

수목식재기반로서 정수슬러지의 재활용을 위한 토양물리성 평가 Physical Properties of Water Treatment Residue and Possibility for Reuse as a Planting Base

박석곤¹ · 야하타 히사시¹ · 구로사와 키요시¹ · 오구균²

¹규슈대학 열대농학연구센터, ²호남대학교 조경학과

I. 서론

수도물 정수처리과정에서 정수슬러지는 불가피하게 부산물로서 생산되고 있다. 한국에서 연간 약 17만톤의 정수슬러지가 발생하며, 세계적으로 매일 약 1만톤의 정수슬러지가 배출되고 있다. 대규모로 발생된 정수슬러지는 대부분 매립되거나 폐기물처리장에서 처분되고 있다. 그러나 최근 연구에서는 정수슬러지가 재활용 자원으로서 경제적 가치가 있다고 보고하였다(Moodley *et al.*, 2004).

정수슬러지는 투수성과 통기성, 유기물이 마사토보다 높아 마사토의 대체재료로서 정수슬러지를 식재기반으로 이용할 가능성이 높다. 정수슬러지를 식재기반으로 재활용하기 위해서는 정수슬러지의 응집구조 및 물리성을 명확히 밝히는 것이 중요하다.

본 연구의 목적은 정수슬러지와 마사토의 물리성을 조사해, 이것들의 토양구조와 물리적 특성을 명확히 밝히고, 마사토의 대체 식재기반으로서 정수슬러지의 재활용 가능성을 찾고자 하였다.

II. 공시재료 및 연구방법

1. 공시재료

일본 후쿠오카시(福岡市)의 다타라(多多良)정수장에서 채취한 정수슬러지는 정수과정에서 부유물질 응집제인 폴리염화알루미늄(PAC)이 첨가되어 응집되었고, 가압탈수법에 의해 탈수처리되었다. 정수슬러지는 각진 판상(두께 4mm)으로 함수비는 121%이었다. 반면, 마사토는 후쿠오카현의 다치바나산(立花山)에서 채취했으며, 실험을 위해

풍건 후에 채로 쳐서 입경분포를 3mm이하로 조절하였다.

정수슬러지는 미사와 점토로 구성되어 있는 응집체지만, 탈수와 건조처리로 자갈과 같은 특성을 보이게 된다. 이 정수슬러지 응집체를 토양실험을 위해 분쇄기로 깨트려 입경 크기를 3mm이하로 조절하였다. 이 결과, 정수슬러지의 입경분포는 모래 78%, 점토 2.4%이었다. 반면, 마사토의 입경분포는 자갈 47.2%, 모래 45.7%이었다. 정수슬러지와 마사토의 입자밀도는 각각 2.35와 2.69 Mg m⁻³이었다.

2. 토양 물리성 측정

풍건한 시료를 균질하게 손으로 실험용 시료원통(높이 51mm, 직경 50mm)에 채워 넣었다. 하룻밤정도 시료원통을 포화시켜 탈수법(흡인법, 가압법, 원심기법)으로 수분유지곡선을 측정하였다.

시료의 가스확산계수는 매트릭퍼텐셜을 6단계로 조정하여 측정되었다. 토양 통기성의 기준이 되는 상대가스확산계수(D/D₀)는 Osozawa (1998)의 측정법에 따라 계산되었다.

포화투수계수는 변수위법으로 측정되었고, 식물유효수분량은 매트릭퍼텐셜 -6과 -1,500 kPa에서의 함수량 차이로 계산되었다. 비제한유효수분(Non-limiting water range)은 식물의 생장이 토양의 산소공급과 토양경도에 최소한으로 제한을 받지 않는 식물유효수분량이다 (Letey, 1985). 비제한유효수분량은 Osozawa *et al.* (1998)가 제안한 D/D₀이 0.02이상일때의 매트릭퍼텐셜과 -1,500kPa에서의 함수량 차이로 계산되었다. 단, -6kPa일때 D/D₀이 0.02이상일때는 비제한유효수분량과 식물유효수분량은 동일하다.

총공극율은 용적밀도와 입자밀도로 계산되었다. 소공극

율은 포화된 토양을 매트릭퍼텐셜 -4kPa로 조정했을 때 토양에 남아 있는 수분량으로 정의하였다. 대공극율은 총공극율에서 소공극율을 뺀 것으로 계산되었다.

Ⅲ. 결과

1. 수분유지곡선

두 토양의 수분유지곡선은 상당히 달랐고, 정수슬러지의 체적함수율은 마사토에 비해 전 매트릭퍼텐셜에서 높았다(그림1). 정수슬러지의 체적함수율은 매트릭퍼텐셜-1~-13kPa까지 빠르게 감소했고, 이후에는 낮은 비율로 줄어들었다.

수분유지곡선의 하강은 매트릭퍼텐셜의 감소에 따라 토양에서 수분이 빠져나가는 것을 의미한다. 매트릭퍼텐셜 -13~-1,500kPa에서 마사토의 체적함수율은 정수슬러지보다 높은 비율로 감소하였다.

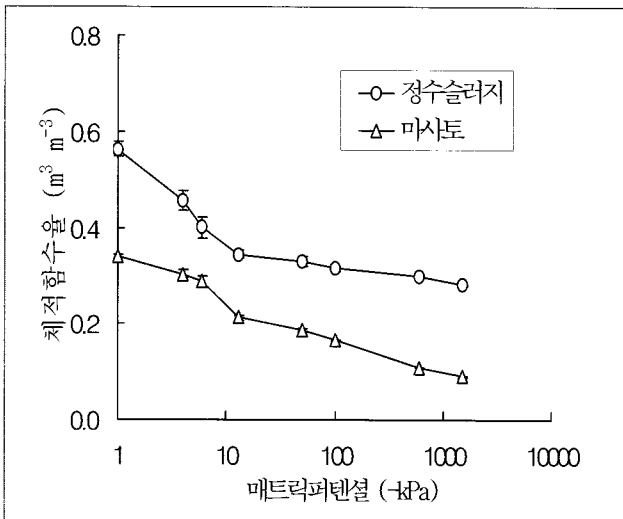


그림1. 정수슬러지와 마사토의 수분유지곡선. 에러바는 표준편차(n=3)

2. 상대가스확산계수(D/D0)

매트릭퍼텐셜 -4kPa이상일 때 정수슬러지와 마사토는 D/D0이 0.02이하로 낮았다. 마사토와 달리, 정수슬러지의 D/D0은 매트릭퍼텐셜 -4~-13kPa에서 0.02에서 0.08까지 급격히 상승했고, 그 후에는 조금씩 높아졌다. 마사토의 경우도 매트릭퍼텐셜의 감소로 D/D0이 증가했지만, 정수슬

러지에 비해 상승율이 낮았다.

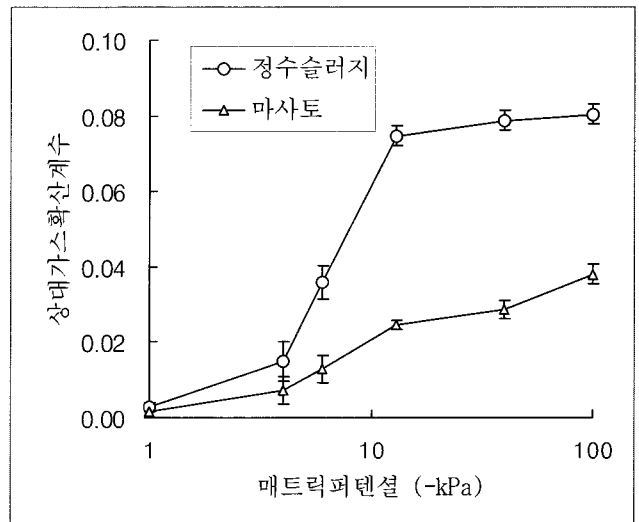


그림2. 매트릭퍼텐셜 변화에 따른 정수슬러지와 마사토의 상대가스확산계수. 에러바는 표준편차(n=3)

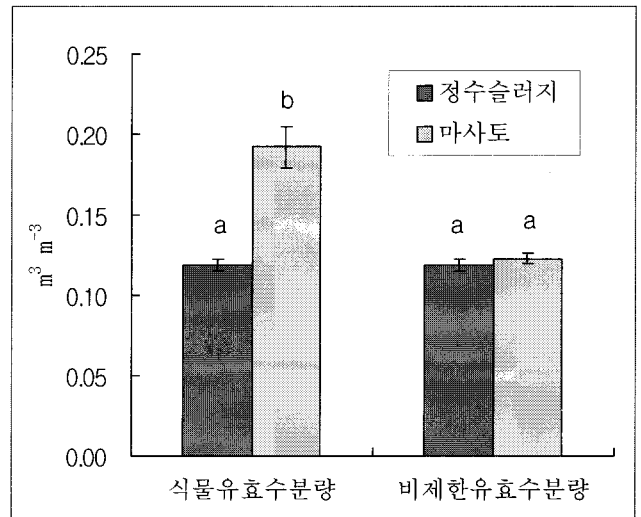


그림3. 정수슬러지와 마사토의 식물유효수분과 비제한유효수분. 서로 다른 알파벳(a-b)은 t-test의 $p < 0.05$ 범위내에서 두 토양간 유의적 차이가 있음을 나타낸다. 에러바는 표준편차(n=3)

전 매트릭퍼텐셜에서 마사토의 D/D0은 정수슬러지보다 낮았다. 매트릭퍼텐셜 -4kPa이하에서 체적함수율과 D/D0은 정수슬러지가 마사토보다 각각 1.4~3.1배, 2.1~3.0배로 높았다(그림1, 2).

3. 식물유효수분과 비제한유효수분

식물유효수분량은 정수슬러지가 마사토에 비해 유의적으로 낮았지만, 비제한유효수분량은 두 토양사이에 유의적 차이가 없었다(그림3).

4. 공극율과 기상율

총공극율과 소공극율은 정수슬러지가 마사토보다 유의적으로 높았지만, 대공극율은 유의적으로 차이가 없었다(데이터 생략).

정수슬러지와 마사토의 D/D_0 은 기상율의 증가에 따라 높아졌지만, 두 토양의 경향은 달랐다(그림4). 정수슬러지의 D/D_0 은 기상율이 0.3일때 약 0.08의 높은 수준까지 도달했고, 기상율이 증가에 조금씩 높아졌다. 기상율 0.3일때 정수슬러지곡선은 굴곡방향이 바뀌었고, 이 지점을 이후부터 변곡점이라 한다. 반면, 마사토의 D/D_0 은 기상율의 증가에 따라 비례적으로 증가하였다.

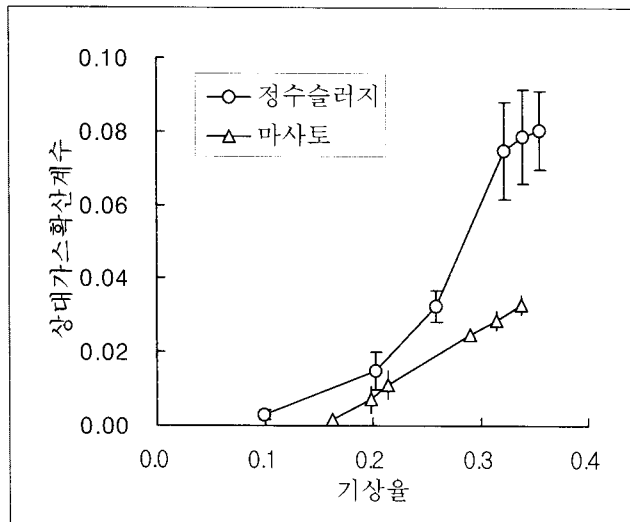


그림4. 기상율 변화에 따른 정수슬러지와 마사토의 상대가스확산계수. 예러바는 표준편차임(n=3)

5. 포화투수계수 및 용적밀도

포화투수계수는 정수슬러지($2.28 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$)가 마사토($1.10 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$)보다 유의적으로 높았다. 용적밀도는 정수슬러지(0.77 Mg m^{-3})가 마사토(1.37 Mg m^{-3})에 비해

2배정도 낮았다.

IV. 고찰

1. 정수슬러지와 마사토에서의 수분유지특성과 가스 확산의 차이

정수슬러지의 수분유지곡선은 구조토나 소성점토의 다공질성 토양개량제(Bigelow *et al.*, 2004)와 비슷하였다. 정수슬러지는 정수처리의 응집과정에서 수많은 공극이 만들어지며(Moodley *et al.*, 2004), 그 결과 다공질성 토양개량제와 유사한 수분유지특성을 나타냈다고 생각된다.

정수슬러지의 체적함수율은 낮은 매트릭퍼텐셜에서 마사토보다 높았다. 이것은 정수슬러지의 내부공극에서 수분을 보전했기 때문이며, 또한 정수슬러지는 점토와 미사가 응집되어 비표면적이 높아 일부 수분은 표면에 흡착된 흡수수 형태로 남아 있을 것이다.

마사토는 직선적인 D/D_0 -기상율 관계를 보여주었다. 마사토는 입자간 응집하기 힘든 모래가 대부분을 차지하고 있어 입단(粒團)구조가 발달하기 힘들다. 따라서 마사토의 입자간 공극은 서로 연결되어 있어 수분이 제거된 공극공간은 대부분 가스확산이나 수분이동의 통로로 이용되었을 것이다.

마사토와 달리, 정수슬러지는 D/D_0 -기상율 곡선에서 변곡점이 관찰되었다(그림4). 정수슬러지의 체적함수율이 마사토보다 높았음에도 불구하고 정수슬러지의 D/D_0 은 마사토보다 전 매트릭퍼텐셜에서 높았다(그림1, 2). 이러한 결과는 정수슬러지와 마사토의 토양구조가 전혀 다르다는 것을 시사한다. 또한, 정수슬러지가 마사토보다 높은 총공극율과 소공극율 그리고 낮은 용적밀도를 보인 것은 정수슬러지가 높은 다공질 토양구조를 갖고 있음을 의미한다.

Currie(1961)는 다공질 매체의 D/D_0 -기상율 곡선은 입단간 공극과 입단내 공극에 의해 뚜렷하게 두개의 부분으로 구분된다고 보고하였다. 정수슬러지에서도 이와 같이 D/D_0 -기상율 곡선에서 두개의 부분으로 나누어졌다(그림4). 첫 번째 부분은 매트릭퍼텐셜의 감소에 따라 입단간 공극에서 수분이 제거되면서, 기상율의 상승으로 비례적으로 D/D_0 이 높아지면서 나타났다. 이 입단간 공극은 거의 가스확산

의 통로로 이용되었기 때문이다. 그 후에 매트릭퍼텐셜의 저하로 입단내 공극에서 수분이 제거되었지만, 입단내 공극은 서로 연결되어 있지 않았기 때문에 가스확산의 통로로 이용될 수 없어 기상율이 증가하여도 D/D_0 은 이전과 같이 높아지지 않았다. 이 결과로 D/D_0 -기상을 곡선에서 변곡점이 생겨났다고 본다. 정리하면, 높은 매트릭퍼텐셜(-1에서 -4 kPa)에서 정수슬러지의 입단간 공극에서 수분이 마사토보다 빠르게 제거되어, 이 공극이 가스확산의 통로로 이용되어 정수슬러지의 D/D_0 이 마사토보다 높았다. 또한 매트릭퍼텐셜(-13에서 -100kPa)이 감소해도 정수슬러지의 입단내 공극은 독립적으로 존재하고 있어 일정 수분을 보전해 정수슬러지의 체적함수율이 마사토보다 높으면서 높은 D/D_0 을 보여주었고 생각된다.

2. 정수슬러지와 마사토에서의 유효수분의 차이

소공극율은 정수슬러지가 마사토보다 높았다. 이로 인해 많은 수분을 유지했지만, 식물유효수분량은 그리 높지 않았다. 그 결과, 정수슬러지의 식물유효수분량은 마사토보다 낮았다.

식물유효수분의 대체평가법으로 토양 통기성을 고려한 비제한유효수분에서는 매트릭퍼텐셜 -10kPa에서 마사토의 D/D_0 이 0.02이상을 보여서 마사토의 비제한유효수분량은 식물유효수분량보다 60% 감소하였다(그림2). 반면, 정수슬러지는 -4.5kPa에서 D/D_0 이 0.02이상을 보여 식물유효수분량이 감소하지 않았다. 결과적으로 정수슬러지와 마사토의 비제한유효수분은 유의적 차이가 없었다. 이것은 마사토는 통기성이 낮아 식물뿌리 활성도가 떨어져 식물유효수분 전체를 이용할 수 없으면, 실제적으로 식물이 이용가능한 수분은 정수슬러지와 마사토 사이에 차이가 없음을 의미한다.

3. 정수슬러지와 마사토에서의 포화투수계수

정수슬러지는 응집과정에서 첨가된 응집제에 의해 미사와 점토가 결합되었고, 건조과정에서 칼슘이온과 반데발스의 힘에 의해 정수슬러지의 결합구조가 더욱 강화되었다

(Moodley et al., 2004). 이러한 이유로 안정적인 정수슬러지 응집체가 포화되어 물이 통과할때 작은 입자들이 응집체에서 쉽게 떨어지지 않을 것이다. 따라서, 작은 입자에 의해 물의 흐름을 방해하는 막힘현상은 정수슬러지에서 발생하지 않았고, 그 결과 마사토보다 높은 포화투수계수를 보였고 생각된다.

V. 결론

D/D_0 , 포화투수계수, 수분유지력, 총공극율과 소공극율은 정수슬러지가 마사토보다 높았다. 식물유효수분량은 마사토가 정수슬러지보다 높았지만, 토양 통기성을 고려한 비제한유효수분량은 두 토양에서 차이가 없었다. 이러한 정수슬러지의 물리성은 정수처리과정에서 첨가된 응집제에 의해 미사와 점토가 결합한 결과로 만들어진 내부공극이 있는 다공질성 응집구조에 기인한다. 마사토와 비교해 통기성, 수분유지력, 투수성의 물리성이 우수해 마사토를 대체할 식재기반재료로서 정수슬러지의 이용이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

VI. 인용문헌

- Bigelow CA, Bowman DC, Casseld DK 2004: Physical properties of three sand size classes amended with inorganic materials or sphagnum peat moss for putting green rootzones. *Crop. Sci.*, 44, 900-907.
- Letey, J 1985: Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1, 277-294.
- Moodley M, Johnston MA, Hughes JC, Titshall LW 2004: Effects of a water treatment residue, lime, gypsum and polyacrylamide on the water retention and hydraulic conductivity of two contrasting soils under field conditions in KwaZulu-Natal, South Africa. *Aust. J. Soil Res.*, 42, 273-282.
- Osozawa S 1998: A simple method for determining the gas diffusion coefficient in soils and its application to soil diagnosis and analysis of gas movement in soil. *Bull. Natl. Inst. Agro. Environ. Sci.*, 15, 1-66 (in Japanese with English summary).