

## 인천 연안 미세오손생물 군집 형성과 원생동물의 영향

최중기 · 양은진 · 이원제 · 윤원득\* · 심재형<sup>1</sup>

인하대학교 해양학과, <sup>1</sup>서울대학교 해양학과 및 해양연구소

### The Effects of Protozoa on the Early Formation of Microbial Fouling Communities of Incheon Coastal Waters

JOONG KI CHOI, EUN JIN YANG, WON JE LEE, WON DUK YOON\* AND JAE<sup>1</sup> HYUNG SHIM  
Department of oceanography and Regional Research Center for Coastal Environments of Yellow Sea,  
Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>1</sup>Department of Oceanography and Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
\*Present address: West Sea Regional Fisheries Research Institute, 98-36 Buksung Dong 1 ga, Jung gu, Incheon 400-201, Korea

본 연구에서는 미세오손생물 군집 형성에 있어서 원생동물의 역할을 파악하기 위하여 초기 미생물막 형성과 미세오손생물 군집의 형성 및 부착과정, 부착 박테리아에 대한 원생동물의 포식영향 등이 연구되었다. 이를 위하여 인천내항과 외항(해경부두), 실험실 등에서 부착실험을 10~30일간 계속적으로 수행하였다. 인천내항 실험에서 박테리아와 편모충류는 실험 시작 6시간내에 미생물막을 형성하기 시작하였고, 섬모충류는 9시간 경과시에 빈모류가 2 cells mm<sup>-2</sup> 출현하였다. 부착오손생물인 따개비 *Balanus albicostatus*의 유생은 실험 첫날부터 부착하기 시작하였다. 수위가 안정된 인천내항에서 편모충류는 13일경 최대 465 cells mm<sup>-2</sup> 출현하였고, 섬모충류는 11일째 63 cells mm<sup>-2</sup>이 최대로 출현하였다. 인천외항에서 편모충류는 초기에 최대 223 cells mm<sup>-2</sup> 출현하였고, 섬모충류는 5일째 최대 39 cells mm<sup>-2</sup> 출현하여 인천내항보다는 외항에서 미생물막이 빠르게 발달하였으나 원생동물 출현 개체수는 작았다. 미생물막에 출현한 편모충류는 대부분 저서성인 *Metromonas*종류와 *Bodonids*종류였고, 섬모충류는 초기에는 소형 유종섬모충류 종류와 빈섬모충 *Strombidium*종류였고, 후에는 빈섬모충 *Strombidium viridae*(60 μm)와 부착성 Suctorina인 *Acineta turberosa*가 출현하였다. 오손생물 군집은 따개비 유생이 초기부터 부착하여 7일째 18 개체 cm<sup>-2</sup> 까지 증가하였다. 이때 따개비 성체가 출현하기 시작하고 9일째부터는 따개비 사체가 발견되기 시작하였다. 이외에 오손생물로 강장동물 *Anthozoa* sp., 참굴(*Crassostrea gigas*)유생, 갯지렁이 유생 등이 실험시작 3일 후부터 부착하기 시작하였다. 부착판에 서식하는 요각류 *Harpacticus* sp. 등과 단각류 등은 미생물막이 잘 발달된 7일 이후에 출현하기 시작하였다. 미생물막 형성에는 알루미늄판이 유리판과 아크릴판보다 다소 유리하였고, 오손생물 군집과 부착판 서식생물 군집의 형성에는 유리판이 알루미늄판보다 유리하였다. 미생물막 박테리아에 대한 원생동물의 섭취율은 낮은 편이나 포식율은 0.058 h<sup>-1</sup>로 비교적 높아 원생동물이 미생물막 박테리아 개체군 사망에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

To understand the role of protozoa in the early formation of microbial fouling community, the studies on the formation of microbial film, the succession of microbial fouling communities, and the grazing pressure on bacteria population in microbial film were carried out in the laboratory, Incheon outer port and Incheon inner harbour. Bacteria and heterotrophic flagellates formed primary microbial film on the aluminum surface within 6 hours and oligotrich ciliates were observed 2 cells mm<sup>-2</sup> on the same surface at 9 hours in Incheon inner harbour which had physically stagnant condition. The larvae of *Balanus albicostatus* which were dominant meiobenthos in Incheon coastal area attached on the glass surface at the first day of experiment. Heterotrophic flagellates showed maximum abundance of 465 cells mm<sup>-2</sup> at the 13rd day and ciliates showed maximum abundance of 63 cells mm<sup>-2</sup> at the 11st day in the Incheon inner harbour. In the Incheon outer port which opens to the outer sea, the maximum abundance of protozoa occurred at early phase, but not so many. The dominant heterotrophic flagellates were *Metromonas simplex* and *Bodonids*. Dominant ciliates were small tintinnids and oligotrich ciliate *Strombidium* sp., Large *Strombidium* (oligotrich ciliate) and sessile *Acineta turberosa* (suctorian ciliate) occurred after 10 days. The attached larvae of *Balanus* occurred as biofouling organism on the early surface and showed maximum abundance of 18 indiv. cm<sup>-2</sup> at 7th day. At that time, adult barnacles were observed on the surface and dead barnacles were observed after two days. Except barnacles, the larvae of *Anthozoa* sp., Oysters (*Crassostrea gigas*) and Polychaeta were observed on the surface from 3rd day. 3 benthic copepods including *Har-*

*pacticus* sp., 1 isopod, 1 polychaeta and 1 gastropoda were observed as predators of the microbial film on the surface after 7 days when microbial film developed very well. Although the ingestion rates of protozoa on the bacteria of the microbial film were relatively low, the average grazing rate of protozoa on bacteria was high of  $0.058 \text{ h}^{-1}$ . This implied that the grazing pressure of protozoa influences the mortality of bacteria populations on the microbial film, but protozoa cannot get enough energy from only bacteria on the microbial film.

## 서 론

해양에는 육상기원 또는 해양기원의 많은 용존유기물이 존재한다. 이런 용존유기물은 해양의 다양한 생물학적 과정을 조절하고 어떤 생물에게는 필수적인 에너지원이 되기도 한다(Stephens, 1967). 이러한 용존유기물은 또한 해양에 존재하는 입자물질이나 고형물질 표면에 부착되어 영양원이 되기도 한다(Khailov and Finenko, 1970). 단백질 계통이나 부식물질(Humic substances)에서 유래된 이러한 폴리머 물질은 거의 모든 자연수에서 발견되고 이들은 수시간내에 고형 물질 표면을 덮어 다분자 표면막을 형성한다(Loeb and Neihof, 1975). 해수 내 용존유기물의 일차 이용자가 박테리아이듯이(Pomeroy, 1974), 용존유기물이 덮인 표면에 일차적으로 부착하는 것은 박테리아이다(Marshall, 1976; Cundell and Mitchell, 1977). 이 유기물 표면막은 고분자 글리코프로테인으로 구성되어(Bauer *et al.*, 1968) 막과 해수사이의 입계 표면장력을 낮추어 박테리아 부착을 허용한다(Mitchell and Kirchman, 1984). 박테리아는 화학적 감지능력으로 표면막으로 유입해 들어가며 막의 성질에 따라 가역적으로 표면막에 약하게 붙으나 박테리아가 분해한 폴리머 물질에 의해 비가역적 흡착이 일어난다(Marshall *et al.*, 1971). 이들 다당류 또는 글리코프로테인 계통의 폴리머는 박테리아를 표면막에 강하게 부착시켜 거의 영구적인 미생물막을 형성하게 한다(Marshall, 1981). 동시에 박테리아는 다량의 폴리머를 생산하여 다른 미생물이 꼬이도록 하여 2차 미생물 개체군이 형성되도록 한다(Cundell and Mitchell, 1977). 이 2차 미생물 개체군 형성은 영양조건에 따라 외양에서는 수주일일 걸리고, 연안에서는 수 일내 형성된다. 미생물막 초기에는 간상형 박테리아가 나타나나 그후 편모를 가진 박테리아로 교체되어 다당류의 점액질 슬라임을 분비하여 미생물막을 발달시킨다. 미생물막이 잘 발달되면 대형 박테리아나 사상체형 박테리아가 부착되어(stalked and filamentous bacteria) 나타난다(Mitchell and Kirchman, 1984; Choi *et al.*, 1996).

이러한 점액질이 모인 표면막은 다른 유기 입자나 다른 미생물들이 부착할 수 있는 여건을 형성한다. 조류의 막 군집 형성기작에 대해서는 충분히 알려지지 않았으나 일부 와편모류(*Crypthecondinium*)와 녹조류 *Dunaliella* 실험에서 박테리아 경우와 같이 화학물질에 대한 감지 반응이 나타났다(Hausser *et al.*, 1975; Sjoblad *et al.*, 1978). 와편모류는 글리신, 알라닌 등에 이끌렸고, *Dunaliella*는 암모니움, 티로신, 트립토판 등에 강하게 이끌려 표면막의 화학조성에 따라 종 특이성을 보였다. 유입된 조류들은 1~3일내에 막표면의 박테리아에 의해 만들어진 다당류 물질에 특별히 결합할 수 있는 단백질체나 렉틴 물질을 생성해 막표면에 단단히 부착하는 것으로 보인다(Mitchell and Kirchman, 1984). 일부 연구자들에 의하면 부착 규조류들

은 미생물막 초기과정에 박테리아와 관계없이 초기에 부착되어 수시간내에 군체를 이룬다고 한다(Sieburth, 1975; Cuba and Blake, 1983; Kang *et al.*, 1998).

고형물질 표면에 형성된 미생물막의 발달은 무척추 오손생물(biofouling invertebrate)의 초기발달에 또한 중요하다. 많은 무척추 오손생물의 유생은 미생물막으로 덮힌 표면에 부착하기를 좋아한다(Crisp, 1974). 특히 박테리아는 유생의 부착을 유도하는 것으로 오래전부터 알려져 왔다. Kirchman *et al.*(1981)은 유생의 표면 단백질이 박테리아나 부착조류에 의해 형성된 탄수화물에 결합되어 부착한다고 하였고, 유생을 유도하는 것은 박테리아에서 분비된 특수한 체외 폴리머라고 하였다. 미생물막 군집에는 미생물막의 발달에 따라 이러한 무척추동물의 유생뿐 아니라 박테리아를 포식하는 원생동물이 유입되고 균(fungi)등이 부착되어 복잡한 2차 미생물막으로 발달하는 것으로 알려져 있다(Cundell and Mitchell, 1977).

미생물막에서의 원생동물의 출현에 관하여는 일찍부터 많은 연구자들에 의해 발표되었으나(Zobell and Allen, 1935; Sieburth, 1975; Marszalek *et al.*, 1979; Caron and Sieburth, 1981; Cuba and Blake, 1983; Mitchell and Kirchman, 1984), 대부분 일부종의 출현상태에 관하여만 단편적으로 언급하고 있을 뿐 구체적인 출현시기와 출현량, 미생물막에서 원생동물의 역할, 다른 미생물과의 관계 등에 대하여는 거의 논의된바 없다. 해수중의 용존유기물을 이용하는 자유 영양박테리아(free living bacteria)와 부유원생동물의 관계에 관하여는 미세생물 먹이고리와 미세생물 먹이망의 개념으로 많이 밝혀졌다(Pomeroy, 1974; Azam *et al.*, 1983; Sherr and Sherr, 1988). 또한 저서생물 군집내에서도 박테리아와 원생동물의 상호관계에 관하여는 많은 연구가 있어왔으며(Fenchel, 1987; Alongi, 1991), 유기쇄설입자에 붙은 박테리아에 대한 원생동물의 영향에 관하여도 많은 연구가 진행되고 있다(Silver *et al.*, 1984; Caron, 1991). 이에 비해 고형물질 표면에 형성되는 미생물막내의 박테리아에 대한 원생동물의 역할과 관계에 대하여는 구체적으로 연구된 것이 없다(Mitchell and Kirchman, 1984).

본 연구는 미생물막 형성과정에서 출현하는 원생동물의 출현시기와 출현양상을 수괴특성과 비교하여 일차적으로 파악하고, 이들의 포식에 의한 박테리아 개체군에 대한영양정도를 실험실 실험과 현장실험을 통하여 비교하여 파악하고자 한다. 또한 인천연안 오손생물 군집으로 출현하는 무척추동물의 유생착생시기와 부착군집 출현양상을 미생물막 발달과정과 비교하여 논의하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 연구 수역 개관

본 연구는 환경조건이 서로 상이한 인천내항과 외항에서 수

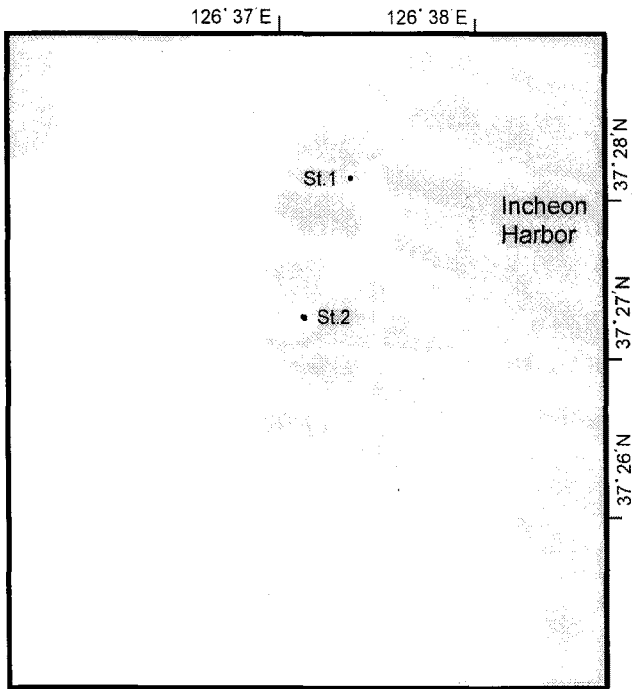


Fig. 1. Map of the study area.

행되었으며, 동시에 실험실에서도 부착실험이 수행되었다.

**정점 1:** 인천항 내의 곡물부두수역으로서(Fig. 1) 적조가 수시로 발생하는 지역으로, 하루에 1번정도씩 해수의 유동이 소규모 있을뿐 거의 정체된 폐쇄수역이라 할수 있다. 부착실험은 1996년 5월 1일 부터 5월 25일까지 수행되었으며, 연구초기에 은편모류에 의한 적조가 발생하였다.

**정점 2:** 하루 2회의 조석운동으로 외해수와의 순환이 용이한 만조시 수심 12 m에 이르는 인천 연안 해경부두로서 만·간조에 따라 해류의 순환방향이 바뀌는 연안수역이다(Fig. 1). 부착실험은 1996년 9월 10일 부터 10월 1일까지 수행되었다.

**현장실험**

**부착 미세생물 실험:** 현장에 원통부표(직경 30 cm)를 띄워놓고 Fig. 2a와 같이 부표 밑에 부착관을 매달아서 시간에 따라 판을 회수하였다. 사용된 부착관은 알루미늄판(75mm×25mm)과 아크릴판(75mm×25mm)으로 수면하 40~50 cm 정도로 수직이 되게 매달았다. 시간에 따라 판을 회수하여 0.2 μm 여과해수로 세척하여준 후(비부착 생물 제거), 중성 포르말린액으로 최종농도 1%가 되게 고정한 후 노출된 표면을 위로 향하게 하여 운반하였다. 부착관의 미세생물 군집을 계수하기 위하여 DAPI로 염색한후 형광현미경(Porter and Feig, 1980)과 광학현미경(Nikon type 104)으로 검경하여 단위 면적당 개체수로 환산하였다. 또한 부착관 회수와 동시에 주위해수를 채수하였다. 편모류 계수를 위하여는 중성 포르말린으로 최종농도 1%가 되게 고정한후 DAPI로 염색하여 형광현미경으로 검경하였고, 섬모충류 계수를 위하여는 루골액으로 최종농도 1%가 되게 고정한후 광학현미경으로 검경하였다.

**부착관 중형동물 실험:** 중형 오손생물 군집의 시간기질에 따

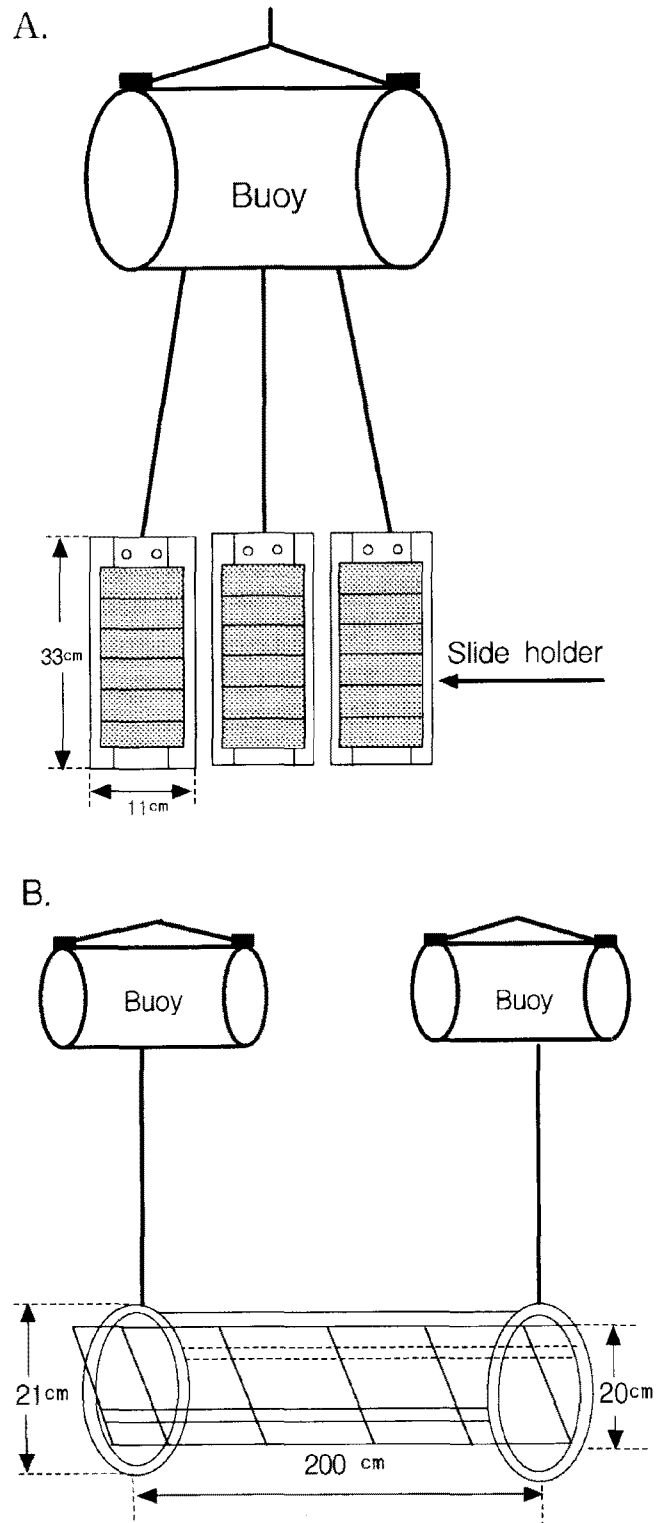


Fig. 2. The diagrams of sampling apparatus. (A) for microfouling organism, (B) for macro- and meiofouling organism.

른 변화를 알아보기 위하여 외해의 자연조건과 유사한 정점 2에서 1996년 9월 13일 부터 9월 30일까지 실험이 수행되었다. 실험기구는 알루미늄으로 제작된 길이 2 m, 폭 21 cm의 원통형(Fig. 2b)으로 선착장 부교에 설치하였다. 이 알루미늄기구에

가로, 세로 20 cm의 알루미늄판과 유리판을 삽입하였다. 알루미늄판은 양면 공히 밋밋한 반면, 유리판은 한면(전면)은 사포로 갈고 다른 한면(후면)은 갈지않은 면으로 되어있다. 판들은 수심 약 30 cm에 수직으로 장치되었다. 유리판의 경우, 갈지않은 면이 부교쪽으로 향하게 하였다. 실험기간 18일 동안 정기적으로 판들을 회수하여, Olympus 해부 현미경으로 오손생물 군집을 동정계수하였고, 이를 단위면적(1 cm<sup>2</sup>)당 개체수로 환산하였다. 판위에 서식하는 동물군집은 0.2 μm 여과해수로 판을 세척하여 이를 250 ml 시료병에 모아 글루타알데하이드로 최종 농도 2%가 되게 고정하였다. 이 시료도 해부현미경하에서 동정계수하였으며, 이를 1 cm<sup>2</sup> 당 총개체수로 통일하였다.

**실험실 배양**

현장에서 실험시작과 동시에 정점 1에 있는 해수를 채수하여 100 l 대형수조에 1 μm와 200 μm 망목으로 각각 여과한 해수를 넣어두고 현장에서 사용한 것과 동일한 재질인 알루미늄판과 유리판을 사용하여 수직으로 매달아 두었다. 박테리아에 의한 부착성장과 미세생물의 섭식율을 알아보기 위하여 대조실험으로서 1 μm로 여과한 해수를 사용하였고, 200 μm 이하의 미소형 원생동물에 의한 부착판에서의 섭식률 관계를 알아보기 위하여 200 μm 망목으로 여과하여 동물플랑크톤에 의한 포식압을 제거하고 실험하였다. 각각의 수조에는 2개의 폭기를 설치하여 산소를 공급하였다. 현장과 같이 시간에 따라 부착판을 회수하여 현장실험과 동일한 방법으로 처리하였으며 동시에 수조의 해수를 채수하여 변화율도 함께 조사하였다.

**원생동물의 포식율과 섭취율**

부착판에서 박테리아에 대한 원생동물의 포식율(G)과 섭취율(I)은 Frost(1972)의 방법에 의거해 다음식을 이용하여 구하였다.

$$G = \frac{\ln C_0 - \ln C_t}{t} + k$$

$$I = G/N \times (C)$$

G: 원생동물의 포식율, k: 대조구의 부착판에서 먹이생물 개체군의 증가율, C<sub>0</sub>: 실험용기 부착판의 초기 먹이 생물 농도, C<sub>t</sub>: 실험용기 부착판의 t시간 후 먹이 생물 농도, t: 실험 시간, I: 원생동물의 섭취율, N: 실험용기 부착판의 원생동물 개체수, (C): 실험용기 부착판의 먹이 생물 평균 농도

**원생동물 동정**

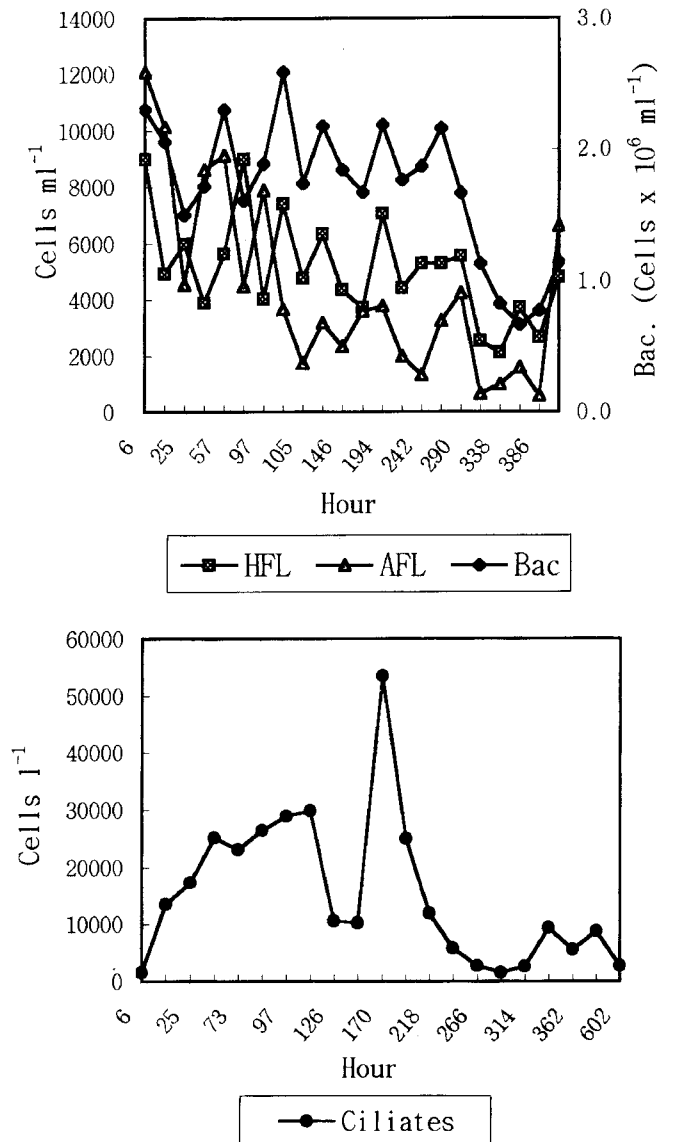
부착 원생동물의 동정은 Lee et al.(1985)과 Patterson et al.(1989), Patterson and Larsen(1991)을 참고하여 수행하였다.

**결 과**

**현장 미생물 부착실험**

**A. 인천항 내에서 부착실험**

**해수내 부유원생동물:** 외해에 비해 해수의 유동이 거의 없는 정체된 수역이면서 부두에서 누출된 유기물이 풍부하게 용존되어 있어 은편모 조류인 *Cryptomonad* sp.에 의해 수시로 적조



**Fig. 3.** Temporal variation of microorganism abundances in sea water of inner harbor.

가 발생하는 인천항내 곡물부두 인근 수역에서 부착실험을 수행하였다. 해수중의 미세생물먹이망 구성요인의 분포는 부착 실험 초기에 *Cryptomonad* sp.의 적조가 발생하였기 때문에 독립 영양편모충류(AFL)는 10,000 cells ml<sup>-1</sup>가 넘는 많은 양이 출현하였다. 이에 따라 박테리아도 평균 2.31×10<sup>6</sup> cells ml<sup>-1</sup>로 비교적 많이 출현하였고, 종속영양편모충류(HFL)도 평균 8,987 cells ml<sup>-1</sup>로 비교적 많이 출현하였다(Fig. 3). 섬모충류도 외해 수역에 비해 많은 10,000 cells l<sup>-1</sup> 이상이 출현하였다. 그러나 부착 실험후 10일이 경과하면서 *Cryptomonad* sp.에 의한 적조가 소멸하면서 독립영양 편모류도 5,000 cells ml<sup>-1</sup>로 감소되고, 종속영양편모충류도 5,000 cells ml<sup>-1</sup> 이하로 감소되었으며, 박테리아도 1×10<sup>6</sup> cells ml<sup>-1</sup> 이하로 떨어졌다. 섬모충류도 10,000 cells l<sup>-1</sup> 이하로 감소되어 출현하였다. 그러나 부착실험 기간중 전반적으로 인천항 바깥(Choi et al., 1995) 조건에 비해 인천항내 미세생물 군집의 양적분포가 풍부하게 유지되었다. 섬

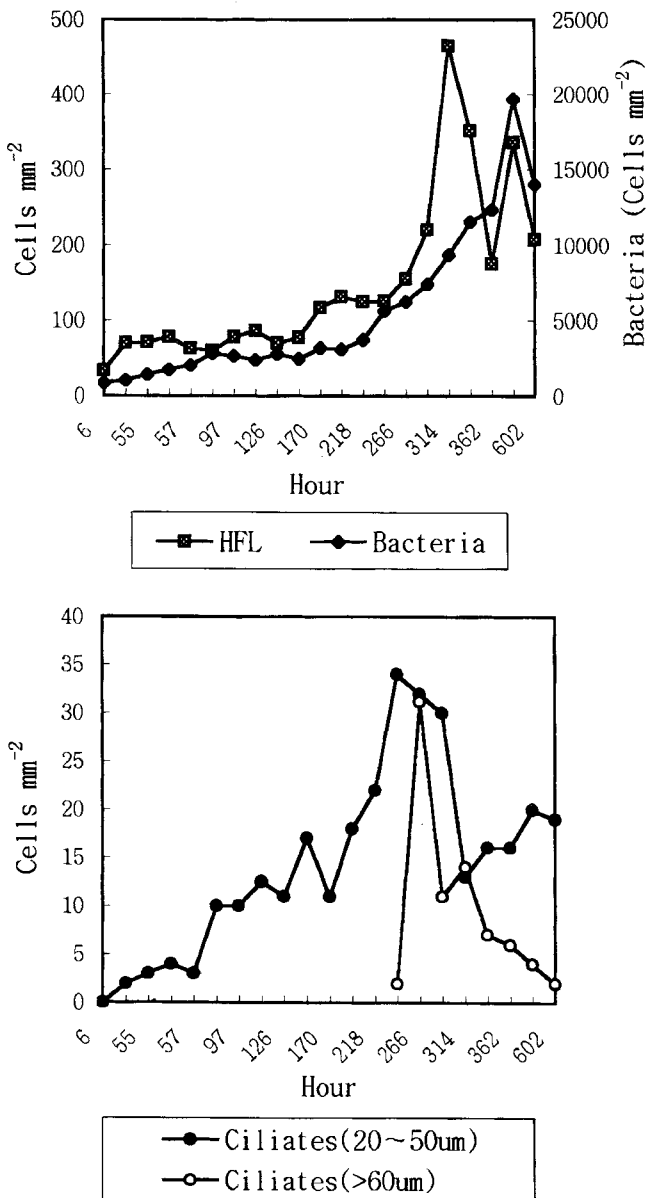


Fig. 4. Time-course changes of abundances of attached microorganisms on aluminum surface in inner harbor.

모충류중 우점종은 빈모류의 *Strombidium* 종류(30~50 µm)로 70~80% 이상의 높은 우점율을 보였다.

**알루미늄 부착 원생동물:** 인천항내 해수에 유입시킨 알루미늄 부착판에는 초기에 간상형 박테리아가 부착되면서 미세생물막이 형성되기 시작하여 6시간 경과시에 박테리아가 평균 836 cells mm<sup>-2</sup> 부착하였고, 종속영양편모충류는 저서성의 *Metromonas simplex*와 3~5 µm 크기의 Bodo 종류가 평균 1 mm<sup>2</sup> 당 33 개체 출현하여 6시간 경과시에 박테리아에 영향을 미친 것으로 보인다. 섬모충류는 부착실험 9시간이 경과되면서 부착판에 출현하였다. 처음 출현종은 20 µm 크기의 빈모류로 1 mm<sup>2</sup> 당 2 개체 출현하였다. 50시간이 경과할때까지 3~4 개체 소량 출현하다가 3일이 지난후 10개체로 증가하여 출현하였다(Fig. 4). 이때 출현종은 20~50 µm 크기의 미소종으로 주로 *Strombidium* 종류였다. 부착 실험 10일 경과 부터 60~70 µm 크기의

*Strombidium viridae*가 다량으로 나타나 11일째에 조사기간중 가장 많은 63 cells mm<sup>-2</sup>가 출현하였다. 12일째에는 부착형인 *Acineta tuverosa*가 플레이트당 2~3개 소량 부착하여 수중미생물을 포식하였다. 13일이 지나면서 대형 섬모충류는 크게 감소하기 시작하고 소형종들만 13~20 cells mm<sup>-2</sup> 지속적으로 출현하였다.

종속영양편모충류는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 박테리아 증가에 맞추어 꾸준히 증가하여 314시간이 경과하였을때 465 cells mm<sup>-2</sup>로 최대 출현하였다가 이후 서서히 감소하여 25일 경과시에는 평균 208 cells mm<sup>-2</sup> 출현하였다.편모충류는 7일 이후 *Anisonema*, *Pusedoperanema*, *Bodonids* 등이 출현하여 다양한 종조성을 보이기 시작하고, 1 mm<sup>2</sup> 당 100 개체 이상 출현하여 안정된 군집으로 진행중임을 보였다.

박테리아는 미생물막 형성이후 꾸준히 증가하여 16일째는 최대 16,980 cells mm<sup>-2</sup> 까지 증가하였다. 이후 25일째 다소 감소하였으나 이때는 이미 미생물막이 대형 군체 집단을 이루어 정확히 판정하기 어려웠다.

**유리판에서의 부착원생동물:** 인천항에서 알루미늄판과 동시에 유입시킨 유리부착판의 미생물막 형성과정을 보면 초기에는 박테리아, 종속영양편모충류, 섬모충류 모두 적은수의 현존량이 부착하였으나 97시간이 지나면서 알루미늄판과 유사한 현존량을 보였다. 즉 박테리아는 초기 15시간 경우에 알루미늄판에 비해 반 이하의 현존량 부착을 보였고, 종속영양편모충류는 73시간 경과 시까지 알루미늄판에 비해 25% 정도 적은 출현 종수를 보였다. 그러나 그이후 박테리아 부착이 증가되면서 종속영양편모충류도 크게 증가되었고, 337시간 경과시에는 최대 465 cells mm<sup>-2</sup> 부착을 보여 하루 늦지만 알루미늄판의 최대 부착량과 동일한 부착량을 보여주었다. 섬모충류는 217시간 경과시에 최대 47 cells mm<sup>-2</sup> 부착하여 알루미늄판 보다 다소 많이 부착하였으나 그후 대형종이 출현하지 않아 전반적으로 알루미늄판보다 적은 부착량을 보였다.

유리판위에서는 알루미늄판과 유사한 종이 출현하였으나 알루미늄판에서 11일 이후에 출현하였던 대형 빈모류나 *Acineta* 등의 부착섬모류가 유리판에는 출현하지 않았다.

**B. 외항에서의 미세생물 부착실험**

**해수조건 및 미세생물 분포:** 외항과 인접한 외항에서 부착실험 기간 동안 해수 염분 변화는 28.5%에서 29.0% 까지로 큰 변화가 없었으나 수온은 실험 초기에는 25°C를 기록하였으나 15일 경과후에는 23°C를 기록하여 실험기간중 약 2°C 변화를 보였다.

미세생물 분포는 Fig. 5와 같이 실험초기에는 박테리아가 1×10<sup>6</sup> cells ml<sup>-1</sup>~1.4×10<sup>6</sup> cells ml<sup>-1</sup> 만큼 분포하였으나 145 시간 이후에는 5.6×10<sup>5</sup> cells ml<sup>-1</sup>~1.3×10<sup>6</sup> cells ml<sup>-1</sup>로 다소 감소하여 출현하였다. 종속영양편모충류는 1~5일 동안에는 평균 7,400 cells ml<sup>-1</sup>로 분포하였으나 145시간 이후에는 평균 2,835 cells ml<sup>-1</sup> 감소되어 출현하였다. 독립영양편모충류는 초기 3일간에는 평균 3,088 cells ml<sup>-1</sup> 출현하였으나 그 이후 평균 767 cells ml<sup>-1</sup>로 감소되어 나타났다. 섬모충류는 초기 5일 동안에는 평균 5,500 cells l<sup>-1</sup>로 출현하였으나 그이후에는 다소 증가하여 평균 7,910 cells l<sup>-1</sup> 출현하였다. 대체로 편모류는 초

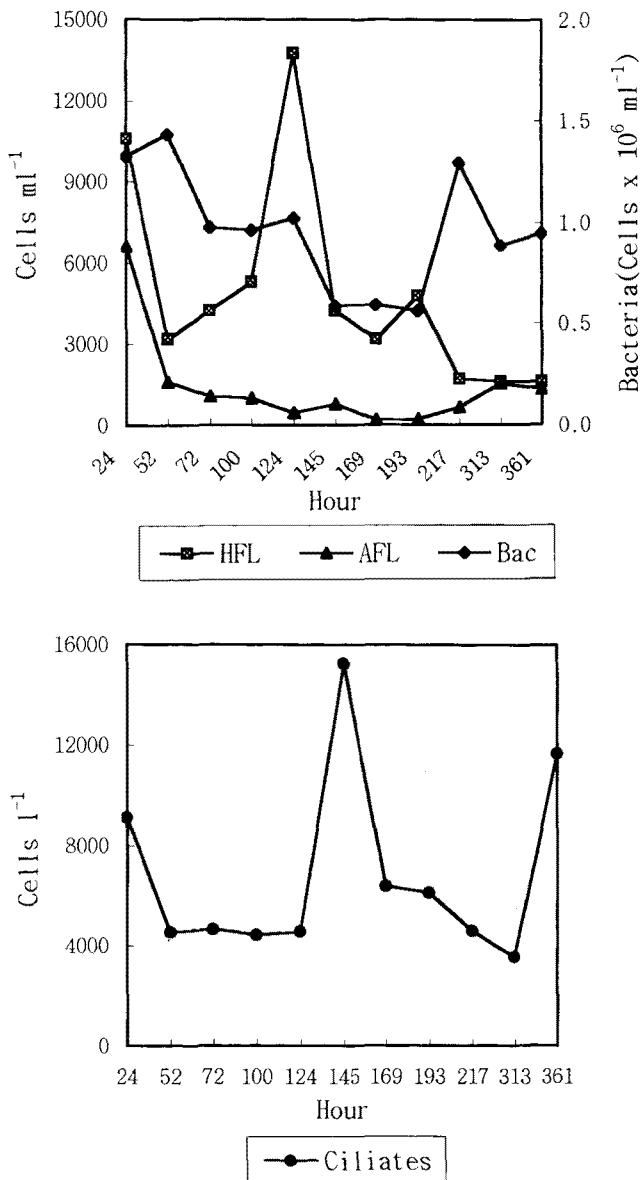


Fig. 5. Temporal variation of microorganism abundances in sea water of outer port.

기에 다소 많이 출현하였고, 섬모충류는 후기에 많이 출현하여 상호간에 역의 관계가 보였다. 이때에 우점한 부유섬모충류는 *Strombidium*계통의 빈모류였다.

**외항에서의 알루미늄판 부착실험:** 해수 유동이 활발하고 소규모 파랑이 있는 외항에서 알루미늄 부착 실험 결과 간상형 박테리아가 24시간 경과시 488 cells mm<sup>-2</sup> 출현하였고 72시간 경과시에는 관면에 생긴 원형의 유기물 부착흔적에 박테리아가 대량으로 부착하기 시작하여 35,538 cells mm<sup>-2</sup>가 출현하였고, 이후 대량으로 계속 증가하여 여러겹의 대규모 군체를 형성하여 측정하기 어려웠다(Fig. 6).

중속영양편모충류는 초기 30시간내에서는 112~223 cells mm<sup>-2</sup>로 많은 수가 부착하였으나 52시간 경과시까지 30 cells mm<sup>-2</sup>로 감소해 이후 박테리아의 증가에도 불구하고 70 cells mm<sup>-2</sup> 이하의 적은 개체수가 부착되어 나타났다. 출현종은 *Metromonas*

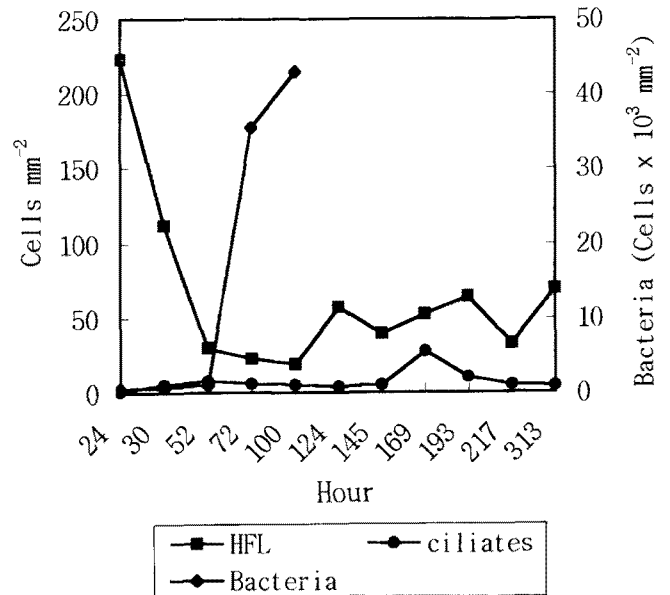


Fig. 6. Time-course changes of attached microorganism of aluminum surface in outer port.

*simplex*, *Pseudoperanema fusiforme*, *Anisonema* sp.등이 주로 출현하였다.

섬모충류는 24시간 경과시에 처음으로 1 mm<sup>2</sup>당 1개체 출현하여 145시간 경과시 까지 8 개체 mm<sup>-2</sup> 이하의 낮은 부착상태를 보이다가 169시간 경과시 28 cells mm<sup>-2</sup>로 큰 증가를 보였으나 217시간 경과 이후 다시 5 cells mm<sup>-2</sup> 이하의 낮은 부착상태를 보였다(Fig. 6). 부착 섬모충류는 30~50 μm 크기의 *Strombidium*과 유종섬모충류가 주로 출현하였다.

**외항에서의 아크릴판 부착 실험:** 아크릴판에서 박테리아 부착은 초기 30시간내에서는 많은 수가 출현하였다. 그러나 13일

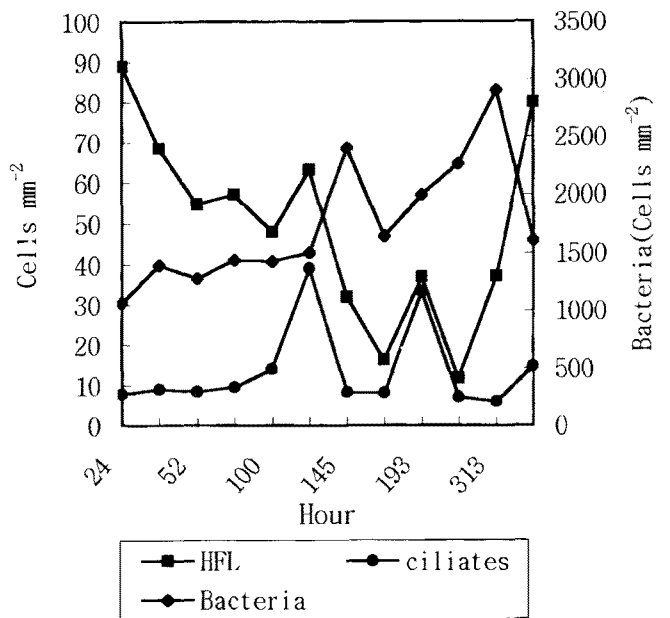


Fig. 7. Time-course changes of attached microorganism of acryl surface in outer port.

경과시 최대 2,904 cells mm<sup>-2</sup>의 개체가 부착하였을뿐 시간이 경과하여도 증가하지 않았다(Fig. 7). 종속영양편모충류는 초기부터 15일 경과시까지 12~80 cells mm<sup>-2</sup> 부착하여 특별한 증가 상태를 보이지 않았다. 섬모충류는 30시간 경과시 9 cells mm<sup>-2</sup> 부착한후 5일 경과시에는 39 cells mm<sup>-2</sup> 까지 증가하였으나 이후 다소 감소하여 8~33 cells mm<sup>-2</sup>의 부착상태를 보였다. 아크릴판에 부착한 원생동물은 동시에 투입한 알루미늄판에 부착한 원생동물과 거의 동일한 종류로 종속영양편모충류는

**Table 1.** Time-course changes of abundance of attached fouling organisms in outer port (A) Glass Plates

Units: individual cm<sup>-2</sup>

	Day								
	1	2	3	5	7	9	11	13	18
<b>Front plates (sand papery)</b>									
larval barnacle	2.4	1.6	11.2	14.8	18.1	6.7	1.6	1.9	0.1
adultbarnacle	0	0	0	0	0.1	2.1	2.4	4.2	0
dead barnacle	0	0	0	0	0	2.4	10.3	11.4	8.6
Anthozoa	0	0	0	0.2	0.1	0.1	0.2	0	0
Oyster	0	0	0	0	0	0.4	0.7	0.1	0.1
Polychaeta	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	
<b>Total</b>	<b>2.4</b>	<b>1.6</b>	<b>11.2</b>	<b>15.0</b>	<b>18.2</b>	<b>11.7</b>	<b>15.2</b>	<b>17.7</b>	<b>9.0</b>
<b>Dominant rate of barnacle(%)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>98.8</b>	<b>99.4</b>	<b>95.2</b>	<b>94.2</b>	<b>98.7</b>	<b>96.2</b>
<b>Back plates (nonsandpapery)</b>									
larval barnacle	0.05	0.03	0.1	1.5	0.7	0.6	0	0.6	0.1
adult barnacle	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0
dead barnacle	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0
Anthozo	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0.4	0.1
Oyster	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polychaeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>	<b>0.2</b>	<b>1.5</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.1</b>	<b>1.2</b>	<b>0.2</b>
<b>Dominant rate of barnacle(%)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>50.0</b>	<b>100</b>	<b>87.8</b>	<b>81.8</b>	<b>75.0</b>	<b>67.4</b>	<b>62.5</b>
<b>Front/Back plates</b>	<b>48</b>	<b>53</b>	<b>56</b>	<b>10</b>	<b>23</b>	<b>14</b>	<b>152</b>	<b>15</b>	<b>45</b>

(B) Aluminum Plates

Units: individual cm<sup>-2</sup>

<b>Front plates</b>									
larval barnacle	0	0	0.4	1.4	2.1	1.6	0.9	1.1	0.5
adult barnacle	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0
dead barnacle	0	0	0	0	0	0	0	1.3	1.1
Anthozoa	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.1
Oyster	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polychaeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.4</b>	<b>1.4</b>	<b>2.1</b>	<b>1.6</b>	<b>0.9</b>	<b>2.7</b>	<b>1.7</b>
<b>Dominant rate of barnacle(%)</b>			<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>98.4</b>	<b>97.3</b>	<b>92.6</b>	<b>96.9</b>
<b>Back plates</b>									
larval barnacle	0	0	0.1	0.6	0.2	0.5	0.4	0.2	0
adult barnacle	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dead barnacle	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthozo	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2
Oyster	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polychaeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>
<b>Dominant rate of barnacle(%)</b>			<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>94.1</b>	<b>85.7</b>	<b>91.7</b>
<b>Front/Back plates</b>			<b>4</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>14</b>	<b>8</b>

*Metromonas simplex*, *Pseudoperanema fusiforme*, *Anisonema* 등이었고, 섬모충류는 *Strombidium* 종류와 유충섬모충류였다.

**다세포성 부착오손생물 군집형성**

**유리관 부착 오손생물 군집:** 해수유동이 비교적 활발한 인천 외항 해경부두에 유리관을 같은면과 갈지 않은면을 양면으로 하여 부착실험 결과 Table 1과 같이 같은 유리면에서는 부착관 투입 첫날부터 따개비 *Balanus albicostatus* 유생이 대거 부착하였다(Fig. 8). 첫날은 1 cm<sup>2</sup>당 2.4 개체 부착하였다가 2일째 다소 감소하였으며, 3일째부터 1 cm<sup>2</sup>당 10 개체 이상 부착하였다. 실험 7일째 따개비 유생이 최대 18 개체 cm<sup>2</sup> 부착한후 9일째 부터 일부는 성체로 발생하고 일부는 사멸하여 부착유생은 감소하였다. 따개비 성체는 7일째 부터 나타나기 시작하여 시간이 경과함에 따라 크게 증가하였다. 따개비의 사체는 실험 9일째 부터 나타나기 시작하여 실험 11일째에는 1 cm<sup>2</sup>당 10 개체 이상 사체로 출현하여 따개비 유생의 80% 이상이 사멸되고 있음을 보여주었다. 말미잘 계통의 *Anthozoa* sp.는 실험 5일째 부터 0.18 개체 cm<sup>2</sup> 출현하여 계속 비슷한 부착 상태를 보이다 실험 13일경 소멸하였다. 이때 패류인 참굴의 유생인 *Crassostrea gigas*는 9일째 부터 출현하여 1 cm<sup>2</sup>당 0.7 개체 까지 증가하였다가 감소하였다. 갯지렁이의 부착유생은 13일부 터 0.1 개체 cm<sup>2</sup> 출현하여 소규모로 증가하기 시작하였다.

같은 유리면에는 1 cm<sup>2</sup> 당 총 2.4 개체 부터 출현하여 7일째는 18 개체 까지 출현하는 양적 증가를 보였다. 갈지않은 유리면에는 총 부착 무척추 오손생물이 1 cm<sup>2</sup> 당 0.05 개체 에서 1.5 개체까지 출현하여 같은 유리면에 비해 극히 낮은 부착율을 보였다. 갈지않은 유리면에서 따개비 유생은 첫날부터 출현하여 5일째 최대 1.5 개체 cm<sup>2</sup> 부착하였으나 그후 감소하기 시작하였다. 따개비 성체는 같은 유리면과 동일한 시기인 7일째 부터 소량(0.03 개체 cm<sup>2</sup>) 부착하기 시작하였고, 따개비 사체는 13일경에 처음 나타났다. 강장동물의 부착은 3일경부터 출현해 같은 유리면 보다 하루 빨리 부착하였다. 참굴은 9 일째 부터 부착하기 시작하여 같은 유리면과 동일한 시기에 출현하였으나 훨씬 적은 개체수가 출현하였다.

유리부착관에 서식하던 무척추 동물은 요각류 *Harpacticus* sp., *Tigriopus japonica*, *Tisbe* sp., 단각류, 갯지렁이 유생, 복족류 등으로 *Harpacticus* sp.는 실험 7일째 부터 출현하기 시작하여 18일째는 1 cm<sup>2</sup>당 0.7 개체까지 출현하였다. *Tigriopus japonica*는 실험 9일째 부터 출현하기 시작하여 18일째는 0.2 개체 cm<sup>2</sup> 출현하였고, *Tisbe* sp.는 9일째 부터 출현하기 시작하여 18일째는 0.3 개체 cm<sup>2</sup> 출현하였으며, 단각류도 9일째 부터 출현하여 18일째 0.4 개체 cm<sup>2</sup> 출현하였다. 갯지렁이 유생은 11일째 부터 소량 출현하였다.

**알루미늄 부착 오손생물 군집:** 유리관과 동일한 시기에 해수 유동이 잘되는 외항에 투입한 알루미늄판에는 투입실험 3일째 부터 따개비 *Balanus albicostatus*의 유생이 소량(0.4 개체 cm<sup>2</sup>) 붙기 시작하여 7일째에는 최대 2.1 개체 cm<sup>2</sup>까지 붙다가 이후 감소되어 나타났다. 따개비 성체는 실험 5일째에 소량 붙었으나 곧 소실되었다가 실험 13일째 다소 증가되어 나타났다(Table 2). 따개비 사체는 실험 13일째 부터 나타나기 시작하였다. 실험

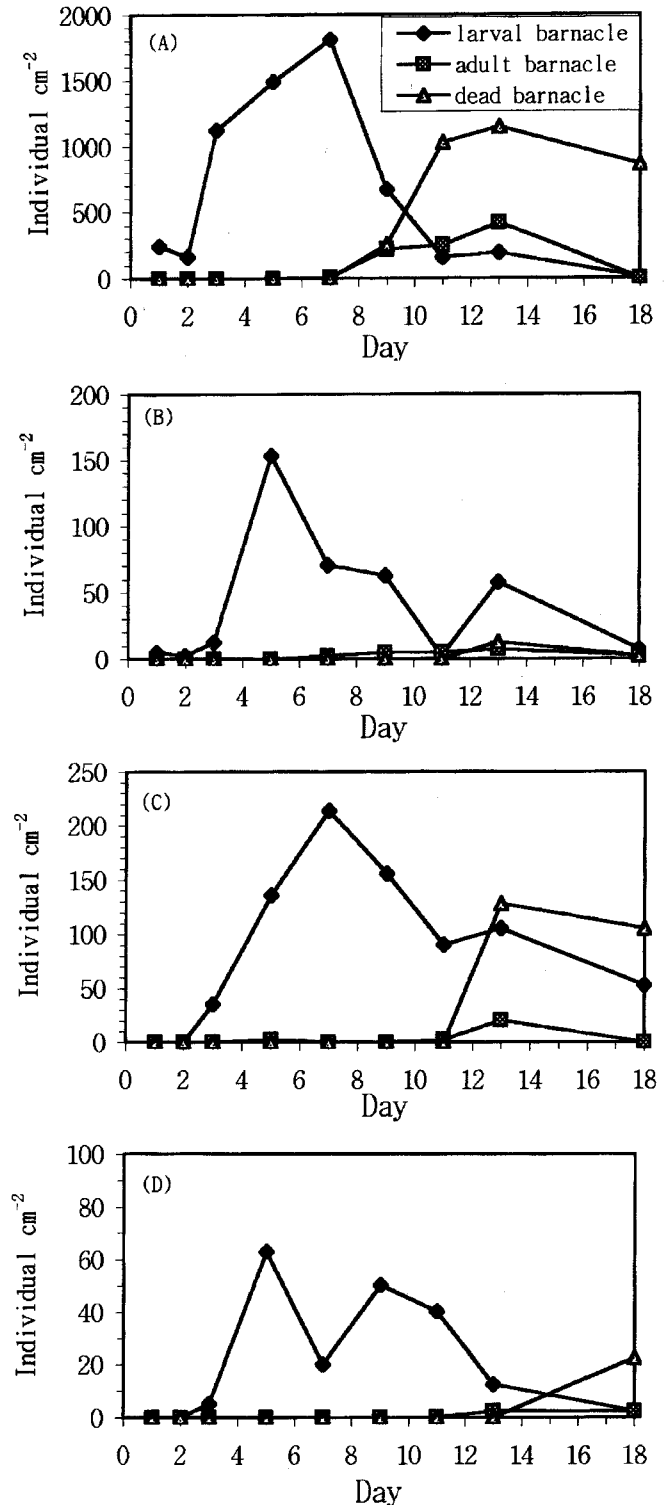


Fig. 8. Time-course changes of attached Barnacle abundance in outer port. (A) sand papery glass, (B) non-sand papery glass, (C) front aluminum, (D) back aluminum.

3일~5일째 부착하였던 따개비 유생들이 실험 13일째 사체로 대량(1.3 개체 cm<sup>2</sup>) 나타난 것으로 보인다. 강장동물인 *Anthozoa* 유생은 실험 9일째 소량 부착하였다. 유리관에 부착하였던 참굴유생과 갯지렁이 유생은 알루미늄판 전면에는 부착하지 않았다. 알루미늄판 후면에는 전면과 동일한 시기인 실험 3



**Table 2.** Time-course changes of abundance of benthic organisms of plates in outer port  
(A) Glass Plates

	Day									
	1	2	3	5	7	9	11	13	18	
<i>Harpacticus</i> sp.					0.11	0.12	0.26	0.21	0.73	
<i>Tigriopus japonica</i>						0.04	0.00	0.04	0.24	
<i>Tisbe</i> sp.						0.04	0.08	0.10	0.34	
Amphipoda						0.04	0.00	0.08	0.39	
Polychata larvae						0.00	0.04	0.02	0.05	
Gastropoda larvae						0.00	0.00	0.00	0.06	
Total					0.11	0.25	0.37	0.45	1.80	

Units: individual cm<sup>-2</sup>

(B) Aluminum Plates

	Day				
	1	2	3	5	7
<i>Harpacticus</i> sp.					0.06
<i>Tigriopus japonica</i>					0.10
<i>Tisbe</i> sp.				0.04	0.39
Amphipoda					1.41
Polychata larvae					0.05
Gastropoda larvae					
Total				0.04	2.62

Units: individual cm<sup>-2</sup>

일째에 따개비 유생이 소량 부착하였고 이후 계속 소량을 유지하였다. 따개비 성체는 13일째 처음으로 소량 출현하였다. 따개비 사체는 18일째 처음 출현하였다. 강장동물은 11일째, 이때패류는 13일째, 갯지렁이 유생은 18일째 소량 출현하였다. 알루미늄판은 유리판보다 평균 1/8 적은 개체수가 오손생물로 출현하였고, 오손생물의 출현시기도 다소 늦게 출현하였다.

알루미늄판에도 유리판에 서식하던 *Harpacticus* sp., *Tigriopus japonica*, *Tisbe* sp., 단각류, 갯지렁이 유생 등이 출현하였으나 출현시기는 다소 다르게 나타났다. 알루미늄판에서는 *Harpacticus* sp.가 실험 9일째 소량 출현한후 18일째 최대 0.7 개체 cm<sup>-2</sup> 출현하였다. *Tigriopus japonica*는 실험 18일째 소량 출현하였고, *Tisbe* sp.는 실험 7일째 소량 출현하였다. 단각류는 실험 13일째 소량 출현한후 18일째 1.6 개체 cm<sup>-2</sup> 출현하여 최대로 많은 개체수가 출현하였다. 갯지렁이 유생은 실험 11일째 소량(유리판과 동일함수) 출현하였다.

이상과 같이 부착관 서식동물 군집은 잡식성 저서성 요각류와 잡식성 단각류에 의해 우점되고 있어 부착오손생물 군집에 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

**원생동물의 부착박테리아 포식영향**

**원생동물의 포식율:** 판위 부착 박테리아에 대한 원생동물의 포식압력을 파악하기 위하여 인천항 내 해수를 200 μm 네트와 1 μm 여과지로 여과한 해수에 알루미늄판과 유리판을 투입하여 배양하였다. 1 μm 여과지로 여과한 해수에서 부착판에 부착한 박테리아를 포식압이 없는 성장 및 유입군으로 하여 박테리아 개체군의 증가계수를 구하고, 200 μm로 여과한 해수내 부착한 박테리아에 대한 원생동물의 포식율과 섭취율을 구하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 알루미늄판 박테리아는 실험 시작후 73시간 까지 계속 증가하여 다른 사망요인은 없었던 것으로 보

인다. 이때까지 200 μm 여과해수에서 부착한 박테리아는 원생동물에 의한 개체군 변화가 있었던 것으로 보아 그 포식율을 구해보면 Table 3에서 보는 바와 같이 22시간까지는 0.035 h<sup>-1</sup>의 낮은 포식율로 박테리아의 개체군 증가가 뚜렷이 있었으나 22시간 경과후 32시간까지는 0.103~0.128 h<sup>-1</sup>의 높은 포식율로 개체군이 크게 감소한후 다시 73시간 까지 0.072~0.079 h<sup>-1</sup>의 다소 감소된 포식율로 박테리아 개체군이 4,000 cells mm<sup>-2</sup>까지 증가하였으나 다시 원생동물의 개체수가 크게 증가하여 박테리아 개체군의 급격한 감소를 보였다. 이후 원생동물의 포식율이 다소 감소하여 박테리아 개체군이 꾸준히 증가하였으나 337시간이 경과한후 동물성 편모충류와 섬모충류의 큰 증가로 원생동물 포식율이 다시 증가하여 박테리아 개체군이 크게 감소하였다. 알루미늄판에서의 전체 평균 포식율은 0.084 h<sup>-1</sup>로 전반적으로 높은 포식율을 보여 박테리아 개체군이 낮게 나타났다.

유리판위에 부착한 포식실험에서는 초기에 원생동물의 낮은 개체수와 낮은 포식율로 박테리아 개체수가 증가하였으나 32시간이 경과하면서 소수의 편모충류에 의한 높은 포식율로(0.076 h<sup>-1</sup>) 박테리아 개체군이 급감하였다(Fig. 10). 그러나 49시간이 후부터 97시간까지 동물성 편모충류의 낮은 개체수와 낮은 포식율(0.016~0.017 h<sup>-1</sup>)로 박테리아 개체군은 다소 증가하였다. 97시간 이후 원생동물의 증가로 높은 포식율(0.053 h<sup>-1</sup>)을 보여 박테리아 개체군이 감소되었으나 145시간이후 낮은 포식율이 계속 유지되어(0.014~0.024 h<sup>-1</sup>) 박테리아 개체군은 크게 증가되고 이에 따라 원생동물 군집도 안정되게 발전하게 되었다.

유리판위의 원생동물에 의한 박테리아 총 평균 포식율은 0.031 h<sup>-1</sup>로 알루미늄판 보다 낮은 포식율을 보여 실험시작 14일 이후에는 박테리아 개체군이 크게 증가되어 나타났다. 이는 유리판 위의 동물성 편모충류와 섬모충류 군집이 알루미늄판위

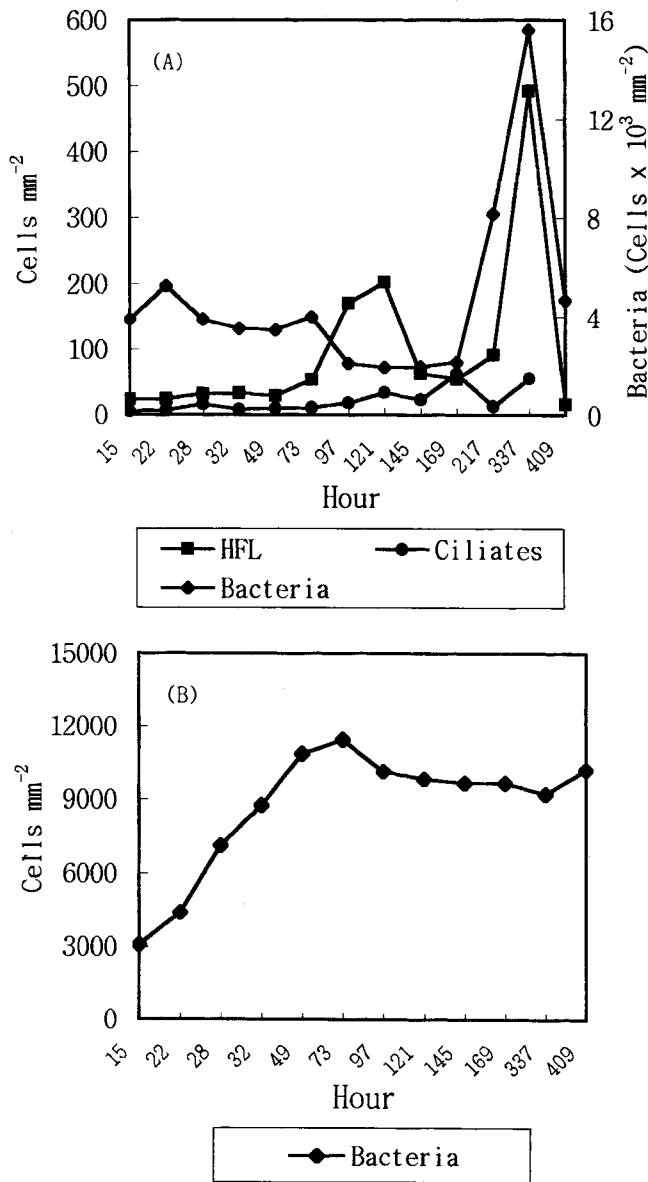


Fig. 9. Time-course changes of attached microorganism abundances on aluminum surface in grazing experiment. (A) filtered by 200 μm mesh net, (B) filtered by 1 μm filter paper.

의 원생동물 군집보다 다소 낮은 섭취율과 다소 작은 개체수가 출현하였기 때문에 포식율이 전반적으로 다소 낮게 나타난 것으로 보인다.

**원생동물의 섭취율:** 알루미늄판과 유리판에 출현한 원생동물은 섬모충류에서 일부 부착성 Suctorina를 제외하고는 대부분 판위에 부착한 생물군집을 포식하여 사는 비여과식성 종속영양식자(nonfilter feeding heterotroph)이다. 이들은 먹이를 거의 막 생물에 의지하므로 주로 미생물막을 이루는 박테리아를 포식하고 산다. 본 조사시에 출현한 일부 대형 섬모충류(60 μm 이상)를 제외한 대부분의 소형 섬모충류(20~50 μm)와 종속영양편모충류는 주로 박테리아 식자 원생동물로 볼수 있다.

박테리아 식자로서 편모충류와 섬모충류의 섭취율은 박테리아 개체수 변화로부터 구하였다(Fig. 11). 이들의 평균 섭취율은

Table 3. The protozoan grazing rate of attached microorganism in inner harbor

Unit: Bacteria h<sup>-1</sup>

Aluminum Plate		Glass Plate	
Hour	Grazing	Hour	Grazing
22	0.035	32	0.026
28	0.128	49	0.076
32	0.103	73	0.016
49	0.079	97	0.017
73	0.072	121	0.053
97	0.105	145	0.014
121	0.081	337	0.018
145	0.078	409	0.024
169	0.074		
337	0.075		
409	0.095		
Avg.	0.084	Avg.	0.030

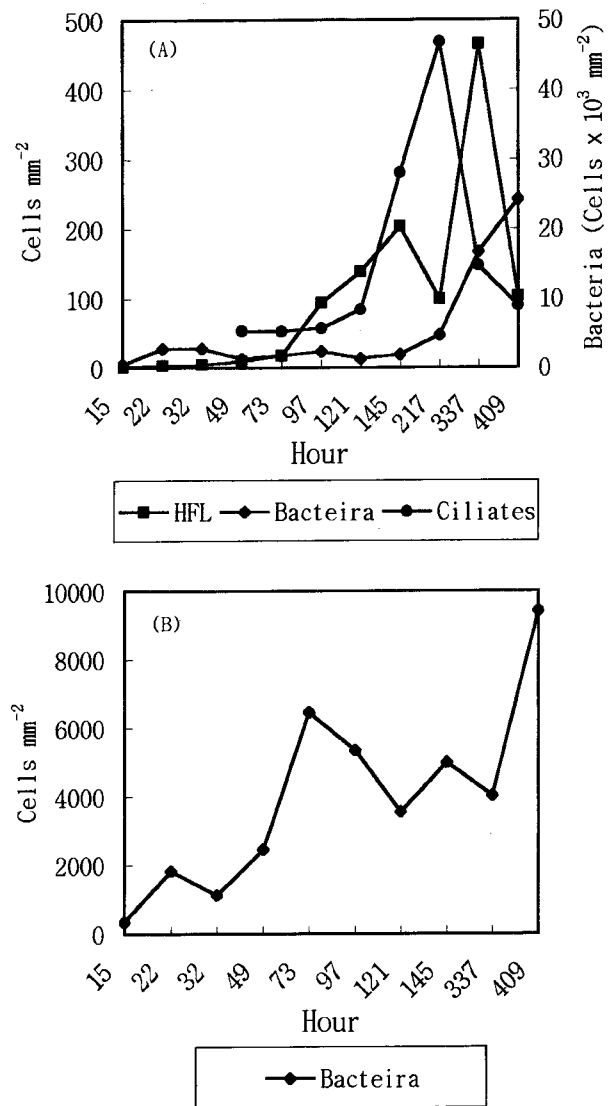


Fig. 10. Time-course changes of attached microorganism abundances on glass surface in grazing experiment. (A) filtered by 200 μm mesh net, (B) filtered by 1 μm filter paper.

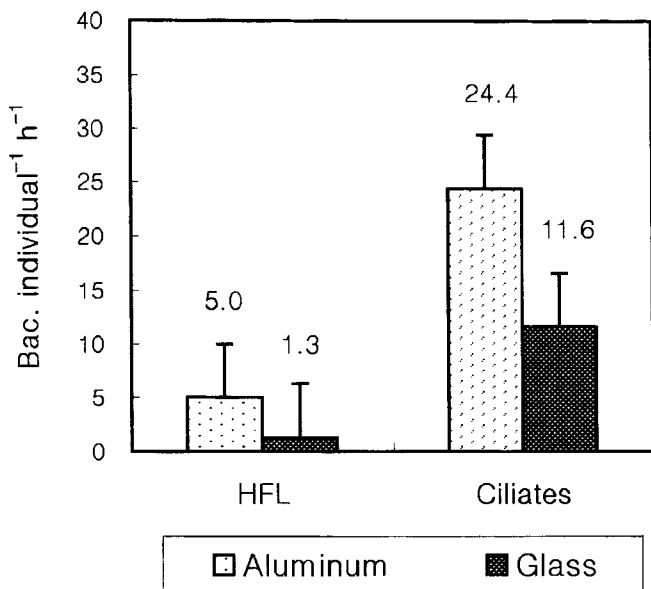


Fig. 11. The ingestion rates of heterotrophic flagellates and ciliates in aluminum and glass surface of grazing experiment.

알루미늄판에서 섬모충류가 포식하지 않았을 때 종속영양편모충류의 섭취율은 평균 5.0 bacteria HFL<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로 비교적 낮은 값을 보였고, 섬모충류의 섭취율은 최대평균 24.4 bacteria ciliate<sup>-1</sup>를 보였다. 유리판에서의 종속영양 박테리아 섭취율은 1.3 bacteria HFL<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로 낮게 나타났으며, 섬모충류의 섭취율은 최대 평균 11.6 bacteria ciliate<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로 낮게 나타났다. 만약 종속영양 편모충류와 섬모충류가 동시에 박테리아를 포식하였을 경우에는 각각의 경우에 이보다 더욱 낮은 포식율을 보였을 것이다.

유리판의 경우 조사기간중 박테리아 개체군에 미친 원생동물의 1일 평균 섭취량은 박테리아 평균 개체군의 57~59%로 박테리아 개체군에 50% 이상의 감소영향을 주었을 것으로 보인다.

## 고찰

### 미생물막에서의 생물 천이

초기에 부착하는 박테리아는 거의 모두 간상형으로 부착판 투입 후 해수중의 용존유기물질이 막표면을 감싸면 바로 간상형 박테리아가 부착하는 것으로 보인다. 본 조사시 6시간 경과시에 이런 박테리아가 800 cells mm<sup>-2</sup> 이상 부착하는 것으로 보아 부착판 투입후 바로 부착하여 초기막을 형성하는 것으로 보인다. Marszalek *et al.*(1979)의 경우 스테인레스 스틸판 부착실험에서 박테리아는 4시간 경과시 이미 1,100 cells mm<sup>-2</sup> 부착하였고, 1일 경과후에는 소규모 군체 형성을 관찰하여 1차 생물막(primary microbial film)이 하루만에 완전히 형성되었다고 하였다. Cuba and Blake(1983)는 가리비 패각의 미세생물 부착실험에서 실험시작 1시간만에 박테리아와 부착 규조류가 3% 정도 부착된 것을 발견하여 부착실험 1시간내에 박테리아와 규조류에 의한 미생물막이 형성되는 것으로 판정하였다.

Choi *et al.*(1996)등이 인천항내에서 행한 박테리아 미생물

막 형성 실험에서는 박테리아 군체가 6시간 이후 지수 성장을 보여주고 실험실의 유리판 실험에서도 초기부터 지수 성장을 보여주었다. 본 연구의 인천 외항 알루미늄판 부착 실험에서도 72시간 경과시 박테리아 개체수가 35×10<sup>3</sup> cells mm<sup>-2</sup> 출현해 Choi *et al.*(1996)의 인천항내 아크릴판 실험에서 70시간 경과시 박테리아 개체수가 22×10<sup>3</sup> cells mm<sup>-2</sup>로 출현한 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. Choi *et al.*(1996)의 인천항내 유리판과 아크릴판 부착실험에서 아크릴판이 유리판 보다 박테리아 군체가 2~3배 높게 나타났고 본 실험에서도 유리판에서 미생물 형성률이 다소 적게 나타났다. 이는 박테리아의 부착률이 유리판에서 낮은 것에 기인된 것으로 보인다(Choi *et al.*, 1996). 부착오손생물 군집의 경우는 갈지 않은 유리판 보다 갈은 유리판에서 다소 높은 생물량을 보여 유리판 부착면의 미끄럼 정도는 부착률 변환에 중요한 요인이 되는 것 같다.

외항의 알루미늄판의 경우 2일 경과시까지 박테리아가 1,000~2,000 cells mm<sup>-2</sup>의 상태를 유지하나 3일 이후에는 군체 형성 등으로 35,000 cells mm<sup>-2</sup> 이상 대량으로 증가하여 측정하기 어렵게 발달하기도 하고(Fig. 6) 그 중 일부는 수중으로 떨어져 나오기도 하였다(Baier, 1984). 그러나 인천항내에서 실험한 알루미늄 판에서는 14일 경과후에야 10,000 개체 mm<sup>-2</sup> 이상이었고, 외항에서 실험한 아크릴판에서는 15일 경과시 까지 2,000 개체 mm<sup>-2</sup> 이하를 유지하여 주변 환경과 부착판 재질에 따라 미생물막의 발달정도가 크게 차이가 났다.

많은 경우에 박테리아에 의한 1차 생물막이 형성된 후 조류, 원생동물 등에 의한 2차막(secondary film)이 형성되는 것으로 보고되고 있다(Cundell and Mitchell, 1977; Mitchell and Kirchner, 1984). 본 조사시에는 박테리아 부착초기에 규조류의 부착이 발견되고 있으며, 인천항내 알루미늄 부착실험에서도 실험 6시간 경과시 종속영양편모충류가 33 개체 mm<sup>-2</sup>나 검출되고 있어 이들 규조류와 편모충류가 1차 미생물막 형성시 이미 참여하고 있는 것으로 보인다. Cuba and Blake(1983)와 Caron and Sieburth(1981) 그리고 Kang *et al.*(1998)의 부착 실험에서도 1차 미생물막 초기형성에 박테리아와 부착조류가 동시에 참여하는 것으로 보고하고 있다.

본 조사시에 부착판 위에서 편모충류의 출현도 1일 이내에 최대 223 cells mm<sup>-2</sup>까지 출현하고 있고, 유리판에서도 최소 3 cells mm<sup>-2</sup> 출현하고 있다. 시간 경과에 따라 감소 또는 증가하는 경향으로 인천항내 알루미늄판 실험에서는 13일 경과시 최대 465 cells mm<sup>-2</sup>까지 출현하여 박테리아 개체군 형성에 영향을 줄 것으로 보인다.

본 실험에서 출현한 편모충류는 주로 저서성의 *Metromonas simplex*와 *Bodonis* 종류였다. 일부 실험에서 많이 출현하는 것편모류(choanoflagellates)는 전혀 발견되지 않았다(Marszalek *et al.*, 1979).

섬모충류는 알루미늄 부착판에서 9시간 경과시에 처음 2 개체 mm<sup>-2</sup>가 발견되었다. 시간이 경과함에 따라 증가하여 실험 11일째 최대 63 개체 mm<sup>-2</sup>까지 증가한 후 감소하였다. 유리판에서는 49시간 경과후 처음으로 출현하여, 10일째 최대 출현을 보인후 감소하였다. 실험실에서는 실험 첫날부터 1~4 개체 mm<sup>-2</sup> 출현후, 6~9일째 최대로 출현한후 감소하였다. 출현종은

초기에 *Metacylis type*의 소형종(4~10  $\mu\text{m}$ )이 출현한 후 시간이 지남에 따라 20~30  $\mu\text{m}$ 의 유충섬모충류 종류와 *Strombidium*종류가 출현하였다. 실험 10일째 부터는 60  $\mu\text{m}$  이상의 *Strombidium viridae*가 출현하여 2~3일간 31 개체  $\text{mm}^{-2}$  까지 증가하였다가 감소되어 소멸되었다. 12일째는 부착 Suctorina인 *Acineta tuberosa*가 plate(75×25 mm)당 2~3 개체 출현하였다. 일반적으로 20일정도 경과시 부착판에서 많이 출현하는 것으로 알려진 Peritrichs(*Zoothammion* sp.)종류(Marszalek *et al.*, 1979)가 본 조사시에는 발견되지 않았다.

미생물막은 무척추 동물 유생의 부착 장소로서 좋은 조건을 가지고 있다. 무척추 동물의 부유유생이 미생물막의 폴리모를 감지해 침착하는 것으로 알려지고 있다(Mitchell and Kirchman, 1984).

본 조사시에 출현한 부착 오손생물(Macrofouling organisms)은 소량이지만 실험 첫날부터 출현하고 있다. 따개비(*Balanus albicostatus*) 유생이 1일 경과시 1  $\text{cm}^2$ 당 2 개체 부착한후 7 일째는 18 개체  $\text{cm}^2$ 까지 부착하였고, 따개비 성체는 실험 5일째 부터 출현하여 계속 증가하였다. 강장동물(*Anthozoa* sp.)은 3일째 0.1 개체  $\text{cm}^2$  부착한후 13일째 0.4 개체  $\text{cm}^2$ 까지 증가한후 감소하였다. 참굴(*Crassostrea gigas*)의 유생은 실험 9일째 부터 소량(0.5 개체  $\text{cm}^2$ ) 부착하였다. 이외에 갯지렁이의 유생은 13일째 부터 소량 부착하였다. 본 부착실험에서 따개비 유생이 미생물 막이 완전히 형성되기전에 이미 부착하기 시작한 것으로 보아, 대부분의 부착 오손생물들의 부착은 먹이에 대한 잇점보다는 기저부 서식처의 안정에 기인된 부착 활동으로 보인다(Cuba and Blake, 1983). 그러나 부착성이 아닌 부착판 서식 요각류인 *Harpacticus* sp., *Tigriopus japonica*, *Tisbe* sp. 등과 단각류들은 미세생물막이 충분히 발달된 후인 실험 7일째 이후에 처음 나타나는 것으로 보아 안정된 서식처에 대한 선호도보다는 충분한 먹이 생물이 인하여 부착판에 들어와 사는 것으로 보인다. 이들 외에도 일부 갯지렁이 유생과 복족류가 11일 이후 발견되었다. 이는 미생물막이 충분히 형성된후에 부착판에서 다양한 먹이생물과 유기물이 공급되기 때문에 이를 이용하고자 유입한 것으로 사료된다(Cuba and Blake, 1983).

부착오손생물 군집은 대부분 여과식자이고, 부착판 서식 무척추 동물은 잡식성으로 기어 다니면서 먹이를 잡기 때문에 출현 시기가 다를 수 있다.

**부착환경에 따른 차이:** 부착환경의 물리적 특성과 화학적 특성에 따른 부착 상태의 차이를 보기 위하여 해수의 유동이 비교적 적고, 부두에서 유출되는 유기물등으로 늘 부영양화 되어 있는 인천항 독크내와 외해수의 유입이 비교적 활발하고 해수의 유동이 많으며 내항보다 비교적 덜 부영양화되어 있는 인천해경 외항을 비교대상으로 정하였다. 인천내항에서 실시한 알루미늄 부착 실험에서는 박테리아 분포가 10,000 cells  $\text{mm}^{-2}$  이상이 되기까지 14일이 걸리고, 편모충류가 최대로 증가하기 까지 13일이 걸리고, 섬모충류도 첫날 2~3 개체에서 최대 34 개체가 될때까지 11일 이상이 걸렸다(Fig. 4). 반면에 인천외항에서는 박테리아 개체수가 3일만에 3만 개체  $\text{mm}^{-2}$  이상이 되었고, 편모충류 최대 출현은 초기 1~2일 사이에 나타났다(Fig. 6). Choi *et al.*(1996)의 인천항내 미생물 막 형성 실험에서도

아크릴판에서 박테리아 개체수가 초기 30시간에는 낮은 증가를 보이다가 5~6일 지난후 20,000 cells  $\text{mm}^{-2}$  이상으로 증가되었다. 즉 내항에 비해 외항쪽이 미생물막 형성이 빨랐으며, 미생물막이 초기 2~3일만에 완성되는데 비해 내항쪽에서는 미생물막 형성이 다소 지연되는 것으로 보인다.

**편모충류와 섬모충류의 포식영향:** 일반적으로 종속영양 편모충류는 박테리아 포식자 또는 용존유기물 섭취자로서 알려져 있고 섬모충류는 박테리아와 편모충류, 소형 섬모충류의 포식자로서 알려져 있다(Sieburth, 1975). 일부 섬모충류에서 용존유기물을 음용하는 것으로 알려져 있으나 에너지 이용 효율면에서 박테리아나 편모충 또는 다른 섬모충류를 섭취하는 것이 효과적인 것으로 알려지고 있다(Sherr and Sherr, 1987). 본 부착실험에서 부착판위에 형성된 미생물막은 표영생태계내의 유기쇄설물이나 저층 퇴적물 표면의 미생물 군집같이 미세생물 먹이고 리나 미세생물 먹이망을 이룰수 있는 조건을 가지고 있다. 미생물막에는 일차적으로 용존유기물이 피막을 이루고 이를 이용하는 박테리아가 있으며 박테리아를 포식할수 있는 편모충류와 섬모충류가 있기 때문에 에너지의 link 가 이루어질수 있는 환경이다. 다만 여기서 편모충을 이용하는 것이 섬모충류냐 또는 그 상위의 부착성 유생 또는 오손생물 군집이나 하는 문제가 있다. 편모충류와 섬모충류의 상위 포식자에 대한 문제는 차후에 연구하기로 하고 본 실험에서는 이들 원생동물이 박테리아에 얼마만큼 영향을 미치는가를 파악 하고자 하였다. 박테리아에 대한 포식율을 보면 총 평균 0.058  $\text{h}^{-1}$ 로 인천연안의 편모충류의 박테리아에 대한 포식율 0.055  $\text{h}^{-1}$ 와 유사한(Choi *et al.*, 1995) 값을 보였다. 동물성 편모충류의 박테리아에 대한 섭취율은 1.3~5.0 bacteria  $\text{HFL}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 인천연안수역의 6~52 bacteria  $\text{HFL}^{-1} \text{h}^{-1}$  보다는 낮으며, Sherr *et al.*(1983)의 10~75 bacteria  $\text{HFL}^{-1} \text{h}^{-1}$  보다 낮으나 퇴적물에서의 동물성 편모충류의 섭취율 1.2~5.0 bacteria  $\text{HFL}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Epstein and Shiaris, 1992), 2.5~45.6 bacteria  $\text{HFL}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Hondereld *et al.*, 1992) 범위에 들어간다. 섬모충류의 최대 섭취율 11.6~24.4 bacteria ciliate $^{-1} \text{h}^{-1}$ 는 저서성 섬모충류의 섭취율 169~704 bacteria ciliate $^{-1} \text{h}^{-1}$ (Epstein and Shiaris, 1992), 37~525 bacteria ciliate $^{-1} \text{h}^{-1}$ (Kemp, 1988) 보다 대단히 낮게 나타났다. 이와같이 편모충류와 섬모충류의 섭취율이 박테리아 개체군에 대한 포식율에 비해 낮게 나타난것은 미생물막내의 박테리아 농도가 해수중이나 퇴적층에 비해 적기 때문에(퇴적층 10<sup>9</sup> cells  $\text{ml}^{-1}$  이상, Kemp, 1988) 원생동물의 박테리아 섭취가 작은 것으로 보인다. 대신에 이들 원생동물은 부족한 에너지 섭취를 미생물 막내에 용존된 각종 유기물을 부수적으로 이용하여 보충하였을 가능성이 있다. 미생물막내에 저서성 규조류가 다량으로 나타나지만 편모충류에 비해 크고, 섬모충류의 크기에 비해서도 같거나 크기 때문에 이들 원생동물이 저서성 규조류를 먹이로 이용할 가능성은 적다.

## 결론

본 연구는 오손생물 군집 형성에 있어서 원생동물의 역할을 파악하기 위하여 초기 미생물막의 형성과정과 원생동물의 출현

과 양적변화 원인 관계등을 조사하고, 미생물막의 주요 요인인 박테리아에 대한 원생동물의 포식영향과 오손생물군집의 주요 구성 요소인 해산 무척추 동물의 부유유생의 침착과정을 실험실 실험과 현장 실험을 통하여 조사하였다.

미생물막의 초기에 박테리아만이 1차막 형성에 관여하는 것으로 알려진것과는 달리 본 조사시에는 실험 6시간경에 이미 부착 규조류와 동물성 편모충류가 부착하였고, 실험 9시간 경과시에는 섬모충류도 출현하여 미생물막의 1차막 형성에 원생동물도 관여하는 것으로 보인다. 원생동물은 미생물막 발달과정에 박테리아 개체군에 영향을 주며 서서히 증가해 실험 7~10일경부터 양적으로 크게 증가하고 종조성도 다양하였다. 이때 비교적 큰 *Strombidium*종류와 부착성 섬모충류가 출현하기 시작하였다.

우점 오손생물인 따개비 *Balanus albicostatus*의 유생은 실험 첫날부터 부착하여 7일째에 크게 증가하였고 이들의 성체는 실험 5일째부터 부착하였다. 한편 부착관 서식생물인 저서성 요각류와 단각류들은 미생물막이 비교적 잘 발달된 7일 이후에 출현하기 시작하였다. 부착오손생물인 따개비 종류는 미생물막이 발달하기전인 초기부터 부착하는 것으로 보아 먹이 보다는 부착장소의 안정성에 의해 출현하는 것으로 보이고, 부착관 서식생물은 기저부의 안정성 보다는 먹이의 공급에 관련되어 미생물막이 발달한후 출현하는 것으로 추정된다.

부착환경에 따른 부착상태를 파악한 결과, 폐쇄수역 보다는 해수의 유동이 비교적 활발한 수역에서 미생물막의 발달이 빨랐다. 재질에 따른 부착상태는 유리판이나 아크릴판보다 알루미늄 판에서 미세생물 군집 형성이 다소 빨랐으나, 중형 오손생물 군집의 경우는 알루미늄판 보다 유리판에서 빠른 진행을 보였다.

미생물막에 출현한 편모충류와 섬모충류는 박테리아에 대하여 비교적 높은 포식율(0.058 h<sup>-1</sup>)을 보여 박테리아 개체군의사망에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이들의 박테리아 섭취율은 해수중이나 퇴적층에서의 박테리아 섭취율 보다는 낮았으나 미생물막의 박테리아 개체군이 해수중이나 퇴적층에 비해 크지 않았기 때문에 원생동물의 박테리아에 대한 포식압이 크게 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었습니다(KOSEF 94-0703-05-01-2). 원고를 자세히 검토하여 주신 두 분의 심사위원과 편집위원께 감사드립니다.

### 참고문헌

Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Meyer-Reil and F. Thingstad, 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **10**: 257-263.

Baier, R.E., 1984. Initial events in microbial film formation. In: *Marine biodeterioration: An Interdisciplinary Study*, edited by Costlow, J.D. and R.C. Tipper, E&F, N, Spon Ltd, London, pp. 57-62.

Baier, R.E., E.G. Shafrin and W.A. Zisman, 1968. Adhesion mech-

anisms that assist or impede. *Science*, **162**: 1360.

Caron, D.A., 1991. Heterotrophic flagellate associated with sedimenting detritus. In: *The Biology of Free Living Heterotrophic Flagellates*, edited by Patterson, D.J. and J. Larsen, Syst. Assoc. Sp. vol 45, Oxford, pp. 77-92.

Caron, D.A. and McN. J. Sieburth, 1981. Distribution of the primary fouling sequence of fiberglass reinforced plastic submerged in the marine environment. *Appl. Environ. Microbiol.*, **41**: 268-273.

Choi, D.H., J.H. Shim and B.C. Cho, 1996. Bacterial colonization of glass and acryl surfaces immersed in coastal sea water. *The Yellow Sea*, **2**: 51-57.

Choi, J.K., S.K. Kim, J.H. Noh and K.C. Park, 1995. The study on the grazing rate of protozooplankton on the microbial food web of Incheon coastal waters. *J. Korea. Soc. Oceanogr.*, **30**: 458-466.

Crisp, D.J., 1974. Factors influencing the settlement of marine invertebrate larvae. In: *Chemoreception in Marine Organisms*, edited by Grant, P.T. and A.M. Mackie, New York. Academic, pp. 177-265.

Cuba, T.R. and N.J. Blake, 1983. The initial development of a marine fouling assemblage on a natural substrate in a subtropical estuary. *Botanica Marina*, **26**: 259-264.

Cundell, A. and R. Mitchell, 1977. Microbial succession on a wooden surface exposed to the sea. *Internat. Biodeter. Bull.*, **13**: 67-73.

Epstein, S.S. and M.P. Shiaris, 1992. Rates of microbenthic and meiobenthic bacteriivory in a temperate muddy tidal flat community. *Appl. Environ. Microbiol.*, **58**: 2426-2431.

Fenchel, T., 1987. *Ecology of Protozoa*. Science Tech. Pub., Madison, 197 pp.

Frost, B.W., 1972. Effect of size concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepoda *Calanus pacificus*. *Limnol. Oceanogr.*, **17**: 805-815.

Hauser, D., M. Levandowsky, S. Hutner, L. Chwoosoff and J. Hollwitz, 1975. Chemosensory responses by the heterotrophic marine flagellates, *Cryptocodinium cohnii*. *Microb. Ecol.*, **1**: 246-256.

Honderdeld, B.J.M., R.P.M. Bakand F.C. van Duyl, 1992. Bacteriivory by heterotrophic microflagellates in marine sediments measured by uptake of fluorescently labeled bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **89**: 63-71.

Kang, J.H., B.C. Cho, J.H. Shim and J.K. Choi, 1998. An Effect of pre-attached bacteria on attachment of diatoms to artificial surfaces immersed in seawater. *The sea J. Korea. Soc. Oceanogr.*, **3**: 271-275. (in Korean)

Kemp, P.F., 1988. Bacteriivory by benthic ciliates: significance as a carbon source and impact on sediment bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **49**: 163-169.

Khailov, K.M. and Z.Z. Finenko, 1973. Organic macromolecular compounds dissolved in sea water and their inclusion into food chains. In: *Marine Food Chains*, edited by Steele, J.H. Oliver and Boyd, Edinburgh, pp. 6-18.

Kirchman, D., S. Graham, D. Reish and R. Mitchell, 1981. Bacterial induce settlement and metamorphosis of *Janua brasiliensis*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **56**: 153-163.

Lee, J.J., S.H. Hunter and E.C. Bovee, 1985. An Illustrated guide to the protozoa. *Soci. Protozoologists*, 629 pp.

- Loeb, G.I. and R.A. Neihof, 1975. Marine conditioning films. In: Applied chemistry at interfaces, Washington: American chemistry society. Advances in Chemistry series, 145, pp. 319–335.
- Marshall, K.C., 1976. Interfaces in the Microbial Ecology. Harvard University press, Cambridge, MA.
- Marshall, K.C., R. Stout and R. Mitchell, 1971. Mechanisms of the initial events in the sorption of marine bacteria to surfaces. *J. Gen. Microb.*, **68**: 337–348.
- Marshall, K.C., 1981. Bacterial behavior at solid surfaces - a prelude to microbial fouling. In: Fouling of heat transfer equipment, edited by Somerscales, E.F.C. and J.G. Kundsén. Hemisphere, New York, pp. 305–312.
- Marszalek, D.S., M.G. Sol and R.U. Lanny, 1979. Influence of substrate composition on marine microfouling. *Appl. Environ. Microbiol.*, **38**: 987–995.
- Mitchell, R. and D. Kirchman, 1984. The microbial ecology of marine surfaces. In: Marine biodeterioration: An Interdisciplinary Study, edited by Costlow, J.D. and R.C. Tipper, E&F, N, Spon Ltd, London, pp. 49–56.
- Patterson, D.J., J. Larsen and J.O. Corliss, 1989. The ecology of heterotrophic flagellates and ciliates living in marine sediments. *Prog. Protistol.*, **3**: 185–277.
- Patterson, D.J. and J. Larsen, 1991. The biology of heterotrophic flagellates. *Systematics Associ.*, Clarendon press, Oxford. 502 pp.
- Pomeroy, L.R., 1974. The Ocean's food web a changing paradigm. *Bioscience*, **24**: 499–504.
- Porter, K.G. and Y.S. Feig, 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.*, **25**: 943–948.
- Sherr, E.B. and B.F. Sherr, 1987. High rates of consumption of bacteria by pelagic ciliates. *Nature*, **325**: 710–711.
- Sherr, E.B. and B.F. Sherr, 1988. Role of microbes in pelagic food webs. A revised concept. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 1225–1227.
- Sieburth, J.MeN, 1975. Microbial Seascapes. Univ. Park. Press. Baltimore, MD. 319 pp.
- Silver, M.W., M.M. Gowing, D.C. BrownLee and J.O. Corliss, 1984. Ciliated protozoa associated with oceanic sinking detritus. *Nature*, **309**: 246–248.
- Sjoblad, R.J., I. Chet and R. Mitchell, 1978. Chemoreception in the green algae, *Dunaliella tertiolecta*. *Curr. Microb.*, **1**: 305–307.
- Stephens, G.C., 1967. Dissolved organic material as a nutritional source for marine and estuarine invertebrates. In: Estuaries, edited by Lauff, G.H., Washington, Amer. Assoc. Scien., pp. 367–373.
- Zobell, C.E. and E.C. Allen, 1935. The significance of marine bacteria on the fouling of submerged surfaces. *J. Bact.*, **29**: 239–251.

---

1999년 3월 4일 원고 접수

1999년 6월 21일 수정본 채택