

간척지토양에서 하수슬러지 고화물 처리가 에너지작물의 생육에 미치는 영향

안기홍* · 이선일* · 구분철*[†] · 최용환* · 문윤호* · 차영록* · 박선태* · 김종곤* · 김병철** · 김상평**

*농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물센터, **수도권매립지 관리공사 가연성사업실

Effects of Application of Solidified Sewage Sludge on the Growth of Bioenergy Crops in Reclaimed Land

Gi Hong An*, Sun-Il Lee*, Bon-Cheol Koo*[†], Yong-Hwan Choi*, Youn-Ho Moon*, Young-Lok Cha*,
Surn-Teh Bark*, Jung Kon Kim*, Byung Chul Kim**, and Sang Pyeong Kim**

*Bioenergy Crop Research Center, National Institute of Crop Science, RDA, Muan 534-833, Korea

**Combustible Waste Recovery Division, SUDOKWON Landfill Site Management Corp., Seo-Gu, Incheon 404-706, Korea

ABSTRACT This study was carried out to obtain the basic data for selecting the cultivatable bioenergy crops through application of solidified sewage sludge in reclaimed lands. The experimental plots consisted of the mixing with solidified sewage sludge plot (SS50), the covering with solidified sewage sludge plot (SS100), and the original reclaimed land plot (ORL) on reclaimed land for the intended landfill in Sudokwon Landfill Site Management Corporation (SLC). The growth of energy crops (Geodae-Uksae 1, *Miscanthus sacchariflorus*, and *Phragmites australis*) were investigated from May to October, 2010 in each experimental plot. The soil from ORL showed higher salinity with high contents of exchangeable Na⁺ cation than that of SS50 and SS100. Soil properties on reclaimed land used in this study must be improved by increasing the buffering capacity of saline with the treatment of solidified sewage sludge due to the fact that the contents of organic matter (OM) in both of SS50 and SS100 were higher than that of the ORL. Thus the growth of energy crops cultivated in the solidified sewage sludge plots were better than in ORL. Geodae-Uksae 1 which showed an excellent adaptability on reclaimed land treated with the solidified sewage sludge has considerably higher biomass than those of other energy crops (*M. sacchariflorus* and *P. australis*). This study suggested that Geodae-Uksae 1 is the most suitable biomass feedstock crop for bioenergy productions, and the solidified sewage sludge may be possible to utilize as a soil cover materials for cultivation of bioenergy crops in reclaimed land.

Keywords : bioenergy crop, Geodae-Uksae 1, reclaimed land, solidified sewage sludge

최근 국제 원유가격의 불안정과 지구 온난화를 극복하기 위한 이산화탄소(CO₂) 배출량 등을 규정하려는 교토의정서 발효로 인해 전 세계적으로 바이오에너지 연구에 대한 투자와 연구노력이 크게 늘어나고 있다. 특히 전 세계 바이오에탄올 공급량의 80% 이상을 생산하고 있는 미국과 브라질은 각각 작곡 우위식량작물인 옥수수나 사탕수수를 원료로 하여 바이오에탄올의 대량생산 체계를 구축하여 실용화하였다(Chris *et al.*, 2010). 그러나 식량자원을 에너지자원으로 이용하게 되면서 국제 식량의 가격 폭등과 제 3세계의 식량 부족현상 등의 식량 윤리문제를 야기하게 되었다(Koonin, 2006). 이런 문제점을 해소하기 위해 식량이 아닌 비 식량자원을 에너지 작물로 개발하고 이를 이용하여 저비용 고효율 바이오에너지 생산기술을 개발하기위한 연구가 핫이슈가 되어가고 있다. 이 분야의 기술개발이 향후 국가 경쟁력을 좌우 할 수 있는 중요한 부분이 될 수 있기 때문에 우리나라도 적극적인 개발이 필요하다.

난지도 쓰레기매립장이 수용한계에 도달함에 따라 서울특별시와 환경부가 공동으로 투자하여 김포시 일부와 인천광역시 서구 백석동에 속한 2074만 9874 m²에 해당하는 해안 간척지에 쓰레기 매립지를 건설하였다. 수도권 매립지는 수도권 3개 광역자치단체(서울시, 인천시 및 경기도)에서 배출되는 생활, 건설, 사업장 폐기물을 처리하게 되는데 단

[†]Corresponding author: (Phone) 82-61-450-0137 (E-mail) koobc@korea.kr

<Received 22 July, 2011; Revised 7 September, 2011; Accepted 16 September, 2011>

일 매립지 규모로는 세계 최대 규모로 총 4개의 매립장과 1개의 시설공구로 이루어져 있다. 이 중 제 1매립장은 1992년부터 2000년에 걸쳐 총 64백만 톤의 폐기물 매립이 완료되었으며, 현재 매립 진행 중인 제 2매립장은 2015년까지 매립이 완료될 것으로 예상하고 있다. 쓰레기 종량제를 시행하게 되면서 쓰레기 유입량이 줄어들어 2015년 이후에 매립이 예정되어 있는 제 3매립장은 유희지 상태가 장기간 지속될 것으로 예측됨에 따라 토지 관리와 활용성에 대한 검토가 시급한 현실이다. 이에 수도권매립지 관리공사는 제 3매립장 및 제 4매립장의 매립예정 간척지를 이용하여 에너지를 생산할 수 있는 바이오 순환림 조성을 시도하고 있는데, 이는 바이오에너지 작물의 대규모 재배를 통해 토지 이용도를 향상시키고 동시에 바이오에너지 원료의 지속적이고 안정적인 공급원으로 활용할 수 있다는 일석이조의 장점을 가진다.

여러 우수한 에너지 작물이 검토되고 있는데 그중에 유력한 후보 중의 하나인 억새(*Miscanthus* spp.)는 화본과(Poaceae) 중 C₄ 광합성 경로를 가지는 대표적인 비 식량 에너지 작물이다(Atkinson, 2009; Chou, 2009; Greef *et al.*, 1997; Moon *et al.*, 2010). 억새는 질소 이용률이 높아 질소 무비재배가 가능하고(Lewandowski & Schmidt, 2006), 병해충에 강한 내성을 가지고 있으며(Beale & Long, 1995), 영년생 작물이기 때문에 한번 재식한 이후 매년 경운, 파종 등의 농작업을 생략할 수 있어 타 에너지 작물에 비해 에너지 산출/투입 수치가 높다(Moon *et al.*, 2010). 더 나아가 한발, 염해, 저온 등의 불리한 환경에 대한 내성이 강하고 염해지 토양조건에서 적응력이 탁월하여 간척지 등에 재배 가능한 가장 유망한 비 식량 바이오에너지 작물이라 할 수 있다(Lee *et al.*, 2003; Moon *et al.*, 2010). 특히 억새의 원산지가 한국 등 동아시아이기 때문에 생태교란의 우려가 거의 없고 특히 국내에 억새 유전자원이 다양하게 분포되어 있어 고생 산성 품종 선발 및 개발이 유리하다(Moon *et al.*, 2010).

우리나라의 본격적인 억새 연구는 2007년 농촌진흥청 국립식량과학원의 억새유전자원 수집으로 억새의 품종육성 및 재배법 개발에 대한 연구가 시작되었다. 특히 국내 억새 연구 중 “거대억새1호” 식물체 개발은 가장 괄목할 만한 성과 중의 하나이다. 거대억새1호는 물억새의 일종으로 유럽, 미국 등에서 바이오에너지 생산용으로 재배하고 있는 3배체 억새(*Miscanthus × giganteus*)와 비교하여 바이오매스 수량 등에서 뒤지지 않아, 국내 토종 억새 유전자원을 이용한 바이오에너지 생산 산업을 위한 새로운 원료작물로서의 기대가 매우 크다.

우리나라의 산업발달과 생활수준의 향상으로 하수 및 폐

수량이 증가되고 있으며 하수처리 과정에서 다량의 하수슬러지가 발생하고 있다. 현재까지 대부분의 하수슬러지의 처리는 해양투기와 매립, 소각, 건조 등의 단순처리에 의존하고 있으나, 하수슬러지의 해양투기는 조만간 국제적으로 금지될 것으로 전망하고 있다. 또한 다량의 유기물질이 함유되어 있는 하수슬러지의 매립처리는 침출수 처리 등의 심각한 문제가 있으며, 소각처리의 경우는 시설비의 과다와 2차 오염발생 등의 문제로 인하여 처리가 곤란한 상태이다(Kwak *et al.*, 2005; 박상철, 2006). 최근 유기물이 다량 함유되어 있는 하수슬러지를 조경용 퇴비 및 토양 복토제 자원으로 재활용하는 방안이 최근 하수슬러지의 처리방안으로 대두되고 있으나, 토양개량제로서의 하수슬러지 고화물 이용에 대한 안정성 및 적합성 등의 사전분석 및 평가가 미비한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 대규모의 매립 예정 간척지 토양을 이용한 대규모 바이오 순환림의 조성에 앞서 시행착오를 최소화하며 에너지 작물로서 적응성 및 활용가치가 높은 후보 작물을 선정하기 위하여 농촌진흥청 국립식량과학원에서 특히 출원된 거대억새1호를 포함한 매립예정 간척지 자생물억새 및 자생 갈대를 검토하고 간척지토양의 하수슬러지 고화물의 토양 복토제(비료)로서 활용가능성을 구명하기 위하여 슬러지 고화물 처리별 에너지 작물의 생육상태 및 토양화학성의 변화를 조사하였다.

재료 및 방법

본 연구의 시험포장은 수도권매립지 제 3매립장 예정부지 북측지역의 간척지 유희지에 하수슬러지 고화물 처리수준에 따라 제 1시험구부터 5시험구까지 총 5개의 시험구를 조성하였다. 본 연구에서 사용한 시험구는 제 3, 4, 및 5시험구로서, 제 3시험구는 간척지 원지반토에 하수슬러지 고화물을 50 cm 복토처리 후 쟁기같이로 원지반토와 혼합함으로써 하수슬러지 고화물을 50% 처리한 시험구(SS50)이며, 제 4시험 구는 원지반토 표토위로 하수슬러지 고화물을 50 cm 복토 처리한 것으로 하수슬러지 고화물을 100% 처리한 시험구(SS100)이다. 제 5시험구는 대조구로서 하수슬러지 고화물 처리 없이 원지반토를 20 cm 쟁기같이로 행한 시험구(ORL)이다.

매립 예정 간척지 토양에 적응성이 높은 에너지 작물을 선정하기 위하여 5종류의 시험작물을 선발하였다. 그 중 2009년 농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물센터에서 개발하여 식물체 특히 출원된 물억새(*Miscanthus sacchariflorus Benth*)의 일종인 거대억새1호는 바이오에너지작물센터 내

의 증식포장에서 증식한 후 지하경을 굴취하였다. 굴취된 지하경은 약 10 cm 간격으로 절단하여 상토(홍농바이오 상토 1호, 몬산토코리아)로 충전된 비닐포트에 재식하였으며 바이오에너지작물센터 내의 유리온실에서 치상하여 약 3개월간 육묘를 하였다. 그 중 생육 상태가 양호한 육묘 약 1,000주를 수도권매립지 관리공사로 운송한 후 재식하였다.

매립지 근처의 자생 물억새와 자생 갈대(*Phragmites australis TRIN*) 중 현지에 적응하는 우수한 후보작물을 선정하고 에너지작물로서의 활용성을 시험하기 위해 매립예정 간척지 내에서 자생 물억새 2종과 자생 갈대 2종을 선발하였다. 선발된 자생 물억새 및 갈대는 식물체 지하경을 굴취하였고, 현장에서 약 10 cm 간격으로 절단한 후 시험포장에 직접 식재하였다. 매립예정 간척지 내 3구의 시험구에 5종의 시험대상 에너지 작물 재식작업은 2010년 5월 12일에 행하여졌다. 각 시험구의 에너지작물은 난괴법 3반복으로 구성하였으며 재식밀도는 100 cm × 50 cm 당 1개체를 재식하였다.

시기별 에너지 작물의 생육조사는 2010년 6월 30일부터 11월 1일까지 매월 1회씩 총 6회 조사하였다. 조사항목으로는 각 에너지 작물의 초장과 경수를 5반복으로 조사를 행하였다. 에너지 작물의 건물수량(마른줄기)은 2010년 11월 1일에 각 공시작물을 수확하여 유리온실 내에서 1개월 정도 자연건조 시킨 후 마른줄기 수량을 측정함으로써 바이오매스량을 조사하였다.

매립예정 간척지 내의 각 시험구의 토양 이화학적 특성을 분석하기 위하여 각 시험구에서 무작위로 5개 지점을 선정하였고, 표토(0-20 cm)의 토양을 채취하였다. 토양 pH와 염분농도 조사는 재식직후(5월 12일)부터 월동직전(11월 1일)까지 매월 1회 측정하였다. 염농도(%)는 토양내의 전기전도도(Electrical Conductivity)를 EC 측정기(EC110 meter, Spectrum Technologies, Inc., IL, USA)를 이용하여 현장에서 직접 토양 내에 전극을 꽂아 측정을 행한 후 측정단위 dS m⁻¹를 %로 환산하기 위해 각 측정치에 0.064를 곱하여 환산하였다. 토양 유기물, 전질소 및 유효인산 함량은 재식직후와 월동직전의 2회 조

사를 행하였다. 토양 분석은 농촌진흥청 토양화학분석법에 준하여 분석하였다(NIAST, 2000). 토양 pH는 1:5로 토양(5 g)과 증류수(25 ml)를 섞은 후 포화추출액을 초자 전극으로 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법으로, 유효인산은 Lancaster법으로, 전질소는 Kjeldahl법으로 정량하였다.

에너지 작물의 하수슬러지 고화물 처리별 초장 및 경수는 SAS 프로그램 9.2 버전(2011)을 이용하여 5% 수준에서 Tukey's studentized range test를 통해 유의성 검정을 행하였으며, 하수슬러지 고화물 처리별 및 에너지 작물별 초장 및 경수의 차이는 분산분석을 통하여 비교 검토하였다.

결과 및 고찰

매립예정 간척지의 시험구별 토양화학적 특성

매립예정 간척지의 하수슬러지 고화물 처리별 토양화학적 특성을 구명하였다. 표 1과 그림 1은 각 시험구의 재식초기(5월 12일)와 월동직전(11월 1일)의 토양 pH평균치와 시기별 토양 pH의 범위 및 변화경향을 나타내고 있다. 재식초기의 하수슬러지 고화물 혼합구(SS50-제 3시험구)의 pH 범위는 6.7~7.5로 평균값은 7.2이었으며 하수슬러지 고화물 복토구(SS100-제 4시험구)의 pH 범위는 7.2~7.9로 평균값은 7.6이었다. 반면, 원지반토(ORL-제 5시험구) pH 범위는 7.7~8.3으로 8.0의 평균값을 나타내며 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구(제 3, 4시험구)에 비해 높은 pH를 나타내었다. 이는 하수슬러지 고화물의 처리량에 따라 토양 pH가 낮아졌음을 알 수 있었다. 원지반토의 pH는 7월 29일까지는 낮아지는 경향이었으나 그 이후 다시 높아졌다. 반면, 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구의 토양 pH는 기간이 경과할수록 높아지는 경향을 보이며 월동직전의 원지반토와 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구의 토양 pH의 차이는 줄어들고 있는 것으로 나타났다.

각 시험구의 토양 염농도 범위는 0.21~0.35%이었다. 재식초기의 하수슬러지 고화물 혼합구의 평균치는 0.28%, 하

Table 1. Soil chemical properties of each experimental plot in reclaimed land.

Plot	pH (1:5)		Salinity (%)		O.M. (%)		Total-N (%)		Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	
	May 12	Nov. 1	May 12	Nov. 1	May 12	Nov. 1	May 12	Nov. 1	May 12	Nov. 1
SS50	7.19	7.74	0.28	0.21	3.24	2.89	0.25	0.15	226.1	174.4
SS100	7.58	7.91	0.31	0.22	5.28	5.56	0.44	0.36	205.9	194.7
ORL	7.98	7.92	0.28	0.31	0.74	0.75	0.02	0.01	136.7	145.7

SS50, the mixing with solidified sewage sludge plot; SS100, the covering with solidified sewage sludge plot; ORL, the original reclaimed land plot.

수슬러지 고화물 복토구는 0.31%, 원지반토는 0.28%로 처리 간 차이가 적었으나 기간이 경과하여 월동직전에는 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구의 염농도는 0.21~0.22%로 낮아졌으며 원지반토의 염농도는 0.31%로 재식초기와 동일한 수준을 나타내었다(그림 2).

시험구별 토양 유기물, 전질소 및 유효인산 함량의 결과

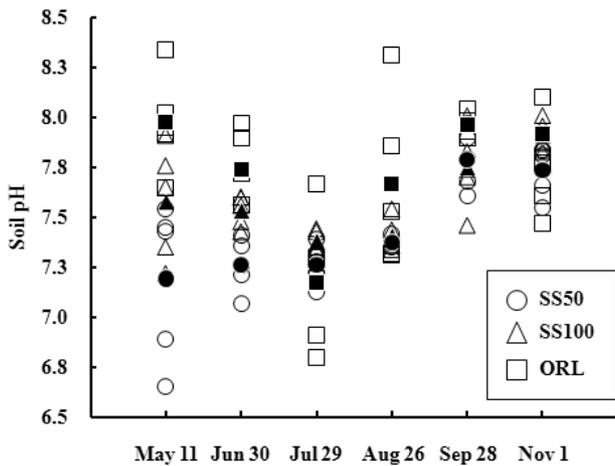


Fig. 1. Difference in the range of soil pH in each experimental plot in reclaimed land. The symbols of open circles, open triangles, and open rectangles indicate soil pH collected from the mixing with solidified sewage sludge plot (SS50), the covering with solidified sewage sludge plot (SS100), and the original reclaimed land plot (ORL), respectively. Each closed symbols indicate the mean pH value in each experimental plots.

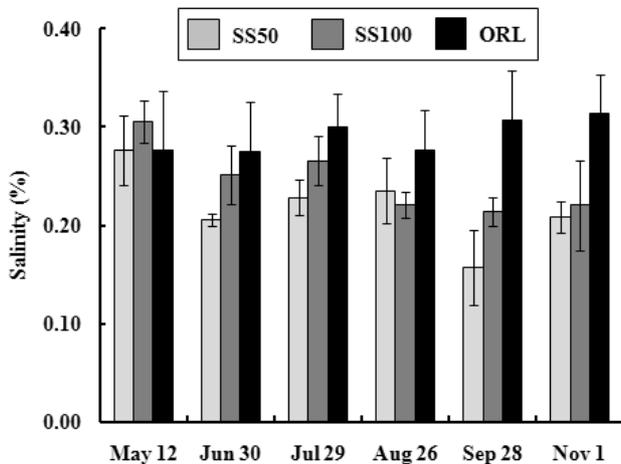


Fig. 2. Salinity of each experimental plot in reclaimed land. Light gray bars, deep gray bars, and dark black bars indicate the the mixing with solidified sewage sludge plot (SS50), the covering with solidified sewage sludge plot (SS100), and the original reclaimed land plot (ORL), respectively.

는 표 1과 같다. 재식초기의 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구의 유기물 함량은 3.24~5.28%로 원지반토의 0.74%에 비해 4배와 7배 높았으며 하수슬러지 고화물의 유기물 함량 5.4%와 비슷한 수준이었다. 이러한 결과는 일반 논토양 토양개량 목표치(2.5~3.0%)보다 과다한 상태이었으며, 원지반토에서는 크게 부족한 것으로 나타났다. 월동직전(11월 1일)의 하수슬러지 고화물을 처리한 시험구의 유기물 함량이 2.9와 5.6%로 원지반토의 0.75%보다 높은 함량을 유지하고 있었다. Back et al.(2009)에 의하면 토양내의 유기물은 입단의 안정도 유지, 식물양분의 보존 및 수분의 침투 등에 중요한 인자가 되고 있다고 보고하고 있어 하수슬러지 고화물의 높은 유기물 함량은 간척지 토양의 염해에 완충능의 효과가 있는 것으로 사료된다.

전질소의 함량은 하수슬러지 고화물 혼합구, 복토구 및 원지반토에서 각각 0.25%, 0.44% 및 0.02%로 원지반토의 함량에 비해 하수슬러지 고화물을 처리한 시험구에서 높았다. 일반 간척지 토양과 원지반토의 낮은 질소함량을 고려해볼 때 하수슬러지 고화물 처리구의 높은 질소 함량은 대부분 하수슬러지 고화물에서 유래되었다고 판단된다.

유효인산 함량은 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구는 226.1 mg kg⁻¹과 205 mg kg⁻¹로 원지반토의 136.7 mg kg⁻¹보다 높게 조사되었으나, 일반적인 간척지 토양의 유효인산 함량(20~30 mg kg⁻¹)보다는 높은 수치이었다. 이는 하수슬러지 고화물의 처리가 작물의 생육을 통해 간척지토양의 염농도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

표 2는 매립예정 간척지 토양의 각 시험구에 대한 치환성 양이온(Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺)을 분석한 결과로서 원지반토의 치환성 나트륨(Na⁺) 함량은 0.857 cmol kg⁻¹로 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구에 비해 1.9~5배 많았다. 간척지 토양은 일반적으로 가용성염류와 치환성 나트륨이 과다하게 함유되어 있어 염농도가 높으며, 치환성 나트륨은 토양의 알칼리성을 증가시키는 주된 원인으로 알려져 있다

Table 2. Exchangeable cation of each experimental plot in reclaimed land.

Plot	Exchangeable cation (cmol ⁺ kg ⁻¹)			
	Ca	K	Mg	Na
SS50	0.694	0.008	0.148	0.446
SS100	0.816	0.007	0.195	0.170
ORL	0.049	0.007	0.077	0.857

SS50, the mixing with solidified sewage sludge plot; SS100, the covering with solidified sewage sludge plot; ORL, the original reclaimed land plot.

(Koo *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2000).

매립예정 간척지 시험구별 에너지작물 생육 모니터링

매립예정 간척지에서 재배 가능한 에너지 작물의 적응성 및 활용가치가 높은 작물을 선정하기 위하여 하수슬러지 고

화물 처리구별 에너지 작물의 생육 모니터링을 실시하였다. 그 결과, 3종류의 에너지 작물(거대억새1호, 자생 물억새 및 자생 갈대) 중 거대억새1호가 자생 물억새와 갈대에 비해 하수슬러지 고화물 처리토양에서 가장 왕성한 생육을 보였다(그림 3). 하수슬러지 고화물 처리구별로는 하수슬러지



Fig. 3. Growth monitoring of energy crops grown at each experimental plot in reclaimed land. The experimental plots consisted of the mixing with solidified sewage sludge plot (A, SS50), the covering with solidified sewage sludge plot (B, SS100), and the original reclaimed land plot (C, ORL).

고화물 복토구에서 에너지 작물의 생육이 가장 좋았으며, 하수슬러지 고화물 혼합구에서도 비슷한 생육양상을 보였다. 원지반토에서의 에너지 작물의 생육은 극히 불량한 것으로 확인되었다.

표 3은 각 처리구에서 시기별 에너지 작물의 초장을 조사한 결과로서, 6월 30일의 거대역새1호의 초장은 하수슬러지 고화물 복토구에서 107.7 cm로 가장 컸으며, 하수슬러지 고화물 혼합구에서는 90.1 cm이었고, 원지반토에서는 60.3 cm로 가장 작았다. 에너지 작물의 생육이 진행됨에 따라 하수슬러지 고화물 복토구와 혼합구 사이의 거대역새 1호 초장은 유의적인 차이가 없었으나, 하수슬러지를 처리한 두 시험구의 거대역새1호 초장은 원지반토의 것과 비교하여 유의한 차이를 나타내어 월등하게 생육이 좋았다. 또한 자생 물억새 및 자생 갈대의 초장도 하수슬러지 고화물을 처리한 시험구의 것이 원지반토의 것에 비해 크게 나타났다.

각 처리구에 대한 생육 시기별 에너지 작물 경수의 평균 값은 표 4에 나타난 것과 같이 하수슬러지 고화물 복토구와 혼합구의 에너지 작물 경수가 원지반토의 것보다 많았다. 하지만 조사 초기(6월 30일)의 고화물을 처리한 두 시험구에서 거대역새1호의 평균경수는 22.1개와 20.3개로 타 에너지 작물에 비해 월등히 많았으나, 월동직전의 경우는 자생

물억새의 경수가 거대역새1호의 것과 거의 동일하였다. 또한 거대역새1호를 제외하고 자생 물억새의 경수가 자생 갈대의 것보다 우수하였다.

각 시험구별 및 에너지작물별 작물의 초장과 경수의 분산 분석 결과 에너지작물의 초장은 하수슬러지 고화물 처리간 ($F=71.76, P<0.0001$) 및 에너지작물간($F=14.17, P<0.0001$)에 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 에너지작물의 경수 역시 하수슬러지 처리간($F=52.27, P<0.0001$) 및 에너지작물간($F=26.95, P<0.0001$)에 고도의 유의성이 인정되었다 (표 5).

하수슬러지 고화물 처리별 에너지 작물의 바이오매스량을 비교하기 위하여 각 에너지 작물의 수확 후 마른줄기 수량을 조사하였다. 이 중 하수슬러지 고화물 복토구에서 재배한 에너지 작물의 수량이 가장 많은 것으로 조사되었다. 특히 거대역새1호는 하수슬러지 고화물 복토구에서 1.16 kg plant⁻¹로 가장 많았고, 혼합구가 1.06 kg plant⁻¹이었으며, 원지반토에서 0.01 kg plant⁻¹로 가장 낮았다. 반면 거대역새1호를 제외하고 자생 물억새 및 자생 갈대는 생존하고 있는 식물체의 수확이 불가능하여 조사를 행하지 못하였다. 에너지 작물 종별 마른줄기 수량은 거대역새1호 > 자생 물억새 > 자생 갈대의 순으로 바이오매스량은 거대역새 1호

Table 3. Stem height of energy crops used in this study.

Energy crop	Plot	Stem height (cm)					
		Jun 30	Jul 29	Aug 26	Sep 28	Nov 1	Jan 11
Geodae-Uksae 1	SS50	90.1 ^b	153.1 ^a	210.7 ^a	213.8 ^a	200.6 ^a	208.2 ^a
	SS100	107.7 ^a	162.5 ^a	218.1 ^a	227.2 ^a	200.5 ^a	203.2 ^a
	ORL	60.3 ^c	75.7 ^b	88.5 ^b	94.1 ^b	97.0 ^b	127.0 ^b
<i>Miscanthus sacchariflorus</i> 1	SS50	48.7 ^a	77.4 ^b	126.9 ^b	186.5 ^a	192.3 ^a	181.7 ^a
	SS100	48.1 ^a	87.3 ^a	147.0 ^a	194.9 ^a	201.1 ^a	194.1 ^a
	ORL	21.8 ^b	39.1 ^c	53.1 ^c	102.0 ^b	89.0 ^b	90.3 ^b
<i>Miscanthus sacchariflorus</i> 2	SS50	44.3 ^a	92.1 ^a	131.7 ^a	173.7 ^a	175.3 ^a	164.7 ^b
	SS100	49.9 ^a	97.5 ^a	153.6 ^a	177.3 ^a	180.9 ^a	174.5 ^a
	ORL	18.6 ^b	28.3 ^b	52.0 ^b	92.4 ^b	90.8 ^b	n.d.
<i>Phragmites australis</i> 1	SS50	52.1 ^a	78.1 ^a	109.4 ^a	131.7 ^b	149.9 ^a	146.6 ^a
	SS100	51.5 ^a	82.9 ^a	107.4 ^a	157.1 ^a	160.8 ^a	153.1 ^a
	ORL	35.7 ^b	51.6 ^b	64.9 ^b	90.4 ^c	63.6 ^b	89.5 ^b
<i>Phragmites australis</i> 2	SS50	46.3 ^a	70.6 ^a	100.6 ^a	136.3 ^a	139.7 ^a	143.7 ^a
	SS100	47.2 ^a	79.3 ^a	102.3 ^a	148.9 ^a	159.5 ^b	135.9 ^a
	ORL	41.1 ^a	59.2 ^b	73.1 ^b	100.8 ^b	n.d.	90.0 ^b

Different letters in columns indicate significantly different at $P<0.05$ (Tukey's studentized range test). SS50, the mixing with solidified sewage sludge plot; SS100, the covering with solidified sewage sludge plot; ORL, the original reclaimed land plot.

Table 4. Stem number per plant of energy crops used in this study.

Energy crop	Plot	Stem number plant ⁻¹				
		Jun 30	Jul 29	Aug 26	Sep 28	Nov 1
Geodae-Uksae 1	SS50	22.1 ^a	41.2 ^a	64.2 ^a	64.8 ^a	66.3 ^a
	SS100	20.3 ^a	39.1 ^a	59.3 ^a	73.8 ^a	59.9 ^a
	ORL	4.9 ^b	6.3 ^b	5.7 ^b	6.2 ^b	7.7 ^b
<i>Miscanthus sacchariflorus</i> 1	SS50	7.1 ^a	29.5 ^a	65.2 ^a	68.9 ^a	60.7 ^a
	SS100	7.2 ^a	32.6 ^a	65.7 ^a	84.0 ^a	69.8 ^a
	ORL	2.5 ^b	4.0 ^b	4.5 ^b	9.7 ^b	4.4 ^b
<i>Miscanthus sacchariflorus</i> 2	SS50	5.7 ^a	20.8 ^a	46.3 ^{ab}	49.3 ^a	41.6 ^a
	SS100	6.7 ^a	22.5 ^a	65.0 ^a	56.3 ^a	41.9 ^a
	ORL	1.8 ^b	1.3 ^b	5.0 ^b	4.6 ^b	3.0 ^b
<i>Phragmites australis</i> 1	SS50	3.3 ^b	8.1 ^a	10.7 ^a	19.1 ^a	16.4 ^a
	SS100	5.1 ^a	9.2 ^a	10.7 ^a	17.7 ^a	13.2 ^a
	ORL	2.3 ^b	2.4 ^b	3.7 ^b	7.4 ^b	6.4 ^b
<i>Phragmites australis</i> 2	SS50	4.3 ^a	8.9 ^a	9.5 ^{ab}	17.7 ^a	14.9 ^a
	SS100	5.5 ^a	10.0 ^a	14.5 ^a	19.0 ^a	15.0 ^a
	ORL	1.9 ^b	2.5 ^b	4.1 ^b	5.9 ^b	n.d.

Different letters in columns indicate significantly different at $P<0.05$ (Tukey's studentized range test). SS50, the mixing with solidified sewage sludge plot; SS100, the covering with solidified sewage sludge plot; ORL, the original reclaimed land plot.

Table 5. ANOVA results for the effects of plot and energy crop on stem height and stem number.

	Stem height (cm)			Stem number plant ⁻¹		
	df.	F value	P value	df.	F value	P value
Plot	2	71.76	<0.0001**	2	52.27	<0.0001**
Energy crop	4	14.17	<0.0001**	4	26.95	<0.0001**

** represents statistical significance at $P<0.01$.

가 월등히 많았다(그림 4).

본 연구의 조사결과 매립예정 간척지의 에너지 작물 중 거대역새1호가 다른 에너지작물에 비해 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구에서 가장 우수한 생육과 적응력을 나타내며 수확 후 마이오매스량도 다른 에너지 작물에 비해 현저히 우수하여 간척지에서 하수슬러지를 비료원으로 활용할 때 거대역새1호가 가장 유망한 에너지 작물인 것으로 나타났다. 또한 매립예정 간척지에 슬러지 고화물의 처리는 간척지토양 내 유기물 함량의 증가로 토양 물리성 및 염해 완충능을 향상시켜 거대역새1호와 같은 우수한 에너지작물의 생육에 효과적인 복토재로 판단된다. 하수슬러지 고화물을 처리한 두 시험구의 거대역새1호는 9월까지 자생 물억새와 갈대에 비해 생육이 월등히 우수하였으나 유기물 및 질소 양분의 과다로 인해 과번무하여 초장 등은 크나 식물

체가 연약하게 되어 도복이 심하였다. Choi *et al.*(2004)에 따르면 저염(0.1%) 및 중염(0.3~0.4%)의 간척지토양에서 질소소비량이 많을수록 식물체의 간장은 커지나 포장도복이 심하였다고 보고한 바 있다. 또한 일반적인 토양조건 하에서의 거대역새1호의 출수는 10월 중순~10월 하순이었던 반면, 매립예정 간척지의 시험포장에서는 거대역새1호가 출수하지 않았으며 그 원인은 첫째, 하수슬러지 고화물 처리로 인해 과잉 영양 상태가 되어 영양생장기간의 연장으로 인한 어린이삭 형성이 지연된 것으로 사료되며 둘째, 9월 하순의 도복발생 이후 이상저온으로 출수 중 어린이삭이 식물체 내에서 고사하였기 때문인 것으로 판단된다. 벼과식물의 저온장애는 생육적온보다 낮은 온도에 처하게 되면 생장점 또는 어린이삭이 스트레스를 받아 장애를 일으켜 고사하게 되거나 퇴화, 불임 등이 발생하게 되는 것으로 알려져 있

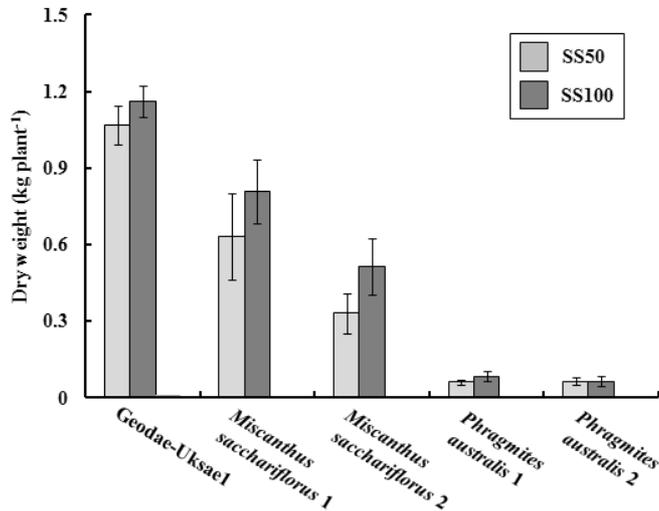


Fig. 4. Dry weight of three types of energy crops (*Geodae-Uksae* 1, *Miscanthus sacchariflorus*, and *Phragmites australis*) grown at each experimental plot on November 1. Light gray bars, and deep gray bars indicate the mixing with solidified sewage sludge plot (SS50), and the covering with solidified sewage sludge plot (SS100), respectively. Plant samples from the original reclaimed land plot (ORL) are not collected.

다(Koo *et al.*, 2003).

원지반토는 다른 하수슬러지 고화물처리 시험구에 비해 높은 염농도 및 치환성 나트륨 함량을 나타내며 토양의 물리성 및 에너지작물의 생육에 악영향을 끼친 것으로 판단된다. 간척지 토양의 과도한 치환성 나트륨은 토양 입자간의 반발력을 증가 시켜 입단형성을 저해하며 염이 물분자를 끌어 당겨 토양 수분 포텐셜이 낮아져 작물의 수분이용도가 감소됨으로서 작물의 생육이 저해된다고 알려져 있다(Lee *et al.*, 2000). 더 나아가 염농도가 높은 간척지 토양의 내염성 식물의 식생에 대한 연구에 따르면 간척지의 대표적인 염생식물 중에 하나인 명아주과의 칠면초(*Suaeda japonica* Makino) 등이 원지반토에 우점하고 있는 점을 미뤄보아 원지반토는 다른 하수슬러지 고화물처리 시험구에 비해 높은 염농도를 유지하고 있음을 육안으로도 확인할 수 있었다(Kang & Shim, 1998; Lee *et al.*, 2003).

적 요

본 연구는 수도권 매립예정 간척지 중 대규모의 유휴지에 농촌진흥청 국립식량과학원에서 특허 출원한 물억새의 일종인 거대억새1호, 간척지 자생 물억새 및 자생 갈대의 에너지 작물을 바이오에너지 생산 목적으로 쓰레기 매립 예정

지에서 재배한 최초의 연구로서 매립예정 간척지의 적응성 및 활용가치가 높은 에너지 작물을 선정함과 동시에 간척지 토양의 하수슬러지 고화물 처리로 인한 에너지 작물의 생육 상태 모니터링 및 토양화학성의 변화를 조사하였다.

1. 각 시험구의 토양 pH범위는 6.7~8.3이었으며 하수슬러지 고화물을 처리한 시험구는 원지반토보다 낮은 pH를 나타내었다. 원지반토의 염농도는 하수슬러지 고화물을 처리한 시험구에 비해 높은 치환성 나트륨 함량을 보이며 높은 염농도를 나타내었다.
2. 하수슬러지 고화물 처리구의 토양 유기물 함량은 재식 초기에는 원지반토에 비해 4배와 7배 높았고, 생육후기에도 2.9~5.6%로 원지반토의 0.75%에 비해 많았다.
3. 각 시험구의 에너지 작물 생육조사결과 거대억새1호가 다른 에너지 작물에 비해 간척지 토양에 하수슬러지 고화물을 투입한 시험구에 대한 적응력이 우수한 것으로 판단되었다.
4. 간척지에 하수슬러지 고화물의 투입으로 인하여 염해 완충능이 향상되는 등 토양이화학성이 개선되었으며, 에너지 작물의 생육이 원지반토에 비해 양호했던 점을 보아 매립예정 간척지의 토양 복토제로서 활용 가능성을 확인하였다.
5. 각 시험구의 에너지 작물 수확 후 마른줄기 수량을 조사한 결과 거대억새1호는 타 에너지 작물에 비해 가장 높은 바이오매스량을 나타내며, 거대억새1호는 바이오에너지 생산을 위한 최적의 에너지 작물임을 확인하였다.

사 사

본 연구는 수도권매립지 관리공사가 요청한 수탁과제 (PJ007825)로 농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물센터에서 수행하였음.

인용문헌

- 박상철. 2006. 하수슬러지의 매립지 복토제로 활용방안. 유기물 자원화, 제14권, 제1호. pp. 88-101.
- Atkinson, C. J. 2009. Establishing perennial grass energy crops in the UK: A review of current propagation options for *Miscanthus* Biomass Bioenergy 33, 752-759.
- Back, S. H., S. U. Lee, H. B. Lim, D. G. Kim, and S. J. Kim. 2009. Influence of gypsum, popped rice hulls and zeolite on contents of Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ in reclaimed tideland

- soils in Kyehwado. *Kor. J. Enviro. Agri.* 28(1) : 25-31.
- Beale, C. V., and S. P. Long. 1995. Can perennial C4 grasses attain high efficiencies of radiant energy conversion in cool climates? *Plant Cell Environ.* 18, 641-650.
- Choi, W. Y., K. S. Lee, J. C. Ko, H. K. Park, S. S. Kim, B. K. Kim, and C. K. Kim. Nitrogen fertilizer management for improving rice quality under different salinity conditions in tidal reclaimed area. *Korean J. Crop Sci.* 49(3) : 194-198.
- Chris, S., Y. Heather, T. Caroline Taylor, C. D. Sarah, and P. L. Stephen. 2010. Feedstocks for lignocellulosic biofuels. *Science* 329 : 790.
- Chou, C. H. 2009. Miscanthus plants used as an alternative biofuel material: The basic studies on ecology and molecular evolution. *Renew. Energ.* 34 : 1908-1912.
- Greef, J. M., M. Deuter, C. Jung, and J. Schondelmaier. 1997. Genetic diversity of European Miscanthus species revealed by AFLP fingerprinting. *Genet. Resour. Crop Ev.* 44 : 185-197.
- Kang, B. H., and S. I. Shim. 1998. Screening of saline tolerant plants and development of biological monitoring technique for saline stress. I. Survey of vegetation in saline region and determination of saline tolerance of the plant species of the region. *Kor. J. Enviro. Agri.* 17(1) : 26-33.
- Koo, B. C., M. W. Park, C. W. Lee, E. B. Yoon, K. J. Kim, and J. G. An. 2003. Classification for types of damages caused by cold stress at different young spike development stages of barley and wheat. *J. Crop Sci.* 48(3) : 252-261.
- Koo, J. W., J. K. Choi, and J. G. Son. 1998. Soil properties of reclaimed tidal lands and tidelands of western sea coast in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(2) : 120-127.
- Koonin, S. E. 2006. Getting serious about biofuels? *Science* 311 : 435.
- Kwak, Y. S., J. K. Hwangbo, H. C. Yun, S. J. Kang, and J. S. Kang. 2005. Evaluation of sludge-derived bio-soil for landscape management. *RIST* 19(1) : 11-14.
- Lewandowski, I., and U. Schmidt. 2006. Nitrogen, energy and land efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agri. Eco. Environ.* 112, 335-346.
- Lee, S. H., S. H. Yoo, S. I. Seol, Y. An, Y. S. Jung, and S. M. Lee. 2000. Assessment of salt damage for upland-crops in Dae-Ho reclaimed soil. *Kor. J. Enviro. Agri.* 19(4) : 358-363.
- Lee, S. H., K. J. Ji, Y. An, and H. M. Ro. 2003. Soil salinity and vegetation distribution at four tidal reclamation project areas. *Kor. J. Enviro. Agri.* 22(2) : 79-86.
- Moon, Y. H., B. C. Koo, Y. H. Choi, S. H. Ahn, S. T. Bark, Y. L. Cha, G. H. An, J. K. Kim, and S. J. Suh. 2010. Development of "Miscanthus" the promising bioenergy crop. *Kor. J. Weed Sci.* 30(4) : 330-339.
- NIAST. 2000. Method of Soil and Plant Analysis, National Institute of Agriculture Science and Technology.