

하천 생태계 복원을 위한 적정 유황 범위 고찰: 한강유역사례

강성규·이동률[†]·최시중

한국건설기술연구원 국토보전연구본부

Flow Regime Boundary for Restoring River Ecosystems: A Case of the Han River Basin

Seongkyu Kang·Dong-Ryul Lee[†]·Sijung Choi

Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, Korea
(Received : 02 October 2019, Revised: 25 November 2019, Accepted: 25 November 2019)

요약

하천에서 물이용을 위한 이수사업은 피할 수 없는 하천유황의 변화를 가져왔고, 이로 인하여 하천 생태계의 건전성을 훼손하고 있다. 우리나라의 경우 1990년대 들어 변화된 하천환경을 자연형 하천으로 복원하고자 하는 노력이 본격화 되었다. 하천 복원사업의 주된 목적은 수로를 복원하고, 오염된 하천의 개선, 생태계를 위한 서식처 설치 및 인간의 친수활동을 위한 공간 확보였으며, 상대적으로 생태계보전에 가장 중요한 요소인 하천에 흐르는 유황의 복원에 대한 관심은 적었다. 하천유황은 생태계의 모든 측면에서 큰 영향을 주기 때문에 유황과 생태계의 관계 규명과 하천에 유지하여야 할 목표유황의 설정 및 하천 유황복원 방법을 정립할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내에서 아직 정립되지 않은 유황과 생태계의 관계를 환경유황의 개념을 통하여 소개하고 자연유황의 역할과 Richter et al.(1997)이 제안한 유황변동분석법(Range of Variability Approach, RVA)을 이용한 유황 평가 및 목표유황 설정 방법을 한강 유역의 사례를 통하여 고찰하였다.

핵심용어 : 하천생태계, 하천복원, 유황, 환경유황, 유황변동분석법

Abstract

River works for water utilization have substantially altered the natural flow regime, and it has resulted in deformation of healthy river ecosystems. In Korea, river restoration projects have conducted actively since 1990's. Major purposes of the river restoration are the rehabilitation of modified river channel, improvement of water quality, and creation of aquatic habitats as well as recreational spaces using natural material for river work. However, there have been little interests about the restoration of flow regime which influences to most aspects of river ecosystems. The restoration of natural flow regime has received much attention in preservation of aquatic ecosystems. It should be needed to explore the relationship between flow regime and river ecosystems, and the restoring flow regime is essential. This paper introduce the concept of environmental flow through the interrelation between flow regime and river ecosystem. It provides rolls of flow regime and addresses the method of establishing target flow regime using the RVA(Range of Variability Approach) that suggested by Richter et al.(1997) through analysis of altered flow pattern case of Han river basin.

Key words : river ecosystem, river restoration, flow regime, environmental flow, RVA

[†] To whom correspondence should be addressed.

Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and building Technology
E-mail: dryi@kict.re.kr

• **Kang, Seongkyu** Korea Institute of Civil engineering and building Technology / Department of Land, Water and Environment Research (skkang@kict.re.kr)
• **Lee, Dong-Ryul** Korea Institute of Civil engineering and building Technology / Department of Land, Water and Environment Research (dryi@kict.re.kr)
• **Choi, Sijung** Korea Institute of Civil engineering and building Technology / Department of Land, Water and Environment Research (sjchoi@kict.re.kr)

1. 서 론

인류 문명의 발달지는 늘 식수와 식량의 채집이 용이한 하천 주변으로 형성되었으며, 사람들의 활동은 물의 자연 상태의 흐름에 영향을 주었고, 산업과 기술의 발전은 이를 가속시켜왔다. 또한, 홍수터에서의 사회·경제활동의 증가로 이들 지역의 홍수피해를 경감하기 위한 노력으로 많은 제방이 건설되어 왔다. 이들 각 부문의 목표는 사람들의 사회·경제적 발전을 지향하고 있으며, Petts(1996)가 지적한 것과 같이 인간과 자연의 전통적인 패러다임은 자연자원의 개발에 중심을 두어왔기 때문에 물 공급과 홍수방어 사업은 자연생태계가 필요로 하는 유량과 서식처에 대한 고려 없이 진행되어 왔다.

2000년대 이전에 이루어진 우리나라의 하천사업은 대부분 홍수 피해를 방어하고자 하는 제방 건설과 저수로 개량에 그 목적이 있었으며, 그 이후는 사람의 접근과 이용이 편리하도록 하는 친수성 개선에 초점이 있었다. 이들 사업은 하천의 자연 생태계와는 거리가 있는 것으로 “공원하천” 또는 “조경하천”으로 불리기도 하였다(Woo et al., 2001). 또한, 진정한의미의 하천복원은 생태서식처를 원래 자연의 상태에 가깝게 하는 “자연형 하천” 또는 “생태하천”으로 되살리는 것이라고 하였다. 최근의 생태하천 복원사업은 자연하천 형태의 수로 복원, 생태계를 고려한 서식처 조성, 하천 구조물 설치 시 자연재료를 이용하는 것에 주안점을 두고 있다. 그러나 Poff et al. (1997)과 Petts (1996)는 생태계의 다양성 확보에 가장 중요한 요소가 이수사업에 의해 훼손된 하천의 자연유량 복원임을 제시한다. Richter et al. (1997)은 “유량변동분석법(RVA, Range of Variability Approach)”이라는 자연유량 분석 및 유량특성과 생태계 특성의 관계 분석이 가능한 유량 복원 목표설정 방법을 제안하였다. 이는 기본적으로 유량의 인위적 변화가 진행되기 이전의 유량 범위를 설정하여 하천생태계관리를 위한 유량 범위의 목표를 정하는 것이다. 이때 유량변동의 특성치를 크게 5가지 범주로 구분하였는데 유량(magnitude), 특정 유량의 발생빈도(frequency), 기간(duration)과 발생시기(timing), 유량 변화율(rate of change)이 그것으로 이들 특성의 변화를 살펴보고 과거 변동 이전의 특성이 생태계에 적합한 유량으로 설정된다.

우리나라의 하천은 다목적댐, 농업용 저수지의 건설과 많은 하천수 이용 등으로 대부분의 하천유량들이 인위적으로 조절되어 자연유량이 변동되었다. 그러나 유량변동에 대한 연구는 다목적댐 건설 전·후의 유량변동에 대한 Lee et al.(1993)의 연구정도가 있고 다양한 유량특성에 대한 포괄적인 연구는 없는 실정이다. 또한, 유량의 변동과 생태계 영향과의 연구도 Choi et al.(2004)의 연구정도로 거의 없는 실정이다. 과거 최소유량 방식의 유량관리보다는 생태계 특성과 유량이라는 측면에서 최근 다양한 연구가 진행되고 있는 환경유량의 개념을 통해 자연유량과 생태계의 연관성을 살펴보고 우리나라 하천에서 이루어진 이수사업 과정에

의한 거시적인 유량의 변동을 평가하였다. 또한 Richer et al.(1997)이 제안한 RVA를 이용하여 한강유역에서 댐 등에 의한 유량의 변동을 평가하여 향후 유량 측면에서 하천 복원의 방향을 고찰한다.

2. 하천유량, 환경유량과 하천 생태계 복원

자연유량은 사람에 의한 영향(취수와 물이동 및 시설물에 의한 조절)이 없던 하천사업 이전의 유량 상태를 말한다. 하천유량은 갈수에서 홍수까지의 유량으로 구성되며, 계절별로 변동되는 수문학적 특성을 가지고 있고, 이는 지역·기후에 따라 고유의 특성을 갖는다. 일반적으로 수행되는 유량의 평가는 유량곡선에 의해 평가되며, 우리나라에서 하천 유지유량을 산정할 때 355일을 유지할 수 있는 갈수량인 Q355유량을 이용하고 있다.

일반적으로 댐이나 저수지에 의한 유량조절의 방향은 홍수방어를 위한 저류로 인해 홍수기 유량은 적어지고, 이수 목적의 물공급에 의해 갈수기의 유량은 증가하는 형태로 나타난다. 특히 우리나라와 같이 물이용이 고도화된 경우 그 변동성은 더욱 커진다. 이러한 변화는 이수 혹은 홍수 안정성 측면에서 유량의 개선이라 표현하기도 하나, 자연 상태의 변화는 생물 서식지 및 다양성에서는 불리하게 작용한다. 홍수터의 범람은 넓은 지역에 물을 공급하여 다양한 동식물 서식의 토대가 되며, 갈수기의 저유량 변화 역시 수변 식생에 영향을 주기 때문이다. 그러나 Poff et al.(1997)과 Petts (1996)의 연구 등에서 알 수 있듯이 생태계를 위해 바람직한 물의 흐름은 자연 상태의 다양성을 간직하여야 한다.

우리나라에서는 하천법에 제시되고 있는 하천유지유량 즉, “하천의 정상적인 기능 및 상태를 유지하기 위해 필요한 최소한의 유량” 중 하나의 필요유량인 생태계 보전을 위한 유량을 지정하고 있다. 하천유지유량은 필요유량 항목으로 수질 보전·생태계보호·경관보전·염수침입방지·하구막힘방지·하천관리시설보호·지하수위 유지를 고려하고 있다. 이 개념으로 볼 때 우리나라의 생태계를 위한 유량은 최소유량 개념을 유지유량을 이용하고 있다. Moore(2004)는 최소유량(minimum flow)개념의 유지유량은 미국에서 시작하였으며, 하천에서 중요한 경제성 어종(魚種) 또는 일부 생태특성을 보호하기 위하여 하천의 최소유량 보전의 필요성에 대한 인식으로 출발하였다고 하였다. 또한, 최소유량은 갈수시 취수를 제한하는 유량기준으로 이용되며, 간헐천에서는 적합한 방법은 아니다. 따라서 우리나라의 하천유지유량은 하천의 다양한 요소를 고려하나, 거시적이며, 최소한의 조건을 고려하고 있으며, 설정과 관리가 이루어진다고 할 수 있다.

최근 외국에서는 하천유지유량의 개념으로 환경유량의 용어가 사용되고 있다. 환경유량은 생태계의 구성요소 및 각 요소별 다양성에 목적을 두고 있으며, 물고기의 생태 특성만을 고려하는 것보다 생태계 측면에서는 진일보한 개념

Table 1. The concept of environmental flow defined in the literature (Moore, 2004)

<ul style="list-style-type: none"> • Dyson, Bergkamp & Scanlon (2003) in the IUCN guide on environmental flows define the concept as the water regime provided within a river, wetland or coastal zone to maintain ecosystems and their benefits where there are competing water uses and where flows are regulated. • Arthington & Pusey (2003) define the objective of environmental flows as maintaining or partially restoring important characteristics of the natural flow regime (ie. the quantity, frequency, timing and duration of flow events, rates of change and predictability/ variability) required to maintain or restore the biophysical components and ecological processes of in-stream and ground water systems, flood plains and downstream receiving waters. • Tharme (2003) defines an environmental flow assessment (EFA) as an assessment of how much of the original flow regime of a river should continue to flow down it and onto its flood plains in order to maintain specified, valued features of the ecosystem. • Brown and King (2003) state that environmental flows is a comprehensive term that encompasses all components of the river, is dynamic over time, takes cognizance of the need for natural flow variability, and addresses social and economic issues as well as biophysical ones.
--

Table 2. Hydrologic parameters and ecosystem influences (Richter et al, 1998)

Group	Regime characteristics	Streamflow parameters	Examples of ecosystem influences
1. Monthly discharge conditions	magnitude timing	Mean discharge	<ul style="list-style-type: none"> - Habitat availability for aquatic organisms - Soil moisture availability for plants - Availability of water for terrestrial animals - Availability of food/cover for furbearing mammals - Reliability of water supplies for terrestrial animals - Access by predators to nesting sites - Influences water temp. oxygen levels, photosynthesis in water column
2. Annual extreme discharge conditions	magnitude duration	max. 1-day means min. 1-day means max. 3-day means min. 3-day means max. 7-day means min. 7-day means max. 30-day means min. 30-day means max. 90-day means min. 90-day means Number of zero-flow days 7-day min. flow divided by mean flow for year(baseflow)	<ul style="list-style-type: none"> - Balance of competitive, ruderal, and stress-tolerant organisms - Creation of sites for plant colonization - Structuring of aquatic ecosystems by abiotic vs. biotic factors - Structuring of river channel morphology and physical habitat conditions - Soil moisture stress in plants - Dehydration in animals - Anaerobic stress in plants - Volume of nutrient exchanges between rivers and floodplains - Duration of stressful conditions such as low oxygen and concentrated chemical in aquatic environments - Distribution of plant communities in lakes, ponds, floodplains - Duration of high flows for waste disposal, aeration of spawning beds in channel sediments
	timing	Julian date of each annual one-day max. discharge Julian date of each annual one-day min. discharge	<ul style="list-style-type: none"> - Compatibility with life cycles of organisms - Predictability/avoidability of stress for organisms - Access to special habitats during reproduction ot to avoid predation - Evolution of life history strategies, behavioral mechanisms
3. High/low Pulses	magnitude frequency duration	No. of high pulses each year No. of low pulses each year Mean duration of high pulses within each year Mean duration of low pulses within each year	<ul style="list-style-type: none"> - Frequency and magnitude of soil moisture stress for plants - Frequency and duration of anaerobic stress for plants - Availability of floodplain habitats for aquatic organisms - Nutrient and organic matter exchanges between river and floodplain - Soil mineral availability - Access for waterbirds to feeding, resting, reproduction sites - Influences bedload transport channel sediment textures, and duration of substrate disturbance (high pulse)
4. Hydrograph Changes	frequency rate of change	Means of all positive differences between consecutive daily values Means of all negative differences between consecutive daily values No. of flow reversals	<ul style="list-style-type: none"> - Drought stress on plans(falling levels) - Entrapment of organisms on islands, floodplains(rising levels) - Desiccation tress on low-mobility streamedge(varial zone) organisms

이라 볼 수 있다. 또한 경제와 산업발전이 주된 관심사였던 과거 우리나라의 하천관리에 있어 하천의 정상적인 기능과 상태가 곧 인간의 물이용에 지장을 주지 않는 범위와 크게 다르지 않았으며, 이로 인해 취수원보호 및 하천구조물 보

호 등의 요소가 포함되어 있는 것이 다른 점이다.

환경유량에 대한 정의는 Table 1과 같으나, 환경유량 분야를 선도하는 연구자와 연구기관 들의 통일된 정의가 부족하다.

이는 유량변동이 초래하는 현안, 연구와 실무에서 가지고 있는 서로 다른 배경에 의한 것이다(Moore, 2004). 그러나 이들 정의에서 환경유량은 최소유량의 개념보다 확대되어 전체 유량의 역할과 고려하고 있는 대상이 전체 생태시스템에 있다는 것을 확인할 수 있다.

환경유량의 개념은 담수시스템의 생태건전성을 유지하고 이들에 의한 사회의 편익을 지속적으로 제공하는데 있다. 이를 위해서는 하천, 습지, 대수층 및 기타 물 시스템에 충분한 양의 물이 필요하다. 그러나 사회·경제 발전은 피할 수 없는 환경적 변화를 수반하기 때문에 하천, 습지, 하구를 자연 상태로 복원하는 것은 비현실적이며 바람직하지도 않다. 환경유량 설정의 목적은 하천시스템을 자연 상태로 복원하는 것이 아니라 수생 생태계에 필요한 수량을 추정하여 물이용과 배분의 의사결정에서 사회·경제 발전을 위한 필요수량과 함께 환경필요수량을 검토하는데 있다(Moore, 2004).

하천생태계는 하천유량과 깊은 관계가 있는 것으로 제시되고 있다. Richter et al.(1997, 1998)은 Table 2와 같이 수문변수들이 생태계에 영향을 주는 상황을 제시하였으며, 자연유량이 하천생태계를 구성하고 유지하는데 중요한 인자임을 보여주고 있다. Richter et al. (1997)은 하천생태계 건전성의 복원을 위해서는 수문학적 특성, 즉 자연유량의 복원이 필수적이라고 지적하였다. 따라서 생태계 보호를 위한 최소 유량조건을 고려하는 우리나라 하천유지유량보다 포괄적이며, 전체적인 관점에서 자연 상태의 유량과 생태계의 연계성 및 보전을 고려하고 있다. 또한, 물 관리자 관점에서는 이들 생태계 보전을 위한 유량을 어떻게 복원할 것인가에 대한 연구 과제를 주고 있다.

3. 우리나라 이수사업과 하천유량의 변화

사람이 중심이 된 하천수를 이용하는 이수사업은 가능한 많은 수량을 저장하여 안정적인 수량을 확보하는 것이 전통적인 사회적 가치였다. Arthington and Pusey (2003)가 언급한 바와 같이 20세기에 건설된 댐과 수자원 기반시설에 대한 사고방식은 자연을 제어할 수 있는 인간의 능력을 보여주는 발전의 상징물이었다. 과거, 댐의 건설과 하천의 제어는 경제·사회 발전의 토대로 인식되었다. 물관리의 주된 목적이 효율적 물이용에 있었으며, 하천 및 하천과 관계가 있는 구성요소인 홍수터, 습지, 지하수 대수층 혹은 바다로 흘러가는 물은 소중한 자원의 낭비로 인식되었다.

우리나라의 경우도 1990년대까지 위와 같은 사회적 가치에서 크게 벗어나지 않았다. 우리의 수자원 정책에 있어 홍수조절능력과 이수사업으로서의 능력을 가진 다목적댐, 농업용 저수지, 광역 상수도 구축 및 물공급은 가장 큰 성공으로 여겨졌으며, 실제로도 경제발전의 원동력으로 되었다. Fig. 1은 시대별로 건설된 댐과 저수지를 유효저수용량으로 나타낸 것으로 용량의 측면에서 1970년대는 저수지 용량이 급격히 늘어나는 최고조의 시기였다. Fig. 2는 다목적댐의

유입량과 방류량을 나타낸 것으로 이들 다목적 댐은 갈수 시 물공급 28억 m^3 , 연평균 30억 m^3 의 홍수조절능력을 통해 안정된 물공급 및 홍수방어, 댐 하류부 하천 수질개선에 크게 기여하였다.

그러나 댐에 의한 용수공급과 하천유량의 조절은 피할 수 없는 자연유량의 변동을 가져왔다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 자연 상태의 홍수의 크기는 경감되고, 갈수기간의 하천 유량은 증가되었다. 우리의 전통적인 이수와 치수관리는 성공적이었다고 평가할 수 있지만 이들에 의한 자연유량의 변화는 하천 생태계 측면에서는 역기능으로 작용하는데 딜레마가 있다. 사실, 국내에서 자연유량과 하천생태계의 특성조사는 특히, 대하천과 중규모하천에서 거의 미미한 상황이다. 따라서 많은 이수사업에 의한 자연유량의 변화에 따른 직접적인 하천 생태계의 영향 평가는 매우 어려운 상황이다. 다만 생태수문학적 관점에서 수문변수들과 생태계의 영향의 연계성에 대한 연구결과들은 Table 2와 같은 연구에서 알 수 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 수문학적 관점에서 한강상류 유역에 건설된 댐들에 의한 팔당댐 하류의 자연유량의 수문학적 변동을 평가한다. 이들 분석은 자연유량에 의한 하천생태계의 직접적인 영향은 평가할 수 없지만, 향후 생태계 복원을 위한 하천유량의 복원에 수문학적 정보를 제공할 수 있을 것이다.

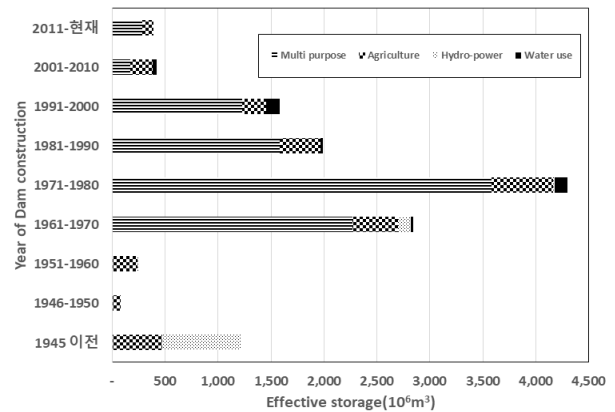


Fig. 1. Construction status of dams

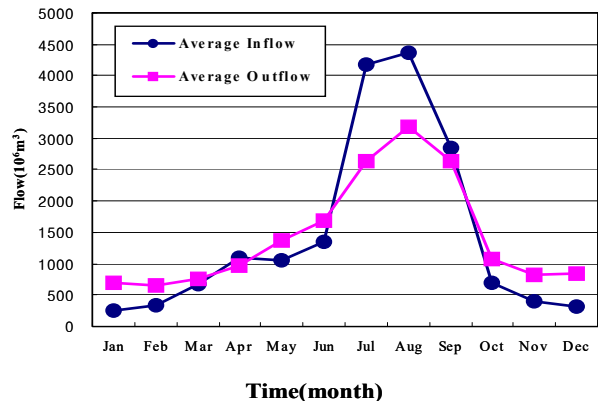


Fig. 2. Regulated flows of dams

4. 하천유황의 변동분석: 한강유역 사례

한강유역의 유황변동분석은 팔당댐 하류 지점의 고안 수위 표 지점을 기준으로 한강 상류의 댐건설 이전 1922-1940년(19년)의 일유출량과 팔당댐에서 하류로 방류한 1983년~2001년(19년)의 동일 자료수를 이용하였다. 자료는 수위-유량 관계식을 통해 작성하였다. Fig. 3은 댐 건설전후의 19년간의 일유량의 평균유출수문곡선을 도시한 것으로 뚜렷한 유황변동을 확인할 수 있다. 댐건설전의 평균최대유량은 7월의 4,053cms였으나 댐건설후는 9월의 2,801cms로 평균홍수량이 31% 감소하였으며, 평균최소갈수량은 댐건설전 1월에 54cms, 댐건설후 2월의 148cms로 174%가 증가하였다. 또한 Fig. 4의 유황곡선은 365일에서 홍수기의 71일은 유량이 감소되고 294일은 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 상류 댐에 의한 이수 및 치수기능 유지에 성공적 운영을 수행했다고 할 수 있다. 그러나 5-6월의 갈수량 증가, 7-8월의 홍수량 감소는 하구 염수유입, 유사퇴적 등에 영향을 주어 하구생태환경의 변화를 초래하였을 것이다. 향후 유황의 변화에 의한 구체적인 생태계의 영향을 평가하기 위한 연구가 필요할 것이다.

Fig. 3과 4의 평균유황분석과 함께 Table 2에 제시된 다양한 유황변동특성에 대한 분석을 Nature Conservancy(2007)에서 개발한 ‘Indicators of Hydrologic Alteration(IHA)’를 이용하여 수행하였다. 분석결과는 Table 3과 같으며 다음과 같은 수문변화율로 자연유황의 변화양상을 파악할 수 있다.

$$\text{수문변화율} = \frac{\text{관측빈도} - \text{기대빈도}}{\text{기대빈도}}$$

여기서 관측 빈도는 댐 건설 후 유량(방류량)이 댐건설 전 “평균유량±1표준편차”의 구간에 속해있는 횟수를 말하며, 기대 빈도는 댐 건설 전의 유량이 댐건설 전 “평균유량±1표준편차” 구간에 속해있는 횟수를 말한다. 0보다 큰 수문변화율은 과거 유황의 범위에 현재의 유황의 범위가 포함되는 것으로 현재 수문량의 특성이 나타나는 횟수가 과거 같은 수문량의 특성이 나타나는 범위를 초과하는 것이며, 이론상 현재 조절된 수문량이 과거의 범위에 한번도 포함되지 않는다면 -1의 값을 나타낸다.

Table 3에서와 같이 저유량 부문(1월-2월 평균유량, 1일, 3일, 7일, 30일, 90일 연최소유량, 연최소유량발생시기, 저유량

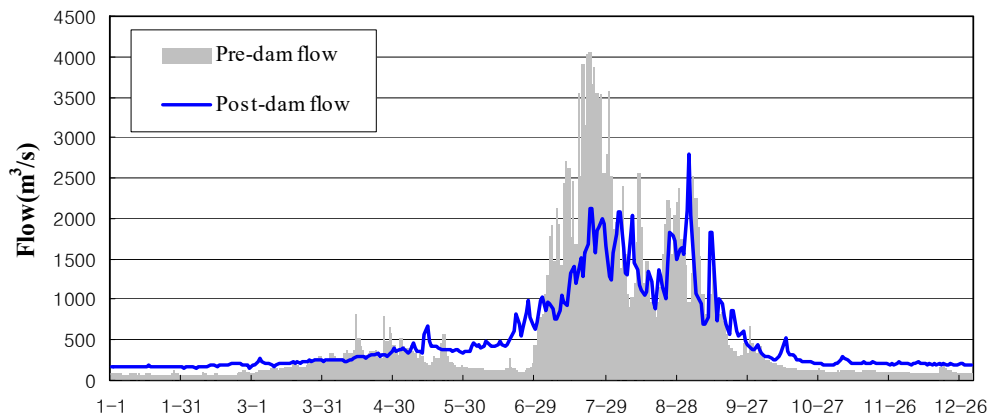


Fig. 3. Average daily hydrograph

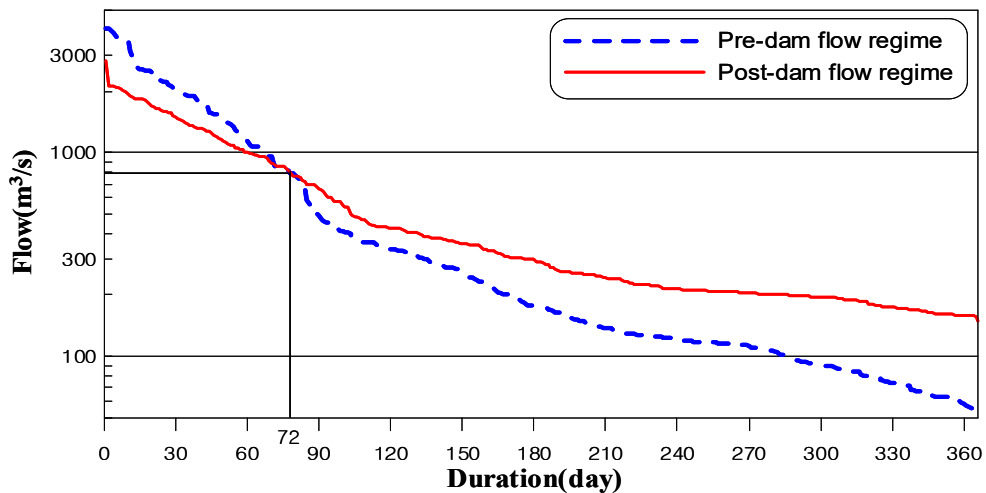


Fig. 4. Flow duration curve of average daily flows

Table 3. Results of the indicators of hydrologic analysis for Han river

	Pre-dam period: 1922-1940			Post-dam period: 1983-2001			RVA boundary		Hydrologic Alteration
	Means	Minimum	Maximum	Means	Minimum	Maximum	LOW (Mean-S.D)	HIGH (Mean+S.D)	
Parameter Group #1(cms)									
Mean flow of OCT.	186.9	29.7	492.9	282.3	124.9	868.4	62.1	311.6	0.0000
NOV.	118.3	26.0	205.1	217.1	124.0	618.7	68.1	168.4	-0.0909
DEC.	99.2	24.0	287.1	200.6	124.1	339.4	33.8	164.5	-0.3333
JAN.	69.3	17.2	157.3	167.9	122.4	349.8	25.5	113.1	-1.0000
FEB.	72.8	17.3	152.4	182.0	123.1	396.5	32.9	112.6	-1.0000
MAR	197.1	30.7	681.2	220.1	116.8	409.3	32.8	361.4	0.1250
APR.	374.0	42.2	962.6	288.0	109.6	638.1	108.6	639.5	0.3571
MAY	303.6	60.6	776.9	395.4	125.0	728.2	84.5	522.7	-0.1429
JUN.	202.8	25.2	759.6	546.1	138.2	2198.0	103.2	393.5	-0.1667
JUL.	2371.0	134.4	8124.0	1326.0	345.8	3015.0	347.2	4395.0	0.2000
AUG.	1464.0	64.3	5468.0	1462.0	474.6	4757.0	161.4	2766.0	0.1429
SEP.	853.2	47.2	2766.0	972.9	144.9	4033.0	185.7	1521.0	-0.0667
Parameter Group #2(cms)									
1-day minimum	40.7	13.1	67.5	131.1	100.0	183.0	24.2	57.2	-1.0000
3-day minimum	41.1	13.3	68.5	136.4	100.0	204.0	24.3	58.0	-1.0000
7-day minimum	42.9	13.5	73.7	140.3	100.0	229.0	24.6	61.2	-1.0000
30-day minimum	49.4	16.2	101.1	146.8	104.4	253.6	25.0	73.7	-1.0000
90-day minimum	69.7	18.2	145.5	156.8	115.7	239.1	31.4	108.0	-1.0000
1-day maximum	12880.0	1288.0	25310.0	10150.0	3004.0	28500.0	6231.0	19420.0	-0.4615
3-day maximum	9161.0	1016.0	19040.0	7900.0	2150.0	20640.0	4146.0	14180.0	-0.3077
7-day maximum	6397.0	817.8	13430.0	5213.0	1451.0	12040.0	2703.0	10090.0	-0.0769
30-day maximum	3198.0	343.9	8464.0	2404.0	773.1	5005.0	1002.0	5394.0	0.2143
90-day maximum	1641.0	230.3	3676.0	1370.0	528.3	3114.0	710.8	2571.0	0.2500
Number of zero days	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0000
Base flow	0.1062	0.0226	0.3557	0.2935	0.1432	0.5117	0.0340	0.1913	-0.7500
Parameter Group #3(day)									
Date of minimum	55.21	17.00	175.00	97.26	1.00	336.00	47.32	63.10	-1.0000
Date of maximum	214.00	134.00	249.00	224.20	184.00	256.00	198.50	229.50	-0.3636
Parameter Group #4(day)									
Low pulse count	3.947	1.000	13.000	0.000	0.000	0.000	1.000	7.153	-1.0000
Low pulse duration	23.610	2.000	63.000						
High pulse count	4.684	0.000	9.000	3.474	1.000	6.000	1.975	7.393	0.2000
High pulse duration	4.540	1.667	16.500	4.169	1.000	13.000	2.405	7.993	-0.1667
Low pulse level (Mean-S.D) = 69.01(cms)									
High pulse level (Mean+S.D) = 2116(cms)									
Parameter Group #5									
Rise rate(cms)	421.00	36.47	766.40	237.50	97.73	492.00	206.80	635.30	-0.1000
Fall rate(cms)	-195.60	-396.80	-17.59	-189.60	-382.00	-87.73	-307.30	-83.93	0.3333
Number of reversals	77.89	55.00	96.00	144.90	80.00	211.00	67.95	87.84	-0.8462

Pulses빈도)의 수문변화율은 모두 -1.0로 댐건설 후의 유량이 과거와 완전히 다르게 변화되었다. 이는 하류의 안정적인 용수공급에는 기여를 했지만 정성적인 측면으로 살펴보면 수생물 서식공간의 다양성 감소, 갈수기 유량 증대로 인한 주변 수위 상승으로 인한 토양수분의 증가, DO 및 수온 등 수질 항목의 변화 초래를 예측할 수 있다. 홍수가 발생하는 규모 및 횟수의 감소는 하상 퇴적토에 영향을 미치며 갈수빈도의 감소는 정체성 어종에 유리하게 작용하는 등 생태계에 다양한 영향을 줄 수 있다. 특히 2-3월에 발생하였던 갈수기간은 3-4월로 변화되었다. Fig. 5와 Fig. 6은 지속기간별 최소유량을 나타내고 있으며, Fig. 7 및 Fig. 8은 지속기간별 최대유량을 나타내는 것으로 고유량 상태의 특징치는 상대적으로 저유량보다 큰 변화율을 나타내지 않는다.

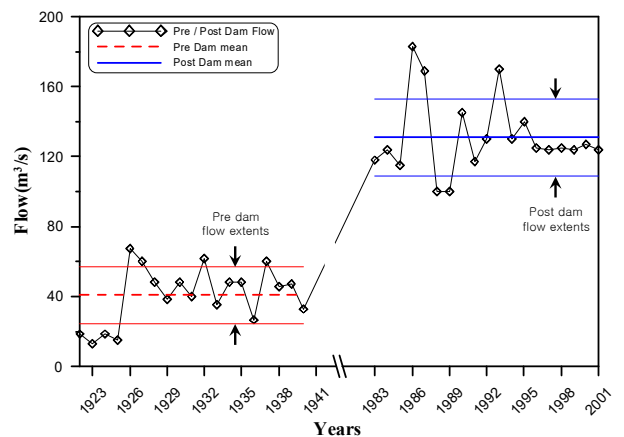


Fig. 5. Change of 1-day minimum flow

이는 상류 댐과 팔당댐사이 유역에서의 호우에 의한 유출량은 팔당댐에 저류되지 못하고 바로 방류되기 때문이라고 판단된다. 그러나 다목적댐 상류의 홍수량은 상당량이 조절되기 때문에 1일, 30일 최대유량은 댐건설 전보다 상당히 감소되었다. 이는 하구의 유사거동에 영향을 주었을 것이다. 또한, 댐 건설 후의 유량의 반전빈도는 상당히 크게 나타났다. 그래프에서 평균의 위와 아래에 표시된 수평선은 각각 댐 건설 전·후의 평균유량±표준편차를 의미한다.

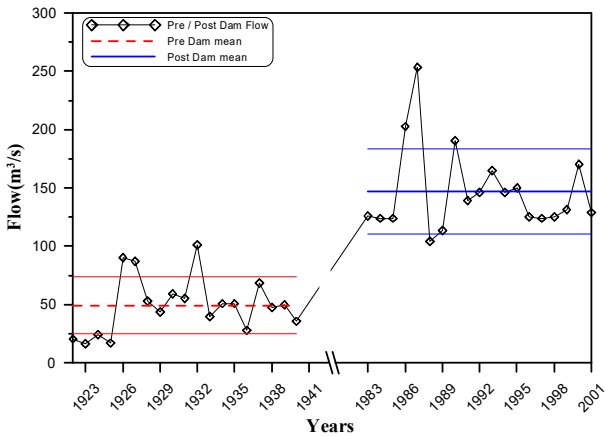


Fig. 6. Change of 30-day minimum flow

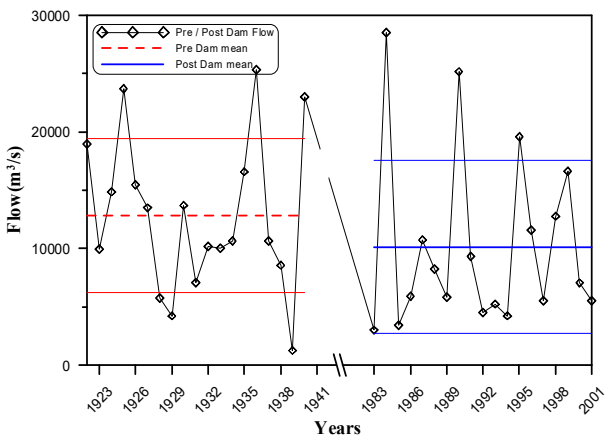


Fig. 7. Change of 1-day maximum flow

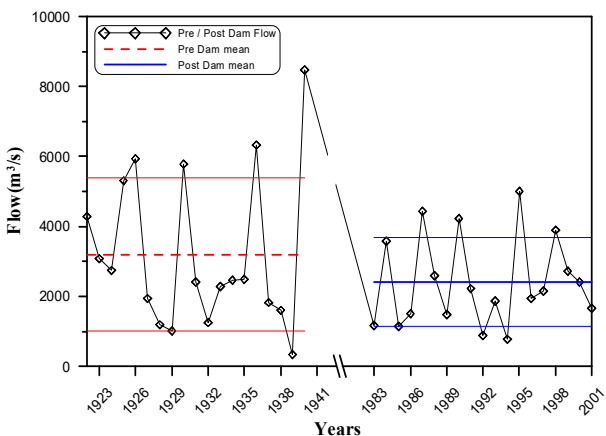


Fig. 8. Change of 30-day maximum flow

이상과 같은 분석결과는 하천 생태계의 건전성을 확보하기 위해서는 갈수기의 유량을 보다 경감시키고 홍수기 유량의 증가를 위한 하천수량관리와 댐 운영의 변화의 필요성을 제시하고 있다. 그러나 이를 위해서는 이들 유황 특성치들의 변화와 하천생태계의 연관성에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

5. 결론

Poff et al.(1997)에 의하면 하천에 흐르는 갈수량에서 홍수량 범위의 자연유황은 하도 및 하도와 홍수터에서 물과 유사를 이송을 통하여 하천의 자연적인 물리적 과정을 형성함으로써 하천생태계를 조직화하고 범위를 설정한다고 하였다. 따라서 하천의 건강한 생태계 보전 및 하천환경 유지의 핵심은 최소유량 개념의 하천유지유량 공급과 관리를 벗어나 유량의 전체적인 변동성을 유지토록 하는 것임을 알 수 있다.

한강유역의 댐건설 전·후의 자연유황 변동성 분석결과 특히 저수량 부문에서는 완전히 다른 수문특성을 보여준다. 대표적으로 갈수기 평균 유량이 3배 이상 증가하였으며, 홍수기 유량은 줄어드는 현상이 나타난다. 이와 같은 변화가 생태계에 미치는 영향에 대한 구체적 조사, 연구가 필요하며, 이에 따라 하천유량관리의 새로운 방향을 모색할 수 있을 것이다. 또한 가용한 범위에서 댐 및 수자원 시설물의 운영은 홍수기의 패턴을 유지할 수 있도록 하는 것이 생태계의 건장성에 도움을 줄 수 있다.

우리나라의 하천복원은 치수사업에 의해 훼손된 하천들이 하천복원의 대상이 되어 왔고, 이들 연구는 하천수리, 생태, 조경 전문가 등의 다학제간 연구에 의해서 주로 수행되고 있다. 그러나 Poff et al(1997)이 제시한 하천의 보전과 복원을 위한 패러다임으로써 하천생태계에 대한 자연유황의 역할이 밝혀지면서 생태수문학, 또는 하천수량관리 전문가의 역할도 커지고 있다. 하천 생태계 건전성 확보를 위한 하천복원은 유황의 특성과 생태계의 연관성 연구가 필수적이다. 우리나라의 대하천은 물론 중소하천의 자연유황은 농업용저수지의 건설과 하천수 취수량의 증가로 상당히 변화되었다. 그러나 이들에 대한 연구는 미진한 실정으로 생태계를 고려한 하천복원을 위해서는 생태수문학적 전문분야의 발전이 필요하다.

사 사

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 83065).

References

Arthington, A., Pusey, B. (2003). "Flow restoration and protection in Australian rivers." *River Research and Applications*, 19. pp. 377-395. [DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.745>]

- Choi, S.W., Yoon, B.M., Woo, H.S., Jo, K.H. (2004). "Effect of Flow-Regime Change due to Damming on the River Morphology and Vegetation Cover in the Downstream River Reach: A case of Hapchon Dam on the Hwang River." *J. of Korea Water Resources Association*. 37(1). pp. 55-66. [Korean Literature] [DOI: [10.3741/JK WRA.2004.37.1.055](https://doi.org/10.3741/JK WRA.2004.37.1.055)]
- Lee, J.W., Kim, H.S., Woo, H.S. (1993). "An Analysis of the Effect of Damming on Flow Duration Characteristics of Five Major Rivers in Korea." *J. of the Korean Society of Civil Engineers*. 13(3). pp. 79-91. [Korean Literature]
- Moore, M. (2004). "Perception and interpretations of environmental flows and implications for future water resource management - A survey study." Master thesis. Linköping University. Sweden.
- Petts, G. E. (1996). "Water allocation to protect river ecosystems." *Regulated Rivers: Research & Management*. Vol. 12. pp. 353-365. [DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199607\)12:4/5<353::AID-RRR425>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199607)12:4/5<353::AID-RRR425>3.0.CO;2-6)]
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. and Stromberg, J.C. (1997). "The natural flow regime - a paradigm for river conservation and restoration." *Bioscience*. 47. pp. 769-784.
- Richter, B.D., Baumgartner J.V., Braun, D.P., Powell J. (1998). "A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network." *Regulated Rivers: Research & Management*. Vol. 12. pp. 329-340.
- Richter, B.D., Baumgartner J.V., Wigington, R., Braun, D.P. (1997). "How much water does a river need?" *Freshwater Biology*. No. 37. pp. 231-249. [DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>]
- The Nature Conservancy. (2009). "Indicators of Hydrologic Alteration." The Nature Conservancy.
- Woo, H.S., Yu, D.Y., Park, J.H. (2001). "Evolution and prospect of river improvement works in Korea." *KSCE 2001 Convention Conference 2001*. [Korean Literature]