

황해 소난지도 인근해역에서 조류(潮流)에 따른 요각류 개체수의 변화

김 용 서* · 장 민 철¹

한국해양연구원 해양자원연구본부, ¹한국해양연구원 장목분원

Variation in Copepod Abundance Due to Tidal Current Near Sonanjido (Is.) in the Yellow Sea

Woong-Seo Kim* and Min-Cheol Jang¹

Marine Resources Laboratory, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea,

¹Jangmok Marine Station, KORDI, 391, Changmokmyun, Koje-shi, Kyungnam 656-830, Korea

Abstract - Although tidal current affects the distribution of zooplankton significantly, its impacts were usually ignored when the studies on the zooplankton abundance were conducted even in the Yellow Sea where tidal current was very strong. Furthermore, information on the tidal impacts was very limited in the Yellow Sea. In this study, the tidal current effects on the abundances of copepod genera *Acartia*, *Calanopia*, *Calanus*, *Centropages*, *Corycaeus*, *Labidocera*, *Paracalanus*, *Tortanus* in a fixed sampling station near the Sonanjido (Island) were studied. The abundance of copepods collected by the same sampling method was highest when the tidal current was fastest at 2 or 3 hours after the high or low tide.

Key words : zooplankton, copepod, tidal current, Sonanjido Is., the Yellow Sea

서 론

해양환경에서 플랑크톤 분포는 조석이나 바람에 의해 변화할 수 있다(Freire *et al.* 1993). 특히 조류(潮流)가 강한 우리 나라 서해안에서 동물플랑크톤을 채집하였을 때 같은 장소라도 채집 시간에 따라 평균 개체수에 큰 변이가 나타난다(박 1989), 그러나 환경영향평가 등 현장조사를 할 경우 여러 가지 사정으로 인하여 조류를 무시한 동·식물플랑크톤 채집이 보편적으로 수행되고 있는 실정이다. 조류가 동·식물플랑크톤 생태에 미치는

영향에 관해서 비교적 많은 연구결과가 축적되어 있다. 조류는 수층의 수직혼합을 유발하며 식물플랑크톤의 경우 수층이 혼합되면 영양염류가 고갈되기 쉬운 표층으로 심층의 영양염류가 공급되므로 일차생산이 증가하는 양상을 보인다(Demers *et al.* 1986). 조석전선(tidal front) 주변에는 일차생산의 증가로 엽록소 농도가 최대 값이 되는 층이 형성되기도 한다(Parsons *et al.* 1983; 최 1991). 조석전선은 식물플랑크톤의 분포 및 종조성에도 영향을 미친다. 조석전선 주변에 분포하는 식물플랑크톤 군집의 일반적인 특징을 살펴보면 수층이 잘 혼합되는 곳에서는 규조류가 번성하며, 조석전선에서는 외편모조류와 작은 규조류가 우점하고, 성층이 형성된 곳에서는 미세 편모조류와 큰 규조류가 번성한다(Pingree *et al.*

*Corresponding author: Woong-Seo Kim, Tel. 031-400-6217, Fax. 031-418-8772, E-mail. wskim@kordi.re.kr

1979; Holligan 1981; Levasseur *et al.* 1984). 이와 같은 식물플랑크톤의 개체수와 종조성의 변화는 초식성 동물플랑크톤의 섭식률, 성장률, 산란율 등에 영향을 미쳐 장기적으로 동물플랑크톤 군집동태에도 영향을 미칠 수 있다(Peterson 1986). 조류나 바람에 의한 난류(亂流)는 포식자가 먹이생물과 만날 수 있는 확률에 영향을 미치므로 치자어를 포함한 부유생물의 영양역학관계에도 중요한 역할을 한다(Rothschild and Osborn 1988; MacKenzie and Leggett 1991). 조류는 식물플랑크톤의 분포뿐만 아니라 어느 정도의 운동능력이 있는 동물플랑크톤의 분포에도 많은 영향을 미친다. 캐나다의 St. Margaret's Bay에서 수행된 기존 연구결과는 동물플랑크톤의 변화가 조류 변화와 밀접한 관계가 있음을 보여주었다(Sameoto 1975). 따라서 환경영향평가와 같이 동물플랑크톤의 분포와 환경과의 관계를 다루는 조사시 조류의 영향에 따른 동물플랑크톤 개체수 변화 양상의 파악은 필수적이라 하겠다. 이 연구에서는 조류가 강한 해역에서 환경영향평가에서 흔히 수행되는 동물플랑크톤 채집방법을 사용하였을 때 고정 정점에서 채집 시간에 따라 동물플랑크톤의 개체수가 어떻게 영향을 받는 지 확인하기 위하여, 강한 조류의 영향을 받는 서해안

대호방조제 앞 소난지도 인근해역의 고정된 정점에서 시간에 따른 동물플랑크톤 개체수 변화를 조사하였다.

재료 및 방법

동물플랑크톤 채집은 1996년 10월 2일과 3일, 12월 9일 세 차례에 걸쳐 대호방조제 앞 소난지도 인근에 위치한 조사정점에서 실시되었다(Fig. 1). 동물플랑크톤 채집량의 주야에 따른 차이(Park 1990; Park *et al.* 1991; 서와 유 1996)를 고려하여 채집은 주간에만 실시되었다. 10월 2일에는 만조시인 오전 8시부터 간조시인 오후 2시까지 1시간 간격으로 동물플랑크톤을 채집하였고 10월 3일에는 오전 9시부터 오후 3시까지 역시 1시간 간격으로 채집하였다. 동물플랑크톤 채집에는 직경 60 cm, 망목 335 μm 인 네트가 사용되었다. 소난지도 인근 조사정점의 수심은 5m 미만으로 매우 낮아, 표층에서 약 2 노트의 속도로 조사정점 주변 반경 5m를 5분간 선회하며 네트를 예망하여 동물플랑크톤을 채집하였다. 채집된 동물플랑크톤은 현장에서 5% 중성포르말린으로 고정되어 해부현미경하에서 동정 및 계수 되었으며 네트에 부착한 유량계에 의해 여과된 해수의 양을 기준으로 단위

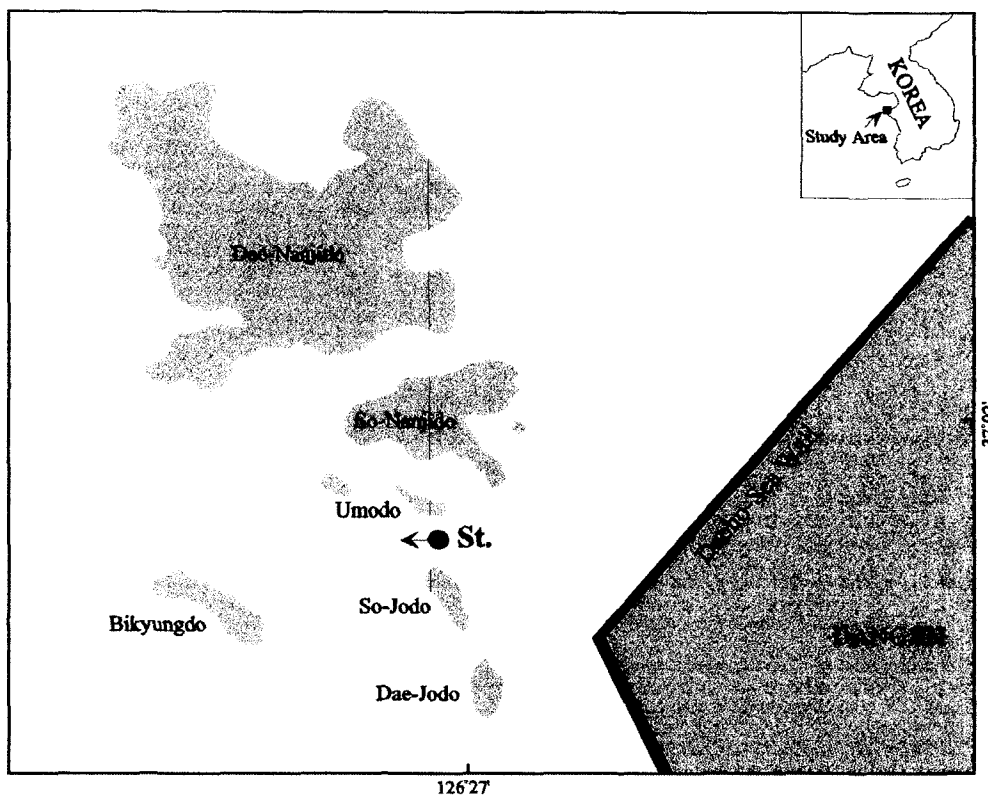


Fig. 1. Sampling station of the study area.

체적당 개체수(개체수/m³)로 환산되었다. 고정된 시료는 동물플랑크톤 개체수 측정시 계수오차를 파악하기 위해 실험실로 운반되어 반복 계수 되었다. 황해 연안역에서는 반복 채집이 필요하다는 의견이 제기되었으나(박 1989), 본 연구의 목적이 환경영향평가에서 흔히 수행되는 방법을 사용하였을 경우 시간에 따른 개체수 변이를 파악하는 것이므로 시간별로 일회채집만 하였다. 조사정점의 환경 자료를 얻기 위해 CTD를 이용하여 수온과 염분을 측정하였고 조류의 유속은 국립해양조사원에서 작성한 조석표를 기준으로 계산하였다. 계절별 변화를 고려하여 동계(12월 9일)에 다시 동물플랑크톤을 채집하였으며, 10월 채집시 낙조류였던 것을 고려하여 12월에는 창조류 때 채집을 하여 추계(10월)의 결과와 비교하였다. 10월 중 조사시기의 고조와 저조 때 조고 및 시각은 Table 1에 표시하였다.

Table 1. Time and height of the high and low tides of the sampling days

	High Tide		Low Tide	
	Time	Height (cm)	Time	Height (cm)
Oct. 2	07:53	809	14:06	88
Oct. 3	08:27	755	14:39	144
Dec. 9	16:05	828	09:47	72

결 과

조사해역의 요각류

조사해역에서 채집한 동물플랑크톤 중에서 가장 우점하는 분류군은 대부분의 해역과 마찬가지로 요각류였다. 논문의 목적이 조류에 따른 요각류의 개체수 변화를 파악하는 것이었기 때문에 조사정점에서 채집된 요각류를 종 수준까지 동정하지 않았고 속(genus) 수준까지 동정하였다. 10월에는 *Paracalanus*, *Labidocera*, *Centropages*, *Corycaeus*, *Tortanus*, *Calanopia*, *Acartia*가 우점하는 요각류의 속이었고 12월에는 *Calanus*, *Paracalanus*, *Labidocera*, *Acartia*가 우점하는 요각류의 속이었다. 요각류의 종조성은 명 등(1994)이 인근 아산만에서 추계(10월)에 보고한 *Paracalanus parvus*, *Acartia bifilosa*, *Corycaeus affinis*, *Tortanus derjugini*, *Tortanus forcipatus*, *Tortanus spinicaudatus*, *Labidocera bipinnata*, *Labidocera euchaeta*, 동계(1월)에 보고한 우점종 *A. bifilosa*, *P. parvus*, *C. affinis*, *Calanus sinicus*, *L. euchaeta*와 큰 차이가 없었다. 한편 인근의 인천항에서 조사한 요각류의 종조성과도 큰 차이가 없었다(Kim

and Lee 1994). 이들 요각류의 개체수도 추계에 최대 201개체/m³, 동계에 최대 172개체/m³로, 본 조사에서 채집된 추계(10월)의 최대 388개체/m³, 동계(12월)의 최대 216개체/m³와 큰 차이가 없었다.

조석에 따른 요각류 개체수 변화

10월 2일과 10월 3일 낙조류시 요각류의 개체수 변화의 폭은 크게 나타났다. 10월 2일의 경우 시간에 따른 전체 요각류의 개체수 범위는 203~449 개체 m⁻³로 시간에 따라 약 2.2배의 변동을 보여주고 있다(Fig. 2). 시간에 따른 변화양상은 조류가 약한 고조(08시)시에 가장 낮은 개체수를 보였으며 시간에 따라 요각류의 개체수가 증가하는 양상을 나타내어 고조 2시간 후(10시)에 가장 높은 개체수를 보였다. 이후 저조로 갈수록 요각류의 개체수는 다시 감소하는 양상을 나타내었다. *Paracalanus*는 전체 출현 요각류 개체수의 59.3~77.6%를 차지하였으며, *Corycaeus*는 7.6~14.2%를 차지하는 우점 속이었다. 요각류 가운데 우점하였던 *Paracalanus*와 *Corycaeus*의 시간에 따른 개체수 범위는 각각 122~346개체 m⁻³와 22~44개체 m⁻³로 시간에 따른 전체 요각류 개체수의 변동은 주로 이들에 변화에 의해 결정되었다. *Labidocera*를 제외한 다른 모든 요각류의 경우 고조와 저조시 유속이 느릴 때보다는 유속이 가장 빠른 고조 후 2~3시간 후에 가장 개체수가 많았다.

10월 3일의 경우 전반적으로 요각류 개체수의 변동은 10월 2일과 비슷하였다. 그러나 시간에 따른 요각류의 개체수 범위는 139~489개체 m⁻³로 시간에 따른 변동이 2일에 비해 크게 나타나 약 3.5배의 차이가 났다(Fig. 3). 시간에 따른 변화양상은 2일에 비해 조석주기가 40분 가량 늦어진 것을 감안하여 볼 때, 2일과 같은 변화양상을 보였다. 즉, 고조에서 최소 개체수를 보였으며 고조 2시간 후(11시)에 가장 많은 개체수를 보인 후 저조로 갈수록 감소하는 양상을 보였다. 2일과 같이 요각류 가운데 *Paracalanus*와 *Corycaeus*가 우점하였고 이들의 시간에 따른 개체수 범위는 각각 86~388 개체 m⁻³와 13~39 개체 m⁻³를 나타내었다. 전체 출현 요각류 개체수의 61.9~79.4%를 차지하였던 *Paracalanus*가 시간에 따른 전체 요각류의 변화 양상을 주도하였다.

12월 9일 창조류시 시간에 따른 요각류의 개체수 범위가 176~323 개체 m⁻³로 약 1.8배의 차이가 나 시간에 따른 변동은 10월에 비해 비교적 적은 것으로 나타났다(Fig. 4). 그러나 시간에 따른 변화양상은 10월의 경우와 유사하였다. 저조 2시간 후(13시)까지 비슷한 개체수를 나타내다 저조 3시간 후(14시)에 가장 많은 개체

수를 보였으며, 이 후 고조가 되면서 개체수가 크게 감소하는 양상을 보였다. 전체 요각류 개체수의 26.3~75.6%, 22.6~58.6%를 차지하였던 *Acartia*와 *Paracalanus*의 시간에 따른 개체수 범위는 각각 54~216개체 m^{-3} 와 61~121개체 m^{-3} 이었다. 이 두 종의 시간에 따른 개체수의 변화 양상은 *Paracalanus*의 경우 고조와 저조 근접 시에 많은 개체수를 나타낸 반면에 *Acartia*는 전체 요각류의 변화 양상과 거의 비슷하였다. 특기할 만한 사실은 낙조류 때나 창조류 때 모두 유속이 가장 빠른 고조와 저조의 중간 때 가장 높은 개체수를 보였다는

것이다.

조석에 따른 환경 변화

10월 수온과 염분의 시간에 따른 변화는 2일의 경우 수온은 20.9~21.7°C, 염분은 31.0~31.4 psu의 범위를, 3일의 경우 수온은 21.3~21.6°C, 염분은 31.3~31.6 psu의 범위를 보였다. 10월 2일과 3일 양일간에 걸쳐 조사된 수온과 염분의 변화 폭은 매우 적은 것으로 나타나 수온과 염분의 변화가 요각류의 조석주기에 따른 현존량 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된

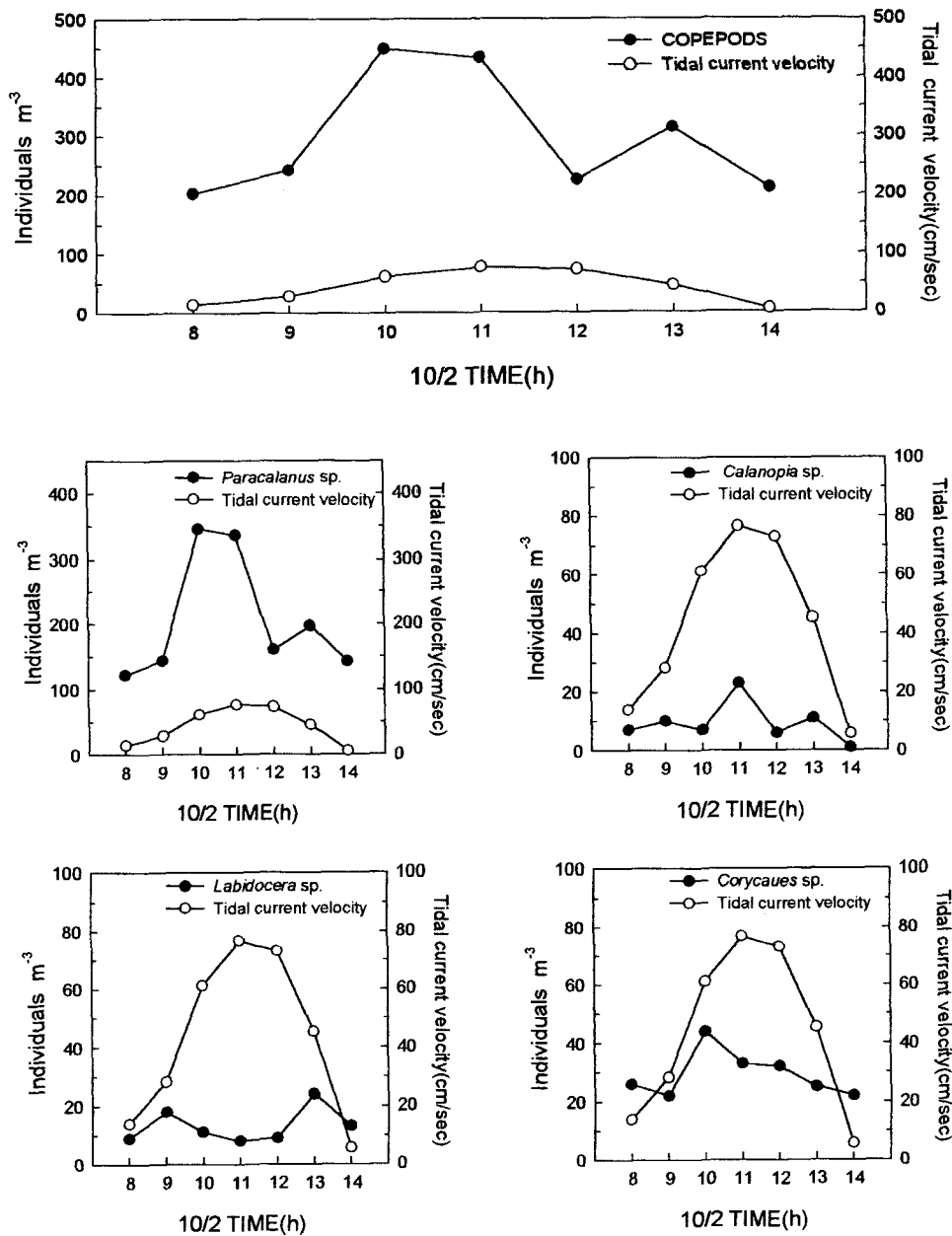


Fig. 2. Changes in the abundance of total and dominant copepods with tidal cycle (October 2, 1996).

다 (한국해양연구소 1996). 용존 산소량은 조석주기에 따라 변화 폭이 심하였으며 일반적으로 저조로 가면서 상승하는 경향이 있었다. 12월 9일에 조사된 수온과 염분의 시간에 따른 변화는 각각 8.0~8.4°C와 31.4~32.2 psu로 나타났다. 12월 9일에도 수온과 염분의 변화 폭은 그다지 크지 않았으나 저조에서 고조로 갈수록 수온이 증가하는 양상을 보였는데 이는 상대적으로 수온이 높은 외해의 물이 유입된 결과로 판단된다. 염분 또한 증가하는 추세를 보여 고조로 가면서 고염분의 물이 유

입됨을 보였다. 용존산소량은 10월과 마찬가지로 변화의 폭이 커서 6.3~9.4 mg l⁻¹이었다. 10월에 저조로 가면서 상승했던 것과 마찬가지로 저조에서 높은 용존산소량을 보였고, 고조로 가면서 감소하는 양상을 나타내었다. 조고(潮高)와 계산된 유속은 Table 2에서 보는 바와 같으며, 조사해역에서 낙조류와 창조류시 조류의 유속은 고조와 저조에서 가장 느렸고 고조와 저조 2~3시간 후에 가장 빨랐다.

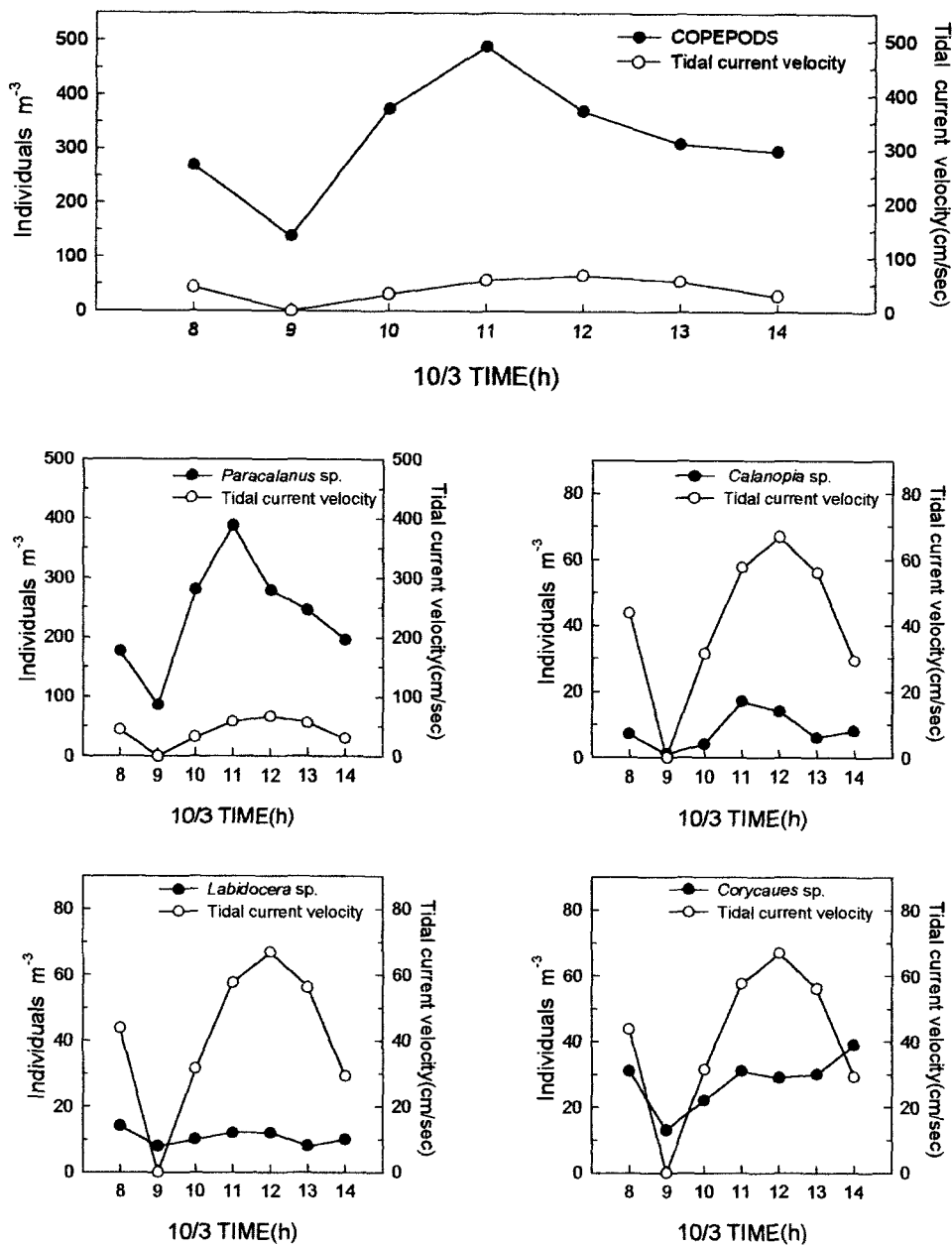


Fig. 3. Changes in the abundance of total and dominant copepods with tidal cycle (October 3, 1996).

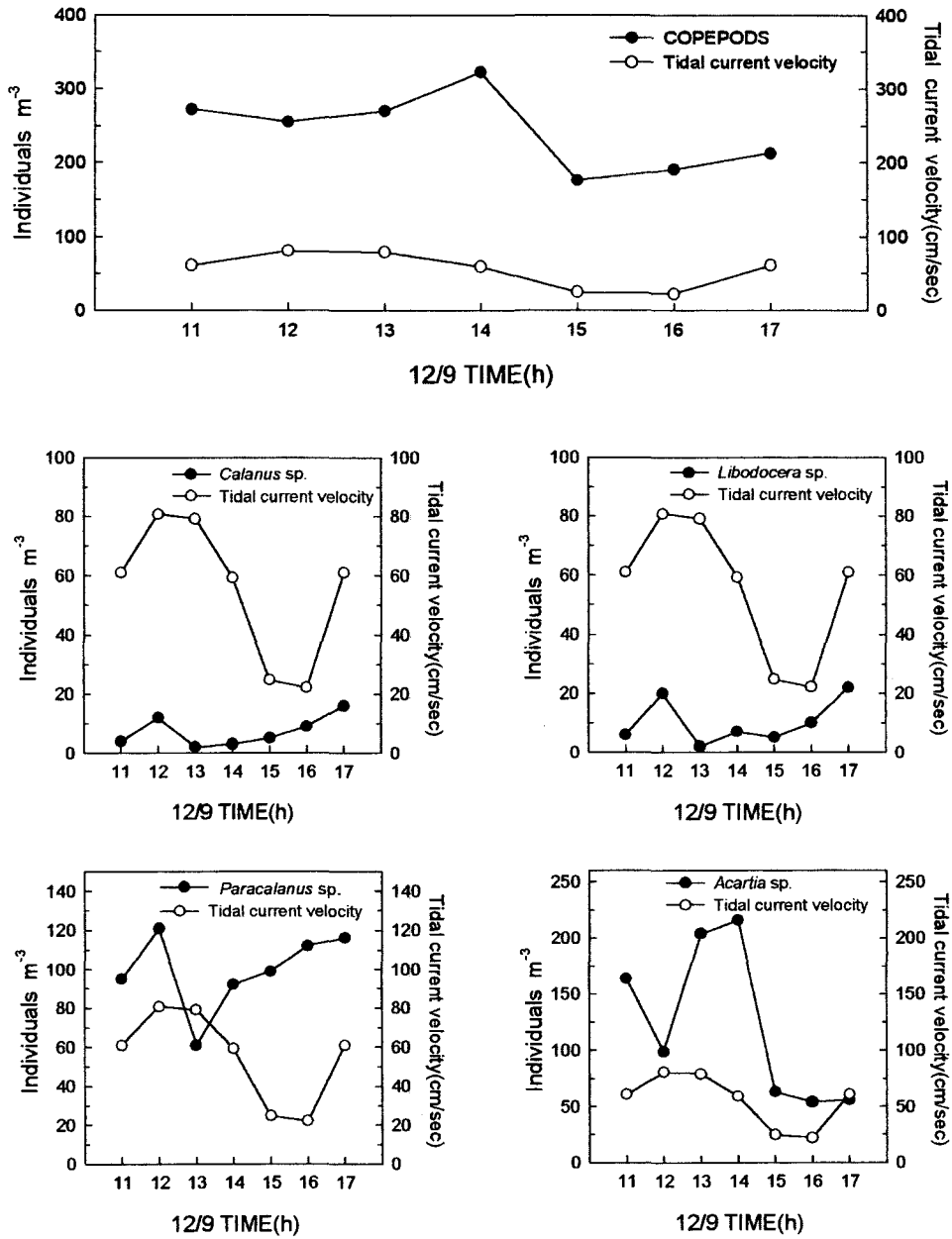


Fig. 4. Changes in the abundance of total and dominant copepods with tidal cycle (December 9, 1996).

고찰

일반적으로 외해에서의 동물플랑크톤 분포는 수괴의 환경 특성에 의해 많은 영향을 받는다. 예를 들어 우리나라의 경우 황해(장과 김 1998)와 남해(Kim et al. 1994)에서 수괴의 환경특성과 동물플랑크톤의 분포에 대한 연구가 있다. 그러나 조석에 의한 영향을 많이 받는 연안에서는 조석주기가 부유생물의 생물량 분포에

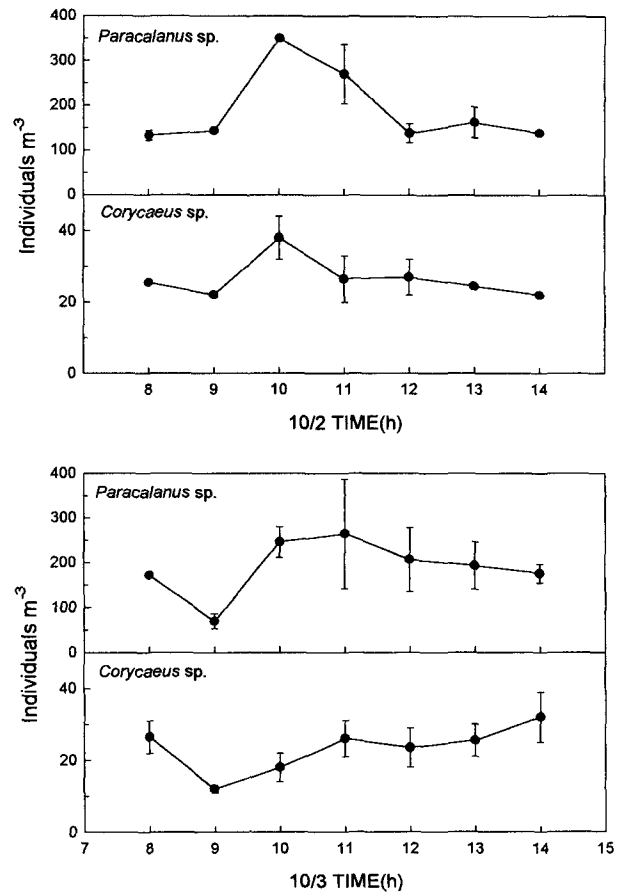
직·간접적인 영향을 미친다. 식물플랑크톤의 경우 조류 등에 의해 수층이 혼합되면 표층으로 공급된 영양염류에 의해 일차생산이 증가하여(Demers et al. 1986) 엽록소 최대농도층이 형성되기도 한다(Parsons et al. 1983). 식물플랑크톤의 생물량 증가는 먹이망을 통해 동물플랑크톤 군집 동태에 영향을 미칠 수 있다(Peterson 1986). 또한 혼합층에 서식하는 동물플랑크톤은 먹이와 만날 확률이 높기 때문에 이들의 섭식률이 증가하는 것이 관찰되었고(Kjørboe and Nielsen 1990), 만약 동물플랑크톤

Table 2. Height of the tide and calculated velocity of tidal current (October 2 and 3, December 9)

Date Time	Height of the tide			Tidal current velocity (cm/sec)		
	10/2	10/3	12/9	10/2	10/3	12/9
08:00	800	750		14.0	43.7	
09:00	748	748		28.3	0	
10:00	621	669		61.2	31.4	
11:00	443	541	132	76.7	57.6	70.0
12:00	266	388	275	73.1	66.9	80.8
13:00	137	248	455	45.3	56.1	79.1
14:00	90	162	635	5.7	29.3	59.3
15:00			770			24.7
16:00			823			22.2
17:00			774			61.0

이 이 수층에 머물러 있다면 이곳의 높은 일차생산력에 의해 성장률이 증가할 것이다. 그러나 조류에 의해 혼합이 된 수층에서 동물플랑크톤의 개체수가 높은 것은 증가한 생산력에 의한 간접적인 것이라기 보다는 조류에 의해 직접 동물플랑크톤이 재배치되어 그렇다는 견해도 있다 (St. John *et al.* 1992). 저서성 요각류의 경우 한 조석 주기동안 개체수의 변화에 큰 차이를 보였고, 발달단계에 따라서도 조석주기에 따른 개체수 변화가 컸다 (Margaret and Brandt 1981). 성체의 개체수는 약 50%가 변화하는 반면 노플리우스 유생의 경우는 60~70%가 변화하여 유생의 변화 폭이 더 컸다. 이와 같은 결과는 같은 종이라도 발달단계에 따라 조류가 분포에 미치는 영향이 다를 수 있음을 보여준다.

먹이망을 통해 장기적으로 동물플랑크톤의 생물량이 변화할 수 있겠으나, 단기적인 관점에서 보면 조류에 의해 동물플랑크톤이 재배치되어 분포에 변화가 일어났다고 생각하는 것이 타당할 것이며, 실제로 동물플랑크톤의 생물량 변화가 조류 변화와 밀접한 관계가 있음을 보여준 결과가 있다 (Sameoto 1975). 조석이 동물플랑크톤 분포에 강한 영향을 미치는 강하구에서는 일정한 정점에서 조석주기에 따라 채집한 동물플랑크톤 개체수의 변동이 지리적으로 상당히 멀리 떨어진 정점이나 또는 같은 정점이라도 계절별 채집처럼 오랜 시간차를 두고 채집한 동물플랑크톤의 개체수 변동보다 더욱 큰 경우가 있다 (Sameoto 1975). 퀘벡의 세인트로렌스 (St. Lawrence) 강 하구에서 수행된 연구 (Gagnon and Lacroix 1982)에서 짧은 시간 간격으로 채집된 단일 동물플랑크톤 시료의 95% 신뢰구간은 평균의 약 25~400%가 된다는 결과가 있다. 따라서 시간 간격을 두고 채집되었거나 다른 정점에서 채집된 시료 사이에 통계학적으로 유의성이 있는 차이가 없는 한, 작은 차이에는 심각하게

**Fig. 5.** Variations in the abundances of copepods by repeated counting. Bar indicates standard deviation.

주의를 기울일 필요가 없다는 의견도 있다.

본 조사의 결과 10월 2일과 3일, 양일에 걸친 조사에서 가장 우점하였던 요각류 (*Paracalanus*) 개체수의 낙조류시 시간에 따른 변화양상은 유속이 느린 고조와 저조 근접시 최소치를 보이고 유속이 빠른 고조 2시간 후에 가장 많은 개체수를 보였다. 그리고 12월 9일 조사에서도 가장 우점하였던 요각류 (*Acartia*)의 창조류시 시간에 따른 변화 양상은 대체로 유속이 느린 고조와 저조 근접시 최소치를 보이고 유속이 빠른 저조 3시간 후에 가장 많은 개체수를 보였다. 이와 같은 결과로 미루어 요각류의 출현 개체수는 조석의 시간에 따른 조류 유속과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

10월 2일과 10월 3일에 각각 우점하였던 *Paracalanus*와 *Corycaeus*의 개체수를 반복 계수하여 본 결과 계수에 의한 오차가 조석주기에 따른 개체수의 변화와 별 차이가 없는 경우도 있었다 (Fig. 5). 이러한 점은 조석주기에 의해 실제로 요각류의 개체수가 변화하더라도 계수 과정에서 통계학적으로 유의성 있는 개체수의 차이

를 파악하지 못 할 수도 있음을 나타낸다. 그렇지만 간조나 만조 시 유속이 최소가 될 때와 유속이 가장 빠를 때는 반복 계수의 값을 분산분석(ANOVA)을 하였을 때 계수된 요각류의 개체수 사이에는 뚜렷한 차이가 있었다($p < 0.001$). 일반적으로 반복 채집을 하였을 경우 요각류 개체수의 변이는 반복 계수를 하였을 때의 변이보다 클 수 있으므로, 조류가 빠른 연안역에서 동물플랑크톤을 채집할 때는 박(1989)이 제안한 반복 채집의 필요성이 대두된다.

동물플랑크톤 군집의 변화는 조류에 의해서 영향을 받지만 남극해처럼 강한 바람이 부는 곳에서는 바람의 방향 역시 큰 영향을 미친다. 실례로 Martel Inlet에서 행한 조사 결과를 보면 북동풍이 불때만 동물플랑크톤 군집이 조류의 영향을 받은 것으로 나타났다(Freire *et al.* 1993). 한 정점에서 각기 다른 시간에 채집된 동물플랑크톤 개체군 밀도의 변이계수(coefficient of variation)는 바다가 잔잔할 때는 15에서 70%까지 변하고, 폭풍이 몰아칠 때는 300%까지 변한다(Cushing 1962). 이는 수층의 물리적 혼합이 동물플랑크톤의 개체수에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 단적으로 보여준다. 이번 조사에서는 10월 채집시에는 바람이 없었고 12월 채집시에는 2~3일 전에 강한 바람이 불었다. 바람에 의한 영향인지 확인할 수는 없으나 바람이 강했던 12월의 요각류 개체수는 10월에 비해 조석주기에 따라 변화가 적은 것으로 나타났다. 이러한 사실은 기존의 Cushing(1962)의 관찰 결과와 반대되는 것이다. 강한 바람이 불고 난 직후 조석주기에 따른 요각류 개체수의 변화가 적은 것이 바람에 의한 혼합작용 때문인지, 기존의 관찰 결과와 상반되는 결과가 어떠한 기작에 의해 일어났는지를 파악하기 위해서는 향후 조사가 필요하다.

적 요

조류는 동물플랑크톤 분포에 다양한 영향을 미치고 있으나 황해처럼 조류가 빠른 곳에서 동물플랑크톤 분포를 조사하는 경우에도 조류의 영향을 무시하고 하는 경우가 많았다. 뿐만 아니라 황해에서 조류의 영향에 따른 동물플랑크톤의 개체수 변화 자료는 많지 않다. 본 연구에서는 강한 조류의 영향을 받는 소난지도 인근해역에서 시간에 따라 동물플랑크톤 가운데 우점하는 *Acartia*, *Calanopia*, *Calanus*, *Centropages*, *Corycaeus*, *Labidocera*, *Paracalanus*, *Tortanus*속에 속하는 요각류의 개체수가 어떻게 변하는지를 조사하였다. 조석 변화에 따른 조류의 유속은 요각류 개체수의 최대 3.5배 차이를 유발하였으며, 대체로 유속이 가장 빠른 저조나 고

조 2~3시간 후 채집된 요각류의 개체수가 증가하는 양상을 보였다.

사 사

이 논문은 한국해양연구소에서 수행된 경기만 해양생태계 연구(BSPK 00019-960-3)의 일부이며, 현장 조사를 도와준 한국해양연구원 이종수 선생님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 명철수, 유재명, 김웅서. 1994. 아산만 해역의 동물플랑크톤 분포. 한국해양학회지. 29(4):366-375.
- 박 철. 1989. 연안역 동물플랑크톤 시료의 변이: 반복 채집 및 시간별 채집의 필요성. 한국해양학회지. 24(4):165-171.
- 서해립, 유옥환. 1996. 영일만 쇄파대에 나타나는 부유성 요각류의 주야 수평운동. 한국수산학회지. 29(4):527-536.
- 장민철, 김웅서. 1998. 1996년 춘계 황해의 동물플랑크톤 분포와 환경특성. Ocean Res. 20(1):19-28.
- 최중기. 1991. 황해 중·동부 연안 수역의 조석전선이 식물플랑크톤 생산력과 분포에 미치는 영향. 한국해양학회지. 26(3):223-241.
- 한국해양연구소. 경기만의 해양생태계 연구. BSPK 00019-960-3.
- Cushing DH. 1962. Patchness. Rapp. P.-v. Reun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer. 153:152-164.
- Demers S, L Legendre and J-C Therriault. 1986. Phytoplankton responses to vertical tidal mixing. pp.1-40. In Tidal Mixing and Plankton Dynamics (Bowman J, M Yentsch and WT Peterson eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Freire AS, MJC Coelho, SLC Bonecker. 1993. Short term spatial-temporal distribution patterns of zooplankton in Admiralty Bay (Antarctica). Polar Biol. 13:433-439.
- Gagnon M and G Lacroix. 1982. The effects of tidal advection and mixing on the statistical dispersion of zooplankton. J. exp. mar. Biol. Ecol. 56:9-22.
- Holligan PM. 1981. Biological implications of fronts on the northwest European continental shelf. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A302:547-562.
- Kim SW and JH Lee. 1994. Seasonal distribution of zooplankton communities in Incheon Dock, an artificially closed marine embayment facing the Yellow Sea, western Korea. J. Korean Soc. Oceanogr. 29(4):376-382.
- Kim W-S, JM Yoo, CS Myung and EK Lee. 1994. Distribution of chaetognaths in the southern sea of Korea in relation to the water masses in fall. pp.203-210. In

- Recent Advances in Marine Science and Technology 94* (Choat OH and N Saxena eds). PACON International and James Cook University of North Queensland.
- Kjørboe T and TG Nielsen. 1990. Effects of wind stress on vertical water column structure, phytoplankton growth and productivity of planktonic copepods. pp.28-40. In *Trophic relationships in the marine environment* (Barnes M and RN Gibson eds.). Proc. 24th Eur. Mar. Biol. Symp. Aberdeen University Press.
- Levasseur M, J-C Therriault and L Legendre. 1984. Hierarchical control of phytoplankton succession by physical factors. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 19:211-222.
- MacKenzie BR and WC Leggett. 1991. Quantifying the contribution of small-scale turbulence to the encounter rates between larval fish and their zooplankton prey: effects of wind and tide. *Mar. Eco. Pro. Ser.* 73:149-160.
- Margaret AP and RR Brandt. 1981. Tidal variation in sediment densities of marine benthic copepods. *Mar. Eco. Pro. Ser.* 4:207-212.
- Park C. 1990. Day-night differences in zooplankton catches in the coastal area of active tidal mixing. *J. Oceanol. Soc. Korea.* 25(3):151-159.
- Park C, K-H Choi and C-H Moon. 1991. Distribution of zooplankton in Asan Bay, Korea with comments on vertical migration. *Bull. Korean Fish. Soc.* 24(6):472-482.
- Parsons TR, RI Perry, ED Nutbrown, W Hsieh and CM Lalli. 1983. Frontal zone analysis at the mouth of Saanich Inlet, British Columbia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40:871-887.
- Peterson WT. 1986. The effects of seasonal variations in stratification on plankton dynamics in Long Island Sound. pp.297-320. In *Tidal Mixing and Plankton Dynamics* (Bowman J, M Yentsch and WT Peterson eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Pingree RD, PM Holligan and GT Mardell. 1979. Phytoplankton growth and cyclonic eddies. *Nature (London).* 278:245-247.
- Rothschild BJ and Osborn TR. 1988. The effects of turbulence on planktonic contact rates. *J. Plankton Res.* 10 (3):465-474.
- Sameoto DD. 1975. Tidal and diurnal effects of zooplankton sample variability in a nearshore marine environment. *J. Fish. Res. Board Can.* 32:347-366.
- St. John MA, PJ Harrison and TR Parsons. 1992. Tidal wake-mixing: localized effects on primary production and zooplankton distributions in the Strait of Georgia, British Columbia. *J. exp. mar. Biol. Ecol.* 164:261-274.

(Received 12 April 2001, accepted 28 May 2001)