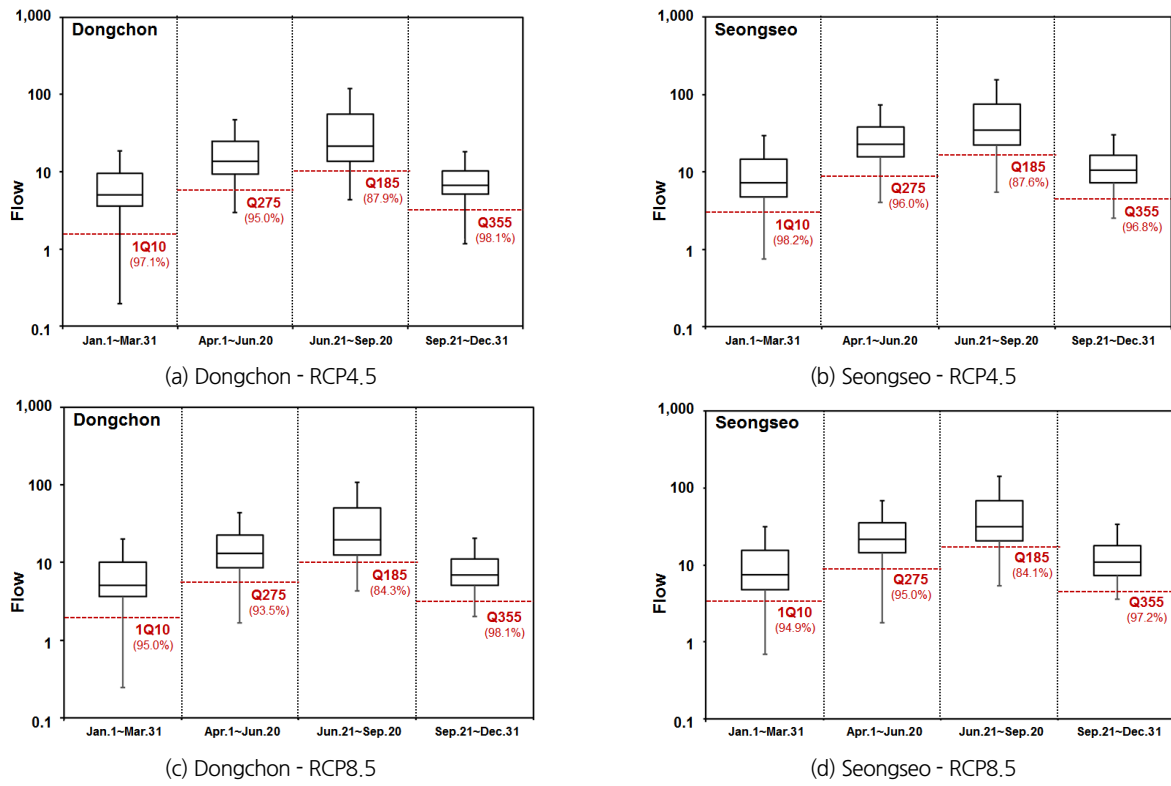


Fig. 6. Climate Change Effects on Determination of Resilient Flow Criteria

Table 3. Existing River Water Rights in the Keumho River Basin (the Status of April 2016)

Code	Sub-basin Name	Permitted Amount of River Water Right (m ³ /day)				
		Municipal	Industrial	Agricultural	Hydropower	Others
201201	Youngcheon Dam	-	-	-	-	-
201202	Jaho Stream	-	900	-	423,000	-
201203	Kochon Stream	-	-	-	-	-
201204	Kohyun Stream	-	-	-	-	-
201205	Shinryoung Stream	-	-	-	-	-
201206	Headwater of the Keumho River	-	-	64,000	-	-
201207	the Upper Keumho River	-	1,300	63,770	-	-
201208	Cheongtong Stream	-	127	-	-	-
201209	Oro Stream	-	-	20,400	-	-
201210	Nam Stream	-	-	-	-	-
201211	Dongchon Water Level Gauging Station	2,000	1,600	15,210	-	-
201212	Gongsan Dam	-	-	-	-	-
201213	Donghwa Stream	-	-	-	-	-
201214	the Middle Keumho River	-	-	21,240	-	-
201215	the Upper Shin Stream	-	-	-	-	-
201216	the Lower Shin Stream	-	-	-	-	-
201217	Palgeo Stream	-	-	-	-	-
201218	Ieon Stream	-	-	21,000	-	-
201219	the Lower Keumho River	-	4,000	8,000	-	0.01

각 기간별 유황분석을 수행하였다. 기준갈수량은 해당 기간의 10번째 최저 갈수량으로 설정하였는데 이는 10년 빈도 유량에 준한다고 할 수 있다.

각 기간 동안 안정적으로 흐르는 유량은 앞 절에서 제시된 결과와 동일하게 도출되었으며, RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 적용한 동촌과 성서 지점에서의 유황분석 결과와 해당 유량 이상의 자료가 차지하는 비율은 Fig. 6에 제시하였다. 과거 10년 적용결과에 비해 특히 홍수기의 평수량 이상의 자료가 84.1%까지 감소되어 탄력적인 허가기준유량 설정에 대한 불확실성이 증가될 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 실제 정책 반영시, 미래 불확실성이나 극심한 가뭄 등의 상황을 고려하기 위해서는 수질오염총량관리제에서 사용되는 안전율(Margin of Safety)과 같은 추가적인 조치가 포함될 수 있을 것이다.

4.4 탄력적 허가기준유량 설정에 따른 가용유량 평가

본 절에서는 금호강 유역의 하천수 허가량을 분석하여 현재 관리기준과 본 연구에서 제시된 탄력적 기준유량을 적용하였을 경우의 가용유량을 산정하여 비교·분석하였다.

4.4.1 금호강 유역의 하천수 사용량 분석

하천수 사용량은 광의적으로 수리권에 의해 사용되는 이수유량의 총합이며, 협의적으로는 하천법에 의한 하천수 사용허가량을 의미한다. 본 연구에서는 후자의 의미를 적용하여 하천수 허가량이 사용량이라고 가정하여 분석을 수행하였다. 하천수 사용시설에서 실제 사용한 양을 적용하지 않은 것은 일정 규모 이상의 용수를 사용하는 피허가자가 스스로 사용량을 보고하므로 그 신뢰성에 한계가 있다고 판단했기 때문이다. 하천수 허가량은 하천수 사용 관리시스템(River Water Use Management System)에서 제시된 2016년도 4월 허가 현황을 이용하였다. 또한 연중 허가량은 동일하다고 가정함으로써 농업용수의 경우 비관개기와 관개기를 구분하지 않고 연중 사용량을 일정하게 적용하였으며, 댐용수 허가량은 댐에서 계약량 만큼의 추가 용수를 댐 하류로 공급한다는 것으로 가정하여 사용량 계산에서는 제외하였다. Table 3에 금호강 표준유역의 용도별 하천수 허가량을 제시하였다.

4.4.2 가용수량 산정을 위한 물수지 분석

가용수량 산정은 현재 하천수 사용허가시 적용되는 물수지 분석 과정을 적용하였다. 여기서는 표준유역을 하나의 물수지 분석 단위로 가정하여, 표준유역의 구조에 따라 누계 허가량과 회귀량을 계산한다. 이때, 하천수 사용에 대한 회귀율은 생활, 공업, 기타용수의 경우 허가량의 65%, 농업용수는

35%, 발전용수는 100% 회귀를 가정하여 분석하였다. 또한 지류의 유입은 허가기준유량 증감량에 포함되는 것으로 간주하여 산정에서 제외하였다. 금호강의 각 표준유역의 시기별 허가기준유량은 4.2.1 절에서 언급된 2005~2014년 자연유출량 모의결과와 동촌과 성서지점의 하천유지유량을 이용하여 계산하였다. 금호강의 물수지 분석 모식도는 Fig. 7과 같으며, 연중 일정한 허가기준유량(기준갈수량에서 하천유지유량을 제외한 값)을 적용하였을 경우와 시기를 고려한 탄력적인 허가기준유량(기간별 안정적으로 흐르는 유량에서 하천유지유량을 제외한 값)을 적용했을 경우의 가용유량을 산정하여 Table 4에 비교하여 제시하였다.

현재와 같이 연중 일정한 하천수 허가기준으로 관리하였을 경우 금호강 유역에서 연간 51.9 백만³의 가용수량이 부족한 것으로 나타났는데 비해, 시기별 허가기준을 설정하였을 때에는 연 41.4 백만³의 가용수량이 부족한 것으로 나타났다. 즉, 수량확보시설을 설치하지 않고 관리기준을 변경하는

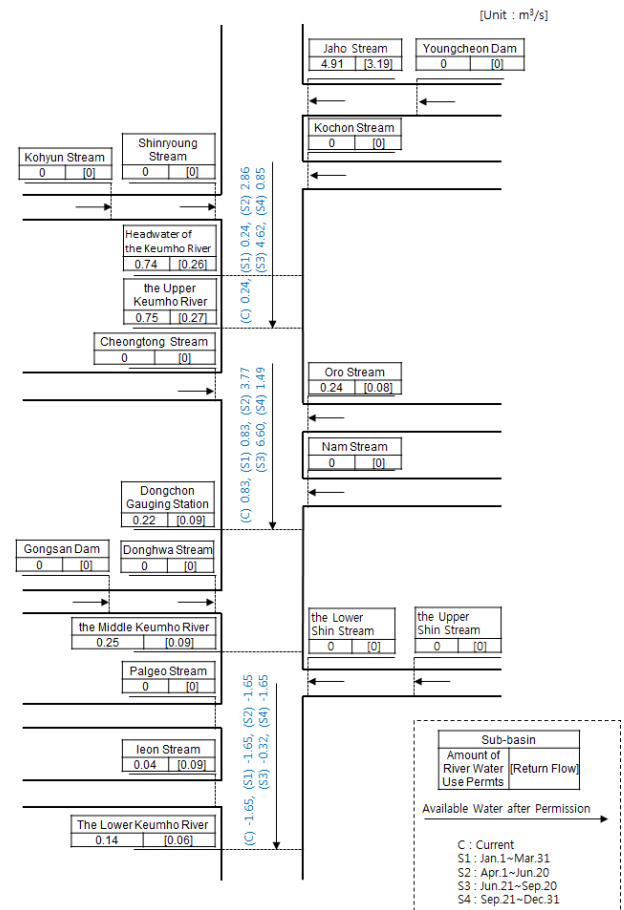


Fig. 7. Schematic Figure for Water Balance of the Keumho River Basin

Table 4. Comparison of Available Water between Current and Resilient River Water Management (Unit : m³/s)

Sub-basin		Flow Criteria for River Water Use Permits				Accumulated River Water Use Permits	Accumulated Return Flow	Available Flow after Permission				
Code	Name	Jan.1 ~Mar.31 (IQ10-IF*)	Apr.1 ~Jun.20 (Q275-IF)	Jun.21 ~Sep.20 (Q185-IF)	Sep.21 ~Dec.31 (Q355-IF)			Current	Jan.1 ~Mar.31	Apr.1 ~Jun.20	Jun.21 ~Sep.20	Sep.21 ~Dec.31
201201	Youngcheon Dam	0.02	0.56	1.06	0.11	0.00	0.00	0.02	0.02	0.56	1.06	0.11
201202	Jaho Stream	0.02	1.05	1.64	0.26	4.91	4.90	0.01	0.01	1.05	1.64	0.26
201203	Kochon Stream	0.02	0.38	0.68	0.05	0.00	0.00	0.02	0.02	0.38	0.68	0.05
201204	Kohyun Stream	0.04	0.46	0.89	0.11	0.00	0.00	0.04	0.04	0.46	0.89	0.11
201205	Shinryoung Stream	0.15	0.98	1.72	0.33	0.00	0.00	0.15	0.15	0.98	1.72	0.33
201206	Headwater of the Keumho River	0.71	2.96	4.57	1.19	5.65	5.16	0.22	0.22	2.48	4.09	0.71
201207	the Upper Keumho River	1.21	3.83	5.59	1.82	6.40	5.43	0.24	0.24	2.86	4.62	0.85
201208	Cheongtong Stream	0.01	0.39	0.76	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	0.39	0.76	0.06
201209	Oro Stream	0.04	0.49	0.92	0.09	0.24	0.08	-0.11	-0.11	0.34	0.76	-0.06
201210	Nam Stream	0.03	0.35	0.66	0.08	0.00	0.00	0.03	0.03	0.35	0.66	0.08
201211	Dongchon Water Level Gauging Station	2.09	5.03	7.85	2.75	6.86	5.60	0.83	0.83	3.77	6.60	1.49
201212	Gongsan Dam	0.01	0.21	0.45	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.21	0.45	0.03
201213	Donghwa Stream	0.06	0.49	0.85	0.13	0.00	0.00	0.06	0.06	0.49	0.85	0.13
201214	the Middle Keumho River	0.00	2.05	5.59	0.17	7.10	5.69	-1.41	-1.41	0.64	4.18	-1.25
201215	the Upper Shin Stream	0.03	0.34	0.62	0.09	0.00	0.00	0.03	0.03	0.34	0.62	0.09
201216	the Lower Shin Stream	0.12	0.71	1.11	0.23	0.00	0.00	0.12	0.12	0.71	1.11	0.23
201217	Palgeo Stream	0.02	0.30	0.53	0.06	0.00	0.00	0.02	0.02	0.30	0.53	0.06
201218	Ieon Stream	0.02	0.23	0.41	0.04	0.24	0.09	-0.14	-0.14	0.07	0.26	-0.12
201219	the Lower Keumho River	0.00	0.00	1.33	0.00	7.48	5.84	-1.65	-1.65	-1.65	-0.32	-1.65

*IF : Instream Flow

것만으로 약 10.6 백만m³/년의 유량을 확보할 수 있는 셈이다. 단, 현재 허가기준유량에서 사용되는 기준갈수량은 수자원 장기종합계획(보완)(2011~2020)(MLTM, 2011)에서 제시된 중권역별 일자연유량(1967~2003년)을 2005년까지 확장하여 10년 빈도 갈수량을 산정하고 면적비를 이용하여 표준유역별 기준갈수량을 도출한데 반하여, 본 연구에서는 2005~2014년의 자연유량을 SWAT모형으로 도출하였으므로 기준갈수량은 수장기에서 제시된 값의 3.8~68.2% 정도를 나타내었다. 일반적으로 수문모형으로부터 산정된 유량은 비유량법으로 산정된 것보다 적으므로(Kim et al., 2007; Park

et al., 2008), 수장기에서 제시된 자료를 사용할 경우 확보되는 가용유량은 본 연구에서 제시된 값보다 클 것으로 예상된다. 가장 많은 가용유량이 발생하는 기간은 6월 21일~9월 20일로, 이 시기에 확보된 하천수는 녹조저감 등 수질개선을 위한 펄스 방류나 마른 장마에 대비한 비상용수, 또는 사용특성이 여름철인 수영장 등에 활용될 수 있을 것이다. 또한 금호강 하류에서는 홍수기를 제외한 나머지 세 기간 동안의 허가기준 유량이 동일하게 계산되었는데 이는 해당 기간의 안정적인 유량에서 유지유량을 제외한 값이 음수가 나와 허가기준유량이 0으로 설정되었기 때문이며, 양수일 경우 각 기간의 허가

준유량은 각기 다르게 설정될 수 있을 것이다.

5. 결론

연중 일정하게 적용하고 있는 하천수 사용허가 기준유량을 시기별 유량변화를 고려한 탄력적인 기준으로 설정할 수 있는 방안을 제시하고, 이를 금호강 유역에 적용하여 개선 전후의 가용유량을 평가하였다.

- 1) 홍수기/이수기, 관개기/비관개기 등을 고려하여 1월 1일~3월 31일(이수기-비관개기), 4월 1일~6월 20일(이수기-관개기), 6월 21일~9월 20일(홍수기-관개기), 9월 21일~12월 31일(이수기-비관개기)의 4개 기간으로 구분하고, 동춘과 성서 수위관측소를 금호강 유역의 대표지점으로 설정하여 SWAT모형의 10년간 일별 자연유량 모의 결과를 사용하여 시기별 유량분석을 수행하였다.
- 2) 서로 인접한 시기의 유량 분포가 다르다는 것을 T-test로 확인하였으며, 동춘과 성서 지점 모두 각 4개 시기별로 모의된 자연유량의 90% 이상이 기준갈수량, 저수량, 평수량, 평균갈수량을 만족하는 것을 확인하였다. 따라서 이 값에서 하천유지유량을 제외한 값을 각 시기별 하천수 사용허가 기준유량으로 설정하였으며, RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 적용하여 미래 변화에서도 적용 타당성을 확인하였다.
- 3) 2016년 4월 현재의 금호강 유역의 하천수 허가량 자료를 활용하여 19개의 표준유역별로 용도별 하천수 허가량 및 회귀량을 계산하고 표준유역 구조에 따라 물수지 분석을 수행하였다. 현재와 같이 연중 일정한 허가기준유량을 적용하였을 경우에 비해, 시기를 고려한 탄력적인 기준으로 개선하였을 경우 추가적인 하천시설 건설없이 10.6 백만 m^3 /년의 유량을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 현재 하천수 사용허가 관리방식과 비교하였을 때, 기준갈수량 산정방법과 자연유량 모의기간 등에 차이가 있어 가용유량 값은 차이가 날 수 있으나 시공간적 유량 조건을 고려한 융통성 있고 효율적인 하천수 관리 방안을 제시하였다는 데 그 의의가 있을 것이다.
- 4) 그동안 탄력적인 유량관리의 필요성이 지속적으로 제기 되었음에도 실제 시행에 어려움을 겪은 이유로는 상황에 맞는 ‘탄력적 대응’에서 수반되는 불확실성과 기존 수리권에 대한 재설정 및 관련 법·제도 정비 등 다양한 측면에서의 변경이 필요하므로 기존 정책에 대한 광범위한 개편의

부담이 작용했을 것으로 보인다. 따라서 기술 개선을 통해 불확실성을 낮추고 효율적인 수자원 활용이 이루어질 수 있도록 제도적인 뒷받침이 마련된다면 탄력적인 하천유량관리의 기초를 닦을 수 있을 것으로 생각된다.

- 5) 허가기준유량 뿐만 아니라 하천수 허가량 역시 시기별 용수 수요패턴 및 실사용량을 고려하여 하천수 사용허가가 이루어지도록 관리된다면 더욱 효과적으로 수자원을 활용할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 판단된다. 현재에도 스키장 제설용수 등으로 시기별 용수사용 허가가 일부 이루어지고 있으나 이에 대한 제도적인 근거가 마련된다면 현실적인 하천수 사용관리가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시된 탄력적 기준유량 설정 방법을 통해 확보된 수량은 신규 수원 확보 사업의 추진 및 이를 위한 예산 확보 등의 정책적 어려움을 개선할 수 있는 동시에 용수공급 안정도를 유지하면서 하천수의 효율적인 활용과 지역적인 수리권 분쟁 해소에도 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(11 기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Arthington, A.H., Rall, J.L., Kennard, M.J., and Pusey, B.J. (2003). "Assessment of the Environmental Flow Requirements of Fish in Lesotho Rivers using the DRIFT Methodology." *River Research and Applications*, Vol. 19, pp. 641-666.
- Brizga, S.O., Arthington, A.H., Choy, S.C., Craigie, N.M., Mackay, S., Poplawski, W., Pusey, B.J., and Werren, G. (2001). *Pioneer Valley Water Resource Plan: Proposed Environmental Flow Assessment Framework*, Department of Natural Resources and Mines, Brisbane, Australia.
- Choi, B.S. (2015). "2015 Drought Status and its Measures." *Journal of Disaster Prevention*, KDPA, Vol. 17, No. 4, pp. 23-33.
- Han River Flood Control Office (2005). *Establishment of River Water Use Permitting and Management System in the Han River Basin*.
- Han River Flood Control Office (2009). *Report on Advancing River Management System for Water Use*.
- Kang, S.K., Yoo, C.S., Lee, D.R., and Choi, S.J. (2016). "Improvement of Instream Flow Evaluation Methodology and Application." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM,

- Vol. 16, No. 1, pp. 296-304.
- Kim, H.N., Lee, E.R., Kang, S.U., and Choi, H.G. (2015). "Long-term Natural Flow Prediction Based on RCP Climate Change Scenarios in Geumho River Watershed." *Crisisonomy*, CEM-TP, Vol. 11, No. 5, pp. 151-166.
- Kim, K.S., and Choi, K.H. (2016). "2015 Drought Counteractions in Nakdong River Basin." *Water for Future*, KWRA, Vol. 49, No. 1, pp. 97-104.
- Kim, N.W., Lee, B.J., and Lee, J.E. (2007). "Analysis of the Characteristics of Low-flow Behavior Based on Spatial Simulated Flows." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 4B, pp. 431-440.
- King, J., and Louw, D. (1998). "Instream Flow Assessments for Regulated rivers in South Africa Using the Building Block Methodology." *Aquatic Ecosystem Health and Management*, Vol. 1, No. 2, pp. 109-124.
- King, J., Brown, C., and Sabet, H. (2003). "A Scenario-Based Holistic Approach to Environmental Flow Assessments for Rivers." *River Research and Applications*, Vol. 19, pp. 619-639.
- King, J.M., Tharme, R.E., and de Villiers, M.S. (2008). *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*, WRC Report No. TT354/08, Water Research Commission, Republic of South Africa, pp. 53-64.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009a). *Guidelines for Instream Flow Evaluation*.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009b). *Work Manual for Permitting River Water Use*.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2011). *National Water Resources Plan (2011-2020)*.
- Nakdong River Flood Control Office (2014). *Study on Efficient River Flow Management in Nakdong River Basin*.
- Park, S.C., Cho, D.J., Roh, K.B., and Jin, Y.H. (2008). "Applicability Analysis of SWAT Model for a Small Basin." Proceedings of the *Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 2042-2045.
- Poff, N.L., Richter, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S.E., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.P., Freeman, M.C., Henriksen, J., Jacobson, R.B., Kennen, J.G., Merritt, D.M., O'Keeffe, J.H., Olden, J.D., Rogers, K., Tharme, R.E., and Warner, A. (2010). "The Ecological Limits of Hydrologic Alteration(ELOHA): A New Framework for Developing Regional Environmental Flow Standards." *Freshwater Biology*, Vol. 55, pp. 147-170.
- Tharme, R.E. (2003). "A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers." *River Research and Applications*, Vol. 19, pp. 397-441.