

## 우분뇨 퇴비화 중 암모니아 휘산에 대한 이분해성 및 난분해성 유기 첨가물의 역할

임상선 · 박현정 · 이선일 · 이동석 · 곽진협 · 최우정\*

전남대학교 농업과학기술연구소 생물산업공학과, 전남대학교 친환경농업연구사업단  
(2009년 3월 10일 접수, 2009년 3월 26일 수리)

### The Role of Organic Amendments with Different Biodegradability in Ammonia Volatilization during Composting of Cattle Manure

Sang-Sun Lim, Hyun-Jung Park, Sun-Il Lee, Dong-Suk Lee, Jin-Hyeob Kwak, and Woo-Jung Choi (Department of Biosystems & Agricultural Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology; Environment-Friendly Agriculture Research Center, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea)

**ABSTRACT:** This study was conducted to investigate the roles of co-existed organic materials (OM) with different biodegradability in composting of cattle manure in terms of CO<sub>2</sub> emission and NH<sub>3</sub> volatilization. Either sawdust (SD, low biodegradability) or rice bran (RB, high biodegradability) was mixed with cattle manure at a various rate and the amounts of CO<sub>2</sub> emission and NH<sub>3</sub> volatilization were determined periodically during 4 weeks of composting. Percentage of dry matter loss during the composting period was also calculated. The amount of CO<sub>2</sub> emitted increased with increasing rate of OM and was significantly ( $P < 0.01$ ) higher in the RB treatment than in the SD treatment by 43 to 122% depending on the rate of OM. Accordingly, % of dry matter loss during 4 weeks of composting was higher in the RB (rang: from 35.1% to 41.5%) than that in the SD treatments (from 18.7% to 22.6%), showing that RB is more biodegradable than SD. During the early composting period up to 8 days, negligible amount of ammonia volatilization was detected in both treatments regardless of application rates. In the RB treatment, substantial amount of ammonia volatilization was detected thereafter; however, no meaningful ammonia volatilization was observed in the SD treatment until the end of composting. Such differences could be attributed to the different properties of SD and RB. For example, the high C/N ratio of SD could enhance NH<sub>4</sub><sup>+</sup> immobilization and thus decrease NH<sub>4</sub><sup>+</sup> concentration that is susceptible to ammonia volatilization. Binding of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> on to phenolic compounds of SD may also contribute to the decrease in NH<sub>4</sub><sup>+</sup> concentration. Meanwhile, as RB has a relatively low C/N ratio, remineralization of immobilized NH<sub>4</sub><sup>+</sup> could increase NH<sub>4</sub><sup>+</sup> concentration as high as the level for the occurrence of ammonia volatilization. Therefore, our study suggests that OM which is resistant to biodegradation can reduce NH<sub>3</sub> volatilization largely by physico-chemical pathways across the entire composting period and that easily biodegradable OM can retard NH<sub>3</sub> volatilization via microbial immobilization in the early period of composting followed by rapid remineralization, leading to substantial volatilization of NH<sub>3</sub> in the middle stage of composting.

**Key Words:** Composting process, N volatilization, rice bran, sawdust

### 서 론

가축분 퇴비는 유기물과 양분이 풍부하여 토양개량효과가 크기 때문에 친환경농업에서 가장 널리 이용되는 자원이지만,

퇴비화 과정 중에는 다양한 물질과 양분이 손실된다<sup>1)</sup>. 탄소의 경우 미생물에 의한 유기물 분해과정에서 최고 80%까지 손실되며, 질소는 우분퇴비의 경우 수분조절제로 톱밥을 사용할 경우 8~26%, 볏짚을 사용할 경우 15~43% 손실되는 것으로 보고된 바 있다<sup>2-4)</sup>. 반면, 인산은 이동성이 낮아서 손실률이 10% 이내로 매우 낮은 것으로 보고된다<sup>4)</sup>. 그 결과 퇴비 중 질소와 인산의 비율은 작물의 질소와 인산 요구 비율보다 낮아져서 퇴비를 질소 기준으로 사용할 경우 토양 중

\*연락처:

Tel: +82-62-530-2153 Fax: +82-62-530-2159  
E-mail: wjchoi@chonnam.ac.kr

에 과잉의 인산이 집적하게 되어 일차적으로 양분 불균형의 문제가 나타나고, 이차적으로 강우사상시 주변 수계의 부영양화를 야기할 수 있다<sup>5)</sup>.

퇴비화 과정 중 질소 손실은 대부분 퇴비화 초기에 발생하는 암모니아 휘산에 의한 것이기 때문에 암모니아 휘산을 저감하여 퇴비 중 질소 함량을 일정 수준으로 유지시킬 수 있는 퇴비화 기법 개발이 필요하다<sup>6)</sup>. 최근, 인산석고와 Alum과 같은 산성 폐자원을 퇴비화에 이용하여 퇴비 더미의 pH를 낮추어 암모니아 휘산을 저감하고자 하는 연구가 진행됨과 있으며, 제올라이트와 같은 비표면적이 큰 흡착제를 퇴비 더미와 혼합하여 암모니아 휘산 저감 가능성을 연구한 결과도 보고된 바 있다<sup>7,8)</sup>. 하지만, 암모니아 휘산과 관련하여 퇴비 중 난분해성과 이분해성 유기물질의 역할에 대한 연구는 매우 부족하다. 톱밥이나 파쇄목과 같은 난분해성 유기물은 C/N가 높기 때문에 퇴비화 과정 중 질소부동화를 촉진시켜 휘산 가능한  $\text{NH}_4^+$  농도를 낮추거나, 그 자체에 포함된 폐놀 작용기와  $\text{NH}_4^+$ 의 결합에 의해 암모니아 휘산을 저감할 수 있다<sup>9)</sup>. 반면, 쌀겨와 같은 이분해성 유기물은 퇴비화 과정에서 쉽게 분해되어 초기에는 타당성 미생물의 활성 증가에 의한  $\text{NH}_4^+$ 의 부동화가 촉진될 수 있지만, 이분해성 유기물이 고갈되는 일정 시점 이후부터는 부동화된 질소의 재무기화에 의해  $\text{NH}_4^+$ 이 생성되어 퇴비화 후기에 암모니아 휘산이 급격하게 발생할 수 있다<sup>9)</sup>. 따라서, 퇴비화 과정 중 암모니아 휘산 저감을 위해 인산석고나 제올라이트를 활용하는 연구와 함께 퇴비화 과정 중 암모니아 휘산과 관련된 난분해성 유기물과 이분해성 유기물의 역할에 대한 연구가 병행될 필요가 있다. 이와 같은 연구 결과는 퇴비화에 투입되는 유기물질의 특성에 따라 암모니아 휘산 저감을 위해 추가적으로 투입되는 물질의 투입시기 결정에도 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 비균질 혼합물인 퇴비에 함유된 난분해성 유기물과 이분해성 유기물이 퇴비화 과정 중 발생하는 암모니아 휘산에 미치는 영향을 독립적으로 평가하기 위해 실험실내 조건에서 대표적인 난분해성 유기물인 톱밥과 이분해성 유기물인 쌀겨를 분뇨와 다양한 비율로 혼합하여 암모니아 휘산 경향을 조사하였다. 이와 함께,  $\text{CO}_2$  발생량, 최종 건물 손실률, 무기태 질소 함량을 조사하여 암모니아 휘산 자료 해석에 활용하였다.

## 재료 및 방법

### 공시재료

분뇨는 전남대학교 부속 봉황동물농장, 톱밥은 장흥군 소재 톱밥 공장, 쌀겨는 전남대학교 미곡처리장에서 수집하였다. 분뇨, 톱밥, 쌀겨 및 최종퇴비의 건물중은 시료를 65°C의 가열건조기에서 72시간 건조한 후 수분함량을 조사하였다. 퇴비화 실험에 이용할 물질은 건조시 변형을 방지하기 위해 동결건조(FREEZE DRYER, Ilshin-lab, Korea)하였다. 동결 건조 시료 중 일부를 분쇄기(MM20, Retch, Germany)를 이용하여 고운 분말(<0.42 mm)로 만든 후 탄소와 질소 함량을 원소분석기(FLASH EA-1112, Thermo, USA)로 분석하였다. 분뇨의 무기태 질소( $\text{NH}_4^+$ 와  $\text{NO}_3^-$ )는 2 M KCl을 1:10(W/V)로 혼합하고 1시간동안 교반한 후 #42 여과지로 여과한 액에 MgO와 Devarda alloy를 연속적으로 투입한 후 증류장치(Pronitro 1, J.P. Selecta, Spain)를 이용하여 증류한 후 산-염기 적정법에 의해 분석하였다<sup>10)</sup>. 톱밥과 쌀겨의 암모늄 보유능(Ammonium holding capacity, AHC)은  $\text{NH}_4\text{OAc-Ethanol-NaCl}$  연속 침출법으로 분석하였다<sup>11)</sup>. 분뇨, 톱밥, 쌀겨의 이화학적성은 표 1과 같다.

### 퇴비화 물질 혼합 처리 및 모니터링

분뇨의 부피를 기준으로 톱밥과 쌀겨를 각각 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 (v/v) 비율로 혼합하고(Table 2), 1 L Mason Jar에 충전한 후 전체 부피의 50%에 해당하는 수분을 공급하였다. 각 처리는 3반복 하였다. 유기물 분해에 필요한 산소를 공급하고 발생한  $\text{CO}_2$ 와  $\text{NH}_3$  정량을 위해  $\text{CO}_2$ 와  $\text{NH}_3$ 가 제거된 공기를 1 L  $\text{min}^{-1}$ 의 속도로 연속적으로 공급하였다.

4주간의 실험기간 동안 퇴비화에 의해 방출된  $\text{CO}_2$ 는 4 N NaOH로 포집한 후 3 N HCl로 적정하여 정량하였고<sup>12)</sup>,  $\text{NH}_3$ 는 1 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 포집한 후 Kjeldahl로 증류하여 0.01 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 적정하여 계산하였다<sup>10)</sup>. 퇴비화 과정 중 물질 손실률을 계산하기 위해 4주 후 Jar에 잔류하는 퇴비 물질을 칭량하고, 일부 시료(5 g)에 대해서 수분함량을 조사하여 건물중을 계산하였다. 약 10 g의 시료를 대상으로 상기의 방법으로 무기태 질소 함량을 정량하였다.

Table 1. Selected properties of manure, sawdust, and rice bran used

Materials	T-C (g $\text{kg}^{-1}$ )	T-N (g $\text{kg}^{-1}$ )	C/N	$\text{NH}_4^+$ (mg N $\text{kg}^{-1}$ )	$\text{NO}_3^-$ (mg N $\text{kg}^{-1}$ )	AHC (cmol $\text{kg}^{-1}$ ) <sup>a</sup>
Manure	296	15.2	19.5	310.8	47.6	ND
Sawdust	410	1.8	227.8	ND	ND	10.2
Rice bran	417	21.4	19.5	ND	ND	0.1

<sup>a</sup> Ammonium holding capacity  
ND, Not determined

Table 2. Experimental setting and selected properties of the manure and organic additive mixture

Treatments	Manure	Additives	Total weight	T-N	T-C	C/N
	(g, dry basis)			(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	
M	23.3	0	23.3	296	15.2	19.5
M+SD 0.25	23.3	8.8	32.1	327	11.5	28.4
M+SD 0.50	23.3	17.6	40.9	345	9.4	36.6
M+SD 0.75	23.3	26.4	49.7	357	8.1	44.1
M+SD 1.0	23.3	35.2	58.5	365	7.1	51.1
M+RB 0.25	23.3	12.5	35.8	338	17.4	19.5
M+RB 0.50	23.3	25.0	48.3	359	18.4	19.5
M+RB 0.75	23.3	37.5	60.8	371	19.0	19.5
M+RB 1.0	23.3	50.0	73.3	379	19.4	19.4

M, Manure; SD, Sawdust; RB, Rice bran

### 통계분석

톱밥과 쌀겨 처리 효과는 SPSS 15.0(SPSS Inc. Chicago, IL)의 일반선형모형을 이용한 ANOVA 분석으로 평가하였으며, 처리효과가 인정될 경우 Duncan의 다중비교를 통해 처리간 차이를 비교하였다( $\alpha=0.05$ ).

### 결과 및 고찰

#### CO<sub>2</sub> 발생량

퇴비화기간 동안 CO<sub>2</sub> 발생량은 첨가물에 상관없이 경시적으로 증가하였으나, 첨가물과 처리수준에 따른 차이는 보였다(Fig 1). 전반적으로 이분해성인 쌀겨처리구가 난분해성인 톱밥처리구에 비해 CO<sub>2</sub> 발생량이 많았으며, 처리량이 증가할수록 CO<sub>2</sub> 발생량도 증가하였다. 누적 CO<sub>2</sub> 발생량은 톱밥처리구인 M, M+SD0.25, M+SD0.50, M+SD0.75,

M+SD1.0에서 각각 2062.7, 2949.6, 3219.7, 3154.8, 3975.0 mg C였으며, 쌀겨처리구에서 각각 2062.7, 4212.4, 5969.9, 7014.0, 7152.8 mg C로 쌀겨처리구의 CO<sub>2</sub> 발생량이 톱밥처리구에 비해서 43~122% 높았다( $P<0.05$ ). 이는 톱밥에 난분해성인 리그닌이 함유되어있고 C/N 비가 227.8(Table 1)로 높아서 유기물 분해속도가 상대적으로 지체되었기 때문으로 판단된다<sup>13)</sup>.

#### 암모니아 휘산

암모니아 휘산의 발생시점과 양은 첨가물에 따라 상이한 차이를 보였다(Fig 2). 분뇨단독 처리구에서는 퇴비화 8일째에 0.29 mg N으로 최고치를 나타냈으며, 이후에 뚜렷한 변화가 보이지 않았다. 톱밥처리구에서는 톱밥 처리 수준에 상관없이 휘산이 발생하지 않았는데, 이는 톱밥처리구의 C/N 비가 28.4~51.1로 매우 높아 미생물들에 의한 질소 부동화가

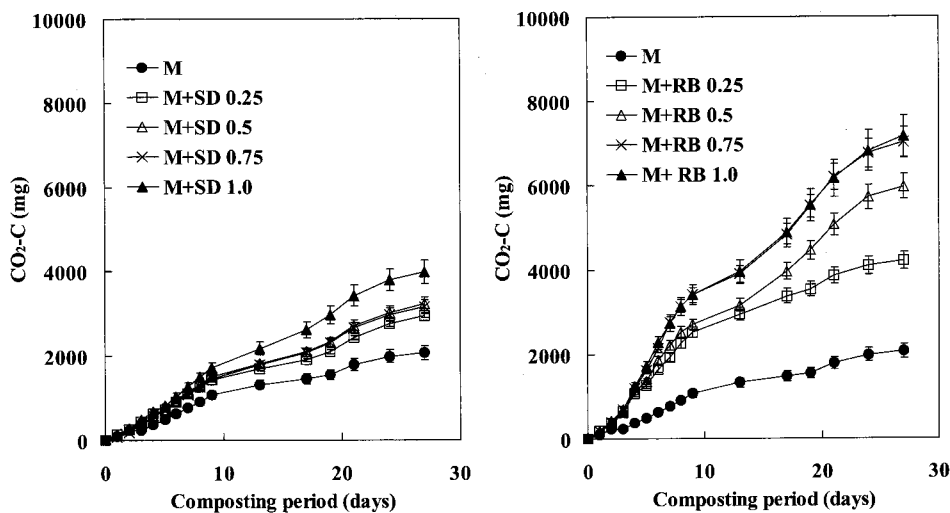


Fig. 1. Accumulative CO<sub>2</sub> emission from composting mixture with sawdust (left) and rice bran (right) during 4 weeks composting. Vertical bars are the standard errors of the means. Treatment codes are described in Table 2.

우세하게 진행되어 휘산 가능  $\text{NH}_4^+$ 의 농도가 낮아졌기 때문으로 판단된다<sup>13)</sup>. 또한 톱밥의 암모니아 고정능이  $10.2 \text{ cmolc kg}^{-1}$ 으로 높기 때문에 암모니아 휘산이 저감되었을 가능성이 있다(Table 1)<sup>14-16)</sup>.

반면, 쌀겨 처리구에서는 퇴비화 초기에는 암모니아 휘산이 발생하지 않았지만, 퇴비화 8일째부터 암모니아 휘산이 발생했다. 쌀겨처리량이 적은 M+RB0.25 처리구에서 휘산이 가장 먼저 발생하였으며, 최종 누적발생량은 M, M+RB0.25, M+RB0.50, M+RB0.75, M+RB1.0에서 각각 0.29, 0.27, 0.19, 0.17, 0.05 mg N으로 쌀겨 투입량이 적을수록 발생량도 많았다. 이는 쌀겨가 이분해성 유기물이고 쌀겨처리구의 C/N비가 19.5로 낮은 편이기 때문에 퇴비화 초기에는  $\text{NH}_4^+$ 이 빠르게 부동화된 후 다시 재무기화되어 암모니아 휘산에 노출된 것으로 판단된다<sup>17,18)</sup>. 최종 퇴비 혼합물에서의  $\text{NH}_4^+$ 의 농도는 톱밥 퇴비보다 쌀겨퇴비에서 2~5배 정도 높았는데, 이는 쌀겨퇴비에서의 암모니아 휘산 가능성이 더 크음을 의미한다(Fig. 3). 본 연구에서 나타난 난분해성과 이분해

성 유기물 투입에 따른 암모니아 휘산량 차이는 기존연구와 일치한다<sup>3,4)</sup>.

**최종물질 손실률**

최종 물질 손실률은 톱밥이나 쌀겨가 처리되지 않은 M 처리구에서 21.9%였고, 톱밥처리구에서는 18.8~22.5%로 톱밥처리 비율이 증가함에 따라 유의성( $P < 0.05$ ) 있게 감소하였다(Fig. 4). 반면, 쌀겨처리구의 물질 손실률은 35.2~41.5% 톱밥처리구 보다 높았으며( $P < 0.05$ ), 쌀겨 처리 비율이 증가할수록 손실률도 증가하였다. 이와 같은 첨가물에 따른 차이는 난분해성인 리그닌이 주성분인 톱밥퇴비보다 이분해성인 전분과 단백질이 주성분인 쌀겨퇴비에서 분해가 더 잘 일어나기 때문이다<sup>13)</sup>. Michel et al.(2004)에 따르면 볏짚과 톱밥을 이용하여 퇴비화를 하였을 때 톱밥퇴비보다 볏짚퇴비에서 부피와 질량 감소 폭이 더 컸으며, 최종 건물중 증은 초기에 비해 50~80%까지 감소할 수 있다고 하였다<sup>9)</sup>.

따라서, 이분해성 유기물은 초기 암모니아 부동화를 통해 암모니아 휘산을 감소시킬 수 있지만, 부동화된 질소의 재무기화에 의해 퇴비화 중반기에 오히려 암모니아 휘산이 증가할 수 있는 것으로 나타났다. 반면, 난분해성 유기물인 톱밥은 암모니아 고정능이 있어 물리화학적 흡착에 의해 암모니아 휘산을 저감시킬 수 있는 것으로 판단되었다.

**요 약**

퇴비화 과정 중 암모니아 휘산과 관련된 난분해성 및 이분해성 유기물의 역할을 재조명하기 위해 분뇨와 톱밥(난분해성) 또는 쌀겨(이분해성)를 혼합한 후 4주간  $\text{CO}_2$  발생량과  $\text{NH}_3$  휘산량을 조사하였다. 이산화탄소 발생량은 톱밥처리구에 비해 쌀겨처리구에서 43~122% 정도 높았으며, 이에 상응하게 최종 건물중 손실률도 쌀겨처리구가 35.1~41.5%로 톱밥처리구의 18.7~22.6%에 비해 유의하게( $P < 0.05$ ) 높았다. 톱밥처리구에서는 시험기간인 4주간 암모니아 휘산이 발생하

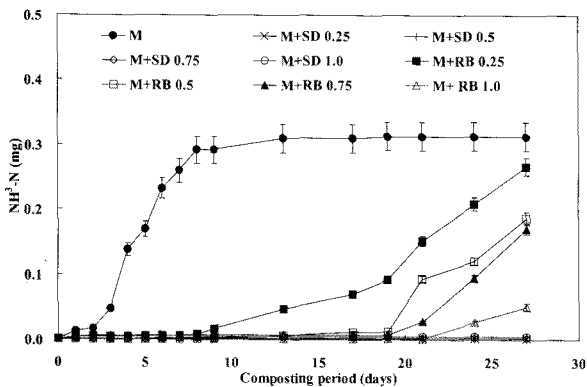


Fig 2. Accumulative  $\text{NH}_3$  emission from composting mixture with sawdust and rice bran during 4 weeks composting. Vertical bars are the standard errors of the means. Treatment codes are described in Table 2.

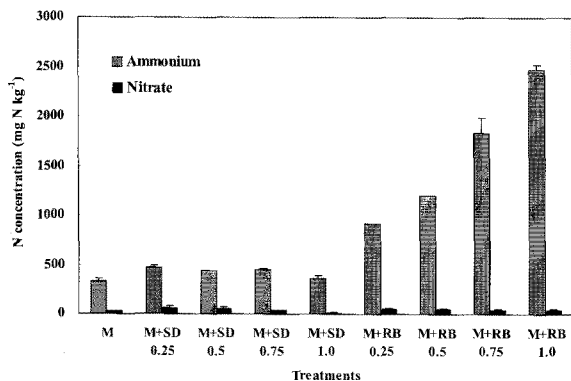


Fig. 3. Concentrations of ammonium and nitrate in the final composting mixture with sawdust and rice bran after 4 weeks of composting. Vertical bars are the standard errors of the means. Treatment codes are described in Table 2.

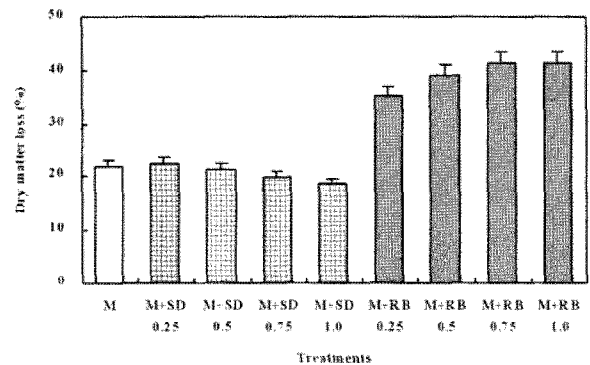


Fig. 4. Percentage of dry matter loss of composting mixture with sawdust and rice bran after 4 weeks of composting. Vertical bars are the standard errors of the means. Treatment codes are described in Table 2.

지 않았는데, 이는 톱밥의 C/N 비가 높아 질소무기화가 지체되었고 톱밥 자체가  $\text{NH}_4^+$ 를 흡착할 수 있는 능력이 있기 때문으로 판단되었다. 반면, 이분해성인 짚겨 처리구에서는 퇴비화 초기에는 질소부동화에 의해 암모니아 휘산이 나타나지 않았지만, 8일 이후부터는 짚겨처리량이 낮은 순서대로 이분해성 유기물의 고갈에 의한 질소재무기화에 의해 암모니아 휘산이 관측되었다. 따라서, 이분해성 유기물은 초기 암모니아 부동화를 통해 암모니아 휘산을 감소시킬 수 있지만, 부동화된 질소의 재무기화에 의해 퇴비화 중반기에 오히려 암모니아 휘산이 증가할 수 있는 것으로 나타났다. 반면, 난분해성 유기물인 톱밥은 암모니아 고정능이 있어 물리화학적 흡착에 의해 암모니아 휘산을 저감시킬 수 있는 것으로 판단되었다.

### 감사의 글

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 이루어졌으며, 전남대학교 농업과학기술연구소의 시료분석지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- Hao, X., Chang, C. and Larney, F. J. (2004) Carbon, nitrogen balances and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting. *J. Environ. Qual.* 33, 37-44.
- Larney, F. J., Sulliva, D. M., Buckley, K. E. and Eghball, B. (2006) The role of composting in recycling manure nutrients. *Can. J. Soil Sci.* 86, 597-611.
- Michel, F. C., Pecchia, J. A., Rigot, J. and Keener, H. M. (2004) Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci. Util.* 12, 323-334.
- Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M. and Knight, W. (2002) Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon loss. *Bioresource Technol.* 83, 189-194.
- Sharpley, A. N., Smith, S. J., Stewart, B. A. and Mathers, A. C. (1984) Forms of P in soil receiving cattle feedlot waste. *J. Environ. Qual.* 13, 211-215.
- Andersson, M. (1996) Performance of bedding materials in affecting ammonia emissions from pig manure. *J. Agric. Engng. Res.* 65, 213-222.
- Zvomuya, F., Larney, F. J., Nichol, C. K., Olson, A. F., Miller, J. J. and DeMaere, P.R. (2005) Chemical and physical changes following co-composting of beef cattle feedlot manure with phosphogypsum. *J. Environ. Qual.* 34, 2318-2327.
- Lee, Y. B., Lee, H. B., Yun, H. B. and Lee, Y. (2008) Alum as a chemical amendment for reducing ammonia emission and stabilizing pig manure phosphorus during composting. *Kor. J. Environ. Agric.* 27, 368-372.
- Diaz, L. F. and Savage, G. M. (2007) Factors that affect the process. In: Diaz, L. et al. (eds) *Compost Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p.49-66.
- Keeney, D. R. and Nelson, D. W. (1982) Nitrogen-inorganic forms. In: Page, A. L. et al. (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, p.643-698.
- Sumner, M. E. and Miller, W. P. (1996) Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Sparks, D. L. et al. (eds) *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*, ASA and SSSA, Madison Wisconsin, p.1201-1229.
- Stotzky, G. (1965) Microbial respiration. In: Black, C. A. et al. (eds) *Methods of Soil Analysis. Part 2*, ASA and SSSA, Madison, Wisconsin. p.1550-1572.
- Insam, H. and de Bertoldi, M. (2007) Microbiology of the composting process. In: Diaz, L. et al. (eds) *Compost Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p.49-66
- Siva, K. B., Aminuddin, H., Husni, M. H. A. and Manas, A. R. (1999) Ammonia volatilization from urea as affected by tropical-based palm oil mill effluent (Pome) and peat. *Commun. Soil Sci. Plan.* 30, 785-804.
- Butler, T. A., Sikora, L. J., Steinhilber, P. M. and Douglas, L. W. (2001) Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost. *J Environ. Qual.* 30, 2141-2148.
- Castells, E., Peñuelas, J. and Valentine, D. W. (2004) Are phenolic compounds released from the Mediterranean shrub *Cistus albidus* responsible for changes in N cycling in siliceous and calcareous soils? *New Phytol.* 162, 187-195.
- Choi, W. J., Lee, S. M., Han, G. H., Yoon, K. S., Jung, J. W., Lim, S. S. and Kwak, J. H. (2006) Available organic carbon controls nitrification and immobilization of ammonium in an acid loam-textured soil. *Agric. Chem. Biotechnol.* 49, 28-32.
- Bengtson, P. and Bengtsson, G. (2005) Bacterial immobilization and remineralization of N at different growth rates and N concentrations. *FEMS Microbiol. Ecol.* 54, 13-19.