

자원 에너지 순환형 복합플랜트

인간의 도시생활 및 산업활동에 필수적인 도시기반 환경기초시설 및 에너지공급시설의 자원 에너지 순환형 복합플랜트를 소개하고 그 구축방안에 대하여 기술한다.

이 태 원

한국건설기술연구원 화재및설비연구센터(twlee@kict.re.kr)

도시기반 복합플랜트

국토의 계획 및 이용에 관한 법률(법률 제8564호, 2007.7.27)에서는 도시기반시설을 교통시설(도로·철도·항만·공항·주차장 등)과 공간시설(광장·공원·녹지 등), 공공·문화체육시설(학교·운동장·공공청사·문화시설·체육시설 등)과 방재시설(하천·유수지·방화설비 등) 및 보건위생시설(화장장·공동묘지·납골시설 등)과 아울러 유통업무설비, 수도·전기·가스공급설비, 방송·통신시설, 공동구 등의 유통·공급시설과 하수도·폐기물처리시설 등의 환경기초시설로 정의하고 있다.

도시기반 복합플랜트라 함은 에너지와 물 그리고 폐기물 등 인간이 도시생활을 영위하기 위하여 필수 불가결의 요소인 자원과 에너지의 효과적인 공급 및 처리를 통하여 자연에 미치는 환경부하를 최소화하기 위하여 도입하는 시설로서, 위의 도시기반시설 중 수도·전기·가스·열 등의 자원 및 에너지 공급시설과 하수도·폐기물처리시설 등의 처리시설(환경기초시설)이 단순히 물리적인 결합의 차원을 넘어서 유기적으로 융합된 종합시설로 정의될 수 있다.

얼마 전까지만 해도 우리의 도시생활에서는 자원 및 에너지를 무한한 것으로 생각하여 단순한 시스템을 통해 낭비적, 비효율적으로 사용해 왔지만, 이러한 자원과 에너지는 유한한 것으로 한계가 있음을 인식하게 되었음은 물론, 특히 이들 자원 및 에너지의 소비과정에서 발생하는 각종 오염물질은 심각한

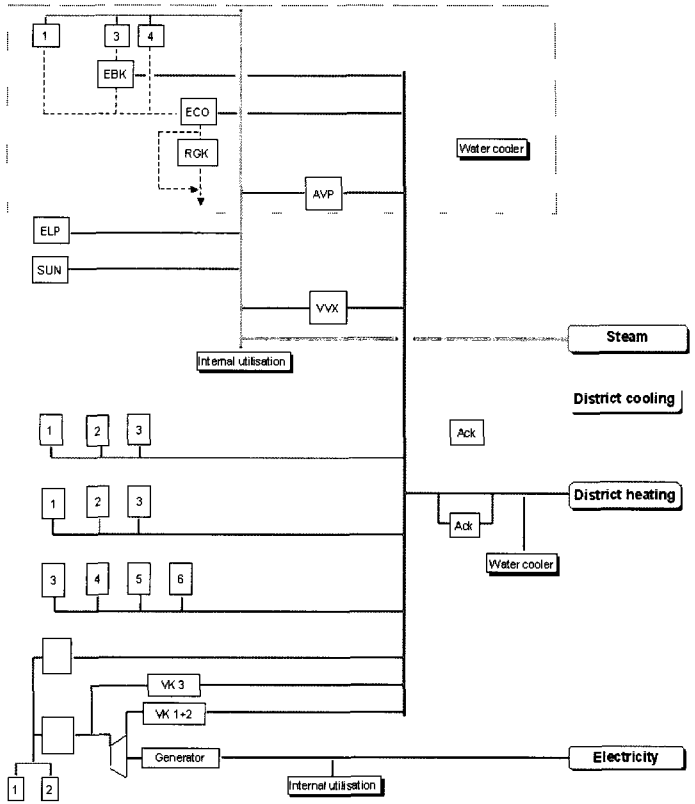
지구환경의 오염원이 되고 있어 순환형 시스템에 대한 요구가 크게 증가하게 되었다.

복합플랜트를 이용한 에너지 자립도시의 예로서 스웨덴의 수도인 스톡홀름의 북서쪽으로 약 60 km에 위치한 인구 11만명의 읍살라(Uppsala)시를 들 수 있다. 이 도시의 동절기 최대 열부하는 약 890 MW이고, 열수요의 약 98%를 도시에너지회사(Uppsala Energi AB)에서 공급하고 있는데, 여기서는 저렴한 에너지의 안정적인 공급과 환경보전을 목적으로 초탄 등의 피트나 목재칩과 같은 고체연료를 사용하여 전력과 온수를 생산하는 시설과 폐열을 이용하여 온수를 생산하는 쓰레기 소각시설, 하수열을 열원으로 이용하는 열펌프시설, 보조용의 전기 및 유류보일러시설, 태양열을 집열하여 지하의 암반에 저장하는 축열시설 등 에너지원의 다양화를 위해서 복합플랜트를 구성하고 있다(그림 1, 그림 2 및 표 1 참조)¹⁾.

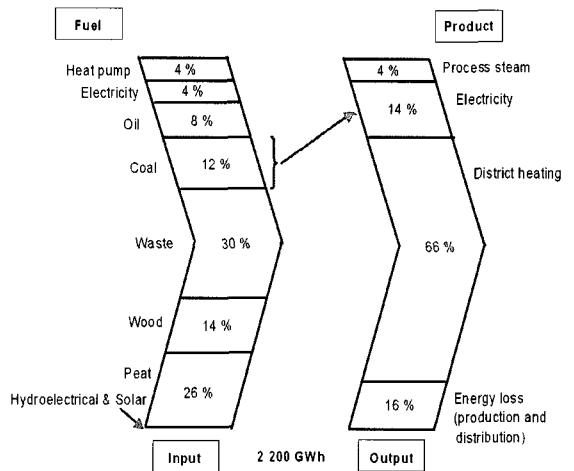
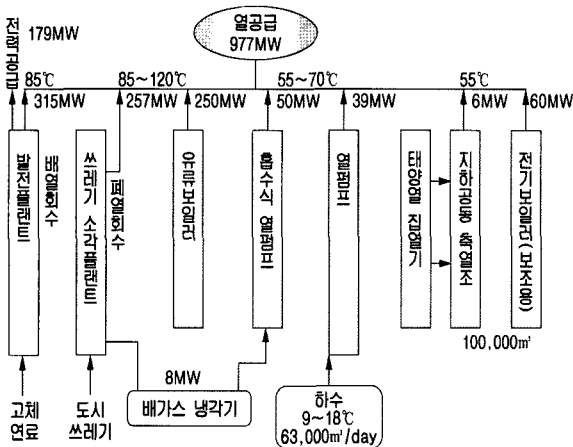
이 도시에서는 이와 같이 다양한 생산시설의 효율적인 운영을 위하여 부하에 따른 시설의 운전순서를 정하고 있다. 즉 생산비용이 가장 저렴한 쓰레기 소각에 의한 폐열을 연간 기저부하로 하고, 부하의 증가에 따라 하수열원 열펌프시설, 목재칩 등에 의한 열병합발전, 목재칩 등에 의한 온수보일러의 순으로 운전하며 전기보일러는 예비용으로만 활용하고 있다(그림 3 참조).

그 결과 시설별 연간 운전실적 측면에서도 소각폐열 이용 및 열펌프시스템은 1년 내내 운전되고, 부하

AFA (waste incineration plant)	Steam boilers Sec. combustion chamber Economiser Flue gas condensation Absorption heat pumps	Waste
Electric boilers	Steam boilers	Electricity
Sunrod	Steam boiler	Oil
VVX	Heat exchangers	
Heat pumps	Heat pumps	Electricity and waste heat
Husbyborg	Hot water boilers	Oil
Boland	Hot water boilers	Oil
HVC	Hot water boiler	Peat/wood, coal, oil
KVV	Co-generation plant	Peat/wood, coal, oil
Solid fuel processing		Peat/wood, coal



[그림 1] 옹살라시 복합플랜트의 구성내역

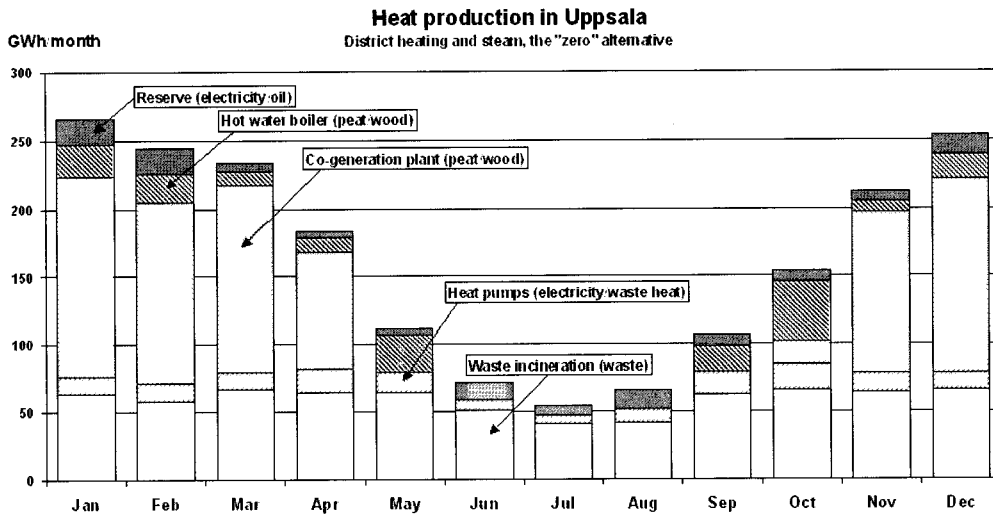


[그림 2] 옹살라시 복합플랜트의 용량 및 사용/생산에너지 비율



<표 1> 읊살라시 복합플랜트 세부내역

항 목	세부내역
고체연료플랜트	· 함수율 10% 이하의 피트성형 고체연료 제조, 연료로 사용 · 연료의 발열량은 석탄의 70%, 석유의 50% 정도
쓰레기소각/ 폐열회수플랜트	· 4기의 소각로에 의해 연간 25만톤 처리 · 쓰레기는 주위의 20개 시·군으로부터 정기적으로 반입 · 노는 다상식으로 800℃의 연소온도로 8,000시간 연속운전 가능 · 배가스 냉각용 열교환기와 흡수식 열펌프의 조합에 의한 열회수 · 다이옥신 배출 2 mg/Nm ³ 이하
하수처리/열원 열펌프시스템	· 열원수량은 피크시 63,000 m ³ /일, 열원수의 온도는 9~18℃ · 연간 성적계수는 약 3.0
보조플랜트	· 비상용으로 전기보일러 및 유류를 연료로 하는 온수보일러



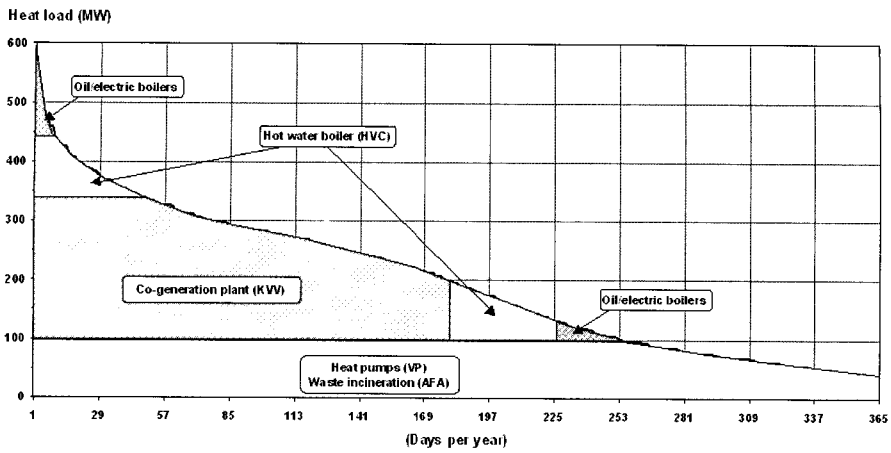
[그림 3] 읊살라시 복합플랜트의 월별 에너지 생산실적

가 증가함에 따라 열병합발전시설이 운전되며 온수 보일러 및 전기보일러는 시설의 용량과 부하의 차이를 극복하기 위한 수단으로만 사용되고 있다(그림 4 참조)¹⁾.

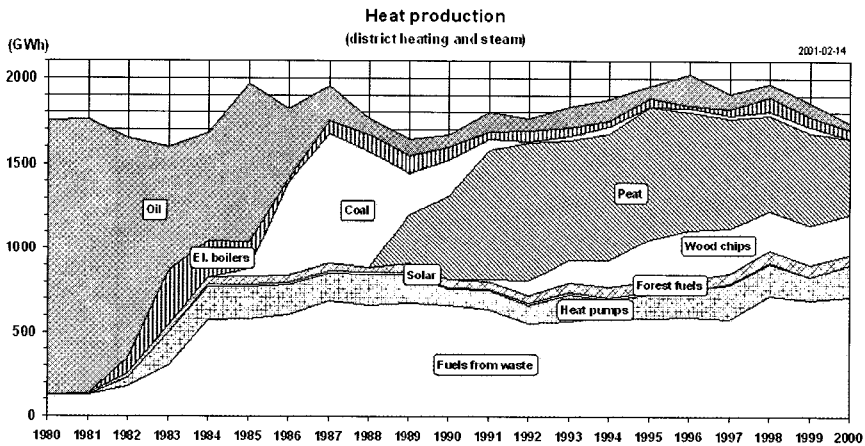
1960년대에 건설된 이 시설은 1970년대에는 1년에 약 240,000 m³의 석유를 소비하여 전체 에너지 소비의 92%를 화석연료에 의존하였으나, 두 차례의 유류 파동을 겪으면서 시설의 개조에 착수하여 1988년에는 석유의존도를 5% 이하로 낮춤으로써 이후에는 건물분야 에너지 수요의 탈석유화에 성공하였다(그림 5 참조)¹⁾.

한편 스웨덴 제2의 도시인 요테보리(Göteborg)시 일원에 집단에너지를 공급하는 도시에너지회사(Göteborg Energi AB)는 열공급 배관의 길이가 410 km이고 약 170,000세대가 에너지 공급계통에 연결되어 있으며, 총 2,025 MW의 열원을 생산할 수 있는 능력을 보유하고 있다.

에너지원으로 쓰레기 소각열과 산업폐열, 하수열, 바이오매스 등의 재생에너지와 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료를 사용하고 있고, 공급된 전체 에너지량 중에서 각종 폐열 등에 의해 생산된 양이 70% 수준에 달하고 있다(표 2 참조)¹⁾.



[그림 4] 읍살라시 복합플랜트의 시설별 연간 운전일수



[그림 5] 읍살라시 복합플랜트의 에너지원별 연간 소비량의 경년 변화

<표 2> 요테보리시 복합플랜트의 시스템 구성 및 사용 에너지원(1999년)

플랜트	에너지원	에너지공급 비율		용량
			폐열 활용 67%	
Renova(GRAAB)	쓰레기소각시설(40만톤/년)의 폐열	24%	67%	120 MW
Shell(Refinery)	산업체 폐열	21%		160 MW
Preem	산업체 폐열	12%		-
Rya	하수처리시설(12,000 m ³ /h)의 열펌프	10%		150 MW
열병합발전 보조보일러	석탄	8%		1000 MW 정도
	천연가스	18%		
	바이오매스	4%		
	석유	3%		



특히 78만명의 인구가 배출하는 하루 52만톤의 하수를 처리하는 리야(Rya) 하수처리시설에 설치된 하수열원 열펌프시스템 4기의 전체 출력은 80 ~ 160 MW로서 이들에 의해 생산되는 열량은 전체 지역난방 공급열량의 21%에 달하는 양으로 연간 70,000 m³의 유류를 절감하고 있다. 열펌프시스템 중 3호기는 출력이 50 MW로서 세계에서 가장 큰 열펌프로 알려져 있다. 열펌프의 냉매로는 R134a를 사용하고 있고 압축기(2기는 Carrier, 2기는 Atlas Copco 제품)는 터보형, 모터는 10 kV에서 4.5 ~ 16.5 MW의 용량을 보유하고 있다(그림 6 참조).

증발기는 동과 니켈재질의 셸/튜브형으로 증발기 입구의 하수온도는 계절에 따라 다르나 5 ~ 18℃이고, 처리수의 최대 유량은 유닛에 따라 다르나 1,000 ~ 1950 kg/s의 범위이다. 또 동 또는 스틸 재질의 응축기는 2 ~ 6단계의 셸/튜브형 열교환기로서 최대 열출력은 유닛당 15 ~ 52 MW이고 지역난방계통 귀환수의 온도는 약 48 ~ 70℃, 송출수의 최고온도는 80 ~ 85℃의 범위를 보여준다. 사이클의 제어는 Sattcontrol에 의하며, 성적계수는 3.0 ~ 3.5의 값을 보여주고 있다.

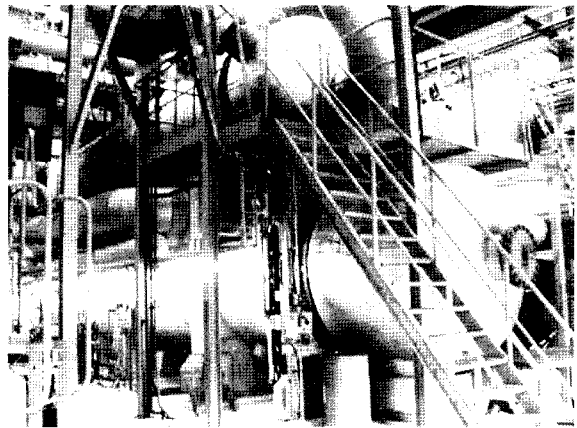
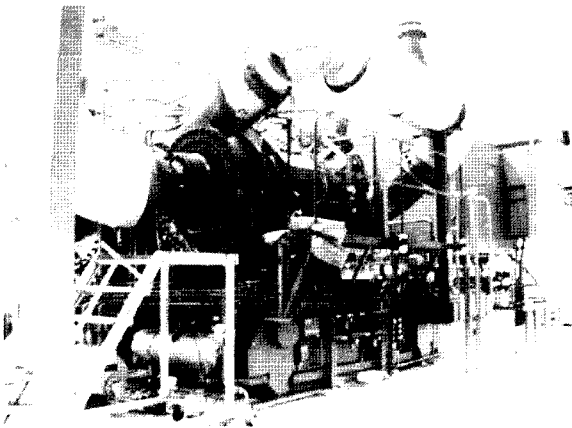
또한 이 시설에서 발생하는 시간당 1,000 m³의 소화가스는 3대의 열병합발전용 엔진의 연료로 사용되어 14,200 MWh의 전력을 생산하고 전력생산량의 1.5배에 해당하는 폐열을 엔진냉각수와 배가스로부터 회수함으로써 84%의 열효율을 얻고 있다. 이 폐

열을 이용하여 시에서 요구되는 지역난방열량의 20% 이상을 공급하고 있으며, 최근에는 전력생산량을 증가시키기 위해 음식물 쓰레기를 반입하여 소화조에 투입하기 시작했다.

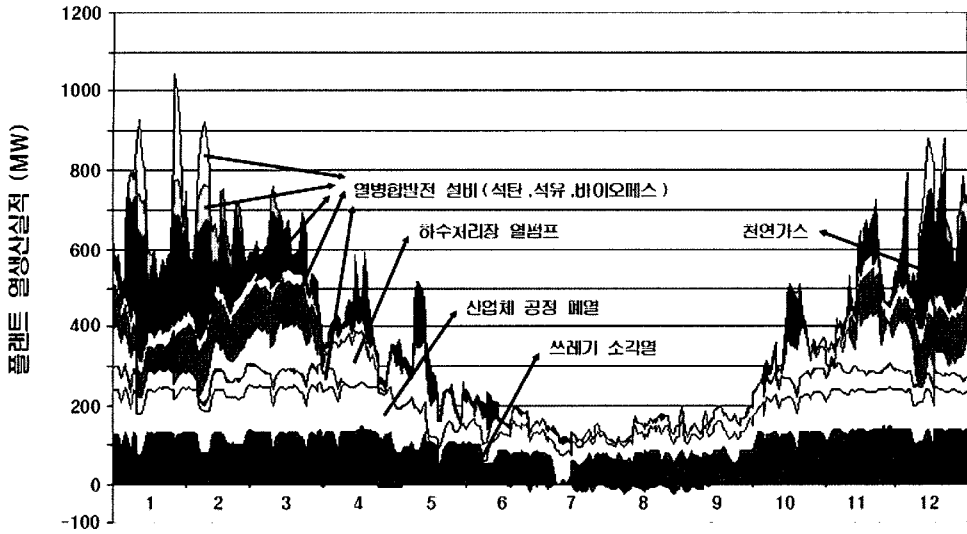
요테보리시도 1980년까지 전체 에너지소비량의 90% 이상을 화석연료에 의존하였으나 이후 폐열 등 대체에너지의 이용노력이 성과를 보여 1990년대 이후에는 기름을 거의 사용하지 않게 되었다 즉 쓰레기 소각열과 산업폐열이 연간에 걸쳐 고르게 열생산량의 기초를 이루고 있고 하수열원 열펌프도 상당한 비중을 차지하고 있음을 보여주고 있으며, 화석연료에 의한 열공급은 동절기 최대부하시에만 수행하고 하절기에는 쓰레기 소각열과 산업폐열에 의해서만 대부분의 열량수요를 충당하고 있다(그림 7 참조)¹⁾.

이들 14곳의 분산형 시설들은 하나의 부지에 설치되어 있지 않고 공장이나 쓰레기 소각시설 및 하수처리시설 등 에너지 수급환경에 적합한 지역에 설치된 후 네트워크화되어 있다. 전체의 시설은 Rosenlund와 Sävenäs에 설치되어 있는 중앙감시 및 통제실에서 감시되는데, 여기서는 부하의 시간변화에 따라 생산비 및 효율을 고려하여 가장 저렴한 운전이 되도록 적기에 각 시설의 기동과 정지를 수행하며, 배관계통의 압력과 온도의 조절은 물론 보고 및 부하예측의 기능도 지니고 있다.

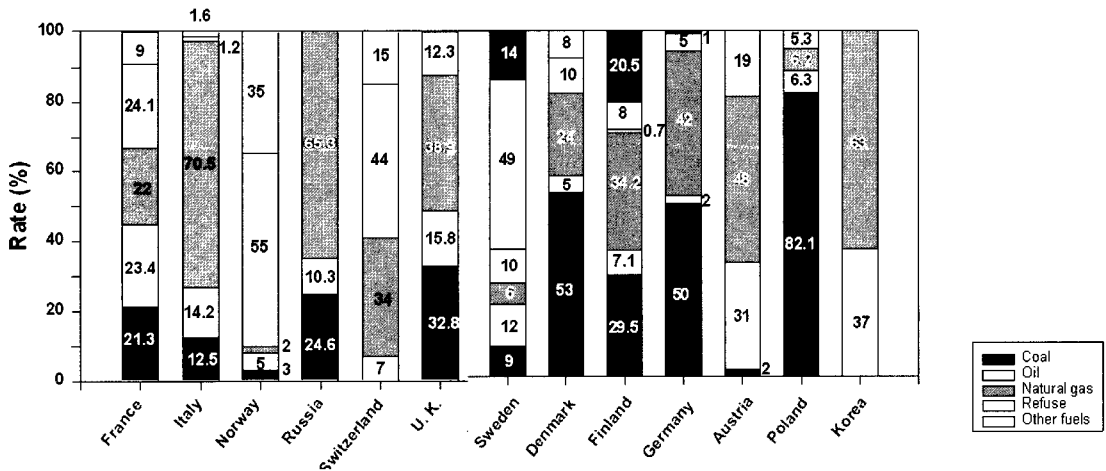
한편 각국의 집단에너지 공급시설에서 사용되는 에너지원을 비교해 보면 스웨덴이나 핀란드 등 북유



[그림 6] 리야 하수처리시설의 하수열원 열펌프시스템 전경



[그림 7] 오테보리시의 월별, 열원시설별 열생산율 변화(1999년)



[그림 8] 각국의 지역에너지 열원비교(Euroheat & Power 지역난방통계, 1998)

럽 국가는 화석연료의 사용을 최대한 억제하고 폐기물에너지와 재생가능에너지의 활용을 적극 활용하여 열원을 다변화시키기 위해 노력하고 있고, 폴란드의 경우에는 지하자원이 풍부하다는 점을 이용하여 집단에너지공급시설의 열원으로서 석탄을 최대한 활용하고 있으며, 프랑스에서는 화석에너지와 재생가능에너지 및 폐기물에너지 등을 고르게 사용하

여 에너지원을 다변화한다는 측면에서 집단에너지공급시설의 장점을 최대한 활용하고 있다(그림 8 참조)¹⁾.

그러나 이와는 대조적으로 국내의 경우에는 집단에너지공급시설의 주류를 이루고 있는 열병합발전과 보조보일러의 열원으로 천연가스(63%)와 석유(37%)가 대부분을 차지하고 있으며, 폐기물 소각폐



열을 사용하고는 있으나 전체 열생산량 중 5.2%만을 차지하고 있어 지금까지 기술한 선진 외국의 경우와 비교할 때 사용 에너지원 및 시설이 매우 단순하여 큰 차이를 보여주고 있다.

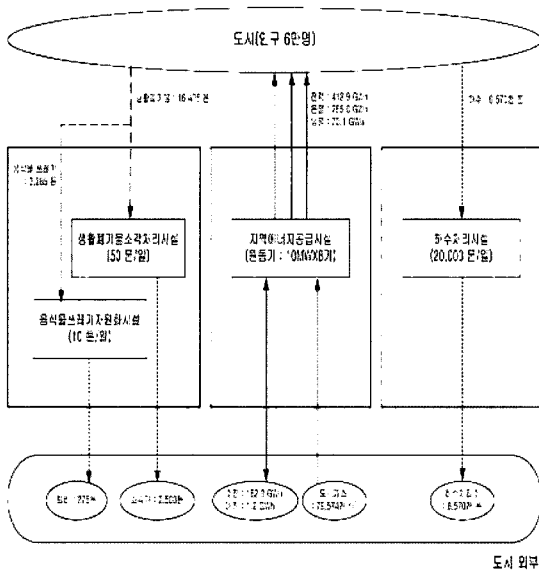
이상에서 살펴본 바와 같이 선진국에서는 각국이 지니고 있는 지역 및 환경적 여건과 특징을 반영한 복합플랜트를 건설, 운영하고 있으며, 이는 부존자원이 부족하여 전체 에너지 소비량의 97%를 수입에 의존하고 있는 우리에게 시사하는 바가 매우 크다 하겠다.

복합플랜트의 도입효과

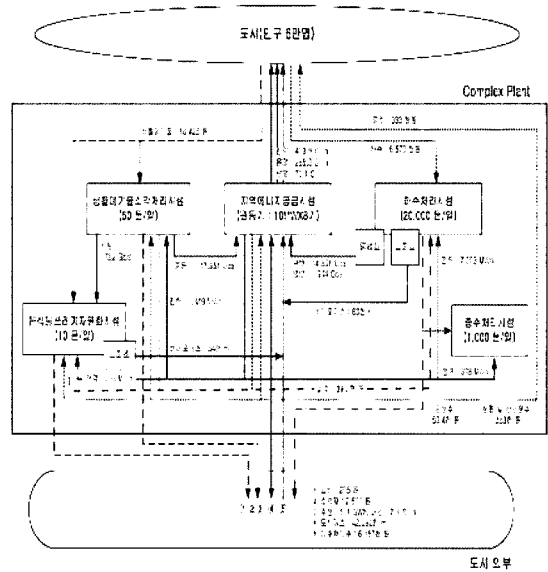
복합플랜트의 적용효과 및 경제성 분석을 위하여 가구수 2만호, 인구 60,000명의 모델도시를 지원하는 에너지공급시설과 쓰레기 소각시설 및 하수처리시설을 기존과 같이 설치하는 경우 대비 복합플랜트의 도입에 따른 효과를 알아보기 위한 개별 및 복합시스템에 대한 열 및 물질수지 해석결과에 따르면, 각각의 도시기반 공급 처리시설들을 대상으로 복합플랜트를 구축함으로써 각종의 자원과 에너지를 절

감(그림 9 참조)할 수 있음은 물론, 에너지부문에서 약 91.8억원(32.9%)과 자원처리부문에서 약 5.3억원의 비용을 절감하여 전체적으로 97.1억원의 비용을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

한편 국내에서도 열공급시설 및 자원회수시설의 통합설치에 관한 시도(Y시)가 있었으며, 쓰레기 소각시설(하수건조슬러지 포함 150톤/일 2기)과 재활용처리시설(80톤/일), 음식물처리시설(60톤/일) 및 지역난방설비(열부하 322 Gcal/h, 열병합발전시설 28 MW, 50 Gcal/h, 침투부하용 온수보일러 68 MW 3기)을 대상으로 검토한 결과, 설치부지는 약 1.4만 m²(32%, 158억원), 설비투자비 약 43억원(2.4%, 지역난방시설은 오히려 3억원 증가), 연간 운전비와 인건비는 각각 약 1.5억원(0.44%)과 4억원(14%) 정도 절감할 수 있는 것으로 산출되어, 단순히 부지와 인건비의 절감 이외에는 효과가 그다지 크지 않고 연간 에너지절감액도 9백만원에 불과한 것으로 예측되었다²⁾. 또한 시설의 소유권 및 각종 제도상의 한계도 극복하여야 할 과제로 제시되었다. 또한 P시에 설치되어 있는 소각시설(지상)과 하수처리시설(지하)은 입체적 통합설치에 따른 부지절감은 가능



a) 기존의 도시기반 플랜트



b) 도시기반 복합플랜트

[그림 9] 개별 및 복합플랜트의 열 및 물질수지도

하나 시설의 상호 연계는 시도되지 않았다.

향후 우리나라는 증가하는 전력부하 및 지역냉난방 부하를 감당하기 위한 지역에너지 공급시스템 및 수질환경 및 대기환경 보전을 위하여 하수처리장 및 생활폐기물 소각장 등과 같은 환경기초시설을 지속적으로 건설할 전망이다. 그러나 현재와 같이 각 시설들이 서로 다른 지역에 위치함은 물론 도시 중심에서 원거리에 위치할 경우에는 시스템의 비효율성이 증가하여 부하에 능동적으로 대처하지 못함에 따라 막대한 손실이 발생할 것으로 판단된다. 따라서 에너지 및 공급처리시설들을 체계적으로 통합하여 설치하고 복합단지화하여 운영 관리함으로써 경제성을 확보하고 에너지 및 자원의 절약에 기여해야 할 것이다.

순환형 복합플랜트 구축방안

자원 에너지절약형(혼합형) 토지이용계획의 수립

각종 도시개발사업이 친환경적이고 지속가능한 것이 되기 위해서는 자원 에너지 소비규모 및 패턴과 토지이용의 연계를 통해 개발에 따른 자원 에너지 부하를 최소화하는 혼합형 토지이용계획이 수립되어야 한다. 이와 같은 혼합형 토지이용계획을 통해 자원과 에너지 공급 처리체계와 도시개발의 연계, 소각열, 발전폐열 및 산업폐열을 이용한 지역난방시설과 주거단지 개발의 연계, 공업단지 개발계획 및 에너지 공급시설의 연계, 전기나 도시가스 등 특정 에너지 다소비업체와 발전소나 가스, 냉열 등 에너지 공급시설의 연계, 전력 및 기존 화석연료의 수요를 감안한 적정 산업시설의 혼합 등이 가능할 것이다.

분산형 시설의 도입 및 인프라시설과의 조화

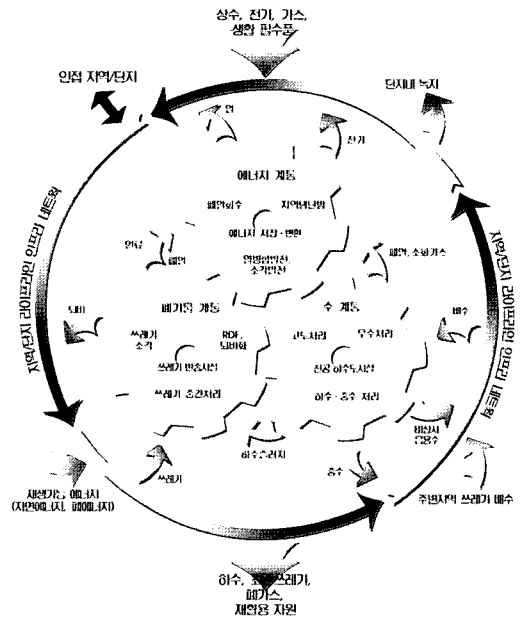
단기간에 걸쳐 산업화와 도시화가 추진되어 온 국내에서는 대부분의 도시개발사업의 수행시 대규모 개발사업에 맞추어 당해지역 전체를 사업지역으로 하는 대규모의 도시기반 플랜트들을 건설하여 왔다. 이들 대규모의 광역 인프라시설들은 주로 발생원이나 수요처로부터 상당한 거리를 두고 따로 떨어져 입지하는 경우가 일반적이며, 이러한 시설들에 의해서는 자원 에너지의 순환이용이나 상호연계에 의한 복합화에 의한 효과를 거두는 것이 실질적으로 불가

능하다. 따라서 공급 및 처리능력의 측면에서 우수한 대규모의 광역시설과 효율 및 순환이용율이 높은 분산형 시설을 적절히 배치하여 고효율의 순환형 사이클을 구성함으로써 자원 에너지의 절약 및 순환이용을 꾀하여야 할 것이다(그림 10 참조).

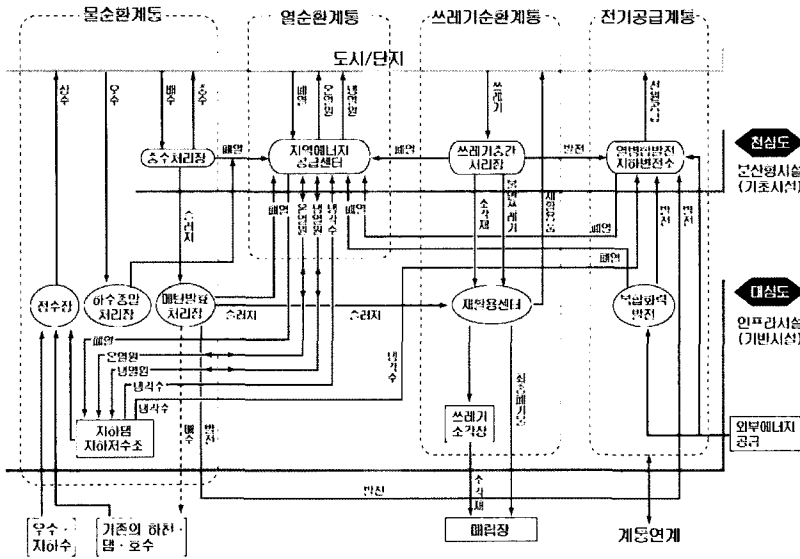
자원 에너지 순환형 복합플랜트의 제안

에너지 순환계통, 물 순환계통 및 자원 순환계통의 각각에 대해 인프라 시설과 분산형 시설이 존재하게 되는데, 앞 장에서도 기술한 바와 같이 각 계통 사이에는 여러 가지의 물질과 에너지의 상호 교환이 이루어짐으로써 복합화가 가능하므로 관련이 있는 순환계통끼리 묶어서 하나의 플랜트로 구축할 필요가 있다(그림 11 참조).

각각의 계통 및 시설별로 매우 밀접하게 연관되어 있고, 먼저 인프라 시설에서는 화석연료와 계통전력을 중심으로 외부로부터 에너지를 공급받아 대규모의 전력과 열을 생산하고 외부로부터 받은 원수로부터 대량의 상수를 생산하며 하수의 처리나 쓰레기의 소각 등을 수행하여 전력과 열 및 상수 등을 분산형 시설로 보낸다. 한편 분산형 시설에서는 인프라 시



[그림 10] 순환형 도시기반 공급·처리시설의 계통도



[그림 11] 시설의 계통별, 기능별 복합화 및 지하화 방안

설에서 공급받는 자원과 에너지 이외에도 자체의 발전시설에서 전력을 생산하기도 하고 발전폐열과 그 지역에 존재하는 도시배열 즉 미활용에너지를 이용하여 열을 생산하며, 중수처리시설에서는 배수를 이용하여 중수를 생산하는 한편 우수를 이용하여 상수나 기타 용도의 용수를 생산하기도 한다. 또 배출된 쓰레기를 모아서 분리 선별하여 재활용센터로 보냄으로써 재활용을 도모하고 최종 쓰레기는 압축하거나 퇴비화하는 등 폐기물의 감량화 등 중간처리를 수행한다.

국내의 경우 외형적으로는 복합화력발전시설이나 하수종말처리시설 및 소각시설 등 대규모의 인프라 시설들은 잘 갖추어져 있는 것으로 보이나 한결같이 혐오시설 기피현상(NIMBY)에 따른 설치부지의 확보에 큰 어려움을 겪고 있고, 분산형 시설이 매우 취약하여 매우 낮은 공급 처리효율을 보여주고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 복합화된 분산형 시설의 개발 및 적용과 지하공간을 이용한 도시 기반시설의 설치를 유도할 필요가 있다.

이 경우 대규모의 인프라 시설들은 시설의 규모와 지역의 특성에 맞추어 결정한 후 지반의 특성과 경제성을 고려하여 대심도 지하에 건설(스웨덴 등 유럽의 대심도 지하공간을 이용한 대규모 지역난방 및

하수처리시설 등)하는 한편, 분산형 시설들은 수요처의 부하 및 에너지 조건과 밀접한 관계가 있으므로 수요처의 인근에 설치되어야 하고 용량도 중소규모이기 때문에 개착식 굴착에 의한 천심도 지하공간을 이용하여 설치(일본의 건물이나 공공시설의 지하에 설치되는 중소규모 열병합발전 및 지역난방 시설 등)하는 방안이 검토될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 지하공간을 이용한 혐오시설의 복합플랜트화, 건설교통부 건설기술기반구축사업 연구보고서 R&D/99S01-01, 2004.
2. 한국지역난방기술(주), 양산 통합시설 타당성 검토, 양산시 외, 2000.
3. Göteborg Energi AB, District heating, Energy for Gothenburg.
4. 伊藤武美 著, 谷口爭幸 編著, 地球環境都市デザイン, 理工圖書, 1996.
5. 伊藤滋・高橋潤二郎・尾島俊雄, 環境共生都市づくり-エコシティガイド, 建設省都市環境問題研究所, ぎょうせい, 1993.