제주 바이오에너지산업의 가능성 분석
– 바이오에탄올 개발 중심으로–

제주하이테크산업진흥원 전략기획실장 **김 창 숙**

1. 서론

최근 전 세계는 고유가와 지구 온난화 문제에 직면하면서 에너지 절약과 신재생에너지 개발에 막대한 예산을 투입하고 있으며, 한국도 "신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법"을 수립하여 신재생에너지산업을 본격적으로 육성해 나가고 있다.

다양한 신재생에너지 자원들 중 바이오에너지(bioenergy)는 온실가스를 증가시키지 않은 특징과 더불어 농업을 중심으로 한 1차 산업과 깊은 연관관계를 갖고 있어 전 세계가 큰 관심을 두고 있다. 바이오매스로부터 생산되는 바이오에너지는 열, 전기뿐만 아니라 수송용 연료도 생산할 수 있기에 고유가에 대한 대체효과가 높다는 장점을 갖는다. 즉, 바이오에너지 사용시 발생되는 이산화탄소(CO_2)는 바이오에너지 생산원료인 식물체가 자라면서 광합성 작용을 통해 다시 흡수함으로 대기중에 CO_2를 늘리지 않는다는 특징으로 갖고 있어서, 선진국들은 바이오연료 보급 확대 통해 CO_2 감축 목표 달성과 에너지 안보를 지키는 이중의 효과를 얻으려 하고 있다.

현재 전 세계의 수송에너지 수요의 약 1% 정도는 바이오연료가 담당하고 있지만 2030년경에는 약 4~7%(약 92~147백만 톤의 오일)로 증가할 것으로 전망되고 있다. 이와 같이 세계 각 국이 바이오연료 공급량을 크게 증가시키고 있는 것은 경제성보다는 사회적 편익을 먼저 생각하는 보급정책을 펴고 있기 때문이다. 즉, 환경 보전 및 에너지 안보 측면과 교토의정서에 의한 온실가스 감축의무와 관련된 부담금을 바이오연료 개발을 통해 선행 투자하고 있는 것이다.

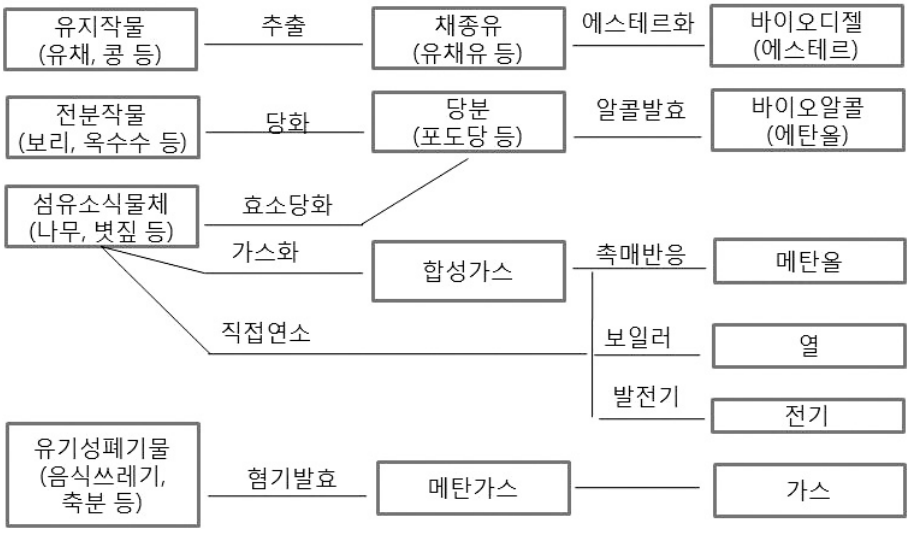
세계의 급변하는 신재생에너지 개발정책을 비롯한 바이오에너지 보급과 관련한 활발한 움직임 등을 고려할 때, 제주지역에서도 바이오에너지가 가질 수 있는 잠재력을 평가하고 향후 보급 방안을 적극 검토해 나가야 할 시점이 되었다. 제주의 대표 브랜드 "청정"의 입지를 강화시킬 뿐만 아니라 주력산업인 1차산업과 관광산업의 활성화 측면에서도 바이오에너지산업은 반드시 도입되어야 할 것이다. 특히 고립된 섬이라는 지리적 환경에서 유기성 폐기물을 재활용하는 바이오에너지산업은 폐기물처리와 에너지 생산이라는 일석이조의 효과를 가져다줄 것이다. 최근들어, 제주에서도 제주형 바이오에너지 개발을 위한 시도들이 부분적으로 추진되고 있다. 유채를 활용하는 바이오디젤 생산과 감귤박 및 해조류(갈파래)등의 폐자원을 이용한 바이오에탄올 생산에 대한 연구가 시작되고 있다. 이에 제주지역의 바이오에너지산업, 특히 바이오에탄올 개발 현황을 토대로 감귤박 및 해조류 활용 바이오연료 상용화의 가능성을 찾아보고자 한다.

2. 바이오에너지의 개념

바이오에너지는 바이오매스(biomass: 유기성 생물체를 총칭)를 직접 또는 생·화학적, 물리적 변환 과정을 통해 액체, 가스, 고체연료나 전기, 열 등의 형태로 전환된 에너지를 말하며, 바이오매스는 태양에너지를 받은 식물과 미생물의 광합성에 의하여 생성되는 식물체뿐만 아니라 균체와 이를 먹고 살아가는 동물체까지 포함하는 모든 생물유기체를 총칭한다. 즉, 썩을 수 있는 물질은 모두 바이오매스라고 지칭할 수 있는 것이다.

바이오매스의 근원은 식물이라 할 수 있는데, 식물체는 성상에 따라 크게 사람이 식량으로 사용할 수 있는 사탕수수, 사탕무와 같은 당질계, 곡물과 감자류 등의 전분질계와 식량으로 사용할 수 없는 셀룰로스계(초본, 임목, 볏짚, 왕겨 등의 농수산물) 바이오매스로 분류된다. 이와같이 바이오매스 자원 대부분이 농작물(사탕수수, 고구마, 옥수수, 콩, 감자류 등)과 농·임산 부산물(목재, 벼짚 등) 또는 유기성 폐기물(음식 쓰레기, 축분 등)로 이루어져 바이오에너지 산업은 농업과 매우 밀접한 관계를 형성하는 것이다.

바이오매스가 원료에 따라 전분질계, 셀룰로스계 및 유기성폐기물계로 나누어진다면, 바이오에너지 기술은 원료의 성상에 따라 고체, 액체, 가스 상태로 분류되고 있다. 따라서 바이오에너지 기술은 원료 바이오매스에 따라 각각 다른 활용기술이 적용된다(그림 1).



〈그림 1〉 바이오매스를 이용한 바이오에너지 종류

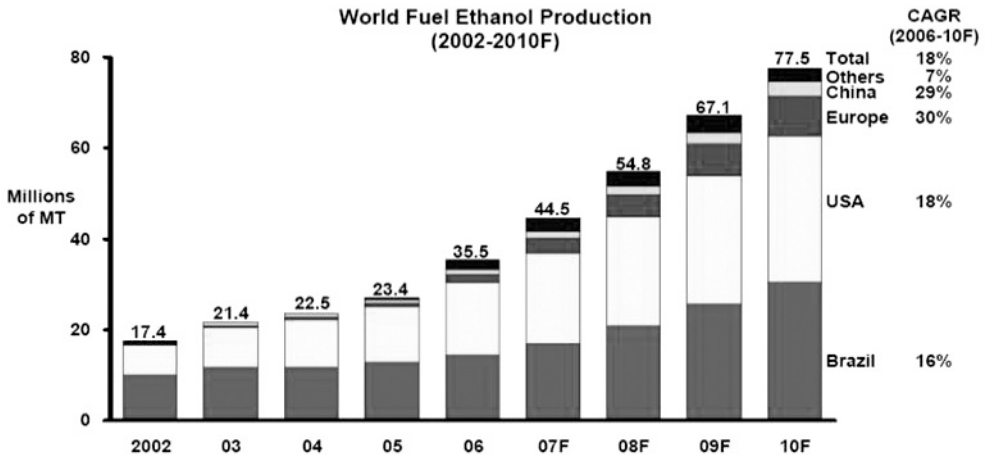
- 자료 : 신재생에너지 RD&D전략 2030, 에너지관리공단

3. 바이오에탄올 활용 및 기술개발 현황

휘발유 대체연료로 사용되는 바이오에탄올은 고유가와 지구 온난화 대응 수단으로 각광 받으면서 보급량이 급증하고 있다. 바이오에탄올 생산량은 지난 5년간 2배로 증가 하였으며, 향후 매년 20% 이상 늘어날 것으로 전망하고 있다(그림 2). 바이오에탄올의 세계 총 생산량은 약 2,700만 kℓ이며, 브리질이 가장 많은 1,100만 kℓ 정도로 전체의 40%를 생산하고 있다. 전 세계에서 생산되는 에탄올은 연료용(61%), 공업용(24%), 음료용(15%)으로 이용되는데, 세계 생산량의 절반 이상

은 수송용 연료로 이용되고 있다.

브라질, 미국, 중국 등은 바이오에탄올을 지속적으로 개발할 뿐만 아니라 보급량 증가을 위해 다양한 정책을 강구하고 있다(표 2). 특히, 이들 국가에서는 바이오에탄올 개발 및 보급사업을 자국의 농업과 연관시켜 대규모로 추진하고 있다. 유럽의 경우에는 수송부문에 있어서 연료전환의 중간단계로 바이오에탄올을 활용하는 정책을 추진하고 있고, 일본은 환경적 이익에 중점을 두어 에테르 계열의 바이오연료 개발에 집중하고 있다.



- 자료 : F.O. Licht (2007)

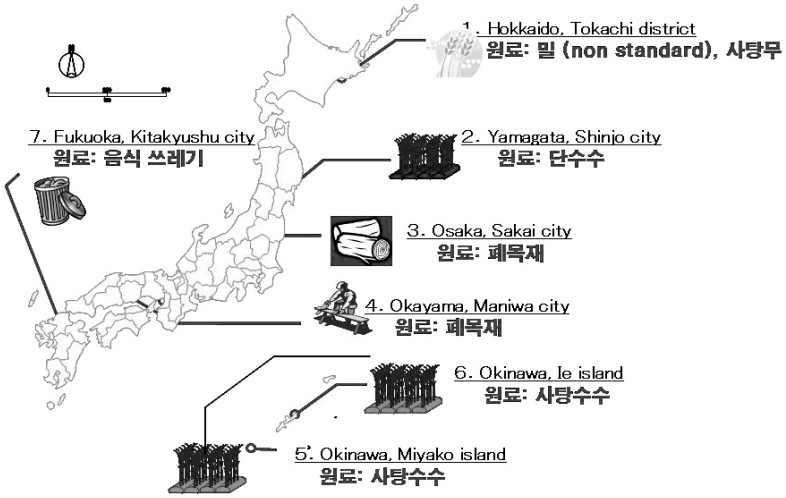
〈그림 2〉 전 세계 바이오에탄올 생산 현황 및 전망

〈표 1〉 세계 주요국가의 바이오에탄올 도입 현황

국가	방식	내용
미국	E10	옥수수를 원료로 한 바이오에탄올을 10% 혼합한 연료시판, '07년 240억 리터 생산
브라질	E20~85	사탕수수를 원료로 한 바이오에탄올 20~85% 혼합한 연료 시판
캐나다	E10	옥수수, 밀을 원료로 한 에탄올 10% 혼합연료 시판
프랑스	E20	일반차량에 바이오에탄올 20% 첨가한 연료 사용
스웨덴	E85	밀을 원료로 사용, 휘발유에 직접 혼합
호주	E10	사탕수수, 밀의 부산물을 원료로 이용, E25 도입 검토
일본	E5	'06년 E5를 거쳐 '11년 E10으로 단계적 도입
EU	E2	'10년까지 휘발유 사용량의 7%를 바이오연료로 확대예정
중국	E10	옥수수를 원료로 한 세계 3위의 에탄올 생산국, 흑룡강성 등 9개 지역 10% 혼합 의무화

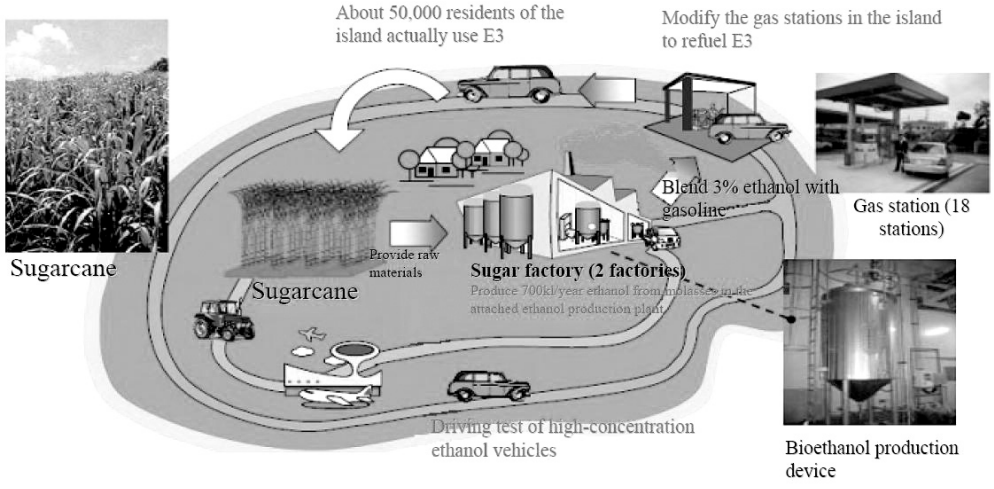
- 자료 : 신재생에너지저널 41호

미국은 바이오에탄올 원료로 대부분 옥수수(95% 정도)를 이용하고 있으며, 브라질은 전 세계에서 가장 바이오에탄올 가격 경제력이 있는 국가로 사탕수수를 주원료로 바이오에탄올을 생산하고 있다. 일본은 에탄올 원료자원이 거의 없는 나라로 각 지역에서 활용 가능한 원료를 대상으로 에탄올 생산에 활용하는 실증연구 사업을 활발히 진행하고 있다. 홋가이도의 밀, 오카니와 지역의 사탕수수, 중부지역의 음식물 쓰레기 등 유기성 폐기물을 원료로 에탄올을 생산하는 기술개발을 추진하고 있어(그림 3), 자원이 부족한 제주지역에 시사하는 바가 크다. 특히, 일본 환경성이 지원하는 carbon free island 프로젝트의 일환으로 미야코 섬에서 사탕수수를 원료로 생산하는 에탄올 시범 보급 사업은 많은 의미를 제시한다(그림 4).



- 자료 : METI, 2007

〈그림 3〉 일본의 바이오에탄올 시범 생산 및 보급 사업



- 자료 : METI, 2007

〈그림 4〉 일본 미야코 섬의 바이오에탄올 시범 보급사업

한편, 현재 상용화되고 있는 바이오에탄올 생산 기술은 식량자원으로 이용되는 당질계 또는 전분질계 바이오매스를 원료로 사용하고 있어 도덕적 문제뿐만 아니라 원료 수급의 문제도 발생되고 있다. 즉, 굶어 죽는 인구가 많은 현실에서 식량을 에너지원으로 사용하는 문제와 식량 수요가 늘어날 경우의 원료 수급문제가 생긴다는 우려가 점차 증가하고 있는 것이다. 이에 최근에는 도덕적인 문제를 해결하고 값싸고 원료수급이 용이한 셀룰로스계 바이오매스를 이용하는 바이오에탄올 생산기술 개발에 집중하고 있다.

한국은 1980년대 후반부터 전분질계 바이오매스 발효에 대한 연구를 시작으로 1992년에는 바이오에탄올을 생산하는 파일롯 플랜트 구축연구가 이루어졌고, 법규, 경제성, 유통체계 등의 확립을 위한 실용화 연구가 진행되었다. 그러나 에탄올 생산시 단가 저감의 한계, 유가 안정, 에탄올 공급에 따른 세수 결함 등의 우려와 정유업계의 반발로 바이오에탄올의 시장도입은 아직 이루지지 않고 있다. 현재 국내에서 생산되는 바이오에탄올 량은 약 40만 kℓ/년으로서 전량 식·음료용으로 활용되고 있을 뿐이다.

4. 제주의 바이오에탄올 개발 현황과 가능성

1) 오렌지 활용 바이오에탄올 생산 사례

미국 플로리다 주정부는 재생에너지 기술개발 프로젝트(Florida Renewable Energy Technologies Grants Program)에 오렌지 부산물로부터 에탄올 연료 생산기술개발 연구(Fuel Ethanol Production from Citrus Waste Biomass)를 수행하여 바이오연료 또는 고부가가치 부산물의 생산이 가능하도록 하고 있다. 플로리다 주에서는 연간 약 5백만 톤의 오렌지 박(orange waste)이 발생되고 있는데, 지금까지는 대부분의 오렌지 박을 pulp pellet 형태로 건조하여 소의 사료로 사용하고 있다. 그러나 최근에는 오렌지 박을 저가의 사료로 활용하기 보다는 고부가가치 제품으로 활용하기 위해 오렌지 박을 대상으로 고부가 물질인 리모넨(limonene), 펙틴(pectin) 등의 회수와 바이오에탄올 전환 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

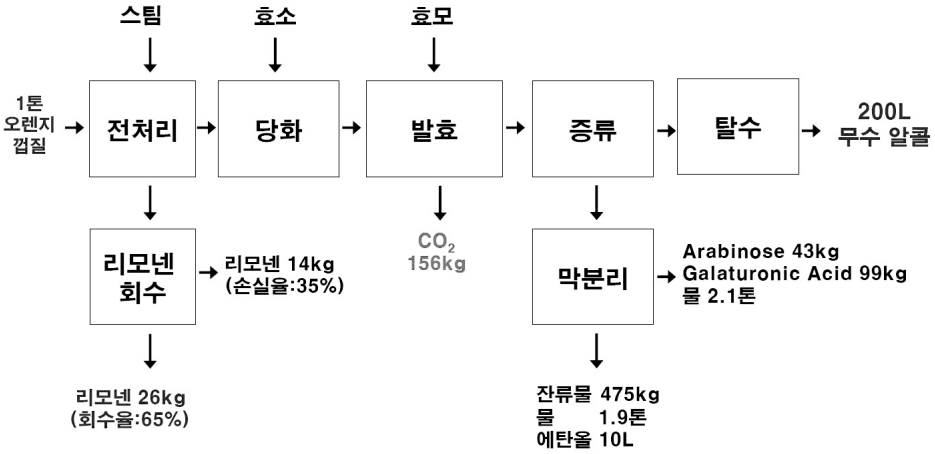
일반적인 바이오에탄올 생산 공정은 오렌지 껍질에 포함된 당류를 pectinase와 cellulose enzyme의 복합효소를 이용하여 가수분해시켜 glucose, galactose, galacturonic acid, fructose, arabinose 및 xylose 들의 혼합물로 변환시킨 후, 이들 단당류를 발효시켜 에탄올을 추출하는 공정을 거친다.

Cellulose –〉(가수분해)–〉 glucose –〉(발효)–〉 ethanol + CO_2

오렌지 박은 리그닌(lignin)을 포함하지 않아 리모넨을 회수하는 과정을 전처리에 포함시키는 것 이외에는 전분질계 원료로부터 에탄올을 생산하는 공정과 유사하며, 리모넨을 회수하여 판매하는 경우 에탄올 생산 단가를 30% 낮출 수 있어서 휘발유에 대해 가격 경쟁력을 가져 상용화가 가능할 것으로 분석되고 있다(그림 5). 이와 같이, 플로리다 주는 오렌지 박을 활용하여 연간 4 백만 겔론(gallon)의 에탄올을 생산하고 있어, 옥수수보다 저비용으로 바이오에탄올 생산을 가능케 하고 있다. 또한, 플로리다 주는 감귤가공과 에탄올 생산 공정을 한 장소에 설치하여 건축, 교통, 생산단가의 효율성을 유도하고 있는데, 이는 제주산 감귤박 이용 에탄올 생산시설 구축시에 시사점을 제공해준다.

2) 제주산 감귤박 활용 바이오에탄올 생산시험

제주의 감귤 총생산량은 향후 10년간 약 53~61만톤/년 정도로 예측되고 있고, 가공용으로 활용되는 비상품과는 약 12~14만톤 정도가 생산될 것으로 전망되고 있다. 따라서 감귤박 4.7~6.9



〈그림 5〉 오렌지 박으로부터의 에탄올 생산 공정도

만톤, 미숙감귤을 포함한 비상품과 13.6~23.6 만톤이 바이오에탄올 원료로 이용될 수 있는 것으로 분석되고 있다. 또한 제주산 감귤박 바이오에탄올의 경제성 분석은 바이오연료 상용화의 가능성을 제시하고 있는데, 생산단가 산출에서는 리터당 88원의 이익이 발생될 수 있으며, 감귤박이 생산되는 3개월간 공장가동시 생산 가능한 에탄올량은 약 1,800 kℓ로 산출되고 있다. 또한 동일 한 규모의 에탄올공장을 잔여 9개월 동안 가동할 경우 7,200kL을 생산할 수 있다는 분석은 제주 바이오연료산업의 가능성을 보여주고 있다.

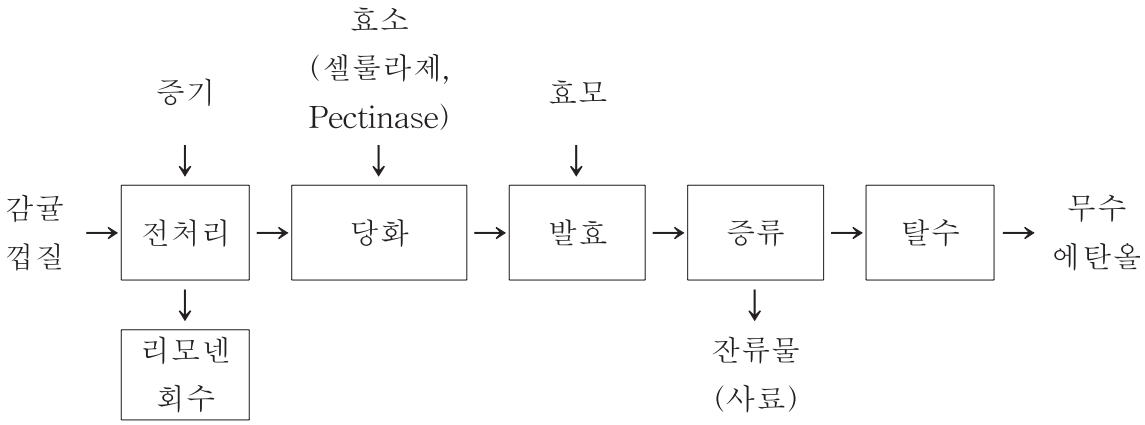
제주산 감귤박은 정유(essential oil) 뿐만 아니라 여러 종류의 플라보노이드(flavonoid) 배당체, 비타민 B_1, C 등 25종 이상의 기능성물질을 함유하고 있어 산업적 가치가 매우 높게 평가되고 있다. 특히, 감귤박은 발효가 가능한 유리당인 fructose (3.06%), glucose(2.91%), sucrose (3.94%)를 함유할 뿐만 아니라 flavonoides로서 hesperidin(194.6 ㎎/100g)과 narirutin(170.1 ㎎/100g)을 함유하고 있다. 그럼에도 불구하고, 감귤박은 가축사료(단미사료), 종이, 활성탄, 한약재료, 유기질 비료 및 식물배양 배지 등의 원료로만 부분적으로 활용되고 있을 뿐이다. 이런 측면에서 폐기되는 감귤박을 활용하여 고부가가치의 기능성물질을 산업화시키고 바이오에탄올을 생산하는 것은 커다란 의미를 갖게 한다.

감귤박에는 전분질계 또는 목질계 원료와 달리 리모넨이라는 미생물 성장 억제물질을 포함하고 있어 에탄올 발효를 억제하므로 전처리 과정에서 제거되어야 바이오에탄올 생산이 가능하다(그림 6). 제거되는 리모넨은 산업적 활용 가치가 높아 정제품으로 회수될 경우 높은 부가 수입도 가능하다.

제주산 감귤박을 cellulase, pectinase, β-glucosidase를 처리하여 당화시킨 결과 glucose, fructose, sucrose 등의 알코올 발효에 적용이 가능한 유리당으로 전환됨을 실험적으로 조사되었고, 건조된 감귤박에서 최대 61%의 고형성분이 발효 가능한 당으로 전환되는 것이 확인되었다. 이 결과는 오렌지 박의 당 전환율 약 60%와 유사한 값으로써, 미국 플로리다의 오렌지 박을 이용한 수송용 바이오에탄올 생산의 타당성과 유사하다고 볼 수 있다.

3) 해조류를 이용한 바이오에탄올 개발

최근들어, 해조류를 이용한 바이오에탄올 생산에 대한 관심이 급증하고 있다. 이는 식용작물 원료 바이오에탄올을 상용화하려는 움직임에 국제 곡물가격 급등 및 식량위기 초래를 걱정하는 국제



〈그림 6〉 감귤박으로부터 에탄올 생산 과정

사회의 비판적 시각 때문으로 여기고 있다. 즉, 해조류 바이오에탄올이 크게 주목 받는 것은 식량자원 고갈 문제를 해결하고, 원료값이 저렴해서 경제성이 높다는데 있다.

국내에서는 한국해양연구원, 한국생산기술연구원 등에서 우뭇가사리, 갈파래 등의 해조류를 이용한 에탄올 시험생산을 성공적으로 수행하고 있는데, 약 50%의 탄수화물을 갖는 갈파래가 바이오에탄올 생산원료로 적합하다고 평가되고 있다. 또한 바이올시스템즈 회사는 우뭇가사리 (갈락토스 60~70% 함유)에서 에탄올을 생산하는 기술을 세계 최초로 개발하여 상용화를 추진하고 있다. 현재, 우뭇가사리 1톤에서 약 250~300 리터의 에탄올을 생산하고 있다. 이 회사는 금호석유화학 및 전라남도 고흥군과 각각 MOU 체결을 통해 에탄올 상용화를 대규모로 추진하고 있는데, 약 10ha 규모의 해조류 양식장을 조성하며, 연간 10만톤 규모의 에탄올 생산시설을 짓고 2012년 상용화할 계획을 세우고 있다. 특히, 필리핀에 최대 100만ha 규모의 해조류 양식장을 무상 임대하는 MOU를 체결함으로써 바이오원료 대량 공급체계도 구축하고 있다.

제주지역은 녹조류(패래, 청각, 갈 파래 등) 가 60종, 갈조류(톳, 모자반, 감태, 갈래곰보 등)가 약 120종, 홍조류 (김, 우뭇가사리 등)가 약 340여종이 분포하는 해조류의 보고이다. 해조류 생산량은 '04년 기준 약 2,980톤이 생산되고 있는데, 톳과 우뭇가사리가 대부분을 차지하고 있다. 한편, 최근들어 제주 해안에 대량으로 밀려오는 녹조류인 갈파래는 연간 최소 1만 2천톤 정도가 생산될 것으로 분석되고 있고, 갈파래의 탄수화물 함량은 60.3%로서, glucose (13.3%), galactose(0.7%), xylose(6.9%), rhamnose 등 (39.4%)으로 구성되어, 바이오에탄올 원료로 적합한 것으로 평가되고 있다. 이와 같은 제주 해양환경은 해조류 활용 바이오에탄올 생산 전진기지로 적합함을 보여주고 있다.

4) 제주형 바이오에탄올 개발 방향

제주에서의 바이오에탄올 개발은 단순 경제적 측면보다는 제주의 대표 브랜드 clean(청정) 이미지와 연계하는 융·복합산업 육성의 개념에서 접근되어야 할 것이다. 일차적으로는 Carbon free island의 이미지를 부각하는 수준에서 시작할 수 있을 것이다. 감귤박, 갈파래 등의 폐기물 재활용 차원에서 바이오에탄올을 생산하여 E3 수준에서 시범 보급함이 적절할 것이다. 특히 감귤박인 경우 감귤가공 공장내에 에탄올 생산시설을 구축하여 순환적으로 에탄올을 생산하며 이용하는 방안을 고려할 필요가 있다. 또한, 중장기적으로는 억

〈그림 7〉 제주형 바이오에탄올 생산 모델(안)

새, 조릿대 등의 목재류를 활용하는 방안을 강구하며, 해조류 에탄올 생산을 위해 대형 해조류 양식장과 미세조류(microalgae) 양식단지를 조성하여 대량의 원료공급 체계를 마련해 나가야 할 것이다(그림 7).

4. 맺음말

다가오는 미래사회에서 바이오에탄올은 고유가와 CO_2 배출 저감효과 등의 이유로 수송부분에서 가장 중요한 대체연료로 자리 매김할 것으로 전망되고 있다. 이에 세계 선진국들은 바이오에탄올 생산 연구개발 지속적으로 증가시킬 뿐만 아니라 보급량도 늘려가고 있고, 한국정부도 이런 급변하는 환경에 대처하기 위하여 바이오에너지 개발사업을 확대해 나가고 있다. 특히 전라남도가 해조류 활용 바이오에탄올 생산기반을 대규모로 구축함에 따라 타 지방단체에서도 지역특성에 맞는 바이오에너지 개발에 관심을 높이고 있다.

국내외적으로 제주의 대표 키워드, 제주의 이미지는 청정으로 여겨지고 있다. 그러기에 청정을 내세우는 지역산업을 육성하고 있으며, Carbon free island의 국제자유도시 건설을 지향하고 있다. 이런 측면에서 연료용 바이오에너지 개발은 필수사항이라 여겨진다. 바이오에탄올이 수송용 연료로서 휘발유를 10% 정도만 대체하더라도 탄소세 대응효과 등의 직접적인 효과뿐만 아니라 전 세계적으로 제주의 이미지를 새롭게 변화시킬 수 있을 것이다. 이를 위해, 우선적으로 제주에 적합한 바이오에너지 개발 모델을 발굴하고, 기술개발 프로젝트를 서둘러 추진해야 할 것이다.

평화로를 신나게 달리는 바이오에탄올 승용차를 빨리 볼 수 있기를 기대해 본다.

▣ 참고문헌

1) 제주특별자치도 신재생에너지보급 기본계획, 2009, 제주특별자치도
2) 제주 감귤 이용 바이오에탄올 생산실증시험연구, 2009, 제주하이테크산업진흥원
3) 신재생에너지저널 41호, 2009, 신재생에너지센터
4) 제주연안 파래 발생원인 조사 및 자원화방안 연구, 2009, 제주특별자치도
5) 신재생에너지 RD&D 전략 2030 시리즈, 2008, 에너지관리공단
6) 제주산 감귤을 이용한 바이오에탄올 상용화 타당성 연구, 2008, 제주특별자치도
7) 제주형 바이오에너지산업 육성 방안 연구, 2007, 제주하이테크산업진흥원
8) 해외 바이오에탄올 도입 타당성 분석, 2005, 산업자원부
9) http://www.energy.or.kr 등