

# 제6장 국·내외 휘발유 대체 바이오에너지의 기술개발 연구현황 분석

한국석유관리원 녹색기술연구소

김재곤 박사(jkkim@kpetro.or.kr)

## 1. 국외 휘발유 대체 바이오에너지의 기술개발 연구 동향

- 미국과 EU 모두 다양한 대체에너지를 개발 보급하기 위해 정책적 노력을 집중하고 있으며 제2세대 바이오연료 생산 기술개발에 주력하고 있음.
- 즉, 비식용원료인 목질계 원료로부터 자국의 휘발유 대체연료인 바이오에탄올 기술개발에 집중하고 있는 실정임.

### 가. 유럽의 바이오연료 기술개발 현황

- EU 또한 전분으로부터 에탄올의 경제적 전환을 위한 새로운 효소와 공정 시스템 개발을 비롯하여 FAME, FAEE 등 유도체 생산을 위한 새로운 촉매공정기술 개발 및 유지작물 이용법 개발, 리그노 셀룰로오스 바이오매스로부터의 가스화에 의한 연료 생산 등 다양한 연구개발이 추진 중이며, 2020년 이후 제2세대 바이오연료의 대량 생산을 목표로 하고 있음.
- EU에 의해 설치된 바이오연료 전문검토기관인 BIOFRAC(the Biofuels Research Advisory Council)는 바이오연료에 대한 장기적 기술목표 및 비 기술적 목표와 관련하여 「Biofuels in the European Union - A Vision for 2030 and beyond」의 초안을 2006년 3월 발표하였음.
  - 동 초안은 중기적(2010~2020)으로 도입확대가 기대되는 제2세대 바이

오연료(BTL 및 NExBTL)에 대한 내용을 포함하며, 2010년까지 제2세대 바이오연료의 기술개발 단계로 평가하고 있음.

**<표 6-1> EU의 1세대 및 2세대 바이오연료 분류**

제1세대 바이오연료			
종류	명칭	바이오매스원료	생산기술
바이오에탄올	- 기존 바이오에탄올	곡류	가수분해+발효
순식물성 유	- 순식물성 유(PPO)	유량작물(예: 유채 등)	압착 추출
바이오디젤	- 에너지작물 BDF - 유채 메틸에스테르(RME) - 지방산 메틸/에틸 에스테르(FAME/FAEE)	유량작물(예: 유채 등)	압착추출+에스테르교환
바이오디젤	- 폐식용유 바이오디젤(FAME/FAEE)	가정, 상업용 폐식용유	에스테르교환
바이오가스	- 정제 바이오가스	Wet계 바이오매스	메탄 발효
바이오ETBE	-	바이오에탄올	화학합성
제2세대 바이오연료			
종류	명칭	바이오매스원료	생산기술
바이오에탄올	- 셀룰로즈계 에탄올	셀루로오스계 원료	고도가수분해+발효
합성 바이오연료	- BTL - FT경유 - 바이오 합성경유 - 바이오메탄올 - 혼합알코올 - 바이오DME	셀룰로즈계 원료	가스화+합성
바이오디젤(제1세대와 제2세대 복합형)	- NExBTL	식물성유/동물성유지	수소화 정제
바이오가스	- SNG(합성 천연가스)	셀룰로즈계 원료	가스화+합성
바이오수소	-	셀룰로즈계 원료	가스화+합성 생물학적 공정

출처: Biofuels in the European Union - A Vision for 2030 and beyond(BIOFRAC, 2006. 3)

**<표 6-2> EU의 바이오에너지 기술개발 로드맵**

단계	기간	목표
1단계	단기(~2010)	현존 기술 향상 2세대 바이오연료(리그노셀룰로직 바이오매스)와 바이오 refinery의 R&D
2단계	중기(2010~2020)	2세대 바이오연료 생산의 정착 바이오 refinery개념 정립 :리그노셀룰로직 바이오연료와 통합된 바이오 refinery 공정 향상을 위한 지속적 R&D
3단계	장기(2020 이후)	2세대 바이오연료의 대량생산 : 통합된 바이오 refinery 정착

출처 : EU Biofuels Research Advisory Council(2006)

- EU의 각 국가별 기술 개발과제에 대해서는 앞에 기술한 바 있으므로 EU 차원에서 수행중인 주요 기술 개발과제에 대해 요약하면 다음과 같음.

**① 1세대 바이오연료**

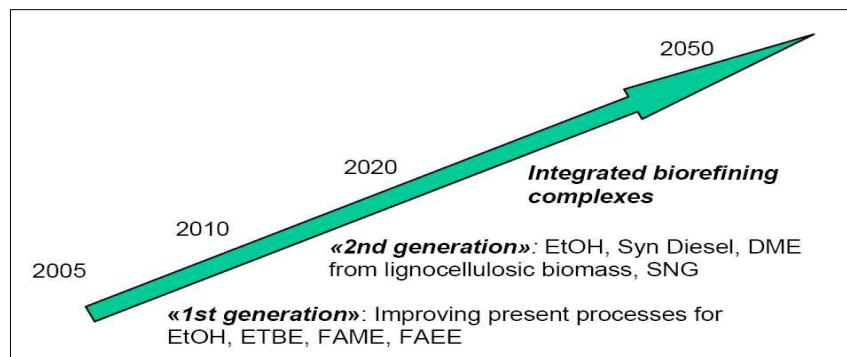
- 에너지 절약형 바이오에탄올 정제 기술 개발
  - 발효 에탄올의 농축에 적합한 투과 증발막 기술 개발로 증류 비용 30~50% 절감
  - 무수 에탄올 제조에 적합한 막 분리 기술 개발로 기존 공정 대비 80% 비용 절감
- 도시 배출 유기성 폐기물과 에너지작물의 바이오연료화 공정 개발
- 바이오에탄올-ETBE 병합 양산 공정의 실증 사업에 대한 타당성
- 섬유소계 바이오에탄올의 공정 효율 향상 기술
- 중장기적으로 목질계 바이오에탄올의 생산 비용을 10~20% 절감하는 것을 목표로 함.
- 고수율 연속 바이오에탄올 발효 공정 개발
- 기존 공정 대비 바이오에탄올 생산 비용의 20% 이상 절감 및 바이오에탄올 생산성 25 g/l-h 달성 목표
- 동물성 우지 및 폐식용유로부터 바이오디젤 생산 공정의 실증

## ② 2세대 바이오연료

- 섬유소계 바이에탄올 생산 공정의 경제성 향상 기술
- 수소 함량이 높은 합성 가스 생산 기술
- BtL 생산 기술
- 바이오수소 생산 기술 개발
- 초임계수를 이용한 바이오매스로부터 수소 생산
- ABE(Acetone-Butanol-Ethanol) 발효 공정 및 공정 균주의 유전자 조작 연구
- 도시배출 유기성 폐기물과 바이오매스의 당화 및 발효기술
- 오탄당의 고온 연속 에탄올 발효기술

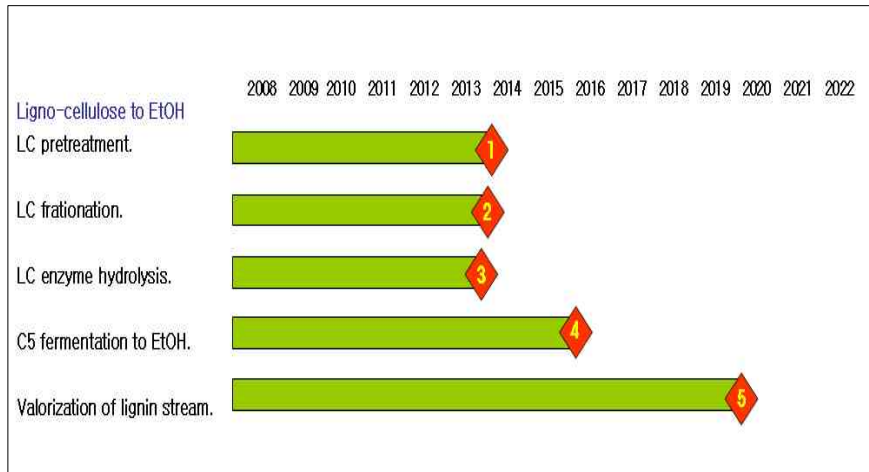
## ③ 기술 개발 로드맵

- EU의 바이오연료 기술개발 총괄 로드맵을 <그림 6-1>에 나타나 있음.
  - 그림에 나타낸 바와 같이 EU는 2010년대 초반까지는 기 상용화된 1세대 바이오연료의 보급을 활성화하는데 필요한 애로기술들을 중점적으로 연구하는 것으로 되어 있으며, 동 로드맵에서는 2020년까지 섬유소계 바이오매스를 원료로 생산하는 2세대 바이오연료 생산 상용화 기술의 확보를 제시하고 있음.
  - 궁극적으로는 바이오매스를 원료로 모든 석유 파생 화학제품을 생산하는 복합 바이오 리파이너리 기술의 상용 공정을 2050년까지 개발하는 것으로 되어 있음.

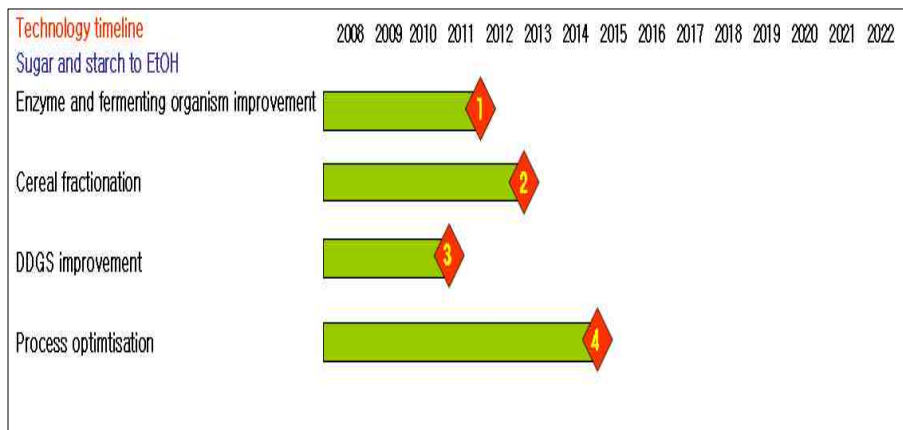


<그림 6-1> EU의 바이오연료 기술 개발 로드맵

- 각 연료에 대한 세부 기술로드맵은 <그림 2-42>~<그림 2-46>에 나타냄.
  - 바이오디젤 관련 연구는 2018년까지 수행하며 가장 애로기술인 글리세린의 고부가 제품화는 2018년까지 연구하는 것으로 제시하였음.

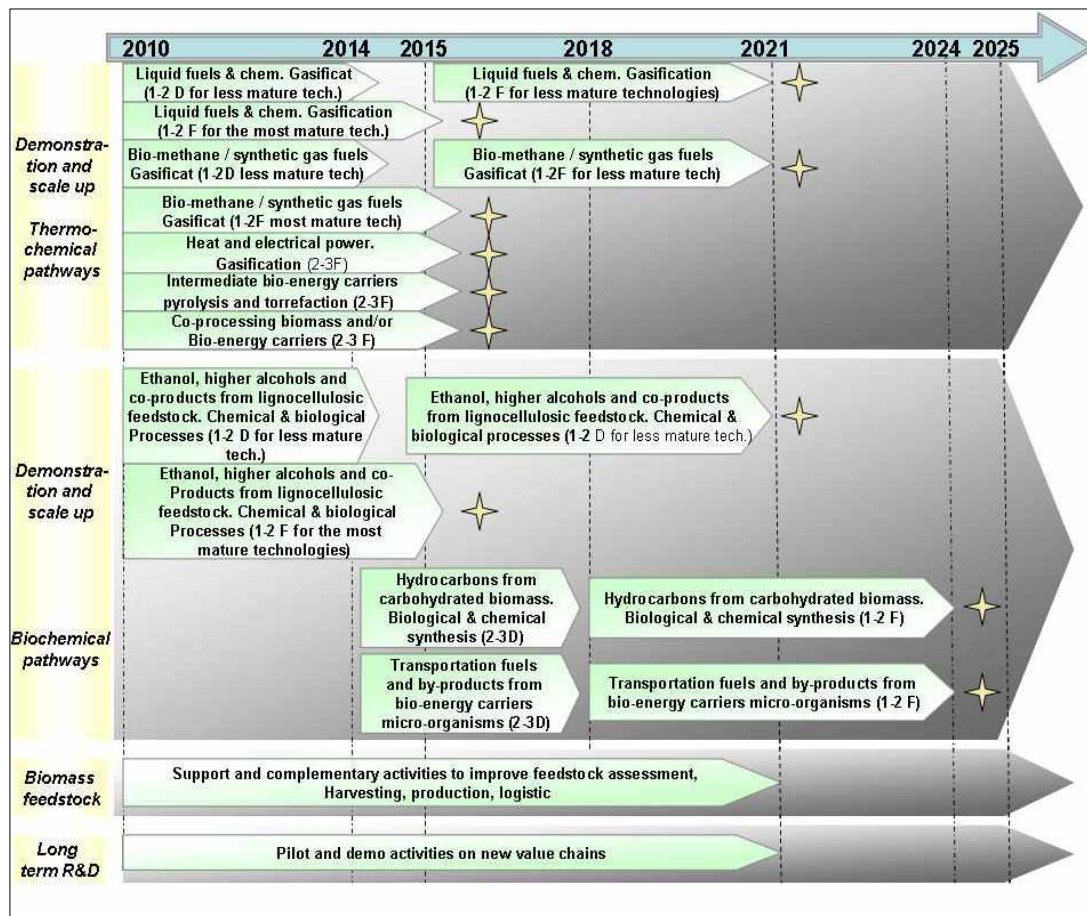


<그림 6-2> EU의 전분질계 에탄올 기술 개발 로드맵



<그림 6-3> EU의 셀룰로스계 에탄올 기술개발 로드맵

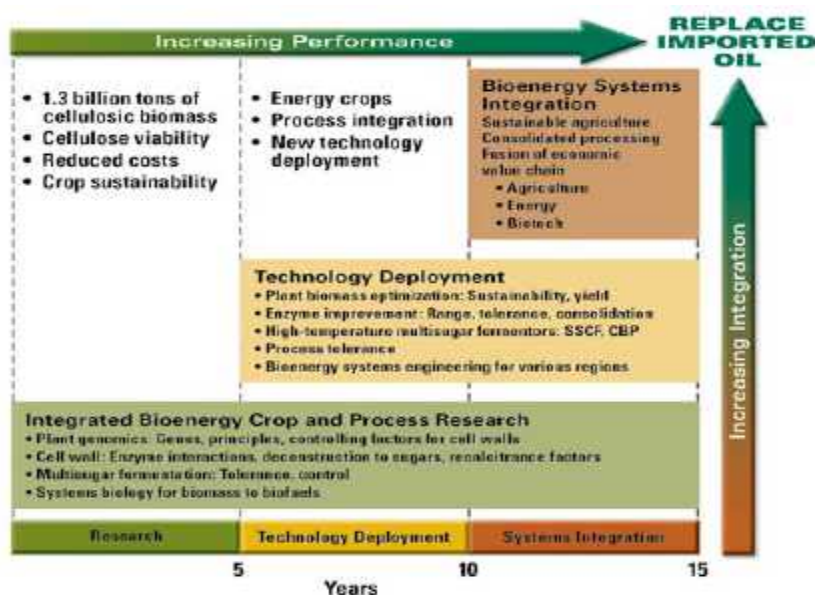
- 또한 2009년 EU는 2020년 에너지 믹스에 있어서 적어도 14%의 바이오 에너지 보급을 위하여 "저탄소 기술개발(SET-Plan)"이란 중장기 기술개발 계획을 설정하였음.
- 리그노 셀룰로오스계 바이오매스 원료 등과 같은 지속가능성 기준을 만족한 바이오연료의 60%에 의해 60% 온실가스 감축을 위한 상업적 이용 기술개발을 목표로 하고 있으며 이를 통하여 2020년 이후에는 바이오연료의 경제적 대량생산이 가능할 것으로 전망하고 있음(그림 2-47).



<그림 6-4> EU의 저탄소 기술개발 중장기 계획

## 나. 미국의 바이오연료 기술개발 현황

- 미국은 휘발유 대체가능한 제2세대 바이오연료인 셀룰로오스계 개발에 최선을 다하고 있으며, 미국의 셀룰로오스 바이오에탄올 생산기술 개발의 핵심은 바이오매스의 확보, 효소 생산 단가의 저감 및 효율적 강화를 위한 전처리 기술임.
- <그림 6-3>는 연구단계(0~5년, 기술개발단계(5~10년), 시스템 통합단계(10~15년)의 3단계 계획으로 추진되고 있는 미국의 바이오에너지 기술 개발 로드맵을 보여주고 있으며 바이오에너지 개발의 초점은 전술한 바와 같음.



<그림 6-5> 미국 셀룰로오스 바이오에너지 기술 개발 로드맵

출처 : U.S. DOE (2006)

- 미국의 DOE 지원으로 현재 목질계 원료로부터 바이오에탄올 생산 경제성이 높은 공정을 개발하기 위해 다양한 기술에 대해 파일럿 공정의 운전 연구가 진행 중이며 각 기술 옵션별 경제적 타당성을 분석 중임. 이러한 파일럿 공정 연구를 통해 2012년까지 상용화에 적합한 목질계 바이오에탄올 생산 기술을 확보할 예정임.

**<표 6-3> 미국의 목질계 에탄올 생산 파일럿 실증 연구 현황**

주관 기관	원료	적용 기술	생산 용량, 천kL/년	지원규모, 10 <sup>6</sup> \$
Abengoa	농산부산물, 억새	열화학/바이오	41	76
Poet	옥수수 부산물	바이오	90~108	80
Iogen	농산부산물, 억새	바이오	65	80
Blue Fire	목질계	강산/바이오	68	40
Range Fuels	목질계	열화학	144	76
Alico	목질계	열화학/바이오	50	33

- 이를 통해 미국의 DOE는 목질계 에탄올 생산비용을 2015년까지 \$0.25/L로 낮춘다는 목표를 제시한 바 있으나 효소 전문회사인 Novozymes Inc는 2015년 목질계 에탄올 생산 단가를 \$0.45/L로 제시한 바 있음(표 2-56).
- 미국의 DOE는 자국의 풍부한 목질계 원료로부터 효율적으로 바이오연료를 생산할 수 있는 원천 기술 확보를 위해 JBEI, EBI 등의 대형 프로젝트를 2008년 착수하였음.

**다. 일본의 바이오연료 기술개발현황**

- 일본은 자국에서 공급 가능한 목질계 원료(건축 폐목재 등)로부터 가솔린 대체연료인 에탄올을 생산하는 기술 개발을 집중 추진 중임. 특히 수송용 바이오연료 R&D 강화를 위해 2007년 “Bioenergy Japan 전략” 수정안 발표
- 일본은 기술 개발을 통해 2015년과 2030년까지 목질계 에탄올 생산 비용을 각각 40 엔/L와 20 엔/L로 낮춘다는 목표를 제시한 바 있음.



**<표 6-4> 미국과 일본의 목질계 에탄올 기술 개발 목표**

년도	미국1)		일본2)
	보급 목표, 104 kL/년	생산 단가, \$/L	생산 단가, 엔/L
2005	-	0.62	-
2010	36	0.36	-
2015	1,080	0.25 (0.453))	40
2022	57,600	0.17	20 (2030년 목표)

1) 미국 DOE (2007), 2) 일본 MITI (2007), 3) Novozymes Inc (2009)

## 2. 국내 휘발유 대체 바이오에너지의 기술개발 연구 동향

### 가. 국내 바이오에탄올 기술개발 현황 및 전망

- 바이오에탄올 관련연구는 1980년대 후반부터 지속되어 왔으며, 균주 개발, 전처리 공정 개발, 당화 공정 개발, 환경성 연구 등 요소 기술을 중심으로 발전해왔음.
  - 전분 당화를 위하여 전분을 직접 이용할 수 있는 효모 균주를 세포 융합법, 유전자 재조합법에 의해 제작하는 방법을 개발함(표 6-5)
  - 발효균주인 효모의 에탄올 생산성을 높이기 위하여 당내성, 알콜내성, 고온 내성, 고생산성 균주를 자연계에서 분리, 돌연변이, 세포융합법 등에 의해 개발함.
  - 전분질계가 아닌 원료로서는 이눌린, 과일 등의 폐농산물, 그리고 유가공 폐기물들로부터 에탄올 제조의 가능성을 보여줌.

<표 6-5> 최근 5년간 바이오에탄올 관련 R&D 현황

과 제 명	주관기관	수행 책임자	사업 기간	총사업비(천원) (정부지원)
바이오에탄올 혼합연료유 도입을 위한 실증평가연구	한국석유 관리원	정충섭	2006.8~ 2008.7	4,996,000 (2,496,000)
연료용 바이오에탄올 탈수용 투과증발 막 분리기술 개발	한국에너지 기술연구원	조철희	2006.12 ~2010.1	1,278,000 (948,000)
식물성 폐기물로부터 연료용 에탄올 생산 공정 개발	(주)배상면주가	정창민	2006.12 ~2008.11	878,000 (638,000)
해조류를 이용한 바이오에너지 생산 타당성 연구	한국생산 기술연구원	김경수	2007.6~ 2007.12	50,000 (50,000)
목질계 에탄올 생산 공정의 상용화를 위한 기반 구축 방안 도출	한국에너지 기술연구원	이진석	2008.10 ~2010.7	312,000 (312,000)
홍조류 유래 바이오에탄올 생산기술개발	한국생산 기술연구원	김용진	2008.10 ~2011.7	3,000,000 (3,000,000)
섬유소계 바이오매스 분별/당화를 위한 연속공정 및 장치 개발	단국대학교 산학협력단	오경근	2008.10 ~2011.7	226,000 (226,000)
당화 바이오매스를 이용한 탄화수소계 바이오에너지 생산 균주 및 공정 최적화 원천기술 개발	서강대학교 산학협력단	이진원	2008.10 ~2011.7	1,016,000 (1,016,000)
미생물 발효공정에서 Ljungdahl 경로 및 유전자 제어를 통한 합성가스로부터 에탄올 생산기술개발	한경대학교 산학협력단	홍성구	2008.12 ~2011.9	934,000 (934,000)
갈조류 유래 바이오에탄올 생산을 위한 고효율 당화공정 원천기술 개발	신라대학교 산학협력단	이재화	2009.06 ~2012.05	382,000 (382,000)
비천연계 C6 합성연료 생산을 위한 바이오융합 화학기술 개발	한국과학 기술연구원	상병인	2009.06 ~2012.05	668,000 (668,000)
(총괄)해양 바이오연료 생산을 위한 Pilot Plant 구축사업	바이올 시스템즈(주)	임동중	2009.12 ~2012.11	
(세부1)Pilot Plant(500L/day 이상)구축을 통한 해조류 바이오에탄올 상용화 설비 Engineering 및 생산 공정 개발	바이올 시스템즈(주)	임동중		10,800,000 (6,900,000)
(세부2)차세대 바이오연료 생산을 위한 해조류 전처리 기술개발	SK에너지(주)	김춘길		4,200,000 (2,100,000)

○ 최근에는 바이오에탄올 보급을 위한 상용화 기술개발과 원료 수급 문제 해결을 위해 비식용 원료(식물 폐기물, 해조류 등)를 대상으로 한 생산 기술 개발도 추진 중임.

- 목질계 원료 연구는 삼림청 주도하에 전처리 기술개발을 하고 있으나, 전처리비용이 과다한 문제와 목재를 운반, 수집하는 비용의 절감 방안을 찾지 못하고 있음.
- 해양조류도 2009년 농수산식품부에서 발표한 “해조류 바이오매스 통합 적 활용 방안” 중간보고에서 바이오에탄올 생산만으로는 경제성을 확

보하지 못하며 생리활성물질, 펄프 등 부가가치가 높은 물질을 우선 추출하고 나머지로 바이오에탄올을 생산 공급하는 방안으로 진행되고 있어 상용화에 많은 시간이 소요될 것으로 예상됨.

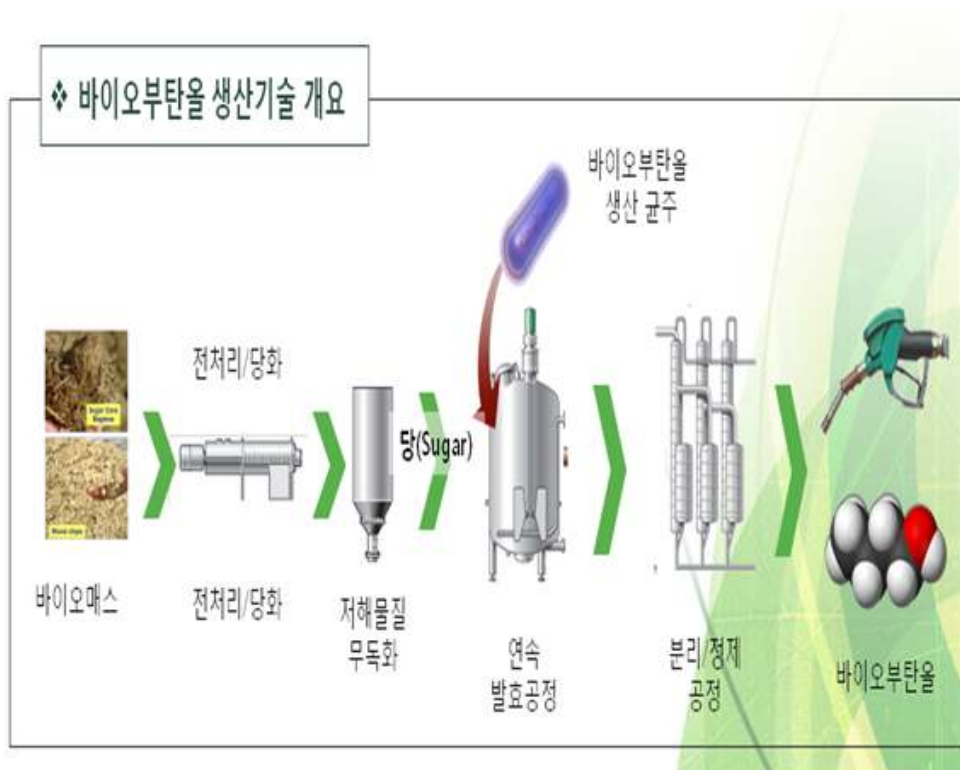
- 목질계 바이오에탄올은 옥수수 바이오에탄올과 비교하여 원료의 수급비용 측면에서 유리한 반면, 전처리과정을 비롯한 효소와 발효공정 등 전반적으로 많은 비용이 소요됨.
  - 각 공정별 요소기술에 대한 R&D가 필요하고, 특히 전처리 부분과 효소 비용이 많은 부분을 차지하고 있어 이에 대한 집중이 요구됨.
  - 국내에서는 목질계 원료(나무)의 바이오에탄올 생산을 위한 전공의 pilot 연구가 진행된 바 있으며, 이후 나무보다 비교적 전처리가 용이한 옥수수 대, 갈대 등의 초본식물에 대한 전처리와 당화기술에 대한 연구가 수행됨.
  - 목질계 원료의 바이오에탄올 생산 경제성은 전처리 기술에 많은 영향을 받고 있어 최근에는 나무보다는 볏짚과 같은 초본계 식물 및 동남아 등지에 산재해 있으면서 비교적 부드러운 목질계 원료의 전처리 기술개발에 연구가 집중되고 있음.
- 해조류 이용 바이오에탄올 생산기술은 옥수수나 사탕수수 등을 활용한 생산 공정과 비슷하게 미생물 발효를 통해 에탄올을 생산하므로 바이오매스를 전처리 과정을 통해 발효가 가능한 당(단당류)으로 분해시키고, 이들 단당류에 발효 미생물을 투입해 에탄올을 생산함.
  - 옥수수나 사탕수수의 경우 단당류의 일종인 포도당이 100%인 반면 해조류는 그 종류에 따라 생산가능한 단당류가 다양하며 생산된 당 성분을 효율적으로 뽑아내는 전처리 기술과 미생물 발효기술이 매우 중요함.
  - (주)바이오시스템즈는 현재 홍조류의 일종인 우뭇가사리를 이용한 바이오에탄올 생산 R&D를 수행하고 있으며, 우뭇가사리 1톤을 넣고 235~299 L의 에탄올 생산이 가능하다고 보고함.
  - 한국해양연구원은 녹조류의 일종인 구멍갈파래를 이용한 바이오에탄올 생산기술을 연구하고 있으며, 화학물질을 사용하지 않는 고압액화기술과 고효율 발효균주 개발을 통해 최대 160 g/L의 에탄올을 생산하였다고 보고함.
  - 지식경제부는 2009년 말부터 “해양 바이오연료 생산기술 실증 및 상용

화” 과제를 통해 연근해 및 외해 해조류 대량 생산, 해조류로부터 에탄올 생산기술 및 파일럿 실증기술을 개발할 예정임.

- 국토해양부는 “해양조류 대량 생산 및 에너지 전환원천기술 개발” 중장기 사업을 추진 중임.
- 농림수산 식품부는 해조류 바다 숲 조성, 해조류 바이오매스의 그린에너지화 및 해조류를 활용한 식품·의약품 기술을 개발할 예정임.

○ 또한 국내 정유사 중 GS칼텍스는 2007년부터 지경부 에너지기술혁신사업의 일환으로 “비식용 바이오매스를 이용한 바이오부탄올 생산기술 개발”을 추진 중에 있음.

- 목질계 바이오매스 전처리기술, 부탄올 연료 고생산 균주개발 및 고효율 발효/분리 정제기술 등을 개발 중에 있으며, 향후 상업 플랜트까지 구축 계획에 있음.



<그림 6-6> GS칼텍스의 바이오부탄올 생산기술 개략도