

## 메틸브로마이드 훈증제 작업자의 요 중 브로마이드 이온을 이용한 생물학적 노출평가

서정욱\* · 김병권\*\*\* · 김유미\*\*\* · 이세영\* · 김나영\* · 임현주\* · 구동철\*\*\* · 홍영습\*\*\*†

\*동아대학교 환경보건센터, \*\*동아대학교 의과대학 예방의학교실,

\*\*\*양산부산대학교 직업환경의학과

### Exposure Assessment of Biological Monitoring by Urinary Bromide Ion in Methyl Bromide Fumigation Workers

Jeong-Wook Seo\*, Byoung-Gwon Kim\*\*\*, Yu-mi Kim\*\*\*, Se-Young Lee\*,  
Na-Young Kim\*, Hyoun-Ju Lim\*, Dongchul Gu\*\*\*, and Young-Seoub Hong\*\*\*†

\*Environmental Health Center, Dong-A University

\*\*Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University

\*\*\*Department of Occupational & Environmental Medicine, Pusan National University Yangsan Hospital

#### ABSTRACT

**Objective:** Methyl bromide (MB) fumigant has been shown to be fatal to human when was exposed. However, it were still used the significant amount in quarantine disinfection sites. The purposes of this study were to assess the MB exposure status and characteristics by fumigation-related workers and to provide supporting data for management plan.

**Methods:** For this study, the three groups related to fumigation work were composed. A total of 107 workers were directly exposed, 20 field inspectors were indirect, and 20 general quarantines were not exposed. The urinary bromide ion concentrations in each group were analyzed by using HPLC/ICP-MS, and the working characteristics were identified using the structured questionnaire.

**Results:** The urinary bromide ion concentration in the exposed group of fumigation workers was higher than the indirect and non-exposed groups. In the work characteristics of workers, there was a significant tendency to increase urinary bromide ion concentrations with higher fumigation work years ( $\leq 4$  years: 2.84 (1.13-7.11) mg/g cr,  $>4-15$  years: 5.36 (4.37- 6.57) mg/g cr,  $>15-37$  years: 6.69 (5.27-8.49) mg/g cr,  $p=0.034$ ). In the comparison of the average number of working days per month, the more working days, the higher the urinary bromide ion concentration was statistically significant ( $\leq 12.5$  days: 2.59 (1.19-5.65) mg/g cr,  $>12.5-19.25$  days: 5.46 (4.62-6.44) mg/g cr,  $>19.25-27.25$  days: 7.93 (5.93-10.59) mg/g cr,  $p=0.002$ ).

**Conclusion:** This study was the first nationwide survey including biological monitoring in workers exposed to methyl bromide. The results of this study were expected to be used as a reference for workers' health rights in relation to fumigation, prevention of addiction accidents, and safe management plan.

**Key words:** Methyl bromide, fumigant, occupational exposure

†Corresponding author: Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University, 32, Daesingongwon-ro, Seo-gu, Busan, Republic of Korea, Tel: +82-51-240-2888, Fax: +82-51-253-5729, E-mail: yshong@dau.ac.kr  
Received: 14 November 2019, Revised: 16 December 2019, Accepted: 16 December 2019

## I. 서 론

국의 수입된 곡물이나 과일이 유통되기 위해서는 검역법에 의해 반드시 거쳐야 되는 과정이 방역이다. 특히 식품류는 병해충을 제거하기 위해 살균가스를 뿌리는 훈증(fumigation)을 실시하게 된다. 훈증이란 밀폐된 장소에 가스 또는 증기 상태의 유효성분을 채워 병해충이 호흡할 때 기공을 통해 체내에 흡입시켜 치사하게 하는 병해충 방제의 한 영역으로 이때 사용되는 유효성분을 훈증제(fumigant)라고 하며, 훈증제는 증기압, 휘발성, 확산성, 침투성, 흡착성이 높고 잔류성이 낮은 약제의 조건을 갖추고 있어야 한다.<sup>1)</sup>

Methyl bromide (MB)는 1900년도 초반 사과해충 방제약으로 사용된 이래, 검역용 훈증 약제로 전 세계적으로 가장 광범위하게 사용되고 있다. MB는 저농도에서 무색, 무취이나 고농도인 경우에는 클로로포름(Chloroform)류의 냄새가 나는 무색의 불연성 액체 또는 기체이다. 살충뿐 아니라 살균, 제초효과도 있어 토양 훈증제로도 이용되고 있으며, 피훈증물에 신속하고 깊게 침투하는 효과를 보인다. 또한 처리 후에는 탈착되어 잔류되지 않는 특성을 가지고 있어 훈증제의 조건에 매우 부합되는 물질로 취급받고 있다. 주요 용도로는 곡물류, 과일류, 목재, 식품류의 살충 및 훈증제, 소화제, 냉동제, 이온화장치, 양묘의 탈지, 유류추출제 등에 이용된다.<sup>2)</sup>

MB는 몬트리올 의정서에 따라 2015년까지 단계적으로 대체할 것을 권고 받고 있으며, 중독 위험성이 낮은 친환경 훈증제인 Ethyl formate (EF)가 개발되어 사용되고 있지만 국내에서는 여전히 과일류 훈증에 MB의 사용 비중이 더 높은 실정이다. 구체적인 2017년 과일류 훈증제 사용실적으로 28,698건의 소독이 실시되었고, 이 중 MB 사용이 15,246건(53%), EF 사용이 13,452건(47%)으로 나타났다.

MB는 상온 기체 상태로 주 노출 경로는 호흡이다. 호흡을 통해 흡입된 MB는 약 절반이 폐를 통과하여 혈액에 흡수된다. 일부 동물 실험에서 경구 섭취된 물의 MB는 위장을 통과하여 거의 대부분이 몸에 흡수되는 것으로 나타났다. 노출된 MB는 폐 또는 위장에서 혈액을 통해 몸 전체에 신속히 퍼지게 된다. 체내 흡수된 MB의 대부분은 다른 화학 물질로 분해되며 소변 및 호흡을 통해 체내 밖으로 배

출된다.<sup>3)</sup> 이러한 배출 작용은 대개 수분 내 시작되어 며칠 이내에 완료된다. MB는 검역법의 소독 기준에 따라 검역용을 제외한 용도로는 제조, 수입, 판매, 보관·저장, 운반, 사용을 금지하고 있으며 훈증소독 등의 사업·작업장 외에서 높은 수준으로 노출되는 경우는 드물다.

MB와 같은 유해화학물질에 노출된 경우 유해한 건강 영향이 발생할지 여부와 그 건강 영향의 유형 및 심각성은 용량, 노출 기간, 노출 경로(호흡, 섭취, 음주 또는 피부 접촉 등), 노출된 다른 유해물질 및 개인 특성(성, 연령, 영양 상태, 가족 특성, 생활 습관 및 건강 상태)과 같은 요인에 의해 결정된다.

인체에 흡수된 MB는 생체 내에서 알킬화작용과 효소억제작용 등을 통해 급성 폐손상, 신세뇨관 손상, 신경계장해,<sup>4-6)</sup> 피부의 세포독성<sup>7)</sup> 및 유전독성<sup>8,9)</sup> 등 여러 가지 독성효과를 일으키며, 만성 노출되면 말초신경장해를 일으키고 반복 노출 시 혈청 및 소변에 브롬이 증가하여 중추성 운동실조증과 다발성 말초신경염, 시신경염, 정신장애를 일으키는 물질로 알려져 있다.<sup>6,10-12)</sup> 중독증상은 천천히 나타나고 회복된 사람의 경우 현기증, 우울증, 환각증, 근심, 주의력 상실 등의 중추신경장해가 오랫동안 지속되는 것으로 알려져 있다.<sup>13)</sup>

MB 훈증제는 중독될 경우 치명적인 인체 위해성을 보이거나, 대체 약제가 있음에도<sup>14,15)</sup> 여전히 가장 높은 비중으로 사용되고 있으며 관련 작업자에 대한 중독 사례 역시 지속적으로 발생되고 있는 실정이다.

이러한 현황에도 불구하고 MB 중독에 대한 의학 적 실태 파악은 미흡한 상태로, 직업 환경 중 직·간접 노출 가능성이 있는 작업자별 중독에 대한 기반 자료가 부족하여 훈증제 노출자에 대한 건강권 보호, 중독사고 예방 및 훈증 안전을 확보하는데 어려움이 존재한다. 따라서 훈증 관련 작업자별 MB 노출 실태와 특성 파악의 필요성이 제기되며, 이에 대한 관리 대책을 마련하기 위한 과학적 근거 자료가 요구된다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 조사 대상자

본 연구를 위해 훈증 방역 작업과 관련된 3개 집단을 구성하였다. 구체적으로 직접 노출군인 훈증 작업자 107명, 간접 노출군인 현장 검역관 20명, 비노

출근인 일반 검역관 20명에 대한 조사를 실시하였다. 농림축산검역본부(The Korea Animal and Plant Quarantine Agency) 협조를 통해 전국 방역 업체에 등록된 작업자 131명을 대상으로 본 연구와 취지와 목적에 대해 설명하였고, 참여 동의한 대상자 107명을 목표로 하였다. 107명 중 부산 소재 20명을 작업자 상제 대상자로 세부 분류한 뒤 직접 접촉 후 대면 조사를 진행하였다. 그 외 소재 87명은 작업자 대규모 대상자로 구분하였고 각 소속 업체별로 대표자(key person)를 선정하여 조사 과정의 관리를 일임하였다. 현장 검역관은 훈증 방역 작업 현장의 감시·감독의 업무를 수행하는 집단으로서 MB에 간접 노출 가능성이 있다. 직·간접 노출군과의 비교를 위한 집단으로서 훈증 현장 작업에서 배제된 일반 검역관을 대상으로 하였다. 구체적인 조사는 2018년 5월~10월 동안에 실시되었다.

조사는 ‘비작업 후 작업 재개일’, ‘연속 작업 종료일’, ‘비작업 종료일’의 3개 시점을 조작적으로 정의하고 각 시점별 생체시료(요) 채취 및 작업 환경 및 특성에 대한 설문조사를 실시하였다. ‘비작업 후 작업 재개일’은 최소 1일 이상의 휴무 시간을 가진 뒤 다시 작업을 실시하는 시점에 대한 정의로써, 실제 시료 채취 및 설문조사는 훈증 작업 전·후 2회 실시하였다. 작업 전을 1차, 작업 후를 2차 조사로 구분하였다. 특히, 작업 전 체내 브로마이드 이온 농도는 MB 누적 노출 수준의 지표로 활용한다. 또한 작업 전·후의 측정으로 1회 작업에 따른 체내 브로마이드 이온 농도의 증가 여부를 확인한다. ‘연속 작

업 종료일’은 ‘비작업 후 작업 재개일’을 포함하여 최소 2일 이상의 연속 작업 후, 휴무 직전의 정의로써, 당일 최종 작업 후 시점에서 조사를 실시하였다. 이는 연속된 작업으로 인한 체내 브로마이드 이온 농도 증가 여부를 확인하는데 목적이 있다. ‘비작업 종료일’은 ‘연속 작업 종료일’에 대한 연속으로 최소 1일 이상의 휴무 후 다시 작업을 실시하기 직전 시점의 정의이다. 비작업 기간 즉, MB 비노출 시간에 따른 체내 브로마이드 이온 농도 감소 여부를 확인하는 것에 의미가 있다.

전체 조사는 3개 시점, 4회의 생체시료 채취 및 설문조사를 실시하는 것으로 구성하였고, 각 집단별 참여 단계는 Fig. 1과 같다.

2. 생체 시료 채취

요 시료는 오염을 방지하기 위해 대상자에게 채뇨법을 숙지시킨 후 진행하였다. 일시뇨의 채취를 위해, 최초 체외 배출 요는 채취하지 않도록 하고 중간뇨를 전용 Urine cup (Qorpak PLC-03701 Natural Polypropylene Jar with 58-400 White Polypropylene Unlined Cap 120 ml)을 사용하여 10 mL 이상 채취한 뒤, 검사기관으로 이송 전까지 4°C에 보관하였다. 이송된 시료는 요 중 브로마이드 이온 농도(bromide ion concentration) 분석을 위해 전용 Conical tube (CELLTREAT 229412 Centrifuge Tube, 15 mL, Polypropylene)에 5 mL씩 분주하여 -80°C인 deep freezer에 보관하였다. 시료 채취에서 분주까지 2시간을 초과하지 않도록 하였다.

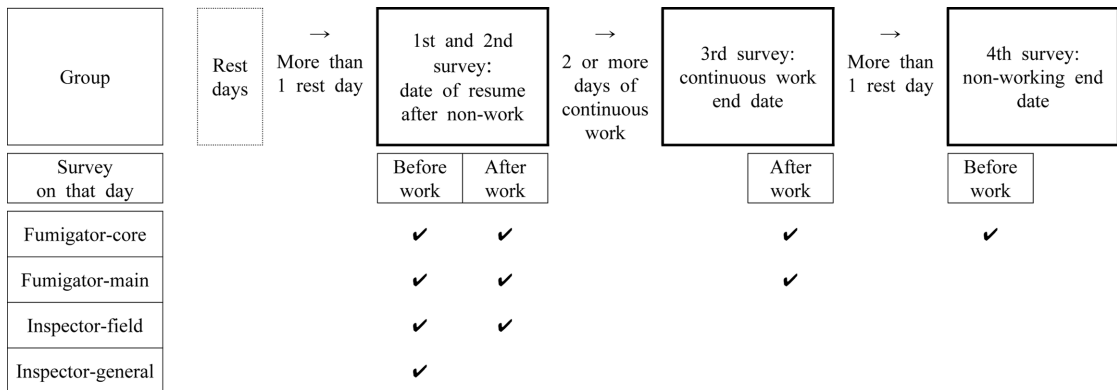


Fig. 1. Investigation steps by group

### 3. 브로마이드 이온 농도 분석

이동상(mobile phase)은 18 mM Nitric acid (electronic grade), 34 mM Ammonium hydroxide (Sigma-Aldrich, USA)를 이용하였으며, 표준용액 Bromide 1,000 mg/L (Sigma-Aldrich, USA)를 사용하여 검량선을 작성하였다. 요 시료는 탈이온수로 20배 희석한 후 0.45 µm 필터로 여과하여 사용하였다. 고성능 액체 크로마토그래프/유도결합 플라즈마 질량분석기(HPLC/ICP-MS, high-performance liquid chromatography/Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer; Agilent Technologies 1260 series/Agilent Technologies 7700 series ICP/MS; Agilent Technologies, CA, USA)를 이용하여 요 중 브로마이드 이온 농도를 측정하였다.

### 4. 통계 분석

요 중 브로마이드 이온 농도는 치우친 분포(skewness >0), 각 시점별 집단의 geometric mean (GM), 95% confidence interval (95% CI)을 제시하였다. 1차 작업 전 농도에 대해 집단 간 차이를 비교하기 위해 분산분석(ANOVA, analysis of variance)를 실시하였다. 또한 집단 내 특성에 따른 농도 비교 및 특성별 집단 간 비교도 함께 실시하였다. 집단 내 각 시점별 농도 변화량과 시점에 따른 집단 간의 농도 차이는 선형혼합모형(linear mixed model)을 이용하여 평가하였다. 추정된 농도 단위는 요 중 크레아티닌

(creatinine)에 대해 보정된 결과이며, 정상 기준치인 300~3000 mg/L를 벗어난 대상자들은 분석에서 제외하였다. 모든 검정은 유의수준 5%하에서 실시되었다. 통계 분석은 SAS (Version 9.4, SAS Institute, Cary, NC)를 이용하였다.

## III. 결 과

### 1. 요 중 브로마이드 이온 농도 분포

작업자 전체 조사 대상자는 107명이었다. 조사 시점별로 107명 중 2차 작업 후 조사 참여 대상자는 104명, 3차 연속 작업 종료일은 69명으로 확인되었다. 4차 비작업 종료일 조사는 상세 대상자 20명 중 3명이 참여하였다.

Table 1의 요 중 브로마이드 이온 농도의 분포를 살펴보면, 작업자의 기하평균(95% 신뢰구간)에서 작업 전이 4.92(3.81-6.35) mg/g cr로 작업 후 5.14(4.45-5.94) mg/g cr로 증가하였고, 연속 작업 종료일에서도 6.79(5.71-8.07) mg/g cr 수준으로 작업일에 따라 농도가 증가한 것을 확인하였다. 95 백분위수를 살펴볼 때, 작업 전 17.24 mg/g cr, 작업 후 16.83 mg/g cr로 유사하였고, 연속 작업 종료일의 경우 25.98 mg/g cr로 상당 수준 증가한 것으로 나타났다. 중심위치 추정치와 마찬가지로 상위 고농도자들의 농도 수준 역시 작업일에 따라 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 전체 조사 시점에서 최대값은

Table 1. Distribution of urinary bromide ion concentration

(mg/g cr)

Group	Investigation	n	Mean±std	GM (95% CI)	Median (range)	P25	P75	P90	P95	P99
Fumigator	1st: before work on resume date	107	7.22±6.44	4.92 (3.81-6.35)	5.61 (<LOD-41.85)	3.41	9.26	12.61	17.24	36.54
	2nd: after work on resume date	104	6.58±4.66	5.14 (4.45-5.94)	5.29 (0.55-22.63)	3.31	8.90	13.49	16.83	19.03
	3rd: continuous work end date	69	8.98±8.10	6.79 (5.71-8.07)	6.27 (2.04-47.42)	4.22	11.36	17.73	25.98	47.42
	4th: non-working end date	3	11.78±6.13	10.82 (3.16-37.05)	9.45 (7.15-18.73)	7.15	18.73	18.73	18.73	18.73
Inspector-field	1st: before work on resume date	20	4.48±3.25	3.48 (2.45-4.93)	3.94 (0.87-11.52)	1.84	5.57	10.40	11.36	11.52
	2nd: after work on resume date	20	4.32±2.83	3.44 (2.39-4.94)	3.92 (0.49-11.63)	2.95	4.86	8.92	11.29	11.63
Inspector-general	1st: before work on resume date	20	4.21±2.43	3.64 (2.79-4.73)	4.26 (1.12-11.51)	2.40	5.23	6.94	9.54	11.51

LOD: limit of detection; Substitute value of LOD/2 for all of them (n=2).

작업 전의 41.85 mg/g cr이 가장 높은 수준으로 측정되었다.

현장 검역관의 경우 작업 전 3.48(2.45-4.93) mg/g cr로 작업 후 3.44(2.39-4.94) mg/g cr와 유사하였다. 최대값 역시 각 11.52, 11.63 mg/g cr로 유사하였다. 일반 검역관은 3.64(2.79-4.73) mg/g cr로 현장 검역관과 큰 차이는 없었으며 최대값 역시 11.51 mg/g cr로 유사하였다.

### 2. 인구학적 특성에 따른 작업 전 요 중 브로마이드 이온 농도

인구학적 특성에 따른 작업 전 요 중 브로마이드 이온 농도는 Table 2와 같다.

누적 노출 수준의 지표인 방역 작업 전 기하평균(95% 신뢰구간)은 작업자의 경우 4.92(3.81-6.35) mg/g cr로 현장 검역관 3.48(2.45-4.93) mg/g cr, 일반 검역관 3.64(2.79-4.73) mg/g cr와 비교해 높은 수준이었으나 통계적으로 유의하다고 할 충분한 근거는 없었다(p=0.343).

작업자는 남성의 비율이 99% 이상이었으며 여성 대상자는 1명에 불과하여 추정이 불가능하였다. 한편, 현장 검역관과 일반 검역관의 남녀 농도 차이는 통계적으로 유의하지 않았으며(p>0.05), 연령에 있어서도 일치된 경향성은 없었으며 통계적인 유의성도 관찰되지 않았다. 반면 작업자는 고연령층일수록 농도가 증가하는 경향성이 나타났으며(≤29: 3.47(2.04-

5.90) mg/g cr, 30-39: 3.01(1.34-6.77) mg/g cr, 40-49: 6.26(4.93-7.96) mg/g cr, ≥50: 6.90(5.35-8.89) mg/g cr) 경계수준의 유의성을 가졌다(p=0.051). 이를 반영한 연령 보정 기하평균은 작업자가 5.08(3.98-6.48) mg/g cr, 현장 검역관 3.87(2.23-6.71) mg/g cr, 일반 검역관 4.10(2.36-7.14) mg/g cr 로 통계적인 유의성은 없었다.

작업 전 요 중 브로마이드 이온 농도에서 간접 노출군인 현장 검역관과 비노출군인 일반 검역관은 유사한 수준이었고, 상대적으로 작업자가 가장 높은 것으로 나타났으나 통계적으로 유의한 수준이라 볼 수 없었다.

### 3. 작업 특성에 따른 작업 전 요 중 브로마이드 이온 농도

작업 특성에 따른 집단별 요 중 브로마이드 이온 농도는 직접 노출군인 작업자 집단 내 비교가 주요하며 Table 3에 제시하였다. 훈증 작업 역할 분류에서 작업 주입이 6.29(4.11-9.62) mg/g cr로 가장 높았고, 작업원 5.80(4.07-8.26) mg/g cr, 방제기술자 4.28(2.89-6.34) mg/g cr 순으로 나타났다. 훈증 작업에 대한 근속 연수가 높을수록 농도가 증가하는 뚜렷한 경향성이 나타났다(≤4년: 2.84(1.13-7.11) mg/g cr, >4-15년: 5.36(4.37-6.57) mg/g cr, >15-37년: 6.69(5.27-8.49) mg/g cr, p=0.034). 다중비교 결과 4년 이하인 경우에 비해 16년 이상에서의 농도가 통

**Table 2.** Urinary bromide ion concentration according to demographic characteristics (mg/g cr)

		Fumigator			Inspector-field			Inspector-general			p-value
		n	GM(95% CI)	c r	n	GM(95% CI)	c r	n	GM(95% CI)	c r	
Total	Crude	107	4.92(3.81-6.35)	20	3.48(2.45-4.93)	20	3.64(2.79-4.73)			0.343	
	Age-adjusted		5.08(3.98-6.48)		3.87(2.23-6.71)		4.10(2.36-7.14)			0.566	
Sex	Male	106	4.89(3.77-6.33)	10	2.89(1.79-4.66)	16	3.65(2.87-4.65)			0.330	
	Female	1	9.26(-)	10	4.19(2.35-7.47)	4	3.58(0.74-17.37)			0.623	
	p-value		-		0.276		0.973				
Age (year)	≤29	12	3.47(2.04-5.90)	7	3.91(1.94-7.88)	4	3.45(0.66-17.96)			0.951	
	30-39	30	3.01(1.34-6.77)	4	3.54(0.55-22.96)	6	3.57(2.15-5.94)			0.973	
	40-49	32	6.26(4.93-7.96)	<sup>a</sup> 7	3.00(1.63-5.51)	<sup>b</sup> 9	3.67(2.61-5.17)		<sup>a</sup>	0.008	
	≥50	33	6.90(5.35-8.89)	2	3.72(-)	1	4.55(-)			0.432	
	p-value		0.051		0.938		0.981				

c: column grouping by post-hoc

r: row grouping by post-hoc

<sup>abc</sup>: Bonferroni post-hoc, estimates with the same letter are not significantly different

**Table 3.** Urinary bromide ion concentration according to working characteristics on the 1st and 2nd survey date (mg/g cr)

		Fumigator		Inspector-field		p-value	
		n	GM(95% CI)	c	n		GM(95% CI)
Fumigation task role (multiple responses)	Head of work	17	6.29(4.11-9.62)				
	Worker	23	5.80(4.07-8.26)				
	Control engineer	65	4.28(2.89-6.34)				
	Short-term worker	1	7.64(-)				
	p-value		0.640				
Fumigation work tour (year) (Including previous locations)	T1 (≤4)	27	2.84(1.13-7.11)	<sup>b</sup>	10	3.79(2.17-6.62)	0.574
	T2 (>4-15)	44	5.36(4.37-6.57)	<sup>ab</sup>	2	2.58(-)	0.156
	T3 (>15-37)	36	6.69(5.27-8.49)	<sup>a</sup>	8	3.36(2.04-5.55)	0.014
	p-value		0.034			0.808	
Average number of working days per month	T1 (≤12.5)	31	2.59(1.19-5.65)	<sup>b</sup>	12	5.07(3.35-7.66)	<sup>a</sup> 0.122
	T2 (>12.5-19.25)	44	5.46(4.62-6.44)	<sup>a</sup>	4	1.88(0.82-4.35)	<sup>a</sup> <.001
	T3 (>19.25-27.25)	32	7.93(5.93-10.59)	<sup>a</sup>	3	2.16(0.44-10.52)	<sup>a</sup> 0.011
	p-value		0.002			0.022	
Non-working days before resume date	T1 (1)	30	6.95(5.05-9.58)		5	3.08(1.85-5.12)	0.046
	T2 (2-4)	32	5.62(4.39-7.19)		4	1.62(0.64-4.12)	0.001
	T3 (5-15)	30	3.48(1.55-7.81)		6	3.71(1.52-9.10)	0.902
	p-value		0.146			0.189	
Working hours	T1 (≤3)	25	3.19(1.19-8.58)		9	3.37(1.79-6.34)	0.925
	T2 (>3-7)	52	5.06(4.10-6.26)		5	2.63(1.04-6.66)	0.072
	T3 (>7-10)	28	6.66(5.08-8.73)		6	4.60(2.34-9.05)	0.242
	p-value		0.133			0.486	
Fumigation task type (multiple responses)	Warehouse	11	4.05(2.50-6.58)		1	2.46(-)	-
	silo	1	1.68(-)				
	Ship	2	1.52(-)				
	container	56	3.72(2.39-5.78)		14	3.36(2.11-5.36)	0.747
	Tent	52	6.89(5.57-8.53)		7	3.05(1.45-6.42)	0.011
	Others	1	11.10(-)				
p-value		0.094			0.912		
Fumigation task classification (multiple responses)	Pre-dosing	56	4.85(4.03-5.84)				
	Dosing	68	4.57(3.12-6.70)		4	2.73(1.23-6.09)	0.521
	Opening	50	5.70(4.51-7.20)				
	Others	6	8.20(5.20-12.92)		17	3.68(2.47-5.47)	0.026
p-value		0.523			0.477		
Fumigation object (multiple responses)	Fruits and Vegetables	39	5.07(4.02-6.39)		7	1.93(1.13-3.29)	<sup>a</sup> 0.002
	Breeding plants	2	4.75(-)		2	3.92(-)	<sup>a</sup> 0.523
	Grains	2	4.01(-)		1	5.77(-)	<sup>a</sup> -
	Wood and bamboo	57	4.91(3.12-7.73)		12	4.12(2.71-6.26)	<sup>a</sup> 0.557
	Sundries	1	4.01(-)		1	11.52(-)	<sup>a</sup> -
	Others	6	3.66(1.65-8.14)				
	p-value		0.996			0.048	
MB usage (kg)	T1 (≤13.2)	40	5.32(4.15-6.83)				
	T2 (>13.2-47.7)	35	3.29(1.66-6.54)		4	4.87(1.47-16.11)	0.702
	T3 (>47.7)	30	6.89(5.09-9.31)		9	4.06(2.45-6.74)	0.082
	p-value		0.075			0.667	

c: column grouping by post-hoc

<sup>abc</sup>: Bonferroni post-hoc, estimates with the same letter are not significantly different

T1, T2, T3: tertile of fumigation worker observations by factors

계적으로 유의하게 높았다. 월 평균 작업 일수에서도 동일하게 작업일이 많을수록 농도가 통계적으로 유의하게 증가하였다( $\leq 12.5$ 일:  $2.59(1.19-5.65)$  mg/g cr,  $>12.5-19.25$ 일:  $5.46(4.62-6.44)$  mg/g cr,  $>19.25-27.25$ 일:  $7.93(5.93-10.59)$  mg/g cr,  $p=0.002$ ). 1차 조사 이전 비작업 일수가 짧을수록 상대적으로 농도가 높아지는 경향성이 확인되었고(1일:  $6.95(5.05-9.58)$  mg/g cr, 2-4일:  $5.62(4.39-7.19)$  mg/g cr, 5-15일:  $3.48(1.55-7.81)$  mg/g cr,  $p=0.146$ ), 1차 조사일의 근무 시간이 길수록 농도가 증가하는 경향을 보였으나 통계적인 유의성은 없었다( $\leq 3$ 시간:  $3.19(1.19-8.58)$  mg/g cr,  $>3-7$ 시간:  $5.06(4.10-6.26)$  mg/g cr,  $>7-10$ 시간:  $6.66(5.08-8.73)$  mg/g cr,  $p=0.133$ ). 당일 컨테이너 방역 작업이 전체의 45.5%로 가장 많았고 농도는  $3.72(2.39-5.78)$  mg/g cr로 관측되었다. 천막 방역 작업의 비율은 42.3%이었고 농도는  $6.89(5.57-8.53)$  mg/g cr로 컨테이너 작업과 비교해 상대적으로 높은 수준이었다. 방역 대상물은 목재 및 축재류(53.3%)와 과일 및 채소류(36.4%)가 주를 이루었고 각각  $4.91(3.12-7.73)$ ,  $5.07(4.02-6.39)$  mg/g cr로 방역 대상물에 따른 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다( $p=0.996$ ). 작업 중 MB 사용량에 대해  $>47.7$ kg에서 농도가  $6.89(5.09-9.31)$  mg/g cr로 가장 높았으나  $\leq 13.2$  kg에서  $5.32(4.15-6.83)$  mg/g cr,  $>13.2-47.7$ 에서  $3.29(1.66-6.54)$  mg/g cr로 나타나 선형적인 경향성은 나타나지 않았고 경계수준의 유의성이 있었다( $p=0.075$ ).

현장 검역관의 방역 작업 특성 수준에 따라 통계적인 유의성이 확인되지 않았으며, 사전 추론된 특성별 세부 가설과는 역의 결과가 다수 나타났다.

직접 노출군인 작업자의 근속 연수가 길수록, 월 평균 작업일이 많을수록, 일 작업 시간이 길수록 요 중 브로마이드 이온 농도가 증가하는 뚜렷한 경향성이 나타났다. 반면 간접 노출군인 현장 검역관의 농도는 방역 작업 형태와 무관한 것으로 확인되었다.

#### 4. 조사 시점 간 요 중 브로마이드 이온 농도 변화량의 분포

조사 시점 간 요 중 브로마이드 이온 농도의 변화량은 Table 4에 제시하였고,  $i$ 가 4회의 조사 차수를 의미할 때  $i-(i-1)$ ;  $i=2, 3, 4$  즉, 각 회차에서 직전 회차와의 농도 차이를 이용하였다.

1일 작업에 의한 농도 변화량에 대한 지표로 2차 조사인 비작업 후 작업 재개일에서의 작업 후 농도와 1차 조사인 작업 전의 농도 차이를 산출하였고, 산술평균 $\pm$ 표준편차에 의한 작업자의 중심위치를 추정된 결과  $-0.56\pm 4.52$  mg/g cr로 작업 전의 평균 농도가 조금 더 높은 것으로 나타났다. 해당 중심위치 추정치  $\mu_0=0$ 에 대한 검정 결과  $p=0.209$ 로 변화량이 0이 아니라고 판단할 통계적 근거는 없는 것으로 확인되었다. 한편, 3차 조사인 연속 작업 종료일의 농도와 2차 조사의 차이는  $1.55\pm 6.08$  mg/g cr 수준으로 연속 작업 종료일의 평균 농도가 상대적으로 더 높은 것으로 나타났다. 또한 이러한 농도 변화량의

**Table 4.** Distribution of changes in urinary bromide ion concentrations (mg/g cr)

Group	Difference Between Survey Points	N	Mean $\pm$ std	p-value	Median (range)	P25	P75	P90	P95	P99
Fumigator	2nd-1st	104	$-0.56\pm 4.52$	0.209	-0.14 (-25.02 to 10.39)	-2.22	1.40	3.78	6.48	10.11
	3rd-2nd	68	$1.55\pm 6.08$	0.040	0.69 (-15.88 to 30.59)	-0.31	3.20	8.22	11.87	30.59
	4th-3rd	3	$-4.16\pm 11.72$	0.601	0.97 (-17.57 to 4.10)	-17.57	4.10	4.10	4.10	4.10
Inspector-field	2nd-1st	20	$-0.16\pm 1.85$	0.705	-0.17 (-5.44 to 2.66)	-0.69	0.90	2.06	2.41	2.66

1st and 2nd survey: date of resume after non-work  
 3rd survey: continuous work end date  
 4th survey: non-working end date  
 p-value: for  $H_0:\mu_0=0$

**Table 5.** Comparison of urinary bromide ion concentration levels between survey points (mg/g cr)

Group	Least Squares Means; GM(95% CI)				p-value
	1st: before work on resume date	2nd: after work on resume date	3rd: continuous work end date	4th: non-working end date	
Fumigator	6.12(5.13-7.30) <sup>a</sup>	6.95(5.81-8.30) <sup>a</sup>	6.98(5.71-8.53)	9.24(4.41-19.36)	0.248
Inspector-field	3.55(2.36-5.34) <sup>b</sup>	3.41(2.27-5.14) <sup>b</sup>			0.830
Inspector-general	3.86(2.56-5.80) <sup>b</sup>				
p-value	0.015	0.002			

<sup>abc</sup>: column grouping by Bonferroni post-hoc, estimates with the same letter are not significantly different

AR1 (first order auto correlation) assumption in covariance matrix; adjusted by age; estimation confidence limit exists because sample size is insufficient (especially, non-working end date n=3)

Adjusted p-value for difference between Fumigator 3rd and Inspector-field 1st of least squares means: 0.005

Adjusted p-value for difference between Fumigator 3rd and Inspector-field 2nd of least squares means: 0.003

Adjusted p-value for difference between Fumigator 3rd and Inspector-general 1st of least squares means: 0.020

평균은 통계적으로 유의하였다( $p=0.040$ ). 비작업 종료일의 4차 조사 참여자는 3명에 불과하여 추정치의 정도(precision)에 한계가 있다. 3차 조사와의 차이는  $-4.16 \pm 11.72$  mg/g cr 수준으로 비작업으로 기간에 따른 농도가 상당 수준 감소한 것으로 볼 수 있으나 통계적인 유의성은 없었다( $p=0.601$ ).

현장 검역관의 2차 조사와 1차 조사와의 차이는  $-0.16 \pm 1.85$  mg/g cr 수준이었고 통계적인 유의성은 없었다.

훈증 작업 정도에 따른 요 중 브로마이드 이온 농도 변화량을 살펴본 결과, 1회 훈증 작업 전·후의 통계적으로 유의한 증감은 발견되지 않았으나 평균 2.73일 연속 작업 후의 농도는 유의하게 증가한 것으로 나타났다.

### 5. 집단 내 조사시점 비교 및 조사시점별 집단 비교

집단 내 조사 시점 간 농도 변화량과 시점별 작업자와 검역관의 농도를 비교하기 위해 Table 5에 선행혼합모형 분석을 실시하였다. 검역관의 경우 3차 조사인 연속 작업 종료일과 4차 조사인 비작업 종료일에 대한 관측치는 없으므로 교호작용 효과는 모형에 내 포함하지 않았다. 작업자의 연령을 보정한 1차 조사의 최소제곱평균(기하평균)은 6.12(5.13-7.30) mg/g cr로 현장 검역관 3.55(2.36-5.34) mg/g cr 및 일반 검역관 3.86(2.56-5.80) mg/g cr와 통계적으로 유의한 차이가 있었다( $p=0.015$ ). 작업자 내 시점별 농도는 3차 조사까지 증가하는 것으로 나타났으나

통계적으로 유의한 차이는 없었다( $p=0.248$ ).

## IV. 고 찰

본 연구에서는 전국의 MB 훈증 방역 작업자를 대상으로 작업 특성 요인에 따른 요 중 브로마이드 이온 농도를 제시함으로써 그 실태를 파악하고자 하였다.

체내 브로마이드 이온의 주 배출원은 요이지만, MB 노출의 생체지표로 요 중 브로마이드를 이용한 연구는 혈액, 혈청에 비해 상대적으로 부족한 수준이다. 일부 연구에서는 대기 중 MB의 농도와 요 중 브로마이드 농도와의 상관성을 보고하고 있다.<sup>16,17</sup> 한편, Lee 등(2001)은 혈청과 요 중 브로마이드 이온 농도를 동시에 분석하였고 두 개 관측값의 상관계수(Pearson's correlation coefficient)가 0.890로 높은 수준의 선형적 관련성이 있음을 제시하였다.<sup>18</sup> MB노출의 바이오마커로 혈액 또는 혈청 중 브로마이드 이온 농도가 직접적인 지표로 활용될 수 있으나<sup>18-24</sup> 요 시료 역시 다양한 연구에서 지표로써 활용되고 있다.<sup>17,18,20,23,25</sup>

요 중 브로마이드 이온 농도는 흔히 gas chromatography와<sup>23,25</sup> ion chromatography,<sup>18,25</sup> ICP-MS<sup>26,27</sup> 등으로 분석되었다. 본 연구에서는 US EPA (1997), Wang 등(2008)의 방법을 적용, 참고하여 HPLC/ICP-MS로 분석하였다.<sup>27,28</sup>

본 연구에서 누적 노출의 지표로 1차 조사인 비작업 후 작업 재개일의 작업 전 요 중 브로마이드 이



은 농도는 작업자가 상대적으로 높은 수준이었다. 구체적으로 연령 보정 기하평균을 살펴보면, 노출군인 작업자가 5.08 mg/g cr로 간접 노출군인 현장 검역관의 3.87 mg/g cr, 비노출군인 일반 검역관 4.10 mg/g cr에 비해 높았다. 하지만 통계적 유의성은 없는 것으로 나타났다. 일부 연구에서 MB 훈증 방역 작업자의 생체 시료 중 브로마이드 이온 농도 노출 수준을 확인하였는데, Lee 등(2001)은 작업자로 구성된 노출군 11명의 요 중 농도의 산술평균을 35.56 mg/L, 비노출군 21명을 4.74 mg/L로 제시하였고 통계적으로 유의한 차이가 있음을 보고하였다 ( $p < 0.001$ ).<sup>18)</sup> 본 연구와 마찬가지로 작업자의 농도 수준이 비노출군과 비교해 상대적으로 높았던 결과는 일치하였다. 하지만 평균 35.6세 남성 작업자로 구성된 Lee 등(2001)의 평균 농도 수준은, 43.8세로 남성(1명 여성 포함)으로 구성된 본 연구와 비교해 매우 높은 수준으로 나타났다.<sup>18)</sup> 최대값 역시 94.56 mg/L로 2배 이상 높은 수준이었다. 산업안전보건연구원(KOSHRI, The Korea Occupational Safety & Health Research Institute)에서는 2000년 22개 업체 144명 작업자에 대한 역학조사를 실시하였고 사업장별 요 중 농도의 평균이 5.04-37.8 mg/L로 본 연구와 비교해 다소 높은 수준으로 제시하였다.<sup>20)</sup> 국외 연구 중 Tanaka 등(1991)은 18-62세로 구성된 251명 작업자의 요 중 농도 기하평균을 9.0 mg/L, 18-65세로 구성된 379명 일반 근로자의 산술평균을 6.3 mg/L로 보고하였다.<sup>17)</sup> 이 때 일반 근로자의 95% 신뢰구간 상한 10 mg/L를 초과하는 작업자의 비율은 46.6%이었다. 본 연구에서도 현장 검역관 및 일반 검역관의 연령을 보정한 95% 신뢰구간 상한은 5.99 mg/g cr이었고 작업자의 38.1%가 이를 초과하여 유사한 결과를 보였다. Koga 등(1991)은 36명의 노출 작업자의 평균을 13.3 mg/L, 비노출군 6명의 평균을 7.1 mg/L로 제시하였다.<sup>25)</sup> MB의 직업적 노출에 대한 다른 연구로 Yamano 등(2011)은 17년간 18-64세로 구성된 MB 제조업체 작업자에 대한 요 중 브로마이드 이온 농도를 분석하였다.<sup>23)</sup> 제조 공정 중 노출 가능성과 양상에 따라 합성(synthesis), 충전(filling), 기타 3개 집단으로 구분하였을 때, 각 요 중 농도의 중앙값은 13.0, 11.9, 7.2 mg/g cr로 노출 가능성이 적은 기타 집단이 통계적으로 유의하게 낮은 농도 수준을 보였다.

본 연구를 포함한 일련의 연구들은 수행 시점과 요 중 브로마이드 이온 농도 분석에 사용된 기기 및 방법이 상이하나, 노출군인 MB 훈증 방역 작업자가 비노출군에 비해 상대적으로 높은 농도 수준을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

작업자의 노출 특성에 따른 요 중 브로마이드 농도 수준을 살펴보면, 근속 연수가 길수록, 월 평균 작업일이 많을수록, 일 작업 시간이 길수록 농도가 증가하는 뚜렷한 경향성이 나타났다. 해당 요인은 MB 노출 빈도에 영향을 주는 작업 특성으로 분류될 수 있다. 특히 농도 수준을 종속변수로 하고 본 연구에서 조사된 작업 특성을 독립변수 한 일반화선형모형(generalized linear model) 결과 월 평균 작업일의 결정계수(coefficient of determination)가 상대적으로 가장 높았다. 즉, 작업자의 월 평균 작업일이 MB 노출에 따른 요 중 브로마이드 이온 농도의 가장 주요한 영향 요인으로 파악된다.

상은 기체 상태인 MB는 훈증 방역 공정 과정에서 대기 중으로 노출될 수 있으며, 작업자가 흡입하게 됨으로써 수용체 노출이 발생한다. 작업 환경 중의 MB 노출은 훈증 방역 대상, 작업 장소 및 방법에 따라 양상이 다르게 나타날 수 있다. 본 연구의 작업 특성을 살펴보면, 작업 장소는 컨테이너(45.5%)와 야적장의 천막(42.3%)이 주를 이루었고, 작업 대상물은 과일 및 채소류(36.4%)와 목재 및 죽재류(53.3%)가 다수였다. 부피가 큰 목재 및 죽재류의 경우 대부분이 야적장 또는 목재소에서 천막 훈증(63.2%)이 실시되고 있었다. 과일 및 채소류는 상대적으로 컨테이너 훈증의 비율이 더 높았다(60.6%). 다만 본 연구의 작업 특성은 조사일 수행 작업에 대한 것이며, 작업자는 동일 작업만을 수행하는 것은 아니므로 인자 수준(factor level)의 명확한 분할(partition)을 담보하는 지표로는 한계가 있을 수 있다. 하지만 조사 결과, 작업 대상물과 훈증 방법은 업체별로 고정되어 있는 경우가 대다수로 작업자의 주(main) 작업 특성에 대한 지표로서 의미부여는 가능할 것으로 판단된다. 훈증 공정은 경고표지, 부착, 투약, 훈증, 확인 및 정리의 단계로 구분될 수 있는데,<sup>29)</sup> Lee 등(2008)은 훈증 장소(천막, 컨테이너), 작업 방법(개인, 지역, 단시간), 업무 형태(투약, 개방)에 따라 대기 중 MB 농도를 측정하여 제시하였다.<sup>30)</sup> 여기서 작업자 개인 측정의 결과로서 (목재)천막 훈

중의 8시간 시간가중 평균농도(TWA, time weighted average)의 산술평균을 1.98 ppm, 기하평균을 0.23 ppm, 컨테이너는 각 0.32, 0.09 ppm 로 보고하였다. 천막 훈증의 산술평균이 컨테이너와 비교해 약 6배 높은 결과는, 본 연구 중 천막 훈증 작업자의 요 중 브로마이드 이온 농도가 6.89 mg/g cr, 컨테이너 훈증이 3.72 mg/g cr로 나타난 것과 상관성을 가질 수 있다(p-value of Student's t-test: 0.013). 또한 업무 형태에 따라 Lee 등(2008)은 천막 공정의 투약에서의 대기 중 MB의 산술평균이 0.12 ppm, 개방 2.55 ppm 이었고, 컨테이너 공정의 투약 0.09 ppm, 개방 0.92 ppm으로 제시하였다.<sup>30)</sup> 훈증 공정에서 투약에 비해 개방 작업의 MB 농도가 매우 높은 것으로 나타났다. 그 중 천막 훈증 개방 시의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서도 투약 작업에 주로 참여한 작업자의 요 중 브로마이드 이온 농도인 4.57 mg/g cr과 비교해 개방을 포함해 투약 후 정리 작업을 수행한 작업자의 농도가 5.70 mg/g cr로 상대적으로 높았다. 그 중 천막 훈증 투약 후 정리 작업자의 농도가 7.41 mg/g cr로 그 외 조건에 비해 상대적으로 높은 것으로 확인되었고(천막 훈증 투약: 6.17 mg/g cr; 컨테이너 훈증 투약 후 정리: 3.89 mg/g cr; 컨테이너 훈증 투약: 2.95 mg/g cr) 대기 중 MB 노출 농도와 일치된 경향성을 보였다. Tanaka 등(1991)은 훈증 방역 공정에서 대기 중 MB 노출 수준에 대해 개방 작업이 투약에 비해 상대적으로 높음을 보였고, 특히 작업 장소에 따라 평균이 약 2배에서 20배까지 차이가 있었다.<sup>17)</sup> 또한 Tanaka 등(1991)은 작업자의 요 중 브로마이드 이온 농도의 기하평균으로 야적장 9.0 mg/L, 본선 9.7 mg/L, 창고 9.0 mg/L, 사일로 7.8 mg/L로 제시하였다.<sup>17)</sup> 본 연구에서 훈증 창고가 4.05 mg/g cr이었고, 그 외 수준에서 표본 수에 제한이 있어 추정치 신뢰성에 한계가 있다.

본 연구와 선행 연구 결과를 종합하여 볼 때, 주 노출원(exposure source)인 대기 중 MB 농도와 요 중 브로마이드 이온 농도의 상관성에 대한 추론으로써 훈증 방역 작업 공정에서 대기 중 MB 노출 농도가 높은 작업 단계에 참여하는 작업자일수록 체내 브로마이드 이온 농도가 높은 경향이 확인되었다. 추가적으로 월 평균 작업 일수와 근속 연수에 따라 만성 노출에 의한 농도 수준이 증가할 것으로 추측된

다. 작업자 중 천막 훈증을, 공정 중 개방 작업에 참여하며, 월 평균 작업 일수가 많고, 상당 기간의 근속 연수를 가지는 경우 만성 노출에 따른 건강영향 예방·관리가 필요한 관심 대상으로 볼 수 있다.

산업안전보건공단(KOSHA, Korea occupational safety & health agency)의 직업병 발생·진단 따르면, 2000년 단기 근로자 남성의 2개월 간 훈증 방역 작업 후 뇌병증 진단을 첫 중독 사례로 보고하고 있으며<sup>31)</sup> 이후 2016년 7년 장기 근로자 남성의 시신경병증 진단 사례에 이르기까지<sup>32)</sup> MB 훈증 방역 작업 노출에 따른 건강영향 사례는 지속적으로 발생하고 있다. 증례별로 일시적 사건 또는 1년 이하 노출기간에 의한 급성 건강영향부터,<sup>33,34)</sup> 12년 이상의 만성 노출에 따른 건강영향까지<sup>35,36)</sup> 다양한 양상을 보이고 있다. 일부 증례는 요 중 브로마이드 이온 농도가 평가되었는데, 급성 노출의 경우 36.3, 37.1 mg/L의 고농도 수준을 보였고 10 mg/L를 초과하는 경우도 다수 존재한다.<sup>37)</sup> KOSHRI의 144명 작업자에 대한 역학조사에서 고농도자로 분류할 수 있는 혈 중 농도 30 mg/L 초과자에서 신경학적 증상 호소는 없었으나 만성 노출에 따른 신경장해를 우려하였다.<sup>20)</sup> 일련의 증례 및 연구는 작업자들의 비공식적인 MB 노출에 따른 건강영향 또는 중독 사례가 존재할 수 있는 가능성을 시사하며, 향후 정밀한 역학조사의 필요성을 제기한다.

작업자의 일 단위 연속 작업에 의한 요 중 브로마이드 이온 농도 증가량과 비작업에 의한 감소량을 평가한 결과로, 본 연구에서 1회 작업 전·후에 따른 통계적으로 유의한 변화는 없는 것으로 나타났다. 하지만 평균 2.73일의 연속 작업 후 67.6% (46/68명 × 100)의 조사 대상자의 농도가 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 농도 증가한 대상자는 작업 환경 중 MB 노출 농도가 높은 것으로 추정되는 천막 훈증 공정에서 개방 작업이 많았다. 일부 조사 대상자에서 농도가 다소 감소하였는데, 컨테이너 훈증 공정 중 투약 작업 비중이 높은 것으로 파악된다. 비작업 일수에 따른 변화량은 감소하는 것으로 나타났으나 농도의 절대적인 수준은 가장 높은 것으로 나타났다. 이것은 측정 표본의 수가 매우 적고 고농도 대상자만이 측정된 결과에 기인한다. 실제 4차 비작업 종료일까지 조사된 3명의 3차 연속 작업 종료일의 산술평균±표준편차는 농도는 15.94±17.84

mg/g cr로 비작업 종료일 11.78±6.13 mg/g cr에 비해 평균이 매우 높으며 편차 또한 매우 크게 나타났다. 4차 조사에서의 감소량 결과에 대한 추론은 보다 큰 표본 크기에서 안정적인 검정력을 확보하여 실시되는 것이 타당하며 본 연구에서는 제한을 두어야 할 부분이다. 4차 조사까지 진행된 3개 관측치를 구체적으로 살펴보면, -17.57, 0.97, 4.10로 농도가 매우 크게 감소한 1개 관측치, 농도 변화량이 매우 미미한 1개 관측치, 4.10의 상당 수준 증가한 것으로 보이는 1개 관측치로 구분될 수 있는데, 감소, 유지, 증가의 사례가 각각 발견되어 해석에 어려움이 있다. 농도 감소한 경우의 비작업 일수는 3일, 유지는 2일, 증가는 4일로, 증가한 경우의 비작업 일수가 가장 많은 것으로 나타났다. Lee 등(2001)은 본 연구와 동일하게 작업 전·후에 따른 요 중 브로마이드 이온 농도에 차이가 없음을 보고하였다.<sup>18)</sup> 또한 1명 작업자에 대해 작업 중단 후 20일 경과 후 일주일 간격으로 요 중 농도를 측정하였을 때, 1차 37.1 mg/L, 2차 2.7 mg/L, 3차 4.7 mg/L로 제시하였고 이에 따라 반감기를 최종 5.9일로 평가하였다. 동일 대상자에서 혈청 중 농도의 반감기는 10.7일로 산출하였다. 또 다른 연구에서는 건강한 일반인의 혈중 농도 반감기를 약 12일, MB 노출 대상자의 반감기는 3~15일로 보고하였다.<sup>38)</sup> 보고된 반감기를 기준으로 본 연구 비작업일의 관찰기간이 감소량을 확인하는데 충분하지 못하였던 것 역시 한계점으로 지적될 수 있다.

이상의 결과에서 MB 훈증 방역 작업자에 대한 대규모 조사를 실시하고 농도 수준에 대해 비노출군과의 비교를 실시하는 한편, 다양한 작업 특성에 따른 농도 수준을 제시하고 주요 인자들을 파악한 것은 의미 있는 성과물이라 볼 수 있다. 하지만, 연속 비작업일에 따른 감소량을 추정하는데 추적 관찰 대상자 수, 관찰 기간이 부족하여 신뢰성 있는 추정치를 제시하지 못한 것은 본 연구의 한계점이다. 간접 노출군 및 비노출군의 각 표본 크기가 충분하지 못하였고, 비교를 위한 검정력 확보에도 제한이 있었다. 또한 작업 환경 중 MB 노출 수준이 제시되지 못한 점, 그에 따른 작업자의 생체 노출 수준과의 상관성을 파악이 미흡한 점 역시 보완이 필요한 사항으로 지적될 수 있다. 마지막으로 본 연구에서 작업자의 MB 만성 노출에 의한 건강영향, 그리고 작업 특성

에 따른 노출 수준별 건강영향을 확인하지 못한 것은 향후 연구에서 추가되어야 할 부분이다. 또 장기적으로는 MB 노출의 약동학적(pharmacokinetic) 연구가 필요하다.

연구의 한계점이 존재하지만, 종합적으로 노출군인 MB 훈증 방역 작업자가 비노출군에 비해 상대적으로 높은 농도 수준인 것을 제시하였고, 작업자의 노출 특성으로 근속 연수가 길수록, 월 평균 작업일이 많을수록, 일 작업 시간이 길수록 농도가 증가하는 경향성 및 작업 공정에서 대기 중 MB 노출 농도가 높은 작업 단계에 참여하는 작업자일수록 체내 브로마이드 이온 농도가 증가하는 경향성을 확인하였다. 본 연구의 작업자 MB 노출 실태와 특성에 대한 결과가 향후 연구의 기초 자료로 활용되기를 기대하며, 작업 환경 노출 평가 및 수용체 만성 노출에 따른 건강영향에 대한 추가적인 연구를 수행함으로써 작업자의 건강권 보호, 중독사고 예방 및 훈증 안전·관리 대책을 위한 과학적 근거 자료의 기반이 마련되어야 할 것이다.

## V. 결 론

본 연구는 유독성 메틸브로마이드 생물학적 노출 평가 기법을 확립하고 노출 작업자에 대한 전국 규모의 연구조사에 적용하여, 노출 방역 작업자가 비노출군과 비교하여 요 중 브로마이드 이온 농도가 작업요인에 따라 증가되어 있음을 확인하였다. 본 연구 결과가 향후 훈증 방역 작업자의 건강권 보호, 중독사고 예방 및 훈증 안전·관리 대책 마련을 위한 추가 연구의 기반 자료로 활용되기를 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 지정 환경보건센터 및 농림축산검역본부의 지원으로 수행되었다.

## References

1. Calvert GM, Mueller CA, Fajen JM, Chrislip DW, Russo J, Briggles T, et al. Health effects associated with sulfuryl fluoride and methyl bromide exposure among structural fumigation workers. *American Journal of Public Health*. 1998; 88(12): 1774-1780.

2. Furuta A, Hyakudo T, Ohnishi A, Hori H, Tanaka I. Neurotoxicity of methyl bromide-neuropathologic evaluation-preliminary study. *Journal of the University of Occupational and Environmental Health*. 1993; 15(1): 21-27.
3. Budnik LT, Kloth S, Velasco-Garrido M, Baur X. Prostate cancer and toxicity from critical use exemptions of methyl bromide: environmental protection helps protect against human health risks. *Environmental Health*. 2012; 11(1): 5.
4. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Documentation of the TLVs and BEIs with Other Worldwide Occupational Exposure Values. American Conference of Governmental Industrial Hygienists Cincinnati, Ohio, 2010.
5. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Bromomethane. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, 1992.
6. Bulathsinghala AT, Shaw IC. The toxic chemistry of methyl bromide. *Human & Experimental Toxicology*. 2014; 33(1): 81-91.
7. Yamamoto O, Hori H, Tanaka I, Asahi M, Koga M. Experimental exposure of rat skin to methyl bromide: a toxicokinetic and histopathological study. *Archives of Toxicology*. 2000; 73(12): 641-648.
8. Garnier R, Rambourg-Schepens MO, Müller A, Hallier E. Glutathione transferase activity and formation of macromolecular adducts in two cases of acute methyl bromide poisoning. *Occupational and Environmental Medicine*. 1996; 53(3): 211-215.
9. Program NT. NTP Toxicology and Carcinogenesis Studies of Methyl Bromide (CAS: 74-83-9) in B6C3F1 Mice (Inhalation Studies). *National Toxicology Program Technical Report Series*. 1992; 385: 1.
10. Chavez CT, Hepler RS, Straatsma BR. Methyl bromide optic atrophy. *American Journal of Ophthalmology*. 1985; 99(6): 715-719.
11. Hezemans-Boer M, Toonstra J, Meulenbelt J, Zwaveling J.H, Sangster B, van Vloten WA. Skin lesions due to exposure to methyl bromide. *Archives of Dermatology*. 1988; 124(6): 917-921.
12. Kishi R, Itoh I, Ishizu S, Harabuchi I, Miyake H. Symptoms among workers with long-term exposure to methyl bromide. An epidemiological study. *Sangyo Igaku Japanese Journal of Industrial Health*. 1991; 33(4): 241-250.
13. DeHaro L, Gastaut J.L, Jouglard J, Renacco E. Central and peripheral neurotoxic effects of chronic methyl bromide intoxication. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*. 1997; 35(1): 29-34.
14. Hasan MM, Aikins MJ, Schilling MW, Phillips TW. Comparison of Methyl Bromide and Phosphine for Fumigation of *Necrobia rufipes* (Coleoptera: Cleridae) and *Tyrophagus putrescentiae* (Sarcoptiformes: Acaridae), Pests of High-Value Stored Products. *Journal of Economic Entomology*. 2019; 13 (5675083).
15. Lee JS, Kim HK, Kyung Y, Park GH, Lee BH, Yang JO, et al. Fumigation Activity of Ethyl Formate and Phosphine Against *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on Imported Sweet Pumpkin. *Journal of Economic Entomology*. 2018; 111(4): 1625-1632.
16. Kawai T, Takeuchi A, Miyama Y, Sakamoto K, Zhang Z.W, Higashikawa K, et al. Biological monitoring of occupational exposure to 1-bromopropane by means of urinalysis for 1-bromopropane and bromide ion. *Biomarkers*. 2001; 6(5): 303-312.
17. Tanaka S, Abuki SI, Seki Y, Imamiya SI. Evaluation of methyl bromide exposure on the plant quarantine fumigators by environmental and biological monitoring. *Industrial Health*. 1991; 29(1): 11-21.
18. Lee JS, Lee YH, Shin JH, Choi JK, Jung HK. Environmental and biological monitoring of workers exposed to methyl bromide through quarantine fumigation. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2001; 11(3): 212-218.
19. Acuna M, Diaz V, Tapia R, Cumsille M. Assessment of neurotoxic effects of methyl bromide in exposed workers. *Revista Medica de Chile*. 1997; 125(1): 36-42.
20. Lee YJ, Kim EA. Still existing dangers, methyl bromide poisoning. *Occupational Health*. 2011; 5-9.
21. Müller M, Reinhold P, Lange M, Zeise M, Jürgens U, Hallier E. Photometric determination of human serum bromide levels-a convenient biomonitoring parameter for methyl bromide exposure. *Toxicology Letters*. 1999; 107(1-3): 155-159.
22. Olszowy HA, Rossiter J, Hegarty J, Geoghegan P, Haswell-Elkins M. Background levels of bromide in human blood. *Journal of Analytical Toxicology*. 1998; 22(3): 225-230.
23. Yamano Y, Tokutake T, Ishizu S, Nakadate T. Occupational exposure in methyl bromide manufacturing workers: 17-year follow-up study of urinary bromide ion concentration for biological monitoring. *Industrial Health*. 2011; 49(1): 133-138.
24. You JH, Lee SK, Jin KH, In SW, Yoo YC, Park SW. Bromide Concentration in Human Biological

- Samples Intoxicated by Methylbromide. *Analytical Science and Technology*. 1998; 11(2): 88-91.
25. Koga M, Hara K, Hori H, Kodama Y, Okubo T. Determination of bromide ion concentration in urine using a head-space gas chromatography and an ion chromatography-biological monitoring for methyl bromide exposure. *Journal of the University of Occupational and Environmental Health*. 1991; 13(1): 19-24.
  26. Allain P, Mauras Y, Dougé C, Jaunault L, Delaporte T, Beaugrand C. Determination of iodine and bromine in plasma and urine by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analyst*. 1990; 115(6): 813-815.
  27. Wang KE, Jiang SJ. Determination of iodine and bromine compounds by ion chromatography/dynamic reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Sciences*. 2008; 24(4): 509-514.
  28. US Environmental Protection Agency. Method 321.8 determination of bromate in drinking waters by ion chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometric. 1997.
  29. Yagi K, Williams J, Wang N, Cicerone R. Agricultural soil fumigation as a source of atmospheric methyl bromide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1993; 90(18): 8420-8423.
  30. Lee HS, Shin YC. Workers' Exposure to Airborne Methyl Bromide in the Exporting/Importing Plants and Products Quarantine Company. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2008; 18(1): 32-40.
  31. Korea Occupational Safety & Health Agency. Central nervous system disease caused by methyl bromide exposed during disinfection. Available from: <http://www.kosha.or.kr/kosha/data/occupationalDisease.do?mode=view&boardNo=246&articleNo=347954&attachNo=> (accessed April 8, 2019)
  32. Shin HU, Kim JK, Yoon BA, Ryu WY. A Case of Optic Neuropathy Associated with Methyl Bromide Intoxication. *Journal of the Korean Ophthalmological Society*. 2016; 57(12): 1987-1993.
  33. Lee JH, Lee MS, Ahn SH, Seo GS, Kim HR, Choi SC, et al. 3 cases of acute methylbromide intoxication. *The Korean Journal of Medicine*. 1998; 55(3): 432-435.
  34. Park TH, Kim JI, Son JE, Kim JK, Kim HS, Jung KY, et al. Two cases of neuropathy by methyl bromide intoxication during fumigation. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2000; 12(4): 547-553.
  35. Choi KD, Shin JH, Kim DS, Jung DS, Park KH, Cho BM, et al. A case of chronic methyl bromide poisoning associated with cerebellar ataxia, polyneuropathy and optic neuropathy. *Journal of the Korean Neurological Association*. 2002; 20(3): 307.
  36. Lee HJ, Oh SW, Lee JS, Chae HJ, Moon JD. A case of polyneuropathy associated with methyl bromide intoxication. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2007; 19(3): 238-243.
  37. Korea Occupational Safety & Health Agency. Toxic encephalopathy in land cargo handling workers. Available from: <http://www.kosha.or.kr/kosha/data/occupationalDisease.do?mode=view&boardNo=246&articleNo=348429&attachNo=> (accessed April 15, 2019)
  38. Alexeeff GV, Kilgore WW. Methyl bromide. Residue reviews: Springer; 1983. p.101-153.

#### <저자정보>

서정욱(박사후 연구원), 김병권(교수), 김유미(교수), 이세영(연구원) 김나영(연구원), 임현주(연구원), 구동철(교수), 홍영섭(교수)