

수전달 진동 평가를 위한 공구 핸들에서의 진동과 작용력의 동시 측정

The Simultaneous Measurement of Vibration and Applied forces at a Power tool handle for the Evaluation of Hand-transmitted Vibration

최석현*.장한기**.박태원***

Seok-Hyun Choi, Han-Kee Jang, and Tae-Won Park

Key Words: Hand-arm System(수완계), Hand-transmitted Vibration(수전달 진동), Grip Force(악력), Feed Force(이송력), Frequency-weighting(주파수 가중), Vibration Total Value(진동 총값)

ABSTRACT

To increase accurateness and reliability of the evaluation of power tool vibration transmitted to an operator, it is necessary to measure grip and feed forces during the measurement of hand-transmitted vibration. In the study a system was invented to measure the vibration and the grip and/or feed force, which consists of a measurement handle and a PC with data acquisition system and the software. Strain gauges and an accelerometer were mounted on the handle for the simultaneous measurement of the forces and the vibration. The program in the system makes it possible to monitor the grip and feed force during the tool operation so that the operator keeps the applying forces within the pre-determined range. Investigating the vibration total values, frequency-weighted root mean square accelerations at the handle, obtained at various conditions with control of the grip and feed force showed more consistency than those measured without force control. By using the system the experimenter can reduce uncertainty of the measured vibration.

1. 서 론

수완계(Hand-arm system) 진동은 주로 동력공구(Power tool)를 사용하는 작업자들이 공구를 쥐고 있을 때, 손을 통하여 신체로 전달되는 충격 및 진동을 의미한다. 수완계 진동을 측정하여 그 평가량을 나타냄에 있어서 작업자에 의해 가해지는 작용력 즉, 악력과 이송력이 개인별로 달라 측정되는 진동 크기에 영향을 미치고, 이는 측정 불확도의 주요한 원인이 된다. 수완계 진동 측정에 관한 ISO 규격^{1,2)}에서는 이들 작용력의 크기를 측정 데이터 보고 시 첨부사항으로 권장하기만 할 뿐, 구체적인 측정 방법이 제시되고 있지 못한 실정이다. 이전까지의 작용력의 실험실내 측정 방법은 정적인 상태에서 악력 측정용 기기를 이용하여 측정하는 것이었는데, 이 방법은 악력의 측정만이 가능하고, 더군다나 실제 수완계 진동에 피폭되는 작업 중에 작업자가 자신의 작용력을 유지하는 것은 사실상 불가능하였다.

본 연구에서는 공구를 동작시키는 동안 진동 크

기와 더불어, 쥐는 힘(악력)과 밀거나 당기는 힘(이송력)으로 구분된 작용력을 동시에 측정하는 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 스트레인게이지를 이용한 힘 측정, 가속도계를 이용한 가속도 측정이 가능하도록 측정용 핸들로 구성되며, 이들 시스템에서 측정되는 신호를 제어하기 위한 PC 기반 데이터 처리장치와 LabVIEW 프로그램을 포함한다. 프로그램에서는 주파수 가중치 적용과 실시간 데이터 분석 및 처리가 가능하도록 하였다. 이 시스템을 이용하면 작업자가 작업 중의 자신의 힘을 모니터링하여 일정 범위내로 작용력을 유지하면서 진동 크기를 측정할 수 있다.

본 연구의 요점은, 진동 크기와 작용력을 동시에 측정하는 기술을 적용함으로써 작업자 간 혹은 작업 도중에 나타나는 작용력의 편차를 감소시키고 수완계 진동 평가량의 신뢰성을 높이고자 하는 것이다.

2. 작용력 측정

2.1 작용력 측정원리

작업자가 진동하는 동력공구를 쥐고 있을 때의 작용력의 변화는 일정 수준의 DC 와 불규칙(Random) 또는 정현파의 신호를 포함한다. 작용력을 측정함에 있어서 DC 의 크기를 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 동적 성분 뿐

* 책임저자; 정회원, 고등기술연구원 제품기술연구센터
아주대학교 기계공학과 대학원

E-mail : oaat8@iae.re.kr

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

.. 정회원, 고등기술연구원 제품기술연구센터

... 정회원, 아주대학교 기계공학과

만 아니라 DC 측정 특성이 우수한 스트레인게이지를 측정용 핸들에 부착하여 힘 변환기로 사용하였다. 작용력 측정을 위해 제작한 핸들은 Fig. 1 과 같이 단면이 반원을 이루는 두 개의 외팔보 형태로 구성되며, 작용력이 가해짐에 따라 아래 위의 외팔보에 개별적으로 변형이 발생한다. 변형률이 상대적으로 큰 뿌리단 근처에 스트레인게이지를 부착하였고, 휘스톤 브리지 회로와 전용 증폭기를 구성함으로써 작용력이 핸들에 가해지면 전압변화가 측정된다. 교정 실험을 통해 가해진 힘과 출력 전압의 관계를 유도하여 작용력을 구할 수 있다.

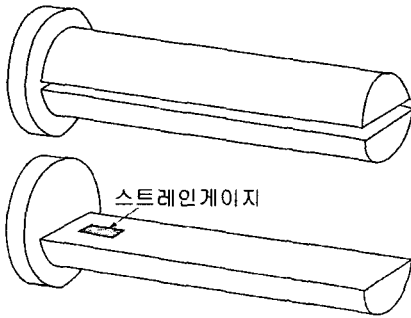


Fig.1 Handle for force measurement

Fig. 2 는 작업자가 핸들을 쥐고 아래로 밀 때의 악력과 이송력 측정의 개념도이다. 악력은 쥐는 힘으므로 아래 위에 모두 작용하고, 이송력은 밀거나 당길 때 추가적으로 위나 아래에 발생한다. 악력과 이송력은 핸들 표면에 분포하중을 발생시키고, 분포하중이 표면에 수직한 방향에 대해 균일하게 작용하는 것으로 가정하면 분포하중의 수평 방향의 성분은 벡터합으로 상쇄되어 수직성분만 남게되므로, Fig. 2 의 오른쪽과 같이 악력과 이송력을 분리하여 표현할 수 있다.

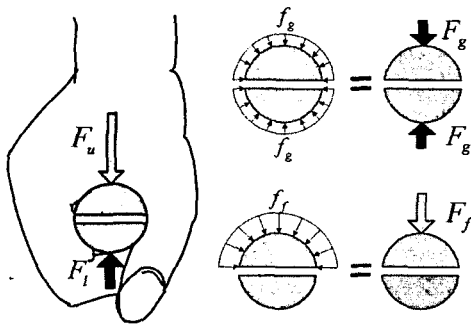


Fig 2. Grip force and feed force at the handle

위와 아래에서 각각 측정되는 힘(F_u, F_l)과 악

력(F_g)과 이송력(F_l)의 관계식은 식(1),(2)로 나타낼 수 있다.

$$F_u = F_g + F_f \quad (1)$$

$$F_l = F_g \quad (2)$$

F_u 와 F_l 는 핸들의 교정 실험의 결과로 얻어지며, 식(1)과 식(2)를 조합하여 식(3)과 식(4)에서 이송력과 악력을 계산 할 수 있다. 핸들을 쥐고 위로 당길 때 이송력은 부(負)의 값으로 표현된다

$$F_f = F_u - F_l \quad (3)$$

$$F_g = F_l \quad (4)$$

2.2 작용력 측정용 핸들의 교정

동력공구 작동시 작업자의 작용력을 모니터링하기 위해서는 먼저 정적 상태에서 식(5)와 같은 작용력과 출력 전압 사이의 관계식을 결정해야 한다.

$$V = \beta W \quad (5)$$

여기서 W 는 Fig.3 에 도시한 하중, V 는 출력 전압이고, β 는 하중-출력전압의 관계를 나타내는 상수로서 선형성을 유지하는 범위 내에서 기울기가 된다.

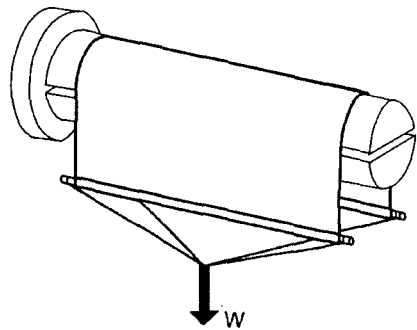


Fig. 3 Determination of voltage sensitivity

출력전압에 대한 하중을 나타내기 위해서 식(5)는 다음과 같이 표현하였다.

$$W = \frac{1}{\beta} V = \alpha V \quad (6)$$

하중 W 를 힘으로 보면, 위 아래에서의 측정된 힘은 식(7), (8)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(3)과 (4)에 각각 대입하면 악력과 이송력을 구할

수 있다.

$$F_u = \alpha_u V_u \quad (7)$$

$$F_l = \alpha_l V_l \quad (8)$$

2.3 작용력 측정용 핸들의 적용

보조핸들을 사용하는 동력공구에 적용할 수 있는 작용력 측정용 핸들을 제작하였다. Fig.4 는 결합 전의 각 부품들이고, Fig.5 는 결합 후의 조립도이다.

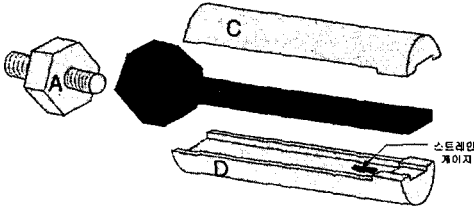


Fig 4. Handle for the force measurement (in parts)



Fig 5. Handle for the force measurement (assembled)

Fig. 4 에서 부품 A 는 동력공구 및 부품 B 와 결합하기 위해 양쪽에 볼트로 탭 가공된 부품이다. 여러 종류의 동력 공구에 적용할 때 핸들을 조립하는 부분의 나사 피치가 다를 경우에는 부품 A 만 교환하면 적용할 수 있다. 부품 C 와 D 는 작업자가 손으로 쥐는 부분으로 스트레인게이지를 안쪽 뿌리단 근처에 부착하였다. 스틸로 제작한 부품 B 는 부품 A, C, D 를 결합하기 위한 중심재 역할을 한다. 부품 C 와 D 를 부품 B 의 끝단에 부착하는 것은 부품 C 와 D 에 발생하는 응력의 연성(Coupling)을 최소화 하기 위함이다. 핸들의 공진이 관심 주파수 범위내에 존재하지 않도록 하기 위해서 부품 A, C, D 는 질량에 비해 강성이 큰 알루미늄 합금을 사용하였다. 이때 부품 C, D 에 스트레인게이지를 접착한 후 중심재 B 에 부착시킬 때 열에 의한 손상을 막고 이종 금속간의 견고한 결합을 위하여 상온경화되는 고강도 에폭시수지 접착제(3M,EP460)를 사용하였다. 본 연구에서는 환경 조건을 유지하면서 일자를 다르게 하여 4 차례 교정실험을 통해 평균값 스트레인게이지의 민감도를 결정하였다. 구한 출력전압-힘의 관계식은 상면과 하면에 대해서 각각 식(9)와 (10)으로

표현된다. 부(負)의 기호는 가한 하중에 대해 스트레인게이지가 압축되기 때문이다.

$$F_u [N] = -89.4 V_u [mV] \quad (9)$$

$$F_l [N] = -78.2 V_l [mV] \quad (10)$$

3. 진동 크기와 작용력의 동시 측정

3.1 진동 크기의 측정

(1) 측정 축

진동 측정 시스템은 진동하는 표면에서의 운동을 알기 위해 가속도계를 사용하며, 동력공구에 대해서 측정 축은 Fig. 6 과 같은 접촉점 좌표계를 사용한다.

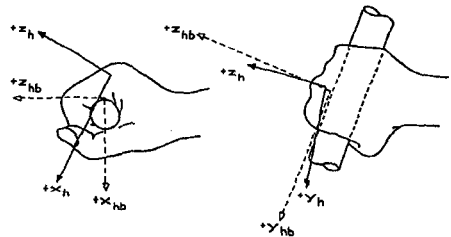


Fig .6 Basicentric coordinate system (---)

몇몇 동력공구의 진동은 특정 단축 또는 2 축에서 지배적이다. 이러한 경우에 진동 피폭 평가량인 주파수 가중된 가속도의 실효치(root-mean-squares) 진동 총값을 구하기 위해 단축 또는 2 축에서의 가속도만을 측정 한 후에 보정계수(multiplying factor)를 사용하는 방법을 제안하기도 한다¹⁾. 비록 단축 또는 2 축에서 진동이 우세하더라도 각축의 진동 크기를 검증하기 위해서는 직관력에 의존해서는 안되고, 반드시 예비 시험이 수행하여 각 진동크기가 지배적인 축에 대한 상대적 크기를 구해야 한다. 단축 또는 2 축 측정시에 가속도계 위치의 부정확성과 작업자세의 변동 및 가공물의 변동에 의해 가속도계가 회전하게 되면, 진동 측정량이 감소하므로 3 축에서의 진동을 동시에 측정하는 것이 바람직하다. 상용화된 10mm 미만의 초소형 3 축 가속도계는 단축 가속도계에 비해 고가인 단점이 있지만, 단축 또는 2 축 측정에서의 단점을 보완하여 정확한 진동 평가량을 산출하기 위해서 필요하다. 즉, 3 축 가속도계의 경우 주파수 가중된 가속도의 실효치(r.m.s.) 진동 총값 계산시 각 축에서 측정 한 진동값의 주파수 가중된 가속도의 실효치로부터 식 (11)과 같이

벡터의 크기를 구하는 방식으로 합산(root-sum-of-squares)하여 계산되므로, 진동 주축에 대한 가속도계의 회전 변위에 기인한 오차는 다른 축에서 측정된 값에서 보상된다. 본 연구에서는 신뢰성 있는 평가량을 산출하기 위해서 초소형 3축 가속도계 (Kistler 8764A500)를 사용하여 진동 크기를 측정하였다.

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hw_x}^2 + a_{hw_y}^2 + a_{hw_z}^2} \quad (11)$$

(2) 측정 위치

진동 측정은 접촉점 좌표계를 기준으로 할 때 진동이 몸으로 들어오는 손바닥 면과 핸들 표면 사이에서 이뤄져야 하므로, 가속도계는 손으로 잡는 부분의 중간에 위치시켜서 손으로 들어오는 진동의 대표적인 평가량을 구하였다. 가속도계는 진동의 증폭을 최소화 하기 위해서 공구 핸들 표면에 가능한 한 가깝게 부착 되어야 하므로, Fig.7 과 같이 유연한 재질로 제작한 보조용구를 사용하였다. 보조용구는 공구 핸들과 작업자의 손바닥 면 사이에서 가속도계를 고정하여 측정 중에 위치가 변하는 것을 방지하고 또, 가속도계로 인해 작업자의 쥐는 손 모양이 변화하는 것을 방지하며, 손을 핸들에 밀착시킬 수 있게 하여 손바닥 아래에서 가속도 측정을 용이하게 한다.

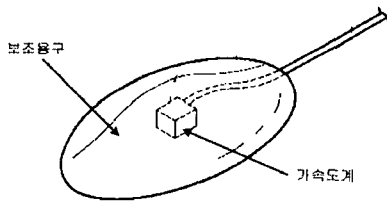


Fig.7 Adapter for the placement of an accelerometer on handle surface

3.2 진동크기와 작용력의 동시 측정

(1) 측정 시스템의 구성

진동 크기(가속도)와 작용력(악력과 이송력)을 동시 측정한다는 것은 주어진 작용력 범위로 작업자가 작용력을 유지한 상태에서 가속도를 측정하는 것을 의미한다. Fig.8 은 작동하는 동력공구에서 가속도와 작용력을 동시 측정하는 시스템의 구성도이다. Fig.5 와 같은 작용력 측정용 핸들을 보조핸들 대신 장착하고, 동력공구를 동작시키면 가속도와 작용력은 증폭기를 통해서 데이터 수집보드(NI-DAQ 6062E)를 내장한 PC 에 입력된다. PC 에서 설치된 측정 프로그램에서는 작용력을 악력과 이송력으로 연산해서 0.25 초마다 수치로 나타냄으로써 작업자가 자신의 작용력을 모니터링하여

작용력을 주어진 범위로 조절할 수 있게 하였다. Fig.9 는 작용력 모니터링과 진동 피폭 평가량 산출을 위해 LabVIEW 로 작성한 프로그램이며, 측정된 가속도에 주파수 가중치를 주어 ¹⁾ 각 축별로 주파수 가중된 실효치로 결과를 표시한다. 비록 작용력을 측정하는 위치는 핸들로 제한되지만, 가속도는 양쪽에서 동시 또는 선택적으로 측정할 수 있도록 하였다.

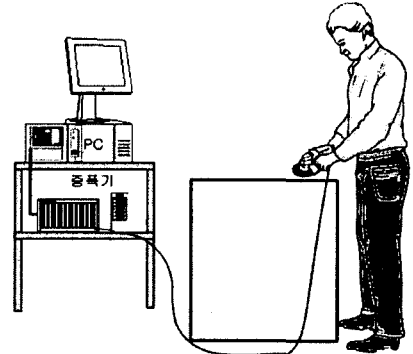


Fig.8 Experimental setup for the measurement of the forces and the accelerations

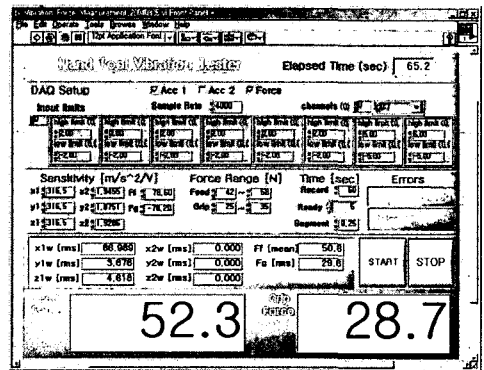


Fig.9 Program for monitoring the forces and the evaluation of the vibration magnitudes

(1) 측정 절차

Fig.5 에 제시한 작용력 측정용 핸들을 동력공구에 보조핸들 대신 부착하여 공구 작업중에 작용력을 측정함과 동시에 초소형 3축 가속도계를 이용하여 진동 크기를 측정한다.

일단 진동 피폭 및 동력공구의 진동 피폭량을 산출 ¹²⁾하기 위한 1 차 실험은 일상적인 작업에 대한 작업자들의 개별적인 작용력을 측정하여 작용력의 산술평균된 크기를 구하고, 허용범위를 선정하기 위해 수행하였다. 2 차 실험에 앞서 실험 진행자는 허용범위를 작업자에게 인시시켜 시험중에 자신의 힘을 모니터링하여 허용범위내로 유지할 수 있도록 한다. 이때 힘을 모니터링 할때의

자세가 작업에 방해되지 않도록 Fig. 8 과 같이 모니터를 배치하였다.

공구진동의 평가량을 산출하기 위한 연산은 작용력이 주어진 범위내에 존재하는 60 초간 진행되도록 하였다. 초기에 동력 공구가 동작할 때, 대부분의 작업자는 작용력을 주어진 범위내에 유지할 수 없으므로 작업자가 작용력을 주어진 범위내로 도달할 때까지 대기시간을 5 초간 주었고, 이 시간내에 작용력이 주어진 범위에 들어오지 못하거나, 진동 크기를 측정하는 시험 중에 3 초이상 작용력이 제한 범위를 벗어나게 되면 처음부터 재측정하였다. 재측정에 앞서 작업자가 충분한 휴식을 취하도록 하였다.

4. 측정 결과 및 분석

작업자가 작업 중에 모니터링하면서 작용력을 유지한 경우와 그렇지 않은 경우에 각각 산출된 수완계 진동 피폭량에 어떠한 차이가 있는지를 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 두 가지 경우에 대해 작업자 3 인이 6 종류의 공구로 각각 작업하면서 측정된 작용력과 가속도의 실험 결과를 Table 1 에 정리하였다.

a_{hwz} , a_{hwy} , a_{hwz} 는 각 축의 주파수 가중된 가속도의 실효치이고, a_{hv} 는 주파수 가중된 가속도의 실효치 진동 총값이다. 1 차 시험은 3 인의 작업자가 임의로 작용력을 가한 상태에서 측정된 결과이고, 2 차 시험 결과는 작용력을 일정한 수준으로 유지하면서 측정된 경우이다. 이 때 선정된 작용력의 범위는 1 차 시험에서의 작업자들이 작업에 적합한 작용력의 평균치를 기준으로 하되 이송력의 경우는 $\pm 10N$, 악력의 경우는 $\pm 5N$ 의 범위를 부여하였다. 이송력이 더 큰 이유는 악력보다 이송력을 조절하기가 쉽지 않기 때문이다.

작용력을 일정하게 유지하기 이전의 1 차 시험에서는 작업자간의 진동 총값의 변화가 매우 커서 경우에 따라 2 배가 넘기도 하였다. 그러나 작용력을 모니터링하면서 제어한 경우에는 표준편차가 7 배까지 줄어들기도 하였다. 폴리셔의 경우는 오히려 편차량이 0.36 에서 0.86 으로 증가하였는데, 이는 실험 진행자가 작업자에게 작용력 유지를 요구하였을 때 자세가 변경되었기 때문이다. 표에서 볼 수 있듯이 임의로 공구를 잡을 때는 핸들의 이송력을 작업면에 대해 반대 방향였으나, 작용력 유지시에는 방향이 바뀌었으며, 이로 인해 수직 방향의 가속도가 큰 폭으로 증가하였기 때문이다.

Table 1 의 결과가 의미하는 것은 작용력의 변화가 진동 크기의 측정에 미치는 영향이 크다는 것이며, 작업자별로 다르게 부가된 작용력 조건에

서 측정된 진동량을 동력 공구의 대표값으로 취급하기에는 무리가 있다는 것이다. 따라서, 측정 진동량의 신뢰도를 높이기 위해서는 작용력의 범위를 제한하는 것이 필요하다.

5. 결론

동력공구에서 발생하는 진동이 작업자의 손을 통해 전달되는 정도를 측정하고 평가하려는 목적은 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 공구 제조업체의 입장에서 인체 유해성이 적은 저진동 공구를 개발하기 위한 것이고, 다른 하나는 현장의 작업 관리자가 수완계 진동에 노출되는 시간을 적절히 조절하도록 하여 작업자에게서 발생할 수 있는 수완계 진동 증후군을 예방하고자 하는 것이다. 어떠한 목적에서든지 공구에서 발생하여 손으로 전달되는 진동을 정확하고 신뢰성있게 측정하는 것이 중요하다. 기존의 측정 규격대로 측정할 경우 작용력에 기인한 불확도를 그대로 감수할 수 밖에 없는데, 이 값은 경우에 따라 30%가 초과하는 경우도 있다.

본 연구에서는 진동 총값에 영향을 미치는 불확도의 원인 중 작용력의 변화를 최소화 하기 위해서 작용력 측정용 핸들을 고안하였다. 예비 시험을 통해 해당 작업에 적합한 작용력의 평균치와 작용력의 적용범위를 적절히 선정하여 작업하도록 하면, 수완계 진동 피폭량 측정시 측정결과와 불확도를 상당량 저감시킬 수 있다. 작용력의 범위를 제한한 결과 측정된 주파수 가중된 가속도의 실효치 진동 총값의 표준 편차가 대부분의 공구에 대해서 50% 이상 감소하였다. 작용력 측정용 핸들은 보조핸들을 사용하는 동력 공구로 적용범위가 제한되기는 하지만, 동력 공구의 진동 특성을 대표하는 신뢰성 있는 평가량을 산출하기 위해서는 진동 크기와 더불어 작용력의 측정이 수반되어야 한다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 표준화기술개발사업과 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) ISO 5349-1:2001, Mechanical vibration - measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General requirements
- (2) ISO 5349-2:2001 Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace

- (3) KS B 2041 진동 및 충격-용어
- (4) KS B 10068 기계적 진동 및 충격-구동점에서 인체 수완계의 기계적 자유 임피던스
- (5) ISO 8662-1~14 Hand-held portable power tools- Measurement of vibrations at the handle
- (6) 최석현 등, 2003, "수완계 진동 평가에 영향을 미

치는 작용력의 측정", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 1038~1042.

Table 1 Test results of simultaneous measurement of grip, feed force(N) and vibration magnitudes(m/s², r.m.s.) for six power tools

		작업	F _f	F _g	a _{hwz}	a _{hwy}	a _{hwz}	a _{hw}	평균	표준편차
일반드릴	1차	1	57.4	24.9	1.4	1.2	1.0	2.1	2.5	0.38
		2	24.6	41.1	2.0	1.6	1.1	2.8		
		3	35.5	42.3	1.9	1.4	1.3	2.7		
	2차	1	39.8	33.8	1.1	0.7	0.7	1.5	1.7	0.16
		2	39.4	35.0	1.2	1.0	1.0	1.8		
		3	37.6	34.7	1.1	1.0	1.0	1.8		
임팩트드릴	1차	1	76.4	68.2	1.5	1.7	1.1	2.5	3.2	0.68
		2	49.7	42.5	1.9	2.1	1.4	3.2		
		3	17.3	30.0	2.2	2.9	1.6	3.9		
	2차	1	50.2	51.4	1.6	1.9	1.6	2.9	3.3	0.32
		2	51.3	55.5	2.0	2.2	1.8	3.5		
		3	45.9	53.7	1.8	2.5	1.5	3.5		
디스크샌더	1차	1	5.9	40.9	4.6	6.4	7.5	10.8	8.0	3.02
		2	-5.6	63.3	3.2	6.9	3.2	8.2		
		3	-22.8	53.4	2.4	3.8	1.8	4.8		
	2차	1	2.4	46.6	3.2	6.4	3.5	7.9	6.9	1.57
		2	-3.4	47.9	2.5	4.0	2.1	5.1		
		3	2.9	47.0	2.4	5.2	5.2	7.7		
폴리셔	1차	1	9.1	65.9	1.4	2.2	2.1	3.3	3.1	0.36
		2	0.8	71.9	1.3	1.9	2.2	3.2		
		3	-15.2	72.0	0.8	1.8	1.8	2.7		
	2차	1	4.9	68.6	1.1	2.1	2.0	3.1	3.7	0.86
		2	-1.3	68.9	1.7	1.9	2.0	3.2		
		3	5.5	69.5	0.9	2.6	3.8	4.7		
4" 그라인더	1차	1	21.2	61.0	9.7	31.8	11.3	35.1	34.2	5.09
		2	17.6	42.1	6.3	25.8	10.9	28.7		
		3	35.6	57.9	5.3	34.2	17.4	38.8		
	2차	1	24.1	49.9	4.3	36.9	12.3	39.2	40.0	0.76
		2	24.8	49.2	5.3	38.5	11.9	40.7		
		3	23.1	47.6	4.2	36.6	15.8	40.1		
9" 그라인더	1차	1	-16.1	60.4	6.6	4.5	7.6	11.1	10.1	1.22
		2	-8.6	46.9	7.2	4.2	6.5	10.6		
		3	-1.8	41.2	6.4	3.8	4.5	8.8		
	2차	1	-10.1	47.7	7.6	4.2	7.5	11.5	10.6	0.85
		2	-13.7	43.4	7.9	3.1	5.0	9.9		
		3	-7.0	50.0	7.5	4.1	5.7	10.3		