

<논 문>

인체의 팔굽진동 특성에 관한 실험적 해석

Experimental Analysis about Hand-transmitted Vibration Characteristics of Human Body

김 대 원*

Kim, D. W.

(1999년 12월 20일 접수 : 2000년 3월 23일 심사완료)

Key Words : Hand-transmitted Vibration(팔굽진동), Human Body(인체), Electric Hand Tools(전동공구) Human Exposure Criteria(인체폭로기준)

ABSTRACT

In this study, the characteristics of transmitted vibration on hand-arm system are examined when operating electric hand tools. Also through the correlation analysis between anthropometric data and transmitted vibration, and comparison study with appropriate amount of work done based on the ISO criteria, the basic data for the ergonomic work design can be presented. The types of electric tools and works for the experiment are drill (general type and impact type), grinder, wire brush and steel to analyze the characteristics of transmitted vibrations, the amount of transmitted vibrations in X, Y and Z direction at tool(T), hand(H), wrist(W), and the joint between forearm and upper arm(A) were measured at the frequency range of 6.3 ~ 1000[HZ]. Also, the limit of human exposure to vibration, and the response of frequency were conducted.

1. 서 론

산업의 급속한 발전에 의해 자동차 여행, 철도 여행, 비행기 여행, 바다여행, 각종 레저 및 공장의 작업장등에서 진동이 인체에 미치는 영향과 그 육체적, 정신적 피해에 대해서 많은 연구들^(1,2)이 진행되고 있다. 특히 인체의 전신진동에 대해서는 수직방향진동과 수평방향진동에 대한 인체 진동감쇠특성에 대해서는 많은 연구들^(1~3)이 진행되었으나 산업전반에 걸쳐서 사용되고 있는 일반전동공구로 인해 작업시 발생하는 진동 때문에 작업자들에게 많은 피로와 함께 인체의 손과 팔에 관계된 많은 질병을 유발시키고 있음에도 그에 관한 충분한 연구^(4,5)가 이루어지고 있지 않다. Fig. 1은 손을 통해 전달되는 진동의 영향인자와 그것으로 인해 유발되는 효과들을 도시적으로 나타낸다. 이러한 인간의 손과 팔은 운동에너지를 저장할 수 있는 탄성 시스템으로 근육조직의 팽창과 이완에 의해 또는 근육조직의 운동으로부터 그 에너지가 활용되어진다. 본 연구에서는

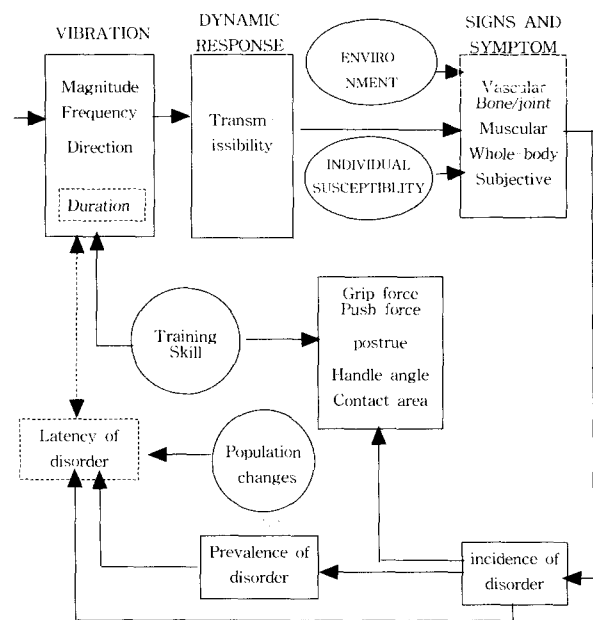


Fig. 1 Conceptual illustration of factors influencing cause-effect relationships for hand-transmitted vibration

* 정희원, 장흥대학 자동차전장과

전동공구인 그라인더(grind)와 드릴(drill)작업을 대상으로 해서 전동 공구들의 진동특성을 규명하고 ISO폭로기준과의 비교를 통해 인체에 영향을 주지 않는 일반 전동 공구별 한계작업 시간을 산출하여 적절한 작업 표준시간 산정에 기초자료로 활용되게 하였다

또한 전동공구의 진동이 인체의 상지에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위한 팔의 위치별(손등, 손목, 팔)진동 감쇠 특성을 분석하기 위해 본 연구를 진행했다.

2. 인체의 진동 특성

2.1 진동의 영향인자

진동을 인체에 부여한 외부자극이라고 생각하면 인체에 영향을 주는 요인으로 진동의 진폭(m), 전신 진동(1~100 Hz)과 국부진동(8~1000 Hz)로 나누어지는 진동의 주파수(Hz), 수직·수평·회전방향 등에 따라 다른 특성을 가지는 진동의 방향, 진동의 파형(연속,비연속), 진동 폭로시간(min/h)등이다. 이 외에도 인체의 자세, 진동 인가점의 상태(쿠손유무)등이 인체에 미치는 진동의 영향 인자이다.

2.2 전신진동

인체는 진동을 받으면 파치니소체, 멜렐츨판, 자유신경종말, 마이셀 소체 등을 통해 진동을 수용하면 신경 임펄스(impulse)지각 신경 경로를 거쳐서 시상에 도달하여 하나는 두뇌로 올라가서 진동을 인식하고 불쾌감 등을 느낀다. 또 다른 하나는 시상하부에 와서 자율신경계를 자극하고 여러 가지의 생체기관에 영향을 미쳐서 생리학적 문제, 심리적 문제 행동제약 등을 일으키는 전신 진동의 경우는 Fig. 2와 같이 선자세에 대한 국제표준(ISO 2631)에서 주파수 대역(1~90 Hz)별 수직방향, 수평방향별 주파수 가중합수를 정의했다.

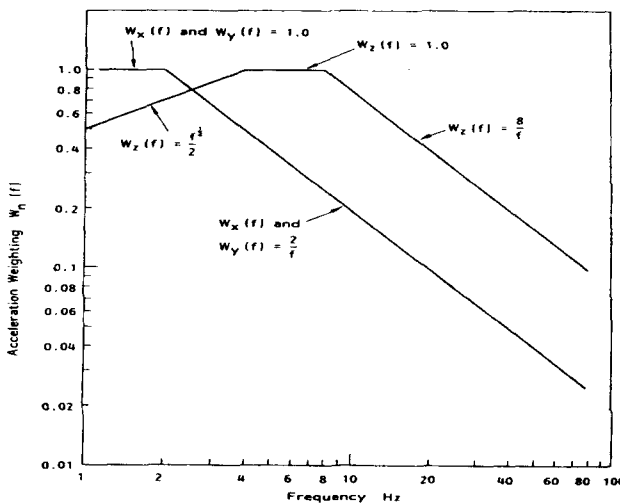


Fig. 2 Acceleration frequency weighting for evaluating all human responses whole-body vibration

2.3 팔굽진동

국제표준(ISO5349)에서 정한 팔굽진동의 주파수 대역은 6.3~1000 Hz으로 주파수 대역별 주파수 가중합수는 Fig. 3과 같다.

또한 모든 진동량은 주파수 가중된 오브올 (over all) 값을 사용한 분석방법으로 평가되는데 1옥타브 또는 1/3 옥타브 분석을 사용하는 경우에는 식 (1)로 주파수 가중된 가속도를 구할 수 있다.

$$a_{hw} = \left[\sum_{i=1}^n (K_i \cdot a_{hi})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서 a_{hw} 는 주파수 가중된 오브올 값, K_i 는 주파수 대역별 가중치, a_{hi} 는 i 번째 옥타브 밴드에서의 진동가속도 값이다.

ISO 5349에서는 식 (1)의 주파수 가중된 가속도 값을 이용해서 4시간의 주파수 가중 에너지 등가 가속도값으로 일일 노출시간에 따라 손이 하얗게 되는 백지증 증상에 대한 발병률의 가능 기간을 식 (2)와 같은 식으로 계산하도록 제안 하고 있다.

$$E(\text{year}) = \frac{9.5}{a_{hw}} \left[\frac{c \cdot T_{(4)}}{t} \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서 t 는 일일노출시간, c 는 발병률, $T_{(4)}$ 는 기준시간이다.

3. 실험 장치 및 실험

본 연구에서는 공구(grind, wire brush, drill, impact drill)의 4가지 요소에 대한 손과 팔의 진동 전달 요소를 측정하기 위하여 공구와 손등, 손목, 팔에 진동(piezo-

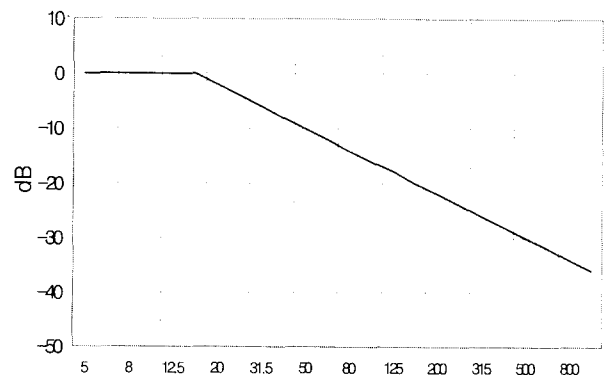


Fig. 3 Acceleration frequency weighting for evaluating all human responses to hand transmitted vibration

electronic sensor)를 Fig. 4와 같이 부착하여 사용하였고 신호 분석을 위해서는 A&D 3600 WCA 의 신호분석기를 사용하였다.

또 그라인드와 드릴은 220V, 60Hz의 일반적으로 사용되는 공구를 사용하였고 충격드릴(Impact Drill)은 25000회/min 의 타격수를 갖는 것을 사용하였다.

진동 센서의 경우 공구에는 PCB 38730(500G), 손목과 손등에는 Rion Vibrometer VM-61과 VM-82를 사용하고 팔에는 PCB 7394(50G)를 사용하였다. 진동 센서의 사양은 Table 1과 같다.

그리고 측정결과의 정확도 향상을 위하여 작업자세는 드릴과 그라인드작업 모두 수평면에 작업물을 두고 작업을 하도록 하는 한가지 작업자세를 취하도록하여 작업자세의 변화에 따른 변수를 최소화하여 Table 2 와 같은 실험조건을 설정했다.

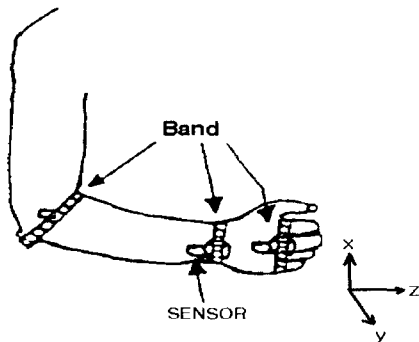


Fig. 4 Measurement point for the experiment

Table 1 Vibration sensor specification

Event	PCB 38730	PCB 7394	VM-61	VM-82
Measuring frequency range	1 ~ 10 kHz	1 ~ 10 kHz	3 ~ 5 kHz	3 ~ 5 kHz
Measuring capacity	500G	50G	10G 100G	10G 100G
Sensitivity	±0.5%	±0.5%	3%	3%

Table 2 Work design for the experiment

Tools	Materials	Pushing force	Direction
Drill	Steel	15 kgf	X, Y, Z
		25 kgf	
Impact Drill	Steel	15 kgf	
		25 kgf	
Grind	Steel	1 kgf	
		2 kgf	
Wire Brush	Steel	1 kgf	
		2 kgf	

또한 진동의 측정방향은 Fig. 4와 같이 X, Y, Z 방향으로 설정하고 각 방향에 대한 공구와 손등, 손목, 팔의 진동 전달특성 실험을 Fig. 5와 같은 방법으로 수행했다.

본 실험에는 손등과 손목을 포함하는 상지에 어떠한 종류의 질환 또는 상해 경험이 없는 신체 건강한 남자 23~26세의 분포를 갖는 15명의 인원을 선정하였다. Table 3은 피실험자의 인체적 특징을 나타낸다.

4. 결 과

4.1 전동 공구의 진동 특성

(1) 전동 공구의 주파수 특성

공구의 손잡이 부분에서 측정된 공구의 특성은 Fig. 6과 Fig. 7 같이 그라인드와 와이어 브러시의 경우는 사용되고 있는

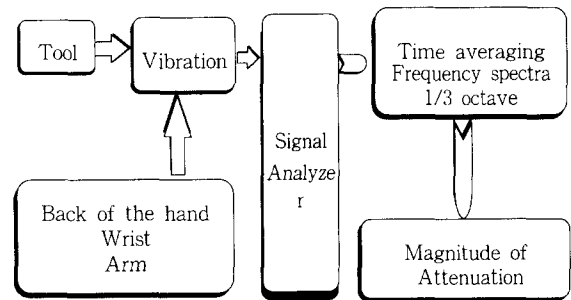


Fig. 5 Diagram of measuring flow

Table 3 Anthropometric data of subjects(n=15)

Dimension	Mean	S.D.
Age	24.5	2.11
Stature	173.0	3.74
Weight	67.21	2.21
Forearm Breadth	9.56	0.75
Wrist Thickness	4.21	0.263
Hand Length	19.16	0.15
Wrist Circumference	15.87	0.58
Wrist Breadth	5.92	0.27

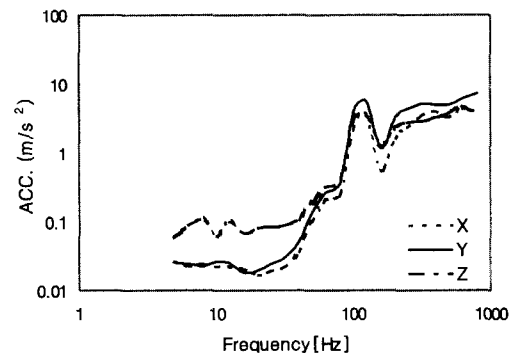


Fig. 6 Vibration characteristics of grinder

220V, 60 Hz 단상에 해당하는 120 Hz부근의 주파수가 피크 (peak)를 나타내고 그 주파수 특성들이 유사함을 알 수 있다. 또 공구의 각 방향(X, Y, Z)에 대해 그래인드의 경우 80 Hz이하의 영역에서는 Z방향의 가속도가 크게 나타나고 80 Hz 이상에서는 Y방향이 크게 나타남을 알 수 있다.

또 Fig. 8과 Fig. 9의 드릴과 충격드릴의 경우는 60 Hz부근에서 피크를 나타내고 특히 충격드릴의 경우는 25000 회/min의 타격수에 해당하는 400 Hz 부근의 주파수가 피크를 나타내며 Y방향의 가속도가 X, Z 방향에 비해 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

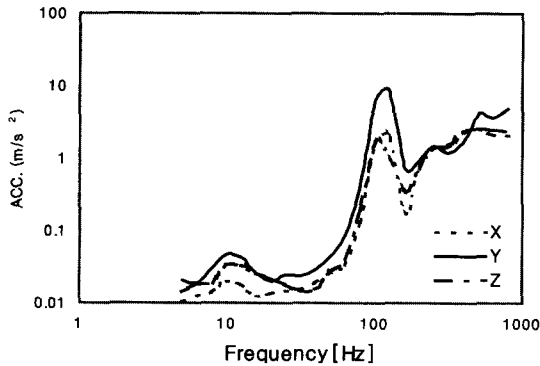


Fig. 7 Vibration characteristics of wire brush

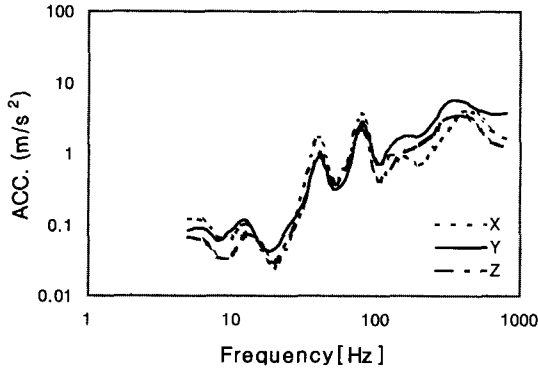


Fig. 8 Vibration characteristics of general drill

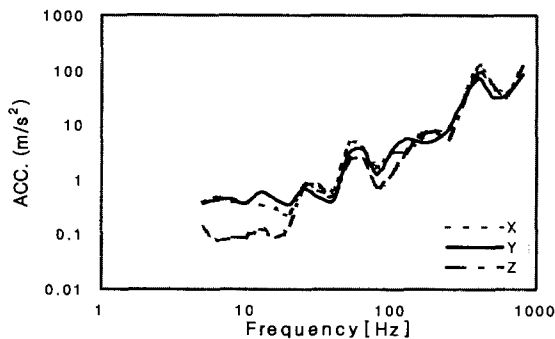


Fig. 9 Vibration characteristics of impact drill

Table 4 Approximate number of years of ovibration exposure before finger blanching develops in 10% and 50% of a population for daily exposure times from 30min to 8hrs.

Tools	Weighted acceleration $a_{nw}(m/s^2)$	Daily exposure time(h)									
		10% affected					50% affected				
		0.5	1	2	4	8	0.5	1	2	4	8
Drill	1.61	>25	>25	>25	18.7	13.2	>25	>25	>25	>25	>25
Impact drill	9.58	8.9	6.3	4.4	3.1	2.2	19.8	14.0	9.9	7.0	5.0
Grinde	1.55	>25	>25	>25	19.4	13.7	>25	>25	>25	>25	>25
Wire brush	1.61	>25	>25	>25	18.7	13.2	>25	>25	>25	>25	>25

(2) 진동공구의 노출한계

식 (1)을 적용하여 본 연구에서 구한 주파수 가중된 오버올 값은 Table 4와 같다.

Table 4에서 보면 일반형 드릴과 와이어 브러시의 주파수 가중 가속도값은 똑같이 1.61 [m/sec^2], 그래인더는 1.55 [m/sec^2]으로 비슷하면서 비교적 적게 나타나고, 충격형 드릴의 경우는 9.58 [m/sec^2]으로 다른 진동공구 보다 약 6배 정도 높게 나타났다. 이것은 회전형 공구의 진동보다 충격형 공구의 진동이 훨씬 높고 인체에 미치는 영향도 크다는 것을 알 수 있다.

그리고 ISO 5349에서 제안한 식 (2)를 이용하여 일일 노출 시간에 따른 손이 하얗게 되는 백지증의 발병률의 가능시간을 계산하면 Table 5와 같다.

Table 4에서 드릴, 그래인터 및 와이어브러시는 주파수 가중된 가속도 값이 낮기 때문에 백지증의 발병률이 50%인 경우는 일일 노출시간이 8시간이더라도 25년이상이기 때문에 문제가 되지 않는 것으로 나타났다.

또한 10%의 발병률에서도 일일 2시간 이하의 노출에 대해서는 25년 이상의 기간으로 길게 나타났다. 그러나 충격형 드릴은 일일 30분이상 노출되면 약 9년이하의 기간에서 10%의 발병률로 백지증이 발생할 가능성이 있으며, 일일 2시간 이상 노출되면 약 10년 이하의 기간에서 50%의 발병률로 백지증이 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

4.2 팔의 위치별 진동 감쇠 특성

(1) 팔의 가진방향별 감쇠특성

구조의 각부위(손등, 손목, 팔)별 진동의 측정방향(X, Y, Z)에 대한 주파수 대역별 진동감쇠량을 실험 공구들을 사용해서 분석해 본 결과 진동의 측정 방향이 Y 방향인 경우가 다른방향 (X, Z방향)들 보다 진동감쇠량이 큰 것으로 나타났다. 그 대표적 예가 Fig. 10과 같다.

(2) 팔 위치별 감쇠특성

실험공구와 팔구조(손등, 손목, 팔)의 진동 특성을 통해 공구에서 팔구조의 각부위로 전달되는 주파수 대역별 진동 감쇠량을 Fig11~18과 같이 분석했다.

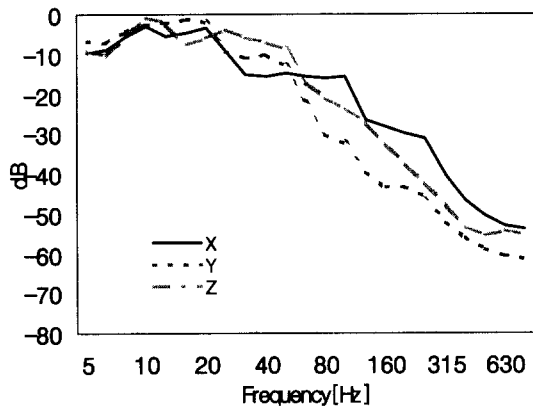


Fig. 10 Vibration attenuation characteristics about actuating direction of forearm

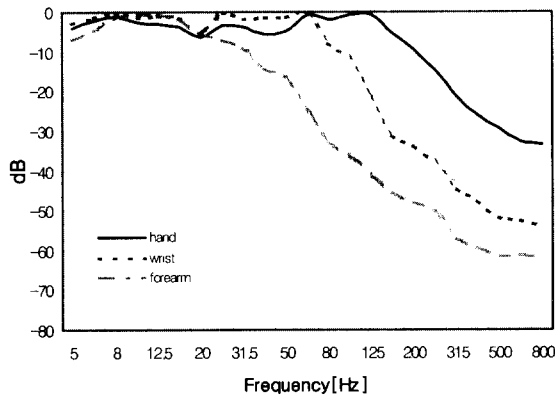


Fig. 11 Characteristics of vibration attenuation with general drill(15 kgf)

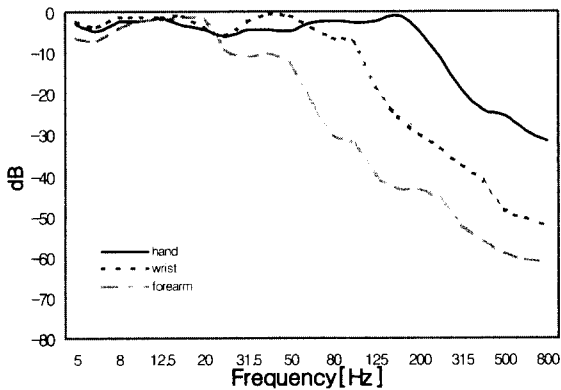


Fig. 12 Characteristics of vibration attenuation with general drill(25 kgf)

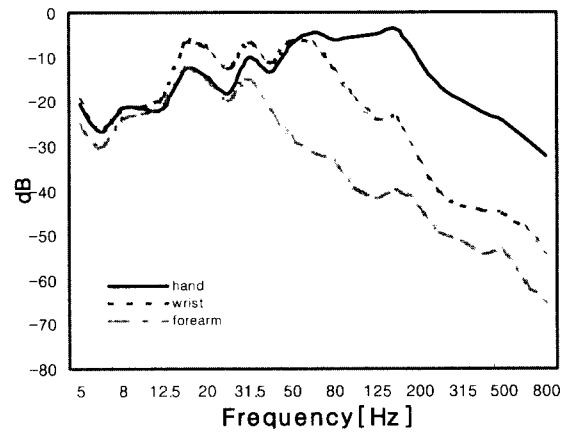


Fig. 13 Characteristics of vibration attenuation with impact drill (15 kgf)

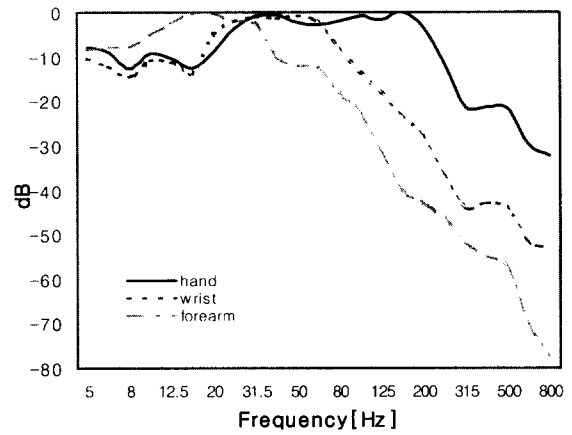


Fig. 14 Characteristics of vibration attenuation with Impact drill (25 kgf)

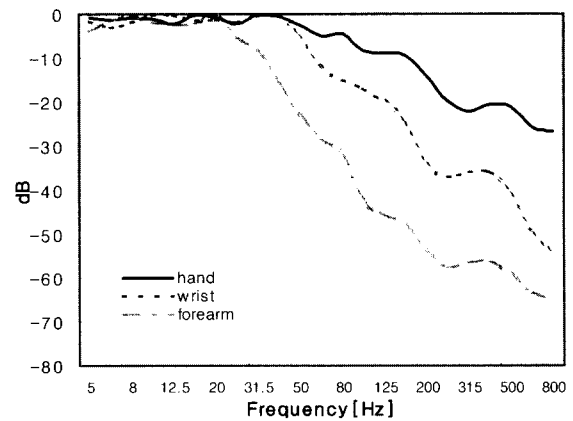


Fig. 15 Characteristics of vibration attenuation with grinder(1 kgf)

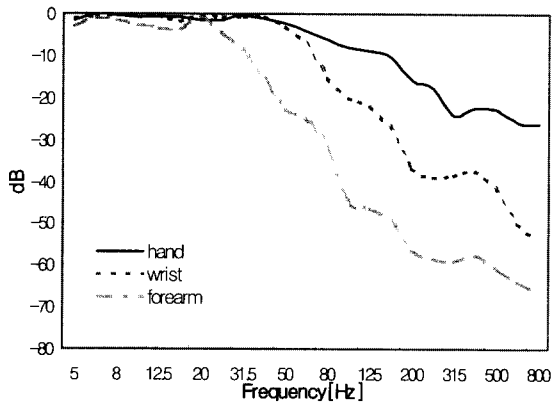


Fig. 16 Characteristics of vibration attenuation with grinder(2 kgf)

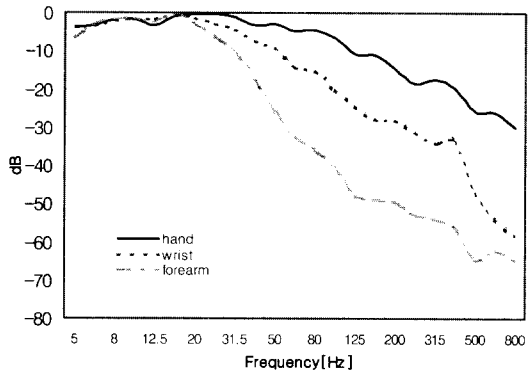


Fig. 17 Characteristics of vibration attenuation with wire brush (1 kgf)

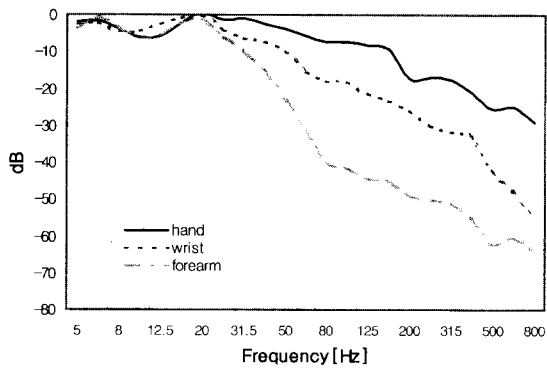


Fig. 18 Characteristics of vibration attenuation with wire brush(2 kgf)

드릴의 경우는 Fig. 11과 Fig. 12, 충격드릴은 Fig. 13과 Fig. 14, 그래인드는 Fig. 15와 Fig. 16, 와이어브러쉬는 Fig. 17과 Fig. 18등에서 보는 것과 같이 실험공구에 작용하는 힘의 차이는 팔구조의 각 부위에 나타나는 주파수 대

역별 진동감쇠량 특성에 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 그리고 Brugstorm과 Lundstorm(1994)은 손과 팔에 흡수되는 진동에너지를 측정하여 손과 팔의 진동 에너지 흡수는 진동수와 진동 자극의 방향에 영향을 받으며 큰 악력에 의해 많은 진동 감쇠가 이루어져 진동 감쇠에 영향을 준다는 분석 내용과 본 연구의 실험 결과와 비교해 보면 팔 구조의 각 부위별 진동 감쇠 특성은 악력만이 영향을 미치고 작용하는 힘은 영향이 없음을 알 수 있다. 즉 악력이 달라질 경우 팔구조의 임피던스 변화가 발생되어 팔 구조의 진동감쇠 특성이 변화는 현상이 발생된다.

또 Fig. 11과 Fig. 12의 드릴 진동감쇠 특성에서 실험공구에 가까운 손등, 손목, 팔의 순서로 높은 주파수대역까지 진동감쇠가 일어나지 않는 강체와 같은 특성을 가짐을 분석할 수 있다. 여기에 나타난 진동감쇠 시작 주파수는 손등의 경우 160 Hz부근, 손목의 경우 100 Hz부근, 팔의 경우 20 Hz부근에서 진동감쇠가 시작됨을 알 수 있다.

Fig. 15와 Fig. 16의 그래인드에 대한 팔 구조의 진동 감쇠특성은 손등과 손목에서 40 Hz부터 진동감쇠가 시작되고 팔에서는 16 Hz부근부터 진동감쇠가 일어나고 있음을 나타내준다. 일반적 진동 시스템의 경우 외력의 변화에도 불구하고 항상 일정한 시스템 전달 특성을 가지고 있으나 본 연구의 결과에 따르면 인체의 팔굽진동 감쇠특성은 작업 전동 공구에 따라서 감쇠특성이 약간씩 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 작업 공구별 공구의 특성에 따라 파지법의 차이들에 따른 인체의 임피던스 변화에 의해 발생되는 것으로 판단된다.

4.3 ISO 감쇠곡선과 비교

실험을 통해 분석한 실험공구별 진동 감쇠특성을 Fig. 3의 ISO 5349에서 제시하고 있는 기준 곡선과 비교하여 Fig. 11부터 Fig. 18까지 나타내었다. 이러한 ISO 5349의 팔굽 진동감쇠 기준곡선은 16 Hz영역 이후부터 진동감쇠가 시작되지만 실험결과에서는 실험공구의 종류와 팔구조의 측정위치에 따라 진동감쇠가 발생하는 주파수 대역이 다르다. 예를 들면 그래인드의 경우는 손등과 손목에서 40 Hz부터 팔에서는 16 Hz부터 진동감쇠가 발생하고, 드릴의 경우는 진동감쇠 시작주파수대역은 손등이 150 Hz, 손목은 60 Hz, 팔은 16 Hz부터 진동감쇠가 나타남을 알 수 있다. 또 진동감쇠곡선에 나타난 기울기를 보면 실험에서 얻어진 그래인드나 드릴의 진동감쇠 기울기는 ISO기준 보다 더 급격한 감쇠를 나타냄을 알 수 있다.

5. 결 론

지금까지의 결과를 살펴보면 다음과 같은 결론을 얻을

수 있다.

첫째, 4가지 종류의 전동공구의 진동특성을 X, Y, Z방향에 대해 비교해 보면 Y방향의 진동가속도가 X, Z방향보다 크게 나타나고 있다.

둘째, 회전형 공구의 진동보다 충격형 공구의 진동이 훨씬 높고 인체에 미치는 영향도 크며 백지증 발병률도 높은 것으로 나타나고 있다.

셋째, 공구에 작용하는 힘을 달리하더라도 진동감쇠특성에는 변화가 나타나지 않는다.

넷째, ISO 5349 팔굽진동의 진동감쇠곡선과 비교해 보면 진동감쇠시작 주파수대역이 실험공구와 팔 구조의 측정부위에 따라 달라지며 감쇠 기울기도 ISO 5349기준보다는 각 방향에 다소 차이가 있으나 더 급격하게 기울어져 나타난다는 것을 알 수 있었다. 진동감쇠곡선이 진동측정방향에 따라 달라지고 또한 팔 구조의 측정부위에 따라 완전히 다른 특성을 가지므로 일률적으로 ISO 5349규격을 적용하는 것은 문제가 있다고 생각된다. 또 국제표준으로 통합하여 규격을 만들다 보니 신체적 체형이 전혀 다른 한국인에게 ISO 5349규격이 적합하지 않을 수도 있다고 생각된다. 본 연구는 국내의 작업환경에 적용될 수 있는 기준을 설정

하기 위한 기초자료로써 수행되어졌기 때문에 이러한 기준들을 국내에 적용하기 위해서는 향후 많은 연구가 진행될 필요가 있다.

참 고 문 헌

- (1) Burstrom, L. and Lundstrom, R., 1994, Absorption of Vibration in the Human Hand and Arm, *Ergonomics*, 37(5), pp. 879~890.
- (2) Anderson, J.S. and Boughtflower, R. A. C., 1978, Measurement of the Energy Dissipated in the Hand and Arm Whilst Using Vibratory Tools, *Applied Acoustics*, 11, pp. 219~224.
- (3) Lundstrom, R. and Burstrom, L., 1989, Mechanical Impedance of the Human Hand-Arm System, *Ergonomics*, 3, pp. 235~242.
- (4) Anderson, E. R., 1990, Design and Testing of a Vibration Attenuating Handle, *Ergonomics*, 6(2), pp. 119~125.
- (5) Griffin, M.J., 1990, *Handbook of Human Vibration*.