

오염퇴적물에 함유된 PCBs의 생물분해 특성

안재환^{1*} · 김소정¹ · 지재성¹ · 배우근² · 황병기³

¹한국건설기술연구원 건설환경연구부

²한양대학교 토목환경공학부

³상명대학교 토목환경공학부

Biodegradation of PCBs into Contaminated Dredged Sediments

Jae-Hwan Ahn^{1*} · So-Jung Kim¹ · Chai-Sung Gee¹ · Woo-Keun Bae² · Byung-Gi Hwang³

¹Construction Environmental Research, Dept., Korea Institute of Construction Technology,
Goyang 411-712, Korea

²Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ, Ansan 425-791, Korea

³Dept. of Civil & Environmental Eng., Sangmyung Univ, Chonan 330-720, Korea

ABSTRACT

This research in the degradation of polychlorinated biphenyls(PCB) has focussed on the use of experimental enrichment cultures to obtain PCB-degrading communities and identification of PCB-degrading bacteria according to pure culture. During 180 days, enrichment culture was performed to obtain PCB-degrading bacteria and initial concentration was injected 1.6 ppm, 0.7 ppm, respectively. After 180 days of enrichment culture, PCBs was removed 80-87% and 57-71%. Biodegradation of PCBs was studied according to dominated PCB-degrading bacteria. Biodegradation of PCBs was 80% in initial concentration of PCBs for 20days, enrichment cultured PCB-degrading bacteria was isolated by pure culture and it was verified to *Pseudoxanthomonas* sp.

Key words : Dredged sediment, PCBs, Biodegradation

요 약 문

본 연구는 혐기성조건에서 오염퇴적물내 PCBs의 생물학적 분해와 PCBs의 생물 분해시 우점종인 미생물을 분리하고자 하였다. PCBs의 분해 미생물을 얻기하기 위해서 180일간 집식배양을 수행하였으며, 초기 농도를 1.6 ppm과 0.7 ppm으로 주입하였다. 180일 후의 PCBs의 분해능은 각각 80-87%, 57-71%의 제거효율을 보였다. 집식 배양에서 우점화된 PCBs 분해 미생물에 의한 PCBs의 분해능을 조사하였다. 그 결과, 초기 PCBs 농도 1.3 ppm에서 약 20일 동안, 80%의 높은 분해효율을 보였다. 또한, 집식 배양된 PCBs 분해 미생물을 순수분리하였으며, 미생물 동정은 *Pseudoxanthomonas* 속으로 밝혀졌다.

주제어 : 준설퇴적물, 유기염소계 화합물, 생물학적 분해

1. 서 론

오염퇴적토(Contaminated Sediments)란 수체의 바닥에 퇴적된 흙, 모래, 유기물질 또는 광물질 등으로 구성된 퇴

적토내에 인체나 환경에 악영향을 유발시킬 가능성이 있는 독성 또는 유해물질을 함유한 퇴적토를 통칭한다. 퇴적물의 오염정도를 평가하기 위하여 각각의 화학물질을 PCBs(Polychlorinated Biphenyls), Pesticides, Metals,

*Corresponding author : jhahn@kict.re.kr

원고접수일 : 2003. 12. 16 게재승인일 : 2004. 4. 28

질의 및 토의 : 2004. 9. 30 까지

Mercury, PAHs(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), Other organics 등 6개의 항목으로 분류하고 있는데, 이 중에서 PCBs는 다양한 산업과정에서 배출되는 유해물질로서 소수성의 특성에 기인하여 수계의 퇴적물내에 오랜 기간 동안 축적된다. 특히, PCBs는 페닐기(phenyl rings)에 염소의 결합위치에 따라 209개의 이성질체로 구성되어 있으며, Polychlorinated dibenzo-p-dioxins(PCDDs)와 Polychlorinated dibenzofurans(PCDFs)의 전구물질(precursors) 및 내분비계장애물질(Endocrine disrupters)로서 엄격한 관리가 요구되는 물질중의 하나이다¹⁾.

또한, PCBs 자체가 독성을 가지고 있으며, 난분해성 물질로 밝혀짐에 따라 1980년대 중반부터는 사용을 규제하게 되었다. PCBs에 대한 국내환경법은 별도의 처리규정을 하고 있지 않지만, 대기환경보전법, 수질보전법, 유해화학물질 관리법에 오염물질 또는 유독물로 분류하여 관리되고 있다²⁻⁴⁾.

Lee(2001)에 따르면, 경기만의 PCBs 농도는 0.99~580 µg/kg로서 높았으며, 남양만 0.99~2.5 µg/kg, 시화호는 2.7~28.0 µg/kg가 퇴적토에 함유된 것으로 보고되었다⁵⁾. 또한, Jeong 등(2001)은 낙동강 수계의 퇴적물에 대한 PCBs의 분포특성 조사에서 퇴적물내의 PCBs 농도분포가 신평-장림 공장단지에서 108~141.0 µg/kg로 가장 높았으며 그 외의 낙동강 주변에서는 1.1~5.9 µg/kg로서 상류보다는 하류의 공단부근에서 PCBs의 농도가 높게 나타나고 있다⁶⁾. 그 외 대규모 국가공업단지가 위치하고 있는 평양만, 진해만, 마산만, 울산만 그리고 온산만 등의 퇴적토의 PCBs 농도분포는 각각 4~60.7 µg/kg(dry wt.), 40.2~48.8 µg/kg, 2.7~33.5 µg/kg, 4.5~8.3 µg/kg, 그리고 4.5~8.2 µg/kg 정도로서 해당수계의 지역적 특성에 따라 부분적으로 퇴적물내의 PCBs의 농도가 높게 나타나고 있다⁵⁻⁷⁾. 지금까지 국내의 경우, 퇴적물에 함유된 중금속과 PAHs 또는 PCBs 등과 같은 유해물질 분포연구에 대해서는 활발히 이루어지고 있지만, PCBs의 처리법에 대한 연구가 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 혐기성조건에서 오염퇴적물내 PCBs의 생물학적 분해(Biodegradation) 평가와 함께 PCBs의 생물 분해시 우점종인 미생물의 분리하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 대상 시료

본 연구에서 사용된 시료는 K시와 B시의 낙동강 하류 부근에서 퇴적토를 사용하였으며, 시료 채취지점은 3군데



Fig. 1. Sampling stations in Gumi and Gimhae, Korea.

를 임의로 선정하였다(Fig. 1). 시료는 간이 시료채취기를 사용하여 채취하였으며, 채취된 시료는 즉시 미리 세척한 폴리에틸렌 백에 넣은 후에 아이스박스에 넣고 실험실로 운반하였다. 4°C 이하의 냉장시설에 보관하였다.

2.2. 미생물 배양

미생물 배양에 사용된 시료는 낙동강 하류의 퇴적토와 지표수로서 1:1 비율로 골고루 혼합하였다. 100 ml의 Glass bottle에 퇴적토와 지표수가 혼합된 시료를 70 ml을 넣고 고무마개와 알루미늄 캡을 사용하여 닫은 후, PCBs를 각각 0.5 ppm과 1 ppm으로 주입하고 30°C에서 배양하였다. 배양된 미생물을 무기염 배지인 K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , NH_4Cl , $MgSO_4$, $MnSO_4 \cdot 2H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 에 주입하였으며, 순치시킨 미생물의 혼합액을 접종원으로 사용하였다. 모든 실험은 glover box에 질소를 불어넣어 내부 공기를 질소가스로 치환 시킨 후, 질소가스로 채워진 밀폐된 공간에서 수행되었다. PCBs의 물질로는 미국 Aroclor 1242, 1260의 제품을 사용하였다.

2.3. 미생물 분리

PCBs 분해균을 분리하기 위해서 균 분리용 고체배지를 사용하였다. 균 분리용 고체 배지로서 탄소원으로는 Arochlor 1260과 무기염 배지를 사용하였다. 180일만에 걸쳐 순치 배양된 토양 미생물을 대상으로 분리하였다. 토양을 멸균증류수에 현탁한 후, 상등액 1 mL를 균분리용 고체 배지에 도말하여 질소가스로 치환된 Glover box내에서 2주일간 배양하여 순수분리하였다. 순수분리된 미생물의 DNA를 추출한 후, PCR(Polymerase chain reaction) 방법에 의하여 미생물을 동정하였다⁷⁾.

2.4. 분석 방법

실험에 사용되는 모든 초자기구는 무인세제로 세척 후 Muffle furnace에서 450°C로 4시간 이상 가열하여 유기물

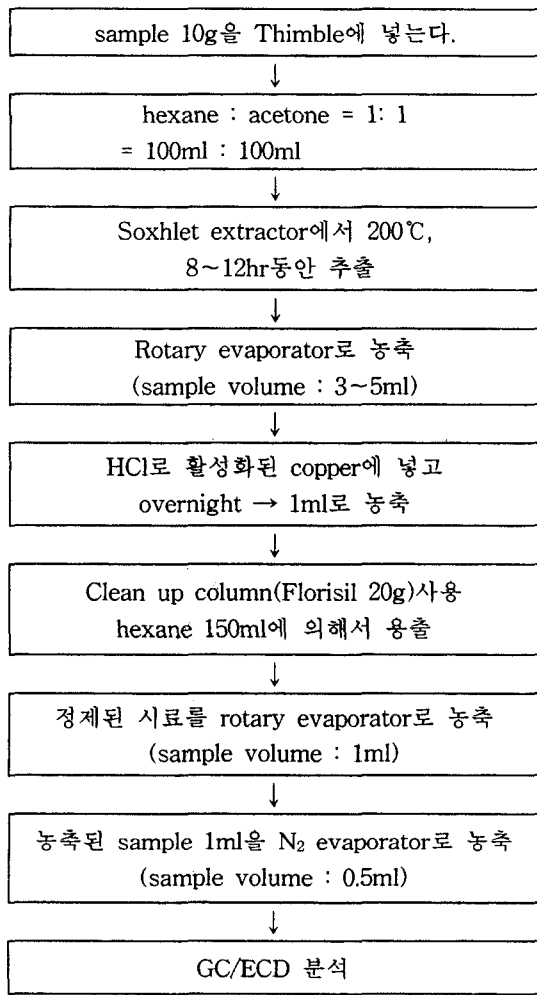


Fig. 2. Analysis method of PCBs Pre-treatment extraction.

Table 1. PCBs analysis condition

Items	Conditions
Injector mode	Splitless
Column flow	1.5 ml/min
Carrier gas	Nitrogen
Injector Temp.	275°C
Detector Temp.	300°C
Oven Temp.	100°C
Lamp 1	5°C/min, 140°C (1 min)
Lamp 2	1.5°C/min, 250°C (1 min)
Lamp 3	10°C/min, 300°C (10 min)

질을 제거하였고 사용하기 전에 Methylene chloride로 세척하여 사용하였다. 실험에 사용된 모든 유기용매는 GC 등급(Merck, 독일)의 용매를 사용하였다. 표준물질은 Aroclor standard(미국)를 사용하였다.

퇴적물에 대한 유기염소계 화합물의 추출 방법을 Fig. 2에 나타내었다⁸⁾.

PCBs 분석 기기는 Hewlett-packard 6890 GC/ECD를 사용하였으며, 0.25 mm I.D×30 m DB-5 fused silica capillary column을 이용하고, 분석 조건은 Table 1에 나타내었다⁹⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 퇴적토내의 PCBs 조사 결과

낙동강 하류에서 채취한 퇴적토에 대한 PCBs의 분석결과를 Table 2에 나타내었다. 낙동강의 PCBs 농도는 site 3에서 2.42 ppb, site 2와 site 1에서 각각 2.14, 1.13 ppb으로 나타났으며, 평균 농도는 1.9 ppb이었다. 그리고 K 공단의 PCBs 농도는 site 1과 site 2에서 각각 8 ppb와 17 ppb로 나타났고 평균 농도 12.5 ppb 였다.

퇴적토는 육지로부터 유입되어 호소, 하천, 해양 등의 수체에 퇴적되기 때문에 낙동강 하류 지역의 PCBs 농도가 높을 것으로 생각되었지만, 낙동강 하류의 PCBs의 오염도는 낮은 것으로 나타났다. 그러나 Jeong 등(2001)에 의하면, 낙동강의 PCBs의 분포농도가 공장부근에서는 108~141.0 µg/kg로 조사되었으며, 공장이외의 부근에서는 1.1~5.9 µg/kg로 보고 조사되었다⁶⁾. 이러한 PCBs의 농도 차이를 고려하여 낙동강 본류를 중심으로 퇴적깊이와 다양한 지점에 따른 추가적인 조사가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

3.2. 기-액-고 평형상태 분석

PCBs는 불활성이며, 반휘발성물질의 무극성으로 분류되는 유기화합물이다. 또한 물에 대한 용해도가 매우 작으

Table 2. PCBs concentrations of samples

Congener No.	site-1	site-2	site-3
PCB 52	0.08	0.10	0.14
PCB 44	0.04	0.24	0.07
PCB 101	0.14	0.09	0.21
PCB 87	0.07	0.12	0.18
PCB 110	0.03	0.08	0.05
PCB 118	0.07	0.13	0.15
PCB 153	0.05	0.14	0.18
PCB 105	0.21	0.37	0.50
PCB 138	0.13	0.23	0.29
PCB 187	0.09	0.12	0.19
PCB 128	0.06	0.14	0.06
PCB 180	0.18	0.38	0.42
SUM (ppb)	1.13	2.14	2.42

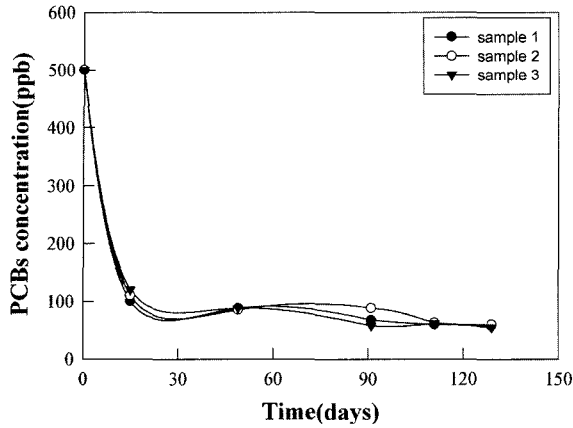


Fig. 3. PCBs biodegradation of air in close-system.

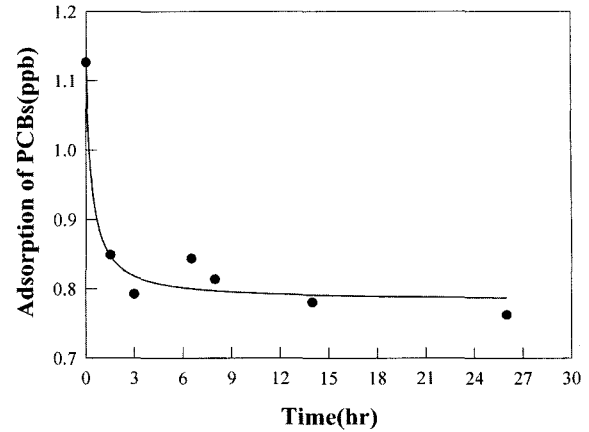


Fig. 4. Equilibrium state of gas-liquid-solid in close-system.

며, Octanol-Water Partition Coefficient(K_{ow})가 매우 크다. 이러한 특징은 일반적으로 내분비계 장애물질이 물이나 대기 등 환경내의 유체상 매체보다는 토양이나 저니층(sediment), 또는 입자상 물질, 생체 등 유기탄소를 함유한 고체상에 주로 축적이 되는 이유가 된다. 한편 물에 대한 용해도가 작기 때문에 증기압이 작아도 잔류성 유기화합물(Persistent organic compounds, POPs)의 헨리상수 값이 반드시 작지는 않다. 따라서 잔류성 유기화합물질이 물에 유입된 경우 그 물질 자체의 휘발성이 매우 작다하더라도 상당 부분이 대기로 이동할 수도 있다¹⁰⁾. 그러므로 폐쇄계에서 PCBs를 주입하여 기상으로 기화되는 농도를 분석함으로써 미생물에 의한 PCBs의 분해율을 알아보고자 하였다.

Fig. 3에 나타난 결과를 보면, 초기 주입농도를 500 ppb를 주입한 후 15일 경과 후에 분석한 결과, 100~120 ppb로 매우 낮은 농도를 나타냈다. 이는 미생물에 의한 PCBs 분해보다는 흡착에 의한 감소로 보인다. 또한, PCBs를 분해하는 미생물이 우점종으로 존재한다고 보기는 어려운 조건이며 유기염소계 화합물 자체의 이성질체가 많으며, 염소 고리를 분리되기 어려운 난분해성 물질이기 때문이다. 따라서 생물학적 분해보다는 물리적 흡착이나 대기 중에 입자 물질의 침적에 의해 기상의 PCBs 농도가 감소한 것으로 사료된다. 이러한 가능성을 확인하기 위해 미생물 배양과 똑같은 조건으로 PCBs 주입시 기-액-고상의 평형에 걸리는 시간을 알아보았다.

기상이 평형상태에 도달하는 데 걸리는 시간에 대한 결과는 Fig. 4와 같으며, 주입 3시간부터는 평형상태를 유지하는 것으로 나타났다. 3시간 이후부터 24시간까지 거의 비슷한 0.8-0.85 ppb의 값을 가지는 것으로 보인다.

따라서, 기상평형상태의 분석에 의해서 15일 경과에서 매우 낮은 기상농도로 나타났지만, 이는 기상의 PCBs가 대기 중 입자상 물질의 침적에 의한 것으로 생각된다. 초기에는 PCBs가 기상으로 배출이 되었지만, 실제로 대기에 남아 있는 부분이 오히려 아주 작은 부분에 불과하다는 것을 보여주고 있다. 따라서 대기에서 토양이나 수체 등으로 매체간 이동의 주요 경로가 대기 중에 존재하는 입자상 물질의 침적에 의한 것으로 볼 수 있다. 그러므로 기상의 PCBs를 분석한다는 것은 시료의 수집도 어렵지만, 기상으로 기화되는 PCBs의 농도가 매우 낮음에 따라 미생물 분해에 의한 분해율을 나타내기는 어려울 것으로 사료된다. 반면 대기 중의 PCBs가 퇴적도에 침적되는 양이 훨씬 크기 때문에 퇴적도를 용출하셔서 미생물에 의한 감소를 관찰하는 것이 타당할 것으로 생각한다.

3.3. PCBs 분해 혼합 미생물 배양

PCBs 분해를 위한 반응의 적정 조건과 미생물의 우점화를 위한 Enrichment culture를 수행하였다.

초기의 PCBs의 주입농도를 1.6 ppm과 0.7 ppm으로 주입하였다. 이는 준설퇴적토의 전처리 공정에서 재활용 가능한 골재와 미세토를 선별하고 분리후 잔류된 퇴적토내의 오염물질이 고농도로 농축하게 된다. 따라서, 고농도로 주입함으로써 고농도 PCBs의 분해가 가능한 활성이 좋은 미생물을 배양하고자 하였다.

180일간의 집식배양에 의한 PCBs 분해능은 Fig. 5와 같다. 초기 농도 1.6 ppm을 주입 후, 120일간의 집식 배양에서는 약 50% 정도의 미생물 분해능을 보이며, 120일 이후에는 미생물의 분해능이 site-1과 site-3에서는 각각 75.1%와 75.4% 그리고 site-2에서 81.4%의 효율을 나타

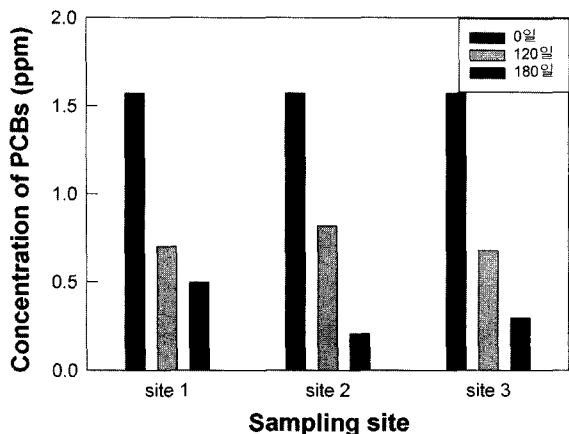


Fig. 5. Biodegradation of Arclor 1260 with long-term.

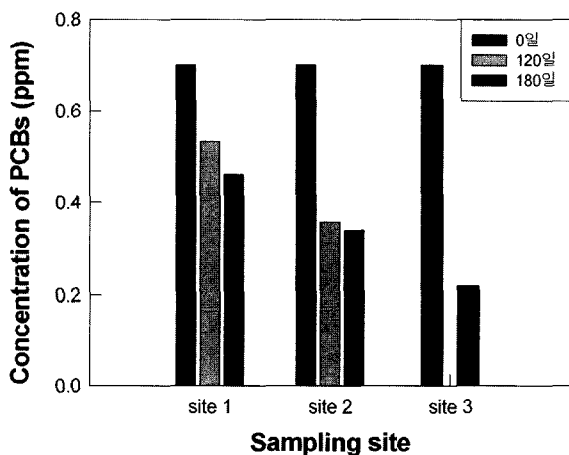


Fig. 6. Biodegradation of Arclor 1260 with long-term.

내었다. 따라서, PCBs를 분해하는 미생물의 군집이 형성 되었으며 시료 채취지점에 따라 미생물의 종류와 양이 조금씩 다른 것으로 생각되고, site 1의 분해능의 저하 원인으로는 미생물의 활성을 떨어뜨리는 요인인 무기염의 부족 또는 미생물의 종에 따라서 생성될 수 있는 독성에 의해 PCBs의 분해율이 낮은 것으로 사료된다.

초기의 PCBs 주입농도 0.7 ppm Fig. 6에서도 Fig. 5의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 미생물 배양 120일 경과 후에는 50%의 PCBs 분해능을 보이고 있지만, 180일 경과에서는 site 1과 2에서는 PCBs의 감소율이 10-20%정도로 낮고, site 3에서는 PCBs의 분해능이 71%로써 양호한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 site 3과 달리 site 1과 2의 미생물의 군집이 비슷하게 형성되었을 것으로 생각된다. 또한 site 3의 미생물 군집이 Fig. 5에서 보여준 PCBs 분해 미생물의 군집과 유사할 것으로 사료된다.

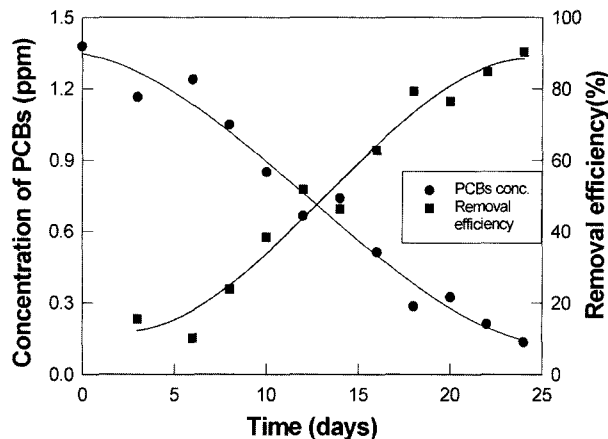


Fig. 7. Biodegradation of Arclor 1260 at initial concentration 1.3 ppm.

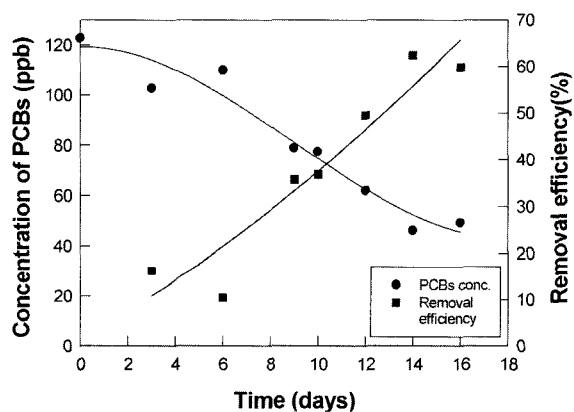


Fig. 8. Biodegradation of Arclor 1260 at initial concentration 120 ppb.

한편, 180일간의 미생물 집식배양은 PCBs를 분해하는 균주를 우점화 하였으며, 우점화된 미생물을 회수하여 Aroclor 1260에 대한 미생물 분해능을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

초기농도 1.3 ppm에 대한 미생물 분해능을 나타낸 Fig. 7의 결과를 보면, 초기 7일간의 lag phase을 가진 후 20일 이후에는 PCBs를 80%이상 분해하였다. 이러한 결과는 미생물 집식배양을 통하여 우점화된 PCBs 분해 균주에 의해서 lag phase에서 log phase로 진행되었던 시간을 매우 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8에 나타낸 초기 농도 120 ppb에 대한 미생물 분해능에 대한 결과를 보면, lag phase가 약 8일 정도로 Fig. 7과 유사함을 보이고 있다. 그러나 16일 동안의 PCBs 분해율은 60%로 제거율이 낮음을 보이고 있다. 이는 PCBs 자체가 난분해성 물질이기 때문에 Fig. 7보다

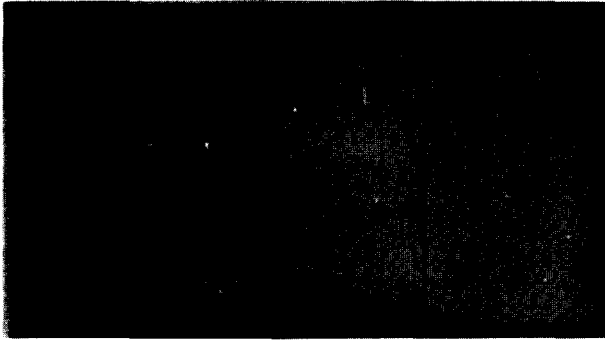


Fig. 9. DNA band according to Gel electrophoresis.

는 낮은 농도이지만, 분해기간을 많이 필요로 하는 것을 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 PCBs의 분해를 위한 기간은 최소 20일 이상은 소요되는 것으로 사료된다.

3.4. PCBs 분해 미생물 분리

180일간에 미생물 순치배양 후, 우점화된 PCBs 분해 미생물을 colony로부터 순수 분리한 결과, yellow colony와 pink colony를 형성하는 균주가 분리되었다. 순수 분리된 2종의 미생물 colony를 DNA 추출과 PCR 방법을 통한 미생물 동정 결과, 2종 모두 *Pseudoxanthomonas* 속으로 밝혀졌다. Fig. 9는 PCR를 통한 DNA 증폭 후 겔 전기영동에 의한 DNA band를 보여주고 있다.

M.R. Harkness의(1993)의 연구에 따르면, 73일 동안 혼합미생물에 의한 PCBs의 분해가 37-55%를 보이며¹¹⁾, B. Tartkovsky의(2001)는 *Rhodococcus* sp. M5를 분리하였으며 Aroclor 1242에 대해 16-19%의 분해능을 나타내었다¹²⁾. 최 외(1996)는 *Pseudomonas* sp. P2에 의한 PCBs 분해가 57.6%임을 보고하였다¹³⁾. 따라서 다른 연구와 비교시 본 연구에서 분리된 *Pseudoxanthomonas* 속의 균주가 PCBs의 분해효율이 우수함을 보이고 있다.

4. 결 론

준설퇴적토내의 난분해성 물질 중 PCBs에 대하여 생물학적 처리에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초기의 PCBs의 주입농도 1.6 ppm에서의 Aroclor 1260은 180일간의 집식배양에 의한 PCBs의 분해능을 보면, 120일간의 집식 배양에서는 약 50% 정도의 미생물 분해능을 보였으며, 120일 이후에는 PCBs의 분해능이 증가하였다. 또한, site에 따라 분해능에 차이를 보이는 하였지만, 반응 후의 전체적으로 PCBs 농도는 0.2-0.3

ppm으로 80-87%의 분해능을 보였다.

2) 0.7 ppm의 초기 주입농도로서 미생물 배양한 경우는 120일 경과 후에는 50%의 PCBs 분해능을 보이고 있지만, 180일 경과에서는 site 1과 2에서는 PCBs의 감소율이 약 57%정도로 낮았지만, site 3에서만 PCBs의 분해능이 71%로서 양호한 것으로 나타났다.

3) 미생물 집식배양에 의해 회수된 균주를 다시 PCBs의 분해능에 대한 실험을 한 결과를 보면, 초기농도 1.3ppm 주입의 경우, 7일 간의 lag phase 후, 12일간에 걸쳐 PCBs를 80%까지 분해하는 것으로 나타났지만, 초기 농도 120 ppb를 주입한 경우에는 8일간의 lag phase 이후, 8일간 약 60%만을 분해하였다. 따라서 미생물 집식 배양에 의한 PCBs 분해 균주를 우점종화 하는데는 긴 시간이 요구되지만, 우점종화된 미생물을 회수하여 대량의 PCBs 분해균주를 투여함으로써 lag phase에 log phase로 진행되는 시간을 매우 감소시킬 수 있지만, PCBs의 분해능을 증가시키기 위해서는 20일 이상의 미생물과의 접촉 시간이 필요한 것으로 나타났다.

4) 180일간에 미생물 순치배양 후, 순수분리에 의하여 우점화된 PCBs 분해 미생물을 동정한 결과, 2종 모두 *Pseudoxanthomonas* 속으로 나타났다.

사 사

본 연구는 건설교통부 2001년도 건설기술연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- USEPA, "Remediation of Contaminated Sediments", EPA 625/6-91/028 (1991).
- Deborah, D. R., Moody, J., and Cerniglia, C. E., "Utilization of mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria isolated from contaminated sediment", *FEMS Microbiology Ecology*, **41**, pp. 1-7 (2002).
- Cutter, L. A., Watts, J. E. M., Sowers, K. R., and May, H. D., "Identification of a microorganism that links its growth to the reductive dechlorination of 2,3,5,6-chlorobiphenyl", *Environmental Microbiology*, **3**(11), pp. 699-709 (2001).
- Tang, N. H., and Myers, T. E., "PCB removal from contaminated dredged material", *Chemosphere*, **46**, pp. 477-484 (2002).
- Lee, K. T., Tanaba, S., and Koh, C. H., "Contamination of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments from Kyeonggi Bay and Nearby Areas, Korea", *Marine Pollution*

- Bullatin*, Vol. 42, pp. 273-279 (2001).
6. Joeng, G. H., Kim, H. J., Joo, Y. J., Kim, Y. B., and So, H. Y., "Distribution characteristics of PCBs in the sediments of the lower Nakdong River, Korea", *Chemosphere*, **44**, pp. 1403-1411 (2001).
 7. Brown, T. A., "Gene cloning", 3rd edition, Chapman & Hall (1995).
 8. Erickson, M. D., "Analytical chemistry of PCBs", Lewis publishers. (1991).
 9. 유준, "황해연안환경의 유기염소계 화합물과 유기인계 농약의 분포에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문 (2002).
 10. Lee, D. S., Multimedia Fate Modelling of Persistent Organic Pollutants (POPs): Overview, presented at 2nd International Symposium "Environmental Risk Management for Bio/Eco Systems" on Water Pollution and Risk Management, Yokohama, Japan, Nov 28 (2003).
 11. Harkness, M. R., McDermott, J. B., and Abramowicz, D. A., "In situ stimulation of Aerobic PCB Biodegradation in Hudson River Sediments", *Science*, **259**(22), pp. 50-507 (1993).
 12. Tartakovsky, B., Michotte, A., and Cadieux, J-C. A., "Degradation of aroclor 1242 in a single-state coupled anaerobic/aerobic bioreactor", *Wat. Res.*, **35**(18), pp. 4323-4330 (2001).
 13. Choi, S. K., and Kim, J. H., "Effects of nutritional sources on degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) by *Pseudomonas* sp. P2", *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, **5**(5), pp. 611-617 (1996).