

생물활성탄을 이용한 절삭유로 오염된 지하수의 처리특성과 미생물군집구조 해석

임병란[†] · 배시애* · 임호주** · 조창호***

명지대학교 환경생명공학부 & 산업기술연구소, *신흥대학 보건위생학과, **가톨릭대학교 의과대학,
***서울산업대학교 환경공학과

Treatment Performance and Microbial Community Structure in BAC-process Treating Contaminated Groundwater by Water-soluble Cutting Oil

Byung-Ran Lim[†] · Bae Ci Ae* · Ho-Ju Lim** · Chang-Ho Cho***

Division of Environmental Eng. and Biotechnology & Institute for Industrial Technology, Myoungji University

*Dept. of Health and Hygiene, Shinheung College

**Dept. of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea

***Dept. of Environmental Engineering, Seoul National University of Technology

(Received November 15, 2005/Accepted January 10, 2006)

ABSTRACT

Treatment performance and microbial community structure were investigated in water-soluble cutting oil treatment process using biological activated carbon. DOC removal in BAC1 column at 15°C was higher than at 25°C, but those of BAC3 column after 60days was high at 25°C. Also, quinone content of first-step reactors at 25°C and 15°C was much the same, but those of the third-step reactor at 25°C was higher than at 15°C. The dominant type of two apparatus was ubiquinone (UQ)-10 followed by UQ-8. Menaquinones were detected from 25°C apparatus and effluent. This suggested that DOC removal at 25°C was advanced degradation by attached microorganisms on the activated carbon surface. The DOC removal in long-term activated carbon apparatus increased with going in BAC3 column. This indicated the influent of POC was a result of DOC removal efficiency decrease. Integrated DOC removal from start point in experiment to break point and quinone content were showed a tendency of increasing with going last-step activated carbon apparatus. Therefore, the biological activated carbon apparatus used by this study was effective treatment process in contaminated groundwater by water-soluble cutting oil.

Keywords: biological activated carbon, cutting oil, microbial community structure, quinone profile

I. 서 론

금속기계가공공장에서 폐 수용성 절삭유, 연제유의 누출이라든지 식품공장에서의 유분함유폐수의 유출 등에 의하여 하천 및 지하수에 유입될 경우 소량이라도 식수원의 수질에 심각한 영향을 미치게 된다. 특히 금속가공공정에 사용되는 유제는 사용하는 목적에 따라 매

우 다양하나 크게 수용성과 비수용성으로 구분되며, 수용성 절삭유는 광유 및 지방유와 같은 기유(base oil)와 계면활성제의 함유량에 따라 에멀전유, 반합성유, 합성유로 구분된다. 이러한 폐 절삭유는 별도의 처리가 필요한 산업폐기물로 분류되어 수질오염 방지법이나 하수도법에 의한 엄격한 규제를 받고 있기 때문에 침강, 부상분리 및 여과분리 등의 물리적 처리나 응집, 산화환원, 활성탄 흡착 등의 화학적 처리 그리고 유기아민, 비이온성 계면활성제, 다가 알코올류 등의 제거를 위한 생물처리를 거쳐 방류해야 하는 현실적인 문제점이 있다.^{1,2)} 그러므로 양질의 지표수원의 확보가 어려운 지역에서의 지하수는 중요한 수자원이기도 하며, 지하

[†]Corresponding author : Division of Environmental Eng. and Biotechnology & Institute for Industrial Technology, Myoungji University
Tel: 82-31-330-6820, Fax: 82-31-336-6336
E-mail: limbr@mju.ac.kr, limbr@hotmail.com

수에 대한 용수로서의 의존도는 더욱 증가할 것으로 예상되므로, 깨끗한 지하수의 보존을 위한 노력과 함께 오염된 지하수를 경제적으로 처리할 수 있는 기술 확보가 매우 중요한 과제라 할 수 있다.³⁾

최근 용존 유기물을 제거하여 음용수의 수질을 향상시키는 기술로서 고도처리방법 중 생물활성탄 공정이 전 세계에 널리 알려져 있다. 이 방법은 입상활성탄 (granular activated carbon: GAC) 공정에서 GAC 파괴점을 지나 지속적으로 운전한 결과, GAC 표면에 부착된 미생물의 응집체(aggregation)에 의한 생물학적 분해 작용으로 인하여 용존 유기탄소가 제거된다는 보고가 알려져 있다.⁴⁻⁷⁾ BAC 공정에 있어서 유기물의 초기 흡착능과 운전기간이 경과함에 따라 생분해능의 증가 등을 파악하는 것은 중요하다. 그러나 활성탄 표면에 부착 성장한 미생물의 활성을 측정하는 방법 중에는 산소소비량 또는 DOC 제거율 등을 이용하여 간접적으로 측정하거나 또는 acridine orange, DAPI 등 미생물을 염색하여 직접계수 및 세포 균체량을 측정하여 왔으나,^{8,9)} 반응조 내에서의 미생물의 군집구조 변화에 대하여 조사한 연구는 거의 없는 실정이다. 상기의 방법으로는 반응조내의 미생물군집의 변화를 결정하기에는 어렵기 때문에 본 연구에서는 활성탄표면에 부착 성장하는 미생물의 양 및 군집구조를 파악하기 위하여 Biomarker중에 하나인 quinone profile 법을 이용하였다.

퀴논(Quinone)이란 호흡쇄 및 광합성전자전달물질이며, 미생물의 세포벽에 존재하고 있으며, 호기 및 혐기 호흡 또는 광합성에 의해 에너지를 얻는 미생물에 존재한다. 퀴논은 주로 유비퀴논(ubiquinone: UQ), 메나퀴논(menaquinone: MK), 비타민(Vitamin) K1(VK1) 및 플라스토퀴논(plastoquinone: PQ)이 있으며, isoprenoid 측쇄의 길이에 따라서 각각 UQ-n(Hx), MK-n(Hx) 및 PQ-n으로 표시된다. Quinone profile은 혼합액내의 각 퀴논을 몰비로서 정의되며, 미생물군집구조의 변화의 지표를 나타내는데 사용할 수 있다. 최근 퀴논프로파일(Quinone profile)법을 이용하여 활성슬러지공정이나 토양 등의 미생물군집구조를 파악한 연구가 많이 보고되고 있다.¹⁰⁻¹⁴⁾

따라서 본 연구에서는 지하수의 오염원인 수용성 질산염의 처리방법으로서 기존의 부상분리 등의 방법으로 처리가 어려우므로 활성탄 단독처리방법과 활성탄 표면에 부착한 미생물에 의한 처리촉진효과에 대해서 장기간의 연속처리실험을 통하여 처리특성을 검토하였다. 또한 퀴논 분석을 통하여 온도변화에 따른 활성탄 표면에 부착 성장하는 미생물의 군집구조를 해석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 유입원수의 성상

본 연구에서는 수용성 질산염이 지하수를 오염시켰을 때를 가정하여, 오염되지 않은 지하수에 수용성 질산염을 첨가하여 활성탄처리 실험의 유입원수로 사용하였다. 유입원수는 오염되지 않은 지하수에 폐 질산염을 첨가하여 Homogenizer로 분산 후 부상유를 분리한 다음 1 μm 의 여과지를 이용하여 여과한 것을 사용하였다. 유입원수의 수질특성을 분석한 결과는 Table 1과 같다. 유입원수의 노말헥세인(N-Hexane)추출물은 13 mg/l이며, 용존유기탄소(Dissolved organic carbon: DOC)가 8.6 mg-C/l이었다. 1 μm 의 여과지로 여과후 DOC 농도는 6.6 mg/l로 여과전과 큰 차이를 보이지 않았으나, 노말헥세인농도는 1.0 mg/l로 저농도이었다. 총 유기탄소(Total organic carbon: TOC)는 8.5 mg-C/l로 노말헥세인 추출물농도에 비해 높게 나타난 것으로 보아 노말헥세인으로 추출할 수 없는 수용성물질이 포함되어 있는 것으로 사료된다. 입자상유기탄소(Particulate organic carbon: POC)는 DOC의 3배 이상으로 현탁물이 많은 것으로 나타났다. 여과된 BOD의 값은 검출한계로 결과치를 얻을 수 없었으나, 여과전 유입원수의 BOD/DOC비는 0.14로 생분해성이 낮은 것으로 나타났다.

Table 1. Water quality of a synthetic groundwater

	unit: mg/l				
	TOC	DOC	POC	BOD	n-Hexa
Raw	38.4	8.6	29.8	1.2	13.0
Filtered water	8.5	6.6	19	ND	1.0

2. 실험장치

본 연구에 이용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 활성탄 접촉조는 유리관(길이 55 mm, 내경 13.6 mm)을 이용하였으며 유입 측으로부터 1단에 입상물질을 제거하는 glass wool(GW)을 충전하였으며, 2-4 단까지는 상하를 glass wool로 채운다음 역청탄(6-16 mesh)을 각각 1.4 g씩 충전하였다. 활성탄 접촉조에서의 체류시간은 24 min이며 온도를 일정하게 하기 위하여 항온조에 설치하였다. 입상활성탄(GAC)은 실험의 정확성을 높이기 위하여 실험하기 전 증류수를 채워 교반하고 하루이상 방치하여 상층에 뜨는 재와 유분을 제거하는 과정을 반복한 뒤 105°C에서 건조한 다음 사용하였다.

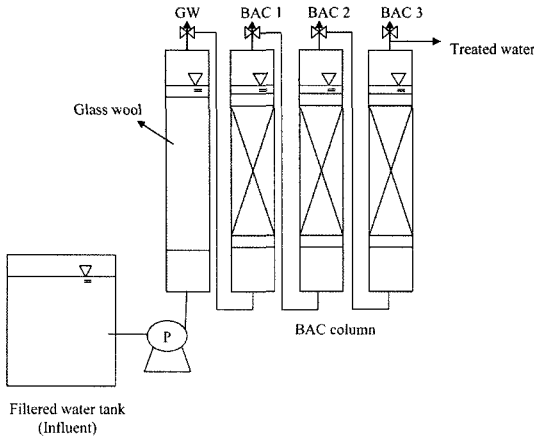


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus for water-soluble cutting oil treatment using biological activated carbons.

3. 분석항목 및 측정방법

1) 수질분석

생물활성탄 처리공정에 따른 수질조사항목인 BOD와 노말헥세인(n-Hexane)은 Standard method¹⁵⁾에 근거하여 분석하였다. DOC는 0.45 μm 멤브레인 필터를 이용하여 여과한 후의 TOC analyzer(Shimadzu 5000A)를 사용하여 기기분석 하였으며, POC는 TOC와 DOC의 차로써 계산하였다.

2) Quinone 분석

생물활성탄 표면에 부착 성장한 미생물의 퀴논(Quinone) 분석은 Hu 등¹⁶⁾이 개량한 방법을 이용하여 분석하였다. 컬럼내의 활성탄을 습중량 1.4g 취해 클로로폼:헥세인(2:1, v/v) 혼합액을 넣어 초음파 처리 후 30분간 진탕하여 하층의 지용성 성분을 여과지로 여과하여 flask에 회수하였다. 플라스크에 회수한 추출물을 헥세인으로 재추출하여 농축한 다음 Sep-Pak[®] Plus Silica cartridges에 흡착시킨 다음 2% 디에틸에터/헥세인(diethylether/hexane)으로 menaquinone(MK)을 플라스크에 회수하고, 10% 디에틸에터/헥세인으로 ubiquinone(UQ)을 분리 회수하였다. 회수한 퀴논을 질소로 증발 건조시킨 다음 아세톤으로 최종 액량을 조절하여 PDA(Photo Diode Array) detector가 부착되어 있는 HPLC(10ADvp, SHIMADZU)로 분석하였다. 컬럼은 ODS(Dupont, 4.6(I.D)×250 mm, Shimadzu, japan)을 이용하였으며 UQ는 흡수파장을 275 nm, MK는 270 nm로 설정한 다음 이동상은 메탄올/이소프로필에테르(9:2, v/v)를 혼합하여 유량 1.0 ml/min으로 공급하였다. 각종의 미생물로부터 추출한 UQ와 MK 등의 혼합액의 용출시간과 비교하는 것에 의해 퀴논 분자종

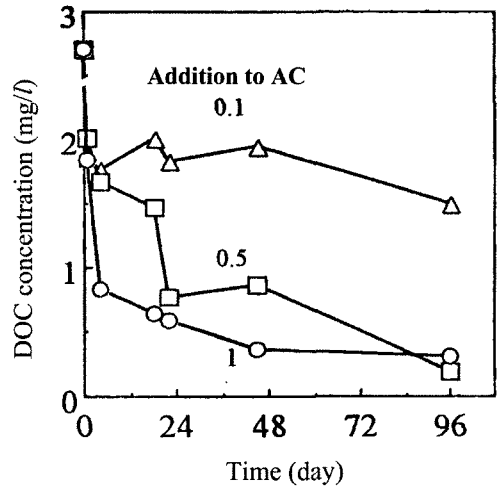


Fig. 2. Change of DOC on amount of added activated carbon in batch test.

을 결정하였으며 UQ-10과 VK1은 각각 UQ와 MK를 정량화하기 위한 표준물질로 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 활성탄을 이용한 수용성 절삭유의 회분처리실험

수용성 절삭유로 오염된 지하수의 최적처리조건을 검토하기 위하여 활성탄 충전량 및 충전층의 체류시간을 결정하기 위하여 삼각플라스크를 이용하여 회분실험을 수행하였다. 삼각플라스크 1에 활성탄을 각각 0.1, 0.5 1.0g을 넣어 시간이 경과함에 따른 DOC 농도변화를 측정하였다(Fig. 2). 활성탄을 1g 첨가한 경우 약 48시간에서 거의 DOC 제거가 포화되었음을 알 수 있었다. 이 실험을 통해 첨가한 활성탄중량 당 흡착량을 계산한 결과 농도에 대해서 흡착량은 거의 직선적으로 되는 것을 알 수 있었으며, 1에 대해 48시간을 운전할 경우 50% 이상의 DOC 제거효율을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 연속으로 운전할 경우 초기 DOC 농도가 10 mg-C/l인 것을 2 mg-C/l 이하로 제거하기 위해서는 유입원수 1l당 3g의 활성탄이 필요한 것으로 계산되었다. 또한 1l를 처리하는 소요되는 처리 시간은 48시간이 적당한 것으로 나타났다.

2. BAC의 유기물제거에 있어서 온도의 영향

활성탄처리에 있어서 최적온도조건 및 생물분해제거 효과를 파악하기 위하여 활성탄 충전층의 온도를 15°C와 25°C로 조절하여 DOC 처리특성을 조사하였다. Fig. 3은 온도변화에 따른 처리수의 DOC 농도변화를

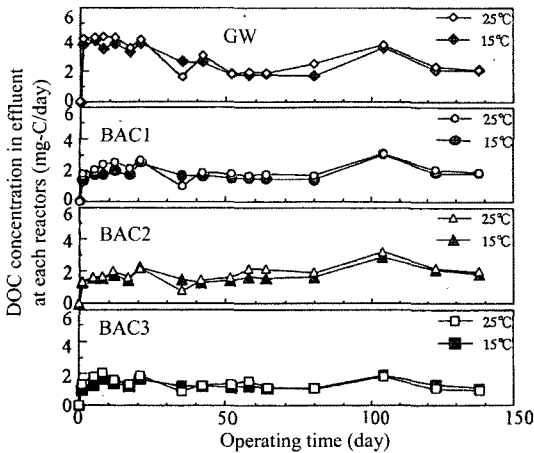


Fig. 3. Effect of temperature on DOC removal by biological activated carbon.

나타낸 것이다. 유입원수의 평균 DOC 농도는 3.0 mg-C/l이었으며, 25°C에서의 DOC 농도는 BAC1에서부터 2.0, 1.9, 1.4 mg-C/day의 순으로 나타났으며, 15°C에서는 BAC1에서부터 1.8, 1.7, 1.3 mg-C/day로 두 온도조건 모두 BAC2에서 DOC 제거량이 낮게 나타났다. 15°C에서 양호한 처리수 수질을 얻은 것으로 보이거나 GW출구에서도 낮게 유출되었기 때문이다. 운전초기에는 BAC1의 제거율이 반응조내 온도를 15°C로 조절할 경우가 25°C보다 높게 나타났다. 그러나 60일 이후 BAC3에서의 DOC 제거율은 15°C 보다 25°C에서 더 높게 나타났다. 이와 같이 15°C보다 흡착능이 적은 25°C에서 DOC 제거효율이 높은 것은 시간이 경과함에 따라 활성탄 표면에 미생물이 부착 성장하여 DOC 분해를 촉진시켰기 때문이라고 사료된다.

3. 장치내의 미생물 군집구조

온도에 따라 DOC제거율의 차이가 나타나 이를 해명하기 위하여 본 연구에서는 장치내의 미생물 양 및 군집구조변화를 Quinone profile를 이용하여 검토하였다.

온도가 다른 두 장치내의 Quinone 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. 140일 동안 연속운전 후 BAC1에서의 Quinone 양은 온도에 관계없이 0.33 mol/ml-packing AC로 거의 같은 양이었다. 이때 BAC1에서의 DOC 제거량 또한 61 mg-C/g-AC으로 동일하였다. 그러나 BAC3에서의 Quinone 양은 15°C의 경우 0.08 mol/ml-packing AC이었으며, 25°C에서는 0.19 mol/ml-packing AC로 약 2.4배 정도 높게 나타났다. 이때 BAC3에서의 DOC 제거량은 15°C에서 57 mg-C/g-AC에 비해 25°C에서는 74 mg-C/g-AC으로 높게 나타났

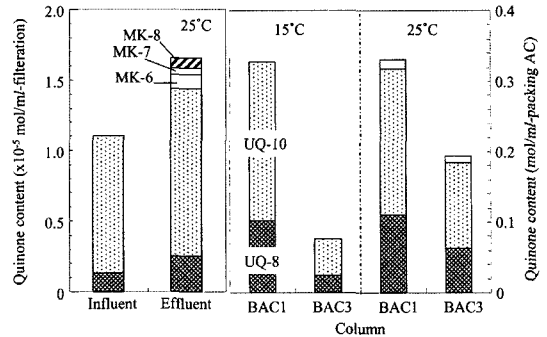


Fig. 4. Effect of temperature on quinone content and composition.

으며, POC축적량은 25°C에서 45 mg-C/g-AC이었으며 15°C에서 53 mg-C/g-AC로 15°C에서 운전한 BAC 컬럼에서 높게 나타났다. 따라서 POC가 균체량을 나타낸다고 한다면 15°C에서는 미생물이 부착성장하지 못하고 유출과 축적이 진행되었지만 25°C에서는 미생물이 활성탄 표면에 부착 성장함을 추측할 수 있었다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 두 장치내의 우점 퀴논 종은 UQ-10이었으며, UQ-8도 검출되었다. 25°C로 운전한 경우는 활성탄 컬럼과 유출수에서 MK도 검출되었다. 퀴논과 POC 농도로부터 알 수 있는 것은 POC 축적량은 반드시 quinone 축적 또는 미생물부착성장을 나타내는 것이 아님을 알 수 있었으며 25°C에서의 DOC제거율이 높은 이유는 활성탄흡착뿐만 아니라 활성탄표면에 부착 성장한 미생물에 의해 DOC 제거율도 촉진되었음을 알 수 있었다.

4. 컬럼을 통한 연속제거 실험 및 미생물의 군집구조해석

상기의 결과에 의해 활성탄 컬럼내의 온도를 25°C로 설정해 장기간 연속운전실험을 수행하였다. Fig. 5에 장기간 연속실험에 있어서 각 충전층에서의 DOC의 농도 변화를 나타내었다. 유입 지하수의 변동은 있었으나 평균 DOC 농도는 6.6 mg/l로 주입되었다. 유입수 변동의 원인으로는 공급한 유탁수의 분산유분이 시간이 경과함에 따라 부상하였거나 원수를 교반하므로 용해되어 있는 유분증발성분이 증발하였기 때문으로 사료된다. 각 단에서의 DOC 농도변화는 110일 경 BAC1과 BAC2에서의 제거율이 저하된 것으로 보이거나 이는 공급한 원수의 농도가 낮았기 때문인 것으로 사료된다. 후단으로 갈수록 DOC 농도는 저하되었으며, 평균 DOC 유출량은 BAC1부터 하단의 순으로 5.39, 4.66, 3.35 mg-C/day이었다. 장기간 연속처리실험전체에 있어서 지하수중의 DOC 제거율은 평균 61%가 제거되

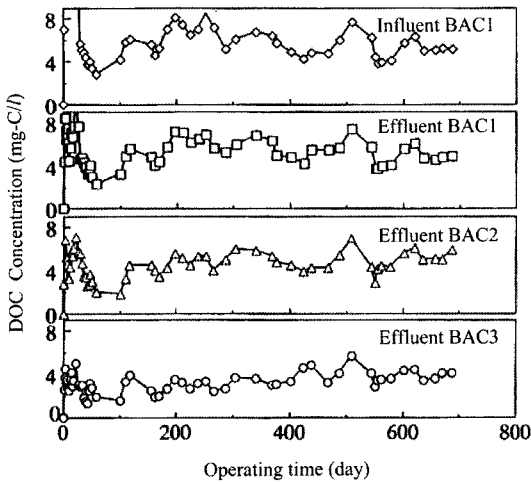


Fig. 5. Change of DOC concentration during continuous BAC process.

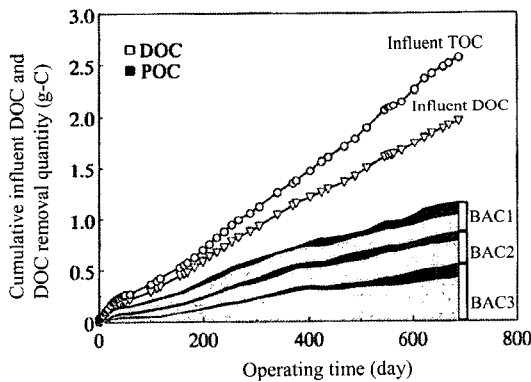


Fig. 6. Cumulative amount of influent DOC and cumulative removal rate of each BAC column.

있으며, TOC는 55%, POC는 28% 제거되었음을 알 수 있었다. 연속처리실험에서 얻은 DOC와 POC 실험 결과를 이용하여 Fig. 6에 DOC 및 POC의 축적량을 계산하여 나타내었다. 운전초기 DOC 제거량은 BAC1이 매우 높게 나타났으나 시간이 경과함에 따라 BAC3에서의 제거율이 높게 나타났다. 이것은 POC성분의 유입이 DOC제거율을 저하시켰을 것으로 사료된다. BAC1에서의 DOC제거는 운전일수 280일경까지 나타났으나 POC의 축적과 유출은 280일 이후로도 계속되고 있음을 알 수 있었다. POC 유입에 의한 DOC 제거율의 저하는 280일경 BAC2에서 나타났으며 BAC3에서는 400일경부터 나타났다. 축적 DOC 제거량은 BAC1과 BAC2에서 각각 0.18 g-C과 0.22 g-C이었으며, BAC3에서는 0.43 g-C로 후단으로 갈수록 제거

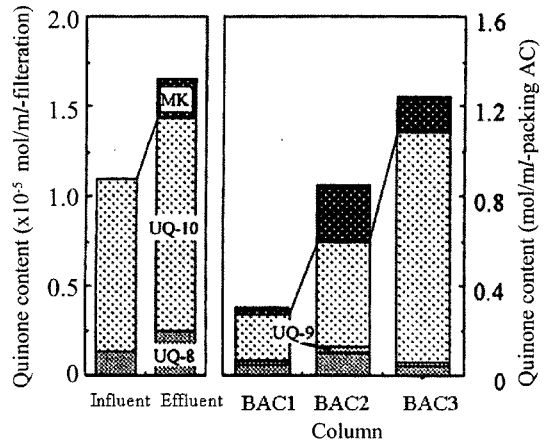


Fig. 7. Quinone content and composition in continuous BAC-process treating groundwater.

량이 많은 것으로 나타났다.

장기간 연속으로 운전한 활성탄 컬럼내의 퀴논을 분석하여 Fig. 7에 나타내었다. 약 680일 연속 운전 후 활성탄 충전층내의 퀴논양은 BAC1에서 0.30 mol/ml-packingAC, BAC2에서 0.85 mol/ml-packingAC, BAC3에서 1.25 mol/ml-packingAC로 후단으로 갈수록 많이 부착되어 있는 것을 알 수 있었다. BAC1에서의 퀴논양은 온도효과에 의한 퀴논결과(Fig. 4)와 유사하였으나 BAC2와 BAC3에서의 퀴논양은 3~4배로 증가하였다. DOC제거율의 차이가 없었던 BAC2에서도 퀴논양이 증가한 것은 DOC로서 본 유분이 또 다른 원인에 의하여 분해되었을 것으로 사료된다. 유입지하수, 유출수 및 활성탄컬럼내의 우점 quinone은 UQ-10이었으며, 다음으로 UQ-8이 높게 나타났다. 그리고 유입수에는 검출되지 않았던 MK는 BAC2, BAC3로 갈수록 다양하게 검출되었다. 검출된 MK는 MKs-6, -7, -8, 8(H₂), -9, -9(H₂), -10(H₂) 등으로 이는 장기간 연속 운전함으로써 활성탄표면에 부착미생물막이 형성됨으로써 안쪽에는 일부 혐기화 되어 검출된 것으로 사료된다. 또한 DOC 제거량 당 균체수율(세포내의 퀴논함유량 1 g-POC=2 μmol로 가정)을 계산한 결과, 온도의 영향실험에서 25°C로 운전한 반응조내의 수율은 0.006이었으며, 장기간 연속실험 한 반응조의 경우는 0.013으로 아주 낮게 나타났다. 그러므로 대부분은 생물분해보다는 흡착으로 유기물이 제거되었음을 알 수 있었다.

또한 질소 흡착법을 이용하여 활성탄 표면적을 검토한 결과, 사용하기 전 활성탄의 비표면적은 9.13×10² m²/g-AC이었으나, 연속제거실험 후 활성탄 비표면적은 BAC1에서 6.4×10² m²/g-AC, BAC2에서는 7.6×10²

m²/g-AC, BAC3에서는 7.7×10² m²/g-AC으로 후단으로 갈수록 비표면적은 아직 여유가 있음을 알 수 있었다. DOC 제거량에 대한 비표면적은 모두 역으로 나타났는데 이는 운전초기에는 흡착에 의한 DOC 제거가 중심이 되었으며, BAC1의 활성탄은 미생물이 충분히 부착 성장하기 전에 파과시점에 달하고 말았으며, DOC 제거가 중심이 되는 활성탄 충전층이 후단으로 진행할 때에는 충분히 생물활성탄으로서 기능을 가지고 있을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

생물활성탄을 이용하여 수용성 절삭유로 오염된 지하수를 처리하는데 있어서 온도의 영향을 알아본 결과, 운전초기에는 15°C에서의 DOC 제거효율이 높게 나타났으나 60일 이후부터는 BAC3에서 25°C로 운전한 경우가 높게 나타났다. 실험 종료 후 퀴논 양 및 미생물 군집구조를 분석한 결과 BAC1에서의 퀴논 양은 15°C와 25°C에서 동일하게 나타났으나 BAC3에서는 25°C에서 더 많이 부착되어 있는 것을 알 수 있었다. 두 장치내의 우점 퀴논 종은 UQ-10이었으며, 25°C의 처리수와 활성탄 표면에 부착한 생물막에서는 MK도 검출되었다. 이로부터 25°C의 실험에서는 활성탄흡착과 더불어 미생물에 의해 DOC 제거효율이 향상되었을 것으로 사료된다.

또한 장기간 활성탄 연속제거실험을 한 결과 운전기간이 길어질수록 DOC 제거효율은 후단으로 진행되는 것을 알 수 있었으며, POC의 축적과 퀴논 양도 후단으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. BAC 컬럼 내의 미생물 군집구조를 퀴논을 이용하여 분석한 결과 UQ-8과 UQ-10을 함유하고 있는 미생물이 DOC 제거에 기여하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 활성탄에 의한 DOC 제거효율은 60~70%에 불과해 안정된 수질을 얻기 위해서는 오존처리 등 기타 화학적산화법을 도입할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2004-050-D00011). 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Daiminger, U., Nitsch, W., Plucinski, P. and Hoff-

- mann, S. : Novel techniques for oil/water separation. *J. Membrane Science*, **99**, 197-203, 1995.
2. Sheng, H. L. and Wen, J. L. : Treatment of waste oil water emulsion by ultra filtration and ion exchange. *Water Res.*, **32**(9), 2680-2688, 1998.
3. 김탁수, 이용미, 김문선, 김성연, 신해철, 최경호, 정문호 : 일부 농촌지역의 오염원 현황과 먹는 물 수질에 관한 조사연구. *한국환경위생학회지*, **30**(2), 98-103, 2004.
4. Imai, A., Onuma, K., Inamori, Y. and Sudo, R. : Biodegradation and adsorption in refractory leachate treatment by the biological activated carbon fluidized bed process. *Wat. Res.*, **29**, 687-694, 1995.
5. Kutics, K. and Suzuki, M. : Attachment and growth of biomass on surface-modified activated carbon fibers. *Wat. Sci. Tech.*, **26**, 665-671, 1992.
6. 우달식, 남상호 : 생물활성탄 유동상법에 의한 상수원수의 생물학적 전처리공정. *한국환경위생학회지*, **24**(1), 38-46, 1998.
7. 김영진, 김영규, 정문호 : 입상활성탄의 총유기탄소 흡착능 및 일반세균의 발생에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **25**(4), 15-19, 1999.
8. Servais, P., Billen, G., Ventresque, C. and Bablon, G. P. : Microbial activity in GAC filters at the Choisy-Roi treatment plant. *J. AWWA.*, **75**, 62-68, 1991.
9. 박홍기, 나영신, 정종문, 류동춘, 이상준, 홍용기 : 낙동강 하류 상수원수의 생물활성탄에 의한 수질개선 및 세균분포 특성. *한국환경과학회지*, **10**(2), 105-111, 2001.
10. Fujie, K., Hu, H.-Y., Tanaka, H. and Urano, K. : Ecological studies of aerobic submerged biofilter on the basis of respiratory quinone profiles. *Water Sci. Tech.*, **29**, 373-376, 1994.
11. Hiraishi, A. : Isoprenoid quinones as biomarkers of microbial populations in the environment. *J. Biosci. Bioeng.*, **88**, 444-460, 1999.
12. Hu, H.-Y., Fujie, K., Tanaka, H., Makabe, T. and Urano, K. : Respiratory quinone profiles as a tool for refractory chemical biodegradation study. *Water Sci. Tech.*, **35**, 103-110, 1997.
13. Lim, B. R., Hu, H.-Y., Huang, X. and Fujie, K. : Effect of seawater on the treatment performance and microbial population in a biofilter treating coke-oven wastewater. *Process Biochem.*, **37**, 943-948, 2002.
14. Kunihiro, T., Hu, H.-Y., Lim, B.-R., Goto, N. and Fujie, K. : Analysis of the differences in microbial community structures between suspended and sessile microorganisms in rivers based on quinone profile. *J. Gen. Appl. Microbiol.*, **48**, 35-41, 2002.
15. APHA : Standard Methods for the examination of water and wastewater. APHA-AWWA-WPCF, New York. 1992.
16. Hu, H.-Y., Fujie, K. and Urano, K. : Development of a novel solid phase extraction method for the analysis of bacterial quinones in activated sludge with a higher reliability. *J. Biosci. Bioeng.*, **87**, 378-382, 1999.