

초정밀가공의 파상도 보정시스템에 관한 연구

김 정 두*

A Study on the Waviness Compensation System of Ultraprecision Machining

Jeong-Du Kim*

Abstract

Recently, precision machining technology has been developed continuously in order to make high productivity and quality assurance of the precision parts of several industrial fields. Waviness may occur on the surface of the machined parts due to the table motion error and the dynamic cutting mechanism between the tool and the workpiece. The waviness may fall off the form accuracy of the precision machine parts.

In the research, a micro cutting device with piezoelectric actuator has been developed to control precise depth of cut and compensate the waviness on the surface of the workpiece. Experiments have been carried out in the precision lathe. The characteristics of the surface profile and cause of the waviness profile have been analyzed and waviness profiles of some cause have been compared with those of experiments.

Keywords : Waviness Compensation(파상도 보정), Precision Machining(정밀가공), Face Cutting(단면 절삭), Piezo-Electric Micro Cutting Device(압전미세 절입장치)

1. 서 론

최근, 항공우주산업, 메카트로닉스 산업 등의 발달로 인해 정밀가공기계부품^(1,3)은 고부가가치 기술로써 매우 중요하게 인식되고 있으며^(1,2), 이러한 정밀가공을 위해 마이크로미터 이하의 안정적인 절삭깊이의 유지가 공작기

계의 성능으로 요구되고 있다. 그러나 공작기계 설계제작 시 여러 변수들로 인하여 설계되어진 대로의 성능을 이루지 못할 수가 있으며, 따라서 최적의 가공을 이루기 위해서는 이러한 문제를 보상하는 시스템이 필요하다. 공작기계를 사용할 때에 발생하는 가공오차는 일반적으로 치수오차, 형상오차, 표면거칠기 등으로 나타나며, 그 원인으

* 한국과학기술원(KAIST)

로는 공작기계 자체의 기하오차, 운동기구에 의한 오차, 가공프로세스에서 생기는 절삭력 및 열에 의한 오차, 그리고 환경 등이 있으며 공작기계, 공작물, 공구에 작용하고, 최종적으로 제작되는 공작물의 품질을 손상시킨다. 특히, 공작기계를 사용할 때에 발생하는 공작기계 테이블의 이송오차는 가공하고자하는 피삭재의 형상에 결정적인 영향을 미치게 된다. 이러한 테이블의 이송오차, 공구와 공작물의 상관관계 등으로 인하여 공작물의 단면에는 파상도(Waviness)가 생성이 되며 이러한 파상도는 정밀기계부품의 가공시에 공작물의 형상오차를 저하시키게 되어 제품의 품질을 떨어뜨리는 요인이 된다. 이와같이 발생하는 문제점은 공작기계 자체가 가지고 있는 고유의 테이블 이송오차, 주축의 회전특성 그리고 진동 등으로 인하여 발생하므로 가공조건의 변화로는 개선이 어려우며 따라서 공작물의 단면에 생성되는 파상도를 보정할 수 있는 이송제어를 이용하여 오차를 보정 및 제어하는 대책이 필요하게 된다. 이러한 이송제어는 크게 공작기계 자체의 이송을 이용하는 방법과 외부의 능동적인 미세이송장치⁽³⁾를 이용하는 방법으로 구분할 수가 있다. He-Ne레이저 인프로세스 측정시스템을 이용하여 선삭가공에서 공작물의 직경을 측정하면서 수치제어 콘트롤러에서 보정된 펄스 신호를 내보내어 공작기계 자체 테이블의 이송을 이용하여 직경변화의 오차를 보정하거나⁽⁴⁾, 공구의 열변위오차를 예측한 모델을 이용하여 공구 변위를 조절함으로써 선삭에서의 직경오차를 보정한 예⁽⁵⁾가 있다. 그러나 공작기계 자체의 이송테이블을 이용한 보정법은 공작물에 생성되는 파상도가 공작기계 최소 설정단위와 비슷하거나 그 이하일 경우에는 한계를 지니게 된다. 따라서, 본 연구에서는 압전소자를 이용한 미세절입장치의 기구를 모델링하고 정밀 평면가공시에 압전미세 절입장치의 공구의 변위와 절삭력과 관계를 정립함으로써 미세변위를 유지하는 시스템을 모델링하고 해석하였다. 해석결과 적절한 제어 이득이 존재함을 알 수 있으며 테이블 이송오차와 같은 외란이 절삭가공시스템에 들어와도 피드백 제어에 의하여 일정한 절삭력을 유지함으로써 이송오차에 의하여 피삭재의 표면에 발생하는 파상도를 보정할 수 있음을 알 수 있다.

2. 압전미세절입장치의 절삭력 모델링

압전미세절입장치를 수치제어선반에 장착하여 가공되는 피삭재의 파상도를 보정하는 시스템의 개략도를 나타내면 Fig.1과 같다.

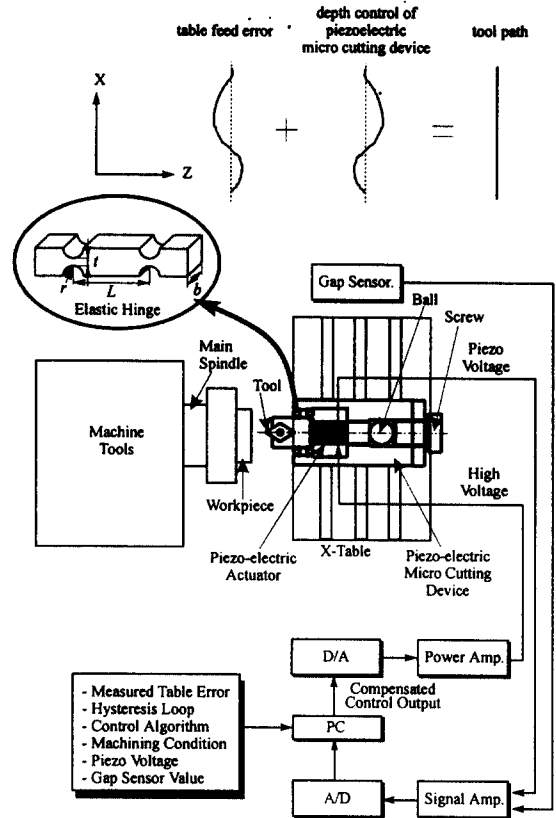


Fig. 1 Schematic diagram of waviness compensation system in precision machining using the piezo-electric micro cutting device

압전소자 시스템의 특성은 등가질량, 등가감쇄계수, 등가강성을 가진 시스템으로 모델링할 수 있으며^(6,9) 고 전압 증폭기와 개인용 컴퓨터에 의한 압전미세절입장치 제어기에 의하여 구동된다. 그림에서 보는 것처럼 압전소자의 변위는 압전미세절입장치의 탄성힌지에 의하여 구속되며 탄성힌지의 강성계수는 K_h 로서 다음 (1)식과 같다⁽¹⁰⁾.

$$K_h = \frac{8Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}L^2} \quad (1)$$

여기서, E는 Young's modulus, b는 힌지폭, t는 힌

지홀 사이두께, r 은 노취반경, L 은 힌지간격이다.

최종적으로 탄성힌지 끝부분에 있는 공구와 공작물과의 상대변위가 공작물의 표면거칠기 또는 파상도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이 때 절삭가공기구(Cutting mechanism)에 의한 수직절삭력 F_N 이 압전미세절입장치 시스템에 영향을 미치게 된다.

이상과 같은 압전미세절입장치에 의한 절삭시스템을 집중질량모델(Lumped mass model)로 나타내면 Fig. 2와 같다. 그림에서 보는 것처럼 압전소자에서의 변위를 u_P 라 하고 공구의 변위를 u_T 라 하면 2자유도계의 진동시스템으로 등가화 할 수 있다.

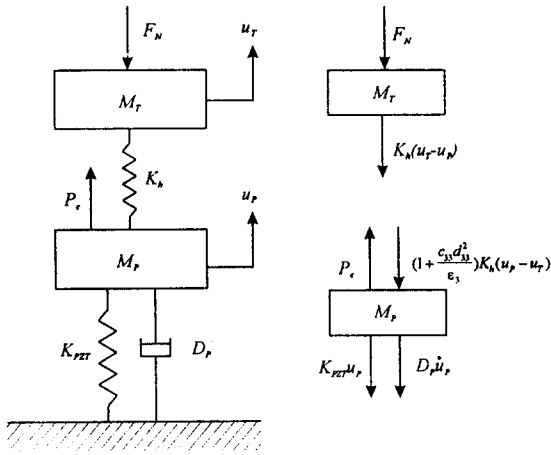


Fig. 2 Equivalent lumped mechanical model of waviness compensation machining system using the piezo-electric micro cutting device

압전소자는 기계적으로는 2차시스템으로, 전기적으로는 등가1차시스템으로 모델링할 수 있으며, 압전소자의 등가질량에 대하여 뉴턴의 운동방정식을 적용하여 힘의 평형방정식을 구하면 다음 식(2)와 같다.

$$M_P \ddot{u}_P + D_P \dot{u}_P + K_{PZT} u_P = P_e - (1 + \frac{C_{33}d_{33}^2}{\epsilon_3})K_h(u_P - u_T) \quad (2)$$

여기서, u_P 는 압전소자의 변위, M_P 는 압전소자의

등가질량, D_P 는 압전소자의 등가감쇠계수, K_{PZT} 는 압전소자의 등가강성계수, P_e 는 등가힘, d_{33} 는 압전소자 전하상수, C_{33} 는 압전소자 탄성계수, ϵ_3 는 압전소자 유전율, K_h 는 탄성힌지의 강성계수를 나타낸다. 여기서 P_e 는 압전소자에 인가되는 전압과 압전전압배환 등에 의하여 최종적으로 압전소자에 작용하는 전압에 의하여 발생하는 등가힘이며 우변의 두 번째항은 압전미세절입장치의 탄성힌지 부분이 압전소자를 구속하여 발생시키는 힘에 의한 영향으로 앞부분의 계수는 압전소자의 물리적 특성상 주어지는 것이다.

그리고, 위의 식을 라플라스 변환하면 다음 식(3)과 같이 된다.

$$(M_P s^2 + D_P s + K_{PZT}) U_P(s) = P_e(s) - (1 + \frac{C_{33}d_{33}^2}{\epsilon_3})K_h(U_P(s) - U_T(s)) \quad (3)$$

압전소자의 변위 u_P 는 등가힘 P_e 와 압전소자 변위와 공구의 변위차에 의하여 생성되는 탄성힌지의 탄성력의 합에 의하여 구해지며, 공구의 변위 u_T 는 압전소자의 변위와 공구변위 사이의 전달함수에 의하여 구해지는데 이 전달함수는 절삭력 모델과 관계가 있다. 공구부분의 등가질량에 대한 힘의 평형방정식을 구하면 다음 식(4)와 같다.

$$M_T \ddot{u}_T + K_h(u_T - u_P) = -F_N \quad (4)$$

여기에서 M_T 는 공구의 등가질량, F_N 은 절삭역학에 의하여 피삭재가 공구에 미치는 힘이다. 여기서 절삭력과 공구변위와의 관계에 대한 모델링이 필요하게 된다. Fig.3은 직선형 공구인전의 절삭력모델에 대한 개략도이다. 좌표계는 Fig.1에 나타낸 것과 같으며 Fig.3(a)는 정면도를 나타낸 것으로 절삭력 F_C 는 위에서 아래로 향하여 공구에 힘을 미치게 된다. Fig.3(b)는 우측 측면도를 나타낸 것으로 시편은 원형으로 실린더형인 것을 알 수 있다. Fig.3(c)는 위에서 바라본 평면도로서 절삭깊이 d_C 와 이송량 f 가 주어지고 공구의 기하학적인 형상각 β 가 주어지면 절삭면적은 절삭깊이와 이송량의 곱으로 나타나고 이러한 절삭면적에 의하여 발생하는 마찰력은 다음 식(5)와 같다⁽¹¹⁾.

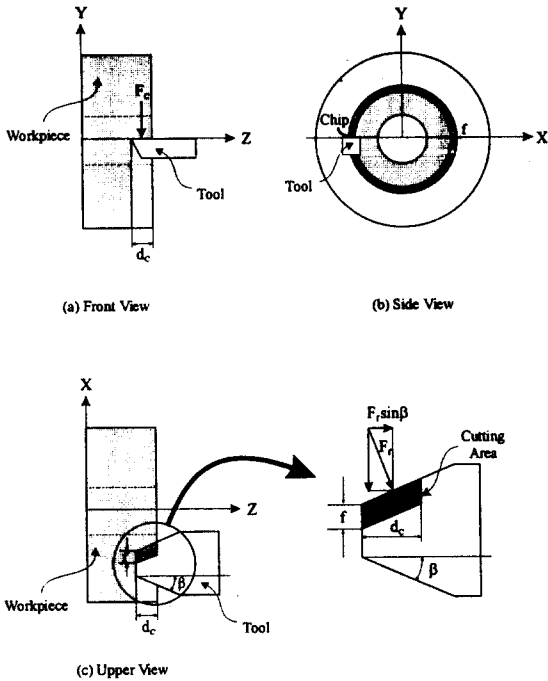


Fig. 3 Cutting Force Model of Straight Type Tool

$$F_f = \frac{C d_c f \cos 2\phi}{\sqrt{3} \sin^2 \phi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \right\}^n \quad (5)$$

여기서, d_c 는 절삭깊이이며 피삭재의 특성은 Ludwick의 구성방정식으로 나타내며 다음 식(6)과 같다.

$$\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}^n \quad (6)$$

여기서, C 는 재료의 비응력(specific stress)이며, n 은 변형을 경화지수(strain hardening exponent), $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률이다.

한편, 기하학적으로 공구상면경사각 α 는 0이므로 전단각은 다음 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$\tan \phi = \cos \frac{\alpha}{(t_c/d_c) - \sin \alpha} = \frac{d_c}{t_c} \quad (7)$$

여기서, ϕ 는 전단각(shear angle), α 는 공구상면경

사각(rake angle), t_c 는 칩두께(chip thickness)이다.

이상과 같이 절삭면적에 작용하는 마찰력을 구할 수 있으며 공구의 수직으로 작용하는 Z방향의 힘은 다음 식(8)과 같다.

$$F_N = F_f \sin \beta = \frac{C d_c f \sin \beta \cos 2\phi}{\sqrt{3} \sin^2 \phi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \right\}^n \quad (8)$$

여기서, 공구에 Z방향으로 작용하는 절삭력의 강성계수 K_T 를 다음 식(9)와 같이 정의하자.

$$K_T = \frac{C f_c \sin \beta \cos 2\phi}{\sqrt{3} \sin^2 \phi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \right\}^n \quad (9)$$

그리고, 공구의 변위가 그대로 절삭과정에 전사된다면 절삭깊이 d_c 는 공구의 변위 u_T 이므로 공구부분의 힘의 평형방정식인 식(4)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$M_T \ddot{u}_T + K_h(u_T - u_p) = -K_T u_T \quad (10)$$

위 식을 라플라스 변환하여 공구의 변위와 압전소자의 변위와의 전달함수를 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$U_T(s) = \frac{K_h}{M_T s^2 + K_h + K_T} U_P(s) \quad (11)$$

절삭력과 공구변위와의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$F_C = \frac{C d_c f}{n+1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \right\}^{n+1} + \frac{C d_c f \cos 2\phi}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \right\}^n \quad (12)$$

여기서, 공구에 수직으로 즉, Y방향으로 작용하는 절삭력의 강성계수를 K_C 라 하고 다음과 같이 정의하자.

$$K_C = \frac{C f}{n+1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \right\}^{n+1} + \frac{C f \cos 2\phi}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3} \sin \phi \cos \phi} \right\}^n \quad (13)$$

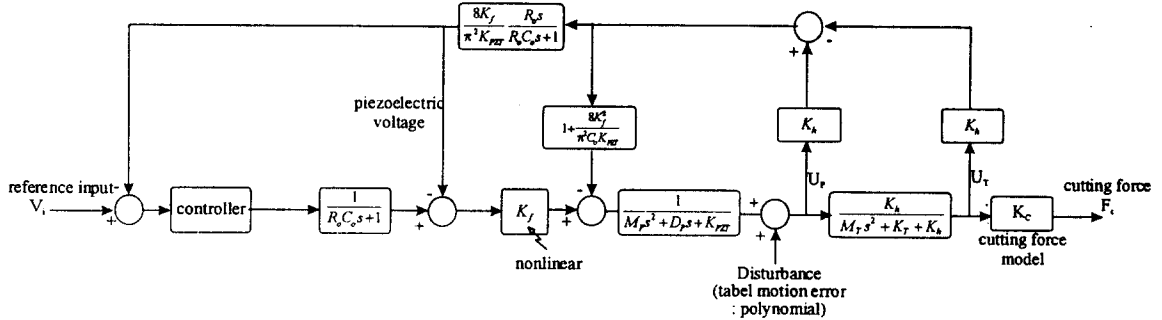


Fig. 4 Block diagram of waviness compensation system of precision machining by the piezoelectric micro cutting device

식 (12)와 (13)으로부터 공구의 변위와 절삭력과의 관계는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_C = K_C u_T \quad (14)$$

이상의 절삭력 모델링과 압전소자와 공구에 대한 힘의 평형방정식으로부터 최종적으로 압전미세절입장치에 의한 파상도 보정시스템의 블록선도를 그리면 Fig.4와 같다. 압전미세절입장치의 절삭력을 모델링하고 Fig.4의 블록선도를 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션하고 해석하였다. 시뮬레이션에 사용된 변수들의 값을 정리하면 Table1과 같다.

Table 1 Parameters of the waviness compensation system by the piezo-electric micro cutting device

Output impedance of high voltage amplifier, R_0	300(Ω)
Capacitance of piezoelectric actuator, C_0	6.5×10^{-9} (F)
Force constance by voltage, K_f	20.794(N/V)
Equivalent mass of piezoelectric actuator, M_T	0.0072(kg)
Equivalent damping constant of piezo actuator, D_p	20144(Nsec/m)
Equivalent stiffness of piezoelectric actuator, K_{TZT}	3.8×10^7 (N/m)
Specific stress of the workpiece, C	452×10^9 (N/m ²)
Strain hardening exponent, n	0.22
Shear angle, ϕ	26(deg.)
Feed rate, f	1×10^{-3} (m/rev)
Side edge angle of the tool, β	20(deg.)
Equivalent mass of tool, M_T	5(kg)
Elastic stiffness of hinge, K_h	30×10^9 (N/m)
Equivalent stiffness of cutting force, K_C	1033(N/m)
Equivalent stiffness of thrust force, K_T	311(N/m)

테이블 이송오차가 없는 이상적인 경우에 압전미세절입장치에 의하여 일정한 절삭깊이를 주어 피삭재를 가공하고 있는 중에는 Z축 방향으로의 절삭력은 일정하게 유지되지만 여기에 테이블의 Z축 방향으로의 이송오차가 있다면 이러한 이송오차는 절삭시스템에 Z축방향으로의 힘으로 작용하게 된다.

Fig.5는 용량형 간극센서로 측정한 테이블의 X축 이송오차를 나타낸 것으로 주어진 이송속도에 대하여 시간축에 대한 테이블의 이송오차를 8차 다항식으로 보간하여 보정실험 및 시뮬레이션에 이용하였다.

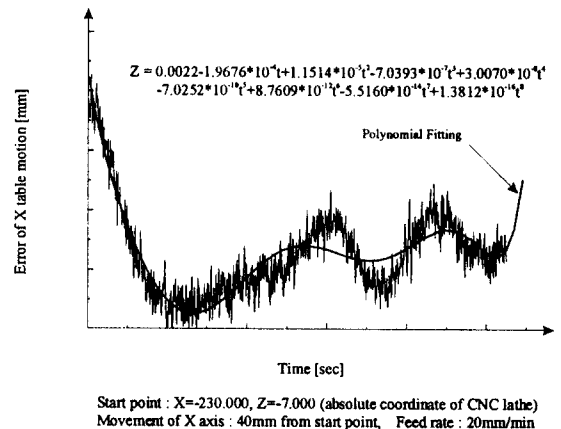


Fig. 5 Error of X table motion measured by capacitance type gap sensor

즉, 시간축에 대하여 테이블의 이송오차는 최대 2 μ m의 진폭을 가지고 있으며, 보간된 8차 다항식을 전체시스템의 블록선도에서 압전소자의 변위부분에 외란으로 추가하였다. 따라서, 적절한 제어가 이루어지지 않는 경우에는 이 외란이 Z축 방향으로의 공구변위와 절삭면적의 변화를 가져오므로 주절삭력의 변화가 나올 것으로 예측할 수 있다.

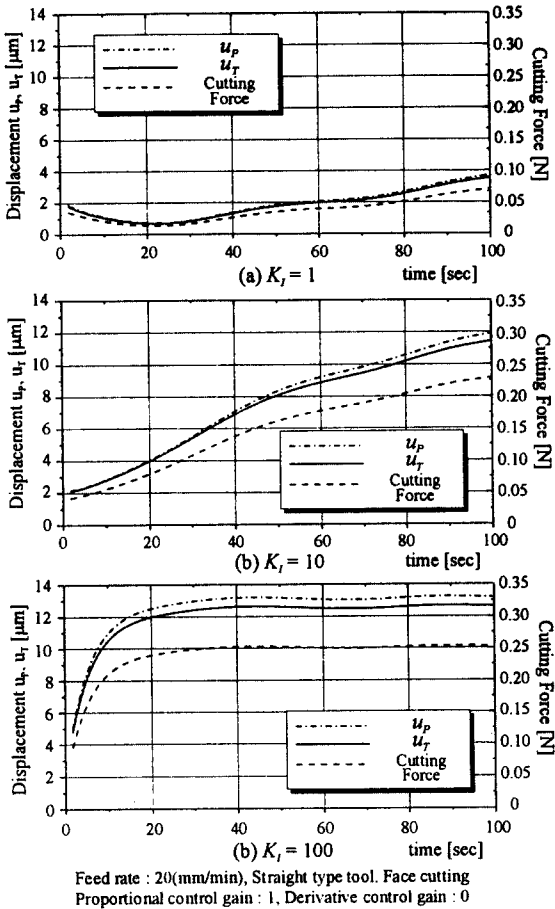


Fig. 6 Comparison of displacement and cutting force according to integral control gain, K_I

Fig.6은 적분제어이득이 1, 10, 100일 때의 압전소자 변위, 공구변위 그리고 주절삭력의 변화를 시간영역에서 나타낸 것으로 적분제어이득이 작을 경우에는 테이블 이송오차에 의한 영향이 그대로 나타나는 것을 볼 수 있으

며 따라서, 피삭재에도 테이블 이송오차에 의한 파상도가 그대로 전사되어질 것이다. 적분제어이득이 커지면 테이블의 이송오차를 극복하고 일정한 절삭깊이를 유지함을 알 수가 있으며, 따라서 테이블 이송오차는 상관없이 일정한 공구변위를 유지하여 절삭력의 변화가 일정함으로 공작물의 파상도를 보정할 수 있음을 알 수 있다. 적분제어 이득이 작으면, 상승시간도 느릴 뿐만 아니라 테이블 이송오차에 의한 절삭력의 변화가 그대로 나타남을 알 수 있으며, 적분제어 이득이 증가하면 상승시간도 줄어들고, 정상상태에서 일정한 절삭력을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

Fig.7은 압전소자가 힘을 받으면 발생하는 압전전압을 적분제어 이득의 변화에 대하여 나타내었다. 블록선도에서 압전전압은 압전소자 변위와 공구 변위의 차에 의해 영향을 받는 것으로, 적분제어 이득이 작으면 시간이 지날수록 그 차이가 커져 압전전압이 증가하는 것을 볼 수 있으며 적분제어 이득이 충분히 커서 일정한 절삭력이 유지되는 상태에서는 압전전압이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 따라서, 실제 파상도 보정가공시에 압전전압을 일정하게 유지되도록 절삭실험을 수행하여야 할 것이다.

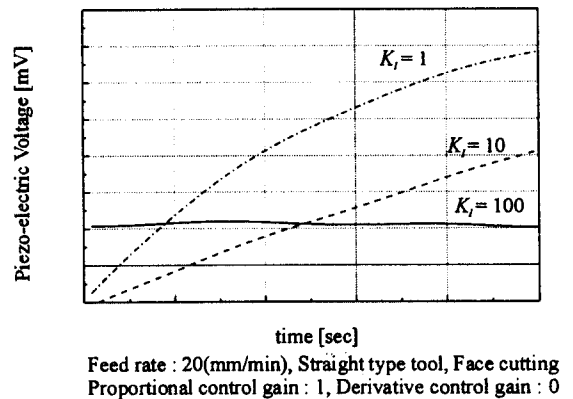


Fig. 7 Comparison of piezo-electric voltage according to integral control gain, K_I

3. 파상도 보정 실험

퍼스널 컴퓨터를 이용하여 압전전압, 미소이송시스템의 변위, 공작기계의 진동등의 신호를 모니터링하고, 인가전압의 형태를 조절하여 압전구동기를 가진시키거나, 압전

소자의 이력을 고려한 전압을 인가할 수 있도록 하였다. 압전 구동기의 드라이버 내부에는 고전압용 연산증폭기를 사용한 압전소자 구동용 전원과 압전전압 분리용 감산회로, 센서의 증폭기 등이 있으며 A/D, D/A 변환기를 통하여 컴퓨터와 접속되어 있다. 압전소자 구동전원으로부터 순수 압전 전압을 산출하기 위해 연산증폭기(Op-amp)의 차동감산 회로로부터 압전전압을 케환하는 회로를 구성하였다. Fig.1과 같은 시스템에서 먼저 용량형 간극센서를 이용하여 수치제어 선반의 X테이블의 이송오차를 측정하였으며 압전미세절입시스템의 압전전압을 케환하여 피드백 제어하여 압전소자의 이력곡선특성으로부터 적절한 출력전압을 내어 놓아 압전미세절입장치에 장착된 다이아몬드 공구의 Z방향으로의 변위는 평면절삭시 이송테이블의 오차 등에 의하여 외란이 들어와도 0이 되도록 하였다.

수치제어 선반에서 주속일정 제어를 이용하여 평면절삭을 수행하였으며, 피삭재의 표면에 생성된 파상도는 Rank Taylor Hobson사의 측정식 표면거칠기 측정기를 파상도(waviness) 측정모드에서 컷오프(cut-off) 2.5mm, 전체측정길이는 22.5mm, 이었다. 여기서, 표면 파상도의 형상과 평균파상도 W_a , 최대파상도 W_{max} , 부하곡선(bearing ratio), 밀도함수 등이 얻어지며 이로부터 피삭재 표면의 특성을 고찰할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

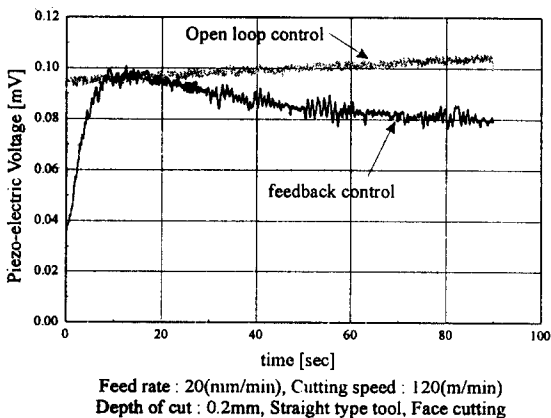


Fig. 8 Experimental results of piezo-electric voltage feedback control and open loop control

Fig.8은 수치제어 선반에서 평면절삭 가공시 압전미세절입 시스템을 이용하지 않고 단면가공을 한 경우와 압전미세절입시스템의 압전전압을 케환하여 테이블의 이송오차를 보상하여 단면가공을 한 경우의 압전전압의 변화를 나타낸 것이다. 이론적인 모델에서 압전전압을 케환할 경우에는 압전전압이 일정하게 유지되면서 절삭공정의 절삭력을 일정하게 유지시킴으로 표면의 파상도를 보정할 수 있음을 예측한 바와 같이 실험에서 나타난 압전전압도 케환을 하여 보정가공 수행시에는 일정하게 유지가 되지만 압전전압을 케환하지 않고 가공을 수행할 시에는 압전전압이 시간이 경과함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig.9는 절삭속도의 변화에 따른 피삭재 표면의 파상도의 형상을 나타낸 것이다. 표면의 특성중 고주파 성분인 표면거칠기가 제외된 저주파 성분인 표면의 파상도의 형상을 나타낸 것으로 압전전압 보정시스템을 사용하였을 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 절삭속도에 따라 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 파상도 보정시스템을 사용하지 않은 경우 표면의 최대 파상도는 2-3 μ m 정도이지만 파상도 보정시스템을 사용할 경우 표면의 파상도가 1 μ m 이내로 들어 오음을 알 수 있다.

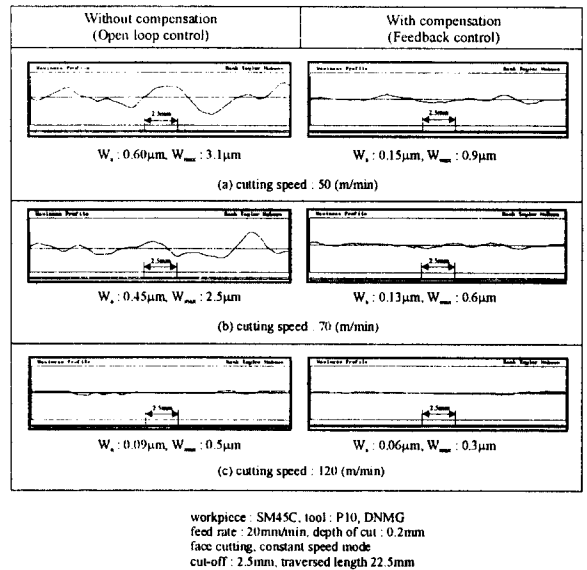


Fig. 9 Waviness profile without compensation and with compensation according to cutting velocity

표면의 최대파상도를 다시 정리하여 나타내면 Fig.10

과 같다. 절삭속도가 50m/min일 경우 압전미세절입 시스템을 이용하지 않으면 최대파상도의 크기는 3.1 μ m이며 압전미세절입 시스템을 이용하여 보정을 한 경우는 0.6 μ m로 파상도의 개선이 이루어졌으며, 절삭속도가 70m/min일 경우는 최대파상도가 2.5 μ m에서 0.6 μ m로, 절삭속도가 120m/min일 경우는 표면의 최대파상도가 0.5 μ m에서 0.3 μ m로 개선되었다. 파상도 보정시스템을 이용하지 않을 경우 절삭속도가 증가하면 안정적인 절삭이 이루어져 표면의 최대파상도가 줄어들었지만, 파상도 보정시스템을 이용할 경우에는 절삭속도의 변화에 크게 영향을 받지 않고 일정한 절삭성능이 나타남을 알 수 있다. 파상도의 보정이 완전하게 이루어지지않은 이유는 공구와 공작물의 열변위 등의 또다른 오차요인에 대하여 정확한 보상이 이루어지지 않았으며 또한 여러 원인에 의한 공작물과 공구와의 상대운동기구에 기인한 것으로 사료된다.

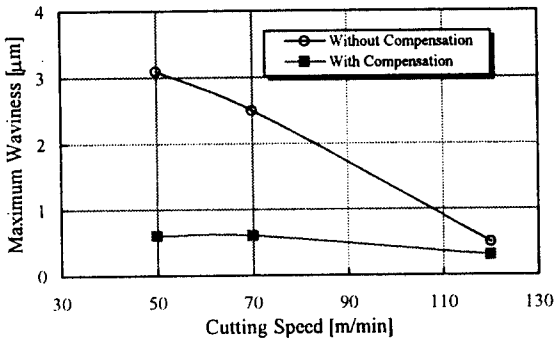


Fig. 10 Maximum waviness without compensation and with compensation according to cutting speed

5. 결론

압전미세절입장치를 개발하고 이를 이용하여 초정밀가공에서 피삭재에 생성되는 파상도를 보정하고 개선하는 연구를 수행하였다. 정밀 수치제어 선반의 테이블의 이송오차를 분석한 후 압전미세절입 시스템의 압전전압 제어를 이용하여 그 오차를 보정함으로써 공작물에 나타나는 파상도를 개선하는 실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 미세절입장치를 조절하고 안정적인 미세이송을 할 수

있는 압전미세절입장치를 개발하고, 압전미세절입장치의 압전전압 제환에 의한 파상도 보정가공을 수행하였다.

- 2) 압전미세절입장치에 의한 파상도 보정 가공시스템을 절삭기구를 도입하여 모델링하고 시뮬레이션하였으며, 테이블의 이송오차를 시스템에 외란으로 주었을 경우 적절한 제어이득을 사용하여 전체 압전미세절입장치에 의한 파상도보정 시스템의 절삭력을 일정하게 유지할 수 있음을 확인하였고, 따라서 테이블 이송오차에 의하여 나타나는 공작물의 파상도를 보정할 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 압전미세절입장치를 이용하여 테이블의 이송오차를 보정하여 단면가공을 수행한 결과 보정가공 수행전 2~3 μ m 파상도의 크기가 1 μ m이내로 개선되었다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Y.Furukawa and N.Moronuki, "Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Process", Annals of the CIRP, Vol.37, pp.113-116, 1988.
- (2) J.D.Kim and S.R.Nam, "Development of a Micro-Depth Control System for an Ultra-Precision Lathe using a Piezoelectric Actuator" International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.37, No, pp.495-509, 1997.
- (3) J.D.Kim and D.S.Kim, "Surface characteristics of magnetic-disk cutting using single-crystal diamond tool in an ultraprecision lathe", Journal of Materials Processing Technology, Vol.59, pp.303-308, 1994.
- (4) M.Shiraishi and K.Uehara, "In-Process Control of Workpiece Dimension in Turning", Annals of the CIRP, Vol.28, pp.333-337, 1979.

- (5) Y.Takeuchi, M.Sakamoto and K.Imura, "Development of Integrated Turning System with Predictive Compensatory Function for Machining Errors", Annals of the CIRP, Vol.34, pp.519-523, 1985.
- (6) Z.Zhong and T.Nakagawa, "Development of a Micro-Displacement Table for Ultra-Precision Machining and Grinding for Curved Surfaces by the Use of It", JSPE, Vol.26, No.2, pp.102-107, 1992.
- (7) H.S.Tzou, "Design of a Piezoelectric Exciter/Actuator for Micro- Displacement Control : Theory and Experiment", Precision Engineering, Vol.13, No.2, pp.104-110, 1991.
- (8) C.V.Newcomb, "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators", Electric Letters, Vol.82, No.11, pp442-444, 1982.
- (9) S.B.Jung, "Nonlinear Modeling for Positioning Uncertainty of Piezoelectric Actuators Driven by Voltage Input", Ph. D Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1993.
- (10) Y.Hara, "A New Micro_cutting Device with High Stiffness and Resolution", Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, pp375-388, 1990.
- (11) Dautzenberg,J.H., Veenstra,P.C. and Van der Wolf,A.C.H., "The Minimum Energy Principle for the Cutting Process in Theory and Experiment", Annals of the CIRP, Vol.30, pp.1-4, 1981.