

인공구조물에서 적조에 의해 파괴된 해조군집의 복원

유종수

한국해양대학교 해양과학기술연구소

Restoration of Algal Community Perturbated by red tide in Artificial Marine Ecosystem

Jong Su Yoo

Research Institute of Marine Science and Technology, Korea Maritime University

Abstract

Succession and community structure of benthic marine algae of Incheon Dock, an enclosed artificial dock in the western coast of Korea, were investigated qualitatively and quantitatively. A total of 52 species was identified in this area: 22 blue-greens, 15 greens, 7 browns and 8 reds. Species composition and biomass of benthic algal community in Incheon Dock were quite different from the rocky shore community. Dominant species determined by biomass and frequency was *Polysiphonia morrowii*, and subdominant species was *Lyngbya semiplena* and *Lyngbya lutea*. During the study, benthic algal community was perturbated completely by red tide(causative species: *Mesodinium rubrum*, ciliate) in June 1990, and recolonization process had begun thereafter. As a result, the succession pattern of benthic algal community of closed dock marine ecosystem staged at channelling succession phase. It was concluded that a normal community structure could be attained after 10 months since the ecosystem was disturbance. Succession pattern was revealed as a seasonal cyclic succession. Multiple regression analysis was applied on benthic algal species and associated physico-chemical environmental factors in Incheon dock. Water temperature, precipitation, Salinity, nitrite-nitrogen and nitrate-nitrogen were important environmental factors for the distribution of benthic algae among the 15 factors.

Key words: artificial dock, benthic algal community, cyclic succession

1. 서론

국내 부착해조류의 천이 양식(succession pattern)과 그 기작에 대한 연구는 1980년대부터 시작되었다. 초기에는 발전소, 선거(dock), 인공어초(artificial reef)와 같은 새로 건설된 구조물에 부착한 해조군집에 대한 연구가 시작되었고(김과 이 1980; Yoo, 1990; 배와 이 1981), 1980대 후반부터 인공 저층 및 자연 암반에 생육하는 해조군집의 초기착생과 천이양식에 대한 연구가 본격화되었다(김과 이 1986; Kim

and Yoo, 1994). 김(1987)은 재질이 다른 7가지 인공 저층에서의 천이과정을 연구하였고, Kim 등(1992)은 조간대 암반에서 영구방형구를 설치한 후 천이양식을 관찰한 결과 조간대의 설치 위치에 따라 해조류의 착생과 천이가 다름을 보고하였고, 그 천이계열(succession sere)은 크게 5가지 형태라고 하였다.

인천항 선거는 서해안 제 1의 국제항으로 최고 10m나 되는 조석간만의 차이 때문에 2개의 갑문에 의해 선박을 입·출거사키는 거대한 인공구조물이다. 이곳은 해양 생태계이면서도 호소와 같은 구조적 특징을 갖는 곳으로 부영

양화되어 있고, 식물플랑크톤에 의한 일차생산력이 매우 높은 곳이다(유 등 1992). 선거 내 물리·화학적 요인과 생물군집의 구조 등에 대한 생태학적 연구는 1977-1979년 (Yoo 1990) 그리고 1990-1991년(유 등 1991; 유 등 1997)에 이루어져서, 인천항 선거가 독특한 해양 선거생태계를 형성하고 있음이 보고된 바 있다. 따라서 인천항 선거와 같은 폐쇄성 해양생태계를 구성하고 있는 곳에 생육하는 부착해조군집의 초기 발생, 천이 단계 및 극상에 이르는 일련의 과정을 밝히는 것은 일반 해양의 해조군집에 대한 천이 양식을 해석하는 데 도움이 된다. 본 연구는 독특한 해양환경을 형성하고 있는 인천항 선거에서 적조에 의한 생태계 교란으로 파괴된 부착해조군집이 회복되는 과정과 이에 관계하는 환경요인을 파악하는 데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 인천항 선거 내 2곳의 조사 점에서 1990-1991년 사이에 계절별(2, 5, 8, 11월)로 2년간 실시하였다(Fig. 1). 부착해조류의 정성 및 정량조사는 3×3cm의 방형구가 10cm 간격으로 연결된 line transect를 부착해조류가 생육하고 있는 수심 4m까지 실시하였다. 이 때 사용된 방형구의 크기는 종-면적곡선(species-area curve)으로 결정하였다. 채집된 해조류는 실험실로 운반 후, point quadrat method를 응용해 빈도를 조사하였고(유 등 1991), 종별 생물량(biomass)은 건조기(dry oven)에서 105°C, 48시간 건조시킨 후, 건량(dry weight)을 단위면적당(m²)으로 환산한 값으로 하였다. 해조군집의 우점종과 준우점종은 빈도와 생물량의 값을 평균한 중요도로 결정하였다. 채집 시기별 해조 군집 구조의 변동은 중요도로 주성분 분석(principal component analysis, PCA)을 하여 상관관계를 비교하였고, 이들 해조 군집 구조에 영향을 주는 환경 요인을 규명하기 위해 유 등(1997)의 환경 자료를 이용해 회귀분석을 하였다(Ludwing and Reynolds 1988).

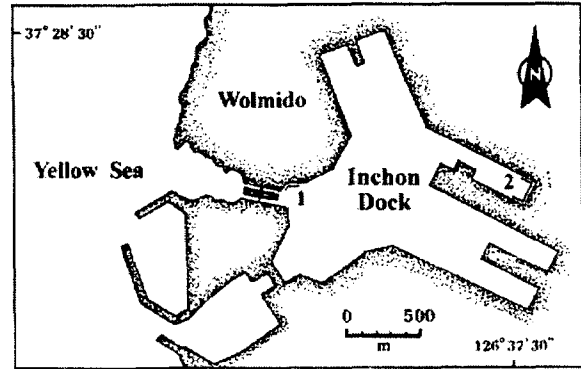


Fig. 1. A map showing the sampling stations in Incheon Dock.

3. 결과

Mesodinium rubrum 적조에 의한 2차 피해(혐기성 박테리아에 의한 유기물분해 작용으로 H₂S 발생함)로 해조군집이 파괴되기 전인 1990년 5월에 건량으로 본 생물량이 가장 높았고 출현종수 또한 30종으로 많았다. 해양생태계의 교란이 있는지 3개월 짜인 8월의 생물량은 측정할 수 없는 수준으로 낮았으며, 출현종수도 10종(남조류 7종, 녹조류 3종)으로 가장 적었다. 한편 홍조류는 9월부터 출현하기 시작하였고(*P. morrowii*), 11월에 *Stylonema alssidii*(마디털)가 관찰되었으나 이후 *P. morrowii* 한 종만이 출현하였고, 갈조류는 11월부터 출현하기 시작하였다(*Acinetospora crinita*, *Ectocarpus arctus*). 생태계 교란 전후 해조류의 출현종수를 비교해보면, 해조군집이 파괴되기 전에는 남조류 15종, 녹조류 12종, 갈조류 6종, 홍조류 8종이 생육하고 있었으나, 군집이 파괴된 이후에는 남조류 18종, 녹조류 13종, 갈조류 4종, 홍조류 2종이 관찰되었다. 종 조성(species composition)으로 볼 때, 남조류는 약간 증가하였으나 갈조류와 홍조류는 감소하여 군집구조가 약간 변화되었음을 알 수 있다.

생태계 교란이 있는 후 정상 해조군집으로의 복원 정도를 알아보기 위하여 누적 출현종수를 월별로 비교하였다(Fig. 2). 군집이 파괴된 후 9개월까지는 지속적인 증가를 보였으나 그 후 14개월째까지는 새로이 정착한 종이 없

었고, 15개월째 5종이 추가되었으며 이 후 이입 종이 없었다.

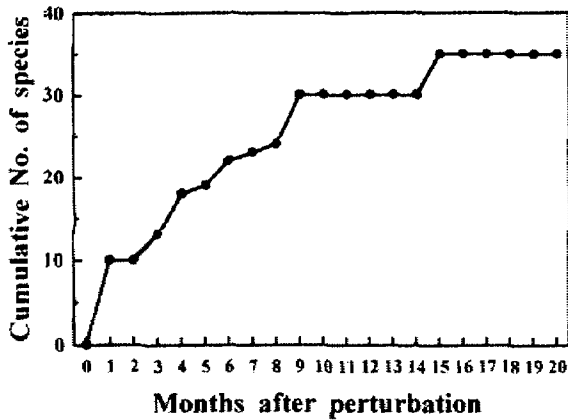


Fig. 2. Cumulative number of species observed after perturbation of algal community at Incheon dock.

해조군집의 천이 과정은 주성분 분석을 통해 교란 전후와 조사정점 사이에 군집 동태의 비교를 통해 알아보았다(Fig. 3). 그 결과 정점 별 차이는 없는 것으로 생각되나, 계절에 따른 해조군집의 변화는 인정되었고, 특히 해조군집의 파괴 후 회복 과정이 잘 설명되었다. 즉, PC I과 II축 평면상에서, 생태계 교란 이전의 해조군집인 1과 2가 제 1군을 형성하였고, 교란 직후의 해조군집인 3(1990년 8월, 여름)은 제 1군과 가장 떨어진 PC I축의 가장 오른쪽에 위치하였다. 그리고 교란 후 6개월이 경과한 1990년 11월(4, 가을)과 1991년 8월(7, 여름)의 군집이 하나의 군을 형성하였다. 교란 후 9개월이 경과한 1991년 2월(6, 겨울), 12개월 후인 1991년 5월(5, 봄) 그리고 1991년 11월(8, 가을)이 하나의 군을 형성하였다. 따라서 PC I축을 기준으로 볼 때, 조사 시기별 부착해조군집은 생태계 교란 전의 봄과 겨울이 가장 왼쪽에, 교란 직후가 가장 오른쪽에 위치하였다. 그리고 해조군집의 회복은 시간이 경과함에 따라 생태계 교란 전의 군집에 접근하는 양상을 보였고, 교란 후 8-11개월이 경과한 1991년 2월(5, 겨울)과 5월(6, 봄)은 교란 이전의 해조군집에 거의 접근하는 것으로 판단된다. 또한 인천항 선거에 생육하고 있는 부착해조군집은 겨울과 봄, 여름 및 가을

로 구분되는 뚜렷한 계절의 차이를 보였다. 한편, 15가지 환경요인과 PCA 축 값으로 회귀분석을 한 결과, PC I축에 영향을 주는 환경요인은 수온, 강수량, 염분, 질산염, 아질산염 등이었고, II축과 III축에 영향을 주는 요인은 용존산소인 것으로 나타났다.

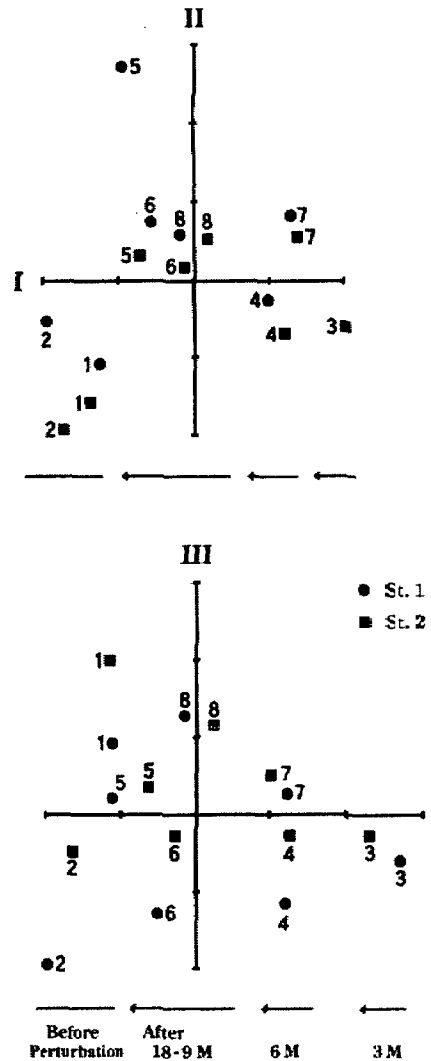


Fig. 3. Position of spatial and seasonal samples along principal component axes I, II and III in Incheon Dock during 1990 and 1991 (symbols: ●, station 1; ■, station 2. numbers: 1, February 1990; 2, May 1990; 3, August 1990; 4, November 1990; 5, February 1991; 6, May 1991; 7, August 1991; 8, November 1991).

4. 고찰

현재까지 해조군집의 천이에 대한 연구는 초기 착생종과 극상종, 저층에 대한 해조류의 기질 특이성, 환경에 대한 적응도, 종간 경쟁 그리고 정상군집을 형성하는 기간 등에 관심을 갖고 수행되었다(Fager 1971; 김 1978; Niell 1979; Kim *et al.* 1992). Northcraft(1948)는 포자의 운동력과 조류의 생장률은 천이와 관계가 있어 미세하고 생장이 빠른 녹조류와 갈조류가 초기착생에 유리하다고 보고하였고, Connell (1972)은 빠른 생장을 하는 조류와 군체성 구조류가 연안에서 초기 착생종이라고 보고하였다. 김(1987)은 표면의 거침 정도가 다른 여러 종류의 인공저층에 부착하는 해조류를 관찰한 결과 구상 남조류와 구조류를 초기 착생조류로 보고하였으며, 조하대 연구에서 Serisawa 등(1998)은 콘크리트로 만든 인공구조물에 무절산호말류(Melobeidean algae)가 초기 착생종을 보고하였다. Kim 등(1992)은 조간대 암반에서 남조류와 사상조류가 초기 천이계열을 형성함을 보고하였다. 본 연구에서는 Kim 등(1992)과 유사한 결과로 남조류와 사상성 녹조류가 초기 착생종으로 나타났다. 이와 같이 연구자에 따라 초기 천이계열이 조금씩 다른 것은 연구 대상 분류군과 조사 간격의 차이에 따른 결과로 생각되지만, 대체로 생장이 빠른 구조류, 남조류 및 사상조류가 천이계열의 초기 착생종을 형성하는 것으로 생각된다(김 1987; Niell 1979; Kim *et al.* 1992).

저층에 착생한 해조류가 극상을 형성하는 기간은 저층의 종류와 생육환경에 따라 다양한 결과가 보고되고 있다. Tsuda and Kami(1973)는 인공저층에서 16-19개월 정도면 해조군집이 극상에 이른다고 하였고, Saito 등(1976)은 방파제에 부착한 해조군집은 3-4년이 소요된다고 하였다. Kim 등(1992)은 조간대 암반에 생육하는 해조군집은 미소환경에 따라 18-24개월이면 극상 군집을 형성한다고 하였다. 본 선거생태계의 정점 1 지역은 1974년에 완공된 콘크리트 구조물로서 해조류가 착생한지 16년이 경과했고, 정점 2 지역(구 선거)은 준공한지 72년이 되었으므로 생태계 교란 이전에 유지되었던 해조군집이 본 지역과 같은 폐쇄성 해양환경에 형성된

안정된 해조군집이라고 생각된다.

한편 생태계 교란이 있기 전인 1990년 1월부터 5월 사이의 출현종수는 30종 전후였고, 교란 후인 1991년 2월에 25종이 출현하여, 출현종수의 측면에서 생각하면 대체로 해조군집이 파괴되기 전의 정상 군집 단계로 진행된 것으로 생각된다. 그러나 해조군집의 구조적인 측면에서 볼 때, 분류군 중 홍조류가 교란 전에는 총 8종이 출현하였으나, 교란 후 *Stylophora alsidii*와 *Polysiphonia morrowii*를 제외하고는 출현하지 않는 것으로 보아 교란 전의 군집 형태와 동일한 경로로 회복되지 않는 것으로 생각된다. 단위면적당 생물량의 경우, 교란 이전인 1990년 2월과 5월 각각 69.79 g-dry wt/m²과 100.76 g-dry wt/m²이었으나, 교란 직후인 8월에는 현존량을 측정할 수 없을 정도로 해조 식생이 빈약해졌고, 1991년 5월에는 교란 전 같은 기간의 63.4%까지 회복되어 군집의 파괴 후 10개월 정도면 50% 이상의 생물량 수준으로 증가함을 알 수 있었다. 해조군집의 재형성이란 측면에서 볼 때, 출현 종수와 생물량이 교란 이전의 수준에 다소 못 미친다 해도, 어떤 군집의 천이가 꼭 이전의 군집 형태로만 진행되지 않는다는 개념에서 본다면, 본 지역 해조군집은 10개월 정도면 정상 군집으로 회복되는 것으로 생각된다.

조사 시기와 정점에 따른 선거 내 해조군집의 동적 변화는 주성분 분석 시 PC I축을 기준으로 왼쪽에는 해조 식생이 풍부한 봄과 겨울 군집, 오른쪽으로 갈수록 식생이 빈약한 가을과 여름의 해조군집이 위치하여 본 선거생태계 해조군집은 뚜렷한 계절적 구분이 있음을 알 수 있었다. 또한 적조로 인한 해조군집의 파괴 후 천이 과정을 잘 보여주었는데, 생태계 교란이 있고 9개월 이후의 해조 군집은 교란 전의 정상 군집에 어느 정도 접근하였고, 이것은 계절적 소장 양식과 밀접한 관계를 갖는 것으로 생각된다. 이런 결과는 환경 요인과의 회귀분석에서 I축에 영향을 주는 요인이 계절과 관계된 수온, 강수량, 염분, 질소계 영양염 등으로 나타난 것과 맥을 같이 한다.

이들을 종합해 볼 때, 선거생태계에서 해조군집이 극상 상태로 회복되는 기간은 해조군집이 파괴된 후 10개월 정도로 판단되고, 군집의 천이양식은 다년생 해조군집으로 대표되는 해양

과는 달리 Niell(1979)이 보고한 천이과정단계(channelling succession phase)의 수준이며, 천이 형태는 계절에 따른 순환형 천이(cyclic succession)를 하는 것으로 판단되었다.

참고문헌

김영환. 1987. 인공저층을 이용한 해조류의 착생 및 천이에 관한 연구. 한국조류학회지 1: 73-91.

김영환, 이인규. 1986. 발전소 취·배수구에 생육하는 부착생물의 생태적 연구. 충북대학교 논문집 31: 71-84.

김영환, 이정호. 1980. 고리원자력발전소 주변 해조류에 관한 연구. 1. 1977-1978년의 해조군집의 변화. 한국식물학회지 22: 3-10.

배수환, 이종화. 1981. 인공어초의 생물학적 연구. 소형간도 하계 생물상과 인공어초의 부착생물(1). 군산수대연보 15: 15-21.

유종수, 김영환, 이인규. 1991. 인천항 선거내에서 교란된 부착해조군집의 재형성. 한국식물학회지 34: 165-173.

유종수, 이진환, 김영환, 이인규. 1992. 인천항 폐쇄 해양생태계 식물플랑크톤의 생물량과 일차생산력. 한국식물학회지 35: 323-332.

유종수, 이진환, 이인규. 1997. 인천항 선거내 해양환경의 이화학적 특성. 한국생태학회지 20: 61-68.

Connell, J.H. 1972. Community interactions on marine rocky intertidal shores. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 3: 169-192.

Fager, E.W. 1971. Pattern in the development of a marine community. *Limnol. Oceanogr.* 16: 241-253.

Kim, Y.H. and J.S. Yoo. 1994. Patterns of algal succession in a *Sargassum thunbergii* (Phaeophyta) dominated rocky intertidal community. *Korea J. Phycol.* 9: 59-65.

Kim, Y.H., J.S. Yoo and J.H. Lee. 1992. Marine algal succession in a perturbed intertidal community. *Korea J. Phycol.* 7: 131-138.

Ludwig, J.A. and J.F. Reynolds. 1988. *Statistical Ecology*. John Wiley & Sons,

Inc. 337 pp.

Niell, F.X. 1979. Structure and succession in rocky algal communities of temperature intertidal system. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 36: 185-200.

Northcraft, R.D. 1948. Marine algal colonization on the Monterey Peninsula, California. *Amer. J. Bot.* 35: 396-404.

Saito, Y, H. Sasaki and K. Watanabe. 1976. Succession of algal communities on the vertical substratum faces of break-waters in Japan. *Phycologia* 15: 93-100.

Serisawa, Y., S. Taino, M. Ohno and Y. Aruga. 1998. Succession of seaweeds on experimental plates immersed during different season in Tosa Bay, Japan. *Bot. Mar.* 41: 321-328.

Tsuda, R.T. and H.T. Kami. 1973. Algal succession on artificial reefs in a marine lagoon environment in Guam. *J. Phycol.* 9: 260-264.

Yoo, S.A. 1990. An ecological study of marine algae of Incheon Dock. *J. Nat. Sci., Pai-Chai Univ.* 3: 109-138.