

## 판별함수에 의한 진해만 적조예측

이 문 옥 · 백 상 호\*  
여수수산대학교 해양공학과 · 여수수산대학교 해양토목공학과  
(1997년 7월 22일 접수)

### The Prediction of Red Tides in Jinhae Bay using a Discriminant Function

Moon-Ock Lee and Sang-Ho Baek\*  
Dept. of Ocean Engineering, Yosu National Fisheries University, Yosu, 550-749, Korea  
\*Dept. of Ocean Civil Engineering, Yosu National Fisheries University, Yosu, 550-749, Korea  
(Manuscript received 22 July 1997)

The discriminant function was introduced to understand the cause and establish the prediction method of red tides occurring in Jinhae Bay, Korea. Two sea regions of Masan and Haengam Bays and Dangdong and Wonmun Bays had different types of causes and patterns for red tides. In Masan and Haengam Bays, the red tides concentrically occurred during June and September. For example, in June the red tides occurred from physical and meteorological factors, which are related to the stratification and the increase in planktons. However, in August the red tides occurred from the water quality environment, based on these conditions. Furthermore, in September the red tides were caused by the balance between the meteorological and water quality environmental factors. In contrast to those, in Dangdong and Wonmun Bays, the red tides mainly occurred during July and October and the frequency of occurrence was not as much as Masan and Haengam Bays. Especially, in August and September most meteorological and physical factors or water quality environmental factors appeared to contribute to the occurrence of red tides. This indicates that red tides do not easily occur as they are controlled by various environmental factors particularly in these regions.

The discriminant functions were applied to predict red tides which they were actually occurred in Masan and Haengam Bays in June. The results showed that they were successful for the prediction of red tide at Haengam Bay but not at Masan Bay. The reason for their discrepancy in Masan Bay could have come from using a slight higher value of pH or COD in May, instead of its value in June.

Key words : discriminant function, red tides, Jinhae Bay, water quality environmental factors

#### 1. 서 론

진해만은 우리나라의 주요어장중의 하나이다. 그러나, 1960년대이후 진해만 인근지역에 급격히 조성되기 시작한 마산 창원공단을 비롯한 각종 산업단지과 인구 집중으로 인하여 다량의 공장폐수와 생활하수 등이 제대로 처리되지 않은 채 만내로 유입하여 심각한 수질오염을 야기하게 되었다. 또한, 한정된 수역에 밀집한 다종다양의 양식생물의 배설물에 의한 자가오염은 물론, 항로준설로 인한 간석지의 소실과 해저질의 개변은 더욱 수질악화를 부채질하고 있다. 그 결과, 진해만은 부영양화해역으로 변하여 지난 1970년대 이래 적조가 거의 매년 발생하기에 이르렀고, 이제 어장으로서의 기능마저 크게 위협받고 있는 실정이다. 따라서 진해만에 있어서의 적조현상을 근본적으로 규명하고 이를 사전에

예측·방지함은 물론, 이에 따른 적절한 대책의 수립은 우리 모두의 절실한 과제이다.

진해만 적조에 관한 최초의 연구는 박주석과 김철수(1967)에 의해 이루어진 1962년 진동만에서 발생한 적조의 생물종에 관한 관찰결과를 들 수 있다. 그 후 박주석(1982)은 진해만 적조와 수질환경과의 관계에 관하여 연구하였고, 이광우 외(1981, 1982, 1983)는 진해만 적조와 오염부하를 감시하기 위한 방안연구를 각각 수행하였다. 또한 장선덕 외(1984), 송영호와 이상룡(1984), 김종화 외(1986), Chang et al.(1993), Kim et al.(1994), 정태성(1996)은 2차원 또는 3차원 수치모형을 사용하여 마산만과 진해만의 해수유동을 규명하기 위한 연구를 각각 행하였고, 박주석 외(1985), 박주석(1995), Park과 Lee(1996), 국립수산

진홍원 (1983, 1987, 1988, 1989, 1995, 1996), 환경처 (1991), 국립환경연구원 (1996) 은 진해만을 비롯한 한국 연안어장의 오염실태의 파악과 적조대책을 위한 연구를 실시하였다. 나기환 (1987), 서봉수 (1987), 해양연구소 (1989), 최우정 (1993), 김종구 (1994), Lee (1995) 는 진해만의 수질환경을 예측하고 적조기구를 구명하기 위한 시도를 하였다. 양동범 (1987), Lee와 Yoo (1990), Kim et al. (1994), Kang et al. (1996), Kim et al. (1996), Lim과 Hong (1997) 은 진해만 적조생물의 군집변화와 관련한 환경요인에 대하여 고찰을 한 바 있다.

진해만 적조와 관련한 이상의 연구는 크게 나누어 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 적조를 유발하는 환경요인을 파악하기 위한 해수유동과 수질예측에 관한 연구, 둘째 적조생물의 군집변화에 관한 연구, 셋째, 수질환경의 실태에 관한 연구가 그것이다. 그러나 이들의 연구는 진해만 적조의 현상적 특징, 예를 들면 해수유동구조, 수질환경, 적조생물 등에 대한 개별적인 정보를 파악하는 데 그쳤을 뿐, 적조가 어떠한 요인에 의해 왜 발생하는가를 구체적으로 밝히지는 못하였다. 그것은 이들 연구가 다양한 인자간의 연계성을 고려하지 않고 독자적으로 수행되어 적조현상 전체를 균형 있게 조명하지 못한 데 기인하고 있다. 더구나 적조의 기구를 밝히고 예보를 행한 연구는 거의 이루어지지 않았다고 생각한다.

이러한 상황하에서 가장 유용한 수법중의 하나가 통계해석이다. 비록 대상해역에 있어서의 적조 또는 수질오탁의 기구가 해명되어 있지 않더라도 적조 및 그 지배인자와 관련한 자료를 수집하여, 그것을 통계해석하는 것에 의해 대상해역에 있어서의 양자의 관계를 명확히 할 수 있기 때문이다.

본 연구는 지금까지 획득한 진해만 해역에서의 적조 발생 관련자료를 통계해석하여 진해만 적조의 근본원인을 구명하고, 적조예측수법을 확립하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 자 료

국립수산진흥원 (1983, 1987, 1989, 1997) 이 1981년부터 1995년까지 진해만내의 마산만, 행암만, 당동만, 원문만 등 4개만에서 조사한 적조관련자료 (적조발생일, 적조주체생물, 적조밀도), 수질자료 (용존산소, pH, COD), 물리자료 (수온, 염분) 와 중앙기상대 (1981~1995) 의 총무의 기상자료 (월평균기온, 평균풍속, 일조시간, 강우) 를 각각 이용하였다. 그러나 이들 자료중에는 년도에 따라 결측된 항목이나 불명한 부분이 있었다. 예를 들면 1981년부터 1985년 사이에는 pH 자료가 없었고, 1987년부터 1989년 사이에는 적조원인종만 밝혀져 있을 뿐, 적조발생일자나 해역별 구분이 불명하였다. 이런 경우에는 해당 항목의 평균치에 의해 대체하거나 관련자료를 참고하여 적절히 적조발생 또는 비발생을 가정하였다.

### 2.2 방 법

진해만 적조의 특징과 그 발생원인을 조사하기 위하여 지금까지의 적조발생상황자료 (발생시기, 적조생물, 세포밀도, 발생해역), 기상자료 (강우, 일조시간, 바람, 기온), 물리환경자료 (수온, 염분, DO, COD, pH) 를 통계처리하여 판별함수 (Discriminant Function) 를 구하였고, 이것으로부터 각 해역별 적조발생의 원인을 규명하였다. 판별함수란 판별분석에 의해 얻어지는 함수로서 두 개 또는 그 이상의 자연상태의 그룹을 구별하기 위해 어떤 변수가 도움을 주고 있는가를 결정하기 위해 사용되며, 따라서 구해진 판별함수에 진해만내의 임의 시간에 있어서의 제 조건 (예를 들면 물리조건, 기상조건 등) 을 대입하면 사전에 적조발생여부를 판단할 수 있다. 그 구체적인 방법은 이하와 같다.

1972년부터 1995년까지 적조가 발생했던 해 (이하 적조발생년) 및 적조가 발생하지 않았던 해 (평상년) 의 각각에 있어서 지배인자로서 기상조건 (기온, 풍속, 일사량, 강우) 의 4개 변수, 물리 및 수질환경조건 (상·하층간의 수온차, 하층 DO, 하층 pH, 상·하층의 COD) 의 5개 변수 등, 총 9개 변수 (variables) 를 선택하여 이들 변수에 대한 판별분석을 실시하였다.

진해만의 적조발생 가능성 여부를 판단하기 위해서는 상기한 9개의 독립변수에 대하여 1981년부터 1995년까지의 각 월별 평균치 (예를 들면 4월, 6월, 8월, 9월) 를 대입하고, 판별분석의 수법에 의한 선형판별함수를 구하면 된다. 그래서 예를 들면 어느 해에 있어서 각각의 독립변수를 구한 판별함수에 대입하여 그 부호값이 +이면 적조발생, -이면 적조비발생, 혹은 그 값이 0이면 적조예측을 유보하게 된다. 단, 이러한 판별함수에 의한 적조발생 여부의 판별에 있어서는 두 가지 전제조건이 필요하다. 첫째, 그룹변수는 적조 발생, 또는 적조 비발생이라는 두 가지 가능성만 가지며, 제 3의 가능성은 전혀 없다고 가정한다. 둘째, 그룹변수내의 두 가지 가능성 즉, 적조발생년과 적조비발생년에 대한 개개의 독립변수의 모분산 (母分散) 과 공분산 (共分散) 은 공통이라고 가정한다.

## 3. 결 과

### 3.1 진해만내 해역별 적조발생의 특징

표 1은 진해만내의 마산만, 행암만, 당동만, 원문만 등 4개 해역에서 1981년부터 1995년 사이에 적조가 발생한 빈도수를 나타낸다. 이 표에 따르면, 먼저 진해만의 북동부에 위치한 마산만과 행암만에서는 적조가 3월부터 10월에 걸쳐 발생하지만, 주로 6월부터 9월 사이의 하계에 집중적으로 발생하였다. 또한 표의 각 칸의 하단에 있는 숫자는 적조가 발생한 달의 발생누적일수를 나타내는데, 마산만과 행암만은 서로 빈도분포가 유사하다. 이에 반하여, 당동만과 원문만에 있어서는 주로 7월부터 10월 사이에 적조가 발생하였고, 마산만이나 행암만에 비하여 발생빈도수도 적었다. 한편, 표 2(a) 및 표 2(b)는 마산만과 행암만, 또는 당동만과 원문만에서의 년도별 적조발생상황을 나타낸다. 이들 결과에 의하면, 마산만과 행암만, 또는 당동만과 원문만에 있어서의 적조는 각각 대체로 동일한 시기에 동일한 생물에 의해

Table 1. Comparison of red tide occurrence numbers for each sea area in Jinhae Bay

Area Year	Masan Bay									Haengam Bay									Dangdong Bay									Wonmun Bay								
	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10				
1981					1	4	1						2	5	3								5						1	4	5					
1982				2	1	2	2					2	1	1	1							1	1								1					
1983	1	2	4	3	4	3				1		1										1								1						
1984		2	1	2	2	1				1	1	1	2	1									1	1						1						
1985	1	2	2	2	3	2	1				1	2	2	2	1								1	1						2						
1986		2	3	4	3	4				1	3	5	1	3								2							2							
1987	unknown									unknown									unknown									unknown								
1988	unknown									unknown									not clear									unknown								
1989	unknown									unknown									not clear									unknown								
1990	1			2	2	1	1				1										1								1							
1991	1			1	1		1				1	1	1	1							1	1				1		2								
1992			1	1	2						1	1																								
1993			1		2		1						1								1	1							2							
1994		1	1	1		1					1	1																								
1995			1								1		1										2													
sum	1	4	12	18	22	20	17	1			5	11	16	12	10	1					5	4	9	2		1		4	10	6	2					
	1	4	14	24	31	37	25	3			5	11	26	29	18	3					10	4	30	11		1		5	15	10	12					

1. The upper figures for each column denote the occurrence frequency and the lower figures denote the accumulated days of red tides for each month, respectively.

발생하였다. 이것은 마산만과 행암만, 또는 당동만과 원문만에서의 적조발생의 형태가 각각 서로 다름을 의미한다. 또한 표 3은 이들 4개만에 있어서의 적조생물 종별 출현빈도를 나타내는데, *Dinophyceae*의 *Prorocentrum*과 *Gymnodinium*, *Raphidophyceae*의 *Heterosigma*가 가장 높았다.

### 3.2 각 해역별 판별분석의 결과

#### 3.2.1 마산만

그림 1은 판별분석에 사용한 기본자료의 한 예로서, 마산만의 6월에 있어서의 9개 변수값의 범위를 나타내며, 또한 표 4는 이들 변수값을 사용하여 단계별 판별 분석을 한 최종결과 (2단계) 를 각각 나타낸다. 이 결과에 의하면, 9개의 초기변수에 대해 순차적으로 판별 분석을 한 결과, 최종적으로 'LOWPH', 'LOWCOD' 등 4개의 변수가 적조발생에 관여하는 변수로 선택되었다. 여기서 표의 둘째 란에 있는 'partial Lambda'를 보면 판별에 가장 잘 공헌하고 있는 변수는 'LOWPH'이며, 다음이 'LOWCOD'로 나타났다 (즉, Wilks' Lambda의 값이 작아질수록 공헌도는 커진다). 이밖에 F-remove, p-level, tolerance (허용치) 등은 판별분석과정에 있어서의 변수제어와 관련한 수치를 나타낸다. 마산만에 대한 판별분석의 결과는 표 5와 같다.

이 결과에 따르면, 먼저 4월에는 상·하층의 수온차와 풍속이 적조에 기여가 큰 것으로 나타났는데, 이것은 성층의 안정 또는 파괴와 관련이 있다. 또한 6월에는 하층 pH와 하층 COD가 적조에 관여하는 것으로 나타났다. 하층 pH는 환원상태의 진행과 함께 그 값이 저하하므로 무산소수의 강도를 나타낸다. 즉 적조발생시는 무산소수의 pH값이 낮은 경향이 있으며, 그 값이 7.7보다 저하한 경우는 황화물이 검출된다. 예를 들면 청조 (靑潮) 발생년에는 6~8월의 하계에 하층 pH나 하층 COD가 낮은 경향을 보였다 (日本環境廳, 1995). 이것은 성층의 발달에 의해 하층으로의 유기물 침강이 방해를 받거나 또는 분해에 의한 무산소화가 진행하여 하층 COD가 낮아지기 때문으로 생각된다. 한편, 8월에는 강우, 하층 DO, 상층 COD 및 하층 pH가 적조에 기여하고 있다. 강우에 의한 육수유입과 이에 따른 상층 COD의 증가와는 밀접한 관련이 있고, 영양염의 공급은 적조생물의 증식요인으로 작용한다. 또한 하층 DO와 하층 pH는 전술한 바와 같이 무산소수의 강도를 나타낸다. 9월에는 하층 DO, 풍속, 상·하층의 수온차, 기온, 상층 COD 등 소위 물리적, 기상학적, 수질환경적인 다양한 요소들이 적조에 관여하고 있다. 특히 이들 요소중에 새로운 변수로 들어온 기온은 적조생물의 증식속도에 영향을 미친다.

Table 2(a). Comparison of annual occurrence conditions of red tides between Masan and Haengam Bays

Area	Masan Bay															Haengam Bay									
	81	82	83	84	85	86	90	91	92	93	94	95	81	82	83	84	85	86	90	91	92	93	94	95	
frequency	6 5	7 5	17 2	8 6	13 8	16 12	7 1	6 2	4 2	4 1	4 1	1 1	10	5	2	6	8	13	1	3	2	1	2	2	
accumulated days	10 9	18 16	17 2	17 15	26 13	22 18	7 1	6 2	4 2	4 1	4 1	1 1	14	16	2	15	13	20	1	3	2	1	2	2	
beginning date	7.23	6.17	4.30	5.17	4.2	5.12	3.22	3.27	5.18	5.24	4.7	5.1	7.23	6.17	5.24	5.24	6.26	5.31	7.10	6.5	6.15	7.5	5.10	5.1	
ending date	9.15	9.9	9.26	9.8	10.12	9.26	9.7	9.3	7.23	9.14	8.29	5.1	9.15	9.9	7.27	9.8	10.12	9.26	7.10	8.5	7.13	7.5	6.7	7.12	
species	<u>G.m</u> <u>P.sp</u> <u>S.co</u> <u>P.m</u> <u>G.sp</u>	<u>P.m</u> <u>S.co</u> <u>T.sp</u> <u>B.sp</u> <u>P.sp</u> <u>G.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>P.sp</u> <u>C.sp</u> <u>L.sp</u> <u>C.sp</u> <u>E.co</u> <u>N.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>E.sp</u> <u>T.sp</u> <u>P.sp</u> <u>S.co</u>	<u>P.de</u> <u>S.co</u> <u>G.sp</u> <u>P.m</u> <u>P.tr</u> <u>E.gy</u> <u>M.ru</u> <u>H.ak</u> <u>P.m</u> <u>G.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>P.m</u> <u>P.mi</u> <u>P.sp</u> <u>S.co</u> <u>C.sp</u> <u>T.sp</u> <u>E.gy</u>	<u>H.tr</u> <u>N.sc</u> <u>S.co</u> <u>P.mi</u> <u>G.sp</u> <u>H.ak</u> <u>P.sp</u> <u>C.sp</u>	<u>H.tr</u> <u>N.sc</u> <u>S.co</u> <u>P.tr</u> <u>T.sp</u> <u>P.mi</u> <u>H.ak</u> <u>P.sp</u>	<u>G.mi</u> <u>S.co</u> <u>C.fu</u> <u>E.gy</u> <u>N.lo</u> <u>H.ak</u> <u>P.sp</u>	<u>P.de</u> <u>H.ak</u> <u>E.gy</u> <u>C.fu</u>	<u>E.gy</u> <u>C.fu</u>	<u>G.m</u> <u>P.sp</u> <u>S.co</u>	<u>P.m</u> <u>S.co</u> <u>T.sp</u> <u>N.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>E.sp</u> <u>T.sp</u> <u>P.sp</u> <u>P.m</u>	<u>P.de</u> <u>S.co</u> <u>G.sp</u> <u>P.m</u> <u>P.tr</u> <u>C.sp</u> <u>S.co</u> <u>C.sp</u> <u>P.de</u> <u>G.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>P.m</u> <u>P.tr</u> <u>P.sp</u> <u>S.co</u> <u>H.ak</u>	<u>P.sp</u> <u>S.co</u> <u>H.ak</u>	<u>P.sp</u> <u>H.ak</u>	<u>G.mi</u> <u>H.ak</u> <u>S.co</u> <u>C.af</u> <u>E.gy</u> <u>P.sp</u>	<u>P.de</u>	<u>G.sa</u>	<u>G.sa</u> <u>P.sp</u>			

1. The figures marked by \* denote frequencies when the red tides simultaneously occurred in Masan and Haengam Bays.
2. The figures marked by \*\* denote the accumulated days when the red tides simultaneously occurred in Masan and Haengam Bays.
3. Underlined species imply organisms to have been appeared at the same time in Masan and Haengam Bays.

*B.sp*: *Biddulphia* sp., *C.fu*: *Ceratium furca*, *C.sp*: *Chaetoceros* sp.,  
*E.co*: *Exuviaella compressa*, *E.gy*: *Eutreptiella gymnastica*, *E.sp*: *Eutreptiella* sp.,  
*G.fr*: *Gonyaulax fratercula*, *G.m*: *Gymnodinium mikimotoi*,  
*G.sa*: *Gymnodinium sanyuineum*, *G.sp*: *Gymnodinium* sp., \**G.sp*: *Gyrodinium* sp.,  
*H.ak*: *Heterosigma akashiwo*, *L.sp*: *Leptocylindrus* sp., *M.ru*: *Mesodinium rubrum*,  
*N.se*: *Nitzschia seriata*, *N.sp*: *Nitzschia* sp., *P.de*: *Prorocentrum dentatum*,  
*P.m*: *Prorocentrum micans*, *P.mi*: *Prorocentrum minimum*, *P.sp*: *Prorocentrum* sp.,  
*P.tr*: *Prorocentrum triestinum*, *R.sp*: *Rhizosolenia* sp., *S.co*: *Skeletonema costatum*,  
*T.sp*: *Thalassiosira* sp.

Table 2(b). Comparison of annual occurrence conditions of red tides between Dangdong and Wonmun Bays

Area	Dang Dong Bay												Won Mun Bay											
	81	82	83	84	85	86	90	91	92	93	94	95	81	82	83	84	85	86	90	91	92	93	94	95
frequency	5 4	2	1 1	1	1 1	2 1	1	2 1	-	2 1	-	2	10	1	1	1	2	1	1	4	-	2	-	
accumulated days	9 8	3	1 1	19	1 9	7 4	1	2 1	-	2 1	-	2	15	1	1	4	12	4	1	4	-	2	-	
beginning date	9.11	8.30	8.5	9.14	10.15	7.1	7.6	7.18	-	7.13	-	9.4	7.28	9.10	8.5	9.5	10.10	7.7	7.1	4.11	-	8.3	-	
ending date	9.27	9.9	8.5	10.2	10.23	7.10	7.6	8.7	-	8.16	-	9.25	9.24	9.10	8.5	9.8	10.23	7.10	7.1	12.17	-	8.16	-	
species	<u>G.m</u> <u>S.co</u> <u>G.sp</u>	<u>D.fi</u> <u>P.sp</u> <u>S.co</u>	<u>C.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>C.sp</u> <u>P.sp</u>	<u>S.co</u> <u>N.se</u>	<u>S.co</u> <u>P.sp</u> <u>P.co</u> <u>P.de</u>	<u>P.de</u>	<u>H.ak</u> <u>P.sp</u>	-	<u>C.fu</u> <u>C.sp</u>	-	<u>C.fu</u> <u>N.sp</u> <u>C.fs</u>	<u>G.mS</u> <u>coG</u> <u>sp</u> <u>C.sp</u>	<u>D.fi</u> <u>G.sp</u>	<u>C.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>S.co</u>	<u>S.co</u> <u>N.se</u> <u>G.sp</u>	<u>S.co</u> <u>P.sp</u>	<u>H.ak</u> <u>C.fu</u> <u>P.de</u>	<u>H.ak</u> <u>N.sc</u> <u>G.sa</u>	-	<u>C.fu</u> <u>S.co</u>	-	

1. The figures marked by \* denote frequencies when the red tides simultaneously occurred in Dangdong and Wonmun Bays.
2. The figures marked by \*\* denote the accumulated days when the red tides simultaneously occurred in Dangdong and Wonmun Bays.
3. Underlined species imply organisms to have been appeared at the same time in Dangdong and Wonmun Bays.

*C.fs*: *Ceratium fusus*, *C.fu*: *Ceratium furca*, *C.sp*: *Chaetoceros* sp., *D.fi*: *Dictyocha fibula*, *G.m*: *Gymnodinium mikimotoi*, *G.sp*: *Gymnodinium* sp., *H.ak*: *Heterosigma akashiwo*, *N.se*: *Nitzschia seriata*, *N.sp*: *Nitzschia* sp., *P.co*: *Prorocentrum costatum*,  
*P.de*: *Prorocentrum dentatum*, *P.sp*: *Prorocentrum* sp., *S.co*: *Skeletonema costatum*

Table 3. The occurrence frequency with the red tides species for each sea area in Jinhae Bay

Species Area	Dinophyceae									Bacillariophyceae				Raphidophyceae	Euglenophyceae	Chrysophyceae	Protozoa		
	Pro.	Cer.	Gon.	Coc.	Gym.	Rhi.	Cha.	Noc.	Exu.	Tha.	Nit.	Ske.	Lep.	Het.	Eut.	Dic.	Bid.	Mes.	
Masan (A)	37	2			12		3		2	5	2		1	17	5			2	
Hangam (B)	19		1		14	1	2			3	1			6	1				1
Dangdong (C)	9	4		1	9			1	1			1		4		1			
Wonmun (D)		1			11		2					1		1		1			
Sum	65	7	1	1	46	1	7	1	3	8	5		1	28	6	2	2		1

**Dinophyceae:** Pro.: *Prorocentrum dentatum*, *Pro. micans*, *Pro. minimum*, *Pro. sp.*, *Pro. triestinum*, Cer.: *Ceratium furca*, *Cer. fusus*, Gon.: *Gonyaulax fratercula*, Coc.: *Cochlodinium sp.*, Gym.: *Gymnodinium mikimotoi*, *Gym. sanyuineum*, *Gym. sp.*, Gyrodinium sp., Rhi.: *Rhizosolenia sp.*, Cha.: *Chaetoceros sp.*, Noc.: *Noctluca sp.*, Exu.: *Exuviaella compressa* **Bacillariophyceae:** Tha.: *Thalassiosira sp.*, Nit.: *Nitzschia seriata*, Ske.: *Skeletonema costatum*, Lep.: *Leptocylindrus sp.* **Raphidophyceae:** Het.: *Heterosigma akashiwo* **Euglenophyceae:** Eut.: *Eutreptiella sp.* **Chrysophyceae:** Dic.: *Dictyocha fibula*, Bid.: *Biddulphia sp.* **Protozoa:** Mes.: *Mesodinium rubrum*

Box & Whisker Plot  
Summary for all groups combined

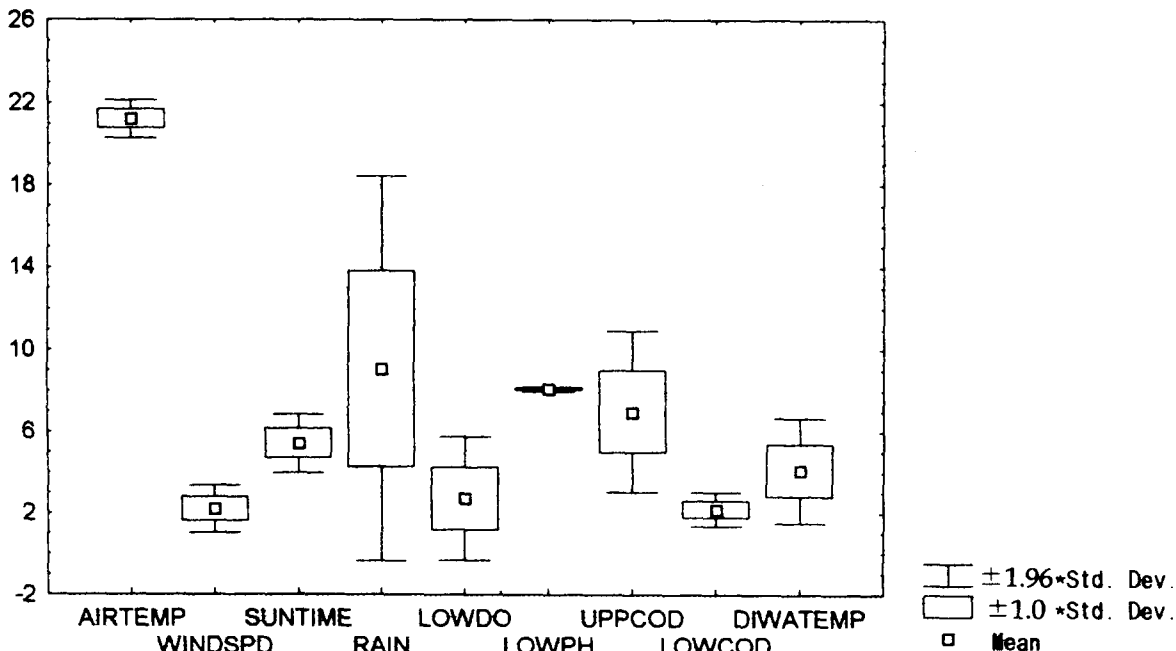


Fig. 1. Variable ranges of June used in the discriminant analysis for Masan Bay.

이상에서 살펴 본 바와 같이, 성층의 형성을 촉진하는 기상요소와 무산소수의 생성상태를 나타내는 수질 특성에 기초한 판별함수에 의해 적조의 발생조건을 만족하고 있는가 아닌가를 판정하여 적조를 예측할 수 있다. 마산만의 각 월별 판별함수는 다음과 같다.

① 4월  
 $JUDGE (Red, Nonred) = 7.51251 - 0.55216 \times DWATEMP - 2.48553 \times WINDSPD$  (1)

② 6월  
 $JUDGE (Red, Nonred) = 277.442 - 33.5434 \times LOWPH - 2.7472 \times LOWCOD$  (2)

③ 8월  
 $JUDGE (Red, Nonred) = 44.73029 + 0.19764 \times RAIN + 0.41880 \times LOWDO - 0.46574 \times UPPCOD - 5.61431 \times LOWPH$  (3)

④ 9월

Table 4. Example of discriminant analysis results for Masan Bay on June

Discriminant Function Analysis Summary (redmasan6.sta)						
Step 2. N of vars in model: 2; Grouping: JUDGE (2 grps)						
Wilks' Lambda: .30211 approx. F(2,6)=6.9300 p< .0276						
N=9	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (1,6)	p-level	Toler.	1-Toler. (R-Sqr.)
LOWPH	.989009	.305471	13.64182	.010167	.422262	.577738
LOWCOD	.549672	.549625	4.91654	.068449	.422262	.577738

Table 5. Discriminant analysis result for Masan Bay

Initial Variables	Actually Used Variables			
	April	June	August	September
· Monthly average air temp. (AIRTEMP) · Monthly average wind speed (WINDSPD) · Hours of sunlight (SUNTIME) · Precipitation (RAIN) · Temp. diff. between the upper and lower layers (DWATEMP) · Upper layer COD (UPPCOD) · Lower layer COD (LOWCOD) · Lower layer DO (LOWDO) · Lower layer pH (LOWPH)	· DWATEMP · WINDSPD	· LOWPH · LOWCOD	· RAIN · LOWDO · UPPCOD · LOWPH	· LOWDO · WINDSPD · DWATEMP · AIRTEMP · UPPCOD

Table 6. Discriminant analysis result for Haengam Bay

Initial Variables	Actually Used Variables		
	June	August	September
· Monthly average air temp. (AIRTEMP) · Monthly average wind speed (WINDSPD) · Hours of sunlight (SUNTIME) · Precipitation (RAIN) · Temp. diff. between the upper and lower layers (DWATEMP) · Upper layer COD (UPPCOD) · Lower layer COD (LOWCOD) · Lower layer DO (LOWDO) · Lower layer pH (LOWPH)	· LOWPH · DWATEMP · AIRTEMP · RAIN	· UPPCOD · LOWCOD · LOWDO	· WINDSPD · UPPCOD · RAIN · SUNTIME

JUDGE (Red, Nonred)=-54.6092+1.1139  
 ×LOWDO+10.6408×WINDSPD-1.0856  
 ×DWATEMP+1.3729×AIRTEMP  
 +0.6663×UPPCOD (4)

상기한 각 월별 판별함수의 변수앞에 붙어 있는 계수는 관측자료를 그대로 사용하여 얻어진 값 (즉, raw coefficients) 으로서, 이들 계수는 각 변수의 판별함수에 대한 독자적인 공헌도를 나타낸다. 즉, 계수값이 클수록 판별에 대한 기여도가 크다.

3.2.2 행암만

행암만에 대한 판별분석의 결과는 표 6과 같다. 이 결과에 따르면, 6월에는 하층 pH, 상·하층의 수온차, 기온, 강우 등이 적조에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 하층 pH는 유기물 분해에 의한 하층의 무산소화와 관련이 있으며, 상·하층의 수온차, 기온, 강우 등은 성층의 진행과 관련이 있다. 특히 하층 pH는 전술한 마산만에서도 6월의 적조발생에 관여하고 있는 점이 주목된다. 8월은 상·하층 COD 및 하층 DO가 적조에 기여하는 변수로 나타났다. 이것은 상·하층에서의 유기물의 공급과 하층의 무산소화의 진행을 의미한다. 한편,

9월은 풍속, 상층 COD, 강우, 일조시간이 적조에 공헌하고 있는데, 이 때에는 기상요소가 적조발생의 주요인자로 등장하는 점이 두드러진다. 행암만에서의 각 월별 판별함수는 다음과 같다.

① 6월  
 JUDGE (Red, Nonred)=-241.04+18.699  
 ×LOWPH-2.315×DWATEMP+4.071  
 ×AIRTEMP+0.278×RAIN (5)

② 8월  
 JUDGE (Red, Nonred)=7.826125-0.928719  
 ×UPPCOD-0.595657×LOWCOD  
 -0.416165×LOWDO (6)

③ 9월  
 JUDGE (Red, Nonred)=-42.6869+12.3398  
 ×WINDSPD+1.6925×UPPCOD+1.0334  
 ×RAIN+1.2999×SUNTIME (7)

3.2.3 당동만

당동만에 대한 판별분석의 결과를 표 7에 나타낸다. 8월에는 9개의 초기변수중 강우와 상·하층의 수온차를 제외한 모든 변수들이 적조에 관여하는 것으로 나타

Table 7. Discriminant analysis result for Dangdong Bay

Initial Variables	Actually used variables	
	August	September
· Monthly average air temp. (AIRTEMP) · Monthly average wind speed (WINDSPD) · Hours of sunlight (SUNTIME) · Precipitation (RAIN) · Temp. diff. between the upper and lower layers (DWATEMP) · Upper layer COD (UPPCOD) · Lower layer COD (LOWCOD) · Lower layer DO (LOWDO) · Lower layer pH (LOWPH)	· AIRTEMP · LOWDO · UPPCOD · WINDSPD · LOWPH · SUNTIME · LOWCOD	· AIRTEMP · LOWDO · UPPCOD · LOWPH

Table 8. Discriminant analysis result for Wonmun Bay

Initial Variables	Actually used variables	
	August	September
· Monthly average air temp. (AIRTEMP) · Monthly average wind speed (WINDSPD) · Hours of sunlight (SUNTIME) · Precipitation (RAIN) · Temp. diff. between the upper and lower layers (DWATEMP) · Upper layer COD (UPPCOD) · Lower layer COD (LOWCOD) · Lower layer DO (LOWDO) · Lower layer pH (LOWPH)	· SUNTIME · DWATEMP · WINDSPD · LOWPH	· AIRTEMP · LOWPH · UPPCOD

났다. 이것은 이 해역에 있어서의 적조가 기상학적인 요소 뿐만 아니라 수질환경적인 요소 등 다양한 인자에 의해 지배를 받고 있으며, 따라서 선술한 마산만이나 행암만에 비해 그 만큼 적조발생이 용이하지 않음을 말해 준다. 또한 9월에는 8월과 유사하지만, 적조생물의 증식에 관계하는 기온과 상층의 COD, 그리고 하층의 빈산소수괴의 존재와 관련한 하층 DO와 하층 PH가 각각 적조발생에 기여하는 것으로 나타났다. 당동만의 각 월별 판별함수는 다음과 같다.

① 8월  

$$\text{JUDGE (Red, Nonred)} = 305.9625 - 4.3855 \times \text{AIRTEMP} + 2.2101 \times \text{LOWDO} - 3.6905 \times \text{UPPCOD} - 10.0093 \times \text{WINDSPD} - 26.5847 \times \text{LOWPH} + 1.1573 \times \text{SUNTIME} - 0.7266 \times \text{LOWCOD} \quad (8)$$

② 9월  

$$\text{JUDGE (Red, Nonred)} = 29.72739 - 5.66855 \times \text{AIRTEMP} - 1.49331 \times \text{LOWDO} - 1.06577 \times \text{SUNTIME} - 2.13688 \times \text{UPPCOD} + 13.84471 \times \text{LOWPH} \quad (9)$$

3.2.4 원문만

원문만에 대한 판별분석의 결과는 표 8과 같다. 8월은 적조생물의 증식에 관계하는 일조시간, 성층의 형성에 관계하는 상·하층의 수온차와 풍속, 그리고 하층의 빈산소수괴의 존재와 관련한 하층 PH가 적조발생에 기여하고 있다. 9월은 적조생물의 증식에 관계하는 기온과 상층 COD, 그리고 하층의 빈산소수괴의 존재와 관련한 하층 PH가 적조발생에 기여하고 있다. 9월은 적조생물의 증식에 관계하는 기온과 상층 COD, 그리고

하층의 빈산소수괴의 존재와 관련한 하층 pH가 적조발생에 기여하고 있다. 원문만의 각 월별 판별함수는 다음과 같다.

① 8월  

$$\text{JUDGE (Red, Nonred)} = 23.91603 - 0.97253 \times \text{SUNTIME} + 0.44809 \times \text{DWATEMP} - 1.87861 \times \text{WINDSPD} - 3.07216 \times \text{LOWPH} \quad (10)$$

② 9월  

$$\text{JUDGE (Red, Nonred)} = -202.945 + 3.304 \times \text{AIRTEMP} + 15.618 \times \text{LOWPH} - 1.792 \times \text{UPPCOD} \quad (11)$$

3.3 실제 해역에 대한 판별함수의 적용

상기한 판별함수를 마산만과 행암만에 적용하여 적조 발생예측을 하기 위한 현장관측을 실시하였다. 1997년 6월 20일 (월령 14.8) 그림 2에서 보는 바와 같이 마산만, 행암만을 포함한 진해만 부도수도 부근의 11개 정점에서 STD (Valeport Ltd., model 600MK3) 에 의한 수온·염분관측, 측류 (Toho Dentan Co., CM2 type), 투명도 관측을 각각 실시하였다. 이들의 결과를 요약하면 표 9와 같다. 표 속의 \*는 마산측후소의 관측당일의 기온과 일강수량을, \*\*는 국립수산진흥원이 5월에 관측한 각 해역에서의 해당변수값을 각각 나타낸다.

이 표에서 알 수 있듯이, 상·하층의 수온차 (DWATEMP)는 마산만 해역인 St. 5~7에서 4.9~6.6℃로 가장 크고, 행암만 해역인 St. 10~11에서 3.0~3.9℃이다. 그러나, 그 값은 거의 모든 해역에서 3.0℃ 이상으로 뚜렷한 성층현상을 보이는데, 하층에서의 빈산소수괴의 발달 또는 생성 가능성을 시사한다. 염분의

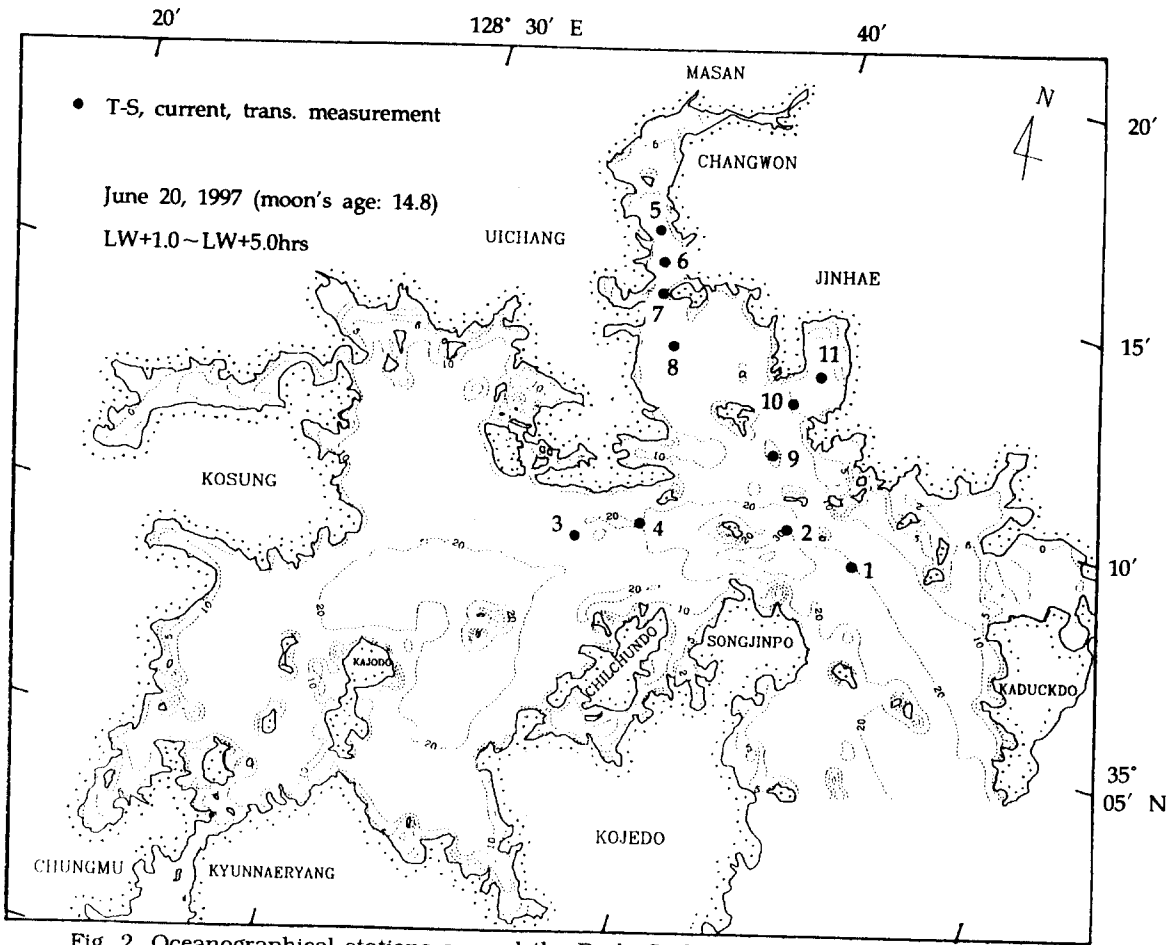


Fig. 2. Oceanographical stations around the Budo Sudo of Jinhae Bay in June 20, 1997.

Table 9. Field observation results and other variables for the neighboring areas of the Budo Sudo in Jinhae Bay in June 20, 1997

St. No.	Water Temperature (°C)			Salinity (‰)		Trans. (m)	Air Temp. (°C)	Rain (mm)	Low pH (ppm)	Low COD (ppm)
	Upper	Lower	Diff.	Upper	Lower					
1	19.8	16.4	3.4	33.6	34.0	1.9	23.3*	20.0*	7.99**	3.78**
2	20.3	17.0	3.3	33.6	34.0	2.5				
3	22.2	16.7	5.5	32.9	33.8	3.0				
4	23.7	17.1	6.6	33.4	33.8	1.6				
5	22.2	17.3	4.9	32.9	33.6	0.8				
6	23.1	17.3	5.8	32.2	33.5	1.9				
7	24.0	17.4	6.6	32.3	33.6	1.4				
8	23.3	17.4	5.9	32.8	33.7	2.0				
9	20.2	18.5	1.7	33.7	33.8	—				
10	21.8	18.8	3.0	33.5	33.8	—				
11	22.8	18.9	3.9	33.5	33.7	—				

경우는 마산만에서 표층이 32.2~32.9%, 하층이 33.5~33.6%로서, 특히 표층염분이 행암만을 포함한 태해역에 비해 상대적으로 낮았다. 또한, 투명도는 흐름이 강한 진해만의 중앙수로에서 높고, 흐름이 약한 마산만 내에서 상대적으로 감소하는 경향을 보인다.

적조발생의 원인으로서 크게 나누어 다음의 세 가지를 들 수 있다. 첫째, 플랑크톤의 증식에 적절한 해수의 온도·염분농도 등의 물리적 조건, 둘째, 플랑크톤의 증식에 충분한 영양염류의 공급, 셋째, 플랑크톤의 성장을 촉진하는 미량의 비타민류나 중금속류의 존재가 그것이다. 이들의 조건이 만족되면 플랑크톤의 대증식이 일어나서 적조의 발생을 야기하게 된다 (日色等, 1992).

4. 고찰

4.1 판별분석 결과의 검토



그런데, 진해만은 부영양수역으로서 플랑크톤의 증식에 필요한 영양염류나 미량성분인 비타민류 등은 이미 다량으로 함유하고 있으므로 여기에 증식에 필요한 적절한 기상이나 물리조건만 구비되면 언제나 적조가 발생할 수 있는 상황에 놓여 있다고 판단된다.

먼저, 마산만의 경우 전술한 표 5에 나타난 바와 같이 4월에 상·하층의 수온차 (DWATEMP) 와 풍속 (WINDSPD) 등 수위 기상조건이 적조에 관여하는 것은 성층의 발달에 따른 빈산소수괴의 형성과정과 연관되어 있다고 보여진다. 왜냐 하면 6월에는 하층 pH와 하층 COD가 적조에 관여하는 요인으로 나타났는데, 이것은 성층의 발달에 의한 유기물 침강의 방해 또는 하층에서의 무산소화의 진행에 따른 pH와 COD의 감소 등을 반영하고 있기 때문이다. 또한 8월에는 하층 DO와 하층 pH 이외에 강우 (RAIN) 와 상층 COD가 적조에 기여하고 있는데 이것은 육수유입에 의한 플랑크톤의 증식을 위한 영양염류의 공급과 관련이 있다. 한편, 9월은 하층 DO와 상층 COD의 수질요인에 더하여 다시 풍속 (WINDSPD), 기온 (AIRTEMP), 상·하층의 수온차 (DWATEMP) 등 기상과 물리요인이 적조에 공헌하는 것으로 나타났는데, 이들은 증식에 적절한 수질환경을 제어하는 부가적 요인으로 작용하고 있다. 상기한 마산만에 있어서의 적조발생에 기여하는 요인을 정리해 보면 다음과 같다. 즉 4월에는 성층에 관여하는 물리·기상요소가 적조발생에 기여하지만 6월과 8월에는 이들 조건에 의해 형성된 수질환경에 의해 적조가 발생하며, 9월에는 물리·기상요소와 수질환경요소간의 평형관계에 의해 적조발생이 결정되는 것으로 판단된다.

다음, 행암만에 대한 판별분석의 결과인 표 6에 의하면, 6월에는 하층 pH, 상·하층의 수온차 (DWATEMP), 기온 (AIRTEMP), 강우 (RAIN) 등 물리·기상요인이 적조에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 하층 pH와 상·하층의 수온차는 성층의 발달에 따른 하층의 무산소화와 관련이 있으며, 기온과 강우는 적조생물인 식물플랑크톤의 증식에 관여한다. 이것은 전술한 마산만에서 6월의 경우 하층 pH와 하층 COD라는 두 개의 수질요인에 의해 적조발생여부가 결정되는 것과는 대조적이다. 그러나, 8월에는 상·하층 COD 및 하층 DO 등 수질요인이 적조에 기여하는 것으로 나타났다. 한편, 9월은 풍속, 상층 COD, 강우, 일조시간이 적조에 공헌하는 것으로 나타났는데, 무엇보다 기상요소가 적조발생의 주요 인자로 등장하고 있는 점이 두드러진다. 행암만에 있어서의 적조발생에 기여하는 요인을 정리해 보면 다음과 같다. 먼저 6월에는 성층에 관여하는 물리요소와 플랑크톤의 증식에 관여하는 기상요소가 적조발생에 각각 기여하지만, 8월에는 이들 조건에 의해 형성된 수질환경에 의해 적조가 발생하며, 9월에는 기상요소와 수질환경요소간의 평형관계에 의해 적조가 발생하는 것으로 판단된다. 상기한 마산만의 경우와 비교해 보면, 6월에 있어서의 적조발생에 기여하는 요소간에 다소간의 차이를 보인다. 이것은 적조발생에 있어, 보다 부영양화된 수역인 마산만에서는 물리 또는 기상요인보다 수질환경요인이 더 지배적임을 시사해 준다. 그러나,

마산만과 행암만에 있어서의 적조발생에 기여하는 요소는 기본적으로는 서로 유사하다고 볼 수 있으며, 이것은 전술한 표 1에서 두 해역간의 적조발생빈도나 그 시기가 거의 동일한 데서도 알 수 있다.

당동만의 경우는 (표 7), 8월에 강우와 상·하층의 수온차를 제외한 모든 수질환경요소와 기상요소들이 적조에 기여하는 것으로 나타났다. 이것은 이 해역에 있어서의 적조가 다양한 환경인자에 의해 지배를 받고 있으며, 따라서 전술한 마산만이나 행암만에 비해 그 만큼 적조발생이 용이하지 않음을 말해 준다. 또한 9월에는 기본적으로 적조에 기여하는 인자는 8월과 유사하지만, 기상요인중 기온만이 적조에 기여하고 있다.

원문만의 경우는 (표 8), 8월에 기상·물리요소인 일조시간, 상·하층의 수온차, 풍속 그리고 수질요소인 하층 PH가, 한편 9월에는 기온, 하층 pH, 상층 COD가 각각 적조에 기여하는 것으로 나타났다. 이러한 원문만에 있어서의 적조에 기여하는 요인은 앞서의 당동만에 있어서의 적조에 기여하는 요인과 정성적으로는 동일한 것임을 볼 수 있다. 즉 전술한 표 1 및 표 2(a)~2(b)에서도 지적하였듯이, 당동만과 원문만에 있어서의 적조의 발생빈도나 발생시기, 즉 적조의 발생패턴이 서로 매우 유사한 것은 바로 이러한 적조발생에 기여하는 인자의 유사성에서 비롯하고 있음을 말해 준다.

#### 4.2 판별함수 적용예의 검토

먼저, 마산만과 행암만의 6월의 적조발생예측을 위해서는 앞서 구한 마산만과 행암만에 대한 6월의 판별함수 식 (2) 및 식 (5)에서, 하층 pH (LOWPH), 하층 COD (LOWCOD), 상·하층의 수온차 (DWATEMP), 기온 (AIRTEMP), 강우 (RAIN) 등의 변수값이 요구된다. 전술한 표 9에 나타난 이들의 값들을 각 식에 대입하면, 결과적으로 마산만은  $JUDGE < 0$ , 행암만은  $JUDGE > 0$  이 된다. 따라서 마산만에서는 적조가 발생하지 않으며, 행암만에서는 적조가 발생함을 의미한다. 그러나, 실제 마산만과 행암만은 4월 및 5월에 이어 6월 20일 현재 이미 적조가 발생하고 있었다. 국립수산진흥원 (1997) 에 따르면, 마산만과 행암만에서 원인생물 *Heterosigma akashiwo*에 의해 각각 6월 5일과 6월 11일에 적조밀도 5 200~10 120 cells/ml의 규모로 적조가 발생하였다. 여기서 판별함수에 의한 적조발생예측결과와 실제 적조 발생상황과의 차이가 생긴 것은 첫째, 마산만의 경우, 6월 관측당시의 실제 LOWPH와 LOWCOD보다 더 큰 값을 사용하였기 때문으로 생각된다. 왜냐 하면 하층 pH와 하층 COD를 측정한 5월의 마산만의 상층수온이 평균 18.4~19.1℃인 데 반하여 (국립수산진흥원, 1997), 6월 관측당시의 마산만의 상층수온은 22.2~24.0℃로서, 상층수온의 증가로 인한 성층효과로 하층 pH나 하층 COD가 5월에 비해 더 감소하였을 것으로 추정되기 때문이다 (실제로 이들 두 값의 근소한 차이에 의해 판별함수 JUDGE값은 -에서 +로 변한다).

#### 5. 결 론

하계를 중심으로 한 진해만 적조의 근본원인을 규명

하고 그 예측수법을 확립하기 위하여 1981년부터 1995년까지의 진해만내의 4개 해역에 대한 현장관측자료와 기상자료를 통계처리하여 판별함수를 구하고 이를 해석하였다. 마산만과 행암만, 그리고 당동만과 원문만은 각각 서로 다른 요인에 의해 적조가 발생하고 적조발생패턴도 차이가 있었다. 마산만과 행암만의 경우, 적조는 주로 6월에서 9월 사이의 하계에 집중적으로 발생하였다. 또한, 6월에는 성층에 관여하는 물리요소와 플랑크톤의 증식에 관여하는 기상요소에 의해 적조가 발생하지만, 8월에는 이들 조건에 의해 형성된 수질환경에 의해 적조가 발생하며, 9월에는 기상요소와 수질환경요소간의 평형관계에 의해 적조가 발생하는 것으로 판단되었다. 그러나, 당동만과 원문만의 경우, 적조는 주로 7월부터 10월 사이에 발생하였고, 발생빈도는 마산만이 나 행암만에 비하여 적었다. 또한, 8월과 9월의 적조발생에 대부분의 수질환경요소와 기상·물리요소들이 기여하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 이 해역에 있어서의 적조가 다양한 환경인자에 의해 지배를 받고 있어서, 전술한 마산만이나 행암만에 비해 그 만큼 적조발생이 용이하지 않음을 시사한다.

한편, 마산만과 행암만에 대한 6월의 판별함수를 써서 실제 해역의 적조발생예측을 행한 결과, 마산만은 적조가 발생하였음에도 불구하고 실제 상황과 다른 결과가 얻어진 반면, 행암만은 일치하는 결과가 얻어졌다. 마산만의 경우, 실제 상황과의 불일치는 관측당일의 하층 pH나 하층 COD보다 높은 5월의 번수값을 사용하였기 때문으로 추정된다.

본 연구에서 구한 각 해역별 판별함수를 사용하면 당해역에서 임의 시기에 어떠한 물리적, 기상적, 수질환경적 조건하에 적조가 발생할 것인가를 사전에 예측할 수 있으며, 이에 따른 적조대책도 세울 수 있다. 그러나, 이를 보다 정도 높게 합리적으로 행하기 위해서는, 앞으로 매일 정기적으로 진해만내의 전 해역을 대상으로 광범위하게 현장조사자료를 실시하여 필요로 하는 수질항목과 물리자료를 계속적으로 축적해 나가야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

국립수산진흥원, 1983, 한국연안어장 보전을 위한 환경오염조사, 사업보고, 58, 215~623.  
 국립수산진흥원, 1987, 한국 연안의 적조발생과 천이에 관한 연구, 사업보고, 69, 17~155.  
 국립수산진흥원, 1988, 적조 (원인과 대책), 1~19.  
 국립수산진흥원, 1989, 한국 연안어장 보전을 위한 환경오염 조사연구, 사업보고, 84, 148~335.  
 국립수산진흥원 남해수산연구소, 1995, 사업보고서, 21~53.  
 국립수산진흥원, 1996, 한국 연안어장 환경오염조사 결과보고서, 139~167.  
 국립환경연구원, 1996, 적조관련 논문수록집, 49~71.  
 국립환경연구원, 1996, 해양오염과 적조, 24~59.  
 김종구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 공학박사학위 청구논문, 1~130.

김종화, 장선덕, 김삼곤, 1986, 마산만의 해수유동에 관하여, 한국수산학회지, 19(3), 274~280.  
 김종화, 장선덕, 김해룡, 1986, 마산만의 해수교환율, 어업기술학회지, 22(3), 29~35.  
 나기환, 1987, 진해만 일원의 적조발생환경, 국립수산진흥원 적조 및 어장보전대책에 관한 심포지엄 결과보고서, 적조현상과 어장보전, 39~44.  
 박주석, 1982, 진해만 적조의 특성과 환경변화, 한국수산학회지, 28, 55~88.  
 박주석, 1995, 적조의 확대변이와 종합대책, 한국수산기술연구원, 9, 6~19.  
 박주석, 김종두, 1967, 진해만의 적조현상에 관한 연구, 국립수산진흥원 연구보고, 1, 66~79.  
 박주석, 김학균, 이필용, 1985, 해양오염 및 적조조사지침, 국립수산진흥원, 1~150.  
 서봉수, 1987, 마산만의 오염물질부하와 대책, 적조 및 어장보전대책에 관한 심포지엄 결과보고서—적조현상과 어장보전—, 국립수산진흥원, 19~26.  
 수산업협동조합 중앙회, 1992, 어장피해보상 사례집, 112~120.  
 승영호, 이상룡, 1984, 유한요소법에 의한 진해만조석의 수치실험, 해양연구소, 6, 31~36.  
 양동범, 1987, 진해만 영양염과 클로로필 a 농도의 일주변화, 국립수산진흥원 적조 및 환경보전대책에 관한 심포지엄 결과보고서, 적조현상과 어장보전, 59~70.  
 이광우, 남기수, 광희상, 1981, 진해만의 적조 및 오염 모니터링 시스템개발을 위한 연구, 한국과학기술원 해양연구소 보고서, BPSE 00031-51-7, 1~287.  
 이광우, 남기수, 광희상, 1982, 진해만의 적조 및 오염 모니터링 시스템개발을 위한 연구, 한국과학기술원 해양연구소 보고서, BPSE 00044-66-7, 1~166.  
 이광우, 남기수, 광희상, 1983, 적조 및 오염모니터링 연구, 한국과학기술원 해양연구소 보고서, BPSE 00048-80-7, 1~222.  
 장선덕, 이문옥, 김종화, 박광순, 김복기, 임기봉, 1984, 진해만 동부해역의 해수유동, 한국수산학회지, 32, 7~23.  
 정대성, 1996, 마산·진해만조류에 관한 3차원 수치모형, 대한토목학회 논문집, 16(II-1), 63~72.  
 최우정, 1993, 진해만의 빈산소 수괴형성에 관한 시뮬레이션, 부산수산대학교 공학박사학위 청구논문, 1~97.  
 환경처, 1991, 진해만 일원 오염실태 조사보고서, 1~502.  
 入江春彦, 1970, 赤潮—その歴史, 地理および季節—, 海洋科學, 5月號, 62~67.  
 九万田一己, 武田健二, 荒牧孝行, 1978, 赤潮豫察調査報告書, 西海區ブロック關係.  
 小野知足, 1979, 赤潮前後のプランクトン相の變動, 昭和53年6月發生ホルネリア赤潮に關する調査報告

- 書, 香川縣, 64~68.
- 鈴木祥弘, 1995, 沿岸性種一溫度に對する適應一, 月刊海洋, 27(10), 582~590.
- 日本海洋學會, 1994, 海洋環境問題の變遷と課題一海洋環境を考へる, 恒星社厚生閣, 69~102.
- 日本環境廳, 1985, 水質總量規制推進檢討調査一海域富栄養化シミュレーションモデル等調査一, 昭和59年度環境廳委託業務結果報告書, 21~32.
- 日本環境廳水質保全局, 1995, 平成6年度環境廳委託業務結果報告書一青潮發生豫測手法確立調査, 186pp.
- 日本(財)電力中央研究所, 1992, 赤潮文獻調査, 電力中央研究所 調査報告, U92017, 186pp.
- 日色和夫, 東國茂, 1992, 赤潮發生豫知海洋觀測技術, 月刊海洋, 24(11), 677~683.
- 村上彰男, 1972, 瀬戸内海の赤潮, 海洋科學, 4月號, 192~197.
- Chang, S., C. Kim and J.S. Lee, 1993, Field observations and hydraulic model experiments of tidal currents in Chinhae Bay, Bull. of the Kor. Fish. Soc., 26(4), 346~352.
- Figueiras FG., K.J. Jones, AM. Mosquera, XA. Alvarezsalgado, A. Edwards and N. Macdougall, 1994, Red Tide Assemblage Formation in an Estuarine Upwelling Ecosystem-Ria-de-Vigo, Journal of Plankton Research, 16(7), 857~878.
- Gower, JFR, 1994, Red Tide Monitoring Using AVHRR HRPT Imagery from a Local Receiver, Remote Sensing of Environment, 48(3), 309~318.
- Imai, I., S. Itakura and A. Ouchi, 1993, Occurrence of *Chattonella* Red Tide and Cyst Dynamics in Sediments in Northern Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea, Japan, Nippon Suisan Gakkaishi-Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 59(1), 1~6.
- Kang, Y.S., J.S. Park, S. Lee, H.G. Kim and P.Y. Lee, 1996, Zooplankton Community and Distributions of *Copepods* in Relation to Eutrophic Evaluation in Chinhae Bay, J. of the Kor. Fish. Soc., 29(4), 415~430.
- Kim, C. 1994, Three-dimensional numerical model experiments of tidal and wind-driven current in Chinhae Bay, J. of the Kor. Soc. of Ocean., 29(2), 95~106.
- Kim, C., S. Chang and J.S. Lee, 1994, Two-dimensional hydraulic and numerical modeling of tidal currents in Chinhae Bay, J. of the Kor. Soc. of Ocean., 29(2), 83~94.
- Kim, H.G., J.S. Park, S.G. Lee and K.H. Ahn, 1993, Illustrations of planktons responsible for the blooms in Korean Coastal Waters, Nat. Fish. Res. and Dev. Agency, 1~97.
- Kim, H.G., K. Matsuoka, S.G. Lee and K.H. An, 1996, The Occurrence of a Dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* from Chinhae Bay, Korea, J. of the Kor. Fish. Soc., 29(6), 837~842.
- Kishimoto, Y., K. Hatamochi, and H. Maeda, 1996, Effects of Vertical Water-Mixing Against Fresh-Water Algal Bloom, Nippon Suisan Gakkaishi, 62(1), 3~11.
- Koizumi, Y., J. Kohno, N. Matsuyama, T. Uchida and T. Honjo, 1996, Environmental Features and the Mass Mortality of Fish and Shellfish during the *Gonyaulax-Polygramma* Red Tide Occurred in and around Uwajima Bay, Japan, Nippon Suisan Gakkaishi, 62(2), 217~224.
- Lee, I.C., 1997, Study on Management of Water Quality and Fisheries Resource in Eutrophicated Coastal Area, The Thesis of Engineering Doctor, Graduate School of Engineering, Yamaguchi University, Japan, 156pp.
- Lee, J.B. and K.I. Yoo, 1990, Dynamics and seasonal succession of Dinoflagellate community in Masan Bay, Korea, J. of Oceanol. Soc. Korea, 25(2), 106~116.
- Lee, M.O., 1995, The physical mechanism of the outbreak of the red tide in the inner bay, Proc. of the 26th Congress of Intern. Assoc. for Hyd. Res., 3, 58~63.
- Lim, H.S. and J.S. Hong, 1997, Ecology of the Macrozoobenthos in Chinhae Bay, Korea 2. Distribution Pattern of the Major Dominant Species, J. of Korean Fish. Soc., 30(2), 161~174.
- Lim, H.S. and J.S. Hong, 1997, Ecology of the Macrozoobenthos in Chinhae Bay, Korea 3. Community Structure, J. of Korean Fish. Soc., 30(2), 175~187.
- Nojiri, S., M. Kawamura and A. Sugamoto, 1996, Collective Motion of Microorganisms from Field—Theoretical Viewpoint, Modern Physics Letters A., Japan Ochanomizu Univ., Tokyo, Japan, 11(11), 915~920.
- Park, S.C. and K.W. Lee, 1996, Modern Sedimentary Environment of Jinhae Bay, SE Korea, J. of the Kor. Soc. of Ocean., 31(2), 43~54.
- Peeters, J.C.H., F.J. Los, R. Jansen, H.A. Haas, L. Peperzak and I. de Vries, 1995, The Oxygen Dynamics of the Oyster Ground, North Sea, Impact of Eutrophication and Environmental Conditions, OPHELIA, 42, 257~288.

Takeuchi T., T. Kokubo, Y. Tsuji and T. Honjo, 1995, Growth of *Gymnodinium mikimotoi* Population in Tanabe Bay and Change of Distribution Pattern of Red Tide by Current, Nippon Suisan Gakkaishi, 61(4), 494~498.

Tilstone, GH., Fg. Figueiras and F. Fraga, 1994, Upwelling-Downwelling Sequences in the Gen-

eration of Red Tides in a Coastal Upwelling System, Marine Ecology-Progress Series, 112(3), 241~253.

Yanagi T., T. Yamamoto, Y. Koizumi, T. Ikeda, M. Tamizono and H. Tamori, 1995, Numerical Simulation of the Red Tide Formation, J. of Mar. Systems, 6(3), 269~285.