

화석연료의 바이오매스 대체를 통한 이산화탄소 배출의 저감

요 약

화석연료를 바이오에너지로 교체하여 사용하면 대기중으로의 이산화탄소 방출을 억제할 수 있다. 이러한 연료교체에 의한 이산화탄소 배출저감의 효율성을 바이오매스 재배 단위면적당, 단위 바이오매스 사용량당의 이산화탄소 배출량 저감과 그에 상응하는 비용저감으로 나타내고자 하였다. 이러한 이산화탄소 저감의 비용은 에너지 사용할 때설의 교체가 필요할 때 현재가격으로 화석연료를 그대로 사용하는 대안과 연료로 각종 바이오에너지를 교체사용하는 대안의 비용차로 계산 하였다. 한편, 바이오매스 생산과 각종 연료형태로의 변환에 사용되는 에너지는 바이오에너지로 충당하여 바이오연료 생산은 이산화탄소 무발생 연료주기로 가정하였고 화석연료에서의 이산화탄소 발생은 화석연료 전주기(fuel cycle(or full energy chain, FENCH) CO₂ emissions)에 걸쳐서 평가 비교되었다.

그 결과 화석연료 대체하여 바이오매스를 전력 혹은 열발생에 사용할 경우가 가솔린 혹은 디젤과 같은 자동차용 연료를 바이오연료(에탄올, 메탄올 혹은 에스테르화 유지 등 바이오매스를 변환한 연료)로 교체하여 사용하는 경우에 비용이 적게들며 이산화탄소의 저감효과도 큰 것으로 나타났다. 그리고 바이오연료 가운데서도 메탄올이나 에탄올과 같은 자동차용 연료를 속성재배된 임목이나 폐목재등을 이용하여 생산하고 사용하는 경우가 유채유로부터 바이오디젤(에스테르화 유지)을 만들거나 밀전분으로부터 에탄올을 생산하고 알팔파 등 초본식물을 재배하고 이로부터 메탄가스를 생산하여 사용하는 경우보다 이산화탄소 저감효과가 큰 것으로 나타났다.

스웨덴에서 에너지 작물재배(속성수 재배), 밀짚 회수이용, 폐목재 회수이용으로 사용이 가능한 연간 125 TWh/년의 바이오에너지를 개발이용하면 연간 1500만톤에 이르는 1992년 이산화탄소 배출량의 절반을 제거할 수 있는 것으로 평가되었다.

1. 머리말

에너지자원의 채취, 변환, 유통, 이용은 환경, 안보 및 경제 개발과 밀접히 연관되어 있다. 에너지 사용에 따른 황산화물, 질산화물 배출은 건축물의 부식이나 식물, 생태계, 토양, 효소의 산성화를 일으키며 이산화탄소의 배출증가는 지구 온난화로 인한 해수면의 상승, 식물 생태계 이동, 한랭지의 감소를 촉발하고 있다. 그리고, 석유자원의 전략적 중요성은 전세계 매장량의 3분의 2를 보유하고 있는 중동 지역의 군사, 정치적 갈등의 원인이 되고 있다. 이러한 에너지 자원의 여타 부문과의 연계성은 이들 부문의 변화추세에 따른 근본적인 에너지 공급 시스템의 변화를 요구하고 있으며 에너지 문제의 해결을 위하여 에너지 이용 효율화와 신재생 에너지 개발이 절실히 요구 된다는 것이다.

이 보고서는 화석연료를 대체한 바이오에너지 사용이 지구 온난화의 주원인이 되는 이산화탄소의 감축을 위하여 할 수 있는 역할을 살펴 보았다. 바이오에너지를 발전, 열공급, 수송 부문에 적용할 경우의 CO₂ 감축율을 폐목재, 밀짚과 각종 에너지 작물의 생산성과 생산원가를 기초로 하여 추정하였다. CO₂ 감축의 구체적 수치는 i) 황무지를 바이오매스 생산에 사용할 경우 단위면적당 ii) 바이오에너지 단위 사용량당의 CO₂ 감축율과 iii) 이 경우 CO₂ 단위 감축량당의 비용으로 표시하여 추정하였다.

상기와 같은 연료대체에 따른 CO₂ 감축율과 CO₂ 감축비용의 추정에는 몇 가지 가정이 필요한데 그것은 다음과 같다.

- ▶ 바이오에너지의 생산, 수송 및 변환에 사용되는 에너지는 바이오에너지 자체로 공급하여 바이오매스의 연소에서 배출되는 CO₂는 이들의 성장과정에서 고정화 되어 CO₂ 증가율 제로 연료주기로 가정한다.
- ▶ 연료교체 전 화석연료의 CO₂배출은 화석연료의 채취, 변환 및 유통 및 최종사용시 CO₂ 배출을 망라하는 연료 전주기 CO₂ 배출계수를 적용한다.
- ▶ 황무지의 에너지 작물재배에 의한 CO₂ 감축율은 단위면적당 화석연료 상당량의 에너지 (MWh_{fossil}/ha. yr)가 생산되고 화석연료 전주기 CO₂ 배출계수(tonne C/MWh_{fossil})를 곱하여 계산한다.
- ▶ 화석연료의 바이오매스 연료로의 교체에 따른 CO₂ 감축율(tonne C/MWh_{bio})은 바이오매스로 교체 전 에너지비(MWh_{fossil}/MWh_{bio})와 화석연료 전주기 CO₂ 배출계수(tonne C/MWh_{fossil})의 곱이다.
- ▶ CO₂ 배출감축 비용의 추정은 먼저 i) 단위면적의 바이오매스 재배단지에서 재배된 바이오매스를 열과 전기로 바꾸고 배분하는 비용과 동일한 량의 에너지를 공급하기 위한 화석연료 사용 비용의 차를 계산하고 이를 ii) 단위 면적에서 가능한 CO₂ 감축율로 나누어 계산 하였다(이의 계산에는 화석연료의 가격, 바이오매스의 재배, 수송, 비용이 포함되어야 한다).
- ▶ 비용의 계산에 있어 세금 수수료, 보조금 등은 제외되었고, 이자율은 6%로 보고 1993년 불변가격으로 계산하였으며 화석연료, 저위발열량 MWh당의 가격은 석탄 \$7.8/MWh, 천연가스 \$16.8/MWh, 중질유 \$12.3/MWh, 경질유 \$19.4/MWh, 가솔린 \$37.5/MWh 그리고 디젤유 \$34.9/MWh로써 발전연료는 발전소의 납품가격, 가솔린 및 디젤은 소비자 가격으로 계산하였다. 달러당 스웨덴 크로네(SEK)의 환율은 \$1 = SEK 7.74로 적용하였다.

대부분의 개발 도상국과 오스트리아, 캐나다, 핀란드, 스웨덴, 미국 등의 선진국에서는 바

이오매스가 연료로 쓰이고 있는데 총량 추정은 상당히 불확실 하다. 한 유엔 통계는 전 세계 총1차 에너지 소비의 6%(6Pwh/yr)를 바이오매스가 공급한다고 추정하였고 여러나라의 자세한 데이터를 인용한 다른 통계는 에너지로 쓰인 바이오매스가 약 15 Pwh/yr 까지 된다고 조사하였다.

한편, 스웨덴은 연간 약 130 Twh/yr의 임산 바이오매스가 생산되는데 35%는 제지, 펄프의 20%는 제재목으로 나머지 45%는 연료로 쓰이며 그 에너지의 75%는 펄프 산업에서 소비(3TWh의 전력생산 포함)되고 15%는 건축물의 냉난방에 나머지 10%는 지역 냉난방에 이용된다고 하였다.

그리고, 스웨덴의 농산 바이오매스 생산은 80TWh/yr의 에너지에 상당하는데 20%는 식량으로 40%는 사료로 나머지 40%는 버려지는 것으로 나타났다. 농산부산물 바이오매스 에너지로 사용된 것은 1992년 0.5TWh에 불과 하였다.

2. 바이오매스의 생산

대부분의 개발 도상국과 오스트리아, 캐나다, 핀란드, 스웨덴, 미국 등의 선진국에서는 바이오매스가 연료로 쓰이고 있는데 총량 추정은 상당히 불확실 하다. 한 유엔 통계는 전 세계 총1차 에너지 소비의 6%(6Pwh/yr)를 바이오매스가 공급한다고 추정하였고 여러나라의 자세한 데이터를 인용한 다른 통계는 에너지로 쓰인 바이오매스가 약 15 Pwh/yr 까지 된다고 조사하였다.

한편, 스웨덴은 연간 약 130 Twh/yr의 임산 바이오매스가 생산되는데 35%는 제지, 펄프의 20%는 제재목으로 나머지 45%는 연료로 쓰이며 그 에너지의 75%는 펄프 산업에서 소비(3TWh의 전력생산 포함)되고 15%는 건축물의 냉난방에 나머지 10%는 지역 냉난방에 이용된다고 하였다.

그리고, 스웨덴의 농산 바이오매스 생산은 80TWh/yr의 에너지에 상당하는데 20%는 식량으로 40%는 사료로 나머지 40%는 버려지는 것으로 나타났다. 농산부산물 바이오매스 에너지로 사용된 것은 1992년 0.5TWh에 불과 하였다.

먼저 스웨덴에서 어떠한 바이오매스 에너지 작물을 재배하여 에너지로 이용할 까르 보기 위하여 각종 에너지 작물(스웨덴에서 생산 가능한)의 바이오매스 생산의 순수 에너지 효율(net energy yields : 생산 바이오매스의 에너지 총량에서 생산에 소요된 에너지를 뺀 값)을 살펴 보기로 하자.

<표 1> 미래와 현재의 에너지 작물, 폐목재 및 밀짚생산의 순수 에너지 효율¹⁾

바이오매스 자원별	에너지 생산량 [*] (MWh/ha · yr)	에너지 투입량 [*] (MWh/ha · yr)	순수 에너지 효율 [*] (MWh/ha · yr)
에너지 작물			
유채 [종자]	22 (18)	2.5 (3.5)	20 (15)
유채 [종자 및 줄기]	30 (20)	2.7 (3.7)	27 (17)
겨울밀 [곡식]	31 (21)	2.4 (3.4)	29 (18)
겨울밀 [곡식, 밀짚]	39 (23)	2.6 (3.6)	36 (19)
갈대 [줄기]	47 (30)	2.0 (2.3)	45 (28)
알팔파 [건초]	58 (32)	2.0 (1.8)	56 (30)
버드나무 [속성재배]	75 (42)	1.3 (1.6)	74 (40)
폐목재 [제재 폐목]	4.1 (1.1)	0.10 (0.04)	4.0 (1.1)
밀짚 [곡식 제외]	8.0 (2.0)	0.22 (0.17)	7.8 (1.8)

* ()밖은 종자개량, 재배기술 개선이 이루어진 2015년의 예측치이며 ()안은 현재의 기술로 가능한 순수 에너지 효율이다. 동 순수 에너지 효율은 위도 58~60°에 위치한 스웨덴 지역의 평균치임.

바이오매스 생산의 에너지 효율은 <표 1>에서 보는 바와같이 임목의 육종, 재배기술의 발전, 가공수송 기술의 개발 등으로 차츰 향상될 것으로 보이며 수송에 필요한 에너지는 50km 이내의 트럭 수송을 가정하여 1% 미만으로 무시하였다.

그리고, 2005년과 2015년 스웨덴의 경우에 사용이 가능할 것으로 보이는 80만 헥타의 유휴지에에너지 작물로 생산가능한 바이오매스의 잠재량은 다음 <표 2>와 같이 평가되었다²⁾.

<표 2> 에너지 작물별 스웨덴의 바이오매스 에너지 생산 잠재량

바이오매스 자원별	바이오에너지 생산 잠재량	
	오늘날의 기술로 2005년 (TWh/yr)	미래의 기술로 2015년 (TWh/yr)
에너지 작물		
유채 [종자]*	2	4
겨울밀 [곡식]	16	29
갈대 [줄기]	22	36
알팔파 [건초]	24	45
버드나무 [속성재배]	32	59
폐목재 [제재 폐목]**	20~22	53~65
밀짚 [곡식 제외]**	6	11

* 유채의 경우는 연작에 따른 병해 및 토양염화로 15만 헥타만이 재배가능한 면적임.

** 1993년 현재의 임목 벌채방법에 기준한 량의 90% 이며 2015년에는 현재의 수준으로 봄.

*** 밀재배 면적은 110만 헥터임.

한편, 이와같이 바이오매스를 재배할 경우의 바이오매스 생산 단위당 비용은 다음 <표 3>과 같이 조사되었다.

<표 3> 스웨덴에서의 바이오매스 생산 및 수집수송의 비용과 총생산원가

바이오매스 자원별	생산원가 (\$/MWh)	수집 수송비 (\$/MWh)	총 생산원가 (\$/MWh)
에너지 작물			
유채 [종자]*	43 (58)	1.7 (1.9)	45 (60)
겨울밀 [곡식]	29 (47)	1.7 (1.9)	31 (49)
갈대 [줄기]	13 (17)	4.0 (4.5)	17 (22)
알팔파 [건초]	12 (17)	4.0 (4.5)	16 (22)
버드나무 [속성재배]	10 (15)	2.3 (2.6)	12 (18)
폐목재 [제재 폐목]**	8.8 (11)	2.3 (2.6)	11 (14)
밀짚 [곡식 제외]**	7.6 (10)	4.0 (4.5)	12 (15)

* ()안은 1993년 현재의 생산원가 ()밖은 2015년의 기술에 의한 생산원가

** 50km를 트럭으로 수송한다는 가정에서 계산한 값.

3. 바이오매스의 변환 (열, 전력 및 바이오연료의 생산)

3.1 열 및 전력 생산원가

바이오매스와 여타의 화석연료로부터 열 및 전력을 생산하는 경우의 투자비와 운전유지 비용을 i) 소규모(10~20 kW), ii) 중규모(6~8 MW) 그리고 iii) 대규모 열병합 발전의 경우로 나누어 비교하였다(<표 4> 참조).

<표 4>의 교체용 바이오매스 연료는 속성재배된 버드나무 칩으로 가정하였으며 소규모 보일러의 연간 열생산량은 25 MWh/yr로 가정하여 열원의 100%를 공급하는 것으로 가정하였고 중, 대규모 보일러 및 열병합발전 플랜트는 기저부하를 공급하는 가정하에 연 5500시간 운전해 총 열부하의 80%를 공급하는 것으로 가정한 것이다. <표 4>에서 쉽게 알 수 있는 것은 바이오매스 보일러와 석탄보일러가 천연가스나 유류 보일러에 비하여 초기투자의 규모가 크며 운전유지에도 비용이 많이 든다는 것을 알 수 있으며 이와같은 투자, 운전비의 상승을 연료비로 상쇄할 수 있어야 경제성이 있다는 것이다.

한편, 추후 계산하게될(후절 참조) 바이오매스 사용에 따른 CO₂ 저감효율은 기존의 화석연료 보일러를 바이오매스 보일러로 교체하여 100%의 열원공급을 할 경우의 효율이며 CO₂ 저감의 비용은 기존 보일러를 바이오매스로 바꿈으로서 생기는 초기투자과 추가된 운전비용을 감안한 것이다.

<표 4> 각종 열 및 전력생산 플랜트의 용량별, 연료별 열효율, 투자비 및 운전유지 비용^{3,4)}

용량 및 연료별	열용량 MWth	전기용량 MWe	열효율	전 력 효 율	초기투자 (\$ 혹은 \$/kW)	고정 운전비용 (\$/kW · yr)	변동 운전비용 (\$/MWh)
(소규모보일러)					\$		
바이오매스	-		0.65		4,700	0*	0
경질유 연료**	-		0.80		2,600	0	0
(중규모보일러)					\$/kW _{th}	\$/kW _{th} · yr	\$/MWh _{th}
바이오매스	6~8		0.87		430	39	1.3
천연가스	6~8		0.92		70	3	0.9
중질유	6~8		0.90		70	3	0.9
경질유	6~8		0.90		60	3	0.8
석탄	6~8		0.87		450	39	1.3
(열병합 발전)					\$/kW _e	\$/kW _e · yr	\$/MWh _e
바이오매스***	35	35	0.43	0.43	2,100	64	11
천연가스	51	50	0.43	0.42	960	30	3.7
중질유	94	50	0.58	0.30	1,600	56	6.8
석탄	94	50	0.56	0.30	2,000	90	11

* 소규모 보일러의 운전비용은 무시되었다. 실제 바이오매스 보일러의 경우 연료투입 등에서 많은 인력이 소요되나 개별 사용자가 무상으로 직접투입하는 것으로 보아 무시하였다.

** 스웨덴의 경우 소형보일러는 거의 경유로 운전된다고 함.

*** 바이오매스 열병합 발전은 바이오매스의 가스화와 열병합사이클을 병합한 신기술 시스템이며 스웨덴에 시범 플랜트⁵⁾가 있음.

3.2 수송용 바이오연료 에너지 수지와 생산원가

바이오매스는 각종 화학공학, 생물공학 기술을 응용하여 바이오디젤, 메탄가스(CNG 차량), 바이오알콜(에탄올), 메탄올 등의 수송연료용 액체 혹은 가스연료로 만들 수 있다. 이는 차량 연료로 사용되어 수송부문의 CO₂ 저감에 크게 기여할 수 있는 것이다.

다음 <표 5>에는 현재의 기술로 생산이 가능한 바이오연료의 에너지 수지를 먼저 살펴 보았다.

한편, <표 5>에서와 같은 에너지 수지에 근거한 수송용 바이오 연료의 추정 생산원가는 다음 <표 6>과 같다. <표 6>에서 현재의 기술로 가장 생산원가가 낮은 것은 바이오매스를 가스화하여 메탄올을 생산하는 것이다. 그러나, 지금까지 자동차 연료로 상용화 된 것은 가

화학연료의 바이오매스 대체를 통한 이산화탄소 배출의 저감

장

<표 5> 수송용 바이오연료의 에너지 수지

수송용 바이오연료명 (원료 및 공정기술)	에너지 투입		에너지 산출	
	원료 (MWh)	공정에너지 (MWh)	연료 (MWh)	부산물 (MWh)
바이오디젤 (에스테르화 유채유) ^a	1	0.035	0.45	0.5
알팔파 메탄가스 (재배후 혐기소화) ^b	1	0.19	0.63	-
바이오에탄올 (밀전분 이용 발효생산) ⁶⁾	1	0.26	0.50	0.10
바이오에탄올 (버드나무 산당화) ⁷⁾	1	0.09	0.30	0.42
바이오에탄올 (버드나무 효소당화) ⁷⁾	1	0.14	0.39	0.30
메탄올 (버드나무 합성가스 공정) ⁸⁾	1	-	0.65	-
바이오에탄올 (폐목재(침엽수) 효소당화) ^c	1	0.12	0.34	0.26
메탄올 (폐목재(침엽수) 합성가스 공정) ^c	1	-	0.57	-

a. kg당 0.25kWh의 에너지로 1톤의 유채씨에서 330리터의 유채유를 얻고 110kg의 메탄올과 1000kg의 유채유가 1톤의 에스테르화 유채유(바이오디젤)을 생산하며 공정 에너지는 생산 에너지의 2%를 쓴다.

b. 알팔파 건조 톤당 2.5MWh의 바이오가스(메탄)를 생성함.

c. 버드나무의 저위발열량은 4.5MWh/dry tonne, 폐목재는 5.1MWh/dry tonne 이므로 이에 근거하여 계산.

<표 6> 수송용 바이오 연료의 생산원가

수송용 바이오연료명(원료 및 공정기술)	현재 원료가격 기준		2015 원료가격 기준		저장 및 유통비 ^{9,10)}
	생산원가	부산물보전후	생산원가	부산물보전후	
바이오디젤 (에스테르화 유채유) ^a	170	140	140	110	5.2
알팔파 메탄가스 (재배후 혐기소화) ¹¹⁾	74	67	57	50	13
바이오에탄올 (밀전분 이용 발효생산) ¹¹⁾	150	-	120	-	14
바이오에탄올 (버드나무 산당화) ⁷⁾	120	92	102	74	14
바이오에탄올 (버드나무 효소당화) ⁷⁾	98	83	85	70	14
메탄올 (버드나무 합성가스 공정) ⁸⁾	43	-	35	-	16
바이오에탄올 (폐목재(침엽수) 효소당화) ¹⁾	93	78	85	70	14
메탄올 (폐목재(침엽수) 합성가스 공정) ⁸⁾	40	-	35	-	16

a. 바이오디젤과 메탄가스는 생산지역에서 소비되는 것으로 보아 경유 유통비의 50% 정도로 추정된 것임.

값비싼 바이오디젤과 중간 생산원가의 밀전분 이용 에탄올이다. 이것은 메탄올이 독성위험물로 취급이 용이치 않은 점도 있고 바이오디젤이나 에탄올은 농부산물로 생산되므로 농업보호의 측면에서 보조금을 지급하며 환경보존(배가스 저감)의 일환으로 추진되고 있기 때문이다. 버드나무(목질계)를 이용한 에탄올 생산과 메탄가스는 생산원가 저감의 가능성이 크고 자원도 풍부하지만 아직도 가솔린과 가격 경쟁력이 없고 공장의 규모가 초대규모(하루 500톤 에탄올 생산 이상)가 되어야 하면 현재 기술개발이 급속히 진행되고 있기 때문인 것으로 보인다¹²⁾(선발공장은 신기술에 의해 위험 당하기 쉽기 때문).

4. 바이오매스의 사용에 따른 이산화탄소의 저감과 비용

4.1 열 및 전력생산의 이산화탄소 저감

상기한 바이오매스의 생산성(<표 1> 참조)과 경제성 및 열효율(<표 3>과 <표 4>)을 참조하여 각종 열 및 전력생산 시설의 연료를 바이오매스(여기서는 버드나무칩)로 바꿀 경우의

<표 7> 소, 중, 대규모 열 및 전력생산 시설의 화석연료를 버드나무칩으로 바꿀 경우의 이산화탄소 배출저감 및 배출저감에의 소요비용

용량 및 기존 연료별	단위 재배면적당 이산화탄소 배출저감 (tonne C/ha · yr)	에너지 공급량 기준* 이산화탄소 배출저감 (kg C/MWh)	이산화탄소 배출저감 톤당 비용 (\$/tonne C)
(소규모보일러) 경질유 연료	4.7	63.5	14
(중규모보일러) 천연가스	4.8	64.8	70
경질유	5.9	79.7	55
중질유	5.8	78.4	145
석탄	8	108.1	60
(열병합 발전) 천연가스	5.0	67.5	125
중질유	7.3	98.6	60
석탄	9.5	128.4	45

* 버드나무(*Salix*)의 단위재배 면적당 연간 에너지 생산율을 74 MWh/ha · yr(<표 1> 참조)로 할 경우의 이산화탄소 배출저감량임 (현재의 기술로는 이 량의 약 54%만이 감축될 것으로 판단됨)

주: 이 부분의 분석결과는 원문에서는 그래프로 도시되어 있다. 그러나, 지금까지의 번역에서 축약된 부분(예를들면 화석연료 보일러를 전기히터(수력, 원자력등 비화석연료 기원 전력이라고 가정)로 교체할 경우의 이산화탄소 저감효과)이 포함되고 있으므로 표(table)로 만들어 번역하였다.

이산화 탄소 배출저감 효율과 저감에 소요되는 비용을 다음 <표 7>에 종합한다(원문의 Fig. 1, 2, 3 참조).

<표 7>에서 당초 단위 에너지 공급량 기준 이산화탄소 배출이 많은 순서인 석탄, 중질유, 경질유, 천연가스의 순으로 연료를 바이오매스로 할 경우 배출저감의 효과가 두드러 지는 것을 볼 수 있으며, 한편 저감비용은 역순으로 낮아서 석탄 및 중질유 열병합 발전소 등은 시 급히 바이오매스 연료로의 연료대체를 서둘러야 하는 것으로 나타났다. 한편, 소규모 보일러의 경우에는 이산화탄소의 배출저감에 드는 비용이 적으므로(소규모 보일러의 경우 가정, 상업용으로 교체비용, 운전비용 등이 낮기 때문) 가정, 상업용 보일러의 바이오매스 연료로의 대체가 저비용으로 이산화탄소의 획기적 저감을 꾀하는 수단이 될 수 있음을 명백히 보여주고 있다.

4.2 수송용 바이오연료의 사용에 따른 이산화탄소 저감

<표 1>과 <표 3>의 바이오매스 생산성과 에너지 수지와 <표 5>, <표 6> 수송용 바이오연료 생산공정의 경제성을 감안하여 기존 수송용 가솔린과 디젤(경유)를 대신하여 에탄올, 메탄올과 메탄가스를 수송용 연료로 활용할 경우의 이산화탄소 배출저감의 가능성과 경제성을 살펴 보았다.

먼저 바이오연료의 성질이 기존연료와 조금씩 다르므로 에너지 효율상의 차이와 기존의 차량을 바이오연료 차량으로 교체할 경우의 추가비용을 다음 <표 8>에 나타내었다.

<표 8>의 가정하에서 승용차와 트럭의 연료를 각종 바이오연료로 대체할 경우의 이산화탄소 저감율과 단위량의 이산화탄소 저감당 소요비용은 다음 <표 9>와 같이 계산 할 수 있다.

<표 8> 기존연료(가솔린, 디젤)의 바이오연료로의 교체에 따른 엔진효율의 변화와 자동차 제작 추가비용(바이오연료용으로 최적화된 차량을 대량생산할 경우로 가정).

연료교체의 방법	엔진효율 변화		자동차 제작 추가비용*	
	승용차, %	트럭, %	승용차, \$/대	트럭, \$/대
디젤 → 바이오디젤	-	±0	-	0
가솔린, 디젤 → 메탄(CNG)	+15	-15	1,300	7,800
가솔린, 디젤 → 에탄올	+15	±0	520	1,900
가솔린, 디젤 → 메탄올	+15	±0	520	1,900

* 승용차 제작의 추가비용은 15년 수명 연간 13,000km 주행, 트럭의 경우 내구연수 12년 연간

화학연료의 바이오매스 대체를 통한 이산화탄소 배출의 저감

48,000km 주행의 가정하에서 주행거리 km당 추가비용으로 환산할 수 있음.

<표 9> 수송용 화석연료의 바이오연료 교체에 따른 이산화탄소 배출저감 및 소요비용

차종 및 교체연료별	단위 재배면적당 CO ₂ 배출저감 (tonne C/ha · yr)	에너지량 기준* CO ₂ 배출저감 (kg C/MWh)	CO ₂ 배출저감 톤당 비용 (\$/tonne C)
(승용차, 기존 가솔린)			
메탄가스 (알팔파 혐기소화 CNG**)	2.5	44.6	420
바이오에탄올 (밀전분 이용 발효생산)	1.8	62.0	860
바이오에탄올 (버드나무 산당화)	4.0	54.0	400
바이오에탄올 (버드나무 효소당화)	3.6	48.6	480
메탄올 (버드나무 합성가스 공정)	4.1	55.4	240
(트럭, 디젤연료)			
바이오디젤 (에스테르화 유채유)	2.1	105.0	480
메탄가스 (알팔파 혐기소화 CNG)	1.8	32.1	490
바이오에탄올 (밀전분 이용 발효생산)	1.6	55.1	1,060
바이오에탄올 (버드나무 산당화)	3.7	50.0	410
바이오에탄올 (버드나무 효소당화)	3.1	41.9	580
메탄올 (버드나무 합성가스 공정)	3.5	47.3	320

* 바이오매스 원료별 단위면적당 연간 에너지 생산율(<표 1> 참조)의 경우 이산화탄소 배출저감량임.

** Compressed Natural Gas : 바이오가스를 정제, 압축하여 자동차 등의 연료로 쓰는 경우

주 : 이 부분의 분석결과는 원문에서는 그래프로 도시되어 있다. 그러나, 지금까지의 번역에서 축약된 부분(예를들면 화석연료 보일러를 전기히터(수력, 원자력 등 비화석연료 기원 전력이라고 가정)로 교체할 경우의 이산화탄소 저감효과)이 포함되고 있으므로 표(table)로 만들어 번역하였다.

<표 9>에서는 이산화탄소 배출저감 톤당의 비용이 바이오매스를 열이나 전력발생에 이용하는 경우에 비하여 수배 혹은 십배 정도가 됨을 볼 수 있다. 이것은 바이오매스를 그대로 연소하는 경우와는 달리 바이오 연료로의 전환비용이 반영된 것으로서 당연한 것으로 볼 수 있다. 수송용 연료로 이용하기 위하여 바이오연료를 개발하는 것은 이산화탄소의 저감 뿐만 아니라 수송체계 연료의 석유의존도 감소, 기타 자동차 배기가스에 의한 대기오염의 감소 등 여러 가지 목적이 있으므로 바이오연료가 이산화탄소 배출 저감의 측면에서만 고려되어야 할 것은 아니다.

그리고, 바이오연료의 특성상 트럭 등 중차량 보다는 승용차 등 경차량에서 이산화탄소의 저

감 효과가 크고 교체 비용도 적게 드는 것을 알 수 있다. 수송용으로 이용될 바이오연료로서 미래의 유력한 대안은 합성가스 공정을 거쳐 생산되는 메탄올과 목질계(버드나무 등)의 당화, 발효로 생산되는 바이오에탄올 인것도 이 <표 9>에서 알 수 있다.

5. 결 론

<표 2>에 의하면 현재 연간 70TWh/yr로 소비되는 바이오매스 에너지는 2015년 까지 125TWh/yr로 증가될 수 있으며, 이를 달성하기 위한 에너지 작물로는 버드나무속(칩으로 가공)이 가장 좋고 벌채 폐목의 광범위한 수집 이용이 필요한 것으로 조사 되었다. 그러나, 벌채 폐목을 수집 이용할 때는 지력유지를 위하여 소각회의 토양환원이 요구되는 것으로 나타났다. 이와같이 하면 연간 1500만톤에 이르는 스웨덴의 1992년 이산화탄소 배출량의 절반을 제거할 수 있는 것으로 평가 되었다.

한편, 열 및 전력생산 부문의 바이오매스 연료로의 대체로 인한 CO₂ 배출 저감에는 CO₂ 저감 톤당 \$50~150이 소요되는 것으로 나타났고 소규모 가정용 보일러와 석탄연소 유틸리티를 바이오매스 연료로 교체할 때 가장 효과가 큰 것으로 나타났다.

이산화탄소 배출저감을 위한 바이오 연료의 사용을 고려할 경우 목질계 바이오매스(여기서는 버드나무로 대표)를 가스화 하거나 당화발효하여 메탄올 이나 에탄올 연료를 생산하는 것이 가장 효과가 큰 것으로 나타났다. 반면에 유채재배에 의한 바이오디젤 생산, 곡식(여기서는 밀)으로부터 에탄올 생산, 그리고 메탄가스 이용은 상대적으로 이산화탄소 저감효과가 낮고 경제성도 떨어졌다. 메탄올, 에탄올을 비롯한 알콜연료는 2000년대 초반(1995년 기준 5~10년 내) 상업화될 것으로 보는데 바이오디젤은 이미 실용화 되고 있다.

(원문 : L. Gustavsson, P. Borjesson, B. Johansson and Sveningsson L., (1996)
Reducing CO₂ emission by substituting biomass for fossil fuels.
Energy Vol. 20, No. 11, pp.1097-1113)