



## Flow regime analysis method by using discharge Gini coefficient

Park, Tae Sun<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Senior Researcher, Department of National Territorial Environment & Resources Research, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong, Korea

Paper number: 21-056

Received: 6 July 2021; Revised: 5 October 2021; Accepted: 20 October 2021

### Abstract

In this study, a new analysis method by using a “Discharge Gini Coefficient” is presented to determine the degree of inequality in daily discharge throughout the year. The Discharge Gini Coefficient can be calculated using the area relationship with the cumulative percentage of the daily mode discharge in the ascending order according to the cumulative percentage of the date of occurrence of the daily discharge throughout the year. The Discharge Gini Coefficient is presented as a value between 0 and 1, and the degree of inequality can be divided into 5 levels. The Discharge Gini Coefficient can be used to estimate the discharge stability of the downstream point relative to the upstream point. In addition, it is possible to quantify the influence of each reference discharge on the total inequality. The applicability of the Discharge Gini Coefficient was reviewed using long-term daily discharge data at eight points upstream and downstream of the four major rivers in Korea. The Discharge Gini Coefficient can also be used to analyze the discharge control effect in the downstream by the upstream dam.

**Keywords:** Coefficient of river regime, Reference discharges for flow regime analysis, Gini coefficient, Discharge gini coefficient

## 유량 지니계수를 이용한 유황분석방안

박태선<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>국토연구원 국토환경·자원연구본부 선임연구위원

### 요 지

본 연구에서는 연중 일유량의 불균등 정도를 파악하기 위해 “유량 지니계수”라는 새로운 개념의 분석방법을 제시한다. 유량 지니계수는 오름차순한 연중 일유량 발생일자의 누계백분율과 일최빈유량의 오름차순 누계백분율과의 면적관계를 이용하여 산정한다. 유량 지니계수는 0~1 사이의 값으로 표현되며, 불균등의 정도는 5단계로 구분할 수 있다. 유량 지니계수를 이용하면 상류 지점에 대한 하류 지점의 유량 안정도를 산정할 수 있다. 또한, 유황분석 기준유량별로 불균등에 미치는 영향의 정도를 수치적으로 파악할 수 있다. 4대강 본류 상·하류 8개 지점의 장기간 일유량 자료를 이용하여 유량 지니계수의 적용성을 검토하였다. 유량지니계수는 상류 댐에 의한 하류에서의 유량조절 효과를 분석하는 데에도 활용될 수 있을 것이다.

**핵심용어:** 하상계수, 유황분석 기준유량, 지니계수, 유량 지니계수

## 1. 서 론

하천에서 이수, 치수, 하천환경 기능을 원활하게 수행하기 위해서는 하천유량을 연중 안정적으로 관리해야 한다. 특히, 한국과 같이 홍수량이나 갈수량의 차이가 큰 경우에는 하천유

량의 안정적 관리가 더욱 중요하다. 연중 일유량을 안정적으로 관리하기 위해서는 장기간에 걸친 일유량의 평균적 변화를 파악할 필요가 있다. 하천 임의지점에서 일유량의 변화를 파악하는 방법에는 여러 가지가 있으나 연중 지속일수 1일에 해당하는 일최대유량을 지속일수 365일에 해당하는 일최소유량으로 나눈 값으로 정의되는 하상계수(河狀係數)가 주로 이용되고 있다. 하상계수는 산정이 용이하고, 직관적 이해가 빨

\*Corresponding Author. Tel: +82-44-960-0395  
E-mail: tspark@krihs.re.kr (T. S. Park)

라 연중 일유량의 불균등 정도를 파악하는 기초적인 지표로 이용되고 있다. 그러나 이러한 활용성에도 불구하고, 하상계수는 다음과 같은 문제점들이 있다.

첫째, 일최대유량과 영(0)유량을 포함하는 일최소유량이라는 극단값들에 의해 결정되기 때문에 계수값이 민감하게 변하여 연중 일유량의 평균적인 변화특성을 적절히 나타내기 어렵다. 둘째, 하상계수의 크기에 대한 정량적인 판단기준이 없기 때문에 어느 정도의 하상계수 값이면 하천유량의 변동이 어떤 상태인지를 파악하기 어렵다. 셋째, 연중 일유량의 상태 판단 기준으로 이용되고 있는 유황분석 기준유량(갈수유량, 저수유량, 평수유량, 풍수유량, 홍수유량)별로 유량변동의 정도를 산정할 수 없기 때문에 불균등의 원인이 되는 유량구간을 파악하기 어렵다.

경제학 분야에서는 산정방법이 비교적 간단하고, 그 결과를 값으로 표현할 수 있는 지니(Gini)계수를 이용하여 구성원들 간의 소득 불균등 정도를 나타내고, 지니계수값에 따른 소득 불균등의 정도를 정량적 기준에 의해 판단하고 있다. 지니계수는 구성원들 간의 소득 불균등 판단이라는 본래의 목적 외에도 분석대상에 따라 하수량 또는 COD배출량의 불균등과 같은 환경문제를 다루면 환경 지니계수, 지목별 토지이용의 불균등과 같은 토지문제를 다루면 토지 지니계수 등으로 불리며, 여러 분야에서 이용되고 있다.

수자원 분야에서도 지역 간 물사용량의 불균등 정도 분석, 가뭄 시의 형평성 있는 지역별 물배분량 결정, 지역별 하수방류 허용량 결정 등에 이용되고 있다. Cullis and Barbara van Koppen (2007)은 지니계수를 이용하여 남아프리카 Olifants강 유역 내 물이용자들 간의 물사용량에 따른 직접고용 편익의 불균등 정도를 분석하였다. Sun *et al.* (2010)은 환경 지니계수를 이용하여 중국 Tianjin 지역에서의 구역별 하수 방류허용량을 분석하였다. Wang *et al.* (2011)은 지니계수를 이용하여 황하강 유역의 상류·중류·하류에서의 생활용수 이용구조 변화를 고찰하였으며, 생활용수 이용에 대한 지니계수는 시간에 따라 변화한다고 주장하였다. Masaki *et al.* (2014)은 지니계수와 로렌츠(Lorenz) 비대칭 계수를 이용하여 4개 기후변화 시나리오 하에서 전 지구 차원에서 하천유량의 계절적 변화특성을 분석하였다. Xie *et al.* (2018)은 지니계수를 이용하여 중국 내에서 물부족이 심각한 지역의 하나인 Ningxia Hui 자치지역 내 5개 지역을 대상으로 물배분과 지역별 인구, GDP, 생산 편익과의 관계를 고찰하여 지니계수가 수자원의 균등한 배분을 판단하는 데 매우 유용하고 효과적인 수단이라고 주장하였다. Dai *et al.* (2018)은 지니계수를 이용하여 중국 Dianchi 호수 유역을 대상으로 가뭄조건에서 물이용자들 간의 물배분

형평성과 물공급 편익과의 관계를 분석하였다. Babuna *et al.* (2020)은 지니계수와 Moran지수를 이용하여 중국 Yangtze 강 삼각주 경제구역 내 35개 도시 간의 물이용 불균등 정도를 분석하였다.

본 연구에서는 기존 하상계수의 문제점들을 개선하기 위해 지니계수의 개념을 하천유량에 적용하여 연중 일유량의 불균등 정도를 분석한다. 지니계수의 정의를 그대로 이용하는 것이 아니고, 하천 내 지점별 연중 일유량의 불균등 정도를 파악하는데 지니계수와 유사한 개념을 적용하는 것이므로 “유량 지니계수”라고 명명하고자 한다. 유량 지니계수를 이용하면 하상계수의 문제점들을 다음과 같이 개선할 수 있다. 첫째, 연중 일유량 자료를 모두 이용하기 때문에 극단값 사용에 따라 계수값이 민감하게 변하는 문제를 해소할 수 있다. 둘째, 정량적 판단기준을 이용하여 하천유량의 불균등 정도를 판단할 수 있다. 셋째, 유황분석 기준유량별로 불균등의 정도를 산정할 수 있기 때문에 어느 기준유량 구간에서 불균등이 가장 심한지를 파악할 수 있다. 넷째, 연중 일유량의 불균등 정도를 값과 그래프로 나타낼 수 있기 때문에 직관적 이해도 뿐만 아니라 시각적 이해도도 높일 수 있다.

## 2. 이론 고찰 및 분석방법

### 2.1 유황분석 기준유량의 의미 고찰

한국에서는 유황분석 기준유량으로 미국이나 유럽에서 이용하는 Weibull 공식에 따른 초과확률의 백분율에 의한 방법보다는 특정 지속일수에 의한 방법을 사용한다. 이는 개념을 쉽게 이해할 수 있고, 수년(water year)의 주기성도 반영할 수 있기 때문이다(Lee *et al.*, 1993). 유황분석 기준유량은 연중 지속일수에 따라 갈수유량(355일,  $Q_{355}$ ), 저수유량(275일,  $Q_{275}$ ), 평수유량(185일,  $Q_{185}$ ), 풍수유량(95일,  $Q_{95}$ ), 홍수유량(10일,  $Q_{10}$ )으로 구분된다. 홍수유량의 지속일수를 1일로 보아  $Q_1$ 을 홍수유량으로 규정하는 경우도 있으나 본 연구에서는 지속일수 355일인 갈수유량과 대비되는 유량으로서의 홍수유량에 대한 정의가 필요하다는 점에서 지속일수 10일에 해당하는 유량을 홍수유량( $Q_{10}$ )으로 정의하였다.

또한, 유황분석 기준유량들의 지속일수가 초과확률에 의한 방법과 지속일수에 의한 방법이 큰 차이가 없다는 점에서 하천유량 관리상의 중요성에 의해 결정된 것이 아니라는 것을 알 수 있다. 즉, Table 1에서 보는 바와 같이 저수유량, 평수유량, 풍수유량은 하천유량 관리상의 의미라기보다는 사분위수(Quartile, 四分位數)라는 통계학적 개념에 근거한 것이고, 갈수유량과 홍수유량은 통계적 이상치 개념을 적용하여 정규

**Table 1.** Statistical meaning of reference discharges in flow regime analysis

Item	Drought ( $Q_{355}$ )	Low ( $Q_{275}$ )	Normal ( $Q_{185}$ )	Plentiful ( $Q_{95}$ )	Flood ( $Q_{10}$ )
Duration	355 day	275 day	185 day	95 day	10 day
Applied Ratio (Meaning)	97.5% (Lower Outlier)	75.0% (3 Quartile)	50.0% (2 Quartile)	25.0% (1 Quartile)	2.5% (Upper Outlier)
Converted Days	355.875 day	273.750 day	182.500 day	91.250 day	9.125 day
Excess Probability	97.0%	75.1%	50.5%	26.0%	2.7%

**Table 2.** Calculation procedure of the coefficient of river regime

Item	Procedure
Step 1	◦ Align the daily discharges for each year by descending order (exclude February 29)
Step 2	◦ Calculate the arithmetic mean of the daily discharges by same ranking
Step 3	◦ Select the maximum and minimum discharge
Step 4	◦ Calculate the Coefficient of River Regime = maximum discharge / minimum discharge

분포 표준편차의 3배( $3\sigma$ ) 이상인 각각 97.5% 및 2.5% 값을 적용하였다는 것을 알 수 있다.

### 2.2 하상계수

하상계수는 Eq. (1)과 같이 일 최대유량에 대한 일 최소유량의 비로 정의된다.

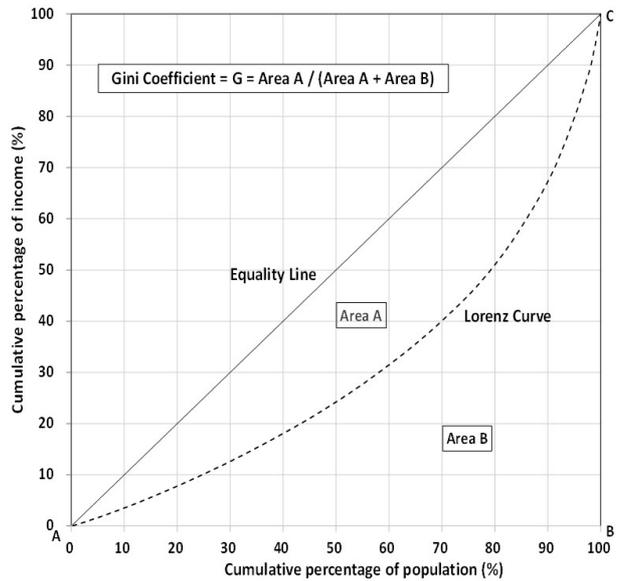
$$\text{하상계수} = Q_1 / Q_{365} \quad (1)$$

여기서,  $Q_1$ 은 분석기간 동안의 매년의 일 최대유량의 산술평균값이고,  $Q_{365}$ 는 분석기간 동안의 매년의 일 최소유량의 산술평균값이다.

하상계수는 산정이 용이하고, 직관적 이해가 빠르며, 현재 이용되고 있기 때문에 인지도가 높다. 반면, 극단값 이용에 따른 계수값 변동이 심하고, 계수값의 적정성을 판단하기 위한 정량적 판단기준이 없으며, 불균등의 원인이 되는 유량구간을 파악하기 곤란하다. 하상계수의 산정과정은 Table 2와 같다.

### 2.3 로렌츠 곡선과 지니계수

로렌츠 곡선이란 1905년 미국의 통계학자인 Lorenz가 소득의 불균등 정도를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 소득순으로 오름차순 한 후, 가로축은 소득별 인구의 누계백분율(%), 세로축은 오름차순 한 소득의 누계백분율(%)로 하여 그래프로 나타낸 곡선이다(Lorenz, 1905). 모든 사람의 소득이 같다면 인구가 누계되어도 소득 누계액이 일정할 것이므로 로렌츠 곡선은 Fig. 1의 AC선과 같은 45° 대각선(완전균등선)이 된다. 반면, 소득이 불균등하다면 처음에는 소득이 적은 사람들의 누계액이 더해져 그래프의 기울기가 완만하다가 뒤로 갈수록



**Fig. 1.** Conceptual diagram of the Lorenz curve and Gini coefficient

소득이 많은 사람들의 누계액이 더해져 아래로 볼록한 곡선이 되고, 한 사람이 모든 소득을 다 가지고 있는 경우에는 ABC선과 같은 모양이 된다. 따라서 로렌츠 곡선이 AC선에 가까워질수록 분배상태가 균등하고, ABC선에 가까워질수록 불균등 정도가 커진다고 할 수 있다. 로렌츠 곡선은 어느 집단의 소득 분배 상태를 그래프로 나타낼 수는 있으나 그 정도를 정량적으로 나타낼 수는 없다.

소득의 분배상태를 정량적으로 나타내기 위해서는 지니계수( $G$ )를 이용해야 한다. 지니계수란 1912년 이탈리아 통계학자인 Gini가 Eq. (2)와 같이 Fig. 1의 대각선과 로렌츠 곡선 사이의 면적을 대각선 아래 삼각형의 전체 면적으로 나눈 값이다 (Gini, 1912).

**Table 3.** Calculation procedure of the Gini coefficient

Item	Procedure
Step 1	◦ Align the individual incomes in target group by ascending order from the lowest to the highest
Step 2	◦ Accumulate the individual incomes by ascending order
Step 3	◦ Draw a Lorentz curve - x axis : cumulative percentage of population (%) - y axis : cumulative percentage of incomes (%)
Step 4	◦ Draw an equality line (45°) - connecting the origin and the intersection of the cumulative percentage of population and the cumulative percentage of income
Step 5	◦ Calculate area A & area B - A : area between equality line and the Lorenz curve - A+B : total area of triangle under equality line
Step 6	◦ Calculate Gini Coefficient (G) - $G = \text{Area A} / (\text{Area A} + \text{Area B})$

**Table 4.** Evaluation criteria of Gini coefficient

Gini Coefficient	0.0~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~1.0
Equality degree	Absolutely equal	Very equal	Relatively equal	Relatively unequal	Highly unequal

$$G = \text{면적 } A / (\text{면적 } A + \text{면적 } B) \quad (2)$$

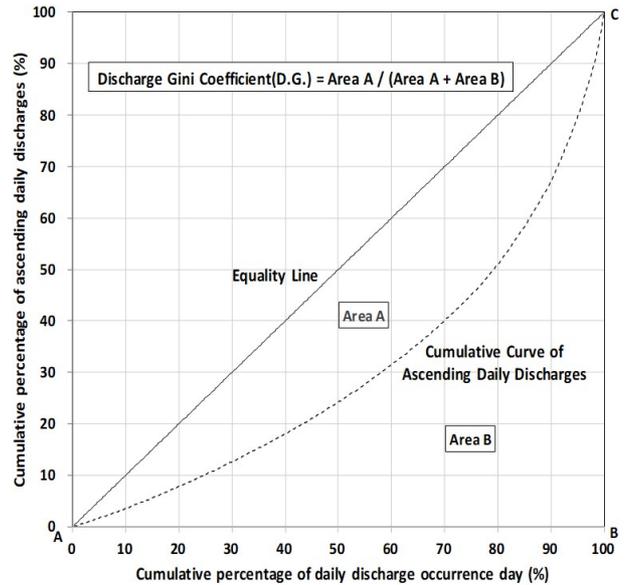
소득분배가 완전히 균등하다면 대각선과 로렌츠 곡선 사이의 면적이 0이 되어 지니계수는 0이 되고, 소득분배가 완전히 불균등하다면 대각선과 로렌츠 곡선 사이의 면적이 대각선 아래 삼각형 ABC의 면적과 같아지므로 지니계수는 1이 된다. 이처럼 지니계수는 0에서 1 사이의 값으로 표현된다.

지니계수는 변수를 이용하지 않기 때문에 작업이 용이하고, 모집단의 크기에 영향을 받지 않는다. 반면, 소득분포가 다른 집단이라도 동일한 계수값을 나타낼 수 있고, 인구의 구조적 변화를 고려하지 않으며, 비교대상 집단 간의 상대적인 값을 제시한다. 지니계수의 산정과정은 Table 3과 같다.

지니계수값의 적정성에 대한 명확한 판단기준은 없으나 지역의 물 균등 배분에 지니계수를 이용한 Xie *et al.* (2018)이나 토지 지니계수를 이용하여 토지이용의 적정성을 분석한 Zheng *et al.* (2013) 등의 연구에서는 Table 4와 같은 판단기준을 적용하였으며, 본 연구에서도 동일한 판단기준을 적용하여 연중 일유량의 불균등 정도를 판단한다.

**2.4 유량 지니계수**

본 연구에서 제안하는 유량 지니계수(D.G.)란 하천 내 임의 지점에서 연중 일유량의 불균등 정도를 나타내기 위한 계수이다. 유량 지니계수는 Eq. (3) 및 Fig. 2와 같이 가로축은 오름차순 유량의 발생일자 누계백분율(%), 세로축은 연중 발생유량의 오름차순 누계백분율(%)로 하여 나타낸 일유량의 누계



**Fig. 2.** Conceptual diagram of the discharge Gini coefficient

곡선과 대각선 사이의 면적을 대각선 아래의 전체 면적인 삼각형 ABC의 면적으로 나눈 값이다.

$$D.G. = \text{면적 } A / (\text{면적 } A + \text{면적 } B) \quad (3)$$

유량 지니계수의 장점은 첫째, 분석기간 동안의 모든 일유량 자료를 이용하기 때문에 일최대유량이나 영유량을 포함하는 일최소유량과 같은 극단값들의 영향이 작아져 연중 일유량의

**Table 5.** Coefficient of river regime at dam points

Item	Soyanggang	Andong	Yong dam	Seomjingang
Period of data	'88~'17(30yrs)	'88~'17(30yrs)	'01~'17(17yrs)	'88~'17(30yrs)
Max. daily discharge (m <sup>3</sup> /sec)	2,336.2	1,068.0	704.4	636.7
Min. daily discharge (m <sup>3</sup> /sec)	0.453	0.314	0.346	0.023
Coeff. of River Regime*	5,157	3,401	2,036	27,682
Zero discharge include years	15	14	11	22
Zero discharge days	117	148	157	573
Coeff. of River Regime**	507.0	269.6	155.8	193.5

Note : \* is the value obtained by dividing the average of daily maximum discharge for each year including zero discharge by the average of daily minimum discharge for each year, \*\* is the value obtained by dividing the average of the maximum discharge among the daily mode discharges for each year by the average daily minimum discharge among the daily mode discharges for each year.

전체적인 변화특성을 반영할 수 있다. 둘째, 값과 그래프로 표현되기 때문에 직관적 이해도뿐만 아니라 시각적 이해도도 높다.

셋째, Eq. (4)와 같이 정의되는 상류지점에 대한 하류지점의 유량 지니계수 상대오차를 이용하여 일유량의 안정화율을 산정하면 상류지점에 비해 하류지점의 유량이 상대적으로 어느 정도 안정되었는지를 수치적으로 파악할 수 있다.

$$\text{일유량의 안정화율(\%)} = \frac{(\text{상류지점의 유량 지니계수} - \text{하류지점의 유량 지니계수})}{\text{상류지점의 유량 지니계수}} \times 100(\%) \quad (4)$$

넷째, Table 4와 같은 판단기준을 이용하여 연중 일유량의 불균등 정도를 정량적으로 판단할 수 있다. 다섯째, 가로축이 일유량 발생일자의 오름차순 누계백분율이며 유황분석 기준유량의 지속일수와 부합하므로 유황분석 기준유량별로 불균등의 정도를 파악할 수 있다. 때문에 유황을 안정시키기 위해서는 어느 기준유량의 범위에 해당하는 유량을 조절해야 하는지를 알 수 있다. 여섯째, 일최빈유량을 이용함으로써 하상계수가 급격히 변하는 문제를 해소할 수 있다. Table 5에서 보는 바와 같이 자연상태에 가까운 댐 상류 4개 지점에서는 일최소유량이 영(0)에 가까워 하상계수가 수천에서 수만에 이르며, 영유량도 빈번하게 발생하는 것으로 나타났다. Park (2021)은 일유량의 대푯값으로 일최빈유량이 적정하며, 일최빈유량을 이용하면 일유량의 산술평균으로 인한 편차를 완화할 수 있다고 주장하였다. 본 연구에서도 매년의 일최빈유량을 이용하여 유량 지니계수를 산정한다.

유량 지니계수의 단점은 첫째, 매년의 일유량을 크기순으로 오름차순한 동일순위의 평균값이므로 연중 일유량의 시간적 변화특성을 고려할 수 없다. 둘째, 연중 일유량의 분포가 다른 지점들에서도 동일한 계수값이 나타날 수 있다.

**Table 6.** Calculation procedure of discharge Gini coefficient

Item	Procedure
Step 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Calculate the daily mode discharges</li> <li>- Align the daily discharges by same date</li> <li>- Select the max. and mini. discharges for each date</li> <li>- Divide into appropriate grades for each date</li> <li>- Calculate the frequency of discharges in each grade</li> <li>- Select the maximum value of the most frequent grade</li> </ul>
Step 2	◦ Align the daily mode discharges for each year by ascending order
Step 3	◦ Calculate the arithmetic mean of the daily mode discharges by same ranking
Step 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Calculate the cumulative percentages of daily discharges</li> <li>- Cumulative discharges / Total cumulative discharge</li> </ul>
Step 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Draw the cumulative curve of ascending daily discharges</li> <li>- x axis : cumulative percentage of occurrence days (%)</li> <li>- y axis : cumulative percentage of daily discharges (%)</li> </ul>
Step 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Calculate the area A &amp; Area B</li> <li>- A : area between the equality line and the cumulative curve of ascending daily discharges</li> <li>- A+B : total area of the triangle under the equality line</li> </ul>
Step 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Calculate the Discharge Gini Coefficient (D.G.)</li> <li>- D.G. = Area A / (Area A + Area B)</li> </ul>

유량 지니계수의 산정과정은 Table 6과 같고, 유량 지니계수의 판단기준은 Table 4와 같다.

### 3. 분석지점 및 이용자료

#### 3.1 분석지점

분석지점은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 한강은 소양강댐과 한강대교, 낙동강은 안동댐과 계내리, 금강은 용담댐과 금강교, 섬진강은 섬진강댐과 송정리 지점 등 4대강 본류 상·하류

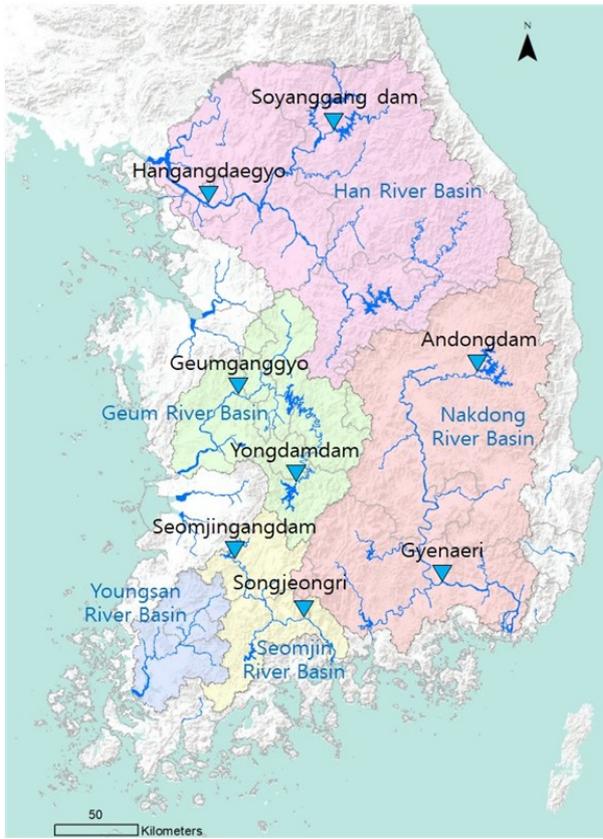


Fig. 3. Location map for each analysis point

8개 지점이다. 상류지점들은 다목적댐이 위치하고 있고, 댐 상류유역의 개발이 적어 비교적 자연상태에 가까운 지점들이다. 하류지점들은 유량이 풍부하고, 하천관리상 중요한 지점들이다.

### 3.2 이용자

“국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)”에서 제공하는 장기간의 관측 일유량을 이용하였다. 상류 4개 지점의 일유량은 댐수위와 방류량을 이용하여 역산한 일평균 유입량이다. 하류지점 중 섬진강 송정리 지점의 일유량은 수위-유량관계식을 이용하여 산정한 유량이고, 한강대교, 계내리, 금강교 지점의 일유량은 초음파 유속계로 자동측정한 유량이다. 또한, 하류지점은 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 영유량 및 결측일 포함년의 모든 일유량 자료를 제외하였다. 분석지점별 개요와 분석자료의 통계적 특성은 Table 7에 제시하였다.

## 4. 유량 지니계수 산정결과와 활용방안

### 4.1 지점별 유량지니계수 산정결과

Table 8에서 보는 바와 같이 유량 지니계수를 이용한 지점별 불균등 정도는 자연상태에 가까운 상류지점에서는 소양강 댐 0.661, 안동댐 0.627, 용담댐 0.616, 섬진강댐 0.627 등 4개

Table 7. Overview and statistical characteristics of analysis points

Name of Points	Address of Points	Period of Data	Years of Analysis	Number of Data	Daily Mean (m <sup>3</sup> /sec)	S. D. (m <sup>3</sup> /sec)	Coefficient of		
							Skewness	Kurtosis	
Up stream	Soyonggang Dam	Chuncheonsi Cheonjeonri	1988~2017	30yrs	10,950	69.7	228.1	11.3	193.5
	Andong Dam	Andongsi Seonggokdong	1988~2017	30yrs	10,950	31.0	96.9	12.4	261.2
	Yongdam Dam	Jinangun Samrakri	2001~2017	17yrs	6,205	22.9	71.2	10.4	166.9
	Seomjingang Dam	Imsilgun Youngsuri	1988~2017	30yrs	10,950	17.5	59.4	10.2	154.8
Down stream	Hangangdaegyo	Seoulsi Noryangjindong	1996~2019	15yrs	5,475	497.5	910.6	7.7	91.0
	Gyenaeri	Hamangun Gyenaeri	2002~2019	18yrs	6,570	409.7	817.0	6.5	59.9
	Geumganggyo	Gongjusi Geumseongdong	1997~2019	13yrs	4,745	134.2	222.0	6.0	59.3
	Songjeongri	Guryegun Songjeongri	1997~2019	21yrs	7,665	79.9	246.5	8.6	100.0

Note : Years of analysis are the period excluding the year including zero discharges and missing data

Table 8. Inequality degree of each point

Upstream Points	Soyonggang Dam	Andong Dam	Yongdam Dam	Seomjingang Dam
Discharge Gini Coeff.	0.661	0.627	0.616	0.627
Coeff. of River Regime	507.0	269.6	155.8	193.5
Downstream Points	Hangangdaegyo	Gyenaeri	Geumganggyo	Songjeongri
Discharge Gini Coeff.	0.395	0.454	0.319	0.589
Coeff. of River Regime	23.1	25.9	17.9	73.9

지점 모두 Table 4의 판단기준치인 0.5를 초과하는 “매우 불균등 상태”로 분석되었다. 반면, 하류지점에서는 한강대교는 0.395로 “다소 균등 상태”, 계내리는 0.454로 “다소 불균등 상태”, 금강교는 0.319로 “다소 균등 상태”, 섬진강 하류의 송정리는 0.589로 “매우 불균등 상태”로 분석되었다.

비교를 위해, 일최빈유량을 이용하여 산정한 하상계수는 소양강댐 507.0, 안동댐 269.6, 용담댐 155.8, 섬진강댐 193.5로 나타났다. 반면, 하류에 위치한 한강대교는 23.1, 계내리는 25.9, 금강교는 17.9, 송정리는 73.9로 상류 지점보다 유황이 크게 안정된 것으로 나타났다.

**4.2 상·하류 지점 간의 일유량 안정화 정도**

전술한 Eq. (4)의 관계를 이용하면 동일 하천 내 상·하류 지점의 유량 지니계수 차이로부터 상류지점에 비해 하류지점에서의 일유량이 상대적으로 어느 정도 안정화 또는 불안정화 되었는지를 수치적으로 알 수 있다. 일유량의 안정화율이 높을수록 상류에서의 유량조절이 잘 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

한강의 경우, 상류지점인 소양강댐 지점과 하류지점인 한강대교 지점의 유량 지니계수가 각각 0.661과 0.395이므로 두 지점 간의 유량 안정화율은 Eq. (5)와 같이 40.2%가 된다. 즉, 상류 지점인 소양강댐 지점에 비해 하류지점인 한강대교 지점에서의 일유량이 40.2% 안정화 되었다고 판단할 수 있다.

$$\text{소양강댐 지점과 한강대교 지점의 일유량 안정화율(\%)} = (0.661 - 0.395) / 0.661 \times 100(\%) = 40.2\% \quad (5)$$

Table 8의 산정결과를 이용하여 동일한 방법으로 하천별 상·하류 지점간의 일유량 안정화율을 산정해 보면, 낙동강의 안동댐 지점과 계내리 지점 간의 일유량 안정화율은 27.6%, 금강의 용담댐 지점과 금강교 지점 간의 일유량 안정화율은 48.2%, 섬진강의 섬진강댐 지점과 송정리 지점 간의 일유량 안정화율은 6.1%이다. 섬진강의 안정화율이 다른 지점들에 비해 낮은 것은 섬진강댐의 물이 상당 부분 동진강 유역으로 방류되어 하류에 미치는 유량조절의 효과가 작기 때문으로 사료된다.

Fig. 4에는 이해를 돕기 위해 한강을 사례로 상류인 소양강댐 지점과 하류인 한강대교 지점의 유량 지니계수와 일유량의 흐름차순 누계곡선을 비교하여 나타내었다.

Fig. 5에서 보듯이 상류인 소양강댐보다는 하류인 한강대교 지점에서 일유량의 변화가 평활화되어 있어 유량 지니계수 값이 상류 지점보다 작아졌음을 시각적으로도 알 수 있다.

**4.3 유황분석 기준유량별 불균등 정도**

유량 지니계수를 이용하면 유황분석 기준유량별로 연중 일

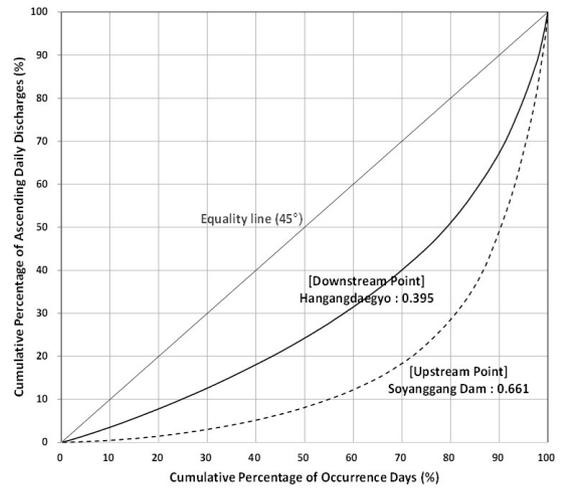


Fig. 4. Comparison of discharge Gini coefficient between upstream and downstream points at Han River

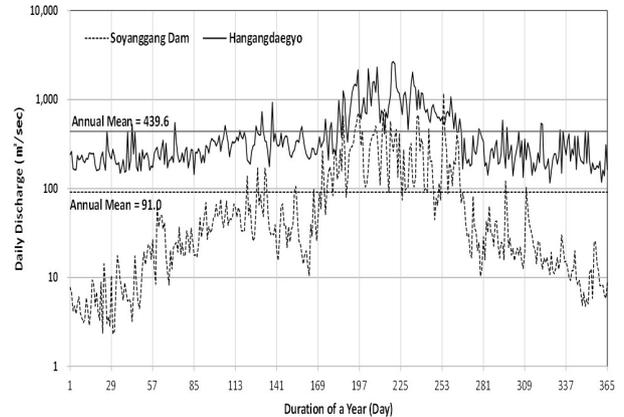


Fig. 5. Comparison of daily discharges between upstream and downstream points at Han River

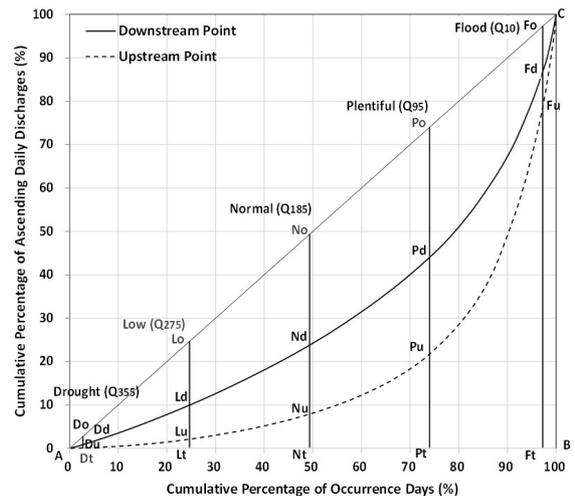


Fig. 6. Conceptual diagram of discharge Gini coefficient by reference discharges

유량의 불균등 정도를 산정할 수 있다. Fig. 6은 산정을 위한 개념도이며,  $D$ 는 갈수유량,  $L$ 은 저수유량,  $N$ 은 평수유량,  $P$ 는 풍수유량,  $F$ 는 홍수유량이고, 아랫첨자  $o$ 는 직선  $AC$ 로 정의 되는 완전균등선과의 교점,  $d$ 는 하류지점,  $u$ 는 상류지점,  $t$ 는 가로축과의 교점을 각각 의미한다.

유황분석 기준유량별 불균등 정도의 산정방법은 다음과 같다. 갈수유량의 불균등 정도는 Fig. 6에서  $ADuDo$ 의 면적을  $ADtDo$ 의 면적으로 나누어 구한다. 저수유량의 불균등 정도는  $DoDuLuLo$ 의 면적을  $DoDtLlLo$ 의 면적으로 나누어 구한다. 평수유량, 풍수유량, 홍수유량도 동일한 방법으로 순차적으로 산정한다. 하류지점의 기준유량별 지니계수도 상류지점

과 동일한 방법으로 산정한다.

Table 9에는 이러한 방법으로 산정한 8개 분석지점에 대한 유황분석 기준유량별 일평균유량, 기준유량 구간별 불균등의 정도와 그 구성비를 나타내었다. 한강의 경우, 상류의 소양강댐 지점과 하류의 한강대교 지점의 유량 지니계수는 각각 0.661과 0.395로서 그 차이는 0.266이다. 이러한 차이는 Table 10에서 보는 바와 같이, 평수유량에서 풍수유량 사이의 유량이 전체 불균등량의 36.2%인 0.096을 차지하여 유황 안정에 가장 크게 기여하였고, 풍수유량에서 홍수유량 사이의 유량이 전체 불균등량의 33.7%인 0.089, 저수유량에서 평수유량 사이의 유량이 22.1%인 0.059를 차지하였다. 반면, 갈수

Table 9. Overview of discharge Gini coefficient by reference discharges at each point

(Unit : m<sup>3</sup>/sec)

Item	Data		Soyanggang Dam			Andong Dam			Yongdam Dam			Seomjingang Dam		
	Number	%	Mean Discharge	Inequality Value	%	Mean Discharge	Inequality Value	%	Mean Discharge	Inequality Value	%	Mean Discharge	Inequality Value	%
Mini.-Drought	10	2.7	2.9	0.001	0.1	2.6	0.001	0.1	2.4	0.001	0.1	1.7	0.001	0.1
Drought~Low	80	21.9	8.4	0.057	8.6	5.3	0.055	8.7	3.7	0.053	8.5	3.2	0.055	8.7
Low~Normal	90	24.7	21.3	0.160	24.2	11.1	0.155	24.7	6.9	0.149	24.2	6.7	0.155	24.7
Normal~Plentiful	90	24.7	51.0	0.236	35.8	27.0	0.228	36.3	14.4	0.219	35.6	15.8	0.229	36.5
Plentiful~Flood	85	23.3	222.9	0.202	30.6	104.9	0.184	29.3	56.2	0.190	30.8	65.1	0.183	29.2
Flood~Max.	10	2.7	706.4	0.005	0.8	310.3	0.005	0.8	178.2	0.005	0.8	175.9	0.004	0.7
Sum or Mean	365	100.0	91.0	0.661	100.0	43.5	0.627	100.0	24.1	0.616	100.0	26.3	0.627	100.0

Item	Data		Hangangdaegyo			Gyenaeri			Geumganggyo			Songjeongri		
	Number	%	Mean Discharge	Inequality Value	%									
Mini.-Drought	10	2.7	136.8	0.001	0.1	90.0	0.001	0.1	50.2	0.000	0.2	14.6	0.001	0.1
Drought~Low	80	21.9	183.0	0.038	9.5	123.2	0.041	9.1	60.3	0.032	10.1	20.9	0.048	8.2
Low~Normal	90	24.7	246.1	0.101	25.5	158.9	0.115	25.4	81.4	0.085	26.6	27.8	0.138	23.5
Normal~Plentiful	90	24.7	360.4	0.140	35.5	272.8	0.166	36.5	108.3	0.111	34.9	45.7	0.215	36.5
Plentiful~Flood	85	23.3	808.6	0.113	28.6	733.3	0.128	28.2	203.0	0.088	27.6	224.2	0.183	31.0
Flood~Max.	10	2.7	2,113.2	0.003	0.7	1,697.6	0.003	0.6	468.7	0.002	0.7	611.7	0.004	0.7
Sum or Mean	365	100.0	439.6	0.395	100.0	353.2	0.454	100.0	121.5	0.319	100.0	92.1	0.589	100.0

Table 10. Inequality value of discharge Gini coefficient by reference discharges between upstream and downstream points

Item	Soyanggang Dam & Hangangdaegyo		Andong Dam & Gyenaeri		Yongdam Dam & Geumganggyo		Seomjingang Dam & Songjeongri	
	Gap of inequality	%	Gap of inequality	%	Gap of inequality	%	Gap of inequality	%
Mini.-Drought	0.00022	0.1	0.00016	0.1	0.00025	0.1	0.00007	0.2
Drought~Low	0.019	7.1	0.013	7.8	0.020	6.8	0.007	16.8
Low~Normal	0.059	22.1	0.040	23.1	0.064	21.6	0.017	42.6
Normal~Plentiful	0.096	36.2	0.062	35.8	0.108	36.3	0.015	37.9
Plentiful~Flood	0.089	33.7	0.055	32.1	0.102	34.2	0.001	1.9
Flood~Max.	0.002	0.8	0.002	1.2	0.003	1.0	0.000	0.6
Sum	0.266	100.0	0.172	100.0	0.297	100.0	0.039	100.0

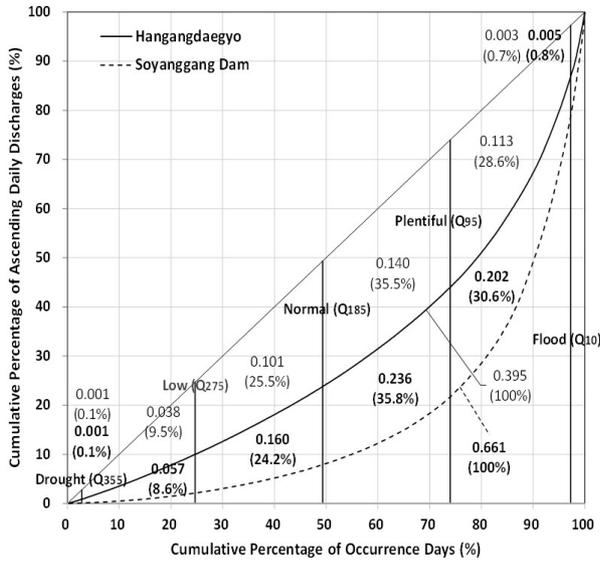


Fig. 7. Comparison of discharge Gini coefficient by reference discharges at Han River

유량 이하의 유량은 0.1%인 0.00022, 홍수유량 이상의 유량은 0.8%인 0.002를 차지하였다.

Fig. 7은 이해를 돕기 위해 Tables 9 and 10의 산정결과 중에서 서한강의 유황분석 기준유량별 불균등 값과 그 구성비를 그래프로 나타낸 것이다.

### 5. 결론

기존의 하상계수는 높은 인지도에도 불구하고, 연중 일최대유량이나 영유량을 포함하는 일최소유량과 같은 극단값들을 이용하기 때문에 계수값이 민감하게 변하고, 연중 일유량의 불균등 정도나 불균등의 원인이 되는 유량구간을 파악하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해소하기 위한 방안으로서 유량 지니계수라는 새로운 개념을 도입하고, 그 적용성을 검토하였다. 검토결과, 유량 지니계수를 이용하면 지점별로 연중 일유량의 불균등 정도를 값과 그래프로 나타낼 수 있고, 이를 정량적 기준에 의해 판단할 수 있다. 또한, 상·하류 지점 간의 일유량의 안정화 정도를 산정할 수 있고, 유황분석 기준유량별로 일유량의 불균등 정도를 산정할 수 있어 불균등의 원인이 되는 유량구간을 알 수 있다.

유량 지니계수는 다양한 모의를 통해 하류지점에서의 유황을 안정시키기 위한 상류 및 중간지점에서의 저류량, 방류량, 취수량과 같은 유출·입 조건을 결정하거나 상류댐의 유황 조절 효과분석 등에도 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2020년도 국토연구원의 연구과제(수시 20-04) 중 일부 내용을 수정·보완한 것임.

### References

Babuna, P., Yang, X., and Bian, D. (2020). “Water use inequality and efficiency assessments in the Yangtze River economic delta of China.” *Water*, Vol. 12, No. 6, 1709. doi: 10.3390/w12061709

Cullis, J., and Barbara van Koppen, B. (2007). *Applying the Gini coefficient to measure inequality of water use in the Olifants River water management area, South Africa*. IWMI Research Report 113, International Water Management Institute, Colombo.

Dai, C., Quin, X.S., Chen, Y., and Guo, H.C. (2018). “Dealing with equality and benefit for water allocation in a lake watershed: A Gini-coefficient based stochastic optimization approach.” *Journal of Hydrology*, Vol. 561, pp. 322-334. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.012.

Gini, C. (1912). *Variabilità e mutabilità; Contributo allo Studio delle distribuzioni e delle relazioni statistiche*. Bologna, Tipogr. di P. Cuppini, pp. 1-152. accessed 9 December 2021, <https://www.byterfly.eu/islandora/object/librib:680892#page/8/mod e/2up>.

Lee, J.W., Kim, H.S., and Woo, H.S. (1993). “Analysis of flow regime changes in the main rivers of the five major rivers due to dam construction.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 79-91.

Lorenz, M.O. (1905). “Methods of measuring the concentration of wealth.” *Publications of the American Statistical Association*, Vol. 9, No. 70, pp. 209-219. doi: 10.1080/15225437.1905.10503443.

Masaki, Y., Hanasaki, N., Takahashi, K., and Hijioka, Y. (2014). “Global-scale analysis on future changes in flow regimes using Gini and Lorenz asymmetry coefficients.” *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 5, pp. 4054-4078. doi: 10.1002/2013WR014266

Park, T.S. (2021). “Improved method of the conventional flow duration curve by using daily mode discharges.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 6, pp. 355-363.

Sun, T., Zhang, H., Wang, Y., Meng, X., and Wang, C. (2010). “The application of Environmental Gini Coefficient (EGC) in allocating wastewater discharge permit: The case study of watershed total mass control in Tianjin, China.” *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 54, No. 9 pp. 601-608. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.10.017

Wang, X.J., Zhang, J.Y., Shahid S., ElMahdi, A., He, R.M., Wang, X.G., and Ali, M. (2011). “Gini coefficient to assess equity in domestic water supply in the Yellow River.” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. Vol. 17, No. 1, pp.

65-75. doi:10.1007/s11027-011-9309-7

Xie, G., and Wang, S. (2018). "Analysis on Gini coefficient of scarce water resources considering both visible and virtual water in the Ningxia Hui autonomous region, China." *International Journal of Science*, Vol. 5, No. 7, pp. 330-336.

Zheng, X., Xia, T., Yang, X., Yuan, T., and Hu, Y. (2013). "The land Gini coefficient and Its application for land use structure analysis in China." *PLoS ONE* Vol. 8, No. 10, e76165. doi: 10.1371/journal.pone.0076165.