

## 바이오매스로서의 억새에 대한 연구 동향

서상규 · 이정은 · 전서범 · 이병현 · 구본철 · 서세정 · 김선형

### Current status on *Miscanthus* for biomass

Sang-Gyu Seo · Jeong-Eun Lee · Seo-Bum Jeon · Byung-Hyun Lee · Bon-Cheol Koo · Sae-Jung Suh · Sun-Hyung Kim

Received: 27 November 2009 / Accepted: 5 December 2009  
© Korean Society for Plant Biotechnology

**Abstract** The carbon dioxide concentration of the atmosphere is projected to increase by almost 50% over the first 50 years of this century. The major cause of this increase is continued combustion of fossil fuels. As a result, the significant changes in climate that have already occurred will be amplified, in particular a global temperature increase. Renewable energy production has a central role to play in abating net CO<sub>2</sub> emissions to a level that will arrest the development of global warming. Especially, biomass crops are becoming increasingly important as concerns grow about climate change and the need to replace carbon dioxide-producing fossil fuels with carbon-neutral renewable sources of energy. To succeed in this role, biomass crop has to grow rapidly and yield a reliable, regular harvest. A prime candidate is *Miscanthus*, or Asian elephant grass, a perennial species that produces over 3 metres of bamboo-like stems in a year. *Miscanthus* species are typically diploid or tetraploid. Hybrids between species with different ploidy levels result in the highly productive triploid hybrids, *M. × giganteus*. Here we will detail the *Miscanthus* characteristics desired of a biomass fuel crop.

S.-G. Seo · J.-E. Lee · S.-B. Jeon · S.-H. Kim (✉)  
서울시립대학교 자연과학대학 환경원예학과  
(Department of Environmental Horticulture, The University of  
Seoul, Jeonong-dong 90, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743,  
Korea)  
e-mail: mongdal@uos.ac.kr

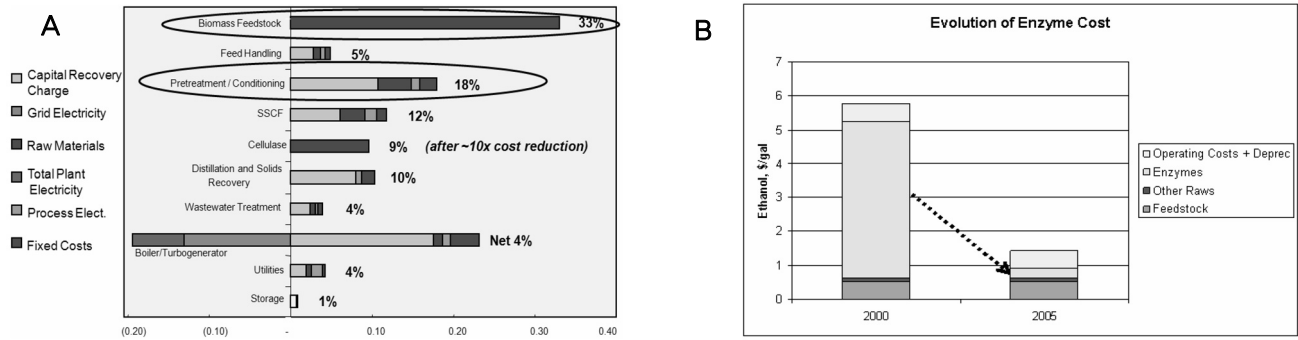
B.-H. Lee  
경상대학교 응용생명학부  
(Division of Applied Life Science, Gyeongsang National  
University, Jinju 660-701, Korea)

B.-C. Koo · S.-J. Suh  
작물과학원 바이오에너지작물센터  
(Bioenergy Crop Reseach Center, National Institute of Crop  
Science, RDA, Muan, Jeonnam 534-833)

### 서론

국제유가 상승과 석유에 의존하는 국가 경제체제, 그리고 화석연료에 의한 지구기후의 변화에 관한 위협이 국제적으로 재생 가능한 에너지 개발에 주력하도록 만들어 가고 있다 (American Society of Plant Biologists 2005, BTAC 2002). 특히 재생 에너지 중 식물유래 바이오에너지는 환경친화적 미래형 에너지 공급을 위한 중추적 역할을 하고 있다 (Bothast and Schlicher 2005). 또한 석유, 석탄, 천연가스의 사용으로 인한 이산화탄소 증가에 따른 온난화 방지에 있어서 순환 가능한 천연 바이오매스를 이용한 바이오에너지 개발에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다 (American Society of Plant Biologists 2005, Bothast and Schlicher 2005).

바이오에너지는 미래 에너지 공급과 다양한 저탄소 (low carbon) 성장에서 중요한 역할을 하고 있다 (Brummer et al. 2000). 바이오에너지 연구분야에 대한 환경적, 정치적 그리고 경제적 필요성이 강력하게 요구되고 있다. 바이오매스 (biomass) 및 바이오에너지로서의 잠재 가능성이 높은 작물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 옥수수, 유채, 고구마, 카사바 등 식물유래 바이오매스를 이용한 바이오에너지에 대한 연구가 중점적으로 이뤄지고 있다 (Brummer et al. 2000). 바이오매스는 사람이 식량으로 사용할 수 있는 당질계, 전분질 (녹말)계 바이오매스 (예: 사탕수수, 고구마, 옥수수, 콩 등)와 식량으로 사용할 수 없는 셀룰로오스계 바이오매스 (나무, 볏짚, 비식용화분과 식물 등)로 구분된다 (Clifton-Brown et al. 2004, Heaton et al. 2004). 셀룰로오스 바이오매스는 지구상에서 가장 많이 생산되고 순환이 가능한 신재생 자원으로서 아직까지 그 활용도가 쌀감, 목재, 건축재, 종이, 펄프 등으로 국한되어 있어 활용도가 극히 낮은 상태이다 (Brummer et al. 2000, Bullard 1999, Clifton-Brown et al. 2004, DEFRA 2001).



**Fig. 1** Cost of producing cellulosic bioethanol (A) and cellulase between 2000 and 2005 (DOE 2006)

당질계나 전분계 바이오매스의 대부분이 식량작물이며, 이는 식량작물을 바이오매스로 전환시켜, 세계 식량 시장에서의 가격상승으로 이어지고 있는 실정이다 (American Society of Plant Biologists 2005). 2008년 시카고 국제 곡물 시장에서 벼, 밀 등이 각각 125%, 87% 가격이 상승되었으며, 이는 옥수수, 콩 등의 바이오매스 생산을 위한 경작지의 증가에 따른 다른 식량작물의 경작지 감소로 이어져 벼, 밀, 옥수수 등의 가격상승이 이루어졌기 때문이다. 또한 식량작물의 가격상승으로 인한 공산품의 가격 상승까지 고려하면, 그 파급효과는 상당한 실정이다. 또한 당질계나 전분계 바이오매스의 효율은 이론적 수치보다 에너지 전환 효율 및 경제적 타당성이 상당히 낮은 상태이다 (Brummer et al. 2000). 그러나 경제적인 측면과 환경적 측면을 고려한 바이오매스를 이용한 바이오에너지 생산에 대한 방법은 아직까지 명확히 제시되지 않고 있다. 저탄소 녹색성장의 미래형 바이오매스의 개발을 위해서는 환경/경제적으로 지속가능한 효율적인 바이오매스 개발이 필요하다 (BTAC 2002).

최근 바이오에탄올용 바이오매스에 대한 연구는 주로 옥수수, 카사바, 사탕수수와 같은 식량작물을 이용하는 바이오매스에서 역새, 포플러 등과 같은 셀룰로오스계통의 비식용 바이오매스 (non-edible biomass)로 전환되고 있다. 또한 셀룰로오스계 바이오매스를 효율적으로 전환시키기 위한 바이오리파이너리에 대한 연구가 동반되어 수행되고 있다 (Brummer et al. 2000, Hodkinson and Renvoize 2001, McLaughlin and Kszos 2005, McLaughlin and Walsh 1998). 이러한 미래형 바이오매스 식물의 주성분인 셀룰로오스를 효과적으로 활용하기 위해서는 탈중합화와 당화공정을 거쳐 발효성 당 (fermentable sugar)으로 전환하여야 하는데, 이와 같이 발효성 당으로의 전환을 위해서는 전처리 및 효소적 당화 등의 과정을 거쳐야 하며 후속 생물전환 공정에서 최종제품을 얻는 과정까지 이어진다. 이러한 발효성 당을 얻는 공정 중 원료작물과 분해효소 셀룰라아제 생산과 바이오매스의 공급이 가장 고비용으로 자리잡고 있다 (Perlack et al. 2005). 최근 셀룰로오스계

바이오매스를 분해하기 위한 셀룰라아제의 국제가격이 크게 하락하여 셀룰로오스 계통 바이오매스에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Fig. 1A). 따라서 바이오에탄올 생산의 원활함을 위해서는 바이오매스의 안정된 공급이 가장 큰 문제임을 알 수 있다 (EERE, 2003, Farrell et al. 2006, Torre Ugarte 2003).

효율적 바이오매스의 이용을 위해서는 재배기간의 단축, 수확량의 안정성 확보 및 타 식량작물의 가격 변동에 영향을 미치지 않는 비식용 작물의 개발, 비경작지에서의 재배 가능성 등이 고려되어야 할 것이다. 특히 경제적 타당성을 고려해볼 때, 식량자원이 아니면서 생산량이 높고 연중 재배가 가능한 셀룰로오스계 바이오매스 식물이 미래형 바이오에탄올 생산을 위한 바이오매스로 주목 받고 있다 (Brummer et al. 2000, Bullard 1999).

**셀룰로오스계 바이오매스의 개발 타당성**

석유화학기술에 근간을 둔 현대사회는 석유자원이 고갈됨에 따라 바이오화학의 시대로 옮겨갈 것이며, 이에 따라 바이오매스자원을 확보하는 기술과 바이오리파이너리기술이 중요한 기술로 등장할 것으로 전망되고 있다 (American Society of Plant Biologists 2005, Bothast and Schlicher 2005, BTAC 2002, Petrulis et al. 1993). 현재 세계 바이오매스 부존량은 연간 2200억 odt (oven-dry tones)로 세계 1차 에너지 사용 총량의 10배에 해당한다. 석유화학에서 생산되고 있는 프로필렌 (propylene)과 같은 소재가 바이오프로필렌 등과 같은 Biochemical로 대체되는 시대가 전개될 것이다. 가장 많은 에너지 소비처의 하나인 수송부문의 연료에 있어서도 현재 석유중심에서 향후 2035년경에는 바이오연료가 전체의 23%까지 이를 것으로 예측되고 있다 (American Society of Plant Biologists 2005, BTAC 2002). 바이오에너지의 기본이 되는 바이오매스자원을 확보하는 방법은 과거의 폐기물 및 미활용바이오매스 자원에서 대량생산 및 효율성이 높은 신바이오매스작물을 개발하

는 방향으로 발전하고 있다 (BTAC 2002). 이는 바이오매스 전환효율이 획기적으로 향상되면 바이오매스 작물재배업이 식량작물 재배업과 경쟁할 수 있을 것으로 예상된다. 우리나라는 경작지 면적이 크지 않아 대면적의 바이오매스 작물의 재배에 불리한 국가라고 할 수 있어, 면적당 바이오매스 자원의 밀도를 획기적으로 향상시킬 수 있는 기술이 중요할 것으로 판단된다.

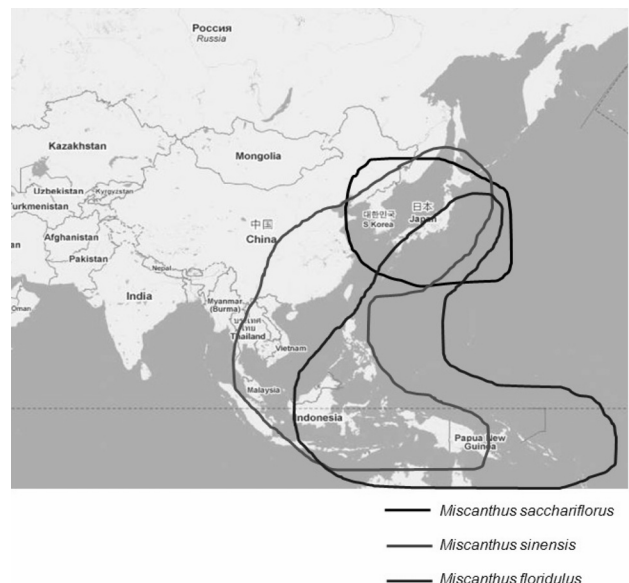
바이오에너지용 바이오매스 대한 연구는 일반적으로 바이오매스의 종류에 따라 현재형 및 미래형으로 구분될 수 있다. 현재형 바이오연료용 바이오매스인 당질, 전분질은 원유의 가격 상승에 따른 대체 에너지로 개발되었으며, 온실가스 감축의 효과는 검증되지 않고 있다. 현재 생산되고 있는 바이오에너지는 콩, 옥수수, 사탕수수 등을 원료로 이용하여 생산하고 있으며, 미국과 브라질이 주도하고 있다 (U.S.Congress 2000). 이는 식량작물을 원료로 사용하므로 곡물, 사료, 식용류 등의 가격을 상승시킬 수 있다. 또한 재배면적을 확대하기 위해 삼림을 훼손할 수 있어 이산화탄소가 오히려 증가하는 부작용을 초래할 수가 있다. 특히 high volume, low cost의 수송용 에탄올 생산을 위해서는 바이오매스의 안정적 공급을 위한 대량생산체계가 획기적으로 개선되어야 바이오연료의 실용화가 가능할 것이다. 셀룰로오스계 화본과 비식용 바이오매스 대량 생산 체계 및 실용화 방안은 현재 진행 중인 바이오에탄올 생산 공정연구사업과도 연계가 될 수 있고 시너지 효과를 낼 수 있는 절실히 요구되는 연구 사업이다. 바이오연료 분야의 R&D를 선도하고 미국 에너지부에서도 이러한 상황을 고려하여 바이오에너지 작물을 통한 슈가 플랫폼 (Sugar Platform) 개념의 연구 사업을 에너지부 (DOE) 산하 NREL을 중심으로 2002년부터 연간 3,000만 달러의 연구비를 투입하여 실용화를 목표로 추진 중이다 (American Society of Plant Biologists 2005, BTAC 2002, EERE 2003). 특히 바이오매스의 안정적인 공급을 위하여 셀룰로오스계 작물을 개발하고 이들을 통한 바이오에너지 대량 생산을 위한 model crop system으로 선택하여 바이오에너지 생산을 위한 연구를 수행 중에 있다. 특히 일리노이즈 주립대를 중심으로 수량성과 에탄올 수율이 뛰어난 초본성 셀룰로오스 작물 (억새)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (American Society of Plant Biologists 2005, BTAC 2002, Bullard 1999, EERE 2003).

### 미래형 바이오매스로서의 억새에 대한 연구현황

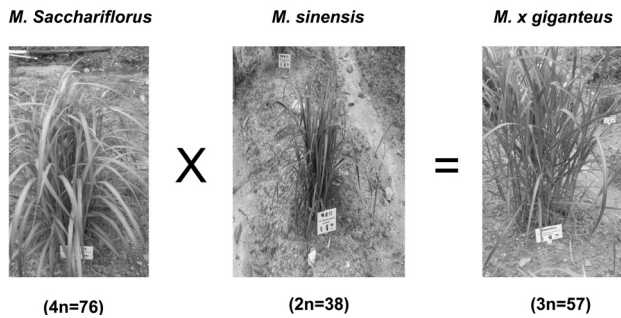
식물의 주성분인 셀룰로오스를 효과적으로 활용하기 위해서는 탈중합화와 당화공정을 거쳐 발효성 당 (fermentable sugar)으로 전환하여야 한다. 이러한 발효성 당으로의 전환을 위해서는 전처리, 효소적 당화 등의 과정

을 거쳐야 하며, 후속 생물전환공정을 통해 최종제품인 에탄올을 얻을 수 있다 (McLaughlin and Forage 1997). 문제는 이러한 발효성 당을 얻는 공정 중 원료작물과 분해효소인 셀룰라아제 생산비용과 바이오매스의 공급비용이 가장 고비용으로 자리 잡았으나, 2000년도와 2005년도에 있어서 셀룰로오스계 바이오매스를 분해하기 위한 셀룰라아제 가격을 비교해볼 때 1/4로 하락하여 바이오에탄올의 원활한 생산을 위해서는 바이오매스의 안정된 공급이 가장 중요하다고 볼 수 있다 (Fig. 1B) (BTAC 2002, McLaughlin and Forage 1997, Perlack et al. 2005) 일리노이즈 주립대와 영국, 일본을 중심으로 바이오매스의 안정적인 공급을 위하여 비식용 초본성 셀룰로오스계 바이오매스 대량 생산을 위한 연구를 수행 중에 있다. 한국에서 바이오에너지용 바이오매스로 이용 가능한 초본성 비식용 셀룰로오스계 식물은 여러종이 분포하고 있으나, 바이오매스의 가장 기본적 요건인 수량성을 따져 볼 때 억새가 가장 이상적인 바이오매스용 식물로 생각된다.

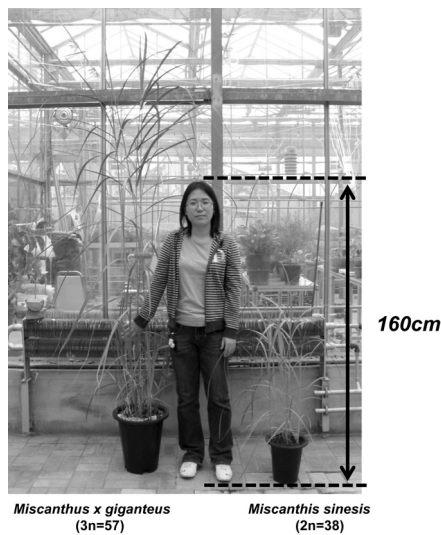
억새 (*Miscanthus*)는 벼과식물 (*Poaceae*)에 속하며 중국, 일본, 한국과 일부종이 폴리네시아와 아프리카에 분포하고 있다. 한국에는 *Miscanthus sacchariflorus* (4n=76)와 *Miscanthus sinensis* (2n=38)가 주로 분포하고 있으며, 한국의 야생에 억새가 다양하게 분포하고 있으나 아직까지 정확한 분류체계가 확립되어 있지 않다 (Fig. 2). 억새의 상업적 이용은 일본에서부터 관상용으로 유럽에 소개되어 1930년대에 본격적으로 활용되기 시작하였다. 바이오매스로서의 연구는 셀룰로오스 fiber 생산을 위한 억새의 생산가능성에 대한 연구가 1960년 대 후반에 덴마크에서 수행되었고, 바이오에너지 생산을 위한 시도는 1983년 덴마크에



**Fig. 2** Distribution of three Asian *Miscanthus* species (Hodkinson and Renvoize 2001)



**Fig. 3** *Miscanthus* genetics. Original *M. × giganteus* hybrid collected in 1935 in Yokohama, Japan, cultivated in Denmark, then distributed throughout Europe and the US as an ornamental plant



**Fig. 4** *Miscanthus* growth during 50 days in University of Seoul

서 시작되어 독일을 기점으로 전 유럽으로 확산되었다 (Clifton-Brown et al. 2004, Lewandowski 2000).

현재 바이오에너지용으로 사용되고 있는 *Miscanthus × giganteus* (3n=57)는 *Miscanthus sacchariflorus*와 *Miscanthus sinensis*의 자연교잡종으로 1983년부터 북유럽에서 집중적인 포장실험이 수행되고 있다 (Fig. 3). 바이오에너지용 억새인 *Miscanthus × giganteus*는 성장기 후반에 크기가 4미터 정도이며, 약 40t/ha의 수확량을 나타내고 있고 (Fig. 4), 에탄올 수율도 다른 셀룰로오스계 작물과 비교해볼 때 약 2배에서 4배 정도의 고효율을 보이고 있다 (Table 1). 억새는 C4 광합성 경로를 갖고 있고, 다른 C4 식물에 비해 낮은 온도에도 잘 성장하며 상대적으로 낮은 기온의 지역에서도 높은 생산성을 가질 뿐만 아니라 수분이용효율이 높은 식물이다 (Christian et al. 2001, Clifton-Brown et al. 2004, Heaton et al 2004, Hodkinson and Renvoize 2001). 현재 유럽에서 억새의 번식은 종자보다는 미세한 라이좀 (rhizome)을 이용하고 있으며, 조직배양에 의해 생산된 라이좀 조각들을 제곱미터당 3-6개의 밀도로 심고, 2-3년

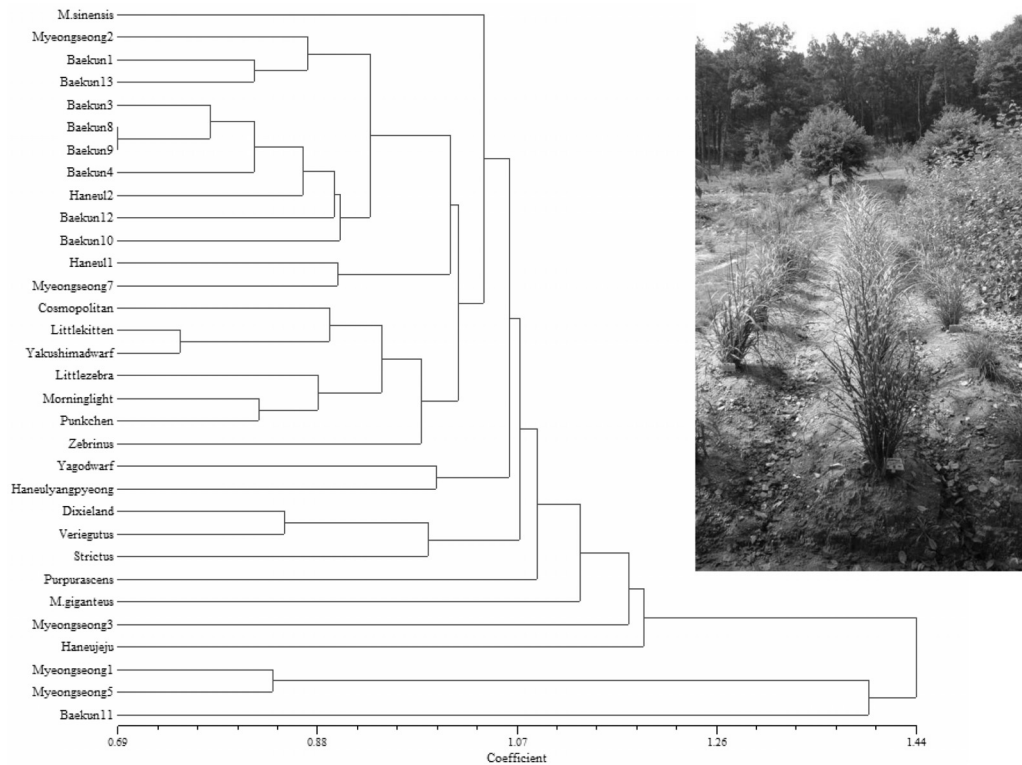
**Table 1** Harvestable biomass and ethanol production in various sources of biomass

Biomass crop	Harvestable Biomass (tons/acre)	Ethanol Production (gallons/acre)
Grain	4.6	456
Corn Stover	3.0	300
Total	7.6	756
Switchgrass	5.6	563
<i>Miscanthus</i>	14.1	1,410

후 rotary tiller 를 이용하여 토양상태에서 분쇄시켜 40-100그램의 조각으로 나눈다. 이와 같이 분쇄된 미세한 라이좀 조각들을 종자처럼 이용하고 있다. 이러한 방법은 경제성 면에서도 종자번식이나 조직배양을 통한 유식물체를 이용하는 방법보다 경쟁력을 가지고 있다 (Clifton-Brown et al. 2004, Heaton et al 2004, Lewandowski 2003).

다른 셀룰로오스계 바이오에너지용 바이오매스 작물과 비교해 보면, 억새는 생활주기(life-cycle)면에서 측면에서 1년생 식물과 다년생 목본의 중간 즈음에 있다 (Bullard 1999, Lewandowski 2000). 또한 1년생 작물에 비해 질소 사용이 적기 때문에 산화질소의 방출 정도가 낮다. 억새는 옥수수나 갈대 등의 다른 초본식물에 비해 토양 침식이 적어 피복작물로도 이용할 수 있다. 현재까지 심각하게 생산량을 제한하는 병해에 관한 보고가 없지만, fusarium 마름병과 보리 yellow dwarf virus에 의한 병해가 능성이 있으며, 다른 영양번식작물과 마찬가지로 질병에 의한 피해를 입을 수 있는 위험성을 내재하고 있다.

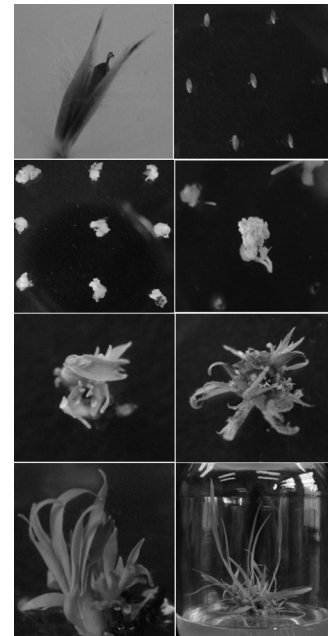
현재 억새에 대한 국내 유전자원확보는 매우 초보적인 단계로 일부 대학 (서울시립대 약 70여종)과 농촌진흥청 바이오에너지 작물센터에서 약 30종을 보유하고 있어 바이오에너지에 대한 연구를 수행 중에 있다. 하지만 국내에서 셀룰로오스계 바이오매스 식물은 아직 표준 품종이 확립되어 있지 않아 바이오매스 식물의 생리생태적 특성 및 바이오매스 생산성/품질특성 표준 평가 기술이 확립되어 있지 않다. 국내에서 화본과 식량작물인 벼의 경우 다양한 분자 마커가 개발되어 유전적 다양성은 물론 QTL 분석 등에 광범위하게 응용되고 있어, 국내 자생 초본성 바이오매스 식물에 대한 연구에 활용가능성이 크다고 볼 수 있다. 따라서 이들에 대한 표준화가 절실히 요구되고 있는 실정이며, 이러한 억새 유전자원을 효율적으로 활용하기 위해서는 사용 목적별 분류를 위한 품종화 및 품종 선점을 위한 품종특히 출원이 필요할 것이다. 또한 4대강 등의 유휴지 활용 측면에서 관상용, 바이오매스용, 농가 소득을 위한 원예용 품종의 선발이 필요할 것이다. 번식 체계를 위한 식물조직배양 연구는 주로 종자번식이 어렵거나 포장 대량생산에 오랜 기간과 많은 비용이 소요되는 약용식물이나 화훼용 식물에 집중되었으며, 초본



**Fig. 5** *Miscanthus* germplasm and diversity of Korea

성 화본과인 벼의 경우 육종을 목적으로 약배양 등의 조직배양 연구가 높은 수준에 도달하였으나 역사에 대한 조직배양 및 형질전환 체계 확립에 대한 연구는 경상대학교 이병현 교수팀이 유일한 실정이다. 재분화 및 형질전환 체계를 확립하기 위하여 역사 (경남지역 자생종 2종)의 성숙종자로부터 배발생 캘러스 유도 및 이로부터 식물체를 재분화 시켰으며 45%이상의 재분화효율을 보이는 고효율 재분화시스템을 확립하여 특허출원 (출원번호 10-2008-0093036) 중에 있으며, 기타지역의 자생종에 대한 재분화체계도 계속 확립 중에 있다 (Fig. 6).

국내의 역사분포는 제주지역을 중심으로 *Miscanthus sacchariflorus*가 화왕산, 백운산, 진주지역까지 주로 분포하고 있으며, 2배체인 *Miscanthus sinensis*는 명성산, 설악산, 경기일원을 중심으로 번식하고 있다. 현재 계통별 분석을 위하여 서울시립대에서 국내산 역사 80계통을 선발하여 RAPD등을 이용하여 선별 작업 중에 있고, 수집지별 역사 품종의 셀룰로오스 조성 분석에 대한 연구를 순천향대학교에서 수행 중에 있으며, 역사 생장 적합 환경 파악을 위한 토양의 이화학적 특성 조사를 통해 대량 생산체계에 있어서의 재배환경에 대한 기초 자료를 제공하고 있다. 또한 원예용 가치가 높은 역사 14종을 선발하여 번식체계 확립 및 특성 파악을 수행 중에 있다. 특히 Cosmopolitan과 같은 계통은 리그닌 함량이 적고 수량성이 *M. giganteus*의 80%에 달하며 가뭄에 강하여 원예용 및 바이오매스용으로 개발이 가능할 것으로 판단된다.



**Fig. 6** Plant regeneration of *M. sinensis*

한국 고유의 역사 자원을 바이오에너지 산업화하기 위한 노력은 일부 기업 (동부하이텍, 유니베라, SK에너지 등)에서 시도하고 있으나, 대부분이 옥상녹화 및 환경생태계 복원에 초점이 맞추어져 있는 실정이다. 2006년부터 (주) 화이엔에서는 국내 역사의 품종화 및 산업화를 위하여 서울시립대학교, 농촌진흥청과 공동으로 30종의 야생

역새종을 국내 자생지에서 선발하여, 화이젠 1호 계통을 선발하였는데, 다른 역새 계통에 비해 키가 크고 성장속도가 빨라 *M. giganteus*를 대체할 수 있는 바이오에너지용 역새로 개발할 예정이다. 이와 같이 한국의 역새 연구는 미국이나 영국에서 대규모로 이루어지고 있는 것과는 달리 일부 대학 (서울시립대, 경상대)과 중소기업 한곳에서 유전자원 확보 및 산업화에 관심을 보이고 있으며, 연구인력의 부족으로 인해 원산지가 동북아시아임에도 불구하고 유전자원의 확보조차 힘든 실정이다.

## 결론

여러 가지 순환 가능한 바이오매스 중 셀룰로오스계 바이오매스인 역새의 이용은 미국과 EU를 중심으로 바이오에너지 산업에서 원료의 확보에서 제품의 이용에 이르기 까지 집중적이고 광범위하게 이루어지고 있다. 역새의 상업화는 미국과 EU에서 지역경제 활성화 및 환경개선, 에너지 문제 완화 등을 해결할 수 있는 미래형 사업으로 인정받고 있다. 역새를 이용한 식물 바이오 연료 생산은 크거나 작은 스케일의 형태로 에너지 시장에 점차 가시적으로 나타날 것이며 이러한 발전은 향후 이와 관련된 산업계의 투자를 이끌 것이다. 특히 역새의 경우 식량 자원이 아닌 비식량 자원으로서 성장속도가 빠르고, 수확량 및 관리 비용에서 현재까지 바이오에너지 생산에 이용되고 있는 다른 작물들과 비교할 때 경제성 면에서 우위를 점하고 있다. 우리나라가 역새의 다양한 유전자원을 가진 점을 감안할 때 장기적인 관점에서 목표를 정하고 일관되고 지속적인 연구체계 확립 및 산업화가 필요하다. 아울러 효율적인 역새의 바이오에너지 산업화를 위한 기초 연구가 필요할 것이다.

지난 수십 년 동안 작물 육종 연구는 탄소동화작용의 효율을 극대화 시키는 것과 식물의 바이오매스를 높이는 데 초점이 맞춰져 있었으며, 특정 작물의 바이오매스 수량에 관한 주목할 만한 연구결과들이 도출되어져 왔다. 이와 같은 연구 결과들을 토대로 하여 바이오매스용 역새에 있어서도, 동화작용, 바이오매스 축적, 분배 (partitioning) 조절 기능의 이해 및 높은 수량성을 나타내는 품종육성을 위한 육종기술 개발에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

더불어 바이오매스를 바이오에너지로 전환하는 과정 역시 에너지가 많이 소요되고 있어서 미래에 중요한 연구 분야가 될 것이다. 바이오매스를 바이오에너지로 활용하기 위한 전환과정에는 여러 가지 방법이 있으며, 특히 역새의 주요 구성성분인 리그닌과 셀룰로오스의 조성비를 전환하기 위한 기질 특이적 고효율 효소의 개발에 초점이 맞추어져야 할 것이다.

식물과 병원균과의 상호작용에 대한 이해는 현재 식물과학 분야에서 중요한 연구 분야이다. 모든 작물에서 병해충에 대한 감수성은 이들의 공격에 대비하여 높은 생산비용을 유발하지만 높은 수준의 저항성은 낮은 생산비용이 소요된다. 그러나 저투입 농업자재 및 가격이 낮은 (低價) 작물인 바이오매스 작물의 경우 병해충은 수량성에 막대한 영향을 끼칠 수 있다. 역새는 약 25년까지 한 자리에서 성장하는 영년생 작물이다. 따라서 새로운 병에 대한 위협, 분명히 지난 날 특정 유전자형을 모두 쓸어버린 전염병 (epidemic)과 같은 형태의 위협이 잠재적으로 높은 상태이다. 따라서 장기간의 지속가능 저항성은 육종 프로그램에서 매우 중요한 요소이다. 재식방법 (윤작 및 혼작)의 변화는 병 발생을 줄일 수 있으나 혼합된 바이오매스 작물의 재식밀도 내에서 병원균의 집단생물학에 대해서는 좀 더 많은 연구가 필요할 것이다. 최소화된 계량 가능한 투입자재 (예를 들어 비료, 물, 화합물 등)를 이용한 최대화 시스템보다는 최적화 시스템이 개발되어야 한다. 특히 전체 토지이용에 있어서 물과 비료의 효율적인 사용방식은 중요한 문제이다. 또한 작물에 대한 환경 (온실가스 유지와 잠재적으로는 감축)과 경제적 경쟁력에 대해서도 연구가 되어야 할 것이다.

## 사사

본 연구는 친환경바이오에너지 사업 연구비 지원 (2009 01OFT123475088) 으로 수행된 연구결과이다.

## 인용문헌

- American Society of Plant Biologists (2005) President Bush cites importance of plant-based biofuels. *ASPB News* 32(4):16-17
- Bothast RJ, Schlicher MA (2005) Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. *Appl Microbiol Biotechnol* 67:19-25
- Brunner EC, Burras CL, Duffy MD, Moore KJ (2000) Switchgrass production in Iowa: economic analysis, soil suitability, and varietal performance. Iowa State University, Ames, Iowa. Prepared for Bioenergy Feedstock Development Program, Oak Ridge National Laboratory, Oak ridge, TN.
- BTAC (2002) Roadmap for biomass technologies in the United States, biomass research and development technical advisory committee. <<http://www.biomass.govtolls.us/pdfs/finalbiomassroadmap.pdf>>
- Bullard M. *Miscanthus* agronomy (for fuel and industrial uses). Technical report NF0403, 1999. <<http://www.defra.gov.uk/farm/crops/industrial/research/research.html>>
- Christian DG, Haase E. Agronomy of *miscanthus*. In: Jones MB, Walsh M, editors (2001) *Miscanthus* for energy and fibre.

- London: James and James (science Publishers) Ltd.; 2001 P. 33-38
- Clifton-Brown JC, Stampfl PF, Jones MB (2004) *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biology* 10(4):509-518
- DEFRA (2001) A review of the potential of giant grasses for UK agriculture. Research and development-final project report NF0419; 2001. <[http://www2.defra.gov.uk/research/project\\_data/More.asp?I=NF0419&M=CFO&V=COSARS](http://www2.defra.gov.uk/research/project_data/More.asp?I=NF0419&M=CFO&V=COSARS)>
- De La Torre Ugarte DG (2003) The economic impacts of bio-energy crop production on U.S. agriculture, U.S. Department of Agriculture and Department of Energy, Agricultural Economic Report No. 816 [www.usda.gov/oce/reports/energy/AER816Bi.pdf](http://www.usda.gov/oce/reports/energy/AER816Bi.pdf)
- DOE (2006) Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol : A joint research agenda
- EERE (2003) Biomass program multi-year technical plan. U.S. DOE, Energy efficiency and Renewable Energy. <[http://devafdc.nrel.gov/biogeneral/program\\_review/MYTP.pdf](http://devafdc.nrel.gov/biogeneral/program_review/MYTP.pdf)>
- Farrell AE, Plevin JR, Turner TB, Jones DA, O'Hare M, Kammen MD (2006) Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311:506-508
- Heaton EA, Long SP, Voigt TB, Jones MB, Clifton-Brown J (2004) *Miscanthus* for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 9(4):433-51
- Heaton EA, Voigt TB, Long SP (2004) A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water. *Biomass and Bioenergy* 27(1):21-30
- Heaton EA, Voigt TB, Long SP (2006) *Miscanthus* × *giganteus*: the results of trials alongside switchgrass (*Panicum virgatum*) in Illinois. University of Illinois at Urbana-Champaign: Department of Plant Biology
- Hodkinson TR, Renvoize S (2001) Nomenclature of *Miscanthus* × *giganteus* (*Poaceae*). *Kew Bulletin* 56:759-760
- Lewandowski I, Clifton-Brown JC, Scurlock JMO, Huisman W (2000) *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy* 19(4):209-227
- Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M (2003) The development and current status of potential rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy* 25(4):335-361
- McLaughlin SB. Forage (1997) Crops as bioenergy fuels: evaluating the status and potential. In: XVIII international grassland congress
- McLaughlin SB, Kszos LA (2005) Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy* 28:515-535
- McLaughlin SB, Walsh ME (1998) Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. *Biomass and Bioenergy* 14(4):317-324
- Perlack RD, Wright LL, Turhollow AF, Graham RL, Stokes BJ, Erbach DC, OAK RIDGE NATIONAL LAB TN (2005). Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply, DOE/GO-102005-2135, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. <[Http://feedstockreview.ornl.gov/pdf/billion\\_ton\\_vision.pdf](http://feedstockreview.ornl.gov/pdf/billion_ton_vision.pdf)>
- Petrulis M, Sommer J, Hines F (1993) Ethanol production and employment. *Agriculture information bulletin* No.678, U.S. Department of Agriculture Economic Research Service.
- U.S. Congress (2000) Biomass Research and Development Act of 2000, Pub. L. 106-224, Sections 301-310