

연구논문

GIS를 이용한 연안 수질등급 평가

정종철* · 조홍래**

남서울대학교 지리정보공학과*, 서울대학교 환경대학원**

(2005년 10월 20일 접수, 2005년 12월 27일 승인)

The Assessment of Coastal Water Quality Grade Using GIS

Jong-chul Jeong* · Hong-lae Cho**

Dep. Geoinformatics Eng. Namseoul Univ.*, Seoul National University**

(Manuscript received 20 October 2005; accepted 27 December 2005)

Abstract

The purpose of this study is to assess spatiotemporal variation of coastal water quality according to time and location changes. For this we developed numerical marine trophic index base on four water quality components (chlorophyll, suspended solids, dissolved inorganic nitrogen and phosphorus) and applied this index to the water quality data measured in the Korean coastal zone for the 7-years period from 1997 to 2003. Water quality data are obtained only at selected sites even though they are potentially available at any location. Therefore, in order to estimate spatial variation of coastal water quality, it is necessary to estimate the unknown values at unsampled locations based on observation data. In this study, we used IDW (Inverse Distance Weighted) method to predict water quality components at unmeasured locations and applied marine trophic index to predicted values obtained by IDW interpolation. The results of this study indicate that marine trophic index and spatial interpolation are useful for understanding spatiotemporal characteristics of coastal water quality.

Key words : eutrophication, water quality index, spatial interpolation, inverse distance weighted

1. 서론

연안수질에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 현

재의 수질이 이전에 비하여 얼마나 개선되었는지, 공간적으로 수질의 분포상태는 어떻게 변동하고 있는지에 대한 정확한 평가가 요구되고 있다. 연안수

질의 시간적, 공간적 변화에 대한 이러한 질문에 답변하기 위해서는 무엇보다도 먼저 연안수질과 관련된 여러 요소를 함께 고려하여 연안수질을 종합적으로 평가할 수 있어야 한다. 그러나 우리나라에서는 현재 BOD, DO와 같은 몇 가지 항목만을 이용하여 수질을 평가하고 있을 뿐, 각종 수질항목을 종합적으로 평가하려는 노력이 부족한 상태이다. 또한 사용되고 있는 수질항목의 대부분은 일반인들이 자료를 대하였을 때 오염정도를 평가하기가 매우 어려운 수치들로 구성되어 있으며, 전문가 또한 다양한 수질 항목을 동시에 사용할 경우 오염의 정도를 제대로 평가하기가 매우 난해하다(민달기와 성일환, 1999). 따라서 현재의 수질 상태를 정확히 평가함과 동시에 이를 일반인들도 이해하기 쉬운 형태로 제시될 필요가 있는데, 이를 위해서는 본 논문에서는 해양수질을 점수화된 척도로 평가할 수 있는 해양부영양화지표 MTI (Marine Trophic Index)를 개발하였으며, 이를 실제 해역에 적용하여 시간적, 공간적 변화에 따른 수질의 변동사항을 평가하였다.

현재까지 연안수질에 대한 연구는 대부분 수질이 측정되는 해당 포인트 위치에 대해서만 수행되어 수질의 공간적 변화 양상을 평가하기 어려운 단점을 갖고 있었다. 그러나 연안수질의 공간적 분포 특성을 파악하기 위해서는 수질이 측정된 지점뿐만 아니라 측정되지 않은 미관측 지점에 대해서도 수질 자료가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 미관측 지점의 수질을 예측하기 위해서 공간보간 기법인 IDW(Inverse Distance Weighted)를 적용하였으며, 이를 통하여 수질의 공간적 분포 특성을 살펴보았다.

II. 해양수질지표의 개발

1. 지표개발 과정

수질지표의 개발과 관련된 국내 연구사례로는 최지용(1996), 민달기와 성일환(1999), 권병택(2001)의 연구를 살펴볼 수 있다. 최지용(1996)은 수질을 종합적으로 평가하기 위하여 단일 수질 항목이 아닌 여러

수질 항목을 통합한 종합수질지표를 개발하였으며, 민달기와 성일환(1999)은 오염지수 및 오염점수를 이용하여 수질을 평가하려고 시도하였다. 권병택(2001)은 기존의 수질평가 기법들이 서로 다른 평가 결과를 나타내는 불확실성을 제거하기 위하여 퍼지 이론을 활용한 수질등급판정 기법을 개발하였다. 외국의 경우에는 Vollenweide 등(1998)이 해양의 부영양화를 점수화하여 평가하기 위해 TRIX (trophic index) 지표를 개발한 사례를 들 수 있다. 본 연구에서는 Vollenweide 등(1998)이 제안한 TRIX 지표의 개발 방법을 토대로 해양부영양화지표를 개발하였다. 지표개발 과정을 설명하면 다음과 같다.

하한값 L 과 상한값 U 를 갖는 어떤 항목의 측정값을 0 과 1 사이의 정량적인 인덱스로 표현하고자 할 때 이는 식 1과 같이 표현된다.

$$X_i = (M_i - L_i) / (U_i - L_i) \quad \text{식 1.}$$

식 1에서 M_i 는 항목 m 에 대한 측정값, U_i 는 항목 m 의 상한값, L_i 는 항목 m 의 하한값을 나타낸다. 식 1인 단일 항목에 대한 지표를 나타낸다. 그러나 수질을 종합적으로 평가하기 위해서는 단일 항목이 아니라 여러 항목을 통합한 종합지표(composite index)를 개발이 필요하게 되는데, 이 경우 앞의 식 1은 식 2와 같이 변경되어 사용될 수 있다.

$$X_c = (1/n) \sum_1^n \left[\frac{(M-L)}{(U-L)} \right]_i \quad \text{식 2.}$$

식 2에서 n 은 종합지표에 포함되는 항목의 개수를 나타낸다. 식 2는 $0 \sim 1$ 사이의 값을 가지며, 이를 $0 \sim k$ 사이의 값으로 확장하고자 할 경우 $(1/n)$ 대신 (k/n) 을 사용하면 된다. 수질항목과 같이 측정값이 비대칭적으로 기울어진 분포(skewed distribution)를 가지며 일부 지역에서 매우 큰 값이 나타나는 경우, 이를 지표화하여 사용하기 위해 로그변환을 이용할 수 있다. 로그변환 후 생성된 지표는 다음 식 3과 같이 표현된다.

$$MTI = (k/n) \sum_1^n \left[\frac{(\log M - \log L)}{(\log U - \log L)} \right]_i \quad \text{식 3.}$$

2. 해양수질지표

해양부영양화지표에 포함될 수질항목으로 Chlorophyll-a, 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP), 부유물질(SS)를 선택하였다. 선택된 수질항목 중 Chlorophyll-a는 생산성을 나타내는 직접적인 항목을 나타내며, 용존무기질소와 용존무기인은 영양염류를 부유물질은 수질을 나타내는 보충적인 자료로 선택되었다. 질소와 인의 경우 2000~2003년 사이에 측정된 총 3911 개의 해양 정점자료(그림 1)에 대한 상관분석 결과 용존무기질소와 용존무기인인 다른 질소, 인의 개별 요소와 매우 높은 상관관계를 보이고 있어 질소와 인을 대표하는 요소로 선택하였다. 각 수질항목간 상관분석 결과는 표 1과 같다.

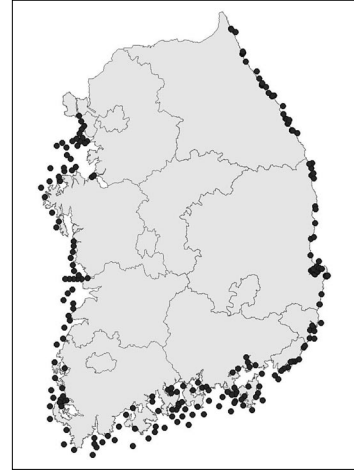


그림 1. 해양수질 측정지점 분포도

표 1. 수질항목간 상관분석 결과

	N	TEMP	SAL	pH	DO	COD	NH4-N	NO2-N	NO3-N	DIN	TN	DIP	TP	SS	Chl-a
TEMP	3911	1.00													
SAL	3910	-0.28	1.00												
pH	3909	0.11	0.18	1.00											
DO	3910	-0.50	0.17	0.06	1.00										
COD	3908	0.07	-0.31	-0.05	0.09	1.00									
NH4-N	3836	NS	-0.32	-0.09	-0.06	0.24	1.00								
NO2-N	3805	NS	-0.35	-0.15	-0.18	0.11	0.30	1.00							
NO3-N	3877	-0.07	-0.56	-0.22	-0.05	0.18	0.37	0.42	1.00						
DIN	3802	-0.06	-0.56	-0.21	-0.07	0.23	0.69	0.48	0.92	1.00					
TN	1957	NS	-0.52	-0.11	-0.08	0.19	0.54	0.50	0.71	0.73	1.00				
DIP	3835	NS	-0.21	NS	-0.09	0.26	0.32	0.25	0.28	0.34	0.40	1.00			
TP	1958	-0.11	-0.21	NS	NS	0.12	0.29	0.27	0.28	0.34	0.26	0.58	1.00		
SS	3905	-0.14	-0.28	-0.18	0.06	0.11	0.12	0.11	0.25	0.22	0.19	0.11	0.35	1.00	
Chl-a	3802	0.21	-0.32	0.08	NS	0.30	0.16	0.10	0.16	0.18	0.18	0.18	0.06	0.05	1.00

N: number of samples, NS: not significant (유의수준 0.05), TEMP: Temperature, SAL: Salinity

표 2. 해양수질지표에 포함된 수질항목의 상한값 및 하한값

수질항목	Max (log units)	Min (log units)*	log range	log range/10
Chl-a	92.79 (2.00)	0.010 (-2)	4.00	0.400
DIN	7.81 (0.90)	0.001 (-3)	3.90	0.390
DIP	6.60 (0.82)	0.001 (-3)	3.82	0.382
SS	348.70 (2.60)	0.100 (-1)	3.60	0.360
Sum of logs	6.32	-9	15.32	1.532

* 측정값 중 0이 아닌 가장 작은 값을 사용하였다.

식 3에서 필요로 하는 수질항목별 상한, 하한값을 산정하기 위하여 1997~2003년 사이에 조사된 총 6634 개의 수질측정 자료로부터 각 수질항목의 상한값과 하한값을 조사하였다(표 1). 조사된 상하한값을 식 3에 대입하여 식 4와 같이 해양부영양화지표를 개발하였다. 식 5의 MTT*는 식 4에서 Chlorophyll-a를 제외한 것으로, 1997년부터 1999년 사이에 조사된 수질자료 중 Chlorophyll-a에 대한 결측치가 많아 90년대 수질을 평가하는 보조적인 지표로 개발하였다.

$$MTI = \frac{(\log[Chl * DIN * DIP * SS] + 9)}{1.532} \quad \text{식 4.}$$

$$MTI^* = \frac{(\log[DIN * DIP * SS] + 7)}{1.132} \quad \text{식 5.}$$

III. 수질항목에 대한 공간보간

환경 분야에서 사용되는 많은 데이터는 공간상 연속적으로 분포하는 특징을 갖는다. 여기서 공간상 연속적으로 분포한다는 것은 공간상의 모든 지점에서 그 값이 존재한다는 의미로 해석되며 강수량, 기온, 고도, 오염농도 등이 그 구체적인 예라고 할 수 있다. 공간상 연속적으로 존재하는 이러한 데이터를 공간 분석 분야에서는 공간통계 데이터(geostatistical data)라 호칭한다. 공간통계 데이터가 필요할 때, 가장 좋은 방법은 모든 지점에서 필요로 하는 값을 획득하는 것이겠지만 비용과 시간을 고려할 때 모든 지점에서 원하는 값을 얻는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 많은 경우 특정 지점을 선정하여 관측값을 얻은 후 이를 이용하여 미관측지점의 값을 예측하는 방법이 사용되며, 이러한 작업과정을 우리는 공간보간(spatial interpolation)이라 한다.

본 논문에서는 대표적인 공간보간 기법인 IDW를 이용하여 미관측지점의 수질을 예측하였다. IDW의 기본 가정은 공간적으로 인접한 지점 사이의 값은 공통된 위치요인으로 인하여 유사성을 갖게 되는 반면에 두 지점 사이의 거리가 증가할수록 이러한 유사성은 상대적으로 감소하게 된다는 것에 기초한다.

IDW에 대한 기본 수식은 식 6과 같이 표현된다. 여기서 $Z(s_0)$ 는 위치 s_0 에서 우리가 예측하고자 하는 값을 나타내며, N 은 관측지점의 수, λ_i 는 관측지점 s_i 에 사용할 가중치, $Z(s_i)$ 는 관측지점 s_i 에서의 관측값을 나타낸다. 식 6에 포함된 가중치 λ_i 는 거리가 증가함에 따라 그 값이 줄어드는 모습으로 식 7과 같이 표현된다. 식 7에서 d_{i0} 는 관측지점 s_i 와 예측지점 s_0 사이의 거리를 나타내며, 지수에 포함된 p 는 거리에 따른 가중치의 변화 정도를 결정한다.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad \text{식 6.}$$

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad \text{식 7.}$$

IDW에 의한 수질예측 적용가능성을 살펴보기 위하여 식 p에 포함된 파라미터 p와 관측점 수를 각각 1, 1.5, 2 및 6, 8, 10로 구분하여 총 9 개 (3x3)의 방법을 적용한 후, 각 방법의 정확성을 평가하였다. 정확성 평가에는 공간보간을 통하여 예측된 자료를 이용하여 본래의 자료값을 다시 예측하는 교차검정을 이용하여 수행하였다. 공간보간은 1 km 간격으로 수행하였으며, 관측지점 탐색반경의 최대 크기는 30 km로 부여하였다. 따라서 미관측지점으로부터 30 km 안에 관측점의 개수가 지정한 것보다 적게 존재하여도 더 이상 관측점을 탐색하지 않고 30 km 안에 존재하는 관측점만을 사용하여 공간보간을 수행하도록 하였다. 또한 관측지점이 가깝게 위치하였다 해도 그림 2와 같이 육지로 인하여 미관측지점과 관측지

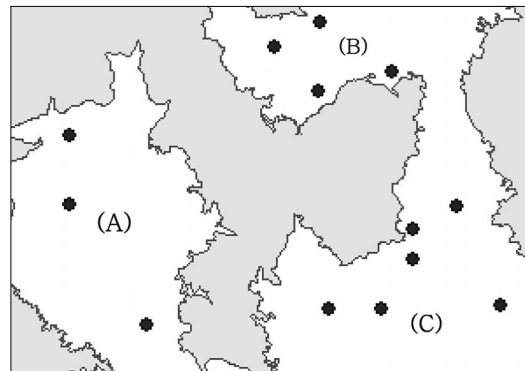


그림 2. 탐색 장벽지정

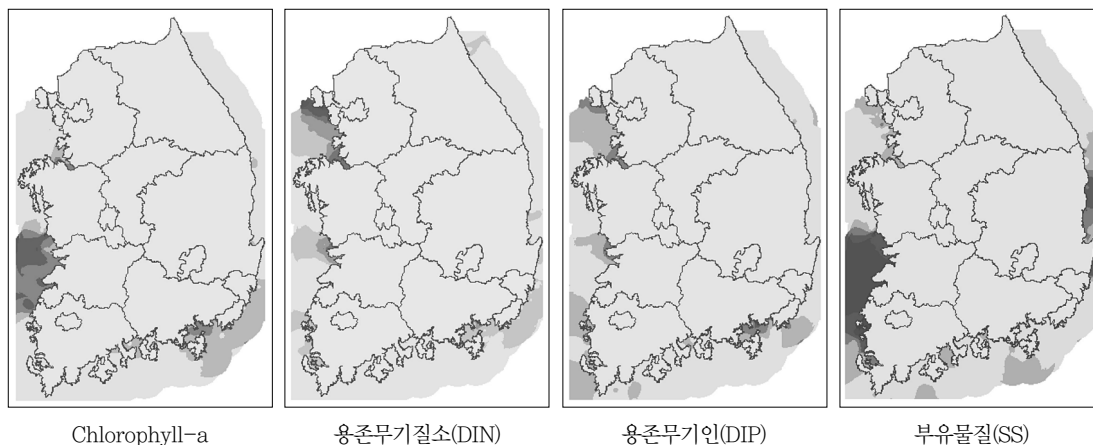


그림 3. IDW를 이용한 수질항목별 예측결과 (2003년 8월)

점이 서로 공간적으로 분리될 경우 공간적 이질성으로 인하여 미관측지점의 값을 예측하는 과정에 육지 맞은편에 있는 관측지점을 사용하는 것은 합당하지 않다.

따라서 본 논문에서는 육지로 인하여 정점자료가 공간적으로 분리될 경우 관측값을 공간보간 과정에 사용하지 않도록 지정하였다. 예를 들어, 그림 2에서 a, b, c 지점은 서로 거리상 가깝게 위치하나 육지로 분리되어 있어 공간보간 과정에서 다른 지역에 포함된 관측값을 이용하지 않게 된다.

수질예측의 정확성 평가는 2003년도 8월 자료를 이용하여 수행하였으며, 파라미터 변화에 따른 수질항목별 정확성 평가 결과는 다음 표 2와 같다. 표 2에서 확인할 수 있는 것과 같이 모든 수질항목에서 사용된 관측점 수가 적을수록, p 값이 커질수록 교차 검증의 정확성이 증가하는 것으로 나타났다. 가장 높은 정확성은 관측지점으로 6 개를 사용하고 p 값으로 2를 지정한 경우 나타나는 것으로 분석되었다. 가장 높은 정확성을 보인 파라미터를 이용하여 각 수질항목을 예측한 결과를 예시하면 그림 3과 같다. 그림 3은 2003년 8월 자료를 이용하여 공간보간을 실시한 결과이다.

표 3. 파라미터 변화에 따른 IDW 기법의 RMS 에러

Power	Samples	수질 항목			
		Chl-a	DIN (*10-3)	DIP(*10-5)	SS
1	6	0.564	1.239	1.279	3.883
	8	0.680	1.504	1.463	4.945
	10	0.805	1.807	1.638	5.539
1.5	6	0.084	0.250	0.299	0.708
	8	0.097	0.272	0.314	0.843
	10	0.109	0.394	0.326	0.917
2	6	0.019	0.085	0.116	0.190
	8	0.020	0.086	0.118	0.204
	10	0.022	0.088	0.119	0.212

IV. 적용 및 분석

시간 및 공간적 수질변화 모습을 평가하기 위해 우리나라 연안을 그림 4에서와 같이 30 km × 30 km의 총 46 개 구역으로 구분한 후 각 구역에 대한 MTT(식 4)와 MTT*(식 5)에 대한 평균값과 최대값을 살펴보았다. 각 구간의 평균값과 최대값을 산정하는 과정을 작업 흐름도로 나타내면 그림 5와 같다. 먼저 수질측정 정점자료로부터 1 km × 1 km의 크기를 갖는 미관측 지점에 대해 해양부영양화지표에 포함된 각 수질항목의 값을 IDW를 이용하여 예측한다. 이렇게 예측된 값은 식 4와 식 5의 해양부영양화지표에 입력하여 각 1 km 크기의 지점별 수질등급을

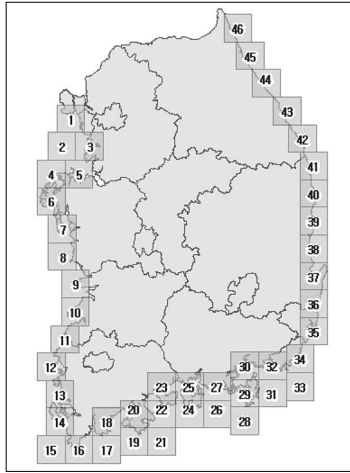


그림 4. 수질 평가를 위한 해역 구분

판별한 후, 그림 4와 같이 46 개 각 구간에 포함된 900 개의 단위 지점에 대한 수질등급 최대값과 평균 값을 산정하여 구간별 수질을 평가한다.

수질자료는 1997년부터 2003년에 걸친 각 연도의 8월 측정치를 이용하였으며, 이로부터 얻은 수질의 시간적, 공간적 분포 특성은 표 4, 5와 같다. 표 4는 Chlorophyll-a를 수질지표에 포함하여 연도별 수질 변화를 살펴본 것(MTI, 식 4)으로, Chlorophyll-a에 대한 결측치가 많은 90년대와 2000년대 이후 해양

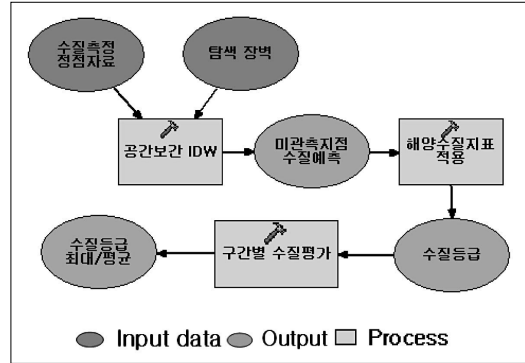


그림 5. 작업 흐름도

부영화지표에 큰 변화가 있음을 확인할 수 있다. 표 5는 Chlorophyll-a를 제외한 식 5의 MTT*에 의해 부영양화지표를 산정한 것으로 Chlorophyll-a를 포함한 표 4에 비하여 90년대와 2000년대 사이에 연속성이 있음을 보여준다. 전체적으로 평가할 경우 표 4, 5에서 모두 남해안, 서해안, 동해안의 순서로 부영화지표가 높은 것으로 분석되었음을 알 수 있다. 구체적으로 서해안의 경우에는 4(서산시), 7(태안군 남쪽해안), 10(부안군) 번 구역에서 부영양화지표가 높은 것으로 분석되었으며, 남해안의 경우 23(여수시), 25(남해군), 27(고성군 서쪽해안), 32(부산시 서남해안), 34(부산시) 지역에서 부영양화지표가 높은 것

표 4. Chlorophyll-a를 수질지표에 포함할 경우 연도별 수질변화

	연도	서해					남해					동해				
		1	4	7	10	15	16	23	25	27	32	34	35	46		
평균	1997	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
	1998	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
	1999	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
	2000	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	2001	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	2002	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	2003	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
최대	1997	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
	1998	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
	1999	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
	2000	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	2001	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	2002	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	2003	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

(범례: □ 0-3 □ 3-4 □ 4-5 ■ 5-6 ■ 6-7 ■ 7-8)

표 5. Chlorophyll-a를 수질지표에 포함하지 않은 경우 연도별 수질변화

	연 도	서 해					남 해					동 해				
		1	4	7	10	15	16	23	25	27	32	34	35	46		
평균	1997	[Grid]														
	1998	[Grid]														
	1999	[Grid]														
	2000	[Grid]														
	2001	[Grid]														
	2002	[Grid]														
	2003	[Grid]														
최대	1997	[Grid]														
	1998	[Grid]														
	1999	[Grid]														
	2000	[Grid]														
	2001	[Grid]														
	2002	[Grid]														
	2003	[Grid]														

(범례: □ 0-3 □ 3-4 □ 4-5 □ 5-6 ■ 6-7 ■ 7-8)

으로 나타났다. 동해안의 경우에는 공간상 변화 특성이 크지 않은 것으로 분석되었다. 수질등급의 공간적 분포특성을 해양부영양화지표에 Chlorophyll-a를 포함한 경우(표 4)와 포함하지 않은 경우(표 5)로 구분하여 비교하면 Chlorophyll-a를 포함한 경우 수질등급이 나쁜 지역이 Chlorophyll-a를 포함하지 않은 경우에 비하여 서로 모여 있음을 알 수 있다. 특히 남해안의 경우 Chlorophyll-a에 대한 측정자료가 온전한 2000년 이후의 분포특성(표 4)에서 수질등급이 나쁜 지역이 구역번호 25번 남해군을 중심으로 매우 무리지역 인접되어 있음을 보여준다(표 4). 이러한 본 연구 결과의 정확성 검증을 위하여 적조발생자료와 수질등급을 비교할 경우, 나쁜 수질 등급을 보인 지역이 적조 상시 발생지역과 공간적으로 높은 유사성을 보임을 확인할 수 있다.

그림 6은 2002과 2003년 연속해서 남해안 지역에 발생한 적조의 공간적 발생빈도를 보여준다. 그림 6은 국립수산과학원에서 제공하는 적조 속보 자료(2002, 2003년)를 디지털이징하여 수치지도화한 후 중첩분석을 통해 공간적 발생빈도를 추정한 것이다. 그림 6에서 짙은 색으로 표시되는 지역이 적조발생 빈도가 높은 지역으로 표 4, 5에서 2002, 2003년 해양부영양화지표가 높은 값을 보인 여수시(23 구역),

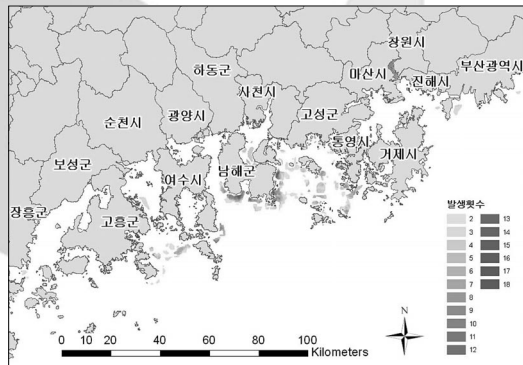


그림 6. 2002~2003년 연속해서 적조가 발생한 지역

남해군(25 구역) 지역과 공간적으로 일치되어 있음을 확인할 수 있다.

연도 변화에 따른 해부영양화지표의 변화 특성을 살펴보면 먼저 수질등급이 높은 지역의 경우 연도 변화와 관계없이 지속적으로 나쁜 수질을 보여주고 있음을 알 수 있다. 특정 해역이 연도 변화와 관계없이 나쁜 수질을 보여주고 있는 것은 해당 지역에 대한 연안수질 개선을 위한 노력이 미진하였거나 또는 개선 대책이 적합하지 않았음을 보여주는 것이라 할 수 있을 것이다.

이와 함께 연도별 변화 양상에서 Chlorophyll-a를 포함한 MTI 지표의 경우 남해안 서쪽 연안인

16(해남군), 17(완도군) 구역에서 2002년 이후 부영양화지표가 높아진 것으로 분석되었다. 따라서 향후 연안 해역의 수질관리에 있어 해남군과 완도군 일대에 대한 각별한 주의가 요구될 것으로 보인다.

V. 결론

해양 수질을 종합적으로 평가하기 위한 해양부영양화지표를 개발하였으며, 수질의 시공간적 변화 특성을 파악하기 위하여 공간보간 방법인 IDW를 이용하여 미관측지점의 수질을 예측한 후 개발한 해양부영양화지표를 적용하였다. 적용 결과 시공간적 변화에 따른 수질의 변화 특성을 파악하는데 해양부영양화지표와 공간보간 기법이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였으며, 앞으로 장기간에 걸친 수질 자료와 각 지역의 공간적 특성을 함께 고려할 경우 해양 수질관리를 위한 합리적 방안 도출에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 민달기, 성일화, 1999, 한강 수계 수질오염도의 통합적인 정량화 방법에 관한 연구, 환경관리학회지, 5(2), 189-198.
- 최지용, 1996, 종합수질지표의 개발, 환경정책평가연구원.
- 최병택, 2001, 퍼지이론을 이용한 수질등급판정 방법 개발, 전남대학교 석사학위논문.
- Vollenweider, R. A., Giovanardi, F., Montanari, G., and Rinaldi, A., 1998, Characterization of the Trophic Conditions of Marine Coastal Waters with Special Reference to the Nw Adriatic Sea: Proposal for a Trophic Scale, Turbidity and Generalized Water Quality Index, *Environmetrics*, 9, 329-357.

최종원고채택 06. 01. 06