

최 중
연구보고서

질소동위원소비 분석을 이용한 유기농산물
판별 기술 개발

The development of a technique to certify
organic produce using stable nitrogen isotope
ratio analysis

서울대학교

농촌진흥청

농림부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “질소동위원소비 분석을 이용한 유기농산물 판별 기술 개발”
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2004년 10월 14일

주관연구기관명 : 서울대학교
총괄연구책임자 : 노 희 명
세부연구책임자 : 노 희 명
연 구 원 : 류 순 호
연 구 원 : 이 상 모
연 구 원 : 윤 석 인
연 구 원 : 최 영 대
연 구 원 : 노 영 동
협동연구기관명 : 농촌진흥청
협동연구책임자 : 송 관 철
연 구 원 : 김 유 학
연 구 원 : 한 경 화
연 구 원 : 류 지 혁

요 약 문

I. 제 목

질소동위원소비 분석을 이용한 유기농산물 판별 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

증산 위주의 고투입 농업 과정에서 과다 투입된 화학비료와 농약은 토양의 염류 집적, 양분 불균형 초래, 토양 미생물 및 천적 감소 등의 생태계 교란, 수질 오염, 농산물의 안전성 문제 등을 야기하고 있다. 이러한 부작용을 극복하고 지속 가능한 농업을 위해서 선진국을 중심으로 다양한 대안이 모색되고 있다. 이러한 국제적 움직임에 부응하고 능동적으로 대처하기 위해 우리나라에서는 "친환경 농업육성법" 과 "동법 시행령"을 제정하여, 친환경 농업을 장려함은 물론 친환경 농산물에 대한 품질인증을 실시하여 고부가가치 농산물 생산을 유도하고 있다. 친환경 농산물 품질기준에 따르면, 농산물은 저농약 농산물(유기 합성 농약 시용기준의 1/2 이하 사용 및 화학비료 권장 시비량의 1/2 이하 사용); 무농약 농산물(유기 합성 농약 시용 금지 및 화학비료 권장시비량의 1/3 이하 사용); 전환기 유기 농산물(1년 이상 유기 합성 농약 사용 금지 및 화학비료 시용금지) 및 유기 농산물(3년 이상 유기 합성 농약 시용 금지 및 화학비료 시용금지)로 분류하고 있다.

친환경 농산물에 대한 품질인증시 심사 사항은 경영관리 심사(2년 이상 영농 자료에 대한 심사); 재배 포장 심사(토양 화학성의 개선 또는 악화 여부에 대한 심사); 재배방법 심사(화학비료와 유기합성 농약의 시용 여부에 대한 심사) 및 품질관리 심사(유통 농산물의 잔류 농약성분 분석)이다. 이러한 유기 농산물과 전환기 유기 농산물 인증에 있어서, 가장 핵심적인 심사 사항은 유기 합성 농약 과 화학비료 시용여부를 판별하는 것이다. 현재의 품질인증 심사 체계에서는 유기 합성 농약 시용여부를 심사하기 위해서 토양이나 작물체 중의 잔류 농약 성

분을 검사하는데, 그 기준은 농산물의 경우 농약 잔류량이 식품 의약품 안전청장 고시 기준의 1/10 이하로 명시되어 있다. 이에 반해, 화학비료 사용 여부는 영농 자료 심사와 토양 화학성 분석 등의 간접적인 방법으로 심사되고 있는데, 영농 자료는 영농인이 작위적으로 수정할 수 있고, 토양 화학성은 투입된 비료의 양에 의해 직접적으로 영향을 받는 성질이지만, 투입된 비료의 종류(화학비료 또는 유기질 비료)와는 과학적인 인과관계가 없다는 문제점이 있다. 따라서 현재의 기술 수준에 의하면 화학비료 또는 유기질 비료 사용 여부를 객관적으로 판별하는 것은 불가능한 실정이며, 그에 따라 이들을 신뢰성 있게 측정할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

질소동위원소의 자연존재비 ($^{15}\text{N}/^{15}\text{N}+^{14}\text{N}$, $\delta^{15}\text{N}$, 단위 ‰)는 질소원에 따라 상이한 값을 갖는데, 예를 들면 대기 중 질소를 직접적인 원료로 생산되는 화학비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $-3.0\sim+2.0\%$ 로 분포하며, 가축 분뇨의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $+10.0\%$ 이상의 값을 갖는 것으로 보고되고 있다. 최근의 조사 결과에 의하면 퇴비의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $+10.0\sim+20.9\%$ 로 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 질소원에 따른 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이를 이용하여 지하수 중 질산태 질소의 오염원을 화학비료 또는 가축분뇨로 구분하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔지만, 이들 질소 동위원소 분석 기술들이 농경지에 화학비료를 사용하였는지 여부, 또는 작물이 화학비료를 사용하여 재배되었는지 여부를 판별하는 데 이용된 경우는 거의 없었다. 최근의 연구 결과에 의하면 화학비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 퇴비보다 낮기 때문에, 화학비료 사용시 옥수수의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 대조구 보다 낮은 반면, 퇴비 사용시 옥수수의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 대조구 보다 높은 것으로 조사되어 $\delta^{15}\text{N}$ 분석을 이용한 유기농산물 판별 가능성이 있는 것으로 판단된다. 하지만, 2000년 현재 작물 종류별 유기농산물 출하량은 채소류 (5733톤)가 다른 곡류 (275톤), 과실류 (624톤), 특작류 (1톤) 및 서류 (149톤)에 비해 월등히 많기 때문에 채소류를 중심으로 한 심도 깊은 연구가 요구된다. 또한 $\delta^{15}\text{N}$ 기술을 유기농산물 판별에 실제로 적용시키기 위해서는 다양한 토양, 작물종, 재배방법 (관수, 시비량, 생육시기) 및 퇴비의 종류에 따른 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이에 대한 체계적인 자료가 요구되며, 그 자료를 기준으로 실제 농작물 생산단계 또는 유통단계에서 유기농산물 여부를 판별할 수 있는 과학적인 방법을 설정하는 것이 필요하다.

앞으로, 유기농산물과 관련하여 국제적으로 지속적인 농업생산성과 식품의 안전성을 보장하기 위해 농업-환경-무역의 연계 논의가 강화되고 관련 국제규범이

제정됨은 물론, 코덱스(Codex)에서는 유기 농산물에 대한 기준을 제정함으로써 향후 유기 농산물의 국제교역이 확대될 전망이다, OECD에서는 13개 부분의 농업환경지표를 개발하여 각국의 농업 정책을 평가할 계획이다. 또한 WTO 출범으로 농산물 시장이 본격적으로 개방화·전면 경쟁화된 시점에서 세계 각국에서는 농산물 무역에서 유리한 입지를 구축하기 위해 자국 농산물의 품질 향상은 물론, 이를 보호하고 장려할 수 있는 다양한 품질 인증 체계 도입을 위한 연구 개발에 박차를 가할 것으로 예상된다. 현재까지 세계적으로 화학비료 사용 여부를 판별할 수 있는 기술 개발은 극히 미진한 상황이기 때문에, 현 시점에서 ^{15}N 분석 기법을 응용하여 화학비료 또는 유기질비료 사용 여부를 판별하는 기술은 대내적으로는 친환경 농업의 발전에 기여할 수 있음은 물론, 대외적으로 농산물 교역 시장에서 우리 농산물의 품질 우위를 과학적으로 뒷받침하는데 크게 기여할 수 있을 것이다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 유기농산물을 구분하는 요인 중에 하나인 화학비료의 사용 여부를 판별하기 위해 질소동위원소비를 이용하는 방법을 개발하는 데에 목적을 두고 있다. 질소질 화학비료를 토양에 사용하였을 때, 질소는 다양한 반응을 거쳐서 식물체로의 흡수, 토양미생물을 통한 유기물로 동화, 무기태질소로 잔류, 대기 또는 수계로의 손실 등의 다양한 경로를 거쳐 다양한 형태로 존재할 것이다. 이 중에서 토양과 식물체의 질소동위원소비를 분석하여 화학비료의 사용여부를 판별하는 기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 크게 식물체와 토양으로 나누어서, 화학비료와 퇴비를 시비량과 시비시기를 달리하는 등 다양한 방법으로 처리하였을 경우 각각이 토양과 식물체의 질소동위원소비의 값에 어떻게 나타나는지를 구명하였다.

먼저 작물체에 미치는 영향을 구명하기 위해서, 화학비료와 퇴비 사용에 따른 최종 수확 작물체의 질소동위원소비 값 차이를 조사하여 각각의 비료가 작물체의 질소동위원소비에 미치는 영향을 조사하였다. 시기별 흡수한 질소에 대한 정보를 얻기 위해서 작물체 부위별 질소동위원소비의 변이를 조사하였다. 질소질

비료의 종류뿐만 아니라 시비량에 대한 영향에 대해서도 조사하였다. 그리고 질소질 비료를 처리한 시기, 즉 기비와 추비를 달리하여 주었을 때 질소동위원소비에 미치는 영향을 조사하였다. 토양에 대해서는 관행농경지와 유기농경지에 대해서 토양 전질소, 무기태 질소의 질소동위원소비 차이를 조사하였다. 또한 각 농경지에 채취한 식물체의 질소동위원소비와 비교하여 상관관계를 구명하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구의 개발 기술은 친환경농산물 품질인증과 관련해서 법령 및 제도 개선 등 정책자료, 농업인 교육·지도 자료 및 산업체 기술이전, 국내외 특허 출원 등의 유형으로 활용 가능하다. 우선 법령 및 제도의 측면에서 현재의 친환경농산물 품질 인증 체계에서는 과학적으로 확인 불가능했던 화학비료 또는 유기질비료 시비 여부에 대한 판별 항목 및 그 방법을 보완하는 것이 가능하다. 농업인 교육·지도의 측면에서는 본 기술을 교육·홍보하여 바람직하지 못한 화학비료 사용을 사전에 억제할 수 있으며, 경작 기간 동안 품질인증 농가의 작물을 대상으로 화학비료 사용 여부를 모니터링하여 농업인 지도에 활용할 수 있다. 그러나 품질인증 기관에서 본 기술의 직접적인 활용을 위해서는 고가의 장비와 숙련된 전문가가 필요하고 관련 법령과 제도의 보완이 요구되기 때문에, 본 기술의 현장 적용에는 일시적인 애로사항이 있을 것으로 판단된다. 그러나 유기농산물 인증과, 때로는 검증이 필요한 경우의 표준화 작업을 위한 후속 연구와 다양한 인자의 효과를 정량화 할 수 있는 연구가 뒤따를 경우 이 기술을 활용한 다양한 분야의 접근이 가능하리라 판단한다. 다른 측면으로, 본 기술을 활용하는 품질인증 기관은 다른 기관에 비해 훨씬 신뢰성 있는 품질 인증 작업을 진행할 수 있으며, 실제 농산물을 거래하는 대형 유통업체의 경우 본 기술을 도입하여 자사 상품에 대한 별도의 검사를 통해 소비자에게 보다 믿을 수 있는 농산물을 공급하는데 활용될 수 있을 것이다. 특히, 국제간의 교역에 있어 농산물, 가공식품의 원료 및 완제품을 인증할 수 있는 길을 제공하고, 이러한 교역을 제어할 수 있는 장치가 마련된다는 점에서 국내 유기농 생산자와 소비자를 보호할 수 있다는 효과도 있다. 만일 가능하다면, CODEX 규격 친환경 또는 유기 축산의 인증에도 활용할 수 있으리라 예상한다.

SUMMARY

(영문 요약문)

In recent years, agriculture has entered a period of major change. With increasing interest in sustaining economically viable crop production with minimal environmental impacts, farming without synthetic fertilizers and pesticides (organic farming) has been widely adopted as an alternative agricultural practice. In line with this, market analyses currently show an increase in consumer demand for organic produce. With increased economic rewards of organic farming, consumer concerns have grown about whether organically labeled produce is truly grown with organic inputs. The use of synthetic pesticide can be investigated qualitatively by pesticide residue analysis of crops; however, the use of synthetic fertilizer is not detectable.

In general, composted manure, which is widely used as organic input, is significantly enriched in ^{15}N compared to fertilizer, and natural ^{15}N abundance ($\delta^{15}\text{N}$) of compost is higher than that of fertilizer. This $\delta^{15}\text{N}$ difference between the two N inputs suggests that isotopic N signature in crops and soils would differ between organic and conventional fertilization practices. To develop the $\delta^{15}\text{N}$ technique for detection of chemical fertilizer in crops and soil, we analysed the $\delta^{15}\text{N}$ of crops and soils receiving the two N sources (organic input and inorganic input).

The $\delta^{15}\text{N}$ of crops reflected the isotopic signature of N sources. In field survey from organically or chemically fertilized uplands and pot experiments of cabbage, crops receiving organic sources only had $\delta^{15}\text{N}$ higher than 9‰, while those receiving inorganic sources had $\delta^{15}\text{N}$ mostly lower than 6‰. Thus, crops having $\delta^{15}\text{N}$ values lower than 6‰ can reflect the fertilization of

inorganic N sources, suggesting that the $\delta^{15}\text{N}$ can be a potential marker of organic production of crops.

The $\delta^{15}\text{N}$ technique using stable nitrogen isotope ratio analysis proposed herein is novel in certifying organic produce, in that the $\delta^{15}\text{N}$ signature in crops and soils are indicative of the use of chemical fertilizer in agricultural produce. As a consequence, a domestic patent for this technique has been applied for this inventive $\delta^{15}\text{N}$ technique to certify organic produce versus conventional produce, and the PCT for an application for the international patent was also claimed.

CONTENTS

(영 문 목 차)

Chapter 1. Introduction	12
Chapter 2. Present situation in development of $\delta^{15}\text{N}$ technique	14
Chapter 3. Contents of study	16
Section 1. Theoretical background	16
1. Natural ^{15}N abundance	16
2. Use of natural ^{15}N abundance	17
Section 2. Objectives and scope	19
Section 3. Pot experiments	21
1. Methods	21
2. Biomass production and N uptake of Chinese cabbage	22
3. Chinese cabbage $\delta^{15}\text{N}$ with N sources	24
4. Chinese cabbage $\delta^{15}\text{N}$ with N application rate	26
5. Chinese cabbage $\delta^{15}\text{N}$ with timing of N application	27
6. Intra-plant variations in cabbage $\delta^{15}\text{N}$ with N application	29
7. $\delta^{15}\text{N}$ of inorganic soil-N with N application	34
8. Conclusions	37
Section 4. Field survey of organic versus conventional uplands	38
1. Introduction	38
2. Methods	39
3. Results	40
Section 5. Incubation study	48
1. Introduction	48
2. Methods	48

3. Results	49
Section 6. Analysis of organic produce in markets	52
Chapter 4. Degree of accomplishment of objectives and contribution to related field	54
Section 1. Degree of accomplishment of objectives in first year	54
1. Difference in plant $\delta^{15}\text{N}$ with N application	54
2. Use of intra-plant variation in $\delta^{15}\text{N}$ to certificate organic produce	54
3. Use of temporal variation in $\delta^{15}\text{N}$ to certificate organic produce	55
4. Difference in plant $\delta^{15}\text{N}$ with N application	55
Section 2. Degree of accomplishment of objectives in second year	55
1. Establishment of plant $\delta^{15}\text{N}$ technique to certificate organic produce as considering the effect factors	56
2. Establishment of soil $\delta^{15}\text{N}$ technique to certificate organic produce as considering the effect factors	56
3. Application and evaluation of $\delta^{15}\text{N}$ technique by analysis of organic produce in markets	57
Chapter 5. Scheme for application of $\delta^{15}\text{N}$ technique	58
Section 1. Needs for further study	58
Section 2. Applications to other study	58
Section 3. Suggestions for the applications	59
Chapter 6. Reference	60

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	12
제 2 장	국내외 기술개발 현황	14
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	16
제 1 절	이론적 배경	16
제 1 항	안정성 질소동위원소의 자연존재비	16
제 2 항	안정성 질소동위원소비의 이용	17
제 2 절	연구 목표와 내용	19
제 3 절	작물 재배 시험	21
제 1 항	연구 방법	21
제 2 항	배추의 건중량 및 질소 흡수량	22
제 3 항	질소질 비료의 종류에 따른 배추의 질소 동위원소비의 값 변화	24
제 4 항	화학비료와 퇴비의 시용량에 따른 배추의 질소 동위원소비의 변화	26
제 5 항	질소질 비료의 시비방법 및 시비시기에 따른 질소 동위원소비의 변이	27
제 6 항	질소질 비료의 시비에 따른 배추 부위별 질소 동위원소비의 변이	29
제 7 항	질소질 비료의 처리에 따른 토양 무기태질소의 동위원소비 변이	34
제 8 항	결론	37
제 4 절	현지 포장 조사	38
제 1 항	서 론	38
제 2 항	재료 및 방법	39

제 3 항	결 과	40
제 5 절	항온 배양 실험	48
제 1 항	서 언	48
제 2 항	실험방법	48
제 3 항	실험 결과	49
제 6 절	유통 농산물 조사	52
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	54
제 1 절	1차년도 연구목표 달성도	54
제 1 항	화학비료와 퇴비 시용에 따른 작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이 구명	54
제 2 항	최종 수확 작물체 부위별 $\delta^{15}\text{N}$ 값 변화 양상 차이를 이용한 유기농산물 판별 기술	54
제 3 항	작물체 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경시적 변화 경향을 이용한 유기농산물 판별 기술	55
제 4 항	유기농 및 관행농경지 토양 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이 구명	55
제 2 절	2차년도 연구목표 달성도	56
제 1 항	작물체 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화에 대한 영향 인자를 고려한 유기농산물 판별 정립	56
제 2 항	토양질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화에 대한 영향 인자를 고려한 유기농산물 판별법 정립	56
제 3 항	유통 농산물을 대상으로 한 $\delta^{15}\text{N}$ 방법의 적용 및 평가	57
제 5 장	연구개발결과의 활용계획	58
제 1 절	추가연구의 필요성	58
제 2 절	타연구에의 응용	58
제 3 절	기업화 추진 방안	59
제 6 장	참고문헌	60

제 1 장 연구개발과제의 개요

90년대까지 우리나라의 농업은 증산위주의 정책으로 비료, 농약 등 농업화학 물질의 사용량이 크게 증가하여 선진농업국의 단위면적당 평균사용량을 초과하는 수준이었다. 이러한 농업경영은 식물생산성과 안정성뿐만 아니라 수질오염, 토양오염 등 환경오염부하 문제를 가중시키고 있다. 농업환경에 관한 문제의 심각성은 1992년 리우에서 열린 국제지구환경회의에서 환경보전을 위한 세계 공동의 노력을 합의케 하였을 뿐만 아니라 이의 실천을 위한 일련의 움직임이 지금까지 이루어지고 있다.

2000년에 들어서는 이런 환경오염을 저감시키고 안전한 작물을 생산하는 친환경농업에 대한 관심이 증가하였다. 여기서 친환경농업의 궁극적 목표는 높은 생산성을 유지하면서 환경이나 국민보건에 미칠 수 있는 농업의 부정적 영향을 최소화 하고자 하는 농업체계이다. 미국 등 선진 농업국에서는 친환경농업기술 개발이 많이 진행되어 보편화되어 있고 많은 국가들이 자국의 농업생산성 유지를 위한 수단으로 기술개발에 적극적으로 서두르고 있다.

선진국에서는 환경을 보전하고 지속적인 농업을 위한 방법으로 친환경농업에 관심을 두고 있지만 우리나라에서는 아직 이에 대한 개념이 부족하고 안전하고 건강한 식품을 생산하는 농업으로 인식하고 있다. 이런 이유로 우리나라의 친환경농산물은 일반 농산물에 비해 가격적인 면에서 우위를 차지하고 있고 이에 대한 수요도 꾸준히 증가하고 있고 이에 맞추어 많은 농가가 친환경 농업으로 전환하고 있는 추세이다.

우리나라에서 이런 국내외적인 움직임에 발맞추어 “친환경 농업 육성법”과 “동법 시행령”을 제정하여 친환경 농업을 장려함은 물론 친환경 농산물에 대한 품질인증을 실시하여 고부가가치 농산물 생산을 유도하고 있다. 친환경 농산물 품질기준에 따르면, 농산물은 크게 네 가지로 분류하고 있다. 유기 합성 농업 시용기준의 1/2이하를 사용하고 화학비료는 권장 시비량의 1/2이하를 사용하는 경우 저농약 농산물, 유기합성 농약 시용을 금지하고 화학비료는 권장시비량의 1/3 이하를 사용하는 경우는 무농약 농산물, 1년 이상 유기합성 농약과 화학비료를 사용하지 않았을 때에는 전환기 유기 농산물, 3년 이상 유기합성 농약 및 화학비

료를 사용하지 않으면 유기 농산물로 분류한다.

친환경 농산물에 대한 품질을 인증할 때 심사 사항은 2년 이상 영농자료에 대한 경영관리 심사, 토양 화학성의 개선 또는 악화 여부에 대한 재배 포장 심사, 화학비료와 유기합성 농업의 사용여부에 대한 재배방법 심사, 유통 농산물의 잔류 농약성분 분석을 통한 품질관리 심사 등이 있다. 유기 농산물의 경우 다른 농산물과 구별되는 가장 큰 특징은 유기합성 농약과 화학비료를 사용하지 않았다는 것이고 이를 판별하는 것이 중요한 심사 사항이 된다. 현재의 품질 인증 심사 체계에서 유기합성 농약 사용여부는 토양이나 작물체의 잔류 농약 성분을 검사하여 구별할 수 있는데, 농약 잔류 기준은 농산물의 경우 식품 의약품 안전청 장 고시 기준의 1/10이하로 명시하고 있다. 화학비료의 경우는 영농 자료 심사와 토양 화학성 분석 등의 간접적인 방법으로 심사하고 있는데, 영농 자료는 영농인이 작위적으로 수정할 수 있고 토양 화학성은 투입된 비료의 양에 의해 직접적으로 영향을 받지만 투입된 비료의 종류와는 과학적인 인과관계가 없다는 문제점이 있다. 따라서 현재의 기술수준에 의하면 화학비료 또는 유기질 비료 사용 여부를 객관적으로 판별하는 것은 불가능한 실정이며, 그에 따라 이들을 신뢰성 있게 측정할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 화학비료 또는 유기질 비료의 사용 여부를 확인할 수 있는 기술로써 안정성 질소동위원소비를 이용하고자 한다. 유기질 비료의 경우 대표적으로 퇴비를 들 수 있는데, 퇴비는 부숙과정 중에 암모니아 휘산 작용에 의해 질소동위원소비가 높아지게 된다. 반면에 화학비료의 경우 대기 중 질소를 고정하고 이 때 동위원소비 변화가 거의 없기 때문에 퇴비보다는 낮은 값을 갖게 된다. 이런 차이로 두 질소질 비료를 처리하였을 경우 토양과 식물체의 질소동위원소비에 미치는 영향은 다를 것이다. 퇴비의 영향을 받은 경우 토양과 식물체의 질소동위원소비는 처리한 퇴비 수준의 값을 가질 것이고 화학비료의 영향을 받은 경우 토양과 식물체의 질소동위원소비는 화학비료 수준으로 퇴비의 영향을 받은 것보다 낮은 값을 가질 것이다. 이런 차이가 작물 생육과정에 유지된다면 본 기술은 유기농산물 검정 기준 중에 하나인 화학비료 사용여부를 확인하는 데에 사용할 수 있을 것으로 본다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

질소동위원소비를 이용하는 기술은 질소의 행동을 추적할 수 있다는 점에서 세계적으로 많이 이용되고 있다. 이에 대한 초기 연구는 Schoenheimer & Rittenberg (1929), Hoering (1955), Parwel, Ryhage & Wickman (1957), Wellman, Cook & Krouse (1968), Delwiche & Steyn (1970) 등에 의해 이루어졌다. 안정성 질소동위원소비의 변이는 식물체에 의해 이용된 질소원에 대한 정보를 제공할 수 있는 거의 유일한 기술이고 생태계에서 질소의 흐름을 추적할 수 있는 유일한 기술이라는 것을 인식할 때였다. 1970년대와 80년대의 연구는 집약 농업에서 처리한 화학비료의 행동을 추적하는 것(Kohl, Shearer and Commoner, 1971; Meints, Boone & Kurtz, 1975)과 질소고정식물의 질소고정능력을 측정하는 데(Amarger, Mariotti & Mariotti, 1977; Delwiche et al., 1979; Shearer & Kohl, 1986)에 이용되었다. 이와 같은 시기에 이와 같이 질소동위원소비를 이용하는 기술에 대해서 일부 비평이 있기도 했는데, 주요 내용은 질소가 생태계에서 동위원소비 분할이 일어날 수 있기 때문에 질소원을 확실하게 이해하는 데에 한계가 있다고 점이다. 즉, 동위원소비는 항상 신뢰성 있는 추적자로서 이용될 수 없다는 것이다 (Hauck et al., 1972). 가장 많이 검토되었던 문제는 질소의 양이 적은 경우 동위원소비에서 미세한 차이를 분석해 낸다는 것과 토양의 질소동위원소비가 다양하게 존재한다는 것이다. 이런 문제는 아직까지 검토되고 있고 연구되고 있는 문제들이다.

분자 또는 이온에서 한 원소 이상의 동위원소를 분석할 수 있게 된 최근의 발전(예를 들어 NO_3^- 에서 ^{15}N 과 ^{18}O 을 같이 측정)은 각 동위원소 원(source)에 대한 효과를 동위원소 분리(fractionation) 효과로부터 구분하여 이해할 수 있게 해 주었다 (Amberger and Schmidt, 1987; Aravena, Evans and Cherry, 1993). 이런 기술을 이용해서 Durka *et al.* (1994)은 강우에서 유래한 질산태 질소와 산림토에서 질산화 작용으로 유래한 질산태 질소가 지하수에 유입되는 정도를 구분하기 위해 시도했었다.

몇 년 전까지만 해도 세계적으로 몇몇 실험실에서만 안정성 동위원소 질량분석기를 보유하고 있어서 질소동위원소비에 대한 연구가 일부 진행되었다. 매우

신뢰할 수 있는 데이터를 제공하지만, 이런 결과를 얻기 위해 시료를 켈달 분해한 후 Rittenberg tubes에서 hypobromite와 반응시켜서 나온 N_2 를 분석하는 과정을 거치는데 좀 지루하고 많은 시간을 걸린다. 최근의 기기들은 Dumas 방법에 따라 건조된 시료를 연소시키는 방법에 기초하고 있다. 이것은 전에 비해 4배정도 빠르게 분석할 수 있게 해 주었다. 이런 기기들은 최근에 많이 보편화되고 있고 이를 분석해주는 분석기관도 생겨났다. 그래서 질소동위원소비를 이용하는 연구가 많이 이루어지고 있는 상황이다.

그러나 국내에서는 질소의 안정성 동위원소비를 이용한 연구가 아직 보편화되어 있지는 못하다. 본 서울대학교 토양학연구실에서는 다양한 분야에 질소의 안정성 동위원소비를 이용하여 연구하였는데, 중질소로 표지된 비료를 처리하여 질소질 비료의 행동을 연구한 내용, 자연동위원소비를 이용하여 $\delta^{15}N$ 의 변이를 알아본 동위원소 분할효과 연구 등이 있다.

질소원을 추적하는 연구는 앞에서 보아왔듯이 식물체와 토양 중 질소원 추적, 지하수의 질산태 질소원 추적 등이 있었다. 그리고 식물체 중 질소원 추적 연구는 대부분 질소고정 식물과 처리한 화학비료 사이의 질소를 구분하기 위해서 이용됐거나, 질소동위원소비를 이용하는 데에 있어서 중질소를 처리하여 이를 추적하는 것이 대부분이었다. 따라서 본 연구에서 개발한 안정성 질소동위원소의 자연존재비를 이용하여 유기농산물의 결정짓는 요소 중에 하나인 화학비료와 퇴비의 시용에 대해 구분한 연구는 세계적으로 아직 없었다고 판단된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 이론적 배경

제 1 항 안정성 질소동위원소의 자연존재비

지상에 존재하는 질소의 안정성동위원소는 ^{14}N 과 ^{15}N 이 있다. 지상에서 이 질소의 비율은 거의 일정한 값을 갖지만 다양한 반응과정을 거치게 되면서 그 비율은 변하게 되고 생물권내의 다양한 구성요소들에서 일반적으로 대기질소와 비교하여 1에서 2%의 편차를 가진다. 이 편차는 동위원소 분할효과의 결과이다. 비록 동위원소 분할효과에 의한 비율의 변화는 작고 이를 측정해 내기에는 어려움이 있지만, 질소동위 원소비율의 차이는 시료의 전처리에 주의를 하고 적당한 측정기기만 있다면 정확하게 측정할 수 있다. 질소 동위원소비의 차이는 다음의 두 가지 측면으로 이용된다. 첫째, 동일한 생성물에 대하여 두 가지 질소원의 상대적인 기여도를 측정하는데 사용되고, 둘째로 대사과정에 연관되는 동위원소 분할효과를 연구하여 대사과정에서 작용기작을 추론하는데 사용된다.

자연적으로 발생하는 수준에서 질소동위원소비율을 표현하기위해 사용하는 단위는 ‰ ^{15}N 또는 ‰ ^{15}N 이다.

$$\delta^{15}\text{N} = \frac{R(\text{sample}) - R(\text{standard})}{R(\text{standard})} \times 1000 (\text{‰})$$

‰ ^{15}N 에서 sample은 측정하려고 하는 시료의 대한 값이고 standard는 일반적으로 대기 중의 N_2 에 대한 값이다. 그리고 $R(\text{standard})$ 의 값은 0.3663%의 값을 가진다. R 은 다음과 같이 정의한다.

$$R = \frac{^{15}\text{N}}{^{15}\text{N} + ^{14}\text{N}} \quad \text{or} \quad R = \frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}}$$

유도식은 사용된 R의 정의에 따라 그 복잡함이 다르다. 처음의 것은 질소원의 확인이 목적일 때 더 유용하며, 후자는 질소분할효과가 목적일 때 더 유용하다. 자연 상태에서는 이 두 정의를 이용하여 계산한 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이가 측정오차보다 매우 작기 때문에 뚜렷하게 구별되는 것은 아니다.

제 2 항 안정성 질소동위원소비의 이용

유기농업에서 유기질비료로써 보통 퇴비를 널리 이용하고 있고 관행농업지역에서는 보통 화학비료를 사용하거나 퇴비와 혼용하여 사용한다. 이런 퇴비와 화학비료는 제조과정의 차이에서 발생하는 동위원소비 분할효과에 의해 안정성 질소동위원소비가 다르게 존재한다. 여기서 분할효과라는 것은 (그림 3-1-1)과 같이 무게가 다른 동위원소별로 결합에너지에서 차이가 생겨 질소반응 중에 가벼운 질소동위원소(^{14}N)가 더 무거운 질소동위원소(^{15}N)에 비해 반응속도가 빨라서 반응물과 생성물 사이에 질소 동위원소비에서 차이가 발생하는 것을 말한다.

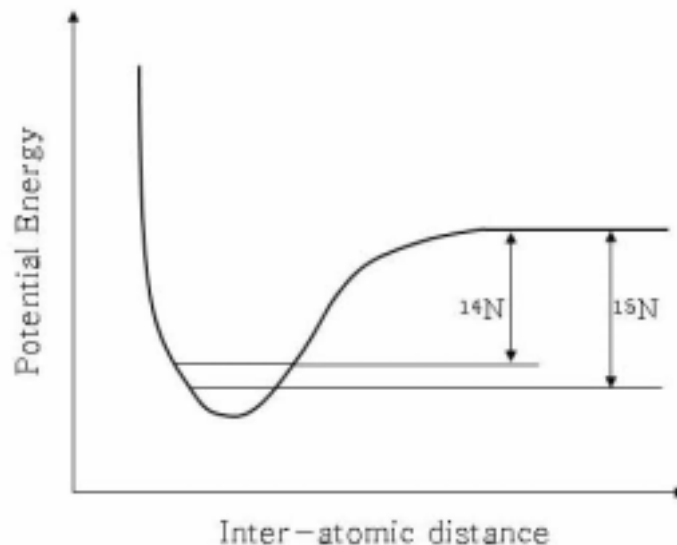


그림 3-1-1. 안정성 질소동위원소의 결합에너지

퇴비는 부숙되는 과정 중에 상당량의 암모니아가 휘산(volatilization)된다. 암모니아의 휘산으로 퇴비중의 총질소 중에서 약 20에서 77%까지 손실될 수 있다고 보고되고 있다 (Martins and Dewes, 1992; Rao Bhamidimarri and Pandey, 1996; Tiquia and Tam, 2000). 이때 휘산되고 남은 퇴비의 질소는 반응 중의 질소동위원소 분할효과에 의해 동위원소비가 증가하게 된다 (그림 3-1-2). 암모니아의 휘산에 의한 질소동위원소 분할효과는 크기 때문에 암모니아의 휘산 정도에 따라 퇴비의 질소동위원소비는 20%이상까지 증가할 수 있다 (Kerley and Jarvis, 1996). 그러나 화학비료는 대기 중의 질소를 하버-보쉬 방법으로 합성하게 되는데 이 반응에서 동위원소 분할 효과는 작다. 따라서 질소동위원소비의 변화는 거의 없게 되어 대기 중의 질소동위원소비와 비슷한 값을 가진다. 그 결과 퇴비의 질소동위원소비는 화학비료에 비해 높게 된다.

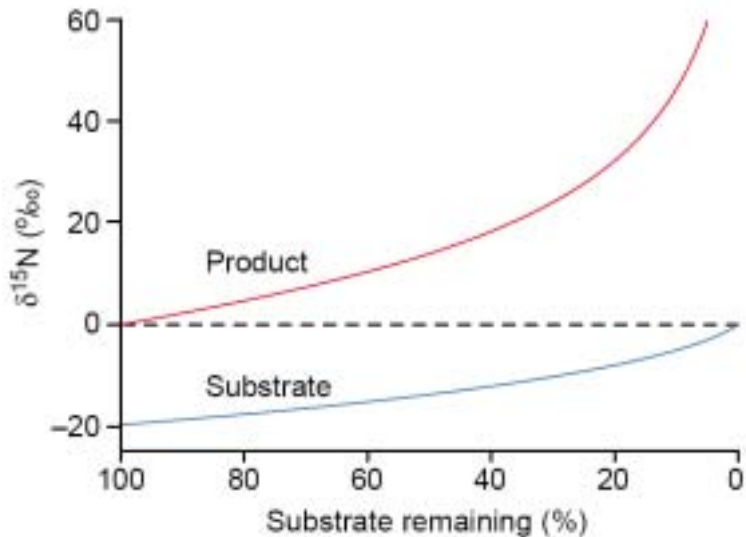


그림 3-1-2. 질소분할효과에 의한 반응물과 생성물 사이의 질소동위원소비 변화

제 2 절 연구 목표와 내용

본 연구는 유기농산물을 판별하기 위한 수단으로 질소의 안정성동위원소비를 이용하고자 한다. 이를 위해 크게 두 가지로 나누어서 실험하였다. 하나는 화학비료와 퇴비 시용에 따른 작물체의 질소 동위원소비의 정량적 차이를 구명하는 것이고 다른 하나는 유기농 및 관행농경지 토양 질소의 동위원소비 차이를 구명하기 위한 실험이다. 그리고 이런 연구를 이해하기 위한 자료를 만들기 위해서 항온 배양 실험을 병행할 것이다. 최종적으로는 유통 농산물을 분석하여 실제 적용가능성을 검토하고자 한다 (그림 3-2-1).

먼저 화학비료와 퇴비를 시용했을 경우 최종 수확 작물체 질소의 질소동위원소비에 미치는 영향을 조사하여 각 질소질 비료의 질소동위원소비 특성이 작물체에 지문을 남기는지에 대해서 알아보았다. 그리고 작물 생육기간 동안에 질소 동위원소비가 변이될 수 있기 때문에 그 변이 양상을 조사하였다. 이것은 중간에 넣어주는 추비의 영향을 알아보기 위한 방법이 되기도 한다. 질소동위원소비는 비료의 종류에 의해 가장 큰 영향을 받지만, 처리하는 질소질 비료의 양에도 영향을 받을 수 있다. 따라서 화학비료와 퇴비에 대해서 양을 달리하여 처리하였을 경우 작물체의 질소동위원소비가 어떻게 나타날 지에 대해서도 알아보았다. 작물 생육기간에 비료를 기비로서 한번 처리하는 경우도 있지만 많은 경우가 작물생육을 좋게 하고 비료효율을 높이기 위해서 생육 중간에 추비를 주는 경우가 많다. 이런 재배방법을 고려하여 본 연구에도 기비와 추비로 나누어서 각각의 질소질 비료를 달리하여 처리하였을 경우 최종 수확물에 어떤 값으로 나타날지에 대해서 알아보았다. 식물체는 생육기간에 따라 부위별로 자라는 시기가 다르다는 것으로 각 부위는 각 시기별 흡수한 질소의 특성을 반영한다고 생각된다. 따라서 각 수확물에 대해서 부위별로 나누어 질소 동위원소비를 측정하였다.

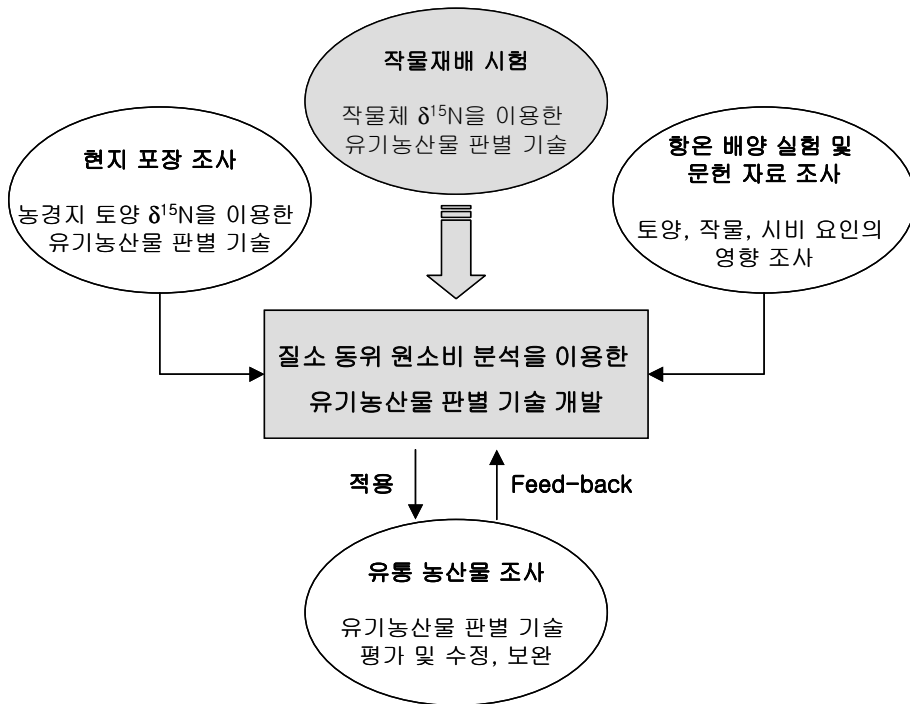


그림 3-2-1. 기술 개발을 위한 연구 모식도

다른 하나는 유기농 및 관행 농경지 토양을 채취한 후 토양 질소의 동위원소비 차이를 조사하였다. 토양 질소의 경우 처리한 질소에 비해서 그 양이 거대하기 때문에 일시적인 처리로 토양 전질소의 질소동위원소비는 거의 영향을 받지 않는 것이 일반적이다. 그러나 관행농경지와 유기농경지로 분리된 토양의 경우 서로 다른 비료를 오랜 기간에 걸쳐서 처리하였기 때문에 전질소의 동위원소비에 차이가 생길 수도 있다고 생각되기 때문에 각 지역에서 채취한 토양 전질소의 동위원소비를 조사하였다. 그리고 무기태 질소의 경우 전질소에 비해서 처리한 질소의 특성을 더 많이 반영해 준다고 생각된다. 따라서 채취한 토양의 무기태 질소의 동위원소비에 대해서도 조사하였다. 토양과 함께 각 지역에서 작물을 채취하여 토양과 작물간의 질소동위원소비의 상관관계를 구명하였다.

처리한 비료 이외에도 식물체와 토양의 질소동위원소비에 영향을 미치는 인자로는 토성, 토양에서의 질소변환양성, 작물의 종류, 수분함량, 토양 유기물 함량, 동위원소분할효과 등 많은 인자들이 영향을 줄 수 있다. 이런 인자들이 미치

는 영향을 알아보기 위해서 배양실험과 기존 자료 수집 등을 통해 질소동위원소 변화를 알아보았다.

제 3 절 작물 재배 시험

제 1 항 연구 방법

질소동위원소비가 상이한 요소와 퇴비 시용에 따라 작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값에 차이가 있는지 여부를 확인하고, 이러한 차이를 유기농산물 판별에 적용시킬 수 있는 현실적인 방법을 모색하기 위해 다양한 시나리오를 동시에 설정하여 연구하였다. 일반 밭 토양을 채취하여 실험조건에 맞는 균질한 토양을 만들기 위해서 풍건시킨 후 10mm 체로 건조하여 포트실험에 사용하였다. 작물은 엽채류인 배추를 선정하였고 재배는 하우스 내에서 이루어 졌다. 질소질 비료의 종류와 처리량, 처리 시기에 따라 총 7가지의 처리구를 3반복으로 두었고, 처리한 질소질 비료는 퇴비와 요소이다 (표 3-3-1).

표 3-3-1. 처리구 별 질소질 비료의 처리량

Treatments	Urea (mg N kg ⁻¹)	Compost (mg N kg ⁻¹)
Control	0	0
C4	0	1000
U2	500	0
C2/C2	500	500
C2/U1	500	250
U1/C2	250	500
U1/U1	250	250

먼저 아무것도 처리하지 않은 상황에서 토양의 영향을 알아보기 위해서 무처리구(Control)를 두었다. 비료를 기비로만 주었을 경우를 생각하여 각각 요소비료(U2)와 퇴비(C4)를 기비로 시비한 처리구를 두었다. 그리고 추비를 주는 경우를 생각하여 기비를 요소로 처리하고 추비를 요소(U1/U1)와 퇴비(U1/C2)를 처리한 것과 기비를 퇴비로 처리하고 추비를 요소(C2/U1)와 퇴비(C2/C2)를 처리한 경우를 두었다. U2 처리구에서는 요소 시용시 작물체 질소의 동위원소비 감소 여부를 확인하였고 C4 처리구에서는 퇴비 시용시 작물체 질소의 동위원소비 증가 여부를 확인하였다. U1/U1 처리구에서는 요소기비 시용량의 감소시 작물체 질소의 동위원소비 변화 여부 및 요소를 추비로 시용시 생육 후반기 작물체 질소 동위원소비 변화를 알아보았다. U1/C2 처리구에서는 요소를 기비로 시용 후 퇴비를 추비로 시용할 때에 후반기 작물체 질소의 질소동위원소비 감소 여부를 확인하였다. C2/C2 처리구에서는 퇴비 기비 시용량을 감소하였을 때 작물체 질소의 질소동위원소비가 감소하는 지에 대한 것과 퇴비를 추비로 처리하였을 경우 생육 후반기 작물체 질소 동위원소비가 어떻게 변할 것인가에 대해 알아보았다. C2/U1 처리구에서는 퇴비를 기비로 시용한 후에 요소비료를 추비로 줄 경우 후반기 작물체 질소의 동위원소비가 감소할 것인가에 대해서 알아보았다. 작물은 생육 후 20, 40, 60일 후에 채취하였고 추비는 작물 생육 후 40일 후에 주었다.

제 2 항 배추의 건중량 및 질소 흡수량

배추는 재배일수에 따라 건중량은 크게 증가하였다 (표 3-3-2). 처리간 비교했을 때에 무처리구에 비해서 그 증가는 더욱 뚜렷했다. 생육 후 20일에는 U2 처리구에서 적은 건중량을 보였으나 처리간 유의적인 차이는 보이지 않았다. 그러나 40일에는 무처리구와 U2처리구에서 건중량이 다른 처리구에 비해서 유의적으로 적은 것을 볼 수 있었다. 나머지 처리구 간에는 유의적인 차이를 보이지 않았다. 최종 수확인 60일에는 무처리구에서 유의적으로 적은 건중량을 보였을 뿐 나머지는 처리간 유의적인 처리를 보이지 않아 U2에서도 증가한 건중량을 볼 수 있었다. U2의 경우는 다량의 암모니아태 질소의 존재로 암모니아 독성을 받을 것으로 생각된다 (표 3-3-4, 5, 6).

표 3-3-2. 시기별 배추의 건중량

처리	재배일수 (일)			LSD ($P = 0.05$)
	20	40	60	
건중량 (g plant^{-1})				
Control	7.4	29.7	65.8	7.0
C4	8.0	40.8	119.5	15.3
U2	5.9	30.7	107.6	16.7
C2/U1			110.0	10.4
C2/C2	8.1	39.7	110.0	12.3
U1/U1			119.8	6.8
U1/C2	6.7	43.1	109.2	6.5
LSD ($P = 0.05$)	2.4	9.6	16.3	

생육기간 동안 배추가 흡수한 질소의 양은 무처리구를 제외하고 모두 크게 증가하였다 (표 3-3-3). 특히 요소를 처리한 경우에 그 경향이 더욱 뚜렷했다. 각 시료 채취 시점에서 처리 간 유의적인 차이를 보였다. 대체로 화학비료를 처리한 것에서 그 양이 높았다. U2의 경우는 건중량이 적었음에도 불구하고 흡수한 질소의 양은 높았다. 그리고 처리한 질소질 비료의 양에 대한 흡수한 질소의 양을 비교하였을 때 퇴비의 경우는 20% 이하를 유지하였으나 요소의 경우 거의 70% 까지 흡수하는 것을 보였다. 이것은 화학비료의 경우 식물체의 질소동위원소비의 값에 더 많은 영향을 미칠 것이라고 생각해 볼 수 있다.

표 3-3-3. 시기별 배추의 질소 흡수량

처리	재배일수 (일)			LSD ($P = 0.05$)
	20	40	60	
질소 흡수량 (mg N plant^{-1})				
Control	388	656	700	181
C4	441 (0.5)*	1525 (11.4)	2200 (18.1)	259 (2.5)
U2	393 (0.1)	1352 (19.3)	3835 (68.9)	836 (15.1)
C2U1	445 (1.1)	1204 (16.3)	3028 (31.8)	273 (4.8)
C2C2			2277 (16.4)	306 (4.8)
U1U1			4025 (67.7)	358 (14.0)
U1C2	438 (2.0)	1860 (48.2)	3528 (34.9)	373 (14.0)
LSD ($P = 0.05$)	131 (2.9)	428 (13.9)	369 (8.8)	

(* 괄호안의 값은 처리한 질소질 비료의 양에 대한 배추가 흡수한 질소의 양을 백분율로 표현한 값이다.)

제 3 항 질소질 비료의 종류에 따른 배추의 질소 동위원소비의 값 변화

배추의 질소 동위원소비의 값은 처리한 질소질 비료에 따라 뚜렷한 차이를 보였다 (그림 3-3-1). 퇴비의 질소를 흡수한 배추는 화학비료의 질소를 흡수한 배추에 비해 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 뚜렷이 높았다. 퇴비처리구의 경우 생육 전 기간에 걸쳐서 10% 이상의 높은 값을 보였고, 화학비료 처리구의 경우 전 기간에 걸쳐서 5% 이하의 값을 보였다. 퇴비 처리구의 경우 생육 후반기에 다소 감소한 것을 볼 수 있는데 이는 퇴비에서 무기화되는 질소를 흡수하기 때문에 이 때 질소 동위원소 분할효과에 의해 질소 동위원소비가 낮은 질소를 흡수하기 때문이라고 생각하고, 다른 요인 중에 하나는 질소 동위원소비가 낮은 토양 질소의 이용률이 높아졌기 때문에 낮아졌다고 생각된다. 그리고 화학비료 처리구의 경우 20일에는 처리한 화학비료(-2%)에 비해 질소 동위원소비가 더 낮은 -5%에 가까운 값을 보이고

있었다. 여기서는 요소를 처리하였는데 요소의 경우 토양에서 암모니아태 질소로 가수분해 된 후 이것은 다시 질산태 질소로 질산화 과정을 거치게 된다. 이 때 식물체는 보통 암모니아태 질소나 질산태 질소의 무기태 형태로 흡수하나 암모니아에 대한 독성피해를 받을 경우 질산태 질소를 흡수하는 경향이 있다고 판단된다. 그래서 이때 질산화 반응을 거쳐 생성된 질산태 질소를 주로 흡수한다고 생각된다. 초기 질산화 과정을 거쳐 생성된 질산태 질소의 경우 동위원소 분할효과에 의해 낮은 질소 동위원소비의 값을 가지게 된다. 20일 후에는 다시 0‰에 가깝게 높아진 것을 볼 수 있다. 이것은 초반에 질산화 과정을 거쳐 흡수한 질소에 비해서 질산화 과정을 거치지 않고 남아 있는 질소의 경우 질소 동위원소비의 값은 증가하게 된다. 이러면서 질소동위원소비가 증가한 암모니아태 질소가 다시 질산화 과정을 거치게 되면 후반부에 질산태 질소 또한 질소 동위원소비가 증가할 수 있다. 그 결과 후반부에 배추의 질소 동위원소비가 높아졌다고 생각된다. 생각해 볼 수 있는 다른 이유로는 토양 질소의 이용률이 증가한 것도 이에 영향을 미쳤다고 판단된다.

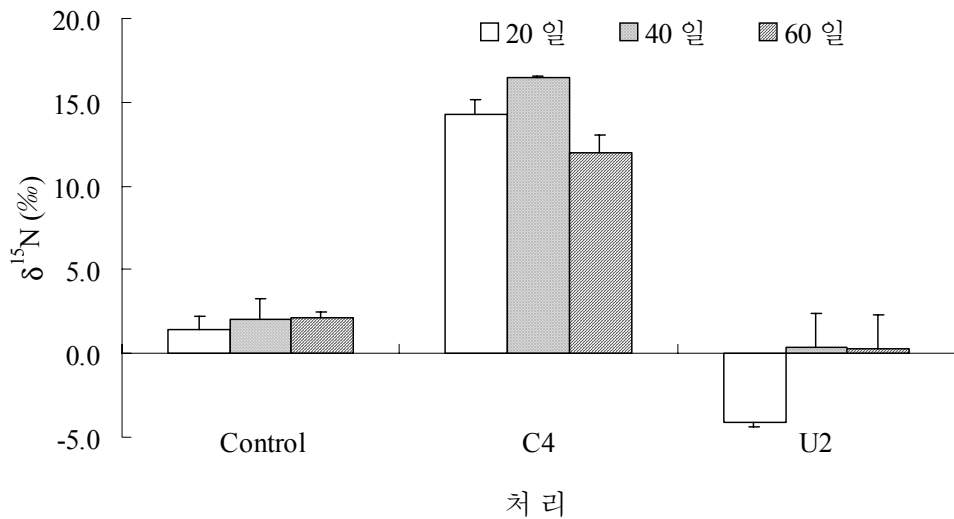


그림 3-3-1. 퇴비(C4)와 화학비료(U2)의 처리에 따른 배추의 질소 동위원소비의 값 차이

제 4 항 화학비료와 퇴비의 시용량에 따른 배추의 질소 동위원소비의 변화

같은 종류의 질소를 시비했을 경우일지라도 시비량에 따라 식물체는 질소 동위원소비의 값에서 차이를 보일 수 있다 (그림 3-3-2). 20일 경우에, 퇴비를 2배로 더 처리했을 경우에 배추의 질소동위원소비의 값은 다소 높아졌다. 요소를 처리했을 경우에도 배추의 질소 동위원소비의 값은 다소 감소하였다. 퇴비의 경우 퇴비 본래의 질소와 퇴비 내에 있는 무기태 질소의 이용률이 높아졌기 때문이라고 판단된다. 요소처리의 경우 많은 양의 요소를 처리할 경우 가수분해하여 나오는 암모니아 형태 질소의 양 또한 많아진다. 이때 질산화 과정을 통해 생성되는 질산 형태 질소는 동위원소 분할효과를 더욱 크게 받게 된다. 그래서 더 낮은 질소동위원소비의 값을 가진 질산 형태 질소를 흡수했기 때문에 요소를 더 많이 처리한 경우 동위원소비가 낮아졌다고 판단된다. 40일의 경우에는 다른 경향을 보였다. C4에서는 높은 값을 유지하였으나 C2에서 낮아진 것을 볼 수 있는데 이때에는 퇴비의 질소보다 토양의 질소 이용률이 높아졌기 때문이라고 생각된다. U2처리에서는 40일에 U1과 거의 유사한 값을 보였다.

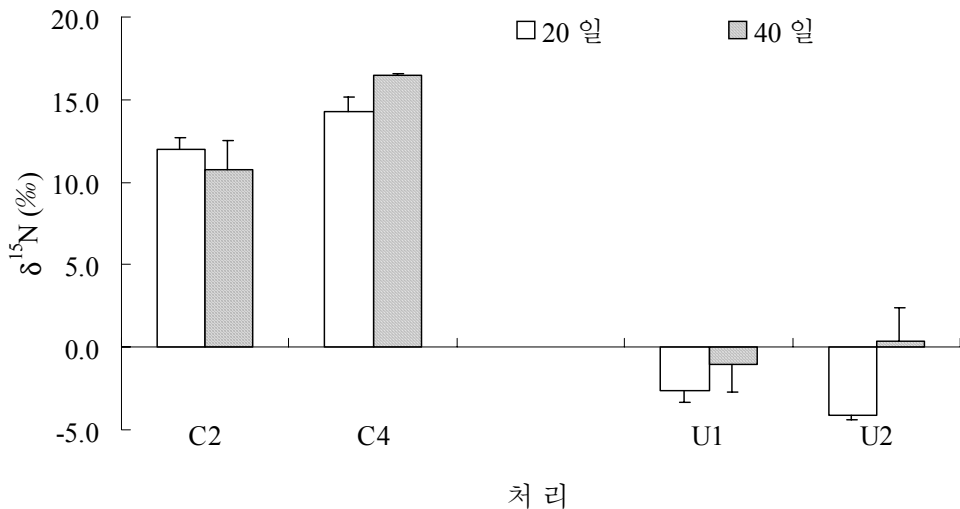


그림 3-3-2. 퇴비와 화학비료의 시비량에 따른 배추의 질소동위원소비 차이

제 5 항 질소질 비료의 시비방법 및 시비시기에 따른 질소 동위원소비의 변이

배추의 질소 동위원소비의 값은 기비뿐만 아니라 추비의 영향도 크게 받음을 알 수 있었다 (그림 3-3-3, 그림 3-3-4). 기비로 퇴비를 준 후 추비로 요소 (C2/U1)와 퇴비(C2/C2)로 나누어 주었을 때 다른 양상의 변이를 보였다. C2/C2의 경우 기비와 추비의 종류가 같았기 때문에 유의적인 변이를 보이지 않았다. 그러나 C2/U1의 경우 추비인 요소의 영향으로 질소 동위원소비가 뚜렷이 감소함을 볼 수 있었다. 또한 요소의 질소 이용률이 퇴비의 비해 높다는 점에서 기비에 의한 퇴비의 영향에 비해 추비인 요소의 영향을 더욱 받아서 크게 감소했다고 판단된다.

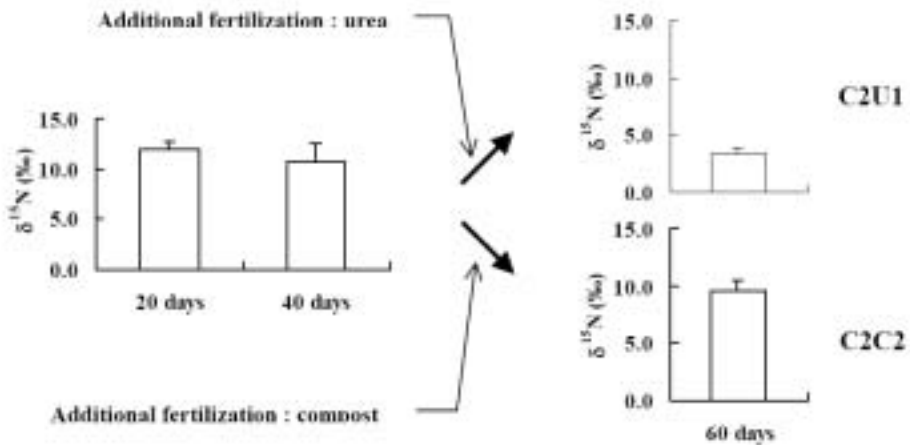


그림 3-3-3. 기비로 퇴비를 준 후 추비로 요소(C2/U1)와 퇴비(C2/C2)를 시비한 배추의 질소 동위원소비 변이

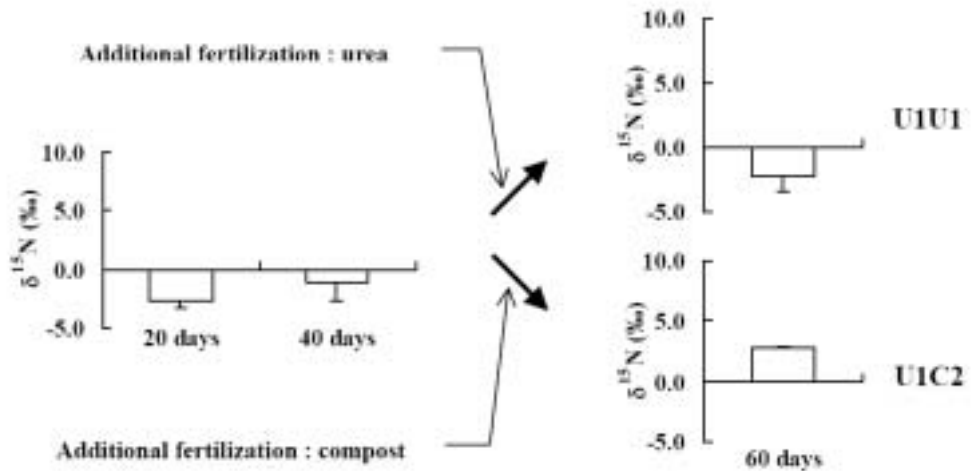


그림 3-3-4. 기비로 요소를 준 후 추비로 요소(U1/U1)와 퇴비(U1/C2)를 시비한 배추의 질소 동위원소비 변이

반대로 기비를 요소로 주고 추비로 화학비료(U1/U1)와 퇴비(U1/C2)로 나누어서 준 경우 질소 동위원소비의 변화에서 뚜렷한 차이를 보였다 (그림 3-3-4). 요소를 기비와 추비로 계속 처리하였을 경우(U1/U1)에 배추의 질소 동위원소비의 값은 0%이하를 유지하였고 오히려 더 음의 값으로 감소하였다. 그러나 추비로 퇴비를 처리하였을 경우(U1/C2) 질소 동위원소비의 값은 양으로 증가하여 약 3%로 되었다. 역시 높은 질소 동위원소비를 가진 퇴비를 처리했기 때문이라고 판단된다. 이렇게 기비가 같더라도 추비의 종류에 따라 배추의 질소 동위원소비는 크게 달라질 수 있음을 보여 주었다. 한편으로 U1/C2 처리의 경우 처리한 퇴비의 질소 동위원소비의 값에 비해 작게 증가하였다. 이는 앞에서 본 바와 같이 배추의 질소 이용률은 퇴비에 비해 요소가 더 높다. 그래서 질소동위원소비의 값에 미치는 영향 또한 추비 요소의 영향을 더 받아 다소 낮은 값을 보였다고 판단된다. 앞에서 본 C2/U1과 U1/C2는 기비와 추비를 반대로 주었지만 서로 비슷한 질소 동위원소비의 값을 보였다. 그러나 기비를 퇴비로 먼저 준 경우에 다소 높은 값을 보였다. 이는 C2/U1의 경우에 더 오랜 기간 동안 걸쳐서 배추가 더 많은 퇴비의 질소를 흡수할 수 있는 기회가 있었기 때문이라고 판단된다.

제 6 항 질소질 비료의 시비에 따른 배추 부위별 질소 동위원소비의 변이

배추의 잎 부위별 질소 동위원소비는 다르게 나타났다. 배추의 각각의 잎은 생성되는 시기가 다르므로 당시 존재하는 토양내 질소의 영향을 크게 받았을 것이고 그에 따른 차이를 보였다고 판단된다. 초기에 생성된 외엽의 경우에는 초반에 시비한 질소의 영향을 받아 초기 질소의 동위원소비를 반영할 것이고 생육 후반기 생성된 내엽의 경우에는 토양 질소 또는 후반기에 시비한 추비의 영향을 받아 후반기에 존재하는 질소의 동위원소비를 반영할 것이다.

먼저 무처리구의 경우 질소 동위원소비의 값은 시기별 유의적인 차이를 보이지 않았을 뿐만 아니라 잎 부위별 차이도 거의 없었다 (그림 3-3-5). 무처리구의 경우 전 생육 기간에 걸쳐서 본래 토양에 존재하는 질소 하나만을 흡수하였기 때문에 질소원의 변이가 없었다. 그리고 토양에서 무기화되고 식물체에 흡수하는 동안에 동위원소 변이를 일으킬 요인도 없다고 판단된다. 그 결과로 이렇게 부위별 일정한 값을 보였을 것이다.

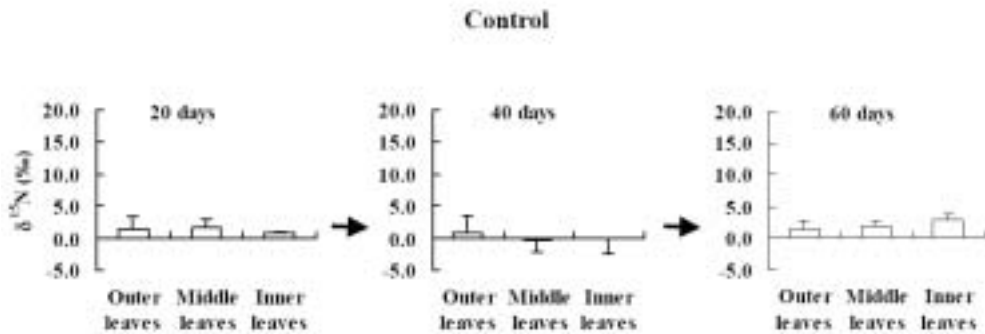


그림 3-3-5. 무처리구(Control)의 각 생육시기별(20, 40, 60일), 배추 부위별(외엽, Outer leaves; 중엽, Middle leaves; 내엽, Inner leaves) 질소 동위원소비의 변이

기비로 퇴비만 처리한 C4 처리구의 경우 잎 부위별 질소의 동위원소비의 값 차이가 뚜렷했다 (그림 3-3-6). 일반적으로 퇴비를 처리하였을 경우 초기에는 퇴비 내에 존재하는 무기태 질소의 영향으로 높은 값을 유지하지만, 후반기에는 점차 토양에서 무기화되어 나오는 질소의 영향이 증가하기 때문에 토양 질소의 질소동위원소비의 값에 따라 변하게 된다. 여기서는 토양의 질소동위원소비가 퇴비에 비해 낮기 때문에 내엽에서 질소의 동위원소비가 감소했다고 판단된다. 이렇게 내엽으로 갈수록 질소동위원소비가 낮아지는 경향은 20일과 40일에 채취한 배추에서 볼 수 있었지만, 60일에 채취한 배추에서는 중엽에서 낮은 값을 보였다가 내엽에서 갑자기 증가한 것을 볼 수 있었다. 이것은 다른 관점에서 해석할 수 있다. 본 연구에서 처리한 퇴비의 경우 무기태 질소의 함량이 높았고 동위원소비 또한 높았다. 외엽의 경우 이런 퇴비의 무기태 질소 영향으로 높은 값을 유지하였지만 중엽의 경우는 점차 토양의 질소 이용률이 높아지면서 질소 동위원소비의 값이 낮아졌다. 그러나 토양의 질소가 어느 정도 이용된 후에는 다시 식물체가 이용할 수 있는 질소의 대부분은 퇴비로부터 오게 된다. 그래서 내엽의 경우 다시 퇴비의 영향으로 질소 동위원소비의 값이 증가했다고 생각된다.

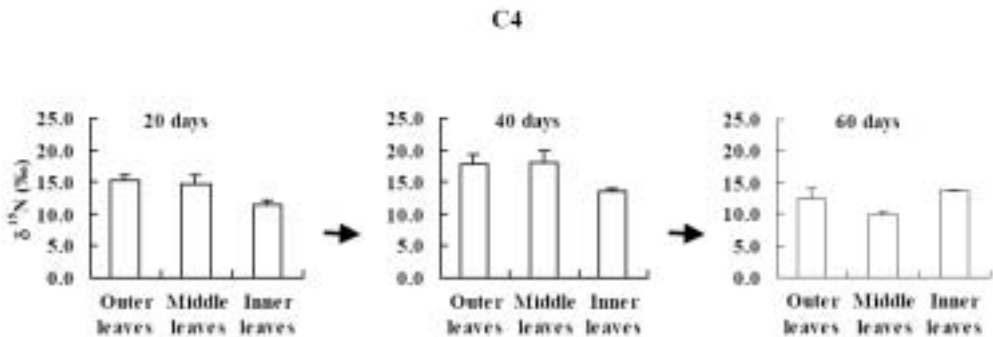


그림 3-3-6. 기비로 퇴비만 처리한 경우(C4)의 각 생육시기별(20, 40, 60일), 배추 부위별(외엽, Outer leaves; 중엽, Middle leaves; 내엽, Inner leaves) 질소 동위원소비의 변이

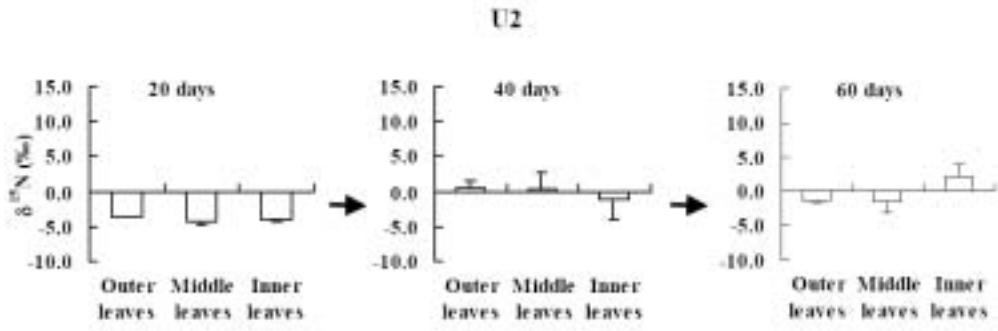


그림 3-3-7. 기비로 요소만 처리한 경우(U2)의 각 생육시기별(20, 40, 60일), 배추 부위별(외엽, Outer leaves; 중엽, Middle leaves; 내엽, Inner leaves) 질소 동위원소비의 변이

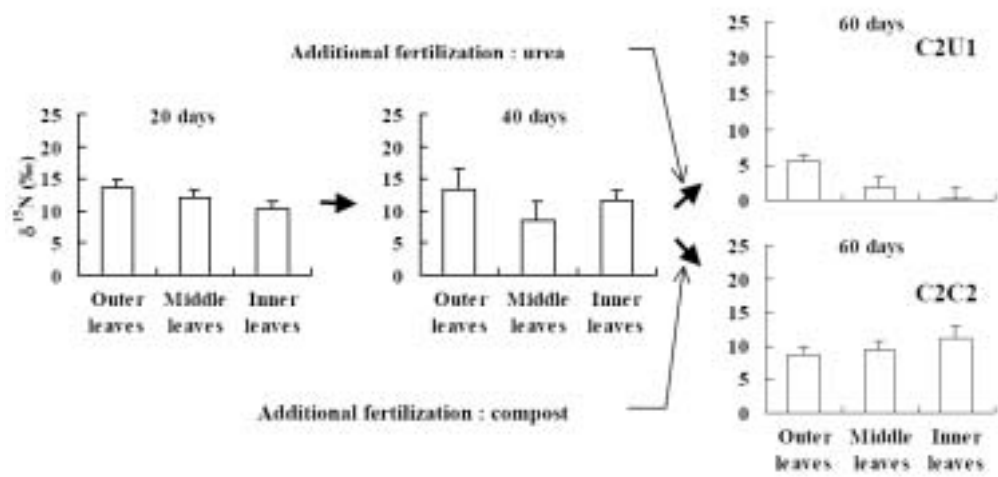


그림 3-3-8. 기비로 퇴비를 처리한 후 추비로 요소(C2/U1)와 퇴비(C2/C2)로 나누어서 처리했을 경우의 각 생육시기별(20, 40, 60일), 배추 부위별(외엽, Outer leaves; 중엽, Middle leaves; 내엽, Inner leaves) 질소 동위원소비의 변이

기비로 요소 비료만을 처리한 U2 처리구의 경우 배추 잎 부위별로 질소동위원소비에서 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다 (그림 3-3-7). 그러나 60일에 수확한 배추의 경우 내엽에서 다소 높은 질소 동위원소비의 값을 보였다. 이는 요소의 가수분해로 생성된 암모니아태 질소가 다시 질산화 과정을 거치면서 질소의 동위원소비가 낮아진 질산태 질소를 흡수하여 전반기에는 낮은 값을 보였으나 후반기에는 흡수하지 않고 남아 있는 질소의 동위원소비가 점차 높아짐에 따라 내엽의 질소 동위원소비가 높아졌다고 판단된다. 한편으로는 토양에서 무기화된 질소를 점차 많이 흡수하게 되어 높아졌다고 생각해 볼 수 있지만 여기서는 처리한 요소에서 유래한 질소의 함량이 높았기 때문에 질소 동위원소 분할효과가 더 컸다고 판단된다.

기비와 추비로 나누어서 준 경우에는 각각의 질소질 비료의 질소 동위원소비 특징을 잎 부위별로 잘 반영해 주었다. 기비와 추비를 모두 퇴비로 처리한 C2C2 처리구의 경우 잎 부위별 유의적인 차이를 보이지 않았지만 내엽에서 다소 증가하였다 (그림 3-3-8). 그리고 잎 전체에서 퇴비의 질소 동위원소비의 값을 잘 반영해 주고 있다. 그러나 기비를 퇴비로 주고 추비를 화학비료로 서로 다른 질소질 비료를 처리한 C2U1의 경우 잎 부위별 뚜렷한 차이를 볼 수 있었다. 먼저 기비로 준 퇴비의 영향을 더 많이 받았을 것이라고 생각되는 외엽의 경우 약 5% 정도의 질소 동위원소비의 값을 보였고 추비로 준 요소의 영향을 많이 받았을 것이라고 생각되는 내엽의 경우는 약 0%에 가깝게 감소하였다. 0%에 가깝게 감소한 것은 요소의 질소 동위원소비와 비슷하므로 요소 처리에 대한 확신을 제공해 준다. 앞에서는 배추 전체의 질소 동위원소비의 값에 대해서 비교하였다. C2U1의 경우 요소와 퇴비 처리의 중간 값을 보여 퇴비와 화학비료의 시비에 대해서 확실하게 밝힐 수 없었다. 그러나 식물체 부위별 분석에서 보면 이렇게 화학비료에 대한 지문에 식물체 한 부위에 남아 있어서 화학비료를 처리하였다는 것을 확실하게 밝혀 줄 수 있었다. 이의 결과는 앞에서 본 전체 부위의 질소 동위원소비의 값에 대한 비교에서 C2U1의 경우 요소와 퇴비처리 중간 값을 보였지만 이렇게 부위별 분석에서 화학비료의 처리여부를 더욱 확실하게 밝힐 수 있다는 것을 보여주었다.

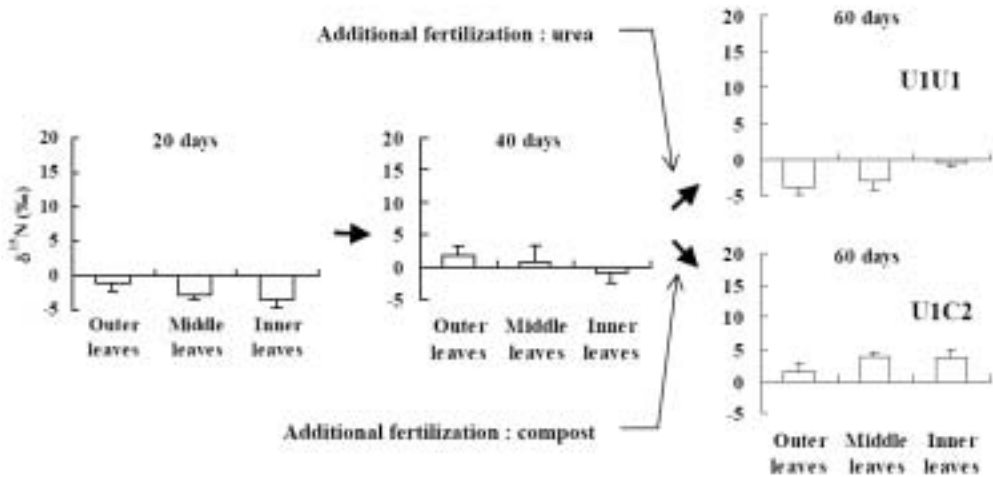


그림 3-3-9. 기비로 요소를 처리한 후 추비로 요소(U1/U1)와 퇴비(U1/C2)로 나누어서 처리했을 경우의 각 생육시기별(20, 40, 60일), 배추 부위별(외엽, Outer leaves; 중엽, Middle leaves; 내엽, Inner leaves) 질소 동위원소비의 변이

반대로 요소를 기비로 처리한 경우도 알아보았다 (그림 3-3-9). 요소를 기비로 준 후 추비로 다시 요소를 처리한 U1/U1 처리구의 경우 전체적으로 요소의 질소 동위원소비를 반영해 주는 값을 보였다. 그러나 내엽으로 갈수록 그 값이 다소 증가하였는데 이는 토양에서 질소의 반응 중에 발생하는 동위원소 분할효과 때문이라고 판단된다. 그리고 요소를 기비로 준 후 추비로 퇴비를 준 U1/C2의 경우 U1/U1에 비해서 전체적으로 질소 동위원소비의 값이 증가하였다. 그리고 내엽 쪽에서 더욱 높은 값을 보여 약 4‰ 정도의 값을 보였다. 퇴비의 질소 동위원소비와 비교하여 배추의 질소 동위원소비는 작게 증가하였는데, 퇴비의 특성 상 표토에 처리한 퇴비가 토양 전체에 골고루 존재하지 못하여 식물체가 흡수할 수 있는 기회가 적었다는 점과 일반적으로 퇴비 질소의 이용률이 화학비료인 요소에 비해 낮다는 점에서 배추의 질소 동위원소비의 증가 폭이 작았다고 판단된다.

제 7 항 질소질 비료의 처리에 따른 토양 무기태질소의 동위원소비 변이

토양 무기태 질소는 두 측면에서 중요한 정보를 제공한다. 하나는 처리한 질소에 대한 정보를 제공할 것이고, 다른 하나는 식물체가 흡수하는 질소에 대한 정보를 제공한다. 그러나 토양에 존재하는 무기태질소는 처리한 질소뿐만 아니라 본래 토양에 존재하는 질소원에서 무기화된 질소로부터 유래한 것도 있기 때문에 질소원을 밝히기가 어려울 수도 있다. 그리고 무기태질소는 토양에서 다양한 반응을 거치면서 동위원소 분할이 일어나 우리가 얻고자 하는 정보를 얻기가 힘들 때도 있다. 본 연구에서도 필요한 정보를 제공하는 경우도 있었지만 그렇지 못하는 경우도 있었다. 그렇지만 토양에 대한 정확한 정보를 가지고 있고, 무기태 질소의 농도 변화와 토양에서 일어날 수 있는 반응을 이해하며, 이에 따른 질소 동위원소비의 변이 가능성과 이를 종합적으로 이해할 수 있는 능력을 갖춘다면 필요한 정보를 최대한 얻을 수 있다고 본다.

먼저 배추 생육 20일 후의 경우, 비료를 처리한 후 가장 적은 시간이 지났음에도 불구하고 질소의 형태에 따라 다양한 질소 동위원소비의 값을 보였다 (표 3-3-4). 암모니아태 질소의 경우 처리한 질소질 비료의 특성이 잘 나타나지 않았다. 특히 요소 비료를 처리한 경우 질소 동위원소비가 높게 나와서 화학비료에 대한 사용여부를 확인하기에 어려움이 있었다. 그러나 질산태 질소의 경우 처리한 질소질 비료의 특성을 상당부분 유지하고 있었다. U2의 경우 -12.0%으로 질소 동위원소비가 크게 낮아졌는데 이는 질산화 과정 중에서 질소분할이 크게 일어났기 때문이라고 판단된다. 질산태 질소에 비해 암모니아태 질소가 많았는데 아직 질산화 반응이 활발히 진행되고 있음을 말해준다. 또한 앞의 식물체 건중량에 대한 결과에서 U2의 경우 건중량이 적었는데 많은 양의 본 표에서 나타났듯이 암모니아태 질소에 의해 독성 피해를 받았다고 판단된다. 그리고 생육 20일 후 배추의 질소 동위원소비와 비교했을 때 토양 질산태 질소의 동위원소비와 상당히 비슷함을 볼 수 있었다. 암모니아의 독성에 의해 질산태 질소를 많이 흡수해서 이런 경향을 보이기도 했지만, 퇴비 처리구의 경우 질산태 질소가 상당량 존재하여 배추가 질산태 질소를 흡수할 기회가 높았음을 알 수 있다.

표 3-3-4. 질소질 비료의 처리에 따른 배추 생육 20일 후 토양 무기태질소의 농도 및 질소 동위원소비

처리	20 일					
	무기태질소의 농도 (mg N kg ⁻¹)			무기태질소의 δ ¹⁵ N (‰)		
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Inorg.-N	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Inorg.-N
Control	7.1	22.3	29.4	28.6	8.1	13.5
C4	20.2	200.7	220.9	27.2	17.0	17.9
U2	308.5	114.3	522.9	8.7	-12.0	3.0
C2/U1 C2/C2	24.8	89.2	114.0	15.6	14.4	14.7
U1/U1 U1/C2	96.4	90.1	186.5	12.4	0.4	6.6

배추 생육 40일 후에는 토양의 무기태 질소가 상당부분 식물체 또는 미생물에 의해 이용되어서 상당량 줄어들었다 (표 3-3-5). 이런 경우에는 처리한 질소가 많은 반응을 거치면서 질소 동위원소 분할에 의해 δ¹⁵N 값이 변하게 되고, 외부적으로는 본래 토양의 질소가 무기화되면서 δ¹⁵N 값을 증가 또는 감소시키게 된다. U2 처리구의 토양에서는 아직 암모니아태 질소가 많이 존재하고 있는데 질산화반응이 일어나고 있고 이 반응으로 질소 동위원소 분할이 일어나고 있다고 판단된다. 그 결과 U2 처리구 토양의 질산태 질소의 δ¹⁵N값은 -7.4‰로 낮게 유지되고 있다.

배추 생육 60일 후에는 토양의 무기태 질소가 대부분 이용되어서 미량으로 존재하고 있다 (표 3-3-6). 이런 상황에서는 무기태 질소의 동위원소비가 큰 의미를 지니고 있지는 않다. 무기태 질소가 많은 때에는 그 농도와 질소동위원소비가 쉽게 변하지 않을 뿐만 아니라 식물체의 질소 동위원소비에 대한 영향력 또한 크다. 그러나 농도가 미량일 경우에는 분석에 의한 질소 동위원소비 값의 오차가 발생할 수 있고 약간의 반응과 본래 토양질소가 약간만 유입되었다고 질소 동위원소비가 쉽게 변할 수 있다.

표 3-3-5. 질소질 비료의 처리에 따른 배추 생육 40일 후 토양 무기태질소의 농도 및 질소 동위원소비

처리	40 일					
	무기태질소 농도 (mg N kg ⁻¹)			무기태질소의 δ ¹⁵ N (‰)		
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Inorg.-N	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Inorg.-N
Control	0.7	5.2	5.9	ND	7.5	7.5
C4	11.3	29.9	41.2	25.4	16.7	19.1
U2	136.0	64.1	200.1	14.9	-7.4	7.7
C2/U1	2.5	2.6	5.1	5.6	22.1	13.9
C2/C2						
U1/U1	13.3	13.7	27.0	29.2	11.8	20.4
U1/C2						

표 3-3-6. 질소질 비료의 처리에 따른 배추 생육 60일 후 토양 무기태질소의 농도 및 질소 동위원소비

처리	60 일			
	무기태질소 농도 (mg N kg ⁻¹)			무기태질소의 δ ¹⁵ N (‰)
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Inorg.-N	Inorg.-N
Control	1.7	3.1	4.7	26.2
C4	3.7	1.5	5.2	19.5
U2	3.7	1.8	5.5	19.1
C2/U1	1.9	1.0	2.8	7.3
C2/C2	1.0	3.1	4.1	9.9
U1/U1	1.6	1.2	2.8	9.7
U1/C2	1.1	1.3	5.4	18.1

제 8 항 결론

질소질 비료의 종류와 시비량에 따라 배추 전체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 유의적으로 영향을 받았다. 무처리구인 대조구(control)과 비교하였을 때, 퇴비의 처리는 배추의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 크게 증가시켰고, 요소의 처리는 배추의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 크게 감소시켰다. 이런 증가와 감소되는 정도는 퇴비 또는 화학비료의 시비량이 증가함에 따라 더 커졌다. 추비를 처리하였을 경우에 시비한 질소질 비료의 종류에 따라 경시적인 변화는 상이했다. 동위원소비가 비슷한 질소질 비료를 처리하였을 경우에는 배추의 질소 동위원소비가 변화없이 비슷한 수준을 유지하였으나 동위원소비가 다른 질소질 비료를 처리하였을 경우에는 배추의 질소 동위원소비가 크게 변화였다. 그리고 이런 경시적인 변화는 배추의 잎 부위별 질소 동위원소 변이에서도 잘 나타났다. 생육 초기에 생성된 외엽의 경우 기비로 준 질소질 비료의 특성을 보인 질소동위원소비를 보였으나 생육 후기에 생성된 내엽의 경우 추비로 준 질소질 비료의 특성을 잘 반영해 주는 질소 동위원소비를 보였다. 결과적으로 기비와 추비를 모두 퇴비로 처리한 C4, C2/C2 처리구의 배추의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 가장 높아서 약 10% 이상의 질소 동위원소비를 나타냈다. 그러나 기비와 추비를 모두 요소로 처리한 U2, U1/U1 처리구의 배추의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 1% 이하로 요소와 유사한 질소 동위원소비를 보였다. 그리고 기비와 추비를 퇴비와 요소를 모두 처리한 경우에는 퇴비와 요소만을 각각 처리한 경우의 중간에 해당하는 값을 보였다. 이 경우에 퇴비와 요소를 혼합하여 처리했다고 판단할 수만은 없을 것이다. 이 경우에는 주기적으로 분석을 하거나 작물체 부위별 분석을 통해 좀 더 정확한 판단을 내릴 수 있을 것이다. 이 연구를 통해서 질소질 비료의 종류, 처리량, 처리시기에 따라 배추의 질소 동위원소비는 특이한 값을 보여서 시비이력을 이해하는 데에 이용할 수 있음을 알 수 있다.

제 4 절 현지 포장 조사

제 1 항 서 론

최근의 농업은 중요한 변환기를 맞이하고 있다. 최소로 환경에 영향을 주며 경제적인 작물 생산성을 유지하는 데에 관심이 증가함에 따라 화학비료와 농약을 사용하지 않는 농법이 대안 농업으로 넓게 보급되고 있다. 현재의 시장 조사에 따르면 유기농산물에 대한 소비자들의 수요는 증가하고 있다. 유기농산물의 증가하는 경제적인 가치에 따라 소비자들의 관심은 유기농산물이 정말로 유기물로 재배하였는지에 쏠렸다.

관행농업과 유기농업은 유기물에 대한 이해를 넓히기 위해 종종 비교되어 왔다. 그러한 연구는 질산태질소의 용탈, 질소산화물의 배출, 토양 유기물의 순환, 토양의 생물학적 물리학적 성질에 집중되어있었다. 식물과 토양의 질소 순환을 연구하기 위한 한 가지 방법은 ^{15}N 의 자연존재비를 측정하는 것이지만, 관행농업지와 유기농업지 사이의 토양과 식물의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화양상을 비교하는 연구는 거의 이루어 지지 않았다.

퇴비의 사용은 화학비료의 사용이 금지되거나 유기농법이 장려되고 있는 몇몇 지역에서 증가를 해왔다. 일반적으로 퇴비는 퇴비의 숙성화 과정 동안 ^{15}N 보다 ^{14}N 의 더 빠른 암모니아 휘산 때문에 비료보다 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 더 높다. 비료의 경우는 -3%에서 2% 정도의 값을 보이고, 퇴비는 8% 이상의 값을 보인다. 이러한 투입되는 질소에 따른 $\delta^{15}\text{N}$ 의 차이는 식물과 토양의 질소 동위원소 조성이 유기농법과 관행 농법사이에 달라질 수 있다는 것을 암시한다. 일반적으로 식물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 질소의 소스와 질소의 동위원소 분할 과정 사이의 상호 작용에 따라 순간적으로 변하기 때문에 질소의 소스의 보존적인 추적자는 아닐지라도, 최 등은 퇴비를 처리한 작물이 초기 성장 기간 동안 화학비료를 처리한 작물보다 더 ^{15}N 비율이 높아짐을 알아내었다. 그러나 오랜 기간 화학비료나 퇴비를 처리한 재배지의 토양과 식물의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화양상을 조사한 연구는 거의 없었다.

토양 무기태 질소의 높은 생물학적 이용도는 질산화 작용과 탈질화 작용을 포함한 여러 질소 변환과정에 따라서 토양 무기태 질소의 수준은 빠르게 변한다는 것을 의미한다. 여러 질소 순환 과정은 무거운 동위원소(^{15}N)에 대해 분할 효

과를 일으키기 때문에 토양 무기태 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 변화양상은 질소 변환 과정에 민감하다. 질산화 과정은 호기성 토양에서 남아있는 NH_4^+ 에서 ^{15}N 의 비율을 상승시키는 주요한 질소 변환 과정이며, 탈질화 과정은 혐기성 토양에서 남아있는 NO_3^- 의 ^{15}N 의 비율을 높이는 주요한 질소 변환 과정이다. 그러나 Rice와 Aulakh 등은 유기물의 분해 과정 동안 증가한 미생물의 산소 요구량으로 인해 호기성 토양의 부분적인 혐기성 부분에서 오히려 탈질화 작용이 촉진되는 것을 밝혀냈고 이것은 유기물의 첨가가 유기농경지에서 탈질화 작용으로 인해 NO_3^- 의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 증가시킬 수도 있는 것을 말해 준다.

이 연구에서는 관행농업지와 유기농업지에서의 토양과 식물의 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이가 유기농업과 관행농업의 구분 가능한 마커로써 이용될 수 있는지 알아보려고 하였다.

제 2 항 재료 및 방법

시료 채취 지역의 밭토양은 주로 사양토이며, 이 지역은 주요 식수원으로 사용되는 북한강에서 가깝기 때문에 1990년 이 후로 수질 오염을 줄이기 위해 유기농법이 추천되었다. 그러므로 이 지역은 관행농업지와 유기농업지로 구분되어 있다.

시료 채취 지역은 화학비료 20개 지역, 유기비료 20개 지역으로 총 40개 지역을 선택하였으며, 관행농업지에서 비료는 주로 요소를 사용했고, 시비율은 $200\text{--}400\text{kg N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이며, 유기농업지에서 퇴비는 $300\text{--}600\text{ N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 정도로 시비하였다. 늦은 봄에 기비가 시용되었고, 유기농업지에서는 퇴비는 정부의 유기농업규칙에 따라 최소 5년 동안 시비되었고, 각각의 작물 재배지는 작물 종류와 시비율에 따라 약간의 농법은 달랐다.

토양과 작물은 여름에 재배지의 작물의 초기 성장단계에 따라서 채취되었다. 이 단계에 작물이 후기 생육단계의 작물보다 비료와 퇴비 사이에 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 더 높았다. 각각의 재배지에서 5개의 식물의 지상부가 무작위적으로 선택되었고, 토양 시료는 식물들의 뿌리의 토양(깊이 0-30cm)을 합쳐서 채취하였다. 또한 8종류의 비료(요소, 황산 암모늄과 6가지 복합비료)와 이 지역에서 사용된 퇴비 10

가지를 $\delta^{15}\text{N}$ 분석을 위해 채취하였다.

식물 시료는 60°C 에서 건조하였고, 토양 시료는 풍건하였다. 식물과 토양 시료는 매우 곱게 갈아서, 총질소 분석을 위해 사용하였다. 총질소 농도와 그에 따른 토양과 식물의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 CN 분석기와 연결된 continuous-flow 안정성 동위원소 질량 분석기를 사용하여 측정하였다. 토양 시료에서 NH_4^+ 와 NO_3^- 의 $\delta^{15}\text{N}$ 과 농도를 측정하기 위해 2M KCl 250ml로 약 100g의 토양을 침출하였고, 침출물의 일부를 증류 플라스크에 넣고 NH_4^+ 를 정량하기 위해 MgO를 넣고 뜨거운 증기로 증류하였고, 연이어 Devarda ally를 넣고 증류하여 NO_3^- 를 정량하였다. 증류된 NH_3 는 H_3BO_3 -지시약으로 포집하였고, NH_4^+ 와 NO_3^- 의 질소 농도는 표준 황산 용액으로 적정하여 측정하였다. 남아 있는 침출액은 토양의 무기태 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 분석을 위해 사용하였다. 남아 있는 침출액의 NH_4^+ 와 NO_3^- 를 위와 같은 방법으로 증류를 하고 포집액은 H_3BO_3 -지시약 대신에 H_2SO_4 로 포집하였다. 시료들 사이의 서로 동위원소 오염을 막기 위해 25ml 에탄올로 각 시료 증류 사이에 3분간 증류하였다. 0.1N H_2SO_4 를 사용하여 pH를 2-3으로 조정 한 후에 적외선램프를 사용하여 농축을 하였다. 용액의 NH_4^+ 는 진공을 걸어 alkaline LiOBr을 사용하여 산화시켜 N_2 기체로 전환시켰으며, N_2 기체는 dual-inlet 안정성 동위원소 질량 분석기로 $\delta^{15}\text{N}$ 을 분석하였다.

퇴비는 풍건하여 곱게 갈아서, continuous-flow 안정성 동위원소 질량 분석기를 이용하여 측정하였고, 화학비료의 질소는 켈달분해 후 N_2 기체의 $\delta^{15}\text{N}$ 을 위의 과정과 같은 방법으로 분석하였다.

제 3 항 결 과

퇴비의 동위원소 조성은 화학비료에 비해 유의적으로 15N의 비율이 높다 (표 3-4-1). 비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 거의 0‰에 가까운데 황산암모늄의 경우는 -3.9‰이고 화학비료의 경우는 0.5‰이다. 퇴비는 15.4에서 19.4‰의 범위를 갖고 있으며 비료보다 훨씬 더 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 보인다.

표 3-4-1 밭토양에 사용된 비료와 퇴비의 $\delta^{15}\text{N}$

시료	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$		시료수
	Mean \pm SD	Range	
비료 ^a	-2.6 \pm 0.5	-3.9 ~ 0.5	8
퇴비	17.4 \pm 1.2	15.4 ~ 19.4	10

^a비료의 종류는 요소, 황산암모늄, 6가지 복합비료 (N-P₂O₅-K₂O, 21-17-17, 15-15-15, 11-12-10, 12-8-12, 13-0-13, 16-0-12)

총 토양 질소와 토양 무기태 질소는 관행농업지에서 보다 유기농업지에서 유의적으로 더 크다. 관행농업지에서 총 무기태 질소는 NO₃⁻가 80%이상을 차지하고 있지만, 유기농업지에서는 NH₄⁺와 NO₃⁻ 모두 유사한 비율을 유지하고 있다. 유기농업지의 총 질소는 관행농업지에 비해 약 2.9‰까지 ¹⁵N의 비율이 유의적으로 더 높게 나왔다. NO₃⁻의 $\delta^{15}\text{N}$ 과 NH₄⁺와 NO₃⁻의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 또한 관행보다 유기농업지에서 유의적으로 더 높은 값을 나타내었다. 그러나 NH₄⁺는 토양들 사이에서 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 유의적으로 다르게 나오지 않았다. 관행 농업지에서 NH₄⁺의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 NO₃⁻의 $\delta^{15}\text{N}$ 값보다 유의적으로 더 높게 측정되었으나, 유기농업지에서 NH₄⁺와 NO₃⁻의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 유의적으로 다르게 나오지 않았다.

비록 식물의 총 질소 농도가 관행농업지와 유기농업지에서 유의적으로 다르지 않을지라도, 식물의 평균 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 유의적으로 관행 (4.1 \pm 1.7‰) 보다 유기농업지(14.6 \pm 3.3‰)에서 더 높았으며, 이것은 작물의 종에 관련이 없었다.

질소 농도와 각각의 토양 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 관행농업지에서는 유의적인 상관관계를 보이지 않았지만, 유기농업지에서는 총 토양질소와 NH₄⁺의 질소는 그들의 $\delta^{15}\text{N}$ 값과 양의 상관관계를 보였으나, NO₃⁻의 질소는 그렇지 않다. 총 식물의 질소 농도는 관행농업지에서 그에 따른 $\delta^{15}\text{N}$ 값과 음의 상관관계를 갖지만, 유기농업지에서는 상관관계를 보이지 않았다.

표. 3-4-2 유기농업지 밭토양의 총질소와 무기태 질소 함량

시료 번호	Total-N N(%)	NH ₄ -N N(mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N N(mg kg ⁻¹)	NH ₄ -N + NO ₃ -N N(mg kg ⁻¹)
1	0.17	8.6	35.2	43.8
2	0.12	13.3	23.2	36.5
3	0.22	23.1	16.6	39.7
4	0.26	12.1	78.6	90.7
5	0.19	6.3	25.0	31.3
6	0.27	59.4	15.5	74.9
7	0.34	20.8	20.5	41.3
8	0.16	60.1	51.6	111.7
9	0.14	11.9	10.2	22.1
10	0.21	17.9	16.9	34.8
11	0.35	78.7	80.7	159.4
12	0.16	15.1	21.4	36.5
13	0.17	19.6	20.3	39.9
14	0.13	10.4	28.2	38.6
15	0.17	18.7	40.0	58.7
16	0.21	18.2	17.5	35.7
17	0.25	24.6	25.4	50.0
18	0.13	6.6	22.0	28.6
19	0.11	7.4	33.5	40.9
20	0.18	60.5	40.6	101.1
평균	0.20	24.7	31.1	55.8
SD	0.07	21.5	19.4	34.8

표 3-4-3. 유기농업지 밭토양의 총질소와 무기태 질소동위원소비

시료 번호	Total-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N + NO ₃ -N
	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$
1	9.0	1.9	9.0	7.6
2	7.3	5.7	11.2	9.2
3	10.6	2.4	20	9.8
4	10.6	6.9	6.2	6.3
5	7.3	2.3	14.9	12.4
6	9.9	19.8	7.3	17.2
7	10.5	11.6	15.3	13.4
8	7.3	8.8	10.8	9.7
9	5.6	0.3	6.7	3.2
10	10.4	6.3	5.5	5.9
11	11.4	21.6	9.4	15.4
12	11.1	7.9	13.6	11.2
13	8.6	9.5	16.8	13.2
14	7.0	1.3	7.5	5.8
15	9.9	10.6	13.1	12.3
16	6.7	27.6	9.6	18.8
17	8.8	9.9	12.5	11.2
18	6.1	2.2	11.6	9.4
19	6.4	0.9	21.6	17.9
20	12.0	22.5	9.3	17.2
평균	8.8	9.0	11.6	11.4
SD	2.0	8.0	4.5	4.4

표 3-4-4. 관행농업지 밭토양의 총질소와 무기태 질소의 함량

시료 번호	Total-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N + NO ₃ -N
	N(%)	N(mg kg ⁻¹)	N(mg kg ⁻¹)	N(mg kg ⁻¹)
1	0.16	5.6	10.5	16.1
2	0.15	7.1	55.2	62.3
3	0.14	7.2	47.3	54.5
4	0.15	7.6	45.2	52.8
5	0.10	5.6	70.6	76.2
6	0.14	4.3	52.1	56.4
7	0.15	5.5	39.8	45.3
8	0.10	6.2	13.7	19.9
9	0.12	6.7	27.1	33.8
10	0.14	4.6	25.4	30.0
11	0.17	5.6	36.6	42.2
12	0.16	6.9	32.7	39.6
13	0.14	6.7	47.9	54.6
14	0.12	4.9	24.5	29.4
15	0.13	7.1	58.2	65.3
16	0.15	4.1	29.1	33.2
17	0.15	6.4	32.3	38.7
18	0.15	8.7	24.1	32.8
19	0.17	3.9	26.8	30.7
20	0.1	6.5	35.1	41.6
평균	0.14	6.1	36.7	42.7
SD	0.02	1.3	15.3	15.6

표 3-4-5. 관행농업지 밭토양의 총질소와 무기태 질소동위원소비

시료 번호	Total-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N + NO ₃ -N
	δ ¹⁵ N(‰)	δ ¹⁵ N(‰)	δ ¹⁵ N(‰)	δ ¹⁵ N(‰)
1	5.8	7.5	3.3	4.8
2	6.1	8.9	5.7	6.1
3	5.3	8.3	4.3	4.8
4	5.5	5.1	5.5	5.4
5	6.8	6.9	5.4	5.5
6	6.2	9.2	3.7	4.1
7	6.4	4.9	5.4	5.3
8	5.6	2.4	1.8	2.0
9	5.9	10.9	3.6	5.0
10	5.0	8.7	4.1	4.8
11	5.2	4.4	5.7	5.5
12	5.1	5.1	4.6	4.7
13	6.9	11.1	4.5	5.3
14	6.1	2.4	5.7	5.2
15	5.6	7.9	4.4	4.8
16	5.6	9.3	6.3	6.7
17	7.2	5.3	4.5	4.6
18	4.8	8.5	5.4	6.2
19	6.6	12.9	4.7	5.7
20	7.0	11.6	5.8	6.7
평균	5.9	9.0	4.7	5.2
SD	0.7	3.0	1.1	1.0

표 3-4-6. 관행농업지 작물체의 질소함량 및 질소동위원소비

시료번호	관행농업지		작물종
	N(%)	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	
1	3.2	4.9	<i>Zea</i>
2	2.95	3.4	<i>Zea</i>
3	3.20	4.8	<i>Solanum</i>
4	3.90	0.6	<i>Solanum</i>
5	1.97	5.3	<i>Capsicum</i>
6	2.72	3.7	<i>Capsicum</i>
7	2.44	5.0	<i>Capsicum</i>
8	2.84	5.6	<i>Brassica</i>
9	3.63	0.3	<i>Brassica</i>
10	2.14	5.0	<i>Brassica</i>
11	4.80	2.3	<i>Cucumis</i>
12	3.82	2.5	<i>Cucumis</i>
13	2.72	2.9	<i>Cucumis</i>
14	2.22	5.3	<i>Cucumis</i>
15	4.05	3.7	<i>Lactuca</i>
16	2.37	4.5	<i>Lactuca</i>
17	2.19	4.8	<i>Spinacia</i>
18	1.77	6.4	<i>Spinacia</i>
19	2.50	4.5	<i>Perilla</i>
20	1.63	5.7	<i>Sesamum</i>
평균	2.90	4.1	
SD	0.84	1.7	

표 3-4-7. 유기농업지 작물체의 질소함량 및 질소동위원소비

시료번호	유기농업지		
	N(%)	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	작물종
1	4.27	14.6	<i>Zea.</i>
2	2.76	20.7	<i>Zea.</i>
3	4.45	13.4	<i>Solanum</i>
4	5.12	15.3	<i>Capsicum</i>
5	2.52	13.6	<i>Capsicum</i>
6	2.53	16.6	<i>Brassica</i>
7	3.18	16.0	<i>Brassica</i>
8	3.72	10.5	<i>Cucumis</i>
9	4.14	16.2	<i>Cucumis</i>
10	2.35	11.8	<i>Cucumis</i>
11	2.47	14.8	<i>Cucumis</i>
12	3.61	14.3	<i>Lactuca</i>
13	2.98	14.2	<i>Lactuca</i>
14	1.26	13.3	<i>Lactuca</i>
15	4.93	12.1	<i>Lactuca</i>
16	1.60	9.6	<i>Spinacia</i>
17	2.58	9.3	<i>Spinacia</i>
18	3.93	19.9	<i>Perilla</i>
19	4.42	21.2	<i>Sesamum</i>
20	4.29	14.4	<i>Sesamum</i>
평균	3.36	14.6	
SD	1.09	3.3	

제 5 절 항은 배양 실험

제 1 항 서 언

토양 무기태 질소의 동위원소존재비($\delta^{15}\text{N}$)는 물리, 화학, 생물학적인 반응과정에 대한 동위원소 분할효과의 결과로 인해 매우 다양하다. 생물학적인 질소형태 변환동안의 동위원소 분할효과에서는 가벼운 동위원소가 무거운 동위원소보다 더 빠르게 반응에 참가하는 경향 때문에 기질의 ^{15}N 함량이 증가한다. 예를 들어, 질산화반응에서 $^{14}\text{NH}_4^+$ 는 우선적으로 NO_3^- 로 전환되며, NH_4^+ 의 $\delta^{15}\text{N}$ 이 증가되는 것이 관찰된다. 다양한 질소의 형태 변환은 토양 내에서 동시에 일어나기 때문에, NH_4^+ 의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화량은 NH_4^+ 가 관여하는 반응의 종류와 관여정도에 따른다. 토양수분상태에 따라 질산화반응에 차이가 존재하며, 토양수분상태에 따라 토양 간에 NH_4^+ 의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이가 존재할 것이다. 그러나 현재까지 이것을 검증하는 연구는 거의 없었다. 따라서 이 실험에서는 간단한 배양 실험을 통해 수분포화와 불포화 토양에서 NH_4^+ 농도의 감소와 관련된 질소 동위원소 분할효과의 변화 형태를 비교하고, NH_4^+ 와 NO_3^- 의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 시간에 따른 변화를 조사하였다.

제 2 항 실험방법

토양은 서울대학교 농업생명과학대학의 시험포장에서 채취하였고, 풍건하여 2mm체를 통과한 것을 사용하였다. 토성은 coarse loamy였고, 13.8g C kg^{-1} , 1.3g N kg^{-1} 을 포함하였고, pH는 5.8이었다. 토양 내 총질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 +8.9‰이었다. 토양 25g을 48개의 100ml incubation flask에 넣었다. 24개씩 둘로 나누어 한쪽은 포화시키고 나머지는 포화상태의 50%의 수분을 가하여 불포화상태를 만들었다. 미생물의 활성을 정상화시키기 위해 27°C에서 10일간 pre-incubation을 실시하였다. 이후 각 flask에 4mg의 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($\delta^{15}\text{N}=-2.6\text{‰}$)를 포함하는 용액 1ml를 처리하였고, spatula로 토양과 용액을 균질하게 섞었다. flask는 통기가 되도록 구멍을 뚫은 알루미늄 호일로 입구를 막고, 27°C의 내부가 어두운 incubator에 넣었

다. flask는 24시간에 한번 무게는 측정하였고, 수분함량이 일정하게 유지되도록 처리 직후에 비해 부족한 무게만큼 증류수를 첨가하였다. 각 처리별로 불포화토양은 7일까지, 포화토양은 36일까지 주기적으로 각각 3개씩의 flask에서 시료를 채취하였다.

무기태 질소(NH_4^+ 와 NO_3^-)는 각 flask의 토양에 60ml의 2M KCl용액을 가하여 추출하였다. 추출액 중 15ml는 증류, H_3BO_3 -indicator 용액으로 포집하여 무기태 질소의 농도를 측정하였고, 나머지 추출액은 증류, H_2SO_4 용액으로 포집, 수분을 증발시켜 얻은 고운 가루(ammonium sulfate)는 $\delta^{15}\text{N}$ 측정에 사용하였다.

NH_4^+ -N 농도 감소의 반응 상수는 다음의 first-order kinetics를 사용하여 획득하였다.

$$\ln(C/C_0) = -kt$$

(C_0 : 초기 기질 농도, C: 시간 t에서의 기질 농도, k: 속도상수)

NH_4^+ -N 농도 감소에 대한 동위원소 분할상수($\alpha_{s/p}$)는 다음의 식에 의하여 계산되었다.

$$\ln\left(\frac{10^{-3}\delta_s+1}{10^{-3}\delta_{s,0}+1}\right) = \left(\frac{1}{\alpha_{s/p}} - 1\right) \ln f$$

(f :시간 t에서 반응하지 않은 기질의 비율, $\delta_{s,0}$:초기 NH_4^+ -N의 $\delta^{15}\text{N}$, δ_s : 시간t에서 NH_4^+ -N의 $\delta^{15}\text{N}$)

제 3 항 실험 결과

NH_4^+ -N 농도는 불포화토양에서 7일 동안 164.8에서 34.4 mg kg^{-1} 으로 급격하게 감소하였고, 포화토양에서는 36일 동안 162.4에서 24.2 mg kg^{-1} 으로 서서히 감소하였다 (그림 3-5-1). 비록 효소반응은 Michaelis-Menten kinetics를 따르지만, 기질의 농도가 Michaelis 상수(K_m)에 비하여 작을 경우 first-order kinetics에 근접한다. NH_4^+ -N 농도 감소에 대한 속도상수는 불포화토양에서 0.21d^{-1}

($r^2=0.97^*$), 포화토양에서 $0.05d^{-1}$ ($r^2=0.99^{**}$)이었다. 불포화토양보다 포화토양에서 속도상수가 아주 작은 것은 혐기성조건에서 느린 질산화 반응의 원인이 된다. 비록 포화토양의 공극이 물로 채워져 있다고 하더라도 표층토양에 얇은 호기성의 층이 존재하기 때문에 질산화 반응은 진행된다.

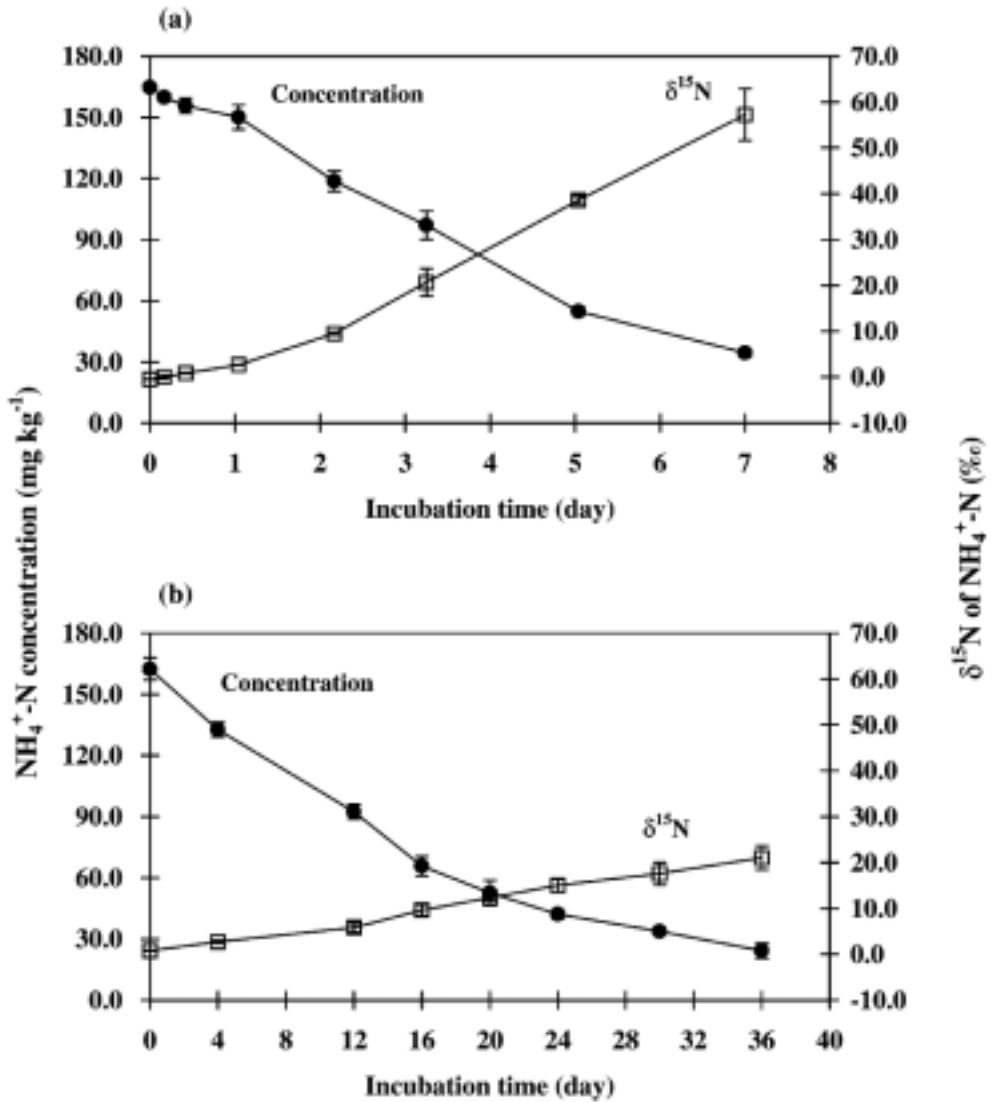


그림 3-5-1. 포화토양과 불포화토양에서 NH_4^+ 의 농도와 $\delta^{15}N$ 의 변화

NH_4^+ 의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 불포화토양에서 -0.4에서 +57.2‰로, 포화토양에서는 +0.8에서 +21.0‰로 증가하였다. NH_4^+-N 농도 감소에 관련되는 동위원소 분할상수($\alpha_{s/p}$)는 불포화토양에서 1.04 ($r^2=0.99^*$), 포화토양에서는 1.01 ($r^2=0.99^*$)로 계산되었다. $\alpha_{s/p}$ 는 동위원소 중 가벼운 것과 무거운 것의 속도상수의 비($k_{14\text{N}}/k_{15\text{N}}$)와 관련이 있기 때문에, 1.04와 1.01의 $\alpha_{s/p}$ 는 주어진 시간 간격 내에서 $^{15}\text{N} - \text{NH}_4^+$ 보다 $^{14}\text{N} - \text{NH}_4^+$ 이 불포화토양과 포화토양에서 각각 4.0과 1.0% 더 많이 반응한다는 것을 의미한다. *Nitrosomanas europaeus*의 순수 집단 내에서의 질산화반응 동안의 동위원소 분할상수는 1.035이라는 것이 알려져 있다. 이 값은 불포화토양에서의 그것인 1.04에 매우 근접한다. 그러므로 질산화작용이 불포화토양에서 지배적인 질소의 형태변환 과정이며, 부동화와 같은 NH_4^+ 와 관련된 다른 반응에 의해 일어나는 동위원소 존재비의 변화는 빠른 질산화 반응 때문에 작다고 추정할 수 있었다.

만약 부동화가 NH_4^+ 농도 감소와 연관이 되었다면, $\alpha_{s/p}$ 는 반응에 따라 다르기 때문에 $\alpha_{s/p}$ 는 1.04보다 작아질 것이다. 예를 들어, 질소동화와 관련된 $\alpha_{s/p}$ 는 1.000~1.020이고 1.002이하의 값이 대부분의 자연생태계에서 적절하다고 알려져 있다.

반면에, NH_4^+ 농도 감소에 대해 불포화토양보다 포화토양에서 $\alpha_{s/p}$ 가 더 작고 속도가 더 느린 것은 질산화반응이 일어나는 상태에서 보다 일어나지 않는 상태에서 더 높은 부동화-무기화 반응의 상호진행을 반영하는 것이다. 불포화토양에서는, 질산화반응 동안 생성된 NO_3^- 는 미생물에 의해 쉽게 부동화되지 않기 때문에 부동화-무기화의 상호진행에 의해 일어나는 NH_4^+ 의 동위원소 존재비의 변화는 작을 것이다. 그러나 포화토양에서는 NH_4^+ 의 상당부분이 질산화반응보다는 미생물에 의해 부동화 되었다가 다시 무기화 된다.

불포화토양에 대한 NO_3^- 의 농도와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화는 질산화반응 동안 NH_4^+ 에서의 ^{15}N 비율의 증가를 보여주었다(그림 5-2). 토양 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 의 농도는 7일 동안 32.0에서 167.4 mg kg^{-1} 으로 증가하였다. NO_3^- 의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 2일까지 -3.3에서 -18.0‰로 급격하게 감소하다가 그 이후 증가하여 7일에 -8.6‰이 되었다 (그림 3-5-2).

2일 이후에 NO_3^- 의 $\delta^{15}\text{N}$ 증가는 남아있는 기질의 ^{15}N 가 점진적으로 증가하는 것의 영향을 받기 때문이었다. 질산화반응 동안의 이런 변화는 닫힌계에서 단일단계의 단방향의 반응에서의 $\delta^{15}\text{N}$ 변화의 전형적인 형태이다. 그러나 포화토양에

대한 NO_3^- 의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 탈질반응에 의해 NO_3^- 의 농도가 낮았기 때문에(5 mg kg^{-1} 이하) 측정하지 않았다.

이 실험에서 NH_4^+ 농도 감소에 관련된 동위원소 분할상수($\alpha_{s/p}$)는 포화토양(1.01)보다 불포화토양(1.04)에서 더 컸다. 부동화-무기화 반응의 상호진행이 혐기성조건에서 더 많은 반면 호기성조건에서는 질산화 반응이 빠르고 지배적으로 일어나기 때문에, 포화토양에서 보다 불포화토양에서 더 큰 $\alpha_{s/p}$ 를 갖는 것은 질산화반응이 부동화보다 질소동위원소 분할효과에 더 많이 기여한다는 것을 보여 준다.

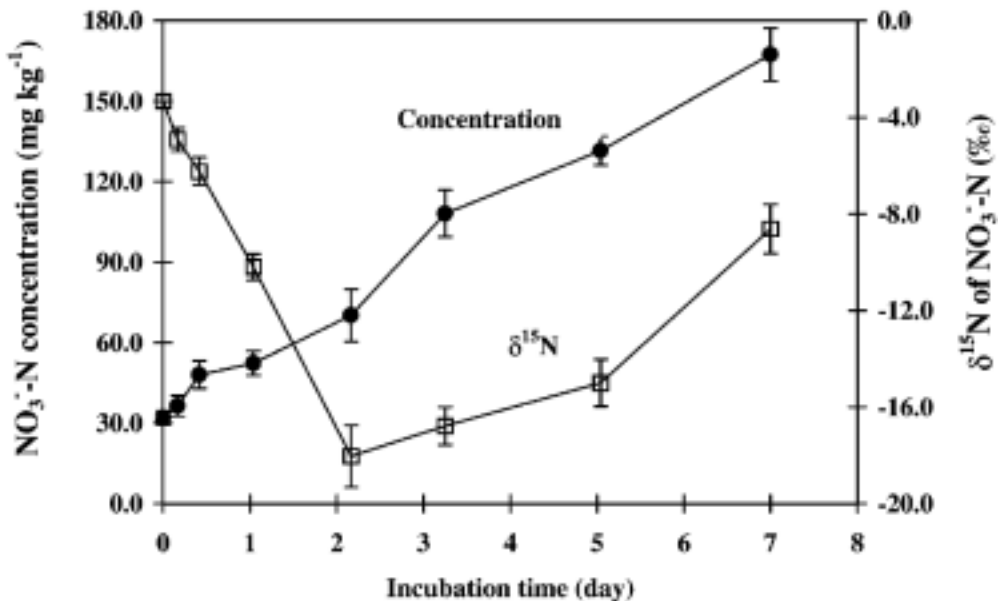


그림 3-5-2. 불포화토양에서 NO_3^- 의 농도와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화

제 6 절 유통 농산물 조사

질소 동위원소비를 이용한 유기농산물 판별 기술에 대해 실제로 적용 가능한 지에 대해 알아보기 위해서 국내 유통매장에서 판매되고 있는 유기농산물을 구입하여 분석하였다 (표 3-6-1). 시료를 분석할 때에 시료를 분쇄한 후 필요한 양

을 건조하여 분석하였다. 이 때 건조시간은 30분 이내로 단축할 수 있었다. 총 6개의 매장에서 15개의 작물에 대해서 총 32개의 시료를 구입하여 분석한 결과 유기농으로 확실하게 판별되는 항목이 있었던 반면에 화학비료를 처리하였다고 판단되는 경우도 있었다. 좀 더 정밀한 분석을 필요로 하는 것도 상당량 포함하고 있었다. 본 연구에서 화학비료를 처리한 경우 대부분 5% 이하의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 가진다고 하였는데 국내 유통매장에서 조사한 시료에 대해서는 5개 시료에서 이에 해당하였다. 그리고 유기농산물로 구분할 수 있는 경우는 9% 이상의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 가지는데 유통매장에서 조사한 시료에 대해서는 16개가 확실히 유기농산물임을 확인하였다. 그러나 나머지 11개 시료에 대해서는 확실한 검정을 위해서 산지 토양의 분석과 처리한 유기질 비료에 대해서 분석할 필요가 있다.

표 3-6-1. 국내 유통매장에서 판매되고 있는 유기농산물의 $\delta^{15}\text{N}$ 분석

시료명	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	시료명	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
양파	1.73	깻잎	9.29
피망	3.71	케일쌈	9.89
피망	4.25	깻잎	10.32
잡곡	4.47	감자	10.62
오이	4.61	상추	11.34
상추	5.29	치커리	11.79
고추	5.65	배청채	11.92
감자	6.55	고추	12.94
명일잎	7.07	치커리	13.22
녹미	7.20	고추	13.51
양파	7.34	상추	14.36
깻잎	7.50	호박	16.02
깻잎	7.57	상추	17.69
호박	7.79	오이	21.09
양파	7.97	마늘종	21.93
적색잎치커리	8.64	깻잎	25.97

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

본 연구는 질소 동위원소비를 이용하여 유기농산물 중에서 화학비료의 사용 여부를 확인할 수 있는 기술을 개발하는 데에 목적을 두고 있다. 세부적으로는 1차 년도에서 질소질 비료의 시용에 따른 작물체와 토양의 질소 동위원소비에서 어떤 차이를 보이는지에 대해 실험을 통해 구명하고자 하였다. 2차 년도에서는 1차년도 결과를 바탕으로 작물체와 토양을 분석하여 유기농산물을 판별하기 위한 방법을 정립하고 이를 일반 유통 농산물에 적용하여 평가하고자 하였다.

제 1 절 1차년도 연구목표 달성도

제 1 항 화학비료와 퇴비 시용에 따른 작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이 구명

작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 화학비료와 퇴비의 시용에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 퇴비를 시용한 경우 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 대부분 9%이상의 값을 보였고 화학비료를 단일 시비하거나 퇴비와 혼합시비하였을 경우에 대부분 6%이하의 값을 보였다. 이런 값에 대해 실제 재배되고 있는 유기농산물과 관행농산물을 채취하여 분석한 경우에도 이에 해당하는 범위의 값을 보였다. 따라서 화학비료와 퇴비 시용에 따른 작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 가질 수 있는 범위가 상당부분 정립되었다고 판단된다.

제 2 항 최종 수확 작물체 부위별 $\delta^{15}\text{N}$ 값 변화 양상 차이를 이용한 유기농산물 판별 기술

작물체의 전체 부위에서 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이가 뚜렷하게 나타난다면 작물체 부위별 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이를 이용할 필요는 없겠지만, 어떤 시료들은 판별하기 어려운 중간 정도의 값을 가지는 경우가 있다. 또한 작물 생육을 좋게 하기 위해서 중간에 화학비료를 처리할 수도 있다. 이런 경우에는 작물체의 부위별 분석을 통해서 좀

더 세밀한 정보를 얻을 수 있다고 생각된다. 본 연구에서도 이에 대해 연구를 했고 예상했던 결과를 얻을 수 있었다. 화학비료를 처리하였을 경우 이 시점부터 생성되는 부위의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 화학비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 수준으로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이럴 경우는 전체 부위의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 분석하여 얻지 못한 정보를 얻어 좀 더 세밀하게 유기농산물을 판별할 수 있었고 비료 시비 이력에 대해서 이해할 수 있는 정보도 얻었다.

제 3 항 작물체 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경시적 변화 경향을 이용한 유기농산물 판별 기술

작물에 대해 생육 단계별로 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화 경향을 본다면 더욱 정확하게 유기농산물을 판별할 수 있다. 본 연구에서는 한 종류의 질소질 비료를 사용할 경우 작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 경시적으로 일정하게 유지함을 알 수 있었다. 그러나 중간에 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 다른 종류의 비료를 처리했을 경우 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 뚜렷하게 변하는 것을 볼 수 있었다. 특히 유기농가에서 작물 재배 중간에 화학비료를 시용할 경우 작물체 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 경시적으로 감소할 것이다.

이는 유기재배 농가를 관리하는 하나의 항목이 될 수 있다. 지금까지 많은 인증기관에서 유기재배 농가를 관리하고 있지만 인증 항목 중에 하나인 화학비료 사용에 대해서 어떤 방법도 없었다. 그렇게 때문에 주기적으로 작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 분석함으로써 좀 더 신뢰성있게 유기농가를 인증할 수 있을 것이다.

제 4 항 유기농 및 관행농경지 토양 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이 구명

토양의 경우 본래 존재하는 질소의 양이 거대하고 오랜 기간에 걸쳐서 질소 동위원소 분할이 일어나기 때문에, 질소질 비료를 처리했다라고 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 쉽게 변하지는 않는다. 그래서 본 연구에서 조사한 유기농 및 관행 농경지 토양질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 작물체 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값과 비교 분석했을 때 토양 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 유기농산물을 구분하는 인자로 사용할 수 있었다. 유기농산물을 판별하기 위해 토양질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 단독으로 이용하는 것은 아직까지 힘들고 작물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이해하기 위한 요소로 이용할 수 있다.

제 2 절 2차년도 연구목표 달성도

제 1 항 작물체 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화에 대한 영향 인자를 고려한 유기농산물 판별법 정립

토양의 질소 동위원소비를 변화시키는 가장 큰 요인 중에 하나는 질산화 반응과 탈질 반응이다. 본 연구의 항온배양실험에서 본 것 처럼 밭 토양 조건의 경우 질산화 반응을 통해 가장 크게 질소 동위원소 분할이 일어난다. 그러나 이 경우에는 수분함량이 낮기 때문에 탈질에 의해 질소 손실이 적다. 따라서 전체적으로 토양에 남아 있는 질소의 동위원소비는 거의 변화가 없고, 식물체의 질소 동위원소비는 처리한 질소질 비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값에서 크게 변하지 않을 것이라는 결론을 얻을 수 있었다.

제 2 항 토양질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화에 대한 영향 인자를 고려한 유기농산물 판별법 정립

1년차 연구에서 토양 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 질소질 비료의 시비에 의해 거의 변하지 않는 것을 볼 수 있었다. 토양 총질소의 경우는 장기간에 걸쳐서 유기 또는 관행재배를 했을 경우에 질소 동위원소비에서 다소 차이가 생겨 유기농을 구분할 수 있을 것이다. 이것은 관행농과 유기농 지역의 토양을 채취해서 분석한 결과 알 수 있었다. 토양 무기태 질소는 질소질 비료를 처리한 후 20일까지 처리한 비료의 특징을 반영해 주는 질소 동위원소비를 보였다. 특히 질산태 질소에서 잘 보여주었다. 따라서 토양의 주기적인 관찰로 화학비료의 사용여부를 확인 할 수 있음을 확인하였다.

제 3 항 유통 농산물을 대상으로 한 $\delta^{15}\text{N}$ 방법의 적용 및 평가

유통되고 있는 유기 농산물을 분석한 결과 약 50%의 시료가 유기농산물로써 확인되었고 약 16%의 시료는 화학비료를 사용했다고 판단되었다. 그리고 나머지 부분은 현지 토양에 대한 분석과 시비한 질소질 비료에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 아직까지는 시중에 유통되고 있는 유기농산물을 대상으로 본 기술을 이용하여 100% 인증할 수 없고 지금으로서는 현지 관리부터 들어가서 주기적인 질소 동위원소비 측정을 통해 유기농산물을 인증하는 것이 가장 적절한 방법이라고 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

유기농산물을 판별하기 위한 수단으로 질소 동위원소비를 이용하였는데 주요 대상은 작물체였다. 토양 질소의 경우 그 양이 거대하고 다양한 반응을 거치면서 질소 분할이 일어나기 때문에 토양 질소 자료만을 이용해서 처리한 질소에 대한 정보를 찾기는 힘들다. 토양으로부터 처리한 질소의 정보를 찾기 위해서는 지금 까지 분류의 토양의 질소 이외에 더 세부적으로 토양 질소를 분리하는 기술을 개발하여야 할 것이다. 여기서 분석한 작물체와 시료 수에는 한계가 있어서 유기농산물을 구분 짓는 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 범위를 정하기에는 다소 큰 오차의 위험을 감수해야 할 것이다. 따라서 좀 더 신뢰성 있는 기준을 정립하기 위해서는 장기간에 걸쳐 유기농가에 대한 모니터링이 필요하다고 본다.

또, 토양의 $\delta^{15}\text{N}$ 별 질소원의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 변화; 모든 유기질 비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 조사; 우리나라 농경지의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 분포 조사; 콩의 $\delta^{15}\text{N}$ 값에 미치는 유기 또는 무기 비료의 효과 및 추비 효과; 외국 수입 농산물의 산지 토양 $\delta^{15}\text{N}$ 값과 시용 유기질 비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값; 서로 다른 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 갖는 토양(전환기 유기농 관련, 즉 연차 누적 효과도 고려)에 퇴비와 혼용 비료의 시용률을 달리한 실험; 토양과 퇴비의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이와 수확전 비료 시용(율)이 작물의 $\delta^{15}\text{N}$ 값에 미치는 영향 등에 관한 연구가 뒤 따라야 한다. 특히, 이 기술을 가공식품의 인증에 이용하고자 할 때는 가공 과정에서 나타날 수 있는 분할효과에 대한 연구도 필수적이다. 앞으로 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화에 영향을 줄 수 있는 작물별 생육시기의 영향, 토양의 영향, 질소 시비율과 시비 빈도, 동위원소 분할과 연관된 질소의 행태 등에 관한 연구가 필요하다.

제 2 절 타 연구에의 응용

이 연구와 비슷한 기술을 이용한 연구는 세계적으로 몇몇 진행되고 있다. 그

중 대표적인 것은 수계, 특히 지하수의 질산태 질소 유입원을 찾는 연구이다. 이것도 화학비료와 퇴비의 질소 동위원소비 차이를 이용한다. 예를 들어서 하천 주위에 점오염원에 해당하는 목장이 있고 주위에 비점오염원에 해당하는 경작지가 있다고 하자. 이때 하천이 질산태질소에 의해 오염된 경우 질소 동위원소비 분석을 통해 이것이 어느 오염원에서 유출되었는지에 대해 유추할 수 있는 정보를 얻을 수 있다.

제 3 절 기업화 추진 방안

본 연구의 개발 기술은 친환경농산물 품질인증과 관련해서 법령 및 제도 개선 등 정책자료, 농업인 교육·지도 자료 및 산업체 기술이전, 국내외 특허 출원 등의 유형으로 활용 가능하다. 우선 법령 및 제도의 측면에서 현재의 친환경농산물 품질 인증 체계에서는 과학적으로 확인 불가능했던 화학비료 또는 유기질비료 시비 여부에 대한 판별 항목 및 그 방법을 보완하는 것이 가능하다. 농업인 교육·지도의 측면에서는 본 기술을 교육·홍보하여 바람직하지 못한 화학비료 사용을 사전에 억제할 수 있으며, 경작 기간 동안 품질인증 농가의 작물을 대상으로 화학비료 사용 여부를 모니터링하여 농업인 지도에 활용할 수 있다. 그러나 품질인증 기관에서 본 기술의 직접적인 활용을 위해서는 고가의 장비와 숙련된 전문가가 필요하고 관련 법령과 제도의 보완이 요구되기 때문에, 본 기술의 현장 적용에는 일시적인 애로사항이 있을 것으로 판단된다. 다른 측면으로 본 기술을 활용하는 품질인증 기관은 다른 기관에 비해 훨씬 신뢰성 있는 품질 인증 작업을 진행할 수 있으며, 실제 농산물을 거래하는 대형 유통업체의 경우 본 기술을 도입하여 자사 상품에 대한 별도의 검사를 통해 소비자에게 보다 믿을 수 있는 농산물을 공급하는데 활용될 수 있을 것이다.

제 6 장 참고문헌

- Aulakh, M.S., Khera, T.S., Doran, J.W., 2000. Mineralization and denitrification in upland, nearly saturated and flooded subtropical soil. I. Effect of nitrate and ammoniacal nitrogen. *Biology and Fertility of Soils* 31, 162-167.
- Beauchamp E G 1986 Availability of nitrogen from three manures to maize in the field. *Can. J. Soil Sci.* 66, 713-720.
- Bergersen F J, Peoples M B and Turner G L 1988 Isotopic discriminations during the accumulation of nitrogen by soybeans. *Aus. J. Plant Physiol.* 15, 407-420.
- Beven K and Germann P 1982 Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.* 18, 1311-1325.
- Bloom A J 1988 Ammonium and nitrate as nitrogen sources for plant growth. *ISI Atlas of Sci.* 1, 55-59.
- Choi W J, Jin S A, Lee S M, Ro H M and Yoo S H 2001 Corn uptake and microbial immobilization of ^{15}N -labeled urea-N in soil as affected by composted pig manure. *Plant Soil* 235, 1-9.
- Choi, W.J., 2002. Natural ^{15}N abundances and source identification of nitrogen in soil-plant-groundwater system as affected by chemical fertilizer and composted manure. PhD dissertation, Seoul National University, Seoul, pp. 98.
- Choi, W.J., Lee, S.M., Yoo, S.H., 2001. Increase in $\delta^{15}\text{N}$ of nitrate through kinetic isotope fractionation associated with denitrification in soil. *Agricultural Chemistry and Biotechnology* 44, 135-139.
- Christie, P., Wasson, E.A., 2001. Short-term immobilization of ammonium and nitrate added to a grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry* 33, 1277-1278.
- Criss, R.E., 1999. Principles of stable isotope distribution, Oxford University

- Press, New York, pp. 16.
- Delwiche, C.C., Steyn, P.L., 1970. Nitrogen isotope fractionation in soils and microbial reactions. *Environmental Science and Technology* 4, 929-935
- Ehleringer J R and Rundel P W 1988 Stable isotopes: history, units, and instrumentation. *In* *Stable Isotopes in Ecological Research*. Ed. P W Rundel et al.. pp 1-15. Springer-Verlag, New York.
- Evans R D 2001 Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition. *Trends Plant Sci.* 6, 121-126.
- Evans R D, Bloom A J, Sukrapanna S S and Ehleringer J R 1996 Nitrogen isotope composition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. Cv. T-5) grown under ammonium or nitrate nutrition. *Plant Cell Environ.* 19, 1317-1323.
- Feast, N.A., Dennis, P.F., 1996. A comparison of methods for nitrogen isotope analysis of groundwater. *Chemical Geology* 129, 167-171.
- Feigin, A., Shearer, G.B., Kohl, D.H., Commoner, B., 1974. The amount and nitrogen-15 content of nitrate in soil profiles from two central Illinois fields in a corn-soybean rotation. *Soil Science Society of America Proceedings* 38, 465-471.
- Handley L L and Raven J A 1992 The use of natural abundance of nitrogen isotopes in plant physiology and ecology. *Plant Cell Environ.* 15, 965-985.
- Handley L L and Scrimgeour C M 1996 Terrestrial plant ecology and ¹⁵N natural abundance: the present limits to interpretation for uncultivated systems with original data from a Scottish old field. *Adv. Ecol. Res.* 27, 133-212.
- Hauck R D 1982 Nitrogen-isotope ratio analysis. *In* *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Micorbiological Properties*. Ed. A L Page et al.. pp 735-779. ASA and SSSA, Madison and Wisconsin.
- Hodges R D 1991 Soil organic matter: Its central position in organic farming. *In* *Advances in soil organic matter research: The impact on agriculture and the environment*. Ed. W S Wilson. pp 355-364. The Royal Society of Chemistry, Redwood Press, Wiltshire.

- Högberg P 1997 Tansley Review No.95 ^{15}N natural abundance in soil-plant systems. *New Phytol.* 137, 179-203.
- Keeney and Nelson 1982 Nitrogen-inorganic forms. *In* Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Micorbiological Properties. Ed. A L Page et al. pp 643-698. ASA and SSSA, Madison and Wisconsin.
- Limaux F, Recous S, Meynard J M and Guckert A 1999 Relationship between rate of crop growth at date of fertilizer N application and fate of fertilizer N applied to winter wheat. *Plant Soil* 214, 49-59.
- Mariotti A, Germon J C, Huber P, Kaiser P, Letolle R, Tardieux A and Tardieux P 1981 Experimental determination of nitrogen kinetic isotope fractionation: some principles; illustration for the denitrification and nitrification processes. *Plant Soil* 62, 423-430.
- Mariotti A, Mariotti F, Champigny M L, Amarger N and Moysé A 1982 Nitrogen isotope fractionation associated with nitrate reductase activity and uptake of NO_3^- by Pearl Millet. *Plant Physiol.* 69, 882-884.
- Millard P 1988 The accumulation and storage of nitrogen by herbaceous plants. *Plant Cell Environ.* 11, 1-8.
- Papendick R I and Elliott L F 1984 Tillage and cropping systems for erosion control and efficient nutrient utilization. *In* Organic farming: Current technology and its role in a sustainable agriculture. ASA Spec. Publ. 46. Ed. D F Bezdicsek et al.. pp 69-81. ASA, CSSA and SSSA, Wisconsin.
- Robinson D 2001 ^{15}N as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends Ecol. Evol.* 16, 153-162.
- Robinson D, Handley L L and Scrimgeour C M 1998 A theory for $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ fractionation in nitrate-grown vascular plants. *Planta* 205, 397-406.
- Turner G L, Gault R R, Morthorpe L, Chase D L and Bergersen F J 1987 Differences in the natural abundance of ^{15}N in the extractable mineral nitrogen of cropped and fallowed surface soils. *Aus. J. Agric. Res.* 38, 15-25.
- Yoneyama T and Kaneko A 1989 Variations in the natural abundance of ^{15}N in nitrogenous fractions of komatsuna plants supplied with nitrate. *Plant*

Cell Physiol. 30, 957-962.

Yoneyama T, Kouno K and Yazaki J 1990 Variation of natural ^{15}N abundance of crops and soils in Japan with special reference to the effect of soil conditions and fertilizer application. Soil Sci. Plant Nutr. 36, 667-675.

Yoneyama T, Omata T, Nakata S and Yazaki J 1991 Fractionation of nitrogen isotopes during the uptake and assimilation of ammonia by plants. Plant Cell Environ. 32, 1211-1217.

부 록

1. 배추 생육 실험에서의 배추 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경시적 변이
2. 배추 생육 실험 사진
3. 향온배양 실험에서의 질소함량과 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경시적 변이

1. 배추 생육 실험에서의 배추 질소함량과 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경시적 변이

표 1-1. 생육 시기에 따른 배추 전체 부위의 $\delta^{15}\text{N}$

Treatment	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		
	20 일	40 일	60 일
Control	1.4	2.1	2.2
C4	14.3	16.5	12.0
U2	-4.1	0.4	0.3
C2/U1			3.4
C2/C2	12.0	10.7	9.6
U1/U1			-2.2
U1/C2	-2.6	-1.0	2.7
LSD ($P=0.05$)	1.2	4.1	2.4

표 1-2. 배추 생육 20일에 잎 부위별 질소의 $\delta^{15}\text{N}$

Treatment	20 일			LSD ($P=0.05$)
	외엽	중엽	내엽	
	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)			
Control	1.4	1.6	0.8	2.9
C4	15.3	14.5	11.5	1.7
U2	-3.7	-4.2	-4.0	1.7
C2/U1				
C2/C2	13.5	12.1	10.4	1.1
U1/U1				
U1/C2	-0.9	-2.7	-3.4	1.0

표 1-3. 배추 생육 40일에 잎 부위별 질소의 ^{15}N

Treatment	40 일			LSD (P=0.05)
	외엽	중엽	내엽	
	^{15}N (‰)			
Control	0.8	-0.4	-0.1	4.6
C4	178.9	18.0	13.5	3.9
U2	0.6	0.3	-1.1	4.6
C2/U1				
C2/C2	13.4	8.5	11.7	3.2
U1/U1				
U1/C2	1.8	0.8	-0.9	2.8

표 1-4. 배추 생육 60일에 잎 부위별 질소의 ^{15}N

Treatment	60 일			LSD (P=0.05)
	외엽	중엽	내엽	
	^{15}N (‰)			
Control	1.5	1.9	2.9	2.3
C4	12.5	9.9	13.6	1.7
U2	-1.3	-1.6	2.2	4.5
C2/U1	5.5	1.9	0.2	3.0
C2/C2	8.8	9.4	11.1	3.4
U1/U1	-4.0	-2.9	-0.5	3.8
U1/C2	1.4	4.0	3.6	2.3

2. 배추 생육 실험 사진



그림 2-1. 배추 생육 30일 후 배추 생육 전경



그림 2-2. 무처리구(Control)의 배추 생육 30일 후 모습



그림 2-3. C4 처리구의 배추 생육 30일 후 모습



그림 2-4. U2 처리구의 배추 생육 30일 후 모습



그림 2-5. C2U1 처리구의 배추 생육 30일 후 모습



그림 2-6. C2C2 처리구의 배추 생육 30일 후 모습



그림 2-7. U1U1 처리구의 배추 생육 30일 후 모습



그림 2-8. U1C2 처리구의 배추 생육 30일 후 모습



그림 2-9. 배추 생육 후 40일에 추비로 퇴비를 처리하는 모습



그림 2-10. 배추 생육 후 40일에 추비로 처리한 후 표토를 섞어 주는 모습



그림 2-11. 무처리구(Control)의 배추 생육 60일 후 모습



그림 2-12. C4 처리구의 배추 생육 60일 후 모습



그림 2-13. U2 처리구의 배추 생육 60일 후 모습



그림 2-14. C2U1 처리구의 배추 생육 60일 후 모습



그림 2-15. C2C2 처리구의 배추 생육 60일 후 모습



그림 2-16. U1U1 처리구의 배추 생육 60일 후 모습



그림 2-17. U1C2 처리구의 배추 생육 60일 후 모습

3. 항온배양 실험에서의 질소함량과 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경시적 변이

표 3-1. 불포화토양에서 배양시간에 따른 NH_4^+ 의 농도와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화

Incubation time (day)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration (mg kg^{-1})	$\delta^{15}\text{N}$ of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (‰)
0	164.75	-0.44
0.17	159.85	0.02
0.42	155.73	0.86
1.04	150.04	2.68
2.17	118.64	9.52
3.25	97.09	20.68
5.04	54.73	38.60
7	34.40	57.23

표 3-2. 포화토양에서 배양시간에 따른 NH_4^+ 의 농도와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화

Incubation time (day)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration (mg kg^{-1})	$\delta^{15}\text{N}$ of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (‰)
0	162.40	0.80
4	132.73	2.72
12	92.42	5.80
16	65.70	9.62
20	52.62	12.31
24	42.14	14.99
30	33.75	17.56
36	24.19	21.02

표 3-3. 불포화토양에서 배양시간에 따른 NO₃⁻의 농도와 ¹⁵N의 변화

Incubation time (day)	NO ₃ ⁻ -N concentration (mg kg ⁻¹)	¹⁵ N of NO ₃ ⁻ -N (‰)
0	32.00	-3.34
0.17	36.41	-4.93
0.42	48.03	-6.24
1.04	52.34	-10.2
2.17	70.21	-18.04
3.25	108.13	-16.78
5.04	131.53	-15.00
7	167.37	-8.63

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.