

유망 바이오에너지작물 “억새” 개발

문윤호^{1*}, 구본철, 최용환, 안승현, 박선태, 차영록, 안기홍, 김종곤, 서세정

Development of “Miscanthus” the Promising Bioenergy Crop

Youn-Ho Moon^{1*}, Bon-Cheol Koo, Yoyng-Hwan Choi, Seung-Hyun Ahn
Surn-Teh Bark, Young-Lok Cha, Gi-Hong An, Jung Kon Kim and Sae-Jung Suh

ABSTRACT In order to suggest correct direction of researches on *Miscanthus* spp. which are promising bioenergy crop, authors had reviewed and summarized various literature about botanical taxonomy, morphology and present condition of breeding, cultivation and utilization of miscanthus. Among the genus of *Miscanthus* which are known 17 species, the most important species are *M. sinensis* and *M. sacchariflorus* which origin are East Asia including Korea, and *M. x giganteus* which is inter-specific hybrid of tetraploid *M. sacchariflorus* and diploid *M. sinensis*. *Miscanthus* is superior to other energy crops in resistance to poor environments including cold, saline and damp soil, nitrogen utilization efficiency, budget of input energy and carbon which are required for producing biomass and output which are stored in biomass. The major species for production of energy and industrial products including construction material in Europe, USA and Canada is *M. x giganteus* which was introduced from Japan in 1930s. In present, many breeding programs are conducted to supplement demerits of present varieties and to develop “Miscanes” which is hybrid of miscanthus and sugar cane. In Korea, the researches on breeding and cultivation of miscanthus were initiated in 2007 by collecting germplasms, and developed “Goedae-Uksae 1” which is high biomass yield and “mass propagation method of miscanthus” which can improve propagation efficiency in 2009. In order to develop “Korean miscanthus industry” in future, the superior varieties available not only domestic but also foreign market should be developed by new breeding method including molecular markers. Researches on production process of cellulosic bio-ethanol including pre-treatment and saccharification of

¹ 농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물센터, 534-833 전남 무안군 청계면 청천리 293-5(Bioenergy Crop Research Center, National Institute of Crop Science, RDA, Muan 534-833, Korea).

* 연락저자(Corresponding author) : Phone) +82-61-450-0145, Fax) +82-61-453-0085, E-mail) yhmoon@korea.kr

(Received November 12, 2010; Examined November 15, 2010; Accepted November 22, 2010)

miscanthus biomass also should be strengthen.

Key words : biomass; bioenergy; miscanthus.

서 언

최근 원유가격이 불안정하고 교토 의정서 발효로 인한 CO₂배출량 감축의무 등에 따라 많은 나라에서 바이오에너지에 대한 투자와 연구·개발을 크게 늘리고 있다. 특히 국토면적이 광활한 미국과 브라질은 각각 자국 우위농산물인 옥수수, 사탕수수를 원료로 바이오에탄올의 대량생산 체계를 갖추고 전 세계 바이오에탄올 공급량의 80% 이상을 생산하고 있다(Chris 등 2010). 그러나 식량작물의 에너지 이용은 국제 곡물가 폭등과 그에 따른 후진국의 식량과동으로 국제적인 식량 윤리문제를 야기하게 되었고(Koonin 2006), 식량을 에너지로 사용한다는 윤리적 딜레마를 해소하기 위해 비식량 에너지 작물 개발과 이를 이용한 직접연소 및 연료펠릿 제조를 통한 열에너지 생산, 더 나아가서 수송용 연료 생산을 위한 셀룰로오스계 에탄올 생산 연구가 활발히 진행되고 있다(Chris 등 2010).

우수한 비식량 에너지작물은 신재생 에너지로서의 자격조건이 있다. 우선 열악한 환경에 대한 내성이 강한 작물로 신규간척지, 황무지 등의 비 농경지 활용이 가능한 작물이어야 한다. 두 번째로는 생산에 투입되는 에너지가 적고 산출되는 에너지가 많아 산출/투입 에너지 수치가 높은 작물이어야 한다. 세 번째로 수확시 바이오매스의 수분함량이 적고 셀룰로오스 함량이 많아 직접연소와 셀룰로오스계 에탄올 생산 등 에너지 전환 효율이 높아야 한다. 마지막으로 환경친화성 작물이어야 한다(Lewandowski 등 2000; Lewandowski 등 2003). 이러한 조건을 충족시킬 수 있는 대표적인 비식량 에너지작물에는 포플러, 버드나무 등 목본계 단기 속성수와 억새, 스위치그래스, 리드카나리그래스 등 다년생 초본식물이 있다. 특히 후보 작물들 중 억새는 상기의 에너지작물 선정 기준에 가장 적합한 것으로 나타나 향후 우리나라

라에서 꾸준히 연구 개발해야 할 가장 유망한 비식량 바이오에너지작물이라고 할 수 있다(Beale와 Long 1995; Bullard와 Metcalfe 2001; Heaton 등 2004; Lewandowski 등 2000; Lewandowski와 Schmidt 2006).

본 소고에서는 억새의 식물학적인 분류 및 형태, 선진국의 억새 육종, 재배 및 이용 현황 그리고 우리나라의 억새 연구 성과 등을 고찰함으로써 향후 우리나라 에너지 자급을 제고를 위한 억새 연구방향을 제시하고자 한다.

억새의 분류 및 형태

억새는 화분과(Poacea) 중 C₄ 광합성 경로를 가진 식물 군인 기장아과(Panicoideae)의 쇠풀족(Andropogoneae) 억새속(Miscanthus)에 속하는 식물이다. 세계적으로 억새속 식물에는 17개 종이 존재한다고 알려져 있다(Trevor 등 2002a; Chen과 Stephen 2006). 이 중 바이오에너지용으로 중요한 종은 그림 1과 같이 한국 등 동아시아가 원산인 참억새(*M. sinensis*)와 물억새(*M. sacchariflorus*) 그리고 3배체 억새(*M. x giganteus*) 등이다(Lewandowski 등 2000).

억새는 염색체 배수성이 다양한 식물로 기본 염색체 수가 19개 이지만 종에 따라 참억새는 2배체($2n=2x=38$) 식물, 물억새는 2배체($2n=2x=38$)와 4배체($2n=4x=76$) 등 두 가지의 배수성 식물이 존재한다. 그리고 3배체 억새는 4배체 물억새와 2배체 참억새의 중간 교잡종으로 염색체 수가 $2n=3x=57$ 이다. 억새 속 식물은 자가불화합성 식물이기 때문에 이론적으로 각 종 및 개체별 유전자형은 각각 다르다(Hirayoshi 등 1955; Hirayoshi 등 1957; Syozo와 Itaru. 1960).



Fig. 1. Origin of *Miscanthus sinensis* and *M. sacchariflorus* which are parents species of *M. x giganteus*.

참억새는 햇볕이 잘 들면서 배수가 양호한 산록경사지에 자생한다. 참억새는 환경 적응성이 매우 강하여 도로공사 후 절개된 바위절벽 등 매우 열악한 환경에 가장 먼저 자리 잡은 식물 중의 하나이지만 습해에 약한 단점이 있다(Christian과 Haase 2001). 물억새는 강변 또는 호숫가 등 강우시에는 습지이지만 강우 후 배수가 잘 되는 곳에서 자생한다(Kim 등 2004).

참억새와 물억새 모두 양분 저장 및 번식기관은 지하경(Rhizome)으로 지하 10~20cm 범위에 분포한다(Lewandowski 등 2000; Chen과 Stephen 2006). 그림 2와 같이 참억새의 지하경은 절간장이 매우 짧

고 가운데가 비어있지 않으며 매우 뻥뻥이 엉켜있다. 그러나 물억새의 지하경은 참억새에 비해 절간장이 길고 가운데가 비어 있으며 참억새에 비해 성기게 자란다. 3배체 억새의 지하경은 4배체 물억새와 2배체 참억새의 중간 교잡종이기 때문에 이들 종들의 중간 특성을 가지고 있다.

이듬해 봄 지하경으로부터 줄기가 발생하기 때문에 참억새는 개개 군락의 크기는 작지만 줄기가 조밀하게 발생하고 물억새는 개개 군락의 크기가 크고 줄기도 성기게 발생한다(Chen과 Stephen 2006). 억새속 식물의 지하경을 재식하면 그림 3과 같이 당년에는 지상부 생육량이 적지만 재식 년수가 경과할수록 많아져 재식 3년에 완전한 크기로 자라는 특성이 있다(Jørgensen 등 2003; Fernando 등 2008).

억새는 줄기의 마디에서 잎 싹과 긴 칼 모양의 잎

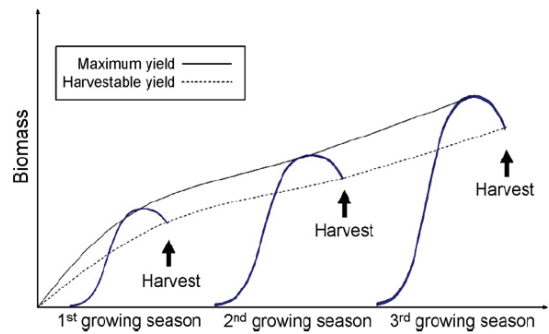


Fig. 3. Schematic representation of *M. x giganteus* growth across three growing seasons. The arrows indicate harvest, the solid line indicates maximum yield and the dashed line indicates harvestable yield.



Fig. 2. Rhizome of *Miscanthus sinensis* (left). *M. sacchariflorus* (center) and *M. x giganteus* (right).



Fig. 4. Seeds and awned spikelets of *Miscanthus sinensis* (left) and awnless *M. sacchariflorus* (right).

이 호생하는데 참억새는 앞의 뒷면에 모용이 있지만 물억새는 없다(Syozo와 Itaru 1960). 참억새는 지상부 줄기가 고사한 이후에도 줄기에 잎과 줄기가 붙어 있지만 물억새는 생육 후기부터 밑 부분의 잎과 잎집이 탈락되기 시작하여 줄기가 고사한 이후에는 대부분이 탈락되어 토양으로 환원된다(Beale 등 1996).

억새는 8월 하순경부터 출수가 시작되어 9월에 꽃이 피는데 줄기 끝에 부채꼴로 꽃차례가 달리며 여기에 작은 영(穎)이 촘촘히 착생한다. 억새의 영(穎)에는 그림 4와 같이 바람에 의한 종자의 비산을 위해 백색의 잔털이 착생하는데 참억새는 영 끝에 8~15mm의 까락이 있지만 물억새는 없다.

에너지작물로서 억새의 적합성

억새는 한밭, 염해, 저온 등 열악환경에 대한 내성이 강한 작물이다. 특히 물억새의 경우 염농도 1%, pH 8.1의 염해지 토양은 물론 담수조건에서 생존이 가능하여 신규 간척지에 재배 가능한 유망한 작물이

다. 또한 -16℃ 정도의 저온에서도 지하경이 동사되지 않는 작물이다(Qingguo 2003; Dafu 등 2008).

억새는 C₄ 식물로서 질소 이용효율이 높고 양분 저장기관이 지하경이기 때문에 질소 무비재배도 가능한 작물이다. Christian 등(2008)은 14년 동안의 억새 비효시험에서 질소 120kg/ha/년 시용구와 무비구의 수량차이 없다고 하였다. 그 이유는 봄과 여름철에 지하경에 저장된 무기양분이 지상부로 이동하여 생육하고 가을에 식물체가 노화될 무렵 지상부의 무기양분은 다시 지하경으로 이동하여 저장되기 때문이다(Beale 등 1996).

억새는 영년생 작물로 한번 재식한 이후 매년 경운, 파종 등 일년생 작물 재배시 실시하는 농작업을 생략할 수 있어 에너지작물 중 에너지 산출/투입 수치가 가장 높은 작물이다(Bullard와 Metcalfe 2001). 억새 바이오매스 생산에 투입되는 에너지는 묘 생산 및 재식 등 최초의 억새밭 조성과 수확에 소요되는 에너지가 거의 전부 이므로 표 1과 같이 년 평균 9,224MJ ha⁻¹의 에너지가 투입된다. 그러나 매년 수확된 바이오매스에서 산출된 에너지가 300,000MJ ha⁻¹로 산출/

Table 1. Comparison between input energy required for biomass production and output energy stored in biomass by energy crops.

Energy crops	Input energy (A) (MJ ha ⁻¹)	Output energy (B) (MJ ha ⁻¹)	Ratio (B/A)
Miscanthus	9,224	300,000	32.53
Willow	6,003	180,000	29.99
Rape seeds	19,390	72,000	3.76

Table 2. Photosynthetic pathway, biomass yield and moisture of harvested biomass by energy crops.

Energy crops	Photosynthetic pathway	Biomass yield (ton ha ⁻¹)	Harvested biomass moisture (%)
Miscanthus	C ₄	8-32	15
Willow	C ₃	8-15	53
Poplar	C ₄	9-16	49
Reed canary grass	C ₃	6-12	13
Switch grass	CS	9-18	15

투입 에너지 수치가 32.5로 여러 가지 바이오에너지 작물 중 가장 높다(Bullard와 Metcalfe 2001).

역사는 표 2와 같이 C₄ 광합성 경로를 갖는 작물이기 때문에 연간 바이오매스 수량이 속성수인 포플러에 비해 높고 동일한 C₄ 에너지작물인 스위치그래스보다도 월등히 많다(Bullard와 Metcalfe 2001; Chris 등 2010). 또한 역사는 건조한 계절인 늦은 겨울 또는 이른 봄에 수확하는 작물이기 때문에 수확가능 기간이 길어 수확기의 이용율이 높고 수확시 수분함량이 15% 정도로 적어 수확 후 건조비용을 줄일 수 있다(Fernando 등 2008).

역사는 표 3과 같이 바이오매스 생산시 농작업으로 인한 탄소 배출량은 137kgC ha⁻¹이지만 바이오매스에 저장된 탄소량은 7,231kgC ha⁻¹로 많아 저장/배출

탄소수치가 52.8로 바이오에너지작물 중 가장 높다. 또한 표 4와 같이 지하경과 뿌리에 211ton ha⁻¹의 CO₂를 저장하면서 2.1ton ha⁻¹의 CO₂를 방출하기 때문에 지하에 저장되는 CO₂가 208.9ton ha⁻¹으로 가장 많다(Bullard와 Metcalfe 2001).

역사는 또한 우리나라가 원산지인 토종작물이기 때문에 생태계 교란 우려가 없고 무성한 역사 숲은 야생 조류 또는 포유류의 서식처 역할을 하기 때문에 생태환경에 유익한 영향을 끼치는 작물이다.

미국 등 선진국의 역사 이용 및 연구 동향

역사의 원산지가 아닌 유럽에서는 1930년대부터

Table 3. Comparison of carbon budget between emitted carbon during the biomass production and stored carbon in biomass by energy crops.

Energy crops	Emitted carbon (A) (kgC ha ⁻¹)	Stored carbon (B) (kgC ha ⁻¹)	Ratio (B/A)
Miscanthus	137	7,231	52.8
Switch grass	40	4,111	41.1
Reed canary grass	115	3,402	29.6

Table 4. Comparison CO₂ amounts between emitted from underground and stored in rhizome during the biomass production by energy crops.

Energy crops	Emitted CO ₂ (A) (ton ha ⁻¹)	Stored CO ₂ (B) (ton ha ⁻¹)	Net stored CO ₂ (B-A)
Miscanthus	2.11	211	52.8
Switch grass	1.82	182	41.1
Reed canary grass	7.20	195	29.6

일본으로부터 억새를 도입하여 재배하였다. 처음에는 관상용으로 재배를 시작하였지만 1960년대에는 섬유소 생산을 위한 3배체 억새의 대규모 재배가 시작되었고 1980년대에 연료용 펠릿 생산 및 직접연소에 의한 열병합발전이 상용화되었다(Lewandowski 등 2000). 현재는 셀룰로오스계 에탄올 생산공정 연구가 활발하게 진행 중이다. 억새의 에너지외 용도 또한 다양하여 압착된 줄기를 10cm 정도로 절단한 후 시설 채소의 양액재배 배지로 활용하거나 시멘트와 혼합, 성형하여 건축자재로 활용한다. 억새는 셀룰로오스 함량이 많기 때문에 바이오매스를 파쇄한 후 0.8mm 정도의 섬유질을 사별하여 강화플라스틱 몰딩용 혼합재료로 활용한다(Moon 2010). 미국과 캐나다는 2000년대 초반 유럽으로부터 3배체 억새를 도입하여 에너지 및 산업용 원료를 생산하기 위해 재배하고 있다. 3배체 억새는 바이오매스 수량이 많고 종자를 생성하지 않아 생태계 교란 우려는 없지만 겨울철 기온이 낮은 미국 북부와 캐나다에 재배하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 겨울철 기온이 낮아 동해 발생이 많아 재식 1년차 억새의 월동율이 낮고, 3배체 억새는 4배체 물억새와 2배체 참억새의 중간 교잡종으로 습해에 약한 참억새의 특성을 가지고 있어 습해 상습지에서는 수량이 크게 적어진다. 그리고 재배년수가 경과할수록 균락 중앙에 줄기가 나지 않는 “공동화(doughnut hole)” 현상이 발생하여 수량이 적어지는 단점도 있다. 따라서 미국과 캐나다의 억새 육종 목표는 이러한 문제점 보완과 아울러 바이오매스 수량증대와 억새 재배로 인한 생태계 교란 방지에 있다(Moon 2010).

억새의 개화시기는 수량, 종자 생성으로 인한 생태계 교란, 동계 생존율 및 양분 재사용 등에 영향을 미치므로 최적 개화시기 설정 및 품종개발도 중요한 연구 대상이다. 억새가 일찍 개화하면 지상부 양분의 지하경으로의 이행 가능 기간이 길어 충분한 양의 양분이 지하경에 저장되므로 월동율이 높지만 바이오매스 수량이 적고 다량의 종자 비산으로 인해 생태계 교란 우려가 있다. 반대로 늦게 개화하면 영양생장기간이 길어져 바이오매스 수량은 많고 종자가 성숙되기 전에 줄기가 고사하므로 종자 비산으로 인한 생태

계 교란 우려는 적지만 지상부 양분 이행가능 기간이 짧아 양분이 지하경에 적게 저장되므로 월동율이 낮은 단점이 있다(Farrell 등 2006).

또 다른 억새에 관한 흥미 있는 연구분야는 사탕수수와의 억새의 교잡종인 미스캔(Miscanes) 육성이다. 사탕수수는 억새와 동일하게 C₄ 광합성 경로 갖는 영년생 식물로서 영양번식법으로 증식하는 화본과 식물로 다른 C₄ 광합성 식물인 일년생 옥수수나 수수보다는 억새와 가까운 근연관계에 있다(Trevor 등 2002b; Laurent 등 2004). 사탕수수는 단일성 개화 특성으로 인해 개화시기가 늦고 경장(莖長)이 4m 이상 크고 경태(莖苔)가 30mm 이상으로 굵어 바이오매스 수량이 많으며 즙액을 추출하여 설탕을 생산할 수 있는 장점이 있지만 열대지역이 원산이기 때문에 내한성과 내병충성이 약하고 신초발생 시기가 늦은 단점이 있다. 반대로 억새는 내한성이 강하고 신초발생 시기가 빠르며 줄기 밀도가 높아 바이오매스 수량이 많고, 휴면성이 있어 수확시 수분함량이 적은 장점이 있지만 북부 지역에 적응한 품종일수록 개화기가 빨라 바이오매스 수량이 적어지는 단점이 있다(David 1997). 두 작물의 장점을 모두 얻기 위해 대만에서 처음 미스캔이 개발되었고 미국에서는 현재 USDA에 US84-1028 등 수개 품종 등록되어 있다. 그러나 현재까지 개발된 미스캔 품종들은 내한성과 내병충성은 어느 정도 개량되었지만 미국 중북부 또는 캐나다에서 재배할 수 있을 정도로는 개량되어있지 않고 당도 또한 낮아 실용적인 설탕생산도 불가능하다(David 등 2009). 따라서 현재 교배를 통한 지속적인 내한성 향상 프로그램을 추진하는 한편 미국 남부지역에서 바이오매스 작물로 재배가 시도되고 있다.

우리나라의 억새 연구 및 금후 연구방향

우리나라 억새 연구는 2004년 자생지의 균락 분포, 종자 발아 등 생리 및 생태 연구 등으로부터 시작되었으나 본격적인 품종육성 및 재배법 개발연구는 2007년 농촌진흥청의 억새 유전자원 수집으로 시작되었다. 연구목표는 국내 억새 유전자원 수집 및 특성

검정, 바이오매스 수량이 많은 우량군락 현지선발 그리고 저비용 대량 증식체계 확립 등이다. 2010년 8월 현재 수집한 역사 유전자원은 720점으로 2010년 말까지 1,000점, 2011년까지 1,500점을 수집할 계획이다. 현재 “거대역사1호” 식물체와 “역사 대량증식방법”의 특허출원의 성과를 거두고 있다.

“거대역사1호”는 한국에 자생하는 물역사(*M. sacchariflorus*) 일종으로서 염색체 수가 76개인 4배체이다. 간장이 400cm, 경태가 9.6mm로서 일반 물역사에 비해 2배 이상 크고 굵어 바이오매스 수량이 30ton ha⁻¹ 정도로 일반 물역사에 비해 50% 이상 많다. 줄기가 고사하면 줄기에 붙어있는 잎 집과 잎이 대부분 탈락되므로 셀룰로오스 함량이 44%로 많고 회분함량이 1.6%로 적어 연료펠릿 및 셀룰로오스계 바이오에탄올 제조용으로 좋은 재료이다. “거대역사1호”는 2010년 현재 경남 산청군 단성면 소재 남강 수변구역 0.6ha 등 전국적으로 약 1ha에 10,000주가 식재되었다. 수도권매립지공사 소유의 매립예정 간척지에서 하수슬러지 고하물 처리시험을 수행 중에 있다. 2011년부터 2012년 까지 금강 하구 옹포지구에 거대역사1호 대규모 시범단지를 조성하여 신 재생에너지 체험 및 교육장으로 활용할 예정이다.

유럽, 미국 등 역사를 상업적으로 재배하는 국가에서는 신규 역사밭 조성을 위한 역사 증식법으로 “지하경 절단법”을 이용한다. 이 방법의 개요는 재식 3년 정도의 역사밭의 지하경을 회전 경운기로 절단하여 감자수집기로 수집한 다음 신규 역사밭에 파종하는 것이다(Lewandowski 1998). “지하경 절단법”은 2~3년 간격으로 지하경을 수확하기 때문에 증식포장 면적대비 50배 정도의 재배면적을 늘릴 수 있을 정도로 증식률이 높다. 또한 자갈이나 점토함량이 많은 포장에 증식포를 설치하면 회전경운기 작업이 어려워 수확작업의 효율성을 위해 반드시 사질토양의 포장을 선택해야만 한다. 회전 경운기로 땅속줄기를 절단하면서 새싹으로 발육할 지하경의 눈을 많이 손상시키기 때문에 파종 후 새싹 발생률이 적고 결주가 많이 발생하는 단점도 간과하기 어렵다(Heaton 등 2004). 새로 개발된 “역사 대량증식방법”은 지상줄기 삽목법으로 줄기 상단부 절단으로 정단우세성을 제

거하여 마디의 신초신장을 유도한 다음 신초가 신장된 삽수를 채취하여 삽목함으로써 증식하는 방법이다. 이 방법은 증식포장 면적당 생산가능 묘수가 1,020본 m²로 땅속줄기 절단법의 50~100본 m²에 비해 월등히 높아 역사 재배포장 조성시 소요되는 묘를 저비용으로 대량생산이 가능하다. 또한 저렴한 묘비용으로 인해 재식밀도 증가도 가능하여 경제적 수확가능연한도 단축시킬 수 있으며 우량 신품종을 수요처에 신속히 보급할 수 있다.

우리나라는 역사 원산지국가 중의 하나로 산야에 품종육성에 활용할 수 있는 다양한 형태의 역사가 산재되어 있다. 이러한 유전자원 다양성으로 인해 우리나라는 역사 우량품종 육성에 상당한 우위를 점할 수 있는 위치에 있다. 역사를 바이오에너지작물로 활용하려면 국내 자생지를 중심으로 유전자원을 수집하여 특성검정 후 데이터베이스를 구축함으로써 우리나라 역사 유전자원 Pool을 만들어 품종육성 기반을 마련해야 할 것이다. 또한 타 작물에서 사용하고 있는 분자유종 등 육종기법을 활용하여 우리나라뿐만 아니라 해외에서도 재배할 수 있는 우량 신품종을 육성해야 할 것이다. 그리고 우리나라 역사자원의 권리확보를 위해 분자마커 개발을 통한 품종판별 기술을 개발해야 할 것이다. 또한 생산된 역사 바이오매스를 수송용 연료로 전환하기 위해 바이오매스의 전처리, 당화 및 발효 등 셀룰로오스계 에탄올 생산공정에 관한 연구도 강화하여 역사의 이용성도 제고되어야 함은 물론이다.

요 약

역사의 식물학적인 분류 및 형태, 선진국의 역사 육종, 재배 및 이용 현황 그리고 우리나라의 역사 연구성과 등을 고찰함으로써 향후 우리나라 에너지를 제고를 위한 역사 연구방향을 제시하고자 국내외 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

역사속 식물에는 17개종이 존재하는데 이 중 바이오에너지용으로 중요한 종은 한국 등 동아시아가 원산인 참역사(*M. sinensis*)와 물역사(*M. sacchariflorus*) 그

리고 이들 두 종의 중간 교잡종인 3배체 억새(*M. x giganteus*) 등이다. 여러 가지 에너지작물 중 억새는 연간 바이오매스 수량이 많고 저온, 염해, 습해 등 열악 환경 적응성과 질소이용효율이 우수하며 에너지 산출/투입 수지가 가장 높고 지상부 줄기와 땅속줄기에 다량의 탄소를 저장하기 때문에 탄소수지가 가장 높다. 유럽, 미국 및 캐나다에서는 1930년대부터 일본으로부터 3배체 억새를 도입하여 연료용 펠릿 생산, 열병합발전, 양액재배 배지, 건축자재 및 강화 플라스틱 원료로 이용한다. 현재 재배되는 3배체 억새 단점보완을 위한 품종육성연구와 사탕수수와의 억새교잡종인 “Miscane” 육성 연구가 진행되고 있다. 우리나라에서는 2007년 억새 유전자원 수집이 착수된 이후 2009년에 바이오매스 수량이 많은 “거대억새1호”와 억새를 증식효율을 높일 수 있는 “억새대량증식방법”을 개발하였다. 향후 우리나라 억새산업 발전을 위해서는 분자육종 등 새로운 육종기법을 활용하여 우리나라뿐만 아니라 해외에서도 재배할 수 있는 우량 신품종을 육성하는 한편 바이오매스의 전처리, 당화 및 발효 등 셀룰로오스계 에탄올 생산공정에 관한 연구도 강화해야 할 것이다.

인 용 문 헌

- 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.
- Beale, C. V., D. A. Bint and S. P. Long. 1996. Leaf photosynthesis in the C₄-grass *Miscanthus giganteus*, growing in the cool temperate climate of southern England. *J. Exp. Bot.* 47: 267-273.
- Bullard, M., and P. Metcalfe. 2001. Estimating the energy requirements and CO₂ Emission from production of the perennial grasses miscanthus, switchgrass and reed canary grass. ADAS Consulting Ltd, USA. 94 p.
- Chen, S., and A. R. Stephen. 2006. MISCANTHUS Andersson. *Flora of China* 22:581-583.
- Chris, S., Y. Heather, T. Caroline Taylor, C. D. Sarah and P. L. Stephen. 2010. Feedstocks for Lignocellulosic Biofuels. *Science* 329:790.
- Christian, D. G., and E. Haase. 2001. Agronomy of *Miscanthus*. In : Jones, M. B., Walsh, M. (Eds.), *Miscanthus for Energy and Fiber*. James & James (Science Publishers) Ltd., London, pp. 21-45.
- Christian, D. G., A. B. Riche and N. E. Yates. 2008. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Industrial Crops and Products* 28:320-327.
- Dafu, W., R. Archie, Jr. Portis, P. M. Stephen and P. L. Stephen. 2008. Cool C₄ photosynthesis : Pyruvate Pi dikinase expression and activity corresponds to the exceptional cold tolerance of carbon assimilation in *Miscanthus x giganteus*. *Plant Physiology* 148:557-567.
- David, M. B., L. T. Thomas, J. H. Jonathan and P. B. David. 2009. Dry matter partitioning and quality of *Miscanthus*, *Panicum*, and *Saccharum* genotypes in Arkansas, USA. *Biomass and Bioenergy* 33:610-619.
- David, M. B. 1997. Chromosome transmission and meiotic behavior in various sugarcane crosses. *J. American Society of Sugar Cane Technology* 17:38-46.
- Farrell, A. D., J. C. Clifton-Brown, I. Lewandowski and M. B. Jones. 2006. Genotypic variation in cold tolerance influences the yield of *Miscanthus*. *Annals of Applied Biology* 149(3):337-345.
- Fernando, E. M., B. V. Maria,, P. L. Stephen and A. B. German. 2008. Meta-analysis of the effects of management factors on *Miscanthus x giganteus* growth and biomass production. *Agricultural and Forest Meteorology* 148:1280-1292.

- Heaton, E. A., J. Clifton-Brown, T. Voigt, M. B. Jones and S. P. Long. 2004. Miscanthus for renewable energy generation : European Union experience and projections for Illinois. *Mitigation Adapt. Strategies Global Change* 9:433-451.
- Hirayoshi, I., K. Nishikawa, R. Kato and M. Kitagawa. 1955. Cytological studies on forage plants. (III) Chromosome numbers in *Miscanthus*. *Jap. J. Breeding* 5(1):49-50.
- Hirayoshi, I., K. Nishikawa, M. Kubono and T. Murase. 1957. Cytological studies of forage plant. VI. On the chromosome number of *ogi* (*Miscanthus sacchariflorus*). *Research bulletin of the faculty of agriculture, Gifu University* 8:8-13.
- Jørgensen, U., J. Mortensen, J. B. Kjeldsen and K. U. Schwarz. 2003. Establishment, development and yield quality of fifteen *Miscanthus* genotypes over three years in Denmark. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, Published by Talyor and Francis, Informa Ltd Registered in England and Wales. pp. 190-199.
- Kim, G. Y., C. W. Lee and G. J. Joo. 2004. The evaluation of early growth pattern of *Miscanthus sacchariflorus* after cutting and burning in the Woopo Wetland. *Korean J. Limnol.* 37(2):255-262.
- Koonin, S. E.. 2006. Getting serious about biofuels? *Science* 311:435.
- Laurent, G. C., J. C. Daniels,? and A. D'Hont. 2004. A review of recent molecular genetics evidence for sugarcane evolution and domestication. *Ethnobotany Research & Applications* 2:9-17.
- Lewandowski, I. 1998. Propagation method as an important factor in the growth and development of *Miscanthus giganteus*. *Ind. Crops Prod.* 8: 229-245.
- Lewandowski, I., J. Clifton-Brown, J. M. O. Scurlock and W. Huisman. 2000. Miscanthus : European experience with a novel energy crop. *Biomass Bioenergy* 19:209-227.
- Lewandowski, I., M. O. S. Jonathan, L. Eva and C. Myrsini. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy* 25:335-361.
- Lewandowski, I., and A. Heinz. 2003. Delayed harvest of miscanthus-influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production. *Eur. J. Agron.* 19:45-63.
- Lewandowski, I., and U. Schmidt. 2006. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agriculture, Eco-systems and Environment* 112:335-346.
- Moon, Y. H. 2010. Report of official foreign trip "America and Canada trip for learning breeding methods and surveying cultivation and utilization of miscanthus". [http : //btis.mopas.go.kr/](http://btis.mopas.go.kr/)
- Qingguo, X. 2003. Potential of giant grass *Triarrhena lutarioriparia* to grow in cold, dry and saline conditions as energy source. *Proc. of International Conference on Bioenergy Utilization and Environment Protection-6th LAMNET Project Workshop, Dalian, China SESSION 5 : BIOMASS RESOURCES.*
- Syozo, A., and S. Itaru. 1960. The cytotaxonomy of the genus *Miscanthus* and its phylogenic status. *Bulletin of the faculty of agriculture, Mie University* 25:1-24.
- Trevor, R. H., W. C. Mark, T. Chigusa, J. L. Illa J., D. B. Michael and A.R. STEPHEN. 2002a. The use of DNA sequencing (ITS and *trnL-F*), *AFLP*, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (*Poaceae*). *American Journal of Botany* 89(2):279-286.
- Trevor, R. H., W. C. Mark, M. D. Lled, S. Nicolas

and A. R. Stephen. 2002b. Phylogenetics of *Miscanthus*, *Saccharum* and related genera (Saccharinae, Andropogoneae, Poaceae) based

on DNA sequences from ITS nuclear ribosomal DNA and plastid *trnL* intron and *trnL-F* intergenic spacers. J. Plant Res. 115:381-392.