

하수슬러지 퇴비화 기술 <2>



조재경 / 현대엔지니어링(주) 환경기술연구소 팀장, 폐기물관리 기술사

목 차

1. 서론

2. 하수슬러지 발생 및 처리 현황

1. 발생현황
2. 처리 현황

3. 퇴비화와 하수슬러지의 성상

1. 농축슬러지와 소화슬러지의 유기물 함량
2. 응집제의 종류에 따른 유기물의 함량
3. 기타 슬러지의 성상

4. 파일럿 플랜트(1톤/일) 장치를 이용한 하수슬러지 퇴비화

1. 실험방법 및 장치
2. 실험결과 및 토의

5. 생성퇴비를 이용한 식물재배 실험

1. 개요
2. 실험방법
3. 실험 결과 및 고찰
4. 식물의 증감속 측정 결과

6. 결론



3. 퇴비화와 하수슬러지의 성상

3.1 농축슬러지와 소화슬러지의 유기물 함량

하수슬러지중의 유기물은 하수배제 방식이 분류식이나 합류식이나에 따라, 슬러지를 혐기성소화 하느냐 여부 또는 계절에 따라 다르지만 주로 유입 하수중에 포함되어 있는 부유물과 활성오니중의 미생물과 그 잔해 등이 슬러지고형물의 약 60%를 차지하고 있다.

유기물의 조성은 지역의 특성 중 일 반주거지역, 상업지역, 공업지역과 같은 생산기반에 따라 틀리지만 아주 복잡한 물질로 구성되어 있다. [표3]은 4개 처리장의 슬러지에 포함되어 있는 유기물의 함유량과 조성을 나타낸 것이다.

C처리장의 소화오니는 소화에 의하여 유기물이 분해되어 혼합슬러지(최 초침전지 슬러지와 잉여슬러지를 혼합한 것)보다도 유기물의 함유량이 적다. 분류 하수관거가 설치되어 있고 생활하수만을 처리하고 있는 D처리장의 유기물함유량은 다른 처리장보다도 높다.

또한 유기물중의 전단백질, 다당류, 지질에 대하여 보면, 특히 소화슬러지의 탄수화물과 전지질이 혐기성소화에 의하여 50%정도 분해된 것을 알 수 있다.

[표 3] 슬러지의 종류별 유기물 함량

처리장	슬러지	유기물질 (VS)(%)	전탄소 T-C (%)	전질소 T-N (%)	탄질비 (C/N)	전단백질 (%)	다당류 (%)	지질 (%)
A	잉여	51.5	29.2	4.4	6.6	27.3	3.65	10.40
	혼합	47.0	27.0	3.5	7.7	21.8	2.98	12.99
B	혼합	46.9	28.0	3.8	7.4	23.9	1.69	10.70
	잉여	63.8	35.6	5.6	6.4	34.9	3.52	19.73
C	혼합	58.6	32.8	4.0	8.2	24.4	4.59	17.80
	소화	40.8	21.8	2.9	7.5	18.3	2.18	8.13
D	혼합	82.0	41.0	5.8	7.0	29.0	9.41	12.4

소화에 따른 유기물의 함량에 대하여 좀더 정확한 비교를 위하여 [표 4]에는 소화과정이 없는 유기물의 조성을, [표 5]에는 소화과정이 있는 유기물의 조성을 나타냈다. 소화과정이 없는 공정의 경우에 잉여슬러지의 유기물 함량이 70~80%대를 보이고 있는 것에 비교하여 소화를 거친 잉여슬러지는 50~60%대에 머물고 있다.

퇴비화를 고려하여 유기물농도를 평가한다면, 유기물의 농도가 높은 경우에 반응열을 지속시킨다면 완숙이 가능하므로 소화하지 않는 생슬러지를 퇴비화하는 것이 유기물의 균형을 맞출 수 있다는 점에서 유리하다.

우리나라의 경우, 대규모 하수처리장은 소화과정을 거치고 있으며, 중소형의 경우에는 소화과정을 거치지 않는다. 또한, 우리나라의 경우에 분류식하수관거가 설치된 곳이 거의 없으므로 유기물의 함량이 낮게 유지되어 소화를 하고 있는 처리장의 경우에는 유기물 함량이 50~60% 정도이고, 소화과정을 거치지 않는 곳은 60~70%의 유기물 함량을 보이고 있다.

[표 4] 소화과정이 없는 슬러지의 유기물조성

처리장	슬러지의 종류	유기물질 (VS) (%)	전탄소 T-C (%)	전질소 T-N (%)	전탄수화물 (%)	전지방 (%)	전단백질 (%)
A	초침슬러지	84.6	42.1	4.2	49.2	7.0	11.9
	잉여슬러지	85	48.2	9.8	13.2	26.9	27.5
B	초침슬러지	61.8	34.0	5.2	6.9	12.2	26.3
	잉여슬러지	69.2	33.4	6.7	6.0	12.1	26.3
C	혼합슬러지	67.6	36.8	4.7	19.5	8.1	26.3
	잉여슬러지	77.9	41.7	8.6	9.0	20.3	27.5

[표 5] 소화슬러지의 유기물 조성

실험대상	슬러지	유기물질 (VS)(%)	전탄수화물 (%)	전지방(%)	전단백질(%)
A	초침슬러지	59.1	7.6	9.8	20.0
	잉여슬러지	68.8	6.8	14.4	31.9
B	초침슬러지	51.3	7.0	8.3	21.3
	잉여슬러지	54.7	7.5	7.3	24.4
C	혼합슬러지	53.7	3.9	8.3	20.0
	잉여슬러지	64.7	6.9	12.4	28.1

3.2 응집제의 종류에 따른 유기물의 함량

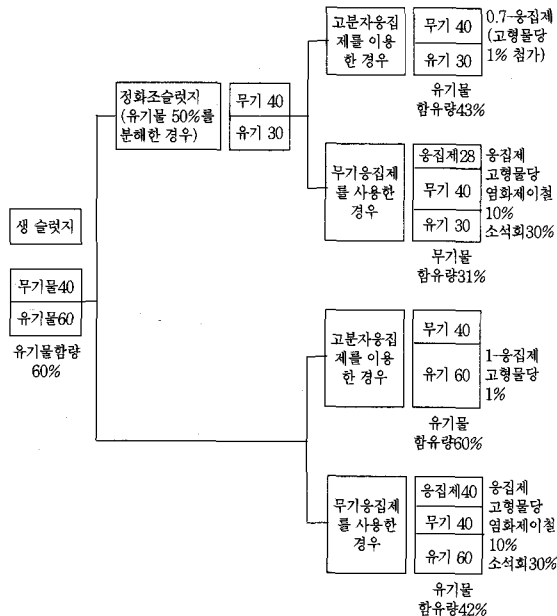
하수슬러지중의 유기물의 함유량은 혐기성소화의 유무, 응집제(응집보조제)의 종류와 첨가량에 따라 많은 차이가 있다. [그림 1]에는 응집제 사용에 따른 유기물함유량의 변화를 계산하여 나타내고 있다. 생슬러지 유기물이 60%로 되어 있던 것이 소화후에 탈수를 하는 과정에 고분자응집제를 넣었을 때 43%로, 무기응집제를 넣었을 때에는 31%로 된다. 생슬러지를 직접탈수하면 고분자응집제에서는 60%, 무기응집제에서는 40%의 유기물함량으로 되는 것을 알 수 있다. 우리나라 대부분의 하수처리장은 무기응집제를 사용하지 않고 통상적으로 고분자응집제를 사용하고 있는 관계로 대부분 60%전후 혹은 그 이상을 나타내게 된다.

3.3 기타 슬러지의 성상

하수슬러지의 수분함량은 탈수하는 슬러지의 종류(생슬러지, 소화슬러지 등), 탈수기의 종류에 따라 그 범위가 크

게 차이하게 된다. 통상적으로 원심분리기에서 70~85%, 진공탈수기에서 70~80%, 가압탈수기에서 55~70%선으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 탈수기내에서 수분함량을 60%전후를 저감시키는 기술이 안정적으로 확립될 시에는 슬러지의 퇴비화에 통기개량제의 사용을 억제할 수 있다는 점에서 필요한 기술중에 하나이다.

pH는 첨가하는 응집제의 종류에 따라 틀리고, 고분자응집제를 사용한 탈수케익은 pH 5~7의 약산성 또는 중성을 나타내고, 무기응집제를 사용한 탈수케익은 11~13의 강알칼리성을 나타낸다. 일반적으로 퇴비화에 있어서 고분자응집제를 사용한 것은 초기온도의 상승이 늦은 경향이 있고, 무기응집제를 사용한 것은 알칼리성을 중화하기 위한 중화절차가 필요하며, 중화후에 중화열이 발생하여 퇴비화의 온도를 상승시키는 효과가 있어 퇴비화가 촉진된다.



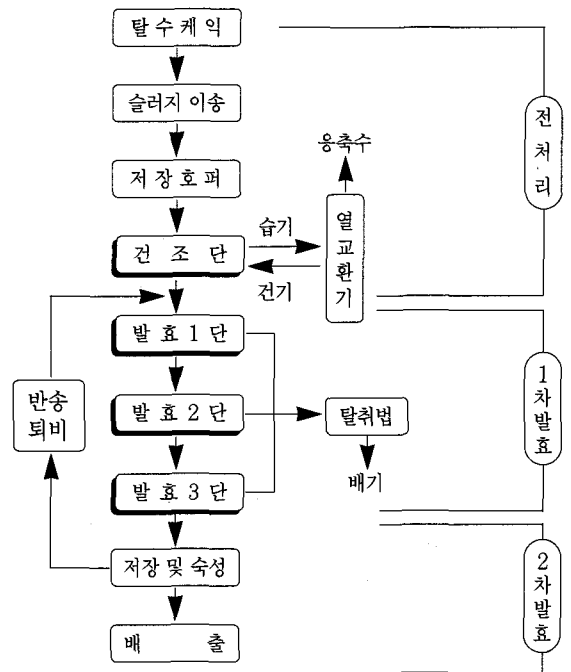
(그림 1) 슬러지처리 공정에서 응집제에 따른 유기물함량의 차이

탄소 및 질소의 함유량도 유기물의 함유량과 함께 응집제(응집보조제)의 종류 및 첨가량과 혐기성소화의 유무에 따라 틀려, 일반적으로 고분자응집제의 경우에는 생탈수케익중에 고형물당 탄소 41~44%, 질소 5~6%, 무기응집제의 경우에는 탄소 22~35%, 질소 2~4%로서 탄질소비는 거의 같은 7~10정도이다.

4. 파일롯플랜트(1톤/일) 장치를 이용한 하수슬러지 퇴비화

4.1 실험방법 및 장치

가. Pilot plant장치 및 운전



(그림 2) 하수처리장 슬러지의 퇴비화 공정도

본 연구에서 목표로하는 퇴비화장치는 주로 도시지역에 위치한 하수처리장의 하수슬러지를 처리한다는 측면에서

우리나라의 경우, 대규모 하수처리장은 소화과정을 거치고 있으며, 중소형의 경우에는 소화과정을 거치지 않는다. 또한, 분류식하수관거가 설치된 곳이 거의 없으므로 유기물의 함량이 낮게 유지되어 소화를 하고 있는 처리장의 경우에는 유기물 함량이 50~60% 정도이고, 소화과정을 거치지 않는 곳도 60~70%의 유기물함량을 보이고 있다.

[그림 2]와 같은 공정을 검토하였다. 본 퇴비화 장치는 통기개량제를 사용하지 않고 대신 전처리 과정에서 건조조작을 통하여 수분을 감량화시키고 후단에서 미생물에 의해 퇴비화하는 것을 특징으로 한다. 주된 공정은 반입공정, 전처리공정, 1차 발효, 숙성과정으로 구성된다.

실험에 이용된 장치의 재질은 강한 SUS로 하였고 건조단은 $\phi 700 \times 2,500L$ 의 크기이며, $\phi 950 \times 3,600L$ 의 크기로 3단으로 이루어져 있다. 정상상태에서 일처리용량 1톤으로 설계·제작되었으며, 반응기의 외부는 적정온도 유지를 위하여 건조단은 히터를, 발효단은 열선배선 및 단열을 실시 동절기에도 이상 없이 사용할 수 있도록 하였고 각 단은 온도제어가 가능하도록 하였다.

장치의 운전은 슬러지를 호퍼내에 저장시키고, 처리용량에 따라 호퍼에 부착된 정량공급장치에 의하여 간헐적으로 건조기내로 공급되게 하였으며 건조기의 건조효율을 검토하기 위하여 온도와 공기량을 변화시켜 운전하였다. 건조기에서 배출된 건조슬러지는 반송퇴비와 혼합조에서 혼합을 하여 발효1 단으로 공급하였으며, 자연적인 흐름에 의하여 2, 3단을 거쳐, 최종적으로 배출되게 하고 배출분의 일부분을 반송시키고, 나머지는 퇴비생성물로서 호퍼에 저장시키면서 부숙시켰다. 발효조에 대해서는 1일 1회 온도를 측정하였으며, 공기량 등을 변화시켜 가면서 퇴비화의 정도, 온도를 지표로 하여 최적조건을 검토하였다.

나. 각종분석방법

퇴비화 과정에서 물성의 변화를 관찰하기 위하여 수분함량과 휘발성 고형물질을 공정시험법에 따라 측정하였고 또한 건조물에 대해서는 원소분석에 의하여 C.H.N.O.S를 분석하였다. 기타항목은 용출한 시료를 이용하여 분석을 실시하였는데 그때 용출 실험조작은 다음과 같다. 증류수에 염산을 넣어 pH를 5.8~6.3으로 한 증류수에 시료와

용매를 1/10(W/V)의 비율로 혼합하고 상온 상압하에서 진탕횟수가 200rpm이상으로 수분간 진탕기(Model SH-WA)를 사용하여 용출한 후, pH meter(Model DP-135M)을 이용하여 pH를, 그리고 일반항목인 CODCr, T-N, T-P, NH_3-N , NO_3-N 등은 Standard method에 의해 측정하였다.

4.2 실험결과 및 토의

가. 건조단의 운전조건 검토

건조단에서의 건조능력이 퇴비화를 위한 적정수분함량의 조정이라는 관점에서 중요한 운전조건이다. 건조단의 운전조건에 중요한 인자로서 작용하는 것이 건조기내의 온도이며, 정해진 온도에 있어서 공기량이 수분을 증발시키는 데 있어서 지표가 된다.

건조단은 설계상에서 내부온도를 70°C로 유지 가능하도록 제작되었으며, 또한 반응장치내에서 배출되는 공기내 악취를 방지할 목적으로 공기를 냉각하여 수분을 응축하여 드레인으로 배출하고, 공기는 다시 재순환시키는 시스템으로 제작되었다.

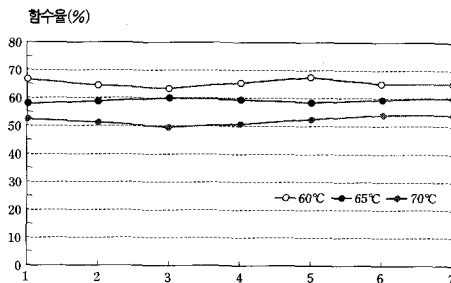
1일처리용량 1000kg으로 투입량을 일정하게 유지시키고 순환되는 공기량, 온도, 투입량을 변화시켜 함수율의 변화 및 내부온도의 변화를 관찰하였는데 발효조에서의 현상과 비슷한 경향을 보여 공기량이 적으면, 내부수분의 제거가 어려웠고, 공기량이 많은 경우에는 역으로 내부온도를 냉각시켜 수분의 증발이 원활하게 되지 않는 경향이 관찰되었다. 실험 결과 건조단의 공기량은 1.5 l/mim. kg-sludge가 적당한 것으로 판명되었다.

이러한 공기량의 조건에서 수분함량의 유지를 위한 온도를 결정하기 위하여 온도변화와 동시에 수분함량의 변화를 측정하였다. 내부온도를 60, 65, 70°C로 유지하면서 7일간 운전한 결과, 60°C에서 수분함량이 64~67%전후가 얻어졌으며, 65°C에서는 58~61%, 70°C에서는

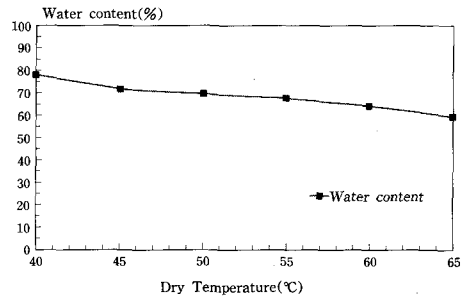
50~55%가 얻어졌다(그림 3). 즉 설계상에서 지표로 한 건조단의 65%전후의 수분함량을 얻기 위해서는 65°C에서 운전하는 것이 최적인 것으로 판정되었다. 이것을 뒷받침하기 위하여 순간적으로 온도를 변화시키면서 40°C~65°C까지의 온도변화에 따른 수분함량의 결과를 (그림 4)에 나타냈다.

건조단의 온도를 60°C로 고정시키고, 투입되는 양에 따라 내부슬러지의 함수율이 어떻게 변화하는지를 관찰하기 위하여, 양을 400~1000kg까지 변화시키면서 수분함량을 측정하였고 그 결과를 (그림 5)에 나타냈다.

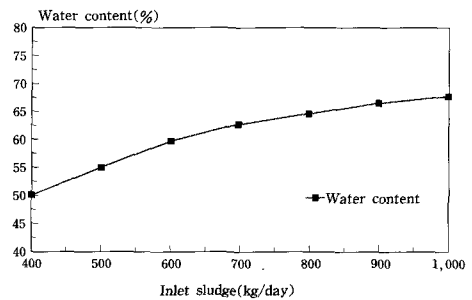
초기에 적은 양이 유입될 시(400~600kg)에는 수분의 제거량이 온도의 변화에 따라 차가 많으나 그 양이 증가함에 따라(700~1000kg) 수분의 제거율이 둔화되는 현상이 관찰되고 있다. 즉 건조기내에 물질의 양이 증가함에 따라, 물질이 건조기의 벽면에서 열전달율이 떨어져 수분의 제거가 미약한 것으로 확인되었다. 설계인자로서 반영시에 동일기종의 건조기를 사용할 경우에 처리용량에 대하여 반응조의 용적을 증가시킨다면, 건조효율을 개선할 수 있다는 결과가 얻어졌다.



(그림 3) 건조단 온도에 따른 수분함량 변화



(그림 4) 건조단 설정 온도에 따른 수분 함량 변화



(그림 5) 건조단 투입량에 따른 수분 함량 변화

나. 발효단의 운전조건 검토

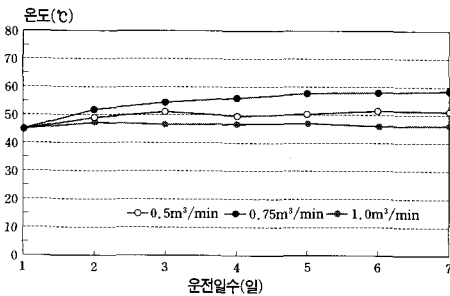
벤치스케일(15kg/일) 시험에서 얻어진 값을 이용하여, 초기의 공기량을 0.5 l/min.kg sludge로 시운전을 실시하였다. 초기값에 대하여 반응은 순조롭게 진행이 되었지만, 각 발효조 1, 2, 3단의 공기량에 따라 반응정도가 틀린 것이 확인되었다. 즉 발효1단의 경우에는 공기의 통과가 어려워, 과량의 공기가 필요하지만, 2, 3단의 경우에는 수분의 감소에 의하여 통기량이 상당히 개선된 상태이므로 적은 량의 공기에 의해서도 퇴비화가 충분하게 일어날 수 있다는 관점에서 각단의 공기량을 변화시키면서 실험을 하였다.

(그림 6)에는 발효1단의 공기량을 0.5, 0.7, 1.0m³/min으로 제어한 후에 일주일간의 경시변화를 나타내었는데 그

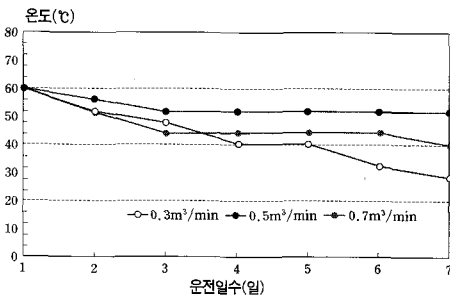
결과 1단의 경우에는 0.7m³/min의 공기량에서 온도가 50°C 이상 유지되는 것이 확인되었으며, 그 이상 혹은 그 이하에서는 온도가 50°C 이하로 떨어졌다.

2단의 경우에는 공기량을 0.3, 0.5, 0.7m³/min로 조정 한 결과, 0.5m³/min에서 가장 활성이 좋은 것으로 관찰되었다(그림 7). 3단의 경우에는 유기물의 분해가 거의 끝난 단계로서 공기를 보내지 않은 조건에서 가장 높은 온도를 보였으나 3단의 경우에는 공기를 투입하지 않는 경우에 유기물의 분해정도가 낮은 것으로 보아, 열의 축적에 의하여 온도는 높으나, 반응조건상 유기물이 분해되지 않는 점으로부터 0.3m³/min가 적당한 것으로 검토되었다(그림 8).

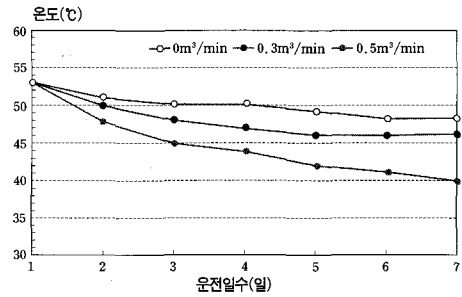
발효단에 있어서 공기량을 일정하게 보내지 않고, 발효 단계에 따라 단계적으로 공기량을 조정하는 것에 의하여 온도를 최대로 하면서 유기물의 분해를 극대화시킬 수 있다는 점이 연구에서 확인되었다.



(그림 6) 발효 1단에서 공기공급량에 따른 온도 변화



(그림 7) 발효 2단에서 공기 공급량에 따른 온도 변화



(그림 8) 발효 3단에서 공기 공급량에 따른 온도 변화

다. 전체공정중에 물질분해 및 성상변화의 검토

반응조가 정상상태로 유지된 시점에서 처리단계별로 함수율, 유기물함량(VS), 암모니아의 농도를 측정하여 [그림 9]에 나타냈다. 함수율은 반응의 진행단계에 따라 변화 하였으며, 당초 설계된 80%에서 건조하여 68%, 발효1단에 50%전후, 발효2단에 40% 전후, 발효3단에서 35%전후를 유지했다. 또한 운전기간중에 암모니아농도가 높게 관찰되었으며, 발효2단에서는 200ppm까지 나타났다.

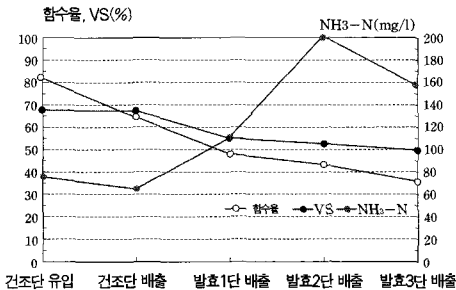
유기물의 분해는 초기에 68%전후의 함량을 나타내었으며, 건조단에서는 유기물의 분해가 거의 없었으나, 발효단을 거치면서 분해가 왕성하게 일어나, 최종 45~50%선까지 분해되었다.

상기의 측정인자 외에 pH와 CODCr농도를 측정하여 [그림 10]에 나타냈다. 각 단계별로 pH는 증가하는 현상이 관찰되었으며, 초기값이 6.8정도에서 건조에 의해서는 변화가 없었으나, 30%의 반응퇴비와 혼합이 되면서 증가하기 시작하여 발효단에서 암모니아의 발생과 함께 증가하는 현상이 관찰되어 최종적으로 8부근을 유지했다. 단지 pH가 증가하는 현상만으로도, 발효단에서 미생물의 대사가 활발하게 이루어지고 있는 것으로 예측이 되었다.

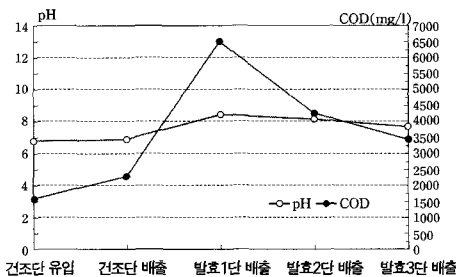
또한 COD농도의 변화는 회분식 반응조에서 얻어졌던 것과 유사한 결과 즉 초기에는 증가하는 현상이 관찰되었으나, 반응의 진전에 따라 감소하는 현상이 관찰되었다. 이

러한 결과는 초기에 미생물에 의하여 고분자물질이 분해되면서 저분자화되어 용출실험에 있어서 수용액에 용해되나, 반응이 활발하게 일어나면서, 저분자화한 물질이 미생물에 의하여 재차 분해되면서 용해성의 저분자 물질이 감소되어 가는 것으로 판단된다.

따라서 물질의 정상변화에서 볼 수 있듯이 반응조내에서 미생물분해가 활발하게 일어나 퇴비화가 진행되고 있는 것으로 확인되었다.



[그림 9] 각단계별 함수율, 유기물함량 그리고 암모니아 농도 변화



[그림 10] 각단계별 물질의 pH와 COD 변화

라. 미생물의 활성을 유지하기 위한 반송비의 결정

퇴비화에 있어서 미생물의 공급이 필요하나, 인위적인 수단에 의하여 공급시에는 많은 경제적 비용이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 퇴비화가 되어 생성되는 퇴비를 반송시켜 주는 방법이 널리 채용되고 있다. 반송비는 미생물 균주의 증가에도 기여하나, 수분함량 및 C/N

비의 조정에도 유용하게 사용될 수 있다. 또한 본 연구에서는 감량화의 목표를 70~80%로 생각하고 있는 점에서 반송비를 최대로 올려줌으로서 분해율을 더욱더 향상시키는 것이 가능하다고 본다. 이러한 점에서 반송비를 바꾸어가면서 연구 검토한 결과 35%수분함량의 생성물 30%정도 반송하는 것이 적합한 것으로 판단되었다. 반송비가 30%일 경우에 건조단에서 배출되는 65%의 수분함량을 발효1단에 약 57%수분함량으로 조정하는 것도 가능하며 반응에 적합한 것으로 검토되었다.

마. 통기개량재의 무첨가방법에 대한 검토

하수슬러지의 수분은 퇴비화 가능량보다도 높기 때문에 통기개량재의 첨가가 요구된다. 그러나 대부분의 하수처리장은 도시지역에 위치하고 있어서 톱밥이나 왕겨와 같은 통기개량재를 구입하기가 매우 어려운 실정이다. 즉 통기개량재가 첨가되지 않는 공정개발이 필요하다는 관점에서 퇴비의 반송비를 증가시키든가 장치상에서 무첨가 시스템에 대한 가능성을 검토하기 위해 실험을 실시한 결과 별도의 통기개량재의 첨가없이 퇴비화 반응이 가능한 것으로 나타났으며, 따라서 건조와 반송퇴비를 이용하여 반송되는 양을 잘 조절하는 것에 의하여 충분히 그 역할을 대신할 수 있는 것으로 검토되었다.