

## 진해만 빈산소수괴의 경년변동 특성

이인철\* · 오유진 · 김현태  
부경대학교 해양공학과

### Annual Variation in Oxygen-deficient Water Mass in Jinhae Bay, Korea

In-Cheol LEE\*, Yoo Jihn OH and Heon-Tae KIM  
Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea.

To improve the oxygen-deficient water mass (ODW), the spatial and temporal variation in the water quality and characteristic of ODW occurrence were analyzed using yearly water quality data from 1989 to 2006 in Jinhae Bay, Korea. In addition, we estimated  $ODW_{area}$ ,  $ODW_{vol}$  and  $ODW_R$  for Jinhae Bay. The overall water quality improved during the 2000s, based the annual variation in dissolved oxygen, chemical oxygen demand, etc. A cluster analysis classified Jinhae Bay into the southwestern, central, northern, and eastern regions. ODW occurred throughout the southwestern region in 1993 and 2002-2004, and the estimated  $ODW_{vol}$  was about  $1.92 \text{ km}^3$ . ODW did not occur in the eastern region because circulating seawater was exchanged in that part of Jinhae Bay. As ODW was generated every year in the southwestern region, this is the most polluted area in Jinhae Bay. The  $ODW_R$  decreased in the northern region, showing that the water quality there has improved since a wastewater treatment plant began operating in 1994.

Key words: Jinhae Bay, Oxygen-deficient water mass, ODW, Annual variation, Cluster analysis

#### 서 론

진해만은 남북방향의 길이가 약 35 km, 동서방향의 폭이 약 25 km이며, 평균수심이 약 10-20 m인 매우 복잡한 지형을 이루고 있다. 동쪽으로는 가덕도 동두말에서 서쪽의 거제대교까지, 남북으로는 마산내만에서 장승포시까지로 복잡한 형태를 이루고 있는 폐쇄성이 강한 내만으로, 내부해역은 6개의 소규모만으로 이루어져 있고 주변 육상에서 만으로 유입되는 하천은 약 40여개로 보고되고 있다. 또한 진해만은 대구의 산란장이며 굴, 흥합, 피조개 등의 중요한 양식장으로 수산 활동이 활발한 해역이다. 그러나 1960년대 이후 공업단지, 농공단지의 조성, 연안역의 인구증가 및 양식업의 밀식 등으로 다량의 생활오수, 공장폐수, 축산폐수 및 자가 오염물질이 마산, 진해만으로 유입하고 있다. 특히, 비교적 얕은 수심과 만의 일부만 외해와 연결되어 있는 반 폐쇄성 지형 조건을 가진 진해만은 외해와의 해수 교환이 적어 수질 오염이 심화되기 쉬운 해역이다. 진해만의 수질오염 개선을 위해 마산시는 마산만 정화사업의 일환으로 1990년 6월-1994년 12월까지 4년에 걸쳐 저질 퇴적물(약 211만 톤)의 준설사업과 1993년 11월에 하수처리장의 가동이 이루어졌으며, 인근 창원시는 1992년 11월에 분뇨처리장이 설치되었다(Cho et al., 1998). 그러나 마산만 준설사업으로 인하여 COD (화학적 산소요구량)와 DIP (용존무기인) 농도는 다소 감소하고 투명도가 높아지는 등 수질 개선효과가 나타났으나, 질소농도는 뚜렷한 변

동이 없었으며, 하수종말처리장의 해양방류에 따른 마산만의 수질환경은 옥계 부근의 방류 해역이 인근 해역보다 COD, TSS (총부유물질), DIN (용존무기질소), DIP의 농도가 높은 것으로 보고하였다(Shin et al., 2004). 진해·마산만의 오염물질 농도는 시간적·공간적으로 큰 변화를 보이고 있을 뿐 아니라, 해수순환이 활발하지 않은 정체수역 또는 소규모 내만에서는 여름철 수온, 염분 및 DO (용존산소)농도의 성층화 현상으로 인하여 연직방향으로도 큰 수질변화를 보이고 있다(KORDI, 1997; 1998; 1999). 특히 DO농도는, 저층에 형성된 빈산소층이 생물이 서식하는 상층으로 용승할 경우 직접적인 생물폐사를 일으키기도 하고, 표층에서의 활발한 광합성 작용에 의한 산소공급과 저층에서의 유기물분해작용에 의한 산소소비의 차이에 따라 연직방향 DO농도가 크게 변화하기 때문에 해역의 성층화에 따른 연직방향 DO농도의 계절적 변화에 대한 보다 상세한 현장관측과 분석이 요구된다(Lee, 1993; Cho et al., 2002). 한편 상기의 DO농도와 빈산소수괴의 발생기구와 관련하여 국·내외적으로 많은 연구(Hong and Kim, 1991; Kim and Lee, 1994; Choi et al., 1994; Yanagi et al., 1997; Yamada, et al., 1998; Kim and Kim, 2003)가 수행되었으나 성층수심을 고려한 장기간의 빈산소수괴 발생역의 시·공간적 변동에 대한 연구는 다소 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 진해만의 빈산소수괴 발생의 저감 방안을 구축하기 위한 기초적 연구로서 1989년-2006년까지의 수질 및 빈산소수괴 (oxygen deficient water mass; ODW)의 시·공간적 경년변동 특성에 대하여 검토하였다.

\*Corresponding author: ilee@pknu.ac.kr

## 재료 및 방법

### 유입오염부하량의 산정

진해만 내로 유입되는 오염부하량을 산정하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 7개 권역으로 분할하였다. 각 권역별 1개 대표하천을 선정하여 일별 하천유량을 Tank 모형 수치실험에 의해 산정하였다. 입력조건은 마산, 통영, 거제관측소의 2004년도 일별 강우량 및 증발산량 자료를 이용하였으며, Tank 모델에 관한 수치계산방법 및 매개변수 등의 내용은 Lee (2003)에 상세히 서술되어 있다. 상기 Tank모델에 의해 산정된 일별 하천유량에 수질농도를 곱하여 각 권역별 유입오염부하량을 산정하였다. 그리고 수질항목은 2004년 국립수산과학원의 해양환경측정망 중 Fig. 1의 7개 유입점에서 가장 가까운 정점을 기준으로 2004년도 연평균 COD, TN (총질소), TP (총인), DIN 및 DIP 등 5개 수질항목을 대상으로 하였다.

### 수질의 경년변동 해석

Fig. 1에 나타낸 국립수산과학원의 해양환경조사 정점에서 하계(8월)에 조사된 저층의 DO, COD, DIN 및 DIP농도를 이용하여 18년간(1989년-2006년)에 걸친 진해만 수질의 경년변동을 해석하였다. 한편 진해만 전해역의 수질농도의 공간분포를 파악하기 위하여 해역을 500 m×500 m 격자로 분할한 후, 1989년-1994년의 26개 정점 및 1997년-2006년의 9개 정점의 수질관측 자료를 선형 보간하여 각 격자별 수질의 등농도선을 작성하였다. 이를 바탕으로 진해만내 해양환경조사가 수행되지 않은 1995년-2006년의 17개 정점에 대하여

각 수질항목의 농도를 산정하였다.

### 군집분석

진해만의 26개 수질조사 정점별 수질변동의 유사성을 파악하고 진해만의 소해역 분할을 위해 군집분석(cluster analysis)을 실시하였다(Kim and Jeon, 1998). 군집분석의 대상년도는 진해만의 수질변화에 크게 영향을 줄 것으로 예상되는 마산만 준설사업(1989년), 마산시 하수처리장 가동(1994년), 진해만 특별관리해역 지정(1999년) 및 부산신항만 건설사업(2004) 등 4개 년도를 대상으로 하였으며, 수질조사 자료는 각 해당년도의 하계(8월)의 수온, 염분, pH, DO, COD, DIN 및 DIP의 표층과 저층의 평균농도를 이용하였다. 또한 cluster간의 거리는 유clidean거리를 채택하였으며, 완전결합법에 의해 분석하였다.

### 빈산소수괴의 경년변동 해석

해수 중 DO 농도가 4 mg/L 이하가 되면 유영생물들은 다른 지역으로 이동하고, 3 mg/L 이하가 되면 조개류 등이 폐사하기 시작하며, 2 mg/L 이하가 되면 대부분의 해양생물들이 피해를 입는다(Sekine et al., 1995). 이에 따라 본 연구에서는 앞절에서 얻어진 진해만 26개 수질조사 정점에서 18년간(1989년-2006년)의 저층 DO 농도가 3 mg/L 이하인 격자를 ODW로 정의한 후, 식 (1)-(4)와 같이 ODW발생면적( $ODW_{area}$ ), ODW발생용적( $ODW_{vol}$ ) 및 ODW발생률( $ODW_R$ )을 구하여 경년변동특성을 해석하였다.

$$ODW_{area} = \text{grid}_{area} \times \text{grid}_N \quad (1)$$

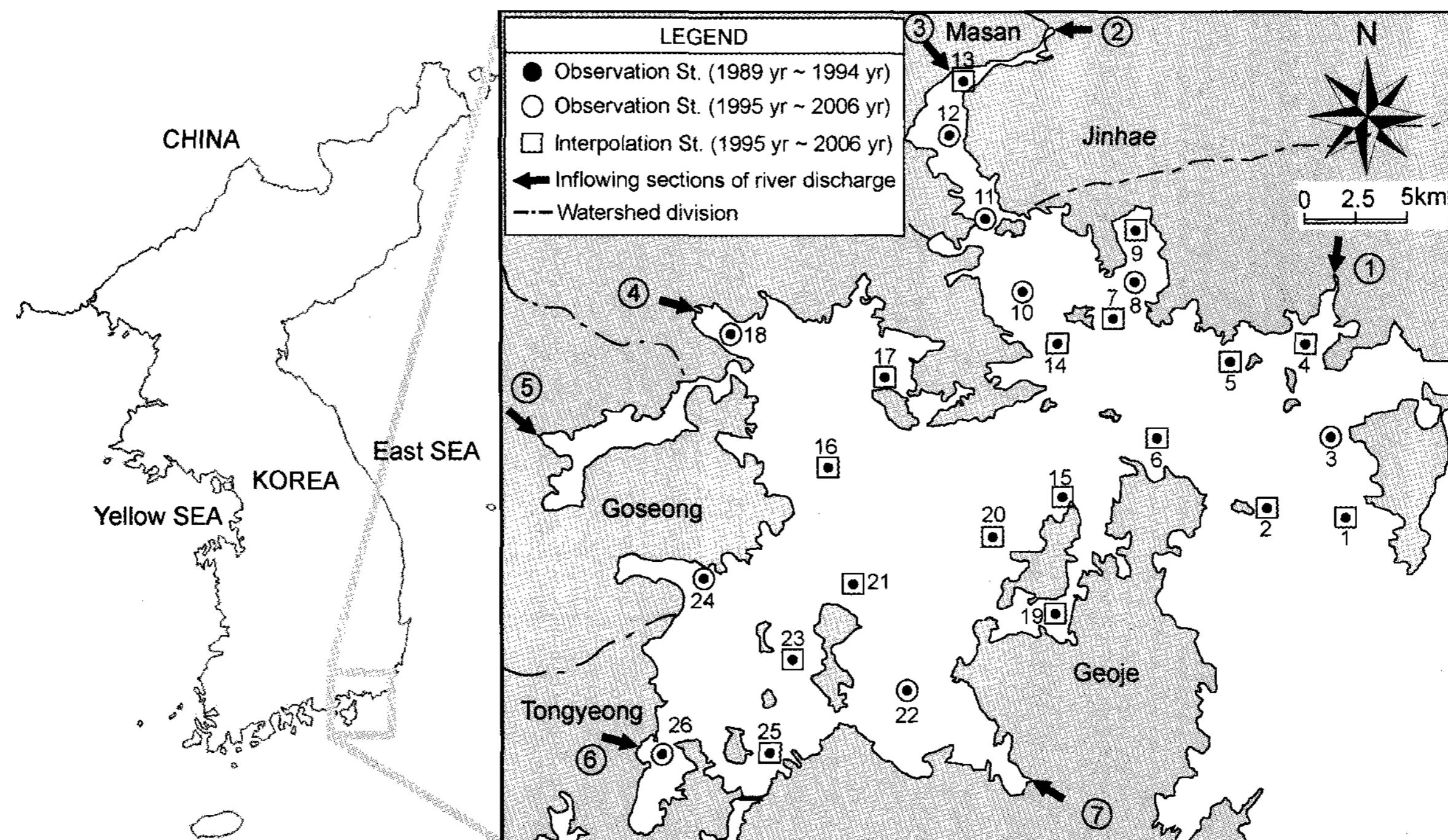


Fig. 1. The map shows inflowing point of river discharges and divided watershed area for calculation of pollutant load and observation stations of water quality by NFRDI (1989-2006).

$$D^* = (D_p - D_s) \quad (2)$$

$$ODW_{vol} = ODW_{area} \times D^* \quad (3)$$

$$ODW_R = \frac{ODW_i}{JH_{area}} \quad (4)$$

여기서,  $grid_{area}$ 와  $grid_N$ 은 각각 격자의 면적 ( $km^2$ )과 격자수를 나타낸다. 그리고 격자별 수심 (m)을 나타내는  $D^*$ ,  $D_p$  및  $D_s$ 는 각각 환산수심, 실제수심 및 성층수심을 표현한 것으로, 만약  $D^*$ 가 음수일 경우  $D_s$ 는 고려하지 않았다.  $D_s$ 에 대해서는 Cho et al. (1998)와 Cho et al. (2002)의 연구결과를 참고로 하여, 진해만 서부와 남부해역은 각각 3-5 m와 5-7 m 이내, 북부와 중부해역 10 m 이하, 동부해역의 경우 20 m 이하로 설정하였다. 한편 식(4)의  $ODW_i$ 는 앞절의 군집분석에 의해 분할된 소영역내  $ODW_{area}$ 를 표현한 것이며,  $JH_{area}$ 는 진해만의 총면적을 나타낸 것이다.

## 결과 및 고찰

### 유입오염부하량 산정

Table 1은 2004년도 진해만 해역에 유입하는 COD, TN, TP, DIN 및 DIP의 오염부하량의 산정 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 COD부하량이 16.5 ton/day로 가장 높았으며, 다음으로 TN 7.1 ton/day, DIN 5.8 ton/day 순으로 산정되었으며, TP 및 DIP는 각각 약 0.2 및 0.1 ton/day로 질소부하량에 비해 약 35배 정도 낮게 산정되었다.

Table 1. Yearly average of pollutant load in Jinhae Bay in 2004 (units: ton/day)

Item	COD	TN	TP	DIN	DIP
Load	16.5	7.1	0.2	5.8	0.1

### 수질의 경년변동 해석

진해만의 1989년-2006년 (18년간)에 하계 (8월) 26개 정점의 저층 수질의 평균값으로부터 얻어진 수질의 경년변동을 나타내면 Fig. 2와 같다. DO농도의 범위는 약 1.5-7.4 mg/L의 범위로서 1989년 마산만 준설사업 이후 1992년까지 농도가 증가하는 양상을 보인 후 1993년과 2002년에 급격히 감소하였으며, 2002년부터 저층 DO농도의 회복이 두드러진 변화를 나타내었다. COD 농도범위는 1.5-2.7 mg/L로서 전반적으로 1989년에서 1998년까지 농도가 감소하였으나, 진해만 특별관리해역의 지정해인 1999년부터 2003년까지는 2 mg/L 이상으로 증가한 후 매년 점차적으로 감소하는 경년변동을 보였다 (Fig. 2A). DIN농도는 0.11-0.52 mg/L의 범위로서 1997년 이후부터 2001년까지 급증한 후 2006년까지 점차적으로 감소하는 경향으로, 특히 부산 신항만 건설이 시행된 2004년에 최저치를 보였다. 그리고 DIP농도는 0.002-0.18 mg/L의 범위로서 전반적으로 DIN농도의 경년변동과 유사한 연변화를 나타내었으며, 특히 마산시 하수처리장 가동 (1994년) 이후 농도가 증가하였으나 2001년 이후 감소하는

추세로 나타났다 (Fig. 2B).

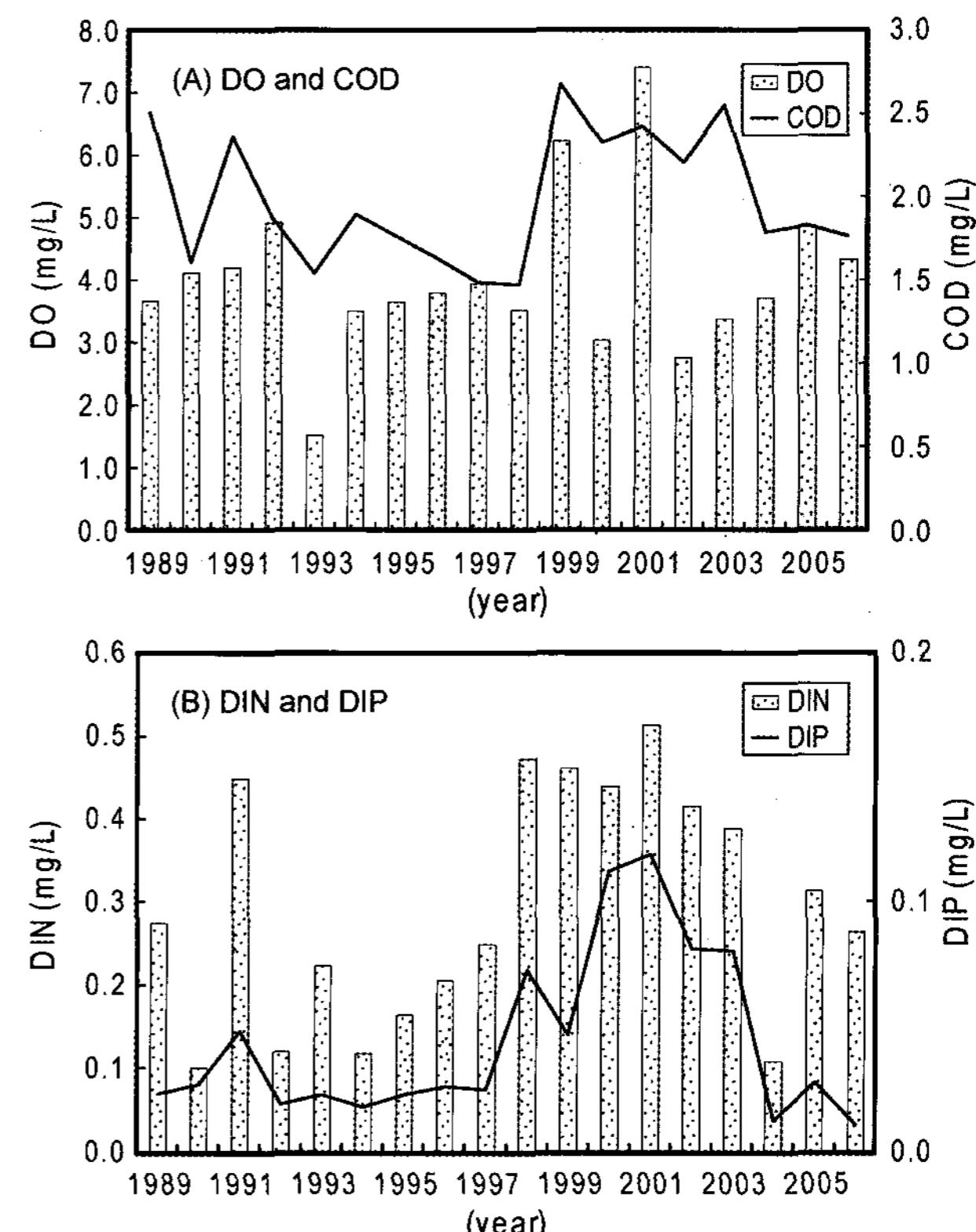


Fig. 2. Annual variations of water quality in Jinhae Bay. A, DO and COD; B, DIN and DIP.

### 군집분석

Fig. 3은 7개 수질항목에 대한 군집분석을 통해 얻어진 dendrogram 결과를 바탕으로 작성한 4개 년도 (1989년, 1994년, 1999년 및 2004년)의 진해만의 유사해역 분할도를 나타낸다. 마산만 준설 및 하수처리장 가동 이전인 1989년의 경우 진해만은 남서부 (I), 중부 (II), 북부 (III), 동부 (IV)의 4개 해역으로 구분되었으나 (Fig. 3A), 마산만 준설사업이 완료되고 하수처리장이 가동되기 시작한 1994년의 경우에는 I, III 해역이 각각 두 개의 소해역으로 세분화되는 것으로 나타났다 (Fig. 3B). 또한 진해만 특별관리해역으로 지정된 1999년의 경우는 1994년과 비교하여 II (진해만 중부)해역이 남서부해역으로, III 해역이 진해만 중부해역으로 다소 확대되었으며 (Fig. 3C), 2004년의 경우 III 해역을 제외하면 1994년도와 거의 유사한 소해역으로 구분되었다 (Fig. 3D). 이상의 4개년도의 해역분할도를 모두 중첩하여 진해만 전역을 소해역으로 나타내면, 진해만 남서부 (I), 중부 (II), 북부·마산만 (III) 및 동부 (IV)해역으로 분할된다 (Fig. 4).

### 빈산소수과의 경년변동 해석

Fig. 5는 진해만의 소해역 분할도 (Fig. 4)를 바탕으로 식 (1)에 의해 산정한 1989년-2006년 (18년간)의 각 격자별 O

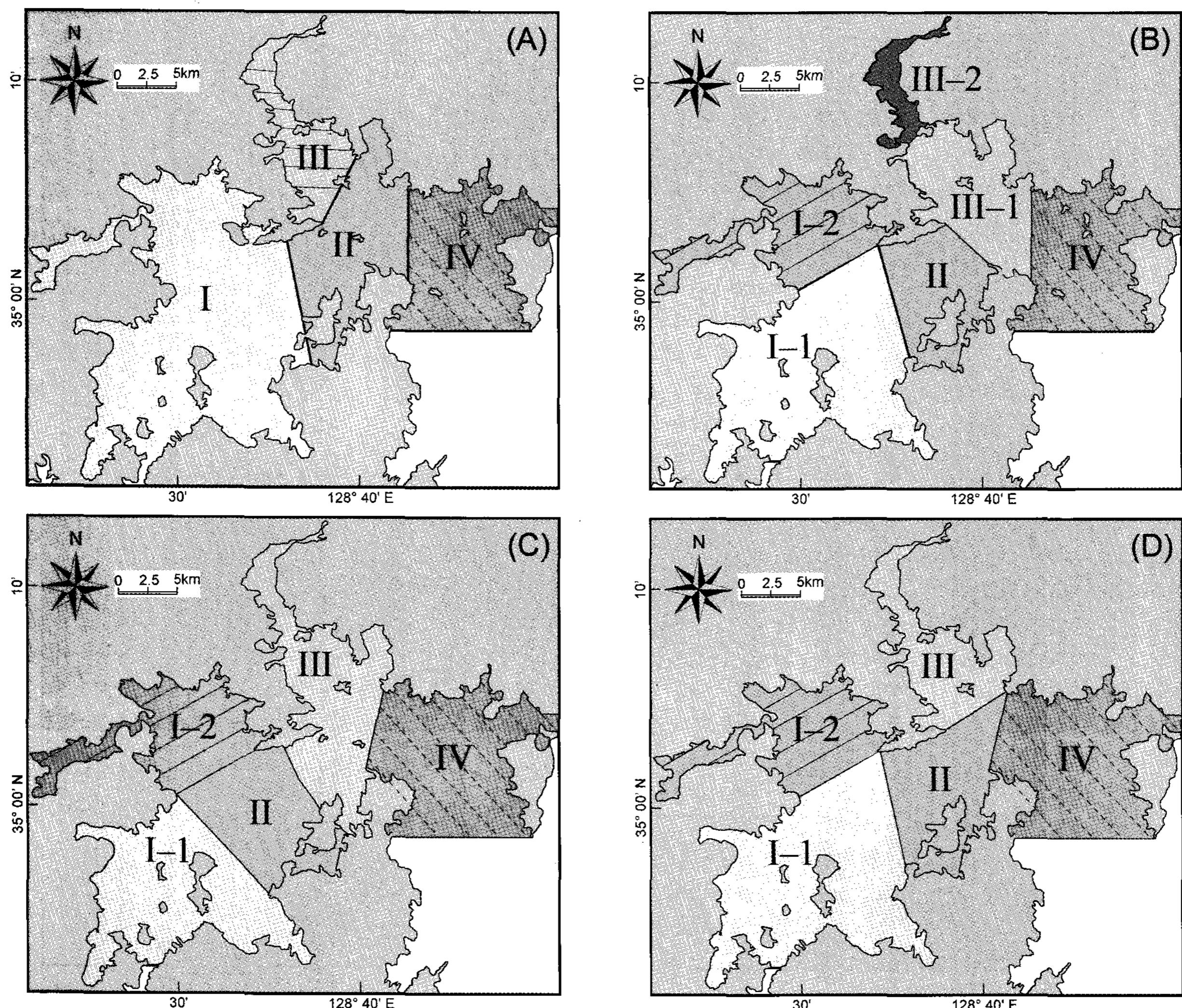


Fig. 3. Cross-sectional division of sea basin in Jinhae Bay by cluster analysis. A, 1989; B, 1994; C, 1999; D, 2004.

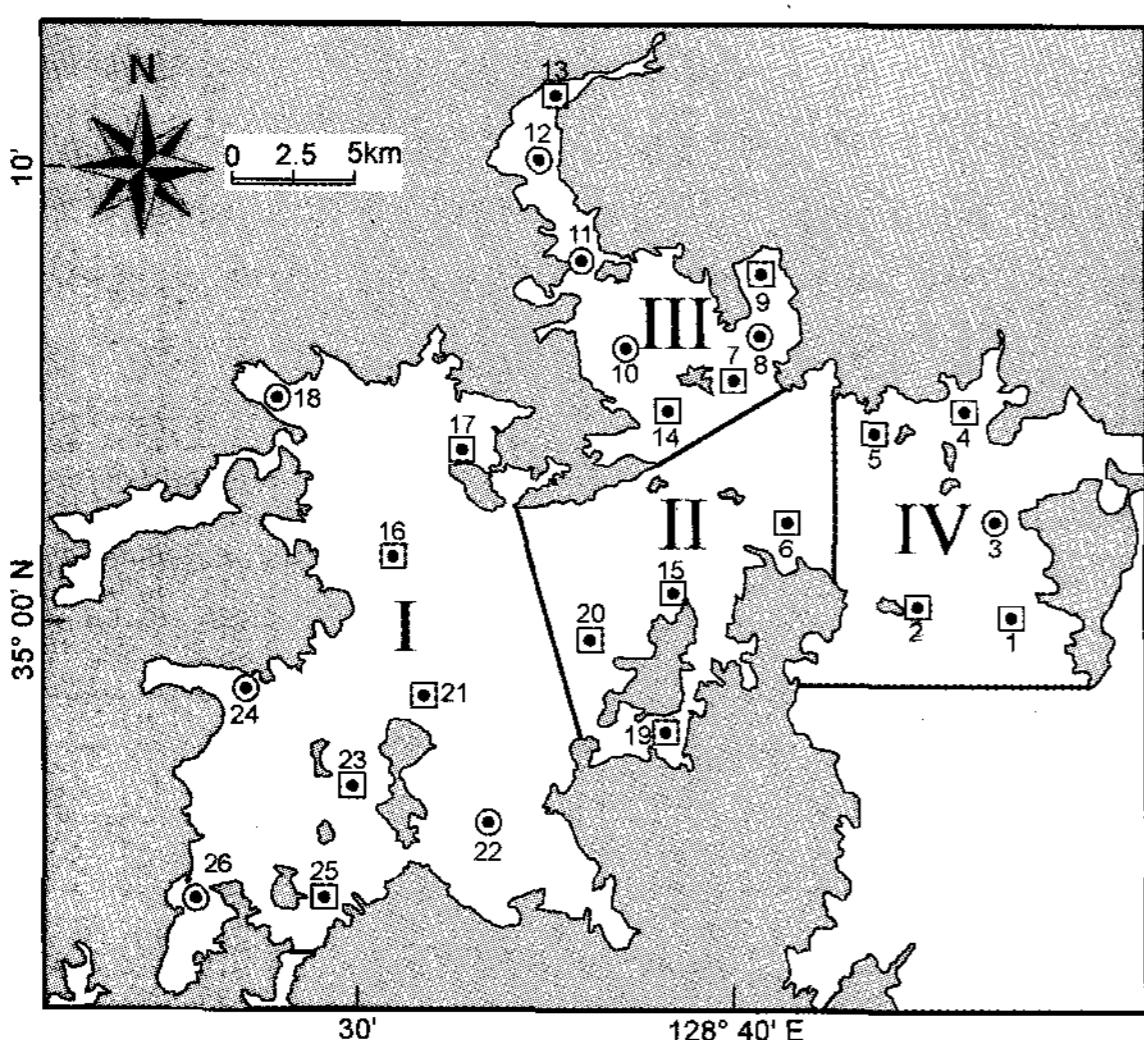


Fig. 4. Division of sea basin in Jinhae Bay by overlapping with Fig. 3.

$DW_{area}$ 의 계산결과 중, 4개 년도 (1989, 1994, 1999 및 2004년)에 대한  $ODW_{area}$ 의 수평적 공간분포를 나타낸 것이다. 빈산소수괴 (ODW)는 1989년의 경우 마산만과 진해만 남서부(I) 해역에서 대규모로 발생하였으나, 1994년과 1999년으로 갈수록 발생해역이 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 2에 나타낸 DO농도의 경년변동에서 알 수 있듯이 1994년, 1999년에 전체적으로 DO농도가 증가하는 결과와 상관성이 있어, 마산만 준설사업과 하수처리장 가동 및 진해만 특별관리해역 지정 등 진해만의 수질관리대책이 반영된 것으로 판단된다 (Fig. 5B, C). 그러나, 최근의 진해만의 ODW발생역은 2004년의 경우에서 알 수 있듯이 전반적으로 진해만 남서부 (I)의 전해역으로 광범위하게 발생하는 것으로 나타나 이 해역의 수질관리가 절실히 필요할 것으로 예상되었다 (Fig. 5D). Fig. 6은 성충수심을 고려한 식 (3)에 의해 산정된 1989년-2006년 (18년간)의 진해만 소해역별  $ODW_{vol}$ 의 경년변동을 보여준다. 진해만  $ODW_{vol}$ 의 최대치는 약  $1.9 \text{ km}^3$ 으로서, 전반

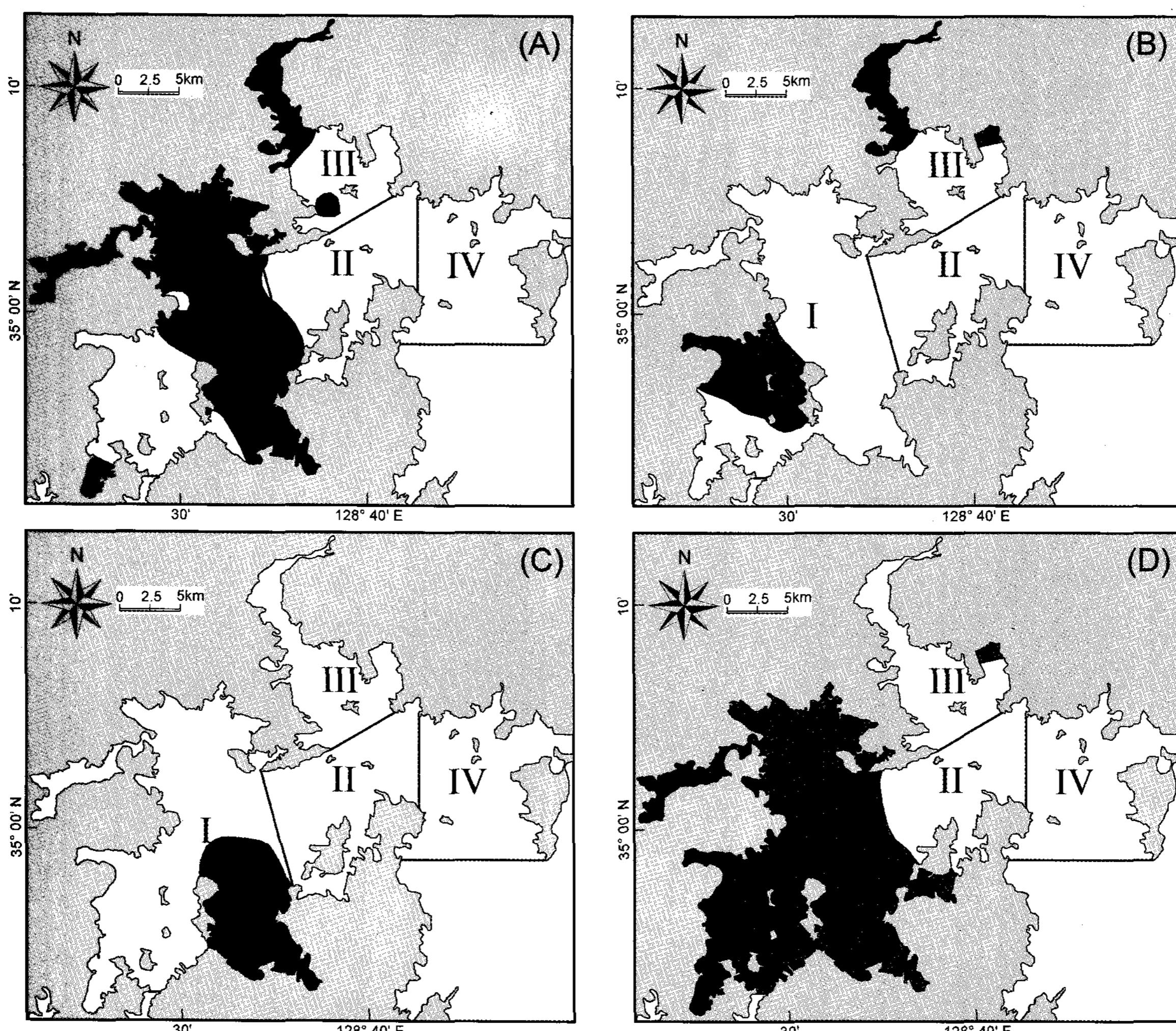


Fig. 5. Horizontal distributions of  $ODW_{area}$  (less than  $DO = 3 \text{ mg/L}$ ) in Jinhae Bay. A, 1989; B, 1994; C, 1999; D, 2004.

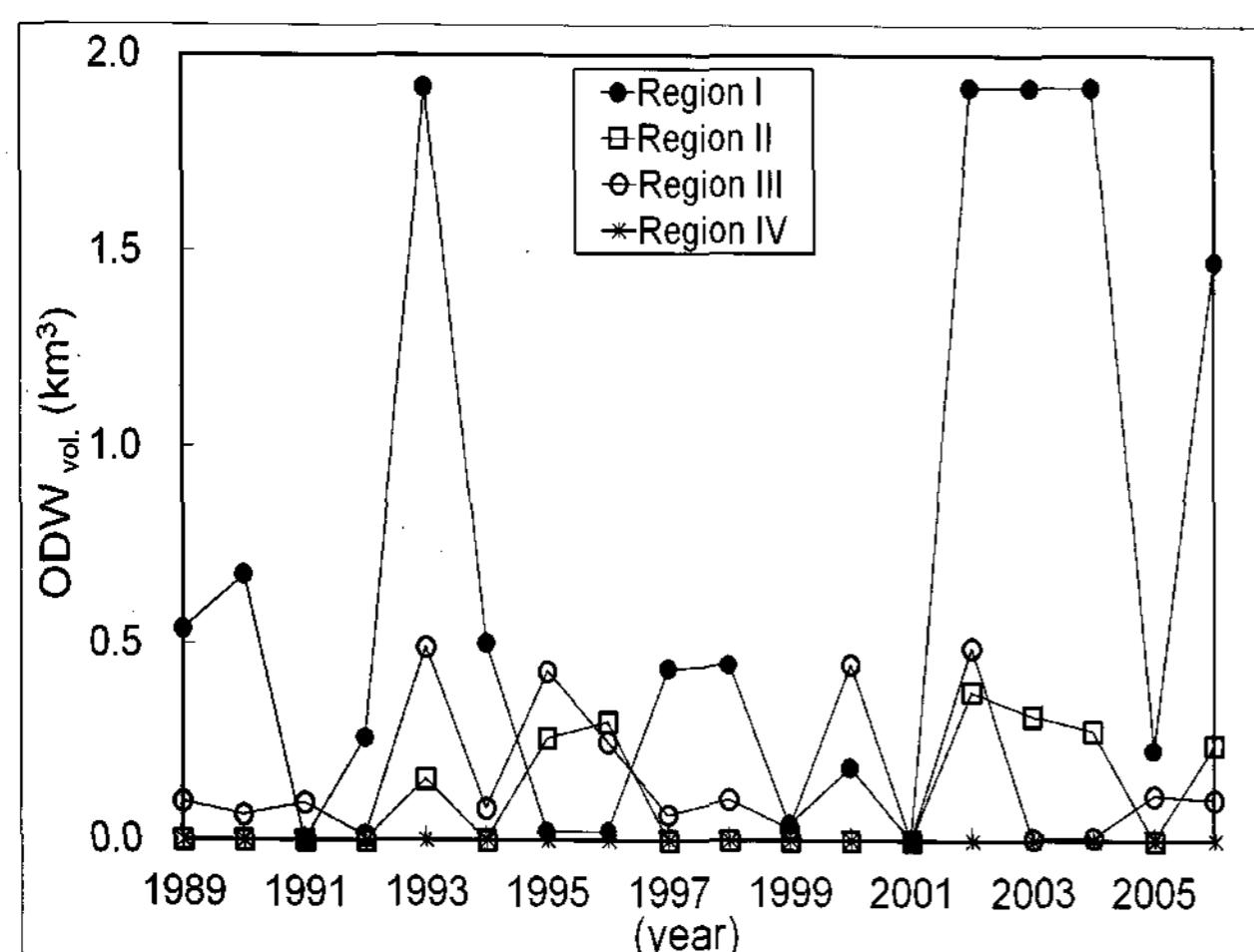


Fig. 6. Estimated results of  $ODW_{vol}$  at each region in Jinhae Bay.

적으로 남서부(I)해역에서 가장 높았으며 경년변화도 가장 크게 나타났다. 특히 I-III 해역에서는 5개년(1993년, 2002-

2004년, 2006년)에  $ODW_{vol}$ 이 상대적으로 높았으며, II 해역에서는 상기 5개년을 제외하고는 ODW가 발생하지 않았다. 그리고 III 해역은 대상기간 동안 약  $0.1 \text{ km}^3$ 으로 일정한 경년변동을 보였으나, 1993년, 2000년과 2002년에 약  $0.5 \text{ km}^3$ 으로 산정되어, 이 시기에는 III 해역 전역에 ODW가 발생한 것으로 추정된다. 그러나 가덕수도와 인접한 IV 해역인 진해만 동부 해역은 전 조사기간에 걸쳐 ODW가 발생하지 않은 것으로 나타났다. Table 2는 식 (4)에 의해 계산되어진 ODW발생률( $ODW_R$ )의 경년변동을 나타낸 것으로, 그 변동성은  $ODW_{vol}$ 과 유사하게 진해만 남서부(I)해역이 타 해역에 비해 상대적으로 큰 값을 보여 거의 매년 ODW가 발생하는 해역임을 알 수 있으며, 특히 1993년과 2002-2004년에는 0.68의 최대 발생률을 나타내었다. 그리고 4개 해역 중 I과 III 해역의  $ODW_R$  경년변동이 현저하였으나, 가덕수도를 통한 외해수 교환이 활발한 II와 IV 해역은 전 조사기간에 걸쳐  $ODW_R$  값이 각각 0.27 이내와 0으로 ODW의 발생이 극히 제한적인 것으로 나타났다. 또한 진해만 전 해역에 걸쳐  $ODW_R$  값이 가장 적은 해는 1992년과 2001년으로서 그 값은 0.02 이내의 범위였다.

Table 2. Estimated results of ODWR at each region

Year	Region			
	I	II	III	IV
1989	0.37	0.00	0.04	0.00
1990	0.03	0.00	0.03	0.00
1991	0.00	0.00	0.05	0.00
1992	0.02	0.00	0.01	0.00
1993	0.68	0.27	0.15	0.00
1994	0.12	0.00	0.04	0.00
1995	0.11	0.00	0.04	0.00
1996	0.13	0.00	0.04	0.00
1997	0.14	0.00	0.04	0.00
1998	0.09	0.00	0.05	0.00
1999	0.01	0.00	0.01	0.00
2000	0.39	0.00	0.19	0.00
2001	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	0.68	0.11	0.15	0.00
2003	0.68	0.07	0.01	0.00
2004	0.68	0.04	0.01	0.00
2005	0.07	0.00	0.03	0.00
2006	0.49	0.06	0.03	0.00

이상의 결과로부터 1993-1999년에 이르기까지 진해만의 수질관리를 위한 일련의 방안이 시행됨에 따라 ODW의 발생역이 점차 감소하는 추세였으나, 2000년 이후부터 현재까지 ODW의 발생역이 진해만 남서부(I) 해역으로 광범위하게 확대되어 가는 경향을 보여, 이에 대한 수질관리 및 개선방안이 수립되어져야 할 것으로 생각된다.

## 사사

이 연구에 참여한 오유진은 2단계 BK21 사업의 지원을 받았으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Cho, K.J., M.Y. Choi, S.K. Kwak, S.H. Im, D.Y. Kim, J.G. Park and Y.E. Kim. 1998. Eutrophication and seasonal variation of water quality in Masan-Jiniae Bay. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 3, 193-202.
- Cho, H.Y., J.W. Chae and S.Y. Chun. 2002. Stratification and DO concentration changes in Chinhae-Masan Bay. *J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng.*, 14, 295-307.
- Choi, W.J., C.K. Park and S.M. Lee. 1994. Numerical simulation of the formation of oxygen deficient water-masses in Jiniae Bay. *J. Kor. Fish. Soc.*, 27, 413-433.
- Hong, G.H. and K.T. Kim. 1991. Annual cycles of nutrients and dissolved oxygen in a nutrient-rich temperate coastal bay, Chinhae Bay, Korea. *J. Oceanogr. Soc. Kor.*, 26, 204-222.
- Kim, C.K. and P.Y. Lee. 1994. Water mass structure and dissolved oxygen distribution in Chinhae Bay. *J. Kor. Fish. Soc.*, 27, 572-585.
- Kim, D.S. and S.W. Kim. 2003. Mechanism of oxygen-deficient water formation in Jindong Bay. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 8, 176-189.
- Kim, K.Y. and M.S. Jeon. 1998. SAS Cluster Analysis. Freedom Academy, Seoul, Korea, 1-68.
- Kong, H.H., I.C. Lee and K. Ok. 2005. Temporal and spatial variation of inflowing pollutant loads in Jinhae bay. Proceedings of Korean Society for Marine Environmental Engineering Fall Meeting, 15-19.
- KORDI (Korea Ocean Research & Development Institute). 1997. Development of the water quality management model in Chinhae-Masan Bay (I). Korea Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, Seoul, Korea.
- KORDI (Korea Ocean Research & Development Institute). 1998. Development of the water quality management model in Chinhae-Masan Bay (II). Korea Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, Seoul, Korea.
- KORDI (Korea Ocean Research & Development Institute). 1999. Development of the water quality management model in Chinhae-Masan Bay (III). Korea Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, Seoul, Korea..
- Lee, I.C. 2003. Seasonal variation estimation of inflow pollutant loads of Yeong-il Bay by using tank model. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, 6, 63-71.
- Lee, P.Y. 1993. Occurrence and seasonal variation of oxygen-deficient water mass in Wonmun Bay. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 26, 392-400.
- Sekine, M., I.C. Lee, T. Narazaki, M. Ukita, T. Imai and H. Nakanishi. 1995. Handling of dissolved oxygen in the Seto Inland sea fisheries ecological model. *Proc. Environ. Eng.*, 32, 301-310.
- Shin, S.Y., C.I. Lee, S.C. Hwang and K.D. Cho. 2004. Relationship between pollution factors and environmental variation in waters around Masan Bay. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Safety*, 10, 69-79.
- Yamada, T., M. Montani, S. Hirotani and T. Yanagi. 1998. Development and characteristics of oxygen-deficient water mass in hypertrophic Dokai Bay, Japan, *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 64, 204-210.
- Yanagi, T., K. Inouea, S. Montani and M. Yamada. 1997, Ecological modeling as a tool for coastal zone management in Dokai Bay, Japan, *J. Mar. Syst.*, 13, 123-136.

2007년 10월 19일 접수

2008년 4월 1일 수리