

Research Paper

A Study on River Representation for Water Impaired Analysis of Measurement Data at TPLMs

Beom Sik Nam¹ · Ha Sun Hwang² · Moo Hwan Cho^{1,†}

¹School of Chemical Engineering, Yeungnam University

²Water Pollution Cap System Division, National Institute of Environmental Research

(Received January 6, 2020; Revised March 18, 2020; Accepted March 31, 2020)

Objectives : This study assessed the applicability of the total pollutant load management (TPLM) data on the analysis of impaired waterbody and pollutant source characterization. To achieve the study objective, the TPLM data collected in the downstream of Yeongcheon-Dam within the Geumho A unit-basin, Nakdong River basin for 6 years (2013-2018) were used to analyze the accountability for precipitation conditions, seasons, and flow rates.

Methods : The study area is the downstream of Yeongcheon Dam within the Geumho A unit-basin, Nakdong River basin. The TPLM data used in this study were obtained from the two monitoring stations in the mainstream of Geumho River (i.e., Jahochon and Geumho A station) and the three tributary streams (i.e., Gochoncheon, Sillyeongcheon, and Bugancheon). Precipitation conditions were classified into rainy (>10 mm/day) and non-rainy days (≤10 mm/day) to assess the TPLM data accountability for the two precipitation conditions. Seasonal accountabilities of the TPLM data were assessed for spring (March-May), summer (June-August), autumn (September-November), and winter (December-February). The TPLM data accountability for stream flow rates was assessed using the standardized daily flow rates which were estimated by % of maximum flow rate. The daily flow rates were simulated using the Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF).

Results and Discussion : During the study period (2013-2018), TPLM data were collected 35-41 times throughout a year in the two Geumho River mainstream stations (i.e., Jahochon, and Geumho A), while the tributary streams (i.e., Gochoncheon, Sillyeongcheon, and Bugancheon) were monitored 36 times per year excluding every January, February, and December. The tributary streams shown the missing data months because those stations were monitored through the implementation assessment for total maximum daily load (TMDL) management. But, the mainstream data were continuously collected by the Water Environment Research Institute. The accountability assessment results shown that 28%, 25%, 28%, and 19% of TPLM data for the two mainstream stations represents spring, summer, autumn, and winter seasons. The three TPLM station data in the tributary streams could not account for winter season with the seasonal data ratios of 29% for spring, 32% for summer, 34% for autumn, and 4% for winter. Secondly, 37.9% and 23.1% of TPLM data for the two mainstream stations and the three tributary streams, respectively, were collected during rainy days. Comparing to 22% of rainy days throughout the study period, the two mainstream stations were monitored more frequently during rainy days than the tributary stations. Lastly, accountability for stream flow rates shown that the annual TPLM data cannot account for mainstream flow conditions. For the tributary stream flow rates, six years composite TPLM data could not represent the flow conditions. Therefore, the TPLM data need to be carefully reviewed before assessing impaired waterbody and pollutant source characterization.

Conclusions : TPLM data was widely used in TMDL implementation and research activities. Thus, detailed TPLM monitoring plans should be developed to improve accountability for various stream characteristics including precipitation, season, and flow rate, etc. In addition, further research is needed to represent wide ranges of flow rate which are hard to be predicted due to the large uncertainties induced by precipitation, precipitation intensity, precedent rain days, and other factors (e.g., dams, wastewater treatment plants, etc.).

Key Words : TPLM (Total Pollutant Load Management), TMDL (Total Maximum Daily Load), HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran), LDC (Load Duration Curve), Impaired Waterbody

† Corresponding author E-mail: mhcho@ynu.ac.kr Tel: 053-810-2517 Fax: 053-810-4631

연구논문

수체손상분석을 위한 총량 측정자료의 하천 대표성 분석에 관한 연구

남범식¹ · 황하선² · 조무환^{1,*}

¹영남대학교 화학공학부

²국립환경과학원 물환경연구부

목적: 본 연구는 총량 측정자료의 수체손상도 분석, 오염원 정밀 분석 등을 위한 기초자료로서의 활용성을 검증하기 위해 낙동강수계 금호A 단위유역 중 영천댐 하류유역에서 측정된 최근 6년간(2013~2018년)의 총량 측정자료를 이용하여 강우조건, 계절조건, 하천유량조건에 대한 대표성을 분석하였다.

방법: 연구유역은 낙동강수계 금호A 단위유역 중 영천댐 방류 후부터 금호A 지점까지 유역인 영천댐 하류유역이며, 연구유역에 사용된 TPLM Data는 금호강 분류하천인 자호천 지점, 금호A 지점 그리고 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천에서 측정된 자료이다. 강우조건에 대한 대표성 분석은 영천기상대의 강우일 자료로부터 10 mm/day 이상인 날을 강우일로 하여 강우일과 비강우일로 구분하여 강우조건에 대한 대표성을 분석하였으며, 계절조건 대표성 분석은 3~5월을 봄으로 분류하고, 6~8월을 여름, 9~11월을 가을, 12~2월을 겨울로 구분하여 측정자료의 계절조건에 대한 대표성을 분석하고, 하천 유량크기에 대한 대표성 분석은 일유량을 시간적 순위에 관계없이 최대유량에서 최소유량까지 크기 순으로 배열한 후 하천유량의 크기를 표준화된 백분율 순으로 나타내어 유량을 표준화한 후 분석하였다. 이때, 하천의 일유량은 HSPF 유역모형을 이용하여 모의하였다.

결과 및 토의: 최근 6년간 총량 측정자료 현황을 분석한 결과, 금호강 분류 하천인 자호천과 금호A 지점은 연간 35회에서 41회까지 다양하게 측정되었으나, 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천 지점은 매년 36회로 일정하게 측정되는데, 이는 분류 하천은 물환경연구소에서 위탁을 받아 전문 측정인력이 연속적으로 측정하고 있어 월별 일정한 측정자료가 확보되고 있으나, 영천시 이행평가를 위해 측정되고 있는 지류하천은 매년 입찰을 통해 재계약을 하는 구조적 특성으로 1~2월 및 12월에는 측정자료가 확보되지 못하는 것으로 나타났다. 총량 측정자료의 하천 대표성을 분석한 결과는 다음과 같다. 첫째 계절조건으로 분석 결과는 분류 하천인 자호천과 금호A는 봄이 28%, 여름이 25%, 가을이 28%, 겨울이 19%로 4계절을 대표하도록 측정되고 있으며, 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천은 봄이 29%, 여름이 32%, 가을이 34%, 겨울이 4%로 나타나 4계절 중 겨울철 하천 특성을 대변하지 못하는 것으로 나타났다. 둘째 강우조건으로 분석한 결과 분류 하천인 자호천과 금호A의 경우 232개 측정자료 중 144개(62.1%)가 비강우시 측정된 자료로 나타났고 88개(37.9%)가 강우자료로 나타났으며, 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천 자료는 216개 측정자료 중 166개(76.9%)가 비강우시 측정된 자료로 나타났으며, 50개(23.1%)가 강우시 측정된 자료로 나타나 영천기상대 강우일수가 22%인 것과 비교하면 분류 측정자료의 강우일이 좀 더 높은 것으로 나타났다. 마지막으로 하천유량크기 조건으로 분석한 결과 1년 단위의 총량 측정자료만으로 하천유량크기에 대한 대표성을 나타내기 어려운 것으로 나타났으며, 지류하천 총량 측정자료는 6년 누적으로도 전 수문에 대한 대표성을 나타내기는 어려운 것으로 나타나 총량 측정자료의 수체손상도 분석, 오염원 정밀 분석 등을 위한 기초자료의 활용 시 대표성에 대한 사전 검토가 필요할 것으로 판단된다.

결론: TPLM Data는 TPLM 시행 및 많은 연구활동의 기초자료로 활용되고 있기 때문에, 측정자료의 하천 대표성은 매우 중요한 요소이며, TPLM Data의 하천 대표성을 높이기 위해서는 다양한 하천조건을 최대한 대표할 수 있는 모니터링 계획이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 하천조건 중 하천유량크기는 강우량, 강우강도, 선행강우일수, 댐 및 환경기초시설 등에 많은 영향을 받아 모니터링 전 예측이 어려우므로 이에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

주제어: 오염총량관리제, TMDL, HSPF, 부하지속곡선, 수체손상

1. 서론

수질오염총량제는 하천의 목표수질을 설정하고 이를 달성할 수 있는 오염부하량을 정하여, 하천으로 유입하는 오염부하량을 허용총량 이내로 관리하는 제도이다. 1999년 한강수계에서 임의제로 도입한 이래, 낙동강수계, 금강수계, 영산강·섬진강수계, 진위천수계 그리고 한강수계까지 의무제 기반을 마련하여 현재 141개 단위유역, 112개 지자체에서 총량제를 시행하고 있으며 이는 전체 지자체의 75% 수준이다.

2004년 총량제 시행과 함께 목표수질 달성 여부를 평가하거나, 하천유량 조건에 따른 수질을 평가하여 총량 삭감계획 수립의 근거를 마련하거나, 삭감계획의 적절성을 평가하기 위해 환경부장은 단위유역의 하단지점을 목표수질지점으로 정하여 본류 하천의 유량과 수질변동을 측정하고 있으며¹⁾ 지자체는 단위유역 내 주요 지류 하천에 대해 평균 8일 간격으로 연간 36회 이상 수질 및 유량을 조사하고 있다.²⁾ 이렇게 장기간 측정되고 있는 수질 및 유량자료는 본류 하천의 수질변화 뿐만 아니라 지류하천 유역의 환경변화까지 파악할 수 있게 되었으며 총량제 외 다양한 연구에 활용되거나 측정자료를 이용하는 방법이 개발되고 있다. 특히 국토교통부는 유량을 측정하고 환경부는 수질을 측정하는 기존의 방법과 달리 총량 측정자료는 유량과 수질을 동시에 측정하는 장점으로 환경관리계획 수립 등을 위한 모델링 보·검증 자료, 통계적 기법을 이용한 하천 수질현황 분석 및 부하지속곡선을 이용한 수체손상분석 등에 많이 활용되고 있다.

이중 부하지속곡선(Load Duration Curve; LDC)은 다양한 유량 조건의 수질 모니터링 자료를 이용하여 일정기간 동안의 관측 수질과 유량 자료를 도식하여 유역의 유황변화에 따른 수질 특성을 눈으로 쉽게 파악할 수 있고, 목표수질 초과 빈도 및 삭감부하량에 대한 정보를 파악하기에 용이하게 하는 방법으로³⁾ 총량관리 이행평가에서도 직접 이용되고 있다. 또한 Park 등⁴⁾은 오염부하지속곡선을 통한 맞춤형 수질오염총량제 추진방안에 대하여 연구하였다. Lee 등⁵⁾은 부하지속곡선을 이용하여 갈수기 수질오염부하특성 및 기여율을 분석한 바 있으며, Kim 등⁶⁾은 MOVE.2 확장기법 적용을 통하여 장기 부하지속곡선을 구축하고 유황조건별 수체손상을 평가하는 등 최근 국내에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다.

부하지속곡선은 유량지속곡선(Flow Duration Curve; FDC)과 함께 도식되는 측정자료가 하천의 조건을 적절하게 대변하는 것이 매우 중요하다. 이런 이유로 유량지속곡선의 하천 수문대표성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 도식되는 측정자료의 하천 및 유역특성을 대변하는 정도에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구는 낙동강수계 금호A 단위유역의 본류 및 지류 하

천에서 최근 6년간(2013~2018년) 측정된 총량 측정자료가 측정지점 하천 및 유역 특성을 대표하는 정도를 측정횟수, 계절조건, 강우조건, 하천유량조건 등 물리적 조건에 대하여 분석하여 총량 측정자료가 수체손상도 분석, 오염원 정밀 분석 등을 위한 기초자료의 활용성을 검증해 우리나라 총량관리 정책에 도움이 되고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상유역

연구대상유역은 낙동강수계 총량관리 금호A 단위유역으로 유역면적은 934.83 km²이며 행정구역은 경상북도 포항시·영천시 일부이다(Fig. 1). 대상유역의 토지이용은 임야가 72.2%, 논 8.9%, 밭 7.6%, 대지 4.5%, 기타 6.8%로 논, 밭의 비율이 대지의 비율보다 높은 농촌지역의 특성을 가지고 있다.

금호A 단위유역의 특성을 보면 영천댐을 기준으로 영천댐 상류유역과 영천댐 하류유역으로 구분된다. 영천댐 상류유역은 발원지부터 영천댐까지이며 유역에서 배출된 강우 유출수와 오염물질은 영천댐으로 모여 장기간 체류한 후 방류되며, 영천댐 하류유역은 영천댐 방류 후부터 금호A 지점까지 유역으로 영천댐 방류와 함께 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천이 있고 본류하천으로 직접 유입되는 영천하수처리장이 위치하고 있으며, 금호A 지점의 유량과 수질에 실질적으로 미치는 영향이 크다. 따라서 본 연구는 영천댐 하류유역을 대상으로 분석하였다.

영천댐 하류유역 내 총량관리를 위한 수질 및 유량 측정자료(총량 측정자료)는 환경부가 ‘물환경측정망 운영계획’⁷⁾에 따라 본류하천에서 측정하고 있는 자호천과 금호A 지점이 있으며, 경상북도 영천시 오염총량관리 계획수립 및 이행평가를 위해 지류하천에서 측정하고 있는 고촌천, 신령천, 북안천 지점이 있다. 영천시 측정자료는 매년 이행평가시 연구유역을 발주하여 평균 8일 간격으로 년 36회 이상 유량과 함께 BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), SS (Suspended Solid), T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorus) 등 5개 수질항목을 측정되고 있다.

본 연구에 활용한 총량 측정자료는 금호강 본류하천인 자호천, 금호A 지점과 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천 하단 지점에서 측정된 이행평가 자료 중 연속된 측정자료가 있는 최근 6년간(2013~2018년) 자료이며 자호천, 금호A 지점 자료는 물환경정보시스템⁸⁾에서 제공받아 사용하였고 고촌천, 신령천, 북안천 지점은 영천시 이행평가보고서 자료⁹⁻¹⁴⁾를 활용하였다. 또한 HSPF 모형 구축 및 보·검증을 위한 영천댐 방류자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공받아 활용하였다.

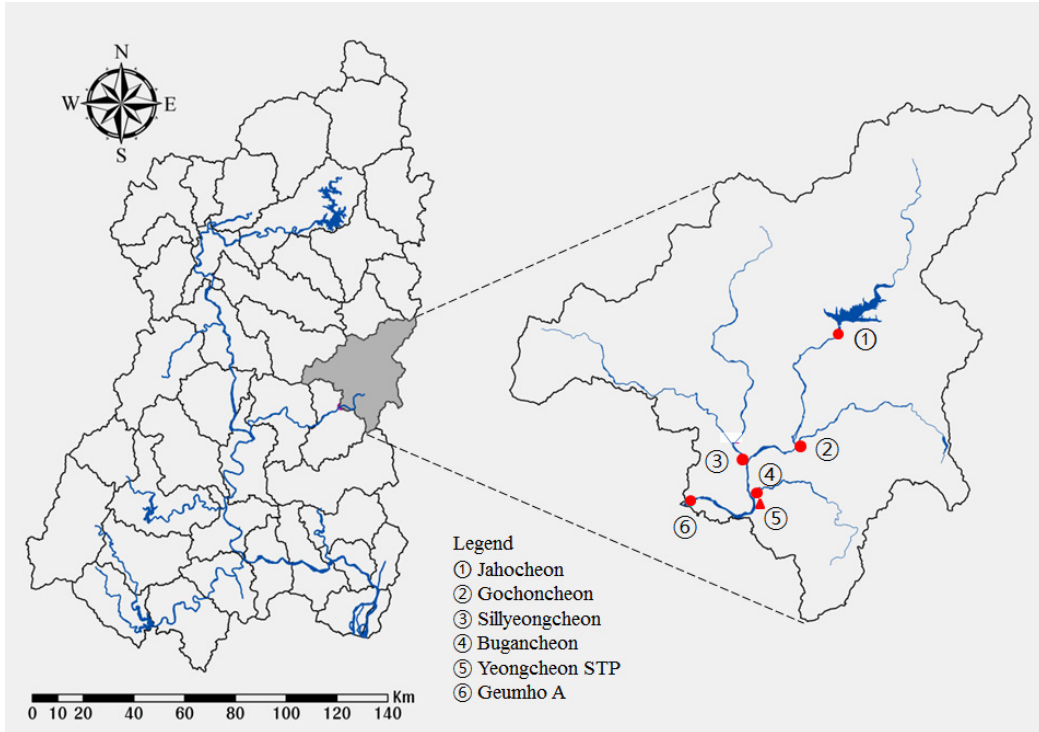


Fig. 1. Location of the Geumho A unit watershed in Nakdong River basin and monitoring station.

2.2. 대표성 분석방법

총량관리를 위해 약 8일 간격으로 측정되고 있는 총량 측정자료는 유량과 수질을 동시에 측정하므로 일반적인 수질 통계량 분석뿐만 아니라 부하지속곡선을 이용한 수체손상 분석 등에서 유용한 자료로 활용되고 있다. 이처럼 표본을 이용하여 현상을 분석하는 경우 측정자료가 해당 하천 및 유역 특성을 대표한다는 가정에서 이루어지게 된다. 또한 하천 유량과 수질은 연중 일정하게 유입되는 점오염물질과 강우시 강우유출수와 함께 유입되는 비점오염물질 그리고 하천 내부 기작 등에 의해 변화되므로 강우일수, 강우량, 하천 유량크기 및 수온 등에 많은 영향을 받기¹⁵⁾ 때문에 측정자료는 다양한 조건을 대표할 수 있도록 측정되어야 하는데 본 연구에서는 측정자료가 다양한 하천조건에서 고르게 분포(등분포)하는 경우를 대표성이 있는 것으로 판단하여 분석하였다.

2.2.1. 강우조건 대표성 분석

강우에 의해 지표유출이 발생하고 이때 지표에 쌓여진 다양한 오염물질이 강우유출수와 함께 하천으로 유입되므로 강우에 의해 하천의 유량이 증가되는 경우 유역 비점오염물질의 유입으로 수질을 악화시키거나 많은 유량이 저농도로 유입되어 희석 작용을 할 수 있다. 유역 유출에 영향을 주는 요소는 강우량, 강우강도, 선행강우일수 등 다양하지만 본 연구는 영천기상대의 강우일 자료로부터 10 mm/day 이상 인 날을 강우일로 하여 강우일과 비강우일로 구분하여 강우

조건에 대한 대표성을 분석하였다.

2.2.2. 계절조건 대표성 분석

우리나라는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 기온 차이가 뚜렷하며 계절별 수온 차이도 뚜렷하다. 이로 인해 미생물에 의한 오염물질 분해 및 조류 성장 등은 계절의 영향을 많이 받는다. 따라서 본 연구는 하천 수온이 일정하게 유지되는 기간을 기준으로 3~5월을 봄으로 분류하고 6~8월을 여름, 9~11월을 가을, 12~2월을 겨울로 구분하여¹⁵⁾ 측정자료의 계절조건에 대한 대표성을 분석하였다.

2.2.3. 하천 유량크기별 대표성 분석

일반적으로 하천의 수문곡선에 영향을 주는 것은 기저유출과 직접유출로 분리될 수 있는데,¹⁶⁾ 기저유출은 지하수 유출과 연관이 있고 직접유출은 지표유출로 하천으로 유입되는 강우 유출수와 주로 연관이 있으며 지표유출은 지표에 쌓여진 다양한 오염물질을 하천으로 이동시키는 역할을 한다. 또한 이외에 저수지 등 대형 수리 구조물 및 환경기초시설 방류 등 하천으로 직접 유입되는 직접유입이 있다. 이런 이유로 하천 유량크기는 하천수질과 유역특성을 분석하는데 중요한 요소가 된다.

총량 측정자료의 하천 유량크기에 대한 대표성을 분석하기 위해서는 우선 매우 다양한 하천 유량크기에 대한 표준화가 필요하다. 하천유량을 시간적 순위에 관계없이 최대유

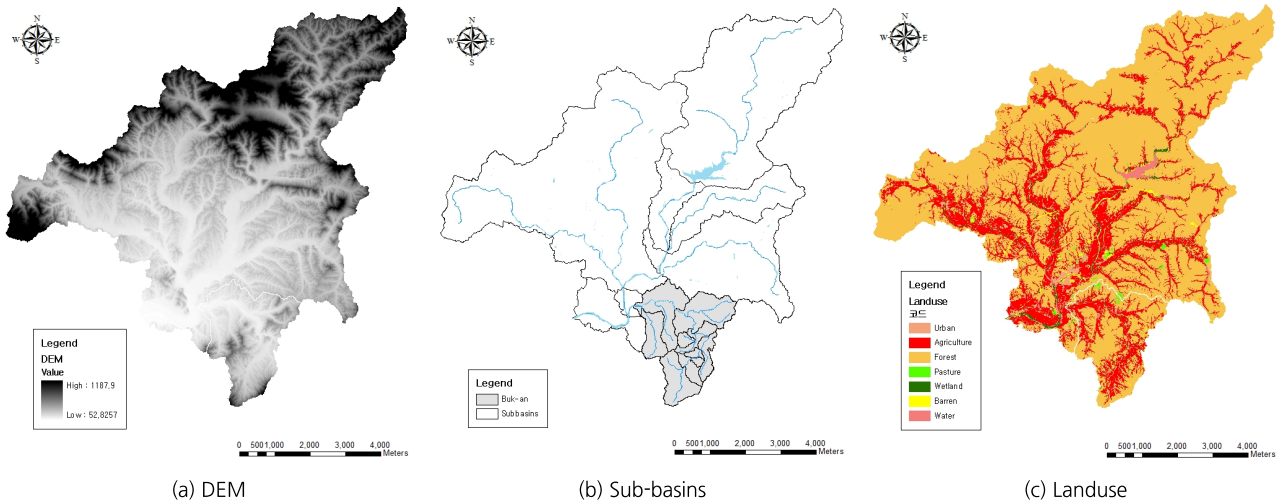


Fig. 2. DEM, sub-basins and landuse of Geumho A watershed.

Table 1. General calibration/validation targets or tolerances for HSPF application.

Constituent	Very good	Good	Fair
Hydrology / Flow	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25

량에서 최소유량까지 크기순으로 배열하고 특정유량보다 큰 유량이 나타나는 빈도(이하 초과백분율)를 식 (1)의 방법으로 산정하면 하천유량의 크기를 표준화된 백분율 순(0 ~ 100%)으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Percent of Days Flow Exceeded (\%)} = \frac{\text{Rank}}{\text{Number of flow data}} \times 100 \quad (1)$$

그러나 약 8일 간격으로 측정되고 있는 총량 측정자료만으로는 실제 하천의 전 수문현상을 대표하기 어려우므로 일반적으로 유역모형을 이용하여 일유량을 예측 후 사용하고 있다.¹⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 각 분류 및 지류하천 지점에서 발생할 수 있는 최소 및 최대 확률 유량까지 반영할 수 있도록 HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran) 유역모형을 구축하고 보·검증한 후 6년(2013~2018년)간의 일유량을 모의하였다.

모의된 6년간 일유량 자료를 이용하여 식 (1)에 따라 지점별 하천 유량크기를 표준화하였으며 미국 EPA의 유황구분기준¹⁸⁾에 맞추어 누적유량빈도의 초과유량 백분율의 0~10% 구간을 I 그룹으로 구분하였고, 10~40% 구간을 II 그룹, 40~60% 구간을 III 그룹, 60~90% 구간을 IV 그룹, 90~100% 구간을 V 그룹으로 하여 총 5그룹으로 구분하였다.

2.3. 유역모형 적용

2.3.1. 유역모형 적용

본 연구의 대상지역인 금호A 유역에 유역모형을 구축하였다. Thiessen 분석 결과 금호A 단위유역은 영천기상대 영

향권에 해당되어 영천기상대의 시간별 강수량, 평균기온, 풍속, 일사량, 상대습도 및 전운량 등을 수집하고 WDM (Watershed Data Management) database를 구축하였다. 또한 1:5,000 수치지도로부터 해상도 30×30 m의 수치고도모델 (DEM; Digital Elevation Model)을 생성한 후 BASINS에 적용하여 대상유역의 소유역을 구성하였으며(Fig. 2(a), (b)), 토지이용도는 환경부에서 2008년 제작된 중분류 토지피복도를 활용하였다(Fig. 2(c)). 구축된 유역모형 최상류인 영천댐 방류량은 WAMIS에서 제공받은 일방류량을 직접 입력하였다.

2.3.2. 유역모형의 보정 및 검증

유역모형의 유량 보·검증지점은 분류하천인 금호A, 지류하천은 고촌천, 신령천, 북안천이다(Fig. 1). 매개변수의 보·검증은 시행착오법에 의해 이루어졌으며, 이는 모형의 다양한 변수를 변화시켜 상관계수 및 결정계수 등의 최적점을 찾는 방법으로 반복횟수가 충분할 경우 전체 근사 최적점에 도달 가능한 방법이나, 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다.¹⁹⁾ 모형효율 평가를 위한 결정계수는 상대오차(% Difference)를 이용하였는데, HSPF 모형의 적용사례 및 연구자료를 바탕으로 Donigan²⁰⁾은 일반적인 모형효율의 범위와 신뢰구간을 Table 1과 같이 제시한 바 있다. 상대오차 산정방법은 식 (2)와 같으며, 이때 O는 관측 값, P는 모의 값을 의미한다.

$$\% \text{ Difference} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Table 2. Hydrologic calibration parameters and possible ranges.

Parameter	Description	Ranges	
		Typical	Possible
INFILT	Infiltration capacity of the soil	0.01 ~ 0.25	0.001 ~ 0.50
AGWRC	Groundwater recession rate	0.92 ~ 0.99	0.85 ~ 0.999
DEEPPFR	Fraction of Groundwater inflow to deep recharge	0 ~ 0.2	0.0 ~ 0.5

Table 3. Status of flow rate each monitoring station in study area.

Year	Flow Rate (m ³ /sec)					
	Jahocheon	Gochoncheon	Sillyeongcheon	Bugancheon	Youngcheon STP	Geumho A
2013	2.370	1.527	2.925	0.584	0.340	11.136
2014	1.957	1.718	3.296	0.674	0.352	10.434
2015	2.351	1.188	2.250	0.509	0.313	7.578
2016	2.330	2.169	4.185	0.707	0.331	13.033
2017	2.332	0.582	1.049	0.401	0.312	4.700
2018	3.642	2.435	4.721	0.804	0.346	13.775
All periods	2.497	1.603	3.071	0.613	0.332	10.111

3. 결과 및 고찰

3.1. 유역모형 적용 및 일유량 모의

3.1.1. 유출량 보검증

유출량 보검 및 검증에 있어서 매개변수는 PWAT-PARM2 block의 Infiltr (0.05~0.25)와 AGWRC (0.92~0.98), PWAT-PARM3 block의 DEEPPFR (0.1~0.15)을 활용하였으며, 각 매개변수의 특징은 **Table 2**에 나타난 바와 같다.

보검기간(2013~2015년) 동안 고촌천, 신령천, 북안천 지점과 금호A 지점의 상대오차(%)는 각각 (-)2.110, (-)24.061, 7.798, 4.608로서, **Table 1**에 나타난 기준에 따라 모형효율은 Very Good과 Good으로 평가되었으며, 검증(2016~2018년)에 있어서도 각각 (-)21.341, (-)23.038, (-)0.598, 11.452로서 Very Good과 Good으로 평가되어 모의치가 실측치를 비교적 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다(**Fig. 3**). 이때 상대 오차가 양의 값을 나타내는 것은 모의 결과에 비하여 상대적으로 실측치가 높게 나타나는 경우를 의미하고, 반면 음의 값을 나타내는 것은 실측치에 비하여 모의치가 높은 경우를 의미한다.

3.1.2. 일유량 모의 결과

보·검증된 HSPF를 이용하여 연구기간인 2013~2018년(6년)의 일유량을 모의하였으며, 모의결과를 이용하여 영천댐 방류량(자호천), 고촌천, 신령천, 북안천 그리고 영천하수처리장 방류량이 단위유역 하단인 금호A 유량에 영향을 분석하였으며 그 결과는 **Table 3**과 같다.

2013년부터 2018년까지 6년간 금호A 평균유량은 10.111 m³/sec이며 유입유량은 신령천이 3.071 m³/sec로 30.38%를

차지하여 가장 많았으며, 그 다음으로 영천댐 방류가 2.497 m³/sec (24.70%), 고현천이 1.603 m³/sec (15.86%), 북안천 0.613 m³/sec (6.06%)이며, 점오염원인 영천하수처리장 방류유량이 0.332 m³/sec (3.29%)로 나타나, 금호A 지점에 미치는 영향이 큰 지점은 직접유입인 영천댐 방류량과 신령천의 강우유출수로 나타났다.

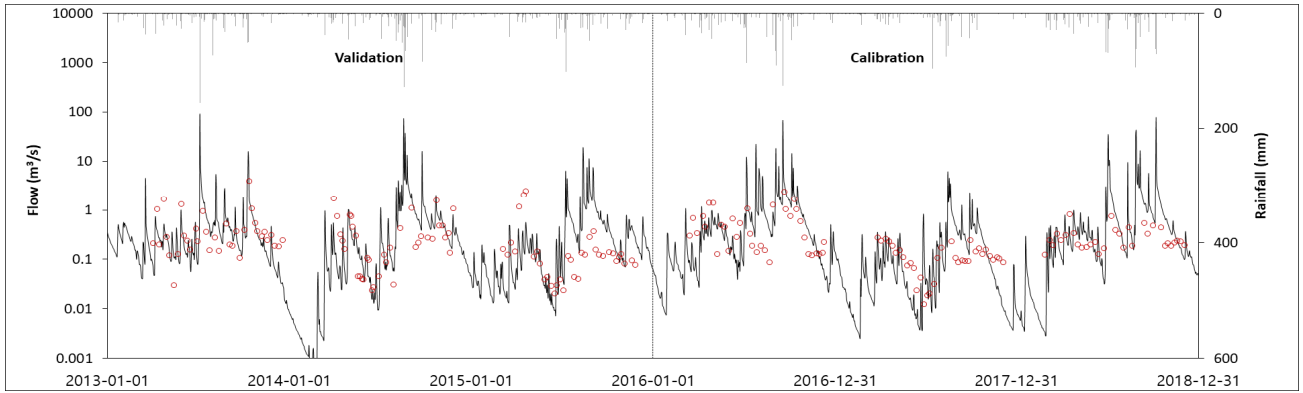
3.2. 측정자료의 대표성 분석

3.2.1. 측정자료 현황

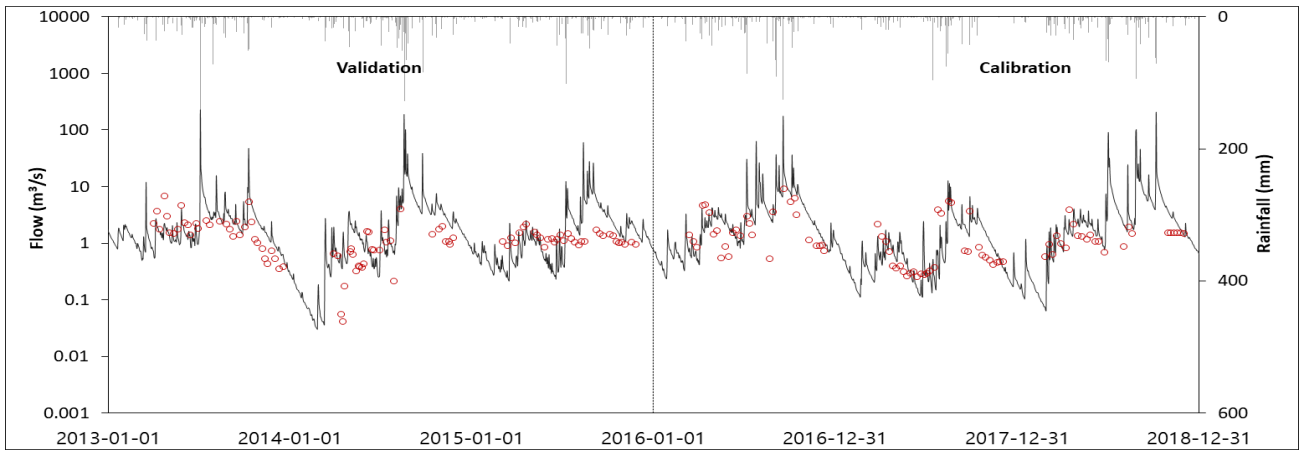
최근 6년간(2013~2018년) 총량 측정자료 현황은 **Table 4**와 같다. 본류하천인 자호천과 금호A는 연간 35회에서 41회까지 다양하게 측정되었으며 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천은 연 36회로 매년 일정하게 측정되었다. 이는 측정기관별로 모니터링 계획을 수립하기에 환경부가 측정하는 자호천과 금호A의 측정현황이 같고, 영천시가 이행평가를 위해 측정하는 고촌천, 신령천, 북안천의 측정현황이 같은 것으로 판단된다. 또한 본류구간은 물환경연구소에서 위탁을 받아 전문 측정인력이 연속적으로 측정하고 있어 월별 일정한 측정자료가 확보되고 있으나 영천시 이행평가 모니터링의 경우 매년 재계약을 하는 구조적 특성으로 1~2월 및 12월에는 측정자료가 확보되지 못하는 특성을 보였다(**Fig. 4**).

3.2.2. 계절조건별 대표성 분석 결과

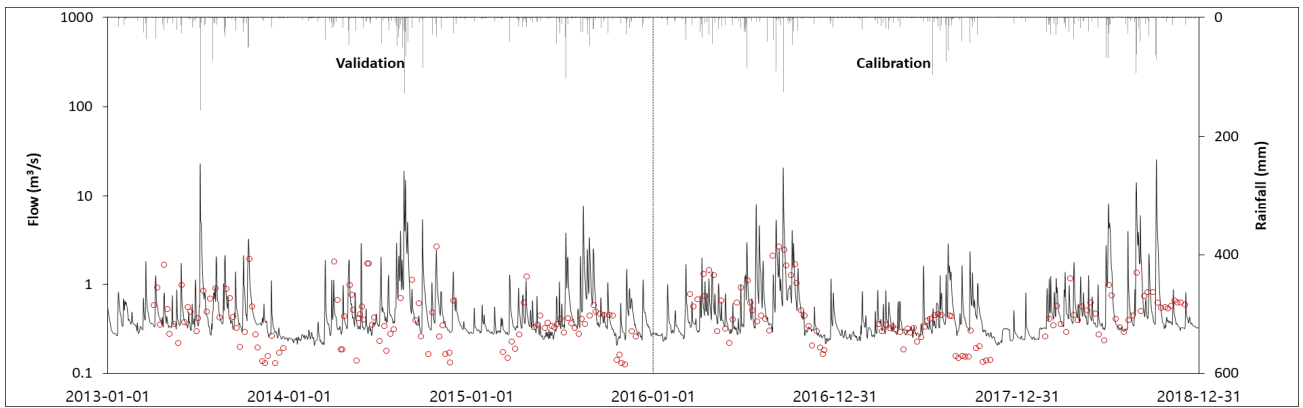
총량 측정자료를 계절별로 분석해 보면, 본류하천인 자호천과 금호A는 봄이 28%, 여름이 25%, 가을이 28%, 겨울이 19%로 4계절을 대표하도록 측정되고 있으며 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천은 봄이 29%, 여름이 32%, 가을이 34%,



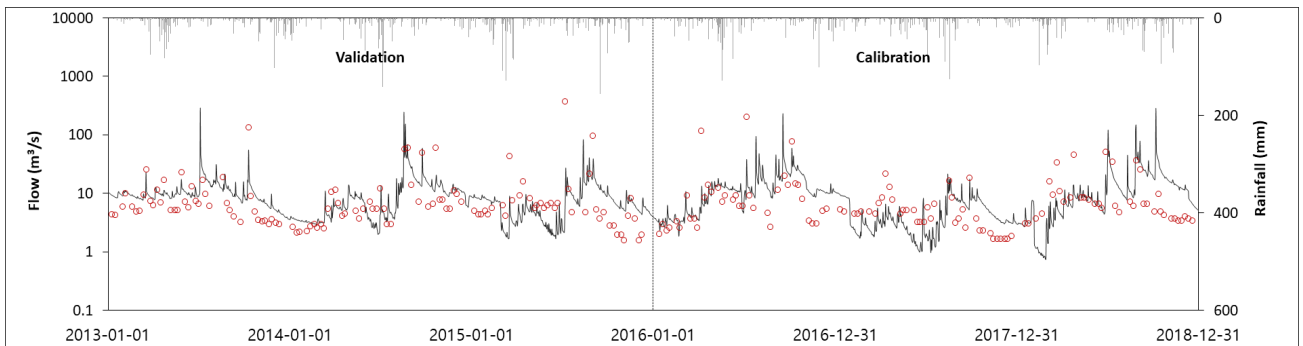
(a) Gochoncheon



(b) Sillyeongcheon



(c) Bugancheon



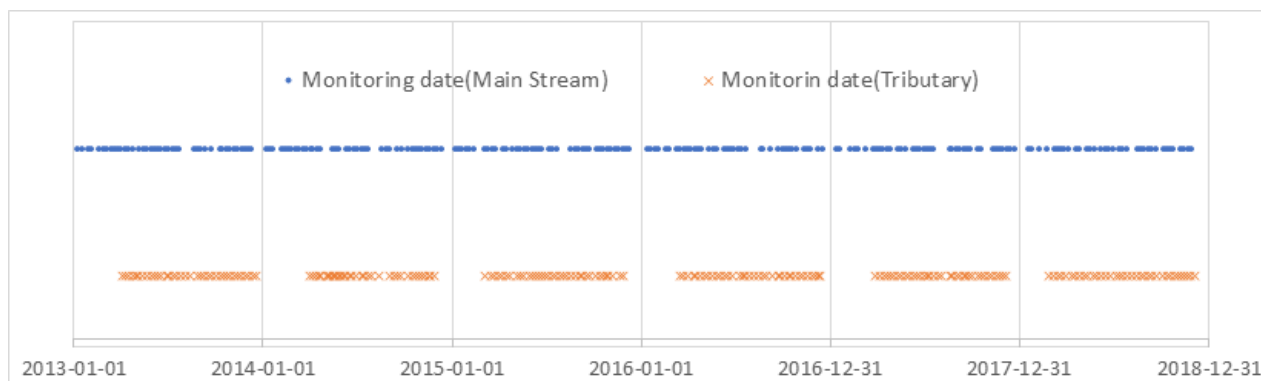
(d) Geumho A

Fig. 3. Calibration and validation of flow rate on each monitoring station.

Table 4. Number of seasonal monitoring data by year in study area.

Site*	Season	Number of monitoring data						All periods
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Main Stream	Spring	12 (29.27)	11 (27.5)	11 (27.50)	11 (28.95)	10 (26.32)	10 (28.57)	65 (28.02)
	Summer	10 (24.39)	9 (22.5)	9 (22.50)	9 (23.68)	10 (26.32)	10 (28.57)	57 (24.57)
	Fall	11 (26.83)	11 (27.5)	12 (30.00)	10 (26.32)	10 (26.32)	11 (31.43)	65 (28.02)
	Winter	8 (19.51)	9 (22.5)	8 (20.00)	8 (21.05)	8 (21.05)	4 (11.43)	45 (19.40)
	All	41 (100.00)	40 (100.00)	40 (100.00)	38 (100.00)	38 (100.00)	35 (100.00)	232 (100.00)
Tributary	Spring	9 (25.00)	13 (36.11)	11 (30.56)	10 (27.78)	9 (25.00)	11 (30.56)	63 (29.17)
	Summer	11 (30.56)	10 (27.78)	13 (36.11)	12 (33.33)	13 (36.11)	11 (30.56)	70 (32.41)
	Fall	13 (36.11)	13 (36.11)	12 (33.33)	11 (30.56)	13 (36.11)	12 (33.33)	74 (34.26)
	Winter	3 (8.33)	- (0.00)	- (0.00)	3 (8.33)	1 (2.78)	2 (5.56)	9 (4.17)
	All	36 (100.00)	36 (100.00)	36 (100.00)	36 (100.00)	36 (100.00)	36 (100.00)	216 (100.00)

* Main Stream is Jahocheon, Geumho A and tributary is Gochoncheon, Sillyeongcheon, Bugancheon.



* Main Stream is Jahocheon, Geumho A and tributary is Gochoncheon, Sillyeongcheon, Bugancheon.

Fig. 4. Distribution of monitoring data during the study (2013-2018).

겨울이 4%로 나타나 사계절 중 상대적으로 겨울철 하천 특성은 잘 대변하지 못하는 것으로 나타났다(**Table 4**).

이는 본 연구지역의 본류 및 지류하천이 연중 건천이 되지 않고, 지역기후 특성상 겨울철 결빙일수가 매우 적은 지역임을 고려할 때 이행평가 모니터링 계약구조의 특성으로 인한 겨울철 측정자료가 적었기 때문으로 판단되며 지자체가 총량관리 이행평가 등을 위한 총량 측정자료 모니터링 계획 수립 시 계절조건별 대표성 고려가 필요할 것으로 판단된다.

다만, 우리나라 많은 지류하천이 겨울철에 건천이 되고, 결빙이 되는 경우가 많으므로 이에 대한 고려가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

3.2.3. 강우조건별 대표성 분석 결과

본 연구지역을 대표하는 영천기상대의 지난 6년(2013~2018년)간 강우일 자료를 분석한 결과는 **Table 5**와 같다. 강우일수는 2017년이 20일(15.5%)로 가장 적었으며 2018년 35일(29.7%)로 가장 많았으며 지난 6년(774일) 중 강우일수는

Table 5. Status of rainfall day by year at Yeongcheon weather station.

Weather	Rainfall day						All periods
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Rainy day	29 (22.7)	33 (24.1)	22 (17.6)	33 (24.1)	20 (15.5)	35 (29.7)	172 (22.2)
Sunny day	99 (77.3)	104 (75.9)	103 (82.4)	104 (75.9)	109 (84.5)	83 (70.3)	602 (77.8)
Total	128	137	125	137	129	118	774

Table 6. Status of rainfall day by year at each monitoring station.

Site*	Weather	Number of monitoring data						All periods
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Main Stream	Sunny day	24	21	26	23	25	25	144
	Rainy day	17	19	14	15	13	10	88
	Total	41	40	40	38	38	35	232
Tributary	Sunny day	26	29	27	30	27	27	166
	Rainy day	10	7	9	6	9	9	50
	Total	36	36	36	36	36	36	216

* Main Stream is Jahocheon, Geumho A and tributary is Gochoncheon, Sillyeongcheon, Bugancheon.

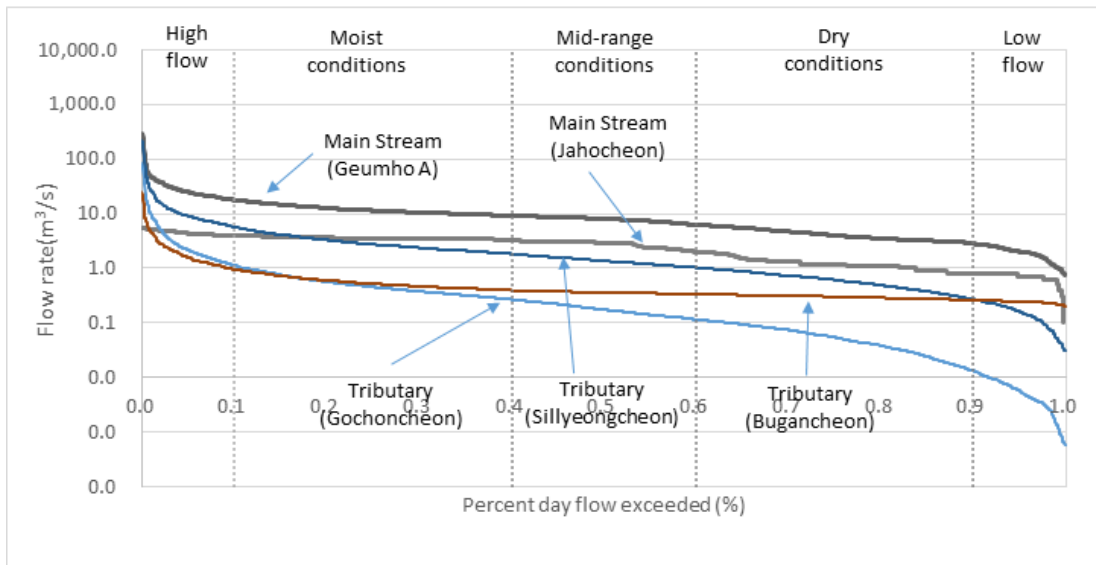


Fig. 5. Flow duration curve at each monitoring station using daily flow in study area.

172일로 약 22.2%로 나타났다.

총량 측정자료의 측정일을 강우와 비강우 조건으로 구분하여 분석한 결과는 **Table 6**과 같다. 분류하천인 자호천과 금호A는 232개 측정자료 중 144개(62.1%)가 비강우시 자료로 나타났으며 88개(37.9%)가 강우자료이며, 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천은 216개 측정자료 중 166개(76.9%)가 비강우시 자료이며, 50개(23.1%)가 강우시 측정된 자료로 나타나 영천기상대 강우일수가 22%와 비교하면 분류의 강우일이 좀 더 높은 것으로 나타났다.

3.2.4. 하천 유량크기별 대표성 분석 결과

HSPF 유역모형에서 모의한 6년(2013~2018년)간 2,191개 일유량 자료를 이용하여 최대유량에서 최소유량 순으로 데이터를 배열하고, 식 (1)의 방법으로 2,191개의 일유량 크기를 0~100%로 변환한 후 이를 5개의 조건(I~V그룹)으로 구분하였다. 자호천, 금호A, 고촌천, 신령천, 북안천에 대하여 x축을 유량으로 하고 y축을 유량보다 큰 유량이 나타나는 빈도인 초과백분율로 하는 그림으로 표현하면 **Fig. 5**와 같다.

Table 7. Number of monitoring data for each hydrologic group.

Site	Group	Number of monitoring data						All periods
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Jahocheon	I	0	3	9	11	0	11	34
	II	22	1	10	2	20	17	72
	III	4	15	3	3	2	3	30
	IV	12	16	15	17	4	2	66
	V	3	5	3	5	12	1	29
	Total	41	40	40	38	38	34	231
Gochoncheon	I	3	2	3	5	0	0	6
	II	16	15	2	18	1	16	40
	III	15	8	12	12	14	20	66
	IV	2	11	19	1	20	0	95
	V	0	0	0	0	1	0	9
	Total	36	36	36	36	36	36	216
Sillyeongcheon	I	1	0	0	3	0	0	4
	II	17	2	4	9	6	6	44
	III	10	11	21	10	2	22	76
	IV	8	18	11	14	25	8	84
	V	0	5	0	0	3	0	8
	Total	36	36	36	36	36	36	216
Bugancheon	I	3	6	1	11	0	3	24
	II	15	13	12	13	6	23	82
	III	3	3	5	1	3	4	19
	IV	5	3	8	4	10	4	34
	V	10	11	10	7	17	2	57
	Total	36	36	36	36	36	36	216
Geumho A	I	4	4	4	4	2	6	24
	II	7	6	2	7	2	4	28
	III	7	7	7	8	5	10	44
	IV	23	16	20	13	20	15	107
	V	0	7	7	6	10	0	30
	Total	41	40	40	38	39	35	233

5개 측정지점에서 모니터링된 총량 측정자료의 유량을 해당 유황곡선의 유량자료와 비교하여 초과 유량 백분율의 값을 결정한 후 5개 그룹으로 구분하여 하천유량크기에 따른 총량 측정자료의 대표성을 분석하였으며 그 결과는 **Table 7** 및 **Fig. 6**과 같다.

자호천 지점의 유량지속곡선 형태는 연중 유량변화가 적은 특성을 보였으며 고유량 구간에서 측정된 자료가 많은 것으로 나타났는데, 이는 자호천 지점이 영천댐 방류 후 약 500 m 하류지점으로 강우유출수 등 자연현상보다는 인위적 댐 수문조절에 영향을 받은 것으로 판단된다. 그 외 지점은 일반적인 하천의 수문 특성을 보였으며, 총량 측정자료의 연도별 그룹별 분포는 매우 다양한 형태를 보였다. 그러나 1년 단위의 총량 측정자료만으로 하천유량 크기에 대한 대표성을 나타내기 어려운 것으로 나타났다.

연구기간(2013~2018년) 총량 측정자료의 그룹별(I~V그룹) 분포를 보면 본류하천인 자호천은 각각 34개(15%), 72개(31%), 30개(13%), 66개(29%), 29개(13%)로 나타났으며 금호A는 24개(10%), 28개(12%), 44개(19%), 107개(46%), 30개(13%)로 나타나 측정자료가 그룹별 고른 분포를 보였다. 그러나 지류하천인 고촌천은 6개(3%), 40개(19%), 66개(31%), 95개(44%), 9개(4%)로 나타났으며 신령천은 4개(2%), 44개(20%), 76개(35%), 84개(39%), 8개(4%)로 나타나 홍수조건인 I 그룹과 갈수조건인 V 그룹의 측정자료가 적은 것으로 나타났는데 이는 겨울철 측정자료가 확보되지 않았고 하천유량이 강우유출수에 의존하는 소규모 유역하천이기에 홍수기 측정자료가 적었기 때문으로 파악된다. 북안천은 24개(11%), 82개(38%), 19개(9%), 34개(16%), 57개(26%)로 평수조건인 III 그룹에서 적게 측정되는 것으로 나타났다.

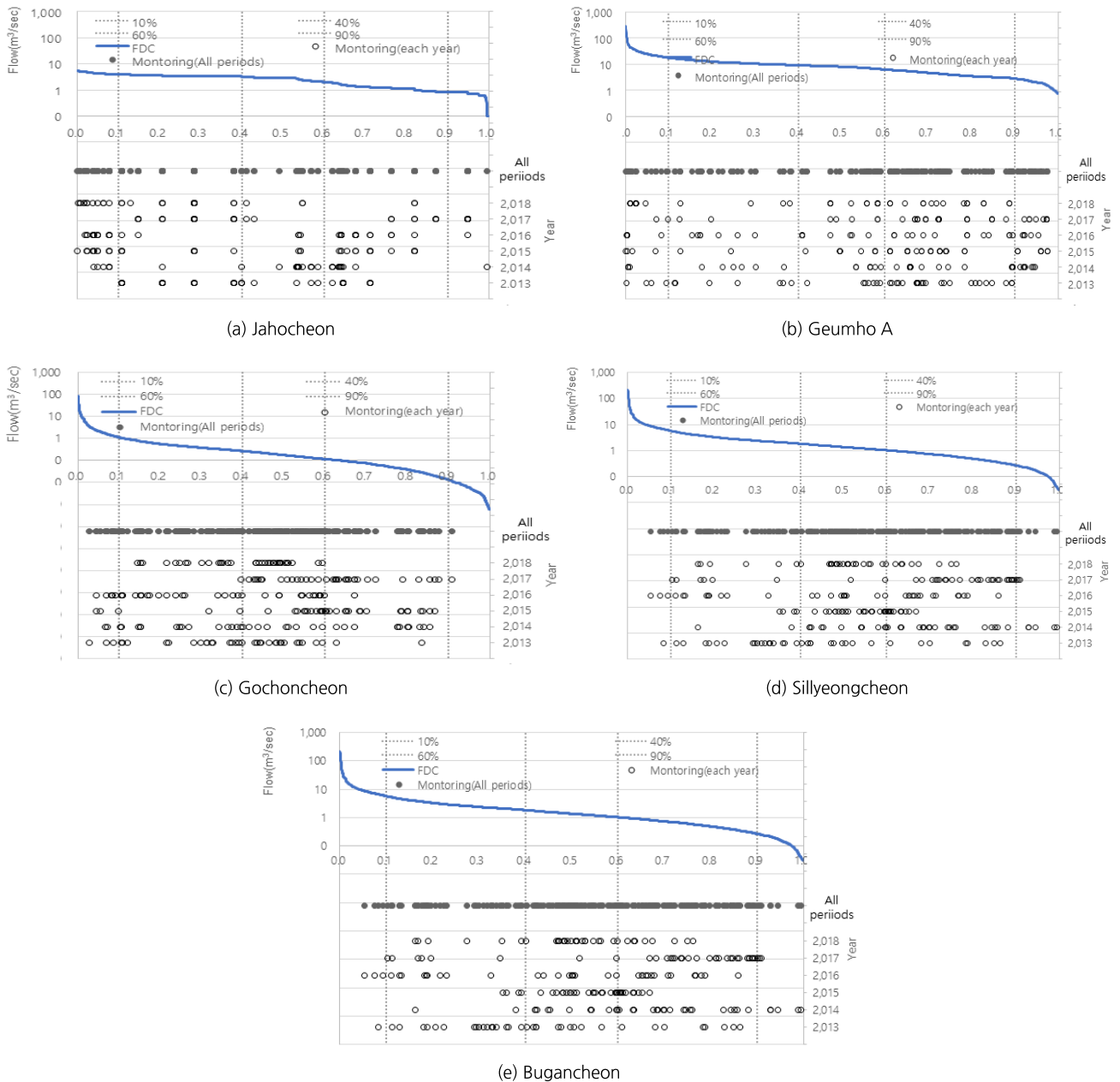


Fig. 6. Distribution of monitoring data on each monitoring station.

황 등¹⁷⁾은 총량관리에서 수체손상 원인 분석 등을 위해 부하지속곡선을 이용하는 경우, 5년 이상의 일평균유량을 이용하여 유량지속곡선을 작성하는 것이 바람직하다고 하였는데, 본 연구에서도 1년 단위의 총량 측정자료만으로 하천유량크기에 대한 대표성을 나타내기 어려운 것으로 나타났으며 지류하천 총량 측정자료는 6년 누적으로도 전 수문에 대한 대표성을 나타내는 어려운 것으로 나타나 총량 측정자료의 수체손상도 분석, 오염원 정밀 분석 등을 위한 기초자료의 활용 시 대표성에 대한 사전 검증이 필요할 것으로 판단된다.

하천유량크기는 강우량, 강우강도, 선행강우일수, 댐 및

환경기초시설 등에 많은 영향을 받아 사전 예측이 어렵고 강우일수가 적어 대표성을 가지기 위해서는 측정간격을 좁히는 것이 대안이나 경제성 등 많은 문제가 있다. 따라서 지자체 등은 과거자료를 활용하거나 유역모형 등을 이용하여 총량 측정자료가 최대한 하천유량크기별로 균등하게 측정될 수 있도록 적절한 모니터링 계획 수립이 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 총량 측정자료의 수체손상도 분석, 오염원 정

밀 분석 등을 위한 기초자료의 활용성을 검증하기 위해 낙동강수계 금호A 단위유역 중 영천댐 하류유역에서 측정된 최근 6년간(2013~2018년)의 총량 측정자료를 이용하여 계절조건, 강우조건, 하천유량조건에 대한 대표성을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 최근 6년간 총량 측정자료 현황을 분석한 결과 금호강 본류하천인 자호천과 금호A 지점은 연간 35회에서 41회까지 다양하게 측정되었으나, 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천 지점은 매년 36회로 일정하게 측정되었다. 측정자료의 특성을 보면 본류하천은 물환경연구소에서 위탁을 받아 전문 측정인력이 연속적으로 측정하고 있어 월별 일정한 측정자료가 확보되고 있으나 영천시 이행평가를 위해 측정되고 있는 지류하천은 매년 입찰을 통해 재계약을 하는 구조적 특성으로 1~2월 및 12월에는 측정자료가 확보되지 못하는 특성이 나타났다.
- 2) 총량 측정자료의 하천 대표성을 계절조건으로 분석한 결과 본류하천인 자호천과 금호A는 봄이 28%, 여름이 25%, 가을이 28%, 겨울이 19%로 4계절을 대표하도록 측정되고 있으며 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천은 봄이 29%, 여름이 32%, 가을이 34%, 겨울이 4%로 나타나 4계절 중 겨울철 하천 특성을 잘 대변하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구지역의 본류 및 지류하천이 연중 건천이 되지 않고 지역기후 특성상 겨울철 결빙일수가 매우 적은 지역임을 고려할 때 이행평가 모니터링 계약구조의 특성으로 인한 겨울철 측정자료가 적었기 때문으로 판단되며 지자체가 총량관리 이행평가 등을 위한 총량 측정자료 모니터링 계획 수립 시 계절조건별 대표성 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 총량 측정자료의 하천 대표성을 강우조건으로 분석한 결과, 본류하천인 자호천과 금호A는 232개 측정자료 중 144개(62.1%)가 비강우시 자료로 나타났으며 88개(37.9%)가 강우자료이며, 지류하천인 고촌천, 신령천, 북안천은 216개 측정자료 중 166개(76.9%)가 비강우시 자료이며, 50개(23.1%)가 강우시 측정된 자료로 나타나 영천기상대 강우일수가 22%인 것과 비교하면 본류의 강우일이 좀 더 높은 것으로 나타났다.
- 4) 총량 측정자료의 하천 대표성을 하천유량크기 조건으로 분석하기 위해 HSPF 모형을 구축 보·검증하여 하천 대표성 분석기간(2013~2018년)의 일유량을 모의하고 모의된 2,191개 일유량 자료를 최대유량에서 최소유량 순으로 배열하여 전체유량을 초과유량백분율(0~100%)로 변환한 후 이를 5개의 조건(I~V그룹)으로 구분하여 분석한 결과, 1년 단위의 총량 측정자료만으로 하천유량크기에 대한 대표성을 나타내기 어려

운 것으로 나타났으며 지류하천 총량 측정자료는 6년 누적으로도 전 수문에 대한 대표성을 나타내기는 어려운 것으로 나타나 총량 측정자료의 수체손상도 분석, 오염원 정밀 분석 등을 위한 기초자료의 활용 시 대표성에 대한 사전 검토가 필요할 것으로 판단된다.

- 5) 총량 측정자료는 우리나라 총량제 시행 및 많은 연구활동의 기초자료로 활용되고 있기 때문에 측정자료의 하천 대표성은 매우 중요한 요소이며 총량 측정자료의 하천 대표성을 높이기 위해서는 다양한 하천조건을 최대한 대표할 수 있는 모니터링 계획이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 하천조건 중 하천유량크기는 강우량, 강우강도, 선행강우일수 및 댐, 환경기초시설 등에 많은 영향을 받아 모니터링 전 예측이 어려우므로 이에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Ministry of Environment (MOE), Act on Water Management and Residents Support in the Nakdong River Basin, Ministry of Environment(2018).
2. Ministry of Environment (MOE), Implementation Standard Notice on the Total Pollution Load Control, Ministry of Environment(2018).
3. H. S. Hwang, C. G. Yoon, J. T. Kim, Application load duration curve for evaluation of impaired watershed at TMDL unit watershed in Korea, J. Korean Soc. Water Environ., 26(6), 903-909(2010).
4. B. K. Park, J. C. Ryu, E. H. Na, J. Y. Seo, Y. S. Kim, Study on the application of spatial-analysis of pollutants and load duration curve for efficient implementation of TMDLs system, J. Korean Soc. Environ. Eng., 39(12), 655-663(2017).
5. S. R. Lee, J. Y. Shin, G. J. Lee, Y. S. Sung, K. S. Kim, K. J. Lim, J. G. Kim, Analysis of water pollutant load characteristics and its contributions during dry season: Focusing on major streams inflow into South-Han River of Chungju-dam downstream, J. Korean Soc. Environ. Eng., 40(6), 247-257(2018).
6. G. H. Kim, H. G. Kwon, T. H. Im, G. D. Lee, D. S. Shin, S. M. Na, Construction of long-term load duration curve using MOVE.2 extension method and assessment of impaired waterbody by flow conditions, J. Korean Soc. Water Environ., 33(1), 51-62(2017).
7. Ministry of Environment (MOE), Water Quality Monitoring Program, Ministry of Environment(2017).
8. Ministry of Environment (MOE), Water Environment Information System (WEIS), <http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do/>, May(2018).
9. Yeongcheon-si, The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan, Yeongcheon-si(2013).
10. Yeongcheon-si, The Implementation Report for Total

- Water Pollutant Load Management System Action Plan, Yeongcheon-si(2014).
11. Yeongcheon-si, The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan, Yeongcheon-si(2015).
 12. Yeongcheon-si, The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan, Yeongcheon-si(2016).
 13. Yeongcheon-si, The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan, Yeongcheon-si(2017).
 14. Yeongcheon-si, The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan, Yeongcheon-si(2018).
 15. B. S. Nam, H. S. Hwang, M. H. Cho, Analysis of impaired waterbody using time series water quality and flow rate data for TPLMs, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 40(9), 359-371 (2018).
 16. R. A. Sloto, M. Y. Crouse, HYSEP : A Computer Program for Stream Flow Hydrograph Separation and Analysis, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96-4040, Pennsylvania Water Science Center U.S. Geological Survey, Pennsylvania, USA, pp. 46(1996).
 17. H. S. Hwang, H. P. Rhee, J. Y. Seo, Y. J. Choi, J. H. Park, D. S. Shin, S. J. Lee, Analysis of the difference of flow duration curve according to the cumulative variation of the daily average flow in unit watershed for TPLCs, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 60(6), 97-109(2018).
 18. B. R. Cleland, TMDL Development from the "Bottom up"-Part III: Duration Curve and Wet Weather Assessment, National TMDL Science and Policy 2003, WEF Specialty Conference, USA, Chicago(2003).
 19. S. C. Lee, D. C. Shin, Performance comparison of genetic algorithm and trial-and-error method in the member size optimization, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 25(10), 3-10(2009).
 20. A. S. Donigian, Lecture #19, Calibration and verification issues, HSPF Training Workshop Handbook and CD, Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA, Slide 19-22(2000).

Authors

Beom Sik Nam

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Researcher, ORCID[®] 0000-0001-7194-7128

Ha Sun Hwang

Water Pollution Cap System Division, National Institute of Environmental Research, Research Fellow, ORCID[®] 0000-0002-6340-9001

Moo Hwan Cho

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Professor, ORCID[®] 0000-0002-5350-6035