



논문

# 왕겨펠릿 생물담체 개발 및 이를 이용한 bio scrubber형 악취제거 시스템 성능평가

## Development of Rice Husk Pellets as Bio-filter Media of Bio Scrubber Odor Removal System

배지열<sup>1)</sup>, 한상종<sup>2)</sup>, 박기호<sup>3)</sup>, 김광수<sup>1),4),\*</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부, <sup>2)</sup>한국건설기술연구원 연구전략기획본부

<sup>3)</sup>주식회사 케이디, <sup>4)</sup>과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 전공

Jiyeol Bae<sup>1)</sup>, Sangjong Han<sup>2)</sup>, Ki Ho Park<sup>3)</sup>, Kwang-Soo Kim<sup>1),4),\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2)</sup>Research Strategic Planning Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>3)</sup>KED Co., Ltd

<sup>4)</sup>Department of Construction Environment Engineering, University of Science and Technology

접수일 2018년 6월 29일  
수정일 2018년 7월 16일  
채택일 2018년 8월 16일

Received 29 June 2018

Revised 16 July 2018

Accepted 16 August 2018

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-910-0299

E-mail : kskim@kict.re.kr

**Abstract** The rice husk contains nutrients which can be easily utilized by microorganisms, and also has a water retaining ability, which played a crucial part in enabling it to become a biofilter media. In this study, we evaluated the applicability of rice husk pellet bio-scrubber as a microbiological carrier. The pelletization experiment of rice husk as a biological media was performed using PVA and EVA binder. Also, the feasibility tests of rice husk as a biological media for odor removal were carried out in order to know whether rice-husk contains useful components as a media for microbiological growth or not. Lastly, a combined test for odor gas absorption and biological oxidation was conducted using a lab scale bio-filter set-up packed with rice-husk pellets as wet-scrubber. The major components of the rice husk were carbon, hydrogen, nitrogen, and oxygen, while carbon acted as the main ingredient which comprised up to 23.00%. The C : N : P ratio was calculated as 45 : 1 : 2. Oxygen uptake rate, yield and decay rate of the rice husk eluent was calculated to be 0.0049 mgO<sub>2</sub>/L/sec, 0.24 mgSS/mgCOD and 0.004 respectively. The most stable form of rice husk pellets was produced when the weight of the rice husk, EVAc, PVAc, and distilled water was 10 : 2 : 0.2 : 10. The prepared rice husk pellets had an apparent density of 368 g/L and a porosity of 59.00% upon filling. Dry rice husks showed high adsorption capacity for ammonia gas but low adsorption capacity for hydrogen sulfide. The bio-filter odor removal column filled with rice husk pellets showed more than 99.50% removal efficiency for NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S gas. Through the analysis of circulation water, the prime removal mechanism is assumed to be the dissolution by water, microbial nitrification, and sulfation. Finally, it was confirmed that the microorganisms could survive well on the rice husk pellets, which provided them a stable supply of nutrients for their activity in this long-term experiment. This adequate supply of nutrients from the rice husk enabled high removal efficiency by the microorganisms.

**Key words** : Bio scrubber, Rice husk pellets, Odor removal, Biological oxidation, Absorption

### 1. 서론

기존의 하수처리 연구에서 오염된 물의 처리에는 높은 관심을 가져왔으나, 폐수 처리 과정에서 발생되

는 악취의 처리에 대해서는 큰 관심을 두지 않았다. 하지만 인간의 주거 환경에 대한 인식이 높아짐에 따라 각국의 정부에서는 악취에 관련된 법령을 제정하기에 이르렀다(Loriato *et al.*, 2012). 하수처리장에서

발생하는 악취 물질은 주로 휘발성황화합물(VSCs: volatile sulfur compounds), 휘발성질소화합물(VNCs: volatile nitrogen compounds), 유기산, 알콜류, 케톤류 등이 있는데, 특히 휘발성질소화합물과 휘발성황화합물은 불쾌한 냄새를 유발하여 처리장 주변 민원의 원인이 되고 하수도 콘크리트의 부식을 초래하여 하수처리공정에도 악영향을 주기도 한다(JRC, 2014; Nicell, 2009). 질소계 악취 중에는 암모니아가 대표적으로 하수처리장, 분뇨처리장, 축산관련, 비료제조공장 등에서 저농도로도 강한 자극성 냄새를 발생하기 때문에 악취제거 시 가장 우선적으로 고려하여야 하는 물질이다(Chung *et al.*, 2001). 황 계열 악취 유발물질 중 대표적 물질인 황화수소는 단백질 및 황 포함 유기물의 혐기성 분해와 황산염의 환원반응으로 생성되는데 이 또한 강한 자극성 냄새를 발생시키는 주요 악취 물질이다(Ahmed *et al.*, 2014).

현재 적용 중인 악취가스 처리기술로는 약품세정법, 토양탈취법, 생물탈취법 등이 있으며 약품세정법은 처리과정 중 폐수가 재 발생되는 문제점이 있고, 토양탈취법은 토양에 존재하는 특수 미생물에서만 처리되고 통기성에 한계가 있어 대용량의 처리에는 문제점이 있었다(Estrada *et al.*, 2011; Kennes and Veiga, 2010). 이에 기존 악취기술의 단점을 보완하여 하수처리장에 간편하게 설치가능하고 물리화학적 방법에 비하여 환경 친화적으로 악취를 처리할 수 있는 생물학적 탈취방법이 큰 주목을 받고 있다(BajPai, 2014; Mudliar *et al.*, 2010; Reza *et al.*, 2005).

생물탈취법은 저에너지 소비형 기술이며, 경제적이고, 안전하며 2차 공해의 발생이 적고 장치의 유지관리가 용이하다는 장점이 있어서 최근에 가장 주목받고 있는 기술 중 하나이다(BajPai, 2014). 생물탈취의 원리는 각종 미생물을 이용하여 공기 중의 악취물질을 인위적으로 제어하는 방법으로(Chen and Hoff, 2009), 과거 악취의 확산 방지에 토양의 효과를 적극적으로 활용하였던 것과 같이 자연계에서의 미생물에 의한 생물화학적 산화분해에 의해 일어나는 탈취현상을 인위적으로 조정 관리하여 효율화하는 것이

다(Kennes and Veiga, 2001).

생물탈취법 중 생물세정방식(Bio-scrubber)은 악취물질을 유체에 직접 흡수시키는 물리적 방식과 미생물에 의해 산화시키는 생물학적 방식이 혼합된 방법으로, 타 생물탈취법의 대안으로 여겨지는 기술이다(Turgeon *et al.*, 2009). 종래의 생물탈취에 사용되는 매디아로는 발포고분자물질, 나무껍질, 세라믹 등을 사용하였으나, 악취공기 유입 시 건조현상이 나타나 미생물 서식이 어려우며, 미생물에 필요한 영양물질을 계속 공급하여야 하는 문제점이 있다. 뿐만 아니라 악취물질이 매디아에 누적 시 암모니아 및 황계열물질의 누적에 의한 독성으로 미생물이 사멸되어, 특정 시간 동안 사용 후 본래의 탈취기능을 상실하는 큰 문제점이 있다(AMBIO, 2016).

최근 Kim and Kim (2009)의 연구에 의하면 왕겨와 볏짚이 미생물이 분해하기 쉬운 당류를 포함하고 있으며, 수분 보유능력이 좋아 미생물 담체로서 큰 장점이 있음을 보고 하였다. 또한 쌀을 주식으로 사용하는 우리나라 특성상 다량 발생하는 왕겨폐기물을 이용하여 환경정화용 미생물 담체를 개발할 경우, 높은 경제성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 기존의 왕겨를 그대로 미생물 담체로 사용할 경우 접촉면적에 한계가 있고, 공극률이 낮기 때문에 미생물서식을 위한 충분한 공간 확보에 어려움이 있다.

이에 본 연구에서는 왕겨를 펠릿화하는 기술을 이용하여 왕겨펠릿 미생물담체를 개발하고, 개발된 왕겨펠릿이 충전된 생물세정탑을 제작하여 악취가스 저감효율을 평가하였다. 구체적으로는 왕겨를 여재로서 사용 가능하도록 왕겨를 분쇄하고 펠릿 형태로 제조하는 기술을 개발하였으며, 개발된 왕겨펠릿이 충전된 실험실 규모의 생물 세정탑(Bioscrubbers)을 제작하여 유입악취의 제거효율을 평가하였다.

## 2. 실험방법 및 내용

### 2.1 시약 및 재료

실험에 사용된 왕겨는 경기도 김포시의 천현정미

공장에서부터 공급받은 왕겨를 이용하였으며, 왕겨의 펠렛화를 위한 점결제(binder)로는 한국 (주)형제산업의 PVAc (Poly Vinyl Acetate) 접착제와 한국 (주)오공본드의 EVAc (Ethylene Vinyl Acetate) 접착제를 이용하였다. 유입 악취가스로 사용된  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ 는 한국의 유니온가스로부터 순도 99.00% 이상의 가스를 공급받아 사용하였으며, 해당 업체의 품질보증기관의 인증을 받은 가스를 사용하였다.

## 2.2 왕겨의 구성성분 및 용출액 분석

먼저, 왕겨 내 유기 탄소원의 공급 가능성을 알아보고, 다른 영양염류의 성분함량과 비율을 분석하였다. 건조된 왕겨 시료는 원소분석기(ELECTRON-FLASH EA1112, Thermo scientific, 미국)를 이용하여 왕겨 내 C, H, O, N, S 등의 원소 성분 함량을 확인하였으며, SEM-EDX(S-4800, HITACHI, 일본)를 이용하여 왕겨 표면의 구성성분을 분석하였다. 또한 건조된 왕겨 시료를 X-Ray Fluorescence Spectrometry (Axios, Philips, 네덜란드)를 이용하여 원소분석기로 분석한 이외의 미량 원소의 성분을 알아보고자 하였다.

왕겨펠렛의 탈취용 담체 가능성을 평가하기 위해 왕겨의 용출액을 통하여 유기물, 영양염류 및 미량원소의 용출특성 평가를 실시하였다. 왕겨용출액을 제조하기 위한 왕겨시료는  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 완전히 건조시킨 후 체거름을 통하여 헝겍물을 제거하였다. 체거름 왕겨는 분쇄용 믹서를 이용하여 적당히 분쇄한 후 용출시험에 활용하였다. 왕겨용출액은 3L의 증류수에 왕겨펠렛 60g을 투여하고, 약  $500 \pm 10$  rpm으로 교반을 실시하면서 일정한 주기별로 왕겨용출액을 추출하였다. 왕겨용출을 발생시키기 위한 증류수의 투입은 첫 4일간 매일 교체하고 차츰 왕겨에서 용출액의 추출 농도가 낮아지면, 증류수 투입 간격을 2~3일 간격으로 증가시켜 총 20일간의 용출변화량을 분석하였다. 왕겨용출액의 모든 샘플은 GF/C 여과지(Whatman cat, 47 mm)에 거른 후, 성분 분석에 활용하였다. 왕겨용출액의 화학적 성상 분석을 위한 항목은 SCOD, TOC,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2$ 로, 총 5가지 항

목으로 선정하였다. 왕겨용출액의 분석 장비는 UV Spectrophotometer (DR-4000, HACH, 미국)와 TOC 분석장비(TOC-VCPH, shimadze, 일본)를 활용하였다. 왕겨용출액을 이용한 미생물의 산소소모속도 실험은 김포 고촌하수처리장으로부터 포기조 활성슬러지를 채취하였고, 실내 반응조 시험으로 안정화시킨 MLSS 농도가 7,420 mg/L인 고농도 활성슬러지를 활용하였다. 또한 양시 하수처리장으로 유입하기 전 약 2km 이전에서 유하하는 하수관 간선 측 맨홀을 통해서 직접 채취한 생하수(하수농도, COD 195 mg/L, TOC 31.3 mg/L)를 왕겨용출액의 대조군으로 이용하였다. 시료는  $20^\circ\text{C}$  항온실에서 2시간 동안 완전 포기를 시켜 포화산소농도를 지니도록 하였다. 산소소모속도 측정 실험방법은 BOD병 300 mL에 활성슬러지와 왕겨용출액, 활성슬러지와 생하수를 1:4로 투입하여 미생물의 생장이 활발해지는 적정 MLSS 농도인 1500 ppm으로 희석한 후, DO meter (YSI 5100, YSI Incorporated, 미국)를 투입 밀봉하여  $200 \pm 10$  rpm으로 완속교반하여 실험 샘플 내에 산소농도가 0이 될 때까지 DO 농도를 20초 간격으로 측정하였다.

## 2.3 왕겨펠렛의 제조

왕겨의 펠렛화를 위한 점결제의 특징은 물과의 반응 시 수분은 침투하되 펠렛이 해체되지 않고, 팽윤됨과 동시에 펠렛의 형태는 유지하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 수용성인 Ethylene Vinyl Acetate (EVAc)와 유기용매 접착제인 Poly Vinyl Acetate (PVAc)를 혼합하여 사용한 co-binder 방식을 이용하였다. EVAc와 PVAc의 혼합을 통해 접착제는 친수성과 소수성 두 가지 특징을 갖추어, 물과의 반응 시 수분을 다량 함유하는 동시에 해체되지 않는 특징을 갖는 접착제를 만들고자 하였다. 알칼리성 용액으로써 30.00%의 암모니아수와 0.1 M의 NaOH 용액을 이용하여, Gum 상태인 EVAc와 점도가 높은 PVAc가 원활한 혼합여부의 가능성을 평가하였다. 펠렛화 방법은 분쇄된 왕겨를 점결제/용매 혼합물과 함께 교반한 방법과, 왕겨와 점결제, 물을 믹서기에 동시에 넣어 혼

합과 분쇄를 동시에 유도한 방법을 사용하였으며, 혼합물을 고압의 압출기에서 온도를 약 80~90°C로 하여 고온에서 압출하였다. 왕겨대 점결제의 비율은 10:0.2~10:4의 다양한 범위에서 실험을 수행하였으며, 점결제로 사용한 EVAc와 PVAc의 비율 또한 2:0~2:0.2의 범위에서 실험을 수행하였다.

#### 2.4 왕겨펠렛의 물리적 특성 평가

대량생산된 왕겨의 길보기 밀도를 측정하기 위해, 왕겨를 메스실린더에 250 mL 충전한 후, 충전된 왕겨의 무게를 측정하였다. 공극률은 메스실린더에 왕겨펠렛 250 mL을 충전하고, 증류수를 주입하여 250 mL 높이까지 물을 채운 뒤, 소모된 증류수의 부피를 측정하였다. 왕겨펠렛의 경우, 고르게 충전하기 위하여 1 cm, 0.5 cm의 길이로 절삭하여 고르게 충전하였다. 또한 왕겨 펠렛의 수분함유 시의 부피팽창 비 실험을 위해 건조왕겨펠렛을 수중에 2일간 담근 후, 전후의 길이 및 체팽창 증가를 산정하였다.

#### 2.5 건조왕겨의 악취가스 흡착

105°C 오븐에서 하루 건조시켜 분쇄한 왕겨를 1g, 2g, 4g별로 1L의 테들러 백에 담아 준비한 후, 암모니아가스 농도는 220 ppmv, 황화수소 농도는 23~25 ppmv를 주입하여 흔들며 주면서 시간별로 암모니아와 황화수소 농도 변화를 측정하였으며, 상온의 Shaking Incubator에서 150 rpm의 교반속도로 진행하였다. 암모니아 가스농도와 황화수소의 초기농도는 사전실험을 통해 흡착평형에 도달되는 조건을 감안하여 선정하였다.

가스시료 중 채취된 암모니아 가스는 gas washing bottle에 흡수액(boric acid, 0.01 N)을 50 mL를 넣고 암모니아 가스를 통과시켜 포집하였다. Inlet의 경우는 약 2 L/min으로 10분 동안 흡수시켜 주었으며, 처리된 가스인 Outlet은 24시간 동안 흡수시켜 주었다. 흡수액은 beaker로 옮겨 Nesslerization Method (Method 4500-NH<sub>3</sub>+C)를 이용하여 분석하였으며, 본 분석방법의 최저 검출한계는 0.01 ppm이다. 황 계

열 악취 시료는 펄스 불꽃 광도 검출기가 장착된 Gas Chromatograph (GC-3800, Varian, 미국)를 이용하여 분석하였으며, 본 기기의 최저 검출농도는 약 0.5 ppb이다.

#### 2.6 왕겨펠렛 담지 생물세정(Bio scrubber) 악취제거 시스템의 악취가스 제거효율

대량생산된 왕겨펠렛의 악취가스제거를 위한 미생물 담체로서의 성능을 평가하기 위해 실험실 규모의 연속 악취가스 제거장치를 제작하여 연구를 수행하였다. 실험실 규모 악취 제거 장치는 크게 악취공급장치, 왕겨펠렛을 충전한 탈취반응조, 수분공급 및 악취 가스 용해를 위한 순환수로로 구성된다(그림 1). 왕겨펠렛을 충전한 생물세정 탈취 반응조는 Acrylic 재질로 제작하여 내경은 10 cm, 높이는 120 cm이며, 실제 가스 유입부부터 가스 유출부까지의 거리는 80 cm로 설계하였다. 또한 Biofilter의 담체 높이가 높아질 경우, 담체의 무게에 의해 압밀현상이 증가되면서 공극률이 감소하여 압력 손실의 증가가 나타남으로, 생물반응조는 5단으로 나누어 충전하였다. 각 단의 높이는 약 12 cm였고, 왕겨펠렛은 각 단별로 8g씩 5단으로 나누어 총 40g의 왕겨펠렛을 충전하였다. 반응조 내로 유입되는 악취가스는 상향류로 주입하고, 공급된 공기는 악취를 희석시켜 주입시키기 위하여 따로따로 주입하고 혼합시킨 후, 생물반응조로 주입하였다. 공기공급은 공기에 함유된 수분을 제거하기 위해 Acrylic column (Ø 6 cm \* 55 cm)에 실리카겔을 각각 충전하여 통과시킨 후, 무취공기를 만들어 주었다. 충전된 악취가스는 regulator를 통해 주입속도를 조절하여 Mixing Chamber에서 주입공기(4L/min)와 혼합된 후에는 암모니아는 30 ppmv, 황화수소는 5 ppmv로 탈취반응조에 유입되도록 하였다. 유입 악취가스의 초기농도는 현행 악취배출 허용기준을 반영하여 유출농도는 허용기준이하, 제거율은 95.00% 이상이 될 수 있는 조건으로 선정하였다.

순환수는 상부에서 분사하여 반응조 하부에 모이고 다시 순환수 공급 반응조로 이동시켜 순환되도록

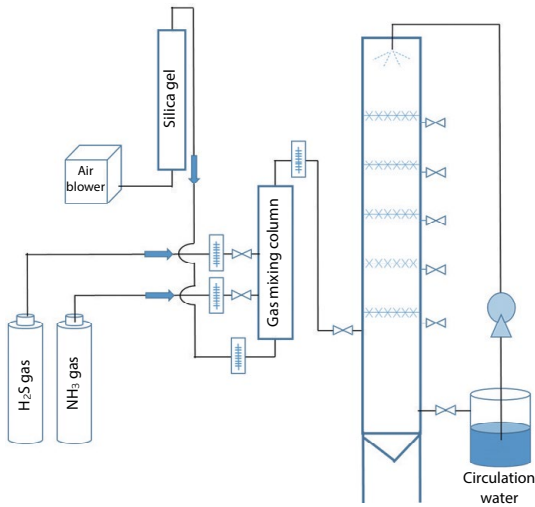


Fig. 1. Scheme of lab-scale bio scrubber.

하였다. 탈취 반응조 내의 순환수는 유량 10 L/hr로, timer를 이용하여 시간당 약 10분씩 총 24번 주입하도록 하였다. 또한 유기탄소원 공급조는 같은 순환수를 공급하여 주었으며, 8 L/hr의 유량으로 24 hr 연속 주입하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 왕겨의 구성성분

표 1과 2는 왕겨의 성분 분석을 위하여 왕겨 내 C, H, N, S, O의 원소 분석 결과를 나타낸 것으로, 주요 유기물 구성성분인 탄소, 수소, 질소 및 산소의 농도가 대부분이었으며, 그 중에서 주요성분인 탄소가 23.00%를 차지하였다. 황 원소의 경우, 검출 한계보다 낮은 양이므로 원소분석기를 통해서 측정할 수 없었다. 특히 SEM-EDX 분석을 통해 왕겨의 표면에 충분한 탄소가 존재함을 확인하여, 미생물 담체의 소재로서 잘 활용될 것으로 판단되었다.

#### 3.2 왕겨용출액 분석

왕겨펠릿의 탈취용 담체 가능성을 평가하기 위해 왕겨의 용출액을 통하여 유기물, 영양염류 및 미량원

Table 1. Elemental composition of dried rick husk (% by weight).

N	C	H	S	O
32.94	23.00	2.05	n/d	42.01

Table 2. Elemental composition of surface of dried rice husk (% by weight).

C	O	Al	Si	K
13.68	25.78	0.18	12.92	0.41

소의 용출특성 평가를 실시하였으며, 추출된 왕겨용출액의 경과 일수에 따른 농도변화를 육안으로 확인한 결과, 점차 색도가 증가함을 확인할 수 있었다. 왕겨용출액의 시간경과에 따른 유기물의 농도 변화는 그림 5에 나타내었다. 왕겨용출액은 3L의 증류수에 왕겨펠릿 60g을 투여한 왕겨용출액 분석결과, 1일 경과 후 왕겨용출액의 최종 용출액 성상은 COD 311 mg/L, TOC 129 mg/L, SiO<sub>2</sub> 78.2 mg/L, PO<sub>4</sub>-P 7.18 mg/L, 그리고 NH<sub>3</sub>-N 3.15 mg/L를 각각 기록하였으며, 반응초기에는 매우 빠르게 용출되다가 점차적으로 용출농도가 희석되었으나, 지속적으로 유기물이 용출되는 것을 확인하였다. 왕겨용출액의 탄소성분의 조성은 COD 측정값과 TOC 농도 측정값은 비율은 COD값이 일반적으로 TOC의 2.25배 정도의 경향을 보였다.

반응초기 매일 반복하여 증류수로 교체하여 왕겨의 용출액 내의 TOC와 SiO<sub>2</sub> 용출농도를 1일 단위로 측정해본 결과, 초기 2일간은 탄소성분의 농도가 더 높은 경향을 보였으나, 3일 이후부터는 SiO<sub>2</sub>의 용출농도가 TOC 용출농도를 역전하여 점차적으로 증가하는 경향을 보였다(그림 2). 이는 유기탄소성분은 용출속도가 점차적으로 줄어드는 반면, 규소성분은 난분해성 성분과 함께 꾸준히 지속적으로 용출되는 것을 확인하였다. 왕겨의 외피는 격자형태로서 규소(Si)가 여러 층으로 피복되어 있으며, 내피는 표면 전체에 걸쳐 규소층이 얇게 분포되어있다(Kim *et al.*, 1998). 이러한 왕겨의 구조 특성으로 인해 규소성분

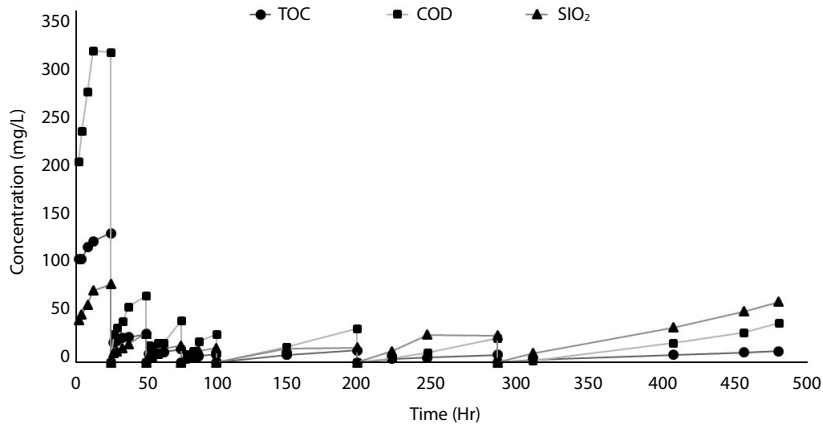


Fig. 2. TOC, COD and SiO<sub>2</sub> concentration of eluted rice husk.

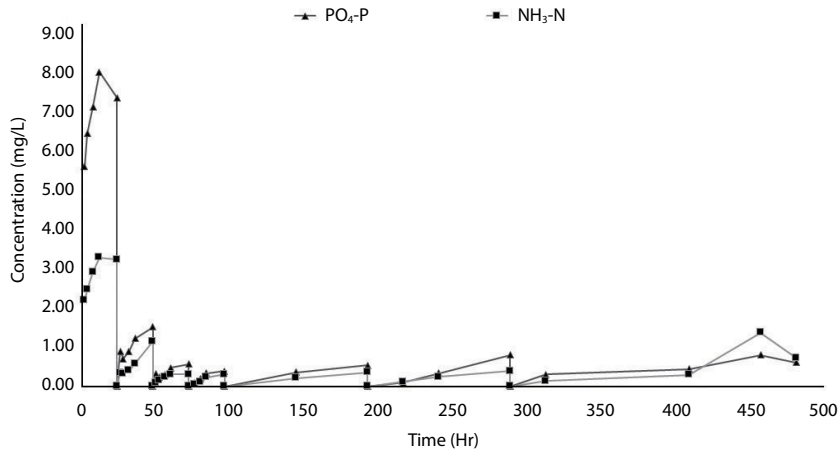


Fig. 3. PO<sub>4</sub>-P and NH<sub>3</sub>-N concentration of eluted rice husk.

이 꾸준히 용출된 것으로 판단된다.

미생물의 성장에 필수요소인 인산염인과 암모니아성 질소의 용출농도를 측정해 본 결과, 초기 2일까지는 고농도로 용출이 되다가 2일 경과 후 용출이 일정한 농도로 지속됨을 확인하였다. 또한 용출 인산염인이 암모니아성 질소에 비하여 평균 약 1.8배 더 높은 농도로 용출되는 경향을 보였다(그림 3). 총 20일간 20 g/L 당 왕겨를 증류수에 투입하여 교반속도 500 ± 10 rpm으로 용출시켜 수용액을 제조하였고, 이 수용액의 화학적 조성비율에 대한 C(COD) : N : P 비율은

약 45 : 1 : 2 정도로 산출되었다. 이를 바탕으로 왕겨 용출액은 질소성분의 함량은 상대적으로 부족하지만, 영양원인 탄소와 성장필수요소인 인산염인을 지속적으로 공급하여 부착성 탈취미생물의 성장성장은 충분한 영양공급원을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 왕겨용출액의 미생물 산소소모속도 (Oxygen uptake rate)

왕겨펠렛은 담체로서 미생물의 부착공간을 형성하

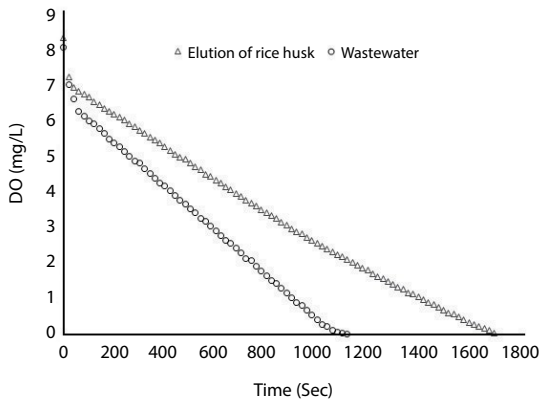


Fig. 4. Oxygen uptake rate of eluated rice husk and water.

면서 탈취용 미생물의 생성성장을 돕는 유기영양물질을 제공한다. 왕겨펠렛이 제공하는 유기영양물질의 분해 정도를 파악하기 위하여 기초실험으로서 왕겨용출액을 이용하여 미생물의 산소소모속도를 파악하였다. 왕겨용출액(왕겨용출액농도, COD 392 mg/L, TOC 71.4 mg/L)에 대한 대조군으로서 고양시 하수처리장으로 유입하기전 약 2 km 이전에서 유하하는 하수관 간선측 맨홀을 통해서 직접 채취한 생하수(하수농도, COD 195 mg/L, TOC 31.3 mg/L)를 활용하여 미생물 산소소모속도 실험을 실시하였다. 또한 김포 고촌하수처리장으로부터 포기조 활성슬러지를 채취하여 실내 반응조 시험으로 안정화시킨 MLSS 농도 7,420 mg/L인 고농도 활성슬러지를 활용하였다. 실험 결과로서 용존산소 소모속도를 그림 4와 같이 나타냈다. 왕겨용출액의 초기 DO 농도 8.28 mg/L로부터 완전히 샘플 내 산소농도가 0이 될 때까지의 시간은 1,700초 이었고, 반면 하수는 초기 DO 농도 8.02 mg/L로부터 약 1,120초 만에 미생물이 산소를 완전 소모하였다. 이는 왕겨용출수의 산소소모 도달시간이 약 1.51배를 기록한 결과이다. 왕겨용출액의 COD 농도가 하수 COD 농도의 약 2배임을 감안하여, 해당 결과를 바탕으로 단위농도에 따른 산소소모속도를 추정하였을 때, 산소소모율이 약 1.5배 빨리 소진되는 것으로 추정하였다. 이를 통하여 BOD 병내 300

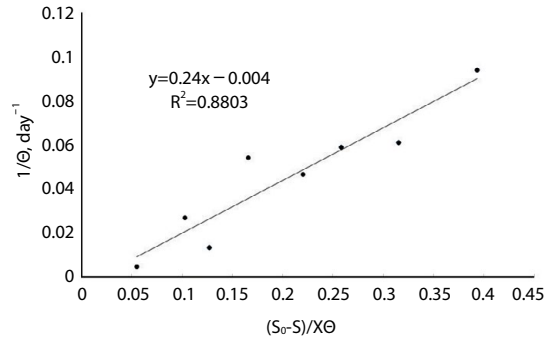


Fig. 5. Growth curve for a microorganism population.

mL내 MLSS 7,420 ppm의 활성슬러지 및 시료의 1:4 투입조건에서, 왕겨용출액과 하수의 산소소모속도는 각각 0.0049 mgO<sub>2</sub>/L/sec이고, 하수는 0.0096 mgO<sub>2</sub>/L/sec임을 확인하였다. 결과적으로 미생물의 산소소모속도는 왕겨용출액을 분해하는데 일반하수 대비 약 0.5배의 산소소모속도를 보임을 알 수 있었다.

본 왕겨용출수를 활용한 미생물 성장속도 산출하기 위하여 총 8개의 다른 F/M비 조건에서 실험을 진행하였으며, 미생물 성장속도(기율기, Yield Value)를 분석하기 위하여 선형회귀곡선을 도출하였다(그림 5). 이때 Y축은 1/SRT (day<sup>-1</sup>), X축은 F/M비 (day<sup>-1</sup>)를 나타낸다. 왕겨용출액 미생물 반응기운전을 통한 분석결과, 왕겨에서 용출된 COD의 Yeild값은 0.24 mgSS/mgCOD, decay rate (k<sub>d</sub>)는 약 0.004로 도출되었으며, 미생물 산소소모속도의 비교 경향과 유사한 결과를 보임을 확인하였다. 일반 하수를 통한 미생물 성장속도 Yeild값이 통상 0.4~0.5 정도를 나타내는 것과 비교할 때, 왕겨용출수는 탄소원뿐만 아니라 미생물이 분해하기 어려운 규소 및 실리카 등이 포함되어 있기 때문에 미생물 성장속도가 일반하수에 비해 약 0.5~0.6배의 낮은 수치를 보인다고 판단된다.

### 3.4 왕겨펠렛의 제조

표 3에 나타난 바와 같이 점결제를 용매에 용해한 후 분말왕겨와 배합하였을 경우 펠렛화가 되지 않았으며, PVAc를 주입하지 않았을 때에도 펠렛이 만들

**Table 3.** The results of pelletization of rick husk.

Method	Rice husk	Mixing ratio (Rice husk : EVAc : PVAc)	Solvent	Pelletization
Grind and mix with dissolved binder	20g	10:0.4:0	DI 20 mL	×
Grind and mix with dissolved binder	20g	10:0.2:0	DI 20 mL	×
Grinding with binder	20g	10:1:0	DI 20 mL	×
Grinding with binder	20g	10:2:0	DI 20 mL	×
Grinding with binder	20g	10:2:0	30% NH <sub>3</sub> solution 20 mL	×
Grinding with binder	20g	10:2:0	0.1 M NaOH 20 mL	×
Grinding with binder	20g	10:2:0.1	DI 20 mL	○
Grinding with binder	20g	10:2:0.1	30% NH <sub>3</sub> solution 20 mL	○
Grinding with binder	20g	10:2:0.1	0.1 M NaOH 20 mL	○
Grinding with binder	20g	10:2:0.2	DI 20 mL	○ (Optimum condition)
Grinding with binder	20g	10:2:0.2	30% NH <sub>3</sub> solution 20 mL	○
Grinding with binder	20g	10:2:0.2	0.1 M NaOH 20 mL	○

어지지 않았다. 반면에 왕겨와 점결제, 수분을 동시에 분쇄한 후 혼합하였을 경우 안정적인 펠렛이 만들어졌으며, 다만 PVAc의 비율이 증가할 경우 더욱 단단한 펠렛이 만들어지는 것을 확인하였다. 또한 PVAc와 EVAc의 안정적 결합을 유도하기 위해 주입했던 알칼리성 용액의 경우 그 역할이 미미했으며, 증류수만으로도 PVAc와 EVAc가 안정적으로 혼합되었다. 결과적으로 분쇄왕겨와 점결제로 EVAc, PVAc 증류수를 무게비로 10 (건조분쇄왕겨) : 2 (EVAc) : 0.2 (PVAc) : 10 (증류수)를 함께 분쇄 혼합하여 압밀한 후 건조하였을 경우 약 6개월간 수중에서 안정적인 형태의 왕겨펠릿 형태를 유지하여 최적 조건으로 선정하였다(표 3). 도출된 최적 조건을 통해 그림 6에 보이는 바와 같이 직경 1cm의 원기둥 형태의 단단한 구조의 왕겨펠릿이 제조되었다. 건조된 펠렛은 딱딱하였으나 수분을 함유한 후에는 약간 팽창하고 점결제로 사용된 EVAc에 의해 약간의 탄력성을 띠게 되었다.

**3.5 왕겨펠릿의 물리적 특성**

왕겨펠릿이 탈취메디아로서 장점을 갖추기 위해서는 높은 공극률을 보여야 하는 동시에 수분함량이 충분해야 하며, 아울러 수분이 많을 경우 팽윤현상이 있어야 한다. 미생물담체의 공극률은 미생물의 생장 공간을 제공하는 주요 인자로, 본 연구에서는 왕겨펠릿을 0.5 cm, 1 cm 길이로 절삭하여 고르게 충전한 후

겉보기 밀도 및 공극률을 측정하였다. 왕겨펠릿 충전 시 겉보기 밀도는 368 g/L이며, 충전 시 공극률은 59.00%로 미생물 담지를 위해 알맞은 물리적 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 왕겨펠릿의 수분함량은 표 4와 같으며, 수분을 함유할 경우 함량에 따른 크기증가는 길이증가율, 지름증가율 및 체팽창율은 각각 1.51%, 3.80%, 9.40%임을 확인하였다(표 5). 따라서 왕겨를 탈취용 펠렛으로 사용할 경우, 전술한 바와 같이 미생물성장에 필요한 유기물과 영양물질인 질소 및 인의 함량이 충분할 뿐만 아니라, 악취공기 유입 시 담체가 건조되어 미생물이 사멸을 방지할 수 있는 수분이 충분히 함유될 수 있음을 알 수 있다.

**3.6 건조왕겨의 악취가스 흡착능**

왕겨펠릿을 이용한 bio scrubber 공정의 경우, 악취의 주요 제거 메카니즘은 순환수 세정에 의한 제거와 미생물에 의한 분해가 주 제거 과정일 것으로 예상된다. 따라서 왕겨 자체의 악취가스 흡착능을 평가하고자 건조왕겨를 이용하여 암모니아 가스와 황화수소 가스의 제거효율을 알아보았다. 실험결과는 그림 7과 같이 나타내었다.

암모니아 가스는 건조 왕겨 1g의 경우 97.73%, 2g의 경우 98.63%, 4g의 경우 100%의 제거율을 보여 왕겨자체가 암모니아 가스에 대한 높은 흡착능을 보임을 확인하였다. 왕겨의 주요 성분은 셀룰로오스와 리그닌 계열로 다양한 연구에서 암모니아 가스 제거



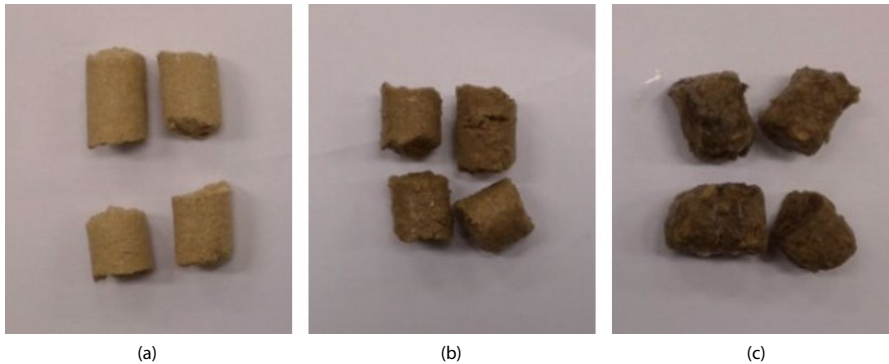


Fig. 6. The picture of dried (a), wetted (b) and microorganism attached (c) rice husk pellet

Table 4. Water retention capacity of rice husk pellets.

Dried pellet (g)	Wetted pellet (g)	Weight increase(%)
17.74	30.68	73

에 있어 셀룰로오스 및 리그닌이 탁월한 흡착소재임이 보고된 바 있다. 일반적으로 셀룰로오스는 극성 수산화기를 포함하고 있으며, 일정량의 수분을 함유하고 있어 주변의 극성 입자 및 가스들을 잘 흡착하는 특성을 지닌다. 이러한 왕겨의 특성이 암모니아 가스에 대한 높은 흡착능의 주요 원인으로 판단된다 (Wonorahardjo *et al.*, 2017).

동일한 방법으로 황화수소의 왕겨에 의한 제거 실험을 수행한 결과, 그림 8에서 나타난 바와 같이 실험 시작 초기에는 황화수소 가스의 농도가 일시적으로 감소되었으나, 재용출되어 제거되지 않는 결과를 나타내었다. 다만 왕겨의 주입량이 높을 경우 약 52.00%의 제거효율을 보였다. 본 실험을 통해서 연속 실험 시 암모니아 가스는 건조왕겨 담체에 의해서도 가능하나, 황화수소 등은 수분공급에 의한 미생물에 의한 제거로 가능할 것으로 판단된다.

### 3.7 악취가스 연속 제거장치의 악취가스 제거 효율

유입 암모니아 가스와 황화수소의 농도는 각각 약 30 ppmv, 5 ppmv로 유지하고, 생물탈취반응조의 공칭 체류시간은 60초, 선속도는 40.2 m/hr, 공극률은 50%

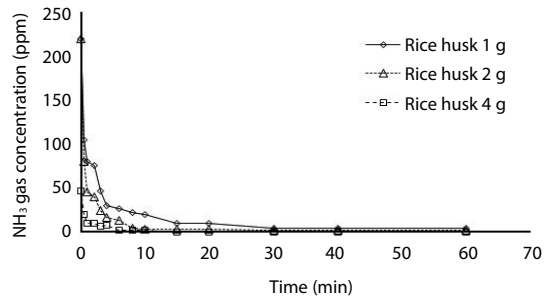


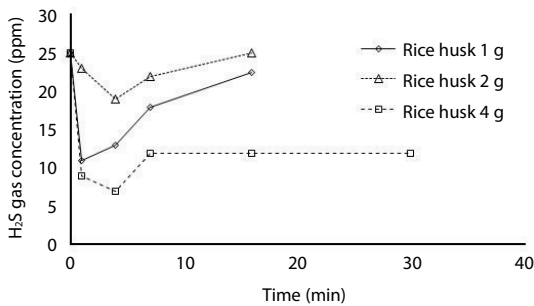
Fig. 7.  $\text{NH}_3$  gas adsorption capacity versus contact time at different rice husk dosage.

이었다. 그리고 부피부하는 암모니아 가스의 경우는 공칭으로는  $30.4 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$ , 순수 매디아에 의해서는  $76 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$ 이었으며, 황화수소의 경우는 공칭 및 순수매디아 각각  $6.2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$ ,  $15.4 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$ 로 운전하였다.

그림 9(a)는 전술된 운전조건에서 약 40일간의 가스 제거효율을 나타낸 것으로,  $\text{NH}_3$  가스의 경우 초기부터 높은 제거효율을 보인다. 이는 미생물이 활성화되기 이전에는 물에 대한 높은 용해도를 갖는 암모니아 가스가 순환수에 흡수되거나 암모니아 가스가 왕겨펠렛에 직접 흡착되기 때문인 것으로 판단된다 (Nisola *et al.*, 2009). 또한 왕겨의 흡착능이 포화가 된 이후에도 지속적으로 높은 제거효율을 유지하는 이유는 순환수에 의한 수착과 미생물에 의한 질산화 반응이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 5일 간격으로 단계별 제거효율을 측정된 결과, 초기 1단에서 평

**Table 5.** Size and bulk increase of rice husk pellets after wetted.

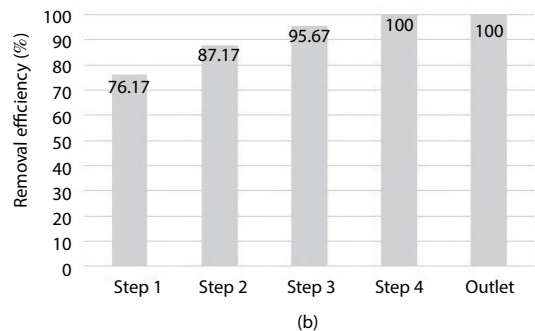
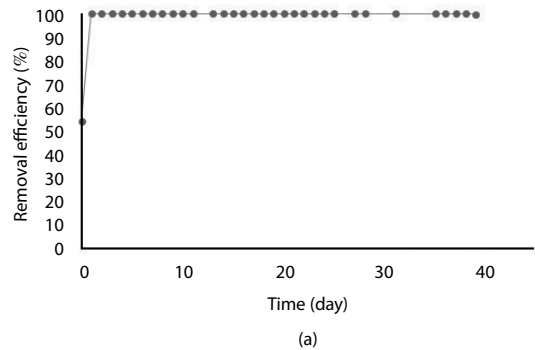
	Dried pellet			Wetted pellet			Length increase (%)	Diameter increase (%)	Volume increase (%)
	Length (mm)	Diameter (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Length (mm)	Diameter (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )			
KED	23.17	11.83	25.45	23.52	12.28	27.84	1.51	3.80	9.4



**Fig. 8.** H<sub>2</sub>S gas adsorption capacity versus contact time at different rice husk dosage.

균 제거율이 76.17%로 측정되어 대부분의 암모니아 가스가 제거되는 것을 확인하였으며, 3단 이후부터는 대부분의 암모니아 가스가 제거되는 것을 확인할 수 있었다(그림 9(b)). 일반적인 Bioscrubber의 생물담체로는 주로 토양, 섬유상이탄, 퇴비, 실리카형 고정화 담체 등이 사용되는데 이들 장치의 암모니아 가스 제거효율은 42~99%로 본 연구 결과와 유사한 결과를 보였다(Liu *et al.*, 2017; Won, 2007).

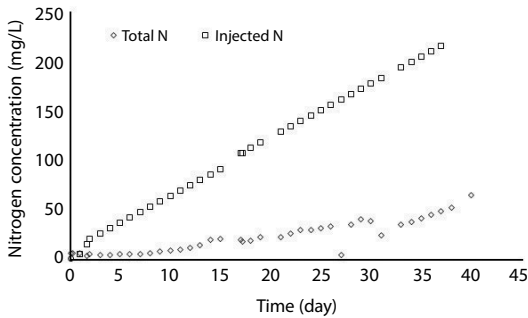
40일간의 반응기 운전 후 순환수의 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결과가 나타났다. 순환수 내의 질소계열 이온의 농도와 가스형태로 유입된 질소의 농도를 비교한 결과를 그림 10에 나타내었다. 유입된 질소의 양과 실제 순환수 내에 존재하는 총질소의 양을 비교해보면 점차 그 차이가 커지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 본 반응기에서 질산화와 탈질이 동시에 발생하였다는 것을 의미한다. 이에 장기간 운전 시 암모니아 가스의 주요 제거효율은 순환수에 의한 용해와 왕겨펠릿 표면에 부착된 질산화 박테리아에 의한 것으로 판단되는데, 이는 왕겨로부터 공급받은 생물학적으로 분해가 용이한 탄소원에 의해 질소가스로 환원되어 유기 탄소원 공급에 의한 종속영양 탈질



**Fig. 9.** NH<sub>3</sub> gas removal efficiency of bio scrubber packed with rice-husk pellets (a) long time experiment, (b) Removal efficiency of each step.

이 발생된 것으로 판단된다.

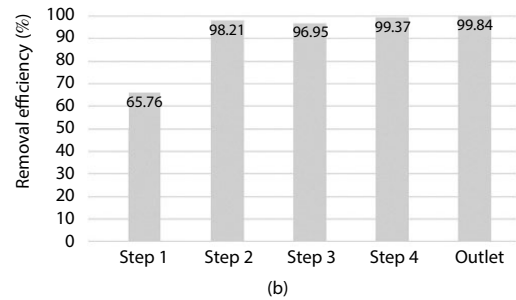
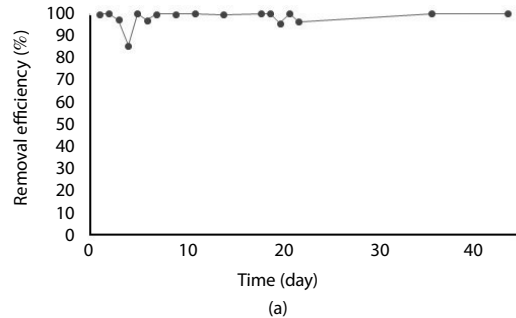
질산화 과정에 참여하는 세균의 경우, 유기물에 저해를 받는 반면(Kulikowska *et al.*, 2010)에, 탈질과정에는 유기물이 필요하다. 산소 요구도 역시 상반된 조건인데, 질산화 세균은 폐수의 높은 산소 용해도(DO)를 요구하나, 탈질세균의 경우 산소는 유독하게 작용하여 무산소조로 운영된다(Lloyd *et al.*, 1987). 본 연구결과의 경우, 한 반응조 내에서 질산화와 탈질이 동시에 일어나는데 이를 바탕으로 종속영양성 질산화와 호기적 탈질을 수행하는 미생물군이 왕겨펠릿



**Fig. 10.** Total nitrogen concentration in circulation water and Injected Nitrogen concentration into bio scrubber reactor.

에 서식된다는 결론을 도출할 수 있다. 종속영양성 질산화와 호기적 탈질을 수행하는 미생물군은 그간 많은 연구자에 의해 발견되어 왔으며, 대표적인 미생물로 *Thiosphaera pantotropha*, *Alcaligenes faecalis*, *Bacillus* sp., *Diaphorobacteria* sp., *Acinetobacter calcoaceticus*, *Agrobacterium* sp., *Pseudomonas putida*, *P. stutzeri*, *Microvirgula aerodenitrificans* (Cherdtrakulkiat *et al.*, 2016; Chu and Wang, 2016; Samuel *et al.*, 2014; Chen and Ni, 2012; Zhao *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2008; Khardenavis *et al.*, 2007) 등이 있다. 유기물과 산소를 이용할 수 있는 조건이 동일하여 동시에 질산화와 탈질이 한 반응기 내에서 일어날 수 있고, 종속영양성 질산화의 최종 생성물 및 기질이 다양하기 때문에 다양한 미생물이 왕겨펠릿 기반 bio-scrubber 악취제거 반응탑 내에서 혼합배양이 가능하다고 판단된다(Marazioti, *et al.*, 2003).

그림 11(a)는 황화수소 가스의 제거율을 나타내며, 주입초기부터 유입 가스의 99.00% 이상의 제거효율을 나타내는데, 이는 기존에 보고된 타 생물담체와 유사한 제거효율을 보임을 확인하였다(Jeon *et al.*, 1998). 황화수소 가스 역시 암모니아 가스와 마찬가지로 왕겨펠릿에 흡착되거나 왕겨펠릿에 부착된 미생물에 의한 제거가 나타나는 것을 의미한다. 또다른 제거 요인으로는 암모니아 가스의 물에 대한 용해도가 높아 순환수에 안정적으로 흡수 제거되는 것으로 판단된다. 왕겨펠릿 충전 단계별 제거율을 측정할 결



**Fig. 11.** H<sub>2</sub>S gas removal efficiency of bio scrubber packed with rice-husk pellets (a) long time experiment, (b) Removal efficiency of each step.

과, 초기 1단에서 65.76% 정도 제거되며, 2단부터 거의 대부분의 가스가 제거되는 것을 확인하였다(그림 11(b)). 순환수 분석을 통해 최초 순환수에 존재하지 않았던 SO<sub>2</sub>가 점차 증가되는 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 미생물에 의한 황화수소 가스의 산화가 발생함을 의미한다(그림 12).

통상적으로 황화수소의 산화에는 광독립영향형 세균과 화학독립영향형 세균이 이용가능한데, 본 연구에서는 반응기에 광원을 조사하지 않아 화학독립영향형 세균에 의한 황화수소 산화가 발생한 것으로 판단된다. 이러한 화학독립영향형 세균은 전자공여체로 황화수소를 이용하고 CO<sub>2</sub>를 탄소원으로 하여 최종적으로 황산염을 생성한다(Huh, 2007).

이를 종합해본 결과 왕겨펠릿이 충전된 bioscrubber 악취제거 장치는 물에 대한 용해도가 높은 악취 가스에 대해 높은 제거효율을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 장기운전 시에도 미생물이 왕겨로부터 영양분을 공급받아 안정적으로 생존하여 지속적으로 높

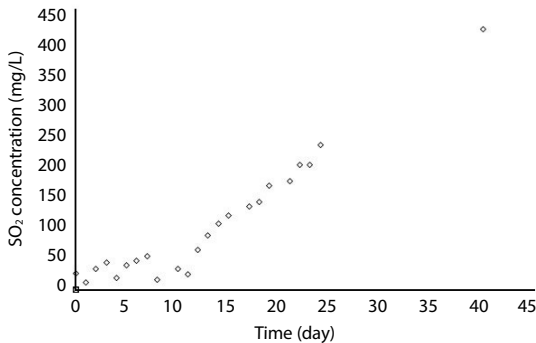


Fig. 12. SO<sub>2</sub><sup>-</sup> ion concentration in circulation.

은 제거효율을 보임을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 왕겨를 생물세정 악취제거 시스템의 미생물 담체로서 활용하기 위하여 이를 펠렛화하는 연구를 수행하였으며, 동시에 개발된 왕겨펠렛이 충전된 생물세정탑을 제작하여 악취가스 저감효율을 평가하였다.

왕겨의 주요 구성성분은 탄소, 수소, 질소 및 산소의 농도가 대부분이었으며, 그중 주요성분인 탄소가 23.00%를 차지하였다. 또한 왕겨용출액 분석을 통해서도 C : N : P 비율은 약 45 : 1 : 2 정도로 산출되어 영양원인 탄소와 성장필수요소인 인산염인을 지속적으로 공급하였으며, 부착성 탈취미생물의 성장에 충분한 영양공급원을 제공함을 확인하였다. 왕겨용출액의 산소소모속도, 용출된 COD의 yeild, decay rate는 각각 0.0049 mgO<sub>2</sub>/L/sec, 0.24 mgSS/mgCOD, 0.004로 도출되었다.

왕겨의 펠렛화 연구의 경우 분쇄왕겨와 EVAc, PVAc, 증류수를 무게비로 10 (건조분쇄왕겨) : 2 (EVAc) : 0.2 (PVAc) : 10 (증류수)를 함께 분쇄 혼합하여 압밀한 후 건조하였을 경우, 가장 안정적인 형태의 왕겨펠렛이 제조되었다. 제조된 왕겨펠렛은 겉보기 밀도는 368 g/L이며, 충전 시 공극률은 59.00%로, 미생물을 담지하기 위해 알맞은 물리적 특성을 갖고

있음을 확인하였다.

건조왕겨는 암모니아 가스에 대한 높은 흡착능을 보이는 반면, 황화수소에 대해서는 낮은 흡착능을 보였다. 왕겨펠렛이 충전된 bioscrubber 악취제거 장치는 물에 대한 용해도가 높은 악취가스에 대해 높은 제거효율을 나타냄을 알 수 있었으며, 순환수 분석을 통해 주요 제거 기작은 물에 의한 용해와 미생물에 의한 질산화 및 황산화 과정임을 알 수 있었다. 최종적으로 장기운전 시에도 미생물이 왕겨로부터 영양분을 공급받아 안정적으로 생존하여 지속적으로 높은 제거효율을 보임을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부 환경산업기술원 씨앗기술성장지원 기술개발사업(2017-001980002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

- Ahmed, W., Shareefdeen, Z.M., Jabbar, N.A. (2014) Dynamic modeling and analysis of biotrickling filters in continuous operation for H<sub>2</sub>S removal, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(8), 1757-1765.
- AMBIO Bio filtration Ltd (2016) Biofiltration Process. [www.ambio.ca/operation.php](http://www.ambio.ca/operation.php).
- Bajpai, P. (2014) *Biological Odour Treatment*, Springer, Heidelberg-New York-Dordrecht-London.
- Chen, L., Hoff, S.J. (2009) Mitigating odors from agricultural facilities: a review of literature concerning biofilters, *Applied Engineering in Agriculture*, 25(5), 751-766.
- Chen, Q., Ni, J. (2012) Ammonium removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 113, 619-623.
- Cherdtrakulkiat, R., Boonpangrak, S., Sinthupoom, N., Prachayasittikul, S., Ruchirawat, S., Prachayasittikul, V. (2016) Derivatives (halogen, nitro and amino) of 8-hydroxyquinoline with highly potent antimicrobial and antioxidant activities, *Biochemistry and Biophysics Reports*, 6, 135-141.
- Chu, L., Wang, J. (2016) Denitrification of groundwater using PHBV blends in packed bed reactors and the micro-

- bial diversity, *Chemosphere*, 155, 463-470.
- Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P. (2001) Biological elimination of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> from waste gases by biofilter packed with immobilized heterotrophic bacteria, *Chemosphere*, 43, 1043-1050.
- Estrada, J.M., Kraakman, N.J.R.B., Munoz, R., Lebrero, R. (2011) A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants, *Environmental Science & Technology*, 45, 1100-1106.
- Huh, M. (2007) Kinetic Theory on Biological deodorization by bioscrubbers, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 29(7), 739-746.
- Jeon, U., Song, M., Sa, J. (1998) Removal Characteristics of H<sub>2</sub>S in a Bioscrubber, *Korean Society for Atmospheric Environment*, 1, 143-145.
- Joint research center (JRC) (2016) Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector, 16-19.
- Kennes, C., Veiga, M.C. (2001) Conventional biofilters. In: *Bioreactors for Waste Gas Treatment*, Springer Science & Business Media, 47-98.
- Kennes, C., Veiga, M.C. (2010) Technologies for the abatement of odours and volatile inorganic and organic compounds, *Chemical Engineering Transactions*, 23, 1-6
- Khardenavis, A.A., Kapley, A., Purohit, H.J. (2007) Simultaneous nitrification and denitrification by diverse *Diaphrobacter* sp., *Applied Microbiology and Biotechnology* 77, 403-409.
- Kim, H., Park, C., Kim, H., Jeong, S., Na, Y. (1998) Odor Removal of Sulfur Compounds using Montmorillonites and Rice Hulls, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Fall domestic conference, 541-542.
- Kim, K.S., Kim, I.T. (2009) Feasibility Test of Rice-Husk as Biological Media for Odor Removal, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 17(4), 105-112.
- Kim, M., Jeong, S., Yoon, S.J., Cho, S.J., Kim, Y.H., Kim, M.J., Ryu, E.Y., Lee, S. (2008) Aerobic denitrification of *Pseudomonas putida* AD-21 at different C/N ratios, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 106, 498-502.
- Kulikowska, D., Jozwiak, T., Kowai, P., Ciesieski, S. (2010) Municipal landfill leachate nitrification in RBC biofilm-process efficiency and molecular analysis of microbial structure, *Bioresource Technology*, 101, 3400-3405.
- Lloyd, D., Boddy, L., Davies, K.J.P. (1987) Persistence of bacterial denitrification capacity under aerobic conditions - the rule rather than the exception, *FEMS Microbiology Ecology*, 45, 185-190.
- Liu, F., Fiencke, C., Guo, J., Rieth, R., Cuhls, C., Dong, R., Pfeiffer, E. (2017) Bioscrubber treatment of exhaust air from intensive pig production: Case study in northern Germany at mild climate condition, *Engineering in Life Science*, 17, 458-466.
- Loriato, A., Salvador, N., Santos, J., Moreira, D.M., Costa Junior, N. (2012) Odour a vision on the existing regulation, *Chemical Engineering Transactions*, 30, 25-30.
- Marazioti, C., Kornarons, M., Lyberatos, G. (2003) Kinetic modeling of a mixed culture of *Pseudomonas denitrificans* and *Bacillus subtilis* under aerobic and anoxic operating conditions, *Water Research*, 37, 1239-1251.
- Mudliar, S., Giri, B., Padoley, K., Satpute, D., Dixit, R., Bhatt, P., Pandey, R., Juwarkar, A., Vaidya, A. (2010) Bioreactors for treatment of VOCs and odours - a review, *Journal of Environmental Management*, 91, 1039-1054.
- Nicell, J.A. (2009) Assessment and regulation of odour impacts, *Atmospheric Environment*, 43, 196-206.
- Nisola, G.M., Cho, E., Orata, J.D., Redillas, M.C.F.R., Farnazo, D.M.C., Tuuguu, E., Chung, J.W. (2009) NH<sub>3</sub> gas absorption and bio-oxidation in a single bioscrubber system, *Process Biochemistry*, 44(2), 161-167.
- Reza, I., Huub, H.J.C., Marc, A.D., Edward, D.S. (2005) Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal, *Environmental Progress*, 24, 254-267.
- Samuel, M.S., Sivaramakrishna, A., Mehta, A. (2014) Degradation and detoxification of aflatoxin B1 by *Pseudomonas putida*, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 86, 202-209.
- Sector available at: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CWW\\_Final\\_Draft\\_07\\_2014.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CWW_Final_Draft_07_2014.pdf)
- Turgeon, N., Buelna, G., Dubois, S., Noël, J. (2009) Plante Development and optimization of an experimental bioscrubber for the control of rendering plant odours F.-B. Frechen (Ed.), *Odours and VOCs: Measurement, Regulation and Control Techniques*, Kassel University Press, Kassel, 198-206.
- Won, Y.S. (2007) Biotreatment technologies for Air pollution control, *Clean Technology*, 1, 1-15.
- Wonorahardjo, S., Ibnu, M.S., Budiasih, E. (2016) Sulfur dioxide and ammonia gas reduction using coconut cellulose and acetylated cellulose, *Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 17(2), 179-188
- Zhao, B., He, Y.L., Hughes, J., Zhang, X.F. (2010) Heterotrophic nitrogen removal by a newly isolated *Acinetobacter calcoaceticus* HNR, *Bioresource Technology*, 101, 5194-5200.