바이오시스템공학 (*J. of Biosystems Eng.*)
Vol. 34, No. 4, pp. 269~277 (2009. 8)

메탄발효 소화액 시용이 벼 생육과 식미에 미치는 영향

류찬석 이충근 우메다 미키오 이승규

Influence of Fertilizing Methane Fermentation Digested Sludge to Rice Paddy on Growth of Rice and Rice Taste

C. S. Ryu C. K. Lee M. Umeda S. K. Lee

Abstract

In this research, the vegetation growth and rice taste of the liquid fertilizer applied fields (LF) were compared with those of chemical fertilizer applied fields(CF) in order to confirm the possibility of methane fermentation digested sludge as liquid fertilizer using precision agriculture and remote sensing technology. In panicle initiation stage, the vegetation growth at LF was 60%~80% of it at CF and there were significant difference of nitrogen contents between CF and LF. The estimation model of nitrogen contents was established by GNDVI ($R=0.607$, $RMSE=1.04$ g/m^2, $n=36$, $p<0.01$). In heading stage, vegetation growth at LF went close to it at CF as ratio of 80%~95%. The nitrogen content estimation model was also established ($R=0.650$, $RMSE=1.73$ g/m^2, $n=35$, $p<0.01$) and there were significant difference of spatial variability between LF and CF. There were not significant difference of rice taste and it's elements, when three samples, which were more than twice of standard deviation, were excepted. The protein contents estimation model using GNDVI of before harvesting ($R=0.700$, $RMSE=0.470\%$, $n=29$, $p<0.01$) were more suitable to predict the protein contents at harvesting comparing with it of heading stage($R=0.610$, $RMSE=0.521\%$, $n=29$, $p<0.01$).

Keywords : Methane fermentation digested sludge, GNDVI, Nitrogen contents, Protein contents

1. 서 론

인류와 지구의 공존이 지속적으로 가능한 사회를 실현하기 위해서는 화석연료가 아닌 바이오매스, 태양광, 풍력과 같은 자연에너지를 적극적으로 활용하여 환경 및 생태계 부하를 주지 않는 에너지 생산 시스템을 확립할 필요가 있다 (Oda et al., 2001). 일본은 2002년 12월 27일 「바이오매스 일본 종합전략」을 국무회의에서 결정했고 2004년에는 「바이오매스 타운 구상」을 만들었다. 2006년 3월 31일에는 이전의 내용을 보다 보충한 「바이오매스 일본 종합전략」을 국무회의에서 결정하였다. 바이오매스의 이용방법으로 가스화(Gasification), 콤포스트화(Composting), 에스테르화(Esterification), 메탄발효(Methane fermentation), 에탄올화(Extraction of ethanol) 등이 있다(MAFF of Japan, 2005). 한국에서도 2008년 11월부터 농림수산식품부에서 바이오매스 및 바이오매스 타운에 관한 연구를 진행하고 있다(MFAFF of Korea, 2007). 이중에서 메탄발효법은 자연계에 생식하고 있는 혐기성세균에 의해 유기성 폐기물을 분해하여 안정화시킬 뿐만 아니라 에너지 자원으로서 유용한 메탄을 만들어 내는 것이 가능하다(Haga et al., 1979). 유기성 폐기물의 에너지 회수측면에서도 다른 처리방법과 비교할 수 없을 만큼 우수한 장점을 가지고 있다 (Noike, 2000).

The article was submitted for publication on 2009-02-20, reviewed on 2009-05-14, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-06-21. The authors are Chan Seok Ryu, Teaching Associate, Mikio Umeda, Professor, KSAM member, Division of Environmental Science and Technology, Kyoto University, Kyoto, Japan, Seung Kyu Lee, Professor, KSAM member, Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, Gyeongsang National University, and Choung-Keun Lee, Agricultural Researcher, KSAM member, Agricultural Researcher, Research Policy Bureau, RDA. Corresponding author: C. K. Lee, Agricultural Researcher, Research Policy Bureau, RDA, Suwon, 441-707, Korea; Tel: +82-31-299-2616; E-mail: <cklee@korea.kr>.

1998년 일본 쿄토부(京都府) 난탄시(南丹市) 야기쵸(八木町)에 순환형 사회 구축을 목표로 젖소 및 돼지의 축산분뇨와 비지 및 폐우유 등의 식품폐기물을 이용한 메탄발효 시설(20,000 ㎥/년)과 육우분뇨 및 탈수케이크를 이용한 퇴비생산 시설을 갖춘 야기 바이오 에코로지 센터 (Yagi Bio Ecology Center: 이하 YBEC라 칭함)가 건설되었다. 바이오 가스를 이용한 발전에서 약 3000 kWh/day가 생산되고 있다. 메탄 발효 후에 생성되는 슬러지는 고분자 응집제를 이용해서 고액(固液)분리를 한 다음 고체는 탈수케이크로, 액체는 정화 처리된다. 일반적으로 메탄발효 시설에서는 고액분리 및 정화처리에 많은 비용이 지출되고 있어 시설운영에 어려움이 따른다(Nakagawa, 2007).

그러나 메탄발효 후 생성되는 슬러지는 비료성분인 질소, 인산, 카리 성분을 포함하고 있기 때문에 유럽에서는 고액분리 및 정화처리를 거치지 않고 목초지나 밭에 액비로서 이용하고 있어 시설 운영에 큰 비용이 지출되지 않는다. 반면, 한국 및 일본은 목초지나 밭이 상대적으로 적기 때문에 몬순기후에 적합한 논에 비료로 이용할 수 있다면 YBEC를 포함한 메탄발효 시설의 채산성 문제가 해결되고 농촌사회의 물질순환이 이루어져 순환형 사회구축이 가능하다(Umeda, 2007). 메탄발효 소화액을 이용한 포트재배에 관한 연구들은 많으나 실제포장에서 실험된 연구들은 부족하다. 메탄발효 소화액 및 이를 탈수 처리한 탈수용액은 공간변이가 제한된 소규모(5×5 m) 포장에서의 비교실험에서 화학비료와 동등한 수확량을 나타내었다(Li et al., 2003). 공간변이가 제한되지 않은 일반 농가 포장을 이용한 실험이 필요하다고 판단되어 선행연구 결과를 바탕으로 농가포장에서 메탄발효 소화액(이하, 액비라 칭함)이 벼의 질소보유량, 식미치 및 수확량의 공간변이에 어떠한 영향을 주고 있는지를 파악하였다. 액비를 시비한 포장에서 생육초기의 생육이 화학비료를 시비한 포장과 비교해 질소농도는 상대적으로 높고, 건물중이 상대적으로 낮은 경향을 나타내었다 (Ryu et al., 2007). 또한 액비성분에 포함된 유기질 질소성분의 무기화의 동태, 주변 환경에 대한 영향평가, 효율적인 시비 시스템의 구축 등에 관한 연구가 필요하다고 판단되어 농업기계학, 농업토목학, 작물학, 농화학 분야의 연구자가 참여하여 공동으로 연구를 진행하였다.

본 연구의 목적은 바이오매스를 이용한 순환형 사회 구축에 필요한 메탄발효 시설에서 생성되는 부산물인 액비를 일반 농가포장에서도 이용하는 것이 가능한지를 구명함에 있다. 이를 위해 포장에 액비를 시용했을 때와 화학비료를 시용했을 때의 벼 생육상태, 쌀의 식미치 및 수확량을 조사하여 비교 분석하였다. 동시에 정밀농업 기법과 리모트 센싱 기술을 활용하여 식생지수를 산출하고 이를 이용한 각 포장의 공간변이도 비교 분석하였으며, 생육 및 식미치의 효율적인 조사를 위해 식생지수를 응용한 단순회귀 모델도 개발하였다.

2. 재료 및 방법

가. 대상포장

본 실험은 2005년에 쿄토부(京都府) 난탄시(南丹市) 야기쵸(八木町)의 일반 농가 포장(135°54′E, 35°08′N, 표고152 m)을 이용하여 액비를 시비한 2개 포장(이하, 1번과 2번 포장)과 화학비료를 시비한 2개 포장(이하, 3번과 4번 포장)에서 실시하였다. 액비 포장의 크기는 장변이 112 m, 단변이 각각 34 m 및 30 m, 면적이 각각 0.38 ha 및 0.33 ha인 인접한 포장으로 지금까지 화학비료를 이용하여 벼를 재배해 오던 포장이다. 3번과 4번 포장은 장변이 각각 100 m 및 102 m, 단변이 각각 41 m 및 29 m, 면적이 각각 0.41 ha 및 0.30 ha이며 1번과 2번 포장과는 직선거리로 각각 530 m및 680 m 떨어져 있다.

품종은 이 지역에서 가장 많이 재배되고 있는 중생종 키누히카리(*Kinuhikari*)이다. 1번, 2번 및 3번 포장의 토질은 실트질 식토(SiC)이며 영농조합이 관리하였다. 4번 포장의 토질은 경식토(LiC)이며 농가에서 직접 관리하였다.

나. 액비 시용

각 포장의 질소 시비량은 야기지역의 기준인 8 kg/10a에 맞도록 각 영농조합 및 농가가 관리하였다. 밑거름과 모내기 작업 시기는 질소보유량을 비교하기 위해 작업시기를 조절하였다. 액비 시비량을 계산하기 위해 밑거름 작업 전에 액비 저장시설에서 샘플을 채취하였다. 계측된 전질소량 3,100 ppm 중에서 암모니아태 질소량 1,650 ppm을 기준으로 밑거름 3 kg/10a, 분얼거름 2 kg/10a 및 이삭거름 3 kg/10a 으로 결정하였다. 액비 시용 방법은 YBEC의 저장시설에서 탱크로리 운반차에 약 2.5 톤씩 적재하여 운반한 다음 농업용수와 함께 평균 시간당 7.63 톤의 속도로 논에 흘려보냈다. 밑거름은 액비를 관개용수와 함께 흘려보낸 후 액비가 골고루 퍼질 수 있도록 로터리를 이용한 써레질 작업을 했다. 분얼거름 및 이삭거름은 작업기를 이용한 균일화가 불가능하므로 시간당 투입되는 양을 3.44 톤으로 줄여 관개용수와 함께 흘려보냈다.

표 1에 YBEC에서 조사한 액비성분의 경향을 참고로 나타내었다. 메탄발효에 투입되는 재료에 따라 성분의 변동이 있다는 것을 알 수 있다. 실제로 본 실험에서 이용된 암모니아

Table 1 Tendency of methane fermentation digested sludge

(Stay 25 days at 55℃)	Units	Sept. 15 2005	Oct. 17 2005	Nov. 13 2005
Total carbon	mg/L	7600	8000	6100
Total nitrogen	mg/L	5100	2600	3800
Mineralizable Nitrogen	mg/kg	2100	2000	2300
Phosphorus	mg/L	410	260	780
Potassium	mg/L	2100	2700	1000
Electronic conductivity	mS/m	1500	1800	1800
Total dissolved solid	mg/L	22000	22000	21000

Table 2 Information of fields management and amount of nitrogen fertilizer

No.	Area [ha]	Basal dressing		Trans planting	Tillering dressing		1st Top dressing		2nd Top dressing	
		date	Amount [kg/10a]		date	Amount [kg/10a]	date	Amount [kg/10a]	date	Amount [kg/10a]
1	0.38	May 27	3.5	May 30	June 27	2.2	July 26	2.2		
2	0.33					2.5		2.5		
3	0.41	May 26	1.0	May 28	June 14	1.4	July 27	2.5	Aug. 3	2.5
4	0.30		2.4				July 16	1.1		

(Amount: Amount of nitrogen per unit area)

태 질소량은 1650 ppm 이었으나 9월, 10월 및 11월의 분석 결과에서는 2000~2300 ppm 이었다.

각 포장의 관리일정 및 질소 시비량을 표 2에 나타내었다. 분얼거름 및 이삭거름의 일정 조정이 불가능하여 4번 포장의 경우는 이삭거름 시기가 다른 포장보다 빠르고 전년도 수확 후 토양개선 작업의 일환으로 퇴비를 시비했기 때문에 기준 시비량의 44%만을 밑거름 및 이삭거름으로 주었다. 질소 시비 계획량과 실제 시비량에 차이가 나는 이유는 액비의 질소 성분이 메탄발효시의 투입재료에 의해 변화했기 때문이다. 전체 질소 시비량은 7.4~8.5 kg/10a 으로 기준량인 8 kg/10a 에 근접했다.

다. 생육량 및 식미치 조사

생육량 조사는 유수분얼기(7월20일) 및 출수기(8월5일)에 각 포장에 지정된 9개 지점에서 각각 6주의 벼를 채취하여 실시하였다. 채취된 샘플의 건물중을 측정하기 위해 유수분얼기에는 잎과 줄기로, 출수기에는 잎과 줄기 그리고 이삭으로 각각 분리한 후, 통풍건조기를 이용하여 80 ℃, 48시간 이상 건조 후 각각의 건물중을 측정하였다. 건조된 잎과 줄기는 두 번에 걸쳐 분쇄한 다음 가스 크로마토그래피 NC900(Sumica Chemical Analysis Service Ltd., Tokyo, Japan)에 의해 질소 농도를 계측하였다(Ryu et al., 2004b).

식미조사는 완숙기에 각 포장의 지정된 9개 지점에서 8주의 벼를 채취하여 탈곡한 후 일반 농가에서 도정할 때의 함수율 범위인 15% 전후가 되도록 건조하였다. 함수율이 조절된 샘플은 정미 및 선별작업을 거쳐 식미계 RCTA11A(Satake Co., Hiroshima, Japan)를 이용하여 아밀로스, 단백질, 함수율, 지방산 및 식미치를 계측하였다. 함수율 및 지방산은 저장방법 및 기간에 영향을 받기 때문에 여기서는 생육과정에서 영향을 받는 아밀로스와 단백질에 관해서만 기술하였다 (Ryu et al., 2004a).

생육량 및 식미치의 유의성은 통계 전용 소프트웨어 SPSS13 (SPSS Inc., Chicago, USA)의 대응비교 t 검증(Paired Samples t-test)을 이용하여 검토하였다.

라. 식생지수 조사

식생지수 조사는 멀티 스펙트럼센서(ADS40, Spectral Imaging Co., Finland)를 이용하여 유수분얼기(7월20일), 출수기(8월5일) 및 등숙기(9월2일)의 실험포장을 항공촬영 하였다. 태양광의 영향을 최소화하기 위해서 촬영시간을 오전 11시경으로 하였고 포장주위에 기준 반사판(Gray panel)을 설치하였다. 영상분석은 리모트센싱 전용 소프트웨어 ENVI4.2(ITT Visual Information Solution, Boulder, USA)를 이용하여 각 샘플지점의 반사율과 포장 주위에 설치된 기준 반사판의 반사율을 이용하여 다음과 같이 식생지수인 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 GNDVI (GreenNDVI)를 산출하였다(Ryu et al., 2004b).

$$X=(DN_X/DN_{X-Standard}) \quad (1)$$

$$NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red) \quad (2)$$

$$GreenNDVI=(NIR-Green)/(NIR+Green) \quad (3)$$

$$RMSE=\sqrt{(\sum_{i=1}^{n}(y_{measured}-y_{calculated})^2)/n} \quad (4)$$

where, DN_X = Digital Number of each band

$DN_{X\text{-}Standard}$ = Digital Number of each band for standard board

NIR, Red, Green = Reflectance of NIR, Red, Green

두 식생지수를 이용하여 유수분얼기 및 출수기의 질소보유량과 식미치를 예측하기 위해 단순회귀 예측모델을 작성하였다. 모델의 정확도는 다음과 같이 RMSE(Root Mean Square of Error)를 이용하여 나타내었다. GNDVI 값은 -1~1로 나타내어지기 때문에 이 값을 0~255로 변환시켜 각 포장의 평균값 및 표준편차를 구하여 변이계수를 산출함으로서 공간변이를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 유수분얼기

1) 생육량

유수분얼기 벼의 각 부위별 건물중, 질소농도 및 질소보유량에 대한 통계치는 표 3과 같다. 유수분얼기의 샘플은 7월22일 각 포장에서 채취되었으나 표 2에서 알 수 있듯이 4번 포장은 7월16일에 이삭거름이 시비되었기 때문에 4번 포장의 건물중이 다른 포장보다 많았다고 판단된다. 유수분얼기까지 액비 시비 포장의 질소시비량(kg/10a)은 화학비료 시비 포장에 비해 2배 이상이었으나 질소농도를 제외한 생육량은 화학비료 시비 포장의 62~83%정도였다. 액비 시비 포장에서는 질소농도가 상대적으로 높고, 화학비료 시비 포장에서는 건물중이 높은 경향은 2004년에 야기지역의 다른 포장에서 실험했던 결과와 동일하게 나타났다. 2004년의 실험에서는 건물중과 질소농도를 곱한 질소보유량이 액비 시비 포장 및 화학비료 시비 포장에서 동등하게 나타났지만 이번 실험에서는 건물중이 상대적으로 많았던 화학비료 시비 포장의 질소보유량이 높게 나타났다. 비슷한 시기에 동일한 시비를 했음에도 불구하고 화학비료와 동일한 질소보유량을 확보할 수 없었던 것은 질소성분의 유출(Nakamura et al., 2007) 및 유수분얼기까지의 평균온도가 2004년에 비해 2℃ 이상 낮았기 때문이라고 사료된다(Terada et al., 2006). 액비를 효율적으로 이용하기 위해서는 질소성분의 유출을 최소화하기 위한 관개용수의 효율적 관리와 시비량을 줄이기 위한 방법으로 액비에 포함된 유기 질소성분의 무기화(無機化)량을 고려한 시비법이 필요할 것으로 판단된다.

2) 식생지수 및 공간변이

유수분얼기의 생육량과 식생지수의 상관관계는 표 4와 같다. 액비 시비 포장에서의 생육량과 식생지수 사이에는 유의한 상관관계가 존재하지 않았지만 화학비료 시비 포장에서는 건물중과 질소농도가 식생지수와 유의한 상관관계를 나타내었다.

비료의 종류에 상관없이 모든 데이터를 식생지수와 비교했을 때 줄기의 질소농도를 제외한 전 생육량 데이터가 식생지수와 유의한 상관관계를 나타내었다. 단독으로 비교할 때보다 전 생육량 데이터를 이용했을 때 상관계수가 높게 나타난 것은 표 3에서도 알 수 있듯이 액비 시비 포장의 생육이 화학비료 시비 포장의 생육과 다른 경향을 나타내고 있기 때문이라고 사료된다.

Table 3 Statistics data of ground truths at panicle initiation stage

Panicle initiation (July 22)		Dry mass [g/m^2]			Nitrogen concentration [%]		Nitrogen content [g/m^2]		
		Leaf	Tiller	Total	Leaf	Tiller	Leaf	Tiller	Total
Liquid (n=18)	1	147±17	161±21	308±38	3.33±0.1	1.18±0.5	4.86±0.5	1.89±0.2	6.75±0.6
	2	149±9.6	159±11	307±20	3.39±0.2	1.25±0.1	5.04±0.4	1.97±0.2	7.02±0.6
Chemical (n=18)	3	187±9.2^{*+}	228±9.2^{*+}	416±14^{*+}	3.33±0.3	1.40±0.3*	6.24±0.8^{*+}	3.18±0.6^{*+}	9.42±1.4^{*+}
	4	213±14$^{*+\#}$	289±19$^{*+\#}$	502±30$^{*+\#}$	2.79±0.1$^{*+\#}$	0.92±0.1$^{*+\#}$	5.93±0.4^{*+}	2.67±0.3^{*+}	8.60±0.6^{*+}
Ratio of Liquid/Chemical		0.74^	0.62^	0.67^	1.12^	1.04N.S.	0.83^	0.66^	0.77^

(mean ± standard deviation, *: vs. field 1, $^{+}$: vs. field 2, $^{\#}$: vs. field 3, with 5% of significant difference, ^: LF vs. CF with 5% of significant difference, N.S.: not significant difference)

Table 4 Coefficient of correlation between ground truths and vegetation indices at panicle initiation stage

Panicle initiation		Dry mass [g/m^2]			Nitrogen concentration [%]		Nitrogen contents [g/m^2]		
		Leaf	Stem	Total	Leaf	Stem	Leaf	Stem	Total
Liquid (n=18)	NDVI	-0.085	-0.072	-0.079	0.155	0.197	0.013	0.098	0.039
	GNDVI	-0.010	-0.003	-0.006	0.142	0.181	0.079	0.155	0.103
Chemical (n=18)	NDVI	0.557*	0.547*	0.569**	-0.509*	-0.471*	-0.076	-0.285	-0.181
	GNDVI	0.611**	0.647**	0.657**	-0.529*	-0.513*	-0.059	-0.280	-0.170
Total (n=36)	NDVI	0.791**	0.813**	0.812**	-0.580**	-0.226	0.576**	0.608**	0.602**
	GNDVI	0.810**	0.837**	0.834**	-0.595**	-0.255	0.587**	0.605**	0.607**

(* : 5% of signification level , **: 1% of signification level)

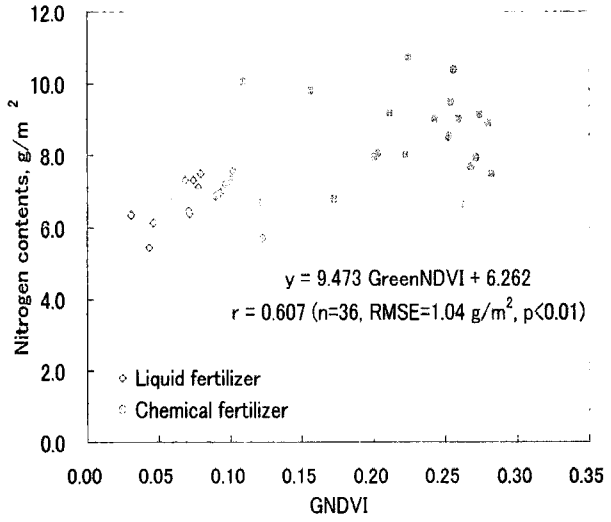

Fig. 1 Estimation model of nitrogen contents at panicle initiation stage by GNDVI.

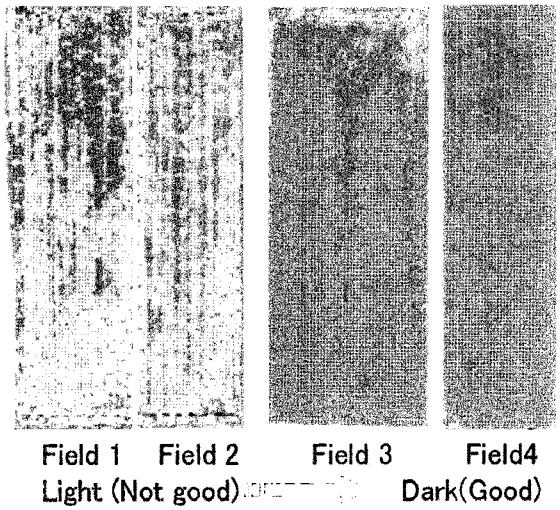

Fig. 2 Spatial variability of vegetation growth at panicle initiation stage by GNDVI.

GNDVI를 이용한 유수분얼기의 질소보유량 예측모델을 그림 1에, GNDVI를 이용한 포장의 공간변이를 그림 2에 나타내었다. GNDVI를 이용해 유수분얼기의 질소보유량을 예측한 결과 상관계수가 0.607 (1% 유의수준), RMSE가 1.04 g/m^{2}이었다. 이를 이용하여 데이터를 축적하면 추비량 산출을 위한 값으로 활용이 가능할 것으로 판단되었다. 동일한 시기에 이앙을 했음에도 불구하고 액비 시비 포장과 화학비료 시비 포장의 생육량은 현저한 차이를 보였다. GNDVI 값을 이용하여 공간변이를 분석하면 각 포장의 변이계수가 4.4%, 4.1%, 4.0% 및 2.5% 로 나타났다. 4번 포장의 공간변이가 적었지만 3번 포장의 경우 포장의 상단부의 생육이 좋지 않았기 때문에 변이가 크게 나타났다. 액비 시비 포장과 화학비료 시비 포장으로 나누어서 계산할 경우 각각의 공간변이는 4.2 % 및 3.4% 이었다. 액비 시비 포장에서 상단부와 하단부의 생육량의 차이가 나타난 것은 액비 중에 포함되어 있는 고형분이 상단부에 침전되어 골고루 확산되지 않았기 때문에 액비 시비 포장의 공간변이와 화학비료 시비 포장의 공간변이에 차가 나타났다고 판단된다. 포장의 공간변이를 줄이기 위해서는 작업기를 이용한 시비법 및 포장면의 균평화(均平化) 작업이 필요하다고 사료된다.

다. 출수기

1) 생육량

출수기 벼의 각 부위별 건물중, 질소농도 및 질소보유량에 대한 통계치는 표 5와 같다. 4번 포장에서 한 지점의 데이터 산출이 불가능하여 화학비료 시비 포장의 데이터는 17지점의 데이터를 이용하였다.

출수기에서도 유수분얼기와 동일하게 액비 시비 포장에서는 질소농도가 높게, 화학비료 시비 포장에서는 건물중이 상대적으로 높게 나타났다. 4번 포장의 경우는 시비량이 3.5 kg/10a으로 다른 포장에 비해 적어 질소농도는 낮게 나타났지만 건물중이 7.4 kg/10a을 시비한 3번 포장과 동등하였다. 이는 성장에 필요한 질소량이 전년도에 투입된 퇴비에서 공급되었다고 사료된다.

Table 5 Statistics data of ground truths at heading stage in 2005

Heading (Aug. 9)		Dry mass [g/m^2]				Nitrogen concentration [%]		Nitrogen content [g/m^2]		
		Leaf	Stem	Spike	Total	Leaf	Stem	Leaf	Stem	Total
Liquid (n=18)	1	189±21	378±49	92±12	664±79	3.00±0.4	0.95±0.3	5.68±1.2	3.56±1.1	9.24±2.3
	2	194±23	374±42	101±6.1*	678±67	3.22±0.2	1.00±0.1	6.25±1.0	3.73±0.6	9.98±1.5
Chemical (n=17)	3	217±35*	475±54^{*+}	137±16^{*+}	838±91^{*+}	2.99±0.4	1.01±0.3	6.55±1.7	4.80±1.5	11.4±3.1
	4	196±29	477±56^{*+}	129±13^{*+}	828±90^{*+}	2.65±0.1^{+}	0.74±0.1^{+}	5.22±0.8	3.52±0.4	8.16±1.9$^{\#}$
Ratio of Liquid/Chemical		0.92$^{N.S.}$	0.79$^{\wedge}$	0.72$^{\wedge}$	0.80$^{\wedge}$	1.10$^{N.S.}$	1.11$^{N.S.}$	1.01$^{N.S.}$	0.87$^{N.S.}$	0.95$^{N.S.}$

(mean ± standard deviation, *: vs. field 1, $^{+}$: vs. field 2, $^{\#}$: vs. field 3, with 5% of significant difference, $^{\wedge}$: LF vs. CF with 5% of significant difference, $^{N.S.}$.: not significant difference)

Table 6 Coefficient of correlation between ground truths and vegetation indices at heading stage

Heading		Dry mass [g/m^2]				Nitrogen concentration [%]		Nitrogen content [g/m^2]		
		Leaf	Stem	Spike	Total	Leaf	Stem	Leaf	Stem	Total
Liquid (n=18)	NDVI	0.070	-0.248	0.052	-0.116	0.661**	0.665**	0.427	0.476*	0.465*
	GNDVI	0.029	-0.266	0.054	-0.139	0.667**	0.673**	0.404	0.470*	0.449*
Chemical (n=17)	NDVI	0.549*	0.133	0.297	0.250	0.886**	0.884**	0.816**	0.858**	0.847**
	GNDVI	0.594**	0.204	0.279	0.311	0.853**	0.830**	0.826**	0.837**	0.843**
Total (n=35)	NDVI	0.453**	0.409*	0.580**	0.479**	0.354*	0.493**	0.515**	0.692**	0.617**
	GNDVI	0.450**	0.327*	0.469**	0.399*	0.455**	0.564**	0.567**	0.702**	0.650**

(* : 5% of signification level , **: 1% of signification level)

출수기의 액비 시비 포장에 대한 화학비료 시비 포장의 생육량은 유수분얼기의 0.62~1.12에 비해서 0.72~1.10로 나타나 생육량의 차가 줄어든 것을 알 수 있다. 액비 시비 포장과 화학비료 시비 포장의 질소보유량의 비율은 0.95로 유수분얼기의 0.77에 비해 증가되었다. 이는 액비가 비료로 충분히 이용 가능하다는 것을 보여주는 자료이다. 생육초기인 유수분얼기의 생육이 화학비료를 시비한 포장에 근접한 생육량을 나타낼 수 있다면 보다 효율적으로 액비를 이용하는 것이 가능하리라고 판단된다.

2) 식생지수 및 공간변이

출수기의 데이터와 식생지수의 상관관계는 표 6과 같다. 유수분얼기와 다르게 건물중 보다는 질소농도 및 질소보유량이 식생지수와 밀접한 관계를 나타내었고 비료의 종류에 의한 영향도 나타나지 않았다. 전체 데이터를 비교했을 때 출수기의 생육량은 유수분얼기처럼 독립되어 있지 않고 혼재해 있기 때문에 단독으로 비교했을 때보다 상관계수가 낮게 나타났다고 판단되었다

출수기의 GNDVI를 이용한 질소보유량 예측 모델을 그림 3에, GNDVI를 이용한 포장의 공간변이를 그림 4에 나타내었다. 그림 1 및 2와 비교하면 유수분얼기와는 다르게 액비 및 화학비료 시비 포장의 생육량의 차이는 감소했다. GNDVI를 이용해 출수기의 질소보유량을 예측한 결과 상관계수가 0.650 (1% 유의수준), RMSE가 1.73 g/m^{2}이었다. GNDVI 값을 이용하여 공간변이를 분석하면 각 포장의 변이계수가 3.5 %, 3.7%, 3.0% 및 2.4% 로 나타났다. 유수분얼기에 3번 포장의 상단부에 나타났던 생육량의 저하가 출수기에는 나타나지 않은 반면 액비 시비 포장의 오른쪽 하단부에 생육량의 저하가 나타났다. 이는 관개용수 배출구가 왼쪽 하단부에 있기 때문에 이삭거름으로 시비한 액비가 골고루 확산되어지지 않았기 때문이라고 사료된다. 액비 시비 포장과 화학비료 시비 포장으로 나눌 경우, 각각의 공간변이는 3.6% 및 2.7% 이었다. 액비 시비 포장의 생육량이 화학비료 시비 포장의 생육량에 미치지는 못하지만 유수분얼기에 비해 생육량의 차가 줄어든 것은 액비에 포함되어 있는 유기성분 질소가 분해되어 공급되었기 때문이라고 사료된다.

하지만 액비에 포함된 유기성분이 균일하게 공급되지 않으면 포장내의 생육량의 공간변이가 크게 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해서는 초기생육의 공간변이를 최소화하기 위한 밑거름 시비법 또는 농축액을 이용한 이삭거름의 기계 시비법 등이 필요할 것으로 판단된다.

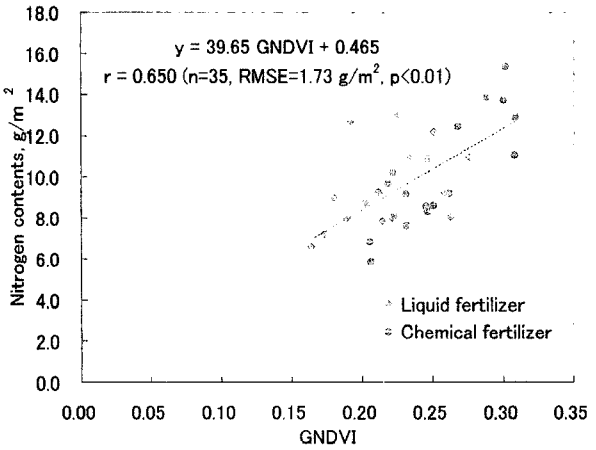

Fig. 3 Estimation model of nitrogen contents at heading stage by GNDVI.

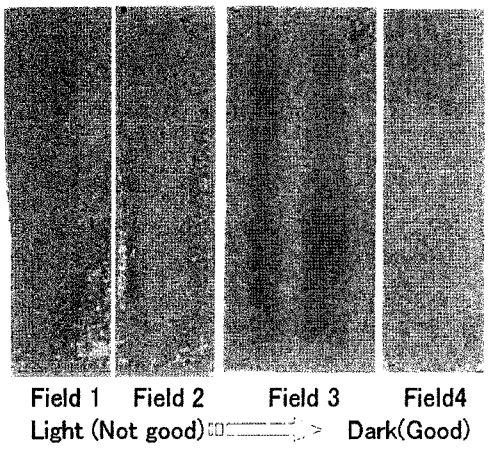

Fig. 4 Spatial variability of vegetation growth at heading stage by GNDVI.

Table 7 Statistics data of rice taste elements in 2005

		Amylose [%]	Protein [%]	Taste [point]
Liquid	1	18.7±0.9	6.46±0.9	78.0±9.3
	2	19.0±0.4	6.71±0.4	75.8±4.5
Chemical	3	18.8±0.7	6.57±0.7	77.8±7.1
	4	18.4±0.2^{+}	6.22±0.2^{+}	82.0±1.7^{+}
Ratio of Liquid/Chemical		1.02 (1.00)$^{N.S.}$	1.03 (0.99)$^{N.S.}$	0.96 (1.00)$^{N.S.}$

(mean ± standard deviation, *: vs. field 1, $^{+}$: vs. field 2, $^{\#}$: vs. field 3, $^{\wedge}$: LF vs. CF with 5% of significant difference, $^{N.S.}$: not significant difference)

Table 8 Correlation between rice taste elements and vegetation indices at heading stage and those at before harvesting

		Heading stage (Aug. 5)			Before harvesting (Sept. 2)		
		Amylose [%]	Protein [%]	Taste [point]	Amylose [%]	Protein [%]	Taste [point]
Liquid (n=15)	NDVI	0.741*(0.612)	0.759*(0.632)	-0.724*(-0.574)	0.592(0.754*)	0.575(0.734*)	-0.560(-0.724*)
	GNDVI	0.752*(0.612)	0.763*(0.634)	-0.734*(-0.585)	0.637*(0.702*)	0.624*(0.677*)	-0.615*(-0.677*)
Chemical (n=17)	NDVI	0.748*	0.730*	-0.760*	0.886*	0.891*	-0.899*
	GNDVI	0.736*	0.716*	-0.743*	0.840*	0.833*	-0.856*
Total (n=32)	NDVI	0.426(0.497*)	0.484*(0.565*)	-0.426(-0.504*)	0.727*(0.785*)	0.693*(0.737*)	-0.717*(-0.782*)
	GNDVI	0.524*(0.554*)	0.568*(0.610*)	-0.520*(-0.559*)	0.709*(0.751*)	0.674*(0.700*)	-0.705*(-0.753*)

(without *: 5% of signification level, * : 1% of signification level, () : Coefficients of correlation when the 3 samples are excluded)

라. 등숙기

1) 식미성분 및 식미치

수확직전에 채취한 식미성분 및 식미치의 통계치는 표 7과 같다. 액비 시비 포장의 3개 지점 및 화학비료 시비 포장의 1개 지점에서는 8 포기의 벼를 채취했으나 분석에 필요한 적정량의 샘플(200 cc)을 채취할 수 없었다. 액비 시비 포장에 대한 화학비료 시비 포장의 아밀로스 및 단백질 함량은 액비 시비 포장에서 높기 때문에 식미치가 낮게 나타났지만 비료의 종류에 의한 식미성분 및 식미치의 유의차는 나타나지 않았다. 액비 시비 포장에서 3개의 샘플이 아밀로스 및 단백질 함량이 높게 나타나 이유는 명확하지 않지만 모두가 포장의 왼쪽 상단부에 존재하였다. 이는 질소성분의 과대 공급으로 인해 단백질이 과다 축적되었기 때문이라고 사료된다. 이는 액비의 질소성분 중에 포함된 유기질소(1450 ppm) 성분이 토양 미생물에 의해 분해되어 벼가 흡수할 수 있는 암모니아태 질소로 변하기 때문에 액비 시비 포장의 질소 시비량이 화학비료 시비 포장보다 많았다고 판단된다.

2) 식생지수 및 공간변이

출수기 및 수확직전의 식생지수와 식미성분 및 식미치의 상관관계는 표 8과 같다. 출수기 및 수확직전의 식생지수를

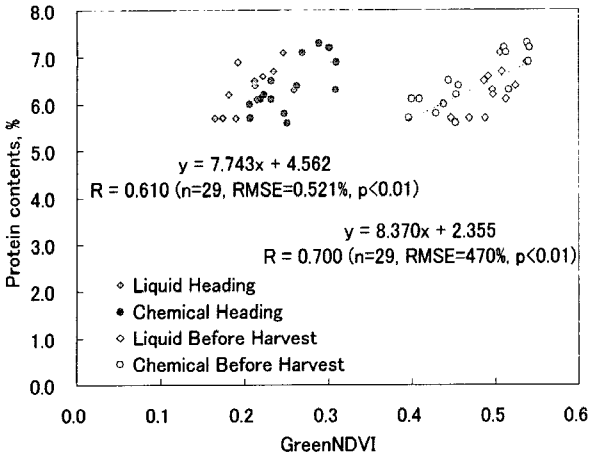

Fig. 5 Estimation models of protein contents by GNDVI of heading stage and before harvesting.

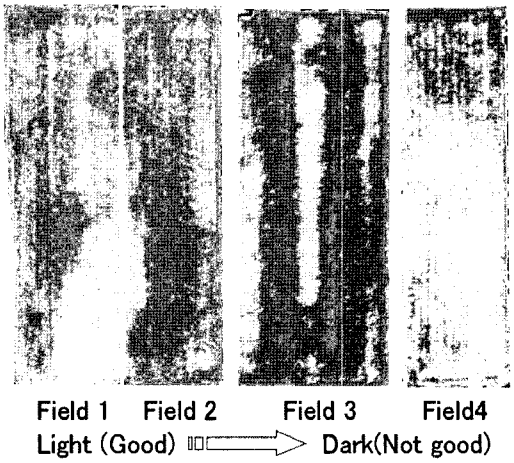

Fig. 6 Spatial variability of vegetation growth before harvesting by GNDVI.

이용하여 수확시의 식미성분 및 식미치 예측이 가능하였다. 액비 시비 포장의 경우 수확직전의 식생지수보다 출수기의 식생지수를 이용할 경우가 보다 좋은 결과를 나타내었다. 반면 화학비료 시비 포장 및 비료의 종류에 상관없이 데이터를 비교하였을 때는 수확직전의 식생지수를 이용하는 것이 보다 정확하게 식미성분 및 식미치를 예측할 수 있었다.

질소보유량의 예측인 경우에는 GNDVI를 이용하는 것이 정확도가 높았으나 식미치 및 식미치 성분은 경우에 따라서 NDVI를 이용하는 것이 더 정확도가 높게 나타났다. 액비 시비 포장에서 식미치가 현저하게 낮게 나타났던 3개의 샘플을 제외할 경우 출수기 모델의 정확도는 낮아졌지만 수확직전 모델의 정확도는 높아졌다. 범용성을 가진 식미치 예측모델을 작성하기 위해서는 데이터의 축적이 좀 더 필요할 것으로 판단된다.

출수기 및 수확직전의 GNDVI를 이용한 단백질 예측 모델을 그림 5에, GNDVI를 이용한 포장의 공간변이를 그림 6에 나타내었다. 출수기 모델의 상관계수는 0.610, RMSE는 0.521% 이었고 수확직전 모델의 상관계수는 0.700, RMSE는 0.470% 이었다. 동일한 방법으로 데이터를 축적하여 만들어진 모델을 이용하면 품질에 따른 적기수확 및 품질등급별로 수확을 함으로서 고품질 쌀 생산을 통한 부가가치 향상이 기대된다.

수확직전의 GNDVI값은 출수기에 비해 증가하였고 각 모델에서 액비 시비 포장과 화학비료 시비 포장의 GNDVI값의 변화가 있었다. GNDVI 값을 이용하여 공간변이를 분석하면 각 포장의 변이계수가 4.5%, 3.9%, 4.8% 및 4.9%로 나타났다. 액비 시비 포장과 화학비료 시비 포장으로 나누어서 계산할 경우 각각의 공간변이는 4.2% 및 4.8% 이었다. 포장내의 공간변이에서는 수확직전에 질소보유량이 많을 경우 식미치는 저하되기 때문에 단백질 추정 모델에서도 알 수 있듯이 GNDVI값이 낮을수록 단백질함유량이 적게 나타난다. 4번 포장을 제외하고 포장 내에서 GNDVI값이 높은 부분이 많이 관찰되었다.

액비 시비 포장의 수확량은 각각 632 kg/10a과 627 kg/10a으로 화학비료 시비 포장의 664 kg/10a과 667 kg/10a에 비해서 약 5% 정도 낮았다(Ryu et al., 2007). YBEC에서 무료로 액비를 제공받았기 때문에 액비를 시비하는 것으로 인한 경제적 손실은 발생하지 않았다.

4. 요약 및 결론

바이오매스를 이용한 순환형 사회 구축에 필요한 메탄발효 시설에서 생성되는 부산물인 액비를 벼 재배 포장 이용 가능성을 구명하였다. 이를 위해 일반 농가 포장에 액비를 시용했을 때와 화학비료를 시용했을 때의 벼 생육상태, 쌀의 식미치 및 수확량을 조사하여 비교 분석하였다. 동시에 정밀농업 기법과 리모트 센싱 기술을 활용하여 식생지수를 산출하고 이를 이용한 각 포장의 공간변이도 비교 분석하였으며, 생육 및 식미치의 효과적인 조사를 위해 식생지수를 응용한 단순회귀 모델도 개발하였다.

(1) 유수분얼기에는 액비 시비 포장의 질소농도가, 화학비료 시비 포장의 건물중이 상대적으로 높게 나타났으며 액비 시비 포장의 생육량은 화학비료 시비 포장의 60~80% 수준이었다.

(2) GNDVI를 이용한 질소보유량 회기식의 상관계수는 0.607, RMSE는 1.04 g/m^2 이었다. GNDVI 값으로 산출된 각 포장의 변이계수는 3.5%, 3.7%, 3.0% 및 2.4% 이고 액비와 화학비료 시비 포장으로 나눌 경우 각

각의 공간변이는 3.6% 및 2.7% 이었다.

(3) 출수기에서도 액비 시비 포장의 질소농도가, 화학비료 시비 포장의 건물중이 상대적으로 높게 나타났으며 액비 시비 포장의 생육량은 화학비료 시비 포장의 80~95% 수준으로 유수분얼기에 비해 생육량의 차이가 줄어들었다.

(4) GNDVI를 이용한 질소보유량 회귀식의 상관계수는 0.650, RMSE는 1.73 g/m^2 이었다. GNDVI 값으로 산출된 각 포장의 변이계수는 3.5%, 3.7%, 3.0% 및 2.4% 이고 액비 시비 포장과 화학비료 시비 포장으로 나눌 경우 각각의 공간변이는 3.6% 및 2.7% 이었다.

(5) 액비 시비 포장에 대한 화학비료 시비 포장의 아밀로스 및 단백질 함량은 액비 시비 포장에서 높기 때문에 식미치가 낮게 나타났지만 비료의 종류에 의한 식미성분 및 식미치의 유의차는 나타나지 않았다.

(6) 출수기 회기식의 상관계수는 0.610, RMSE는 0.521% 이었고 수확직전 회기식의 상관계수는 0.700, RMSE가 0.470% 이었다. GNDVI 값으로 산출된 각 포장의 변이계수는 4.5%, 3.9%, 4.8% 및 4.9% 이고 액비와 화학비료 시비 포장으로 나눌 경우 각각의 공간변이는 4.2% 및 4.8% 이었다.

각 생육시기의 생육량과 식미성분 및 수확량 등을 비교하여 액비가 비료로 이용가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 생육초기에 존재하는 화학 비료 시비 포장과의 생육량의 차이를 줄일 수 있다면 보다 폭넓고 효율적으로 액비를 이용하는 것이 가능하다고 판단된다. 이를 위해서는 물 관리에 의한 액비성분의 유출방지, 액비 중에 포함된 유기물의 무기화 정도, 생육량의 공간변이를 줄이기 위한 시비법 등의 데이터 축적과 관련 기술의 개발이 필요할 것으로 판단되었다.

인용문헌

1. Haga, K., H. Tanaka and S. Higaki. 1979. Methane production from animal wastes and its prospects in Japan. Journal of Agricultural Waste 1:45-55.
2. Li, K., T. Inamura and M. Umeda. 2003. Growth and nitrogen uptake of paddy rice as influenced by fermented manure liquid and squeezed manure liquid. Journal of Soil Science & Plant Nutrition 49:463-467.
3. Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries of JAPAN. 2005. Annual report on food, agriculture and rural areas in Japan. http://www.maff.go.jp/j/wpaper/pdf/fy2005_rep.pdf
4. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries of KOREA. 2007. http://www.mifaff.go.kr/main.tdf
5. Nakagawa, Y. 2007. Biomasstown project in Yagi Branch, Nantan City, Japan: Experience from the methane fermentation of livestock wastes. Journal of Environmental Conservation Engineering 36(9):9-16. (In Japanese)
6. Nakamura, K., K. Hunamoto and T. Mitsuno. 2007. The fate of nitrogen in paddy applied with methane fermentation manure liquid. Journal of Environmental Conservation Engineering 36(9):23-30. (In Japanese)
7. Noike, T. 2000. The importance of methane fermentation process in the global environment Era and present status on the development of the technology, for the recycling society. Journal of New Policy (Shinseisaku) 15(9):44-47. (In Japanese)
8. Oda, A., A. Esaka, M. Yamazaki and A. Oida. 2001. Development of closed methane fermentation system for agricultural biomass using solar cells. Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery 63(3):43-50. (In Japanese)
9. Ryu, C. S., M. Iida, M. Suguri, M. Umeda, T. Inamura, H. Inoue, H. Shinjo and N. Moritsuka. 2004a. Effect of variable rate fertilizer application aimed at reducing the spatial variability of grain yield on rice taste. Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery 66(5):49-62. (In Japanese)
10. Ryu, C. S., M. Suguri, M. Umeda and T. Inamura. 2004b. Estimation of nitrogen content of rice plant using remote sensing technology. Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery 66(2):85-96. (In Japanese)
11. Ryu, C. S., T. Ueda, M. Suguri, M. Iida and M. Umeda. 2007. Utilization digested sludge from methane fermentation as liquid fertilizer for paddy field. Research of Resource Recycling Branch Journal of Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering 2:59-69. (In Japanese)
12. Terada, C., C. S. Ryu, M. Suguri, M. Iida and M. Umeda. 2006. Analysis of vegetation growth and taste elements of rice using remote sensing. Kansai Branch Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery 99:98-101. (In Japanese)
13. Umeda, M. 2007. Present and future situation on bio-gas business. Journal of Environmental Conservation Engineering 36(9):2-8. (In Japanese)