

양식업 종사자 포르말린 살포 작업에 대한 포름알데히드 노출평가

김은영* · 최성원 · 이성숙 · 손혜림 · 백진이 · 신재훈 · 김대호

근로복지공단 직업환경연구원

Evaluation of Formaldehyde Exposure for Formalin Spraying Work of Fish Farm Workers

Eun Young Kim* · Sungwon Choi · Sungsook Lee · Hyerim Son · Jin Ee Baek · Jae Hoon Shin · Deaho Kim

Institute of Occupation and Environment, COMWEL

ABSTRACT

Objectives: Formalin is used as an anthelmintic in farms where flounder are raised. In this study, we aim to identify formaldehyde exposure levels for aquaculture industry workers and provide basic data for managing formaldehyde exposure.

Methods: Exposure levels of formaldehyde in the air, including formalin spraying operations, were assessed separately for personal and area samples. In addition, considering the formalin administration method, dermal exposure to the hands was estimated when administering the chemical, and dermal exposure to the legs during water tank work was estimated by collecting water in the water tank and evaluating the amount of formaldehyde remaining. Finally, the respiratory exposure level and the estimated dermal exposure level were added to derive the total exposure level and compared with the maximum allowable human dose.

Results: As a result of the airborne evaluation, the formaldehyde concentration of the worker (1 person) who performed the formalin spraying and flounder sorting was 33.61 ppb, and the arithmetic mean of formaldehyde concentrations of the workers (3 people) who only performed the flounder sorting was 3.28 ppb (range: 2.25-4.89 ppb). In the case of dermal exposure, when spraying formalin once, the amount was estimated to be 0.33-2.62 mg when wearing protective gear and 3.27-26.12 mg when not wearing it.

Conclusions: There was a difference in the formaldehyde exposure level of workers depending on their operation of handling formalin and whether or not protective gear was worn. In particular, because the level of formaldehyde exposure due to dermal exposure can be significant, there is a need to improve formalin administration methods in a way that avoids skin contact as much as possible.


Key words: fish farm, formaldehyde, formalin spraying work, skin exposure


I. 조사개요


양식은 수산동식물을 인공적인 방법으로 길러서 거두어들이는 행위를 말하며, 양식업종사자란 양식업자를 위하여 수산동식물을 양식하는 일에 종사하는 자를 말한다

(MoF, 2023). 2023년 통계청에서 발표한 2022년 어류 양식 동향 조사에 의하면 어류양식 종사자 수는 2021년 4,860명 대비 189명(3.9%)이 증가한 5,049명으로 확인되며, 지역별로는 제주 1,670명(33.1%), 전남 1,665명(33.0%), 경남 1,154명(22.9%) 순이었으며 제주의 경우

*Corresponding author: Eun Young Kim, Tel: 032-540-4973, E-mail: qksksk777@comwel.or.kr
478, Munemi-ro, Bupyeong-gu, Incheon, 2F Incheon Labor & Welfare Complex
Received: November 1, 2023, Revised: November 30, 2023, Accepted: December 12, 2023


 Eun Young Kim <http://orcid.org/0000-0003-4881-1470>


 Sungsook Lee <http://orcid.org/0009-0007-0522-0781>

 Jin Ee Baek <http://orcid.org/0000-0002-4932>

 Deaho Kim <http://orcid.org/0000-0003-3551-0804>

 Sungwon Choi <http://orcid.org/0000-0003-3469-6563>

 Hyerim Son <http://orcid.org/0009-0004-9476-9677>

 Jae Hoon Shin <http://orcid.org/0000-0001-9436-6860>

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.

넙치류(49.1%)를 가장 많이 양식하고 있는 것으로 확인되었다(Statistics Korea, 2023).

양식장에서는 양식 대상 수산물의 질병 치료 및 생산성 향상을 위해 수산용 의약품 사용한다. 수산용 의약품이란 동물용 의약품 제조·판매·수입업자가 국립 수산과학원의 안전성·유효성 심사를 거쳐 품목허가를 받은 의약품을 말한다. 수산용 의약품은 항 병원성 약(항생, 항균물질, 구충제), 소화기계 작용 약, 대사성 약(비타민제, 영양제), 생물학적제제(백신), 비노생식기계 작용 약(호르몬제), 신경계 작용 약(마취제), 외피 작용 약(구충제), 의약외품(소독제), 보조적 의약품 등이 있다(NFPQMS, 2022).

이 중 수산용 구충제로 사용되고 있는 것이 비치오놀(bithionol), 포르말린(formalin), 후마갈린(fumagillin dicyclohexylamine), 프라지퀀텔(praziquantel), 트리클로로폰(trichlorofon), 과산화수소(hydrogen peroxide)가 있으며, 넙치와 어란(무지개송어 및 연어)의 외부기생원충류(*Ichthyobodosp.*, *Scuticociliatida*) 및 수생균(*Saprolegnia* spp.) 구제 목적으로는 포르말린, 넙치의 스쿠티카충(*Scuticociliatida*) 구제 목적으로 과산화수소가 효능이 좋은 것으로 제시한다. 과거에는 넙치의 구충제로 포르말린만을 제시하고 있었으나, 최근에는 과산화수소가 추가로 포함되었다. 구충제로 사용하고 있는 포르말린은 37% 포르말린 원액이며, 투약 방법은 약욕 방식으로 수조에 저장된 물 톤수 당 100-200 ml의 비율로 투약 후 일정 시간이 지난 후 희석 배출하는 방식이다. 다만 구충제 살포 횟수는 정해진 것이 아니며, 수조 관리를 하면서 생산량이 저하되면 양식업종사자들의 판단으로 적절한 약품을 투약한다. 한편, 포르말린(formalin)은 포름알데히드(formaldehyde) 35~37%가 물에 녹아 있는 수용액 상태로, 포르말린을 취급하는 작업자는 포르말린의 기체 상태인 포름알데히드에 노출될 수 있다. 포름알데히드는 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 백혈병(leukemia)을 유발할 수 있는 Group 1으로 분류하고 있는 강력한 발암물질이다. 그러나 이러한 발암성에도 불구하고 양식업 종사자들은 구충제로 사용되고 있는 포름알데히드의 위험성을 제대로 인지하지 못하고 있다. 또한 국내외에서 양식장 종사자들을 대상으로 공기 중 포름알데히드 노출수준을 평가한 연구가 드물게 이루어지고 있다(Kim et al., 2022).

따라서 본 연구의 목적은 구충제로 포르말린을 사용하고 있는 양식업종사자를 대상으로 포름알데히드 농도

를 평가하여 수조 관리 작업 중 포름알데히드 노출 실태를 평가하고, 양식업종사자의 포름알데히드 노출을 관리하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 조사방법

1. 작업환경평가 대상

2022년 6월 16일 제주도 내 광어를 양식하는 A 사업장을 방문하여 양식장을 관리하는 작업자를 대상으로 평가하고자 하였다. A 사업장은 50개 이상의 수조를 보유하고 있는 업체로 외국인 근로자 4명이 수조 관리를 하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 외국인 근로자 4명을 대상으로 공기 중 포름알데히드 노출평가, 수조에 잔류하고 있는 포름알데히드 양을 파악하기 위해 수조 내 물(water)과 광어를 입수하여 잔류하고 있는 포름알데히드 양을 평가하였다.

1) 공기 중 포름알데히드 평가

공기 중 포름알데히드 평가는 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH) method 2016을 참고하여 평가하였다. 시료 채취 여재는 2,4-dinitrophenylhydrazine (2,4-DNPH)가 코팅된 실리카겔(Cat no 226-119, SKC inc)을 사용하였으며, 개인시료채취기와 연결하여 채취하였다. 평가 대상 작업자는 포르말린을 살포 작업 후 광어 선별 작업을 수행한 작업자 1명과 선별 작업만 수행한 작업자 3명을 대상으로 개인시료채취를 하였고(Figure 1), 포르말린 살포 주변 수조와 미 살포 수조 주변에서 지역 시료를 채취하였다. 대조군은 양식장 외부에서 실시하였다.

2) 수조 내 물(water) 및 광어 내 잔류 포름알데히드 평가

수산물 내 포름알데히드 함량 분석은 Kim et al. (2010) 및 Andreoli(2003) 논문을 참고하였다. 수산물은 현장 평가 대상 양식장에서 사육하고 있는 넙치류인 광어이며, 각 수산물의 부위별로 3개씩 절단한 후 아세트나이트릴로 용출, 2,4-DNPH를 동량으로 가한 후 30분간 유도체화 하고, 용출액을 원심분리하여 상층액을 분석 시액으로 사용하였다. 수조 내 물의 포름알데히드 함유량 분석은 Wahed(2016) 방법에 참고하여 2,4-DNPH를 동량으로 가한 다음 30분간 유도체화하고 필터로 여과 후 분석을 실시하였다. 모든 시료의



Figure 1. Formalin spraying work (top) and flounder sorting work (bottom)

포름알데히드 분석은 액체크로마토그래피-질량분석기 (HPLC: Agilent Technologies 1200 series, Agilent Technologies, USA / 질량분석기 3200 Q Trap, AB Sciex, USA)를 사용하여 분석하였다.

III. 조사결과

1. 양식장 작업특성 파악 결과

광어는 처음 광어알(종란)이 입수되면 7~8 cm로 치어를 키운 후 중간 육성장에서 20 cm로 키우고, 이후 최종 육성장에서 20 cm 이상으로 키워 출하하는데, 20 cm 미만의 치어일 때와 20 cm 이상으로 육성 중일 때 배급하는 사료 차이가 있을 뿐 작업의 차이가 없다. 한편, 기생충 제거를 위해 포르말린과 과산화수소를 사용하고

있었는데, 포르말린의 경우 1회 사용할 때 200 ppm으로 희석하여 사용한다고 한다. 양식장 작업자들은 하루 2회 오전과 오후에 사료를 주는 작업을 하고, 광어들이 스트레스를 받지 않도록 하기 위해 사료 주기 1~2시간 전에는 수조 내부로 진입하지 않는다고 한다. 작업은 오전 사료 주기 → 직원 식사 → 폐사 선별 및 물관리 → 오후 휴식 → 저녁 사료 주기로 업무가 진행된다. 포르말린을 살포하는 작업은 월 2회 정도 있으며, 약품 살포 시간은 약 5분 정도 소요되고, 살포 후 한 시간 정도 지난 후 수조의 물을 교체 작업을 하는데 약 30~40 분 정도 소요된다.

2. 포르말린 사용량 조사 결과

2017년부터 2021년까지(5년) 구매명세서를 검토한

결과, 사용하는 제품은 5종(스쿠말린, 스킨러, 오션닥터, 참신과수, 포름A)로 확인되었으며, 5년간 구매 수량은 오션닥터 10개, 참신과수 210개이고, 포르말린 제품인 스킨러는 100개, 포름A는 30개, 스쿠말린은 83개로 확인된다. A 양식장에서 물질안전보건자료를 보유하고 있지 않아, 국립수산물품질관리원에서 발간하는 2022년 수산물 의약품 제품 요약해설집에서 제품명을 기준으로 검색하여 성분을 확인하였다. A 양식장에서 구매한 약품은 5종이며, 제품 중 스쿠말린(18 L), 스킨러(18 L), 포름A(18 L)에 포르말린이 포함된 것으로 확인되며, 총 213개의 제품을 구매한 것으로 확인된다. 사용 용법에 대해서는 포르말린이 함유된 제품은 모두 동일하며, 100~200 mL/톤 희석하여 사용하고, 1시간 살포 후 수조의 물을 교체한다. 약품 구매명세서에 토대로 A 양식장에서 5년간 평균 3.6개/월의 포르말린이 포함된 약품을 사용하는 것으로 추정된다.

3. 기존 작업환경측정결과보고서 검토

연구 대상이 되는 양식장은 작업환경측정을 실시하고 있었으며, 2021년 하반기에 실시한 결과를 확인하였을 때, 2명의 작업자를 대상으로 평가되었고 그 검출량은 불검출 및 8.9 ppb로 확인된다.

4. 공기 중 포름알데히드 노출평가 결과

수조에 포르말린을 살포하는 작업은 포르말린을 물로 희석(약 200 ppm)하여 바가지를 이용하여 살포하는 방식이다. 수조 1개당 약 $9.5 \times 10.39 \times 0.5 \text{ m}^3$ (약 50 m^3) 규모이며, 약품 살포 시간은 약 5분 정도 소요되고, 살포 후 한 시간 정도 지난 후 수조의 물을 교체한다. 평가 결과 5분간 포르말린 살포 후 선별 작업을 하였던 작업자의 시간가중평균 농도는 33.610 ppb이었으며, 고용노동

부 노출기준(300 ppb)의 1/10 수준이다. 그 외 포르말린 살포를 하지 않았던 작업자 3명의 농도는 산술평균 3.282 (2.249~4.894 ppb)로 확인되었다(Table 1).

포르말린 살포 작업에 대한 단시간 노출을 평가하기 위해서는 별도로 현장평가가 이루어졌어야 했지만, 현장 평가에서 누락되었다. 현장평가 당일 포르말린 살포 작업자의 작업 내용을 관찰한 결과 포르말린 살포 시간인 5분을 제외하고 모든 작업은 다른 동료 근로자와 함께 선별 작업을 수행하였다. 이러한 작업 내용을 고려하면 포르말린 살포 작업을 한 작업자에서 검출된 포름알데히드 검출량은 5분간의 살포 과정에서 노출된 양과 선별 과정에서 노출된 양이 합산된 노출량이라고 판단된다. 이에 제한적인 추정 방법이지만 선별 작업자의 검출량에서 선별 작업자 3명에서 검출된 포름알데히드 평균 검출량을 제외한 양이 포르말린을 5분간 살포하면서 노출된 포름알데히드 노출수준이라고 추정할 수 있으며, 이는 약 3.065 ppm이다(수식 1-2). 이는 미국직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)의 단시간 노출기준(short-term exposure limit, STEL)인 2 ppm보다 약 1.5배 높은 수준이다.

수식 1) 추정 포름알데히드 검출량(μg) =

$$\text{살포작업자 검출량}(\mu\text{g}) - \text{평균 선별작업자 검출량}(\mu\text{g})$$

수식 2) 추정 공기 중 포름알데히드 농도(ppm) =

$$\frac{\text{추정 포름알데히드 검출량}(\mu\text{g})}{\text{총 유량}(L)} \times \frac{24.45}{30.03}$$

5. 수조 내 물(water) 및 광어 내 잔류 포름알데히드 평가 결과

포르말린 살포 여부에 따른 수조 내 물의 포름알데히

Table 1. Airborne formaldehyde concentration in the fish farm (2022. 6. 16.)

(unit : ppb)

Process	Type	Sampling time(min)	No [†]	Concentration	
				(Arithmetic) mean	Min-Max
Spraying(5min) and sorting	Personal	292	1	33.610	-
Sorting	Personal	267	3	3.282	2.249~4.894
Fish tank with formalin	Area	266	2	206.780	165.443~248.116
Fish tank without formalin	Area	268	8	2.323	0.856~6.250
Control	Area	205	1	2.344	-

[†]Number of sample

Table 2. Formaldehyde content in cultured flounder and water in fish tank (2022. 6. 16.)

Formaline	Location	No. of sample (No. of detected samples)	Mean content(%)	Unit
Sprayed	Water in tank	1(1)	0.125	mg/L
	Head	3(3)	0.435	mg/kg
	Fillet	5(5)	0.125	
	Fin	3(3)	0.218	
	Tail	3(3)	0.240	
	Average		0.254	
Not sprayed	Water in tank	1(1)	0.001	mg/L
	Head	3(3)	0.351	mg/kg
	Fillet	5(5)	0.118	
	Fin	3(3)	0.236	
	Tail	3(3)	0.180	
	Average		0.221	

드 함유량에서는 살포 수조 0.125 mg/L, 현장평가 당일 미 살포 수조 0.001 mg/L으로 차이가 있다. 그러나, 포르말린을 살포한 수조의 내 잔류하고 있는 포름알데히드 수준 또한 먹는 물 기준(0.5 mg/L)의 25%에 해당하는 낮은 수준이다.

포르말린을 살포한 수조와 살포하지 않은 수조에서 양식하고 있는 광어를 각각 입수하여 포름알데히드 함유량을 평가한 결과, 포르말린 살포 수조 0.254 mg/kg, 미 살포 수조 0.221 mg/kg으로 수조에 따른 포름알데히드 함유량에는 차이가 거의 없는 것으로 확인되었다 (Table 2).

6. 포름알데히드의 피부 노출 추정

피부 노출을 통한 위험성 평가 대상 물질은 기본적으로 체내효과(systemic effect), 즉 해당물질이 피부를 통해 체내로 흡수되어 전신에 노출됨으로써 독성을 이야기하는 피부 투과 물질을 대상으로 한다. 어떤 화학 물질이 수용성 및 지용성 정도를 나타내는 물리/화학적 특성값이 옥탄올/물 분배계수 값이다. 피부를 통한 체내 흡수가 쉽게 일어나기 위해서는 그 옥탄올/물 분배계수 값(LogKow)이 -0.5에서 3.0 사이의 물질(OSHA)이어야 하며, 이 범위의 물질이 피부 흡수가 가장 잘 일어난다는 것을 의미한다.

현장평가 당일 작업자는 보호의와 보호 장갑을 착용

한 상태에서 포르말린 살포 작업을 수행하였다. 포르말린 살포 작업에서 작업 자세 및 방법을 고려하면 피부 노출이 가능한 신체부위는 손과 다리이다. 그러나 보호의와 보호장갑을 착용한 상태에서는 손과 다리를 통해 피부 노출이 거의 일어나지 않을 것으로 추정된다. 다만 이러한 보호구를 미착용하거나 또는 일부 침투성이 있는 보호구를 착용한 상태에서 작업을 할 경우 피부 노출이 가장 빈번하게 이루어지는 부위는 손과 팔이다. 따라서 포름알데히드 노출수준이 높을 것으로 추정되는 상황을 가정하여 피부 노출수준을 추정하였다.

첫째, 포름알데히드 노출량 추정에 대해 손의 경우 바가지로 포르말린을 떠서 뿌리는 작업이기 때문에 37% 포르말린 원액에 그대로 노출될 수 있다. 다리의 경우 수조에 희석된 포름알데히드에 노출될 수 있는데, 포르말린 살포를 한 직후와 미 살포 수조에서 선별 작업을 할 때 노출되는 수준이 다를 것으로 판단된다. 구충의 목적을 달성하기 위해 권고되는 포르말린 희석 농도는 200 ppm 이다. 미 살포 수조에서 선별 작업을 할 때는 수조에 잔류하고 있는 포름알데히드에 노출될 수 있다. 따라서 포르말린을 살포하는 작업 중에는 최대 희석농도인 200 ppm, 미 살포 수조에서 선별 작업을 할 때의 노출 가능 농도는 미 살포 수조의 잔류 농도를 노출 가능 농도로 가정하였다.

둘째, 포름알데히드에 노출되는 피부면적은 MFDS

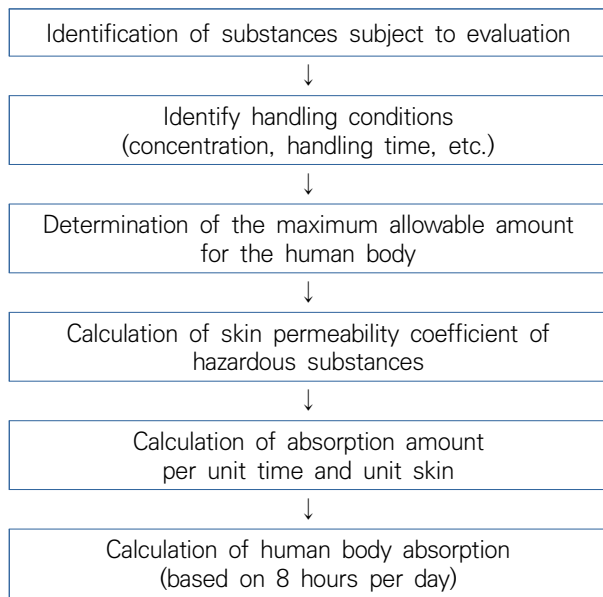


Figure 2. Dermal exposure risk assessment procedure

(2010)에서 제시한 국내성인남녀의 평균 피부면적 조사 결과를 인용하여 적용하였다. 국내성인남자의 좌우측 평균값은 손은 462.34 cm^2 , 다리 2479.76 cm^2 이다. 포르말린 살포 작업을 할 때 바가지를 잡고 있는 한 손과 수조에 담겨져 있는 두 다리가 피부 노출이 가능한 부위이다. 따라서 피부 노출 평가 대상이 되는 손과 다리 면적은 각각 462.34 cm^2 , 4959.52 cm^2 로 적용할 수 있다. 다만 손에 대한 피부 노출을 추정할 때 손 면적의 참고

치를 모두 적용하는 것은 포르말린에 손을 담갔다는 가정이기 때문에 작업 상황을 고려하면 타당한 추정이 될 수 없다. 따라서 바가지 손잡이를 잡고 포르말린을 떠서 뿌리는 작업이라는 점을 감안하면 포르말린이 손 전체에 노출되기 보다는 손의 일부만 노출될 것으로 추정되며, 이에 따라 포르말린에 노출되는 손 면적의 비율을 100, 50, 30, 10%로 가정하였다. 다리의 경우는 물속에 잠긴 상태이기 때문에 별도의 노출 부위에 면적 비율을 고려하지 않았다.

셋째, 피부 노출을 추정할 때는 보호구의 보호계수를 고려해야 한다. 보호구의 보호계수가 0.1일 때에는 투과율이 10%라는 것을 나타낸다. 손 보호구의 투과율을 정보를 확보할 수 없어서 투과율 10%와 100%를 가정하였고, 노출시간은 실제 포르말린을 살포하는데 소요되는 시간인 5분을 적용하였다(Figure 2).

이러한 가정에 수식 3에 따라 계산하면 손 피부 노출 추정값은 0.33-26.11 mg 범위로 나타난다(Table 3). 다리의 경우 포르말린을 살포할 때 희석된 농도에 노출되고, 살포작업을 할 때에는 잔류하고 있는 농도에 노출될 것이다. 살포 직후 수조의 물과 미 살포한 수조의 물을 채취하여 분석하였고, 각각 0.125, 0.001 mg/L로 확인되었다. 따라서 살포 과정에서 노출될 수 있는 농도는 살포 수조 농도, 선별 작업에서 노출될 수 있는 농도는 미 살포 수조의 포름알데히드 검출량을 적용하였다. 노출 시간은 포르말린 살포 시간 5분, 선별 작업

Table 3. Estimated dermal exposure for hands during formalin spraying (applied to 5 minutes of working time)

Exposure region	Hand (whole)	Back of hand (50%)	Back of hand (30%)	Back of hand (10%)
Formaldehyde exposure limit (ppm)			0.3	
Formaldehyde exposure limit (mg/m^3)			0.37	
Formaldehyde concentration used (%)			37	
Formaldehyde concentration used (mg/cm^3)			370	
Average daily respiratory volume for adults (m^3)			10	
Maximum allowable amount (mg)			3.68	
Octanol/water partition coefficient ($\log K_{ow}$)			0.35	
skin permeability coefficient ($\log K_p$)= cm/hr			-2.74	
K_p			0.00183	
J (flux rate, $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{hr}$)			0.6777	
Area of both hands in domestic adults (cm^2)	462.34	231.17	115.59	57.79
Protection factor	0.1(1)	0.1(1)	0.1(1)	0.1(1)
Absorption dose (mg)	2.61(26.11)	1.31(13.06)	0.65(6.53)	0.33(3.26)

Table 4. Estimated dermal exposure for legs during tank maintenance work

Exposure region	Leg (spraying)	Leg (sorting)
Formaldehyde exposure limit (ppm)	0.3	
Formaldehyde exposure limit (mg/m ³)	0.37	
Formaldehyde concentration used (%)	0.125	0.001
Formaldehyde concentration used (mg/cm ³)	0.000125	0.000001
Average daily respiratory volume for adults (m ³)	10	10
Maximum allowable amount (mg)	3.68	
Octanol/water partition coefficient (logKow)	0.35	
skin permeability coefficient (logKp)=cm/hr	-2.74	
Kp	0.00183	
J(flux rate, mg/cm ² *hr)	0.229 × 10 ⁻⁶	0.183 × 10 ⁻⁸
Area of both leg in domestic adults (cm ²)	4959.52	4959.52
Protection factor	0.1(1)	0.1(1)
Absorption dose (mg)	9×10 ⁻⁶ (9×10 ⁻⁵)	4×10 ⁻⁶ (4×10 ⁻⁵)

은 290분으로 적용하였고, 그 외 다른 조건들은 동일하다. 이러한 가정하에 다리 피부 노출을 추정하면 $4 \times 10^{-6} - 9 \times 10^{-5}$ mg 범위로 나타난다(Table 4).

이를 포름알데히드 최대 허용가능량(mg)과 비교하기 위해서는 손 및 다리, 호흡기를 통한 노출량을 총합하여 비교해야 한다. 따라서 호흡기를 통한 노출량을 공기 포름알데히드 검출량(mg)을 적용하여 작업 중 노출될 수 있는 전체 포름알데히드 양을 추정하였다. 선별 작업만을 한다고 가정하였을 때, 다리와 호흡기 노출의 합산 포름알데히드 노출량은 0.0002 mg이다. 그러나 당일 포르말린을 1회 살포하는 작업을 할 경우, 보호구를 착용했을 때 0.33-2.62 mg, 미착용 시 3.27-26.12 mg으로 추정된다.

수식 3)

흡수량(mg) = J × 노출면적 × 노출시간 × 보호구 보호계수

J : 피부 면적으로 통한 흡수량(flux rate), mg/cm² · hr

노출면적 : 유해물질에 노출되는 면적(cm²), 국내 성인 남녀의 주요 피부면적 참조

노출시간 : 유해물질에 직접 노출되는 시간(hr)

보호구 보호계수 : 유해물질의 보호구 투과율, 본 연구에서는 10%와 100%로 가정

IV. 고찰 및 결론

포르말린을 5분간 살포한 작업자의 포름알데히드 검

출량의 시간가중평균농도는 33.610 ppb 이었으며 그 외 선별 작업자 3명의 검출수준은 2.249-4.894 ppb로 확인된다. 포르말린 살포 작업을 수행한 작업자의 개인 노출의 경우 고용노동부 노출기준(300 ppb)의 약 15%에 해당하는 수준이지만 미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH)의 권고기준(Recommended Exposure Limit, REL)인 16 ppb보다는 2.8배 높은 수준이다. 또한 포르말린 살포 작업을 5분 내외의 수행한 후 다른 작업자들과 동일한 수조에서 선별 작업을 했지만 선별 작업만 수행한 다른 3명의 작업자에 비해 검출 수준이 최소 10배 이상 차이가 난다는 점을 고려하면 포르말린을 희석하여 살포하는 5분 내외에서 상당히 높은 수준의 포름알데히드에 노출된다고 판단된다. 본 연구에서 포르말린 살포 작업만을 대상으로 평가하지 못했다는 제한점이 있지만, 포르말린 살포 시간(5분)을 제외하고 모든 작업 조건이 동일하였다는 점을 감안하여 단시간 노출 수준을 추정하면 5분간의 작업시간 동안의 포름알데히드 노출수준은 약 3 ppm으로 짧은 시간 내에 고농도 포름알데히드 노출이 가능한 것으로 판단된다.

A 사업장의 2017년부터 2022년까지 5년간 약품 구매명세서를 검토하였을 때, 평균 3.5개/월의 포르말린이 포함된 약품을 사용하였을 것으로 추정된다. 구매한 약품을 모두 사용하였다는 가정 하에 약품의 적정 사용량이 100-200 ml/톤을 희석하여 사용하는 해야 한다는 점과 양식장의 수조 1개당 규모가 50톤 규모라는 점을 고려하면 1회 사용량은 약 5 L이고, 18 L를 3-4회에

걸쳐 사용할 수 있다. 포르말린 구매량이 3.5개/월이라는 점을 고려하며 최대 월 14회 정도 포르말린을 살포하였을 것으로 추정된다. 따라서 해당 양식장에서 근무하는 작업자들 중 한 명이 포르말린 살포 작업을 전담한다는 전제하에 월 14회 정도는 5분/회 내외의 짧은 시간이지만 높은 수준의 포르말린에 노출되었다고 판단된다.

다음으로 양식장 관리 작업은 수산물 선별 작업을 포함한다. 선별 작업의 경우 수조 내로 들어가서 수산물을 크기별로 구분하는 작업을 수행하게 된다. 포르말린 살포를 한 수조 주변에서 선별 작업을 할 경우 살포 과정에서 발생하는 포름알데히드에 노출될 가능성이 있다. 본 연구에서 포르말린 살포 수조 주변에서 일정한 간격을 두고 지역 시료를 채취한 결과 수조와 멀어질수록 포름알데히드 검출수준이 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 바로 인접한 수조가 아니라면 거의 대조군과 유사한 수준이거나 낮다는 것으로 나타났다. 더불어 양식장 내 수조 주변에 사람의 인기척이 있으면 수산물들이 스트레스를 받아 성장에 악영향을 주어 수조 내부에는 필요시에만 진입하는 점을 고려하면 살포 후 수조 내 물에 잔류하고 있는 포름알데히드에 노출되는 빈도 및 그 양은 적을 것으로 판단된다.

포름알데히드는 피부 흡수가 잘 이루어지는 여부를 판단할 수 있는 옥탄올/물 분배계수 값(LogKow)이 0.35로, 피부 노출이 가능한 물질이다. 포르말린을 희석하여 바가지로 퍼 살포하는 작업과 수조 내에서 선별 작업을 한다는 점을 감안하면 호흡기를 통한 노출뿐만 아니라 피부 노출도 가능할 것으로 판단된다. 다만 피부 노출의 경우 직접적으로 포르말린에 노출되는 부위의 양에 따라 노출수준이 달라질 수 있다. 또한 보호구를 착용하였다 할지라도 보호구의 투과율에 따라 노출수준이 달라질 수 있는데, 조사 대상 사업장에서 사용하고 있는 보호구는 화학물질로부터 예방 목적이 아닌 작업의 편리성을 위한 보호구이었기에 투과율에 대한 정보가 존재하지 않았다. 그렇기에 본 연구에서는 임의로 보호구의 투과율을 10%(보호구 착용), 100%(보호구 미착용)로 가정하여 피부 노출을 추정하였고, 포르말린을 1회 살포하는 작업을 할 경우 보호구를 착용했을 때 0.33-2.62 mg, 미착용 시 3.27-26.12 mg으로 추정되었다. 보호구를 착용할 경우 손의 전체 부분이 노출된다고 할지라도 포름알데히드 최대허용량(3.68 mg) 초과하는 수준은 아니지만 최대허용량의 약 71%에 해당하는

높은 수준이다. 그럼에도 불구하고 사업장 내에서 포르말린을 살포하는 작업을 관찰했을 때 보호구를 착용한 상태에서 손잡이형 바가지를 사용한다는 점을 고려하면 측정 당일 노출에 대해 최소 노출인 0.33 mg에 노출될 것으로 추정하는 것이 타당하다고 판단된다.

한편, 작업 당일 착용하고 있는 상의의 형태에 따라 피부가 공기 중에 그대로 드러나는 경우 손과 다리뿐만 아니라 추가로 포름알데히드에 노출될 수 있다. 특히 여름철에는 짧은 상의로 인해 팔, 목, 얼굴 등은 보호의 착용 범위를 벗어나기 때문에 그대로 노출될 수 있다. 본 연구에서는 작업과정에서 작업방법을 고려하여 대표적으로 노출될 수 있는 신체 부위인 손과 다리를 대상으로 피부 노출을 추정하였다. 그러나 작업자가 착용한 상의 또는 보호의의 형태에 따라 추가적으로 피부 노출을 이루어질 수 있기에 본 연구결과에서 추정된 최소 노출 수준보다는 추가적으로 포름알데히드에 노출될 수 있다고 판단된다.

이렇듯 포르말린을 살포하는 작업 방식 및 보호구 착용 여부에 따라서 작업자의 포름알데히드 노출수준에 차이가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 피부 노출에 의한 포름알데히드 노출수준이 상당할 수 있기 때문에 최대한 피부 접촉을 피하는 방식으로의 포르말린 투약 방법을 개선할 필요가 있다.

References

- Andreoli R, Manini P, Corradi M, Mutti A, Niessen WM. Determination of patterns of biologically relevant aldehydes in exhaled breath condensate of healthy subjects by liquid chromatography/ atmospheric chemical ionization tandem mass spectrometry. *Rapid Commun Mass Spectrom* 2003;17(7):637-645. <https://doi.org/10.1002/rcm.960>
- Kim HA, Jang JW, Kim DH, Lee HJ, Lee SM et al. Analysis of formaldehyde in fisheries products. *Korean Journal of Food Science and Technology* 2010;43(1):17-22
- Kim KY, Lee KS, Kim MS. Work improvement of aquaculture workers by investigation to exposure level of harmful factors. *Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA)*. 2022. p. 27-59
- Ministry of Food and Drug Safety(MFDS). Skin body surface area survey of risk assessment. 2010. p. 13-14
- Ministry of Oceans and Fisheries(MoF). Aquaculture Industry Development Act. 2021

National Fishery Products Quality Management Service (NFPQMS). 2022 Aquatic medicine catalog. 2022. p. 128-141

Occupational Safety and Health Administration(OSHA). OSHA technical manual(OTM): surface contaminants, skin exposure, biological monitoring and other analyses [Accessed 2023 Oct 31]. Available from: URL <https://www.osha.gov/otm/section-2-health-hazards/chapter-2>

Statistics Korea. 2022 Survey on the status of fish culture. 2023. p. 11-15

Wahed P, Razzaq MA, Dharmapuri S, Corrales M. Determination of formaldehyde in food and feed by an in-house validated HPLC method. Food Chem 2016;202:476-483. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.136>

<저자정보>

김은영(연구원), 최성원(연구원), 이성숙(연구원), 백진이(연구원), 손혜림(연구원), 신재훈(연구위원), 김대호(연구위원)