

## 우리나라 오염총량관리제도의 적용 및 개선: 2. 안전을 산정 및 삭감부하량 할당

김경태 · 정은성<sup>\*,†</sup> · 김상욱<sup>\*\*</sup> · 이길성<sup>\*\*\*</sup>

(주) 건화 수자원부

<sup>\*</sup>서울대학교 공학연구소

<sup>\*\*</sup>국회입법조사처 경제산업조사실 국토해양팀

<sup>\*\*\*</sup>서울대학교 건설환경공학부

## Improvement and Application of Total Maximum Daily Load Management System of Korea: 2. Determination of Margin of Safety and Allocation of Pollutant Loads

Kyung-Tae Kim · Eun-Sung Chung<sup>\*,†</sup> · Sang-Ug Kim<sup>\*\*</sup> · Kil Seong Lee<sup>\*\*\*</sup>

*Department of water resources, Kunhwa Consulting & Engineering Co., Ltd*

*<sup>\*</sup>Engineering Research Institute, Seoul National University*

*<sup>\*\*</sup>Land, Transport and Maritime Affairs Team, National Assembly Research Service*

*<sup>\*\*\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University*

*(Received 27 August 2008, Revised 19 January 2010, Accepted 20 January 2010)*

### Abstract

This study proposes the improvement of the present Total Maximum Daily Load (TMDL) management system of MOE (Ministry of Environment). The margin of safety (MOS) is calculated by a method using standard error and a method using variability and uncertainty. The allocation of pollutant loads are calculated using three methods, equal load reduction method, equal percent removal method and method using equity standards. This study applied the improved TMDL management system to the Anyangcheon watershed. Since MOS varies from 12% to 44% due to the high variability of measured and simulated data, it must not be ignored in the TMDL. The method using equity standards is the most proper in this application since the others produced unrealistic allocations. Area, runoff, water use quantity, population and budget are considered for equity standards. This study shows that this allocation method can be also applicable for the administrative units as well as the sub-watersheds. Finally, Hydrologic Simulation Program-FORTRAN (HSPF) with the allocated pollutant load was used to confirm whether it satisfy the water quality standard or not. This study will be helpful to improve the MOS and allocation system TMDL in the future.

**keywords** : Allocation method, Confirmation of the allocated pollutant load, HSPF model, Margin of safety (MOS), TMDL management system

### 1. 서론

본 연구에서는 이전 연구인 김경태 등(2009)에서 제시한 우리나라 수질오염총량관리제도(이하 오염총량제도)가 가지고 있는 문제점들의 일부를 개선하고, 안양천 유역의 소유역별 가능한 할당부하량 산정방안을 제시하였다.

현재 기준유량은 평균저수량을 사용하도록 되어 있는데 갈수기를 제외한 기간에서 오염부하량의 증가량보다는 수량의 증가가 더 커서 평균저수량이 평균갈수량보다 수질 기준을 만족시키기 더 쉽다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 평균저수량과 더불어 평균갈수량을 제안하였다. 또 현재 수질오염 총량관리제도에서는 전국에서

동일한 비점오염원단위를 사용하고 있어 지역의 유출 특성을 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 오염총량관리계획수립지침(환경부, 2006)과 정은성 등(2006)의 비점오염원단위를 사용한 결과를 비교하였다.

더 나아가 본 연구는 다음과 같은 현재 오염총량제도가 가지고 있는 안전을 설정에 대한 문제점과 삭감부하량 할당에 대한 문제점의 개선방안을 제시하고 실제 유역에 적용하였다.

- 안전을 설정에 대한 문제점: 오염원 조사, 오염부하량 산정, 수문조건, 모형 적용 등 존재할 수 있는 불확실성들을 고려함에 있어 안전율이 과대 또는 과소 산정될 수 있음
- 삭감부하량 할당에 대한 문제점: 삭감부하량을 총량관리 단위유역 내 소유역 또는 행정구역에 할당하기 위한 구체적인 방법이 기술되어 있지 않음

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
cool77@snu.ac.kr

오염총량제도의 안전을 설정과 오염부하량 할당은 아직까지 구체적으로 고정된 방법이 존재하지 않아 이에 대한 연구가 국내외에서 지속적으로 진행되고 있다. 뉴욕시 환경보전부(NY DEP, 1999)의 식용수로서 저수지를 관리하기 위한 TMDL (Total Maximum Daily Load) 보고서에서는 1 단계를 실행하는 동안 저수지가 저수지 농도 자료로 계산된 연간 인부하량에 대해서 해마다 큰 변동이 있음을 발견하고, 큰 폭의 인 농도 변화를 보이는 이러한 저수지들의 안전을 설정함에 있어 표준오차를 고려한 불확실성을 제안하고 분석하였다. Walker Jr.(2003)는 미국 TMDL의 안전을 설정하기 위해서 실측 자료와 수질 모형에 의해서 예측된 자료가 가지고 있는 변동성과 불확실성을 설명하는 안전을 변동성에 의한 안전율과 불확실성에 의한 안전율의 합으로 나타내어 제시한 바 있다. 김시현과 임재명(2005)은 오염부하량의 할당은 매우 중요하지만 논란의 여지가 많음을 기술했고, 오염부하량 할당법에 대해 열거하였으며 부하량 할당시에 고려해야 할 점과 오염부하량 할당과정에서의 문제점 및 개선방안을 제시하였다. 오염부하량의 할당과 유사한 수자원의 할당과 관련된 연구로 Mimi and Sawalhi(2003)가 있는데 이스라엘, 요르단, 팔레스타인, 시리아, 레바논 5개국의 상수원으로 사용되고 있는 Jordan 강의 수자원을 둘러싼 혼란에 대해 기술하고 국제 물법에 의거하여 Jordan 강의 수자원을 합리적으로 할당하기 위해 공평 기준을 이용하여 5개국에 분배하였다. 본 연구에서는 이러한 연구들을 결합하여 안전을 설정 방안, 삭감부하량 할당 방안 등을 안양천 유역에 대해 제안하였다.

## 2. 연구방법

김경태 등(2009)은 유역의 오염총량을 계산하기 위해서 총량관리단위유역의 설정, 목표수질 및 기준유량의 설정, 오염원 그룹별 오염부하량을 계산하고, 기준배출부하량과 수질 모형을 이용한 유달부하량을 산출하여, 오염총량을 제시하였다. 본 연구에서는 계산된 오염총량을 이용하여 안전율(Margin of Safety)을 설정하고 허용총량과 삭감부하량을 계산한 다음, 계산된 삭감부하량을 시행주체가 될 각 소유역 및 행정구역에 할당하였고, 최종적으로 각 소유역에 할당된 부하량이 수질 기준을 만족시킬 수 있는지 검증하였다.

### 2.1. 안전율의 적용에 대한 문제점

미환경청(U.S. Environmental Protection Agency)에서는 안전율이 수체의 수질과 오염부하량 사이의 관계에 존재하는 불확실성을 설명하는 TMDL의 필수적인 요소라고 명시하고 있다(U.S.EPA, 1991). 일반적으로 안전율이 지나치게 낮게 설정될 경우 목표수질 달성이 어려워져서 오염총량제도에 대한 의미가 줄어들며 안전율이 너무 높게 산정될 경우 비효율적이고 높은 비용을 요구하게 된다.

우리나라 오염총량관리계획기본지침(환경부, 2006) 제10 조에도 환경부장관이 조사·연구반의 검토를 거쳐 안전율을 정한다고 제시되어 있다. 다만, 이 고시에 의해 수립되는 오

염총량관리계획기간에 적용되는 안전율은 오염총량관리계획에 관한 조사·연구반의 검토결과 특별한 이상이 없는 경우 기준배출부하량의 1할로 한다고 고시되어 있다. 이는 오염총량을 산정함에 있어 오염원 조사 및 오염부하량 산정의 불확실성, 수질모델링 기법의 불확실성 등을 고려하여 기준배출부하량에 10%의 안전율을 부여하도록 한 것이다.

본 연구에서는 오염원 조사, 오염부하량 산정, 수문조건, 모형적용 등 오염총량제도를 실행함에 있어 존재할 수 있는 불확실성들을 고려하기 위해 현재 오염총량제도의 안전율, 표준 오차(standard error)를 고려한 방법, 변동성(variability)과 불확실성(uncertainty)을 고려한 방법을 이용하였다.

#### 2.1.1. 표준 오차를 고려한 방법

표준 오차를 고려한 방법은 1999년 뉴욕시에서 식용수로 사용되는 저수지의 TMDL을 위해 사용된 방법이다(NY DEP, 1999). 뉴욕시에서는 1 단계를 실행하는 동안 저수지 농도 자료로 계산된 연간 인부하량이 해마다 큰 변동이 있음을 발견하였다. 그래서 큰 폭의 인 농도 변화를 보이는 저수지들의 TMDL을 위해 불확실성(uncertainty) 요소를 추가하였다. 1999년 시행한 2단계에서는 안전율 10%는 일반적인 불확실성을 설명하기 위한 각 저수지의 기준선으로 하고, 추가적으로 각 저수지의 변동성(variability)을 반영하기 위해 저수지 유역 오염부하량 자료의 표준오차를 이용하여 안전율을 설정하였다.

#### 2.1.2. 변동성과 불확실성을 고려한 방법

Walker Jr.(2003)는 안전율을 식 (1)과 같이 변동성과 불확실성의 합으로 나타내었다.

$$MOS = MOV + MOU \quad (1)$$

여기서, MOS는 안전율이고, MOV는 변동률(Margin of Variability)이며, MOU는 불확실성(Margin of Uncertainty)을 나타낸다.

목표 수질을 만족시키기 위한 이행률(compliance rate,  $\beta$ )의 함수인 MOV를 증가시키면, 즉, 이행률을 증가시키거나 주어진 목표를 만족시키기 위한 확률을 증가시키면 허용총량이 작아지게 되어 삭감량이 많아진다. 또한 특정 이행률에서 목표 수질을 만족시키기 위한 신뢰도(confidence level,  $\alpha$ )의 함수인 MOU를 증가시키면, 즉, 신뢰도를 증가시키거나 특정 이행률에서 목표를 만족시키기 위한 확률을 증가시키면, 허용총량이 작아지게 되어 삭감량이 많아진다. 그러므로 만약 이행률과 신뢰도를 어떤 특정한 값으로 가정하면 특정 정책이나 규정에 의한 안전율을 결정할 수 있다.

충분한 개수의 연 수질 자료가 가지는 변동성은  $S_V$ 라는 변동계수(coefficient of variation)를 이용하여 대수정규분포(lognormal distribution)로 나타낼 수 있고, 주어진 목표 수질하에서 수질 모형에 의해 예측된 수질 자료가 가지는 불확실성은  $S_U$ 라는 변동계수를 가지는 대수정규분포로 나타낼 수 있다. 특정 수질 목표를 만족시키기 위해 특정 이행

를과 그에 따른 특정 신뢰도를 가지는 할당된 장기간 평균 허용총량  $L_A$ 는  $S_V$ 와  $S_U$ 를 이용하여 식 (2)~(4)로 나타낼 수 있다(Walker Jr., 2003).

$$L_A = \text{TMDL} F_V F_U \quad (2)$$

$$F_V = \exp(-Z_\beta S_V) \quad (3)$$

$$F_U = \exp(-Z_\alpha S_U) \quad (4)$$

여기서,  $L_A (= \text{TMDL} - \text{MOS})$ 는 할당된 장기간 평균 허용총량,  $F_V$ 는 실측 수질 농도의 연별 변동성을 설명하는 인자,  $S_V$ 는 실측 자료의 변동계수,  $F_U$ 는 예측된 평균 수질 농도의 불확실성을 설명하는 인자,  $S_U$ 는 예측된 평균 수질 자료의 변동계수,  $Z_\beta$ 는 확률  $\beta$ 를 가지는 표준정규변량치 (standard normal variate),  $Z_\alpha$ 는 확률  $\alpha$ 를 가지는 표준정규변량치를 나타낸다.

위 식들을 조합하면 MOS, MOU, MOV는 Eq. 5~8과 같이 정리될 수 있다(Walker Jr., 2003).

$$L_A = \text{TMDL} - \text{MOS} = \text{TMDL} F_V F_U \quad (5)$$

$$\text{MOS} = \text{TMDL} (1 - F_V F_U) \quad (6)$$

$$\text{MOV} = \text{MOS} (1 - F_U) / (2 - F_U - F_V) \quad (7)$$

$$\text{MOS} = \text{MOV} + \text{MOU} \quad (8)$$

### 2.2. 삭감부하량의 할당

미국 TMDL에서 할당은 오염원에 대해 오염부하량을 오염원별로 분배하는 방법, 정해진 허용총량을 필요에 따라 오염원별로 나누는 것이라고 정의하였고, 이와 덧붙여 기술적으로 가능해야 하며, 산업 규제 등과 같은 제약조건을 적용하는 주 또는 연방 프로그램과 일관성이 있어야 한다고 미 환경청에서 고시하였다. 이를 토대로 점오염원에 대한 할당방법이 명시되어 있지만, 최근 문제가 되고 있는 비점오염원에 대해서는 구체적인 방법을 제시하고 있지 않다. 또한 점오염원 할당방법이 명시되어 있다고 해도 U.S.EPA 조차 어떤 할당방안을 선정해야 하는지에 대한 근거를 제시하지 않고 있다. 단, 할당 결정의 근거(기준)가 반드시 제시되어야 한다고만 언급되어 있다(U.S.EPA, 1991).

우리나라 오염총량제도에서도 ‘오염원그룹별 할당부하량에 대해서 총량관리구역의 총오염부하량을 시장·군수는 오염총량관리계획에서 소유역별 할당부하량을 오염원그룹별로 할당한다.’라고 명시되어 있지만(환경부, 2006), 구체적인 할당방법에 대해서는 명시하고 있지 않다.

허용총량을 지역 또는 오염원별로 할당하는 것은 오염총량제도에서 가장 핵심이 되는 사항 중 하나이다. 오염총량관리의 시행주체가 될 지자체의 경제적 상황이나 영향 등

을 종합적으로 고려하지 못하고 오염할당이 이루어진다면 부작용이 발생할 가능성이 높다(문현주와 황석준, 2005).

오염부하량의 할당은 모든 상황에 적용 가능한 방법론은 없으며 대상오염물질의 종류와 현 규제정도, 현 오염수준의 인식정도, 오염원 종류의 수, 할당결과 경제적인 이해관계와 이해당사자 간 합의에 따라 결정되므로(김시현과 임재명, 2005), 오염부하량을 할당함에 있어 과학적이며 합리적인 방법을 이용해야 할 것이다.

본 연구에서는 Mimi and Sawalhi(2003)가 제안한 공평기준에 의한 할당 방법을 사용하였다. 유역의 지형학적 특성, 유출량, 기상조건, 과거 물사용량, 경제적/사회적 물 수요량, 물 사용 인구, 대체 수자원 확보 비용, 다른 자원의 이용도 등의 공평기준을 이용하여 이스라엘, 요르단, 레바논, 시리아, 팔레스타인 5개국에 물을 공급하는 Jordan 강 유역의 수자원을 효율적으로 할당하기 위해 개발되었다. 할당방법에 따라 각국의 물 사용량이 결정되므로 수자원의 할당이 매우 민감한 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 Mimi and Sawalhi(2003)가 제안한 기준 중 자료획득이 가능하고 국가간 분쟁이 아닌 유역별 한 국가안의 분배인 점을 고려하여 안양천 유역의 지형학적 인자, 수문학적 인자, 사회·경제학적 인자들 중에서 각 소유역별 배출부하량과 관계 깊은 5개의 인자, 면적(F1), 인구(F2), 물의 사용량(F3), 유출량(F4), 경제력(예산) (F5)을 공평 기준으로 산정하였다.

5가지의 공평 기준을 이용하여 각 소유역에 할당하기 위해서는 공평기준들과 배출부하량과의 상관관계가 높아야 한다. 따라서 상관계수를 계산하면 Table 1과 같은데 5개의 기준들이 배출부하량과 매우 높은 상관관계를 가지고 있으므로 적절하다고 볼 수 있다.

**Table 1.** Coefficient of correlation between discharged loads and each factor

Factor	Correlation coefficient ( $r$ )
Total area	0.936
Outflow	0.883
Use of water	0.898
Population	0.904
Annual budget	0.955

최적할당비율을 찾기 위해서 식 (9)와 같은 2차 함수 형태(quadratic form)의 목적함수를 이용하여 공평 기준, 최적할당비율, 가중치의 함수로 나타낼 수 있다. 목적함수가 가장 작은 값을 가지는 곳에서 가능한 할당 결과의 집합으로부터 최적 할당 비율( $X_j^*$ )을 찾기 위해서는, 목적함수의 1차 도함수가 영(0)이 되는 점을 찾으면 된다.

$$\min d = \sum_{i=1}^5 W_i \sum_{j=1}^{12} (X_{ij} - X_j^*)^2 \quad (9)$$

$$\frac{\partial d}{\partial X_j^*} = 2 \sum_{i=1}^5 W_i (X_{ij} - X_j^*) = 0 \quad (10)$$

$$X_j^* = \frac{\sum_{i=1}^5 W_i X_{ij}}{\sum_{i=1}^5 W_i} \quad \text{for } j = 1, \dots, 12 \quad (11)$$

여기서,  $i = 1, \dots, 5$ 이며 5가지의 공평 기준을 나타내고,  $j = 1, \dots, 12$ 이며 12개의 소유역을 나타내며,  $X_{ij}^*$ 은  $j$ 번째 소유역에 할당된 최적삭감률(%),  $W_i$ 는  $i$ 번째 공평인자의 가중치(%),  $X_{ij}$ 는  $j$ 번째 소유역에 대한  $i$ 번째 공평인자의 몫(%)을 나타낸다.

공평 기준으로 사용되는 5가지의 인자 중에서도 배출부하량에 좀 더 높은 영향을 미칠 수 있기 때문에, 각 인자에 가중치를 주어 사용하였다. 각 공평 기준에 가중치를 주는 것은 매우 주관적이며 민감한 문제이다. 어떻게 가중치를 주는가에 따라서 각 소유역별로 삭감부하량이 많게 혹은 적게 할당된다.

각 소유역을 관할하고 있는 지자체에 많은 삭감부하량이 할당되게 되면 그 만큼의 배출부하량을 줄이기 위해 환경기초시설의 개설 또는 증설, 방류수질의 고도처리 등 많은 비용이 소요되며, 반대로 적은 양의 삭감부하량을 할당받게 된 지자체는 그 만큼의 다른 분야에 투자를 할 수 있으므로, 각 공평 인자에 가중치를 부여하는 것은 각 지자체의 이득 또는 손실에 영향을 미칠 수 있기 때문에 매우 신중하게 다루어져야 할 문제이다.

위에서 설명한 5개의 공평 기준은 각 소유역의 오염부하량 삭감에 대한 권한을 결정하는 중요한 인자가 된다. 그러나 이러한 5개의 공평기준 중에 어떤 것이 각 소유역의 오염부하량 삭감을 위해 사용될지는 알 수 없으며, 이러한 공평 기준들을 모두 이용하기 위해서는 각 공평인자에 대한 현실적인 가중치가 필요하다(Mimi and Sawalhi, 2003). 본 연구에서는 현실적인 가중치를 부여하기 위해서 3개의 시나리오를 구성하였다. 시나리오는 면적, 인구, 물의 사용량, 유출량, 예산의 척도를 나타내는 5개의 공평 기준에 대해 1개의 인자가 지배적인 경우, 2개의 인자가 지배적일 경우, 3개의 인자가 지배적인 경우에 대해 구성하였다.

하나의 공평 기준을 고려하는 경우는 그 공평 기준이 다른 4개의 공평 기준들 보다 오염물 배출부하량에 지배적인 것을 의미한다. 그러므로 5개 공평기준에 대하여 하나의 공평기준에 가중치 50%를 부여하고, 나머지 4개의 공평기준에 대해서는 4개의 공평기준의 합이 50%가 되도록 하였다. 같은 방법으로 두 개의 공평 인자를 고려하는 것은 두 개의 공평 인자에 가중치 60%를 부여하고, 나머지 3개의 공평 인자에 대해서는 3개의 공평 인자의 합이 40%가 되도록 하였고, 세 개의 공평 인자를 고려하는 것은 세 개의 공평 인자에 가중치 75%를 부여하고, 나머지 두 개의 공평 인자에 대해서는 두 개의 공평 인자의 합이 25%가 되도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 안전율의 계산

안전율은 오염총량제도를 실시하는 시행 주체들이 목표 수질을 만족시킴에 있어 불확실성이 존재하기 때문에 적용하고 있다. 그러나 현재 오염총량제도에서 10%의 일괄적인 안전율을 적용하고 있기 때문에 본 연구에서는 수질 자료와 수질 모형에 대한 변동성 및 불확실성을 고려하기 위해 표준오차를 고려한 방법과 변동성 및 불확실성을 고려한 방법을 사용하였다.

##### 3.1.1. 표준 오차를 고려한 방법

표준 오차는 10%에서 20%까지의 범위가 되는 안전율을 식별하기 위해 선형적으로 1.0에서 3.0사이의 값을 사용하였다. 표준 오차가 1.0보다 작으면 10%, 표준오차가 3.0보다 크면 20%의 안전율을 적용하였다. 그래서 안양천 유역의 환경부 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/weis>)의 BOD 농도 자료를 이용하여 표준 오차 및 안전율을 계산하였다.

##### 3.1.2. 변동성과 불확실성을 고려한 방법

MOV와 MOU를 산정하기 위해 1997년~2006년까지 10년간의 환경부 물환경정보시스템의 실측자료와 HSPF의 모의 자료를 이용하였다. 이행률은 목표 수질 이하의 수질을 가지는 해의 확률을 나타내며, 80%로 가정하였다. 이행률이 너무 크게 되면 하천의 목표 수질을 만족시키기 위한 확률을 높이는 결과가 되어 수질 개선 가능성은 높아지게 되지만, 높아진 안전율만큼 허용총량이 작아지게 되고, 결국 각 소유역 및 행정 지차제의 삭감부담이 커지게 된다. 또 특정 이행률에서 목표 수질 이하의 수질을 가지는 해의 신뢰도 역시 이행률과 같은 이유로 90%로 가정하였다. 그리고 이행률과 그에 따른 신뢰도가 각각 50%라면 그 의미는 각각을 고려하지 않는다는 의미이다. 즉, 연 BOD 농도 자료가 대수정규분포를 따르기 때문에 결국 표준정규분량이 0이 되므로 수질 자료나 수질 모형에 의한 불확실성의 영향을 고려하지 않는다는 의미가 된다(Walker Jr., 2003).

이행률과 신뢰도를 각각 80%, 90%로 가정했을 경우, MOS가 43.760%, MOV가 27.181%, MOU가 16.579%로 제 1차 수질오염 총량관리제도의 안전율인 10%에 비해 매우 큰 안전율을 나타내었다. 그 이유는 불확실성뿐만 아니라 자료의 변동성을 고려하였고, 또 오염총량제도의 안전율은 불확실성을 고려하여 10%의 안전율을 고시하고 있지만 정확한 방법을 이용하여 산정한 값이 아니기 때문이다. MOV를 결정하는 실측 자료가 가지고 있는 변동성에 의해 변동계수가 커지게 되어 결국 MOV가 커지게 되고, MOU를 결정하는 예측된 자료(수질 모형)가 가지고 있는 불확실성에 의해 변동계수가 커지게 되어 MOU 역시 커진다. 또, MOU에 의한 안전율보다는 MOV에 의한 안전율이 더 큰 안전율을 나타내고 있는데, 그 이유는 실측 자료의 변동성이 더 커서 안전율이 높아졌음을 의미한다.

##### 3.1.3. 안전율의 비교

지금까지 안전율을 산정하기 위하여 오염총량제도의 제1차 계획기간 중 안전율인 10%와 1999년 New York 시에

**Table 2.** Comparison of margin of safety among three methods

Method	MOS	MOU	MOV
Existing value	10.00	-	-
Method considering standard error	11.63	-	-
Method considering uncertainty and variability	43.76	27.18	16.58

사용한 표준 오차를 고려한 방법과 Walker Jr.(2003)가 사용한 변동성과 불확실성을 고려한 방법까지 3가지 방법을 이용하였다.

3가지 방법을 이용한 안전율을 비교해보면 Table 2와 같고, 그 중에 Fig. 1은 변동성과 불확실성을 고려한 방법을 사용했을 경우, 기준배출부하량의 항목별 분포를 나타낸 것이다. Table 2를 보면 3가지 방법이 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 안전율을 산정함에 있어 자료의 불확실성, 다양성, 모형의 오차 등 안전율 산정과 관련된 많은 제반 사항을 고려할수록 안전율이 커짐을 알 수 있다. 오염총량제도의 고시된 안전율을 사용할 경우 10%이지만 실측 자료의 표준오차를 고려한다면 안전율이 11.63%이고, 실측 자료의 변동계수와 수질 모형에 의해 예측된 값의 변동계수를 함께 고려한다면 43.76%의 안전율을 사용해야 함을 알 수 있다. 앞으로 수질이 개선된다면 수질 자료에 대한 변동성, 수질 모형에 대한 불확실성 등이 작아져 안전율을 줄일 수 있다. 더불어 오염총량제도에서 정확하고 풍부한

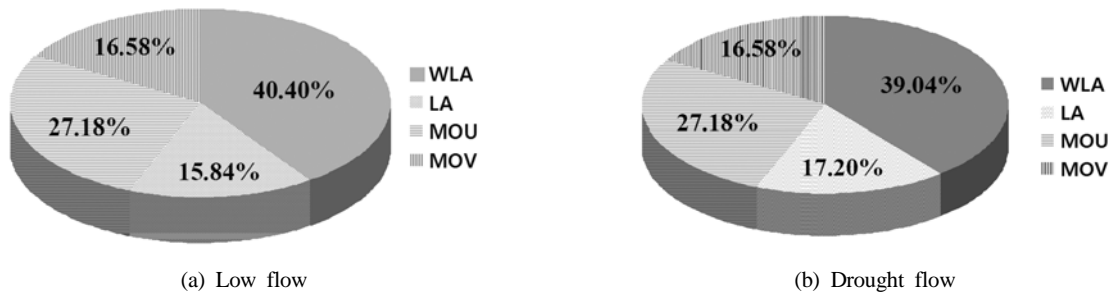
실측자료와 정교하게 구축된 유역유출 수질모형이 반드시 필요하다.

**3.2. 허용총량, 삭감부하량의 계산**

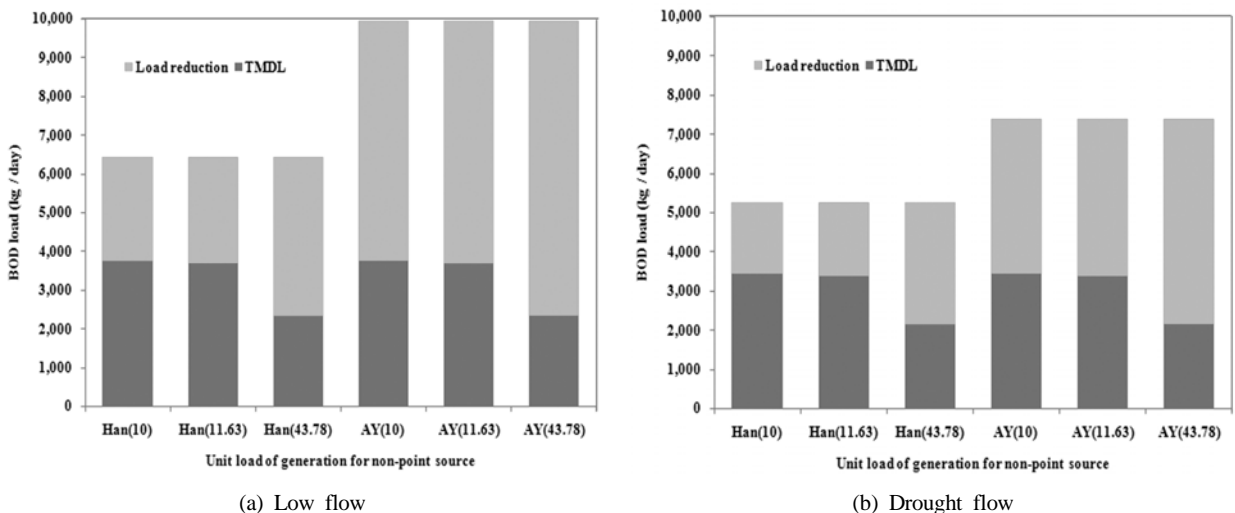
허용총량은 목표 수질과 기준 유량에 의한 기준배출부하량에서 안전율을 제외한 값이고, 이러한 허용총량과 그에 따른 안전율을 배출부하량에서 제외한 값이 삭감부하량이 된다. 위에서 계산한 3가지 방법에 의한 안전율을 적용하여 기준유량과 비점오염원단위에 따른 허용총량 및 삭감부하량을 계산하면 Fig. 2와 같고, 지금까지 계산한 안양천 유역의 오염총량제도 적용 결과는 Table 3과 같다. 안양천 유역의 오염부하량과 할당부하량은 김경태 등(2009)의 결과를 이용하였다.

**3.3. 삭감부하량의 할당**

할당은 오염총량관리의 시행주체가 될 지자체의 경제적 상황이나 영향 등을 종합적으로 고려하지 않고 이루어진다면 부작용이 발생할 가능성이 높다. 오염부하량의 할당은 모든 상황에 적용 가능한 방법론은 없으며 대상오염물질의 종류와 현 규제정도, 현 오염수준의 인식정도, 오염원의 종류와 수, 경제적인 이해관계와 이해당사자 간 합의에 따라 결정되므로, 오염부하량을 할당함에 있어 과학적이며 합리적인 방법을 이용해야 한다.



**Fig. 1.** Loading capacity by the method considering variability and uncertainty.



**Fig. 2.** TMDL, MOS and load reduction using the unit load of generation for non-point source of the Anyangcheon watershed.

**Table 3.** Total amount of pollutant for the Anyangcheon watershed

Target discharge	Unit load of generation for non-point source	BOD load (kg / day)										
		Discharged load	Loading capacity	MOS			TMDL			Load reduction		
				MOS (%)								
				10	11.63	43.78	10	11.63	43.78	10	11.63	43.78
Low flow	Han River basin	6,425	4,168	417	485	1,824	3,751	3,683	2,344	2,674	2,742	4,081
	Anyang-cheon watershed	9,965								6,213	6,281	7,621
Drought flow	Han River basin	5,251	3,837	384	446	1,679	3,454	3,391	2,158	1,798	1,860	3,093
	Anyang-cheon watershed	7,375								3,921	3,984	5,217

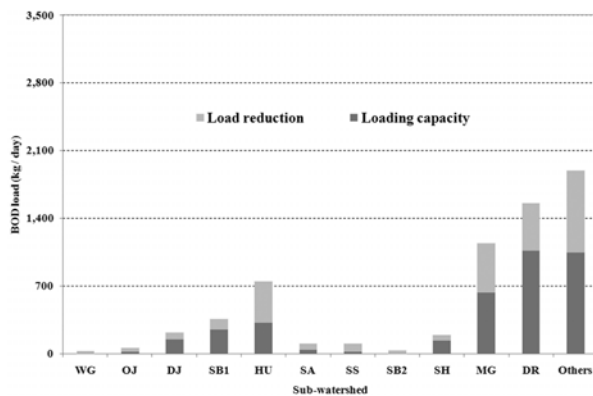
**3.3.1. 소유역별 할당**

각 소유역에 삭감부하량을 할당하기 위해서 Mimi and Sawalhi(2003)가 연구한 바 있는 공평 기준(equity standard)을 이용하였다. 할당에 사용된 공평 기준은 면적, 유출량, 물의 사용량, 인구, 예산이다.

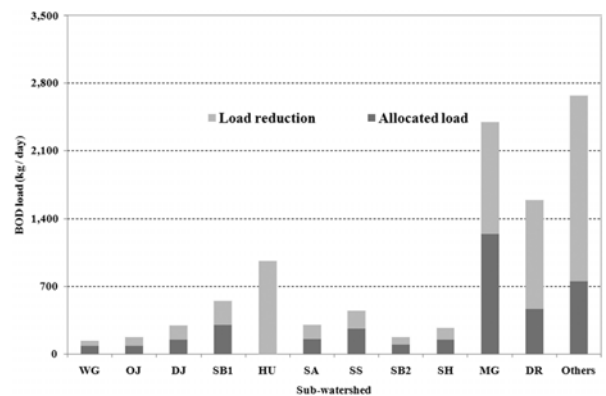
시나리오별 최적할당비율을 찾기 위해서 식 (9)~(11)을 이용하여 목적함수가 가장 작은 값을 가지는 최적 할당 비율을 찾을 수 있다. 앞서 산정된 안양천 유역의 소유역별 공평 기준들과 각 가중치 시나리오들을 이용하여 최적 할당 비율을 계산할 수 있고, 계산된 최적 할당 비율을 대입

하여 최적 할당 비율과 공평 기준 사이의 오차의 제곱합  $d$ 가 가장 작은 값을 가지는 최적 할당 비율을 찾으면 이 값이 안양천 유역의 각 소유역별 삭감률이 된다.

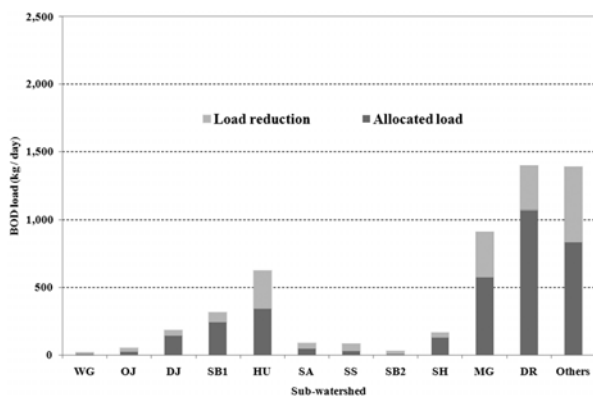
Fig. 3은 각각 기준유량과 비점오염원단위에 따른 시나리오 평균 소유역별 할당결과를 나타낸다. 단, 본 연구에서 기준 유량, 비점오염원단위, 안전율, 할당방법에 대해 모두 산정을 하였으나, 경우의 수가 많기 때문에 표준 오차를 고려한 방법을 사용한 안전율, 공평 기준을 이용한 할당 방법, 시나리오별 할당비율의 평균값을 사용했을 경우에 대한 소유역별 할당결과를 나타내었다.



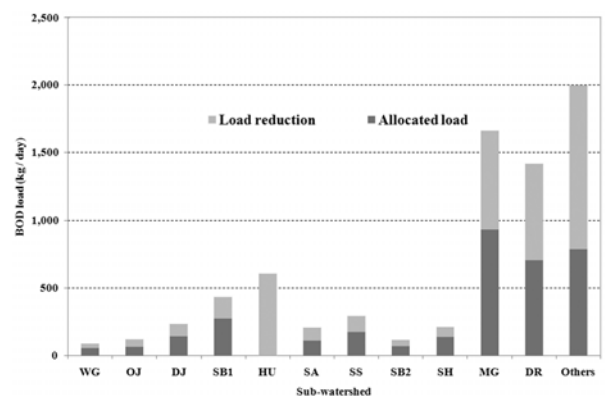
(a) The Han River basin (Low flow, MOS = 11.63%)



(b) The Anyangcheon watershed (Low flow, MOS = 11.63%)



(c) The Han River basin (Drought flow, MOS = 11.63%)



(d) The Anyangcheon watershed (Drought flow, MOS = 11.63%)

**Fig. 3.** Allocation of load reduction by the sub-watershed.

3.3.2. 할당 방법의 비교

동일부하삭감방법과 동일비율삭감방법, 공평 기준을 이용한 방법까지 3가지 할당방법을 이용하여 안양천 유역의 소유역별 오염총량을 계산하고 할당하였다. Table 4는 안양천 유역 원단위를 이용하여 3가지 할당방법에 따른 각 소유역별 할당부하량과 삭감부하량을 비교하였다.

동일부하삭감방법으로 총 삭감부하량을 할당할 경우 비점오염원단위와 안전율, 기준유량에 상관없이 왕곡천 유역, 오전천 유역, 당정천 유역, 삼성천 유역, 수암천 유역, 삼봉천 유역, 시흥천 유역은 할당된 삭감부하량이 배출부하량보다 크기 때문에 오염물 배출량이 0이 되므로 현실적으로 불가능하다.

동일비율삭감방법으로 총 삭감부하량을 할당할 경우 동일부하삭감방법으로 할당할 때와는 달리 모든 소유역에서 0인 할당부하량이 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나 배출부하량이 전체 배출부하량에 대해 1%도 되지 않는 왕곡천 유역(0.38%), 삼봉천 유역(0.47%), 오전천 유역(0.89%)

에는 매우 불리한 할당방법이다. 그 뿐만 아니라 학의천 유역(11.62%), 목감천 유역(17.76%), 도림천 유역(24.38%), 본류 유역(29.38%)을 제외하고는 나머지 소유역들도 불리한 할당방법이 될 수 있다.

공평 기준을 이용한 할당방법으로 총 삭감부하량을 할당하는 경우, 학의천 유역의 경우 기준유량과 안전율에 상관없이 안양천 유역의 비점오염원 발생원단위를 사용할 경우, 할당된 삭감부하량이 배출부하량보다 많기 때문에 0인 할당부하량을 볼 수 있는데 그 이유는 최근 학의천의 수질개선으로 인해 실측자료로 계산된 발생원단위가 다른 유역 원단위보다 훨씬 작는데 비해 공평 기준에 사용된 면적, 유출량, 물의 사용량, 인구, 예산 모든 부분에서 큰 삭감비율(15.21%)을 할당 받았기 때문이다.

3.3.3. 행정구역별 할당

행정구역별 할당은 소유역별 할당과 마찬가지로 공평 기준을 이용한 방법을 사용하였다. 할당 절차는 소유역별 할

Table 4. Comparison of three allocation methods by the sub-watershed

Sub-watershed	Discharged load (kg/day)	Unit load of generation for non-point source of the Anyangcheon watershed					
		Equal load reduction method (kg/day)		Equal percent removal method (kg/day)		Method using equity standards (kg/day)	
		Allocated load	Load reduction	Allocated load	Load reduction	Allocated load	Load reduction
Low flow							
WG	134	0	134	49	84	78	55
OJ	173	0	173	64	109	85	88
DJ	296	0	296	110	187	150	146
SB1	552	29	523	204	348	293	259
HU	536	12	523	198	338	0	955
SA	300	0	300	111	189	149	151
SS	451	0	451	167	284	250	201
SB2	173	0	173	64	109	93	81
SH	269	0	269	100	170	152	117
MG	2,396	1,872	523	886	1,510	1,240	1,156
DR	1,587	1,064	523	587	1,001	486	1,102
Others	3,098	706	2,392	1,145	1,953	707	1,971
Outlet	9,965	3,683	6,281	3,683	6,281	3,683	6,281
Drought flow							
WG	86	0	86	39	46	51	35
OJ	120	0	120	55	65	64	56
DJ	234	0	234	108	126	141	93
SB1	431	99	332	198	233	267	164
HU	496	164	332	228	268	0	606
SA	204	0	204	94	110	108	96
SS	291	0	291	134	157	164	127
SB2	115	0	115	53	62	64	51
SH	212	0	212	97	114	137	74
MG	1,662	1,330	332	764	898	929	733
DR	1,414	1,082	332	650	764	715	699
Others	2,111	716	1,395	971	1,140	751	1,250
Outlet	7,375	3,391	3,984	3,391	3,984	3,391	3,984

WG: Wanggokcheon, OJ: Ojeoncheon, DJ: Dangjeongcheon, SB1: Sanboncheon, HU: Hakuicheon, SA: Suamcheon, SS: Samsungcheon, SB2: Sambongcheon, SH: Siheungcheon, MG: Mokgamcheon, DR: Dorimcheon (Specific locations are described in Kim et al., 2009.)

당과 같지만, 할당에 사용된 공평 기준은 행정구역별 유출량을 산정하기 어렵기 때문에 유출량을 제외한 면적, 물의 사용량, 인구, 예산으로 하였다.

Table 5는 각각 기준유량과 비점오염원단위 따른 시나리오 평균 행정구역별 할당결과를 나타내고, 표준 오차를 고려한 방법을 사용한 안전을 산정, 공평 기준을 이용한 할당 방법, 인자에 대한 가중치 시나리오별 할당비율의 평균 값 등을 사용했을 경우를 포함하고 있다.

H시의 경우 기준유량, 비점오염원단위, 안전율에 상관없이 배출부하량보다 삭감부하량이 크기 때문에 할당부하량이 모두 음수인 것을 볼 수 있다. 그 이유는 H 시가 전체 배출부하량의 0.25% 기여하는데 반해, 평균 최적 할당 비율이 0.81%로 배출부하량 기여율보다 크고, 인구(0.17%)를 제외한 나머지 면적(1.39%), 물의 사용량(2.03%), 예산(0.64%)과 같은 공평 인자들이 배출부하량의 기여율보다 크기 때문이다. 그리고 L 시는 한강수계 비점오염원단위를 사용했

을 경우, 기준유량에 상관없이 할당부하량에 비해 매우 큰 삭감부하량을 나타내고 있는데 반해 안양천 유역의 비점오염원단위를 사용했을 경우, 기준유량에 상관없이 할당부하량과 삭감부하량이 합리적으로 배분되었기 때문에 안양천 유역의 원단위가 지역 특성을 반영함을 알 수 있다. 수질 오염총량제의 경우 유역별 관리가 원칙이지만 우리나라와 같이 행정구역별 역할이 분명한 경우 본 연구가 오염부하량 할당을 행정구역별로 제시 및 시행에 도움이 될 수 있을 것이다.

3.4. 할당된 오염부하량의 확인

현 수질오염 총량관리제도가 가지고 있는 몇 가지 문제점에 대해 개선안을 제시하였고, 이렇게 개선된 수질오염 총량관리제도를 안양천 유역에 적용하여 삭감부하량을 소유역 및 행정구역에 할당하였다. 마지막 단계로 이렇게 할당된 부하량이 목표 수질을 만족시키는지 여부를 확인해야 한다.

Table 5. Allocation of load reduction by the administrative district

Administrative district	Unit load of generation of the Han River basin			Unit load of generation of the Anyangcheon watershed		
	Discharged load (kg/day)	Allocated load (kg/day)	Load reduction (kg/day)	Discharged load (kg/day)	Allocated load (kg/day)	Load reduction (kg/day)
Low flow						
A	374	220	154	425	73	352
B	878	578	301	956	268	689
C	648	433	215	838	345	493
D	341	208	133	489	184	305
E	360	252	109	393	144	249
F	368	227	141	530	207	323
G	673	456	217	676	179	497
H	16	-10	26	15	-45	61
I	449	255	195	1,270	825	446
J	593	365	229	866	342	524
K	271	147	125	464	178	285
L	110	1	110	428	177	251
M	1,023	479	543	1,610	365	1,245
N	319	73	246	1,005	443	563
Sum	6,425	3,683	2,742	9,965	3,683	6,281
Drought flow						
A	339	235	104	370	147	223
B	767	563	204	813	377	437
C	518	372	146	631	319	313
D	258	168	90	347	154	193
E	310	236	74	330	172	158
F	245	149	96	342	137	205
G	565	418	147	567	252	315
H	12	-6	18	11	-27	38
I	331	199	132	824	541	283
J	515	360	155	679	346	332
K	223	138	85	338	157	181
L	81	7	74	272	112	159
M	823	455	369	1,176	386	790
N	264	97	167	675	318	357
Sum	5,251	3,391	1,860	7,375	3,391	3,984



**Table 6.** Comparison of annual average of BOD concentration

Target discharge	Unit load of generation for non-point source	Existing load	Average	
			11.63	43.76
Low flow	Han River basin	11.41	8.25	7.49
	Anyangcheon watershed	11.51	8.31	7.51
Drought flow	Han River basin	11.21	8.10	7.39
	Anyangcheon watershed	11.33	8.10	7.40

확인을 위해 할당된 부하량을 HSPF 모형에 입력하여 안양천 하구에서 유달부하량을 모의하였고, 결과는 Table 6과 같다. 기존의 배출부하량으로 인한 안양천 하구에서의 연평균 BOD 농도가 한강수계 비점오염원단위와 저수량을 사용한 경우는 11.41 mg/L, 갈수량을 사용한 경우는 11.21 mg/L이고, 안양천 유역 비점오염원단위와 저수량을 사용한 경우는 11.51 mg/L, 갈수량을 사용한 경우는 11.33 mg/L이다. 하지만 삭감부하량과 안전율을 제외한 할당부하량을 이용하여 연 평균 유달부하량을 모의한 결과 한강수계 비점오염원단위와 저수량을 사용한 경우는 8.25 mg/L, 갈수량을 사용한 경우는 8.10 mg/L이고, 안양천 유역 비점오염원단위와 저수량을 사용한 경우는 8.31 mg/L, 갈수량을 사용한 경우는 8.10 mg/L로 현저히 수질이 개선된 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 수질오염 총량관리제도의 안전율 설정과 삭감부하량 할당에 대한 개선안을 제시하였고, 이를 안양천 유역에 적용하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 일괄적으로 10%를 적용하고 있는 안전율을 표준오차, 변동성과 불확실성을 고려한 방법을 이용하여 산정하였고 적용결과를 비교하였다.
- 2) 계산된 삭감부하량을 각 소유역과 지자체에 할당하는데 있어 구체적인 방법이 제시되지 않고 있지만 동일부하삭감, 동일비율삭감, 공평 기준을 고려한 삭감 방법들을 이용해 각 소유역 및 행정구역에 삭감부하량을 할당하고 수질기준을 만족시키는지 확인하였다. 특히 동일부하삭감과 동일비율삭감은 불합리한 결과를 도출할 수 있으므로 적용에 주의해야 한다.

- 3) 본래 오염총량제도는 유역별 적용이 원칙이나 우리나라와 같이 행정구역 단위 구별이 강한 경우 행정구역별로 오염부하량 할당 및 적용이 가능함을 확인하였다. 본 연구의 결과가 오염총량제도를 개선하는데 활용되기 위해서는 향후 시행주체의 경제적인 이해관계나 합의 등에 대한 경제성 분석에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(80%)과 Safe and Sustainable Infrastructure Research(SIR)의 연구비 지원(20%)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

- 김경태, 정은성, 김상욱, 이길성(2009). 우리나라 오염총량관리제도의 개선 및 적용: 1. 안양천 유역의 오염부하량 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(6), pp. 972-978.
- 김시현, 임재명(2005). 수질오염총량관리계획의 시행단계에서 오염부하량 할당방안 개선에 관한 연구. *대한위생학회지*, **20**(3), pp. 51-56.
- 문현주, 황석준(2005). 총량관리제 하에서의 지역환경 관리. 연구보고서, 한국환경정책·평가연구원.
- 정은성, 이길성, 신문주(2006). SWAT 모형과 EMC 산정 결과를 이용한 안양천 유역의 수량 및 수질 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(4), pp. 648-657.
- 환경부(2006). 한강수계 오염총량 관리계획 수립지침.
- 환경부(2008). 물환경정보시스템. <http://water.nier.go.kr/weis/>.
- Mimi, Z. A. and Sawalhi, B. I. (2003). A decision tool for allocating the waters of the Jordan River basin between all riparian parties. *Water Resources Management*, **17**, pp. 447-461.
- New York City Department of Environmental Protection (1999). *Methodology for Calculating Phase II Total Maximum Daily Loads (TMDLs) of Phosphorus for New York City Drinking Water Reservoirs*.
- U.S. Environmental Protection Agency (1991). *Technical Support Document for water Quality-based Toxics Control*. U.S. EPA 505/2-90-001.
- Walker Jr., W. W. (2003). Consideration of variability and uncertainty in phosphorus Total Maximum Daily Loads for lakes. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **129**(4), pp. 337-344.