

# 논土壤의 脫窒作用에 關한 研究

## 第 4 報 土壤有機物含量, 溫度, pH, 窒素肥種 및 施肥量이 脫窒作用에 미치는 影響

李相奎 · 金承煥 · 朴俊奎 · 安相培\*

### Studies on the Denitrification in the Submerged Paddy Soil

#### IV. Influences of soil organic matter contents, soil temperature, pH values, kinds and levels of N-fertilizer on the evolution of $N_2O$ gas

Sang Kyu Lee, Seung Hwan Kim, Jun Kyu Park and Sang Bae An

#### Summary

A series of laboratory experiments were carried out to find the effects of soil organic matter contents, soil temperature, pH values, kinds and amount of nitrogen fertilizers on the denitrification- $N_2O$  gas evolution.

The results obtained were summarized as follows:

1. Denitrification rate, amount of  $N_2O$  gas evolution, was influenced the order of organic matter contents > soil temperature > pH values > kinds of N-fertilizer > levels of N-fertilizer.
2. The highest denitrification rate was observed in organic matter content of 3.0%, pH values at 6.0 with application of  $KNO_3$  at levels of 20 mgN/100g soil.
3. For the evolution of 1 mole  $N_2O$  gas, averaged carbon consumption was obtained as 0.5 mole in all these experiment condition. However, the highest carbon consumption rate was obtained in organic matter contents for 1.0% with application of  $(NH_4)_2SO_4$  at levels of 10 mgN/100g soil (1.06 mole) while lowest carbon consumption rate was obtained in organic matter contents for 3.0% with application of  $KNO_3$  at levels of 20 mgN/100g soil (0.13 mole).
4. According to Michaelis-Menten's equation, the  $V/2$  values for evolution of  $N_2O$  gas was estimated by progress curve. The results obtained was as 550 ug for  $(NH_2)_2CO$  and 1100 ug  $N_2O/100g$  soil by application of  $KNO_3$  in organic matter contents of 1.0% soil. On the other hand, when the application  $(NH_4)_2SO_4$  the  $V/2$  values of  $N_2O$  gas was obtained as the amount of 490 ug/100g soil while  $V/2$  values of  $N_2O$  gas by application of  $KNO_3$  was on the linear line in soil organic matter contents of 3.0%.

\* 農業技術研究所 (Agricultural Sciences Institute Suweon, 170, Korea)

緒 言

논土壤의 脫窒作用은 土壤微生物의 呼吸과 同化作用에 의하여 일어나는 代謝作用이며 窒酸과 亞窒酸의 還元에 의한 脫窒作用의 主要 gas 成分은  $N_2O$ 와  $N_2$  이다.”

脫窒作用 過程에 있어서 土壤自體는 主要 根原이 되며 또한 土壤은 大氣中の  $N_2O$ 를 吸收할 수 있는 作用을 갖는다.” 土壤中에서 이와같은 微生物의 代謝活動은  $N_2O$  및  $N_2$  gas가 放出되기도 하고 同化에 의하여 吸收利用되는 作用이 일어난다.”

湛水狀態의 논土壤에서 일어나는 脫窒作用은 數 많은 土壤構成要因과 環境條件이 關係하는데 土壤中 有機物の 含量<sup>1)</sup>, 窒素의 肥種 및 施肥量<sup>1)</sup>, 土壤 pH 價,<sup>6,8,16)</sup> 酸化還元電位差<sup>5,14)</sup>, 土壤水分含量<sup>1,6)</sup>, 土壤溫度<sup>12,15)</sup> 및 微生物의 種類와 分布<sup>9)</sup> 등은 大體로 主要한 因子들이다.

그런데 以上과 같은 많은 因子에 對한 研究는 주로 實驗室條件에서 단편적으로 이루어진 結果가 많으며 實

際 우리나라와 같은 湛水狀態의 논土壤條件과는 距離가 먼 研究結果가 많다. 그러므로 本 研究에서는 논土壤을 供試하여 實際 圃場에서 主要 脫窒作用에 影響을 많이 줄수있는 要因 即 土壤有機物含量差異, 窒素의 肥種 및 施肥量, 恒溫溫度 및 pH 등을 달리했을 때 일어나는 脫窒作用을 一聯의 室內試驗으로 遂行한 結果를 報告한다.

材料 및 方法

本 試驗에 使用한 土壤은 表 1 에서와 같이 有機物含量이 相異한 砂壤質 論土壤의 表土를 供試하였다.

供試土壤은 濕潤한 狀態를 2mm 체에 通過시켜 乾土 100g에 相當한 濕土를 200ml들이 가지달린 特殊恒溫瓶에 넣고 磷酸 및 加里는 溶磷과 鹽化加里를 使用하여 成分量으로 各記 10mg/100g 土壤이 되게 添加하였다. 窒素는  $(NH_4)_2SO_4$ ,  $(NH_2)_2CO$  및  $KNO_3$ 를 使用하여 成分量으로 各 0, 10, 15 및 20mg/100g 土壤이 되게 窒素溶液으로 添加하였다. 三要素를

Table 1. Chemical characteristics of soils used

O. M (%)	pH (1:5)	Av. SiO <sub>2</sub> (ppm)	Exch. me/100 g			Av. SiO <sub>2</sub> (ppm)
			K	Ca	Mg	
1	5.9	8	0.49	5.30	2.20	156
3	5.5	136	0.42	4.56	0.68	76

施肥한 土壤은 均一히 잘 混合한 後  $Ca(OH)_2$ 와 0.5 N HCl을 使用하여 緩衝曲線法에 의하여 土壤의 pH를 試驗設計에 따라 各各 調節하였다. 湛水條件은 土壤과 물의 比率(W/V)이 1:0.5되게 調節하였다. 處理가 끝난 供試 土壤은 10°C, 20°C 및 30°C 恒溫器內에서 恒溫하면서 徑時的으로 各 成分을 調査하였다. 그리고 溶液을 分析하기 위하여 同一한 方法으로 2反復을 더 만들어 漏水 50ml을 採取分析하였으며 漏水를 採取한 後는 증류수 50ml를 添加하였다.

恒溫期間中 Gas 分析法 및 無機態窒素 등의 分析方法은 第 1報에서 實施한 方法에 따라 行하였다.

結果 및 考察

恒溫期間中 有機物含量差異, 溫度 및 pH가 相異했

을 때  $N_2O$  gas의 累積發生量 調査結果는 그림 1과 같다.

恒溫溫度에 따른  $N_2O$  gas의 發生量은 10°C와 30°C 處理土壤에서는 恒溫 30日까지 處理間에 큰 差異 없이 徐徐히 增加되는 傾向을 보이다가 30日 以後부터 急히 增加를 보였다. 그러나 恒溫溫度 20°C 調節區에서는 恒溫 5日後부터 他處理에 比하여 顯著히 높은 發生量으로 增加되었다. 恒溫溫度差異에 의한 累積發生量은 恒溫 35日間 10°C 處理區는 總 3298, 20°C 일때는 5053, 그리고 30°C 處理時에는 3607  $\mu g/100g$ 의  $N_2O$  gas가 發生되어 20°C일때 가장 많은 量의  $N_2O$  gas가 發生되었다.

그리고 土壤有機物含量差異에 의한  $N_2O$  gas 累積發生量을 보면 gas의 徑時的 發生樣象은 溫度差異에 의한 發生과 거의 같은 傾向을 보였다. 그런데 恒溫 35

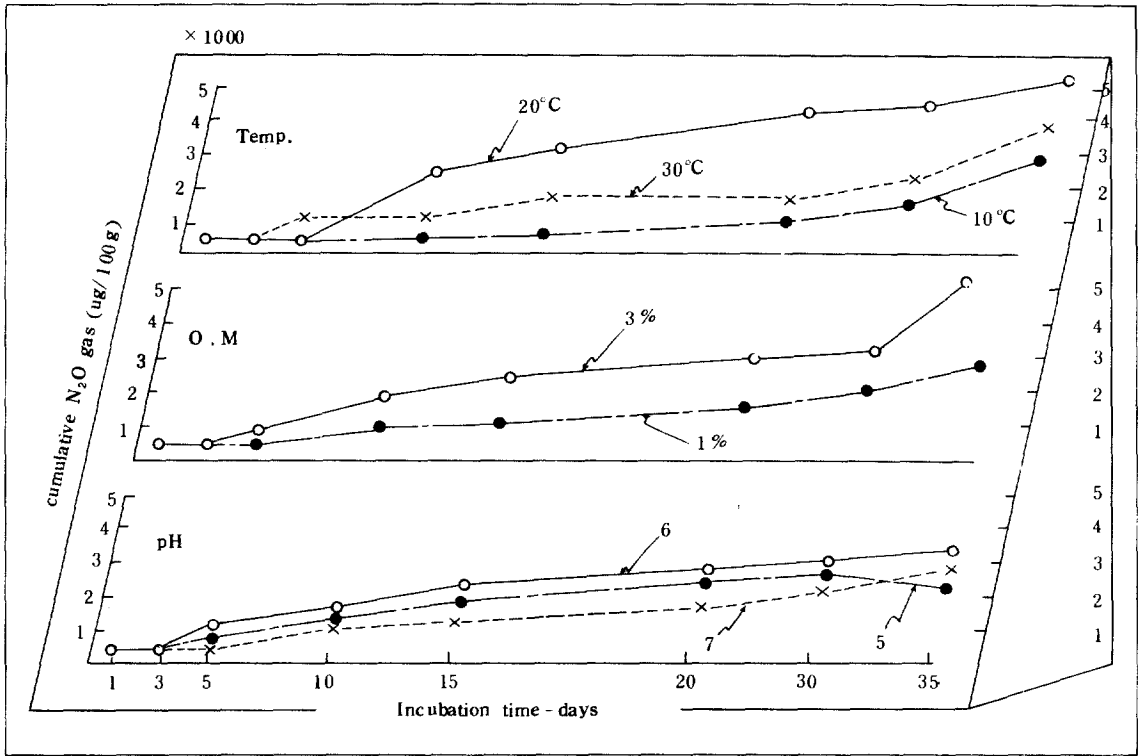


Fig. 1. Cumulative evolution of N<sub>2</sub>O gas on the different temperature, organic matter contents with different pH values under assessment of incubation time.

日間 累積發生量 總計는 1% 土壤에서 2014  $\mu\text{g}$  그리고 3% 土壤에서는 5158  $\mu\text{g}/100$  土壤이 發生되어 有機物이 낮은 土壤에 比하여 높은 土壤에서 脫窒量이 增加되었다.

한편 土壤 pH의 相異에 따른 N<sub>2</sub>O gas의 累積發生量을 보면 發生樣象은 前者와 비슷하였으며 pH의 差異에 따라서도 顯著한 差異는 보이지 않았다. 그런데 恒溫 35日間 總發生量을 pH別로 보면 pH 5調節區는 3967, pH 6調節區는 4348 그리고 pH 7調節區는 3643  $\mu\text{g}/100$  g 土壤으로 pH 6調節時 가장 많은 N<sub>2</sub>O gas 發生量을 보였다.

窒素肥種別 및 施肥量에 따른 N<sub>2</sub>O gas의 階時的 累積發生量을 보면 그림2와 같다.

窒素肥種別 N<sub>2</sub>O gas의 發生量은 恒溫 30日까지 비슷한 增加量을 보였으나 30日以後에 顯著한 差異를 보였다. 恒溫 35日間 累積發生量 總計를 보면 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>

SO<sub>4</sub> 施用區에서 1473, (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> CO 施用區는 1468 그리고 KNO<sub>3</sub> 施用區에서는 3647  $\mu\text{g}/100$  g 土壤으로 他處理에 比하여 KNO<sub>3</sub> 施用時 N<sub>2</sub>O gas 發生量이 가장 많았다.

窒素施用量別 N<sub>2</sub>O gas의 累積發生量을 보면 發生樣象은 肥種別 發生과 비슷한 傾向으로 進行되었으나 量間에는 多少의 差異가 있었다. 恒溫 35日間 總發生量差異를 보면 NO區에서 1550, N10  $\text{mg}$  施用區에서 2017, N15  $\text{mg}$  施用區에서 2383 그리고 N20  $\text{mg}/100$  g 土壤區에서는 2570  $\mu\text{g}/100$  g 土壤으로 施肥量이 增加할수록 N<sub>2</sub>O gas 發生量도 增加되는 結果를 보였다.

그런데 土壤有機物含量, 窒素肥種 및 施肥量 및 土壤 pH價가 相異했을 때 N<sub>2</sub>O gas 1 mole을 生成시키기 위하여 消耗되는 炭素 mole比의 變化를 보면 表2 및 그림3과 같다.

表에서와 같이 有機物含量差異에 의한 炭素 消耗量

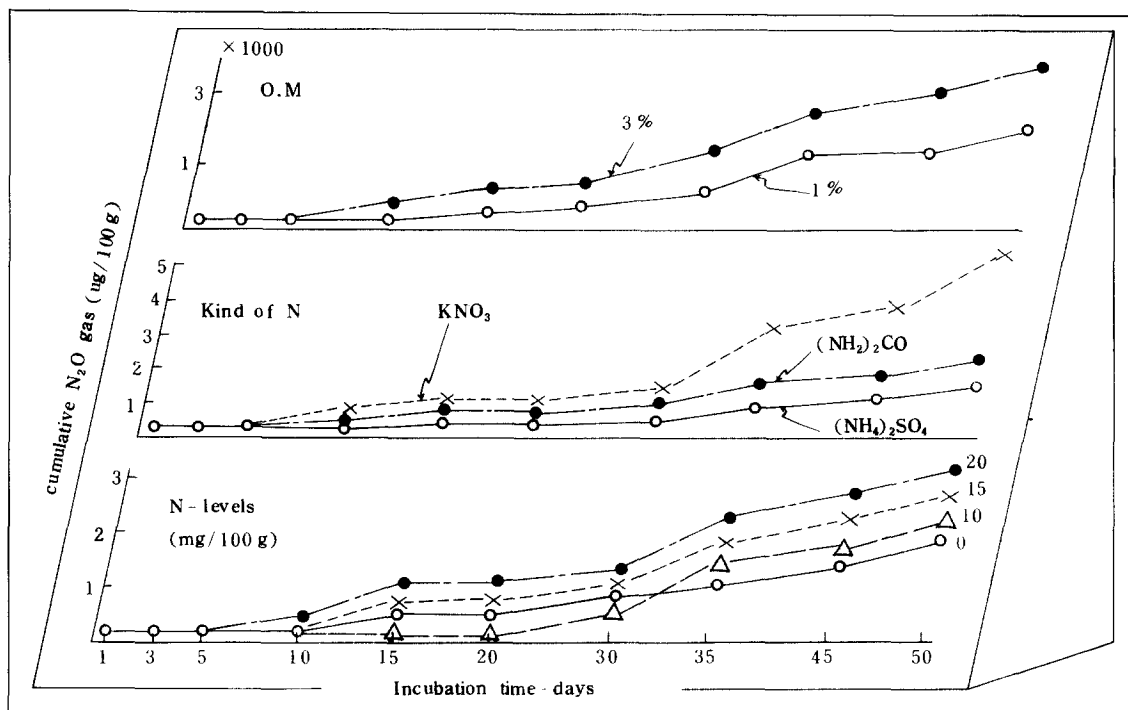


Fig.2. Amount of cumulative N<sub>2</sub>O gas on the different amount and kinds of nitrogen fertilizer under assessment of incubation time.

Table 2. Evolution of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O gas and estimation of molar ratio of carbon and N<sub>2</sub>O gas by the consumption of carbon for evolution of 1 mole N<sub>2</sub>O gas on the different organic matter concentration with different kinds and amount of nitrogen fertilizer

O.M (%)	N- source	N- level (mg/100g)	Gas evolved (ug/100g/35 days)			C/N mole Ratio	
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O		
1	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	647.8	9.7	980	0.56	
		10	941.4	12.9	790	1.06	
		15	904.7	21.0	880	0.96	
		20	773.5	20.0	990	0.72	
	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	10	1,065.5	15.6	1,160	0.82	
		15	1,006.3	21.8	1,460	0.63	
		20	994.1	18.4	1,190	0.75	
		10	781.5	2.6	3,480	0.19	
	KNO <sub>3</sub>	15	890.0	2.6	4,450	0.17	
		20	927.7	2.6	4,620	0.17	
		(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	603.3	45.4	2,120	0.29
			10	713.9	32.9	2,160	0.32
15	631.8		30.9	2,000	0.31		
20	655.7		63.9	1,860	0.38		
3	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	10	651.7	54.3	2,530	0.27	
		15	592.9	58.5	2,450	0.26	
		20	557.4	57.2	2,420	0.25	
		10	631.7	8.9	2,090	0.27	
	KNO <sub>3</sub>	15	615.4	6.5	2,900	0.19	
		20	643.1	5.3	4,340	0.13	

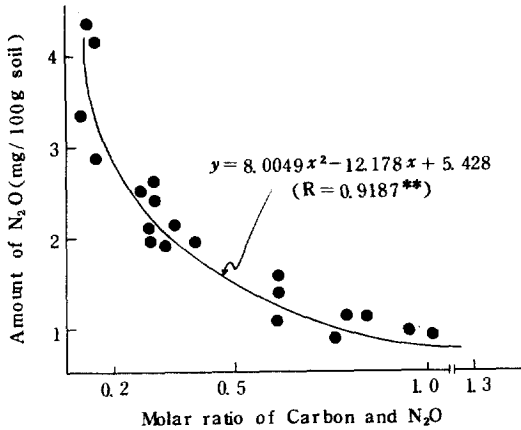


Fig. 3. Correlationship between the molar ratio of N<sub>2</sub>O and carbon by the consumption of carbon for the evolution of 1 mole N<sub>2</sub>O gas.

差異는 有機物含量 1% 土壤인 경우 N<sub>2</sub>O gas 1 mole 生成하는데 平均 0.67 mole 消耗되었고 3%인 土壤은 0.30 mole의 炭素가 消耗되어 有機物이 많은 土壤은 적은 土壤에 比하여 N<sub>2</sub>O gas의 發生에 必要한 Energy 消耗量이 적은 것으로 나타났다.

窒素肥種別로는 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 施用時 0.57 mole, (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO 施用時 0.50 mole, 그리고 KNO<sub>3</sub> 施用時는 0.19 mole의 炭素가 各記 消耗되어 硫安과 尿素 施用時는 Energy 利用量이 비슷하게 높았으나 窒酸加里 施用時 Energy 消耗는 前者의 約 1/3 程度에 不

過한 것으로 보여진다. 그림 3에서도 역시 脫窒量이 增加할수록 炭素와 窒素의 Mole 比는 줄어지는 結果를 볼 수 있는데 卽 炭素 消耗量이 적을수록 N<sub>2</sub>O gas 發生量은 增加된다는 것을 알 수 있다.

Michealis-Menten의 酵素反應式에 의한 脫窒反應式을 有機物含量, 土壤溫度, pH變化 및 窒素肥料의 肥料量差異에 따른 N<sub>2</sub>O gas 發生量計算結果를 보면 그림 4와 같다.

먼저 有機物含量 1.0%인 土壤에 (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO 및 KNO<sub>3</sub> 施用時 施肥量에 따른 N<sub>2</sub>O gas 發生量은 두 肥種 모두 2次曲線에 의하여 最高發生量이 計算될 수 있었으며 또한 두 肥種間 V/2 値는 (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO의 경우 550 N<sub>2</sub>O μg / 100 g 土壤이었는데 KNO<sub>3</sub> 施用時 V/2 値는 1100 N<sub>2</sub>O μg / 100 g 土壤이었다. 이를볼때 (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO 施用時보다 KNO<sub>3</sub> 施用에 의한 脫窒量이 많음을 알 수 있었다. 그리고 有機物含量 3.0%인 土壤中 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 KNO<sub>3</sub> 施用時 N<sub>2</sub>O gas의 豫想發生量을 보면 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 施用時 V/2 値는 490 N<sub>2</sub>O μg / 100 g 이나 KNO<sub>3</sub> 施用時는 一直線에 놓여 있어서 KNO<sub>3</sub> 施肥量이 增加하면 할수록 脫窒量은 無限히 增加되는 結果를 보였다.

以上에서 調査된 結果를 綜合檢討해보면 N<sub>2</sub>O gas 發生에 의한 脫窒作用 量은 有機物이 적은 土壤보다 많은 土壤中 土壤溫度는 20°C, pH는 6.0 그리고 尿素나 硫安施用보다 KNO<sub>3</sub> 施用時 脫窒能이 높고 量도 많은 結果를 보였다. 그런데 N<sub>2</sub>O gas 發

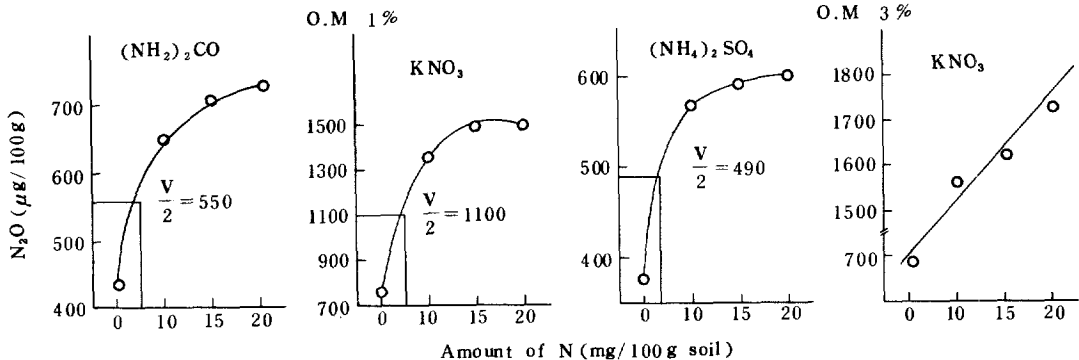


Fig. 4. Comparance of denitrification reaction on the different contents of organic matter in soil with different kinds and amounts of nitrogen fertilizer by Michealis-Menten's equation,  $[V = V_{max} \cdot CN / (C + Kc) (N + Kn)]$ . Where, V=amount of total denitrification, C=amount of total carbon in soil, N=amount of NO<sub>3</sub>, Kc=1.25, Kn=0.99 Vmax=highest concentration of NO<sub>3</sub>-N.

생에 必要한 Energy 消耗量을 알아보기 위하여  $N_2O$  gas 1 mole 發生에 必要한 炭素源의 消耗量은 有機物含量이 많은 土壤에서보다 적은 土壤에서 많이 要求되었고 窒素肥種別로는  $KNO_3$  施用보다 尿素나 硫酸施用區에서 많은 結果를 보였다.

그리고 Michealis-Menten 의 酵素反應式에 의한 脫窒量의 理論的 計算에 의한 生成量도 實生成量과 類以한 結果를 보였다.

이와같이 湛水狀態의 논土壤에서 有機物の 集積과 無機養分の 濃度は 土壤環境要因과 더불어 土壤微生物의 活性에 크게 影響함을 알 수 있었다. 土壤中 脫窒作用에 關係하는 微生物의 種類와 數는 他微生物과 比較하여 相對的으로 적음에도 불구하고 窒素肥料의 經濟的面에서 脫窒作用과 脫窒量은 대단히 중요한 役割을 하는것은 잘 알려진 事實이다.

Focht<sup>8)</sup> 의 研究에 의하면 湛水土壤中  $N_2O$  gas 生成에 미치는 土壤環境因子中 土壤溫度變化에 의한 影響은 크지 않으나 pH 變化 및 土壤의 通氣性은 매우 크다고하였다.

Burford 等<sup>4)</sup> 은 土壤有機物含量이 相異한 17個 土壤을 供試하여 室內에서  $N_2O$  gas 의 發生量을 調査한 結果 土壤有機物中 水溶性有機物の 濃度は  $N_2O$  gas 發生量과 高度의 有意性 있는 正相關關係( $r = 0.999^{***}$ )를 보였으며 易分解性有機物과는 多少 낮은 有意性( $r = 0.77^{**}$ )을 보였다고 하였다.

李等<sup>3)</sup> 의 研究結果에 의하면 土壤有機物含量 1.5%인 土壤과 3.81%인 논土壤을 供試하고 窒素施肥量을 달리했을 때  $N_2O$  gas 發生量은 有機물이 적은 土壤보다 많은 土壤에서 그리고 施肥量이 增加할수록 增加되는 結果를 보였다.

以上的 結果들은 논土壤의 水稻作에서 窒素肥料經濟面中 대단히 重要な 要素이므로 앞으로 보다 깊이 있는 研究가 實施되었으면 한다.

## 摘 要

湛水狀態의 論土壤中 有機物含量, 溫度, pH 窒素肥種 및 施肥量等을 달리했을때 脫窒作用과 脫窒量을 알고저 室內에서 恒溫試驗한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 湛水狀態의 論土壤에서 脫窒量에 關係가 큰 要

因은 土壤有機物含量 > 恒溫溫度 > pH價 > 窒素肥種 > 窒素施肥量의 順으로 컸다.

2.  $N_2O$  gas의 生成量은 土壤有機物含量 3.0%인 土壤에서 恒溫溫度 20°C, pH 6.0 일때  $KNO_3$  20mg/100土壤 施用區에서 가장 많았다.

3.  $N_2O$  gas 1 mole 生成하는데 消耗되는 炭素는 全體平均이 0.5mole 이었으며 炭素量이 第一 많이 要求되는 경우는 土壤有機物含量 1.0%인 土壤에서 硫酸 10mg/100g 土壤 施用時(1.06 mole)였으며 第一 적은 炭素要求의 경우는 有機物含量 3.0%인 土壤에서  $KNO_3$  20 mg/100g 土壤 施用時(0.13 mole)였다.

4. Michealis-Menten 의 酵素反應式에서 誘導된  $N_2O$  gas 의 V/2價는 有機物 1.0% 土壤에서  $(NH_4)_2CO$  施用時 550,  $KNO_3$  施用時는 1100  $N_2O \mu g/100g$  土壤이었고 3.0%인 土壤에서  $(NH_4)_2SO_4$  施用時는 490  $N_2O \mu g/100g$  土壤이였으며  $KNO_3$  施用時는 施肥量이 增加할수록 V/2價는 계속 增加되었다.

## 引 用 文 獻

1. Aulakh, M.S., D.A. Rennie and E.A. Paule. 1982. Gaseous nitrogen losses from cropped and summer-fallowed soils. Can. J. Soil Sci. 62: 187-196.
2. Blackmer, A.M. and J.M. Bremner. 1978. Inhibitory effects of nitrate on reduction of  $N_2O$  to  $N_2$  by soil microorganisms. Soil Biol. Bioch. 10: 187-191.
3. Brice, A.A., A.E.J. Eggleton, and S.H. Penkett. 1977. An important ground surface sink of atmosphere nitrous oxide. Nature. 268: 127-129.
4. Burford, J.R. and J.M. Bremner. 1975. Relationships between the denitrification capacities of soil and total water-soluble and readily decomposable soil organic matter. Soil Biol. Bioch. 7: 389-394.
5. Castignetti, D. and T.C. Hollocher. 1982. Nitrogen redox metabolism of a heterotrophic nitrifying-denitrifying *Alcaligenes sp* from soil. Appl. Environ. Microb. Oct. 923-928.
6. Delwiche, C.C. and B.A. Bryer. 1976. Denitrification. Annual Reviews of Microbiol. 30: 241-262.
7. Firestone, M.K. and J.M. Tiedje. 1979. Temporal change in nitrous oxide and dinitrogen from

- denitrification following onset on anaerobiosis. *Appl. Environ. Microbiol.* Oct. 673-679.
8. Focht, D.D. 1974. The effects of temperature, pH and aeration on the production of nitrous oxide and gaseous nitrogen-A zero-order kinetic model soil. *Soil Sci.* 118
  9. Gamble, T.N. M.R. Batlach, and J.M. Tiedje. 1977. Numerical dominant denitrifying bacteria from world soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 33: 926-939.
  10. Hadas, A.S. Feigenbanm, A. Feigin, and R. Rotnoy. 1986. Nitrification rates in profiles differently managed soil type. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 633-639.
  11. Hauck, R.D. 1979. Methods for studying N-transformation in paddy soils: Review and comments. 73-94 in *Nitrogen and Rice*, IRRI.
  12. Keeney, D.R., I.R. Fillery and G.P. Marx. 1979. Effect of temperature on the gaseous nitrogen product of denitrification in a silt loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 1124-1128.
  13. 李相奎, 金承煥, 朴俊奎. 1986. 논土壤의 脫窒作用에 관한 研究 第Ⅱ報. 有機物の 種類 및 窒素肥料施肥量 差異가 脫窒에 미치는 影響. *韓土肥誌* 19(1): 76-82.
  14. Misra, C., D.R. Nielsen and J.W. Biggar. 1974. Nitrogen transformation in soil during leachin II. Steady state nitrification and nitrate reduction. *Soil Sci. Soc. Am J.* 38: 294-302.
  15. Nommik, M. 1959. Investigations on denitrification in soil. *Act. Agri. Scand.* 6: 195-228.
  16. Wiljer, J. and C.C. Delwiche. 1954. Investigation on the denitrification process in soil. *Plant and Soil.* 5: 155-169.