Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
DOI : http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2015.57.3.001

Vol. 57, No. 3, pp. 1~7, May 2015
ISSN 1738-3692 | eISSN 2093-7709

지표와 지중 퇴비 시비에 따른 토양에서의 분변성 미생물 생존성 비교

Comparison of Fecal Microbes' Survival in Soil between Compost Surface Application and Soil Incorporation

전상민* · 송인홍**,† · 김계웅*** · 황순호* · 강문성****
Jun, Sang Min · Song, Inhong · Kim, Kyeung · Hwang, Soon Ho · Kang, Moon Seong

Abstract

The objective of this study was to compare fecal microbes survival in soil between compost surface application and soil incorporation. The survival experiment was conducted in six styrofoam beds (510 × 325 × 305 (mm) in size) filled with sandy loam soil. A half of six boxes were received by compost surface application, while the other half were treated with compost-soil mixture. Duplicated surface and surbsurface soil (20 cm depth) samples were collected at various interval up to 50 days and analyzed for the determination of fecal coliforms and *E. coli* numbers. As expected, surface applied beds demonstrated two to three magnitudes order greater in both the study microorganisms as compared to soil incorporated beds. Microbial inactivation rate of soil surface was twice as great as subsurface soil condition probably due to exposure to sun light and environmental conditions including moisture loss. When rainfall occurred, microbes on the surface were transported into soil along with water movement. It was concluded that surface compost application may be easier to apply but pose higher risk of human exposure to microbes. Winter compost application may be favorable in alleviating health risk by giving some time for inactivation compared to spring application.

Keywords: Livestock compost; Fecal coliform; *E. coli*; Microbial Survival; Land application

Ⅰ. 서 론

정부는 화학비료에 대한 국고 지원을 2005년에 폐지하고, 친환경농업 육성을 위해 부산물퇴비를 포함하여 친환경비료 생산을 위한 퇴비화 시설을 지원하고 퇴비구매를 보조해주는 사업을 추진해왔다 (Son, 2011). 더불어 2012년 발효된 런던협약에 따른 해양 투기 금지로 가축분뇨, 농림부산물, 각종 식물 잔재물을 이용한 부산물 퇴비의 생산과 사용량이 지속적으로 증가하는 추세에 있다 (Son, 2011, Kim and Lee, 2008).

* Ph.D. Student, Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University
** Research professor, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University
*** MSc Student, Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University
**** Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Research Institute of Green Eco Engineering, Seoul National University
† **Corresponding author**
Tel.: +82-2-880-4618 Fax: +82-2-873-2087
E-mail: inhongs@snu.ac.kr
Received: January 29, 2015
Revised: March 17, 2015
Accepted: March 19, 2015

축산 분뇨를 원료로 발효한 축분 퇴비의 시비는 폐기물 재활용을 통한 자원순환에도 기여하는 측면이 있다. 다만, 축분 퇴비는 화학비료에 비해 중금속 함량이 많아 토양 및 작물의 중금속 축적, 중금속 유출에 영향을 미칠 수 있어, 원료에 따른 중금속 함량 분석에 관한 다양한 연구가 진행되었다 (Ahn et al., 2013; Kim and Han, 2008; Ko et al., 2004; Moore et al., 1998). 또한 축산 분뇨는 다양한 미생물의 서식처로 일부 병원성 미생물의 생존 가능성이 있고, 이에 따른 미생물 위해성 관리도 함께 요구된다 (Sidhu and Toze, 2009; Spieds and Goyal, 2007; Renter et al., 2004). 하수처리수 재이용이나 축분 퇴비의 사용에 따른 논에서의 화학적 특성 분석에 대한 연구는 많이 진행된 반면 (Jeong et al., 2013; Jun et al., 2013; Ahn et al, 2013; Ko et al., 2004), 미생물 함량이나 생존에 관한 국내연구는 미흡한 실정이다.

우리나라에서 축분 퇴비는 작물의 종류에 따라 차이가 있으나 지표에 흩어 뿌리는 방법으로 시비하는 경우가 일반적이다. 액비도 일부 지중으로 시비하는 장비가 도입되어 운영되고 있으나, 지표 살포가 일반적이다. 하지만 강우에 의한 손실이나 냄새 문제로 특히 액비의 경우 지표 살포 전 후로 농경지를 경운하거나 로타리를 하도록 권장되고 있다 (RDA, 2010). 퇴·액비의 살포는 논의 경우 벼 수확 직후 겨울철에서부터 이듬해 봄 사이에 관행적으로 이루어진다 (Hong and

Lee, 2001).

이와 같이 다양한 퇴비 시비 관행은 잠재하는 미생물에게 다양한 생존환경을 제공함에 따라 농경지에서 미생물 생존성에 영향을 미친다. 미생물은 다양한 환경요인에 영향을 받는데 주요 인자로 온도, 토양수분, 태양광, 토양 특성 등이 있다 (Song et al., 2005; Redlinger at al., 2001; Hurst et al, 1980). 일반적으로 온도가 올라갈수록, 토양 수분이 일정 수준까지 증가할수록 미생물의 생존성이 증가한다 (Kim et al., 2010; Song et al., 2005; Zalestki et al., 2005; Santamaria and Toranzos, 2003). 미생물은 또한 태양광에 노출되는 정도에 따라 생존성에 영향을 받는데 태양광에 포함된 자외선의 작용 때문이다 (Song et al., 2006; Deller et al., 2006). Song et al. (2006)은 하수 처리수 관개토양에서 미생물의 생존성이 토양의 표면에서보다 토양 중에서 더 좋은 것으로 보고한 바 있다.

퇴비의 살포 방법은 잠재 병원균의 토양 생존성뿐만 아니라 작물이나 경작자에 대한 노출에도 영향을 주게 된다. 따라서 퇴비 살포 방법에 따른 토양에서의 미생물 농도와 생존성 조사는 위해성 평가를 위한 노출 정도를 파악하는데 중요한 요소이다. 본 연구에서는 퇴비의 지표 또는 지중 시비를 모의하는 실험을 설계하여 토양 중의 미생물 농도를 조사하고, 토양에서의 미생물의 생존성을 비교·분석하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험의 설계

실험은 퇴비 시비 방법에 따른 미생물의 생존성 차이를 확인하기 위해 시비 방법 이외에 토양조건, 기상조건 등이 똑같이 적용되도록 설계하였다. 510 × 325 × 305 (mm^3) 크기의 단열 스티로폼 박스 6개를 이용하여 지표시비 처리구와 지중시비 처리구를 3개씩 구성하였다 (Fig. 1). 실험은 서울대학교 농업생명과학대학 주변 햇빛이 잘 드는 곳에서, 2013년 10월 16일부터 2013년 12월 4일까지 50일간 수행하였다. 축분 퇴비의 시비가 수확 후 겨울에 주로 이루어지기 때문에 이를 반영하기 위해 실험기간을 겨울철로 정하였다. 실험에 사용된 토양은 서울대학교 인근 밭에서 채취하였으며, 채취 시 경작중이 아니었고 작물의 사체 등은 존재하지 않았다. 퇴비는 상용 녹색비료 부숙 유기질 비료 (가축분퇴비)를 구입하여 사용하였고, 계분 30 %, 돈분 20 %, 우분 5 %, 톱밥 30 %, 수피 10 %, 왕겨 5 %의 비율로 구성되었다. 시비량은 일반적인 시비량이 10 a당 200 - 600 kg이 시비됨에 따라 10 a당 300 kg를 기준으로 하여 박스당 500 g씩 시비하였다. 지표시비 처리구

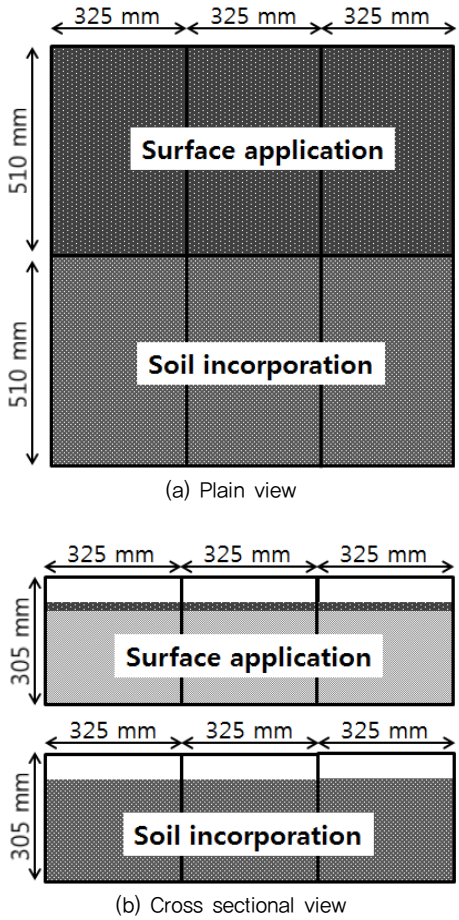


Fig. 1 Experimental layouts of compost surface application and soil incorporation

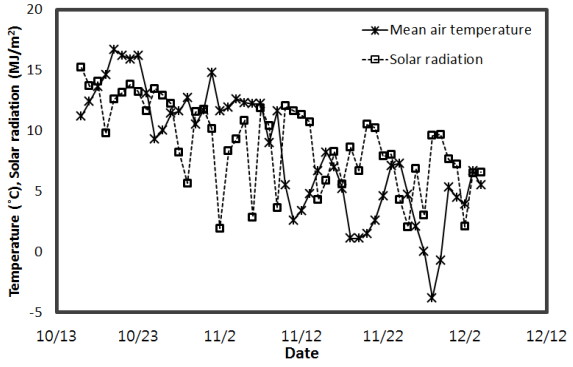
의 경우 스티로폼 박스에 토양을 넣고 토양표면 위에 약 1.5 cm 정도 두께로 퇴비를 균일하게 뿌려 시비하였으며, 지중시비 처리구의 경우 삽을 이용하여 토양과 퇴비가 완전히 혼합되도록 잘 섞은 후 스티로폼 박스에 넣어 준비하였다.

2. 시료의 채취

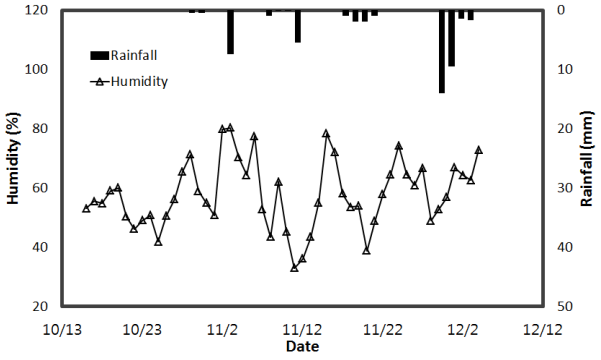
시료는 실험을 시작한 날을 기준으로 당일, 2일, 5일, 9일, 13일, 20일, 34일, 49일에 걸쳐 각 처리구별로 총 8번의 샘플링을 실시하였다. 시료는 매회 각 처리구별로 3개의 박스 중 무작위로 2개의 박스에서 채취하였고, 두 개의 박스에서 채취한 시료를 분석하여 결과의 평균값으로 화학적 특성 및 미생물 개체수를 결정하였다. 실험 초기에는 대장균 수 및 토양의 화학적 특성의 변화를 조사하기 위해 채취 간격을 짧게 하였으며, 이후 간격을 늘려가며 장기변화를 조사하였다. 또한 토양의 표층과 심층에서의 대장균 생존성을 비교하기 위해 지표와 약 20 cm 깊이의 지중 시료를 수집하여 분석하였다.

Table 1 Statistics of meteorologic conditions during the experimental period

Parameter	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Solar radiation (MJ/m^2)	Precipitation (mm)
Mean	8.2	57.8	9.0	47.9
Max	22.9	80.3	15.2	
Min	−6.4	32.9	1.9	



(a) Temperature and solar radiation



(b) Rainfall and humidity

Fig. 2 Environmental conditions during the experimental period

3. 시료의 화학 및 미생물 분석

채취한 시료는 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM)에 위탁하여 토양화학분석법 (국립농업과학원, 2010)을 준용하여 pH, EC, T-N, TOC, NO_3-N, 분원성대장균 (Fecal Coliform), *E. Coli.* 등 총 12개 항목에 대하여 분석하였다. 본 연구의 주요 분석대상인 대장균수 분석에는 총 대장균군, 분원성대장균군 및 *E. coli*를 동시에 정량적으로 분석할 수 있는 Colilert quanti-tray 시스템 (IDEXX, Wertbrook, MA)을 이용하였다.

4. 미생물 비활성화계수 산정

퇴비의 시비 방법에 따른 표층 및 심층에서의 대장균 생존성을 정량적으로 비교하기 위하여 처리구별 미생물 비활성화계수 (inactivation rate)를 산정하였다. 비활성화계수는 아래 식 (1)과 같이 시간에 대한 미생물 개체수를 지수식으로 나타낼 때 기울기로 정의된다.

$$k_d = -\log(N_0/N_t)/t \quad (1)$$

여기서 k_d는 비활성화계수, N_0는 초기 미생물 수, N_t는 시간 t에서의 미생물 수, 그리고 t는 시간을 나타낸다. 비활성화계수는 Microsoft Office Excel (Version 2010)의 회귀함수 기능을 이용하여 산정하였다.

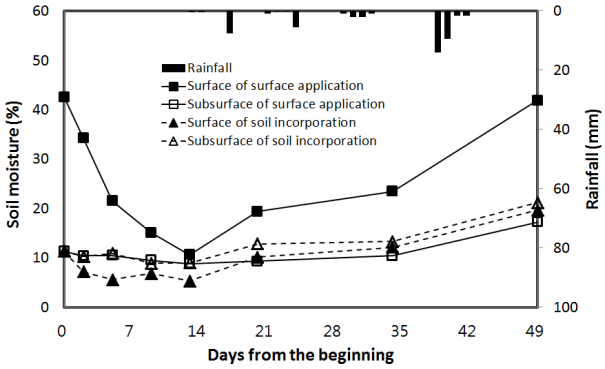


Fig. 3 Changes of soil moisture during the experimental period

Ⅲ. 결과 및 고찰

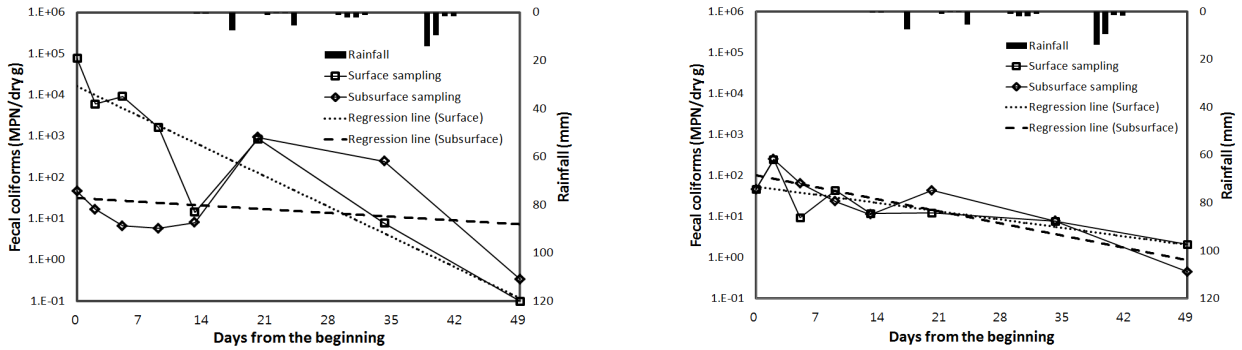
1. 기상자료 및 토양수분변화 분석

실험기간 동안 (2013년 10월 16일 - 2013년 12월 4일, 50일)의 기상조건을 정리하여 Table 1과 Fig. 2에 나타내었다. 실험기간의 총 강우량은 47.9 mm 였으며, 기온은 평균 8.2 ℃를 기록했다. 강우는 실험 시작 후 14일째 처음 발생해서 후반기에 주로 기록되었다. 기온과 일사량은 동일한 변화 형태를 보이고, 시간에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 나타냈다.

Fig. 3은 실험기간 동안의 토양수분 변화를 나타내고 있다. 실험 초기 각 처리구의 표층에서 채취한 시료의 수분 함량이 심층에서 채취한 시료에 비해 빠르게 감소하는 것을 확인할

Table 2 Initial conditions of compost and soil

Item	Compost	Soil	Item	Compost	Soil
pH	7.94	6.67	Water content (%)	42.6	12.1
Organic content (%)	51.6	1.04	TOC (%)	29.9	0.60
EC (dS/m)	47.4	0.14	Fecal coliform (MPN/dry g)	76,538	969
T-N (%)	2.32	0.04	*E. coli* (MPN/dry g)	8,358	70
P_2O_5 (mg/kg)	4,384	7.18	–	–	–



(a) Surface application (b) Soil incorporation

Fig. 4 Changes in fecal coliform counts for surface application and soil incorporation

수 있고, 실험 중반 이후 강우에 의해 수분 함량이 증가하는 것으로 나타났다. 지표시비 처리구의 표층에서 채취한 시료의 경우 대부분이 퇴비 성분으로, 다른 시료에 비해 기상조건에 의한 수분 함량의 변화가 많은 것으로 나타났다.

2. 대장균 수 변화 분석

가. 퇴비 및 토양의 초기 성분

시비에 앞서, 퇴비와 토양의 초기 성분을 분석하였다. pH, 유기물 함량, EC, T-N, P_2O_5, 수분 함량, TOC, 분원성대장균 및 *E. coli*를 분석하였으며, 분석 결과는 Table 2에 나타냈다. 퇴비의 pH는 7.94로 6.67인 토양보다 조금 높게 나타났으며, 유기물 함량 및 EC는 각각 51.6 %, 47.4 dS/m로 나타났다. 퇴비의 영양물질 함량은 T-N과 P_2O_5이 각각 2.32 %, 4,384 mg/kg 이었다. 마지막으로 분원성대장균 및 *E. Coli*는 각각 76,538 MPN/dry g, 8,358 MPN/dry g으로 각각 969 MPN/dry g, 70 MPN/dry g인 토양과 비교해 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 실험에 사용한 토양은 서울시 관악구 봉천동에 위치한 밭에서 채취하였으며, 토양환경정보시스템 (흙토람)에서 토성을 확인한 결과 사양토인 것으로 나타났다. 농촌진흥청의 농업용어사전에 따르면 사양토는 20 % 이하의 점토, 52 % 이상의 모래를 가지는 토양으로 분류된다.

나. 대장균 수 변화 분석

실험기간 총 8회에 걸쳐 64개의 시료를 채취하였으며, 분원성대장균과 *E. coli* 수의 변화를 시간의 흐름에 따라 분석하였다. Fig. 4의 (a)는 지표시비 처리구의 분원성대장균 수 모니터링 결과를 나타내고 있다. 초기에는 지표에 시비된 퇴비의 영향으로 표층에서 심층에 비해 분원성대장균 수가 수천 배 많았으나, 빠른 속도로 감소하여 실험 시작 약 14일 후에는 비슷한 수를 나타냈다. 이는 심층에 비해 표층이 건조하고 직사광선에 의한 자외선 강도가 높아, 대장균이 빠르게 사멸했기 때문으로 사료된다 (Song et al., 2006; Dellen et al., 2006). 실험 중반 강우에 의해 심층에서 분원성대장균의 수가 초기에 비해 증가한 후 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이는 강우수가 지중으로 침투함에 따라 미생물이 토양의 공극을 통해 심층으로 이동하였기 때문으로 판단된다 (Abu-Ashair et al., 1993). 또한 Zalesky et al. (2005)은 미생물은 수분이 증가함에 따라 증식이 가능하다고 보고한 바 있으며, 본 실험에서도 강우에 의해 토양수분이 증가하면서 대장균의 증식이 일어났을 가능성이 있다. 추세선의 감소 기울기는 표층이 심층에 비해 큰 것으로 나타났다.

Fig. 4 (b)는 지중시비 처리구의 분원성대장균 수 모니터링 결과를 나타내고 있으며, 표층 및 심층에서의 대장균 수 감소 속도는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 실험 초기에는 퇴비가 토양과 골고루 섞여 있어 표층 및 심층에서 같은 수의 분원성대장균 수를 기록했으며, 실험 중반 강우시에는 침

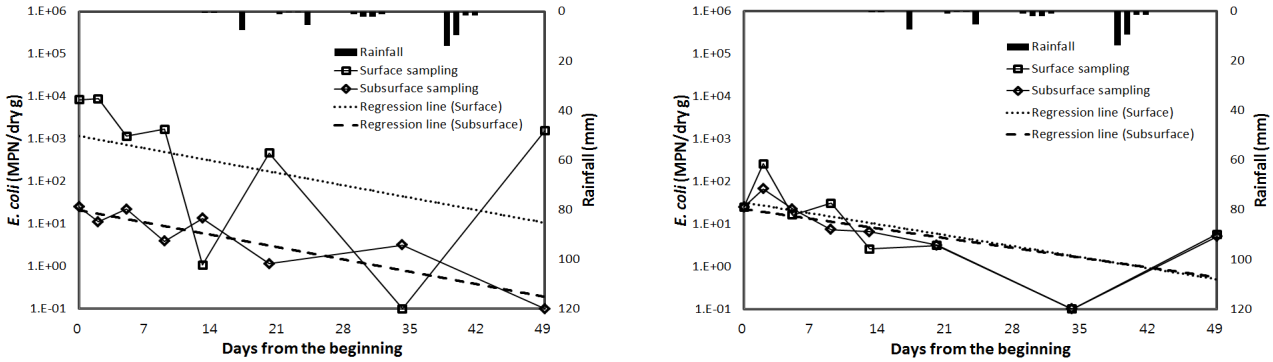


Fig. 5 Changes in *E. coli* counts for surface application and soil incorporation

투에 의해 표층에 비해 심층에서 대장균 수가 비교적 크게 증가하는 것으로 나타났다. 추세선의 감소 기울기는 심층에서 표층에 비해 조금 큰 것으로 나타났다.

Fig. 5의 (a)는 지표시비 처리구의 *E. coli*수 모니터링 결과를 나타내고 있다. 실험 시작시 퇴비가 집중되어 있는 표층의 *E. coli* 수가 심층에 비해 많은 것을 확인할 수 있으며, 분원성 대장균과 마찬가지로 낮은 수분함량 및 강한 자외선 강도에 의해 *E. coli* 수가 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 실험 약 35일째에는 표층에 *E. coli*가 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. 실험 마지막에는 지표시비처리구의 표층에서 *E. coli* 수가 크게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 표층에서 채취한 두 개의 샘플 중 하나의 분석 결과가 3,116 MPN/dry g으로 감소 추세에 어긋나는 높은 값을 나타냈기 때문이다. 이는 분석상에 발생한 오차의 가능성 혹은 강우와 샘플링으로 인해 토양에 존재하는 퇴비의 분포가 비균질성을 가지게 되었고, 퇴비가 비교적 많이 존재하는 부분이 분석에 사용되었을 가능성이 있는 것으로 사료된다. 지중시비처리구를 포함한 이외의 샘플에서는 실험 마지막에 10 MPN/dry g 이하의 *E. coli* 수를 기록하여 대부분의 대장균이 사멸하는 것으로 나타났다. 심층에서는 분원성대장균에 비해 뚜렷한 증가추세 없이 *E. coli* 수가 감소하는 것으로 나타났으며, 실험 마지막에는 *E. coli*가 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. *E. coli* 수 그래프의 추세선의 경우 표층 및 심층에서 비슷한 기울기를 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 5의 (b)는 지중시비 처리구의 *E. coli* 모니터링 결과를 나타내고 있다. 지표시비 처리구와 마찬가지로 *E. coli*수가 꾸준히 감소하는 것으로 나타났으며, 추세선의 기울기는 표층 및 심층에서 큰 차이를 보이지 않았다.

대장균 수 변화 분석 결과를 종합하면, 실험 초기에는 지표시비의 경우 표층에서 높은 대장균 수를 기록하였다. 실험 초기에는 강우에 따른 수분함량 증가에 의한 증식, 퇴비의 지중침투 등의 효과로 표층과 심층 모두에서 분원성대장균 수가 증가하는 경향을 보였으며, 실험 후기에는 강우에 의한 대장균 수 증가 효과는 미미한 것으로 나타났다. *E. coli*는 분원성대장균에 비해 강우에 의한 개체수 증가효과가 나타나지 않았다. 전반적으로 지표시비의 경우가 대장균 수가 많은 것으로 나타났고, 특히 지표시비 직후 표층의 대장균 수가 굉장히 많아 인체에 위해한 병원성 미생물이 존재할 가능성이 높은 것으로 사료된다. 또한 표층에서 심층에 비해 대장균 수 변화가 큰 것으로 나타났으며, 이는 심층에 비해 낮은 수분 함량 및 강한 자외선 등의 영향 때문일 것으로 판단된다.

본 연구의 미생물 모니터링 결과, 전반적으로 병원성 미생물에 의한 인체 위해성 측면에서는 지중시비 방법이 지표시비 방법에 비해 안전할 것으로 보인다. 하지만 국내에서는 지표시비 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 따라서, 지표시비에 따른 위해성을 줄이기 위해서는 영농활동과 충분한 간격을 두고 시비 시기를 정하여 병원성 미생물이 사멸할 시간을 갖도록 하거나, 시비 후 경운 등을 통해 영농활동에 따른 병원성 미생물 접촉의 잠재성을 줄이는 방법이 필요할 것으로 사료된다.

3. 미생물 비활성화계수

지표시비 처리구와 지중시비 처리구에서 분원성대장균 및 *E. coli*의 비활성화계수를 각각 산정하였고, 초기 대장균 수와 함께 Table 3에 나타냈다. 지표시비 처리구 분원성대장균 심층 모니터링의 경우, 실험 중반 강우에 의한 대장균 수 증가 효과를 배제하기 위하여 강우 이전까지의 데이터를 사용하여 비활성화계수를 산정하였다. 계산 결과, 지표시비 처리구에서의 비활성화계수가 지중시비 처리구에 비해 높은 것으로 나타났으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 건조한 환경조건과

Table 3 Initial levels and inactivation rate of fecal coliforms and *E. coli*

Treatments	Sampling location	Fecal coliforms		*E.coli*	
		Initial levels (MPN/dry g)	Inactivation rate (1/day)	Initial levels (MPN/dry g)	Inactivation rate (1/day)
Surface application	Surface	76,538	0.105	8,358	0.136
	Subsurface	46	0.054	25	0.042
Soil incorporation	Surface	243	0.029	259	0.037
	Subsurface	248	0.042	66	0.033

강한 자외선에 의해 지표에 시비된 퇴비에 존재하는 대장균이 빠르게 사멸하였기 때문이다.

초기 개체수가 많아 개체수 변화가 크게 일어나는 지표시비 처리구의 표층에서 분원성대장균 및 *E. coli*의 비활성화계수 각각 0.105, 0.136으로 크게 나타났고, 심층에서는 0.054, 0.042로 표층과 큰 차이를 보였다. 지중시비 처리구의 표층에서는 분원성대장균 및 *E. coli*의 비활성화계수가 각각 0.029, 0.037로 나타났으며, 심층에서는 각각 0.042, 0.033으로 처리구 및 샘플링 위치별로 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 분원성대장균과 *E. coli* 사이의 비활성화계수 차이는 크지 않은 것으로 나타나, 두 대장균의 생존성은 유사한 것으로 판단된다.

Ⅳ. 요약 및 결론

본 연구에서는 지표시비 및 지중시비 처리구를 각각 조성하여 시비방법에 따른 표층 및 심층 토양의 대장균 수 변화 특성을 모니터링 하고, 그래프를 이용한 도해적방법과 비활성화계수 등의 정량적인 지표를 이용해 퇴비 시비 방법에 따른 토양에서의 대장균 생존성을 분석하였다.

1. 퇴비의 유기물 함량은 51.6 %, 영양물질 함량은 T-N과 P_2O_5이 각각 2.32 %, 4,384 mg/kg로 나타났다. 퇴비에 존재하는 분원성대장균 및 *E. Coli*는 각각 76,538 MPN/dry g, 8,358 MPN/dry g으로 각각 969 MPN/dry g, 70 MPN/dry g인 토양과 비교해 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.
2. 지표시비 처리구에서 지중시비 처리구에 비해 전반적으로 대장균의 개체수가 많은 것으로 나타났다. 특히 지표시비 직후 표층의 대장균 수가 굉장히 많아 인체에 노출될 경우 병원성 미생물에 의해 위해할 수 있을 것으로 사료되며, 따라서 지중시비가 비교적 안전한 시비방법으로 판단된다.
3. 비활성화계수 산정 결과, 지표시비 처리구의 표층에서 분원성대장균 및 *E. coli*의 비활성화계수가 각각 0.105, 0.136으로 나타났고, 심층에서는 0.054, 0.042로 나타났다. 지중시비 처리구의 표층에서는 분원성대장균 및 *E. coli*의 비활성화계수가 각각 0.029, 0.037로 나타났으며, 심층에서는 각각 0.042, 0.033으로 처리구 및 샘플링 위치별로 큰 차이를 보이지 않았다. 지표시비 처리구에서의 비활성화계수가 지중시비 처리구에 비해 높게 나타난 것은 건조한 환경조건과 강한 자외선에 의해 지표에 시비된 퇴비에 존재하는 대장균이 빠르게 사멸하였기 때문으로 사료된다.
4. 분원성대장균과 *E. coli* 사이의 비활성화계수 차이는 크지 않은 것으로 나타나, 두 대장균의 생존성은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다.

모니터링 결과, 전반적으로 병원성 미생물에 의한 인체 위해성 측면에서는 지중시비 방법이 지표시비 방법에 비해 안전할 것으로 보인다. 따라서, 지표시비에 따른 위해성을 줄이기 위해서는 시비 시기 조절, 경운 등의 방법을 통해 영농활동에 따른 병원성 미생물 접촉의 잠재성을 줄이는 방법이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구의 결과는 퇴비 잠재 위해성 관리를 위한 대책 마련의 기초자료로 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2012R1A1A2007326).

REFERENCES

1. Abu-Ashour, J., D. M. Joy, H. Lee, H. R. Whiteley, and S. Zelin, 1993, Transport of microorganisms through soil. *Water, Air and Soil Pollution* 75: 141-158.
2. Ahn, J. H., I. Song, and M. S. Kang, 2013, Correlation between raw materials and chemical contents of livestock compost. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(2): 37-45 (in Korean).
3. Chiou, R. J., 2008. Risk assessment and loading capacity of

reclaimed wastewater to be reused for agricultural irrigation. *Environmental Monitoring and Assessment* 142(1-3): 255-262.

4. Deller, S., Mascher, F., Platzer, S., Reinthaler, F.F., Marth, E., 2006. Effect of solar radiation on survival of indicator bacteria in bathing waters. Cent. Eur. J. Public Health 14 (3), 133-137.
5. Hong, S. G., and N. H. Lee, 2001. Assessment of pollutant loading potential during land application of animal waste. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(1): 66-74 (in Korean).
6. Hurst, C. J., C. P. Gerba, and I. Cech. 1980. Effects of environmental variables and soil characteristics on virus survival in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 40:1067−1079.
7. Jeong, H. S., J. H. Park, C. H. Seong, T. I. Jang, M. S. Kang, and S. W. Park, 2013. Effects of Indirect Wastewater Reuse on Water Quality and Soil Environment in Paddy Fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 91-104 (in Korean).
8. Jun, S. M., I. Song, H. S. Jeong, M. S. Kang, and S. W. Park, 2013. Statistics and Probability Distribution of Total Coliforms in Wastewater. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 105-111 (in Korean).
9. Kim, G. S., and S. M. Lee, 2008, Management strategy for the prohibition of ocean dumping of sewage sludge in 2011. *Seoul Metropolitan Study* 9(3): 3-21 (in Korean).
10. Kim, J. H., and K. H. Han, 2008, Estimation of heavy metal loads at plain area of the rural watersheds during farming season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 85-92 (in Korean).
11. Kim, M. K., M. Y. Kim, C. M. Choi, B. G. Ko, S. I., Kwon, and H. Y. Weon, 2010, Pathogenic E. coli inactivation in upland soils to a change of soil moisture content and temperature, Korean J. Soil Sci. Fert. 43(1): 90-95.
12. Ko, H. J., H. L. Choi, and K. Y. Kim, 2004, Heavy metal speciation in compost derived from the different animal manures. *J. Anim. Sci. & Technol.* 46(2): 273-282 (in Korean).
13. Moore, P. A., Jr. T. C. Daniel, J. T. Gilmour, B. R. Shreve, D. R. Edwards, and B. H. Wood, 1998. Decreasing metal runoff from poultry litter with aluminum sulfate. *J. Environ. Qual.* 27: 92-99.
14. National academy of agricultural science (NAAS), 2010. Chemical analysis of soil.
15. RDA, 2010, Manual for the use of livestock compost and liquid manure. Document No. 11-139000-002801-01.
16. Renter, D. G., J. M. Sargeant, and L. L. Hungerford, 2004, Distribution of Escherichia coli O157:H7 within and among cattle operations in pasture-based agricultural areas. *Am. J. Vet. Res.* 65:1367-1376.
17. Santamaria, J., and G. A. Toranzos, 2003, Enteric pathogens and soil: a short review. Int. Microbiol. 6: 5-9.
18. Sidhu, J. P. S., and S. G. Toze, 2009, Human pathogens and their indicators in biosoilds: a literature review. *Environmental International* 35: 187-201.
19. Son, Y.M., 2011, Status of domestic fertilizer industry and environmental-friendly fertilizer production. *KIC News,* 14(4): 41-49 (in Korean).
20. Song, I., C. Y. Choi, S. O'Shaughnessy, and C. P. Gerba, 2005, Effects of temperature and moisture on coliphage PRD-1 survival in soil, J Food Protet. 68(10): 2118-2122.
21. Song, I., S. W. Stine, C. Y. Choi, and C. P. Gerba, 2006, Comparison of crop contamination by microorganisms during subsruface drip and furrow irrigation. J Environ. Eng. 132(10): 1243-1248.
22. Spieds, M., and S. Goyal, 2007, Best management practices for pathogen control in manure management systems, http://www.extension.umn.edu/agriculture /manure-management-and-air-quality/manure-pathogens/best-management-practices/, University of Minnesota Extension, M1211.
23. Zaleski, K. J., K. L. Josephson, C. P. Gerba, and I. L. Pepper, 2005, Survival, growth, and regrowth of enteric indicator and pathogenic bacteria in biosolids, compost, soil, and land applied biosolids, J Residuals Sci. & Technol. 2(1): 49-63.