

자동차 제조업체 조립과정 근로자의 국소진동 노출 수준 및 작업환경 만족도 평가

박성현¹ · 강모열² · 김승원³ · 최상준^{1,4*}

¹가톨릭대학교 보건의료경영대학원, ²가톨릭대학교 서울성모병원 직업환경의학과,
³계명대학교 공중보건학과, ⁴가톨릭보건의료경영연구소

Evaluation of Hand-Arm Vibration Exposure Level and Work Environment Satisfaction of Workers in Automobile Manufacturer Assembly Process

Seong-Hyun Park¹ · Mo-Yeol Kang² · Seung Won Kim³ · Sangjun Choi^{1,4*}

¹Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea

²Department of Occupational and Environmental Medicine, Seoul St. Mary's Hospital,
College of Medicine, The Catholic University of Korea

³Department of Public Health, Keimyung University

⁴Catholic Institute for Public Health and Healthcare Management

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to evaluate hand-arm vibration (HAV) exposure levels due to the use of power hand tools and to evaluate the determinants in the automobile assembly process.


Methods: The exposure level to HAV was evaluated for 30 work lines in five assembly processes (body, engine, chassis, door, and design) that use air-powered tools and battery-powered tools and operate in circulation for two hours. The 2-hr equivalent energy vibration acceleration, A (2), of the task was measured. The 8-hr equivalent energy vibration acceleration, A (8), was estimated in consideration of the number of tasks that can be performed per day by each process. In addition, a survey on the working environment was conducted with workers exposed to vibration.


Results: The geometric mean of the HAV exposure level, A (2), for a total of 30 tasks was 2.51 m/s², and one case was 10.30 m/s², exceeding TLV (2hr). The HAV exposure level of A (8) was evaluated from 1.03 m/s² to 5.36 m/s². A (2) showed a statistically significant difference (P<0.01) for each process, and the chassis process (GM=3.90 m/s²) was the highest. The larger the tool size and the longer the tool length, the higher was the vibration acceleration when using a battery-powered tool than an air-powered tool (P<0.01). Battery-powered tool users showed higher dissatisfaction on all items than did air-powered tool users.


Conclusions: As a result of this study, it is necessary to implement a program to reduce the HAV exposure levels.


Key words: air-powered tool, automobile assembly process, battery-powered tool, hand-arm vibration

*Corresponding author: Sangjun Choi, Tel:02-2258-7379, E-mail: junilane@gmail.com
Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea, 222 Banpo-daero, Seocho-gu, Seoul, 06591, Korea
Received: January 4, 2023, Revised: February 10, 2023, Accepted: April 1, 2023

 Seong-Hyun Park <https://orcid.org/0000-0003-2493-5081>

 Mo-Yeol Kang <https://orcid.org/0000-0002-1682-865X>

 Seung Won Kim <https://orcid.org/0000-0003-2960-5866>

 Sangjun Choi <http://orcid.org/0000-0001-8787-7216>

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.

I. 서 론

산업이 발달함에 따라 자동화 생산 및 수공구 사용이 증가하면서 업무의 효율성과 생산성은 향상되지만, 근로자들의 국소진동 노출 가능성은 더욱 커지고 있다. 국소진동(hand-arm vibration, HAV)은 수공구의 접촉되는 위치 부근에서 발생하여 손과 팔로 전달되며 수공구의 크기 및 무게, 작업 방법, 사용 방법에 따라 다르게 나타난다(Oh, 2022).

동력 수공구 사용 시 발생한 국소진동은 일시적인 감각 손상이 생겼다가 회복하는데 20분 이상 소요되는데 오랜 기간 국소진동에 노출 되는 경우 작업자에게 말초 신경계, 순환계 및 근골격계 장애를 유발할 수 있는 국소진동증후군(Hand-arm vibration syndrome, HAVS)이 발생하며 불면증, 현기증, 초조감 등의 정신 질환도 발생시키는 것으로 알려져 있다(Heaver et al., 2011; Nieradko-Iwanicka, 2019).

미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 경우 1972년부터 1차 프로그램을 기획하여 HAVS에 대한 역학조사를 중심으로 연구를 실시했고, 2000년대부터 2차 프로그램으로 HAVS에 영향을 주는 진동 특성 및 저감 대책을 중심으로 연구해 오고 있다(Dong et al., 2021). 우리나라의 경우 자동차 조립 공정(Jeong & Kim, 1995; Kim & Paik, 1996; Park & Huh, 2004), 금속가공 작업(Youn et al., 1999), 선박 건조업(Ju et al., 1998;

Jang et al., 2002; Yim et al., 2006)의 동력 공구 사용에 따른 국소진동 노출 평가 연구가 수행된 바 있으나, 현재까지도 산업안전보건법에 의한 작업환경측정 대상이 아니고 고용노동부의 노출기준도 제정되어 있지 않기 때문에 국소진동의 예방 관리의 가장 기초가 되는 노출 평가 연구가 부족한 실정이다.

특히 자동차 조립 공정의 경우 로봇에 의한 자동화가 진행되고 있지만 여전히 동력 수공구를 이용한 반복적인 조립 작업으로 인해 국소진동 노출이 가장 빈번하게 이루어지고 있는데, 국내에서 실시된 기존 연구는 대부분 공기압축식 공구를 사용할 때 진동 노출 수준을 평가했거나(Jeong & Kim, 1995; Kim & Paik, 1996), 전동 공구에 대한 평가 연구도(Park & Huh, 2004)의 장 공정만을 일부 조사하였다. 이에 본 연구에서는 자동차 조립 공정 다섯 곳(차체, 샤시, 의장, 도어, 엔진)을 대상으로 공기 압축식 수공구(air-powered tool, 이하 에어툴)와 배터리 충전식 전동 수공구(battery-powered tool, 이하 전동툴) 사용에 따른 국소진동 노출 수준을 평가하고, 작업환경 만족도 조사를 통해 국소진동 관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

국내 자동차 제조업체 한 곳의 수공구를 사용하는 조립 공정 다섯 곳(차체, 엔진, 샤시, 도어, 의장)을 대상

Table 1. Basic characteristics of process, department, and tasks in this study

Process	Department	Description	Number of tasks	Working hour per task, hr	Maximum HAV* exposure duration, hr
Body	Body A	Panel assembly (front, rear)	3	2	6
	Body B	Door panel assembly	2	2	4
Chassis	Chassis A	Brake parts assembly	3	2	6
	Chassis B	Power parts assembly	2	2	4
Design	Design A	Car interior assembly	3	2	6
	Design B	Car outside assembly	2	2	4
Door	Door A	Door wiring assembly	3	2	6
	Door B	Door glass assembly	2	2	4
Engine	Engine A	Install engine block	3	2	6
	Engine B	Install engine parts	2	2	4
	Engine C	Install engine wiring	2	2	4
	Engine D	Transmission & engine assembly	3	2	6
Total			30		

* HAV: hand-arm vibration

으로 국소진동 노출 수준을 평가하고, 작업자의 작업환경에 대한 만족도를 조사하였다. 각 공정은 Table 1과 같이 작업 내용에 따라 차체(body), 샤시(chassis), 의장(design), 도어(door)는 2개의 부서로 나누어져 있고, 엔진(engine)은 4개의 부서로 구성되어 있다. 각 부서마다 2개에서 3개의 단위작업별 조립 라인이 나누어져 있고 2시간 마다 작업자들은 순환근무를 한다. 이에 본 연구에서 국소진동 측정은 5개 공정의 총 30개 단위작업에 대해 실시하여 2시간 등가 국소진동 가속도(A(2), %) 수준을 평가하였다. 그리고 부서 작업자들이 순환 근무하며 노출되는 최대 국소진동 노출 시간을 고려한 부서 작업자들의 8시간 등가 국소진동 가속도(A(8), %) 수준을 각 단위작업별 A(2) 측정결과를 이용하여 평가하였다.

국소진동 측정 근로자들 대상으로 작업 환경 만족도 설문문을 대면 조사로 실시하였고, 사전에 작업자의 동의를 구했으며, 전체 연구 설계에 대해 가톨릭대학교 생명윤리심의위원회(institutional review board, IRB)의 심의를 거쳐 승인(MC22OASI0097)을 받고 진행하였다.

2. 국소진동 측정 및 평가

1) 국소진동 가속도 측정 방법

국소진동 평가 대상 수공구는 자동차 조립 공정에서 가장 많이 사용하는 임팩트 렌치이며, 동력원에 따라 에어툴과 전동툴로 구분 된다(Figure 1). 에어툴은 콤프레셔에서 만들어진 압축 공기를 호스로 연결하여 작동되며, 작업량이 많은 공정에서 사용되는 특징이 있고, 전동툴은 충전식 배터리를 이용하여 작동되기 때문에 작업의 편의성이 필요한 공정에서 사용된다. 본 연구에서 평가 대상 공정별 사용되는 에어툴은 6종, 전동툴 7종이었으며 국소진동 가속도 발생에 영향을 줄 수 있는 공구 길이, 렌치 크기, 공구 무게, 토크, 연결봉의 길이 등의 특성을 함께 조사하였다. 공구 길이와 렌치 크기는 Figure 1과 같이 측정하였고, 연결봉의 길이는 공구 앞에 추가로 연결하는 공구의 길이를 측정하였다.

국소진동 측정은 작업자 팔에 측정기(HVM 200, Larson Davis, USA)를 부착한 밴드를 착용한 후 기기를 고정하고 손가락 검지와 중지 사이에 변환기를 끼어 수공구 손잡이 중심 부위에 부착 하여 진동가속도(%)를 측정하였다. 진동가속도 측정은 국제표준기구



(a)



(b)

Figure 1. Examples of air-powered tool (a) and battery-powered tool (b)

(International Standards Organization, ISO)의 표준지침(ISO 5349-1)에 따라 실시하였다(ISO, 2001). 생체역학 좌표계를 중심으로 3개 직교 좌표 축(X축: 상하, Y축: 좌우, Z축: 전후) 별로 1초 마다 주파수 가중 실효값(root mean square, rms)인 진동가속도($a_{hw}(t=1\text{sec})$)와 최대 순간 가속도(peak value)를 측정하였다.

조립 라인의 좌, 우 근로자가 2명 이상 동시 작업하는 경우 측정 대상은 한 곳을 기준으로 측정하고 작업자들 중 수공구 사용 시간이 하루 10분 이내로 짧고 자동차 조립 공정 외에서 근무한 근로자는 제외하였다.

2) 단위작업(A(2))에 대한 국소진동 평가

국소진동 단위작업 시간(2시간) 중 반복적으로 이루어지는 최소단위의 작업에 대해 수공구가 신체에 접촉되어 작업이 시작된 순간부터 1초 간격으로 순간 진동 가속도($a_{hw}(t=1\text{sec})$) 값을 기록하고 약 1분 이상 측정 후 작업이 종료되어 신체 접촉이 끝나면 측정을 종료하였다. 최소단위 작업의 총 노출시간(T)에 대한 각 축별 진동가속도(a_{hw})를 식 (1)과 같이 계산하고, 3축 진동가속도 값을 이용하여 식 (2)와 같이 벡터 합으로 계산된 총 진동가속도(a_{hv})를 최소단위 작업에 대한 진동가속도로 활용하였다.

$$a_{hw} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{hw}(t=1\text{sec})^2 dt} \quad (1)$$

a_{hw} : The frequency-weighted rms acceleration associated with worker exposure time (T) in each respective direction(%)

$$a_{hv} = \sqrt{(a_{hwx})^2 + (a_{hwy})^2 + (a_{hwz})^2} \quad (2)$$

a_{hv} : The magnitude of the vibration total value(%)

a_{hwx} , a_{hwy} , a_{hwz} : The frequency-weighted rms acceleration associated with the exposure time in each respective direction X, Y, and Z (%)

측정결과는 제조사에서 제공한 분석 프로그램(G4 LD Utility 4.5.1, Larson Davis)을 활용하여 다운로드 받았다. 최소 단위작업이 2시간동안 반복적으로 진행되기 때문에 2시간 등가 진동가속도 수준(A(2))도 최소 단위작업

에 대한 측정결과와 동일한 값으로 추정 하였으며, 미국정 부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 TLV(threshold limit value)와 비교 평가하였다. ACGIH TLV(2hr)는 최대허용 노출시간 2시간에 대해 10 %, Action level(AL)은 5 %로 제안하고 있다 (ACGIH, 2022).

3) 1일 8시간 등가 국소진동 노출수준(A(8)) 평가

각 공정내 부서별 작업자는 Table 1과 같이 2시간 단위의 단위작업 라인을 순환근무하기 때문에 1일 최대 노출될 수 있는 국소진동 노출수준, A(8)은 각 단위작업에 대해 측정된 A(2) 결과를 활용하여 식(3)과 같이 평가하였고, ACGIH TLV(8hr) 5 %, AL(8hr) 2.5 %와 비교 평가하였다.

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^n (A(2)_i)^2 T_i} \quad (3)$$

$A(2)_i$: Vector sum of the 2 hour energy-equivalent acceleration for unit task i (%)

n : Total number of tasks per day

T_i : Total time in hours associated with the Task i

3. 작업환경 만족도 조사

조립 공정 다섯 곳(차체, 엔진, 샤시, 도어, 의장)에서 전동 수공구를 사용 하는 근로자 대상으로 대면 조사를 통해 국소진동 노출에 대한 작업 환경 만족도 설문 조사를 진행 하였다. 설문 항목은 진동 장애 예방 교육 이수 여부, 작업 시 착용하는 장갑의 종류, 수공구 사용과 관련된 특성(수공구 무게, 수공구 손잡이 두께), 작업 설비, 작업 속도, 휴식 시간에 대한 만족도와 육체적 정신적 부담 정도로 구성하였다. 만족도 항목은 ‘매우 만족한다’ 부터 ‘매우 불만족한다’까지 5점 척도로 조사하였으며, 자료 분석때는 ‘매우 만족한다’, ‘만족한다’, ‘보통이다’로 응답한 경우 ‘만족’으로 분류하고 ‘불만족한다’와 ‘매우 불만족한다’를 ‘불만족’으로 재 코딩하여 분석하였다.

4. 자료분석

전체 작업 공정의 A(2) 국소진동 측정 결과는 유의수준 0.05에서 Shapiro-Wilk test를 실시하여 정규성을 검정

하였고, 대수정규분포 함이 확인되어 모수 통계 분석 때 각 자료는 대수변환하여 분석하였다. 단위작업에 대한 국소진동 측정결과는 기술통계분석을 실시하여 기하평균(geometric mean, GM), 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD), 산술평균(arithmetic mean, AM), 표준편차(standard deviation, SD), 최소값(minimum, Min), 최대값(maximum, Max)으로 요약하였고, 각 축마다 실시간 측정된 진동 가속도의 peak 값과 rms 값의 비(peak/rms)인 crest factor를 계산하여 진동 특성을 확인하였다.

작업 공정 및 수공구 특징(종류, 길이, 연결봉 길이, 무게, 최대 토크값)에 대하여 유의수준 0.05에서 T-test 또는 One-way ANOVA test를 실시하여 각 단변량에 따른 진동 가속도 수준의 차이를 검정하였고, 국소진동에 미치는 결정요인 평가를 하기 위해 수공구의 특징 변수들을 독립변수로 하여 다중회귀분석(multiple linear regression analysis)을 실시하였다.

국소진동 작업 환경 인식도 설문 결과 분석은 수공구 종류에 따라 각 설문 항목에 대한 응답 빈도 분포에 대해 Chi-squared test를 실시하였고, 평가 셀의 응답 수가 5 미만일 경우 Fisher's exact test를 실시하였다. 모든 통계 분석은 IBM SPSS statistics 29.0 프로그램과 마이크로소프트 엑셀을 활용하였다.

III. 연구결과

1. 단위작업별 진동가속도 노출 수준(A(2))

자동차 조립 공정에서 측정한 총 30개의 단위작업별 국소진동 노출수준, A(2)를 대수변환하여 Shapiro-Wilk test 실시 결과($W=0.957$, $P < 0.05$) 대수정규분포 하였으며, 세부 결과는 Table 2에 요약하였다. 공정별 국소진동 노출 수준은 통계적으로 유의한 차이가 있었으며($P < 0.01$), 샤시 공정이 가장 높았고(GM=3.90 %, Max=10.30 %) TLV를 초과하는 경우도 한 건 있었다.

Table 2. Summary of hand-arm vibration exposure level for two hours (A (2)) by process and the characteristics of hand tools

Category		N	A(2), %					
			GM	GSD	AM	SD	Min	Max
Process**	Body	5	2.54	1.31	2.62	0.75	1.85	3.77
	Chassis	5	3.9	1.75	4.53	3.25	2.49	10.30
	Design	5	1.31	1.16	1.32	0.18	1.01	1.49
	Door	5	2.07	1.33	2.14	0.59	1.39	2.97
	Engine	10	3.03	1.31	3.13	0.87	2.20	4.53
Tool type	Air tool	15	2.86	1.31	2.96	0.84	1.85	4.53
	Battery tool	15	2.2	1.78	2.67	2.26	1.01	10.30
Tool size, inch**	1/4	6	1.33	1.15	1.34	0.17	1.01	1.49
	3/8	11	2.49	1.17	2.52	0.41	1.85	3.36
	1/2	13	3.38	1.54	3.74	2.14	1.95	10.30
Tool length, cm**	≤14	14	1.97	1.5	2.12	0.84	1.01	3.55
	>14	16	3.1	1.52	3.42	2.01	1.85	10.30
Tool connect length, cm	≤3	12	2.31	1.35	2.39	0.58	1.01	3.36
	>3	18	2.65	1.73	3.09	2.10	1.36	10.30
Tool weight, kg	≤1.5	11	2.49	1.17	2.52	0.41	1.85	3.36
	>1.5	19	2.52	1.78	2.98	2.10	1.01	10.30
Max torque, Nm	≤100	15	2.86	1.31	2.96	0.84	1.85	4.53
	>100	15	2.2	1.78	2.67	2.26	1.01	10.30
Total		30	2.51	1.59	2.81	1.68	1.01	10.30

N: number of measurement, GM: Geometric mean, GSD: Geometric standard deviation, AM: arithmetic mean, SD: standard deviation, Min: minimum, Max: maximum

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ (t-test or ANOVA)

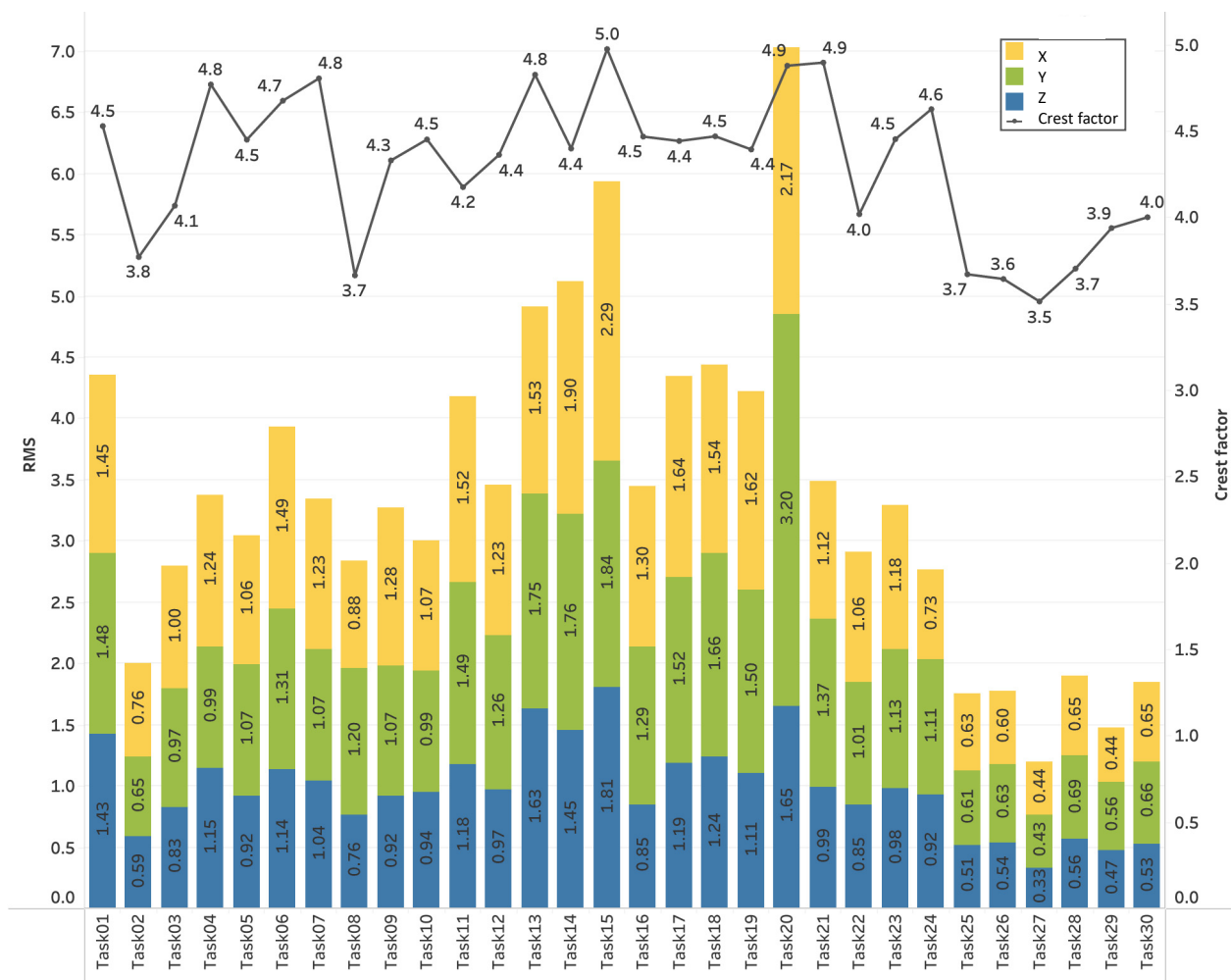


Figure 2. Comparison of the frequency-weighted root means square (RMS) acceleration (%) of three axes and average crest factor measured in 30 tasks

공구 종류별로 비교하면 에어툴(GM=2.86 %, Max=4.53 %)이 전동툴(GM=2.20 %, Max=10.30 %)보다 높게 나타났으나, 통계적으로 유의하지는 않았다. 공구의 주요 특성별로 진동 가속도 수준은 공구 크기가 가장 큰 1/2 인치인 경우(GM=3.38 %, Max=10.30 %), 공구 길이가 14 cm보다 긴 경우(GM=3.10 %, Max=10.30 %)가 상대적으로 짧은 경우보다 통계적으로 유의하게 진동 가속도 수준이 높았다($P < 0.01$). 공구 연결봉이 3 cm보다 긴 경우(GM=2.65 %, Max=10.30 %), 공구 무게가 1.5 kg보다 큰 경우(GM=2.52 %, Max=3.36 %)를, 최대 토크가 100 Nm 미만인 경우(GM=2.86 %, Max=4.53 %)에 그렇지 않은 경우보다 진동가속도 수준이 높았으나 통계적으로 유의하지는 않았다.

Figure 2는 각 축에 대해 실시간 측정된 진동가속도의 rms 값 대비 peak 값의 비인 crest factor를 계산한 결과와 축별 rms 평균값을 단위작업별로 비교한 결과다. crest factor의 30개 작업별 평균 값은 3.5에서 5.0 수준이었고, 각 축별 rms 평균값을 비교하면 y축이 가장 높은 작업이 18개, x축이 가장 높은 작업이 12개로 z축 보다는 주로 y축과 x축 방향의 진동 가속도가 높았다.

2. 단위작업별 진동가속도 노출 수준에 영향을 주는 요인 분석

수공구의 특징인 종류, 크기, 길이, 무게에 대하여 평가된 A(2)에 대한 영향을 분석하기 다중회귀분석을 실시한 결과 Table 3과 같았다. 분석 결과 회귀 모형

Table 3. Multiple regression analysis results on the effect of hand tool characteristics on hand-arm vibration exposure level(A (2))

Variable	Non-standardized coefficient		Standardized coefficient	T
	B	SE	β	
(Intercept)	-0.656	0.093		-7.077
Tool size, inch	1.306	0.149	0.628	8.765*
Tool length, cm	0.578	0.08	1.46	7.205*
Tool type ^{a)}	0.437	0.08	1.105	5.486*

* $P < 0.001$, a) Coding of tool type (0 = air tool, 1 = battery tool), Adjusted $R^2 = 0.857$

은 통계적으로 유의하게 나타났으며($F=58.982$, $P < 0.001$) 독립변수에 의한 종속변수가 설명되는 설명력은 85.7%였다.

공구 무게를 제외한 공구 크기($P < 0.001$), 공구 길이($P < 0.001$), 공구 종류 ($P < 0.001$)는 국소진동에 미치는 영향이 유의한 것으로 확인 되었다. 유의한 변수에 대한 비표준화계수를 확인한 결과 공구 크기($B=1.306$), 공구 길이($B=0.578$), 공구 종류($B=0.437$)는 모두 양수로써 공구 크기, 공구 길이, 공구 종류가 증가될수록 국소진동 결과가 높아진다는 것을 알 수 있었다. 또한, 표준화계수로 변수 간의 상대적 영향력을 살펴보면 국소진동의 미치는 영향력은 공구 길이($\beta=1.46$)가 가장 크며 다음으로 공구 종류($\beta=1.105$), 공구 크기($\beta=0.628$) 순이었다.

3. 공정별 8시간 등가 진동 가속도 노출 수준(A(8))

공정별로 작업자가 1일 최대 노출될 수 있는 국소

진동 노출량 A(8)은 Table 4와 같이 나타났다.

에어툴을 사용하는 8시간 등가 국소진동 가속도 A(8) 평균은 2.34 m/s^2 였고, 평균 보다 높게 평가된 공정은 차체 앞,뒤 패널 조립(2.36 m/s^2), 변속기&엔진 조립(3.73 m/s^2)이었으며, 평균 보다 낮게 평가된 공정은 차체 도어 패널 조립(1.88 m/s^2), 엔진 블록 조립(2.17 m/s^2), 엔진 부품 조립(1.67 m/s^2), 엔진 와이어 조립(2.19 m/s^2)으로 TLV(8hr)를 초과하는 경우는 없었지만 AL(8hr)을 초과한 경우는 한 건 있었다.

전동툴을 사용하는 8시간 등가 국소진동 가속도 A(8) 평균은 2.26 m/s^2 로 평가 되었고, 평균 보다 높게 평가된 공정은 샤시 제동 장치 조립(2.74 m/s^2), 동력전달 장치 조립(5.36 m/s^2)이며, 평균보다 낮게 평가된 공정은 도어 와이어 조립(2.16 m/s^2), 도어 유리 장착(1.20 m/s^2), 내장재 조립(1.08 m/s^2), 외장재 조립(1.03 m/s^2)으로 샤시 공정에서 TLV(8hr)를 초과하는 경우 한 건 있었고, AL(8hr)을 초과한 경우도 한 건이었다.

Table 4. Comparison of daily hand-arm vibration exposure (8-hour energy equivalent total value) levels by process

Process	Group	Job description	Tool type	A(8), m/s^2
Body	Body A	Panel assembly (front, rear)	Air tool	2.36
	Body B	Door panel assembly	Air tool	1.88
Engine	Engine A	Install engine block	Air tool	2.17
	Engine B	Install engine parts	Air tool	1.67
	Engine C	Install engine wiring	Air tool	2.19
	Engine D	Transmission & engine assembly	Air tool	3.73
Chassis	Chassis A	Brake parts assembly	Battery tool	2.74
	Chassis B	Power parts assembly	Battery tool	5.36
Door	Door A	Door wiring assembly	Battery tool	2.16
	Door B	Door glass assembly	Battery tool	1.20
Design	Design A	Car interior assembly	Battery tool	1.08
	Design B	Car outside assembly	Battery tool	1.03

4. 작업 환경 만족도 설문 평가

국소진동 평가 공정의 수공구 사용 근로자 30명(에어 툴 15, 전동툴 15)을 대상으로 작업 환경에 대한 설문 조사 결과 모두 진동 수공구 사용 빈도는 2시간 연속 작업을 주 5-6회 하는 것으로 응답하였다. 또한 국소진동 예방 교육은 모두 받은 적이 없다고 답하였다.

수공구 사용 관련 기타 작업환경에 대한 주관적 평가 결과를 사용하는 수공구 종류에 따라 비교하면 Table 5와 같다. 에어툴 사용 작업자보다 전동툴 사용 작업자가 모든 항목에 대해 불만족 비율이 상대적으로 높았으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다($P > 0.05$). 그리고 수공구 종류에 상관없이 작업자 모두 방진장갑 대신 면장갑 혹은 고무가 코팅된 장갑을 착용하는 것으로 조사되었다.

사용하는 수공구 종류에 따라 각 항목별 만족도와 불만족 응답률을 퍼센테이지 포인트(%p) 차이로 비교한 결과 Figure 3과 같았다. 에어툴 사용자는 수공구의 무게, 손잡이의 두께, 작업대 및 작업도구에 대한 만족도, 작업속도, 육체적 부담과 정신적 부담에 대한 만족도가

불만족보다 6.7%p 높게 나타난 반면, 전동툴 사용 작업자는 불만족도가 만족도보다 6.7%p에서 46.7%p까지 높게 나타났다. 특히 전동툴 사용자들은 공구의 무게가 무겁다고 느끼는 비율이 적당하다는 작업자보다 46.7%p로 가장 큰 차이를 보였고, 에어툴 사용자의 경우 특히 휴게시간에 대한 만족도가 불만족보다 60%p 높아 가장 큰 만족도를 나타냈다.

IV. 고 찰

본 연구는 자동차 조립 공정 5곳의 30개 단위작업을 대상으로 동력 수공구 사용에 따른 국소진동 노출 수준과 작업 만족도에 대한 평가를 실시하였다. 자동차 조립 공정의 30개 단위작업별로 측정된 A(2) 결과 1.01~10.30 m/s² 수준이었으며 공정별로 유의한 차이를 보였다(Table 2). 가장 낮게 측정된 의장 공정과 가장 높게 측정된 샤시 공정의 조립 작업을 비교하면 Figure 4와 같이 의장 공정의 경우 주로 플라스틱 재료를 조립하는 반면, 샤시 공정은 엔진과 차체를 연결하

Table 5. Comparison of subjective evaluation results of workers on the working conditions by hand tool type

Category		Tool type		P-value
		Air tool (n=15)	Battery tool (n=15)	
Tool weight	Moderate	8 (53.3) ^{a)}	4 (26.7)	0.264 ^{b)}
	Heavy	7 (46.7)	11 (73.3)	
Tool grip size	Moderate	8 (53.3)	7 (46.7)	0.715 ^{c)}
	Thick	7 (46.7)	8 (53.3)	
Worktable	Satisfied	8 (53.3)	5 (33.3)	0.269 ^{c)}
	Dissatisfied	7 (46.7)	10 (66.7)	
Working tool	Satisfied	8 (53.3)	5 (33.3)	0.269 ^{c)}
	Dissatisfied	7 (46.7)	10 (66.7)	
Glove	Cotton glove	7 (46.7)	3 (20.0)	0.245 ^{b)}
	Rubber glove	8 (53.3)	12 (80.0)	
Work speed	Satisfied	8 (53.3)	6 (40.0)	0.464 ^{c)}
	Too fast	7 (46.7)	9 (60.0)	
Break time	Satisfied	12 (80.0)	7 (46.7)	0.128 ^{b)}
	Dissatisfied	3 (20.0)	8 (53.3)	
Physical burden	Satisfied	8 (53.3)	5 (33.3)	0.269 ^{c)}
	Dissatisfied	7 (46.7)	10 (66.7)	
Mental burden	Satisfied	8 (53.3)	6 (40.0)	0.464 ^{c)}
	Dissatisfied	7 (46.7)	9 (60.0)	

a) Number of response (%), b) Fisher's exact test, c) Chi-squared test

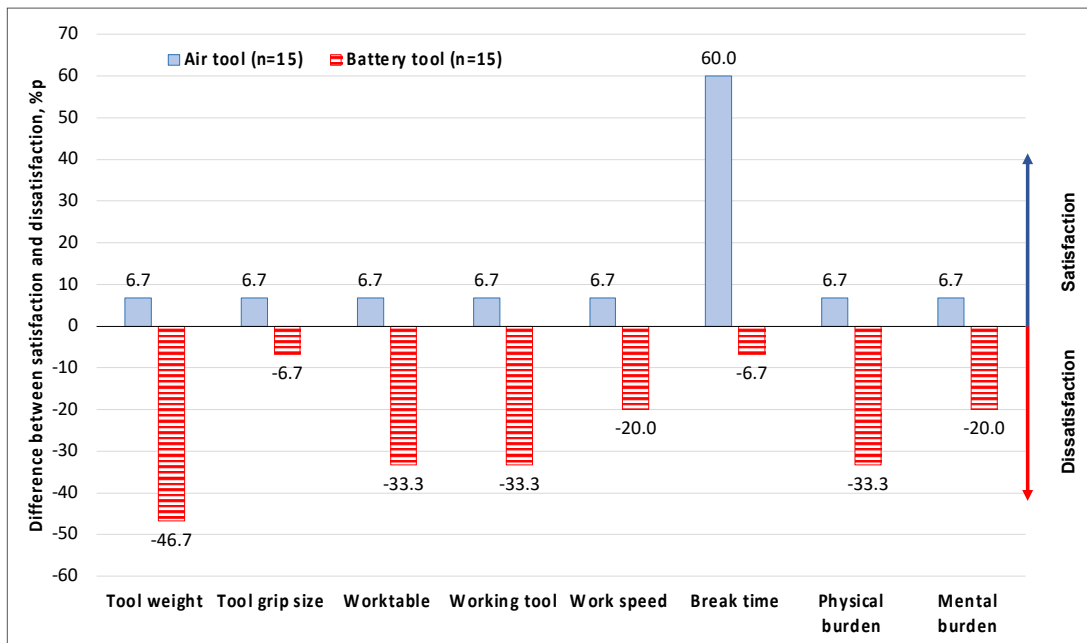
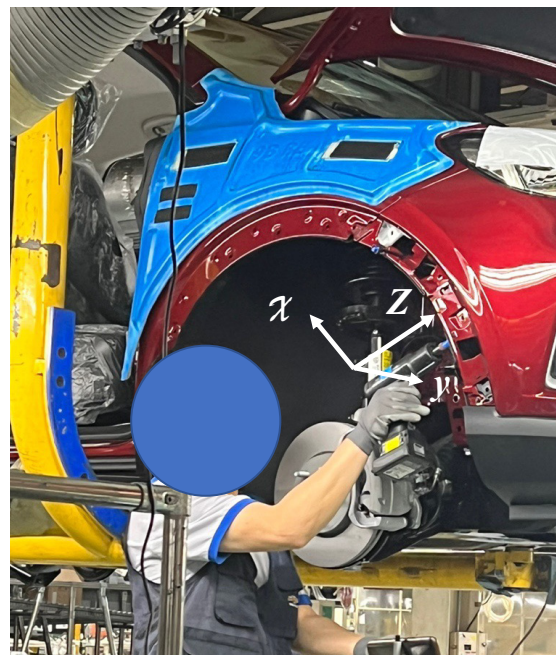


Figure 3. Comparison of percentage point (%p) differences between satisfaction and dissatisfaction responses in the working environment according to the type of hand tool used



(a) Design, battery tool



(b) Chassis, battery tool

Figure 4. Comparison of assembling tasks between design and chassis process

는 동력 전달 장치를 조립하면서 금속의 마찰이 발생함에 따라 순간적으로 진동가속도가 높게 발생하기 때문에 평균 국소진동 노출 수준이 높게 평가되었다고 판단된다. 특히 샤시 공정에서 가장 높은 진동 발생 작업

(Task20)의 경우 TLV(2hr) 10 m/s²를 초과하였는데, 이 작업은 차량의 동력 전달 장치(power parts)의 블록 체결 작업으로 사용한 수공구의 크기는 1/2인치, 공구 길이는 14.75 cm, 공구에 연결한 연결봉은 가장 긴

10.25 cm였고, 공구 무게도 1.7 kg으로 무겁고 최대 토크도 조사된 공구들 중 가장 큰 290.91 Nm 이었다. 또한, 작업 시 수공구를 쥐는 힘이 강하게 들어가는 특성을 확인할 수 있었다.

수공구 특징에 따라 발생하는 국소진동에 영향을 주는 요인을 평가한 결과 단변량 분석과 다변량 분석 모두 공구 길이가 길고 공구 크기가 큰 수공구 일수록 국소진동 발생이 높았다(Table 2, Table 3). 또한 통계적으로 유의성은 없었지만, 공구 연결봉 길이가 길고, 공구의 무게가 무거울수록 진동가속도가 높은 경향을 보였다(Table 2). 이는 Jang & Oh (2003)의 선행 연구 결과와도 유사하였는데, 임팩트 렌치의 크기가 1인치인 대형일 경우 가장 큰 진동가속도가 발생하였고, 동일 크기의 렌치에 연결봉 길이가 길수록 진동가속도가 높게 발생한다고 보고하고 있다.

동력 수공구 사용 중 발생하는 진동의 특성을 파악하기 위해 실시간 rms 값과 peak 값을 측정하여 crest factor를 계산하였다. crest factor가 클수록 매 순간 충격에 의한 진동 크기가 크다는 것을 나타내며, 전신 진동 평가에 대한 국제 표준 규격인 ISO 2631에서는 crest factor가 9 이하인 경우에만 진동의 변이가 크지 않아 rms 실효값으로 진동수준을 평가할 수 있다고 권고하고 있다(ISO, 1997). 국소진동의 경우 ISO 5349에서는 crest factor를 고려하고 있지 않지만, 짧은 시간에 반복적인 충격(mechanical shock)이 가해질 경우 손가락의 혈류가 감소되는 급성 영향이 나타날 수 있다는 연구 보고가 있다(Ye et al., 2012). 본 연구 결과 crest factor는 모든 단위작업에서 평균 5.0 이하였으며, 순간적인 물리적 충격에 의한 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다(Figure 2).

진동가속도의 발생 축별 차이를 비교한 결과 z축 보다는 y, x축의 가속도가 상대적으로 높게 나타났다(Figure 2). 이는 기존 연구와도 비슷한 결과를 보였는데, Jeong & Kim(1995)의 연구에서는 자동차 조립 라인에서 오일-펄스형 임팩트 렌치 에어공구를 사용했을 때 오른 손으로 사용했을 때는 z축이 가장 높았으나, 왼손에서는 y축이 가장 높았고, 전체 가속도 수준과 축별 가속도 수준과의 상관성 분석 결과 y축과 가장 상관성이 높다고 보고하였다. Kim & Paik(1996)의 연구에서는 8가지 각종 동력공구별로 평가를 하였는데 임팩트 렌치의 경우 y축 가속도가 가장 높았고, 다음으로 x축, z축 순이었다. 이는 임팩트 렌치의 경우 공구를 쥐 손에

서 좌, 우 회전력에 의해 작동되기 때문에 전, 후 방향의 z축 보다는 x, y축 방향의 가속도가 주로 기여하는 것으로 판단된다.

작업자가 1일 최대 노출될 수 있는 시간을 고려하여 총 12개의 공정-부서별 노출군에 대한 A(8) 평가 결과 1.03 m/s²에서 5.36 m/s²의 수준이었으며, 단위작업 평가에서와 같이 사시 공정의 2개 부서와 엔진 공정의 엔진D 그룹이 AL(2hr) 2.5 m/s²를 초과하였다(Table 4). A(8) 결과는 각 작업자들이 하루 중 국소진동 발생 작업을 최대 할 수 있는 순환근무 조합일 경우에 해당하기 때문에 가장 최고로 노출될 수 있는 상황(worst case)을 가정한 것이다. 따라서 이러한 점을 고려할 때 사시공정과 엔진공정이 국소진동 노출 관리가 가장 필요한 공정이라고 판단되며 작업자들의 작업 환경 만족도 결과를 참고하여 진동 예방 대책을 수립할 필요가 있다.

작업 환경에 대한 만족도는 사용하는 툴 형태에 따라 통계적 유의성은 없지만 다른 특성을 보였는데, 에어툴 사용자들은 대부분 만족 비율이 불만족보다 높은 반면, 전동툴 사용자들은 불만족 비율이 높았다(Table 5). 특히 공구가 많이 무겁다는 불편감을 호소했고, 휴식시간도 불만족 비율이 높았다(Figure 3). 이러한 응답 원인은 에어툴의 경우 일정한 장소에서 사용하고 조립 작업이 끝나면 거치대에 걸어 놓는 작업 특성이 있지만 전동툴의 경우 배터리를 장착하고 있어 더욱 무겁고, 작업 시 지속적으로 수공구를 들고 다녀야 하기 때문에 근로자가 공구를 들고 있는 시간이 더 많아 피로도가 높은 것으로 확인 되었다. 이는 2004년에 조사한 Park & Huh(2004)의 연구 결과와도 유사한데, 이 연구에서는 설문조사한 20명이 사용한 임팩트 렌치의 유형이 명확히 제시되어 있지 않았지만 공구가 '무겁다'는 불편감 호소가 36.8%로 가장 많았다. 또한 이 연구에서도 방진장갑을 착용하는 작업자가 한 명도 없었고, 목장갑 2개 혹은 목장갑 1개와 코팅장갑을 착용하는 비율(83.3%)이 가장 높은 것으로 조사되었는데, 18년이 지난 후에 실시한 본 연구에서도 방진장갑을 착용하는 작업자는 없었으며, 면장갑 혹은 고무 코팅 장갑을 착용하고 있었다. Park & Huh(2004)의 조사 결과와의 차이점은 2004년에는 방진장갑을 착용한 경험 자체가 없는 경우(70%)가 많았으나, 본 연구에서는 대부분의 근로자가 방진 장갑을 지금 받고 있으나 작업의 불편함 때문에 일반 면장갑과 고무 코팅 장갑을 착용하여 작업

을 진행하는 것으로 확인되어 관리가 필요하였다.

영국에서는 2005년부터 사업장들과 협력하여 국소진동과 관련 규정에 대한 인식도를 높이고 2010년에 국소진동 노출기준 적합율을 90% 이상 달성할 수 있도록 진동 예방 사업을 실시하였다(Burges & Foster, 2012). 그러나 우리나라의 경우 산업안전보건기준에 관한 규칙 진동 관련 조항이 신설된 이후에도 국소진동에 대한 작업환경측정 노출 기준이 설정되어 있지 않고 작업환경측정 유해인자로 설정되어 있지 않아 국소진동 작업 환경 측정이 실시되지 않고 있다. 본 연구 결과 국소진동 TLV를 초과하는 수준이 확인되었으며, 방진장갑이 지급되어도 작업의 불편감 때문에 착용하고 있지 않고 있음이 확인되어 국소진동 노출 저감을 위한 관리가 필요하였다.

V. 결 론

국내 자동차 제조 사업장 한 곳의 동력 수공구를 사용하는 5개 조립 공정의 30개 단위작업에 대한 국소진동 노출수준 평가 결과 30건 중 한 건이 TLV(2hr)를 초과하였고(3.3%), 샤시 공정이 가장 높았고 의장 공정이 가장 낮았다($P < 0.05$). 국소진동 노출 수준은 공구 길이가 길고 공구 크기가 큰 수공구 일수록 높았으며($P < 0.05$), 통계적 유의성은 없었으나 연결봉의 길이가 길고, 공구 무게가 무거울수록 진동가속도가 높은 경향을 보였다. 작업자들의 1일 8시간에 대한 진동가속도 최대 노출 수준 A(8)를 평가한 결과 1.03 m/s^2 에서 5.36 m/s^2 으로 한 건이 TLV(8hr)를 초과하고(8.3%), 3건이 AL(8hr)을 초과하였다(25.0%). 국소진동에 노출되는 작업자들의 작업환경 만족도 설문 조사 결과 방진장갑이 지급되지만 불편감으로 인해 착용하고 있지 않는다는 것을 확인하였고, 에어툴 보다는 배터리를 이용하는 전동툴 사용자의 경우 불만족도가 더욱 컸다. 따라서, 향후 자동차 조립 공정 중 사용하는 공구의 특성을 고려하여 국소진동 노출 위험요인을 예측하고 건강장해 예방을 위한 관리 프로그램 시행이 필요하다고 판단된다.

References

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold Limit Values (TLVs)

- and Biological Exposure Indices (BEIs). 2022.
- Burgess M, Foster G. Implementation and effectiveness of the European directive relating to vibration in the workplace. Canberra: Safe work Australia; 2012.
- Dong RG, Wu JZ, Xu XS, Welcome DE, Krajnak K. A Review of Hand-Arm Vibration Studies Conducted by US NIOSH since 2000. *Vibration* 2021;4(2):482-528. doi: 10.3390/vibration4020030.
- Heaver C, Goonetilleke KS, Ferguson H, Shiralkar S. Hand-arm vibration syndrome: a common occupational hazard in industrialized countries. *J Hand Surg Eur* 2011;36(5):354-363. doi: 10.1177/1753193410396636.
- International Standards Organization (ISO): ISO 5349-1 Mechanical vibration – Measurement and assessment of human exposure to hand-transmitted vibration – Part 1: General guidelines. ISO, Geneva, Switzerland. 2001.
- International Standards Organization (ISO): ISO 2631-1 Mechanical vibration and shock– Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. ISO, Geneva, Switzerland. 1997.
- Jang JG, Oh SY. A study on the noise, vibration evaluation and management of power hand tools – focusing on vibration in impact wrenching process in automobile manufacturing and maintenance industry. *Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI)*. 2003.
- Jang JY, Kim S, Park SK, Roh J, Lee TY et al. Quantitative exposure assessment for shipyard workers exposed to hand-transmitted vibration from a variety of vibration tools. *Am Ind Hyg Assoc J*. 2002;63(3): 305-10. doi: 10.1080/15428110208984718.
- Jeung JY, Kim JM. Hand-arm vibration and noise levels of double-hammer type and oil-pulse impact wrenches in automobile assembly lines. *Kor Ind Hyg Assoc J*. 1995;5(2):147-159.
- Ju YS, Choi HR, Kim MK, Sohn H, Jeon SJ et al. Evaluation of health exams on local vibration illness among shipyard workers. *Kor J Occup Environ Med*. 1998; 10(4):413-27.
- Kim S, Paik N. Assessment of vibration produced by pneumatic hand tools used in automobile assembly. *Kor J Occup Environ Med*. 1996;6(1):1-16.
- Nieradko-Iwanicka B. Hand-arm vibration syndrome. *Reumatologia* 2019;57(6):347-349. doi: 10.5114/reum.2019.90364.
- Oh J. Evaluation of hand-arm vibration (HAV) exposure levels among grounds maintenance workers: An

- observational human exposure measurement study. Health Sci Rep 2022;5(4):e731. doi: 10.1002/hsr2.731.
- Prk HS, Huh SM. A study on measurement and analysis of local vibration induced by the powered hand tools used in automobile assembly lines. IE Interfaces 2004;17(3):375-83.
- Ye Y, Mauro M, Bovenzi M, Griffin MJ. Acute effects of mechanical shocks on finger blood flow: influence of shock repetition rate and shock magnitude. Int. Arch. Occup. Environ. Health 2012;85: 605-614. doi: 10.1007/s00420-011-0704-x.
- Yim S, Lee Y, Park HS. Assessment of vibration produced by the grinder used in the shipbuilding industry and development of prospective prevalence model of hand-arm vibration syndrome. J Kor Soc Occup Environ Hyg. 2006;16(4):398-412.
- Youn J, Park S, Kim S, Lee T, Jang J. Evaluation of hand-arm vibration of steel processing factory workers. Kor Ind Hyg Assoc J. 1999;9(2):52-65.
- <저자정보>**
 박성현(석사과정), 강모열(교수), 김승원(교수), 최상준(교수)