

수출입식물 훈증 작업자의 브롬화메틸 노출수준 평가

정지연* · 이광용¹ · 조숙자² · 박승현¹

용인대학교, ¹산업안전보건연구원, ²미네소타 보건국

Assessment of Methylbromide Exposure Levels in Fumigation Workers on Import and Export Plant

Jee Yeon Jeong* · Gwang-Yong Yi¹ · Sook-Ja Cho² · Seung-Hyeon Park¹

Yong In University

¹Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

²Minnesota Department of Health

ABSTRACT

Objectives: Methyl bromide is a highly toxic substance that can cause systemic poisoning, neurotoxicity, pulmonary edema. Methyl bromide is a widespread fumigation agent used for import and export quarantine, but there is little data on exposure assessment of workers participating in such fumigation. Therefore, this study aims to investigate the exposure level of methyl bromide among workers and the concentration distribution of methyl bromide in the workplace during fumigation.

Methods: For this study, one wood tent and one container fumigation area in Pusan, and one wood tent fumigation area in Incheon were investigated over three months from June 2001.

Results: Methyl bromide exposure levels for container fumigation workers were from undetected to 1.86 ppm and from undetected to 2.28 ppm for tent fumigation workers as an 8 hr TWA. After opening the container door, the methyl bromide concentration in the container decreased rapidly over time, but the concentration remained over 1 ppm even after about one hour. The concentrations around the tent during its removal were highly affected by wind, but were detected in a range from undetected to 11.97 ppm.

Conclusions: This study confirmed that both container and tent fumigation caused workers to exceed the exposure limit of 1 ppm as an 8 hour TWA. In particular, it could be confirmed that a situation exists in which the worker may be exposed to high concentrations of methyl bromide when opening the container or removing the tent due to the nature of the work. Therefore, it is very important to improve working methods and to wear appropriate personal protective equipment.

Key words: container, fumigation, methyl bromide, tent

1. 서 론

브롬화메틸(methyl bromide)은 무색, 투명한 휘발성 액체로서 상온·상압하에서는 가스상으로 존재한다. 저농도에서는 냄새가 없지만 노출기준의 500배인 500 ppm의 농도에서는 클로로포름과 비슷한 케케묵은

과일 냄새가 난다(Van et. al., 1982; ACGIH, 2017). 1900년대 초반부터 사용하기 시작한 브롬화메틸은 끓는점이 매우 낮은(3.56℃) 물리적 특성으로 인해 제2차 세계대전 당시에는 잠수함이나 항공기의 소화제, 냉매제로 사용하기도 하였으나 치명적인 중독사고가 빈발하여 사용이 중지되었다(ACGIH, 2017). 브롬화메틸은

*Corresponding author: Jee Yeon Jeong, TEL: 031-8020-3208, E-mail: jtop123@naver.com
Department of Occupational and Environmental Health, Yong In University, 134 Yongin daehak-ro Cheoin-gu, Yongin-si 17092

Received: January 12, 2020, Revised: February 25, 2020, Accepted: March 7, 2020

© Jee Yeon Jeong <https://orcid.org/0000-0003-3414-7425>

© Gwang-Yong Yi <https://orcid.org/0000-0002-3141-0024>

© Sook-Ja Cho <https://orcid.org/>

© Seung-Hyeon Park <https://orcid.org/0000-0002-6515-4428>

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.

의약품, 염료 제조과정에서 메틸화를 시키는 물질로 사용되기도 하였고, 1960년 이후부터 토양 훈증제, 곡물, 목재, 과일, 식물 등의 광범위 살충제로 사용되었다(Van et al., 1982). 그러나 최근에는 오존층파괴물질로 알려져 검역, 수출 또는 수입국의 위생 또는 식물위생에 대한 살균 및 살충의 요구조건을 만족시키기 위해 선박에 싣기 전에 실시하는 선적 전처리 용도 등에만 한정적으로 사용되는 추세이다.

브롬화메틸은 전신중독, 신경독성, 폐부종 등을 일으키는 독성이 매우 강한 물질로 무색무취의 기체로서, 특별한 경고 사인이 없이 중독이 일어나는 것이 특징이고 노출 후 증상이 즉시 나타나기보다는 시간이 경과 해서 나타나는 특징을 보이며 치사율이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Torkelson & Rowe, 1981).

따라서 각국에서는 브롬화메틸에 대한 건강영향을 최소화하기 위해 노출기준을 설정하여 작업자의 노출을 줄이고 있다. 우리나라 고용노동부와 미국 산업위생전문가 협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 전신중독, 신경독성, 폐부종뿐만 아니라 더 낮은 농도에서 나타날 수 있는 폐 자극, 눈 및 피부자극을 예방하기 위한 목적으로 8시간 시간가중평균치(Time Weight Average, TWA)로서 1 ppm을 제시하고 있다(ACGIH, 2019; MoEL, 2020). 미국 산업안전보건연구원(National Institute for Occupational and Health, NIOSH)에서는 동 물질을 잠재적인 발암물질로 규정하여 가능하여 가능한 노출은 최소화하도록 하고 있으며(NIOSH, 2010), 미국 산업안전보건청(OSHA, 2020)에서는 최고노출기준(Ceiling)으로 20 ppm을 제시하고 있다.

우리나라에서 브롬화메틸 중독이 공식적으로 보고된 것은 부산지역에서 발생한 수출입 식물 컨테이너 검역 작업자의 중독사건이다(Park et al., 2000). 우리나라 경우 선창에서의 훈증, 야적장이나 제재소에서 이루어지는 목재 천막훈증, 각종 수출입 식물 컨테이너 훈증 등 다양한 훈증작업이 이루어지고 있으나 훈증작업에 참여하는 작업자의 노출평가 자료는 별로 없는 실정이고 실제 작업과정에서 작업자가 어떻게 노출되고, 무엇이 문제이고 또한 어떻게 관리해야 하는지에 대한 자료도 별로 없는 실정이다. 따라서 본 조사연구에서는 훈증작업 방법(컨테이너와 천막 훈증)에 따른 브롬화메틸 작업자의 노출수준, 훈증작업 시 작업장에서 브롬화메틸의 농도분포 특성을 조사한 결과를 제시하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 조사대상

2001년 6월부터 3개월간 부산지역에 소재한 목재 천막훈증 1개소, 컨테이너 훈증작업 1개소와 인천 소재의 목재 천막훈증 1개소를 대상으로 브롬화메틸 작업자의 노출수준 등을 조사하였다.

2. 측정 및 분석

공기 중 브롬화메틸 농도를 평가하기 위해서 미국 OSHA 측정 및 분석방법(OSHA method PV 2040)을 이용하여 시료를 채취 및 분석하였다(OSHA, 2001). 시료채취 매체는 400/200 mg Anasorb 747TM(SKI Inc, USA) 흡착튜브를 사용하여 개인시료 채취기를 이용하여 0.1 L/분 유량으로 개인 및 지역 시료를 채취하였으며, 시료파괴가 일어나지 않도록 총 유량 5 L을 넘지 않도록 시료채취 시간을 조절하였다. 채취된 시료는 즉시 뚜껑으로 밀봉하여 냉장상태로 보관 및 운반한 후 냉동저장 1주일 이내에 분석하였다. 탈착과정에서 발생할 수 있는 시료의 휘발을 막기 위해 가스크로마토그래피(6890N, Agilent Technologies, USA)에서 바이엘을 꽂아두는 트레이(tray)를 냉동시켜 사용하였고, 2 ml의 이황화탄소를 사용하여 30분간 탈착시켜 불꽃이온화검출기가 장착된 가스크로마토그래피를 사용하여 분석하였다. 검량선을 작성하기 위한 표준용액은 1~2 L의 테들라 백에 가스상의 브롬화메틸을 채운 후 가스타이트 실린더를 사용하여 일정량을 채취한 후 5 mL의 이황화탄소 용액에 주입하여 조제하였다. 천막 해체 작업 시 바람의 방향이 주변 공기 중 브롬화메틸의 농도에 영향을 크게 미칠 것으로 판단되어 바람의 방향도 파악하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 작업방법

1) 컨테이너 훈증

컨테이너 작업조건은 Table 1과 같다. 훈증대상에 따라 투약량이 다르고 작업방법에 있어 약간의 차이는 있으나 일반적으로 6단계로 작업이 진행된다.

먼저 준비단계(preparation phase)로 경고표지 부착, 이후 투여될 브롬화메틸이 새지 않도록 밀봉 테이프 로 컨테이너를 봉하는 작업, 가스 실린더와 연결된 에어

Table 1. Fumigation specification of containers and plastic sheets

Variable	Site	A*	B*	C*	D†	E†	F†
Volume(m ³)		59.7	76	67	235.2	1,900	2,100
Commodity		roses	hay	orange	wood	wood	wood
Approximate Load(%)		50	>95	>90			
Application concentration(ppm)		11,800	-‡	15,400	8,800	8,100	8,600
Temp. of container and sheet(°C)		10	-	4.4	-	-	-
Aeration time(hour)		2	24	2	24	24	24
Ventilation method		natural	-	Natural			
Air Volume control(m ³ /h)		90	-	90	NA§	NA	NA

* : Container, †: Plastic sheet, ‡: Not recorded, §: Not applicable

라인을 컨테이너 내부에 설치하는 작업과 컨테이너 내부에서 주입되는 브롬화메틸이 잘 혼합될 수 있도록 송풍기 팬을 설치하는 작업 등으로 컨테이너당 약 20~30분 소요된다.

투입단계(treatment phase)에서는 가스 실린더의 밸브를 통해 나간 브롬화메틸이 증기화가 잘되도록 예열과정을 거쳐 에어라인을 따라 컨테이너 내부에 유입되며, 혼합이 잘되도록 송풍기를 가동한다. 투약시간은 대상물체의 투약량에 따라 다른데 약 5~15분 정도 소요된다.

훈증기간(aeration phase)은 투약된 브롬화메틸에 의해 살충효과가 일어나도록 일정 시간 동안 방치하는 시간으로 순환용 송풍기를 가동하여 컨테이너 내부의 온도를 조절한다. 약 2시간 정도 경과 후 식물검역소 직원의 입회하에 직독식 장비로 잔류농도를 측정하여 잔류농도가 기준에 적합하면 훈증이 성공적으로 이루어진 것으로 간주한다.

개방단계(open phase)는 잔류농도 검사에 합격한 경우 컨테이너 내부에 있는 브롬화메틸의 농도를 낮추기 위해 컨테이너 뒤쪽 쪽에 있는 배기구를 열고, 입구 문을 열어 놓은 단계로 약 1시간 30분 정도가 소요된다.

확인단계(inspection phase)에서는 살충효과가 제대로 나타났는지 확인하기 위해 검역소 직원이 무작위로 표본을 추출하여 육안으로 확인하며 일부는 실험실에서 정밀검사를 하기 위해 가져가기도 한다.

마지막으로 정리단계(management phase)로 일정 시간 개방 후 다시 컨테이너를 밀폐하는 단계로, 컨테이너 순환용 팬을 사용하여 컨테이너 온도를 적정온도로 맞추게 된다.

2) 천막을 이용한 훈증

천막을 이용한 훈증도 컨테이너와 유사하며 일반적으로 다음과 같이 5단계로 이루어진다. 준비단계에서는 적재된 원목을 천막으로 완전히 덮고 천막이 날아가지 않도록 못이나 끈으로 고정시키는 일, 천막 연결부위나 누출부위에 대한 밀봉 테이프를 붙이는 일, 브롬화메틸 주입 및 농도 확인을 위한 에어라인 설치, 경고표지를 붙이는 일이 포함된다.

투약단계에서는 가스 실린더 밸브와 에어라인을 연결한 후 밸브를 열어 브롬화메틸이 천막 내부로 투입되도록 한다. 투약시간은 원목 더미당 약 2~5분 정도가 소요된다.

훈증기간은 보통 24시간(겨울 48시간) 지속되며, 잔류농도를 측정하여 잔류농도 기준을 만족하면 성공적으로 훈증이 이루어진 것으로 간주한다.

천막을 해체하는 작업은 천막을 고정한 못이나 끈, 연결부위 부착 테이프를 제거한 후 천막을 제거하는 작업을 말한다. 경우에 따라서는 천막을 바로 걷지 않고 어느 정도 방치 후 남아있는 브롬화메틸 가스가 날아간 후 천막을 걷기도 한다. 천막을 걷는데 소요되는 시간은 더미의 크기나 수에 따라 다르다.

2. 브롬화메틸 농도

1) 컨테이너 훈증작업

근로자 노출농도를 측정한 결과(Table 2), C 지역에서 근로자 두 명이 8시간 시간가중평균농도로 각각 1.86 ppm, 1.12 ppm으로 모두 우리나라 고용노동부와 미국 ACGIH의 기준인 1 ppm을 초과하고 있었다. A, B 지역의 경우 노출기준을 초과한 경우는 없었는데

Table 2. The results of personal sampling of methyl bromide during container fumigation

Site	Worker	Sampling time(min)	Concentration(ppm)		Work practice
			Results*	TWA [†]	
A	P1	10:55~11:10(15)	3.80	0.42	Preparation, Open, Management
		13:15~13:53(38)			
	P2	10:55~11:10(15)	ND	ND [‡]	Preparation
		13:15~13:53(38)			
	P3	10:55~11:10(15)	1.13	0.12	Preparation, Treatment
		13:15~13:53(38)			
B	P4	12:10~14:25(15)	1.02	0.03	Management
C	P5	13:42~16:40(178)	5.02	1.86	Treatment, Open, Inspection, Management
	P6	13:42~16:40(178)	3.01	1.12	Open, Inspection, Management

*: The concentration in sampling time, [†]: Time weighted average, [‡]: Not detected (LOD: 0.018 ug/sample)

이러한 차이는 브롬화메틸의 노출시간, 작업량 및 작업 내용에 따라 개인노출량 차이가 있기 때문이다. A 지역과 C 지역에서의 훈증작업은 컨테이너 1대를 대상으로 실시되었지만, C 지역 경우 작업 시 훈증이 잘되었는지 육안으로 확인하는 과정이 있었으며, 이 과정에서 작업자들이 컨테이너 안쪽에 있는 박스를 꺼내고 확인작업이 끝난 후 제자리로 옮기는 작업을 하게 되어 훨씬 많이 노출되었던 것으로 판단된다. B 지역 경우 작업자는 컨테이너 문을 열어 에어라인을 제거하고 바로 닫았기 때문에 상대적으로 노출이 적었던 것으로 판단된다. 그러나 이러한 결과는 컨테이너 1대 작업량 기준으로 평가하였기 때문에 하루 작업하는 컨테이너 대수에 따라 노출량은 많은 차이가 있을 것으로 판단된다.

2) 컨테이너 개방 후 내부 농도변화

컨테이너 개방 후 컨테이너 내부의 브롬화메틸 농도 변화를 살펴보기 위해 컨테이너 문 입구 내부에서 약 120~150 cm 높이에서 시간대별로 짝을 이루어 측정한 결과는 Table 3과 같다.

A 지역 측정결과를 보면 컨테이너 한쪽 문을 개방하고 컨테이너 뒤쪽 배기구를 25% 정도 열어 놓은 상태에서(배기구의 공기배출량: 90 m³/h) 개방된 문 입구 안쪽 약 120~150 cm 높이에서 짝을 이루어 측정한 결과 측정치는 매우 유사했다. 문 개방 후 11분이 경과 후 10분간 측정한 농도는 141.55 ppm, 140.38 ppm이었으며, 연속해서 21분간 측정한 농도는 각각 20.80 ppm, 20.38 ppm으로 급격히 감소하였고, 44분이 경

Table 3. Methyl bromide concentration at the inside of container

Site	Fumigation time	Open door	Sampling time(min)	Conc.(ppm)	Ventilation	Wind direction
A	10:55	13:15~14:30	13:26~13:36 (10)	141.55 140.38	Natural ventilation (door opening)	SE*
			13:36~13:57 (21)	20.80 20.38		
			13:59~14:28 (29)	2.30 1.94		
			14:13~14:23 (10)	16.73 - [†]		
			14:15~14:25 (10)	15.29 13.84		
			15:54~16:04 (10)	455.24 421.75		
B	Day before	14:13~14:26	16:04~16:28 (14)	110.50 115.64	Natural ventilation (door opening)	NE [‡]
C	13:45	15:52~16:38				

*: South east, [†]: Breakthrough, [‡]: North east

과해서 29분간 측정된 농도는 2.30 ppm, 1.94 ppm 이었다. 농도감소 추세에서 알 수 있듯이 브롬화메틸은 빠른 속도로 대기 중으로 날아가는 것으로 알 수 있다.

B 지역에서의 브롬화메틸 농도는 하루 전날 혼중한 건초가 빠르게 쌓인 컨테이너로 문을 개방하여 에어 라인을 제거하는 동안 측정된 농도인데 두 컨테이너 모두 노출기준을 초과하는 농도였다.

C 지역에서는 개방 후 2분이 경과 한 후 10분간 측정된 값이 각각 455.24 ppm, 421.75 ppm, 연속해서 14분간 측정된 값이 110.50 ppm, 115.64 ppm이었다. 개방 후 26분이 지난 상태에서도 매우 높은 농도여서 이 기간 동안 혼증여부를 확인하기 위해 대상을 옮기고 쌓는 일은 삼가해야 할 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합적으로 판단할 때 혼증대상, 기온에 따라 브롬화메틸의 잔류농도는 다르지만, A 지역에서 문을 개방하기 전 잔류농도 검사에서 적어도 잔류농

도가 24 g/m³(6,000 ppm), C 지역의 경우는 38 g/m³(9,700 ppm) 이상이 되어야 검사기준에 합격하기 때문에 문 개방시에서는 미국 NIOSH에서 설정 권고하고 있는 IDLH(immediately dangerous to life or health concentration) 250 ppm보다 훨씬 높은 농도이다(NIOSH, 2010). 따라서 컨테이너 문 개방시 브롬화메틸의 농도는 매우 높은 농도 수준이므로 호흡기, 피부 등 직접노출을 피하는 것이 필요하며 호흡보호구도 공기정화식보다는 공기공급식 호흡보호구 착용이 필요해 보이고 문 개방시는 노출시간을 가급적 짧게 해야 할 것이다.

3) 천막혼증 작업

천막을 이용한 목재혼증에서 투약 및 해체 작업시의 작업자의 브롬화메틸 노출농도는 Table 4와 같다.

D 지역 작업자는 원목 한 더미에 천막을 씌운 후 브

Table 4. The exposure concentration of methyl bromide during sheets fumigation

Site	Worker	Date Sampled	Sampling time(min)	Concentration(ppm)		Work practice
				Results*	TWA†	
D	P1	6.21	13:34~13:39(5)	ND‡	ND	Preparation, Treatment
	P2		13:35~13:39(4)	2.01	0.02	Preparation
	P1	6.22	13:45~14:27(42)	2.58	0.23	Removal
	P2		13:46~14:27(41)	13.34	1.14	Removal
E	P1	9.26	15:26~16:10(44)	0.28	0.03	Treatment
	P2		15:56~16:07(10)	ND	ND	Preparation
	P3		15:53~16:07(14)	6.76	0.2	Post warning sign
	P4		15:51~16:11(19)	0.34	0.01	
	P5		15:48~16:11(23)	0.09	0.004	Treatment
E/F (AM/PM)	P1	9.28	10:57~11:44(47)	0.04	0.08	Removal(6 sheets, from 10:30)
			15:15~16:22(67)	0.54		
	P2		10:57~11:44(47)	0.11	0.90	
			15:12~16:18(66)	6.50		
	P3		10:59~11:44(45)	ND	ND	
	P4		10:59~11:44(45)	ND	1.85	
	15:14~16:19(65)	13.64				
E/F (AM/PM)	P5	9.28	11:03~11:44(44)	ND	0.33	Removal(2 sheets from 15:15)
			15:12~16:18(66)	2.38		
	P6		11:03~11:44(41)	0.46	2.28	
			15:13~16:18(65)	16.61		
	P7		11:04~11:44(40)	ND	0.71	
	15:14~16:20(67)	5.11				

*: The concentration in sampling time, [†]: Time weighted average, [‡]: Not detected(LOD: 0.018 µg/sample)

롬화메틸을 투약하는 동안 노출수준을 평가하였는데 8 시간 가중평균치로 환산시 노출농도는 불검출~0.02 ppm이었고, E 지역 작업자는 원목 여섯 더미를 천막을 씌우고 투약 및 경고표지를 부착하는 작업에서 측정된 농도는 불검출~0.2 ppm으로 노출기준(1 ppm) 미만으로 평가되었다. 그러나 E 지역에서 경고표지를 부착했던 한 작업자에서 측정된 농도가 6.76 ppm으로 투약을 담당했던 작업자 농도(0.28 ppm)보다 더 높아 경고표지를 부착하는 과정에서 천막에서 누출된 브롬화메틸에 노출된 것으로 보인다. 따라서 작업자의 브롬화메틸 노출량을 줄이기 위해서는 투약 전에 경고표지 부착 작업이 이루어지거나 병행하는 호흡보호구를 착용한 상태에서 이루어져야 할 것으로 판단된다.

천막을 해체하는 동안 작업자의 노출수준은 D 지역의 경우 8시간 시간가중평균농도를 0.23 ppm~1.14 ppm, 그리고 E/F 지역에서는 불검출~2.28 ppm으로 노출기준을 초과하는 작업자도 있었다.

이를 종합해 볼 때, 전체적으로 투약작업보다는 해체작업 시 더 높은 농도에 노출됨을 알 수 있었다. 그러나 이러한 측정결과가 훈증작업자의 전체 노출량을 대표한

다고 말하기는 무리가 있다. 왜냐하면 개인노출수준에 영향을 미치는 요인이 매우 많기 때문이다. 예를 들면 E 지역에서의 해체작업은 투약 후 2일이 경과된 시점에 해체를 시작했는데 측정을 시작한 시점이 이미 해체작업이 진행된 상태로 고농도에 노출될 우려가 있는 초기시점을 놓친 상태에서 측정했기 때문에 원목 여섯 더미를 해체하고도 검출한계 미만이었으나 오후에는 원목 두 더미를 해체하고도 오후 작업자 6명 중 5명이 작업시간 동안 노출정도가 노출기준을 초과하는 수준이었다. 따라서 당일 작업자의 전체적인 노출수준은 본 평가보다는 높았을 것으로 판단된다.

4) 천막 해체시 브롬화메틸 누출량 평가

훈증이 이루어진 목재 더미가 쌓인 천막을 해체하는 동안 더미로부터 전후좌우로부터 각각 1.0 m~5.0 m 떨어진 거리에서 높이 1.0 m~2.1 m 지점에서 지역시료 채취로 브롬화메틸의 농도를 측정된 결과는 Table 5와 같다. D 지역의 경우 해체작업이 진행되는 동안 바람의 영향으로 오른쪽에서 농도가 4.56 ppm~9.22 ppm으로 왼쪽에서 농도 0.40 ppm~2.32 ppm보다 높았으

Table 5. The concentration of methyl bromide during removal of fumigation sheet

Site	Date Sampled	Removal	Sampling location			Sampling time(min)	Conc.(ppm)	Wind direction
			A*	B†(cm)	H‡(cm)			
D	6.22	14:06~14:27	Right	200	120	13:52~14:40(48)	7.49	SE [§]
			Right	200	120	13:51~14:39(48)	9.22	
			Right	430	210	13:51~14:39(48)	4.81	
			Right	200	120	13:50~14:38(48)	4.56	
			Right	430	210	13:51~14:38(47)	6.94	
			Left	380	145	13:50~14:35(45)	0.40	
			Left	200	164	13:49~14:35(46)	0.59	
			Left	280	160	13:49~14:35(46)	1.94	
			Left	500	120	13:48~14:34(46)	1.19	
			Left	280	160	13:48~14:34(46)	2.32	
			Back	230	167	13:50~14:37(47)	0.96	
F	9.28	15:53~16:16	Front	420	100	13:54~14:42(48)	NDI	NW [¶]
			Right	150	200	15:36~16:22(48)	0.20	
			Right	150	200	15:37~16:22(45)	0.97	
			Left	100	150	15:40~16:22(42)	6.36	
			Left	100	150	15:39~16:22(43)	11.97	
			Front	100	100	16:40~16:22(42)	0.54	

*: Direction of sampling site from quarantine plant, †: Horizontal distance, ‡: Height, §: Not detected(LOD: 0.018 µg/sample), ¶: South east, ¶: North west

며, F 지역의 경우는 반대로 왼쪽에서의 농도가 6.36 ppm~11.97 ppm으로 오른쪽에서의 농도 0.20 ppm~0.97 ppm보다 높았다. 전면에서의 농도는 D 지역의 경우 불검출이었으며 F 지역은 0.54 ppm이었다.

Lee et al.(2001)이 수출입 농산물 방역을 위한 훈증 작업자 8명을 대상으로 실시한 브롬화메틸 노출평가 결과에서는 훈증제 주입작업자(2명)의 노출 평균농도는 0.67 ppm(범위: 0.60~0.76 ppm)이었고, 준비 및 주입가스 제거 작업자(6명)의 노출 평균농도는 2.54 ppm(0.32~4.60 ppm)이었다고 보고하고 있으나 동 작업이 천막 훈증작업인지 컨테이너 훈증작업인지는 확인할 수 없었다. Lee & Shin(2008)의 연구결과에 의하면 컨테이너 훈증작업자 2명에 대한 브롬화메틸 노출수준은 8-TWA로 ND~1.86 ppm을 보고하고 있는데 동 수준은 이번 연구결과와 동일 작업자에 대한 노출수준과 유사하였으며, 천막훈증에서 훈증제 주입작업자 경우는 Lee & Shin(2008)의 연구결과는 ND~0.25 ppm, 그리고 본 연구결과는 ND~2.28 ppm으로 나타나 본 연구결과에서 더 높은 수준에 노출되는 작업자가 있었다. 그러나 본 연구결과와 마찬가지로 훈증작업 단계 중 컨테이너 개방 또는 천막 해체 작업 시 가장 높은 농도로 브롬화메틸에 노출되고 있었다. Tanaka et al.(1991)이 보고한 내용 중 본 연구대상과 유사한 목재 천막훈증 작업 시 작업자의 노출평가 결과를 보면, 훈증제 주입작업자 34명을 대상으로 측정된 브롬화메틸의 농도 범위는 0.1 ppm~21.6 ppm이었고 천막해체 작업자 38명을 대상으로 실시한 측정농도 범위는 0.1 ppm~390 ppm으로 나타나 본 연구결과보다는 훨씬 높은 수준이었다. 그러나 노출수준은 작업방법, 천막으로 덮인 훈증 대상물질의 규모, 작업 시 기상 상황 등에 많이 좌우되므로 본 연구결과를 직접적으로 비교하기는 곤란하다. 그렇지만 일본의 연구결과도 천막 해체작업이 훈증제 주입작업보다 훨씬 높은 수준의 브롬화메틸이 공기 중으로 발생한다는 점을 볼 때 이러한 경향은 모든 연구결과 들에서 같다는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

브롬화메틸의 건강장해는 온실에서 토양 훈증제로 사용하다 중독된 사례, 곡물 저장고를 훈증 하다가 중독된 사례, 견과류 포장공장에서 포장하기 전 훈증 챔버에서 공장 내로 확산되어 중독증상을 보고한 사례 등 주로

고농도 급성 중독이 많이 보고되었다(Ingram et. al., 1951; Van et. al., 1982; Deschamps & Turpin, 1996). 이번 조사에서 컨테이너나 천막 훈증 모두 8시간 시간가중평균농도로 노출기준인 1 ppm으로 초과하는 작업자가 있음이 확인되었다. 특히, 작업자가 고농도의 브롬화메틸에 노출될 수 있는 상황은 컨테이너를 개방하거나 천막을 걷어내는 작업에서 가장 많이 노출될 수 있음을 확인할 수 있었다. 컨테이너나 천막훈증 작업의 경우 작업 특성상 단시간에 고농도로 노출될 우려가 있기 때문에 작업방법의 개선이나 적절한 개인보호구의 착용 필요성이 매우 중요하였다. 컨테이너 작업 경우 컨테이너 개방 후 최소한 두 시간 정도는 지난 후에 작업자가 컨테이너 내에서 작업을 해야 할 것으로 판단되지만, 컨테이너 개방 후 컨테이너 안에서 농도변화 및 배기구 유무에 따른 농도변화 등 추가조사를 통해 적절한 개방시간의 설정에 대한 결론을 도출해야 할 것으로 판단된다. 또한 훈증 작업자의 경우 훈증제 투약 및 컨테이너 문 개방 시 직결식 전면형 방독마스크를 착용하고 있었다. 그러나 이번 평가에서 C 지역의 컨테이너 경우 개방 후 2분이 경과한 상태에서 10분 동안 측정된 브롬화메틸농도는 미국 NIOSH가 규정한 IDLH(250 ppm)보다 약 1.7배 높은 수준이었고 26분이 경과한 시점에서도 약 110 ppm 정도로 높은 수준이었다. 미국 NIOSH 경우 브롬화메틸은 잠재적인 발암물질로 간주하여 가능한 노출을 최소한으로 줄이도록 권고하고 있다는 점과 컨테이너 문 개방시 상당히 고농도의 농도를 노출될 가능성을 고려해보면 호흡보호구의 경우도 공기 공급식 호흡보호구 착용도 적극 검토할 필요성이 있다고 판단된다.

References

- ACGIH(American conference of government industrial hygienist). Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices. 7th ed., Cincinnati, OH, ACGIH; 2017.
- American conference of government industrial hygienist (ACGIH). TLVs[®] and BEIs[®]. Cincinnati, OH, ACGIH; 2019.
- Deschamps FJ, Turpin JC. Methyl bromide intoxication during grain store fumigation. *Occup Med* 1996; 46(1):89-90
- Ingram FR. Methyl bromide fumigation and control in the date-packing industry. *Arch Ind Hyg Occup Med*

- 1951;4(3):193-198
- Lee JS, Lee YH, Shin JH, CHoi JK, O cj, Jung HK. Environmental and biological monitoring of workers exposed to methyl bromide through quarantine fumigation. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2001; 11(3):212-218
- Lee HS, Shin YC. WOrkers' exposure to airborne methyl bromide in the exporting/importing plants and products quarantine company. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2008;18(1):32-40
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Notice 2020-48: Exposure limits for chemical substances and physical agents. MoEL; 2020.
- National institute for occupational and health (NIOSH). Pocket guide to chemical hazards. Cincinnati, OH, NIOSH; 2010.
- Occupational safety and health administration(OSHA). Sampling and analytical methods. [cited 2001 Oct 26]. Available from: URL:https://www.osha-slc.gov/dts/slts/methods/partial/pv2040/2040.html
- Occupational safety and health administration(OSHA). CFR 1910.1000 Table Z-1 Limits for air contaminants. [cited 2020 Feb 18]. Available from: URL:https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1
- Park TH, Kim JI, Son JE, Kim JK, Kim HS, Jung GY, Kim JY. Two Cases of Neuropathy by Methyl Bromide Intoxication during Fumigation. Ann Occu Env Med 2000;12(4):547-553
- Tanaka S, Abuku S, Seki Y, Imamiya S. Evaluation of methyl bromide exposure on the plant quarantine fumigators by environmental and biological monitoring. Industrial health 1991;29:11-21
- Torkelson TR, Rowe VK. Methyl bromide. In: Clayton GD, Clayton FE eds. Patty's industrial hygiene and toxicology, 3rd ed., New York: John Wiley and Sons, 1981. P. 3442-3446
- Van DO, Roosels RD, Lahaye D. Actual hazard of methyl bromide fumigation in soil disinfection. Br J Ind Med 1982;39:140-144

<저자정보>

정지연(교수), 이광용(차장), 박승현(실장), 조숙자(연구원)