

금속가공유 취급 작업장의 생물학적 인자 노출평가

박현희* · 박동진 · 박해동

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Microbial Assessment in Metal-Working Fluids Handling Industry

Hyunhee Park* · Dongjin Park · Hae Dong Park

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

ABSTRACT

Objectives: The objective of this study is to evaluate microbial exposure hazards in the metal-working fluids(MWF) handling industry.

Methods: Air quality parameters(airborne bacteria, fungi, endotoxin and oil mist) and bulk MWF in storage tanks were evaluated at 54 points at nine sites in South Korea.

Results: The geometric means(GM) of culturable airborne bacteria, fungi, endotoxin and oil mist concentration were 133 CFU/m³ (n=376, range 7~6,510 CFU/m³), 159 CFU/m³ (n=381, range 7~8,469 CFU/m³), 8.06 EU/m³ (n=103, range 0.34~280.4 EU/m³) and 0.20 mg/m³ (n=104, range 0.01~2.87 mg/m³), respectively. The ratio of indoor to outdoor concentration was 2.7 for bacteria, 6.1 for endotoxin, and 4.8 for oil mist. Even though average airborne bacteria concentration did not exceed recommended exposure limits(1,000 CFU/m³), MWF in the storage tanks was highly contaminated with bacteria(arithmetic mean 2.1×10^6 CFU/ml) and exceeded recommended bacteria limits(10^5 CFU/ml).

Conclusions: It is necessary for MWF handling workplaces to conduct periodical biohazard inspection of MWF storage tanks. Additionally, further research may be necessary to establish biological occupational exposure limits.

Key words : bioaerosols, biological agents, microbial risk, metal-working fluids, endotoxin

I. 서 론

금속가공유란 금속을 가공하는 공정에서 발생하는 열, 절삭 칩 등을 제거하고 가공물의 방청, 공구수명의 연장, 가공정도의 향상 등 금속가공 기능을 향상시키기 위해 사용되는 물질을 의미한다. 금속가공유는 금속의 가공과정 중 고속으로 분사되어 기계본체, 공구에 부딪히게 되면 미세한 입자형태의 오일미스트로 발생하여 작업자 호흡기 및 피부를 통해 노출되는데 금속가공유의 노출이 암, 호흡기 질환, 피부 질환 발생과 유의한 연관성이 있다고 알려져 있다(Jung et al., 2006; Park et al., 2006).

금속가공유 내 발암물질로는 기유 중 함유물질인 다핵방향족 탄화수소와 첨가제로 사용되는 아민류(니트로소아민 등)가 주요 원인으로 추정되며, 후두암, 직장암, 췌장암, 피부/음낭암, 방광암 등의 발생과 상당한 관련성이 있다고 보고하였다(NIOSH, 1998). 또한 금속가공유를 취급하는 작업은 대부분 수작업으로 접촉성 피부염, 모낭염, 유성 여드름, 색소 이상 등의 피부질환을 발생하는 것으로 보고되고 있다(Almor, 1994; Park et al., 1991; Chun et al., 1996).

금속가공유를 취급하는 작업자에게서 발생하는 과민성 폐렴, 천식, 급성 기도자극, 만성 기관지염, 폐기능 장애 등의 호흡기 질환은(Kennedy et al., 1989;

*Corresponding author: Hyunhee Park, Tel: 052-7030-907, E-mail: phh2000@kosha.net
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, 400, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, Republic of Korea, 681-230
Received: May 29, 2014, Revised: August 22, 2014, Accepted: August 26, 2014

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.

Ameille et al., 1995; Massin et al., 1996; Greaves et al., 1997) 금속가공유를 재순환하여 사용하는 과정에서 발생하는 미생물 오염과 밀접한 연관성이 있다고 알려져 있다(Bernstein et al., 1995; Kreiss & Cox-Gander, 1997; CDC, 1996).

그러나 현재 산업안전보건법에서 금속가공유에 대한 작업장 관리는 중량기준으로 마련된 금속가공유의 노출기준(0.8 mg/m^3 , 혼합용매추출물; 고용노동부 고시 제 2013-38호)에 의해서만 관리되고 있어, 호흡기 질환의 주요 원인으로 알려져 있는 금속가공유에서 번식하는 미생물 농도와 금속가공유 내 함유되어 있는 다양한 첨가제에 대해서는 적절한 관리가 이루어지지 못하고 있다.

국내 금속가공유를 제조 또는 사용하고 있는 사업장 수는 2009년 실시된 제조업 실태조사 결과에서 5인 이상 전체 제조업 사업장(약 85,385개소)의 약 10.3%에 이르는 8,833개소이며, 금속가공유를 직접 취급하는 근로자는 57,810명으로 5인 이상 전체 제조업 종사 근로자 2,589,334명의 약 2.2%에 해당하는 것으로 보고되었다(Park et al., 2013). 미국 국립산업안전보건연구소(National Institute of Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 미국 내 전체 근로자의 약 5%에 해당하는 120만 명이 금속가공유에 노출되며, 사업장에서 가장 일반적인 유해요인 중 하나인 소음(85 dB(A) 이상)에 노출되는 근로자 수가 전체근로자의 약 17%인 400만 명임을 고려할 때, 금속가공유 역시 노출집단 근로자 측면에서 매우 중요한 유해요인이라고 하였다(NIOSH, 1998).

이번 연구에서는 대규모 노출집단을 가지고 있는 금속가공유 취급 작업을 대상으로 작업장 공기 및 저장조 내 금속가공유 중 세균, 곰팡이 등 생물학적 인자에 대한 농도수준을 평가하고 농도에 영향을 주는 환경변수를 분석하여 작업환경개선을 위한 자료로 활용하고자 하였다.

II. 연구대상 및 연구방법

1. 연구대상

금속가공유를 취급하는 자동차 및 기계 부품 제조 사업장 9개소를 대상으로 2013년 3월에서 8월 사이에 생물학적 인자 노출 평가를 실시하였다. 금속가공

유를 취급하는 작업장 내부와 옥외를 대상으로 공기 중 시료를 채취하고, 가공기계 내부 금속가공유 저장조에서 벌크시료를 채취하였다.

2. 측정방법

생물학적 인자의 공기 중 농도평가는 배지 충돌법 및 엔도톡신 분석방법(Park et al., 2012)을 이용하였다. 배지 충돌법은 살아있는 총 부유세균과 총 부유진균을 평가하는 방법이며 엔도톡신 분석방법은 모든 살아있거나 또는 죽은 생물학적 인자에 대한 생체량을 평가하는 방법이다. 생물학적 인자 평가와 함께 금속가공유 농도도 함께 평가하였다. 배지 충돌법은 하루 3 ~ 6회(각 5분씩 시료포집) 측정하고 엔도톡신과 금속가공유는 하루 6시간 동안 시료를 포집하였다. 공기 중 시료 채취와 함께 금속가공유 저장조에서 금속가공유 벌크시료를 채취하여 시료 중 세균, 곰팡이 및 엔도톡신 농도를 분석하였다.

1) 공기 중 총 부유세균 및 부유진균 평가

공기 중 총 부유세균과 총 부유진균은 NIOSH의 분석지침(Manual of Analytical Methods # 0800: Bioaerosol sampling, 1998) 및 국제표준화기구(ISO)의 분석지침(Indoor air-Part 18: Detection and enumeration of moulds-Sampling by impaction, 2011)에 따라 1단 앤더슨 샘플러(400 Hole ; single-stage-viable particulate impactor, Model Quick take 30, SKC Inc, USA)를 사용하였다. 배양법은 각 측정 장소에서 분당 28.3 리터(28 Liter per minute)로 5분씩 세균과 진균을 작업시간(10:00 ~ 16:00)중 3 ~ 6회, 바닥으로부터 약 1 m 떨어진 지점에서 지역시료 형태로 채취하였다. 세균의 채취는 곰팡이의 성장을 억제하기 위해 Cycloheximide 500 mg이 첨가된 세균용 배지 Trypticase Soy Agar(TSA; Komed, Korea, Lot no. 13I115504), 곰팡이(진균류)의 채취는 세균의 성장을 억제하기 위해 Chloramphenicol 100 mg이 첨가된 곰팡이용 배지 Sabouraud Dextrose Agar(SDAC; Komed, Korea, Lot no. 13H221524)를 사용하였다. 세균의 경우 37°C 에서 24 ~ 48시간, 곰팡이의 경우 25°C 에서 72시간 배양시킨 후 배양된 집락수를 계수하였다. 배양된 집락수를 계수한 후 이를 보정 방법(Positive hole correction 방법: Janet, 1989)에 따라 보정을 실시한 후 채취유량으로 나누어 농도를 환산하

였다. 집락수 보정방법은 앤더슨 샘플러로 유입된 생물학적 인자 입자가 400개의 구멍(Hole) 중 이미 생물학적 인자가 채워진 구멍으로 재유입되어 농도를 과소 평가하게 되는 현상을 보정하기 위하여 사용하는 방법으로 보정표를 사용하여 계수된 생물학적 인자 농도를 환산하게 된다.

2) 공기 중 엔도톡신 평가

엔도톡신 시료포집은 폴리카보네이트 필터(PC, Poly Carbonate, 37mm, 0.8 μ m, SKC, USA, Lot no. 225-1602)를 사용하여 분당 2 리터의 유속으로 약 6시간 동안 시료를 채취하였다. 일반적으로 사용하는 종이재질의 후면지지대 대신 플라스틱 재질의 지지대를 사용하였으며 필터 조립은 플라스틱 집게(Forcep)를 사용하여 3단 카세트(3-piece cassette)에 조립하였다. 시료채취는 바닥으로부터 약 1 m 떨어진 지점에서 지역시료 형태로 채취하였다. 엔도톡신은 실제 작업시간 중 약 6시간 동안 시료를 채취하였다. 그리고 4°C 이하로 보관하며 실험실로 운송된 시료는 -20°C에서 보관하였다가 5 ml의 튜브(Conical tube)로 옮긴 후 추출액(Limulus Amebocyte Lysate water, Lonza, Walkersville, MD USA, Part No. W 50-640, Lot no. 0000205473)에 넣어 필터가 잠기게 한 후 1시간 동안 초음파처리기(Sonicator, Branson, Model 5510, USA)를 사용하여 시료를 추출하였다. 엔도톡신 분석은 Lonza사(Walkersville, MD USA)의 엔도톡신 시약(Kinetic Limulus Amebocyte Lysate, Product Code: K50-643, Lot no. ML088XECQ4)를 이용하여 비색법(Chromogenic Method)으로 405 nm에서 설정한 흡광도에 이르는 시간을 계산하여 농도를 산출하는 방법인 Onset Time법(OD : 0.2)으로 분석, 평가하였다. 엔도톡신은 네덜란드 등 유럽국가에서 90 EU/m³을 관리기준으로 설정하여 관리하고 있으며, 작업환경 및 건강영향을 평가할 수 있는 유용한 지표로 활용되고 있다.

3) 공기 중 금속가공유 평가

시료채취 및 분석은 NIOSH의 분석지침(Manual of Analytical Methods # 5524: Metal working fluids, all categories, 2003)에 근거하여 지역시료로 채취하였으며, 고유량 샘플러를 사용하여 분당 2 리터의 유속으로 작업시간 중 6시간 이상 측정하였다. 시료채취매체는 폴리테

트라플루오로에틸렌 필터(PTFE: Polytetrafluoroethylene, 37 mm, 2.0 μ m, SKC, USA, Lot no. 225-27-07) 필터를 사용하였다. 측정결과와 정확도를 높이고 오차를 최소화하기 위해 측정 전, 후에는 유량보정을 실시하였고 현장 공시료를 포함시켰다. 시료는 냉장 상태로 운송 및 보관하여 3일 이내에 분석하였다. 시료는 추출작업 전 해독도 10⁻⁶ g의 전자저울(XP2U, Mettler-Toledo, German)을 이용하여 먼저 무게를 측정한 후 여과지 직경 37 mm 필터에 적합한 추출갈대기에서 테트라하이드로퓨란, 톨루엔, 메탄올(Tetrahydrofuran:Toluene:Methyl alcohol)을 1:1:1로 혼합한 용매를 이용하여 금속가공유를 추출하고 건조 후 다시 무게를 칭량하여 추출 전 무게와의 차이를 금속가공유의 무게로 하였다. 무게 칭량은 전자저울이 설치된 중량 분석실에 필터를 최소한 1시간 정도 방치하여 중량 분석실의 온·습도 조건에 필터의 온·습도 조건을 평형화시키고 정전기를 제거한 후 무게를 측정하였다.

4) 벌크시료 분석

각 지점별로 채취한 금속가공유를 적절한 배율로 희석하고 TSA 배지 및 SDAc 배지에 100 μ l씩 분주하여 도말하고, 세균의 경우 37°C에서 24 ~ 48시간, 곰팡이의 경우 25°C에서 72시간 배양시킨 후 배양된 집락수를 계수하였다.

3. 자료 분석 및 통계

측정결과는 자료의 정규성 검정을 실시하여 분포 특성에 따라 평균값을 산술평균, 기하평균 등으로 나타내었다. 공기 중 생물학적 인자 농도에 영향을 주는 변수를 알아보기 위해 상관분석 및 다중회귀분석을 실시하였으며, 자료 분석을 위한 통계처리는 PASW version 18.0을 이용하였다.

III. 연구결과

1. 공기 중 생물학적 인자 노출 농도 수준

9개 사업장의 63개 지점(작업장 내부 54개 지점, 옥외 9개 지점)에 대한 평가를 실시하였으며, 공기 중 세균, 곰팡이, 엔도톡신, 금속가공유(오일미스트) 평가 결과는 Table 1과 같았다. 측정 자료의 분포를 살펴보면 (Kolmogorov-Smirnov), 세균(p=0.194)과 금속가공유

Table 1. Airborne biological agent concentration in MWF handling processes

Classification		Bacteria (CFU/m ³)	Fungi (CFU/m ³)	Endotoxin (EU/m ³)	MWF (mg/m ³)
Indoor (Processes) (54 points)	n*	376	381	103	104
	Mean±SD [†]	347±672	324±641	26.46±50.62	0.35±0.39
	GM [‡] (GSD [§])	133(3.827)	159(3.203)	8.06(4.333)	0.20(3.086)
	Range	7 ~ 6,510	7 ~ 8,469	0.34 ~ 280.4	0.01 ~ 2.87
Outdoor (9 points)	n	55	54	15	11
	Mean±SD	144±342	384±660	2.09±1.84	0.05±0.046
	GM(GSD)	50	174	1.33	0.042
	Range	7 ~ 2,105	14 ~ 3,891	0.08 ~ 6.92	0.02 ~ 0.17

n* : sample numbers, SD[†] : standard deviation, GM[‡] : geometric Mean, GSD[§] : geometric standard deviation

($p=0.062$)는 대수정규분포하는 특성을 보였으나, 진균($p<0.01$)과 엔도톡신($p=0.02$)은 대수분포에 가까운 자료 분포를 나타내었다. 공기 중 생물학적 인자 농도를 기하평균값을 기준으로 살펴보면 세균은 133(7 ~ 6,510) CFU/m³, 진균은 159(7 ~ 8,469) CFU/m³, 엔도톡신은 8.06(0.34 ~ 280.4) EU/m³, 금속가공유는 0.20(0.01 ~ 2.87) mg/m³ 이었다. 옥외 측정 자료는 세균이 50(7 ~ 2,105) CFU/m³, 진균은 174(14 ~ 3,891) CFU/m³, 엔도톡신은 1.33(0.08 ~ 6.92) EU/m³, 금속가공유는 0.042(0.02 ~ 0.17) mg/m³ 이었다. 산술평균값을 기준으로 살펴보면, 세균은 347 CFU/m³, 진균은 324 CFU/m³, 엔도톡신은 26.46 EU/m³, 금속가공유는 0.35 mg/m³ 이었다. 옥외 측정 자료의 산술평균은 세균이 144 CFU/m³, 진균은 384 CFU/m³, 엔도톡신은 2.09 EU/m³, 금속가공유는 0.05 mg/m³ 이었다.

기하평균값을 기준으로 작업장 내부와 옥외의 공기 중 농도를 비교하면, 작업장 내부가 옥외보다 세균은 약 2.7배, 엔도톡신 약 6.1배, 금속가공유는 약 4.8배 더 높았고, 진균은 유사한 농도 수준을 보였다. 산술평균값으로는 작업장 내부가 옥외보다 세균은

약 2.4배, 엔도톡신은 약 12.6배, 금속가공유는 약 7배 더 높았고, 진균은 유사한 농도를 보였다.

작업장 내부 측정지점 중 미국산업안전청(Occupational Safety and Health Agency, OSHA)에서 권고한 실내 공기 중 세균 및 진균 농도기준(1,000 CFU/m³)을 초과하는 지점 수는 세균은 전체 작업장 내부 시료 376개 중 29개 시료(7.7%)가 초과하였고 진균은 381개 시료 중 22개 시료(5.8%)가 초과하였다. 엔도톡신은 전체 시료 103개 중 10개 시료(9.7%)가 네덜란드에서 권고한 엔도톡신 농도기준인 90 EU/m³을 초과하였다.

2. 벌크시료 중 생물학적 인자 노출농도 수준

벌크시료 중 세균 및 곰팡이 농도를 살펴보면, 전체 70개 벌크시료 중 세균은 42개 시료, 진균은 24개 시료에서 검출되었다. ‘금속가공유 K’를 제외하고 모두 수용성 금속가공유였으며 비수용성인 ‘금속가공유 K’는 pH 5.122로 매우 낮았고, 세균 및 곰팡이가 전혀 성장하지 못하였다. 검출된 시료의 산술평균을 살펴보면 (Table 2), 금속가공유의 평균 온도는 22.3℃였고, pH는

Table 2. Biological agent concentration of bulk MWF

Classification	Temp*(°C)	pH	Bacteria(CFU/ml)	Fungi(CFU/ml)
n	70	70	42	24
Mean	22.3	8.794	2,127,046	1,675
GM	21.8	8.735	121,979	780
Range	16.5 ~ 32.8	4.844 ~ 10.950	10 ~ 42,600,000	60 ~ 10,000

Temp* : temperature

Table 3. Biological agent mean concentration of bulk MWF by types of MWF

Type of MWF*	n	Temp. (°C)	pH	Detected n	Bacteria (CFU/ml)	Detected n	Fungi (CFU/ml)
A	14	23.3	9.521	4	53,313	5	656
B	6	20.5	9.100	5	1,504,780	4	1,733
C	2	21.2	9.634	1	10	-	-
D	5	18.7	8.971	2	26,190	-	-
E	6	18.2	8.668	6	1,325,580	1	3,160
F	5	21.4	8.813	3	904,667	-	-
G	5	20.1	8.884	-	-	1	7,000
H	6	21.3	8.640	6	1,335,012	5	260
I	9	27.2	8.908	8	7,307,500	4	4,000
J	4	25.4	8.404	-	-	-	-
K	4	29.8	5.122	-	-	-	-
L	4	28.7	8.257	4	108,025	4	633

MWF*: metal working fluids

8.794였으며 세균은 2.1×10^6 CFU/ml, 진균은 1,675 CFU/ml이었다. 기하평균으로는 세균이 1.2×10^5 CFU/ml, 진균이 780 CFU/ml이었다. 최대농도는 세균이 4.2×10^7 CFU/ml, 진균은 10^4 CFU/ml였고, pH는 10.950, 가공유 온도는 32.8°C이었다. 벌크시료 중 생물학적 인자 농도는 금속가공유의 종류에 따라 큰 농도차이를 보였다(Table 3). 벌크시료 중 가장 높은 세균농도를 나타낸 ‘금속가공유 I’의 농도는 7.3×10^6 CFU/ml로 매우 높았다. 금속가공유의 종류별로 농도수준을 살펴보면, B, E, F, H, I, L 금속가공유에서는 세균이 부패한 계 10^5 CFU/ml을 초과하는 농도를 나타내었고 반면 A, D, G, J, K에서는 생물학적 인자가 거의 성장하지 못하였다.

3. 공기 중 생물학적 인자 간 상관관계

생물학적 인자 간 상관관계 분석결과는 Table 4와 같다. 공기 중 세균농도는 온도($r=0.341$, $p<0.01$), 습도($r=0.317$, $p<0.01$), 진균농도($r=0.346$, $p<0.01$), 엔도톡신($r=0.305$, $p<0.01$), 벌크시료 중 세균 농도($r=0.276$, $p<0.01$), 벌크시료 pH($r=-0.274$, $p<0.01$), 벌크시료 온도($r=0.286$, $p<0.01$)와 약한 상관관계가 있었다. 공기 중 진균농도의 경우, 온도($r=0.529$, $p<0.01$), 습도($r=0.634$, $p<0.01$), 벌크시료 온도($r=0.545$, $p<0.01$)와 상관관계가 있었고, 세균농도($r=0.346$, $p<0.01$), 엔도톡신 $r=0.250$, $p<0.01$), 벌크시료 중 진균 농도($r=0.322$, $p<0.01$), 벌크시료 pH($r=-0.312$, $p<0.01$)와 약한 상관관계가 있었다.

Table 4. Correlation coefficients of biological hazards and environmental factors

구분		Airborne					Bulk				
		Temp	Humidity	Bacteria	Fungi	Endotoxin	Oilmist	Bacteria	Fungi	pH	Temp
Air borne	Temp n=450	1.000	.530**	.341**	.529**	.035	-.131**	.093	.145**	-.128*	.617**
	Humidity n=450	.530**	1.000	.317**	.634**	.111*	.016	.121*	.154**	-.494**	.575**
	Bacteria n=431	.341**	.317**	1.000	.346**	.305**	.037	.276**	.103	-.274**	.286**
	Fungi n=435	.529**	.634**	.346**	1.000	.250**	-.052	.267**	.322**	-.312**	.545**
	Endotoxin n=449	.035	.111*	.305**	.250**	1.000	.239**	.574**	.279**	-.364**	-.112*
	Oilmist n=435	-.131**	.016	.037	-.052	.239**	1.000	.021	.018	.133**	-.192**
Bulk	Bacteria n=398	.093	.121*	.276**	.267**	.574**	.021	1.000	.528**	-.287**	-.025
	Fungi n=378	.145**	.154**	.103	.322**	.279**	.018	.528**	1.000	-.179**	.133*
	pH n=393	-.128*	-.494**	-.274**	-.312**	-.364**	.133**	-.287**	-.179**	1.000	-.138**
	Temp n=393	.617**	.575**	.286**	.545**	-.112*	-.192**	-.025	.133*	-.138**	1.000

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

Table 5. Environmental factors affecting airborne bioaerosol concentration

Dependent variable	Most affecting Independent variable	B	β	R2	F	p-value
Airbone Bacteria	Constant	2.397		0.263	20.455	<0.001
	Temp.	0.083	0.313			<0.001
	Bacteria in Bulk	0.061	0.292			<0.001
	MWF 'I'	1.268	0.247			<0.001
	Half-Enclosed	0.771	0.211			<0.001
Airbone Fungi	Constant	0.922		0.651	12.561	<0.001
	Humidity	0.028	0.451			<0.001
	LEV(None)	0.950	0.313			<0.001
	Temp.	0.056	0.245			<0.001
	MWF 'I'	0.864	0.211			<0.001
Airbone Endotoxin	Constant	1.263		0.537	12.561	<0.001
	Bacteria in Bulk	0.128	0.563			<0.001
	CNC	0.702	0.222			<0.001
	MWF 'K'	-1.723	-0.234			<0.001
	MWF 'A'	-1.219	-0.222			<0.001

온도, 습도와는 상관관계는 공기 중 세균보다 공기 중 진균이 더 강한 상관관계를 나타내었으며 세균과 진균 모두 벌크시료의 pH 농도와는 음의 상관관계를 나타내었다.

엔도톡신의 경우 온도($r=0.035$, $p=0.465$), 습도($r=0.111$, $p<0.05$)와는 상관관계가 없었으며 공기 중 세균농도($r=0.305$, $p<0.01$), 진균농도($r=0.250$, $p<0.01$)와는 약한 상관관계가 있었고 벌크시료 중 세균농도($r=0.574$, $p<0.01$)와는 상관관계가 있었다. 벌크시료 중 pH($r=-0.364$, $p<0.01$)와는 약한 음의 상관관계가 있었다.

4. 공기 중 생물학적 인자 농도에 영향을 주는 환경 변수

공기 중 세균에 대한 회귀분석결과(Table 5), 베타 계수로 본 독립변수들의 상대적인 영향력은 온도($\beta=0.313$)가 가장 크고, 다음으로 벌크시료 중 세균($\beta=0.292$), 금속가공유 종류('F', $\beta=0.247$), 가공기계구조(반밀폐, $\beta=0.211$)이었다. 공기 중 진균은 습도($\beta=0.451$)가 가장 영향력이 컸고, 다음으로 국소배기장치의 설치여부(미설치, $\beta=0.313$), 온도($\beta=0.245$), 금속가공유 종류(가공유'I', $\beta=0.211$), 가공기계구조(반밀폐, $\beta=0.211$) 등의 순이었다.

공기 중 엔도톡신은 벌크시료 중 세균($\beta=0.563$)의 영향이 매우 컸고, 가공기계의 종류(CNC, $\beta=0.222$)

가 영향력이 있었으며, 금속가공유 종류('K', 'A', $\beta=-0.234$, $\beta=-0.222$) 중 일부가 음의 영향력을 가지고 있었다.

IV. 고 찰

1. 공기 중 생물학적 인자 노출 수준

금속가공유 취급 작업장 9개소의 54개 측정지점에서 평가한 공기 중 생물학적 인자의 기하평균값은 세균 133(7 ~ 6,510) CFU/m³, 진균 159(7 ~ 8,469) CFU/m³, 엔도톡신 8.06(0.34 ~ 280.4) EU/m³, 금속가공유(오일미스트) 0.20(0.01 ~ 2.87) mg/m³ 이었다. Gilbert et al.(2010)의 연구에서는 캐나다에 위치한 25개 금속가공유 취급 작업장의 44개 지점에서 측정한 공기 중 세균농도가 120 ~ 1,500 CFU/m³이고 엔도톡신은 검출한계 미만 ~ 183 EU/m³로 보고하여 이번 연구결과 보다 낮은 농도 수준이었다. Woskie et al.(1996)의 연구에서는 금속가공유에 노출되는 근로자들의 공기 중 세균농도(기하평균)가 102 CFU/m³이었고 노출되지 않는 그룹이 14 CFU/m³이었으며 엔도톡신은 노출그룹이 7.1 EU/m³, 비노출그룹이 1.9 EU/m³으로 보고하여 이번 연구결과와 유사하였다. Thorne et al.(1996)의 연구에서는 중온성 세균이 40 ~ 4,000 CFU/m³, 진균이 <470 CFU/m³, 엔도톡신이 검출한계(4 EU/m³) ~ 790 EU/m³수준으로 보고하여 이번 연구와 유사하였다. Simpson et al.

(2003)의 연구에서는 공기 중 오일미스트가 중앙값(Median)으로 비수용성 0.78 mg/m³(n=40), 수용성 0.12 mg/m³(n=298), 공기 중 엔도톡신이 97.52 EU/m³(n=141)으로 보고하였다. Kreiss & Cox-Gander(1997)의 연구에서는 8명의 과민성 폐렴 환자가 0.50 mg/m³이하의 금속가공유 농도에서 발생하여 낮은 금속가공유 농도에서도 발생할 수 있다고 하였다. 이번 연구에서는 수용성 금속가공유를 대상으로 하였고, 금속가공유(오일미스트) 측정 및 분석을 용매추출법을 사용하였기 때문에 과거 연구에서 사용한 중량법과 비교하면 이번 연구결과에서 약 3배 정도 높은 값을 나타내었을 것으로 추정된다. 금속가공유(오일미스트)의 노출기준은 중량법(5 mg/m³)에서 용매추출방법(0.8 mg/m³)으로 변경된 후 작업환경측정결과 농도수준이 약 0.25~0.31 mg/m³에서 0.08~0.1 mg/m³으로 3배 이상 낮아졌다(Park et al., 2013). 이러한 결과로 비추어볼 때 과거 노출평가 논문과 비교하기 위하여 금속가공유 농도를 중량법으로 측정, 분석하였다고 가정하면 약 0.60 mg/m³ 수준이었을 것으로 추정된다. 과민성폐장염이 발생되었던 역학조사 사례(Lee et al., 2008)에서는 공기 중 세균이 100 CFU/m³, 진균 75 CFU/m³으로 이번 연구보다 낮은 농도수준이었으나 금속가공유 벌크시료에서는 세균이 4.6×10^5 CFU/mL, 진균이 1.8×10^5 CFU/mL, 엔도톡신이 1.5×10^4 EU/mL 수준으로 부패한계를 초과하였고, 기존의 과민성 폐장염 발생사례들과 비슷한 수준 또는 그 이상으로 오염되어있어 금속가공유에 의한 미생물 항원에 노출되어 과민성폐장염이 발생한 것으로 보고하였다.

2. 금속가공유 벌크시료 중 생물학적 인자 노출 수준

금속가공유 취급 작업장의 공기 중 세균농도는 사료제조업, 폐기물 취급업 등 생물학적 인자에 노출가능한 타 업종과 비교하여 낮은 농도수준이었으나, 금속가공유 벌크시료의 세균 오염은 대부분 부패한계를 초과하여 잠재적 위험성을 가지고 있었다. 금속가공유 벌크시료 중 세균 농도(n=70)는 산술평균으로 2.1×10^6 CFU/ml로 부패한계인 10^5 CFU/ml를 초과하였고, 최대농도는 4.2×10^7 CFU/ml 였다. 금속가공유는 총 12종류였으며 세균의 산술평균 농도는 12종 중 7종에서 부패한계인 10^5 CFU/ml를 초과하였다. Gilbert et al.(2010)의 연구에서도 공기 중 생물

학적 인자 농도는 낮았으나 금속가공유 벌크 중 세균농도는 2.4×10^9 CFU/ml로 매우 높았다고 보고하였다. 가장 높은 농도를 나타낸 금속가공유는 유해성분이 전혀 첨가되지 않은 친환경 금속가공유(금속가공유 'T')이었으며 금속가공유에서 세균이 번식하지 못한 경우는 염소계 성분이 함유된 가공유(금속가공유 'G')이거나 비수용성(금속가공유 'K')이었고 방부제 등 첨가제(트리에탄올 아민, 에탄올 아민, 벤조트리아졸, 플루오레세인, 트리아진, 보린산 등)가 다량 함유된 경우(금속가공유 'A')로 금속가공유 중의 미생물 농도는 함유된 방부제에 따라 농도수준의 차이가 매우 크게 나타났다. Marchand et al.(2010)의 연구에서도 금속가공유를 사용하는 가공기계에서 청소방법과 방부제 첨가유무 등 다양한 조건으로 실험을 하였는데 청소방법의 변화는 세균농도 변화에 영향을 주지 못했으나 방부제 사용은 큰 영향을 주었다고 보고하였다. 금속가공유 중 미생물의 종류는 방부제가 없는 경우 매우 다양한 균종이 분포하였고, 방부제가 2종 이상 함유된 경우 균의 종류는 감소하였다고 보고하였다. 금속가공유 중 미생물에 의한 건강영향을 최소화하기 위해 미생물 번식을 억제하는 것은 중요하다. 그러나 미생물 번식을 억제하기 위한 화학적 방부제를 무분별하게 사용하게 되면 2차적인 건강영향의 우려가 발생할 수 있으므로(Yoon et al., 2012) 화학적 방부제가 아닌 방법(오존처리, 금속가공유 필터링, 저장조 관리 등)으로 미생물 증식을 억제하는 기술의 도입이 필요하다. 금속가공유에 함유된 화학적 방부제의 유해성을 확인하는 작업은 매우 어려웠는데, 실제 물질안전보건자료(MSDS) 등을 통해서는 영업비밀로 분류한 경우가 많아 방부제 등 첨가제의 함량 및 사용종류를 구분하기 어려웠다. Yoon et al.(2012)의 연구에서 120건의 수용성 금속가공유의 MSDS에 기록된 방부제 성분 및 함량의 정보제공 여부를 분석한 결과 120건 중 3건(2.5%)만이 기록되어 있다고 보고하였고, 대부분의 금속가공유의 MSDS에서는 방부제에 대한 정보 또는 함유표시를 하지 않았는데, 영업비밀로 나타낸 성분에 방부제가 함유되어 있을 가능성이 높다고 추정하였다. 금속가공유 등을 구매하는 경우 물질안전보건자료의 구성 성분 확인 뿐 아니라 영업비밀로 분류한 내용, 미량 함유로 표시되지 않은 방부제 사용 유무에 대한

확인 등이 필요하다. 또한 저장조의 금속가공유를 부패한계 이내로 유지하도록 하는 pH 점검, 교체주기 설정, 저장조 청소 등의 작업환경관리가 필요하다.

3. 공기 중 생물학적 인자 농도에 영향을 주는 환경 변수

공기 중 엔도톡신 농도는 공기 중 세균농도($r=0.305$)보다 금속가공유 벌크시료 중 세균농도($r=0.574$)와 더 높은 상관관계가 있었다. 엔도톡신 농도와 벌크시료 중 세균농도와와의 관계는 회귀분석을 통해서도 확인할 수 있었는데 엔도톡신 농도를 종속변수로 두고 분석하였을 때 가장 영향력 있는 독립변수는 벌크시료 중 세균농도($\beta=0.563$, $R^2=0.537$)였다. 금속가공유 작업장의 경우 대부분 가공기계를 밀폐하여 작업을 하고 간헐적으로 개방하므로 금속가공유가 공기 중으로 비산하여 공기 중 세균 농도에 영향을 주는 것은 크지 않은 것으로 추정된다. 대부분의 금속가공유가 부패한계를 초과하는 높은 농도수준의 세균에 오염되어 있음에도 불구하고 공기 중 세균 농도수준은 높지 않고, 공기 중 세균 농도가 금속가공유 중 세균농도와 약한 상관관계만을 보이고 있는 점이다. 다만, 금속가공유가 부패한계를 초과한 경우, 작업장 내 누적 오염도가 높아 공기 중 엔도톡신 농도에 영향을 주는 것으로 판단된다. 금속가공유 벌크시료 중 세균 농도는 함유된 첨가제의 종류에 따라 명확한 농도차이를 나타내어 금속가공유 취급 작업장의 공기 중 생물학적 인자 농도관리를 위해서는 금속가공유의 선정 및 지속적인 저장조의 오염여부 확인, 관리가 필요하다. Gilbert et al.(2010)의 연구에서는 가공기계의 종류(Type of machines)는 작업장 내부 공기 중 생물학적 인자 농도에 영향을 준다고 보고하였는데 CNC 선반의 엔도톡신 농도가 머시닝센터(MCT) 및 표면연마기(G/R)보다 높았고, 흡입성 분진은 범용선반이, 그리고 오일미스트는 표면연마기(G/R)에서 통계적으로 유의하게 높다고 보고하였다. 또한 밀폐되어 있는 구조에서 오일미스트 농도가 적었으며 가공기계를 밀폐 구조화 하는 것이 오염원의 노출을 감소시키는 좋은 대책이라고 하였다. 그러나, 금속가공유의 종류가 엔도톡신 농도 및 금속가공유 오일미스트 농도에 어떠한 영향을 미치는지는 밝혀내지 못했으며 인자들 상호간의 상관관계는 확인할 수 없었다고 보고하였다. Simpson et al.(2003)의 연구에서는 수용성 가공유의

pH, 온도, 희석비율 등이 가공유 내의 세균농도에 영향을 주는 인자라고 하였고, Park et al.(2008)의 연구에서는 금속가공유에 작동유가 유입될 때, pH가 8.5보다 낮을 때, 온도가 높을 때 또한 합성유일 때 엔도톡신 농도가 높았다고 보고하였다.

V. 결 론

금속가공유를 취급하는 사업장에서 작업장 공기, 외부공기, 벌크시료를 채취하여 세균, 진균, 엔도톡신 농도를 분석한 결과는 다음과 같았다.

1. 금속가공유 취급 작업장 9개소의 54개 측정지점에서 평가한 공기 중 생물학적 인자의 기하평균값은 세균 133(7 ~ 6,510) CFU/m³, 진균 159(7 ~ 8,469) CFU/m³, 엔도톡신 8.06(0.34 ~ 280.4) EU/m³, 금속가공유(오일미스트) 0.20(0.01 ~ 2.87) mg/m³ 이었다.
2. 세균의 경우 전체 376개 시료 중 29개 시료가 미국 산업안전보건청(OSHA)에서 정한 관리기준 1,000 CFU/m³를 초과하였다. 진균은 381개 시료 중 22개 시료가 1,000 CFU/m³를 초과하였다. 엔도톡신은 103개 시료 중 10개 시료가 네덜란드에서 정한 관리기준 90 EU/m³를 초과하였고 금속가공유는 104개 시료 중 13개 시료가 노출기준 0.8 mg/m³를 초과하였다.
3. 전체 작업장 내부 농도는 옥외 농도와 비교하여 세균은 약 2.7배, 엔도톡신 약 6.1배, 금속가공유는 약 4.8배 높았고, 진균은 유사한 농도를 보였다.
4. 금속가공유 벌크시료 중 세균 농도($n=70$)는 산술평균으로 2.1×10^6 CFU/ml로 부패한계인 10^5 CFU/ml를 초과하였고 최고농도는 4.2×10^7 CFU/ml였다. 금속가공유는 총 12종류였으며 세균의 산술평균 농도는 12종 중 7종에서 부패한계인 10^5 CFU/ml를 초과하였다.
5. 공기 중 생물학적 인자 농도에 가장 많은 영향을 주는 인자는 저장조 내 금속가공유의 부패여부였으며, 이외에도 세균은 높은 온도와 밀폐되지 못한 구조의 가공기계가, 진균은 높은 습도와 국소배기장치 미설치가 농도를 높이는 환

경인자였다.

금속가공유 취급 작업장의 공기 중 생물학적 인자의 농도수준은 전체시료의 약 10%정도가 권고기준을 초과하는 정도였으나, 옥외농도와 비교하여서는 세균 2.7배, 엔도톡신 6.1배 이상 높았다. 또한, 저장조 내의 금속가공유 벌크시료는 부패한계(10^5 CFU/ml)를 초과하여 잠재적 위험성이 내재되어 있었다. 금속가공유를 부패한계 이하로 유지관리하는 것이 매우 중요하나, 미생물 번식 억제를 위해 화학적 방부제를 남용하는 것은 2차적인 건강장해를 유발할 수 있으므로 방부제의 사용을 최소화하고 오존 처리, 금속가공유 필터링, 저장조 관리 등 미생물 증식을 억제하는 기술의 도입이 필요하다. 또한, 금속가공유를 공기 중 오일미스트 농도에 대해서만 규제하는 것이 아니라 공기 중 생물학적 인자 및 금속가공유 벌크시료에 대한 세균, 곰팡이 등의 농도에 대한 관리기준 마련이 필요하다.

References

- Alomar A. Occupational skin disease from cutting fluids. *Dermatol Clin* 1994;12(3):537-546
- Ameille J, Wild P, Choudat D, Ohl G, Vaucouleur JF et al. Respiratory symptoms, ventilatory impairment, and bronchial reactivity in oil mist-exposed automobile workers. *Am J Ind Med* 1995 Feb;27(2):247-56
- Bernstein DI, Lummus ZL, Santilli G, Siskosky J, Bernstein IL. Machine operator's lung. A hypersensitivity pneumonitis disorder associated with exposure to metalworking fluid aerosols. *Chest* 1995 Sep;108(3):636-41
- Centers for Disease Control and Prevention(CDC). Biopsy-confirmed hypersensitivity pneumonitis in automobile production workers exposed to metalworking fluids--Michigan, 1994-1995. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 1996 Aug 9;45(31):678
- Chun BC, Kim HO, Kim SD, Oh CW, Yum YT. A study on dermatologic diseases of workers exposed to cutting oil. *Korea J. of Preventive Medicine* 1996; 29(4)
- Gilbert Y, Veillette M, Meriaux A, Lavoie J, Cormier Y et al. Metalworking fluid-related aerosols in machining plants. *J Occup Environ Hyg* 2010 May;7(5):280-9
- Greaves IA, Eisen EA, Smith TJ, Pothier LJ, Kriebel D et al. Respiratory health of automobile workers exposed to metal-working fluid aerosols: respiratory symptoms. *Am J Ind Med* 1997 Nov;32(5):450-9
- International Organization for Standardization. ISO 16000-18:2011(en) Indoor air — Part 18: Detection and enumeration of moulds — Sampling by impaction, 2011. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16000:-18:ed-1:v1:en>
- Janet M. Positive Hole Correction of Multi-Jet Impactors for Collecting Viable Microorganisms. *Am Ind Hyg Assoc* 1989; 50(11) 561-568
- Jung JY, Lee JJ, Kim PG, Kim HR, Park HR. Chemical occupational limits for metalworking fluids. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report 2006. p. 63-91
- Kennedy SM, Greaves IA, Kriebel D, Eisen EA, Smith TJ et al. Acute pulmonary responses among automobile workers exposed to aerosols of machining fluids. *Am J Ind Med* 1989;15(6):627-41
- Kreiss K, Cox-Gander J. Metalworking fluid-associated hypersensitivity pneumonitis: a workshop summary. *Am J Ind Med* 1997;32(4):423-432
- Lee SW, Ko DH, Chin KW, Park DU, Lee JT. A case of hypersensitivity pneumonitis in a worker exposed to metal working fluids. *Korean J Occup Environ Med* 2008;20(1):37-45
- Massin N, Bohadana AB, Wild P, Goutet P, Kirstetter H et al. Airway responsiveness, respiratory symptoms, and exposures to soluble oil mist in mechanical workers. *Occup Environ Med* 1996 Nov;53(11):748-52
- Marchand G, Lavoie J, Racine L, Lacombe N, Cloutier Y et al. Evaluation of bacterial contamination and control methods in soluble metalworking fluids. *J Occup Environ Hyg* 2010 Jun;7(6):358-66
- National Institute for Occupational Safety and Health, Criteria for recommended standard: occupational exposure to metalworking fluids(DHHS (NIOSH) Pub No. 98-102), 1998.
- NIOSH Manual of Analytical Methods #0800, Bioaerosol sampling (Indoor Air) Culturable organisms: bacteria, fungi, thermophilic actinomycetes, Issue 1: 15 January 1998, <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0800.pdf>
- NIOSH Manual of Analytical Methods #5524, Metalworking fluids (MWF) All Categories, Issue 1: 15 January 2003, <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/5524.pdf>
- Park BC, Lee JY, Kim HG, Kim JW. Epidemiologic Study on the Dermatologic Disorders from Cutting Oil.

- Annals of Dermatology 1991;29(3):298-303
- Park DU, Yoon CS, Ha KC, Choi SJ. Practical guideline for Metalworking fluids. Korea Occupational Safety and Health Agency Research Report. Publication No Incheon 2006-25-758, 2006. p. 40-55
- Park DU, Yoon CS, Ryu KN, Ha KC, Choi SJ. Practical guideline for the replacement of soluble metalworking fluids. J Korea Soc Occup Environ Hyg 2008; 18(2):T1-T5
- Park HH, Park DJ, Park HD. Micobial exposure assessment in metal-working fluids handling industries. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. Publication No 2013- OSHRI-970 2013. p. 12-17
- Park HH, Park HD, Lee IS. A Study on the Biological Hazards Exposure for Waste Handling Industries in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg, 2012; 22(4): 265-275
- Simpson AT, Stear M, Groves JA, Piney M, Bradley SD et al. Occupational exposure to metalworking fluid mist and sump fluid contaminants. Ann Occup Hyg 2003 Jan;47(1):17-30
- Thorne PS, DeKoster JA, Subramanian P. Environmental Assessment of Aerosols, Bioaerosols, and Airborne Endotoxin in a Machining Plant. AIHA J 1996 Dec; 57, 12; ProQuest p.1163
- Woskie SR, Virji MA, Kriebel D, Sama SR, Eberiel D et al. Exposure assessment for a field investigation of the acute respiratory effects of metalworking fluids. I. Summary of findings. Am Ind Hyg Assoc J 1996 Dec;57(12):1154-62
- Yoon CS, Park DU, Kim SG, Lee SM, Lim JH. Evaluation of health and survey of workplace use and exposure of biocide. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. Publication No 2012- OSHRI-915 2012. p. 189-192