

보 문

## 생물증강법을 이용한 도심 오염 소하천의 친환경적 수질정화 및 악취제어

장재수<sup>1</sup> · 송지경<sup>1</sup> · 김인수<sup>1</sup> · 유장연<sup>2</sup> · 고성철<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양대학교 환경공학과, <sup>2</sup>한국해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

## Eco-friendly remediation and odor control of a contaminated urban stream using beneficial microorganisms

Jae-Soo Chang<sup>1</sup>, Jikyung Song<sup>1</sup>, In-Soo Kim<sup>1</sup>, Jangyeon Yoo<sup>2</sup>, and Sung-Cheol Koh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49112, Republic of Korea

(Received December 7, 2015; Accepted December 24, 2015)

**ABSTRACT:** Dongchun, one of the representative streams in urban area, is a downstream that is connected to Hogyechun, Bujeonchun, Jeonpochun, Danggamchun, and Gayachun as its upstream. Hogyechun has been mostly covered with concrete structures for decades, causing sewage pollution from the upstream, overflow of the downstream region and other serious pollution that gave rise to many civil complaints from the residents nearby. In this study, we analyzed 3 stations, including control station for water quality and malodor changes of Hogyechun after applying the microbial augmentation (BM-2) for a few months including the rainy season. Amounts (g/h) of DO in the middle site (Middle) and the downstream site (Borim) increased by 1.7 times compared with the upstream site (Chuhae) after augmentation for about 2 months. Amounts (g/h) of COD and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N decreased by 2 and 1.7 times, respectively, in the middle and downstream sites while SS increased by 7.5 and 22 times in the middle and downstream sites, respectively. Moreover, odor removal efficiencies at the middle and downstream sites were 65% and 19%, respectively, indicating the microbial activity in reduction of malodor in the polluted stream. The dominant microbial species of the sampling sites were *Hydrogenophaga caeni*, *Sphaerotilus natans*, *Acidovorax radialis*, *Acidovorax delafieldii*, and *Cloacibacterium rupense*. Densities of the two species *Sphaerotilus natans* and *Acidovorax delafieldii* were significantly increased in the middle site after augmentation which possessed potential odor removal and denitrification activity, respectively. Potential pathogens [e.g., *Arcobacter cryaerophilus*] were also removed from the middle site after the implementation.

**Key words:** beneficial microorganisms, contaminated stream, odor control, stream remediation, urban stream

하천의 정화의 원리는 기본적으로 물리적, 화학적 및 생물학적 정화원리가 적용되는 것으로서 물리적 기법은 침전, 여과 및 흡수작용으로 이루어지며, 화학적 기법은 주로 산화 환원 작용이 주된 과정이며, 생물학적 기법은 호기적 및 혐기적 미생물 및 기타 거대 생물(동물 및 식물 등)의 주로 오염물질로 된 기질의 산화 환원 작용에 의해 이루어진다. 하천의 정화기법은 인공 및 자연기법으로 이루어지는데 인공기법은 접촉제(자갈, 목탄 등)에 오염하천수를 침수 또는 여과시킴으로써 오염물질의 물리적 제거 및 생물화학적으로 분해 제거하는 방법

이다. 이 경우 인공구조물(플라스틱, 섬유 및 목탄 등의 여재)을 적극 활용한다. 또한 하천의 정화시설은 대상하천의 수질에 적합하고, 유지관리비가 적을 것 그리고 유수의 정상기능을 저해하지 않아야 한다.

폐기물로 생성되는 제철소 제강슬래그를 특수개질공정을 통해 새로운 응집처리제로 개발하고 이를 하천 및 호소수 처리에 적용하여 유기물, 고형물 뿐 만아니라 질소와 인 그리고 색도를 비교적 효율적으로 제거할 수 있는 것으로 나타났다 (Chang *et al.*, 2005). 그러나 이 경우 장기간의 사용으로 인한 효율의 감소 및 biofouling에 대한 검토가 없었다. 끈상접촉산화시설을 자연형하천의 수질정화에 활용하였으나 질소, 인의

\*For correspondence. E-mail: [skoh@kmou.ac.kr](mailto:skoh@kmou.ac.kr);  
Tel.: +82-51-410-4418; Fax: +82-51-410-4415

제거효과는 15~36% 정도로 비교적 낮게 나타났다(Chung and Im, 2006). 1950년대 이후로 국내·하천정화방법으로 다양한 방법이 연구개발 되었으며 미국 등 선진국에서는 주로 도시하천과 호수의 수질보전을 위해 인공습지를 활용하고 있으며, 특히 비점오염원의 관리, 하수처리시설의 기능향상에 중점을 두고 있다. Hunt 등(1999)은 North Carolina 연안에 In-stream wetland (ISW)를 설치하여 비점오염원으로 인해 오염된 하천의 질소를 저감시켰다. 근래에는 각각의 지상흐름 인공습지 및 지하흐름 인공습지를 연결한 형태로서 각각 설치된 인공습지에 비하여 소요부지와 질소제거 효율 면에서 더욱 효과적인 다단계방식의 인공습지에 대한 연구가 이루어지고 있으며 (Jung and Lin, 2004). 이는 제한된 공간을 이용하는 효율적인 방법이 될 수 있다.

근래에 들어 미생물제제를 이용한 생물학적 정화기술이 하천 정화의 대안이 될 수 있어 수로가 좁은 지형 등에 이를 적용하고 있다. 미생물 함유 티타늄 바이오볼을 이용하여 광촉매 및 생물막의 작용으로 오폐수, 하천수 및 수족관수의 정화에 활용하는 것으로 보고되고 있으나(Yang, 2003) 티타늄광촉매는 자외선의 작용이 상당히 필요한 점을 고려하면 자외선이 통과하기 어려운 수중의 유기물제거에는 어느 정도의 제한이 있을 수 있다. 바이오벤코리아주는 수중의 대부분 호기성 미생물 (*Bacillus* sp., *Rhizobium* sp., *Azospirillum* sp., *Flavobacterium* sp., *Streptomyces* sp. 및 *Penibacillus* sp.)을 조합해 제조한 복합 미생물 제제를 이용하여 수질개선용으로 사용하고 있으나 용도로 제시한 혐기적 조건에서의 처리는 한계가 있을 수 있다 (Biovankorea, 2010). 고효율의 질소제거능을 가진 수중의 광합성 박테리아(*Rhodobacter blasticus*, *Rhodobacter capsulatus*, *Rhodocycclus tenuis*, *Rhodomicrobium vannielii*, 및 *Rubrivivax gelatinosus*)를 세라믹담체에 부착, 성장시킨 후 실험실 수준 폭기식 접촉산화 반응조를 이용하여 하천수의 저농도의 암모니아성 질소를 82.8% 수준까지 제거가 가능하였다(Kim and Lee, 2010). 하지만 이 경우 저유기물 및 저질소의 하천현장에서 검증은 이루어지지 않은 상태이다. 오염하천의 질산화미생물의 생물증강법에 의한 정화사례를 보면(pilot scale의 생물학적 접촉산화지법) TN 및  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거율은 각각 50.3% 및 60.1%를 보였으며, 이 때 질산화 및 암모니아산화 미생물의 번성이 관찰되었다(Jiao et al., 2011). 도심지역 중소하천의 효율적인 수질정화를 위해 파일럿수준의 처리장치로서 가압 부상(Micro Bubble Process, MBP)공정과 관로형 미생물 부착(Attached Microbial Pipe System, AMPS)공정으로 구성하여 순환운전 결과 MBP 공정에 의해 최대 TSS 69.7%, T-P 70.1%의 처리효율을 나타냈으며, AMPS 공정에 의해 T-BOD5 제거

효율은 최대 68.5%를 나타내어 오염부하가 높은 하천의 수질 개선에 기여 할 수 있을 것으로 보고되었다(Kim et al., 2013). 이 경우 특수미생물의 생물증강법대신 현장하천의 토착미생물의 작용을 이용하였다.

도심의 오염된 하천에 유용미생물 제제(EM; effective micro-organisms)을 활용한 EM 흙공으로 그 정화를 시도한 바가 있으나(Koh and Ekpeghere, 2009), 객관적이고 과학적인 검증이 이루어지지 않았다. 한편 최근 Koh 등(2015)은 수백 종의 미생물이 서로 밀접한 관계로 성장된 특수혼합미생물제제 (BM-S-1)를 직접 투여하여 바닷물이 혼합된 인공해수천을 경제 및 환경친화적으로 정화한 바가 있다. 그러나 이러한 유사 제제를 이용하여 한 방향으로 흐르는 경사진 도심의 오염 하천을 경제적으로 정화한 경우는 거의 없는 실정이다. 부산광역시의 대표적 도심하천인 동천은 부산진구, 남구, 동구의 5개의 지천인 호계천, 부전천, 전포천, 당감천, 가야천과 함께 연결된 하류 하천으로 대부분이 복개가 되어 수십 년 동안 지속이 되어 오고 있으며, 상류의 생활오수오염, 하류의 하수의 월류 등으로 심각한 오염상태에 있어서 주위 거주자들의 심각한 민원을 야기하고 있다. 특히 호계천이 위치하고 있는 동구지역(안창마을)은 주거환경이 열악하여 부산광역시의 도시 재생 대상지역으로서 주민들이 하천환경 정화사업을 절실히 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 특수혼합미생물 제제 (BM-2)를 활용하여 도심의 대표적인 오염 소하천인 호계천을 경제적이고 환경친화적으로 악취저감 및 수질정화 방안을 도출하여 하천의 경제적이고 환경친화적 관리에 기여하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 조사정점 및 시기

본 연구는 호계천 수질에 대하여 장마철을 포함하여 수개월 동안에 걸쳐 선정된 대조군을 포함한 3개 지점에 대하여 미생물제제 투입 전후의 수질과 악취변화를 분석하였다.

이 조사는 상류(Chunhae), 중류(Middle) 및 하류(Borim)를 정하여 미생물제제 투입 전 후에 걸쳐 수 차례에 대해서 조사하였고, 미생물군집분석 대조군으로는 동천 상류지역에 해당하는 당감천 상류지점(Danggam)을 선정하여 분석하였다 (Table 1).

**Table 1.** Geographical location of the test sites (Hogyechun, Busan, South Korea) for monitoring of water quality, odor, and microbial communities

Station	Chunhae	Middle	Borim	Danggam*
Code	St.1	St.2	St.3	St.4
Latitude	35° 8'46.00"N	35° 8'35.90"N	35° 8'31.40"N	35° 10'15.01"N
Longitude	129° 2'36.22"E	129° 3'2.61"E	129° 3'24.51"E	129° 2'9.59"E

\*For microbial community analysis only

**Table 2.** Average width, depth, flow rate and flow volume in the three test sites of Hogyechun (Busan, South Korea)

	Chunhae	Middle	Borim
Average width (m)	1.74	1.40	1.95
Average depth (m)	0.012	0.030	0.090
Average flow rate (m/sec)	0.71	1.09	0.83
Average flow volume (m <sup>3</sup> /h)	53.37	164.81	521.24

### 혼합미생물제제(BM-2)의 현장배양 및 투여

포기장치가 장착이 된 5톤의 배양조를 상류지점(Chunhae)에 설치하였다. 분말성 미생물제제(BM-2) (“B” 회사 제품)를 1.4 kg을 취하여 당밀(0.3%) 및 염분(0.3%)이 함유된 배지(200 L)에서 7일간 상온(25°C 부근)에서 배양한 후 이 배양원액을 수돗물 4톤에 투여하여 포기조건에서 3일간 실온에서 활성화 시켰다(pH 4-4.5). 이후 배양액 전량을 약 4일에 걸쳐 투여하였으며(0.042 m<sup>3</sup>/시간) 이후 시료를 채취하여 수질의 이화화학적 분석과 필요할 경우 악취분석을 실시하였다. 제제 투입은 하계와 추계에 걸쳐(7/4-9/11, 2015) 상류지점에서 7-10일 간격으로 실시하였다.

### 조사 항목

수온, pH, 용존산소(DO) 등은 현장에서 미국 YSI 사의 YSI550A 및 YSI63을 이용하여 측정하였다. 부유물질(SS)은 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005)에 제시된 방법을 따라서 수행하였으며, 화학적산소요구량(COD), 총질소(T-N), 총인(T-P), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 및 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 측정은 Humas사의 전처리기기(HS-R200), 종합수질분석기(HS-3300) 및 각 해당 측정키트(즉순서로, HS-COD(Mn)-L, HS-TN-L, HS-TP-L, HS-NO2(N)-L, HS-NO3(N)-L, HS-PO4(P)-L)를 이용하였으며, 하천수의 복합악취측정은 악취공정시험기준(National Institute of Environment, 2007)의 공기희석관능법에 따라 냄새역치(threshold odor number; TON) 측정방법에 따라 실시하였다. 시료채취는 4개의 500 ml 부피의 암갈색 병에 200, 50, 12 및 2.8 ml의 시료를 취해서 담고 무취 정제수를 넣어 200 ml로 맞춘 후 마개로 막았다. 그리고 무취 정제수만 넣은 경우는 대조군으로 하였다.

### 하천의 기초환경 조사

시료 채취지점별 하천 폭 및 수심을 측정한 결과 상류지점(Chunhae)은 각각 평균 1.74 m 및 12 mm, 중류지점(Middle)은 각각 평균 1.4 m 및 30 mm, 그리고 하류지점(Borim)은 각각 1.95 m 및 90 mm로 나타났다. 한편 이러한 하천의 폭과 수심은 대체로 계절적으로 일중 시간적으로 변동을 보였다(Table 2). 그리고 유속은 상류지점과 하류지점이 각각 0.71 m/sec 및 0.83 m/sec으로 비슷한 수준이었고 중류지점은 약간 높은 수준(1.09 m/sec)이었다. 그리고 유량의 경우 상류지점(53.37 m<sup>3</sup>/h)에 비해 중류 및 하류가 각각 약 3.1배, 9.8배 정도로 높게 나타났다.

### 하천의 미생물군집분석

미생물제제(BM-2) 접종 최종 완료시점(9/11-15, 2015)에 호계천내의 지점(상류, 중류 및 하류)과 대조군으로 당감천 상류지점에서 슬러지 시료를 채취하였으며 이들의 총 DNA 추출은 Mobio Power Soil DNA Isolation Kit (MOBIO Laboratories Inc.)를 이용하여 실시하였다. 이후 군집분석은 이전의 연구(Kim *et al.*, 2012)의 방법에 준하여 16S rRNA gene-based pyrosequencing의 실시를 통해 이루어졌다. 우선 fusion primers를 이용하여 16S rRNA 유전자의 변이지역(V1-V3)이 증폭되었고(Hur *et al.*, 2011) 이후 DNA 증폭조건, library 제조, 염기서열분석 등은 이전의 연구(Chun *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012)에 사용된 454 GS FLX Junior Sequencing System (Roche)을 이용하여 실시하였다. 그리고 미생물의 군집자료분석은 Chun-Lab, Inc.의 홈페이지의 분석 소프트웨어(CLcommunity™ Software)를 활용하여 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 하천의 물리적 환경 조사분석

조사기간중 채취지점의 하천수 수온은 평균 상류지점(Chunhae)은 22.9°C, 중류지점(Middle)의 경우 23.5°C, 하류지점(Borim)의 경우 23.8°C로 나타났다. 상류지점에 비해 중류, 하류 지점이 평균 약 1°C 높은 것으로 나타났다. 미생물제제 처리 전의 경우 각 정점 평균 pH가 상류지점(Chunhae)은 7.1, 중류지점(Middle)의 경우 7.2, 하류지점(Borim)의 경우 6.8을 보였으며, 이후 장마철 기간을 포함하여 각 정점 평균 pH가 상류지점(Chunhae)은 7.2, 중류지점(Middle)의 경우 7.4, 하류지점(Borim)의 경우 7.5 범위에서 변화를 보였다. 따라서 이 기간의 경우 미생물제제 처리에 의한 pH의 일관성 있는 변화를 감지하기는 어려웠다. 한편 장마철 이후의 경우 모든 지점의 pH는 약 6.2-7.1 범위에서 나타났다(자료 미제시).

미생물제제 처리 전의 경우 전반적으로 DO가 약 3-5 mg/L 부근의 범위에서 나타났으나, 이후 처리가 진행된 장마철의 경우 약 1-5 mg/L 부근의 범위에서 나타났으며 장마철 이후는 약 3-8 mg/L를 보였다(Fig. 1의 수직 화살표로 표시된 7/9-7/15 기간). 우기일 때 북개가 안된 부분이 있는 중류지점이 다소 높게 나타났으며, 이는 중류지점에서의 호기성 미생물(접종된 BM-2 균주 포함)의 작용이 기대되었다

### 미생물처리 전후 하천의 화학적 환경 조사분석

미생물제제 처리 전의 경우(5/29-7/1) 각 정점 평균 COD가 상류지점(Chunhae)은 25.5 mg/L, 중류지점(Middle)의 경우 34.0 mg/L, 하류지점(Borim)의 경우 29.0 mg/L을 보였으며, 처리 2개월 후 장마철 기간을 포함하여 각 정점 평균 COD가

상류지점(Chunhae)은 18.7 mg/L, 중류지점(Middle)의 경우 14.3 mg/L, 하류지점(Borim)의 경우 12.5 mg/L 범위로 변화를 보였다(Fig. 2). 따라서 미생물의 접종이 시작되어 그 작용을 무시할 수 있는 상류에 비해 제제로 처리한 중류 및 하류의 COD의 농도변화는 각각 57% 및 56%의 감소를 보였다. 전반적으로 7월 13일경까지 주로 장마의 영향으로 2-16 mg/L 범위로 감소를 보였으며, 7월 15일부터 7월 28일의 기간에는 다시 증가하는 경향을 보였다. 그리고 장마 이후의 경우는 약 2-28 mg/L의 범위를 보였다.

한편 오염물질 총량[시간당 유량(m<sup>3</sup>) × 오염물질의 농도]에 기초하고 제제처리전 3개 시점(5월 29일, 6월 26일 및 7월 1일)의 DO 및 오염물질별 단위시간당 평균총량을 기준으로 하고 처리 후의 모든 시점(7/7-9/11)의 단위시간당 평균총량을 계산하여, 제제처리 전후의 DO 및 오염물질별 제거효율을 Fig. 3에 나타내었다. 용존산소의 경우는 중류 및 하류의 경우 상류에 비해서 1.7배 정도의 높은 농도를 나타내었다. COD의 경우는 중류 및 하류에 있어서 가장 높은 제거효율을 보여 상류에 비해 약 2배의 제거효율을 보였다(약 60%에 육박). 이는 처리미생물제제의 작용으로 인한 유기물의 분해와 흐르는 하천수의 대기접촉 증가로 인한 용존산소의 상승에 기인한다고 볼 수 있다. T-N은 하류에서 약간강도(13%) 축적되었으나 상류 및 중류에서는 거의 처리전후에 변화가 없었다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N의 경우 상, 중, 하류에서 유사한 제거 및 축적 양상(중류에서 축적, 그 외는 제거)을 보였다. 이는 질산화미생물에 의한 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N의 생성은 암모니아의 생성과 연계가 되어 있기 때문으로 판단된다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 경우는 중, 하류에서 약 40%의 제거율을 보였으며 중, 하류에 존재하는 탈질미생물(Comamonadaceae; *Acidovorax delafieldii*; 미생물군집분석부분 참조)

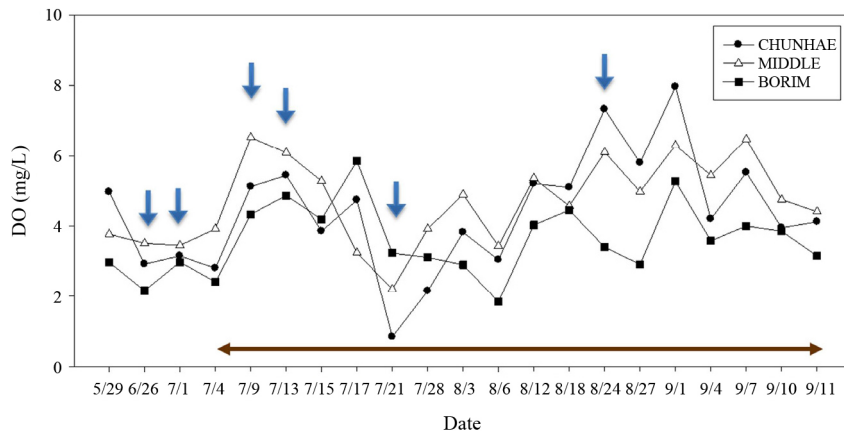


Fig. 1. Changes of dissolved oxygen (DO) at the three different sites of Hogyechun during the monitoring period. Blue vertical arrows indicate occurrences of heavy rainfall and dark brown horizontal arrow indicates bioaugmentation period.

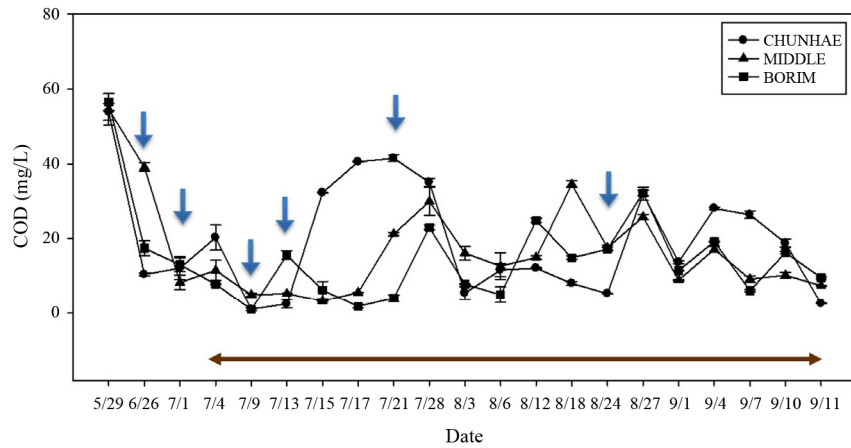


Fig. 2. Changes of chemical oxygen demand (COD) at the three different sites of Hogyechun during the monitoring period. Blue vertical arrows indicate heavy occurrences of rainfalls and dark brown horizontal arrow indicates bioaugmentation period.

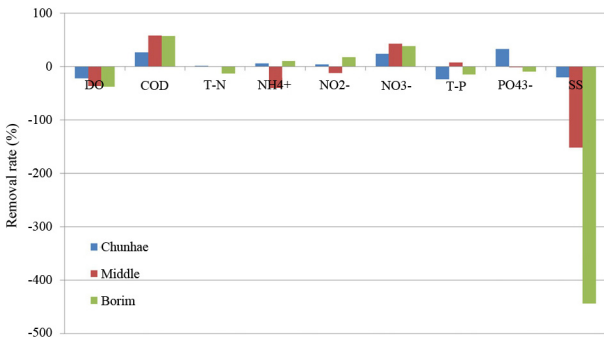


Fig. 3. Removal efficiencies of various physicochemical water quality parameters after bioaugmentation of the microbial agent BM-2 at the three different sites of Hogyechun.

의 작용에 기인하는 것으로 판단된다. T-P의 경우는 상, 하류에서 축적(각각 24, 15%), 중류에서 7.6% 정도 제거되는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 DO가 낮은 상류에서 무기인의 방출이 일어나고 상대적으로 DO가 높은 중류에서는 인의 흡수가 일어나기 때문으로 추측된다.  $PO_4^{3-}$ -P의 경우는 상류에서 32% 제거, 하류에서 10% 정도 축적되는 것으로 나타났다. 또한 부유물질(suspended solids; SS)의 총량변화는 미생물제제의 영향을 받지 않은 상류의 경우는 20%의 축적효과가 일어난 반면 중류 및 하류로 갈수록 각각 152% 및 444% 가량 현저히 증가하는 경향을 보였다. 이는 제제처리에 의한 하천의 기질(바닥, 자갈 및 기타 고형물체)에 부착서식하는 미생물막의 탈리가 중, 하류로 갈수록 증가하여 SS의 증가에 기여한 것으로 관찰, 분석되었다.

### 미생물제제처리 전후 하천의 복합악취 조사분석

오염하천수에서 발생하는 악취의 변화는 장마철이 지난 기

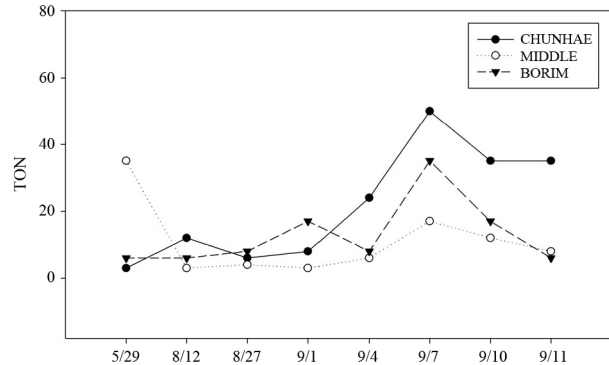


Fig. 4. Changes of threshold odor number (TON) at the three different sites of Hogyechun during the monitoring period.

간 동안(8월 중순-9월 중순) 냄새역치(threshold odor number; TON) 측정을 통하여 모니터링 하였다(Fig. 4). 여기서 제제처리 전에 비해 제제처리 후 상류지점(Chunhae)의 악취에 비해 중류지점(Middle)의 악취감소가 평균 약 65% 정도 감소가 나타났으며, 하류지점(Borim)의 악취감소는 평균 약 19% 정도 감소하였다. 따라서 미생물제제처리에 의한 악취저감이 현저함을 알 수 있었다. 즉, 미생물제제가 투입되기 전에는 미생물 투입 지점 이후 구간인 중류지점부터 하류지점 사이의 복개된 구간의 환기구 겸용 우수 유입구를 통해 악취가 심하였으나, 미생물제제 투입 시점 이후의 경우에는 악취 발생 강도가 현저하게 저하되었다(본 연구팀의 미발표 자료).

### 미생물제제처리 전후 하천의 미생물군집변화 분석

약 2개월간의 미생물접종(bioaugmentation) 완료 후(9/11) 문(phylum) 및 종(species) 수준에서 상류(Chunhae), 중류(Middle) 및 하류(Borim)의 미생물 군집분석을 실시하였다. 여

기서 대조구로 부산지역의 다른 하천인 당감천 상류(Danggam) 지점도 포함하였다. 우선 문수준에서는 전반적으로 Proteobacteria (61–85%) 및 Bacteroidetes (13–36%)가 대부분을 차지하였으며 Firmicutes는 5% 이하로 나타났고, SR1 (비명명의 문으로서 deep-branching bacterial phylum에 속함)은 0.5% 이하의 매우 낮은 분포를 보였다(Fig. 5). 미생물처리의 가장 직접적인 영향을 받은 중류에서는 약 3%의 Proteobacteria가 증가한 반면에 약 4%의 Bacteroidetes가 감소한 것으로 나타났다. 이는 본 연구팀의 이전의 결과(Kim et al., 2013, 2014)와 유사한 경향을 보이고 있다. 한편 미생물처리의 직접적인 영향을 미약하게 받은 하류에서는 대조군으로 관찰된 Danggam과 유사한 수준의 Proteobacteria (61%) 및 Bacteroidetes (36%) 군집패턴을 보이고 있으며 Bacteroidetes (36%)는 다른 모든 지점에 비해서 높게 나타나는 경향을 보였다.

종(Species)수준에서는 전반적으로 *Hydrogenophaga caeni*, *Sphaerotilus natans*, *Acidovorax radialis*, *Acidovorax delafieldii* 및 *Cloacibacterium rupense*가 상위우점종으로 나타났다(Fig. 6). *Hydrogenophaga caeni*는 호계천에서 압도적인 출현빈도를 보여 Chunhae (52%), Middle (20%) 및 Borim (15%)의 순으로 높게 나타났으나, 대조구인 Danggam (3.8%)의 경우는 상대적으로 낮았다. 이 종은 Comamonadaceae과에 속하는 조건적 혐기성미생물이며 활성슬러지에 존재하며 인을 축적하는 것으로 알려져 있다(Chung et al., 2007). 중류, 하류로 갈수록 현저히 이 종의 밀도가 낮아지는 것은 DO의 증가로 인한 혐기성 환경의 상대적 파괴로 잔류 사용기질인 유기물이나 가용수소의 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 최근 염색폐수에서 분리된 호기성의 *Hydrogenophaga* sp. Strain PBC는 4-aminobenzenesulfonate를 효율적으로 분해하는 것으로 알

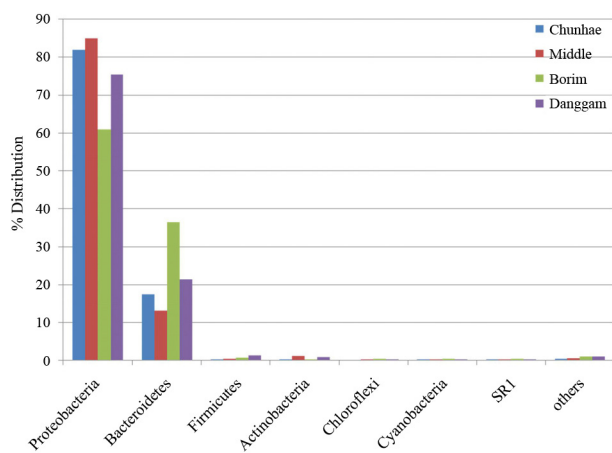


Fig. 5. Phylum microbial community structures at the three different sites of Hogecheon after completion of the bioaugmentation.

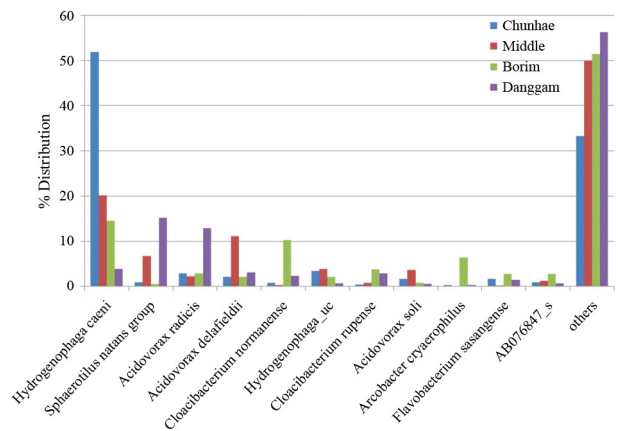


Fig. 6. Species microbial community structures at the three different sites of Hogecheon after completion of the bioaugmentation.

려지고 있다(Gan et al., 2012). 한편 *Hydrogenophaga\_uc*는 미분류 종(unclassified species)를 의미하며 AB076847\_s는 미분류 종 및 속으로서 Comamonadaceae과에 속하는 것으로 나타났다. *Sphaerotilus natans*는 beta-Proteobacteria의 Comamonadaceae에 속하며, 주로 흐르는 물, 오수 및 활성슬러지에 흔히 존재한다(Pellegrin et al., 1999). 특히 이들은 sheath로 둘러싸인 filament 구조의 세포로 되어 있고 그 한쪽 말단부에 정착질의 물질이 있어서 고체의 표면에 부착하여 흐르는 물에 용이하게 성장한다(Mulder and Deinema, 1992). 특히 이 종은 악취성분인 황화수소(H<sub>2</sub>S)(Belousova et al., 2013) 및 암모니아(van Veen et al., 1978) 대사시스템을 가지고 있어서 혐기성 상태에서 이 악취성분들을 제거한 것으로 사료된다. *Acidovorax radialis*는 Chunhae에 비해서 Danggam에서 4배 정도 높게 나타났으나 *Acidovorax delafieldii*는 오히려 Middle의 경우가 Chunhae 및 Danggam에 비해 약 4배 이상 정도 높게 나타났으므로 *Acidovorax delafieldii*는 하천의 지역적 특이성을 보이는 것으로 판단된다. 또한 이종은 악취를 제거하는 것으로 보고되고 있으며(le Roux et al., 2010), 탈질에 관여하는 것으로 알려지고 있다(Ehsani et al., 2015). 이들 모두 Comamonadaceae과에 속하는 호기성세균이며 전자는 최근 밀의 뿌리에 서식하면서 이의 성장을 촉진하는 것으로 보고되고 있다(Li et al., 2011). 후자는 절대적 호기성이며, 토양 및 수질환경 시료 그리고 병원시료(Willems et al., 1990)에서 분리된 바가 있고, 또한 상수시스템의 구리로 된 배관을 부식시킬 수 있는 것으로 보고되었다(Davidson et al., 1996). *Cloacibacterium normanense*는 호계천 상류 및 중류에 비해 하류에서 약 20배 정도 높게 나타났으며 대조군에 비해 약 5배 정도 높게 나타난 것으로 보아 하천과 하천내의 지역적 특이성을 보였다.

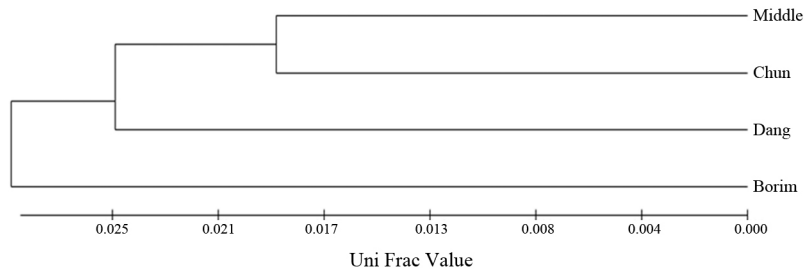


Fig. 7. Fast Uni Frac cluster analysis of microbial communities at the three different sites of Hogecheon after completion of the bioaugmentation. Samples names “Chun” and “Dang” indicate Chunhae and Danggam, respectively.

*Cloacibacterium normanense*는 조건적 혐기성균으로 도시의 생하수(raw sewage)에서 분리된 바가 있다(Allen *et al.*, 2006). 또한 최근에 이 종과 근연관계에 있는 *Cloacibacterium rupense* 가 Nepal의 Rupa Lake의 퇴적물에서 분리된 바가 있다(Cao *et al.*, 2010). Campylobacteraceae과에 속하는 *Arcobacter cryaerophilus*는 Chunhae 및 Danggam에서 공히 0.26% 존재하였으나 중류에서는 전혀 관찰되지 않았고 하류(6.4%)에서는 다시 25배 정도 다시 증가하는 현상을 보였다. 이는 미생물제제의 처리영향을 직접 가장 많이 받는 Middle에서는 성장하지 못함을 의미하므로 일종의 제제처리효과의 지표종으로 판단된다. 이 현상은 본 연구팀의 이전에 실시한 하수처리장의 생물증강실험에서도 관찰이 된 바가 있다(자료 미제시). *Arcobacter cryaerophilus*는 최근 인간의 설사(diarrhoea) 및 균혈증(bacteraemia)을 일으키는 병원균으로 알려지고 있다(Figueras *et al.*, 2014). 더구나 대장균의 분석 결과 Chunhae에 비해 Middle에서 33% 제거되는 효과가 나타나고(자료 미제시) 있는 것으로 보아서 본 제제는 하수에 처리시 병원성미생물의 성장억제효과도 보이는 것으로 판단된다.

한편 출현미생물군집자료에 기반하여 시료채취지점의 Fast Uni Frac 기법(Hamady *et al.*, 2010) 이용 집괴분석(cluster analysis)을 실시한 결과(Fig. 7) Chunhae 및 Middle은 가장 서로 유사한 그룹으로 나타났고 다음으로 이들은 대조구인 Danggam과 유사한 그룹에 형성이 되었다. 한편 Borim은 나머지 모든 지점과 상이한 그룹을 형성하였다. 이는 지리적 위치가 다른 하천이라 하더라도 비슷한 생활오수에 의한 영향을 지속적으로 받으면 미생물군집구조는 유사한 유형을 보임을 의미하며, 또한 하천주위의 생활환경차이에 의한 오염물질 종류 및 정도에 따라서 같은 하천내에서 서로 다른 미생물군집 구조를 형성할 수 있음을 의미한다.

## 결론

본 연구에서는 동천의 하류와 연결된 호계천의 수질환경현황 및 문제점을 분석하여 하천의 실태를 파악하고, 수질 및 악취를 비롯하여 병원미생물제거를 위한 친환경적이며 가장 경제적인 하천관리방안을 제시하고자 하였다. 활성화된 미생물제제는 0.042 m<sup>3</sup>/h의 속도로 4일간 지속적으로 유지하여 처리하였고 약 2개월에 걸쳐 7-10일 간격으로 실시하였다. 주요 하천수질의 물리화적요인을 시간당 총량변화를 조사한 결과 상류에 비해서 중류 및 하류는 DO는 1.7배 정도의 높은 농도를, COD는 2배의 제거효율을, NO<sub>3</sub>-N는 1.7배 이상의 제거효율을 보였으며, SS는 미생물제제의 작용으로 중류 및 하류에서 하천생물막의 탈리로 인해 상류에 비해 각각 7.5배 및 22배 증가하는 경향을 보였다. 한편 제제처리 전에 비해 제제처리 후 상류지점의 악취에 비해 중류지점의 악취감소가 평균 약 65% 정도 감소가 나타났으며, 하류지점의 악취감소는 평균 약 19% 정도 감소하였다. 따라서 미생물제제처리에 의한 악취저감이 현저함을 알 수 있었다. 미생물군집의 종(Species) 수준에서는 전반적으로 *Hydrogenophaga caeni*, *Sphaerotilus natans*, *Acidovorax radialis*, *Acidovorax delafieldii* 및 *Cloacibacterium rupense*이 상위 우점종으로 나타났으며 병원균인 *Arcobacter cryaerophilus*는 제제처리 후 중류에서는 제거되는 효과를 보였다. Fast Uni Frac 기법 이용 집괴분석(cluster analysis)을 실시한 결과 호계천 상류지점(Chunhae) 및 제제처리의 효과가 직접적으로 인정되는 중류지점(Middle)은 가장 서로 유사한 그룹으로 나타난 것과 중류지점에서의 악취제거 효과가 가장 양호한 것을 볼 때 제제처리의 효과가 어느 정도 인정이 되는 것으로 판단된다.

## 적요

본 연구에서는 동천의 하류와 연결된 호계천의 수질환경현

항 및 문제점을 분석하여 하천의 실태를 파악하고, 수질 및 악취를 비롯하여 병원미생물제거를 위한 친환경적이며 가장 경제적인 방안을 제시하고자 하였다. 조사 정점은 부산시 동구 범일동 호계천 수질에 대하여 장마철을 포함하여 지난 수개월 동안에 걸쳐 선정된 3개 정점에 대하여 미생물제제의 투입 전 후의 수질과 악취변화를 분석하였다. 활성화된 미생물제제는 0.042 m<sup>3</sup>/시간의 속도로 4일간 지속적으로 유지하여 처리하였고 약 2개월에 걸쳐 7-10일 간격으로 실시하였다. 제제처리 전후의 DO 및 오염물질별 단위시간당 평균총량을 계산하여, 제제처리 전후의 DO 및 오염물질별 제거효율을 분석한 결과 용존산소는 중류 및 하류의 경우 상류(대조군)에 비해서 1.7배 정도의 높은 농도를 나타내었다. 이는 하천의 정화작용으로 인해 회복이 됨을 의미한다. COD의 경우는 중류 및 하류에 있어서 가장 높은 제거효율을 보여 대조군에 비해 약 2배의 제거효율을 보였다(약 60%에 육박).

그리고 제제처리 전에 비해 제제처리 후 상류지점의 악취에 비해 중류지점의 악취감소가 평균 약 65% 정도 감소가 나타났으며, 하류지점의 악취감소는 평균 약 19% 정도 감소하였다. 따라서 미생물제제처리에 의한 악취저감이 현저함을 알 수 있었다. 미생물군집의 종(Species) 수준에서는 전반적으로 *Hydrogenophaga caeni*, *Sphaerotilus natans*, *Acidovorax radialis*, *Acidovorax delafieldii* 및 *Cloacibacterium rupense*이 상위우점종으로 나타났으며 병원균인 *Arcobacter cryaerophilus*는 제제처리 후 중류에서는 제거되는 효과를 보였다.

## 감사의 말

본 연구는 부산녹색환경지원센터의 2015년도 환경현안조사연구사업 연구비 및 한국해양대학교 교내연구비지원으로 수행이 되었으므로 이에 감사드립니다. 또한 미생물제제를 공급한 ㈜바요에 감사드립니다.

## References

- Allen, T.D., Lawson, P.A., Collins, M.D., Falsen, E., and Tanner, R.S. 2006. *Cloacibacterium normanense* gen. nov., sp. nov., a novel bacterium in the family Flavobacteriaceae isolated from municipal wastewater. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **56**, 1311-1316.
- American Public Health Association (APHA). 2005. American Water Works Association, Water Environment Federation. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st Ed.; Authors: Washington, DC, USA.
- Belousova, E.V., Chemousova, E.Y., Dubinina, G.A., Tourova, T.P., and Grabovich, M.Y. 2013. Detection and analysis of sulfur metabolism genes in *Sphaerotilus natans* subsp. *sulfidivorans* representatives. *Microbiology* **82**, 586-593.
- Biovankorea. 2010. Microbial agent effective in wastewater treatment and its manufacturing methods and wastewater treatment technology. *Korea Patent*. No. 10-2010-0089906
- Cao, S.J., Deng, C.P., Li, B.Z., Dong, X.Q., and Yuan, H.L. 2010. *Cloacibacterium rupense* sp. nov., isolated from freshwater lake sediment. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **60**, 2023-2026.
- Chang, W.S., Park, J.S., Son, S.H., and Lee, W.S. 2005. Development of polluted streams treatment technology with rapid purification coagulant using reformed steel slag by SAP method 2005 Proceed. 2005 Fall Joint Conference of Korea Drinking Water and Wastewater Society and Korea Water Environment Society, Gwangju.
- Chun, J., Kim, K.Y., Lee, J.H., and Choi, Y. 2010. The analysis of oral microbial communities of wild-type and toll-like receptor 2-deficient mice using a 454 GS FLX titanium pyrosequencer. *BMC Microbiol.* **10**, 101.
- Chung, Y.J. and Im, K.S. 2006. Purification of stream water quality by using rope media filter. *J. Korean Soc. Water Quality* **22**, 238-243.
- Chung, B.S., Ryu, S.H., Park, M., Jeon, Y., Chung, Y.R., and Jeon, C.O. 2007. *Hydrogenophaga caeni* sp. nov., isolated from activated sludge *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **57**, 1126-1130.
- Davidson, D., Beheshti, B., and Mittelman, M.W. 1996. Effects of *Arthrobacter* sp., *Acidovorax delafieldii*, and *Bacillus megaterium* colonisation on copper solvency in a laboratory reactor. *J. Bioadhesion Biofilm Res.* **9**, 279-292.
- Ehsani, E., Jauregui, R., Geffers, R., Jarek, M., Boon, N., Pieper, D.H., and Vilchez-Vargas, R. 2015. First draft genome sequence of the *Acidovorax caeni* sp. nov. type strain R-24608 (DSM 19327). *Genome Announc.* **3**, e01378-15.
- Figueras, M.J., Levican, A., Pujol, I., Ballester, F., Rabada Quilez, M.J., and Gomez-Bertomeu, F. 2014. A severe case of persistent diarrhoea associated with *Arcobacter cryaerophilus* but attributed to *Campylobacter* sp. and a review of the clinical incidence of *Arcobacter* spp. *New Microbes New Infect.* **2**, 31-37.
- Gan, H.M., Chew, T.H., Tay, Y.L., Lye, S.F., and Yahyac, A. 2012. Genome sequence of *Hydrogenophaga* sp. strain PBC, a 4-aminobenzenesulfonate-degrading bacterium. *J. Bacteriol.* **194**, 4759-4760.
- Hamady, M., Lozupone, C., and Knight, R. 2010. Fast Uni Frac: Facilitating high-throughput phylogenetic analyses of microbial communities including analysis of pyrosequencing and Phylo Chip data. *ISME J.* **4**, 17-27.
- Hunt, P.G., Stone, K.C., Humenik, F.J., Matheny, T.A., and Johnson, M.H. 1999. In-stream wetland mitigation of nitrogen contamination in a USA coastal plain stream. *J. Environ. Quality* **28**, 249-256.



- Hur, M., Kim, Y., Song, H.R., Kim, J.M., Choi, Y.I., and Yi, H.** 2011. Effect of genetically modified poplars on soil microbial communities during the phytoremediation of waste mine tailings. *Appl. Environ. Microbiol.* **77**, 7611–7619.
- Jiao, Y., Zhao, Q., Jin, W., Hao, X., and You, S.** 2011. Bioaugmentation of a biological contact oxidation ditch with indigenous nitrifying bacteria for *in situ* remediation of nitrogen-rich stream water. *J. Bioresour. Technol.* **102**, 990–995.
- Jung, S.R. and Lin, Y.F.** 2004. Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river water in southern Taiwan. *Environ. Poll.* **127**, 291–301.
- Kim, M.K., Choi, J.S., Kim, S.J., and Kim, H.G.** 2013. Improvement of medium and small urban stream water quality and applicability of design factor using biological and physicochemical processing. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* **35**, 509–517.
- Kim, I.S., Ekpeghere, K.I., Ha, S.Y., Kim, S.H., Kim, B.S., Song, B., Chun, J., Chang, J.S., Kim, H.G., and Koh, S.C.** 2013. An eco-friendly treatment of tannery wastewater using bioaugmentation with a novel microbial consortium. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* **48**, 1732–1739.
- Kim, I.S., Ekpeghere, K.I., Ha, S.Y., Kim, B.S., Song, B., Chun, J., Kim, J.T., Kim, H.G., and Koh, S.C.** 2014. Full-scale biological treatment of tannery wastewater using the novel microbial consortium BM-S-1. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* **49**, 355–364.
- Kim, B.S., Kim, J.N., Yoon, S.H., Chun, J., and Cerniglia, C.E.** 2012. Impact of enrofloxacin on the human intestinal microbiota revealed by comparative molecular analysis. *Anaerobe* **18**, 310–320.
- Kim, S.J. and Lee, S.S.** 2010. The development of treatment system for removing the low concentrated nitrogen and phosphorus using phototrophic bacteria and media. *Korean J. Microbiol.* **46**, 27–32.
- Koh, S.C. and Ekpeghere, K.I.** 2009. Remediation and improvement of contaminated coastal sediment using EM mud balls. *Res. Report Coastal Environ.* **8**, 135–159.
- Koh, S.C., Kim, I.S., Ekpeghere, K.I., Ha, S.Y., and Kim, S.H.** 2015. Eco-friendly restoration of constructed sea stream in Yeongdo innovation complex. In Preparation.
- Li, D., Rothballer, M., Schmid, M., Esperschütz, J., and Hartmann, A.** 2011. *Acidovorax radiceis* sp. nov., a wheat-root-colonizing bacterium. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **61**, 2589–2594.
- Mulder, E.G. and Deinema, M.H.** 1992. The sheathed bacteria. In Balows, A., Trüper, H.G., Dworkin, M., Harder, W., and Schleifer, K.H. (eds.). *The prokaryotes*, pp. 2612–2624. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- National Institute of Environment.** 2007. Official Methods of Odor Analysis.
- Pellegrin, V., Juretschko, S., Wagner, M., and Cottenceau, G.** 1999. Morphological and biochemical properties of a *Sphaerotilus* sp. isolated from paper mill slimes. *Appl. Environ. Microbiol.* **65**, 156–162.
- le Roux, L.D., Johnson, M.E., Jason So, M., and de los Reyes, F.L.** 2010. Use of molecular tools to identify microbial communities in a full scale biotrickling filter treating odors from a municipal WWTP. *Proceed. Water Environ. Federation* **3**, 855–863.
- van Veen, W.L., Mulder, E.G., and Deinema, M.H.** 1978. The *Sphaerotilus-Leptothrix* group of bacteria. *Microbiol. Rev.* **42**, 329–356.
- Willems, A., Falsen, E., Pot, B., Jantzen, E., Hoste, B., Vandamme, P., Gillis, M., Kersters, K., and De, L.J.** 1990. *Acidovorax*, a new genus for *Pseudomonas facilis*, *Pseudomonas delafieldii*, E. Falsen (EF) group 13, EF group 16, and several clinical isolates, with the species *Acidovorax facilis* comb. nov., *Acidovorax delafieldii* comb. nov., and *Acidovorax temperans* sp. nov. *Int. J. Syst. Bacteriol.* **40**, 384–398.
- Yang, K.H.** 2003. Water treatment system using titanium bioball. Korea Patent. No. 10-2003-0102359.