

하·폐수 슬러지 처리기술의 개발 동향에 관한 연구

A Study on the Development Trends of Wastewater Sludge Treatment Technology

이 채 영¹⁾ · 정 우 진²⁾ · 김 지 태[†]
Chaeyoung Lee · Woojin Chung · Jitae Kim

Received: February 12th, 2016; Revised: March 2nd, 2016; Accepted: May 25th, 2016

ABSTRACT : As the increase of domestic sewage treatment plant and reinforcement of the standard of effluent water quality continues, the volumes of sewage sludge are consistently increasing. Existing treatment of sewage sludge, such as incineration and ocean dumping has been prohibited because of air pollution and prohibitions towards ocean dumping, and in turn, recycling and energy recovery from waste methods have being studied recently. However, the lack of technical level and systematic analyses of application technique are problems, that future analysis of such relative technique would be required. The present study has been investigated as follows, management technique of sludge, patent on refuse-derived fuel and increase biogas production and utilizable technology, trend of research paper. Furthermore, research development from five developed nations (Korea, Japan, China, United States, and United Kingdom), domestic and foreign have been investigated and analyzed by section. In this study, the future technical field which is required for effective management of sludge has been suggested.

Keywords : Sludge treatment, Biogas, Waste to energy, RDF

요 지 : 국내 하수처리장의 증가 및 방류수 수질기준 강화 등에 따라 하수 슬러지의 발생량은 지속적으로 증가하는 추세이다. 기존 하수 슬러지는 소각과 해양배출 등으로 처리하였지만, 대기오염과 해양배출 금지 등에 따라 최근에는 자원화 또는 에너지화 방법 등을 연구하고 있다. 그러나 전반적인 기술의 수준 및 적용기술에 대한 체계적인 분석 등이 부족하여 관련 기술에 대한 향후 분석이 필요한 실정이다. 본 논문은 슬러지 처리기술, 고체연료화 및 바이오가스 증산·활용기술을 대상으로 관련 특허, 논문 동향을 조사하였다. 또한, 국내·외 연구개발 추이를 분야별·5개 국가별(한국, 일본, 중국, 미국, 유럽)로 조사 및 분석하였다. 향후 슬러지의 효과적 처리를 위해 필요한 기술 분야를 제시하였다.

주요어 : 슬러지 처리, 바이오가스, 폐자원 에너지, RDF

1. 서 론

국내 하수처리장의 신·증설, 하수관거 정비 및 방류수 수질기준 강화 등으로 인해 하수 슬러지 발생량이 지속적으로 증가하고 있다. 하수 슬러지의 발생량은 2008년 7,446톤/일에서 2013년에는 10,946톤/일로 32% 증가되었다(Cho et al., 2014). 하수 슬러지의 처리는 종래 해양배출 방식에 크게 의존해 왔으나 슬러지의 해양배출이 금지됨에 따라 다양한 육상 처리기술이 적용되고 있다. 그러나 실제 적용되는 처리기술 수준은 여전히 미흡한 실정이다.

대부분의 선진국에서는 슬러지를 유용한 폐자원으로 활용하기 위해 자원화 또는 에너지화 방식의 기술을 개발·적용하고 있다. 미국은 1950년대부터 슬러지를 bio-solid로 칭

하고 있으며 자원화 및 처리과정에 관한 내용을 상세히 규정하고 있다(Nam & Han, 2011). 일본의 경우는 하수 슬러지의 안정화 및 감량화를 주요 정책 방향으로 유지하였으며 최근에는 자원화를 촉진하는 방안을 강조하고 있다. 유럽 국가들의 경우 EU에서 정한 지침을 기본으로 국가별 특성을 고려하여 독자적인 처리 기준을 설정하고 있으며 기본적으로 자원화를 지향하고 있다(Nam & Han, 2011). 국내의 경우에도 해양배출이 금지되기 이전부터 퇴비화 등 자원화 방안과 소각, 바이오가스 등 다양한 처리정책을 추진하고 관련 기술을 개발하여 왔으나 하수처리기술과 비교할 때 슬러지 처리기술의 전반적인 수준이 떨어지고 적용기술에 대한 체계적인 조사·분석도 미비한 실정이다. 따라서 슬러지 자원화 및 에너지화 관련 기술에 대한 분석을 기초로 향후

1) Department of Civil Engineering, The University of Suwon

2) Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University

† Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University (Corresponding Author : jtkim221@kgu.ac.kr)

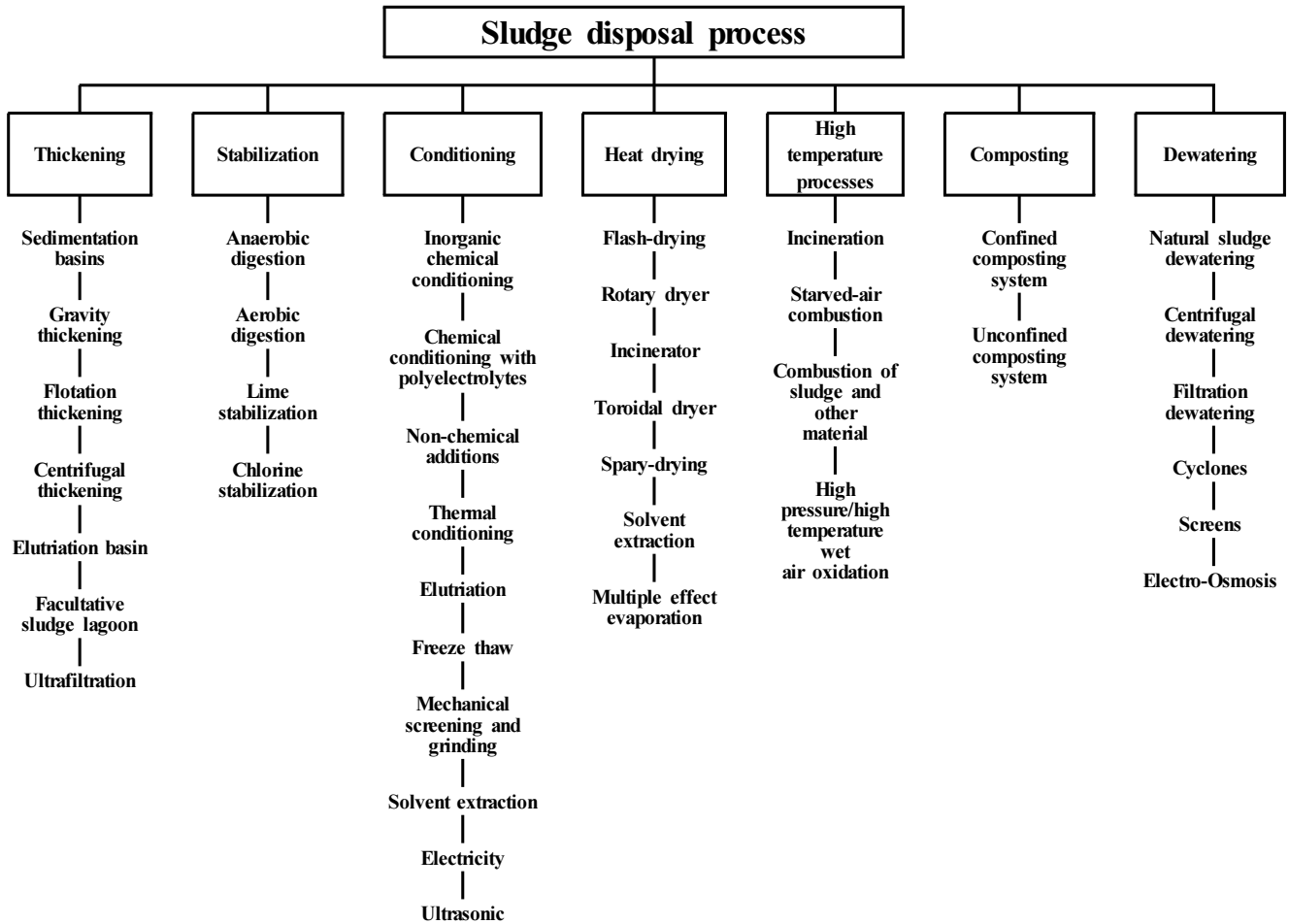


Fig. 1. Sectional view of reaction tank

개발 및 적용 효율성이 높은 기술을 도출할 필요가 있다(김지혜 등, 2013; 오동익 등, 2011).

본 연구에서는 바이오가스 관련 기술을 포함한 하·폐수 슬러지 처리기술의 분야별 특허 등록 및 논문 발표 추세를 조사·분석하고, 이를 토대로 국내 기술의 취약점과 보완·개선할 과제를 도출하여 슬러지의 효율적인 처리를 위해 필요한 기술개발 분야와 내용을 제시하고자 한다.

2. 하·폐수 슬러지 처리기술 관련 특허 동향

2.1 하·폐수 슬러지 처리기술 특허 동향

하·폐수 슬러지 처리기술을 크게 농축(thickening), 안정화(stabilization), 개량(conditioning), 탈수(dewatering), 열 건조(heat drying) 및 고온이용(high temperature), 퇴비화(composting) 등 여섯 가지 분야로 분류하고 Table 1과 같이 각 분야별 기술들의 키워드를 선정하여 특허 등록 추세를 조사하고 핵심기술을 분석하였다. 특허 분석은 5년 단위로 구분하였으

Table 1. Sludge treatment technology

Sub-class	Key words
Thickening	Solids concentration, Thickened sludge
Stabilization	Suspended solids, Pathogenic organism, Utilization of sludge
Conditioning	Particle size, Surface, Degree of hydration
Heat drying	Heating temperature, Humidity, Heat transfer
High temperature process	Sludge fuel value, Heat balance, Moisture content
Composting	Temperature, Moisture, Oxygen supply
Dewatering	Water content, Reducing volume, Dissolved solids

며 특허 검색어는 분류된 기술 분야명과 키워드를 혼합하여 사용하였다. 아울러 기술의 활용분야를 살펴보기 위하여 IPC (International Patent Classification) 기준에 따라 특허내용을 분석하였다. 기술발전 단계는 특허 건수와 신장세를 토대로 지속적인 성장세를 보이는 성장기, 증가추세를 유지하는 발전기, 신장세가 감소되는 성숙기, 건수 자체가 감소하는 쇠퇴기로 구분하였다. 국가별 기술개발 추세를 분석하기 위해 한국, 일본, 중국, 미국, 유럽 등 5개 국가군으로 구분

하여 비교하였다.

첫 번째로 하·폐수 슬러지 처리기술 중 농축 관련 기술의 경우 특허 점유율은 일본이 41%로 가장 높게 나타났다. 최근 추세를 보면 2000년을 기준으로 일본의 농축 관련 특허는 감소하는 반면 중국의 경우 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 미국의 경우에는 농축 관련 특허가 가장 먼저 등록되었으나 일본이나 중국에 비해 크게 증가하는 경향이 나타나지 않았다. 국내의 경우 다른 국가에 비해 가장 늦게 특허가 등록되었으나 지속적인 증가세를 보여 2014년 현재 154건, 점유율 12%로 유럽에 비해 높게 나타나고 있다(홍정석과 김형진, 2012).

농축 관련 특허를 IPC 기준에 따라 분석한 결과 모든 국가에서 C02F 및 B01D 그룹의 기술을 포함하고 있다. 점유율이 가장 높은 일본의 경우 측정 및 관측기기 관련 분야의 특허를 포함하고 있으며 중국의 경우 미생물, 효소 및 발효 관련한 농축기술 그룹(C12N, C12P)이 특허에 다수 포함되어 있다. 최근 10년간의 특허 건수 상승률을 보면 중국의 성장이 가장 두드러진다. 기술발전 단계를 보면 점유율이 높은 일본과 미국의 경우 발전기, 성숙기를 거쳐 쇠퇴기에 접어든 것으로 판단된다. 점유율이 가장 낮은 유럽의 경우 발전기에서 더 이상 성장하지 못하고 쇠퇴기로 접어들어 슬러지 농축기술의 이용도가 낮은 것으로 보인다. 중국의 경우 가장 빠른 성장세를 보이며 현재 발전기에 있어 향후 하·폐수 슬러지 농축기술이 더욱 발전할 가능성이 높으므로 예상된다.

둘째, 안정화 관련 기술의 경우 일본의 특허 점유율이 가장 높고, 기술 분야는 안정화 처리를 거쳐 발생하는 부산물을 이용하여 건축 재료와 연료로 사용하는 C04B 및 F23G 그룹이 높은 것으로 나타났다. 두 번째로 점유율이 높은 미국의 경우에도 연료와 관련된 C10L 그룹이 나타났으며 중국의 경우에는 발효에 관련된 C12P 그룹도 나타났다. 전반적으로 단순 처리 단계를 넘어서 부산물을 활용할 수 있는 다양한 기술 분야의 특허가 있는 것으로 분석되었다. 국내의 경우에도 부산물을 활용하는 기술 분야가 다수 포함되었고 이 중 비료로 활용하는 기술 그룹인 C05F가 상위권에

있다. 기술발전 단계를 분석해보면 미국과 일본의 경우 현재 성숙기에서 쇠퇴기로 전환되었고, 유럽의 경우에는 성숙기에서 다시 발전기로 접어드는 형태로 나타났다. 중국의 경우에는 2000년 이후 특허 건수가 급격히 상승하는 추세로 관련 기술이 비약적으로 발전하는 것으로 분석된다. 우리나라의 경우에는 성장기를 거쳐 발전기에 도달하였으나 최근 급격하게 쇠퇴기로 접어들고 있어 이 분야의 기술 개발이 필요한 것으로 나타났다.

셋째, 개량 관련 기술의 특허는 미국이 530건, 점유율 45%로 가장 높게 나타났으며 농축과 안정화 관련 특허 점유율이 가장 높은 일본이 269건(점유율 23%)으로 두 번째이고, 중국의 경우 125건(점유율 10%)으로 나타났다. 우리나라는 관련 기술 특허가 130건(점유율 11%)으로 중국보다 다소 높게 나타났다. IPC 코드별 특허 분야를 분석하면 모든 국가에서 B01D 분야 기술이 포함되어 있어 슬러지의 개량이 수분 또는 특정 물질 제거에 중요한 요소인 것으로 판단된다. 미국을 제외한 중국, 일본, 유럽, 한국은 C05F 분야 기술이 나타나 비료 사용을 위한 슬러지의 개량 기술이 적용되는 것으로 판단되며, 점유율이 가장 높은 미국의 경우에는 슬러지 개량 기술 중 C07C 그룹(비환 또는 탄소환 화합물)이 유일하게 나타났다. C07C 그룹은 유기물 합성 분야 중 기초 분야에 해당되고 슬러지 개량의 핵심 기술 또는 원천기술을 다수 포함하고 있다. 유럽의 경우 B01J 그룹이 상위 5개 그룹 내 포함되는 것으로 나타났으며 이 B01J 그룹은 C07C 그룹과 유사하게 슬러지 개량 분야의 핵심 기술에 해당된다. 우리나라의 경우에는 활용 분야 또는 단순 처리 분야에 집중되고 있는 것으로 나타났다. 기술개발 단계를 보면 미국의 경우 발전기와 성숙기를 반복하는 것으로 나타나 핵심 또는 원천 기술이 지속적으로 개발되고 있는 것으로 나타났다. 일본과 유럽의 경우에는 성숙기를 거쳐 점차 쇠퇴기에 진입하는 것으로 나타났으며 중국은 가장 늦게 특허가 등록되기 시작하여 현재는 발전기에 있는 것으로 나타났다. 우리나라는 발전기, 성숙기를 지나 쇠퇴기에 접어든 것으로 나타났으나 다른 국가의 발전 과정을 고려해 볼 경우 과도기적인 쇠퇴 현상인 것으로 보인다. 앞으로 우리나라도

Table 2. The status of patent on sludge treatment technology

	Thickening	Stabilization	Conditioning	Heat drying / High temperature	Composting	Dewatering
USA	259	192	530	316	91	210
Japan	534	303	269	650	70	97
Europe	98	77	135	120	35	61
China	262	126	125	122	21	97
Korea	154	45	130	177	27	30
Total	1,153	698	1,059	1,208	217	465

Table 3. The classification of sludge treatment technology in 5 countries

IPC Code	Contents	Country				
		USA	China	Japan	Europe	Korea
A01C	Seeding, Sowing, Fertilization	E				
A01G	Horticulture, Forestry, Irrigation			E		
B01C	Physical, Chemical methods or general devices	F				
B01D	Separation	A, B, C, D	A, B, C, F	A, B, C, E, F	A, B, C, D, E, F	A, C, D, E, F
B01F	Dissolution, Emulsification, Dispersion	B			C	
B01J	Chemical or physical methods	E	D			
B02C	Crushing, grinding or fine grinding general	E				
B04B	Centrifugal separator					A
B09B	Treatment of solid waste		B, F	A, B, C, D, F	A, B, C, F	A, B, C, D
C01B	Non-metallic elements or that compound		D			
C02 (B, C, F)*	Treatment of water, Waste water, Sewage or sludge	A, B, C, D, E, F	A, B, C, D, E, F	A, B, C, D, E, F	A, B, C, D, E, F	A, B, C, D, E, F
C04B	Mortars, Concrete or similar construction materials		C, D, F	B, D, F	D	B, D, F
C05F	Fertilizers from waste or refuse	D, E	C, E	C, E	C, E	A, B, C, E
C07C	Acyclic compound or carbocyclic compound	C				
C08F	Carbon-carbon macromolecular compounds obtained by reactions only involving unsaturated bond		A, F		B	
C09K	Dyes, Paint, Resin etc. unclassified material					B, C, E
C10L	Unclassified fuel	B, F		D	B, F	
C12N	Microorganism or enzyme; The composition		A			
C12P	Method for synthesizing the desired chemical or composition using fermentation or enzyme		A, B, C			
C22B	Pre-treatment of the fuel	F	D	F	F	
F23G	Incinerate the low-grade fuel by combustion	A, D		A, B, C, D	D	
F26B	Dried by removing the liquid from the solid fuel or solid material	C, D, F			A, D	D
G01N	Investigating or analyzing materials by detection of the chemical or physical properties of the material		B	A		

*C02B, C02C is included in group C02F in IPC (2014. 01)

A (concentration), B (stable), C (improvement), D (dry and high temperature), E (composting), F (dehydrated)

핵심기술 성격의 개량기술 개발이 필요하며 미국의 발전 과정을 참고할 필요가 있는 것으로 판단된다.

넷째, 열 건조 및 고온이용 공정에 관련한 특허는 일본이 650건(점유율 47%)으로 가장 높게 나타났다. 미국과 유럽에서는 열에 의한 공정은 비교적 낮은 비율을 보이고 있으며 큰 변화를 보이지 않았다. 일본, 한국, 중국을 비교하면 2000년 이전에는 일본이, 이후에는 한국과 중국에서 기술 특허가 증가하는 경향을 보였다. 분야별로는 미국을 제외한 모든 국가에서 C04B 그룹이 나타났으며 이는 건조된 슬러지를 이용하여 건축 재료로 활용하거나 촉매 또는 첨가제로 이용하는 것을 의미한다. 특히 일본의 경우 C04B 그룹이 차지하는 비율이 20%로 매우 높게 나타났다. 미국에서는 다른 국가와는 달리 건조된 또는 고온 처리된 슬러지를 이용하여 비료로 활용되는 C05F 그룹이 상위권에 포함되었다. 중국의

경우 일본과 유사하게 C04B 그룹이 높게 나타났으며 B01J, C22B, C01B 등 건축 재료뿐만 아니라 다양한 분야에서 신장세를 보이고 있다. 기술발전 단계를 보면 미국의 경우 발전기-성숙기-쇠퇴기가 반복적으로 나타나고 있으며 유럽의 경우에도 유사한 경향을 보이고 있다. 중국과 한국의 경우 발전기로 나타나고 있으나 중국은 성숙기로 나아가는 추세로 한국은 쇠퇴기로 나아가는 추세로 진행되고 있다.

다섯째, 퇴비화 기술은 다른 분야에 비해 특허 건수가 전체적으로 적게 나타났다. 미국이 91건(점유율 37%)으로 가장 많고 일본이 70건(점유율 29%)으로 두 번째이며, 국내의 경우 27건(점유율 11%)으로 중국 다음이었다. 최근 10년간 미국, 일본과 유럽의 경우에는 퇴비화 관련 특허가 감소하는 추세인 반면 점유율이 낮은 중국과 한국은 증가하는 추세를 보였다. 퇴비화에 관련된 특허 분야를 보면 모든 국가

에서 C05F 그룹이 나타나 비료 연계 활용기술이 주로 개발되는 것으로 판단된다. 특히 분야 중 B09B(고체 폐기물의 처리) 그룹이 퇴비화 기술에서만 나타나지 않으며, 이는 퇴비화의 경우 슬러지의 처리보다는 자원화 분야에 적용되기 때문인 것으로 보인다. 미국의 경우에는 다른 국가들과는 달리 B01J와 B02C 그룹이 모두 상위권에 포함되어 있으며, 이는 퇴비화에 관련된 핵심 또는 원천 기술을 다수 보유하고 있는 것을 반영하는 것으로 보인다. 일본의 경우 A01G 그룹이 나타나 퇴비화의 활용 방안이 다수 개발된 것으로 나타났다. 기술발전 단계를 보면 점유율이 높은 미국과 일본의 경우 발전기-성숙기를 반복하며 지속적으로 기술 개발이 이뤄지고 있으며, 유럽의 경우에는 발전기-성숙기를 지나 쇠퇴기에 접어드는 것으로 나타났다. 한국과 중국의 경우에는 발전기를 거쳐 성숙기에 근접해 가는 것으로 나타났다.

여섯째, 탈수기술의 경우 중국을 제외한 모든 국가에서 2000년대 이후 관련 특허가 감소하는 추세이다. 특히 건수를 보면 미국이 210건으로 전체 특허의 42%를 점하고 있으며 1970년대부터 슬러지 탈수 관련 특허가 등록되기 시작하여 2000년대 이전까지 지속적인 증가세를 보였다. 일본과 유럽의 경우 2000년대 이후 감소하는 추세이고 중국의 경우 1990년대 이후 급증하는 것으로 나타났으며 당분간 증가세를 유지할 것으로 전망된다. 기술 분야는 모든 국가에서 C02F 그룹이 상위권으로 나타났고, 미국의 경우만 다른 국가와 달리 물리·화학적 처리 및 장치에 관련된 기술 분야와 고체연료에 관련된 기술 분야가 포함되었다. 미국을 제외한 국가에서 B01D 그룹을 모두 포함하고 있으며 B09B(중국, 일본, 유럽)와 C04B(중국, 일본, 한국)는 세 국가씩 포함되어 있다. 기술발전 단계를 보면 미국, 일본 및 유럽은 두 번의 성숙기를 거쳐 현재 쇠퇴기에 접어든 것으로 나타났으며 중국도 성숙기에 접어든 것으로 판단된다. 우리나라는 쇠퇴기에 해당되나 특허 건수가 다른 국가에 비해 적은 것으로 보아 일시적인 현상인 것으로 판단된다(Bennamoun et al., 2013; Cho et al., 2014; Christy et al., 2014).

2.2 하·폐수 슬러지 처리기술 수준 분석

특히 분석 결과를 활용하여 우리나라가 취약한 슬러지 처리기술 분야를 도출하였다. 기술 분야를 원천기술(처리기술 적용을 위한 기초 연구개발 단계), 응용기술(원천기술이 확보된 상태에서 슬러지 처리에 적용하는 단계), 활용기술(응용기술을 확대 적용하는 단계)로 분류하였으며 기술별 우선순위는 활용, 응용, 원천기술 순으로 설정하였다(Baik et al., 2014). 농축기술 분야에서는 연소에 의해 저등급 연료를 소각하는 활용기술(F23G)과 재료의 화학적, 물리적

성질의 검출에 의해 재료 조사 또는 분석을 통해 슬러지 농축에 따른 성상 변화를 분석하는 응용기술 분야(G01N)가 취약한 것으로 나타났다. 안정화기술 분야에서는 분리기술을 통해 슬러지 안정화 전·후 고액분리를 하는 기술 분야(B01D)와 연소에 의해 저등급 연료를 소각하는 활용기술(F23G) 등이, 개량기술 분야에서는 비환 화합물과 탄소환 화합물을 이용한 슬러지 개량과 이를 기초로 부산물 및 유용자원을 개발하는 원천기술(C07C), 고체연료와 고형물에서 액체를 제거하여 슬러지를 개량하고 이를 통해 고체 연료를 생산하는 활용기술 분야(F26B)가 취약한 것으로 나타났다. 퇴비화기술 분야에서는 식종, 파종, 시비를 이용한 슬러지 퇴비화 관련 활용기술 분야(A01C), 화학·물리적 방법을 통한 퇴비화 관련 원천기술 분야(B01J), 파쇄·분쇄 등을 통한 슬러지 퇴비화의 후처리 활용기술 분야(B02C)가 미흡한 것으로 나타났다. 탈수기술 분야에서는 물리/화학적 방법을 적용한 탈수 응용기술 분야(B01C), 고체연료와 고형물에서 액체를 제거하여 슬러지를 개량하고 이를 통해 고체 연료를 생산하는 활용기술 분야(F26B)가 취약한 것으로 나타났다(Mahmoud et al., 2010; Stefanakis et al., 2011).

3. 바이오가스 기술 관련 기술 동향

3.1 바이오가스 기술 동향

바이오가스 관련 기술은 크게 증산기술(기질 전처리, CO₂ 메탄화 기술, 생물전기화학적 증산기술 등), 정제 및 고질화기술(흡착, 흡수, 막분리 등), 활용기술(액화, 열병합 발전, 수송용 연료 등) 등 세 분야로 분류하여 기술동향을 분석하

Table 4. The domestic technology level analysis by utilizing patent analysis results

Sludge treatment technology (Classification)	Share best country		National level	
	Country	Technical level	Technical level	Vulnerable areas ¹⁾
Concentration	Japan	Decline	Maturity	F23G, G01N
Stabilization	Japan	Decline	Development	B01D, F23G
Improvements	USA	maturity	Decline ²⁾	C07C, F26B
Dry and use high-temperature processes	Japan	Decline	Development	C10L, F23G
Compost	USA	Maturity	Maturity	A01C, B01J B02C
Dehydration	USA	Decline	Maturity	B01C, F26B

¹⁾ Patents is the highest share among the top five groups. But, there is no domestic sector.

²⁾ Temporary decline

Ref : Mahmoud et al., 2010; Stefanakis et al., 2011

였다. 분류된 범주별로 Table 5와 같이 키워드를 선정하여 특허 조사 및 핵심기술 도출에 이용하였다(Wojciech, 2016).

첫째, 증산기술의 경우 2000년대 이후 바이오가스의 이용 가치가 높아짐에 따라 관련 특허가 급격하게 증가하였다. 바이오가스의 활용도가 높은 미국과 유럽에서 가장 큰 증가율이 나타났으며, 특허 점유율은 미국이 285건(점유율 60%)으로 가장 높게 나타났다. 일본은 미국을 제외한 타 국가에 비해 증산기술 관련 특허가 일찍 등록되었으나 이후 증가세가 미미하여 점유율이 가장 낮게 나타났다. 국내의 경우 1995년대부터 증산기술 관련 특허가 등록되기 시작하여 2010년대 이후 큰 폭으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 기술 분야를 분석해 보면 모든 국가에서 C02F 및 C12P 분야가 포함되었다. 점유율이 높은 미국, 유럽 및 중국에서 C12M 분야가 공통적으로 나타났으나 국내에서는 포함되지 않았다. 일본은 특허 점유율은 낮게 나타났으나 미생물 및 효소 관련 특허가 높게 나타나 이 분야의 기술을 선점하고 있는 것으로 판단된다. 기술개발 단계를 보면 점유율이 가장 높게 나타난 미국의 경우에는 성숙기를 지나 쇠퇴기에

접어든 것으로 나타났다. 유럽과 중국의 경우에는 각각 성숙기, 발전기인 것으로 나타났으며 일본의 경우에는 특허의 건수가 적고 신장률의 변동이 심한 것으로 보아 관련 분야의 기술 발전이 뚜렷하지 못한 것으로 보인다. 우리나라는 2000년대 이후 급격한 발전을 거쳐 성숙기에 접어든 것으로 나타났다. 이러한 국가군별 개발 추세가 유지될 경우 향후 바이오가스 증산기술은 중국의 발전세가 가장 두드러질 것으로 보인다.

둘째, 정제 및 고질화 관련 기술의 특허는 타 분야에 비해 건수가 적었으며 국가군별로는 유럽과 한국의 점유율이 높은 것으로 나타났다. 바이오가스 플랜트가 가장 많이 설치된 유럽이 특허 건수도 49건(점유율 38%)으로 가장 높게 나타났으며 1980년대부터 정제 및 고질화 관련 분야의 연구가 활발하게 진행되어 지속적으로 특허 건수가 증가되었다. 국내의 경우에는 2010년대부터 정제 및 고질화 관련 분야의 특허 건수가 급증하여 총 30건(점유율 23%)으로 두 번째로 높은 점유율을 나타냈다. 기술 분야를 보면 모든 국가에서 C02F 분야가 공통적으로 나타났으며, B01J 분야는 원천기술에 근접한 항목으로 점유율이 높은 유럽에서만 나타났다. 이는 유럽이 상대적으로 바이오가스의 활용도가 높은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 특허 건수가 타 분야에 비해 적어 기술발전 단계 역시 유럽을 제외한 나머지 국가에서는 발전기 또는 성숙기 단계인 것으로 나타났다. 유럽의 경우에는 발전기를 거쳐 재도약기에 접어드는 추세를 보이고 있는데 이는 최근 재생에너지원으로 바이오가스가 주목받고 있는 것에 따른 것으로 판단된다. 점유율이 두 번째로 높은 우리나라의 경우에는 최근 바이오가스의 이용가치 향

Table 5. Biogas technology

Sub-class	Key words
Enhancement of biogas production	Pretreatment, CO ₂ conversion, Bioelectrochemistry
Purification / upgrading	Carbon dioxide, Trace matter, Dehydration, Separation
Utilization of biogas	Liquefaction, Power generation, Storage
Operation / management technology	Monitoring, Control system, Microorganisms

Table 6. Biogas technology classification contents and country

IPC code	Contents	Country				
		USA	China	Japan	Europe	Korea
A01C	Planting, Sowing, Fertilization				A	
A23K	A particularly suitable method for joining a particular food or its production to the animal		A			
B01D	Separation	A, B, C			A, B, C	A, B, C
B01J	Chemical or physical methods				B	
B09B	Treatment of solid waste	C		A, B, C		A, C
C02 (C, F)	Water, Waste water, Sewer or treatment of sludge	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B, C
C05F	Compost from waste or garbage		A, B, C		C	A
C12M	Device for zymology or microbiology	A, C	A, C		A, C	
C12P	Method for synthesizing the desired chemical or composition using fermentation or enzyme	A, B, C	A, B, C	A	A, C	A
C12N	Microorganism or enzymes; Composition			A		
C10L	Unclassified fuel (Natural gas, Liquid petroleum gas)			A, B, C		B, C
H01M	Chemical energy, a method or means for converting electric energy directly			C		
F02D	Control of combustion engine			C		

A (transpiration), B (purification and upgrading), C (utilization)

상으로 정제 및 고질화 분야에 대한 관심이 높아졌으며 기술 수준 역시 발전기를 거쳐 성숙기에 접어든 것으로 판단된다.

셋째, 바이오가스 활용기술 분야의 경우 중국이 81건(점유율 22%)으로 가장 높게 나타났다. 중국의 경우 2000년대 초반까지 상대적으로 특허 건수가 저조했으나 2010년대부터 급증하고 있다. 일본과 유럽의 경우 2010년대에 접어들면서 감소하는 경향을 나타냈으며 국내의 경우에는 2005년대부터 관련 특허가 등록되기 시작하여 지속적으로 증가세를 보이고 있다. 기술 분야별로 보면 중국과 유럽의 경우에는 비료화와 관련된 분야(C05F, C05G)가 나타나 바이오가스 뿐만 아니라 바이오가스 플랜트에서 발생하는 잔류물을 활용하는 기술도 개발된 것으로 판단된다. 일본과 우리나라에서는 연료 관련 분야인 C10L이 나타나 수송용(또는 가정용) 연료로 활용되는 기술이 개발되는 것으로 나타났다. 일본의 경우 점유율은 상대적으로 낮게 나타났으나 바이오가스를 이용한 발전기술로 볼 수 있는 H01M 및 F02D 분야가 나타나는 특징을 보이고 있다.

3.2 바이오가스 기술 수준 분석

특허 분석 결과를 토대로 국내 바이오가스 기술의 취약

Table 7. The status of patent on biogas related technology

	Enhancement of biogas production	Purification/Upgrading	Utilization of biogas
USA	285	28	76
Japan	48	11	64
Europe	170	49	65
China	102	12	81
Korea	77	30	78
Total	605	100	286

Table 8. The domestic technology level analysis by utilizing patent analysis results

Sludge treatment technology (Classification)	Share best country		National level	
	Country	Technical level	Technical level	Vulnerable areas ¹⁾
Transpiration technology	USA	Decline	Development	C12M
Refining and chronic	Europe	Decline (Reform)	Development	B01J
Utilization	China, Japan ²⁾	Development	introduction	H01M, F02D

¹⁾ Patents is the highest share among the top five groups. But, there is no domestic sector.

²⁾ Japan has added. Because power generation facilities in biogas utilization field has high percentage.

부분을 도출하였다. 증산기술 분야의 경우 효소, 미생물을 이용하여 생물학적 방법을 통한 바이오가스 응용기술(C12M)이, 정제 및 고질화기술 분야의 경우 화학/물리적 방법을 적용한 바이오가스 정제 및 고질화 관련 원천기술(B01J)이, 활용 분야에서는 화학적/전기적 에너지로 전환하는 활용기술(H01M)과 연소 기관 제어를 통한 바이오가스 활용기술(F02D)이 각각 취약한 것으로 나타났다.

4. 슬러지 처리 관련 학술 동향

4.1 슬러지 처리 관련 학술 동향

슬러지 처리 관련 학술 동향을 살펴보기 위해 국내·외 논문 건수를 분야별로 조사하였다. 안정화와 열 건조/열이용 기술이 높은 비중을 차지하였으며 탈수, 퇴비화, 농축기술은 상대적으로 낮은 비중을 나타내고 있다. 후자의 경우 대부분 장치 성능과 연관되므로 상대적으로 적은 것으로 보인다. 논문 건수는 모든 국가군에서 2000년대 중반부터 크게 증가하고 있어 효율적 슬러지 처리를 위한 연구가 증가하고 있음을 알 수 있다(Gianico et al., 2015).

4.2 바이오가스 관련 학술 동향

바이오가스화 기술 분야의 논문 건수를 비교하면 증산기술 분야의 비율이 크고 최근까지 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 정제·고질화와 활용 분야는 2000년대 들어 증가하고 있으며 2010년대 이후에는 활용 분야가 정제·고질화 분야에 비해 높은 증가세를 보이고 있다. 이는 바이오가스의 직접 활용기술, 고순도 바이오가스 생산 기술 등의 개발에 따른 것으로 판단된다(Hosseini & Wahid, 2014).

최근 3년간 바이오가스 증산기술 분야의 핵심 키워드는

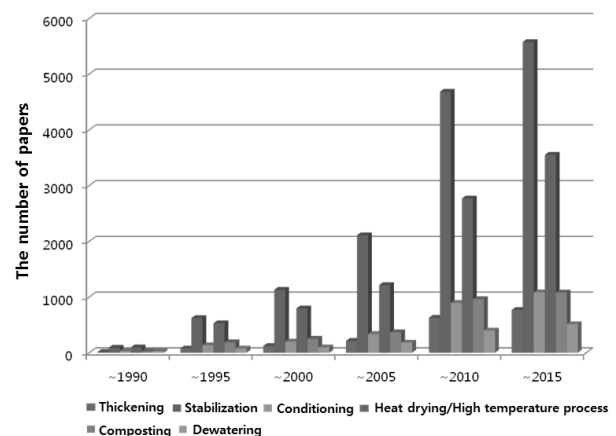


Fig. 2. The trend of published papers on sludge treatment technology

메탄 생성균, 전처리, 반응조, 생물전기화학 및 수소로 나타났다. 전처리의 경우 바이오가스의 수율 향상을 위해 기질을 대상으로 수행한 연구를 반영하는 키워드로써 증산기술 중 기본 연구에 해당된다. 반응조의 경우 반응조의 형태뿐만 아니라 교반, 소화조 구성, 운영 방식 등 다양한 분야를 대표할 수 있는 키워드이다. 또한, 반응조의 경우 세부적으로 보면 고상 혐기성 소화, 입상 미생물 기반 혐기성 소화 등과 관련된 연구가 주로 이루어지고 있다.

정제 및 고질화 분야에서 핵심 키워드는 분리와 바이오가스 내 불순물 항목들로 나타났다. CO₂의 경우 바이오가스 내 메탄을 제외한 성분 중 가장 많은 비중을 차지하고 있으며 제거·분리에 관한 다수의 연구 결과가 도출되었다(Fulazzaky et al., 2015). 탈황의 경우 탈황제, 활성탄 등을 이용한 흡착하는 방법이 가장 널리 연구되었고 상용화되어 있다. 또한, 2단 혐기성 소화 공정을 통해 전단에서 생물학적 탈황, 후단에서 메탄 생성을 하는 연구가 최근 시도되고 있다. 탈황의 경우 물리·화학적 방법에 의해 높은 처리 효율이 가능하나 고가의 흡착제 및 발생 부산물 처리 문제 등이 나타나고 있어 보다 경제적인 방법에 대한 연구 개발이 진행되는 것으로 보인다(Nikaen et al., 2015).

바이오가스화 활용 분야의 핵심 키워드는 엔진, 터빈, 발전, 열 및 수송용 연료로 나타났다. 엔진과 터빈의 경우 바이오가스 활용 시 효율을 극대화할 수 있는 설비 개발에 집

중되어 있다. 발전의 경우 바이오가스 전용 발전기, 열병합 발전기 등에 집중되어 있으며 효율 향상을 위한 기술 개발이 진행 중이다. 바이오가스의 열에너지 전환 기술은 전용 보일러 또는 열병합 발전에 관련된 분야로써 주로 열전달 효율을 향상시키거나 폐열, 잔열 등으로 회수할 수 있는 기술과 발전 및 열관련 설비의 소형화 기술에 집중되어 있다(Lee, 2008; Lee et al., 2012).

5. 하·폐수 슬러지 처리기술의 변화 고찰

5.1 하·폐수 슬러지 처리의 변화

과거 하·폐수 슬러지의 처리는 농축, 개량, 안정화 등과 같은 단일 공정을 거치는 것에 한정되었다. 즉 하·폐수 슬러지 처리의 중간과정에 해당하는 기술만을 적용하고 폐기물의 발생에서 최종처리까지의 통합적인 기술 개발이 미진하여 처리 전 단계와 후 단계 및 최종처리기술이 실용화되지 못해 안정적인 처리 및 에너지화가 어려운 실정이었다. 20세기 후반부터는 고유가 문제, 화석 연료의 한계 등 각종 사회적, 환경적 문제로 인해 폐자원의 자원화 또는 에너지화에 관련된 기술 개발이 강조되고 있다(Halim et al., 2015; Yang et al., 2015).

5.2 고체연료화 기술 적용 동향

전 세계적으로 슬러지의 효율적 처리 대안으로 에너지화 기술을 적용하는 추세이다. 폐기물 고형연료(Refuse-Derived Fuel, RDF)의 경우 발열량이 높아 에너지로의 회수효과가 우수한 장점이 있다. 에너지 잠재량을 효과적인 에너지원으로 이용하기 위해서는 슬러지가 보유한 열원을 효과적으로 이용하는 기술, 그리고 잠재 에너지량의 최대화를 유효에너지

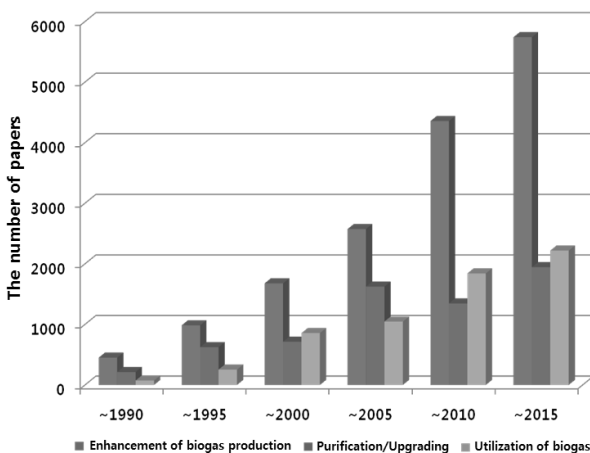


Fig. 3. The trend of published papers on biogas technology

Table 9. Sectoral core keywords

Transpiration technology	Refining and chronic technology	Utilizing bio-gasification
Methanogens Pretreatment Reactors Bioelectrochemistry (MECs) Hydrogen	Separation CO ₂ H ₂ S Siloxane Trace matter	Engine Turbine Power Heat Vehicle fuel

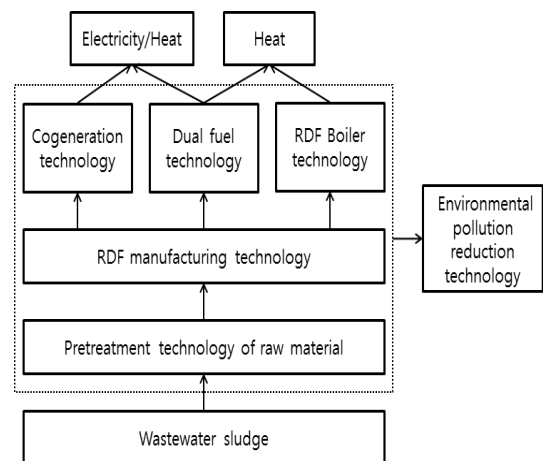


Fig. 4. Solid fuel technology systems of wastewater sludge

지로 전환하는 기술 개발이 중요하다. 우리나라의 경우 RDF 제조 및 성형 관련 기술은 일본 등의 외국기술을 도입하고 있어 국산화율이 아직 저조하고 상용화도 미진한 실정이다.

하·폐수 슬러지의 고체연료화는 원료의 전처리 과정을 거쳐 고형연료 제조 후 열병합발전, 혼소 및 전용보일러 기술을 통해 최종적으로 전기와 열을 생산하는 기술이다. 현재 우리나라는 하·폐수 슬러지의 저에너지 소비형 고열량 고체연료 제조 기술 및 고효율 RDF 전용 보일러 시스템 기술개발 등이 진행되고 있다.

5.3 바이오가스화 기술 적용 동향

하·폐수 슬러지의 에너지화 기술 중 혐기성 소화를 통한

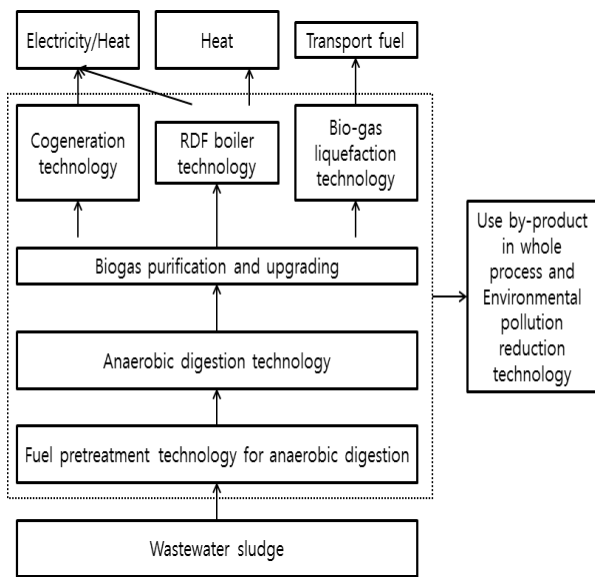


Fig. 5. Solid fuel technology systems of wastewater sludge

바이오가스화는 슬러지를 처리함과 동시에 부산물인 메탄을 통해 에너지 회수가 가능한 장점을 지니고 있다. 에너지 선진국인 유럽에서는 1990년대부터 실증 혐기성 플랜트가 다수 건설되어 운영 중에 있으며, 미국의 경우 12,000여개가 넘는 바이오가스 시설이 운영되고 있다. 국내에서도 신·재생에너지 확대 정책에 따라 혐기성 소화 공정의 중요성이 점차 증가되고 있다. 그러나 혐기성 소화 공정을 이용한 바이오가스 시설은 일부 하수 처리장 및 매립지에 제한적으로 적용되고 있는 실정으로 향후 지속적인 확충이 필요한 실정이다.

6. 결 론

하·폐수 슬러지는 유기물의 농도와 함수율이 높기 때문에 처리 및 처분에 많은 어려움이 있다. 또한, 런던협약 '96 의정서에 따라 슬러지의 해양투기가 전면 금지되었으며, 소각 처리는 대기오염, 유해화학물질 방출 등의 위해성을 지니고 있다. 국제적으로 하·폐수 슬러지의 고형연료화, 바이오가스화 등 자원화 또는 에너지화 기술이 온실가스 감축, 자원고갈 문제의 유력한 해결수단의 하나로 인식되고 있다.

본 조사에서는 하·폐수 슬러지 처리기술을 농축, 안정화, 개량, 열 건조 및 고온 이용, 퇴비화 그리고 탈수로 구분하여 기술 수준을 국가별로, 분야별로 분석하였다. 농축, 안정화, 열 건조 및 고온 이용공정 분야에서는 일본이 가장 높은 점유율을 나타냈으며 개량, 퇴비화, 탈수 분야에서는 미국이 가장 높게 나타났다. 국내의 하·폐수 슬러지 처리기술의 경우 취약한 분야는 F23G(연소에 의해 저등급 연료를

Table 10. Detail technology in key issues of solid fuel and bio-gasification in wastewater sludge

Division	Status	Key issues	Detail technology
Solid fuel	Localization of skills shortage	▶ RDF manufacturing technology to localization	▶ High-efficiency / compression technology for RDF Manufacture
	Manufacturing and utilization process is not optimized	▶ Dedicated high-efficiency boiler (or system) development ▶ Reduction technology to Environmental pollution	▶ Cogeneration technology to Use RDF ▶ RDF / coal dual fuel technology ▶ Technology of reduction for stink when dry to wastewater sludge
Bio-gasification	Localization of skills shortage	▶ Biogas production increase technology	▶ Bioelectrochemical method based high efficiency anaerobic digestion process ▶ Production of hydrogen gas by an bio electrochemical method ▶ Integration process of Solid-phase anaerobic digestion ▶ Integration process of Granular microbe-based high efficiency anaerobic digestion
	Lack of technical perfection	▶ Technology of byproduct use to cycle ▶ Based on anaerobic digestion for biogas system Operating / management technology	▶ Utilization technologies of wastewater sludge acid fermentation broth ▶ Operation / management techniques in order to respond to the anaerobic digestion operating disturbances

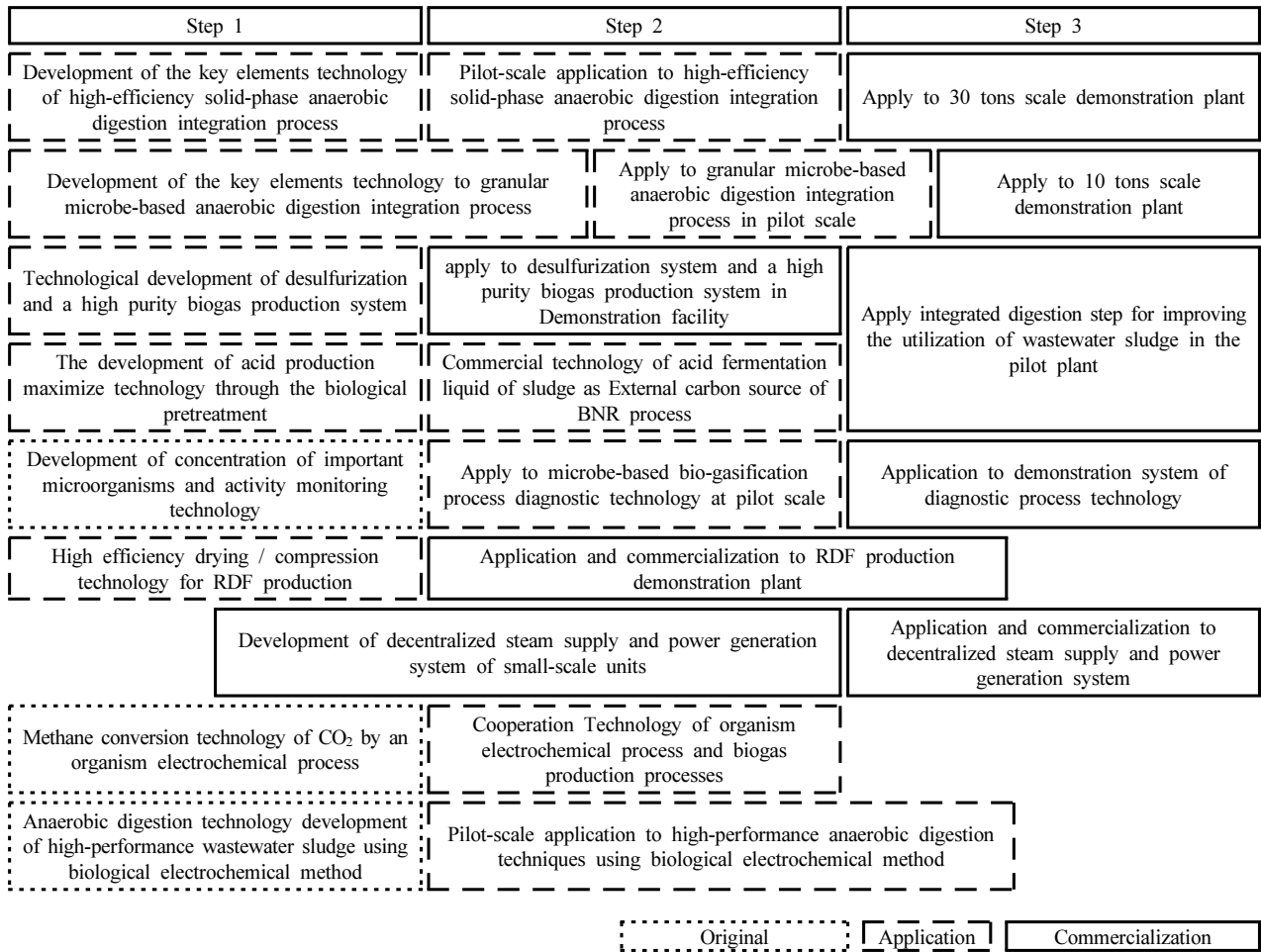


Fig. 6. Solid-fuel/Bio-gasification technology roadmap of wastewater sludge

소각하는 것), F26B(고체연료 또는 고형물에서 액체를 제거하는 것에 의한 건조), C10L(달리 분류되지 않는 연료) 등 고형연료 관련 분야로 나타났다. 미국을 비롯한 선진국에서는 하·폐수 슬러지를 이용하여 고형연료를 생산하는 연구가 다수 진행되어 왔으나 국내의 기술 수준은 아직 미흡한 것으로 나타났다. 현재 국내의 하·폐수 슬러지를 이용한 고형연료 생산 기술은 외국 기술을 도입하여 국내 실정에 맞춰 변형하는 수준에 머물고 있다.

바이오가스화 기술과 관련한 기술 수준 분석에서는 미국, 유럽이 각각 증산기술과 정제/고질화 기술 분야를 선점하고 있는 것으로 나타났다. 국내의 취약 분야로는 C12M(효소학 또는 미생물학을 위한 장치), B01J(화학적 또는 물리적 방법) 등 증산기술 분야, 정제/고질화 기술 분야, 활용기술 분야로 나타났다. 미국과 유럽의 경우 오래전부터 혐기성 소화 공정을 이용한 하·폐수 슬러지의 바이오가스화 플랜트가 설치·운영되고 있다. 국내의 경우에는 해외 기술을 기반으로 하수처리장 내 바이오가스화 시설이 도입되고 있으나 성공적인 사례가 드물어 최적의 기술 개발이 필요한 실정이다.

이러한 조사 결과를 토대로 향후 우리나라에서 중점 개발되어야 할 분야를 살펴보면 먼저 슬러지 처리기술의 경우 고형연료 제조 기술의 국산화, 고효율 전용 보일러(또는 발전) 시스템 개발, 그리고 2차 오염 저감기술로 분류할 수 있다. 이슈별 세부 기술로는 고형연료 제조를 위한 고효율 건조/압축 기술 개발, 고형연료를 이용한 열병합 발전 기술 개발, 고형연료와 석탄의 혼소 기술 개발, 하·폐수 슬러지를 이용한 고형연료 생산 시 발생하는 악취 저감 기술 등의 개발이 필요하다.

바이오가스화 관련 기술의 경우 바이오가스 증산기술, 바이오가스 정제 및 고질화 기술, 바이오가스 시스템 운영/관리 기술, 전과정 부산물 이용 기술로 분류할 수 있다. 이슈별 기술개발이 필요한 세부 기술로는 생물전기화학적 방법 등을 통한 CO₂의 메탄 전환 기술, 혐기성 소화 운전 교란에 대응하기 위한 운영/관리 기술, 탈황 및 고순도 바이오 가스 생산 기술, 하·폐수 슬러지 산발효액의 활용기술 등을 예시할 수 있다.

하·폐수 슬러지의 자원화 및 에너지화 관련 환경시장의 규모가 지속해서 성장할 것으로 전망되고 슬러지의 자원화

가치 역시 높아지고 있어 이러한 기술개발의 중요성도 더욱 커지고 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발 사업”으로 지원받은 과제입니다(과제번호 : 2016001410001).

References

1. 김지혜, 박경철, 한영립, 정병길, 최영익, 성낙창 (2013), 유기성폐자원의 혼합에 따른 고품연료의 제조특성 및 발열량 향상에 관한 연구, 한국폐기물자원순환학회 춘계학술연구회, Vol. 2013, pp. 33.
2. 오동익, 최정수, 윤문섭, 김상일, 환경부 (2011), 미래지향형 하수처리 시스템에 대한 기술동향, 기술동향보고서, 한국환경산업기술원, pp. 79~82.
3. 홍정석, 김형건 (2012), 폐기물 저감·재활용·에너지화 기술의 R&D 투자 현황 분석, 에너지공학, Vol. 21, No. 3, pp. 315~324.
4. Baik, S. J., Han, I. S., Choi, I. H., Kang, S. H. and Hong, S. M. (2014), Research on composting of sewage sludge using dryer facility with indirect heating system, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol. 28, No. 3, pp. 299~304.
5. Bennamoun, L., Arlabosse, P. and Léonard, A. (2013), Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 28, pp. 29~43.
6. Cho, I. H., Ko, I. B. and Kim, J. T. (2014), Technology trend on the increase of biogas production and sludge reduction in wastewater treatment plants: sludge pre-treatment techniques, Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 52, Issue 4, pp. 413~424 (in Korean).
7. Christy, P. M., Gopinath, L. R. and Divya, D. (2014), A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 34, pp. 167~173.
8. Fulazzaky, M. A., Abdullah, N. H., Yusoff, A. R. and Paul, E. (2015), Conditioning the alternating aerobic-anoxic process to enhance the removal of inorganic nitrogen pollution from a municipal wastewater in France, Journal of Cleaner Production, Available Online, Vol. 100, pp. 195~201.
9. Gianico, A., Bertanza, G., Braguglia, C. M., Canto, M., Laera, G., Heimersson, S., Svanstrom, M. and Mininni, G. (2015), Upgrading a wastewater treatment plant with thermophilic digestion of thermally pre-treated secondary sludge: techno-economic and environmental assessment, Journal of Cleaner Production, Available Online, Vol. 102, pp. 353~361.
10. Halim, M. H. A., Anuar, A. N., Azmi, S. I., Jamal, N. S. A., Wahab, N. A., Ujang, Z., Shraim A. and Bob, M. M. (2015), Aerobic sludge granulation at high temperatures for domestic wastewater treatment, Bioresource Technology, Vol. 185, pp. 445~449.
11. Hosseini, S. E. and Wahid, M. A. (2014), Development of biogas combustion in combined heat and power generation, Vol. 40, pp. 868~875.
12. Lee, H. Y. (2008), A study on the characteristics and utilization of ash from sewage sludge incinerator, Korean Institute of Resources Recycling, Vol. 17, Issue 3, pp. 3~9 (in Korean).
13. Lee, B. S., Na, K. D., Han, S. K., Phae, S. E. and Oh, S. E. (2012), Reclaimed products to recycling and energy recovery for sustainable use of closed non sanitary landfills through reclamation Works, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 21, Issue 1, pp. 17~29 (in Korean).
14. Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J. and Hoadley, A. F. A. (2010), Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering, Water Research, Vol. 44, Issue 8, pp. 2381~2407.
15. Nam, Y. W. and Han, K. S. (2011), A study on the present state and improvement plan of domestic sewage sludge treatment, Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 28, Issue 1, pp. 103~109 (in Korean).
16. Nikaeen, M., Nafez, A. H., Bina, H., Nabavi, B. F. and Hassanzadeh, A. (2015), Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting, Waste Management, Vol. 39, pp. 104~110.
17. Stefanakis, A. I., Komilis, D. P. and Tsihrintzis, V. A. (2011), Stability and maturity of thickened wastewater sludge treated in pilot-scale sludge treatment wetlands, Water Research, Vol. 45, Issue 19, pp. 6441~6452.
18. Wojciech, M. B. (2016), A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 54, pp. 1148~1171.
19. Yang, G., Zhang, G. and Wang, H. (2015), Current state of sludge production, management, treatment and disposal in china, Water Research, Vol. 78, pp. 60~73.