

# 농업생태계 내 물질 순환 및 생물지화학적 모델의 이용



곽 유 리 나  
 서울대학교 농업생명과학연구원  
 /선임연구원  
 irieli00@snu.ac.kr

## 1. 머리말

영양소(원자, 이온, 분자)들이 무생물환경(공기, 물, 토양, 암석)과 생물체 사이를 끊임없이 순환되는 현상을 영양소의 순환(Nutrient cycle) 또는 생물지화학적 순환(Biogeochemical cycle)이라고 정의한다. 농경지(인간에 의하여 관리되어지는 작물 재배지 및 산림)는 지구 전체 면적의 40~50%를 차지하고 있으며, 인간이 농경지에 가하는 행위들은 농업 생태계 내 물질 순환의 균형을 깨뜨리고 있다.

본래 자연 생태계 내의 물질 순환은 평형 상태를 이루고 있었으나, 산업 혁명 이후, 화석 연료 사용에 의한 이산화탄소 배출의 증가와 비료 생산에 의한 인공적 질소 고정은 물질 순환의 평형 상태에 변화를 가져왔다. 생태계 내 물질 순환 중 한 단계의 순환 과정의 증가는 그 산물의 증가를 초래하며 그 결과, 지구 대기 내 온실 가스(greenhouse gas: GHG)가 급속도로 축적되어 지속적

으로 지구의 평균 온도를 높이고 있다. 이러한 온난화 현상은 최근에 우리 인류가 당면한 가장 시급한 환경 문제로 대두되고 있다.

배출되는 온실 가스 중 이산화탄소는 그 방대한 배출 규모 때문에 온난화의 주범으로 지목되고 있으며, 이산화탄소 배출의 가장 중요한 원인은 산업 혁명 이후 급속하게 증가된 화석 연료의 사용으로 알려져 있다(그림 1). 농업에서 발생하는 중요한 온실 가스는 메탄과 아산화질소로 알려져 있으며, 인간 활동으로 인해서 발생하는 메탄의 50%, 아산화질소의 60%가 농업 활동으로 인해서 발생되고 있다.

IPCC(2007)에 따르면 전 세계에서 배출되는 온실 가스의 14%가 농업 활동으로 인해서 발생되고 있으며, 최근에 농업에서 발생하는 온실 가스 배출량을 줄이기 위한 연구들이 진행되고 있다. 작물 재배 관리 방법(시비, 경운, 윤작, 수확 후 부산물 이용, 배수 및 물 관리) 및 축산 관리 방법(사료 관리, 분뇨 관리)을 개선함으로써

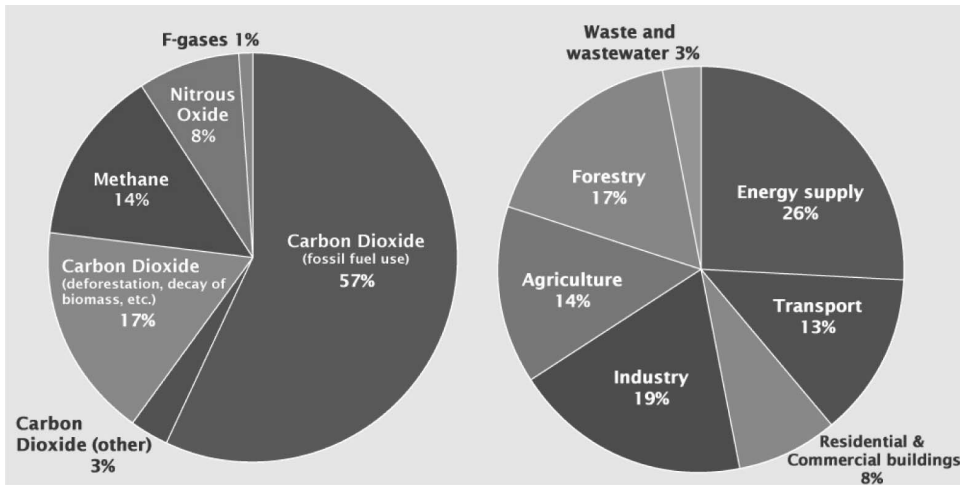


그림 1. 전 세계에서 배출되는 온실 가스의 종류 및 발생원 (출처: [www.epa.gov](http://www.epa.gov))

온실 가스 배출량을 줄일 수 있으며, 토양과 작물의 탄소 격리(carbon sequestration) 능력을 증가시켜 메탄과 아산화질소의 발생량을 감소시킬 수 있다.

지구 온난화 방지 협약 및 프로그램들을 성공적으로 수행하기 위해서는 온실 가스 배출량의 정확한 예측이 필요하다. 농업에서 발생하는 온실 가스 배출량을 예측하기 위해서 직접 농경지에서 발생하는 온실 가스의 배출량을 측정하는 방법, 각 온실 가스의 배출 계수를 이용하는 방법 및 모델을 이용하는 방법 등이 사용되고 있다. 그 중에서도 생물지화학적 모델(biogeochemical model)은 작물 재배 시스템과 연관시켜 다양한 생물지화학적 반응에 영향을 받는 온실 가스의 싱크-소스 변화량을 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있어, 최근에 활발한 연구가 진행되고 있다.

## 2. 농업 생태계 내 물질 순환

### 2.1 탄소 순환

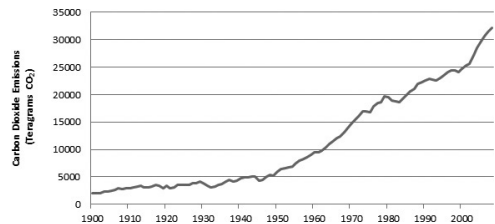


그림 2. 1900년 이후 이산화탄소 배출량의 추이 (출처: [www.epa.gov](http://www.epa.gov))

산업 혁명 이후 화석 연료의 사용이 급격하게 증가하였고, 화석 연료의 연소에 의해 발생하는 이산화탄소의 양도 급격하게 증가하였다. 2008년 이산화탄소 배출량은 1900년과 비교하여 16배 증가하였으며, 1990년과 비교하여 1.5배 증가하였다(그림 2).

대기 중의 이산화탄소는 바다의 표층수에 녹아 식물성 플랑크톤에 의해 생물학적 탄소 고정 작용으로 순환되고 나머지는 물리적인 현상으로 심해로 가라앉아 탄소가 바다깊이 축적되는데 이 양은 대기 중 탄소량의 55배에 이르는 40,000 Gt으로 추정하고 있다. 토양 속에

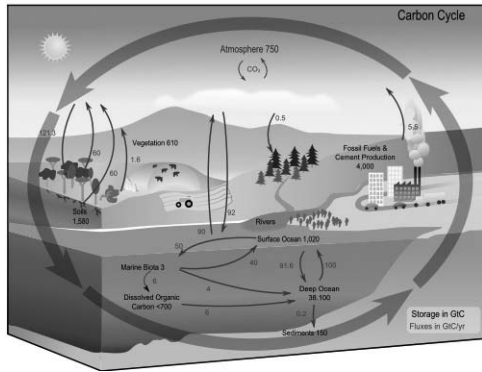


그림 3. 생태계 내 탄소 순환  
(출처: <http://ko.wikipedia.org>)

는 1,580 Gt의 탄소가 매장되어 있고, 식물체에는 610 Gt의 탄소가 저장되어 있다.

Wisniewski and Sampson(1993)은 육상 생태계에서 연간 탄소 배출량이 연간 탄소 흡수 고정량보다 35.7%가 많으며 이산화탄소의 농도가 2배로 증가하면 연간 탄소 배출량이 연간 탄소 흡수량보다 69%나 많아져 탄소 배출량과 흡수 고정량의 차이가 더욱 커질 것으로 추정하였다. 그러나 이산화탄소가 증가하여도 농업 생태계 내 알맞은 식생 관리를 통하여 탄소 배출량을 줄이고 탄소 흡수 고정량을 증가시킬 수 있다.

기존의 연구들에서 이산화탄소 농도 증가에 따른 작물의 생산성 향상 효과는 거의 인정되었다. 따라서 화석 연료의 연소 때문에 대기 중 이산화탄소의 농도가 증가하면, 그 증가된 이산화탄소 때문에 식물의 흡수 고정량도 증가하여 대기 중 이산화탄소 농도 증가를 완화시킬 수 있을 것으로 생각된다.

최근 농업이 기후 변화 완화에서 중요한 역할을 할 수 있다는 것은 많은 연구를 통해 밝혀지고 있다. 그 중에서도 토양의 탄소 격리 효과는 매우 큰 것으로 알려져 있다. 지난 50년간 과도한 화학 비료와 에너지-자본 집

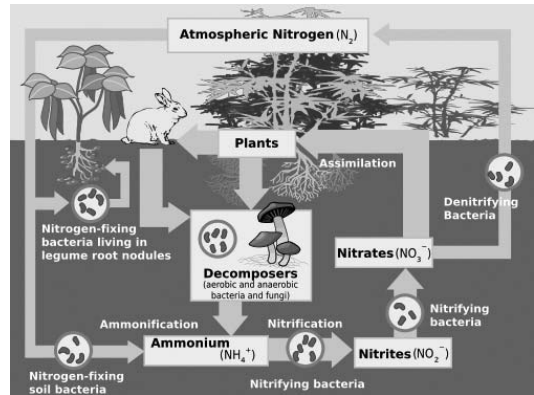


그림 4. 농업 생태계 내 질소 순환  
(출처: <http://ko.wikipedia.org>)

약적 생산 방식은 토양 유기물의 손실을 초래했으나, 퇴비, 작물 잔존물의 농경지 환원, 보전 경운, 무경운, 토양 식생 피복, 윤작 등 재배 관리 방법의 전환을 통하여 농경지 내 탄소 함량을 증가시키고 대기 중 온실 가스 농도 증가를 완화시킬 수 있다.

## 2.2 질소 순환

1890년부터 1990년의 100년간 생태계 내 식물에 흡수 가능한 질소량은 1.3억 톤에서 2.8억 톤으로 약 2배 정도 증가한 것으로 예측하고 있으며 (Galloway and Cowling, 2002), FAO 통계에 의하면 1961년에서 2000년까지 농경지 면적은 거의 변화가 없음에도 불구하고 곡류 생산은 9억 톤에서 20억 톤으로 2배 이상 증가하였다. 농경지에 화학 비료를 투입한 것이 이 증가의 가장 큰 원인이라고 할 수 있다.

대기 성분 중 약 80%를 차지하고 있는 질소는 자연 생태계인 대기, 물, 토양, 생물 영역에서 질소기체( $N_2$ ), 암모니아태 질소( $NH_4^+$ ), 암모니아( $NH_3$ ), 질산태 질소( $NO_3^-$ ), 아질산성 질소( $NO_2^-$ ) 등의 형태로 순환하고 있

다 (그림 4). 그러나 거의 대부분의 생물은 대기 중의 질소 분자를 이용할 수 없으며 미생물 등이 질소 고정으로 만들어 내는 질소 화합물을 이용한다.

20세기 초, 처음으로 암모니아를 합성해내면서 질소를 고정시키는 공업적 공정을 성공시켰다. 인공적인 질소의 고정은 곧바로 농업 혁명으로 이어져 작물 재배에 필요한 질소 화합물이 대량으로 공급되었다.

질소의 순환 과정 중 대기에서 고정화되는 질소량과 질소가스로서 대기 중으로 돌아가는 양은 원래, 자연의 기본적인 순환과정으로서 균형을 이루고 있었다. 그러나 질소 비료를 농경지에 공급하면서 이 균형이 깨졌고, 농업 생태계 내 여러 가지 문제점이 발견되고 있다.

현재 농경지에 사용하고 있는 질소 비료의 대부분은 작물이 흡수하지 못한 채 토양에 잔류하게 된다. 비가 내리면 용탈되어 지하수 오염 및 하천의 부영양화 현상을 일으킨다. 또한, 토양 미생물에 의해 온실 가스인 아산화질소를 발생시키고, 광화학 스모그와 산성비의 원인이 되는 산화질소와 이산화질소를 발생시킨다. 대기 중 질소는 토양 내 질소와 밀접한 관계를 가지고 있고, 토양 내 질소가 대기로 방출된다는 것은 작물이 이용할 수 있는 질소량이 감소된다는 것이므로 농업적인 측면에서 큰 손실이라고 할 수 있다.

농업 생태계 내 질소 부하 문제를 해결하기 위해서는 재배 후 토양 내 질소 잔유량이 극소화될 수 있는 질소 비료의 적정량 사용이 우선되어야 한다. 그리고 작물의 질소 이용 효율을 높일 수 있는 시비법의 개발과 윤작, 피복 작물의 도입 등 작물 작부 체계의 검토가 필요하다.

### 3. 농업 생태계에서 배출되는 온실 가스

#### 3.1 메탄(CH<sub>4</sub>)

메탄은 이산화탄소보다 지구 온난화에 미치는 영향이 21배나 더 큰 가스이며, 담수되어 있는 논이 가장 큰 발생원으로 알려져 있다. 논에서의 메탄 발생 과정에는 토양 내 메탄 생성 박테리아가 관여하며 메탄 생성에 사용되는 기질과 환경적인 요인의 영향을 받는다. 토양 유기탄소는 메탄 생성에 사용되는 기질이 되며 토양 유기탄소는 식물체 지상부 및 지하부가 고사하여 토양으로 되돌려지거나 퇴비 또는 녹비가 토양에 투입되는 양에 따라 변화한다. 환경적인 요인에는 토성, 기상 환경과 재배 관리법 등이 포함된다.

IPCC의 보고에 의하면, 전 세계적으로 논에서 발생하는 메탄의 양은 33-49 Tg으로 추정되며 논에서 발생하는 메탄의 배출량은 각 나라 별로 큰 차이를 보였다 (IPCC, 2000). 이는 메탄 발생량이 벼 재배 시기, 재배 기간 동안의 물 관리 및 유기질 비료의 사용에 큰 영향을 받기 때문이다. 전 세계적으로 논에서 발생하는 메탄의 배출량이 가장 큰 48개국의 메탄 배출량을 조사한 결과, 인도와 중국에서 가장 많은 양의 메탄이 발생하였으며 일본은 10번째, 우리나라는 12번째로 높은 메탄 배출국이었다.

논에서 발생하는 메탄의 배출량을 억제하기 위한 여러 가지 연구들이 진행되고 있다. 그 중에서도 논에 지속적으로 물을 대는 방법 대신 생장기 중반에 물을 빼논을 건조시키는 방법이 쌀 수확량을 손실시키지 않고 메탄 억제에 큰 효과가 있음이 확인되었다.

### 3.2 아산화질소( $N_2O$ )

아산화질소는 지구 온난화에 미치는 영향이 이산화탄소보다 310배나 더 큰 온실 가스이며, 대부분 농경지에 인위적으로 투입된 질소 비료의 산화와 환원 과정에서 생성되는 중간물질로 주로 밭 토양에서 많이 발생된다. 아산화질소의 발생 과정은 토양 내 미생물이 이용 가능한 암모니아태 질소 및 질산태 질소의 양에 영향을 받으며, 토양 내 질소 기질의 양은 투입된 화학 비료 및 가축 분뇨, 녹비 등 유기질 비료의 양에 따라 좌우된다. 그 외에도, 토양 유기 물질(soil organic matter)의 무기화 과정에서 아산화질소가 발생되기 때문에 오랜 기간 유기 물질이 축적된 산림이나 초목지에서 발생하는 아산화질소의 양도 많다.

Mosier et al. (1998)는 축산 및 농경지에서 직간접적으로 발생하는 아산화질소를 전부 포함하여 전 세계 농업 시스템에서 발생하는 아산화질소 배출량을 6.3 Tg으로 예측하였으며, 그 중 농경지에서 직접적으로 발생하는 아산화질소 배출량은 2.1 Tg이었다. 농경지 내 화학 비료 사용량의 증가가 대기 중 아산화질소 농도 증가의 가장 큰 원인으로 알려져 있다. 앞으로 개발도상국에서의 질소 비료 사용량은 증가할 것으로 예상되며 대기 중 아산화질소의 농도 역시 계속 증가할 것으로 예상된다.

농경지에서 직접적으로 발생하는 아산화질소 배출량을 예측하기 위하여 IPCC에서는 배출 계수를 사용하고 있다. IPCC에서는 토양에 투입한 질소량의 약 1.25%가 아산화질소로 배출된다고 예측하고 있다 (IPCC, 2000). 그러나 최근 연구 결과에 따르면 작물의 종류, 기상 환경, 비료의 종류와 재배 방법에 따라서 실제 배출 계수의 차이가 크며 고정된 배출 계수만을 이용한 배출량 예측 방법은 오차가 커질 수 있다는 문제점이 있다. 현재

각 국에서 작물별, 토양별, 질소 비료 종류별, 재배 방법별로 분류하여 배출 계수를 산출하여 고유의 국가 배출 계수를 개발하려는 노력이 진행되고 있다.

## 4. 농업 생태계 내 물질 순환 예측을 위한 생물지화학적 모델

### 4.1 생물지화학적 모델

농업 생태계 내 물질 순환은 작물, 기상 환경, 토양 환경 및 인간 활동(시비, 관개, 경운, 피복 등) 등 다양한 요인들에 의해 영향을 받는다(그림 5). 농업 생태계 내 질소 순환의 경우, 생물지화학적 모델을 이용하여 예측하는 방법이 토양에 투입되는 질소량만으로 아산화질소 배출량을 예측하는 방법(배출 계수 이용법)보다 많은 장점을 가지고 있다.

생물지화학적 모델은 생태계 내 물질 순환에 관여하는 여러 가지 생물지화학적 반응들을 포함하기 때문에 여러 가지 요인들의 변화가 농업 생태계 내 물질 순환에 미치는 영향을 예측할 수 있다. 생물지화학적 모델을 이

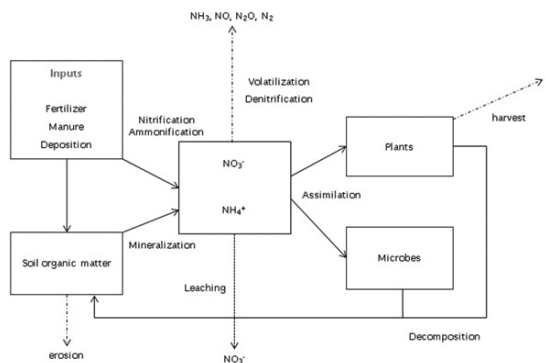


그림 5. 생물지화학적 모델을 이용한 농업 생태계 내 질소 순환 예측

용하여 기초 시나리오 뿐 만 아니라 기상, 토양, 재배 환경 등 복수의 요인을 변화시킨 시나리오에 따른 온실 가스 배출량 또한 예측할 수 있다.

최근에는 생물지화학적 모델을 이용하여 국가별 온실 가스 인벤토리를 구축하는 연구들이 진행되고 있다. 생물지화학적 모델을 이용한 온실 가스 배출량 예측의 오차를 줄이기 위해서는 정확하고 신뢰성 있는 기상 환경, 토양 환경 및 재배 관리 정보의 수집이 필요하다. 또한, 실제 측정치를 바탕으로 하여 모델의 예측 능력을 실증하는 과정을 거친 후에 실제 농경지에서 발생하는 온실 가스 배출량 예측에 사용되어야 한다.

현재까지 농업 생태계 내 물질 순환을 예측하기 위하여 다수의 생물지화학적 모델이 개발, 사용되어 왔다. 각 모델들은 다양한 관점에서 농업 생태계 내 생물지화학적 반응에 접근하고 있으며, 각기 다른 지역, 작물, 재배 관리 시스템에서 보정되었기 때문에 각 모델들마다 다른 특성을 가지고 있다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 생물지화학적 모델로는 DAYCENT와 DNDC가 대표적이다.

## 4.2 DAYCENT

DAYCENT는 생물지화학적 모델인 CENTURY를 변형시킨 모델이며 대기-토양-작물의 탄소, 영양소, 가스의 교환을 예측할 수 있다. DAYCENT는 작물 기관 내 탄소 할당에 따른 작물 생육, 토양 유기 물질 분해, 영양소 무기화, 질산화 과정과 탈질화 과정에 따른 아산화질소의 발생 예측 서브 모델들로 구성되어 있다. 이 모델의 장점은 필요한 입력 데이터가 간단하여 비교적 수집하기 쉬우며, 다수의 국가 및 농업 시스템에 적용되어 사용되고 있다는 점이다. 2005년부터 미국에서는 국가

온실 가스 인벤토리 구축을 위하여 농경지 및 목초지에서 발생하는 아산화질소 배출량을 예측하는데 사용되고 있다.

## 4.3 DNDC

DNDC는 Denitrification and Decomposition의 약자이며 농업 생태계 내 작물 생육, 토양 탄소 축적, 온실 가스 배출, 질산태 질소 용탈을 예측할 수 있는 모델이다. 1990년대 처음으로 농경지에서 발생하는 아산화질소 배출량을 예측하기 위하여 개발되었고, 이후 농경지 이외에 산림, 습지 및 축산 시스템 내 물질 순환을 예측할 수 있는 시리즈 모델들이 개발되었다. DNDC는 먼저 기상, 토양, 작물 재배 데이터를 이용하여 토양 환경 인자들(온도, 수분 함량, pH, 산화환원전위, 기질 농도)을 예측하고, 토양 환경 인자들에 의하여 질산화, 탈질화, 발효 과정 등 미생물 활동을 예측하게 된다. 이 모델의 장점은 토양 환경과 미생물 활동을 연계시켜서 연속적인 탈질화 과정의 예측이 가능하며, 농업 재배 시스템에서 이루어지는 대부분의 재배 관리 방법들(시비, 경운, 관수 등)의 적용이 가능하다는 점이다. 유럽과 뉴질랜드에서는 각 나라별 농업 시스템의 특성에 맞춰서 개량되어 사용되고 있으며, 최근에는 작물의 최적관리방안(BMP: Best Management Practice)에 대한 정보를 제공하는데 이용되고 있다.

## 5. 마치면서

인간 활동으로 인하여 자연 생태계 내 물질 순환의 평형 상태가 깨어지면서 탄소와 질소의 축적은 곧 대기 중 온실 가스 농도를 증가시키는 결과를 가져왔다. 농업은

생산 활동 과정에서 메탄과 아산화질소 등 온실 가스를 배출하여 기후 변화 가해자의 역할을 하기도 하지만, 농경지의 적절한 관리를 통하여 온실 가스 흡수원으로서 기후 변화 해결자의 역할을 할 수도 있다.

농업 생태계에서 발생하는 온실 가스 배출량을 억제 시키기 위해서는 과학적인 정보의 축적 및 연구 등이 선행되어야 하며, 농경지에서 발생하는 메탄과 아산화질소의 배출량에 영향을 미치는 요인들은 다양하고 불확실하므로 장기적이고 다각적인 전략이 필요할 것이다.

기후 변화에 대응하기 위해서는 농업에서 발생하는 온실 가스에 대하여 염려하고 대처할 필요가 있으며 아울러 생물지화학적 모델을 국내 농업 시스템에 적용, 개량하여 보다 정확한 국가 온실 가스 인벤토리를 구축하여야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Galloway, J.N. and Cowling, E.B., 2002. Reactive Nitrogen and The World: 200 Years of Change. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31:64-71.
2. IPCC, 2000. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/index.html>
3. IPCC, 2007. Climate Change 2007. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/spm.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/spm.html)
4. Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., and van Cleemput, O., 1998. Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52:225-248.
5. Wisniewski, J. and Sampson, R.N. (Eds), 1993. *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification of sinks and sources of CO<sub>2</sub>*. Kluwer, Dordrecht.

기획: 홍성구 [bb9@hknu.ac.kr](mailto:bb9@hknu.ac.kr)