

북태평양체제전환 (North Pacific Regime Shifts)과 한반도 주변해역 동물플랑크톤 계절주기 변동 특성

강영실

국립수산과학원 해양생태연구과

Seasonal Variation in Zooplankton Related to North Pacific Regime Shift in Korea Sea

Young-Shil KANG

Marine Ecology Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Gijang-kun, Busan 619-902, Korea

In the seas around the Korean Peninsula, the seasonal cycle of zooplankton related to North Pacific regime shifts was investigated to understand the reaction of the ecosystem to climate change using long-term data on zooplankton biomass (1965-2000) and the abundance of four major zooplankton groups: copepods, amphipods, chaetognaths, and euphausiids (1978-2000). In general, the zooplankton biomass showed a large peak in spring and a small peak in autumn in Korean waters, but there was a slight difference in the peak time depending on the location and the period before and after the North Pacific regime shift. The zooplankton biomass showed conspicuous seasonal peaks in R-III (1990-2000) compared to R-I (1965-1976) and R-II (1977-1988), and the seasonal peak shifted from the autumn in R-II to the spring in R-III. The peak of copepods and euphausiids in abundance was from April to June, while chaetognaths peaked from August to October. We postulate that the time lag between the peaks for copepods and chaetognaths results from the predator-prey relationship. The regime shift in 1989 did not alter the seasonal cycle of the four major zooplankton groups, although it enhanced their production. The seasonal peaks of the four major zooplankton groups did not shift, while the seasonal peaks of the zooplankton biomass did shift. This was not only because the zooplankton biomass included other mesozooplankton groups but also because the abundance of the four major zooplankton groups increased significantly in spring.

Key words: North Pacific regime shift, Climatic change, Zooplankton, Seasonal variation

서론

최근 지구온난화현상에 의한 기후변화 및 엘니뇨, 라니냐 등의 영향으로 해양생태계 내의 물리, 생물학적 변화가 일어나면서, 특히 먹이망 구조에서 하위영양단계에 있는 동·식물플랑크톤에 급격한 변화가 일어나고 있다 (Roemmich and McGowan, 1995; Rebstock, 2001, 2002; Lavaniegos and Ohman, 2003, 2007). 이러한 하위영양단계 생물의 변화는 상위영양단계에 있는 어류와 같은 유용수산자원생물에 영향을 미치게 된다 (Cushing, 1995; Pershing et al., 2005; Alheit et al., 2005). 이와같이 기후변화 등 전 지구적 환경변화에 따른 해양생태계의 변화를 파악하려면 장기적 자료의 분석이 필수적이다. 북태평양의 경우, 최근 100년간에 몇 차례의 대규모적인 기후변화에 따른 체제전환 (Regime shift)이 있었다고 밝혀진 바 있다 (Minobe, 2000, 2002; Minobe and Manuta, 1999). 이러한 체제전환에 따라 북태평양에서는 동·식물플랑크톤 및 어류의 조성 그리고 생산에 커다란 변화가 일어났다. 캘리포니아연안의 경우, 1990년대 중반기에 동물플랑크톤이 급격히 감소하였으

며 최고 약 70%의 감소를 보였다고 한다 (Roemmich and McGowan, 1995). 동해의 경우, 1970년대에는 춘계와 추계에 동물플랑크톤 현존량이 높았다가 1980년대에 낮아지며, 다시 1990년대에 증가하는 양상을 보였다 (Tian et al., 2008). 그러나 최근에는 동물플랑크톤 등의 연간 변동에 대한 장기분석으로 기후변화의 영향을 파악하는 데는 한계가 있으며, 계절적 변동에 대한 고려가 중요하다고 강조되고 있다 (Chiba et al., 2008; Yoo et al., 2008).

한반도 주변해역은 전형적인 온대해역으로 동, 서, 남해 해역에 따라 다소 시기의 차이는 있으나 동·식물플랑크톤의 춘계 및 추계 대번식이 나타나는 것으로 보고된 바 있다 (Choe, 1967, 1969; Kim, 1972). 동물플랑크톤 현존량의 경우, 한반도 주변해역에서는 6월과 10월에 가장 높은 값을 보여 전형적인 온대해역의 특성을 나타내었다 (Kim, 1972; Kang and Lee, 1991). 그러나 해역별로 볼 때 남해는 가을철인 10월에 높은 값을 보인 반면, 동해는 2월과 10월에 다소 높은 값을 보이거나 뚜렷한 대번식 현상을 보이지 않아 해역별로 차이가 있는 것으로 밝혀진 바 있다. 이러한 계절적 변동 양상은 기후체제 전환 (Climatic regime shift)라는 전 지구적 환경변화에 커다란

*Corresponding author: yskang@nfrdi.go.kr

영향을 받은 것으로 판단된다. Rebstock & Kang (2003)은 1965년에서 2000년간 한반도 주변해역 및 동, 서, 남해 해역별 동물플랑크톤현존량의 장기변동과 대변식시기를 보고하였다. 동물플랑크톤 현존량은 1990년대에 접어들면서 지속적으로 증가하는 양상을 보인다고 밝혔으나 이들 연구에서 기후체제전환에 따른 변화에 대하여서는 논의가 이루어지지 않았다. 기후체제전환과 같이 대규모적인 환경변화가 해양생태계에 미치는 영향을 밝히는 것은 궁극적으로 앞으로 일어날 변화를 예측하고 이에 대비할 수 있는 과학적 기반을 조성하는 것으로 매우 중요하다. 특히, 동물플랑크톤과 같은 하위영양 단계 생물의 변화를 안다는 것은 어류와 같은 유용수산생물의 변동을 예측하는 기초 자료를 확보하는 것으로 식량자원의 변동에 적극적으로 대응할 수 있는 기반을 조성한다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 북태평양체제전환에 따른 동물플랑크톤의 계절주기 변동을 밝히고자 하였다.

재료 및 방법

국립수산과학원에서 실시하고 있는 한국근해해양변동조사 (Fig. 1)에서 얻어진 1965-2000년간 동물플랑크톤현존량 및 1978-2000년간 주요 동물플랑크톤그룹인 요각류 (copepods), 모악류 (chaetognaths), 단각류 (amphipods), 유우과우지아류 (euphausiids)의 풍도자료를 사용하였다.

동물플랑크톤은 NORPAC 네트 (망구 0.5 m, 망지 0.33 mm)로 저층 또는 100 m 수심에서 표층까지 수직 채집하였다. 채집된 동물플랑크톤은 선상에서 즉시 5-10% 중성호르말린에 고정하였으며, 동물플랑크톤 중 크기가 3 cm 이상 되는 것은 제외하고 나머지 개체의 습증량을 측정하여 현존량 (mg/m^3)을 구하였다. 주요 4개 동물플랑크톤 그룹은 개체를 계수하여 풍도 (개체수/ m^3)를 구하였다. 또한, 북태평양체제전환에 따른 해역별 변동을 파악하기 위하여 동해 (East Sea), 서해 (West Sea), 남해 (South Sea) 해역별로 자료를 분석하였으며, 한반도 주변해역 전체 (Korea Sea) 즉, 동·서·남해 3개 해역을 합하여 그 변동 특성을 분석하였다.

북태평양체제전환 (North Pacific Regime Shifts)에 따른 변동을 밝히기 위하여 동물플랑크톤현존량은 북태평양체제전환이 발생한 1976/77년과 1989년을 기준으로 하여 1965-76년 (R-I), 1977-89년 (R-II) 그리고 1990-2000년 (R-III)으로 자료를 나누어서 분석하였다. 주요 동물플랑크톤 그룹의 풍도는 1977-89년 (R-II) 그리고 1990-2000년 (R-III)로 나누어 분석하였다.

본 연구에서는 계절적 변동을 통계학적으로 검증하기 위하여 one-way ANOVA-test로 Duncan's multiple comparison test (SPSS version 10.0)를 실시하였다. 또한, 해역별, 시기별 군집의 변동을 밝히기 위하여 SOM (Self-Organizing Map)을 이용하여 집괴분석을 하였다.

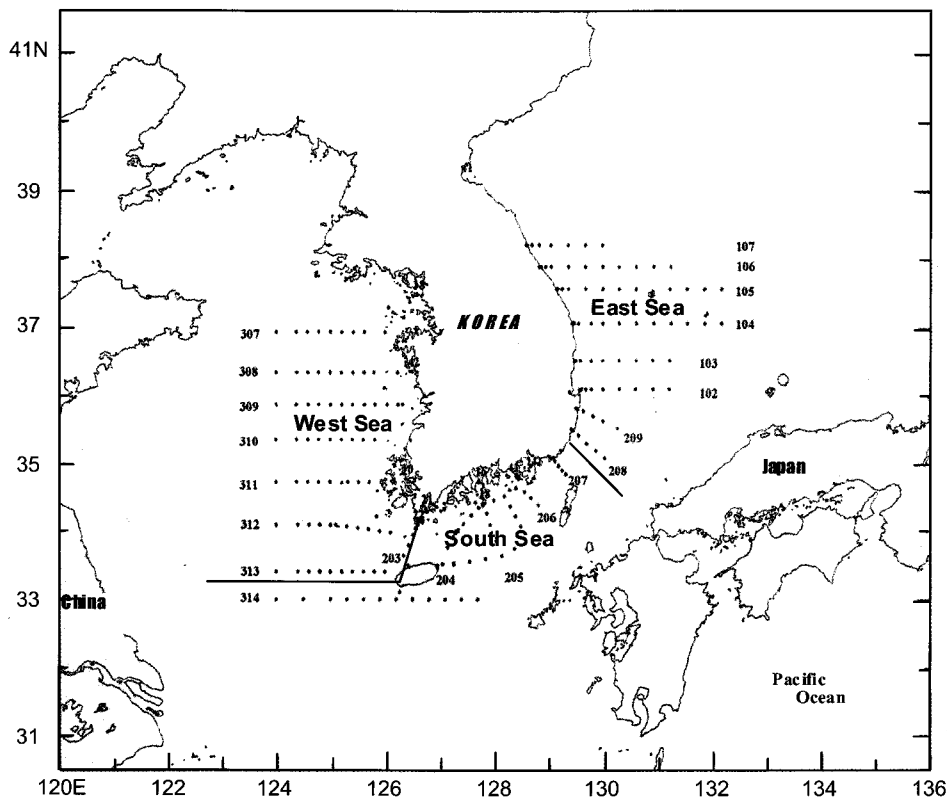


Fig. 1. Map showing the study area and sampling stations.

결 과

북태평양체제전환과 동물플랑크톤 현존량 계절주기 변동 본 연구에서는 1965-2000년간 동물플랑크톤 평균 현존량으로 동, 서, 남해 해역별 변동 특성과 이 3개 해역을 통합하여 한반도 전체 해역의 변동을 비교 분석하였다. 한반도 전 해역의 변동을 보면, 봄인 4월에 평균 153.4 mg/m³로 대규모 피크가 일어나며, 가을인 10월에 평균 125.2 mg/m³로 다시 한번 소규모 피크가 일어나는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 4월의 봄철 대피크는 6월까지 지속되는 것으로 나타나 가을에 비해 봄철 피크가 매우 크며, 지속기간도 긴 것으로 나타났다. 이에 반해 2월과 12월에는 각각 77.2 mg/m³, 74.0 mg/m³의 평균 현존량으로 연 중 가장 낮은 값을 보여 겨울철에 생산성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 계절적 변동은 통계학적으로 유의하였다 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$).

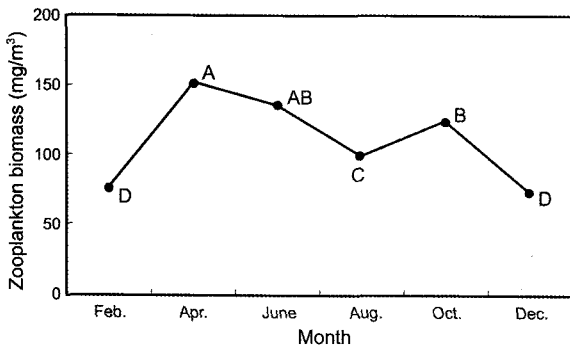


Fig. 2. Seasonal variation in zooplankton biomass in the Korea Sea (combined East, South and West Seas) for 1965-2000. Different English letters written on the graph indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$).

동, 서, 남해 해역별 변동을 보면 (Fig. 3) 동해 (East Sea)의 연평균 현존량은 87.6 mg/m³이며, 남해 (South sea)는 120.8 mg/m³, 서해 (West sea)는 139.4 mg/m³로 서해의 연평균 현존량이 가장 높게 나타났다. 동해의 경우, 연중 1회의 피크가 있으며, 2월에 시작되어 4월까지 지속되었으나 그 값은 각각 106.9, 101.3 mg/m³로 다른 해역에 비해 매우 낮았다 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$, Fig. 3). 또한, 10월에 다시 조금 높은 값을 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 서해에서는 6월에 대규모 피크가 일어났으며 10월에 다시 소규모의 피크가 나타났다. 6월의 평균값은 254.6 mg/m³이며, 10월의 평균값은 177.0 mg/m³이었다 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$). 남해의 경우, 서해와 달리 봄철 피크가 4월에 나타났으며, 10월에 다시 소규모 피크를 보였다 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$). 4월의 값은 267.0 mg/m³로 서해와 유사한 값을 보이며, 10월에는 122.6 mg/m³으로 서해에 비해 조금 낮았다. 남해와 서해의 경우, 봄철 피크시기에 있어 차이가 있었으나 봄과 가을에 피크가 나타나 전형적인

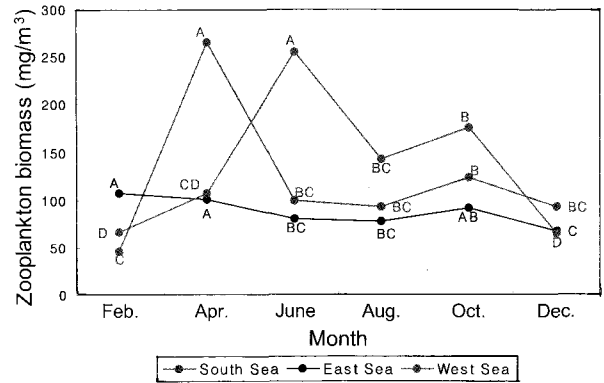


Fig. 3. Seasonal variations in zooplankton biomass in each sea for 1965-2000. Different English letters written on the graph indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$).

온대 해역의 특성을 나타내었다. 그러나 동해는 매우 다른 계절주기를 보이며, 계절별 평균값도 타 해역에 비해 매우 낮게 나타났다.

북태평양체제전환 (North Pacific Regime Shifts)에 따른 한반도 주변해역 동물플랑크톤 현존량의 계절주기 변동을 보면 (Fig. 4a), 1965-76년 (R-I)에는 2월에 평균 85.3 mg/m³으로 다소 높은 값을 보였으며, 1977-89년 (R-II)에는 가을인 10월에 평균 89.7 mg/m³으로 소규모 피크가 있었다 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$). 이에 반해 1990-2000년 (R-III)에는 4월과 10월에 뚜렷한 피크가 나타났다. 4월에는 평균 284.7 mg/m³로 대규모 피크였으며, 10월에는 평균 192.6 mg/m³으로 소규모 피크가 나타났다. 6월 평균값은 231.8 mg/m³로 4월의 피크가 지속되는 경향을 보였다.

북태평양체제전환을 전후로 한 각 해역별 계절주기를 보면, 동해의 경우 (Fig. 4b), R-II에는 계절주기가 나타나지 않았으나 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$), R-I과 R-III에서는 피크가 겨울인 2월에 나타났다. 특히, R-III에는 4월까지 높은 평균값을 보였으며, 10월에 다시 한번 다소 높은 값을 보였으나 통계학적으로 유의하지는 않았다. 남해에서는 R-I 시기에는 봄인 4월과 8-10월에 피크가 있었으나 그 평균값은 83.7-88.3 mg/m³로 높지 않았다 (Fig. 4c; Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$). R-II 시기에는 가을인 10월에 한번의 피크가 있었으며, R-III 시기에는 4월에 대규모 피크가 있었으며 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$), 10월에 다시 한번 동물플랑크톤 현존량이 증가하는 양상을 보였다. 서해의 경우 (Fig. 4d), R-I 시기에는 8월에 피크가 일어났으며, R-II 시기에는 93.8-129.0 mg/m³ 범위로 6월에 피크가 일어나 10월 까지 지속되는 것으로 나타났다. R-III 시기에는 봄인 6월에 평균값이 479.1 mg/m³인 대규모 피크가 일어났으며, 가을인 10월에 소규모 피크가 다시 한번 있었다.

북태평양체제전환과 주요 동물플랑크톤그룹의 계절 주기 변동

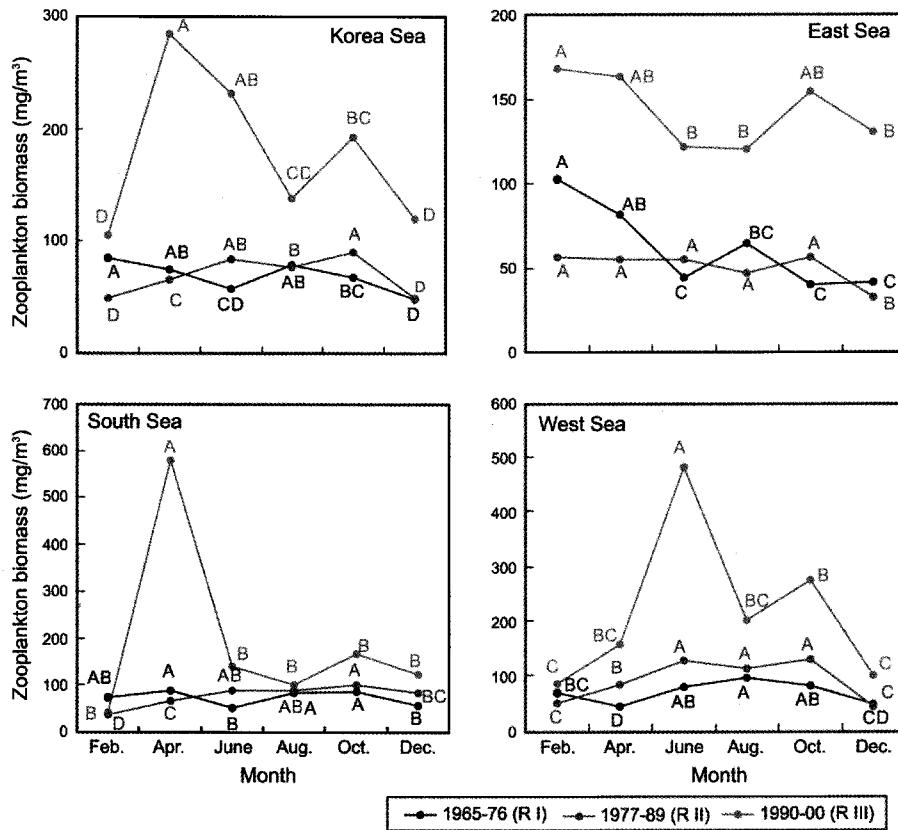


Fig. 4. Seasonal variations in zooplankton biomass for each period divided by after and before regime shifts. Different English letters written on the graph indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test: $P < 0.05$).

동물플랑크톤 중 주요그룹인 요각류 (copepods), 단각류 (amphipods), 모악류 (chaetognaths), 그리고 유우파우지아류 (euphausiids) 풍도의 계절변동을 분석하였다. 한반도 전 해역의 평균값 변동 (1978-2000년)을 보면 (Fig. 5a), 요각류, 단각류 및 유우파우지아류는 6월에 피크를 보이며, 모악류는 8월에 피크를 보였다. 해역별 계절변동을 보면, 동해의 경우 (Fig. 5b), 요각류와 유우파우지아류는 4월에 피크를 보였으며, 단각류는 6월에 피크를 보였다. 모악류는 8월에 피크를 일으켜 10월까지 지속되었다. 남해에서 (Fig. 5c)는 요각류와 유우파우지아류가 역시 4월에 피크를 보였으며, 요각류는 10-12월에 걸쳐 또 한번의 피크를 보였다. 단각류와 모악류는 10월에 피크를 보였다. 서해에서 (Fig. 5d)는 요각류와 유우파우지아류가 6월에 피크를 보였으며, 모악류는 8월에 피크를 보였다. 동해와 남해와는 달리 서해에서는 단각류의 피크를 볼 수 없었다.

주요 동물플랑크톤의 변동을 1989년 북태평양체제전환 (North Pacific Regime Shift)를 중심으로 하여 R-II (1978-1989년)와 R-III (1999-2000년)로 자료를 나누어 분석하였다. 한반도 전 해역에서 동물플랑크톤의 평균 풍도를 보면 (Fig. 6), 요각류 및 유우파우지아류는 R-II와 R-III 시기, 모두 4월 또는 6월에 피크를 보이며, 단각류는 R-II 시기에는 10월에 피크를

보이나 R-III 시기에는 6월에 피크를 보였다. 모악류는 R-II와 R-III 시기 모두 8월에 피크를 보였으며, R-II 시기에는 10월까지 피크가 지속되었다.

동해의 경우 (Fig. 7), 요각류는 R-II 시기에는 4월에 피크가 일어나 6월까지 지속되었으나 그 값은 매우 낮았다. 그러나 R-III 시기에는 4월에 매우 높은 피크를 보였다. 단각류는 R-II 시기에는 10월에 피크를 보이나 R-III 시기에는 6월에 피크를 보였으며, 모악류는 R-II 시기에는 8월에 그리고 R-III 시기에는 10월에 피크를 보여 피크시기가 늦어진 것으로 나타났다. 유우파우지아류는 R-II 시기에는 6월에서 8월에 걸쳐 피크를 일으켰다. R-III 시기에는 4월과 10월에 각각 피크를 보였다. 남해 경우 (Fig. 8), R-II와 R-III 시기, 모두 요각류와 유우파우지아류는 4월 그리고 모악류는 10월에 피크를 일으켰으며, 요각류는 R-III 시기에 10월에 또 한번의 피크를 일으켜 12월까지 지속되었다. 이에 반해, 단각류는 R-II 시기에는 10월에 서 12월에 걸쳐 피크를 일으켰다. 서해의 경우 (Fig. 9), 요각류는 R-II와 R-III 시기, 모두 6월에 피크를 보였으며, 모악류는 R-II와 R-III 시기, 모두 8월에 피크를 보였다. 단각류는 R-II 시기에는 10월에 피크가 나타났으며, R-III 시기에 6월에 피크를 보였다. 유우파우지아류는 R-II 시기에는 6월에 피크를 보이다가 R-III 시기에는 4월에 피크를 일으켜 6월까지 지속되

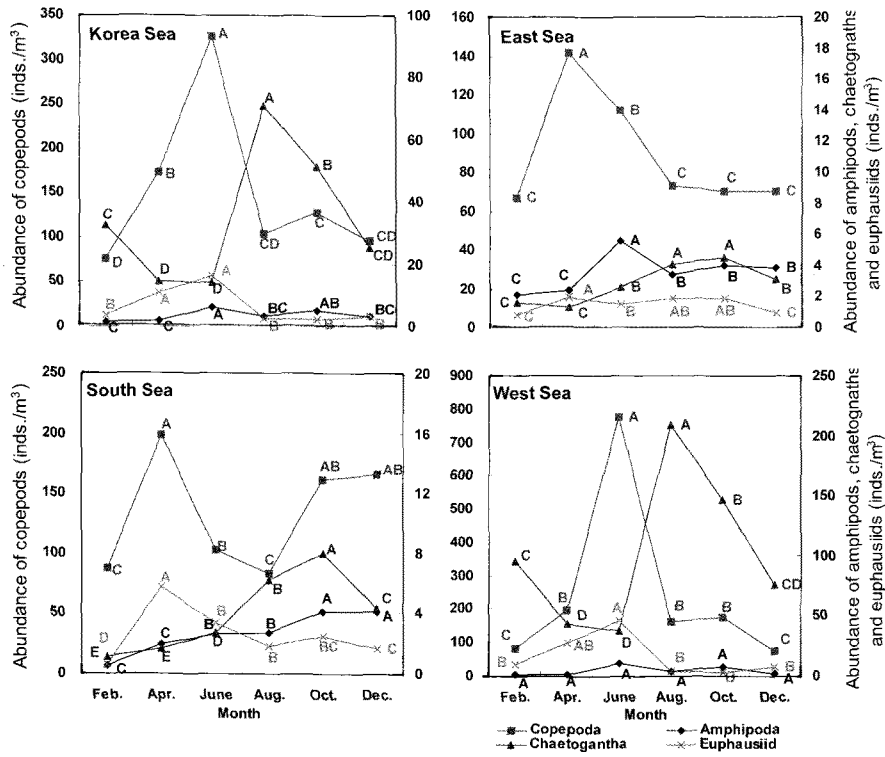


Fig. 5. Seasonal variations in four major zooplankton groups (copepods, amphipods, chaetognaths and euphausiids) in each sea for 1978-2000. Different English letters written on the graph indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test: $P < 0.05$).

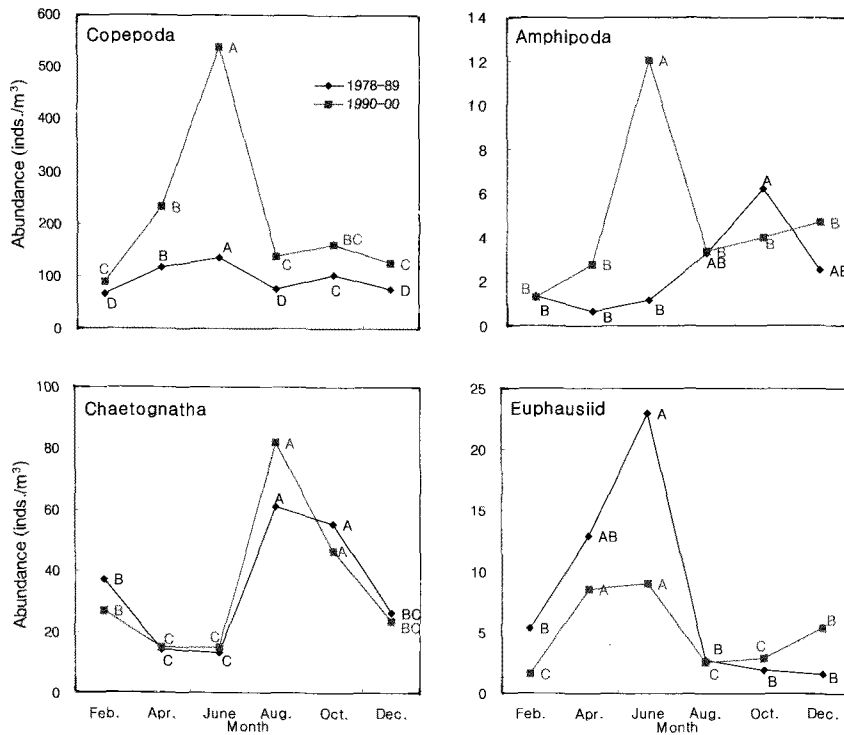


Fig. 6. Seasonal variations in four major zooplankton groups (copepods, amphipods, chaetognaths and euphausiids) in Korea sea (combined East, south and East Seas) for each period divided by after and before regime shifts. Different English letters written on the graph indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test: $P < 0.05$).

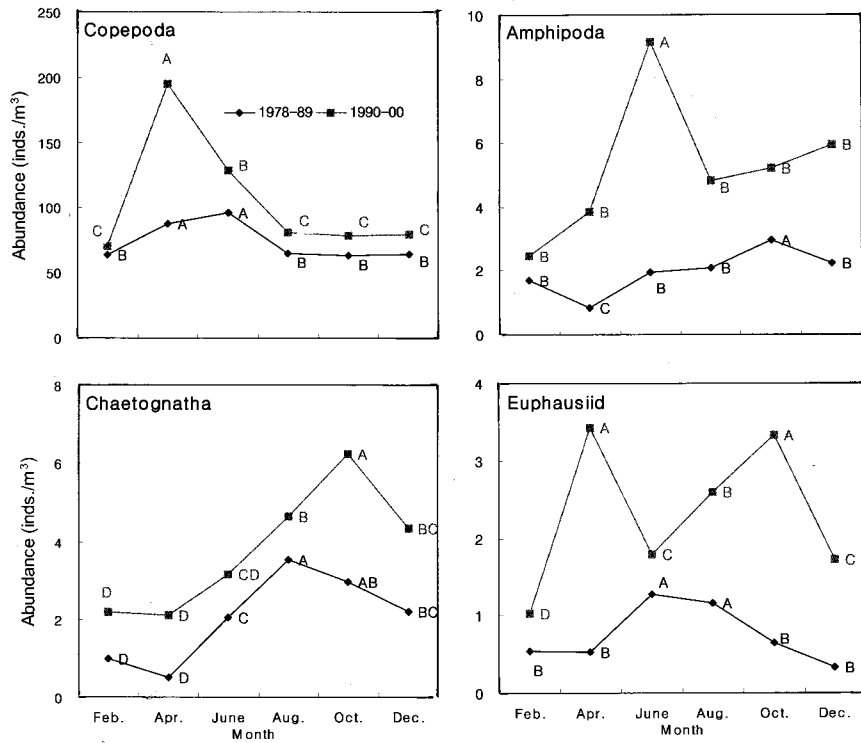


Fig. 7. Seasonal variations in four major zooplankton groups (copepods, amphipods, chaetognaths and euphausiids) in the East sea for each period divided by after and before regime shifts. Different English letters written on the graph indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test: $P < 0.05$).

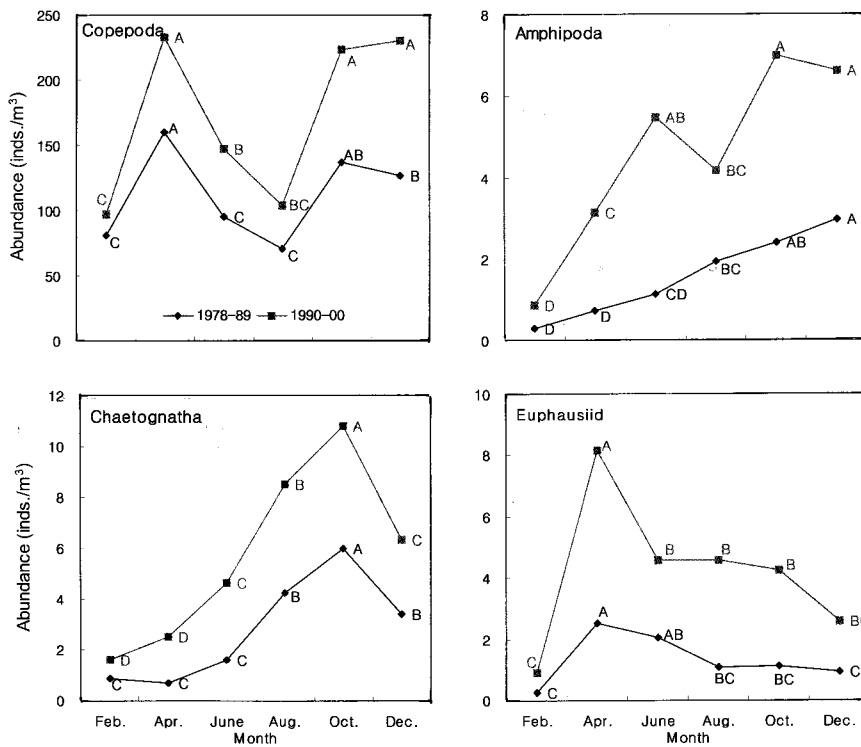


Fig. 8. Seasonal variations in four major zooplankton groups (copepods, amphipods, chaetognaths and euphausiids) in the East China sea for each period divided by after and before regime shifts. Different letters indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test: $P < 0.05$).

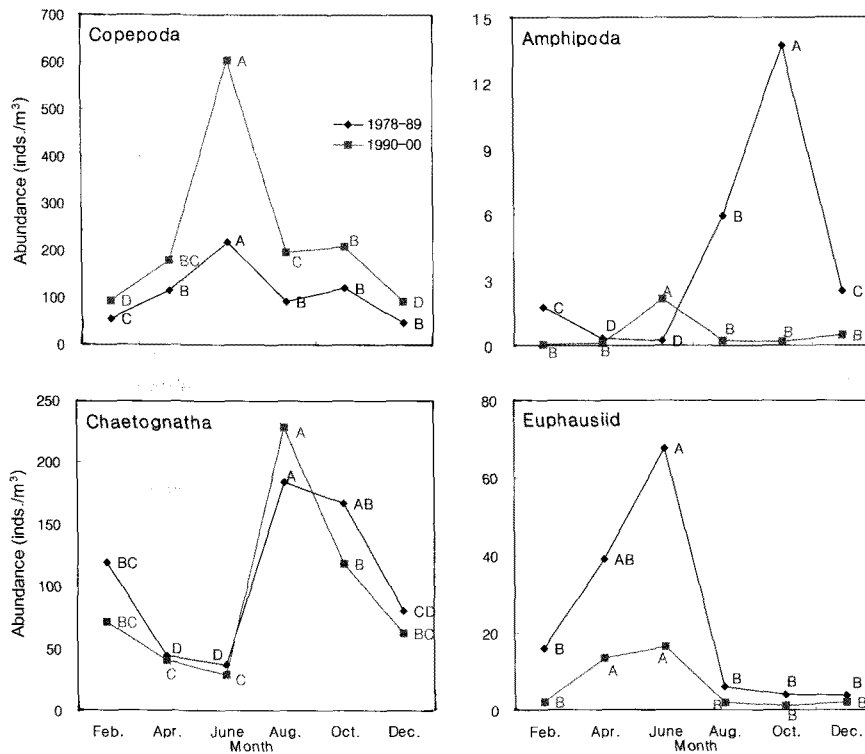


Fig. 9. Seasonal variations in four major zooplankton groups (copepods, amphipods, chaetognaths and euphausiids) in the West sea for each period divided by after and before regime shifts. Different English letters written on the graph indicate significantly different mean (Duncan's multiple comparison test: $P < 0.05$).

었다.

동해, 서해, 남해에서 4개 주요 동물플랑크톤 그룹의 풍도가 대부분 R-II 시기에 비하여 R-III 시기에 높았으나, 서해의 단각류와 유우파우지아류만이 R-II 시기에 풍도가 더 높아 남해, 동해와 다른 양상을 보였다.

북태평양체제전환과 주요 동물플랑크톤 군집 변동

북태평양체제전환을 전후로 하여 주요 동물플랑크톤 군집의 변동을 파악하기 위하여 주요 동물플랑크톤 그룹인 요각류 (copepods), 단각류 (amphipods), 모악류 (chaetognaths), 유우파우지아류 (euphausiids) 풍도로 SOM (Self-Organizing Map) 분석을 하였다. 유사도에 따라 집괴분석을 한 결과 총 크게 3개의 집괴 (cluster)로 대별된 결과를 택하였다 (Fig. 10). 각 집괴별 동물플랑크톤군집 구성 특성을 보면, 집괴 I (cluster I)은 3개의 집괴 동물플랑크톤그룹의 풍도가 102.1 (inds./m³)로 가장 낮으며 요각류가 4개 동물플랑크톤 그룹 중 95%를 차지하여 최우점하였다 (Table 1, Fig. 11). 집괴 II는 동물플랑크톤그룹의 풍도가 432.6 (inds./m³)로 3개의 집괴 중 가장 높으며, 모악류의 풍도가 231.1 (inds./m³)로 54%, 요각류의 풍도는 197.1 (inds./m³)로 46%를 점유하였다. 집괴 III은 동물플랑크톤그룹의 풍도가 388.5 (inds./m³)로 집괴 I과 II의 중간이며 요각류 풍도가 334.7 (inds./m³)로 4개 동물플랑크톤 그룹 중 86%를 점유하였고, 다음으로 유우파우지아류가 9%의 조성률

을 보였다. 따라서 집괴 I이 낮은 동물플랑크톤 풍도와 요각류로 대별된다면, 집괴 II는 모악류, 집괴 III는 높은 동물플랑크톤 풍도와 요각류, 유우파우지아류로 대별되어지는 특성을 보인다.

북태평양체제전환을 전후로 하여 동물플랑크톤 군집의 변화를 파악하기 위하여 집괴 I, II, III에 속하는 정점의 수를 전체 정점수에 대한 백분율로 계산하였다 (Fig. 12). 동해의 경우, RII (1978-1989년)시기에는 집괴 I에 속하는 정점수가 전체 정점의 94%를 차지하였으나 R-III (1999-2000) 시기에는 70%로 감소하였다. 이에 반해 집괴 III에 속하는 정점은 R-II 시기에는 5%였으나 R-III 시기에는 28%로 증가하였다. 이는 요각류의 현존량이 전반적으로 R-II 시기에 낮다가 R-III 시기에 증가하는 양상을 보이며, 특히 요각류 및 유우파우지아류의 증가가 두드러지는 군집 특성을 보이는 것으로 나타났다. 남해, 역시 동해와 같이 R-II (1978-1989년) 시기에 집괴 I의 점유율이 높았으나, R-III (1978-1989년) 시기에는 집괴 III의 점유율이 증가하였다. 이와 달리 서해는 R-II 시기에 집괴 I의 점유율이 52%로 90% 이상의 점유율을 보이는 동해나 남해와는 달리 매우 낮은 점유율을 보였다. R-III 시기에는 집괴 I이 28%로 낮아진 반면에 모악류로 대별되어지는 집괴 II가 48%로 급격히 증가하였으며, 또한 요각류 및 유우파우지아류의 증가를 보이는 집괴 III의 점유율이 24%로 높아졌다.

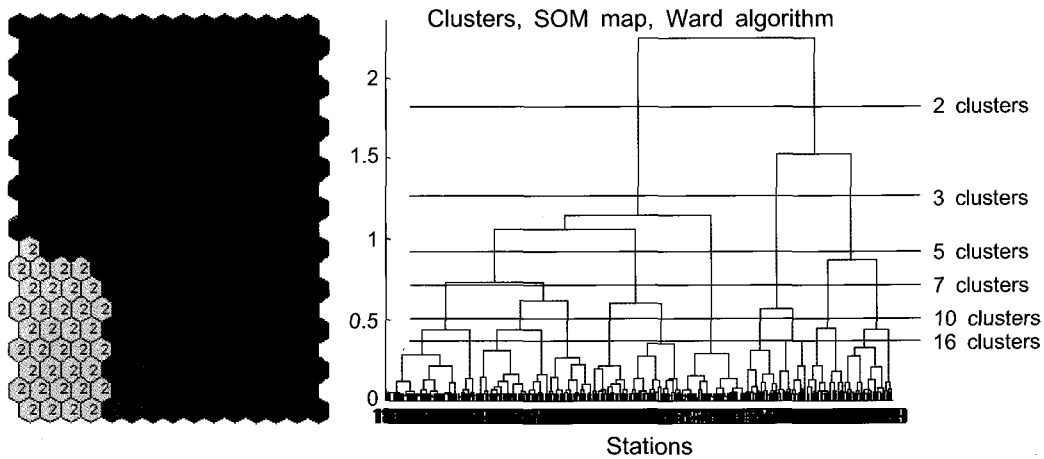


Fig. 10. Hierarchical clustering of the trained SOM (Self-Organizing Map) by the four major zooplankton groups and clustering by the U-matrix. The different clusters are displayed with characters.

Table 1. Average and standard deviation of abundance (inds./m³) of major zooplankton groups, copepods, amphipods, chaetognaths and euphausiids in each clusters. (↑ Very rapid increase, ↓ Very rapid decrease, ↗ Slow increase, ↘ Slow decrease)

	Copepods		Amphipods		Chaetognaths		Euphausiids	
Cluster I	97.3 (±380.2)	↓	2.8 (±41.1)	↘	1.3 (±2.1)	↓	0.7 (±1.7)	↓
Cluster II	197.1 (±359.9)	↗	1.1 (±9.1)	↓	231.1 (±502.1)	↑	1.8 (±7.0)	↘
Cluster III	334.7 (±1,227.3)	↑	9.3 (±50.4)	↗	10.1 (±29.2)	↘	34.4 (±248.3)	↑

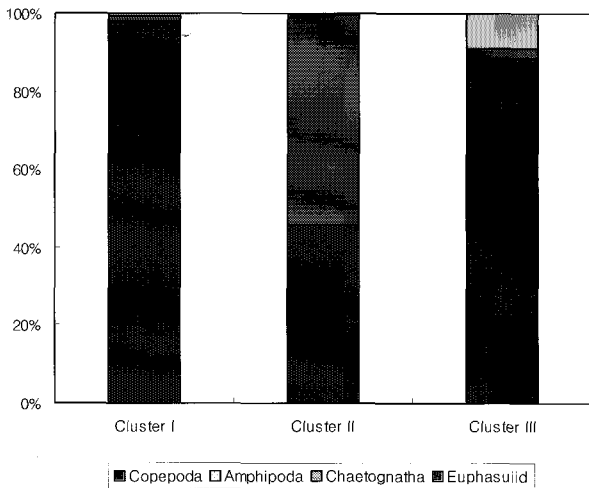


Fig. 11. Percent composition of major four zooplankton groups in each cluster demarcated by SOM analysis.

고찰

북태평양체제전환과 동물플랑크톤현존량의 계절 변동 한반도 주변해역에서 동물플랑크톤현존량은 봄철인 4월과 가을인 10월에 각각 피크를 보이며, 봄 피크가 가을 피크에 비하여 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 온대해역의 경우 봄과 가을에 식물플랑크톤의 대번식이 일어난 후, 뒤이어 동물플랑크톤 대번식이 일어난다는 사실 (Parson et al., 1984)과 일치하였다. 또한, 남해연안에서 식물플랑크톤과 동물플랑크

톤 생체량 변동을 분석한 결과, 일년에 두 번의 대발생이 있다고 밝혀진 바 있다 (Lee and Zhang, 2008).

북태평양체제전환과 관련하여 난류성어종인 멸치, 고등어, 오징어 등의 산란시기가 빨라지고 어장이 확대되는 현상 (Park et al., 2001) 등이 나타나고 있지만 동물플랑크톤 대번식은 여전히 온대해역의 특성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 그러나 해역별로는 피크 발생시기에 차이가 있었다. 동해는 값은 매우 낮았으나 2, 4월의 피크가 나타났으며 (Duncan's multiple comparison test; $P < 0.05$), 통계학적으로 유의하지는 않았지만 추계인 10월에 조금 높은 값을 보였다. 남해는 4월과 10월에 그리고 서해는 6월과 10월에 피크가 일어났으며, 춘계의 피크가 추계에 비해 월등히 컸다. 동해, 서해, 남해의 경우, 물리학적으로 그 특성이 다르며, 기후변화에 대응한 반응도 다르다는 것은 이미 밝혀진 바 있다 (NFRDI, 2001; Rebstock and Kang, 2003). 따라서 이러한 해양환경 특성이 동물플랑크톤의 계절적 변동에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 특히, 동해의 경우, 기초생물생산성이 아극전선대 (subpolar front)의 형성고 동한난류의 강제에 영향을 받는 것으로 밝혀진 바 있으며 (Yoo and Kim, 2004), 또한 표층 혼합층 및 겨울철 수온도 중요한 것으로 보고된 바 있다 (Chiba et al., 2008). 이에 반해 남해의 경우, 대마난류 및 연안수의 영향을 받으며, 서해는 조석의 영향을 받는 등 전형적인 연안해역의 물리적 특성을 나타낸다 (NFRDI, 2001). 따라서 동해의 이러한 물리적 특성이 남해나 서해와는 다른 동물플랑크톤 계절 주기를

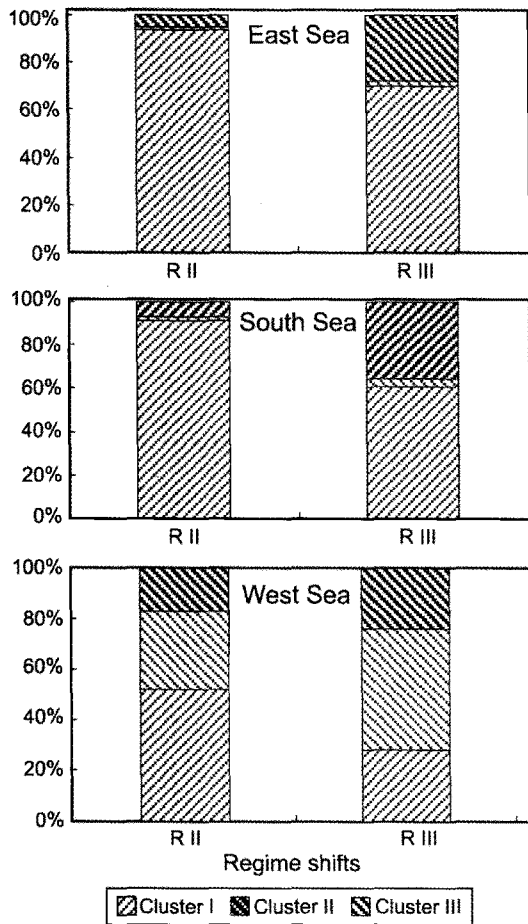


Fig. 12. Percent composition of number of stations occupied by each cluster per total stations in each regimes.

보이는 것으로 판단된다. Yoo et al. (2008)은 북태평양에서 클로로필의 피크는 주로 4-5월에 일어나며, 동물플랑크톤 피크는 주로 4-8월에 일어난다고 보고하였다.

동물플랑크톤현존량의 변동은 북태평양에서 발생한 체제전환을 전후로 하여 차이가 있는 것으로 밝혀졌다 (Table 2). 동물플랑크톤 평균 현존량이 월등히 낮은 1965-76년 (R-I), 1977-89년 (R-II) 시기에는 계절 주기가 뚜렷하게 나타나지 않았으나, 평균 현존량이 월등히 높은 1990-2000년 (R-III) 시기에는 계절 주기가 매우 뚜렷하였다. 캘리포니아 연안의 경우, 역사 동물플랑크톤 현존량이 높았던 시기 (1951-1985년)에는 계절 주기가 뚜렷하였으나, 현존량이 낮았던 시기 (1986-1998년)에는 계절주기가 뚜렷하지 않았다 (Yoo et al., 2008).

캘리포니아 연안의 동물플랑크톤 변동은 태평양 10년 주기변동 (PDO: Pacific Decadal Oscillation)과 밀접한 상관성이 있는 것으로 보고 된 바 있다. 그러나 본 연구해역에서는 그러한 주기성을 찾아 볼 수는 없었다.

북태평양체제전환에 따른 해역별 피크시기의 차이는 앞서 설명한 바와 같이, 해역별로 물리적 특성이 다르기 때문에 나타나는 양상이라 판단된다. 또한, 동해, 서해, 남해 모두 R-I과 R-II 시기의 피크는 모두 소규모이며 그 값이 매우 낮아 동물플랑크톤 현존량이 낮으면 피크가 잘 나타나지 않는다는 사실 (Yoo et al., 2008)을 잘 반영하였다. 서해나 남해의 경우, R-II 시기에 주로 가을인 10월을 중심으로 소규모 피크가 있었으나, R-III 시기에는 남해에서는 4월에 그리고 서해에서는 6월에 대규모 피크가 일어났다. 이상으로 볼 때, 1989년 북태평양체제전환을 기점으로 하여 남해나 서해에서는 가을 중심 피크에서 봄 중심 피크로 계절주기가 전환 된 것으로 판단된다. Chiba et. al. (2008)은 동해에서 하위 영양단계 생물의 생산은 겨울철 수온과 밀접한 상관성이 있으며, 1990년대에 접어들면서 겨울철 동물플랑크톤 현존량이 증가하는 양상을 보인다고 밝혔다. 한반도 주변해역에서는 1976/77년 북태평양체제전환 후 겨울철 수온 상승현상이 나타나기 시작하면서 1989년 체제전환 후에는 이러한 상승현상이 더욱 두드러졌다 (Rebstock and Kang, 2003). 따라서 R-II 시기에 조금씩 증가하기 시작한 동물플랑크톤이 R-III 시기에 급격하게 증가하며, 특히 봄 피크가 두드러지는 것은 겨울철 수온 상승과 밀접한 상관성이 있는 것으로 판단된다. 또한, 북태평양에서 동물플랑크톤은 주로 4월에서 8월간에 피크가 일어나는 것으로 밝혀진 바 있으며 (Yoo et al., 2008), 캘리포니아 연안에서도 역시 4-8월에 동물플랑크톤의 피크가 일어나, 봄철 피크가 중요한 것으로 나타났다 (<http://calcofi.org/newhome/data/zooplankton>).

북태평양체제전환과 주요 동물플랑크톤그룹 및 군집의 계절 변동

요각류 (Copepoda), 단각류 (Amphipoda), 유우파우지아류 (Euphausiid)의 피크시기를 보면 주로 봄인 4월-6월 피크를 보이며, 남해에서만 요각류가 가을철에 또 한번의 소규모 피크를 보였다. 모악류 (Chaetognatha)는 주로 8월 또는 10월에 피크를 보였다 (Table 3). 요각류와 유우파우지아가 주로 초식성이거나 잡식성인 것 (Barnes, 1986a, b)을 고려 할 때, 식물플랑크톤의 대번식이 일어나는 봄 또는 가을에 피크를 일으키는 것은 일반적인 양상인 것으로 판단된다. 모악류의 경우, 요각

Table 2. Seasonal peak of zooplankton biomass in the Korea sea and each three seas in the period divided by after and before regime shifts. Resulted from Ducan's multiple comparison test ($P < 0.05$)

Period	Korea Sea (combined East, South and West Seas)	East Sea	South Sea	West Sea
R-I (1965-76)	No	No	April/August-October	August
R-II (1977-89)	October	February	October	June-October
R-III (1990-00)	April>October	February-April>October	April>October	June>October

Table 3. Seasonal peaks of major zooplankton groups in the Korea sea and each three seas during 1978-2000. Resulted from Ducan's multiple comparison test ($P<0.05$)

	Korea Sea (combined East, South and West Seas)	East Sea	South Sea	West Sea
Copepoda	June	April	April/October-December	June
Amphipoda	June	June	October-December	-
Chaetognatha	August	August-October	October	August
Euphausiid	April-June	April	April	June

Table 4. Seasonal peaks of major zooplankton groups in the period divided by after and before regime shifts. Resulted from Ducan's multiple comparison test ($P<0.05$)

	Period	Korea Sea (combined East, South and West Seas)	East Sea	South Sea	West Sea
Copepoda	R-II (1978-89)	June	April - June	April/October	June
	R-III (1990-00)	June	April	April/October - December	June
Amphipoda	R-II (1978-89)	October	October	December	October
	R-III (1990-00)	June	June	October - December	April
Chaetognatha	R-II (1978-89)	August - October	August	October	August
	R-III (1990-00)	August	October	October	August
Euphausiid	R-II (1978-89)	June	June - August	April	June
	R-III (1990-00)	April - June	April/October	April	April - June

류의 피크가 일어 난 후에 시간차를 가지고 피크를 일으켰다. 모악류는 육식성이며, 주로 요각류를 먹는 것으로 알려져 있다 (Barnes, 1986c). 따라서 요각류의 피크시기와 시간차를 보이는 것은 모악류가 요각류와 피·포식관계에 있기 때문인 것으로 추정되나, 이에 대하여서는 앞으로 보다 심도있는 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

북태평양체제전환을 전후로 하여 요각류는 R-II (1978-89년) 시기와 R-III (1990-00년) 시기 모두 비슷한 시기에 피크를 보이며, R-III (1990-00년) 시기에 계절 평균값이 높아지면서 피크가 더 뚜렷하게 나타났다 (Table 4). 위와 같은 사실을 고려할 때, 1989년 전후로 하여 발생한 기후체제전환이 요각류의 계절적 변동에는 직접적으로 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 그러나 생산의 증대에는 크게 영향을 미친 것으로 판단되며, 특히 봄에 영향을 많이 미친 것으로 보인다. 한반도 주변해역에서 기후체제전환 후 겨울철 수온 상승 현상은 매우 뚜렷한 물리적 현상 중 하나이다 (Rebstock and Kang, 2003). Chiba et al. (2008)은 겨울철 수온이 춘계 식물플랑크톤 생산에 크게 영향을 미친다고 보고한 사실을 고려할 때, 한반도 주변해역에서 기후체제전환 후 봄에 요각류 풍도의 급격한 증가는 겨울철 수온상승에 의한 봄철 식물플랑크톤 생산의 변화에 영향을 받은 것으로 판단된다. 한반도 주변해역에서 겨울철 수온상승이 봄철 식물플랑크톤 생산에 미치는 영향에 대한 직접적인 연구결과는 없다. 그러나 Yoo and Kim (2004)이 식물플랑크톤의 대번식이 일어나는 동해의 일부 해역에서 몇 주 뒤에 요각류 풍도가 증가하며, 이러한 요각류의 증가가

식물플랑크톤과 밀접한 상관성이 있다고 밝힌 바 있다. 또한, 북태평양 주요 해역에서 콜로로필은 주로 봄에 피크가 일어난다는 사실 (Yoo et al., 2008)을 고려 할 때, 봄에 요각류가 증가하는 것이 먹이생물의 증가와 관련성이 있음을 알 수 있다. 단각류 및 모악류, 유우파우지아류는 남해, 동해에서도 역시, R-II 시기에 비하여 R-III 시기에 풍도가 증가하는 양상을 보이며, 피크를 보이는 시기는 유사하였다. 그러나 서해에서는 다른 해역과는 달리 단각류 및 유우파우지아류는 피크시기는 유사하였으나 R-II 시기에 비해 R-III 시기에 풍도가 낮아지는 양상을 보였다. 이들 역시 요각류와 같이 북태평양체제전환으로부터 계절주기에 영향을 받지 않은 것으로 판단되나 생산에 있어서는 영향을 받은 것으로 판단된다.

동, 서, 남해 해역별로 4개 주요 동물플랑크톤 그룹의 풍도는 R-II 시기에 비하여 R-III 시기에 증가하였으나, 주로 대규모 피크 시기는 봄철로 R-II 시기와 R-III 시기, 모두 유사하였다. 그러나 동물플랑크톤 현존량의 경우, 가을 피크에서 봄 피크로 전환하는 양상을 보인다고 앞서 밝힌 바 있다. 이와 같이 동물플랑크톤 현존량과 4개 동물플랑크톤 그룹간에 1989년 기후체제전환 후에 피크시기의 변화 양상이 다른 것은 크게 두개 요인에 기인한 것으로 판단된다. 첫째, 동물플랑크톤 현존량이 4개 주요 동물플랑크톤 외에 다른 중소형 동물플랑크톤을 모두 포함되어 있으므로 이들 다른 동물플랑크톤의 변동에도 영향을 받기 때문이다. 예를 들면, 1997년 남해안에서 봄철에 동물플랑크톤 현존량이 매우 높았는데 이는 이들 4개 동물플랑크톤에 기인 한 것이 아니라 살파의 대량 출현에

의한 것으로 밝혀졌다 (Kang et al., 2000). 또한 이러한 동물플랑크톤 중 조성의 변화가 고등어 자원에게까지 영향을 미치는 것으로 나타났다 (Kang and Rebstock, 2004). 둘째, 1989년 체제전환 후 4개 주요 동물플랑크톤 풍도의 봄철 증가현상이 두드러지면서 봄철 동물플랑크톤 현존량 증가에 크게 영향을 미쳤기 때문이다.

주요 4개 동물플랑크톤군집 군집조성은 북태평양체제전환을 전후하여 해역별로 다른 특성을 보였다. 동해와 남해의 경우, 집괴 III의 비율이 R-II 시기에는 각각 5, 7%였다가 R-III 시기에 각각 28, 35%로 증가하여 군집구조의 변동이 다수의 정점에서 일어났음을 알 수 있었다. 즉, 4개의 주요 동물플랑크톤 그룹이 R-III 시기에 모두 증가하나, 특히 요각류가 급증하고 유우과우지아류가 증가하는 양상으로 주요 4개 동물플랑크톤 군집 조성이 변동한 것으로 나타났다. 이에 반해 서해는 집괴 II가 R-III 시기에 48%에 이르러, 모악류의 증가가 두드러지는 것으로 나타났다. 이와 같이 동해와 남해의 주요 동물플랑크톤 군집조성 변동은 유사한 반면에 서해는 다른 것으로 나타났다. Rebstock and Kang (2003)은 동해와 남해는 기후변동에 대하여 물리적이거나 생물학적으로 유사하게 반응하나, 서해는 다르게 반응한다고 밝힌바 있다. 본 연구에서도 R-II 시기에 군집의 조성이 동해와 남해는 유사한 반면에 서해는 달랐으며, R-III 시기에는 그 차이가 더 큰 것으로 나타났다. 이상으로부터 북태평양체제전환에 대한 해역별 반응에 있어 서해는 남해나 동해와는 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 남해, 동해와는 달리 서해가 반폐쇄성 해역이며 대마난류와 같은 큰 외양성 해류의 영향을 거의 받지 않는 물리적 특성을 가지고 있기 때문이라 (NFRDI, 2001) 판단되나, 이에 대하여서는 앞으로 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Alheit, J., C. Mollmann, J. Jutz, G. Kornilovs, P. Loewe, V. Mohrholz and N. Wasmund. 2005. Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES J. Marine Sci.*, 62, 1205-1215.
- Barnes, R.D. 1986a. Class Copepoda. In: *Invertebrate zoology*. R.D. Barnes, ed. CBS College Publishing., 572-574.
- Barnes, R.D. 1986b. Order Euphausiacea. In: *Invertebrate zoology*. R.D. Barnes, ed. CBS College Publishing., 596-597.
- Barnes, R.D. 1986c. Phylum Chaetognatha. In: *Invertebrate zoology*. R.D. Barnes, ed. CBS College Publishing., 865-870.
- Chiba, S., M.N. Aita, K. Tadokoro, T. Saino, H. Sugisake and K. Nakata. 2008. From climate regime shifts to lower-trophic level phenology: Synthesis of recent progress in retrospective studies of the western North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, 77, 112-126.
- Choe, S. 1967. Phytoplankton studies in Korean waters. II. Phytoplankton in the coastal waters of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 2, 1-12.
- Choe, S. 1969. Phytoplankton studies in Korean waters. IV. Phytoplankton in the adjacent seas of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 4, 49-67.
- Cushing, D.H. 1995. The long-term relationship between zooplankton and fish. *ICES J. Mar. Sci.*, 52, 611-626.
- Kim, Y.S. 1972. Secular variation of zooplankton biomass in the south sea of Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 5, 108-114.
- Kang, Y.S., Y.J. Jo, W.J. Go, S.S. Kim, K.A. Jeon and H.J. Oh. 2000. Swarm of salps (Tunicata: Thaliacea) and its impact on marine ecosystem in the South Sea of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 5, 47-58.
- Kang, Y.S. and S.S. Lee. 1991. Seasonal fluctuation of zooplankton biomass in the adjacent seas of Korea. *Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency*, 45, 13-21.
- Kang, Y.S. and G.A. Rebstock. 2004. Ecosystem consequences of an anomalous high zooplankton biomass in the south sea of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 39, 207-211.
- Lavanigos, B.E. and M.D. Ohman. 2003. Long-term changes in pelagic tunicates of the California Current. *Deep-Sea Res.*, II, 50, 2473-2498.
- Lavanigos, B.E. and M.D. Ohman. 2007. Coherence of long-term variations of zooplankton in two sectors of the California Current System. *Prog. Oceanogr.*, 75, 42-69.
- Lee, J.H. and C.I. Zhang. 2008. Analysis of the lower trophic level of the Northern East China Sea ecosystem based on the NEMURO model. *J. Kor. Soc. Oceano.*, 13, 15-26.
- NFRDI. 2001. Oceanographic features of the Korean waters. In: *Oceanographic handbook of the neighbouring Seas of Korea*. Kim B.G., H.D. Jung and S. H eds. Yemun publishing. 51-118..
- Park, J.H., K.S. Hwang and Y.S. Kang. 2001. Variation of fishing condition and the winter warming in Korean waters. *J. Korean Soc. Fish. Res.*, 3, 77-87.
- Parson, T.R., M. Takahashi and B. Hargrave. 1984. *Biological oceanographic processes*. Pub. Pergamon Press Ltd.
- Minobe, S. 2000. Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, 47, 381-408.
- Minobe, S. 2002. Interannual to interdecadal changes in the Bering Sea and concurrent 1998/99 changes over

- the North Pacific. *Progress in Oceanography*, 55, 45-64.
- Minobe, S. and N. Mantua. 1999. Interdecadal modulation of interannual atmospheric and oceanic variability over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, 43, 163-192.
- Pershing, A.J., C.H. Greene, J.W. Jossi, L. O'Brien, J.K. Brodziak and B.A. Bailey. 2005. Interdecadal variability in the Gulf of marine zooplankton community, with potential impacts on fish recruitment. *ICES J. Marine Sci.*, 62, 1511-1523.
- Rebstock, G.A. 2001. Long-term stability of species composition in calanoid copepods off southern California. *Mar. Eco. Progr. Ser.*, 215, 373-375.
- Rebstock, G.A. 2002. Climatic regime shifts and decadal-scale variability in calanoid copepod populations off southern California. *Global Change Bio.*, 8, 71-89.
- Rebstock, G.A. and Y.S. Kang. 2003. A comparison of three marine ecosystem surrounding the Korean peninsula: Responses to climate change. *Prog. Oceanogr.*, 59, 357-379.
- Roemmich, D. and J.A. McGowan. 1995. Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science*, 267, 1324-1326.
- Tian, Y., H. Kidokoro, T. Watanabe and N. Iguchi. 2008. The late 1980s regime shift in the ecosystem of Tsushima warm current in the Japan/East Sea: Evidence from historical data and possible mechanisms. *Prog. Oceanogr.*, 77, 127-145.
- Yoo, S., H.P. Batchelder, W.T. Peterson and W.J. Sydeman. 2008. Seasonal, Interannual and event scale variation in North Pacific ecosystems. *Prog. Oceanogr.*, 77, 155-181.
- Yoo, S. and H. Kim. 2004. Suppression and enhancement of the spring bloom in the southwestern East Sea/Japan Sea. *Deep-Sea Res.*, II, 51, 1093-1111.

2008년 9월 11일 접수
2008년 12월 15일 수리