

질소순환에서 미생물의 역할

한국과학기술원 유전공학센터 유익동

1. 서론

자연계에 있어서 질소는 대기중의 분자상질소 (N_2)를 비롯하여 초산, 암모니아와 같은 무기태질소, 단백질, 핵산 등의 유기태질소 등 다양한 형태로 존재하며 생물권내에서 흡수, 고정, 대사, 분해되는 등 다양한 순환을 거듭하고 있다.

대기중의 분자상질소는 *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Clostridium*, Blue-green algae 및 광합성세균 등에 의해 고정되어 암모니아의 형태로 환원된다. 한편 대부분의 식물들은 초산이나 암모니아 형태의 질소를 흡수 동화하여 핵산, 단백질을 만들고 이들 구성물은 사후 암모니아로 재분해된다. 또한 동식물의 유체내지는 배설물들도 각기 분해되어 암모니아의 형태로 변화되는데 이와같은 일련의 질소순환(nitrogen cycle)은 *硝化세균*, *脫窒세균* 내지는 질소고정균 등 대부분의 미생물에 의해 크게 지배를 받고 있다.

2. 지구상에 있어서의 질소순환

지구화학적 규모에서 본 질소순환의 경로 및 질소 balance의 양적 관계를 Fig. 1에 나타냈다(1).

즉 Fig. 1에서 보는 바와 같이 자연계에 존재하는 질소는 지곡(primary rock)내에 139×10^{16} 톤으로 97.8% 이상이 함유되어 대부분을 차지하고 있고 나머지는 지표의 퇴적물에 0.2% (4×10^{14} 톤), 대기중의 분자상 질소로 2% (3.9×10^{15} 톤)를 차지하고 있다.

한편 육지와 해양중에 24×10^{12} 톤의 질소가 함유되어 있어 이들이 대기중의 질소분자와 함께 생물

권내에서 질소순환에 이용되고 있는 것이다.

한편 atmosphere-land-sea pool 사이에서 순환되어지는 질소중 생물권내에서의 고정질소를 보면(2, 3), 생물질소고정량이 연간 175×10^6 톤, Harber-Bosch법에 의한 공업적 질소 고정량 30×10^6 톤, 그밖에 공기중의 방전 10×10^6 톤, 연소 20×10^6 톤, 성층권내에서의 오존작용 15×10^6 톤 정도가 고정되어 진다고 추정된다. 반면 질소의 소비량을 보면 육지 및 해양에서의 휘산, 탈질량이 210×10^6 톤 용탈 및 유실량이 15×10^6 톤, 침전작용에 의한 소실량이 15×10^6 톤으로 생물권내에서의 질소는 공급과 소비가 대체적으로 balance를 유지해 가며 순환된다.

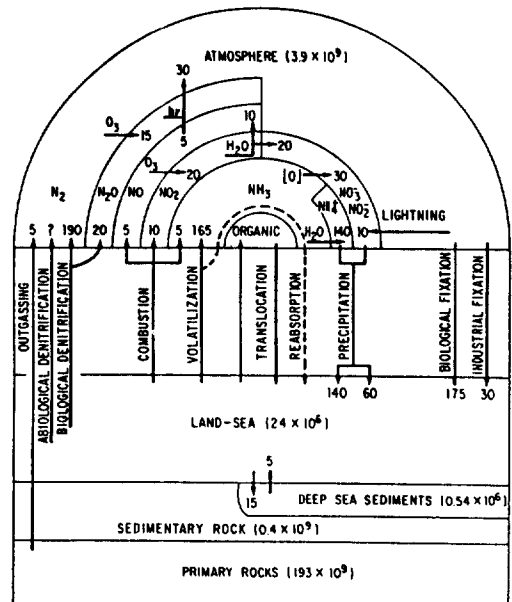


Fig. 1. Global cycling of nitrogen. Figures are millions of metric tons¹⁾.

3. 토양 및 수계(水界) 질소(4)

토양중에 있어서 질소 함유량과 존재형태는 水界에 비하여 매우 넓은 폭으로 변동하고 있으며 그 변동은 토양 유기물함량에 의해 크게 좌우된다. 일반적으로 경작지 토양에서의 질소함량은 0.02~0.5% 정도이며 그중 약 50%는 부식물질중의 결합형 아미노산이나 약간의 아미노당의 형태로 존재한다. 또 토양질소중 무기태질소로는 N_2O , NO , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- 태질소의 형태로 존재하는데 N_2O 와 NO 는 gas의 형태로 극미량밖에 존재하지 않고 나머지가 토양용액중 이온형태로 존재하며 식물에 흡수된다. 그러나 이 량은 총 질소의 2% 미만이며 나머지는 유기태질소의 형태로 존재하며 토양유기물의 5~6%를 차지한다. 그러나 이들 토양질소는 토양입자에 강하게 흡착되어 있지 않고 물리적으로만 결합되어 있어 토양으로부터 용탈되기 쉽다. 따라서 용탈, 유실되는 토양 질소는 하천이나 호수로 흘러 들어가게 된다.

한편 水界에서의 질소분포양상을 보면 질소 gas는 표면수에는 어느정도 포화에 가깝게 용존되어 있으나 심층부에는 과포화상태로 용존되어 있는 경우가 많다. 또 무기태질소의 량은 계절에 따라 약간씩 변동하나 대부분은 토양으로부터의 유입량

과 강우량에 의해 결정된다. 호수의 표면수에는 약 0.05~0.1mg/l의 미량으로 암모니움염이 존재하나 하층부에는 퇴적물중의 유기물에 의해 오염되어 0.1~1mg/l의 암모니움염이 축적되어 있다. 한편 초산염은 표층부에서는 식물프랑크톤에 의해 이용되고, 혐기적 조건인 곳에서는 탈질되어 일반적으로 그 농도는 아주 낮다. 표면수중의 유기질소는 전용존질소의 50~75%를 점하고 있으나 그 대부분은 단백질, 혹은 유리아미노산의 아미노기로 존재한다. 해양중의 질소함량은 그다지 연구되어 있지 않으나 遠海에는 약 0.45mg/l의 질소가 함유되어 있으며 近海나 河口에는 그보다 많은 량의 질소가 함유되어 있다. 그중 약 95%는 용존태의 질소 gas로 존재하며 나머지중의 65%는 아초산이나 초산염으로 존재한다.

4. 질소순환과 미생물의 역할

이상과 같은 대기권, 육상권 및 수권에서의 질소순환은 대부분이 미생물에 의해 이루어지는데, 미생물과 질소화합물간의 중요한 순환과정은 다음과 같은 4가지 경로를 거치게 된다. 즉,

硝化作用(nitrification) : 암모니아가 아초산, 초산으로 산화

硝酸還元(nitrate reduction) : 초산이 아초산, 암모니아로 환원

脫窒作用(denitrification) : 아초산이 질소 gas로 환원

窒素固定(nitrogen fixation) : 질소 gas가 암모니아로 환원

이상의 4가지 경로는 주로 통기성 또는 생태계 내의 가급태질소의 함량과 서식하는 미생물의 종류에 따라 좌우된다. 이상과 같은 과정을 중심으로 진행되는 질소 cycle(5)을 Fig. 2에 요약하였다.

1) 硝化作用(nitrification)

질소를 함유한 유기물들의 최종 분해산물은 암모니움염을 형성하는데 이 암모니움염은 미생물내지는 식물에 의해 흡수 이용되게 된다. 초화작용이라 함은 이와같은 암모니아염이 gram 음성균인 초화세균(nitrifying bacteria)에 의해 초산염으로 산화되는 과정을 말하며 다음과 같은 식으로

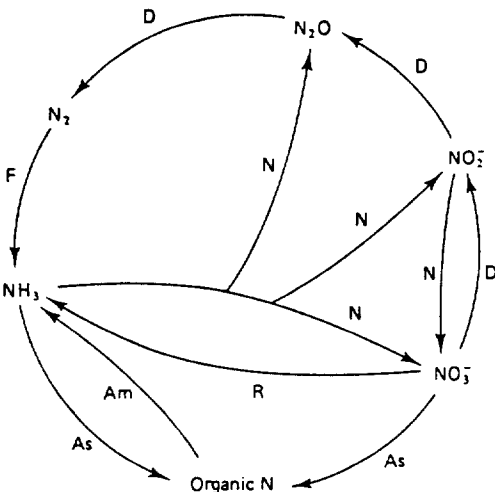
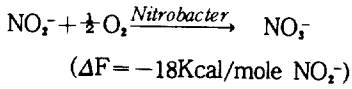
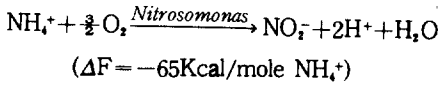


Fig. 2. The nitrogen cycle. For simplicity, most intermediates have been omitted⁵⁾. D = Denitrification; As = Assimilation; Am = Ammonification; N = Nitrification; F = Nitrogen fixation; R = Dissimilatory nitrate reduction.

나타낼 수 있다.



즉 *Nitrosomonas*는 암모니아염을 아초산염으로, *Nitrobacter*는 아초산염을 초산염으로 변환시킨다. 이상의 균주 이외에도 해양에서는 *Nitrosocystis* 및 *Nitrosococcus* 등이 초화작용에 관여한다고 보고되었다. 그러나 이때 아초산염이 초산염으로 진행되는 과정은 매우 급속히 진행됨으로 실제 아초산염의 양은 아주 낮은 수준이다. 이상의 균주는 편성호기성균이며 화학독립영양세균이므로 산화에 의해서 에너지를 얻고, 그것을 탄소고정에 이용한다. 특히 이상의 균주들은 pH 6 이하보다 낮은 pH에서는 硝化를 일으키지 않는다.

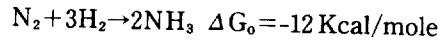
2) 硝酸還元과 脫窒作用

초산환원작용은 초화작용의 반대과정으로 초산을 아초산 또는 암모니아로 환원시키는 작용이다. 또 탈질작용은 초산 또는 아초산을 질소 gas로 변화시켜 방출시키는 작용을 말하며 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ 의 순으로 환원된다. 이때 관여하는 미생물로는 *Pseudomonas denitrificans*,

Micrococcus denitrificans 등을 들 수 있는데 이외에도 각 반응에 따라 Table 1에 나타난 각 균주들이 관여한다. 특히 탈질작용은 세계의 질소수지와 농업적인 측면에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 지구상 전육지 면적의 평균 탈질량은 22.5 kg/ha/年이라고 추정된다.

3) 窒素固定

대기중에는 약 80%의 분자상 질소가 존재하나 실제 작물은 이들 분자상의 질소(N_2)는 이용치 못하며 고정된 질소만을 이용한다. 질소고정경로는 2가지로 생각할 수 있겠다. 첫째는 현재 질소비료의 공업적 생산방법인 1913년에 개발된 Harber-Bosch법이다. 그러나 이 방법은 고압고온의 에너지를 필요로 할 뿐만 아니라 석탄, 석유 등의 화학 원료를 필요로 하는 다량의 활성에너지가 필수적이다.



둘째로는 생물학적 질소고정으로 다음과 같은 반응식에 의해 이루어진다. 생물 질소고정에 관여

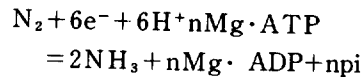


Table 2. Examples of nitrogen-fixing organisms⁶⁾

Table 1. Reactions of denitrification and dissimilatory nitrate reduction, and examples of the bacteria which use them⁵⁾

Maximum possible reaction	Species which use the reaction
$\text{NO}_3^- - \text{NO}_2^-$	<i>Thiobacillus thioparus</i> , <i>Lysobacter antibioticum</i>
$\text{NO}_3^- - \text{N}_2\text{O}$	<i>Achromobacter (Corynebacterium) nephrii</i> , <i>Aquaspirillum itersonii</i> , various pseudomonads
$\text{NO}_3^- - \text{N}_2$	<i>Paracoccus denitrificans</i> , <i>T. denitrificans</i> <i>Rhodopseudomonas sphaeroides</i> , <i>Alcaligenes eutropha</i> , <i>Hyphomicrobium</i> , <i>Pseudomonas</i> and <i>Halobacterium</i> sp.
$\text{NO}_2^- - \text{N}_2$	<i>Neisseria</i> and <i>Flavobacterium</i> sp.
$\text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$	<i>Vibrio succinogenes</i>
$\text{NO}_3^- - \text{NH}_3$	<i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>K. aerogenes</i> , <i>Campylobacter</i> sp.

- Blue-green bacteria
- Anabaena cylindrica*
- Gloeocapsa* species
- Phototrophic bacteria
- Rhodospirillum rubrum*
- Rhodopseudomonas capsulata*
- Strict anaerobes
- Clostridium pasteurianum*
- Desulfovibrio vulgaris*
- Obligate and facultative aerobes
- Rhizobium japonicum*
- Frankia alni*
- Klebsiella pneumoniae*
- Azotobacter vinelandii*
- Bacillus polymyxa*
- Mycobacterium flavum*
- Beijerinckia indica*
- Spirillum lipoferum*

Table 3. Data for a nitrogen balance on earth³⁾

	Area ha × 10 ⁶	KgN ₂ fixed per ha × yr	Metric tons per yr × 10 ⁶
Biological fixation			
legumes	250	55-140	14-35
non fields	1,015	5	5
rice fields	135	30	4
other soils and vegetations	12,000	25-30	30-95
marine	36,100	0.3-1	10-36
Industrial fixation			30
Atmospheric fixation			7.6
Juvenile addition			0.2
Denitrification			
terrestrial	13,400	3	43
marine	36,100	1	40
Loss to sediments			0.2

하는 질소고정 미생물은 대부분이 원핵생물에 한정되어 있으나 식물의 근권(rhizosphere), 엽권(phyllosphere), 토양 및 수권(hydrosphere) 등의 광범위한 생태계에 서식하고 있다. 질소고정에 관여하는 대표적인 미생물의 종류를 Table 2에 나타냈다(6).

미생물에 의한 질소고정량은 질소고정 미생물의 종류와 분포, 활성능, 환경조건 등에 따라 매우 다양하여 고정량을 추정하기에는 많은 어려움이 있다. 그러나 Quispel 등(3)의 추정치에 의하면 지구상에서의 연간 총고정량은 175×10^6 톤으로 농업적 질소고정량의 5-6배에 이르고 있다. 그중 농경지에서의 고정량이 90×10^6 톤, 두작작물에 의한 고정량이 35×10^6 톤으로 전체 생물질소고정량의 대부분을 차지하고 있다. 이들 생물 질소고정은

금후 농업적인 측면에서 매우 기대가 크다고 할 수 있겠고 그와 같은 이유로 현재 질소고정 관련 유전자(*nif*, *nod*, *hup* gene 등)의 연구가 활발히 진행되고 있다고 하겠다.

5. 결 론

이상으로 지구화학적 규모에서 본 총질소함유량 및 미생물에 의한 질소순환과 관련하여 기술하였다. 특히 질소는 탄소와 더불어 생물체의 필수 구성성분으로 주요할 뿐만 아니라 농업적 측면에서 본다면 인류의 식량공급에 결정적인 역할을 담당하고 있고, 이와같은 질소순환은 미생물에 의해 크게 지배를 받고 있기 때문에 금후의 연구성과가 크게 기대된다.

참고문헌

1. Burns, R.C. and R.W.F. Hardy: Nitrogen fixation in bacteria and higher plants. Springer-Verlag, New York (1975).
2. 中村道徳: 生物窒素固定, 學會出版センター(1980).
3. Quispel, A.: The biology of nitrogen fixation, North-Holland publishing Company, Amsterdam (1974).
4. Campbell, R.: Microbial ecology, 2nd ed. Blackwell Scientific Publications (1983).
5. Cole, J.A. and S.J. Ferguson: The nitrogen and sulphur cycles. Cambridge University Press (1988).
6. Gottschalk, G.: Bacterial metabolism, Springer Verlag, New York (1979).