

총설(Review)

슬러지 특성평가방법의 표준화 현황

김탁현*, 박철환†, 김상용†**

한국원자력연구원 방사선과학연구소
580-185 전라북도 정읍시 신정동 1266

†광운대학교 화학공학과
139-701 서울시 노원구 월계동 447-1

‡한국생산기술연구원 청정공정팀
330-825 충청남도 천안시 입장면 홍천리 35-3

(2007년 5월 22일 접수; 2007년 6월 13일 채택)

The Present Status of Standard Sludge Characterization Method

Tak-Hyun Kim*, Chulhwan Park†, and Sangyong Kim†**

Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI),
1266 Sinjeong-dong, Jeongeup City, Jeonbuk 580-185, Korea

†Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University,
447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

‡Green Engineering Team, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),
35-3 Hongchon-ri, Ipjang-myun, Chonan City, Chungnam 330-825, Korea

(Received for review May 22, 2007; Revision accepted June 13, 2007)

요 약

대도시의 인구집중과 환경문제에 대한 관심의 고조에 따른 환경배출기준의 강화로 환경처리시설에서 배출되는 슬러지의 양은 매년 급증하고 있는 실정이다. 2003년부터는 하수처리 슬러지의 매립지에의 직매립을 금지하고 있을 뿐만 아니라, 2012년부터는 해양투기 또한 전면 금지됨에 따라 육상에서의 자원화 혹은 감량화 등을 통한 소각, 퇴비화 등의 방법으로 처분해야 하는 실정이다. 그러나 이들 슬러지의 성상은 슬러지발생원, 발생 시기, 처리공정 등에 따라 그 성상이 다양하게 변하는 특성을 가지므로 슬러지처리, 재활용 및 처분방법을 결정하는데 있어서 슬러지성상에 대한 평가가 중요하게 작용한다. 이를 위하여 물리화학적 처리, 생물학적 처리 등 서로 다른 처리방법에 의해 발생하는 슬러지의 특성평가방법을 표준화할 필요성이 크다고 하겠다. 그러나 아직까지 우리나라에서는 표준화된 슬러지 특성평가방법이 제정되어 있지 않다. 본 총설에서는 우리나라의 슬러지 특성평가방법에 관한 현황과 문제점 등을 파악하고, 독일 등 선진국의 사례를 바탕으로 적절한 슬러지의 재활용과 처분을 위한 우리나라에 적합한 15가지 항목의 표준화된 슬러지 특성평가방법을 제시하고자 하였다.

주제어 : 슬러지, 특성평가, 표준화, 폐수, DIN 38414

Abstract – As the interest in environmental problems increased, the guideline of effluent qualities becomes strict and the amount of sludge produced from the wastewater treatment facilities steeply increased. The revised Korean acts prohibit the direct reclamation of the sludge exhausted in sewage treatment works from 2003, and the ocean dump of sludge will be also prohibited from 2012. Therefore, the sludge must be recycled, incinerated or composted. To properly perform the utilization and disposal operations, the establishment of well-defined procedures for the characterization of sludge by physical, chemical and biological method and setting up of

*,** To whom correspondence should be addressed.
E-mail : *tkhk@kaeri.re.kr, **sykim@kitech.re.kr

guidelines for different treatment and disposal routes has become necessary. However, there have not been such standardized methods for sludge characterization in Korea. This review analyzes the present status of establishment and problems of sludge characterization method of Korea. Finally, it was proposed total 15 items of standardized characterization methods suitable to our country for proper sludge recycling and disposal, which was based on the more systematic standard methods of Germany (DIN 38414) and those of advanced nations.

Key words : Sludge, Characterization, Standard, Wastewater, DIN 38414

1. 서 론

슬러지는 반고형물로서 폐수처리 과정에서 발생되며, 오염 성분이 많고 부패성이 매우 크고 함수율이 높아 악취발생 및 자연생태계에 영향을 끼친다. 그러나 일부 슬러지는 중요한 영양물질과 유기물질을 포함하여 자원적 가치가 있으나, 아직까지는 각종 산업장 및 제한된 토지면적을 가진 도시에서 고품 폐기물과 더불어 심각한 문제로 인식되고 있다.

이처럼 대도시의 인구집중 현상이 심해지고 환경에 대한 관심이 고조되어 폐수처리 방류수기준이 강화됨에 따라 슬러지의 발생량도 매년 급증하고 있는 실정이다. 2005년 현재 전국 하·폐수슬러지 발생량은 18,501톤/일이며, 이중 하수슬러지가 7,052톤/일(38%), 폐수슬러지가 11,449톤/일(62%)을 차지하고 있다. 하수슬러지는 하수종말처리시설의 신·증설 등으로 1999년부터 2005년까지 6년 동안 약 159%가 증가하는 등 발생량 증가속도가 빠르며, 앞으로도 계속 증가할 것으로 예상하고 있다. 폐수슬러지는 섬유·피혁 등 고농도폐수 배출업종의 폐쇄 및 해외이전 등으로 증가 추세가 둔화되고 있는 실정이나(약 4.3% 감소) 하수슬러지보다 훨씬 많은 발생량을 보이고 있다. 이러한 하수 및 폐수슬러지의 처분현황을 살펴보면, 해양투기가 9,693톤/일(53%)로 가장 많고, 재활용 5,673톤/일(31%), 소각 2,452톤/일(13%), 매립 535톤/일(3%)을 차지하고 있다. 즉, 하·폐수종말처리시설에서 발생하는 슬러지는 대부분 해양투기되고 있는 실정이다[1].

그러나 2003년부터는 하수처리장에서 배출되는 유기성오염물질, 슬러지의 매립지에의 직매립이 금지되어 있으며, 소각이나 퇴비화 후 그 잔재물만을 매립할 수 있도록 규정하고 있어 매립량을 줄이거나, 퇴비화와 같이 자원화하여야 한다. 또한, 런던협약의 '96 의정서에 따라 2012년부터는 기존에 허용되어 오던 해양투기 또한 전면 금지된다[2].

지금까지 슬러지의 처리는 대개 위생매립지에 매립하거나 소각 또는 해양투기, 하수슬러지의 경우 퇴비화 등에 의한 재활용 등의 처리기술에 의해 처리되어 왔다. 그러나 위와 같이 슬러지 발생량은 해를 거듭할수록 계속 급증하고 있는 반면, 매립지 부지의 확보 어려움, 해양투기의 원천적 금지 등에 의해 슬러지의 처리가 더욱 심각한 환경문제의 하나로 대두되고 있다.

매립은 침출수의 처리 및 지하수 유입 등을 방지하기 위한 시설만 갖추고 있으면 현재로서 가장 손쉬운 처리방법이다. 그러나 침출수의 처리 등 위생매립에 따른 비용이 상승하여 매립율은 매년 감소하고 있으며, 특히 새로운 매립지의 확보는

인근 주민들의 반대 등의 여러 가지 문제점을 안고 있다. 해양투기는 일시적인 해양오염이 일어나지만 대량의 해수에 의해 희석되고 염분해에 의해 응집, 침전되며, 유기물은 해수의 자정작용에 의해 안정화된다. 그러나 오물관리, 저장, 운반, 감시, 기상조건에 의한 지연 등 처리비용이 증가하는 추세이고, 특히 장기적인 안목으로 볼 때 해양오염의 문제를 야기함으로써 결코 좋은 처리방법이라고는 할 수 없다.

그 밖에 매립의 문제를 해결하기 위한 방법으로 최근에 많이 사용되고 있는 건조 후 단순 소각하는 방법은 건조시 발생하는 악취문제와 건조된 슬러지를 소각시킬 때 인체에 유해한 다이옥신 등의 유해물질이 발생하여 슬러지의 매립이나 토지 개량제로 사용할 경우 건강상의 문제를 일으킬 수 있다.

슬러지를 적절한 처리를 통하여 유용한 자원으로 활용하는 연구가 일본을 비롯하여 캐나다, 미국, 독일 등에서 활발히 진행되고 있다. 특히, 슬러지에 포함된 유기물은 에너지원으로 활용가능성이 높기 때문에 슬러지의 처리에 의한 에너지 회수 기술의 개발에 많은 비용과 노력을 투자하고 있다. 우리나라 환경부의 폐기물 정책도 발생억제, 재이용, 재활용, 에너지회수, 소각 그리고 최후로 매립하는 방향으로 진행되고 있으며, 재활용 및 소각 비율을 매년 높이고 매립 비율은 낮추는 방향으로 추진되고 있다.

슬러지 발생량의 증가, 다양한 슬러지의 발생, 심화되는 행정규제 등으로 인해 슬러지 처리문제는 매우 복잡한 문제이다. 특히, 슬러지의 성상은 그 발생원 및 발생 시기, 처리기술의 유형에 따라 달라지며, 액상 혹은 고형폐기물과는 다른 물리화학, 생물학적 거동을 보여 기존의 수질 혹은 폐기물 성상평가 방법으로서의 평가가 곤란하다. 또한, 개별 슬러지 성상 값들은 이후의 처리기술 및 재활용/최종처분 방법 등의 선정에 중요하게 작용한다. 슬러지 중에서도 하수슬러지는 일반적으로 유사한 방법에 의하여 발생되어 유사한 특성을 가지고 있어 성상에 대한 고찰이 이루어져 있으나, 하수슬러지와 달리 사업장에서 배출되는 폐수 슬러지에 대한 일반화된 성상이 제시되어 있지 않은 실정이다. 기존 산업폐수 슬러지처리에 관련된 관리기술(1, 2차 처리, 매립, 탈수, 건조, 소각 등)에 대한 전문성이 부재한 상황이며, 현재까지 산업폐수 슬러지 자체에 대한 표준적인 성상평가방법의 부재로 슬러지의 부가가치적 측면을 살리지 못하고 폐기물로 인식되고 있는 실정이다. 특히, 향후 엄청난 양의 발생이 예상되는 하수 및 산업폐수 슬러지의 적절한 처리를 위하여 처리기술의 개발과 함께 이의 물리화학적, 생물학적 성질을 분석하고 이를 처리기술을 개발하는데 광범위하게 활용하는 것이 절실하게 요구되고 있다.

본 총설에서는 적절한 슬러지의 재활용 및 처리처분을 유도하기 위하여 우리나라의 슬러지 성상평가방법의 제정 현황 및 문제점을 분석하고, 더 나은 평가방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 선진국의 표준화된 슬러지 성상평가방법의 제정 현황을 살펴보고 우리나라의 슬러지 성상평가방법의 보완방안을 제안함으로써 표준화된 슬러지 성상평가방법의 제정을 위한 기반을 마련하고자 한다.

2. 슬러지의 분류와 성상인자

2.1. 슬러지의 분류 및 특성

슬러지의 종류에 따라 적합한 처리방법을 선택하고, 처리시 그 효율을 사전에 예측하기 위해서는 슬러지를 유형별로 분리할 필요가 있다. 슬러지의 조성은 오염원 및 처리공정에 따라 달라지며 Table 1에 주요산업별 폐수 슬러지의 발생원 및 그 구성에 따른 분류를 나타내었다[3].

2.1.1. 친수성 유기 슬러지(Hydrophilic organic sludge)

가장 큰 부분을 차지하는 슬러지이며, 이 슬러지는 탈수가 쉽지 않은데 이는 슬러지의 많은 부분이 친수성 콜로이드물질로 구성되어 있기 때문이다. 폐수의 모든 유형의 생물학적 처리시 발생하는 슬러지와 총 건조슬러지 함량의 90% 이상이 휘발성고형분인 슬러지(예, 농업음식료업, 유기화학산업 등)도 이 부류에 속한다.

2.1.2. 친수성 무기 슬러지(Hydrophilic inorganic sludge)

물리화학적 처리시 금속이온의 침전결과 생성되는 금속수산화물이나 무기성 응집제(2가 혹은 3가 철염응집제, 알루미늄응집제 등)를 포함하고 있는 슬러지이다.

2.1.3. 오일류 슬러지(Oily sludge)

미량의 광유(mineral oil)나 동물성 지방 등이 포함된 슬러지이다. 이 오일류는 에멀전 형태이거나 친수성 혹은 소수성 슬러지입자에 흡착되어 있는 형태로 존재한다. 생물학적 공정에서 발생하는 슬러지 중 최종 활성슬러지처리(예, 정제폐수의 처리) 과정에서도 존재할 수 있다.

2.1.4. 소수성 무기 슬러지(Hydrophobic inorganic sludge)

적은 양의 결합수(모래, 실트, 슬래그, 선박작업스케일, 결정염 등)와 함께 다량의 입자상물질로 구성된다.

2.1.5. 친수성-소수성 무기 슬러지(Hydrophilic-hydrophobic inorganic sludge)

이 슬러지는 주로 소수성 성분을 함유하나, 많은 양의 친수성 성분을 함유하기도 하여 탈수시킬 경우 효율이 불량하다. 여기에는 금속성 수산화물(응집제 등) 등이 포함된다.

2.1.6. 섬유질 슬러지(Fibrous sludge)

제지펄프폐수 슬러지, 카드보드폐수 슬러지가 여기에 속하며, 수산화물이나 생물학적 슬러지가 존재함에 의하여 섬유질을 친수성을 이용하여 재생하는 경우를 제외하고는 탈수가 용이하다.

2.2. 슬러지 주요 성상인자

슬러지의 성상 중, 슬러지의 주요 처리기술 및 최종처분에 영향을 미치는 항목들에는 화학조성, 미생물학적 조성, 용출특성 및 화학적 안정성, 독성, 가연성, 물리적 특성, 입경 및 점도, 표면전하 등을 들 수 있다.

2.2.1. 화학조성

화학조성은 고형물이 자연적인 생성물인지 인공적인 화학물질인지를 알 수 있게 한다. 슬러지에 대한 화학적 성질은 시간이 지남에 따라 일어날 수 있는 화학반응을 예측할 수 있다. 온도, pH, 압력 변화에 의해 탈수프로세스에 영향을 미칠 수 있다.

온도는 액체점도, 응집 및 포화의 정도에 영향을 미치며, 물질의 선택에도 영향을 미친다. 액체상의 pH는 응집의 정도나 고체입자의 분산 등도 바꿔놓을 수 있다. pH도 슬러지의 부식성을 결정하기 위해 사용되는 경우 물질의 선택에 영향을 미친다. 휘발성과 가연성이 높으면, 진공여과를 고려할 때 증기압을 결정해야 하고, 이의 제어수단이 필요하게 된다[4].

2.2.2. 미생물학적 조성

유기성 슬러지에는 무수히 많은 생물들이 존재할 수 있다. 특히, 처리장내 1차 슬러지에는 높은 미생물 개체수를 포함하며, 또한 많은 기생생물도 포함할 수 있다. 이들은 취급 및 처리, 토양에의 적용 등에 의해 인간, 동물, 식물 등에 건강상의 위험을 끼칠 수 있다. 주된 관심대상의 생물에는 박테리아(특히, salmonella, coliforms, 기타 비장세균), 바이러스, protozoan, *Taenia saginata* (beef tapeworm), potato cyst nematodes, *Ascaris* (roundworm) 등이 있다. 사용 전에 슬러지는 이들 병원성 생물을 없애기 위한 처리를 해야 하며 다양한 처리공정상의 특정변수들은 이들의 효율을 확실하게 관찰하기 위하여 필요하다.

2.2.3. 용출특성 및 화학적 안정성

모든 용출실험은 액상과 고상사이에서 이루어진다. 폐기물과 반응하게 되는 액상은 leachant가 되며, 반응중에 일어나는 프로세스들은 조성의 변화를 일으키게 한다. 접촉 이후의 액상은 leachate로 간주한다. 각 국가마다 인정받은 표준적인 시험방법은 없지만, 많은 용출시험 방법이 제시되어 있다. 용출시험의 목적은 특성화 시험 혹은 규제에 대한 만족여부 실험이라고 할 수 있다. 특히, 슬러지의 액상성분은 침전이나, 원심분리, 압력필터 등에 의해 고액분리되며, 용출시험은 폐기물 중 고형분에 대하여 이루어진다.

슬러지 내 수분은 비교적 쉽게 제거될 수 있는 자유수(free water)와 콜로이드성 수화(hydration)수, 공극 내 및 화학적 결합수로 구성된다. 이중 자유수는 공극수의 성분을 조사하기 위하여 분석될 수 있으며, 대체적으로 leachant를 대상으로 분석할 수도 있다. 어떤 시험방법은 건조 상태의 시료를 사용하도록 특화되어 있다.

결합수의 배출을 위해서는 상당한 에너지를 필요로 하며, 특히 공극 내 수분은 강력한 열적처리(열적 안정화, 건조 혹은

Table 1. Classification and property of sludge

Principle characteristic of the sludge		Origin-Industry	Water treatment sludge pretreatment	Constituents of sludge
Organic	Hydrophilic	1. Domestic wastewater treatment plants 2. W.W. from agriculture and foodstuffs industry • Breweries/abattoirs/dairies /canneries/livestock rearing 3. W.W. from textile industry, organic chemical industry/petrochemistry 4. Polishing biological treatment	1. Settling/digestion/biological treatment/physico-chemical flocculation-settling 2. Settling/biological treatment including extended aeration, aerobic stabilization or anaerobic digestion 3. Physico-chemical (flocculation-settling)/biological treatment 4. Biological treatment	• Predominantly volatile solids, VS/DS 30~90% • Protein matter, often very fermentable • Vegetable or animal wastes • Animal and sometimes mineral oils and fats • Hydrophilic hydroxides (Al, Fe) in physicochemical treatment • Hydrocarbons (petro-chemistry)
	Hydrophobic	1. Drinking water and industrial make-up water (river water or groundwater) • Clarification/partial carbonate removal/deionization eluates 2. W.W. from metal finishing treatment • Pickling/anodizing/galvanizing/painting 3. W.W. from inorganic chemical industry 4. W.W. from coloring agents; dyeworks 5. W.W. from tanneries 6. Total final treatment of W.W. for recirculation	1. Physico-chemical (floc.-settling); Neutralization 2. Neutralization + flocculation-settling/ Decontamination (cyanide, Cr(VI) + flocculation-settling 3. Physico-chemical (floc.-settling); Neutralization 4. Physico-chemical (floc.-settling); Neutralization + biological 5. Physico-chemical (floc.-settling); Neutralization + biological 6. Physico-chemical (floc.-settling); Neutralization + filtration	• Predominantly hydrophilic metallic hydroxides (Al, Fe, Cr...), VS (<30% of DS), CaCO ₃ (carbonate removal) or CaSO ₄ 2H ₂ O (neutralization H ₂ SO ₄) • Mineral + organic • Mineral + organic + animal fats and organic matter
Inorganic	Hydrophilic	1. Industrial make-up water- carbonate removal (river water or groundwater) 2. Iron and steel industry- steelworks-foundries-gas scrubbing 3. Coal washing 4. Incineration of refuse, Flue gas scrubbing	1.2.3. Neutralization-flocculation-settling	• Dense inorganic solids • Low content of hydrophilic hydroxides (Fe, Al, Mg <5% of DS) • Low VS content (<5% of DS)
	Hydrophobic	1. W.W. from refineries 2. W.W. from engineering works (soluble oils) 3. W.W. from cold rolling, metallurgy	1. Oil removal 2. Flocculation-settling/flocculation 3. Biological (refineries)	• Mineral oils and greases • Hydrocarbons • Hydroxides (Al, Fe) • Biological VS
Oily	Hydrophilic	1. W.W. from steel rolling mills	1. Settling	• Dense and readily settleable DS (scale-Fe oxides) • Considerable mineral oil and grease
	Hydrophobic	1. W.W. from paper mills 2. W.W. from paper pulp 3. W.W. from board mills	1. Settling/flotation (fiber recovery) 2. Flocculation-settling 3. Biological	• Cellulose fibers + sawdust and shavings • Cellulose fibers + hydrophilic hydroxides (in varying amounts) • Cellulose fibers + biological VS
Fibrous				

* W.W.: wastewater, VS: volatile solids, DS: dry solids

연소 등)에 의해서만 분리될 수 있다. 자유수분 및 결합수분의 구성비율은 슬러지의 탈수에 있어서 적용가능성을 평가하는데 중요한 인자이다. 또한, 이를 통하여 슬러지의 소수성 경향을 평가할 수 있고, 안정화 프로세스의 함수로서 결합수분의 비율

을 평가하게 된다[4-5].

2.2.4. 독성

단일 성분의 독성학적 특성분석을 위한 시험은 보통 복잡한

프로세스이며, 한 종 이상의 화합물이 존재하면 그 문제는 보다 더 어려워진다. 독성시험은 시간과 비용이 결부되므로 슬러지의 독성을 결정하는 것이 중요하지 않다면, 예를 들어, 유해성 혹은 특정 폐기물로서의 장래의 법적 지위를 부여하는데 필요하다면, 독성시험은 비실용적일 수 있다. 그러므로 대부분의 경우 입자상 슬러지의 개별 화학조성에 대한 독성평가방법이 개발되어야 한다.

2.2.5. 가연성

가연성을 결정하는 주된 목적은 슬러지를 소각할 것인지 아니면 다른 열적 처리가 적합한지, 그리고 가연성 관련 특성이 위해성을 나타내는지 여부를 결정하는 것이다. 물질이 소각에 적절하지 아니면 다른 열적 처리가 적합한지를 평가하는 것은 다음의 총 열량, C, S, N, H, O, 할로겐원소 함량, 수분함량, 회분함량 항목들에 대한 특성을 결정할 필요가 있다.

2.2.6. 물리적 특성

슬러지의 물리적 특성은 그 발생원, 처리프로세스 유형에 따라 달라진다. 침전조 슬러지, 활성슬러지, 살수여상 슬러지, 혐기소화조 슬러지, 소화슬러지 등 발생원에 따라서 주요 성상이 상이하다.

슬러지의 흐름 및 탈수특성에 영향을 미치는 특성들은 크게 고체상 및 액체상의 특성으로 나누어 볼 수 있다. 고체상의 특성은 화학적 조성, 입경분포, 비중, 형태, 강도, 연마성(abrasivity), 자기적 특성, 전기적 특성 등이 있다. 고체상의 구조는 슬러지가 원심분리기내에 존재할 때처럼, 높은 전단력을 가지는 영역에 주입되었을 때 중요하다.

2.2.7. 슬러지 입경 및 점도

슬러지의 입경 및 입경분포는 슬러지의 펌핑 및 침전, 여과 특성에 영향을 미친다. 비중은 중력이나 원심분리에 의한 탈수의 용이성에 영향을 미치게 된다. 고체상과 액체상간의 비중차가 적으면 원심분리나 침전에 의해 체류시간이 짧아지므로 효율이 떨어지게 된다. 응집제를 사용하여 입경을 키워주면 침전 시간이 길어짐에 따라 중력침전효율이 증가하게 된다. 공극률은 커질수록 침전속도를 낮추는 영향을 미치게 되고, 슬러지의 형태가 다양하게 존재하게 되면 이들도 슬러지의 침전특성에 영향을 미치게 된다.

슬러지 부유물은 비-뉴톤 유체로서, 그 점도에 대한 값들은 매우 상대적인 값들을 가지며, 전단응력에 영향을 받는다. 점도는 입자간에 작용하는 힘의 세기라고도 할 수 있는데, 슬러지의 가벼운 교반에 의해 슬러지가 컴팩트화되고 다시 유체상으로 돌아가는 성질, 즉 요변성(thixotropic nature)을 평가할 수 있다. 이 성질은 슬러지의 수집, 이송 및 펌핑작용에 있어서 매우 중요한 인자로 작용하게 된다. 슬러지는 원래의 구성성분, 노출되어 있는 기간 및 프로세스 등에 따라 그 분류가 달라지며, 그 유동학적 특성을 결정짓는 것은 가장 적절한 주입장치 및 혼합장치를 선택할 수 있게 한다. 액상의 유동학적 특성을 측정하는 장치는 상당히 많다[5-6].

어떤 조건에서는 입자상 슬러지의 유동학적 특성을 바꾸어 주는 것이 취급이나 처리에 보다 더 이점을 갖게 된다. 여기에

는 수분량 및 온도를 올려주거나, 전단력을 적용시키거나, pH를 변화시키거나, 전해질용액을 첨가하거나, 혹은 처리된 슬러지를 반송하는 방법 등이 유효하다.

여과비저항(specific resistance)은 슬러지의 여과특성을 측정하는 것이며, 수학적으로 단위질량의 케이크를 통한 단위 점도의 슬러지가 단위 여과속도를 만들어내는데 필요한 압력차로 정의된다. 비저항은 슬러지 탈수시스템을 선택하는데 유용한 도구가 된다. 이는 드럼여과에서 여과속도를 계산하는 데는 제약사항이 있지만, 진공여과 변수의 평가 및 슬러지의 상대적 여과특성을 평가하는 데는 중요하다. 여과특성은 입경, 형태, 밀도, 입자상의 전하 등에 의해 영향을 받는다. 입경이 커질수록 여과속도가 커지고, 케이크의 수분함량도 낮아진다. 생하수 슬러지는 소화된 하수슬러지보다 여과가 용이하며, 1차 하수 슬러지는 2차 슬러지보다 여과가 쉽다.

2.2.8. 표면전하

입자상의 표면전하는 입자상호 간의 결합/탈착 성질에 영향을 미치게 된다. 높은 표면전하는 분산을 유발하지만, 낮은 표면전하는 응집을 향상시킨다. 낮은 표면전력은 더 양호한 탈수 특성을 갖도록 한다. 소수성 표면은 부상을 촉진시키고, 친수성 표면은 부상을 방해한다.

3. 슬러지 성상평가방법의 표준화 현황

슬러지의 성상을 특징짓는 방법에는 여러 가지가 있다. 개별 방법을 선택하기에 앞서 특성화가 필요한 이유를 확실하게 하는 것이 중요하다. 슬러지의 화학적 조성이 폐수처리기술에 적합한지를 결정하기 위하여 슬러지를 특성화하는 방법은 규제를 위해서 테스트해야 하는 특성화 방법과는 달라진다. 이는 여러 종류의 슬러지의 성상(화학조성, 용출시험, 독성, 기타 위해성 특성)과 관련이 있다.

시료의 취급, 준비 및 저장과 관련된 분석상의 프로토콜을 인지하는 것은 중요하다. 또한, 많은 분석방법에는 각각의 경우에 대해 시료채취 및 취급절차 등에 대한 요령 및 정의가 잘 되어 있어야 한다. 만일 개별 시료채취 시 분석자의 요구사항을 알지 못했다면 분석절차를 명확하게 할 수 없다. 시료의 입경분포를 포함하여 시료 내에서 완전히 분산 상태로 있는지, 덩어리 상태로 뭉쳐있는지, 혹은 휘발성인지, 변하기 쉬운 물질인지 등의 분석물 자체의 성질뿐만 아니라, 부수적인 시료시간, 온도, 공기존재여부 등에 따라 한번 채취된 후에 안정적 인지 등의 인자들을 충분히 고려해야 한다[7-8].

3.1. 국외 슬러지 성상평가방법의 표준화 현황

선진 외국의 슬러지 성상평가방법과 관련된 표준화 현황을 국제규격(ISO, IEC 등), 국가규격(JIS, ANSI, BS, DIN, NF 등) 및 단체규격(ASTM, ASME, IEEE, NEMA, API, UL, SAE 등) 등을 바탕으로 조사하여 보았다[7-53]. Table 2는 위 규격에 제정되어 있는 항목의 채택 여부를 비교하여 놓은 것이다.

대부분의 분석항목에 대해서는 분석방법이 존재한다. 그러

Table 2. Present status of establishment of sludge characterization methods in some countries

Items	KS	JIS	DIN	ISO	BS	EN	Std. Mtd.
Terminology	×	×	×	×	○	○	×
Sampling	△	△	○	○	○	○	○
Water content/Solid content	×	×	○	△	○	○	×
Residue on ignition/Loss on ignition	×	×	○	×	○	○	×
Leachability test	×	×	○	×	×	○	×
pH	×	×	○	×	○	○	×
Oxygen consumption rate	×	×	○	×	△	×	○
Acid-soluble portion of metal	×	×	○	×	△	△	×
Amenability to anaerobic digestion test	△	△	○	△	△	△	×
Biochemical oxygen demand	×	×	○	×	×	×	×
SV/SVI	×	×	○	×	×	×	○
Phosphorus (P)	×	×	○	×	○	○	×
POX/EOX/AOX	×	×	○	×	×	×	×
Volatile organic acid	×	×	○	×	×	×	×
PCB	×	×	○	×	×	×	×
PAH	×	×	○	×	×	×	×
Freeze drying residue	×	×	○	×	×	×	×
Kjeldahl nitrogen	×	×	×	×	○	○	×
Settling rate	×	×	×	×	×	×	○
Capillary Suction Time	×	×	×	×	×	×	○

* KS: Korea Standard, JIS: Japanese Industrial Standard, DIN: Deutsche Industric Normen, ISO: International Standard Organization, BS: British Standard, EN: Européen Normes (European Committee for Standardization), Std. Mtd: APHA et al., Standard methods for the examination of water and wastewater

** ○: Including identical item, △: Including similar item, ×: Not including any identical or similar item

나 많은 경우 표준방법이 적합하지 않아 비효율적일 수 있고, 슬러지와 같은 물질의 분석에 직접적으로 적용할 수 없거나 유효하지 않을 수 있다. 가장 널리 알려져 있는 방법은 미국 EPA, 영국 환경부, ASTM, BSI/ISO 등의 방법론에 의해 제시되어 있다. Table 3과 4에서는 미국 EPA와 APHA 등에서 제정하여 놓은 슬러지 관련 특성평가방법을 정리한 것이다.

EU의 유해폐기물 관련 부서에서는 폐기물이 위험한지를 결정하는 기준을 제시하고 있다. 여기에는 여러 특성(독성, 가연성, 자극성 등)의 특정 시험방법이 포함되어 있다.

해외의 슬러지 특성평가 표준시험법 중 가장 체계적으로 정리되어 있는 표준규격으로는 독일표준규격인 DIN 38414를 들 수 있다.

3.2. 국내 슬러지 특성평가방법의 표준화 현황

우리나라에서 슬러지 관련 유사 규정을 담고 있는 주요공정 시험법으로는 수질공정시험법, 폐기물공정시험법, 토양공정시험법을 들 수 있다. 그러나 독립적으로 슬러지의 성상을 평가하기 위한 공정시험방법은 제시되어 있지 않다[54].

3.2.1. 국내 산업표준(KSA)

우리나라의 산업표준 제정 기관인 한국표준협회(KSA)에서 제정하는 한국산업표준에서는 슬러지에 대한 특성평가방법, 처리방법에 대한 표준화의 제시가 부족한 실정이며, 대부분 법령(폐기물 관리법, 공정시험법)으로 제시되어 있고, 특히 성상의 평가방법에 대해서 그 표준화 실정이 매우 미비한 실정이다.

한국산업표준 규격 중에서 환경분야의 슬러지 관련 규정에

는 다음의 것들이 있다.

- ① 수중에서 유기화합물의 호기성 생물학적 산소분해 평가 방법 [반연속적 활성 슬러지법] : KS M 9139
- ② 화학 물질과 폐수에 의한 활성슬러지 미생물의 질산화 억제 효과 추정 방법 : KS M 9176
- ③ 액상배지에서 유기화합물의 제거와 생분해성에 대한 평가(활성슬러지 모의시험) : KS M 9191
- ④ 분해 슬러지에서 유기화합물의 "최종" 혐기성 생분해에 대한 평가(생물 기체량 측정 방법) : KS M 9192
- ⑤ 샘플링(하수 처리장과 정수장 슬러지의 샘플링 지침) : KS M 9197
- ⑥ 습식침전물의 샘플링에 대한 지침 : KS M 9117
- ⑦ 슬러지와 침전물 시료의 취급과 보존에 관한 지침 : KS M ISO 5667-15

3.2.2. 폐기물 공정시험방법

우리나라 환경 분야의 공정시험방법은 수질, 대기, 폐기물, 토양, 소음·진동의 다섯 분야로 나누어 제시되어 있으며, 슬러지에 대해서는 별도의 시험방법으로 제시되어 있지 않고, 폐기물 공정시험방법에 준하여 성상을 평가하도록 되어 있다.

슬러지의 특성상, 고형 폐기물이나 수질과는 그 거동이나 성상, 취급방법 등의 특징이 다르기 때문에 고형폐기물과 함께 동일한 시험방법에 의하도록 하는 것은 다소 무리가 있다. 필요 시 수질 공정시험방법이나 폐기물 공정시험방법과 별도의 "슬러지 공정시험방법"의 제정이 필요할 것으로 사료된다.

현재 폐기물 공정시험방법상에 언급되어 있는 슬러지 관련

Table 3. EPA guideline of sewage sludge sampling and analysis

Category	Range	Content
Sludge sample preparation	Background information	• Solid content and viscosity • Sludge property
	Selection of sampling point	• General consideration • Sludge sampling point
	Selection of sample	• Sampling apparatus • Sampling procedure
	Sample size, Sample shape, Interval of sampling	• Material of sample vessel • Preparation of sample vessel • Sample storage • Preservation before analysis
	Preparation of sample and storage	
	Packing and transport	• Packing • Outline of transport
	Documentation	• Sample labelling • Outline of storage • Record of sampling
	Safety consideration	
Analysis	General pollutant and inorganic pollutant	
	Metal	• Separation/preparation • Analytic technique of metal
	Organics	• Abstract and separation • Analytic technique of organics
	Pathogenic microorganism	
Quality Assurance		
Cost of sampling and analysis	Demand of human resource	
	Cost of direct/indirect analysis	
	Cost of sampling	
	Chance for saving cost	

Table 4. Sludge analysis method of Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

Category	Content
2710. Tests on sludges	- Oxygen consumption rate - Settled sludge volume - Sludge volume index (SVI) - Zone settling rate - Specific gravity - Capillary suction time
5520. Oil and grease	- Extraction method for sludge samples
9060. Samples	- Sampling

주요 내용은 다음과 같다[54].

- 시료의 채취/조제/전처리
 - 함유량시험방법/용출시험방법/기기분석방법
 - 항목별시험방법
- : pH, 수분 및 고형물, 강열감량 및 유기물함량, 시안, Cr,

Cr⁶⁺, Cu, Cd, Pd, As, Hg, 유기인, PCBs, 휘발성 저급염 소화 탄화수소류, 할로젠화 유기물질

3.2.3. 폐기물관리법

국내 폐기물 관리법상에서는 슬러지에 대하여 별도의 분류로 언급하지 않고, 폐기물의 한 종류로 취급하여 다음의 항목 등에 대하여 언급하고 있다[1].

- 슬러지류의 유해물질 함유기준
- 수집/운반/보관/처리 기준 및 방법
- 처리업의 시설/장비/기술능력의 기준
- 처리시설의 설치기준
- 처리시설의 관리기준
- 재활용 시 그 용도 및 방법

그리고 특징적으로 폐기물 관리법에서는 폐수처리 슬러지 및 공정슬러지의 발생시설에 관한 것과 유기성슬러지 등을 토지개량제 및 매립시설 복토용도로의 재활용하는 경우 그 방법 및 성상에 대하여 고시로서 별도로 규정하고 있다. 토지개량제 혹은 매립시설 복토용도로 재활용되는 경우 이외의 슬러지처리 방법에 대해서도 그 슬러지의 성상과 관련된 표준화가 더욱 더 이루어져야 할 것이다.

4. 슬러지 성상평가방법의 표준화를 위한 제안

주요 공정시험법과 DIN 38414 규격을 상호 비교한 결과, 외국의 사례 중 가장 체계적으로 슬러지 성상평가방법을 정리한 표준이 독일 국가표준인 DIN 38414임을 확인하였다 (Table 2). 또한 Table 5에서는 이들 DIN 38414 표준규정과 우리나라의 슬러지 관련 공정시험법인 수질공정시험법, 폐기물공정시험법 그리고 토양공정시험법과의 항목별 유사성을 여부를 비교하여 보았다.

Table 2 및 Table 5에서는 주요 선진국의 슬러지 성상평가방법의 표준화 제정현황 및 국내 제정실정을 종합적으로 비교 분석하였고, 주요 선진국의 국가표준 및 단체표준에서 채택하고 있으면서 우리나라에서 시급히 우선적으로 채택할 필요가 있다고 판단되는 슬러지 성상인자 항목 15개항을 선정하여 이들의 성상평가방법을 아래에 언급하였다. 이들 내용은 슬러지 성상평가방법과 관련하여 가장 체계적으로 정리되어 있는 것으로 사료되는 DIN 38414의 규정과 주요 선진국의 국가표준 및 단체표준의 내용을 근거로 하였다.

- ① 용어의 정의
- ② 슬러지 시료의 채취
- ③ 수분함량, 건조잔류물 및 고형분 함량
- ④ 연소잔류물 및 연소손실율
- ⑤ 수분에 의한 용출성 시험
- ⑥ 수소이온농도(pH)
- ⑦ 산소 소비율
- ⑧ 산(acid)추출법에 의한 미량금속의 정량
- ⑨ 혐기성 소화 시험

Table 5. Comparison of Korea standard analysis method and DIN 38414 for sludge analysis

Items	Water quality analysis method	Waste analysis method	Soil analysis method	DIN 38414
Flowrate measurement	○	×	×	×
Sampling and storage	○	○	○	○
Sample pretreatment	○	×	×	×
Preparation of sample	×	○	○	×
Leaching test	×	○	×	○
Temperature	○	×	×	×
Transparency	○	×	×	×
pH	○	○	○	○
Dissolved oxygen	○	×	×	×
Biochemical oxygen demand (BOD)	○	×	×	×
Chemical oxygen demand (COD)	○	×	×	○
Color	○	×	×	×
Suspended solid	○	×	×	×
n-hexane extraction	○	×	×	×
Chloride	○	×	×	×
Ammonia nitrogen	○	×	×	×
Nitrite nitrogen	○	×	×	×
Nitrate nitrogen	○	×	×	×
Total nitrogen	○	×	×	×
Phosphate phosphorus	○	×	×	×
Total phosphorus	○	×	×	○
Phenols	○	×	×	×
Cyanide	○	○	○	×
Flouride	○	×	○	×
Chrome	○	○	×	×
Cr (VI)	○	○	○	×
Zinc	○	×	○	×
Copper	○	○	○	×
Cadmium	○	○	○	×
Lead	○	○	○	×
Manganese	○	×	×	×
Arsenic	○	○	○	×
Nickel	○	×	○	×
Iron	○	×	×	×
Selenium	○	×	×	×
Mercury	○	○	○	×
Alkyl mercury	○	×	×	×
Organic phosphorus	○	○	○	×
Polychlorinated biphenyl (PCB)	○	○	○	○
Anionic surfactant	○	×	×	×
Volatile hydrocarbons	○	○	×	×
E. Coli	○	×	×	×
Chlorophyl a	○	×	×	×
Conductivity	○	×	×	×
Fecal coliforms	○	×	×	×
plankton (algae)	○	×	×	×
Water/solid content	×	○	○	○
Fixed/organic solid	×	○	×	○
Oil	×	○	×	×
Halogenated organics	×	○	○	○
Phenol	×	×	○	×
Benzene · toluene · ethylbenzene · xylene (BTEX)	×	×	○	×
Total petroleum hydrocarbon (TPH)	×	×	○	×
Oxygen consumption rate	×	×	×	○
Acid-soluble portion of Metals	×	×	×	○
Amenability to anaerobic digestion	×	×	×	○
SV/SVI	×	×	×	○
Steam-volatile organic acid	×	×	×	○
Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)	×	×	×	○

* ○: including identical item, △: including similar item, ×: not including identical or similar item

- ⑩ 슬러지부피와 슬러지부피 지표(SVI)
- ⑪ 인(P)
- ⑫ 킬달질소(Kjeldahl nitrogen)
- ⑬ 유기결합 할로젠 화합물의 탈기 및 추출성분 정량
- ⑭ 유기흡착 할로젠 화합물의 정량
- ⑮ 폴리클로리네이트드 바이페닐(PCBs)

4.1. 용어의 정의

슬러지 관련 일반적인 용어를 비롯하여 슬러지의 발생원에 따른 슬러지종류별 즉, 폐수슬러지, 하수슬러지, 정수슬러지 등에 관련된 주요 용어에 대한 정의를 내려야 한다.

4.2. 슬러지 시료의 채취

폐수처리와 하수처리장에서 발생하는 슬러지를 채취하는 표준방법을 명시해야 하며, 시료채취 방법, 시료채취 도구, 채취기술 및 운송/보관 방법 등에 대하여 기술한다.

4.3. 수분함량, 건조잔류물 및 고형분 함량

수분함량과 건조 잔류물은 슬러지와 침전물의 처리 또는 처분에 중요한 요소들이다. 이들 역시 건조 잔류물에 관계있는 구성 성분을 분석적으로 결정할 때마다 기준 양으로써 사용된다. 활성슬러지의 고형물 함량은 활성슬러지 공법의 운전 및 설계에 중요한 인자이다. 특히, 이것은 슬러지 부피지표(SVI) 계산에 사용된다.

4.4. 연소잔류물 및 연소손실율

연소잔류물은 휘발되지 않거나, 시료에 존재하는 무기화합물들의 측정으로 평가가 가능하다. 일반적으로, 무기기질들 또는 분해 생성물들은 반응 조건하에서 방출(예, H_2O , CO_2 , SO_2)하거나 또는 흡수(예, CO_2 , O_2)하게 되는데, 연소손실율은 슬러지의 건조 잔류물의 결정 외에 축축하거나 젖은 슬러지 또는 폐기물의 유기물질 함량을 평가할 수 있다.

4.5. 수분에 의한 용출성 시험

슬러지는 정해진 상태 하에서 물이 유출된다. 그러면 용해되지 않은 성분은 여과에 의해서 분별되며, 이 성분의 농도는 여과액의 수질 분석에 의해 측정된다. 물질들이 버려져서 반복적으로 물이나 지하수와 접촉하므로 용출공정을 반복하는 것이 바람직하며, 일반적으로 슬러지의 조건에 따라서 (a)물질이 손쉽게 녹거나 첫 번째 용출공정에서 거의 모든 양이 용출되어 아주 소량만 나타날 때, (b)물질이 손쉽게 녹지 않거나 여러 번 용출공정을 거쳐도 많은 양의 물질을 포함하고 있을 때, (c)시험하는 동안에 용해도가 다양한 물질의 경우 등에 따라 일단용출 혹은 반복용출을 수행한다.

4.6. 수소이온농도

수소이온농도(pH) 값은 슬러지와 고체 폐기물을 평가할 때 중요한 척도이다. 특정 pH 범위는 유기물질의 생물학적 분해를 위해, 특히 슬러지 소화를 위해 유지되어야 하는 경우에 중

요하게 된다. 만약 슬러지 시료가 충분히 유동성이 있다면 직접적인 측정을 할 수 있다. 만약 슬러지 시료가 비교적 적은 수분을 포함하거나 고체 폐기물이면 측정은 희석에 의한 방법을 따라 수행한다.

4.7. 산소소비율

산소소비율은 활성슬러지의 활성을 측정하기 위한 첫째 요소이다. 게다가 영양원의 이용가능성에 의해 주로 결정된다. 산소소비율의 크기는 온도, pH, 자연환경, 숫자 그리고 개체 자신의 생리학적 단계와 그 외의 다른 인자들에 의해 영향을 받는다.

호기성 슬러지 안정화의 경우, 산소소비율은 슬러지의 안정화 단계에서 측정하여 사용될 수 있다. 산소소비율의 측정은 기질의 짧은 기간 동안의 효과 또는 활성 슬러지로 폐수를 시험하는데 사용된다.

4.8. 산추출법에 의한 미량금속의 정량

이 시험방법은 슬러지나 슬러지 산물로부터 산 혼합용액을 이용하여 미량원소를 추출하기 위한 방법이다. 이 시험결과 생성되는 용액은 비색법에 의해 As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn 등의 정량에 사용된다.

4.9. 혐기성 소화 시험

슬러지의 혐기소화 적용가능성은 주어진 시간 내에 유기물로부터 방출된 가스의 부피를 통해 간접적으로 측정되는 인자이다. 슬러지의 유기물 함량은 직접적으로 측정될 수 없으므로 이를 위해 슬러지가 포함하고 있는 건조물질의 연소로 인한 손실로 측정할 수 있다. 특정 소화가스의 생산은 유기물질의 양과 관련된 소화가스의 부피로서 해석할 수 있다. 이는 슬러지의 유기물의 양을 제시해주는 데에 사용되는 건조물의 손실로서 알 수 있다.

4.10. 슬러지부피와 슬러지부피 지표(SVI)

슬러지 부피의 비율은 평정한 상태의 침강 후 30분 이내에 슬러지-물 혼합물안의 활성슬러지에 의해서 차지되는 총 부피의 비율을 의미한다. 슬러지 부피지표는 슬러지 용액 또는 혼합물의 건조 물질 질량에 따른 농축에 의한 슬러지 부피 비율의 지표이다. 이들 지표들은 슬러지의 침강성을 표현하는 인자가 된다.

4.11. 인(P)

인화합물은 다양한 형태로 슬러지와 침전물에 존재하며, 이는 산소에 의해 분해된다. 인화합물은 인산염의 형태로 용해되어 있을 수 있고, 이는 분광광도계로 측정되어진 총 농도에 따른다.

4.12. 킬달질소(Kjeldahl nitrogen)

이 방법은 슬러지 및 슬러지 산물내의 "킬달질소"를 정량하기 위한 방법이다. 셀레늄 혹은 구리 촉매 존재하에 시료를 환

발한 산 소화에 의해 대부분의 질소화합물이 황산암모늄으로 전환된다. 적절한 소화온도로 올리기 위하여 황산나트륨을 가하고, 알칼리조건에서 소화액의 과잉 희석 황산(혹은 과잉 봉산)으로의 증류에 의해 암모니아를 황산암모늄(봉산암모늄) 용액으로 전환시키게 된다.

4.13. 유기결합 할로겐 화합물의 탈기 및 추출성분 정량

유기결합 할로겐물질은 탈기, 흡착, 용출 혹은 핵산추출에 의해 수집되며, 수소/산소 화염으로 연소되어진다. 응축되면서 나타나는 무기화(mineralization) 생성물은 argentometric 반응 혹은 이에 상응하는 방법에 의해 결정된다.

4.14. 유기흡착 할로겐 화합물의 정량

무기 할로겐 화합물들은 할로겐 화합물이 포함되지 않은 질산용액의 용리에 의해 슬러지나 침전물로부터 제거된다. 그때 활성탄은 용리된 슬러지나 침전물에 부가되고 혼합물은 산소 흐름에 유기적으로 결합된 할로겐의 수소 할로겐화물로 전환하는 연소과정을 거치게 된다. 이들로부터 할로겐 함량이 결정된다.

4.15. 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)

이 방법은 크로마토그래피에 의해 감압-동결건조된 시료의 펜던 혹은 핵산 추출물로부터 방해물질을 제거한 다음, 추출물 내의 PCBs를 capillary 가스 크로마토그래피로 분리하고 전자 포획검출기(ECD)로 정량하는 것이다. 이 표준시험방법에 의해 슬러지 내 6종의 폴리클로리네이티드 바이페닐(PCBs)의 정량이 가능하다.

5. 결 론

본고에서는 슬러지의 적절한 처리, 재활용 및 처분을 위한 슬러지 성장평가방법의 표준화를 위하여 슬러지의 종류를 특성별로 체계적으로 분류하였고, 슬러지 성장평가를 위한 중요한 성장인자들에 대한 특성과 그 활용에 대하여 언급하였다. 슬러지의 성상을 평가하기 위한 표준화된 평가방법의 개발을 위하여 미국, 영국 및 독일 등 선진국의 슬러지 관련 표준화 현황 및 기술체계를 소개하였으며, 독일 표준규격인 DIN 38414 및 주요 선진국의 표준 슬러지 성장평가방법들과 우리나라의 슬러지 관련 표준 체계를 비교하였다. 최종적으로 총 15개항에 걸친 성장인자들에 대한 슬러지성장 표준 평가방법을 제시하였다.

이제 우리나라도 슬러지만을 위한 단독적인 성장평가를 위한 표준시험방법의 제정이 필요한 시점이라고 여겨진다. 또한 이를 슬러지의 성장평가, 적절한 재활용기술 및 처리/처분 기술의 선정 등에 널리 활용할 가치가 있을 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 산업자원부의 산업기반기술개발사업의 연구비

지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Ministry of Environment, Republic of Korea, Comprehensive Measures of Organic Sludge Management (2006).
2. Ministry of Environment, Republic of Korea, Waste Administration Act (2007).
3. Haudy, A., Water Treatment Handbook, 6th ed., Degremont, Paris, 1991, pp. 427-433.
4. Paul, N. C., Sludge Management and Disposal, Prentice-Hall, New Jersey, 1994, pp. 23-47.
5. Dentel, S. K., "Evaluation and Role of Rheological Properties in Sludge Management", *Wat. Sci. Tech.*, **36**(11), 1-8 (1997).
6. Seyssiecq, I., Ferrasse, J.-H., and Roche, N., "State-of-the-art: Rheological Characterization of Wastewater Treatment Sludge", *Biochem. Eng. J.*, **16**, 41-56 (2003).
7. EPA, "POTW Sludge Sampling and Analysis Guidance Document," (1989).
8. WEF, "Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge", 40 CFR Parts 257, 403 and 503 (1994).
9. Korea Standards Association, "Water Quality-Evaluation of the Aerobic Biodegradability of Organic Compounds in an Aqueous Medium [Semi-Continuous Activated Sludge Method (SCAS)]", KS M 9138 (1997).
10. Korea Standards Association, "Water Quality-Method for Assessing the Inhibition of Nitrification of Activated Sludge Micro Organisms by Chemicals and Wastewaters", KS M ISO 9509 (2003).
11. Korea Standards Association, "Water Quality-Evaluation of the Elimination and Biodegradability of Organic Compounds in an Aqueous Medium-Activated Sludge Simulation Test", KS M ISO 11733 (2003).
12. Korea Standards Association, "Water Quality-Evaluation of the Ultimate Anaerobic Biodegradability of Organic Compounds in Digested Sludge Method by Measurement of the Biogas Production", KS M ISO 11734 (2003).
13. Korea Standards Association, "Water Quality-Sampling-Part 13: Guidance on Sampling of Sludges from Sewage and Water-Treatment Works", KS M ISO 5667-13 (2003).
14. Korea Standards Association, "Water Quality-Sampling-Part 8 : Guidance on the Sampling of Wet Deposition", KS M ISO 5667-8 (2006).
15. Korea Standards Association, "Water Quality-Sampling-Part 15: Guidance on Preservation and Handling of Sludge and Sediment Samples", KS M ISO 5667-15 (2002).
16. Deutsche Industric Normen, "Part 1. Sludge and Sediments (Group S); Sampling of Sludges", DIN 38414 (2001).

17. Deutsche Industrie Normen, "Part 2. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Water Content of Dry Residue and of Solids Content", DIN 38414 (2002).
18. Deutsche Industrie Normen, "Part 3. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Loss on Ignition and Residue on Ignition of the Dry Matter of a Sludge", DIN 38414 (2002).
19. Deutsche Industrie Normen, "Part 4. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Leachability by Water", DIN 38414 (2002).
20. Deutsche Industrie Normen, "Part 5. Sludge and Sediments (Group S); Determination of pH Value in Sludge and Sediments", DIN 38414 (2002).
21. Deutsche Industrie Normen, "Part 6. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Oxygen Consumption Rate", DIN 38414 (2002).
22. Deutsche Industrie Normen, "Part 7. Sludge and Sediments (Group S); Digestion Using Aqua Regia for Subsequent Determination of the Acid-Soluble Portion of Metals", DIN 38414 (2002).
23. Deutsche Industrie Normen, "Part 8. Sludge and Sediments (Group S); Determination of the Amenability to Anaerobic Digestion", DIN 38414 (2002).
24. Deutsche Industrie Normen, "Part 9. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Chemical Oxygen Demand (COD)", DIN 38414 (2002).
25. Deutsche Industrie Normen, "Part 10. Sludge and Sediments (Group S); Determination of the Proportion of Sludge Volume and Sludge Volume Index", DIN 38414 (2002).
26. Deutsche Industrie Normen, "Part 11. Sludge and Sediments (Group S); Sampling of Sediments", DIN 38414 (2002).
27. Deutsche Industrie Normen, "Part 12. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Phosphorus in Sludges and Sediments", DIN 38414 (2002).
28. Deutsche Industrie Normen, "Part 13. Sludge and Sediments (Group S); Detection of *Salmonellae* in Disinfected Sewage Sludge", DIN 38414 (2002).
29. Deutsche Industrie Normen, "Part 15. Sludge and Sediments (Group S); Determination of the Specific Residual Beta Activity in Sludge, Sediment and Suspended Matter", DIN 38414 (2002).
30. Deutsche Industrie Normen, "Part 16. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Radionuclides in Sludge, Sediment and Suspended Matter by Means of Gamma-Ray Spectrometry", DIN 38414 (2002).
31. Deutsche Industrie Normen, "Part 17. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Strippable and Extractable Organically Bound Halogens", DIN 38414 (2002).
32. Deutsche Industrie Normen, "Part 18. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Adsorbed Organically Bound Halogens (AOX)", DIN 38414 (2002).
33. Deutsche Industrie Normen, "Part 19. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Steam-Volatile Organic Acids", DIN 38414 (2002).
34. Deutsche Industrie Normen, "Part 20. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Six Selected Polychlorinated Biphenyls (PCB) by Gas Chromatography", DIN 38414 (2002).
35. Deutsche Industrie Normen, "Part 21. Sludge and Sediments (Group S); Determination of Six Selected Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) using Fluorescence Detection" DIN 38414 (2002).
36. Deutsche Industrie Normen, "Part 22. Sludge and Sediments (Group S); Freezing-Drying of Sludge and Determination of Freeze Drying Residue", DIN 38414 (2002).
37. British Standard Institution, "Characterization of Sludges- Utilisation and Disposal of Sludges-Vocabulary", BS EN 12832 (2001).
38. British Standard Institution, "Guidance on Sampling of Sludges from Sewage and Water Treatment Works", BS EN ISO 5667-13 (2001).
39. British Standard Institution, "Characterization of Sludges- Determination of the Loss on Ignition of Dry Mass", BS EN 12879 (2001).
40. British Standard Institution, "Characterization of Sludges- Determination of Dry Residue and Water Content", BS EN 12880 (2001).
41. British Standard Institution, "Characterization of Sludges- Determination of Kjeldahl Nitrogen", BS EN 13342 (2001).
42. British Standard Institution, "Characterization of Sludges- Determination of Trace Elements and Phosphorus-Aqua Regia Extraction Methods", BS EN 13346 (2002).
43. British Standard Institution, "Water Quality-Determination of Phosphorus-Ammonium Molybdate spectrometric Method", BS EN 1189 (2001).
44. British Standard Institution, "Products Used for Treatment of Water Intended for Human Consumption-Expanded Aluminosilicate", BS EN 12905 (2001).
45. European Committee for Standardization, "Characterization of Sludges-Determination of pH-value", CEN EN 12176 (2002).
46. European Committee for Standardization, "Leaching : Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials", CEN PREN 12457 (2002).
47. European Committee for Standardization, "Water Quality- Determination of Kjeldahl Nitrogen-Method after Mineralization with Selenium", CEN EN 25663 (2002).

48. European Committee for Standardization, "Determination of the Sulphur Content of Petroleum Products by the Wickbold Combustion Method", CEN EN 41 (2002).
49. Deutsche Industrie Normen, "Part 19. Determination of Fluoride, Chloride, Nitrite, (Ortho) Phosphate, Bromide, Nitrate and Sulfate Anions in Water a Low Pollution Level by Ion Exchange Chromatography", DIN 38405 (2002).
50. Deutsche Industrie Normen, "Part 8. Determination of Extractable Organically Bonded Halogens (EOX)", DIN 38409 (2002).
51. Deutsche Industrie Normen, "Part 14. Determination of Adsorbable Organically Bonded Halogens (AOX)", DIN 38409 (2002).
52. Deutsche Industrie Normen, "Part 1. Testing of Mineral Oils and Fuels-Determination of Sulfur content (Total Sulfur)-General Working Principles", DIN 51400 (2002).
53. APHA, AWWA, WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th ed.), Washington DC, 2-51~2-82 (1995).
54. Ministry of Environment, Republic of Korea, Standard Analysis Methods for water/waste/soil, Seoul, 38-259 (2007).