Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 18, No. 3 1999. 12

인체진동 측정 및 분석체계*

Measurement and Analysis of Human Vibration

박 희 석**, 장 동 성***

Abstract

This article aims to provide information necessary for the measurement and analysis of human vibration, especially hand-arm vibration. The major health problems associated with the use of powered hand tools are the signs and symptoms of peripheral vascular and peripheral neural disorders of the fingers and hands. To prevent these problems, it is the first and the most important to measure the amount of the vibration transmitted to the upper extremities, and analyze its characteristics against the exposure limits such as ISO standards. In our country, however, very few studies have been done on the hand-arm vibration. One of the possible reasons might be lack of knowledge for the measurement and analysis schemes. The information introduced in this article would hopefully be of help for the upcoming studies.

Keywords: 인체진동(human vibration), 수완진동(hand-arm vibration), 측정(measurement)

* 본 논문은 1998년도 홍익대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.
** 홍익대학교 정보·컴퓨터공학부 교수
*** 홍익대학교 대학원

I. 서 론

작업 및 작업장이 기계화, 자동화됨에 따라 동력을 사용하는 공구(powered hand tools)가 점차 많이 사용되고 있다. 동력공구는 전통적인 수공구에 비하여 생산성이 높고 작업에 필요한 생체에너지가 덜 소요되는 장점이 있으나 대개의 경우, 기계적 진동(vibration)을 인체에 전달함으로써 작업자의 건강에 악영향을 주는 경우가 많다. 진동은 물리적으로는 물체가 일정한 주기(period)를 가지고 반복적으로 움직이는 현상을 말한다. 진동은 특정한 경우, 우리 몸에 좋은 영향도 주지만(예: 안마기), 작업장에서 발견되는 지속적인 형태의 진동은 그렇지 않는 경우가 대부분이므로 가능한 한 진동에 노출되는 것을 피해야 한다.

진동은 그 전파되는 범위에 따라서 전신진동(whole body vibration)과 국소진동(local vibration)으로 대별할 수 있다. 전신진동이란 주로 운송수단과 중장비 등에서 발견되는 형태로서 바닥, 등받이와 같이 몸을 받치고 있는 지지구조물을 통하여 몸 전체에 진동이 전해지는 것을 말한다. 전신진동은 불편감, 멀미, 소화장애, 그리고 요통의 발생가능성에 악영향을 주는 등(Griffin, 1990), 다양한 영향을 미치지만 직업병의 직접적인 위험요인으로 간주되지는 않고 있다. 반면, 작업장에서 문제가 되는 것은 동력공구의 사용으로 인하여 손, 팔, 어깨로 이루어지는 상지(upper extremities)에 전달되는 국소진동, 특히 手腕진동(hand-arm vibration)이다. 진동을 일으키는 공구는 중공업, 조선소, 자동차 등 제조업과 광산, 임업, 건설업, 그리고 정비공장 등에서 많이 쓰인다. 가장 흔한 공구는 착암기, 끌, 그라인더, 마감기, 전기톱, 햄머 등이다.

동력공구로 인한 건강에의 악영향을 총칭하는 진동증후군(handarm vibration syndrome)의 대표적인 것으로서 진동성 白指(vibration white fingers)를 들 수 있다. 주요증상은 손과 손가락의 혈관이 수축하며 혈행(血行)이 감소하여 손이나 손가락이 창백해지고 바늘로 찌르듯이 저리며 통증이 심하다. 이외에 진동증후군의 증상으로서 손목관절, 팔꿈치관절, 어깨, 다리 등에 나타나는 증상으로는 차가워짐, 굳어짐, 무력감, 감각 저하, 떨림, 손톱의 변형, 운동제한 등이 있으며, 전신증상으로는 두통, 위장장해, 불면, 현기증, 피로감, 초조감 등이 생기고, 반복되는 혈관장애에 의한 신경손상과 골관절 변형에 의한 압박성 신경질환이 생길 수 있다(NIOSH, 1989). 또한 국소진동은 누적외상성질환(cumulative trauma disorders)의 위험요인 중의 하나임이 밝혀진 바 있다(Cannon et al., 1981; Armstrong et al., 1986). 즉, 동력공구를 사용하여 작업을 할 때는 반복적인 움직임, 부자연스러운 자세, 과도한 근력요구 등과 함께 상지에 가해지는 생리적 스트레스를 증가시킴으로써 누적외상성질환의 발병을 촉진시킬 수 있는 것이다.

이러한 진동에 의한 건강상의 문제점을 예방하기 위하여 선진국에서는 다각적인 노력을 경주해왔으나, 우리나라에서는 다른 작업장 위험요인에 비하여 많은 관심을 받아오진 않았다. 특히, 산업안전보건법상에서도 진동과

관련하여 언급된 부분은 극히 미미하며, 그 내용 또한 매우 피상적이다. 즉, 진동의 측정과 관련된 법적인 규정은 없고 산업보건기준에 관한 규칙에 '건강장해 예방조치(시행규칙 제10조)'와 '보호구 지급(시행규칙 제30조 8항)'과 관련된 최소한의 관리만 규정되어 있다.

또한 우리 인간공학계를 포함한 산업의학 및 산업보건 학계에서도 여타의 분야에 비하면 진동관련 연구가 많이 이루어지지는 않았다. 그 배경에는 여러 이유가 있겠으나 1) 진동노출의 결과로 너무나 다양한 형태(혈관계, 근골격계, 신경계 등)의 비정형적인 질병이 발생할 수 있고 2) <그림 1>에 제시되어 있듯이 진동과 결과적인 질병사이의 인과관계(cause-effect relationship)에는 매우 많은 변수가 서로 복합적으로 포함되어 있으며, 3) 관련 연구의 근본이 되는 진동의 측정 및 분석에 기계공학적, 전기전자적인 지식과 기술이 많이 필요하기 때문이라고 생각된다. 이에 본 논문에서는 인체진동중 수완진동에 관한 연구의 요소기술들을 인간공학적 관점에서 쉽게 해설함으로써 국내 연구의 기반이 되고자 한다. 그 첫 번째 노력으로서 본 편에서는 인체진동과 관련하여 측정되어야 하는 주요변수에 대하여 논하였다.

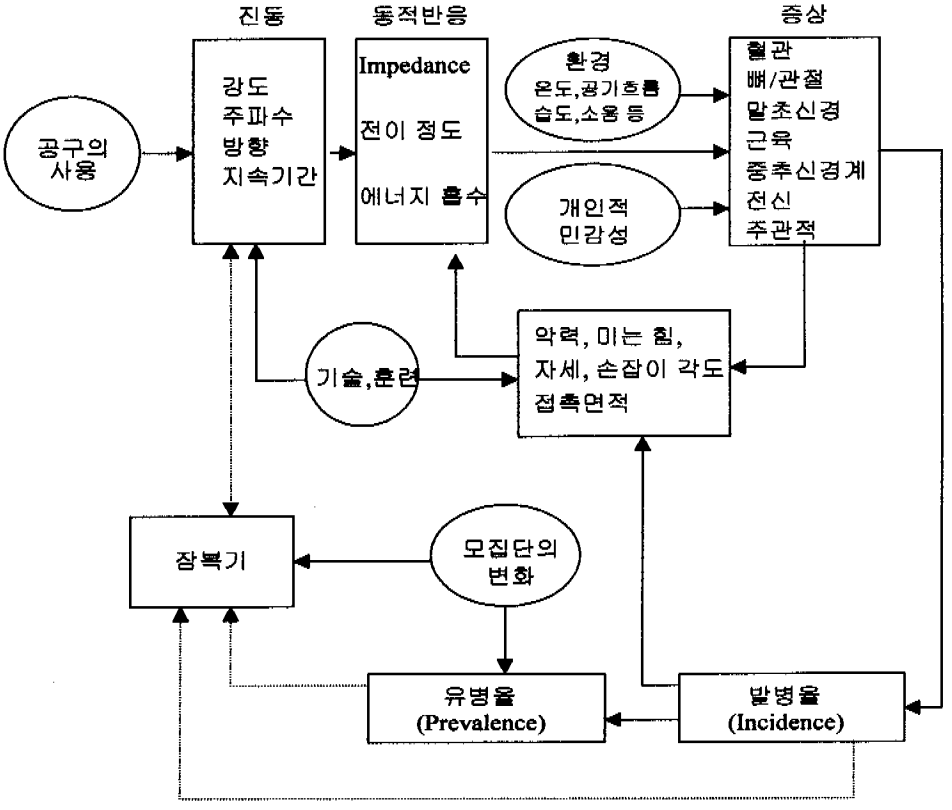


그림 1. 진동과 질병과의 인과관계

II. 인체진동의 측정요소

1. 전달의 축(Axis)

전동공구는 3차원 공간에서 사용되므로 인체에 전달되는 진동신호는 벡터의 형태가 된다. 특정 공구내에서도 벡터를 구성하는 축에 따라 인체에 전달되는 진동신호의 형태가 서로 다르기 때문에 전달의 축과 방향이 명확히 정의되어야 한다. 이를 위하여 국제표준화기구(ISO, 1986)에서는 〈그림 2〉와 같이 공구를 쥐고 있는 손에 중심을 둔 basicentric 또는 진동면에 중심을 둔 biodynamic system을 적용하기로 통일하였다.

실제로는 주로 basicentric system이 사용된다. 이 체계에서 X축은 공구의 형태에 따라 다르지만 손바닥을 수직으로 관통하는 축이며, Y축은 공구손잡이 축, 그리고 Z축은 양축에 직각인 축으로 정의된다. 하지만 이러한 정의는 공구의 형태에 따라 달라질 수 있으므로 경우에 따라 연구자가 임의대로 정의할 필요가 있으며, 그 경우에는 그림이나 사진을 곁들여서 정확히 표현해줌이 바람직하다.

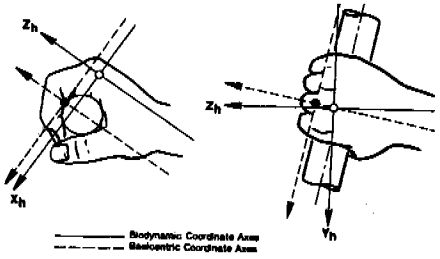


그림 2. basicentric system과 biodynamic system (NIOSH, 1989)

2. 강도(Magnitude)

진동신호의 강도를 표현하는 방법으로는 변위(displacement), 속도(velocity), 가속도(acceleration) 등이 있다. 진동신호의 주기는 변위, 속도, 가속도 중 어느 것으로 표현되든지 간에 동일하며, 단지 3척도의 최대값과 위상(phase)이 달라진다. 3개의 척도중에서 일반적으로 가속도를 가장 많이 사용한다. 그 이유로는, 우선 움직임이 큰 저주파의 물체는 변위를 측정할 수 있으나 현실적으로는 진동체(인체부위)의 변위정도가 육안으로는 구별이 안되는 정도로 작은 반면, 공구의 주파수는 상대적으로 고주파수이므로 이 척도는 거의 사용되지 않는다. 그리고 속도는 가속도의 값으로부터 쉽게 계산될 수 있고, 특정한 주파수에서의 가속도 값이 변위나 속도값보다 커서 측정하기가 상대적으로 쉽기 때문에 현장에서 쓰이는 장비들이 대부분 가속도 중심으로 되어 있다. 따라서 가속도로써 진동신호의 강도를 나타내는 것이 국제적으로 일반화되어 있다.

가속도의 단위로서는 m/s^2이 사용되며 현장에서는 중력가속도($1g=9.8m/s^2$) 단위로 변환하여 쓰이기도 한다. 가속도 수준은 파형의 최대변화를 나타내는 최대peak값, 또는 peak-to-peak값으로 표현할 수 있다. peak값은 진동파가 전달되는 과정 중에 가지는 여러 값 중에서 가장 최대값을 말하며, peak-to-peak값은 최대값과 최소값간의 차이를 말한다. 여기서 가속도의 값은 음의 부호를 가질 수 있으며, 이는 전달방향이 반대임을 의미한다. 따라서 peak값으로는 부호에 관계없

이 가장 큰 값을 취하며, peak-to-peak값은 양의 값 중에서 가장 큰 값과 음의 값 중에서 가장 큰 값 사이의 상대적인 차이를 말한다. peak, peak-to-peak값들은 짧은 시간내 충격의 크기를 나타내는데 유용하다. 하지만 충격파를 제외한 대부분 진동신호의 강도는 최대peak값이 아닌 수준들도 많은 영향을 미치므로 측정시간내의 RMS(root-mean-square) 값이 함께 사용된다. RMS값은 부호(전달방향)에 관계없이 전달되는 시간에 평균적인 값을 산출하므로, 다양한 가속도 구성요소를 갖는 진동파의 크기를 나타내는데 적합하다.

3. 주파수(Frequency)

1초 동안에 반복운동의 완전한 1주기가 일어나는 횟수를 주파수라고 부르며, Hertz(Hz)로 측정된다. 실제로 현장의 진동신호는 동시에 일어나는 많은 주파수들로 구성되어 있으므로 시간-진폭의 관계에서는 얼마나 많은 주파수 성분이 합성되어 있고 또한 각 주파수에서의 진동강도는 어느 정도인가를 즉시 구별할 수 없다. 따라서 합성된 신호를 Fast Fourier Transform(FFT)을 사용하여 주요 주파수 성분으로 분리하는 주파수 분석(frequency analysis) 과정을 거쳐야 한다. 즉, 시간-강도의 관계를 주파수-강도(가속도 또는 에너지로 표현됨)의 관계로 변환하는 것이다(실제로 이 변환과정은 손으로 계산하기 어렵고 컴퓨터나 주파수 분석기를 사용한다). 〈그림 3〉에는 시간-강도의 관계(좌측 그림)가 주파수-강도(우측 그림)의 관계로 변환된 결과를 보여준다. 이러한 주파수 분석을 통하여 기계 여러 부분의 운동에 관련된 특유의 주기적 주파수 성분들을 찾아냄으로써 바라지 않는 진동성분을 추적할 수 있는 것이다.

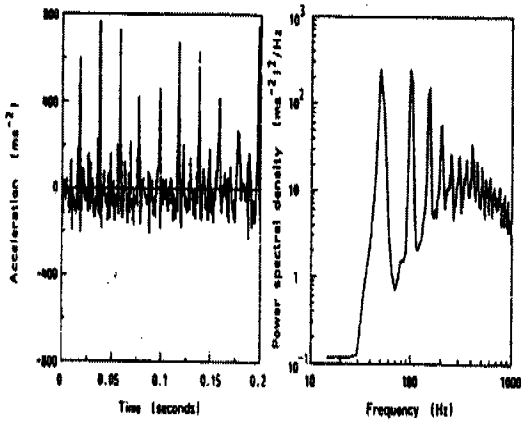


그림 3. 주파수 분석 결과

주파수 분석을 실시할 경우 모든 주파수 대역(bandwidth)을 그 대상으로 할 필요는 없으며, 현장에서는 관심이 있는 대역에 대해서만 주파수 분석을 하게 된다. 이 경우에는 진동신호 중 좁은 주파수 범위에 포함된 부분만 통과시키는 필터(filter)를 사용한다. 진동신호의 주파수 분석에는 다음의 2가지 기본적인 필터가 사용된다. 첫째는 필터가 정수의 변하지 않은 대역(3Hz, 10Hz 등)으로 구성된 일정대역폭(constant bandwidth) 필터이고, 두번째는 주파수값에 비례하여 필터의 크기가 변화하는 비례대역폭(proportional bandwidth) 필터이다. 이 경우 1, 2, 4, 8, 16Hz와 같이 한 Octave만큼 넓거나($f_2=2f_1$), 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 3.15, 4.0, 5.0Hz와 같이 1/3 Octave ($f_2=2^{1/3}f_1$) 만큼 변할 수 있다. 주파수 분석에 어떤 필터형태를 사용할 것인지에 대한 명확한 답은 없으나, 일정대역폭(10Hz

이하의 폭) 필터가 고주파수에서의 분해능력이 상대적으로 좋으므로 일반적으로 사용되고 있다(Griffin, 1990).

4. 지속시간(Duration)과 그외의 요소들

진동에 노출되는 시간은 일일당 또는 총년수로 측정할 수 있으며, 어느 척도를 적용하더라도 진동에의 노출은 연속적이 아니며, 또한 그동안 회복도 가능하다는 것이다. 그리고 노출기간 동안 다양한 공구를 사용하고 또한 다양한 형태의 작업에 종사할 수 있으므로 지속시간을 측정한다는 것은 정확하지 못하다. 하지만 현실적으로는 ISO기준 등은 노출시간을 일일당 노출시간의 형태로 기술하고 있으며, 많은 역학적(epidemiological) 연구들은 총년수 형태를 많이 적용하고 있다. 그외, 진동과 관련하여 측정 또는 계량화되어야 하는 요인들은 아래 〈표 1〉과 같다.

진 동 특 성	강도 주파수 방향 전달부위 지속기간
진 동 원 (源)	공구의 종류, 형태 작업 공구사용방법 동력源(공기압, 전력 등) 공구 혹은 손에 쥐는 작업물의 중량 손잡이 혹은 손에 쥐는 작업물의 치수 손잡이 혹은 손에 쥐는 작업물을 쥐는데 필요한 힘 손잡이 혹은 손에 쥐는 작업물을 미는데 필요한 힘 손잡이 장갑
환 경 조 건	주위의 온도 손가락 주변의 온도 손 근처의 공기흐름 소음 생리학적 부담
노출된 사람의 특성	인원수 노출 지속기간 인적 특성(연령, 성별, 체중, 신장 등) 건강 상태 공구사용 방법 동적 반응(임피던스 등) 이전 직장의 작업이력
노출의 결과	증상 현재증상이 나타나기 까지의 노출지속기간

표 1. 진동연구의 측정요소

5. 가속도계(Accelerometer)

진동강도와 주파수를 측정하기 위하여는 가속도계를 진동체에 부착하고, 이를 주파수 분석기에 연결(앰프 경유)하게 된다. 진동측정에 사용되는 가장 보편적인 형태는 압전형(piezoelectric) 가속도계이다. 그 원리로는 가속도계내에 있는 특수한 세라믹 재료가 기계적인 변형(압축, 인장, 전단 등)의 힘(=질량x가속도)에 비례하여 전기적 전하량을 발생시키며, 이를 앰프를 통하여 증폭시키게 된다. 이 형태는 매우 넓은 주파수 범위(1-50,000Hz)를 소화할 수 있고, 자가 발전을 하기 때문에 전원이 필요하지 않으며, 마모되는 부품이 없으므로 신뢰성이 높은 장점을 가지고 있다.

현재 판매되고 있는 가속도계는 그 용도나 측정범위에 따라 매우 다양한 종류가 있다. 중요한 점은 충격(impact)형태의 공구(해머, 리벳건 등)에 사용되는 가속도계는 기계적 필터가 있는 특수한 형태의 가속도계를 사용하여야 측정오차를 줄일 수 있다. 하지만 인체진동의 측정에는 이른바 일반용도형을 사용하여도 무난하다. 아주 작은 신체부위에 전달되는 고주파의 진동신호를 측정하기 위하여는 작은 크기(무게 0.5-2gram)의 형태를 사용하면 된다. 이상적으로 가속도계는 높은 출력을 내는 것이 좋지만 고감도의 것은 큰 압전체가 내재하여야 하므로 크고 무겁기 때문에 항상 바람직하다고 볼 수는 없겠다. 그리고 출력감도는 전치증폭기(preamplifier)가 낮은 수준의 신호를 처리하도록 설계되어 있어서 실제로는 심각한 문제는 되지 않는다. 그외 3축의 신호를 동시에 측정할 수 있는 형태도 있어서 여러 개의 가속도계를 부착해야 하는 번거로움을 덜 수 있다.

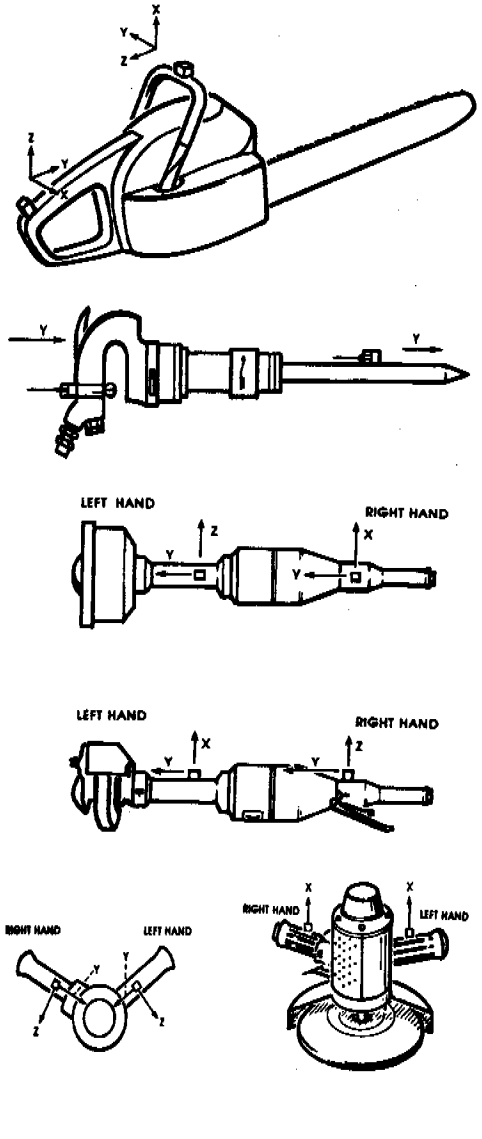


그림 4. 가속도계의 부착위치 (NIOSH, 1989)

가속도계의 측정한계로는, 우선 하한 한계

는 연결 케이블이나 증폭회로의 전기적 잡음에 의하여 결정되며, 일반적으로 0.01m/s^2 정도이다. 상한 한계는 가속도계의 구조적 강도, 자체질량, 스프링계의 공진(resonance) 주파수에 의하여 결정되며, 일반용도의 경우 50,000-100,000m/s^2 정도이다. 특히 가속도계의 공진주파수(질량이 작은 조그만 가속도계는 공진주파수가 180Hz인 것도 있으나, 좀 더 크고 높은 출력의 일반용도형 가속도계의 공진 주파수는 20~30KHz인 것이 보편적이다)에서는 그 감도가 원래의 값보다 증폭되므로 그 출력값은 부정확하게 된다. 이러한 문제는 가능한 한 넓은 주파수 범위를 가진 가속도계를 선택하고 저역통과(low-pass)필터를 사용함으로써 극복할 수 있다. 보통 진동계와 전치증폭기에는 저역통과 필터가 포함되어 있어서 가속도계의 공진으로 인한 필요치 않는 신호가 제거된다.

가속도계는 출고 이전에 이미 공장에서 교정(calibration)되어 판매된다. 정상적인 조건하에서 사용되면 가속도계의 특성에는 큰 변화가 없지만 예를 들어 가속도계를 손높이에서 바닥으로 떨어드리게 되면 수천 g의 충격을 받게 된다. 따라서 감도를 주기적으로 점검함이 바람직하다. 이를 위하여 정확히 10m/s^2 으로 진동하는 교정기를 사용하여 그때의 출력을 비교하여 가속도계의 감도와 정확성을 결정할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 인체진동의 주요한 측정요소와 가장 기본이 되는 장비인 가속도계에 대하여 고찰하였다. 추후, 국제적 노출한계와 작업장 관리방안을 비롯한 진동관리 방안과 우리나라 실태에 대하여 별도의 논문에서 심도있게 논하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] Armstrong, T.J., Fine, L.J., Radwin, R.G. and Silverstein, B.S. (1987), Ergonomics and the effects of vibration in hand-intensive work. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health 13:286 -89.

[2] Cannon, L.J., Bernacki, E.J. and Walter, S.D. (1981), Personal and occupational factors associated with carpal tunnel syndrome, Journal of Occupational Medicine 23:255-258.

[3] Griffin, M. J.(1990), Handbook of Human Vibration, Academic Press, London.

[4] International Organization for Standardization (1986), Mechanical vibration-Guidelines for the measurement and the assessment of human exposure to hand-transmitted vibration. ISO 5349, Geneva.

[5] National Institute for Occupational Safety and Health (1989), Occupational exposure to hand-arm vibration, Criteria for a recommended standard, Cincinnati, OHIO.