

상향식 접근법에 의한 국내 시설재배 에너지부분의 온실가스 배출량 및 감축 잠재량 분석^{††}

백천현[†] · 정용주*

동의대학교 산업경영공학과, *부산외국어대학교 e-비즈니스학과
(2015년 10월 5일 접수, 2015년 11월 6일 수정, 2015년 11월 10일 채택)

Greenhouse Gas Emission and Abatement Potential Analysis for the Korean Horticulture Energy Sector Using Bottom-Up Approach

Chunhyun Paik[†], Yongjoo Chung*

Dong-eui University, *Busan University of Foreign Studies

(Received 5 October 2015, Revised 6 November 2015, Accepted 10 November 2015)

요 약

상향식 접근법을 통한 국내 농업 시설재배부분의 온실가스 배출잠재량을 산정하고 이를 바탕으로 감축잠재량 및 감축한계비용을 도출하였다. 이를 위해 시설재배부분의 활동량을 정의하였고 국내의 각종 문헌 및 통계자료를 이용해 시설재배부분의 에너지원별 사용량을 추정하였다. 추정된 에너지사용량을 통해 에너지원별 원단위를 도출하고 이를 이용해 2030년까지의 온실가스 발생 잠재량을 산정하였다. 다음으로, 국내에서 고려하고 있는 감축수단별 감축효과 분석을 통해 감축수단별 감축잠재량 및 감축한계비용 분석을 수행하였다.

주요어 : 시설재배, 온실가스, 상향식접근법, 감축잠재량

Abstract - A bottom-up approach has been conducted to estimate greenhouse gas (GHG) emission and to analyze the marginal abatement cost for the Korean horticulture energy sector. With the systematically derived activity and energy balance data, the BAUs have been estimated, along with the marginal abatement cost over the period 2010 through 2030. The result from the marginal abatement cost analysis may provide general guidelines and procedures for the establishment of GHG abatement polices.

Key words : Horticulture Sector, GHG Emissions, Bottom-up Approach, BAU, Marginal Abatement Cost

1. 서 론

기후온난화에 대처하기 위해 온실가스(GHG, Greenhouse Gas) 배출량을 감축하고자 하는 노력이 전 세계적으로 경주되고 있다. 국내에서도 2009년도에 2020

년 국내 배출량을 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 30% 감축을 국내외에 선언하였고, 최근에는 2030년까지 국가 온실가스 감축목표를 BAU 대비 37% 감축으로 수정하였다.

농축산(농업)부분의 온실가스 배출원은 에너지와 비에너지부분으로 크게 구분할 수 있다. 에너지부분에서의 온실가스 배출은 농기계 및 냉난방 등 농업활동에 수반되는 에너지(화석연료, 전력 등) 소비로 발생되고, 농업의 비에너지부분의 배출은 농경지 토양, 작물재배, 가축사육에 의해 발생하는 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)를 의미한다. 2010년 기준으로 농업의 에너지와

[†]To whom corresponding should be addressed.

Depart. of Industrial & Management Engineering, Dong-eui University 176 Eomgwangno Busan_jin_gu, Busan 47340, Korea

^{††}이 논문은 2015학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(2015AA055).

Tel : +82-51-890-1660 E-mail : chpaik@deu.ac.kr

비에너지부분의 온실가스 발생량은 국내 온실가스 발생량의 약 1.2%)와 3.3%를 각각 차지하고 있다. IPCC (1996) 가이드라인에서 온실가스 산정 항목 및 절차에 대해 규정하고 있는 농업의 비에너지 부문과는 다르게, 농업활동에 수반되는 에너지 사용으로 발생하는 온실가스 발생량 산정을 위한 별도의 절차는 IPCC 가이드라인에 마련되어 있지 않으며 이 부분에 대한 국내 연구 역시 비에너지 부문에 비하면 매우 부족한 현실이다. 활동량(activity)과 배출계수(emission factor)를 곱하는 형태로 간단하게 산정될 수 있음에도 불구하고 이 같이 관련 연구가 부족한 이유는 산정에 요구되는 각종 관련 자료의 미비가 가장 큰 요인으로 파악된다. 농업 에너지부분에서 주요 온실가스 배출원은 다시 농업기계, 시설재배 및 축사의 냉난방용으로 구분할 수 있다²⁾. 이 중에서 시설재배부분의 배출규모는 다른 부분과는 다르게 지속적으로 증가하고 있으며, 농업부문에서 현재 고려되고 있는 대부분의 주요 온실가스 감축수단(기술)이 시설재배 부분과 관련되어 있다(김창길 외 2011, 박현태 외, 2010).

온실가스 배출 및 감축 잠재량을 산정을 위한 접근법은 크게 하향식(top-down)과 상향식(bottom-up)으로 구분할 수 있다(Detlef et al. 2011). 경제학 분야에서 주로 활용하고 있는 하향식 접근법은 거시경제 지표를 이용하여 온실가스 배출량을 추정하는데 대부분의 경우 농업의 특정부분이 아닌 농업부문 전체를 대상으로 온실가스 배출 잠재량을 산정한다(김연중 외 2013, 김충실 외, 2009, 최한주 외, 2006). 이러한 하향식접근법은 거시경제적인 지표에 따른 부문의 에너지 사용행태에 대한 특성을 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있음에도 불구하고 특정 부분(시설재배)의 활동량의 직접적인 영향분석에 한계를 가지고 있기 때문에 시설재배부분으로 국한된 감축수단의 효과분석에 어려움이 있다. 이에 반해 분석 대상 부문의 활동량과 배출계수를 기반으로 하는 상향식접근법은 그동안 에너지생산 부문(전력, 정유 등)과 산업부분에 적용되어 활동량 및 배출계수에 영향을 미치는 기술발전을 고려한 온실가스 배출 및 감축 잠재량을 산정하는데 효과적으로 활용되고 있다(백천현 외, 2015, 정용주 외, 2015). 농업부분의 경우 상향식 접근법에 의한 국내외 연구는 비에너지부분에 집중되어 있다(Dalgaard et al., 2011,

Paik et al., 2015, Zhou et al., 2007). 하지만 상향식 접근법에 의한 농업의 에너지부분에 대한 국내 연구는 매우 미진한 상태이다. 본 연구에서는 상향식접근법을 이용해 시설재배부분의 온실가스 배출량 전망치와 및 감축잠재량을 산정한다. 상향식접근법에서는 온실가스 발생영역의 활동량(activity)을 정의하고 단위 활동량별 에너지원별 사용량을 도출하여 온실가스발생량을 추정한다.

2. 시설재배부분의 활동량정의 및 에너지 사용행태

2.1 활동량 정의

시설재배 작물은 크게 과채소류와 화훼류로 구분할 수 있는데, 시설재배 면적은 국내 농업경쟁력 제고를 통한 농가소득 향상을 위해 국가의 지원 하에 꾸준히 확대되어 왔다. 이는 경종 분야의 다른 작물의 재배면적이 지속적으로 감소하고 있는 것과는 대비되는 현상이다. 시설재배에서 에너지 사용은 대부분 가온을 위한 난방용으로 사용된다. [Table 1]은 시설재배면적과 가온면적의 연도별 변화추세를 보여준다. 시설재배면적은 최근 들어 다소 정체되거나 감소추세에 있으나 가온면적은 지속적으로 증가하고 있는 모습을 보이고 있다. 가온면적의 증가는 가온에 필요한 난방 에너지의 증가를 수반하는데, 에너지절감을 위한 다양한 절감수단들이 정책당국의 지원 하에 보급되고 있다. 가온방법은 크게 온풍난방, 온수난방, 지중난방 등으로 구분될 수 있는데, 아직까지 온풍난방의 비중이 절대적으로 많은 비중을 차지한다. 또한 온풍난방에 사용되는 에너지로 유류가 절대적인 비중을 차지하고 있으며 최근에는 연탄, 폐목, 코르크 등 고체연료의 사용이 증가하고는 있으나 그 비중은 아직 미약한 편이다. 한편, 시설재배의 에너지 절감기술인 보온기술 역시 보급이 확대되고 있다. 본 연구에서는 가용한 자료의 종류와 뒤에서 소개할 감축수단 단위와의 정합 등을 고려하여 시설재배면적 중 가온면적을 시설재배부분의 활동량으로 정의한다.

1) 이 비율에는 농업부문과 더불어 어업부문에서의 에너지사용으로 인한 온실가스배출량이 포함되어 있음.
2) 농업활동과 관계없이 농촌가정에서 이용되는(예, 주거 냉난방용, 취사 등) 에너지는 포함되지 않는다.

Table 1. 연도별 시설재배 및 가온면적

연도	시설재배 면적 (ha)			가온면적	
	채소	화훼	합	면적(ha)	비율(%)
1990	23,698	1,752	25,450	2,200	8.6
1991	26,780	2,229	29,009	2,762 ⁺	9.5
1992	29,258	2,449	31,707	3,467 ⁺	10.9
1993	33,448	2,483	35,931	4,352 ⁺	12.1
1994	37,801	2,844	40,645	5,463 ⁺	13.4
1995	40,077	3,054	43,131	6,858	15.9
1996	42,669	3,274	45,943	8,537 ⁺	18.6
1997	43,934	3,338	47,272	10,626	22.5
1998	45,265	3,244	48,509	11,437 ⁺	23.6
1999	47,940	3,292	51,232	12,309	24.0
2000	48,853	3,336	52,189	12,398	23.8
2001	48,749	3,386	52,135	12,710	24.4
2002	48,535	3,338	51,873	12,950	25.0
2003	48,589	3,560	52,149	12,602	24.2
2004	47,840	3,397	51,237	12,370	24.1
2005	48,574	3,448	53,022	12,886	24.3
2006	48,680	3,232	51,912	12,537	24.2
2007	49,828	3,208	53,036	12,776	24.1
2008	50,345	3,063	53,408	13,329	25.0
2009	50,024	3,112	53,136	14,695	27.7
2010	48,835	2,994	53,409	15,591	29.2
2011	49,537	2,856	52,393	16,103	30.7
2012	47,924	2,674	50,598	NA	NA

출처: 채소생산실적 및 화훼재배현황(농림부)

통계청 및 농림통계연보에서도 시설재배면적에 대한 자료를 발표하고 있으나 위 자료와는 다소 차이 있음.

가온면적 자료와의 일관성을 위해 농림부 자료 사용

+: 보간법으로 추정된 수치임.

2.2 에너지 사용행태 분석

본 연구의 조사에 의하면, 시설재배부분의 에너지 사용행태에 대한 구체적인 정보를 제공하는 국내의 통계자료 및 문헌은 존재하지 않고 다만 농업 전체를 대상으로 하는 관련 통계 및 자료를 제공하는 여러 출처의 자료가 있다. 농업부문에서 사용되고 있는 에너지의 종류는 크게 석유류, 석탄류 그리고 전력 등으로 구분할 수 있는데 에너지원별 사용량을 제공하는 대

표적 자료로는 에너지경제연구원이 매년 발간하는 에너지통계연보가 있다. 하지만 이 자료에는 농업과 어업이 구분되지 않고 단일부분으로 분류되어 있다. 한편, 한국석유공사가 정기적으로 발간하고 있는 석유류 수급통계에서도 연도별 에너지 사용량이 석유류에 속하는 에너지원별로 제공하고 있는데 에너지통계연보와는 다르게 에너지사용량이 농업과 어업으로 구분되어 있다. 하지만 제공되는 자료가 석유류에 국한된다는

한계를 지니고 있다. 3년마다 발표되는 에너지총조사에서 제공되는 자료가 다른 출처의 자료와 가장 큰 다른 특징은 에너지의 사용용도별로 에너지 사용량을 구분하고 있는 점이다. 하지만 조사시점마다 에너지 사용용도의 분류가 상이한 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 에너지통계연보, 석유류수급통계, 에너지총조사 등 확보 가능한 통계자료를 이용해 시설재배부분의 에너지원별 에너지사용량을 추정한다. 먼저, 시설재배부분이 포함된 농업부분의 에너지 사용량 추정은 에너지통계연보에서 주어진 (농업+어업)부분의 석유류의 에너지원별 절대 사용량을 석유류수급통계에서 주어진 석유류의 농업과 어업의 상대적인 비율을 이용해 산정하였다. 다음으로, 이와 같이 산정된 농업부분의 에너지 사용량에서 시설재배부분의 에너지 사용량을 분리하기 위해 에너지총조사의 결과를 이용하였다. 농업부분에서 사용용도별로 에너지 사용을 구분한 통계자료가 없는 현실을 감안하여 본 연구에서는 농업부분에서 사용되는 에너지 중에서 (농업기계+수송)이 차지하는 비율을 에너지총조사를 참고하여 에너지원별로 산정하였다. 농업기계와 수송이 차지하는 비율을 묶어서 산정한 이유는 여섯 번(1995~2010)에 걸친 에너지총조사에서 사용용도의 구분이 비교적 일관되게 이루어진 것이 농업기계용과 수송용에 관한 것이기 때문이다. 한편, 에너지총조사의 농업기계 항목에 난방기가 포함되어 있는 것으로 가정하여 농업기계의 석유류 사용비율을 산정할 때 난방기 비율(64%)을 차감하였다(농촌진흥청, 2008). 농업부분의 에너지 사용량 중에서 (농업기계+수송)분야의 사용량이 차감된 잔여 에너지사용량은 시설재배 및 축산부분에서 사용되는 에너지가 된다. 한편, 주어진 에너지원 중 석탄유(연탄)의 사용량은 에너지통계연보에 주어지지 않았기 때문에, 에너지총조사의 석유류 사용량 대비 연탄사용량에 대한 비율을 고려하여 산정하였다.

시설재배부분의 에너지원별 사용량 추정을 위한 마지막 단계로, 농업부분의 에너지 사용량 중에서 (농업기계+수송)분야의 사용량이 차감된 잔여 에너지사용량을 시설재배와 축산으로 다시 구분하였다. 1990년대 이후 고급 원예작물의 꾸준한 수요증가와 시설현대화 지원사업이 본격적으로 추진되면서 시설재배의 가온면적은 지속적으로 증가하고 있다. 또한 축산에서 축사관리에 소요되는 에너지 역시 돼지 및 닭의 사육두수 증가에 따라 1990년대 이후 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 시설재배 및 축산에 대한 에너지 사

용을 구분하고 이들의 사용비율을 제시한 연구는 없기 때문에 본 연구에서는 산업연관분석을 통해 2005~2009년 기간 동안의 농업부분의 에너지소비량 행태에 대한 분석을 수행한 김연중 외 (2013b)에 제시된 결과를 이용하여 농업의 기타분야의 에너지 사용량을 에너지원별로 시설재배와 축산부분으로 다시 구분하였다. 기존 연구결과를 이용해 에너지사용량을 시설재배용과 축산용으로 구분하는데 있어 다음과 같은 가정을 하였다. 먼저, 기존 연구는 에너지원별로 세분하지 않고 석유류, 석탄류 그리고 전력만으로 구분하고 있어 본 연구는 석유류의 에너지원별 비율은 시설재배용과 축산용으로 구분하기 전의 비율과 동일한 것으로 가정하였다. 또한 기존 연구는 2005~2009년 자료만 제시하고 때문에 1990~2004년 시설재배와 축산구분은 2005년 자료를 그리고 2010년의 구분은 2009년을 기준으로 이루어졌다.

[Table 2]는 이상에서 언급한 절차에 의해 산정된 시설재배부분의 연도별 에너지원별 사용량을 보여준다. 시설재배부분을 포함한 농업부분의 에너지 소비행태는 면세유 공급과 가격 정책을 포함한 정부의 정책적 요소, FTA 등 대내외 경제적 요소 그리고 기후 및 질병 등 매우 복잡한 요소들에 의해 영향을 받는다. 또한 면세유의 가격정책에 따라 농업에서 사용되는 에너지의 종류 역시 변화하고 있어 일관된 에너지원별 사용량패턴을 찾는 것은 매우 어렵다. 본 연구의 대상인 시설재배부분의 경우 농가소득 향상을 위한 정부의 강력한 지원정책과 FTA에 따른 농수산물 개방화의 대응책으로 시설재배 면적 중 가온면적은 꾸준히 증가하고 있는데 농업부분에서 언급되고 대부분의 에너지절감 수단이 시설재배와 연관되어 있는 것은 주목할 만한 일이다.

[Fig. 1]은 시설재배부분의 연도별 에너지 혼합(mix)의 변화 행태를 보여주고 있다. 사용되는 에너지원 중 석유류의 비중은 90년대 중반까지 가파른 증가를 보이다가 2000년대 초반까지 비교적 안정적인 비중을 유지하지만 그 후 감소하는 추세를 보이고 있다. 반면에 1990년 약 5%에 지나지 않았던 전력의 사용 비중은 2000년 중반 이후 꾸준한 증가세를 보이고 있으며 2010년에는 그 비중이 약 13%에 달하고 있다. 이 같은 에너지 혼합의 변화는 유가의 전반적인 상승추세와 정부의 기후변화 대응차원에서 화석연료 사용 억제 정책의 일환으로 면세유의 공급가격이 지속적으로 상승한 경우가 상대적으로 저렴한 전력으로 대체된

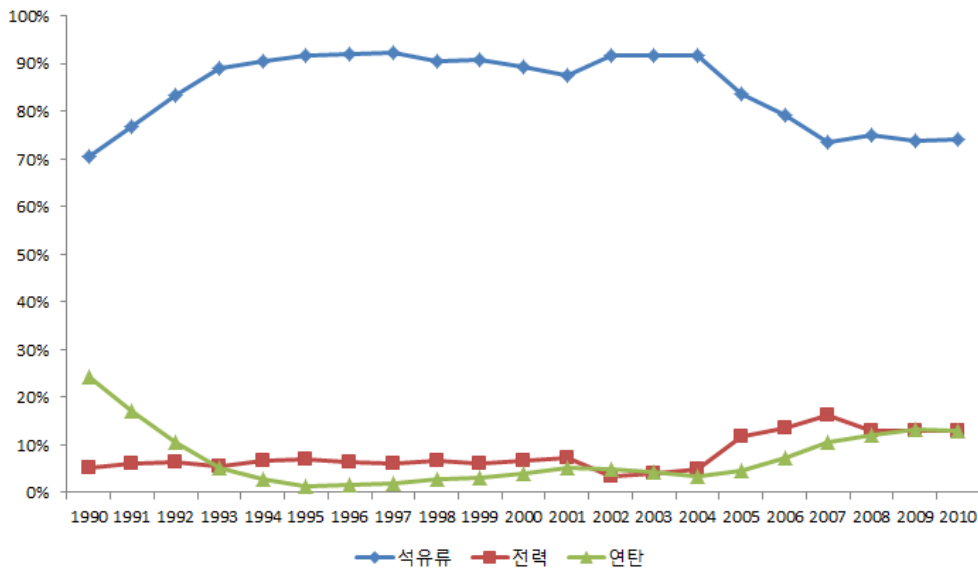


Fig. 1. 시설재배부분의 연도별 에너지원 Mix 변화

Table 2. 시설재배부분의 에너지원별 에너지 사용량(단위: 천 TOE)

에너지	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
휘발유	1	1	2	3	3	3	3	4	4	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
등유	136	128	175	212	219	282	362	402	403	458	379	435	323	294	257	245	205	206	186	179	203
경유	283	339	423	507	601	633	766	874	690	874	983	985	783	623	548	595	564	604	549	560	609
경질 중유	0	0	0	4	5	4	6	6	2	6	6	5	6	5	8	9	10	6	3	1	3
중유	5	6	7	15	19	27	35	45	41	61	63	54	54	44	53	56	60	60	53	45	48
중질 중유	4	6	7	10	14	14	20	43	34	52	58	51	47	48	56	0	0	0	30	28	24
전력	31	38	46	47	62	72	82	89	86	98	113	128	46	44	48	128	145	192	142	142	156
연탄	147	106	77	45	26	15	20	27	36	49	67	91	65	46	33	51	76	125	131	145	155
합계	608	625	738	843	950	1,052	1,296	1,490	1,296	1,599	1,670	1,751	1,324	1,105	1,003	1,084	1,061	1,193	1,094	1,100	1,199

결과로 보인다. 하지만, 또 다른 에너지원인 연탄은 1990년 약 24%에 달하던 비중이 1995년에는 1.4% 정도로 축소되었으나, 2006년 이후 의미 있는 증가를 기록하여 2010년에는 약 13%를 차지하고 있는데 이는 석유류 또는 전력에 비해 우수한 경제성이 가장 큰 요인인 것으로 생각된다.

3. 온실가스 인벤토리 및 배출량 전망치

시설재배부분의 활동량과 에너지원별 사용량을 이용해 구한 1990~2010년 기간 동안의 연도별 에너지원별 원단위(toe/ha)가 [Table 3]에 주어져 있다. 그리고 에너지원별 원단위에 활동량을 곱하여 산정한 에너지원별 에너지사용량이 [Fig. 2]에 주어져 있다. 여기서 석유류, 석탄유(연탄) 그리고 전력은 순발열량

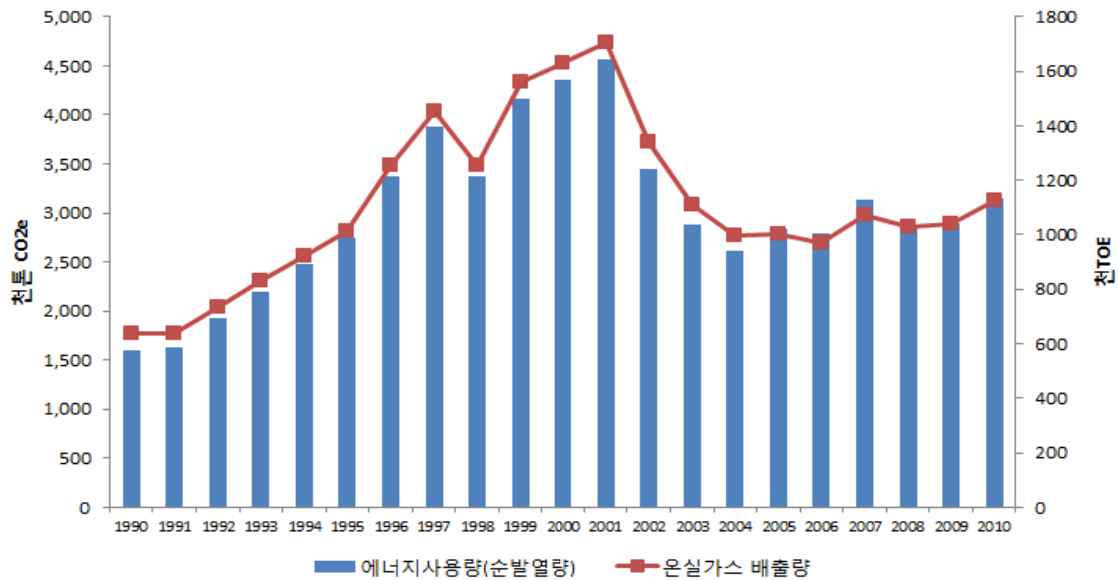


Fig. 2. 시설재배 부분의 연도별 에너지사용량 및 온실가스 배출량 인벤토리

기준으로 산정된 결과로 총발열량 기준으로 제시된 [Table 2]와는 구분됨에 유의한다. [Fig. 2]는 에너지 사용량을 근거로 1990~2010년 기간에 시설재배부분에서 배출된 온실가스 배출량(인벤토리) 산정결과를 보여 준다. 1990~2010년 기간 동안 에너지 사용량(또는 온실가스 배출량)의 변화추세 특징을 살펴보면, 2000년대 초반까지 증가추세를 보이다가 이후부터는 감소되다가 2010년 전후부터 다시 증가하는 모습을 보이고 있다.

시설재배부분의 온실가스 배출잠재량(BAU, Business As Usual) 산정을 위해 기준년도(base year)를 2010년으로 설정하였다. 연도별 BAU는 기준연도의 에너지 원별 배출계수에 BAU 산정 연도의 활동량을 곱하여 결정된다. 따라서 BAU 산정을 위해 활동량에 대한 예측이 선행되어야 한다. 시설재배부분의 활동량을 가온면적으로 정의하였는데, 활동량을 결정하는 유도인자(driver factor)로 시설재배 면적과 가온면적 비율이 있다. 본 연구에서 유도인자의 전망치를 이용해 활동량인 가온면적의 전망치를 한다. 그 이유는 활동량 자체에 대한 전망치는 존재하지 않지만 유도인자들에 대한 전망치 자료의 경우 부분적으로나마 확보가 가능하기 때문이다. 하지만 활동량 예측을 위한 유도인자에 대한 예측 값 역시 매우 부분적으로 그리고 산발적으로 발표된 제한적인 자료만이 존재한다. 유도인자 또는 활동량 예측에 대한 엄밀한 이론적인 분석은 본 연구의 범위를 벗어나기 때문에 본 연구에서는 제한적 자료만을 이용하여 시험적인 BAU를 산정한다. 따라서

본 연구에서 사용된 활동량과 이를 이용해 도출된 BAU는 활동량 또는 유도인자에 대한 보다 신뢰성이 있는 자료가 확보되면 추후 검증이 필요하다.

시설재배부분의 활동량인 가온면적은 시설재배 면적과 가온면적 비율을 곱하여 구할 수 있다. 2020년까지의 시설재배 면적 전망치는 “시설농자재 산업의 발전방안 연구”(한국농촌경제연구원, 2009)에서 제시된 추정치를 활용하였고, 2022년 전망치는 “농업, 농촌 및 식품산업발전계획”(농림축산식품부, 2013)에 나온 자료를 사용하였다. 2023년 이후 시설재배 면적을 전망한 자료는 없기 때문에 2023~2030년 동안의 전망치는 2014~2022년 동안의 증감률을 일률적으로 적용하였다.

시설재배 면적과 함께 활동량인 가온면적 계산을 위해 요구되는 자료가 가온면적 비율이다. 가온면적 비율을 전망한 자료가 없기 때문에 본 연구에서는 일본의 가온면적 비율을 참고하였다. 2012년을 기준으로 가온면적 비율이 45%인 일본의 경우를 참고하여, 2030년 가온면적 비율을 40%로 설정하고 중간에 놓인 연도의 비율은 증감률을 이용해 결정하였다. [Table 4]는 위와 같은 가정 하에 산정된 시설재배 부분의 활동량인 가온면적의 전망치를 보여준다.

활동량 전망치가 주어지면, 기준년도인 2010년의 에너지 원단위(toe/ha)를 이용해 BAU를 산정할 수 있다. 그런데 에너지 원단위의 연도별 변화행태를 살펴보면 특정한 추세를 보이는 경우도 있음을 확인할 수

Table 3. 시설재배부분의 연도별 에너지원별 에너지 원단위(toe/ha)

에너지	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
휘발유	0.50	0.47	0.55	0.58	0.60	0.49	0.40	0.41	0.34	0.13	0.11	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
등유	62.02	46.37	50.57	48.82	40.13	41.19	42.39	37.86	35.22	37.22	30.56	34.21	24.97	23.36	20.78	19.01	16.36	16.14	13.99	12.21	13.03
경유	128.44	122.72	121.97	116.39	110.06	92.32	89.78	82.24	60.32	70.98	79.33	77.47	60.47	49.45	44.29	46.16	45.02	47.28	41.21	38.10	39.08
경질 중유	0.08	0.13	0.13	0.91	0.94	0.62	0.75	0.54	0.22	0.50	0.49	0.38	0.48	0.40	0.61	0.73	0.78	0.47	0.20	0.09	0.22
중유	2.45	2.16	2.12	3.53	3.48	4.01	4.15	4.25	3.56	4.95	5.04	4.28	4.15	3.46	4.28	4.33	4.80	4.66	3.94	3.08	3.08
중질 중유	2.00	2.13	2.09	2.39	2.47	2.08	2.34	4.01	2.99	4.21	4.65	3.99	3.64	3.83	4.55	0.01	0.01	0.01	2.27	1.90	1.53
전력	14.11	13.76	13.32	10.90	11.41	10.50	9.66	8.39	7.51	7.93	9.13	10.06	3.52	3.50	3.90	9.91	11.59	15.05	10.64	9.63	9.98
연탄	66.76	38.47	22.17	10.28	4.76	2.21	2.36	2.53	3.12	3.97	5.39	7.20	5.03	3.69	2.68	3.93	6.08	9.79	9.84	9.86	9.96
소계	276.35	226.20	212.93	193.81	173.86	153.42	151.82	140.23	113.29	129.89	134.71	137.73	102.26	87.69	81.09	84.09	84.64	93.40	82.09	74.88	76.89

Table 4. 시설재배 부분의 활동량 전망치 (2010-2030)

구분	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
시설재배 면적 (ha)	53,409	52,393	50,598	53,510	56,590	57,053	57,496	57,918	58,321	58,704	59,069	61,079	63,158	64,031	64,916	65,813	66,722	67,645	68,579	69,527	70,488
가온면적 비율	29.2%	30.7%	31.2%	31.6%	32.1%	32.6%	33.0%	33.5%	34.0%	34.5%	35%	35.5%	35.9%	36.4%	36.9%	37.4%	37.9%	38.4%	38.9%	39.5%	40%
가온면적 (ha)	15,591	16,103	15,778	16,928	18,163	18,578	18,994	19,412	19,831	20,252	20,674	21,665	22,704	23,327	23,967	24,625	25,301	25,995	26,709	27,442	28,195

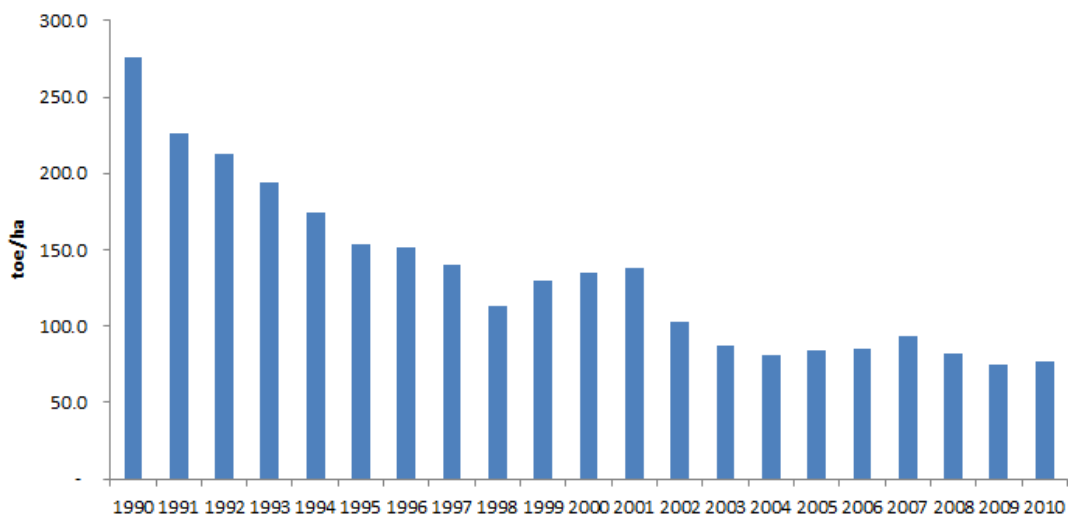
**Fig. 3.** 시설재배부분의 에너지원단위의 연도별 변화행태

Table 5. 시설재배 부분의 BAU (2010-2030): 시나리오 2의 경우

구분	단위	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
에너지	천TOE	1,134	1,161	1,144	1,203	1,263	1,282	1,300	1,319	1,337	1,354	1,372	1,410	1,448	1,470	1,491	1,511	1,531	1,550	1,569	1,587	1,603
배출량	천톤 CO ₂ e	3,132	3,207	3,160	3,322	3,487	3,539	3,591	3,642	3,692	3,740	3,788	3,895	3,999	4,058	4,116	4,173	4,228	4,281	4,332	4,381	4,428

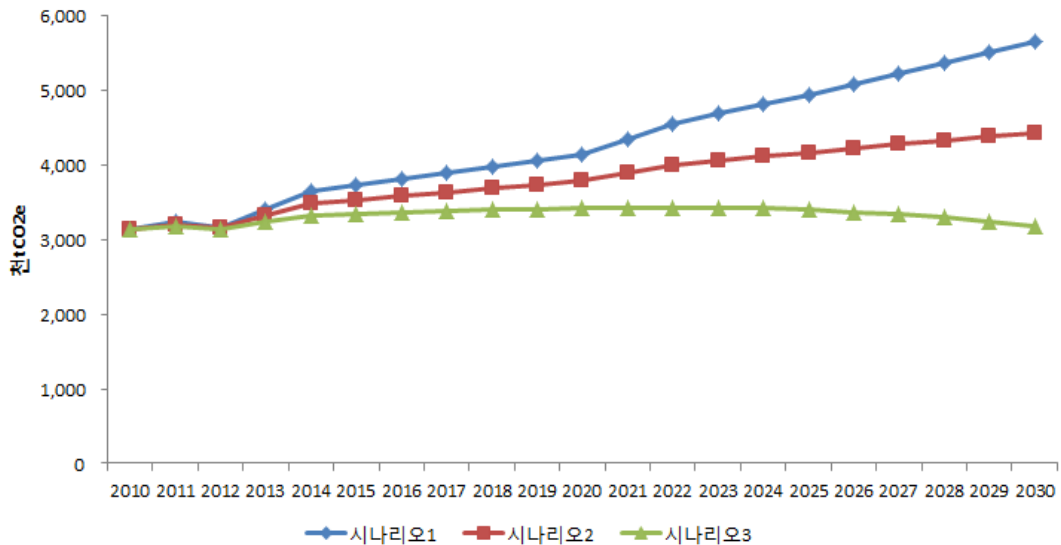


Fig. 4. 시설재배 부분의 시나리오별 BAU

있다. [Fig. 3]은 과거 20년간 시설재배부분의 에너지 원단위의 변화행태를 보여주는데, 이 기간 동안 원단위가 감소하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 에너지혼합 행태의 변화와 더불어 시설재배 면적의 확대에 따른 에너지 사용효율의 증가 그리고 각종 에너지 절감 정책의 시행에 따른 결과인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 BAU 산정에 있어 에너지 원단위의 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 원단위의 평균변화율에 대한 세 가지 시나리오를 고려하였다. 모든 시나리오에서 원단위 평균변화율을 구하기 위한 기간은 최근 6년(2005~2010)으로 설정하였다. 먼저, 시나리오 1은 평균변화율을 반영하지 않는 경우이다. 따라서 BAU 산정 기간인 2010~2030년 에너지 원단위는 2010년 원단위가 그대로 사용된다. 시나리오 2는 2005~2010년 동안의 평균변화율을 50%만을 그리고 시나리오 3은 100% 모두를 반영하는 경우를 가정한다. 예를 들어 시나리오 2의 경우 특정 연도의 에너지 원단위는 전

년도의 원 단위에 평균변화율 0.5를 곱하여 결정된다. 단 에너지원별 비율은 변하지 않는다고 가정한다.

[Fig. 4]를 보면, 에너지 원단위의 변화를 고려하지 않는 시나리오 1의 경우, BAU가 증가하는 것으로 나타났다는데, 이는 시설재배의 활동량 증가로 인한 에너지사용 증가효과가 그대로 반영된 결과이다. 한편, 시나리오 3은 최근 5년(2005~2010)간의 에너지 원단위 변화율을 BAU 산정에 100% 반영한 것이기 때문에 BAU는 감소 정도가 매우 크다. 시나리오 2는 시나리오 1과 시나리오 3과 중간 정도의 BAU 값을 나타내고 있다. 앞서서도 언급했듯이, 시설재배 부분의 상향식접근법에 의한 인벤토리 및 BAU 산정에 요구되는 많은 자료가 현재로서는 불완전한 상태이다. 따라서 위와 같은 시나리오별 분석의 결과에 타당성은 제시된 활동량에 대한 정의 및 전망의 불확실성에 대한 검토가 추후에 이루어져야 한다. [Table 5]는 시나리오 2 하에서 2010~2030년 기간 동안 BAU를 구체적으로 보여준다.

4. 온실가스 감축잠재량 및 감축한계비용

농업 에너지부문의 에너지(또는 온실가스) 및 감축 수단(또는 기술)의 대부분은 시설재배부분과 관련되어 있다. 시설재배의 에너지 감축수단으로는 보온력향상, 에너지효율향상 그리고 신재생에너지이용 등 세 가지로 구분할 수 있으며(김창길 외, 2011, 박현태 외, 2010), 감축수단별로 다양한 하위기술들이 존재한다. 하위기술별로 보급면적의 현황 및 전망 자료가 없기 때문에 본 연구에서는 감축수단을 하위기술로 세분화하지 않고 보온력향상, 에너지효율향상 그리고 신재생에너지 등 세 가지로 구분하였다.

국내에서는 2000년대 후반부터 국가 정책지원을 통해 감축수단의 시범사업을 시행하여 기술의 실용성, 경제성 등을 평가하여 보급하고 있다. 하지만 감축수단들에 대한 자료가 여러 출처에 산재되어 있고 산출된 근거가 명시되어 있지 않아 자료의 신뢰성이 매우 부족한 실정이어서 감축효과 및 감축비용에 대한 불확도(uncertainty)를 평가할만한 구체적인 자료가 전무한 상태이다. [Table 6]은 각 종 출처의 자료를 조사한 결과 얻은 감축수단별 보급 현황 및 계획에 대한 자료이다.

온실가스 감축수단별 보급면적 전망치 산정을 위해

“국가 온실가스 감축목표달성을 위한 로드맵(환경부, 2014)”에서 감축목표로 설정된 값을 기준자료로 이용하였다. 로드맵에서는 2020년 지열, 목재펠릿 등 신재생에너지 면적을 2013년 1,076ha에서 2020년 2,375ha 확대하고, 에너지절감시설 면적(본 연구에서는 이를 보온력향상 및 에너지 효율 향상 기술이 보급된 면적으로 가정함)을 2013년 4,690ha에서 2020년 10,050ha로 확대하는 방안을 제시하고 있다. 본 연구에서는 [Table 6]에 주어진 2009, 2012, 2013, 2020년 보급면적에 대한 현황 및 전망치에 대한 부분 자료를 이용하여 2010~2020년 기간 중에 현황 또는 전망치가 제시되지 않은 연도의 보급면적을 자료가 존재하는 기간 간의 증감률을 이용하여 추정하였다. 이 때 보온력향상과 에너지효율향상 기술 간에 구분이 필요한 경우 2009년 비율을 적용하였다. 이렇게 부분적이나마 자료가 있는 2020년까지의 전망자료와는 달리 2020년 이후의 자료는 전무한 상태이다. 뿐만 아니라 농업 에너지부문의 감축기술의 보급은 시장논리보다는 정부의 정책목표에 의해 주로 결정되기 때문에 과거자료에 의한 계량적인 예측방법을 적용하는 것도 한계가 있다. 본 연구에서는 2021~2030년 각 기술의 보급면적에 대한 전문가 자문 결과에 따라 보급향상기술, 에너지효율향상기술, 신재생에너지의 2030년 보급

Table 6. 시설재배부분의 온실가스 감축기술 보급현황 및 계획(단위:ha)

구분	2009	2012	2013	2020
보온력 향상기술	1,479 ³⁾	NA	4,690 ²⁾	10,050 ²⁾
에너지효율 향상기술	387 ³⁾	786 ³⁾		
신재생에너지 이용기술	91 ³⁾	NA	1,076 ²⁾	2,375 ²⁾
합(보급현황 및 계획)*	2,370 ¹⁾	3,610 ²⁾	5,766	12,425 ²⁾

1) 원예시설 에너지진단, 컨설팅 매뉴얼, 농촌진흥청 (2011)

2) 국가 온실가스 감축달성을 위한 로드맵 (2014); 2013-2017 농업 농촌 및 식품산업 발전계획, 농림축산식품부(2013)

3) 농업부문 에너지 이용 실태, 한국농촌경제연구원(2010).

* 2009년의 경우, 개별기술의 보급현황 자료와 합계 자료의 출처가 달라 개별기술의 보급면적과 합계가 다름.

Table 7. 시설재배부분의 온실가스 감축기술 보급목표

감축기술	에너지 절감기술 보급목표(가온면적대비 비율)	
	2020년(확정)	2030년
보온향상기술	0.39	0.45
에너지효율향상기술	0.10	0.20
신재생에너지	0.12	0.15

면적을 가온면적 대비 45%, 20%, 15%로 각각 설정하였다 ([Table 7]). 표에서 2020년 보급률은 국가 로드맵에 주어진 값을 이용해 산정된 값이다. [Table 8]은 감축기술별 보급면적에 대한 전망치를 보여준다.

감축수단 보급면적과 함께 감축량 산정에 필요한 또 다른 요소는 세 가지 감축수단별 온실가스 감축효과(감축률 또는 단위당 감축량)이다. 본 연구에서는 하위감축기술별 경제성분석을 수행한 문헌을 참고하여 주요 하위 감축기술별 감축효과 및 감축비용을 새로이 산정하였다. [Table 9]는 본 연구에서 감축잠재량 산정에 포함시킨 하위감축기술별 감축효과 및 한계감축비용을 보여준다. 음의 한계비용은 감축기술의 적용을 위해 투입된 비용보다 에너지(또는 온실가스) 감축을 통해 획득된 절감액이 큰 것을 의미한다. [Table 9]에서 보듯이, 목재펠릿 난방기를 제외한 대

부분의 기술들의 한계감축비용은 음의 값을 가지고 있으며 보온력향상 및 에너지효율향상 감축수단에 속하는 하위감축기술들은 신재생에너지에 속한 감축기술들 보다 한계감축비용 면에서 강점을 가지고 있다고 할 수 있다.

한편, 앞서 언급했듯이, 하위감축기술별 보급면적 전망치에 대한 확보가 불가능하기 때문에 보급면적 전망은 보온력향상, 에너지효율향상, 신재생에너지로 구분하여 이루어졌다. 따라서 세부 하위기술의 감축효과 및 감축비용을 가중평균하기 위한 하위기술별 비중은 현재의 보급면적을 감안하여 [Table 10]과 같이 설정하였다.

[Table 9]에 주어진 감축효과는 특정 시점에 실험실 또는 시범사업을 통해 획득된 자료를 이용해 산정된 것이다. 따라서 시설재배 환경에 따라 감축효과가 매

Table 8. 시설재배부분의 감축기술별 보급면적 전망(단위: ha)

구분	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
보온기술 향상	1,766	2,108	2,516	3,717	4,145	4,622	5,153	5,746	6,407	7,144	7,966	8,478	9,023	9,416	9,826	10,254	10,700	11,166	11,652	12,159	12,688
에너지 효율향상	490	621	786	973	1,085	1,209	1,348	1,504	1,676	1,869	2,084	2,339	2,625	2,888	3,178	3,497	3,847	4,233	4,658	5,125	5,639
신재생 에너지	169	313	580	1,076	1,205	1,349	1,511	1,692	1,894	2,121	2,375	2,556	2,751	2,903	3,063	3,232	3,411	3,599	3,798	4,008	4,229

Table 9. 시설재배부분의 주요 감축기술별 감축효과 및 감축비용

감축기술	세부 하위 감축기술	감축효과(톤CO ₂ e/ha)	한계비용(원/tCO ₂ e)
보온력향상	다겹보온커튼	92.5 ¹⁾	-264,915
	순환식수막보온	67.1 ¹⁾	-136,932
	보온터널개폐시스템	109.0 ¹⁾	-136,932
에너지 효율향상	농업용 열회수형 가온 환기장치	55.1 ²⁾	-197,146
	온풍난방기 배기열 회수장치	71.4 ²⁾	-266,469
	시설원예용제습기	1.0 ²⁾	0
신재생에너지	지열히트펌프	77.6 ³⁾	-45,860
	목재펠릿 난방기	486.0 ¹⁾	39,643
	공기열 히트펌프	43.4 ⁴⁾	-39,309

- 1) 기후변화 대응을 위한 농림수산물산업 전략수립 연구, 한국농촌경제연구원(2011)
- 2) 농업용 에너지절감시설 보급효과 및 정책방안, 농촌경제연구원(2009)
- 3) 농업부문 에너지 수급전망과 신재생에너지 농업시스템 구축 방안(1/2년차년도), 한국농촌경제연구원(2010)
- 4) 공기열 히트펌프의 감축효과 및 비용은 지열펌프에 비해 약 60%로 가정

Table 10. 감축잠재량 및 감축비용 산정을 위한 하위기술별 비중에 대한 가정

감축기술	세부 하위 감축기술	보급면적 비율
보온향상기술	다겹보온커튼	0.5
	순환식 수막재배시스템	0.3
	터널 보온덮개 자동개폐시스템	0.2
에너지효율향상기술	농업용 열회수형 가온 환기장치	0.5
	온풍난방기 배기열 회수장치	0.5
	시설원예용 제습기	0.0
신재생에너지 기술	온실냉난방용 지열히트펌프	0.5
	목재펠릿 난방기	0.3
	공기열 히트펌프	0.2

Table 11. 시설재배부분의 감축기술별 온실가스 감축량 전망치(단위:천톤CO2e)

구분	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
보온향상	272	317	368	423	485	513	542	563	585	607	629	651	674	696	719
에너지향상	49	58	67	78	89	101	115	127	141	155	171	188	207	227	248
신재생에너지	558	628	706	793	889	943	999	1,044	1,091	1,139	1,188	1,238	1,290	1,343	1,397
합	879	1,003	1,141	1,294	1,463	1,558	1,655	1,735	1,817	1,901	1,989	2,078	2,171	2,266	2,363

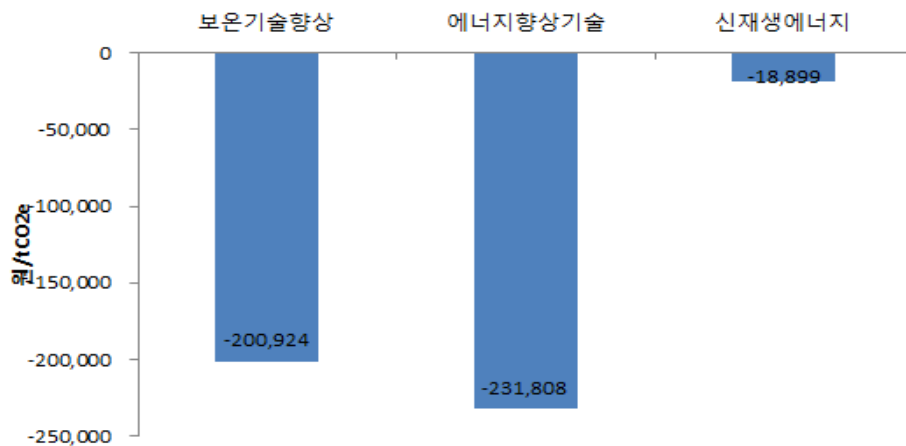


Fig. 5 시설재배부분의 감축수단별 한계감축비용

우 달라질 수 있다. 국가 온실가스 배출량 산정에 있어 개별 환경 특성의 차이를 일일이 반영하는 것은 어려운 일이지만, 과거자료 분석을 통해 비교적 명백히 밝혀진 특성요인들은 반영되어야 한다. 이러한 특성요인 중 하나가 BAU 산정에 대한 내용을 소개할 때 언급한 에너지원단위의 연도별 변화형태이다. BAU 산

정 시에 본 연구에서는 시간에 따른 에너지원단위의 변화요소를 반영하였기 때문에 온실가스 감축 잠재량 산정에도 이를 반영해야 한다. 그렇지 않으면, 사용되지도 않는 에너지 사용을 감축하는 형태가 되어 감축량을 지나치게 과대 계상하는 결과를 초래하게 된다. 본 연구에서는 감축기술별 감축잠재량 산정에 2010년

도 시설재배의 에너지원단위 대비 각 연도의 에너지 원단위에 대한 비율을 감축수단별 감축량 산정에 반영하여 산정된 2010~2030년 기간 동안의 감축수단별 온실가스 감축잠재량 전망치와 한계감축비용이 [Table 11]과 [Fig. 5]에 각각 주어져 있다.

[Table 11]에서 보듯이, 시간이 지날수록 신재생에너지 감축수단의 감축량은 다른 두 가지 감축수단의 감축량에 비해 크게 증가한다. 이것은 감축수단의 보급면적만으로 감축량이 결정되는 신재생에너지 경우와는 달리 보온향상 및 에너지효율향상 수단의 경우 감축량이 에너지사용량의 영향을 받기 때문이다. 즉, 에너지사용 원단위(toe/ha)가 일정하지 않고 가온면적의 증가에 따라 감소(에너지사용 효율 증가)하기 때문에 에너지 사용량과 감축수단 보급면적 모두에 의해 감축량이 결정되는 보온향상 및 에너지효율향상 감축수단의 감축효과는 보급면적만으로 결정되는 신재생에너지 감축수단에 비해 그 효과가 적게 나타난다. 이러한 결과는 본 연구에서 채택한 감축량 산정방법론의 특성에 기인하지만, 에너지사용 효율의 증가가 에너지 절대사용량 감소를 가져오고 이는 보온향상이나 에너지효율 향상으로 감축될 수 있는 에너지 절대량에 영향을 미칠 수 있는 상황이 반영된 것으로 볼 수 있기 때문에 의미가 있는 결과로 생각된다.

5. 결론

시설재배부분은 에너지를 소모하는 농업의 여러 분야 중에서 상당한 비중을 차지할 뿐만 아니라 농업부문에서 적용되는 감축기술 대부분을 차지하는 부분이다. 본 연구는 국내 농업의 시설재배부분을 대상으로 상향식접근법에 의해 온실가스 인벤토리, 배출량 전망치 그리고 감축잠재량 및 한계감축비용 산정에 대한 연구를 수행하였다. 상향식접근법을 위해 국내 관련 문헌 및 통계자료를 수집하고 분석하여 시설재배부분의 활동량인 가온면적과 에너지원별 에너지원단위를 도출하였다. 이를 이용해 시설재배부분의 BAU를 산정하였다. 또한 현재 국내에서 거론되고 있는 주요 감축수단별 감축잠재량과 한계감축비용을 산정하였다. 본 연구는 시설재배부분을 대상으로 상향식접근법에 의해 수행된 국내 최초 연구로 분석결과는 시설재배부분의 온실가스 배출 및 감축정책을 계획하고 실행하는데 가이드라인을 제시하는데 유용할 것으로 판단된다. 하지만 현재 국내의 관련 통계자료가 아직 부족

하여 본 연구결과의 비교 검증이 미비한 것은 본 연구의 한계라고 할 수 있다. 이에 향후 연구주제로서 시설재배 부분의 에너지원별 에너지사용량 등에 대한 정량적인 분석방법론을 개발하여 이러한 한계점을 극복하는 것은 상향식접근법의 유효성을 제고하는데 기여할 것으로 기대된다.

References

1. Kim C.S. and Lee H.G., "CO2 Emission Analysis of Energy consumption in Agricultural Sector", *Agricultural Economy*, 32(1), 41-61, (2009)
2. Paik C.H., Chung Y.J., and Yoo J.H., "Greenhouse Gas Emission Inventory Calculation of Korean Glass Industry through the Bottom-up Production Process Analysis", *Korean Management Science Review*, 32(1), 101-111, (2015)
3. Chung Y.J., Kim H.G., Paik C.H., and Kim Y.J., "Marginal Abatement Cost Analysis for the Korean Residential Sector Using Bottom-Up Modeling", *J. of Energy Engineering*, 24(1), 58-68, (2015)
4. Choi H.J. and Lee G.H., "An Estimation and Decomposition of CO2 Emissions Change in Korea Industry, 1990~2000 Using a Hybrid Input-Output Model and Structural Decomposition Analysis", *Environmental and Resource Economics Review*, 15(1), 27-50, (2006)
5. Dalgaard T., Olesen J.E. et al., "Developments in greenhouse gas emissions and net energy use in Danish agriculture-Kow to achieve substantial CO2 reductions?", *Environmental Pollution*, 159, 3193-3203, (2011)
6. Detlef P. van Vuurena, et al., "Comparison of top-down and bottom-up estimates of sectoral and regional greenhouse gas emission reduction potentials", *Energy Policy*, 37(12), 5125-5139, (2009)
7. IPCC, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, (1996)
8. Paik C.H., Chung Y.J., Kim H.G., and Kim Y.J., "Comparison of Emission Estimates for Non-CO2 Greenhouse Gases from Livestock and Poultry in Korea from 1990 to 2010", *Animal Science Journal*, DOI: 10.1111/asj.12456, (2015)

9. Zhou J.B., Jiang M.M., and Chen G.Q., "Estimation of methane and nitrous oxide emission from livestock and poultry in China during 1949-2003", *Energy Policy*, 35, 3759-3767, (2007)
10. Kim Y.J., Kim J.J., and Han H.S., *The Current Status of Energy Use and Policy in Agriculture and Rural Communities*, Korea Rural Economy Institute, Research Report R695-2, (2013)
11. 김연중, 김한호, 김재경, 배은영, 농업·농촌 에너지 수급 및 투입구조 분석, 한국농촌경제연구원 연구 보고서, R695, (2013)
12. Kim C.G., Jung H.K, et al., *Strategies for Agriculture, Food, Forestry and Fishery Industries against Climate Change*, Korea Rural Economy Institute, Research Report, (2011)
13. Park H.T. and Kim H.J., *Prospect of Demand and Supply of Energy in the Agricultural Sector and Strategies for introducing Clean Energy Farming System*, Korea Rural Economy Institute, Research Report, (2010)
14. 농촌진흥청, 시설원예 에너지절감 가이드북, (2008)
15. Korea Energy Economics Institute, *Energy Consumption Survey*, (1995~2010)
16. Korea Energy Economics Institute, *Yearbook of Energy Statistics*, (1990-2010)
17. Korea National Oil Corporation, *Korea Oil Statistics*, (1990-2010)
18. 환경부, 국가온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵, (2014)