

# 손으로 전달된 관리기 진동의 분석과 방진 대책

## Analysis and Isolation of Cultivator Vibration transmitted to Hand

박영준\*    채문권\*    김경욱\*  
정회원    정회원    정회원  
Y.J.Park    M.K.Chae    K.U.Kim

### 1. 서론

기계로부터 발생하는 진동은 생산성을 낮추고 작업의 정확성을 떨어뜨리며 인체에도 악영향을 미친다. 따라서 기계조작으로 인한 진동을 감소시킴으로써 기계조작의 능률성과 생산성을 향상시키고 쾌적성을 확보하려는 움직임이 인간공학, 산업공학, 환경공학을 비롯한 몇몇 학문의 영역에서 시도되고 있다. 특히, 많은 종류의 기계가 인간의 손에 의해 조작되고 있는 현실을 볼 때, 손을 통해 전달되는 진동의 특성에 대한 분석 및 평가가 필요하며, 더 나아가 손으로 전달되는 진동을 방지하기 위한 기술의 연구가 필요하다.

보행형 관리기와 이앙기, 경운기의 경우, 기계와 지면으로부터 발생하는 격렬한 진동이 핸들을 통해 작업자의 손과 팔로 직접 전달된다. 이렇게 전달된 진동은 손과 팔의 혈관과 신경에 이상을 가져올 수 있으며 가장 빈번하게 발현되는 것은 손이 차가워지는 현상으로 그 결과 손가락이 하얗게 변하는 백지현상(white finger syndrome)이 나타난다. 또한 손과 손가락의 마비와 육신거림, 피부 감각 능력의 저하, 팔의 능력저하 등의 다양한 종류의 질병을 야기하게 된다.

본 연구는 보행형 관리기의 손으로 전달되는 진동의 특성을 해석하여 관리기의 진동장애 발생기간을 평가하고 그 결과를 이용하여 손으로 전달되는 진동의 감소를 위한 방안을 제시할 목적으로 수행되었다.

### 2. 재료 및 방법

#### 가. 진동 측정 방법

관리기에서 손으로 전달되는 진동 가속도의 크기를 측정하고 측정된 신호를 분석하기 위한 신호처리 순서는 Fig. 1과 같으며 3개의 가속도계(piezoelectric accelerometer : B & K, type 4374), 증폭기(charge amplifier : B & K, type 5974), 테이프 레코더(tape recorder : Sony PC208Ax), 신호 분석기(signal analyzer : B & K, type 3550), 가속도계 고정용 어댑터(handle adapter set : B & K, UA0891), 보정기(calibration exciter : B & K, type 4294)를 사용하였다.

---

\* 서울대학교 농생대 생물자원공학부 농업기계전공

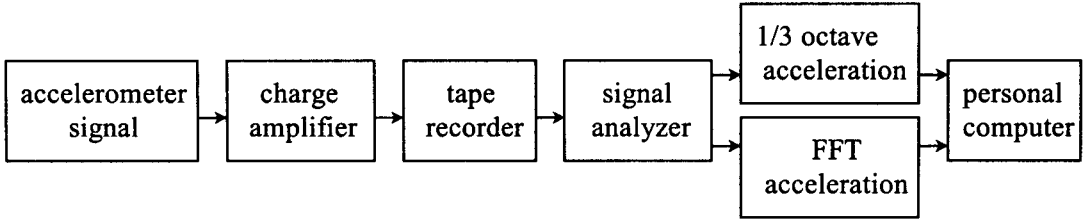


Fig. 1 Block diagram of the signal processing.

관리의 진동에 의해 가속도계에서 발생하는 전기적 신호를 증폭하기 위해 각각의 가속도계의 감도를 고려하여 증폭기와 테이프 레코더의 범위(range)를 설정하였으며 손으로 전달되는 진동량을 측정하기 위해 가속도계를 어댑터에 설치하여 작업자가 작업시 접촉하는 부위인 관리의 핸들에 흔들리거나 틈이 없게 밀착하였다. 또한 3축 방향의 설정은 ISO 5349-1:2001(E)의 생체 동역학 좌표계(Biodynamic coordinate system)를 이용하였으며(Fig. 2) 이를 근거로 관리기에 대한 축의 방향을 Fig. 3에 나타내었다. 관리기에서 발생하는 진동 가속도의 데이터는 테이프 레코더에 저장되었다. 저장된 데이터는 실험실에서 신호 분석기의 FFT분석과 1/3 옥타브분석을 이용하여 6.3Hz~ 1250Hz의 주파수 범위에 대하여 분석되었다. 측정의 정확성을 높이기 위하여 측정 전후에 보정기로 가속도계를 보정하였다.

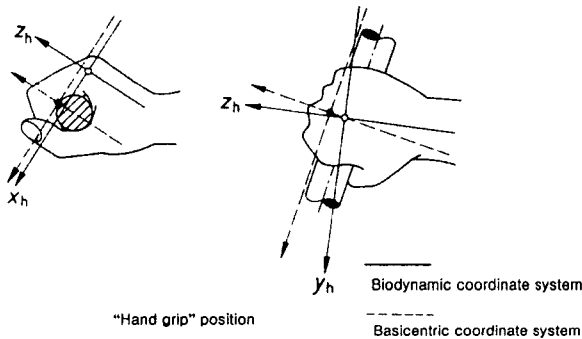


Fig. 2 Coordinate system of vibration on hand.

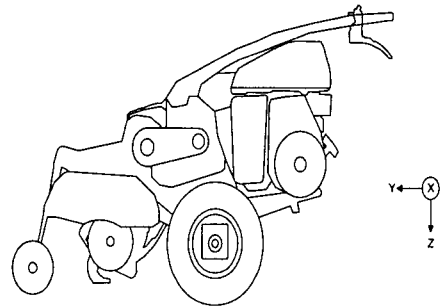


Fig. 3 Direction of axle.

### 나. 분석 및 평가 방법

진동노출에 대한 분석 및 평가는 ISO 5349-1:2001(E)과 5349-2:2001(E)을 근거로 하였다. 일일 진동 노출량(daily vibration exposure,  $A(8)$ )은 진동의 크기와 일일 진동노출 시간으로부터 구할 수 있다. 작업에 따라 다양한 일일 진동노출 시간에 대한 일일 진동 노출량을 쉽게 비교하기 위해서 일일 진동 노출량은 8시간 동안의 에너지 등가 주파수 가중 총 진동 값(energy-equivalent frequency-weighted vibration total value,  $a_{hv(eq,8h)}$ )으로 나타낸다. 쉽게 표기하기 위해서  $a_{hv(eq,8h)}$ 는  $A(8)$ 로 표현되며 다음과 같은 식으로 구하게 된다.

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (1)$$

여기서,  $a_{hv}$  is the vibration total value ( $=\sqrt{a_{hvx}^2 + a_{hvy}^2 + a_{hvz}^2}$ );

$T$  is the total daily duration of exposure to the vibration  $a_{hv}$ ;

$T_0$  is the reference duration of 8h를 의미한다. 또한 평균제곱근(r.m.s) 주파수 가장 가속도( $a_{hw}$ )는 식(2)으로 구할 수 있다.

$$a_{hw} = \sqrt{\sum_i (W_{hi} a_{hi})^2} \quad (2)$$

여기서,  $W_{hi}$  is the weighting factor for the  $i$ th one-third octave band;

$a_{hi}$  is the r.m.s acceleration measured in the  $i$ th one-third octave band, in meters per second squared( $m/s^2$ )를 나타낸다. 일일 진동 노출량과 진동의 영향에 대한 평가는 ISO 5349-1 부록 C를 근거로 식(3)을 통해서 구할 수 있다.

$$D_y = 31.8(A(8))^{-0.106} \quad (3)$$

여기서,  $A(8)$  is the daily vibration exposure;

$D_y$  is the group mean total (lifetime) exposure duration in year을 나타낸다. 이것은 임의의 다른 진동 가속도 값에 노출되었을 경우 노출집단의 일부에서 혈관계 질병이 나타날 가능성이 있는 노출 연수를 제시한 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 관리기의 진동 특성 분석과 1/3 옥타브 분석

Fig. 4, 6, 8은 각 작업의 FFT분석을 나타낸 그래프이다. 모든 그래프에서 y방향의 가속도 값이 가장 크고 다음으로 z방향이 크며 x방향의 가속도 값이 가장 작은 것을 알 수 있다. 중경로터리 작업과 중경제초 작업은 엔진의 작업 조건이 3000rpm(50Hz)이므로 50Hz에서 가장 큰 가속도 값이 나타나며 구굴 작업은 엔진의 작업 조건이 3780rpm(63Hz)이므로 63Hz에서 가장 큰 가속도 값이 나타남을 알 수 있다. Fig. 4, 5, 6의 공통된 특징은 큰 피크 값(로터리, 제초기 : 50Hz, 구굴기 : 63Hz)의 배수가 되는 주파수에서 작은 피크값이 나타

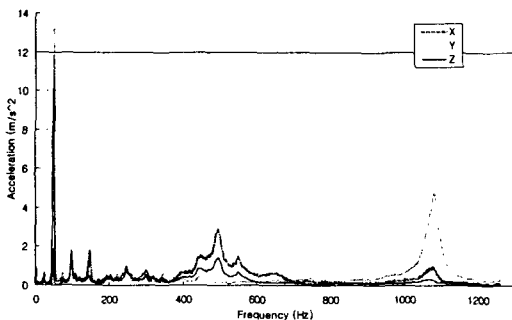


Fig. 4 FFT graph of rotary tillage.

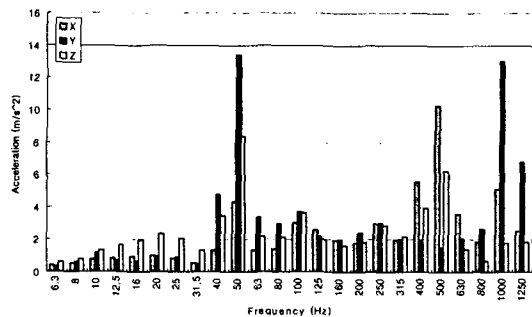


Fig. 5 1/3 octave graph of rotary tillage.

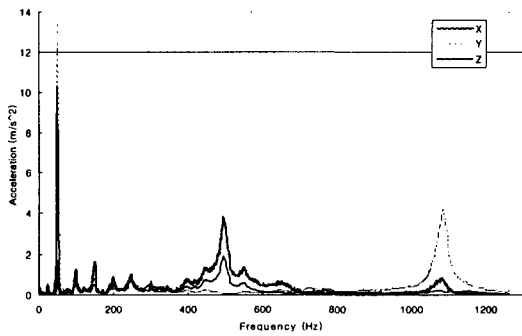


Fig. 6 FFT graph of weeder.

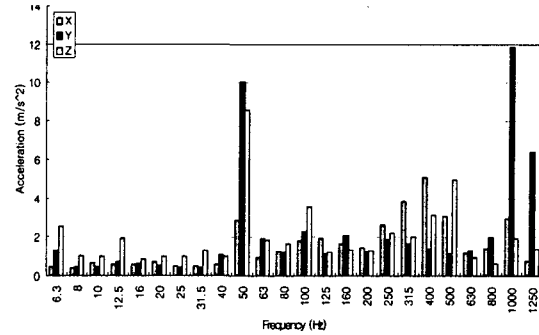


Fig. 7 1/3 octave graph of weeder.

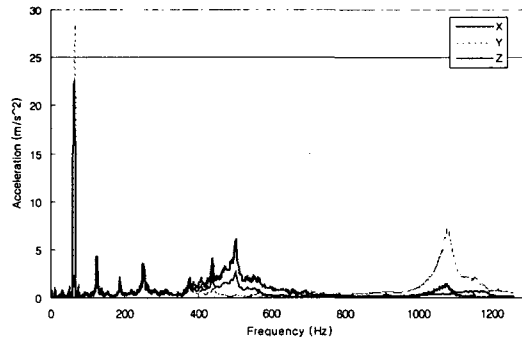


Fig. 8 FFT graph of trencher.

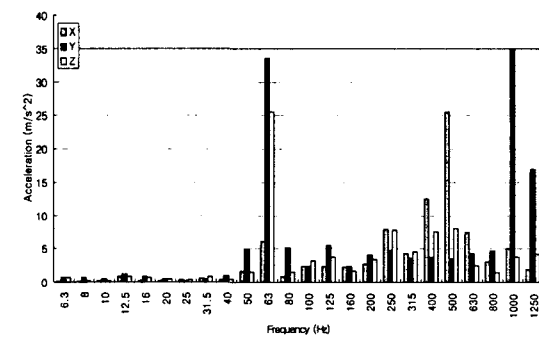


Fig. 9 1/3 octave graph of trencher.

나는 것이다. 이것을 하모닉 성분이라고 하는데 하모닉 성분은 대부분의 회전체에서 발생하는 현상이다. 하모닉 성분은 진동신호 자체가 정확한 정현파 신호가 아니라 그 신호에 고주파 성분을 가진 신호가 들어가서 왜곡(distortion)이 생기기 때문에 발생한다. 또 다른 공통된 특징은 가진된 주파수(로터리, 제초기 : 50Hz, 구굴기 : 63Hz)와 관계없이 496Hz(x, z방향)와 1080Hz(y방향)에서 큰 가속도 값을 가진다는 것이다. 이것은 관리기의 손잡이 부분의 고유한 특성이며 이 주파수가 손잡이 부분의 공진 주파수라고 추측할 수 있다.

Fig. 5, 7, 9는 작업시 작업기별 1/3 octave 주파수 분석결과를 그래프로 나타낸 것으로 그래프의 경향이 3개 모두 비슷하며 특정 주파수에서 큰 값을 보이고 있다. 그래프는 1/3 옥타브 밴드의 주파수 가중 팩터(weighting factor,  $W_{hi}$ )를 적용하지 않은 데이터를 나타내며 주파수 가중 팩터를 적용하면 고주파 성분이 많이 작아져서 x방향의 가속도 값이 작아진다. 각 작업기에 대하여 5회씩 진동측정 시험을 수행하여 얻은  $a_{hwz}$ ,  $a_{hwy}$ ,  $a_{hwz}$ 의 평균 가

Table 1 Average values of frequency weighted acceleration (unit :  $m/s^2$ )

	$a_{hwz}$	$a_{hwy}$	$a_{hwz}$	$a_{hw}$
Rotary tillage	1.1303	4.6643	4.1051	6.3155
Weeder	1.1482	4.6388	3.9478	6.1985
Trencher	2.3024	8.1974	7.0461	11.0519

속도 값과 총 진동 값( $a_{hv}$ )을 Table 1에 나타내었다. Table 1의 분석결과에 의하면, 구굴기가  $11.0519m/s^2$ 로 가장 높은 가속도 값이 발생하는 것으로 나타났으며 중경로터리가  $6.3155m/s^2$ , 중경제초기가  $6.1985m/s^2$  순으로 나타났다.

8시간 동안의 에너지 등가 주파수 가중 총 진동 값( $A(8)$ )과 진동장애 발생기간은 Table 2에 나타내었다. 3가지 작업의 진동 노출 시간은 동일하게 2~4시간으로 비교하였기 때문에 진동 가속도 값이 가장 큰 구굴 작업에서 진동 노출 수준이 가장 높은 것으로 나타났다. 작업시간을 하루에 3시간이라고 가정해서 작업자 그룹의 10% 이상에게 백지현상(white finger syndrome)이 나타날 수 있는 기간은 로터리 작업의 경우 대략 6.2년 정도이고 제초 작업의 경우는 대략 6.8년 정도이며 구굴 작업의 경우는 대략 4년 정도일 것으로 예측되었다.

Table 2  $A(8)$  &  $D_y$  according to actual exposure time

	Exposure time (h)	$A(8)$ ( $m/s^2$ )	$D_y$ (year)
Rotary tillage	2	3.8196	7.6823
	3	4.6780	6.1967
	4	5.4017	5.3204
Weeder	2	3.4978	8.4334
	3	4.2839	6.8026
	4	4.9467	5.8406
Trencher	2	5.7591	4.9711
	3	7.0534	4.0098
	4	8.1446	3.4428

## 나. 관리기의 진동 방지 방안

### 1) 진동 방지 장치의 원리

관리기의 엔진과 토양에서 전달되는 진동은 프레임과 핸들을 통해서 손으로 전달된다. 매질(프레임, 핸들)을 통해 전달되는 진동은 특성이 다른 매질을 만나면 일부는 반사되고 나머지는 투과된다. 이것이 바로 방진 장치의 원리이다. 진동의 반사율(reflection coefficient)은 두 매질의 임피던스 차이가 크면 클수록 커진다. 한 예로서 쇠(iron)에서 고무(rubber)로 진동이 전달될 때 진동 반사율은 약 99.1%가 된다. 따라서 프레임 및 핸들을 통한 진동 전달을 차단하기 위해서 두 매질 사이에 고무 재질의 매질을 사용하면 효과적으로 진동을 차단시킬 수 있다. 진동 반사율과 투과율을 수학적으로 분석하면 식(4)과 같다.

$$\text{진동 반사율} : R_I = \left[ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2, \quad \text{진동 투과율} : T_I = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4)$$

여기서,  $Z = \rho$  (재질의 밀도)  $\times c$  (진동 전달 속도)를 나타내며 재질의 특성 임피던스라고 한다. 위에서 제시한 수식의 진동 반사율과 진동 투과율에서 알 수 있듯이 두 매질의 임피던스의 차이가 클수록  $R_I \rightarrow 1$ ,  $T_I \rightarrow 0$ 임을 알 수 있다. 고무(rubber)와 쇠(iron)의 경우를 예로 들면, 고무(soft)의 특성 임피던스  $Z_1$ 은  $0.065 \times 10^6 Pa \cdot s/m$ 이고 쇠(cast)의 특성 임피던스  $Z_2$ 는  $28.5 \times 10^6 Pa \cdot s/m$ 이다. 그러므로 식(4)에서 진동의 반사율과 투과율을 구해서 비

교해보면 진동 반사율  $R_f$ 는 0.991(99.1%)이며 진동 투과율  $T_f$ 는 0.009(0.9%)임을 알 수 있다. 즉, 프레임과 핸들을 통해 전달되는 진동의 경우, 프레임과 핸들사이의 진동전달 경로에 임피던스의 특성이 다른 재질인 고무를 삽입함으로써 진동전달을 감소시킬 수 있다.

## 2) 진동 방지 장치의 진동차단 효과

진동 방지 장치의 진동차단 효과 시험은 3개의 작업기 중에서 진동 가속도의 크기가 가장 큰 구굴기에서 수행되었다. 그리고 그 결과를 구굴기의 진동 발생량과 비교, 분석하였다. 고무 패드와 방진 장갑의 경우, 200Hz이상의 고주파 성분은 많이 제거되었으나 x방향의 가속도 성분에서 160Hz이하의 저주파 성분이 많이 커졌다. 손으로 전달되는 진동은 저주파 성분이 인체에 악영향을 미치는데 저주파 성분을 많이 제거하지 못하므로 방진 효과가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 핸들 방진 장치와 엔진 마운트는 고주파 성분뿐만 아니라 저주파 성분까지 전체적으로 가속도의 크기를 낮추어 주었으므로 방진 효과가 크다. Table 3은 각 방진 장치들에 대하여 5회씩 진동측정 시험을 수행하여 얻은  $a_{hwx}$ ,  $a_{hwy}$ ,  $a_{hwz}$ 의 평균 가속도 값과 총 진동 값( $a_{hw}$ )을 나타낸 것이다. 이 값들을 Table 1의 구굴기의 가속도 값들과 비교해 보면 고무 패드와 방진 장갑에서는 y방향과 z방향의 가속도 값이 줄어들었으나 x방향의 가속도 값은 오히려 증가했음을 알 수 있다. 즉, x방향의 저주파 성분을 고무 패드와 방진 장갑이 증폭시킨다고 볼 수 있다. 반면에 핸들 방진 장치와 엔진 마운트는 모든 방향의 가속도 값이 전체적으로 유사한 비율로 줄어들었음을 알 수 있다. 각 방진 장치의 방진 효과에 대해서 살펴보기 위해서 총 진동 값( $a_{hw}$ )을 비교해 보면 고무 패드는 12%, 방진 장갑은 13.1%, 핸들 방진 장치는 23.6%, 엔진 마운트는 24.2%의 방진 효과를 나타내었다. 또, 방진 효과가 좋은 핸들 방진 장치와 엔진 마운트를 결합하여 실험했을 때는 31.2%의 방진 효과를 나타내었다. 결론적으로 말해서 손잡이 부분에 손잡이와 특성이 다른 재질을 입혀서 진동을 차단하는 장치는 고주파 성분을 제거할 수는 있지만 저주파 성분을 차단하는 데에는 큰 효과가 없다는 것을 알 수 있으며 핸들 방진 장치, 엔진 마운트와 같이 진동전달 경로에 특성이 다른 재질을 삽입하여 진동을 차단하는 방법은 전 구간의 주파수 영역에서 고르게 효과가 있음을 알 수 있다. 손으로 전달되는 진동의 경우, 고주파 성분보다는 저주파 성분의 영향을 더 많이 받기 때문에 저주파 성분을 제거할 수 있는 방진 장치를 사용하는 것이 효

Table 3 Average values of frequency weighted acceleration using rubber pad, anti-vibration glove, handle anti-vibration device, engine mount (unit :  $m/s^2$ )

	$a_{hwx}$	$a_{hwy}$	$a_{hwz}$	$a_{hw}$
Rubber pad	3.6930	7.3368	5.2098	9.7267
Anti-vibration glove	3.2797	7.4865	5.0537	9.6096
Handle anti-vibration device	1.9296	6.8172	4.6077	8.4515
Engine mount	2.1924	6.7057	4.5756	8.4089
Handle anti-vibration device & Engine mount	1.5610	6.4418	3.7337	7.6075

과적이라 하겠다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 보행형 관리기의 손으로 전달되는 진동특성을 실험적으로 해석하고 평가하며 방진 방안을 제시할 목적으로 수행되었다. 관리기의 작업기 중에서 설문을 통해 사용 빈도가 높은 3개의 작업기(중경로터리, 중경제초기, 구굴기)를 선정하였고 각 작업기별 진동수준을 측정하였다. 진동 방지 방안에 대해서는 4개의 방진 장치(고무 패드, 방진 장갑, 핸들 방진 장치, 엔진 마운트)를 선정하여 각 방진 장치별 진동수준을 측정하였다. 방진 장치의 성능을 정확하게 비교하기 위해 진동의 측정은 진동수준이 가장 높은 구굴기에서 수행되었다.

실험결과에 의하면 관리기 작업이 작업자의 인체에 해를 끼칠 위험이 매우 크지만 이 결과는 작업자가 매일 3시간씩 관리기를 사용할 경우를 기준으로 설정한 값이기 때문에 실제로 관리기 사용일수가 많지 않은 대부분의 우리나라 사용자들에게 적용하는데는 한계가 있음을 밝힌다. 그렇다 하더라도 관리기의 주 사용자는 보행형 관리기 뿐만 아니라 보행형 경운기나 보행형 이앙기 등의 손으로 전달되는 진동이 심한 기계를 함께 사용하는 경우가 많음을 고려하면 방진 장치를 개발하거나 진동수준이 낮은 농작업기계를 개발하여 작업환경을 개선하는 조치가 필요하다고 생각한다. 그러므로 농작업기계에 대한 진동수준에 대한 종합적인 연구와 그에 대한 대책 마련이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

#### 5. 참고 문헌

1. 김대원. 2000 .Experimental Analysis about Hand-transmitted Vibration Characteristic of Human Body. 한국소음진동공학회지. 제 10권 제2호.
2. 연정택, 박상규, 김소연, 이태영, 장재연. 1999. Evaluation of hand-arm vibration of steel processing factory workers. 한국산업위생학회지. 제 9권 제2호.
3. International Organization for Standardization. 2001. ISO 5349-1:2001(E). Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1 : General requirements.
4. International Organization for Standardization. 2001. ISO 5349-2:2001(E). Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration -Part 2 : Practical guidance for measurement at the workplace.
5. Ying Yibin, Linbin Zhang, Fang Xu and Meidui Dong. 1998. Vibratory characteristics and hand-transmitted vibration reduction of walking tractor. Transaction of ASAE. 41(4) : 917 - 922