

저탄소 녹색 성장을 위한 폐기물 제로 청정도시 구상 Realization of Zero Waste Clean City to Low Carbon Green Growth

오정익† · 안수정 · 김종엽
Jeong-Ik Oh · Soo-Jeung Ahn · Jong-Yeob Kim

한국토지주택공사 토지주택연구원 녹색성장연구실
Green Growth Research Team, Land & Housing Institute, Korea Land & Housing Corporation

(2009년 12월 15일 접수, 2010년 01월 15일 채택)

ABSTRACT : Zero waste clean city was visualized by designing the environmental fundamental facilities such as automated waste collection and bio-energizing system of domestic waste, which was categorized into food and combustible waste from urban area. The biomass circulation position was applied to the domestic waste collection position combined with bio-energizing system in the zero waste clean city. Bio-energizing system consisted of bio-gasification, bio-fuel and bioenergy-circulation process. Food wastes were treated by bio-gasification with anaerobic digestion, and combustible wastes were made of bio-fuel with pyrolysis/drying. Bio-gas and bio-fuel was utilized into the electric generation or boiler heat in bioenergy-circulation process. The emission of carbon dioxide(CO₂) and construction fee of the environmental fundamental facilities related with domestic waste was estimated in the existing city and zero waste clean city, assuming the amount of food waste 35 ton/day, combustible waste 20 ton/day from domestic area. Consequently, 2.7 times lower carbon dioxide emission and 15% construction fee of the environmental fundamental facilities related with domestic waste were obtained from the zero waste clean city by comparing with existing city.

Key words : Low Carbon, Waste Zero, Automated Waste Collection, Bio-gasification, Bio-fuel, Bio-energizing system

요약 : 도심 내에서 발생하는 음식물쓰레기와 일반 가연성쓰레기인 생활폐기물을 수거 및 집하한 후에 바이오매스로 활용하고 이를 이용하여 생성된 에너지는 주거 및 상업단지 등에 공급하는 폐기물 제로 청정도시를 구상하였다. 바이오매스 순환거점으로는 바이오에너지화 시스템을 연계한 생활폐기물 자동집하시설을 설정하였다. 바이오에너지화 시스템은 바이오가스화, 연료화, 에너지순환공정으로 구성하였다. 음식물쓰레기는 처리하면서 바이오가스화하고, 일반 가연성 쓰레기는 열분해/건조하여 연료화하며, 발생되는 바이오가스와 연료는 에너지 순환공정에서 발전기, 보일러의 연료로 사용되게 하였다. 또한, 가상의 사업 대상지구에서 음식물쓰레기 35 톤/일, 일반 가연성 쓰레기 20 톤/일로 생활폐기물 총 55 톤/일에 대한 처리 및 처분에 있어서 기존도시와 폐기물 제로 청정도시에서의 탄소저감 및 건설비를 비교하였다. 그 결과, 폐기물제로청정도시에서는 기존 도시 대비 연간 탄소배출량이 약 2.7배 저감 가능하고, 폐기물 관련 환경기초시설의 건설비도 기존도시에 비교하여 약 15%절감이 예측되었다.

주제어 : 저탄소, 폐기물 제로, 자동집하, 바이오가스, 바이오연료, 바이오에너지화 시스템

1. 서론

오존층 파괴, CO₂배출에 따른 지구온난화, 기타 각종 환경오염물질 배출에 따른 자연환경 파괴 등의 환경문제가 범세계적 공동대처과제로 대두되고 있다. 우리나라는 CO₂ 배출국 세계 9위의 에너지 다소비 국가로 1993년 12월 기후변화협약에 가입하였으며 2013년 온실가스 배출 감축 의무국으로 포함이 예상된다. 이에 대응하기 위해 우리 정부는 최근에 2020년까지 신·재생에너지 20%, 녹색기술개발투자 2배 확대 등을 실현하기 위한 「저탄소 녹색성장」을 공표하고, 온실가스 규제사회 도래로 환경규제, 무역장벽의 강화, 국내외적인 탄소 거래시장

형성 등에 대응한 범국가적 기술·정책 개발을 추진하고 있다.^{1~4)} 다시 말해서, 기후변화에 대한 대응방안이 필수적으로 요구되는 저탄소 시대의 도래로 도시 건설에서는 쾌적하고 편리함을 유지하면서 온실가스저감을 위한 효율적 에너지 관리, 자원순환기술접목을 통한 시스템 개발이 요구되고 있다. 그러나 현재 우리나라는 도시화율 90% 이상으로 지속적인 신/도시 건설사업이 추진되고 있으나, 기후변화에 대응하기 위한 새로운 개념의 도시차원의 기술·정책 개발은 미비한 실정이다.

최근, 주거지 등에서 배출되는 음식물쓰레기, 일반가연성 쓰레기로 구성되는 생활폐기물이 도시의 유용한 바이오매스로 부각되고 있으며, 이를 이용한 폐기물 에너지는 저탄소 녹색

† Corresponding author : E-mail : ojijp@lh.or.kr Tel : 042-866-8454 Fax : 042-866-8472

색 기술의 신 성장동력으로서 주목받고 있는 신·재생에너지 중의 한 분야이다. 국내 폐기물 에너지 생산단가는 소수력보다 다소 높으나 태양광의 10%, 풍력의 66% 수준으로 신·재생에너지 보급 확대에 가장 효율적인 방안으로 인식되고 있으며, 국내에서 공급되고 있는 신·재생에너지 중의 폐기물 에너지화 부문이 전체의 약 76%를 차지하고 있다. 특히, 2013년부터 음식물쓰레기 해양 투기 물량을 육상처리로 전환, 에너지화 시설확충으로 바이오 연료 생산 및 오염원 저감 방안 수립이 시급히 요구되고 있는 실정이다.^{5,6)}

그러나, 폐기물 처리부문은 지금까지 대부분 냄새, 소음 등의 남비현상 초래로 인해 유해시설로 인식이 되어서 별도의 시설로 분류되어 운영되어 왔으나, 신도시의 건설부문에서 저탄소 도시로의 접근을 강구 하기 위해서는 보다 획기적인 적용방안 마련이 필요하다.

본 고에서는 신도시의 건설에서 생활폐기물을 주요 도시 바이오매스로 설정하여, 생활폐기물 제로 청정 도시 조성 동향을 조사 분석하였다. 또한, 폐기물 에너지화 시설의 적용방안을 사례별로 제시하고 이에 따른 탄소 저감효과 및 생활폐기물 관련 환경기초시설의 건설비를 비교 분석하여 폐기물 제

로 청정도시 구상방안의 적용 가능성을 고찰하였다.

2. 실험재료 및 방법폐기물 제로 청정도시 조성동향

2.1. 국외현황

선진국은 장래 화석연료의 고갈 및 지구온난화에 대비한 대체에너지 개발 보급의 시급함을 인지하고 폐기물을 새로운 자원으로 인식하고 이의 에너지화를 적극 추구하고 있다.

유럽연합(EU)은 에너지안보를 위한 유럽전략 「그린페이퍼」를 2000년에 발표하고, 음식물쓰레기, 가축분뇨, 하수슬러지 등 유기성폐기물과 목재 등을 바이오매스로 정의, 이의 에너지화 정책화를 적극 추진하고 있다. 총 에너지 소비량 1,728 MTOE의 6.5%를 2005년 기준으로 신·재생에너지에 의존하고 있으며 이 중 폐기물이 10.6%, 바이오에너지가 57.3%를 차지하고 있다. 또한, 매립지침(Landfill Directive, '99)을 통해 에너지화 가능한 유기탄소 5% 이상 생분해성폐기물, 발열량 1,433 kcal/kg 이상 가연성 폐기물

Table 1. Examples of zero waste clean city in developed countries^{10~12)}

City	Principal contents
Hammarby Sjostad, Sweden	<ul style="list-style-type: none"> • Energy is produced in a renewable fuel-fired district heating plant in the area • wastewater is treated, the heat recovered for heating houses and the silt is converted into biogas • Combustible waste in the area is recycled as heat and food waste is composted into soil. • The area has an experimental on-site sewage works as well, plans are to extract nutrients from sewage and wastewater via new technology for use on farmland
Masdar City, UAE	<ul style="list-style-type: none"> • Carbon-Free City by renewable energy • PV panel on the roof/wall of building • Waste to energy : Product energy using the urban waste • Geothermal cooling system • Water recycling
Milton Keynes, UK	<ul style="list-style-type: none"> • Biofuel CHP (75 kWe/150 kWth) • Biomass boiler, Gas co-generation (1,413 kWe/1,505 kWth) • PV panel : 20% of roof area (375 kW) • Intensive insulation and airtightness (34~49% advanced performance) • Heat recovery ventilation system • Geothermal heat pump
Zlin/Louky, Czech	<ul style="list-style-type: none"> • Solar collector : 50 detached houses (900 m²), apartment house and public bath (300 m²) • PV system → 40 detached houses (2 kWp/house) • Biogas co-generation by waste
Weiz & Gleisdorf, Austria	<ul style="list-style-type: none"> • Energy Region Weiz-Gleisdorf (ERWG) Project • Solar collector : 40 detached houses (600 m²), apartment house, tourism (400 m²) • PV systems on 20 households : total 60 kWp • The district heating systems using wood chip (8 units) • The largest solar collect system of the world
Neckarsulm, German	<ul style="list-style-type: none"> • Solar collector : small scale building (2,000 m²), large scale building (500 m²) • solar sludge drying plant • PV system : small scale building (200 kWp), large scale building (300 kWp) • Wood pellet power plant

의 직매립을 금지하고 있다. 1995년을 기준년도로 하여 상기 폐기물을 2006년 75%, 2009년 50% 2016년 35%의 연차별 감축목표 제시하고 있다. 독일은 1980년 분리선별기술을 개발하여 가연성폐기물의 RDF(Reuse Derined Fuel)생산기술을 확보하여 전용발전시설, 화력발전소 및 시멘트 보조연료로 활용하고 있다. 유기성폐기물의 경우는 바이오가스 생산을 최대화 하는데 초점을 두어 1,900여개의 개별 농가형 시설에 최근 집중형 바이오 에너지화 시설 11개소를 설치하여 발전시스템에 연계 전환 중에 있다. 미국은 유럽에서 전파된 RDF 시설 개발 및 활성화를 통해 25개 이상 RDF 제조시설과 30여개 RDF 석탄 혼합발전소 운영 중에 있다. 폐기물을 주요 재생에너지로 규정하고 기존 소각공정을 열처리공정으로 전환하여 전기 및 열 생산 시설을 설치 추진하고 있다. 일본은 '바이오매스 에너지 도입 가속화 전략'을 온난화 대책 및 자원순환형 사회구축 등 환경산업 진흥을 위한 역점사업으로 추진하고 있다. 2004년 기준 총 에너지 소비량 중 신·재생에너지 기여도 1.3%를 2010년까지 3% 수준까지 확대추진 계획을 수립하고 있다. 또, 유기성 폐기물을 통합 관리하는 '바이오매스타운' 건설을 추진하고 있다. 이는 바이오매스 열 이용량을 2006년 0.6MTOE에서 2010년 2.8MTOE로 증대가 예측되며 CO₂ 삭감 목표치의 약 10%인 760 만톤 저감이 가능하다고 한다. 1997년 다이옥신발생량이 많은 중소형 소각로를 RDF 생산시설로 대체하여서, 57개 RDF 생산시설과 5개 RDF 전용발전소를 가동하고 있다.^{7~9)}

선진 외국의 폐기물 에너지화 기술정책들은 기후변화 대응 저탄소 도시 조성 통합 포트폴리오 전략수립을 통해서 실현되고 있다. 즉, 국가·공공기관 주도로 상황에 따른 기술 선택과 집중 투자 전략을 설정하고 자연환경, 자원 부존량, 에너지 공급구조 등을 고려하고 세부 요소기술들을 도시차원의 적용을 통하여 완성도를 높이고 있다. Table 1에 선진 외국에서의 폐기물 제로 청정도시 개발사례의 일부를 정리하였다.

2.2. 국내현황

국내의 경우 2013년부터 음식물류폐기물 및 음폐수 중 해양 투기 물량을 육상처리로 전환해야 하는 실정이나 고농도 유기성 폐기물을 육상에 직매립할 경우에 매립지 안정화에 악영향을 초래할 수 있다. 전국 227개 매립지의 평균수명은 약 19.1년으로 현재 해양 배출되는 유기성 폐기물을 전량 매립처리로 전환할 경우 평균수명 11.3년으로 단축될 것으로 예상된다. 또 다른 대안으로 고려할 수 있는 폐기물의 소각 처리 시에는 다이옥신 등 대기오염문제 유발이 우려되고 높은 처리비용이 요구되므로, 소각은 적정 육상처리로 대체선택이 곤란

한 실정이다. 즉, 매립지 신설 및 증설이 난해하고 소각처리는 환경부담이 우려되므로, 폐기물 에너지화 시설확충으로 바이오 연료 생산 및 오염원 저감 방안 수립이 시급히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 정부는 폐기물 에너지화 목표를 2012년까지 총380 만톤 (약1만 톤/일), 2020년 까지 총1,218 만톤으로 계획하고 있다.¹³⁾

한편, 근래 들어 선진외국과 마찬가지로 국내에서도 쾌적한 주거환경 조성을 위한 지방자치단체들의 친환경 및 생태도시 건설정책이 유행처럼 붓물을 이루고 있다. 그러나 국내의 경우 폐기물 에너지화가 도시차원에서 적용되기 보다는 별도의 단위처리시설의 개념으로 적용되고 있으며, 폐기물 제로 청정도시의 실현은 미흡한 실정이다.

3. 폐기물 제로 청정도시 구상

3.1. 구상배경

기후변화 대응방안에 관한 고민과 자원순환에 대한 개념이 더해져 폐기물 관리에 대한 새로운 패러다임이 등장되고 있다. 기존 폐기물 관리방안에서는 쾌적한 생활환경의 조성을 목표로 폐기물 발생저감, 재활용, 안전처리방법 강구를 위해 쓰레기 종량제 시행, 폐기물처리시설 확충을 모색하여 왔다. 반면, 새로운 폐기물 관리방안에서는 지속가능한 자원 순환형 사회정착을 목표로 Zero Waste, CO₂ 감축방법 마련을 위해 폐기물 감량화 정책강화, 재활용산업 지원 확대, 에너지 자원화 시설 확충을 수행하고 있다. 특히, 국제적으로 유기성 폐기물의 바이오가스화 등 폐기물에너지화가 온실가스감축의 유력한 수단으로 등장하고 있으며, 메탄 등의 바이오가스 지구온난화 지수는 이산화탄소의 21배에 달해 폐기물 에너지화에 따른 감축효과는 기대치가 높은 실정이다.

이에, 도시개발 사업을 추진할 경우에 계획단계에서 폐기물 에너지화 시설을 도시에 설치함으로써 폐기물 제로 청정도시체계의 구축 가능성을 가늠하고자 하였다.

3.2. 구상제안

폐기물 제로 청정도시는 Fig. 1에서처럼 주거, 상업지 등에서 발생하는 생활폐기물, 공원녹지 등에서 발생하는 폐목재, 식물잔재물을 주요 바이오매스로 하여 폐기물 에너지화 시스템이 구축된 바이오매스 순환거점을 형성함으로써 실현할 수 있다.

바이오매스 순환거점에서는 생활폐기물 중의 음식물쓰레기를 생물학적으로 처리하면서 바이오가스화하고, 바이오 가

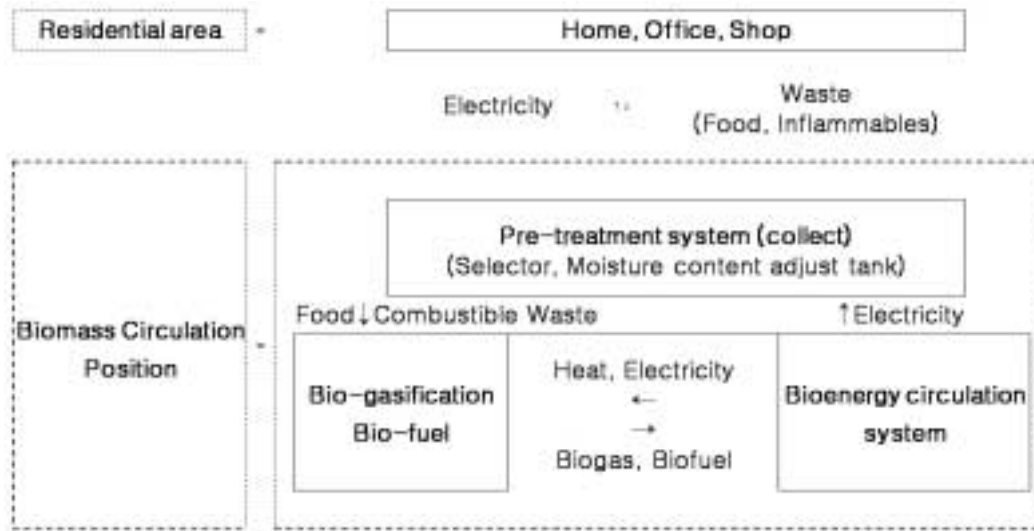


Fig. 1. The concept of biomass circulation position in zero waste clean city.

스는 발전 연료로 활용할 수 있다. 이 때 바이오가스 중의 이산화탄소는 탄소 흡수원인 식재에 공급시켜서 처리하고, 배출되는 슬러지는 연료화하여 발전소 등에 공급할 수 있다.

또한, 일반 가연성쓰레기는 선별, 파쇄, 압축, 성형, 가공하여 연료화하여 발전소, 시멘트 공장 등에 화석에너지 대체연료로 활용할 수 있다.

한편, 바이오매스 거점을 신 도시개발에 적용할 수 있는 대상으로는 주로 환경기초시설이 될 수 있다. 환경기초시설에는 음식물쓰레기 집하장, 하수처리장, 집단에너지 시설 등이 있는데 이러한 시설의 기존 건설방향은 대부분이 도시외곽지역에 위치하고 있다. 최근 신도시 건설에서는 도심 내 쓰레기 집하장 건설 추진으로 쾌적한 주거환경 조성 및 주민의 편리성 측면에 기여하고 있다. 도심의 쓰레기 집하장은 음식물쓰레기와 기타 가연성 쓰레기를 집하하는 시스템으로 투입시설, 관로시설, 집하시설로 구분되는데, 음식물쓰레기와 일반쓰레기를 도심 쓰레기집하장에 압송관로로 집하하고, 집하된 쓰레기는 차량으로 소각시설로 이송 후 처분하는 것으로 하고 있다¹⁴⁾. 이러한 도심 쓰레기 집하시설은 다량의 에너지소비설비 위주로 구성되며, 이는 최근 이슈인 기후변화 대응 저탄소 도시 요소로는 미흡한 실정이다.

본 구상에서는 Fig. 2에서처럼 쓰레기 자동집하시스템을

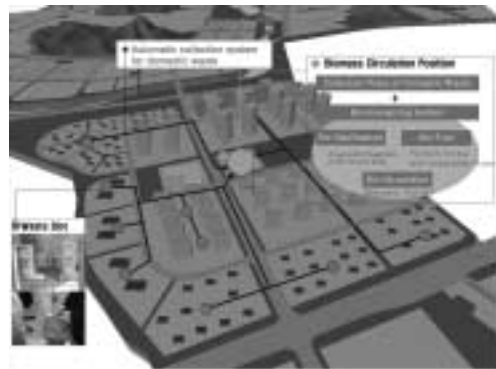


Fig. 2. Visualization of zero waste clean city concept.

통해 도심 쓰레기집하장에 집하된 음식물쓰레기를 집하장 내에서 처리하여 에너지로 회수할 수 있는 시스템을 설치하여 바이오매스 순환거점으로 제시하였다. 이는 기존 음식물쓰레기의 소각, 매립시설로의 차량운반 규모 축소가 가능하며, 도시 폐기물 최종처리시설(소각, 매립)의 규모 및 기능조정이 가능할 것으로 예측된다.

Table 2. The assumed information of area, house, population, waste unit, amount of waste emission for target region of zero waste clean city

Area(m ²)	House(households)	Population(persons)	Waste standard unit(kg/person · day)		Waste Emission(ton/day)
4,090,160	53,039	130,998	Food Waste	0.250	35
			Combustible Waste	0.146	20
			Domestic Waste	0.396	55

4. 폐기물 제로 청정도시 구상

4.1. 대상지구의 및 생활폐기물 발생량 계획

폐기물 제로 청정도시를 계획한 대상지구는 수용인구 130,998명으로 세대당 2.5인기준으로 53,039세대를 수용하고, 면적 4,090,160 m²로 가상하였다. 생활폐기물의 발생량은 Table 2에서처럼 배출량 원단위로 환산하여 음식물쓰레기 35 톤/일, 일반 가연성 쓰레기 20 톤/일로 설정하고 생활폐기물 총 55 톤/일이 발생한다고 계획하였다.

4.2. 생활폐기물 자동 집하시설

최근 도시 고밀화에 관한 삶의 질 향상 욕구 증대, 편리성 및 친환경성을 추구하는 미래 수요와 일치하여 청정도시 조성 개념의 자동집하시설 필요성 확대되며 Fig. 3에 나타난 것처럼 우리나라에도 많은 신도시에 쓰레기 자동집하시설을 적극 적용하는 추세이다. 생활폐기물 자동집하시설 도입은 수거차량 및 장비의 낙후, 수집운반업의 영세성, 수거작업의 비능률화 소규모업체의 난립 및 수의계약에 의존하여 존속하는 등의 기존 수집운반업의 문제점이 대두됨에 따라 수집운반 장비의 현대화 요구, 다양한 수집운반 기술의 개발요구와 경쟁력을 확보하기 위한 수단 필요 등에 의해 선진 수집운반 시스템으로서 자동집하시설의 도입이 증가하고 있다. 그러나 아직은 외국의 기술을 그대로 도입하여 우리나라의 여건에 맞게 적용하고 있는 실정이며, 업체별 시스템이 다양하여 시스템에 대한 표준화 및 집하장과 단지 내 효율적 통합운영이 무엇보다 필요하다. 2009년 6월 기준, 전국적으로 용인수지, 송도, 김포장기, 과천3단지, 과11단지, 용인흥덕, 판교신도시, 은평 뉴타운 등 8개의 쓰레기 자동집하시설이 설치·운영 중이며, 17개 지구가 추가적으로 건설 중에 있다.¹⁵⁾

본 대상지구에서는 생활폐기물 자동집하시설을 약 20,000명 기준 1개소로 총 55 톤/일의 용량으로 그 중에 음식물쓰레기가 약 35 톤/일로 예상하였다. 생활폐기물 자동집하시설에

서의 압송관로시설은 관경 500 mm로 하고, 압송 권역은 사업지구(블럭형 단독, 연립주택, 공동주택 등)내의 권역반경 2 km 이내로 설치를 계획하였다. 지구 내에 생활폐기물의 집하시설은 부지면적이 약 40 m × 50 m, 건폐율 20%, 용적율 80%로 하며, 쓰레기 수거 및 에너지공급을 고려하여 사업지구 중심부의 복합커뮤니티 센터에 연계하여 설치하도록 계획하였다.

4.3. 바이오매스 에너지화 시스템

바이오매스 에너지화 시스템은 Fig. 4에서처럼 바이오가스화, 바이오연료화, 에너지순환, 기타부대 시설로 구성하였다. 바이오가스화 시설은 혐기상태의 미생물 반응조에서 음식물폐기물을 생물학적으로 처리하고 발생하는 메탄가스를 바이오 가스로 활용하는 시스템을 선정하였다. 단, 미생물반응조는 유입 음식물 폐기물량을 35 톤으로 하고, 반응조 온도 35℃로 중온소화 조건을 유지하고, 수리학적체류시간 15 일, 유입고형물 농도는 10%로 운영할 수 있도록 설계하였다. 음식물쓰레기 처리 시 혐기성 소화조 내의 미생물 활성화 및 부산물의 자원화(퇴비화)에 염분농도가 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 염분농도가 1%이하라면 자원화 등에 영향이 낮으며,^{16~18)} 본 대상지구 음식물쓰레기 염분농도는 혐기성 소화에 영향을 미치지 않는 것으로 설정하였다.

바이오연료화 시설은 고온 고압상태의 열분해/건조 반응조에서 화학반응을 일으켜 포화수증기가 갖는 분해 작용을 이용하여 가연성 폐기물을 가수분해 및 물질 변환하여 처리하고 발생하는 부산물은 건조하여 바이오 연료로 활용하는 시스템을 선정하였다. 더욱이, 바이오가스화의 미생물 반응조에서 발생하는 소화 슬러지도 동시에 처리가 가능할 것으로 사료되었다. 바이오 연료화를 위한 열분해/건조 반응조는 유입 가연성폐기물량을 20 톤으로 하고, 반응조 온도 200~230℃, 16~30 bar의 고온 고압조건을 유지하고, 수리학적체류시간 약 10시간으로 운영할 수 있도록 설계하였다.

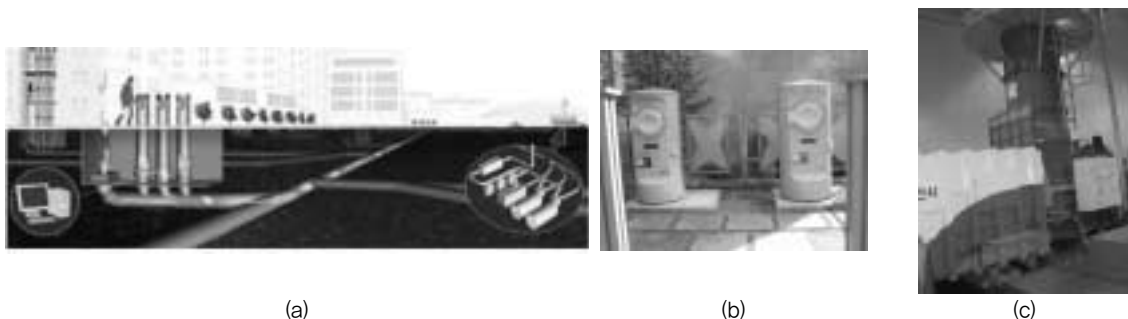


Fig. 3. The concept of automated waste collection system for domestic waste, (a) Structure of automated waste collection pipeline network, (b) Waste slot in domestic area, (c) Collection place of domestic waste.

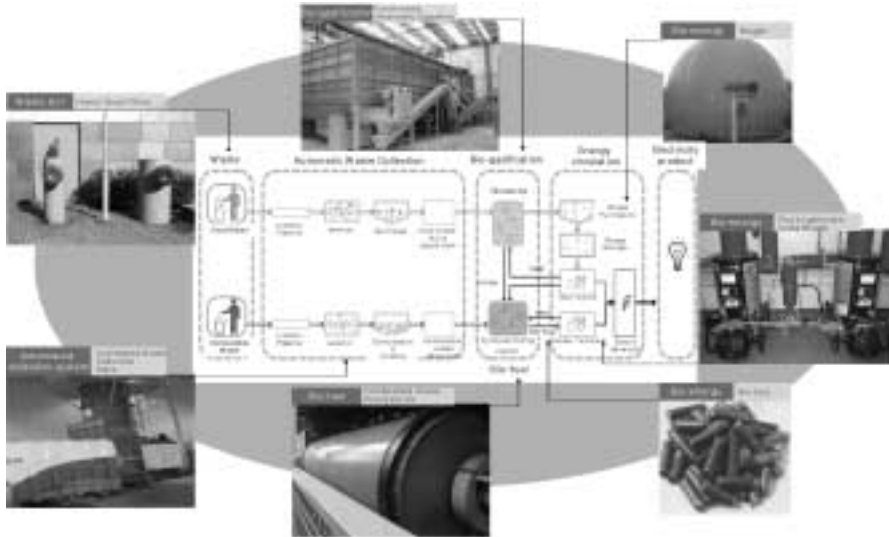


Fig. 4. The concept of bio-energizing system with automated waste collection facility.

최종적으로, 생활폐기물 에너지 순환공정은 음식물쓰레기 바이오 가스화 및 가연성 쓰레기 바이오 연료화 시스템과 연계하여 가스터빈, 보일러, 발전기 등으로 구성하였다. 생활폐기물 자동집하시설과 바이오에너지 시스템을 연계설치 시에는 유입되는 폐기물을 원심분리기, 선별기, 슬러지 조정조, 탈취공정, 바이오가스정제 및 저장조, 기타 처리설비 등의 부대시설도 동시에 설치하도록 계획하였다.

5. 폐기물 제로 청정도시 실현효과 분석

5.1. 분석 대상

폐기물 제로 청정도시의 실현에 따른 기존도시의 폐기물 처리방식에 대하여 탄소저감효과와 폐기물 관련 환경기초시

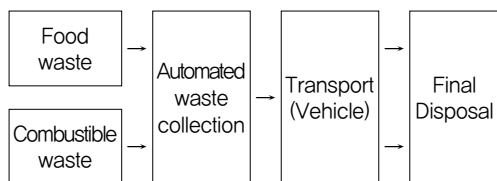


Fig. 5. Flowchart of domestic waste in the existing city.

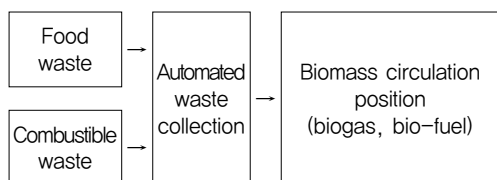


Fig. 6. Flowchart of domestic waste in zero waste clean city.

설의 건설비를 비교분석하였다. Fig. 5는 기존의 도시에서의 음식물쓰레기와 일반 가연성쓰레기를 자동 집하하여 최종 처리·처분하는 방안을 나타낸다.

Fig. 6은 폐기물 제로 청정도시의 생활폐기물 처리방안으로서 음식물쓰레기와 일반 가연성 쓰레기를 자동 집하한 후에 바이오매스 순환거점에서 바이오 에너지화 시스템에 연계하여 처리하면서 에너지로 이용하는 방안이다.

5.2. 분석방법

5.2.1. 탄소저감효과

생활폐기물 처리방식에 따른 탄소저감효과를 비교분석하기 위해서 시설별 탄소배출 원단위 산정에 고려한 인자를 Table 3에서 정리하였다.

생활폐기물 자동집하시설에서 발생하는 CO₂ 발생량은 대 상지구에서 55 톤/일의 생활폐기물을 집하한다는 가정 하에 추정하였다. 이때 사용되는 송풍기 용량에 있어서는 폐기물 1 톤 집하하는데 약 150 kWh로 사용되는 점을 고려하고, 300 일 가동한다는 계획 하에 소요되는 전력량을 단위 환산하여 CO₂발생량을 예측하였다.

차량 운반의 경우, 1톤 수거트럭 55대가 1일 1회 생활폐기물을 운반하고 1대당 운행거리는 10 km, 연비는 15 km/L 로 예상하여 300일 동안 운전한다고 계획하고, 이 때 소요되는 연료(경유)량을 단위환산하여 CO₂발생량을 예측하였다.

최종 처리·처분시설은 소각시설을 기준으로 하였으며, 생활폐기물 1톤 소각하는데 0.9 톤 LNG가 소모된다고 가정하여 300일 동안 운영 계획하에서 소요되는 연료(LNG)량을 단위 환산하여 CO₂ 발생량을 예측하였다.

Table 3. CO₂ emission units of domestic waste facilities

Facilities related with domestic waste		CO ₂ Emission Units
Automated waste collection system		<ul style="list-style-type: none"> • Blower electricity: 150 kWh/ton Waste • Operation time: 300day • A number of truck: 55 • Transport distance: 10 km/1truck • Truck's fuel efficiency: 15 km/L gasoline • Operation time: 300day
Transportation fee		
Final disposal facility (Incineration)		<ul style="list-style-type: none"> • Incineration fuel usage: 0.9 ton LNG/ ton Waste • Operation time: 300day
Bio bio-energizing system	Bio-gasification	<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulic retention time : 15days • Solid concentration of food waste : 10% • Methane formation rate : 0.42 ton CH₄/kg Volatile Solid • Low level caloric value of methane : 8,600 kcal/ton CH₄, • Electricity generation with methane gas : 2,150 Kcal/KWh • Efficiency of Electricity generation : 30% • Operation time: 300day
	Bio-fuel	<ul style="list-style-type: none"> • Bio-fuel production : 0.5 ton/ton Combustible Waste • Caloric value of bio-fuel : 4800 kcal/kg • Efficiency of Electricity generation : 34% • Operation time: 300day

Table 4. Construction units of domestic waste facilities

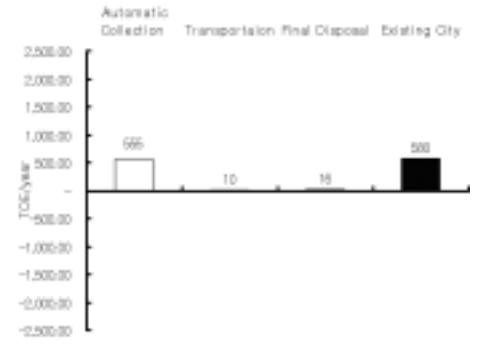
Facilities related with domestic waste		Construction Units(thousand won/ton)	Waste Emission(ton/day)
Automated waste collection system (slot, automatic transport pipeline, collection place)		600,000	55
Transport truck (1ton)		200,000	55
Transportation fee of domestic waste		32,077	55
Final disposal facility (Incineration)		700,000	55
Bio bio-energizing system with automatic collection system	Bio-gasification	250,000	35(food Waste)
	Bio-fuel	250,000	20(Combustible Waste)
	Bio-circulation	250,000	55

한편, 바이오에너지화 시스템은 바이오 가스화, 연료화 시설과 바이오 에너지 순환시설로 구성하였다. 바이오가스화 시설의 경우, 음식물쓰레기 35 톤/일 처리규모의 혐기성 소화로 체류시간 15일, 고형물 농도 10%, 메탄수율 0.42 톤 메탄/kg VS(Volatile Solid)로 계획하였으며 이 때 발생하는 메탄가스를 이용하여 300일 동안 발전한 전력을 단위 환산하여 CO₂ 발생 저감량으로 산정하였다. 단, 메탄 저위발열량 8,600 kcal/톤CH₄, 메탄가스를 정제하여 사용할 경우의 소요에너지를 2,150 Kcal/KWh로 설정하고, 30% 발전 효율로 가정하였다.

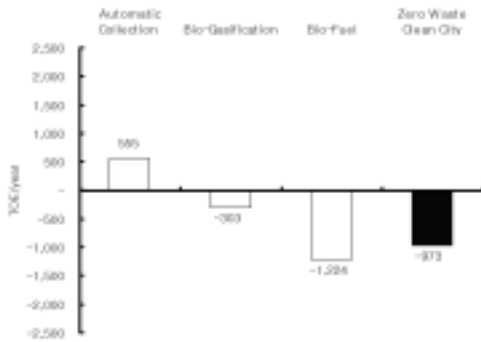
바이오연료화 시설의 경우에는 일반가연성쓰레기 발생량 20 톤/일을 기준으로 용량설정하여 가연성 폐기물 1 톤당 바이오연료 0.5 톤 생산을 가정하였다. 바이오 연료의 발열량을 4,800 kcal/kg, 발전효율은 34%로 하여 연중 300일 동안의 바이오 연료를 이용한 발전 전력량을 단위 환산하여 CO₂ 발생 저감량으로 산정하였다. 상기 예측에서의 단위환산은 에너지관리공단 석유환산톤 및 이산화탄소배출량 자동계산 프로그램을 이용하였다¹⁹⁾.

5.2.2. 폐기물 관련 환경기초시설 건설비

생활폐기물 처리방식에 따른 폐기물 관련 환경기초시설 건설비를 비교분석하기 위해서 시설별 건설단가를 Table 4에서 설정하였다. 생활폐기물 자동집하시설은 투입구, 압송관로, 집하장을 포함하여 집하하는 생활폐기물 톤당 6억으로 가정하였다. 운반에 소요되는 차량운반비용은 2004년 환경부 평균치인 32,077 원/톤을 적용하여 하루 생활폐기물 발생량에 따른 운반비용과 특장차 대당 2억원으로 55대로 추정한 비용으로 차량운반에 소요되는 사업비를 산출하고, 최종 처리·처분은 소각시설로 설정하여 톤당 7억으로 산정하였다. 한편, 집하장에 연계되어 설치되는 바이오가스화, 연료화, 순환공정 시스템은 건설비를 집하시설의 부대설비에 연계하여 설치하는 점을 감안하여서 부지비 등의 부대비용을 제외한 설비비용만을 산정하여 톤당 각 시설별로 2.5억으로 가정하였다. 단, 비교분석 대상지구내에서의 생활폐기물의 발생량은 4.1절 또는 Table 2에서처럼 음식물쓰레기 35 톤/일, 일반 가연성 쓰레기 20 톤/일로 설정하고 생활폐기물 총55 톤/일로 계획하였다.

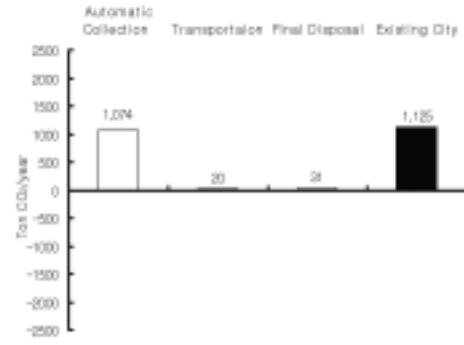


(a)

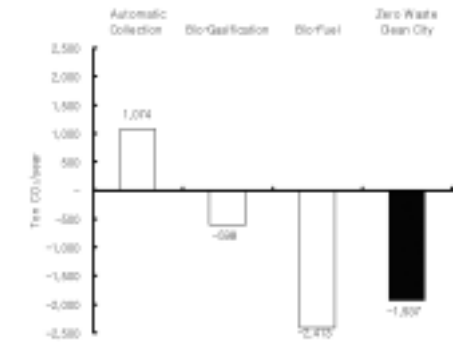


(b)

Fig. 7. Comparison of annual oil consumption estimation in the case of the existing city with the zero waste clean city, (a) Existing city, (b) Zero waste clean city.



(a)



(b)

Fig. 8. Comparison of annual CO₂ emission estimation in the case of the existing city with the zero waste clean city, (a) Existing city, (b) Zero waste clean city.

5.3. 분석결과

5.3.1. 탄소저감효과

Fig. 7은 기존 생활폐기물 처리에서의 연간석유사용량의 예측결과이다. 기존의 자동집하, 차량운반, 소각을 통한 생활폐기물 처리에서는 석유사용량이 자동집하시설에서 연간555 TOE이고, 차량운반에서 연간10 TOE, 소각처리에서 연간16 TOE으로 연간 총 580 TOE를 사용하게 된다고 예측되었다. 폐기물 제로 청정도시에서는 석유사용량이 자동집하한 후에 바이오가스화, 연료화를 함으로 석유대체효과에 따라 오히려 연간 -973 TOE로 집계되었다. 이는 기존 처리방식에 비교하여 무려 약 270% 저감가능한 도시가 조성될 수 있다고 사료된다.

또한 Fig. 8은 기존 생활폐기물 처리에서의 CO₂ 발생량 예측결과이다. 기존의 자동집하, 차량운반, 소각을 통한 생활폐기물 처리에서는 자동집하시설에서 CO₂ 1,074 톤이 발생되고, 차량운반에서 CO₂ 20 톤, 소각처리에서 CO₂ 31 톤으로 총 CO₂ 1,125 톤이 발생된다고 예측되었다. 폐기물 제로 청정도시에서는 자동집하한 후에 바이오가스화, 연료화를 함으로 오히려 탄소발생량이 CO₂ -1,937 톤으로 집계되었다. 이는 기존 처리방식에 비교하여 CO₂ 저감량이 3,062 톤이 증가함으로써 기존 생활폐기물처리시설에 비해 무려 약 2.7배

CO₂ 저감이 증대된 도시가 조성될 수 있다고 사료된다.

위와 같은 연료절감 및 CO₂ 발생 저감 효과와 더불어, 바이오에너지화 시스템에서 생산된 에너지는 도시 내의 압송관로, 집하시설 및 기타 공공시설 운영 에너지로 활용이 기대된다.

5.3.2. 폐기물 관련 환경기초시설 건설비

기존도시와 폐기물 제로 청정도시에서의 생활폐기물처리 방식에 따른 시설의 소요비용을 Fig. 9에서 비교하였다. 기존도시의 경우, 생활폐기물을 자동집하 및 운반하여 최종 처리·처분할 경우의 관련 환경기초시설별 건설비를 예측하였다. 한편, 폐기물 제로 청정도시에서는 생활폐기물을 자동집하한 후에 바이오가스화, 바이오연료화, 바이오순환 시스템으로 구성된 바이오에너지화 시스템을 집하장내에 연계 설치하는 방안으로 건설비를 예측하였다.

기존도시에서는 자동집하시설과 최종처리처분 시설의 건설비용이 대부분을 차지하고 있으나, 폐기물 제로 청정도시에서는 바이오에너지화 시스템 추가설치 비용이 발생되나 운반비용과 최종처리처분 시설에 대한 건설 부담축소가 예상되며, 도시 건설에서의 폐기물 처리시설에 대한 총 건설비는 기존도시에 비교하여서 약 15% 절감이 예측되었다.

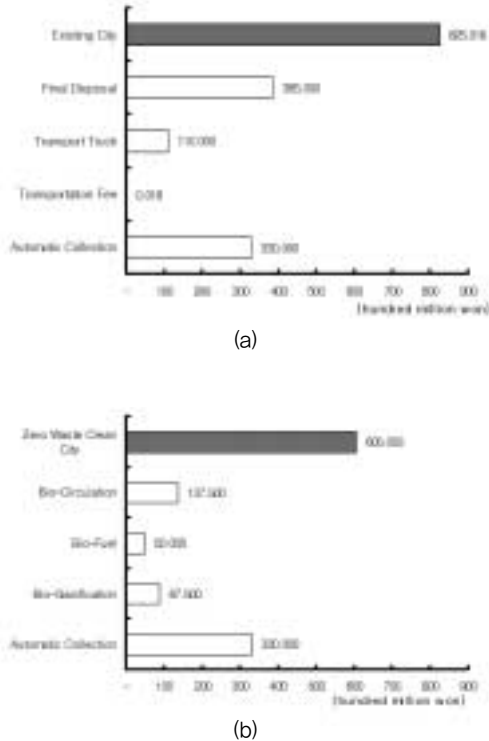


Fig. 9. Comparison of the construction cost for domestic waste(total 55 ton/day including food waste 35ton and combustible waste 20ton) treatment facilities in the case of the existing city with zero waste clean city, (a) Existing city, (b) Zero waste clean city

6. 결론

바이오매스 순환거점을 도심 내에 구축하여 발생하는 음식물쓰레기와 일반 가연성쓰레기인 생활폐기물을 수거 및 집하한 후에 바이오매스로 활용하고 이를 이용하여 생성된 에너지는 주거 및 상업단지 등에 공급하는 폐기물 제로 청정도시를 구상할 수 있었다. 바이오매스 순환거점으로는 바이오에너지화 시스템을 연계한 생활폐기물 자동집하시설을 설정하였다. 바이오에너지화 시스템은 바이오가스화, 연료화, 에너지순환 공정으로 구성하였다. 음식물쓰레기는 처리하면서 바이오가스화하고, 일반 가연성 쓰레기는 열분해/건조하여 연료화하며, 발생하는 바이오가스와 연료는 에너지 순환공정에서 발전기, 보일러의 연료로 사용되게 하였다. 또한, 수용인구 130,998명으로 세대당 2.5인 기준으로 53,039세대를 수용하고, 면적 4,090,160 m²로 가상한 사업 대상지구에 대하여 생활폐기물의 발생량은 음식물쓰레기 35 톤/일, 일반 가연성 쓰레기 20 톤/일로 설정하고 생활폐기물 총 55 톤/일로서 탄소저감효과 및 건설비 저감효과를 비교하였다. 기존 처리방식에 비교하여 폐기물제로 청정도시에서는 연간석유사용

량 및 탄소배출이 무려 약 2.7배 저감가능한 도시가 조성될 수 있다고 예측되었다. 특히, 생활폐기물처리방식에 따른 시설의 소요비용을 비교한 결과, 폐기물 관련 환경기초시설 건설비가 기존도시에 비교하여서 폐기물제로청정도시에서는 약 15% 절감이 예측되었다.

이러한 점으로부터 폐기물 제로 청정 도시건설을 통하여 기후변화에 대응한 저탄소 도시로의 접근이 가능하다고 사료된다. 바이오매스 순환거점을 도시에 적용할 수 있는 대상으로 바이오매스 에너지화 시스템을 연계한 생활폐기물 자동집하시설을 제시하였으나, 그 밖의 환경기초시설도 그 대상으로 활용이 가능하다. 환경기초시설에는 음식물쓰레기 집하장, 하수처리장, 집단에너지 시설 등이 있다. 이러한 시설은 기존 건설방향은 대부분이 도시외곽지역에 위치하여 대규모 센터를 구축하고 있으나 향후 바이오매스거점 구축을 통한 폐기물 제로 청정 도시 구상에서는 도심 내로의 분산접근을 통한 에너지 공급원으로서의 역할이 요구된다. 이를 통한 바이오매스 순환도시에서는 쓰레기 운반, 소각이 불필요하며 폐기물 처리장 규모나 기능이 축소되어 친환경적이며 탄소중립의 도시로 탈바꿈이 기대된다. 그러나 생활폐기물은 종래에 저장, 수거, 운반 과정에서는 도시 내에서 남비현상 발생으로 쾌적성 저해요인으로 적용이 난해한 실정이며, 향후에 바이오매스 에너지화 시스템에 대한 보다 심도 깊은 실증연구와 신사업으로 진출가능한 제도적 뒷받침이 개선되어야 한다고 판단된다.

KSEE

참고문헌

1. 대한주택공사, 기후변화 대응 Zero Emission City 실현 예비 연구(2009).
2. 대한주택공사, 미래를 여는 저탄소 녹색성장 이야기(2009).
3. 대한주택공사, 미래주택 및 도시에서의 에너지자원 적용 방안 연구(2007).
4. 박천규, "기후변화의 영향 및 우리의 대응방향", 대한환경공학회지, **30(12)**, 1179~1182(2008).
5. 에너지관리공단, 신재생에너지원별 공급비중(2006).
6. 동종인, "기후변화시대에 대비한 환경 에너지 및 온실가스 저감기술", 대한환경공학회지, **30(12)**, 1203~1206(2008).
7. 환경부, 음식물류 폐기물 처리시설 발생폐수 육상처리 및 에너지화 종합대책(2007).
8. 지식경제부, 그린에너지산업 발전전략(2008).
9. 이귀호, 주홍신, "녹색기술 연구개발 정책방향", 대한환경공

- 학회지, **31**(3), 163~172(2009).
10. Sam N., Paths to a low-carbon economy - the Masdar example, *Energy Procedia*, 3951-3958(2009)
 11. Summerfield, A. J., Lowe, R. J., Bruhns, H. R., Caeiro, J. A., Steadman, J. P. and Oreszczyn, T., "Milton Keynes Energy Park revisited: Changes in internal temperatures and energy usage, *Energy and Buildings*", **39**(7), 783-791(2007)
 12. Bauer, D., Marx, R., Nußbicker-Lux, J., Ochs, F., Heidemann, W. and Müller-Steinhagen, H., German central solar heating plants with seasonal heat storage, *Solar Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online, (2009)
 13. 환경부, 경제살리기와 기후변화대응을 위한 폐기물에너지화 종합대책(2008).
 14. 정원식, 김이태, 쓰레기 관료수송시스템의 해외 적용사례 분석을 통한 효율적인 국내 적용방안 도출, 대한환경공학회 2005 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 575-578(2005)
 15. 정영훈, 김호겸, 오정은, 쓰레기 집하시설, 대한설비공학회 2006년도 운송설비부문 학술강연회, pp. 22~37(2006)
 16. 배재근, 주요섭, 박정수, "음식물쓰레기 염분농도가 퇴비화 및 식물성장에 미치는 영향", *유기물자원화(구-폐기물자원화)*, **10**(4), 103~111(2002)
 17. 박석환, "음식물쓰레기의 호기성 퇴비화 전과 후의 세척에 따른 염분도와 퇴비화효율 비교", *한국환경보건학회지*, **31**(2), 160~164(2005)
 18. 김남천, 장병만, "삼중염을 이용한 음식물쓰레기 퇴비 중 염분 제거 및 공정효율화 실험", *유기물자원화(구-폐기물자원화)*, **14**(2), 83~90(2006)
 19. <http://co2.kemco.or.kr/directory/toe.asp>