

혐기소화발효액비의 벼 생육 및 수량에 미치는 영향과 적정 시용량

변지은¹ · 이홍주² · 류종원³ · 황선구^{3,†}

Effect of Different Liquid Manure Anaerobic Digestates on the Growth and Yield of Rice and the Optimum Application Concentration

Ji-Eun Byeon¹, Hong-Ju Lee², Jong-Won Ryoo³, and Sun-Goo Hwang^{3,†}

ABSTRACT This research examined the effects of different liquid manure based anaerobic digestate on the growth and yield of rice compared to chemical fertilizer. The liquid manure was produced by aerobic fermentation from swine with cow or apple pomace anaerobic digestate and treated at different concentrations. The number of grains per panicle increased in both the liquid manure-treated and chemical fertilizer treated rice. The yield index did not vary significantly between the liquid manure and chemical fertilizer. An increased concentration of liquid manure did not correlate with increases in unhulled rice. However, pH and exchangeable K in the soil increased with an increase in liquid manure. In summary, we suggest a properly applied 100% liquid manure fertilizer can replace chemical fertilizer to reduce our excessive use of inorganic fertilizer.

Keywords : anaerobic digestate, fermentation liquid fertilizer, rice growth, rice yield, yield component

가축분뇨는 잠재적 가치가 큰 유기물 발생원이므로, 안정적으로 토양이 충분하게 수용할 수 있는 형태로 변화시킬 수 있는 기술이 지속적으로 개발되어야 한다(Jeong *et al.*, 2014). 국내에서는 가축분뇨를 처리하기 위해 처리시설은 주로 퇴비화, 액비화, 정화방법의 형태로 운용되고 있다(Jeong *et al.*, 2014).

액비화 방법 중 하나인 혐기소화는 부피감량이 뛰어나고 메탄가스와 같은 에너지를 회수할 수 있다(Lee *et al.*, 2001). 이 과정에서 발생한 바이오가스의 활용으로 전기를 공급할 수 있다는 장점이 있으나 소화시설 건설과 유지에 많은 비용이 소요되고 운영하기 위해서는 전문 인력이 필요하다는 단점이 있다(Lim *et al.*, 2002b).

혐기소화 시 유기물은 메탄가스로 배출되고 나머지 영양 성분들은 혐기소화액에 남아있기 때문에 혐기소화액에는 작물이 필요로 하는 비료성분이 함유하고 있어 퇴비와 액비로 사용될 수 있는 유용한 자원이다(Kim *et al.*, 2010). 그럼에도 불구하고 혐기소화액에 대한 작물의 이용 측면이

정립되지 않은 실정이다(Hong *et al.*, 2011).

혐기소화를 거친 유기물들은 최종적으로 고농도의 암모니아를 함유한 혐기소화액으로 잔류하기 때문에 혐기소화액을 액비로 토양에 환원하기 위해서는 토양의 오염을 방지하기 위해 안정성과 위생성을 조사할 필요가 있다(Jeong *et al.*, 2009). 음식물류 폐수와 가축분뇨를 1:1로 혼합한 폐수를 고온/중온성 혐기소화하였을 때 대장균을 비롯하여 장내세균을 제어할 뿐만 아니라 병원성미생물의 제어에도 효과가 큰 것으로 조사되었다(Jeong *et al.*, 2009).

혐기소화액을 농경지에 직접 살포할 경우 약해, 점도, 악취로 작물 시용에 적합하지 않을 수 있으므로 작물 시용 시 안정성을 높이기 위하여 호기처리가 필요하다(Byeon *et al.*, 2020a). 혐기소화액의 폭기처리와 관계없이 N, P, K의 합이 0.3%이상으로 가축분뇨발효액의 비료공정규격에 적합하였으나 혐기소화액 후처리과정으로 폭기처리를 하였을 때 혐기소화액을 3배 희석하여 무종자를 이용해 종자발아시험을 실시한 결과 혐기소화액 폭기처리 전보다

¹상지대학교 생명환경과학대학 박사과정 (Ph.D. Student, College of Life and Environment Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea)

²상지대학교 생명환경과학대학 석사과정 (M.S. Student, College of Life and Environment Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea)

³상지대학교 생명환경과학대학 교수 (Professor, College of Life and Environment Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea)

[†]Corresponding author: Sun-Goo Hwang; (Phone) +82-33-730-0512; (E-mail) sghwang9@sangji.ac.kr

<Received 5 October, 2020; Revised 3 November, 2020; Accepted 14 December, 2020>

폭기처리가 진행될수록 발아지수가 높아졌다(Byeon *et al.*, 2020b; Byeon *et al.*, 2020a). 즉 혐기소화액을 폭기처리한 후 사용하는 것이 작물에 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

혐기소화액을 벼 재배 시 질소 기준으로 100%, 150% 사용하거나 혐기소화액 100%를 화학비료와 같이 사용하였을 때 벼의 수량이 혐기소화액 100% 처리구, 150% 처리구가 무처리구보다 많았을 뿐만 아니라 표준시비구(화학비료)와 비슷하거나 약간 많았으며, 혐기소화액 100%를 화학비료와 같이 사용하였을 때는 무처리구보다는 수량이 많았지만 고중 증가 및 도복으로 인하여 표준시비구보다 수량이 약간 낮았다고 보고하였다(Lim *et al.*, 2002a). 또한 질소 기준으로 혐기소화액 100%를 사용하거나 질소 기준으로 혐기소화액 50%와 화학비료 50%, 혐기소화액 70%와 화학비료 30%를 사용하였을 때 벼의 수량은 질소성분을 기준으로 혐기소화액 70%와 화학비료 30%를 사용한 처리구와 혐기소화액 100% 처리구가 무처리구보다 많았을 뿐만 아니라 표준시비구보다 약간 많았다(Lim *et al.*, 2002b). 벼 재배 시 혐기소화액을 이용하여 진행된 연구는 대부분 혐기소화 후 배출된 혐기소화액을 이용한 연구이며, 혐기소화액을 후처리를 한 후 생산된 액비를 이용한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 시험은 혐기소화액을 후처리로 호기처리를 한 후 발생한 혐기소화발효액비의 사용량이 벼 생육과 수량에 미치는 영향을 알아보기 위해 실시하였다.

재료 및 방법

식물 재료 및 생육 조사

본 시험을 실시하기 전 논흙(사양토)을 약 1주일가량 자연 건조를 시킨 후 체거름망(7 mm×12 mm)을 통해 선별하였으며, 와그너포트(1/5,000a) 밑 부분을 마개로 막고 선별된 논흙을 약 15 cm가량 담은 다음 물을 약 450 mL 넣고 잘 혼합시켰다. 공시품종은 삼광벼(*Oryza sativa* L. Samkwang) 이었으며, 유묘를 이앙하기 4일 전 처리구별로 설정한 량의 기비를 사용하였다. 모든 처리구는 5반복씩 난괴법으로 무작위로 배치하였으며, 기비 4일 후 5월 28일에 삼광벼의 유묘를 이앙하였고 31일 후 분얼비, 58일 후 수비 사용하였다. 벼의 수확은 10월 21일에 실시하였다.

이앙 후 53일부터 약 한 달간 2주에 한번(이앙 후 53일, 67일, 81일) 생육조사(초장, 분얼수)를 실시하였고, 수확 후 수량구성요소 조사와 수량조사를 실시하였으며, 조사 시 독립된 3개의 개체를 사용하였다. 벼의 수량구성요소 및 수

량 조사는 처리구별 주당 수수, 수당 립수, 등숙률, 천립중, 정조수량을 조사하였으며, Yield index는 화학비료 처리구의 정조수량을 100으로 하였을 때 발효액비의 지수를 산출하였다. 정조수량은 포트 당 임실종자무게를 이용하여 환산하였으며, 포트당 임실종자의 무게는 포트 당 전체 종자에서 임실종자를 분류한 후 정밀저울(EPG413C, OHAUS, U.S.A.)을 이용하여 측정하였다.

엽록소 함량 및 토양의 화학적 특성 분석

엽록소는 모를 이앙 한 후 유수분화기(이앙 후 53일), 수잉기(이앙 후 67일), 출수기(이앙 후 81일)에 Chlorophyll meter (SPAD-502, KONICA MINOLTA, Japan)를 이용하여 엽록소 함량을 측정하였으며, 토양의 화학적 특성은 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다.

포트 관리

발효액비와 화학비료를 사용한 후 약 일주일간 유실을 방지하기 위해 와그너 포트 하단부에 있는 구멍을 마개로 막았으며, 2차로 비닐을 이용하여 하단부위를 감쌌다. 또한 우천 시 빗물 틈에 의해 액비와 비료의 유실을 방지하고자 일주일간 비닐 차단막을 덮어주었다. 이앙 후 매일 수분관리를 실시하였으며, 8월 말경 병해충을 막기 위해 약제(후치왕, 엠브이피, 파단)를 살포하였다.

혐기소화발효액비

본 시험에서 돈분(100% 돈분), 돈·우분(70% 돈분, 30% 우분), 돈분·사과착즙박(70% 돈분, 30% 사과착즙박)을 혐기소화하여 발생한 혐기소화액에 공기량을 1 m³당 0.1 m³/air/min을 30분 주입, 15분 미주입이 반복되도록 설정하여 폭기처리하였다. 이를 통하여 생산한 돈분 액비(Liquid Swine Manure; LSM), 돈·우분 액비(Liquid Swine/Cow Manure; LSCM), 돈분·사과착즙박 액비(Liquid Swine/Apple pomace Manure; LSAM)는 벼의 생육에 대한 영향 평가를 위하여 사용하였다.

발효액비의 pH는 9.2~9.3으로 약알칼리성을 보였으며, 전기전도도(Electrical conductivity, EC)는 돈분 액비(LSM)가 16.42 mS/cm로 액비 중 가장 낮았고 돈·우분 액비(LSCM)는 18.08 mS/cm, 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)는 17.05 mS/cm이었다(Table 1). 총질소량(Total nitrogen; T-N)은 돈분 액비(LSM)와 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)가 0.23%로 동일하였으며 돈·우분 액비(LSCM)는 0.26%이었다. 인(Phosphorus; P)은 돈분 액비(LSM)가 0.016%, 돈·우분 액비(LSCM)가 0.012%, 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)가 0.011%였다. 칼륨(potassium; K)는 돈분 액비(LSM)가 0.30%로

Table 1. Chemical component (pH, EC, T-N, P, K) of the different liquid manures.

	pH	EC (mS/cm)	T-N (%)	P (%)	K (%)
LSM	9.20	16.42	0.23	0.016	0.30
LSCM	9.26	18.08	0.26	0.012	0.28
LSAM	9.25	17.05	0.23	0.011	0.25

LSM, liquid swine manure; LSCM, liquid swine/cow manure; LSAM, liquid swine/apple pomace manure.

발효액비 중 함량이 가장 높았으며, 돈분·사과착즙박 액비 (LSAM)가 0.25%로 상대적으로 낮은 함량을 보였다.

액비의 사용량

벼 생육에서 화학비료와 발효액비의 구별되는 영향을 평가하기 위하여 다른 사용량(100%, 120%, 140%)의 발효액비와 대조구로써 화학비료를 식물 재배 시 처리하였다. 대조구인 화학비료와 발효액비의 처리구들은 와그너포트(1/5000a) 환경을 고려하여 표준시비량(N-P-K=9:4.5:5.7 kg/10a)의 두 배의 양(N-P-K=18:9:11.4 kg/10a)을 사용량으로 설정하였다. 화학비료 처리구는 요소, 용성인비, 염화가리를 사용량에 맞춰서 사용하였으며, 처리구별 발효액비는 설정한 사용량의 질소기준으로 100%, 120%, 140%에 해당하는 양을 사용하였다. 발효액비는 설정한 사용량의 질소를 기준으로 기비 50%, 분얼비 20%, 수비 30%로 나누어 주었으며, 대조구인 화학비료 처리구에 질소는 요소, 인산은 용성인비, 가리는

염화가리를 이용하여 기비 때 질소 50% 인산 100% 가리 100% 사용하였고 분얼비 때 질소 20%, 수비 때 질소 30%를 사용하였다.

통계처리

생육조사 및 수량조사의 측정값은 R package Agricolae을 이용하여 Duncan의 다중범위검정법(Duncan's new multiple range test)을 통해 평균제곱오차를 고려하여 평균값을 5% 유의수준에서 비교하였으며, 벼의 수량구성요소 및 수량과 토양의 화학적 특성의 상관관계는 Pearson's correlation coefficients으로 상관계수(*r*)에 대한 통계적 유의성은 n-2 자유도의 normal t-test로 분석하였다.

결과 및 고찰

초장, 분얼수와 엽록소 함량

벼의 생육에 대한 발효액비의 영향을 평가하기 위하여 이앙 후 유수분화기(Panicle differentiation stage), 수잉기(Booting stage), 출수기(Heading stage)에 초장과 분얼수, 엽록소 함량(SPAD)을 측정하였다(Table 2). 이앙 후 유수분화기에 100% 돈분 액비(100% LSM), 140% 돈분·사과착즙박 액비(140% LSAM)를 제외한 나머지 7개의 발효액비 처리구(78%)보다 대조구인 화학비료 처리구가 유의하게 긴 초장(53 cm)을 보였다. Ryoo (2007)의 연구에서는 유수분화기와 유사한 시기에 1년, 3년 시용구는 화학비료 사용

Table 2. Variations in plant height, Tiller number and SPAD using different liquid manures.

The life of rice (After rice transplanting)	Investigating items	Panicle differentiation stage (53 days)			Booting stage (67 days)			Heading stage (81 days)		
		Plant height (cm)	Tiller number (No)	SPAD	Plant height (cm)	Tiller number (No)	SPAD	Plant height (cm)	Tiller number (No)	SPAD
LSM	100%	51.3±0.76abc*	14.7±2.08b	28.4±0.87bcd	61.9±0.50ab	15.3±0.58bc	28.0±0.40cde	75.9±2.42bc	17.3±1.15b	28.4±1.15de
	120%	50.5±0.50cd	14.7±1.53b	27.9±0.51bcde	62.7±1.15ab	14.0±1.73bcde	28.9±0.79abc	78.7±1.33ab	17.0±1.00b	29.7±0.97cd
	140%	49.5±1.50d	14.3±0.58b	29.3±0.15b	63.5±2.14a	12.3±1.53de	29.8±0.96ab	81.6±0.75a	17.7±0.58b	30.0±0.75bc
LSCM	100%	51.2±1.76bcd	13.7±0.58bc	27.3±0.70de	64.5±2.20a	13.0±1.00cde	28.4±1.12bcde	78.5±3.88ab	16.0±1.00bc	30.9±1.16abc
	120%	50.8±0.76bcd	13.7±1.15bc	29.0±0.25bc	63.7±1.62a	16.0±1.00b	28.4±0.32bcde	77.0±0.60bc	16.0±2.00bc	31.2±0.95abc
	140%	50.7±0.76bcd	14.0±2.00bc	27.6±1.65cde	61.4±0.35ab	15.0±2.00bcd	30.2±1.58a	75.3±2.31bc	15.7±0.58bc	31.7±0.79a
LSAM	100%	51.0±0.50bcd	10.7±0.58d	26.7±0.90ef	63.7±3.21a	14.0±1.00bcde	27.2±0.25de	75.3±3.30bc	14.0±2.00c	28.2±0.15e
	120%	49.5±0.87d	12.3±1.53bcd	25.8±0.64f	63.8±2.99a	12.0±1.00e	28.2±0.62cde	78.5±1.47ab	15.3±1.53bc	29.8±0.15bcd
	140%	52.3±0.76ab	11.7±0.58cd	27.7±0.38cde	63.7±1.22a	14.3±2.31bcde	28.6±0.11bcd	77.8±0.20abc	16.7±0.58b	31.3±0.35ab
Control (Chemical fertilizer)		53.0±0.00a	21.0±1.00a	31.9±0.38a	59.5±1.10b	19.0±1.00a	27.0±0.35e	74.4±1.25c	22.7±0.58a	26.3±0.40f

LSM, liquid swine manure; LSCM, liquid swine/cow manure; LSAM, liquid swine/apple pomace manure.

Results are presented as the mean ±SD of three independent experiments.

* Indicates separation within columns by Duncan's new multiple range test at a 5% level of significance.

구의 초장보다 짧았으며, 5년 시용구에서는 화학비료 시용구와 유의한 차이가 없었다(Ryoo, 2007). 수잉기에는 화학비료 처리구보다 6개의 발효액비 처리구(67%)에서 유의하게 긴 초장을 보였으며, 출수기에는 4개의 발효액비 처리구(44%)에서 화학비료 처리구보다 유의하게 초장이 길었다. 특히 출수기에 돈분 액비(LSM)와 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)의 경우 시용량이 늘어날수록 초장이 길어지는 경향을 보였다. Lee *et al.* (2010)의 연구에서는 이앙 후 80일의 초장이 2개 지역(영광, 백수)에서는 양돈분노 발효액비 처리구가 화학비료 처리구보다 길었지만 유의성의 차이를 나타내지 않았고 염산 지역에서는 양돈분노 발효액비 처리구에서 화학비료 처리구보다 초장이 길었다(Lee *et al.*, 2010).

유수분화기의 평균 분얼수는 돈분 액비(LSM)은 14.3개에서 14.7개, 돈·우분 액비(LSCM)은 13.7개에서 14.0개, 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)은 10.7개에서 12.3개로 나타났다. 동일한 시기에 화학비료의 분얼수(21.0개)에 비하여 모든 발효액비 시용 시 유의하게 적은 분얼수를 나타냈으며 발효액비 내에서 돈분·사과착즙박 액비(LSAM) 시용 시 돈분 액비(LSM)와 비교하여 유의하게 적은 분얼수를 보였다. 화학비료와 비교한 발효액비의 유의하게 적은 분얼수는 유수분화기 뿐만 아니라 수잉기와 출수기에도 유사하게 관찰되었다. 예를 들어 평균 분얼수는 수잉기때 화학비료가 19.0개, 발효액비 시용 시 12.0개에서 16.0개로 나타났으며 출수기때 화학비료가 22.7개, 발효액비 시용 시 14.0개에서 17.7개로 유의한 차이가 관찰되었다. Ryoo (2007)의 연구에서 벼의 분얼수 조사 시 출수기와 유사한 시기에 가축분노 액비 1년 시용구에서 화학비료 처리구보다 분얼수가 적었으나 액비 3년 시용구와 5년 시용구에서는 화학비료 처리구와 분얼수의 차이가 없었다(Ryoo, 2007). 발효액비를 3년 이상 시용한다면 화학비료 처리구와 분얼수가 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

엽록소측정치(SPAD)는 벼의 생육 중 영양 상태를 평가하는 간접지표로 이용되고 있다(Ryoo, 2009). 엽록소 함량(SPAD)의 경우 이앙 후 유수분화기에는 대조구인 화학비료 처리구가 31.9로 모든 발효액비 처리구(25.8~29.3)보다 상대적으로 유의하게 높은 수치를 나타내었다. 이와 유사하게 Ryoo (2007)의 연구에서도 본 시험과 같이 생육 초기에 가축분노 액비 1년 시용구보다 화학비료 처리구가 높은 결과를 보였다(Ryoo, 2007). 하지만 수잉기에는 120%와 140% 돈분 액비(LSM), 140% 돈·우분 액비(LSCM), 140% 돈분·사과착즙박 액비(LSAM) 처리시 화학비료보다 유의하게 높은 엽록소 양을 나타내었다. 출수기의 평균 엽록소

측정치는 화학비료(26.3)보다 모든 발효액비 시용 시 유의하게 높은 수치(28.2~31.7)를 나타내었다. 이러한 엽록소 측정치에 대한 결과는 화학비료와 비교하여 발효액비가 식물의 성장과정에서 시간이 지남에 따라 광합성 효율 증대에 영향을 미쳤음을 제시한다. Ryoo (2014)의 연구에 의하면 돈분액비를 질소의 기준으로 전량을 기비로 시용하였을 때 돈분 액비 100%, 130% 처리구는 화학비료 처리구와 엽록소 측정치가 큰 차이를 보이지 않았으며, 돈분액비 160% 처리구는 화학비료 처리구보다 엽록소 측정치가 높았다(Ryoo, 2014). 벼의 신장과 광합성에 관련한 식물 발달 효과가 유수분화기에 화학비료가 발효액비에 비하여 상대적으로 증진되었음에도 불구하고 출수기까지 고려한다면 발효액비가 화학비료보다 벼의 생육과정에 크게 기여하였음을 나타낸다.

수량구성요소 및 수량조사

벼의 수량성과 관련한 발효액비의 영향을 평가하기 위하여 주당 수수(Panicles per hill), 수당 립수(Grains per panicle), 등숙률(Percent ripening), 천립중(Thousand grain weight), 정조수량(Unhulled rice), 생산지수(Yield index)를 조사하였다(Table 3). 주당 수수는 화학비료 처리구가 15개로 발효액비 처리구들보다 많았으며, 수당 립수는 화학비료 처리구가 42.0개로 6개의 발효액비 처리구(67%)와 비교하여 유의하게 적었다. 발효액비 처리구들은 수치로 보면 140% 처리구에서 수당 립수가 많았으나 돈분 액비(LSM)와 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)의 경우 시용량에 따라 유의한 차이가 없었고, 돈·우분 액비(LSCM)는 120%와 140%는 유의한 차이가 없었다. Ryoo(2014)의 연구에서도 돈분 액비 시용량이 많을수록 수당 립수가 증가하였으며, 100%와 130%시용구가 화학비료 처리구와 유의한 차이가 없었고 160% 시용구는 화학비료 처리구보다 수당 립수가 많았다(Ryoo, 2014). 천립중은 모든 발효액비 처리구에서 화학비료 처리구보다 유의하게 높은 수치를 나타내었다. 벼의 수당 립수, 천립중과 관련해 발효액비가 화학비료보다 상대적으로 높은 생육증진효과를 보인 것은 초장과 엽록소 함량과 관련한 식물 성장과 광합성 효율에서 발효액비가 더 좋은 조건이기 때문인 것으로 보인다. 하지만, 등숙률은 화학비료와 발효액비의 처리구 사이에서 큰 유의성을 관찰할 수 없었다. Hong *et al.* (2011)의 연구에서는 화학비료 처리구와 돈분 혐기소화액 및 통합 혐기소화액 처리구가 천립중과 등숙률 등이 차이를 보이지 않았다(Hong *et al.*, 2011).

벼의 정조수량은 화학비료 처리구가 782.8 kg/10a로 가

Table 3. Yield component and yield using different liquid manures.

Investigating items Treatments	Panicles per hill	Grains per panicle	Thousand grain weight (g)	Percent ripening (%)	Unhulled rice (kg/10a)	Yield index	
LSM	100%	11.0±1.00b*	52.7±1.15bc	29.3±0.78a	71.3±6.93c	678.5±27.99abc	89.4±22.19a
	120%	9.0±1.00cde	50.3±2.08bc	29.3±0.28a	76.9±9.21abc	677.2±40.41abc	88.6±17.93a
	140%	9.7±0.58bcde	60.7±9.87ab	29.2±0.43a	77.2±0.71abc	724.2±52.10ab	94.1±13.48a
LSCM	100%	9.7±1.53bcde	54.7±10.21bc	29.0±0.72a	77.5±5.89abc	684.2±21.55abc	89.3±15.93a
	120%	9.7±0.58bcde	71.7±13.58a	29.0±0.36a	84.7±2.55ab	777.2±66.33a	101.9±22.93a
	140%	10.7±0.58bc	74.3±3.06a	29.3±0.44a	86.8±6.39a	751.8±11.41a	98.7±21.96a
LSAM	100%	8.7±0.58de	71.3±10.12a	29.0±0.51a	74.4±3.25bc	609.2±28.52c	79.6±14.87a
	120%	8.3±0.58e	64.3±6.43ab	29.3±0.56a	84.9±4.40ab	633.2±12.33bc	83.1±18.16a
	140%	10.3±1.15bcd	75.3±11.15a	29.6±0.49a	82.5±7.74abc	679.2±49.88abc	88.4±13.73a
Chemical fertilizer	15.0±1.00a	42.0±7.55c	27.6±0.20b	76.1±7.65abc	782.8±144.14a	100.0±0.00a	

LSM, liquid swine manure; LSCM, liquid swine/cow manure; LSAM, liquid swine/apple pomace manure.

Results are presented as the mean ±SD of three independent experiments.

* Indicates separation within columns by Duncan's new multiple range test at a 5% level of significance.

Yield index = when the yield index of chemical fertilizer treatment is 100, the value of yield index by different liquid manures.

장 많았으나 돈분 액비(LSM)와 돈·우분 액비(LSCM)는 시용량과 관계없이 유의한 차이가 없었으며, 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)의 경우에는 140% 처리구만 유의한 차이가 없었다. Kim *et al.* (2011)의 연구에 의하면 사양질 논토양에 벼를 재배하였을 때 화학비료(표준시비량)와 가축분뇨 처리구(질소 기준 100% 기비)가 무처리구에 비해 벼의 수확량이 높았으며, 화학비료와 가축분뇨 처리구 간에는 통계적인 차이가 없었다(Kim *et al.*, 2011). 벼 재배 시 액비마다 조금씩 차이가 있었지만 발효액비 100%를 사용하여도 수량구성요소와 수확량이 120%와 140% 사용하였을 때와 큰 차이가 없었다. 뿐만 아니라 화학비료와 생산지수가 차이를 보이지 않았다.

토양의 화학적 특성

화학비료와 발효액비가 토양에 미치는 영향을 분석하기 위하여 처리 전과 후의 화학적 특성을 분석하였다(Table 4). 토양의 pH는 시험 전 pH 6.2보다 시험 후에 120% 돈·우분 액비(120% LSCM)처리구 토양을 제외하고 화학비료 처리구 토양을 포함한 나머지 처리구의 토양에서 유의하게 높아졌다. 특히 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)처리구의 토양은 시용량과 관계없이 100%, 120%, 140% 토양에서 상대적으로 가장 높은 pH를 관찰할 수 있었다. 시험 전 토양보다 발효액비 처리구의 토양에서 pH가 높아진 것은 시험에 사용한 발효액비들이 약알칼리성이었기 때문으로 판단된다. 수도재배를 위한 적정 pH는 6.0~6.5이므로(Ryoo, 2009) 모

든 처리구의 토양이 시험 전 토양보다 유의하게 높아졌더라도 문제가 없을 것으로 판단된다.

유기물(Organic matter; O.M.) 함량은 시험 전 토양(15.1 g/kg)보다 140% 돈·우분 액비(140% LSCM)와 120% 돈분·사과착즙박 액비(120% LSAM)를 사용한 토양에서 유의적으로 증가하였으나 화학비료 처리 토양과 7개의 발효액비 처리구 토양에서는 유의한 차이를 관찰할 수 없었다. 유기물 함량의 적정수준은 25~30 g/kg인데(Ryoo, 2009) 시험 전 토양의 유기물 함량보다 증가한 140% 돈·우분 액비(140% LSCM)처리구의 토양과 120% 돈분·사과착즙박 액비(120% LSAM)처리구의 토양도 적정수준인 25~30 g/kg보다 낮은 함량을 보였다.

유효인산(Avail. P₂O₅)의 적정수준은 80~120 mg/kg (Ryoo, 2009)이며, 화학비료 처리구 토양은 89.3 mg/kg으로 처리구의 토양 중 유효인산(Avail. P₂O₅)이 가장 많았을 뿐만 아니라 적정수준이었다. 120% 돈분 액비(120% LSM)토양도 화학비료 처리구 토양보다 유효인산(Avail. P₂O₅)이 적었으나 적정수준으로 나타났으며, 이를 제외한 시험 전 토양을 포함한 발효액비 처리구들의 토양은 80~120 mg/kg보다 낮았다.

치환성 칼슘(Ex. cation Ca)는 140% 돈분 액비(LSM 140%)의 토양이 4.4 cmol⁺/kg로 화학비료 처리구의 토양보다 많았으나 토양의 치환성 칼슘 함량은 8개의 발효액비 처리구(89%)과 화학비료 및 시험 전 토양 사이에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 치환성 마그네슘(Ex. cation Mg) 함량은 모든 토양에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 반면에 치환

Table 4. Change in chemical composition of soil with anaerobic digestate fermentation liquefied fertilizers.

Investigating items Treatments	pH (1 : 5)	O.M. (g / kg)	Avail. P ₂ O ₅ (mg / kg)	Ex. cation (cmol ⁺ / kg)			EC (dS / m)	Avail. SiO ₂ (mg / kg)	
				Ca	Mg	K			
LSM	100%	6.4±0.03a*	16.4±0.85abcd	76.7±1.19bc	3.7±0.35ab	0.6±0.20a	0.19±0.02b	0.44±0.04ab	67.5±7.67f
	120%	6.3±0.03b	14.5±0.91d	80.7±2.77b	3.7±0.46ab	0.6±0.26a	0.20±0.03b	0.35±0.08bcde	91.8±10.18e
	140%	6.3±0.02b	15.6±0.78bcd	77.4±1.87bc	4.4±0.38a	0.8±0.21a	0.25±0.03a	0.51±0.02a	109.4±14.99de
LSCM	100%	6.3±0.04b	16.2±0.35abcd	74.1±1.53cd	3.9±0.21ab	0.7±0.21a	0.17±0.02bc	0.41±0.09abcd	164.6±16.16b
	120%	6.2±0.02c	17.0±1.59abc	73.9±1.63cd	3.9±0.36ab	0.7±0.17a	0.20±0.02b	0.49±0.05a	172.8±11.76b
	140%	6.4±0.04a	17.9±1.82a	74.2±1.68cd	3.3±0.40b	0.6±0.23a	0.19±0.02b	0.42±0.09abcd	142.4±10.34c
LSAM	100%	6.4±0.02a	15.6±1.31bcd	70.4±1.96d	3.3±0.50b	0.6±0.15a	0.15±0.02cd	0.40±0.08abcde	235.4±7.04a
	120%	6.4±0.02a	17.5±1.20ab	78.8±3.26b	3.9±0.30ab	0.7±0.10a	0.17±0.02bc	0.30±0.05cde	119.4±9.97d
	140%	6.4±0.03a	15.5±1.19bcd	71.4±1.75d	3.4±0.46b	0.6±0.10a	0.19±0.03b	0.42±0.08abc	107.3±6.89de
Chemical fertilizer	6.3±0.01b	15.4±0.84bcd	89.3±2.46a	3.5±0.57b	0.6±0.15a	0.09±0.02e	0.29±0.05de	63.2±6.05f	
Before treatment	6.2±0.01c	15.1±0.45cd	73.1±4.10cd	3.4±0.44b	0.6±0.15a	0.13±0.02d	0.28±0.07e	73.2±8.21f	

LSM, liquid swine manure; LSCM, liquid swine/cow manure; LSAM, liquid swine/apple pomace manure.

Results are presented as the mean ±SD of three independent experiments.

* Indicates separation within columns by Duncan’s new multiple range test at a 5% level of significance.

Table 5. Correlation of chemical properties in soil with yield component and yield.

	Panicles per hill	Grains per panicle	Percent ripening	Thousand grain weight	Unhulled rice
pH	-0.13	0.27	-0.05	0.37	-0.61
O.M.	-0.14	0.47	0.64	0.20	0.16
Avail. P ₂ O ₅	0.67	-0.82*	-0.22	-0.73*	0.42
Ex. cation Ca	-0.26	-0.24	-0.06	0.11	0.12
Ex. cation Mg	-0.33	0.05	0.16	0.12	0.12
Ex. cation K	-0.60	0.38	0.18	0.77*	-0.05
EC	-0.28	0.45	0.01	0.45	0.21
Avail. SiO ₂	-0.54	0.61	0.19	0.18	-0.32

* Statistically significant at $p < 0.05$, in a normal t-test with n-2 degrees of freedom.

성 칼리(Ex. cation K) 함량은 화학비료 처리 토양이 처리 전 토양보다 낮았으며, 100% 돈분·사과착즙박 액비(100% LSAM)는 처리 전 토양과 유의한 차이가 없었으나 8개의 발효액비 처리구(89%)에서는 유의하게 증가된 수치를 보였다. Lee *et al.* (2010)에 의하면 3개의 지역(영광, 군남, 법성)에서 치환성 칼리의 함량이 액비 시용 전에 비해 증가하는 경향을 보였고, Ryoo (2007)의 연구에서도 가축분뇨액비를 1년, 3년, 5년 연용하였을 때 연용 기간이 길수록 치환성 K의 함량이 높아졌다(Lee *et al.*, 2010; Ryoo, 2007). 환경 농업을 위한 치환성 칼리함량의 적정 수준은 0.3 cmol⁺/kg이며(Ryoo, 2007), 시험 후 모든 토양의 치환성 칼리함량이 발효액비를 시용하였음에도 적정 수준으로 나타났다.

전기전도도(EC)는 시험 전 토양과 화학비료 처리 토양과

비교하여 4개의 발효액비 처리 토양에서 유의하게 증가된 수치를 보였으며, 유효규산(Avail. SiO₂)의 함량은 8개의 발효액비 처리 토양에서 유의하게 증가된 수치를 보였다. 치환성 칼리와 유효규산(Avail. SiO₂)은 발효액비에 의하여 함량의 많은 변화를 나타내었다. 벼 재배 시 발효액비를 장기간 연용하기 위해서는 토양환경을 고려하여 100%를 사용하는 것이 적정할 것으로 보인다.

벼의 수량구성요소 및 수량과 토양의 화학적 특성의 상관관계

토양의 화학적 특성이 벼의 수량구성요소(주당 수수, 수당 립수, 등숙률, 천립중) 및 수량과 관련해 생육에 미치는 상관관계(r)를 분석하였다(Table 5). 치환성 칼리와 천립중 사이의 상관관계(r)는 0.77의 유의한 양의 상관관계를 보였

고 이외에도 유의한 음의 상관관계는 유효인산(Avail. P₂O₅)과 수당 립수(Grain number per panicle) 사이에서 -0.82, 유효인산(Avail. P₂O₅)과 천립중(Thousand grain weight)에서 -0.73으로 관찰되었다. 이러한 결과는 토양 내 치환성 칼리의 함량이 높으면 벼 종실의 무게가 증가하며, 토양 내 잔류하는 유효인산(Avail. P₂O₅)의 함량이 높으면 식물이 흡수한 인산의 양이 상대적으로 적은 것을 나타내므로 벼의 우수형성과 종자의 무게가 감소한다는 것을 의미한다.

적 요

본 시험은 혐기소화액을 후처리로 호기처리를 한 후 발생한 액비를 벼 재배 시 사용함으로써 벼 생육과 수량에 미치는 영향을 알아보기 위해 실시하였다. 벼 재배 시 사용한 액비는 혐기소화 후 배출된 혐기소화액을 후처리로 폭기처리(1 m³당 0.1 m³/air/min)를 한 후 생산한 액비로 돈분 액비(Liquid Swine manure; LSM), 돈·우분 액비(Liquid Swine/Cow Manure; LSCM), 돈분·사과착즙박 액비(Liquid Swine/Apple pomace Manure; LSAM)이며, 액비를 농도별(100%, 120%, 140%)로 처리구를 두었고 대조구로 화학비료를 처리구로 두었다. 발효액비 및 화학비료의 사용량은 와그너포트(1/5000a) 환경을 고려하여 표준시비량의 두배의 양을 사용량으로 설정하였으며, 발효액비는 질소를 기준으로 사용하였다.

1. 벼의 주당 수수는 화학비료 처리구가 15개로 가장 많았으나 수당 립수는 화학비료 처리구보다 발효액비 처리구들이 많았다. 천립중도 화학비료 처리구보다 발효액비 처리구들이 무거웠으며, 발효액비 사용량별 큰 차이는 없었다. 등숙률은 화학비료 처리구와 발효액비 처리구들과 차이를 보이지 않았다.
2. 벼의 수확량은 수치로 보면 화학비료 처리구가 782.8 kg/10a로 가장 많았으나 돈분 액비(LSM)와 돈·우분 액비(LSCM)의 경우 사용량과 관계없이 화학비료 처리구와 차이가 없었고, 돈분·사과착즙박 액비(LSAM)의 경우는 140% 처리구만 화학비료 처리구와 유의한 차이가 없었다.
3. 치환성 칼리는 시험 전 토양보다 모든 발효액비 처리구의 토양에서 사용량과 관계없이 증가하는 경향을 보였으며, 수치상으로 사용량이 많을수록 증가하는 경향을 보였다.

벼 재배 시 혐기소화발효액비를 사용할 경우 벼의 생산량과 사용 전 후 토양의 화학성을 종합해 볼 때 벼의 생산

량은 모든 발효액비가 사용량에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 벼의 생산 지수는 화학비료 처리구와 발효액비 처리구들과 차이를 보이지 않았다. 토양의 화학성 중 치환성 칼리는 사용량과 관계없이 사용 전보다 증가하는 경향을 보였으며, 사용량이 많을수록 수치상 증가하는 경향을 보였다. 따라서 혐기소화발효액비는 화학비료를 대체할 수 있을 것으로 보이며, 토양의 환경을 고려하여 발효액비를 과사용하는 것보다는 100%를 사용하는 것이 적정할 것으로 판단된다. 혐기소화 후 발생된 혐기소화액을 후처리 과정을 거쳐 발효액비를 생산해 작물 재배 시 사용한 연구가 많지 않으므로 농지에 사용하기 위해서는 추후 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구과제인 가축분뇨와 농업분야 재활용 자원을 이용한 통합혐기소화 및 혐기소화액 처리기술 개발(PJ012851022019)과 2020년도 한국연구재단의 이공분야기초연구사업과제(NRF-2020R1G1A1006539)에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

인용문헌(REFERENCES)

Byeon, J. E., H. J. Lee, S. G. Hwang, T. J. Rhim, and J. W. Ryoo. 2020a. Maturity evaluation and determination of aeration time using germination index of co-digestates. *Journal of the Korea Organic Resources recycling Association* 28(2) : 5-13.

Byeon, J. E., H. J. Lee, J. W. Ryoo, and S. G. Hwang. 2020b. Changes in the chemical properties of different co-digestion digestates caused by aeration. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences* 32(1) : 44-53.

Hong, S. G., J. D. Shin, S. I. Kwon, W. K. Park, J. W. Heo, H. S. Bang, Y. M. Yoon, and K. K. Kang. 2011. Comparative environmental effects of digestates application to the rice paddy soil in bioenergy village: Field trial. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 19(1) : 123-130.

Jeong, D. Y., M. H. Chung, and Y. J. Kim. 2009. Two-phase anaerobic digestion of food and livestock wastewater and hygienic aspects of the digested water. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 17(4) : 66-73.

Jeong, K. H., J. K. Kim, M. A. Khan, D. W. Han, and J. H. Kwag. 2014. A study on the characteristics of livestock manure treatment facility in Korea. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 22(4) : 28-44.

Kim, H. G., D. S. Lee, H. N. Jang, and T. H. Chung. 2010. Anaerobic digestion technology for biogas production using

- organic waste. Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association 18(3) : 50-59.
- Kim, M. K., S. I. Kwon, S. S. Kang, M. S. Han, G. B. Jung, and K. K. Kang. 2011. Response of soil properties to land application of pig manure liquid fertilizer in a rice paddy. Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association 19(4) : 97-105.
- Lee, K. H., J. H. Yoo, E. J. Park, Y. I. Jung, S. C. Tipayno, C. C. Shagol, and T. M. Sa. 2010. Effect of swine liquid manure in soil chemical properties and growth of rice (*Oryza sativa* L.). Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 43(6) : 945-953.
- Lee, Y. H., S. H. Park, and N. C. Sung. 2001. Study on production characteristic of methane gas in anaerobic digestion reactor according to input type of food waste. Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association 9(4) : 55-60.
- Lim, D. K., W. K. Park, S. I. Kwon, J. J. Nam, and S. B. Lee. 2002a. Application amount of anaerobic digestion waste water from methane fermentation of pig manure on rice. Korean Journal of Environmental Agriculture 21(4) : 248-254.
- Lim, D. K., W. K. Park, S. I. Kwon, J. J. Nam, B. K. Park, and S. H. Kim. 2002b. Application level of anaerobic digestion waste water from methane fermentation of pig manure in rice. Korean Journal of Environmental Agriculture 21(4) : 255-260.
- NIAST. (2000). Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Ryoo, J. W. 2007. Effects of continuous application of animal liquid slurry on growth characteristics and yield of rice. Journal of Animal Environmental Science 13(1) : 53-58.
- Ryoo, J. W. 2009. Effects of application seasons and rates of swine liquid manure on yield and quality in rice. Korean Journal of Organic Agriculture 17(1) : 95-109.
- Ryoo, J. W. 2014. Effects of application rates of liquid pig manure on rice growth, quality and soil properties. Korean Journal of Organic Agriculture 22(4) : 667-682.