

시화호 및 인천연안의 COD 오염부하량 추정기법 COD Pollutants Load Estimation Schemes in Lake Shihwa and Incheon Coastal Zone

조홍연* · 조범준*

Hong Yeon Cho* and Bum Jun Cho*

요 지 : 연안해역의 COD 항목 농도관리를 위해서는 유역 COD 오염부하량 조사·추정이 필요하나, 현재 유역에서의 발생 오염부하량 추정식이 BOD 기준으로 제시되어 있는 실정이다. 해역 오염총량관리를 수행하기 위한 COD 오염부하량 추정식 개발은 많은 관측 및 시간이 소요될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 시화호 및 인천 연안유역의 하천 및 공단배수 COD 농도, BOD 농도 비율 변화분석을 수행하였으며, 분석결과를 이용하여 COD 오염부하량 추정기법을 제시하였다. COD 오염부하량 추정은 기존의 BOD 오염부하량 원단위를 이용하여 추정한 방법에 환산계수를 곱하는 방법으로, 환산계수는 평균 + [1~3 범위의 안전계수] × 표준편차로 계산할 수 있다. 본 연구결과에 의하면 시화호 및 인천연안의 COD 오염부하량 추정 환산계수는 안전계수 1, 2, 3인 경우 각각 1.7, 2.3, 2.9로 추정되었다.

핵심용어 : COD 오염부하량, BOD 오염부하량, BOD 대비 COD 농도비율, 환산계수, 안전계수

Abstract : For the concentration management in COD parameters, it requires the measurement and estimation of the COD pollutants load (hereinafter PL) in the watershed. The estimation method of the PL, however, is provided only based on the BOD parameters. The development of COD PL estimation schemes is expected to execute total PL management in coastal zone and needs to more observation and much time. This study provides COD PL estimation schemes using statistical information about ratio analysis with COD & BOD concentration of rivers and drainages of an industrial complex in Lake Shihwa and Incheon Coastal Zone watershed. The COD PL is computed with ease by multiplying the conversion factor, which is calculated as the sum of the average and 1 to 3 (safety factors) times standard deviation. The conversion factor of Lake Shihwa and Incheon Coastal Zone is estimated as 1.7, 2.3 and 2.9 with respect to the safety factor 1, 2, and 3, respectively.

Keywords : COD pollutants load, BOD pollutants load, BOD vs. COD ratio, conversion factor, safety factor

1. 연구의 배경 및 목적

시화호 및 인천연안은 해양환경문제가 중요한 사안으로 부각되어 해양수산부에서 특별관리해역(해양오염방지법 시행령 별표 2참조)으로 지정하여 환경관리를 수행하고 있는 지역이다. 연안해역의 환경관리는 연안유역(coastal watershed)에서의 오염부하량 관리와 직접적인 관계가 있다. 그러나, 해역수질관리는 COD 항목, 하천 수질관리는 BOD(COD 항목도 조사·분석 수행)항목으로 수행하고 있

기 때문에 유역에서 발생하는 오염부하량 추정은 하천의 관점에서 BOD 오염부하량 추정방법에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 한편, TN, TP 항목의 오염부하량 추정방법은 하천, 호소, 해역 모두 공통으로 사용할 수 있는 방법으로 판단되어, 본 연구에서는 제외하였다.

따라서, 해역의 수질관리, 즉 COD 항목 농도관리를 위해서는 유역 COD 오염부하량 조사·추정이 필요하나, 현재 유역에서의 발생 오염부하량 등 대부분의 추정식이 BOD 기준으로 제시되어 있는 실정이며, 해역오염총량관

*한국해양연구원 연안개발연구본부(Corresponding author: Bum Jun Cho, Coastal and Harbor Engineering Research Lab., Korea Ocean R&D Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea. bjcho@kordi.re.kr)

리를 수행하기 위한 COD 오염부하량 추정식 개발은 많은 시간이 소요될 것으로 예상된다. 특별관리해역의 환경관리가 시급한 현 상황에서는 COD 오염부하량 추정 방법을 개발하는 연구도 병행추진하면서 적절한 추정식을 이용하여 연안해역의 COD 오염부하량 추정방법을 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 시화호 및 인천연안 유역의 하천 및 공단배수 COD 농도, BOD 농도 비율자료에 대한 통계적인 분석결과를 이용하여 COD 오염부하량 추정을 BOD 오염부하량 추정결과를 이용한 계산하는 방법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. COD 대비 BOD 비율 분석 방법

BOD(생물화학적 산소요구량, 생화학적 산소요구량) 항목은 호기성 조건하에서 미생물의 증식 및 호흡작용에 의하여 소비되는 산소의 양을 측정하는 방법(수질오염공정시험방법, 제5항)으로 분해가 용이한 유기물 오염도 추정에 이용되는 농도로 하천 수질관리의 중요한 항목에 해당한다. 반면, COD(화학적 산소요구량) 항목은 산화제(과망간산칼륨, 중크롬산칼륨 등)를 이용하여 소비되는 산소의 양을 화학적으로 측정하는 방법(수질오염공정시험방법, 제6항)으로 분해가 어려운 난분해성 또는 해수, 호소의 유기물 양의 측정에 이용되는 방법이나 산화제에 따라 수치가 다르게 나타나는 경우가 많으며, 우리나라에서는 현재 과망간산칼륨을 산화제로 쓰는 방법을 표준으로 하고 있는 실정이다. COD(난분해성 유기물 오염지표) 및 BOD(생물학적 분해가 가능한 유기물 오염지표) 농도측정에는 근본적인 차이가 있으나, 유역환경관리에는 BOD 항목, 해역 환경관리에는 COD 항목을 이용하고 유역 BOD 오염부하영향이 해역에도 미치기 때문에 BOD 농도와 COD 농도의 상관관계 및 비율 분석에 관한 정량적인 연구가 필요한 상황이다.

2.1 분석자료 및 관측지점

본 연구에서는 전국 하천 및 호소 등의 수질보전대상 공공수역에 대한 수질현황을 종합적으로 파악할 수 있는 환경부, 물환경정보시스템(water.nier.go.kr/weis/)에서 제공하는 월별 수질측정자료를 사용하였다. 시화호 및 인천연안 유역의 하천 4개 지점(공촌천, 반월천, 장만수천 및 승기천)과 공단배수 12개 지점(인천공단, 인천지방공단, 반월공단(1)~(4), 인천공단(5&6), 시화공단, 반월도금단지,

인천남동공단, 학익배수구 및 송현배수구)의 수질측정자료를 이용하여 BOD 대비 COD 비율을 분석하였다. 위의 16개 지점 중에서 승기천과 인천공단을 제외하고, 분석에 이용된 수질측정자료의 측정기간은 1998년 1월~2005년 12월이다. 승기천의 측정기간은 2000년 1월~2005년 12월이고, 인천공단의 측정기간은 2002년 1월~2005년 12월이다. 시화호 및 인천연안 유역의 16개 수질관측지점의 위치도를 LANDSAT 인공위성 사진에 제시하였다(Fig. 1. 참조, egis.me.go.kr/egis/).

2.2 BOD 대비 COD 농도비율 분석방법

시화호와 인천연안 유역의 16개 지점의 모든 COD와 BOD 농도자료 개수는 1,456개이며, 분석에 사용된 모든 지점의 농도자료를 순서대로 Fig. 2에 제시하였다. 한편, COD/BOD 농도비율의 평균은 1.35이고, 표준편차가 1.32이다. 그러나, COD/BOD 비율 계산과정에서 이상자료(Outlier)로 판단되는 자료가 통계적 정보의 편기(Bias)를 유발하기 때문에 이상자료를 처리한 경우에 대하여 통계적인 정보도 제시하였다(Table 1참조). 이상자료를 제거하기 전·후 계산된 환산계수는 안전계수 1.0을 적용한 경우 각각 2.67, 1.72로 계산되었다.

COD/BOD 농도 비율은 화학적으로 분해가능한(난분해성의) 유기물과 생물학적으로 분해가능한 유기물의 비율로 간주 할 수 있다. 이 값이 1보다 크면, 시화호 및 인천연안 유역의 하천 및 공단배수에 함유된 유기물 성분

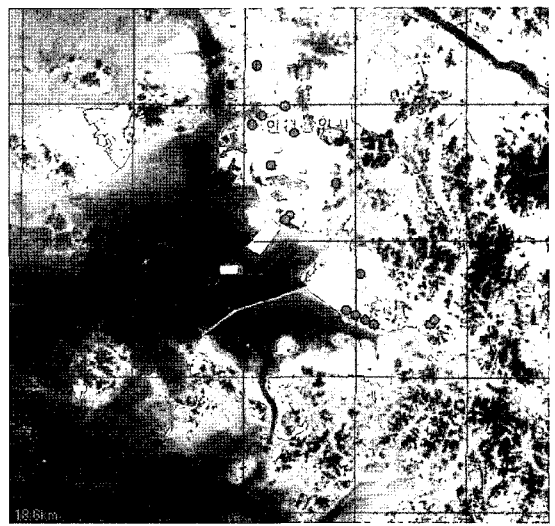


Fig. 1. LANDSAT Image in Lake Shihwa and Incheon Coastal Zone.

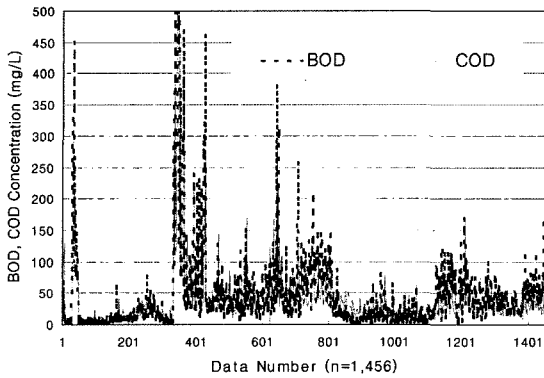


Fig. 2. Line Plot of the BOD, COD Concentration Data.

이 생물학적으로 분해되는 양보다 화학적으로 분해되는 양이 많다는 의미이다. 반대로 1보다 작으면 생물학적으로 분해되는 양이 화학적으로 분해되는 양보다 많다는 것을 의미한다.

위의 측정지점 16개 지점 중에서 COD/BOD 비율이 가장 크게 나타난 곳은 시화공단과 반월공단(4) 지점으로 평균비율이 각각 3.57과 2.02이며, 가장 적게 나타난 곳은 인천(5,6)공단과 송현배수구 지점으로 평균비율이 0.60과 0.62이다. BOD 농도가 COD 농도보다 높게 나타난 지점은 이 두 지점 이외에 학익배수구, 장만수천, 승기천 및 인천남동공단 지점이다.

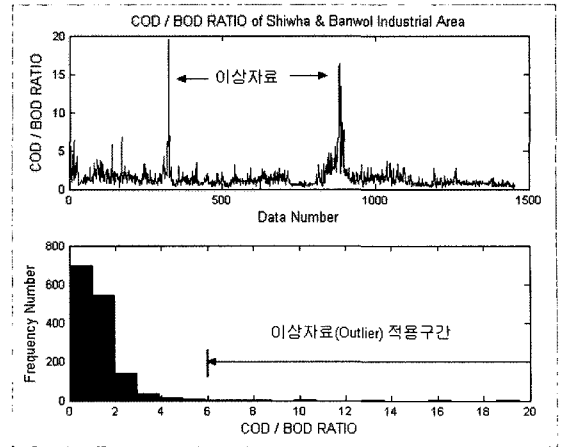


Fig. 3. Histogram of the COD vs. BOD ratio before outlier removal.

COD/BOD 비율에 따른 분포도를 히스토그램으로 나타낸 결과, 히스토그램 분포도가 정규분포의 형태를 보이지 않고 있으며, 전반적으로 우측으로 왜곡되어(Skewed) 있고, 이상자료를 포함하고 있음을 알 수 있다(Fig. 3참조). 총 16개 지점의 COD/BOD 비율 히스토그램은 이상자료(Outlier)를 제거한 결과를 제시하였다(Fig. 4참조). 그 중에서 인천지방공단과 반월공단(2) 지점은 우측의 일부 비율만 제거되면 거의 정규분포 형태를 나타내고 있어서 지점별 특성에 따라 비율을 달리 적용하는 방법도 검토할

Table 1. Statistical Information of the COD vs. BOD ratio

Stations	Mean		Standard deviation		Sample No.	
	Outlier removal		Outlier removal		Outlier removal	
	Before	After	Before	After	Before	After
Incheon Industrial Complex	1.77	1.58	1.30	0.97	47	45
Gongchongcheon	1.78	1.64	0.89	0.65	96	91
Incheon Local Industrial Complex	1.49	1.38	0.74	0.46	95	90
Banwol Industrial Complex (4)	2.02	1.64	2.19	0.82	96	91
Banwol Industrial Complex (3)	1.07	1.04	0.52	0.41	96	91
Banwol Industrial Complex (2)	1.04	0.98	0.39	0.25	96	91
Banwol Industrial Complex (1)	1.40	1.34	0.49	0.43	96	91
Hakik Drainage Basin	0.87	0.81	0.42	0.33	96	91
Incheon Industrial Complex (5,6)	0.60	0.59	0.19	0.13	94	89
Shiwa Industrial Complex	3.57	3.01	3.07	1.89	96	91
Banwol Coating Complex	1.43	1.35	0.54	0.44	95	90
Banwolcheon	1.59	1.49	0.65	0.51	94	89
Jangmansucheon	0.76	0.68	0.46	0.31	96	91
Seunggicheon	0.93	0.85	0.47	0.32	72	68
Incheon Namdong Industrial Complex	0.75	0.73	0.18	0.16	95	90
Songhyeon Drainage Basin	0.62	0.58	0.25	0.20	96	91
Data (Total)	1.35	1.13	1.32	0.59	1,456	1,383

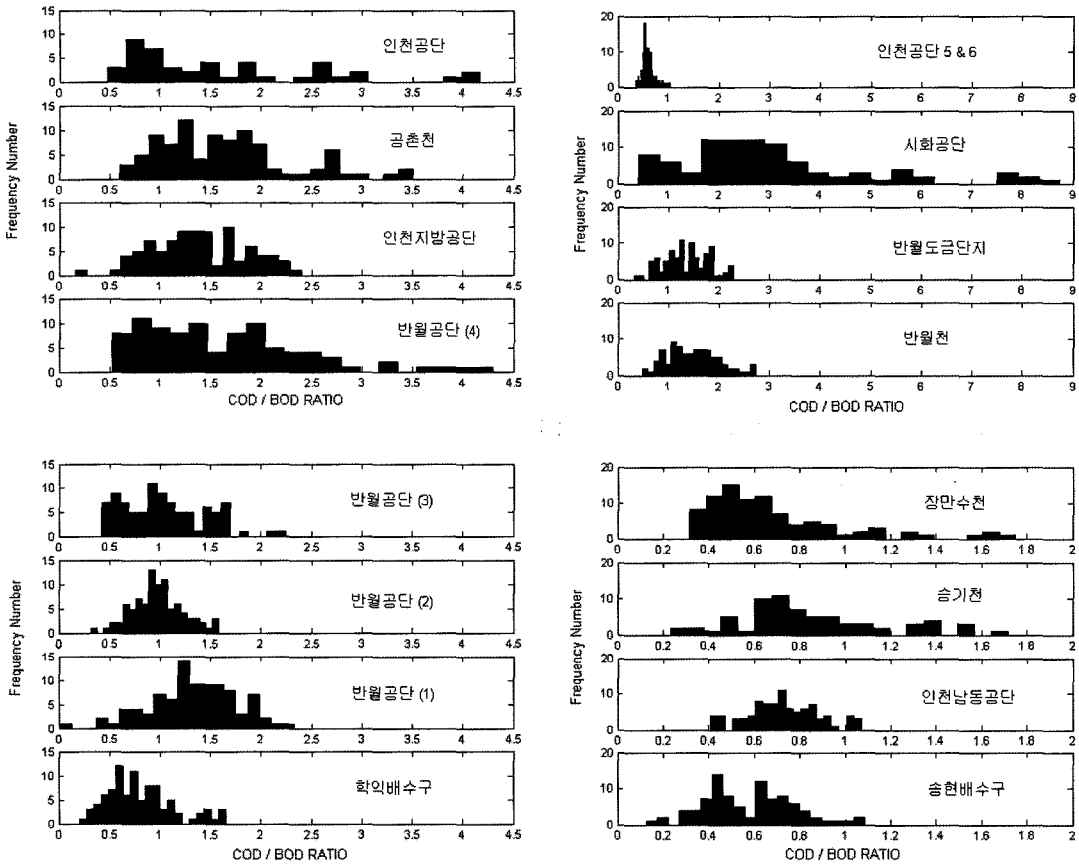


Fig. 4. Histogram of the local COD vs. BOD ratio after outlier removal.

필요가 있다. 본 연구의 모든 지점에서 대체적으로 COD/BOD 비율 분포가 우측으로 왜곡되어 있으며, 이상자료가 존재하는 것으로 추정되어 이상자료 제거기법을 적용하여 비교분석하였다(Fig. 4참조).

이상자료는 임의로 관측된 자료 중에서 하나 또는 그 이상의 기대되지 않은 높거나 낮은 값이 있을 경우에 이러한 값은 전반적인 분포 양상과는 다른 자료와 너무 멀리 떨어져 있어서 자료의 대표적인 통계정보를 왜곡시키기 때문에 일반적으로 통계학에서는 제거하여 분석을 수행한다. 전반적 자료 양상이 분포에서 벗어난 것으로 판단되는 이상자료의 제거기준은 COD/BOD 농도 비율 중에서 우측 5% 상한치로 선정하였으며, 측정지점별 COD/BOD 농도 비율을 적용하였다. COD/BOD 농도 비율값 중에서 우측 5%는 높은 수치를 나타내고 있으므로 이상자료를 제거한 후에 평균과 표준편차의 값이 보다 낮아지고 있음을 알 수 있다(Table 1참조). 이상자료를 제거하기 전

후의 시화호 및 인천연안 지역의 하천 및 공단배수 COD/BOD 농도 비율에 따른 평균, 표준편차 및 사용된 자료의 개수를 제시하였다(Table 1참조). 이상자료를 제거한 경우, 평균은 1.35에서 1.13으로 16.3% 감소되었고, 표준편차는 1.32에서 0.59로 55.3%로 크게 감소되었다.

2.3 BOD 및 COD 농도 상관관계 분석

BOD 및 COD 농도는 근본적으로 분석기법의 차이는 있으나, 유기물 오염지표로 사용하는 농도항목으로 어느 정도의 상관관계가 있을 것으로 예상되어, 본 연구에서 사용한 자료를 이용하여 상관관계 분석을 수행하였다. 상관관계 분석은 산포도(Scatter plot) 및 회귀분석을 이용한 결정계수 및 상관계수를 이용하여 분석하였으며, 보다 상세한 분석은 BOD 농도를 일정 구간으로 구분하여 해당하는 COD 농도 자료와의 상관관계를 분석하였다. 전체 자료를 이용(일부 Outlier 자료 제거)하여 추정한 결정계

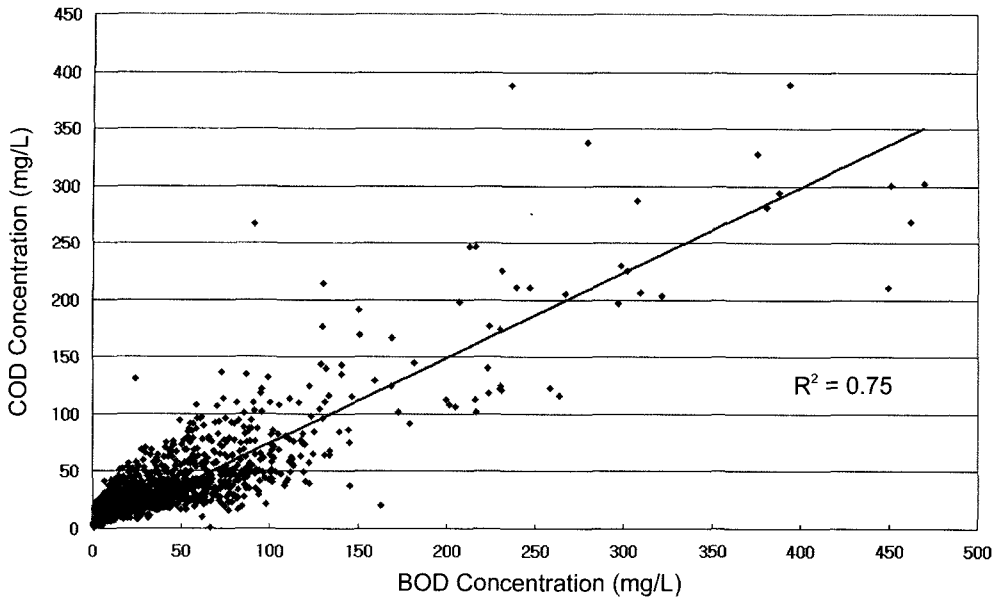


Fig. 5. Scatter Plot of the BOD and COD Concentration.

수(R^2 ; 통계모형의 적합도 척도 지표)는 0.75 정도로 COD 농도와 BOD 농도는 상관관계가 있는 것으로 추정되었으며, 회귀곡선식은 상관계수는 0.88로 계산되었다(Fig. 5 참조). 상관계수는 다음 식을 이용하였다(Kottegoda and Rosso, 1997).

Correlation coefficient (상관계수): ρ

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{SD(X) \cdot SD(Y)}$$

여기서, $\text{Cov}(X, Y) = (X, Y)$ 공분산, $SD(X)$, $SD(Y)$ 는 각각 변수 X , Y (본 연구에서의 경우 BOD 농도, COD 농도)의 표준편차이다.

3. 인천연안 및 시화호 유역의 [COD 오염부하량] 추정방법

본 연구에서는 COD 오염부하량 추정기법으로 현재 계산가능한 BOD 오염부하량 추정결과에 환산계수를 곱하는 방법을 제시하였다. 이 방법으로 해역 COD 오염부하량 추정에 적용한 경우는 미흡한 실정이나, COD 오염부하량 원단위가 없는 현 상황에서 적절한 환산계수를 이용하면 매우 수월한 방법으로 판단된다. 환산계수는 오염부하량 과소추정에 따른 위험에서 안전적인 측면으로 평균을 기준으로 표준편차를 이용한 허용범위를 결정하여 계

산할 수 있다. 이 방법의 골격은 통계적인 자료처리 과정에서 일반적으로 사용하는 방법이다. 따라서, 본 연구에서는 COD 오염부하량 추정방법으로 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

[COD 오염부하량]

$$\begin{aligned} &= [\text{BOD 오염부하량}] \cdot \text{COD 오염부하량 추정계수} \\ &= [\text{BOD 오염부하량}] \cdot [\mu_R + \alpha \cdot SD_R] \end{aligned}$$

여기서, μ_R , SD_R 는 각각 BOD 농도대비 COD 농도비율의 평균 및 표준편차이다.

위에 제시된 식 중에서 [COD 농도]/[BOD 농도] 비율 자료는 수질측정지점에 따라 다양한 값이 계산되므로 가능한 많은 자료를 이용하여 평균값을 이용하거나 [COD 오염부하량] 추정량을 안전적인 측면에서 과대추정(안전범위)하는 방법으로 [평균 + 안전계수 × 표준편차]로 계산된 계수를 이용한다. 안전계수는 1.0 정도가 적합하며, 평균값을 이용하는 경우는 안전계수(α) 0.0에 해당한다. 따라서, [COD 농도]/[BOD 농도] 비율 평균은 2.67이 된다.

한편, COD, BOD 농도비율의 통계정보를 이용하지 않고, COD 평균농도 및 BOD 평균농도를 이용하여 환산비율을 포함한 통계정보를 이용하여 추정하는 방법도 가능하지만, 각각의 농도를 평균하는 과정에서 COD 농도와 BOD 농도자료 하나하나의 관계가 무시되기 때문에 부적합한 방법으로 판단된다. 또한, 각각의 평균농도를 이

Table 2. COD Pollutants Load Conversion Factor in case of Outlier Removal

Stations	Safety factor (α)	Conversion factor ($\mu + \alpha \cdot \sigma$)
	0	1.58
Incheon Industrial Complex	1	2.55
	2	3.52
	3	4.49
	0	3.01
Shihwa Industrial Complex	1	4.90
	2	6.49
	3	8.68
	0	1.13
Watershed of the Incheon Coastal Zone and Lake Shihwa (Data Total)	1	1.72
	2	2.31
	3	2.90

용한 환산계수는 농도비율을 평균한 환산계수와 차이가 있으므로, 일반적인 회귀곡선식을 이용한 방법은 상관성 분석에는 적합하나 환산계수 추정에는 부적합하다.

[BOD] 오염부하량은 환경부 고시 오염총량관리계획수립지침(안)에 제시된 [별표 2] 오염부하량 산정방법에 제시된 방법 및 오염부하량 원단위를 이용하여 추정하는 것을 기본으로 하고, 신뢰성있는 조사자료가 있는 경우에는 조사자료를 이용할 수 있다(Table 2참조).

연안유역의 COD 오염부하량 추정식은 유역에서 측정된 BOD, COD 수질항목의 평균 농도비 또는 안전계수(평균 + [1~3] × 표준편차 등)가 포함된 농도비로 추정하는 방법을 이용하거나 대상 유역의 관측 자료를 이용하여 추정할 수 있다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 유역의 COD 발생부하량과 BOD 발생부하량 비율이 하천 및 공단배수에서 측정된 농도자료와 비슷한 양상을 가질 것이라는 가정하에서 수행하였다. 따라서, 적절한 검토과정이 필요할 것으로 사료된다.

시화호 및 인천연안 유역의 COD 오염부하량 추정식은 16개 지점의 모든 COD와 BOD 농도를 이용하여 COD/BOD 평균농도비, 표준편차 및 안전계수로 계산된 계수와 환경부 고시 오염총량관리계획수립지침(안)에 제시된

BOD 오염부하량을 통하여 산정할 수 있다. 지점별 특성에 따라 비율을 달리 적용할 수도 있지만, COD/BOD 평균농도비에서 이상자료의 제거기준을 상위 5%로 정한 이유는 평균농도 분포형태가 우측으로 왜곡되어 있기 때문이다. 만약 이러한 형태가 정규분포를 띄게 되었다면 상하위의 비율을 같이 적용할 수도 있다고 판단된다.

유역의 COD와 BOD 발생부하량 비율이 하천 및 공단배수에서 측정된 농도자료와 다른 양상을 보일 경우에는 BOD 농도와 COD 농도와와의 여러 상관관계를 고려하여 보다 적절한 COD 오염부하량을 추정할 수 있는 방법을 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 중점연구사업 “하구 관리 및 복원기술 개발(PE-971-01)” 사업의 일환으로 추진되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

금강수계오염총량관리기본방침 (환경부 훈령 제535호, 2002. 11. 6).
 낙동강수계오염총량관리기본방침 (환경부 훈령 제531호, 2002. 10. 14).
 소하천정비법 (일부개정 2005.8.4 법률 7678호, 시행일 2006. 8. 5).
 수문(水文)관측업무규정 (건설교통부 훈령 제444호, 2003. 12. 29).
 수질오염공정시험방법 (환경부 고시 제2004-188호, 2004. 12. 17).
 영산강 · 섬진강수계오염총량관리기본방침 (환경부 훈령 제534호, 2002. 11. 6).
 오염총량관리계획수립지침(안)(환경부 고시 제1999-143호, 1999. 9).
 하천법 (2004). (개정분 포함).
 Chapman, D. (1992). Water Quality Assessments. 78-80.
 Kottogoda, N.T. and Rosso, R. (1997). Probability, Statistics and Reliability for Civil and Environmental Engineers, Chap. 6., McGraw-Hill.

Received April 26, 2006

Accepted August 16, 2006