

사업구분 : 산학연공동	Code 구분 :	농업환경(전반기)
연구과제 및 세부과제명	연구기간	연구책임자
농경지 배출 온실가스 저감기술에 관한 연구	'00~'04	농과원 환경생태과 이정택
강원지역 농경지 배출 온실가스 저감기술 연구	'00~'04	강원도원 환경농업연구과 김세원
색인용어	목초액, 친환경농자재, 병해방제, 생물검정, 토마토, 오이, 고추, 배추	

ABSTRACT

This study was carried out to monitoring the greenhouse gas from paddy and upland soil in Gangwon Province from 2000 to 2004. During five years this is experimented with three steps as follows applying various fertilization methods. So we could obtain the possible options for mitigating greenhouse gases.

- Step 1. Measurement emission of CH₄ and N₂O in a paddy soil incorporated with rice straw and in a upland soil with non-urea fertilization
- Step 2. Effects of organic matter application and nitrogen fertilization level on the emission of CH₄ and N₂O in a paddy and upland soil
- Step 3. Effects of liquid pig manure on the emission of CH₄ and N₂O in a paddy and upland soil

1. 연구배경

최근 온실가스 규제로 지구온난화를 막자는 국제기후협약인 교토의정서 발효가 임박하고 있다. 지구온난화에 기여하는 물질은 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등이 있으며 휘발성 유기화합물과 질소산화물(NO_x)의 대기중 광화학 과정을 통해 생성되는 오존(O₃) 등이다. 대기중 메탄에 대한 다양한 배출원의 하나인 논은 최근 세계적으로 재배면적이 늘어나고 있으므로 지구온난화의 주요 잠재적 배출원으로 간주되고 있다. 농업부문 배출 온실가스 가운데 아산화질소는 농경지에 시용된 질소질 화학비료나 가축분뇨 중 질소에서 배출된다. 지구온난화잠재력(Global Warming Potential)은 이산화탄소와 비교하여 메탄은 21배, 아산화질소는 310배에 이른다.

농경지로부터 온실가스를 저감시키기 위해 세계의 농경지 면적을 감소시키는 것은 현재의 폭발적인 식량수요를 감안하면 불가능하므로 단위면적당 메탄, 아산화질소 등의 발생량을 최소화시켜 나가는 방안이 강구되어야 한다.

최근 국내에서도 논에서의 물관리방법 및 재배양식별, 유기물과 완효성비료를 포함한 질소비료 종류별, 품종별 온실가스 배출저감 기술에 대한 많은 연구가 행하여지고 있는 바, 본 연구는 전국 각 기관과 공동 프로젝트 과제로서 강원도 지역에 대한 농경지 온실가스 배

출량을 모니터링하여 국가 정책자료에 대한 자료 축적을 도모하기 위해 강원지역 논과 대표 밭작물에 대하여 유기물 시용 및 질소 공급 수준에 따른 배출량을 조사하고자 수행되었다. 특히 순환농법의 일환으로 보편화된 가축분뇨 농경지 사용과 관련하여 화학비료를 대체할 경우 온실가스가 많이 발생하였다고 한 기존 결과들에 있어서 화학비료의 공정생산을 위해 많은 이산화탄소의 배출이 수반된다는 점이 대부분 언급되지 않아 단순비교에는 무리가 있다고 판단하여 농경지에서 가축분뇨 액비 시용에 따른 온실가스 배출저감을 위한 기초자료로 이용하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

강원지역 농경지배출 온실가스 모니터링 및 저감기술 개발을 위해 5개년간 3단계에 걸쳐 시험을 수행하였다. 1단계로서 논에서 벼짚 유기물의 가을시용 및 벼 품종에 따른 비교와 밭에서의 질소시용 유무에 따른 온실가스 배출량을 조사하였고 2단계에서는 논에서 질소 무비 처리구와 밭에서 고랭지와 평야지를 구분하고 질소 30% 감비 수준을 추가하였으며 공시작물로서 배추외에 감자에 대해서 조사하였다. 마지막 3단계에서는 논에서 벼짚대신 유기물로 시판 부산물퇴비를 시용하고 가축분뇨 액비 시용방법을 적용하여 논과 밭 모두 조사하였다.

가. 온실가스(CH₄, N₂O) 분석방법

포장에서 메탄과 아산화질소 flux를 조사하기 위해 간이폐쇄챔버법을 이용하였으며, 논토양에서는 60×60×100cm 크기의 밀폐식 polyacrylic plastic chamber를 이양직후 설치하였고, 밭토양에서는 62×62×30cm 크기의 chamber를 정식 직후 설치하였다<그림 1>. 시료는 주1~2회, 오전10~11시에 60mℓ syringe로 수확기까지 채취한 후 시료채취 전후의 챔버내 온도를 기록하였고 분석시기 지연을 대비하여 진공상태의 vial에 옮겨 보관하며 분석하였다. 하였다. 채취된 시료는 Gas Chromatography(HP6890)로 분석하여 아래의 배출계수(flux)로 환산하였다.

$$\text{Flux} = \rho \times V / A \times \rho \times V / A \times \Delta C / \Delta t \times 273 / (273 + T) \times 273 / (273 + T)$$

ρ : 가스밀도 상수(mg/m³) - 메탄은 1.96, 아산화질소 1.25

V : Chamber 체적(m³)

A : Chamber 바닥면적(m²)

ΔC : 밀폐전후 메탄농도변화(ppmv)

Δt : 밀폐된 시간(hr)

ΔC/Δt : 가스농도 평균증가속도

T : Chamber내 평균온도(°C)



[그림 1] 논과 밭에서의 챔버 설치 및 가스 채취

나. 논 유기물(볏짚) 시용 및 밭 질소 무시용에 따른 비교(1단계)

1) 논토양

본 시험은 강원도농업기술원 답작포장(춘천 우두동)에서 2개년간('00~'01) 수행되었는데 1년차에 오대벼를 공시하여 2000년 5월 17일, 2년차에는 상주찰벼를 2001년 5월 14일 이앙하였다. 수확기까지 총재배기간은 110일이었다. 당해시험 전년도 가을 벼 수확기에 유기물로써 볏짚을 10a당 700kg 수준으로 시용한 후 깊이갈이하였고 대조구로써 유기물 무시용구를 두었다. 표준시비량은 $N-P_2O_5-K_2O = 11-4.5-5.7$ (kg/10a)로 전층시비하였다. 물관리 방법은 상시담수 상태로 유지하였다.

생육 및 수량조사는 수확기에 農村振興廳 農事試驗研究 調査基準法에 準하여 수행하였고 토양의 산화환원전위는 토양Eh미터(EHS-120)를 이용하여 측정하였다. 가스시료는 주1회 채취하였다.

2) 밭토양

본 시험은 평창 진부에서 2개년간 가을배추에 대하여 검정시비구와 무질소구를 두어 수행하였다. 1년차에는 올림픽배추를 공시하여 2000년 6월 15일 정식하였는데 검정시비량은 $N-P_2O_5-K_2O=26.4-11.5-18.1$ (kg/10a)이었다. 2년차에는 미호70호를 공시하여 2001년 9월 30일 정식하였는데 검정시비량은 $N-P_2O_5-K_2O= 34.7-32.6-6.4$ (kg/10a)이었다. 생육 및 수량조사는 수확기에 農村振興廳 農事試驗研究 調査基準法에 準하여 수행하였다.

다. 논 질소 무시용 및 밭에서 질소감비 수준과 지대별 비교(2단계)

1) 논토양

본 시험은 1단계와 동일한 논포장에서 2개년간('02~'03) 수행되었는데 오대벼를 공시하여 1년차(2002년)에는 5월 25일, 2년차(2003년)에는 5월 22일 이앙하였다. 수확기까지 재배기간은 1년차에 109일, 2년차에 120일이었다. 유기물 시용처리는 1단계와 동일하게 하였고 표준시비구, 볏짚 가을시용구, 무질소구 등 3처리를 두었다. 2단계 시험 수행에 앞서 볏짚 유기물시용 여부에 따른 재배전 토양화학성은 표 1과 같다. 논토양 벼 재배지 시험전 토양 환경은 전년 볏짚시용을 한 유기물시용구에서 유기물 함량이 높은 조건이었다.

<표 1> 2002년 공시 논토양의 재배전 토양화학성

시험구	pH (1:5)	EC (ds/m)	O.M (g/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	NH ₄ -N <-- mg/kg -->	NO ₃ -N <-- mg/kg -->	Ca	K	Mg
							cmol ⁽⁺⁾ /kg		
유기물 시용	6.3	0.24	26	292	0.298	0.21	4.8	0.32	0.7
유기물무시용	6.2	0.22	37	333	0.175	0.21	3.8	0.34	0.6

2년차에는 표준시비구에 TAO액상비료(상지대 개발)를 이앙기와 최고분얼기 2회에 걸쳐 10a당 3L를 살포하였다. 분얼비는 6월 10일, 수비는 7월 19일 시용하였다. 물관리방법은 상시담수 상태로 유지하였다. 생육 및 수량조사, 토양 산화환원전위는 1단계와 동일하게 수행하였다. 단, 1년차에는 메탄과 아산화질소 모두 측정하였으나 2년차에는 메탄만 측정하였다.

2) 밭토양

본 시험은 2개년간 검정시비구와 무질소구, 질소 30% 감비구를 두고 1년차에는 고랭지(평창 황계) 여름재배로 봄노랑배추를 공시하여 5월 30일 정식하였고 검정시비량은 N-P₂O₅-K₂O=27.6-8.7-33.9(kg/10a)이었다. 평야지(춘천 우두동) 가을재배는 불암3호를 공시하여 8월 30일 정식하였고 검정시비량은 N-P₂O₅-K₂O=23.4-41.6- 19.9(kg/10a)이었다. 시험포장의 시험전 토양화학성은 표 2와 같다.

<표 2> 2002년 공시 밭토양의 시험전 토양화학성

시험장소	pH (1:5)	EC (ds/m)	O.M (g/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	NH ₄ -N <-- mg/kg -->	NO ₃ -N <-- mg/kg -->	Ca	K	Mg
							cmol ⁽⁺⁾ /kg		
고랭지	7.3	0.24	28	487	0.35	10.2	9.5	0.16	1.8
평야지	5.8	0.21	17	496	25.4	30.6	1.9	0.39	0.3

2년차에는 고랭지에서 배추 동일품종으로 5월 28일 정식하였고 검정시비량은 N- P₂O₅-K₂O=34.6-3.0-22.7(kg/10a)이었다. 평야지에서는 수미감자를 공시하여 4월 2일 정식하였고 검정시비량은 N-P₂O₅-K₂O=18.8-8.4-19.5(kg/10a)이었다.

라. 가축분뇨 액비 시용에 따른 온실가스 배출량 조사(3단계)

1) 가축분뇨 액비 화학적 특성

본 시험에 사용된 가축분뇨액비는 철원 유기재배농가 저장액비를 분양받아 사용하였는데 장기간 폭기처리에 의해 돈분뇨 슬러리가 완전분해된 상태로 상대적으로 악취도 적은 상태였다. 액비의 화학적특성은 표 3과 같다.

<표 3> 2004년 공시된 가축분뇨 액비의 화학적 특성

	일반성분(%)						중금속(ppm)							
	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	NaCl	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	Ni	Hg	As
공시액비	0.28	0.05	0.34	0.22	0.004	0.52	71.52	124	3.43	8.27	1.28	4.04	0.11	0.14
공정규격 [↓]	0.3					<0.3	50	130	30	15	0.5	5	0.2	5

↓공정규격 : '04. 9월 농진청 개정 고시

최근 가축분뇨 액비화 사업이 토양중금속 과다 집적문제로 잠정 중단된 바 있으나, 최근 공정규격이 완화되어 사업재개의 계기가 마련되고 있는 실정으로 공시된 액비는 염분농도, Cu와 Cd함량이 기준보다 약간 초과되었다.

2) 논토양

本 試驗은 2004년 한해동안 공시토양은 미사질 양토인 강원도농업기술원 답작시험포장(춘천 우두동)에서, 공시품종은 오대벼로 실시하였으며 5월 1일 파종하여 5월 24일 이앙하였다. 시험포장면적은 10a로 4등분하여 표준시비, 표준시비+유기물시용, 액비70%(기비)+화학비료30%(추비), 액비150%(전량기비)구로 나누고 단구제로 시험을 수행하였다. 유기물은 시판부산물퇴비를 변질기준 1/2량에 맞추어 500kg/10a 시용하였고, 액비시용방법은 질소기준으로 보정하여 화학비료와 같이 이앙 2일전 표층시비하였다. 표준시비량은 N-P₂O₅-K₂O = 11-4.5-5.7(kg/10a)로 하였으며 분얼비는 6월 10일, 수비는 7월 19일 시용하였다. 물관리방법은 상시담수 상태로 유지하였다. 생육 및 수량조사는 수확기에 農村振興廳 農事試驗研究 調査基準法에 準하여 수행하였고 토양의 산화환원전위는 토양Eh미터(EHS-120)를 이용하여 측정하였다. 온실가스 배출량을 측정하고자 일정규격의 가스포집챔버를 설치하여 재배기간중 주2회 시료를 채취, 기체크로마토그래프를 이용 기기분석하였다.

3) 밭토양

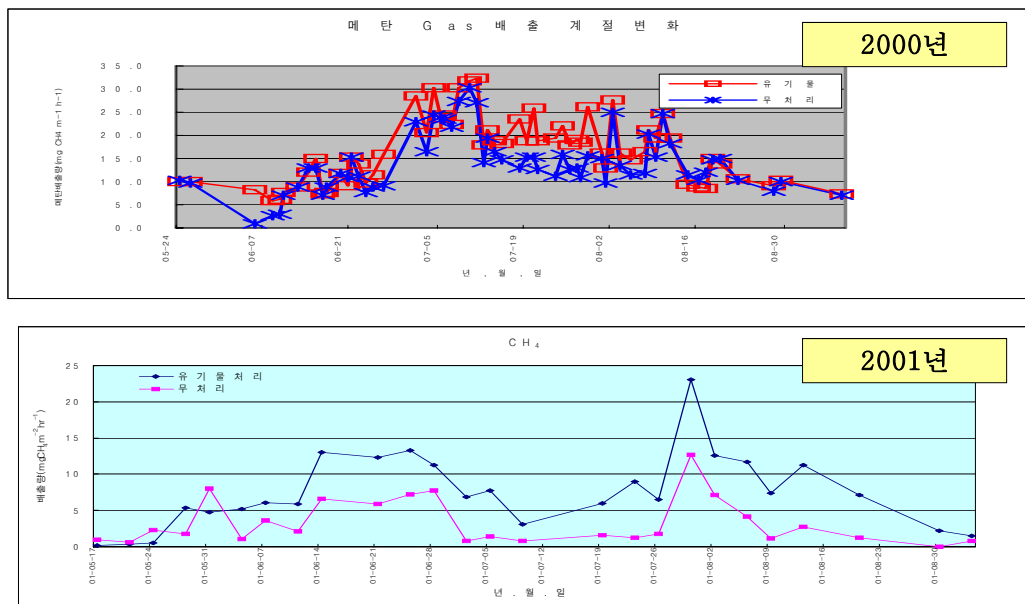
본 시험은 2004년 봄부터 가을까지 고랭지(평창)와 평야지(춘천)에서 수행하였다. 고랭지여름배추재배지의 경우 공시토양은 미사질양토인 산채시험장 인근 농가포장(평창 봉평면)에서 공시품종은 고랭지여름배추를 사용하였으며 5월 27일 정식하였다. 평야지 가을배추재배지의 경우 공시토양은 미사질양토인 강원도농업기술원 환경생태시험포장(춘천 우두동)에서 공시품종은 불암3호를 사용하였으며 8월 31일 정식하였다. 시비처리는 기비수준을 기준으로 검정시비, 질소30%감비, 액비50%+화학비료50%, 액비100%구로 나누고 단구제로 시험을 수행하였다. 가축분뇨 액비는 논에서의 시험과 동일한 재료를 사용하였고 질소기준으로 보정한후 시험포장 골타기 직전 표층살포하였다. 추비는 정식후 20일경 1회 분시하였다. 생육 및 수량조사는 수확기에 農村振興廳 農事試驗研究 調査基準法에 準하여 수행하였다. 온실가스 배출량을 측정하고자 일정규격의 가스포집챔버를 설치하여 재배기간중 주2회 시료를 채취, 기체크로마토그래프를 이용 기기분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 논 유기물(볏짚) 시용 및 밭 질소 무시용에 따른 비교(1단계)

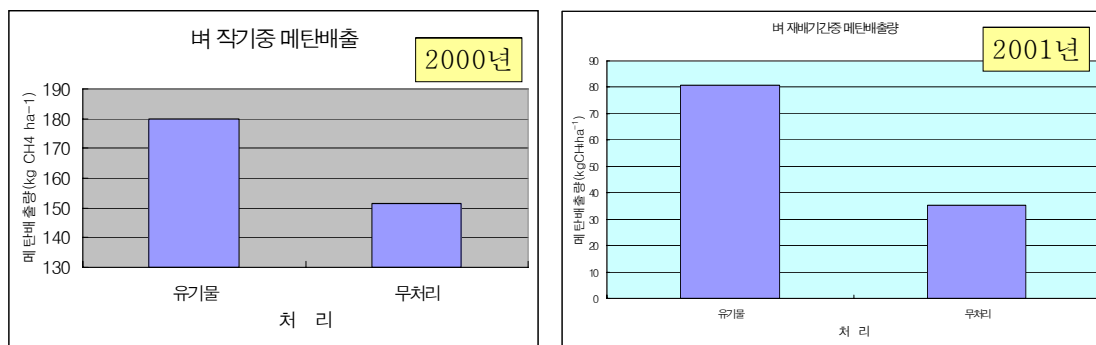
1) 논토양

논 토양중 메탄가스 발생량의 계절변화는 유기물처리시 이앙 1개월 후부터 배출량이 증가하기 시작하였다<그림 2>.



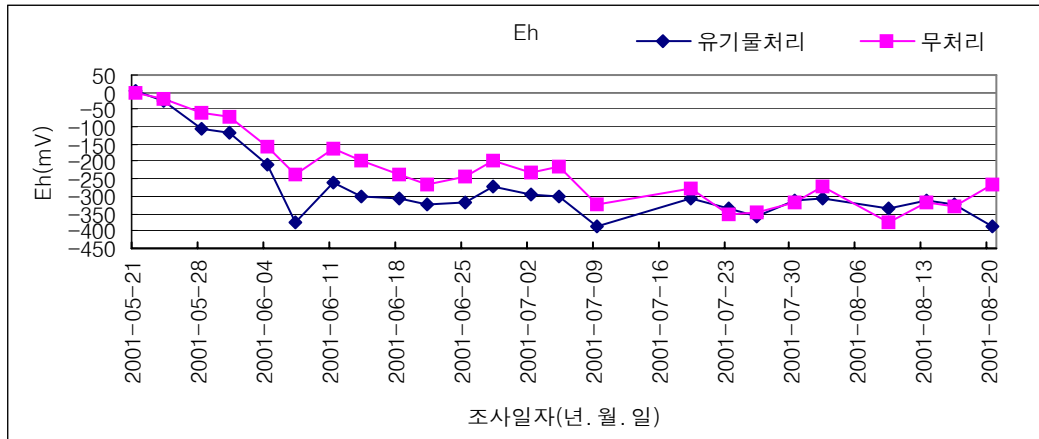
[그림 2] 2000~2001년 볏짚 유기물 시용에 따른 온실가스 배출양상

2000년 작기중 메탄 평균배출량은 유기물(볏짚시용) 처리시 16.6, 무처리시 14.0mgm⁻¹h⁻¹이었고, 작기중 메탄 배출량은 유기물(볏짚시용) 처리시 179.8, 무시용시 151.3 kgha⁻¹ 이었다. 2001년 벼 재배기간중 평균배출량은 유기물(볏짚시용) 처리시 7.47, 무처리시 3.28 mg CH₄ m⁻²hr⁻¹이었고 벼 재배기간중 중 메탄배출량은 유기물(볏짚시용)처리시 80.73, 무처리시 35.4 kg CH₄ ha⁻¹로 유기물 처리시 무처리 대비 메탄 발생량이 128% 증가하였다<그림 3>.



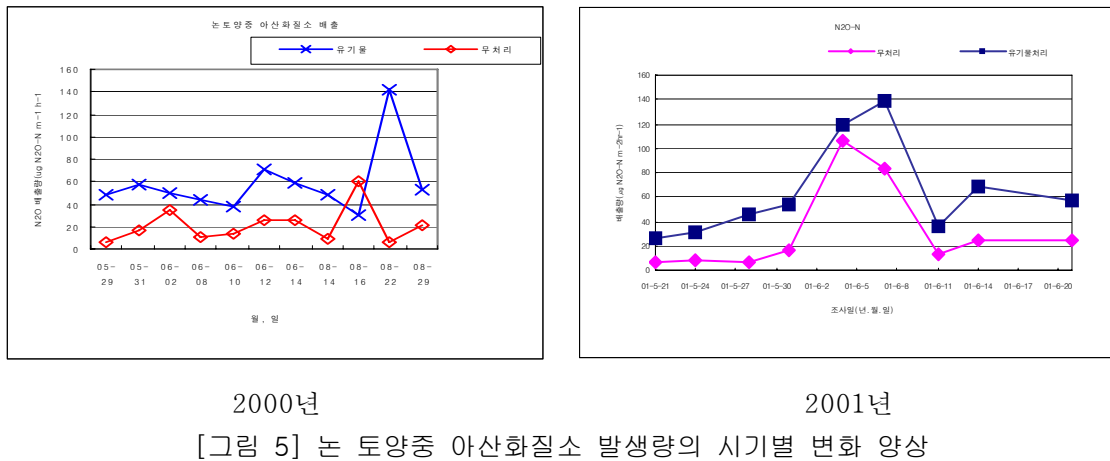
[그림 3] 벼 재배기간중 메탄배출량 비교

2001년 조사된 벼 재배기간중 논토양의 산화환원전위의 변화는 그림과 같다. 이앙직후부터 20일 경과후까지 Eh값은 급격히 떨어지다가 수확기까지 변화폭이 적은 안정한 상태가 되었다. 유기물처리시 상대적으로 논토양의 환원상태가 더 많이 진행되었고 7월중순이후 고온기에 접어들면서 차이가 없었다<그림 4>.



[그림 4] 2001년 논토양의 산화환원 전위 변화

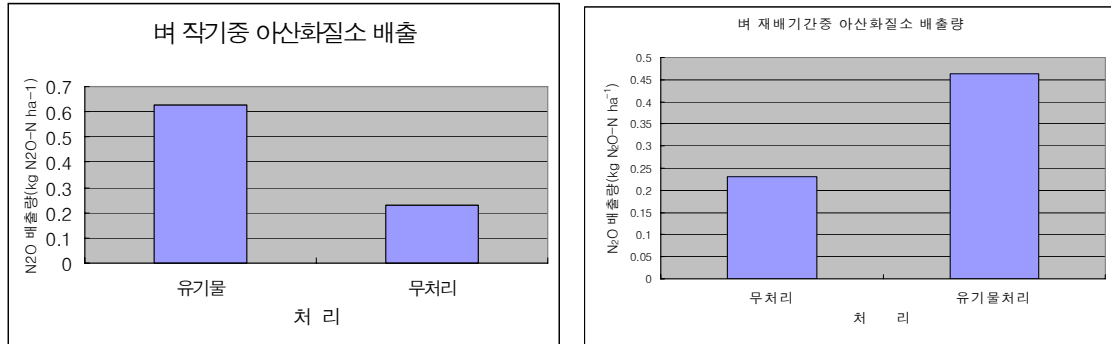
논 토양중 아산화질소 발생량의 시기별 변화 양상은 그림과 같다<그림 5>.



[그림 5] 논 토양중 아산화질소 발생량의 시기별 변화 양상

2000년 논토양중 아산화질소의 평균발생은 유기물 시용시 58.1, 무시용시 21.1ug N₂O-N m⁻¹ h⁻¹로 전작기 중 일정한 경향이였다. 또한 작기중 아산화질소 가스배출량은 유기물시용시 0.628, 무시용시 0.228kg N₂O-N ha⁻¹ 이였다. 2001년에는 아산화질소의 평균 배출량은 무처리시 32.1, 유기물처리시 64.22 ug N₂O m⁻²hr⁻¹였다. 벼 재배기간중 아산화질소 배출량은 무처리시 0.23, 유기물처리시 0.46 kg N₂O ha⁻¹ 로 유기물처리시 아산화질소

배출량이 많은 경향이였다<그림 6>.

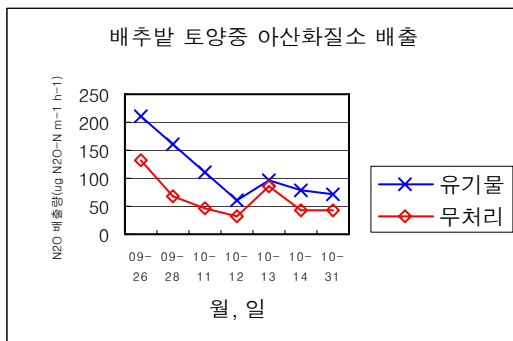


2000년 2001년

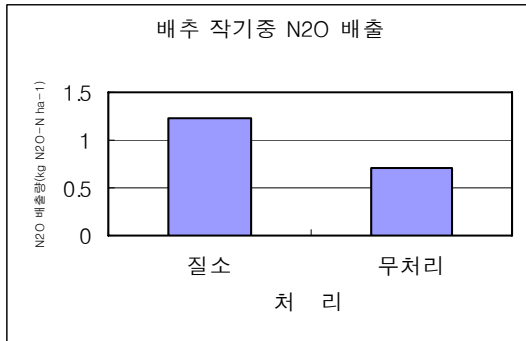
[그림 6] 벼 재배기간중 아산화질소 배출량 비교

2) 발토양(배추)

배추밭 토양중 아산화질소 배출량의 계절변화 양상은 그림과 같다<그림 7>.



[그림 7] 발토양(배추)의 아산화질소 발생량의 시기별 변화 양상



[그림 8] 배추 재배기간중 아산화질소 배출량 비교

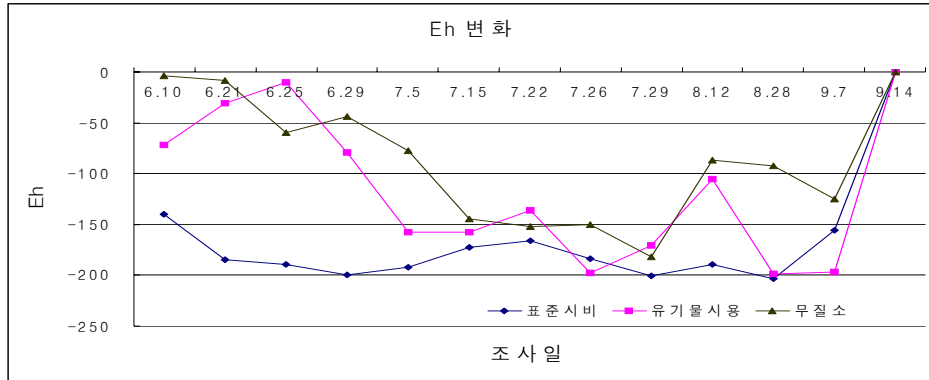
2000년 조사된 배추밭 토양중 아산화질소 배출량은 정식 20일후 질소처리 210.8, 무처리 133.0 ug N₂O-N m⁻¹ h⁻¹으로 높았으나 30일 이후는 변화량이 적었으며, 평균배출량은 질소시용시 113.0, 무시용시 64.6 ug N₂O-N m⁻¹ h⁻¹이었고, 작기중 아산화질소 배출량은 질소 시용시 1.22, 무시용시 0.69kg N₂O-N ha⁻¹ 이었다<그림 8>.

나. 논 질소 무시용 및 밭에서 질소감비 수준과 지대별 비교(2단계)

1) 논토양

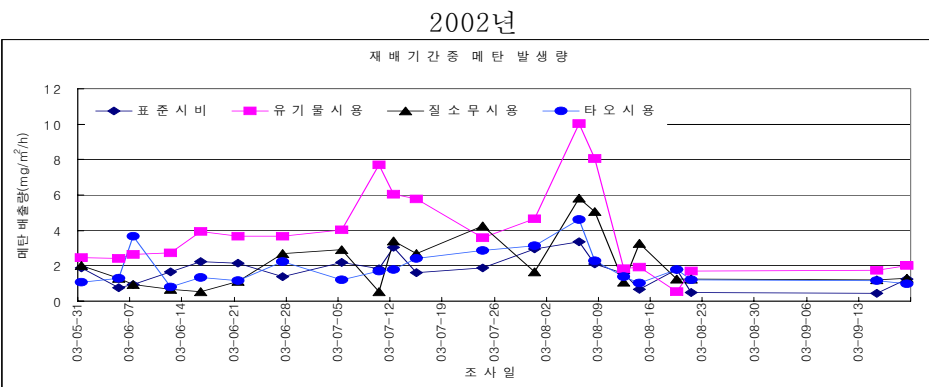
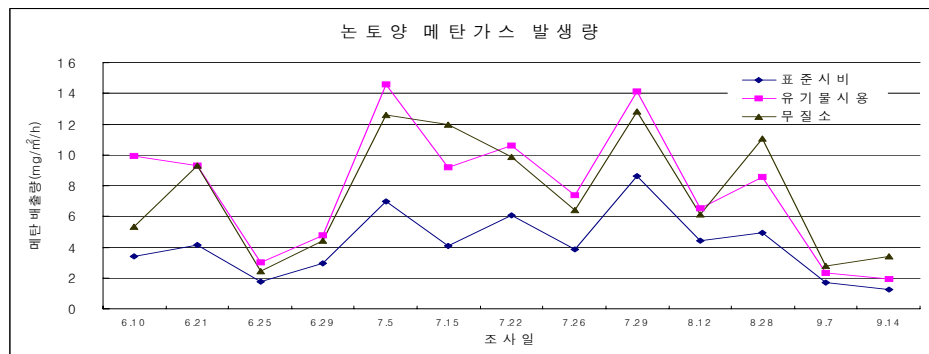
공시 논토양의 Eh 변화는 그림과 같다<그림 9>. 년차별 경향치가 불분명하였으나 볏짚 유기물 시용에 따라 토양의 환원상태가 빨리 유도됨을 알 수 있었다. 특히 2003년에 처리된 TAO액상비료의 시용시 Eh값이 낮았는데 유기물의 부숙정도가 Eh변화에 미치는 영향이

큰 것으로 추정된다.



[그림 9] 2002년 논토양의 산화환원전위 변화

재배기간중 메탄가스 배출량의 시기별 변화양상은 그림 10과 같다. 2개년 조사결과벼짚 유기물 시용시 7월상순과 7월하~8월상순경 2회에 걸쳐 배출량의 급격한 증가를 보이는 peak가 나타났는데 유기물의 분해, 무기화 기작과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다.

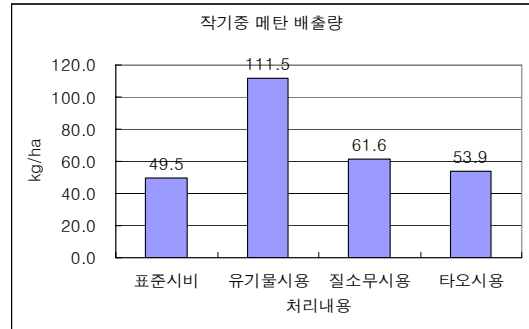
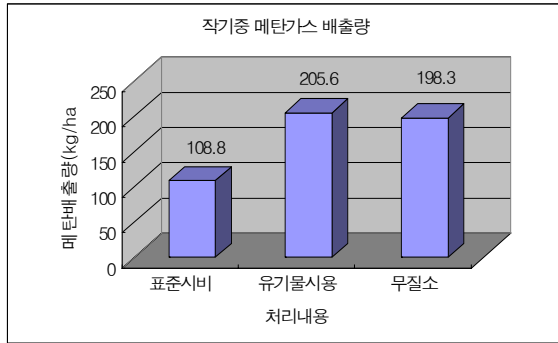


2003년

[그림 10] 2002~2003년 논토양의 메탄 배출량의 계절변화

벼재배기간중 논토양의 메탄가스 배출량은 유기물시용>무질소구(유기물시용)>표준시비(유

기물 무시용) 순으로 많은 경향이였다. 1년차 메탄 flux는 무시용 4.16, 유기물시용 7.86, 무질소 7.58($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)이였고 2년차에는 표준시비1.72, 유기물시용 3.87, 질소무시용 2.14, 타오시용1.87($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)이였다.



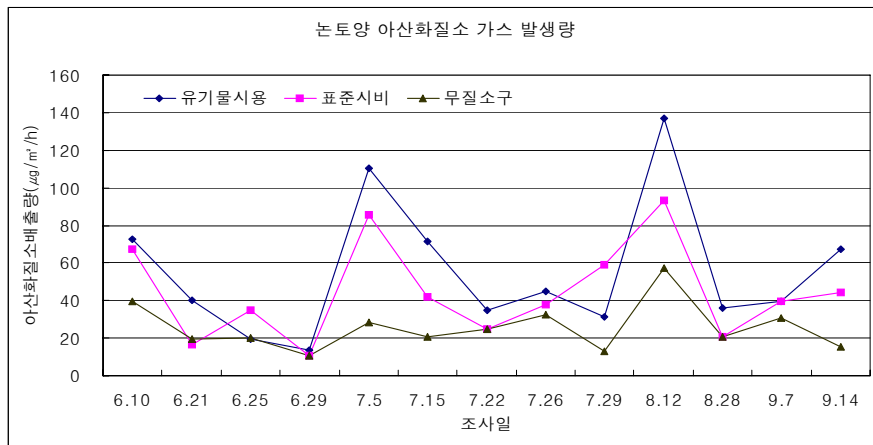
2002년

2003년

[그림 11] 2002~2003년 논토양의 작기중 메탄 배출량 비교

2002년 재배기간중 총메탄 배출량은 유기물시용 205.6, 무질소구 198.3, 표준시비 108.8 kg/ha 였으며 2003년에는 유기물시용 111.5, 질소무시용구 61.6, 타오시용 53.9, 표준시비 49.5 kg/ha 였다<그림 11>. 2003년 결과에서 지구온난화지수(GWP)로 환산할 경우 표준시비 1040, 유기물시용 2342, 질소무시용 1294, TAO액비 시용시 1132($\text{kg}/\text{CO}_2/\text{ha}$)으로 표준시비 대비 유기물시용시 GWP 1.24~2.25배 증가하였다.

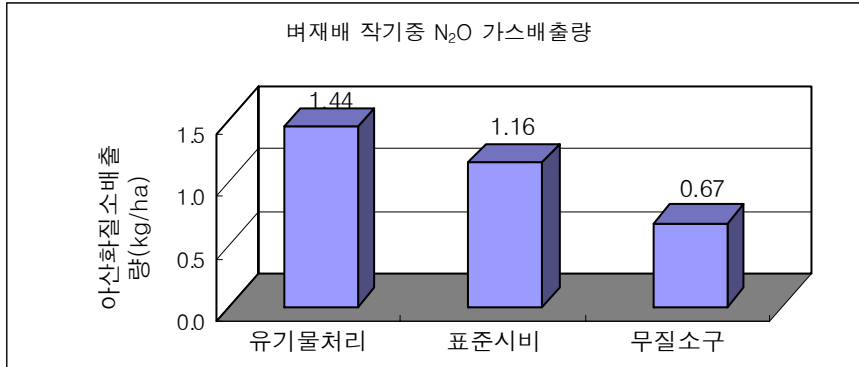
2002년 조사된 벼재배기간중 아산화질소가스 발생량 변화양상은 그림 12와 같다. 아산화질소의 경우 표준시비구와 유기물 시용구 모두 무질소구와 다르게 7월상순과 8월중순경 급격한 배출증가가 나타났다.



[그림 12] 2002년 논토양의 아산화질소 배출량의 계절변화

논에서의 아산화질소 배출량은 유기물시용>표준시비(유기물무시용)>무질소구(유기물시용) 순이었다. 배출 flux는 유기물처리 55.22, 표준시비 44.26, 무질소구 25.66 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ 이였고 작

기중 총배출량은 유기물시용 1.44, 표준시비 1.16, 무질소구 0.67kg/ha 었다<그림 13>.



[그림 13] 2002년 논토양의 작기중 아산화질소 배출량 비교

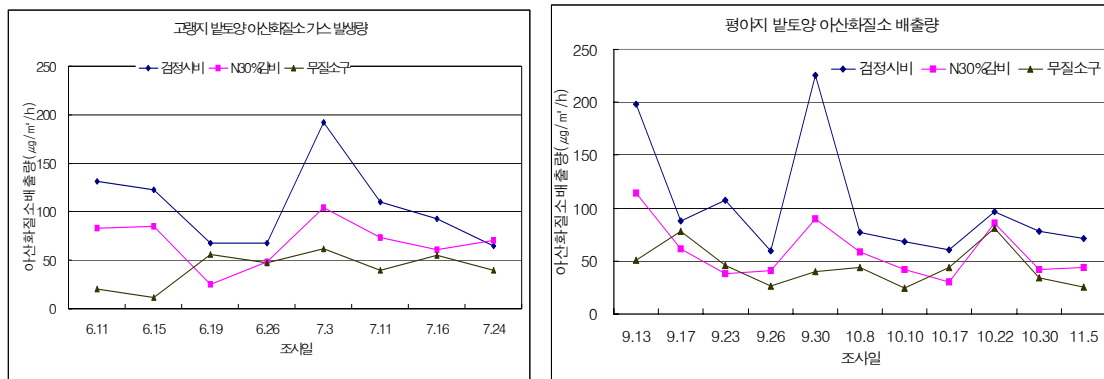
2개년간 평균조사된 공시 오대벼 생육 및 수량은 표준시비보다 유기물시용시 수장과 수수가 약간 높았고 14% 증수되었으며 무질소구에서는 생육이 저조하고 23% 감수되었다<표 4>.

<표 4> 2002~2003년 벼 생육 및 수량

처리	간장 (cm)	수장 (cm)	수수 (개/주)	등숙비율 (%)	정현비율 (%)	수량(kg/10a)			
						정조	현미	백미	지수
표준시비	71.8	21.8	15.3	88.3	81.7	660	529	483	100
유기물시용	69.9	22.8	17.5	90.1	82.9	739	603	551	114
무질소구	63.2	17.7	9.8	91.4	81.8	492	402	370	77

2) 발토양

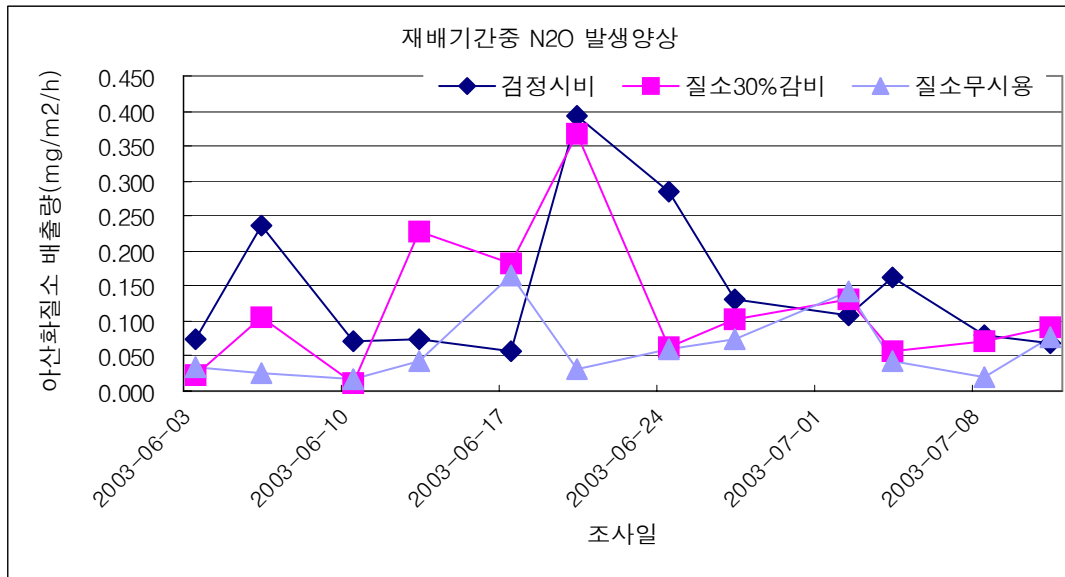
고랭지와 평야지 발토양에서의 N₂O가스 발생변화 양상은 그림 14, 15와 같다.



2002년 고랭지

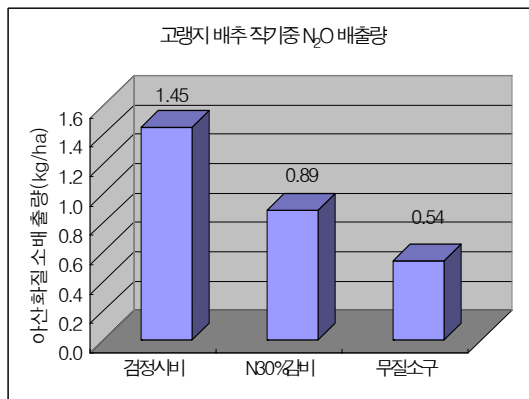
2002년 평야지

[그림 14] 2002년 고랭지와 평야지 배추재배지의 작기중 아산화질소 배출량 비교

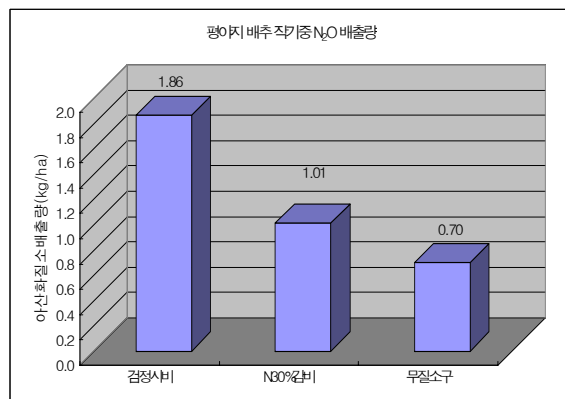


[그림 15] 2003년 고령지 배추재배지의 시기별 아산화질소 배출양상

고령지 배추 재배지에서의 아산화질소 flux는 2개년 평균하여 검정시비 0.129, N 30%감비 0.095, 무질소구 0.051mg/m²/h이었으며 작기중 총배출량은 검정시비 1.67, 질소 30%감비 1.23, 무질소구 0.63kg/ha였으며, 평야지의 경우 아산화질소 flux는 검정시비 0.118, N30%감비 0.064, 무질소구 0.044mg/m²/h이었고 작기중 총배출량은 검정시비 1.86, 질소 30%감비 1.01, 무질소구 0.7kg/ha였다<그림 16, 17>.

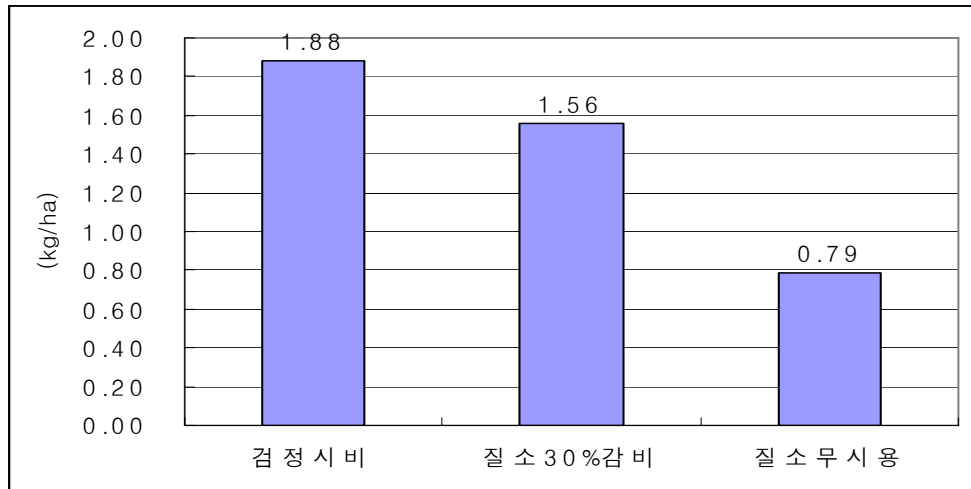


2002년 고령지



2002년 평야지

[그림 16] 2002년 배추 재배지의 작기중 아산화질소 배출량 비교



[그림 17] 2003년 고랭지 배추재배지의 작기중 아산화질소 배출량 비교

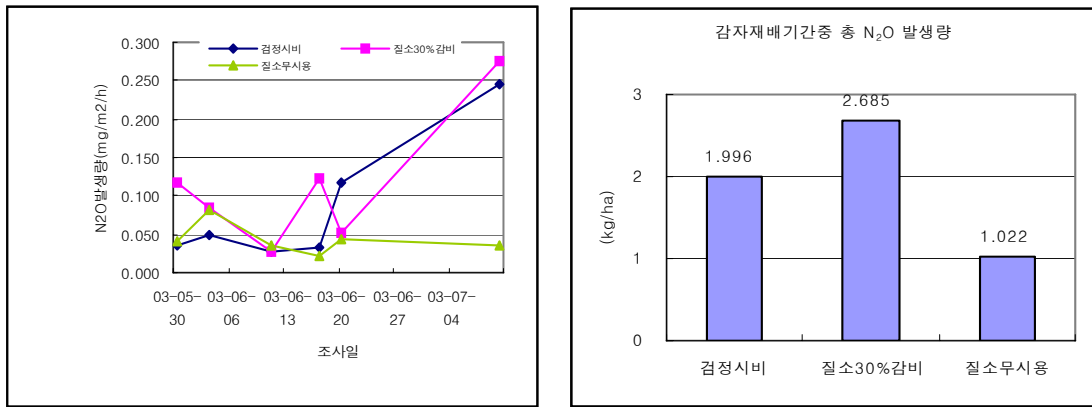
2년차 고랭지 배추 재배지에서의 지구온난화지수(GWP)는 검정시비 583, 질소 30%감비 484, 질소무시용 245(kg/CO₂/ha)로서 검정시비 대비 질소30% 감비시 17%, 질소무시용 58%가 감소되었다.

년차별 처리 및 지대별 배추 생육상황은 표 5와 같다. 검정시비 대비 질소를 30%로 감비하거나 전혀 주지 않았을 때 수량이 현저히 감소하였다.

<표 5> 2002~2003년 배추 생육 및 수량

수행 년도	시험 장소	처리내용	엽수(매/주)		구(cm)		무게(kg/주)	
			외	내	폭	고	구	주
2002	고랭지	검정시비	12.9	55	16.5	25.4	2.2	3.1
		30% N 감비	10.5	56	14.9	26.4	1.9	2.5
		무질소구	12.7	51	14.1	24.5	1.6	2.3
2002	평야지	검정시비	17.2	54.3	21.4	38.6	1.4	2.4
		30% N 감비	18.4	50.2	21.4	38.3	1.4	2.5
		무질소구	22.2	45.7	20.1	37.1	1.0	2.1
2003	고랭지	검정시비	13.8	44.5	14.7	33.7	1.8	2.6
		30% N 감비	13.8	41.7	15.6	29.8	1.8	2.8
		무질소구	16.3	33.5	11.4	25.6	0.7	1.4

발토양중 감자 재배기간중 아산화질소 발생량의 변화양상 및 총 발생량은 그림 18과 같다.



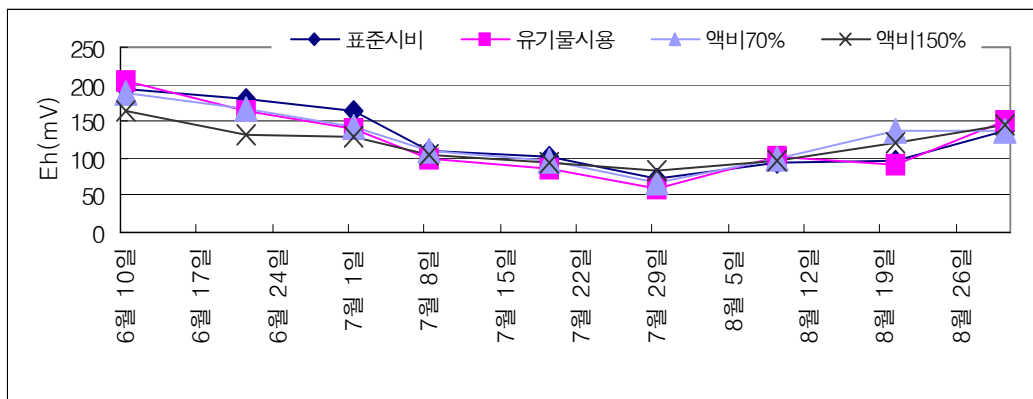
[그림 18] 2003년 감자재배지의 시기별 아산화질소 배출양상 및 총배출량

감자재배지에서의 아산화질소 flux는 검정시비 0.084, 질소30%감비 0.123, 질소무시용 0.043 mg/m²/h로 재배기간중 총 발생량은 질소30%감비>검정시비>질소무시용 순이었는데 배추재배지와 다른 양상을 보였는데 정확한 원인을 확인할 수 없었다.

다. 가축분뇨 액비 시용에 따른 온실가스 배출량 조사(3단계)

1) 논토양

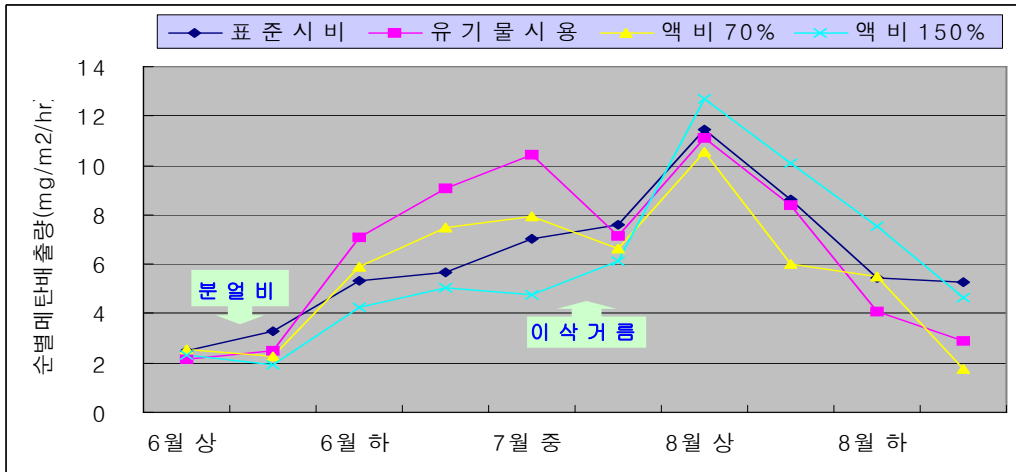
재배기간중 논토양의 Eh 변화는 이앙후 초기에는 산화환원전위 값이 높다가 서서히 낮아져서 7월말 고온기에 가장 낮은 환원상태를 나타내었고 그후 수확기까지 약간 높아지는 경향이어서 평균온도에 반비례하였는데 처리간 경향치는 큰 차이가 없었다<그림 19>.



[그림 19] 논토양의 산화환원전위(Eh) 변화

재배기간중 메탄은 초기에 7월중순까지 증가하다가 장마기에 하락하였는데 이삭거름시용 후 7월하순부터 재상승하는 양상을 보이고 8월중순 이후부터 급격히 배출량이 감소하였다. 특히 액비 150% 기비시용구에서는 초기에 상대적으로 적게 배출되다가 7월하순이후부터

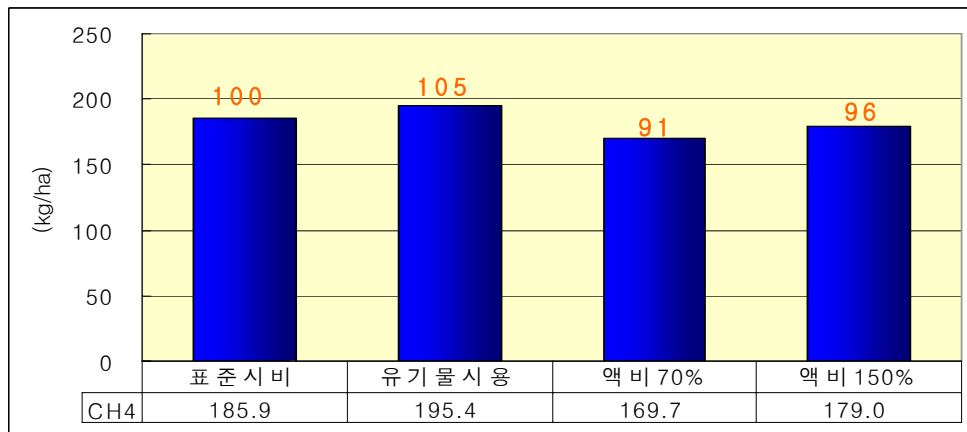
배출량이 더욱 많았는데 이는 여름철 고온기에 접어들면서 유기태 질소의 무기화가 빨리 진행되기 때문인 것으로 생각된다<그림 20>.



[그림 20] 논에서의 시기별 메탄 flux 변화양상

논에서의 메탄 flux는 표준시비 6.46, 유기물시용 6.79, 액비70% 5.89, 액비150% 6.21(mg/m²/hr)로 나타나서 액비와 화학비료를 일부 혼용시 배출량을 절감시킬 수 있음을 확인하였다. 특히 벼 싹 가을갈이할 경우 메탄 배출량이 매우 많았다고 보고된 결과에 대하여 유기물로서 시판 부산물퇴비를 이양전 사용시에는 표준시비 대비 배출량이 큰 차이를 보이지 않았다. 부산물퇴비는 이미 이분해성 물질들이 분해된 상태의 유기물원으로써 토양환경에 큰 영향을 주지 않으며 메탄 배출량이 적었다고 한 고 등의 결과와 일치하였다. 또한 가축분뇨 액비를 전충시비할 경우 메탄배출량이 많았다고 보고된 바 있으나 표준시비할 경우 오히려 감소하는 결과를 얻어 가축분뇨 사용에 따른 문제점 해결 가능성을 확인할 수 있었다.

재배기간(120일)중 메탄 총배출량을 비교한 결과는 그림 21과 같다.



[그림 21] 벼 재배기간중(120일) 메탄 총배출량

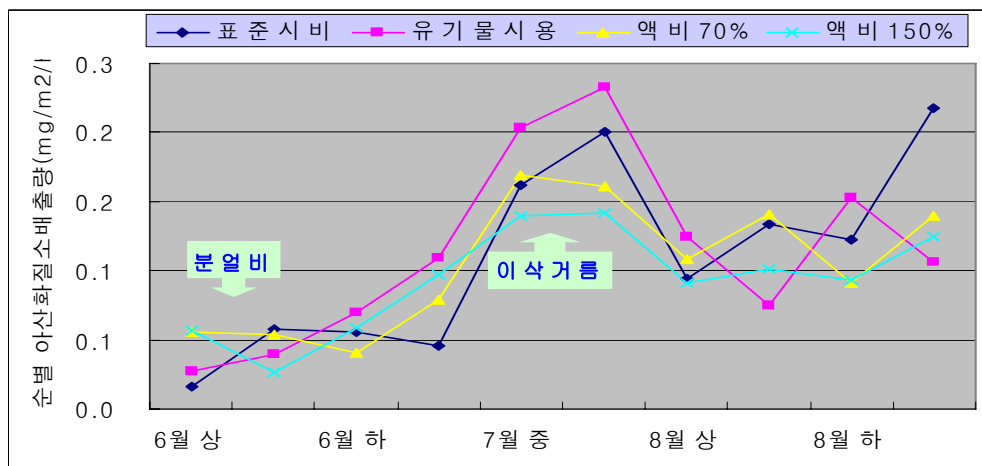
논에서의 메탄배출량과 강우량, 평균기온 등의 기상조건과의 상관관계를 분석한 결과(표 6) 강우량보다는 평균기온이 밀접한 정의 상관을 나타내었는데 화학비료 표준시비구에서는 상관 유의성이 보다 높았다.

<표 6> 논토양에서 기상조건과 메탄배출량과의 상관관계

	표준시비	유기물	액비70	액비150	강우량	평균온도
표준시비	1.00000	0.77257	0.77599	0.76874	-0.06629	0.62588**
유기물		1.00000	0.81457	0.52585	0.30982	0.42685*
액비70			1.00000	0.49948	0.13886	0.44476*
액비150				1.00000	0.02396	0.46588*
강우량					1.00000	-0.26712
평균온도						1.00000

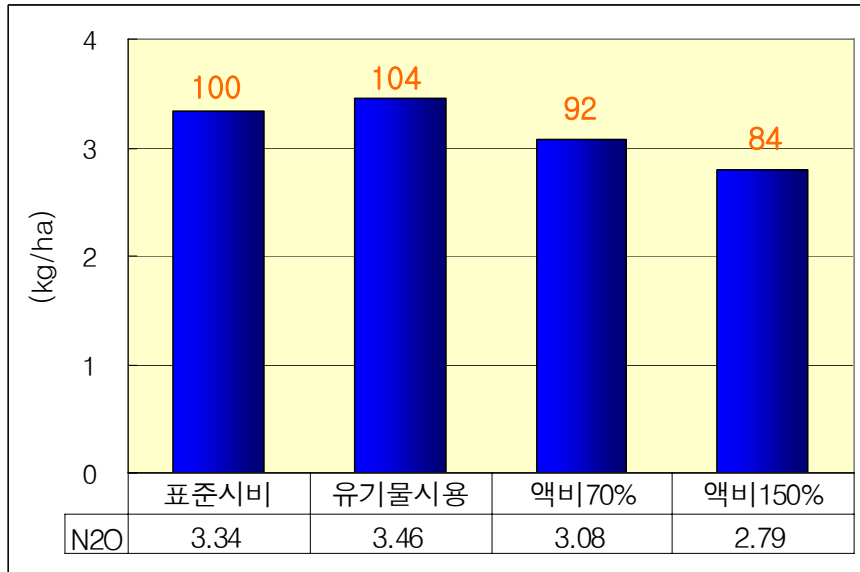
significance level : ** 0.01, * 0.05

재배기간중 아산화질소는 7월 하순까지 모든 처리구에서 증가하다가 급격히 감소하는 경향이었는데 유기물 시용구에서 상대적으로 배출량이 많았다. 이삭거름 시용에 따른 배출양상은 메탄의 경우와 반대로 나타났다<그림 22>.



[그림 22] 논에서의 시기별 아산화질소 flux 변화양상

논에서의 아산화질소 flux는 표준시비 0.116, 유기물시용 0.120, 액비70% 0.107, 액비150% 0.097(mg/m²/hr)이었는데 가축분뇨액비 시용시 화학비료 시용구보다 아산화질소의 발생량이 적어 가축분뇨 시용방법에 따라서 충분히 아산화질소 배출저감이 가능할 것으로 판단된다. 기존 연구성과는 전혀 다른 결과를 보였다. 재배기간중 아산화질소 총발생량은 그림 23과 같다.



[그림 23] 벼 재배기간중(120일) 아산화질소 총배출량

시험전후의 토양화학성 변화는 액비 150% 전량기비시 토양 pH가 약간 낮아졌으며 모든 시험구에서 EC값은 낮아졌다. 유기물함량은 높아졌으나 양이온 함량은 감소하는 경향이 있었다. 공시된 액비가 일반 가축분뇨의 특성과 달리 인산함량이 낮아서 인산축적에는 영향이 없었다<표 7>.

<표 7> 공시토양의 시험전후 일반성분 변화

처리구	채취시기	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (%)	P2O5 (mg/kg)	Ex.(cmol+/kg)		
						K	Ca	Mg
표준시비구	시험전	5.17	0.51	3.00	179	0.70	3.08	0.57
	시험후	5.32	0.10	3.11	181	0.39	2.66	0.34
유기물시용구	시험전	5.04	0.29	3.00	156	0.56	3.12	0.40
	시험후	5.08	0.11	3.49	181	0.35	2.85	0.45
액비 70%	시험전	5.24	0.23	2.94	155	0.42	2.89	0.49
	시험후	5.11	0.12	3.02	154	0.35	2.66	0.34
액비 150%	시험전	5.29	0.34	3.06	187	0.63	3.48	0.65
	시험후	4.97	0.10	3.24	176	0.44	2.60	0.34

토양중금속 함량을 분석한 결과, 대부분의 중금속이 시험전보다 약간 증가하는 경향이나 토양내 과다집적 양상은 보이지 않았다. 다만 액비 150% 전량기비구에서 Pb와 Zn이 상대적으로 많이 증가된 편이었다<표 8>.

<표 8> 공시토양의 시험전후 중금속함량 변화

처리구	채취 시기	중금속(ppm)									
		Fe	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As	Mn
표준시비구	시험전	220	0.06	0.38	3.04	5.24	3.56	1.27	0.01	0.15	34.50
	시험후	297	0.12	0.42	4.63	0.26	4.68	1.36	0.02	0.09	32.42
유기물시용구	시험전	175	0.06	0.31	2.79	4.25	3.21	1.18	0.01	0.14	25.18
	시험후	265	0.11	0.38	4.21	3.53	3.59	1.47	0.01	0.10	26.95
액비 70%	시험전	183	0.03	0.33	3.91	4.74	3.54	1.21	0.01	0.11	33.08
	시험후	234	0.09	0.32	3.68	4.22	3.39	1.34	0.01	0.09	26.53
액비 150%	시험전	189	0.04	0.32	3.33	4.61	2.91	1.19	0.01	0.12	28.83
	시험후	274	0.10	0.39	3.51	3.88	4.53	1.71	0.01	0.08	30.80

수량성은 표준시비 대비 유기물 추가시용시 4%가 증수되었고 액비 70%(기비)+ 화학비료 30%(추비)에서 7%정도 감소되었는데 당해연도 작황과 같은 수량을 나타내었다<표 9>. 액비 150% 전량기비구에서는 15%정도가 감소되었는데 이는 추비를 주지않을 경우 수량이 절대 감소한다고 한 기존결과와 같았다.

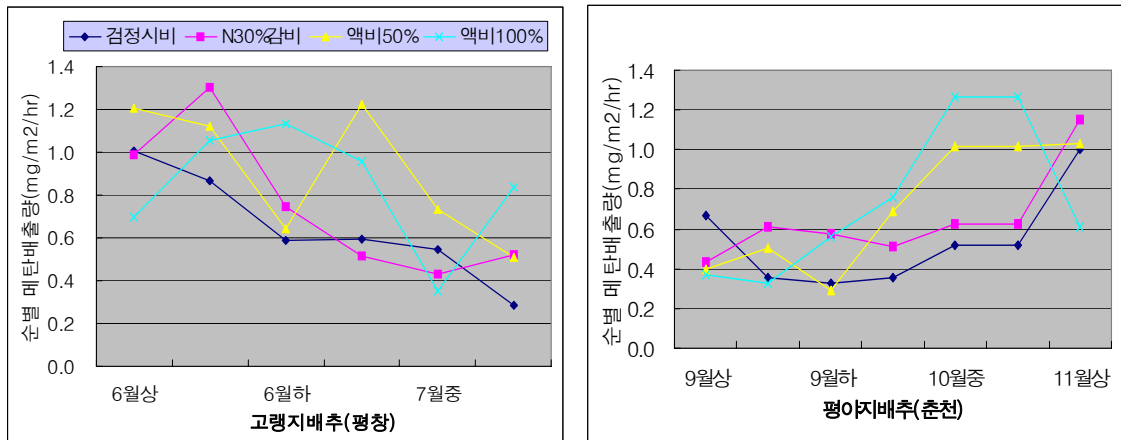
<표 9> 처리별 벼 생육 및 수량성

처리	간장 (cm)	수수 (개)	수장 (cm)	수당 립수	등숙율 (%)	천립중 (g)	수량(kg/10a)	
							백미 [↓]	지수
표준시비	67	13.2	18.6	86.5	86.4	24.3	518ab	100
유기물	71	11.9	19.0	85.4	86.2	24.4	538a	104
액비 70%	66	11.5	18.4	82.1	82.2	23.0	480bc	93
액비150%	65	13.1	17.7	78.3	83.0	23.6	440c	85
'04년작황	73	13.4	20.1	79.1	84.6	25.2	480	93

↓ DMRT 0.05

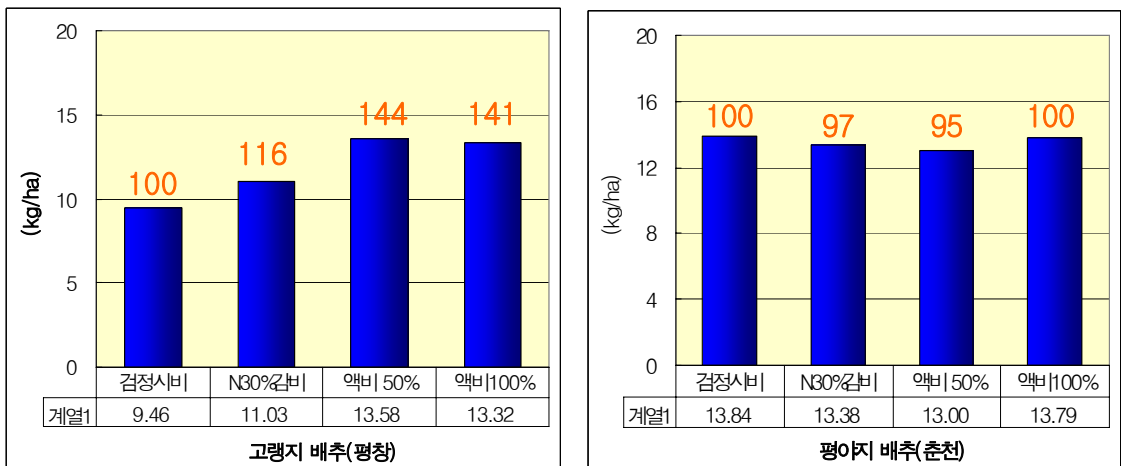
2) 발토양

밭에서의 메탄 배출량의 시기별 변화는 처리간에 뚜렷한 경향치를 확인할 수 없었으나 질소 30% 감비구에서 발생량이 적어 기존 결과와 같았다. 단 가을배추의 경우 온도가 점차 낮아짐에도 불구하고 오히려 메탄 발생량이 증가되어 반비례 양상을 보였는데 가축분뇨액비 시용시 빠른 시일내에 훨씬 많이 배출되었다<그림 24>.



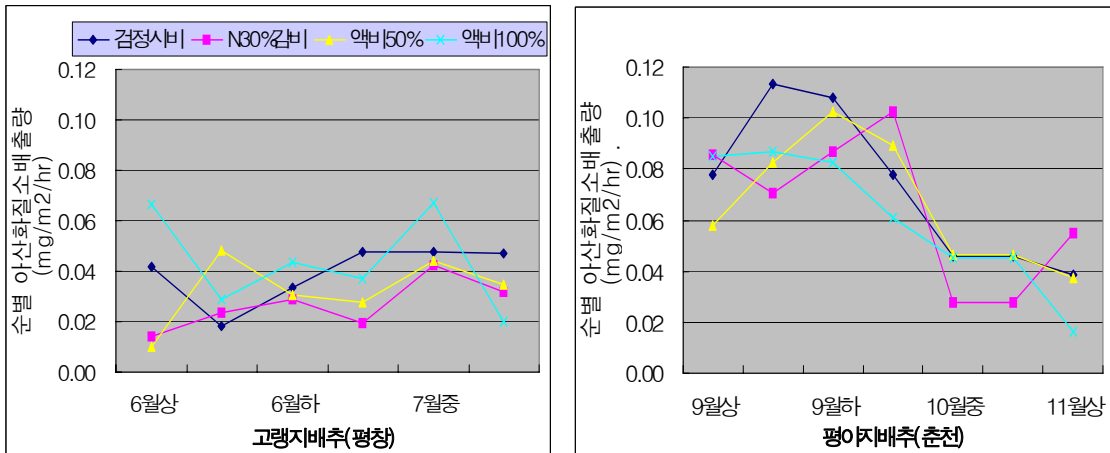
[그림 24] 배추 재배지의 시기별 메탄 배출양상

밭에서의 메탄 flux는 고랭지 여름배추의 경우 검정시비 0.616, 질소30%감비 0.718, 액비50% 0.884, 액비100% 0.867(mg/m²/hr)이었고, 평야지 가을배추의 경우 검정시비 0.721, 질소30%감비 0.697, 액비50% 0.677, 액비100% 0.718(mg/m²/hr)이었다. 고랭지 여름재배시 가축분뇨 액비 시용구에서 메탄 배출량이 많았으나 평야지 가을배추의 경우에는 처리간 차이가 미미하였다. 재배기간(고랭지 여름배추 64일, 평야지 가을배추 80일)중 메탄 총배출량은 그림 25와 같다.



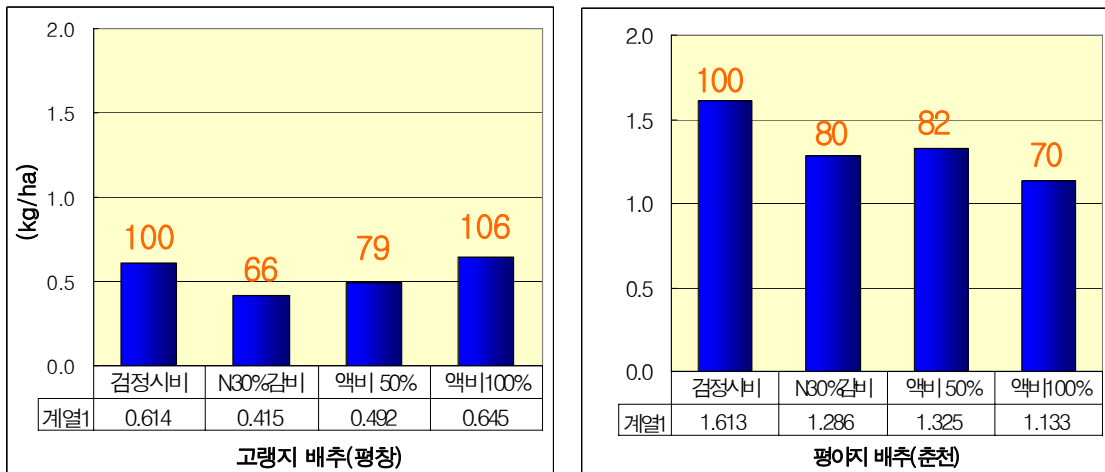
[그림 25] 배추 재배지의 재배기간중 메탄 총배출량

재배기간중 아산화질소는 고랭지에서는 뚜렷한 변화양상을 찾아볼 수 없었으나 평야지 가을배추 재배포장에서는 초기에 많은 양 배출되다가 정식후 30일경부터 평균온도가 낮아지면서 급격히 감소하였는데 이는 메탄과 전혀 반대 경향이었다<그림 26>.



[그림 26] 밭에서의 시기별 아산화질소 배출양상

밭에서의 아산화질소 flux는 고랭지 여름배추의 경우 검정시비 0.040, 질소30%감비 0.027, 액비50% 0.032, 액비100% 0.042(mg/m²/hr)이었고 평야지 가을배추의 경우 검정시비 0.084, 질소30%감비 0.067, 액비50% 0.069, 액비100% 0.059(mg/m²/hr)이었다. 고랭지에서 평야지보다 아산화질소의 배출량이 높게 나타났는데 기상조건에 의한 때문인지는 좀 더 검토할 필요가 있다. 고랭지에서 액비사용에 따른 차이는 확인이 곤란하였으나 평야지 가을재배의 경우 액비 표층살포시에 질소 30%감비구와 유사하거나 오히려 감소되어 기존 연구결과와는 큰 차이가 있었다. 재배기간중 아산화질소 총배출량은 그림 27과 같다.



[그림 27] 배추 재배지의 재배기간중 아산화질소 총배출량

시험전후의 토양화학성을 분석한 결과(표 10) 고랭지와 평야지 모두 큰 변화양상은 없었다.

<표 10> 밭 공시토양의 시험전후 화학적 특성

시험장소	채취시기	처리구	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (%)	P2O5 (mg/kg)	Ex.(cmol+/kg)		
							K	Ca	Mg
고랭지 (평창)	시험전	전체포장	5.07	0.36	5.83	584	0.95	2.87	0.68
		검정시비	5.17	0.51	4.71	461	0.65	1.86	0.26
	시험후	질소30%감비	5.04	0.29	5.53	530	0.87	1.61	0.19
		액비 50%	5.24	0.23	5.12	557	0.89	3.13	0.50
		액비 100%	5.29	0.34	5.80	543	1.26	3.16	0.63
평야지 (춘천)	시험전	전체포장	6.22	0.14	1.54	394	0.51	3.78	0.94
		검정시비	6.68	0.21	2.04	385	0.44	3.41	0.38
	시험후	질소30%감비	6.24	0.25	1.71	377	0.37	3.12	0.29
		액비 50%	6.28	0.38	1.64	402	0.50	3.50	0.61
		액비 100%	6.68	0.18	1.87	410	0.86	3.54	0.85

처리별 배추의 수량성은 고랭지에서 액비50%+화학비료50%, 액비100%시비시 검정시비 대비 각가 17, 20% 증수되었고, 질소30%감비구에서 11% 감수되었으며, 평야지에서 액비 50%+화학비료50% 시비시 검정시비구보다 11% 증수되었다<표 11>.

<표 11> 배추 시험포장 수량

처리	고랭지 배추(평창)				평야지 배추(춘천)			
	주중 (g)	결구엽 (엽)	수량 [↓] (kg/10a)	수량 지수	주중 (g)	결구엽 (엽)	수량 (kg/10a)	수량 지수
검정시비	1,429	59	4,762b	100	1,770	58	7,372ab	100
질소30% 감비	1,286	60	4,285b	89	1,725	56	7,186b	97
액비 50%	1,678	63	5,592a	117	1,971	57	8,212a	111
액비100%	1,718	62	5,725a	120	1,709	57	7,121b	97

↓ DMRT 0.05

4. 적 요

가. 논 유기물(볏짚) 시용 및 밭 질소 무시용에 따른 비교(2000~2001년)

- 1) 논 토양중 메탄가스 발생량의 계절변화는 유기물처리시 이앙 1개월 후부터 배출량이 증가하기 시작하였다. 볏짚 유기물 시용에 따른 논토양의 작기중 총메탄 발생량은 무처리 대비 19~128% 증가하였고 아산화질소 발생량은 100~175% 증가하였는데 상주찰벼 재배시 오대벼보다 메탄 발생은 매우 많았고 아산화질소 발생은 상대적으로 적었다.
- 2) 배추밭에서 아산화질소 배출량은 정식 20일후에는 무질소구보다 검정시비구에서 많았으나 30일 이후는 변화량이 적었고, 작기중 총배출량은 질소시용시 77%가 많았다.

나. 논 질소 무시용 및 밭에서 질소감비 수준과 지대별 비교(2002~2003년)

- 1) 논에서의 표준시비 대비 볏짚유기물 시용시 메탄 발생량은 89~125%, 아산화질소는 24% 증가하였고 볏짚유기물은 공급하되 질소를 시용하지 않을 경우에는 메탄발생량은 24~82% 증가하고 아산화질소는 42% 감소되어 메탄 발생은 요소시비보다는 유기물에 의해 많은 영향을 받았으며, 아산화질소는 질소시비에 의해 영향이 컸다.
- 2) 논에서 돈분뇨를 소재로 조제된 TAO액비 시용시 메탄 발생량이 표준시비보다 9% 증가하였다.
- 3) 논에서 볏짚유기물 시용시 지구온난화지수(GWP)가 1.24~2.25배 증가되었다.
- 4) 배추재배지에서의 아산화질소 배출량은 고랭지의 경우 검정시비보다 질소 30%감비시 17~39% 감소되었고 평야지에서는 46%가 감소하여 상대적으로 질소감비에 의한 아산화질소 배출저감 효과가 컸다. 질소 무시용시에는 지대별 구분없이 검정시비 대비 37~38% 수준이었다.
- 5) 배추 재배시 지구온난화지수(GWP)는 검정시비 대비 질소30% 감비시 17%, 질소무시용시 58% 감소하였다.
- 6) 평야지 감자재배지에서 질소 무시용시 아산화질소 배출량은 검정시비 대비 51% 수준으로 배추보다는 상대적으로 배출량 저감효과가 적었다.

다. 가축분뇨 액비 시용에 따른 온실가스 배출량 조사(2004년)

- 1) 논에서 담수조건하에 이앙 전 액비를 표층시비한 결과는 기존 전층시비시 나타난 결과와 많은 차이가 있었다.
- 2) 논에서 부산물비료 유기물 시용시 메탄 발생량 5%, 아산화질소는 4% 증가되었고 액비70% 기비후 화학비료 30% 추비시에는 메탄은 9%, 아산화질소는 8% 감소하였다. 액비 150% 전량기비로 시용할 경우 메탄은 4%, 아산화질소는 16% 감소하였다.
- 3) 액비150% 전량기비시 논에서 메탄발생은 7월하순까지 상대적으로 완만한 증가추세를 보이다가 장마기 이후 고온기에 급격히 증가되는 경향이었다.
- 4) 수량성은 표준시비구 대비 액비70%+추비30% 시비와 액비150% 전량기비시 각각 7, 15% 감수되었다..
- 5) 배추밭에서의 메탄 발생량은 고랭지 여름배추의 경우 액비 시용구에서 41~44%정도 높은 경향이었으나 평야지 가을배추의 경우 처리간 비슷하였고 질소 감비에 의한 메탄 배출량 변화는 두 지역 모두 차이가 없었다.
- 6) 배추밭에서의 아산화질소 발생량은 질소감비시 검정시비 대비 68~80% 수준이었고 액비50%와 화학비료 50% 기비 시용구에서는 80~82% 수준이었다. 액비 100% 기비 시용구에서는 고랭지의 경우 5% 증가, 평야지의 경우 30%가 감소하여 전혀 다른 양상을 보였는데 좀 더 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 7) 배추 수량성은 고랭지에서 액비50%+화학비료50%, 액비100%시비시 검정시비 대비 각각 17, 20% 증수되었고, 질소30%감비구에서 11% 감수되었으며, 평야지에서 액비 50%+화학비료50% 시비시 검정시비구보다 11% 증수되었다.

5. 인용문헌

- 신용광 외. 1994. 경작지에서 메탄 및 아산화질소 배출량 측정방법. 한국환경농학회지 13(3), 359-371
- 신용광 외. 1995. 한국 논토양에서 물관리와 벅짚시용에 따른 메탄 배출량의 추정. 한국토양비료학회지 28(3), 261-265
- 고지연 외. 2002. 논토양에서 경운 및 무경운재배시 재배방법별 메탄 배출양상. 한국토양비료학회지 35(4), 216-222
- 김건엽 외. 2002. 논에서 물과 양분관리에 따른 메탄, 아산화질소 배출특성. 한국환경농학회지 21(2), 136-143
- 이경보 외. 1997. 벼 품종별 CH₄ 배출과 뿌리의 탄수화물 분비 특성. 한국토양비료학회지 30(3), 257-264
- 박백균 외. 2001. 벼에 대한 돈분뇨 액비의 시용량 및 시용시기 구명
- 김종구 외. 2002. 벼논 온실가스 배출저감을 위한 유기물 시용 및 물관리. 농진청 결과활용 자료
- 경기천. 2003. 돈분뇨액비 시용답의 온실가스 배출조사. 충남도원 시험연구결과
- 고지연 외. 1996. 벼 건답직파재배에서 물관리와 벅짚과 퇴비가 메탄배출에 미치는 영향

6. 연구결과 활용제목

- 논에서의 온실가스 배출저감을 위한 가축분뇨 액비 시용방법(2004, 영농활용)
- 유기물 시용 및 질소시비가 논토양의 메탄과 아산화질소 배출에 미치는 영향(2004, 학술발표)
- 질소 시비수준이 벼 재배지 토양의 아산화질소 배출에 미치는 영향(2004, 학술발표)