

목질계 폐기물의 에너지 자원화 기술 개발

유 경선¹⁾, 구 재회²⁾, 선 도원³⁾, 최 연석⁴⁾

Development of Energy Recycling Technology Using Woody Waste

Kyunseun Yoo¹⁾, JaeHoi Gu²⁾, Dowon Shun³⁾, Yeonseok Choi⁴⁾

Key words : Woody Waste(목질계 폐기물), Biomass(바이오매스), Pyrolysis(열분해), Gasification(가스화), Fluidization(유동화)

Abstract : Interests have been focused to the renewable energy because energy cost of fossil fuel increased and global climate change caused by CO₂ evolution became severe. To overcome these problems, it is essential to develop the energy conversion technologies of renewable resources. Therefore, production and utilization state of wood and woody waste was firstly investigated and then various technologies (pyrolysis, gasification, and combustion) converting the wood and woody waste to energy were summarized. Some case studies of woody waste utilization in europe was introduced with the policy of EU countries. Economical aspect of woody waste was compared with the current fossil fuels and the energy policy of wood and woody waste was suggested.

1. 서론

최근 온실가스 배출에 의한 지구온난화 문제로 전 세계적인 협력과 기술개발에 많은 관심이 기울여지고 있다. 온실가스 배출을 효과적으로 제어할 수 있는 방법의 하나로 많은 국가에서 신재생에너지 사용을 확대하려 하고 있으며 국내에서도 신재생에너지의 보급과 확대에 많은 노력을 경주하고 있는 실정이다. 산업자원부에서는 1차 에너지를 기준한 신재생에너지 공급율을 2006년 2.3%에서 2011년 5%까지 끌어올리려는 국가에너지 기본계획을 수립하였다. 국내의 신재생에너지 공급을 영역별로 구분하면 폐기물 분야가 76%를 차지하고 있으며 수력, 바이오, 풍력, 태양열/태양광 분야가 각각 17.8, 4.2, 1.2, 0.7%를 차지하고 있다. 현재까지 폐기물 에너지 비중이 절대적으로 높으며 이는 재생에너지의 경우 기존의 기술을 기반으로 에너지 생산이 가능하기 때문으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 신재생에너지의 하나로 고려할 수 있는 목재에너지의 이용가능성을 고찰하고자 한다. 특히 현재 사용되지 않고 버려지고 있는 폐목재의 현황과 이를 에너지원으로 활용할 수 있는 기술적 대안, 그리고 그 경제성에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 목재자원 현황

2.1 산림현황 비교

국내의 산림면적과 지상부 바이오매스 현황 해외의 자료와 함께 표 1에 정리하였다. 2000년을 기준으로 국내의 산림면적은 약 600만ha로서 토지면적 1000만ha 대비 산림면적은 약 64%를 점유하고 있으며 지상부의 바이오매스 축적은 1ha 당 58m³ (36ton) 정도로 보고되었다. 비교적 토지면적 대비 산림의 면적은 높지만 산림자원의 축적은 아시아 평균과 지구전체의 평균값 보다 매우 낮은 값을 보이며 산림자원의 효율적인 이용의 필요성을 보여주고 있다. 또한 국내의 목재 자원의 수급동향을 살펴보면 연간 27,000,000m³

- 1) 광운대학교 환경공학과
E-mail : yooks@kw.ac.kr
Tel : (02)940-5497 Fax : (02)911-2033
- 2) 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
E-mail : jaehoi@iae.re.kr
Tel : (02)123-4567 Fax : (031)216-9125
- 3) 에너지기술연구원 청정시스템연구센터
E-mail : dshun@kier.re.kr
Tel : (042)860-3672 Fax : (042)860-3134
- 4) 한국기계연구원 청정환경기계연구센터
E-mail : yschoi@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7344 Fax : (042)868-7284

의 목재가 필요한 데 비하여 자급율은 8.8%로서 대부분의 목재가 외국으로부터 수입되고 있는 실정이다¹⁾.

Table 1 Current status of wood resources

	토지 면적	산림면적		축적 및 지상부 바이오매스	
		전체	1인당 (ha)	m/ha	t/ha
인도네시아	181	105	0.5	79	136
말레이시아	33	20	0.9	119	205
중국	932	163	0.1	52	61
일본	38	24	0.2	145	88
한국	10	6	0.1	58	36
소계	1,194	318			
아시아계	3,084	548	0.2	63	82
지구전체	13,063	3,869	0.5	100	109

2.2 폐목 발생 및 재활용

국내에서 발생되고 있는 폐목의 양과 재활용율을 표 2에 정리하였다²⁾. 발생원별로는 임지 폐잔재, 산업가공폐목재, 건설폐목재, 생활폐목재, 물류폐목재로 구분되며 연간 11,011,000m³의 폐목재가 발생하는 것으로 보고되었다. 산업가공 폐목재의 경우 표에 도시한 바와 같이 연간 3,533m³ 정도가 발생하지만 수집과 재활용이 용이하여 대부분 파티클보드(particle board) 또는 MDF(Medium Density Fiber)형태로 재활용되고 있다. 그러나 표에 도시한 바와 같이 건설폐목재의 경우 연간 5,752,000m³정도 발생하며 일부 재생보드로 사용되는 것을 제외하면 대부분 소각이나 매립처리 되고 있는 실정이다. 건설폐기물 중에는 방부처리나 오염 등으로 인하여 물리적 재활용이 불가능한 경우들이 있어 재활용기술에 대한 다양한 고려가 요구된다. 생활폐목재와 물류폐목재의 경우도 발생량은 건설폐목재와 비교할 때 많지는 않지만 대부분 매립되거나 소각 처리되고 있는 실정이다³⁾. 생활폐목재의 경우 소재의 고급화 및 다변화로 인하여 순수한 목재성분 이외에

다양한 화학성분을 포함하게 되어 소각 시 유해 화학물질의 발생이 가능할 수 있어 신중한 접근이 요구된다고 사료된다. 임지 폐잔재의 경우 다른 폐목재와 비교할 때 비교적 높은 재활용율을 보이지만 산림자원의 효율적 이용이라는 측면을 고려할 때 보다 부가가치가 높은 방법을 개발할 필요가 있다고 판단된다.

3. 폐목재의 자원화 기술

3.1 목재 구성성분 및 발열량

목재의 원소분석과 공업분석 결과를 표 3에 도시하였다. 조사된 목재는 상수리나무와 낙엽송이었으며 폐기물에 대한 삼성분 분석법을 기준하였다. 분석결과에 의하면 함수율6-8%, 휘발분 74%, 회분 0.5-1% 으로 조사되었다. 비교적 낮은 수분함량은 수분건조를 오븐에서 4시간 수행하였기 때문이며 일반적인 수분함량 30% 보다 낮은 값을 보였다. 목재의 발열량은 건조시료 기준으로 약 4000 kcal/kg 수준으로 무연탄의 발열량 보다 다소 낮은 값을 갖는다. 구성 원소는 대부분 탄소와 산소로 구성되는데 이는 목재의 주성분이 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌으로 구성되기 때문이다. 목재의 에너지 가치를 다른 일반 연료와 비교한 결과를 표 4에 도시하였다. 표에 도시한 결과와 같이 목재의 톤당 에너지는 다른 에너지원에 비하여 비교적 작은 값을 갖지만 에너지를 기준한 가격은 오일보다는 낮으며 가스와 유사한 수준을 유지함을 알 수 있다. 또한 목재의 경우 이산화탄소에 대하여 중립적인 위치를 점하고 있어 석탄과 오일 등의 이산화탄소 배출량과 비교할 때 1/10 수준의 배출량을 유지할 수 있다는 장점을 갖는다. 이는 향후 이산화탄소 배출권 거래 등이 활성화 될 경우 에너지 가격의 감소효과를 보일 수 있는 요인이 된다. 그러나 시료의 밀도가 낮아 상대적으로 많은 목재를 사용하여야 하기 때문에 에너지 저장고의 부피가 증가하고 기존의 보일러 설비에 적용하기 위해서는 설비의 개보수가 필요하다는 단점을 갖는다⁵⁾.

Table 2 The Domestic rate of the generation of wastewood and recycling

발생원별	구분	합계	재활용				폐기		
			소계	재이용	원료	연료	계	소각	매립
총계	물량	11,011	4,788	137	2,562	2,079	6,233	3,628	2,605
	비율	100	43.4	1.2	23.3	18.9	56.6	32.9	23.7
임지 폐잔재	물량	911	551	-	446	105	360	-	360
	비율	100	60.5	-	49.0	11.5	39.5	-	39.5
산업가공 폐목재	물량	3,533	3,533	-	1,837	1,696	-	-	-
	비율	100	100	-	52.0	48.0	-	-	-
건설 폐목재	물량	5,752	250	-	115	135	5,502	3,405	2,097
	비율	100	4.3	-	2.0	2.3	95.7	59.2	36.5
생활 폐목재	물량	190	23	7	15	1	167	19	148
	비율	100	12.1	3.7	7.9	0.5	87.9	10.0	77.9
물류 폐목재	물량	624	421	130	148	142	204	204	-
	비율	100	67.4	2.8	23.8	22.8	32.6	32.6	-

Table 3 Proximate and ultimate analysis of wood species

		상수리	낙엽송
Proximate Analysis [wt%]	Moisture	8.32	6.27
	Volatiles	73.94	79.11
	ash	1.02	0.58
	Fixed C	16.72	15.04
Ultimate Analysis [wt%]	C	47.60	47.20
	H	6.10	6.00
	N	0.20	0.10
	S	0.00	0.00
	O	46.10	47.60

3.2 폐목재의 자원화기술

폐목재를 이용한 자원화 기술을 그림 1에 정리하였다. 폐목재의 재활용은 크게 물리적 재활용, 화학적 재활용, 열적 재활용으로 구분할 수 있다. 물리적 재활용 방법은 주로 폐목재를 잘게 분쇄하여 파티클 보드나 MDF와 같이 새로운 목재 소재로 활용하거나 임지의 지주목 또는 어장의 해태목 등으로 사용하는 것을 들 수 있다. 화학적 재활용은 탄화공정을 이용하여 폐목재로부터 목탄이나 목초액을 생산하는 것을 예로 들 수 있으며 톱밥을 이용하여 비료를 생산하는 것도 포함될 수 있다. 열적 재활용 방법은 폐목재를 화목으로 사용하는 것을 고려할 수 있으며 지금까지 가장 많이 사용되어 온 방법이라 할 수 있다. 그러나 폐목재를 이용한 새로운 열적처리기술의 하나로 열분해 및 가스화를 고려할 수 있다.

Fig.1 Energy conversion technologies

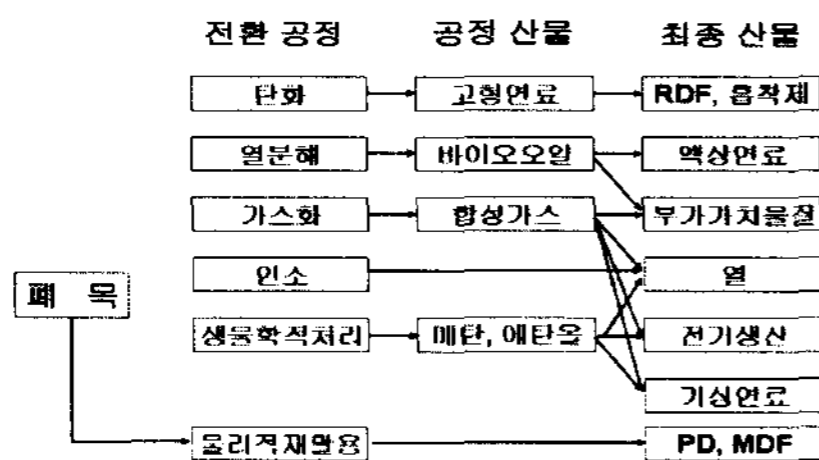


Table 4 Comparison of wood pellet with fossil fuels

연료형태	목재펠릿	가스	오일	석탄
톤당에너지 [GJ/Ton]	16.8	49.4	43.5	29.0
에너지가격 [₩/GJ]	3.5	3.3	4.3	2.0
에너지사용량 [Ton/yr]	154.2	52.4	59.5	89.3
CO ₂ 배출량 [Ton/yr]	18.1	140	204	210
소요연료부피 [m ³]	237.2	52.4	59.5	89.3

3.2.1 폐목재의 열분해

열분해는 무산소 분위기에서 폐목재를 가열함으로써 가스상, 액상, 고상의 착로 분해하는 것을 의미하며, 열분해 속도에 따라서 생성물의 비율이 변화하게 된다. 일반적으로 열분해 속도를 완만하게 유지하면 완속열분해(slow pyrolysis)가 진행되고 대부분의 생성물은 고상의 착를 얻는다. 목재에서 숯을 얻는 탄화공정의 경우 완속열분해의 대표적 사례가 될 수 있다. 급속열분해(fast pyrolysis)는 유동층 반응기와 같이 열전달 속도를 빠르게 할 수 있는 장치를 통하여 진행되며 일반적으로 60% 이상의 바이오 오일을 얻을 수 있게 된다. 생성된 바이오 오일은 적갈색의 점성액체로 수용성이며 17-20MJ/Kg의 발열량을 갖는다. 바이오 오일은 유기산(organic acids)과 페놀류(phenolics), 탄수화물류(carbohydrates), 시린골류(syringols), 구아이아콜류(guaiacols)등으로 구성된다. 수용성임에도 비교적 연소성이 좋아 기존의 버너에 다른 액상연료와 혼합하여 사용할 수 있다.

3.2.2 폐목재의 가스화

목재를 고온에서 산화제로 수증기 혹은 산소를 주입하면 수소와 일산화탄소가 혼합된 합성가스를 얻을 수 있는데 이를 가스화 반응이라 한다. 가스화는 목재가 산화제가 없는 상태에서 300-500°C로 가열되면 열분해되어 응축성 탄화수소 혹은 타르, 그리고 가스가 분리되며 착(char)가 생성되고 탄소가 수증기와 반응하여 수소와 일산화탄소로 전환된다. 일부 탄소는 산화되어 CO, CO₂를 만들면서 열을 내고, 수증기-가스변환 반응을 통해서 H₂O의 일부가 수소로 전환된다. 생성가스의 조성은 원료의 조성, 수분함량, 반응 온도, 압력, 열분해생성물의 산화정도, 반응기 종류 등 많은 인자에 좌우된다. 목재의 경우 액상생성물의 일부가 타르로 전환되는데 생성된 타르는 제거하기가 까다롭기 때문에 반응기의 선택이 중요하다.

3.2.3 폐목재의 연소

일반적인 폐목재의 연소기술은 크게 스토커 타입의 고정층 연소와 유동층 연소로 구분할 수 있다. 고정층 연소의 경우 가정용 보일러나 소형의 산업용 보일러에 유리하며 대용량 연소의 경우 유동층 연소기술이 보다 유리한 것으로 알려져 있다. 유동층 연소의 경우 10MWt 이상의 규모는 기포유동층 연소가 유리하며 35MWt 이상은 순환유동층 연소기술이 유리하다. 유동층 연소기술은 연료의 전처리가 간단하고 SO_x, NO_x, HCl과 같은 오염물질의 연소중 처리가 가능하며 연소효율이 높고 관리가 쉽다는 장점을 갖는다⁶⁾.

폐목재의 연소에서는 폐목재내에 포함된 오염물질의 배출이 환경오염 문제를 유발할 수 있어 연소 후처리에 특별한 관심을 기울여야 할 필요가 있다¹⁾.

4. 국외 목재에너지 정책과 적용 사례

목재를 포함한 바이오매스의 열이용은 최근 청정개발메카니즘(CDM, Clean Development Mechanism)으로 인하여 많은 관심의 대상이 되고 있다. 유럽의 바이오 에너지 정책을 표 5에 정리하였다⁷⁾.

환기기술을 고려할 필요가 있다. 특히, 건설폐목과 같이 화학물질로 오염되어 소각처리가 용이하지 않은 에너지원의 경우 가스화나 열분해 기술을 활용할 경우 보다 용이하게 신재생에너지를 활용할 수 있는 방법이 될 것으로 사료된다. 또한 연료용 속성수의 개발과 효율적인 인공조림을 병행한다면 보다 낮은 가격으로 원활한 목재칩과 펠렛의 공급이 가능하여 신재생에너지의 확대보급이 보다 원활하게 진행될 것이라 판단된다.

Table.5 Bio-energy policy in EU countries

국가	정책	에너지원	현황
오스트리아	세제혜택; 보일러, 가스화 감세; 바이오디젤 중과제; 화석연료	1차에너지 11% 임산폐기물 → 지역난방유체 → 바이오디젤	가정난방, 지역난방 감소 열병합 발전 증가
덴마크	50%까지 지원	폐목재와 밀짚이 주 소스	1990-2000 열이용 정체 발전 10배 증가
핀란드	에너지세 감면 폐기물 에너지화 정책	1차에너지 20% 펄프, 폐지, Black liquor	2010까지 > 100MWe
프랑스	바이오디젤(100%), 바이오에탄올(80%)에 대한 감세 바이오 연료 개발에 주도적	최종에너지 6% 기존 농산, 임산 폐기물 활용 및 잉여 농지에 유체 재배	열공급: 400PJ 바이오연료: 50PJ 발전: 10PJ
독일	바이오연료에 대한 면세	최종에너지 3% 폐기물로 분류 유체씨로 바이오디젤생산	2010까지 800PJ 목표
네덜란드	연료대체에 대한 과세차별	바이오에너지 수입정책	2007: 85PJ 2020: 15PJ
스페인	투자에 대해 10%감세 설비지원 30%	폐기물로 분류 유체, 곡류(수수)의 재배	Present: 160PJ 2010: 430PJ
스웨덴	차별과제 및 행정지원 (CO ₂ 및 에너지세)	1차에너지 17%	2020: 최종에너지 40%
영국	최종에너지 1% GHG 정책에서 취급	MSW로 취급	MSW 에너지 50%가 바이오에너지 발전: 4500GWh 열공급: 40PJ

오스트리아는 1차에너지의 11%를 바이오매스로 공급하고 있으며, 임산폐기물은 지역난방 에너지원으로 사용하고 있다. 농산물로 재배되는 유체를 이용하여 바이오 디젤을 생산하고 있으며 바이오매스 보일러에 대한 자금지원, 바이오 디젤에 대한 세금감면과 화석연료에 대한 중과세 정책을 취하고 있다. 현재 작은 규모의 지역난방 보일러에서 바이오매스를 이용한 발전설비로 전환하고 있다.

스웨덴은 환경정책상 폐기물과 바이오 에너지를 분리하고 있는데, 임목을 연료로 사용하는 보일러는 폐목재의 혼소를 금지하고 발생된 화재는 숲으로 돌려보내 토양으로 뿌려진다. 폐목재의 경우 포함된 오염물질의 성상에 따라 소각되거나 석탄, 폐기물등과 혼소하는 정책을 사용하고 있다.

4. 결 론

목재의 수급동향, 목재폐기물의 현황, 목재에너지 이용기술 및 사례에 대하여 고찰하였다. 현재 국내의 목재에너지 이용기술은 주로 임목폐기물과 같이 오염이 크지 않은 소재를 중심으로 파티클보드와 같은 물리적 재활용기술에 집중되었으나 향후 연소, 열분해, 가스화 등의 에너지 전

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 폐기물에너지 연구 기획사업 “목질계 폐기물의 열적처리에 의한 에너지화 기술”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 김외정, 1992, 우리나라 목재수급 실태와 건축재 이용전망, 대한건축학회지, Vol.36, pp. 73-77.
- [2] 농림부, 1999, 廢木材의 發生實態 및 再活用 促進方法
- [3] 이종영, 1998, “폐목재의 재활용에 대하여, 대한토목학회, Vol.46, No.12, pp. 33-41.
- [4] 농림부, 2006, 환경친화적 임업의 활성화를 위한 열에너지 생산과 공급시스템설계
- [5] 林奇杓, 1976, “에너지 자원과 목재이용” The J. of Tappik Vol.8, No.1, pp.29-38.
- [6] The National Non-Food Corps Centre Biocentre, 2004, “Woodfuel heating in the North of England: A Practical guide,
- [7] Faaj, A.P.C., 2004, “Bio-energy in europe: changing technology choices,” Energy Policy, Vol. 33, pp. 965-974.