

근권세균과 옥수수를 이용한 유류 및 중금속 복합 오염토양의 Rhizoremediation

홍선화 · 구소연 · 김성현¹ · 류희욱² · 이인숙¹ · 조경숙*
이화여자대학교 환경공학과, ¹이화여자대학교 에코과학부
²승실대학교 환경화학공학과

Rhizoremediation of Petroleum and Heavy Metal-Contaminated Soil using Rhizobacteria and *Zea mays*. Hong, Sunhwa Hong, So Yeon Koo, Sung Hyun Kim¹, Hee Wook Ryu², In Sook Lee¹, and Kyung-Suk Cho*. Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea, ¹Division of Ecoscience, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea, ²Department of Chemical and Environmental Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea – In this study, the rhizoremediation of petroleum and heavy metal-contaminated soil was characterized employing *Zea mays* and two plant-growth promoting rhizobacteria, *Gordonia* sp. S2RP-17 and *Serratia* sp. SY5 which have petroleum-degrading activity and heavy metal-resistance, respectively. After 51 days, the average dry weights of *Zea mays*' root without and with the inoculation of rhizobacteria were 1.9±0.2 and 5.6±0.7 g, respectively. Compared with initial TPH concentration in soil (21,576±3,426 mg-TPH·kg-dry soil⁻¹), the residual TPH concentrations were 220±98 mg-TPH·kg-dry soil⁻¹ in soil planted with *Zea mays*, and 20±41 mg-TPH·kg-dry soil⁻¹ in soil planted with *Zea mays* and inoculated with rhizobacteria. These results indicated that the inoculation of S2RP-17 and SY5 could promote TPH removability in soil as well as the growth of *Zea mays*' root. There was little positive effect of the rhizobacteria inoculation on the removability of heavy metal such as Cu, Cd and Pb in soil planted with *Zea mays*.

Key words: Rhizoremediation, petroleum, heavy metal, *Zea mays*, plant-growth promoting rhizobacteria

광석의 제련 및 정련 과정 등 각종 산업활동과정에서 배출된 유류와 중금속에 의한 토양오염은 주요 환경문제로 대두되고 있다[27, 38, 45]. 중금속과 유류로 오염된 토양을 정화하기 위해 미생물과 식물을 이용하는 생물정화방법은 경제적이고 환경친화적인 방법으로 최근 들어 상용화되고 있다[12, 19, 20]. 유류 오염 토양 정화를 위해 이용될 수 있는 유류 분해 미생물로 *Pseudomonas*[10, 30], *Arthrobacter*[35], *Alcaligenes*[30, 32], *Rhodococcus*[2, 22, 23, 24, 35], *Bacillus*[1, 11] 등이 있다. 또한, 유류 오염 토양 정화에 이용될 수 있는 식물로는 쥐보리[6, 18, 29], 콩과식물[18, 29], 포플러[5, 29, 43], 소나무[29], 툴 페스큐[14], 옥수수[24, 28, 39, 44] 등이 보고 되고 있다.

일반적으로 중금속은 식물에 의해 분해되는 것이 아니라, 토양으로부터 식물체내로 축적되어 제거되기 때문에, 식물 근권의 발달은 중금속 제거에 매우 중요하다[20]. 중금속과 축적 식물과 식물이 중금속을 잘 축적할 수 있게 돕는 미생물에 관한 연구가 많이 진행되고 있다[16, 36, 46, 47]. 지금까지 연구된 중금속과 축적식물(Metal-hyperaccumulator)은

국화과(*Asteraceae*), 십자화과(*Brassicaceae*), 석죽과(*Caryophyllaceae*), 사초과(*Cyperaceae*), 콩과(*Fabaceae*), 이나뎀과(*Iacourtiaceae*), 꿀풀과(*Lamiaceae*), 벼과(*Poaceae*), 그리고 제비꽃과(*Violaceae*) 등이 있고[20, 34], 중금속에 내성이 강한 미생물로는 *Bacillus* sp., *Pityrogramma calomelanos*, 그리고 *Serratia* sp. 등이 알려져 있다[16, 21, 36, 47].

지금까지 진행된 대부분의 연구는 유류 혹은 중금속을 미생물이나 식물을 이용하여 제거하는 것에 초점이 맞추어져 있다. 유류와 중금속으로 복합 오염된 토양은 한 종류의 오염물질로 오염된 토양보다 오염물질을 제거하는 것이 훨씬 어려워지는 경우가 많다[7, 38, 42, 48]. 따라서, 2종 이상의 오염물질로 오염된 토양정화에 대한 연구를 통해 관련 정보를 구축하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 미생물과 식물을 동시에 이용한 mesocosm 실험을 통해 복합오염 토양의 정화 특성을 조사하였다. 즉, 유류 분해능이 있고 식물 성장 촉진능력을 가진 *Gordonia* sp. S2RP-17[13], 중금속에 내성을 가지며 식물성장촉진 능력이 있는 *Serratia* sp. SY5[21] 및 옥수수를 이용하여 유류 및 중금속 오염 토양의 정화 특성을 조사하였다.

토양 시료 준비 및 미생물 배양은 다음과 같이 하였다. 이화여자대학교에서 채취한 토양을 2 mm 체로 친 후, 마사와 2 : 1(w/w) 비율로 섞었다. 이 혼합토양에 비료를 50 : 3(w/

*Corresponding author

Tel: 82-2-3277-2393, Fax: 82-2-3277-3275

E-mail: kscho@ewha.ac.kr

w) 비율로 섞었는데, 비료는 돈분 25%, 계분 35%, 우분 5%, 톱밥 25%로 섞어 C/N비가 50 이하가 되도록 숙성시킨 것이다. 이렇게 준비한 토양시료를 인위적으로 오염시키기 위해 디젤을 20,000 mg·kg-wet soil⁻¹이 되도록 첨가하였고, Pb, Cu 및 Cd는 각각 500, 50 및 30 mg·kg-wet soil⁻¹이 되도록 첨가한 후 잘 혼합하였다. 중금속은 CuCl₂·2H₂O (Duksan pure chemical Co., LTD, Korea, 97%), Pb(NO₃)₂ (Duksan pure chemical Co., LTD, Korea, 99%), 그리고 CdCl₂(Farco chemical Co., LTD, China, 99%) 시약으로 stock 용액을 만들어서 토양에 첨가하였다. 중금속 첨가량 (30-500 mg·kg-wet soil⁻¹)이 미량이므로, 중금속 용액에 함유된 염소와 질산염은 토양미생물과 식물에 영향을 미치지 않는다. 오염시킨 토양을 4일간 서늘한 곳에 두고, 하루에 한번씩 토양을 완전히 섞어 주었다. 이렇게 준비한 오염토양 시료의 pH, 수분함량, 유기물함량 및 탈수소효소 활성은 각각 5.7±0.01, 8.2±0.6%, 3.5±0.02% 및 124±21 µg-TPF·g-dry soil⁻¹·d⁻¹이었다.

오염 토양에 접종한 세균으로 디젤을 분해하는 동시에 식물의 성장을 촉진할 수 있는 *Gordonia* sp. S2RP-17[13]과, Pb에 강한 내성을 가지고 있으며 식물 성장 촉진능이 있는 *Serratia* sp. SY5[21]을 이용하였다. 이들 세균은 1 L의 LB 배지(Difco, USA)에서 30°C에서 3일 동안 진탕배양(180 rpm)하였다. 배양액을 10,000 rpm에서 10분 동안 원심분리하여 회수한 균체에 멸균수를 첨가하여 현탁 한 후 다시 동일 조건으로 원심분리 하였다. 이 과정을 2차례 반복하여 균체를 세정해 주었다. 세정한 균체를 멸균수 700 mL에 현탁한 후, 균주 현탁액을 디젤과 중금속으로 오염시킨 토양 5 kg에 주입한 후 충분히 혼합하였다. 최종 접종 농도는 S2RP-17균주는 2.6×10⁷ CFU·g-dry soil⁻¹, SY5 균주는 1.2×10⁸ CFU·g-dry soil⁻¹이었다.

Mesocosm은 직경 150 mm인 원통형 PVC관을 이용하여, 3개의 층(각 층의 높이 300, 250, 250 mm로, 총 800 mm)으로 만들었다(Fig. 1). 중간과 하부 두 단(총 500 mm)은 비오염토양을 10 kg 넣었고, 유류와 중금속으로 인공 오염시킨 토양 혹은 오염 토양에 근권세균을 접종한 토양 5 kg을 상부 첫째 단(300 mm)에 넣었다. 오염 토양을 넣은 첫째 단에 윗부분 가운데에 4 cm 정도의 빈 공간으로 만들어 비오염 토양을 넣은 후 옥수수 씨앗을 3알씩 심었다. 오염 토양에 식물만 식재한 조건(DHM+P) 및 오염 토양에 식물과 근권세균을 함께 접종한 조건(DHM+P+B)으로 mesocosm 실험을 4반복으로 하였다. 실험은 기온이 약 20-35°C인 온실에서 51일간 수행하였으며, 재배 초기 20일 동안은 하루에 한번씩, 그 이후에는 이틀에 한번씩 물을 주었다.

근권세균을 미접종 혹은 접종한 오염토양에서 옥수수를 51일 동안 재배한 후, 토양의 특성 변화 및 잔류 오염물질 농도를 분석하여 비교하였다. 각 mesocosm 상단층에서 옥수수의 뿌리가 손상되지 않도록 조심스럽게 옥수수를 채취

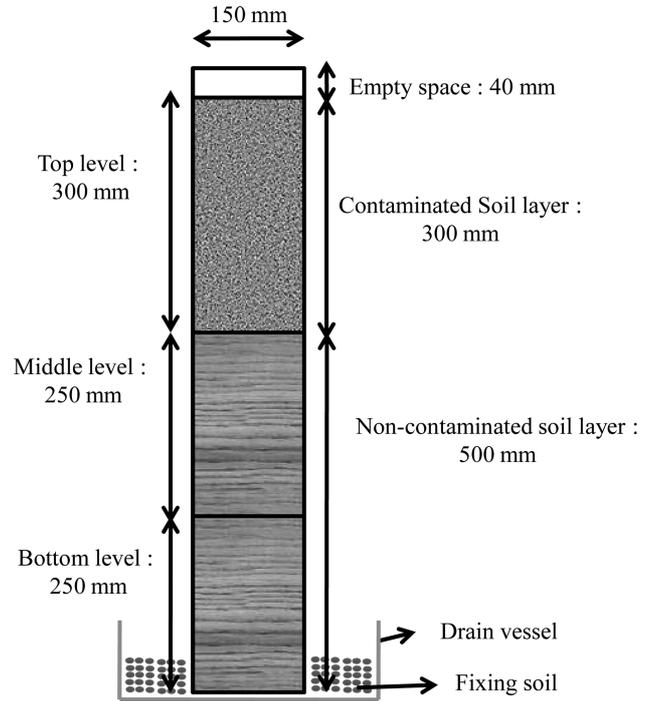


Fig. 1. Schematic diagram of a soil mesocosm.

한 후, 상단층 토양을 전부 꺼내 손으로 잘 혼합하였다. 토양의 pH는 토양 5 g에 증류수 25 mL을 넣고 교반기 안에서 한 시간 동안 혼합한 뒤, 30분간 정치한 후 상등액의 pH를 pH meter(420A, Orion Research Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 일정량의 토양을 110°C에서 24시간 건조시킨 후, 전후의 무게 차를 이용하여 수분함량을 구하였다. 이렇게 건조한 토양을 다시 650°C에서 30분간 강열감량 하였으며, 전후의 무게 차를 이용하여 유기물함량을 구하였다. 토양 미생물 활성을 비교하기 위해 탈수소 효소 활성을 측정하였다[31]. 토양의 잔류 TPH 농도를 분석하기 위해, 토양 5 g(습중량)을 test tube에 넣고, hexane-acetone solution (1:1, v/v)을 5 mL 넣어 준 후 30°C, 200 rpm의 교반기에서 30분간 교반하였다. 그 후 test tubes를 실온에서 30분간 정치한 후 상등액을 채취하여 용매 속에 녹아있는 잔류 TPH의 농도를 gas chromatography(GC, 5890 series II, Hewlett Packard, USA)를 이용하여 분석하였다. GC 분석 조건은 오븐 온도가 초기 40°C에서 3분간 유지한 후, 4°C·min⁻¹으로 70°C까지 승온, 10°C·min⁻¹으로 200°C까지 승온, 그리고 8°C·min⁻¹으로 300°C까지 승온 한 후 15분간 유지하였다. 시료 주입부와 검출기 온도는 각각 300, 320°C이고, column은 HP-5 capillary column(0.25 mm×30 m, 0.25 µm)을 사용하였으며, carrier gas는 N₂를 사용하였다. 디젤의 농도가 0, 312.5, 625, 1,250, 10,000, 20,000, 그리고 40,000 mg·L⁻¹로 하여 검량선을 작성한 후, 검량식으로부터 TPH농도를 환산하였다. 또한, 토양의 중금속 농도를 분석하기 위해, 풍건 토양 0.5 g에 왕수(65% HCl 1.8 mL + 37% HNO₃ 0.6

mL) 2.4 mL를 가한 후 가열하여 시료를 산 분해하여, 증류수 10 mL로 희석하고 여과지(Whatman, No.44, USA)로 여과하였다. 이 시료를 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS analysis 100, Perkin Elmer, USA)로 측정하였다. 토양 중금속 분석법의 신뢰도는 캐나다의 CNRC(National Research Council of Canada)에서 공인된 표준물질인 MESS-2(Marine Sediment)의 분석을 통해 확인하였다. 위의 모든 실험의 결과는 SPSS(12.0K)을 이용하여 통계분석(Anova, two sample t-test)을 하였다.

유류 및 중금속 복합오염 토양에 옥수수만 식재(DHM+P)하거나 옥수수 식재와 더불어 근권세균을 동시에 접종한 조건(DHM+P+B)에서 51일 동안 처리한 토양의 pH, 수분 함량, 유기물 함량 및 탈수소효소 활성을 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다. 토양의 pH는 DHM+P 및 DHM+P+B 조건에서 거의 비슷하였으나, 근권세균을 접종한 DHM+P+B 토양의 수분함량과 유기물 함량이 옥수수만을 식재한 DHM+P 토양보다 높았다($p < 0.05$). 또한, 근권세균을 접종한 조건인 DHM+P+B 토양의 탈수소 효소 활성($840.6 \pm 127.9 \mu\text{g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)은 옥수수만 식재한 DHM+P의 활성($418.8 \pm 117.6 \mu\text{g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)보다 2배 이상 높았다. 또한, 본 연구에 사용한 토양의 초기 탈수소 효소 활성($124 \pm 21 \mu\text{g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)과 비교해 보면, 옥수수 식재 및 근권세균 접종에 의해 토양의 탈수소 효소 활성이 약 3~7배 이상 증가되었다. 일반적으로 식물의 뿌리에서 영양물질이 분비되며 이로 인해 토양 미생물의 활성과 신진대사가 활발해지는 것으로 알려져 있다[26, 41]. 그러므로 본 연구에서 옥수수 식재로 인하여 토양의 미생물 활성이 증가함을 알 수 있었다. 또한, DHM+P+B 토양의 탈수소 효소 활성이 DHM+P의 활성 보다 2배 이상 높은 결과는 토양에 접종한 *Gordonia* sp. S2RP-17과 *Serratia* sp. SY5의 두 균주가 유류 및 중금속 오염 토양에서 어느 정도 생존하고 있다는 것을 간접적으로 시사하는 결과로 생각된다.

유류와 중금속으로 복합 오염된 토양에 식재한 옥수수의 생장에 미치는 근권세균 접종효과를 분석하기 위해, 51일 동안 재배 후 수거한 옥수수의 지상부 길이와 중량 그리고 지하수(뿌리) 길이와 중량을 측정하였다(Table 2). 옥수수만을 식재한 DHM+P 조건에서 재배한 옥수수 지상부 길이와 중량은 각각 76.1 ± 6.6 cm 및 4.4 ± 0.1 g이었다. 근권세균을 접종한 DHM+P+B 조건에서 재배한 옥수수의 지상부 길이와

Table 2. Comparison of the growth of *Zea mays* after 51 days (n=12)

Treatment	Shoot length (cm)	Root length (cm)	Soot biomass (g)	Root biomass (g)
DHM+P	76.1 ± 6.6^a	40.9 ± 5.5^a	4.4 ± 0.1^a	1.9 ± 0.2^a
DHM+P+B	78.7 ± 5.8^a	38.3 ± 5.28^a	5.6 ± 1.1^a	5.6 ± 0.71^b

DHM+P, contaminated soil + plant; DHM+P+B, contaminated soil + plant + rhizobacteria.

^{a,b}Different letters indicate statistical significance ($p < 0.05$).

중량은 각각 78.7 ± 5.8 cm 및 5.6 ± 1.1 g로, 근권미생물 접종에 의해 옥수수의 지상부 생장이 약간 촉진된 것으로 보였으나, 유의적인 차이는 없었다($p > 0.05$). 그런데, DHM+P 조건에서 재배한 옥수수의 뿌리 길이와 중량은 각각 40.9 ± 5.5 cm 및 1.9 ± 0.2 g이었으나, DHM+P+B 조건에서 재배한 옥수수의 뿌리 길이와 중량은 38.3 ± 5.2 cm 및 5.6 ± 0.7 g이었다. 근권세균 접종 유무에 따라 뿌리 길이는 유의차가 없었으나($p > 0.05$), 근권세균 접종에 의해 옥수수의 뿌리의 중량이 유의적으로 증가함을 알 수 있었다($p < 0.05$). 식물상 복원에 있어 식물의 생장을 촉진하고 또한 식물과 함께 오염물질을 제거할 수 있는 근권미생물의 역할이 매우 중요하다[9, 17]. 미생물은 토양에 있는 유기 오염물질을 탄소원으로 이용하며[3], 식물성 병원균으로부터 식물을 보호하거나 그러한 병원균으로부터의 해로운 영향을 줄이는 항생물질(antibiotic)을 합성하게 된다[20]. 본 연구에서 접종한 *Gordonia* sp. S2RP-17과 *Serratia* sp. SY5는 옥수수의 지상부(줄기, 잎) 생장에는 큰 영향을 미치지 않았지만, 뿌리의 biomass 생장을 향상시켰다. *Gordonia* sp. S2RP-17는 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid(ACC) deaminase 활성을 가지고 있는데[13], 이에 의해 옥수수 뿌리 생장이 촉진된 것으로 사료된다. 즉, 식물이 오염물질에 노출 될 경우 ethylene을 생산하게 되는데, ethylene이 고농도로 축적되면 식물의 뿌리 생장이 저해를 받게 된다[4, 37, 40]. 그런데 ACC는 ethylene의 전구체로, ACC deaminase은 ACC를 분해함으로써 ethylene을 생산을 억제하는 효과로 인해 식물 성장을 촉진할 수 있게 된다[4, 37, 40]. 또한, *Serratia* sp. SY5 균주는 indole-3-acetic acid(IAA) 생산능이 우수한 근권세균인데[21], IAA는 식물 성장 호르몬인 옥옥신 중의 하나로 식물 성장을 촉진하는 것으로 알려져 있다[8, 25].

Table 1. Comparison of physicochemical properties and dehydrogenase activity in soil after 51 days.

Treatment	pH	Moisture content (%)	Organic matter content (%)	Dehydrogenase ($\mu\text{g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
DHM+P	5.2 ± 0.1^a	16.5 ± 0.9^a	5.5 ± 0.5^a	418.8 ± 117.6^a
DHM+B+P	5.1 ± 0.1^a	18.9 ± 1.2^b	6.6 ± 0.72^b	840.6 ± 127.972^b

DHM+P, contaminated soil + plant; DHM+P+B, contaminated soil + plant + rhizobacteria.

^{a,b}Different letters indicate statistical significance ($p < 0.05$).

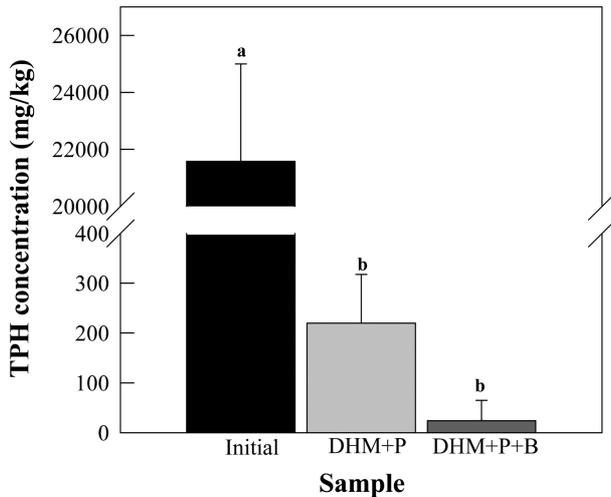


Fig. 2. Comparison of residual TPH concentration in soil after 51 days. DHM+P, contaminated soil + plant; DHM+P+B, contaminated soil + plant + rhizobacteria. ^{a,b}Different letters indicate statistical significance ($p < 0.05$).

유류 및 중금속 복합오염 토양을 mesocosm에서 51일 동안 처리한 후, 토양의 잔류 TPH와 중금속 농도를 Fig. 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 초기에는 토양의 TPH 농도는 $21,576 \pm 3,426$ mg-TPH·kg-dry soil⁻¹이었는데, 51일 후 DHM+P와 DHM+P+B 토양의 TPH 농도는 각각 220 ± 98 및 20 ± 41 mg-TPH·kg-dry soil⁻¹ 이었다(Fig. 2). 이러한 결과로부터 옥수수 식재에 의해 대부분의 TPH를 제거할 수 있으며, 옥수수와 함께 근권세균을 접종하면 TPH 효율이 약간 향상됨을 알 수 있었다. 근권미생물은 식물의 성장을 저해하는 독성물질을 분해함으로써 식물의 성장을 돕거나, 식물이 독성물질을 분해할 수 있도록 도와주는 역할을 한다 [19]. 원유로 오염된 토양의 경우, *Azospirillum lipoferum* strain 15와 밀(*Triticum aestivum*)을 함께 배양하였을 때, 14일 동안 원유가 56.5%가 제거되었으며, 밀 뿌리의 성장이 촉진하였다[28]. TPH와 PAH로 오염된 토양의 경우, 툴 페스큐(*Festuca arundinacea*)를 이용하여 오염토양을 복원할 때, *Enterobacter cloacae* CAL-2, *Azospirillum brasilense* Cd, *Pseudomonas putida* UW3의 접종에 의해 오염물질에 대한 툴페스큐의 내성이 강해지고 오염물질에 의한 스트레스 하에서도 툴 페스큐의 성장이 촉진 되었다[14, 15]. 이는 근권미생물이 존재할 때 오염물질의 제거와 식물의 성장이 우수했던 본 연구와 일치하는 결과이다.

중금속 제거효율을 비교해 보면(Table 3), 복합오염토양의 초기 Cu 농도는 104 ± 4.1 mg·kg-dry soil⁻¹이었고, DHM+P 및 DHM+P+B 토양의 Cu 농도는 각각 66.3 ± 1.5 및 67.6 ± 7.3 mg·kg-dry soil⁻¹로, 초기값에 비해 Cu 농도가 감소하였으나 근권세균 접종 효과는 관찰되지 않았다. 즉, 옥수수만 식재한 조건과 비교하여, 근권세균을 접종한 경우의 Cd 잔

Table 3. Comparison of residual heavy metal concentration in soil after 51 days.

Treatment	Heavy metal concentration (mg-heavy metal·kg-dry soil ⁻¹)		
	Cu	Cd	Pb
Initial	104 ± 4.1^a	40.3 ± 0.7^a	663.3 ± 13.6^a
DHM+P	66.3 ± 1.5^b	27.7 ± 3.45^b	412.8 ± 7.645^b
DHM+P+B	67.6 ± 7.3^b	20.1 ± 4.845^c	547.6 ± 42.345^c

DHM+P, contaminated soil + plant; DHM+P+B, contaminated soil + plant + rhizobacteria.

^{a-c}Different letters indicate statistical significance ($p < 0.05$).

류 농도가 약간 낮았으나, Pb 잔류농도는 오히려 조금 높았다($p < 0.05$).

근권미생물은 토양에 존재하는 무기오염물질을 제거해주고 무기오염물에 대한 식물의 내성을 완화시켜 식물이 잘 성장하게 도와준다[12]. 중금속의 경우는 식물체에 중금속을 축적하여 오염물질을 제거하기 때문에 식물의 생장은 식물상 복원이 성공적으로 상용화되기 위해 매우 중요한 요소이다 [20]. 본 연구에서 사용한 *Gordonia* sp. S2RP-17과 *Serratia* sp. SY5는 S2RP-17는 식물 성장 촉진 능력을 가지고 있어 이들 근권세균 접종에 의해 옥수수에 의한 중금속 제거 효율이 향상될 것으로 기대하였으나, 실험결과 중금속 제거에는 근권세균 접종 효과가 거의 없었다. 본 연구에서 접종한 2종의 근권세균은 중금속과 유류로 오염된 토양에서 서식하는 식물의 근권에서 분리한 근권세균이다: *Gordonia* sp. S2RP-17은 쇠뜨기(*Equisetum arvense* L.)의 근권에서, *Serratia* sp. SY5는 돌피(*Echinochloa crus-galli*)의 근권에서 분리되었다[13, 21]. 이들 근권세균의 접종에 의해 복합 오염토양에서 유류 제거효율은 증가하였으나, 중금속 제거 효율에 영향을 미치지 않은 이유는 *Gordonia* sp. S2RP-17은 옥수수와 양(positive)의 상호작용을 가지고 있으나, *Serratia* sp. SY5는 옥수수와 상호작용을 거의 하지 않았기 때문으로 사료되나, 향후 추가 연구가 필요하다. 본 연구 결과와는 달리, 유채(*Brassica campestris* subsp. *napus* var. *nippo-oleifera*)를 이용한 식물상 복원에 있어 근권 미생물을 함께 접종하여 중금속 제거 효율을 증가시킨 연구 사례가 있다[33]. 또한, 납과 아연 제거에 *Azotobacter chroococcum* HKN-5가 활용되었는데, 이 미생물은 식물의 성장을 촉진함과 동시에 중금속 독성으로부터 식물을 보호하였다[46]. *Bacillus megaterium* HKP-1, *Bacillus mucilaginosus* HKK-1, 그리고 *Bacillus subtilis* SJ-101은 니켈로 오염된 토양에서 갖의 뿌리길이는 28%, 줄기는 51%가 미생물을 접종하지 않은 조건보다 더 성장하였고[47], *Bacillus* sp. SM3는 해바라기(*Helianthus annuus*)의 성장을 향상시켰고, 동시에 중금속을 축적 능력을 향상시켰다[36].

요 약

본 연구에서는 유류 분해능이 있고 식물 성장 촉진능력을 가진 *Gordonia* sp. S2RP-17, 중금속에 내성을 가지며 식물 성장촉진 능력이 있는 *Serratia* sp. SY5 및 옥수수를 이용하여 유류 및 중금속 오염 토양의 정화 특성을 조사하였다. 유류 및 중금속 오염 토양에서 51일간 재배한 옥수수의 평균 뿌리 건중량은 1.9 ± 0.2 g이었으나, 근권세균을 접종한 오염 토양에서 재배한 옥수수의 뿌리 건중량은 5.6 ± 0.7 g로, 근권세균 접종에 의해 옥수수의 뿌리의 중량이 유의적으로 증가함을 알 수 있었다($p < 0.01$). 초기에는 토양의 TPH 농도는 $21,576 \pm 3,426$ mg-TPH·kg-dry soil⁻¹이었는데, 51일 후 옥수수만을 식재한 토양의 잔류 TPH 농도는 220 ± 98 mg-TPH·kg-dry soil⁻¹이었고, 옥수수와 함께 근권세균을 접종한 토양의 잔류 TPH 농도는 20 ± 41 mg-TPH·kg-dry soil⁻¹이었다. 이러한 결과로부터 옥수수 식재에 의해 대부분의 TPH를 제거할 수 있으며, 옥수수와 함께 근권세균을 접종하면 TPH 효율이 조금 더 향상됨을 알 수 있었다. 그러나, 중금속 제거효율에 미치는 근권세균 접종 효과는 거의 없었다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단 지정 차세대바이오환경기술연구센터(AEBRC, R11-2003-006-06001-0)와 국가지정연구실사업의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. R0A-2008-000-20044-0), 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Al-Sharidah, A., A. Richardt, J. R. Golecki, R. Dierstein, and M. H. Tadros. 2000. Isolation and characterization of two hydrocarbon-degrading *Bacillus subtilis* strains from oil contaminated soil of Kuwait. *Microbiol. Res.* **155**: 157-164.
- Andreoni, V., L. Cavalca, M. A. Rao, G. Nocerino, S. Bernasconi, E. Dell'Amico, M. Colombo, and L. Gianfreda. 2004. Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils. *Chemosphere* **57**: 401-412.
- Boopathy, R. 2004. Factors limiting bioremediation technologies(review paper). *Bioresour. Technol.* **74**: 63-67.
- Deikman, J. 1997. Molecular mechanism of ethylene regulation of gene transcription. *Physiol. Plant* **100**: 561-566.
- El-Gendy, A. S., S. Svingos, D. Brice, J. H. Garretson, and J. Schnoor. 2009. Assessments of the efficacy of a long-term application of a phytoremediation system using hybrid poplar trees at former oil tank farm sites. *Water Environ. Res.* **81**: 486-498.
- Etsuko, K., M. T. Shyoji, and T. Masahiko. 2006. Ryegrass enhancement of biodegradation in diesel-contaminated soil. *Environ. Exp. Bot.* **55**: 110-119.
- Fijalkowska, S., K. Lisowska, and J. Dlugonski. 1998. Bacterial elimination of polycyclic hydrocarbons and heavy metals. *J. Basic Microbiol.* **38**: 361-369.
- Frankenberger, W. T. and W. J. Brunner. 1983. Method of detection of auxin-indole-3-acetic acid in soil by high performance liquid chromatography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47**: 237-241.
- Glick, B. R., D. M. Karaturovic, and P. C. Newell. 1995. A novel procedure for rapid isolation of plant growth promoting *pseudomonads*. *Can. J. Microbiol.* **41**: 533-536.
- Hamann, C., J. Hegemann, and A. Hildebrandt. 1999. Detection of polycyclic aromatic hydrocarbon degradation genes in different soil bacteria by polymerase chain reaction and DNA hybridization. *FEMS Microbiol. Lett.* **173**: 255-263.
- Haritash A. K. and C. P. Kaushik. 2009. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *J. Hazard. Mater.* **169**: 1-15.
- Hong, S. H. and K. S. Cho. 2007. Effects of plants rhizobacteria and physicochemical factors on the phytoremediation of contaminated Soil. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **35**: 261-271.
- Hong, S. H. 2010. Rhizoremediation of diesel and heavy metal contaminated soil, Doctor's thesis, Ewha Womans University, South Korea.
- Huang, X. D., Y. El-Alawi, J. Gurska, B. R. Glick, and B. M. Greenberg. 2005. A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils. *Microchem. J.* **91**: 139-147.
- Huang, X. D., Y. El-Alawi, J. Gurska, B. R. Glick, and B. M. Greenberg. 2004. A multiprocess phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils. *Environ. Pollut.* **130**: 465-76.
- Jankong, P., P. Visoottiviset, and S. Khokiattiwong. 2007. Enhanced phytoremediation of arsenic contaminated land. *Chemosphere* **68**: 1906-1912.
- Johnson, D. L., D. R. Anderson, and S. P. McGrath. 2005. Soil microbial response during the phytoremediation of a PAH contaminated soil. *Soil Biol. Biochem.* **37**: 2334-2336.
- Johnson, D. L., K. L. Maguire, D. R. Anderson, and S. P. McGrath. 2004. Enhanced dissipation of chrysene in planted soil:the impact of a rhizobial inoculum. *Soil Biol. Biochem.* **36**: 33-38.
- Kim, J. Y. and K. S. Cho. 2006. Bioremediation of oil-contaminated soil using rhizobacteria and plant. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **34**: 185-195.
- Koo, S. Y. and K. S. Cho. 2006. Interaction between plants and rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal-contaminated soil. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **2**: 83-93.
- Koo, S. Y., and K. S. Cho. 2009. Isolation and characterization of a plant growth promoting rhizobacterium, *Serratia* sp. SY5. *J. Microbiol. Biotechnol.* **19**: 1431-1438.
- Lee, E. H. and K. S. Cho. 2009. Effect of substrate interac-

- tion on the degradation of methyl tert-butyl ether, benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene by *Rhodococcus* sp. *J. Hazard. Mater.* **167**: 669-674.
23. Lee, E. H., J. Kim, K. S. Cho, Y. G. Ahn, and G. S. Hwang. 2009. Degradation of hexane and other recalcitrant hydrocarbons by a novel isolate, *Rhodococcus* sp. EH831. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **17**: 64-77.
 24. Liste, H. and D. Felgentreu. 2006. Crop growth, culturable bacteria, and degradation of petrol hydrocarbons (PHCs) in a long-term contaminated field soil. *Appl. Soil Ecol.* **31**: 43-52.
 25. Ma, Y., M. Rajkuma, and H. Freitas. 2009. Improvement of plant growth and nickel uptake by nickel resistant-plant-growth promoting bacteria. *J. Hazard. Mater.* **166**: 1154-1161.
 26. Macek, T. M. and J. Kas. 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation (research review paper). *Biotechnol. Adv.* **18**: 23-34.
 27. Margesin, R., D. Labbe, F. Schinner, C. W. Greer, and L. G. Whyte. 2003. Characterization of hydrocarbon-degrading microbial populations in contaminated and pristine Alpine soils. *Appl. Environ. Microbiol.* **69**: 3085-3092.
 28. Muratova, A. Y., T. V. Dmitrieva, L. V. Panchenko, and O. V. Turkovskaya. 2008. Phytoremediation of oil-sludge-contaminated soil. *Int. J. Phytoremediat.* **10**: 486-502.
 29. Palmroth, M. R. T., J. Pichtel, and J. Puhka. 2002. Phytoremediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel. *Bioresour. Technol.* **84**: 221-228.
 30. Pepi, M., A. Minacci, F. Di cello, F. Baldi, and R. Fani. 2003. Logn-term analysis of diesel fuel consumption in a co-culture of *Acinetobacter venetianus*, *Pseudomonas putida* and *Alcaligenes faecalis*. *Antonie Van Leeuwenhoek.* **83**: 3-9.
 31. Pepper, I. L., C. P. Gerba, and J. W. Bredecke. 1995. *Environmental Microbiology: A Laboratory Manual*, Academic Press Inc., New York, USA.
 32. Plaza, G. A., K. Ulfing, and R. L. Brigmon. 2005. Surface active properties of bacterial strains isolated from petroleum hydrocarbon-bioremediated soil. *Pol. J. Microbiol.* **54**: 161-167.
 33. Poonguzhali, S., M. Madhaiyan, and T. Sa. 2006. Cultivation-dependent characterization of rhizobacterial communities from field grown Chinese cabbage *Brassica campestris* ssp *pekinensis* and screening of traits for potential plant growth promotion. *Plant Soil* **286**: 167-180.
 34. Prasad, M. N. V., and H. M. O. Freitas. 2003. Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electron. J. Biotechnol.* **6**: 285-321.
 35. Radwan, S. S., H. Al-Awadhi, N. A. Sorkhoh, and I. M. El-Nemr. 1998. Rhizospheric hydrocarbon-utilizing microorganisms as potential contributors to phytoremediation for the oily Kuwaiti desert. *Microbiol. Res.* **153**: 247-251.
 36. Rajkumar, M., Y. Ma, and H. Freitas. 2008. Characterization of metal-resistant plant-growth promoting *Bacillus weihenstephanensis* isolated from serpentine soil in Portugal. *J. Basic Microb.* **48**: 500-508.
 37. Reed, M. L. E. and B. R. Glick. 2005. Plant growth-promoting bacteria facilitate the growth of the common reed *Phragmites australis* in the presence of copper or polycyclic aromatic hydrocarbons. *Curr. Microbiol.* **51**: 425-429.
 38. Riis, V., W. Babel, and O. H. Pucci. 2002. Influence of heavy metals on the microbial degradation of diesel fuel. *Chemosphere* **49**: 559-568.
 39. Ronchel, M. C. and J. L. Ramos. 2001. Dual system to reinforce biological containment of recombinant bacteria designed for rhizoremediation. *Appl. Environ. Microbiol.* **67**: 2649-2656.
 40. Safronova, V. I., V. V. Stepanok, G. L. Engqvist, Y. V. Alekseyev, and A. A. Belimov. 2006. Root-associated bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase improve growth and nutrient uptake by pea genotypes cultivated in cadmium supplemented soil. *Biol. Fertil. Soils* **42**: 267-72.
 41. Shimp, J. F., J. C. Tracy, L. C. Davis, E. Lee, W. Huang, L. E. Erickson, and J. L. Schnoor. 1993. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. *Environ. Sci. Technol.* **23**: 41-77.
 42. Sokhn, J., F. A. A. M. De Leij, T. D. Hart, and J. M. Lynch. 2001. Effect of copper on the degradation of phenanthrene by soil micro-organisms. *Lett. Appl. Microbiol.* **33**: 164-168.
 43. Tesar, M., T. G. Reichenauer, and A. Sessitsch. 2002. Bacterial rhizosphere populations of black poplar and herbal plants to be used for phytoremediation of diesel fuel. *Soil Biol. Biochem.* **34**: 1883-1892.
 44. Toshitomi, K. J. and J. R. Shann. 2001. Corn (*Zea mays*) root exudates and their impact on ¹⁴C-pyrene mineralization. *Soil Biol. Biochem.* **33**: 1769-1776.
 45. Wei, Q. F., R. R. Mather, and A. F. Fotheringham. 2005. Oil removal from used sorbents using a biosurfactant. *Bioresour. Technol.* **96**: 331-334.
 46. Wu, S. C., K. C. Cheung, Y. M. Luo, and M. H. Wong. 2006. Effects of inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*. *Environ. Pollut.* **140**: 124-35.
 47. Zaidi, S., S. Usmani, B. R. Singh, and J. Musarrat. 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. *Chemosphere* **64**: 991-997.
 48. Zukauskaitė, A., V. Jakubauskaitė, O. Belous, D. Ambrazaitienė, and Z. Stasiskienė. 2008. Impact of heavy metals on the oil products biodegradation process. *Waste Manag. Res.* **26**: 500-507.

(Received May 28, 2010/Accepted August 24, 2010)