

Article

새만금 해역에서 방조제 건설에 따른 동물플랑크톤 군집의 변화

이창래 · 강형구* · 노재훈

한국해양연구원 해양생물자원연구부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure
Post Construction of Saemangeum Dyke

Chang-Rae Lee, Hyung-Ku Kang*, and Jae-Hoon Noh

Marine Living Resources Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Zooplankton community structure was investigated in the Saemangeum region in March, May, July and October of 2007 and 2008 in order to understand the potential effect of post construction of Saemangeum dyke on their temporal and spatial distribution. Mean abundance of zooplankton in the inner and outer area of the dyke, except for dinoflagellate *Noctiluca scintillans*, ranged from 173 to 15,830 ind.m⁻³, showing higher variability in the inner area compared to the outer area. Zooplankton abundance was higher in the outer area than the inner area in 2007, and vice versa in 2008. In the inner area of the dyke, zooplankton abundance was the highest in May 2007 and March 2008. In the outer area of the dyke, abundance was the highest in October 2007 and July 2008. Brackish species such as *Tortanus derjugini* and *Pseudodiaptomus inopinus* were dominant prior to construction of the dyke, and appeared less frequently in the inner area. Marine zooplankton taxa such as juvenile hydromedusa, and calanoid copepods *Acartiahongi* and *Paracalanus parvus* s.l. dominated both areas of the dyke. In CCA analysis, zooplankton community structure in the inner and outer area was similar in March and May, but different in July and October. Temperature, salinity and COD were important environmental factors affecting zooplankton community structure. These results suggest that zooplankton community structure in the inner and outer area of Saemangeum dyke are significantly affected by whether the sluice gates are closed or open.

Key words : Saemangeum dyke, zooplankton community, environmental variables, CCA

1. 서 론

연안 하구역은 일반적으로 육상에서 공급되는 많은 유기물의 영향으로 생물 생산성이 높은 지역이다. 또한 육상으로부터 유입되는 금속이온을 포함한 많은 오염물질들을 생지화학적인 과정을 거쳐 저층으로 침강시켜 연안역을 정화해 주는 역할을 한다(Zhang 1995; Attrill 2002; Nielsen

and Andersen 2002). 하구생태계에 영향을 미치는 환경요인으로는 부유퇴적물, 수온, 염분 등이 있다(Laprise and Dodson 1994; 정 등 2000; Roman et al. 2001; Uriarte and Villate 2006). 강으로부터 유입되는 부유퇴적물은 물의 탁도를 높여 투과되는 빛의 양을 감소시켜 식물플랑크톤의 광합성에 영향을 주고, 수온과 염분은 조석에 의해 하루 두 차례 주기적으로 변화한다. 특히, 염분은 수온에 비해 조석에 따른 변동 폭이 크기 때문에 하구역 동물플랑크톤의 분포에 영향을 미친다(Kimmerer 2002).

*Corresponding author. E-mail : kanghk@kordi.re.kr

간척지 내의 농토와 공업 용지를 개발할 목적으로 건설된 방조제는 외측 해역에서는 비정기적인 수문개방으로 인해 염분 감소와 해안선 변형이 부유물질과 모래유동 변화와 연결되어 해저지형 및 퇴적물 입도 특성을 변화시킨다(Park and Yoo 1997; Lee and Park 2002; 이 등 2006, 2008). 방조제 내측에서는 담수유입에 따른 염분 감소, 영양염류 및 유기물에 의한 식물플랑크톤과 COD가 증가되고, 방조제의 영향에 의한 조차, 평균 해수면, 조류의 세기 등 해수 유동이 크게 감소된다(해양수산부 2007; 박 등 2008; Lee et al. 2008; Noh et al. 2008). 한편, 새만금 방조제는 내측의 담수를 외측으로 방류하기도 하지만, 내측의 수질정화를 목적으로 외측의 해수를 내측으로 끌어들이 내·외측의 물을 자주 교환하기 때문에 방조제 주변 해역의 환경변화는 매우 복잡할 수 있다.

대규모의 방조제 건설에 따른 생태계 변화를 연구한 사례를 보면 국외에서는 Bakker(1994)와 Bakker and Rijswijk(1994)가 네델란드의 Oosterschelde 하구에서 해일방지벽(storm-surge barrier)의 건설 진행에 따른 동물플랑크톤의 생체량과 종조성 등을 모니터링하면서 생태계 변화를 보고하였지만, 조류(tide)가 하구안으로 자유롭게 드나든다는 점에서 우리나라에 건설된 방조제의 성격과 많은 차이가 있다. 국내에서는 주로 식물플랑크톤과 저서생물을 중심으로 연구가 진행되었고(안 등 2006; 임 2007; 구 2008; 김 등 2009), 동물플랑크톤의 분포를 통해 연구한 사례는 Park et al.(1998), Lee and Park(2002), 유 등

(2006)으로 매우 미흡한 실정이다. Park et al.(1998)과 Lee and Park(2002)은 방조제 건설에 따른 방조제 외측의 동물플랑크톤 장기변화를 모니터링하였으며, 방조제 건설로 인한 방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤 군집변동에 대한 연구는 유 등(2006)이 유일하다. 유 등(2006)은 새만금 끝물막이 공사 완공이전 동물플랑크톤의 분포와 환경요인과의 관계를 통해 방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤 군집특성을 비교·설명하였다. 본 논문은 2006년 4월 끝물막이 공사 완공이후 2007년과 2008년에 새만금 방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤 군집구조 변화와 동물플랑크톤 군집과 환경요인 사이의 관계를 알아보려고 한다.

2. 재료 및 방법

새만금 해역에서 2007년과 2008년 3월, 5월 7월, 10월에 동물플랑크톤 조사를 실시하였다(Fig. 1). 이중 2008년 10월에는 방조제 내측에서만 조사를 하였다. 연구해역의 수심은 조석의 영향으로 채집시기에 따라 다소 차이가 있었지만, 방조제 내측에서는 골에 위치한 정점 7과 306에서 30-40 m로 가장 깊었으며, 다른 정점들에서는 10-15 m였으며, 방조제 외측에서는 대부분의 정점들이 15-20 m 내외였다.

동물플랑크톤의 채집은 방조제 내측 6개 정점, 방조제 외측 7개 정점에서 망구 50 cm, 망목 300 μ m의 원추형 네트를 이용하여, 바닥까지 네트를 내린 후 표층까지 올리는

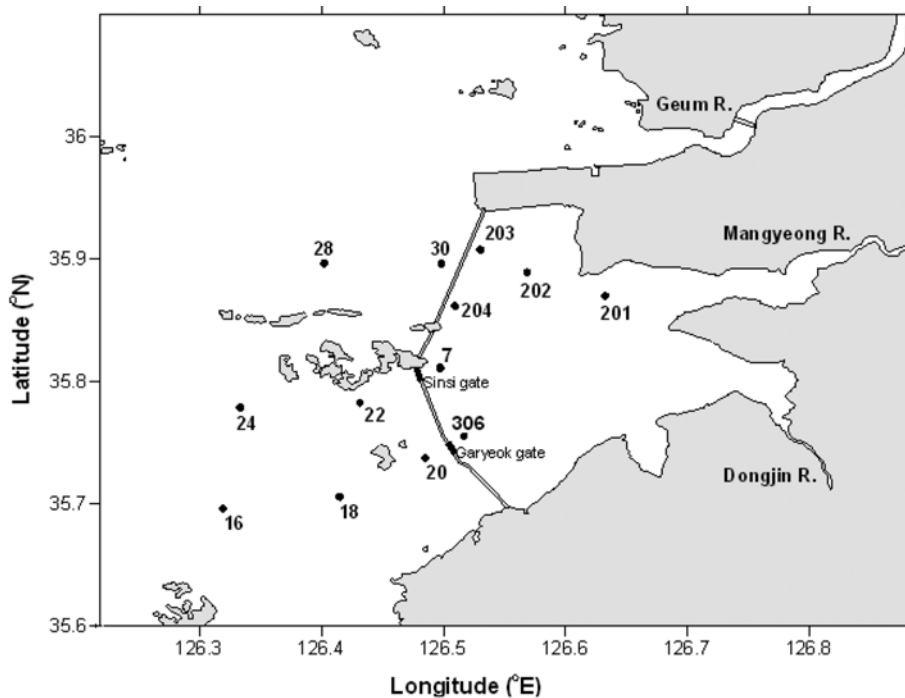


Fig. 1. A map showing the sampling sites in the Saemangeum area.

수직 채집을 하였다. 충분한 시료를 얻기 위해 2-3회 반복 채집하였고, 수심이 5 m 이하인 정점에서는 수평 채집하였다. 채집된 시료는 선상에서 중성포르말린으로 고정하여 최종 농도가 4-5%가 되도록 하였다. 네트에 여과된 해수의 양은 네트 입구에 부착된 유량계(Hydro-Bios, Model 438115)를 이용하여 계산하였다. 종 동정과 계수를 위해 채집된 동물플랑크톤 시료는 실험실로 운반한 후, Folsom 분할기를 이용하여 생물량이 500-1,000 개체가 되도록 부차시료(subsample)를 취하였다. 부차시료는 계수관(Bogorov counting chamber)으로 옮겨 해부현미경(ZEISS Stemi 2000-C)에서 동정·계수하였다. 요각류는 대부분 중 수준까지 동정하였으며, 일부 동물플랑크톤 및 기타 부유유생은 강 혹은 문 수준의 상위 분류군으로 구분하였다. 동정된 각 동물플랑크톤은 단위 체적(m³)당 개체수로 환산하였다.

환경요인인 수온과 염분은 CTD(idronaut-304)를 이용하여 측정하였으며, 엽록소-a 농도는 표층과 저층의 해수를 부유물질의 농도에 따라 200-500 m를 GF/F 여과지에 여과한 후, 실험 전까지 냉동고에 보관하였다. 실험실로 운반된 GF/F 여과지는 90% 아세톤 용액에서 24시간 동안 냉장실에서 용출시켰다. 추출된 용액은 spectrophotometer(Lambda 19, Perkin-Elmer)와 fluorometer(10-AU, Turner Design)를 이용하여 엽록소-a 농도를 측정하였다(Parsons et al. 1984). 화학적 산소요구량(COD)은 해양수산부(2008)와 국토해양부(2009) 자료를 이용하였다.

통계분석

정준대응분석(Canonical Correspondence Analysis: CCA)은 CANOCO(CANONical Community Ordination) 프로그램(version 4.5; ter Braak and Šmilauer 2002)을 이용하여 환경요인과 관련한 동물플랑크톤의 공간적인 분포를 분석하였다. 정준대응분석은 동물플랑크톤 개체수 자료를 바탕으로 한 동물플랑크톤 종조성과 환경변수들과의 관계를 이해하는데 널리 사용하는 다변량 통계분석이다(ter Braak 1986; 유 등 2006; Marques et al. 2006). 통계분석에 이용한 자료는 자료의 정규분포 가정을 만족하기 위해 로그(log₁₀^{X+1}) 변환하였다.

3. 결 과

환경요인(수온, 염분, 엽록소-a, COD)의 변화

조사기간 동안 방조제 내측과 외측의 수온 분포는 각각 7.1-28.5°C와 6.8-26.7°C 범위였다. 계절별 방조제 내측과 외측의 평균 수온차이는 0.4-2.2°C로 내측에서 약간 높았고, 정점간 수온 차이는 방조제 내측과 외측 모두 약 1°C 이내로 작았다(Fig. 2). 염분은 조사기간 동안 방조제 외측에서 28 psu 이상을 기록하였지만, 방조제 내측에서는 5.5-32.1 psu를 기록하여 조사시기에 따라 큰 변화를 보였다(Fig. 2). 가장 낮은 염분은 2007년 7월 여름철 장마의 영향으로 만경강 하구인 정점 201에서 나타났으며, 방조제로 접근하면서 증가하였고, 전체적으로 평균 25 psu 이

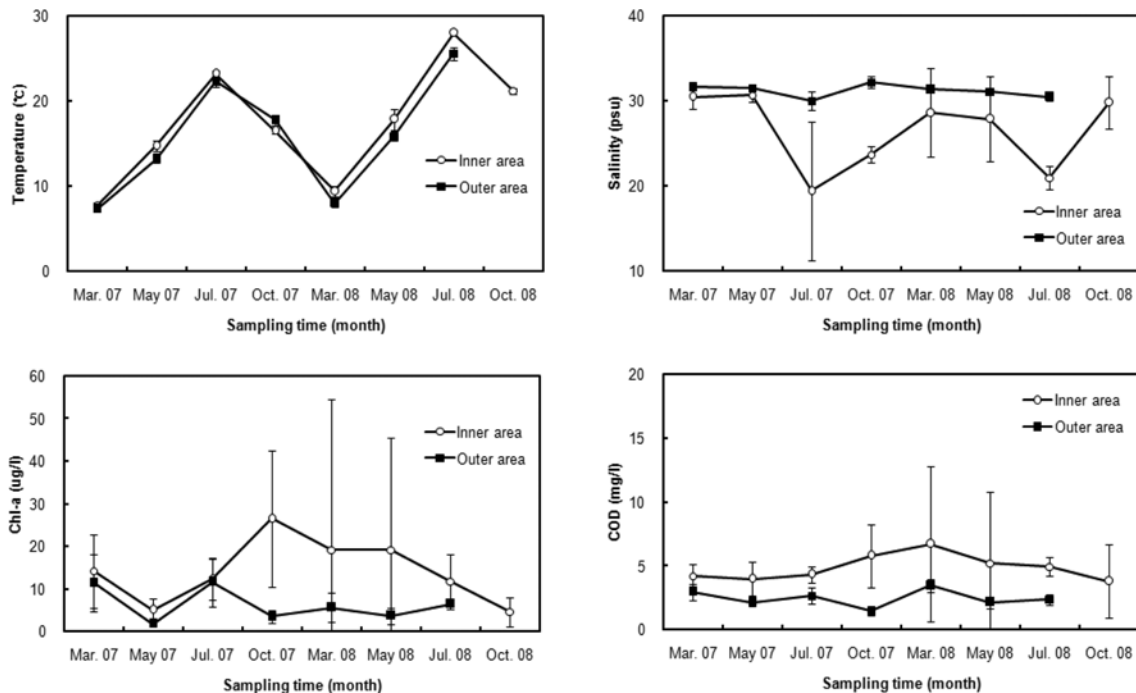


Fig. 2. Temporal variations of temperature, salinity, chlorophyll-a (Chl-a) and COD concentration in the inner area and outer area of the Saemangeum dyke. Error bars represent standard deviation.

하의 낮은 염분을 보였다. 2008년 7월에도 방조제 내측은 2007년과 유사하게 평균 25 psu 이하를 기록하였지만, 만경강 하구인 정점 201보다 방조제 근처의 정점 203과 7에서 20 psu 이하를 기록하였고, 전체적으로 2007년에 비해 약간 높았다. 2007년 3월과 5월에는 만경강 하구역에서 염분이 각각 27.6, 29.5 psu인데 반해, 2008년 3월과 5월에는 모두 19 psu 이하를 기록하였다. 2007년의 경우 신시갑문과 가력갑문의 개방으로 인해 방조제 바깥에서 유입된 해수의 영향이 있었던 것으로 추정된다.

방조제 내측과 외측의 엽록소-*a* 농도범위는 각각 1.5-91.6 $\mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 와 1.5-22.7 $\mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 로 방조제 외측보다 내측에서 높았으며, 내측에서 시공간적인 변동이 매우 컸다. 특히, 다른 조사시기에 비해 2007년 10월, 2008년 3월과 5월에 내측의 정점간 변동이 매우 컸다(Fig. 2). 방조제 내측과 외측에서 기록한 최대 엽록소-*a* 농도는 2008년 3월에 방조제 내측의 만경강 하구 정점 201에서 91.6 $\mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 이었으며, 2007년 3월에 방조제 외측의 신시갑문 앞에 위치한 정점 22에서 22.7 $\mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 이었다. 평균 엽록소-*a* 농도를 보

면 방조제 내측에서는 2007년 10월에, 방조제 외측에서는 2007년 3월과 7월에 가장 높아 방조제 내측과 외측의 엽록소-*a* 분포가 계절에 따라 차이가 있었다. 그리고 식물플랑크톤 대증식은 2008년에는 3월과 5월에 발생하였지만, 2007년에는 10월에 발생하여 새만금 해역의 엽록소-*a* 농도 변화는 시공간적으로 변화가 매우 컸다. COD는 방조제 외측(1.5-3.5 mgL^{-1})보다 내측(3.8-6.7 mgL^{-1})에서 항상 높았고, 정점간의 차이도 크게 나타나 엽록소-*a* 농도와 유사하였다.

주요 동물플랑크톤의 분포

아광층을 제외한 전체 동물플랑크톤은 방조제 내측에서 2007년 5월에 높은 개체수를 보였는데, 정점 203과 204를 제외한 대부분 정점에서 1,500 $\text{ind.}\text{m}^{-3}$ 이상이었다. 2008년 3월에는 정점 201에서 70,000 $\text{ind.}\text{m}^{-3}$ 이상으로 나타나 다른 내측 정점들에 비해 10배 이상의 차이를 보였다(Fig. 3, 4). 방조제 외측에서는 2007년 10월에 정점 16과 20에서 3,000 $\text{ind.}\text{m}^{-3}$ 이상의 최대 개체수가 출현하였으

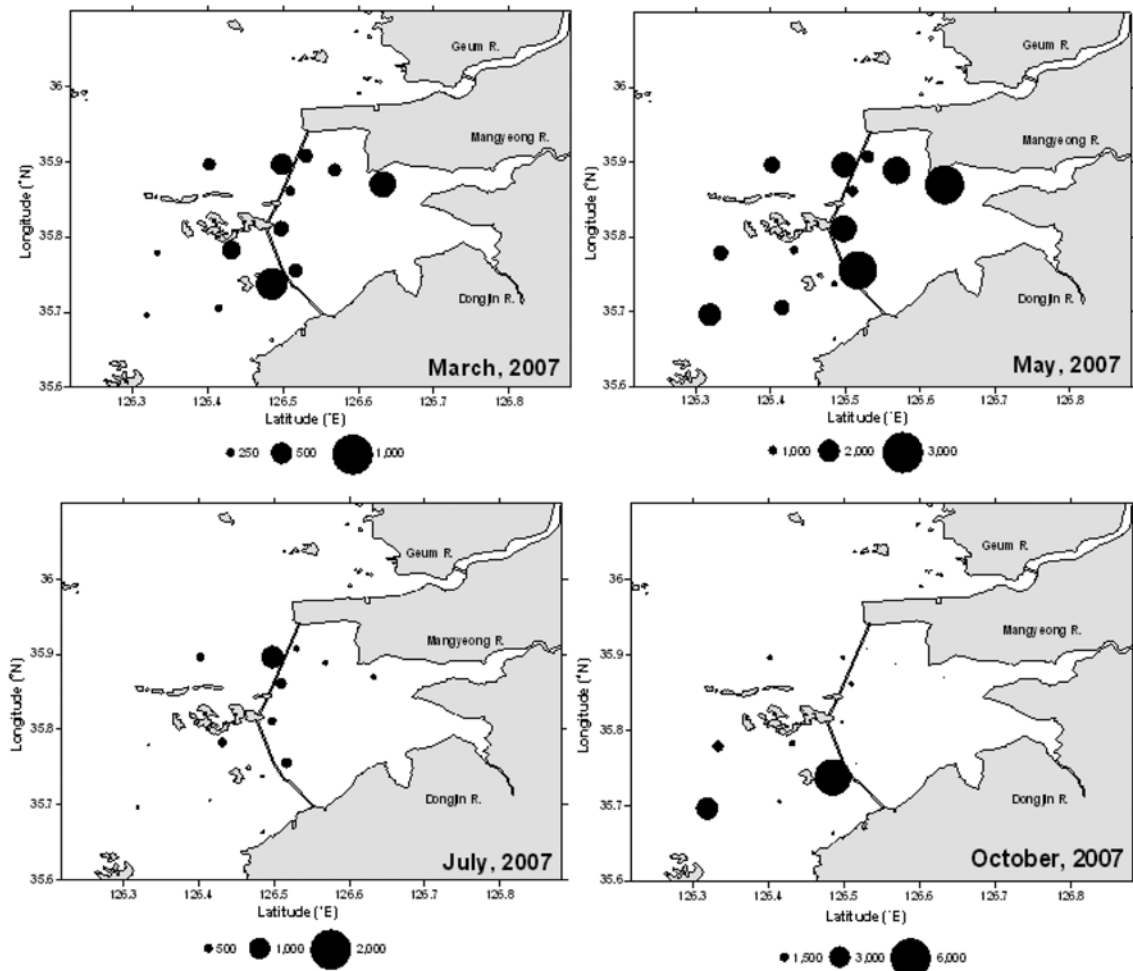


Fig. 3. Distribution of zooplankton abundance in the Saemangeum area from March to October 2007.

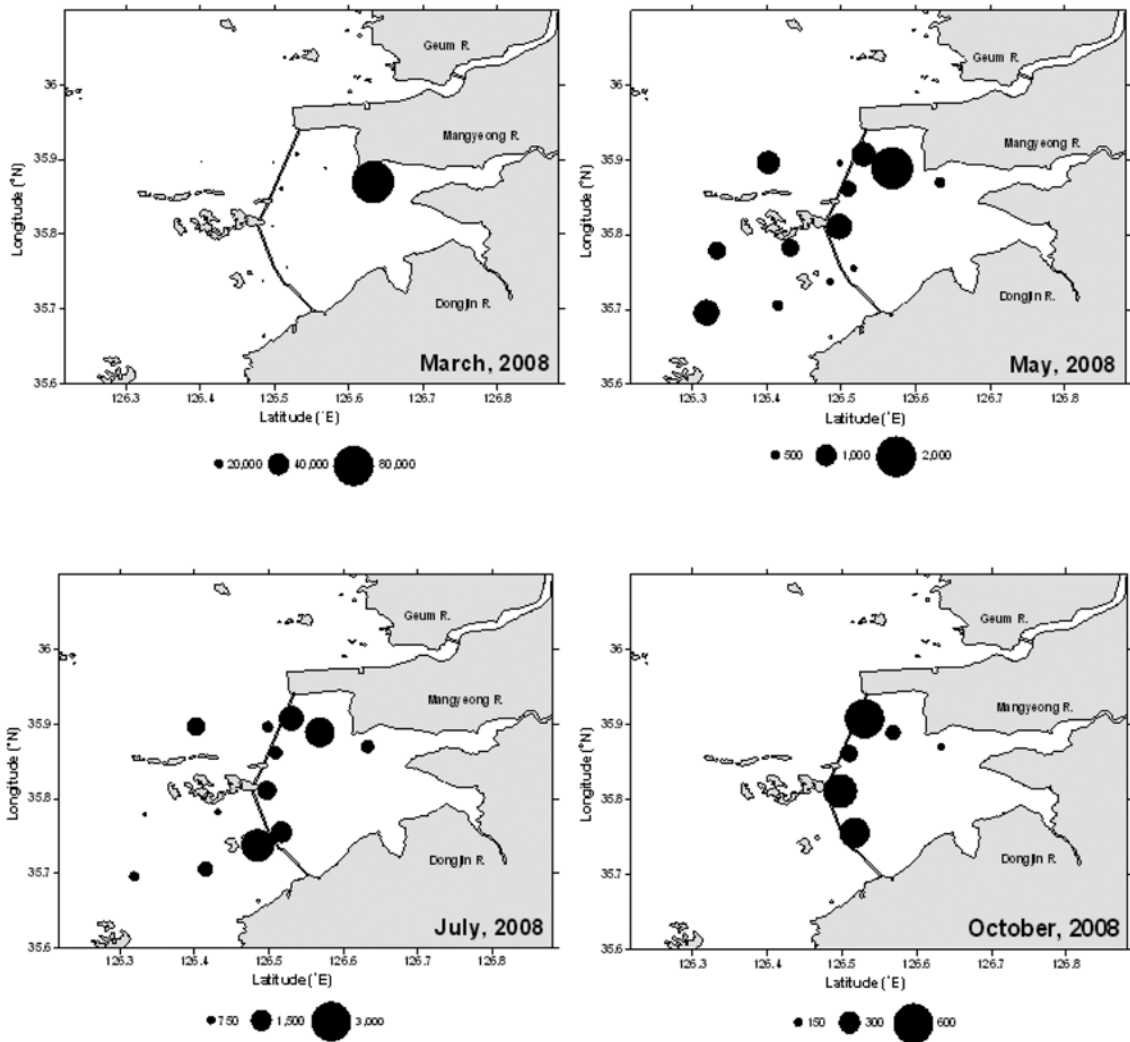


Fig. 4. Distribution of zooplankton abundance in the Saemangeum area from March to October 2008.

며, 2008년 7월의 정점 20에서 $2,000 \text{ ind.m}^{-3}$ 이상이였다 (Fig. 3, 4).

방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤의 우점 분류군의 조성은 조사시기에 따라 달랐다(Table 1, 2). 2007년 3월에는 방조제 내측과 외측 모두 해파리 유생(Juvenile of hydromedusa)과 요각류 *Acartia hongii*가 우점하였다. 5월에는 방조제 내측에서 지각류 *Pondon polyphemoides*와 *A. hongii*, 외측에서는 미충류 *Oikopleura dioica*와 만각류 유생(Cirripedia larva)이 우점하였다. 7월에는 방조제 내측에서 십각류 유생(Decapoda larva)과 요각류 *Paracalanus. parvus* s.l., 방조제 외측에서는 지각류 *Evadne tergestina*와 십각류 유생이 우점하였다. 10월에는 방조제 내측과 외측에서 *P. parvus* s.l.가 공통적으로 우점하였다. 특히, 방조제 내측에서는 만각류 유생의 우점률이 31%로 상당히 높았다.

2008년 3월에는 방조제 내측인 정점 201에서 *P.*

*polyphemoides*와 요각류 *A. hudsonica*가 대량 출현(약 $30,000 \text{ ind.m}^{-3}$ 이상)하여 상위 우점 분류군으로 분류되었다(Fig. 4; Table 2). 이들의 개체수는 인접한 정점 202보다 30배 이상 높았으며, 방조제 내측과 외측의 우점분류군 구성이 전혀 달라 2007년과 비교해 볼 때 이들의 대량 출현은 매우 특이한 현상이었다. 5월에는 내측에서 *P. parvus* s.l.와 만각류 유생, 외측에서는 요각류 *Centropages abdominalis*와 만각류 유생이 우점하였다. 방조제 내측과 외측 모두 연안성 동물플랑크톤이 우점하였으며, 저서동물의 유생인 따개비 유생의 출현이 이전 조사월에 비해 두드러졌다. 7월 조사는 방조제 내측과 외측 모두 *P. parvus* s.l.와 *E. tergestina*가 우점하였다. 여름 장마시기에 수행되어 낮은 염분이 관측되었지만, 2007년과 2008년 모두 연안성 동물플랑크톤이 우점하였고, 담수성 혹은 기수성 요각류는 거의 없거나 그 개체수가 매우 적었다. 10월에는 만각류 유생과 *P. polyphemoides*가 우점하였다.

Table 1. Averaged total abundance (Abu.: ind.m⁻³) and composition (Com.: %) of major zooplankton in the Saemangeum area from March to October 2007. Asterisks indicate <1 of zooplankton abundance and <0.001 of zooplankton composition. Blanks indicate no occurrence.

	March				May				July				October			
	Inner area		Outer area		Inner area		Outer area		Inner area		Outer area		Inner area		Outer area	
	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.
Juvenile of hydromedusa	230	66.4	89	26.9	29	1.9	115	11.0	11	6.3	7	2.2	3	1.5	28	1.6
<i>Acartia hongii</i>	51	14.7	90	27.2	289	19.4	70	6.7	8	4.7	1	0.2	1	0.3		
<i>Sagitta crassa</i>	15	4.3	26	7.8	14	0.9	8	0.7					2	1.2	94	5.6
<i>Paracalanus parvus</i> s.l.	12	3.5	21	6.3	32	2.1	35	3.3	21	11.4	45	14.2	62	35.8	436	25.8
<i>Calanus sinicus</i>	2	0.6	3	1.0	53	3.6	26	2.4	*	0.2	1	0.2	1	0.5	94	5.5
<i>Oikopleura dioica</i>	3	1.0	8	2.3	147	9.8	191	18.2	4	2.2	2	0.5	2	1.2	43	2.6
<i>Podon polyphemoides</i>					493	33.1	17	1.6	1	0.3	*	0.03				
Cirrepedia larvae					146	9.8	186	17.7	9	4.7	7	2.2	53	30.6	23	1.3
<i>Centropages abdominalis</i>	2	0.4	4	1.1	55	3.7	50	4.8								
Decapoda larvae	*	0.1	1	0.4	23	1.6	17	1.6	35	19.5	63	20.1	*	0.01	5	0.3
<i>Evadne tergestina</i>					2	*			14	7.5	79	25.0	*	*	*	*
Others	32	9.2	89	26.9	206	13.8	332	31.7	78	43.1	110	34.9	50	28.7	964	57.1
Total	347		331		1,489		1,047		181		315		174		1,687	

Table 2. Averaged total abundance (Abu.: ind.m⁻³) and composition (Com.: %) of major zooplankton in the Saemangeum area from March to October 2008. Asterisks indicate <1 of zooplankton abundance. Blanks indicate no occurrence.

	March				May				July				October	
	Inner area		Outer area		Inner area		Outer area		Inner area		Outer area		Inner area	
	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.	Abu.	Com.
Juvenile of hydromedusa	1,484	9.4	622	66.5	1	0.1	1	0.1	12	1.0	19	2.0	14	4.1
<i>Acartia hongii</i>	36	0.2	103	11.0	138	14.3	89	12.6	131	11.3	4	0.5		
<i>Acartia hudsonica</i>	5,815	36.7												
<i>Paracalanus parvus</i> s.l.	21	0.1	15	1.6	168	17.4	49	6.9	261	22.5	26	2.7	40	12.2
<i>Calanus sinicus</i>	2	0.01	8	0.8	*	0.03	21	3.0					*	0.03
<i>Oikopleura dioica</i>	2	0.01	4	0.4	27	2.8	15	2.2	5	0.4	14	1.5	5	1.6
<i>Podon polyphemoides</i>	8,259	52.2	7	0.8	105	10.9	27	3.8	1	0.04			57	17.1
Cirrepedia larvae	*	0.001	*	0.03	167	17.2	94	13.3	20	1.7	97	1.0	89	26.8
<i>Centropages abdominalis</i>	6	0.04	13	1.3	109	11.3	163	23.1						
<i>Evadne tergestina</i>									247	21.3	599	63.2	36	10.8
Others	206	13.0	162	17.3	201	20.8	247	35.0	484	41.7	189	19.9	90	27.2
Total	15,831		934		966		706		1,161		948		331	

동물플랑크톤 분포와 환경요인의 상관성

2007년과 2008년의 주요 우점 분류군을 대상으로 정준 대응분석(CCA)을 실시하였다. 7월을 제외한 전 조사기간에 동물플랑크톤에 대한 환경요인의 상관성은 제 1축과 2축에서 0.80 이상이였다(Table 3). 동물플랑크톤 분포에 영향을 주는 환경요인은 조사시기에 따라 서로 달랐으며, 4개의 환경요인(수온, 염분, 엽록소-a, COD)이 동물플랑크톤 분포의 90% 이상을 설명하였다(Table 4). 채집시기를 기준으로 채집정점들과 환경요인과의 상관성을 살펴보면 3월에는 2007년과 2008년의 정점들이 서로 다르게 구분되었으며, 방조제 내측과 외측은 구분되지 않았다(Table 4; Fig. 5). 2007년에는 염분이, 2008년에는 수온과 COD의 영향이 컸다. 이 중에서 수온, 염분, COD만이 유의하였다. 5월에는 2007년과 2008년 정점들이 서로 구분되어 3월과 유사한 패턴을 보였으며, 수온, 염분, 엽록소-a, COD

와 유의적인 상관성($p < 0.05$)을 보였다(Table 4; Fig. 5). 7월에는 2007년 방조제 내측과 외측 그리고 2008년 방조제 내측과 외측 각각 4개 그룹으로 구분되었다. 2007년과 2008년 방조제 내측의 정점들은 수온, 엽록소-a, COD와 상관성이 크며, 2007년 방조제 외측의 정점들은 염분과 상관성이 높았다. 하지만, COD만이 통계적으로 유의하였다(Table 4; Fig. 5). 10월에는 2007년 방조제 내측과 외측, 2008년 방조제 내측이 각각 서로 다르게 구분되어 7월과 유사하였다. 2007년 방조제 외측은 염분, 2008년 방조제 내측(201, 202정점 제외)은 수온이 유의한 상관관계를 보였다. 그러나, 2007년 방조제 내측은 엽록소-a, COD와 통계적으로 유의하지 않았다.

정준대응분석의 결과를 통해 3월과 5월은 2개의 그룹으로 구분하였지만, 원점으로부터 정점간의 거리가 짧아 크게 하나로 묶어 2007년과 2008년의 동물플랑크톤 종조성

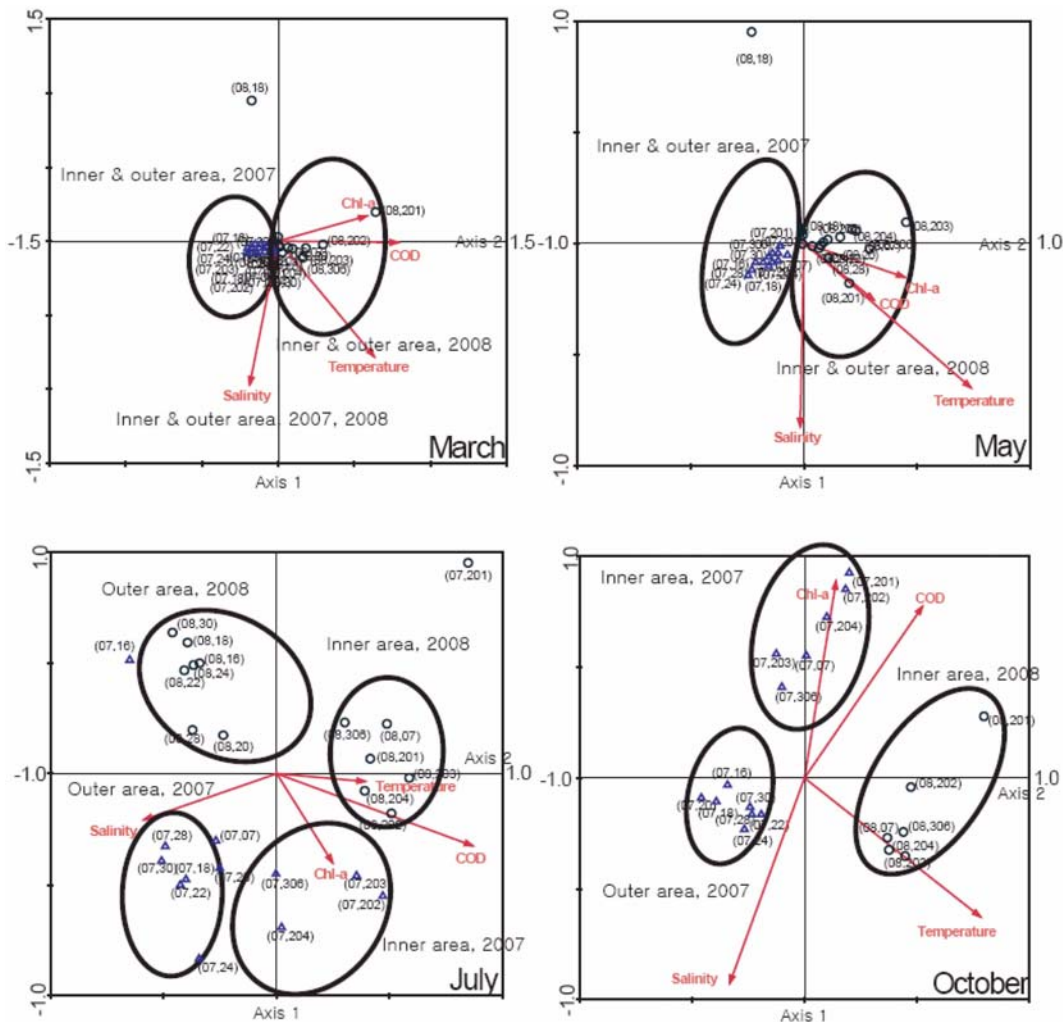


Fig. 5. Canonical Correspondence Analysis (CCA) ordination diagrams of stations in relation to environmental variables (temperature, salinity, COD and Chlorophyll-a) for zooplankton abundance data sampled over the Saemangeum area from March 2007 to October 2008. Arabic numbers in parenthesis indicate year and station.

Table 3. Summary of Canonical Correspondence Analysis (CCA) for zooplankton abundance data over the Saemangeum areas from March 2007 to October 2008

	March		May		July		October	
	AX1	AX2	AX1	AX2	AX1	AX2	AX1	AX2
Eigenvalue	0.233	0.031	0.080	0.023	0.049	0.017	0.193	0.070
Species-env. correlations	0.932	0.799	0.900	0.850	0.800	0.543	0.936	0.853
Cumulative percentage								
of species data	47.6	53.9	40.3	51.7	17.9	23.9	41.2	56.2
of species-environment relation	82.2	93.0	70.3	90.2	65.7	87.9	69.7	94.9
Sum of all eigenvalue	0.489		0.199		0.273		0.467	
Sum of all canonical eigenvalue	0.283		0.114		0.074		0.276	

Table 4. Forward selection of environmental variables for Canonical Correspondence Analysis (CCA) (Monte Carlo permutation tests with 999 unrestricted permutations, $p < 0.05$). The variables are listed by the order of their inclusion in the forward-selection

Environmental variable	March			May			July			October		
	p-value	Explained		p-value	Explained		p-value	Explained		p-value	Explained	
		Inertia	%		Inertia	%		Inertia	%		Inertia	%
Temperature	<0.05	0.05	13	<0.01	0.05	45.5	0.14	0.02	28.6	<0.01	0.14	50
Salinity	<0.01	0.09	24	<0.01	0.03	27.2	0.19	0.01	14.3	<0.01	0.12	42.9
Chlorophyll- <i>a</i>	0.43	0.01	0.03	<0.05	0	0	0.53	0	0	0.69	0.01	3.6
COD	<0.01	0.21	55	<0.01	0.03	27.2	<0.01	0.04	57.1	0.56	0.01	3.6
Total		0.38			0.11			0.07			0.28	

이 유사하며, 다른 7월과 10월에는 조사시기에 따라 방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤이 종조성이 서로 다른 것으로 나타났다.

4. 토 의

연구기간 동안 새만금 해역의 방조제 내측과 외측에 분포하는 동물플랑크톤은 대체로 내측과 외측 모두 연안성 요각류 *Acartia hongii*, *Paracalanus parvus* s.l., *Calanus sinicus*, *Centropages abdominalis* 등이 주요 우점분류군이었으며, 기수성 요각류의 출현은 매우 미미하였다. 새만금 방조제 건설 전에는 기수종 *Acartia hudsonica*와 *Pseudodiaptomus inopinus* 두 종이 만경강과 동진강 하구역에서 시·공간적으로 넓게 분포하였고, 만경강과 동진강 하구에서 신시도로 가면서 기수종의 조성률이 감소하고, 연안종의 조성률이 증가하였다(서 등 1991). 또한, 새만금 방조제 공사 이후 방조제가 완전히 막히기 이전에는 방조제 내측에서 기수성 요각류 *Tortanus derjugini*와 *P. inopinus*가 채집시기에 따라 다소 차이는 있었지만, 방조제 내측에서 넓게 분포하였고 방조제 외측에서는 연안성 요각류가 우점하였다(유 등 2006). 따라서, 과거 결과와 본 연구결과를 비교해 보면 새만금 해역의 동물플랑크톤 군집분포는 방조제 건설 전과 후의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 2007년 7월 채집당시 집중호우의 영향으로 방조제 내측에서 낮은 염분(6-28 psu)을 기록하여 *P. inopinus*와 *A. hudsonica*의 출현을 기대하였지만, 매우 적은 개체수($<1 \text{ ind.m}^{-3}$)만 확인되었다. 이것은 집중호우로 인해 방조제 내측에서 저염분 범위가 확장됨에 따라 기수성 요각류의 분포범위가 확대될 것으로 예측할 수 있지만, 빠른 염분저하에 생리적으로 적응하지 못한 동물플랑크톤이 사망하여 소멸되는 것으로 추정해 볼 수 있다. 동물플랑크톤 분류군은 염분에 대한 내성한계가 크기 때문에 방조제 내측에서도 동물플랑크톤들이 일정 개체수를 유지할 것으로 보이지만, 담수유입으로 인한 순간적인 염분감소(salinity shock)가 전체 요각류 개체수의 30%를 사망시키기도 하며, 포식자에 의한 사망보다 염분감소로 인해 사망이 크다는 보고도 있다(Cervetto et al. 1999; Tang et al. 2006). 또한, 순간적인 염분감소는 요각류의 사망률 뿐만 아니라 섭식률에도 심각한 영향을 주기 때문에 염분의 영향이 새만금 방조제 내측에서 기수성 요각류의 분포에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다(Soetaert and Herman 1994; Calliari et al. 2008).

본 연구에서 방조제 끝물막이 공사가 끝난 이후 동물플랑크톤 군집구조는 3월과 5월처럼 방조제 내측과 외측이 유사한 그룹으로 구분되거나, 7월과 10월처럼 서로 다른 그룹으로 구분되었다(Fig. 3, 4). 특히, 3월의 경우, 2008년

에 대량출현한 *A. hudsonica*가 포함되었음에도 불구하고, 방조제 내측과 외측이 동물플랑크톤 군집의 차이가 크지 않았다. 3월과 5월의 결과는 끝물막이 완공 이전 유 등 (2006)의 결과와 유사하였다. 끝물막이 공사로 인해 새만금 해역은 방조제 내측과 외측의 자연적인 해수유통이 완전히 단절되어 방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤의 군집구조가 전혀 다를 것으로 예상하였지만, 채집시기에 따라 그 결과가 달랐다. 이같은 결과를 통해 끝물막이 공사 이후 새만금 해역의 동물플랑크톤 군집변화는 환경 변화와 관련하여 다음과 같은 시나리오가 가능하다. 방조제의 수문개방에 따라 방조제 외측의 해수가 내측으로 상당량 유입되었다면, 동물플랑크톤의 종조성은 내측과 외측의 차이가 크지 않을 것이다. 그러나 수문폐쇄에 따라 일정기간 내측과 외측환경이 서로 격리되었다면 내측과 외측간의 동물플랑크톤의 종조성은 차이가 있을 것이다. 본 조사에서 새만금 방조제 내측의 동물플랑크톤 분포는 만경강과 동진강으로부터 유입되는 상당량의 담수 영향에도 불구하고 2008년 3월의 기수종 *A. hudsonica*를 제외하면 담수종 혹은 기수종의 분포는 매우 적었으며, 조사기간 내내 연안종이 우점하였다는 것과 2007년 7월 만경강 입구에 있는 정점 201에서 염분 5.5 psu를 기록하였지만, 연안종인 *P. parvus* s.l.와 *A. hongii*가 최우점종으로 출현하였다는 것은 새만금 해역의 동물플랑크톤 분포는 인위적인 방조제의 수문개폐로 인한 해수의 유입량에 따라 결정될 수 있다는 것을 뒷받침해준다(서 2008).

연구해역의 동물플랑크톤 군집 분포는 환경요인인 수온, 염분, COD와 밀접한 관계를 보였다(Table 3, 4; Fig. 5). *P. parvus* s.l.는 분포 중심이 넓은 수온 및 염분범위에 있었으며, *A. hongii*는 저온 고염에 위치하였다(Fig. 6). *C. sinicus*는 고염에서, *P. marinus*는 고온저염에서 분포중심이 있었다. 그리고, 다른 동물플랑크톤에 비해 *A. hongii*와 *P. parvus* s.l.는 상대적으로 높은 COD에서 분포중심이 있었다(Fig. 7). 특히, *Acartia* 개체군은 COD와 높은 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있다(Ueda 1986; 강 등 1996; Uriarte and Villate 2005; 유 등 2006). 그러나 *A. hongii*는 유기물 유입에 따라 좋은 조건이 유지되어 일시적으로 개체군이 증가할 수도 있지만, 염분변화에 따라 개체군의 크기가 감소할 수도 있을 것이다. 따라서, 방조제 수문개방에 따라 내측으로 유입된 연안성 동물플랑크톤들 중 *A. hongii*는 수문을 막을 경우 방조제 내측의 담수유입에 의한 염분감소로 개체수가 감소할 것으로 예상되며, *P. parvus* s.l.는 상대적으로 넓은 염분범위에 적응해 살기 때문에 내측의 높은 먹이농도의 영향으로 높은 개체수를 유지할 것으로 추정된다.

새만금 방조제가 2006년에 완공된 이후 방조제의 영향으로 내측에서는 조석운동이 소멸되고, 외측에서는 조류

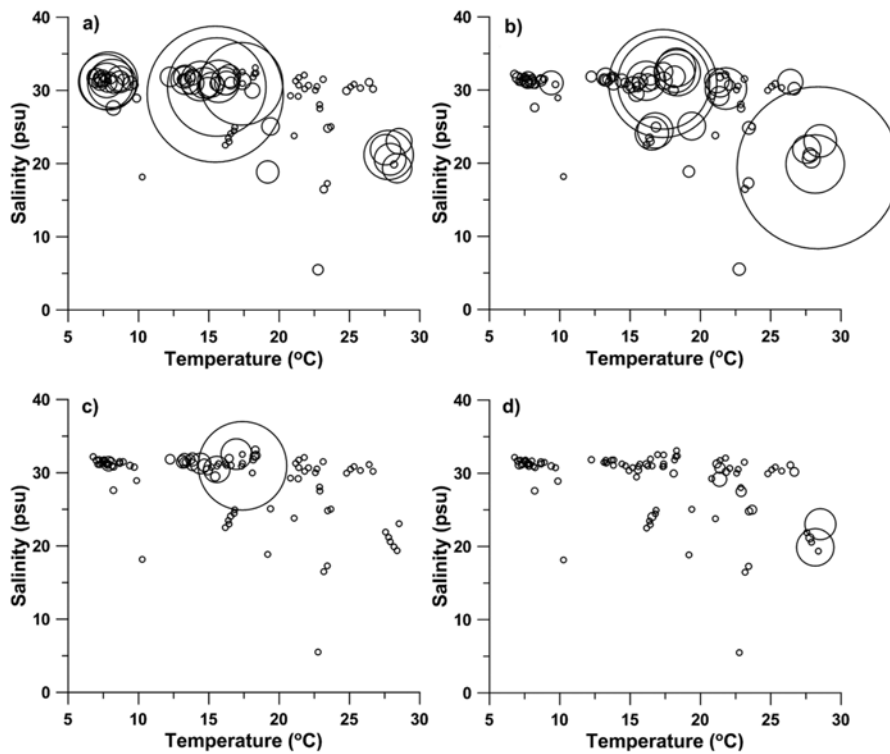


Fig. 6. Distribution of zooplankton abundance in relation to temperature and salinity in the Saemangeum area from March 2007 to October 2008 (a: *Acartia hongii*, b: *Paracalanus parvus* s.l., c: *Calanus sinicus*, d: *Pseudodiaptomus marinus*).

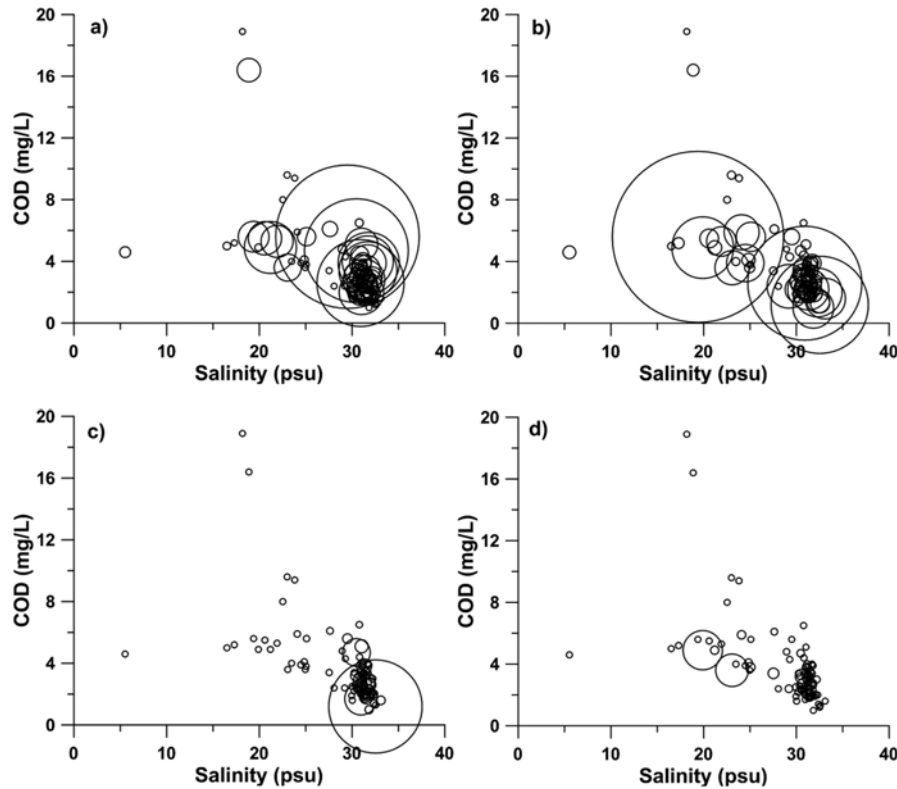


Fig. 7. Distribution of zooplankton abundance in relation to salinity and COD in the Saemangeum area from March 2007 to October 2008 (a: *Acartia hongii*, b: *Paracalanus parvus* s.l., c: *Calanus sinicus*, d: *Pseudodiaptomus marinus*).

가 급속히 약화되었다(Lee et al. 2008). 물리적인 해류패턴의 변화로 새만금 방조제 주변에서 해저지형 및 퇴적상의 변화가 확인되었다(이 등 2006, 2008). 새만금 해역의 동물플랑크톤 군집은 2008년 3월 기수성 요각류 *Acartia hudsonica*가 대량 출현한 것을 제외하면, 방조제 내측에서 기수성 요각류의 큰 감소, 방조제 내측과 외측 모두 연안성 동물플랑크톤의 우점, 배수갑문의 운영과 관련한 조사 시기에 따라 방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤 종조성의 차이가 있었다는 점에서 끝물막이 공사 완공 이전과 이후에 차이가 있었다. 새만금 해역의 동물플랑크톤의 군집 구조는 배수갑문을 통한 해수유통의 영향이 클 것으로 판단된다.

5. 결 론

2006년 4월 새만금 방조제의 끝물막이 공사가 완료된 이후, 새만금 해역의 해양환경은 방조제를 중심으로 내측과 외측이 서로 구분되었으며, 단지 두 개의 배수갑문을 통한 제한적인 해수교환이 이루어지고 있다. 새만금 해역의 동물플랑크톤 분포는 방조제 내측과 외측 모두 연안성 동물플랑크톤이 우점하였다. 방조제 내측에서는 만경강으로부터 유입되는 담수의 영향으로 낮은 염분특성을 보이고 있음에도 불구하고, 2008년 3월 방조제 내측에서 출현한 기수성 요각류 *Acartia hudsonica*의 경우를 제외하면, 기수종의 출현량은 매우 미미하였다. 동물플랑크톤의 최대 개체수 출현시기는 방조제 내측과 외측이 서로 달랐으며, 외측에 비해 내측에서 정점간 변동폭이 매우 컸고, 방조제 내측과 외측의 동물플랑크톤 종조성의 차이는 명확하게 구분되지 않았다. 따라서, 새만금 해역의 방조제 내측에서 분포하는 동물플랑크톤의 군집 변동은 배수갑문 운영에 따른 해수유통의 영향이 큰 것으로 추정할 수 있다. 그리고 채집시기에 따라 차이는 있지만, 수온, 염분, COD가 동물플랑크톤 분포에 영향을 미치는 중요 환경요인으로 확인되었다.

사 사

본 연구는 국토해양부의 “새만금 해양환경보전 대책을 위한 조사연구(PM54892)” 사업비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

강영실, 박주석, 이삼석, 김학균, 이필용 (1996) 진해만 수질 환경과 동물플랑크톤 군집 및 요각류 특성. 한국수산학회지 29(4):415-430

- 김영길, 박종우, 장건강, 이원호 (2009) 새만금 방조제 완공 이전 만경강 하구역 식물플랑크톤 군집의 주기적인 변동. Ocean and Polar Res 31(1):63-70
- 구분주 (2008) 새만금 4호 방조제 연결 후 군산갯벌 대형저서동물 변화. Ocean and Polar Res 30(4):497-507
- 국토해양부 (2009) 새만금 해양환경보존대책을 위한 조사연구-2008년도 요약보고서. 한국해양연구원 282 p
- 박철, 이두별, 이창래, 양성렬, 정병관 (2008) 아산만 해역 동-춘계 대증식기의 플랑크톤 변화. 한국해양학회지 「바다」 13(4):308-319
- 서민호 (2008) 영산강 하구 댐 개폐에 의한 동물플랑크톤의 군집 특성. 이학석사 학위논문, 전남대학교, 53 p
- 서해립, 서호영, 차성식 (1991) 만경 동진강 하구계의 동물플랑크톤의 분포와 염분. 한국해양학회지 26(3):181-192
- 안순모, 이재학, 우한준, 구분주, 이형근, 유재원, 제종길 (2006) 새만금 방조제 공사로 인한 조하대환경과 저서동물 군집변화. Ocean and Polar Res 28(4):369-383
- 유정규, 정정호, 남은정, 정경미, 이순우, 명철수 (2006) 새만금 수질 환경과 동물플랑크톤 군집 분포: 방조제 건설에 따른 군집 변화. Ocean and Polar Res 28(3):305-315
- 이희준, 조형래, 김민지 (2006) 새만금 방조제 축조에 따른 지형 및 입도특성의 변화. Ocean and Polar Res 28(3):293-303
- 이희준, 김민지, 김태경 (2008) 고군산군도 내측해역의 현생 퇴적환경. Ocean and Polar Res 30(4):519-536
- 임영훈 (2007) 새만금 방조제 건설에 따른 갯벌 저서환경과 대형저서동물 군집구조의 변동. 이학박사 학위논문, 전남대학교, 440 p
- 정익교, 강영작, 권오섭, 서정관 (2000) 낙동강 하구 해역 식물플랑크톤의 군집동태. 한국조류학회지 15(2):99-110
- 해양수산부 (2007) 새만금 해양환경보존대책을 위한 조사연구-해양수질환경 모니터링분야. 한국해양연구원, BSPM 37901-1842-4, 321 p
- 해양수산부 (2008) 새만금 해양환경보존대책을 위한 조사연구-해양수질환경 모니터링분야. 한국해양연구원, BSPM 43701-1956-4, 250 p
- Atrill MJ (2002) A testable linear model for diversity trends in estuaries. J Animal Ecol 71:262-269
- Bakker C (1994) Zooplankton species composition in the Oosterschelde (SW Netherlands) before, during and after the construction of a storm-surge barrier. Hydrobiologia 282/283:117-126
- Bakker C, Rijswijk P (1994) Zooplankton biomass in the Oosterschelde (SW Netherlands) before, during and after the construction of a storm-surge barrier. Hydrobiologia 282/283:127-143
- Calliari D, Andersen Borg MC, Thor P, Gorokhova E, Tiselius P (2008) Instantaneous salinity reductions affect the survival and feeding rates of the co-occurring

- copepods *Acartia tonsa* Dana and *A. clausi* Giesbrecht differently. *J. Exp Mar Biol Ecol* **362**(1):18-25
- Cervetto G, Gaudy R, Pagano M (1999) Influence of salinity on the distribution of *Acartia tonsa* (Copepoda, Calanoida). *J Exp Mar Biol Ecol* **239**:33-45
- Kimmerer WJ (2002) Distribution patterns of zooplankton in Tomales Bay, California. *Estuaries* **16**(2):264-272
- Laprise R, Dodson JJ (1994) Environmental variability as a factor controlling spatial patterns in distribution and species diversity of zooplankton in the St. Lawrence Estuary. *Mar Ecol Prog Ser* **107**:67-81
- Lee CR, Park C (2002) Long-term variation of zooplankton composition and abundance in Asan Bay, Korea: is it influence of dyke construction? *The Yellow Sea* **8**(1):9-18
- Lee S, Lie HJ, Song KM, Cho CH, Lim EP (2008) Tidal Modification and Its Effect on Sluice-Gate Outflow after Completion of the Saemangeum Dike, South Korea. *J Oceanogr Soc Japan* **64**:763-776
- Marques SC, Azeiteiro UM, Marques JC, Neto JM, Pardal M (2006) Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns. *J Plankton Res* **28**(3):297-312
- Nielsen TG, Andersen CM (2002) Plankton community structure and production along a freshwater-influenced Norwegian fjord system. *Mar Biol* **141**(4):707-724
- Noh JH, Choi DH, Lee S, Kim ES (2008) Impact assessment of phytoplankton distribution after the Saemangeum dyke Enclosure in Korea. In: 2008 Joint symposium on tidal flat issues, University of Nagasaki, Japan, 27-28 November 2008
- Park C, Lee PG, Lee CR (1998) Seasonal variation in abundance, species occurrence and species diversity of zooplankton in Asan Bay, the Yellow Sea over the last eight years. *The Yellow Sea* **4**:40-48
- Park SC, Yoo DG (1997) Bedform distribution and sand transport trend on a subtidal ridge in a microtidal bay, West coast of Korea. *J Kor Soc Oceanogr* **32**(4):181-190
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press 173 p
- Roman MR, Holliday DV, Sanford LP (2001) Temporal and spatial patterns of zooplankton in the Chesapeake Bay turbidity maximum. *Mar Ecol Prog Ser* **213**:215-227
- Soetaert K, Herman PMJ (1994) One foot in the grave: zooplankton drift into the Westerschelde estuary (The Netherlands). *J Exp Mar Biol Ecol* **105**:19-29
- Tang KW, Freund CS, Schweitzer CL (2006) Occurrence of copepod carcasses in the lower Chesapeake Bay and their decomposition by ambient microbes. *Estuar Coast Shelf Sci* **68**:499-508
- ter Braak CJF (1986) Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate gradient analysis. *Ecology* **67**:1167-1179
- ter Braak CJF, Šmilauer P (2002) CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power (Ithaca NY, USA), 500 p
- Ueda H (1986) Taxonomic reexamination and geographic distribution of copepods known as *Acartia clausi* in Japanese coastal and inlet waters. *J Oceanogr Soc Japan* **42**:134-138
- Uriarte I, Villate F (2005) Differences in the abundance and distribution of copepods in two estuaries of the Basque coast (Bay of Biscay) in relation to pollution. *J Plankton Res* **27**(9):863-874
- Uriarte I, Villate F (2006) Spatial variations in size, weight and condition factor of the females of *Acartia clausi* (Copepod: Calanoida) along a salinity gradient in two contrasting estuaries of the Basque coast (Bay of Biscay). *Hydrobiologia* **571**:329-339
- Zhang J (1995) Geochemistry of trace metals from Chinese river/estuary system: An overview. *Estuar Coast Shelf Sci* **41**:631-658

Received Jul. 17, 2009

Revised Nov. 20, 2009

Accepted Dec. 10, 2009