ORIGINAL PAPER 원저

습윤 및 건조과정에서의 톱밥내 물리적 성상과 공기투과성의 변화

김병태†
대진대학교 환경공학과
(2009년 12월 18일 접수, 2009년 12월 28일 채택)

Comparison of physical properties and air permeability in the sawdust during wetting and drying procedure

Byung Tae Kim†
Department of Environmental Engineering, Daejin University, Pocheon, Korea

ABSTRACT

Moisture is one of the important design factors that affects to the changes of physical properties and air permeability in the composting matrix.

This study examines the effects of moisture during the wetting and drying procedure on physical properties like bulk density, particle size, free air space and air permeability in the sawdust used as the bulking agent in composting process.

During both procedures of wetting and drying of the water, with increasing moisture content, bulk density and particle size increased, but FAS decreased.

In the range of near 40 to 60% moisture content on a wet basis, particle size and FAS in wetting procedure were larger and higher than those in drying procedure.

During wetting procedure, pressure drop continuously decreased ranging from near 20 to 60% moisture content, despite of decreasing FAS as a consequence of increasing moisture, and then over the range of 60% moisture content, pressure drop rapidly increased to the saturated moisture condition while the pore space was filled with the water. On the other hand, during drying procedure, pressure drop decreased from the saturated condition to 40% moisture content.

In the recommended range of 50 to 60% moisture content for composting operation, pressure drop in wetting procedure were lower than in drying procedure.

For the enhancement of the air permeability in the composting matrix, the wetting procedure was proper than the drying procedure, and the optimum moisture content for the efficient composting operation was appeared to be near 60%.

†Corresponding author : btkim@daejin.ac.kr

Keywords : wetting and drying procedure, hysteresis, particle size, pressure drop

초 록

본 연구에서는 퇴비화에서 첨가제로 주로 사용하고 있는 톱밥을 대상으로 수분 혼합방식으로서의 습윤과정과 건조과정에서의 수분함량별 톱밥의 물리적 성상의 변화로 인한 공기투과성의 차이점을 파악하고자 하였다. 수분증가에 따라 겉보기밀도는 증가하며, 공기공극은 감소하였다. 그러나 습윤 및 건조과정에서 동일한 수분함량일지라도 습윤과정의 공기공극이 건조과정에 비하여 높게 나타나고 있어 습윤과정이 퇴비화 매체 내에서의 공기이동에 유리한 물리적 성상을 보이고 있다. 또한 수분이 증가함에 따라 톱밥 입자크기가 커지며, 수분함량 40%부터 60% 구간에서 습윤과정이 건조과정에 비하여 큰 입자를 형성하였다. 또한, 습윤과정에서는 수분이 증가함에 따라 공기공극이 작아짐에도 불구하고 수분함량 60% 정도에서 차감압력이 가장 낮아지고 이후 수분 포화상태에 도달하면 급격히 증가하고 있다. 건조과정에서는 습윤과정과는 다르게 포화상태에서부터 수분이 감소함에 따라 차감압력이 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 퇴비화에서 주로 활용되는 건조기준 수분함량 0.67(습량기준 40%) 이상의 수분함량 구간에서 유입 공기유량이 동일할 경우 습윤과정이 건조과정에 비하여 차감압력이 낮아 공기투과성이 개선되어 있음을 알 수 있다. 또한 동일한 수분함량에서의 차감압력은 유입 공기유량에 비례하여 증가하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과로서, 퇴비화공정에서 매체내의 공기이동성을 원활하게 하기 위하여는 습윤과정이 적절하며 수분함량 60% 정도가 최적의 운영조건이라 판단된다.

핵심용어 : 습윤 및 건조과정, 이력현상, 입자크기, 차감압력

1. 서론

유기성폐기물의 퇴비화공정에서 미생물에 의해 유기성분 분해에 필요한 산소의 원활한 공급과 분해과정에서 발생하는 가스와 열의 효율적 배출여부가 중요한 요소이다. 퇴비화 매체 내에서의 산소공급과 발생가스 배출을 제어하기 위한 파라메타로는 매체내의 공기공극(Free Air Space, 이하 공기공극이라고 함.)과 공기투과성이 있다[1].

공극은 매체 입자사이의 수분과 공기가 차지하는 공간으로 크기에 따라 대공극과 소공극으로 나누어진다. 대공극은 산소를 포함한 가스의 이동통로가 되고 소공극은 주로 수분을 보유하거나 세균의 서식공간이 된다. 이러한 공극은 매체입자의 크기, 배열상태에 따라 같은 부피의 공극이라 하더라도 공기 및 물의 이동흐름과 건조속도가 달라지게 된다[2].

특히 공극내에서 공기가 차지하는 공간을 공기공극(Free Air Space)이라고 하며 공극내에서 수분의 증감여부에 따라 공기공극 비율이 달라지게 된다. 또한 매체 내부로 수분이 증가되는 습윤과정과 매체로부터 수분이 증발되는 건조과정에 따라 동일한 수분함량이라도 메트릭포텐셜이 달라지는 이력현상(hysteresis)이 발생하게 된다[2].

하지만 퇴비화에서 적절한 공기공극의 확보는 공정운영을 위한 필요조건이 될 수 있지만 효율적으로 공정을 제어하기 위한 충분한 조건은 아니다. 이는 동일한 공기공극에서도 가스 이동경로에 접한 매체의 입자크기, 입자 배열형태, 수분위치 등에 따라 가스 이동성은 달라지기 때문이다. 가스가 매체를 통과할 때 가스의 이동유량과 이동거리가 증가함에 따라 이에 대한 저항이 증가하여 압력손실이 증가하게 된다[3]. 따라서 성공적인 공정제어를 위하여는 매체 내부에서의 충분한 공기공극 확보와 함께 원활한 가스이동이 동시에 이루어져야만 한다.

고형 매체 내부에서의 유체 이동성에 대한 연구로는 Ergun과 Carman이 차감압력(pressure drop)과 속도와의 관계식을 제시한 이후에 많은 연구자들이 경험식을 제시하였다[4),5)]. 이 후에도 다양한 재료를 사용하여 차감압력에 영향을 미치는 요소로서 수분함량, 미세입자와 밀도를 제시하는 등의 연구가 이루어졌다[6),7),8),9),10),11),12)].

이러한 연구결과를 유기성 퇴비화에 접목하여 퇴비화 매체 내부의 물리적 특성을 파악하고자 퇴비화 매체에서의 공기공극 분포[13,14)] 및 공기투과성[3),15),16),17)]에 대한 연구가 이루어졌다.

우리나라의 경우 퇴비화에 대한 연구는 주로 유기물질의 성상변화를 대상으로 하고 있으며, 공정과정에서의 퇴비화 매체 내부의 물리적 변화특성에 대한 연구로는 김[18),19),20)]의 연구가 있으나 아직은 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 퇴비화 공정 과정에서 수분함량 변화에 따른 매체 내부의 물리적 변화를 파악하기 위한 기초연구로서 퇴비화에서 첨가제로 주로 사용하고 있는 톱밥을 대상으로 수분함량 변화에 대한 물리적 성상과 공기투과성 변화를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 습윤과정과 건조과정에서의 수분함량별 물리적 성상변화의 차이가 톱밥 내부에서의 공기투과성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시료의 제조

실험재료는 경기도 포천시에 소재한 제재소에서 원목 가공시에 배출되는 톱밥을 사용하였다. 습윤과정 시료는 수거된 톱밥을 건조기에서 항량이 될 때까지 건조 후 수분함량 0%, 20%, 40%, 60% 및 포화수분까지로 구분하여 분무기로 물을 첨가하여 혼합한 후 4시간 동안 밀폐 보관하였다. 또한 건조과정 시료는 수분 포화시료를 건조기에서 건조시키면서 습윤과정과 동일한 수분함량 시료를 채취하여 실험에 사용하였다.

2.2 실험방법

본 연구를 위하여 수분 혼합방식별로 각 수분함량에서의 겉보기밀도, 공기공극, 입자 평균크기, 유입 유량별 공기투과성을 분석하였으며, 모든 분석항목은 3회 반복 실험하여 평균치를 산정하였다.

습윤과정 및 건조과정 시료의 수분함량별 평균 입자크기는 시료를 4.75mm, 2mm, 1mm와 0.425mm의 표준체를 부착한 체진동기에서 4분간 진동시킨 후 각 단에 남아있는 시료 무게를 측정하고 중량평균법[21)]을 이용하여 입자 평균크기를 산정하였다.

중량평균법에 의한 입자 평균크기 산정식은 다음과 같다. (d_p는 입자 평균크기(mm), m_i는 각 단에 남겨진 시료 무게, d_i는 각 단사이의 체 규격 중간치, M은 총 시료무게이다.)

$$d_P = \frac{\Sigma\ m_i d_i}{M}$$

겉보기밀도는 12.5L의 용기에 퇴비화 실험법[22)]에 따라 시료를 채우고 질량을 측정하여 산정하였다.

수분함량은 시료를 104℃로 조정된 건조기에서 하루 동안 건조한 후의 수분무게로 계산하거나 수분함량계(Ohaus MB200)를 사용하였다.

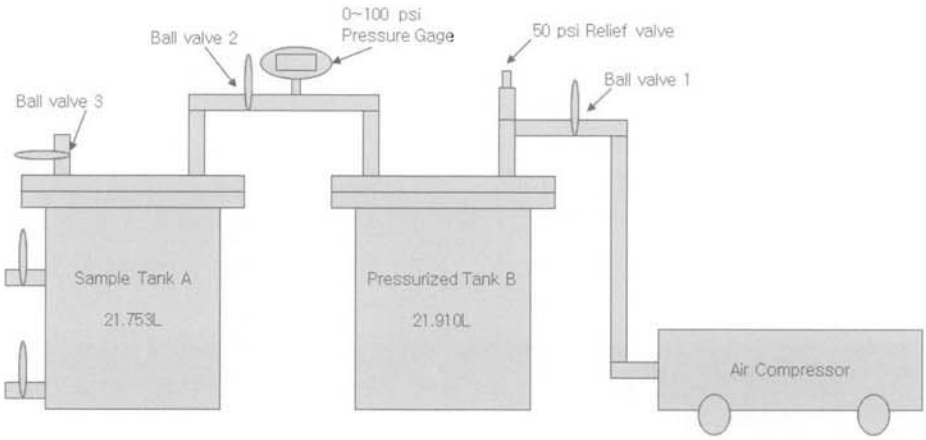
톱밥내의 공기공극은 실험실에서 자체 제작한 air pycnometer로 측정하였다. Air pycnometer에는 [Fig. 1]에 나타낸 바와 같이 약 20L 용량의 반응기 2개로 되어 있으며, 시료를 반응기에 넣기 전후의 압력변화를 측정하고 Boyle의 법칙에 의하여 공기공극을 산정하였다.

각 수분함량별 매체 내부에서의 공기투과성은 [Fig. 2]와 같이 직경 150 mm의 원통형 아크릴로 제작된 permeameter에 시료를 넣고 공기량을 5~30 LPM으로 유입시키면서 매체 상부와 하부간의 차압을 이용하여 계산하였다. 차압은 digital manometer (Testo-525, Germany)로 측정하였으며 공기유량은 유량조절계(MJT MR-300, 한국)로 조절하였다.

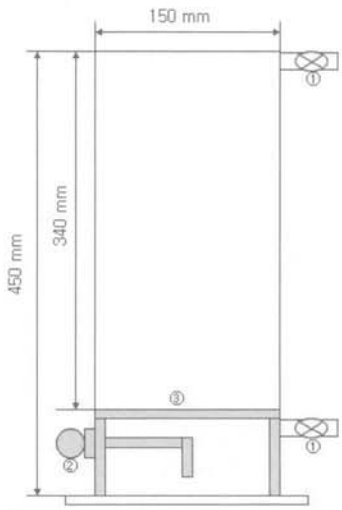
3. 결과 및 고찰

3.1 수분함량에 따른 겉보기밀도 변화

건조한 톱밥의 겉보기밀도는 176.0 kg/m^3(수분

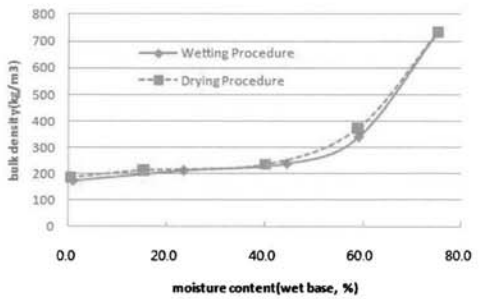


〔Fig. 1〕 Schematic diagram of air pycnometer.



〔Fig. 2〕 Schematic diagram of permeameter.
① port for measurement of pressure drop
② air coupling
③ porous plenum

함량 1.0%)으로, 건조 시료에서 부터 수분을 첨가하는 습윤과정에서 수분함량 40%까지는 완만한 밀도 증가를 보이나 이후에는 급격히 증가하여 수분포화 상태에서는 733.4 kg/m^{3}로 급격히 증가하고 있다. 또한 습윤과정과 건조과정에서의 밀도는 건조과정이 약간 높으나 그 차이는 크게 나타나지 않았다〔Fig. 3〕.



〔Fig. 3〕 Variation of bulk density with moisture content.

3.2 수분함량에 따른 공기공극 변화

수분의 유입이나 증발에 따라 수분이 위치하던 공간이 공기로 대체됨으로써 습윤과정에서는 수분 증가에 따라 공기공극은 감소하게 되나 건조과정에서는 수분 증발로 인하여 공기공극이 증가하게 된다.

실험 결과, 습윤과정에서는 공기공극이 초기 0.866에서 수분함량 40%까지는 0.830으로 완만하게 감소하나 수분함량 60%를 거쳐 포화상태에 도달할 때까지는 급격히 공기공극이 감소하여 포화상태의 공기공극은 0.347로서 초기에 비하여 59.9%나 감소하였다. 건조과정에서는 수분 포화상태에서 수분함량 40%까지는 공기공극이 급격히 감소하고 이후 완만하게 감소하였다. 그러나 습윤

과정과 건조과정의 수분함량 40%에서 포화상태까지의 구간에서는 동일한 수분함량일지라도 수분 혼합방식에 따라 공기공극이 다르게 나타나고 있다. 즉 〔Fig. 4〕에서와 같이 이 구간에서의 공기공극은 습윤과정이 건조과정에 비하여 높게 나타나고 있어 습윤과정이 퇴비화 매체 내부에서의 공기이동 측면에서 유리한 물리적 특성을 가진다고 하겠다. 이는 수분을 추가할 때와 수분이 증발할 때의 입자크기 변화가 서로 다르고 이로 인한 매체내의 대공극과 소공극간의 구조 변화로 인하여 수분유입속도 및 증발속도간의 차이로 인한 결과라고 여겨진다.

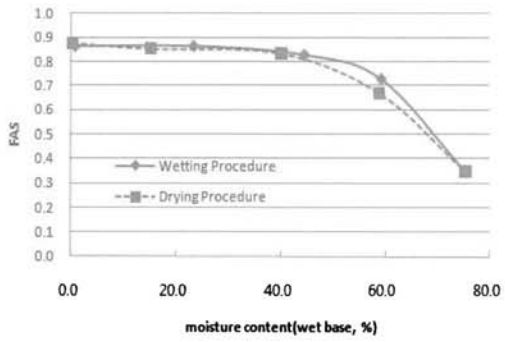
또한 퇴비화에 적정한 수분함량인 약 60% 부근에서의 공기공극은 습윤과정이 0.729, 건조과정이 0.668로서, 습윤과정에서는 공기공극이 초기에 비하여 15.8% 감소하였으며, 건조과정에서는 92.5%가 증가하였으나 습윤과정에서의 공기공극이 건조과정에 비하여 더 높게 나타났다.

3.3 수분함량에 따른 입자크기 변화

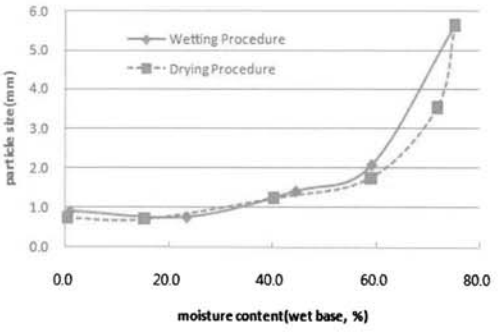
입자크기는 매체내의 대공극과 소공극 구성에 영향을 미치는 요소로서 입자크기가 커질수록 전체 공극량이 많아지고 공기의 이동통로로 활용되는 대공극이 증가하게 된다.

수분은 수분 주위에 인접한 매체 표면에 흡착되는 부착력을 가지고 있으며 특히 포화상태의 자유수에 비하여 불포화상태에서의 수분 부착력이 더 높으며, 또한 매체가 건조할수록 수분이 강하게 흡착된다. 따라서 수분의 첨가 또는 증발은 매체의 입자크기 변화에 영향을 미치는 요인이 된다.

〔Fig. 5〕에서 습윤과정에서는 톱밥의 초기 입자크기 0.91mm에서 수분함량 23.5%에서 0.76mm로 줄어드나 이후 완만히 입자크기가 증가하여 수분함량 59.2%에서 2.08mm로 입자가 커지게 된다. 이후 포화상태인 수분함량 75.3%에서는 입자크기가 5.64mm로 급격히 증가된다. 반면에 건조과정에서는 수분이 증발함에 따라 입자크기가 작아져 초기 5.64mm에서 수분함량 58.9%에서는 1.75mm로 급격히 줄어들고 이후 완만히 감소하여 수분함량 15.3%에서는 0.72mm로 나타났다. 이러한 수분함량 변화에 따른 톱밥 입자크기 변화는 수분의 매체 흡착력에 기인한다고 여겨진다. 즉 습윤과정에서는 수분 증가시 수분이 작은 크기의 톱밥입자를 흡착시켜 톱밥의 입자크기가 커지게 된다. 반면에 수분 포화상태에서 입자가 커진 톱밥은 건조과정을 거치면서 공극을 채우고 있던 수분이 증발하고 이 과정에서 공극크기가 적은 소공극의 병목구간에서 강한 모세관력이 작용하여 수분의 제거가 어려워지게 된다. 이에 따라 동일한 수분함량이라고 할지라도 습윤과정의 메트릭포텐셜이 건조과정에서보다도 낮아지는 이력현상(hysteresis)이 발생하여 입자크기가 더 커지게 된다고 여겨진다. 이러한 현상은 〔Fig. 5〕에서와 같이 수분함량 40%부터 수분 포화구간에서 명확



〔Fig. 4〕 Variation of FAS with moisture content.



〔Fig. 5〕 Variation of particle size with moisture content.

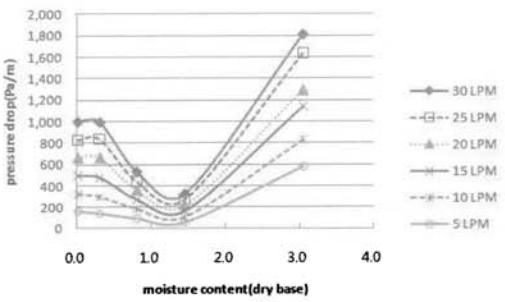
히 나타나고 있어 이 구간에서의 습윤과정의 입자크기는 1.41mm~5.64mm, 건조과정의 1.24mm~5.64mm로서 습윤과정이 건조과정에 비하여 더 큰 입자가 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 수분 혼합방식에 따른 입자크기 변화는 매체 공극의 불규칙성과 공극내의 공기, 매체의 팽창과 수축으로 인한 매체 내부의 구조변화에 기인한다고 여겨진다[2].

3.4 수분함량에 따른 공기투과성 변화

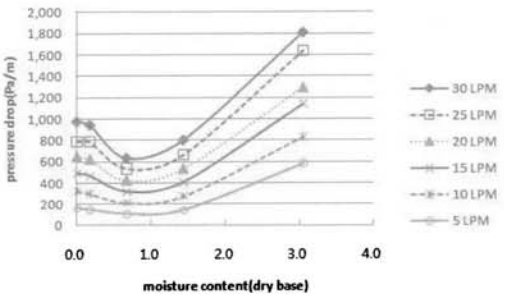
톱밥의 습윤과정 및 건조과정에서의 수분함량 변화는 입자크기 및 공기공극 등의 물리적 구조에 영향을 미치고 이는 톱밥 내에서의 공기 이동능력에 변화를 가져오게 된다.

톱밥의 습윤과정 및 건조과정별로 각 수분함량에 공기유량을 5~30 LPM으로 유입시키면서 차감압력을 측정한 결과는 〔Fig. 6〕과 〔Fig. 7〕에 나타내었다.

습윤과정에서는 모든 유입 공기유량에 걸쳐서 수분이 증가함에 따라 건조기준 수분함량 0.31(습윤기준으로는 23.5%)에서부터 차감압력이 감소하기 시작하여 건조기준 수분함량 1.45(습윤기준으로는 59.2%)에서 가장 낮아짐으로써 이 수분함량에서 공기이동성이 매우 좋아지고 있음을 보여주고 있다. 차감압력이 가장 낮아진 지점의 수분함량은 퇴비화에 가장 적절한 수분함량으로 알려진 건조기준 수분함량 1.0~1.5(습윤기준으로는 50%~60%)와 일치하고 있다. 이후의 연속적인 수분증가로 포화수분에 도달할 때까지는 차감압력이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 예로써, 20 LPM의 공기유량 유입시 건조기준 수분함량 0.31(습윤기준으로는 23.5%)에서의 차감압력 666.7 Pa/m와 비교하여 수분이 증가한 건조기준 수분함량 0.81(습윤기준으로는 44.6%)과 1.45(습윤기준으로는 59.2%)에서의 차감압력은 각각 358.7 Pa/m, 216.0 Pa/m로 차감압력이 각각 46.2%, 67.6%나 감소하였다. 이후 건조기준 수분함량 1.45(습량기준으로는 59.2%)에서 3.06(습량기준으로는 75.3%)으로 수분이 포화상태에 도달하면 차감압력이 1,298.7 Pa/m로 급격히 증가하고 있다. 차감압력이 감소하는 수분함량 구간에서는 〔Flg. 4〕에서 초기에 비하여 공기공극이 4.6%, 16.2%나 감소하였음에도 불구하고 공기투과성은 오히려 각각 46.2%, 67.6%나 증가하였다. 이렇게 공기공극은 줄어들었음에도 공기투과성이 높아진 이유는 수분함량이 증가하면서 톱밥입자가 응결하여 입단화되면서 톱밥입자 사이에 형성된 공극 크기가 커짐에 기인한 것으로 여겨진다. 이는 〔Fig. 5〕에서 이 구간에서의 입자크기가 초기에 비하여 85.5%, 173.7%나 커지고 있는 결과와 일치하고 있다. 그러나 건조기준 수분함량 1.45(습량기준으로는 59.2%) 구간을 넘어서서 연속적으로 수분이 증가하여 포화상태 도달시의 차감압력은 1,298.7 Pa/m로서, 입자크기가 커짐에도 불구하고 공극의



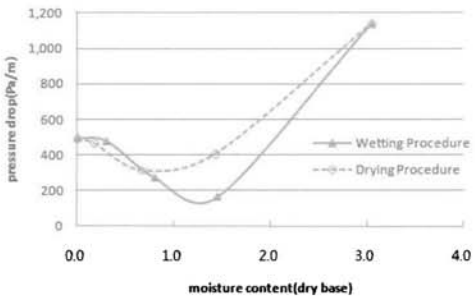
〔Fig. 6〕 Variation of pressure drop with moisture content in wetting procedure.



〔Fig. 7〕 Variation of pressure drop with moisture content in drying procedure.

대부분이 수분으로 채워지게 되어 공기투과성이 매우 악화되는 것으로 판단된다.

반면에, 건조과정에서는 습윤과정과는 다르게 〔Fig. 7〕에서와 같이 포화수분에서부터 수분이 감소함에 따라 차감압력이 지속적으로 감소하여 건조기준 수분함량 0.67(습량기준으로는 40.2%)에서 가장 낮아지며, 이 후의 건조구간에서는 습윤과정에서의 동일한 수분함량의 차감압력과 유사해 진다. 즉, 20 LPM의 공기유량을 유입할 경우 포화상태인 건조기준 수분함량 3.06(습량기준으로는 75.3%)에서 1.43(습량기준으로는 58.9%)과 0.67(습량기준으로는 40.2%)로 낮아지면 차감압력도 1,298.7 Pa/m에서 533.3 Pa/m, 422.7 Pa/m로 낮아지고 있어 수분이 감소함에 따라 공기투과성이 개선되고 있음을 나타내고 있다.



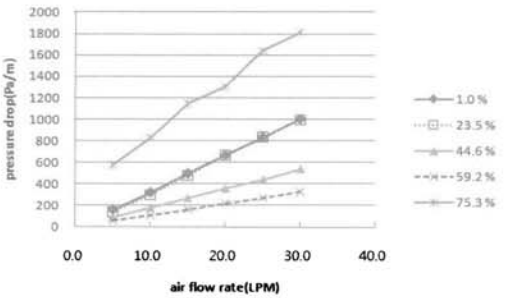
〔Fig. 8〕 Comparison of the pressure drop at air flow rate of 15 LPM.

그러나 동일한 수분함량일지라도 습윤과정과 건조과정에서의 차감압력은 서로 다르게 나타나고 있으며, 특히 퇴비화에서 주로 활용되는 건조기준 수분함량 0.67(습량기준 40%) 이상의 구간에서는 습윤과정이 건조과정에 비하여 차감압력이 낮아 공기투과성이 더욱 개선되어 있음을 알 수 있다. 예로서 〔Fig. 8〕에서 15 LPM의 공기유량을 유입할 경우 습윤과정의 건조기준 수분함량 1.45(습량기준으로는 59.2%)에서의 차감압력은 164.0 Pa/m이나, 건조과정에서는 비슷한 수분함량인 1.43(습량기준으로는 58.9%)에서의 차감압력이 405.3 Pa/m로서 습윤과정이 건조과정의 40.5%에 불과한 차감압력을 나타내고 있다. 이는 건조한 톱밥에서 수분을 추가하는 습윤과정이 건조과정에 비하여 입자크기가 더 커지고 이로 인한 공기공극 증가 특히 대공극이 증가하여 공기유통이 원활해 진 결과로 여겨진다.

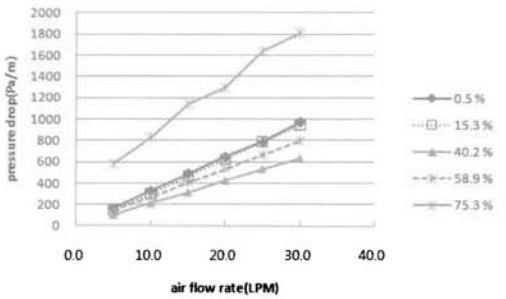
또한 〔Fig. 9〕와 〔Fig. 10〕에서 동일한 수분함량에서의 차감압력은 유입 공기유량에 비례하여 증가하고 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

유기성폐기물 퇴비화의 첨가제로 사용되는 톱밥에 수분을 첨가하는 습윤과정과 수분을 증발시키는 건조과정에서의 톱밥 매체 내부의 물리적 성상과 공기투과성 변화를 비교한 결과는 다음과 같다.



〔Fig. 9〕 Relationship between pressure drop and air flow rate by moisture content in wetting procedure.



〔Fig. 10〕 Relationship between pressure drop and air flow rate by moisture content in drying procedure.

1. 습윤과정과 건조과정에서의 겉보기밀도 차이는 크게 나타나지 않았다.
2. 수분함량 40%에서 포화상태까지의 구간에서 습윤 및 건조과정의 공기공극 변화는 다르게 나타났으며, 동일한 수분함량에서는 습윤과정의 공기공극이 건조과정에 비하여 높게 나타났다. 또한 수분함량이 높아질수록 입자크기는 커지고 있으며 수분 혼합방식에 따라 동일한 수분함량에서의 입자크기는 다르게 나타났다.
3. 습윤과정에서는 수분이 증가함에 따라 공기공극이 작아짐에도 불구하고 차감압력이 감소하여 수분함량 60% 정도에서 가장 낮아지고 이후 포화상태에 도달할수록 차감압력이 급격히 증가하고 있다. 건조과정에서는 습윤과정과는 다르게 포화상태에서부터 차감압력이 지속적으로 감소하여 수분함량 40% 정도에서 가장 낮아졌다.
4. 퇴비화에서 주로 활용되는 건조기준 수분함량 0.67(습량기준 40%) 이상의 수분함량 구간에서 유입 공기유량이 동일할 경우 습윤과정의 차감압력이 건조과정에 비하여 낮았으며, 동일한 수분함량에서의 차감압력은 유입 공기유량에 비례하여 증가하고 있는 것으로 나타났다.
5. 이러한 실험 결과로서, 퇴비화공정에서 매체내의 공기이동성을 원활하게 하기 위하여는 습윤과정이 적절하며 수분함량 60% 정도가 최적의 운영조건이라 판단된다.

사사

이 논문은 2009학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Richard, T.L., and Kim, B.T., "Biodegradation impacts on fluid transport properties of organic porous media", Articles in Proceeding of the 2003 annual meeting on CD, Institute of Biological Engineering, Athens, Georgia, Jan17-19, pp. 1~13 (2003).
2. 김계훈 등 공저, 토양학, 향문사, pp. 74,75,82,125,126 (2007).
3. Das, K., and Keener, H.M., "Moisture effect on compaction and permeability in composts", Journal of Environmental Engineering, 123(3), pp. 275~281 (1997).
4. Higgins, A.J., Chen, S. and Singley, M.E., "Airflow resistance in sewage sludge composting aeration systems", Trans. ASAE., 24(4), pp. 1010~1014, 1018 (1982).
5. Van der Sman, R.G.M., "Prediction of air flow through a vented box by the Darcy-Forchheimer equation", J. Food Engineering, 55, pp. 49~57 (2002).
6. Haque, E., Ahmed, Y. N., and Deyoe, C.M., "Static pressure drop in a fixed bed of grain as affected by grain moisture content", Trans. ASAE., 25(4), pp. 1095~1098 (1982).
7. Siebenmorgen, T.J., and Jindal, V.K., "Airflow resistance of rough rice as affected by moisture content, fines concentration and bulk density", Trans. ASAE., 30(4), pp. 1138~1143 (1987).
8. Grama, S.N., Bern, C.J., and Hurburgh, C.R., "Airflow resistance of mixtures of shelled corn and fines", Trans. ASAE., 27(1), pp. 268~272 (1984).
9. Kristensen, E.F., and Kofman, P.D., "Pressure resistance to air flow during ventilation of different types of wood fuel chip", Biomass & Bioenergy, 18, pp. 175~180 (2000).
10. Endo, Y., Chen, D., and Pui, D.Y.H., "Air and water permeation resistance across dust cakes on filters-effects of particle polydispersity and shape factor", Powder Technology, 118, pp.

24~31 (2001).

11. Chung, D.S., Maghirang, R.G., Kim, Y.S., and Kim, M.S., "Effects of moisture and fine material on static pressure drops in a bed of grain sorghum and rough rice", Transactions of the ASAE, 44(2), pp. 331~336 (2001).
12. Rough, S.L., Bridgwater,J., and Wilson, D.I., "In situ measurements of porosities of alumina pastes", Powder Technology, 123, pp. 262~274 (2002).
13. Richard, T.L., Hamelers, H.V.M., Veeken, A.H.M., and Silva, T., "Moisture relationships in composting processes", Compost Science and Utilization, 10(4), pp. 286~302 (2002).
14. Van Ginkel, J.T., Van Haneghem, I.A., and Raats, P.A.C., "Physical properties of composting material: gas permeability, oxygen diffusion coefficient and thermal conductivity", Biosystems Engineering, 81(1), pp. 113~125 (2002).
15. Lynch, N. J., and Cherry, R. S., "Design of passively aerated compost piles: vertical air velocities between the pipes", Biotechnol. Prog., 12, pp. 624~629 (1996).
16. McGuckin, R.L., Eiteman, M.A., and Das, K., "Pressure drop through raw food waste compost containing synthetic bulking agents", J. Agric. Engng. Res., 72, pp. 375~384 (1999).
17. Barrington, S.B., Choiniere, D., Trigui, M., and Knight, W., "Compost airflow resistance", Biosystems Engineering, 81(4), pp. 433~441 (2002).
18. 김병태, Richard, T.L., "퇴비화매체의 공기흐름에 영향을 미치는 요인분석", 유기성자원학회 2005년 추계 학술대회 및 공동심포지엄, pp. 210~215 (2005).
19. 김용성, 수직형 퇴비화 공정에서 반응조 높이와 공기투과성의 상관관계 분석, 대진대학교 석사학위 논문 (2007).
20. 김용성, 김병태,"수직형 퇴비화 반응조에서 침하현상에 의한 FAS와 공기투과성의 변화 특성 연구", 한국폐기물학회지, 24(8), pp. 696~703 (2007).
21. Nicolai, R.E., and Janni, K.A., "Determining pressure drop through compost-wood chip biofilter media", Paper number:014080 ASAE. Annual International Meeting, Sacramento, July 30-August 1, pp. 1~7 (2001).
22. U.S. Composting Council, Test method for the examination of composting and compost on CD, New York, pp. 1~4 (2002).