



# 목재펠릿과 석탄의 단위 발열량에 따른 사회적 비용 비교 분석

## Comparison on Social Cost by Unit Calorific Value between Wood Pellets and Coals

이 영 영 · 김 준 순\*

강원대학교 산림경영학과

(2017년 6월 5일 접수, 2017년 7월 13일 수정, 2017년 8월 7일 채택)

Lingying Li and Joon Soon Kim\*

*Department of Forest Management, Kangwon National University*

(Received 5 June 2017, revised 13 July 2017, accepted 7 August 2017)

### Abstract

With the growing importance of GHG reduction, wood pellets are considered as a cheaper renewable energy and carbon neutral. On the other hand, there is a concern that the burning wood pellets may release even more air pollutants such as CO and VOCs. In this study, we analyzed the social costs of burning fuels including wood pellets and coals based on the unit calorific value. The social costs were calculated by sum of the import costs of the fuels and the emission costs of the air pollutants. The results showed that wood pellets are inferior to coals in the aspect of the social costs. It is necessary to improve the quality of the wood pellets and pellet boiler facilities for being used eco-friendly energy sources in the future. We suggest that the control facilities of CO and VOCs should be installed, if the control costs are lower than the pollution costs.

**Key words** : Social cost, Air pollutants, GHG, CO, VOCs

## 1. 서 론

화석연료의 사용에 따른 온실가스의 배출이 기후변화에 미치는 부정적 영향으로 신재생에너지의 개발과 사용이 점점 중요시되고 있다. 한국에서는 2015년의 신기후체제를 계기로 자체적으로 2030년까지 온실가스의 감축 목표를 개선 조치가 시행되지 않았을 경우 대비 37%로 결정하였다. 온실가스 배출이 적은 신재

생에너지의 사용은 감축 목표 달성을 위해 필수적이다. “제4차 신·재생에너지 기본계획”에서도 2035년까지 1차 에너지에서 신재생에너지의 비율을 11%까지 높일 것이라고 제시하였다(Ministry of Trade Industry and Energy, 2014). 또한, 일정 규모 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자에게 총 발전량의 일정 비율 이상을 신·재생에너지로 이용하여 공급하도록 의무화한 “신재생에너지공급의무화제도 (Renewable Portfolio Standard)”가 추진 중이다.

바이오에너지는 신재생에너지의 한 종류로 높은 관심을 받고 있다. 2014년 세계 총 신재생에너지 생산열

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-250-8338, E-mail : jskim@kangwon.ac.kr

량 5,294,465 GWh에서 바이오에너지는 399,496 GWh로 수력발전과 풍력발전 다음으로 3위를 차지하였다(International Renewable Energy Agency, 2016). 한국에서 바이오에너지는 2014년 전체 신재생에너지 생산 열량  $11,537,366 \cdot 10^7$  kcal의 24.5%로 폐기물 다음으로 높은 비율을 차지하였다(Korea Energy Economics Institute, 2015). 그중에서도 목재펠릿은 바이오에너지의 28.1%로 1위를 차지하였는데(Korea Energy Economics Institute, 2015) 금후의 사용량이 계속 늘어날 것으로 예측되고 있다(Korea Environment Institute, 2015). 목재펠릿은 1970년 1차 오일쇼크 후 스칸디나비아반도에서 시작되었으며, 한국에서는 2008년 정부 지원 사업에 의해 산림조합중앙회 목재유통센터에서 처음으로 생산되었다(Kim and Yoon, 2013). “목재펠릿 규격 · 품질기준” (국립산림과학원고시 제2013-5호, 2013.6.28. 일부 개정)에서는 목재펠릿은 “유해물질에 오염되지 않은 목재”를 압축 성형하여 생산하는 작은 원통 모양의 표준화된 목질계 고체바이오연료라고 정의하였다. 신재생에너지인 태양열 및 지열과 비교하였을 때, 단가가 저렴할 뿐만 아니라, 발전용, 산업용, 농업용 등으로도 널리 사용가능하다(Korea Environment Institute, 2015). FAO의 임업통계에서는 2015년 기준으로 세계 총 목재펠릿 생산량은 28,000,000톤이고 수출량은 16,000,000톤인데 각각 2014년 대비 8%, 7% 증가하였고 그중에서 영국의 소비량은 25%, 미국은 11%, 한국은 5%를 차지하였다. Strauss and FutureMetrics (2017)는 세계 목재펠릿의 소비량은 2010년부터 2025년까지 연평균 2,740,000톤씩 증가할 것이라고 예측하였다. 한국의 목재펠릿 공급량과 소비량은 2015년을 제외하고 지속적으로 증가하였는데, 2010년부터 2015년까지 연평균 전년대비 공급 증가율은 129%이고 소비 증가율은 128%였다(Korea Forest Service, 2016). 그중, 국산과 수입산 모두 공급량과 소비량이 증가했지만, 2014, 2015년을 제외하고 2009년부터 2013년까지 수입산은 공급량이 소비량과 같은 반면, 국산은 공급량이 소비량보다 많았으며 국산의 소비량이 전체 소비량에서 차지하는 비율은 2009년의 34%로부터 4.6%로 떨어졌다.

목재펠릿은 바이오매스의 한 종류로서 “탄소중립원칙”을 따르는 경우에 석탄보다 온실가스의 배출은 적지만 상황에 따라 그 외의 대기오염물질은 더 많이 배

출되기도 한다(EC-European Commission, 2003). 특히, CO와 VOC의 배출량이 높는데 목재펠릿의 주요 사용 시설인 보일러에는 CO와 VOC의 방지시설의 설치가 보편화 되지 않은 것이 원인이다. 그럼에도 불구하고 목재펠릿과 관련한 경제성 분석 연구에서는 온실가스 감축기능만을 포함한 연구가 대부분이다(Lee and Kang, 2013; Jeong and Kim, 2010; Gyeonggi Research Institute, 2009). 그러므로 다양한 대기오염물질의 배출 문제를 모두 포함하여 목재펠릿의 사회적 경제성을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 온실가스와 국가에서 배출관리를 하고 있는 기타 대기오염물질의 배출까지 포함시켜 목재펠릿과 석탄의 경제성을 비교 분석하고 목재펠릿의 단위 발열량에 따른 사회적 비용(원/kcal)을 줄이기 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 연구방법 및 데이터

사회적 비용은 내적 비용과 외적 비용을 포함하는데 본 연구에서 연료별 내적 비용은 연료의 구입 비용과 연소 후 배출된 대기오염물질을 방지하는 데 발생하는 직접 비용으로 가정하고, 외적 비용은 방지시설을 거친 후, 대기오염물질이 대기 중에 배출된 오염으로 발생하는 사회적 피해 비용으로 가정하였다. 한국은 화석연료와 목재펠릿을 대부분 수입에 의존하고, 연료의 수입 비용에는 세금과 보조금 등 정책적 수단으로 발생한 비용이 배제되기 때문에 수입 비용을 구입 비용으로 사용하였다. 그러므로 연료별 사회적 비용( $C_j$ )은 연료의 수입 비용( $C_j^i$ )과 대기오염물질 배출 비용( $C_j^e$ )의 합으로 표현할 수 있고,  $C_j^e$ 를 대기오염물질 방지 비용( $C_j^f$ )과 대기오염물질 오염 비용( $C_j^p$ )의 합으로 표현하면 식 1과 같다. 식 1에서  $f$ 의 범위를 목재펠릿과 1, 2, 3종 보일러에서 사용하고 있는 유연탄과(비민수용) 무연탄으로 가정하였고 각 변수의 단위는 원/kcal로 단위 발열량에 따른 비용을 의미한다. 대기오염물질 방지 비용은 단위 발열량에 따른 대기오염물질 방지시설과 운영비를 포함한 비용을 의미한다. 대기오염물질 오염 비용은 방지시설 통과 후, 대기 중에 배출되는 대기오염물질로부터 발생하는 단위 발열량에 따른 사회적 피해 비용을 의미한다.

$$C_f = C_f^I + C_f^c + C_f^p \quad (1)$$

$C_f^c$ 는 대상 연료의 대기오염물질별 방지 비용( $C_{fi}^c$ ) (원/kcal)의 총합이다. 연료의 대기오염물질별 방지 비용( $C_{fi}^c$ )은 연료의 대기오염물질별 배출계수( $F_{fi}$ ) (kg/kcal)에 대기오염물질 및 시설별 방지효율( $R_{ix}$ )을 곱하여 대기오염물질 방지량( $F_{fi} \cdot R_{ix}$ ) (kg/kcal)을 도출 후 (National Institute of Environmental Research, 2013), 대기오염물질 및 시설별 방지단가( $C_{ix}^c$ )를 곱하여 도출하였다(식 2). 대기오염물질 및 시설별 방지단가는 대기오염물질 1kg을 처리하는 데 발생하는 감가상각비와 운영비를 포함한 비용을 의미한다.  $i$ 는 대기오염물질의 종류를 의미하는데 범위를 배출계수와 사회적 비용의 도출이 가능한 전형적인 온실가스를 포함한 대기오염물질(GHG(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), NO<sub>x</sub>(NO, NO<sub>2</sub>), SO<sub>x</sub>, PM, CO, VOC)로 하였다(National Institute of Environmental Research, 2015a; Lee and Choi, 2012; Holland and Watkiss, 2002).  $x$ 는 방지시설의 종류를 의미하는데 범위를 Ministry of Environment(2016)에서 제시한 고체연료를 사용하는 보일러시설의 최적 방지시설 저 NO<sub>x</sub>버너, SCR, SNCR, 배연탈황시설, 여과집진시설, 전기집진시설로 하였다.

$$C_f^c = \sum_{i=1}^n F_{fi} \times R_{ix} \times C_{ix}^c \quad (2)$$

$C_f^p$ 는 대상 연료의 대기오염물질별 오염 비용( $C_{fi}^p$ ) (원/kcal)의 총합이다. 대상 연료의 대기오염물질별 오염 비용( $C_{fi}^p$ )은 대기오염물질별 배출계수( $F_{fi}$ )에서 대기오염물질 방지량( $F_{fi} \cdot R_{ix}$ )을 차감한 배출량에 대기오염물질별 오염단가( $C_i^p$ )를 곱하여 도출하였다(식 3). 대기오염물질별 오염단가는 대기오염물질을 1kg 배출하였을 때 발생하는 사회적 피해 비용을 의미한다.

$$C_f^p = \sum_{i=1}^n (F_{fi} - F_{fi}R_{ix}) \times C_i^p, \quad (3)$$

$$\text{즉 } C_f^p = \sum_{i=1}^n F_{fi} \times (1 - R_{ix}) \times C_i^p$$

연료의 종류( $f$ )에 따라 변하지 않는  $C_i^c + (C_{ix}^c - C_i^p) \times R_{ix}$ 을 대기오염물질별 배출 비용계수  $k_{ix}$ 라고 가정하면 식 1, 2, 3으로부터 식 4를 도출할 수 있다.

$$C_f = C_f^I + \sum_{i=1}^n F_{fi} \times R_{ix} \times C_{ix}^c + \sum_{i=1}^n F_{fi} \times (1 - R_{ix}) \times C_i^p$$

$$C_f = C_f^I + \sum_{i=1}^n [C_i^c + (C_{ix}^c - C_i^p) \times R_{ix}] \times F_{fi}$$

$$\text{즉, } C_f = C_f^I + \sum_{i=1}^n k_{ix} \times F_{fi}, \quad C_f = C_f^I + C_f^E \quad (4)$$

식 4는 이론적으로  $R_{ix}=0$ , 혹은  $C_{ix}^c = C_i^p$ 일 때,  $k_{ix} = C_i^c$ 이고;  $R_{ix} = 1$ 일 때,  $k_{ix} = C_{ix}^c$ 이다. 또한, 변수  $C_f^I, C_f^E, F_{fi}, k_{ix}$ 가 각각  $\Delta(Max. - Min.)$ 만큼 변하면  $C_f$ 는 각각  $\Delta C_f^I, \Delta C_f^E, k_{ixmin.} \cdot \Delta F_{fi} \sim k_{ixmax.} \cdot \Delta F_{fi}, F_{fimin.} \cdot \Delta k_{ix} \sim F_{fimax.} \cdot \Delta k_{ix}$ 만큼 변하게 되는데, 우선 각 변수의  $C_f$  최대 절감 가능 양으로부터 통제에 유리한 변수를 추정하였다.

본 연구에서는  $C_f^I, F_{fi}, k_{ix}$ 의 최저치, 대표치, 최고치를 각각 적용하여  $C_f$ 의 대표치와 가능한 범위( $Min. \sim Max.$ ), 그리고 각 변수별  $C_f$ 의 변화에 미치는 영향을 도출하였다. 도출과정에서 대표치는 일부 적용 방법과 데이터를 명시한 경우를 제외하고 중간치를 적용하는 것을 기준으로 하였다. 비용과 관련된 데이터  $C_f^I, C_{ix}^c, C_i^p$ 는 통계청(kostat.go.kr) 국제통계연감의 GDP 디플레이터와 환율을 적용하여 2015년 기준으로 전환한 데이터를 사용하였고,  $C_f^I, F_{fi}$ 는 에너지열량 환산기준(Korea Energy Economics Institute, 2015)의 총 발열량을 적용하여 단위를 각각 원/kcal, kg/kcal로 전환한 데이터를 사용하였다. 목재펠릿의 총 발열량은 Korea Forest Service(2016)의 경제적 분석 부분에서 제시한 4500 kcal/kg을 적용하였다.

$C_f^I$ 는 한국무역협회(www.kita.net)에서 제시한 목재펠릿의 수입 시작 연도인 2009년부터 2015년까지의 연도별 관세 전 총 수입액에 수입량을 나눈 데이터를 2015년 기준으로 전환한 후, 총 발열량을 적용하여 도출한 연료별 수입단비의 최저, 중간(대표치), 최고치를 적용하였다.

석탄의 대기오염물질 배출계수와 목재펠릿 GHG 배출계수는 CAPSS(Clean Air Policy Support System)에서 제시한 2012년 기준 석탄 사용량이 가장 많은 배출원 공공발전일 때를 대표치로 적용하였다. GHG의 배출계수는 “공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침”의 “온실가스 배출량 등의 산정방법”(별표4 제6조 제2항 관련)에 따라 도출하였다. 그중, 목재펠릿은 “온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침” 제94조에 의하여 바이오에너지로서 탄소중립원칙을 지키기 때문에 최저치, 대표치를 구할 때에는 CO<sub>2</sub>의 배출량을 0으로 적용하고, 최고치를 구할 때에

**Table 1. Air pollutants emission factors of wood pellets by types of the facilities and the sources.** (Unit: g/kg)

Facility	Source	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	CO	VOC
Stove	National Institute of Environmental Research, 2014	0.2	4.6	14.4	119.2	37.7
	United States Environmental Protection Agency, 2001	0.2	-	6.3	17.9	-
Boiler	National Institute of Environmental Research, 2014	<b>0.2</b>	<b>4.7</b>	<b>11.9</b>	<b>156.97</b>	<b>48.8</b>
Combustion	Gyeonggi Research Institute, 2009	0.2	2.4	7.8	-	-
	Korea Forest Service, 2010	1.4	-	0.7	-	-
	National Institute of Environmental Research, 2015b	-	0.93	2.42	-	-

**Table 2. The information needed to derive emission cost factors of the different types of air pollutants ( $k_i$ ).**

$i$ (Pollutant)	$x$ (Facility)	$R_{ix}$	$C_{ix}^c$ (Won/kg)	$C_i^p$ (Won/kg)
GHG	-	0	$C_{GHG}^p$	11,184 <sup>d)</sup>
NO <sub>x</sub>	Low-NO <sub>x</sub> burner	0.2 <sup>a)</sup> ~0.53 <sup>b)</sup>	810 <sup>d)</sup>	10,196 <sup>b)</sup>
	SNCR	0.6 <sup>a)</sup> ~0.75 <sup>c)</sup>	890 <sup>d)</sup>	
	SCR	0.7 <sup>a)</sup> ~0.95 <sup>c)</sup>	1,420 <sup>d)</sup>	
SO <sub>x</sub>	Flue gas desulfurization	0.8 <sup>a)</sup> ~0.98 <sup>c)</sup>	463 <sup>d)</sup>	11,452 <sup>b)</sup>
PM	Bag filter	0.9 <sup>a)</sup> ~0.95 <sup>d)</sup>	7,257 <sup>d)</sup>	33,289 <sup>b)</sup>
	Electrostatic precipitator	0.9 <sup>a)</sup> ~0.999 <sup>e)</sup>	618 <sup>d)</sup>	
CO	-	0	$C_{CO}^p$	8,475 <sup>b)</sup>
VOC	-	0	$C_{NOx}^p$	4,625 <sup>b)</sup>

Source: <sup>a)</sup>Ministry of Environment, 2004; <sup>b)</sup>National Institute of Environmental Research, 2016; <sup>c)</sup>Ministry of science and technology of the people's republic of China and ministry of environmental protection of the people's republic of China, 2014; <sup>d)</sup>Daegu Regional Environmental Management Office, 1999; <sup>e)</sup>Jang *et al.*, 2011; <sup>f)</sup>Ministry of Environment, 2001; <sup>g)</sup>Lee and Choi, 2012; <sup>h)</sup>Kim, 2016; <sup>i)</sup>Lee and Choi, 2012; Holland and Watkiss, 2002; Base year of monetary evaluation: <sup>d)</sup>1999; <sup>b)</sup>2015; <sup>e)</sup>2009

는 연소하여 배출되는 CO<sub>2</sub>의 배출량 112,000 kg/TJ을 적용하였다. 목재펠릿의 순 발열량은 4157 kcal/kg을 적용하였는데, 총 발열량이 4500 kcal/kg일 때, 수소함량 5.5% (Lee *et al.*, 2012), 수분함량 7.7% (Kwon *et al.*, 2012)를 수식, 순 발열량 = 총 발열량 - [6 · (9 · 수소함량 (%) + 수분함량 (%))] (Lee *et al.*, 2012)에 대입하여 도출하였다. 온실가스 외, 기타 대기오염물질 배출계수 중 석탄은 “대기오염물질 배출계수 - 2012년 대기오염물질 배출량 기준 -” (National Institute of Environmental Research, 2015a)을 참고하였고 목재펠릿은 표 1에 제시한 데이터를 참고하였는데 National Institute of Environmental Research (2014)의 펠릿보일러시설의 배출계수를 대표치로 적용하였다. 석탄 배출계수 중의 황함량은 “국가 대기오염물질 배출량 기초자료구축을 위한 표준 업무 절차서 - 2013년 배출량 기준 -” (National Institute of Environmental Research, 2016)을 참고하였다.

대기오염물질별 배출 비용계수  $k_{ix}$ 의 도출에는 표 2에 제시한  $R_{ix}$ ,  $C_{ix}^c$ ,  $C_i^p$  데이터를 적용하였다. 대기오염물질별 배출 비용계수의 대표치는 표 2 자료를 참고하여, 석탄을 가장 많이 사용하는 발전 부문에서 주로 사용하는 SNCR, 배연탈황시설, 전기집진기를 방지시설로 사용하였을 때의 방지효율 최저치와 최고치의 평균을 적용하고 시설에 따른 방지단가, 대기오염물질에 따른 오염단가를 적용하여 도출하였다 (Kim *et al.*, 2004). 대기오염물질별 배출 비용계수의 최저치는 표 2에서 방지효율의 최고치를 기준으로 효율이 가장 높은 시설을 선택하고, 그중에서 방지단가가 가장 낮은 시설을 사용한 경우를 기준으로 도출하였고 최고치는 최저치와 반대의 경우를 도출하였다.

사업장 1, 2, 3종 보일러의 방지시설 설치상황은 2012년 SEMS (Stack Emission Management System)의 대기오염물질 배출량과 CAPSS의 연료사용량을 종합 참고하면, 대기오염물질 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM을 주로 방지처

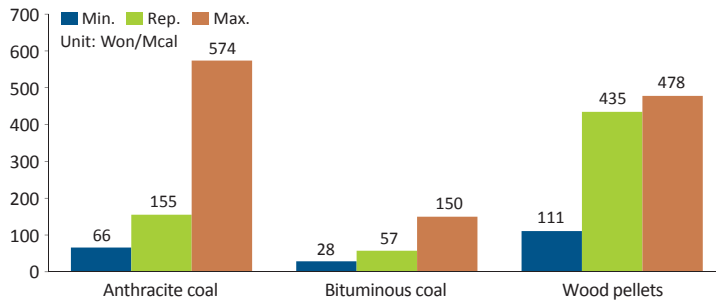


Fig. 1. Unit social costs by fuel types.

리하고 GHG, CO, VOC의 방지시설은 보편적이지 않다. 그러므로 GHG, CO, VOC의 방지효율은 0을 적용하였다(표 2).  $C_{ix}^c$ 는 Ministry of Environment (2001)에서 제시한 방지시설별 대기오염물질을 방지하는 데 필요한 시설의 감가상각비를 포함한 운영비를 이용하여 도출한 단위 대기오염물질을 방지하는 데 드는 비용을 적용하였다. 온실가스의 오염단가( $C_{GHG}^p$ )는 한국거래소(www.krx.co.kr)의 2015년 탄소배출권 거래가격, 할당배출권(KAU, Korean Allowance Unit)과 상쇄배출권(KCU, Korean Credit Unit)을 모두 포함하여 거래량 대비 가중평균 매매 가격인 11.184원/kg(Kim, 2016)을 적용하였다. 온실가스 외의 대기오염물질 오염단가는 국내외 상관 연구를 종합한 후,  $NO_x$ ,  $SO_x$ , PM, CO, HC의 사회적 피해 비용을 제시한 Lee and Choi (2012)의 연구결과를 적용하였다(표 2). VOC의 단가는 Lee and Choi (2012)의  $SO_x$  사회적 피해 비용 11,452원/kg에 Holland *et al.* (2002)가 1998년 기준으로 유럽 15개 국가를 대상으로 대기오염물질에 의한 사회적 피해 비용을 제시한 VOC (2,100€/t)의 사회적 피해 비용이  $SO_x$  (5,200€/t)에서 차지하는 비율을 곱하여 도출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

목재펠릿의 사회적 비용은 대표치 기준으로 석탄보다 높게 나타났으며 무연탄의 2.8배, 유연탄의 7.6배이다(그림 1). 그러나 목재펠릿의 최저치는 무연탄의 대표치, 유연탄의 최고치보다는 적게 도출되었는데, 이것은 목재펠릿이 더 경제적인 수도 있다는 것을 의미한다.

연료별 사회적 비용은 수입 비용과 대기오염물질별 배출 비용의 합이다. 목재펠릿의 사회적 비용의 구성에서 가장 큰 비율을 차지하는 것은 CO의 배출 비용인데 약 전체의 75%이고, 다음으로 VOC의 배출 비용 13%, 수입 비용 9%,  $NO_x$ 의 배출 비용 3%, PM의 배출 비용 1%이다(그림 2). 목재펠릿의 CO와 VOC의 배출 비용은 석탄보다 현저하게 높게 나타났고,  $NO_x$ 의 배출 비용도 석탄보다 높게 나타났다(그림 2). 목재펠릿의 수입 비용은 유연탄의 1.9배, 무연탄의 1.6배이다(그림 2). CO와 VOC의 배출 비용을 제외한 사회적 비용은 목재펠릿이 유연탄보다 낮게 나타났다(그림 2).

대표치(최저치~최고치)의 형식으로 정리하였을 때, 무연탄, 유연탄, 목재펠릿의 수입 비용은 26 (20~39), 21 (13~26), 40 (30~49)원/Mcal이고, 대기오염물질 배출 비용은 129 (45~534), 36 (15~124), 395 (80~427)원/Mcal로 나타났다. 그러므로 목재펠릿의 수입 비용은 항상 유연탄보다 높고, 배출 비용도 목재펠릿이 적은 경우가 많지 않다. 대기오염물질 배출 비용은 대기오염물질별 배출 비용계수와 연료와 대기오염물질별 배출계수를 이용하여 도출되었다. 대기오염물질 GHG,  $NO_x$ ,  $SO_x$ , PM, CO, VOC의 배출 비용계수는 11.184, 4,473 (2,434~9,182), 1,956 (882~3,029), 2,822 (894~12,727), 9,306, 5,078원/kg으로 나타났고, 목재펠릿의 GHG,  $NO_x$ ,  $SO_x$ , PM, CO, VOC의 배출계수는 7.2 (7.2~462.3), 2.6 (0.2~3.2), 0.04 (0.04~0.3), 1.0 (0.2~1.0), 34.9 (4.0~34.9), 10.8 (8.4~10.8) g/Mcal이다.

연료별 수입 비용과 대기오염물질별 배출 비용의 변화는 같은 양의 사회적 비용의 변화를 발생시키는데 각 비용의 통계를 통하여 사회적 비용을 절감할 수 있다. 목재펠릿 수입 비용 통계로 절감할 수 있는 사회적

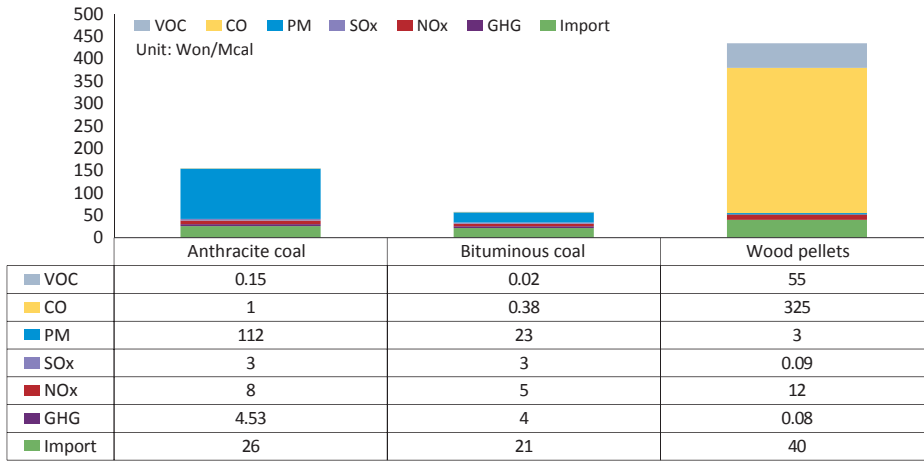


Fig. 2. Unit import costs and unit emission costs of air pollutants by fuel types.

비용은 최대 19원/Mcal로 무연탄과 같고 유연탄보다 많이 나타났다. 목재펠릿 대기오염물질 배출 비용의 통제로 절감할 수 있는 사회적 비용은 최대 348원/Mcal인데 사회적 비용 최대 절감량의 95%이고 목재펠릿 사회적 비용 최고치의 73%이다. 목재펠릿 GHG, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM, CO, VOC 배출 비용의 통제로 절감할 수 있는 사회적 비용은 최대 5, 29, 1, 13, 288, 13원/Mcal이다.

대기오염물질 배출 비용은 대기오염물질별 배출 비용계수와 연료와 대기오염물질별 배출계수의 변화로부터 발생하는데 두 계수의 통제를 통하여 배출 비용을 절감할 수 있다. 목재펠릿의 대기오염물질 배출 비용계수의 통제로 절감 가능한 배출 비용은 최대 4~35원/Mcal이고 대기오염물질 배출계수 통제로 절감 가능한 배출 비용은 최대 314~345원/Mcal이다. 목재펠릿 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM 배출 비용계수의 통제로 절감 가능한 배출 비용은 최대 1.0~21.6, 0.1~0.7, 2.4~12.4원/Mcal이다. GHG, CO와 VOC는 해당 방지시설이 보일러에 설치되지 않았기 때문에 배출 비용계수의 가능한 통제량은 0이다. 목재펠릿 배출계수의 통제로 절감 가능한 배출 비용이 가장 많은 대기오염물질은 CO인데 287.6원/Mcal이다. GHG, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM, VOC의 배출계수 통제에 따른 최대 감소량은 각각 5.1, 7.4~28.0, 0.2~0.8, 0.7~10.7, 12.5원/Mcal이다.

목재펠릿을 석탄과 비교하였을 때의 경제성을 높이

는데 통제가 가장 필요한 것은 사회적 비용의 구성에서 가장 큰 비율을 차지하는 CO와 VOC의 배출 비용이고 다음으로 수입 비용, NO<sub>x</sub>, PM의 배출 비용, 기타의 순이다. 사회적 비용의 최대 변화량이 클수록 각 비용의 통제효과를 쉽게 볼 수 있다고 하면, 목재펠릿은 우선 통제에 가장 유리한 것은 CO, NO<sub>x</sub>의 배출 비용이고 다음으로 수입 비용, PM, VOC, GHG, SO<sub>x</sub>의 배출 비용의 순이다. 배출 비용을 결정하는 배출 비용계수와 배출계수 통제로 절감 가능한 최대 배출 비용이 클수록 계수의 통제효과를 쉽게 볼 수 있다면, 목재펠릿은 우선 통제에 가장 유리한 계수는 최고치를 기준으로 CO의 배출계수, NO<sub>x</sub>의 배출계수, NO<sub>x</sub>의 배출 비용계수, VOC의 배출계수, PM의 배출 비용계수, PM의 배출계수, GHG의 배출계수, SO<sub>x</sub>의 배출계수, SO<sub>x</sub>의 배출 비용계수의 순이다. 대기오염물질별 배출 비용계수의 최저치가 크면 대기오염물질의 방지시설의 개선 가능성도 크다고 하면, 방지시설의 개선 가능성이 가장 큰 대기오염물질은 CO, VOC이고 다음으로 NO<sub>x</sub>, PM, SO<sub>x</sub>의 순이다. 대표치를 기준으로 대기오염물질별 배출 비용계수 혹은 배출계수가 1단위 변화했을 때, 배출 비용의 변화량이 가장 많은 대기오염물질은 CO이고 다음으로 VOC의 순이다. 배출 비용계수는 연료의 종류와 상관없이 대기오염물질별 처리단가, 방지효율, 오염단가에 의하여 결정된다. 배출계수는 연료별 품질, 사용하는 시설과 배출원에 따라 범위가 발생

하였는데, 목재펠릿의 배출계수는 펠릿의 품질과 사용 시설에 따라 범위가 발생하였다. 그러므로 목재펠릿의 사회적 비용을 절감하기 위해서는 양질의 목재펠릿과 보일러 시설을 사용하여 CO와 VOC의 배출을 줄이는 것이 절대적으로 중요하다. 또한 방지시설은 CO와 VOC의 처리단가가 오염단가보다 낮다면 추가 설치하는 것이 바람직하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 보일러에 사용하고 있는 신재생에너지 목재펠릿과 석탄의 수입과 온실가스 및 기타 대기오염물질의 방지와 배출과정에서 발생하는 비용(원/kcal)의 합을 도출하고 목재펠릿을 연료로 선택하였을 때의 경제성 여부를 제시하였다. 대기오염물질은 기존의 GHG(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)뿐 아니라 NO<sub>x</sub>(NO, NO<sub>2</sub>), SO<sub>x</sub>, PM, CO와 VOC 여섯 종류를 포함하였다. 또한, 목재펠릿의 사회적 비용의 구성과 연료 종류 외의 기타 변수에 의한 비용 범위의 변화 특징을 비교 분석하여 목재펠릿의 사회적 비용 절감에 효과적인 수단을 제시하였다.

목재펠릿은 석탄보다 사회적 비용(원/kcal)이 높게 나타났다. 목재펠릿 사회적 비용의 주요 구성은 대기오염물질 배출 비용인데 전체 사회적 비용의 91%(대표치 기준)로 나타났다. 목재펠릿은 신재생에너지로서 수입 비용의 경쟁력도 석탄보다 낮다. 이것은 석탄 사용의 발전 역사에 따른 시스템의 완비와도 관련이 있는 부분이기 때문에 신재생에너지인 목재펠릿의 경쟁력을 효과적인 수단을 통하여 높이려는 노력이 필요하다.

목재펠릿 사회적 비용의 절감은 주로 대기오염물질 배출 비용의 절감으로 실현할 수 있는데 주요 수단은 다음과 같다. 첫째, 목재펠릿과 펠릿보일러의 품질 개선이다. 둘째, CO와 VOC의 처리단가가 오염단가보다 저렴한 방지시설을 개발하고 설치하는 것이다. 셋째, PM과 NO<sub>x</sub>의 방지시설 단가를 절감하고 방지효율을 높이는 것이다.

본 연구에서는 연료의 사회적 비용을 수입과 대기오염물질의 방지와 처리에 따른 비용의 합으로 간주하였는데 그 외에도 본 연구에는 포함되지 않았지만 발생하는 비용 혹은 편익이 존재한다. 예를 들면 연료 운송

과정에서 발생하는 연료별 비용, 목재펠릿이 연소한 후의 회분을 비료로 사용하여 발생하는 편익 등이 있다. 또한, 대기오염물질의 종류도 본 연구에서 제시한 물질 외에도 많이 존재한다. 이런 부분은 관련 데이터의 축적과 함께 금후의 연구에서 더 발전시킬 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(C1010824-01-01).

#### References

- Daegu Regional Environmental Management Office (1999) The Practical Guide of Air Pollution Prevention Facilities Design, Administrative publication registration number 38045-67030-67-9901, 83pp.
- EC-European Commission (2003) External Costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport, EC e European Commission, Luxembourg, 12pp.
- Gyeonggi Research Institute (2009) A Study on the Energy Utilization of Wood Biomass, 12, 74pp.
- Holland, M. and P. Watkiss (2002) Benefits Table Database: Estimates of the Marginal External Costs of Air Pollution in Europe BeTa Version E1.02a, Contract report for European Commission Directorate-General for Environment (created by netcen), 13pp.
- International Renewable Energy Agency (2016) Renewable Energy Statistics 2016, 3, 55pp.
- Jang, K.-W., H.-C. Kim, Y.-M., Lee, D.-J. Song, N. Jung, S.-K. Kim, J.-H. Hong, S.-J. Lee, and J.-S. Han (2011) Estimating PM emission factor from coal-fired power plants in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(5), 485-493. (in Korean with English abstract)
- Jeong, N.-Y. and L.-H. Kim (2010) The study of economic feasibility of wood pellet in domestic power plants sector, Journal of Energy Engineering, 19(4), 251-257. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-G., Y.-S. Eom, J.-H. Hong, S.-J. Lee, K.-S. Seok, D.-G. Lee, E.-J. Lee, and S.-A. Bang (2004) A study

- on the estimation of air pollutants emission factors in electric power plants, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(3), 281-290. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.-L. (2016) Status of Domestic Emission Trading, *Capital Markets Weekly ZOOM-IN*, NO. 2016-01, pp. 1-3.
- Kim, T.-H. and S.-Y. Yoon (2013) Analysis of greenhouse gas emissions associated with the production of wood pellets, *Korean Journal of Organic Agriculture*, 21(3), 305-319. (in Korean with English abstract)
- Korea Energy Economics Institute (2015) 2015 Yearbook of Energy Statistics, 125pp.
- Korea Environment Institute (2015) A Study on Appropriate Distribution for Utilization of Waste Resources and Bioenergy (II): Focusing on Woody Biomass, 89pp. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service (2010) Research on Wood Pellet Management Based on Prediction of Future Supply and Demand for Wood Pellet, 69pp.
- Korea Forest Service (2016) Statistics of Wood Pellets in 2015, 1, 25pp.
- Kwon, G.-J., N.-H. Kim, and D.-S. Cha (2009) Characteristics of Commercial Wood Pellets, *Journal of Forest Science*, 25(2), 127-130.
- Lee, J.-C. and K.-Y. Kang (2013) Analyses of GHG reduction effectiveness and economic feasibility in the wood pellet fuel switching project, *Journal of The Korean Wood Science and Technology*, 41(6): 594-605. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.-J. and K.-C. Choi (2012) A model for estimating social cost of mobile emission considering geographical and social characteristics, *Journal of Korean Society of Transportation*, 30(5), 33-42. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.-K., S.-J. Kim, C.-S. Cho, and E.-C. Jeon (2012) Development of CO<sub>2</sub> Emission Factor for Wood Chip Fuel and Reduction Effects, *Climate Change Research*, 3(3), 211-224. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Environment (2001) Improvement Plan of Emission Tax System, 221-223pp.
- Ministry of Environment (2004) (Air pollutant emission site) Handling Procedures for the Changed Method of Classification, 16pp.
- Ministry of Environment (2011) The Management Plan of the Unit Emission Control, 51pp.
- Ministry of Environment (2016) The Guidelines for the Licensing and Permitting of the air pollution emission facilities, 125pp.
- Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China and Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2014) Compilation of Advanced Technology for Air Pollution Control, 1-3pp.
- Ministry of Trade Industry and Energy (2014) The 4<sup>th</sup> Basic Plan for Renewable Energy, 1pp.
- National Institute of Environmental Research (2013) Guide of National Calculation Method of Air Pollutant III, NIER Official Press Release No. 11-1480523-001501-01, 7-8pp.
- National Institute of Environmental Research (2014) Calculation Method of Air Pollutant Emissions by Biological Combustion, NIER Official Press Release No. 11-1480523-001913-01, 20pp.
- National Institute of Environmental Research (2015a) Air Pollutants Emission Factors-2012 Emission Standard, NIER Official Press Release No. 11-1480523-002288-01, 1-19pp.
- National Institute of Environmental Research (2015b) Notice of Air Pollutant Emission Factor for the Emission Facilities, National Institute of Environmental Research Notice No. 2015-9, Enforced on 2015.7.28., 14pp.
- National Institute of Environmental Research (2016) Standard Work Procedures for Establishing Basic Data of National Air Pollutant Emissions, NIER Official Press Release No. 11-1480523-002718-10, 35, 279pp.
- Strauss, W. and FutureMetrics (2017) Global pellet market outlook in 2017 (Overview of global wood pellet markets: historic and future demand), *Canadian Biomass (magazine)*, published in 2017-1-5, No pages.
- United States Environmental Protection Agency (2001) EIIP Vol. 3 CH. 2: Residential Wood Combustion, 2-4-5pp.