

총설

# 수질유해물질 배출허용기준 설정에 따른 배출시설 비용영향 분석사례 연구: 1,4-Dichlorobenzene을 중심으로

김경진 · 김원기\* · 허진 · 김광인 · 김재훈\*\* · 김상훈\*\* · 염익태†

성균관대학교 사회환경시스템공학과

\*무배출형환경설비지원센터

\*\*국립환경과학원

## Case Study of Cost Effect Analysis for Toxic Compounds to Developing Effluent Limitation Standards : Focus on 1,4-Dichlorobenzene

Kyeongjin Kim · Wongi Kim\* · Jin Heo · Kwangin Kim · Jaehoon Kim\*\* · Sanghun Kim\*\* · Icktae Yeom†

Department of Civil & Environmental Engineering, Sungkyunkwan University

\*Center for zero emission technology, Sungkyunkwan University

\*\*National Institute of Environmental Research

(Received 31 May 2010, Revised 29 June 2010, Accepted 29 June 2010)

### Abstract

Recently, regulations on toxic compounds in aquatic environment have been strengthened in Korea due to the increasing public awareness of the water quality. Typically, these regulations include introduction of emerging toxic compounds and stricter effluent limitations for the already regulated compounds. However, too strict regulations may cause excessive burden on the industry. Therefore it is also important to assess the economic impacts when the new effluent limitation guidelines are introduced. The estimation of the additional cost for the wastewater dischargers to meet the new guidelines are based on the selected treatment technology to handle the hazardous substances and the regulatory levels for effluent limitations. To explore the procedures for cost estimation in enforcing new effluent limitations, a case study was performed specially for 1,4-dichlorobenzene. The pollutants of concern are surveyed for different industrial categories and various treatment technologies. For a given pollutant, the general performances of the treatment technologies are surveyed and a representative technology is selected. For a given technology, the capital cost and annual Operation and Maintenance (O&M) cost was calculated. The calculation of baseline costs to operate ordinary treatment technologies is also important. The ratio between the cost for introducing new treatment process and the baseline cost required for conventional technology was used to evaluate the economic impact on the industry. For 1,4-dichlorobenzene, steam stripping and activated carbon processes were selected as the specific treatment technologies. The cost effects to the regulation of the compound were found to be 6.4% and 14.5% increase in capital cost and O&M cost, respectively, at the flow rate over 2,000 m<sup>3</sup>/d for the categories of synthetic resin and other plastics manufacturing industry. For the case of petrochemical basic compounds manufacturing industry, the cost increases were 5.8% and 12.4%, respectively. It was suggested that cost effect analysis to evaluate the economic impacts of new effluent limitations on the industry is crucial to establish more balanced and reasonable effluent limitations to manage the industrial wastewater containing emerging toxic compounds in the wastewater.

**keywords** : Cost effect analysis, Economic impacts, Effluent limitations, Regulations on toxic compounds, 1,4-dichlorobenzene

## 1. 서론

전 세계적으로 246,000종의 화학물질이 사용되고 있고, 국내에서 사용되는 화학물질은 40,731종(2007년 11월)에 이르며, 매년 400여종의 새로운 화학물질이 국내로 들어오

고 있다(환경부, 2009b). 이러한 화학물질 중 발암물질, 내분비계 장애물질(Endocrine Disrupters, EDs)은 인간과 생태계에 매우 유해하여 일부 수생태계에서는 유해화학물질에 의한 생태계 교란이 발생되고 있으며, 이들 물질이 상수원에 잔류할 가능성이 항상 존재하고 있다. 따라서 국내에서도 이러한 수질유해물질의 위험성을 인지하고 사람의 건강이나 동식물의 생육에 직, 간접적으로 피해를 줄 우려가 있는 수질유해물질로서 ‘특정수질유해물질’을 지정하여 1990

† To whom correspondence should be addressed.  
skjkim@skku.edu

년대에 들어와서 규제하고 있다. 2009년 11월 환경부에서는 현행 특정수질유해물질로 지정되어 있으나 배출허용기준이 없는 1,4-다이옥산, 비스(2-에틸헥실)프탈레이트, 염화비닐, 아크릴로니트릴, 브로모포름에 대한 배출허용기준 항목을 신규 설정하고 인체유해성이 높은 수질유해물질의 경우 특정수질유해물질로 지정하고 배출허용기준을 신설한다고 입법예고하고 있다.

현재까지 국내에서 특정수질유해물질로 지정 및 배출허용기준 설정된 수질유해물질들은 아래와 같다.

- 최초지정(1991) : 수질환경보전법(구리, 납, 비소, 수은, 시안화물, 유기인, 6가 크롬, 카드뮴, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 페놀류, 폴리클로리네이트바이페닐), 총 12개 항목
- 추가지정(1999) : 5종 추가(셀레늄, 벤젠, 사염화탄소, 디클로로메탄, 1,1-디클로로에틸렌), 총 17개 항목
- 추가지정(2006) : 2종 추가(1,2-디클로로에탄, 클로로폼), 총 19개 항목
- 추가지정(2008) : 5종 추가(1,4-다이옥산, 비스(2-에틸헥실)프탈레이트, 염화비닐, 아크릴로니트릴, 브로모포름), 총 24개 항목

환경부에서는 ‘수질유해물질 적정관리를 위한 배출허용기준 설정연구’를 진행하면서 미국의 126개 항목, 일본의 26개 항목, EU의 33개 항목 수준으로 지속적으로 확대시킬 계획에 있다(환경부, 2009b). 그러나 이러한 특정수질유해물질의 확대 적용 및 배출허용기준 신설에 따른 처리기술 연구와 배출시설의 경제적 영향에 대해서는 체계적인 연구가 부족한 상황이다. 특히 특정수질 유해물질 확대 적용에 따른 배출시설들의 경제적 영향 분석은 매우 중요하다고 판단된다. 현재 인체 및 수생태 위해성을 근거로 수질유해물질 확대 및 배출허용기준을 설정하고 있지만 배출시설에서 이를 처리하기 위한 처리기술이 정립되어 있지 않고 또한 추가시설 설치 및 운영을 위하여 과도하게 많은 비용을 지출해야 한다면 기업들의 심한 반발을 초래할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 미국, EU 등에서는 신규 수질유해물질 규제를 위해서는 환경 영향과 동시에 비용영향 분석을 심층적으로 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 수질유해물질 규제 시 처리기술을 기반으로 고려해야 할 폐수 배출시설의 비용 분석을 현재 환경부에서 수질유해물질 신규지정을 고려하고 있는 1,4-디클로로벤젠을 대상으로 수행하였다(환경부 2009b). 아직 국내에서는 체계적인 연구 및 관련 자료가 조사된 바 없으므로 USEPA에서 기술근거배출허용기준(Technology Based Effluent Limitations, TBELs) 설정 시 수집된 자료들을 참고로 기존 국내 적용 가능한 기술적 비용영향 분석을 수행하였다(김경진 등, 2010b).

## 2. 비용분석 방법론

수질유해물질 규제 시 산업계에 미치는 비용영향 분석방법은 배출시설에서 신규 수질유해물질들을 처리하기 위해 필요한 처리기술을 근거로 접근해야 한다. 먼저 대상 수질

유해물질 특성별로 생물학적, 물리적, 화학적 처리기술에 대한 검토가 필요하며 유해성을 근거로 제시된 배출허용기준의 규제수준에 따른 처리기술 수준에 대한 검토가 필요하다. 또한 배출시설의 업종 및 규모에 따라 오염물질 배출특성과 처리비용의 편차가 크므로 업종별, 규모별 비용 분석이 이루어져야 한다(김경진 등, 2010b, 2010c).

수질유해물질 규제에 따른 산업계의 비용영향 분석을 위해서는 기존 배출시설들의 업종별, 규모별로 기준-시설비용 및 기준-운전비용 분석이 필요하다. 현재 비용기준(Baseline)을 결정하지 않으면 추가적인 처리기술 도입에 따른 비용 증가 영향에 대한 평가가 어렵기 때문이다. 기준비용은 현재 처리기술 수준의 시설비용 및 운전비용을 의미하며 업종별, 규모별 편차가 크기 때문에 이를 고려하여 산출해야 한다. 또한 수질유해물질별로 배출허용기준을 준수하기 위한 처리기술의 수준을 결정하기 위해서는 국, 내외 자료 및 기존 연구 자료들과 개별 업종별 시설들의 처리현황을 분석할 필요가 있다. 잘 알려져 있지 않은 신규 화학물질의 경우 Pilot 실험을 병행하여 처리가능성을 검토해야 한다. 현재 국내 배출시설들의 업종별, 규모별로 시설비용 및 운전비용 자료를 체계적으로 조사한 자료가 없으며, 특히 신규지정 물질의 경우 국내 산업폐수 업종별 배출특성과 처리기술에 대한 자료가 부족하기 때문에 비용분석에 많은 애로점이 있다(김경진 등, 2010a, 2010c).

비용영향 평가를 위한 단계적 과정을 다음 Fig. 1과 같이 제시하였다. 비용 영향평가를 위해서는 현장 조사를 통해 위해성이 높은 수질오염물질인 관심오염물질(Pollutants of Concern, POCs)들의 배출여부와 유입, 유출수내 농도를 파악한다. 조사 결과 국내 배출시설에서 상당량 수계로 배출된다고 판단될 경우, 그동안 다양한 경로를 통해 조사했던

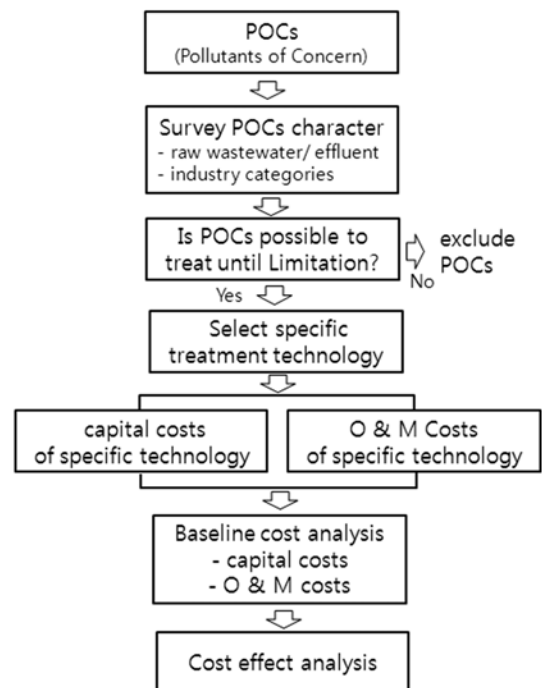


Fig. 1. Flow for Cost-Effect analysis.

자료 및 국내외 연구자료를 검토하여 해당 관심오염물질이 배출허용기준(안)까지 처리가능한지 여부에 대한 처리가능성(Treatability) 검토를 수행한다. 처리가능성 검토 후, 처리가 가능하다고 판단되면 적합한 근거 처리기술(Specific technology)을 선정하게 된다. 근거 처리기술이 선정되면 이 처리기술에 의하여 해당물질을 처리하는 데 소요되는 용량별 시설비용 및 유지관리비용을 산정한다. 이 경우 다양한 처리기술의 조합이 가능하므로 해당 수질유해물질의 특성과 처리기술의 경제성을 고려하여 산정하여야 한다. 또한 배출허용기준 설정에 따라 근거 처리기술을 도입해야 하는 대상업종들의 현재 기준비용을 산출한다. 근거 처리기술 비용과 현재 기준비용을 비교하여 신규오염물질 규제에 의해 영향을 받는 업종들의 비용영향을 분석할 수 있다. 본 연구에서는 국내에 적합한 비용영향 분석방법을 제시하기 위해 환경부에서 신규 수질유해물질 대상물질로 검토 중에 있는 1,4-디클로로벤젠에 대한 비용영향분석을 실시하였다(환경부, 2009b).

### 3. 1,4-디클로로벤젠 비용영향 분석

비용영향분석을 위하여 ‘수질유해물질 적정관리를 위한 배출허용기준 설정연구(이하 ‘배출허용기준 설정연구’, 환경부, 2009b)에서 신규 특정 수질유해물질 지정여부를 검토하고 있는 1,4-디클로로벤젠에 대한 비용영향분석을 실시하였다.

#### 3.1. 처리가능성(Treatability) 분석

관심오염물질(POCs)에 대한 처리가능성 검토는 근거 처리기술을 선정하기 위한 사전 작업에 해당된다. 화학물질의 물리적, 화학적, 생물학적 처리특성을 고려하고 기존 연구자료, 처리특성자료, 외국 사례, 논문자료, Pilot 운전, 추가 실험을 통하여 제시된 적절한 처리기술을 선정하게 된다. 아직 국내에서는 체계적인 관련 자료가 조사된 바 없으므로 USEPA에서 기술근거배출허용기준(Technology Based Effluent Limitations, TBELs) 설정 시 수집된 자료들을 참고로 기존 국내 적용 가능한 비용영향 분석을 수행하였다(국립환경과학원, 2009; USEPA, 1987, 1998, 2009).

#### 3.1.1. 1,4-디클로로벤젠 처리특성

1,4 디클로로벤젠은 물에서 용해도가 156 mg/L, 25°C (Banerjee, 1984)이고 생분해도가 비교적 높아 호기성 조건에서 분해가 가능한 것으로 알려져 있다(분해상수,  $k=0.05d^{-1}$ ; Tabak, 1981). 1,4-디클로로벤젠은 헨리상수가 높은 High Henry's Index group(USEPA, 1987)에 포함되어 있는 휘발성이 높은 물질이다. 또한 활성탄 흡착량은 121 mg/g(0.03 lb/lb)로 Medium carbon adsorption capacity group (0.03~0.04 lb/lb; USEPA, 1987)에 포함되어 활성탄에 의한 흡착능도 비교적 우수한 것으로 알려져 있다. 기존 연구자료에 의하면 1,4 디클로로벤젠은 UV만으로 25~75% 제거되며, UV+TiO<sub>2</sub>에 의해서는 58%~100% 제거된다(Selli et al., 2008). 또한 초음파에 의해서도 60~70% 정도 제거되어 염소이온과 CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>로 분해된다(Jiang et al., 2002).

#### 3.1.2. USEPA 처리가능성 자료 검토

USEPA에서 조사한 1,4-디클로로벤젠의 처리가능성 자료(USEPA, 2009)를 검토해본 결과 활성슬러지와 활성탄 공정에 의해서는 모든 유입농도 범위에서 90% 이상 높은 제거율을 나타내고 있다. 또한 비교적 고농도(10~100 mg/L) 유입 조건에서 Air stripping을 적용한 결과 90% 정도의 제거율을 나타내고 있다. 그러나 화학침전이나 화학적 산화에서는 처리변동성이 크며 50% 미만의 낮은 제거율을 보여주고 있다(Table 1 참조).

미국에서 1,4-디클로로벤젠을 규제하고 있는 업종인 유기화학, 플라스틱, 합성섬유 업종(Organic chemical and plastics and synthetic fibers point source(OCPSF) category)의 폐수 및 처리수에 포함된 1,4-디클로로벤젠 농도를 조사하였다(USEPA, 1987). 조사결과 폐수내에서는 평균 105.6 µg/L, 최대 721 µg/L가 발생하는 것으로 나타났으며 Air stripping과 활성슬러지 공법 처리를 거친 후에는 평균 10 µg/L, 일최대 28 µg/L로 유출되는 것으로 나타나고 있다(Table 2, 3 참조).

USEPA 조사자료(USEPA, 1987, 2008, 2009)를 통해 1,4-디클로로벤젠의 처리가능성을 검토한 결과 처리기술로는 Air stripping(Steam stripping)과 생물학적 처리, 활성탄 흡

**Table 1.** Treatment efficiency of specific technologies for 1,4-dichlorobenzene (USEPA, 2009)

Influent	Specific technologies	Effluent concentration (µg/L)		Removal rate (%)
		Min.	Max.	
0~100 µg/L	Activated sludge	0.5	10	95~76
	Chemical precipitation	1.0	66	29~84
	Activated carbon	0.2	10	40~98
100~1000 µg/L	Activated sludge	10	27	90~98
	Chemical precipitation	-	480	42
	Activated carbon	10	-	96
1~10 mg/L	Activated sludge	12	-	99
	Chemical precipitation	-	700	31
10~100 mg/L	Activated carbon	15	-	99
	Stripping	-	3,600	90
100~1000 mg/L	Chemical precipitation	62,000	67,000	39~44

**Table 2.** Influent concentration of 1,4-dichlorobenzene in OCPSF industrial category (USEPA, 1987)

1,4-dichlorobenzene concentration in influent	Unit	Minimum	Maximum	Mean	Median
	µg/L	10	721	105.6	42

**Table 3.** Effluent concentration of 1,4-dichlorobenzene in OCPSF industrial category (USEPA, 1987)

1,4-dichlorobenzene concentration in effluent	Unit	Long term average	Daily maximum	Monthly average
	µg/L	10	28	15

작공정이 선정되었으며 이러한 단위공정의 조합을 통해 처리할 경우 ‘배출허용기준 설정연구’에서 검토하고 있는 1,4-디클로로벤젠 배출허용기준(안)(청정지역 60 µg/L, 가, 나, 특례지역 600 µg/L) 달성은 가능하다고 판단된다(환경부, 2009b)

### 3.2. 1,4-디클로로벤젠 국내 배출실태 조사결과

‘배출허용기준 설정연구’(환경부, 2009b)에서 실시한 배출실태 조사 결과 1,4-디클로로벤젠은 총 46개 배출시설들 중 유입수는 2개소, 유출수는 2개소에서 검출되었으며 유출수에서 배출허용기준(안)(청정지역 60 µg/L, 가, 나, 특례지역 600 µg/L)을 초과하여 검출된 배출시설은 2개소로 나타났다. 유출수에 1,4-디클로로벤젠의 배출허용기준(안)을 초과해서 배출되는 업종은 석유화학계 기초화학물 제조시설(조사대상 10개소 중 1개소 검출)과 합성수지 및 기타 플라스틱 제조시설(동업종 조사대상 6개소 중 1개소 검출)로 나타났다. 2007년도 화학물질 배출량 조사에 의하면 1,4-디클로로벤젠 연간 총배출량은 128 kg이고 전량이 대기로 배출되고 있다. 국내 사용 업종을 살펴보면, 섬유제품 제조업에서 0.00309 kg으로 극히 적은 양이 사용되는 것으로 나타났다(환경부, 2007b). 1,4-디클로로벤젠이 초과 배출된 시설들의 폐수처리공정을 검토한 결과 석유화학계 기초화학물 업종에 해당하는 배출시설의 경우, 유기성 폐수는 Stripping + 활성탄 흡착, 무기성 폐수는 화학침전공정만으로 처리하고 있으며 합성수지 및 기타 플라스틱 업종에 해당되는 배출시설의 경우 화학침전공정 + 가압부상공정만으로 처리가 이루어지고 있다(환경부, 2009b).

### 3.3. 근거 처리기술(Specific technology) 선정

1,4-디클로로벤젠의 처리특성과 외국사례 및 관련 자료를 검토하고 국내 배출시설 실태조사 분석결과를 반영하여 처리근거기술은 활성슬러지 공법, Steam stripping, 활성탄 흡착공정으로 제안하였다. 1,4-디클로로벤젠이 비교적 생분해도가 높은 물질이지만 실태조사 결과 배출허용기준(안)이 초과된 배출시설들이 모두 생물학적 처리시설을 갖추고 있는 양을 알 수 있다. 추가 생물학적 처리가 가능한 경우에는 활성슬러지 공정 도입이 필요하다고 판단된다. 그러나 대상 업종 폐수가 미생물의 성장에 필요한 적정 유기물이 부족하여 생물학적으로 처리가 힘든 폐수일 경우에는 휘발성이 강한 1,4-디클로로벤젠의 특성을 이용하여 Steam stripping 공정을 거쳐 사전에 제거하는 것으로 제안하였다. 생물학적 처리나 Steam stripping을 적용하기 어려

울 경우와 적용 후에도 배출허용기준(안) 농도이상 잔존할 경우에는 후단에 활성탄 흡착공정을 제안하였다. 활성탄 흡착공정의 경우 고농도 독성오염물질로부터 생물학적 처리 시스템을 보호하고 잔류 오염물질을 제거하기 위해 폐수가 혼합되기 전에 공정상에서 처리하는 것이 경제적이라고 판단된다.

USEPA의 경우 1,4-디클로로벤젠의 처리를 위한 경제성을 고려한 최적처리기술(Best Available Technology, BAT)로 Steam stripping과 생물학적 처리를 제안하였다. USEPA는 활성탄의 경우 주기적인 교체가 필요하여 타 공정(Steam stripping, 생물학적 처리)에 비해 유지관리비가 증가되므로 BAT기술에서는 제외시키고 근거 처리기술은 1,4-디클로로벤젠이 타 폐수와 혼합, 희석되기 전에 처리하는 것으로 제안하였다(국립환경과학원, 2009; USEPA, 1987, 1998).

### 3.4. 근거 처리기술의 적용(Designing of Specific technology) 및 비용산정

해당 수질유해물질을 처리하기 위한 처리기술들의 조합과 적정 처리를 위한 운전조건을 고려한 처리기술별 비용산정이 필요하다. 해당 수질유해물질의 특성별(생분해도, 흡착능, 헨리상수 등) 운전 및 설계조건이 달라지기 때문에 이를 고려한 비용 산정이 이루어져야 한다.

#### 3.4.1. 생물학적 처리공정

1,4-디클로로벤젠의 경우 생물학적 분해가 가능하므로 ‘배출허용기준 설정연구’(환경부, 2009b) 조사 결과 생물학적 처리공정을 갖추고 있을 경우 배출허용기준(안)을 만족하고 있는 것을 알 수 있다. 1,4-디클로로벤젠을 처리하기 위해 생물학적 처리를 할 경우 BOD를 제거하기 위한 처리공정보다 체류시간을 다소 길게 설계하여 미생물을 충분히 적응시킬 경우 활성탄 흡착보다 효과적으로 제거가 가능하다고 보고되고 있다(USEPA, 1987).

생물학적 처리공정은 일반적인 활성슬러지 처리공법으로 적용하고 추가적인 시설비용 및 운전비용은 2001년도 환경부에서 보고한 ‘주택단지 내 상수, 오수발생량 원단위 산정 및 하수처리시설 소요비용연구(환경부, 2001)’ 내용을 근거로 산정한 결과 시설비용 :  $C = 6.94Q^{0.692}$ , 운전비용 :  $C = 128.13Q^{0.601}$  (C: 비용(원), Q: 시설용량(m<sup>3</sup>/일))으로 나타났다(Table 4 참조).

#### 3.4.2. Gas stripping (air, steam)

Stripping은 주로 공기, 증기를 폐수를 통과시켜 폐수내 휘

**Table 4.** Capital and O&M cost functional formula for activated sludge process (ME, 2001)

Cost functional formula	Capital cost	$C = 6.94Q^{0.692}$ C : total capital cost (million won), Q : capacity (m <sup>3</sup> /d)
	O&M cost	$C = 128.13Q^{0.601}$ C : total capital cost (million won), Q : capacity (m <sup>3</sup> /d)

발성 물질을 제거하는 방법을 말한다. 휘발성 유기물질 (Volatile Organic Compounds, VOCs)은 휘발 또는 증류시켜 화학물질을 회수하여 별도로 농축시킨 후, 외부 위탁처리 또는 소각을 통해 제거해야 한다. Stripping 기술을 적용할 경우 반드시 농축액을 처리하기 위한 별도시설 도입 및 처리비용을 고려해야 한다. VOCs 물질을 수중에서 대기로 매체 전환시킬 경우 또 다른 대기오염문제를 발생시킬 수 있기 때문이다. Stripping은 공기나 증기 사용여부에 따라 Air stripping과 Steam stripping으로 구분된다(USEPA, 1987).

□ Gas stripping

Gas stripping 방법은 비용해성 기체가 포함된 액체가 공기와 만나거나 공기와 용액사이에 기체가 접촉할 때 발생하는 교환작용에 의해 발생된다. 가스의 교환은 접촉컬럼에서 이루어지며 접촉표면적을 증가시키기 위한 여재가 충전되어 있고 팬을 설치하여 공기가 접촉컬럼을 통과하도록 한다.

□ Steam stripping

Steam stripping은 폐수내 휘발성 물질이 상온에서 물에 용해 가능할 경우 폐수를 가온하여 증류시켜서 휘발을 촉진시킨다. Steam stripping은 하나 이상의 기체/액체 접촉단계를 갖는 연속적인 공정이다. 예열된 폐수는 증류라인의 최상부로 들어가서 바닥에서 올라오는 가열된 증기와 기체와 접촉하게 된다. 휘발성 오염물질이 폐수에서 가열된 증기로 추출된 후, 증기는 수용성과 휘발성 두 개의 층으로 응축된다. 수용성 층은 비교적 낮은 농도의 휘발성 물질을 함유하기 때문에 폐수처리시설로 이송된다. 휘발성 층은 회수되거나 현장에서 소각, 또는 운반 처분된다. Steam stripping은 에너지 집약적 기술로써 폐수를 예열하고 폐수에서 휘발성 물질을 추출하는데 필요한 가열된 증기를 생산하기 위한 열에너지가 필요하다. 어떤 폐수는 Steam stripping에 앞서 고형물 제거와 같은 전처리를 요구하는데 고형물이 많으면 증기와 폐수 사이의 효율적인 접촉을 방해할 수 있기 때문이다. Steam stripping은 압력에 대한 용해도의 비(헨리 상수)를 바탕으로 휘발성 오염물질을 제거하도록 설계되어야 한다. 장비의 높이와 직경, 기압, 온도 등

은 휘발성 오염물질의 종류에 따라 다르다(USEPA, 1987).

헨리상수는 중요한 설계변수이므로 USEPA는 오염물질을 헨리상수가 높은 범위, 중간범위, 낮은 범위의 세 범위로 분류하였다. 헨리상수가 낮은 그룹의 오염물질은 Steam stripping 외의 다른 처리를 필요로 한다. 제거 대상인 휘발성 유기화합물의 고유한 헨리상수에 맞추어 Steam stripping 설계 및 운전되어야 한다. 1,4-디클로로벤젠의 경우 헨리상수가 높은(High HI) 그룹에 포함되어 있으므로 stripping 적용 시 제거효율이 높은 오염물질에 해당된다. 또한 Stripping 시설 외에 농축된 휘발성 층을 소각 처분하기 위한 시설비용 및 운전비용을 고려하여 산정하였다(Table 5 참조).

3.4.3. 활성탄 흡착

활성탄 흡착은 오염물질을 흡착하여 흡착제 표면에 축적 시킴으로써 오염물을 제거하는 물리적 공정이다. 활성탄은 무극성 흡착제로 극성이 없고 용해성이 적은 유기화합물질을 흡착한다. 활성탄이 유기물질을 흡착함에 따라 주기적으로 재생되거나 신규 활성탄으로 교체해주어야 한다. 활성탄 흡착 공정은 산업폐수내에서 유기성 용존 물질을 제거하는데 효과가 높은 것으로 알려져 있다. 활성탄에 의해 용이하게 제거되는 화합물들은 페놀류, 염소계 탄화수소, 계면활성제, 유기 염색제, 유기산, 고분자 알콜, 아민류 등이며 무기물질들로서 시안화물, 크롬, 수은등도 효과적인 제거가 가능하다. 활성탄은 흡착능에 따라 3가지로 분류되며 1,4-디클로로벤젠은 Medium carbon adsorption capacity group의 활성탄 흡착능을 나타내고 있다(USEPA, 1987, 1998).

□ High carbon adsorption capacity group : 0.04~0.08lb/lb 이상

□ Medium carbon adsorption capacity group : 0.03~0.04lb/lb - 1,4-디클로로벤젠 : 121mg/g (0.03lb/lb)

□ Low carbon adsorption capacity group : 0.02~0.005이하 lb/lb

물질별 흡착능에 따라 흡착탑에 대한 설계조건 및 활성탄 교체주기가 달라지므로 시설비용 및 운전비용의 차이가 발생한다. USEPA는 소용량(0.2MGD이하)과 대용량으로 구분하여 비용 계산을 구분하였으며 또한, 물질별 흡착능에

**Table 5.** Summary of capital and O&M costs for stream stripping process on high Henry Index group pollutants (USEPA, 1987)

Steam stripper			Overhead flow disposal			
Total flow (MGD)	Capital cost (\$)	O&M cost(\$)	Flow (gpd)	Disposal method	Capital cost *	O&M cost *
0.01	302,201	11,816	100	contract hauling	-	45%
0.50	462,875	471,673	5,000	Incineration	60%	80%
1.00	611,976	969,521	10,000		49%	62%

\* % Overhead cost to steam stripper cost

**Table 6.** Summary of capital and O&M costs for medium carbon adsorption process (USEPA, 1987)

Cost		0.01MGD	0.02MGD	0.05MGD	0.10MGD	0.20MGD
Capital	Details	installation, initial A/C, design, others				
	yearly cost (\$)	75,971	116,020	226,798	377,138	630,723
O&M	Details	electricity, regenerating A/C, additional A/C, maintenance, others				
	yearly cost (\$)	53,331	75,457	140,303	246,317	455,521

정도로 High / Medium / Low carbon adsorption capacity를 구분하여 별도 비용계산식을 제시하고 있다(USEPA, 1987). 1,4-디클로로벤젠의 경우 Medium carbon adsorption capacity를 가지고 있으므로 이를 고려하여 시설비용 및 운전비용을 산정하였다(Table 6 참조).

### 3.5. 기준(Baseline) 비용분석

#### 3.5.1. 개요

기준비용분석은 해당수질유해물질에 대한 비용영향 평가를 하기위한 사전단계로 현재 처리수준과 처리공정에서 폐수처리를 위한 시설비용 및 유지관리 비용을 분석하는 것이다. 일반적으로 폐수처리시설의 기준 비용을 분석하기 위해서는 폐수처리공정과 설치년도를 고려해야 한다. 폐수처리를 위한 시설 및 운전의 기준 비용을 산출하기 위해서는 폐수처리를 위한 기준 단위공정들의 조합을 선택해야 하지만 현실적으로 폐수특성에 따라 폐수처리 단위공정들이 매우 상이하기 때문에 선정하기가 쉽지 않다. 유기성 폐수만 처리하는 폐수처리시설은 생물학적 처리시설만 요구되지만 중금속 물질과 난분해성 물질이 다량 유입되는 폐수처리시설은 화학적 처리시설만으로 운영되기도 한다. 특정수질오염물질의 경우는 특성에 따라 별도의 물리적, 화학적 처리시설이 추가적으로 요구되고 있으므로 기준 단위공정을 결정은 쉽지 않은 일이다. 또한 시설의 설치년도에 따라 시설비용이 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 운전비용 역시 이러한 단위공정구성과 설치년도에 따라 많은 영향을 받는다(USEPA, 2008).

이러한 기준 시설비용 및 운전비용 분석 시 비용차이를 결정하는 큰 기준이 되는 것은 발생폐수의 특성이다. 폐수처리단위공정 선정과 유지관리비용 결정은 결국 폐수처리 특성이 결정하는 것이기 때문이다. 현재 환경부 82개 업종 분류와 발생폐수 특성이 반드시 일치하지는 않지만 발생폐수 특성도 원료 및 생산품에 의해 결정되므로 가장 큰 상관관계를 나타내고 있다.

기준 비용분석 시 고려해야 할 것들은 수집된 조사 자료의 수준과 한계를 정하는 것이다. 즉, 검토대상 및 분석대상 자료가 풍부하면 보다 정확한 기준비용 산출이 가능하지만 국내의 경우 자료가 매우 부족하므로 일반조건에 합리적인 가정을 통하여 이를 보완하는 작업을 수행해야 한다. 다양한 업종과 용량의 개별 업체에 대한 폐수시설의 시설비용 분석은 해당 자료가 부족하여 산정하기 어려우므로 폐수처리 표준공정으로 설계된 공공폐수종말처리장의 용량별 시설비용 자료를 기준시설비용으로 적용하였다.

일반적으로 기준비용 분석 시 공공폐수처리장과 기업 내

폐수배출시설의 비용은 별도로 계산되어야 한다. 기업내 폐수배출시설이 소규모이고 해당업종의 특성을 반영하고 있기 때문에 공공폐수처리장 보다 시설비용은 유사하거나 다소 낮게, 운전비용은 높게 발생하고 있기 때문이다.

USEPA의 경우 공공폐수처리장의 경우는 BPT 기준을 BCT로 강화시킬 경우 수집된 데이터가 공공폐수처리장 기준비용 BOD 1파운드 제거 당 0.56\$(1990년 \$기준)를 초과할 경우 비용효과 평가 시 문제를 제기하고 있다. 또한 기업의 경우에는 (BCT 기술 개선 시 오염물 제거량 당 비용) / (BPT 기술 제거량 당 비용)이 1.29를 초과할 경우 경제성에 문제가 있다고 판단하고 있다(USEPA, 1998).

#### 3.5.2. 기준 비용분석에 이용된 자료 및 적용

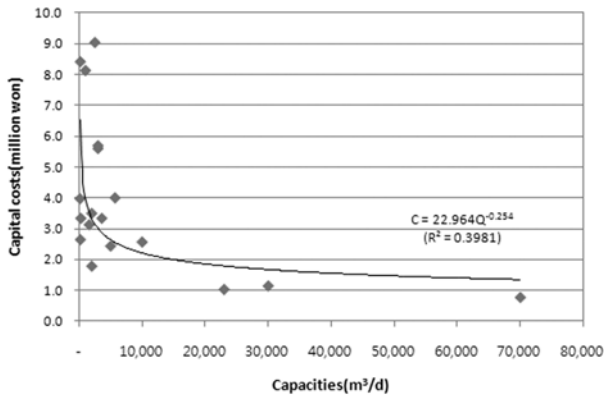
기준 비용 분석을 위하여 환경부에서 발표한 '2008년도 산업단지 폐수종말처리시설 운영현황(환경부, 2009a)' 자료와 '폐수 배출업소 조사자료(환경부, 2007a)'를 활용하였다. 시설비용은 업종별로 조사, 정리된 자료가 없으므로 폐수종말처리시설 시설비용을 용량별로 업종구분 없이 적용하였다. 운전비용은 개별시설의 업종 및 용량별로 차이가 크게 발생하므로 업종별, 용량별로 구분하였다. '폐수 배출업소 조사자료' 내 업종별, 용량별 자료를 분석하여 운전비용을 산정하였다.

#### 3.5.3. 기준-시설비용(Baseline capital cost) 산정

현재 국내 배출시설에 대한 규모별, 업종별 현황에 대한 조사, 분석된 자료가 부족한 상황이므로 공공폐수처리시설의 용량별 시설비용을 기준-시설비용으로 산정하였다. '2008년도 산업단지 폐수종말처리시설 운영현황(환경부, 2009a)' 자료에서 설치년도, 처리공법, 시설용량, 연간운영비, 총사업비용 분석하여 시설용량별 기준-시설비용을 산정하였다. 기준-시설비용 표본의 정확성을 높이기 위하여 설치년도와 표본 단위공정의 범위를 제한하였다. 기준시설은 2000년도 이후 설치된 폐수종말처리장을 대상으로 하였으며 표준 단위공정의 범위는 2000년 이후에 착공한 폐수종말처리시설 21개소 중 표준 활성슬러지와 자연정화법만을 채택하고 있는 3개소를 제외하고 물리화학적 처리공정과 함께 운영되고 있는 18개소를 대상으로 용량별로 구분하여 기준-시설비용을 산정하였다(Table 7 참조). 표본 폐수종말처리장은 생물학적처리+물리, 화학적처리를 기반으로 하고 있으며 일부의 경우 오존, 활성탄 등 고도처리시설도 확보하고 있다. 이 자료를 활용하여 통계분석을 한 결과 용량별 기준-시설 비용 산술식은  $C = 22.964Q^{0.254}$  (C: 기준-시설비용, 백만원/ Q: 시설용량, m<sup>3</sup>/일)로 나타났다(Fig. 2 참조).

**Table 7.** Summary of capital and O&M costs for public industrial wastewater treatment plants in industrial estate (ME, 2009b)

Capacity	Plants No.	Capital cost per ton (million won)	O&M cost per ton (won)
under 1000 m <sup>3</sup> /d	5	5.30	1,024
1000~10,000 m <sup>3</sup> /d	9	4.28	353
10,000~30,000 m <sup>3</sup> /d	3	1.57	149
over 30,000 m <sup>3</sup> /d	1	0.76	122



**Fig. 2.** Capital costs for public industrial wastewater treatment plants in industrial estate (ME, 2009b).

3.5.4. 기준-운전비용(Baseline O&M cost) 산정

‘전국 폐수배출시설 조사자료(환경부, 2007a)’를 활용하여 업종별, 규모별(종별) 평균 시설용량 및 폐수 발생량, 운전 비용 자료들을 고려하여 기준-운전비용을 산정하였다(Table 8, 9 참조). 톤당 운전비용 산출을 위하여 시설용량별 운전 비용과 폐수 발생량별 운전비용을 비교해본 결과 시설용량 별 운전비용 산정이 보다 정확한 것으로 나타났다. 이는 시설용량보다 적은 양의 폐수가 발생하더라도 고정비용(인건비, 전력비용 등)이 비용의 대부분을 차지하고 있기 때문이다. 따라서 시설용량기준으로 운전비용을 산출하는 것이 적합하다고 판단된다. 그러나 펄프제지업종과 같은 용수 사용량이 많고 폐수발생량이 많은 업종의 경우 약품사용량

등의 변동비용이 운전비용이 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 용수 다량사용 업종에 대해서는 폐수발생량 기준의 운전비용 산정이 적합하다고 판단된다. ‘배출허용기준 설정연구(환경부, 2009b)’에서 유출수에서 배출허용기준(안)을 초과한 2개 업종(석유화학계 기초화학물 제조시설, 합성수지 및 기타 플라스틱 제조시설)의 환경부 폐수배출량 종별기준에 따라 평균 시설용량과 발생량, 그리고 평균 운전비용을 정리하였다(Table 8, 9 참조). 통계분석을 한 결과 석유화학계 기초화학물 제조시설 업종에 대한 용량별 기준-운전비용 산술식은  $C = 16393Q^{-0.113}$  (C: 기준-운전비용(원), Q: 시설용량(m<sup>3</sup>/일))이며 합성수지 및 기타 플라스틱 제조시설에 대한 용량별 기준-운전비용은  $C = 11826Q^{-0.132}$  (C: 기준-운전비용(원), Q: 시설용량(m<sup>3</sup>/일))로 나타났다(Fig. 3, 4 참조).

3.6. 비용 영향 평가

3.6.1. 적용대상 근거기술 및 적용대상범위 선정

1,4-디클로로벤젠 배출허용기준(안) 설정을 위한 처리 근거기술은 처리가능성 검토를 통해 제안하였다. 1,4-디클로로벤젠의 경우 전처리로 Steam stripping, 생물학적 처리로 활성슬러지 공법, 그리고 활성탄 흡착 공정을 제안하였다. 대부분 폐수배출시설에서는 생물학적 처리시설을 확보하고 있으며, 미확보된 경우에는 폐수 정상자체가 생물학적 처리에 부적합한 경우가 많으므로 활성슬러지 공법의 적용은 보류하였다. 경제성 분석결과 활성탄 공정은 주기적인 교체

**Table 8.** Summary of O&M cost analysis data for petrochemical basic compounds manufacturing industry (ME, 2007)

Class <sup>1)</sup>	Plant No.	Average capacities (m <sup>3</sup> /d)	Average discharge (m <sup>3</sup> /d)	Average O&M cost (won/m <sup>3</sup> )	Note
Class 1	14	6,845	7,176	9,125	-
Class 2	11	1,273	915	7,330	-
Class 3	16	323	317	8,761	-
Class 4	12	96	79	13,356	Exclude consignment treatment
Class 5	19	90	13	16,542	Exclude consignment treatment

1) Class 1 : over 2,000 m<sup>3</sup>/d, Class 2 : 700~2,000 m<sup>3</sup>/d, Class 3 : 200~700 m<sup>3</sup>/d, Class 4 : 200~50 m<sup>3</sup>/d, Class 5 : under 50 m<sup>3</sup>/d

**Table 9.** Summary of O&M cost analysis data for synthetic resin and other plastics manufacturing industry (ME, 2007a)

Class <sup>1)</sup>	Plant No.	Average capacities (m <sup>3</sup> /d)	Average discharge (m <sup>3</sup> /d)	Average O&M cost (won/m <sup>3</sup> )	Note
Class 1	11	3,890	4,199	7,840	-
Class 2	10	1,113	1,191	6,807	-
Class 3	3	320	326.7	4,182	-
Class 4	11	75	83.9	15,014	Exclude consignment treatment
Class 5	52	19	38.4	12,409	Exclude consignment treatment

1) Class 1 : over 2,000 m<sup>3</sup>/d, Class 2 : 700~2,000 m<sup>3</sup>/d, Class 3 : 200~700 m<sup>3</sup>/d, Class 4 : 200~50 m<sup>3</sup>/d, Class 5 : under 50 m<sup>3</sup>/d

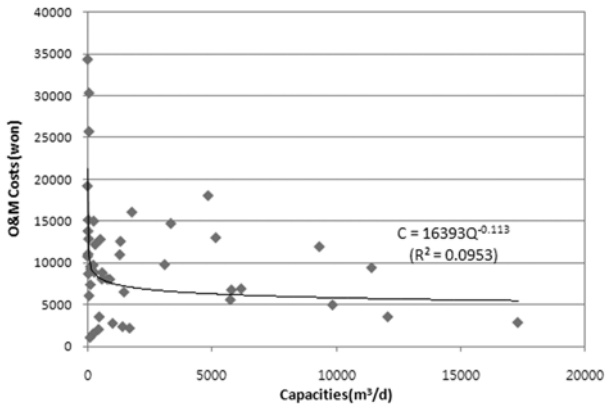


Fig. 3. O&M costs for petrochemical basic compounds manufacturing industry (ME, 2007a).

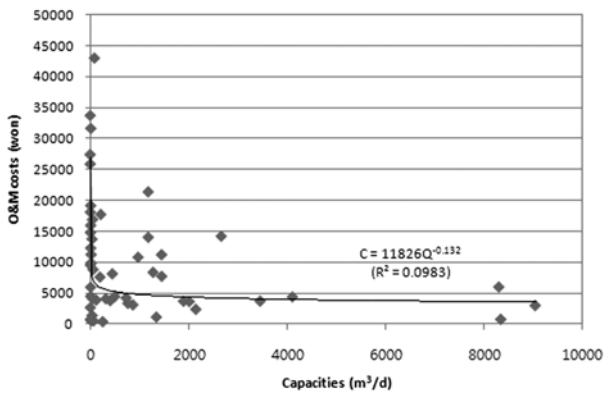


Fig. 4. O&M costs for synthetic resin and other plastics manufacturing industry (ME, 2007a).

및 재생이 필요하여 대용량 시설(1~3종)의 경우 Steam stripping보다 운전비용이 많이 소요하는 것으로 나타났으나, 소규모(4, 5종) 시설에서는 활성탄 시설이 Steam stripping보다 경제적인 것으로 나타났다. 따라서 최종 근거기술 범위는 대용량 시설(1~3종)에서는 Steam stripping 기술, 소용량(4, 5종)에서는 활성탄 흡착 기술로 선정하였다. 설치 위치는 최종 종말처리시설에서 전체 폐수가 혼합되기 전에 대상오염물질이 발생하는 공정내(In plant)에서 발생유량만 처리하는 것이 합리적이라고 판단된다. 적용 대상범위는 ‘배출허용기준 설정연구(환경부, 2009b)’ 조사 결과 유출수에서 기준(안)을 초과하는 석유화학계 기초화합물 제조시설

업종과 합성수지 및 기타 플라스틱 제조시설 업종을 대상으로 하였다.

3.6.2. 비용영향 평가 분석

처리 근거기술에 대한 비용영향 평가결과 석유화학계 기초화합물 제조시설과 합성수지 및 기타 플라스틱 제조시설 모두 처리기술로 1~3종 사업장에서는 Steam stripping을 도입하고 4종, 5종 사업장에서는 활성탄 흡착공정을 도입하는 것이 시설비와 유지관리비 측면에서 유리하다고 분석되었다. 처리근거 기술 도입 시 석유화학계 기초화합물 제조업종에 대한 각 배출시설 규모별(종별) 추가 비용 영향은 1종 사업장이 시설비 5.8%, 운전비 12.4%가 증가되고, 2종사업장에서는 시설비 9.6%, 운전비 15.4%가 각각 증가되는 것으로 나타났으며 전체용량의 93%가 1, 2종 사업장에 해당된다. 합성수지 및 기타 플라스틱 제조업종의 처리근거기술 도입에 따른 비용영향을 살펴보면 Steam stripping 기술을 도입하는 1종 사업장이 시설비 6.4%, 운전비 14.5%가 증가되고, 2종사업장에서는 시설비 10.2%, 운전비 16.6%가 각각 증가되는 것으로 나타났으며 전체 용량의 94%가 1, 2종 사업장에 해당된다(Table 10 참조).

4. 결론

특정수질유해물질 확대 적용 및 신규 수질유해물질의 배출허용기준을 설정하기 위해서는 규제에 따른 경제적 영향을 면밀히 분석해야 한다. 현재 인체 및 수생태 위해성을 근거로 수질유해물질 확대 및 배출허용기준을 설정하고 있지만 이를 처리하기 위한 기술도입과 운영을 위하여 많은 비용을 지출해야 한다면 기업들의 심한 반발을 초래할 수 있기 때문이다. 그러나 아직 국내에서는 이러한 신규 수질유해물질의 규제에 따른 배출시설의 비용영향분석을 심층적으로 진행하지 못하고 있다. 그 이유로는 수질유해물질 배출특성에 대한 모니터링 자료부족, 업종별 배출시설들에 대한 운영자료 부족, 신규 수질유해물질에 관한 특성 및 처리기술 연구부족 등을 들 수 있다. 수질유해물질 규제를 효과적으로 달성하기 위해서는 규제에 따라 업종별로 배출시설들에게 미치는 경제적 영향이 과학적으로 제시되어야 할 것이다. 본 연구에서는 수질유해물질 규제 강화에 따른 비용영향 분석방법을 1,4-디클로로벤젠 분석사례를 통하여

Table 10. Summary of economic impacts on the industry categories by regulating 1,4-dichlorobenzene

Industrial categories		Increase rate (%)					Average
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	
Petrochemical basic compounds manufacturing	Capital	5.8%	9.6%	21.5%	22.5%	22.8%	18.9%
	O&M	12.4%	15.4%	12.6%	14.9%	12.3%	13.4%
Synthetic resin and other plastics manufacturing	Capital	6.4%	10.2%	21.6%	23.9%	43.3%	27.0%
	O&M	14.5%	16.6%	26.3%	14.3%	34.7%	21.2%

Class1 : over 2,000 m<sup>3</sup>/d, Class2 : 700~2,000 m<sup>3</sup>/d, Class3 : 200~700 m<sup>3</sup>/d, Class4 : 200~50 m<sup>3</sup>/d, Class5 : under 50 m<sup>3</sup>/d



제시하였다.

- 1) 비용영향 분석을 위해서는 먼저 해당 오염물질의 물리, 화학, 생물학적 특성 분석과 처리가능성 검토를 통한 근거 처리기술의 선정이 필요하며, 선정된 처리기술의 용량별 시설비용 및 운전비용을 산정한 후, 비용영향 범위(대상 업종)를 선정하고, 기준(Baseline) 시설비용 및 운전비용과 비교하여 관심오염물질의 처리를 위한 비용분석을 수행해야 한다.
- 2) 1,4-디클로로벤젠의 처리 근거기술의 비용영향 분석 결과 석유화학계 기초화학물 제조시설과 합성수지 및 기타 플라스틱 제조시설 모두 처리기술로 1~3종 사업장에서는 Steam stripping을 도입하고 4종, 5종 사업장에서는 활성탄 흡착공정을 도입하는 것이 시설비와 유지관리비 측면에서 유리하다고 분석되었다.
- 3) 1,4-디클로로벤젠의 비용영향 평가 결과 석유화학계 기초화학물 제조시설은 1종 사업장이 시설비 5.8%, 운전비 12.4%가 증가되고, 합성수지 및 기타 플라스틱 제조시설의 경우도 1종 사업장이 시설비 6.4%, 운전비 14.5%가 증가되는 것으로 나타났다.
- 4) 비용영향 분석은 신규 수질유해물질 규제 및 기존 유해물질 기준강화 시 영향을 받을 수 있는 업종들에 대한 경제적 영향을 검토하는 과정으로 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 수질유해물질들 확대적용 및 배출허용기준 신설에 따른 수질오염 개선 효과를 분석하고 동시에 현재 배출시설들에서 적용가능한 적용기술 검토 및 비용영향 분석이 함께 이루어져야 실질적이고 효과적인 산업폐수의 관리가 이루어질 수 있을 것이라 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부·국립환경과학원 용역과제인 '수질유해물질 적정관리를 위한 배출허용기준 설정연구(2009)'사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국립환경과학원(2009). 기술에 근거한 폐수배출허용기준 및 근거자료 조사연구(II). KIST, 성균관대.  
 김경진, 손대희, 허진, 김광인, 권오상, 염익태(2010a). 처리

기술에 근거한 산업폐수 배출허용기준 국내 적용성 연구(I) : 미국 TBELs 적용사례 검토. 수질보전 한국물환경학회지, **26(1)**, pp. 1-9.

김경진, 김원기, 정상구, 정진영, 김재훈, 김상훈, 염익태(2010b). 처리기술에 근거한 산업폐수 배출허용기준 국내 적용성 연구(II) : 산업폐수 위해성 지표를 이용한 오염부하 기여도 분석. 수질보전 한국물환경학회지, **26(2)**, pp. 191-199.

김경진, 손대희, 허진, 김광인, 김재훈, 김상훈, 염익태(2010c). 처리기술에 근거한 산업폐수 배출허용기준 국내 적용성 연구(III) : 국내적용 방안 및 사례연구(펠프, 종이 및 종이제품 제조시설). 수질보전 한국물환경학회지, **26(3)**, pp. 377-386.

환경부(2001). 주택단지 내 상수, 오수발생량 원단위 산정 및 하수처리시설 소요비용연구.

환경부(2007a). 전국 폐수배출시설 조사자료.

환경부(2007b). 화학물질 배출량 조사자료.

환경부(2009a). 2008년도 산업단지 폐수종말처리시설 운영 현황.

환경부(2009b). 수질유해물질 적정관리를 위한 배출허용기준 설정연구(9차년도). 성균관대.

Banerjee, S. (1984). Solubility of organic mixture in water. *Environ. Sci. Technol.*, **18**, pp. 587-591.

Jiang, Y., Petrier, C., and David Waite, T. (2002). Kinetics and mechanisms of ultrasonic degradation of volatile chlorinated aromatics in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, **9**, pp. 317-323.

Selli, E., Bianchi, C. L., Pirola, C., Cappelletti, G., and Ragaini, V. (2008). Efficiency of 1,4-dichlorobenzene degradation in water under photolysis, photocatalysis on TiO<sub>2</sub> and sonolysis. *Journal of Hazardous Materials*, **153**, pp. 1136-1141.

Tabak, H. H., Quave, S. A., Mashni, C. I., and Barth, E. F. (1981). Biodegradability Studies with organic priority pollutant compounds. *J. Water Pollu. Control Fed.*, **53**, pp. 1503-1518.

USEPA (1987). *Development Document for Effluent Limitation Guideline and Standards for OCPSF Point Source Category*.

USEPA (1998). *Development Document for Effluent Limitation Guideline and Standards for Pharmaceutical Manufacturing Point Source Category*.

USEPA (2008). *Technical Support Document for the 2008 Effluent Guidelines Program Plan*.

USEPA (2009). *Treatability Database Version 5.0' Database*.