국내 바이오매스 잠재 가용자원을 이용한 바이오 연료 생산량 및 온실가스 감축효과 분석

Evaluations of Potential Biofuels and Environmental Implications with Latent Biomass Resources in South Korea

서 교* · 김태곤**† · 이정재***

Suh, Kyo · Kim, Taegon · Lee, Jeong-Jae

ABSTRACT

Biofuel based on available biomass in rural area could contribute to increase the vitality and income of rural residents. This study estimates the potential production and environmental benefits of biofuel production from surplus rice, rice straw, cow manure, and food waste in South Korea. We could produce about 2.4 billion liters of ethanol using surplus rice and rice straw and 841 million m³ of methane from cow manure and food waste. 1.7 billion liters of gasoline and 800 million liters of diesel could be replaced with these potential biofuel productions, which can annually reduce 4.9 million ton CO₂ eq. GHGs.

Keywords: Biofuel; biomass; cow manure; ethanol; food waste; methane; rice straw; surplus rice

I. 서 론

재생에너지에 대한 세계적 관심이 증대되는 가운데 특히 바이오매스를 이용한 바이오연료의 생산과 이용은 화석연료에 대한 대안으로서 관심이 증가하고 있으며 현실성이 높은 것으로 평가되고 있다. 또한 바이오연료의 생산은 바이오매스를 생산하는 농촌지역의 소득증대와 활력증대에 기여할 것으로 전망된다. 바이오 연료는 화석연료에 대한 의존성을 저감시켜 줄 뿐만 아니라 지구온난화에 영향을 주는 이산화탄소 배출감소에 대한 탄소 배출권도 확보할 수 있다. 실제로 콜롬비아의 경우 에탄올 혼합에 대한 법안을 통해 17만개의 일자리를, 베네수엘라의 경우 1백만 개의 일자리를 새로이 제공할 수 있었다(Worldwatch Institute, 2007). 또한 미국의 경우 옥수수과 옥수수 잔류물을 통한 에탄올생산을 통한 탄소 배출권에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 (Aden et al., 2002; Sheehan et

al., 2003; Perlack and Turhollow, 2002; Liska et al., 2009; Kim and Dale, 2005a; Kim and Dale, 2005b; Spataro et al., 2005). 국내에서도 환경에 대한 관심이 높아지고 있으며 이는 그린정책 등을 통해 나타나고 있다 (Hong, 2008; PCGG, 2009).

첫째, 쌀은 국내에서 생산되는 최대 주곡으로 전체 곡물생산량의 86 % 이상을 차지하고 있으나 매년 일인당 쌀 소비량의 감소로 인해 시장가격이나 재고에 대한 염려가 많다 (Yonhap news, 2010; SBS news, 2010). 미국의 경우에는 옥수수를 기반으로 한 에탄올의 생산으로 통해 높은 옥수수시장가격의 유지와 함께 농촌보조금의 지급을 통한 농촌 활성화라는 두 가지 목표를 실현하고 있다. 현재 미국의 경우 옥수수 에탄올 1 갤런 당 41 센트라는 보조금을 지급하고 있으며 이는 에탄올 판매가격의 25 %에 해당하는 금액이다. 연간 필요한 국내 쌀 소비량을 산정하고 이를 충족시킨 이후 발생하는 잉여생산량을 바탕으로 한 에탄올 생산량을 평가해 보았다.

둘째, 쌀과 함께 생산되는 부산물로서 비료나 가축 잡자리 짚으로 많이 사용되어온 볏짚은 셀룰로오스계 바이오매스 (cellulosic biomass)로서 잠재적으로 에탄올 생산이 가능하며 에탄올 생산 과정에서 부수적으로 발생하는 전기에너지의 판매까지도 가능하다. 기존의 셀룰로오스계 바이오매스인 옥수수대 (corn stover)와 스위치그라스 (switchgrass)를 통한 에탄올 생산관련 연구를 바탕으로 볏짚을 통한 잠재적 에탄올 생산량과 온실가스 (GHG,

* Institute on the Environment, University of Minnesota

** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

*** 서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수, 서울대학교 농업생명과학연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4592

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: taegon.kim@daum.net

2010년 4월 22일 투고

2010년 5월 26일 심사완료

2010년 6월 30일 게재확정

Greenhouse gas) 저감량을 평가해 보았다.

셋째, 가축분뇨와 음식물쓰레기는 바이오가스의 생산이 가능한 바이오매스로서 축산분뇨와 음식물쓰레기의 처리와 에너지 생산을 통해 사회적 편익증진과 환경보호라는 두 가지 가치를 동시에 만족시킬 수 있다. 음식물 쓰레기의 경우 바이오가스 생산 잠재력이 클 뿐 만 아니라 중국의 경우 이미 소규모의 혐기성 소화시설 (Anaerobic digestion)이 보편적으로 이용되고 있으며 그 수는 지속적으로 증가하고 있다 (Yu et al., 2008). 바이오가스의 생산은 지속적으로 증가하는 국내 음식물쓰레기를 효과적으로 처리할 뿐만 아니라, 에너지생산을 통한 부가가치 창출과 환경개선효과 등의 다양한 편익의 증진이 가능한 리소스라 할 수 있다 (Nielsen et al., 2002). 현재 음식물 쓰레기는 약 68 %, 가축분뇨는 약 87 %가 퇴비화 등으로 재활용되고 있으므로 수거된 자원을 바이오연료로 전환하여 이용한 후 남은 잔류물을 비료화하여 이용하는 경우 추가적인 경제적 효과와 함께 현재 발생하는 문제에 대한 해결방법을 제시할 수 있다. 현재 퇴비로 전환된 음식물 쓰레기와 가축분뇨의 경우 판매처를 찾기가 어려울 뿐만 아니라 비료화 하는 과정에 추가적인 에너지가 투입된다는 점이 문제로 지적되고 있으며, 바이오가스를 생산하고 남은 잔류물은 가공되지 않은 가축분뇨에 비해 질소환원율이 우수하며 초산염 침출이나 악취발생이 적다는 장점이 있는 것으로 보고되고 있다 (Seo, 2005). 영국의 바이오가스 생산시설 케이스보고서에 따르면 연간 5,000 톤을 처리하는 시설에서 4,320 톤의 바이오비료를 생산하여 농가에 공급하고 있으며, 이는 처리된 음식물쓰레기의 약 86 %가 다시 더 효율이 높은 비료로 재생산됨을 의미한다 (Friends of the Earth, 2007).

바이오연료를 생산할 수 있는 바이오매스는 매우 다양하나, 본 연구에서는 현재 국내에서 상업적 규모의 시설운영이 가능한 생산잠재력을 기준으로 선정한 쌀, 벳짚, 소 분뇨, 음식물쓰레기를 대상으로 생산가능한 바이오연료를 평가해보고 이를 통한 환경개선 기대효과를 온실가스 저감효과를 바탕으로 평가해 보았다. 자료는 도별 단위의 쌀 생산량과 가축분뇨 발생량, 음식물 쓰레기 발생량을 바탕으로 하였으며 연료전환 및 생산량은 현재 보고된 많은 연구 자료를 바탕으로 하여 추정하였다. 본 연구는 향후 국내의 바이오연료 개발 방향과 관련한 길을 제시하는데 의미가 있을 것으로 생각된다.

II. 재료 및 방법

1. 잉여 쌀

잉여 쌀을 이용한 잠재 에너지량은 연평균 잉여 쌀 생산량을

추정하여 계산하였다. 잉여 쌀 생산량은 연간 생산되는 도별 쌀 생산량을 바탕으로 총 생산량을 계산한 후 일인당 연간 쌀 소비량과 인구를 통해 환산된 소비량을 통해 계산하였다. 우리나라 2008년 한해의 쌀 생산량은 4백8십만 톤이며, 일인당 쌀 소비량은 75.8 kg으로 인구 4950만 명을 기준 (2008년 기준)으로 할 경우 이에 따른 연간 쌀 소비량은 375만 톤으로 추정되며 이 경우 잉여 쌀의 생산이 1백만 톤 이상에 달한다 (Appendix A).

잉여 쌀을 이용한 잠재 에너지량을 산정하기 위하여 쌀의 수분함량은 11.4 %, 에탄올 수율은 480 리터/톤을 사용하였으며 자세한 계산식은 식 (1)과 같다 (Kim and Dale, 2004).

$$E_r = \sum_{i=1}^n v_e m_r y_r (P_{ri} - C_{ri}) \quad (1)$$

Where,

E_r : Energy potential of surplus rice (MJ)

P_{ri} : Rice production of region i (kg)

C_{ri} : Rice consumption of region i (kg)

y_r : Ethanol yield of rice (0.48 L/kg)

m_r : Moisture content of rice (0.886)

v_e : Conversion rate of ethanol (MJ/L of ethanol)

n : Total number of regions

i : Region i

Fig. 1에서 보는 것과 같이 쌀 생산량의 변화에 비해 일인당 쌀 소비량의 감소가 매우 크기 때문에 장기적으로 이에 따른 잉여 쌀 생산량이 점차 증대될 것으로 예상할 수 있다. 또한 인플레이션을 고려한 쌀 가격의 변화를 살펴보면 지속적으로 감소되는 것을 알 수 있다. 쌀이 식량안보 외에 에너지 안보로

Fig. 1 Trends of rice production, net balance, and per capita consumption (2000~2008)

도 이용될 경우 장기적으로 쌀 가격안정과 농민소득 증대에 크게 기여할 것으로 판단된다.

2. 벼짚

벼짚의 잠재 생산량은 도별 쌀 생산량을 기준으로 추정하였다. 추정한 쌀 생산량을 바탕으로 1 kg의 쌀이 생산될 때, 1.4 kg의 벼짚이 생산된다고 가정하였다 (Kim and Dale, 2005b). 이론적으로 벼짚 1 Mg당 459 리터의 에탄올을 얻어낼 수 있고, 본 연구에서는 이론치의 70 % 수준으로 생산 가능할 것으로 가정하여 계산하였다. 생산된 에탄올이 에너지로 환산하는 데는 ORNL 자료를 인용하여 1 리터당 21.2 MJ로 가정하였다 (ORNL, 2010).

$$E_{rs} = \sum_{i=1}^n v_e m_{rs} y_{rs} c_{rs} P_{ri} \quad (2)$$

Where,

E_{rs} : Energy potential of rice straw (MJ)

P_{ri} : Rice production of region i (kg)

c_{rs} : Conversion factor of rice straw (1.4)

y_{rs} : Ethanol yield of rice straw (0.459 L/kg)

m_{rs} : Moisture content of rice straw (0.88)

v_e : Conversion rate of ethanol (MJ/L of ethanol)

n : Total number of regions

i : Region i

3. 소 분뇨

소 분뇨를 통해 생산가능한 바이오가스 생산량은 각 도별 소 마리수를 통해 추정하였다. 각 도별 소 분뇨량은 소의 무게에 따라 다양하며 포함되는 수분함량에 따라 휘발성 고형물 (Volatile solids, VS) 양도 다양하므로 소의 무게에 따른 평균 분뇨 발생량과 평균적인 수분함량 및 TS/VS 비율을 통해 발생가능한 양을 추정하였다. 또한, 가축분뇨의 종류에 따라 추출 가능한 바이오가스량과 CH_4 함량이 다른 점도 고려하였다.

평균적으로 발생가능한 소 분뇨량은 약 24 kg/day이며 총 고형물 (Total solids, TS)는 적게는 5 %에서 많게는 12 %이며, 이 가운데 휘발성 고형물 (VS) 양은 약 75-85 % 정도이다. 이를 통해 추출 가능한 바이오가스량은 0.2-0.3 m^3/kg VS이며 이에 포함된 메탄 함량은 55-85 % 정도로 추정할 수 있다 (Monnet, 2003). 본 연구에서는 소의 경우 총 고형물 (TS) 발생량은 15 %, 휘발성 고형물 (VS) 함량은 80 %, 추출 가능

한 메탄량은 VS기준 17.5 %로 추정하였다.

$$E_{cm} = \sum_{i=1}^n v_g u_a y_{rs} c_{cm} H_{ci} \quad (3)$$

Where,

E_{cm} : Energy potential of cow manure (MJ)

H_{ci} : Heads of cow in region i (heads)

u_a : Annual production of cow manure per cow
(8,614 kg/yr/head)

y_{cm} : Methane yield of VS (0.175 m^3/kg VS)

c_{cm} : VS content in cow manure (0.068 kg VS/kg of cow manure)

v_g : Conversion rate of biogas (MJ/L of biogas)

n : Total number of regions

i : Region i

4. 음식물 쓰레기

음식물 쓰레기로부터 추출 가능한 에너지량을 계산하기 위하여 환경부 환경통계포털의 2006년 기준 도별 음식물 쓰레기 발생량을 이용하여 2008년 도별 연간 음식물 쓰레기 발생량을 추정하였다. 본 연구에서 음식물 쓰레기의 수분함량 (MC, moisture content)과 총 고형물 대비 휘발성 고형물의 비율 (VS/TS)은 각각 85 %로 가정하였다 (Zhang et al., 2007). 이에 따라 1 kg의 음식물 쓰레기에서 약 84 리터의 메탄을 생산가능한 것으로 산정하였다. 음식물 쓰레기는 수분 함량이 매우 크기 때문에, 잠재 수분함량과 휘발성 고형물량에 따라 잠재 바이오가스량이 달라질 수 있다.

$$E_{fw} = \sum_{i=1}^n y_{fw} c_{fw} (1 - m_{fw}) w_{fw} P_i \quad (4)$$

Where,

E_{fw} : Energy potential of food waste (MJ)

P_i : Population of region i (person)

w_{fw} : Annual food waste per capita (98.5 kg/person)

c_{fw} : VS content in food waste (95 %)

m_{fw} : Moisture content of food waste (85 %)

y_{fw} : Methane yield of VS (0.44 liter/g VS)

n : Total number of regions

i : Region i

III. 온실가스 저감효과

본 연구에서는 현재 생산가능한 잠재적 바이오매스를 바탕으로 이를 바이오연료로 생산하여 기존의 연료를 대체하는 경우 얻어지는 환경적 이익을 평가해 보았다. 에탄올의 경우 기존의 휘발유를 바이오가스의 경우에는 기존의 디젤버스를 바이오가스를 이용한 CNG 버스로 각각 대체하였을 경우를 가정하여 환경개선효과를 추정하였다.

1. 바이오 에탄올

에탄올의 휘발유에 대한 에너지량 비율 (0.72)을 고려하여 에탄올이 기존의 휘발유를 대체하는 경우를 기준으로 온실가스 저감효과를 평가하였다 (Kim and Dale, 2005a). 이미 미국을 포함한 많은 국가에서 휘발유와 에탄올을 섞어 자동차 연료로 사용하고 있으며 현재 북미에 수출되는 대부분의 차량의 경우에는 10 %까지 에탄올이 혼합된 연료의 사용에 문제가 없도록 제작되고 있다 (Hawaii State Energy Office, 2009). 볏짚을 이용한 에탄올의 온실가스 저감효과는 같은 셀룰로오스계 바이오매스인 스위치그라스와 옥수수대의 경우 얻을 수 있는 온실가스 저감량을 바탕으로 평가하였다. 스위치그라스와 옥수수대의 전 처리과정상에서 배출하는 온실가스 수치는 각각 1리터의 에탄올 당 489 g과 330 g의 CO₂ 환산가스량으로 나타났다 (Spatari et al., 2005). 이 때 처리공정은 작물 생산, 탄소 격리, 원료 수송, 에탄올 생산, 에탄올 분배, 그리고 사용에 이르는 전 과정을 모두 의미한다. 스위치그라스와 옥수수대의 경우 가솔린과 비교했을 경우 1 MJ의 에너지를 생산하는 데 있어서 각각 69 g과 76 g의 CO₂ 환산가스를 저감할 수 있다.

2. 바이오가스

현재 스웨덴에서는 바이오가스를 사용한 버스를 이용하고 있으며 점차 그 수가 늘어나고 있다. 기존의 연구보고서를 바탕으로 바이오가스 버스를 사용하는 경우의 환경개선효과를 살펴 보았다. CNG 버스와 디젤버스의 연료효율은 각각 1 갤런 당 3.27과 3.86 마일을 사용하였으며 1 마일 당 배출가스 발생량은 각각 평균 2618과 2693 CO₂ eq. g을 사용하였다 (Nigel et al., 2007). 소 분뇨 처리를 통한 온실 가스 저감 효과를 계산하기 위하여 고형물로 변환하는 과정에서 저감되는 CH₄의 양을 같은 양의 온실가스에 해당하는 CO₂ 무게로 변환하여 구하였다 (Beet et al., 2002). 소 분뇨와 음식물 쓰레기를 이용하여 바이오연료를 생산하는 경우 각각 연간 566와 643 Gg GHG 저감효과를 기대할 수 있으며 이 가운데 처리과정에서

얻어지는 환경개선효과가 전체 저감량의 96 %와 93 %를 차지하고 있어 유기폐기물의 처리를 통한 연료생산의 경우 직접적 형태의 배출량 저감뿐 만 아니라 간접적 형태의 잠재적 온실가스 저감을 기대할 수 있음을 보여주고 있다.

IV. 연구결과

1. 잉여 쌀

식 (1)을 이용하여 소비량 감소에 따른 잉여쌀 생산량을 통한 에탄올 생산 가능량을 계산하였으며, 2008년을 기준으로 잠재적 에탄올 생산 가능량은 연간 약 461백만 리터에 달하는 것으로 추정되었다. 잉여 쌀의 경우 재배과정에서의 쌀 1 kg 당 1.27 kg CO₂를 저감하지만 1.12 kg CO₂ eq. GHGs의 메탄가스를 방출하기 때문에 생애주기를 고려하는 경우 에탄올 생산을 통한 온실가스 저감효과가 상대적으로 적을 것으로 추정되나 안정적인 쌀의 수요관리나 경제적 측면에서 효과가 있을 것으로 기대된다 (NREL, 2008). 또한 쌀을 통한 에탄올 생산의 경우에는 잔류물인 주정박 (Dried Distiller's Grains with Solubles, DDGS)이 가축사료를 대체할 수 있으므로 사료생산에 따른 경제적 환경적 효과를 추가적으로 고려할 수 있다 (Kim and Dale, 2004).

2. 볏짚

재작 총 볏짚 생산량은 약 6백만 톤 정도로 추정되며, 이를 통한 에탄올 생산량은 이론적 추정치인 70 %를 기준으로 약 19억 리터로 추정된다. 이를 볏짚과 같은 셀룰로오스계 에탄올 (cellulosic ethanol)인 옥수수대와 볏짚의 휘발유 대비 MJ 당 환경저감 효과를 바탕으로 추정해 본 온실가스 저감효과는 약 310만 톤 (CO₂ equivalent)으로 산정되었다 (Appendix A).

Fig. 2는 볏짚을 이용한 잠재 에너지량 및 이를 통한 온실가스 저감량을 도시화한 것이다. 볏짚량은 쌀 생산량을 이용하여 추정하기 때문에 쌀 생산량이 많은 전라남도과 충청남도가 잠재량이 크며, 전라북도과 경상북도가 그 뒤를 이었다. 우리나라 대규모 정유단지가 울산 (경상북도), 여수 (전라남도), 대산 (충청남도)인 점을 고려하면, 볏짚을 이용하여 생산된 에탄올을 근처 석유화학단지에서 가공하여 E10과 같은 혼합유로 활용 가능할 것으로 기대된다.

3. 소 분뇨

각 도별 소 마리수를 기준으로 발생될 분뇨를 추정하였으며 분뇨에 포함된 수분과 휘발성 고형물 중량을 추정하였다. 바이

Fig. 2 Regional bioenergy potential for rice straw. The top numbers denote bioenergy potential of states (TJ) for rice straw and the bottom numbers given in parenthesis are expected GHGs reduction (metric ton per year)

오가스에 포함된 메탄의 함량은 천연 가스에 포함된 함량보다 적으며 천연 가스의 경우에는 90 % 이상의 메탄을 함유하고 있으므로 바이오가스에서 발생하는 메탄의 양만으로 디젤 대체량을 추정하였다.

추정된 디젤 대체량은 약 3억 리터이며 이는 연간 국내에서 소비되는 디젤량의 1 %에 해당되는 것으로, 이를 일반 디젤버스에서 LNG나 CNG버스로 전환하여 사용하는 경우 2만3천 톤의 CO₂ equivalent GHG 감축효과를 기대할 수 있는 양이다 (Appendix B).

Fig. 3은 소 분뇨를 활용하여 잠재 에너지 및 온실가스 저감량을 도시화한 것으로 앞서 벼짚을 이용한 잠재량에 비해서 상대적으로 그 양이 적음을 확인할 수 있다. 가장 잠재 에너지량이 높은 경상북도의 경우에도 1,855 TJ에 그치고 있다. 이는 디젤을 이용한 에너지 소비량의 1 %에 해당하는 양으로 에너지 측면에서 기여하는 바가 크지 않을 것으로 생각되나, 처리과정에서 온실가스 저감효과를 기대할 수 있기 때문에 녹색성장이라는 측면에서 활용성이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3 Regional bioenergy potential for cow manure. The top numbers denote bioenergy potential of states (TJ) for cow manure and the bottom numbers given in parenthesis are expected GHGs reduction (metric ton per year)

4. 음식물 쓰레기

음식물 쓰레기 발생량은 환경부 환경통계포털의 도별 음식물 발생량을 바탕으로 산정하였으며, 2000년부터 2006년까지 연간 평균적으로 약 3 % 가량의 발생량 증가 경향을 보이고 있는 점을 감안하여 2008년도 발생량을 추정하였다. 이는 우리나라 인구수를 고려할 때 일인당 연간 약 98.5 kg 정도의 음식물 쓰레기를 발생시키는 것으로 미국의 연간 일인당 음식물 쓰레기 발생량의 약 70 %에 해당하는 수준이다 (Zhang et al., 2007)¹⁾.

Nielsen et al. (2002)에 의해 보고된 음식물 처리에 따른 온실가스 저감량 (105 kg CO₂ eq GHGs/ton of waste)을 통해 계산된 CO₂ equivalent 양은 연간 52만7천 톤에 달하며, 생산된 바이오가스가 현재 디젤버스를 대신한 LNG 혹은 CNG버스에 이용되는 경우 추가적으로 3만8천 톤의 추가적인 온실가스 저감효과를 기대할 수 있을 것으로 추정되었다 (Appendix B).

1) 연간 4,360만 톤의 음식물 쓰레기와 미국의 인구를 고려하여 1인당 음식물 발생량 계산

Fig. 4 Regional bioenergy potential for food waste. The top numbers denote bioenergy potential of states (TJ) for food waste and the bottom numbers given in parenthesis are expected GHGs reduction (metric ton per year)

Fig. 4는 음식물 쓰레기를 활용하여 기대되는 잠재 에너지 및 온실가스 저감량을 도시화한 것으로 인구수에 비례한 결과를 보여주고 있어서 수도권 지역에서 많은 에너지와 온실가스 저감을 기대할 수 있다. 인천 지역에 국내 4~5위 수준의 석유화학단지가 존재하고 있음을 고려할 때, 음식물 쓰레기를 이용하여 생산된 바이오디젤을 소화해 낼 수 있을 것으로 기대한다.

5. 바이오연료 잠재 에너지

본 연구에서 평가한 잠재적 바이오매스를 대상으로 에너지도별 잠재 에너지 지도를 TJ 단위로 작성하였으며, 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 바이오에너지 생산을 통한 잠재적 GHG 저감량을 함께 표시하였으며, 경기도, 충청남도, 전라남도, 경상북도가 가장 잠재적 에너지 생산량이 큰 것으로 나타났다. 이들 지역은 국내에 존재하는 석유화학단지의 위치와 일치함을 고려할 경우, 운송비 절감 등의 부수적이 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 5 Regional total bioenergy potential and GHG reduction of biomass. The top numbers denote bioenergy potential of states (TJ) and the bottom numbers given in parenthesis are expected GHGs reduction (metric ton per year)

GHG 저감효과는 현재 생산가능한 잠재적 바이오매스를 바탕으로 이를 바이오연료로 생산하여 기존의 연료를 대체하는 경우 얻어지는 환경적 이익을 바탕으로 평가하였다. 에탄올의 경우 기존의 휘발유를, 바이오가스의 경우에는 기존의 디젤버스를 바이오가스를 이용한 CNG 혹은 LNG 버스로 각각 대체하였을 경우를 가정하여 환경개선효과를 고려하여 계산하였다.

Fig. 5에서 아래 파이 그래프는 잠재적 에너지 자원에 따른 기대 효과를 비교하여 도시한 것으로, 볏짚을 이용하여 휘발유 사용량 중 일부를 에탄올로 대체할 경우 온실가스 저감효과가

소 분뇨나 음식물 쓰레기 처리를 통한 방법에 비해 상대적으로 4 ~ 5배 가량 크다는 것을 확인할 수 있다.

V. 고 찰

본 연구에 이용된 많은 변수의 경우 국가나 지역 혹은 기술 수준에 따라 많은 차이가 있을 수 있다. 따라서 발생 가능한 불확실성을 반영한 경우 생산 가능한 에너지양과 환경저감효과를 산정하여 비교해 보았다. 에탄올은 생산 가능량을 이론적 비율로 70 % 수준으로 고려하여 계산하였으나 60 %와 80 %로 달라지는 경우의 결과와 비교해 보았다. 소 분뇨와 음식물 쓰레기 처리를 통해 생성할 수 있는 바이오가스의 경우에는 바이오가스에 포함된 메탄가스 함량의 변화에 따른 생산량 변화를 고찰하였다.

1. 에탄올 변환율에 따른 차이

에탄올 변환율은 60 % (Kim and Dale, 2005b), 70 % (Sheehan et al., 2003), 80 % (Huang et al., 2009)를 기준으로 적게는 17억 리터에서 많게는 22억 리터 정도로 볼 수 있다. 이를 벧짚과 같은 셀룰로오스계 에탄올의 휘발유 대비 MJ 당 환경저감 효과를 바탕으로 추정해본 온실가스 저감효과는 약 273만 톤 ~ 355만 톤 (CO₂ equivalent)에 이른다. 에탄올 변환율에 따른 결과는 Table 1과 같이 정리하였다.

2. 메탄 함량에 따른 차이

본 연구에서 소 분뇨에서 추출한 바이오가스의 70 % (Monnet, 2003), 음식물 쓰레기로 생성하는 바이오가스의 73 % (Zhang

et al., 2007)가 메탄이라고 가정하였다. 하지만, 바이오가스의 메탄 함량은 50 %에서 75 % 사이로 다양하므로, 각각에 대해 CH₄ 함량을 10 % 적은 60 %와 63 %로 가정했을 경우 추정되는 환경개선효과를 대체가능한 디젤량을 바탕으로 평가해 보았으며 결과는 Table 2와 같이 정리하였다.

VI. 결 론

본 연구에서는 지역별 바이오연료 생산 잠재력과 이를 통한 환경개선 효과 (온실가스, 이산화탄소 equivalent value)를 일인당 쌀 소비량 감소로 인해 예상되는 잉여 쌀의 양과 쌀 생산량을 통해 환산된 벧짚 생산량, 각 지역별로 사육되는 소에서 추정되는 분뇨량, 일인당 음식물쓰레기 발생량을 바탕으로 한 음식물 쓰레기 발생량을 바탕으로 평가해 보았다.

쌀을 이용한 에탄올 생산의 경우 지속적인 농업의 자족적인 생산기반인 쌀의 가격유지 및 에탄올 생산과 판매에 따른 부가가치 증대 측면에서 매우 긍정적인 효과가 있을 것으로 기대된다. 벧짚의 경우 연구자별 추정 변환 비율에 따라 연간 17 ~ 22억 리터의 생산이 가능하며, 이를 휘발유를 대체하는 연료로 사용하는 경우 273 ~ 355백만 Mg의 CO₂ eq. GHG를 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 벧짚의 경우에는 식량자원의 직접적 이용이 아니라는 장점이 있으나, 사료나 비료 사용을 대체할 추가적인 질소 비료나 사료생산에 따른 영향에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

지역적으로 가축분뇨를 이용한 바이오가스 생산 잠재력은 연간 449백만 m³에 달하며 이는 3억 리터의 디젤을 대체할 수 있는 양이며, 기존의 디젤버스가 바이오가스에서 생산된 CNG/LNG 버스로 대체되어 운행되는 경우 운행과정에서만 연간 2만3천 톤의 CO₂ eq. GHG를 감축할 수 있으며 처리과정의 감축효과를 포함하는 경우 64만 톤의 CO₂ eq. GHG를 줄일 수 있을 것으로 평가되었다. 음식물 쓰레기의 경우에는 관리를 통한 효과적인 이용을 하는 경우 연간 59만 톤의 온실가스 저감효과를 기대할 수 있다.

벧짚 사용을 통한 에탄올의 생산이 가져올 환경개선효과는 그 잠재력이 상대적으로 다른 자원에 비해 높은 것으로 나타

Table 1 Study results according to ethanol yield with rice straw

Rice straw	60 %	70 %	80 %
Ethanol (liters)	1,682,740,501	1,915,459,932	2,189,949,517
Energy (MJ)	35,674,098,614	40,607,750,550	46,426,929,757
GHGs reduction	2,726,713	3,103,811	3,548,594

Table 2 Displaced diesel and GHGs reduction with food waste

		Methane (m ³)	Displaced Diesel (liters)	GHGs Reduction (Mg CO ₂ eq.)
Cow manure	60% concentration	269,544,815	257,530,273	19,875
	70% concentration	314,468,950	300,451,985	23,187
Food waste	63% concentration	469,085,767	448,176,997	34,588
	73% concentration	544,610,470	520,335,304	40,156

났으나 벚짚의 다른 이용에 대한 대치효과를 포함할 필요성이 있으며, 사용된 데이터의 대부분이 국외 자료에 의존한 변수가 많아 국내환경에서 연구된 자료를 이용하여 보다 현실적인 연구결과와 도출이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 농림기술관리센터 ‘농업시설의 계획·설계를 위한 CAD와 GIS 자료구조 통합 시스템 개발’ (과제번호: 203103-03-3)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., Wallace, B., Montague, L., Slayton, A., Lukas, J. 2002. Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis for Corn Stover. NREL/TP-510-32438, National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).
- Beer, T., T. Grant, D. Williams, H. Watson, 2002. Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles. *Atmospheric Environment* 36(4), pp. 753-763.
- Fabien Monnet, 2003. An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes, Final Report, Remade Scotland.
- Friends of the Earth, 2007. Briefing Anaerobic Digestion. http://www.foe.co.uk/resource/briefings/anaerobic_digestion.pdf accessed 13 Dec. 2009.
- Hong, Seong gu, 2008. Strategic Planning for Bioenergy Considering Biomass Availability in Rural Area, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(4), pp. 51-58. (in Korean)
- Huang, H., S. Ramaswamy, W. Al-Dajania, U. Tschirnera and R. A. Cairncross, 2009. Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: A comparative process and economic analysis, *Biomass and Bioenergy* 33, pp. 234-246.
- Kim, S. and Dale, B., 2004. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy* 26(4), pp. 361-375.
- Kim, S. and Dale, B. 2005a. Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain: nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. *Biomass and Bioenergy* 28, pp. 475-489.
- Kim, S. and Dale, B., 2005b. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. *Biomass and Bioenergy* 29 (6), pp. 426-439.
- Liska, A.J., Yang, H.S., Bremer, V., Walters, D.T., Erickson, G., Klopfenstein, T., Kenney, D., Tracy, P., Koelsch, R., Cassman, K.G. 2009. BESS: Biofuel Energy Systems Simulator; Life Cycle Energy and Emissions Analysis Model for Corn-Ethanol Biofuel. vers. 2008.3.1 ed. University of Nebraska-Lincoln.
- Nielsen, L., Hjort-Gregersen, K., Thygesen, P., Christensen, J., 2002. Socio-economic analysis of centralised biogas plants. Danish Research Institute of Food Economics.
- Nigel N. Clark, Feng Zhen, W. Scott Wayne, Lyons, D. W., 2007. Transit Bus Life Cycle Cost and Year 2007 Emissions Estimation.
- NREL, 2008. U.S. Life-Cycle Inventory Database (V 1.6.0). National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO 80401-3393.
- Hawaii State Energy Office. the Latest E-10 Fact Sheet!. <http://hawaii.gov/dbedt/ert/new-fuel/files/E10-4pagefactsheet060117.pdf> accessed 12 Oct. 2009.
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory), 2010. Bioenergy Conversion Factors. http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/energy_conv.html accessed 5 Jan. 2010.
- The Presidential Committee on Green Growth (PCGG), 2009. Green Growth Korea, <http://www.greengrowth.go.kr> accessed 5 Oct. 2009. (in Korean)
- Perlack, R., Turhollow, A. 2002. Assessment of options for the collection, handling, and transport of corn stover, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 29.
- Petrolia, D.R. 2008. The economics of harvesting and transporting corn stover for conversion to fuel ethanol: A case study for Minnesota, *Biomass and Bioenergy* 32, pp. 603-612.
- SBS news, 2010. article of 23th Mar. 2010, 'Bags of rice' Overfull of stack. This year's rice crop 'worried', http://news.sbs.co.kr/section_news/news_read.jsp?news_id=N1000724845 accessed 5 Feb. 2010. (in Korean)

20. Seo, Se-Wook, 2005. Applications and conditions for biomass resource, Korean institute for the Study of Rural Societies, peasant and society, 2005 vol. summer, pp. 112-125. (in Korean)
21. Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Walsh, M., Nelson, R. 2003. Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol, *Journal of Industrial Ecology* 7, pp. 117-146.
22. Spatari, S., Zhang, Y., MacLean, H., 2005. Life cycle assessment of switchgrass-and corn stover-derived ethanol-fueled automobiles, *Environ. Sci. Technol* 39 (24), pp. 9750-9758.
23. Worldwatch Institute, 2007. Implications for Agricultural and Rural Development. In *Biofuels for Transport: Global Potential and Implications for Sustainable Energy and Agriculture*, Mastny, L., Ed. Earthscan: London/Sterling, VA, pp. 120-135.
24. Yonhap news, 2010. article of 4th Feb. 2010, Government, considering to sale half price for long-stored rice about 40 tons, <http://media.daum.net/economic/view.html?cateid=100012&newsid=20100204144506798&p=yonhap> accessed 5 Feb. 2010. (in Korean)
25. Yu, L., K. Yaoqiu, H. Ningsheng, W. Zhifeng, X. Lianzhong, 2008. Popularizing household-scale biogas digesters for rural sustainable energy development and greenhouse gas mitigation, *Renewable Energy* 33 (9), pp. 2027-2035.
26. Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., Gamble, P., 2007. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion, *Bioresource Technology* 98, pp. 929-935.

Appendix A. Bioethanol

Region	Surplus rice				Rice straw			
	Surplus rice (ton)	Ethanol (10 ³ liters)	Energy (MJ)	GHG reduction (Mg CO ₂ eq)	Rice straw (dry Mg)	Ethanol (10 ³ liters)	Energy (MJ)	GHG reduction (Mg CO ₂ eq)
Seoul	-770,663	-327,747	-6,948,245,460	-531,082	3,154	1,012	21,463,056	1,641
Busan	-248,950	-105,873	-2,244,516,696	-171,557	26,174	8,402	178,118,216	13,614
Daegu	-168,082	-71,482	-1,515,420,875	-115,830	25,707	8,252	174,940,678	13,371
Incheon	-133,755	-56,883	-1,205,929,737	-92,174	86,672	27,822	589,823,234	45,083
Gwangju	-76,646	-32,596	-691,033,732	-52,818	38,432	12,337	261,539,080	19,990
Daejeon	-102,954	-43,784	-928,225,241	-70,948	11,455	3,677	77,954,492	5,958
Ulsan	-50,557	-21,501	-455,822,739	-34,840	41,596	13,352	283,069,208	21,636
Gyeonggi	-346,148	-147,210	-3,120,844,709	-238,539	628,081	201,614	4,274,216,767	326,695
Gangwon	84,528	35,948	762,099,173	58,250	245,018	78,651	1,667,394,425	127,446
Chungbuk	136,994	58,261	1,235,131,890	94,406	310,685	99,730	2,114,270,350	161,602
Chungnam	742,652	315,835	6,695,701,959	511,779	1,103,449	354,207	7,509,194,020	573,957
Jeonbuk	621,611	264,359	5,604,409,342	428,367	939,128	301,460	6,390,952,015	488,486
Jeonnam	755,842	321,444	6,814,621,295	520,869	1,110,404	356,440	7,556,521,736	577,575
Gyeongbuk	456,095	193,968	4,112,123,602	314,306	811,616	260,529	5,523,207,352	422,161
Gyeongnam	228,139	97,023	2,056,883,657	157,216	582,259	186,905	3,962,390,417	302,861
Jeju	-39,787	-16,921	-358,715,643	-27,418	3,336	1,071	22,703,889	1,735
Total	1,088,319	462,840	9,812,216,087	749,987	5,967,165	1,915,460	40,607,750,550	3,103,811

Appendix B. Biogas

Region	Cow Manure							Food Waste					
	Total Cattle (heads)	Manure (ton)	VS (ton)	Biogas (10 ³ m ³)	CH ₄ (10 ³ m ³)	Displaced Diesel (10 ³ liters)	GHG reduction (Mg CO ₂ eq.)	Food Waste (ton)	VS (ton)	Biogas (10 ³ m ³)	CH ₄ (10 ³ m ³)	Displaced Diesel (10 ³ liters)	GHG reduction (Mg CO ₂ eq.)
Seoul	944	8,131	744	186	130	124	266	1,267,280	240,783	182,235	133,293	127,351	133,445
Busan	2,486	21,414	1,959	490	343	328	701	331,420	47,227	47,658	34,859	33,305	34,899
Daegu	22,372	192,712	17,638	4,410	3,087	2,949	6,313	300,395	42,806	43,197	31,596	30,187	31,632
Incheon	18,361	158,161	14,475	3,619	2,533	2,420	5,181	257,325	36,669	37,003	27,065	25,859	27,096
Gwangju	6,773	58,342	5,339	1,335	934	893	1,911	173,375	24,706	24,931	18,236	17,423	18,256
Daejeon	4,216	36,316	3,323	831	582	556	1,190	154,030	21,949	22,150	16,201	15,479	16,219
Ulsan	24,511	211,137	19,324	4,831	3,382	3,231	6,916	110,960	15,812	15,956	11,671	11,151	11,684
Gyeonggi	348,914	3,005,545	275,083	68,771	48,140	45,994	98,453	1,159,605	165,244	166,751	121,967	116,531	122,106
Gangwon	147,979	1,274,691	116,666	29,167	20,417	19,507	41,755	145,270	20,701	20,890	15,279	14,598	15,297
Chungbuk	148,163	1,276,276	116,811	29,203	20,442	19,531	41,807	149,650	21,325	21,520	15,740	15,039	15,758
Chungnam	324,682	2,796,810	255,979	63,995	44,796	42,800	91,615	167,900	23,926	24,144	17,660	16,873	17,680
Jeonbuk	217,844	1,876,508	171,748	42,937	30,056	28,716	61,469	217,540	30,999	31,282	22,881	21,861	22,907
Jeonnam	316,026	2,722,247	249,154	62,289	43,602	41,659	89,173	127,385	18,152	18,318	13,398	12,801	13,414
Gyeongbuk	427,904	3,685,965	337,359	84,340	59,038	56,406	120,741	217,540	30,999	31,282	22,881	21,861	22,907
Gyeongnam	247,062	2,128,192	194,783	48,696	34,087	32,568	69,713	331,785	47,279	47,711	34,897	33,342	34,937
Jeju	21,019	181,057	16,571	4,143	2,900	2,771	5,931	66,430	9,466	9,553	6,987	6,676	6,995
Total	2,279,256	19,633,511	1,796,965	449,241	314,469	300,452	643,135	5,177,890	798,045	744,581	544,610	520,335	545,232

※ Food Waste per capita; 98.5 Kg