

Relationship between Chemical Property and Microbial Activity of Reclaimed Tidal Lands at Western Coast Area in Korea

Eun-seong Ko, Ji-An Joung, Chang-Hwan Kim¹, Su Hwan Lee², Tongmin Sa³, and Joon-Ho Choi*

Department of Food Science and Biotechnology, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk 570-749, Korea

¹Department of Ecology Landscape Architecture-Design, Chonbuk National University, Iksan 570-752, Korea

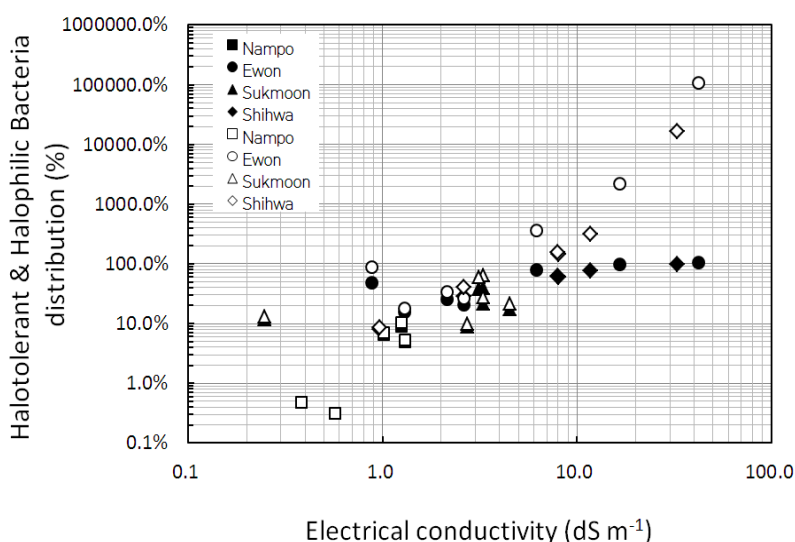
²National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Iksan 570-080, Korea

³Department of Environmental Science and Biological Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 361-763, Korea

(Received: July 21 2014, Revised: July 22 2014, Accepted: August 8 2014)

The scientific information between microbial activities and chemical properties of reclaimed tidal soil is not enough to apply for reclamation projects. This study was conducted to investigate the relation between chemical properties and microbial activities of reclaimed tidal lands located at western coastal area (25 samples from Nampo, Ewon, Sukmoon and Shihwa sites). Most of the reclaimed soils showed chemical characteristics as salinity soil except Nampo site. The major component influenced the salinity of reclaimed soil was identified as a sodium from the relationship between EC and exchangeable cation. With an increase in EC of soil, the population of mesophilic bacteria decreases whereas halotolerant and halophilic bacteria increases. The population of mesophilic bacteria increased with an increase in both organic matter and dehydrogenase activity. However, the population of halotolerant and halophilic bacteria decreased with an increase in organic matter. Based on the relation between chemical property and microbial activity of reclaimed tidal soil, electrical conductivity and organic matter as chemical properties of soil, population of mesophilic bacteria, halotolerant and halophilic bacteria and dehydrogenase activity as microbial activities could be the major parameters for reclamation process.

Key words: Electrical conductivity, Microbial distribution, Halotolerant and halophilic bacteria



Relation between electrical conductivity and content of halotolerant and halophilic bacteria in microbial population from reclaimed lands at western coastal area. Open symbol, $(HTB+HB) MB^{-1} (\%)$, closed symbol, $(HTB+HB) (HTB+HB+MB+TB+A+F)^{-1} (\%)$.

*Corresponding author : Phone: +82638506679, Fax: +82638507308, E-mail: jhchoi1124@wku.ac.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ009287)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

본래 간척지는 바닷물에 잠겨 있었던 토양인데 우리나라 서남해안 간척지는 대부분 인위적 방조제 구축으로 형성되었기 때문에 가용성 염류와 치환성 나트륨 과다로 인한 염분농도는 높은 반면 유기물 함량은 절대적으로 낮고 토양구조가 발달되지 않아 식물의 발아 및 생육에 불리한 환경이 형성되어 있다. 또한 간척지 토양의 염분농도는 일시적으로 낮아졌다 하더라도 염분을 함유한 수분 상승으로 재염화 가능성이 높을 뿐만 아니라 높은 지하수위와 불량한 투수성 등 토양물리화학적 측면에서 토양의 제염이 어려운 실정이다 (Jung and Yoo, 2007). 국내에서는 간척지 토양의 개선을 위하여 적정량의 시비, 유기물 투입, 토양개량제 사용 등 물리화학적 측면에서 노력이 추진되었으나 친환경적인 토양관리를 위한 축분퇴비 등 다양한 유기물이 사용되면서 토양에 중금속 집적을 초래하는 부작용이 나타나고 있다 (NIAST, 2012). 최근에는 간척지를 수도작 위주에서 밭작물, 사료작물, 원예작물 등 종합적인 작물재배 기반으로 조성하기 위한 다양한 연구도 진행되고 있다 (Lee et al., 2007).

간척지토양을 지속가능한 일반 토양으로 변화시키기 위하여 토양 구조 및 화학성, 비옥도, 미생물 분포, 표토 관리 및 물질순환 등에 집중할 필요성이 있다. 특히 간척사업에 따른 토양의 숙전화는 매우 복잡한 과정이기 때문에 토양물리화학적 뿐만 아니라 작물재배와 연관된 식물상과 토양의 생물학적 환경을 활성화하는 방안을 함께 고려하여야 한다 (Flip, 2002). 한편 토양의 물리적, 화학적, 생물성을 고려한 3차원적 시스템이 제안되기도 하였으며 (Bentham et al., 1992), 토양의 건전성과 활용에 있어서 우선적으로 토양물리화학을 고려하지만 자연생태계의 물질순환에 관여하는 미생물 생태에 대하여도 비중을 두어야 할 것이다 (Suh and Shin, 1997).

일반적으로 토양에 유기물이 투입되면 토양미생물체량과 다양한 효소활성이 증가하게 되어 토양미생물에 의한 물질순환이 이루어진다 (Crecchio et al., 2004). 이러한 관점에서 미생물에 의해 영향을 받는 토양의 건전성은 미생물상, 미생물체량, 군집구조, 효소활성 등이 함께 고려되어야 한다고 알려져 왔다 (Shu, 1998; Bossio and Scow, 1998; Hu and Cao, 2007). 토양미생물체량은 토양 pH와 상관관계가 높고 (Kemmitt et al., 2006), 화학비료나 유기물 사용은 토양화학적 미생물활성에 영향을 주는데 (Clegg, 2006; Deenik, 2006), 유기물이 분해되는 과정에서 수소이온이 분리되면서 탈수소효소활성이 증가되기 때문에 대표적인 생물학적 인자로 활용되고 있다 (Dinesh et al., 1998). 또한 유기물공급, 단일작물 연작, 시비방법, 경운작업과 횡수 등은 미생물활성에 영향을 주고 있으며 (Sardans et al., 2008; Timothy and Dick, 2004) 이에 따른 미생물의 다양성에 대한 연구도

진행되고 있다 (Kirk et al., 2004).

그러나 지금까지 간척지 토양에 대한 연구는 대부분 토양물리화학과 내염성 작물 위주로 이루어져 왔고 특히 내염·호염성 미생물을 포함한 미생물에 대한 연구결과는 매우 미흡한 것이 현실이다. 토양미생물 생태계는 토양의 유기물 함량과 염류농도에 민감하게 반응하며, 토양의 염류집적은 간척지 토양뿐만 아니라 시설재배 및 건조한 환경에서 중요한 관리인자로 인식되고 있다. 우리나라의 4계절 변화에 따라 표층 토양은 반복되는 건조와 습윤, 동결과 건조, 그리고 지하수위 등 환경적인 요인에 따라 토양미생물의 구성이 많은 영향을 받고 있다. 특히 토양미생물은 물질순환 및 다른 생물에 의한 영향을 많이 받기 때문에 농업환경의 미생물학적 특성을 평가하고 기후 변화와 더불어 지속적으로 조사해야 할 대상이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 남포, 이원, 석문, 시화간척지 토양을 대상으로 간척지구별 토양의 화학적 특성과 내염·호염성 세균을 포함한 미생물의 다양성을 조사함으로써 간척지 토양의 숙전화에 따른 미생물 활성을 분석하였다.

Materials and Methods

조사지점 및 시료채취 국가관리 간척지구인 서해안 간척지 토양의 이화학적 특성과 미생물 분포를 조사하기 위하여 남포지구에서 5개 지점, 이원지구에서 7개 지점, 석문지구에서 6개 지점, 시화지구에서 7개 지점, 총 25개 지점에서 2013년 3~4월에 표토토양을 대상으로 시료를 채취하였다. 간척지구별 간척시기와 면적, 그리고 조사지점에 대한 정보는 Table 1에 정리하였다.

토양 시료조제 및 화학성 분석 토양의 화학적 특성 분석은 농업과학기술원 토양 및 식물체분석법에 준하여 실시하였다 (NIAST, 2000). 표토토양 (0~15 cm)을 채취하여 음건 한 이후 2 mm 체를 통과시킨 세토를 분석시료로 사용하였다. pH 및 EC (Electrical conductivity)는 토양과 증류수

Table 1. Information of reclaimed tidal lands at western coastal area.

Site	Reclamation Period	Area (ha)	Sample
Nampo	1985~2007	1,467	5 Samples from paddy soil
Ewon	1990~2009	777	5 Samples form paddy soil and 2 samples from unused land
Sukmoon	1987~2005	2,831	4 Samples from paddy soil and 2 samples from upland soil
Shihwa	1998~2012	3,636	2 Samples form paddy soil, 2 samples from upland soil and 3 samples from unused land

를 1:5(w/v) 비율로 한 초자전극법, 토양 유기물은 Tyurin 법, 치환성 양이온은 1N-NH₄OAc (pH 7.0)으로 추출하여 유도결합플라즈마 발광광도계 (ICP, Varian)로 분석하였다. 토양의 수분함량은 수분측정기 (ML-50, AND)로 측정하였다.

토양 시료제조 및 토양미생물 분석 토양미생물 분석을 위하여 채취한 토양시료는 4°C 냉장고에서 45일 이내로 보관하였으며, 토양시료는 2 mm 체를 통과시킨 후 미생물 생균수를 생리식염수를 이용한 희석평판법을 이용하여 측정하였다. 토양 중 호기성 세균은 Yeast Glucose (YG) 한천배지 (James, 1958)를 이용하여 28°C와 55°C에서 7일간 배양한 결과를 바탕으로 중온성 (MB; Mesophilic bacteria) 및 고온성 (TB; Thermophilic bacteria) 세균에 대한 조사를 수행하였다. 곰팡이 (F; Fungi)는 Streptomycin이 첨가된 Rose-bengal (RB) 한천배지 (Martin, 1950)를 이용하였고, 방선균 (A; Actinomycetes)은 Starch Casein Agar (SCA) (Wellington and Cross, 1983) 배지를 이용하여 30°C에서 7일간 배양한 결과를 분석하였다. 내염성 (HTB; Halotolerant bacteria) 및 호염성 (HB; Halophilic bacteria) 세균은 Tryptic Soy Agar (TSA) 배지 (Brisou et al., 1974)에 각각 5% 및 10% NaCl을 첨가하여 28°C에서 7일간 배양한 결과를 분석하였다. 미생물의 분포는 수분함량을 적용하여 산출한 건조토양 (g) 당 CFU (colony forming unit)로 환산하였다.

토양의 탈수소효소활성 분석 토양 내 생존 미생물의 탈수소효소활성 (Dehydrogenase activity)을 측정하기 위하여 토양미생물 분석용 토양 시료 2 g에 0.1 M Tris 완충용액 (pH 7.6)으로 제조한 2% 2,3,5-Triphenyltetrazolium (TTC) 용액 0.5 mL, 2% (w/v) 포도당 용액 1 mL, 그리고 토양 시

료의 pH에 따른 0.1 M Tris 완충용액 1.5 mL을 첨가하여 잘 혼합한 이후 암상태의 25°C에서 72시간 반응시켰다 (Klein et al., 1971; ICI). 반응 후 생성된 Triphenylfromazan (TPF)를 10 mL 메탄올을 이용하여 추출하여 여과한 뒤 485 nm에서 흡광광도계 (POP, Optigen)를 이용하여 흡광도를 측정하였다. 탈수소효소활성은 수분함량을 적용하여 $\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{soil hr}^{-1}$ 로 환산하였다.

Results and Discussion

간척지구별 토양의 화학적 특성 서해안에 위치한 4개 국가관리 간척지구별 표토토양의 화학적 특성은 간척지 토양이 일반토양으로 숙전화 과정에서 중요한 인자로 인식되는 pH, EC, 유기물 함량, 그리고 치환성 양이온에 대하여 조사하였으며 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 최근에 간척사업이 완료된 시화지구를 제외한 나머지 남포, 이원, 석문지구의 간척지는 대부분 논으로 사용되고 있다. 이원지구와 석문지구의 경우에는 일부 밭작물 재배 및 유희지 (비경작지)로 사용되고 있었으며, 시화지구는 농업용지로의 활용은 미흡하여 일부 벼와 밭작물 재배에만 활용하고 있으며 아직 미개발지가 많은 실정이다 (Table 1). 또한 논으로 활용되고 있는 간척지구별 토양은 재염화 방지와 유기물 함량 증대를 위하여 객토, 벅짚회원, 축분퇴비 시비 등의 다양한 작업이 추진되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

남포지구의 경우, 논으로 사용되고 있는 토양의 pH와 치환성 양이온 (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)은 일반적인 벼 재배에 적합한 수준을 나타내는 반면 유기물 함량은 낮은 수준으로 확인되었다 (NIAST, 2006). 또한 유기물 함량, EC 및 치환성 Na⁺은 각각 9.6 g kg⁻¹, 1.02 dS m⁻¹, 0.76 cmol_c kg⁻¹으로 다른

Table 2. Chemical properties of reclaimed lands at western coastal area.

Site	pH	EC	OM	Exchangeable cation				Sample	
				K	Ca	Mg	Na		
		1:5	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹				
Nampo	Mean	5.70	1.02	9.56	0.27	1.94	1.52	0.76	5
	Min.	5.23	0.39	6.51	0.24	1.47	1.29	0.29	
	Max.	6.35	1.31	11.1	0.39	2.52	2.58	1.44	
Ewon	Mean	7.80	6.23	3.98	1.06	3.24	5.66	6.29	7
	Min.	5.92	0.89	2.73	0.36	1.39	1.02	0.80	
	Max.	8.29	42.5	6.46	3.10	6.96	21.2	20.6	
Sukmoon	Mean	6.99	3.15	8.85	0.68	4.43	3.56	3.28	6
	Min.	6.04	0.25	5.76	0.23	2.39	1.35	0.23	
	Max.	7.97	4.53	10.1	0.93	4.78	6.00	4.44	
Shihwa	Mean	7.18	8.03	4.91	1.57	3.97	5.13	8.70	7
	Min.	6.31	0.97	3.78	0.51	1.42	3.13	2.34	
	Max.	9.16	32.9	8.81	2.68	11.0	17.2	29.1	

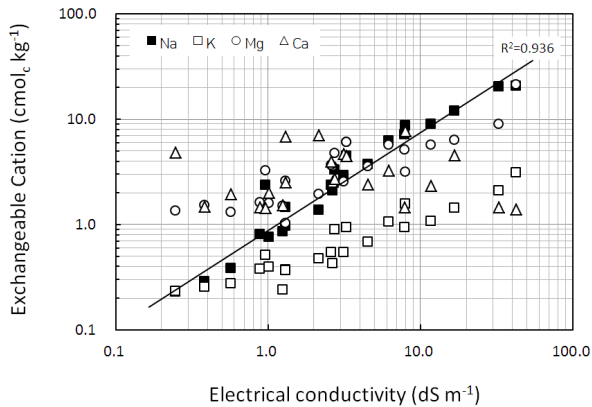


Fig. 1. Relation between electrical conductivity and exchangeable cation of reclaimed lands at western coastal area. Na, exchangeable Na^+ ($R^2=0.936$); K, exchangeable K^+ ($R^2=0.880$); Mg, exchangeable Mg^{2+} ($R^2=0.752$); Ca, exchangeable Ca^{2+} .

3개 간척지구 토양에 비하여 일반토양에 근접한 것으로 나타났다. 이원지구에서 논으로 사용되는 토양의 pH는 7.80 (5.92~8.29)으로 건조기 재염화 현상으로 비 재배에 적합한 수준보다 높게 나타났으며 최소값과 최대값의 차이도 크게 발생하는 것으로 나타났다. 특히 논토양의 EC는 2.17 dS m^{-1} , 치환성 Na^+ 역시 $1.36 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 약한 염류성으로 확인되었다. 유기물 함량 역시 4.0 g kg^{-1} 으로 남포지구의 40% 수준에 불과하였다. 이원지구 중 유희지 토양의 pH는 7.8~8.0, EC는 16.8~42.5, 치환성 Na^+ 은 $12\sim 21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 전형적인 염류토양의 특성을 보이고 있다. 석문지구에서 논으로 사용되는 토양의 pH는 6.99 (6.63~7.97)로 이원지구와 동일하게 재염화로 인해 비 재배에 적합한 수준보다 높게 유지되고 있으며, EC는 3.31 dS m^{-1} , 치환성 Na^+ 은 $3.71 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 이원지구보다는 강한 염류토양의 성질을 나타내고

있었다. 반면 유기물 함량은 7.21 g kg^{-1} 으로 이원지구의 2배 수준으로 높게 나타났다. 석문지구 중 발작물 재배에 활용된 토양의 pH는 6.0~7.0, EC는 0.25~2.74, 치환성 Na^+ 은 $0.23\sim 3.28 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 논토양에 비하여 염류집적도가 낮다는 사실을 확인하였다. 시화지구에서 논토양으로 사용되는 토양의 pH와 유기물 함량은 각각 6.65~7.10과 $3.8\sim 8.8 \text{ g kg}^{-1}$ 인 반면 EC는 $2.62\sim 11.8 \text{ dS m}^{-1}$, 치환성 Na^+ 은 $2.34\sim 8.98 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 전형적인 염류토양으로 확인되었다. 시화지구 중 발작물 재배에 활용된 토양의 pH는 6.3~8.0, EC는 0.97~32.9, 치환성 Na^+ 은 $2.37\sim 20.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 논토양에 비하여 염류에 의한 영향이 매우 높은 현상을 확인하였다. 시화지구 중 유희지 토양의 pH는 7.2~9.2, 유기물 함량은 $3.2\sim 7.8 \text{ g kg}^{-1}$, EC는 $7.92\sim 8.03 \text{ dS m}^{-1}$, 치환성 Na^+ 은 $7.11\sim 29.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 매우 강한 염류토양의 성질을 지니고 있는 점이 확인되었다.

토양의 pH에 대한 간척지구별 평균값은 남포 < 석문 < 시화 < 이원지구 순으로 증가하는 경향을 보이는 반면 토양의 염류집적도를 나타내는 EC에 대한 간척지구별 평균값은 남포 < 석문 < 이원 < 시화지구 순으로 증가하는 것으로 조사되었다. 실제 간척지구별 토양의 EC와 치환성 양이온 간의 상관관계에서 다른 양이온에 비하여 나트륨이 가장 높은 정의 상관관계 ($R^2=0.936$)를 갖고 있다는 사실을 확인할 수 있었다 (Fig. 1). 그러나 본 연구에서 채취한 토양의 용도에 따라 객토, 벧짚환원, 축분퇴비 시비 등으로 인한 간섭효과를 완전하게 제거할 수 없다는 문제점도 발견되었다.

간척지구별 토양미생물 분포 국가관리 간척지구 토양의 미생물 다양성을 분석한 결과는 Table 3에 정리하였

Table 3. Microbial population (CFU g^{-1}) and dehydrogenase activities of reclaimed lands at western coastal area.

Site		DHA	HTB	HB	MB	TB	A	F
		$\mu\text{g TFP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^5$	$\times 10^2$	$\times 10^2$	$\times 10^2$
Nampo	Mean	44.6	4.16	0.32	17.4	ND	2.18	3.06
	Min.	42.7	0.64	0.10	2.07	ND	0.71	2.31
	Max.	50.0	14.7	5.03	45.7	ND	4.46	67.5
Ewon	Mean	44.7	47.6	2.71	1.05	ND	1.18	2.20
	Min.	34.2	1.21	0.19	0.02	ND	0.27	0.80
	Max.	53.5	162	11.3	10.9	ND	23.3	32.0
Sukmoon	Mean	48.2	32.1	3.69	13.6	1.67	1.45	5.31
	Min.	43.9	4.49	1.22	5.44	ND	0.15	0.29
	Max.	53.2	789	237	376	11.0	35.7	69.7
Shihwa	Mean	41.8	2.18	4.08	1.52	5.07	1.92	2.02
	Min.	37.3	6.05	0.36	0.06	ND	0.62	1.48
	Max.	60.5	455	66.5	20.3	1.82	6.88	8.34

DHA, Dehydrogenase activity; HTB, Halotolerant bacteria; HB, Halophilic bacteria; MB, Mesophilic bacteria; TB, Thermophilic bacteria; A, Actinomyces; F, Fungi; ND, Not detected

다. 간척지구 토양 특성을 감안하여 내염성 (Halo-tolerant) 및 호염성 (Halophilic) 세균의 분포를 조사하였다. 내염성 세균의 간척지구별 평균값은 남포 < 시화 < 석문 < 이원지구의 순으로 증가하고 있으나 호염성 세균의 분포는 남포 < 이원 < 석문 < 시화지구의 순으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 중온성 세균의 간척지구별 평균값은 이원 < 시화 < 석문 < 남포지구의 순으로 증가하고 있으나 중온성 세균 중 일부가 내염성 세균으로 검출될 가능성을 유의하여야 한다. 간척지구별 토양 중에서 벼 재배에 가장 적합한 남포지구의 경우 내염성 세균이 4.16×10^4 CFU g^{-1} , 호염성 세균이 0.32×10^4 CFU g^{-1} , 중온성 세균이 17.4×10^5 CFU g^{-1} , 방선균이 2.18×10^2 CFU g^{-1} , 곰팡이가 3.06×10^2 CFU g^{-1} , 그리고 탈수소효소 활성은 $44.6 \mu g$ TFP $g^{-1} h^{-1}$ 이었다. 일반적인 농경용지의 세균분포는 중온성 세균은 10^6 CFU g^{-1} , 방선균은 10^4 CFU g^{-1} , 곰팡이는 10^3 CFU g^{-1} 이상이 존재하는 것으로 보고되었고 (Suh and Shin, 1997; Hong et al., 2010) 우리나라 농경지를 대상으로 2004년부터 2007년간에 조사된 미생물 분포에서 세균은 6개 구간으로 곰팡이균은 5개 구간으로 구분하였으며 세균과 곰팡이균의 최저 구간은 각각 $\sim 5 \times 10^6$ CFU g^{-1} 과 5×10^4 CFU g^{-1} 을 적용하였다 (Suh et al., 2010). 서해안 4개 간척지구 중 가장 일반토양에 근접한 남포지구 토양 내에 존재하는 미생물 분포는 중온성 세균만이 우리나라 토양의 최저 수준에 근접하고 나머지 방선균이나 곰팡이는 현저하게 낮은 수준으로 확인되었다. 남포지구 토양 내에 존재하는 전체 미생물 중에서 내염 및 호염성 세균의 비중은 2.6%, 호염성 세균의 비중은 0.2% 수준으로 다른 지구에 비하여 매우 낮은 실정이다. 일반적으로 유기물 분해에 중요한 역할을 하는 미생물은 초기에는 세균이 중반 이후에는 곰팡이가 수행하기 때문에 남포지구의 경우 시간의 경과에 따라 점진적으로 곰팡이와 방선균의 수가 증가할 것으로 예상된다. 전반적으로 중온성 세균과 방선균, 곰팡이의 개체 수가 낮은 이유는 토양 내 유기물 함량이 일반적인 논토양에 비하여 50% 미만이기 때문인 것으로 판단된다. 중온성 세균은 이원과 시화지구에서 남포 또는 석문지구에 비하여 10% 미만의 수준으로 존재하고 있으며 이는 토양 내에 존재하는 높은 염류에 의한 영향이라고 판단된다. 이는 토양미생물 중 곰팡이는 세균에 비하여 염류에 의한 삼투압에 민감한 것으로 알려져 있으며 (Pankhurst et al., 2001), NaCl에 의한 염류토양에서 곰팡이의 생균수가 급격하게 감소하는 사실과도 일치한다. 또한 토양의 염류도가 5% 이상인 경우 세균과 사상균의 개체수 역시 급격하게 감소하였으며 (Omar et al., 1994), 다른 한편으로는 삼투압에 의한 스트레스를 극복하는 과정에서 생리적 특성이 변화하거나 생존하기 위하여 많은 에너지를 사용하기 때문에 생육이 저해된다고 알려진 사실과도 일치하는 결과이다 (Oren, 1999). 그러나 남포지구를 제외한 나머지 간척지구별 미생물 분포는 최소값

과 최대값의 차이가 남포지구에 비하여 5~20배 정도로 심하게 발생하여 토양의 화학적 특성이 미생물 군락에 미치는 영향이 다양한 것으로 판단된다.

간척지구별 토양화학성과 미생물 분포 간의 상관관계

간척지구별로 채취한 25개 지점 토양의 화학성 특성 중 염류도 기준에 활용되는 EC와 미생물의 분포 간의 상관관계를 조사하였다. 토양의 염류화 정도를 의미하는 EC와 중온성 세균의 분포 간에 부의 상관관계 ($R^2=0.524$)를 확인하였다 (Fig. 2). 토양의 EC가 증가함에 따라 중온성 미생물의 생균수는 감소하며, EC값이 $5 dS m^{-1}$ 이상에서 중온성 세균 생균수는 급격하게 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 토양 미생물이 염류에 의한 삼투압에 민감하여 세균 및 곰팡이의 생균수가 염류도 증가에 따라 감소한다는 사실과도 일치한다 (Pankhurst et al., 2001; Omar et al., 1994), 그러나 내염·호염성 세균은 토양의 EC 증가에 따라 증가하는 정의 상관관계 ($R^2=0.301$)가 확인되었는데 이는 간척지구별 토양화학성 특성 중에서 EC와 치환성 나트륨 간에도 정의 상관관계 (Fig. 1)가 존재하기 때문에 토양 내에 존재하는 미생물의 분포와 EC 또는 치환성 Na^+ 간의 상관관계가 성립하는 것이다. 따라서 내염·호염성 세균의 경우 생리적 특성에 따라 일정 수준 이상의 염류도가 있어야 생존이 가능하다는 사실과도 일치하는 결과이다. 토양의 염류화 정도를 판정하는 기준으로 pH와 EC를 일반적으로 사용하지만 실제 토양 내의 자연생태계와 물질순환 등을 반영할 수 있는 미생물 분포를 확인하고자 토양미생물 중 내염·호염성 세균의 비중을 분석하였다. 실제 토양 EC에 따른 내염·호염성 세균 (HTB+HB) 이 미생물 군집에서 차지하는 비중을 확인한 결과, 내염·호염성 세균 (HTB+HB)이 전체 미생물 (HTB+HB+MB+TM+A+F) 중 차지하는 비중이 20% 이상이거나 중온성 세균 (MB) 대비 내염·호염성 세균 (HTB+HB)의 비율이 20% 이상인 경우는 대부분 토양 EC 값이 $2 dS m^{-1}$ 이상으로 확인되었다

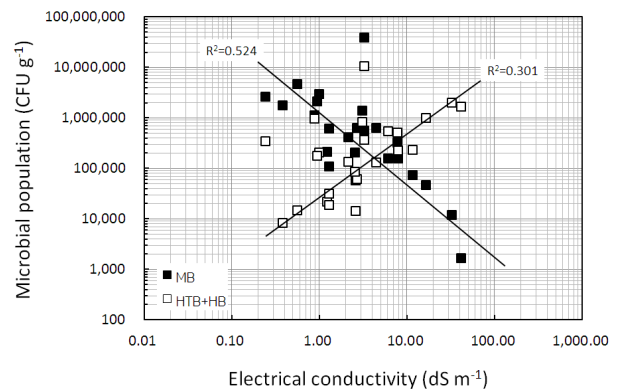


Fig. 2. Relation between electrical conductivity and microbial population of reclaimed lands at western coastal area. MB, mesophilic bacteria; HTB+HB, halotolerant and halophilic bacteria.

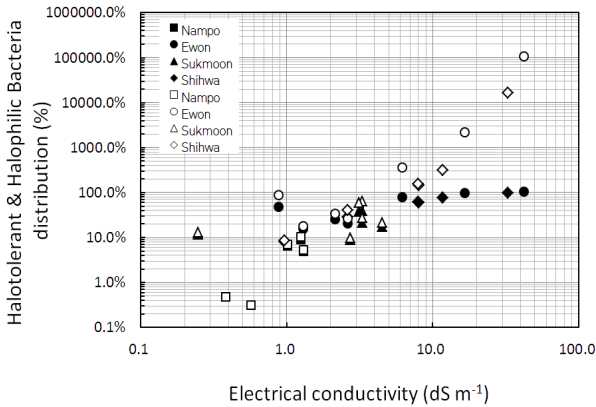


Fig. 3. Relation between electrical conductivity and content of halotolerant and halophilic bacteria in microbial population from reclaimed lands at western coastal area. Open symbol, (HTB+HB) MB⁻¹ (%), closed symbol, (HTB+HB) (HTB+HB+MB+TB+A+F)⁻¹ (%).

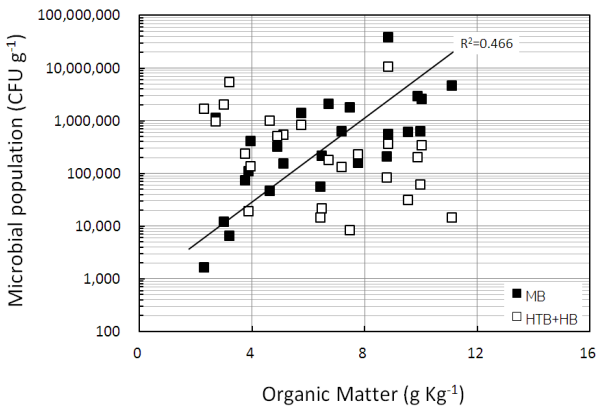


Fig. 4. Relation between organic matter and microbial population of reclaimed lands at western coastal area. MB, mesophilic bacteria; HTB+HB, halotolerant and halophilic bacteria.

(Fig. 3). 따라서 분석 가능한 미생물 군락 중에 내염·호염성 세균의 비중이 20% 이하인 경우에 일반 토양과 유사한 염류도를 가진 토양으로 분류할 수 있다는 점이다. 이와 같은 결과는 간척지 염해담토양의 제염정도를 분류하는 기준으로 EC가 2 dS m⁻¹ 이하인 경우에 non-saline으로 판단할 수 있다는 연구결과와 동일한 경향을 보였다 (Sonn et al., 2006). 일반적으로 토양 내 유기물 함량, 미생물체량, 탈수소효소활성, 토양 pH, 유기탄소함량들 간에 상관관계가 있다고 알려져 있으나 (Joa et al., 2013; Kemmitt et al., 2006; Yao et al., 2000), 토지이용과 경작방법, pH, 토양관리방법, 수분 및 온도 등의 환경요인 등에 따라 상관관계의 유의성은 일정하지 않다 (Aciego and Brookes, 2009; Rahman et al., 2008; Ahn et al., 2011; Lee and Ha, 2011). 간척지구별 토양의 유기물 함량과 중온성 세균의 분포 간에는 정의 상관관계 (R²=0.466)가 존재하였다 (Fig. 4). 이러한 사실로부터 토양 내 유기물 함량의 조절에 중온성 세균이 중요한 역할

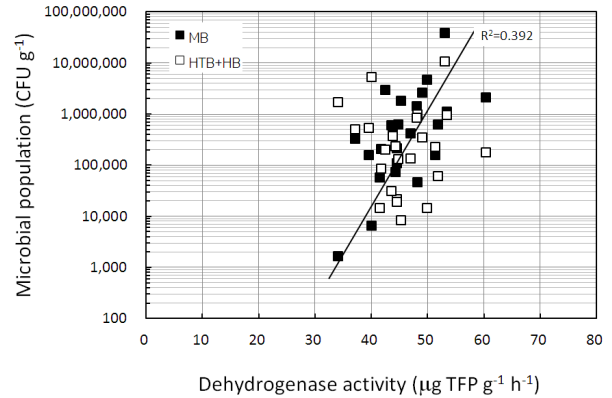


Fig. 5. Relation between dehydrogenase activity and microbial population of reclaimed lands at western coastal area. MB, mesophilic bacteria; HTB+HB, halotolerant and halophilic bacteria.

을 수행하고 있으나 내염·호염성 세균과는 무관하다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 토양 내에 존재하는 전체 미생물 중에서 내염·호염성 세균이 차지하는 비중을 토양의 염류도를 관리하는 생물학적 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

간척지구별 토양화학성과 탈수소효소활성 간의 상관관계 탈수소효소활성은 토양의 생물학적 특성을 대표하는 인자이지만 토양의 수분함량, 산소이용도, 산화환원전위, pH, 유기물 함량, 온도 등 토양의 환경적인 인자에 의하여 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Quilchano and Maranon, 2002). 특히 대부분의 탈수소효소는 혐기성 미생물에 의하여 생성되지만 일반적으로 토양미생물체량과 탈수소효소활성 간에 비례관계가 성립한다. 높은 유기물 함량은 미생물 생육에 필요한 영양분을 공급하여 위하여 유기물 분해에 필요한 효소생성으로 효소활성이 증가하게 된다. 따라서 토양의 유기물 함량과 탈수소효소활성 간에 정비례하는 관계가 성립하게 되는 것이다. 대부분 토양의 탈수소효소활성은 표준방법 (Casida et al., 1964)을 사용하지만 본 연구에서는 너무 낮은 탈수소효소활성으로 인하여 유기탄소원인 포도당을 첨가하는 방법 (Klein et al., 1971)을 적용하여 탈수소효소활성을 조사하였다. 간척지구별 토양의 탈수소효소활성은 중온성 세균 간에 유의적인 정의 상관관계 (R²=0.392)가 존재하였으나 내염·호염성 세균 간에는 상관관계가 없었다 (Fig. 5). 또한 간척지구별 토양의 탈수소효소활성과 토양의 pH, EC, 유기물 함량 간의 유의적인 상관관계가 없는 것으로 확인되었다. 실제 토양화학성과 탈수소효소활성 간의 상관관계는 시설재배지와 과수원 토양의 유기물 함량 (Joa et al., 2013; Ahn et al., 2011)과 pH (Kim et al., 2011)에서 보고되었으나 탈수소효소활성이 토양온도, 유기물공급, 연작, 시비, 제초, 경운, 표토관리 등 다양한 요인에 영향을 받기 때문에 상관관계를 확정하기는 어렵다 (Kang et al.,

2009; Nosalewicz and Nosalewicz, 2011; Sardans et al., 2008; Sebiomo et al., 2011; Timothy and Dick, 2004). 또한 탈수소효소활성이 토양의 염류에 의하여 감소하는 경향이 보고되었으나 (Frankenberger and Bingham, 1982) 본 연구에서는 별다른 상관관계를 찾을 수 없었다.

Conclusions

본 연구는 간척사업에 따라 조성된 간척지 토양의 숙전화 과정에서 일어나는 토양화학성과 미생물활성 간의 상관관계를 조사하기 위하여 서해안에 위치한 4개 (남포, 이원, 석문, 시화) 국가관리 간척지구별 25개 지점 토양에 대하여 염류도와 관련된 토양화학성 (pH, EC, 치환성 양이온, 유기물 함량)과 미생물활성 (내염·호염성 세균, 중온·고온성 세균, 방선균 및 곰팡이, 탈수소효소활성)을 조사하였다. 남포지구 토양은 pH가 5.7, EC가 1.02로서 가장 일반토양 (논)과 유사한 특성을 보이고 있지만 유기물 함량은 아직 50% 미만에 불과하다. 남포지구를 제외한 나머지 간척지구의 토양화학성은 대부분 염류토양의 특성을 갖고 있다. 간척지 토양의 EC와 치환성 양이온 간에 상관관계로부터 간척지 토양의 염류집적에 중요한 영향을 미치는 인자가 NaCl ($R^2=0.936$)임을 확인할 수 있었다. 간척지 토양의 미생물 분포는 중온성 세균에 한하여 높은 수준이고 방선균이나 곰팡이는 매우 낮은 수준인 반면 내염·호염성 세균의 분포는 염류도 증가에 따라 증가하였다. 토양미생물 분포는 토양의 EC와 중온성 세균 간에 부의 상관관계 ($R^2=0.524$)를 보였다. 또한 토양 EC와 미생물 중 내염·호염세균의 비중 간의 상관관계로부터 EC 값이 2 dS m^{-1} 이상인 경우에 내염·호염성 세균의 비중이 20% 이상으로 급격히 증가하였다. 중온성 세균의 분포는 유기물 함량과 탈수소효소활성 간에 정의 상관관계를 나타내었다. 간척지 토양의 화학성과 미생물 활성 간의 상관관계로부터 간척지 토양의 숙전화에 토양화학적 인자로서 토양의 EC와 유기물 함량, 그리고 생물학적 인자로서 전체 미생물 중 내염·호염성 세균의 비중이 중요한 관리인자임을 확인하였다.

References

Aciego, P.J.C. and P.C. Brookes. 2009. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Biol. Biochem.* 41:1396-1405.

Ahn, B.K., H.J. Kim, S.S. Han, Y.H. Lee and J.H. Lee. 2011. Response of microbial distribution to soil properties of orchard fields in Jeonbuk area. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:696-701.

Bentham, H., J.A. Harris, P. Birch and K.C. Short. 1992. Habitat classification and soil restoration assessment using analysis of soil microbiological and physico-chemical characteristics. *J.*

Appl. Ecol. 29:711-718.

Bossio, D.A. and K.M. Scow. 1998. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. *Micro. Ecol.* 35:265-278.

Brisou, J., D. Courtois and F. Denis. 1974. Microbiological study of a hypersaline lake in French Somaliland. *Appl. Microbiol.* 27:819-822.

Casida, L.E., D. Klein and T. Santoro. 1964. Soil dehydrogenase activity. *Soil Sci.* 98:371-376.

Clegg, C.D. 2006. Impact of cattle grazing and inorganic fertiliser additions to managed grasslands on the microbial community composition of soils. *Appl. Soil Ecol.* 31:73-82.

Crecchio, C., M. Curici, M.D.R. Pizzigallo, P. Ricciuti and P. Ruggiero. 2004. Effects of municipal solid waste compost amendments on soil enzyme activities and bacterial genetic diversity. *Soil Biol. Biochem.* 36:1595-1605.

Deenik, J. 2006. Nitrogen mineralization potential in important agricultural soils of Hawaii. *Soil Crop Manage.* 15:1-5.

Dinesh, R., R.P. Dubey and G.S. Prasad. 1998. Soil microbial biomass and enzyme activities as influenced by organic manure incorporation into soils of a rice-rice system. *J. Agron. Crop Sci.* 181:173-178.

Filip, Z. 2002. International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88:169-174.

Frankenberger W.T. and F.T. Bingham. 1982. Influence of salinity on soil enzyme activities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1173-1177.

Hu, C. and Z. Cao. 2007. Size and activity of the soil microbial biomass and soil enzyme activity in long-term field experiments. *World J. Agri. Sci.* 3:63-70.

ICI Prague. Determination of soil dehydrogenase activity (DHA). Laboratory of Ecotoxicology and LCA. Department of Environmental Chemistry. <http://www.geosis-naip-nbsslup.org/pdf/biological/Determination%20of%20soil%20dehydrogenase.pdf>

James, N. 1958. Soil extract in soil microbiology. *Can. J. Microbiol.* 4:363-370.

Joa, J.H., K.H. Moon, K.S. Choi, S.C. Kim and S.W. Koh. 2013. Soil dehydrogenase activity and microbial biomass C in croplands of Jeju province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46:122-128.

Jung, Y.S. and C.H. Yoo. 2007. Soil problems and agricultural water management of the reclaimed land in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:330-348.

Kang, H.J., S.K. Kang and D.W. Lee. 2009. Variations of soil enzyme activities in a temperate forest soil. *Ecol. Res.* 24:1137-1143.

Kemmitt, S.J., D. Wright, K.W.T. Goulding and D.L. Jones. 2006. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 38:898-911.

- Kim, B.Y., H.Y. Weon, I.C. Park, S.Y. Lee, W.G. Kim and J.K. Song. 2011. Microbial diversity and community analysis in lettuce or cucumber cultivated greenhouse soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:1169-1175.
- Kirk, J.L., L.A. Beaudette, M. Hart, P. Moutoglis, J.N. Klironomos, H. Lee and J.T. Trevors. 2004. Methods of studying soil microbial diversity. *J. Microbiol. Meth.* 58:169-188.
- Klein, D.A., T.C. Loh and R.L. Goulding. 1971. Short communication: A rapid procedure to evaluate the dehydrogenase activity of soils low in organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 3:385-387.
- Lee, K.B., J.G. Kang, J. Li, D.B. Lee, C.W. Park and J.D. Lim. 2007. Evaluation of salt-tolerant plant for improving saline soil of reclaimed land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:173-180.
- Lee, Y.H. and S.K. Ha. 2011. Impact of chemical properties on microbial population from upland soils in Gyeongnam province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:242-247.
- Martin, J.P. 1950. Use of acid, rose bengal and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Sci.* 69:215-232.
- NIAST. 2000. Method of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suweon, Korea.
- NIAST. 2006. Fertilization standard of crop analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suweon, Korea
- NIAST. 2012. Monitoring project on agro-environmental quality. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suweon, Korea.
- Nosalewicz A. and M. Nosalewicz. 2011. Effect of soil compaction on dehydrogenase activity in bulk soil and rhizosphere. *Int. Agrophys.* 25:47-51.
- Omar, S.A., M.A. Abdel-Sater, A.M. Khallil and M.H. Abdalla. 1994. Growth and enzyme activities of fungi and bacteria in soil salinized with sodium chloride. *Folia Microbiol.* 39:23-28.
- Oren A. 1999. Bioenergetic aspects of halophilism (Microbiology and molecular biology review). *Microbiol. Mol. Biol. R.* 63:334-348.
- Pankhursy, C.E., S. Yu, B.G. Hawke and B.D. Harch, 2001. Capacity of fatty acid profiles and substrate utilization patterns to describe differences in soil microbial communities associated with increased salinity or alkalinity at three locations in South Australia. *Biol. Fertil. Soils* 33:240-217.
- Quilchano, C. and T. Maranon. 2002. Dehydrogenase activity in Mediterranean forest soils. *Biol. Fertil. Soils* 35:102-107.
- Rahman, M.H., A. Okubo, S. Sugiyama and H.F. Mayland. 2008. Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 101:10-19.
- Sardans, J., J. Penuelas and M. Estiarte. 2008. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland. *Appl. Soil Ecol.* 39:223-235.
- Sebiomo, A., V.W. Ogundero and S.A. Bankole. 2011. Effect of four herbicides on microbial population, soil organic matter and dehydrogenase activity. *Afr. J. Biotechnol.* 10:770-778.
- Sonn Y.K., G.S. Hyeon, M.C. Seo, K.H. Jung, B.K. Hyun, S.J. Jung and K.C. Song. 2006. A taxonomical consideration based on changes of salinity and profile features of the texturally different two reclaimed tidal soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39:59-64
- Suh J.S. and J.S. Shin. 1997. Soil microbial diversity of paddy fields in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30:200-207.
- Suh, J.S. 1998. Soil microbiology. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(S):76-89.
- Suh, J.S., H.J. Noh, J.S. Kwon, H.Y. Weon and S.Y. Hong. 2010. Distribution map of microbial diversity in agricultural land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:995-1001.
- Timothy, R.K. and R.P. Dick. 2004. Differentiating microbial and stabilized β -glucosidase activity relative to soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 36:2089-2096.
- Wellington, E.M.H. and T. Cross. 1983. Taxonomy of antibiotic producing actinomycetes and new approaches to their selective isolation. P. 36. In M.E. Bushell (ed.) *Progress in industrial microbiology* Elsevier, Amsterdam.
- Yao, H., Z. He, M.J. Wilson and C.D. Campbell. 2000. Microbial biomass and community structure in a sequence of soils with increasing fertility and changing land use. *Microb. Ecol.* 40:223-237.