

# 온실가스배출 감축사업(KVER) 제지목재 분야 인증 감축방법의 경제성 분석

## Economic Analysis of GHG Emission Reduction Methodology in Pulp, Paper and Wood Industry Approved by Korea Voluntary Emission Reduction Program

김영민(Young Min Kim)<sup>1</sup>, 송명호(Myung Ho Song)<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>에너지관리공단 기후대책실, <sup>2</sup>동국대학교 신재생에너지공학과

<sup>1</sup>Korea Energy Management Corporation, Climate Change response Department, Gyeonggi 448-994, Korea

<sup>2</sup>Department of New and Renewable Energy Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

(Received October 29, 2014; revision received December 16, 2014; Accepted: December 19, 2014)

**Abstract** The Energy and Green House Gas target management system was launched by the Korean Government in 2010. The Korea Emission Trading System will start in 2015. Therefore, simultaneous pursuit of energy saving and greenhouse emission reduction through energy use rationalization is an important obligation of Korean engineers, who import about 97% of domestic energy consumption. Economic analysis of the GHG emission reduction methodologies registered and approved by Korea Voluntary Emission Reduction (KVER) program was conducted. The results for waste heat recovery employed in an energy intensive pulp, paper and wood industry were reported. The emission reduction intensities were 9.7 kg CO<sub>2</sub>/ton\_pulp production. Net Present Value analysis showed that the GHG emission reduction was economically beneficial with an internal rate return of 60%. The results of exergy analysis indicated that the second law efficiencies of waste heat recovery system employed in KVER program were 77.3% and 53.6%. NPV decreased as the exergy decreased.

**Key words** GHG(온실가스), KVER(국내 자발적 온실가스배출 감축사업), Economic analysis(경제성 분석), Pulp(펄프), paper(종이), wood(목재)

\* Corresponding author, E-mail: songm@dgu.edu

### 기호설명

$ER_y$  : 해당(y)년도 배출 감축량 [tCO<sub>2</sub>/year]  
 $U_{BL}$  : 베이스라인 배출집약도 [tCO<sub>2</sub>/t\_product]  
 $U_{PL,y}$  : 사업 후 배출집약도 [tCO<sub>2</sub>/t\_product]  
 $Q_{P,y}$  : 해당년도 사업 후 기준활동량 [t\_product]  
 $LE_y$  : y년 사업 후 연간 누출량 [t\_product]

### 그리스 문자

$\varphi$  : 엑서지 [kJ/kg]  
 $\eta_{II}$  : the second law efficiency

### 1. 서 론

인류의 지속적인 발전을 위협하는 기후 변화에 대응하여 국제사회가 기울이는 주요 노력으로 대기 중 온실가스 감축을 위한 국제협약의 도출과 실행은 세계적

인 관심사항이다. 2011년 현재 한국은 온실가스 총배출량 기준으로 OECD 회원국 중 5위이고, 배출량 증가는 회원국 중 1위를 기록한 온실가스 다배출 국가이다.<sup>(1)</sup> 이미 2009년에 “2020년 온실가스 배출 BAU 대비 30% 감축”이라는 국가 온실가스 감축 중기목표를 발표한 바 있으며, 2010년에는 저탄소녹색성장기본법에 따른 온실가스에너지목표관리제를 도입하였고, 2015년에는 온실가스 배출권거래제를 시행할 예정이다.

한편, 우리나라의 산업구조는 제조업 중심이며 에너지의 97%를 수입에 의존하는 등 에너지의 효율적 이용은 국가 경쟁력의 확보를 위해 중요하다. 결국, 국내 에너지 다소비 업종에서 에너지이용 합리화를 통해 에너지 사용 절감과 온실가스 배출 감축 효과를 동시에 추구하는 작업의 의미는 매우 크다. 이미 배출권거래제를 실시한 유럽을 중심으로 에너지 다소비 업종의 하나인 제지업종을 대상으로 온실가스 배출 감축효과와 엑서지 분석에 대한 다수의 연구가 수행되었다.<sup>(2-5)</sup>

본 연구에서는 국내 자발적 온실가스 배출 감축사업 (Korea Voluntary Emission Reduction program; 이하 KVER)의 측정/보고/검증 체계(Measuring, Reporting, Verifying system)를 통해 등록되고 인증된 사례에 대하여 경제성 분석을 수행함으로써, 향후 기업의 효과적인 온실가스 감축설비 선택과정에 도움이 되고자 하였다.

특히, 다양한 경제성 분석 기법을 국내의 대표적인 에너지 다소비 업종인 제지목재업에 적용하여 온실가스 배출 감축설비가 기업의 이익에도 긍정적인 영향을 미친다는 사실을 보였다. 또, 제지산업의 초지공정에 도입된 폐열회수 열교환기의 엑서지 분석 결과와 입구 온도 조건의 변화에 따른 경제성 분석 결과를 비교하여 기술하였다.

## 2. 분석방법

### 2.1 KVER 개요 및 분석 대상

KVER은 국내의 자발적 온실가스 감축 사업을 체계적으로 등록 및 인증하기 위해, CDM 사업을 벤치마킹하여 산업통상자원부와 에너지관리공단이 운영하는 제도이다. KVER에서는 CDM 방법론, KVER 승인 방법론, 사업시행자가 자체 개발하여 KVER 등록·인증·방법론 평가위원회의 승인을 받은 방법론을 사용하여 온실가스 감축사업을 등록할 수 있다. 감축사업 등록 후 5년간 매년 감축실적을 관찰하여 인증하며, 1회에 한하여 5년의 연장이 가능하다. Table 1에 나타난 바와 같이 2006년부터 등록이 시작되어 2013년까지 총 470개의 감축사업이 등록되었으며, 이로부터 980개의 감축 건이 인증되어 총 1,469만 톤의 감축실적이 인증되었다.

이 중 본 연구에서는 에너지다소비 업종 중 하나인 제지목재업종의 미활용 폐열회수로 등록된 사업 중 후드 배기열을 이용하여 온실가스를 감축한 사례를 분석하였다. 본 사업은 KVER 사업으로 등록되어 총 4개년 동안 감축실적에 대한 인증을 받았다. 후드를 통해 대기 중으로 배출되던 배기열을 회수하여 기존의 보일러에 소비되던 화석연료를 절감함으로써 온실가스를 저감하였다. 모니터링 차수에 따른 연간 감축인증량과 열회수량을 Table 2에 나타내었다.

Table 1 KVER validation and verification credit during 2006~2013

Validation	Number of validation	470
	Annual expected emission reudciton [x1000 tCO <sub>2</sub> ]	5,722
Verification	Number of verification	980
	Certified emission reduction[x1000 tCO <sub>2</sub> ]	14,692

Table 2 Case study data

Verification	GHG reduction (tCO <sub>2</sub> )	Heat recovered (Gcal)
1st	2,049	8,547
2nd	1,081	6,994
3rd	2,054	11,126
4th	1,822	9,085
Average	1,752	8,938

### 2.2 온실가스 배출 감축량의 산정

온실가스 배출 감축량은 베이스라인 배출집약도와 사업 후 배출집약도의 차이에 기준활동량을 곱하고 이로부터 누출량을 차감하여 산정한다.

$$ER_y = (U_{BL} - U_{PJ,y}) \cdot Q_{PJ,y} - LE_y \quad (1)$$

단, 생산량의 단순 증감에 의해 감축량이 변화하는 것을 방지하기 위해, 베이스라인 배출집약도와 사업 후 배출집약도의 차에 곱해지는 Q<sub>PJ,y</sub>는 베이스라인 기준활동량을 초과하지 않도록 제한한다.

기준활동량이란 온실가스 감축/제거량을 산정하는 대상이 되는 사업경계 내에서 사용하는 원료, 또는 사업경계 내에서 생산되는 제품, 반제품 등의 크기이며, 배출집약도는 단위 기준활동량 당 배출량이다.

베이스라인 배출집약도는 감축사업을 하지 않았을 경우에 사업 경계 내에서 가장 발생 가능성이 높은 배출집약도를 말한다. 베이스라인 배출집약도와 사업 후 배출집약도의 차이는 온실가스 배출감축집약도로서, 온실가스 감축설비 도입을 통해 한 단위의 기준활동량을 생산할 때 감축할 수 있는 온실가스라고 할 수 있다. 누출량이란 감축사업 시행과정 중, 당해 사업의 범위 밖에서 부수적으로 발생하는 온실가스 배출 증가량 또는 감축량을 말한다.<sup>6)</sup>

### 2.3 엑서지 분석 대상

엑서지 분석의 대상이 되는 특정 사례는 제지산업의 초지공정이었다. 감축설비 도입 이전 해당 공정에서 2개의 후드를 통해 고온 공기가 대기 중으로 배출되었다. 사업 수행에 따라 폐열 회수를 위해 열교환기를 설치하여 Fig. 1과 같이 공기에열에 사용되는 용수의 가열과 공정에 사용되는 용수의 가열을 위한 열교환기가 각각의 후드에 설치되었다. 해당 사례의 각 작동유체의 입출구에서 온도, 유량 및 엔탈피와 엔트로피는 Table 3과 같다.

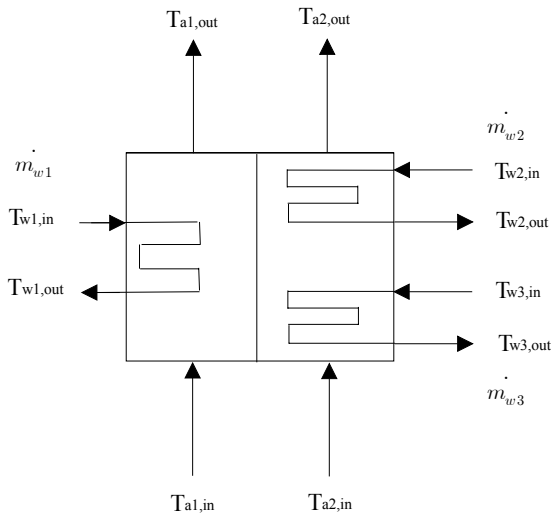


Fig. 1 Schematics of inlet and outlet conditions.

Table 3 Case study conditions

Parameter	Symbol	value [°C or kg/s]	h [kg/kJ]	s [kg/kJ · K]
water #1 inlet temp.	$T_{w1, in}$	40.8	170.9	0.5830
water #1 outlet temp.	$T_{w1, out}$	45	188.4	0.6386
water #1 mass flow rate	$\dot{m}_{w1}$	61.2		
waste heat air #1 inlet temp.	$T_{a1, in}$	66.7	340.1	1.8270
waste heat air #1 outlet temp.	$T_{a1, out}$	44.2	317.5	1.7580
water #2 inlet temp.	$T_{w2, in}$	7.1	29.84	0.1077
water #2 outlet temp.	$T_{w2, out}$	38.3	160.4	0.5495
water #2 mass flow rate	$\dot{m}_{w2}$	5.1		
water #3 inlet temp.	$T_{w3, in}$	23.9	100.2	0.3516
water #3 outlet temp.	$T_{w3, out}$	46.4	194.3	0.6569
water #3 mass flow rate	$\dot{m}_{w3}$	16.1		
waste heat air #2 inlet temp.	$T_{a2, in}$	61.8	335.2	1.8123
waste heat air #2 outlet temp.	$T_{a2, out}$	37	310.2	1.7350

분석 대상 폐열회수 설비의 경우, 온실가스 감축량 산정은 식(1)을 사용하되, 베이스라인 배출량은 본 사업을 통해 절감된 기존의 외부스팀 사용량과 보일러 연료 사용량으로부터 발생될 온실가스 배출량이다.

사업 후 배출량은 열교환을 위한 펌프 및 송풍기 가동에 사용된 전기로부터의 온실가스 배출량이 된다.

## 2.4 경제성 분석

온실가스 배출 감축설비의 경제성분석에는 아래와 같이 널리 받아들여진 분석방법<sup>(7)</sup>을 다양하게 적용하였다.

순현재가치(Net Present Value) 방법은 비용편익분석의 하나로 온실가스 배출 감축사업 수행 결과 창출되는 편익의 현재가치와 사업 수행에 필요한 비용의 현재가치의 차이를 평가하여 경제성을 판단하는 기법이다. NPV가 0보다 크면 경제성이 있다고 판단한다. 편익은 에너지 절감비용과 온실가스 감축실적의 정부구매 가격으로 구성되고, 비용은 초기 투자비와 운영에 필요한 유지보수비로 구성되며 할인율을 고려하여 다음 식(2)와 같이 계산했다.

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{(B - C)_i}{(1 + r)^i} \quad (2)$$

여기서, B는 편익, C는 비용, r은 할인율, i는 연도이다.

내 부수익률(Internal Rate of Return)은 식(3)과 같이 순현재가치를 0으로 만드는 할인율을 나타내며, 보통 평균 금리이상이면 경제성이 있다고 한다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{(B - C)_i}{(1 + r)^i} = 0 \quad (3)$$

여기서, B는 편익, C는 비용, r은 할인율, i는 연도이다.

비용대비이익(Benefit Cost Ratio)은 총 비용을 총 이익으로 나눈 값으로 1 이상이면 경제성이 있는 것으로 판단할 수 있으며, 식(4)와 같다

$$BCR = \frac{\sum B}{\sum C} \quad (4)$$

여기서, B는 편익, C는 비용이다.

회수 기간(Payback Period)은 총 투자비를 연간 에너지 절감 및 온실가스 감축에 따른 이익으로 나누어 산정했고, 식(5)와 같이 계산하였다.

$$PP = \frac{\sum B}{C_a} \quad (5)$$

여기서, B는 편익,  $C_a$ 는 연간 평균 이익이다.

에너지 가격은 전력의 경우 에너지경제연구원 통계 시스템을 참고하여 인증 기간의 평균 가격(77.66원/kWh)을 적용하였고, 열량의 경우 한국지역난방공사 고시 가격(업무용 108.41원/Mcal)을 참조 하여 적용하였다.

Table 4 Values of parameters employed in economic analysis

Price of government purchase	Approval period	Discount rate	O&M Cost
5,000 ₩/tCO <sub>2</sub>	10 years	3%	3% of capital cost

할인율은 에너지관리공단 에너지이용합리화자금 융자 대표이율인 3%, 운영기간은 KVER 사업 유효 가능기간인 10년, 연간 유지보수 비용은 총 투자비의 3%, 정부구매는 분석대상 기간(2006~2011)의 정부구매 기준가격인 톤당 5천 원을 적용했다. Table 4에 경제성 분석에 사용한 인자들의 값을 요약하였다.

2.5 엑서지 분석

고온 배출공기로부터 폐열을 회수하는 열교환기를 대상으로 엑서지 분석을 수행하므로, 화학반응이 없고 운동 및 위치 에너지가 무시할 정도로 작은 개방시스템의 경우로 가정한다. 엑서지는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\varphi = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \tag{6}$$

여기에서 h는 엔탈피[kJ/kg], s는 엔트로피[kJ/kg · K], T는 온도[K]이고 하첨자 o는 사장 상태(dead state)를 나타낸다.

엑서지 효율은 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_{II} = \frac{\sum \dot{m}_{wj}(\varphi_{wj,out} - \varphi_{wj,in})}{\sum \dot{m}_{ai}(\varphi_{ai,in} - \varphi_{ai,out})} \tag{7}$$

$\eta_{II}$ 는 엑서지 효율을 나타낸다.  $\dot{m}_{wj}$ 는 열회수측 유량,  $\dot{m}_{ai}$ 는 열원측 유량,  $\varphi_{wj,in}$ 는 열회수측 유입 엑서지,  $\varphi_{wj,out}$ 는 열회수측 유출 엑서지,  $\varphi_{ai,in}$ 는 열원측 유입 엑서지,  $\varphi_{ai,out}$ 은 열원측 유출 엑서지를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 감축량 및 경제성 분석 결과

본 사례 연구의 KVER 사업 모니터링 해당 기간 동안 온실가스 배출 감축량은 연평균 1,752톤, 배출감축 집약도는 9.7 kgCO<sub>2</sub>/ton\_ 제지생산량으로 감축설비 도입을 통해 1톤의 제지생산량당 9.7 kg의 온실가스 배출을 감축할 수 있었다.

Table 5 Economic evaluation results for GHG reduction utilizing waste heat recovery

NPV	BCR	IRR	PP
5,481.69	4.29	55.26%	1.62 year

연평균 열회수량은 37,422 GJ으로써 사업 후 추가 전력소모는 1,756 MWh였으며, 이를 바탕으로 경제성 분석을 실시한 결과는 Table 5와 같이 NPV는 5,478, BCR은 4.3, IRR은 60%, 회수기간은 1.6년으로 나타났다.

NPV는 0보다 크고, IRR은 3년 만기 평균 국고채금리인 2.87%보다 큰 것으로 나타나 매우 경제성이 양호한 것으로 나타났다.

각 모니터링 차수간의 차이를 분석하면, 열회수량이 증가함에 따라 온실가스 감축량이 증가하고 이에 따라 정부구매 및 에너지절감으로 인한 이익 증가로 경제적인 타당성이 커진다고 할 수 있다. 온실가스 배출 감축설비를 설치함으로써 감축효과와 함께 경제적인 타당성이 있는 결과를 보였다.

3.2 엑서지 분석 결과

열교환기를 이용한 폐열회수 과정을 엑서지 분석한 결과 각각 엑서지 효율은 배출공기 유로 각각에 대해 77.3%와 53.6%, 엑서지 손실량은 -35.7 kW와 -133.0 kW로 나타났다. 이는 활용되지 못하고 사장된 엑서지가 각각 22.7%와 46.4%인 것을 의미하며, 폐열회수 공정을 개선하여 엑서지 효율을 증대할 여지가 있음을 의미한다.

엑서지 효율을 증대하기 위한 운영 조건을 모색하기 위해 폐열공기 #1의 열교환기를 대상으로 폐열공기의 입구 온도를 변화시키며 엑서지 효율과 손실량을 계산하여 결과를 Table 6에 나타내었다. 이 때, 폐열공

Table 6 Exergy evaluation by waste heat air #1 inlet temperature

T <sub>ai, in</sub> (°C)	65.0	66.0	66.7	67.0	68.0
Second law efficiency(%)	78.1	77.6	77.3	77.2	76.8
exergy destruction(kW)	-31.56	-34.00	-35.72	-36.44	-36.77
water #1 mass flow rate(kg/s)	56.6	59.3	61.2	62.0	64.7
mass flow rate change(%)	-8.1	-3.1	-	+1.3	+5.7
NPV	5,576	5,518	5,482	5,467	5,416

기의 유량은 고정하였으며 다른 온도조건은 동일하다고 가정하였다.

다만, 에너지 균형을 만족하기 위해 열회수측인 회수온수 #1의 유량이 변화였다.

폐열공기의 입구 온도가 증가할수록 엑서지 효율은 낮아졌으며, 이에 따라 엑서지 손실량도 증가하였다. 폐열공기 입구 온도 조건에 따라 폐열공기 유량이 변하게 되고, 이에 대한 회수온수#1 펌프의 소요전력 증감을 반영하여 경제성 평가 분석을 수행하였다. 입구 온도가 증가하게 되면서 엑서지 효율이 감소하면서 반대로 유량 증가로 펌프 소요동력이 증가하면서 NPV 값은 감소하여 경제성이 낮아지는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

온실가스 감축설비 도입에 따른 경제성 및 엑서지 효율 분석을 국내 자발적 온실가스 배출 감축사업(KVER)의 특정한 사례에 적용하였다. 대표적인 에너지 다소비 업종인 제지목재업종의 열교환기를 통한 폐열회수사업의 온실가스 배출 감축량과 이에 따른 경제성 분석, 엑서지 분석을 하였다.

- (1) 온실가스 감축설비 도입으로 KVER 사업 인증기간 동안 총 1,752톤의 온실가스를 감축하였으며, 배출 감축집약도는 9.7 kgCO<sub>2</sub>/ton\_제지생산량으로 나타났다.
- (2) 온실가스 감축설비 도입의 경제성 분석 결과 NPV는 0보다 컸으며, IRR은 60%, 비용대비이익은 4.3, 회수기간은 1.6년으로써 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다.
- (3) 엑서지 분석 결과 엑서지 효율은 각각 77.3%와 53.6%, 엑서지 손실량은 -35.72 kW와 -133.20 kW로 나타났다. 엑서지 효율을 증대하기 위해서는 폐열공기의 입구 온도를 낮추어서 운영하는 것이 필요한 것으로 시뮬레이션 결과 나타났으며, 경제성을 높이기 위해서도 온도를 낮추는 것이 필요한 것으로 나타났다.

2015년 온실가스 배출권거래제 도입으로 인해 온실가스 감축설비 도입에 대한 효과에 대한 연구가 많이

필요한 상황이다. 감축설비 도입에 대한 정확한 경제성 분석과 감축효과에 대한 사례 연구가 더욱 필요할 것으로 보인다.

#### References

1. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, 2013, National greenhouse gas inventory report of Korea, Report 11-1480745-000003-10.
2. Leena, S. and Pekka, A., 2009, Energy efficiency improvement of dryer section heat recovery systems in paper machines-A case study, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 3663-3668.
3. Gabbrielli, R., Medeot, C., and Miconi, D., 2006, Energy saving in the tissue industry : technical and economic aspects of a case study, Journal of Cleaner Production, Vol. 14, pp. 185-193.
4. de Beer, J., Worrell, E. and Blok, K., 1998, Long-term energy-efficiency improvements in the paper and board industry, Energy, Vol. 23, No. 1, pp. 21-42.
5. Pulat, E., Etemoglu, A. B., and Can, M., 2009, Waste-heat recovery potential Turkish textile industry : Case study for city of Bursa, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 663-672.
6. Ministry Of Trade, Industry and Energy, 2011, Notification on Korea voluntary emission reduction registry and management provision, MOTIE Notification No. 2011-71.
7. London, J. B., Junfeng, L., Ward, W. A. and Wells, G. J., and Yande, D., Jingru, L., 1998, Options for reducing greenhouse gas emissions in the Chinese industrial sector, Energy Policy, Vol. 26, No. 6, pp. 477-485.
8. Korea Energy Management Corporation, 2012, Project design document and monitoring report guideline.
9. Ministry Of Trade, Industry and Energy, 2012, Notification on KVER government purchase and trading provision, MOTIE Notification No. 2012-153.