한국환경과학회지 제8권(제5호), 587~592, 1999
J. of the Korean Environmental Sciences Society

인공 간석지 창출에 있어서 토양구조를 결정하는 인자에 관한 연구

이 정 규 · 최 영 찬*
한국해양연구소 해양생물단 · *제주대학교 해양과학대학 해양학과
(1999년 6월 4일 접수)

Study on Controlling Factors for Soil Structure in Creation of Man-made Tidal Flat

Jeoung-Gyu Lee and Young-Chan Choi*
Biological Oceanography Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P. O. Box 29, Seoul 425-600, Korea
**Department of Oceanography, Cheju National University 1-Aradong Chejushi Chejudo, 690-756, Korea*
(Manuscript received 4 June, 1999)

The purpose of this study was to identify the controlling factors to construct tidal flat ecosystems having similar characteristics as natural ones. We transplanted the soil in a constructed tidal flat to a natural one and vice versa. Parameters monitored after these transplantations were silt content, organic matter, bacterial population and oxidation-reduction potential. Moreover, the relationship among silt content, organic matter and bacterial population was investigated by laboratory column experiment.

The silt content, organic matter, bacterial population and vertical profile of oxidation-reduction potential in the soil transplanted from the constructed tidal flat to the natural one changed to similar values to those in the natural one. On the contrary, all the parameters for the soil transplanted from the natural tidal flat to the constructed one changed to similar values as those in the constructed one. The silt contents in these two transplanted soils were in proportion to the organic carbon contents and bacterial population. Similarly, the bacterial population in laboratory column experiment increased with the increase in silt and organic matter contents.

It seemed to be important to select a place to enhance accumulative of silt and/or to maintain the silt content by hydrodynamic control of seawater in order to construct a tidal flat having similar characteristics as natural one.

Key words : construction of tidal flat, controlling factor, selection of location, soil structure

1. 서 론

연안지역의 친수성 기능을 포함한 자연 친화적인 환경 창출 및 복원, 즉 인간과 자연이 조화를 이루는 환경보전 및 정비를 요구하는 여론의 목소리가 높아지고 있다. 이러한 최근의 추세에도 불구하고 연안개발이나 산업기지 조성 등을 위한 매립으로 간석지의 감소는 계속되고 있다. 한편에서는 인간의 강력한 요구에 따라 친수성의 확보 또는 해양생물의 자원보호 등을 목적으로 한 간석지의 복원 및 조성사업이 시행되고 있다. 간석지의 복원 및 창출에 있어서는 원래 존재했던 간석지 기능, 구조 및 가치의 전부 또는 일부를 대체할 것을 요구하고 있다. 일본의 경우에는 수산양식을 목적으로 하는 인공간석지의 조성이 주로 시행되어 왔다.[1~3] 특히 최근에는 폐기물 매립장의 대체지나 휴양지 등을 확보하기 위한 수단으로 인공간석지를 조성하고 있다. 또한 연안의 생태계나 수질환경을 회복시키기 위한 수단으로 간석지의 정화기능을 이용하려는 연구가 활발히 추진중에 있다.[4] 그러나 인공간석지의 조성사례가 증가하고 있음에도 불구하고, 자연간석지와 동일하게 조성하기 위한 조사연구는 충분하게 이루어지지 않고 있다.

저자[5,6]는 일본 히로시마만에 있는 세 개의 자연간석지와 일곱 개의 인공간석지를 대상으로 물리화학적 및 생물학적인 구조와 기능의 차이를 비교 · 검토하였다. 그 결과, 자연간석지와 인공간석지 토양중 실트함량, 유기물함량, 미생물현존량 및 환원층의 발달에 명확한 차이를 보였다. 조사한 일곱 개 인공간석지는 전부가 조성 후 10년 이상 경과한 것이며, 자연간석지와 같은 구조나 기능을 가진 간석지로 변화해 가고 있는 천이과정에 있다고는 판단되지 않았다. 이것은 인공간석지 조성에 있어서 조성방법과 입지선정 등이 적절하지 못한 것에 원인

이 있다고 사료된다. 한편 조사한 인공간석지 중에서 1개소가 자연간석지와 같은 구조나 기능을 가지고 있었다. 이 결과로부터 조성방법과 조성장소 등이 적절하면, 자연간석지와 동일한 구조나 기능을 가진 인공간석지를 조성하는 것이 가능할 수 있음을 시사하였다.

DeFlaun[7]은 미국의 Damariscotta간석지의 토양중 미생물현존량, 유기물함량 및 입경분포를 비교했으며, 입경이 작을수록 미생물현존량과 유기물함량이 높다고 보고하였다.[8~10] 이것은 입자가 작을수록 표면적이 크기 때문인 것으로 추정하였다. 토양중 대부분의 미생물은 입자표면에 부착해서 존재하고, 미생물의 분포밀도는 구성입자의 크기에 영향을 받아, 입자가 작을수록 미생물현존량이 높아지는 경향이 있다고 보고하였다. 이와 같이 간석지에 있어서 미생물현존량, 유기물함량과 입자크기 사이에는 높은 상관관계가 있다는 것을 시사하였다.

따라서 본 연구에서는 자연간석지와 인공간석지에서 명확한 차이를 나타낸 실트함량, 유기물함량, 미생물현존량 및 토양중의 산화환원전위를 지표로 하여, 인공간석지의 입지조건이나 토양조성에 관한 정보를 얻는 것을 목적으로 하였다. 구체적으로는 자연간석지 토양을 인공간석지에, 인공간석지 토양을 자연간석지에 이식하고, 이식토양의 물리화학 및 생물학적 특성의 변화를 추적하였다. 또한 실트함량, 유기물함량 및 미생물현존량의 관계를 실내실험을 통하여 이들 간의 상호관련성에 관해서 검토하였다.

2. 실험방법

2.1. 이식실험

이식실험을 실시한 자연 및 인공간석지는 히로시마만 북부 해역에 존재하고, 하천수 유입이 없는 47,000 m^2의 자연간석지와 50,000 m^2의 인공간석지로 대략 동일한 면적을 가진 것을 선택하였다. 간석지의 경사는 자연간석지가 1/100, 인공간석지가 2/100이다. 간석지의 위치를 Fig. 1, 토양의 특성을 Table 1에 나타내었다.

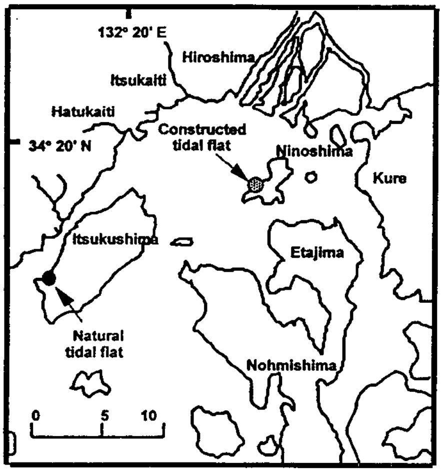

Fig. 1. Location of natural and constructed tidal flats in Hiroshima bay used for soil transfer.

Table 1. Physico-chemical and biological characteristics of soils in natural and constructed tidal flat

Parameters	Depth(cm)	Natural	Constructed
Bacterial population (10^9 cells / g)	0~2	2.9	0.3
	5~10	3.0	0.3
Ignition loss (%)	0~2	1.4	0.9
	5~10	1.5	1.0
Silt content (%)	0~2	3.5	0.4
	5~10	5.7	0.5
Median particle diameter (㎜)	0~2	0.6	0.3
	5~10	0.4	0.4

Values are averages of three replicate samples (n=3, March 1996)

이식지점은 자연 및 인공간석지에 있어서 대조시(spring tide)의 만조위선(high water level)과 간조위선(low water level)의 중간지점에 위치하는 일본기상청이 지정한 기준면으로부터 +1.2 m 높이에 위치하고 있다.

토양의 이식은 가로 60 cm, 세로 60 cm, 깊이 10 cm의 토양을 채취하였으며, 저서생물 (Macrobenthos) 의 침입을 막기 위해 망목의 크기가 1 mm의 나일론망을 깔고 그 위에 이식토양을 투입하였다. 이식토양은 1996년 4월에 각각의 간석지에서 깊이 10 cm까지 채취하여 혼합후 저서생물(크기 1 mm 이상)을 제거하고, 인공간석지는 자연간석지에 자연간석지는 인공간석지에 각각 이식하였다. 이식 후 약 2주간은 3일 간격으로 토양시료를 채취하고, 그 이후에는 대조시에 토양시료를 채취하였다.

채취한 토양시료의 측정항목은 미생물현존량, 유기물함량의 지표로서 강열감량 그리고 실트함량이었다. 또한 이식실험 종료 후 내경 10.5 cm의 폴리카본네이트제 원형관으로 이식토양을 채취하여 산화환원전위(ORP)를 측정하였다.

2.2. 실내실험

실내실험은 토양중의 미생물현존량과 실트함량의 상호관련성을 조사하기 위한 목적으로 실시하였다. 토양중의 실트함량을 인위적으로 설정한 토양 컬럼을 이용하여 유입수에 유기물 첨가와 무첨가 조건에서 장기간 배양 후 미생물현존량을 측정하였다.

또한 토양중에 실트함량이 높게 되면 토양 입자간의 간격이 작아질 것으로 생각하였다. 따라서 미세입자에 의한 토양중의 여과효과가 높아질 것이라고 생각하였다. 이를 확인하기 위하여 실트함량이 각각 다른 토양 칼럼을 이용하여 해수로부터 토양에 Trap된 현탁대 유기물량의 차이를 검토하였다.

2.2.1. 장치

실내실험에 사용한 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 토양을 충진한 칼럼을 설치한 수조(45 cm × 30 cm ×

30 cm)에 해수 40 ℓ를 순환시켰다. 해수의 순환은 실제 간석지와 같이 12시간 주기의 조석간만을 재현하였다. 해수의 간만은 토양의 충진 높이 5 cm 칼럼의 최상부에서 최하부까지 되도록 조절하였다. 수조내의 실트함량이 다른 각각의 칼럼을 설치하고 암실조건 20 ℃에서 실험을 하였다.

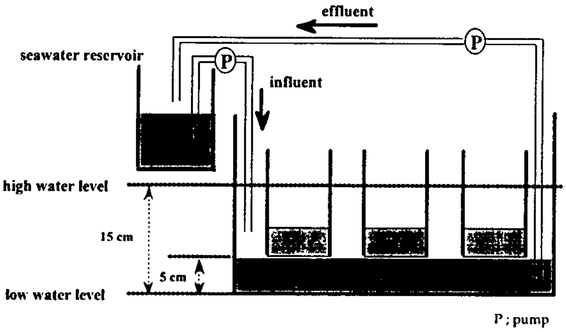

Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

사용한 해수는 히로시마만의 자연간석지의 근해에서 채취하였다(Fig. 1). 채취한 해수의 염분농도, TOC, TN, TP는 각각 31.2 ‰, 2.0 ㎎/ℓ, 0.44 ㎎/ℓ, 0.025 ㎎/ℓ였다. 현탁태 유기물을 제거하기 위해서 0.45 ㎛ 여지로 여과후 사용하였다.

칼럼은 내경 10 cm, 높이 8 cm의 폴리카본네이트제 원형관 하부에 20 ㎛의 나일론 망을 부착하여 실트분의 유실을 막았다. 본 연구에 사용한 실트 입자의 크기는 75 ~ 20 ㎛이다.

2.2.2. 실트와 유기물 첨가

실험에 이용한 토양은 히로시마만의 자연간석지에서 채취하였다(Fig. 1). 초기 미생물현존량과 유기물함량의 오차를 줄이기 위하여, 실험에 앞서 토양입자에 부착된 미생물과 유기물을 제거한 후 사용하였다. 토양 약 20 g을 탈염(脫塩) 처리한 후 30% H_2O_2용액을 50 ㎖를 첨가하여 토양중의 유기물을 가열 분해시키면서 완전하게 건조시킨 후, JIS검정된 스텐레스체를 이용하여 입자를 분리하였다.[11]

각 칼럼의 토양입자는 2,000 ~ 425㎛ 분획 60%와 425 ~ 75㎛ 분획 40%를 혼합하여 충진시켰다. 이것은 자연 및 인공간석지에 있어서 토양의 입자분포는 2,000 ~ 425㎛의 분획이 약 60%로 가장 많았기 때문이다. 각 칼럼계열의 토양 총중량에 대해서 실트분을 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 8%, 10%로 첨가하여 충분히 혼합한 후, 각 칼럼에 높이 5 cm가 되도록 충진시켰다. 사전에 예비실험을 실시하여 본 조건에서 해수의 통수가 충분히 되는 것을 확인한 후 실험을 실시하였다. 또한 상기의 칼럼에서 유기물함량이 미생물현존량에 미치는 영향을 보기 위해 유기물 무첨가계와 유기물 첨가계 실험을 실시하였다. 유기물 무첨가계는 자연간석지의 근해에서 취수한 해수를 0.45 ㎛로 여과후 사용하였다. 유기물 첨가계는 Glucose를 600 ㎎/ℓ(TOC, 24 ㎎/ℓ)를 해수에 첨가하였다.

2.2.3. 유기물 Trap 실험

Fig. 2에 나타낸 토양 칼럼을 이용하여, 칼럼의 상부에서 식물플랑크톤을 증식 배양한 해수를 통과시켰다. 그 토양중의 Trap된 Chl.a 농도 분포를 측정하였다.

해수는 2.2.1 장치에 사용한 것을 이용하였다. 이 해수에 영양염을 첨가해서, 20℃에서 산소 포기하여 배양하였다. 신선한 식물플랑크톤을 사용하기 위해 증식이 정상상태로 되었을 때를 확인하여 실험에 사용하였다. 배양에 이용한 인공기질은 Table 2[12]와 같다. Chl. a의 농도는 90% 아세톤에 추출한 후 흡광광도계(SIMAZU, UV-240)로 측정하였다.[13] Trap량의 계산은 유입수에서 유출수를 뺀 Chl. a 농도로 구하였다. 실험은 해수가 토양 칼럼을 완전히 통과한 후에 실시하였다. 실험중 Chl. a의 변화를 막기 위해 4℃의 암실 조건에 실시하였다.

Table 2. Added nutrients for culture of sea water

Solution A		Solution B	
KNO_3	20.0 g	$NO_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	4 g
H_2O	100 ㎖	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	4 g
		HCl	2 ㎖
		$FeCl_3$	2 ㎖
		H_2O	80 ㎖

Sol. A 2ml and sol. B 1 ㎖ add to filtered sea water 1000㎖.

2.3. 분석방법

이식실험 및 실내실험에 이용한 실트함량, 강열감량, 산화환원전위 및 미생물현존량의 분석은 방법은 李[5]와 LEE[6] 등에 준하여 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이식실험

Fig. 3에 인공간석지 토양을 자연간석지에 이식한 후, 실트함량, 미생물현존량 및 강열감량의 경일변화를 나타내었다. 전 실험항목은 이식실험 개시일부터 약 44일까지 변화경향이 일정하였다. 실험개시시의 실트함량은 0.38%이었지만 44일에는 2.92%가 되어, 실험개시 초기와 비교하면 약 8배로 증가하였다. 미생물현존량은 실험개시후 6일까지는 약 0.43 $\times 10^9$ cells/g dry였지만, 44일에는 1.32 $\times 10^9$ cells/g dry가 되어 초기와 비교하면 약 4배 증가하였다. 강열감량도 미생물현존량 및 실트함량과 같은 경향을 나타내었다. 실험개시부터 44일에는 전 실험항목이 Table 1에 나타낸바와 같이 이식을 실시한 자연간석지의 토양과 같은 수준의 값을 나타내었다.

자연간석지 토양을 인공간석지에 이식한 후 실트함량, 미생물현존량 및 강열감량의 경일변화는 Fig. 4에 나타내었다. 실험개시시의 실트함량은 10.3 %로 Table 1의 자연간석지와 비교해서 상당히 높은 값을 나타내었다. 이것은 이식할 때에 실트함유량이 높은 토양이 채취되어

높은 값을 나타내었다고 사료된다. 미생물현존량과 강열감량은 모두 높은 값을 나타내었다. 그러나 이식개시부터 22일경 후에는 실트함량은 0.7 %로 1/10 이하로 감소하였다. 미생물현존량, 강열감량도 이식후 급격히 감소하였고, 22일경 이후에는 인공간석지와 동일한 수준의 값을 나타내었다.

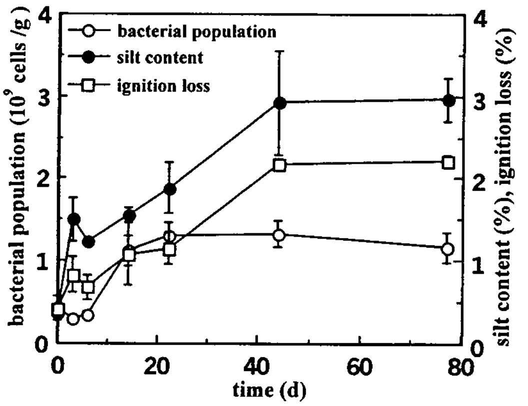

Fig. 3. Variation in bacterial population, silt content and ignition loss in soils of constructed tidal flats transferred into natural tidal flat. Points and bars indicate means and standard deviations of three replicate samples.

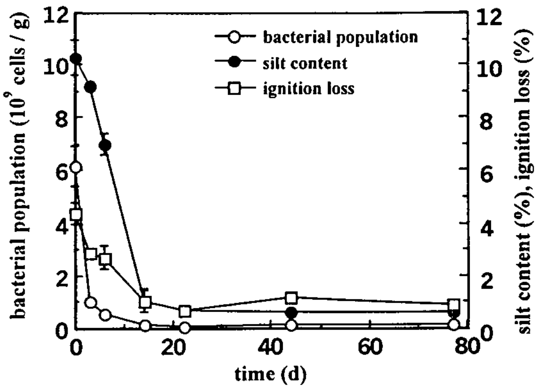

Fig. 4. Variation in bacterial population, silt content and ignition loss in soils of natural tidal flats transferred into constructed tidal flat. Points and bars indicate means and standard deviations of three replicate samples.

이식실험의 개시시와 종료시(자연 및 인공간석지 모두 78일 이후)에 토양의 깊이별 산화환원전위를 Fig. 5에 나타내었다. 인공간석지의 토양의 산화환원전위는 표면에서 7 cm까지 플러스의 값을 나타내어 산화환경으로 변화하였다. 한편 자연간석지에 이식한 인공간석지 토양은 표면 0.5 cm에서 +215 mV, 2.5 cm이하 층에서는 -66 ~ -115 mV의 범위로 자연간석지의 토양과 동일한 구조로 변화하였다.

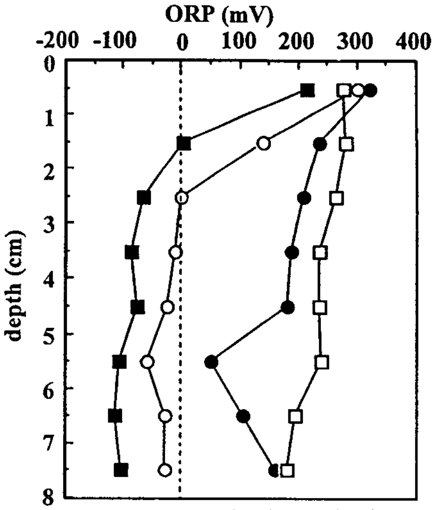

Fig. 5. Vertical profiles of oxidation-reduction potential of soils transferred between natural and constructed tidal flats.
(■) natural, (□) constructed, (○) transfer from constructed to natural (●) transfer from natural to constructed.

이상과 같이 이식한 토양은 시간이 경과함에 따라 이식한 간석지 토양과 동등한 구조로 변화해 가는 것을 알 수 있었다.

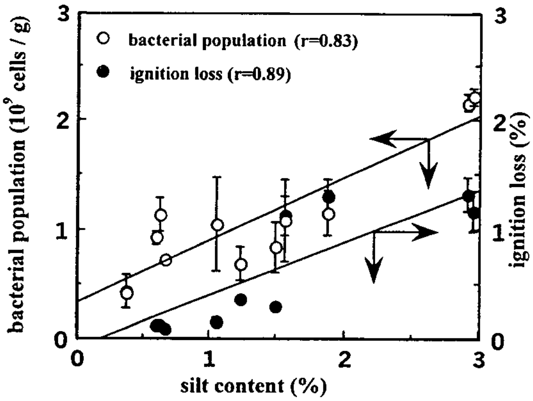

Fig. 6. Relationship between bacterial population, ignition loss and sit content for soil samples during transfer between natural and constructed tidal flats. Points indicate means of three replicate samples.

Fig. 6은 간석지 토양의 이식실험에 있어서 실트함량과 미생물현존량 및 유기물함량간의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것처럼 실트함량이 증가함에 따라 미생물현존량과 유기물함량이 증가하였다. 실트 입자는 해수로부터의 유입, 반대로 해수유동에 의한 유출 등 물리적인 인자에 의해서 결정된다고 생각된다. 즉 해수

의 유동이 강한 경우 해수중의 실트 입자는 침강하기 어렵고, 토양중에 존재하는 실트 입자는 재부상(Resuspension)되어 토양 밖으로 유출할 것으로 생각된다. 한편 해수의 흐름이 약한 경우는 해수중의 실트 입자는 침강하기 쉽고 토양 중에 퇴적될 것으로 추측된다.[14~16]

이와 같이 자연간석지에 이식한 인공간석지 토양 중에는 실트함량이 증가했으며 그 결과로서 미생물현존량이 증가하였다고 추측된다. 한편 인공간석지에 이식한 자연간석지 토양은 실트함량을 많이 함유한 토양을 이식했음에도 실트함량은 감소하는 경향을 나타내었으며 미생물현존량도 감소하였다. 따라서 자연과 동등한 인공간석지를 조성하기 위해서는 간석지에 투입하는 토양조성이 중요한 인자이며, 또한 해수의 유동과 같은 물리적인 인자에 의해 실트 축적의 촉진이 결정되므로 장소의 선정이 중요하다고 생각한다.

3.2. 실트함량, 유기물함량과 미생물현존량과의 관계

현장 이식실험의 결과로부터, 간석지 토양중의 실트함량이 미생물현존량 및 유기물함량을 결정하는 중요한 인자인 것을 알았다. 이와 같은 결과라면 자연과 동일한 구조를 가진 인공 간석지를 조성하기 위해서 실트함량이 높은 토양으로 조성하면 된다는 결론도 나올 수 있다. 그렇지만 간석지 토양중의 미생물에게 영양원으로 공급되는 유기물, 즉 먹이의 공급이 없다면 자연과 동일한 구조를 가진 인공 간석지가 될 것인가에 대한 의문도 제기된다.

이러한 의문을 이해하기 위해서 실내실험을 통하여 실트함량, 유기물함량과 미생물현존량과의 관계를 검토하였다.

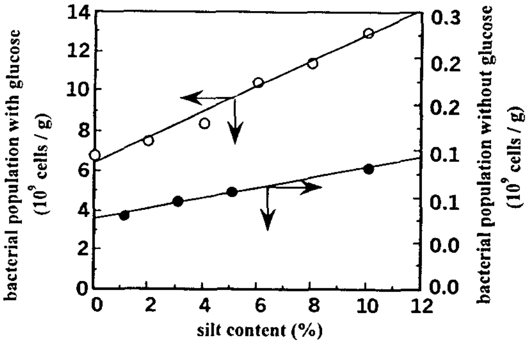

Fig. 7. Relationship between bacterial population and sit content in soil content in soil samples taken at the end of experiments with or without the addition of glucose. Points are mean of six replicate samples.

Fig. 7은 유기물 무첨가계와 첨가계에 있어서 각 칼럼의 실트함량과 미생물현존량간의 상관관계를 나타내었다. 미생물현존량은 실험개시시부터 증가하여 40일 이후부터 변화경향이 일정하게 되었다. 유기물 무첨가계는 첨가계와 함께 실트함량과 미생물현존량간에 높은 상관계수를 나타내었다(각각, r=0.99). 유기물 첨가계의 미생물현존량을 무첨가계와 비교해 보면 약 1 ~ 3차수 높았다. 실제 간석지에서도 유기물함량이 높은 자연간석지가 인공간석지 보다 약 10배 높은 미생물현존량을 나타내었다(Table 1). 이러한 결과는 자연간석지는 인공간석지에 비해서 토양중의 유기물함량이 높게 유지되었기 때문인 것으로 사료된다.

해수로부터 간석지 토양으로 퇴적하는 현탁태 유기물원은 식물성 플랑크톤이라고 사료된다. 이 식물성 플랑크톤이 축적되는 과정에 있어서 토양중의 실트함량에 영향을 받을 것으로 사료되어 실내 Trap실험을 실시하였다. Fig. 8은 칼럼에 해수를 유입시키기 전과 후의 해수중 Chl. a 농도의 차에서 칼럼 중에 Trap된 량을 산출한 것이다. 이 결과에서 토양중의 실트함량이 높은 칼럼일수록 토양중에 Trap되는 Chl. a량이 높아지는 것을 알 수 있었다.

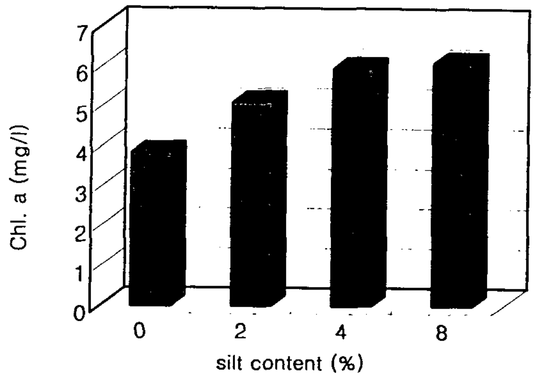

Fig. 8. The amount of chlorophyll a trapped in column.

Meyer-Reil,[9] Weise and Rheinheimer[10]은 간석지에 있어서 토양중의 미생물은 대부분이 입자표면에 부착해서 존재하고 있다고 보고하였다. 토양중의 미생물현존량은 구성입자 크기의 영향을 받아, 입자가 작을수록 미생물현존량이 높게 나타나는 경향이 있다고 하였다.[8]

본 연구의 결과에서도 실트함량이 증가함에 따라 미생물현존량이 증가하였다. 유기물을 첨가함에 따라 미생물현존량이 증가한 것은 기질(영양)이 충분하게 공급되었기 때문으로 생각된다. 간석지 토양중 유기물량의 증가를 촉진시키는 것은 실트함량에 기인한다는 것을 알 수 있었다. 또한 간석지 토양중이나 표면에 생식하고 있는 미생물은 먹이사슬을 통하여 저서생물, 어류, 조류 등과 깊게 관련되어 있다는 것이 보고되고 있다.[17,18] 따라서 자연과 동등한 구조를 가진 인공 간석지를 생각할 경우 실트함량은 중요한 조성인자가 될 것으로 사료된다.

또한 이식실험을 실시한 히로시마만은 폐쇄성 수역이기 때문에 간석지에 유입하는 해수 중의 유기물량은 대략 일정하게 존재하고 있다고 생각된다. 따라서 해수에 함유된 유기물량이 동일한 경우를 생각한다면, 자연간석지와 동일한 인공간석지를 조성하기 위해서는 간석지 토

양중의 실트함량을 높게 유지시키거나 해수의 유동을 제어하는 것이 중요하다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자연간석지와 인공간석지에 있어서 실트함량, 유기물함량, 미생물현존량, 토양중의 산화환원전위의 차와 그 변화경향으로부터, 인공 간석지조성에 있어서 입지조건이나 토양조성에 관한 기초적인 지식을 제공하는 것을 목적으로 하였다. 구체적으로는 자연간석지 토양을 인공간석지에 인공간석지 토양을 자연간석지에 이식하고, 이식토양의 물리화학적 및 생물학적 특성의 변화를 추적하였다. 또한 실트함량과 유기물함량이 미생물현존량에 미치는 영향에 관해서 실내실험을 통하여 검토하였다.

자연간석지 토양을 인공간석지에 인공간석지 토양을 자연간석지에 이식한 결과, 실트함량, 유기물함량, 미생물현존량 및 토양중의 산화환원전위층은 시간의 경과와 함께 이식한 간석지의 토양구조와 동일하게 변이해 가는 것을 알았다. 또한 이식 토양중의 실트함량, 미생물현존량 및 유기물함량과는 높은 상관관계를 나타내었다. 실트함량 및 유기물함량의 증감과 함께 미생물현존량이 비례해서 증감하는 것을 알았다. 또한 실내실험 결과에서도 실트함량이나 유기물함량의 증가와 함께 미생물현존량이 증가하였다. 또한 그 원인은 실트함량이 증가 함에 따른 결과라는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 자연과 동등한 인공간석지를 조성하는 것은 간석지 토양에 있어서 실트의 축적이 가능한 장소의 선정이나 해수의 유동을 제어하여 실트 성분을 유지관리하는 것이 중요하다고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 일본 히로시마대학 대학원 공학연구과 환경기초화학연구실의 환경복원 연구팀과 1998년 제주대학교 발전기금 국외 파견 연구지원과 공동으로 연구되었다.

참 고 문 헌

1) 小倉陸夫，今村 均，1995, 人工干潟の創造技術について，ヘドロ，64，64~74.
2) 福田和國，横山正樹，羽原浩史, 1992, ミチゲーションを目的とした人工干潟造成事業，土木施工，33，53~60.
3) 酒井活二， 1997， 港灣における干潟の創出，水環境學會, 20, 10~13.
4) Hitoshi Imamura, 1994, Mitigation by means of Artificial Tidal Flat - Monitoring of Ecosystem and Live Environment -, 用水と廢水, 36, 33~39.
5) 李正奎，西嶋涉，向井徹雄，瀧本和人，淸木徹，平岡喜代典，岡田光正, 1997, 自然及び人工干潟における構造と有機物分解能の比較，水環境學會，20，175~184.
6) LEE, Jeoung gyu, W. NISHIJIMA, T. MUKAI, K. TAKIMOTO, T. SEIKI, K. HIRAOKA, and M. OKADA, 1997, Factors to determine the functions and structures in natural and constructed tidal flats, *Water Research*, 32, 2601~2606.
7) DeFlaun, M. F. and L. M. Mayer, 1983, Relationships between bacteria and gran surfaces in intertidal sediments, *Limnol. Oceanogr.*, 28, 873~881.
8) Meyer-Reil, L. A., 1984, Bacterial biomass and heterotrophic activity in sediments and overlying waters, in Heterotrophic Activity in the Sea. Ed. by J. E. Hobbie and P. J. LeB. Williams, Plenum Press, New York, 523~546.
9) Meyer-Reil, L. A., R. Dawson, G. Liebezeit, and H. Tiedge, 1978, Fluctuations and interactions of bacterial activity in sandy beach sediments and overlying waters, *Marine Biology*, 48, 161~171.
10) Weisel, W. and G. Rheinheimer, 1978, Scanning electron microscopy and epifluorescence investigation of bacterial colonization of marine sand sediments. *Microb.,Ecol.*, 4, 175~188.
11) 土質工學會編, 1979, 土質工學ハンドブック，65~72，土質工學會，東京.
12) 岩奇英雄編, 1993, 海洋 6 海洋科學基礎講座, 東海大學出版會, 東京, 58pp.
13) 日本海洋學會, 1980, 海洋還境調査法, 恒成社厚生閣, 東京, 666pp.
14) De Jonge, V. N. and J. E. E. Van Beusekom, 1995, Wind and tide-induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats in the Ems estuary. *Limnol. Oceanogr.*, 40, 766~778.
15) Smaal, A. C. and Haas, H. A., 1997, Seston dynamics and food availability on Mussel and Cockle Beds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45, 247~259.
16) Wang F. C., Lu Tiesong and Sikora Walter B., 1993, Intertidal Marsh Suspended Sediment Transport Processes, Terrebonne Bay, Louisiana, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 9, 209~220.
17) Montagna, P. A., 1984, In Site Measurement of Meiobenthic grazing rates on sediment bacteria and edaphic diatoms, *Mar. Ecol. Prog. ser.*,18, 119~130.
18) 栗原 康, 1988, 河口・沿岸域の生態學とエコテクノロジー, 東海 大學出版會, 東京, 335pp.