

수완계 진동 평가에 영향을 미치는 작용력의 측정 Measurement of Grip and Feed Force in the Evaluation of Hand-arm Vibration

최석현† · 장한기*

Seok-Hyun Choi, Han-Kee Jang

Key Words : Hand-arm system(수완계), Hand-transmitted vibration(수전달 진동), Coupling force(작용력), Grip force(악력), Feed force(이송력), Frequency weighting(주파수 가중치)

ABSTRACT

In order to evaluate dynamic impedance of a hand-arm system, it is necessary to measure the hand-transmitted vibration and the reaction force at the same time while gripping the vibrating handle. In the study a device was developed to measure both the vibration and the force. The device consists of a measurement handle with four strain gauge and two accelerometers and a PC based control system with a program for the signal processing and evaluation of the hand-transmitted vibration and reaction force. The handle was installed on the vibration shaker so that it can move by the generated signal from the control system. As an application of the system, dynamic reaction force and the frequency weighted acceleration at the handle attached to the shaker were measured at various grip force and feed force. This system will be very useful in the area of impedance measurement and the evaluation of performance of anti-vibration gloves.

1. 서 론

수완계(Hand-arm system) 진동은 주로 작업자들이 사용하는 동력공구(Power tool)에서 발생하여 공구를 쥐고 있는 손을 통해 신체로 전달되는 충격 및 진동을 의미한다. 수완계 진동이 인체에 미치는 영향을 평가하려면 공구의 핸들에서 손으로 전달되는 진동뿐만 아니라 이 때의 작용력, 즉 악력(Grip force)과 이송력(Feed force)을 정확히 측정해야 한다. 더욱이, 수완계의 임피던스를 구하기 위해서는 두 가지 물리량을 동시에 측정해야만 한다. 국내외에서 사용되는 기존의 힘 측정용 핸들은 주로 정적인 힘을 측정하는 용도로 많이 활용되고 있다. 이미 활용되고 있는 핸들은 보통 수 백 Hz에서 첫 번째 공진이 발생하고 있으며, 이는 수완

계 진동 평가 주파수 영역(ISO 10819, 13753 등)내에 핸들의 공진이 위치하고 있음을 의미하는 것이며, 즉, 측정된 가속도나 작용력이 왜곡되고 있음을 의미한다. 본 연구의 최종 목표는 수완계 진동 평가 주파수 영역내에 공진이 존재하지 않는 가속도 및 힘 동시 측정용 핸들을 개발하는 것이다.

이를 위한 첫 번째 단계로, 국외에서 사용되는 측정용 핸들과 유사하게 핸들을 제작하여 힘 교정시험을 우선 수행하였으며, 이 장치를 활용하여 악력 및 이송력을 변화시켜가면서 가속도와 작용력을 측정하여 그 상관관계를 분석하는 시험을 수행하였다. 이 장치는 스트레인게이지를 이용한 힘 측정 및 가속도계를 이용한 가속도 측정이 가능한 측정용 핸들과 이들 신호를 제어하기 위한 노트북 PC 기반 데이터 처리장치와 LabView 프로그램으로 구성되었으며, 이 제어 장치에서는 주파수 가중치 적용을 포함하여 실시간 데이터 분석 및 처리가 가능하도록 하였다.

마지막으로는 본 연구에서 개발된 시스템을 사용하면서 발생한 문제점에 대해 고찰하였으며, 이로부터 도출된 문제점을 개선하기 위한 핸들의 개선방안을 제시하였다.

† 고등기술연구원, 아주대학교 시스템공학과 대학원

E-mail : oaat8@iae.re.kr

Tel : (031) 330-7411, Fax : (031) 330-7116

* 고등기술연구원 제품기술연구센터

2. 작용력 측정용 핸들 제작

2.1 측정장치의 구성

작용력 측정을 위한 핸들은 Fig.1과 같은 형상으로 알루미늄 재질을 사용하여 제작하였으며, 그림에 표시한 지점에 스트레인 게이지를 부착하여 힘에 의한 변형을 측정할 수 있도록 하였다. Fig.2는 핸들에 부착한 스트레인 게이지를 앰프로 연결하기 위해 브리지 박스(Bridge box)를 설치한 것을 보여주고 있다. 핸들에 가해지는 작용력은 핸들의 변형을 유발하며 이 양이 스트레인 게이지에서 측정되어 앰프를 통해 전압값으로 출력된다. 보 시험장치에서는 앰프의 변환값(교정값)이 용력 $100\mu\epsilon$ ($1\mu = 10^{-6}$)에 대해 2 volt 로 출력되도록 설정하였다.

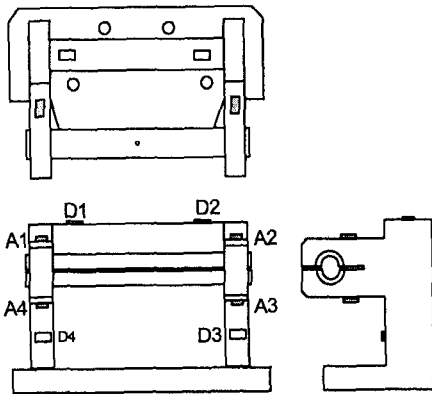


Fig.1 Aluminum handle for force measurement and the attachment points of strain gauge



Fig.2 Experimental set-up and connection of strain gauge to an amplifier(Top view)

2.2 스트레인 게이지의 부착 및 온도보상

수완계 진동 측정에 관련된 ISO 규격들에서는 핸들을 쥐는 힘과 밀거나 당기는 힘을 측정하도록 하고 있다. 따라서 Fig.1의 우측 하단과 같이 핸들과 핸들의 지지부를 슬롯 형

태로 따내어 Cantilever Beam의 형태로 만들어서 손으로 쥐거나 밀 때 아래 위에 부착된 스트레인게이지에서 스트레인이 측정되도록 하였다. 스트레인 게이지를 핸들 지지부 좌우에 부착한 이유는 핸들을 쥐는 위치가 정확하게 중앙에 오지 않기 때문이다. 장치에 사용된 Kyowa社의 KFG-5-120-C1- 23LIM2R 모델의 스트레인 게이지가 온도 변화에 따라 영점(Zero point)이 변하는 특성을 보였는데, 이를 보상하기 위해서 스트레인 게이지의 온도 보상법인 Active-Dummy법을 적용하였다. 이 방법은 온도 변화에 의해 Active Gage 저항값이 변할 때, Dummy Gage의 저항값 역시 변화하는 특성을 이용하여 온도 변화가 출력 전압에 미치는 영향을 제거하는 것이다. 이때 Dummy Gage는 정적 하중에 의한 영향을 받지 않는 지점에 부착하여 온도를 보상하는 기능만을 갖도록 해야 한다. Fig. 1과 같이 변형이 발생하는 지점에 부착한 스트레인 게이지(A1, A2, A3, A4) 외에 추가로 스트레인 게이지(D1, D2, D3, D4)를 부착하였고, Fig. 3과 같이 배선하였다.

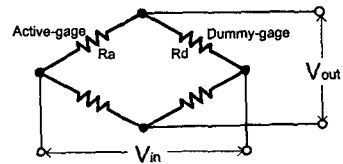


Fig.3 Active Dummy Method

2.3 작용력 환산을 위한 실험식 결정

핸들에 악력과 이송력을 동시에 가하는 경우 Fig.4와 같이 힘이 작용하게 된다. 물론 작용방향 이외의 힘이 존재할 수 있으나 관련 ISO 규격에서는 핸들 길이방향에 수직하고 또 팔의 길이방향에 따른 힘에 대해서만 정의하고 있으므로 본 연구에서도 해당 방향의 힘만을 고려하였다.

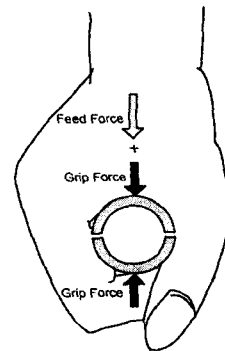


Fig.4 Grip force and feed force at the handle

Fig.4는 핸들을 미는 경우에 대한 개념도를 보여주고 있

다. 이 경우 핸들의 아래 부분에 부착된 스트레인지지에서서는 압력과 관련된 성분만 측정되고 핸들의 위 부분에 부착된 스트레인지지에서는 미는 힘과 쥐는 힘이 더해진 힘이 측정된다. 따라서 핸들 지지부의 상, 하 지점에 지지부 2군데에 부착된 4개의 스트레인지지로부터 측정된 변형률을 힘(F_1, F_2, F_3, F_4)으로 환산하면 식 (1)과 (2)와 같이 압력(F_g)과 이송력(F_f)을 동시에 측정할 수 있게 된다⁽⁴⁾.

$$F_g = \frac{F_3 + F_4}{2} \quad (1)$$

$$F_f = \frac{F_1 + F_2}{2} - \frac{F_3 + F_4}{2} \quad (2)$$

2.4 스트레인지지의 민감도 결정

본 측정용 핸들을 이용하여 힘을 측정하기 위해서는 힘과 스트레인지지 사이의 민감도를 결정해야 한다. 이를 위해서 중간면이 절단된 핸들의 윗부분과 아래 부분에 대해서 각각 인장 및 압축력을 작용시켜 힘과 스트레인지지 앰프에서 나오는 전압사이의 관계를 구하였다.

스트레인지지의 민감도를 구하기 위해서 Fig.5에서와 같이 힘이 작용하는 방향으로 손잡이 부분의 중앙에 지름 2mm의 작은 구멍을 뚫어서 와이어와 추를 이용하는 방식을 사용하였다. Fig.5(a)는 손잡이 윗 부분(1, 2지점의 스트레인지지)에 대해 압축력을 가할 때이고, Fig.5(b)는 핸들을 지지대에 반대 방향으로 뒤집어서 고정된 후 동일한 스트레인지지에 인장력이 가해지는 경우이다. 정적 하중은 최소 0.5 kgf 의 단위로 증감하였다. 손잡이 아래 부분(3, 4 지점)에 대해서도 같은 방식으로 압축력과 인장력을 가하였다.

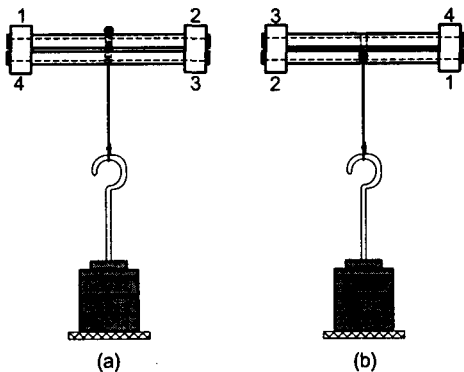


Fig.5 Determination of voltage sensitivity of compression and tension force

윗 그림에서 보는 바와 같이 핸들 손잡이의 중앙에 0.5kgf 또는 1kgf 단위로 정적 하중을 가하고 스트레인지지를 부착한 4지점에서의 출력 전압값을 각각 측정하였다. 한 지

점에 대해서 4차례 반복 실험을 행하여 얻은 출력값의 평균에 대해 선형화된 관계식을 얻었다. 식(3)~(6)에서 X는 가해진 정적 하중(N)을, Y는 4개의 각 지점의 스트레인지지에 해당하는 앰프의 출력 전압값(mV)을 의미한다.

$$Y_1 = 1.956 X_1 - 1.554 \quad (3)$$

$$Y_2 = 2.337 X_1 + 0.801 \quad (4)$$

$$Y_3 = 2.481 X_3 + 0.167 \quad (5)$$

$$Y_4 = 2.328 X_4 + 1.884 \quad (6)$$

실험결과로부터 압력과 이송력이 관심 범위(압력:10~50N, 이송력:10~80N)내에서 하중과 앰프의 출력 전압사이 선형관계를 보이고 있었다.

식(3)~(6)를 힘에 대해서 다시 정리하면 식(7)~(10)과 같이 정리할 수 있다. 이들 식은 식 (1)과 (2)의 대입하여 압력과 이송력의 결정에 사용된다.

$$F_1 [N] = 0.5018 \times \epsilon_1 [mV] + 0.795 \quad (7)$$

$$F_2 [N] = 0.4031 \times \epsilon_2 [mV] - 0.345 \quad (8)$$

$$F_3 [N] = 0.4277 \times \epsilon_3 [mV] + 0.067 \quad (9)$$

$$F_4 [N] = 0.4296 \times \epsilon_4 [mV] - 0.809 \quad (10)$$

3. 작용력 및 가속도 측정 실험

3.1 실험장치의 구성

실험장치의 개략도인 Fig.6과 같이 제작한 측정용 핸들을 가진기에 장착하고 가진기의 컨트롤러를 이용하여 10Hz에서 1600Hz 범위에서 랜덤 가진을 발생하도록 하였다. 이때 작업자는 ISO 10819에서 규정하는 Fig.7의 자세를 취하도록 하였다.⁽³⁾

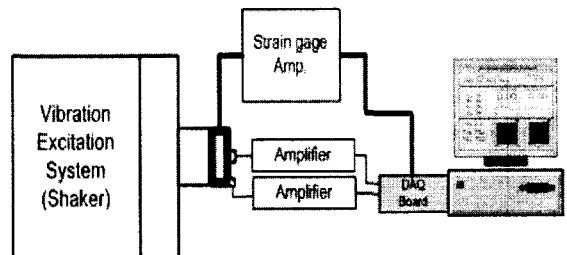


Fig.6 Schematic diagram of force and acceleration measuring system

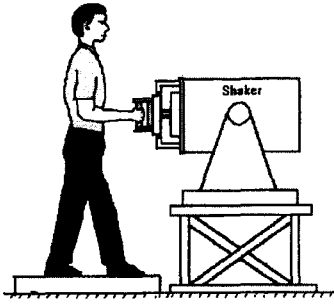


Fig.7 Posture of the operator

3.2 작용력 및 가속도 측정

악력과 이송력의 범위는 각각 20~50 N과 40~70 N으로 각 구간을 10 N씩 증가시키면서 작업자가 각 기준 작용력의 $\pm 10\%$ 범위 내에서 힘을 유지하도록 하고 가속도를 측정하였다. 2개의 가속도계를 사용하였는데 하나는 핸들 손잡이 근처에 부착하고, 또 하나는 보조용구를 사용하여 핸들과 손바닥 사이에서 측정하였다.

수완계 진동 측정 실험시 작업자는 정해진 규격의 범위 내에서 악력과 이송력을 유지하여야 하므로 작업자가 자신의 작용력을 모니터링 할 수 있도록 하기 위해 노트북 PC와 LabVIEW를 이용하여 Fig.8과 같이 실시간 모니터링 및 신호처리 분석용 프로그램을 개발하였다. 작용력은 앰프에서 출력되는 신호를 DAQ 보드로 입력하여 0.25초 시간 동안 RMS(root mean square)를 취하여 표시하도록 하였다.

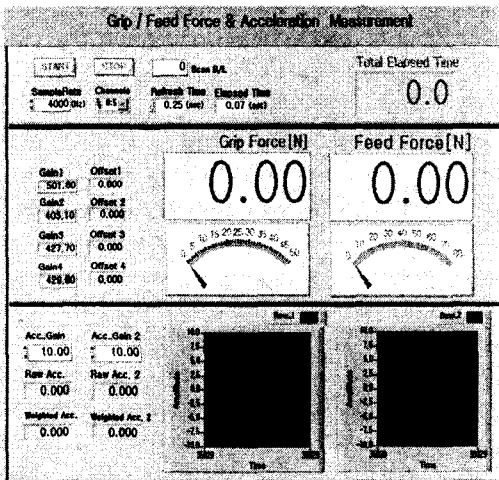


Fig.8 LabVIEW Program for the measurement and signal processing of the grip force, feed force and the accelerations

이 시스템에는 ISO 10819에서 규정한 방진장갑의 전달률

측정이 가능하도록 측정된 가속도에 실시간으로 주파수 가중치를 적용하여 체감 진동량을 계산할 수 있는 기능이 추가되어 있다. ISO 5349-1(2001)에서 규정되어 있는 주파수 가중치(Frequency Weighting)는 전달함수는 식(11)의 밴드패스 필터와 식 (12)의 가중치 필터 $H_w(s)$ 이다.

$$H_B(s) = \frac{s^2 4\pi^2 f_2^2}{(s^2 + 2\pi f_1 s / Q_1 + 4\pi^2 f_1^2)(s^2 + 2\pi f_2 s / Q_2 + 4\pi^2 f_2^2)} \quad (11)$$

$$H_W(s) = \frac{(s + 2\pi f_3) 2\pi K f_4^2}{(s^2 + 2\pi f_4 s / Q_2 + 4\pi^2 f_4^2) f_3} \quad (12)$$

Table 1에는 식 (11)과 (12)에 사용된 각 인자들을 정리하였다. s-domain에서의 대역 제한 필터와 주파수 가중 필터의 전달함수를 식(13)를 이용하여 z-domain에서의 전달함수로 변환시킬 수 있고, 변환된 전달함수는 시간영역의 가속도에 디지털 필터 개념으로 적용되어 신호처리에 사용된다.

$$s \approx \frac{z-1}{Tz} \quad (13)$$

Table 1 Parameters for the band-limiting and frequency weighting filters

Band limiting			Frequency weighting			
f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	Q_2	K
6.310	1258.9	0.71	15.915	15.915	0.64	1

3.3 작용력 측정 시험 및 결과 분석

본 연구의 첫 번째 목적은 힘 측정용 핸들을 이용하여 동적인 작용력을 구하는 것이다. 이를 위해 제작한 핸들을 가진기에 장착하여 랜덤 가진 하면서 동적 작용력을 측정하였다. Fig.9와 Fig.10은 각각 서로 다른 악력과 이송력 조건에서 악력을 측정하여 PSD(power spectrum density)로 표시하였다. 시험 결과 작용력의 d.c. 성분에 해당하는 정적 작용력을 확인해본 결과, ± 2 N의 오차내에서 정확하게 측정되고 있었다.

수완계 전달 진동을 평가함에 있어서 작용력은 정적인 성분만 고려하는 것이 일반적이지만 수완계의 임피던스를 구하기 위해서는 동적인 성분도 정확하게 측정해야만 한다. Fig.9와 10은 랜덤가진 시의 작용력을 측정했 것이기 때문에 주파수에 따라 그 크기가 일정하게 나타나고 있지 않으며, 특히, 1400 Hz에서 큰 피크가 나타나고 있다. 측정용 핸들에 대한 모우드 해석 결과 이 피크는 측정용 핸들의 공진주파수임이

밝혀졌다. 그리고 700 Hz의 작은 피크도 마찬가지로 작용력 방향의 수직인 방향으로의 모우드에 기인하는 것으로 나타났다. 이들 피크는 관심 주파수 범위에서 작용력뿐만 아니라 가속도의 측정까지 심각한 왜곡을 유발하므로 측정용 핸들의 강성을 충분히 보장하는 쪽으로 시스템을 재구성해야 함을 알 수 있고, 현재 개선방안을 도출하여 관심 주파수 범위내에서 공진이 발생하지 않는 측정용 핸들을 제작중에 있다.

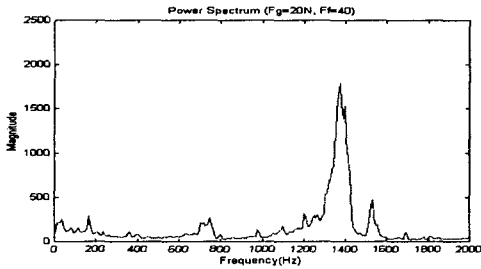


Fig.9 Power spectrum of grip force
($F_g = 20 N, F_f = 40 N$)

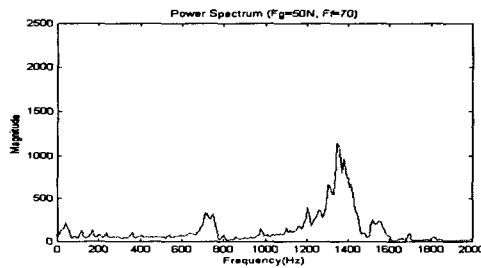


Fig.10 Power spectrum of grip force
($F_g = 50 N, F_f = 70 N$)

4. 결론

동적 작용력과 가속도를 동시에 측정할 수 있는 핸들을 제작하고, 스트레인 게이지와 힘 사이의 민감도 결정 실험을 수행하여 악력과 이송력을 추출할 수 있는 선형관계식을 유도하였다. 이 핸들을 가진기에 장착하여 진동을 발생시키면서 악력과 이송력의 변화를 측정하여 본 핸들의 활용가능성을 확인해보고자 하였으며 이로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 동적 가진시 핸들에서 측정된 작용력의 정적 성분(0 Hz에서의 값)은 실제로 사용자가 가하는 정적 작용력과 약 2 N의 오차범위내에서 일치하고 있어서 본 핸들은 ISO 10819에서 요구하는 작용력의 정적

성분 측정에 문제가 없음을 알 수 있었다. (2) 동적 성분의 측정을 위해서는 관심주파수 범위(ISO 10819의 경우 1500 Hz)에서 핸들의 공진이 없어야 하지만 본 시스템은 1400 Hz에서 주요한 피크가 관찰되었고, 700 Hz부근에서 영향을 줄 수 있는 피크가 나타났다. 따라서 본 시스템을 수완계 진동 측정에 활용하려면 이들 공진 주파수를 관심주파수 범위 밖으로 밀어 올려야 함을 알 수 있었다.

(3) 본 연구에서 구현한 작용력 및 가속도 측정 시스템은 공진 주파수 문제만 해결되면 ISO 10819에서 규정하는 방진장갑의 성능 평가를 위한 전달률 측정 실험에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 표준화기술개발사업과 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) ISO 5349-1, Mechanical vibration-Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration-Part 1: General requirements
- (2) ISO 5349-2, Mechanical vibration-Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration-Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace
- (3) 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
- (4) ISO 10068, Mechanical vibration and shock-Free, Mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point
- (5) D. Welcome, S. Rakheja, R. G. Dong, B. Westfall, and A. W. Schopper "A preliminary study of hand grip and push forces to total coupling forces", UK Group conference on Human Response to Vibration, 2001
- (6) Martine J O'Boyle "The effect of Hand and arm volume on the vibration transmissibility of gloves according to current standard", 36th United Kingdom Group Conference on Human Response to Vibration, 2001
- (7) S. Braun, Mechanical Signature Analysis theory and application, Academic Press, 1986.