

외란관측기를 이용한 CNC 공작기계의 절삭력 제어

Cutting Force Control of a CNC Machine using Disturbance Observer

°손주형*, 권동수**

* 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(Tel : 02-958-3457; E-mail : sohnjh@robot.kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 기계공학과(Tel : 042-869-3042; E-mail : kwon@automation.kaist.ac.kr)

Abstract : In recent manufacturing process, the increase of productivity is required by reducing machining time with the increase of cutting force. However, the excessive increase of cutting force can cause tool breakage, and have a bad effect on both the manufacturing machine and the workpiece. Thus, it is necessary to estimate and control cutting force in real time during the process. In this study, use of disturbance observer is proposed for the indirect cutting force estimation. The estimated cutting force is used for the real time control of feedrate, making the actual cutting force follow the reference force command. Since the suggested method does not need an expensive sensor like a dynamometer, the method is expected to be used practically. By reducing the machining time resulting from making the actual cutting force follow the reference force, the increase of productivity are also expected, and the quality of cutting surface has been improved due to the adjusted feedrate. Besides, an actual constant cutting force guarantees the prevention of tool breakage. To show the effectiveness of the suggested cutting force control method, an experimental setup has been made without the force sensor, applied to several workpieces. Experiments show that the suggested method is superior to the conventional method operated by constant feedrate.

Keywords : Disturbance Observer, Cutting Force Control

1. 서론

최근 급속히 보급되고 있는 CNC 공작기계는 기존 재래식 공작기계와 달리 생산성과 정밀도에 대한 신뢰를 높이고 있으며, 품질면이나 가공시 드는 비용면에서 좋은 결과를 보여주고 있다. 그러나, 기존의 재래식 공작기계에 비해 위와 같은 장점을 가지고 있는 CNC 공작기계도 아직까지는 생산성에 장애가 되는 요소들 가지고 있는 것이 사실이다. 일반적으로, CNC 공작기계는 대개 최악의 경우를 가정하여 작동되고 따라서 너무 적은 이송률과 주축의 속도가 설정되는 경우도 있어서 생산성의 저하를 가져온다. 그러므로, 생산성 향상을 위해 절삭공정시에 변화하는 파라미터에 따라 절삭력을 기준치에 추종하게 하고 이에 상응하는 이송률을 만드는 절삭공정의 구현이 필요한데, 이러한 절삭공정의 구현에 필요한 절삭력 측정법은 크게 공구동력계를 이용한 방법과 전류측정을 이용한 방법으로 나뉜다. Y.S.Tarn과 S.T.Cheng은 공구동력계에서 측정된 절삭력을 이용, 퍼지이론을 적용하여 절삭값이가 변하는 밀링공정에 대해 실제절삭력이 기준절삭력을 추종하도록 하는 방법을 제시하였다.^[1] L.K. Lauderbaugh와 A.G. Ulsoy는 공구동력계에서 측정된 절삭력을 바탕으로 한 밀링작업시의 모델참조적용제어기(Model Reference Adaptive Controller ; MRAC)를 제안하였다.^[2] M.A. Elbestawi와 R. Sagherian은 공구동력계와 절삭공정모델을 이용하여 절삭력을 측정, 이를 밀링작업에 적용하여 실제 절삭력이 기준 절삭력을 따라가도록 하였다.^[3] L. Liu와 Y. Mohamed, M.A. Elbestawi도 CNC 밀링가공에 공구동력계를 도입한 적용제어 알고리즘을 적용하였다.^[4] 그러나, 공구동력계의 사용은 연구의 차원에는 별 문제가 없으나 가격과 설치상의 문제, 가공물 형상 및 이송 스트로크의 제약 등으로 인하여 실용화의 측면에서는 많은 어려움이 따른다. J.M. Lee, D.K. Choi, J. Kim, C.N. Chu는 NC 밀링작업시에 교류 서보모터에 흐르는 전류를 측정하여 절삭력을 간접적으로 제어하여 공구 파손의 사전 방지를 제시하였다.^[5] J.W. Kim은 CNC 밀링공정에서 절삭시에 걸리는 전류를 측정하여 이송률을 조정, 실제 절삭력이 기준 절삭력을 추종하도록 하였다.^[6] Y. Altintas는 밀링공정에서 이송 드라이브 모터(feed drive motor)를 구동하기 위한 전류를 이용하여 간접적인 절삭력의 측정과 공구의 파손을 예측할 수 있다고 했다.^[8] 그러나, 전류측정을 이용한 방법에서는 모터의 가감속에 쓰이는 전류성분까지 절삭력으로 간주한다는 점 등으로 인해 정확한 절삭력 측정이 어렵게 된다. 따라서, 본 연구에서는 최악의 경우를 가정한 기존 일괄적 이송률 하의 가공공정보다 더 나은 생산성 추구를 위한 하나의 방편으로 외란관측기를 밀링 공정의 이송축 시스템에 적용하여 가공시의 절삭력을 외란으로 간주하는 절삭력 간접 측정 방법에 의한 고가의 센서를 필요로 하지 않는 절삭력 제어 시스템의 구현을 제시하고 제안된 절삭력 제어 시스템의 타당성을 보이고자 한다.

2. 외란관측기가 적용된 절삭력 제어 시스템

2.1. 절삭력 간접 측정을 위한 외란관측기의 구성

이송축 시스템의 속도와 외란으로 간주되는 절삭력을 상태변수로 놓고 입력을 전류로 놓은 상태에서 상태공간방정식을 작성하면 식 (1), (2)와 같다. 여기서 외란토크는 샘플링 주기에 비해 서서히 변하며 샘플링주기동안에 상수로 간주된다고 가정하였다. 한편, 식 (1), (2)에서 최소차수 외란관측기의 식을 식 (3), (4)의 형태로 유도할 수 있으며 유도된 식에 의한 블록 다이어그램은 그림 1과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K \\ J \end{pmatrix} u \quad \dots(1)$$

$$y = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad \dots(2)$$

(Where $x_1 = \hat{\theta}$, $x_2 = T_d$, and $u = i$)

$$\dot{\tilde{\eta}} = -g\tilde{\eta} + g^2 J_n \hat{\theta} + g K_n u \quad \dots(3)$$

$$\tilde{x}_b = \tilde{\eta} - g J_n \hat{\theta} \quad \dots(4)$$

(where $-g$ is an observer eigenvalue)

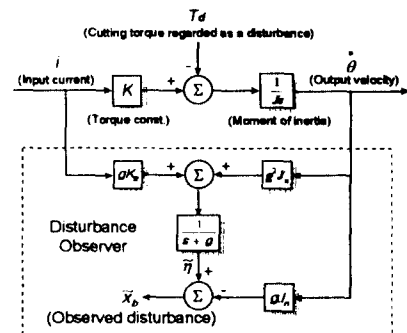


그림 1. 외란관측기를 이용한 외란의 추정
Fig. 1. Disturbance Estimation by Disturbance Observer

2.2. 이송축 시스템에 대한 외란관측기의 적용

절삭력 측정 시스템을 구성할 때 중요한 점은 기존 공작기계의 구조를 크게 바꾸지 않고 절삭력 감지 시스템을 구성할 수 있어야 한다는 것이다. 만일 기존에 상용화된 공작기계의 구조변경이 필요하거나 부가적 장치가 요구되면 경제적 측면에서의 타당성이 떨어진다. 본 연구에서는 제어를 통해 프로그래밍이 가능한 이송축 시스템에 외란관측기를 적용함으로써 기존 공작기계의 구조를

바꾸거나 부가적인 장치를 쓰지 않았다. 이송축 시스템에 외란관측기를 적용한 이유는 밀링공정에서 공구에 걸리는 힘의 방향이 주축회전방향과 직각이 되는 이송축 시스템이 움직여서 생겨나는 방향이기 때문이다.

2.2.1. 모델링 오차로 인한 외란

이송축 시스템에 외란관측기를 적용해서 측정한 출력은 순수한 절삭력과 모델링 오차에 의한 외란, 그리고 동력전달장치의 점성 마찰에 의한 외란의 합으로 이루어진다. 마찰의 영향을 무시한다는 가정 하에서^[7] 외란관측기의 신호는 순수한 절삭력과 모델링 오차에 의한 외란의 합이 된다. 따라서, 외란관측기의 출력에서 순수한 절삭력만을 얻으려면 가능한 한 모델링 오차를 줄여야 한다. 식 (3)과 (4)의 외란관측기의 파라미터 중 모델링 토크상수를 정확히 알고 관성모멘트의 모델링 파라미터를 정확히 모른다고 가정하면 $K_n=K$, $J_n=J+\Delta J$ 로 놓을 수 있으며, (ΔJ : 모델링 오차) 식 (5), (6)과 같이 기술된다.

$$\ddot{\eta} = -g\ddot{\eta} + g^T(J + \Delta J)\dot{\theta} + gK \cdot u \quad \dots(5)$$

$$\ddot{x}_b = \ddot{\eta} - g(J + \Delta J)\dot{\theta} \quad \dots(6)$$

식 (5), (6)에 라플라스변환을 적용하고 시간영역에서 \ddot{x}_b 에 관해 정리한 뒤 마찰의 영향을 무시한다는 가정 하에 ΔJ 에 관한 항과 그렇지 않은 항으로 분류하여 정리하면 식 (7), (8), (9)와 같다. (\otimes : 쾨벨루션) 그리고, \ddot{x}_{b1} 은 추정된 외란 중 순수 외란을 가리키며 \ddot{x}_{b2} 는 모델링 오차에 의해 생긴 항을 가리킨다.

$$\ddot{x}_b = \ddot{x}_{b1} + \ddot{x}_{b2} \quad \dots(7)$$

$$\ddot{x}_{b1} = g^T J (e^{-s^t} \otimes \dot{\theta}) + gK (e^{-s^t} \otimes u) - gJ\dot{\theta} \quad \dots(8)$$

$$\ddot{x}_{b2} = g^T \Delta J (e^{-s^t} \otimes \dot{\theta}) - g\Delta J\dot{\theta} \quad \dots(9)$$

식 (9)와 같이, 모델링 오차에 의한 부분이 외란관측기의 고유치가 일정하다는 조건 하에서는 속도값에만 연관이 있음을 알 수 있다. 따라서, 외란관측기에서 추출된 신호 중 모델링 오차로 인한 부분을 정확히 분리하는 것이 어렵게 된다. 그림 2, 3은 같은 모델링 오차에 대해 속도지령이 달라짐에 따라 모델링 오차로 인한 외란 추정이 달라진다는 것을 보여주기 위해 입력이 각각 10rad/sec의 크기를 가진 사인파와 구형파인 경우에 모델링 오차가 $\Delta J=J(J_n=2J)$, $\Delta J=-0.5J(J_n=0.5J)$ 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다.

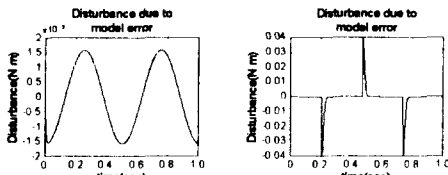


그림 2. $J_n=2J$ 일때의 모델링 오차에 의한 외란
Fig. 2. Disturbance due to Model Error ($J_n=2J$)

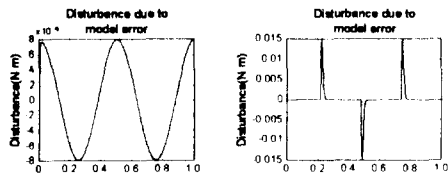


그림 3. $J_n=0.5J$ 일때의 모델링 오차에 의한 외란
Fig. 3. Disturbance due to Model Error ($J_n=0.5J$)

2.2.2. 순환최소자승법에 의한 모델링 파라미터의 추정

본 논문에서 대상이 되는 이송축 시스템은 그림 4에서와 같이 Z축의 수직 링크와 모터 베이스, 스피들 모터의 조합이 Y축 볼스크류와 모터에 결합되어 있는 것이다. 위의 단락에서 언급된 바와 같이, 모델링 오차로 인한 영향을 최소화시키면서 이들 질량이 이루는 동가의 관성모멘트를 구하는 것이 외란관측기의 정확한 신호추정에 결정적 역할을 하게 된다. 여기서는 이송축 모터의 동가 관성모멘트를 구하기 위해 순환최소자승법을 이용하였다.^[8] 여기서는 서보모터의 이산시간모델을 이용하여 이송축 시스템의 동

가 관성모멘트를 구하고자 한다. 이 모델은 식 (10), (11)과 같이 설정가능하며 (10)-(11)을 하면 (12)를 얻는다.

$$J \cdot \alpha[m] = K \cdot i[m] + T_d[m] \quad \dots(10)$$

$$J \cdot \alpha[m-1] = K \cdot i[m-1] + T_d[m-1] \quad \dots(11)$$

$$J \cdot \Delta \alpha[m] = K \cdot \Delta i[m] + \Delta T_d[m] \quad \dots(12)$$

(Where α is an angular acceleration)

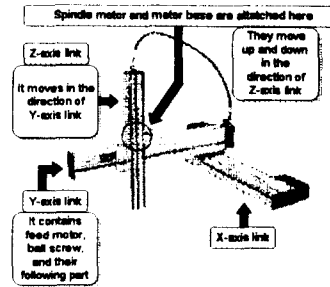


그림 4. 각 링크에 대한 설명
Fig. 4. Explanation of the Links of the Robot

외란 T_d 가 한 샘플링주기동안에 서서히 변한다고 가정하면 ΔT_d 를 랜덤 노이즈로 볼 수 있다. 이제 식 (12)에서 순환최소자승법을 이용하여 관성모멘트를 구한다. 먼저, 최소화시킬 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

$$f(J) = \sum_{m=1}^M \lambda^{M-m} (J \cdot \Delta \alpha[m] - K \cdot \Delta i[m])^2 \quad \dots(13)$$

식 (13)에서의 λ 는 망각지수이며, 0에서 1사이의 값을 갖는다.^{[8],[9]} 망각지수란 순환최소자승법에서 계산되어진 이전 값보다 이후에 계산되는 나중 값에 가중치를 두기 위해 도입되는 지수이다. 망각지수의 선택은 시간에 따라 변화하는 파라미터를 추종하는 능력과 파라미터 변화시에 발생하는 노이즈에 대한 민감도 사이에서 트레이드 오프에 의해 시행착오를 거쳐 결정되는 것이 일반적이다. 한편, 식 (13)의 목적함수를 최소화하는 J 의 추정치 \hat{J} 을 구하기 위한 순환추정식은 식 (14)와 (15)에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$P[m] = \frac{P[m-1]}{\lambda + P[m-1](\Delta \alpha[m])^2} \quad \dots(14)$$

$$\hat{J}[m] = \hat{J}[m-1] - \frac{P[m-1]\Delta \alpha[m]}{\lambda + P[m-1](\Delta \alpha[m])^2} (\hat{J}[m-1]\Delta \alpha[m] - K \cdot \Delta i[m]) \quad \dots(15)$$

관성 모멘트 추정 알고리즘에서 식 (12)는 차분식을 씬으로써 샘플링 주기에 비하여 느리게 변화하는 외란의 영향을 억제할 수 있고, 순환최소자승에 의한 추정방법을 씬으로써 잔류가능한 랜덤 노이즈의 영향을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 추정식을 계산하기 위해 모터의 가속도의 차분까지 이용하므로 측정 오차로 인한 잡음에 민감하다는 단점이 있음을 알 수 있다. 따라서, 이러한 방법을 관성모멘트의 추정에 적용할 때는 모터의 속도 변화를 일정하게 한 상태에서 행함이 유리함을 알 수 있다. 순환최소자승법을 CNC 제어기에 적용하여 이송축 시스템의 동가 관성모멘트를 구함과 동시에 시뮬레이션을 수행하였다. 모터의 속도로는 CNC 제어기 내에 내장되어 있는 사인파를 할당하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 시뮬레이션과 실험이 거의 일치함을 보임과 동시에 추정되는 관성모멘트가 일정한 값에 수렴하는 현상을 보여주고 있다. 사인파를 준 이유는 가속도의 급격한 변화로 인한 충격을 로봇에 발생시키지 않기 위함이다.

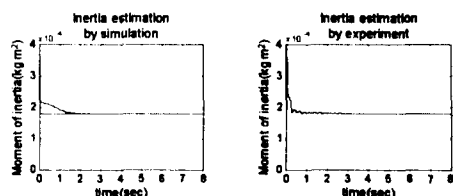


그림 5. 이송축 시스템의 동가 관성모멘트 획득
Fig. 5. Equivalent Inertia Moment of Feed System

3. 절삭력 제어 시뮬레이션

그림 6은 이송축 시스템에 외란관측기를 적용한 절삭력 제어 시스템 블록 다이어그램이다. 이 블록 다이어그램에 의한 절삭력 제어 시뮬레이션을 절삭 깊이가 변화하는 경우와 재질이 변화하는 경우의 두 가지에 대해 수행하였으며 기준 절삭력에 실제 절삭력이 추종하기 위한 이송률의 변화를 관찰할 수 있다.

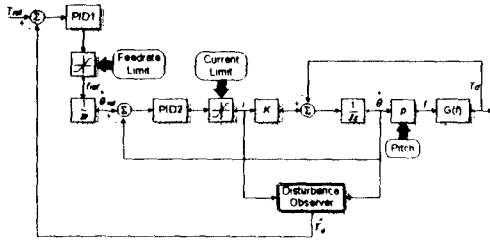


그림 6. 외란관측기를 사용한 절삭력 제어 시스템
Fig. 6. Disturbance Observer-based Cutting Force Control System

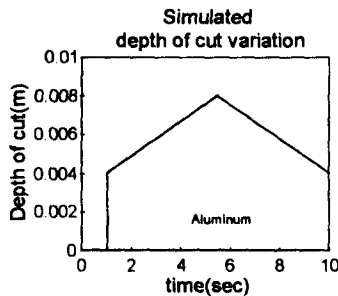


그림 7. 절삭 깊이 변화에 대한 시뮬레이션 데이터
Fig. 7. Simulation Data for Depth of Cut Variation

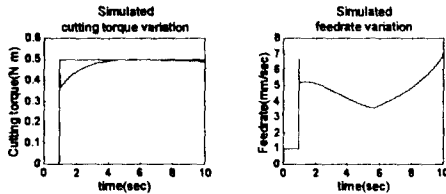


그림 8. 절삭 깊이 변화에 대한 절삭력 제어 시뮬레이션
Fig. 8. Cutting Force Control Simulation for Depth of Cut Variation

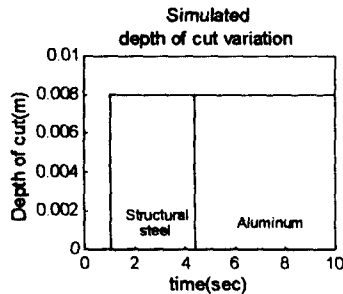


그림 9. 재질 변화에 대한 시뮬레이션 데이터
Fig. 9. Simulation Data for Material Property Variation

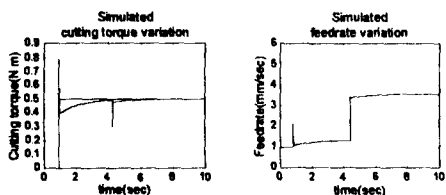


그림 10. 재질 변화에 대한 절삭력 제어 시뮬레이션
Fig. 10. Cutting Force Control Simulation for Material Property Variation

4. 실험장치의 구성

그림 11과 12는 기존의 시스템에 부가적인 장치 및 다른 구조변경을 필요로 하지 않으면서 동시에 고가의 센서가 필요없는 외란관측기를 이용한 절삭력 제어 시스템을 실제 절삭공정에 적용하기 위한 실험장치의 구성도와 사진이다.

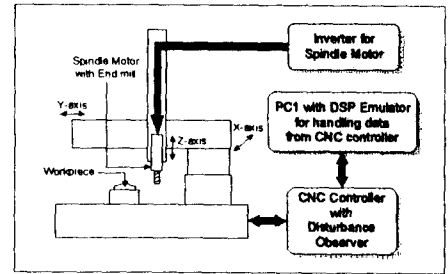
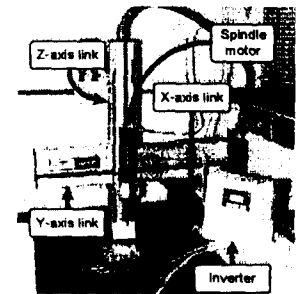
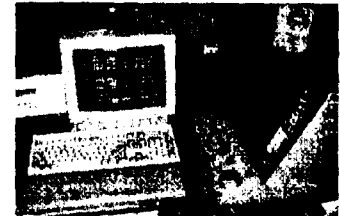


그림 11. 실험장치 구성도
Fig. 11. Experimental Setup



(a) 로봇, 스핀들 모터 및 인버터
(a) Robot, Spindle Motor, and Inverter



(b) CNC 제어기
(b) CNC Controller

그림 12. 실험장치 구성 사진
Fig. 12. Photo of Experimental Setup

5. 절삭력 제어 실험 및 결론

제안된 절삭력 제어 시스템의 성능 확인을 위해 Y축 단일 이송에 대해 절삭력 제어 실험 및 기존의 일반적인 이송률 하에서의 공정을 수행하였다. 공구는 $\phi 10$ 의 절삭선선이 두개인 엔드밀을 사용하였고, 주축회전수는 900rpm, 기준 절삭력은 0.1N·m으로 설정했으며 가공소재는 로봇의 강성을 고려하여 아크릴을 사용하였다. 가공대상을 아크릴로 사용했음에도 불구하고 실험 결과에서의 절삭력과 이송률의 진동을 발견할 수 있는데 이는 사용된 실험장치의 한계에서 기인한다. 기존 방식에서 주어지는 일반적인 이송률은 최대 절삭깊이에서 기준 절삭력 0.1N·m가 나오는 이송률로 정하였다. 계단형 및 지붕형 시편을 대상으로 한 절삭력 제어 실험의 경우에는 기준 절삭력에 실제 절삭력이 추종하기 위한 이송률의 변화와 이에 따른 가공시간의 단축이 관찰된다. 계단형 시편을 대상으로 한 절삭력 제어 하에서의 가공 시간은 18.8초로써 기존의 일반적인 이송률 하에서의 가공 시간인 21.2초보다 대략 11.3%의 가공시간이 단축되었고, 지붕형 시편을 대상으로 한 절삭력 제어에서의 가공시간은 19.0초이며 일반적인 이송률 하에서의 가공시간인 22.8초보다 16.7%의 가공시간을 단축하였다.

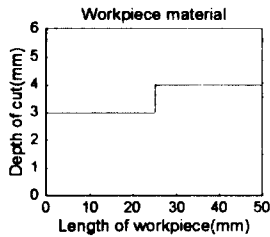
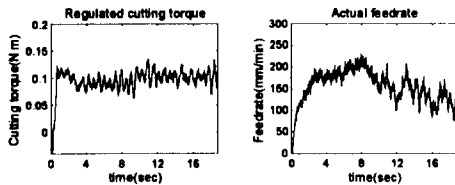
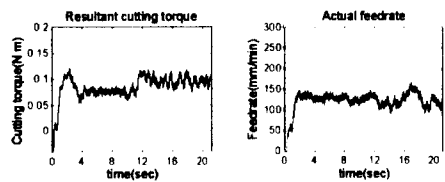


그림 13. 계단형 실험 시편
Fig. 13. Workpiece Material(1)



(a) 절삭력 제어에 의한 가공공정 실험(1)
(a) Cutting Force Control Experiment(1)



(b) 고정된 이송률 하에서의 가공공정 실험(1)
(b) Experiment under Constant Feedrate(1)

그림 14. 계단형 재료에 대한 절삭력 제어 실험
Fig. 14. Cutting Force Control Experiment with Workpiece Material(1)

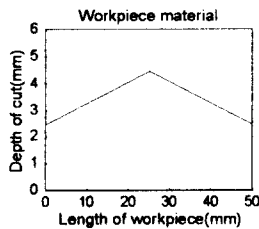
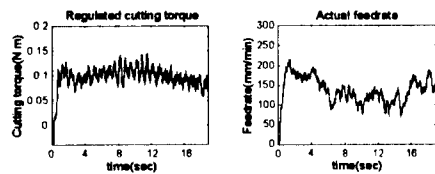
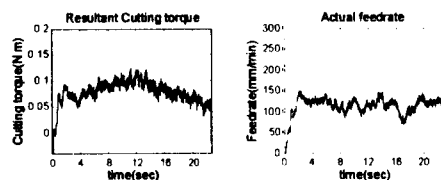


그림 15. 지붕형 실험 시편
Fig. 15. Workpiece Material(2)



(a) 절삭력 제어에 의한 가공공정 실험(2)
(a) Cutting Force Control Experiment(2)



(b) 고정된 이송률 하에서의 가공공정 실험(2)
(b) Experiment under Constant Feedrate(2)

그림 16. 지붕형 재료에 대한 절삭력 제어 실험
Fig. 16. Cutting Force Control Experiment with Workpiece Material(2)

본 장에서는 외란관측기를 이용한 절삭력 제어 시스템에 대해 계단형 절삭깊이의 시편과 지붕형 절삭깊이의 시편 두 가지를 대상으로 실험을 수행함과 동시에 같은 시편으로 기존의 일괄적인 이송률 하에서의 가공을 수행하였다. 실험을 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 기존 CNC 공작기계의 구조변경 또는 부가적 장치 없이 제어기 내부에 소프트웨어로 구현된 외란관측기에 의해 절삭력을 간접 측정, 이를 이송률의 온라인 조정에 이용하여 공구동력계와 같은 고가의 센서를 사용하지 않고도 절삭력 제어 시스템을 구현할 수 있었다.

둘째, 기존의 최악의 경우를 가정한 일괄적인 이송률 하에서의 가공 공정에서 걸리는 시간보다 짧은 시간 안에 가공을 수행함으로써 인하여 가공 시간의 단축을 통한 생산성 향상의 가능성을 보였다.

셋째, 절삭력 제어를 통하여 가공 도중에 기존 절삭력에 실제 절삭력이 추종하도록 절삭력을 일정하게 유지시켜 공구에 걸리는 급작스런 힘의 변화를 방지함으로써 공구 파손의 사전 방지에 대한 가능성을 보였다. 실제로, 가공 도중에 일어나는 공구의 파손은 공작기계뿐만이 아닌 공작물에도 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 절삭력 제어를 통해 얻을 수 있는 위와 같은 장점은 무척 중요하다.

참고 문헌

- [1] Y.S. Tarn, and S.T. Cheng, "Fuzzy Control of Feed Rate in End Milling Operations", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.33, No.4, pp.643-650, 1993.
- [2] L.K. Lauderbaugh, A.G. Ulsoy, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling", *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol.111, pp.13-21, 1989.
- [3] M.A. Elbestawi, R.Sagherian, "Parameter Adaptive Control in Peripheral Milling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol.27, No.3, pp.399-414, 1987.
- [4] L. Liu, Y. Mohamed, M.A. Elbestawi, "Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining", *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and control*, Vol.112, pp.611-617, 1990.
- [5] Lee, D.K. Choi, J. Kim, and C.N. Chu, "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process", *Annals of the CIRP*, Vol.44, pp.59-62, Jan.1995.
- [6] Kim Jong-Won, "Adaptive Cutting Force Controller for Milling Processes by Using AC Servodrive Current Measurements", *Proc. of the 11th KACC*, pp.840-843, Oct.1996.
- [7] Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol.114, pp.386-392, 1992.
- [8] Yoichi Hori, "Robust and Adaptive Control of a Servomotor using Low Precision Shaft Encoder", *IEEE IECON'93*, Nov. 15-19, 1993.
- [9] Rolf Johansson, "System Modeling & Identification", Prentice-Hall International.