

대기노출형 백색부후균 생물막을 이용한 유기물 처리특성

이순영[†] · 강기철* · 원찬희*

전북지역환경기술개발센터 · *전북대학교 환경공학과

(2007년 4월 5일 접수, 2008년 4월 2일 채택)

Characteristics of Organics Treatment Using White-rot Fungus Biofilm of Atmospheric Exposed Type

Soon-Young Lee[†] · Ki-Cheol Kang* · Chan-Hi Won*

Jeonbuk Regional Environmental Technology Development Center

*Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT : It is really urgent to develop wastewater treatment system which is economically efficient, occupies small area for build-up, can be easily operated, discharges small amount of sludge due to the more strict water quality standard, the expensive water and energy cost and so on. This study on treatment of wastewater including nonbiodegradable materials using white-rot fungus biofilm were designed to investigate the submerged type of biofilm, hydraulic retention times, recycle rates, and module turning times. Removal efficiencies of fully exposed biofilm type in atmosphere are similar to submerged biofilm of aeration type. The optimum conditions of white-rot fungus biofilm of fully exposed type in atmosphere are HRT 3~4 hr, recycle rate 6~10 Q, module turning times 0.5~2 times/min. At this time, removal efficiencies of organics were COD_{Cr} 65.0~69.9%, NBDCOD 70.4~72.7%, BOD₅ 88.8~90.1%, SS 84.2~90.4%. Moreover average effluent concentration of BOD₅(8.9 mg/L) satisfied water quality standard of heavy water(BOD₅ less than 10 mg/L) but concentration of NBDCOD(29.6 mg/L) was higher than water quality standard of heavy water(NBDCOD less than 20 mg/L).

Key Words : HBC Ring Media, *Phanerochaete chrysosporium* PSBL-1, Biofilm, Organics

요약 : 점점 더 강화되는 수질기준, 연료 및 에너지비용 증가 등으로 경제성, 소요부지의 최소화, 운전의 용이성, 슬러지 발생의 최소화, 높은 처리효율을 지니는 폐수처리시스템의 개발은 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 난분해성물질을 함유한 오·폐수에 대해 대기노출형 백색부후균 생물막을 이용하여 생물막의 침지형태, 체류시간, 재순환비, 모듈회전수에 따른 유기물 처리특성을 연구하였다. HBC 링 여체에 부착된 백색부후균 생물막을 대기중에 완전히 노출하여 운전시 침지형 포기조건과 거의 비슷한 제거율을 나타냈다. 대기노출형의 최적조건은 HRT 3~4 hr, 재순환비 6~10 Q, 모듈회전수 0.5~2회/min이며, 이때 유기물 제거율은 COD_{Cr} 65.0~69.9%, NBDCOD 70.4~72.7%, BOD₅ 88.8~90.1%, SS 84.2~90.4%를 나타냈다. 또한 본 연구에서 BOD₅의 유출수 평균농도는 8.9 mg/L로 중수도 수질기준 BOD₅ 10 mg/L이하를 만족하였으나, NBDCOD의 경우 평균농도가 29.6 mg/L로 중수도 수질기준 20 mg/L보다 높은 것으로 나타났다.

주제어 : HBC Ring 여체, *Phanerochaete chrysosporium* PSBL-1, 생물막, 유기물

1. 서론

무한한 산업적인 잠재력으로 인해 최근에는 리그닌 분해 곰팡이 및 효소에 대한 관심이 날로 증가하고 있으며, 다이옥신과 같은 환경오염물질의 분해 및 무독화, 클로로페놀, 나일론,¹⁾ 염료 등의 분해에 널리 응용되고 있다. 1970년대 Tien과 Kirk에 의해 백색부후균을 이용한 난분해성 물질 제거 연구가 시작된 이래 현재까지 백색부후균을 이용한 폐수처리의 적용분야는 꾸준히 시도되고 있다.^{2~8)} 또한 백색부후균 세포외효소 lignin peroxidase, manganese peroxidase와 laccase 등에 의해 다양한 범주의 난분해성 화합

물을 비특이적으로 분해할 수 있어, 이를 이용한 각종 오염물질의 생물학적 복원에 대한 효과를 인정받고 있는 추세이다.⁹⁾ 류¹⁰⁾의 연구에 의하면, 질소(ammonium tartrate)첨가 농도 0.02%(=200 mg/L)에서 LiP 생산이 가장 우수한 결과를 보이며, 반면에 0.1%(=1,000 mg/L) 이상에서는 LiP 생산이 거의 없음을 보고하고 있다. Leisola 등¹¹⁾은 Lysine auxotroph인 돌연변이 균주의 경우 nutrient rich condition 하에서도 균주로부터 효소의 생산 촉진된다고 보고하고 있다. 이러한 세포외효소를 효과적으로 이용하기 위해 백색부후균을 nylonweb,¹²⁾ porous ceramics,¹³⁾ polyurethane foam과 polyethylene,¹⁴⁾ biolace, biostage과 ceramic bal,¹⁵⁾ polysulphone과 ceramic membranes¹⁶⁾과 같은 다양한 media에 부착시켜 폐수를 처리하는 연구도 수행되었다. 김¹⁷⁾ 등은 *P. chrysosporium*을 glass beads나 hydroballs에 각각

[†] Corresponding author

E-mail: lucidme@chonbuk.ac.kr

Tel: 063-270-2446

Fax: 063-270-2449

부착하여 air flow rates 0.026 L/h에서 BTX 제거능을 연구한 결과 benzene 40~60%, Toluene 50~80%, Xylene 50~60% 제거율로 glass beads보다는 hydroballs의 제거율이 25~30% 상향 제거되었으며 air flow rates를 증가시키에 따라 제거율은 증가하는 것으로 나타났다. Juan Wu¹⁸⁾는 다공성 플라스틱 미디어에 부착된 *Plerotus ostreatus*에 대해 pH 6에서 16일 동안 탄소원 농도(glucose 0~50 g/L)에 따른 펄프·제지폐수의 COD 및 리그닌 제거능을 조사한 결과, 7일째 glucose 농도 1 g/L 주입시 리그닌 및 COD 제거율 각각 66%와 35%로 가장 높았으며, glucose 농도가 증가함에 따라 리그닌 및 COD 제거율이 감소하는 경향을 나타냈다. Y. Zhang 등¹⁹⁾은 ceramic honeycomb에 부착된 *Candida tropicalis*와 부유 *Candida tropicalis*에 대해 28시간 동안 고농도 곡물폐수(grains-washing wastewater)의 COD 제거능을 비교한 결과, 부유상보다 고정상이 4.8 배 빠르게 제거된다는 결과를 나타냈다.

백색부후균은 현장적용에 있어서도 성장조건의 특이성으로 선택적인 성장을 보이므로 기타 미생물의 영향을 배제할 수 있는 장점이 있다.²⁰⁾ 그러나 아직까지 백색부후균을 이용한 폐수처리방법이 실규모로 적용된 예는 거의 없는데 이는 효소발현을 위한 환경조성이 까다롭기 때문이다.²¹⁾

현재까지 연구된 대부분의 생물막 공법은 물속에 침지시켜 일정농도의 DO를 유지하기 위해 포기용 송풍기를 이용하여 강제로 산소를 공급하므로 포기에 소모되는 전력 비용이 많이 소요된다. 또한 포기에 의해 발생하는 전단응력에 의해 여재에 형성된 생물막의 탈리로 인해 많은 양의 슬러지를 발생함에 따라 또다른 산업 폐기물을 배출한다.

따라서 본 연구에서는 대학교 내 실험실에서 배출되는 각종 폐수가 유입되어 난분해성물질이 함유된 오·폐수를 대상으로 부하변동 및 독성물질 유입에 강한 백색부후균을 HBC(Hanging Bio-Contactor)링 여재에 부착하여 대기 중에서 폐수와 접촉하여 처리하는 단위공정을 개발하는데 있으며, 대기노출형 백색부후균 생물막의 최적 처리조건 규명 및 유기물의 처리특성을 연구하고자 한다.

2. 실험재료

2.1. 대상시료

본 연구에 사용된 시료는 C대학 내 위치하는 식당, 화장실 및 실험실에서 배출되는 오·폐수로 대학 내 오수처리장의 1차 침전 후 율류수를 대상으로 하였다.

2.2. 미생물

본 연구에 사용된 균주는 백색부후균 중 *P. chrysosporium* PSBL-1으로 Y대학에서 분양 받아 사용하였다. 균주의 보관을 위하여 YMPG 액체배지²²⁾에 agar 20 g/L가 포함된 고체배지를 만들어 15일마다 계대 배양하였으며, 고체배지상의 균주를 YMPG 액체배지에서 배양하여 폐수에 적용

Table 1. Characteristics of wastewater

Item	Concentration(mg/L)
pH	6.66~7.97
COD _{Cr}	167~249
COD _{Mn}	89.7~116
BOD ₅	70.2~101
SS	39.4~120
TN	39.1~63.2
NH ₄ -N	37.2~61.2
TP	3.2~5.3
NBDCOD	70~100

하였다. 배양온도는 37℃로 유지하였으며, 배양에 사용된 모든 시약은 Sigma chemical Co. 및 Aldrich chemical company, Inc.(USA)에서 구입하여 사용하였다.

2.3. HBC링 접촉여재

본 연구에 사용된 HBC(Hanging Bio-Contactor)링 접촉여재는 국내 D사 제품으로 폴리에틸렌과 폴리프로필렌으로 구성된 플라스틱 미디어로써 실타래와 같이 다량의 가는 실을 묶어서 비표면적을 늘린 여재이다. HBC링 접촉여재의 비표면적은 0.8 m²/m이다.

2.4. 반응기

본 연구의 lab scale plant는 투명 아크릴을 이용하여 가로 40 cm, 세로 40 cm, 높이 총 80 cm인 3단으로 설계·제작되었다. 1단은 높이 10 cm 구조로 정량펌프에 의해 일정량의 유입수와 내부반송수가 혼합되어 살수되는 구조로 되어 있다. 2단은 높이 20 cm로 3단에서 살수되는 유입수와 반송수가 1단으로 전달되는 중간구조로, 1단에서 살수되는 폐수에 의해 생물막 형성을 방해하는 전단응력을 최소화하고 낙하되는 폐수의 용존산소를 증가시켜 주기 위한 구조로 제작되었다. 3단은 높이 50 cm의 구조로 HBC링 여재(30 cm × 8 cm × 16 cm)가 장착된 물레형 모듈이 폐수의 자연유하 또는 모터에 의해 일정 방향으로 회전하면서 폐수와 접촉한 후 폐수 중 일부는 재순환되고 일부는 유출

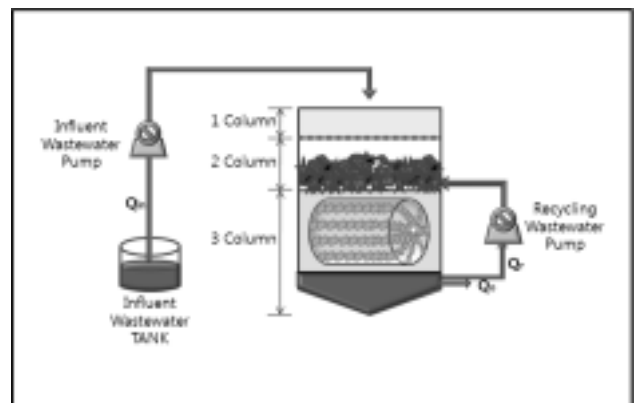


Fig. 1. Schematic diagram of lab scale plant.

부로 배출되도록 하였으며, 3단의 하단부분은 사각뿔 구조로 되어 있어 탈리된 슬러지를 주기적으로 배출할 수 있도록 제작되었다. 본 연구의 반응기는 각 단이 분리가 되도록 제작되어 폐수의 성상에 따라 생물막이 형성된 3단은 다단으로 설치가 가능하다. 외부공기가 반응조 내부로 충분히 유입되어 생물막과 대기 중의 산소가 충분히 접촉되고 살수되는 폐수의 용존산소를 증가시키기 위해 1단과 3단 측면 양쪽에 60 cm²의 공기 유출·유입부를 만들었다. Fig. 1은 본 실험에 사용한 반응기 모식도를 나타내고 있다.

3. 실험방법 및 내용

대기노출형 백색부후균을 이용한 생물막공법은 회전원판법과 살수여상법을 혼합한 방식으로 포기 및 슬러지 반송에 소모되는 전력이 없으며, 슬러지 발생량이 적고, 부하변동 및 독성물질의 유입에 강하다. 기존의 기계적인 공기주입으로 발생하는 높은 전단력에 의한 LiP 생성과 활성이 저하²³⁾되는 것을 최소화하기 위해, 생물막이 장착되어 있는 물레의 회전속도를 조절하여 난류에 의한 빠른 산소전달로 낮은 전단력이 발생되도록 한다. 또한 폐수의 내부순환비 조절을 통해서 폐수와 미생물의 접촉시간을 조절하여 처리율을 향상시킬 수 있다. 기존의 살수여상과 다른점은 플라스틱 및 자갈 등 일반 여재가 아닌 보다 비표면적이 넓은 HBC링 여재를 사용하고, 여재에 부착된 생물막을 물속이 아닌 대기 중에서 폐수와 접촉하여 일정한 농도의 산소가 폐수내 용존되면서 미생물의 활성을 일정하게 유지하도록 하였다.

3.1. 미생물 부착

HBC링 접촉여재가 장착된 물레형 모듈을 0.3회/min 회전하면서 백색부후균 *P. chrysosporium* PSBL-1 농도 4,750 mg/L, 12 L를 약 10회 정도 반복하여 부어 주어 균과 배양액이 분리되면서 HBC링 접촉여재에 부착되었다.

3.2. Lab scale plant 성능 시험

생물막 형성이 안정된 상태에서 폐수의 운전조건에 따른 성능시험을 실시하였으며, 유입수의 pH는 lignin peroxidase의 최대 활성영역인 4.5로 조절하여 아래와 같은 조건에서 연속식으로 진행하였다. 제시된 각 조건의 결과는 steady state 상태로 일정하게 유지된 후 1회/일 채수하여 얻어진 결과를 그래프화 하였다.

3.2.1. 폐수 접촉상태에 따른 처리특성

폐수의 접촉상태에 따른 처리특성을 조사하기 위해 침지형과 대기노출형으로 나누어 진행하였으며, 침지형은 균이 부착된 물레형 모듈이 수중에 1/2 정도 잠기도록 하여 포기(Sub. anaerobic)와 무포기(Sub. aerobic) 조건에서 처리특성을 조사하였다. 대기노출형(Exp.)은 균이 부착된 물레형 모듈이 대기중으로 완전히 노출되어 무포기 상태의 처

리특성을 조사하였다. 이때의 침지형과 대기노출형의 운전 조건은 24 L/6 hr, 모듈회전수 0.3회/min, 재순환비 3 Q로 동일하게 하였다.

3.2.2. 경과시간에 따른 처리특성

물레형 모듈 HBC링 접촉여재에 부착된 백색부후균에 의한 반응속도를 조사하여 적정한 HRT를 선정하기 위해 폐수량 24 L, 재순환비 3 Q, 모듈회전수 1회/min로 하여 HRT 1~10 hr으로 변화시켜 폐수처리특성을 조사하였다.

3.2.3. 재순환비에 따른 처리특성

동력비 소요를 최소화하면서 재순환수에 의한 폐수 중의 용존산소 및 처리율을 최대로 하기 위한 조건을 조사하기 위해 생물막이 형성된 물레형 모듈이 대기로 노출된 상태로 24 L/3 hr, 모듈 회전수 0.3회/min로 하여 재순환비를 1 Q, 3 Q, 6 Q, 10 Q, 20 Q로 변화시켜 각 조건에서의 처리특성을 조사하였다.

3.2.4. 모듈회전수에 따른 처리특성

물레형 모듈 회전에 의해 발생하는 난류에 의한 생물막의 영향을 조사하기 위해 생물막이 형성된 물레형 모듈이 대기로 노출된 상태로 24 L/3 hr, 재순환비 3 Q로 하여 모듈회전수를 0.3회/min, 0.5회/min, 1회/min, 2회/min, 4회/min로 변화시켜 폐수 처리특성을 조사하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 폐수접촉상태에 따른 처리특성

미생물이 부착되어 있는 물레형 모듈의 폐수 접촉상태에 따라 크게 침지형과 대기노출형으로 나누어, 물레형 모듈을 약 1/2 정도 폐수 중에 침지하여 무포기와 포기조건에서 폐수 처리특성을 조사하였으며, 또한 물레형 모듈이 대기중으로 노출되어 무포기 조건에서 폐수처리특성을 조사한 결과 Fig. 2~5와 같은 결과를 얻었다.

물레형 모듈이 폐수 내에 침지되어 운전시 COD_{Cr}, NBDCOD, BOD₅, SS는 무포기 조건에서 각각 평균 약 35.1%, 39.5%, 63.2%, 52.5%의 제거율을 나타냈으며, 포기조건에서 각각 평균 약 74.7%, 81.9%, 94.0%, 75.6%의 제거율을 나타냈다. 물레형 모듈이 대기중으로 완전히 노출되어 운전된 경우 COD_{Cr}, NBDCOD, BOD₅, SS는 72.5%, 73.7%, 92.5%, 79.0%의 제거율로 침지형의 포기조건과 거의 비슷한 경향을 나타냈다. 유²⁴⁾는 회전원판법으로 인공폐수 처리시 원판 침적율이 45%일 때 90.2%, 50%일 때 86%의 BOD₅ 제거율을 얻었다. 이는 본 연구공법의 침지형 포기조건에서 운전된 경우 BOD₅ 94.0%와 대기노출형으로 운전된 경우 BOD₅ 92.5%와 비슷한 결과를 나타냈다.

SS 제거율의 경우 침지형의 포기조건보다 상승된 제거율을 나타내고 있는 것으로, 이는 포기에 의해 여재에 부착되어 있는 미생물이 탈리되어 유출수 중의 SS의 배출

량이 증가한 것으로 판단된다. 또한 슬러지발생량은 유출수 중의 SS농도로 산출(반응조(3단) 사각별 하부에서 재순환수가 공급되므로 침전된 슬러지 제외)하였는데 침지형 무포기·포기조건에서는 각각 평균 0.025 kg/m³, 0.011 kg/m³, 대기노출형에서는 평균 0.010 kg/m³로 포기조건과 대기노출형의 슬러지발생량은 비슷하였으며 침지형 무포기 조건보다 1/2 정도 적은 슬러지발생량을 나타냈다. 침지형 무포기조건의 경우 *P. chrysosporium*의 충분한 산소공급이 이루어 지지 않아 성장감소와 더불어 부착력 감소로 탈리미생물이 증가하여 슬러지발생량이 가장 많은 것으로 판단된다. Egemen 등²⁵⁾에 의하면 폐슬러지발생량 감소는 폐슬러지 처리비용이 하수처리장 전체 비용의 50~60%를 차지하는 점을 고려할 때 매우 중요한 사항임을 보고하고 있다.

침지형과 대기노출형의 연구결과를 바탕으로 제거율과 경제성을 고려하여 볼 때 대기노출형으로 운전시 효율적으로 폐수를 처리할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 하수종말처리시설의 배출허용농도를 만족하므로 이후 모든 실험은 대기노출형으로 운전하여 처리능을 조사하였다.

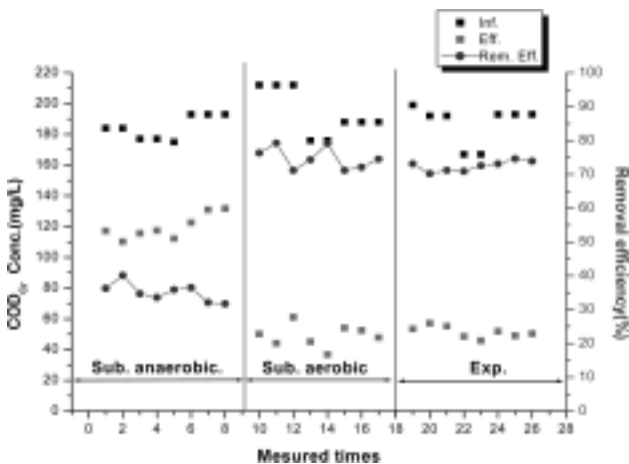


Fig. 2. Change of COD_{Cr} concentration according to wastewater contact condition.

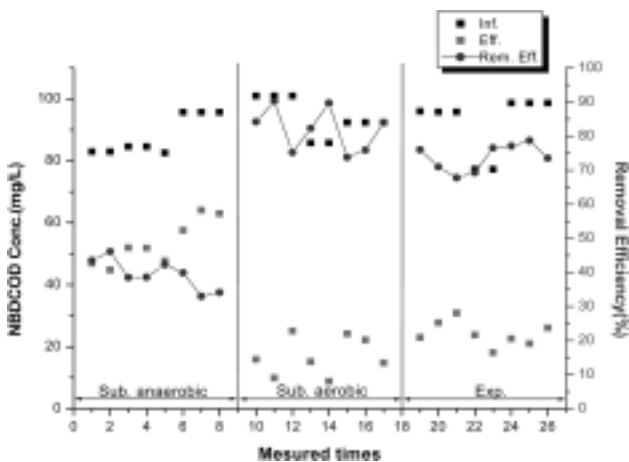


Fig. 3. Change of NBDCOD concentration according to wastewater contact condition.

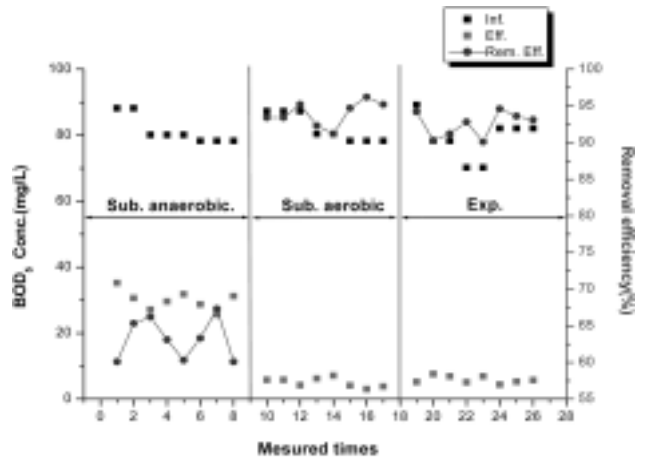


Fig. 4. Change of BOD₅ concentration according to wastewater contact condition.

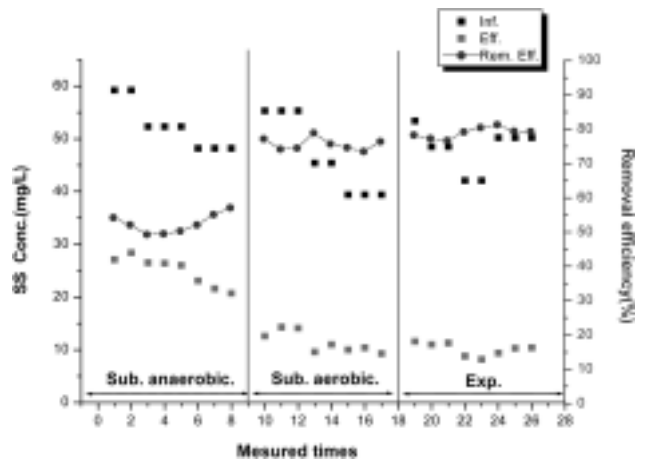


Fig. 5. Change of SS concentration according to wastewater contact condition.

4.2. 경과시간에 따른 처리특성

물레형 모듈 HBC링 접촉여체에 부착된 백색부후균에 의한 적절한 반응시간을 선정하기 위해 폐수량 24 L, 재순환비 3 Q, 모듈회전수 1회/min로 하여 HRT 1~10 hr으로 변화시켜 폐수처리특성을 조사한 결과 Fig 6과 같다.

실험결과 반응시간이 증가할수록 제거율이 증가하다가 3 hr 경과 후 COD_{Cr}, NBDCOD, BOD₅, SS는 각각 63.9%, 60.1%, 87.3%, 83.3%의 제거율을 나타냈다. 4 hr 경과 후부터 유기물 제거율 향상은 거의 미미한 것으로 나타났다. 또한 슬러지발생량을 유출수 중의 SS농도로 산출한 결과 0.006~0.049 kg/m³로 전반적으로 HRT가 증가할수록 슬러지발생량이 적어짐을 알 수 있었다.

유기물 부하에 따른 영향을 살펴본 결과 유기물 부하 0.407~1.358 kgCOD_{Cr}/m³·d(0.186~0.622 BOD/m³·d)에서 COD_{Cr}, NBDCOD, BOD₅의 제거율은 각각 63.9~79.6%, 60.1~91.5%, 87.3~95.5%로 부하율 변동에 따른 제거율의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 COD_{Mn}과 BOD₅의 하수종말처리시설 방류수 수질기준 COD_{Mn} 40 mg/L, BOD₅ 10 mg/L를 동시에 만족할 수 있는 부하율은 1.019 kgCOD_{Cr}/

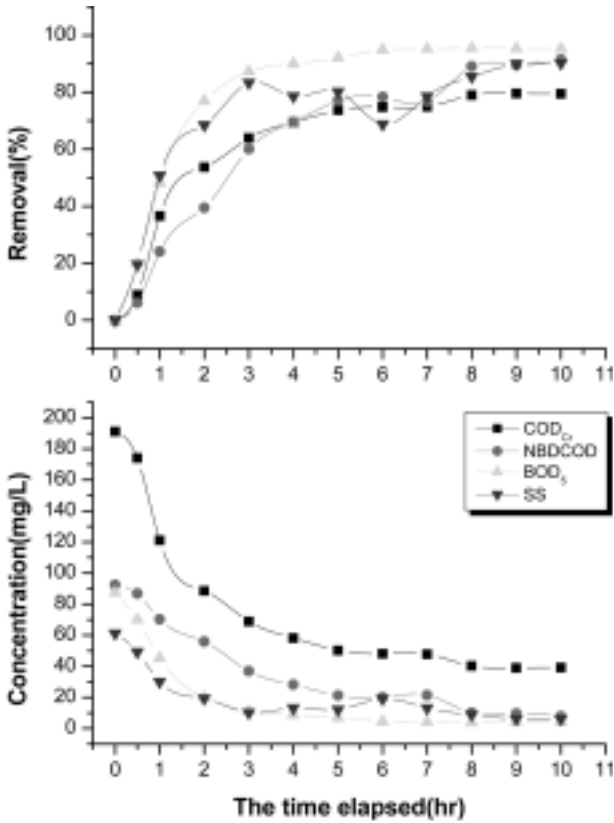


Fig. 6. Change of organics concentration according to the time elapsed.

$m^3 \cdot d(0.466 \text{ BOD}/m^3 \cdot d)$ 이하인 것으로 판단된다. 이²⁴⁾의 HBC링 생물막공법의(BOD+SS)용적부하는 $0.94 \text{ kg}/m^3 \cdot \text{day}$, 표준활성슬러지공정의 BOD용적부하 $0.3 \sim 0.8 \text{ kg}/m^3 \cdot \text{day}$ 에 비하여 낮은 것으로 나타났다.

이러한 연구결과를 바탕으로 본 공법을 이용한 하·폐수처리시 최적의 반응시간은 3~4 hr으로 판단되며, 반응시간을 6 hr 이상으로 증가시킬 경우 반응시간 대비 처리능의 향상은 현저히 떨어지는 것으로 판단된다. 따라서 이하 모든 실험은 폐수처리용량 24 L에 대해서 반응시간을 3 hr으로 하여 처리특성을 조사하였다.

4.3. 재순환비에 따른 처리특성

동력비 소요를 최소화하면서 재순환수에 의한 폐수 중의 용존산소 및 처리율을 최대로 하기 위한 조건을 조사하기 위해 생물막이 형성된 물레형 모듈이 대기로 노출된 상태로 유입유량 24 L/3 hr, 모듈 회전수 0.3회/min로 하여 재순환비를 1 Q, 3 Q, 6 Q, 10 Q, 20 Q로 변화시켜 각 조건에서의 처리특성을 조사한 결과 Fig. 7~10과 같다.

실험결과 재순환비를 증가시킬수록 COD_{Cr} , NBDCOD, BOD_5 , SS의 제거율은 미미하게나마 증가하는 경향을 나타내고 있다. 재순환비를 1 Q로 운전시 COD_{Cr} , NBDCOD, BOD_5 , SS의 제거율은 각각 평균 약 65.6%, 70.4%, 88.8%, 75.0%를, 3 Q로 운전시 COD_{Cr} , NBDCOD, BOD_5 , SS의 제거율은 각각 평균 약 62.9%, 65.2%, 88.8%, 83.0%를

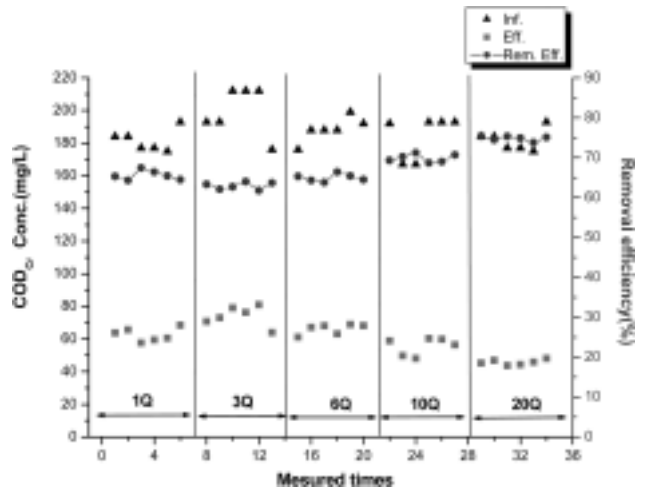


Fig. 7. Change of COD_{Cr} concentration according to recycle rate.

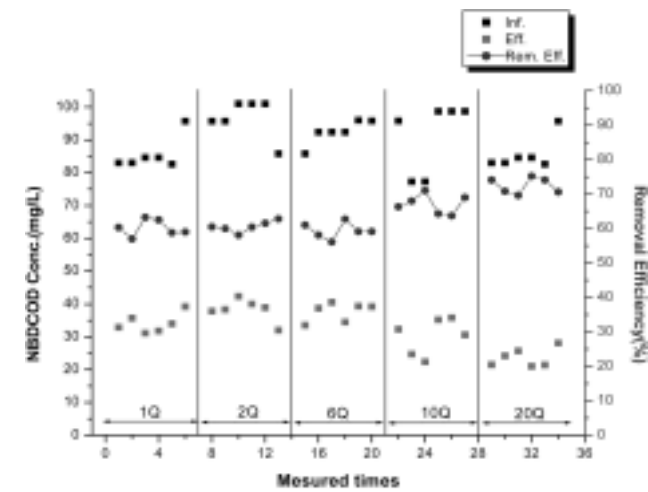


Fig. 8. Change of NBDCOD concentration according to recycle rate.

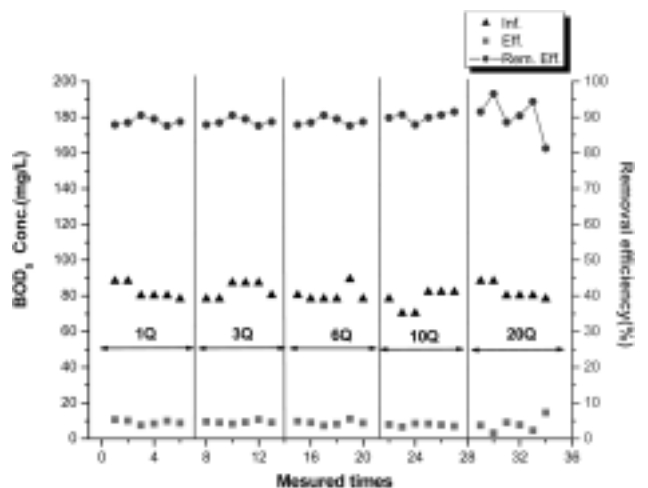


Fig. 9. Change of BOD_5 concentration according to recycle rate.

나타내고 있다. 20 Q로 운전시 각각 74.8%, 77.0%, 90.4%, 90.5%를 나타내고 있다. 재순환비를 1 Q에서 3 Q로 증가시킬 경우 제거율의 증가는 거의 없는 것으로 나타났으나,

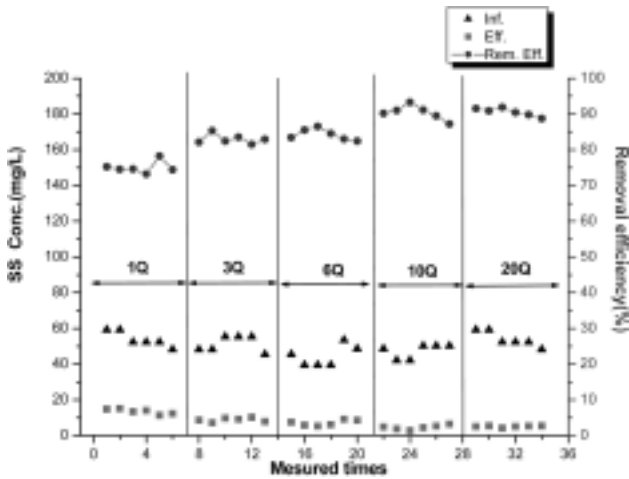


Fig. 10. Change of SS concentration according to recycle rate.

6 Q로 증가시 제거율이 약 5~10% 내외로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 가장 효율적으로 운전할 수 있는 재순환비는 6~10 Q로 판단된다.

또한 슬러지발생량을 유출수 중의 SS농도로 산출한 결과 재순환비 1 Q, 3 Q, 6 Q, 10 Q, 20 Q에서 슬러지 발생량은 각각 0.013, 0.009, 0.007, 0.005, 0.005 kg/m³로 재순환비를 증가시킴에 따라 슬러지발생량이 적어짐을 알 수 있었다.

4.4. 모듈회전수에 따른 처리특성

물레형 모듈 회전에 의해 발생하는 난류에 의한 생물막의 영향을 조사하기 위해 생물막이 형성된 물레형 모듈이 대기로 노출된 상태로 유입유량 24 L/3 hr, 재순환비 3 Q로 하여 모듈회전수를 0.3회/min, 0.5회/min, 1회/min, 2회/min, 4회/min로 변화시켜 폐수처리특성을 조사한 결과 Fig. 11~14와 같다.

실험결과 물레형 모듈의 회전속도를 증가시킴에 따른 COD_{Cr}, NBDCOD 제거율은 증가하는 경향을 나타내고 있으나 BOD₅, SS의 제거율은 거의 변화가 없는 것으로 나

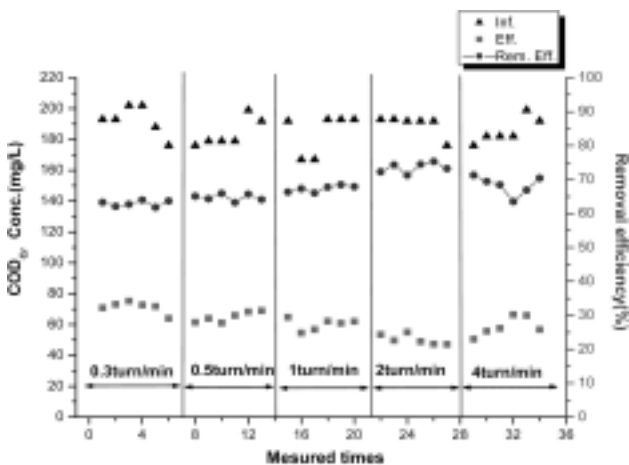


Fig. 11. Change of COD_{Cr} concentration according to the number of revolution of module.

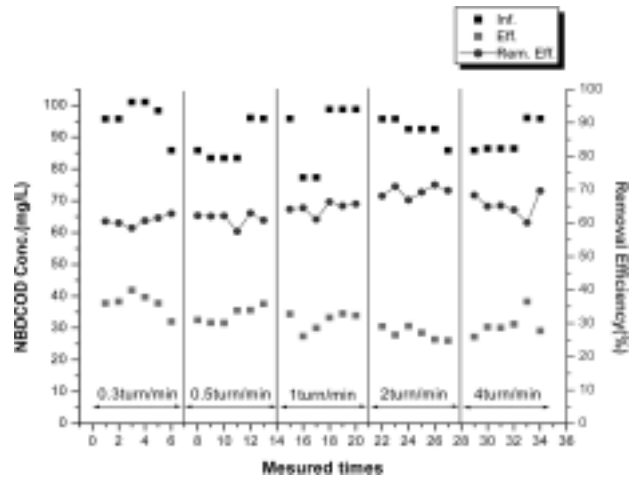


Fig. 12. Change of NBDCOD according to the number of revolution of module.

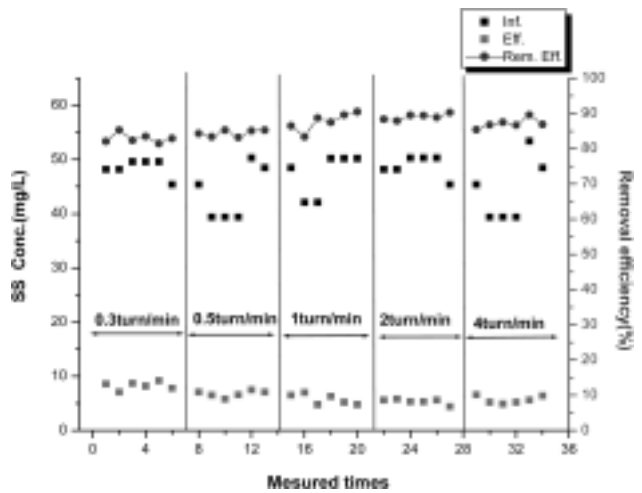


Fig. 13. Change of SS according to the number of revolution of module.

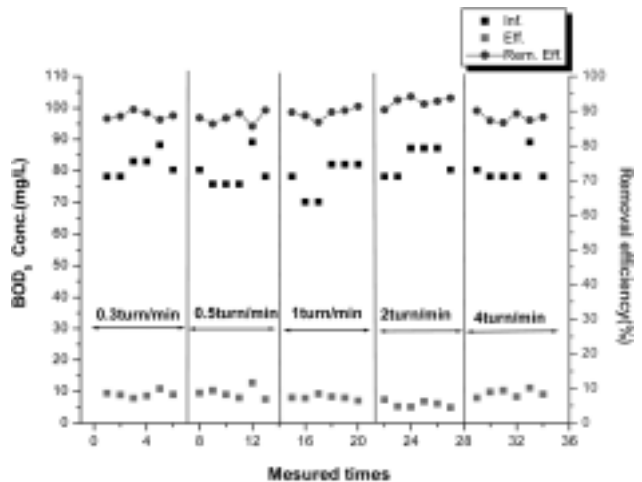


Fig. 14. Change of BOD₅ according to the number of revolution of module.

타났다. COD_{Cr}, NBDCOD의 제거율은 0.3회/min에서 각각 평균 약 62.9%, 65.2%를 나타냈으며, 4회/min에서 68.3%,

72.3%를 나타냈다. BOD₅, SS의 제거율은 모듈 회전속도에 상관없이 거의 비슷한 값으로 평균 약 89.4%, 86.3%를 나타냈다.

또한 슬러지발생량을 유출수 중의 SS농도로 산출한 결과 모듈회전수 0.3, 0.5, 1, 2, 4회/min에서 평균 슬러지발생량은 각각 0.008, 0.007, 0.006, 0.005, 0.006 kg/m³로 전반적으로 모듈회전수를 증가시키에 따라 슬러지발생량이 적어짐을 알 수 있었다.

따라서 모듈회전수에 따른 처리특성은 특이하게 나타나지 않았으나, 하수종말처리시설의 COD_{Mn} 기준(40 mg/L)에 따라 최소 0.5~2회/min 속도로 회전시켜 주는 것이 유리한 처리율을 얻을 것으로 판단된다.

4.5. 대상시료 오수처리장과의 비교

현재 운전되고 있는 대상시료의 오수처리장의 운전조건 및 유출수질과 본 공법의 운전조건 및 유출수질을 비교·검토한 결과 Fig. 15~16과 같다.

대상시료의 오수처리장은 침지형 섬모상 생물막공법으로 1차 포기조를 거쳐 방류되기까지 총 HRT는 7~9 hr이다. 1차 포기조에 유입되는 BOD₅, SS 농도는 각각 85.4~

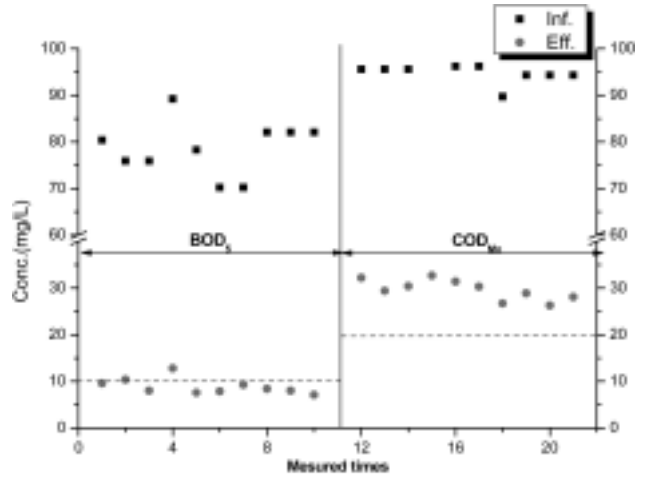


Fig. 16. Treatment characteristics of BOD₅ and COD_{Mn} using White-rot fungi biofilm of exposed type in atmosphere.

128.2 mg/L, 46.5~52.3 mg/L이며, 유출수의 BOD₅, SS 농도는 12.4~18.6 mg/L(평균 15.9 mg/L), 8.3~11.8 mg/L(평균 9.4 mg/L)로 오수처리시설 방류수 수질기준 BOD₅ 20 mg/L, SS 20 mg/L를 만족하였으며, 0.008~0.012 kg/m³의 슬러지를 발생하고 있다.

본 공정의 운전조건 HRT 3 hr, 재순환비 3 Q, 모듈회전수 0.5~1회/min에서의 BOD₅, SS, COD_{Mn} 제거율은 85.7~91.4%, 83.2~90.5%, 66.3~72.1%이며, 유출수 농도는 7.1~12.8 mg/L(평균 8.9 mg/L), 4.8~7.5 mg/L(평균 6.1 mg/L), 26.3~32.7 mg/L(평균 29.6 mg/L)로 오수처리시설 방류수 수질기준을 만족하고 있으며, 0.005~0.008 kg/m³의 적은 슬러지를 발생하고 있다. 또한 현재 수도법에 규정되어 있는 우리나라 중수도 수질기준은 수세식화장실용수, 살수용수 및 조경용수로 제한하여 BOD₅ 10 mg/L, COD_{Mn} 20 mg/L로 BOD₅ 유출수 농도는 중수도 수질기준을 만족하나, COD_{Mn}의 유출수 평균농도는 중수도 수질기준을 상회하는 것으로 나타났다. 또한 수질오염총량제 시행시 오염부하량(BOD)을 상당량 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 대기노출형 백색부후균 생물막공법이 대상폐수의 오수처리시설 침지형 섬모상 생물막공법의 운전 HRT보다 2~3배 정도 짧게 운전하면서도 유출수의 농도가 2배 정도 낮게 유출되므로, 소규모 오·폐수 처리시설 및 중수처리시스템의 단위공정으로써 유지관리가 용이하고 저비용-저에너지형의 고효율적인 새로운 방식의 수처리시스템으로 도입될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 처리수를 간단히 사여과 정도만 시킨다면 중수로서도 충분히 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

유지관리가 용이하며 저비용-저에너지 고효율적인 새로운 수 처리 방식인 대기노출형 백색부후균을 이용한 폐수 처리시 다양한 운전조건에 따른 처리특성을 분석한 결과 다음과 같다.

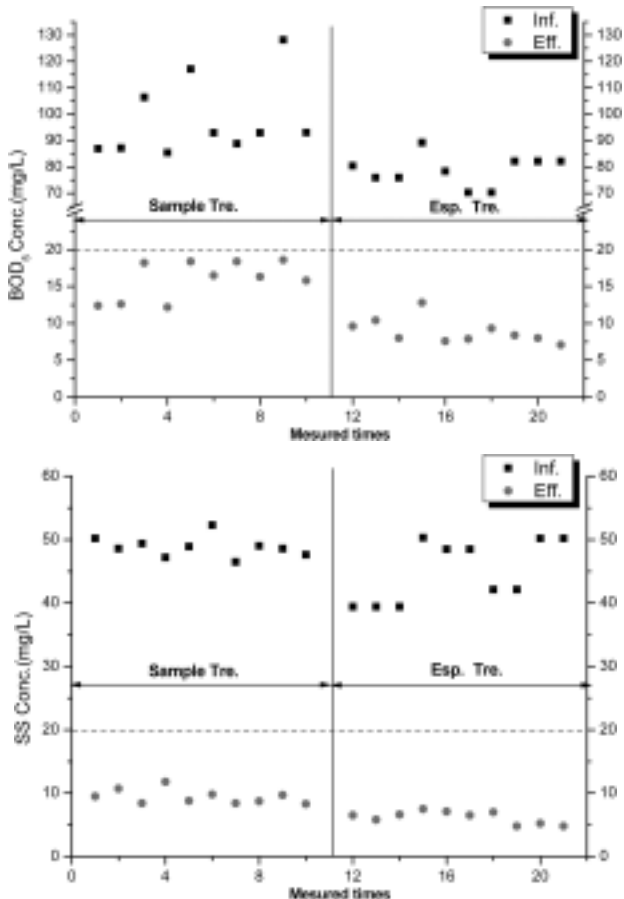


Fig. 15. BOD₅ and SS concentration of wastewater treatment place sampled object wastewater of this study(Sample Tre.) and White-rot fungi biofilm of exposed type in atmosphere(Esp. Tre.).

1) 대기노출형 백색부후균 생물막을 이용한 오·폐수 처리특성을 시험한 결과 대기노출형으로 운전시 침지형 포기 조건과 거의 비슷한 제거율을 나타냈다. 대기노출형의 최적조건은 HRT 3~4 hr, 재순환비 6~10 Q, 모듈회전수 0.5~2회/min이며, 이때 제거율은 COD_{Cr} 65.0~69.9%, NBDCOD 70.4~72.7%, BOD₅ 88.8~90.1%, SS 84.2~90.4%를 나타냈다. 반면 섬모상 생물막공법의 오수처리시설에서는 HRT 8~9 hr에서 제거율은 BOD₅ 83.7%, SS 80.7%를 나타냈다.

2) 수리학적 체류시간이 증가할수록, 재순환비가 증가할수록 슬러지발생량은 감소하는 경향을 나타냈으며, 모듈회전수에 따른 슬러지발생량은 거의 일정하였다.

3) 대기노출형 백색부후균 생물막공법이 대상폐수의 오수처리시설 침지형 섬모상 생물막공법의 운전 HRT보다 2~3배 정도 짧게 운전하면서도 유출수의 농도가 2배정도 낮게 유출되므로, 소규모 오·폐수 처리시설 및 중수처리시스템의 단위공정으로써 유지관리가 용이하고 저비용-저에너지형의 고효율적인 새로운 방식의 수처리 시스템으로 도입될 수 있을 것으로 판단된다.

4) 또한 본 연구에서 BOD₅의 유출수 평균농도는 8.9 mg/L로 중수도 수질기준 BOD₅ 10 mg/L 이하를 만족하였으나 COD_{Mn}의 경우 평균농도가 29.6 mg/L로 중수도 수질기준 20 mg/L보다 높았으며, 처리수를 사여과 정도의 간단한 후처리를 한다면 중수도로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

5) 백색부후균이 대기중에서 폐수와 접촉시 2~3 mm 정도의 수층이 형성되어 있으므로 본 연구가 수행되는 총 4달 동안 백색부후균의 포자형성은 일어나지 않은 것으로 나타났다.

사 사

본 연구(KRF-2004-217-D00006)는 정부(교육인적자원부)의 재원으로 전북환경기술개발센터(JENTEC)를 통해서 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Deguchi, T., Kakezawa, M., and Nishida, T., "Nylon biodegradation by lignin-degrading fungi," *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**, 329~331(1998).
2. Eggen, T., "Application of fungal substrate from commercial mushroom production *Pleurotus ostreatus* for bioremediation of creosote contaminated soil," *Biodegradation*, **44**, 117~126(1999).
3. Maria, T. M., Ivan, Gumersindo, F., "Evaluation of different fungal strains in the decolourisation of synthetic dyes," *Kluwer Academic Publishers*, **22**, 1499~1503(2000).
4. Semple, K. T., Reid, B. J., and Fermor, T. R., "Impact of composing strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants," *Environ. Pollut.*, **112**, 269~283(2001).

5. Webb, M. D., Ewbank, G., Perkins, J., and McCarthy, A. J., "Metabolism of pentachlorophenol by *Saccharomonospora biridis* strains isolated from mushroom compost," *Soil. Biol. Biochem.*, **33**, 1903~1914(2001).
6. Lau, K. L., Tsang, Y. Y., and Chiu, S. W., "Use of spent mushroom compost to bioremediate PAH-contaminated samples," *Chemosphere*, **52**, 1539~1546(2003).
7. Law, W. M., Lau, W. N., Lo, K. L., Wai, L. M., and Chiu, S. W., "Removal of biocide pentachlorophenol in water system by the spent mushroom compost of *Pleurotus pulmonatus*," *Chemosphere*, **52**, 1531~1537(2003).
8. Xawed, V., Bhatt, T., Cajthami, T., Malachobá, K., and Lednicka, D., "Compost-mediated removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil," *Arch Environ. Contam. Toxicol.*, **44**, 336~342(2003).
9. Watanabe, K., "Microorganisms relevant to bioremediation," *Current Opinion in Biotechnology*, **12**(3) 237~241(2001).
10. 류원률, 백색부후균에 의한 Ligninase의 생산 및 Xenobiotics의 분해 특성에 관한 연구, 영남대학교 대학원 응용화학공학과 유기공업화학 및 생물화학공학 전공, 박사학위논문, pp. 95~100(2001).
11. Leisola, M., Thanei-Wyss, U., and Fiechter, A., "Strategies for Production of High Ligninase Activities by *Phanerochaete chrysosporium*," *J. Biotechnol.*, **3**, 97~107(1985).
12. Moreira, M. T., Feijoo, G., Palma, C., Lema, J. M., "Continuous production of Manganese Peroxidase by *Phanerochaete chrysosporium* immobilized on polyurethane foam in a pulsed packed-bed bioreactor," *Biotechnol. Bioeng.*, **56**, 130~137(1997).
13. Cornwell, K. L., Tinland-Butez, M. F., Tardone, P. J., Cabasso, I., Hammel, K. E., "Lignin degradation and lignin peroxidase production in cultures of *Phanerochaete chrysosporium* immobilized on porous ceramic supports," *Enzyme Microb. Technol.*, **12**, 916~920(1990).
14. Hela Zouari, Marc Labat, Sami Sayadi, "Degradation of 4-chlorophenol by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* in free and immobilized cultures," *Bioresour. Technol.*, **84**, 145~150(2002).
15. Soon-Seop Shim, Katsuya Kawamoto, "Enzyme production activity of *Phanerochaete chrysosporium* and degradation of pentachlorophenol in a bioreactor," *Water Res.*, **36**, 4445~4454(2002).
16. Sheldon, M. S., Small, H. J., "Immobilisation and biofilm development of *Phanerochaete chrysosporium* on polysulphone and ceramic membranes," *J. Membr. Sci.*, **263**, 30~37(2005).
17. Oh, Y. S., Choi, S. C., and Kim, Y. K., "Degradation

- of Gaseous BTX by Biofiltration with *Phanerochaete chrysosporium*,” *The Journal of Microbiol.*, **36**(1), 34~38(1998).
18. Juan Wu, Ya-Zhong Xiao and Han-Qing Yu, “Degradation of lignin in pulp mill wastewaters by white-rot fungi on biofilm,” *Bioresour. Technol.*, **96**(12), 1357~1363(2005).
 19. Yongmin Zhang, Bruce E. Rittmann, Jianlong Wang, Yuhong Sheng, Juntang Yu, Hanchang Shi, Yi Qian, “High-carbohydrate wastewater treatment by IAL-CHS with immobilized *Candida tropicalis*,” *Process Biochem.*, **40**, 857~863(2005).
 20. Field, J. A., E. de Jong, G. F. Costa, and J. de Bont, “Biodegradation of by New Isolates of White Rot Fungi,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **58**, 2219~2226(1992).
 21. Ibrahim, M. B., Poonam, N., Datel, S., Roger, M., “Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents: A review,” *Bioresour. Technol.*, **58**, 217~227(1996).
 22. Tien, M., Kirk, T. K., “Selection and Improvement of Lignin-Degrading Microorganisms,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**(2), 242~245(1987).
 23. 유재익, “회전원판법에 의한 하수처리에 관한 연구,” 동아대학교, 석사학위논문, p. 16(1985).
 24. Egemen, E., Corpening, J., and Nirmalakhandan, N., “Evaluation of an ozonation system for reduced waste sludge generation,” *Water Sci. Technol.*, **44**(2-3), 445~450(2001).
 25. 이동운, “미생물 접촉여재를 이용한 생물막공정의 슬러지 원천감량에 관한 연구,” 계명대학교, 박사학위논문, p. 98(2007).