

가습기 살균제 피해자 호흡기로 흡입된 가습기 살균제 양 추정 - 호흡기 외부(external) 및 내부 노출(internal exposure) 추정 방법과 사례 -

박동욱*† · 류승훈* · 임흥규** · 김선경*** · 노현석**** · 차원석* · 박두용*****

*한국방송통신대학교 환경보건학과, **환경보건시민센터, ***서울대학교 보건대학원,
****타이니 랩스, *****한성대학교 기계시스템공학과

Estimation of Humidifier Disinfectant Amounts Inhaled into the Respiratory System

Dong-Uk Park*†, Seung-Hun Ryu*, Heung-Kyu Lim**, Sun-Kyung Kim***,
Hyun-Suk Roh****, Won-Seok Cha*, and Dooyong Park*****

*Department of Environmental Health, Korea National Open University

**Asian Citizen's Center for Environment and Health

***School of Public Health, Seoul National University

****Tiny Labs

*****Department of Mechanical System Engineering, Hansung University

ABSTRACT

In South Korea, many cases of humidifier disinfectant-associated lung injury (HDLI) have been reported among people who used humidifier products containing humidifier disinfectant (HD). The objectives of this study are to estimate both airborne HD concentration in the room where HD was used and the amount of humidifier disinfectant absorbed into the respiratory system. Information and data on the HDs were collected using a structured questionnaire and home environmental investigations include the volume of HD (ml) and hours used per day, concentration of disinfectants contained in the HD brand ($\mu\text{g}/\text{ml}$), volume of the room (m^3), assumed ventilation rate (m^3/hr) and breathing rate assumed (m^3/hr). We used children aged under five years old as a sample and estimated both airborne HD concentrations and amount of HD absorbed into the respiratory system. The estimated airborne concentration of HD in the room ranged from 68 to $369 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PHMG (polyhexamethylene guanidine phosphate) and from 16 to $239 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PGH (oligo (2-(2-ethoxy) ethoxyethyl guanidine)). The amount of HD absorbed in the respiratory system per day was estimated to range from 227 to $1,225 \mu\text{g}$ for PHMG and from 53 to $794 \mu\text{g}$ for PGH. In conclusion, a great amount of HD was likely absorbed into respiratory system, likely beyond the level of the capacity of the immune system to remove the HD absorbed.

Keywords: CMIT, humidifier disinfectant (HD), humidifier disinfectant-associated lung injury (HDLI), MIT, PGH, PHMG

†Corresponding author: Department of Environmental Health, Korea National Open University, Seoul, 03087, Korea, Tel: +82-2-3668-4707, Fax: +82-2-741-4701, E-mail: pdw545@gmail.com

Received: 24 May 2016, Revised: 9 June 2016, Accepted: 13 June 2016

I. 서론

2013년부터 2015년까지 두 차례에 걸쳐서 조사된 가습기 살균제 피해자는 221명으로 이들은 다시 회복하기 어려운 폐 손상을 입었다. 이 피해자 수는 임상적으로 구분해 낼 수 있는 특이한 폐 손상자만 해당된다.^{1,2)} 현재 가습기 살균제 사용으로 건강피해를 입었다고 신고한 사람(이하 피해자라 함)은 총 1,282명(1차 361명, 2차 169명, 3차 752명)이다. 피해자가 노출되었던 주요 살균제 성분은 폴리헥사메틸렌 구아니딘(polyhexamethylene guanidine; 이하 PHMG), 염화에톡시에틸 구아니딘(Oligo(2-)ethoxyethoxyethyl guanidine chloride; 이하 PGH), 클로로메틸이소티아졸리논(chloromethylisothiazolinone, CMIT)와 메틸이소티아졸리논(methylisothiazolinone, MIT)(이하 CMIT/MIT혼합물)이다. 현재 보고된 문헌으로는 이들의 살균력, 독성(toxicity)의 절대적인 비교는 어렵다. 가습기 살균제 피해 규모 및 피해자들의 가습기 살균제 노출특성은 Park *et al.* (2016)이 보고하였다.³⁾

가습기의 폐 손상 등 건강 영향 위험(risk)은 살균제 자체가 갖고 있는 독성과 사용과정에서 호흡기로 흡입되는 양으로 결정된다. 독성이 있는 살균제를 사용하는 과정에서 호흡기에 흡입되어 폐 손상 등의 건강영향을 일으키는 것이다. 본 연구에서는 피해자가 가습기 살균제를 사용한 공간에서 가습기 살균제 사용으로 인한 공기 중 살균제 농도를 추정하고 이 공간에서 생활한 시간 동안 호흡기로 흡입되는 양을 추정했다. 연구결과는 살균제로 인한 건강 위험을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

II. 연구 방법

가습기 살균제를 사용한 방안 공기 중 살균제 농도와 피해자 호흡기로 흡입된 살균제 양을 추정하는 단계는 Fig. 1에 제시했다. 본 연구에서 사용한 가습기 살균제 관련 자료와 정보는 피해자 가정의 환경조사 및 피해자 인터뷰 등을 통해서 얻은 것이다. 환경보건전문가가 피해신고자의 가정을 직접 방문하여 가습기 살균제를 사용한 환경 및 설문조사를 진행하였다. 자세한 가습기 살균제 노출평가 전략 및 설문 내용은 Park *et al.* (2015)이 보고하였다.⁴⁾

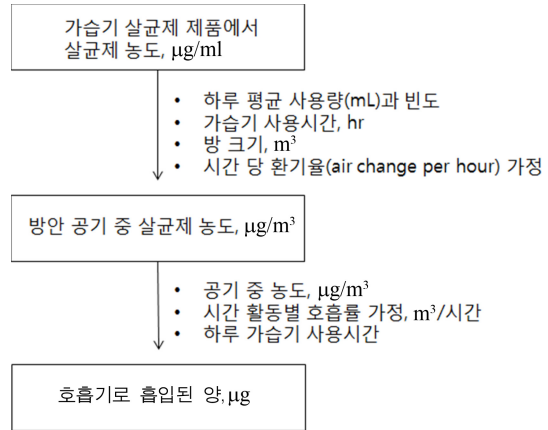


Fig. 1. Framework to estimate both airborne humidifier disinfectant (HD) concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) and HD amounts absorbed into the respiratory system.

1. 가습기 살균제 제품의 살균 성분 및 농도

가습기 살균제 제품(이하 제품이라 함)별 살균제 농도($\mu\text{g}/\text{ml}$)는 보건복지부가 2011년 국정감사에서 보고한 자료(문서번호, 역학조사과-822호, 2011년 7월 22일 등)를 참고했다.⁵⁾ 가습기 살균제 제품 중 살균제 농도가 보고된 것은 총 10개였고, 이 중 PHMG, PGH, CMIT와 MIT혼합물이 들어 있는 제품은 총 6개였다(Table 1). 5개 제품에서 Didecyldimethylammonium chloride(DDAC)가 낮은 농도로 들어있거나 검출되지 않았다.

2. 공기 중 살균제 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 추정

가습기를 사용한 방에서 공기 중 살균제 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 (1) 가습기 살균제 제품의 살균제농도($\mu\text{g}/\text{ml}$), (2) 하루 평균 가습기에 넣은 살균제 용량(ml), (3) 하루 평균 가습기 사용 시간(hr), (4) 가습기를 사용한 방 체적(m^3)을 근거로 추정했다. 대부분의 피해자가 가정에서 살균제에 노출되었기 때문에 공간이 크고 개방된 장소는 가정하지 않았다.

3. 공기 호흡률(m^3/hr) 가정

가습기 살균제를 사용한 피해자의 호흡률은 국내 외에서 보고된 연령별 표준 호흡률 중 피해자의 활동(가벼운 활동, 수면 등)에 맞는 자료를 활용했다. 두 가지 시간별 활동(잠잘 때와 그 외 활동)으로 단순하게 구분했다. 피해자가 공기 중 살균제에 주로

Table 1. Disinfectant concentration in humidifier disinfectant products as quantified by the Korea Center for Diseases Control and Prevention⁵⁾

제품 이름	주요 살균제 성분	농도, µg/ml	평균, µg/ml
옥시 싹싹 New 가습기 당번	PHMG	1260, 1290, 1280	1280
	DDAC	ND	
롯데마트 와이즐렉 가습기 살균제	PHMG	1330, 1320, 1270	1310
	DDAC	ND	
베지터블 홈 가습기 클린업	PHMG	6730, 7040, 6980	6920
세퓨 가습기 살균제	PGH	1710, 4970, 5130, 4900, 4690, 4960, 4710, 4820	4490
	DDAC	0.015~0.016(n=7)	
아토오가닉 가습기 살균제	PGH	300, 290, 310	300
	DDAC	ND	
애경 홈크리닉 가습기 메이트	CMIT	130, 110, 130	120
	MIT	30, 40, 40	
	DDAC	0.016, 0.007, 0.008	

PHMG, polyhexamethylene guanidine phosphate; DDAC, Didecyldimethylammonium chloride; PGH, oligo (2-(2-ethoxy) ethoxyethyl guanidinium; CMIT, chloromethylisothiazolinone; MIT, methylisothiazolinone; ND, no detection

노출되는 주된 시간활동은 잠잘 때였다. 잠잘 때 시간 당 호흡률은 국내 정보가 없어 미국 환경청 자료를 활용했다.^{6,7)} 수면 외의 활동은 보통의 경우로 최근 국립환경과학원이 보고한 호흡률을 활용했다.⁸⁾

4. 호흡기로 흡입된 살균제 양(µg) 추정

가습기 살균제를 사용한 방안 공기 중 농도(µg/m³)에 피해자의 호흡률(m³/hr)을 곱해서 시간 당 호흡기로 흡입된 살균제 양(µg)을 추정했다. 살균제 양이 호흡기 각 부위에 침착하는 정도(양)는 살균제 입자 크기 분포 자료가 없어 추정하지 못했다. 공기 중 살균제 농도와 호흡기로 흡입된 살균제 양은 5세 이하 아이를 사례로 추정하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 가습기 살균제 제품에서 살균제 농도(µg/ml)

2011년 질병관리본부가 발표한 가습기 살균제 제품 분석자료에 의하면 PHMG 평균농도가 옥시 싹싹 제품에서는 1,280 µg/ml, 롯데마트 와이즐렉은 1,310 µg/ml이었으며, 베지터블 홈 가습기 클린업은 가장 높은 6,920 µg/ml이었다. PGH 평균 농도는 세퓨가 4,490 µg/ml, 아토오가닉 가습기 살균제가 300 µg/ml이었다. CMIT와 MIT혼합물을 살균제로 사용한 제품은 애경 홈크리닉 가습기 메이트였고 제품

농도는 300 µg/ml 이하로 다른 제품 살균제 농도보다 훨씬 낮다(Table 1). 이 살균제 농도들은 가습기 살균제를 사용했던 1994년부터 2011년 판매 금지 전까지 모든 시기를 대표할 수 없지만 유일하게 보고된 자료이다. Ag₂O가 주성분 (농도범위 18~4,340 µg/ml)으로 들어있는 3개 제품(에코후레쉬 가습기 향균볼, 모던라이프 가습기 살균볼 스틱형, 옥시 싹싹 가습기당번 교체형)은 폐 손상 피해자가 주로 사용한 제품은 아니었다.⁵⁾

2. 공기 중 살균제 농도(µg/m³) 추정

1) 공기 중으로 분산된 시간 당 살균제 양(µg)

살균제가 들어있는 제품의 사용량을 사용 시간으로 환산했다. 예를 들면 PHMG 농도 1,280 µg/ml이 녹아 있는 옥시 싹싹 제품의 살균제를 20 ml 을 가습기에 넣어서 하루 10시간(잠자는 시간 8시간 포함) 동안 사용했다면 공기 중으로 발생된 시간 당 PHMG 발생률은 아래와 같다.

- 가습기 살균제 제품에서 PHMG 농도(µg/ml) × 하루 사용량(ml)
- 1,280 µg/ml × 20 ml/10 hr = 25,600 µg/10 hr = 2,560 µg/hr

제품의 살균제 농도(Table 1)를 활용하여 공기 중

으로 분산된 살균제 양을 추정할 수 있다. 가습기 살균제의 권고 사용량은 1회당 10 ml 또는 20 ml 였다. 설문 조사에서 피해자의 살균 성분 사용량은 평균 1회 10 ml 부터 최대 10회 주입하여 사용한 경우까지 다양하게 조사되었다.

2) 공기 중 살균제 농도

공기 중으로 분산된 살균제 양이 일정 크기의 방 전체로 혼합되었을 때 공기 중 살균제 농도를 추정했다. 살균제를 사용한 방 체적(m³)은 직접 조사했고, 시간당 공기 교환율(air change per hour, 이하 ACH)은 가정하였다. ACH는 방의 공기가 외부의 신선한 공기로 완전히 교체되는 시간당 횟수이다. 밀폐가 비교적 양호한 방의 경우, ACH는 2보다 낮거나 2 정도이며, 수시로 통풍이 잘 되는 방은 4~5 정도가 된다. 기계 환기 시설이 없는 가정에서 겨울철 잠잘 때 방의 환기는 2를 넘지 않을 것으로 판단된다. 방 크기 3 m×5 m×2.5 m(37.5 m³)와 시간당 공기 교환율(ACH=1)을 가정하여 추정된 공기 중 PHMG 농도(C, µg/m³)는 아래와 같다.

$$C = G/Q = (2,560 \mu\text{g/hr}) / (37.5 \text{ m}^3/\text{hr}) = 68.3 \mu\text{g/m}^3$$

폐 손상자 221명이 가습기를 사용한 평균 방 크기는 33.7 m³였고 범위는 5.6~276 m³였다. 겨울철 잠잘 때 방은 대부분 닫혀 있기 때문에 본 연구에서 추정된 농도는 과소평가될 가능성이 있다. 아이들의 대표적인 방 크기 2.5 m×4 m×2.5 m(약 25 m³)에서 동일한 살균제 사용 및 환기율을 적용하면 공기 중 농도는 102.4 µg/m³로 높아진다. 다양한 방 크기 및 환기율 조건에 따라 추정된 공기 중 PHMG 농도를 비교했다(Table 2). 공기 중 살균제 농도는 방의 체적, 환기 정도에 따라 달라진다.

PHMG와 PGH는 나노 크기의 중합체(평균 30~80 nm)여서⁹⁾ 쉽게 가라앉지 않고 분산된 상당 양이 공기 중에 그대로 남아 있을 가능성이 있어 사용 시간이 늘어날수록 누적으로 높아질 수 있다.

본 연구에서 방 전체로 확산을 가정하여 추정된 공기중 농도는 실제 사용자의 호흡기 영역에서 농도보다 과소평가될 가능성이 있다. 잠잘 때 가습기를 가까이에서 사용할 때는 살균제가 방 전체로 확산되기 전 호흡기 근처 공간에서 살균제 농도는 훨씬 높을 수 있고, 보통 겨울철에 환기는 잘 일어나지 않

Table 2. Airborne humidifier disinfectant concentration based on room volume and ventilation with an assumption of 2,560 µg dispersed into the air per hour

Air Change per Hour (ACH)	방 체적(W x L x H), m ³			
	(2.5×4×2.5)	(3×4×2.5)	(3.5×4×2.5)	(5×7×2.5)
1	102.4	85.3	73.1	29.3
2	51.2	42.7	36.6	14.6
3	34.1	28.4	24.4	9.8
4	25.6	21.3	18.3	7.3

W, width; L, length; H, height

기 때문이다. 하루 환기는 몇 분 정도 문을 가끔 열어 놓는 정도라고 응답한 경우가 대부분이었다. 본 연구에서 추정된 공기 중 살균제 농도는 불확실성은 있지만 일반적인 노출수준 범위로 볼 수 있다.

3. 호흡기로 흡입된 살균제 양(µg) 추정

호흡기로 흡입된 살균제 양(µg 또는 mg)은 위에서 추정된 방안 공기 중 살균제 농도에 5세 이하 아이의 표준호흡률을 잠잘 때와 가벼운 활동으로 구분해서 계산했다. 잠잘 때 연령별 표준호흡률은 연구된 결과가 없어 미국 환경청(Environmental Protection Agency, US EPA)에서 보고한 5세 이하의 잠잘 때 호흡률인 0.31 m³/hr,⁷⁾ 다른 시간 활동에서 호흡률은 우리나라 앉은 상태(sedentary)의 0.42 m³/hr을 활용했다.⁸⁾ 5세 이하 아이의 하루 호흡기로 흡입된 총 양(µg)은 살균제 농도(68.3 µg/m³)가 포함된 공기를 8시간 잠자는 동안과 2시간 동안 가정에서 가벼운 활동 때 호흡률을 근거로 아래와 같이 추정했다.

- 8시간 동안 잠잘 때 호흡기로 흡입된 살균제 양(µg)
공기 중 농도(68.3 µg/m³)×0.31 m³/hr×8 hr = 169.4 µg

- 2시간 가벼운 활동 때 호흡기로 흡입된 살균제 양(µg)
공기 중 농도(68.3 µg/m³)×0.42 m³/hr×2 hr = 57.4 µg

하루 호흡기로 흡입되는 총 PHMG양은 226.8 µg 이 된다. Table 3은 5세 이하 아이를 사례로 제품별 살균제 성분별 1일 호흡기로 흡입되는 양을 비교한

Table 3. Estimation of humidifier disinfectant amounts absorbed into the respiratory system based on room volume, volume of humidifier disinfectant used and ventilation rate*

가습기 살균제 제품 이름	주요 살균제 성분 ***	추정에 사용한 평균 농도, µg/ml	공기중 발생률, µg/hr	공기중 농도, µg/m ³	1일 살균제 호흡기 흡입량 (5세 이하)**			월호흡기 살균제 흡입량, mg
					수면 외 활동시간, 0.42 m ³ /hr	잠잘 때 8시간, 0.31 m ³ /hr	하루 10 시간 노출시호흡기 흡입 총량, µg	
옥시 싹싹 New 가습기 당번	PHMG	1,280	2,560	68	57	169	227	6.8
롯데마트 와이즐렉 가습기 살균제	PHMG	1,310	2,620	70	59	173	232	7.0
베지터블 홈 가습기 클린업	PHMG	6,920	13,840	369	310	915	1,225	36.8
세퓨 가습기 살균제	PGH	4,486	8,972	239	201	593	794	23.8
아토오가닉 가습기 살균제	PGH	300	600	16	13	40	53	1.6
애경 홈크리닉 가습기 메이트	CMIT	120	240	6	5	16	21	0.6
	MIT	37	73	2	2	5	6	0.2

*가습기 살균제를 사용한 방의 크기(37.5 m³), 하루 20 ml 사용, 시간 당 환기(ACH=1) 가정

**잠잘 때와 수면 외 활동으로 구분함

***PHMG, polyhexamethylene guanidine phosphate; PGH, oligo(2-(2-ethoxy) ethoxyethyl guanidinium; CMIT, chloromethylisothiazolinone; MIT, methylisothiazolinone

것이다. 살균제의 물리화학적 특성, 입자 크기 등을 모두 고려해서 호흡기 부위별로 침착되는 살균제 양을 추정하는 것은 매우 어렵다. 또한 개인별 호흡률, 개인 활동시간 등에 따라 호흡기로 흡입된 양은 달라진다. PHMG, PGH는 나노 크기의 입자이기 때문에 본 연구에서 추정한 호흡기 흡입량의 상당량이 폐포까지 쉽게 들어갔을 것으로 추정된다. 불확실성이 있다고 하더라도 겨울철 몇 개월 동안 매일 호흡기로 흡입된 PHMG, PGH의 양은 호흡기 방어기전에 의해 쉽게 제거되지 않았을 것으로 판단된다. PHMG가 들어있는 “옥시 싹싹 New 가습기 당번” 제품 사용자에서 가장 많은 폐 손상 피해자(70.1%)가 나왔고, PGH가 들어 있는 “세퓨 가습기 살균제”를 사용한 사람에게서 가장 높은 폐 손상 발생률(72.7%)과 사망률(54.2%)을 보인 이유로 의심할 수 있다.³⁾ 한편 “베지터블 홈 가습기 클린업”제품의 호흡기 흡입량이 가장 높게 추정되었다. 이것은 제품에 들어 있는 PHMG농도(6,920 µg/ml)가 가장 높기 때문이다. 이 제품을 사용한 사람들의 폐 손상 발생자는 다른 제품에 비해 많지 않았다. 피해 신고자(530명) 중 이 제품만을 사용한 사람은 단지 2명이었고 폐 손상자로 판정을 받은 사람 1명이 이 제품을 50% 이상 사용하였다.³⁾

본 연구에서 추정한 공기 중 살균제 농도와 호흡기로 흡입된 살균제 양은 폐 손상 등 여러 건강영

향과 상관 연구를 통해 가습기 살균제의 노출로 인한 건강영향을 규명하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 수 많은 화학물질이 들어간 제품의 사용과정에서 호흡기로 노출되고 흡입되는 노출 시나리오를 평가하는데 활용될 수 있다. 가습기 살균제 제품을 허가하기 전 본 연구에서 제시한 것처럼 공기 중 농도와 호흡기로 흡입된 양을 추정했다면 가습기 살균제 사용으로 인한 위험을 인지하고 허가할 수 없는 제품이었지만 이러한 평가과정이 없었다.

IV. 결 론

집단 폐 손상을 초래한 가습기 살균제 제품의 살균 성분인 PHMG, PGH, CMIT/MIT의 농도, 가습기 살균제 사용 특성을 근거로 방 안에서 공기 중 살균제 농도와 호흡기로 흡입되는 양을 추정했다. 호흡기로 흡입된 살균제 양은 5세 이하 아이의 1일 10 시간 활동 시간별 호흡률을 사례로 추정했다. 가습기 살균제 제품별 성분별로 1일 호흡기로 흡입된 양은 PHMG가 옥시 싹싹 New 가습기 당번이 227 µg, 롯데마트 와이즐렉 가습기 살균제가 232 µg, 베지터블 홈 가습기 클린업이 1,225 µg이었다. PGH는 세퓨 가습기 살균제가 794 µg, 아토오가닉 가습기 살균제가 53 µg 그리고 애경 홈크리닉 가습기 메이트

의 CMIT와 MIT 혼합물은 74 μg 으로 추정되었다. PHMG와 PGH가 CMIT와 MIT의 혼합물에 비해서 물질의 특성, 가습기 살균제 제품에서 높은 농도 등으로 호흡기로 흡입되는 양이 많은 것으로 추정됐다. 이처럼 높은 살균제 양이 겨울철 동안 매일 호흡기로 흡입되어 많은 사람에게서 폐 손상 등 건강영향이 발생된 것으로 판단된다.

References

1. Korea Center for Disease Control and Prevention (KCDC). 1st Study on the relationship between the use of humidifier disinfectant and lung injury; 2014. p.6-9.
2. Korea Environmental Protection Agency. 2nd Study on the relationship between the use of humidifier disinfectant and lung injury. 1st ed. 2015.
3. Park DU, Ryu SH, Lim HK, Kim SK, Ahn J, Roh HS, et al. Characteristics of exposure to humidifier disinfectant by lung injury patients. *J Environ Health Sci.* 2016; 42(3): 147-159.
4. Park DU, Friesen MC, Roh HS, Choi YY, Ahn JJ, Lim HK, et al. Estimating retrospective exposure of household humidifier disinfectants. *Indoor Air.* 2015; 25(6): 631-640.
5. KCDC. Analytical results of the chemical components of various humidifier disinfectant brands from KCDC's parliamentary inspection. Department of epidemiology research, Korea Center for Disease Control and Prevention; 2011.
6. Buonanno G, Morawska L, Stabile L, Wang L, Giovinco G. A comparison of submicrometer particle dose between Australian and Italian people. *Environ Pollut.* 2012; 169: 183-189.
7. US EPA. Metabolically Derived Human Ventilation Rates: A Revised Approach based upon Oxygen Consumption Rates, National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development; 2009. 600/R-06/129F.
8. National Institute of Environmental Research(NIEH), Korean Exposure Factors for Children; 2015. p.45-61.
9. KCDC, Aerosolization of humidifier disinfectants, 4th ed. Public Health Weekly Report, Korea Center for Disease Control and Prevention (KCDC);2011. P.831-832.