

연구논문

산업계 배출수에서 포름알데히드의 배출허용기준 설정방안 고찰

정동환 · 신진수 · 신기식 · 김재훈 · 김용석 · 류덕희

국립환경과학원 물환경연구부

(2013년 3월 18일 접수, 2013년 4월 9일 승인)

A Study on the Determination of Formaldehyde Effluent Limitation in the Industrial Wastewater

Dong-Hwan Jeong · Jinsoo Shin · Kisik Shin · Jaehoon Kim
Yongseok Kim · Doughee Rhew

National Institute of Environmental Research

(Manuscript received 18 March 2013; accepted 9 April 2013)

Abstract

This study looked at how to establish effluent limitation standards for formaldehyde, a toxic chemical widely used in industries. To this end, we reviewed Water Quality Based Effluent Limitation (WQBEL), Technology Based Effluent Limitation (TBEL), and water quality criteria for protection of human health and aquatic organism. Based on the results, we estimated formaldehyde effluent limitation standards appropriate to control water quality of industrial wastewater in Korea. However, this study has limits due to the lack of some data necessary in estimating formaldehyde effluent limitation. For example, although water quality criteria based on non-carcinogenic properties of formaldehyde were calculated, those based on carcinogenic properties were not be able to estimate because of the absence of applicable cancer potency factor q1. Without applicable factor, we calculated water quality standards for formaldehyde based on water quality criteria of advanced countries including the United States, while with no water quality standard we referred to applicable drinking water quality standards of other countries. For eco-toxicity based on water quality criteria, proper figures could not be calculated since there have been few reliable data.

Keywords : Effluent limitation, Industrial wastewater, WQBEL, TBEL, Water quality criteria

I. 서론

1960년대 이후 급속한 산업화 및 도시화가 진행되어 상하수도의 보급률이 지속적으로 증가함에도 불구하고 우리나라의 수질 및 수생태계는 다양한 유해화학물질에 노출되어 있다. 국내에서 사용되는 화학물질은 약 4만 여종에 이르며, 매년 400여종의 화학물질이 신규로 사용되고 있다. 2008년 화학물질 배출량 조사에 따르면 배출총량은 47,624 톤이었으며 수계로 배출되는 배출량은 150 톤으로 전체 배출량의 0.32%를 차지하고 있다(환경부, 2010). 이러한 화학물질 중 일부는 유해화학물질로써 발암물질, 내분비계 장애물질(Endocrine disruptors) 등으로 분류되고 상수원수에 잔류할 가능성이 존재하고 있다. 이러한 유해물질을 관리하기 위하여 1978년 환경보전법상 9개 항목이 특정수질유해물질로 최초 지정되었고(보건사회부, 1978), 1991년 3개 항목, 1999년 5개 항목, 2006년 2개 항목, 2008년 5개 항목, 2010년 1개 항목이 추가 지정되어 현재 특정수질유해물질은 총 25개 항목이 지정되어 있다(국립환경과학원, 2009·2010).

우리나라의 산업계 배출수 배출허용기준은 청정, 가, 나, 특례 지역과 배출량으로 구분하여 규제하고 있으나 모든 산업계 배출수에 대해 오염물질의 종류와 농도, 배출량에 관계없이 동일한 기준을 적용하고 있다. 산업계 유사 배출시설의 차이뿐만 아니라 같은 배출시설에서도 원료와 생산공정, 생산규모와 배출수 발생량, 처리기술 차이 등 특성에 따라 다양한 차이가 나타난다. 이를 감안하여 미국(NPDES) 및 유럽(IPPC)은 개별 배출시설에 대해 최상가용기술(BAT)을 도입하여 배출수 배출허용기준을 다르게 적용하고 있다. 산업계 배출수에 대하여 배출허가를 받기 위해 먼저 배출시설의 오염물질의 배출특성을 파악하고 오염물질을 적절하게 제거할 수 있는 처리기술수준을 적용한다. 또한 배출수역의 안전성과 목표수질 등을 고려하여 규제대상 물질과 배출허용기준을 적용한다(김재훈, 2011; US EPA, 2000·2002a). 우리나라도 산업계 배출수에 대한 개별사업장의 오염물질 배출특성과 적정

처리기술 수준을 평가하고 해당 지역의 수질환경보전을 위한 정책목표 달성이 가능한 수준에서 배출허용기준을 도입하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 화학, 섬유, 제지 등의 산업분야에서 배출되는 포름알데히드에 대한 배출허용기준을 설정하기 위해 발암 위해도, 유통량 및 국내 사용량을 검토하고 물질별로 업체별 검출여부, 처리현황, 하·폐수처리장 및 공단방류 하천의 포름알데히드 잔류실태 등을 조사하였고, 포름알데히드를 배출하는 사업장 및 관련 종말처리장, 공단방류 하천을 모니터링 한 후, 위해성을 기반으로 설정되는 수질근거 배출허용기준(WQBEL)과 처리기술을 기반으로 설정되는 기술근거 배출허용기준(TBEL)을 상호 비교 평가하여 배출허용기준 설정에 대한 방안을 제시하고자 한다.

II. 국내외 산업계 배출수의 유해물질 관리

1. 국외 산업계 배출수 유해물질 배출허용기준 현황

(1) 미국

미국은 사람의 건강 및 수생태계 보호를 목적으로 수계에 존재할 수 있는 다양한 오염물질의 양을 규제하는 수질환경기준(Water quality criteria)를 국가에서 지정하고 있으며, 이를 기반으로 물 이용 목적에 따라 수질기준(Water quality standard)을 각 주별로 설정하고 있다. 수질환경기준을 달성하기 위한 수단으로 개별 사업장에서 수계로 방류하는 배출수를 규제하는 배출허용기준(Effluent limitation), 그리고 종말처리장의 방류수 수질을 규제하는 이차처리기준(Secondary treatment standard)이 있으며, 종말처리장의 원활한 운영을 위해 종말처리장으로 배출하는 사업장에 대한 전처리기준(Pretreatment standard)이 존재한다. 수질환경기준을 제외한 나머지 수질 관련 기준들은 미국 EPA에서 발급하는 허가제도에 포함된 형식으로 나타나며, 이는 규제대상(배출사업장, 종말처리장 등)의 상황을 고려하여 유연성 있는 규제기준 설

Table 1. Comparison with industrial wastewater limitation in America and Korea

Effluent limitation at industrial wastewater in US EPA	Technology or Standard	Effluent limitation at industrial wastewater in Korea
Effluent standard	BPT, BAT, BCT, NSPS	Industrial wastewater limitations (Direct discharge)
Pretreatment standard	PSES, PSNS	Industrial wastewater limitations (Indirect discharge)
Secondary treatment standard	-	Water quality standards of industrial wastewater treatment facilities

* BPT: Best Practicable Control Technology Currently Available, BAT: Best Available Technology Economically Achievable, BCT: Best Conventional Pollution Control Technology, NSPS: New Source Performance Standards, PSES: Pretreatment Standards for Existing Sources, PSNS: Pretreatment Standards for New Sources

정을 가능케 해 준다. 미국의 배출허용기준과 관련된 용어를 Table 1에 나타내었다.

미국의 배출허용기준은 1972년에 청정수법(CWA, Clean water act)에 의해 설정된 것으로 업종별로 지정되어 있는 것이 특징이다. 즉 업종에 따라서 수계로 직접 배출하는 경우와 폐수종말처리장 등을 거쳐 배출되는 간접 배출의 경우로 나누어 기술수준에 근거한 배출기준을 적용하게 된다. 엄밀히 말하면, 국가배출허용기준(National effluent limitation guideline)은 배출수가 방류되는 수계의 수질기준을 보장할 수 없기 때문에 CWA는 주정부 스스로가 필요할 경우 국가배출허용기준보다 더 엄격한 배출허용기준을 적용하여 수질에 근거한 허가제도를 마련하도록 하고 있다. CWA에서 모든 배출은 개별적 기초 하에서 고려되어야 한다. 모든 배출에 대한 최소한의 배출기준이 처음으로 정해지고 나서 수계에 주는 영향에 따라 기준이 강화되었다. CWA의 목표는 1976년까지 모든 산업체에서 사용되는 BPT(Best practicable control technology currently available)를 요구하고 1981년까지는 BAT(Best available technology economically achievable)를 1985년까지는 무방류 시스템을 요구하는 것이다. 그 결과 많은 산업체에 대한 기준이 설정되었다(국립환경과학원, 2009·2010).

1977년부터 수질유해물질 관리로 정책이 변화하면서 독성오염물질을 줄이기 위해 EPA는 NPDES(National pollutant discharge elimination system)를 수립하였다. NPDES는 배출허가제도를 통해 화학물질과 독성에 대한 제한치를 설정하였다. 초기에는 허가제도가 주로 SS와 BOD에 기

초하여 이루어졌고, 이후 129개의 우선독성물질을 위주로 한 수질근거 위주의 분석을 통해 독성을 모니터링하였다. 그러나 배출수에 우선 독성물질 이외의 물질들도 유독한 경우가 있었기 때문에 우선 독성물질의 배출을 제한하는 것만으로 수계는 안전하지 못하였다. 이러한 독성물질로 극성 유기물, 비극성 유기물, 양이온 금속, 음이온 무기물, 암모니아 등이 있다.

1984년 EPA는 독성의 확인에 통합적 접근법인 생태독성 시험법(Whole effluent toxicity method)은 수질근거 분석과 함께 사용하도록 권고하였으며, 이 시험법은 다양한 종류의 어류와 물벼룩을 이용한다. 또한 법원명령(Consent decree)에 의해 21개의 산업 업종에 대한 신규 산업체에 대한 배출허용기준과 전처리기준을 요구하였다. 이 업종으로 목재업, 증기발전업, 피혁업, 제강제철업, 석유정제업, 유기·무기화합물 제조업, 비철금속업, 페인트 및 잉크제조업, 펄프 및 종이 제조업, 주물주조업, 전기도금업, 철광 및 석탄채광업이 포함된다. 이러한 업종에 대하여 특정오염물질에 대한 목록과 배출허용기준이 작성되었다(Sell, 1992).

미국의 배출허용기준은 2002년에 50개 이상의 업종에 대한 배출기준을 설정하고 있으며, 이 배출허용기준을 통하여 매년 10억 파운드 이상의 독성오염물질의 배출을 예방하고 있다(US EPA, 2002b). 미국의 경우 배출허용기준을 독성물질별로 개정 또는 신규로 지정하기보다는 산업별로 기준을 개정하거나 신규로 지정하여 왔다. 이러한 배출허용기준의 산업별 신규 지정 및 변화를 Table 2에 나타내었다(US EPA, 2002c).

Table 2. Effluent limitation standards for formaldehyde of industrial wastewater in America (a portion)

Industry Category	40 CFR Part	First Promulgation	Reviewed	Technology and Limitation standards
Pulp, paper and paperboard	430	1998	1999	BPT, BCT, BAT, NSPS, PSES, PSNS, BMP
Organic chemicals, plastics and synthetic fibers	414	1987	1993	BPT, BAT, NSPS, PSES, PSNS
Inorganic chemicals	415	1982	1984, 1996	BPT, BCT, BAT, NSPS, PSES, PSNS
Iron and steel manufacturing	420	1982	1984, 1995, 2002	BPT, BCT, BAT, NSPS, PSES, PSNS
Nonferrous metals manufacturing	421	1984	1990	BPT, BAT, NSPS, PSES, PSNS

(2) 유럽

유럽연합은 물을 이용하는 측 또는 배출하는 측의 개별 목적에 부응하여 수질기준에 관한 규정(지표수 수질규정, 해수욕장 수질규정, 어류 수질규정, 음료수 수질규정 등)과 배수기준에 관한 규정(도시하수처리규정, 어패류 수질규정, 음료수 수질규정)을 정하고 있다. 특히 몇몇 유해물질에 대한 규정이 1976년(76/464/EEC)에 마련되어 1991년 개정(91/692/EEC) 등을 거친 후 오늘에 이르고 있는데, 1982년에 회의를 통해 76/464/EEC 규정을 기본으로 독성, 지속성, 생물농축과 생산량이 높은 물질을 조사하여 약 130여개의 물질을 선정하였다. 이 물질들은 List 1과 List 2로 분류되었고, List 1의 물질을 관리하기 위해 별도의 규정이 공포되었다. 또한 독성, 지속성, 생체축적성이 있는 List 1 항목에 대해 지하수로의 배출을 금지하고, List 2 항목에 대해서는 기준을 설정하여 관리토록 하였다. List 1에 포함된 항목으로는 유기할로겐화합물, 유기인 화합물, 수은, 카드뮴, 광유류, 유기주석류 등이 있고, List 2에는 Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, As 등으로 구성되어 있다. 그러나 이러한 규정이 각국의 이해관계 때문에 구체적으로 시행되지 못하여서 주요 항목에 대해 산업별로 구체적인 배출허용기준을 규정하고 있다.

현재까지 17종의 물질은 추가적인 규정(Daughter directive)에 의해 수질기준 목표치와 이를 달성하기 위한 배출허용기준치가 마련되어 있다. 각 규정의 내용을 보면 배출허용기준, 수질환경기준과 측정방법이 명시되어 있다. 배출허용기준치는 수질목표를 달성하기 위해 일평균치와 월평균치로 각각 농도와 총량규제치로 제시되어 있다. 유럽연합에서

는 76/464/EEC 규정만으로는 수계에서의 유해물질 관리가 어려워 물환경기본법(Water framework directive, Directive 2000/60/EC for priority substances)을 마련하여 수계관리를 위한 우선물질 선정 작업을 수행하였다.

2. 국내 산업계 배출수 유해물질에 대한 배출허용 기준

미국·유럽 등 주로 지하수를 상수원으로 이용하는 나라에 비해서 주로 하천수 및 호소수 등 지표수를 상수원수로 사용하고 있는 우리나라는 지표수의 수질관리가 매우 중요하다. 산업의 발전과 더불어 유해물질의 사용 및 유통량이 증가함에 따라 수질 유해물질에 대해 미국·유럽 등 먹는물 수질기준, 수질환경기준 및 배출허용기준 등 수질규제기준을 강화하고 있다. 우리나라 특정수질유해물질은 처음보다 다수 증가하였지만 여전히 미국, 일본, 유럽 등에 비하여 상대적으로 적으며, 수질기준과 배출수 배출허용기준이 개별적으로 분리되어 설정·운영되고 있다. 즉 우리나라의 수질기준과 산업계 배출수 관련 기준에서 수질유해물질이 연관성을 가지고 있는 항목은 특정수질유해물질의 25개 항목이며, 이는 미국의 126개 항목, EU의 33개 항목, 일본의 26개 항목에 비하여 적은 편이다.

우리나라 배출허용기준은 1963년 『공해방지법』에서 배출기준으로 하수처리장이 있는 지역과 없는 지역으로 구분하여 공장 또는 사업장 배출수를 대상으로 21개 항목에 대하여 규제하기 시작하면서 시작되었다고 할 수 있으며, 이 때 수질유해물질로서 크롬, 수은, 시안 등이 규제되었다. 이후 1978년에 『환경보전법』이 제정되면서 현재 배출허용기준이 만들어 졌으며, 이 시기 배출허용기준은 23개 항

Table 3. Effluent limitation standards for water pollutants

Classification		Clean area (mg/L below)	'Ga' area (mg/L below)	'Na' area (mg/L below)	Special area (mg/L below)	Remarks
BOD	2,000 m3/d↑	30	60	80	30	
	2,000 m3/d↓	40	80	120	30	
COD	2,000 m3/d↑	40	70	90	40	
	2,000 m3/d↓	50	90	130	40	
SS	2,000 m3/d↑	30	60	80	30	
	2,000 m3/d↓	40	80	120	30	
pH		5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	
n-Hexane	Mineral oil	1	5	5	5	
	Animal-plant oil	5	30	30	30	
Phenol*		1	3	3	5	
Cyanide*		0.2	1	1	1	
Chromium		0.5	2	2	2	
Iron(soluble)		2	10	10	10	
Zinc		1	5	5	5	
Copper*		1	3	3	3	
Cadmium*		0.02	0.1	0.1	0.1	
Mercury*		0.001	0.005	0.005	0.005	
Organophosphorous*		0.2	1	1	1	
Arsenic*		0.05	0.25	0.25	0.25	
Lead*		0.1	0.5	0.5	0.5	
Hexavalent chromium*		0.1	0.5	0.5	0.5	
Manganese(soluble)		2	10	10	10	
Fluoride		3	15	15	15	
Polychlorinated biphenyl(PCB)*		Non-detected	0.003	0.003	0.003	
Total coliforms		100	3,000	3,000	3,000	(Unit: /mL)
Color		200	300	400	400	(Unit: degree)
Temperature		40	40	40	40	(Unit: °C)
Total nitrogen		30	60	60	60	
Total phosphorous		4	8	8	8	
Trichloroethylene(TCE)*		0.06	0.3	0.3	0.3	
Tetrachloroethylene(PCE)*		0.02	0.1	0.1	0.1	
Alkyl benzene sulfonate(ABS)		3	5	5	5	
Benzene*		0.01	0.1	0.1	0.1	
Dichloromethane*		0.02	0.2	0.2	0.2	
Whole effluent toxicity		1	2	2	2	(Unit: TU)
Selenium*		0.1	1	1	1	
Carbon tetrachloride*		0.004	0.04	0.04	0.04	
1,1,-Dichloroethylene*		0.03	0.3	0.3	0.3	
1,2-Dichloroethane*		0.03	0.3	0.3	0.3	
Chloroform*		0.08	0.8	0.8	0.8	
Nickel		0.1	5.0 (3.0)	5.0 (3.0)	5.0 (3.0)	
Barium		1.0	10.0	10.0	10.0	
1,4-Dioxane*		0.05	4.0	4.0	4.0	
Bis(2-ethylhexyl) phthalate(DEHP)*		0.02	0.8 (0.2)	0.8 (0.2)	0.8	
Vinyl chloride*		0.01	1.0 (0.5)	1.0 (0.5)	1.0	
Acrylonitrile*		0.01	1.0 (0.2)	1.0 (0.2)	1.0	
Bromoform*		0.03	0.3	0.3	0.3	

*Water specific toxic substances(including acrylamide) in law on the protection of water quality and ecology

2012.1.1~
2013.12.31
(): Application
from 2014.1.1

목에 대하여 BOD, COD, SS은 규모 및 지역에 따라 다르게 적용하고, 페놀류 등 20개 항목은 지역에 따라서 차등 적용하였다(최지용·신은성, 1997). 이후, 1990년대에 『수질환경보전법』이 제정되면서 현재의 배출허용기준으로 이어지고 있다. 『수질환경보전법』은 2007년 『수질 및 수생태계 보전에 관한 법률』로 명칭이 개정되었으며 특정수질유해물질에 대하여 지역에 따라서 배출허용기준을 차등 적용하고 있다. 2012년 12월 현재 수질오염물질 48종 중 43종에 대한 배출허용기준이 Table 3과 같이 마련되어 있으며, 또한 『수질 및 수생태계 보전에 관한 법률』(2012.8.2) 제2조 제8항, 동법 시행령 제31조, 제32조 및 시행규칙 제4조 별표 3에 특정수질유해물질을 지정하여 배출시설의 설치 허가 및 특별대책지역 안에서의 특정수질유해물질을 배출하는 배출시설의 설치를 제한할 수 있도록 하고 있다(환경부, 2012).

III. 산업계 배출수에서 포름알데히드 배출특성 및 수계 분포현황

1. 포름알데히드의 특성 및 위해성

포름알데히드는 무색이며 실온에서 가연성 기체로 존재한다. 또한 자극적인 냄새가 나며 눈과 코, 폐에 고농도로 노출되었을 때 작열감을 일으킬 수 있다. 포름알데히드는 가정에서 담배 생성물, 가스레인지를, 벽난로에서 생성되며, 매일 사용하고 있는 방부제, 의약품, 화장품, 식기세척제, 섬유유연제, 구두약, 카펫클리너, 접착제, 스프레이, 종이, 플라스틱과 목재 제품에서 찾을 수 있다. 산업계에서도 다양하게 사용되며 비료, 제지, 합판과 urea-formaldehyde 수지의 제조에 사용된다. 포름알데히드는 제철공장내의 대기 중에서 검출되고, 고무공업에서 라텍스의 제조, 가죽제혁, 목재보존과 인화필름제조에 사용되고, 병원과 실험실의 조직표본을 보존용으로도 사용된다. 포름알데히드는 소비재가 미생물에 의한 오염을 막기 위한 용도로 오랜 기간 동안 사용되었고 가구세척제, 주방세제, 직물유연제, 자동차 세제와 광택제, 카펫

세탁제로도 사용되었다. 이런 용도의 제품에 포함되어 있는 포름알데히드의 함유율은 1% 이하가 일반적이다(환경부, 1998).

포름알데히드는 공기 중에서 반감기는 41시간이며 360 nm보다 큰 파장의 자외선을 흡수하고, 직접적인 빛에 의해 광분해가 쉽다. 자극적인 햇빛에서 포름알데히드의 반감기는 6시간이다. 근로상의 노출은 포름알데히드가 생산되거나 사용되는 곳에서, 흡입과 피부 접촉을 통해 일어날 수 있다. 관찰한 결과, 보통 사람들은 포름알데히드를 공기의 흡입이나 음식의 소화, 그리고 이 물질을 포함하는 화장품이나 에어로졸 상품에 대한 피부접촉으로 노출된다. 외부와 내부의 공기의 포름알데히드의 농도는 각각 1~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 25~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 범위를 갖는다(국립환경과학원, 2009·2010).

포름알데히드는 US EPA에서는 발암등급 B1 (Probable human carcinogen)로 분류되어 있고 국제암연구소(IARC)에서는 발암등급 1(Carcinogenic to humans)로 분류되어 있다. 비발암 독성 평가로 인체 건강에 대한 참고치(RfD, Reference dose)는 0.2 mg/kg·day로 제시되어 있고 주요 영향은 쥐에게서 체중의 감소, 위의 점막이 두꺼워지는 조직병리학적 변화를 유발하는 것으로 알려져 있다. 또한, 0.5 ppm 이상의 높은 농도에서 기침, 흉부통증, 혈떡거림 등의 증상이 관찰되며, 2~3 ppm의 농도에서 코, 목, 눈에 대한 자극적인 통증을 일으킨다(US EPA, 2009).

2. 산업계 포름알데히드 배출량 현황

2007년도 수질근거 배출량 조사결과에 의하면 국내 포름알데히드의 연간 총배출량은 96,908 kg 이고 수계배출량은 57 kg으로(Table 4) 배출량 조사대상 물질 219개 물질 중 수계배출량 순위 36위 물질로 수계배출량이 많은 물질이다(환경부, 2009). 업종별 수계배출량을 살펴보면, 화학물 및 화학제품 제조업에서 전량을 배출하고 있는 것으로 나타났다. 지역별 수계배출량 순위를 살펴보면, 인천지역에서 50.5 kg/년, 경기지역에서 6.5 kg/년,

Table 4. Discharge and dealing loads of formaldehyde in Korea

Classification	Discharge loads				Amount of dealing	
	Total amount of discharge(kg/year)	Amount of Discharge into watershed(kg/year)	Ratio of discharge(%)	Transfer amount of wastewater(kg)	Amount of use (ton)	Amount of Production (ton)
Formaldehyde	96,908	57	0.058	338,860	331,328	380,832

자료: 환경부, 2009, 2007년 화학물질 배출량 조사결과 보고서.

Table 5. Discharge and distribution load rank for formaldehyde in industrial categories

Classification	Carcinogenic group		Investigation results of discharge and distribution in the industry	
	EPA	IARC	Korea (Ranking use and distribution)	America (Ranking of discharge into watershed)
Formaldehyde	B1	1	①Chemical and its product ②Car and trailer ③Timber and its product ④Electronic parts, movie, sound and communication device ⑤Pulp, paper and its product	①Paper ②Chemicals ③Hazardous waste/solvent recovery ④Primary metals ⑤Others

자료: US EPA, IRIS; MOE, 2008; US EPA, TRI explorer.

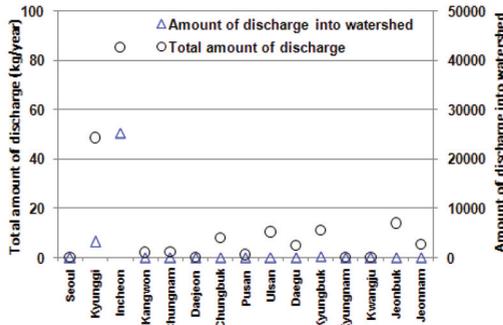


Figure 1. Amount of local discharge for chemical materials in Korea

자료: 환경부, 2009, 2007년 화학물질 유통량 조사결과 보고서

경북지역에서 0.5 kg/년 순으로 나타났다(Figure 1). 국내 포름알데히드 사용업종 순위를 살펴보면, 화학물 및 화학제품 제조업, 자동차 및 트레일러 제조업, 목재 및 나무제품 제조업, 전자부품·영상·음향 및 통신장비 제조업, 펄프·종이 및 종이제품 제조업의 순으로 나타났다(Table 5).

2007년 미국의 TRI의 조사결과에 따르면 연간 포름알데히드의 총배출량은 9,948,900 kg이며, 이 중에서 on-site 연간 총배출량은 9,665,134 kg 이고, off-site 연간 총배출량은 283,766 kg으로 나타났다. 이러한 포름알데히드의 환경 배출량 중 지표수로의 연간 배출량은 126,250 kg으로 나타났

다. 이러한 포름알데히드의 지표수로의 연간 배출량을 업종별로 살펴보면, 제지업종(Paper)에서 102,382 kg, 화학업종(Chemicals)에서 19,648 kg, 유해폐기물/용매 재생업(Hazardous waste/Solvent recovery)에서 2,300 kg, 제1차 금속산업(Primary metals)에서 544 kg, 기타산업(Others)에서 1,376 kg 순으로 나타났다(US EPA, 2008).

3. 수계 및 산업계 배출수 포름알데히드 조사

국내에서 포름알데히드에 대한 수질기준은 마련되어 있지 않으며, 미국의 경우 각 주의 먹는물 수질 가이드라인으로 0.1~1.0 mg/L로 지정되어 있으며, WHO의 먹는물 수질기준 권고치는 0.9 mg/L로 설정되어 있다. 또한 EU의 먹는물 수질기준으로는 0.02 mg/L로 설정되어 있으며 일본의 경우 먹는물 수질기준으로는 0.08 mg/L로, 수생태계 보전을 위한 가이드라인이 1.0 mg/L 이하로 설정되어 있다. 포름알데히드 농도를 측정하기 위해 Headspace 장치를 이용하여 전처리하였으며 GC/MS를 이용하여 정량 분석하였다(국립환경과학원, 2010).

(1) 공단방류 하천

포름알데히드는 조사대상 10개 공단방류 하천 중

모든 조사대상 지역에서 0.0122~0.0503 mg/L의 농도로 검출되었다(Figure 2-a). 공단방류 하천과 같은 주요 수계의 오염도 및 환경 노출현황을 파악하는 것은 조사대상 물질이 인간 및 수생태계에 어느 정도 위해도를 가지고 있으며, 현재의 수환경이 어떤 상태인지를 보여준다. 이를 통해 조사대상 물질을 어떻게 관리하여야 하는지에 대한 기초적인 판단이 가능하며, 특정수질유해물질로의 지정이 필요한지 여부를 판단할 수 있는 기초자료를 제공한다. 수생태계에서의 조사대상 물질에 의한 오염정도 및 위해도가 높을 경우 수질 및 수생태계 환경기준 및 배출허용기준의 설정 등의 수질기준 및 관리방안이 필요하게 된다. 지표수를 먹는물의 원수로 사용하고 있는 우리나라에서는, 주요 수계의 특정수질유해물질에 의한 오염은 먹는물의 오염과 직접적인 관련이 있다. 그러므로 특정수질유해물질에 의한 주요 수계의 오염은 먹는물의 원수관리라는 차원에서도 이해되어야 할 것으로 판단된다. 또한 우리나라의 경우, 담수 생물의 주된 서식처로서 4대강 수계의 역할은 매우 중요하여 특정수질유해물질에 의한 주요 수계의 오염은 국내 수생태계에 큰 영향을 미친다는 점에서도 고려되어야 할 것이다. 이처럼 주요 수계에서의 수질 유해물질에 의한 오염은 인체건강의 측면과 수생생물에 대한 측면에서 동시에 이해되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 산업폐수 종말처리장

모든 조사대상 10개 하수처리장 및 산업폐수 종말처리장에서 유입수 0.0572~0.9042 mg/L, 방류수 0.0293~0.2951 mg/L의 농도로 검출되었다(Figure 2-b). 공단 종말처리장은 개별배출 사업장에서 처리된 배출수를 다시 처리하여 개별배출 사업장에서 처리하기 힘들거나 미처리된 물질을 처리함으로써 수계의 수환경을 보전하는 역할을 수행한다. 이러한 역할과 더불어 산업폐수 종말처리장은 별도의 배출허용기준을 설정하여, 기존의 배출허용기준보다 완화된 기준을 적용함으로써 개별배출 사업장의 처리에 대한 부담을 줄이는 역할을 수행하기도 한다. 그러나 별도의 배출허용기준은 주

로 부유물질 및 유기물을 대상으로 설정되어 있고, 특정수질유해물질에 대한 별도의 배출허용기준은 아직 설정되어 있지 않다. 이처럼 산업계 배출수 처리장은 특정수질유해물질의 오염에 대한 마지막 처리 과정이며, 산업계 배출수의 배출량을 고려하면 수환경에 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

조사대상물질이 배출되는 업종을 파악하고 배출정도를 파악하는 것은 많은 시간과 비용이 소요되는 것으로 산업계 배출수 종말처리장에서의 검출여부는 조사대상물질의 국내 배출여부를 파악할 수 있는 현실적인 방안이 되며, 특정수질유해물질의 지정여부를 판단하는 중요한 요소이다. 일부 배출수는 하수처리장으로 유입되어 처리되므로, 하수처리장 또한 공단 배출수 종말처리장과 같은 입장에서 분석하였다.

(3) 개별배출 사업장

개별배출 사업장에서 특정수질유해물질이 수계로 배출되는 것은 직접배출(Direct discharge)과 간접배출(Indirect discharge)로 나누어진다. 직접배출은 개별배출 사업장에서 배출수가 직접 수계로 배출되어 수계에 영향을 주게 되고, 간접배출은 배출되는 배출수가 종말처리시설로 유입되어 다시 처리를 거치게 되어 수계에 직접적인 영향을 미치지 않는다. 개별배출 사업장에 대한 조사는 현장에서의 처리시설에 대한 효율성을 판단할 수 있는 자료가 된다.

개별배출 사업장에 대한 배출 실태조사에 따른 분석 시료의 채취는 짧은 사업기간의 이유로 건기·우기 구분 없이 7~10월에 이루어졌지만, 강수에 의한 영향을 고려하여 강우이후 1주일 이상의 기간 동안은 채수를 피하였다. 배출실태 조사결과 포름알데히드는 조사대상 15개 개별배출 사업장의 유입수에서 0.006~164.81 mg/L, 배출수에서 0.0098~13.523 mg/L의 농도로 검출되었다(Figure 2-c). 고농도로 검출된 개별배출 사업장의 업종은 전자부품, 합성수지, 기타 비철금속, 화학제품, 목재가공업에서 고농도로 검출되었다.

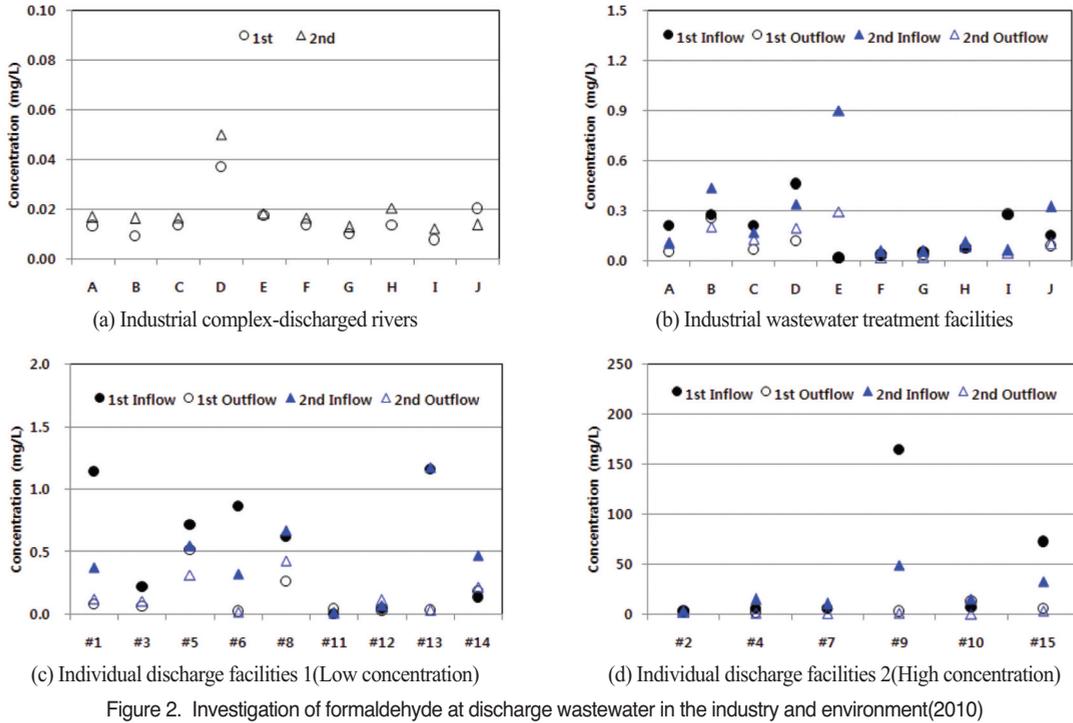


Figure 2. Investigation of formaldehyde at discharge wastewater in the industry and environment(2010)

Table 6. Calculation equation of AWQC on human health

Non-carcinogenic influence	Carcinogenic influence	
	Linear low-dose extrapolation	Nonlinear low-dose extrapolation
$AWQC = RfD \times RSC \times \left(\frac{BW}{DI + \sum_{i=2}^4 FI_i \times BAF_i} \right)$	$AWQC = RSC \times \left(\frac{BW}{DI + \sum_{i=2}^4 FI_i \times BAF_i} \right)$	$AWQC = \frac{POD}{UF} \times RSC \times \left(\frac{BW}{DI + \sum_{i=2}^4 FI_i \times BAF_i} \right)$

*RSC = $\frac{(10^{-4} \text{ or } 10^{-5} \text{ or } 10^{-6})}{\text{Cancer potency factor}(q1)}$

IV. 산업계 배출수의 포름알데히드 배출 허용기준 설정방안 고찰

1. 배출허용기준 마련을 위한 수질준거치 설정방법

(1) 수질준거치의 설정

1) 인체건강에 대한 수질준거치 설정방법

미국의 인체건강에 대한 수질준거치는 오염물질의 농도와 인체건강에 대한 영향간의 관계에 대한 자료와 과학적 판단에 의해서만 설정되는데, 경제적인 영향이나 기술적 타당성에 대한 고려는 반영되지 않는다. 수질환경기준을 설정하는데 있어 과학적 분석(Scientific analysis), 과학 정책(Science

policy), 위해도 관리 결정(Risk management decision)에서 나온 독성학적 변수를 포함한다. 미국의 인체건강에 대한 특정수질유해물질의 수질준거치 설정방법은 발암성 영향과 비발암성 영향에 따라 Table 6의 식에 의해 설정된다(US EPA, 2000).

여기서, AWQC(Ambient water quality criteria, mg/L)는 수질준거치이며, RfD는 비발암성 영향에 대한 참고치로 단위는 mg/kg/day로 표시된다. 출발점(Point of departure)은 발암물질에 대한 비선형 저용량 외삽법으로 LOAEL, NOAEL, L(E)D₁₀ (Lower 95 percent confidence limit on dose associated with a 10 percent extra risk)이 주된 형태이며, 단위는 mg/kg/day이다. UF(Uncertainty

factor)는 발암물질에 대한 비선형 저용량 외삽법에서의 불확실성 인자이며, RSD(Risk-specific dose)는 선형 저용량 외삽법에서 발암물질에 대한 위험도(10^{-5})에 따른 용량이며, 단위는 mg/kg/day이다. RSC(Relative source contribution)은 물을 통하지 않은 노출에 대한 오염원 상대기여도이며, BW(Body weight)는 사람의 체중(한국인 60 kg)이며, DI(Drinking water intake)는 먹는물 섭취량으로 성인에 대하여 2 L/day로 산정한다(환경부, 1996). 또한 FI(Fish intake)는 어류 유기물섭취량으로 2008년 국민건강통계 조사결과(질병관리본부, 2010)인 0.0514 kg/day로 산정하며, BAF(Bioaccumulation factor)는 생물축적계수로 단위는 L/kg이다. 여기서 Table 6의 계산식에서 BAF 대신 BCF 값을 넣어 산정하는데, BCF값은 US EPA(2002a)의 National recommended water quality criteria 2002(Human health criteria calculation matrix) 보고서에서 유해물질 항목별 값을 참조하였다. 또한 오염원 상대기여도(RSC : Relative source contribution)를 고려하여 대기 및 음식으로부터의 노출에 대한 고려도 필요하다.

2) 수생생물에 대한 수질준거치 설정방법

수생생물 보호를 위한 수질준거치 도출과정은 ANZECC(2000)의 보고서에 근거하여 계산하였다(환경부 · 국립환경과학원, 2006). 담수 생물상에

대한 독성 데이터는 국외 독성 데이터 자료 중 만성 실험데이터의 값과 급성 시험 데이터의 값을 정리한 후 국내종의 데이터만을 선별하였다. 검토된 데이터 자료는 자료의 신뢰도를 위해 주로 ECOTOX database(US EPA, 2010)의 급성 및 만성 시험 데이터 값을 이용하였다.

호주 · 뉴질랜드 방식으로 수생생물 보호를 위한 수질준거치를 도출할 경우 3가지 방법 중 하나의 형태로 결과 값이 도출된다. 첫 번째는 고신뢰도 방식으로 최소 4개의 다른 분류학 그룹에서 최소 5개의 다른 종의 만성 NOEC(No observed effect concentration) 데이터 조건(이 때의 5개 자료는 기본적인 영양계급을 나타낼 수 있도록 수생식물, 갑각류, 어류를 포함해야 함)을 만족시키는 경우 이 데이터를 가지고 수질준거치 산정 프로그램을 실행한 결과값을 수생생물 보호를 위한 수질준거치로 이용하는 방법이다.

두 번째는 중간신뢰도 방식으로 최소 4개의 다른 분류학 그룹에서 최소 5개의 급성 LC_{50} 또는 EC_{50} 데이터 조건(이 때의 5개 자료는 기본적인 영양계급을 나타낼 수 있도록 수생식물, 갑각류, 어류를 포함해야 함)을 만족시키는 경우 이 데이터를 가지고 수질준거치 산정 프로그램을 실행한 결과 값을 최종 급만성비 ACR(Acute to chronic ratio: 같은 문헌에서 나온 급성만성 값으로부터 독성물질에 대한 모

Table 7. Methodology deriving ambient water quality guideline based on ecological risk

High reliability guideline	Moderate reliability guideline	Low reliability guideline
AWQC = Seeking a concentration that protects 95% of the biological species, through analyzing logistically distributed NOEC data	$AWQC = AWQC_{acute} \times \text{Acute-to- chronic ratio}$	$AWQC = \frac{LC_{50}, EC_{50} \text{ or } NOEC}{\text{Uncertainty factor}(10 - 1,000)}$
High reliability guideline AWQC were derived from multiple-species NOEC data, using the risk-based statistical distribution method.	Moderate reliability guideline AWQC, which reflect a lower confidence in extrapolation methods, were derived from acute toxicity data. Again, where the statistical distribution method was used with the acute toxicity data. It was then necessary to convert the figure from that calculation to a chronic protection figure by application of either calculated or default acute-to-chronic ratios.	Low reliability guideline AWQC were derived, in the absence of a data set of sufficient quantity, using larger assessment factors to account for greater uncertainty.

NOEC: No-Observed-Adverse-Effect-Concentration

LC_{50} : Concentration (food or water) resulting in mortality in 50 percent of the exposed organisms

EC_{50} : Concentration resulting in a non-lethal effect in 50 percent of the exposed organism

든 종별 ACR의 기하평균)로 나누어 수생생물 보호를 위한 수질준거치로 이용하는 방법이다.

세 번째는 저신뢰도 방식으로 OECD가 제시한 MPD(Minimum premarketing dataset; 어류 또는 무척추동물 또는 조류)를 충족시키는 독성자료가 있을 경우, 최저 급성 LC₅₀ 또는 EC₅₀ 데이터 또는 최저 만성 NOEC 데이터를 평가계수(Assessment factor)로 나누어 수생생물 보호를 위한 수질준거치로 이용하는 방법이다. 이러한 준거치 산정방법을 Table 7에 요약하여 나타내었다(OECD, 1995; EC, 2003).

본 연구에서는 수생생물 보호를 위한 수질준거치의 경우 고신뢰도 방식 또는 중간신뢰도 방식으로 산정된 값을 우선으로 하되 조건을 충족시키지 못할 경우에는 EPA에서 제시하고 있는 수생태에 대한 환경기준(National water quality criteria for freshwater)를 참조하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

(2) 배출허용기준의 설정체계

배출허용기준의 설정에는 특정수질유해물질이 어디에서 주로 배출되어 환경 내에 존재하며, 배출

원을 어느 정도로 규제하면 목표로 하고 있는 수질 및 수생태계 환경기준을 만족시킬 수 있을 것인가가 매우 중요하다. 즉 특정수질유해물질의 배출원과 배출정도, 수질 및 수생태계 환경기준의 설정여부, 배출규제의 정도, 기술적, 경제적 타당성 등이 배출허용기준 설정의 중요한 요소로 작용한다. 특정수질유해물질로 지정된 항목은 수질근거 배출허용기준(WQBEL)과 기술근거 배출허용기준(TBEL)을 비교 검토하여 적합한 배출허용기준 설정체계를 정하고 기술적, 경제적 타당성 분석을 통하여 배출허용기준을 결정하게 된다. 그러나 배출이 확인되었지만 국내 수질 및 수생태계 환경기준이 존재하지 않는 특정수질유해물질의 경우, 인체 및 생태유해도, 외국기준치, 검출한계 등을 고려하여 특정수질유해물질의 수질환경기준 설정방안에 맞추어 잠정기준을 설정하고 이를 기준으로 WQBEL과 TBEL을 비교 검토하여 적합한 배출허용기준체계(절차)를 결정하고 기술적, 경제적 타당성 분석을 통하여 배출허용기준을 설정하게 된다.

수질오염물질의 배출허용기준 설정체계는 기존 체계에서 수질근거 배출허용기준(WQBEL)과 기술

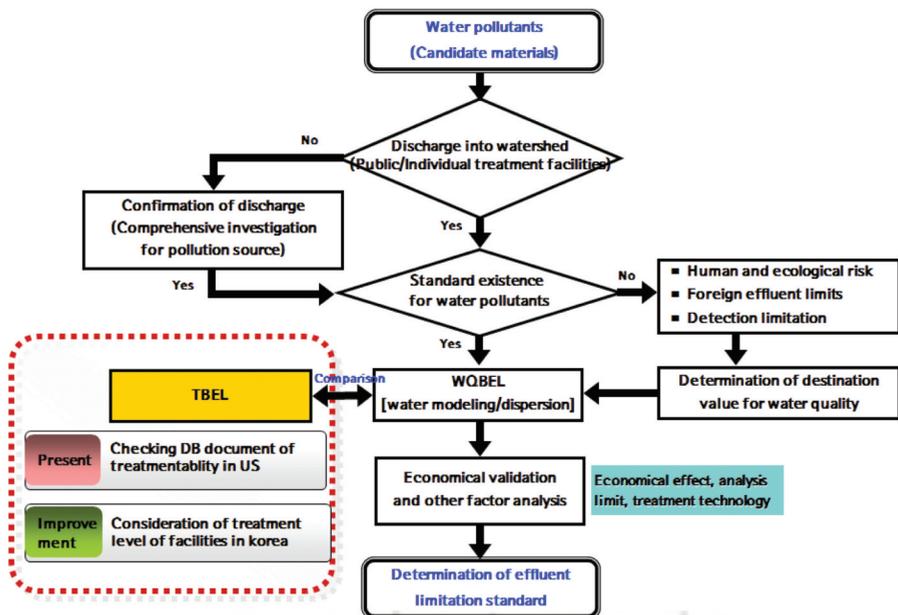


Figure 3. Determination framework of effluent limitation standard for water pollutants

근거 배출허용기준(TBEL)을 비교 검토하여 수계에 대하여 안전할 수 있는 배출허용기준을 설정하되, 규제로 인하여 산업시설에 미치는 영향을 충분히 고려하여 그 기준치를 설정하도록 개선하였다(Figure 3).

2. 배출허용기준 도출 방법

배출허용기준 설정체계에 따르면 크게 수질근거 배출허용기준(WQBEL)을 설정하고 기술근거 배출허용기준(TBEL)을 설정한 후 두 기준을 비교 검토하여 최종적인 배출허용기준을 설정하도록 되어 있다. 수질근거 배출허용기준은 위해성을 기반으로 사람 및 수생태계를 보호하기 위해 보호 대상 수계를 해당물질 허용농도 또는 목표수질(인체 및 수생태계 보호를 위한 수질 및 수생태계 환경기준 또는 수질준거치) 이하로 유지하기 위하여 점오염원으로부터 해당물질의 배출을 제한하는 기준이다. 또한 기술근거 배출허용기준은 업종별로 배출수 특성에 따라 배출수 처리기술의 선택사항(단위공정 등)을 제시하고, 위해성과는 상관없이 현재의 처리기술 및 가용한 처리기술에 따라 오염물질의 종류 및 배출허용기준을 설정하는 방식이다. 하지만 국내 여건 상 기술근거 배출허용기준을 설정하는 데에는 어려움이 있었고 이에 관련된 몇몇 연구가 수행되었지만 아직까지 기술근거 배출허용기준이 마련되어 있지 않다.

(1) 기술근거 배출허용기준 산정

기술근거 배출허용기준의 경우, 업종별 배출수 특성의 차이와 기술성능 등을 반영하고 경제적 영향을 고려하여 설정하는 것이 원칙이다. 하지만, 업종별 배출수 특성을 파악하고 그 기술성능을 파악하기 위해서는 각 산업 업종의 개별 사업장에 대한 해당 오염물질이나 유해물질에 대한 다년간의 모니터링 결과가 충분해야 그 결과를 도출할 수 있다. 미국의 경우, 개별 사업장의 인·허가 단계 및 허가갱신제도에 의하여 해당 사업장에 대한 관련된 수질 유해물질 전체에 대한 실측 데이터가 필수조건으로 수집되고 있기 때문에 이런 기술근거 배출허용기준에 대한 보다 합리적이고 과학적인 접근이 가능하

였다. 현재 국내에 축적된 개별업체에 대한 자료로는 이런 업종별, 기술성능 차이에 근거한 배출허용기준을 산정하기는 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 수질근거 배출허용기준(WQBEL)과 비교하기 위하여 현장 조사된 업체의 분석 데이터를 토대로 기술근거 배출허용기준(TBEL)을 산정하였다.

지정 검토 단계에서의 해당물질에 대한 분석데이터와 배출허용기준 설정단계에서의 모니터링 자료를 활용하여, 정상가동 여부, 처리시설의 종류 등을 고려하여 데이터의 가용 유무를 판단한다. 데이터의 가용 유무를 판별한 후에는 해당물질의 각 개별 시설 배출수의 평균농도를 구하고 조사된 기간 중의 농도 변동률을 감안하여 기술근거 배출허용기준 값을 산정하였다. 이 값이 원칙적인 TBEL 값으로 보기는 어려우나 '최소한 현재의 처리시설로 정상적인 처리시설 운영을 하는 대표적인 개별업체의 실제적인 평균 방류 농도'라는 의미가 있으므로 TBEL 중 BPT에 근접한 수치라고 볼 수 있다. 다만 조사하는 물질들이 그동안의 규제대상 수질오염물질이 아니고, 신규로 지정하도록 검토하는 배출허용기준 설정 대상물질이기 때문에 개별 처리시설에서 해당 물질을 처리하기 위하여 배출수 처리시설을 설계하였는지의 여부는 판단하기 어렵다. 즉 해당 처리시설이 해당물질에 대하여 최적의 처리조건으로 설계되었는지 여부와 최적의 처리조건으로 운전되었는지에 대해서는 경우에 따라 다르기 때문에 쉽게 판단하기 어렵다.

(2) WQBEL과 TBEL의 비교를 통한 기준설정 방안

수질근거 배출허용기준(WQBEL)은 위해성에 기반하여 목표수질(수질환경기준 등)을 유지하기 위해 개별배출 사업장의 방류 농도를 규제하는 방식으로 본 연구에서는 기존 체계를 유지하여 목표수질을 설정하고, 청정, 가, 나, 특례 지역 기준으로 하천에 대한 최소희석율 10을 고려하여 WQBEL을 설정하고 있다. 또한 기술근거 배출허용기준은 앞서 설명한 바와 같이 해당물질을 배출하는 각 개별 시설 배출수의 평균농도를 구하고 조사된 기간 중의 농도 변동률을 감안하여 기술근거 배출허용기준

Table 8. Comparison with WQBEL and TBEL, and determination method of effluent limitation standard

Classification		Determination method of effluent limitation standard		Remarks
		Clean area	'Ga', 'Na', Special area	
CASE-1	If TBEL > WQBEL	Higher value between TBEL×0.1 and water quality goal	TBEL	
CASE-2	If WQBEL > TBEL	Water quality goal	Water quality goal×10	Application as WQBEL

값을 산정한다. 이렇게 산정된 수질근거 배출허용기준(WQBEL)과 기술근거 배출허용기준(TBEL)을 비교하여 최종적인 배출허용기준(안)을 설정해야 한다.

조사결과 TBEL이 WQBEL 보다 높을 경우, 즉 현재의 배출수 처리기술 및 처리수준이 수질목표를 만족시키지 못하는 경우로, 최종적인 배출허용기준은 청정지역은 TBEL×0.1과 수질목표(수질환경기준) 중 높은 값, 가, 나, 특례지역의 경우 TBEL로 설정하는 것을 제안한다. 반대로 WQBEL이 TBEL 보다 높을 경우, 즉 현재의 배출수 처리기술 및 처리수준이 수질목표를 충분히 만족시키는 경우로, 최종적인 배출허용기준은 WQBEL로 설정하는 것을 제안한다. 이 두 가지 경우에 따른 설정방안을 Table 8에 나타내었다.

3. 포름알데히드의 배출허용기준 설정 고찰

(1) 인체건강 보호를 위한 수질준거치

인체건강과 관련하여 포름알데히드에 대한 수질준거치는 Table 6과 같이 비발암성 영향 산정식으로 계산하며 기준복용량(RfD) 0.2 mg/kg/day를 사용하여 구하도록 하였다. 상대 기여도(RSC)는 1을 적용한다. 이미 도출한 먹는물 섭취율 2 L/day, 어류 섭취율 0.0514 kg/day, BAF 0 L/kg을 적용하면, 우리나라의 사람 건강의 보호를 위한 배출허용기준은 6 mg/L로 계산된다. IRIS(US EPA, 2009) 및 IARC(2007)에서는 포름알데히드가 인체에 대해 발암가능성이 있다고 분류하였으나 발암영향계수(q1)를 아직 제시하지 않고 있다. 따라서 비발암영향에 따른 기준복용량(RfD)을 이용하여 도출된 값 보다는 각국의 먹는물 수질기준을 참조하여 인체건강 보호를 위한 수질준거치(배출허용기준)을

산정하는 것이 보다 바람직한 것으로 판단되었다. 이에 국내·외 수질기준 중 활용 가능한 기준인 미국의 먹는물 수질기준 가이드라인과 WHO, EU, 일본의 먹는물 수질기준을 참조하여 포름알데히드에 대한 인체 수질준거치를 0.15 mg/L로 산정하였다.

(2) 수생생물 보호를 위한 수질준거치

수생생물의 보호와 관련하여 포름알데히드의 수생생물 독성자료(환경부·국립환경과학원, 2006)를 검토한 결과 최저급성 L(E)C₅₀는 5,800 µg/L로 나타났다. 또한, 다른 분류학적 그룹 1개(갑각류 1종)로써 최소 4개의 분류학적 그룹이 필요하다는 조건을 충족시키지 못하므로 저신뢰도의 수질준거치 도출 방식에 따라 수질준거치를 산정하여야 하는데 본 연구에서는 저신뢰도 방식으로 산출한 생태독성 관련 수질준거치는 사용하지 않으므로 수생생물 보호를 위한 포름알데히드의 배출허용기준을 도출하지 않았다. 참고로 본 연구에서 수생생물 보호를 위한 배출허용기준 산정에 이용하지 않았지만 저신뢰도 방식(최저급성 L(E)C₅₀/평가계수)으로 계산된 값은 (Crustaceans, *Daphnia pulex*의 최저 급성 L(E)C₅₀ 5,800 µg/L ÷ 평가계수 1,000) 5.8 µg/L 이었다.

(3) 포름알데히드 배출허용기준(안) 설정

포름알데히드에 대한 배출허용기준은 인체 및 생태독성, 오염현황 및 배출현황, 주요국가의 기준설정 상황, 검출한계, 위해성 평가치 등을 고려하여 설정함으로써, 모니터링 시 수환경에서의 오염도의 판단기준으로 활용할 수 있도록 하여야 한다.

Figure 4에 나타난 배출수 평균농도는 포름알데히드가 배출되는 개별 사업장의 2년간 배출수 내 포름알데히드 평균농도의 산술 평균값으로 0.5393

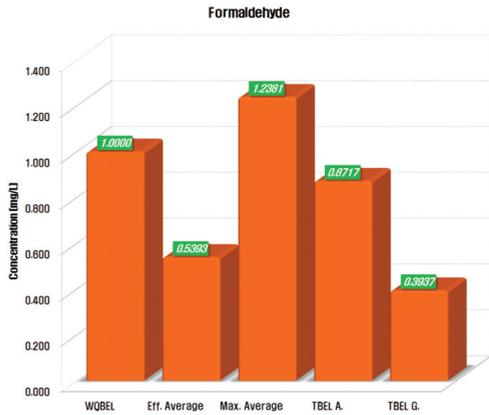


Figure 4. Calculation of WQBEL and TBEL for formaldehyde

mg/L이며, 개별 사업장의 2년간 배출수 내 포름알데히드는 최대 농도의 산술 평균값인 1.2381 mg/L로 조사되었다. TBEL 평균농도(TBEL A.)는 개별 사업장 배출수에서 포름알데히드 평균농도에 조사기간 동안의 농도 변동률(방류농도의 최대, 최소값 편차의 1/2)을 더한 값으로 0.6717 mg/L이며, TBEL 기하평균 농도(TBEL G)는 개별 사업장의 2년간 배출수 내 포름알데히드 평균농도의 기하평균값에 조사기간 동안의 농도 변동률을 더한 값으로 0.3937 mg/L였다. 따라서 포름알데히드의 경우 수질근거 배출허용기준과 기술근거 배출허용기준을 비교분석한 결과 WQBEL > TBEL의 경우로 최종적인 배출허용기준(안)으로 수질근거 배출허용기준(WQBEL)에 의한 준거치를 선정하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다. 즉, 앞서 산정한 배출허용기준 값에서 안전율을 고려하여 포름알데히드의 배출허용기준 준거치는 청정지역에 대해 0.15 mg/L, 가·나·특례 지역에 대해 1.5 mg/L로 제안하였다 (Table 9).

V. 결론

미국, 유럽 등 선진국은 수 십 년간의 데이터를 축적하고 관련 연구를 통하여 각종 수질 규제 항목 및 기준을 마련한 반면, 우리나라는 짧은 기간 내에 우리 실정에 맞는 수질 및 수생태계 환경기준, 산업계 배출수 배출허용기준 등 수질기준을 설정 혹은 강화하는데 어려움을 겪고 있다. 수질 및 수생태계 환경기준, 산업계 배출수 배출허용기준 등 수질기준 설정시 판단의 근거가 되는 유해물질별 수질환경기준(Ambient water quality criteria)의 산정 방법 및 발암위해도 등 변수(Factor)에 따라 설정하고자 하는 기준이 달라진다. 따라서 미국, 유럽과 같은 나라에서 제도적으로 명시된 '수질환경기준(Water quality criteria)' 산정방법을 사용하고 있듯이 우리나라도 수질 규제대상 물질 및 모니터링 대상 물질에 대한 통일된 수질환경기준을 산정하고, 산정을 위한 가이드라인을 마련하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 산업계에서 많이 사용되는 포름알데히드에 대해 배출수에서 포름알데히드의 배출허용기준 설정 방안에 대해 고찰하였다. 이를 위해 수질근거 배출허용기준 및 기술근거 배출허용기준, 인체건강 보호 수질환경기준 및 수생생물 보호 수질환경기준을 검토하였고 이를 토대로 국내 산업계 배출수 수질관리에 적합한 포름알데히드 배출허용기준(안)을 산정하고 그 방안을 제시하였다. 그러나 포름알데히드 배출허용기준 산정에 필요한 자료가 부족하여 몇 가지 한계를 가지고 있다. 포름알데히드의 인체에 대한 비발암성을 기반으로 한 수질환경기준을 산정할 수 있으나 적용가능한 발암영향계수(q1)가 확인되지 않아 발암성에 근거한 인체 수질환경기준을 계산할 수 없었다. 계산에 필요한 변수

Table 9. Draft effluent limitation standard for formaldehyde

Classification	Effluent limitation standard(draft)		Japan	EU	WHO	USA
	Clean area	'Ga', 'Na', special area	Drinking water quality standard	Drinking water quality standard	Drinking water quality guideline	Drinking water quality guideline
Formaldehyde (mg/L)	0.15	1.5	0.08	0.02	0.9	0.1~1.0 Average 0.359

가 가용하지 않을 경우는 미국 등 선진국의 수질환경기준을 우선 참조하고, 수질환경기준이 존재치 않을 경우, 먹는물 수질기준을 참조하는 방식에 따라 포름알데히드의 경우 적용가능한 외국의 먹는물 수질기준을 참조하여 인체에 대한 수질준거치(배출허용기준)를 산정하였다. 생태독성을 기반으로 한 배출허용기준에 대하여는 현재 신뢰성이 있는 조건에 부합되는 데이터가 부족한 관계로 배출허용기준을 산정할 수 없었다.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2009, 수질유해물질 걱정 관리를 위한 배출허용기준 설정 연구(9차년도).
- 국립환경과학원, 2010, 수질유해물질 걱정 관리를 위한 배출허용기준 설정 연구(10차년도).
- 김재훈, 2011, 산업폐수 별도 배출허용기준 설정 체계, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2011 공동 추계학술발표회 논문요약집.
- 보건사회부, 1978, 환경보전법 시행규칙.
- 질병관리본부, 2010, 2008년 국민건강통계.
- 최지용 · 신은성, 1997, 수질환경 및 규제기준의 합리적 조정, 한국환경정책평가연구원, KEI/1997/RE-18.
- 환경부, 1996, 환경위해성 평가 및 관리기술 : 수질 오염물질의 위해성 평가 및 관리기술.
- 환경부, 1998, 세계보건기구(WHO) 먹는물 수질관리 지침.
- 환경부, 2009, 2007년 화학물질 배출량 조사결과 보고서.
- 환경부, 2010, 2008년 화학물질 배출량 조사결과 보고서.
- 환경부, 2012, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 (법률 · 시행령 · 시행규칙).
- 환경부 · 국립환경과학원, 2006, 물환경종합평가 방법 개발 조사연구(III) 최종보고서.
- ANZECC, 2000, Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality.
- EC, 2003, Technical guidance document on risk assessment.
- IARC(International Agency for Research on Cancer), 2007, Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans and their supplements: a complete list, available from <http://monographs.iarc.fr/monoeval/allmonos.html>.
- OECD, 1995, Guidance document for aquatic effects assessment.
- Sell, N.J., 1992, Industrial pollution control - issues and techniques, Von Nostrand Reinhold: New York.
- US EPA, 2000, Methodology for deriving Ambient Water Quality Criteria for the protection of human health-Technical support document, Volume 1: Risk assessment; EPA-822-B-00-005.
- US EPA, 2002a, National recommended water quality criteria 2002: human health criteria calculation matrix.
- US EPA, 2002b, Effluent guidelines program plan for 2002/2003, EPA 821-F-02-017.
- US EPA, 2002c, A strategy for national clean water industrial regulations- effluent limitations guidelines, pretreatment standards, and new source performance standards(Draft), EPA-821-R-02-025.
- US EPA, 2008, TRI explorer, available from <http://www.epa.gov/triexplorer/>.
- US EPA, 2009, IRIS(Integrated Risk Information System), available from <http://www.epa.gov/iris/index.html>.
- US EPA, 2010, ECOTOX database(ECOTOXicology Database System).