IE Interfaces
Vol. 17, No. 3, pp. 375-383, September 2004.

자동차 조립공정에서 동력수공구에 의하여 발생되는 국소진동의 측정과 분석에 관한 연구

박희석† · 허승무

홍익대학교 정보산업공학과

A Study on Measurement and Analysis of Local Vibration Induced by the Powered Hand Tools Used in Automobile Assembly Lines

Hee-Sok Park · Seung-Moo Huh

Department of Information and Industrial Engineering, Hongik University, Seoul, 121-791

The purpose of this study is to investigate the characteristics of vibration induced by the powered hand tools used in the automobile assembly lines, and estimate the prevalence of vibration syndrome. The acceleration levels of four major powered hand tools were measured using the ISO 5349 method along with the time of exposure to the vibration of the hand tools. Four-hour-energy-equivalent frequency-weighted accelerations ranged from 1.27m/s^2 to 2.58m/s^2, After exposure to vibration for 12.6 years, about 10% of the workers using impact ranches were expected to develop Raynaud's disease. For the workers using grinders, 16.6% of the workers were expected to develop Raynaud's disease. The results would be of help in developing the guidelines of local vibration control.

Keywords: powered hand tool, vibration syndrome, Raynaud's disease, automobile assembly, ISO 5349

1. 서 론

산업현장이 갈수록 기계화, 자동화됨에 따라 드릴(Drill), 임팩트 렌치(Impact wrench), 그라인더(Grinder)와 같은 동력수공구의 사용이 급격히 증가하고 있다. 동력수공구의 사용은 작업자의 에너지 소비량을 줄일 수 있고, 생산량을 증대시키면서 생산성 향상을 가져오게 되었다. 그러나 동력수공구를 장기간 사용함에 따라 소위 HAVS(Hand-Arm Vibration Syndrome) 등의 질병들이 발생하게 되었다.

HAVS란 주로 상지에 전달되는 국소진동이 원인이 되어 혈액순환, 감각, 운동신경의 손상 등을 발생시키는 질환을 총칭한다. 그 중 수지창백증(vibration-induced white finger)은 손가락 동맥의 혈액순환장애로 인하여 손가락이 하얗게 되거나 창백해지는 현상으로서, 춥거나 차가운 환경에 노출되면 그 증상이 심해지고, 증상이 나타나는 동안은 손가락 부위의 감각을 전혀 느끼지 못하며, 손을 따뜻하게 하거나 마사지를 통해 다시 회복할 수 있다. 그러나 장기간 반복적인 국소진동에 노출되면 손끝이 갈라지고 괴사가 일어나며 영구히 감각이 손실될 수 있다(Taylor and Brammer, 1982).

또한 국소진동은 작업관련성 근골격계질환(work-related musculoskeletal disorders)의 한 요인으로 밝혀졌다. 작업관련성 근골격계질환이란 노동부에서 제시한 산업보건기준에 관한 규칙 제 142조에 의하면 반복적인 동작, 부적절한 작업자세, 정적인 자세, 무리한 힘의 사용, 날카로운 면과의 신체접촉, 진동 및 온도 등의 요인으로 인해 발생하는 건강장해로서, 목, 어깨, 허리, 상지·하지의 신경, 근육 및 그 주변 신체조직에 나타나는

본 연구는 2003년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.
†연락저자 : 박희석 교수, 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1 홍익대학교 정보산업공학과, Fax : 02-336-1130,
E-mail : hspark@hongik.ac.kr
2004년 3월 22일 접수, 2회 수정 후 2004년 8월 15일 게재 확정.

질환으로 정의되어 있다. 근골격계질환의 종류와 증상은 매우 다양하며, 질환의 종류를 정확히 구분하기가 애매한 경우가 많다. 대개의 경우, 정상적인 모습이 변형되거나, 근력이 저하되고, 운동범위가 제한 또는 축소되며, 기능손실이 수반되는 징후를 보인다. 그리고 통증이 있으며, 감각이 무디어지고, 뻣뻣함과 경련 등의 증상을 느끼게 된다(Occupational Safety and Health Administration; OSHA, 2001). 노동부가 발표한 "산업재해분석"에 따르면, 국내 작업관련성 근골격계질환자 수는 1996년에 처음으로 업무상 질병으로 인정되어 총 506명이 보고된 이후, 2000년대가 되면서 급속도로 증가하고 있는 추세이며, 전체 업무상 질병자 중 약 1/3을 차지하고 있다(<표 1> 참조).

표 1. 국내 근골격계질환자 발생현황

연도	총 업무상 질병자 수	작업관련성 근골격계질환자		
		신체 부담작업 (%)	요통 (%)	계 (%)
1996	1,529	345 (22.6)	161 (10.5)	506 (33.1)
1997	4,424	133 (9.3)	88 (6.2)	221 (15.5)
1998	1,288	75 (5.6)	51 (4.0)	123 (9.6)
1999	2,732	161 (5.9)	183 (6.7)	344 (12.6)
2000	4,051	487 (12.0)	522 (12.9)	1,009 (24.9)
2001	5,653	768 (13.6)	866 (15.3)	1,634 (28.9)
2002	5,417	1,167 (21.5)	660 (12.2)	1,827 (33.7)

근골격계질환이 발생하면 작업자 개인의 건강문제뿐만 아니라 요양 및 치료를 위한 비용과 작업손실로 인한 경제적 손실도 막대하다. 미국산업안전보건청(OSHA)의 보고에 따르면, 1997년 한 해 동안 근골격계질환으로 인한 작업 전체의 경제적인 손실비용이 $150~540억, 총 626,000일의 결근일수에, 산업재해 보상금으로 지출된 총 금액 중 약 1/3에 해당하는 금액이 근골격계질환에 의하여 지출되었다고 한다(OSHA, 2001). 국내의 경우는 근골격계질환으로 발생하는 직·간접적 손실비용에 대해 분석이 된 예가 아직 없지만, 질환자의 장기간 치료 및 요양에 따른 노동력 손실이 빈번히 발생하고 있어, 이로 인한 경제적인 손실비용 또한 막대할 것으로 추정된다. 따라서 작업관련성 근골격계질환은 우리 나라에서 가장 중요한 산업보건문제가 되고 있으며, 이로 인해 생산성 저하, 근로의욕 저하, 품질저하, 재해비용 증가, 노사관계 악화 등의 경영손실부분에서 경영주의 관심이 고조되고 있다. 또한 근골격계질환에 직접적으로 노출되어 있는 작업자들에게도 큰 관심의 대상이 되고 있다.

이에 근골격계질환의 요인을 밝히고 개선하여 근본적인 질환의 발병을 억제하는 노력이 진행되어 왔다. 국내에서도 근골격계질환의 심각성을 인지하여 2002년 12월 30일 산업안전보건법 제24조 제1항 5조를 개정하여 근골격계질환을 유발하는 요인에 대한 사업주의 예방조치의무를 추가하였다. 그리고 사업주의 구체적인 조치의무는 노동부가 제시한 산업보건기준에 관한 규칙 제9장 근골격계 부담작업 유해요인 조사지침에서 구체적으로 규정하는 등 일련의 조치들이 마련되고 있다. 또한 노동부 고시안 2003-24호에서는 여러 유해요인들 중 무리한 힘이나 반복성, 부적절한 자세, 정적인 자세 등에 관해서 비교적 상세하게 분석방법과 관리방법이 제시되어 있다.

그러나 여러 유해요인 중 진동에 관해서는 한국산업안전공단이 2000년 9월 15일에 국소진동 측정 및 평가지침을 KOSHA CODE H-23-2000에서 제시했을 뿐, 아직 노출한계(exposure limit)에 대한 지침과 체계적인 관리방법은 제시되지 못하고 있다. 우리 나라 작업장에서도 과거 인력으로 수행되던 작업들에 진동공구가 급속도로 널리 사용되고 있으며, 제조업의 거의 모든 작업장에 진동공구가 사용되고 있다고 할 수 있다. 따라서 가까운 장래에 진동공구로 인한 건강장해가 많은 작업장에서 문제가 되리라 예상되며, 적절한 진동노출한계와 관리방안 제시가 시급히 요구되고 있다.

하지만 진동의 예방관리에 가장 기초가 되는 진동수준의 측정이 우리 나라에서는 불충분한 실정이다. 특히 자동차산업은 조선업과 함께 우리나라의 대표적인 수출주력산업으로서 진동공구를 집중적으로 사용하는 산업이다. 조선업에서의 국소진동에 관해서는 일부 연구가 수행되었으나(주영수 등, 1998; 임상혁 등, 2002), 자동차 조립사업장에 대해서는 여러 진동공구 중 공압식 임팩트 렌치에 대해 제한된 연구가 수행되었다(정재열과 김정만, 1995; 김선술과 백남원, 1996). 정재열과 김정만(1995)의 연구에서는 자동차 조립사업장에서 사용하는 임팩트 렌치를 이중-해머형과 오일-펄스형으로 나누어 각각의 진동수준을 측정하고 비교하였다. 김선술과 백남원(1996)은 공압식 임팩트 렌치에 대하여 진동수준을 측정하고 비교하였다. 그러나 자동차 조립사업장에서 사용하는 전동식 진동공구에 대한 진동수준 측정에 대한 연구는 수행된 바 없었다.

이에 본 연구에서는 자동차 조립사업장에서 사용되는 공압식, 전동식 주요 진동공구에 대하여 진동노출수준을 측정하여 그 결과를 국제 기준들과 비교하고 수지창백증이 발생할 때까지의 노출년수를 추정하고자 한다. 아울러, 공구사용 및 관리실태를 조사하였다. 본 연구의 결과는 국내 기계조립 사업장의 진동노출수준과 관리방안 제시를 위한 기초자료로 활용될 것이다.

2. 국소진동 노출수준 평가를 위한 기준

국소진동의 노출수준에 대한 허용기준을 자체적으로 마련한 일부 선진국에서는 측정과 분석방법에 관해서도 지침을 제공하고 있다. 그러나 전 세계적으로 가장 많이 통용되는 측정·분석방법은 국제표준화기구(ISO; International Organization for Standardization)에서 제시한 ISO 5349를 주로 따르고 있다. ISO

5349에서는 가속도계 부착방법, 대상이 되는 주파수범위 등의 기초적인 사항에서부터 진동수준분석을 위한 가속도 값의 변환 등에 대한 폭넓은 자료를 제공하고 있다. 또한 국소진동 노출수준 평가를 위해 수지창백증에 노출될 가능성이 있는 노출년수를 산출하는 방법을 부록을 통해 제공한다.

또한 국제적으로 통용되는 국소진동 노출수준에 대한 다른 기준은 미국의 산업위생 전문가협회(ACGIH; American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서 제공한 방법이 있다. ACGIH 방법에서는 일일 노출시간에 따른 진동노출 가속도의 허용한계를 제시하고 있다. 본 연구에서도 측정된 가속도에 대해 ISO 5349 및 ACGIH에서 제시한 방법에 따라 노출수준을 평가하였다.

2.1 ISO 5349

진동수준을 측정하기 위해서는 3가지 물리량, 즉 변위(displacement), 속도(velocity), 가속도(acceleration) 중 한 가지를 선택하여 측정을 하게 된다. ISO 5349에서는 주파수가중 가속도(frequency-weighted acceleration) 값을 사용하며 그 단위는 m/s^2이다. 측정된 가속도는 6.3Hz~1,250Hz 범위의 주파수대역에 대해 1/3옥타브 범위에서 분석을 한다. ISO 5349에서는 주파수에 따른 가중치를 두어 가속도 값을 보정하도록 되어 있다. 이는 인체에 영향을 주는 정도를 고려하여 주파수대별로 다른 가중치를 두어 가속도 값을 계산하는 방법으로서 주로 낮은 주파수로 갈수록 가중치가 높아진다. 주파수가중 가속도는 다음의 식(1)로 산출한다.

$$a_{hw} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(K_j \cdot a_{hj})^2} \quad (1)$$

a_{hw}: 주파수가중 가속도
K_j : 주파수가중 인자
a_{hj}: 1/3옥타브 범위의 j번째 가속도 값

주파수가중 가속도는 진동수준을 주파수대별로 가중한 수치일 뿐 진동공구 사용시간을 고려된 수치는 아니다. 따라서 공구 사용시간을 고려한 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도로 변환하여야 한다. 이 변환을 위해 식 (2), (3)을 이용한다.

$$(a_{hw})_{eq(4)} = [\frac{1}{T_4}\int_0^t [a_{h,w}{}^{(t)}]^2 dt]^{1/2} \quad (2)$$

$$(a_{hw})_{eq(4)} = a_{hw}\sqrt{\frac{T}{T_4}} \quad (3)$$

$(a_{hw})_{eq(4)}$: 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도
a_{hw} : 주파수가중 가속도
T : 일일 노출시간
T_4 : 일일 기준시간(4시간)

또한, ISO 5349의 부록에서는 진동에 의해 수지창백증이 발생할 수 있는 노출년수를 예측하는 공식을 제공한다. 이를 이용하면 현 작업수준과 동일한 수준으로 작업을 계속한다는 가정하에 총 작업자 중 수지창백증이 발생할 가능성이 있는 작업자의 수를 <그림 1>과 같이 예측할 수 있다.

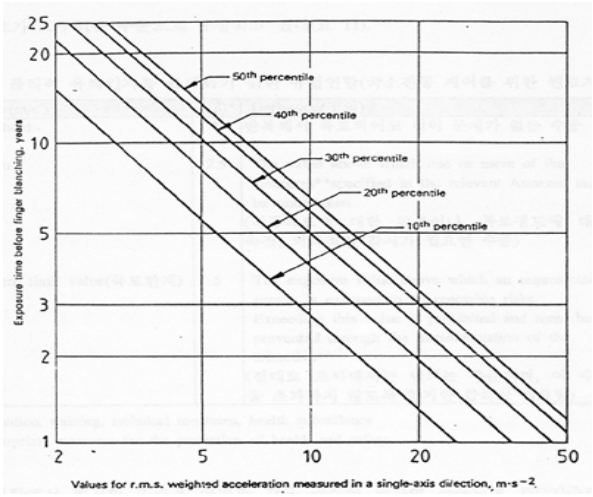


그림 1. 국소진동 노출년수에 대한 수지창백증 반응곡선(ISO 5349).

ISO 5349의 1986년 판에는 X, Y, Z축의 가속도 값 중 가장 큰 가속도 값을 나타내는 축(dominant axis)의 가속도 값을 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도로 변환하여 국소진동의 수준을 평가하였으나, 2001년 개정판에는 3축 방향의 가속도를 백터(vector) 합으로 합산한 8시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도를 사용한다. 1986년 판과 차이가 나는 이유는 3방향의 가속도 크기가 비슷할 경우 실제 영향을 미치는 가속도 값과 측정 값과의 오차가 많이 생길 수 있기 때문에 3축 방향의 가속도 값을 합산하여 진동수준을 평가하는 방법으로 바뀌었다. 그러나 현재 우리 나라의 표준에서는 한국산업안전공단이 제시한 국소진동 측정 및 평가 지침(KOSHA, 2000)에서 가속도 값이 가장 큰 축에 대한 4시간 주파수가중 에너지 등가가속도로 진동수준을 평가한다. 이에 본 연구는 1986년 방식을 따라 진동수준을 평가하였다.

2.2 미국 산업위생 전문가협회 기준

미국 산업위생 전문가협회(ACGIH)에서는 일일 평균 진동노출시간을 기준으로 초과할 수 없는 진동가속도의 수준을 제시하고 있다. <표 2>는 ACGIH 기준을 요약한 표이다. ACGIH에서 제시한 진동가속도 또한 가속도 값이 가장 큰 축을 대상으로 하며, 주파수가중 에너지 등가가속도를 사용한다.

표 2. ACGIH의 진동노출한계 기준

하루 작업 중 노출시간(hours)	a_k (m/s^2)
4-8	4
2-4	6
1-2	8
1	12

3. 연구 대상 및 방법

3.1 측정 대상

자동차 조립사업장은 크게 생산차량종류(승용차, 상용차 등) 및 작업종류(의장, 도장 등)에 따라 작업장을 분류하고 있다. 본 연구에서는 RV(Recreational Vehicle) 차량을 조립하는 의장 작업장을 대상으로 진동의 수준을 측정하고 분석하였다. 진동공구는 그 동력원에 따라 유압식, 공압식 및 전동식으로 나눌 수 있다. 일반 사업장에서는 대기를 압축하여 동력원으로 사용하는 공압식 공구가 가장 많이 이용되고 있다. 자동차 조립사업장의 체결용 진동공구로는 공압식 공구가 가장 많이 사용되고 있으며, 때때로 전동식 스크루 드라이버를 사용하고 있다.

사업장 내 사용되는 진동공구는 각 작업장마다 공구실을 마련하여 관리하고 있었으며, 다음의 진동공구에 대한 자료는 공구실의 자료를 참고로 수집하였다. 의장 작업장에서 조사된 총 공구의 수는 1,515개이고, 이 중 1,330개(87.8%)가 현장에서 사용중이었으며, 나머지 185개(12.2%)는 공구교체를 위해 공구실에 비치되어 있었다. 보유하고 있는 공구 중 다양한 크기의 육각머리붙임 볼트를 체결하는 공압식 임팩트 렌치(impact wrench)가 1,417개(93.5%)로 가장 많이 사용되고 있었으며, 일반 나사를 체결하는 스크루 드라이버(screwdriver), 차체의 마무리 작업 중 광택을 위하여 사용하는 폴리셔(polisher), 그라인더(grinder) 순으로 나타났다. 임팩트 렌치의 대부분이 공압식(70.2%)이었고 작은 볼트나 너트의 체결용으로는 전동식(29.8%)이 간간이 사용되었다. 전동식 진동공구는 전선이 필요 없는 충전식 제품이 사용되고 있었다.

본 연구에서는 사용빈도가 많은 공압식 임팩트 렌치와 한번 사용함에 있어 사용시간이 긴 공압식 그라인더 및 전동식 스크루 드라이버를 측정 대상으로 선정하였다(<표 3> 참조). 임팩트 렌치의 경우 사업장 전반에 걸쳐 가장 광범위하게 사용되는 공구였으며, 제조회사별로 총 8가지 제품이 사용되고 있었다. 임팩트 렌치의 선정에 있어서 자동차 차체 내에서 조립하는 경우, 작업반경이 큰 경우, 작업 중 타 공구를 같이 사용하는 경우는 가속도계의 부착이 용이하지 않고 잡음이 포함될 가능성이 많기 때문에 사용량이 비교적 많으면서 가속도계의 설치가 용이한 작업에서 사용되고 있는 공구를 선정하였다. 그라인더의 경우에는 현재 사용되고 있는 2개 종류 중 상대적으로 많이 사용되는 공구를 선정하였다.

표 3. 진동측정에 선정된 공구

공구명	동력원	모델명	중량(Kg)	사용빈도*
임팩트 렌치	공압	α-50d	0.8	3개 Bolt/1대
그라인더	공압	ONV-125B	2.8	7초/1대
스크루 드라이버	전동	EZF-500	1.5	17개 Bolt/1대
	전동	YBX-50A	1.7	5개 bolt/1대

* 1일 생산량 = 400대(정상적인 조건하에서의 평균 생산량)

그림 2. 임팩트 렌치.

그림 3. 스크루 드라이버.

그림 4. 에어 그라인더.

3.2 측정 장비

진동공구에서 발생하는 진동의 수준을 측정하기 위해 3개의 가속도계(B&K 4374), 8채널 증폭기(B&K 5974), 테이프 저장장치(Sony PC208Ax), 주파수 분석기(B&K 2035), 가속도계 보정용 어댑터(Handle Adaptor set, B&K UA0891)를 사용하였다. 공구진동에 의해 가속도계에서 발생되는 전기적 신호를 증폭하기 위해 각각의 가속도계의 감도를 고려하여 증폭기의 스위치를 설

정하였으며, 손에 전달되는 진동량을 측정하기 위해 가속도계가 부착된 어댑터를 공구손잡이에 밀착하여 흔들리거나 틈이 없게 설치하였다. 가속도계는 <그림 5>와 같이 ISO 5349 방식에 의거, X, Y, Z축을 정의하여 부착하였다.

각 측정공구별 3축 측정점을 도시하면 <그림 6>과 같다.

인체에 전달되는 국소진동을 측정하기 위한 가속도계의 부착은 잡음(noise)의 영향을 최소화하기 위해 흔들림이나 공진이 없이 설치되어야 한다. 그러나 가속도계의 크기 등의 특성으로 인해 설치 및 측정이 상당히 곤란하였다. 또한 측정 시에도 가속도계의 연약한 성질 때문에 매우 조심스럽게 측정을 해야 한다. 이에 본 실험에서는 가속도계를 고정할 수 있는 일종의 지그(zig) 역할을 하는 어댑터(adaptor)를 보조기구로 이용하였다. 어댑터에 가속도계를 미리 설치하고, 실제 측정 시는 어댑터를 작업자가 공구 손잡이와 같이 움켜쥐어 측정을 하였다. (<그림7>)

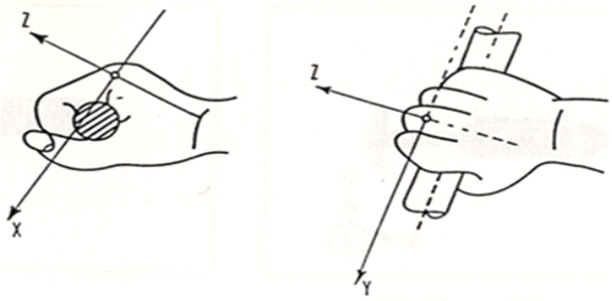


그림 5. 기본 중심 좌표체계 (ISO 5349).

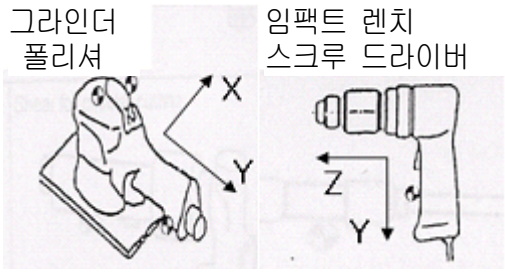


그림 6. 측정공구들의 3축 측정방향.

그림 7. 진동공구에 가속도계를 부착한 모습.

진동측정은 선정된 4개의 공구에 대해 총 48회 측정이 되었다. 예비실험에서 같은 작업의 반복작업 시 측정횟수에 따른 오차는 크지 않는 것으로 나타났으며, 각 공구별로 2일에 걸쳐 9회 이상을 반복해서 측정한 실제 측정 시에도 동일한 결과(변동계수(표준편차/평균)=0.067～0.278)를 나타냈다.

4. 결 과

4.1 진동수준 측정 결과

사용비율이 가장 많았던 임팩트 렌치가 <표 4>에서 보다시피 Z축에서 11.7m/s^{2}으로 가장 높은 가속도 값을 나타내었다.

이는 충격성 공구인 임팩트 렌치의 특성에 따른 결과로 풀이된다. 임팩트 렌치와 똑같이 Z축에서 가장 큰 가속도 값을 보인 공구는 스크루 드라이버인 YBX-50A와 ONV-125B이다. 즉, 4개의 공구 중 3개가 Z축에서 가장 큰 가속도 값을 나타냈으며, EZF-500만이 X축에서 가장 큰 가속도 값이 나타났다.

표 4. 공구별 가장 큰 가속도 값과 축

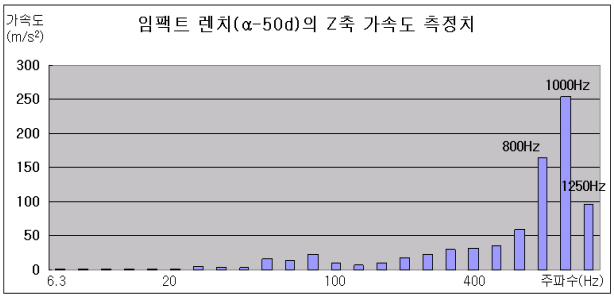
모델명	공구명	가속도 (m/s2)	가속도 값이 가장 큰 축
α-50d	임팩트 렌치	11.7 (1.86)	Z축
YBX-50A	스크루 드라이버	7.95 (0.53)	Z축
ONV-125B	그라인더	5.85 (0.43)	Z축
EZF-500	스크루 드라이버	3.38 (0.94)	X축

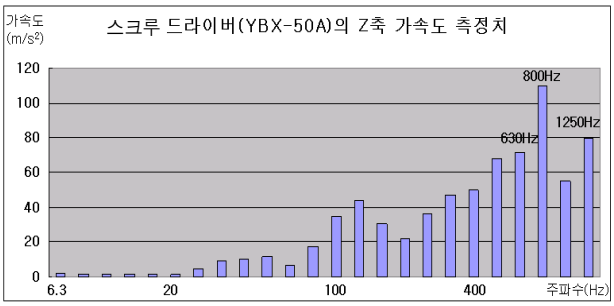
* 괄호 안은 표준편차

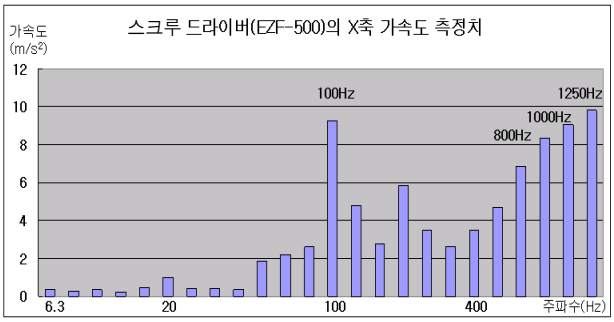
가장 큰 가속도 값을 나타낸 축에 대해 각 공구의 주파수별 가속도 값을<그림 9>에 나타내었다.

국소진동 노출수준을 평가하기 위해서 주파수가중 가속도를 실제 진동노출시간을 고려하여 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도($(a_{hw})_{eq(4)}$)로 변환하여야 한다. 이를 위하여 일일 국소진동 노출시간을 조사하였다. 일일 국소진동 노출시간을 산출하기 위하여 공구에 따라 1~2일에 걸쳐 9~15회의 표본을 추출하고 스톱와치를 사용하여 측정하였다. 이를 캠코더를 사용하여 기록된 영상기록과 시간을 비교하여 정확한 노출시간을 산출한 후 일일 기준으로 평균하여 환산하였다. 즉, 일일 국소진동 노출시간은 측정대상 공구의 Bolt 1개 체결 시 평균 작업시간 × Bolt 수 = 1대당 국소진동 노출시간, 1대당 국소진동 노출시간 × 일일 작업대수 = 일일 실제노출시간 으로 산출하였다. (예를 들면, 1대 작업하는 데 2개의 Bolt를 작업하고 진동노출시간이 Bolt 1개당 1초라고 하면, 1×2=2초(1대당 작업시간), 일일 100대의 작업량이 있을 때, 일일 총 노출시간은 2×100=200초.)공구별 국소진동 실제 노출시간을 정리하면

<표 5>와 같다.







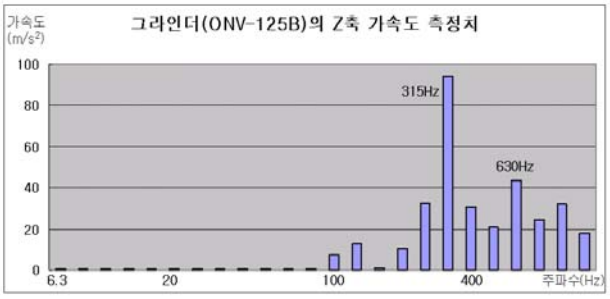


그림 8. 각 공구별 Dominant Axis에 대한 주파수별 가속도 크기.

표 5. 공구별 국소진동 일일 실제 노출시간

공구명	모델명	측정횟수	일일 실제 노출시간
임팩트 렌치	α-50d	9회	605초 (41초)
스크루 드라이버	EZF-500	15회	2042초 (86초)
	YBX-50A	15회	1004초 (152초)
그라인더	ONV-125B	9회	2801초 (243초)

* 괄호 안은 표준편차

공구별 국소진동 일일 실제 노출시간을 살펴보면 작업의 특성상 그라인더의 노출시간이 약 2801초로 가장 많은 노출시간을 나타내었고, 임팩트 렌치의 노출시간이 605초로 타 진동공구와 비교해 상당히 적었다.

식 (2)를 이용하여 국소진동 실제 노출시간을 고려하여 공구별 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도를 산출하면 <표 6>과 같다. 예를 들어, 임팩트 렌치의 경우 주파수가중 가속도(a_{hw})는 11.7m/s^{2}로 계산되었고, 이를 식 (3)에 대입하면

$$(a_{hw})_{eq(4)} = a_{hw}\sqrt{\frac{T}{T_4}} =$$

$$11.7 \times \sqrt{\frac{605}{14400}} = 2.39$$

를 얻을 수 있다.

표 6. 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도

공구명	모델명	$(a_{hw})_{eq(4)}$, m/s^2
임팩트 렌치	α-50d	2.39
스크루 드라이버	EZF-500	1.27
	YBX-50A	2.1
그라인더	ONV-125B	2.58

가속도가 가장 큰 축에 대한 주파수가중 가속도 값은 임팩트 렌치(α-50d)가 가장 높은 가속도 값을 나타내었으나, 임팩트 렌치는 진동에 대한 실제 노출시간이 다른 진동공구들에 비해서 상당히 적었다. 따라서 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도는 국소진동에 대한 노출시간이 가장 많은 그라인더(ONV-125B)가 2.58m/s^{2}로 가장 높은 값을 나타냈다.

4.2 ISO 5349에 의한 수지창백증 발생비율 예측

전술한 바와 같이 ISO 5349 부록에서 국소진동에 의해 수지창백증이 발생될 가능성을 예측할 수 있는 정보를 제공하고 있다. 수지창백증 발생기간을 4시간 기준 주파수가중 에너지등가가속도를 이용한 식 (3)을 사용하여 예측해 보면 <표 7>과 같다.

<표 7>에서 보다시피 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도와 비례하여 그라인더(ONV-125B), 임팩트 렌치(α-50d), 스크루 드라이버(YBX-50A, EZF-500) 순으로 노출년수가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도가 가장 높은 그라인더(ONV-125B)는 현재와 같은 조건으로 계속 사용한다는 가정하에 11.6년 후에 작업자의 10%가 수지창백증 증세를 보인다고 예측할 수 있다. 반대로 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도가 가장 낮은 스크루 드라이버(EZF-500)의 경우 작업자의 10%가 수지창백증에 노출될 수 있는 연수가 23.6년으로 그라인더(ONV-125B)에 비해 2배의 잠

복기간을 가지는 것으로 추정되었다. 전체 공구 중 사용량이 가장 많았던 임팩트 렌치는 12.6년으로 일일 국소진동 노출시간이 가장 길었던 그라인더와 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 한편 해당 작업장의 작업자 평균 근속년수는 약 15년(표준편차 5.4년)이었다. 따라서 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도가 가장 높은 그라인더 작업을 전담하는 작업자의 경우 현재 약 16.6%가 수지창백증에 노출될 수 있는 가능성이 있는 것으로 예측되었다. 진동수준이 가장 낮았던 스크루 드라이버(EZF-500)의 경우 근속년수 15년 기준으로 4%가 수지창백증에 노출될 수 있는 가능성이 있는 것으로 예측되었다.

4.3 ACGIH 노출한계치와의 비교

전술한 바와 같이 ACGIH에서는 진동공구의 실제 노출시간에 따라 주파수가중 에너지 등가가속도의 한계를 제시하고 있다.

각 공구별 국소진동에 대한 실제 노출시간과 주파수가중 에너지 등가가속도를 정리하면 <표 8>과 같다. <표 8>에서 보다시피 4개의 진동공구 모두 실제 노출시간이 1시간을 넘지 않는다. 1시간 미만 기준으로 ACGIH 기준을 <표 2>에서 찾아보면 12m/s^{2}의 한계가속도 값을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 4개 진동공구의 주파수가중 에너지 등가가속도 값이 모두 한계치인 12m/s^{2}를 넘지 않는 수준으로 평가되었다.

4.4 측정결과의 요약

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

① 선정된 진동공구 중 임팩트 렌치(α-50d)의 Dominant Axis의 진동가속도가 Z축에서 11.7m/s^{2}로, 측정공구 중 가장 큰 가속도 값을 나타냈다.

② 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도가 가장 큰 값을 나타낸 공구는 그라인더(ONV-125B)로서 2.58m/s^{2}를 나타냈다. 이는 국소진동에 대한 실제 노출시간이 임팩트 렌치(α-50d)보다 크게 높아 나타난 결과이다.

③ 수지창백증이 발생할 수 있는 노출년수를 작업자의 10% 기준으로 살펴보면, 그라인더(ONV-125B)의 경우가 11.6년으로 가장 짧았으며, 스크루 드라이버(EZF-500)가 23.6년으로 가장 길었다.

④ 4개의 진동공구 모두 ACGIH 기준의 진동노출한계보다 적은 가속도 값을 나타내었다.

4.5 진동공구 사용실태 및 관리실태 조사

조사 사업장의 공구실 자료 및 작업자 면담을 위주로 진동공구에 대한 사용 및 관리 실태를 조사하였다. 작업자 면담은 사용량이 가장 많은 임팩트 렌치를 주로 사용하는 작업자 20명을 대상으로 하였다.

각 공구에 대한 공구교체시기는 정확한 자료를 산출할 수 없었지만 공구실 자체 평가로 평균 약 3~6개월로 나타났다. 공구교체는 작업자의 요구가 있을 때 실시하였다. 공구교체의 이유 중 가장 큰 이유가 토크가 약해지는 현상이 발생할 때였으며, 그 다음 공구의 파손, 고장 등으로 조사되었다.

현재 사용하는 공구에 대해 불편한 이유에 대한 작업자 면담 결과는 <표 9>와 같다.

진동공구 사용 시 장갑착용 여부를 조사한 결과, 목장갑 1개 착용이 16.7%, 목장갑 2개 혹은 목장갑 1개와 코팅장갑을 동시

표 7. 수지창백증이 발생할 수 있는 노출년수(year) 예측

공구명	모델명	해당 작업자 중 수지창백증 발생비율 예측(%)				
		10	20	30	40	50
		노출년수, TF				
임팩트 렌치	α-50d	12.6	17.8	21.8	25.2	28.1
스크루 드라이버	EZF-500	23.6	33.4	40.9	47.2	52.8
	YBX-50A	14.3	20.3	24.8	28.7	32.1
그라인더	ONV-125B	11.6	16.5	20.2	23.3	26.0

표 8. 공구별 주파수가중 에너지 등가가속도 및 실제 노출시간

공구명	모델명	주파수가중 에너지 등가가속도 (㎨)	실제 노출시간 (hour)
임팩트 렌치	α-50d	2.39	0.17
스크루 드라이버	EZF-500	1.27	0.57
	YBX-50A	2.10	0.28
그라인더	ONV-125B	2.58	0.78

에 착용하는 작업자가 83.3%로 조사되었다. 방진장갑을 착용하고 진동공구를 사용하는 작업자는 없었으며, 대부분이 방진장갑에 대하여 착용경험이 없었다(70%). 그 중 지급이 된다면 착용해 보겠다는 의견이 대다수를 차지했다. 한편, 방진장갑 착용경험이 있는 작업자들의 경우 모두가 방진장갑에 대해 불만족하고 있는 것으로 나타났다. 이유는 방진장갑의 두께로 인한 수작업의 불편함과 미끄러움의 이유로 작업이 불편하다는 의견이 가장 많았다.

표 9. 사용중인 진동공구가 불편한 이유

불편한 이유	응답자 수(%)
무겁다	7 (36.8%)
진동이 과도하다	5 (26.3%)
손목각도가 불편하다	3 (15.8%)
토크가 약하다	2 (10.5%)
손잡이가 불편하다	1 (5.3%)
고열이 발생한다	1 (5.3%)
계	19 (100%)

현재 사용하는 공구의 손잡이 부분에 패드 없이 사용하는 경우가 가장 많았으며, 이는 기본부착 패드의 마모로 인한 이유가 많았지만 미끄러움을 이유로 고의로 기본 패드를 제거하고 사용하는 작업자도 상당수 있었다. 패드가 있는 공구를 사용하는 경우에는 기본 패드를 그대로 사용하는 경우가 가장 많았다. 패드에 대한 관리형태를 요약하면 <표 10>과 같다.

표 10. 사용 진동공구의 손잡이 패드 재질 조사

패드 종류	패드 재질	공구수량
패드 없음	–	9 (52.9%)
기본 패드	플라스틱	3 (17.6%)
	고무	2 (11.8%)
	스폰지	2 (11.8%)
청테이프 매핑	스폰지	1 (5.9%)
합계	–	17 (100%)

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 자동차의 의장조립 사업장에서 사용하는 주요 공압식, 전동식 진동공구에 대하여 실제 작업 시의 진동노출수준을 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도로 평가하고 수지창백증 발생년도를 추정하였다.

작업의 특성상 임팩트 렌치의 사용량이 가장 많았고, 그 외의 공구는 소수만이 사용되었다. 임팩트 렌치의 주파수가중 가속도는 11.7m/s^{2}으로 측정되었고 이를 4시간 기준 주파수가중 가속도로 변환하면 2.35m/s^{2}이 되었다. 이는 작업특성상 총 진동노출시간이 워낙 적어(총 하루 1시간 이내) 나타난 결과이며, 만약 진동노출시간이 길어진다면 진동수준이 급격히 올라갈 가능성이 있다. 따라서 작업순환 및 작업교대 등의 관리적 측면의 제어가 필요하다. 그라인더는 노출시간이 상대적으로 길었기 때문에 가장 높은 4시간 기준 주파수가중 에너지 등가가속도 값(2.58m/s^2)을 얻었다.

본 연구의 가속도 값과 관련된 결과는 자동차 조립사업장에 대한 국내의 선행 연구에서 같은 종류의 임팩트 렌치에서 측정된 11.55m/s^2(김선술과 백남원, 1996)와 직접적으로 비교할 수는 없다. 그 이유는 김선술 등의 연구에서는 가속도 값이 가장 큰 값을 갖는 축이 X축이었으나, 본 측정에서는 작업방법 및 작업특성, 작업자 개인특성 등의 이유로 Z축에서 가장 큰 가속도 값이 얻어졌으며, 측정된 공구의 공회전속도(r.p.m.)도 각각 4500 r.p.m.과 7000 r.p.m.으로 서로 달랐다. 한편, 가속도 관련 값에 추가하여 수지창백증의 유병률 또는 발생의 예측년수를 비교할 수 있지만, 김선술 등의 연구에서는 α-임팩트 렌치에 대한 예측년수를 산출하지 않아 이에 대한 비교도 불가능하였다.

그라인더는 작업성격상 타 진동공구에 비해 일일 실제 노출시간이 상당히 길었기 때문에 수지창백증 등의 유병률이 가장 높은 것으로 예측되었다. 따라서 공구의 교체, 방진장갑의 착용 등의 직접적 진동수준관리와 더불어 작업순환, 작업교대 등의 관리적 측면의 제어로서 노출시간을 줄이는 노력이 필요하겠다.

ISO 5349를 비롯한 국소진동에 대한 세계적 기준 혹은 표준들은 주파수가중 가속도 값을 사용한다. 미국 표준협회(American National Standards Institute), 미국 ACGIH, 영국 표준협회(British Standards Institution)등 주요 표준들이 이 방식을 이용하고 있다. 그러나 미국 산업안전보건연구원(NIOSH; National Institute for Occupational Safety and Health)은 주파수의 가중 없이 분석하는 방법을 제시하고 있다. NIOSH가 제시한 방법에 의하면 가중 가속도 값의 적용은 고주파로 갈수록 점차적으로 과소평가될 수 있다는 이유로 비가중 가속도 값을 사용한다. 또한 비가중 가속도 값은 가속도계에서 측정된 값을 수정 없이 이용할 수 있기 때문에 편리하다는 장점이 있다. 이처럼 주파수대에 따른 가속도에 가중을 하느냐 마느냐의 문제는 지금도 연구의 대상이 되고 있다. Letz *et al.*(1992)의 연구에 의하면 이 두 방법 사이의 빈약한 상관관계 때문에 상호비교가 용이하지 않으며, Griffin(1992)은 중요 주파수(dominant frequency)가 저주파수(250Hz 이하)를 갖는 공구의 경우에는 가중가속도 값을 적용해야 한다고 보고하고 있다.

가속도를 산출하는 방법에 있어서는 점차 세 축의 가속도 방향을 합산하는 방식으로 바뀌어 가고 있으며, 2001년 개정된 ISO 5349 역시 세 축 방향을 모두 고려한 가속도 값을 사용하고 있다. 또한 2001년 개정판에는 8시간 기준의 가속도 값으로 환산하도록 되어 있다. 또한 ACGIH에서 제시한 진동노출한계가

속도 값도 8시간 기준의 주파수가중 에너지 등가가속도 값을 사용하고 있다. 상기에서 제시된 기준 이외에도 유럽연합에서 책정한 국소진동 제어를 위한 노출수준을 살펴보면, 8시간을 기준으로 반복적으로 계속하여 노출되어도 전혀 문제가 없는 진동 가속도의 수준을 $1m/s^2$로 규정하고 있다. 또한 8시간 기준으로 $2.5m/s^2$ 이상의 진동 가속도에 대해서는 노출 정도에 대한 측정 및 의학적 감시가 지속적으로 필요한 수준으로, 그리고 $5m/s^2$ 이상의 수준에 대해서는 절대로 노출되면 안 되는 수준으로 규정하고 있다. 한편, 우리 나라에서는 2000년 한국산업안전공단이 국소진동측정 및 평가지침으로 제시한 방법에서 1986년 방식을 따르고 있다. 아직 개정된 방식에 대한 완전한 현장 검증은 충분하지 않으나, 우리 나라의 지침도 국제적인 일관성을 가질 필요는 있다고 사료된다. 추후, 의학적 검진결과 혹은 작업자의 자각증상 등과 연계된 연구가 계속적으로 이루어져 진동 관련 국내 기준이 확립되어야 하겠다.

공구의 사용 및 관리에 대한 실태조사결과, 공구가 주기적, 즉시적으로 교체되지 못하고 있어 생산성 저하 및 작업자의 불만이 나타나고 있다. 진동공구는 모터 노화 및 출력 약화, 혹은 패드 손상 등으로 인해 작업성이 저하될 수 있으므로, 보다 체계적인 관리지침이 현장에서 요구되었다.

진동전달을 경감시켜 주는 무진동공구는 일반 진동공구에 비해 무게가 무거운 것이 가장 큰 단점이다. 그 예로서 M12 볼트를 체결하기 위한 일반 임팩트 렌치는 1.32kg이었으나 똑같은 규격의 무진동 임팩트 렌치의 무게는 2.4kg으로 약 2배 정도 무거운 것으로 조사되었다. 무진동공구는 이러한 무게에 대한 부담 때문에 작업자들에게 종종 외면당하고 있다. 따라서 이런 무게로 인한 한계점을 없애기 위해 진동공구를 지지할 수 있는 지지대(hanger) 등을 적극 도입할 필요가 있다.

방진장갑의 효과에 관해서는, 김선술과 백남원(1996)은 400Hz 이하의 주파수 폭에서 발생된 진동수준에 대해서는 방진효과가 뚜렷이 나타나지 않았지만 400Hz 이상의 주파수 폭에서는 현저한 방진효과를 나타낸다고 보고하였다. 그러나 본 연구의 조사결과, 방진장갑을 사용해 본 작업자들은 작업에 불편함을 호소하였다. 추후 방진장갑의 착용감, 두께, 땀이나 기름 등에 대한 미끄러움 등 방진장갑의 사용성에 대한 개선이 필요하다고 사료된다.

진동공구의 패드는 인체에 전달되는 진동을 줄이기 위해 사용하는 것이 주목적이다. 그러나 전술한 바와 같이 기본 패드를 제거하고 사용하는 경우도 종종 발견되었다. 이는 교육을 통해 작업자 인식의 변화를 유도하여야 하며, 패드 재질 및 형상에 따른 진동감쇠에 대한 추가적인 연구도 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

김선술, 백남원 (1996), 자동차 조립공정에서 공기압력식 진동공구의 국소진동평가, *한국산업위생학회지*, **6**(1), 1-16.

이동춘, 김길주 (2000), 전동드릴의 진동전달 특성에 따른 적정 드릴 무게의 결정, *대한인간공학회지*, **19**(2), 75-86.

임상혁, 박희석, 양정인 (2002), 조선업 정동수공구의 진동평가와 진동증후군에 대한 연구, *대한인간공학회지*, **21**(4), 25-45.

정재열, 김정만 (1995), 자동차 조립라인에서 이중-헴머형(Double-hammer type) 임팩트 렌치와 오일-펄스형(Oil-pulse type) 임팩트 렌치 에어공구의 국소진동가속도 및 소음수준, *한국산업위생학회지*, **5**(2), 147-159.

주영수, 최홍렬, 김미경, 손홍, 전순자, 조성일, 김형식 (1998), 조선소 근로자에서의 국소진동장해 진단방법에 대한 평가, *대한산업의학회지*, **10**(4), 413.

노동부 (2002), 2001 산업재해분석.

노동부 (2003), 고시안 2003-24호.

한국산업안전공단 (2000), KOSHA CODE H-23-2000.

한국산업안전공단 (2003), KOSHA CODE H-30-2003

한국산업안전공단 (2003), 산업보건에 기준에 관한 규칙 142조.

ACGIH. TLVS and BEIs (1998), Threshold limit values and biological indices. Cincinnati, Ohio : *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*.

Griffin M.J. (1992), Handbook of Human Vibration, New york; *ACADEMIC PRESS*.

ISO (1986), Mechanical vibration-guidelines for the measurement and the assessment of human exposure to hand-transmitted vibration.: *International Organiza- tion for Standardization*, Ref. No. ISO 5349.

ISO (2001), Mechanical vibration-Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmetted vibration.: *International Organization for Standardization*, Ref. No. ISO 5349.

Letz R, MG Cherniack, F Gerr, D Hershman, P Pace (1992), A cross sectional epidemiological survey of shipyard workers exposed to hand-arm vibration, *Br J Ind Med*., **49**, 53-62.

NIOSH (1989), Criteria for a recommended standard: occupational exposure to hand- arm vibration. Cincinnati, Ohio : *U.S. Department of Health and Human Service*.

OSHA (2001), Ergonomics Program.

Taylor,W. and Brammer, A.J (1982), Op.Cit., 1-12.

박희석
서울대학교 산업공학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
미시간대학교 산업공학과 박사
현재: 홍익대학교 정보산업공학과 교수
관심분야: 인간공학, 근골격계질환, 인체진동, 사용성공학

허승무
홍익대학교 기계공학과 학사
홍익대학교 정보산업공학과 석사
현재: 원진노동환경연구소 연구원
관심분야: 인간공학, 근골격계질환, 인체진동