공작기계 자동화를 위한 적응제어 기술의 개발동향

정 성 종

한양대학교 기계설계학과 교수

●1956년 12월 12일생
●공작기계 동력학, 제어공학 및 절삭공정의 자동화를 전공하고 생산공정의 상황인식 및 제어, 머시닝센터의 가공오차 개선, 고속절삭 및 초정밀가공, 지능있는 공작기계 개발, 가공공장의 자동화 등의 연구에 관심을 가지고 있다.

1. 머 리 말

중진국 이상의 공업국가에서 생산공정이 GNP에 이바지하는 비율은 30% 정도에 이르고 있으며 그중 공작기계를 이용한 기계가공이 차지하는 비율은 10%에 다다르고 있다. 이와 같이 공작기계가 중요한 위치를 차지하고 있는 것은 공작기계가 생산제품의 기계가공에 직접 관계하고 있기 때문이다.

이와같은 관점에서 볼때 생산품의 등급과 생산비용에 직접적인 영향을 주는 것은 공작기계 산업의 기술적인 수준이라고 할 수 있겠다. 생산성 향상과 다품종 소량생산의 요구에 부응하기 위하여 수치제어(NC) 공작기계가 개발되어져 왔으며 1970년대 초에 NC장치에 컴퓨터를 이용하기 시작하면서부터 종래의 복잡한 하드웨어적인 구조를 소프트웨어인 프로그램으로 처리할 수 있게 되었고, 그림 1과 같은 구조를 갖는 컴퓨터 수치제어(CNC) 공작기계의 보급으로 오퍼레이터의 프로그램에 의한 명령에 따라서 상당한 수준의 정밀가공이 가능하게 되었다. 그러나, 공구의 마멸, 공구의 휨, 공작물의 변형, 공구의 파손, 공작기계 자체의 불완전성, 그리고 절삭공정중 발생하는 진동현상 때문에 오퍼레이터 또는 프로그래머의 경험이나 지식에 의하여 프로그래밍이 잘 되었다고 하더라도 미리 프로그램된 절삭조건에 따라서만 가공을 하게 되어 가공 중에 불안정한 현상이 유발되면 가공정도를 만족스럽게 얻을 수 없게 된다. 따라서 보다 정밀한 제품을 신속정확하게 가공하기 위하여는 종래에는 무시할 수 있었던 공구마멸, 처짐 및 파손방지 등을 고려한 수준높은 정교한 프로그램과 측정장치 등을 이용한 교정이 가공중에 이루어져야 하며 이는 생산공정의 자동화 측면에서 볼 때 상당한 시간적, 해석적 및 경제적 부담을 주게된다. 이에 절삭공정 그 자체의 상황인식 능력 및 그에 대한 대처 기능을 갖는 CNC 공작기계의 개발에 대한 필요성이 크게 대두되고 있으며, 이는 궁극적인 공장 자동화를 이룩하기 위한 필수적인 요건이라 할 수 있겠다.

가공공정에서 생산성과 생산품의 등급에 대한 요구가 점점 고도화 되면서 실제 절삭공정중에 공작기계의 안정성에 대한 문제가 중요한

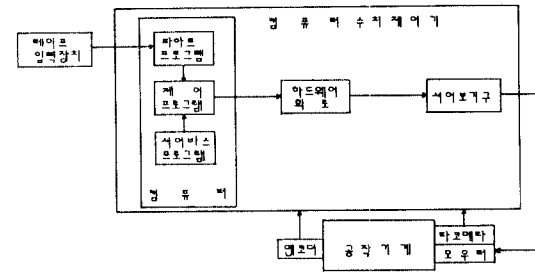


그림 1 컴퓨터 수치제어 시스템의 기본구조

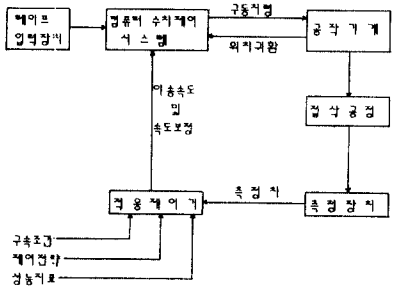


그림 2 공작기계용 적응제어 시스템의 기본 구조

관심거리가 되어져 왔으며 가공변수의 자동제어에 따른 공작기계의 제어에 대한 요구도 이런 관점에서 발전되어져 왔다. 적응제어라는 것은 공정의 특성변화를 추정하여 항상 전체 공정이 원하는 방향으로 동작이 이루어지도록 제어하는 방법으로 절삭공정에서는 가공공정중에 변화가 일어나는 절삭공정의 동적 및 정적인 특성변화에 대하여 전체 가공공정의 성능이 항상 원하는 결과를 창출해낼 수 있도록 제한조건 하에서 절삭가공중 가공변수들을 제어기를 이용하여 보상하는 그림 2와 같은 구조를 갖고있다.

이와같은 적응제어 기법중 공작기계의 자동화에 이용되고 있는 방법들은 크게 (1) 최적적응제어(ACO : Adaptive Control Optimization), (2) 구속적응제어(ACC : Adaptive Control Constraint), (3) 기하학적 적응제어(GAC : Geometric Adaptive Control)등이 있으며, 그림 3은 가공공정에 응용되는 적응제어 기법의 간단한 분류를 보여주고 있다.

국내에서도 여러기업 혹은 연구소등이 CNC 공작기계를 제작 또는 개발하고 있으나 대부분의 주요기술은 외국으로부터 들여오므로 상대적으로 기술축적의 기반이 대단히 취약한 실정이며, 더우기 이에 대한 연구는 미비한 형편이다. 과학기술처에서도 2000년대를 향한 과학기술 목표중 기존산업의 부가가치 및 생산성 극대화를 위하여 초정밀 가공기술 개발, 기계자동화를 위한 핵심부품 기술 및 자동화기기 개발 그리고 메카트로닉스 및 로보틱스를 위한 센서 기술등이 요구되고 있는 바 앞에 언급한 공작기계의 자동화에 필요 불가결한 적응제어 기술의 개발은 국가적 및 산업적으로도 매우 중요한 연구과제이다. 그러나, 이와같은 적응제어 기법을 적용하는데 가장 문제가 되는 것은 제어효과를 극대화하기 위하여 어떤 값을 측정치나 또는 성능지표로 취하느냐 하는 것이며, 앞에 언급한 제어기술을 적용하여 무인가공시스템을 설계 제작하는 데 측정과 그의 올바른 피드백에 대한 요구는 실로 중요한 문제라 할 수 있겠다. 이런 관점에서 적응제어 기법을 적용하는 경우 물리적인 현상을 제대로 인식하여 제어에 활용할 수 있는 센서의 개발과 가공 공정제어를 위한 피드백을 수행할 수 있도록 하는 상황인식 및 판단기술이 무엇보다도 선행되어져야 할 것이며, 이들을 이용하면 지능있는 공작기계(intelligent machine tool)의 개발도 가능하게 될 것이다.

본 해설에서는 각종 공작기계에서 사용되고

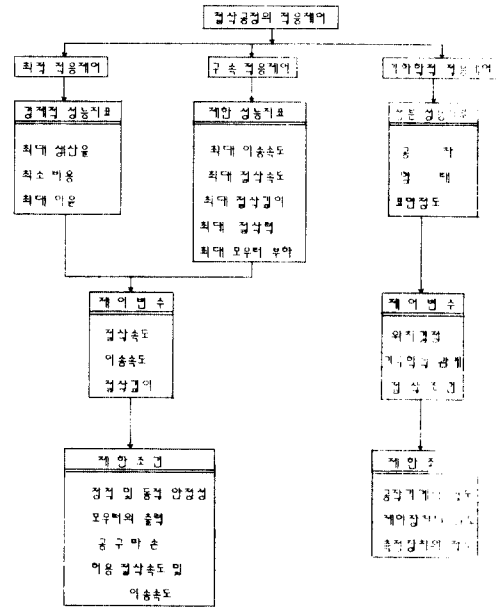


그림 3 적응제어 기법의 분류도

있는 적응제어 기술들에 대하여 소개하고 앞으로의 연구과제인 지능있는 공작기계의 개발방향 등에 대하여 간략하게 그 개념을 소개하고자 한다.

2. 최적 적응제어(ACO) 방법

공작기계의 최대 절삭력, 토오크 및 주축출력 등의 제한조건하에서 최소 절삭비용 또는 최대 생산량으로 표현되는 성능지표를 최적화하는 방향으로 이송속도나 절삭속도 등의 절삭조건을 조절하여 제어하는 방법이다.

1960년대부터 개발이 시도되어진 제어기법으로 밀링가공에 응용된 대표적인 연구사례는 1962년부터 1964년 사이에 미공군의 지원하에 Bendix Co.에서 개발된 그림 4와 같은 구조를 갖는 시스템이다. 이 시스템에 적용된 적응제어 장치는 그림 5와 같은 구조를 갖고 있으며 공구마멸율(tool wear rate)을 단위시간당 절삭체적, 공구온도 그리고 절삭토오크의 변화율로 구할 수 있도록 모형화 하였다. 최적화에 사용되는 성능지표는 단위비용당 절삭량으로

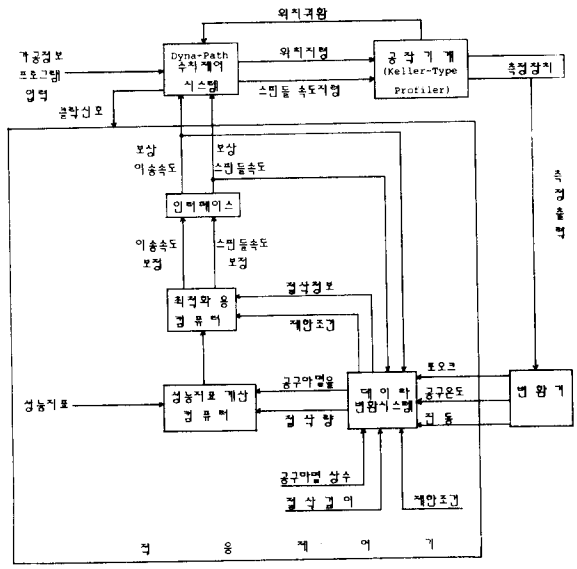


그림 4 밀링머시인용 ACO 시스템

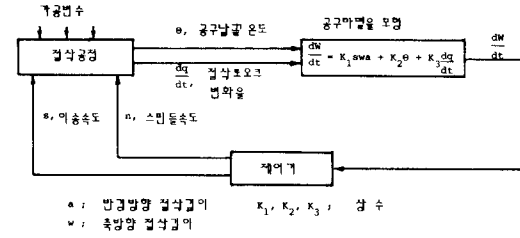


그림 5 ACO 시스템의 기본구조

$$(PI)=\frac{swa}{c_1+(c_1t_1+c_2b)\left(\frac{dW}{dt}\right)/W_0} \qquad (1)$$

로 주어지며, 여기서

c_1=단위시간당 절삭비용(노동력+기계사용료)
c_2=공구비용(공구 연삭비용 포함)
t_1=공구교환 시간
W_0=허용 마멸율
b=상수

이다.

성능지표(PI)를 최대 및 최소 이송 속도, 스핀들 속도, 최대 토오크, 최대 공구온도 등의 제한조건하에서 gradient 방법을 이용하여 매 적응제어 스텝마다 극대화 시키는 방향으로 최적의 이송속도와 스핀들 속도를 구함으로써 제어를 수행하게 된다.

그러나, 이와같은 ACO 시스템은 제품화로 연결되어지지는 못 하였다. 그 이유는 식(1)에서 볼 수 있듯이 성능지표에 직접적인 영향을 주는 공구 마멸율의 측정이 정확하게 이루어지지 못 하였기 때문이다. ACO를 성공적으로 수행하기 위해서는 온라인(on-line)으로 공구마멸량을 정확히 측정해 낼 수 있어야 하는데 아직까지도 직접적인 방법을 이용하여 가공중 공구마멸량을 측정할 수 있는 방법이 개발되어지지 않고 있으며, 간접적인 방법으로 절삭력의 변화나 온도변화 및 초음파신호 등을 측정함으로써 예측하고 있는데 이 경우 이들 양이 공구마멸 뿐만 아니라 공작물의 불균일성 그리

고 절삭조건 등의 변화에 따라서 영향을 받기 때문이다. 이와같은 적절한 공구마멸량의 온라인 측정장치의 개발지연 등으로 밀링이나 드릴링 및 선삭작업에서는 ACO의 응용이 현장에서 이루어지지 못하고 있는 실정이며 ACO의 적용을 위하여는 공구마멸의 온라인 측정법에 대한 연구 개발이 선행되어져야 할 것이다.

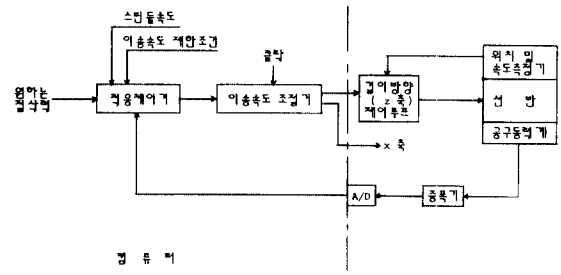
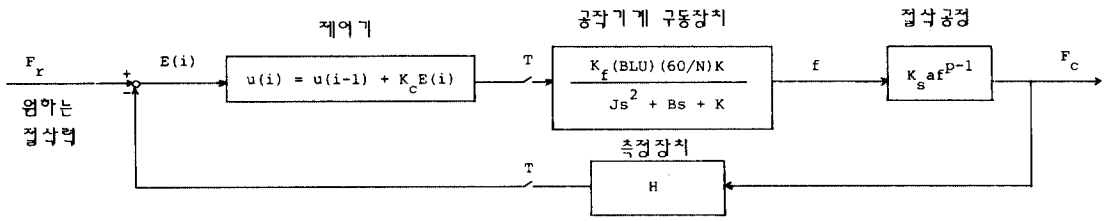


그림 6 선삭공정용 ACC 시스템

3. 구속 적응제어(ACC) 방법

ACO의 적용에 어려움을 극복하고자 ACC가 개발되어졌다. ACC는 절삭공정이나 공작기계 자체가 가지고 있는 제한조건(즉, 허용 절삭력, 토오크, 또는 공작기계의 최대 출력 등)하에서 공구파손이나 채터 등을 방지하면서 이송속도나 절삭속도 등의 공정변수들을 최대로 하는 즉, 단위시간당 절삭량을 최대로 제어하는 방법이다. 이 방법을 적용하는 경우 공구 마멸량을 측정해야 하는 ACO에 비하여 측정값을 비교적 쉽게 구할 수 있으며 복잡한 성능지표를 계산하지 않아도 된다는 점 때문에 밀링, 드릴링 및 선삭작업 등에 널리 사용되고 있다. 그림 6은 선반에서 이송속도를 제어함으로써 절삭조건에 관계없이 절삭력을 원하는 값으로 일정하게 제어하는 ACC 시스템이다. 비례-적분제어기를 사용한 경우 공작기계, 절삭공정 및 측정장치 사이의 관계를 블록선도로 표현하면 그림 7과 같이 된다. 이 경우 전체 제어시스템의 안정성을 좌우하는 개회로 이득 $\underline{K}=K_cTK_f(BLU)(60/N)KK_saf^{p-1}H$로 표현되며 $\underline{K}$ 값은 절삭조건에 따라서 변하는 스핀들속도 N, 절삭깊이 a 그리고 이송속도 f등의 절삭과정 그 자체의 함수값으로 표현되는 것을 알 수 있다. 이와같이 절삭가공 시스템에서는 절삭조건 그 자체가 전체공정의 계수값이 되며, 그 계수값이 절삭조건에 따라서 변화하므로 절삭력을 절삭조건에 관계없이 일정하게 제어하기 위하여는 이득값 $\underline{K}$가 안정한 값이 되도록 제어기의 이득값 K_c를 조절하여 제어할 수 있는 그림 8과 같은 ACC 시스템이 필요하게 된다. 그림 9와 그림 10은 각각의 ACC 시스템에서 절삭력을 제어한 경우 그의 응답특성을 보여주고 있다. 요사이는 이와같은 계수추정 ACC 시스템의 적응제어 알고리즘에 Self-Tuning Regulator 및 Model Reference Adaptive Control 등의 방법이 적용되고 있으



a ; 절삭깊이
f ; 이송속도 (mm/rev)
B,J,K,K_c,K_f,K_s ; 상 수
BLU ; 수치제어 장치의 최소분해능
N ; 스핀들속도
p ; 상 수
T ; 샘플링 시간
u(i) ; 제어입력

그림 7 고정이득 절삭력 제어 시스템

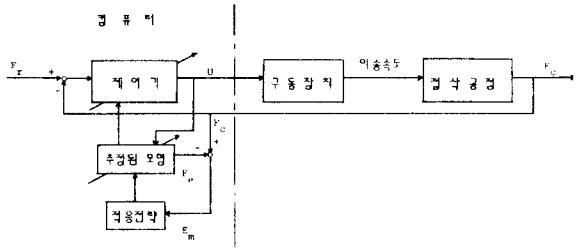


그림 8 변동이득 ACC 시스템에서 추정기의 구조

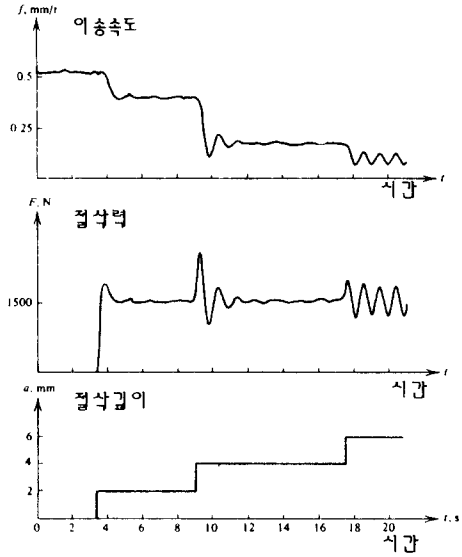


그림 9 절삭깊이 변화에 따른 ACC 시스템의 응답특성(Kc=0.6 ; N=500rpm)

며, ACC 작업을 성공적으로 수행하기 위하여는 절삭력이나 토오크 또는 주축출력 등을 이송속도나 스핀들 속도 및 절삭깊이 등의 절삭조건에 따라서 정확하게 모형화하는 작업이 우선 선행되어야 하겠다.

4. 기하학적 적응제어(GAC) 방법

ACO나 ACC 방법은 주어진 제한조건하에서 거친절삭을 하는 경우 생산성 향상의 관점에서 연구 개발된 방법들이며 실제 절삭가공에서는 그림 11과 같은 제오차 원인들에 의하여 가공

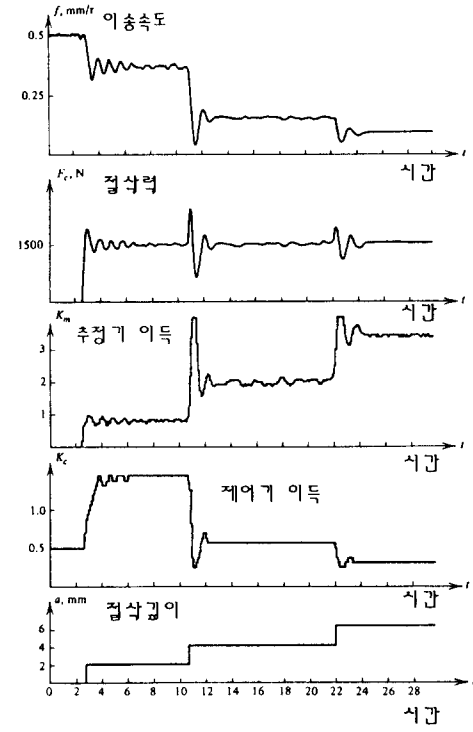


그림 10 절삭깊이 변화에 따른 변동이득 ACC 시스템의 응답특성

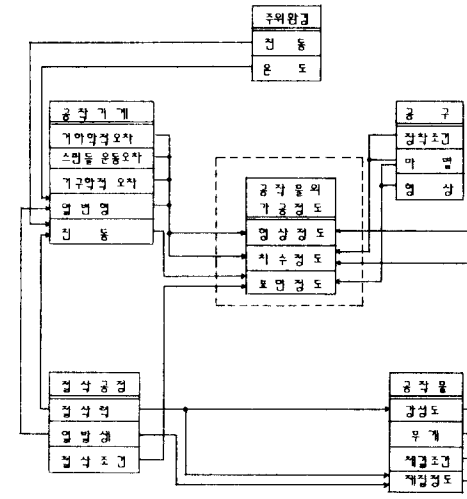


그림 11 절삭공정에서 가공정도에 영향을 주는 제오차 원인

정밀도가 영향을 받게 된다. 정밀가공에서는 가공정도가 중요하며 가공중 발생하는 오차를 측정장치를 이용하여 측정후 가공조건을 조절하여 공작물 자체의 오차 개선을 추구하는 기하학적인 적응제어 방법이 요구된다.

절삭공정의 목표는 정해진 치수 그리고 표면 정밀도 내에서 공작물을 가공하는 것이다. 물론 절삭공정에서 발생하는 주된 가공오차가 모성원리에 의한 결과로서 공작기계의 설계나 제작시 정밀한 공작기계를 생산함으로써 해결할 수 있는 문제이기도 하지만 고정밀도의 가공조건이 제시되면 될수록 그림 11에 제시된 절삭공정, 공구와 공작물 상태 그리고 주위환경에 의하여 오차가 필연적으로 발생된다. 이와같은 오차를 개선하기 위해서 공작기계의 오차 발생기구를 정확하게 규명한후 가공전이나 가공후 측정된 반복오차를 줄이는 수동오차 보상법이나 온라인 측정법과 수학적 오차모형화 방법을 이용하여 반복오차 뿐만 아니라 비반복오차 등을 보상할 수 있는 능동오차보상법 등의 GAC 방법이 연구개발 되어지고 있다.

그림 12와 같은 각주형 공작물의 엔드밀링 가공시 공구이송 방향으로 발생하는 직진도오차를 가공후 측정하여 이송속도 f에 대한 공구휨 사이의 관계

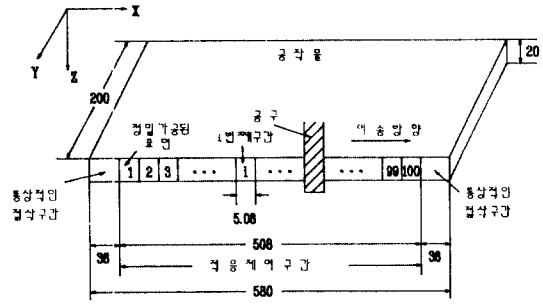


그림 12 공작물의 형상과 적응제어 구간

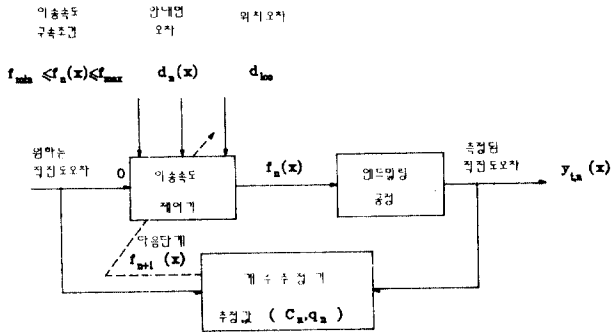


그림 13 GAC시스템의 기본구조

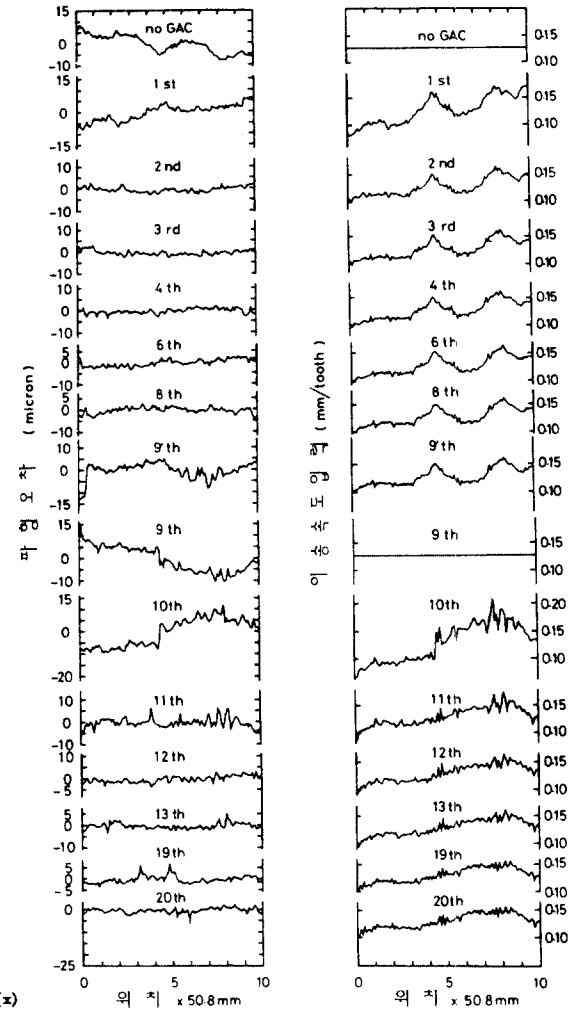


그림 14 제어된 파형오차 및 이송속도 입력 (절삭조건 : 반경방향 절삭깊이 = 0.381mm ; 축방향 절삭깊이 = 20 mm ; 스핀들속도 = 300rpm ; 공구날수 = 4)

$$d_y = cf^q \qquad (2)$$

를 이용하여 가공오차를 보상제어하는 시스템의 블록선도를 그림 13에 나타내었다. 표면정밀도에 대한 이송속도의 제한조건하에서 공작기계 자체의 안내면오차와 절삭공정중 발생하는 제오차 요인들에 적응할 수 있도록 절삭공정계수 c와 q를 추정하면서 제어한 결과 그림 14와같이 절삭공정이 진행됨에 따라서 직진도 오차의 보상이 이루어짐을 볼 수 있다.

그러나, 이와같은 GAC방법은 앞에 언급한 ACO나 ACC등의 적응제어 방법들에 비하여 연구개발이 미흡한 실정인데 그 이유는 (1) 환경변화에 영향을 받지 않는 측정장치의 선택 및 설치, 오차 원인의 분리 그리고 측정지연 등의 측정상의 문제점, (2) 공작기계의 기구학적 오차발생 기구, 공구마멸, 정적 및 동적인 변형 등을 고려한 수학적 오차 모형화의 문제, (3) 안정성을 보장하면서 랜덤한 상황변화에 강건성(robustness)을 보장할 수 있는 적응제어 기법의 적용상의 문제점등 때문이다. 그러므로 성공적인 GAC를 수행하기 위해서는 위에서 언급한 세가지 분야의 연구가 우선 선행되어져야 하겠다.

5. 지능있는 공작기계

CNC 공작기계, 로봇 및 자동화설비 등을 갖춘 현대화된 가공공장에서도 효율적인 작업관리를 위하여 이들을 최적으로 운용할 수 있는 기능과 경험등을 기계에 부과하고자 하는 움직임이 일어나고 있다. 지능있는 기계라 함은 작업자로부터 상세한 정보의 입력이 없이도 공정의 상황변화에 관계없이 주어진 임무를 수행할 수 있는 기계를 뜻한다. 특히 기계가공을 하는 경우에 지능이라 함은 (1) 공작물의 재질변화 (2) 마이크로 및 마크로적인 공구 및 공작물의 형태 변화 (3) 생산성이나 효율 및 부하변동등에 따른 요구변화 (4) 병진운동 및 회전운동에 의한 위치변화 (5) 작업순서등 여러가지 요인에 관계없이 최적으로 공작물을 가공해 낼 수 있는 능력을 주는 것이다. 이와같은 시스템은 그림 15에서 볼 수 있듯이 가공상황의 인식기능(recognition)과 제어동작의 결정기능(decision making)을 기본적으로 갖추어야하고 측정장치, 컴퓨터 그리고 수치제어장치 등을 기본 하드웨어로 가지고 있어야 한다. 측정장치로부터 얻어진 결과를 이용하여 컴퓨터에서는 인식 알고리즘에 따라서 가공상황을 인식하게 되고 원하지 않는 상황변화에 대해서는 수치제어 장치를 통하여 제어신호를 공작기계에 보내주게 된다. 컴퓨터는 갑작스런 상황변화에 대해서는 기계에 정지명령등의 신호를 보낼 수 있으며 가공중 잘못된 점이 측정되었을 때 학습활동(learning process)을 통하여 데이타 베이스로 이미 만들어진 결정규칙에 따라서 작업자에게 권고도 해줄 수 있게 된다. 그림 16은 절삭공정의 패턴인식(pattern rec-

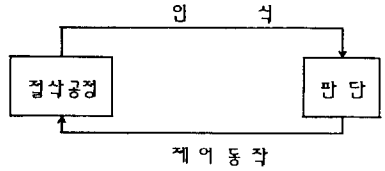


그림 15 지능있는 제어시스템의 기본구조

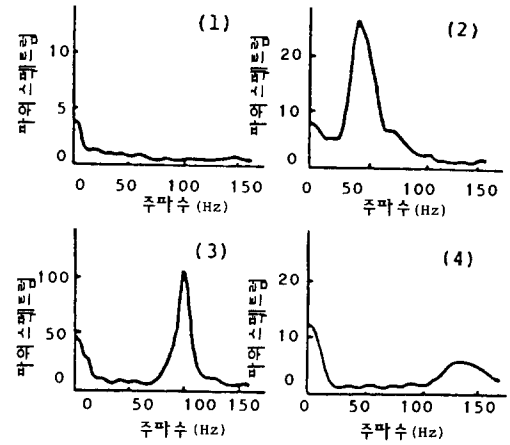


그림 16 절삭력의 파워스펙트럼[(1) : 연속칩 : (2) 불연속칩 : (3) 채터 : (4) 빌트업에지의 경우]

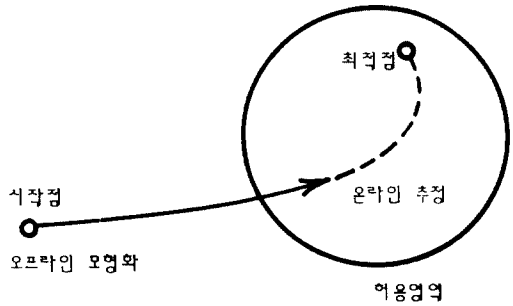


그림 17 지능있는 제어시스템의 최적화 과정

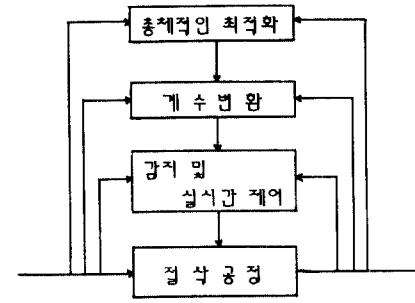


그림 19 다층구조 제어시스템의 구조

ognition)에 사용하기 위하여 절삭력을 측정하여 신호처리 장치로 분석한 칩의 형태에 따른 데이터 베이스 내의 자료값이다.

지능있는 공작기계에서 성능지표의 최적화는 그림 17과 같이 첫단계에서는 넓은 범위의 허용영역 내에서 오프라인(off-line)으로 데이터 베이스를 이용하여 우선 초기의 변수 값들을 설정하고 두번째 단계에서는 온라인 최적화 기법에 따라서 변수들을 추정하는 방향으로 해결할 수 있다. 이들의 일련된 작업을 수행하기 위해서는 그림 18과 같은 구조를 갖는 지능있는 측정장치가 필요하다. 지능있는 측정장치는 (1) 측정장치, (2) 전자장치, (3) 신호처리 장치, (4) 국부적인 판단과 지시 및 자가보정

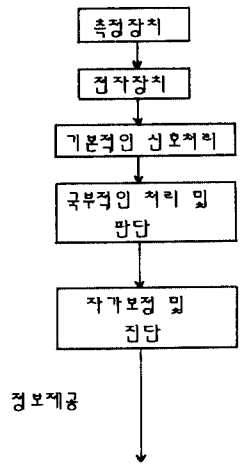


그림 18 지능있는 측정시스템의 기본구조

(self-calibration)등의 기능을 갖춘 것으로서 이와같은 역할을 수행하기 위해서는 하드웨어적인 측정장치에 학습활동과 패턴인식 기능을 할 수 있는 알고리즘등을 접목함으로써 만들 수 있겠다. 또한 여러가지 측정값의 해석이 필요한 경우에는 다른 측정장치들로부터 얻어진 결과들을 종합하여 하나의 정보를 제공하여 줄 수 있는 기능을 갖추어야 한다. 그러나, 상황인식에 따라서 입력된 판단 자료를 제어에 활용하는 경우 그 자료의 중요도에 따라서 제어입력을 수치제어 장치에 전달할 때 응답 시간에 차이를 줄 수 있도록 제어시스템이 설계되어야 한다. 즉, 공구파손의 위험이 인식된 경우와 전체 절삭공정의 최적화를 위하여 이송속도나 절삭속도 등을 바꿔야할 필요성이 동시에 발생한 경우 절삭공정을 우선 정지시키고 공구교환을 수행한 후 그다음 작업이 수행되어질 수 있도록 설계해야 하며 그림 19는 이와같은 관점에서 설계된 지능있는 공작기계의 제어를 위한 다층구조 제어시스템의 블록선도 이다. 여기서는 절삭공정에 가까운 부시스템일 수록 그 제어동작이 단위시간당 많이 이루어 질 수 있도록 고려한 경우 이다.

6. 맺 음 말

이상에서 공작기계의 자동화에 적용되는 ACO, ACC 및 GAC 등에 대한 원리와 이용방안 그리고 연구개발 되어져야 할 점들에 대하

여 수학적인 논술을 피하고 그 기본개념 등을 소개하였다. 궁극적인 자동화의 목표가 공작기계에 인공지능을 부여하여 경험이 없는 작업자라고 하더라도 생산공정을 관리 감독할 수 있도록 하기 위하여는 지능있는 공작기계의 개발이 이루어져야 하겠다. 지능있는 공작기계의 개발시 고려되어져야 할 사항들을 고찰해 볼때 공작기계의 ACO, ACC 및 GAC 등에 대한 연구개발에 앞서 절삭공정 매카니즘 그자체의 연구개발은 물론 절삭상황을 실시간으로 측정 및 인식 할 수 있는 측정장치들에 대한 연구들이 선행되어져야 할 것이고, 선진국 대열에 들어서기 위해서는 공작기계 산업에 대한 육성은 물론 연구개발에 집중적인 투자가 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

(1) M. Weck. 1984, "Handbook of Machine Tools", John Wiley & Sons, N.Y.

(2) Y. Koren, 1983, "Computer Control of Manufacturing Systems", McGraw-Hill, N. Y.

(3) S.C.Chung, 1987, "Geometric Adaptive Straightness Control in the CNC End Milling Machine", Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering Department, KAIST.

(4) T. Watanabe, 1983, "A Model-Based Approach to Adaptive Control Optimization in Milling", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, pp. 56~64.

(5) R. Bedini and P. C. Pinotti, 1976, "A Hardwired Logic for the Adaptive Control of a Milling Machine", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 16, pp. 193~207.

(6) D. W. Yen and P. K. Wright, 1983, "Adaptive Control in Machining-A New Approach Based on the Physical Constraints of Tool Wear Mechanisms", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 105, pp. 31~38.

(7) K. F. Eman, 1986, "A New Approach to from Accuracy Control in Machining", International Journal of Production Research, Vol 24, No. 4, pp. 825~838.

(8) F. M. Ferriera and C. R. Liu, 1986, "A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of a Machining Center", Annals of the CIRP, Vol. 35, No. 1, pp. 259~262.

(9) C. W. Lee, S. C. Chung and J. S. Kim, 1987, "Geometric Adaptive Straightness Control System for the Peripheral End Milling Process", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 27, No. 4, pp. 417~430.

(10) D. A. Dornfeld, 1986, "Acoustic Emission Process Monitoring for Untended Manufacturing", Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Osaka, Japan, pp. 831~836.