

한국의 폐기물부문의 온실가스 배출량 및 감축잠재량 분석*

정용주¹ · 김후곤^{2†}

¹부산외국어대학교 e-비즈니스학과, ²경성대학교 경영학과

Analysis of Greenhouse Gas Emission and Abatement Potential for the Korean Waste Sector

Yongjoo Chung¹ · Hugon Kim^{2†}

¹Department of e-Business, Busan University of Foreign Studies

²Department of Management, Kyungsung University

■ Abstract ■

Waste sector has been a target of abatement policies by the most governments, even though its greenhouse gas (GHG) emission is not so high, since it is related to almost of other sectors. This study propose new GHG calculation equations which resolves logical contradiction of IPCC GL (Intergovernmental Panel on Climate Change Guideline) equations by including waste-to-energy effects. According to two GHG calculation equations, GHG emission inventory and BAU by the year 2050 have been computed. And GHG abatement potential and marginal cost for the five abatement policies carefully selected from the previous researches have been calculated for the year 2020. The policy that makes solid fuel like RDF from flammable wastes and uses them as combustion fuel of electricity generations has been found to be the most efficient and effective one among five policies. The cumulative abatement amount when five policies not mutually exclusive are applied sequentially has been reckoned.

Keywords : Waste, Greenhouse Gas(GHG), GHG Abatement Potential, GHG Abatement Cost, GHG Abatement Policy

논문접수일 : 2016년 10월 19일 논문게재확정일 : 2016년 12월 08일

논문수정일 : 2016년 12월 08일

* 본 연구는 환경부 2016년 '기후변화대응 환경기술개발 사업'에 의해 지원되었음.

† 교신저자, hkim@ks.ac.kr

1. 서 론

2011년 남아공 더반에서 개최된 유엔기후변화협약 당사국 총회를 계기로 주요 배출국인 미국과 중국을 포함한 새로운 기후변화체계의 수립이 예상되고 있다. 한편 한국은 2009년에 2020년 배출량을 배출전망치(BAU; Business As Usual)인 7.69억톤 대비 30% 감축목표를 국내외 선언하였고 2015년 6월에는 2030년의 감축목표치 37%를 제시하였다. 2009년 발표된 감축목표에 따르면 폐기물부문은 2020년 13.4%의 온실가스를 감축하는 것이다[6].

에너지 연소 또는 공정물질 사용에 따른 온실가스 배출을 산정하는 다른 부문과는 달리 폐기물부문은 폐기물 처리과정에서 발생하는 온실가스를 산정하는 비에너지 부문에 해당된다. 폐기물 처리과정에서 발생하는 온실가스 배출량은 국가전체에서 차지하는 비중이 그리 높지 않지만 가정, 상업, 산업을 비롯한 국가의 전 부문과 연관되어 있기 때문에 국가적인 감축목표를 달성하기 위한 정책의 주요 대상이 되고 있다.

국가적인 차원 또는 특정 지역에서 폐기물부문의 온실가스 배출 및 감축정책을 분석한 해외사례는 일부 발표되었다. Ioannis et al.[25]은 EU 29개 국가를 대상으로 폐기물부문의 온실가스 감축잠재량을 분석하였다. 이 연구에서는 폐기물 처리뿐만 아니라 폐기물 이동, 재활용에 따른 에너지 소비 및 절감 등 폐기물과 관련된 전 과정을 포함하고 있으며 감축정책으로는 매립에 대한 규제 정책의 효과를 분석하고 있다. 특히, 매립에 따른 온실가스 배출량 산정에 FOD(First Order Decay) 공식을 적용하고 있다. 반면, Cosmi et al.[20]와 Salvia et al.[28]은 상향식 모형의 하나인 MARKAL(Market Allocation)을 이용하여 이탈리아의 특정지역에서의 폐기물 처리와 관련된 정책의 효과를 분석하였다. 하지만 매립에 따른 온실가스 배출량 산정에 FOD가 아닌 Mass Balance 공식을 적용하고 있다. Gielen[23]은 상향식 모형중의 하나인 MARKAL을 이용하여 폐기물부문을 모형화하기 위한 방법론을 제시하고 있다.

국내의 경우, 국가적인 차원에서의 폐기물부문의

온실가스 배출량에 대한 분석은 국가인벤토리 보고서, 지자체 온실가스 산정 방법론 등 주로 유관기관에서 수행하는 보고서 형태로 이루어지고 있다. 이들 보고서의 대부분은 매립에 FOD를 적용하고 있지만 정상별 배출계수가 아닌 단일 배출계수를 적용함으로써 배출량 산정의 정확도를 떨어뜨리고 있다 [12, 13, 14, 15].

IPCC GL에 의하면 소각(incineration), 매립(landfill), 생물학적 처리(biological treatment) 등 폐기물 처리과정에서 발생하는 온실가스만을 폐기물부문에 산정하고 처리과정에서 발생하는 메탄, 여열 등의 부산물을 에너지화 함에 따른 온실가스 배출량 감축효과는 에너지 부문에서 다루기를 권고하고 있다[26]. 그러나 본 연구에서는 폐기물 처리에 의한 온실가스 발생과 부산물 에너지화에 따른 감축을 통합하여 분석하고자 한다. 즉 본 연구에서는 폐기물부문의 온실가스 배출량은 폐기물처리에 의한 발생량에서 부산물의 에너지화에 따른 감축잠재량을 뺀 양으로 정의한다. 이는 온실가스 감축정책이 IPCC GL의 구분에 따른 특정 부문과 관련되어 있다 하더라도 감축의 효과는 특정 부문에 한정하기 보다는 국가적인 관점에서 분석하는 것이 합당하기 때문이다. 또한, 폐기물 또는 폐기물 처리 부산물의 에너지화에 따른 온실가스감축을 폐기물부문의 감축수단으로 고려하고 있는데 에너지화에 따른 온실가스 감축잠재량을 폐기물부문에 포함시키지 않는 것은 모순이다. 실제로 Ioannis et al.[25]에서도 폐기물부문의 감축정책의 효과를 분석함에 있어 폐기물 처리에 의한 배출량과 에너지화에 따른 감축잠재량을 포함하고 있다. 또한, MARKAL을 이용하여 폐기물 처리에 의한 온실가스 배출량을 분석하고 있는 Gielen[23]도 폐기물로부터 에너지를 생산되는 에너지에 의한 온실가스 감축효과를 포함하여 폐기물부문의 온실가스 배출량으로 산정하고 있다.

본 연구는 두 산정식에 따라 폐기물부문의 온실가스 배출량을 계산하고 국가에서 설정하고 있는 폐기물에 의한 온실가스 감축정책 및 기술의 감축잠재량과 감축비용을 분석한다. 먼저 폐기물부문의 특징과

폐기물부문의 국내 현황을 살펴보고, IPCC GL에서 규정하고 있는 온실가스 발생량 산정방법과 본 연구에서 제시하는 에너지화에 따른 감축잠재량 산정방법을 소개한다. 2013년까지의 폐기물부문의 온실가스 배출량에 대한 인벤토리를 구하고 2050년까지의 BAU 배출량을 계산한다. 이때 활동량(activity)에 대한 예측자료는 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 제시하는 자료를 활용하였다[7]. 또한, 국내 연구보고서[1, 16, 19]에서 제안하는 5개의 감축수단을 제시하고 각 감축수단별 감축잠재량과 감축비용을 분석하였다. 상호 독립적이지 않은 5개의 감축수단의 총 감축잠재량을 구하기 위하여 감축수단을 순차적으로 적용했을 때의 감축잠재량을 구하였다.

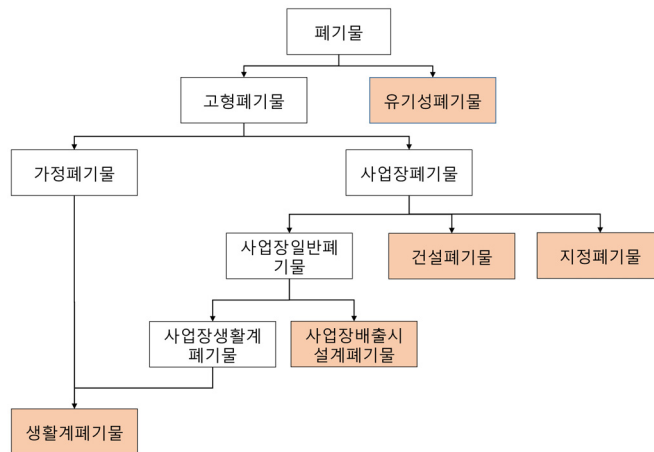
2. 폐기물 발생원 및 처리 국내현황

폐기물은 먼저 고품폐기물과 유기성폐기물 슬러지로 분류된다. 고품폐기물은 <그림 1>과 같이 발생원에 따라 크게 가정생활폐기물과 사업장폐기물로 구분된다. 국내의 통계자료 수집을 위한 목적으로 생활폐기물, 사업장배출시설계폐기물(편의상 이후에는 ‘사업장폐기물’로 표기), 건설폐기물, 지정폐기물로 분류된다. 각 폐기물 배출원은 다시 성상에 따라 상세하게 구분된다. 예를 들어, 생활폐기물은 음식물채소류, 중

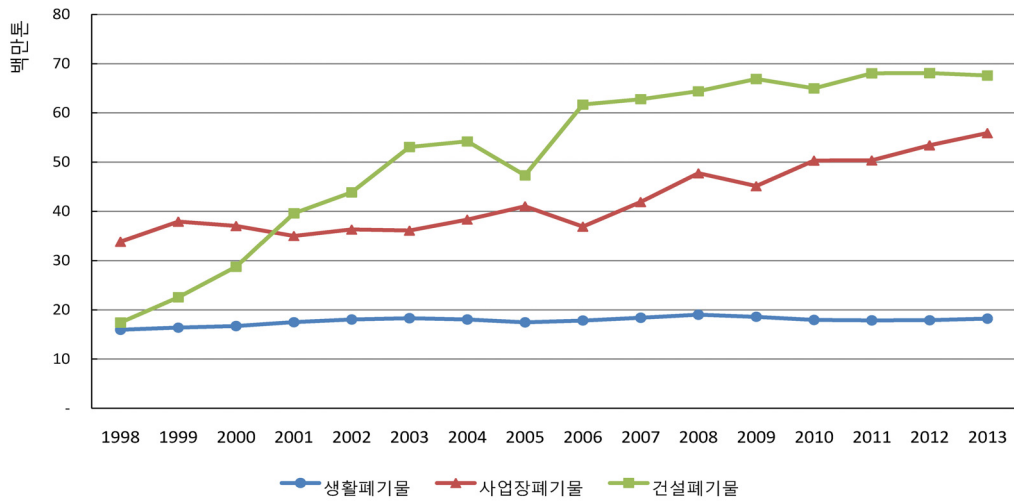
이류, 나무류 등 10개의 성상으로 구분된다. 유기성폐기물 슬러지에는 하수, 폐수, 분뇨 등이 포함된다. 본 연구에서는 유기성폐기물과 지정폐기물과 관련된 온실가스 발생량도 적고 주요 감축수단으로 포함되지 않기 때문에 구체적 수치는 생략한다.

<그림 2>는 생활폐기물(Municipal Solid Waste), 사업장배출 시설계폐기물(Industrial Waste, 편의상 본 연구에서는 사업장폐기물로 표기), 건설폐기물(Construction Waste)의 발생량을 보여 준다. 인구의 증가와 경제활동의 활성화로 고품 폐기물의 총 발생량은 점진적으로 증가하는 추세에 있다. 반면 인구가 늘어남에도 생활폐기물의 발생량은 이에 비례하여 증가하지 않는 것은 정부의 지속적인 폐기물 관리정책으로 1인당 하루 생활폐기물 발생량이 1998년 1.3kg, 2008년 1.04kg 2013년 0.94kg으로 지속적으로 감소하였기 때문이다.

폐기물은 재활용, 매립, 소각, 하·폐수 처리 또는 생물학적 처리 등의 과정을 통해 처리된다. <그림 3>은 생활폐기물에 대한 소각(incineration), 매립(landfill), 재활용(recycling) 처리행태를 보여준다. 재활용이 크게 확대되고 매립처리비율이 크게 낮아진 반면, 소각처리율은 점진적으로 증가하는 추세를 확인할 수 있다. 사업장폐기물과 건설폐기물에도 같은 패턴을 보이고 있다.

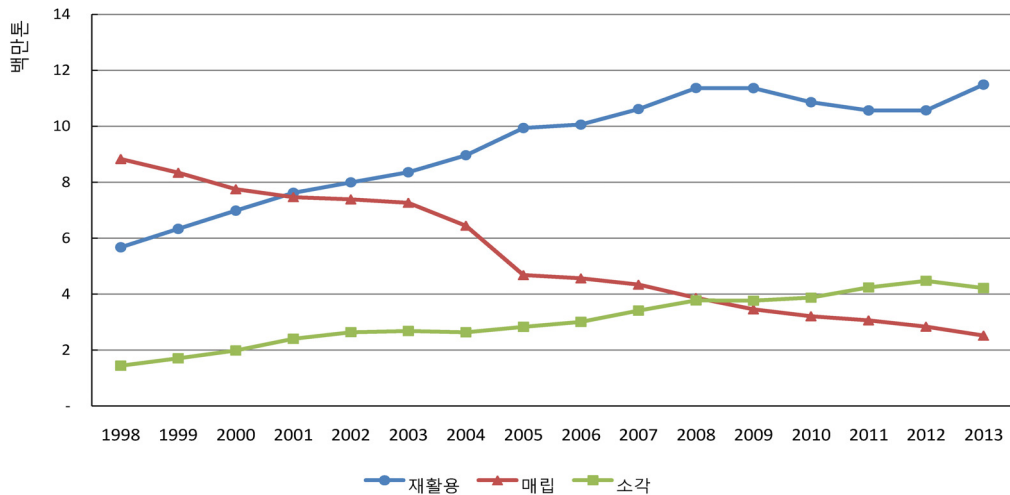


<그림 1> 한국의 폐기물 분류



출처: 2013 폐기물 발생 및 처리, 환경부, 2014.

〈그림 2〉 고형 폐기물 발생량



출처: 2013 폐기물 발생 및 처리, 환경부, 2014.

〈그림 3〉 생활폐기물 처리

3. 폐기물부문의 온실가스 배출량 산정 방법

IPCC GL 2006에 따르면, 폐기물부문의 배출량으로 집계되는 온실가스에는 매립, 소각, 생물학적 처리 및 하·폐수 등의 폐기물 처리과정에서 발생하는 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂), 아산화질소(N₂O) 등이

포함한다. 본 연구에서는 여기에 매립가스(Landfill Gas; LFG) 및 소각에 따른 여열의 에너지화 등 폐기물 처리과정에서 발생한 부산물의 에너지화에 따른 온실가스 저감량을 공제하여 폐기물부문의 배출량으로 집계한다. 즉 폐기물 처리에 의한 온실가스 발생량 산정에는 IPCC GL 2006을 따르고 있으며 에너지화에 따른 감축잠재량은 기존의 연구결과를 참조하여

산정하였다[25]. Ioannis et al.[22]는 폐기물의 평생주기분석(life-cycle analysis)으로써 폐기물 처리와 부산물 에너지화에 따른 온실가스 발생량 외에도 폐기물 재사용에 따른 에너지 절감과 그에 따른 온실가스 저감량 및 폐기물 수송을 위한 에너지 사용과 그에 따른 온실가스 배출량을 포함하고 있다. 본 연구는 폐기물 처리와 부산물 에너지화 과정에서의 온실가스 배출량과 절감량을 분석하는 것을 목표로 하여 재사용과 수송에 따른 온실가스 절감과 배출량은 고려하지 않았다. 폐기물 재사용에 따른 온실가스 절감효과는 처리과정을 회피함에 따른 온실가스 절감량을 계상하는 것으로 충분하며 재사용하는 물질을 덜 생산하게 되어 발생하는 절감효과까지 포함하게 되면 과대 계상하기 때문이다.

3.1 소각

소각은 관리되는 소각 시설에서의 고품 및 액상 폐기물 연소로 정의된다. 우리나라는 폐기물 중간처리 방식으로서 소각을 이용하고 있고, 생활폐기물, 사업장배출시설계폐기물 등 다양한 배출원에서 발생한 폐기물에 대하여 소각 처리가 이루어지고 있다. 폐기물 소각에 의한 온실가스 배출량은 IPCC GP 2000에 따라 이산화탄소와 아산화질소를 산정한다. 고온과 충분한 체류시간의 소각환경을 고려할 때 메탄의 배출량이 미미한 것으로 명시하였고 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서도 메탄 배출은 제외하고 있다. IPCC GL 2006에서 노천소각에 의한 배출량 산정방법을 추가하였지만 국내에는 아직 이와 관련된 자료가 확보되지 않아 적용하지 않고 있다.

IPCC GP 2000에 따르면 폐기물의 소각에 의하여 발생하는 온실가스의 대부분은 이산화탄소이며 소각물질중 화석탄소의 함량에 의하여 배출량이 결정된다[27]. 소각에 의한 아산화질소 배출량은 기본적으로 소각량에 아산화질소 배출계수를 곱하여 산정된다.

한편, IPCC GP 2000에 따르면, 여열회수 시설이 설치된 소각로에서의 소각은 에너지 부문에서 취급

하고 여열회수 시설이 설치되어 있지 않은 소각로에서의 소각만 폐기물부문에서 다루도록 권고하고 있다[26]. 여열회수가 되는 소각으로 발생하는 온실가스는 폐기물부문의 배출량으로 포함하지 않는다. 하지만 이러한 논리는 소각으로 발생하는 온실가스 배출량과 여열회수에 의한 온실가스 감축효과가 서로 동일하다는 전제가 바탕이 되어야 하는데 이에 대한 논리적 근거가 빈약하다. 또한, 가연성 폐기물의 에너지화를 폐기물부문의 감축수단으로 포함되고 있는데 소각여열의 에너지화에 따른 온실가스 감축효과를 배제한다는 것은 논리적으로 모순되는 것으로 판단된다. 이에 따라 본 연구에서는 소각에 의한 온실가스 배출량 산정에 여열을 회수하는 생활폐기물 소각에 의한 온실가스 배출뿐만 아니라 소각여열회수 에너지화에 따른 온실가스 감축효과를 포함하였다.

소각에 따른 에너지 생산량은 다음과 같은 식에 의해 구했다[25]. 먼저 소각에 의하여 발생된 열은 소각되는 폐기물의 에너지 함유량으로 계산하고 발전소 또는 보일러에 의하여 최종적으로 전기나 열에너지로 변환되는 것으로 가정하였다. 이때 전기 생산효율과 열에너지 생산효율을 곱하여 최종적인 전기 및 열 에너지를 계산한다.

$$\text{소각 에너지 함유량} = \text{소각량} \times \text{회수율} \times \sum[(\text{성상별 칼로리}(\text{J/kg}) \times \text{성상비율}(\%))]$$

$$\text{전기 에너지 생산량} = \text{소각에너지 함유량} \times \text{전기 생산비율} \times \text{전기 생산효율}$$

$$\text{열에너지 생산량} = \text{소각에너지 함유량} \times \text{열에너지 생산비율} \times \text{열에너지 생산효율}$$

건량 폐기물의 성상별 발생 칼로리는 다음 표와 같다.

한편, 2010년 폐기물 소각에 의한 여열 중에서 회수되는 비중은 92.5%로 되고 있으며 전기 생산효율은 33%, 열에너지의 생산효율은 56%로 조사되었다[7, 19, 25]. 또한, 습량기준 폐기물 대비 건량폐기물은 60%인 것으로 가정하였다[18].

〈표 1〉 폐기물 성상별 칼로리 함량

	음식물	공원폐기물	종이	나무	의류	플라스틱	기타 (inert)
칼로리 (GJ/톤)	2	5	15	15	16	30	0

출처 : IPCC GL 2006.

3.2 매립

매립은 과거의 활동량(매립량)까지도 확보해야만 당해연도의 배출량을 산정할 수 있다. IPCC GL 2006에 따르면 Mass Balance가 아닌 FOD(First Order Decay) 식에 따라 매립에 의한 메탄 발생량을 계산하는 것을 기본으로 하고 있기 때문이다. 즉 Mass Balance는 매립한 당해 년도에 메탄이 발생하는 것으로 간주하지만 FOD는 매립 후 수십 년에 걸쳐 발생한다고 가정하고 있다.

본 연구에서는 매립지에서 배출되는 메탄의 양을 산정하기 위해 <그림 4>와 같이 IPCC GL 2006의 Tier 2 방법(FOD method)을 적용한다[25]. 또한, 배출계수는 IPCC GL 2006에서 제시하는 기본값을 사용하였다.

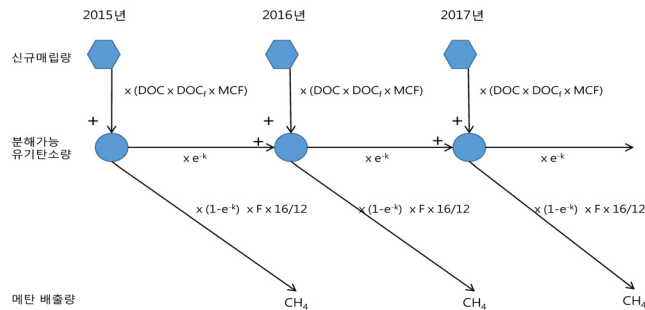
<그림 4>는 FOD 공식에 따라서 매립에 의한 온실가스 발생량을 산정하는 절차를 도식화하고 있다. 특정 연도에 신규 매립이 발생하게 되면 매립량에다 (DOC×DOCf×MCF)를 곱한 값이 당해년도 분해가능 유기탄소량으로 누적된다. 분해가능 유기탄소량 중의 e-k에 해당하는 부분은 분해되지 않고 다음 년도 분해가능 유기탄소량으로 남아 있게 되고 나머지

(1-e-k)에 해당하는 부분은 분해되어 F×16/12가 곱해진 양만큼 다음 년도에 메탄으로 배출된다.

따라서 FOD에 따라서 매립에 의한 온실가스 발생량을 구하기 위해서는 과거 매립량에 대한 자료가 필수적이다. IPCC에서는 과거 50년 정도의 자료를 요구하고 있지만 한국의 경우도 1986년 이전의 폐기물 처리에 대한 통계가 없는 실정이다. 본 연구에서는 국가온실가스 인벤토리 보고서에서 공개한 공식 자료를 사용하였다. 국가온실가스 인벤토리 보고서는 인구수, 경제지표 등을 설명변수로 하는 선형회귀법, 추세외삽법 등의 방법을 사용하여 과거 매립량 자료를 추정하였다.

발생되는 메탄의 일부는 회수되어 에너지 생산에 사용된다. 실제로 전기, 열 등의 다양한 에너지를 생산하지만 본 연구에서는 전기 에너지만 생산하는 것으로 가정하였다. 전기에너지 생산량은 아래와 같은 식에 의하여 구해진다. 메탄 1톤은 55 GJ의 열량을 가지며 발전 효율은 33%인 것으로 가정하였다 [25].

$$\text{전기 에너지 생산량} = \text{메탄 회수량} \times \text{메탄 톤당 열량} \times \text{전기 생산효율}$$



〈그림 4〉 매립에 의한 메탄 발생량 계산식

3.3 생물학적 처리

폐기물의 퇴비화 또는 혐기성 소화(Anaerobic digestion) 등 생물학적 처리에 따른 아산화질소 및 메탄 발생량은 생물학적 처리량에 배출계수를 곱하여 구한다. 생물학적 처리에 의한 온실가스 배출량이 폐기물 전체에서 차지하는 비중은 매우 낮은 편이다.

3.4 하·폐수

하·폐수는 주로 인간의 기본적인 생활과 산업활동 및 경제활동을 통해 배출되는 유기물과 질소 등의 화합물로 구성되어 메탄과 아산화질소가 발생하는 주된 온실가스이다. 메탄은 하수 및 산업폐수의 처리과정 중 혐기적 처리과정에서 주로 발생하며, 아산화질소는 분뇨처리과정에서 질소제거과정에서 배출된다.

본 연구에서는 아래 식과 같이 하수처리량 및 미처리량에 BOD 농도와 메탄배출계수를 곱하여 하수에 의한 메탄 발생량을 산정하며, 인구수에 단백질

섭취량, 단백질 중 질소비중 및 배출계수를 곱하여 분뇨에 의한 아산화질소 배출량을 산정한다. 산업폐수는 폐수원에 따라 배출계수가 서로 다르지만 비중이 낮기 때문에 산업폐수 전체 발생량과 대표적인 배출계수를 사용하였다.

- 하수 처리에 의한 메탄 배출량 = 하수처리량×BOD 농도×하수처리 메탄 배출계수×(1-제거율)×(1-메탄회수율)
- 하수 미처리에 의한 메탄 배출량 = 하수 미처리량×BOD 농도×하수 미처리 메탄배출계수
- 분뇨에 의한 아산화질소 배출량 = 인구 수×1인 1일 단백질섭취량×단백질중 질소비중×NO2 배출계수
- 산업폐수에 의한 메탄 배출량 = 산업폐수 발생량×배출계수

<표 2>는 본 연구에서 사용하는 각 폐기물 처리 방법에 대한 활동량과 배출계수의 출처를 요약 정리

<표 2> 폐기물 온실가스 산정을 위한 활동량 및 모수 정리

구 분	활동량	입력자료	출처
소각	성상별 폐기물 소각량	총 탄소비율(CCW)	IPCC GPG 2000 기본값
		화석탄소 비율(FCF)	IPCC GPG 2000 기본값/한국환경공단
		폐기물 종류별 소각 효율(EF)	IPCC GPG 2000 기본값
매립	성상별 폐기물 매립량 메탄회수량	메탄 발생 속도(k)	IPCC GL 2006 기본값
		메탄 보정계수(MCF)	IPCC GL 2006 기본값
		분해가능한 유기탄소비율(DOC)	IPCC GL 2006 기본값
		매립가스 내 메탄비율(F)	IPCC GL 2006 기본값
		산화율(OX)	IPCC GL 2006 기본값
생물학적 처리	생물학적 처리량	메탄 배출 계수	IPCC GL 2006 기본값
		아산화질소 배출계수	IPCC GL 2006 기본값
하폐수	업종별 폐수처리량	업종별 배출계수	IPCC GPG 2000 및 국내자료
		하수처리량	BOD 평균 농도
	메탄 배출계수		IPCC GPG 2000 및 국내자료
	제거율		환경부 자료
	메탄 회수율		환경부 자료
	분뇨량	질소 배출계수	IPCC GPG 2000 기본값
		단백질 중 질소비율	IPCC 1996 기본값
		1인당 1일 단백질 섭취량	통계청
	하수미처리량	BOD 평균 농도	IPCC GPG 2000 기본값
		메탄 배출계수	IPCC GPG 2000/IPCC GL 2006

한 것이다.

4. 폐기물부문 온실가스 인벤토리

<표 3>은 본 연구에서 제안하는 방식에 따른 2010년의 폐기물 처리에 의한 온실가스 배출량에 대한 상세정보를 나타낸다. CO₂e 저감항목은 메탄 및 소각여열을 회수하여 에너지화함에 따른 온실가스 저감량을 나타낸다. 매립에 따른 배출량에서 본 연구의 산정식이 IPCC GL보다 적은 이유는 매립에 따라 발생한 메탄을 회수하여 에너지화 함으로써 저감된 온실가스 항목이 추가되기 때문이다. 소각에 있어서는 본 연구의 산정식은 IPCC GL 산정식에 소각여열을 회수하여 에너지화 함으로써 저감된 온실가스항목이 추가되고 IPCC GL 산정식에서는 포함하지 않았던 여열회수되는 소각의 온실가스 배출량

이 추가된다. 이때 본 연구의 소각여열회수에 따른 온실가스 저감량이 IPCC GL 산정식 보다 적기 때문에 본 연구의 소각에 의한 배출량이 IPCC GL에 따른 소각 배출량보다 큰 값을 가지게 된다.

생물학적 처리와 하폐수 처리에 배출량을 산정할 때에는 두 방식이 동일한 방법론을 사용하여 동일한 값을 가진다.

2013년까지의 연도별 배출량을 비교하면 2013년도와 마찬가지로 총 배출량은 거의 유사하지만 본 연구의 산정식에 따른 매립의 배출량은 IPCC GL에 따른 양보다 조금 적고 반면에 소각의 배출량은 조금 큰 것을 확인할 수 있다. 폐기물을 통한 에너지 생산이 적기 때문에 배출량에 대한 과거 인벤토리에 있어서 두 산정식의 차이는 별로 없지만 폐기물 에너지화가 본격적으로 도입되는 감축수단이 적용되면 두 산정식간의 차이는 커지게 된다.

<표 3> 2013년의 온실가스 배출 분포

(단위: 톤)

		CH4	CO2	N2O	CO2e	본 연구		IPCC GL	
						CO2e 저감	총합	CO2e 저감	총합
매립	생활	369,691			7,763,509				
	사업장	64,028			1,344,578				
	건설	52,599			1,104,583				
	지정	7,505			157,610				
	(메탄회수)	(123,352)			(2,590,396)	(314,994)			
	소계	370,471			7,779,884	(314,994)	7,464,890		7,779,884
소각	생활		1,810,233	232	1,882,256				
	(여열회수)					(1,323,415)		(1,740,426)	
	사업장		2,953,773	923	3,239,859				
	건설		727,456	34	737,854				
	지정		404,967	51	420,870				
	소계		4,222,599	1,240	6,280,840	(1,323,415)	4,957,424	(1,740,426)	4,607,010
생물학적처리	생활	17,773		1,333	786,458				
	소계	17,773		1,333	786,458		786,458		786,458
하폐수	하수처리	3,108			65,278				
	하수미처리	6,247			131,184				
	분뇨			3,369	1,044,422				
	폐수	2,968			62,329				
	소계	12,323		3,369	1,303,213		1,303,213		1,303,213
	총합	400,567	4,222,599	5,942	16,150,395	(1,638,410)	14,511,986		14,476,566

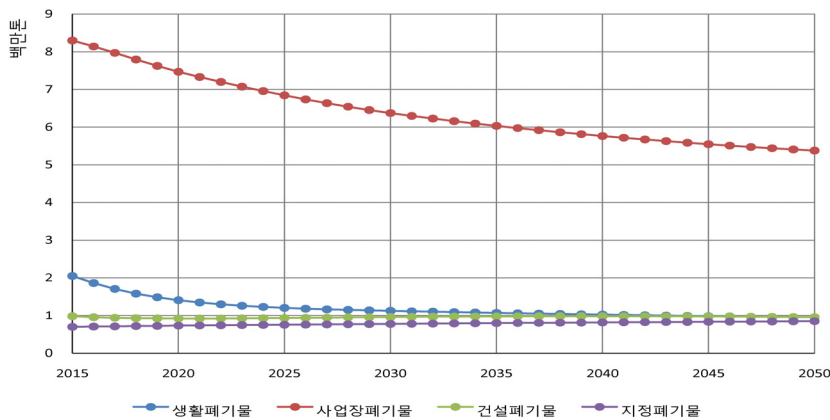
5. BAU 및 폐기물부문의 감축수단

감축수단의 감축잠재량과 감축비용은 BAU와 감축수단이 적용되었을 때의 배출량과 총비용을 비교하여야 한다. 본 연구에서의 BAU는 온실가스정보센터에서 수행한 연구결과를 차용하였다. 폐기물부문의 온실가스 감축을 위한 정책 등의 감축수단으로 기존의 연구보고서, 문헌 등에서 을 참고하여 감축수단으로 채택하고 있는 정책 들 중에서 공통성이 높으며 적용가능성이 높은 가연성 폐기물의 에너지화, 소각여열 회수, 매립가스 에너지화, 생활폐기물 감축, 사업장 폐기물 감축 등 다섯 가지 방법을 고려하였다[1, 7, 13, 18].

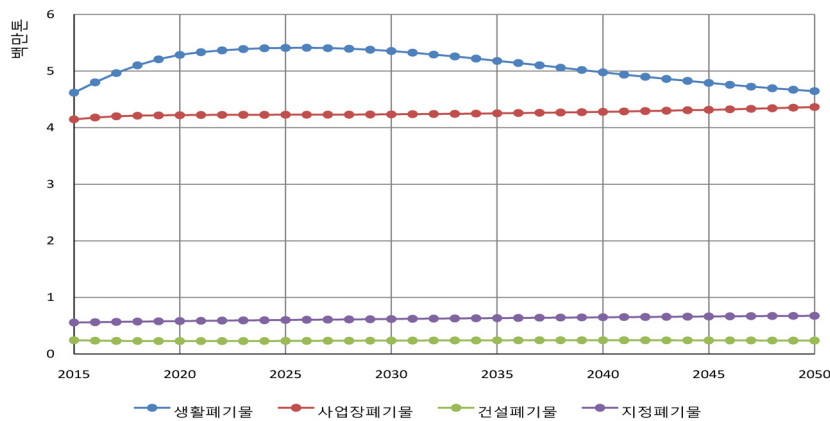
5.1 BAU

폐기물에 대한 매립 및 소각의 활동량에 대한 예측치(BAU; Business As Usual)는 <그림 5>과 같다. 위 예측자료는 온실가스정보센터에서 수행한 연구결과로서 본 연구에서는 이를 차용하였다. 그림에서 보듯이 생활폐기물 및 사업장 폐기물의 매립량은 줄어드는 추세를 보인다. 매탄회수율은 25%로 고정되어 있는 것으로 가정하였다

이와 같은 예측자료를 바탕으로 구한 BAU에서의 온실가스 배출량은 <그림 6>과 같다. 매립량의 축소에 따라 매립에 의한 온실가스 배출량이 줄어들고 있으며 소각에 의한 배출량은 증가후 유지되는 추세

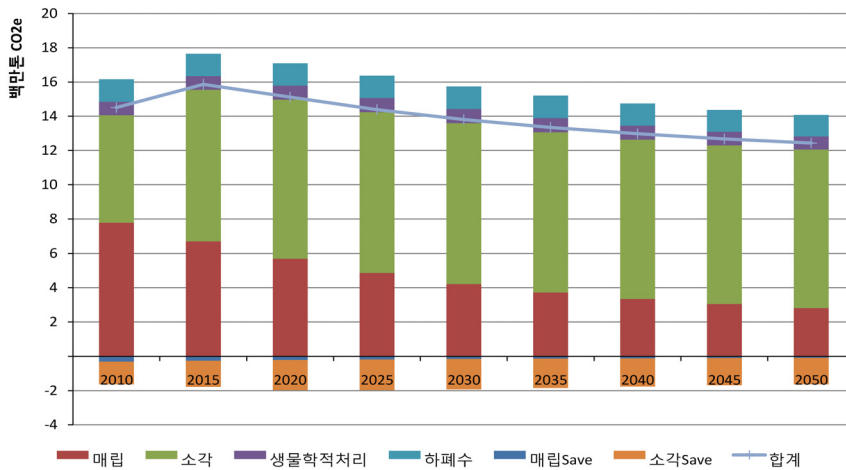


(a) 매립량



(b) 소각량

<그림 5> BAU 활동량 예측



〈그림 6〉 BAU 온실가스 배출량

를 보이고 있다.

5.2 감축수단

5.2.1 가연성 폐기물의 에너지화

이 감축수단은 매립 또는 소각되는 가연성 생활폐기물로부터 고품연료(RDF, Refuse Drive Fuel)를 생산하여 발전 등의 연소용 연료로 사용하게 됨으로써 매립량 및 소각량 감소에 따른 메탄, 이산화탄소 및 아산화질소 배출량 감소분을 감축잠재량으로 산정한다. 또한, RDF로부터 전기에너지를 생산함으로써 발생하는 온실가스 저감량이 포함된다. 이때, RDF 1톤당 전기생산량은 다음과 같은 식에 의해 구해진다. RDF 1톤당 발열량은 4,800kcal/kg, 전기생산효율은 33%로 가정하였다[16].

$$\text{RDF 전기생산량} = \text{RDF 생산량} \times \text{발열량/RDF 1톤} \times \text{전기생산효율}$$

국가 폐기물 통계 중 매립 또는 소각되는 가연성 생활폐기물을 에너지화 가용물량으로 산정하였다. 또한 RDF 수율(RDF톤/폐기물톤)은 32%로 가정하였다[16, 19]. 가용물량 중 감축안에서 설정한 에너지화율은 <표 4>와 같다. 2016년부터 RDF를 생산하

기 시작하여 2030년에는 가용물량의 90%가 RDF로 생산되는 것으로 가정하였다.

5.2.2 감축수단 2 : 매립가스 회수 강화

이 감축수단은 매립지에서 발생하는 메탄가스를 회수 및 정제사업계획에 따라 추가적으로 회수되는 메탄가스량을 감축잠재량으로 산정한다. <표 4>와 같이 BAU에서는 회수율이 25%로 고정되어 있는데 반하여 감축안은 2016년부터 회수율이 증가하여 2030년에는 35%에 이르는 것으로 가정하였다.

5.2.3 감축수단 3 : 생활폐기물 감축

이 감축수단은 생활폐기물 감량화 정책을 감축수단으로 적용한 것으로 생활폐기물 감축에 따라 회피되는 매립 또는 소각량에 의한 온실가스 배출량 감소량을 감축잠재량으로 산정한다. <표 4>와 같이 BAU 대비해서 2016년부터 감량화가 시작되어 2020년에는 매립 또는 소각되는 생활폐기물의 5%가 줄어들는 것으로 가정하였다.

5.2.4 감축수단 4 : 사업장폐기물 감축

이 감축수단은 사업장폐기물의 단계적 감축으로 매립 또는 소각량 감소분을 감축잠재량으로 산정한다. BAU 대비해서 2016년부터 감량화가 시작되어

<표 4> 상세 감축 방안

연도	감축 1 (에너지화율)		감축 2 (LFG 회수율)		감축 3 (MSW감축율)		감축 4 (INW 감축율)		감축 5 (소각여열회수율)	
	BAU	감축안	BAU	감축안	BAU	감축안	BAU	감축안	BAU	감축안
2014	0%	0%	25%	25%	0%	0.0%	0%	0.00%	90.44%	92.83%
2015	0%	0%	25%	25%	0%	0.0%	0%	0.00%	90.44%	94.03%
2016	0%	18%	25%	26%	0%	1.0%	0%	1.30%	90.44%	95.22%
2017	0%	36%	36%	27%	0%	2.0%	0%	2.60%	90.44%	96.42%
2018	0%	54%	25%	28%	0%	3.0%	0%	3.89%	90.44%	97.61%
2019	0%	72%	25%	29%	0%	4.0%	0%	5.19%	90.44%	98.81%
2020	0%	90%	25%	30%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2021	0%	91%	25%	31%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2022	0%	91%	25%	31%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2023	0%	92%	25%	32%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2024	0%	92%	25%	32%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2025	0%	93%	25%	33%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2026	0%	93%	25%	33%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2027	0%	94%	25%	34%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2028	0%	94%	25%	34%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2029	0%	95%	25%	35%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%
2030	0%	95%	25%	35%	0%	5.0%	0%	6.49%	90.44%	100.0%

2020년에는 매립 또는 소각되는 사업장 폐기물의 6.49%가 줄어드는 것으로 가정하였다.

5.2.5 감축수단 5 : 생활폐기물 소각여열회수 강화

이 감축수단은 생활폐기물 소각에서 발생하는 여열에 대한 회수율을 높임으로써 배출량 산정에 포함되는 소각량을 줄이는 것을 목표로 한다. <표 4>와 같이 BAU 대비해서 2016년부터 회수율이 증가하여 2020년에는 전량 회수하는 것으로 가정하였다.

투자 및 운용비용을 구하였다. 투자비는 1톤 처리설비용량에 대한 비용이 아니라 시설에 대한 총 투자비를 시설의 내용연수동안 실제로 처리한 톤수로 나눈 것이다. 따라서 1톤의 폐기물을 소각하는 데는 투자비(60.11천 원)와 운용비(93.75천 원)를 합친 153.86천 원이 소요되는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 매립 및 소각 처리에 여러 가지 방식이 있고 방식별로 처리 비용이 서로 다르긴 하지만 본 연구에서는 대표되는 하나의 값을 사용하였다.

<표 6>은 본 연구의 산정식과 IPCC GL에 따른 산정식의 감축수단별 2020년도의 감축잠재량과 톤당 감축비용을 나타내고 있다. 감축수단의 감축잠재량은 BAU에서의 2020년 온실가스 배출량 대비 줄어드는 온실가스 배출량을 계산한 것이다. 연도별 톤당 감축비용은 기본적으로 (증가비용/감축잠재량)으로 정의된다. 증가비용을 구하기 위하여 <표 5>에 주어진 폐기물 처리방식별 투자 및 운용을 사용한다. 본 연구는 IPCC GL와는 다른 증가비용과 감축잠재량을 보이는데 포함하는 항목이 다르기 때문이다. 폐기물

6. 폐기물부문의 감축시나리오 효과 분석

6.1 감축수단별 감축잠재량 및 감축비용

본 연구에서는 각 감축수단의 감축잠재량뿐만 아니라 감축비용(1톤 CO₂e를 줄이는데 소요되는 비용)을 분석하기 위하여 다음과 같이 각 처리방식별

〈표 5〉 폐기물 처리에 따른 비용 및 수익 정보

구 분	투자(천원/톤)	운용(천원/톤, 년)	판매수익(천원/톤)
소각*	60.11	93.75	
소각여열회수***	0.30	26.40	10.17
매립*	12.12	76.12	
RDF 생산**	42.91	42.46	28.00
RDF 발전비용****		56.09	
매립가스 회수발전**	0.53	0.53	3.31
유기성폐기물 에너지화***	20.67	32.20	0.10

* 출처 : 환경부 폐기물 통계자료, 2010.

** 출처 : 국가온실가스 감축 달성을 위한 로드맵, 관계부처 합동, 2014.

*** 출처 : 환경부 DB 및 대형생활폐기물 소각시설설치현황, 2008.

**** 출처 : Waste-to-Energy Report, 2008, 한국환경공단.

부산물을 통하여 에너지를 생산할 경우 IPCC GL에 따르면 이는 에너지 판매 수익으로 계상되고 본 연구에서는 에너지 판매수익이 발생하지 않고 에너지를 생산하기 위한 비용이 추가되고 에너지 생산에 따른 온실가스 배출량 감축이 추가된다. 즉 본 연구방식에 따라 계산된 감축비용과 감축잠재량은 IPCC GL보다 큰 값을 가진다.

예를 들어 감축수단 1 (가연성 폐기물의 고품연료화 및 발전)의 경우 본 연구에서 산정하는 감축잠재량에는 <표 7>과 같이 회수한 메탄의 에너지화에 따른 감축량과 가연성 폐기물의 에너지화에 따른 감축량이 포함되지만 IPCC GL에서는 이러한 감축요인은 배제된다. 반면 IPCC GL의 산정식에 따른 비용에는 생산된 RDF를 판매함으로써 발생하는 수익

을 증가비용항목에서 고려하고 있지만 본 연구의 방식에서는 RDF로부터 전기를 생산하기 위한 발전비용을 포함하고 있다.

따라서 본 연구방식에 따른 감축수단 1의 증가비용은 (RDF 생산 및 발전비용 - 매립 및 소각 회피수익)으로 계상되고, 온실가스 감축잠재량은 (가연성 폐기물 에너지화에 따른 감축량+매립/소각 회피에 따른 감축량-여열회수 감소에 따른 증가량)으로 계상된다.

감축수단 1은 가장 많은 감축잠재량과 가장 낮은 음의 감축비용을 보이고 있기 때문에 가장 효과적인 수단으로 분석되었다. 매립 및 소각 회피에 따른 비용감소가 RDF 생산 및 발전비용을 상쇄하고도 남는다는 의미로 해석된다.

〈표 6〉 감축정책에 따른 효과 비교

감축수단	본 연구		IPCC GL	
	2020년 감축잠재량 (톤 CO2e)	2020년 톤당 감축비용 (천원/톤 CO2e)	2020년 감축잠재량 (톤 CO2e)	2020년 톤당 감축비용 (천원/톤 CO2e)
감축수단 1	2,657,199	-216	648,568	-1,137
감축수단 2	379,499	0	379,499	-0
감축수단 3	53,781	NA*	25,411	NA*
감축수단 4	377,336	NA*	377,707	NA*
감축수단 5	184,508	8	245,177	27

* 감축수단 3과 4는 정책적인 감축수단으로써 감축비용을 계산하지 않았다.

<표 7> BAU와 감축수단의 2020년도 온실가스 배출 분포 비교

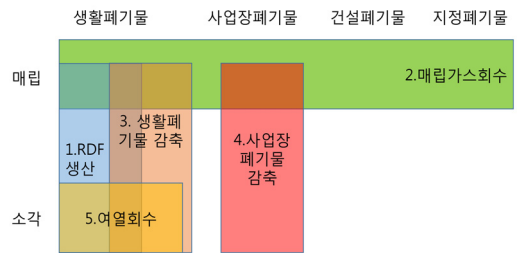
		BAU			감축수단 1		
		CO2e	CO2e 저감	총합	CO2e	CO2e 저감	총합
매립	생활	5,299,948			4,778,158		
	(가연성폐기물 에너지화)					(244,785)	
	사업장	1,229,226			1,229,226		
	건설	872,237			872,237		
	지정	258,569			258,569		
	(메탄회수)	(1,897,495)	(222,876)		(1,784,548)	(209,142)	
	소계	(5,692,0485)	(222,876)	5,469,609	5,353,643	(453,927)	4,899,716
소각	생활	2,663,500			261,968		
	(여열회수)		(1,745,904)			(171,718)	
	(가연성폐기물 에너지화)					(1,259,960)	
	사업장	5,680,010			5,680,010		
	건설	458,387			458,387		
	지정	477,224			477,224		
	소계	9,279,122	(1,745,904)	7,533,218	6,877,590	(1,431,678)	5,445,912

감축수단 3의 감축효과가 상대적으로 매우 적은 데 이는 생활폐기물 매립 및 소각량이 줄어들었지만 매립량 감소효과는 몇 년에 걸쳐 분산되고 소각량 감소효과는 소각여열회수로 상쇄되기 때문이다.

6.2 누적감축잠재량

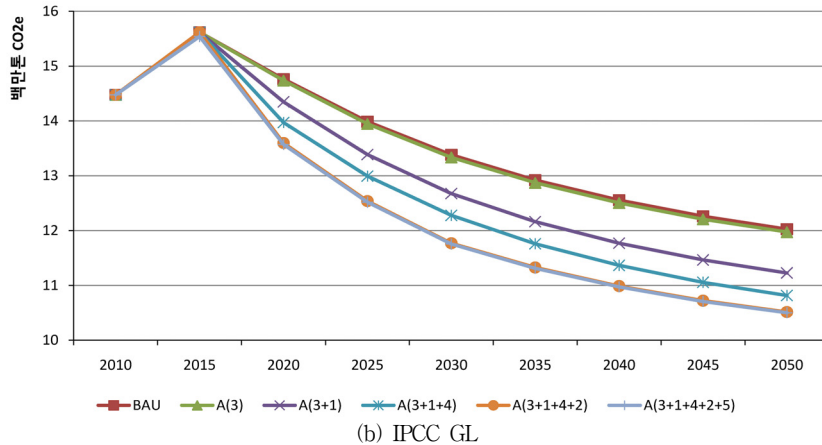
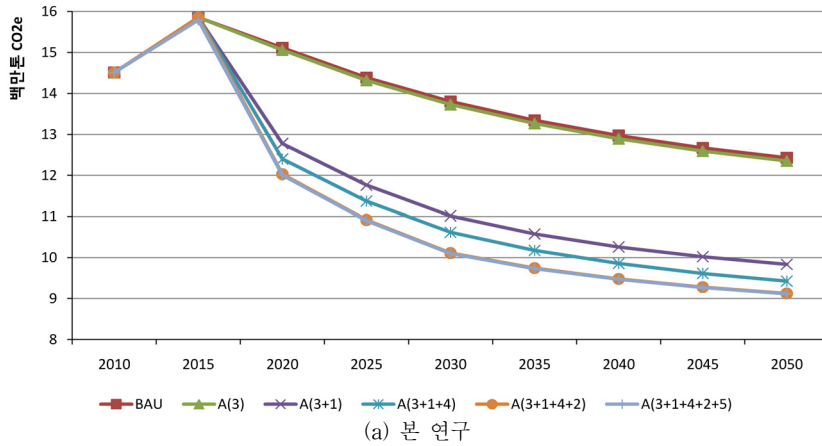
5개의 감축수단을 폐기물 발생원(생활폐기물, 사업장 폐기물, 건설폐기물)과 처리방법(매립, 소각)의 관점에서 범위를 도식화하면 <그림 7>과 같다. 예를 들어, 감축수단 2에 해당하는 LFG 회수는 생활폐기물, 사업장 폐기물, 건설 폐기물의 관리형 매립지에서 발생하는 메탄을 회수한다. 그림에서 볼 수 있듯이 5개의 감축수단이 서로 독립적인 것이 아니라 부분적으로 중첩되어 있다. 따라서 5개의 감축수단을 모두 적용한다고 가정했을 때의 감축잠재량은 개별적 감축수단의 감축효과를 단순히 합치게 되면 중복하여 산정하는 결과를 가져오게 된다. 따라서 본 연구에서는 5개의 감축수단을 순차적으로 적용했을 때

누적 감축잠재량을 계산하였다.



<그림 7> 감축수단 간의 관계

<그림 8>은 감축수단을 3->1->4->2->5 순서대로 누적적으로 적용했을 때의 온실가스 배출량을 나타낸다. 본 연구에서 제시한 방식에 따라 2020년도에 감축수단을 독립적으로 적용했을 때의 감축잠재량의 합은 3,652,323톤 CO2e인데 반하여 누적 감축잠재량은 3,105,529톤 CO2e로 줄어들게 된다. 누적 감축잠재량은 2020년 폐기물부문 BAU 배출량의 21%에 해당한다. IPCC GL에 따른 산정식에 따르면 두 값은 각각 1,676,362톤 CO2e, 1,190,558톤 CO2e이다.



〈그림 8〉 온실가스 누적 감축 잠재량

7. 결 론

본 연구에서는 폐기물부문의 온실가스 감축잠재량과 감축비용을 계산하기 위한 지침을 제공하는 IPCC GL의 논리적 모순점을 해결하는 합리적인 산정식을 제시하였다. 새로운 산정식에 따른 온실가스 배출량은 IPCC GL에서는 포함되지 않는 매립가스, 소각 여열 등 폐기물 처리과정 부산물의 에너지화에 따른 온실가스 저감량을 포함한다. 또한 IPCC GL에서는 음의 비용으로 계상되는 에너지 판매수익이 본 연구에서는 에너지 생산비용으로 계상된다.

본 연구에서 제시한 산정식과 IPCC GL 산정식을

비교하여 우리나라 폐기물부문의 온실가스 배출량에 대한 인벤토리와 정부기관에서 제공하는 BAU에 따라 BAU 배출량을 계산하였다. 또한 문헌조사를 바탕으로 적용가능성이 높은 다섯 개의 감축수단을 제시하고 각 감축수단의 2020년 온실가스 감축잠재량과 온실가스 단위 톤당 감축비용을 계산하였다. 다섯 개의 감축수단 중에서 매립 또는 소각되는 가연성 생활 폐기물로부터 고품연료를 생산하여 발전 등의 연소용 연료로 사용하는 감축수단 1이 감축잠재량 및 감축비용 측면에서 가장 효과적인 수단으로 확인되었다. 또한, 본 연구에서 제시하는 산정식에 따른 온실가스 감축잠재량이 IPCC GL보다 큰 값을 가져 감축수단의

효과를 크게 평가하는 것으로 분석되었다.

다섯 개의 감축수단은 서로 독립적이지 않고 중복된 측면이 있기 때문에 다섯 개의 감축효과를 단순하게 합치는 감축잠재량을 과대 계상하게 된다. 본 연구에서는 일정 순서에 따라 다섯 개의 감축수단을 순차적으로 누적 적용했을 때의 감축잠재량을 계산하였다.

본 연구는 폐기물부문의 배출량을 계산하기 위한 합리적인 산정식을 제시하고 폐기물 부산물의 에너지화를 고려하여 폐기물 감축수단의 감축잠재량과 감축비용을 계산한 국내 최초의 연구로써 의의가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 관계부처 합동, 「국가온실가스 감축 달성을 위한 로드맵」, 2014.
- [2] 기후변화대책기획단, 「기후변화대응 종합기본계획」, 2008.
- [3] 김희찬, “생활폐기물 소각시설의 에너지회수 효율개선에 관한 연구”, 충남대학교 박사학위 논문, 2013.
- [4] 산업이슈(산은경제연구소), 「폐기물 에너지화 동향과 대응방안」, 2009.
- [5] 에너지경제연구원, 「기후변화협약대응 IPCC 신규 가이드라인 적용을 위한 기획연구」, 2008.
- [6] 온실가스종합정보센터(www.gir.go.kr).
- [7] 온실가스종합정보센터, 「2014 국가 온실가스 인벤토리 보고서」, 2014.
- [8] 한국기계연구원, 「국내 가동 RDF 제조시설의 기술 및 운영 현황」, 2012.
- [9] 한국대기환경학회, 「환경부문의 온실가스 저감 잠재력 평가」, 2000.
- [10] 한국산업관계연구원, 「생활폐기물 처리시설 설치·운영비용 조사연구」, 2007.
- [11] 한국폐기물협회(www.kwaste.or.kr).
- [12] 한국환경공단, 「지자체 온실가스 배출량 산정 지침」, 2012.
- [13] 한국환경공단, 「폐기물부문 배출시설별 온실가스 감축가이드라인」, 2012.
- [14] 한국환경공단, 「폐기물부문 온실가스 배출량 및 에너지 소비량 산정 Tool」, 2010.
- [15] 한국환경공단, 「폐기물부문 온실가스 배출전망 및 감축잠재량 산정」, 2011.
- [16] 한국환경공단, 「Waste-to-Energy Report」, 2008.
- [17] 한국환경정책평가연구원, 「온실가스감축을 위한 폐기물 관리방안 연구」, 2010.
- [18] 환경부(www.me.go.kr, www.ieco.or.kr).
- [19] 환경부, 「폐기물 에너지화 종합대책」, 2008.
- [20] Cosmi, C., V. Cuomo, M. Macchiato, L. Mangiamele, S. Masi, and M. Salvia, "Waste management modeling by MARKAL model: A case study for Basilicata Region," *Environmental Modeling and Research*, Vol.5, No.1(2000), pp.19-27.
- [21] EPA, 「Solid Waste Management and Greenhouse Gases : A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks」, 2006.
- [22] EUROPEAN COMMISSION, 「Waste Treatments Industries」, 2006.
- [23] Gielen, D.J., "The MARKAL systems engineering model for waste management," *Working Paper*, 1988.
- [24] IAEA, *MESSAGE User Manual*, 2008.
- [25] Ioannis, B., M. Sieck, T. Hermann, F.M. Andersen, and H. Larsen, "Projections of Municipal Waste Management and Greenhouse Gases," *Working Paper*, 2011.
- [26] IPCC 2006 Guideline.
- [27] IPCC Good Practice, 2000.
- [28] Salvia, M., C. Cosmi, M. Macchiato, and L. Mangiamele, "Waste management system optimization for Southern Italy with MARKAL model," *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.34, No.2(2002), pp. 91-106.
- [29] Wei, Y.M., G. Wu, and Y.F.-C. Liu, "Progress in energy complex system modelling and analysis," *International Journal of Global Energy Issues*, Vol.25, No.1/2(2006), pp.109-128.