

수질오염총량관리 단위유역 수질변화 유형분석 - 낙동강수계를 대상으로 -

박준대 · 김진이[†] · 류덕희 · 정동일

국립환경과학원 물환경연구부 수질총량연구과

A Study on the Water Quality Patterns of Unit Watersheds for the Management of TMDLs - in Nakdong River Basin -

Jun Dae Park · Jin Lee Kim[†] · Doug Hee Rhew · Dong Il Jung

Water Pollution Cap System Research Division, Water Environmental Research Department, National Institute of Environmental Research
(Received 13 October 2009, Revised 15 December 2009, Accepted 23 December 2009)

Abstract

The water quality variations or changes are closely relevant to the characteristics of unit watersheds and have an effect on the attainment of their water quality goal. This study was conducted to analyze the water quality distribution and its change patterns of unit watersheds in Nakdong river basin. It revealed that 25 unit watersheds out of 41 showed the normality in water quality. Most of unit watersheds had a considerable variation in water quality, especially in the season of spring and summer but a little in terms of flow rate. Annual relative differences in water quality ranged from 13.0 to 26.6% with the maximum of 75%. 28 unit watersheds (62%) had the tendency to decrease in water quality as the flow rate increased while 13 (38%) to increase. The extension of standard flow led to considerable differences in water quality depending on its ranges, which meant uncertainties might be included in the process of TMDL development. It is suggested that annual average flow rate should be chosen as a standard flow in the area where the water quality change has little relation to the flow rate.

keywords : Nakdong river basin, Standard flow, Total maximum daily loads, Unit watershed, Water quality patterns, Water quality variation

1. 서론

수질오염총량관리제는 수계를 단위유역으로 구분하여 각 단위유역의 목표수질을 설정하고, 이 목표수질을 달성할 수 있도록 단위유역으로부터 허용되는 총 배출부하량을 할당하여 관리하는 제도이다(환경부·국립환경연구원, 2004). 우리나라에서는 2004년부터 낙동강수계를 시작으로 하여 2005년부터는 금강 및 영산강·섬진강수계에서 단계적으로 수질오염총량관리를 시작하였다(국립환경과학원, 2008).

제1단계 수질오염총량관리 계획기간은 2004년 8.1부터 2010년 12.31까지로서 BOD₅를 관리대상물질로 선정하였으며 기준유량은 10년 평균 저수량을 사용하도록 하고 있다(환경부, 2002b). 낙동강수계에서는 5개 광역시도에서 기본계획을 수립하여 추진하고 있다(강원도, 2005; 경상남도, 2005; 2004; 경상북도, 2005; 대구광역시, 2004; 부산광역시). 또한 2011년부터 시작되는 제2단계에서는 총인(T-P)이 대상물질로 추가됨으로서 10년 평균 저수량과 함께 평

수량을 기준유량으로 설정하여 관리할 계획에 있다(환경부, 2007).

수질오염총량관리 단위유역의 목표수질 달성여부에 대한 수질평가는, 과거 3년동안 측정된 수질을 대상으로 대수정 규분포식(log normal distribution equation)에 의한 평균수질을 산정하여 평가하므로, 대상기간 동안 측정된 수질자료의 정규성 및 분산성 등 수질분포 형태가 수질평가에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 수질분포 형태는 단위유역의 오염원과 함께 하천유량 변화에 따라 단위유역별로 나타나는 특성이 서로 다르다. 또한 오염총량관리 할당부하량 산정의 기준이 되는 기준유량 조건의 수질은 그 조건이 변화함에 따라서 서로 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 수질오염총량관리에 있어서는 각 단위유역에서 특성적으로 나타나는 수질분포 및 수질변화 등을 파악하여 이를 계획수립 및 이행과정에 반영하여 효과적으로 관리할 필요가 있다.

본 연구에서는 낙동강수계를 대상으로, 각 단위유역 하단 지점에서 나타나는 단위유역별 수질분포 형태, 하천유량 변화 및 기준유량 조건에 따른 수질변화 형태를 분석하여 단위유역별 수질변화 유형을 제시하고자 하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
emery99@korea.kr

2. 연구방법

2.1. 수질분포 형태분석

수질오염총량관리 지역에서는 단위유역별 수질변동을 측정·확인하기 위하여 연중 8일 간격으로 수질과 유량을 동시에 측정하고 있으며, 각 단위유역별로 매년 약 40여개 이상씩의 수질 및 유량자료가 축적되고 있다.

본 연구에서는 낙동강수계 총 41개 단위유역을 대상으로 하여 각 단위유역의 하단지점에서 2005년부터 2007년까지 과거 3년간 측정된 수질 및 유량자료(국립환경과학원, 2005, 2006a, 2007)를 이용하여 수질 정규성과 수질 분산성 및 수질 편차성을 분석하였다.

수질 정규성 검증은 kolmogorov - Smirov 검증법을 사용하였다. 수질 분산성은 3년간 측정된 수질에 대한 분산을 비롯하여 각 계절에 해당하는 수질 및 각 유량시기(저수기, 평수기 및 풍수기로 구분)에 해당하는 수질에 대한 분산을 분석하여 표준편차(standard deviation : SD)와 변이계수(coefficient of variation : CV)로 나타내었다.

2.2. 하천유량과 수질변화 형태분석

단위유역의 하단지점에서 나타나는 수질은 하천유량에 따라 변화한다. 그러나 하천유량에 따른 수질변화는 반드시 비례적으로 나타나는 것이 아니므로 유량과 수질 사이의 직접적인 상관성 분석방법에 의해서는 그 경향을 파악하기가 어렵다. 유량-부하량 관계식은 수역의 유량에 따른 수질변화 경향분석이나 또는 유량과 부하량의 관계 등을 파악하는데 이용되고 있다. 그러므로 하천유량과 수질변화와의 관계는 유량-부하량 관계식을 이용한 부하량 변화로서 간접적으로 파악할 수 있다. 이형진 등(2007)은 남한강 중류구간 수계에서 유량-부하량 관계식을 이용하여 유량 증가에 따른 수질농도 변화경향을 분석하였으며, 김태근(2006)은 금강수계의 유량-부하량 관계식을 도출하여 용담호 유입하천에 대한 유입부하량 변동특성을 파악하였다. 본 연구에서는 낙동강수계 단위유역별 유량변화에 따른 수질변화 경향을 파악하기 위하여 2005년부터 2007년까지 3년간 측정된 수질 및 유량자료를 이용하여 각 측정시점의 부하량을 산정한 다음, 산정된 부하량자료와 유량자료로부터 유량-부하량 관계식을 도출하여 분석하였다.

2.3. 기준유량 조건과 수질변화 형태분석

수질오염총량관리 단위유역의 할당부하량은 기준유량 조건 하에서 수질모델링을 통하여 목표수질을 만족할 수 있는 배출부하량을 산정하여 결정한다(국립환경과학원, 2007). 우리나라 수질오염총량관리제에서는 기준유량으로 저수량(Q_{275})과 평수량(Q_{185})을 사용하므로(환경부, 2007), 저수량과 평수량 조건하에서 수질모델의 보정과 검증에 필요한 수질자료의 확보가 필요하다. 그러나 일일단위로 유량·수질을 측정하지 않는 이상 기준유량 조건과 동일한 유량·수질 측정자료의 확보가 어렵기 때문에, 통상적으로 기준유량 조건을 변화하여 즉, 기준유량 범위를 확장하여 수질자료를

확보하게 된다. 이와 같이 확보된 기준유량 수질자료는 확장범위에 따라 달라질 수 있으므로 그 적용성 여부를 면밀히 검토하여야 한다(국립환경과학원, 2006b). 본 연구에서는 기준유량 확장범위를 다음과 같이 일반적으로 사용할 수 있는 확장범위라고 판단되는 기준유량 $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ 의 3가지의 범위로 확장하였을 경우의 수질변화 형태를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질분포 형태

3.1.1. 수질 정규성

3.1.1.1. 목표수질 평가를 위한 수질자료의 정규성

단위유역의 하단지점에서 나타나는 수질분포 형태는 유역의 강우량, 지형조건, 토양특성 및 하천유량 등의 자연적인 수질변동 요인과 단위유역 오염원의 크기와 종류 및 위치, 오염물질 처리시설의 종류 및 운영형태 등과 같은 인위적인 수질변동 요인에 의하여 다양하게 나타난다. 목표수질 달성여부 평가를 위한 평균수질 산정 시 단위유역 수질자료의 분포가 정규성을 이루며 분산의 크기가 작게 나타나는 단위유역에서는 평균수질이 낮게 산정되어 목표수질을 달성하는데 비교적 어려움이 없으나, 이와는 반대로 수질분포가 정규성을 이루지 않거나 분산이 크게 나타나는 단위유역에서는 그 만큼 상대적으로 평균수질이 높게 산정되어 목표수질을 안정적으로 달성하기가 어렵게 된다.

낙동강수계 단위유역별 수질 정규성을 파악하기 위하여 총 41개 단위유역에서 목표수질 달성여부 평가대상이 되는 2005년부터 2007년까지 3년간 측정된 수질자료를 이용하여 다음 Fig. 1과 같이 Kolmogorov - Smirov 검증법에 의한 확률값(p-value)을 분석하였으며, 이 방법에 의한 확률값(p-value)이 0.05 이상이면 정규분포를 나타내고 있는 것으로 보았다.

낙동강수계 수질 정규성 분석결과, 다음 Table 1에 나타난 바와 같이 총 41개 단위유역중 Nakbon-A 등 25개 단위유역인 약 61%에서 p-value 0.05 이상의 정규성을 나타내고 있으며, 5개 단위유역인 약 12%에는 p-value 0.005 미만으로서 정규성이 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 또한 본류수역과 지류수역을 구분해서 살펴보면 본류수역의 14개 단위유역 중 8개 단위유역인 약 57%에서 p-value 0.05 이상으로 나타나고 있으며, 지류수역의 27개 단위유역 중 17개 단위유역인 약 63%에서 p-value 0.05 이상으로서 본류수역에 비하여 다소 정규성이 높은 것으로 나타나고 있는데 이러한 현상은 본류수역에 비하여 지류수역에서는 댐방류를 비롯한 상류흐름의 영향 등 인위적인 변화 요인이 다소 적기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.1.2. 연도별 수질자료의 정규성

연도별 수질분포 및 수질변화 경향을 파악하는 것은 그 단위수역에 대한 오염사감대책의 수립 및 이행과정을 평가하는데 필수적인 기초자료이다. 다음 Table 2는 낙동강수계

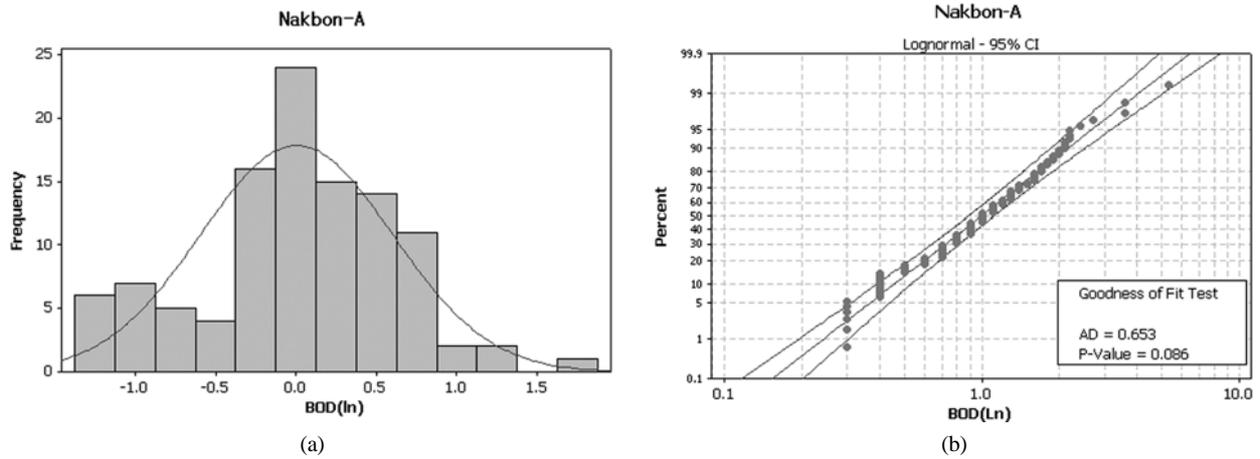


Fig. 1. The distribution of water quality (a) & p-value by Kolmogorov - Smirnov Method (b) for Nakbon-A unit watershed in Nakdong river basin.

Table 1. The list of unit watersheds classified by Kolmogorov-Smirnov p-value in Nakdong river basin

Period	Name of unit watershed.	p-value		
		Above 0.05	0.005 ~ 0.05	Below 0.005
2005~2007		Nakbon-A, Nakbon-E, Nakbon-G, Nakbon-H, Nakbon-J, Nakbon-K, Nakbon-L, Nakbon-N, Yongjeon-A, Gilan-A, Naeseong-A, Naeseong-B, Yeonggang-A, Ian-A, Byeongseong-A, Wicheon-B, Geumho-A, Geumho-B, Hoecheon-A, Hwanggang-A, Hwanggang-B, Namgang-B, Namgang-D, Namgang-E, Milyang-B	Nakbon-B, Nakbon-D, Nakbon-F, Banbyeon-A, Banbyeon-B, Geumcheon-A, Wicheon-A, Gamcheon-A, Namgang-A, Namgang-C, Milyang-A	Nakbon-C, Nakbon-I, Nakbon-M, Micheon-A, Geumho-C
	No. of unit watershed	25	11	5

Table 2. The number of unit watersheds classified by the p-value in Nakdong river basin

p-value	2005	2006	2007
Above 0.05	33(80%)	35(85%)	32(78%)
0.005 ~ 0.05	7(17%)	4(10%)	7(17%)
Below 0.005	1(3%)	2(5%)	2(5%)
Total	41(100%)	41(100%)	41(100%)

각 단위유역에 대하여 연도별 수질측정자료 대상으로 p-value를 분석한 결과로서 2005년부터 2007년까지 매 연도 별로 약 32~35개 단위유역에서 p-value 0.05 이상을 나타내고 있다. 연도별 수질측정자료의 정규성과 Table 1의 목표수질 평가대상이 되는 3년간 수질측정자료의 정규성을 비교하여 볼 때, 연도별 수질측정자료의 수가 적음에도 불구하고 오히려 정규성이 높은 것으로 나타나고 있는데, 이는 각 연도별 수질자료의 분포중심이 서로 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.2. 수질 분산성

3.1.2.1. 목표수질 평가를 위한 수질자료의 분산성

단위유역의 하단지점에서 나타나는 수질은 유역오염원의 규모가 일정한 경우에도 끊임없이 변동하고 있으며, 이와 같은 변동현상은 변동범위 그래프 및 분산의 크기로서 파악할 수 있다.

다음 Fig. 2는 2005년부터 2007년까지 목표수질 평가대상이 되는 수질자료에 대한 변동범위를 분석한 그래프로서, 낙동강수계 본류수역에서는 낙본H, 낙본I, 낙본N 단위유역의 수질 변동범위가 비교적 크게 나타나고 있으며, 지류수역에서는 금호C, 남강E, 밀양B 단위유역의 수질 변동범위가 비교적 크게 나타나고 있다. 이와 같은 단위유역에서는 특별하게 높거나 또는 낮은 특이수질이 비교적 빈번하게 출현하여 수질 변동범위가 크게 나타난 것이며, 이러한 현상은 계절적인 강우량 차이 및 상류댐 방류량의 급격한 변화 등과 같은 자연적인 요인과 환경기초시설 방류수질의 변동이나 또는 유역내의 알려지지 않은 오염원으로부터의 일시적인 배출현상 등과 같은 인위적인 요인에 기인된 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 특이수질의 출현으로 인하여 해당 단위유역에 대한 수질 분산성이 커지고 목표수질 달성여부 평가를 위한 평균수질이 높게 산정됨으로서 효과적인 수질오염총량관리가 어렵게 된다. 따라서 이와 같은 단위유역에서는 특이수질 출현의 원인을 파악하여 그 원인이 인위적인 요인으로 판명될 경우에는 삭감계획의 우선순위의 변경 등 이행관리 방안에 대한 조정이 필요하다.

다음 Table 3은 목표수질 평가대상이 되는 단위유역별 수질자료에 대한 표준편차 및 변이계수를 분석한 결과이다. 낙동강수계 41개 단위유역의 수질 표준편차는 0.4~2.2 mg/L 범위로 나타나고 있으며, 수질 변이계수는 38.9~92.1% 범위로서 평균 57.7%로 나타나고 있다. 각 단위유역에서 나

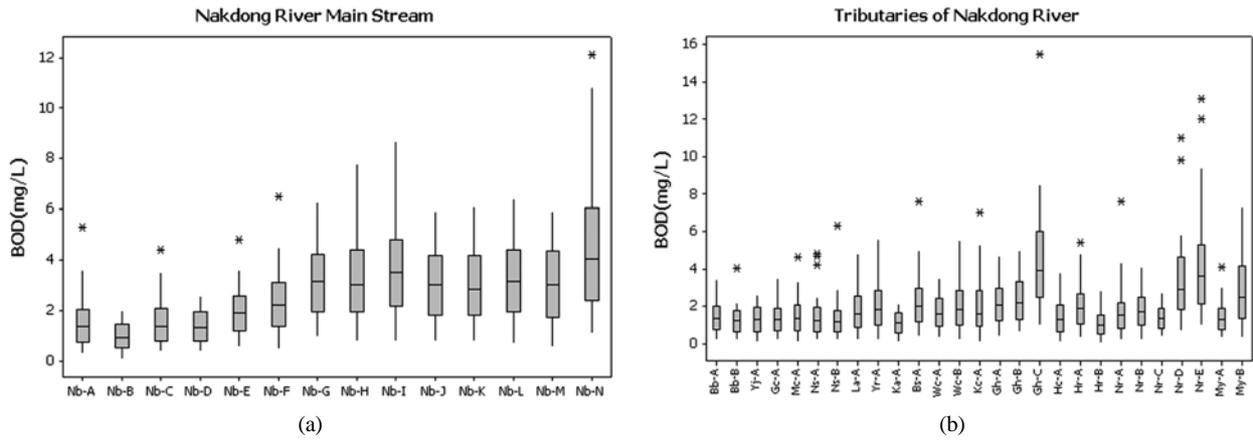


Fig. 2. The variation range in water quality of unit watersheds on main stream (a) & tributaries (b) in Nakdong river basin.

Table 3. The range of SD & CV in water quality of unit watersheds in Nakdong river basin

Water quality level (mg/L)	Number of unit watershed	Range of SD (mg/L)	Range of CV (%)
≤ 1	12	0.4~0.8	50.8~92.1
1 ~ 2	16	0.4~1.0	38.9~77.2
2 ~ 3	9	1.0~1.5	44.1~65.0
3 <	4	1.5~2.2	46.8~63.9

타나는 변이계수를 농도구간별로 살펴보면, 1 mg/L 이하의 농도수준을 나타내고 있는 12개 단위유역에서는 평균 61.8%의 변이계수를 나타내고 있으며, 1~2 mg/L 농도수준의 16개 단위유역에서는 58.8%, 2~3 mg/L 농도수준의 9개 단위유역에서는 50.5% 및 3 mg/L 이상의 농도수준을 나타내는 4개 단위유역에서는 57.0%의 변이계수를 나타내고 있다. 낙동강수계에서는 일부 낮은 농도수준에서 변이계수가 비교적 높게 나타는 경향이 있으나 수질 농도와 변이계수 사이에 직접적인 비례관계는 나타나고 있지 않다.

3.1.2.2. 계절별 수질자료의 분산성

우리나라에서 수질변동이 나타나는 주요한 요인 중의 하나가 계절적 현상이다. 즉, 계절에 따라 강우량 및 기온 등이 큰 폭으로 변화됨에 따라 수질변동이 발생하게 된다.

다음 Table 4는 낙동강수계 단위유역의 계절별 수질 변이계수 분석결과를 요약한 것이다. 낙동강수계 계절별 수질 변이계수를 보면 봄 6.5~107.2(평균 32.7%), 여름 2.4~79.8(평균 32.6%), 가을 0.4~68.8(평균 27.7%), 겨울 0.4~29.3(평균 11.4%)로서 강우 빈도수가 많은 봄철과 여름철에 수질변동이 가장 크게 나타나고 있으며, 겨울에는 수질변동이 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.1.2.3. 유량시기별 수질자료의 분산성

우리나라에서는 특히 강우량의 편중으로 인하여 연중 하천유량 변동폭이 크게 나타나고 있으며, 이와 같은 유량변동은 단위유역의 점오염원과 비점오염원의 분포비율 및 배출특성과 함께 단위유역 하단지점에서 수질변동의 중요한 요인이 되기도 한다. 낙동강수계에서 연중 하천 유량시기를

Table 4. The coefficient of variation of unit watersheds for each season in Nakdong river basin

		Spring	Summer	Autumn	Winter
Coefficient of variation(%)	Min	6.5	2.4	0.4	6.4
	Max	107.2	79.8	68.8	29.3
	Avg	32.7	32.6	27.7	11.4

Table 5. The coefficient of variation of unit watersheds for the stream flow in Nakdong river basin

		Low flow period	Ordinary flow period	High flow period
Coefficient of variation(%)	Min	17.6	35.2	34.1
	Max	105.3	100.3	89.6
	Avg	49.2	54.7	55.3

3가지 시기 즉, 저수기(low flow period), 평수기(ordinary flow period) 및 풍수기(high flow period)로 구분하고 각 유량시기별 수질 변이계수를 분석하였다.

위의 Table 5에서 보는 바와 같이 낙동강수계 유량시기별 수질 변이계수는 저수기에 17.6~105.3(평균 49.3%), 평수기에 35.2~100.3(평균 54.7%) 및 풍수기에 34.1~89.6(평균 55.3%)로서 유량시기별 수질 변이계수는 차이가 크지는 않으나 평균적으로 볼 때 유량이 많은 시기일수록 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다.

3.1.3. 수질 편차성

3.1.3.1. 연도별 수질의 상대적 차이

단위유역의 오염원의 크기는 자연증감과 지역개발 및 삭감행위에 따라서 변화한다. 그러나 대규모의 지역개발이나 삭감행위가 이루어지지 않는 한 급격한 수질변동을 초래할 만큼 연도별 오염원의 변화는 그다지 크게 일어나지 않는다. 그럼에도 불구하고 단위유역의 환경조건 등 여러 가지 요인에 따라 연도별로 상당한 수질변동이 나타나고 있다. 다음 Table 6은 '05년부터 '07년까지 3년간의 수질측정결과 중 각 연도별 평균수질을 구하여 연도별 상대적 수질차이를 나타낸 것이다. 낙동강수계 41개 단위유역에서는 3년 동안 연도별로 최대 75%까지 수질차이가 나타나고 있으며,

Table 6. Differences in water quality of unit watersheds between years in Nakdong river basin

	'05&'06 difference (%)	'06&'07 difference (%)	'05&'07 difference (%)
Max	71.4	35.7	75.0
Min	0.0	0.0	0.0
Avg	26.6	13.0	24.9

평균 13.0 ~ 26.6%의 수질차이를 나타내고 있다.

3.1.3.2. 연도별 수질편차

수질오염총량관리를 위해서는 먼저 광역시도 경계지점의 목표수질을 설정하고, 이 경계지점의 목표수질이 달성될 수 있도록 광역시도 관할구역 내의 각 단위유역들에 대한 목표수질을 설정한다. 그리고 연중 특정시점의 기준유량을 정하여 이 기준유량 조건 하에서 목표수질을 만족할 수 있는 할당부하량을 산정하여 매년 목표수질지점의 수질을 평가한다. 전국 수질오염도 현황 파악 및 수질 변화추이 등은 환경부 수질측정망 수질자료를 바탕으로 매년 산술평균식에 의하여 산정된 연도별 평균수질로 평가하고 있으나(국립환경과학원, 2007), 수질오염총량관리 단위유역의 목표수질 달성여부 평가를 위한 수질은, 해당년도 1년간 측정된 수질에 대하여 산술평균식에 의한 평균값으로 산정하는 것이 아니라, 해당년도를 기준으로 과거 3년간 측정된 수질자료를 이용하여 대수평균분포식에 의한 평균수질을 산정하여 평가한다(환경부, 2002a). 목표수질 달성여부 평가를 위한 평균수질이 2회(2년) 연속 목표수질 이하인 단위유역을 제외하고는 시행계획을 수립하게 된다. 단위유역 하단지점에서 일정기간 나타나는 수질변화 유형은 단위유역에 따라 고유한 특징을 가지고 있거나 또는 동일 단위유역일지라도 시간의 경과에 따라 그 양상이 다르게 나타날 수 있다.

이와 같이 목표수질 달성여부를 평가하는데 있어서 당해년도의 연평균 수질을 사용하지 않고 과거 3년간 수질측정자료의 평균수질을 사용하는 것은 연도별 수질변동(annual variation)에 따른 차이폭을 완화시켜 수질오염총량관리 제도의 안정성을 기하도록 하기 위함이다. 그러나 수질오염총량관리 이행평가 과정에서는 당해년도 1년간 측정된 수질자료를 이용하게 되는데 이와 같은 경우에는 목표수질 평가방법으로 산정한 3년간의 평균수질과 연도별 평균수질 사이에는 그 규모나 유형에 있어서 당연히 차이가 나타날 수 있다. 따라서 보다 명확한 수질변화 경향을 파악하기 위해서는 단위유역별로 3년평균 수질에 대한 연도별 수질편차를 검토·확인할 필요가 있다.

다음 Table 7은 3년평균 수질에 대한 각 연도별 평균수질의 편차를 나타낸 것이다. 연도별 수질편차는 최대 53.3%로까지 나타나고 있으며, 평균 약 9.9 ~ 13.5% 범위로서 연도별 상대적 수질차이에 비해 약 절반정도의 수준으로 나타나고 있다.

수질오염총량관리 지역에서는 과거 3년간 연도별 수질의 상대적 차이가 크거나 또는 3년평균 수질에 대한 연도별

Table 7. The deviation of annual average water quality to 3-year average of unit watersheds in Nakdong river basin

	'05 deviation (%)	'06 deviation (%)	'07 deviation (%)
Max	53.3	40.0	27.3
Min	0.0	0.0	0.0
Avg	13.5	11.1	9.9

수질편차가 큰 단위유역에서는 그 원인을 정확하게 분석하여 이를 총량관리 계획에 적절하게 반영할 필요가 있다.

3.2. 하천유량에 따른 부하량 변화

3.2.1. 유량-부하량 관계식

상류지역의 영향을 배제할 경우, 단위유역 하단지점의 하천유량은 단위유역에 내리는 강우량에 따라 변동된다. 이로 인하여 유역으로부터 유출되는 부하량이 달라지며 수질변동을 수반하게 된다. 다음 Table 8은 낙동강수계 41개 단위유역 하단지점의 하천유량과 BOD부하량의 관계식($L = a \times O^b$)을 도출한 결과이다. 유량-부하량 관계식에서 중요한 의미를 가지는 값은 기울기를 나타내는 계수 b로서 0.697 ~ 1.243 범위로 나타나고 있다. 상류지역의 영향이 그리 크지 않다고 전제할 때 관계식에서 계수 b값이 1보다 작게 나타난 경우는 유역의 오염원이 주로 점오염원으로 분포되어 있어 하천유량이 증가하여도 유출되는 부하량이 큰 비율로 증가하지 않은 단위유역 즉, 수질이 증가하는 경향이 나타나지 않는 단위유역들이며, 계수 b값이 1보다 크게 나타난 경우는 유역의 주 오염원이 비점오염원으로 분포되어 있어 하천유량이 증가함에 따라 유출되는 부하량도 함께 큰 비율로 증가함으로써 수질이 증가하는 경향을 나타내는 단위유역들의 특성이 나타난 것이라고 할 수 있다.

3.2.2. 하천유량 증가에 따른 부하량 변화유형

하천유량 변화에 따라 단위유역 하단지점의 부하량이 어떤 변화유형을 나타내는가를 확인하면 총량관리 목표수질 달성을 위한 효과적인 삭감대상 오염원을 우선 선정할 수 있다.

다음 Fig. 3은 단위유역 하단지점의 하천유량과 BOD부하량의 관계식을 도식화 하여 나타낸 것이다. 그림 왼쪽의 낙분A 단위유역은 관계식의 계수 b값이 1보다 작은 경우로서 하천유량 증가에 따라 부하량이 큰 비율로 증가하지 않는 지역 즉, 점오염원이 수질변화 지배적인 단위유역의 유형을 나타낸 것이며, 그림 오른쪽의 황강B 단위유역은 관계식의 계수 b값이 1보다 큰 경우로서 하천유량 증가에 따라 부하량이 비교적 큰 비율로 증가하는 지역 즉, 비점오염원이 수질변화 지배적인 단위유역의 유형을 나타낸 것이다. 낙분A 단위 유역을 비롯한 전체 단위유역의 약 68%인 28개 단위유역은 점오염원이 수질변화 지배적인 특성을 나타내고 있는 단위유역으로 나타났으며, 황강B 단위유역을 비롯한 약 32%인 13개 단위유역은 비점오염원이 수질변화 지배적인 특성을 나타내고 있는 단위유역으로 나타났다. 수질오염총량관리를 위해서는 단위유역의 하단지점에서

Table 8. Regression Equation and correlation coefficient for each unit watershed in Nakdong river basin

Unit watershed	$L = a \times Q^b$	R	Unit watershed	$L = a \times Q^b$	R
Nakbon-A	$L=114.456Q^{0.776}$	0.775	Geumho-B	$L=174.157Q^{0.966}$	0.911
Nakbon-B	$L=71.095Q^{0.974}$	0.916	Geumho-c	$L=382.056Q^{0.897}$	0.815
Banbyeon-A	$L=78.010Q^{1.049}$	0.922	Nakbon-G	$L=738.848Q^{0.762}$	0.866
Banbyeon-B	$L=76.895Q^{1.026}$	0.947	Hoecheon-A	$L=71.869Q^{1.034}$	0.877
Yongjeon-A	$L=82.990Q^{0.899}$	0.905	Hwanggang-A	$L=87.379Q^{1.052}$	0.901
Gilan-A	$L=56.962Q^{1.111}$	0.950	Hwanggang-B	$L=26.676Q^{1.243}$	0.809
Micheon-A	$L=89.367Q^{1.023}$	0.930	Nakbon-H	$L=253.479Q^{0.970}$	0.925
Nakbon-C	$L=47.025Q^{1.148}$	0.848	Namgang-A	$L=91.697Q^{0.973}$	0.845
Naeseong-A	$L=67.460Q^{0.976}$	0.875	Namgang-B	$L=105.342Q^{0.996}$	0.896
Naeseong-B	$L=53.971Q^{1.030}$	0.899	Namgang-C	$L=71.838Q^{1.088}$	0.954
Geumcheon-A	$L=83.978Q^{1.079}$	0.963	Namgang-D	$L=445.186Q^{0.800}$	0.914
Yeonggang-A	$L=165.004Q^{0.836}$	0.875	Namgang-E	$L=749.534Q^{0.709}$	0.854
Ian-A	$L=86.944Q^{0.989}$	0.893	Nakbon-I	$L=1127.434Q^{0.725}$	0.863
Byeongseong-A	$L=144.589Q^{0.926}$	0.910	Nakbon-J	$L=915.742Q^{0.755}$	0.851
Wicheon-A	$L=108.031Q^{0.962}$	0.944	Milyang-A	$L=95.871Q^{0.956}$	0.927
Wicheon-B	$L=102.930Q^{1.058}$	0.923	Milyang-B	$L=357.664Q^{0.697}$	0.864
Nakbon-D	$L=64.247Q^{1.052}$	0.891	Nakbon-K	$L=719.551Q^{0.778}$	0.868
Gamcheon-A	$L=110.341Q^{0.961}$	0.847	Nakbon-L	$L=702.244Q^{0.798}$	0.873
Nakbon-E	$L=187.454Q^{0.933}$	0.887	Nakbon-M	$L=352.005Q^{0.881}$	0.919
Nakbon-F	$L=229.015Q^{0.922}$	0.860	Nakbon-N	$L=355.842Q^{0.976}$	0.902
Geumho-A	$L=169.322Q^{0.929}$	0.909	-	-	-

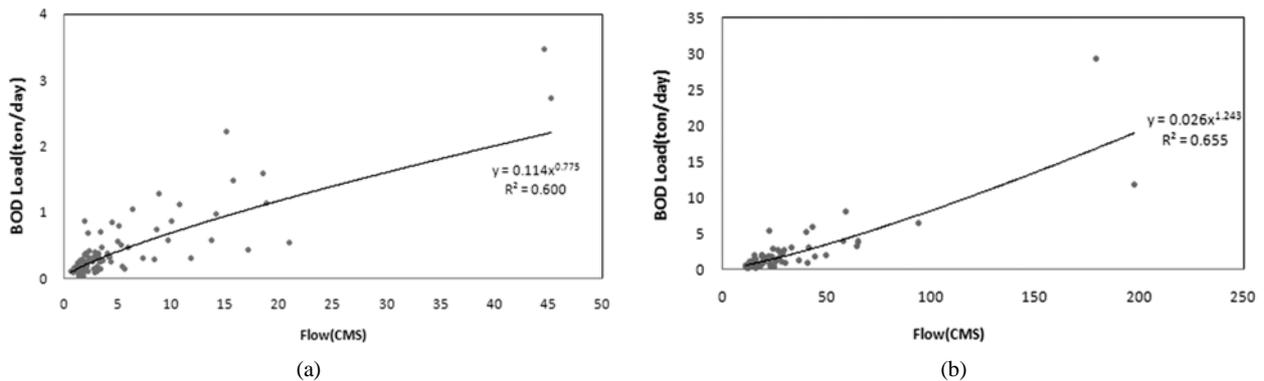


Fig. 3. The flow-loads curve on Nakbon A (a) & Hwanggang B (b) in Nakdong river basin.

나타나는 부하량 변화유형을 기준으로 하여 효율성이 가장 큰 삭감방안을 우선적으로 고려할 필요가 있다.

3.3. 기준유량 조건변화와 수질변화 유형

3.3.1. 기준유량 조건변화와 수질자료 확보성

수질오염총량관리에 있어서 저수량 또는 평수량을 기준 유량으로 설정한다는 것은 그 시점의 배출부하량을 할당부하량으로 지정한다는 것을 의미하므로 그 유량시의 수질 및 배출부하량이 연중 배출부하량의 일정한 기준이 되거나 또는 대표적인 특징을 나타낼 수 있어야 한다. 그러나 기준유량 시점의 수질자료가 유량과의 유의성이 없거나 해당 유량시기의 대표성이 나타나지 않는 지역에서는 기준유량 설정에 대한 의미가 없어질 뿐만 아니라 수질오염총량관리를 위한 합리적인 계획수립이 어렵게 된다.

현재의 유량 및 수질측정 체계 하에서는 저수량이나 평

수량과 같은 특정 기준유량 조건에 대한 수질측정자료의 확보가 매우 어렵기 때문에 기준유량 조건을 확장하여 즉, 기준유량 범위를 넓혀서 수질측정자료를 확보하게 되는데, 이 경우 기준유량 확장범위에 따라서 수질값이 서로 다른 양상으로 나타날 수 있다. 그러므로 이와 같은 방법에 의하여 확보된 자료를 이용하고자 할 경우에는 그 수질값이 해당 기준유량 조건의 수질을 대표할 수 있는 지에 대한 다각적인 검토와 함께 수질모델 적용성 여부를 판단하여야 한다.

다음 Table 9는 낙동강수계 41개 단위구역에서 2005년도 부터 2007년까지 3년간 연간 30회 이상 측정(연간 최대 45회 측정)한 자료에 대하여 기준유량 확장범위별로 확보할 수 있는 유량·수질 측정자료 수를 나타낸 것이다. 기준유량의 확장범위가 커질수록 측정자료 수는 많아지고 있으나 총 수질측정자료수와 비교하여 지나치게 많은 경우도 있으

Table 9. The number of measurements(water quality & flow rate) by the extension range of standard flow in Nakdong river basin

		Low flow			Ordinary flow		
		±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%
2005	Max	3	5	9	2	4	8
	Min	0	0	0	0	0	0
	Avg	1	2	4	0	1	2
2006	Max	9	15	16	4	9	14
	Min	0	0	0	0	0	0
	Avg	2	4	7	1	2	4
2007	Max	8	11	17	6	9	16
	Min	0	0	0	0	0	0
	Avg	2	3	7	1	2	4

며, 또한 기준유량 범위를 확장하여도 수질측정 자료를 전혀 확보할 수 없는 단위유역도 존재하고 있다. 즉, 2007년도의 기준유량±20% 경우를 보면 저수량에서 최대 17개의 자료(연간 최대 측정자료수의 약 38%) 및 평수량에서 최대 16개의 자료(연간 최대 측정자료수의 36%)가 기준유량에 포함되어 측정자료가 지나치게 편중되는 현상을 나타내고 있다. 이러한 경우에는 해당 기준유량의 수질 대표성을 나타내는 데 문제가 있을 수 있다. 또한, 매년 2~3개 단위유역에서는 기준유량±20% 범위까지 확장하여도 2005년부터 2007년까지 3년간 수질자료가 확보되지 않고 있으며, 이 경우 수질자료를 확보하기 위하여 확장범위를 더욱 증가시킬 경우 기준유량의 범위가 너무 광범위하게 되어 기준유량 설정의 의미를 상실하게 된다.

3.3.2. 기준유량 확장범위별 상대적 수질차이

이와 같이 기준유량 확장범위를 어떻게 설정하느냐에 따라서 각 범위에 포함되는 수질측정자료의 수가 달라지며, 이에 따라 수질값의 차이가 발생하게 된다.

다음 Table 10은 기준유량 확장범위들 사이의 수질값의 상대적인 차이를 나타낸 것으로서 수질값의 차이가 매우 크게 발생하고 있다. 즉, 2006년 평수량의 경우에는 최대 216.7%까지 나타나고 있으며 평균 4.8 내지 38.9%의 범위

Table 10. Differences in water quality between the extension of standard flow in Nakdong river basin

		Low flow			Ordinary flow		
		±5&±10%	±10&20%	±5&±20%	±5&±10%	±10&20%	±5&±20%
2005	Max	10.0	100.0	100.0	27.8	62.5	62.5
	Min	-18.2	-38.1	-33.3	-30.0	-25.0	-16.7
	Avg*	4.8	16.9	17.4	8.2	15.8	12.4
2006	Max	133.3	44.4	166.7	160.0	216.7	216.7
	Min	-47.1	-26.1	-51.5	-42.9	-31.3	-47.6
	Avg*	29.5	14.3	38.9	22.5	21.2	33.1
2007	Max	75.0	125.0	85.7	88.9	166.7	166.7
	Min	-41.0	-28.6	-38.5	-17.4	-48.0	-33.3
	Avg*	13.3	16.9	22.1	13.5	25.2	29.2

* average from absolute values

로 나타나고 있다. 이것은 특정 기준유량 조건에 대한 수질자료를 확보하기 위하여 기준유량 조건을 확장할 경우 수질값이 크게 달라지므로 이 자료들을 수질모델링이나 할당부하량 산정 시 적용할 경우 불확실성 요인이 크게 증가될 수 있음을 시사해 주는 것이다.

3.3.3. 기준유량 확장에 따른 수질변화 유형

기준유량 확장에 따른 수질변화를 파악하기 위하여 연평균 수질을 기준으로 하여 각 기준유량 확장범위별 수질과 비교하였다. 다음 Table 11은 연평균 수질과 기준유량 확장범위별 수질값과의 차이비율을 산정하여 그 최대, 최소 및 평균(각 차이값 비율의 절대치에 대한 평균)을 나타낸 것이다. 연평균 수질을 기준으로 한 기준유량 확장범위별 수질편차는 저수량의 경우 2005년도 42.9 ~ 58.0%, 2006년도 16.7 ~ 32.9%, 2007년도 17.7 ~ 25.7%로 편차가 크게 나타난 반면, 평수량의 경우에는 2005년도 28.8 ~ 34.8%, 2006년도 24.0 ~ 32.7%, 2007년도 25.4 ~ 32.8%로 저수량에 비해 비교적 편차가 작게 나타나고 있다.

기준유량 확장에 따른 수질변화 유형을 나타내기 위하여 Table 11에서 산정한 수질편차를 다음 그림과 같이 도식화하였으며(Fig. 4), 수질변화 유형은 4종류로 구분하였다. 즉, 기준유량 3가지 확장범위(±5%, ±10%, ±20%)에 대한 수질이 ①모두 연평균 수질보다 높은 경우(Fig. 4의 a에 해당), ②모두 연평균 수질보다 낮은 경우(Fig. 4의 b에 해당), ③연평균 수질보다 높은 수질에서 낮은 수질로 교차하는 경우(Fig. 4의 c에 해당), ④연평균 수질보다 낮은 수질에서 높은 수질로 교차하는 경우(Fig. 4의 d에 해당)로 나타내었다. Fig. 1의 (a)와 (b)의 경우와 같이 수질편차가 그다지 크지 않고 유량과의 유의성을 나타내는 경우에는 크게 문제가 되지 않으나, (c)와 (d)의 경우와 같이 수질편차가 크고 특히, 평균수질과 교차하여 유량과의 유의성을 전혀 나타내지 않는 경우에는 이와 같은 수질모델링 또는 할당부하량 산정의 기준수질로서 적용하는 데는 신중한 검토가 필요하다.

다음 Table 12는 낙동강수계에서 기준유량 확장에 따른 수질변화 유형별 단위유역을 나타낸 것이다. 여기에서 모든

Table 11. The deviation of water quality of extended standard flow rate to the annual average in Nakdong river basin

		Low flow			Ordinary flow		
		±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%
2005	Max	162.5	162.5	123.1	144.4	144.4	144.4
	Min	-54.5	-54.5	-66.7	-33.3	-47.8	-62.5
	Avg*	53.0	58.0	42.9	28.8	34.8	31.9
2006	Max	74.4	35.3	57.1	115.4	50.0	75.0
	Min	-70.0	-55.6	-50.0	-100.0	-73.3	-58.8
	Avg*	32.9	21.2	16.7	32.7	25.6	24.0
2007	Max	75.0	75.0	115.8	60.0	85.0	73.9
	Min	-50.0	-50.0	-57.1	-75.0	-75.0	-58.8
	Avg*	25.7	17.7	18.2	31.4	32.8	25.4

* average from absolute values

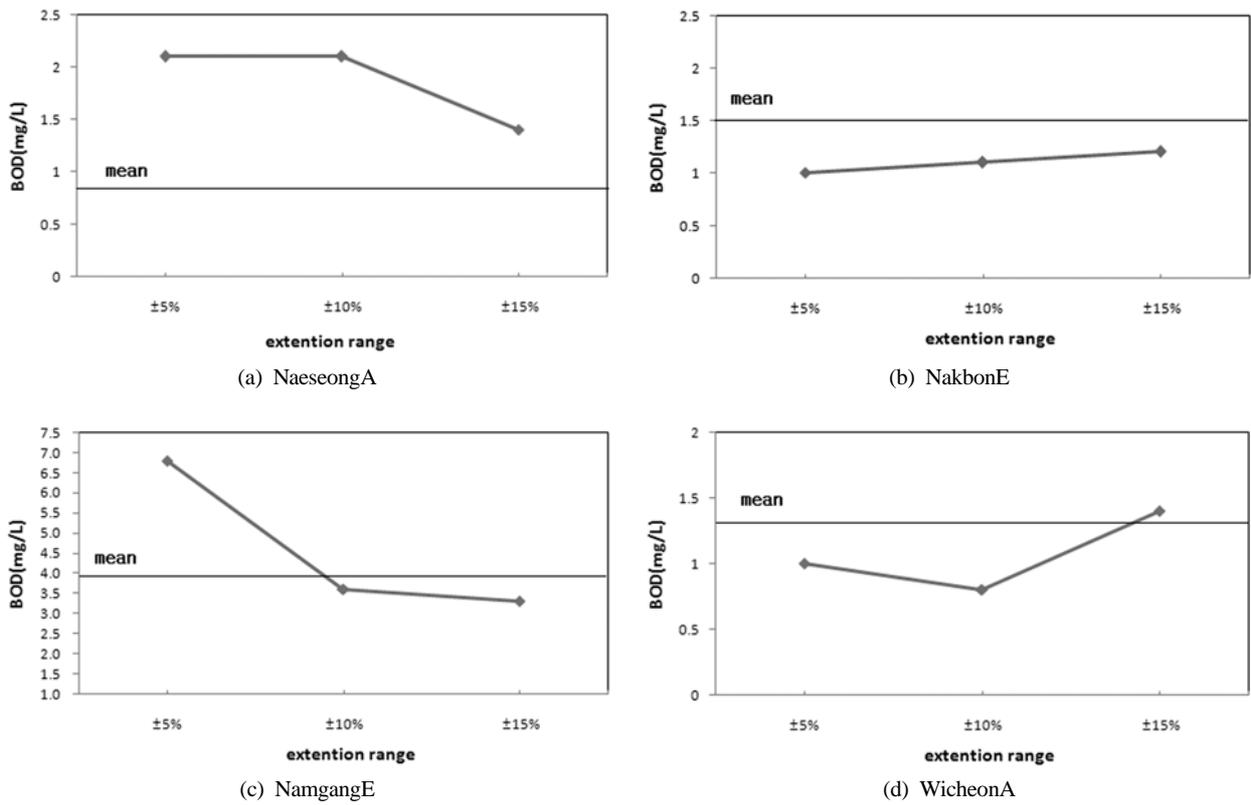


Fig. 4. The water quality patterns due to the extension of standard flow rate in Nakdong river basin.

Table 12. The list of unit watersheds classified by water quality patterns due to the extension of standard flow rate in Nakdong river basin

	Water quality pattern	Unit watershed		
		2005	2006	2007
Low flow	Higher than annual average	YongjeonA, GilanA, NakbonC, NaeseongA, NaeseongB, GuemcheonA, YeonggangA, WicheonB, NakbonD, GuemhoA (10)	NakbonE, GuemhoA, GuemhoC, MilyangB, NakbonM (5)	BanbyeonB, YongjeonA, GilanA, NakbonC, GamcheonA, GuemhoB, NakbonG, NakbonH, NamgangA, NamgangB, NamgangD, NamgangE, NakbonJ, NakbonK, NakbonL, NakbonM (16)
	Lower than annual average	NakbonB, IanA, ByeongseongA, GamcheonA, NakbonE, NakbonF (6)	BanbyeonB, GilanA, NakbonC, NaeseongA, NaeseongB, GuemcheonA, YeonggangA, WicheonA, WicheonB, NakbonD, GamcheonA, NakbonF, HwanggangA, NamgangA, NamgangB, NamgangD, NakbonI, MilyangA (18)	NaeseongA, NaeseongB, mcheonA, WicheonB, NakbonD, NakbonE, NakbonF, GuemhoA, HwanggangA, MilyangB (10)
	Crossing the annual average downward	-	BanbyeonA, NakbonH (2)	BanbyeonA, MicheonA, WicheonA (3)
	Crossing the annual average upward	-	IanA, ByeongseongA, NakbonG, NamgangE (4)	NakbonI (1)
	Others (the same as annual average)	-	MicheonA (1)	HoicheonA (1)
Ordinary flow	Higher than annual average	NakbonB, BanbyeonB, WicheonB, GuemhoA, GuemhoC (5)	NakbonA, BanbyeonA, MicheonA, WicheonA, WicheonB, NakbonH (6)	GuemhoA, GuemhoC, NakbonG, HwanggangB, NakbonH, NamgangD (6)

Table 12. The list of unit watersheds classified by water quality patterns due to the extension of standard flow rate in Nakdong river basin (continued).

	Water quality pattern	Unit watershed		
		2005	2006	2007
Ordinary flow	Lower than annual average	NakbonA, YongjeonA, GilanA, MicheonA (4)	BanbyeonB, YongjeonA, GilanA, NakbonE, GuemhoB, NakbonG, HwanggangB, NakbonI, MilyangB, NakbonL, NakbonM (11)	NakbonA, BanbyeonA, MicheonA, YeonggangA, NakbonD, GamcheonA, NakbonE, HoicheonA, HwanggangA, NamgangA, NakbonJ, MilyangB, NakbonK, NakbonL (14)
	Crossing the annual average downward	HoicheonA (1)	NakbonB, NakbonC, NamgangA, NamgangB (4)	-
	Crossing the annual average upward	-	NaeseongA, GuemcheonA, GamcheonA, HwanggangA, NakbonJ, NakbonK (6)	WicheonA (1)
	Others (the same as annual average)	-	-	-

단위유역에서 3년 동안 연속해서 기준유량 확장범위에 따른 수질값이 반드시 확보되는 것은 아니므로 동일한 단위유역이 3년간에 걸쳐서 분석대상이 되지 않은 한계점은 있지만, 기준유량 확장에 따른 수질값이 그 확장범위에 따라서 연평균 수질과 교차하는 단위유역이 상당수 존재하고 있다.

저수량에서는 2006년도의 경우 반변A 등 6개 단위유역에서 연평균 수질과 교차하고 있으며, 2007년도의 경우에는 반변A 등 4개 단위유역에서 연평균 수질과 교차하고 있다. 펄수량에서는 2005년도에 1개 단위유역에서, 2006년도에는 낙본B 등 10개 단위유역에서, 2007년도에는 1개 단위유역에서 연평균 수질과 교차하고 있는 것으로 나타났다.

3.3.4. 기준유량 설정의 합리적 대안

2011년부터 시행되는 제2단계 수질오염총량관리는 관리대상물질이 BOD와 T-P로서 기준유량은 10년 평균 저수량과 펄수량을 사용하고 있다. 이와 같이 2개 이상의 기준유량을 사용하는 것은 관리대상 오염물질의 종류 또는 단위유역의 오염물질 배출특성에 따라 두가지 기준유량중 하천수질이 더 악화되는 조건의 배출부하량을 산정하여 할당함으로써 목표수질을 보다 안정적으로 달성할 수 있는 기준이 설정되도록 하기 위한 것이다.

이와 같은 방법은 단위유역의 일일 유량측정자료와 수질 측정자료를 바탕으로 하여 기준유량 조건을 명확히 확인할 수 있고 유량과 수질 사이에 유의적인 관계를 나타내는 경우에는 바람직한 방법이 될 수 있으나 현실적으로 일일단위의 연속 측정된 유량 및 수질자료를 확보한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 또한 기준유량 범위를 확장하여 수질자료를 확보하고자 하는 경우에는 기준유량 확장범위가 적을수록 유량적인 측면에서는 오차가 크게 발생하지 않은 반면 수질 측정자료가 아주 적거나 아예 없는 경우가 발생할 수 있고, 확장범위가 클수록 수질 측정자료의 확보는 비교적 용이한 반면, 기준유량과의 편차가 커지게 되므로 확보된 자료의 신뢰도는 감소하게 된다. 그러나 확장범위가 큰 경우라고 할지라도 반드시 측정자료가 확보될

수 있는 것은 아니며, 이와는 반대로 특정 기준유량시에 측정자료가 너무 많이 편중되어 있거나 유량과의 유의성이 존재하지 않을 경우에는 수질 대표성에 대한 문제점을 내포하게 된다.

그러므로 우리나라와 같이 연중 하천유량 변동이 매우 심하고 특정 유량시기의 유량과 수질과의 관계에 대한 유의성을 파악하기 어려운 단위유역이 존재하는 지역에서는 연평균 유량을 기준유량으로 설정하는 것을 고려해 볼 수 있을 것이다. 즉, 연간 30회 이상 측정된 유량자료를 평균하여 그 값을 기준유량으로 설정하고, 또한 동일 기간동안 측정된 수질자료를 평균하여 기준유량 조건의 수질로 적용하는 것이다. 이와 같이 연평균 유량을 기준유량으로 설정하고 연평균 수질을 기준유량 시기의 수질로 적용하면 수질모델링 과정의 배출부하량과 수질과의 관계에 있어서 편향되거나 왜곡되는 것을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 보다 합리적으로 할당부하량을 산정할 수 있게 된다. 또한 이 방법은 현행 수계법 상의 목표수질 만족여부 수질평가를 위한 평균수질 산정방법과 일치하게 되어 오염총량관리 계획수립과 평가과정의 일관성을 유지할 수 있게 된다.

4. 결론

수질오염총량관리는 유역의 할당부하량 관리를 통하여 궁극적으로 수역의 목표수질을 달성하는 것이다. 수질오염총량관리 과정에서는 단위유역 하단지점의 수질변화를 최소화시킬 수 있는 삭감대안을 우선적으로 고려하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 낙동강수계 41개 단위유역을 대상으로 단위유역 하단지점에서 나타나는 수질분포 형태, 유량에 따른 수질변화 및 기준유량 조건의 수질변화 유형을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, 기본계획 수립시 단위유역별로 특성적으로 나타나는 수질변화 유형을 충분히 고려함으로써 목표수질이 보다 효과적으로 달성되도록 하여야 할 것이다.

- 1) 낙동강수계 총 41개 단위유역 중 수질 정규성을 나타내고 있는 단위유역은 25개(약 61%)이며, 5개 단위유역(약 12%)에서는 정규성이 거의 없는 것으로 나타나고 있다.
- 2) 수질측정자료의 분산을 나타내는 표준편차는 0.4~2.2 mg/L 범위로 나타나고 있으며, 변이계수는 38.9~92.1% (평균 57.7%)로서 비교적 큰 폭으로 나타나고 있다. 각 계절별 수질측정자료의 변이계수는 봄 6.5~107.2(평균 32.7%), 여름 2.4~79.8(평균 32.6%), 가을 0.4~68.8(평균 27.7%), 겨울 0.4~29.3(평균 11.4%)로서 봄철과 여름철에 수질변동이 가장 심하게 나타나고 있으며, 유량시기별 수질측정자료의 변이계수는 저수기 17.6~105.3(평균 49.3%), 풍수기 35.2~100.3(평균 54.7%) 및 풍수기 34.1~89.6(평균 55.3%)로서 평균적으로 유량이 많은 시기일수록 다소 증가하는 경향을 나타내었다.
- 3) 단위유역의 연도별 상대적 수질차이는 최대 75% 및 평균 13.0~26.6%의 범위로 나타나고 있으며, 연평균 수질을 기준으로 한 수질편차는 최대 53.3% 및 평균 약 9.9~13.5% 범위로서 연도별 상대적 수질차이에 비해 약 절반정도 수준으로 나타났다. 연도별 상대적 수질차이 및 연도별 수질편차가 큰 단위유역에서는 총량관리 시행계획 이행평가지 배출부하량 검토와 함께 수질편차가 발생하는 원인을 분석하여 차기년도 이행과정에 적절하게 반영하여야 할 것이다.
- 4) 하천유량에 따라 점오염원이 수질변화 주요 요인으로 작용하고 있는 단위유역은 28개로서 전체 단위유역의 약 68%를 차지하고 있으며, 비점오염원이 수질변화 주요 요인으로 작용하고 있는 단위유역은 13개로서 약 32%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 수질오염총량관리를 위해서는 이와 같은 수질변화 유형을 기준으로 하여 효과적인 삭감방안의 우선순위를 선정하는 것이 필요하다.
- 5) 기준유량 확장범위별 수질값의 상대적 차이는 2006년 평수량의 경우 최대 216.7%까지 매우 크게 나타나고 있으며, 평균 4.8 내지 38.9%의 범위를 나타내고 있다. 또한, 기준유량 확장시의 수질변화 유형은 2006년도의 경우 저수량에서 9개 및 평수량에서 10개의 단위유역에서 연평균 수질과 교차하고 있으며, 2007년도의 경우 저수량에서 4개 단위유역 및 평수량에서 1개의 단위유역에

서 연평균 수질과 교차하고 있다. 이와 같이 수질편차가 매우 크거나 평균수질과 교차하는 등 유량과의 유의성을 전혀 나타나지 않을 경우에는 수질모델링 또는 할당 부하량 산정의 기준수질로서 적용하는 데는 신중한 검토가 필요하다.

- 6) 우리나라와 같이 연중 하천의 유량변동이 매우 심하고 유량과 수질과의 관계에 대한 유의성을 파악하기 어려운 지역에서는 연평균 유량을 기준유량으로 설정하는 것이 합리적인 대안으로 판단된다.

참고문헌

- 강원도(2005). 강원도 낙동강 오염총량관리 기본계획.
- 경상남도(2005). 경상남도 낙동강 오염총량 관리 기본계획.
- 경상북도(2005). 경상북도 낙동강 오염총량 관리 기본계획.
- 국립환경과학원(2005). 낙동강수계 단위유역 목표수질지점 유량·수질측정결과.
- 국립환경과학원(2006a). 낙동강수계 단위유역 목표수질지점 유량·수질측정결과.
- 국립환경과학원(2007). 낙동강수계 단위유역 목표수질지점 유량·수질측정결과.
- 국립환경과학원(2006b). 낙동강수계 제2차 오염총량관리 기준설정연구. 낙동강수계 오염총량관리조사연구반.
- 국립환경과학원(2008). 수질오염총량제 3년 성과와 향후과제 연구.
- 김태근(2006). 유량-부하량 관계식을 이용한 용담호 유입하천의 영양염류 유입량 변동특성. 환경영향평가학회지, 15(2), pp.129-138.
- 대구광역시(2004). 대구광역시 낙동강 오염총량관리 기본계획.
- 부산광역시(2004). 부산광역시 낙동강 오염총량관리 기본계획.
- 이형진, 공동수, 김상훈, 신기식, 박지형, 김병익, 김성미, 장승현, 천세익(2007). 남한강수계 저수기 수질변동 특성에 관한 연구. 수질보전 한국물환경학회지, 23(6), pp. 889-896.
- 환경부(2002a). 낙동강수계 물관리 및 주민 지원 등에 관한 법률 시행규칙.
- 환경부(2002b). 낙동강수계 오염총량관리 기본방침.
- 환경부(2007). 낙동강수계 오염총량관리 기본방침.
- 환경부·국립환경연구원(2004). 수질오염총량관리제도-지속가능한 사회를 열어갑니다.