

# 우드칩 바이오매스를 이용한 열병합발전 운영 사례 분석

서길영\*, 김성현\*\*

## Case Study and Evaluation of Economic Feasibility of Combined Heat and Power System using Woodchip Biomass

Gill Young Suh\* and Sung Hyun Kim\*\*

### Abstract

The extensible supply of New & Renewable energy resources desperately needs to counter the high dependence on imported energy, recent high oil prices and the Climate Change Conference, and the government has operated the 'Renewable Portfolio Standard' (RPS) as one of the renewable energy policy from 2012. By analyzing the operation case of combined heat and power plant using the woodchip biomass, we drew the price of wood chip fuel, plant capacity factor, electricity selling price, heat selling price and LCOE value. After analyzing the economic feasibility of 3MWe combined heat and power plant based on the operating performance, the minimum of economic feasibility has appeared to be secured according to the internal rate of return (IRR) is 6.34% and the net present value (NPV) is 3.6 billion won as of 20 years life time after installation, and after analyzing the cases of the economic feasibility of the price of wood chip, plant capacity factor, electricity and heat selling price are changed, the economic feasibility is valuable when the price of wood chip is over 64,000 won/ton, NPV is minus, and the capacity factor is above 46.9%, the electricity selling price is 116 won/kWh and the heat selling price is above 75,600 won/Gcal. When going over the new installation hereafter, we need the detailed review of the woodchip storage and woodchip feeding system rather than the steam-turbine and boiler which have been inspected many times, the reason why is it's hard to secure the suitable quality (constant size) of woodchip by the lack of understanding about it as a fuel because of the domestic poor condition and the calorific value of woodchip is seriously volatile compared with other fuels.

### Key words

Woodchip Biomass, New & Renewable Energy(신·재생 에너지), CHP(열병합발전), RPS(신재생에너지 의무할당제), Economic Feasibility(경제성), LCOE(Levelized Cost of Energy)

(접수일 2012. 8. 31, 수정일 2012. 11. 22, 게재확정일 2012. 11. 22)

\* 고려대학교 그린스쿨대학원 (Korea University / Greenschool)

■ E-mail : goodever@naver.com ■ Tel : (010)8395-0806 ■ Fax : (031)701-5167

\*\* 고려대학교 화공생명공학과 (Korea University / Dept. of Chemical & Biological Engineering)

■ E-mail : kimsh@korea.ac.kr ■ Tel : (02)3290-3297 ■ Fax : (02)3290-3725

## 1. 서론

2010년 기준 우리나라의 에너지 수입의존도는 96.5%로 최근의 고유가로 인한 경제적 어려움과 에너지 안보 문제 그리고 전 세계적인 기후변화협약에 대응하기 위해서 신·재생 에너지의 확대 보급이 절실한 상황이나 국내에 공급된 1차 에너지 중 수력을 포함한 신재생에너지의 비율은 2.8%에 불과한 현실이다<sup>(1)</sup>. 정부는 2030년까지 신재생에너지 비율을 11%까지 확대할 계획이며, 2012년부터 신재생에너지 의무할당제도(RPS, Renewable Energy Portfolio Standard)를 통해 설비규모 500MW이상의 발전사업자 및 수자원공사, 지역난방공사에 대해 발전량의 일정부분을 의무적으로 신재생에너지 원으로 발전하도록 하였다<sup>(2)</sup>. 2012년도 의무비율은 2.0%이고 연차별로 점진적으로 증가하여 2022년에는 발전량의 10%를 신재생에너지원으로 충당하여야 한다. 그러나, 현실적으로 경제성 있는 신재생에너지원의 확보가 쉽지 않은 상황이며, RPS 의무이행을 위해 경제성을 등한시하고 설비투자를 할 수도 없는 상황이다. 이에 최근에 설치되어 운영중인 우드칩 바이오매스를 이용한 열병합발전소의 운영사례를 분석하여 우드칩 바이오매스 열병합발전의 현황 및 경제성에 대해서 살펴보고, 향후 운영과정에서 연료 조달가격, 발전이용률, 및 전기·열 판매단가가 변동될 경우 경제성에 미치는 영향에 대해서 고찰해 보고자 한다. 또한, 신규로 발전소를 설치할 때 고려해야 할 사항에 대해서도 살펴보고자 한다.

## 2. 우드칩 발전시설 구성

사례로 한 열병합발전소의 보일러 용량은 27톤/h, 전기출력 3MW이며, 전기생산 후 발생하는 잉여증기는 증기터빈에서 추가하여 열생산(14.5Gcal/h)하도록 구성하였다(Table 1). 폐목재의 습윤고위발열량은 2,800~6,300kcal/kg, 습윤저위발열량은 2,200~5,600kcal/kg로 폐목재의 발생원에 따라 큰 차이를 보이고 있으나<sup>(3)</sup>, 본 사례의 우드칩 열병합발전소는 소나무 재선충 피해목을 활용하기 위해 계획되어 고위발열량 3,200kcal/kg(저위발열량 2,800kcal/kg)를 기준으로 하였으며, 보일러의 기동연료는 천연가스(LNG)를 사용하고, 향후 우드칩 공급불가시 사용연료를 가스(LNG 또는 LFG,

Landfill Gas)로 전환할 수 있도록 관련 설비의 설치위치만을 반영하였다<sup>(4)</sup>. 환경오염 방지설비로는 탈질, 싸이클론 집진 및 전기집진설비를 갖추었다. 또한, 증기터빈 이상시 바이패스 계통을 통해 응축 열교환기에서 열을 회수할 수 있도록 Dumping 시스템을 고려하였으며, 발생하는 모든 열은 지역 난방열로 활용 가능함에 따라 잉여열을 대기중으로 방출할 수 있는 냉각탑은 배제하였다. 우드칩 보일러는 고체연료에서 많은 사용실적이 있고 투자비가 상대적으로 저렴하며 유지보수가 용이한 Stoker 형식(Traveling Grate Type)을 채택하였다. 연소후 발생하는 Ash는 Fly Ash와 Bottom Ash로 구분하여 벨트컨베이어를 통해 이송하고 Ash Bag에 담아 외부 위탁처리하는 것으로 구성하였다(Fig. 1).

우드칩 발전소 건설비는 202억원, 추가로 설치한 우드칩 선별 및 저장시설 투자비는 51억원으로 총 253억원이 투자되었다.

### 2.1 우드칩 선별 및 저장시설

보일러에 인접하여 피트병커 형식의 저장조(7일분)를 마련하여 우천시 및 연휴기간동안 우드칩이 반입되지 않아도 설비가 연속가동될 수 있도록 하였으나, 당초 예상과 달리 재선충 피해목의 반입이 감소하고 택지개발 및 도로건설 현장에서 발생하는 임목폐기물을 주로 사용하게 되어 우드칩에 자갈, 돌, 철사 및 규정크기 이상의 나뭇가지 등 이물질이 포함되어 반입됨에 따라 이물질 선별시설이 요구되었다. 이에 우드칩발전소 준공이후 이물질 선별장치(전처리설비)를 추가로

Table 1. 시설 개요

구분	단위	사양
보일러 용량	톤/h	27.6
전기/열 용량	MW,Gcal/h	3.0/14.5
전기/열 효율(LHV)	%	13.2/74.2
우드칩 소비량	kg/h	6,978
가동률(6~9월 제외)	%	90
소내소비율(전기/열)	%	20.0/4.0
증기조건(압력/온도)	kg/cm <sup>2</sup> , °C	36.0/388
우드칩 저장시설면적	m <sup>2</sup>	15,000
발전소 투자비	백만원	20,189
저장시설 투자비	백만원	5,082
투자비 합계	백만원	25,271

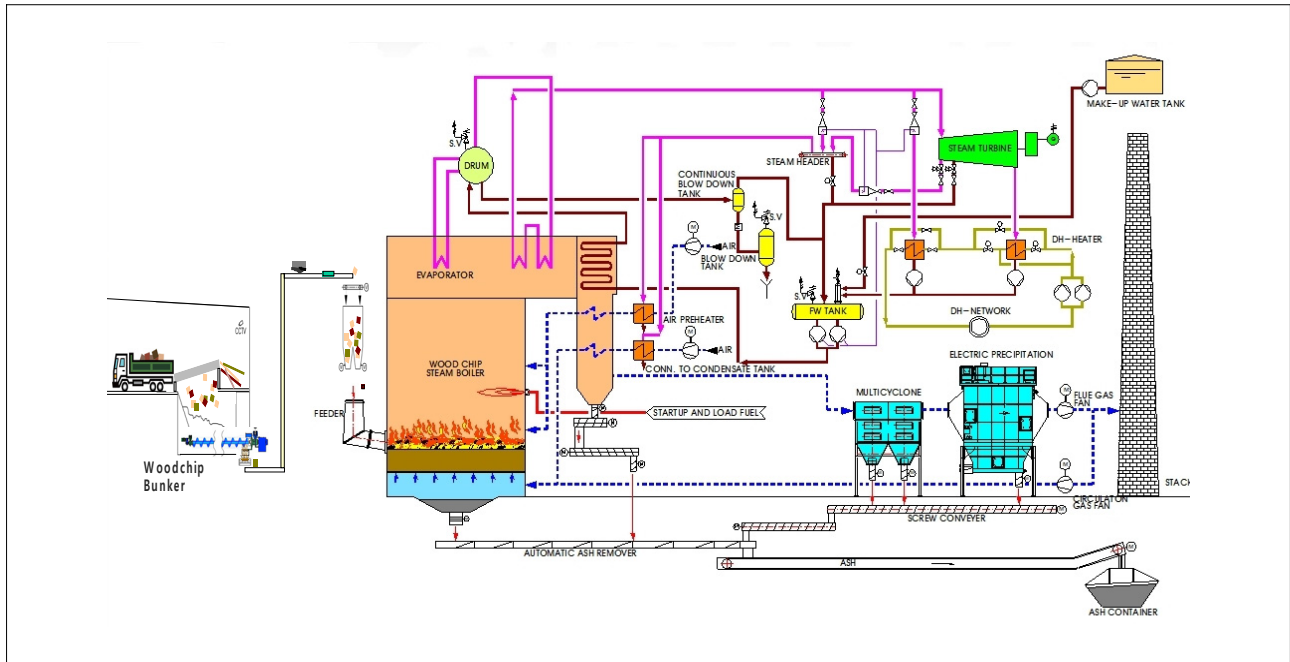


Fig. 1 우드칩 열병합발전소 계통도

Table 2. 우드칩 성분 및 발열량 [wet%, kcal/kg]

구분	C	H	N	S	O	수분	HHV	LHV
설계	47,6	6,3	0,06	0,04	45,4	28,0	3,200	2,800
2011,2	-	-	-	-	-	-	3,079	2,682
2011,6	-	-	-	-	-	35,2	3,745	3,127
2011,7	-	-	-	-	-	16,4	4,641	4,173
2011,8	-	-	-	-	-	50,4	4,185	3,557
2012,2	48,7	6,0	0,7	0,0	38,1	3,1	4,171	2,327
2012,4	49,3	6,2	0,54	0,02	34,4	5,0	4,405	2,554
2012,5	-	-	-	-	-	-	2,847	2,377

우드칩 저장시설(최대저장량 11,000톤)을 설치하였다<sup>5)</sup>. 임목폐기물은 수집 및 파쇄후 반입시 수분함량이 최대 50%로써 반입 즉시 연소하면 보일러 효율저하 및 Ash 발생을 증가시키는 원인이 되므로 저장시설은 안정적인 연료 확보 외에 저장하는 동안 자연건조되는 효과도 기대된다.

## 2.2 우드칩 연료

우드칩 연료는 연간 45천톤 사용하는 것으로 계획하였으며, 우드칩은 무상으로 확보하지만, 확보된 우드칩을 수집하여 보일러에서 연소할 수 있도록 Fig. 2와 같이 파쇄한 후 열원까지 운송하는 비용은 별도로 발생하며, 수집, 파쇄, 선별 및 운송을 외부 용역업체와 위탁계약을 체결하였다. 연료의 성분분석은 발전소 운영중 주기적으로 실시하고 있으며, 성분 및 발열량은 Table 2와 같다.



Fig. 2 우드칩 연료

갖추었으며, 임목폐기물의 발생시기(봄부터 가을)와 연료 사용시기(겨울)간의 차이로 인해 우드칩을 장기간 저장할 필요성이 대두되어 별도의 부지를 확보하여 텐트하우스 형식으로

## 3. 운영실적 분석

우드칩보일러는 10월부터 익년도 5월까지 열소요처가 확보된 기간에 우선 가동하고 있으며, 하절기에는 인근의 매립

지에서 발생하는 매립가스(LFG, Landfill Gas)를 이용한 별도의 전용보일러를 가동하여 열수요가 충족됨에 따라 우드칩 보일러는 가동하지 않고 있다. 이는 전기생산후 냉각탑을 통해 대기중으로 열을 방출할 경우 수익성이 확보되지 않으며, 하절기 잦은 강우로 인해 연료의 수분량 증가로 인한 효율 저하를 피하고 정지기간을 우드칩보일러 유지보수 시기로 활용하는 등 장점이 더 많기 때문이다.

우드칩보일러 가동 초기에는 우드칩 연료내 흙, 돌, 철사 등 많은 이물질이 함유되어 반입됨에 따라 연료의 이송장치 및 보일러 본체에 잦은 Trouble이 발생하였으며, 이를 해결하기 위해 연료 저장조(지하 피트병커)에서 연료를 송출하는 설비의 교체(Hydraulic Pusher Type→Reclaimer Screw Type), 이송설비의 개선(경사 벨트컨베이어→수직 버킷엘리베이터 컨베이어), 이물질 선별장치 개선(다공판 진동 선별기

→디스크스크린 선별기), 풍력선별기 추가 설치 등 많은 설비 개선이 있었으며, 확보된 우드칩의 저장을 위해 별도의 부지를 마련하여 저장시설을 갖추었다. 또한, 보일러 내부의 Grate 재질도 내열성이 확보된 재질로 변경(주철→내열주강)하여 내구성을 향상시켰으며, 그 외 설비의 가동상황을 중앙 제어실에서 감시할 수 있도록 여러 곳에 CCTV를 추가로 설치하였다.

2010년 우드칩발전소를 준공하고 가동 초기 잦은 기동정지로 인해 기동연료(LNG)의 사용량 증가, 발전량 부족 및 전기소내소비율 상승 등 문제점이 있었으나, 2011년 말 이물질 선별 및 우드칩 저장시설을 별도로 설치함에 따라 2012년부터는 보다 안정적으로 설비를 운영하고 있다. 연간 발전량은 2011년 11,274MWh에서 2012년 12,979MWh로 15% 증가하였고 이를 통해 매년 20,855톤의 CO<sub>2</sub> 저감이 예상된다. 발전

Table 3. 발전소 운영실적<sup>6)</sup>

[단위:백만원,%]

구 분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	계	
2011	열생산량(Gcal)	5,401	4,043	6,686	1,073	8,743	8,709	5,589	2,136	6,579	7,187	2,843	7,263	66,252
	전기생산량(MWh)	57.7	364.4	1,201.8	187.7	1,713.7	1,724.6	1,059.9	440.1	1,260.6	1,410.4	480.3	1,373.2	11,274.5
	열판매량(Gcal)	5,379	4,029	6,675	1,014	8,303	8,833	4,133	1,558	5,082	6,600	2,737	7,224	59,567
	전기판매량(MWh)	18.3	258.0	908.0	143.4	1,361.7	1,393.7	830.9	351.3	965.4	1,075.9	335.3	1,085.9	8,727.8
	우드칩사용량(톤)	2,802	2,542	5,143	815	6,594	5,627	3,775	1,441	3,975	5,872	2,667	4,971	46,224
	재료비	180	158	269	31	358	319	245	73	238	353	198	339	2,762
	Ash처리비용	41	33	51	7	51	44	35	18	52	46	27	36	443
	매출액	376	317	578	91	817	772	489	190	622	663	258	706	5,877
	전기소내소비율	68.3	29.2	24.4	23.6	20.5	19.2	21.6	20.2	23.4	23.7	30.2	20.9	22.6
	가동률	10.9	35.0	84.4	12.5	95.2	86.5	61.8	23.5	86.7	95.2	43.5	79.6	60.0
이용률	2.6	18.1	53.8	8.7	76.8	79.8	47.5	19.7	58.4	63.2	22.2	61.5	42.9	
2012	열생산량(Gcal)	8,231	8,477	8,156	7,834	7,776	1,221	-	-	-	6,739	7,776	8,035	64,245
	전기생산량(MWh)	1,540.4	1,567.0	1,603.4	1,790.1	1,560.6	220.0	-	-	-	1,404.0	1,620.0	1,674.0	12,979.4
	열판매량(Gcal)	8,182	8,486	8,070	7,524	6,803	1,172	-	-	-	6,469	7,465	7,714	61,886
	전기판매량(MWh)	1,222.0	1,269.6	1,282.9	1,475.2	1,257.9	175.9	-	-	-	1,123.2	1,296.0	1,339.2	10,441.8
	우드칩사용량(톤)	4,993	4,692	5,179	5,457	4,612	1,422	-	-	-	4,591	5,298	5,474	41,719
	재료비	302	306	309	326	268	83	-	-	-	274	316	326	2,511
	Ash처리비용	42	36	47	52	53	13	-	-	-	44	50	52	389
	판매비	812	858	855	847	830	119	-	-	-	678	783	809	6,590
	REC	73	76	77	89	75	11	-	-	-	67	78	80	627
	전기소내소비율	20.7	19.0	20.0	17.6	19.4	20.0	-	-	-	20.0	20.0	20.0	19.6
가동률	89.1	89.9	94.4	94.9	90.2	12.8	-	-	-	75.5	90.0	90.0	62.4	
이용률	69.0	75.0	71.8	82.9	69.9	10.2	-	-	-	62.9	75.0	75.0	49.3	

1) 2012년도 7~9월은 하절기 정지기간이며 10~12월은 전량치임.  
 2) 가동률 : 연간 8,760시간중 설비가 가동되는 시간의 비율  
 3) 이용률 : 연간 8,760시간동안 생산가능량 대비 실제 전기생산량의 비율

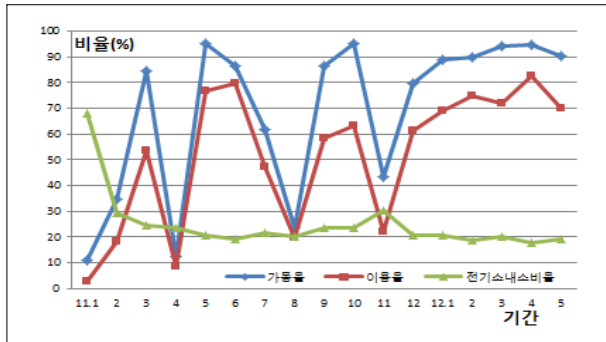


Fig. 3 가동률, 이용률 및 전기 소내소비율

소의 연간 가동률은 67%(하절기 제외시 90%)로 예상하였으나, 2011년은 60%였으며 2012년은 62%로 전년 대비 소폭 상승하였다. 연간 이용률은 2011년 43%에서 2012년 49%로 높아졌으며, 향후에도 50% 정도로 운영이 가능할 것으로 예상된다. 가동률 상승폭보다 이용률 상승폭에 큰 이유는 발전소가 가동은 되지만 100% 부하로 운전되지 않는 경우가 있기 때문이다(Table 3).

전기 소내소비율은 당초 20%로 예상하였으나, 발전소 가동 초기 적은 발전량 대비 보조기기의 전력사용량은 일정하여 2011년에는 22.6%였으며, 2012년 상반기에는 19.3%(2012년 누적치 19.6% 예상)로 약 3% Point 감소하였다(Fig. 3).

우드칩 연료가격은 2011년 53,416원/톤에서 2012년 상반기에 58,374원/톤으로 약 9.3% 상승하였으며, 전기 판매단가는 123원/kWh에서 159원/kWh로 약 30% 상승하였으나, 열판매단가는 유사하였다. 또한, 2012년부터 RPS제도가 시행됨에 따라 REC(renewable energy certificate) 수익이 추가로 발생하였다(Table 4, Fig. 4).

2011년부터 12년 5월까지 우드칩연료의 평균 발열량은 당초 계획 발열량(2,800kcal/kg, LHV) 대비 저하된 2,065kcal/kg로 추정되며, 최대 3,327kcal/kg, 최저 1,205kcal/kg로 산정되었다(Table 5). 이는 우드칩 연료가 당초 예상했던 재선충 피해목을 파쇄한 일정한 크기의 양호한 형태의 연료가 아니고 택지개발지구 및 도로개설시 발생한 임목폐기물이 반입됨에 따라 연료의 수분이 증가하여 발열량이 감소된 것으로 사료된다.

반면에 동 기간 동안 총 11회에 걸쳐 우드칩연료를 샘플링하여 외부기관에 의뢰하여 분석한 저위발열량은 평균 3,089 kcal/kg(최대 4,173~최소 2,327kcal/kg)로써 실적에 근거

Table 4. 운영 실적

구분	단위	2011	2012,1~5	2012(예상)
우드칩 가격	원/톤	53,416	58,374	57,078
전기판매단가	원/kWh	122.5	159.4	151.4
열판매단가	원/Gcal (원/kWh)	80,719 (69.4)	81,000 (69.7)	80,937 (69.6)
Ash 처리비용	원/톤	9,592	9,239	9,331
REC	원/REC	-	40	40

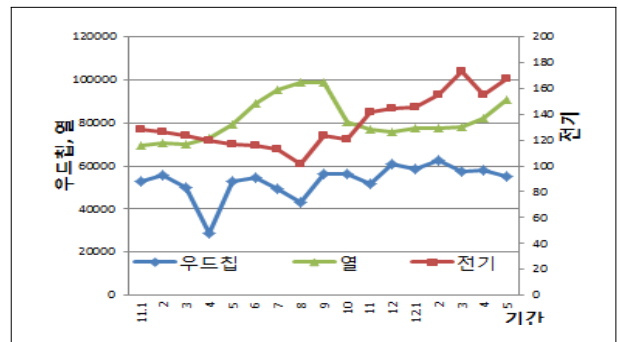


Fig. 4 우드칩 가격, 전기 및 열 판매단가

Table 5. 우드칩 저위발열량

[단위:kcal/kg]

구분	발열량 추정값			외부기관 분석값
	2011	2012,1~5	누계	
평균	1,914	2,307	2,065	3,089
최대	2,774	3,327	3,327	4,173
최소	1,205	1,366	1,205	2,327

\* 발열량 추정식 = (열 + 전기 생산량) ÷ (우드칩 사용량 × 이론중합효율 87.4%)

하여 계산한 발열량과는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 우드칩 연료의 발열량 측정을 위한 샘플링 과정에서 흙, 모래 등의 이물질과 톱밥 등의 Particle이 원천적으로 배제된 상태로 채취되고, 샘플링에서부터 성분분석까지 기간 동안 포장지 내에서 수분이 증발하여 비닐포장지 내부에 수분이 맺혀지지만 성분분석 과정에서는 이러한 수분이 배제된 상태로 성분분석이 이루어져 나타난 결과로 추정된다.

#### 4. 경제성 분석

경제성을 평가하는 방법은 내부수익률법(IRR, Internal Rate of Return), 순현재가치법(NPV, Net Present Value), 자본

회수기간법(PB, Payback period), B/C 분석(Benefit/cost analysis) 등 여러 가지가 있으나<sup>(7)</sup>, 여기서는 신재생 에너지 설비에서 생산된 에너지의 생산원가를 산정하고 순현재가치와 내부수익률을 비교하여 그 경제성을 평가하고자 한다. 에너지 생산원가를 산정시 설비의 운전기간중 발생하는 총 비용을 현가화하여 동 기간중 생산된 생산량으로 나누어 산정하였으며, 전기와 열을 동시에 생산하는 LCOEt와 전기만 생산할 경우인 LCOEe로 구분하여 산정하였다\*. 생산원가는 초기 투자비용, 우드칩 조달가격에 따라 변동되며, 내부수익률과 순현재가치는 상기 조건 외에 발전소 이용률, 전기 및 열판매단가 등에 따라서 차이가 난다.

#### 4.1 전제 조건

발전설비용량은 3MW급으로 소내소비 전력을 제외하고 전량 기존 전력망과의 연계하는 계통연계형이며, 초기 투자비는 25,271백만원(부지비 제외)으로 2007년부터 2010년까지 단계적으로 투자되었으며, 설비의 수명기간은 2010년에 준공한 후 2011년부터 20년과 30년 두 가지 경우로 구분하여 분석하였고 감가상각 기간은 20년으로 하고 잔존가치는 없는 것으로 적용하였다. 설비운영 유지보수비는 발전설비와 부속 설비로 구분하여 가동년수가 늘어날수록 유지보수비가 더 소요되는 현실을 반영하여 연도별로 차등 적용하였다.

초기 투자비의 99% 이상을 회사채를 발행하여 조달함에 따라 차입자금의 이자율과 할인율은 동일하게 5.25%를 적용하였으며, 법인세는 22%가 있는 경우로 분석하였다(Table 6). 물가상승은 감안하지 않았으며, 부지비용은 산입하지 않았으나 저장시설의 임대비는 반영하였다. 운영을 위한 인력은 총 6명이 소요되는 것으로 산정하였다. 전기 및 열생산량으로 2011~2012년에는 Table 3의 실적값을 사용하였으며, 2013년 이후는 경과년수가 지남에 따라 2012년 실적값대비 매년 0.1%씩 감소하는 것으로 가정하였다. 탄소배출권 가격은 2008년 8월 톤당 20유로를 넘긴 적도 있으나 유럽의 탄소

\* LCOEt : levelized cost of energy(total), 총 비용을 전기와 열 생산량을 합한 값으로 나눈 것으로서 열병합발전을 통해 전기와 열을 모두 활용할 경우임(1kWh = 860kcal)  
LCOEe : levelized cost of energy(electricity), 총 비용을 전기생산량으로 나눈 값으로 열을 냉각탑을 이용하여 대기중으로 방출할 경우에 해당함.

Table 6. 경제성분석 기준

구분	단위	적용
운전기간	년	20/30
초기 투자비	백만원	25,271
자체자금/차입자금	%	0.6/99.4
차입자금 상환기간	일시상환	5년
이자율(자체/차입)	%	4.96/5.25
할인율	%	5.25
1인당 경상인건비	백만원/년	65
REC(1.5 적용)	원/kW	60
연간 유지보수비	투자비 %	0.3~2.4
보험료,제세	투자비 %	0.23
법인세	%	22

배출권 거래소인 블루넥스트(BlueNext)에서 2012년 6월 평균 4.02유로/톤 거래되는 등 가격이 급락하여 금번 사례분석에서는 탄소배출권 거래로 인한 수익은 반영하지 않았다<sup>(8)</sup>. 그러나 향후 배출권 거래시 CO<sub>2</sub> 저감을 통해 추가적인 수입(122백만원/년)이 예상되며, 이는 경제성에 긍정적 요인으로 작용할 것이다.

운영사례는 기존의 지역난방 공급지역에 우드칩발전소만을 추가로 설치한 경우로써 열원에 대한 투자비 외에 열공급을 위한 열배관은 기존의 배관망을 활용함에 따라 열배관 투자비가 없는 조건이며 투자비 변동없이 아래의 각각의 경우로 구분하여 경제성을 분석하였다.

1. 우드칩 가격 : 50,000, 60,000, 70,000원/톤
2. 발전소 이용률 : 45%, 50%, 55%
3. 전기판매단가 : 120, 140, 160, 180원/kWh
4. 열판매단가 : 75,000, 80,000, 85,000, 90,000원/Gcal

#### 4.2 경제성 분석

운영실적 기준으로 경제성을 분석한 결과 수명기간 20년일 경우 내부수익률은 6.34%, 순현재가는 36억원, 투자회수기간은 15.0년, LCOEt는 89원/kWh로 나타났다. 수명기간이 30년일 경우에는 내부수익률은 7.48%, 순현재가는 95억원으로 증가하고 LCOEt는 49.2원/kWh로 감소하였다(Table 7). 우드칩 바이오매스를 활용하여 열병합발전으로 운영함에 따라 냉각탑으로의 손실이 없이 전기와 열을 모두 판매하여 매

출이 발생함에 따라 경제성을 확보된 것으로 사료된다. 이는 달리 보면, 열수요처가 확보되지 않은 상태에서 전기 판매만으로는 수익성을 확보할 수 없음을 보여준다.

우드칩가격, 이용률 및 전기·열 판매단가가 변경될 경우의 경제성 분석 결과는 Table 8과 같이 나타났다. 다른 모든 조건이 동일한 상태에서 우드칩가격만을 변경하여 분석한 경제성은 수명기간 20년, 우드칩가격이 50,000원/톤일 경우, 내부수익률은 7.25%, 순현가는 68억원, LCOEt는 85.8원/kWh, 투자회수기간은 13.7년이였다. 우드칩가격이 60,000원/톤으로 상승하면 내부수익률은 5.83%, 순현가는 19억원, LCOEt는 90.6원/kWh, 투자회수기간은 15.7년이 된다. 만약 우드칩가격이 70,000원/톤으로 상승하면 내부수익률은 4.34%, 순현가는 -29억원으로 감소하며, LCOEt는 95.4원/kWh, 투자회수기간은 18.4년으로 증가한다. 우드칩가격이 10,000원 상승할 때마다 내부수익률은 약 1.5%, 순현가는 48억원이 감소하였고 LCOEt는 4.8원/kWh이 증가하였다. 우드칩 가격이 64,000원/톤을 넘을 경우 순현가가 마이너스가 되어 경제성이 없는 것으로 나타났다(Fig. 5).

이용률이 45%, 50% 및 55%일 경우 경제성에 미치는 영향을 분석한 결과, 수명기간 20년, 가동률이 45%일 경우 내부수익률은 4.24%, 순현가는 -31억원, 투자회수기간은 19년으

Table 7. 운영사례 경제성 분석

구 분	20년	30년
내부수익률(IRR,%)	6.34	7.48
순현가(NPV, 백만원)	3,590	9,469
LCOEt(원/kWh)	88.96	49.18
LCOEe(원/kWh)	628.44	332.25
투자회수기간	15.0	←

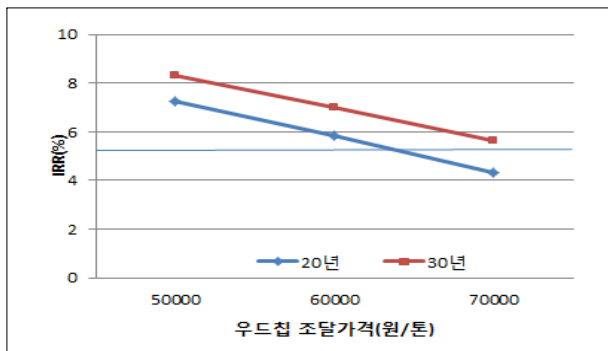


Fig. 5 우드칩 가격과 내부수익률

Table 8. 각 안별 경제성

구 분		경제성분석			
		20년	30년		
우드칩 가격 (원/톤)	50,000	IRR(%)	7.25	8.32	
		NPV(백만원)	6,755	13,334	
		LCOEt(원/kWh)	85.76	45.81	
		LCOEe(원/kWh)	605.82	309.50	
		투자회수기간	13.7	←	
	60,000	IRR(%)	5.83	7.02	
		NPV(백만원)	1,921	7,511	
		LCOEt(원/kWh)	90.6	50.57	
		LCOEe(원/kWh)	640.01	341.65	
	70,000	IRR(%)	4.34	5.65	
		NPV(백만원)	-2,933	1,669	
		LCOEt(원/kWh)	95.44	55.33	
이용률	45%	IRR(%)	4.24	5.53	
		NPV(백만원)	-3,064	1,103	
		투자회수기간	19.0	←	
	50%	IRR(%)	6.81	7.88	
		NPV(백만원)	4,976	10,787	
		투자회수기간	14.5	←	
	55%	IRR(%)	9.13	10.02	
		NPV(백만원)	12,933	20,387	
		투자회수기간	11.7	←	
	전기 판매 단가 (원/kWh)	120	IRR(%)	5.39	6.60
			NPV(백만원)	442	5,568
			투자회수기간	16.6	←
140		IRR(%)	6.06	7.22	
		NPV(백만원)	2,659	8,262	
		투자회수기간	15.5	←	
160		IRR(%)	6.72	7.82	
		NPV(백만원)	4,875	10,956	
		투자회수기간	14.5	←	
180		IRR(%)	7.36	8.41	
		NPV(백만원)	7,091	13,651	
		투자회수기간	13.6	←	
열판매 단가 (원/Gcal)	75,000	IRR(%)	5.10	6.35	
		NPV(백만원)	-466	4,573	
		투자회수기간	17.0	←	
	80,000	IRR(%)	6.15	7.31	
		NPV(백만원)	2,980	8,726	
		투자회수기간	15.3	←	
	85,000	IRR(%)	7.17	8.23	
		NPV(백만원)	6,426	12,879	
		투자회수기간	13.9	←	
	90,000	IRR(%)	8.14	9.13	
		NPV(백만원)	9,872	17,032	
		투자회수기간	12.7	←	

1) 이용률, 전기 및 열판매단가 변동시 LOCE는 Table 7의 운영사례 경제성 분석 결과와 동일함

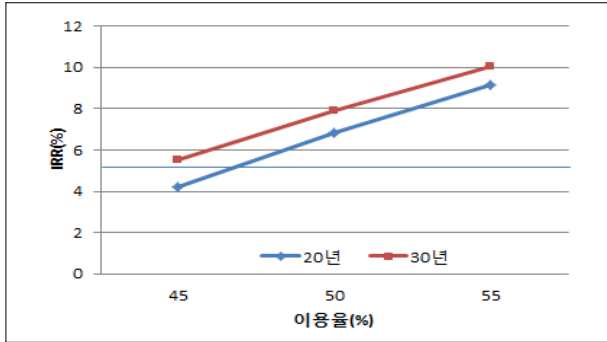


Fig. 6 이용률과 내부수익률

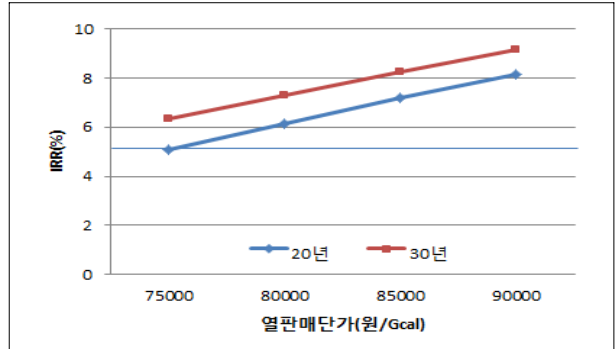


Fig. 8 열 판매단가와 내부수익률

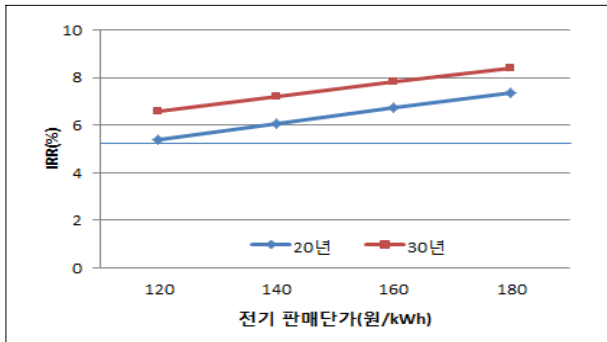


Fig. 7 전기 판매단가와 내부수익률

로 손실이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이용률 50%일 경우 내부수익률은 6.81%, 순현재가치는 50억원, 투자회수기간은 14.5년이며, 이용률이 55%일 경우에는 내부수익률은 9.13%, 순현재가치는 129억원, 투자회수기간은 11.7년으로 경제성이 양호한 것으로 나타났다. 이용률이 1% 상승하면 내부수익률은 0.49%, 순현재가치는 16억원이 증가하며, 투자회수기간은 0.7년씩 감소하였다. 이용률이 최소 46.9% 이상이어야만 순현재가치의 값으로써 경제성을 확보할 수 있는 것으로 산정되었다.

전기 판매단가가 kWh당 120원, 140원, 160원 및 180원일 경우로 가정하여 경제성을 분석한 결과 전기 판매단가가 120원/kWh일 경우에도 최소한의 경제성은 확보할 수 있으며, 전기판매단가가 20원씩 상승할 때마다 내부수익률(IRR)은 약 0.6%, 순현재가치(NPV)는 22억원씩 증가하였고 투자회수기간은 약 1년씩 감소하는 것으로 나타났다. 전기판매단가가 최소 116원/kWh 이상이면 경제성이 있는 것으로 산정되었다(Fig. 7).

열판매단가가 75,000원/Gcal에서부터 90,000원/Gcal까지 5,000원 단위로 변동되었을 경우 경제성을 분석한 결과,

열판매단가가 5,000원 상승할 때마다 내부수익률(IRR)은 1%, 순현재가치(NPV)는 34억원이 상승하였으며, 투자회수기간은 1.2~1.7년 감소하는 것으로 나타났으며, 열판매단가가 최소 75,700원/Gcal 이상이면 경제성을 확보할 수 있는 것으로 산정되었다(Fig. 8).

## 5. 결론

본 분석에서는 신재생에너지 원중 우드칩 바이오매스를 이용한 열병합발전의 운영실적을 분석해 보았으며, 우드칩가격, 설비비용, 전기 및 열 판매단가에 따른 내부수익률, 순현재가치 및 에너지생산단가와 투자회수기간을 산정하여 경제성을 고찰하였다.

운영실적 분석결과 연간 가동률은 62%, 이용률은 49%로 나타났으며, 우드칩가격은 평균 55,153원/톤, 전기 및 열 판매단가는 각각 138.2원/kWh, 80,830원/Gcal로 산정되었다. 동일한 조건으로 20년 운영할 경우 경제성을 분석한 결과 내부수익률은 6.34%, 순현재가치는 36억원, 투자회수기간 약 15년이며, 전기와 열을 생산하는 열병합일 경우인 LCOEt는 89.0원/kWh, 전기만 생산하는 LCOEe는 628.4원/kWh로써 열병합발전의 장점을 활용하여 전기판매 뿐만 아니라 열판매 수익도 발생할 경우 최소한의 경제성이 있으나, 만약 열수요처를 확보하지 않을 경우에는 경제성을 확보하기 어려운 것으로 나타났다.

현 실적치 기준으로 다른 조건이 일정하다는 조건하에 우드칩가격, 이용률 및 전기, 열 판매단가가 각각 변동될 경우 경제성을 분석한 결과는 다음과 같다.



- 우드칩가격이 64,000원/톤 이하일 경우 경제성을 확보할 수 있으며, 이 때 LCOEt는 92.5원/kWh, LCOEe는 653.7원/kWh이다.
- 발전량 기준으로 연간 이용률은 최소 46.9% 이상이어야 한다.
- 전기판매단가는 최소 116원/kWh, 열판매단가는 75,700원/Gcal 이상이면 경제성이 있다.

국내 여건상 양질의 우드칩 확보가 어려운 상황이므로 당초 예상과 다른 형태의 우드칩이 반입될 경우를 고려하여 우드칩 저장 및 이송설비를 구성하거나, 사전에 반입되는 우드칩 종류를 확정하여 품질기준을 정립한다면 시행착오로 인한 비용을 절감할 수 있으며 설비를 보다 안정적으로 운영할 수 있을 것이다.

우드칩의 발열량은 다른 고체연료나 액체연료와 달리 발열량의 변동이 심한 편이며, 발열량 감소시 연료사용량을 증가해야 출력을 일정하게 유지할 수 있으므로 이송설비 및 보일러에 충분한 여유율을 반드시 감안하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 우드칩 연료의 정확한 성분분석 및 발열량 측정을 위해 샘플링 채취방법 및 측정 방법의 개선이 필요한 것으로 사료된다.

당초 계획시는 발전소의 가동률을 기준으로 타당성을 검토하였으나, 운영결과 발전소를 최대출력으로 연속가능하는 것보다 여건에 맞게 부하를 조정하여 운영하는 경우가 더 많으므로 우드칩발전소의 경제성을 산정하는 기준으로 가동률을 사용하는 것은 부정확한 것으로 판단되며, 대신 연간 이용률을 사용하여 경제성을 검토하는 것이 더 적절한 것으로 사료된다.

발전효율 27%와 우드칩 사용량 6,978kg/h를 기준으로 발전량을 산정해 보면 5MW이상의 발전출력도 가능하나, 송전량 3MW이상을 전력계통에 역송하기 위해서는 전용선로를 설치하여야 하고 이로 인한 송전선로 투자비 증가가 커 전기출력을 3MW이하로 선정하였다. 만약 전력계통 연계가 가능한 변전소가 인근에 있을 경우 발전출력을 최대로 하고 열출력을 감소시킬 수 있다면 경제성에는 긍정적으로 작용할 것이다.

이와 관련하여 사례와 동일한 양의 우드칩을 사용하고 5MW급으로 발전출력을 증가시켰을 경우 투자비 증가, 전기 및 열생산량 변동 등을 반영하여 경제성을 분석해 보는 것도 의미있는 일이 될 것으로 사료된다.

## References

- [1] 지식경제부, 2011, 에너지통계연보.
- [2] 지경부 고시 제2012-134호, 2012. 6, 「신·재생에너지 공급 의무화제도 관리 및 운영지침」.
- [3] 국립환경과학원, 2007, 폐목재 관리체계 개선 및 재활용 활성화방안 연구.
- [4] KDHC, 2006, 신재생 바이오에너지시설 타당성 검토 보고서.
- [5] KDHC, 2011, 우드칩 조달방법, 체계 및 품질규격 최적화 개선 연구 최종보고서.
- [6] KDHC, 2012, 운영실적 자료(2010. 1~2012. 5).
- [7] Thumann, Albert, Woodroof, Eric A, 2005, Handbook of Financing Energy Projects.
- [8] BlueNext, June 2012, Report and Statistics "BlueNext Spot CER since 12/08/2008".

## 서길영



1993년 전북대학교 기계공학과 학사  
1996~현재 한국지역난방공사(Korea District Heating Corp.) 차장

현재 고려대학교 그린스쿨대학원 석사과정  
(E-mail : goodever@naver.com)

## 김성현



1978년 고려대학교 화학공학과 학사  
1981년 University of Southern California 석사  
1986년 University of Southern California 박사  
1978~1981년 KIST, 연구원  
1981~1986년 University of Southern California, Research Assistant  
1987~1987년 University of Southern California, Post Doctor  
1981~1986년 한국에너지기술연구소, 책임연구원  
1994년~현재 고려대학교 화공생명공학과 교수

현재 고려대학교 화공생명공학과 교수  
(E-mail : kimsh@korea.ac.kr)