

## 초소형 3축 가속도계를 이용한 수전달 진동 측정에 관한 연구

### Measurement of the hand-transmitted vibration using a miniature 3-axes accelerometer

송치문<sup>1)\*</sup>, 장한기<sup>2)</sup>, 김승한<sup>3)</sup> 채장범<sup>4)</sup>

Chi Mun Song, Han-Kee Jang, Seung-Han Kim, Jangbom Chai

**Key Words** : Hand-arm system(수완계), Hand-transmitted vibration(수전달 진동), Power tool(동력 공구), Frequency weighting curve(주파수 가중치 곡선), Transducer adapter(측정 보조용구)

#### ABSTRACT

Most of the measurement and the evaluation of hand-transmitted vibration have been performed by using a small size single axis accelerometer between the handle and the hand palm or a three axis accelerometer attached on an adapter outside the hand(indirect measurement). It is most desirable for the correct evaluation of hand-transmitted vibration from the power tool handle to measure the acceleration between the handle surface and the hand palm in the three axis(direct measurement) as recommended in ISO 5349-1. In the study three axes acceleration measurement device was developed of which the thickness was less than 7 mm so that it can be placed between the handle and the palm without any inconvenience during the measurement. To verify the performance of the developed device, measured acceleration by the two methods, direct and indirect, were compared in the study.

#### 1. 서 론

동력공구(power tool)를 이용한 작업시 공구에서 발생하여 작업자의 손과 팔, 어깨 등으로 전달되는 극심한 진동 및 충격은 작업자에게 불편함을 주고 작업효율을 감소시킬 뿐만 아니라 장시간 노출시 혈관계, 신경계, 근골격계의 질환 또는 심각한 손상을 유발하는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 선진국의 통계자료를 보면, 발생 진동량이 큰 동력공구를 사용하는 작업기간 3~5년 이상이 되면 자각 증상이 발생하고, 진동 피폭 기간이 장기화될 경우 손의 혈관이 썩어 들어가 손이 하얗게 변하는 백수증(white hand disease)에 이르기기도 한다. 또 손에 반복 충격이 가해지는 경우에는 손목의 근골격계 사이를 통과하는 신경계가 눌려서 신경계 장애가 발생하는 Carpel tunnel syndrome과 같은 회복이 어려운 질병의

수준으로 발전하기도 한다.

이와 같이 심각한 문제를 야기하는 공구의 진동은 그 크기와 피폭 시간 등에 의해 그 유해성이 결정된다. 따라서 수완계로 전달되는 진동을 정확히 측정하는 것은 매우 중요한 일이라고 하겠다. ISO 10819나 ISO 5349와 같은 관련 국제규격에서는 핸들에서 발생하는 진동을 3축으로 측정할 것을 규정하고 있으며<sup>2)3)</sup>, 손과 핸들 표면사이에서 측정하는 것이 가장 바람직하지만 측정이 용이하지 않을 경우에 한해 손에 직접한 지점이나 보조용구를 이용하여 측정할 것을 대안으로 제시하고 있다<sup>4)</sup>. 그러나 손바닥과 직접한 지점에서 측정하거나 보조 용구를 사용하여 측정하는 경우 손으로 전달되는 진동과 차이가 생길 수 있으며, 이는 인체에 대한 유해성을 평가하는데 정량적으로 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 수완계로 전달되는 진동을 보다 정확히 측정하기 위하여, 두께 5 mm의 초소형 3축 가속도계를 어댑터 안에 삽입함으로써 작업자가 핸들을 잡는데 불편함을 주지 않는 측정 장치를 제작하였다. 아울러 실시시간으로 3축 가속도를 측정하여 ISO 5349-1에 제시된 주파수 가중치를

1) 고등기술연구원 및 아주대학교 기계공학과

2) 고등기술연구원 제품기술연구소

3) 주)아띠

4) 아주대학교 기계공학과

적용하고 평가할 수 있도록 LabVIEW 프로그램을 개발하여 공구 진동 측정 평가 시스템으로 구축하였다. 개발된 시스템을 이용하여 수전달 진동을 손과 핸들 사이에서 3축으로 직접 측정하였으며, 이 방법과 어댑터를 이용한 간접적인 측정 방법에 의해 얻어진 가속도 데이터를 비교, 분석하였다.

## 2. 수완계 진동 측정 기법 현황

수완계 진동 측정 평가는 1986년판 ISO 5349를 대폭 개정 및 세분화한 ISO 5349-1,2(2001)에 상세하게 언급되어 있다. ISO 5349-1에서는 측정 방법과 정량화 방법 일간 피폭량 환산방법이 구체적으로 정리되어 있으며, ISO 5349-2에는 다양한 유형의 공구에 대해 측정시의 기술적인 사안들과 측정지점을 명시해 놓고 있다. 이 규격에서도 종전과 마찬가지로, 인체에 대한 영향을 보다 정확히 평가하기 위해 손과의 접촉 지점에서 3축으로 진동을 측정할 것을 권고하고 있다. 종전에는 손과 핸들 사이의 매우 작은 공간에서 3축 진동을 측정할 만한(측정 장치의 두께가 10 mm 이내인) 장치가 없어서 손과 인접한 지점에 가속도계를 부착하여 측정하거나 단축 측정을 수행 하였었다<sup>5)</sup>. 이 경우 손바닥에서 직접 측정한 가속도와 차이가 날 수 있는 문제점이 대두된다.

그러나 최근에 들어 손바닥과 핸들 사이에 삽입이 가능하도록 세 변의 길이가 모두 5 mm 정도인 초소형 3축 가속도계가 출시되었다. 본 연구에서는 이 가속도계를 이용하여 핸들을 쥐고 있는 손바닥에서의 3축 진동량을 직접 측정할 수 있는 시스템을 제작하여 (Fig.1), 손 외부에서의 진동량을 측정하는 것보다 정확성을 높이고자 하였다<sup>6)</sup>.

## 3. 실험 장치 구성

본 연구에서는 전술한 바와 같이 손바닥과 핸들 사이의 진동을 직접 측정할 수 있도록 Fig.1과 같이 어댑터에 삽입된 형태의 3축 가속도 측정 장치를 구성하였다. 세 변의 길이가 모두 5 mm인 초소형 가속도계를 유연한 재질의 어댑터에 삽입하여 작업자가 핸들을 편하게 쥐고 진동을 측정할 수 있도록 하였다. 이 측정 장치는 본 연구실에서 구축한 수완계 전달 진동 및 작용력 측정 시스템(Fig.2)의 일부로 사용하였다. 이 시스템에 사용된 가속도계와 앰프 등의 장비는 Table 1에 정리하였다. 가속도와 핸들의 작용력 데이터는 테이프 레코더에 저장되며, 동시에 실시간 신호처리 및 분석을 위해 DAQ 카드가 장착된 PC에 넘어가서 수완계 진동 평가지수 계산용 LabVIEW 프로그램을 이용하여 핸들의 진동량을 산출하였다.

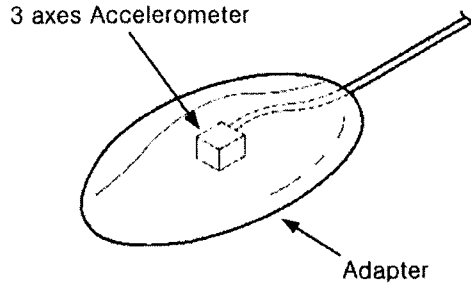


Fig.1 Moulded hand-held adapter for the measurement of the hand-transmitted vibration in three axes

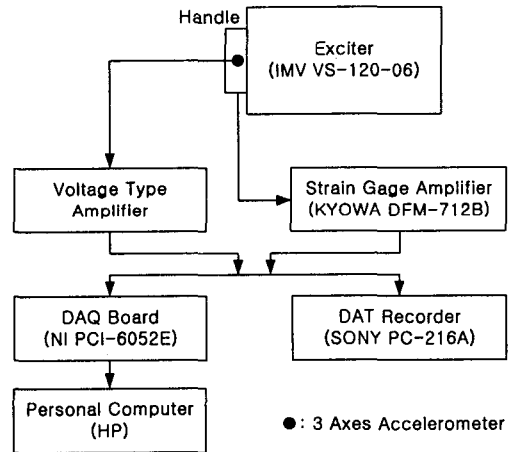


Fig.2 Configuration of the force and acceleration measurement system

Table 1 Specification of experimental equipments

실험 장비	수량	용도
3축 가속도계 (Endevco 25)	2	각 측정점의 가속도 측정
Voltage Type Amplifier	1	가속도 신호 증폭
DAT Recorder (SONY PC216A)	1	시간 데이터 저장
DAQ Board (NI PCI-6052E)	1	데이터 획득
Dynamic Strain Gage Amplifier (KYOWA DFM-712-B)	1	변형을 증폭
Exciter (IMV VS-120-06)	1	핸들 가진

#### 4. 가속도 측정 및 분석

##### 4.1 가속도 측정 및 신호처리 방법

공구에서 측정되는 진동은 여러 가지 인자에 의해서 좌우되는데, 시편에 가하는 힘(이송력), 공구를 쥐는 힘(악력), 자세 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다<sup>7)</sup>. 측정 방법과 측정 지점 또한 진동 측정의 중요한 변수가 될 수 있다. 본 연구에서는 본 연구에서 제작한 어댑터를 이용하여 핸들을 쥐고 있는 손바닥에서 직접 측정된 진동량과 보조 기구를 이용하여 측정된 진동량을 동시에 측정하여 두 가지 측정량의 차이점에 대해 고찰해 보고자 한다.

가속도 측정시 핸들의 악력과 이송력은 일정하게 유지하도록 하여 30초 동안 가속도 신호를 수집하였으며, 이때 측정된 가속도는 식 (1)과 같은 주파수 가중치 함수를 시간영역의 필터로 바꿔서 주파수 가중된 진동량으로 변환하였다.

$$H_b(s) = \frac{s^2 4\pi^2 f_4^2}{(s^2 + 2\pi f_1 s / Q_1 + 4\pi^2 f_1^2)(s^2 + 2\pi f_2 s / Q_1 + 4\pi^2 f_2^2)}$$

$$H_w(s) = \frac{(s + 2\pi f_3) 2\pi K f_4^2}{(s^2 + 2\pi f_4 s / Q_2 + 4\pi^2 f_4^2) f_3}$$

$$H(s) = H_b(s) \cdot H_w(s) \quad (1)$$

가진 주파수는 그래인더 작업시 나타났던 주파수 성분들을 위주로 선정하였다. 가공하지 않고 공회전 할 당시에는 주요 발생 주파수가 340 Hz이었으며, 시편을 가공할 때에는 넓은 주파수 대역의 성분이 나타났다. 따라서 가진 주파수는 340 Hz와 random 신호를 각각 선택하였다. Fig.

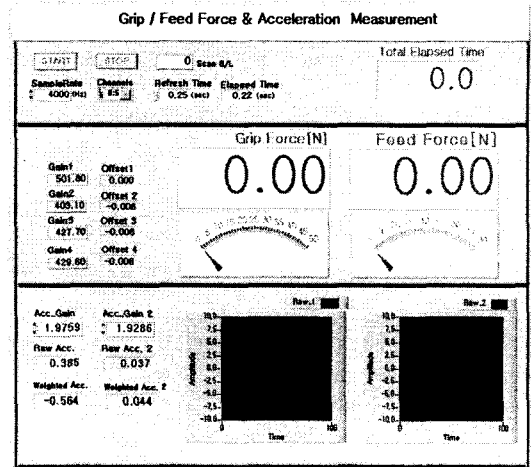


Fig.3 LabVIEW program for the measurement and analysis of the force and acceleration data

Fig.3은 본 연구실에서 핸들의 작용력(악력 및 이송력)을 모니터링하면서 두 지점에서 3축 방향으로의 가속도를 동시에 측정하여 분석할 수 있도록 개발한 프로그램을 나타낸 것이다.

##### 4.2 가진 시험 수행 및 측정 결과 비교 분석

본 시험에는 수전달 가속도 측정을 위해 ISO 5349-1에서 제시한 대로 3명의 피 시험자가 참여하여 측정된 3개의 가속도 RMS 값의 평균값을 취했다. 가진기에 장착된 핸들을 쥐고 있는 상태에서 악력과 이송력을 변화시켜 가며 각 조건에서 손바닥과 핸들 사이에서의 가속도와 어댑터를 이용한 손 외부에서의 가속도를 동시에 측정하여 진동량을 비교하였다. 손바닥 안에서의 가속도 측정에는 Fig.1과 같은 형상의 측정 장치를 사용하였으며, 어댑터를 이용한 측정에는 Fig.4와 같은 I형(핸들의 축 방향에서 보았을 때)형상의 어댑터를 손으로 쥐고 측정하였다. 이 어댑터는 좌측을 핸들의 표면에 밀착하여 손으로 감싸 쥐고 손가락 사이로 튀어나온 기둥 위에 가속도계를 붙여서 사용한다. 동일한 조건에서의 두 가지 어댑터의 성능을 상대적으로 비교하기 위해 본 연구에서는 두 가지 측정 장치를 동시에 쥐고 시험을 수행하였다.

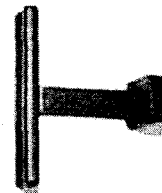
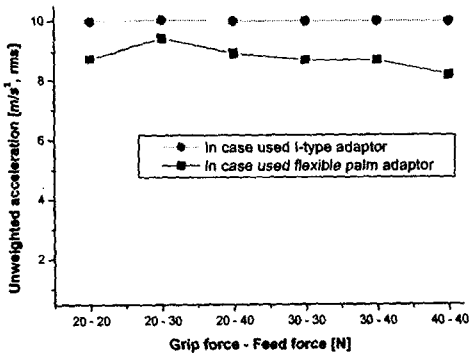


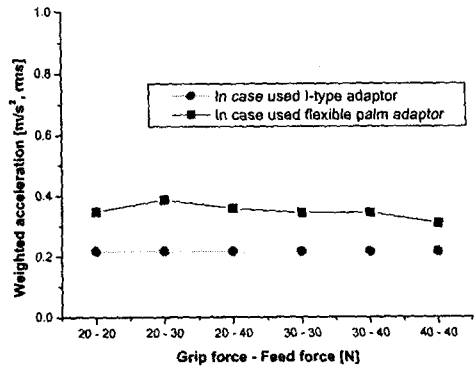
Fig.4 I-type adapter for the measurement of hand-transmitted vibration

핸들에 대한 작용력은 6가지 조건을 만들어서 수행하였는데, 각각 (악력, 이송력)을 (20, 20), (20, 30), (20, 40), (30, 30), (30, 40), (40, 40) N이 그것이다. 각 경우에 대해 작용력을 30초간 유지하며 진동을 측정하였다. 가진은 두 가지 형태의 신호를 이용하여 수행하였는데, 첫 번째는 340 Hz에서 정현파 신호 12 m/s<sup>2</sup>(peak)를 사용하였으며, 두 번째는 RMS값이 15 m/s<sup>2</sup>인 랜덤 신호를 사용하여 가진하였다. 랜덤 신호의 크기를 위와 같이 선정한 이유는 그라인더 작업시 손에서 느껴지는 수준과 비슷하도록 정한 것이다.

Fig.5는 340 Hz의 정현파로 핸들이 가진되고 있을 때 각 작용력 조건에서 측정된 가속도를 RMS값으로 도시한 그림이다. 수완계 진동에 대한 주파수 가중치를 적용하기 이전의 신호를 비교한 Fig.5(a)를 보면, I형 어댑터를 사용한 경우가 Palm 어댑터를 사용하여 측정한 경우보다 상대적으로 크고, 작용력의 영향을 별로 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 가속도의 정량적인 크기는 Palm 어댑터가 실제 값인  $8.48(=12/\sqrt{2})$  m/s<sup>2</sup>에 훨씬 근접함을 알 수 있다.



a) Unweighted acceleration

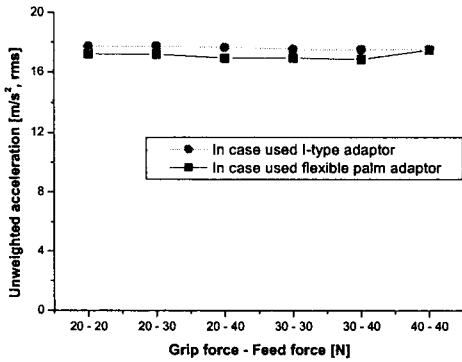


b) Weighted acceleration

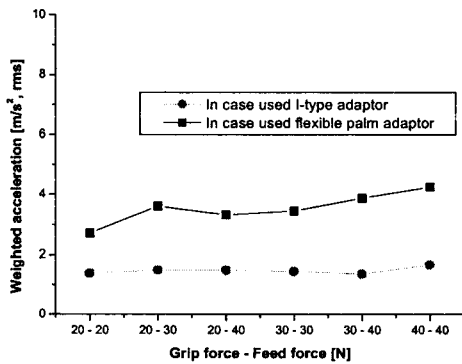
Fig.5 Accelerations measured at two positions; one is between the handle and the palm(dashed square) and the other is by using the adapter(dashed circle) before and after the application of frequency weighting with the excitation of sinusoid of 340 Hz

수완계 진동의 주파수 가중치를 적용한 Fig.5(b)를 보면, 두 어댑터에 대한 정량적인 크기가 뒤집혀 있음을 볼 수 있는데, 이는 가속도의 고주파수 성분에 의한 것으로 추정된다. I형 어댑터의 경우, 일정한 질량을 갖는 물체를 손으로 잡고 사용하기 때문에 높은 주파수에서 금속간의 불완전한 접촉으로 뒹 현상이 발생할 것으로 예상되며, 이로 인해 주파수 가중치 적용 이전에는 실제 가진 레벨보다 가속도가 크게 관측되었으며, 주파수 가중치 적용 후에는 오히려 적어졌기 때문이다. 수완계 진동의 주파수 가중치는 수백 Hz부터 급격하게 감쇠시키는 특성이 있다.

이 결과를 두고 볼 때, 두 가지 측정 방법에 모두 문제가 있음을 알 수 있다. Palm형 어댑터의 경우 악력이나 이송력에 의해서 측정량에 차이가 있을 수 있고, I형 어댑터의 경우는 작용력에 의한 차이가 상대적으로 적지만 불완전한 접촉으로 인해 신호의 왜곡현상이 생길 수 있다는 것이다.



a) Unweighted acceleration



b) Weighted acceleration

Fig.6 Accelerations measured at two positions; one is between the handle and the palm(dashed square) and the other is by using the adaptor(dashed circle) before and after the application of frequency weighting with the excitation of random signal

Fig.6은 랜덤 신호(10~1600 Hz 15 m/s<sup>2</sup>, RMS값)을 입력 신호로 주었을 때 작용력 조건을 바꿔가면서 두 가지 어댑터를 사용하여 가속도를 측정된 결과를 정리한 것이다. 이 경우도 그래프의 형상에는 다소 차이가 있으나 정현파 가진의 경우와 대동소이한 결과를 나타냈으며, 특히, 고주파수 성분이 많은 랜덤 신호이기 때문에 주파수 가중치 적용 후 변화의 폭이 더 좁을 알 수 있었다.

그러나 한 가지 문제점은 두 가지 어댑터 모두 실제로 입력 신호로 이용한 15m/s<sup>2</sup>보다 큰 값을 나타내고 있다는 것이다. 관측 결과 이는 700 Hz와 1400 Hz 부근에 위치한 핸들의 공진 주파수에 의해 신호의 증폭현상이 발생하였기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 측정 어댑터뿐만 아니라 공진 주파수가 관심 주파수 이상으로 높도록 핸들을 개선할 필요성이 대두되었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 공구 작업 중 수완계에 전달되는 진동을 측정하기 위한 장치를 개발하여 그 타당성을 확인해 보았으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 초소형 3축 가속도계를 이용하여 손바닥 안에서 3축으로의 가속도 측정이 가능한 측정 장치와 신호 분석용 프로그램을 제작 개발하였는데, 이는 기존의 국제규격에서 제시하는 측정 방법에 가장 부합되는 것이라고 할 수 있다.

2) 악력과 이송력을 30초간을 유지하면서 6가지의 작용력 조건에서 가속도를 측정하였을 때, 본 연구개발에서 제작한 Palm형 어댑터가 I형 어댑터보다 실제값에 더 가까운 측정결과를 나타내었다. 그러나 Palm형 어댑터는 작용력의 변화에 따라 측정되는 양이 변화하고 있어서 이에 대한 보다 상세한 분석이 요구된다.

본 연구의 목적은 수완계로 전달되는 진동을 정확히 측정하기 위한 방법을 개발하는데 있다. 그러나 측정용 핸들의 공진 주파수로 인해서 정확한 비교가 이루어지지 못했다, 따라서 공진 주파수가 관심 주파수 범위안에 나타나지 않는 측정용 핸들의 개발이 요구되며, 현재 본 연구실에서는 어댑터의 특성 분석과 함께 관심 주파수 범위에서 충분히 강성을 갖는 측정용 핸들을 개발하고 있다.

## 후기

본 연구는 표준화개발사업과 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 1) Pelmear, P. L. and Wasserman, D. E., Hand-arm Vibration, 2nd ed., OEM Press, 1998.
- 2) International Organization for Standardization, ISO 5349-1; Mechanical Vibration- Measurement and Evaluation of Human Exposure Hand-transmitted Vibration. Part 1:General Requirements, 2001.
- 3) International Organization for Standardization, ISO 10819; Mechanical Vibration and Shock- Hand-Arm Vibration-Method for the Measurement and Evaluation of the Vibration Transmissibility of Gloves at the Palm of the Hand, 1996.
- 4) International Organization for Standardization, ISO 5349-2; Mechanical vibration- Measurement and Evaluation of Human Exposure Hand-transmitted Vibration. Part 2:Practical Guidance for Measurement at the Workplace, 2001.
- 5) Sue Hewitt, "Assessing the Performance of Anti-vibration Gloves - A Possible Alternative to ISO 10819, 1996," Ann. occup. Hyg 42(4), pp.245-252, 1998.
- 6) O'Boyle, M. J., "Assessment of Alternative Palm Adapters for the Measurement of Vibration to the Hand," Presented at the 37<sup>th</sup> U.K. Conference on Human Response to Vibration, pp.18-20, 2002.
- 7) Thomas J. A., Mattew M. M, Bernard J. M. and et al, "Exposure to forceful exertions and vibration in a foundry," International Journal of Industrial ergonomics, 30, pp.163-179, 2002.