

# Flow Duration Curve를 이용한 오염원추적 방법



**이창희**  
중원대학교  
신재생에너지자원학과 조교수  
chlee@jwu.ac.kr



**박경옥**  
국립환경과학원  
유역총량연구과 전문위원  
kopark7777@gmail.com

를 달성하기 위해서 BOD와 T-P 항목별 점·비점 오염원에 대한 관리계획을 수립한다. 그러나 BOD 및 T-P 항목별 관리계획을 수립하더라도 BOD와 T-P에 대한 수질은 대상물질 이외의 수질항목에 대해서 영향을 받으므로, BOD와 T-P만을 대상으로 하는 부하량 관리로 목표수질을 설정하기에는 한계가 있다. 또한, 단위유역 말단의 목표수질 달성을 위해서 지류 및 환경기초시설과 같은 점오염원에 대해서 유황별로 단위유역 말단지점에 미치는 영향관계 파악을 한다면 점오염원을 보다 적절히 운영할 수 있다.

## 1. 서론

본 고에서는 Flow Duration Curve(이하 FDC)를 이용한 오염원추적 방법과 관련하여 박경옥 등(2016)의 연구결과를 토대로 소개하고자 한다. 수질오염총량관리제는 목표수질 한도 내에서 오염물질의 배출 총량을 관리 또는 규제하는 제도로써, 단위유역 말단지점에 대상물질별 목표수질을 설정한 뒤, 이를 달성·유지할 수 있도록 5년간의 부하량 관리계획을 수립한다. 오염총량관리대상 오염물질(이하 대상물질)의 종류는 BOD와 T-P이며, 기준유량의 적용과 관련하여 BOD는 저수량, T-P는 저수량 또는 평수량 중 수질악화 조건의 수량을 적용하고, 대상물질인 BOD와 T-P 수질목표

## 2. 연구 방법

### 2.1 흐름도

FDC를 이용한 오염원 추적은 수질유량관측 자료를 이용하여 측정 지점별 공간분석과 군집분석과 연계하여 수행된다. 유역 말단에 영향을 주는 수질항목의 공간적 원인분석을 위하여 그림 1과 같이 본류 및 지류의 수질·유량 측정결과와 환경기초시설의 방류수 수질과의 상관성 분석을 수행하여 분석할 수 있다.

### 2.2 FDC(Flow Duration Curve)

FDC는 특정 유량의 값보다 큰 값이 총 유량 값

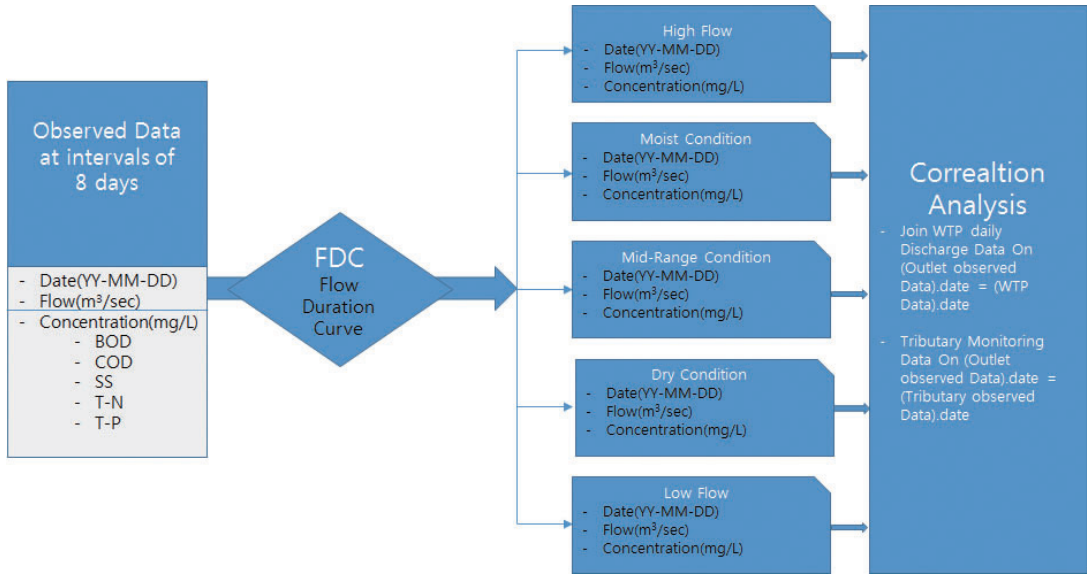


그림 1. 흐름도

의 몇 %에 해당하는가를 나타내는 곡선으로 일정 기간 동안의 유량자료의 누적도수분포를 나타낸다. 즉 일정 기간 동안의 유량자료를 내림차순으로 정리하여 1순위일 경우 가로축은 1을 도수(N)으로 나눈 값이 되고 세로축은 그 때의 유량자료가 된다. 따라서 가로축의 왼쪽 부분은 비교적 높은 유량 상태를 나타내고 오른쪽으로 갈수록 낮은 유량 상태를 나타낸다. 이는 부하지속곡선과 함께 분석되어 유량시기별로 오염물질의 간접적인 추적을 하는데 주로 사용된다(Kim et al., 2015; Park and Oh, 2012). FDC를 작성하기 위해서 연간 365일간의 연속적인 유량측정자료가 필요하다. 그러나 환경부 수질유량측정망에서는 8일 간격으로 유량을 측정하고 있으므로 식 (1)과 같은 유량 배율순을 백분율로 나타내어 유황을 구분하는 방법을 적용할 수 있다. 이 방법은 주기적 측정 자료를 이용하여 통계적 관계식에 의하여 일 단위 유량을 추정하는 방법으로서 유형의 지형적 특성이나 수리·수문학적 조건 등이 유사한 지역에서 간편하게 적용할 수 있다. FDC 분석은 수문학적 유황 상태를 나타내는 것으로 여러 개의 구

간으로 군집화 될 수 있는데, 미국 EPA의 유황구분기준에 맞추어(Yun et al., 2013; Park et al., 2013; Davis et al., 2001) high flows(0-10%), moist conditions(10-40%), mid-range flows(40-60%), dry conditions(60-90%), low flows(90-100%)와 같이 다섯 개의 구간으로 구분할 수 있다. 그림 2는 금호강 유역에서 FDC를 나타낸다.

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

### 2.3 상관성 분석

단위유역별 목표수질 설정지점인 유역말단 수질에 영향을 미치는 유입 지점별 영향을 분석하기 위해 측정지점간의 상관계수를 이용하여 상관성 분석을 수행된다. 여기서 상관계수(correlation)는 두 개의 확률변수 사이의 선형적 관계 정도를 나타내는 척도를 나타내고 방향성과 선형적 결합 정도에 대한 정보를 모두 포함하고 있다. 두 변수의 공분산을 각 변수의 표준편차로 모두 나누어 구하게 되는데 -1과 1사이에서 그 값이 결정되게 되며

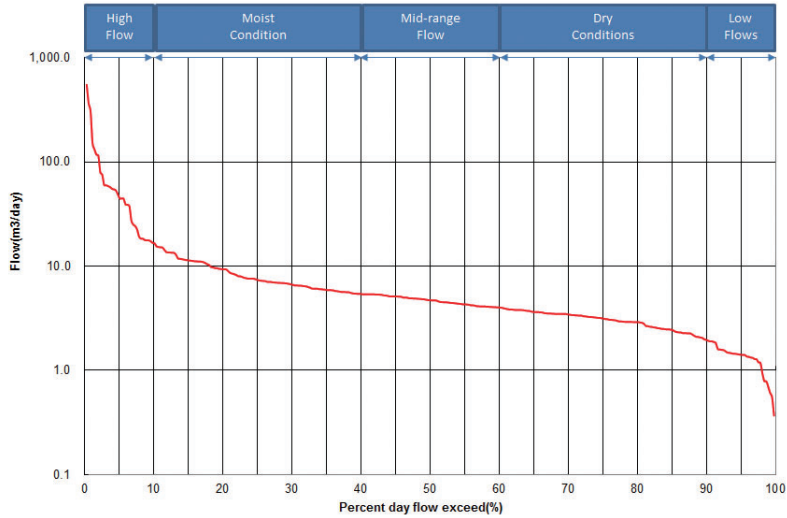


그림 2. Flow Duration Curve (금호강 유역)

공분산은 원래의 단위의 곱이 되기 때문에 경우에 따라서 이를 표준화할 필요가 있다. 표준화한 결과가 상관계수가 되며 상관계수는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\rho_{XY} = \frac{Cov[X, Y]}{\sqrt{Var|X|} \times \sqrt{Var|Y|}} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_{XY} (-1 \leq \rho_{XY} \leq 1)$ 는 상관계수,  $Cov[X, Y]$ 는  $X, Y$ 에 관한 표준편차를 나타낸다.

상관계수가 +1은 완전한 양의 상관성, -1은 완전한 음의 상관성, 0은 무상관성을 의미한다. 수치가 높으면 높을수록 상관성의 정도가 높아지는데, 양의 상관성의 경우에 0-0.2은 아주 낮은 관계, 0.2-0.4는 낮은 관계, 0.4-0.7은 비교적 높은 관계, 0.7-0.9는 높은 관계, 0.9-1.0은 아주 높은 관계를 의미한다(Data Solution, 2013). 수질측점지점간의 유사성을 분석하기 위하여 각 개체 사이에 유사성이 높은 대상 집단을 분류하고, 그 군집에 속한 객체들의 유사성과 서로 다른 군집에 속한 객체들의 유사성과 서로 다른 군집에 속한 객체 간의 상이성을 규명하는 통계분석방법인 군집분석이 수행된다(Kim et al., 2010)

### 3. 유역별 오염물질 간 상관관계 분석

그림 3과 그림 4는 금호 A 유역에 대해서 2005년부터 2014년까지 10년간 수질자료로 부터 유역 말단지점인 목표수질 설정지점의 오염물질 간 상관성 분석 결과를 FDC와 유량별 군집분석을 수행하지 않은 것과 수행한 것을 각각 나타낸다. 그림 3을 통해 BOD-COD, TP-COD가 강한 상관성을 띠는 것으로 나타났지만, 그 이외 오염물질 간의 상관관계가 잘 드러나지 않았다. 그림 4와 같이 FDC 분석에 의한 유량별 군집화를 수행한 경우에는 유량별 군집화를 수행하지 않은 경우 나타나지 않은 Q-SS 간의 상관성이 확인되어 비점오염원의 영향을 군집화로 확인할 수 있었고, Dry-Condition과 Low Flow 상태에서는 BOD-COD 간 강한 상관성 결과를 확인할 수 있다.

### 4. 환경기초시설에 대한 오염원 추적

표 1은 단위유역 말단지점인 목표수질 설정지점에 영향을 미치는 환경기초시설에 대한 오염원 추

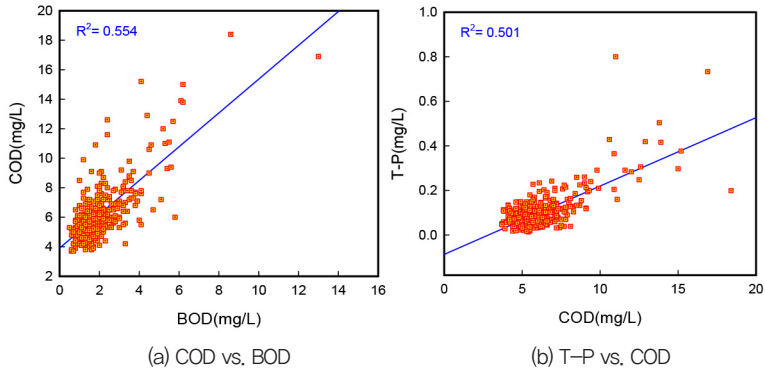


그림 3. 상관관계 분석 예 (FDC 분석을 수행하지 않은 경우)

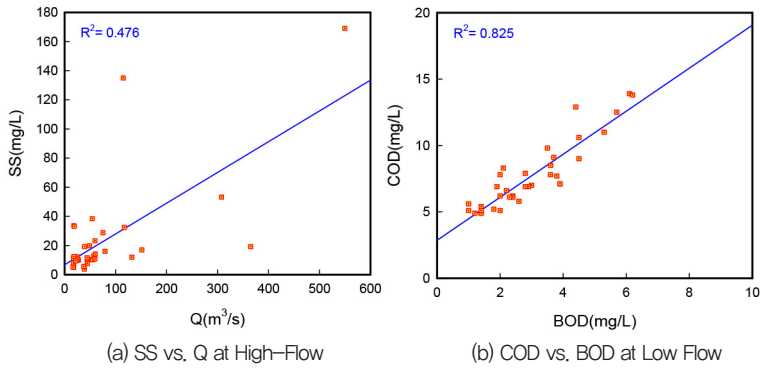


그림 4. 상관관계 분석 예 (FDC 분석을 수행한 경우)

적결과를 나타낸다. 금호A 단위유역은 영천하수처리장에 대해서 단위유역 말단인 목표수질 설정지점까지의 상관관계를 분석 사례를 보여주는, 근 집화하기 이전의 모든 자료를 활용한 결과 영천하수종말처리장의 BOD가 시간이 경과함에 따라 개선됨에 따라 유역 목표수질의 수질도 개선되고 있음을 나타내었고, High Flow에서 시간이 진행됨에 따라 SS, T-P가 개선에 따른 영향이 큰 것을 확인할 수 있다. 본 구간에서 주목할 수 있는 분석 결과는 금호A 단위유역 말단지점의 T-P 수질과 환경기초시설의 방류 T-P 수질이 0.7의 상관관계를 나타낸다는 점이다. 이를 통해 단위유역 말단지점에서의 T-P 수질이 개선되고 있는 가장 큰

이유가 영천하수종말처리장에서의 방류수 수질개선에 기인함을 확인할 수 있다.

### 5. 상류 및 지류 하천에 대한 오염원추적

금호A 단위유역에는 상류 및 지류에 죽장천, 자호천, 금호강1, 신령천 등 4개 관측소가 있다. 분석 결과 표 2와 같이 신령천과 단위유역 목표수질 설정지점과의 상관관계가 유황 전 구간에서 나타나는 경향을 보였다. 특히 High Flow 상태일 경우 단위유역 말단지점인 목표수질 설정지점과 강한 상관관계가 나타남을 확인할 수 있다.

표 1. 환경기초시설에 대한 오염원 추적 예

Watershed	WTP Name	Cluster Group	Variable 1	Variable 2	Correlation Coefficient
금호 A	영천 하수처리장	All Data	date	WTP BOD	-0.7
		High Flow	date	WTP SS	-0.7
			date	WTP BOD	-0.8
			date	WTP T-P	-0.7
		Moist Condition	date	WTP BOD	-0.7
		Mid-Range Flow	date	WTP BOD	-0.8
			date	WTP T-N	-0.7
			date	WTP T-P	-0.7
			Outlet T-P	WTP T-P	0.7
		Dry Conditon	date	WTP BOD	-0.7
Low Flow	date	WTP BOD	-0.7		

표 2. 상류 및 지류 하천에 대한 오염원 추적 예

Monitoring Point Name	Cluster Group	Tributary Variable	Outlet Variable	Correlation Coefficient
Shinryungchun	All	EC	EC	0.8
		COD	COD	0.7
		T-N	T-N	0.7
		T-P	SS	0.7
		T-P	T-P	0.8
	High Flow	EC	EC	0.8
		BOD	BOD	0.8
		COD	BOD	0.7
		COD	COD	0.7
		COD	SS	0.8
		SS	BOD	0.7
		SS	SS	0.7
		T-P	COD	0.7
	Moist Condition	T-P	SS	0.8
		T-P	T-P	0.8
		BOD	COD	0.7
		COD	COD	0.7
		COD	SS	0.7
		COD	T-P	0.7
		SS	SS	0.7
Mid-Range Flow	T-P	T-P	0.8	
	COD	COD	0.7	
	EC	EC	0.8	
Dry Conditon	COD	T-N	-0.7	
	T-N	T-N	0.8	

## 6. 결론 및 제언

지표수 관리를 위해서는 수질오염에 대한 원인 분석을 명확히 규명하는 것이 필요하며 이를 통해 효율적 대책 수립이 가능하게 된다. FDC를 이용할 경우 원인을 보다 명확하게 규명하고 더 나아가 오염물질 추적의 한 도구로 사용될 수 있을 것

이라 판단된다. 본 연구에서는 8일 간격 측정되는 수질측정망 자료와 일별 측정되는 환경기초시설의 방류수질, 월별 측정자료 등을 활용하여 상관성 분석을 실시하였지만 일별 자료가 추가로 확보될 경우 오염원 추적이 보다 정확하게 실시될 수 있을 것이라 판단된다.



국립환경과학원(2014). 수질오염총량관리기술지침.

박경옥, 이창희, 차일권 (2016). FDC 및 상관관계 분석을 이용한 금호강 유역에서의 오염원추적, 한국습지학회논문집, Vol. 18, No. 3, pp. 232-243.

김은경, 류지철, 김홍태, 김용석(2015). 부하지속곡선(Load Duration Curve; LDC)을 이용한 한강수계 오염총량관리 목표수질 평가방법 적용 방안, 한국물환경학회 논문집, Vol. 31, No. 6, pp. 732-738.