

해양생물막; 생성 기작과

항오손기술 개발에 관하여

글 권개경 _ 한국해양연구원 해양생명공학 연구센터

토양에 노출된 유리 슬라이드에 미생물이 부착하는 것이 관찰된 이후 많은 연구자들이 다양한 표면에 부착하는 미생물에 관하여 보고하였다 (Beech *et al.*, 2002; Cooksey & Wigglerworth-Cooksey, 1995; Denyer *et al.*, 1993; Leriche *et al.*, 2000; Marshall, 1992; van Loosdercht *et al.*, 1987). 생물막 (biofilm)은 폐수처리와 같은 분야에선 필수 요소로, 식품 가공 등의 분야에선 유용하게 작용한다. 그러나 싱크의 물 때 처럼 일상 생활에선 불편하고 불쾌한 부분이 되기도 하며 치석처럼 보기 싫거나 해가 되는 상황을 일으키기도 한다. 나아가 선박이나 냉각관 등에서는 생물오손을 유발하여 막대한 경제적 손실과 환경에 피해를 입히는 원인이 되며 질병의 발병 기작으로 작용하거나 혹은 의료기기에 발생함으로써 인간 생명을 위협하는 요소가 되기도 한다 (Jenkinson & Lappin-Scott, 2001). 이와 같이 생물막에 의한 다양한 피해 사례가 새롭게 인식됨에 따라 최근 들어 그 생성 기작과 제어방법에 대해서 생태, 생리, 유전학 등 다양한 분야에서 관련 연구가 폭발적으로 증가하고 있다 (Webb *et al.*, 2003). 이 글에서는 생물막의 정의와 특성을 간략히 살펴본 후 해양에서 생물막에 의해 일어나는 피해인 생물오손 (Biofouling)과 생물부식 (Biocorrosion)을 방지하기 위한 기술 개발현황

을 살펴보기로 한다.

1. 생물막이란 무엇이며 어떤 구조를 가지고 있는가?

생물막에 대한 정의는 다양하지만 일반적으로 「미생물과 그들이 낸 세포외 산물로 이루어진 구조물이 움직이거나 혹은 고정된 표면에 부착된 상태」를 의미한다 (Sutherland *et al.*, 2004). 좀 더 적극적으로는 「다세포생물이 표면 부착과 군집속에서의 기능 분화를 통하여 다세포의 조직체로 기능하는 상태」로 보기도 한다 (Costerton *et al.*, 1995; Webb *et al.*, 2003). 어떤 경우이던지 생물막은 “미생물”, “세포외 물질”, “표면”이라는 3대 요소로 구성되며 구성성분 중 73~98%는 물이 흘러가는 통로와 세포의 고분자물질인 것으로 생각되고 있다 (Dunne Jr, 2002). 생물막은 구성 중에 따라 차이는 있지만 버섯이 위로 돌아난 형태, 혹은 해초의 수풀처럼 보이는 외관과 구조를 지니며 구조체 사이사이로 형성된 채널을 통해서 물의 흐름이 있고 그 흐름을 통해 신호물질의 전달과 영양소 및 폐기물의 순환이 일어나는 것으로 인식되고 있다 (그림 1, Pratt & Kolter, 1999).

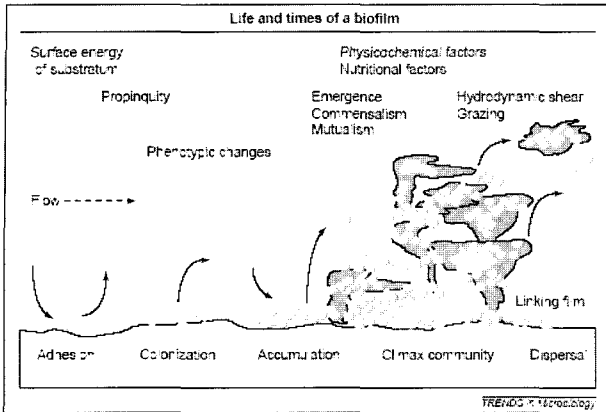
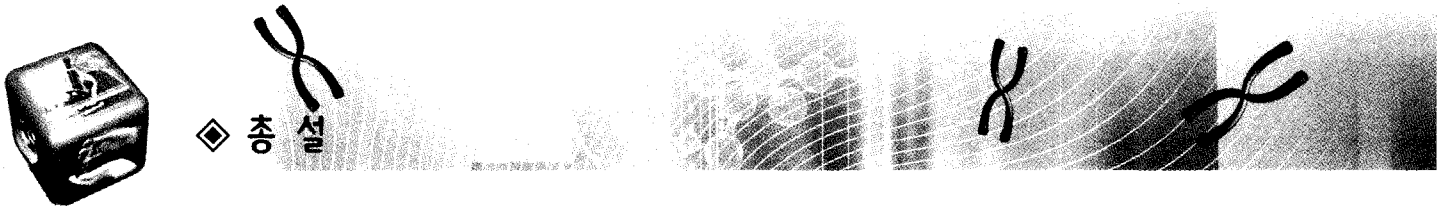


그림 1. 생물막 생성 과정 및 구조의 모식도. 세균은 외부 환경변화와 flagellar의 운동성, adhesin 등의 부착단백질의 기능에 의해 표면에 부착한 후 집락을 형성하게 되며 EPS의 생산을 통해 생물막의 구조를 안정화시킨다. 성숙된 생물막에는 물이 흘러가는 통로가 존재하며 이 통로를 통해 물질의 교환이 일어난다. 성숙된 생물막에서는 다시 막의 일부가 탈리되는 등의 과정을 거쳐 표면구조의 변화를 가져오며 탈리된 부분은 새로운 서식처를 찾아가는 여행을 한다 (Jenkinson & Lappin-Scott, 2001으로부터 차용).

은 유전형질의 획득 가능성 증대 등 (Cowan *et al.*, 2000; Dang & Lovell, 2000; Møller *et al.*, 1998; Stickler, 1999; Tolker-Nielsen & Molin, 2000). 이와 같이 생물막 형성 결과로 다양한 이득을 얻을 수 있기 때문에 어떤 면에서 유영상태는 자연계에서는 오히려 예외적인 생활방식으로서 더 나은 서식처를 찾기 위한 전이과정으로 이해될 수도 있다 (Beveridge *et al.*, 1997; Stickler, 1999). 한편 *Pseudomonas aeruginosa* 에서 연구된 바에 따르면 부착생활과 유영생활을 결정하는 유전자인 *crc gene*은 영양원의 이용 가능성에 반응하는 global regulator로서 탄소원의 부족이 감지되면 부착과 관련된 type IV piliA의 구조유전자 발현을 증진시킨다 (O'Toole *et al.*, 2000). 이는 영양원의 이용 가능성이 생물막 생성의 가장 큰 이유임을 시사한다. 즉, 세균이 생물막을 형성하는 것은 악화되는 환경에서 살아남기 위한 적극적인 대응방안이다.

2. 생물막은 어디에, 왜 생성되는가?

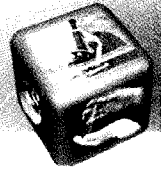
앞서 생물막의 3대 요소 중 하나로 표면을 들었다. 그렇다면 생물막은 어떤 표면에 생성되는가? 정답은 모든 표면이다. 생물막은 토양과 물의 경계면 외에 물과 공기, 물과 기름, 토양과 공기, 유기물 덩어리, 생체표면, 내장기관의 표면 등 표면의 종류를 가리지 않고 경계면이 있는 거의 모든 곳에 생성된다 (Costerton *et al.*, 1995; Flemming, 1996). 특히 토양에 비해 상대적으로 유기물의 함량이 적은 해양과 같은 빈영양 환경에서 미생물은 생존을 위해 좀 더 유리한 조건을 획득하는 한 방법으로 부착생활을 하게 된다 (Costerton *et al.*, 1978; Dawson *et al.*, 1981; Marshall, 1988).

세균이 생물막을 형성함으로써 얻는 이익은 서식환경에 따라 다르지만 다음과 같이 요약할 수 있다. i) 영양물질 획득 기회 증가, ii) 독성물질, 항생제 등의 위협으로부터의 보호, iii) 세포의 효소활성 유지 및 다른 미생물과 대사과정 공유, iv) 포식자로부터의 보호, v) 새로

3. 왜 생물막을 연구하는가?

생물막은 산업공정과 의료 시스템 등에서 중요 관심사가 되고 있다. 생물막을 형성한 세균은 항생-살균물질 처리에 대한 내성 (세균은 생물막 형성시 유영상태일 때에 비해 항생제 내성이 약 500배 증가한다)을 보이고 세균 오염의 저장고로 작용 (Coquet *et al.*, 2002) 한다. 생물막은 미생물부식의 원인이 되며 이로 인해 송유관, 저수탱크 및 많은 산업시설에 손상을 끼쳐서 매년 수 백만 달러의 피해를 일으킨다 (Flemming, 2002; Videla, 2002). 또한 급·배수관, 냉각관, 여과장치 등의 산업시설과 선박 등에 생물오손을 발생시키는 출발점이 된다 (Characklis, 1990; Videla, 2002). 한편으로 생물막은 폐수처리과정의 핵심요소로 작용하며 독성 유기오염물질 분해 (Fathepure & Vogel, 1991; Johnsen & Karlson, 2004), 음식물 및 의약품의 분해 (Bagge *et al.*, 2001; Verran *et al.*, 2002) 등에도 관여한다.

생물막은 조류나 패류의 유생이 착생하고 변태하는



과정에도 관여하고 있으며 (Lau *et al.*, 2003; O'Corner & Richardson, 1998; Patel *et al.*, 2003; Wiczorek & Todd, 1997) 이는 해양생물의 양식과 오손생물의 제어기술 개발에 결정적인 자료가 된다.

4. 생물막 연구에는 어떤 방법들이 이용되는가?

다른 생물학의 분야와 마찬가지로 생물막의 중요성이 널리 인식되고 연구가 활발하게 진행될 수 있었던 배경에는 새로운 장비와 기술의 발달이라는 뒷받침이 있었다. 현재 이용되는 생물막 연구의 가장 강력한 방법은 형광지시자와 다중초점 주사레이저현미경 (Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)의 동시 사용이다 (그림 2). 형광지시자로는 Green fluorescent protein (GFP)이 가장 널리 이용되고 있다 (Møller *et al.*, 1998; Errampalli *et al.*, 1999). 유전자 정보가 알려진 미생물을 대상으로 할 경우 생물막 생성과 관련하여 그 기능을 알고자 하는 유전자의 뒤에 GFP 유전자를 집어넣고 발현 여부를 관찰할 수 있으며, 특정 유전자의 발현

과 관계없이 표면의 부착과정과 이동, 탈리, 구조변화 등을 현미경으로 입체적으로 관찰하고 프로그램을 이용해서 정량화하는 것이 가능하다. CLSM을 이용하는 방법은 생물막 자체에 손상을 주지 않고 결과를 관찰할 수 있다는 측면에서 가장 강력한 연구방법이 되고 있다 (Dune Jr., 2002; Webb *et al.*, 2003). 유전자발현을 분석하기 위해 β -galactosidase 유전자와 X-gal과 같은 chromogenic substrate를 조합해서 이용하는 방법도 가능하다.

표면, 즉 생물막 생성에 의한 유전자 발현의 변화를 분석하는 방법은 Micro-array 기술의 발달과 genome project의 성과에 힘입어 비약적인 발전을 이루고 있는 분야의 하나이다. 이미 full sequencing이 끝난 *E. coli*, *P. aeruginosa* 등의 균주들은 유영상태일 때와 부착 후 시간 경과에 따른 유전자 발현 양상을 micro-array기술로 비교 분석하는 것이 가능해졌으며 유전자 발현 분석을 위해 genomics와 proteomic기술이 활용되고 있다 (Burrows *et al.*, 2003; Jefferson, 2004; Vilain *et al.*, 2003, Wen & Burne 2002). 연구 결과에 따르면 생물막 생성의 결과로 최대 38%의 유전자 발현이 달라진다 (Prigent-Combaret *et al.*, 1999).

이보다 오래 되었지만 여전히 유효한 방법으로는 point mutation을 유발한 후 그 결과로 나타나는 표현형의 차이와 그에 따른 부착능력의 차이를 microtiter plate를 이용하여 분석하는 것이다 (Loo *et al.*, 2000).

손상을 입히지 않고 생물막의 표면구조를 관찰하거나 혹은 EPS의 정량을 하고자 할 경우에는 Lectin immunosorbent와 CLSM을 결합하는 방법도 널리 이용되고 있다 (Leriche *et al.*, 2000).

자연생물막의 종다양성과 관련된 연구 역시 분자생물학 기술의 발달과 밀접한 연관을 가지고 있다. Cloning과 염기서열 분석, DGGE/TGGE 등의 기술은 과거 확실하게 알지 못했던 생물막 구성 종의 다양성을 좀 더 확실하게 접근할 수 있도록 하고 있다 (Gillan *et al.*, 1998).

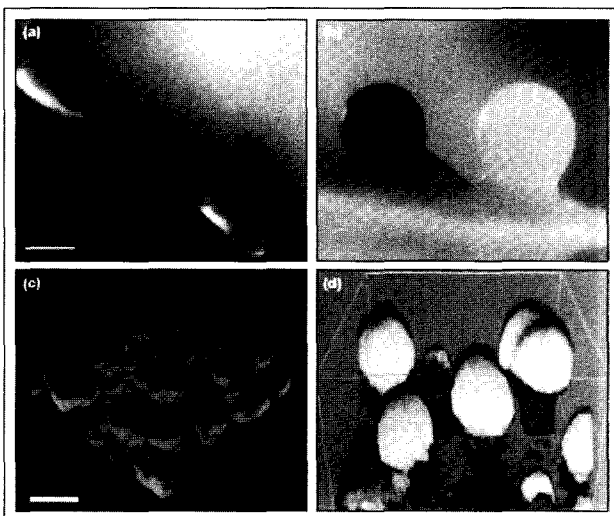
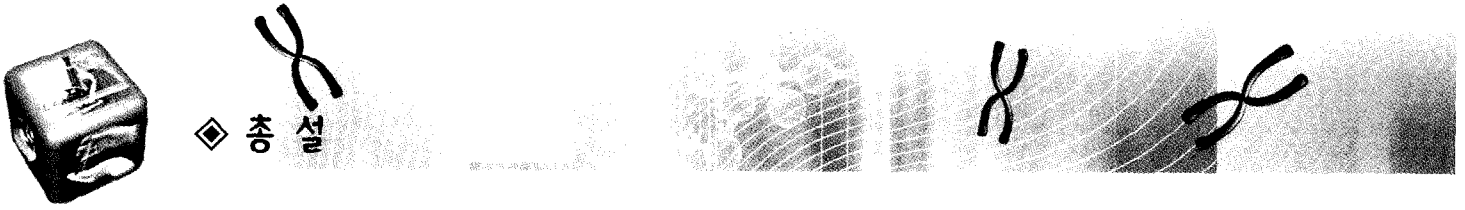


그림 2. Confocal Laser Scanning Microscopy와 GFP-tagging에 의한 생물막의 입체 영상. 컴퓨터 프로그램을 이용해서 막의 두께, 표면구조 및 세균의 이동과 활성 등을 연구할 수 있다 (Webb *et al.*, 2003으로부터 차용).



최근 들어 Atomic force microscopy (AFM, Beech *et al.*, 2002), Fluorescence lifetime imaging (FLIM, Walczysko *et al.*, 2003) 등의 방법도 새롭게 도입되고 있다.

5. 생물막은 어떤 과정을 통해 만들어지는가?

해양환경에서 생물막의 생성은 미생물이 유기물이 흡착된 고체 표면에 전하 혹은 표면소수성 등의 요인에 의해 부착하는 것으로부터 시작된다 (Beveridge *et al.*, 1997). 생물막 형성과 관련하여 Marshall은 부착과정이 두 단계로 나뉘어 이루어진다고 제안하였다 (Marshall *et al.*, 1971). 첫 번째 단계는 매우 빨리 일어나 부착 능력이 상대적으로 약하고 가역적이며 세포의 운동 상태를 유지하면서 세포와 세포간의 접촉, 세포와 기질 표면사이에서 서로 잡아당기는 Van der Waal's 인력과 전자층 (electron layer)의 척력이 작용하여 미생물과 부착 기질 사이에는 좁지만 일정한 간극이 존재한다. 이에 반해 두 번째 단계에서는 비가역적인 단단한 부착이 이루어지며 이 과정으로 이행되기까지는 초기 부착 후 최소 3시간을 필요로 하는 것으로 보고하였다. 두 번째 단계에 들어서면 생물막은 흐르는 물로 세척하여도 부착된 표면으로부터 쉽게 탈리되지 않는다. 미생물 부착의 전후관계를 포함하여 생물막 형성 초기과정을 요약해 보면 i) 먼저 표면에 유기 혹은 무기입자들이 부착되고 ii) 다음으로 pioneer organism이 부착하며 iii) 1차 부착자들의 성장과 증식이 있고, iv) 마지막으로 biofilm matrix의 성숙이 이어진다 (Dang & Lovell, 2000; Davey & O' Toole, 2000).

초기 부착 이후 미생물은 다당류를 비롯하여 핵산, 지방산, 단백질 등의 물질들을 분비하고 이들 물질과 미생물들간의 상호 작용 과정을 거쳐 생물막이 형성된다. 이렇게 형성된 생물막에 따개비를 비롯하여 부착생활을 하는 해양생물들의 유생이 가입하고 변태과정을 거쳐 성장함에 따라 생물막은 생물오손의 단계로 진행된다.

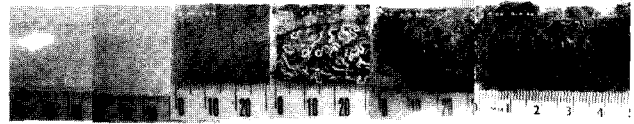


그림 3. 해수에 노출시킨 아크릴판에 생성된 생물막. 고등생물이 부착-성장하면서 2달 이내에 생물오손상태로 발달한다.

이때까지 걸리는 기간은 대개 10일에서 한 달 이내인 것으로 밝혀졌다 (그림 3, Yebra *et al.*, 2004).

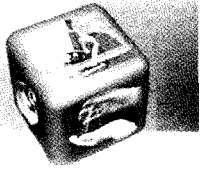
6. 생물막 생성에 영향을 미치는 요소

미생물이 표면에 부착하는 데에는 세포 내외의 많은 요인들이 관여한다. 그 중 내적인 요소로서 cell의 운동성 (Mireles II *et al.*, 2001), 세포표면의 구조물 및 표면 특성 (Toledo-Arana *et al.*, 2001; Grasland *et al.*, 2003), 신호물질의 생산 (Allison *et al.*, 1998; Davies *et al.*, 1998; Mclean *et al.*, 1997; Pasmore & Costerton, 2003) 등이 매우 중요한 역할을 하는 것으로 이해되고 있다. 외적인 요소로서는 부착 기질 표면의 소수성, 산성도, 전하 상태, 온도와 습도, 표면의 거칠기와 전단응력, hydrodynamics 등이 생물막 초기 형성에 영향을 주기도 한다 (Else *et al.*, 2003; Purevdorj *et al.*, 2002; Stoodley *et al.*, 2002). 이 글에서는 내부적인 요소로서 운동성과 세포의 고분자물질, quorum sensing signal에 대해서 간략히 살펴보도록 한다.

6.1. 운동성

표면부착 과정에서 운동성의 중요성에 관해서는 이미 Pratt & Kolter (1999), Kuchma & O' Toole (2000) 등의 여러 논문들에서 고찰하고 있다. 이들 논문들에서는 운동성 외에도 adhesin과 같은 부착 단백질에 대해서도 논하고 있지만 여기서는 운동성 자체에 대해서만 요약해서 소개한다.

연구가 수행된 몇몇 *Vibrio*종은 유영상태에서는 polar flagellar를 갖다가 표면에 부착하게 되면 lateral flagellars



를 가지는 형태로 변화한다. Polar flagellar의 회전운동에 의해 유영을 하던 cell이 표면에 가까워지면 flagellar의 회전운동이 장애를 받게 되고 그 결과로 surface-specific gene의 upregulation이 유발된다. 다음 단계로 표면에서 쉬이 이동할 수 있는 상태, 즉 lateral flagellars로 상태가 변경된다. 부착에 있어 flagellar의 중요성은 *Pseudomonas aeruginosa*에서도 밝혀졌는데, flagellar 생성을 조절하는 *fliF* gene에 mutation이 생기면 표면 부착능력이 현저하게 떨어진다. 또한 표면 부착 15분 이내에 alginate 합성 유전자인 *algC*의 발현이 향상되며 반대로 flagellar 합성 유전자의 발현은 억제된다. 이 두 유전자는 상위 단계에서 동시에 조절되는 것으로 나타났다.

운동성과 관련된 다른 요소로서 pili의 중요성을 확인한 연구들도 다양하게 진행되었다. 결론만 예기하자면 pili는 flagellar가 부착 자체에 관여하는 것과는 달리 부착의 유지와 그에 따른 생물막 생성에 직접적으로 관여하는 것으로 추정된다 (references in Hall-Stoodly & Stoodley, 2002).

6.2. 세포외 다당류

세균이 세포외로 분비하는 다양한 물질을 EPS (extracellular polymeric substances)로 통칭하는데 주로 다당류 (40~95%), 단백질 (1~60%), 핵산 (1~10%), 지질 (1~40%)로 구성되어있다 (Davey & O' Toole, 2000; Flemming & Wingender, 2001). EPS는 미생물의 생존에 필요한 여러 물질을 함유하고 그들의 성장을 향상시키는 역할을 하며 생물막 형성 초기에 표면의 부착, colonization 과정에 매우 중요한 역할을 담당한다 (Boyd & Chakrabarty, 1995; Costerton *et al.*, 1995). 또한 생물막 구조형성, 수분 증발 억제, 미생물 세포의 응집 등의 기능 외에도 항생제, 포식압 등의 외부 스트레스를 완화 시켜주는 역할을 한다 (Decho, 2000; Sutherland, 1999; Wimpenny, 2000). 이와 관련하여 미생물 유래의 EPS는 미생물 군체를 형성하는데 사용

되는 생물체의 세포외 중합 기질체"로 정의할 수 있으며 (Geesey, 1982) 그 안에서는 미생물과 다른 물질들이 유기 중합체와 결합하는 일이 빈번하게 일어난다 (Charaklis & Wilderer, 1989). 또한 원생동물이나 bacteriophage 등으로부터 보호막의 역할을 하거나, 병원균일 경우 보호막 및 감염 기작의 신호전달체로 작용하거나 환경 내에서 독성물질이나 중금속 이온 등의 착화합물을 형성하는 등의 역할을 한다. 따라서 EPS에 의하여 형성된 생물막은 병원균의 감염성에 필수적이고 미생물이 서식환경의 불리한 조건에서도 생존이 가능하게 하며 미생물과 다른 생물의 공생관계를 유지하는데 도움을 준다. 한편으로 부착과 함께 발현이 증진되는 유전자 중 한 가지가 EPS 생산에 관계된 유전자이며 (Kuchma & O' Toole, 2000) EPS생성 저해로 미생물에 의한 생물막 형성이 저해된다는 보고도 있다 (Brown & Gilbert, 1993; Cammarota & Sant' Anna Jr., 1998). 즉, 부착생활 (생물막 형성)이 미생물에게 제공하는 다양한 이점은 주로 생물막을 구성하고 있는 EPS의 기능으로 볼 수 있을 정도로 EPS의 역할은 중요하다.

6.3. Quorum sensing과 biofilm

Quorum sensing signal molecules (QSM), 즉 세균의 신호전달물질은 해양의 발광생물과 공생하는 *Vibrio fisheri*에서 처음 연구가 시작되었다. QSM은 표면에 부착한 세균들의 대사과정에 변화를 유발함으로써 생물막의 성장과 성숙 (Allison *et al.*, 1998; Davies *et al.*, 1998), 병원성 세균의 경우 병원성 발현 등에 관여하며 (references in Rumbaugh *et al.*, 2001) 특정 세균이 이미 형성된 생물막에 가입하기 위한 수단으로 이용되기도 한다 (Yan *et al.*, 2004). 또한 생물막 내부의 영양원이 고갈되고 폐기물이 쌓이게 되면 성장을 조절하는 신호로 작용하기도 한다. *P. aeruginosa*에서 밝혀진 바에 의하면 대표적인 QSM인 acylated homoserine lactone (AHL) 생산에 관여하는 *lasI* gene에 mutation을 유발시킬 경우 생물막의 두께가 얇아지며 detergent



에 의해 쉽게 탈리 되는 것으로 나타났다 (Kuchma & O' Toole, 2000).

또한 QSM은 algae의 zoospore나 따개비의 유생 등에 의해 포착되어 이들 생물이 생물막에 부착하거나 혹은 회피하는 원인으로 작용하기도 한다 (Bauer & Robinson, 2002; Joint *et al.*, 2002). QSM으로는 초기에 AHL (Eberhard *et al.*, 1981)이 알려졌으며 현재는 gram negative 및 일부 gram positive 균주에서 광범위하게 발견되고 있다. 또한 AHLs 외에 단백질을 비롯한 여러 생체물질이 QSM으로 작용하는 것으로 밝혀졌다. QSM은 해양환경에서 생물막 생성과정 뿐만이 아니라 세균과 고등생물간의 상호작용을 조절하는 핵심적인 역할을 하는 것으로 생각된다. 생물막과 QSM의 관계 및 해양생물학에서의 중요성에 관한 보다 자세한 사항은 Pasmore & Costerton (2003)의 총설을 참고할 수 있다.

7. 생물오손 (biofouling)과 생물부식 (biocorrosion) - 해양생물막에 의한 피해와 그 제어기술에 관하여

생물막 형성은 해양환경에서 일반적인 현상이지만 그 결과로 발생하는 생물오손과 부식은 선박 운항 비용 증가, 해양 구조물 파손 및 냉각관 효율 저하 등의 피해를 유발시키는 원인이 된다 (그림 4, Flemming, 2002; Galperin & Baker, 2004; Yebra *et al.*, 2004). 이에 따라 생물오손 방지 방법으로 구리, 유기주석화합물 등 다양한 물질들이 방오도료에 이용되어왔지만 이들 물질, 특히 유기주석화합물은 1 ppt 이하의 농도에서도 각종 해양생물의 암컷에 수컷 생식기가 발생하는 것과 같은 Imposex를 유발하는 등 해양생물에 치명적인 독성을 미치기 때문에 현재는 사용에 제약을 받고 있으며 곧 전세계적으로 그 사용이 중단될 예정이다 (Yebra *et al.*, 2004). 이 절에서는 생물오손을 방지하기 위한 다양한 연구현황과 생물부식 제어기술에 관하여 간략히 살펴보고자 한다.

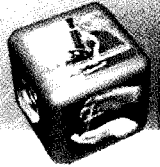


그림 4. 오손생물이 달라붙은 선박의 일부. 생물오손의 결과로 선박의 무게와 표면의 거칠기가 증가되며 이로 인해 선박 운항비용이 크게 증가된다 (Yebra *et al.* 2004로부터 차용).

7.1. 생물오손 제어

먼저 생물오손을 정의하면 “원치 않는 장소에 생물막이 성장하여 막대한 손해를 끼치는 것”을 의미한다 (Flemming, 2002). 이와 같은 손해를 방지하거나 혹은 감소시키기 위하여 다양한 종류의 물리·화학·생물학적인 방법이 개발되었고 또한 시도되고 있다. 생물오손 방지는 크게 세 가지 측면에서 접근할 수 있다. 첫 번째로 독성, 혹은 무독성 물질을 이용하여 생물막 생성 자체를 방지하는 것이고 다음은 발생된 생물막을 떨어뜨리는 것, 마지막으로 생물막이 생성되지 않는 재료를 개발하는 것이다. 여기서는 주로 생물학적인 측면에서의 항오손 기술 개발에 관련된 내용을 다루도록 한다.

생물학적인 측면에서 볼 때 생물오손은 생물과 표면, 생물과 화학물질의 상호관계와 생물-생물 상호관계의 결과로 발생하므로 먼저 생물 상호간 혹은 생물과 화학물질의 상호관계를 이해하는 것은 매우 중요한 요소다 (Berk *et al.*, 2001). 이와 같은 관점에서 Grasland *et al.*, (2003)은 생물막 생성 초기에 관여하는 세균의 역할 (전자공여체 혹은 수용체), 세포표면 소수성, 표면부착능, 신호전달물질 (QSM) 생성 여부 등을 조사함으로써 생물막 생성 세균들의 특성을 파악하고자 하였다. Lau *et al.*, (2003)은 생물막에서 분리된 여러 세균 중 *Vibrio sp.*의 생물막과 따개비 (*Balanus amphitrite*) 유



생 부착의 상관관계를 조사하였는데 이때 세균의 세포 표면 특성, 특히 세포의 고분자물질 (EPS)과 세균의 대사산물이 중요하게 작용함을 보고하였다. Patel *et al.* (2003)은 미세조류의 유생이 부착하는 데 있어서 생물막이 중요하게 작용하지만 따개비 유생의 부착은 저해되는 것을 밝혔다. 또한 오손생물의 종류에 따라 생물막에 대한 반응이 달라지는 것이 관벌레인 *Bugula flabellata*와 식물인 *Ciona intestinalis*의 부착 연구과정에서 확인되었다 (Wieckzoreck & Todd, 1997). 이상의 결과들은 오손생물의 표면 부착에 미생물이 중요한 역할을 담당하지만 여기에는 복잡한 상호관계가 존재함을 시사하며 이에 대한 연구는 아직도 초보수준이라 할 수 있다.

새로운 방오물질 개발은 생태학적 관찰에 기초하고 있다. 많은 연구팀이 표면에 다른 생물이 달라붙지 않는 해면, 해조류, 어류 등의 해양생물로부터 항오손물질을 분리하고 그 구조를 연구해 왔다. 이와 같은 연구과정에서 발견된 가장 대표적인 물질이 QSM인 AHL과 유사한 구조를 지니는 furanone 계열의 화합물인 fimbrolides (de Nys *et al.*, 1995)이며 이 물질은 AHL의 analogue로 작용하여 quorum sensing을 교란시키는 역할을 한다. 이 외에도 quorum sensing을 교란시키는 다양한 물질이 해면, 산호 등 다양한 해양생물로부터 발견되었으며 (Armstrong *et al.*, 2000) 이들 물질을 방오도료에 포함시키고자 하는 시도가 이루어지고 있다 (Baveja *et al.*, 2004). 다른 한편 Nogata *et al.* (2004)은 항오손효과를 지닌 isocyano-terpenes 계열의 화합물을 기반으로 하여 합성한 3-isocyanotheonellin 유도체를 방오도료로 이용하기 위해 개발하고 있다.

7.2. 생물부식 (Biocorrosion) 방지

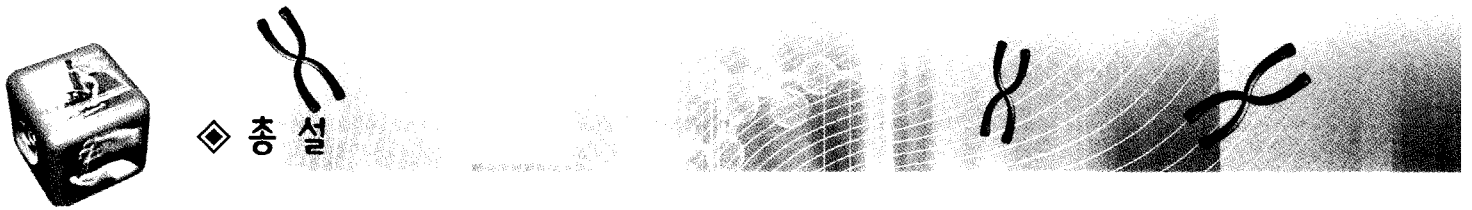
금속표면에 형성된 생물막은 미생물 유래 다당류와 금속간의 정전기적 금속 결합으로 부식작용을 촉진시키는데 이를 생물부식이라 한다 (Bass *et al.*, 1998; Beech & Gaylarde, 1991; Costerton *et al.*, 1987). 열 교환

기, 파이프, 선박 표면 외에도 지속적인 내구성을 요구하는 장비나 제품에 형성된 생물막은 열전달효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 부식, 파손과 같은 심각한 문제를 일으키며 이로 인해 장비나 공장의 가동이 중단될 수도 있다. 이와 같은 사태를 예방하기 위해서는 냉각관 유입수의 물리화학적 요인과 미생물의 수 및 종조성, 냉각관 내부의 오손생물의 성장 상황 등을 지속적으로 감시하는 한편 적절한 방오물질 개발을 포함하는 다면적인 접근이 필요하다 (Flemming, 2002).

생물부식은 황산염환원과정에서 생성되는 산에 의하여 발생하므로 생물막 중의 황산염환원미생물 (SRB; sulfate reducing bacteria)을 억제하는 방법으로 부식을 막을 수 있다. 예로서 항생 peptide를 생산하는 세균을 이용해 SRB를 억제하기 위한 연구를 들 수 있는데, 이미 생물막이 생성된 상태에서는 항생물질이 SRB 중 하나인 *Desulfovibrio vulgaris*를 죽일 수 없어 철근이 녹스는 것을 막지 못 하는 것과는 달리 항생물질을 생산하는 *Bacillus brevis*로 철근에 생물막을 만들어줄 경우 황산염환원세균인 *D. vulgaris*의 성장이 억제되어 철근에 녹이 생기지 않는 것이 확인되었다 (Jayaraman *et al.*, 1999). 또한 항생 peptide를 미리 철근에 발라놓는 것도 *D. vulgaris*의 성장을 억제시키는 효과를 보였다. 호기성 생물막을 만들어주는 경우에도 SRB의 생물막이 생기는 것을 방지함으로써 부식을 억제할 수 있었다 (Jayaraman *et al.*, 1997).

7.3. 항오손소재 (Antifoulant) 개발

신소재의 개발도 오손방지의 한 방법이 된다. 대두고래의 경우 피부표면의 미세돌기구조가 세균이 부착하는 것을 막아줌으로써 미세오손생물의 부착을 막아주는 것이 관찰되었다 (Baum *et al.*, 2002). 따라서 표면에 미세한 돌기를 가지는 재료의 개발은 생물막을 예방하는 방법으로 가능할 것이다. 한편 이매패류의 껍질에 나타나는 결은 오손생물의 부착을 방지하기 위한 최선의 방법인 것으로 확인되었다 (Vers & Wahl, 2004). 이와



◆ 총 설

같은 관찰에 기초한 금속 구조물의 오손생물 부착에 관한 많은 연구 결과들이 2004년 7월 영국 Southampton 대학에서 개최된 제 12차 국제 부식 및 생물오손학회에서 발표되기도 하였다.

생물막의 생성과 그에 따른 오손생물의 부착 및 방어 기작은 오랜 시간에 걸친 진화의 산물이며 (Clare, 1998) 생물 유래의 방오물질들의 경우에도 이들 물질을 분해하는 미생물이 존재한다 (Bauer & Robinson, 2002). 이와 같은 상호관계는 한편으로 가장 좋은 오손 방지 방법은 자연에서 찾을 수 있음을 시사하지만 동시에 효율적인 방오기술의 개발을 위해서는 복잡한 생물-생물 상호작용에 대한 이해가 필요함을 시사한다.

8. 맺음말

부착생활은 미생물의 기본적인 특성이다. 또한 지구 상에 존재하는 절대다수의 미생물이 부착생활을 하고 있다 (Jefferson, 2004). 따라서 미생물학 연구에 있어서도 우리가 그들에 대해 더 많은 것을 이해하고 이용할 수 있기 위해서는 미생물을 유영생활을 하는 단세포 생물로 취급하기보다는 부착생활을 기본으로 하는 조직체로 보고 접근하는 발상의 전환이 필요한 시점이다. 이미 국제 학계에서는 이와 같은 발상의 전환 속에서 생물막을 대상으로 하여 생물막 형성에 관여하는 유전자의 역할, 생물막 형성에 따른 대사과정의 변화, 신호전달 체계 (quorum sensing) 등이 genomics, proteomics 수준에서 연구가 진행되고 있으며 (Wen *et al.*, 2002 and many abstracts in ASM conferences Biofilms 2003, Victoria) 관련 학회가 한 해에도 수 차례 개최되는 등 눈부신 발전을 이루고 있다 (<http://www.biofilmsonline.com> 참조). 연구의 많은 부분이 의료, 치의학 및 폐수처리 분야에 치우쳐있지만 이들 미생물의 생물막 형성 메커니즘은 해양세균의 생물막 생성과정 이해와 제어기술 개발에 활용될 수 있다. 나아가 해양 환경에 고유한 생물막 생성과 관련된 생리, 생화학적,

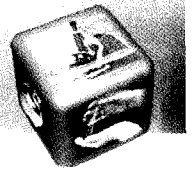
유전적 특성이 깊이 있게 연구된다면 부차적인 환경오염 없이 생물오손과 생물부식 등의 과정을 제어할 수 있는 때가 올 것이다.

감사의 글

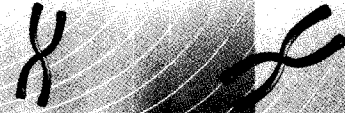
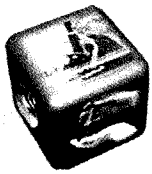
본 논문은 국가지정연구실 사업인 「해양미생물 다양성 확보 및 유전자원 이용기술 개발」의 지원으로 작성되었습니다.

9. 참고문헌

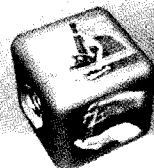
- Allison DG, BA Ruiz, C SanJose, A Jaspe, and P Gilbert. 1998. Extracellular products as mediators of the formation and detachment of *Pseudomonas fluorescens* biofilms. *FEMS Microbiol Lett* 167, 179-184.
- Armstrong E, KG Boyd, and JG Burgess. 2000. Prevention of marine biofouling using natural compounds from marine organisms. *Biotech Annual Review* 6, 221-241.
- Bagge D, M Hjelm, C Johansen, I Huber, and L Gram. 2001. *Shewanella putrefaciens* adhesion and biofilm formation on food processing surfaces. *Appl Environ Microbiol* 67, 2319-2325.
- Bass C, P Sander, and H Lappin-Scott. 1998. Study of biofilm of sulfidogen from North Sea oil production facilities using continuous-Flow apparatus. *Geomicrobiology Journal* 15, 101-120.
- Bauer WD and JB Robinson. 2002. Disruption of bacterial quorum sensing by other organisms. *Curr Opin Biotechnol* 13, 234-237.
- Baum C, W Meyer, R Stelzer, L-G Fleischer, and D Siebers. 2002. Average nanorough skin surface of the pilot whale (*Globicephala melas*, Delphinidae): considerations on the self-cleaning abilities based on nanoroughness. *Mar Biol* 140, 653-657.
- Baveja JK, MDP Willcox, EBH Hume, N Kumar, R Odell, and LA Poole-Warren. 2004. *Biomaterials* 25, 5003-5012.
- Beech IB and C Gaylarde. 1991. Microbial polysaccharides and corrosion. *International Biodeterioration* 27, 95-107.
- Beech IB, J Smith, AA Steele, I Penegar, and SA Campbell. 2002. The use of atomic force microscopy for studying interactions of bacterial biofilms with surfaces. *Colloids and Surfaces B :Biointerfaces* 23, 231-247.
- Berk SG, R Mitchell, RJ Bobbie, JS Nickels, and D White. 2001. Microfouling on metal surfaces exposed to sea water. *Int Biodeter Biodegr* 48, 167-175.
- Beveridge TJ, SA Makin, JL Kadurugamuwa, and Z Li. 1997. Interactions between biofilms and the environment. *FEMS Microbiol Rev* 20, 291-303.
- Boyd A and AM Charkrabarty. 1995. *Pseudomonas aeruginosa*



- biofilms: role of the alginate exopolysaccharide. *J Ind Microbiol* 15, 162-168.
- Brown MRW and P Gilbert. 1993. Sensitivity of biofilms to antimicrobial agents. *J Appl Bacteriol* 74, 87S-97S.
- Burrows LL, A Finelli, and CV Gallant. 2003. Use of IBET (In biofilm expression technology) to identify novel genes involved in *Pseudomonas aeruginosa* biofilm development. p.118 In Abstracts of the ASM conferences Biofilm 2003. Victoria, Canada. Nov. 1-6, 2003.
- Cammarota MC and GL Sant' Anna Jr. 1998. Metabolic blocking of exopolysaccharides synthesis: effects on microbial adhesion and biofilm accumulation. *Biotechnol Lett* 20, 1-4.
- Charaklis WG. 1990. Microbial foulings. pp 523-584 In Charaklis WG and KC Marshall eds. Biofilms. Wiley, New York.
- Charaklis WG and PA Wilderer. 1989. Glossary. p.369-371 In: Charaklis WG and PA Wilderer eds. Structure and function of biofilms. Wiley, Chichester.
- Clare AS. 1998. Towards nontoxic antifouling. *J Mar Biotech* 6, 3-6.
- Cooksey KE and B Wigglesworth-Cooksey. 1995. Adhesion of bacteria and diatoms to surfaces in the sea: a review. *Aquat Microb Ecol* 9, 87-96.
- Coquet L, P Cosette, L Quillet, F Petit, G-A Junter, and T Jouenne. 2002. Occurrence and phenotypic characterization of *Yersinia ruckeri* strains with biofilm-forming capacity in a rainbow trout farm. *Appl Environ Microbiol* 68, 470-475.
- Costerton JW, GG Geesey, and KJ Cheng. 1978. How bacteria stick. *Sci Am* 238, 86-95.
- Costerton JW, KJ Cheng, GG Geesey, TI Ladd, JC Nickel, M Dasgupta, and TJ Marrie. 1987. Bacterial biofilms in nature and disease. *Ann Rev Microbiol* 41, 435-464.
- Costerton JW, Z Lewandowski, DE Caldwell, DR Korber, and HM Lappin-Scott. 1995. Microbial biofilms. *Ann Rev Microbiol* 49, 711-745.
- Cowan MSE, E Gilbert, D Liepmann, and JD Keasling. 2000. Commensal interactions in a dual-species biofilm exposed to mixed organic compounds. *Appl Environ Microbiol* 66, 4481-4485.
- Dang H and CR Lovell. 2000. Bacterial primary colonization and early succession on surfaces in marine waters as determined by amplified rRNA gene restriction analysis and sequence analysis of 16S rRNA genes. *Appl Environ Microbiol* 66, 467-475.
- Davey ME and GA O' Toole. 2000. Microbial biofilms: form ecology to molecular genetics. *Microbiol Molecular Biol Rev* 64, 847-867.
- Davies DG, MR Parsek, JP Pearson, BH Iglewski, JW Costerton, and EP Greenberg. 1998. The involvement of cell-to-cell signals in the development of a bacterial biofilm. *Science* 280, 295-298.
- Dawson MP, BA Humphery, and KC Marshall. 1981. Adhesion, a tactic in the survival strategy of a marine *Vibrio* during starvation. *Curr Microbiol* 6, 195-198.
- Decho AW. 2000. Microbial biofilms in intertidal systems: an overview. *Cont Shelf Res* 20, 1257-1273.
- Denyer SP, SP Gorman, and M Sussman. 1993. Microbial biofilms: formation and control. Blackwell Scientific Publications.
- de Nys R, PD Steinberg, P Willemsen, SA Dworjanyn, CL Gabelish, and RJ King. 2000. Broad spectrum effects of secondary metabolites from the red alga *Delisea pulchra* in antifouling assays. *Biofouling* 8, 259-271.
- Dunne Jr, WM. 2002. bacterial adhesion: Seen any good biofilms lately? *Clinical Microbiology Reviews* 15, 155-166.
- Eberhard A, AL Burlingame, C Eberhard, GL Kenyon, KH Neelson, and NJ Oppenheimer. 1981. Structural identification of autoinducer of *Photobacterium fischeri* luciferase. *Biochemistry* 20, 2444-2449.
- Else TA, CR Pantle, and PS Amy. 2003. Boundaries for Biofilm Formation: Humidity and Temperature. *Appl Environ Microbiol* 69, 5006-5100.
- Errampalli D, K Leung, MB Cassidy, M Kostrzynska, M Blears, H Lee, and JT Trevors. 1999. Applications of the green fluorescent protein as a molecular marker in environmental microorganisms. *J Microbiol Method* 35, 187-199.
- Fathepure BZ and TM Vogel. 1991. Complete degradation of polychlorinated hydrocarbons by a two-stage biofilm reactors. *Appl Environ Microbiol* 57, 3418-3422.
- Flemming H-C. 1996. The forces that keep biofilms together. p.311-316 In Sand W ed. Biodeterioration and biodegradation, Dechema Monographs 133. VCH, Weinheim.
- Flemming H-C. 2002. Biofouling in water systems - cases, causes and countermeasures. *Appl Microbiol Biotechnol* 59, 629-640.
- Flemming H-C and J Wingender. 2001. Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPSs) - Part I: Structural and ecological aspects. *Water Sci Technol* 43, 1-8.
- Galperin MY and AJM Baker. 2004. Environmental biotechnology. From biofouling to bioremediation: the good, the bad and the vague. *Cur Opin Biotech* 15, 167-169.
- Geesey GG. 1982. Microbial exopolymers. ecological and economic considerations. *ASM News* 48, 9-14.
- Gillan DC, AGCL Speksnijder, G Zwart, and C de Ridder. 1998. Genetic diversity of the biofilm covering *Montacuta ferruginosa* (Mollusca, Bivalvia) as evaluated by denaturing gradient gel electrophoresis analysis and cloning of PCR-amplified gene fragments coding for 16S rRNA. *Appl Environ Microbiol* 64, 3464-3472.
- Grasland B, J Mitalane, R Briandet, E Quemener, T Meylheuc, I Linossier, K Vallee-Rehel, and D Haras. 2003. Bacterial biofilm in seawater: cell surface properties of early-attached marine bacteria. *Biofouling* 19, 307-313.
- Hall-Stoodley and P Stoodley. 2002. Developmental regulation of microbial biofilms. *Curr Opin Biotechnol* 13, 228-23.
- Holtmann D and D Sell. 2001. Investigations into the application of a process for the determination of microbial activity in biofilms. *Appl Microbiol Biotechnol* 56, 826-830.
- Jayaraman A, JC Earthman, and TK Wood. 1997. Corrosion inhibition by aerobic biofilms on SAE 1018 steel. *Appl Microbiol Biotechnol* 47, 62-68.



- Jayaraman A, PJ Hallock, RM Carson, C-C Lee, FB Mansfeld, and TK Wood. 1999. Inhibiting sulfate-reducing bacteria in biofilms on steel with antimicrobial peptides generated *in situ*. *Appl Microbiol Biotechnol* 52, 267-275.
- Jefferson KK. 2004. What drives bacteria to produce biofilm? *FEMS Microbiol Lett* 236, 163-173.
- Jenkinson HF and HM Lappin-Scott. 2001. Biofilms adhere to stay. *Trends in Microbiology* 9, 9-10.
- Johnsen AR and U Karlson. 2004. Evaluation of bacterial strategies to promote the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Appl Microbiol Biotechnol* 63, 452-459.
- Joint I, K Tait, ME Callow, JA Callow, D Milton, P Williams, and M CaMara. 2002. Cell-to-cell communication across the prokaryote-eukaryote boundary. *Science* 298, 1207.
- Kuchma SL and GA O' Toole. 2000. Surface-induced and biofilm-induced changes in gene expression. *Curr Opin Biotechnol* 11, 429-433.
- Lau SCK, V Thiyagarajan, and P-Y Qian. 2003. The bioactivity of bacterial isolates in Hong Kong waters for the inhibition of barnacle (*Balanus amphitrite Darwin*) settlement. *J Exp Mar Biol Ecol* 282, 43-60.
- Lerliche V, P Sibille, and B Carpentier. 2000. Use of an enzyme-linked lectinosorbent assay to monitor the shift in polysaccharide composition in bacterial biofilms. *Appl Environ Microbiol* 66, 1851-1856.
- Loo CY, DA Corliss, and N Ganeshkumar. 2000. *Streptococcus gordonii* biofilm formation: Identification of genes that code for biofilm phenotypes. *J Bacteriol* 182, 1374-1382.
- Marshall KC. 1988. Adhesion and growth of bacteria at surfaces in oligotrophic habitats. *Can J Microbiol* 34, 503-506.
- Marshall KC. 1992. Biofilms: an overview of bacterial adhesion, activity and control at surfaces. *ASM News* 58, 202-207.
- Marshall KC, R Stout, and R Mitchell. 1971. Mechanism of the initial events in the sorption of marine bacteria to surfaces. *J Gen Microbiol* 68, 337-348.
- McLean RJC, M Whiteley, DJ Stickler, and WC Fuqua. 1997. Evidence of autoinducer activity in naturally occurring biofilms. *FEMS Microbiol Lett* 154, 259-263.
- Mireles II JR, A Toguchi, and RM Harshey. 2001. *Salmonella enterica* serovar Typhimurium swarming mutants with altered biofilm-forming abilities: surfactin inhibits biofilm formation. *J Bacteriol* 183, 5848-5854.
- Møller SR, C Sternberg, JB Andersen, BB Christensen, JL Ramos, M Givskov and S Molin. 1998. In situ gene expression in mixed-culture biofilms: evidence of metabolic interactions between community members. *Appl Environ Microbiol* 64, 721-732.
- Nogata Y, Y Kitano, E Yoshimura, K Shinshima, and I Sakaguchi. 2004. Antifouling activity of simple synthetic isocyanides against larvae of the barnacle *Balanus amphitrite*. *Biofouling* 20, 87-91.
- O'Conner NJ and DL Richardson. 1998. Attachment of barnacle (*Balanus amphitrite Darwin*) larvae: responses to bacterial films and extracellular materials. *J Exp Mar Biol Ecol* 226, 115-129.
- O' Toole GA, KA Gibbs, PW Hager, PV Phibbs Jr, and R Kolter. 2000. The global carbon metabolism regulator Crc is a component of a signal transduction pathway required for biofilm development by *Pseudomonas aeruginosa*. *J Bacteriol* 182, 425-431.
- Pasmore M and JW Costerton. 2003. Biofilms, bacterial signaling, and their ties to marine biology. *J Indust Microbiol Biotechnol* 30, 407-413.
- Patel P, Callow ME, Joint I, and JA Callow. 2003. Specificity in the settlement - modifying response of bacterial biofilms towards zoospores of the marine alga *Enteromorpha*. *Environ Microbiol* 5, 338-349.
- Pratt LA and R Kolter. 1999. Genetic analysis of bacterial biofilm formation. *Curr Opin Microbiol* 2, 598-603.
- Prigent-Combaret C, O Vidal, C Dorel, and P Lejeune. 1999. Abiotic surface sensing and biofilm-dependent regulation of gene expression in *Escherichia coli*. *J Bacteriol* 181, 5993-6002.
- Purevdorj B, JW Costerton, and P Stoodley. 2002. Influence of hydrodynamics and cell signaling on the structure and behavior of *Pseudomonas aeruginosa* biofilms. *Appl Environ Microbiol* 68, 4457-4464.
- Rumbaugh KP, JA Grisword, and AN Hamood. 2000. The role of quorum sensing in the in vivo virulence of *Pseudomonas aeruginosa*. *Microbs & Infection* 2, 1721-1731.
- Stoodley P, R Cargo, CJ Rupp, S Wilson, and I Klapper. 2002. Biofilm material properties as related to shear-induced deformation and detachment phenomena. *J Indust Microbiol Biotechnol* 29, 361-367.
- Stickler D. 1999. Biofilms. *Curr Opinion Microbiol* 2, 270-275.
- Sutherland IW. 1999. Biofilm exopolysaccharide. p.73-92 In Wingender J, TR Neu and H-C Flemming eds. *Microbial Extracellular Polymeric Substances*. Springer, New York.
- Sutherland IW, KA Hughes, LC Skillman, and K Yait. 2004. The interaction of phage and biofilms. *FEMS Microbiol Lett* 232, 1-6.
- Toledo-Arana A, J Valle, C Solano, MJ Amizubieta, C Ucarella, M Lamata, B Amorena, J Leiva, JR Penades, and I Lasa. 2001. The *Enterococcal* Surface Protein, Esp, Is Involved in *Enterococcus faecalis* Biofilm Formation. *Appl Environ Microbiol* 67, 4538-4545.
- Tolker-Nielsen T and S Molin. 2000. Spatial organization of microbial biofilm communities. *Microb Ecol* 40, 75-84.
- van Loosdrecht MCM, J Lyklema, W Norde, G Schraa, and AJB Zehnder. 1987. The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion. *Appl Environ Microbiol* 53, 1893-1897.
- Verran, J, RD Boyd, KE Hall, and R West. 2002. The detection of microorganisms and organic material on stainless steel food contact surfaces. *Biofouling* 18, 167-176.
- Vers AV and M Wahl. 2004. The influence of natural surface microtopographies on fouling. *Biofouling* 20, 43-51.
- Videla HA. 2002. Prevention and control of biocorrosion. *Int Biodeter Biodegr* 49, 259-270.
- Vilain S, P Cosette, I Zimmerlin, J DuPont, GA Junter, and T



Jouenne. 2003. The biofilm proteome: Unicity or versatility? p.168 *In Abstracts of the ASM conferences Biofilm 2003*. Victoria, Canada. Nov. 1-6, 2003.

Walczyso P, U Kuhlicke, S Knappe, C Cordes, and TR Neu. 2004. Fluorescence lifetime imaging (FLIM) of interfacial microbial communities. p. 58 *In Abstracts of the ASM conferences Biofilm 2003*. Victoria, Canada. Nov. 1-6, 2003.

Webb JS, M Givskov, and S Kjelleberg. 2003. Bacterial biofilms: prokaryotic adventures in multicellularity. *Curr Opin Microbiol* 6, 578-585.

Wen ZT and RA Burne. 2002. Functional genomics approach to identifying genes required for biofilm development by *Streptococcus mutans*. *Appl Environ Microbiol* 68, 1196-1203.

Wieczorek SK and CD Todd. 1997. Inhibition and facilitation of bryozoan and ascidian settlement by natural multi-species biofilms: effects of film age and the roles of active and passive larval attachment. *Mar Biol* 128, 463-473.

Wimpenny J. 2000. An overview of biofilms as functional communities, p.1-24 *In Allison D, P Gilbert, H Lappin-Scott, and M Wilson eds., Community structure and co-operation in biofilms*. Cambridge University Press, Cambridge.

Yan L, A WObker, and JG Burgess. 2004. Biofilm dispersal during bacterial competition. p.7 *In Abstracts of the 12th International Congress on Marine Corrosion and Biofouling*. Southampton, UK. July 27-30, 2004.

Yebra DM, S Kiil, and K Dam-Johansen. 2004. Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Prog Org Coat* 50, 75-104.

약 력



권 개 경

- 1985. 3. - 1989. 2. 서울대학교 미생물학과 (이학사)
- 1989. 3. - 1991. 2. 서울대학교 미생물학과 (이학석사)
- 1999. 3. - 2002. 8. 서울대학교 해양학과 박사과정 수료
- 1991. 3. - 1998. 2. 한국해양연구원 (연구원)
- 1998. 3. - 현재 한국해양연구원 (선임연구원)