

## 염화비닐 (Vinyl Chloride)의 인체 및 수생태계 영향 연구

남 선 화 · 안 윤 주\*

(건국대학교 환경과학과)

**Effects of Vinyl Chloride to Human Health and Aquatic Ecosystems. Nam, Sun-Hwa and Yoon-Joo An\* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)**

Vinyl chloride (VC) is a known human carcinogen, and it is released to multi-environmental media via several exposure routes. VC was potentially evaluated as a water quality pollutant based on human health risk assessment in Korean water environments. In this study, we investigated physicochemical and toxicological properties of VC, human health and ecological risk assessment, and the regulation of VC as a water quality pollutant in developed countries. Currently there are no standard or guideline values of VC in Korean legal system for the protection of human health and aquatic ecosystem, except that it is designated as a specific toxic substance and a water quality pollutant. Human health risk assessment of VC was previously performed based on the limited water quality monitoring data. The monitoring level of VC in Korean water system is more higher than other countries'. VC was assessed as potential hazardous chemical based on the US EPA's cancer risk assessment. There were a few ecotoxicity data of VC available using very limited kinds of aquatic organisms, and the toxicity results obtained seem to be overestimated without considering the losses of VC in open exposure system. Therefore it is needed to monitor the VC in various areas and to carry out the ecotoxicity research using multi-level organisms. We expect that these results can be useful information for implementing VC as a water quality pollutant in legal system for the protection of human health and aquatic ecosystem in near future.

**Key words : risk assessment, standard, vinyl chloride, water quality pollutant**

## 서 론

각종 유해화학물질의 종류 및 양이 증가함에 따라 이에 노출된 인체 및 생태계의 유해 영향이 날로 심각한 수준에 이르고 있다. 유해화학물질로 인한 영향을 최소화하기 위해서는 제도적으로 관리 기준이 체계적으로 설립될 필요가 있다. 그러나 이는 특정 소수의 유해화학물질에 국한되며, 날마다 증가하는 다양한 화학물질을 관리하는 데에는 한계가 있다(안 등, 2008c). 따라서 지속적으로

유해화학물질에 대한 관리 기준을 확대해나갈 필요가 있으며, 이를 위해서는 인체 및 생태 위해성 평가를 기반으로 관리 후보 물질 선별 및 그 기준치 설정 방안을 마련하여야 한다(안 등, 2008a, b).

이미 미국, 호주/뉴질랜드, 네덜란드, 캐나다 등 선진국에서는 위해성 평가 기법을 바탕으로 유해화학물질에 대한 기준을 설정하고 있다(환경부·국립환경과학원, 2006). 또한 국내에서도 사람의 건강보호를 위한 수질환경기준과 배출허용기준 항목 확대를 위한 기반 연구로서 위해성 평가 기법을 활용한 바 있다(환경부·국립환경과학원,

\* Corresponding author: Tel: 02) 2049-6090, Fax: 02) 2201-6295, E-mail: anyioo@konkuk.ac.kr

2006; 국립환경과학원, 2007). 특히 수질 유해 화학물질 중 염화비닐(Vinyl chloride, VC)은 국내 수질환경기준과 배출허용기준 항목 확대를 위한 위해성 기반 연구를 통해 위해우려물질로 평가된 바 있다(환경부·국립환경과학원, 2006; 국립환경과학원, 2007). 국내 주요 4대강(한강, 금강, 낙동강, 영산강) 유역 및 공단천, 하폐수종말처리장, 개별배출업소 등의 수질 모니터링 자료를 바탕으로 VC에 대한 인체 위해성 평가를 한 결과 위해우려가 상당히 높은 물질인 것으로 판별된 바 있다(환경부·국립환경과학원, 2006; 국립환경과학원, 2007). 특히 VC는 사람의 건강보호를 위한 수질환경기준 항목 확대 과정에서 우선순위물질로 분석되었으나, 제도적 관리 차원에서 시기적으로 적절치 못하여 기준화 과정에서 제외된 바 있다. 그러나 VC는 향후 지속적인 수질환경기준 확대를 위한 주요 고려대상물질로서 특별 관리되고 있다. 따라서 관리 기준으로서의 VC를 지속적으로 감시하기 위해서는 현시점에서 VC의 독성 및 노출 자료에 대한 기반 조사가 필요하며, 현 단계의 문제점 및 이를 보완하기 위한 방안제시가 필요하다.

본 연구에서는 수질오염물질인 VC에 대하여 향후 지속적인 위해성 평가를 위한 기반 자료로서 VC의 물리·화학적 특성, 독성학적 특성, 인체 및 생태 위해성 평가, 그리고 국내 및 선진국의 제도적 규제 및 관리 현황을 조사하여 분석하였다.

## 염화비닐의 특성

### 1. 일반적인 특성

VC는 자연계에는 존재하지 않는 합성 물질로, 1930년대 염화수소와 아세틸렌의 화학적 반응에 의해 처음 생성되었다(ATSDR, 2006). 주로 vinyl chloride homo-polymer와 vinyl chloride co-polymer 수지 생성에 사용되며(PIMs, 1997), 이러한 polymer poly vinyl chloride(PVC) 물질들은 파이프, 가구, 건축 재료, 포장용품 등으로 널리 이용된다(ATSDR, 2006). PVC 물질 내 잔존하는 VC 단량체 흡입으로 인한 작업장, 소비자 및 환경 노출은 미국 및 OECD 국가들에서 엄격하게 관리되므로 매우 낮은 수준이다. VC 생산 시설 근처 대기 중 VC의 농도는  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  미만이며, 일반적으로 지하수 내에서는  $0.001 \text{ ppm}$  이하이다(OECD SIDS, 2001). 국내 화학물질 배출량 조사 결과에 따르면 최근 2007년까지 VC의 대기 배출량은  $78,171 \text{ kg yr}^{-1}$ 로, 수계 및 토양 배출량은 전무한 것으로

**Table 1.** Physical and chemical properties of vinyl chloride.<sup>1</sup>

Property	Vinyl chloride (VC)
CAS registry No	75-01-4
Molecular formula	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$
Molecular weight	62.5
Color/form	Colorless gas
Odor	Mild ethereal odor
Boiling point (°C)	-14
Melting point (°C)	-154
Vapour pressure (mm Hg at 20°C)	2,530
Water solubility ( $\text{mg L}^{-1}$ at 25°C)	2,400
Henry's law constant ( $\text{atm}\cdot\text{m}^3 \text{ mole}^{-1}$ at 25°C) <sup>2</sup>	0.0278
Log $K_{oc}$ <sup>2</sup>	1.376
Log $K_{ow}$ <sup>2</sup>	1.62
Bioconcentration factor <sup>2</sup>	3.55
Half-life (hr) <sup>2</sup>	360

<sup>1</sup>PIMs(1997), <sup>2</sup>US EPA(2000a)

보고되었다(환경부, 2009). 그러나 지난 2004년 국내 수질 모니터링 실태 조사 자료에 따르면 한강 24개 지점 중 11개 지점 및 낙동강 26개 지점 중 1개 지점에서  $0.8 \sim 4.7 \mu\text{g L}^{-1}$ (검출한계  $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ )의 농도로 VC가 검출된 사례가 있으며(환경부·국립환경과학원, 2006), 17개 개별배출업소 유출수 중 화학물질 제조업소인 3개소에서  $10.6 \sim 668 \text{ VC } \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도로 검출된 바 있다(국립환경과학원, 2007). 한편 1989~1990년 독일의 Rhine, Main, Lippe, Ruhr, Wupper, Saale 강에서 각각 0.031, 0.008, 0.40, 0.060, 0.069, 69  $\text{VC } \mu\text{g L}^{-1}$ 가 보고된 바 있으며(ECB, 2000; OECD SIDS, 2001), 1995년 일본 오사카의 강에서  $1.2 \text{ VC } \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 검출된 바 있다(IPCS, 1999). 또한 미국 뉴저지의 지표수에서 1977~1979년 최대  $566 \text{ VC } \mu\text{g L}^{-1}$ 가 보고된 바 있으며, 1980~1981년 로스앤젤레스 폐수처리시설로부터 나온 최종 방류수에서 평균  $6.2 \text{ VC } \mu\text{g L}^{-1}$ 가 검출된 바 있다(IPCS, 1999).

### 2. 물리·화학적 특성

VC의 물리·화학적 특성은 Table 1에 정리하였다. VC는 상온·상압에서 부드러운 에테르 냄새가 나는 무색 기체로, 염소 원자를 포함한 유기염소계용매이다(PIMs, 1997; Young-Cheol *et al.*, 2003; Zhongchun, 2003; 김 등, 2004). 테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene, PCE), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE), 시스-1,2-디클로로에틸렌(*cis*-1,2-dichloroethylene, *cis*-1,2-DCE)과 같은 염소계지방성탄화수소의 탈염소 과정을 통해 생성

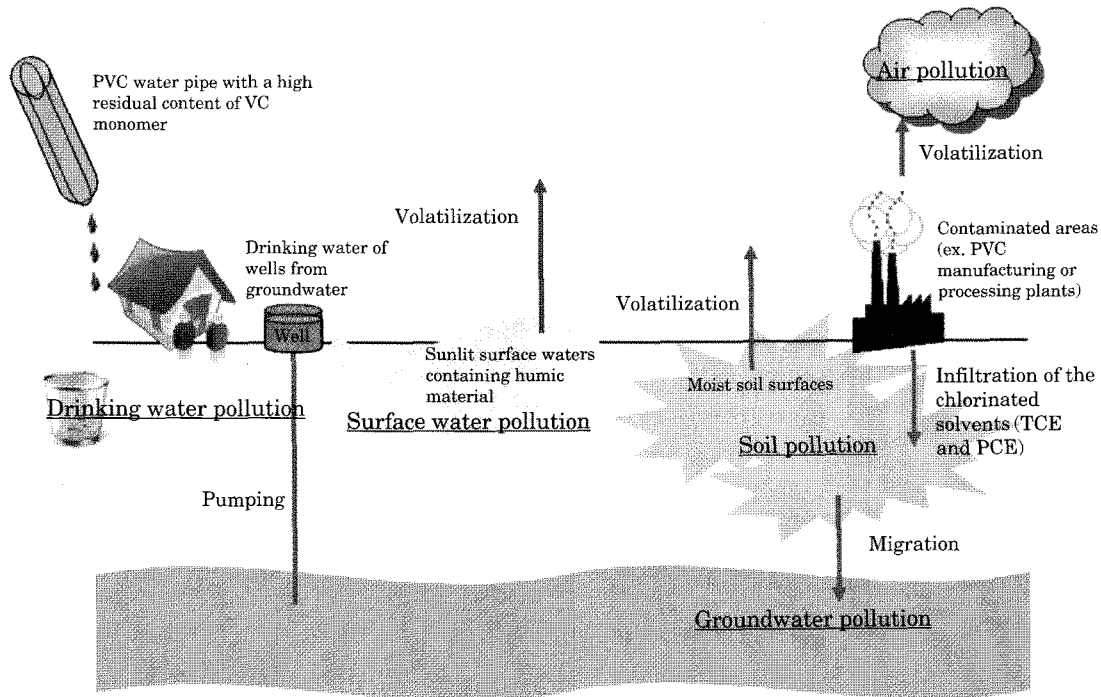


Fig. 1. Routes of environmental exposure of vinyl chloride.

되며, 유지제거제와 드라이클리닝제 등으로 널리 사용되는 PCE와 TCE로 오염된 토양과 지하수 내에서 염소 처리된 에텐의 생물학적 분해로 인해 VC가 존재하기도 한다(환경부, 1996; PIMs, 1997; Young-Cheol *et al.*, 2003; Zhongchun, 2003; 김 등, 2004; WHO, 2006). 이 때 생성된 VC는 낮은 생물학적 분해 능력으로 인해 자연계에서 쉽게 분해되지 않아 토양과 지하수를 오염시킬 가능성이 있다(김 등, 2004; US NLM, 2007). 특히 오염된 지하수를 끌어올려 용수로 사용하거나, VC 단량체가 다량 함유된 PVC 수도관을 통해 공급된 물을 사용할 경우 영향을 받을 수 있다(WHO, 2006). VC의 수용해도는 25°C 기준 2,400 mg L<sup>-1</sup>로 물에 잘 잘 녹는 성질을 보유하나, 헨리 상수가 25°C 기준 0.0278 atm·m<sup>3</sup> mole<sup>-1</sup>로 지표수 근처에서는 대기층으로의 휘발 가능성이 높아 대기로의 배출량이 상당량을 차지한다(PIMs, 1997; US EPA, 2000a; 국립환경과학원, 2007; US NLM, 2007). 특히 햇볕이 잘 드는 지표수에서는 humic 물질과 같은 감광성 물질이 존재할 경우 광분해 속도가 증가하여 대기로의 증발이 가능하다(국립환경과학원, 2007; US NLM, 2007). VC의 유기탄소 분배계수(Log K<sub>oc</sub>)는 1.376으로 토양 내 이동 가능성이 있어(US EPA, 2000a; US NLM, 2007), PVC 제조 공장과 같은 오염지역에서 TCE, PCE와 같은 염소계 유기용제의 토양 내 침투로 인해 토양 오염을 야기할 수

있다(Fig. 1). 옥탄올-물 분배계수(Log K<sub>ow</sub>)와 생물농축계수는 각각 1.62와 3.55로 수용체 내 VC의 축적 가능성은 낮다(US EPA, 2000a).

### 3. 인체 독성학적 특성

VC는 주로 흡입 경로를 통해 빠르게 잘 흡수되며, 경구 및 흡입 경로를 통해 흡수된 VC는 간에서 활성화된다(OECD SIDS, 2001). 체내 물질대사 및 배설이 빠르게 일어나기 때문에 쉽게 축적되지 않고 소변을 통해 배설된다(ATSDR, 2006). 급성 독성은 랫드 경구 LD50 > 4,000 mg kg<sup>-1</sup>, 랫드 흡입 LC50 390,000 mg m<sup>-3</sup>, 마우스 흡입 LC50 294,000 mg m<sup>-3</sup>로 낮은 것으로 보고된 바 있으며, 인체에 대한 마취 영향은 5분 노출 기준 30,720 mg m<sup>-3</sup> 수준에서 나타난 바 있다(OECD SIDS, 2001). 랫드, 토끼, 기니아피그 또는 개를 대상으로 6달 동안 흡입 노출시킨 결과 악영향무관찰량(No-Observed-Adverse-Effect-Level, NOAEL)은 50 ppm으로 나타났으며, 경구 반복 독성에서 표적 기관은 간으로 랫드의 전생애 NOAEL은 0.13 mg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>인 것으로 보고되었다(OECD SIDS, 2001). VC는 DNA 부산물을 생성하며 유전자 및 염색체 변이를 야기하는데, 특히 염색체 변이는 작업장 노출로 인해 말초 림프구에서 발견된 바 있다(OECD SIDS,

**Table 2.** Toxicological properties of vinyl chloride.<sup>1</sup>

Property	Vinyl chloride (VC)
Toxicokinetics	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Route of exposure: inhalation, oral, dermal contact</li> <li>- Organ of bioactivation: liver</li> <li>- Pathway of excretion: urine<sup>2</sup></li> </ul>
Acute toxicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rat oral LD50: &gt; 4,000 mg kg<sup>-1</sup></li> <li>- Rat inhalation LC50: 390,000 mg m<sup>-3</sup></li> <li>- Mouse inhalation LC50: 294,000 mg m<sup>-3</sup></li> </ul>
Genetic toxicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Production of DNA adducts</li> <li>- Cause of gene mutation and chromosomal aberration</li> </ul>
Reproductive/developmental toxicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rat NOAEL: 2,816 mg m<sup>-3</sup></li> <li>- Human data have not linked VC exposure with negative results.</li> </ul>
Carcinogenicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Classification               <ul style="list-style-type: none"> <li>· IRIS: A (Human carcinogen)<sup>3</sup></li> <li>· IARC: 1 (Carcinogenic to humans)<sup>4</sup></li> <li>· ESIS: R45<sup>c</sup> (May cause cancer)<sup>5</sup></li> </ul> </li> <li>- Oral slope factor (mg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 0.72 (Continuous lifetime exposure during adulthood)<sup>3</sup></li> <li>· 1.5 (Continuous lifetime exposure from birth)<sup>3</sup></li> </ul> </li> <li>- Air unit risk (μg m<sup>-3</sup>)<sup>-1</sup> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 4.4 × 10<sup>-6</sup> (Continuous lifetime exposure during adulthood)<sup>3</sup></li> <li>· 8.8 × 10<sup>-6</sup> (Continuous lifetime exposure from birth)<sup>3</sup></li> </ul> </li> <li>- Reference dose (mg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>): 0.003 (Liver cell polymorphism)<sup>3</sup></li> <li>- Reference concentration (mg m<sup>-3</sup>): 0.1 (Liver cell polymorphism)<sup>3</sup></li> </ul>

<sup>1</sup>OECD (2001), <sup>2</sup>ATSDR (2006), <sup>3</sup>US EPA (2000b), <sup>4</sup>WHO IARC (1998), <sup>5</sup>ECB ESIS (2007)

2001; WHO, 2006). 랫드에 대한 생식/발달 연구의 NOAEL은 2,816 mg m<sup>-3</sup>이며, 인체 연구에서 VC 노출로 인한 생식 영향에 대한 관련성은 현재까지 보고된 바 없다(OECD SIDS, 2001). VC의 발암성은 통합위해정보시스템(Integrated Risk Information System, IRIS)에서 경구, 흡입, 경피 독성 자료를 통해 Group A (human carcinogen), 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 경구 및 흡입 노출 자료를 바탕으로 Group 1 (carcinogenic to humans), 유럽화학물질정보시스템(European chemical Substances Information System, ESIS)에서 risk phrase 45 (may cause humans)로 평가된 바 있다(Table 2). IRIS에서는 경구 노출로 인한 발암계수(slope factor, SF)는 성인기 0.72 (mg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup> ~ 전생애 1.5 (mg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>로, 흡입 경로에 의한 단위위해도(unit risk, UR)는 성인기 4.4 × 10<sup>-6</sup> (μg m<sup>-3</sup>)<sup>-1</sup> ~ 전생애 8.8 × 10<sup>-6</sup> (μg m<sup>-3</sup>)<sup>-1</sup>로 제시되어 있다. 또한 경구 노출에 의한 비발암 참고치(reference dose, RfD)는 0.003 mg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 흡입 노출로 인한 비발암 참고치(reference concentration, RfC)는 0.1 mg m<sup>-3</sup>로 랫드를 이용한 만성독성실험에서 간세포 다형성을 유발하는 것으로 보고된 바 있다(WHO IARC, 1998b; US EPA, 2000b; EC,

2001; OECD SIDS, 2001).

#### 4. 생태 독성학적 영향

VC에 대한 수서생태독성은 어류, 환형동물, 원생동물, 선형동물, 녹조류를 대상으로 연구된 바 있다(Table 3). 어류독성실험은 48시간부터 14일까지 어류 5종을 대상으로 수행되었다. *Brachydanio rerio*를 대상으로 96h-LC50 210 mg L<sup>-1</sup>가 산정되었으며(US EPA, 2008), *Lueciscus idus*를 대상으로 48h-LC50 356 mg L<sup>-1</sup>와 48h-LC50 406 mg L<sup>-1</sup>가 산출되었다(US EPA, 2008). Eric and Thomas (1977)는 실험용기 당 15마리씩의 *Esox lucius*를 VC 농도 388 mg L<sup>-1</sup>까지 10일 동안 노출시킨 결과 100% 치사 반응을 확인하였다. *Lepomis macrochirus*와 *Micropterus salmoides*를 대상으로 한 실험 결과에 따르면 각각 96h-LC50 1,220 mg L<sup>-1</sup>와 96h-LC50 1,060 mg L<sup>-1</sup>가 산정되었다(US EPA, 2008). 남선화(2008)에 따르면 *Oryzias latipes*에 대한 급성 및 만성 독성 실험 결과 96h-LC50 > 15 mg L<sup>-1</sup>과 14d-NOEC < 10 mg L<sup>-1</sup>로 나타났으며, 수정란 및 자어 단계에 부종, 척수 기형 등의 기형 형성에 VC가 영향을 미침을 확인하였다. 무척추동물을 대

**Table 3.** Reported aquatic ecotoxicity data of vinyl chloride.

Test species	Endpoint	Value (mg L <sup>-1</sup> )	Reference
<b>Fish</b>			
<i>Brachydanio rerio</i> (zebrafish)	96h-LC50	210	US EPA (2008)
<i>Leuciscus idus</i> (ide)	48h-LC50	356	US EPA (2008)
<i>Leuciscus idus</i> (ide)	48h-LC50	406	US EPA (2008)
<i>Esox lucius</i> (Northern pike)	10d-LC100	388	Brown <i>et al.</i> (1977)
<i>Lepomis macrochirus</i> (Bluegill sunfish)	96h-LC50	1,220	US EPA (2008)
<i>Micropterus salmoides</i> (Largemouth bass)	96h-LC50	1,060	US EPA (2008)
<i>Oryzias latipes</i> (Japanese medaka)	96h-LC50	> 15	Nam (2008)
<i>Oryzias latipes</i> (Japanese medaka)	14d-NOEC	< 10	Nam (2008)
<b>Invertebrates</b>			
<i>Moina macrocopa</i>	48h-L(E)C50	> 20	Nam (2008)
<i>Gyraulus convexiusculus</i>	48h-L(E)C50	> 10	Nam (2008)
<i>Uronema parduczi</i>	20h-Toxicity threshold	1,050	US EPA (2008)
<i>Tetrahymena pyriformis</i>	9h-IC50	405	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995c)
	6h-IC50	430	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995c)
	36h-IC50	520	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995b)
	9h-IC50	540	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995a), Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995b)
	3h-IC50	806	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995c)
<i>Panagrellus redivivus</i>	96h-LC50	> 62.5	US EPA (2008)
<b>Plants</b>			
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	8d-Toxicity threshold	710	OECD SIDS (2001); US EPA (2008)

상으로 수행된 독성실험에는 환형동물 2종, 원생동물 2종, 선형동물 1종이 보고된 바 있다. 환형동물 *Moina macrocopa*와 *Gyraulus convexiusculus*를 대상으로 치사 및 유영장애와 부착성에 대해 관찰한 결과 각각 48h-L(E)C50 > 20 mg L<sup>-1</sup>와 48h-L(E)C50 > 10 mg L<sup>-1</sup>로 보고되었으며, *Gyraulus convexiusculus*의 생존 및 부착성에 VC가 영향을 미침을 확인하였다(남선화, 2008). 또한 원생동물 *Uronema parduczi*를 대상으로 20시간 동안 VC에 노출시킨 결과 1,050 mg L<sup>-1</sup> 농도에서 독성 역치가 확인되었다(US EPA, 2008). Marie-Pierre *et al.* (1995a, b, c)은 N,N'-dimethylacetamide에 용해시킨 VC 단량체를 원액으로 사용하였으며, 원생동물 *Tetrahymena pyriformis*를 대상으로 36시간 동안 세포 증식률을 관찰하여 3h-IC50 806 mg L<sup>-1</sup>, 6h-IC50 430 mg L<sup>-1</sup>, 9h-IC50 405 mg L<sup>-1</sup>, 9h-IC50 540 mg L<sup>-1</sup>, 36h-IC50 520 mg L<sup>-1</sup>를 산정하였다. 선형동물 *Panagrellus redivivus*를 대상으로 연구한 결과 96h-LC50 > 62.5 mg L<sup>-1</sup>임이 확인된 바 있다(US EPA, 2008). 식물독성실험은 녹조류 *Scenedesmus quadricauda*를 대상으로 8일 동안 노출시킨 결과로, toxicity threshold 710 mg L<sup>-1</sup>임이 확인되었다(OECD SIDS, 2001; US EPA, 2008).

원문 확인이 가능한 연구논문을 대상으로 세부 실험

과정에 대해 Table 4와 같이 검토한 결과 대체로 실험 방법을 구체적으로 밝히지 않았거나 VC의 휘발로 인한 손실 부분을 고려하지 않은 것으로 나타났다. 휘발성이 높은 VC의 특성 상 수체로부터 공기층으로의 휘발이 발생하여 수체 내 노출 농도의 손실이 야기될 가능성이 높다. 특히 Marie-Pierre *et al.* (1995a, b, c)의 경우 실험 용기 내 상부 공간이 존재하도록 실험 설계를 하였으나, 이로 인한 VC의 수체 내 농도 감소를 고려하지 않았다. 따라서 실질적인 노출 농도보다 실험자의 실험 농도로부터 계산되었기 때문에 결과적으로 과다 산정된 독성치가 보고되었을 것으로 사료된다. 한편 남선화(2008)의 경우 VC의 휘발로 인한 손실을 방지하기 위해 폐쇄식으로 수행된 바 있으나, 유기용제 메탄올의 최대허용농도의 제약으로 인해 VC의 독성 영향이 유의하게 나타날 수 있는 노출 농도로 실험하는 데 한계가 있어 독성치 산출이 불가하였다.

### 염화비닐의 인체 및 생태 위해성 평가

#### 1. 인체 위해성 평가

환경부·국립환경과학원(2006) 및 안 등(2008b)의 연

**Table 4.** Reported aquatic ecotoxicity data of vinyl chloride.

Test species	Duration (h)	Test system	Dilution water	Solvent	Endpoint	Value	Reference
<i>Esox lucius</i>	240	Kept 15 fish (6-19 in. in length) in tank (10-20 gal in size)	Nonpolluted, clean lake (Illinois Benedictine Lake)	—	Mortality	10d-LC100: 388 mg L <sup>-1</sup>	Eric and Sinclair (1977)
<i>Oryzias latipes</i>	96	Kept 5 larva (7d) in 50 mL of 130 mL clear narrow neck bottle with silicon septum screw cap	Dechlorinated water	MeOH	Mortality	96h-LC50: > 15 mg L <sup>-1</sup>	Nam (2008)
<i>Oryzias latipes</i>	336	Kept 1 embryo (blastula) in 1 mL of 2 mL flat-bottomed glass vial with silicon septum screw cap	Embryo-rearing solution	MeOH	Hatchability, mortality, time to hatch, developmental abnormality	14d-NOAEC: < 10 mg L <sup>-1</sup>	Nam (2008)
<i>Moina macrocopa</i>	48	Kept 5 juveniles in 34 mL of 34 mL flat-bottomed glass vial with silicon septum screw cap	Moderately hard water (MHW) medium	MeOH	Mortality, immobilization	48h-L(E)C50: > 20 mg L <sup>-1</sup>	Nam (2008)
<i>Gyraulus convexiusculus</i>	48	Kept 5 juveniles in 16 mL of 16 mL flat-bottomed glass vial with silicon septum screw cap	Moderately hard water (MHW) medium	MeOH	Mortality, adherence	48h-L(E)C50: > 10 mg L <sup>-1</sup>	Nam (2008)
<i>Tetrahymena pyriformis</i>	9	Kept 100 mL medium (exponential growth phase 10 <sup>4</sup> TP mL <sup>-1</sup> ) in a constant 1% volume	Proteose peptone/ yeast extract medium enriched with inorganic salts (PPYS)	N,N'-dimethylacetamide	Cell proliferation rate	3h-IC50: 806 mg L <sup>-1</sup> 6h-IC50: 430 mg L <sup>-1</sup> 9h-IC50: 405 mg L <sup>-1</sup>	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995c)
<i>Tetrahymena pyriformis</i>	9	Kept 100 mL medium (exponential growth phase 10 <sup>4</sup> TP mL <sup>-1</sup> ) in 500 mL flask	Proteose peptone/ yeast extract medium enriched with inorganic salts (PPYS)	N,N'-dimethylacetamide	Doubling time	9h-IC50: 540 mg L <sup>-1</sup>	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995b)
<i>Tetrahymena pyriformis</i>	36	Kept 200 µL medium in 300 µL 96-well microplate	PPYS-modified culture medium	N,N'-dimethylacetamide	Doubling time	36h-IC50: 520 mg L <sup>-1</sup>	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995b)
<i>Tetrahymena pyriformis</i>	9	Kept 100 mL medium (exponential growth phase 10 <sup>4</sup> TP mL <sup>-1</sup> ) in 500 mL flask	Proteose peptone/ yeast extract medium enriched with inorganic salts (PPYS)	N,N'-dimethylacetamide	Doubling time	9h-IC50: 540 mg L <sup>-1</sup>	Marie-Pierre <i>et al.</i> (1995a)
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	192	Kept 50 mL medium in 300 mL flask	—	—	Biomass	8d-Toxicity threshold	OECD SIDS (2001); US EPA (2008)

구에 따르면, 화학물질에 대한 인체 위해성 평가를 기반으로 사람의 건강 보호를 위한 수질환경기준 항목 우선순위 물질을 선정한 바 있다. 수질유해화학물질 20개 (Zinc, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, Dichloromethane, 1,1-dichloroethylene, Benzene, Carbon tetrachloride, Phenol, Selenium, Toluene, Ethylbenzene, 1,2-dich-

loroethane, Chloroform, Vinyl chloride, 2,4-dichlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol, Pentachlorophenol, Diethylhexylphthalate, Benzo(a)pyrene, Antimony)를 대상으로 국내 실정을 반영할 수 있도록 수정 및 보완된 미국환경보호청 (US Environmental Protection Agency, US EPA) 의 발암·비발암 영향 수식과 2004년부터 2005년까지의

한강, 낙동강, 금강, 영산강 수질 모니터링 자료를 활용하여 물질 우선순위를 선정하였다. VC는 IRIS 기준 발암 등급 A에 해당하므로 발암 영향 수식이 적용되었으며, 수식 내 인자는 국내 실정을 반영하기 위해 한국인 성인 표준 체중 60 kg, 음용수 섭취량 2 L day<sup>-1</sup>, 어류 섭취량 0.0641 kg day<sup>-1</sup>가 활용되었다. 인체 위해성 평가 결과 VC의 인체 준거치 1.75 µg L<sup>-1</sup>와 수질 모니터링 산술평균값 0.14 µg L<sup>-1</sup>를 바탕으로 위해도 0.08이 산정되었으며, VC는 20개의 수질유해화학물질 중 아홉 번째로 위험한 물질인 것으로 나타났다. 이때 VC는 낮은 검출빈도 (3.85%), 한정적 검출 지점 (2004년 한강 일부), 분석 난이도 등의 근거로 다른 물질에 비해 수체 유출 가능성이 낮다는 판단 하에 사람의 건강 보호를 위한 수질환경기준 항목 선정 과정에서 제외되었다.

특정수질유해물질 및 배출허용기준 항목 확대를 위한 국립환경과학원 (2007)의 연구에 따르면, 10개 유해화학 물질을 대상으로 인체 건강 영향, 공단천을 대상으로 한 주요 수계 오염도, 배출 현황 등의 자료를 활용하여 인체 위해성 평가를 수행한 바 있다. 이 연구 역시 환경부·국립환경과학원 (2006) 및 안 등 (2008b)의 연구와 동일한 노출인자를 적용하여 수정 및 보완된 US EPA의 발암 영향 수식을 활용하였다. 다만 환경부·국립환경과학원 (2006) 및 안 등 (2008b)의 연구에서는 단위 위해도 수준 10<sup>-6</sup>을 적용하였으나, 국립환경과학원 (2007)의 연구에서는 10<sup>-5</sup>을 적용하였다. 그 결과 VC의 검출농도는 인체 및 수서생물에 의해 영향을 미치는 수준인 것으로 나타나 특정수질유해물질 후보로 분류되었으며, 배출허용기준 항목 고려 대상 후보 물질로 선정되었다.

한편 일본 환경성의 초기 위해성 평가 보고서 (2005)에 따르면, US EPA의 MOE (Margin of exposure) 방법을 활용하여 VC에 대한 위해성 평가를 수행한 바 있다. VC의 반복 투여 독성의 경구 NOAEL 130 µg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>에 일일 섭취량 0.012 µg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>을 고려하여 MOE 11,000을 산출하였으며, 흡입 악영향최저관찰량 (Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level, LOAEL) 26 mg m<sup>-3</sup>에 일일 호흡량 2.4 µg kg<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 체중 0.35 kg, 노출빈도 6 hours day<sup>-1</sup>, 6 days week<sup>-1</sup>, 흡수율 1 등을 고려하여 MOE 1,700을 산출하였다. 또한 중간 특이성 10, 종내 특이성 10, 독성의 성상 10 (흡입 LOAEL에 적용됨)을 고려하여 불확실성계수 100과 1000을 산출하였다. 이때 MOE 11,000 및 1,700과 불확실성계수 100 및 1000을 각각 비교한 결과 110배 및 1.7배 이상 큰 것으로 나타남에 따라 인체 건강에 대한 악영향을 미치지 않는 것으로 평가하였다.

## 2. 생태 위해성 평가

VC의 생태 위해성 평가는 호주·뉴질랜드의 고·중간·저 신뢰도 방식을 적용한 수서생물 보호를 위한 수질 준거치와 수질 모니터링 값을 활용하여 환경부·국립환경과학원 (2006), 안 등 (2008a), 국립환경과학원 (2007)의 연구에서 수행된 바 있다. 환경부·국립환경과학원 (2006) 및 안 등 (2008b)의 연구에 따르면, 생태 위해성 평가 기반 수질환경기준을 설정하기 위해 VC를 대상 화학물질 중 하나로 선정하여 호주/뉴질랜드의 고·중간·저 신뢰도 방식을 활용한 생태 위해성 평가를 수행한 바 있다. VC의 생태 준거치를 산출하기 위한 기반 독성 자료는 US EPA의 ECOTOXicology Database, 호주/뉴질랜드의 TOX-2000 Database, 유럽연합의 International Uniform Chemical Information Database와 같은 생태 독성 데이터베이스와 US EPA의 Ambient Water Quality Criteria 보고서를 바탕으로 수집되었으며, 이 중 국내 수계에 분포하는 생물종만 선별하여 준거치 산출에 활용하였다. 그러나 선별된 생태 독성 자료는 세균류 2종 (*Bacillus subtilis*, *Clostridium botulinum*), 양서류 1종 (*Rana temporaria*), 균류 1종 (*Saccharomyces cerevisiae*), 곤충류 1종 (*Culex pipiens*)으로, 호주/뉴질랜드의 고·중간·저 신뢰도 방식을 적용하기 위한 최소한의 자료 요구 조건 (예. 어류, 갑각류, 조류 자료 포함)을 충족하지 못하였다. 따라서 생태 독성 자료의 부족으로 생태 준거치 산출이 불가함에 따라 생태 위해성 평가가 보류된 바 있다.

특정수질유해물질 및 배출허용기준 항목 확대를 위한 국립환경과학원 (2007)의 연구에 따르면, 환경부·국립환경과학원 (2006) 및 안 등 (2008b)의 연구와 마찬가지로 호주/뉴질랜드의 고·중간·저 신뢰도 방식을 VC의 국내 생태 독성 자료에 적용하였으나, 이 역시 가용한 독성 자료의 부족으로 생태 위해성 평가가 불가하였다. 한편 일본 환경성의 초기 위해성 평가 보고서 (2005)에 따르면, 영양 단계를 대표하는 생물종 (어류, 갑각류, 조류) 중 가장 민감한 독성 수치와 환경 측정 농도를 고려하여 MOE를 산출하였으며, 인체 위해성 평가와 마찬가지로 불확실성 계수를 적용하여 생태 위해성 평가를 수행하게 된다. VC의 경우 독성 자료가 없는 갑각류 및 조류를 제외하고, 가장 민감한 어류 *Bachydanio rerio* (zebrafish)에 대한 96시간 LC50 210 mg L<sup>-1</sup>와 모든 수역에서 발견되어 있던 2002년 수질 조사 결과를 검출 한계의 반값으로 처리한 0.005 µg L<sup>-1</sup>를 토대로 MOE 42,000,000을 산출하였다. 또한 실내-현장 외삽 10, 급성-만성 외삽 100을 고려하여 불확실성계수 1000을 산출하였다. 이 때 MOE

42,000,000과 불확실성계수 1000을 비교한 결과 42,000배 이상 큰 것으로 나타남에 따라 수생생물 건강에 대한 악영향을 미치지 않는 것으로 평가하였다.

## 염화비닐에 관한 규제 및 관리 현황

### 1. 수질환경기준

우리나라의 수질환경기준은 환경정책기본법 시행령 제2조 별표 1 환경기준에 제시된 수질 및 수생태계 부분에 제시되어 있으며, 이 중 하천 및 호수 수역의 사람의 건강보호를 위한 기준에 VC는 포함되어 있지 않다. 반면 US EPA에서는 사람의 건강을 위한 국가수질권고치로  $0.025 \mu\text{g L}^{-1}$ (물과 유기체 소비)와  $2.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (유기체 소비)를 각각 제시하고 있으며(US EPA, 2006b), 일본은 사람의 건강을 위한 권고치  $2 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 제시하고 있다(Ministry of the Environment, Japan, 2006).

### 2. 수질규제기준

우리나라의 수질규제기준은 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙 제34조 별표 13 수질오염물질의 배출허용기준과 제26조 별표 10 폐수종말처리시설의 방류수 수질기준에 제시되어 있으나 VC에 대한 기준 설정 및 관리는 현재까지 이루어지고 있지 않다. 한편 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙 제4조 별표 3 특정수질유해물질과 제3조 별표 2 수질오염물질을 통해 인체 및 수생태계 위해 우려가 있는 VC를 특정수질유해물질 및 수질오염물질로 2008년 10월 신규 지정한 바 있다.

### 3. 먹는물 기준

우리나라의 먹는물 기준은 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제2조 별표 1 먹는물의 수질기준에 의해 기준 항목을 제시하고 있으나, VC에 대한 기준은 포함되어 있지 않다. 반면 US EPA에서는 먹는물 기준  $2 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 제시하고 있으며(US EPA, 2006a), 세계보건기구(World Health Organization, WHO)(2006)에서는 먹는물 권고치  $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 제시하고 있다.

## 현재의 제한점 및 향후 연구 방향 제시

수계 내 VC에 대한 위해성 기반 관리를 위해서는 신뢰성 있는 자료를 바탕으로 평가되어야 한다. 그러나 현

시점에서 위해성 평가 시 기본적인 모니터링 자료 및 독성 자료의 미비가 문제시되고 있으므로 이에 대한 체계적인 기반 형성 후 단계적으로 추진될 필요가 있다. 먼저 노출 평가 시 활용되는 수질 모니터링 자료는 현재까지 공개된 바에 따르면 환경부·국립환경과학원(2006)과 국립환경과학원(2007)의 4대강 유역, 공단천, 하·폐수종말처리장, 개별배출업소 등의 일부 지점 및 단회 자료에 한한다. 따라서 이러한 일회성 자료를 바탕으로 특정 물질의 위해성 평가를 하는 것은 과소평가 또는 과대평가될 가능성이 높으므로 지속적인 모니터링 사업을 통해 자료의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다. 다음으로 독성 평가 시 활용되는 독성치가 존재하는 생태 독성 자료는 현재까지 세균류 2종, 양서류 1종, 균류 1종, 곤충류 1종에 대한 것뿐이다. 따라서 독성 평가 시 최소한의 자료 조건으로 간주되는 어류, 갑각류, 조류 등의 자료가 추가적으로 생성되지 않는 한 VC에 대한 생태 위해성 평가는 수행되기 어렵다. 그러므로 궁극적으로 VC에 대한 생태 독성 자료를 지속적으로 생성함으로써 자료의 활용도를 향상시켜야 한다.

## 적 요

VC는 국제적인 발암등급 체계인 IRIS, IARC, ESIS에 의해 인체발암물질로 평가되고 있으며, 경구, 호흡, 경피 노출 경로를 통해 간세포 다형성 등을 유발하는 것으로 보고된 바 있다. 또한 VC는 자연계에서 쉽게 분해되지 않는 유기염소계용제로서, 대기, 지표수, 지하수, 먹은물, 토양으로 유출되어 인체를 포함한 환경을 오염시킬 가능성이 높은 것으로 나타났다. 현재 우리나라의 수질환경기준과 먹는물 기준에서는 VC에 대한 규제 항목 및 기준치가 제시되어 있지 않으나, 인체 및 수생태계 위해 우려가 있어 특정수질유해물질 및 수질오염물질로 지정된 바 있다. US EPA, 일본, WHO 등 선진국에서는 법적 항목 및 기준치로 VC를 제도적으로 관리하고 있다. 특히 우리나라에서는 2004년 한강 및 낙동강 유역에서  $0.8 \sim 4.7 \mu\text{g L}^{-1}$ (검출한계  $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ ), 개별배출업소 유출수에서  $10.6 \sim 668 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도로 VC가 검출된 사례가 있으며, 독일, 일본, 미국 등의 국외에서 검출된  $0.03 \sim 566 \mu\text{g L}^{-1}$  농도보다 국내 수계 내 VC의 분포 수준이 높은 것으로 나타났다. 국내 인체 위해성 평가 결과 VC에 대한 위해 우려가 높은 것으로 평가된 바 있으며, 생태 위해성 평가는 자료 부족으로 보류된 바 있다. 이 때 활용된 모니터링 자료는 일부 지점 및 단회 기반의 신뢰성 다소 낮은



자료에 국한되므로 지속적인 모니터링 사업을 통해 신뢰성 높은 자료로 대체될 필요가 있다. 또한 물 환경 내 생태독성연구는 일부 시험종에 국한되어 있고, 실험 설계도 VC의 수체 내 농도 감소를 고려하지 않아 결과치가 과다 산정되었을 가능성이 높다. 따라서 지속적으로 다양한 수서생물을 활용한 VC의 생태 독성 자료가 생성되어야 추후 VC에 대한 신뢰도가 높은 생태 위해성 평가가 수행될 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 2006년 한국과학재단 국가과학기술 장학사업의 지원을 받아 수행된 연구임(S2-2006-000-01111-1).

## 인 용 문 헌

- 국립환경과학원. 2007. 특정수질유해물질 확대지정 및 배출허용기준 설정 연구(6차년도).
- 김중호, 강완협, 박주양. 2004. 시멘트/Fe(II)에 의한 Vinyl Chloride의 환원성 분해 특성. *대한환경공학회지* **26**: 703-707.
- 남선화. 2008. 다양한 생태독성시험기법을 이용한 염화비닐의 수서생태독성평가. *건국대학교 석사청구논문*.
- 안윤주, 남선화, 김용화. 2008a. 생태 기준 설정을 위한 대상물질의 생태위해성평가. *한국물환경학회지* **24**: 592-597.
- 안윤주, 남선화, 이재관. 2008b. 인체 위해성기반 수질환경기준 항목 확대를 위한 연구. *한국하천호수학회지* **41**: 34-42.
- 안윤주, 남선화, 이재관. 2008c. 수계 유출가능성이 있는 유해 화학물질 분류화. *한국물환경학회지* **24**: 247-259.
- 일본 환경성. 2005. 초기 위해성 평가 보고서 Ver. 1.0 No. 75 Chloroethylene.
- 환경부, 국립환경과학원. 2006. 물환경종합평가방법 개발 조사 연구(III) -인체 및 수생태계 위해성평가 체계 구축.
- 환경부. 1996. 수질오염물질의 위해성 평가 및 관리기술.
- 환경부. 2009. 2007 화학물질 배출량조사 보고서.
- ATSDR. 2006. Toxicological profile for vinyl chloride.
- EC. 2001. Commission Directive 2001/59/EC of 6 August 2001 adapting to technical progress for the 28th time Council Directive 67/548/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances Annex 6 general classification and labelling requirements for dangerous substances and preparations Official Journal Legislation 225.
- ECB. 2001. IUCLID dataset.
- ECB ESIS. 2007. Vinyl chloride.
- Eric, R.B. and T. Sinclair. 1977. Chemical pollutant in relation to diseases in fish. *Annals of the New York Academy of Sciences* **298**: 535-546.
- Euro Chlor. 1999. Euro Chlor risk assessment for the marine environment-Vinyl chloride.
- IPCS. 1999. Environmental health criteria 215 Vinyl chloride.
- Marie-Pierre, S.-R., D. Pepin, J. Bohatier and C.A. Groliere. 1995a. Comparison of six bioassays for assessing in vitro acute toxicity and structure-activity relationships for vinyl chloride monomer its main metabolites and derivatives. *The Science of the Total Environment* **172**: 79-92.
- Marie-Pierre, S.-R., D. Pepin, J. Bohatier and C.A. Groliere. 1995b. Microplate technique for screening and assessing cytotoxicity of xenobiotics with *Tetrahymena pyriformis*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **32**: 159-165.
- Marie-Pierre, S.-R., D. Pepin, C.A. Groliere and J. Bohatier. 1995c. Effects of organic and inorganic substances on the cell proliferation of L-929 fibroblasts and *Tetrahymena pyriformis* GL protozoa used for toxicological bioassays. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **55**: 171-178.
- Ministry of the Environment, Japan. 2006. Water and soil environmental management in Japan.
- OECD SIDS. 2001. Vinyl chloride.
- PIMs. 1997. Vinyl chloride (PIM 558).
- US EPA. 2000a. EPI (Estimation Program Interface) Suite™.
- US EPA. 2000b. IRIS (Integrated Risk Information System).
- US EPA. 2006a. 2006 Edition of the drinking water standards and health advisories.
- US EPA. 2006b. National recommended water quality criteria.
- US EPA. 2008. ECOTOX (<http://www.epa.gov/ecotox>).
- US NLM. 2007. HSDB (Hazardous Substances Data Bank).
- WHO. 2006. Guidelines for drinking-water quality, 3rd (current) edition, including the first addendum.
- WHO IARC. 1998. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans volume 19 some monomers, plastics and synthetic elastomers, and acrolein.
- Young-Cheol, C., K. Jung and Y.-S. Yoo. 2003. Anaerobic degradation of *cis*-1,2-dichloroethylene by cultures enriched from a landfill leachate sediment. *J. Microbiol. Biotechnol.* **13**: 366-372.
- Zhongchun, A.G. 2003. Assessment of reductive dechlorination of vinyl chloride and characterization of enrichments that grow on vinyl chloride as the sole carbon and energy source, University of Washington.

(Manuscript received 29 June 2009,  
Revision accepted 2 September 2009)