

1-브로모프로판의 노출 실태와 역학조사에 따른 노출기준 강화에 관한 연구

하권철* · 김승원¹ · 피영규² · 이나루³

창원대학교 생명보건학부, ¹계명대학교 공중보건학전공,
²대구한의대학교 보건학부, ³한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Strengthening the Occupational Exposure Limit for 1-Bromopropane according to the Results of Epidemiological Studies and Exposure Status

Kwonchul Ha* · Seung Won Kim¹ · Young Gyu Phee² · Naroo Lee³

Department of Biochemistry and Health Science, Changwon National University

¹Faculty of Major in Public Health, Keimyung University

²Faculty of Health Science, Daegu Haany University

³Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objective: The aim of this study was to propose revision of the occupational exposure limit(OEL) for 1-Bromopropane(1-BP) following a review of the appropriateness of the standard in light of increasing epidemiological data and handling risk.

Materials and Methods: The results of toxicity and epidemiologic investigations for 1-BP and agencies' OELs were compared and reviewed through a literature review. In order to investigate the status of 1-BP handling in South Korea, data from work environment actual condition survey results and work environment measurement results were used.

Results: The toxicity of 1-BP, such as central nervous system(CNS) damage, peripheral neuropathy, hematological adverse effects, and developmental and reproductive toxicity(male and female) has been reported. ACGIH recommends 0.1 ppm as a TLV-TWA value, but the OEL of South Korea stands at 25 ppm, which is 250 times higher than the TLV-TWA. Although 1-BP is a specially managed substance under the Industrial Safety and Health Law, the currently applied OEL cannot be said to be a safe level based on the results of epidemiological studies to date. In a work environment measurement in 2017, the total number of samples was 626, which were derived from 78 industries, and the average concentration was 1.173 ppm(standard deviation 2.88).

Conclusions: To protect the health of workers handling 1-BP, estimated to be 780 in South Korea, it is necessary to strengthen the OEL(TWA) to a level of 0.3 ppm(lower than the 0.34 ppm with known toxic effects), which is believed to be safe as a result of epidemiological investigation. "Skin" notation should be recommended.

Key words: 1-bromopropane, occupational exposure limit(OEL), work environment measurement

1. 서 론


1-브로모프로판(1-bromopropane, n-프로필브로마이드(n-propylbromide), 1-BP, nPB)은 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Br}$ 의


화학식으로 표시되는 유기 브롬 화합물로 독특한 탄화수소 냄새가 나는 무색의 액체이다. 1-BP는 끓는점이 70.3°C, 증기압은 19.5 kPa(20°C), 밀도는 1.354 g/ml의 물리화학적 특성이 있다(Loffe & Kampf, 2002).


*Corresponding author: Kwonchul Ha, Tel: 055-213-3553, E-mail: kcha@changwon.ac.kr


Department of Biochemistry & Health Science, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Changwon, Gyeongnam 51140

Received: September 8, 2020, Revised: September 19, 2020, Accepted: September 28, 2020

 Kwonchul Ha <http://orcid.org/0000-0001-7014-9466>

 Seung Won Kim <http://orcid.org/0000-0003-2960-5866>

 Young Gyu Phee <https://orcid.org/0000-0003-2011-7591>

 Naroo Lee <http://orcid.org/0000-0003-1483-6928>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1-BP의 상업적 생산 방식은 알켄(alkenes)에 자유라디칼을 첨가하는 anti-Markovnikov 산물로 얻어진다(NCBI, 2005). 상업용 제품에는 1-BP뿐만 성능 향상과 분해를 억제하기 위해서 첨가물을 사용하고 있다.

1-BP는 원래 살충제, 향료, 의약품, 화학제품 생산 등에 사용하였으며, 현재는 다른 액체성 할로겐화 탄소(halocarbons)와 같이 접착제, 드라이클리닝, 증기 탈지, 전자 및 금속 클리닝 산업에서 일반적인 용제로 사용하고 있다. 용제의 사용 예로는 자동차 제조업 등에서 발포 쿠션을 접착할 때 사용하는 스프레이용 접착제, 항공 산업에서 정비보수 시, 아스팔트 및 합성 섬유를 생산, 전자 회로 기판의 납땜 잔유물을 제거, 금속, 플라스틱, 전자 및 광학 부품 세척을 위한 증기 및 침지 탈지(degreasing) 작업 등을 들 수 있다(NIOSH, 2013). 또한, 2007년 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)의 SNAP(Significant New Alternatives Policy)에 따라 1-BP를 오존층 파괴 물질을 대체할 수 있는 용도로 승인함(U.S. EPA, 2007)에 따라 드라이클리닝 용제로 사용하고 있는 chlorofluorocarbons과 perchloroethylene의 대체재로 사용되면서 그 사용량이 증가하고 있다(Trout et al., 2015; EPA, 2020).

미국 EPA는 독성물질관리법(Toxic Substances Control Act)에 근거하여 2013년부터 1-BP에 대한 위험성 평가를 수행하여 2020년에 최종보고서를 발간하였는데, 환경, 공중보건, 직업노출 등의 일부 공정이나 조건에 대해 불합리한 위험(unreasonable risk)으로 평가하였다(U.S. EPA, 2020). EU에서는 1-BP를 REACH(Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, 등록, 평가, 허가 및 제한 화학물질)에 따라 생식독성 물질로 분류하여, “매우 우려되는 물질(substance of very high concern)”로 구분하고 있다(EU, 2012).

미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)에서는 1-BP에 대한 노출기준(Permissible Exposure Limits, PELs)을 권고하고 있지 않으나, 2014년에 노스캐롤라이나지청(North Carolina Department of Labor)에서 “근로자, 소비자, 환경 보호를 위해 규제되고 있지 않다(is not regulated to protect workers, consumers or the environment)”라는 유해 경보(Hazard Alert)를 발령한 바있다(NC DoL, 2014).

1-BP에 직업적으로 노출되면 신경계가 비가역적으

로 손상되며, 두통과 함께 하지의 감각이 감소되는 것으로 알려졌다. 동물실험에서 종양이 발견되어 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 A3(확인된 동물성 발암물질)인 물질로 채택하였으며, 노출기준(Threshold Limit Value, TLV) 중 시간가중평균(Time-Weighted Average, TWA)으로 0.1 ppm을 권고하고 있다(ACGIH, 2020).

우리나라에서는 1-BP에 대한 노출기준(TWA)으로 25 ppm, 발암성 2, 생식독성 1B로 권고하고 있다(MoEL, 2020). 노출기준 제정 후 1-BP에 의한 재해 사례가 그동안 세 차례 보고된 바 있으며, 산업안전보건법 상 준용하게 되어있는 ACGIH 보다 약 250배 덜 엄격하게 관리하고 있어, 이에 대한 적절성 여부를 파악할 필요가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 1-BP에 대한 노출 기준의 적절한지를 국외 기관의 노출기준 설정 근거 등을 문헌을 통해 검토하고, 우리나라의 노출 실태 등의 자료를 확인하여 고용노동부의 노출기준이 적절한지를 판단하고, 노출기준 개정안을 제안하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 문헌 고찰을 통한 역학조사 결과 및 노출기준 파악

1-BP 관련 화학물질 독성과 역학 연구 결과를 파악하기 위해서 국내·외 논문 및 보고서를 검토하였다. 국내 논문은 KISS(한국학술정보), 과학기술학회마을, DBPIA에서 “1-브로모프로판”, “1-Bromopropane”, “KOSHA Alert” 등의 중심어를 입력하여 검색하였으며, 국외 논문은 Science Direct, EBSCO Host, PubMed, Google 학술검색을 이용하여 Key Words로 “1-Bromopropane”, “n-propylbromide” 등을 입력하여 검색하였으며 독성 및 역학조사 자료와 관련한 결과를 취합 정리하였다. 또한, 안전보건공단, OSHA, 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH), 영국 HSE(Health and Safety Executive) 등의 홈페이지를 방문하여 검색어로 “1-브로모프로판”, “1-Bromopropane”으로 검색하여 그 검색 결과를 중심으로 주요 재해 사례 등을 기술하였다.

1-BP에 대해 여러 기관이 권고하고 있는 노출기준을 파악하기 위해서 미국 ACGIH의 TLVs, OSHA PEL,

NIOSH REL(Recommended Exposure Limit), 일본 산업보건학회(The Japan Society for Occupational Health, JSOH)의 OELs(JSOH, 2018), 독일연구재단(German Research Foundation, DFG)의 Maximum concentrations at the workplace(MAXs, DFG, 2018) 등의 자료를 검토하여 1-BP에 대한 노출기준(TWA와 STEL 등)과 발암성, Skin 표시 여부 등을 파악하였다. 우리나라의 경우 고용노동부에서 권고하고 있는 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부 고시 제2020-48호)을 검토하였다.

2. 1-BP의 노출 실태 파악

1-BP의 취급에 따라 노출되는 근로자 수, 사업장 수, 노출 수준, 업종, 공정 등의 노출 실태를 파악하기 위해 작업환경측정 결과와 작업환경 실태조사 결과 자료를 활용하였다. 작업환경측정 자료는 산업안전보건법 제125조(작업환경측정)에 따라 매년 지정측정기관에서 사업장을 대상으로 측정을 수행한 후 고용노동부에 자료를 제출하여 안전보건공단에서 보관하고 있는 데이터베이스(DB)이며, 작업환경실태 자료는 산업안전보건법 시행규칙 제143조(유해인자의 관리 등)에 따라 5년을 주기로 안전보건공단에서 조사하여 발표하는 통계청 승인통계이다. 작업환경측정 DB의 경우 1-BP 관련 취급 업종, 공정, 작업자 등의 노출 수준을 파악하기 위하여 노출 수준을 노출기준으로 나누는 위험 특성 비를 활용하여 분류하였다.

3. 자료의 통계분석

자료의 통계분석은 Microsoft Excel 2016, SigmaPlot (ver. 10.0 for window, Sysstat Software, Inc., USA), SPSS(ver. 23.0.0.0)를 이용하였으며, 농도 분포는 기술통계 및 그림 등으로 나타냈으며, 업종 및 공정의 농도 분포 차이 등을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 1-BP에 대한 독성 및 작업환경 역학조사 결과

1-BP에 대한 독성 및 작업환경 중 역학조사 결과를 문헌 고찰을 중심으로 고찰하였다. 1-BP는 랫트(rat)에서 낮은 급성 독성(LD₅₀ 2,000 mg/kg 이상)을 나타내지만, 반복 노출 시 신경독성(Ichihara et al., 2000), 간

독성(ClinTrials, 1997), 생식 및 발달(Huntingdon, 2001) 독성을 나타내는 것으로 알려졌다. 랫트를 대상으로 한 만성 연구에서 간 독성에 대한 무관찰유해효과 수준(no-observed-adverse effect level, NOAEL)은 200 ppm이었다(ClinTrials, 1997).

Ichihara et al.(2002)은 접착제 스프레이 작업으로 1-BP에 노출된 3명의 작업자에서 나타난 신경 장애를 보고했다. 세 명의 근로자는 갈지자 걸음(staggering gait), 지각이상으로 인한 무감각(numbness with paresthesia/ dyesthesia), 다리의 진동 감각 감소, 실금(incontinence), 설사, 두통, 비정상적 발한 등의 증세를 보였다. 작업장 환기 시설이 개선된 후에도 작업장 공기 중 1-BP의 노출 농도(TWA)는 60-261 ppm이었다. 연구자들은 1-BP가 말초, 중추신경계 및 자율 신경계(가능성)에서 신경 장애를 유발한다고 결론지었다.

2004년에는 중국의 1-BP 생산 공장에서 일하는 여성 근로자(23명)를 조사하여 맥주 공장의 연령 일치 대조군과 비교했다. 대조군과는 달리 1-BP에 노출된 근로자 중 15명은 발의 진동 감각이 감소했다. 한 명의 작업자는 오른발의 진동 감각을 완전히 잃었으며 이 근로자의 1-BP에 대한 노출 농도(TWA)는 1.10 ppm이었다. 1-BP 노출 근로자들은 대조군보다 감각 신경 전달 속도가 느렸으며, 기억력 및 기분 검사(memory and mood tests)에서도 점수가 낮았다. 수동 시료 채취기로 측정된 1-BP의 노출 농도(TWA)는 0.34~49.19 ppm(중앙값 1.61ppm, 기하평균 2.92ppm)이었다. 1-BP 노출 시 사람의 말초 감각 신경, 운동 신경, 중추신경계가 악영향을 받는다고 보고했다(Ichihara et al., 2004a).

Ichihara et al.(2004b)은 또 다른 연구에서 1-BP 공장에서 일하는 24명의 여성과 13명의 남성 근로자에 대한 1-BP 노출 수준과 건강 상태를 평가하여 노출된 근로자는 두통과 불쾌감을 동반한 눈, 코, 목 자극을 보고하였다. 170 ppm 이하에 노출된 근로자의 신경학적 손상에 대한 중증 만성 징후는 없었다. 요 중 1-BP 농도는 개인 노출 수준과 유의한 상관관계가 있으므로 노출의 지표가 될 수 있다. 이 연구결과를 참조하여, 1-BP 노출의 유용한 생체 지표로 요 중 브롬화물과 주 대사산물인 N-acetyl-S-(n-propyl)-L-cysteine을 제안하였다(Hanley et al., 2006). 그러나 ACGIH에서는 1-BP에 대한 생체 지표를 채택하고 있지 않다(ACGIH, 2020).

Perrone et al.(2008)은 1-BP에 직업적으로 노출되어 나타난 신경계 질환 2건을 보고했다. 전자산업체에서 1-BP를 세정 용제로 사용했던 근로자에게서 혼란, 구음 장애, 현기증, 감각 이상, 운동장애 등의 증상과 함께 작업장 공기 중 1-BP의 농도는 178 ppm이었다고 보고하였다. 또 다른 사례는 개인보호구 없이 수동으로 드라이클리닝 기계에 50~60갤런의 1-BP를 충전하는 작업자가 두통, 현기증, 메스꺼움, 불쾌감 등을 호소하였다고 보고하였다.

폼 쿠션 접착 일을 할 때 스프레이 접착제를 사용하게 되는데 이때 1-BP에 노출되는 근로자를 통해 신경독성의 다양한 사례가 밝혀졌다(Majersik et al., 2007). 질병에 이환된 근로자들은 하지 통증, 보행의 어려움, 메스꺼움, 두통 등을 호소하였다. 혈청 브롬화물 농도 44-170 mg/dl(기준 0-40 mg/dl)이었고, 혈장 염화물 농도 105-139 mmol/dl(기준 98-107 mmol/dl)였을 때 과염소혈증(hyperchloremia)이 나타났다. 접착 작업 중 채취한 공기 중 1-BP 농도는 91~176 ppm이었으며, 신경독성이 두통, 메스꺼움, 원위 감각 상실을 동반한 아 급성 경련성 대뇌 부전과 관련이 있다고 결론지었다.

Li et al.(2010)은 1-BP를 취급하는 중국의 공장 4 곳에서 근로자 86명(여성 60명, 남성 26명)과 연령, 성별, 지역을 고려하여 맥주 공장, 냉동 장비 공장, 니트 작업장, 철강 공장 작업자를 대조군으로 선정하여 역학 조사를 하였다. 1-BP 노출 근로자와 대조군에 대해 설문 조사와 함께 생리학적, 신경학적, 신경 행동학적, 혈액 검사 등을 실시하였다. 1-BP의 지역시료 농도 수준은 취급 기계 부위에서 3.3~5.5 ppm, 가공 제품 수거 장소에서는 16.5~58.3 ppm이었다. 여성 근로자(n=60) 대상 개인시료농도(TWA)는 0.07~106.4ppm(중앙값 6.6 ppm)이었고, 남성 근로자의 경우 0.06~114.8 ppm(중앙값 4.6 ppm)이었다. 1-BP 노출 근로자에게서 용량-의존적-악영향(dose-dependent adverse effects)이 확인되었으며, 진동 감각 상실 및 적혈구 세포 수 감소에

대한 최소관찰유해효과수준(Lowest-Observed Adverse-Effect Level, LOAEL)은 1.28 ppm이었으나, 1-BP 노출에 따른 신경학적 영향에 대한 NOAEL은 확인되지 않았다.

Samukawa et al.(2012)은 적절한 개인보호구 없이 1-BP를 세척제로 사용하는 남성 근로자에게서 나타난 신경독성을 보고하였다. 노출된 작업자에게 근력 약화, 통증, 무감각, 보행 장애 등이 나타났으며, 신경학적 검사를 통해 상부 운동 신경 세포의 경미한 축삭 손상(axonal damage)과 관련된 감각 운동 신경병증으로 확인되었다.

우리나라에서는 2007년, 2008년, 2011년에 1-BP와 관련한 직업병이 발생하여 안전보건공단에서 직업병 발생 위험 경보(KOSHA Alert)가 발령된 적이 있다. 외국의 사례와 유사하게 Table 1과 같이 2011년 가구 제조공장에서 쿠션 폼의 접착작업을 수행하던 근로자가 척추와 하지 부위에 통증이 있고, 걸을 때 절름거리림이 발생하였으며, 2008년 세탁소에서 드라이클리닝 솔벤트를 퍼클로로에틸렌에서 1-BP가 95% 함유된 제품인 DrySolv로 교체한 후 세탁 및 세척작업을 수행하던 근로자에게 두통, 메스꺼움, 어지럼증, 실신 등의 증상이 나타났으며, 2007년 전자제품 제조공장에서 세척작업을 수행하던 근로자에게 발생장애, 어지럼증, 지각이상, 운동실조증의 문제가 발생하였다. 이들 사업장에 대한 작업환경 중 1-BP의 노출 수준은 알려지지 않았다.

2. 작업환경 중 1-BP 노출 실태

1) 작업환경실태조사 결과

2014년 실시한 『작업환경실태조사』 결과에 따르면 1-BP를 취급하고 있는 사업장은 126곳, 근로자 수는 총 780명(남성 628명, 여성 152명)이며, 총 취급량은 1,904톤(함유량은 1~100%)이었다. 취급 근로자수가 가장 많은 업종은 “전자관 또는 반도체 소자 제조업(한국표준산업분류 코드(KSIC code) : 22501)으로 26개

Table 1. Occupational disasters related to 1-BP in South Korea

Year	Industry/Employee	Work history	Symptom
2011	Furniture manufacturing/ Female worker	5 years/spray gun adhesion	Pain in the spine and legs, lameness, etc.
2008	Laundry/male	Unknown/dry cleaning	Headache, nausea, dizziness, fainting, etc.
2007	Electronic product manufacturing/Male	8 years/circuit board cleaning	Dysphonia, dizziness, paresthesia, ataxia, etc.

Table 2. Summary of No. of business and employees exposed to 1-Bromopropane in 2014 work environment survey results data base by purpose of use

Purpose of use	No. of Business	No. of employee		
		Total	Male	Female
Adhesive, binding agents	1	2	1	1
Cleaning/washing agents and disinfectants	51	293	182	111
Coating agent	1	1	1	0
Degreaser	32	199	168	31
Experiment	1	1	1	0
Lubricants and additives	22	201	200	1
Pigment, paint, ink/additives	5	8	8	0
Processing	1	3	3	0
Raw materials	5	18	18	0
Softners	1	14	6	8
Surface treatment	1	1	1	0
Welding and soldering agents	1	2	2	0
Other	4	37	37	0
Total	126	780	628	152

Table 3. Summary statistics(ppm) of exposure assessment data base for airborne 1-Bromopropane concentration(TWA) in 2017

No. of samples	range	arithmetic mean	standard deviation	geometric mean	geometric standard deviation
626*	LOD** ~ 19.63	1.17	2.88	0.01	49.13

* It can be marked by year overlap, because employee exposure assessment for 1-Bromopropane is usually conducted semiannually.

** LOD: Limit of Detection

사업장에 289명으로 전체 취급 근로자 중 37%에 해당한다(KOSHA, 2018). 1-BP의 용도로는 Table 2와 같이 세제/살균 및 소독제, 세정, 도장, 접착제, 윤활유(절삭유, 첨가제), 용접제, 연화제(경화촉진제) 등으로 나타났다. 이 중 세제/살균 및 소독제가 취급사업장 51곳(40%), 근로자 293명(37.6%)으로 가장 많았으며, 윤활 및 첨가제(25%), 탈지제(17%) 순으로 나타났다. 여성근로자의 경우도 세제/살균 및 소독제로 사용하는 공정에 가장 많은 111명(73%)이었다.

2) 2017년 작업환경측정 결과

2017년 작업환경측정 결과 DB를 바탕으로 1-BP 취급 현황을 파악한 결과는 Table 3에 표시한 바와 같다. 전체 시료 수는 626개였으며, 농도 범위별로 평가했을 때 검출한계(limit of detection, LOD) 수준의 시료 수는 407개(65.02%)였으며, 미국 ACGIH TLV-TWA 기준인 0.1 ppm 미만은 22개(3.51%), 0.3 ppm 미만

은 19개(3.03%), 10 ppm 이하는 159개(25.4%), 10 ppm 이상은 19개(3.04%) 시료가 해당하였다(KOSHA, 2018). 가장 큰 값은 19.63 ppm이었으며, 평균은 1.173 ppm(표준편차 2.88), 기하평균 0.01 ppm(기하 표준편차 49.13)으로 나타나 농도의 범위가 매우 넓게 나타났다.

Figure 1은 2017년 1-BP의 작업환경측정을 통해 나타난 시료들에 대해 누적확률분포도로 나타낸 것이다 (LOD 이하 값 제외). 역학조사 결과를 고려하였을 때 전체 시료 중 28.34% 해당하는 0.3 ppm 이상의 농도에 노출되는 근로자는 1-BP가 건강에 악영향을 미칠 수 있는 수준이라고 할 수 있다.

1-BP에 대한 작업환경측정 결과를 업종별로 분석한 결과는 Table 4와 같다. 우리나라 전체 업종 수 1,145개 중 건설업 등 78개의 업종(6.8%)에서 1-BP를 취급하고 있었다. 시료 수가 가장 많은 업종은 “건설업본사(KSIC 41999)”로 110개 시료가 채취되었으며, 다음으

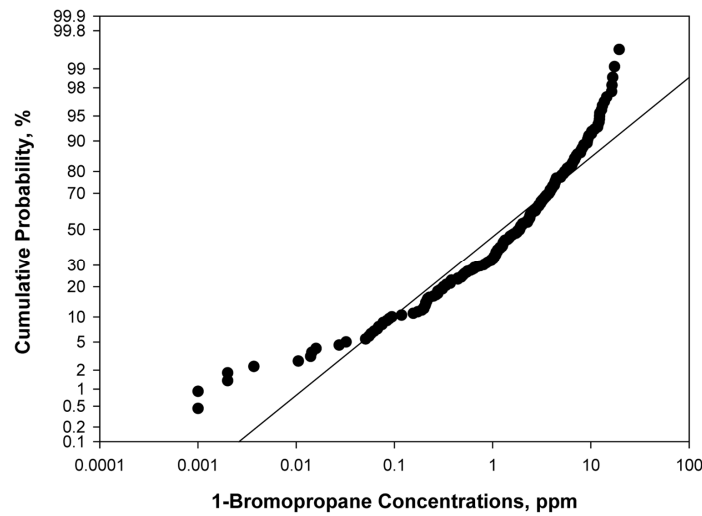


Figure 1. Cumulative probability plot of airborne 1-Bromopropane concentration from exposure assessment DB of 2017

Table 4. Summary of occupational exposure concentrations of 1-Bromopropane by major industry according to number of samples

KSIC code	Industries	No. of samples	Concentration, ppm			
			Min	Max	AM	SD
41999	Other construction of civil engineering projects	110	-*	-	-	-
26421	Manufacture of broadcasting apparatuses	66	-	19.63	2.49	4.4
42209	Construction of installing other building equipment	61	-	5.22	0.12	0.71
26299	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components	51	-	16.22	2.65	4.17
42202	Installation of machinery equipment for building	35	-	0.52	0.02	0.1
26519	Manufacture of video and other visual equipment	21	-	3.99	0.53	1.03
26221	Manufacture of laminated plates for printed circuit boards	17	-	9.51	1.65	2.78
25200	Manufacture of weapons and ammunition	16	-	12.22	1.8	3.18
28909	Manufacture of other electrical equipment n.e.c.	12	-	6.82	1.62	2.32
70129	Research and experimental development on other engineering	12	-	2.25	0.21	0.62
26329	Manufacture of other peripheral apparatuses	11	0.97	6.56	2.45	1.74
27199	Manufacture of other medical and surgical equipment and orthopedic appliances n.e.c.	11	-	6.68	1.37	2.34
30320	Manufacture of parts and accessories for motor vehicle body (new products)	11	-	12.29	2.31	3.54
29199	Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c.	10	-	-	-	-
29294	Manufacture of mould and metallic patterns	10	-	11.81	1.56	3.46
20129	Manufacture of other basic inorganic chemicals	8	-	-	-	-
26129	Manufacture of other diodes, transistors and similar semi-conductor devices	8	-	3.19	0.56	1.08
29141	Manufacture of ball and roller bearings	8	-	-	-	-
20202	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	6	-	2.39	0.6	0.91
31322	Manufacture of aircraft parts and accessories	6	-	16.36	3.91	5.67
35119	Other power generation	6	-	-	-	-
20111	Manufacture of basic organic petrochemicals	5	-	-	-	-
	Others(lower and equal 4 than 4)	125	-	11.17	1.79	0.8
	Total	626	-	19.63	1.17	2.88

* - : Lower than LOD

로 “방송장비제조업(KSIC 26421)”으로 66개 시료가 채취되었다. 방송장비제조업에서 가장 높은 농도 수준인 19.63 ppm이 기록되었다. 평균값이 가장 높은 수준은 “그 외 금속 압형제품 제조업(KSIC 25914)”에서 11.17 ppm 기록되었으며, 두 번째로는 “반도체 제조용 기계 제조업(KSIC 29271)”으로 8.44 ppm이었다. Table 2의 2014년 작업환경 실태조사 결과와는 다른 한국표준산업분류(KSIC code) 체계가 적용되어 작업환경측정 결과와는 비교하기 어려운 한계점이 있었다.

우리나라 고용노동부의 노출기준인 25 ppm을 초과하는 시료는 없었으나, 미국 ACGIH의 TLV(0.1 ppm)를 초과하고 있는 시료 수는 197개(31.47%)로 나타났다. 만일 노출기준을 역학조사 결과 건강에 영향을 미치지 않는 수준이나 ACGIH TLV-TWA 수준으로 강화하기 위해서는 전체 시료 중 상당한 부분을 차지하고 있는 시료들에 해당하는 작업환경에 대한 좀 더 체계적인 검토와 함께 사회 경제학적 영향에 대한 검토도 이루어져야 할 것이다.

3. 1-BP의 노출기준 비교

1) 외국 기관의 노출기준

ACGIH에서는 1-BP에 대해 2003년에 TLV-TWA로 10 ppm을 최초로 제안하였다(2004년 채택). 이후에 사용량 및 역학 자료의 증가에 따라 2011년에 0.1 ppm으로 100배 강화된 변경 공지(notice of intended changes)를 한 후, 2014년에 0.1 ppm을 채택하였으며, 2020년 현재까지 이를 유지하고 있다. 채택 근거가 되었던 건강 영향으로 중추신경계(CNS) 손상, 말초 신경염, 혈액학적 약영향, 발달 및 생식독성 등을 들고 있다(ACGIH, 2017). ACGIH와는 달리 미국 OSHA, NIOSH, 독일 DFG(Deutsche Forschungsgemeinschaft), 미국산업위생학회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)에서는 노출기준을 제시하고 있지 않다. 다만 독일 DFG에서만 발암성(Group 2)과 피부 흡수 관련 “H (Perc abs : danger of percutaneous absorption)” 표시를 제시하고 있다(DFG, 2020). 일본의 경우는 2012년부터 1-BP에 대한 노출기준(TWA)으로 0.5 ppm, 발암성은 2B, 생식독성은 2로 채택하였으며(JSOH, 2012), 2020년 현재까지 이를 유지하고 있다. 캘리포니아 산업안전보건청(The California Occupational Safety and Health Administration)은 2010년에 노출기준(PEL, permissible exposure limit)으로 5

ppm을 제안하고 있다(NIOSH, 2013).

발암성으로는 ACGIH에서는 동물실험 결과를 근거로 “인체 관련성은 알려지지 않았으나 동물 발암이 확인된 물질”인 “A3”를 제시하고 있다(ACGIH, 2020). 독일의 MAK에서는 등급 “2(인체에서 암을 일으킬 수 있다고 고려되는 물질)”로, NTP에서는 등급 “R(잠재적 인체 발암물질(reasonably anticipated human carcinogen, RAHC))”을 채택하고 있다(NIOSH, 2013).

렛트(125, 250, 500 ppm)나 마우스(62.5, 125, 250 ppm)를 2년 동안 하루 6시간, 주 5일간 1-BP에 노출시키면 암컷과 수컷 렛트의 대장에서 암이, 암컷 마우스에서 폐 종양이 생성되어(NTP, 2011), ACGIH에서 1-BP의 발암성과 관련하여 “인체와의 관련성이 알려지지 않은 확인된 동물성 발암물질”인 A3로 권고하는 근거가 되었다. ACGIH에서는 피부에 대한 LD₅₀는 2 g/kg 이상으로 1-BP에 대한 Skin 표시 관련 근거가 없으며, 감작반응이나 TLV-STEL을 지지하는 자료는 없다고 밝히고 있다(ACGIH, 2017).

2) 우리나라 노출기준 및 관리

우리나라에서는 1-BP에 대한 노출기준(TWA)은 25 ppm으로 미국 ACGIH의 기준인 0.1 ppm에 비교하면 약 250배 정도 높게(덜 엄격하게) 제정되어 있다. 그 외 발암성으로 “2(사람이나 동물에서 제한된 증거가 있지만, 구분1로 분류하기에는 증거가 충분하지 않은 물질)” 등급, 생식독성으로 “1B(사람에게 성적기능, 생식능력이나 발육에 악영향을 주는 것으로 추정할 정도의 동물 시험 증거가 있는 물질)” 등급을 제시하고 있다(MoEL, 2020).

비록 OSHA, NIOSH, 독일 DFG MAKs, AIHA 등에서는 노출기준을 제시하고 있지 않으나, 학술적인 목적에 따라 미국 ACGIH가 역학조사 결과를 근거로 고용노동부의 노출기준보다 더 엄격한 TLV를 제안하고 있다. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부고시 제2020-48호)의 제1조(목적)에서 작업환경평가와 근로자의 보건상 유해하지 아니한 기준을 정함으로써 유해인자로부터 근로자의 건강을 보호하는데 기여함이라고 명시하고 있어서, 현재의 노출기준은 지금까지 나타난 역학조사 결과 근로자의 건강에 악영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다. 또한 2020년 발표된 EPA의 위험성 평가 결과를 근거로 우리나라에서도 780명으로 추정되는 1-BP를 취급하는 근로자의 건강보호를 위해

서는 노출기준 강화가 필요하다고 할 수 있다. 특히 우리나라 작업환경에서 환기와 개인보호구 미착용으로 인하여 발생한 세 건의 재해 발생 사례를 고려하면 노출기준에 대한 엄격한 개정과 함께 철저한 관리방안이 제시되어야 할 것이다.

1-BP에 대한 직업적 노출은 일반적으로 흡입이나 피부 접촉을 통해 발생하며, 피부를 통해 혈액으로 쉽게 흡수되므로, NIOSH에서는 1-BP의 직업적 노출을 제어하기 위해서 이를 물이나 아세톤 기반 접촉제로 대체하는 것이 먼저 이루어져야 하며, 격리, 환기와 같은 공학적 대책, 행정적 대책, 호흡기와 피부 보호를 위한 개인보호구(personal protective equipment) 등을 대책으로 제안하고 있다(NIOSH, 2013). 독일 DFG와 EPA에서도 피부를 통한 흡수가 가능하다고 보고하고 있어(DFG, 2020; EPA, 2020), 피부 흡수에 대한 주의

를 권고할 필요가 있다. 1-BP는 대부분의 장갑을 침투할 수 있지만, 폴리 비닐 알코올이나 래미네이트로 만든 장갑에는 침투할 수 없다. 2008년에 미국 질병관리본부(U.S. Centers for Disease Control, CDC)는 퍼클로로에틸렌의 대체재로 1-BP를 사용하려면 장비 개선, 환기 시설의 향상, PPE 등을 권고하였다(CDC, 2008).

4. 노출기준 제안

역학조사, 동물실험, 여러 기관의 노출기준 근거 자료를 검토하여 작업환경 관리를 위한 1-BP의 노출기준 적절성에 대한 검토한 결과 Table 5와 같다. 노출기준 설정의 근거가 되었던 동물실험에서는 신경독성, 간 독성, 생식 및 발달 독성이 확인되었으며, 간 독성의 경우는 1997년에 NOAEL 값으로 200 ppm을 제시하였다. 인체 역학조사나 사례연구를 통하여 다발성 신경병증과

Table 5. Summary of revisional OEL basis for 1-Bromopropane

Item	Basis	Reference
OEL	• TLV-TWA 0.1 ppm	ACGIH, 2014
	• Japan OEL-M(mean) 0.5ppm	JSOH, 2012
	• PEL(TWA) 5 ppm	The California Occupational Safety and Health Administration, 2012
	• animal Study	
	- neurotoxicity	Ichihara et al., 2000
	- hepatotoxicity, NOAEL 200 ppm	ClinTrials, 1997
	- reproductive toxic	WIL, 2001
	- developmental toxic	Huntingdon, 2001
	• human study	
	- polyneuropathy	Sclar, 1999
- neurotoxicity	Ichihara et al., 2002, 2004a, b; Li et al., 2010; Samukawa et al., 2012	
	- diminished vibration sensation and lower scores in memory and mood tests(TWA 0.34 ~ 49.19)	Ichihara et al., 2004a
	- dose-dependent neurological and hematologic effects	Li et al., 2010
	- Lowest observed adverse effect level : 1.28 ppm	
Carcinogenicity	• large intestine in both sexes of rats	NTP, 2011
	• lung tumors in female mice	
	• “likely to be carcinogenic to humans”	EPA, 2020
	• A3(confirmed animal carcinogens with unknown relevance to humans)	ACGIH, 2014
	• 2B(possibly carcinogenic to humans)	JSOH, 2012
	• 2(Substances that are considered to be carcinogenic for man)	DFG, 2020
Skin Notation	• dermal exposure may occur through skin contact with liquids	EPA, 2020
	• H(Perc abs : danger of percutaneous absorption)	DFG, 2020

신경독성이 확인되었으며, 중국 1-BP 생산 공장의 환자-대조군 연구에서 하지의 진동 감각 감소, 감각 신경 전달 속도가 감소, 기억력 및 기분 검사에서 점수가 낮았으며 농도 수준은 0.34~49.19 ppm(중앙값 1.61 ppm, 기하 평균 2.92 ppm)이었다. 1-BP 노출과 신경독성은 용량-의존적-악영향이 있으며, LOAEL 값은 1.28 ppm을 이었다(Li et al., 2010).

1-BP는 산업안전보건법상 특별관리물질 임에도 불구하고 현재 적용되고 있는 25 ppm의 노출기준은 ACGIH 기준 대비 약 250배에 해당하며, Table 5에서 제시한 인체 사례 및 역학조사 연구를 살펴보았을 때 안전한 수준이라고 판단할 수 없다. 따라서 현재의 노출기준인 25 ppm을 안전한 수준이라고 판단되는 ACGIH의 TLV-TWA(0.1 ppm)와 일본 JSOH의 OEL(0.5ppm)의 중간 수준인 0.3 ppm(역학조사 결과 독성 효과가 알려진 0.34 ppm보다 낮게)으로 낮춰야 할 필요가 있다. 다만 2017년 작업환경측정 결과 0.3 ppm을 초과(전체 시료 중 28.34%)하고 있는 작업장에 대한 보다 세밀한 조사와 함께 대체 물질 개발 및 노출기준 개정으로 인한 사회경제적인 영향에 대한 검토가 이루어져야 할 것이다. 피부를 통한 흡수가 이루어지는 것으로 보고되고 있으므로 “Skin” 표시도 제시할 필요가 있다. 발암성(발암성 2, 생식독성 1B)은 현재와 같이 유지토록 한다.

IV. 결 론

1-BP에 대한 역학조사 자료 증가, 취급으로 인한 위험성 증가에 따라 노출기준의 적절성에 대한 검토를 통해 새로운 노출기준을 제시하고자 한다. 문헌 고찰을 통해서 1-BP에 대한 독성 및 역학조사 결과와 ACGIH 등 여러 기관의 노출기준 관련 사항을 비교 검토하였으며 우리나라에서 1-BP 취급 현황을 파악하기 위하여 작업환경 실태조사 자료와 작업환경측정 결과 자료를 활용하였다. 1-BP는 중추신경계 손상, 말초 신경염, 혈액학적 악영향, 발달 및 생식독성 등의 독성이 보고되었다. 1-BP는 산업법상 특별관리물질 임에도 불구하고 현재 적용되고 있는 우리나라 노출기준 25 ppm은 ACGIH의 기준보다 250배 높으므로 지금까지 알려진 역학조사 연구 결과와 비교 시 안전한 수준이라고 할 수 없다. 2017년 작업환경측정 결과 전체 시료 수는 626개, 78개의 업종에서 사용하고 있었으며, 평균은

1.173 ppm(표준편차 2.88)이었다. 우리나라에서 780명으로 추정되는 1-BP를 취급하는 근로자의 건강보호를 위해서 노출기준(TWA)을 역학조사 결과 안전하다고 믿고 있는 수준인 0.3 ppm으로 강화할 필요가 있다. 피부 흡수에 대한 주의를 위해서 “Skin” 표시도 할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). 2017 Guide to Occupational Exposure Values. ISBN 978-1-607260-91-2. 2017
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold Limit Values(TLVs) and Biological Exposure Indices(BEIs). 2020
- Centers for Disease Control(CDC). “Neurologic Illness Associated with Occupational Exposure to the Solvent 1-Bromopropane. New Jersey and Pennsylvania. 2013
- ClinTrials. A 13-week inhalation toxicity study of a vapor formulation of ALBTA1 in the albino rat. Project Number 91190; Document ID Title OAR-2002-0064. 1997
- Deutsche Forschungsgemeinschaft(DFG). List of MAK and BAT Values. 2020
- European Union(EU). “Agreement of the Member State Committee on the Identification of 1-Bromopropane [N-Propyl Bromide] as a Substance of Very High Concern according to Articles 57 and 59 of Regulation(EC) 1907/20061”(PDF). 2012
- Hanley, KW, M Petersen, BO Curwin, et al.. Urinary bromide and breathing zone concentrations of 1-bromopropane from workers exposed to flexible foam spray adhesives. Ann Occup Hyg 2006;50: 599-607
- Hazardous Substances Data Bank. “1-Bromopropane: Human Health Effects”. 2013
- Huntingdon Life Sciences(Huntingdon). A developmental toxicity study in rat via whole body inhalation exposure. Study Number 98-4141; Oocument 10 Title OAR-2002-0064. 2001
- Ichihara G, Kito J, Yu X et al.. 1-Bromopropane, an alternative to ozone layer depleting solvents, is

- dosedependently neurotoxic to rats in long-term inhalation exposure. *Toxicol Sci* 55:116-123. 2000
- Ichihara G, Miller JK, Ziolkowska A et al.. Neurological disorders in three workers exposed to 1-bromopropane. *J Occup Health* 2002;44:1-7
- Ichihara G, Li W, Shibata E et al.. Neurologic abnormalities in workers of a 1-bromopropane factory *Environ Health Perspect* 2004a;112:1319-1325.
- Ichihara G, Li W, Oing X et al.. A survey on exposure level, health status, and biomarkers in workers exposed to 1-bromopropane. *Am J Ind Med* 2004b;45:63-75
- The Japan Society for Occupational Health(JSOH). Recommendation of Occupational Exposure Limits. 2012
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Research on reinforcing field applicability of occupational exposure limits for chemicals. 2018
- Li W, Shibata E, Zhou Z; et al.. Dose-dependent neurologic abnormalities in workers exposed to 1-bromopropane. *J Occup Environ Med* 2010;52:769-777
- Loffe, D, Kampf A. "Bromine, Organic Compounds" in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons. doi: 10.1002/0471238961.0218151325150606.a01. 2002
- Majersik JJ, EM Caravati, JD Steffens. Severe neurotoxicity associated with exposure to the solvent 1-bromopropane(n-propyl bromide). *Clin Toxicol* 2007;45:270-276
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational exposure limits for chemical substances and physical agents (MoEL Public Notice No. 2020-48). 2020
- National Center for Biotechnology Information(NCBI). "1-bromopropane - Compound Summary". PubChem Compound. 2005
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). "Hazard Alert: 1-Bromopropane"(PDF). DHHS Publication Number 2013-150. 2013
- National Toxicology Program. "Report on Carcinogens Monograph on 1-Bromopropane"(PDF). 2013
- North Carolina Department of Labor(NC DoL). "Hazard Alert"(PDF). State of North Carolina. 2014
- Perrone J, SM Marcus, JD Blando, et al.. Neurologic illness associated with occupational exposure to the solvent 1-bromopropane - New Jersey and Pennsylvania, 2007-2008. *Morbid Mortal Week Rep* 2008;57:1300-1302
- Samukawa M, G Ichihara, N Oka, et al.. A case of severe neurotoxicity associated with exposure to 1-bromopropane, an alternative to ozone-depleting or globalwarming solvents. *Arch Intern Med* 2012;172:1257-1260
- Statistics Korea, Statistical classification portal. URL=<https://kssc.kostat.go.kr:8443>, Retrieved 2020
- The Japan Society for Occupational Health(JSOH). Recommendation of Occupational Exposure Limits (2018-2019), *J Occup Health* 2018;60:419-452
- Trout, Doug, N Hudson, D Naomi, D Scott, K Hanley. "1-Bromopropane". National Institute for Occupational Safety and Health. 2013
- Urbina, Ian. "As OSHA Emphasizes Safety. Long-Term Health Risks Fester". *The New York Times*. 2013
- U.S. Environmental Protection Agency(US EPA). "Protection of Stratospheric Ozone: Listing of Substitutes for Ozone- Depleting Substances- n-Propyl Bromide in Solvent Cleaning"(PDF). 2007
- U.S. Environmental Protection Agency(US EPA). "Final Risk Evaluation for 1-Bromopropane". URL=<https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/final-risk-evaluation-1-bromopropane>. 2020

<저자정보>

하권철(교수), 김승원(교수), 피영규(교수), 이나루(연구원)