

BIOMASS의 생물학적 전환

— 돼지감자로부터 알코올 생산

金 哲

〈亞州大學校 工大學長〉



세계적인 석유과동 이후에 바이오매스이용에 대한 연구개발활동이 활성화되어 있다. 에너지 측면으로만 보면 원자력, 풍력 및 조력 등 각종 대체 에너지를 들 수 있지만 이들은 그 자체가 에너지 이외에 각종 화학공업의 원료를 공급하는 원유의 역할을 할 수는 없다. 더우기 세계 인구의 폭발적 증가로 오늘날 이미 세계 도처에서 당면하고 있는 식량문제는 흑색의 황금인 원유로서도 해결이 안되며 따라서 식량원을 찾는 문제는 에너지에 앞서 인류생존과 직결되는 문제임에 틀림없다.

바이오매스는 에너지 뿐만 아니라 각종 유기 합성물 및 식량원으로서도 잠재력이 있는 중요한 우리 자원이 아닐 수 없다. 바이오매스는 광합성으로 생성되는 모든 유기물을 포함하고 있으며 에너지로 추산하여 약 7×10^{18} Kcal의 방대한 양이 매년 재생되는 비고갈성 자원이다. 에너지 원으로서의 바이오매스는 비공해성이라는 장점도 아울러 지니고 있다.

바이오매스를 에너지로 전환하는 방법으로는 열화학적, 생물화학적 및 광생물학적공정등 주로 3가지 공정이 있으나 최종 산물의 내용과 형태에 따라 적절한 방법이 사용될 수 있다.

생물화학 공정은 박테리아, 곰팡이등 미생물을 사용하여 바이오매스를 에너지(알코올)로, 전환시키며 반응조건이 비교적 완만하고 사실상 수천년 전부터 이미 사용되어 온 방법이기도 하다. 특히 근래에 발달한 유전자 조작을 응용하여 미생물의 활성도를 높이는 방법이 개발되면 다른 공정에 비하여 극히 전망이 밝은 것으로 판단된다.

이 소고에서는 바이오매스를 생물화학적 공정을 이용하여 알코올로 전환하는 한 연구 개발내용을 개술하기로 한다.

각종 바이오매스 대상식물 중 돼지감자는 이미 가장 우수한 에너지작물의 하나로 미국, 프랑스, 소련, 캐나다 등 선진 공업국에서 크게 각광을 받고 있으며 이 작물의 에너지원으로서의 이용에 대한 연구개발이 집중적으로 진행되고 있는 실정이다.

돼지감자는 학명이 *Helianthus tuberosus* L.

로서 우리나라에서는 풍단지라고도 불려오고 있다. 원래 북미산으로 유럽에서는 오랜동안 동물사료로 재배되어 왔으나 17세기 이래로 사람의 식용으로 이용되기도 했다. 조기의 문헌에는 단위면적 당 돼지감자 생산량은 사탕무우와 비등하고 고구마 보다는 많은 것으로 보고되어 있고, 근래에 보고된 바에 의하면 수종의 돼지감자는 같은 재배지역 및 조건아래서 알코올로 발효할 수 있는 탄수화물 함량으로 보아 옥수수나 사탕무우보다. 생산량이 월등한 것으로 알려져 있다. 재배면에서 나쁜 기후조건에도 잘 자라며 내병성, 내충성이 강하고 저장도 다른 작물에 비해 용이 하므로 대체에너지개발 작물로서 이용 가치가 크다. <표-1>

<표-1> 돼지감자의 특성

- A PERENNIAL PLANT, GROWS ON ANY TYPE OF SOIL, THE RICHER THE BETTER, PREFERS LIGHTER, SANDY LOAMS
- REPRODUCE BY MEANS OF TUBERS
- WITHSTAND FROST, DROUGHT
- RESISTENT TO INSECTS AND DISEASES
- REQUIRES LESS FERTILIZER OR NO FERTILIZER
- STORAGE IS A PROBLEM, KEEP NEAR THE FREEZING POINT CAN STORE IN THE FIELD DURING THE WINTER MONTHS

<표-3> 돼지감자 품종과 바이오매스 생산량

VARIETY	ORIGIN	TUBER YIELD FRESH WT (TON)	TOP YIELD DRY WT (TON)
JA 2/K	SUWON	26.3	17.5
JA 3/K	SUWON	34.1	13.2
JA 5/J	JAPAN	25.0	13.9
JA 6/K	KANGWON-DO	19.7	13.0
JA 7 (MAMMOTH FRENCH WHITE)	WASHINGTON, USA	35.7	20.6
JA 9 (NAHODKA)	FRANCE	48.6	20.2
JA 10 (MEDIUS)	FRANCE	51.3	18.6
JA 11 (VIOLET DE RENNE)	FRANCE	46.2	15.7
JA 12 (D-19)	GERMANY	45.7	18.1
JA 13 (K 8)	USSR	48.1	20.6
JA 2/K MUTANT (γ IRRADIATION)	SUWON	APPROX 200	18.0

Basis : 1Hectare

돼지감자는 지상부의 경엽과 지하부의 괴경으로 나누어 생각할 수 있는데, 괴경에 저장된 탄수화물의 주성분은 저분자량의 후락토스 중합체인 이눌린이며 경엽에는 많은 량의 섬유소가 함유되어 있다<표-2>. 이눌린은 온수에 용해되어 후락토스로 가수분해가 용이하지만 경엽에 함유된 섬유소는 분해가 잘 되지 않는다.

<표-2> 돼지감자의 함유성분

TUBER		TOPS	
MOISTURE	79.74	MOISTURE	71
INULIN	17	SOLUBLE CARBOHYDRATE	15.8
ASH	1.25	CELLULOSE	8.8
PROTEIN	1.76	ASH	2
LIPIDS	0.24	PROTEIN	2
		LIPIDS	0.4
	100.00		100.00

본 연구에서는 우선 우수품종 선발을 위하여 우리나라 재래종을 비롯, 세계 각처에서 수집한 품종으로 재배 실험을 하였다. <표-3>에 기술된 바와 같이 프랑스와 소련품종의 1헥타아르당 생산량이 많았고, 특히 감마선으로 조사한 수원 변이종에서 생산된 괴경의 양은 다른 품종에 비하여 월등하여 감마선의 조사가 효과적인 품종개발의 한 방법임을 제시하고 있다.

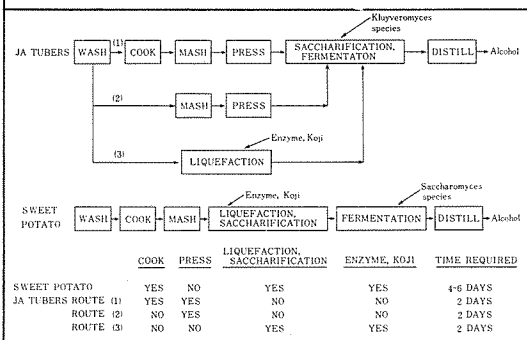
재배실험에서는 토질에 따른 생산량, 개화 및 괴경의 생성, 괴경과 경엽의 성장, 함유 총 당

량 및 각종 성분의 변화량과 이에 따른 최적 수확시기결정 등 광범위한 연구를 수행하고 있다.

◇ 괴경에서의 알코올 생산

수확된 돼지감자 괴경을 세척하여 찢후 마쇄된 괴경을 물과 섞어 압착하여 쥬스를 만든다. 이 쥬스에 균주를 성장시켜 발효하여 알코올을 생성한다. 개략의 공정도가 고구마 발효와 비교하여 <그림-1>에 도시되어 있고, 도시한 바와 같이 돼지감자의 발효에는 3가지의 공정을 적용할 수 있으며, 현재 이들 3공정에 의한 발효효과를 검토중에 있다. 고구마발효와 비교하여 이들 모든 공정이 단순하며 수율 및 생산 단가면에서 유리한 점을 가지고 있다. 발효에 사용되는 균주의 선발을 위해서 이눌생산 및 발효능력이 강한 수종의 이스트를 대상으로 실험을 하여 두종의 *Kluveromyces* 균주가 가장 효과적인 균주로 선정되었다. 이 균주를 사용하여 알코올발효의 최적조건을 검토하였으며 통기율 0.25vvm, 2.5ppm의 무기질소원인 $(NH_4)_2 HPO_4$ 의 첨가로 알코올 수율이 최대가 되었고, 이때의 온도는 30°C, 산도(PH)는 5.5임이 확인되고 있다.

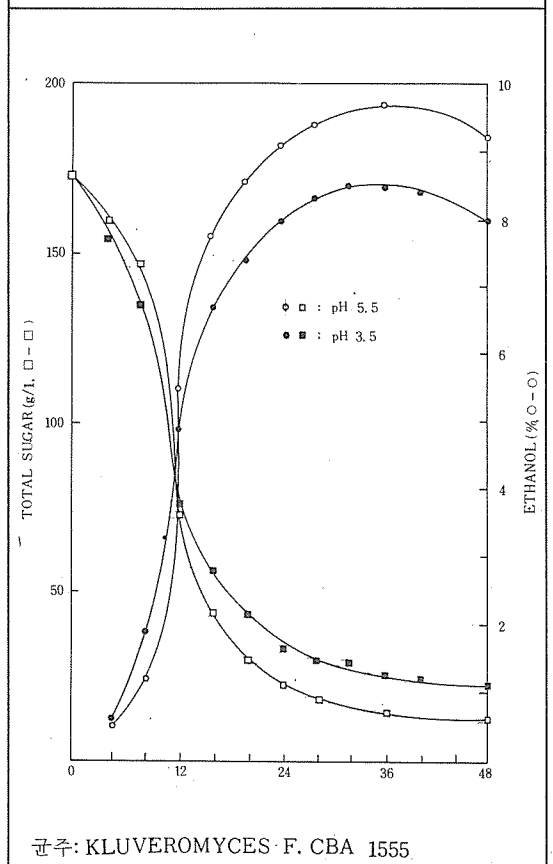
<그림-1> 괴경으로부터의 알코올 발효과정



<그림-2>에 돼지감자괴경 쥬스의 발효상태를 도시한 바와 같이 PH5.5에서 24시간 후의 발효는 81%, 28시간 후에는 83%, 그리고 32시간 발효후에는 수율이 약 86%에 이르고 있

다. 황산을 첨가하여 PH를 3.5로 조정된 경우는 발효전의 찌는 과정(Cooking step)을 완전히 제거할 수 있었으나 발효 수율이 24시간 후에 68%로, 32시간 후에는 76%로 줄어들고 있다.

<그림-2> 괴경으로부터의 알코올발효

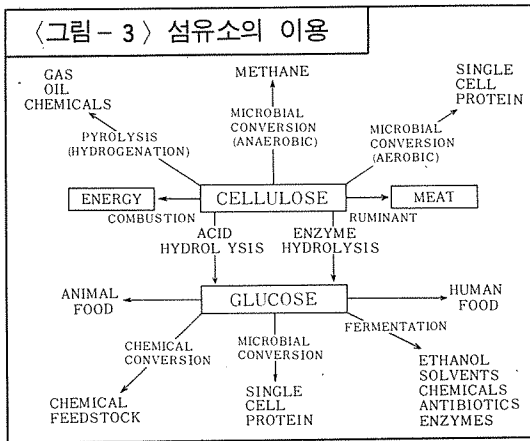


◇ 경엽에서의 알코올 생산

<표-2> 및 <표-3>에서 볼 수 있는 바와 같이 경엽의 생산량 및 단위 무게당 경엽에 함유된 당의 함량은 괴경과 비교할만 하다. 현재 돼지감자에 대한 연구는 주로 괴경에 관심을 모으고 있고 경엽은 건조한 후 연소열을 이용하는데 그치고 있다. 그러나 경엽의 생산량 및 조성으로 보아 경엽을 생물화학적 방법으로 전환하여 에너지생산에 이용한다면 돼지감자 이용

의 경제성은 물론 효율적인 자원이용을 크게 제고할 수 있을 것이다.

그러나 생물학적 전환에서 경엽에 다량 함유된 섬유소성분은 미생물에 의하여 직접 알코올로 발효되기 어려우며, 미생물에 의하여 생성된 효소로 우선 단당인 글루코스(glucose)로 전환하고 이어 글루코스를 발효시켜 알코올을 생성하는 방법이 있다. 섬유소 분해물인 글루코스나 혹은 직접 섬유소의 활용 범위가 <그림-3>에 도시되어 있거나 섬유소의 용도는 아주 넓으며 대체원유 에너지로서도 충분한 활용을 기대할 수 있다.



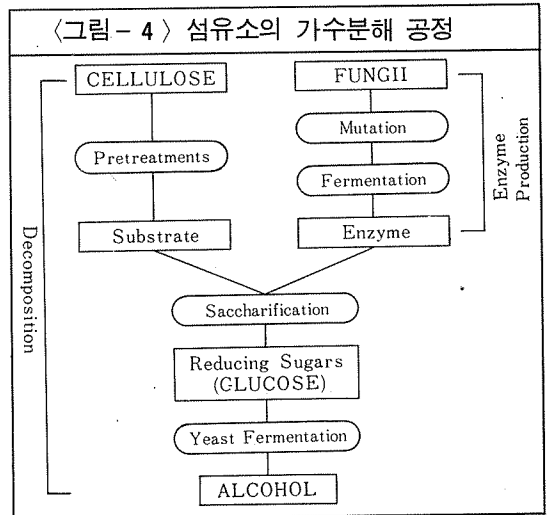
이와 같이 경엽의 이용을 위하여는 섬유소의 효율적인 전환이 중요한 인자라 할 수 있다. 경엽에 대한 연구는 *Tricho derma viride*로부터 얻어진 효소를 이용, 섬유소를 글루코스로 분해하는 공정에 중점을 두었다. 효소에 의한 섬유소 분해과정 연구는 <그림-4>에 도시한 바와 같이 효소생성분야와 섬유소 분해분야로 크게 구분되고 각 분야 공히 효율적인 섬유소 분해를 위해 결정적으로 중요하다.

본 연구에서는 우선 섬유소를 글루코스로 전환시키는 기초 반응기구를 규명하여 이로부터 반응속도를 정량적으로 표시하는데 일차적 목표를 두고 있으며 이들 자료는 앞으로의 공정 및 공장설계에 기본자료로 필요하다.

기초반응기구를 규명키 위하여 순수 섬유소 가수분해에 포함될 수 있는 다음 단계를 고려하여 반응 모델을 설정하였다. (1) 섬유소 분말

에 의한 효소의 흡착, (2) 섬유소-효소 복합체 형성, (3) 복합체의 분해, (4) 생성물에 의한 반응 억제.

이러한 각 반응단계를 포함한 모델이 순수 섬유소에 대하여 잘 적용이 되고 있음은 이미 필자의 전 연구에서 확인된바 있다. 그러나 반응이 진행되어 감에따라 모델에 의한 반응을 추정이 반응초기에 비하여 정확하지 않음이 확인되어 본 연구에서는 마지막 반응단계에서의 반응억제현상이 반응생물의 섬유질 표면에 효소와 경쟁적으로 흡착함으로써 발생함을 규명하고 이에따라 억제과정 중 생성물 흡착을 정량화 하였다.



폐지감자의 경엽에는 순수 섬유소와는 달리 가용성 탄수화물, 조단백, 지방질 등 화합물이 함유되어 있고 반응억제현상에서 이들 화합물의 영향을 고려하여야 한다. 가용성 탄수화물은 섬유소 분해물인 글루코스나 저분자의 글루코스 중합체의 물리적 특성이 유사하므로 이들을 이른바 "Garbage can"으로 처리하여 이의 흡착을 아울러 정량화하므로써 순수 섬유소에 적용되는 반응모델을 수정 보완하였다.

효소생성분야는 종래의 회분식(batch) 발효조에 의한 효소생성을 2단계 유동반응기(CSTR)를 사용하여 미생물 성장 및 효소생성과정으로 분리하였으며, 각 단계에서의 성장 및 생성속도 정량화 연구가 수행되고 있다.

회분식발효에 비하여 연속식발효는 미생물 성장과 효소생성을 최적 제어함으로써 생성 수율을 높이고 연속조업에 의한 효소의 양산시스템 연구에 기여할 것으로 기대된다.

◇ 품종선발 및 재배

돼지감자의 품종을 수집, 비교하여 우수품종을 선발하고 우리나라의 환경에 적당한 재배방법을 개발하기 위하여 실험을 실시하였다. 국내 11종, 해외 14종을 수집하였으며, 해외의 품종은 품종별 특성이 대체로 뚜렷하고 우리나라의 기상 및 토양에 잘 적응하였다.

품종간 피경수량을 보면, 유럽계 품종 Medius (프랑스), Fuseau 60 (프랑스), Nahodka (소련) 등이 4.8t/10a 이상으로 비교적 다수성으로 나타났으며 2, 4 및 6Kr의 감마(γ) 선을 피경에 조사(irradiation) 한 JA2와 JA3 품종에서 새로운 변이개체가 발생하였다. 조사된 후 지상부 생육은 지연되고 키가 별로 크지 않았으나 피경의 크기는 다양하여져 거대형이 나타났고 따라서 피경수량이 매우 높아질 가능성이 있음을 알게 되었다.

피경의 파종은 5월말까지 완료하여야 정상적으로 생육하였으며 소량의 석회, 질소분 등 비료분은 피경의 생산량을 거의 2배로 증가 시켰다.

돼지감자가 개화를 시작할 무렵 줄기의 탄수화물 함량이 최대에 도달하여 건물(dry matter) 중의 38%가 탄수화물이었고 그 후 피경이 형성되기 시작함에 따라 줄기의 탄수화물은 급격히 감소하여 이때 피경의 총 당함량은 70% 내외로 분석되었다.

◇ 생산시스템의 개발

이 부분에서는 수확의 기계화 시스템을 확립하고자 지상부의 수확은 낫을 사용하는 인력 예취방법과 휴대용 동력 예취기를 사용하는 기

계적 예취방법을 비교 검토하고 있고 피경의 수확에 대하여도 인력 및 기계적 굴취방법을 사용하여 연구를 수행 중이다.

이상과 같이 돼지감자를 연료용 알코올로 전환하는 연구가 수행중이나 실제 응용성을 위하여 경제성 검토가 필요한 당연하다.

현재까지 얻어진 연구자료를 기초로 돼지감자 생산 및 피경으로부터의 알코올 생산비용을 고구마와 비교하여 검토하였다. 이 결과 돼지감자의 생산단가는 고구마와 비교하여 약 1/3로 추정되고 있으나(표-4) 이 문제는 연구가 계속 되어 좀 더 정확한 자료가 축적되면 자세한 검토가 가능하리라 본다.

〈표-4〉 돼지감자 생산비추정

	Basis : 1ha	
	JA	SWEET POTATO
SEED TUBERS	\$ 79	\$ 158
FERTILIZERS		
INORGANIC	42	85
ORGANIC	63	127
PESTICIDES	-	9
CONSUMABLES	21	21
HARVESTER	24	24
AUXILIARIES	6	6
DEPRECIATION	14	14
MAINTENANCE & REPAIR	13	13
SUBTOTAL	\$ 262	462
LABOR	405	986
	667	1448
PRODUCTIVITY		46.2t 28.9t
TUBERS TOPS (Dry Matter)		15.7
PRODUCTION COST OF TUBERS (\$/TON)		14.4 50.1
PRODUCTION COST OF TUBERS (\$/TON)		85 251
(Based on fermentables)		

알코올로 전환시 비용을 감안하면 경제성은 높아지고 더우기 경엽을 동시에 사용하면 알코올 생산단가는 고구마와 비교하여 더욱 제고될 것이 틀림없고 대체에너지자원으로서 돼지감자의 이용은 전망이 밝다 하겠다.

주 : 이 원고는 한국과학재단 지원 연구 <공동연구진>: 목영일, 유연우(아주대), 김수일, 이호진(서울대)의 보고서 중에서 발췌한 것이다.