

공단폐수슬러지의 토양중 화학적 특성 변화

이홍재 · 조주식 · 허종수

경상대학교 농화학과

(1996년 3월 20일 접수)

Changes of Chemical Characteristics of the Industrial Wastewater Sludge in Soil

Hong-Jae LEE, Ju-Sik CHO and Jong-Soo HEO

Dept. of Agricultural Chemistry, Gyeongsang National University, Chin Ju 660-701, Korea

(Manuscript received 20 March 1996)

Chemical characteristics of the industrial wastewater sludge, degradation of the sludge in soil and CO₂ generation and changes of nitrogen in soil treated with the sludge were investigated.

The results obtained were summarized as follows:

1. Degradation rate of the sludge in soil was 26% at natural temperature, and 33% at incubation temperature at 12 weeks after treatment.

2. T-C, T-N and the C/N ratio of sludge in soil was 16.0%, 0.63% and 26, respectively, at natural temperature, and 15.0%, 0.65% and 23, respectively, at incubation temperature at 12 weeks after treatment.

3. Cumulative CO₂ generation in soil treated with 1%, 3% and 5% of sludge was 284, 440 and 512 mg/100 g, respectively, at natural temperature, and 440, 558 g and 654 mg/100 g, respectively, at incubation temperature at 12 weeks after treatment.

4. Changes of inorganic nitrogen in soil treated with 1%, 3% and 5% of sludge were 7.8, 12.8 and 16.3 mg/100 g, respectively, at incubation temperature at 12 weeks after treatment. Mineralization ratio of organic nitrogen in soil treated with 1%, 3% and 5% of sludge was 10.7%, 13.6% and 15.2%, respectively, at incubation temperature at 12 weeks after treatment.

5. Changes of pH in soil treated with 1%, 3% and 5% of Industrial wastewater sludge were in the range of 6.7~7.5 at natural temperature, and 6.1~7.9 at incubation temperature at 12 weeks after treatment.

Key words : industrial wastewater sludge, CO₂ generation, C/N ratio, inorganic nitrogen, mineralization, organic nitrogen

1. 서 론

산업발달로 인한 폐기물의 발생량은 매년 증가하고 있으며, 이의 처리와 관리문제는 환경보존적인 차원에서 큰 문제로 대두되고 있다 (Calton-Smith and Davis, 1993; Chang et al., 1983). 우리

나라의 폐기물 발생량은 1988년에 1일 124천톤에서 1992년에는 1일 145천톤으로서 매년 크게 증가되고 있으며, 전체 폐기물 발생량중 산업폐기물이 차지하는 비율은 약 48%에 해당된다.

폐기물의 현행 처리방법은 매립, 소각, 해양투기, 토양살포 및 재활용 등의 방법으로 하고 있으나,

매립처리는 좁은 국토로 인한 매립지의 확보에 어려움을 안고 있을 뿐만 아니라, 폐기물 매립으로 발생하는 침출수에 의한 토양 및 지하수의 오염이 큰 문제이며, 해양투기도 해양오염을 일으키므로 폐기물의 현행처리 방법은 2, 3차의 공해를 유발하게 하는 등 여러가지 측면에서 큰 문제를 안고 있기 때문에 폐자원의 재활용 측면에서 폐기물의 농경지 이용가능성에 대한 연구는 중요한 일이라 아니할 수 없다 (高橋和夫, 1980; 吳旺根 외, 1984).

폐기물중 공단폐수슬러지등은 비교적 유기물함량이 많을 뿐 아니라 작물에 필요한 영양원을 비교적 풍부하게 함유하고 있으며, 또한 이들 슬러지의 농지 시용시 모래 함량이 많은 토양에서는 수분함량과 수분보유력 및 토양의 단립조직을 증대시키고, 점토성분이 많은 토양에서는 투수율 증대, 토양내 미생물을 증가시키는 등 토양의 물리적 성질을 개선시키고, 유기질의 함량이 높고 전질소, 총인산등의 함량도 높아 토양 개량제와 유기질 비료원으로서의 가치가 충분히 있다고 볼 수 있다 (한순교와 이화형, 1987; 최종우 외, 1992).

본 연구는 공단폐수슬러지의 이화학적 특성과 토양중에 슬러지를 매립시 슬러지의 분해율, CO₂ 발생량 및 유기태 질소의 무기화율등 슬러지 분해양상을 검토함으로써 슬러지의 농지 이용 가능성을 제시코자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시 토양 및 슬러지

공시 토양은 경상대학교 부속농장의 토양을 사용하였고, 공시 슬러지는 진주시 환경관리공단 폐수종말처리장에서 활성오니법으로 처리된 슬러지를 사용하였다. 공시 토양 및 슬러지의 이화학적특성은 Table 1에서 보는 바와 같다.

2.2. 슬러지의 토양중 분해율, T-C 및 T-N 조사

공시 슬러지를 각각 100 g씩 polyethylene천으로 싸서 100l 용량의 플라스틱 용기에 10 cm 깊이로 매설한 다음 수분을 포장상태로 유지시키면서 실온과 항온 (30°C)에서 각각 3반복으로 처리하여 매설 1주, 2주, 4주, 6주, 8주, 10주 및 12주 후 슬러지의 분해율을 중량법으로 구하였으며, 슬러지의 T-C 및 T-N를 분석하여 C/N율을 구하였다. 이때 실온에서의 슬러지 매설 시기별 실제 일 평균 온도는 Table 2에서 보는 바와 같다.

2.3. 슬러지 처리 토양중 CO₂ 발생량, 질소 및 pH변화 조사

Table 1. Characteristics of the industrial wastewater sludge and soil used in the experiment.

	pH (1:5 H ₂ O)	M.O	T-C	T-N %	C/N ratio	NH ₄	NO ₃ μ/g	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO %	MgO
Waste water sludge	7.6	58.3	21.8	0.64	34	148	78.0	237	0.08	1.07	0.44
Soil	6.1	-	1.67	0.07	24	1.2	5.9	69.9	0.03	0.11	0.15

M.O: Moisture content

T-C: Total carbon

T-N: Total nitrogen

Table 2. Natural temperature at weeks after treatment of the sludge in soil.

Weeks after treatment	1	2	4	6	8	10	12
Temp.(°C)	8.7	9.3	10.2	12.1	13.7	15.5	16.3

공시 슬러지를 처리한 토양중 CO₂발생량 조사는 田邊市郎 (1966), Puig-Gimenez (1984) 및 Nommik (1971) 등의 방법에 의하였다. 즉 공시 토양을 5 mm체에 통과시킨 다음 토양 100 g에 2 mm체를 통과시킨 공단폐수슬러지를 각각 1%, 3% 및 5%의 비율로 혼합한 후 300 ml의 플라스틱 용기에 넣어서 수분을 포장상태로 유지시켰다. 이때 플라스틱 용기내에 50 ml 용량의 beaker를 넣고 beaker내에 0.4 N-NaOH 40 ml을 넣은 후 용기를 밀폐시켰다. 이렇게 하여 1주 및 2주 간격으로 12주 동안 NaOH에 흡수된 CO₂를 phenolphthalene 지시약을 사용하여 0.4 N-HCl로 역적정하여 CO₂ 발생량을 구하였다.

토양중 슬러지 처리시 질소의 변화는 토양 100 g에 2 mm체를 통과시킨 공시슬러지를 각각 1%, 3% 및 5%의 비율로 혼합 후 수분을 포장상태로 유지하여 항온 (30°C)하에서 처리 6주 및 12주 후 토양중 무기태질소 (NH₄+NO₂+NO₃-N)를 구하였으며, 총질소에서 무기태질소를 제외한 나머지를 유기태질소로 환산하였다.

토양중 슬러지 처리시 pH변화는 각 슬러지 처리 후 실온 및 항온 (30°C)하에서 처리 1주, 2주, 4주, 6주, 8주, 10주 및 12주 후 토양의 pH를 측정하였다.

2.4. 분석방법

공시 슬러지 및 토양의 분석은 토양화학 분석방법 (1989), Standard Method (1989) 및 환경오염 공해공정시험법 (1992)에 준하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지의 토양중 분해율

실온 및 항온하에서 슬러지의 토양중 분해율을 조사한 결과는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 실온에서는 매립 2주 후 약 9% 분해되었으며, 그후 시일

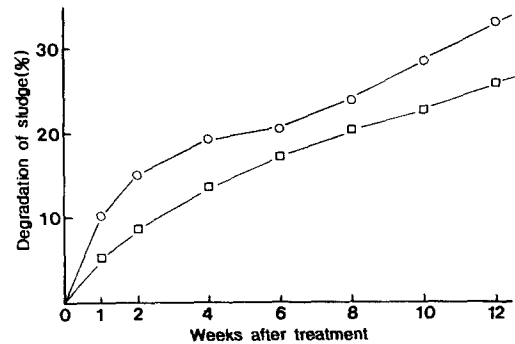


Fig. 1. Degrees of degradation of the sludge in soil at natural and incubation temperature for 12 weeks.

□: Natural temp.
○: Incubation temp.(30°C)

이 경과할수록 증가되어 12주 후 약 26% 분해되었다. 항온에서는 매립 4주까지 급격히 분해되어 약 19% 분해되었고, 그후에도 계속적으로 분해되어 매립 12주 후 약 33% 분해되었다.

토양중에서의 슬러지 분해는 일반적으로 C/N율에 따라 다르며, C/N비가 25~35일 경우 분해 안정화가 잘 이루어지고, C/N비가 40 이상일 경우 질소기아 현상으로 인하여 유기물의 분해가 잘 일어나지 않으며, C/N비가 낮을 경우 탈질 현상이 일어나 질소가 유실되는 것으로 알려져 있으며 (Willson and Epstein, 1976), 본 실험에 사용한 슬러지는 C/N율이 약 34로서 미생물 생육에 적합한 환경조건을 갖추었기 때문에 비교적 높은 분해율을 나타낸 것으로 생각되었다. 또한 前田乾一 (1978)은 제지슬러지의 경우 토양중에서의 연간 분해율이 75% 정도 된다고 하였으며, 슬러지의 토양중 분해는 유기물질의 성질에 따라 분해되는 정도가 다르며, 일반적으로 용해성 당분, 아미노산, 지방, 단백질 등은 분해가 비교적 잘 되지만, 셀룰로오스, 리그닌, Wax 등은 비교적 분해가 잘 되지 않는다고 하였다.

3.2. 슬러지의 토양중 T-C, T-N 및 C/N율 변화

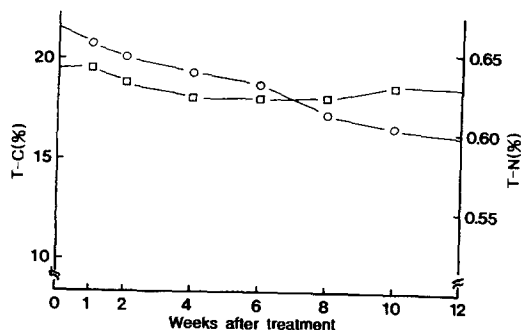


Fig. 2. Changes of T-C and T-N of the sludge in soil at natural temperature for 12 weeks.

○: Total carbon
□: Total nitrogen

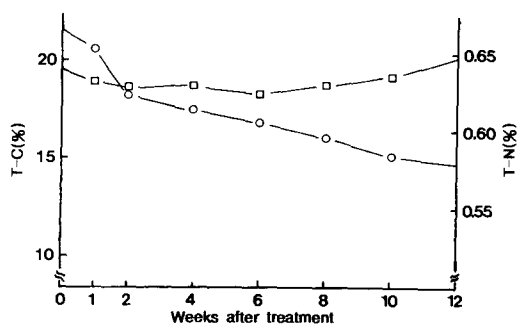


Fig. 3. Changes of T-C and T-N of the sludge in soil at incubation temperature for 12 weeks.

○: Total carbon
□: Total nitrogen

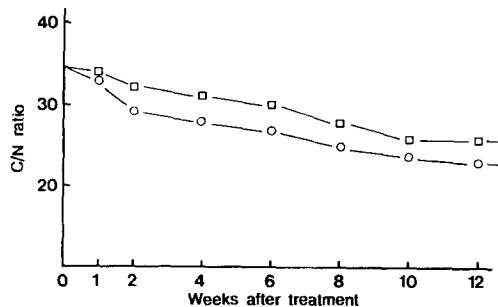


Fig. 4. Changes of C/N ratio of the sludge in soil at natural and incubation temperature for 12 weeks.

□: Natural temp.
○: Incubation temp.(30°C)

슬러지의 토양중 매립 시기별 T-C 및 T-N의 변화는 각각 Fig. 2 및 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 먼저 실온에서 T-C 변화는 매립 초기부터 서서히 감소하여 매립 12주 후 약 16%이었고, T-N는 거의 변화가 없었다. 항온에서 T-C의 변화는 매립 2주까지 급격히 감소하여 약 18%로서 원슬러지에 비하여 약 17% 감소되었으며 그후에도 지속적으로 감소하여 매립 12주 후 약 15%이었다. T-N의 변화는 매립초기에는 거의 변화가 없었으나 후기로 갈수록 증가하는 경향이였다.

슬러지의 토양중 매립 시기별 C/N을 변화는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 실온에서는 지속적으로 감소하여 매립 12주 후 약 26이었고, 항온에서는 매립 2주까지 급격히 감소하였으며 그후에도 계속적으로 감소하여 매립 12주 후 약 23으로 실온에 비하여 항온에서 감소가 많이 되었다.

일반적으로 유기성 산업폐기물을 토양에 사용하였을때 탄소 및 질소는 미생물에 의해 무기화 되며, 무기화되는 과정은 산업폐기물의 종류 및 특성, PH 등 토양 특성 그리고 수분함량 등에 따라 다르지만, 25°C 항온하에서 매립 45일 후 탄소는 약 8% 정도 분해되고, 질소는 토양의 특성에 따라 3~13% 정도 분해되는 것으로 알려져 있으며 (Tester et al, 1977, 1979), Terry등 (1979)은 336일 후 30°C 항온하에서 46% 정도가 분해되며, 혐기소화된 슬러지가 호기성 토양에서 분해가 빨리 진행된다고 하였다.

3.3. 슬러지처리 토양중 CO₂ 발생량

슬러지를 토양중 1%, 3% 및 5%의 비율로 처리하여 실온 및 항온하에서 CO₂ 발생량을 조사한 결과는 각각 Fig. 5 및 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 실온에서 처리 4주 후 1%, 3% 및 5% 처리했을 경우 CO₂ 발생량은 각각 약 142, 271 및 360 mg/100g이었으며, 그후 시일이 경과할수록 슬러지 처리량이 많을 수록 CO₂ 발생량이 증가되어 처리 12주 후 CO₂ 발생량은 각각 약 284, 440 및 512 mg/100g이었다. 항온하에서는 처리 4주 후 CO₂ 발생량이

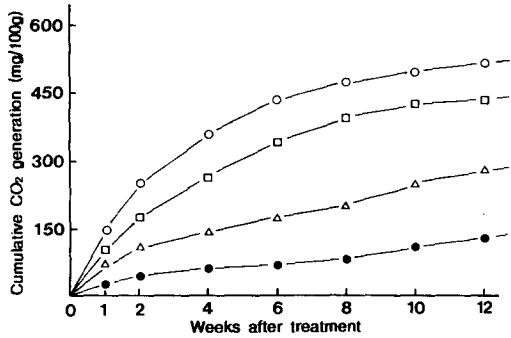


Fig. 5. Cumulative CO₂ generation in soil treated with sludge at natural temperature for 12 weeks.
 ●: 0% sludge △: 1% sludge
 □: 3% sludge ○: 5% sludge

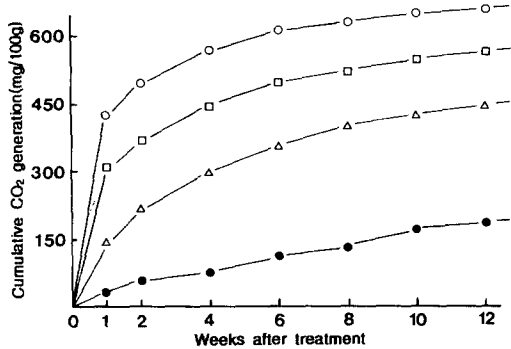


Fig. 6. Cumulative CO₂ generation in soil treated with sludge at incubation temperature for 12 weeks.
 ●: 0% sludge △: 1% sludge
 □: 3% sludge ○: 5% sludge

급격히 증가하여 각각 약 297, 442 및 571 mg/100 g이었으며, 그후 모든 처리구에서 비슷한 경향으로 초기에 비해 CO₂ 증가율은 감소하였으며, 처리 12 주 후 CO₂ 발생량은 각각 약 440, 558 및 654 mg/100 g이었다.

슬러지 처리 12주 동안 CO₂ 발생 경향을 구체적으로 해석하기 위하여 Broaddbent등 (1964)이 제시한 $Y=aT^n$ ($Y=CO_2$ 발생량, $T=$ 처리시기, a 및 $n=$ 상수)식에 적용시켜 log-log 그래프로 나타낸 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 실온에서는 처리

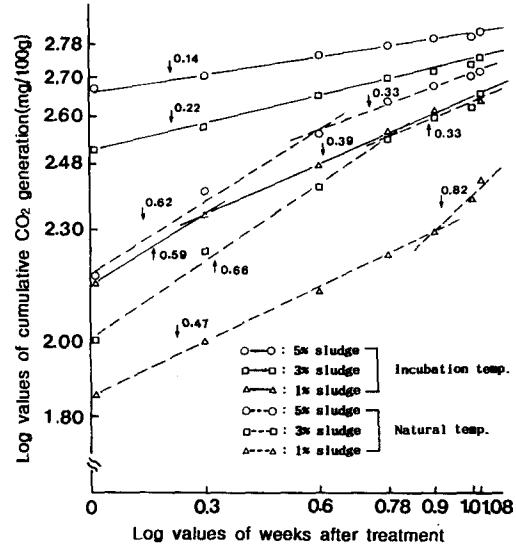


Fig. 7. Log-log graph of cumulative CO₂ generation in soil treated with sludge at natural and incubation temperature for 12 weeks. The numbers indicate the slopes of the graph.

4주까지 기울기 값이 큰 것으로 미루어 이 시기에 분해가 쉬운 유기물이 분해되었으며, 그후 비교적 분해가 어려운 유기물이 분해된 것으로 해석할 수 있었다. 항온에서는 실온에 비하여 처리 1주까지 모든 처리구에서 분해가 잘 되었고, 그후 계속해서 분해가 된 것을 알 수 있었다.

3.4. 슬러지 처리 토양중 질소의 변화

슬러지를 토양에 1%, 3% 및 5%의 비율로 처리했을 경우 토양중 무기태질소 함량을 항온하에서 조사한 결과는 Table 3에서 보는 바와 같다. 슬러지를 처리하지 않았을 때 처리 12주 후 무기태질소는 6.01 mg/100 g으로 처리 초기에 비하여 약 5.3 mg/100 g 증가되었다. 슬러지를 1%, 3% 및 5%로 처리했을 경우 처리량이 증가할수록 토양중 무기태질소의 양도 증가하여 처리 12주 후 각각 약 7.8, 12.8 및 16.3 mg/100 g으로서 처리초기에 비하여 각각 약 6.9, 11.4 및 14.5 mg/100 g 증가되었다.

무기태질소중 NH₄-N 함량은 모든 처리구에서 처

Table 3. Changes of inorganic nitrogen content in soil treated with sludge at incubation temperature (30°C) for 12 weeks. (mg/100 g)

Treatment (%)	Weeks after treatment									Increased inorganic
	0			6			12			
	Inorganic-N	NH ₄ -N	NO ₃ +NO ₂ -N	Inorganic-N	NH ₄ -N	NO ₃ +NO ₂ -N	Inorganic-N	NH ₄ -N	NO ₃ +NO ₂ -N	
0	0.71	0.12	0.59	4.92	0.91	4.01	6.01	—	6.01	5.39
1	0.93	0.86	0.07	5.91	5.22	0.69	7.81	2.72	5.09	6.88
3	1.37	1.19	0.19	7.42	6.25	1.17	12.8	6.12	6.68	11.4
5	1.80	1.57	0.23	7.61	4.18	3.43	16.3	7.15	9.15	14.5

Table 4. Organic nitrogen mineralized in soil treated with sludge at incubation temperature at 12 weeks after treatment.

Treatment (%)	Initial		Inorganic-N at 12 weeks after treatment (c) (mg/100g)	Organic-N Mineralized ¹⁾ (%)
	Total-N(a) (mg/100g)	Inorganic-N(b) (mg/100g)		
0	69.1	0.71	6.01	7.67
1	73.9	0.93	8.81	10.7
3	84.2	1.37	12.8	13.6
5	95.3	1.80	16.3	15.2

1) % of organic-N mineralized

$$= \frac{(c)-(b)}{(a)-(b)} \times 100$$

리 초기에 비하여 처리 후 시일이 경과할수록 상대적인 증가량이 감소하였으며, NO₃+NO₂의 함량은 처리 12주 후 1%, 3% 및 5% 처리구에서 각각 약 5.1, 6.7 및 9.2 mg/100 g이었다.

그리고 슬러지 처리 12주 후 유기태질소의 무기화율을 항온하에서 조사한 결과는 Table 4에서 보는 바와 같이 1%, 3% 및 5%로 처리했을 경우 총질소 및 무기태질소는 각각 약 74 및 0.9 mg/100 g, 약 84 및 1.4 mg/100 g, 약 95 및 1.8 mg/100 g이었다. 처리 12주 후 유기태질소의 무기화율은 1%, 3% 및 5%로 처리했을 경우 각각 약 10.7%, 13.6% 및 15.2%로서 처리량이 증가할수록 무기화율이 높았다.

Volz와 Heichel (1979)은 슬러지처리 토양중 무기태질소는 슬러지중의 NH₄⁺, NO₂⁻ 산화미생물 그리고 NO₃⁻ 환원 및 탈질 미생물, 종속영양미생물이 증가하여 유기태질소가 무기화되어 증가된다고 하였으며, Tester (1977)등은 탈질작용은 수분

함량이 65%일 경우에 가장 잘 일어나고, 처리 초기에는 암모니아화 작용이 일어나며, 시일이 경과할수록 질산화작용이 증가하여 처리 54일 후에는 총질소의 약 6% NO₃⁻로 무기화 되었으며, 암모니아의 산화에 가장 적절한 pH는 7~9, 질산화에는 pH 7~8이라고 하였다. 그리고 Hadas와 Portnoy (1994)은 토양중 슬러지 및 유기물질의 무기화율은 슬러지의 특성, 토양의 성질 및 pH에 따라 다르지만 일반적으로 11~29% 정도 무기화 된다고 하였으며, 본 실험에서도 Hadas와 Portnoy의 연구결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

3.5. 슬러지처리 토양중 pH의 변화

슬러지를 토양에 1%, 3% 및 5%의 비율로 처리했을 경우 평균 pH 변화는 Table 5에서 보는 바와 같다. 슬러지 무처리구의 경우 실온에서는 처리시

Table 5. Changes of pH in soil treated with industrial wastewater sludge.

	Sludge treatment (%)	Weeks after treatment						
		1	2	4	6	8	10	12
Natural temp.	0	6.8	5.2	5.5	6.0	5.7	5.6	5.5
	1	6.6	6.7	6.4	6.6	6.4	6.6	6.7
	3	7.8	7.5	7.4	7.2	7.3	7.2	7.2
	5	8.0	7.5	7.5	7.6	7.6	7.5	7.5
Incubation temp. (30°C)	0	5.0	5.3	5.0	5.1	5.1	5.2	5.0
	1	6.6	6.2	6.4	6.4	6.1	6.3	6.1
	3	7.7	7.5	7.3	7.2	6.9	7.3	6.6
	5	8.2	7.8	7.3	7.4	7.8	7.7	7.9

일이 경과함에 따라 감소하는 경향이었으나, 항온하에서는 큰 변화가 없었다.

실온에서 슬러지를 1%, 3% 및 5%로 처리했을 경우 처리 1주 후 pH는 각각 6.6, 7.8 및 8.0이었으며, 그후 변화가 없거나 약간씩 낮아지는 경향으로 처리 12주 후 pH는 각각 6.7, 7.2 및 7.5이었고, 항온에서도 실온과 비슷한 경향으로 처리 12주 후 pH는 각각 6.1, 6.6 및 7.9이었다. 슬러지 처리량이 증가함에 따라 토양 pH가 상승한 것은 유기물의 시용으로 토양이 환원되었기 때문인 것으로 사료되었으며, 항온하에서 실온 보다 pH가 일반적으로 높은 것은 유기물의 활발한 분해로 CO₂가 많이 발생되었기 때문인 것으로 생각되었다.

3.6. CO₂ 발생량과 무기태질소 함량과의 관계

슬러지를 토양중 1%, 3% 및 5%로 처리했을 경우 실온 및 항온하에서 처리 시기별 CO₂ 발생량과 무기태질소의 함량과의 상관관계를 검토한 결과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 고도의 유의성 있는 정 상관관계를 나타내었다. 슬러지 처리시 전반적으로 CO₂ 발생량은 토양중 무기태질소의 함량에 비하여 처리 초기에 급격히 발생하였으며 처리 6주 후부터 CO₂ 발생량의 증가율은 감소하였으나, 토양중 무기태질소의 함량은 처리량에 따라 약간 다르지만 처리 12주까지 계속적으로 증가하였다.

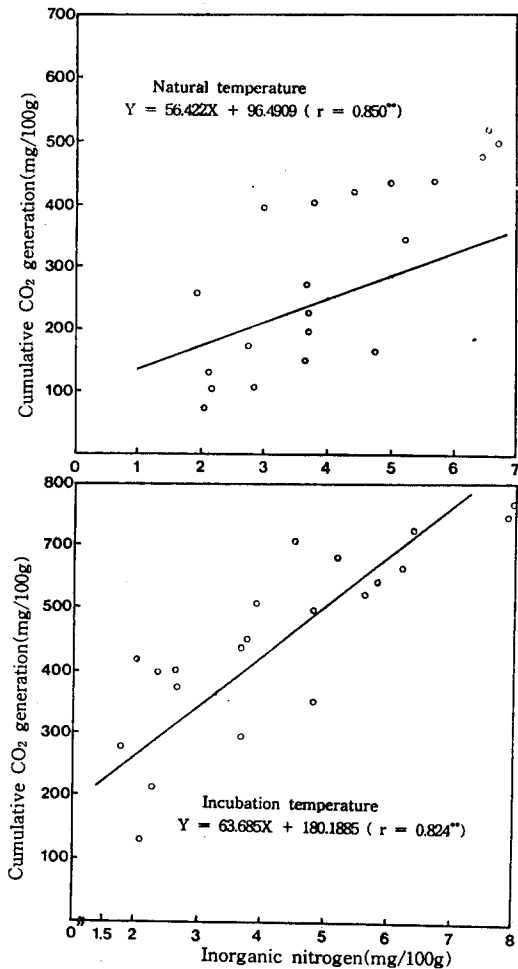


Fig. 8. Relationship between inorganic nitrogen and cumulative CO₂ generation in soil treated with sludge at natural and incubation temperature for 12 weeks.

4. 결 론

공단폐수슬러지의 농업적 이용 가능성을 검토하기 위하여 이들 슬러지의 이화학적 특성, 슬러지의 토양중 분해율, 토양중 CO₂ 발생량 및 질소 변화등 그 분해특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 공단폐수슬러지를 토양에 매립했을 경우 슬러지의 분해율은 매립 12주 후 실온에서는 약 26%이었고, 항온하에서 약 33%이었다.

2. 슬러지를 토양중에 매립했을 경우 T-C, T-N 및 C/N율은 매립 12주 후 실온에서 각각 약 16%, 0.63% 및 26이었고, 항온에서는 각각 약 15%, 0.65% 및 23이었다.

3. 토양중 슬러지를 1%, 3% 및 5%로 처리했을 경우 처리 12주 후의 CO₂ 발생량은 실온에서 각각 약 284, 440 및 512 mg/100g이었고, 항온에서는 각각 약 440, 558 및 654 mg/100g이었다.

4. 토양중 슬러지를 1%, 3% 및 5%로 처리했을 경우 항온하에서 처리 12주 후 무기태질소 함량은 각각 약 7.8, 12.8 및 16.3 mg/100g이었고, 유기태질소의 무기화율은 각각 약 10.7%, 13.6% 및 15.2%이었으며, CO₂ 발생량과 토양중 무기태질소 함량과의 상관관계는 고도의 유의성 있는 정의 상관관계를 나타내었다.

5. 토양중 슬러지를 1%, 3% 및 5%로 처리하였을 경우 처리 12주 후 pH는 실온에서 약 6.7~7.5 범위였고, 항온에서는 약 6.1~7.9 범위였다.

참 고 문 헌

- 高橋和夫, 1980, 水田におけるわらはこ類の施用をめぐる 諸問題, 日土肥學會講演要旨集. 26, 193~194.
- 吳旺根, 李春秀, 郭漢剛, 1984. 沓土壤에서 腐熟汚尼施用이 벼 收量性에 미치는 影響, 韓土肥誌, 17(2), 134~140.
- 田邊市郎, 渡邊巖, 1966, 土壤微生物作用の測定法, 日土肥誌, 1 37(1), 46~54.
- 前田乾一, 1978, 水田における各種施用有機物の分解過程の 特徴お農業よわひ園藝, 53(5), 48~52.
- 崔種佑, 趙丁禮, 李奎承, 金文圭, 1992, 製紙슬러지의 沓土壤 施用效果, 農業科學研究, 19(2), 187~193.
- 환경오염공정시험방법, 1992, 동화기술.
- 한순교, 이화형, 1987, 제지슬러지 비료화 연구, Journal of the Tappik, 19, 56~63.
- 토양화학분석방법, 1989, 농업기술연구소
- Standard method for The examination of water and wastewater, 1989 APHA-AWWA-WPCF.
- Broadbent, F.E., R.H. Jackman and J. Mcnicoll, 1964, Mineralization of carbon and nitrogen in some new zealand allophanic soils, Soil Sci., 98, 118~128.
- Carlton-Smith, C.H, and R.D. Davis, 1993, Comparative uptake of heavy metals by forage crops grown on sludge-treated soils, In Proc. Int. Conf.Heavy Metals in the Environment. Heidelberg, West Germany. Sept. CEP Consultants, Edinburgh, Scotland. 1, 393~396.
- Chang, A.C., A.L. Page and J.E. Warneke, 1983, Soil conditioning effects of municipal sludge compost, J. Environ. Enginee, 109(3), 574~583.
- Hadas, A. and R. Portnoy, 1994, Nitrogen and carbon mineralization rates of composted manures incubated in soil, J. Environ. Qual., 23, 1184~1189.
- Nommik, H, 1971, A technique for determining Mmneralization of carbon in soils during incubation, Soil Sci., 112, 131~136.
- Puig-Gimenez, M.H. and F.E. Chase, 1984, Laboratory studies of factors affecting microbial degradation of wheat straw residues in soil, Can. J. Soil Sci., 64, 9~19.
- Terry, R.E., D.W. Nelson, and L.E. Sommers, 1979, Decomposition of anaerobically digested

- sewage sludge as affected soil environmental conditions, J. Environ. Qual., 8(3), 342~347.
- Tester, C.F., L.J. Sikora, J.M. Taylor and J.F. Parr, 1979, Decomposition of sewage sludge compost in soil: 3. Carbon, nitrogen, and Phosphorus transformations in different sized fractions, J. Environ. Qual., 8(1), 79~82.
- Tester, C.F., L.J. Sikora, J.M. Taylor and J.F. Parr, 1977, Decomposition of sewage sludge compost in soil: 1. Carbon, nitrogen transformations, J. Environ. Qual., 6(4), 459~463.
- Volz M.G. and G.H. Heichel, 1979, Nitrogen transformations and microbial population dynamic in soil amended with fermentation residue, J. Environ. Qual., 8(3), 434~439.
- Willson C.B and E. Epstein, 1976, A forced aeration system for composting wastewater sludge, J. Water poll. Control Fed., 48(4), 688~694.