

보상 제어의 정밀공학에의 응용

文 義 俊

<홍릉기계공업회사>

Key Words; 보상제어, 시계열해석, CAM, 정밀가공, 스톱캐스틱제어

1. 서 론

가공물의 높은 정밀도는 부품의 호환성, 긴 수명, 미소화, 더 높은 성능등을 줌으로써 생산성을 높여준다. 그러나 기계가공 작업의 가공 오차는 불완전한 동작기계 자체 뿐만 아니라 작업의 환경, 작업 조건, 가공물의 형상과 크기 등 여러 가지 원인에 의해서 유발되며 따라서 기계가공 정밀도 향상이란 문제는 복잡성과 가변성을 지닌다.

기계가공 정밀도의 향상에는 크게 두가지 접근 방법이 있다. 그 첫째로는 설계와 제작 기술을 사용하여 동작기계자체의 정밀도를 높이는 방법이며 두번째는 제어 기술을 사용하여 오차를 보상하여 줌으로써 정밀도를 높이는 방법이다. 일반적으로 보상에 의하여 오차를 상쇄시키는 방법보다는 동작기계 혹은 그 환경을 개선시켜 오차의 근본 원인 자체를 제거하는 첫번째의 방법이 바람직한 일차적인 접근 방법이다. 종종 높은 열적 및 구조적 안정성, Abbé의 법칙, kinematic 설계 등의 기본적인 법칙들⁽¹⁾을 따른 사려깊은 설계로 별다른 비용의 증가 없이도 동작기계의 정밀도를 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 오늘날의 고도로 발달된 정밀 공학 기술에도 불구하고 단지 제작이나 설계 기술만으로 달성할 수 있는 정밀도에의 한계가 있다. 또한 어

느선 이상의 정밀도에서는 동작기계의 구조나 그 작업을 개선하는 것이 때때로 상당히 비싸며, 요구되는 정밀도가 높아짐에 따라 그 비용이 기하급수적으로 높아진다.

최근의 높은 생산성을 향한 NC 혹은 CNC 동작기계를 이용한 기계가공의 자동화 및 작업 공간 내부에서의 오차측정이라는 시대적 조류와 함께, 기계가공 오차의 보상 제어, 혹은 형상 및 치수의 적응 제어(Geometric Adaptive Control, GAC)는 이미 여러 선진국가에서 주목을 받아 왔고⁽²⁾⁽³⁾, 병기 공학을 포함한 여러 분야에서 정밀도의 향상에 대한 요구는 높아만 가고 있어 이 방향에 대한 지속적인 연구가 요망된다. 더군다나 전자 및 광전자적인 계측 제어 기구의 발달과, 저렴하고 높은 성능의 마이크로 컴퓨터의 등장으로 GAC를 통한 정밀도 향상은 더욱 가능하여졌다.

2. 가공 정밀도의 보상 제어

가공물의 치수, 형상 및 표면조도를 요구되는 오차의 범위 이내로 유지하기 위한 보상 제어에는 여러가지 접근 방식이 있다. 가공오차를 보상하기 위해서는 그 크기가 직접 혹은 간접적인 측정을 통해 구해져야 한다. 이 오차를 구하는 방식에 따라 사전보정(precalibrated) 오차보상과 능동(active) 오차 보상의 두 방법으로 나

눌 수 있다⁽⁴⁾.

2.1. Precalibrated 보상 제어

이 방식에 의하면 절삭가공 오차를 가공 절삭전이나 시험 절삭(test cut) 후에 측정 한 후, 그 측정에서 구해진 오차만큼 다음 절삭 가공시 부터 보상한다. 이 경우, 오차와 측정시스템 모두 반복성을 가진다고 가정된다. 오차의 측정이 절삭 가공 전, 가공 후 혹은 중간 단계이냐에 따라 다음과 같이 나누어 진다.

- 전작업(pre-process) 측정
- 후작업(post-process) 측정
- 단속작업(intermittent-process) 측정

전작업 측정과 후작업 측정에 의한 오차 보상은 가장 오래된 오차 보상 기술들로 비교적 간단하나 적용의 범위가 제한되어 있다. 가공물을 가공 공간으로부터 측정실로 이동시켜야 하므로 긴 비생산 시간이 요구되는 후작업 측정의 단점을 없애기 위하여 단속작업 측정에서는 기계 가공 공간내에서 오차를 측정한다. 이의 관건은 공구를 전자 게이지로 내치 시킴으로써 동작기계를 3차원 측정기계로 변환시키는데 있다.

2.2. 능동 보상 제어

능동 보상 제어에서는 가공 오차의 측정 및 제어가 가공중에 동시에 행해진다. 그러므로 반복 뿐만아니라 비반복 오차도 보상 될 수 있다. 능동 오차 보상을 위한 오차 측정 방법에는 수학적 모델을 이용한 오차의 간접 측정 방법과 in-process 측정에 의한 방법의 두가지가 있을 수 있다.

수학적인 모델에 의한 능동 오차 보상 방법은 가공 오차를 직접 in-process 로 측정하기는 어렵고 온도 혹은 절삭력 등 다른 변수의 측정이 용이할 경우에, 그들 변수와 오차간의 원인과 결과 관계를 나타내는 수학적 모델을 통하여 오차를 산출, 보상하는 방법이다. 이 방법은 계측시스템의 반복성 외에 수학적인 모델의 높은 정확도를 요구한다. 간략화된 유한요소법, 유한차등법 등의 방법들이 동작기계 혹은 가공물의

열적 및 구조적 거동을 예측하기 위하여 사용될 수 있으나, 결합 조인트, 가이드 웨이 그리고 베어링 등의 열전달, 정적 및 동적 거동을 정확히 예측하는데에 여전히 문제가 있다.

직접적인 in-process 측정에 의한 능동 오차 보상 방법은 단지 계측시스템의 반복정밀도(repeatability)에만 의존한다. 이 방법은 최근에 적용되기 시작했으며 가장 포괄적인 정밀도 향상 방법중의 하나이다. 그러나 실제적으로, in-process 측정과 관련하여, 종종 적당한 계측케이지가 없다는 점과 게이지의 절삭 지점에의 비접근성 문제로 인하여 적용이 어렵다. 특히 형상 정밀도 제어를 위해서는 동작기계의 독립된, 측정을 위한 기준선 시스템이 필요하다.

다음장에서는 오늘날 급속히 발전하는 광전자 계측장치 및 여러 방면의 노력에 의해 in-process 계측 문제가 가까운 장래에 극복되리라는 기대와 함께 능동 보상 제어에 적절한 제어 알고리즘을 소개한다.

3. 예측 보상 제어

앞에서도 언급된 바와 같이 가공 정상 작업의 정밀도는 여러가지 인자들의 복합된 영향을 받으며, 그에 대한 정량적인 해석이 어렵다. 이러한 불규칙적인 현상을 확률적인 시계열(time series) 모델링^(5,6) 혹은 스토케스틱 제어⁽⁷⁾ 이론을 써서 보다 쉽게 모델을 얻고 또한 제어를 할 수 있다. 이들을 이용한 보상 제어는 통계적인 모델링 특성과 그 모델로부터의 최적 예측을 얻을 수 있다는 특장을 가진다. 시계열의 확률적인 모델링을 통하여, 여러가지 오차 및 그 원인들 사이의 복잡한 관계식을 구할 필요없이 반복 및 비반복 오차의 특성을 간단한 구조를 가진 Autoregressive (AR) 혹은 Autoregressive Moving-Average (ARMA) 모델로 나타낼 수 있다. 또한 최적 예측을 통하여 제어시스템에서 불가피한 측정, 계산 및 구동에 필요한 시간지연을 보상해 줄 수 있다.

예측 보상 제어(Forecasting Compensatory

Control)시스템은 전형적인 피드백 제어 시스템과 같은 구조를 가진다(그림 1). 다만 측정치가 시간(혹은 공간) 지연된 측정치 일 수도 있으며 귀환 신호가 측정된 신호가 아닌 예측된 신호라는 점이 다르다. 전체 시스템은 in-process 측정 장치, 디지털 제어기 및 구동시스템으로 구성되어진다. 구동 시스템은 공구 운반대, 공작기계의 베드등, 공구와 가공물의 상대적인 위

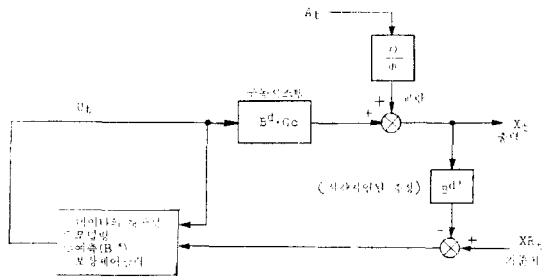


그림 1 예측 보상 제어 시스템의 블록 선도

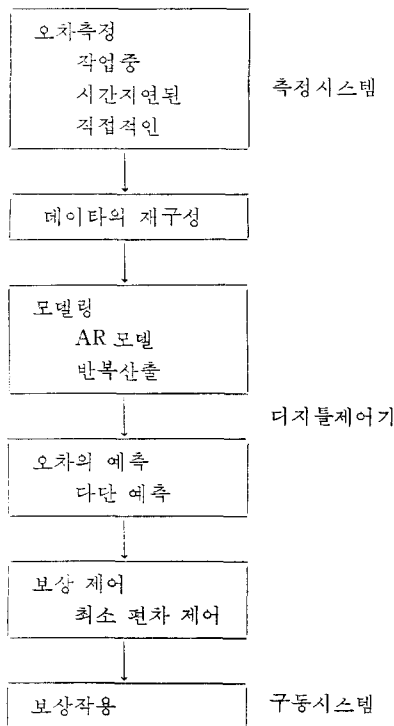


그림 2 제어 유통도

치를 변화시켜 줄 수 있는 시스템이다. 그림 1에서 G_n 는 구동시스템을 포함한 공작기계 시스템의 전달함수이며 이는 그 시간지연을 나타낸다. 교란은 가공 정밀도에 영향을 미치는 여러 인자들이다. 진직도와 같은 형상 제어를 위한 예측 보상 제어는 다음과 같은 중요한 단계를 거친다(그림 2).

3.1. In-process 측정

현재까지 개발된 in-process 오차 측정시스템은 접촉 케이지 방식, 공기 마이크로미터 방식, 광학 방식, 초음파 방식 등이 있으며 연삭 및 선삭 가공에서 치수 및 형상 제어에 사용되었다. 원통형이 아닌 각주형(prismatic) 가공물의 형상 정밀도 측정은 공작기계 작업공간안에 독립된 측정 기준시스템이 없어서 때때로 어려우나, 직선자(straight-edge) 혹은 최근에 개발되고 있는 tooling 테이저 및 레이저 간섭계 등을 이용하여 측정할 수 있다.

3.2. 모델링

시계열 모델링의 경우 AR 혹은 ARMA 모델을 쓸 수 있다. Off-line 으로 모델의 매개변수들의 값을 구할 경우, AR 모델을 위해서는 최소자승법을 사용하고 ARMA 모델을 위해서는 steepest descent 와 같은 비선형 최소자승법을 쓸 수 있다. 절삭가공중에 가공 상태가 일정하다면 off-line 모델링으로 on-line 제어로 사용되는 마이크로 컴퓨터의 부하를 줄일 수 있다. 그러나, 절삭 속도, 절삭 깊이 등의 작업조건 및 가공상태의 변화에 의해 on-line 적응 모델링이 필요한 경우, 반복 매개변수산출법을 사용하여 한다.

AR, ARMA 혹은 출력 신호외에 입력과 잡음(noise)을 함께 고려하는 ARMAX (ARMA with exogenous components) 모델의 매개변수 ϕ 의 값들을 구하는 반복산출법에는 여러가지 방법들이 있으며 대체로 아래의 같은 형태를 가진다⁽⁸⁾.

$$\phi_{i+1} = \phi_i + r \cdot e$$

위의 식에서 r 는 수정계수이며, e 는 전방 예측

오차이다. 가장 기본적이고 공통적으로 사용되는 반복산출법은 반복최소자승(recursive least squares)법으로 이는 최소자승법에 “matrix inversion 정리”를 적용시켜 구해진다.

교란이 독립된 random 일때만 진정한 매개변수의 값을 주는 반복최소자승법의외에, 수정된 반복산출법들이 있으며, 대체로 더 진정한 매개변수의 값을 주나 더 많은 량의 계산이 요구된다. 그외에 디지틀 마이크로컴퓨터를 이용한 계산시에 그 수치적인 안정성을 높이기 위하여 개발된 square root filtering 형의 방법들이 있으며, 그들중 Thornton 과 Bierman 에 의해 개발된 “U-D covariance factorization”방법⁽⁹⁾이 효과적으로 쓰일 수 있다.

On-line 반복산출법에 의한 모델링의 경우, 측정되는 오차는 진정한 오차가 아니고 이미 예측에 의해 보상된 오차이므로 보상되기 이전의 진정한 오차의 데이터를 구하기 위해서는 k -스텝 이전의 제어 입력치들이 측정치에 더해져야 한다. 그러므로 그림 2에서 보는 바와 같이 모델링 단계 이전에 오차 데이터의 재구성 단계가 경우에 따라 필요하다.

3.3. 오차의 예측

모델의 매개변수들이 구해지면 미래 또는 전방의 출력치를 다단 예측(multistep forecasting)을 통하여 얻을 수 있다. 출력치의 k -스텝 전방 예측 $\hat{X}_t(k)$ 는 다음의 식으로 구해진다⁽⁷⁾.

$$\hat{X}_t(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \phi_i \hat{X}_t(k-i) + \sum_{i=k}^n \phi_i X_{t+k-i} - \sum_{i=0}^{m-k} \theta_{k+1} a_{t-1}$$

예측 스텝 수 k 는 제어시스템 시간지연 d 와 측정 시간지연 d' 를 포함하는 값으로 정해진다.

3.4. 오차의 보상

교란을 받는 시스템의 제어에 있어서 한 공통된 문제는 어떻게 하여 출력을 요구되는 값에 가깝게 일치시키느냐 하는 문제이다. 이러한 경우에 있어, 최적제어는 출력의 최소 분산(vari-

ance) 혹은 최소 자승 오차를 주는 값으로 입력을 조정함으로써 얻을 수 있다. 가공 정밀도 향상을 위한 보상 제어에서 얻고자 하는 것이 이러한 최소 분산 제어(minimum variance control)의 목적과 동일하다고 볼 수 있다.

스토케스틱 제어 이론의 “separation principle”에 의하면, 미래의 출력치를 예측할 수 있다면 이 예측치를 요구되는 값과 동등하게 놓으면 최소 분산 제어를 얻을 수 있다. 즉, 최소 분산 제어를 위해서는 k -스텝 전방 예측치 $\hat{X}_t(k)$ 는 그때에 요구되는 값 XR_t 와 같아야 한다.

$$\hat{X}_t(k) = XR_t$$

진직도 제어 혹은 진원도 제어와 같은 조절(regulatory) 문제에 있어서는 XR_t 의 값이 어떤 일정한 상수가 될 것이며 윤곽(contour) 제어와 같은 추적(tracking) 문제에서는 XR_t 의 값이 질박하고자 하는 형상에 따라 변하는 값이 된다.

이제까지의 예측 보상 제어 알고리즘이 가공 정밀도에 영향을 미치는 교란인자들의 특성 파악, 오차의 예측 및 그에 대한 보상에 그치지 않고, 최적제어기의 실제 문제로 까지 확대될 수 있다. 그러나, 이러한 경우 구동 장치들 또한한 공작기계 시스템의 동특성이 입력치의 결정에 고려되어야 하며 이를 위해서는 더 짧은 샘플링 시간 간격과 더 많은 량의 계산이 마이크로컴퓨터에 요구될 것이므로 실제적인 적용에 문제가 있다.

4. 예측 보상 제어의 적용례

그림 2의 알고리즘은 그대로 밀링 가공의 진직도 제어에 적용되었다⁽¹⁰⁾. 실제적인 적용에 앞서 off-line 시뮬레이션을 통하여 예측 보상 제어의 유효성 및 최적 모델 차수, 최적 전방 예측 스텝수 등이 구해졌다. 그림 3은 시뮬레이션의 한 중간 결과로 보상되지 않은 원래의 진직도 오차, AR 모델링을 통한 1단 및 4단 전방 예측 오차 그리고 반복산출법에 의해 산출되는

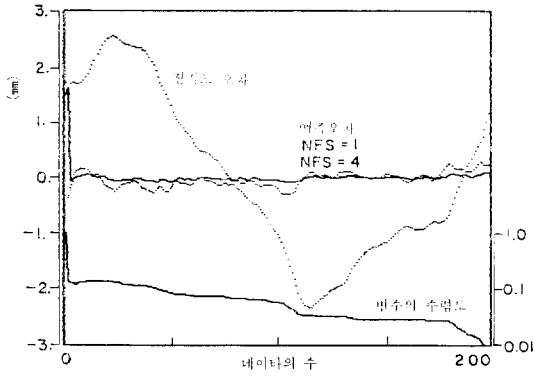


그림 3 예측 오차 및 매개 변수 산출의 수렴도

매개변수의 수렴특성을 보여준다. 1 단 전방 예측의 경우에는 98%, 4 단 전방 예측의 경우에는 91%의 진직도 향상을 보여준다.

정밀도 향상을 위한 보상 제어 시스템의 실현을 위해서는 정밀 제측, 정밀 구동 등의 여러 분야의 선진 기술의 조합이 불가피하다. 그림 4는 시뮬레이션 결과를 토대로 진직도 제어를 위해 적용된 시스템의 개략도이다.

In-process 진직도 측정을 위해서는 tooling 레이저 시스템이 사용되었으며 진직도의 기준으로는 직선자가 사용되었다. 구동시스템을 위해서는 정밀 유압구동장치가 개발되었으며, 16 bit Motorola MC 68000 마이크로컴퓨터 시스템이 디지털 제어기로 쓰였다.

그림 5는, 실제 절삭 실험 결과의 한가지 예로, 20 inch 길이의 알루미늄 2024 작업물을 같은 절삭 조건에서 보상 제어 없이 절삭한 후의

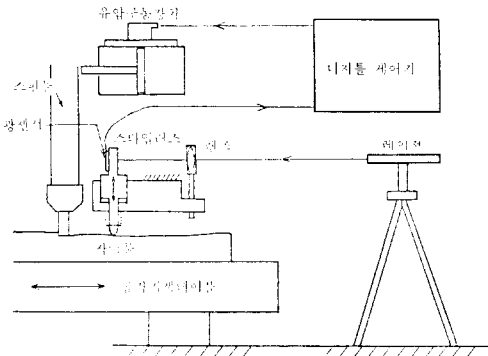
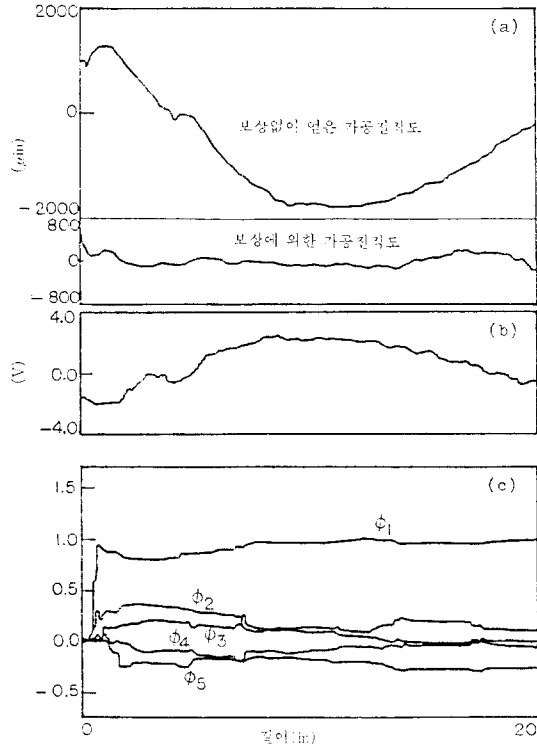


그림 4 진직도 제어 시스템



(a) 절삭후의 진직도
(b) 보상 제어 입력 신호
(c) 계산된 AR 모델의 매개수치

그림 5 절삭 실험 결과

진직도와 보상 제어를 써서 절삭한 후의 진직도의 비교를 보여준다. 예측 보상 제어의 효과가 뚜렷하며, 이 경우 약 81%의 진직도 향상을 나타낸다.

원통형 연삭 작업 및 브링 작업의 진원도 제어에도 예측 보상 제어가 성공적으로 적용되었으며 최근에는 원통도(cylindricity) 제어에의 적용이 시도 되고 있다.

5. 결 론

여러가지 보상 제어 방법들 중에서 in-process 측정을 통한 능동 보상 제어가 최적 자동 생산 원리에 가장 잘 부합된다. 소개된 예측 보상 제어가 공작기계의 정밀도 향상에 효과적으로 사용될 수 있으며, 이의 적용 범위를 넓히기 위해

서는 더 많은 연구가 요망된다. 특히 적합한 in-process 제측 장비의 개발에 많은 노력이 쏟아져야 한다.

참 고 문 헌

- (1) Mckeown, P.A., "The Design of High Precision Machine System," lecture notes on Precision Engineering, Univ. of Wisconsin, 1982
- (2) Peklenik, J. "Geometric Adaptive Control of Manufacturing System," Annals of CIRP, Vol. 18, pp. 265~272, 1970
- (3) Namba, Y. and Tsuwa, H., "Geometric Adaptive Control in Profile Milling by CNC System," Proc. of the 17th Int. MTDR Conf., Vol 17, 1976
- (4) Pfeifer, T. and Furst, A., "Advantages and Conditions for a Direct Measurement of the Workpiece Geometry on NC-machine Tools," Proc. IFAC Int. Symp. on Inf. Cont, Problems in Manufac. Tech., Tokyo, Japan. pp. 165~172, 1977
- (5) Pandit, S.M. and Wu, S.M., Time Series, and System Analysis with Applications, John Wiley & Sons, 1983
- (6) Box, G.E.P. and Jenkins, G.M., Time Series Analysis: forecasting and controls Revised Ed., Holden Day, Sanfrancisco, 1976
- (7) Aström, K.J., Stochastic Control Theory, Academic Press, New New York, 1970
- (8) Eykhoff, p., System Identification: Parameter and State Estimation, John Wiley & Sons, 1974
- (9) Maybeck, P.S., Stochastic Models, Estimation, and Control, Vol. 1, Academic Press, 1979
- (10) Moon, E.J., Forecasting Compensatory Control of Machining Straightness, Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, 1984.

(436 페이지에서 계속)

- (6) Proceedings of the 22nd Meetings of the Mechanical Failures Prevention Group, NBS Special Publication 436, 1975
- (7) Roth, O., et. al., Digital Signal Analysis, Brüel & Kjaer, 1981
- (8) The Anti-Friction Bearing Manufacturers Association, "Rolling Bearing Vibration and Noise", Standard 13, 1968
- (9) White, R.G. and J.G. Walker, Noise and Vibration, John Wiley & Sons, New York, 1982
- (10) 小野繁, ころがり軸受の應用設計, 大河出版, 1979
- (11) 小島宏行外, "磁氣軸手を有する回轉軸系の非線形ねじり振動", 日本機械學會論文集(C編) 49卷 446號, 1981
- (12) 五十嵐昭男外, "缺陷をきつころがり軸受の振動音響に関する研究", 日本機械學會論文集(C編) 47卷 422號, 1981