

간척지에서 질소비료 및 돈분 퇴비 시용에 따른 사탕무 (*Beta vulgaris* var. *Aaron*)의 수량 반응 해석을 위한 시비반응 모델 탐색

임우진 · 손연규¹ · 윤영만*

국립한경대학교, ¹국립농업과학원

The Selection of Yield Response Model of Sugar beet (*Beta vulgaris* var. *Aaron*) to Nitrogen Fertilizer and Pig Manure Compost in Reclaimed Tidal Land Soil

Woo-Jin Lim, Yeon-Kyu Sonn¹, and Young-Man Yoon*

Division of Plant & biological Environment, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Republic of Korea,

¹National Academy of Agricultural Science, Suwon, 441-707, Republic of Korea

In order to interpret yield response of sugar beet to nitrogen fertilizer, and pig manure compost in saline-sodic soil of reclaimed tidal land, 4 kinds of response model, i.e., quadratic, exponential, square root, and linear response, and plateau model, are applied. The root fresh yield of sugar beet decreased exponentially with the increase of soil EC. The root fresh yield of sugar beet to nitrogen fertilizer was fitted best to the linear response, and plateau model among 4 yield response models with highly significant determination coefficient ($R^2=0.92^{**}$). The optimum N rate determined on the model was 138 kg N ha⁻¹. The root fresh yield of sugar beet to pig manure compost was fitted best to the quadratic model among 4 yield response models with highly significant determination coefficient ($R^2=0.99^{**}$). The maximum N rate determined on the model was 9.17 ton ha⁻¹. In conclusion, the proper model to interpret the yield of sugar beet in saline-sodic soil differs with the kinds of nutrient, linear response, and plateau model for fertilizer nitrogen, and quadratic model to pig manure compost.

Key words: Nitrogen, Yield response, Linear response and plateau model, Reclaimed tidal land, Sugar beet

서 언

우리나라는 1906년 처음으로 사탕무가 도입되어 당시 수원 권업모범장 등지에서 시험재배 하였으며, 1917년 평양에 조선제당회사가 설립되면서 일반 농가에서 재배 되기 시작하였다. 그러나 경제성 및 식물병 방제의 어려움으로 1930년경부터는 농가재배가 중단 되었다. 이후 시험연구분야에서 우량품종 선발 및 간척지 토양에서의 생산성에 관한 연구 (Lim et al., 1980)가 진행되어 10a당 생산 수량이 6.77~7.3 ton, 당도가 17.3~18.9%인 우수 품종이 보고되기도 하였다.

사탕무의 생산량에 영향을 주는 인자로는 생육기간 중 주위의 잡초들과 경쟁하는 광에너지의 양 (Scott and Jaggard, 1993), 사탕무의 성장특성 중 엽면적지수 (LAI;

leaf area index)(Andrieu et al., 1997), 생육기간 중 양분의 공급상태 (Werker and Jaggard, 1997), 질소 영양 (Scott and Jaggard, 1993) 등이 보고되고 있다. 따라서 사탕무의 생산량 및 시비반응을 해석하기 위해서는 재배시기, 재배포장의 위치, 수분과 양분 공급도에 대한 종합적인 고려가 요구된다.

사탕무의 생산량에 영향을 주는 주요 인자는 사탕무의 잎의 광에너지 수득율과 질소영양으로 토양비옥도 측면에서는 질소시비가 매우 중요하다. Cattanach et al. (1991)은 사탕무 재배에서 질소양분이 부족하면 생체수량이 감소하고, 질소영양이 과다하면 설탕함량이 감소되는 반면 불순물 함량은 증가되는 현상이 나타나 설탕 추출량을 감소시킨다고 보고 된 바 있다.

한편 사탕무는 내염성이 강한 작물로 EC 12 dS m⁻¹에서 10% 정도의 수량 감소가 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Brady and Weil, 2002). 이러한 사탕무의 내염성은 낮은 염분농도에서 19.6~19.9%의 설탕 함량을 보이는 것과 비교하여 높은 염분농도에서는 체내에

접수 : 2010. 4. 16 수리 : 2010. 4. 21

*연락처 : Phone: +82316705335

E-mail: yyman@hknu.ac.kr

24.8% 까지 축적한다는 보고 (Lim et al., 1980)에서 보듯이 설탕 생산량과 깊은 관련이 있다.

최근 사탕무의 생산성과 성장인자와의 상관관계를 해석하는 다양한 함수식을 이용하는 방법이 시도되고 있다 (Malnou et al., 2008; Malnou et al., 2006; Jaggard and Qi, 2006). 특히 비료 시비량과 시비반응과의 관계해석을 통해 도출되는 최적 시비량 및 최대생산량에 관한 정보는 비료자원의 경제적인 이용 및 과다시비를 통한 환경오염 방지 측면에서 정밀농업을 위한 시비지표의 개발에 큰 의미가 있다.

성장인자와 시비반응 (yield response)을 해석하는 함수식은 농작물의 종류와 성장인자의 특성 등에 따라 다양한 적용 특성을 보인다. Malnou et al. (2006)는 질소시비와 사탕무의 당생산량과의 상관관계를 Linear response & plateau model을 이용하여 해석한 바 있으며, Colwell (1994)은 옥수수의 경제수량 극대화를 위한 질소 최적 시비량 분석에서 Square root model을 적용하여 해석한 바 있다. 또한 Holford et al. (1992)은 Micherlich의 시비반응식을 이용하여 질소와 인산 시비수준에 따른 밀의 시비반응을 해석하였으며, 특히 Gilles et al. (2000)은 질소시비와 감자의 시비반응곡선을 통계적 모델을 이용하여 분석하고 비료가격과 감자가격을 기초로 경제수량 도출을 위한 적정 질소비료 시비량을 분석하기도 하였다.

국내에서는 1980년대 초반 벼, 담배, 옥수수, 땅콩 등 다수의 시비반응 연구 사례가 있다. 주로 Quadratic model (Shin et al., 1983; Park et al. 1984)을 사용하였고, 일부 담배의 시비량에 따른 경제성분석에 지수함수를 이용한 바 있으며 (Jeong et al., 1985), 시비량이 담배수량에 미치는 영향을 대수함수를 이용하여 나타낸 바 있다 (Lee et al., 1982).

이와 같이 다양한 성장인자와 시비반응간의 관계를 해석하는 함수식들은 작물의 시비반응곡선의 특성을 일반화시킨 경험식으로서 일반적으로 각각의 함수식의 상수들은 성장인자와 작물간의 생리적 의미를 반영하지 않는다. 따라서 성장인자별 작물의 시비반응 형태에 따라 다양한 함수식이 적용될 수 있는 특성이 있다.

본 연구에서는 설탕 생산뿐만 아니라 최근 바이오 에너지작물로 검토되고 있는 사탕무의 시비반응을 합리

적으로 해석하고 경제성 있는 최적 시비량 및 최대 수확량의 도출을 위한 방법론을 검토하기 위하여 간척지 토양에서 염분농도별로 사탕무를 재배하여 염분인자에 따른 사탕무의 시비반응을 조사하였으며, 수준별 질소비료와 돈분퇴비의 시용에 따른 사탕무의 시비반응을 조사하였다. 또한, 비선형 함수식인 Quadratic model, Exponential model, Square root model과 선형 함수식인 Linear response & plateau model을 이용하여 통계적으로 시비반응을 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

공시토양 본 연구에서는 충청남도 당진군 대호방조제 내 간척지 토양을 표토 15 cm 깊이까지 채취하여 사탕무 재배에 이용하였다. 채취한 토양은 풍건시켜 2 mm 체를 통과한 후 토양 이화학성을 분석하였다. 공시 토양의 이화학적 특성은 pH (1:5)가 7.6, EC는 8.1 dS m⁻¹으로 약알칼리성을 보였으며, 질소와 인산 함량은 낮았다 (Table 1). 공시토양의 CEC는 14.4 cmol_c kg⁻¹이었으며 ESP (exchangeable sodium percentage)는 28.2 %로 염류나트륨성 (saline-sodic soil) 토양에 속하였다.

재배방법 간척지의 염류 토양의 사탕무 재배시험을 위하여 유럽품종인 사탕무 (*Beta vulgaris* var. *Aaron*)을 공시하였다. 간척지 토양에서 염분 함량에 따른 사탕무의 시비반응을 평가하고, 질소비료와 돈분퇴비 시용에 따른 사탕무의 시비반응을 조사하기 위하여 pot를 이용하여 재배실험을 실시하였다. 우선 간척지 토양에서 염류농도 조절을 위하여 인공해수 (NaCl 29.2, MgSO₄ 6.6, MgCl₂ 5.5, CaCl₂ 1.47, KNO₃ 1.0, KH₂PO₄ 0.058, NaHCO₃ 0.042 g L⁻¹)을 조제하여 준비하고, 충청남도 당진군 대호방조제 내 간척지에서 채취한 염류토양을 세척과 인공해수 처리를 통해 토양 EC를 5수준 (2, 4, 6, 8, 10 dS m⁻¹)으로 조절 후 재배실험에 공시하였다. 그리고 질소 시비구는 세척과정을 거치지 않은 간척지 토양에 요소를 이용하여 5수준 (질소기준으로 0, 90, 180, 270, 360 kg ha⁻¹)으로 처리하고,

Table 1. Chemical properties of reclaimed tidal land soil used in this experiment.

pH	EC	OM	Inorg.-N [†]	Av. P ₂ O ₅	CEC	Ex. Cation			
						K	Ca	Mg	Na
1:5	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹ -----			
7.6	8.1	23.0	18.0	38.0	14.5	1.08	5.96	0.94	5.14

[†]Inorg.-N : Sum of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents.

퇴비 처리구는 돈분퇴비를 이용하여 5수준 (0, 5, 10, 15, 20 tons ha⁻¹)으로 처리하였다. 이때 질소처리구에는 인산질 비료를 200 kg ha⁻¹ 수준시비하고 돈분퇴비는 사용하지 않았으며, 돈분퇴비 처리구에는 질소와 인산비료를 각각 270 kg ha⁻¹와 200 kg ha⁻¹ 수준으로 시비하였다. 본 시험에 사용한 재배 pot는 지름 30 cm, 깊이 45 cm의 원통형의 PVC 재질의 pot를 이용하여 한경대학교 내 재배포장에서 각 처리구당 6 반복으로 임의배치하였다. 재배실험에서 비료시비는 질소의 경우 3회 분시 (기비와 추비 2회)하였고, 기비로 40%, 추비로 30% 씩을 파종 후 58일과 81일에 시비하였으며, 인산 (P₂O₅)시비는 용성인비를 이용하여 200 kg ha⁻¹를 기준으로 전량 기비로 사용하였다. 돈분퇴비는 전량 기비로 시비하였다. 처리구당 시비기준은 pot 당 토양무게를 1 ha 당 토양무게 1,000 Mg으로 간주하여 질량비로 질소비료 및 돈분퇴비의 시비량을 산출하여 시비하였으며, 사탕무는 2006년 4월 6일에 파종하여 2006년 7월 11일 (생육기간 96일)에 수확하였다.

분석방법 공시토양의 이화학적 분석은 농업과학기술원 토양화학분석법 (NIAS, 2000)에 준하여, 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 pH와 EC를 측정하였다. 유기물은 Tyurin법을, 유효인산은 Lancaster법으로, 무기태 질소는 2 M KCL로 추출하여 Kjeldahl증류법으로 분석하였으며, CEC는 1 M NH₄OAc로 포화시킨 후 세척하여 Kjeldahl증류하여 분석하였으며, 치환성 양이온은 1 M NH₄OAc로 추출하여 ICP (GBC Integra)를 이용하여 분석하였다.

수량분석모델 질소비료와 돈분퇴비의 사용에 따른 사탕무의 시비반응을 분석하기 위하여 네 가지 종류의 통계모델 (1) Quadratic model, (2) Exponential model, (3) Square root model, (4) Linear response & plateau model을 이용하였으며 각각의 통계모델은 SigmaPlot 2006 (ver. 10.0)을 이용하여 분석하였다. 각각의 통계모델에서 Y는 사탕무의 지하부 생중량 (g plant⁻¹)을 나타내고, N은 각 수준별 질소 시비량(kg ha⁻¹)을 나타낸다. 또 a, b, c는 각 시비반응 모델의 상수이며, N_{opt}는 적정질소시비량 (kg ha⁻¹)을 나타낸다. 시비반응 분석을 위한 각 통계모델은 다음과 같다.

$$Y = a + bN + cN^2 \text{ (Quadratic model)} \quad (1)$$

$$Y = a + b \exp(cN) \text{ (Exponential model)} \quad (2)$$

$$Y = a + bN^{\frac{1}{2}} + cN \text{ (Square root model)} \quad (3)$$

$$Y = a + b(N - N_{opt}) + c|(N - N_{opt})| \quad (4)$$

(Linear response & plateau model)

결과 및 고찰

토양 EC에 따른 사탕무의 생육반응 곡선 토양 EC에 따른 사탕무의 시비반응은 토양 EC가 증가함에 따라 사탕무 지하부 생체중이 지수함수적으로 감소하였다. Figure 1은 이 관계를 Three parameter sigmoidal growth response model (三變數 S형 성장반응 모형)으로 나타낸 것이다 (Van Genuchten, 1983). 사탕무는 토양용액 중 EC 12 dS m⁻¹에서도 식물생육이 10% 밖에 감소되지 않는 내염성 작물군으로 분류된다 (Brady and Weil, 2002). 그러나 본 연구에서는 EC 2.0 dS m⁻¹에서의 시비반응 대비 10% 수량 감소를 일으킨 토양 EC는 2.7 dS m⁻¹정도로 매우 낮았다. Son et al. (2009)도 보리의 초장생육이 50% 저해되는 EC는 4.5 dS cm⁻¹로 문헌상에 알려진 것보다 비교적 낮은 EC 값에서 생육저해가 발현된다고 보고 한 바 있다. 이는 국제적으로 통용되는 토양 EC의 측정방법은 토양포화침출용액을 통한 토양용액의 EC인 반면, 본 논문과 Son et al. (2009)이 사용한 EC측정법은 토양과 증류수를 1:5로 추출하여 EC를 측정하고, 측정값에 희석배수 (5)를 곱하여 산출한 것으로 실제 토양용액의 EC상태를 명확히 반영하지 못하는 데에서 기인한 것으로 생각된다. 따라서 염류토양에서 재배한 작물의 시비반응을 외국의 연구결과와 직접적으로 비교하는 데는 어려움이 있으며, 외국의 연구결과와 직접적인 비교분석을 위해서는 토양포화침출법과 증류수 (1:5) 추출법과의 관계를 명확히 밝힐 수 있는 연구가 추가로 필요하다고 생각된다.

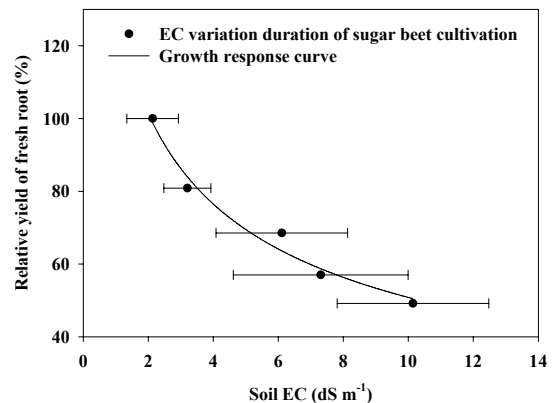


Fig. 1. Effect of soil EC on the relative yield of fresh root of sugar beet. Horizontal bars indicate the ranges of minimum, and maximum soil EC values changed during the cultivation of sugar beet.

질소비료와 돈분퇴비 사용 수준에 따른 사탕무의 시비반응 조사는 EC 8.1 dS m⁻¹ 인 간척지 토양을 대상으로 실시하였으며, 이는 EC 2.0 dS m⁻¹ 수준에 비해 57%의 시비반응을 보인 염 농도이다.

질소시비에 대한 사탕무 생육반응 곡선 Table 2는 질소비료 시비수준에 따른 사탕무의 수확 전후 토양의 EC 변화를 나타내었다. 각각의 질소비료 처리구에서 EC는 7.83~8.37 ds m⁻¹의 범위를 보였으며, 96 일간의 사탕무 재배 후 토양에서의 EC는 4.09~5.69 ds m⁻¹로 전반적으로 크게 감소하였다. 이는 재배기간 중 염류의 용탈에 의한 것으로 생각된다.

질소시비에 의한 사탕무 수량 (근 생체중)은 질소 180 kg ha⁻¹ 처리구까지 증가 폭이 매우 컸으나, 그보다 높은 처리구에서는 증가폭이 미미하였다 (Fig. 2). 간척지 토양에서 사탕무의 질소 시비 반응을 해석하기 위해 네 가지 통계모형을 적용해 본 결과 Quadratic model, Exponential model, Square root model, Linear response & plateau model의 결정계수 (R²)은 각각 0.86*, 0.90*, 0.89*, 0.92**로 고도의 유의성을 보였으며, 구분적 선형 함수식 (piecewise linear function)인 Linear response & plateau model에서 가장 높은 결정계수를 보였다. Malnou et al. (2006)도 사탕무의 질소시비 반응이 Linear plus exponential function 보다는 구분적 선형 함수로 더 잘 표현할 수 있다고 하였다. 구분적 선형 함수식에서 가장 흔히 사용하는 식은 Linear response & plateau model로 Liebig의 최소양분율의 법칙을 기반으로 하는 함수식으로 알려져 있다 (Blank, 1993). Figure 2에서 보이는 바와 같이 Linear response & plateau model은 분리된 두 개의 선형함수가 교차하는 점을 찾을 수 있으며, 이 교차점에서의 질소시비량은 138 kg ha⁻¹로 최적 질소시비량 (N_{opt})이 되며, 이 때의 사탕무 시비반응 (568 g plant⁻¹)은 최대시비반응으로 간주할 수 있다. Linear response & plateau model에서 최적 질소시비량 (N_{opt}) 이후의 평탄한 사탕무의 시비반응은 질소시비 비용 대

비 수량효과라는 경제적인 측면에서 의미가 미미하며, 과다시비와 비료성분의 환경유출이라는 환경문제를 야기할 수 있는 시비반응구간이다. 사탕무의 최대수량은 Linear response & plateau model에서 568 g plant⁻¹ 이었고, Quadratic model에서는 591 g plant⁻¹로 나타났으며, 이 때의 질소 시비량은 Linear response & plateau model과 Quadratic model에서 138과 296 kg ha⁻¹로 나타났다. 두 모델에서 사탕무 최대수량은 큰 차이 없는 반면, 최적 질소 시비량은 두 배 이상이 차이가 나타나는 이유는 시비반응을 분석하는 모델함수의 해석 특성에서 기인한다. Quadratic model은 비선형 모델로서 시비반응이 증가하다가 감소하는 시비반응의 변곡점 탐색이 가능하여 최대 생산량과 이에 따른 최적 질소 시비량을 산출할 수 있다. 따라서 Quadratic model은 비료의 시비효과 뿐만 아니라 과비에 의한 수량저감 등 다양한 시비반응을 해석하는 데는 유리하다. 그러나 Quadratic model은 최대수량 인근에서는 시비반응 자료보다 증가하여 정점 값을 나타냄으로 최대 수량을 과대평가하는 오류가 나타날 수 있다 (Cerrato and Blackmer, 1990). 반면, Linear response & plateau model은 직선형 모델로서 시비반응이 최대수량에 도달하면 이후 질소시비 효과는 일정하다. Cerrato and Blackmer (1990)는 Linear response and plateau model은 두 개의 직선식의 교차점이 최대수량을 나타냄으로 Quadratic model로부터 얻는 최적 질소시비량과 비교하여 더 낮은 최적 질소 시비량을 보인다고 보고한 바 있으며, 작물의 시비반응은 질소 시비량이 증가할수록 생산량 증가율은 점차적으로 감소하고 저투입 최적 생산의 개념에서 비료 투입량 대비 생산량 증가율을 고려할 때, Linear response & plateau model의 적용

Table 2. The changes of soil EC with N application rates.

N application rates kg ha ⁻¹	Soil EC	
	Before seeding	After harvesting
	dS m ⁻¹	
0	8.12	4.27
90	8.37	4.87
180	8.02	5.69
270	8.13	4.09
360	7.83	5.30

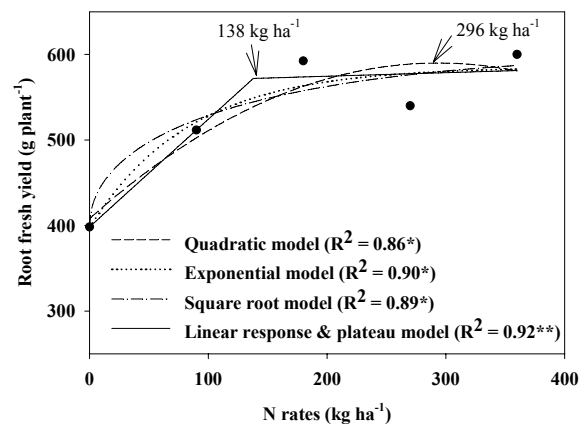


Fig. 2. Use of response models to represent the response of fresh root yield of sugar beet to nitrogen fertilization in reclaimed tidal land soil. The N rates with arrow show the maximum yield of linear response, and plateau model and quadratic model, respectively.

은 경제수량 산출을 위한 하나의 방법이 될 수 있을 것으로 생각된다.

Exponential model과 Square root model에서는 재배시험 구간에서 최대수확량을 평가할 수 없었다. 일반적으로 Linear response & plateau model에서 두 개의 직선 함수식의 교점은 비선형 함수식에서 구하는 시비량보다 낮다. 따라서 경제적인 시비량의 설정을 위해서는 Linear response & plateau model을 적용하는 시비반응의 해석이 유리할 수 있다고 판단된다.

돈분퇴비에 대한 사탕무 시비반응 Table 3은 돈분퇴비의 시비수준에 따른 사탕무의 수확 전후 토양에서 EC 변화를 나타내었다. 각각의 퇴비 처리구에서 EC는 7.91~8.58 ds m⁻¹의 범위를 보였으며, 96 일간의 사탕무 재배 후 토양에서의 EC는 퇴비 시비량의 증가할수록 증가하였다.

돈분퇴비 시용에 따른 사탕무의 시비반응은 퇴비 시용량 증가에 따라 점진적으로 증가하여 최대수량에 도달하고 이 후, 감소하는 시비반응을 보였다 (Fig. 3). 퇴비의 시비량이 증가함에 따라 사탕무 수량이 감소하는 것은 퇴비 시용량이 증가함에 따라 재배기간 중 지속적인 유기물 분해 및 염류의 용해로 인해 EC가 높게 유지되어 사탕무의 수량이 감소하는 것으로 생각된다.

돈분퇴비의 생육반응을 가장 잘 표현 할 수 있는 반응함수식을 찾기 위하여 네 가지 함수식을 적용해 본 결과 두 개의 함수식, Quadratic model과 Square root model에서 각각 0.99^{**}, 0.78^{*}의 결정계수를 보였다. 따라서 돈분퇴비의 생육반응을 가장 잘 표현 할 수 있는 함수식은 Quadratic model로 판단되었다. 퇴비 시비에 따른 사탕무의 최대수량은 Quadratic model과 Square root model에서 각각 679와 683 g plant⁻¹으로 나타났으며, 이때의 퇴비시비량은 각각 9.17과 4.65 tons ha⁻¹로 나타났다. 그러나 Linear response & plateau model과 Exponential model은 돈분퇴비 시용에 따른 시비반응의 해석에 적용할 수 없었다.

Table 3. The changes of soil EC with compost application rates.

Compost application rates tons ha ⁻¹	Soil EC	
	Before transplanting	After harvesting
0	8.13	4.09
5	7.94	4.90
10	8.25	6.88
15	8.17	6.43
20	8.58	8.29

시비반응곡선에 대한 고찰 질소시비반응은 Linear response & plateau mode에서 적합성이 높았으며, 돈분퇴비 시비반응의 경우는 Quadratic model 적용이 가장 우수한 것으로 판단되었다. Brady (1993)는 Liebig의 최소양분율의 법칙에 따르면 양액재배 실험에서 특정 양분이 결핍되는 경우 결핍증상이 나타나 시비반응곡선의 초기구간에서는 주요 양분이 흡수되는 양만큼 생체중을 생산하지만, 시비반응곡선의 후기구간에서는 특정양분의 결핍으로 인해 평탄한 시비반응을 나타내며 토양에서는 Cl⁻이온과 NO₃⁻이온이 주요한 사례라고 보고하고 있다. 특히 NO₃⁻이온은 작물이 이용하는 가장 중요한 질소 양분의 흡수형태이기 때문에 NO₃⁻이온의 결핍은 시비반응곡선에서 직선적인 시비반응 구간을 나타낼 수 있다. 돈분퇴비 시비반응이 Quadratic model에서 적합성이 높은 이유는 돈분퇴비가 무기화되는 과정에서 다양한 양분이 작물에 공급될 수 있고, 이들 양분의 혼합효과가 작물의 시비반응에 영향을 주기 때문에 질소시비반응과 같은 직선적 증가를 보이지 않는 것으로 판단된다. 이는 Mitscherlich의 “수확체감의 법칙”(Mitscherlich, 1909)을 따르는 것으로 생각된다.

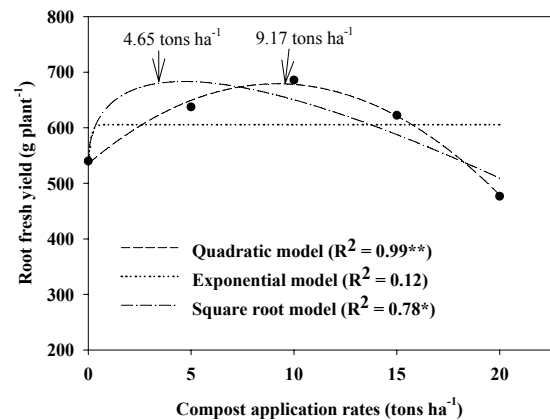


Fig. 3. Use of response models to represent the response of fresh root yield of sugar beet to pig manure application in reclaimed tidal land soil. The pig manure application rates with arrow show the maximum yield of square root model, and quadratic model, respectively.

요 약

본 연구에서는 사탕무의 시비반응을 합리적으로 해석하고 경제성 있는 최적 시비량 및 최대 수확량의 도출을 위한 방법을 검토하기 위하여 간척지 토양에서 수준별 질소비료와 돈분퇴비의 시용에 따른 사탕무의 시비반응을 조사하였다. 시비반응은 Quadratic model, Exponential model, Square root model 및 Linear

response & plateau model을 이용하여 통계적으로 분석하였다. 토양 EC가 증가함에 따라 사탕무 지하부 생체중이 지수함수적으로 감소하였다. 질소비료 시비수준별 사탕무 지하부 생체량의 시비반응은 Linear response & plateau model에서 결정계수 (R^2)가 0.92**로 고도의 통계적 유의성을 보였으며, Linear response & plateau model에서 최적 질소시비량 (N_{opt})은 138 kg ha^{-1} 으로 나타났다. 돈분퇴비의 시비반응은 Quadratic model에서 0.99**의 유의성 있는 결정계수 (R^2)를 보였으며, 최적 퇴비시비량은 각각 9.17 tons ha^{-1} 으로 나타났다. 상기 결과로 볼 때 사탕무에서 질소와 돈분퇴비의 시비반응을 적절히 평가하기 위해서는 각각 Linear response & plateau model과 Quadratic model을 이용하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

인용문헌

- Andrieu, B.J., and K.W. Jaggard. 1997. Ground cover and leaf area index of maize and sugar beet crops, *Agronomie*. 17:315-321.
- Bélanger, G., J.R. Walsh., J.E. Richards., P.H. milburn., and N. Ziadi. 2000. Comparison of Three Statistical Models Describing Poto Yield Respones to Nitrogen Fertilizer. Published in *Agron. J.* 92:902-908.
- Black, C.A. 1993. Soil fertility evaluation and control. Lewis Publishers.
- Brady, N.C., and R.R. Weil. 2002. The nature and properties of soils(13th ed.). Prentice Hall. New Jersey.
- Cattanach, A.W., A.G. Dexter., and E.S. Oplinger. 1991. Sugarbeets. Alternative field crops manual. University of Wisconsin-Madison. WI53706.
- Cerrato, M.E., and A.M. Blackmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* 82:138-143.
- Colwell, J.D. 1983. Fertilizer requirements. An Australian Viewpoint. CSIRO, Division of Soil, Melbourne. Academic Press, London. p. 795-815.
- Colwell, J.D. 1994. Estimating fertilizer requirements. A quantative approach. CAB Internation, Wallingford, UK.
- Entz, M.H., D.B. Fowler. 1989. Respones of winter wheat to N and water: Growth, water use, yield and grain protin. *Can. J. Plant Sci.* 69:1135-1147.
- Holford, I.C.R., A.D. Doyle, and C.C. Leckie. 1992. Nitrogen response characteristics of wheat protein in relation to yield response and their interactions with phosphorus. *Austr. J. Agric. Res.* 43:969-986.
- Jaggard, K.W., and A. Qi. 2006. Crop physiology and agronomy. In: A.P. Draycott, Editor, *Sugar Beet*, Blackwell Publishing, Oxford. p. 134-168.
- Jeong, H.C., S.J. Cho, Y.H. Lee, and Y.Y.Kim. 1985. Upland soil fertility and its value of fertilizer response to flue-cured tobacco cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.*18:156-160.
- Kim, D. 1996. Effects of Nitrogen and Potassium Application on Growth and Betacyanin Content of Sugar Beet. *Res. Bull. Inst. Agr. Reso. Dong-A Univ.* 5:255~264.
- Lee, Y.H., H.C. Jeong, and S.J. Cho. 1982. Fertilizer responses of flue-cured tobacco on the soils of different fertility. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 15:194-198.
- Malnou, C.S., K.W. Jaggard, and D.L. Sparkes. 2006. A conopy approach to nitrogen fertilizer recommendations for the sugar beet crop. *Europ. J. Agronomy.* 25:254-263.
- Malnou, C.S., K.W. Jaggard, and D.L. Sparkes. 2008. Nitrogen fertilizer and the efficiency of the sugar beet crop in late summer. *Europ. J. Agronomy.* 28:47-56
- Mombiela, F.A., and L.A. Nelson. 1981. Relationships among some biological and empirical fertilizer response models and use of the power family of transformations to identify an appropriate model. *Agronomy Journal.* 73:353-356.
- Overman, A.R., D. Downey, and S.R. Wilkinson. 1989. Application of simulation models to bahiagrass production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 20.
- Park, Y.H., S.B. Ahn, and C.S. Park. 1984. Evaluation of the parameters of soil potassium supplying power for predicting yield response, K_2O uptake and optimum K_2O application levels in paddy soils II. determination of potassium supplying power by gapon equation and Kas/Kai and response to K_2O application. *Korean J. Soil Sci. Fert.*17:363-370.
- Royo, A.R., A. Eplayán., and R. Ortiz. 2000. Salinity-Grain Yield Response Functions of Barley Cultivars Assessed with a Drio-Injection System. Published in *Soil Sci. Am. J.* 64:359-365.
- Scott, R.K., and K.W. Jaggard. 1993. The Sugar Beet Crop. *Crop physiology and agronomy.* p. 179-237.
- Shin, C.W., J.J. Kim, J.H. Yoon, and B.O. Cho. 1983. Yield responses to NPK fertilizers in different corn cultivars and soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16:242-249.
- Werker, A.R., and K.W. Jaggard. 1997. Modelling asymmetrical growth curves that rise and then fall: applications to foliage dynamics of sugar beet (*Beta vulgaris L.*). *Ann. Bot.* 79:657-665.