

Technical Article

## 조류 바이오매스를 이용한 토양개량제의 퇴비화 과정에 따른 영양성분 특성

안창혁 · 이새로미 · 박재로

한국건설기술연구원 국토보전연구본부

### Nutritional Properties by Composting Process of Algae Biomass as Soil Conditioner

Chang-Hyuk Ahn · Saeromi Lee · Jae-Roh Park

Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**요약:** 본 연구에서는 폐기되는 조류 바이오매스를 재활용하여 퇴비화 과정을 통해 새로운 형태의 조류토양개량제(algae soil conditioner, ASC)로 제조하고 영양성분에 대한 특성을 평가하였다. ASCs는 응집부상공법을 통해 수집된 조류 바이오매스를 주원료로 하였으며 추가적으로 다양한 보조 원료(톱밥, 펄라이트, 깻묵 등)를 첨가하여 제조하였다. ASCs는 투입된 조류 바이오매스 질량 비율에 따라 각각 blank 0%, ASC1 11.7%, ASC2 21.6%, ASC3 37.6%, ASC4 59.5%로 구분하여 총 127일간 부숙하였다. ASCs는 호기성 미생물 반응에 의해 온도 증감이 뚜렷하게 나타났으며 6~7회의 크고 작은 온도 피크가 관찰되었다. 이화학 분석결과 유기물이 무기화(mineralization) 되면서 macronutrients (TN, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) 뿐만 아니라 secondary macronutrients (CaO, MgO)에서도 두드러진 증가를 보였다. 미생물 군집변화는 ASCs의 부숙과정에 따라 1단계(세균, 사상균)→2단계(방선균, 세균)→3단계(고초균)로 나타났으며 온도변화와 영양성분의 거동과 밀접한 관련이 있다고 판단되었다. 부숙 완성도에 따라 토양개량제의 품질이 결정될 수 있으며 본 연구결과에서는 조류 바이오매스를 59.5% 이내로 조절한다면 효과적인 미생물 활성을 유도할 수 있을 것으로 판단되었다. 결론적으로 조류 바이오매스를 재활용한 토양개량제의 제조 및 활용 가능성을 확인하였으며 추가적인 기술적 발전이 이루어진다면 향후 효과적인 토양개량제로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** 조류토양개량제, 조류 바이오매스, 퇴비화 과정, 영양성분, 미생물

**Abstract:** In this study, we produce a new type of the algae soil conditioner (ASC) using discarded algae biomass through a composting process and evaluate its nutritional characteristics. As the main ingredient, the ASCs used algae biomass collected through the coagulation-floating method and made by adding a variety of additional supporting materials (sawdust, perlite, oilcake etc.). ASCs

First & Corresponding Author : Chang-Hyuk Ahn, Tel: +82-31-910-0743, E-mail: chahn@kict.re.kr, ORCID: 0000-0002-6761-0693

Co-Authors: Saeromi Lee, Tel: +82-31-910-0059, E-mail: saeromi@kict.re.kr, ORCID: 0000-0003-3352-5607

Jae-Roh Park, Tel: +82-31-910-0302, E-mail: jrpark@kict.re.kr, 0000-0002-0961-2797

Received: 1 October, 2019. Revised: 24 October, 2019. Accepted: 30 October, 2019.

were divided into 0% in blank, 11.7% in ASC1, 21.6% in ASC2, 37.6% in ASC3, 59.5% in ASC4, and composted during 127 days. ASCs showed a sharp increase in temperature by aerobic microbial reaction, and 6~7 high and low temperature peaks were observed. As a result of physicochemical analysis, mineralization proceeded according to decomposing the organic matter and there was a marked increase not only in macronutrients (TN, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O), but also in secondary macronutrients (CaO, MgO). The microbial community change was found in stage 1 (bacteria, filamentous fungi) → stage 2 (actinomycetes, bacteria) → stage 3 (*Bacillus* sp.), depending on the maturation process. It was estimated that microbial transition was closely related to temperature change and nutritional behavior. The quality of soil conditioner can be determined according to the maturity of compost process, and it was determined that effective microbial activity could be induced by controlling algae biomass below 59.5% in this study. In conclusion, we found out the possibility of manufacturing and utilizing soil conditioner recycled algae biomass and if further technological development is made on the basis it can be used as an effective soil conditioner.

**Keywords :** Algae soil conditioner (ASC), algae biomass, composting process, nutritional ingredients, microorganism

## I. 서론

최근 조류(algae)는 세계적으로 대체 에너지, 사료, 식품, 의약품 원료 등 다양한 분야에서 활발히 연구 중이다. 조류는 가공이 용이하고 단위면적당 생산성이 높으며 육지 자원과 경쟁할 필요가 없는 이유로 3세대 바이오매스로 주목받고 있을 만큼 가치가 크다(Adeniyi et al, 2018). 조류는 광독립영양생물(photoautotrophs)로서 세포단위로 수중에서 CO<sub>2</sub>를 고정시키거나 영양염류를 흡수하는 기작을 통해 높은 광합성 효율을 내어 바이오매스를 증가시킬 수 있다. 이와 같은 조류의 생리적 특징을 활용한다면 수중의 질소(nitrogen), 인(phosphorus), 미네랄 등을 손쉽게 확보하여 재이용 할 수 있는 생태공학적인 기술 개발이 가능할 뿐만 아니라 최근 세계적인 부영양화 이슈와 관련하여 조류의 활용성을 증가 시킬 수 있을 것이다(Han et al, 2014).

조류는 다양한 방식으로 농업에 활용될 수 있다. 특히 토양의 물리화학적 성질을 개선하는 토양개량제(soil conditioner)나 식물성장을 촉진시킬 수 있는 생물비료와 같은 분야는 미세조류의 장점을 최대한 활용할 수 있는 유망한 시장 중 하나로 인식된다(Han et al, 2014). 관련 시장은 2010년 이후 크게 상승 중

이며 이것은 전 세계적으로 인식되고 있는 부영양화(eutrophication)와 조류 대발생(algae bloom)이라는 사회·환경적 이슈와 밀접한 관련이 있을 것이다. 조류 바이오매스를 활용하여 생물비료로 활용하는 기술은 크게 생산, 가공, 활용 분야로 구분할 수 있지만 실제로 이를 구현하고 구체화하는 연구는 현재 미진한 실정이므로 향후 관련된 다양한 연구 및 지원이 수반되어야 할 것으로 보인다.

토양개량제는 토양의 물리화학적 성질을 식물생육에 적합하게 개선하기 위하여 사용하는 재료이다. 토양개량제는 토양의 단립화(團粒化, aggregated structure)를 유도하여 통기성, 보수성, 배수성, 산소공급, 근원생태계 조성, 미생물 성장 환경 개선, 영양염류 공급 등과 같은 근본적인 근권(根圈)토양환경 개선의 역할을 담당한다. 그리고 식물성장 측면에서는 홍수나 가뭄 같은 외부 기상환경에 대응 가능하고 직접적으로는 병충해 개선, 면역력 증가, 영양성분 확보, 미생물 공생 등과 같은 이점이 있다. 또한, 식물성장을 위한 초기단계 뿐만 아니라 황폐/건조하거나 생태학적 복원이 필요한 토양 등에 토양개량제를 투입한다면 균근균(mycorrhizal fungi), 근립균(leguminous bacteria), 지피식물(ground cover

Table 1. Components of raw materials for the ASCs used in the experiment

| Description | Components of the composts   | Total |
|-------------|--|-------|
| Blank       | Sawdust (27.0L) + oil cake (2.0L) + perlite (2.0L) + water (1.5L) + fermentation promoter (0.3L)                         | 32.8L |
| ASC1        | Algae biomass (1.5L) + sawdust (25.5L) + oil cake (2.0L) + perlite (2.0L) + water (1.5L) + fermentation promoter (0.3L)  | 32.8L |
| ASC2        | Algae biomass (3.0L) + sawdust (24.0L) + oil cake (2.0L) + perlite (2.0L) + water (1.5L) + fermentation promoter (0.3L)  | 32.8L |
| ASC3        | Algae biomass (6.0L) + sawdust (21.0L) + oil cake (2.0L) + perlite (2.0L) + water (1.5L) + fermentation promoter (0.3L)  | 32.8L |
| ASC4        | Algae biomass (12.0L) + sawdust (15.0L) + oil cake (2.0L) + perlite (2.0L) + water (1.5L) + fermentation promoter (0.3L) | 32.8L |

plant) 등의 고정효과로 인해 원활한 초기 토양생태계 초기 정착을 유도하고 훼손된 지역의 토사 및 오염원 유출을 미연에 방지할 수 있다(Kuznetsov and Novikox 2010; Kumari et al. 2013).

본 연구에서는 조류의 바이오매스를 활용하여 유기성 토양개량제를 제조하기 위한 실험적 접근을 시도하였으며 장기간 퇴비화 과정을 통해서 생산되는 영양성분의 특성 분석을 실시하였다. 또한, 부숙 최종 단계에서 토양개량제의 영양성분 농도를 추정하였고 이를 통해 조류를 활용한 토양환경개선에 대한 향후 발전 가능성을 검토하고자 하였다.

## II. 연구재료 및 방법

본 연구에서 사용된 조류 바이오매스는 2018년 8월에 낙동강수계 A지점의 응집부상공법을 통해 채취한 시료를 활용하였다. 해당 공법은 이동형 수질정화 시설로서 녹조가 번무한 상황에서 시범운영도중에 수거된 시료(함수율 약 90%)의 일부를 현장에서 제공받았다. 당시 원수는 Chl-a 235.3 µg/L, 남조류 세포수 241,000 cells/mL 수준으로 나타났다.

수집된 조류 바이오매스를 주원료로 하되 각기 다른 비율로 적용하여 총 4종류의 ASC (algae soil conditioner)로 제조하고자 하였다. 또한 자연적인 가공을 위해서 다양한 보조 원료(톱밥, 펄라이트, 깻묵 등)를 배합하여 퇴비화 과정(composting process)을 적용하였다. 본 연구에서는 조류 바이오매스 1.5~12.0 kg (fresh weight)에 톱밥 4.5~7.7 kg, 펄라이

트 0.7 kg, 깻묵 1.2 kg을 혼합하여 전체 탄질율을 약 30 전후로 조절한 후 미생물 발육 촉진제를 약 300 g 각각 투입하였다. 일반적으로 퇴비화를 진행할 때 탄소는 풍부하지만 질소가 부족한 경우 효율적인 C/N비 조성을 위해 부숙 초기 또는 후기 단계에서 질소계 재료(두엄, 깻묵, 곡물 껍질 등)의 투입이 이루어진다. 본 연구에서 활용된 주재료인 조류 바이오매스, 톱밥 등은 탄소 함량이 높은 재료이기 때문에 적정 C/N비 조성을 위해 질소계 보조 재료가 필요하였고 본 연구에서는 깻묵을 활용하였다. 모든 재료를 골고루 섞은 뒤 조류 바이오매스의 질량 비율을 각각 blank 0%, ASC1 11.7%, ASC2 21.6%, ASC3 37.6%, ASC4 59.5%로 구분하여 rotatable batch reactor에서 2018년 10월부터 2019년 2월까지 127일(옥외 52일 : 실내 75일) 동안 부숙하였다. 혼합물은 호기성 미생물의 활성을 향상시키고 수분침적을 방지하기 위해 7~15일 간격으로 뒤집기를 실시하였다. 온도와 pH 모니터링은 혼합물의 깊이 약 30 cm 지점에서 지속적으로 측정하였다.

이화학분석은 농촌진흥청 비료분석법(농촌진흥청 고시 제2011-46호)에 준하여 실시하였다. 분석항목은 유기물(회화법), TN (Kjeldahl법), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (auto analyzer (RFA)법), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (ICP법), K<sub>2</sub>O (ICP법), MgO (ICP법), CaO (ICP법)이었으며 탄소함량은 유기물 함량을 환산계수로 전환하여 추정하였다(Nam et al. 1998; RDA 2012).

미생물 분석은 세균, 사상균, 방선균, 고초균 (*Bacillus* sp.)으로 구분하여 진행하였다. 세균수를

측정하기 위해 희석평판법(dilution plate method)을 활용하였으며 일반세균과 방선균은 egg albumin agar 배지, 사상균은 rose-bengal agar 배지, 고초균은 mannitol egg yolk polymyxin agar를 사용하였다. 배양기간은 균종의 생육특성에 따라 차등 적용하였으며 확인시험 후 희석배수를 곱하여 최종적으로 계산하였다(RDA 2012).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 온도변화 결과

Figure 1에 퇴비화 과정 중 온도변화를 나타내었다. 총 127일 기간 동안 ASCs는 온도 증감이 뚜렷하게 나타났으나 blank에서는 초기를 제외하고는 외부기온과 유사한 패턴을 보였다. ASCs의 평균온도범위는 15.0~46.6°C였으며, 31일째(최대 53°C) 가장 높게 나타난 후 점차 감소하였다. 또한, 6~7회의 크고 작은 온도 피크가 관찰되었으며 주로 뒤집기를 실시한 직후부터 수일 내에 나타났다. 약 40일 경과 후에는 20~30°C 범위를 유지하였으며, 90일 이후에는 대기온도의 변화와 비슷하였다.

보통 퇴비화 과정에서 생성되는 열은 미생물 활동에 의해 발생한다(Sanchez et al, 2017). 이는 부숙과정동안 산소공급으로 미생물 활동이 촉진되어 호기성 발효가 일어나는 현상으로서 기존 연구와 유사하였다(Chang et al, 1994). 선행연구에 따르면 최적

조건 시 퇴비 내 온도가 24시간 동안 30°C 이상 상승 가능하며(Harper et al, 1994), 만약 온도가 지나치게 높아(80°C 이상) 미생물의 적정 서식 온도를 상회하면 미생물 활동은 크게 쇠퇴할 수 있다(Miller 1989; Zwietering et al, 1991). 하지만 본 연구에서 ASCs의 고온기는 미생물 생장에 저해를 줄 정도로 길거나 높지는 않았다.

부숙과정에서 ASCs의 온도는 높게 유지되었지만 다소 간헐적이었다. 일반적으로 상업용 퇴비 장치에서는 부숙 초기~중기동안 중온성(mesophilic) 미생물이 고온성(thermophilic) 미생물로 전환되면서 고온상태가 길게 유지되지만 본 연구에서는 자연조건에서 부숙하였고, 겨울 휴지기간을 활용하였으며, 실험용으로 퇴비 규모가 상대적으로 작은 점 등이 고온성 미생물의 성장이 다소 제한된 원인으로 판단된다. 하지만 최고 온도를 기록한 시점 대비 외부기온이 0.8~5.3°C로 매우 낮은 점을 감안하면 기계식 또는 상온에서 부숙을 진행 할 시 온도상승은 더 클 수 있을 것으로 사료된다.

반면에 blank의 평균 온도범위는 2~22°C였으며 최대온도는 17일째 나타났다. Blank는 조류 바이오매스의 투입 없이 제조되었기 때문에 C/N비의 불균형으로 인해 부숙이 원활하게 일어나지 않은 것으로 보인다. 비록 온도만으로는 부숙 여부를 판단할 수는 없지만 낮은 온도는 결국 미생물 성장 및 활성도가 저조하다는 증거이기 때문에 blank는 실험구에 비해 최

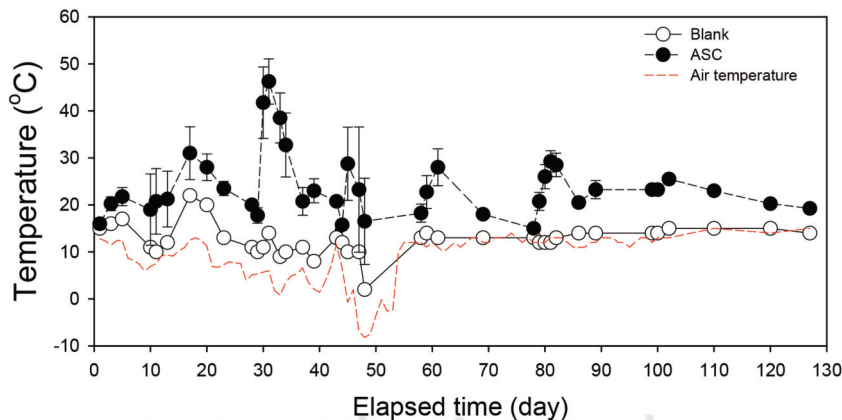


Figure 1. Temperature changes of the average value of the ASC1 to 4 and air temperature of outside during composting process (n=4).

중 퇴비의 성능이 낮을 것으로 예상할 수 있다. 실험 기간 동안 pH는 ASCs  $7.0 \pm 0.4$ , blank  $7.1 \pm 0.2$  로서 큰 변동을 나타내지 않았다.

## 2. 이화학 분석 결과

이화학 분석을 통해 영양성분 변화를 도출하였다. 총 실험기간 동안 유기물의 분해가 활발하였으며 점차적으로 무기화가 진행되는 경향을 보였다. 하지만 조류 함량에 따라 진행속도는 상이하였으며 일부 실험구에서는 영양염류 용출이 제한되기도 하였다(Figure 2). 본 연구에서는 Castro and Gomez (2010)의 분류에 따라 macronutrients (TN,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ), secondary macronutrients (CaO, MgO) 크게 구분하여 실시하였다.

유기물 항목은 50일까지 빠르게 감소하다가 실험 중반 이후부터는 서서히 안정화 되었다(Figure 2a). 보통 퇴비화 과정은 유기성 물질이 미생물 등에 의해 분해되어 토양에 무해한 물질로 안정화 되는 과정을 의미한다(Han et al. 2014). 하지만 일반적인 유기물의 성분 중 탄수화물, 지방, 단백질 등은 분해가 용이하지만 리그닌(lignin)과 같이 셀룰로스(cellulose)를 포함하는 유기폴리머(organic polymer) 물질은 상대적으로 분해가 어렵기 때문에 많은 시간이 소요되는 특징이 있다. 따라서 본 연구에서 유기물 항목은 약 50일까지는 탄수화물, 지방, 단백질 등이 빠르게 분해되는 당분해기이며 이후에는 느리게 분해되는 셀룰로스 또는 리그닌 분해기로 추정할 수 있다.

C/N비는 유기물 항목과 유사한 경향을 보였다(Figure 2b). C/N비는 퇴비의 초기 상태와 부숙정도를 판단하는 중요한 기준 중 하나이다. 많은 연구에서 퇴비 부숙에 적절한 초기 C/N비는 30 전후로 알려져 있으며(Zhu 2007; Han et al. 2014; Sánchez et al. 2017) 본 연구에서는 25.9~39.2 수준으로 나타났다. 세부적으로는 ASC1~2의 경우 초기 C/N비가 양호하였고 83일까지 급격하게 C/N비가 감소하였지만, ASC4는 초기 C/N비가 낮았을 뿐만 아니라 감소폭 또한 작았다. 일반적으로 퇴비 C/N비를 통한 부숙정도는 20 이하일 때(Poincelot 1974; Sánchez et al. 2017), 또는 초기 C/N비의 0.75이하 일 때의

기준 등을 활용한다(AGHTM 1985). 이러한 기준 이외에 본 연구에서는 실험 종료 후 solvita test를 별도로 실시한 결과 blank를 제외한 모든 실험구에서 부숙완료 결과를 얻을 수 있었던 점을 고려했을 때 최종적인 부숙 완료 시점은 약 60일로 판단되었다. 대개 C/N비가 낮은 유기물은 분해가 빠르므로 잉여분의 무기화된 질소가 손실될 우려가 있으며, 반대로 C/N비가 높은 유기물은 미생물과 식물 사이에 경합현상이 발생하여 성장에 불리하다(RDA 2017). 두 작용의 경계지점은 C/N비 약 20 수준으로서 본 연구결과는 적절한 범위라고 할 수 있을 것이다.

질소(nitrogen)는 핵산, 아미노산, 단백질, 조효소(coenzymes) 등을 합성하는 가장 필수적인 영양성분 중 하나이자 식물성장에 있어서 중요한 제한 요소로 인식되고 있다(Sánchez et al. 2017). TN의 경향은 ASC1, 2의 경우 83일째 다소 증가하였으나 이후에는 다시 감소하였고 ASC3, 4의 경우 전체적으로 유사하였다(Figure 2c). 총 ASCs에서 볼 때 초기농도 대비 최종농도의 증감은 평균  $-3.3\%$  ( $-40.0 \sim 26.7\%$ ) 수준을 나타내어 결과적으로는 큰 변화가 없었다. TN의 거동을 C/N비와의 관계로 해석하면, 총 탄소의 지속적인 감소가 이루어지는 과정에서도 질소함량의 변화는 두드러지지 않으므로 결국 C/N비의 점진적인 감소를 야기한다고 설명할 수 있다(Chang et al. 1994). 질소는 대기 중에 약 78%를 차지할 만큼 흔하지만 동식물과 같은 진핵생물(eukaryotic organisms)들은 이를 직접 고정시켜 사용할 수 없다. 하지만 일부 세균(bacteria)은 대기 중의 질소를 고정하거나 식물 또는 세균이 직접 이용 가능한 형태로 동화할 수 있는데 이는 퇴비화 과정에서 흔히 나타난다(Sánchez et al. 2017). 본 연구에서 나타난 TN의 패턴은 선행연구결과와 유사하였으며 퇴비화 과정에서 미생물에 의한 질소의 소모와 생산이 균형을 이룬 결과로 추정된다(Kim et al. 2006).

$NH_4^+-N$ 는 질소계 중에서도 식물이 직접적으로 성장에 활용할 수 있는 중요한 무기물 형태이다. 전체 실험기간 동안  $NH_4^+-N$ 의 최종농도는 ASC1, 2에서 서서히 증가하였지만(39.3~56.3%) 오히려 ASC3, 4에서는 크게 감소하였다(56.7~100%) (Figure 2d).

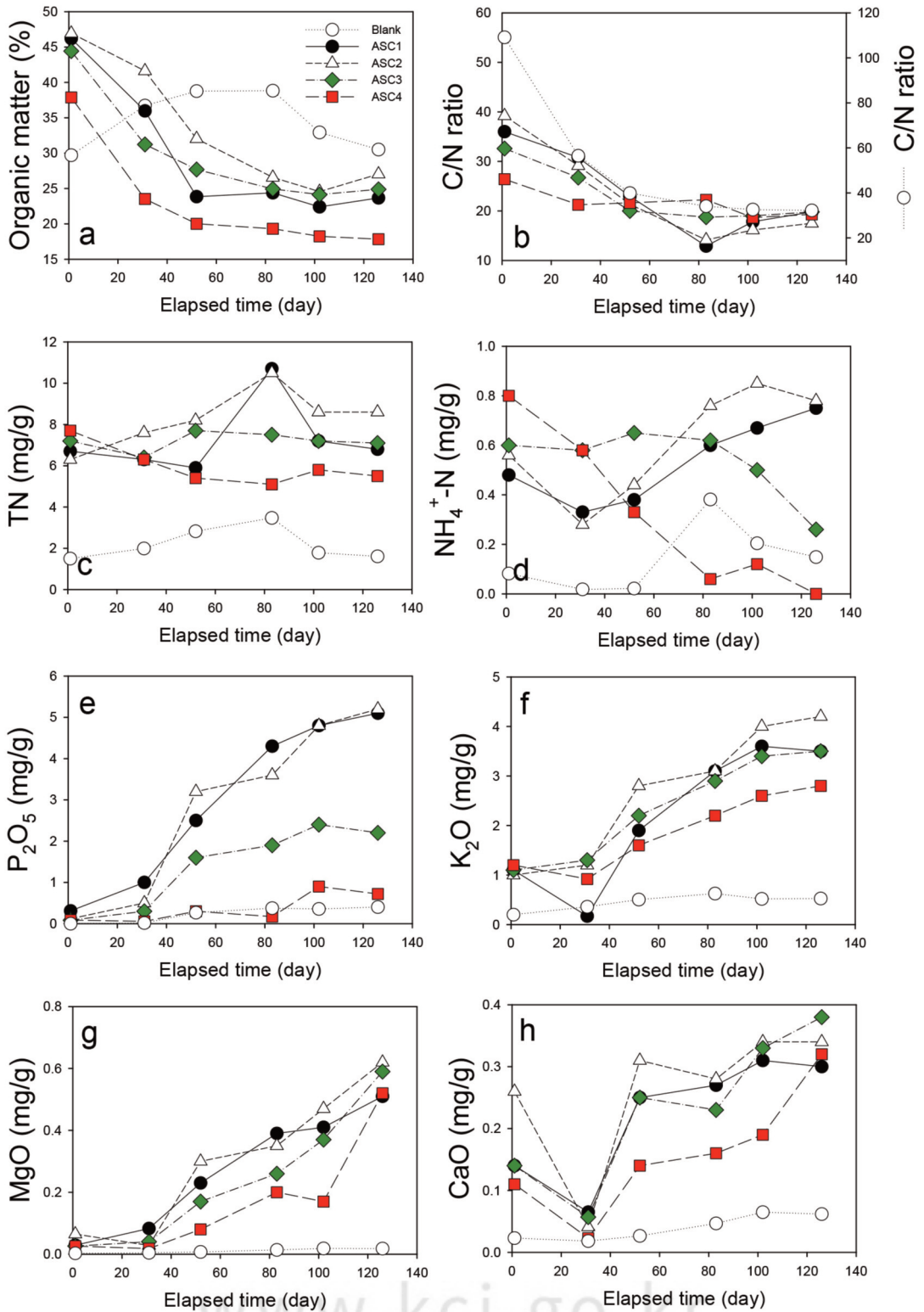


Figure 2. Changes of organic matter and nutrients of different ASCs.

보통  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 은 알칼리 조건에서 경우에 따라 휘산(volatilization)이 잘 발생하므로 급격한 비료의 손실이 일어날 수 있다. 하지만 본 연구의 ASC1, 2와 같이 부숙이 정상적으로 진행되는 시료에서는 질소계 혼합물(nitrogenous compounds)의 무기화가 자체적으로 진행되므로 장기적이고 지속적인 측면에서 영양분 공급이 가능할 것이다. 만약 퇴비화 과정 중 질소함량의 증가를 위해서는 대기 중의 질소 고정 세균(nitrogen fixation bacteria) 또는 질산화 세균(nitrifying bacteria)을 추가하여  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  휘산(ammonia volatilization)을 상쇄하는 방법을 제시할 수 있다(Pepe et al. 2013). 하지만 이와 같이 미생물을 주로 활용한 방법은 부숙기간을 연장시킬 수 있는 점을 참고해야 할 것이다.

인(phosphorus)은 식물성장 인자(DNA, ATP 등) 및 각종 대사에 큰 영향을 미치기 때문에 영양 성분 중 중요한 기능을 하는 인자이다. 인도 질소와 마찬가지로 식물이 직접적으로 이용하기 위해서는 orthophosphate 형태가 되어야 한다. 본 연구에서는 수용성 형태의  $\text{P}_2\text{O}_5$ 를 모니터링 한 결과 실험기간 동안 지속적인 상승이 관찰되었다(Figure 2e). 주로 ASC1, 2에서 급격하게 상승하였고 ASC4는 상대적으로 저조하였다.  $\text{P}_2\text{O}_5$  농도는 단계적으로 상승하였는데 31~52일 사이에 가장 급격하게 상승하였으며 83~102일간도 소폭 상승하였다.

칼륨(potassium)은 질소, 인과 더불어 비료의 영양측면에서 빼 놓을 수 없는 인자이다. 일반적으로 칼륨은 단백질 합성, 효소, 광합성 등과 관련한 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 또한 칼륨은 작물의 품질을 향상시킬 뿐만 아니라 작물의 질소와 인에 대한 활용률을 증진시키므로 궁극적으로는 질소와 인의 과도한 활용과 유실을 줄일 수 있다(Basak and Biswas 2009). 식물은 수용성 형태의 칼륨을 우선적으로 섭취하기 때문에  $\text{K}_2\text{O}$ 의 농도는 퇴비나 비료의 품질을 결정하는 중요한 척도일 것이다. 본 연구에서  $\text{K}_2\text{O}$ 는 31일까지 유지되거나 다소 감소하였지만 이후에는 지속적으로 증가하였다(Figure 2f).  $\text{K}_2\text{O}$ 는 모든 실험구에서 상승하였지만 특히 질소와 인이 높았던 ASC2가 가장 높게 나타났다. 모든 실험구의 초기  $\text{K}_2\text{O}$ 는

1.0~1.2 mg/g이었지만 최종적으로는 2.8~4.2 mg/g로 2.3~4.2배 상승하였다.

MgO은 모든 실험구에서 크게 상승하였다(Figure 2g). 초기 MgO은 0.026~0.065 mg/g 수준이었으나 최종값은 0.51~0.62 mg/g으로 9.5~20.0배로 크게 증가하였다. MgO은 식물에서 엽록소를 구성하는 필수원소일 뿐만 아니라 인의 수송과 효소 활성화 등의 역할을 한다고 알려져 있으며, 만약 MgO이 결핍되면 엽록소가 파괴되고 작물의 품질이 저해될 수 있다. 이러한 측면에서 MgO의 증가는 식물의 생육에 긍정적으로 작용한다고 볼 수 있다.

CaO은 식물의 뿌리와 분열조직(meristems)의 성장 기능에 관여하여 기계적 강도를 증가시킨다. 연구 기간 동안 CaO의 거동은 31일까지는 하락하였지만 이후에는 단계적인 상승을 보였다(Figure 2h). 대부분의 영양성분과 유사하게 31~52일 사이에 가장 급격하게 상승하였으며 최종값의 범위는 0.30~0.38 mg/g로서 초기대비 23.5~65.6% 증가하였다.

전체 실험기간 동안 blank는 실험구인 ASCs와 차별화된 패턴을 보였다. 유기물의 경우 ASCs에서 전반적으로 유사한 경향으로 감소하였지만 blank는 다른 패턴을 나타내었으며 C/N비도 초기에 매우 높은 값(109.1)을 나타내었다. 특히 blank는 리그닌, 헤미셀룰로스(hemicellulose), 셀룰로스가 풍부하여 상대적으로 분해가 지연되었으며 선행연구에 의하면 퇴비화 과정동안에는 새로운 생분해성 기질이 생성되는 등 동적인 분해 작용을 보일 수 있다고 알려져 있다(Banegas et al. 2007). 그 결과 최종적으로 부숙이 원활하게 진행되지 않았으며 영양성분의 생성 및 증가가 전반적으로 미흡하게 나타났다. 따라서 실험구와 대조구 결과를 종합하면 조류를 활용한 토양개량제는 부숙과정을 통해 자체적인 영양성분을 증진시킬 수 있으며 상대적으로 질적으로 우수한 제품을 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

추가적으로, 무기화된 영양성분은 식물성장에 필수적이지만 토양개량제의 경우 유기물을 배제하고 단순히 영양성분이나 미네랄만 차별적으로 공급한다면 토양 내 영양성분 순환 저해, 물리화학적 및 미생물상 변화를 가져오게 되어 결과적으로 비옥도 저해를

야기한다. 따라서 유기물, 무기물의 균형 있는 공급뿐만 아니라 토양 내 박테리아, 미생물의 성장을 증진시킬 수 있는 환경 조성이 장기적인 식물 성장에 필요한 중요한 전략 중 하나가 될 것이다(Sánchez et al. 2017). 특히 토양을 근원으로 하는 체내기생식물의(endophytic) 미생물들은 질소고정, 인 흡수력 증가, phytohormone 등을 분비하는 부가적인 순기능이 있다(Sánchez et al. 2017). 따라서 조류와 부숙과정을 잘 활용하여 유기물과 영양물질이 균형 있게 구성된다면 토양환경에 긍정적인 뿐만 아니라 경제적으로도 우수한 토양개량제 생산이 가능할 것이다.

### 3. 미생물 분석 결과

미생물 분석결과를 Figure 3에 나타내었다. 퇴비의 부숙과정에서는 많은 미생물의 증감 및 천이가 발생하는데 이러한 미생물들은 다양한 영양성분의 생성과 변환에 핵심적인 역할을 담당한다(Sánchez et al. 2017). 본 연구에서는 퇴비제작 과정에서 흔히 출현하는 미생

물 균집을 세균, 사상균, 방선균, 고초균(*Bacillus* sp.)으로 구분하여 천이의 양상을 가늠하였다.

세균은 퇴비화 과정의 초기에 우점하는 대표적인 그룹이다(Sánchez et al. 2017). 세균은 초기단계에서 서서히 증가하여 52일에 가장 높은 피크를 보였으며 83일 이후에는 낮게 유지되는 경향을 나타내었다(Figure 3a). ASC3, 4는 예외적으로 초기 농도가 다소 높았는데 이는 투입된 녹조 바이오매스의 양이 많았기 때문으로 판단된다. 또한 ASC4의 세균농도는 52일의 피크시점에 타 실험구와 반대로 감소 추세를 보였다. 이는 ASC4가 부숙과정 및 영양성분의 완성도가 상대적으로 저조한 점을 미루어 볼 때 타 실험구보다 미생물 활성도가 낮은 점이 인과관계로 작용하였다고 사료된다.

사상균(filamentous fungi)은 진균류(eumycetes)의 일종으로 자연의 대표적인 분해자 중 하나이다. 퇴비공정에서는 세균과 함께 초기 중온성(mesophilic) 단계와 완숙단계에서 주로 출몰한다고 알려져 있다.

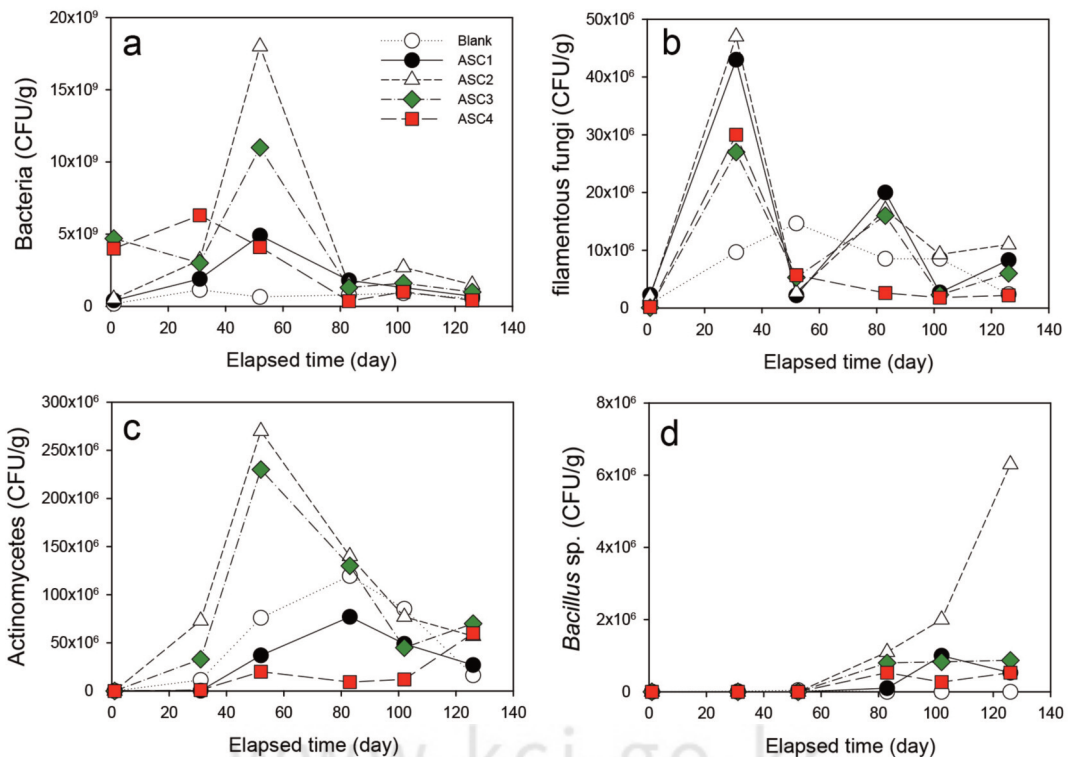


Figure 3. Changes of microbial community of different ASCs.



사상균은 세균과 더불어 퇴비 공정에서 식물이 이용 가능한 영양성분을 생성하는 주요 미생물군 이다 (Sánchez et al, 2017). 본 연구에서 사상균은 크게 두 번의 피크(31일, 83일)를 보였으며 126일차에도 약간의 상승이 관찰되었다(Figure 3b). 피크 값은 단계적으로 낮아졌으며 ASC1, 2에서 두드러졌고 ASC3, 4는 상대적으로 낮았다. 특히 ASC4는 두 번째 피크(83일)에서는 크게 상승하지 못했으며 이후에는 지속적으로 일정한 낮은 값을 보였다.

방선균은 세균과 사상균의 중간적 특성을 가지는 미생물로서 사상형 그람양성균(filamentous gram-positive)의 일종이다. 방선균은 중온성 또는 고온성(thermophilic) 조건에 적응 가능한 특성을 가지기 때문에 lignocellulose 물질과 같은 복합체의 분해에 중심적인 역할을 담당한다(Tuomela et al, 2000). 본 연구에서 방선균의 거동은 52일에 크게 증가하였다가 점차 감소하는 패턴을 나타내었다(Figure 3c). 방선균은 ASC2, 3이 우세하였으며 ASC1은 83일에 뒤늦은 피크가 나타났고 ASC4는 전체적으로 낮았다. 방선균은 최고 온도(53°C, 31일)를 기록한 이후인 고온~중온기에 급증하기 시작하였다. 전체적으로 방선균은 세균과 유사한 경향을 보였지만 상대적으로 더 긴 시간동안 우점하였다(Figure 3c).

고초균은 간균과의 호기성 세균으로 비병원성이며 중온~고온에서도 잘 성장한다. 고초균은 퇴비의 부숙 뿐만 아니라 발효식품에서도 주로 활용되고 있으며 다양한 가수분해 효소, 혈전분해 효소, 기능성 펩타이드, 고분자 점진물 등 생리활성물질 등을 생성할 수 있다고 알려져 있다(Jung et al, 2010). 고초균은 타 미생물과 다르게 부숙 초기보다는 후기로 갈수록 증가하였다(Figure 3d). 단계적으로는 52~83일 사이에 눈에 띄는 성장을 나타내었으며, 특히 ASC2에서는 100~126일까지 매우 큰 폭으로 상승하였다. 본 연구결과에 따르면 고초균은 부숙 초기보다는 부숙이 어느 정도 완료된 후기단계에서 발생하였고 ASC2과 유사한 조건이 유지된다면 타 미생물과의 경쟁에서 우점 할 수 있는 것으로 보인다. Phae et al, (1990)는 고초균이 균류(fungi)의 성장을 저감시키며 잘 숙성된 퇴비에서는 phytopathogens도 억제할 수 있다

고 보고한 점과 관련하여 본 연구에서도 이러한 고초균의 타 종과의 경쟁적인 생리적 특징이 반영되었을 것으로 추정된다.

이상과 같이 ASCs는 뚜렷한 미생물 군집 조성 및 천이가 발생했지만 blank의 경우는 전혀 다른 패턴을 나타내었다. Blank에서는 실험구와는 달리 사상균이나 방선균의 피크가 나타나지 않았으며 고초균은 미미하게 관찰되었다. Blank의 경우는 초기 C/N비의 불균형으로 인해 부숙에 관여하는 미생물의 초기 정착이 원활하지 않았으며 대부분의 재료가 톱밥으로서 생물학적 분해가 어려운 리그닌 성분이 많기 때문에 전반적으로 부숙이 저해되거나 지연되는 경향을 보였다.

본 연구에서 나타난 ASCs의 부숙과정에 따른 미생물상 변화는 크게 1단계(세균, 사상균)→2단계(방선균, 세균)→3단계(고초균)로 기존 결과와 유사하게 나타났다(RDA 2017). 미생물 천이는 퇴비 원료와 기질 활용정도에 따라 달라지는데 이는 온도변화와 관련이 있다. 1단계에서는 유기물이 분해되기 시작하고 온도가 상승하는 기간으로서 중온성 세균과 사상균이 관여한다. 이 시기는 당분해균이 우세하여 분해가 용이한 당류나 아미노산 등이 주로 분해된다. 2단계는 중온성 미생물이 고온성 미생물로 대체되는 시기이며 온도는 정점에 달한 후 다소 저감하며 셀룰로스 분해균이 우점한다. 이들은 주로 세균, 방선균으로 구성되어 있으며 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 펙틴(pectine)와 같은 고분자 섬유소 등의 분해가 가능하다고 알려져 있다(RDA 2017). 3단계는 분해속도가 느려지고 온도도 동시에 저감하여 리그닌과 같은 난분해성 유기물만 남게 된다. 이러한 조건으로 인해 주요 미생물은 고초균이나 중온성에서 적응 가능한 종이 우세한다. 또한, 유기물들이 대폭 저감된 후 숙성이 진행되기 때문에 악취가 감소하거나 재료가 흑갈색으로 변색하는 등 완속에 가까운 퇴비의 외관적 특징을 보이게 된다(RDA 2017).

#### 4. 조류 바이오매스의 특징

조류 바이오매스를 활용하여 부숙한 토양개량제의 특징 중 하나는 병원균에 대한 안전성이다. 일반적인

로 분뇨를 활용한 퇴비나 토양개량제는 비포자형성(non-spore forming) 병원균(Salmonella, E.coli etc.)이나 각종 질병에 취약할 수 있으나 ASCs는 주재료가 식물에서 유래하였으므로 상대적으로 안전한 장점이 있다. 두 번째는 풍부한 유기물 함량이다. 토양 내 유기물이 풍부하면 식물 양분 공급원 효과(다량·미량요소 공급, 지속적·누적 효과, 이산화탄소 공급, 기타 성장 촉진 물질 공급 등), 토양 물리적 개선(단립화, 투수성, 보수성, 통수성, 내침식성 증가 등), 이화학적 개선(양이온치환능력 증대, 킬레이트 작용, 원충작용, 화학비료 사용 감소 등), 토양 생물상 활성화(미생물 증가, 물질 순환 증가, 생물적 완충능, 유해물질 분해 등)과 같은 다양한 순기능이 있다(RDA 2017; Yang et al. 2017). 이러한 기능을 극대화하기 위해서는 적절한 보조재료를 추가적으로 활용하는 것도 하나의 방법일 것이다. 세 번째는 안정성(stability)과 성숙도(maturity)이다. European Commission은 퇴비의 OUR (oxygen uptake rates)을 안정성 판단 척도로 여기고 있으며 조류를 활용한 퇴비는 기준치(1 g O<sub>2</sub>/kg OM/h)보다 약 50% 이하의 낮은 수준을 나타내므로 안정성이 높다고 평가할 수 있다(EU 2001; Tambone 2004; Han et al. 2014). Australian standard는 퇴비의 성숙도는 생물학적 안정성과 식물 성장 반응과 관련이 있다고 정의했으며(Han et al. 2014), 조류를 활용한 퇴비 또는 추출물은 종자 발아, 뿌리 성장 등에 도움이 되는 생물촉진제(biostimulants) 측면에서 우수한 가능성이 있다고 평가되었다(Michalak et al. 2017). 마지막으로 악취 부분이다. 조류 바이오매스를 활용한 토양개량제는 식물재료가 주성분이기 때문에 완숙 후에 악취가 적으므로 경우에 따라 실내 공간에서도 충분히 활용할 수 있는 장점이 있다.

이외에도 조류를 활용한 토양개량제는 직접 또는 간접적으로 환경에 기여할 수 있다. 토양개량제의 기본적인 기능은 토양의 물리화학적 성질 개선이지만 본 연구결과에서처럼 어느 정도의 비효효과 또한 있으므로 추가적인 화학비료의 과다한 사용을 사전에 감소할 수 있다. 지나친 화학비료는 질소나 인의 유출에 따른 부영양화를 야기하지만 유기물 함량이 높

고 안정된 토양개량제는 상대적으로 영양염류의 유출이 억제된다. 예를 들면, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N과 같은 질소계 무기물들은 미생물에게 우선 흡수되어 천천히 침출(1~3% of total N/yr)되며 한번 부동화(immobilization)된 질소의 침출(leaching)은 유기물이 분해되거나 미생물이 사멸할 때에 한해 상당부분 증가한다. 하지만 화학비료의 경우는 매우 빠른 시간에 용출되어 비료 내 질소성분이 쉽게 고갈될 뿐만 아니라 인근 토양 및 수계에 악영향을 줄 수 있다(Sánchez et al. 2017). 이외에도 미량원소의 공급이나 남조류에 의한 질소고정, 충해방지 등의 부가적인 효과가 있을 것으로 사료된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 조류 바이오매스를 활용한 유기성 토양개량제를 제조하기 위해 총 127일 기간 동안 퇴비화 과정을 통해서 생산되는 영양성분에 대한 분석을 실시하였다. 그 결과 부숙과정동안 온도변화에 따른 미생물 천이 경향을 파악할 수 있었으며 유기물을 포함한 다양한 영양성분의 용출 및 거동을 확인할 수 있었다. 본 실험을 통해서 담수조류를 토양개량제로 제조 시 수반되는 퇴비화 과정 및 영양염류 발생에 대한 전반적인 모니터링 결과에 대해 참고할만한 자료를 얻었다고 사료되며 향후 조류를 활용한 토양환경 개선 및 식물성장에 대한 발전 가능성 있는 기초자료를 확보할 수 있었다. 본 연구에서 도출한 주요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 부숙기간인 총 127일 기간 동안 ASCs는 미생물 반응에 의해 온도 증감이 뚜렷하게 나타났다. 전체 기간 동안 평균온도는 15.0~46.6°C, 최대 온도는 53°C(31일차)를 기록하였으며 뒤집기를 실시한 이후 호기성 미생물 작용에 의해 6~7회의 크고 작은 온도 피크가 관찰되었고 약 40일 이후인 중후반에는 20~30°C 범위를 유지하였다.

2) 이화학 분석결과 시간경과에 따라 유기물이 분해되면서 무기화가 진행되었으며 대부분의 영양성분은 유기물과 C/N이 급격하게 하락한 시기에 가장 크게 증가하였다. 영양성분은 macronutrients (TN,

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) 뿐만 아니라 secondary macronutrients (CaO, MgO)에서도 두드러진 증가를 보였으며 영양 성분 이외에도 일정 수준의 유기물을 포함하고 있으므로 토양환경적으로 균형 있는 토양개량제로 판단되었다. 하지만 영양성분의 최종 농도는 조류 함량에 따라 상이하였으며 상대적으로 ASC1~3에 비해 부속이 저조한 ASC4는 미흡하였다.

3) 미생물 군집을 세균, 사상균, 방선균, 고초균 (*Bacillus* sp.)으로 구분하여 천이의 양상을 모니터링한 결과, ASCs의 부속과정에 따라 미생물상 변화는 크게 1단계(세균, 사상균)→2단계(방선균, 세균)→3단계(고초균)의 결과를 보였다. 미생물의 천이는 부속과정에서 발생하는 영양성분의 증가와 감소에 크게 관여할 것으로 추정되며 초기에는 주로 당류나 아미노산과 같이 분해가 용이한 물질이 분해되지만 후기로 갈수록 고분자 섬유소 또는 리그닌과 같은 난분해성 유기물의 분해가 이루어 질 것으로 판단되었다. 실험결과에 의하면 영양성분 분포가 ASC1~3에 비해 ASC4가 저조하였으므로 조류 바이오매스를 59.5% 이내로 조절한다면 효과적인 미생물 활성을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 조류 바이오매스는 병원균에 대한 안전성, 풍부한 유기물 함량, 안정성 및 성숙도 부분에서 장점이 있으며 종자 발아, 뿌리 성장 등에 도움이 되는 기능을 가진다고 알려져 있다. 또한 화학비료에 비해 영양염류의 유출을 억제하고 자체적인 균근균, 근립균, 지피식물 등의 조기 활착으로 인한 토양고정효과를 기대할 수 있으므로 토양유실방지 및 부영양화에 직·간접적으로 기여할 수 있을 것이다. 따라서 관련 사항에 대해 기술적인 발전이 전제된다면 향후 효과적인 토양개량제로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 「녹조 바이오매스를 활용한 유기성 생물비료 기술 개발 (20190114)」과제에 의해 수행되었습니다.

## References

- Adeniyi OM, Azimov U, Burluka A. 2018. Algae biofuel: Current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 90: 316-335.
- AGHTM (Association Generale des Hygienistes Techniciens Municipaux). 1985. *Residus Urbains*. 2nd edition. Technique et Documentation. AGHTM. Paris, France. p. 437.
- Banegas V, Moreno JL, Moreno JI, Garcia C, Leon G, Hernandez T. Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. *Waste Management*. 27: 1317-1327.
- Basak B, Biswas DR. 2009. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare Pers*) grown under two Alfisols. *Plant Soil* 317. p. 235-255.
- Castro HE, Gomez MI. 2010. Fertilidad de suelos y fertilizantes. In: Burbano, H. Silva, F. (Eds.), *Ciencia del Suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogota. p. 217-303.
- European Commission. 2001. working document: biological treatment of biowaste, 2nd draft. 2.
- Han W, Clarke W, Pratt S. 2014. Composting of waste algae: A review. *Waste Management*. 34: 1148-1155.
- Harper ER, Miller FC, Macauley BJ. 1992. Physical management and interpretation of an environmentally controlled composting ecosystem. *Aust J Exp Agric*. 32(5): 657-667.
- Jung H, Kim J, Seo J, Lee S. 2010. Physicochemical and antioxidant properties of red ginseng marc fermented by *Bacillus subtilis* HA

- with mugwort powder addition. J Korean Soc Food Sci Nutr. 39(9): 1391-1398.
- Kim KY, Choi HL, Ko HJ, Kim CN. 2006. Estimation of ammonia emission during composting livestock manure based on the degree of compost maturity. J Anim Sci. & Technol. 48(1): 123-130.
- Kumari R, Kaur I, Bhatnagar AK. Enhancing soil health and productivity of *Lycopersicon esculentum* Mill. using *Sargassum johnstonii* Setchell & Gardner as a soil conditioner and fertilizer. J Appl Phycol. 25: 1225-1235.
- Kuznetsov PI, Novikov AE. 2010. Effect of soil conditioners on water permeability and water-holding capacity of light chestnut soils. Russian Agricultural Sciences. 36(4): 279-281.
- Michalak I, Chojnacka K, Saeid A. 2017. Plant growth biostimulants, dietary feed supplements and cosmetics formulated with supercritical CO<sub>2</sub> algal extracts. Molecules. 22(66): 1-17.
- Miller FC and Macauley BJ. 1989. Substrate usage and odours in mushroom composting. Aust J Exp Agric. 29: 119-124.
- Nam JJ, Cho N, J K, Lee S. 2012. Conversion factor for determining carbon contents from organic matter contents in composts by ignition method. J Korean Soc Soil Sci Fert. 31(4): 380-383.
- Pepe O, Ventrino V, Bliotta G. 2013. Dynamic of functional microbial groups during mesophilic composting of agro-industrial wastes and free-living (N<sub>2</sub>)-fixing bacteria application. Waste Manage. 33: 1616-1625.
- Phae C, Sasaki M, Shoda M, Kubota H. 1990. Characteristics of *Bacillus subtilis* isolated from composts suppressing phytopathogenic microorganisms. Soil Sci Plant Nutr. 36(4): 575-586.
- Poincelot RP. 1974. A scientific examination of the principle and practice of composting. Compost Sci. 15: 24-31.
- Rural Development Administration (RDA). 2012. Research survey analysis standard of agricultural science and technology, 5th edition. Rural Development Administration, Suwon, Gyeonggi Province, Republic of Korea. p. 1135.
- Rural Development Administration (RDA). 2017. Production and use of compost, Rural Development Administration, Jeonju, Jeollabuk Province, Republic of Korea. p. 145.
- Sánchez ÓJ, Ospina DA, Montoya S. 2017. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. Waste Management. 69: 136-153.
- Tambone F, Confalonieri R, Adani F. 2004. Dynamic respiration index as a descriptor of the biological stability of wastes. J Environ Qual. 33: 1866-1876.
- Tuomela M, Vikman M, Hatakka A, Itavaara M. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. Bioresour. Technol. 72: 169-183.
- Yang I, Ji M, Jeon B. 2017. A review on efficient operation technology of compost depot. Clean Technol. 23(4): 345-356.
- Zhu N. 2007. Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. Bioresour Technol. 98: 9-13.
- Zwietering MH, De Koos JT, Hasenack BE, De Wit JC, Riet K. 1991. Modeling of bacterial growth as a function of temperature. Applied and Environmental Microbiology. 57(4): 1094-1101.