

낙동강 하구 해역의 자생COD 평가

신성교 · 박청길 · 송교욱*
부산수산대학교 환경공학과 · *부산발전연구원

Evaluation of Autochthonous COD in the Nakdong Estuary

Sung-Kyo SHIN, Chung-Kil PARK and Kyo-Ouk SONG*
Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan,
Pusan 608-737, Korea
*Pusan Development Institute, Pusan, 612-021, Korea

To determine the autochthonous COD caused by the production of phytoplankton, three different methods were used simultaneously utilizing several environmental factors and applied to the Nakdong Estuary. From the estimation of the tropic state index, tropic level in the Nakdong Estuary was found to be in excess of eutrophication level at all area studied. The percentage of autochthonous COD in total COD was largest in summer and in station No. 6 (43.5%). Using of the relationship between COD and salinity was not appropriate for the evaluation of the autochthonous COD due to discrepancy with other results evaluated. However, the evaluations of autochthonous COD obtained from the Δ COD and the relationship between COD and chl.a were found to be proper methods, resulting in a relative error less than 20% for all of the area investigated.

Key words : autochthonous COD, eutrophication, Δ COD, Nakdong Estuary

서 론

낙동강 하구 해역은 오염이 심화되어 자정작용의 한계를 초과하고 있고, 연안에는 각종 개발사업을 대단위로 실시하고 있는 지역으로, 향후 각종 공단과 주거단지가 입지 하게 되면 이 해역의 수질오염은 더욱 가중될 것으로 예상된다. 이와 같은 하구 해역의 오염은 하천을 통해 유입된 유기물이 하구 해역에서 물리, 화학, 생물학적 작용을 거쳐 해역의 유기물 오염 지표 항목인 COD농도 결정에 영향을 미친다. 또한 하천을 통해 유입한 질소·인과 같은 과량의 무기영양염류를 이용하여 식물플랑크톤의 증식이 활발하게 일어나 해역의 생산성을 높이게 된다. 이들 식물플랑크톤의 증식에 의해 생성된 유기물 역시 COD농도를 증가시키게 된다. 따라서 특정 수계의 측정 COD값은 하천수 유입에 의한 외래성COD와 해역 자체 내부생산에 의한 자생COD의 합으로 나타나게 된다(Strask-

rabova et al., 1993).

그러므로 특정 수계의 유기물 오염을 제어하기 위해서는 그 수계의 측정 COD농도에 자생COD와 외래성COD가 각각 어느 정도의 비율로 기여하는가를 정량적으로 파악하고, 이에 따른 수질관리 대책을 결정하여야 할 것이다(Morioka, 1980). 그러나 현재의 COD측정법으로는 자생COD와 외래성COD를 구분해 측정하는 것이 불가능하다. Kim(1994)은 진행반에서 시물레이션을 통해 식물플랑크톤에 의한 내부 유기물 생산량을 계산하는 방법을 적용하였다. 그러나 낙동강 하구 해역은 하구연의 건설로 하천수의 유입이 부정기적으로 일어나고 지형이 복잡하여 시물레이션을 통한 식물플랑크톤의 생성량 적용이 어렵다. Shin et al. (1994)은 하천수에서 식물플랑크톤의 증식량을 Chl.a 값으로 나타내고 COD농도와의 상관성에 관한 연구를 수행하였으며, Nakanishi(1990)는 Δ COD법, Chl.a와의 상관법, 염분농도 이용법 등에 대한 비교적 간단한

평가법을 소개하고 있다. 그러나 이들 방법은 여러 해역에서 별도로 적용되어, 각 방법의 상호 비교가 이루어지지 않았으며, 시·공간적 적용성에 대한 평가는 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구는 낙동강 하구해역을 대상해역으로 하여 Δ COD법, Chl.a와의 상관법, 염분농도 이용법을 적용하여 자생COD량을 정량적으로 평가하고, 하구해역에서의 각 평가법에 대한 적용성을 비교하였다.

재료 및 방법

1. 수질조사

낙동강 하구 해역의 자생COD 평가를 위해 Fig. 1과 같이 낙동강 수계의 수질에 직접적인 영향을 받는 동편 해역 3개 정점, 낙동강 수계의 수질에 간접적인 영향을 받는 서편 3개 정점 및 대조점으로 외해역인 가덕도 인근 해역 1개 정점으로 하여 7개 정점을 선정하고, 1994년 1월부터 12월까지 월 2회씩 총 23회에 걸쳐 표층수를 채수하여 수질분석을 행하였다. 수질 분석 방법은 COD는 공정시험법(1992), 염분은 Salinometer (Tsurumi E-1), Chl.a는 SCOR- UNESCO (1966)에 따라 정량 하였으며, 영양염류는 Standard method (1985)에 따랐다.

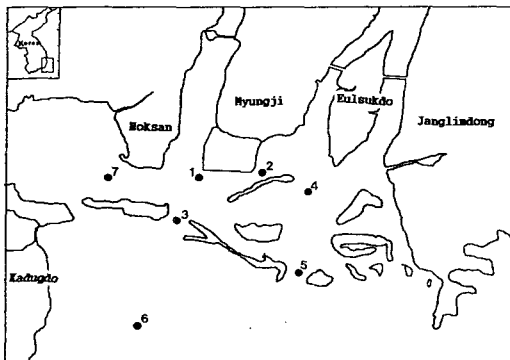


Fig. 1. Location of sampling stations in Nakdong estuary.

2. 부영양화도 평가

조사 해역의 부영양화 정도를 평가하기 위하여 Okaichi (1985)가 제시한 평가식을 사용하였다. 이식은

적조발생 가능 농도로 COD 1mg/l, DIN 7.14 μ g-at/l와 PO₄³⁻-P 0.48 μ g-at/l일 때를 부영양화도지수 1로 하여, 수역의 부영양화도를 계산하였다.

$$\text{부영양화도(TSI)} = \frac{\text{COD(mg/l)} \text{ DIN}(\mu\text{g-at/l)} \text{ PO}_4^{3-}\text{-P}(\mu\text{g-at/l})}{3.43}$$

3. 자생COD의 평가법

해역에서 자생COD를 평가하기 위해 다음의 3가지 방법을 각각 적용하였다.

1) Δ COD법

연중 수온이 낮아 식물플랑크톤의 광합성작용이 크게 일어나지 않는 동계에 측정된 각 정점에서의 COD농도는 하천수의 유기물 유입에 의해서만 결정되는 각 수역의 외래성COD농도로 가정하고, 연중 실제 측정 COD농도와 차를 자생 COD라 한다.

2) 염분농도를 이용하는 방법

외래성COD는 하천을 통해 유입하여 외해수와의 교환을 통하여 희석·확산된다. 이때 COD를 보존성 물질로 보면, 각 수역에서 염분농도 저하는 하천수 유입에 의한 희석의 결과이며, 이때의 희석율을 구하여 외래성COD를 계산한다. 또한 외해역으로부터 유입되는 해수 중에도 고유의 COD농도를 포함하고 있을 것이다. 따라서 이 값을 대조역인 정점 6에서 가장 높은 염분농도를 보일 때의 COD농도로 가정하여 외해수 고유의 COD농도를 구하였다. 따라서 각 해역에서의 자생COD농도는 다음식과 같이 측정COD농도에서 외해수 고유의 COD농도와 하천수의 COD농도가 해수와 희석됨에 따라 염분농도를 통한 희석율로 구한 외래성COD농도의 차로부터 구할 수 있다.

$$\text{자생COD} = \text{측정COD} - (\text{희석율} \times \text{외래성COD} + \text{외해수 고유COD농도})$$

3) COD와 Chl.a와의 상관성을 이용하는 방법

식물플랑크톤의 현존량을 Chl.a로 표현하면 식물플랑크톤 증식에 의해 공급되는 유기물량은 COD농도의 증가를 나타낼 것이며, 이들 사이에는 일차관계식이 성립한다고 가정한다. 따라서 이들 관계식으로부터 Chl.a농도가 0일 때의 COD농도를 외래성COD농도로 하여 측정COD농도와 차를 자생COD로 한다.

결과 및 고찰

1. 해역의 수질 특성

낙동강 하구 해역은 낙동강 수계의 수질에 직접적인 영향을 받는 동편 해역과 간접적인 영향을 받는 서편해역에서 그 수질특성을 달리 함이 Table 1에 나타나 있다. 동편 정점인 2, 4 및 5에서 총무기질소의 농도가 연평균 71.29~108.00 $\mu\text{g-at/l}$ 로, 서편해역의 20.29~25.89 $\mu\text{g-at/l}$ 에 비해 매우 높게 나타났고, 이들

무기영양염류를 이용한 식물플랑크톤의 증식의 결과로 Chl.a농도 역시 동편해역에서 연평균 15.58~22.32 $\mu\text{g/l}$ 로 서편해역의 연평균 농도 11.57~14.55 $\mu\text{g/l}$ 에 비해 높은 농도를 보였다. 낙동강 수계를 통해 유입하는 외래성 유기물과 식물플랑크톤의 생산에 의한 자생유기물에 의해 하구해역의 COD농도는 동편 해역이 연평균 2.36~2.69 mg/l 로 서편해역의 2.08~2.19 mg/l 에 비해 높은 농도를 보였다.

그러나 전 조사해역에서 하구해역의 일반적인 특성

Table 1. Range and mean values of water quality parameters in Nakdong estuary

St. No.		COD mg/l	Salinity ‰	Chl.a $\mu\text{g/l}$	DIN $\mu\text{g-at/l}$	PO ₄ ³⁻ -P $\mu\text{g-at/l}$
1	Range	0.63~3.43	21.08~33.34	1.13~60.61	2.78~68.50	0.23~2.23
	Mean	2.11	29.53	14.55	25.86	0.97
2	Range	1.33~4.23	8.16~32.91	2.48~53.78	6.07~249.64	0.29~2.74
	Mean	2.69	23.30	18.73	71.29	1.19
3	Range	0.59~3.83	25.63~33.32	1.03~42.12	2.50~74.36	0.07~1.32
	Mean	2.08	30.15	13.26	24.21	0.68
4	Range	1.45~5.38	5.65~29.50	2.28~67.09	1.93~343.79	0.07~2.55
	Mean	2.67	19.33	22.32	108.00	0.97
5	Range	1.13~4.64	6.55~32.49	1.31~46.39	1.14~288.64	0.10~1.52
	Mean	2.36	24.60	15.58	84.43	0.77
6	Range	0.47~3.75	26.51~33.52	1.51~46.10	0.93~70.57	0.10~1.03
	Mean	2.07	31.12	14.87	23.79	0.58
7	Range	1.10~3.47	25.83~33.95	1.21~28.68	1.00~70.43	0.10~1.16
	Mean	2.19	31.11	11.57	20.29	0.61

Table 2. Eutrophic state indices for each sampling site in Nakdong Estuary

Station	Seasons			
	Spring	Summer	Autumn	Winter
1	11.4	26.4	18.3	6.0
2	91.9	96.8	37.4	35.2
3	13.1	5.0	11.5	7.6
4	90.1	111.0	67.5	46.6
5	101.3	55.4	9.0	33.4
6	9.3	7.7	5.5	7.8
7	5.9	5.2	9.2	9.2

인 풍부한 영양염의 농도를 나타내고 있고 이에 따른 하계의 Chl.a와 COD농도가 높게 나타났다. 따라서 Okaichi (1985)의 제안식을 이용하여 조사해역의 계절

별 부영양화도를 평가한 결과가 Table 2에 나타나 있다. 전 조사 정점과 전 계절에 걸쳐 부영양화 기준 1을 훨씬 초과하였고, 특히 춘계와 하계에 있어 부영양화 지수는 100을 초과하는 해역도 있어 부영양화 단계를 지나 과영양 단계에 이르는 해역임을 알 수 있다. 따라서 조사해역에서는 식물플랑크톤의 증식에 의한 자생COD 기여율이 클 것으로 추정할 수 있다.

2. 자생COD의 평가

1) ΔCOD 법에 의한 자생COD의 평가

각 수역의 동계 평균 COD농도를 하천수 유입에 의해 공급되는 외래성COD농도로 하여, 각 조사기간 및 조사정점에서 실제 측정COD 농도와 차를 자생COD 농도로 평가한 결과는 Fig. 2에 나타나 있다. 또 계절별 각 조사정점에서 총COD 중 자생COD가 차지

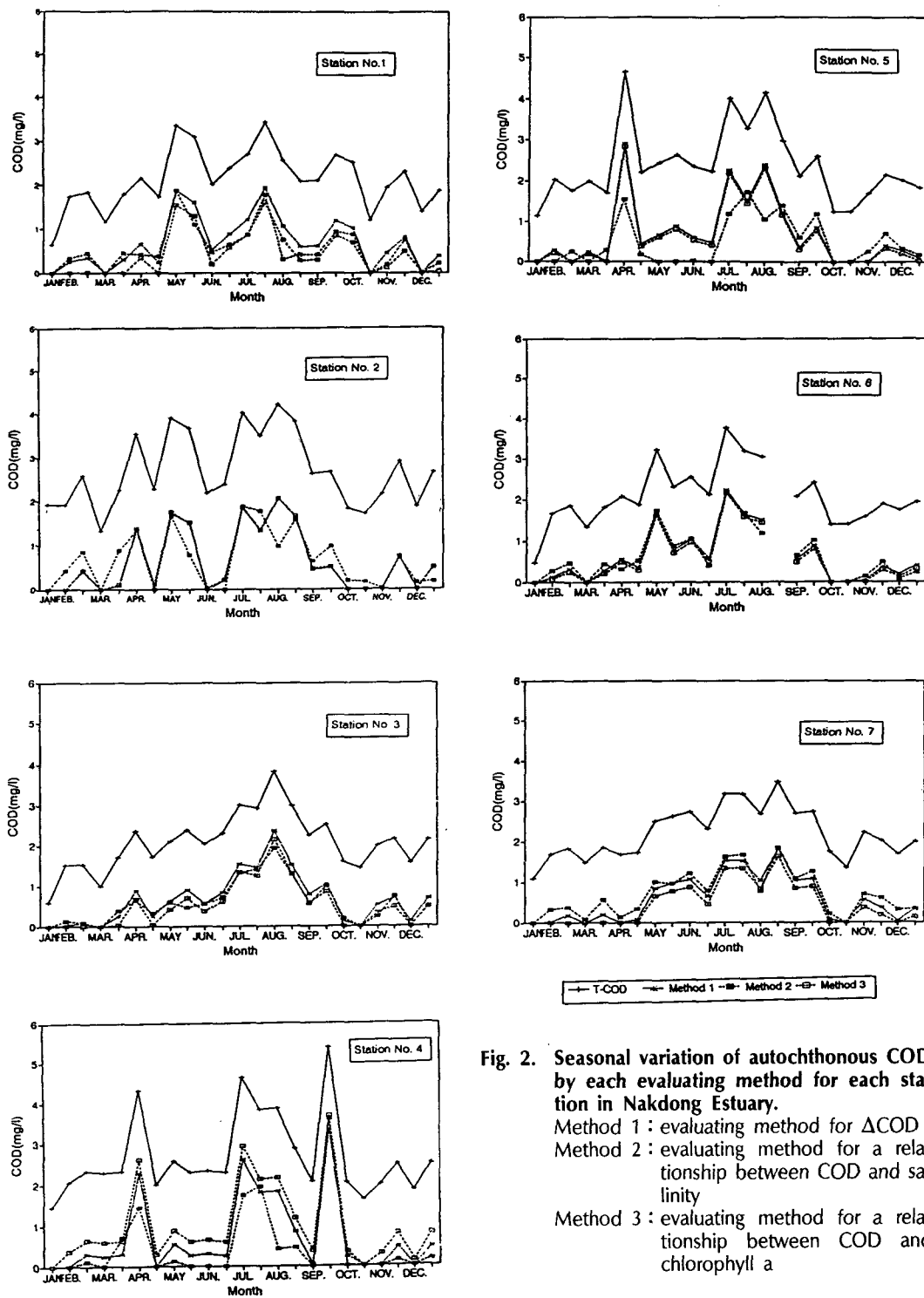


Fig. 2. Seasonal variation of autochthonous COD by each evaluating method for each station in Nakdong Estuary.
 Method 1 : evaluating method for Δ COD
 Method 2 : evaluating method for a relationship between COD and salinity
 Method 3 : evaluating method for a relationship between COD and chlorophyll a

Table 3. Percentage of autochthonous-COD in total-COD by each evaluating method

Season	Evaluating method	station No.						
		1	2	3	4	5	6	7
Spring	1 ¹⁾	28.0	21.8	22.5	18.1	25.8	24.3	14.2
	2 ²⁾	26.0	23.5	19.3	11.4	9.3	21.6	9.2
	3 ³⁾	17.1	22.3	13.8	31.4	23.5	26.6	23.4
	mean	23.7	22.5	18.5	20.3	19.5	24.2	15.6
Summer	1	39.2	30.6	46.2	33.9	41.2	45.6	42.1
	2	27.3	27.0	40.5	19.2	26.0	41.7	35.5
	3	25.6	31.2	38.6	44.9	38.9	43.1	44.0
	mean	30.7	29.6	41.8	32.7	35.4	43.5	40.5
Autumn	1	28.6	10.1	23.9	13.8	11.3	14.0	21.0
	2	21.9	17.5	20.2	14.1	20.3	18.0	26.8
	3	16.5	10.4	16.3	25.1	9.8	11.9	14.9
	mean	22.3	12.7	20.1	17.7	13.8	14.6	20.9
Winter	1	10.5	6.8	9.1	6.4	6.3	11.5	5.9
	2	10.8	13.8	7.5	2.4	7.9	11.4	15.2
	3	0.5	7.1	4.4	16.9	4.2	8.3	1.4
	mean	7.3	9.2	7.0	8.6	6.1	10.4	7.5

- 1) evaluating method for ΔCOD
- 2) evaluating method for a relationship between COD and salinity
- 3) evaluating method for a relationship between COD and chl.a

하는 비율이 Table 3에 나타나 있다. ΔCOD법에 의해 평가한 결과는, 계절별로는 동계에 전 해역에서 수온의 저하로 인한 식물플랑크톤 생산의 감소의 결과 낮은 자생COD 비를 보였고, 하계에 정점 3, 5, 6 및 7에서 46.2%, 41.2%, 45.6% 및 42.1%를 차지해 가장 높은 비를 보였다. 이들 정점은 가장 외해역에 위치한 정점으로, 상대적으로 낙동강의 하천수에 의한 외래성 유기물의 영향을 적게 받는 지점에 해당하며, 하계 수온의 상승으로 식물플랑크톤의 생산이 활발해짐으로 인해 상대적으로 자생유기물이 차지하는 비율이 크지게 되어, COD의 기여분이 40% 이상으로 크게 작용함을 알 수 있다.

2) 염분농도를 이용하는 방법

하구역으로 유입하는 하천수가 갖는 COD농도, 즉 염분농도가 0일때의 COD농도가 외래성 COD농도가 된다. 그러나 낙동강 하구해역의 경우 하구언으로 인해 하천수의 유입량이 일정하지 않아 외래성COD농도를 나타내는 염분농도 0일 때의 COD농도를 구할 수 없었다. 따라서 Fig. 3과 같이 낙동강에 가장 인근

한 조사해역인 정점 4에서 5.65‰로 조사기간중 가장 낮은 염분농도를 보일 때의 COD 3.87mg/l를 하천수가 갖는 외래성COD농도로 하였고, 이들 COD를 보전성 물질로 가정하면 외해수와의 희석작용에 의해 확산될 것이며, 희석율은 염분농도와 상관성이 있을 것

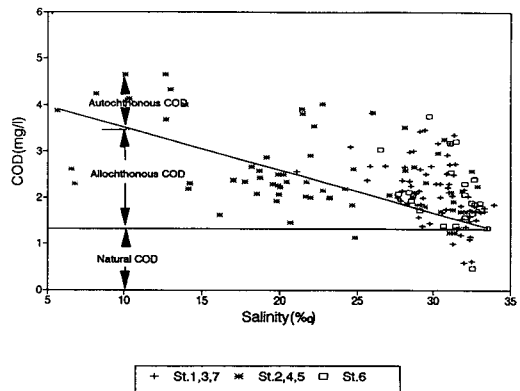


Fig. 3. Relationships between COD and salinity for evaluating autochthonous COD Nakdong Estuary.

이다. 또한 가장 외해역에 위치한 정점 6에서 33.52%로 가장 높은 염분농도를 보일 때의 COD 1.33mg/l을 외해수가 함유한 고유의 COD농도로 하였다. 따라서 각 조사 기간 및 조사정점에서의 자생 COD농도는 측정농도와 외해수 고유의 COD농도인 1.33mg/l을 유입하천수가 희석된 결과인, 염분농도를 이용해 구한 외래성COD농도의 차를 통하여 구할 수 있다. 그 결과는 Fig. 2와 Table 3에 나타내었다. 이 방법에 의한 평가 결과 자생COD가 차지하는 비율은 2.4~41.7%의 범위였으며, 하계에 정점 3, 6에서 높게 나타났다. 전 조사기간 중 낙동강의 수질에 직접적인 영향을 받는 동편 수계는 부영양화 지수가 높은데도 불구하고, 자생COD가 차지하는 비율이 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 하천수에 의한 외래성COD의 기준농도로 사용한 염분농도 5‰ 일때의 정점 4에서 COD농도 중에는 이미 자생COD가 상당량이 포함되어 있고, 이 자생COD를 모두 외래성COD에 포함시켜 외해수와 희

석에 따른 각 정점에서 외래성COD농도를 계산해 측정COD와의 차를 자생COD로 함에 따라, 자생COD의 농도가 과소 평가된 결과로 사료된다.

3) COD와 Chl.a와의 상관성을 이용하는 방법

COD와 Chl.a는 일차 상관식을 따른다는 가정하에 상관식을 구한 결과는 Table 4와 같다.

각 해역의 연평균 외래성COD값에 해당하는 절편값은 1.60~2.16mg/l로 ΔCOD법의 경우 적용된 1.47~2.18mg/l과 유사한 값을 보였다. 계절적 자생COD비는 Fig. 2와 Table 3에서와 같이 동계의 정점 1에서 0.5%로 가장 낮았으며 하계 정점 4, 6 및 7에서 44.9, 41.7 및 44.0%로 가장 높은 자생COD 기여율을 보였다. Fig. 4는 전조사자료를 이용하여 COD와 chl.a농도와의 상관관계를 나타낸 것으로 전환계수 0.032, 상관계수는 0.55로, Shin et al.(1994)이 낙동강 하천수에서 적용한 결과인 상관계수 0.8이상과 Nakanishi (1991)가 오오사카만등에서 적용한 결과 상관계수 0.9이상을 보인 결과에 비해 낮은 상관성을 보였다. 이는 하구해역의 수질변화가 급속히 일어나며, 낙동강 하천수의 하구언 수문 조작으로 인해 하천수의 유입이 부정기적으로 일어남에 의한 요인과 조사해역의 수심이 비교적 얕아 저질 유기물의 재부유와 같은 요인이 작용하므로 인한 결과로 사료된다.

4) 자생COD 평가법의 비교

총COD 중 자생COD가 차지하는 비율은 Table 3에서 보는 바와 같이 하계에 19.2~44.9%로 가장 크

Table 4. Relationships between COD and Chl.a in Nakdong Estuary

Station	Regression equation	r
1	COD=0.0199 Chl.a+1.82	0.383
2	COD=0.0284 Chl.a+2.16	0.504
3	COD=0.0298 Chl.a+1.68	0.434
4	COD=0.0440 Chl.a+1.70	0.701
5	COD=0.0346 Chl.a+1.82	0.509
6	COD=0.0320 Chl.a+1.60	0.566
7	COD=0.0300 Chl.a+1.85	0.399

COD: mg/l, Chl.a: μg/l

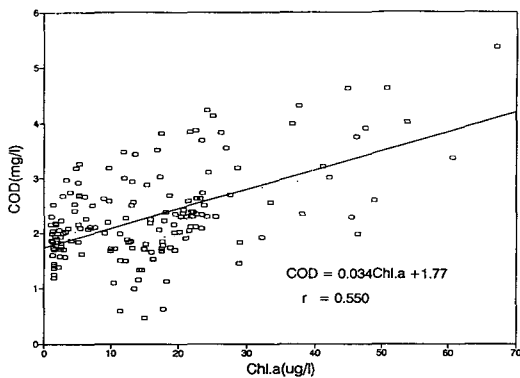


Fig. 4. Relationships between COD and chl.a for evaluating autochthonous COD in Nakdong Estuary.

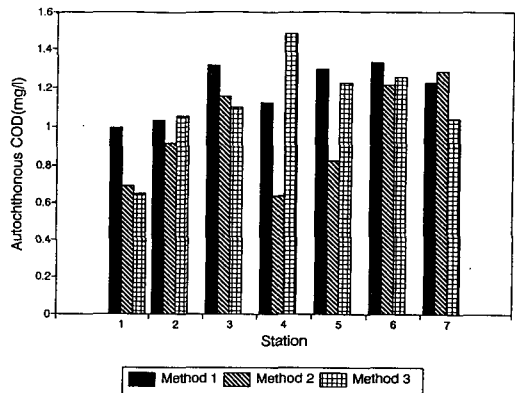


Fig. 5. Comparison of autochthonous CODs by the evaluating method in summer in Nakdong Estuary.

게 나타났다. 따라서 하계 조사해역별 각 평가방법에 따른 하계의 자생 COD의 농도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 전 조사정점에서 평균 0.6mg/l 이상으로 높은 자생COD농도를 보였고, 각 평가방법별 자생COD농도도 유사하게 나타났다. 그러나 염분농도와의 관계로부터 구하는 평가법에 의해 구한 정점 4, 5에서 자생COD 농도는 다른 평가법에 비해 특히 낮은 농도를 보였다. 이는 낙동강하구와 같이 하구언의 건설로 인해 하천수의 유입이 부정기적으로 이루어지고, 하구언 수문 개방과 함께 자생유기물의 증감이 순간적으로 이루어지는 해역에서는 염분농도와의 관계를 이용한 평가법은 자생COD농도 평가법으로 부적절한 것으로 나타났다. 또한 낙동강 하구해역은 수심이 얕아 해상의 기상변동에 따른 저질의 유기물 재부유에 의한 영향과 같은 수리적, 기상학적 요인이 많은 작용을 하는 것으로 나타났다.

이를 제외한 두 평가법을 통해 나타난 자생COD농도는 전수역 및 전계절에 걸쳐 유사한 농도를 보였으며, 상대오차 20%이내의 값을 보였다. 따라서 Δ COD 법과 chl.a의 상관성을 이용하는 방법은 해역의 자생COD농도 평가를 위한 유용한 방법으로 사료된다.

요 약

낙동강 하구를 대상해역으로하여 자생COD 농도를 구하기 위해 3가지 방법을 적용하고, 각 방법간의 적용성을 평가한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

낙동강 하구 해역의 부영양화도 평가 지수는 5.0~111.0로 부영양화 기준 지수 1을 훨씬 초과하여 과영양단계에 있는 것으로 나타났다. 낙동강 하구 조사해역의 총COD중 자생COD 비는 0.5~44.9%의 범위였으며, 계절별로는 하계에 가장 높은 비율을 보였다. 지점별로는 하계에 정점 6에서 평가방법 평균 43.5%로 가장 높은 비율을 나타내었다. 염분농도를 이용한 평가법은 낙동강 하구에서 하구언의 수문조작에 따른 하천수의 부정기적인 유입으로 인해 자생COD를 평가하기에 부적절한 방법이었다. Δ COD법과 COD와 Chl. a와의 상관성을 이용해 자생COD 농도를 평가하는 방

법은 하계 전조사해역에서 상대오차 20%이내의 값을 보여 낙동강 하구 해역의 자생COD평가를 위한 적절한 방법임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- APHA · AWWA · WPCF. 1985. Standard method 16th Ed., Port City Press, Baltimore, Maryland 373~452.
- Ministry of Environment. 1992. Standard testing method, Water Part, Donghwa Tech., Seoul 193~195 (in Korean).
- Kim, J. 1994. The eutrophication modeling for Jinhae Bay in summer. Ph.D. thesis, National Fisheries University of Pusan, Korea, 1~130 (in Korean).
- Morioka, T. 1980. Application of ecological dynamics for eutrophication control in Kobe Harbour Area, Pro. Wat. Tech., 12, 445~458.
- Nakanishi, H. 1990. Inflowing pollution loads relating to eutrophication of water bodies and their control. Sci. Forum of the Seto Inland Sea., 1 (3), 31~43 (in Japanese).
- Okaichi, T. 1985. The cause of red-tide in neritic waters, Japan Fisheries Res. Convers. Ass. , 58~75.
- SCOR-UNESCO. 1966. Determination of photosynthetic pigments in seawater. Monographs on oceanographic methodology, UNESCO, Paris., 1, 11~18
- Shin, S. K., S. W. Lee and C. K. Park. 1994. Effect on BOD value by the production of phytoplankton. Proceedings of a Symposium Jeju. Kor. Soc. Env. Eng., 455~458 (in Korean).
- Straskrabova, V., J. Komarkova and V. Vyhnalek. 1993. Degradation of organic substances in reservoirs. Wat. Sci. Tech., 28(6), 95~104.

1995년 2월 8일 접수

1995년 5월 24일 수리