
도시 하수처리장, 처리에서 생산기지로! 신재생에너지¹⁾의 생산기지: 물재생센터

작성자: 최영준

1. 정책수행시기

서울시 하수도 시스템을 운영, 관리하는 부서에서는, 2007년부터 각 하수처리장 특성에 적합한 신재생에너지 도입 계획이 수립되어 추진 중이었다.

하지만, 2012년 새로운 서울시 에너지 정책으로 ‘원전하나줄이기’ 정책이 수립되어, 서울시 전체를 포괄하는 에너지 정책이 추진되자, 서울시 에너지 정책에 기여하기 위한 방안의 하나로, 물재생센터의 특성과 자원을 활용한 신재생에너지 생산 정책을 보다 적극적으로 추진하게 되었다.

원전하나줄이기

2012년 4월, 서울시는 지역에너지 정책의 하나로, ‘원전 하나 줄이기(One Less Nuclear Power Plant)’를 추진하겠다고 발표했다. ‘원전 하나 줄이기’ 에너지 정책은, 후쿠시마 원전사고, 전국 순환정전(2011년 9월 15일) 등 에너지 위기와 지구온난화 등 기후변화에 효과적, 선제적으로 대응하는 것을 목적으로 시작되었다(유 외, 2015). 에너지를 절약하고, 신재생에너지를 생산함으로써, 2014년까지 원자력 발전소 1기에서 생산하는 200만 TOE만큼의 에너지를 절감하는 것을 목표로

1) 기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나, 햇빛·물·지열(地熱)·강수(降水)·생물유기체 등을 포함하는 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지: 1) 태양에너지, 풍력, 수력, 연료전지, 해양에너지, 지열에너지, 수소에너지, 2) 대통령령으로 정하는 기준 및 범위에 해당하는 폐기물에너지, 3) 생물자원을 변환시켜 이용하는 바이오 에너지로서 대통령령으로 정하는 기준 및 범위에 해당하는 에너지, 4) 석탄을 액화·가스화한 에너지 및 중질잔사유(重質殘渣油)를 가스화한 에너지로서 대통령령으로 정하는 기준 및 범위에 해당하는 에너지, 5) 그 밖에 석유·석탄·원자력 또는 천연가스가 아닌 에너지로서 대통령령으로 정하는 에너지, 6) 하수열 에너지원(하수열, 하천수열 등 미활용에너지의 경우 법규상 신·재생에너지로 분류되지 않지만 서울시는 이를 포함시켜 신재생에너지 정책을 추진하고 있다).

하였으며, 당초 계획보다 6개월 앞당긴 2014년 6월 204만 TOE를 초과 달성하였다(유 외, 2015).

원전하나줄이기 2단계

2014년 성공적인 ‘원전하나줄이기’ 1단계 사업의 성과를 바탕으로 서울시는, ‘원전하나줄이기’ 2단계 사업을 시작했다. 2단계 사업은, 친환경에너지 관련 제도와 생산 및 소비구조의 변화를 통해 사업의 의미와 가치를 실현하겠다는 목표를 가지고 있으며, 1단계 사업 중 노정된 조직적 문제를 보완하고, 신기술의 적용과 이미 도입되거나 시행되고 있는 정책에 대한 연구를 통해 새로운 과제를 적극적으로 발견하기 위한 목적으로 기획되었다. 서울시의 ‘원전하나줄이기 2단계’의 핵심목표는 전력 자립률 20% 달성이다(그림 1). 2013년 4.2%에 불과했던 서울시의 전력 자립률을 2020년 20%까지 확대하며, 이 가운데 46%는 신재생에너지와 열병합발전을 통해 달성하고, 나머지 54%는 에너지 효율 개선 및 절약을 통해 달성한다는 계획이다.

서울시의 경우, 2011년 9월 15일 서울을 비롯한 전국 곳곳에서 발생했던 대규모 정전사태와 같은 전력 위기에 대비, 무정전 도시 구현을 위한 최소한의 자립기반을 마련할 필요가 대두되었다. 특히 화석연료를 포함한 에너지 절감노력과 함께, 신재생에너지의 분산형 생산과 이용효율화라는 과제가 중요한 해결책으로 제안되었다.

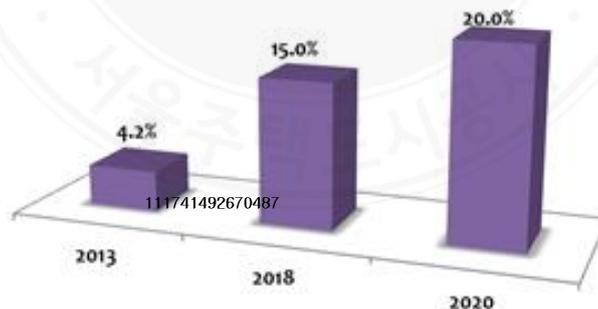


그림 1. 서울시 전력 자립률 목표 (Lee, 2015)

서울시 전력 자립률을 높이기 위해서는, 에너지 소비 도시에서 생산 도시로 탈바꿈하고, 이를 위해서 대형, 중앙 집중형 에너지 생산 및 분배 시스템 보다 분산형 에너지 시스템으로 에너지 생산 공급 구조를 바꾸어 나갈 필요가 있다. 2020년까지 20% 에너지 자립률 목표를 달성하기 위해서, 전력 수요 절감을 통해 9,553 GWh의 전력을 절감하고, 신재생에너지 생산으로 2,711 GWh, 화력과 열병합 발전을

통해 5,444 GWh의 전력을 생산하는 등, 2020년에 총 8,155 GWh의 전력을 생산할 계획이다(그림 2).



그림 2. 서울시 원전하나줄이기 2단계 사업을 통한 전력생산량 전망(Lee, 2015)

2. 당시의 상황: 정책 도입배경

서울시 하수도 시스템

조선시대 만해도 가정에서 배설되는 오수는 노상과 저지대로 자연적으로 집수되어, 구거(溝渠)를 통해 하천으로 유입되거나 지하로 침투되었다. 다만, 청계천의 경우, 특별히 치수를 위한 관리와 준설공사가 행해졌다(그림 3). 기록에 따르면, 태종 12년(1412년) 하천의 범람을 막기 위해 청계천 및 옥천을 대대적으로 준설 및 보수하였다고 한다(서울특별시 물관리국, 2009a). 물론 이전에도 기초적인 하수도 기능을 담당하던 구조물들이 발견된 사례²⁾가 있어, 기록상으로 추적될 수 있는 하수도 관련 시설의 역사는 신라시대까지 거슬러 올라간다.

근대적 개념의 하수도가 도입된 것은, 1921년 이후라고 할 수 있는 데, 1943년까

2) 1983년 황룡사지 발굴 조사에서 배수로와 배수암거의 잔형이 발견되어, 신라시대에도 하수처리법이 적용되었다는 것을 알 수 있다고 한다(서울특별시 물관리국, 2009a)

지 지속적으로 총 225 km에 이르는 간선 및 지선의 하수도가 개량, 정비, 건설되었다. 당시 하수도 시스템의 건설과 운영 목적은, 시가지 범람 방지, 하수의 정체와 이로 인한 오염 방지, 그리고 방류분뇨의 처리였다.

이후의 하수도는 주로 도시 우수배제를 목적으로 이루어졌으나, 도시화와 산업화에 따른 고도성장과 생활수준 향상으로 분뇨처리 방식이 종래의 수거식에서 수세식으로 변화되어 단위 오염 부하량이 증가하고, 하천 수질오염이 문제가 되면서 하수처리장 건설과 하수도 건설 및 정비에 대한 관심이 증가하기 시작했다.



그림 3. 청계천의 예전 모습(뒤쪽의 다리가 수표교)

1953년 한국전쟁이 끝나고 난 뒤, 1954년부터 전쟁복구를 위한 각종 원조에 힘입어 서울시의 하수도 건설 및 정비가 대대적으로 이루어지기 시작한다. 청계천, 신당동과 혜화동 지역의 개수공사 및 치수사업에 많은 예산이 투입되었고, 1959년 청계천 1차 복개 사업이 준공되었다. 같은 해 3월 17일 서울시 수도국 하수과가 발족되어 하수관리를 위한 행정조직이 기능하기 시작하게 되었다. 1966년에는 하수도법이 제정(건설부)되어 하수도 관리를 위한 제도적인 장치가 마련되었다. 1965년 서울시 최초의 하수처리장인 청계천 하수처리장 건설계획이 수립되었고, AID 차관 350,000 달러로 사업이 시작되어, 1976년 하루 15만 m³규모의 청계천(중랑) 하수처리장이 준공되어 서울시 하수가 본격적으로 처리되기 시작했다.

하수도 보급은 상수도 보급에 비해 늦은 편이었는데, 1970년의 하수도 보급률⁴⁾은 27.9%로 같은 해 상수도 보급률(85.6%)의 1/3수준에 불과했다. 당시의 상황을 보면 대부분의 하수와 빗물이 하수관거가 아니라 지상에 그대로 노출되었다는 것으로 당시 서울의 위생수준이 열악했음을 알 수 있다. 그러나 이때까지만 해도 하수처리

3) <https://goo.gl/30I2cR>

4) 총인구 중 공공하수처리시설 및 폐수종말처리시설을 통해 처리되는 하수처리구역 내 하수처리인구의 비율을 말한다. 하수도 보급률=(하수처리구역 내 인구/총인구)×100으로 나타낼 수 있다. [곽동희, 2007, 상하수도용어집]

시설의 필요성을 인식하지 못했다. 전쟁 후 서울로 몰려든 빈민들이 청계천변 판자촌에 살면서 청계천이 거의 하수처리장 역할을 했고, 여타 서울시내 작은 하천들도 청계천과 크게 다르지 않았다. 하수도 보급률이 50%를 넘긴 것은 1977년에 들어서였으며, 80년대부터 급속하게 확충되기 시작하였다. 1982~1983년 1년 사이 하수도 보급률은 68.8%에서 85.9%로 약 17% 증가하였다. 1980년대 중반 들어 서울시의 하수도 보급률은 90%를 넘어섰고, 1997년에는 100%를 달성하였다. (서울연구원, 2010)

1986년 아시안게임에 이어, 1988년 올림픽게임이 서울에서 치러지게 되자, 도시기능의 개선을 위해 하수처리시설이 급격하게 증설되었다. 이에 따라 1980년대 중반을 넘어서면서 서울시 하수도 보급률은 90%를 넘어섰다. 1986년 난지 하수처리장을 기점으로 중랑(청계천), 탄천, 서남, 난지 등의 하수처리장이 신설 및 증설되어, 1997년 하수도 보급률은 100%에 도달하게 된다. (표 1).

표 1. 서울시 물재생센터 현황

	중랑	난지	탄천 (민간위탁)	서남 (민간위탁)	계
시설용량 [M m ³ /day]	159	86	90	163	498
처리구역	10개구	7개구 1개시	4개구 2개시	9개구 1개시	서울시 25개구 경기도 4개시 일부

2005년부터는 하수처리장이라는 명칭을 물재생센터로 개명하고, 하수를 처리하는 것 뿐만 아니라, 유용하고 필요한 자원의 하나로서의 수자원을 재생하기 위한 기술적, 정책적 노력을 기울이게 되었다(그림 4).

Assembly)에서 post-2015 SDG 의사 일정이 채택, 추진되게 되었다.

‘지속가능한 개발(Sustainable Development)’는 여러 가지로 정의될 수 있지만, 국제 지속가능개발 연구소(International Institute for Sustainable Development, IISD)에 따르면, 가장 널리 사용되는 정의는 Brundtland Report로 알려져 있는 ‘Our Common Future’라는 보고서에서 사용된 정의이다. “지속가능한 개발이란, 후세대들이 자신들의 필요를 충족시킬 수 있는 능력에 영향을 주지 않으면서, 현재의 필요를 충족시킬 수 있도록 하는 개발”을 말한다. UN의 ‘지속가능발전목표’는 17개 목표와 169개의 세부추진목표로 구성되어 있다(그림 5).



그림 5. UN의 지속가능한 개발목표(Sustainable Development Goals)

출처: <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>

111741492670487

193개국 모든 UN 회원국들이 합의한 지속가능한 개발목표의 실제적인 이행주체는 도시가 되어야 할 것이다. 이런 의미에서 서울시는 2016년 6월 8 - 10일, ‘지속가능한 개발목표를 위한 도시정책에 대한 국제포럼(International Forum on Urban Policy for the Sustainable Development Goals)’를 개최한 바 있으며, 향후 지속가능한 개발목표를 달성하는데 앞장 설 것을 약속했다.

지속가능한 개발의 전제는 자원의 효율적 이용과 재이용 혹은 지속가능한 생산이라고 할 수 있다. 따라서, 모든 부문에서의 자원의 효율적 이용과 생산은 이러한 의지와 계획을 뒷받침하는 데 필수적이라 할 수 있다. 이런 의미에서 하수처리시스템에서의 에너지 생산은, 반드시 포함되어야 할 시정 어젠더가 되었다.

Water-Energy NEXUS

수자원을 그 자체로 이용하거나, 처리를 거쳐 수돗물로 만들어 공급하는 경우, 그리고 사용된 하폐수를 차집⁵⁾하고, 처리하고, 방류하거나 재이용하는 경우, 또는 해수를 담수화하는 경우, 모든 수자원의 생산과 이용에는 에너지가 개입될 수 밖에 없다.

2011년 미국에서 물과 관련된 시스템에 사용된 에너지는, 전체 에너지 사용량의 12.6%이다(<http://goo.gl/2pFvgQ>). 하수처리에 사용되는 에너지는, 미국 전체 에너지 사용량의 0.1~0.3% 정도이다(Stillwell et al., 2010). 우리나라의 경우, 공공부문의 전력사용량은 전체 사용량의 4.6%이고, 이 가운데 1.02%가 상하수도 부문에서 사용되고 있다(최, 2015). 서울시의 경우에는 상수도가 전체 전력 사용량의 0.8%를, 그리고 하수도가 0.9%를 사용하고 있다(2013).

또한, 에너지의 생산을 위해서도 물이 필요하다. 화력발전의 냉각수나 수력발전용수, 광물자원의 생산을 위해 사용되는 물, 그리고 연료 생산에 필요한 물 등이 에너지 생산에 사용되는 수자원이라고 볼 수 있다. 미국의 경우, 화력발전의 냉각용으로 사용되는 물은 전체 에너지 생산에 필요한 물의 48.7%를 차지하고 이는 담수취수(freshwater withdrawal⁶⁾)의 52%, 담수사용량의 10%에 해당한다(그림 6).

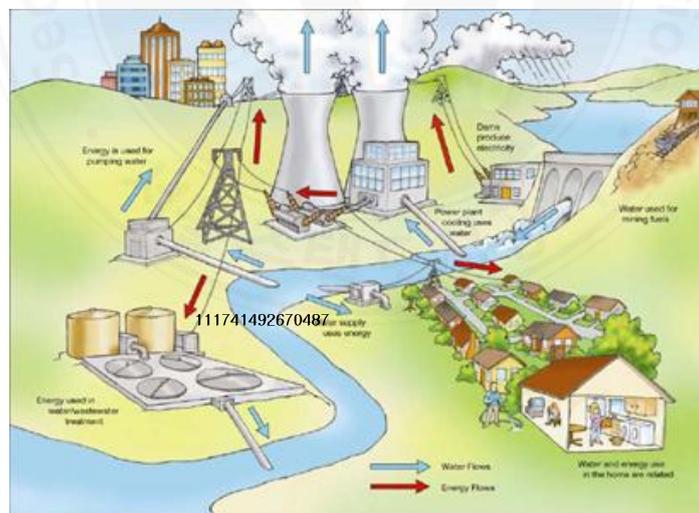


그림 6. 물과 에너지의 넥서스관계

출처:<http://goo.gl/UCozax>

5) 서울시의 하수도 관거 시스템은 중력을 이용한 자연유하방식으로 운영되기 때문에, 차집이나 방류를 위한 이송 에너지는 사용할 필요가 없다.

6) 에너지 생산에 사용되는 물은 대부분 ‘withdrawal (취수)’ 이다. 즉, 사용 후, 원래 상태에 큰 변화 없이 기원이 된 수체(water body, water system)으로 회귀되는 물 사용을 ‘취수(withdrawal)’ 이라고 한다.

하수도 시스템에서 선순환적인(virtuous) 물-에너지 넥서스(Water-Energy NEXUS)를 구축하기 위한 접근법으로는, 1) 에너지 절약, 2) 시스템 효율화, 3) 최적 관리 전략(Best Management Practice, BMP) 활용, 4) 신재생에너지 생산이 있다(최, 2015).

미국 에너지부(Department of Energy, DOE)의 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory)의 시나리오에 따르면, 2050년까지 신재생에너지 사용비율을 80%로 올리게 되면, 발전분야에서 사용하는 수자원량의 50%를 절감할 수 있을 것이라고 한다(NREL, 2012).

UN의 보고서에 따르면, 2050년까지 세계 인구는 92억명에 이르게 될 것이고, 기본적인 에너지 사용량은 80% 증가할 것으로 전망되고 있다(Le Blanc, 2012). 신재생에너지가 차지하는 부분 10% 남짓할 것으로 판단되지만, 현재로서는 가장 지속가능한 대안이기 때문에, 물재생센터에서 생산되는 신재생에너지는 그 의미가 크다고 할 수 있다.

대부분의 하수처리장에서는, 에너지 효율 증대 방안과 처리 공정의 변화를 통해 30% 정도의 에너지 사용을 줄일 수 있다(Means, 2004). 특히, 포기조와 펌프의 효율적인 운영만으로도 하수처리에 사용되는 전체 에너지의 3~6%를 절감할 수 있다(Hoppock and Webber, 2008).

따라서, 하수처리시설의 효율적 운영과 함께, 신재생에너지 생산은, 지속가능한 물-에너지 넥서스(Water-Energy NEXUS)의 중요한 요소일 수 밖에 없다.

기후변화와 물-에너지 넥서스

111741492670487

기후변화로 인한 환경문제는 물론, 물 관련 문제에 대한 논의는 너무나 많으므로 본 보고서에서는 생략할 것이다. 다만, 기후변화로 인해, 물-에너지 넥서스가 물-에너지 갈등관계(Water-Energy Conflict)에 대해 언급하는 것은, 서울시의 하수처리 시설 신재생에너지 생산정책의 배경을 이해하는데 도움이 될 수 있을 것이다. 기후변화로 인한 수자원의 가용성(availability)이 감소하게 될 것이며, 가용성을 높이기 위해 필연적으로 에너지 사용량이 증가할 수 밖에 없다. 에너지 수급과 재정적 부담은 물-에너지 갈등관계를 증폭시킬 수 밖에 없을 것이다. 2015년도의 가뭄으로 인한 문제는 다행히 유가하락으로 인한 에너지 수급 문제가 완화됨으로써, 물-에너지 갈등관계가 표면화되지 않았지만, 향후 기후변화로 인한 물-에너지 갈등관계의 악화는 언제든지 발생할 수 있기 때문에, 하수처리 시설을 포함한 수자원

시스템의 에너지 자립화 혹은 에너지 자립율 향상의 정책적 필요성은 상존한다고 볼 수 있다.

3. 정책의 중요성

독일의 경우, 도시 전체에서 필요로 하는 에너지의 100%를 신재생에너지를 통해 공급하는 지역이 20여곳에 이르고 있다. 이 가운데 15개 도시가 속해 있는 쉘레스비히홀슈타인 주는, 독일 최초로 100% 신재생에너지를 사용하는 주가 되었다. 하지만, 일년 내내 강풍이 부는 독일 북부지역이라는 점에서 다른 지역이나 도시의 사례가 되기에는 어려웠다. 또한 대부분의 신재생에너지 공급률 100%의 도시는 대개 1만명 이하의 소규모 도시였다. 하지만, 2013년 6월 프라운호퍼 연구소가 보고한 프랑크푸르트 시의 ‘기후 보호를 위한 마스터플랜’에 따르면 프랑크푸르트 시는 2050년까지 탄소배출량을 1990년 대비 95% 이상 줄이고, 모든 에너지 수요를 신재생에너지로 공급하기로 했다고 한다(신, 2016).

서울시의 경우에는 이러한 기후변화에 대비한 장기적, 전략적 계획이 아니라 하더라도, 2011년 발생한 대규모 정전사태와 같은 비상상황에 대처할 수 있는 능력을 갖추기 위해, 전기를 절약하고, 신재생에너지 생산을 확대할 필요성이 시급하게 대두되었다. 따라서, 어떠한 상황에서도 필수적인 도시기반시설을 가동할 수 있도록 전력 자립율을 높이는 것이, 서울시 에너지정책의 우선순위로 부상하게 되었다(유외, 2015). 시스템의 효율성을 높이고, 신재생에너지를 생산해내기에 가장 적합한 도시기반시설 가운데 하나가 물재생센터라고 할 수 있다.

물-에너지 연관(Water-Energy NEXUS)이 선순환적으로 이루어지도록 하기 위해서는, 물 관련 공정(process)에서 필요한 요소는, 시스템의 효율성 향상과 에너지의 생산이라고 할 수 있다. 또한, 하수처리장, 혹은 물재생센터로 유입되는 하수는 많은 양의 유기물을 포함하고 있어 그 자체가 에너지 원이라고 할 수 있으며, 그런 의미에서, 물재생센터의 정체성 혹은 주요 기능을, 하수 ‘처리’에서 에너지 ‘생산’으로 전환하는 것은 의미 있는 일이라고 할 수 있을 것이다.

하수도는 자본과 에너지가 집중한 프로세스로 구성되어 있다. 따라서, 방류수의 수질 기준이 강화될 경우, 이는 처리 시스템의 건설 확대로 이어질 수 밖에 없어, 지자체에 재정적인 부담을 가중시키게 된다. 시스템 효율 향상과 신재생에너지 생산을 포함한, 하수처리 시설의 에너지 자립화는 지자체의 재정부담을 완화시키는 데에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

4. 다른 정책과의 관련

신기후체제에 관한 ‘파리협정’ 채택

지난 2015년 12월 프랑스 파리에서 개최된 제21차 기후변화당사국총회(COP21)에서는 신기후체제에 대한 ‘파리협정(Paris Agreement)’가 채택되었다. 이 협정은 2020년 이후부터 교토 의정서 체제를 대체하게 되는 새로운 기후체제에 대한 것이었는데, 선진국과 개도국 구분 없이 모든 국가가 전지구적인 차원의 기후변화 대응노력에 참여하도록 하였다는 데에 큰 의미가 있다(김, 2016).

파리협정의 주요 내용은, 전지구적으로 산업화 이전과 비교해서 지구평균기온 상승을 2 C 보다 ‘상당히 낮은 수준’으로 유지하고, 온도 상승을 1.5 C이하로 제한하기 위해 공동으로 노력한다는 것이다. 또한 각 국가에게 2020년까지 장기 저탄소 개발 전략(long-term low greenhouse gas emission development)을 마련하여 제출하도록 요청하였다(김, 2016). 이에 따라 우리나라는 2015년 6월, 2030년 배출 전망치(BAU) 대비 37% 감축안을 제시한 바 있다.

협정채택 국가들은, 온실가스 감축목표의 효과적 달성을 위해, 다양한 형태의 국제 탄소시장 설립에도 합의하였다.

저탄소 경제로의 이행과 지속가능한 발전

파리협정의 주요한 의미 가운데 하나는, 이번 협정으로 인한 신기후체제가 저탄소 경제로의 이행을 위한 플랫폼이 될 것이라는 것이다. 화석연료에 전적으로 의존하고 있는 우리나라의 경우, 저탄소 경제로의 이행을 위해서는, 에너지 효율 개선 사업과 더불어, 신재생에너지의 공격적인 생산과 활용정책이 필요하게 될 것이다.

111741492670487

탄소저감을 위한 기술적인 기반은, 에너지효율 개선, CCS⁷⁾, 신재생에너지 등이 주요 감축수단이 될 것으로 보이며, 이와 관련해서, 국내에만, 2030년 약 47.2조원의 시장형성이 전망되고 있다(원, 2016).

2011년, 서울시의 온실가스 배출량은 49,008천 톤CO₂eq로 전국 배출량의 9.8%를 차지했는데, 인구와 경제규모에 비해 전체 국가 발생량에서 차지하는 비중은 낮은 편이었다. 하지만, 배출형태를 분석해보면, 직접배출량의 감소와 간접배출량 증가가 두드러지는데 이는 석유, 석탄 등 직접 배출원에 의존하던 에너지 사용이 점차 전기 및 열에너지로 전환된 것을 의미한다(유 외, 2015). 서울시는, ‘원전하나

7) CCS: Carbon capture and storage

줄이기 2단계’에 포함된 사업을 통해, 2020년까지 온실가스 1,000만 톤 감축하겠다는 목표를 설정했다. 이는 2011년 대비 20.5%의 온실가스를 감축한 것과 같다. 이러한 목표는, 건물 에너지 효율개선이 가장 큰 부분으로 전체의 28%, 신재생에너지 생산, 절약실천, LED 보급을 통한 부분이 각각 21%, 그리고 수송부문 6%, 열 생산 부문 2%를 통해 달성될 계획이다⁸⁾(그림 7).

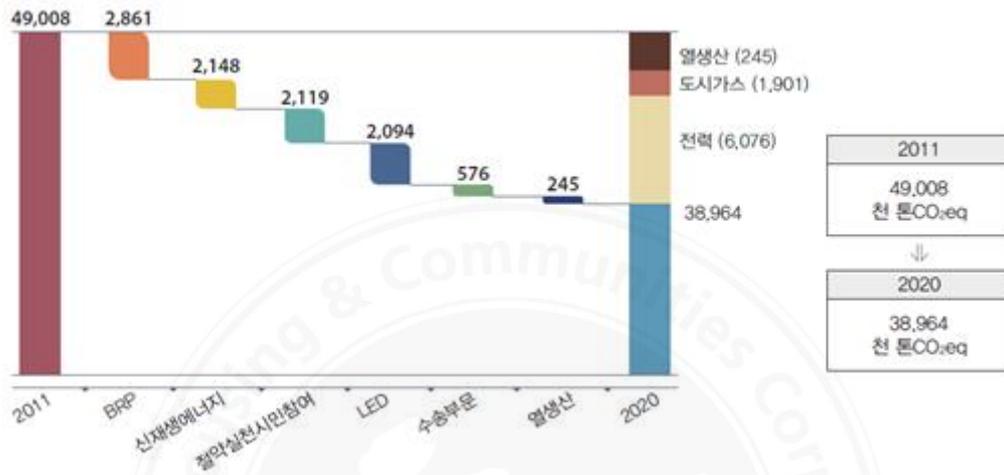


그림 7. 서울시 ‘원전하나줄이기 2’ 사업을 통한 온실가스 감축 목표(유 외, 2015)

특히 2016년 6월, ‘제 1회 지속가능한 개발목표를 위한 도시정책에 대한 국제포럼(International Forum on Urban Policy for the Sustainable Development Goals)’을 통해, ‘지속가능한 발전을 위한 지방정부의 주도권’을 천명한 바 있는 서울시의 경우, 지속가능한 발전을 위한 목표 달성과 이를 위한 주도권을 위한 기술적 기반의 확보는 매우 중요한 일이라고 할 수 있다. 따라서, 국가적인 차원에서는 물론, 서울시의 차원에서도 하수도 시스템에서의 신재생에너지 생산은 매우 큰 의미를 갖는다고 할 수 있다.

111741492670487

5. 정책목표

유기물이 풍부한 하수를 에너지와 자원으로 변환시킬 경우, 이론적으로 하수처리에 드는 비용의 약 10배에 해당하는 에너지를 생산할 수 있다고 한다. 현실적으로는 그보다 훨씬 적은 양의 에너지를 생산할 수 있지만, 실제로, 독일이나 덴마크의 하수처리 시설 가운데 에너지 자급률이 100%를 넘은 곳이 있다.

8) 건물 에너지 효율개선 2,861천 톤CO₂eq, 신재생에너지 생산 2,148천 톤CO₂eq, 절약실천 2,119천 톤CO₂eq, LED보급 2,094천 톤CO₂eq, 수송 576천 톤CO₂eq, 열 생산 245천 톤CO₂eq

2016년 현재 서울시 하수처리 시설의 에너지 자급률은 51.3%이다. 서울시는 2020년까지 하수처리 시설의 에너지 자급률을 100%로 향상시킬 계획이다(그림 8).

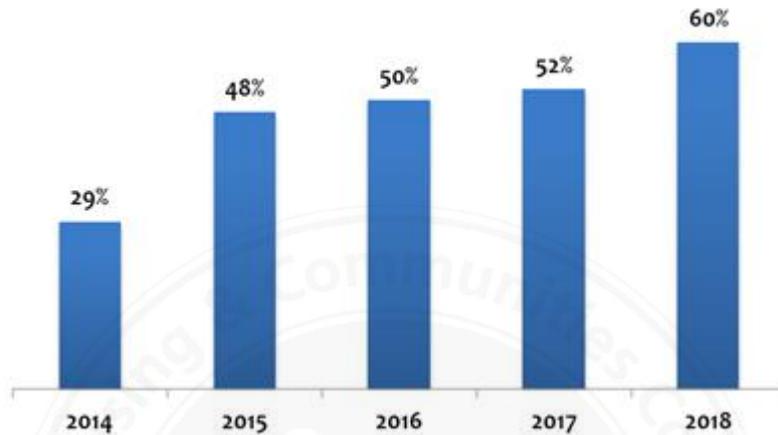


그림 8. 서울시 하수처리시설 에너지 자립율 목표

보다 구체적이고 장기적인 서울시 물재생센터 에너지 종합관리계획 수립을 위한 용역이 시행 중(용역기간 : 2016년 5월 ~ 2017년 1월)이며 이를 통해, 에너지 중심 경영을 위한 종합계획(단기, 중, 장기)안이 수립될 것이다.

이 에너지 종합계획에는

- 1) 물재생센터 에너지 자립율 목표 설정,
- 2) 물재생센터 에너지 경영 기반 확립 방안,
- 3) 에너지 생산 확대 및 에너지사업 활성화 방안, 그리고
- 4) 운영 관리 측면에서 에너지 절감 효율화 사업추진에 관한 사항이 정리될 것이다.

6. 주 정책내용

환경부, 하수처리시설 에너지 자립화 기본계획

환경부에서는 2010년 하수처리시설에 녹색기술을 적용, 에너지를 절감하고 신재생 에너지를 생산하기 위한 ‘하수처리시설 에너지 자립화 기본계획’을 발표했다. 이

계획에 따르면, 당시 국내 하수처리시설에서 사용되는 전력은 연간 총전력 사용량의 0.5%였으며, 공공하수처리시설의 에너지 자립율은 0.8%에 불과하다고 한다(환경부, 2010).

환경부의 에너지 자립화 계획은, 3단계로 구분되며, 1단계인 2010~2015년에는 에너지 자립율 18%, 2단계인 2016~2020년은 30%, 그리고 마지막 3단계인 2021~2023년은 50%를 목표로 삼고 있다. 환경부는 1) 에너지 절감, 2) 에너지 자립화 기반구축, 3) 미활용 에너지⁹⁾ 이용, 4) 자연에너지¹⁰⁾ 생산으로 과제를 세분화하여 사업을 추진해나갈 계획이다(환경부, 2010).

서울시 에너지 정책

최근 서울시의 주요 에너지 정책은 ‘원전하나줄이기’로 수렴된다고 볼 수 있다. 1단계 사업(2012~2014)은 원전1기의 생산량(200만 TOE)만큼 서울시의 에너지 사용량을 줄이고 신재생에너지를 생산한다는 것이었고, 2단계 사업은, ‘에너지 자립도시, 서울’을 목표로 추진하고 있다. 1단계 사업의 경우, 2014년도 상반기 신재생에너지 생산과 에너지 절감량은 총 204만 TOE로 목표를 초과달성 했다. 2단계 사업의 목표는 2020년까지 서울의 에너지 전력 자립율을 20%까지 올리는 것이다(서울특별시, 2014).

서울시의 에너지 생산 분야에서는 하수열 등 폐열을 회수하여 생산된 에너지가 전체 에너지 생산 및 절감량의 46%로 가장 큰 비율을 차지하고 있다(표 2, 그림 9).

표 2. 서울시 에너지 생산

생산 분야	계 [104TOE]	259,533	
발전(태양광, 연료전지 등)		57,403	22.1%
폐열(하수열, 소각열 등), 지열생산, 재생전력		119,218	45.9%
환경영향평가		82,912	31.9%

출처: 서울특별시, 2014

9) 소화가스, 소수력, 하수열

10) 태양광 발전, 풍력 발전



그림 9. 서울시 에너지 생산분야

출처: 서울특별시, 2014

하수도 시스템에서의 에너지 절감과 생산

앞서 언급된 ‘물재생센터 에너지 종합관리 계획’의 중점 추진 내용은, 크게 3분야로 정리될 수 있다. 첫째는 ‘에너지 자립화 기반 구축’으로, 노후시설의 개선과 슬러지의 자원화 사업이 포함된다. 둘째는, ‘에너지 절감 및 신재생에너지 생산 확대 추진’이다. 이를 위한 사업으로는, 1) 전력 수요 관리를 통한 에너지 절감, 2) 소화가스 에너지화 확대, 3) 슬러지 자체 건조처리 시설 증설, 4) 미활용 에너지 적극 발굴 등이 있다. 세번째는, ‘에너지 절감’으로, 하수처리시스템의 공정관리 강화 및 최적관리, 에너지 절감형 하수처리 공정의 도입 등이 있다.

111741492670487

7. 기술적 내용

하수처리 시스템에서, 지속가능한 물-에너지 넥서스를 구축하기 위한 접근법은 크게 두 가지로 정리해볼 수 있다. 하나는 시스템 효율 향상을 통한 에너지 절감이고, 다른 하나는 하수와 하수처리 시스템으로부터 신재생에너지를 생산해 내는 것이다. 구조적으로 볼 때, 시스템의 효율 향상을 기대할 수 있는 부분은, 하수 차집, 하수 처리, 물 재이용, 처리수의 방류로 구분해 볼 수 있다.

미국의 경우, 1 m³의 하수 차집에 사용되는 에너지는 568,000 kWh이라고 한다 (Klein, 2005). 노후관거를 통한 하수 차집 과정에서 발생하는 I/I (Inflow and Infiltration) 문제는 노후 하수관거 개선 비용과 합류식 하수관거로 유입된 불명수

로 인한 처리 효율 저하이다. 다행히 서울시의 경우, 중력을 이용해서 하수 차집이 이루어지기 때문에 이송에 필요한 에너지는 사용되지 않지만, 관거의 노후화로 인한 처리비용 증가는 가능성이 있는 시나리오이다.

하수처리 과정에서의 시스템 효율 향상은, 하수처리수에 대한 수질기준의 경직성과 하수관련 재정 운영 및 지원의 구조로 인해, 한계가 있을 수 밖에 없다. 미국의 경우, 2000년부터 2019년까지 20년 동안 하수처리 시스템 개선을 위해 투자되어야 할 예산규모가 130~209억 달러이다(CBO, 2002).

미국의 경우, 하수처리 공정 가운데 가장 많은 에너지를 사용하는 공정은 포기조로, 전체 에너지 사용량의 54.1%를 사용하고 있다. 하수 펌핑에 사용된 에너지는 14.3%, 혐기소화에 사용된 에너지는 14.2%를 차지하고 있다. 서울시의 경우에는 하수처리 자체 공정에 사용된 에너지는 전체의 64%, 슬러지 처리에 15%, 공통설비에 21%가 사용되고 있다(최, 2015).

물 재이용¹¹⁾은, 하수처리시 시스템의 에너지 절감보다는, 사용처에서 물순환이 이루어짐으로써 해서, 정수처리를 위한 원수의 이동과 처리, 그리고 배급수 과정에 필요한 에너지를 줄일 수 있다는 이점이 있다. 하지만, 서울시 하수처리수 방류도 역시 중력에 기반하고 있으므로, 이 공정에서의 에너지 효율 향상은 전체 시스템의 에너지 절감에 큰 기여를 하기 어렵다고 볼 수 있다. 따라서, 본 보고서는, 서울시 하수도 시스템의 에너지 절감 및 생산을 위한 물-에너지 넥서스의 범위를, 신재생에너지 생산이라는 부분에 한정해서 다루었다.

서울은 일 평균 약 407만 m³의 생활하수가 발생하고 있으며(2014년 기준), 이를 처리하는 과정에서 발생하는 바이오 가스 중 일부는 소각해왔다. 서울시의 4개 물재생센터 중 서북부지역에서 발생하는 하수를 처리하는 난지 물재생센터는 2013년 3월부터 전국 최초로 바이오 가스를 활용한 3.1 MW급 열병합 발전소를 설치하여 운영하고 있다. 또한 하수처리과정에서 발생하는 바이오 가스 26,000 m³/일을 한국지역난방공사에 공급하고, 한국지역난방공사는 이를 연료로 이용해 매년 20,000 MWh의 전기와 24,000 Gcal의 열을 생산해 8,000세대에 공급하고 있다. 또한 서울 동북부 지역의 하수처리를 담당하고 있는 중량물재생센터는 연간 598만m³의 소화가스를 생산하여 도시가스로 판매하고 있으며, 이를 위한 가스정제시설 등 사업비 78억 원은 전액 민간자본을 유치하여 설치하였다.

2016년 현재 서울시 하수처리시설에서 사용되는 에너지는 총 64,944 TOE 이며

11) 미국의 하수처리 방류수의 7~8%가 재이용되고(EPA, 2012), 서울시의 경우 2010년 현재 약 3%만이 재이용되고 있다. 서울시는 물 재이용율을 2020까지 14.4%까지 끌어올릴 계획이다.

(표 3), 이 가운데 전력사용량이 78%(50,781 TOE)를 차지한다.

표 3. 서울시 하수처리시설 에너지원별 사용량

에너지원	전력	열회수	유류	LNG	소화가스	계
사 용 량	50,781	5,391	41	22	8,709	64,944
[TOE, %]	78.2%	8.3%	0.1%	0.03%	13.4%	

이 전력에너지의 가장 큰 소비공정은 송풍기로 전체 전력 사용량 가운데 49%(24,811 TOE)를 사용하고 있다(그림 10).

따라서, 서울시 물재생센터의 신재생에너지 전략은, 전력사용량의 절감, 소화가스의 활용, 열회수의 순서로 우선 순위가 정해지게 되었다.

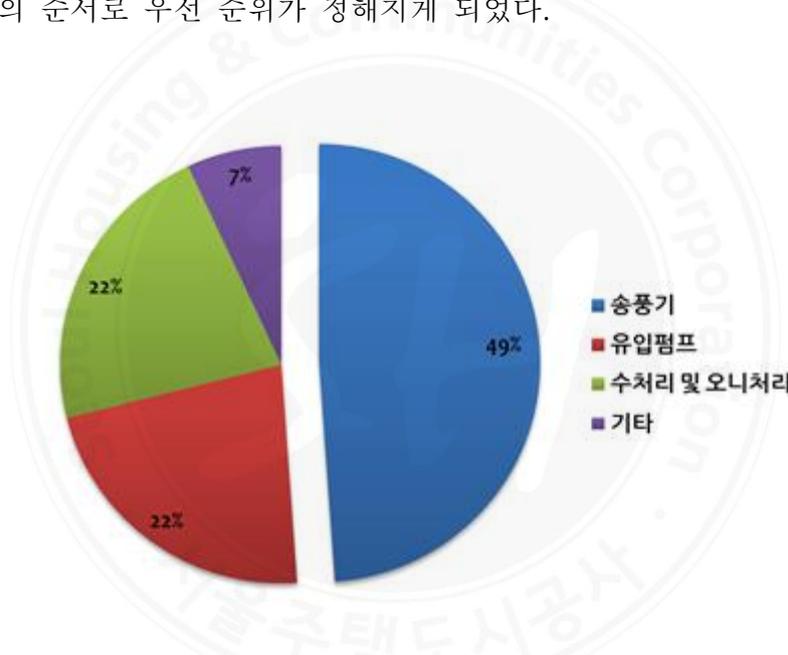


그림 10. 서울시 물재생센터 전력소비 이 (2016)
111741492670487

앞서 논의된 현실을 반영한 서울시 ‘물재생센터 에너지 종합관리 계획’의 중점 추진 내용은, 크게 1) 에너지 자립화 기반구축, 2) 에너지 절감 및 신재생에너지 생산확대, 3) 에너지 절감의 3분야로 정리될 수 있다.

에너지 자립화 기반 구축

2020년 서울시 전력 자립률 20%를 달성하기 위한 방안의 하나로, 하수도 시스템의 에너지 자립화 기반구축 사업이 진행되고 있다. 앞서 논의된 바와 같이 하수처리시설에서 사용되는 전체 전력에너지 가운데 송풍기가 차지하는 비중은 50%내외로 평가되고 있다. 따라서, 노후화된 송풍기를 효율적인 시스템으로 교체하고, 역시

전력사용량 비중이 큰 노후 펌프를 포함한 제반 설비를 교체 개선하는 사업이 진행되고 있다. 또한, 하수 슬러지 자원화를 위한 건조시설 건설사업¹²⁾이 추진되고 있는데 이로 인한, 건조에너지 생산량은 392 TOE에 이를 전망이다.

에너지 절감 및 신재생에너지 생산 확대 추진

전력사용량 절감을 위한 전력수요관리 사업도 추진되는데, 앞서 논의된, 노후 송풍기를 포함한 대형 기전설비를 고효율, 절전형 설비로 단계적으로 교체해 나가고, 전력 성수기에는 전력 사용량 관리를 강화해 나가는 것이 이 사업의 기본 목표라고 할 수 있다. 신재생에너지 가운데 현재 가장 현실적으로 활용되고 있는 소화가스는, 탈황설비 정비로 생산된 가스의 품질을 향상시키고, 증산제를 투입하여 생산량을 증대시키는 방향으로 사업이 진행될 예정이다. 또한 2019년까지 슬러지 건조처리 시설을 증설(1,175톤)하고, 슬러지 건조처리 잔재물을 발전소 연료로 판매하는 사업을 적극적으로 추진해 나갈 계획이다. 아직 적극적으로 활용되고 있지 못한 미활용 에너지의 발굴도 추진될 예정인데, 특히, 방류수의 낙차를 활용한 소수력 발전사업의 확대¹³⁾와 하수열을 이용한 지역난방공급 사업도 확대¹⁴⁾될 예정이다.

에너지 절감 사업

신재생에너지 생산이 물재생센터 에너지자립화 사업의 주요한 축이라면, 에너지 절감은 또 다른 주요한 축이라고 할 수 있다. 에너지 절감을 위한 사업으로는 하수처리 시스템의 공정관리와 최적 운영 사업이 있다. 모니터링 시스템을 고도화하여 운전 최적화를 위한 기반 시스템을 구축하는 것과, 센터별, 공정별 에너지 원단위 관리를 통해 하수처리 시스템의 공정을 효율적으로 관리할 수 있도록 하고, 유입 펌프 운전 최적화와, 부하변동에 대응한 송풍기의 효율적인 운전시스템 도입으로 공정운전을 최적화하는 것이 주요한 사업내용이라고 할 수 있을 것이다. 또한, 탈수기나 농축기를 위한 고효율 유입펌프¹⁴⁾ 도입하는 등, 에너지 소비 절감형 하수처리 공정을 도입하는 사업도 추진되고 있다.

기기나 설비, 공정의 개선과 교체를 통한 효율제고는 물론이고, 이러한 내용을 체계화한 운전매뉴얼을 작성하고, 에너지 절감을 위한 동기부여를 위한 인센티브 도입도 준비 중이다.

12)하수슬러지 자원화 건조시설 건설 사업: 건조에너지 생산량 392TOE, 추진기간 : 2016. 1. ~ 2019. 12.(현재 기본 및 실시설계 용역 중), 건설용량 : 1,175톤/일 (중량 350, 난지 130, 탄천 140, 서남 555톤) ※ 기존 건조시설 : 950톤/일 (이, 2016)

13)방류수 소수력발전 사업 확대: 중량 60kW, 탄천 60kW

14)하수열 이용 지역난방공급 확대(서남): 마곡지구에 연간 15만 Gcal 공급(2017년 10월 준공예정)

신재생에너지 추진사업

서울시가 추진 중인 ‘에너지 살림도시, 서울’ 사업 계획에서는 2020년까지 전력 자립률 목표를 20%로 설정했다. 이를 위해 2015년까지 추진되었던 사업은 다음과 같다(그림 11).



그림 11. 서울시 물재생센터 신재생에너지 시설

[시계방향으로, 열병합발전시설 서남, 하수열 지역난방 공급 시설 탄천 태양광 발전 서남 소수력 발전(서남), 소화가스 발전시설(서남), 지하 공동구 자연채광 시설(중랑)]

소화가스 연료화 사업은 하수처리과정 중 발생하는 소화가스를 도시가스 연료로 공급하는 사업으로, 물재생센터 내 슬러지 처리시설, 음식물처리시설로, 4개 물재생센터에 설치 운영 중이며, 연간 약 25,000TOE의 에너지 절감효과를 거두고 있는 것으로 분석되었다.

태양광 발전사업은, 상대적으로 넓은 물재생센터의 부지를 활용하여 태양광발전사업 실시하는 것으로 서울시의 투자 뿐만 아니라, 민간자본사업도 포함된 사업이다. 4개 물재생센터에 총 5,545 kW 규모의 태양광발전 시설을 설치 운영하는 것이다. 이 사업을 통해 연간 약 1,586 TOE의 에너지 절감효과를 거둘 수 있는 것으로 나타났다.

바이오가스 연료 열병합 발전은, 소화가스를 이용하여 열병합발전을 함으로써, 열과 전기를 동시 생산, 공급하는 사업이다. 소화가스 연소로 인한 열은 소화조 가운데 우선적으로 공급되고, 잔여 열은 지역난방공사에 활용하며, 생산된 전기는 전력거래소에 판매하는 것이 열 병합 발전 사업의 수익모델이라고 할 수 있다. 이 사업은 민간투자사업으로 수행되고 있으며, 현재 난지 물재생센터에 3.06 MW, 서남 물재

생센터에 5.8 MW 규모의 발전 시설이 설치 운영될 것이다.

지하공동구 자연채광 사업은, 지하 공동구 조명에 태양광을 직접 사용하는 것으로, 쾌적성 및 살균효과 등으로 지하 공동구 환경을 개선할 수 있는 사업이다. 물론 에너지 생산이라는 측면에서 큰 규모는 아니지만, 연간 약 20 TOE의 에너지 절감효과가 있는 것으로 분석되고 있다. 현재, 중랑과 서남 물재생센터의 포기조 지하 공동구 총 245개소에 설치, 운영 중이다. 방류수 열 회수 사업은, 방류수에 잠재하는 열을 열 펌프로 회수하여, 관리동을 비롯한 물재생센터 내 건물의 냉난방에 활용하는 사업이다. 현재 난지와 서남 물재생센터 관리동의 냉난방에 활용되고 있으며, 연간 약 12 TOE의 에너지를 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

가장 현실적인 사업 가운데 하나인, 소화가스의 도시가스 공급사업은, 민간투자사업으로 이루어지고 있는데, 버려지던 소화가스를 정제하여, 도시가스로 일반가정에 공급하는 사업으로, 중랑물재생센터에서 생산된 소화가스를 매일 약 26,000 m³ 규모로 공급하고 있다. 이 사업을 통해, 매년 도시가스 5,280,000 m³을 약 7,000세대 가정에 공급하고 있다.

실질적인 효과가 있는 또 다른 사업은, 하수열을 활용한 지역난방 공급사업으로, 이 사업 역시 민간투자사업으로 진행되고 있으며, 하수처리수의 열을 지역난방공급을 위한 열원으로 활용하는 것이다. 현재 탄천 물재생센터에서는 연간 20만 Gcal 이상의 열을 생산하여, 아파트 2만 세대 난방을 공급하고 있다. 2016년 들어 새로이 추진되고 있는 신재생에너지 사업은 소수력 발전과 하수열 활용 지역난방 공급 사업의 확대이다. 앞서 탄천 물재생센터에서 공급되던 연간 20만 Gcal의 하수열 지역난방 사업에 더해, 서남 물재생센터의 하수열을, 인근에 조성중인 마곡지구 지역난방에 활용하는 사업이 민간투자사업으로 추진되고 있다. 이 사업을 통해, 마곡지구 에 연간 15만 Gcal의 지역난방이 공급될 예정이다(그림 12).

111741492670487

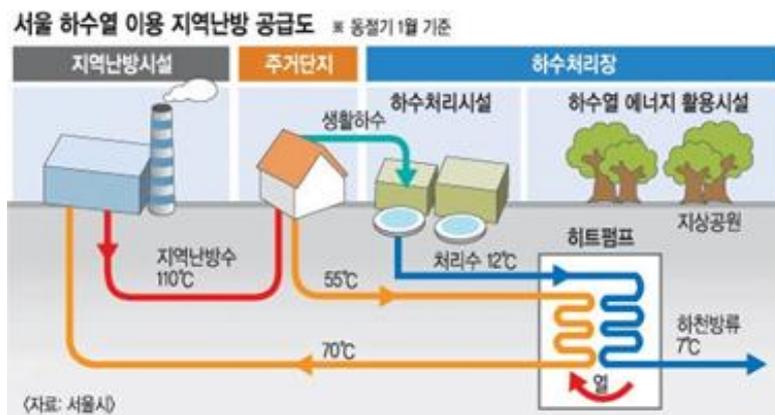


그림 12. 서울시 하수열 이용 지역난방 공급도

방류수를 활용한 소수력 발전 사업은, 물재생센터의 방류수 (낙차)를 이용한 소수력 발전 사업으로, 서남 물재생센터에서는 2015년 4월부터 상업발전(100 kW)이 시작되었으며, 중랑센터는 2015년 11월, 60 kW의 발전시설의 건설이 착공되었다. 이 사업을 통해, 물재생센터 처리 방류수의 버려지는 위치 에너지를 활용함으로써, 신재생에너지 확대 보급에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

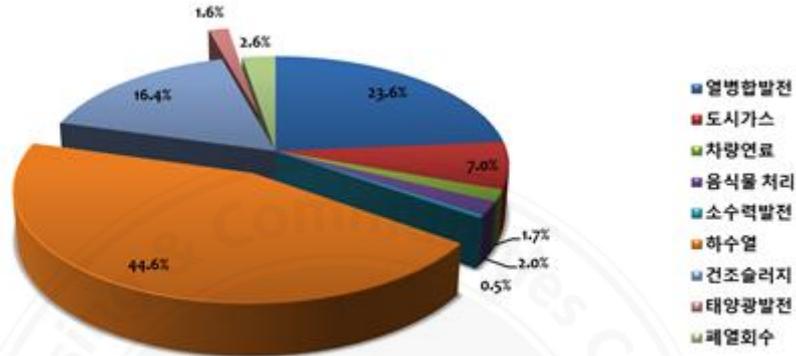


그림 13. 서울시 물재생센터 신재생에너지 생산비율

8. 정책효과

물재생센터 기능 변화와 에너지 자립률 제고

서울시 물재생센터는, 생활 속 하수를 처리하는 하수처리 기능만이 강조되어 왔다. 하지만, 현대의 물재생센터는, 버려지는 하폐수를 원료로 새로운 수자원을 생산하는 것 뿐만 아니라, 하폐수 내에 존재하는 자원을 활용하여 신재생에너지를 생산하는 에너지 생산기지로 그 기능과 의미가 바뀌고 있다(그림 14). 즉, 물재생센터의 주요 기능이 하수처리에서 신재생에너지 생산과 자원회수로 바뀌고 있다는 뜻이다. 이를 통해 서울시는, 에너지 소비도시에서 에너지 생산도시로 변모하겠다는 ‘원전 하나줄이기 2단계’ 사업은 물론, UN의 지속가능한 발전목표 달성과 파리협약을 통해 전세계가 동참하고 있는 저탄소 경제로의 이행 목표를 달성할 수 있는 정책적, 기술적 기반을 마련했다고 할 수 있을 것이다.

PPP(Public-Private Partnership) 사업모델의 효과적 활용

에너지 관련 시설을 포함한 도시기반시설의 건설과 운영에는 막대한 예산이 필요하게 된다. 특히, 서울시의 시설은 그 규모 면에서 대한민국 최대라고 할 수 있으며, 이는 공공 부문의 능력만으로 시행하기에는 실제적인 어려움이 많은 사업이라는 것을 의미한다. 하지만, 서울시는 공공예산투자에 대한 막대한 부담을 해결하기 위해 서울시, 민간사업자, 지역에너지사업자가 공동으로 투자, 건설, 운영하는 다자간 협력모델을 도입하여, 물재생센터 신재생에너지 생산 및 공급 사업을 추진하고 있다. 특히 하수열을 이용한 지역난방 공급 사업은, 전국 최대 규모로 민관이 공동으로 협력하는 PPP 사업모델이 성공적으로 적용된 것이라 측면에서 정책적 의미가 크다고 할 수 있을 것이다. 방류수의 낙차를 이용한 소수력 발전시설 건설 및 운영 사업에도 유사한 사업모델이 적용되었다. 즉, 물재생센터 신재생에너지 사업과 관련하여 적용된 사업모델은, 서울시가 방류수 및 열 생산 시설에 필요한 부지를 제공하고, 사업과 관련된 행정절차를 지원하고, 민간부문은 설계, 시공, 운영관리를 포함한 프로젝트에 필요한 사업비를 투자, 시설을 설치하고, 사업완료 후에 이 시설에서 생산된 에너지 판매로 수익을 내는 구조로 이루어져 있다.

특히, 서울시 물재생센터의 하수열 지역난방공급 사업은, 지역에너지사업자는 고가의 LNG를 사용해 공급하던 지역난방을 저가의 하수열로 공급함으로써 난방 공급 단가를 낮춰 새로운 열수요에 대처하고 예비열원을 확보, 공공, 민간, 에너지사업자가 서로 보완, 협력하는 ‘신성장 녹색산업 모델’로 평가되고 있다(최, 2016).

기술적 어려움의 극복과 신기술의 확대

물재생센터 방류수의 낙차를 활용한 소수력 발전사업의 경우, 설치되는 발전기는, 낙차가 2 m 이상 되어야 발전이 가능한 기존 발전조건의 한계성을 뛰어넘어, 2 m 이하의 저낙차에서도, 유속과 유량을 이용, 발전효율을 극대화 할 수 있는 저낙차 흐름식 발전기라는 데 의미가 있다(백, 2014). 저낙차 조건에서도 유량과 유속을 이용하여 발전이 가능하도록 함으로써, 국내외 유사 입지조건을 갖춘 물재생센터에도 적용이 가능한 사례가 될 수 있을 것으로 보인다. 또한, 보급단계인 저낙차 흐름식 발전기가 성공적으로 운영 될 경우, 새로운 성장 동력사업으로, 기술 개발보급 확대에 따른 일자리창출에도 기여할 것으로 판단된다.

온실가스 저감과 저탄소 경제로의 이행

현재까지 성공적으로 운영되고 있는 서울시 물재생센터 신재생에너지 생산 및 자원 회수 시설의 설치와 운영은, 향후 민간과 공공의 협력사업 모델의 좋은 사례가 될 수 있을 것으로 판단된다. 금을 포기하는 생산자가 많아 재활용품 수급에 크게 도움이 되질 않았다.



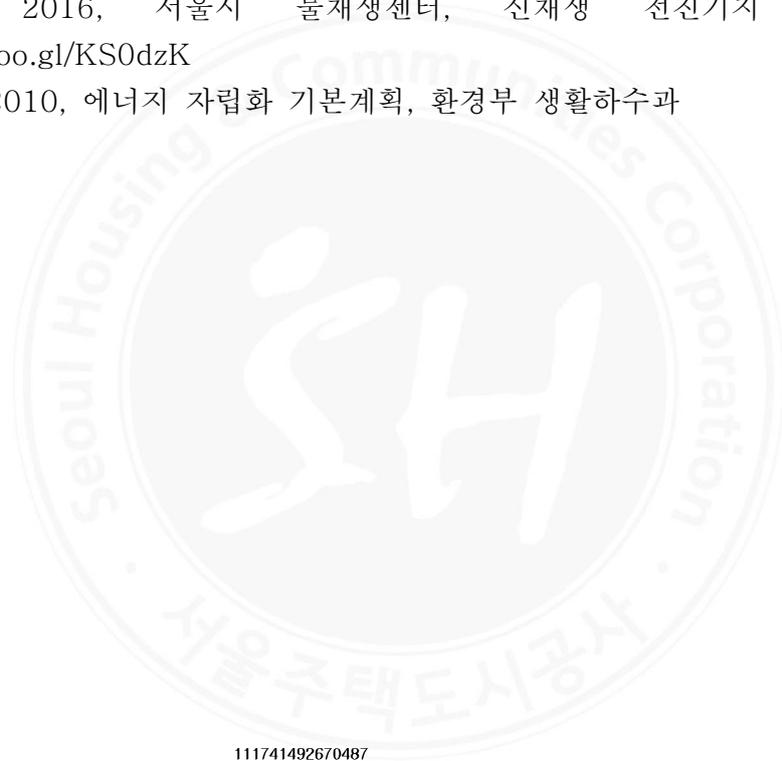
111741492670487

참고문헌

- CBO, 2002, Future Investment in Drinking Water and Wastewater Infrastructure, Congressional Budget Office
- EPA, 2012, 2012 Guidelines for Water Reuse
- Hoppock, D.C., Webber, M.E., 2008, Energy needs and opportunities at POTWs in the United States, In Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) 2nd International Conference on Energy Sustainability, Jacksonville, FL, USA
- Klein, G., Krebs, M., Hall, V., O'Brien, T., Blevins, B., 2005, California's Water-Energy Relationship, California Energy Commission
- Le Blanc, D., 2012, Back to our common future: Sustainable Development in the 21st century (SD21) project, UN DESA
- Lee, Y.J., 2015, Governance and stakeholder participation: Key to policy making - Regional and urban case studies from Germany and Korea, Seoul International Energy Conference 2015
- Means, E.G., 2004, Water and wastewater industry energy efficiency: A research roadmap, Water Research Foundation, Denver, CO, USA
- NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2012, Renewable Electricity Futures Study: Exploration of High-Penetration Renewable Electricity Futures, vol.1
- Stillwell, A.S., Hoppock, D.C., Webber, M.E., 2010, Energy recovery from wastewater treatment plants in the United State: A case study of the Energy-Water Nexus, Sustainability 2, 945 - 962
- US GAO (Government Accountability Office), 2012, Energy-Water NEXUS. Coordinated federal approach needed to better manage energy and water tradeoffs, GAO-12-880
- 김길환, 2016, 파리협정 채택과 우리나라의 대응방향, 과학기술정책연구원
- 백영대, 2014, 물재생센터, 방류수 이용 소수력발전, 국토매일, <https://goo.gl/8nMNBS>
- 서울연구원, 2010, 서울연구데이터베이스-하수도
- 서울특별시 기후환경본부, 2014, 원전하나줄이기 성공에 이어 '에너지살림도시' 만든다, 서울정책아카이브 (<http://env.seoul.go.kr/archives/43330>), 서울특별시
- 서울특별시 물관리국, 2009a, 서울 하수도 이야기, 서울특별시
- 서울특별시 물관리국, 2009b, 2020 서울특별시 하수도정비기본계획, 서울특별

시

- 서울특별시, 2014, 서울 에너지정책의 희망 메시지 원전하나줄이기, 서울시 기후환경본부, 원전하나줄이기 시민실행위원회
- 신한술, 2016, 미래를 다투는 독일 도시들, 사사IN (2016년 11월 10일; <http://www.sisain.co.kr/?mod=news&act=articleView&idxno=27460>)
- 원동규, 2016, 파리협정 주요내용과 전력부문 이슈, KEMRI 전력경제 REVIEW
- 유재룡 외, 2015, 원전하나줄이기2: 에너지 살림도시 서울, 서울특별시
- 이철해, 2016, 서울시 하수처리 에너지 자립화, 서울물연구원 하수처리 에너지 신기술 세미나 Proceeding.
- 최영준, 2015, 도시 물재이용의 현재와 미래, 서울시-한국물환경학회 공동포럼
- 최인식, 2016, 서울시 물재생센터, 신재생 전진기지 변신, 칸, <https://goo.gl/KS0dzK>
- 환경부, 2010, 에너지 자립화 기본계획, 환경부 생활하수과



111741492670487