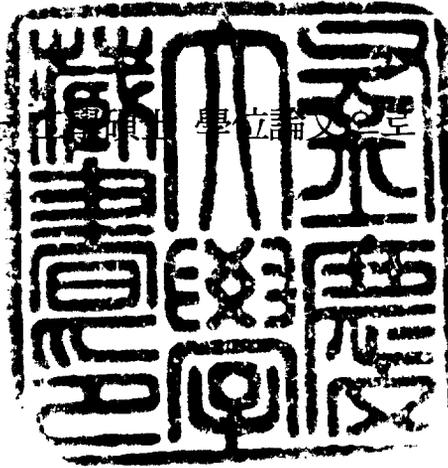


工學碩士 學位論文

CNC 공작기계의 절삭력감시를 통한 Tool Monitoring
System개발에 관한 연구

指導教授 權 純 在

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2002年 2月

釜慶大學校 産業大學院

機械工學科

金 泰 和

이 論文을 金泰和의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2001年 12月 日

主 審 工學博士 安 斗 星



委 員 工學博士 金 相 奉



委 員 工學博士 權 純 在



A Study on the Development of the Tool Monitoring System by Cutting Forces on CNC Machining Center

Tae - Hwa Kim

*Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University*

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 manufacturing machine and workpiece. Thus, it is necessary to estimate and control cutting force in real time during the process. In this study, to develop on-line tool breakage detection system in milling operation, analysis and experiment were performed. 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. To show the effectiveness of the suggested

cutting force measurement method, an experimental setup has been made without sensor, applied to several workpiece. The tool breakage detection experiment was performed in machining center and the effectiveness of the developed tool breakage detection algorithm and the usage of feed drive current as a detection signal were verified.

목 차

Abstract	i
목 차	iii
표 및 그림 목차	iv
제1장. 서론	1
1.1. 연구 배경 및 필요성	1
1.2. 기존 연구 고찰	2
1.3. 연구목적 및 내용	5
제2장. 절삭력 측정 및 해석	7
2.1. 절삭력 측정의 필요성과 기존 측정 방식의 문제점	7
2.2. 제안한 절삭력 측정 방식	8
2.3. 절삭력과 절삭 깊이, 이송률간의 관계 해석	10
제3장. Tool Monitoring System개발을 위한 주축 모터 Simulation	16
3.1. 이송계 모델	16
3.2. 절삭공정 모델	22
3.3. 절삭력 측정 시스템의 제어 시뮬레이션	23
제4장. Tool Monitoring System 적용	28
4.1. 실험장치의 개요	28
4.2. 실험장치의 구성 요소	30
4.3. Tool Monitoring System 프로그램의 구성	32
4.4. 실험결과	35
4.4.1. 축방향 절삭깊이의 변화	38
4.4.2. 원호를 포함한 반경방향의 가공	40
제5장. 결 론	42
참고 문헌	45

표 및 그림 목차

표 2-1	Merchant 2차원 절삭 개념도에 사용된 기호 . . .	12
표 3-1	절삭력 제어 Block도에 사용된 기호	18
표 4-1	절삭실험 조건	37
그림 2-1	제안된 절삭력 측정 방식의 시스템 흐름도	9
그림 2-2	Merchant 2차원 절삭 개념도	11
그림 2-3	절삭 깊이가 깊을 때의 절삭부하의 측정($t=20$) .	15
그림 2-4	절삭 깊이가 얇을 때의 절삭부하의 측정($t=2$) .	15
그림 3-1	적용제어기가 내장된 CNC의 절삭력 제어 Block도	18
그림 3-2	X축의 계단응답에 대한 시뮬레이션 결과	19
그림 3-3	Y축의 계단응답에 대한 시뮬레이션 결과	19
그림 3-4	X축의 주파수응답에 대한 시뮬레이션 결과	20
그림 3-5	Y축의 주파수응답에 대한 시뮬레이션 결과	20
그림 3-6	Y축의 주파수응답에 대한 시뮬레이션 결과	21
그림 3-7	Y축의 주파수응답에 대한 시뮬레이션 결과	21
그림 3-8	축방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션	26
그림 3-9	축방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션	26
그림 3-10	반경방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션	27
그림 3-11	반경방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션	27
그림 4-1	실험구성도	28
그림 4-2	절삭력 실험 장면	29
그림 4-3	X-Y Recorder	31
그림 4-4	Spindle Check Board	31

그림 4-5	Tool Monitoring System의 Flow Chart	32
그림 4-6	Tool Monitoring System Main 화면	33
그림 4-7	Tool Monitoring System 부하감시 화면	34
그림 4-8	Tool Monitoring System Alarm History 화면	34
그림 4-9	고정된 이송률 하에서의 가공공정 실험	36
그림 4-10	CNC내부에서의 이송모터 절삭력 감시화면	36
그림 4-11	축방향 절삭깊이 변화시의 Spindle Motor 절삭부하 측정	39
그림 4-12	축방향 절삭깊이 변화시의 X,Y 이송 Motor 절삭부하 측정	39
그림 4-13	반경방향 가공시의 Spindle Motor 절삭부하 측정	41
그림 4-14	반경방향 가공시의 X, Y 이송 Motor 절삭부하 측정	41

제 1 장 서 론

1.1. 연구배경 및 필요성

최근 생산공정 전 영역에 걸쳐 CNC 공작기계의 보급이 비약적으로 성장함에 따라 생산환경도 급속하게 변모하여 왔다. 또한 최근에는 생산성의 향상 및 고객의 다양한 요구사항 충족, 단축된 제품사이클, 잦은 노사분규 등의 이유로 기계가공의 자동화와 무인화가 함께 요구되고 있는 실정이다. 이런 시점에서 산업현장에서 생산공정의 기본 유닛으로서 머시닝센터를 고려할 때 신중하게 검토해야하는 것이 공작기계의 자기진단 기능과 시스템화라고 할 수 있다.

CNC 공작기계에서 기계를 동작시키기 위해서는 이송축 모터로 각각의 이송축을 움직여야 하고 가공을 하기 위해서는 주축모터를 통하여 공구를 회전시켜야 한다. 하나의 가공프로그램을 실행시키면 공구축, 주축의 회전속도와 이송축의 좌표값, 그리고 좌표값의 변화에 따른 이송속도 등과 같은 파라미터들이 결정된다. 이러한 가공프로그램의 작성은 다양한 소재와 공구의 조합에 따라 프로그래머의 경험에 의존하여 작성하거나 CAM 소프트웨어의 Post Processing을 통하여 작성하는 것이 일반적이다. 그렇지만 가공시에 발생하는 공구의 상황(파손, 마모)이나 절삭부하의 감시에 관한 것은 가공프로그램에서의 고려대상이 아니며 전적으로 외부장치나 센서에 의존하고 있다고 해도 과언이 아니다.^[1] 특히 머시닝센터에서 밀링 절삭가공시, 절삭공구의 점진적인 마모 혹은 급작스런 파손은 고정밀도를 요구하는 가공재료의 표면 거칠기를 나쁘게 만들뿐만 아니라 공작기계 강성에도 나쁜 영향을 주게 된다. 따라서 밀링 절삭가공에 있어서 공구의 마모 및 파손의 거동을 관찰하고 신뢰성 있는 시스템의 모니터링(monitring)

기법으로 마모 및 파손을 검출하고 제어하는 것이 정밀절삭과 경제절삭을 달성할 수 있는 방법이며 공작기계의 설계와 강성의 개선에 있어서 고려되어야 할 중요한 인자로서 지금까지 많은 연구가 수행되어지고 있다.[2][3][4]

본 연구에서는 이러한 밀링가공 공정에서 공구 파손현상의 실시간 검출 시스템 및 CNC 탑재용 소프트웨어를 개발하는 것을 목표로 하였다. 하지만 실제 공작기계의 절삭과정은 다양한 절삭기구의 조합으로 이루어지기 때문에 절삭상태의 예측이나 공구파손의 감시에는 다소 어려운 점이 있으나 생산라인의 절삭효율성 증가를 위해 신속한 공구수명 예측과 이상상태의 감시 및 공구파손의 검출이 필요한 실정이다. 따라서 생산성 향상과 공작기계의 이상현상에 대한 신속한 대처가 가능한 실용적이고 경제적인 공구 감시시스템의 개발에 초점을 맞추고자 하였다.

1.2. 기존 연구 고찰

생산라인의 절삭효율성 증가를 위해 공구수명 예측과 이상상태 감시 그리고 무인 지능화된 가공공정에서 생산성 향상 및 공작기계의 이상현상에 대한 신속한 대처를 위해서는 절삭상태의 정보를 얻어야 하며 가장 중요한 것은 절삭력이다. 절삭정보를 얻기 위한 방법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법이 있고 직접적인 방법에는 공구동력계[3][4], 가속도계[5] 그리고 AE(Acoustic Emission)센서[6][7] 등을 사용해서 측정하는 방법이 대부분이며 이들은 감시시스템을 실용화하기 위해서는 불리한 점이 많았다.[8][9] 특히 공구동력계나 가속도계를 통한 절삭력의 측정은 설치, 비용 상의 문제와 가공범위 제한 등의 이

유로 현장 적용에 어려움이 있고 AE 센서는 공구의 경사면과 여유면에서의 마찰, 전단영역에서의 소성변형, 크랙의 형성과 전파, 칩과 공작물의 충돌, 칩의 부서짐 등에서 발생하는 응력파(stress waves)를 이용하여 주로 공구파손을 검출하는 데 있어서 유용한 센서로 사용되었지만 현장 적용시 고온 다량의 냉각수, 칩에 의한 마모를 견디지 못하는 등 내구성에서 문제가 있는 것으로 파악되고 있다.^[10] 이러한 점에서 간접적인 방법의 하나인 모터전류 측정에 의한 공구 감시가 가장 실용 가능한 방법으로서 주목을 받고 있다.

일반적으로 이송 모터 전류 신호의 주파수 대역폭은 일반적인 절삭공정의 이물립 주파수 보다 높다고 알려져 있고 주축 모터 전류 신호는 공구에 직접 걸리는 절삭력에 의한 토크가 주축과 기어, 벨트 전달장치부를 경유함으로써 변형된 전달토크가 부하토크로서 인가됨으로써 5 [Hz] 미만의 낮은 주파수 대역을 가지고 있어 절삭계의 동적 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려져 왔다. 그러나 최근 고정밀 공작기계에서의 주축 모터는 기어나 벨트장치가 없는 내장형 모터(Built-in Motor)를 사용하거나 주축계의 강성이 높은 Unit를 사용함으로써 높은 주파수 대역폭에 대응하고 있는 추세이다.^[11]

공구동력계를 이용한 절삭력 관련 연구에서는 공구의 파손 방지와 높은 생산성의 구현을 목적으로 Y.S.Tarng과 S.T.Cheng이 공구동력계에서 측정된 절삭력과 퍼지이론을 적용하여 절삭 깊이가 변하는 밀링 공정에 대하여 공구의 절삭력이 기준 절삭력을 추종하는 방법을 제시하였다.^[12] L.K. Lauderbaugh와 A.G.Ulsoy는 공구동력계에서 측정된 절삭력을 바탕으로 한 밀링 작업시 모델참조적응제어기(Model Reference Adaptive Controller)를 제안하였고^[13] Oren Masory와 Yoram Koren은 힘센서(force sensor)가 적용된 적응제어시스템을 선

반작업에 도입하였으며^[14] Liu와 Y. Mohamed, M.A. Elbestawi는 CNC 밀링 가공에 공구동력계를 도입한 적응제어 알고리즘을 적용하였다.^[15]

A.E센서를 이용한 절삭력 관련 연구에서 Dornfeld는 이송속도, 절삭력, 절입깊이 등의 절삭인자들과 AE신호와의 관계를 해석함으로써 공구파손을 검출하고자 하였고^{[16][17]} 절삭력신호의 시계열 분석법(Time Series Analysis)을 통하여 검출 파라메타를 개발하고자 하는 노력이 Lan, Altintas 등에 의하여 제안되었다.^{[18][19]} T. Blum 등은 AE 신호의 거동을 관찰하기 위해서 2차원 절삭 시험을 통하여 AE 신호 특성과 절삭조건들과의 상호관계를 규명하였다.^[20]

모터 전류를 이용한 절삭력 간접측정에 대한 연구에 J.M. Lee, D.K. Choi, J. Kim, C.N. Chu는 NC 밀링 작업시에 교류 서보 모터에 흐르는 전류를 이용해서 절삭력을 간접적으로 제어하여 공구 파손의 사전 방지를 제시하였고 ^[21] W. Hi은 CNC 밀링 공정에서 절삭시에 걸리는 전류의 측정을 이용하여 이송률을 조정, 실제 절삭력이 기준 절삭력을 추종하도록 하였다.^[22] 또 Y. Altintas는 밀링공정에서 이송 드라이브 모터(feed drive motor)를 구동하기 위한 전류를 이용하여 간접적인 절삭력의 측정과 공구의 파손을 예측할 수 있다고 했고^[23] Matsushima 등은 주축모터의 전류량 감지를 통한 절삭력 측정을 이용하여 검출을 시도하였다.^[24]

1.3 연구 목적 및 내용

머시닝센터에서 적용가능한 실용적인 공구파손현상의 검출을 위해서는 시스템자체의 신뢰성뿐만 아니라 실제 가공공정에의 적응성, 경제성 등의 측면이 같이 만족되어야한다. 즉 머시닝센터에서 적용 가능한 이상적인 공구 파손 검출 시스템은 신뢰성과 동시에 시스템의 설치가 가공공정에 영향을 미치지 않아야 하며 경제성 또한 만족되어야 한다. 현재 개발되어 있는 대부분의 시스템은 공구동력계(Tool Dynamometer)와 같은 고가의 장비를 사용하고 있거나 별치형 센서를 적용하여 이를 PC와 연동하여 처리하는 방법을 사용하고 있으므로 경제성뿐만이 아니라 실제 가공공정에의 적용 또한 거의 불가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 실시간 검출 시스템 및 운용 소프트웨어 개발을 목표로 하였으며 제안하고자 하는 시스템의 실용성에 중점을 두고 주축 모터의 전류값과 CNC에서 실시간으로 취득할 수 있는 각종 제어변수를 활용하였다. 또한 공구파손현상의 정량적 해석을 위하여 절삭력 모델링을 수행하였고 시뮬레이션결과를 통하여 절삭조건에 기인하는 전류의 입력 패턴과 레벨(Level)을 추정하였다. 또한 이를 통하여 공구파손 취득 알고리즘을 개발하여 CNC의 Add-in Software 개발언어인 MACRO 언어를 통해 운용 소프트웨어를 개발하였다.[25]

과거와는 달리 현재의 CNC에는 NC 기능이 수행되는 동안 실시간으로 background로 처리가 가능한 MACRO Executor라는 기능이 있다. 이 기능은 과거 Custom MACRO B 라고 호칭되던 때에 NC의 가공프로그램 영역(SRAM)에서만 실행되던 것이 Binary형태로 CNC의 프로그램 메모리(FROM)에 저장되어 가공프로그램과는 별개로 직접 실행되는 형식으로 발전된 것인데 Microprocessor의 비약적인 발

전에 힘입어 CNC CPU 부하의 증가가 없고 병목현상이 없는 원활한 동작을 보장하고 있다. 또한 CNC화면의 Customizing을 가능하게 해 주는 기능을 사용함으로써 CNC 자체의 각종 기능신호(F Address)뿐만 아니라 링크되어 있는 Servo Amplifier와 모터의 각종 입·출력 제어 변수를 취득할 수 있으며 특정한 제어기가 구현된 Algorithm을 탑재하여 별도의 제어용 PC, 측정용 센서, 신호처리용 Unit 등이 없이도 경제적이고 실용적인 System을 구현 가능하다는 장점을 가지고 있다.[25][26]

따라서 본 연구에서는 상기 MACRO 프로그램의 장점을 적극 활용하여 다음과 같은 조건을 만족하는 공구 부하 감시 시스템을 구현하고자 한다.

- (1) 공구동력계 및 각종 센서를 사용하지 않고 실용화가 가능한 공구 부하 감시시스템
- (2) 기존의 상용 머시닝 센터에 적용 가능한 In-Process Software개발
- (3) 무인 자동화에 대비한 범용 I/O Sequence Interface 구현

위와 같은 목적을 달성하기 위해서 주축모터와 이송모터에 지령되는 전류를 이용하여 절삭력을 간접적으로 측정하여 경제적이고 현장 적용이 용이한 공구 부하감시 시스템을 구축한다. 또한 CNC의 CRT 상에서 사용자에게 직관적인 정보를 제공함으로써 신속한 작업의 관리와 다음 공정으로의 원활한 이행을 보장하는 Software를 설계하여 상용 머시닝 센터에 적용 가능한 시스템을 구현하고 절삭공정에 관한 정보를 알고 있는 생산환경을 구축한다.

제 2 장 절삭력 측정 및 해석

2.1. 절삭력 측정의 필요성과 기존 측정방식의 문제점

최근의 기계가공은 대량생산이라는 측면에서 가공시에 걸리는 시간의 단축이 절실히 요구되며 이를 위해서는 공구를 동작시키는 절삭력의 증가가 필요하다. 그러나 지나친 절삭력의 증가는 공구의 파손을 초래하며 실시간 에서 절삭력을 측정하여 제어하는 것이 필요하게 된다. 측정하고자 하는 절삭력은 가공할 공작물의 형상과 관계없이 주위의 소음, 진동 등에 가능한 한 영향이 적어야 하고 측정시의 비용이 저렴해야 하며 측정방식은 기존의 공작기계에 적용하기가 용이해야 한다. 측정된 절삭력은 이송률 외에 다른 파라미터들을 변화시키는 데에 사용될 수 있으며 이를 이용하여 실제 절삭력이 기준 절삭력을 추종하게 하도록 쓰일 수도 있다. 실제로 절삭력 신호를 측정하는 것은 절삭공정 제어분야에서만이 아닌 공구 파손의 실시간 감지와 채터링(chattering)의 감지 등 공장 자동화를 위한 기계의 상태 감시 분야에서도 필요한 사항이다.[27] 따라서, 적용이 용이하며 신뢰할 수 있는 절삭력 측정 시스템의 개발은 절삭공정 제어분야로의 응용에 한정되지 않고 CNC의 고기능화 및 지능화와 자동화를 위해서 필수적인 사항이다.[27]

공구동력계와 같은 센서를 공작물이나 공작기계에 직접 장착하여 절삭력을 측정하고자 한다면 가공시의 진동이나 노이즈 등이 정확한 절삭력을 측정하는 데에 영향을 미칠 것이며 또한 가공하고자 하는 공작물의 형상과 이송 스트로크에도 제약을 주게 된다. 또한 센서의

가격이 비싸고 과도한 부하와 충격에 약하다는 것도 문제점으로 작용할 수 있다. 또 다른 방식으로는 주축이나 이송축에 흐르는 전류를 이용하여 절삭력을 간접적으로 측정하는 방식이 있다. 이 방식은 가공시에 공구에 걸리는 절삭력을 모터가 낼 수 있는 힘과 비교하여 절삭력에 따라 변하는 전류의 변화를 측정하는 것으로 과거의 연구에서는 모터에서 발생하는 전류의 변화가 미소하여 측정된 절삭력이 정확하지 않다고 보고하고 있으며 모터의 가감속에 사용되는 전류 성분도 절삭력 측정시에 감지되기 때문에 정확하게 측정을 할 수 없게 된다고 보고하고 있다.

2.2. 제안한 절삭력 측정 방식

본 연구에서는 센서를 이용한 절삭력 측정 방법과 전류를 이용한 절삭력 측정 방식이 가지고 있는 문제점을 개선하기 위하여 스피indle 파라미터 변화에 큰 영향을 받지 않는 이송축 시스템에 CNC의 외관 관측기를 통해 전달되는 가공 공정시의 피드백 신호를 절삭력으로 간주하여 간접 측정한다. 추정된 절삭력은 MACRO 프로그램에서 얻은 후 실제 절삭력과 기준 절삭력과의 관계를 비교하여 가공공정의 감시를 실행한다. 이 방식은 공구동력계와 같은 고가의 센서의 장착이 필요 없게 된다는 점 때문에 인해 비용절감의 효과를 가져올 수 있으며 노이즈로 인한 절삭력 측정시의 부정확성을 제거할 수 있다. 이송축과 주축 시스템에 실시간 측정 시스템을 적용함으로써 얻을 수 있는 이점은 이송축 시스템이 주축 파라미터의 변화에 대해서도 그다지 영향을 받지 않기 때문에 정확한 측정이 가능하다는 것이다. 또한 주축 및 이송축에 흐르는 전류를 이용한 측정방식에서 문제점으로 지적되

는 가감속에 필요한 전류 성분으로 인한 영향이나 이송 슬라이드 면에서의 마찰 토크를 극복하기 위해 필요한 전류 성분으로 인한 영향을 배제할 수도 있다. 다음 그림은 제안된 절삭력 측정 방식의 시스템 흐름도를 보여준다.

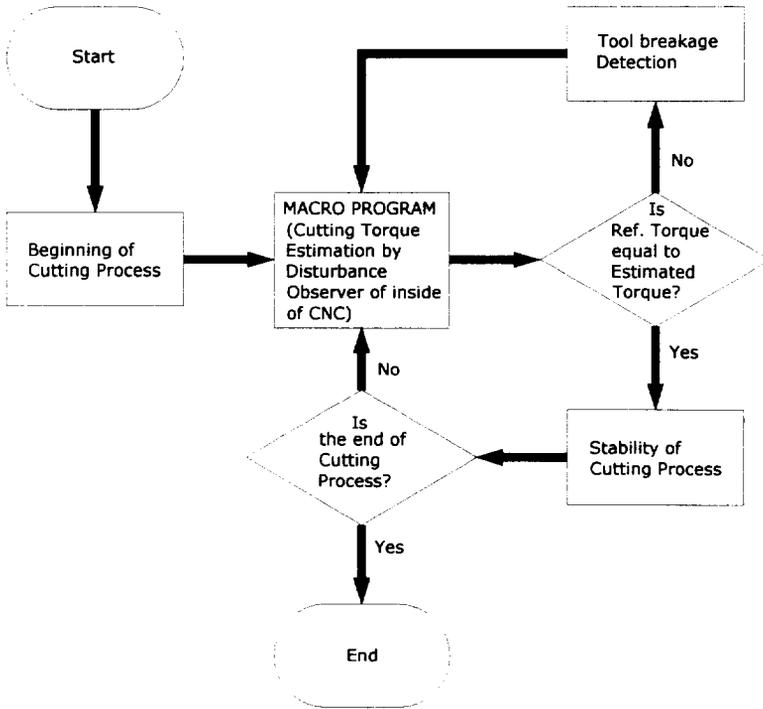


그림 2-1 제안된 절삭력 측정 방식의 시스템 흐름도

2.3. 절삭력과 절삭 깊이, 이송률간의 관계 해석

일반적으로 절삭력과 절삭 깊이, 이송률간의 관계는 가공공정에서 야기되는 기하학적인 조합으로 인하여 복잡한 양상을 가지게 된다. 공구의 날에 있는 흠은 절삭공정시의 기하학적인 조건을 국소적으로 변화시켜 결국 절삭공정에 대한 해석을 어렵게 만들기도 하며 절삭날이 가지고 있는 오프셋(offset)이나 기울어진 형상은 가공 중에 예기치 않은 불균형을 야기하기도 한다. 따라서 절삭력을 측정하는 경우에는 측정된 절삭력이 공구의 날의 있는 흠, 오프셋, 기울어진 형상을 따라 생겨난 비선형적 현상을 포함하게 된다. 더구나 실제 상황에서는 공구가 가지고 있는 연성(compliance)이나 가공공정에서의 동적효과(dynamic effect)를 무시할 수 없다. 그러나 이러한 모든 상황을 고려한 절삭공정 모델은 그 복잡성과 비선형성으로 인해 제어기의 설계 또는 가공공정의 분석 등에 부적합하여 선형화된 단순한 절삭공정 모델을 필요로 하게 된다.

절삭시 가공물의 변형은 대부분이 3차원의 소성 변형상태에서 진행된다. 그러므로 절삭공정을 이론적으로 다룬다면 3차원에서의 응력과 변형을 다루어야 한다. 그러나 절삭에 있어 3차원의 이론은 매우 복잡하고 이해하기가 곤란하므로 일반적으로 이해하기 쉬운 2차원 절삭을 취급하고 여기에서 얻은 이론을 3차원에 적용하는 것이 편리하다. 이 장에서는 Merchant에 의해 제시된 2차원 절삭 설명도를 근거로 하여 가공시에 발생하는 절삭력은 절삭 깊이와 이송률에 비례한다는 것을 보이려고 한다. 그림 2-2는 Merchant에 의해 제시된 2차원 절삭 해석의 설명도이며^[28]

표 2-1에서는 절삭 해석의 설명도에서 사용된 기호들을 나타내었다.

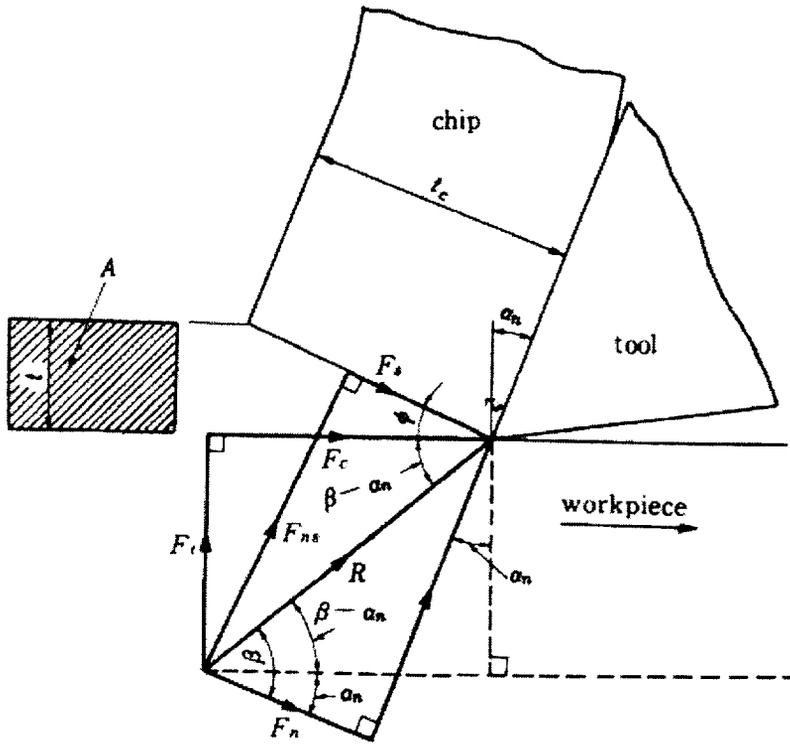


그림 2-2 Merchant의 2차원 절삭 개념도

표 2-1 Merchant 2차원 절삭 개념도에 사용된 기호

기호	의 미	단위
R	바이트에 작용하는 힘	N
R'	가공물과 chip의 전단면에서 일어나는 힘의 합력	N
F	공구표면에서 작용하는 마찰력(friction force)	N
F_n	F의 수직작용력	N
F_s	전단력(shearing force)	N
F_{ns}	전단면상의 압축응력(compression force)	N
F_c	주절삭력(main cutting force)	N
F_t	배분력(thrust force)	N
τ_s	재료의 항복 전단응력(yield shear stress)	N/m ²
α_n	공구의 경사각(rake angle)	rad
β	마찰력의 원인이 되는 마찰각(friction angle)	rad
φ	전단각(shear angle)	rad
t	절삭깊이(depth of cut)	m
t_c	chip의 두께(chip thickness)	m
b	절삭너비(width of cut)	m
A	절삭하고자하는 부분의 단면적	m ²

그림 2-2에서 대상이 되는 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\tau_s A}{\sin \varphi} \cdot \frac{1}{\cos(\varphi + \beta - \alpha_n)} = \frac{\tau_s A}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \alpha_n)}$$

. 식(2-1)

수식화된 절삭력에서 재료의 항복전단응력 A 가 일정하고 전단각 φ , 경사각 α_n 등 절삭시의 기하학적 조건과 공구와 공작물 사이의 마찰력이 일정하다고 하면 절삭력 R 은 절삭면적에 비례하게 된다.

그리고 절삭 면적 A 가 절삭깊이 t 와 절삭너비 b 에 비례하기 때문에 동시에 R 도 절삭깊이와 절삭너비에 비례함을 알 수 있다. 즉 R 은 절삭깊이와 절삭너비의 함수로 표현이 가능하다.

$$R \propto t, b \rightarrow R = f(t, b) \quad \dots \dots \text{식(2-2)}$$

정면밀링(face milling) 또는 엔드밀링(end milling)의 경우를 고려해 보았을 때 그림 2-2에서 절삭깊이로 표시된 t 를 이송량으로 볼 수 있고 절삭너비로 표시된 b 를 절삭깊이로 간주하는 것이 가능하다. 따라서, 절삭력 R 은 절삭깊이와 이송량에 비례하게 된다. 한편 일정한 시간간격 Δt 내에서 이송량이 변한다고 하면 $t = f(\text{이송률}) \times \Delta T$ 가 되어 식(2-3)과 (2-4)에서와 같이 R 은 절삭깊이 b 와 이송률 f 의 함수로 표현된다.

$$R = \frac{\tau_s \cdot (f \cdot \Delta t) \cdot b}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \alpha_n)} \quad \dots \dots \text{식(2-3)}$$

$$R \propto f, b \rightarrow R = f(f, b) \quad \dots \dots \text{식(2-4)}$$

측정되는 절삭력이 토크의 형태로 표현되는 경우에는 절삭력과 이에 의한 토크 사이의 비례상수(cutting force transmission gain as a torque) K_f 를 이용하여 식 (2-3)과 (2-4)를 다음과 같이 쓸 수 있다.^{[22][27]}

$$T = \frac{K_f \cdot \tau_s \cdot (f, \Delta t) \cdot b}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \alpha_n)} = K_f \times R \quad \dots \dots \dots \text{식(2-5)}$$

$$T \propto f, b \rightarrow T = f(f, b) \quad \dots \dots \dots \text{식(2-6)}$$

그러므로 앞에서의 가정을 적용하면 식 (2-5)와 (2-6)에서 알 수 있듯이 가공시의 절삭력은 절삭 깊이와 이송률에 비례한다는 것을 알 수 있다. 여기서 절삭깊이의 변화에 따라 절삭력부하를 감시할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 그림 2-3과 2-4는 절삭 깊이의 변화에 따른 절삭부하 측정 데이터이다.

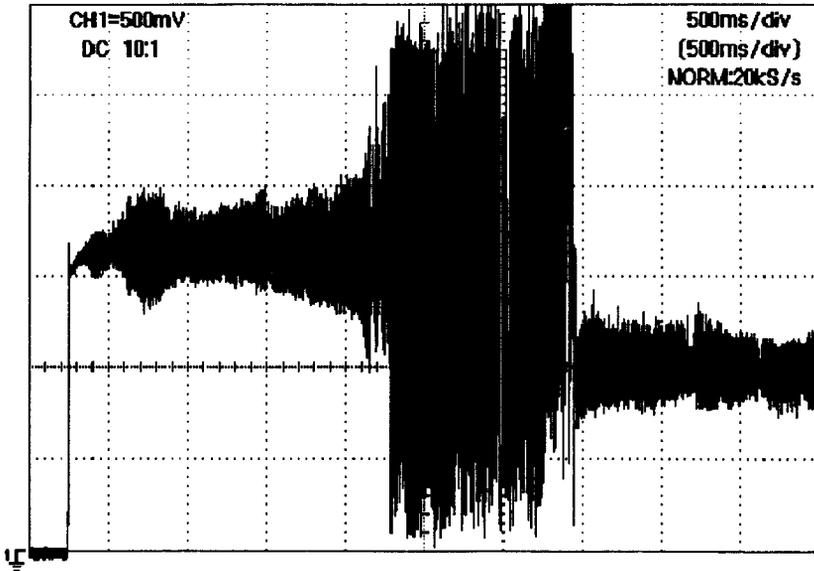


그림 2-3 절삭 깊이가 깊을 때의 절삭부하의 측정($t=20\text{mm}$)

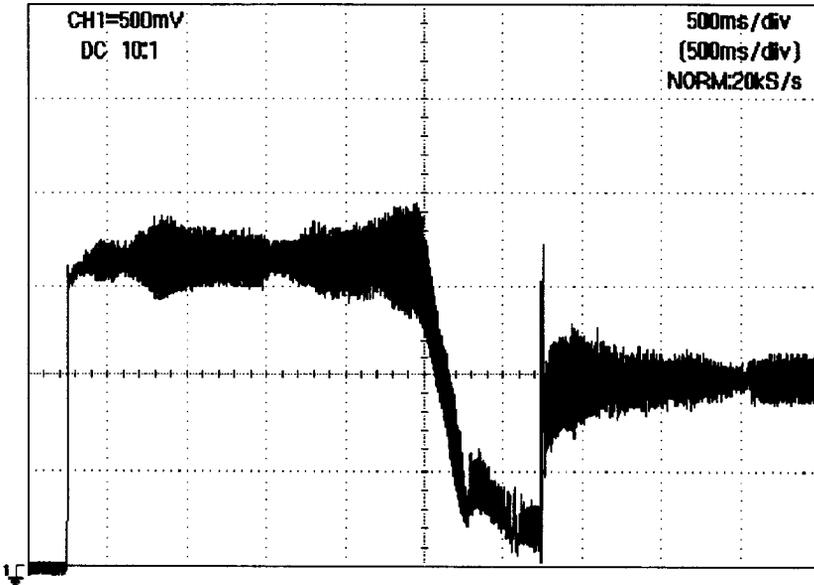


그림 2-4 절삭깊이가 얇을 때의 절삭부하의 측정 ($t=2\text{mm}$)

제 3 장 절삭력 추정 시뮬레이션

3.1. 이송계 모델

CNC 공작기계에서 이송계 속도 루프는 이송시점과 종점에서 가해지는 충격을 보상하기 위해 절삭 이송 시 지수함수로 가속 또는 감속하는 과정을 반복한다. 이런 이유로 이송계는 단순히 이송모터의 동작 특성뿐만이 아니라 속도 명령의 지수함수 가감속을 고려하여 모델링 되어져 있다.[26]

속도제어 루프를 단순히 1차 시스템으로 가정할 때 전체속도 루프는 그림 3-1과 같이 구성되어지며 각각의 시정수는 다음과 같다.

$\tau_1 = 0.01 \text{ sec}$: 지수함수 가감속에 의한 시정수

$\tau_2 = 0.023 \text{ sec}$: 속도 제어 루프의 시정수

$\tau_3 = 0.055 \text{ sec}$: 속도 명령이 PMC를 거쳐 모터로 전달되는 과정에서 발생하는 시간지연

여기서 지수함수 가감속의 시정수(10msec)는 서보 파라메타로 지정된 값이며 각 축이 동일하고 나머지 시정수는 계단응답과 주파수응답으로부터 실험적으로 구하였다.

따라서 전체 이송계는 아래와 같은 전달함수를 갖는다.

$$\frac{V_{act}(s)}{V_{com}(s)} = \frac{4347.83 \cdot e^{-0.055s}}{s^2 + 143.48s + 4347.83} \quad \dots \dots \text{식(3-1)}$$

주파수 응답을 비교하기 위하여 자동변경 된 이송속도 오버라이드를 통해 삼각과 형태의 속도명령을 주고 엔코더 신호로부터 이송속도를 측정하였다.

그림3-2부터 그림3-7까지의 결과로부터 X, Y축 이송계가 동일한 전달함수로 모델링 될 수 있었으며 각 축의 동특성이 일치하므로 원호나 2축 동시 이송시에 정상상태 오차를 유발할 수 있는 축의 오차가 잘 해결되었음을 알 수 있다.[29]

또한, 그림3-1은 적응제어기(외관관측기)가 내장된 CNC의 기본적인 제어시스템에 대한 개략도를 나타내었으며 표3-1에서는 제어시스템의 개략도에서 사용된 기호들을 나타내었다.

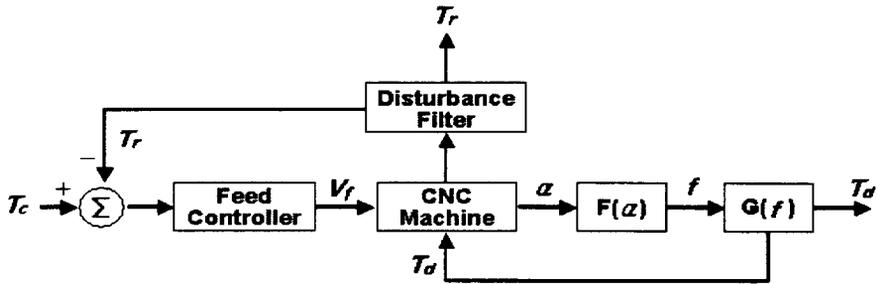


그림 3-1 적응제어기가 내장된 CNC의 절삭력 제어 Block도

표 3-1 절삭력 제어 시스템의 기호

기호	의 미	단위
T_c	Cutting torque as a reference	N.m
T_d	Cutting torque regarded as a disturbance	N.m
T_r	Estimated torque from observer	N.m
V_f	Feedrate as a reference	m/sec
f	Actual feedrate	m/sec
$F(\alpha)$	Relationship between feedrate and angular velocity	m/rad
α	Angular velocity of feed system	rad/sec
$G(f)$	Cutting process modeling	.

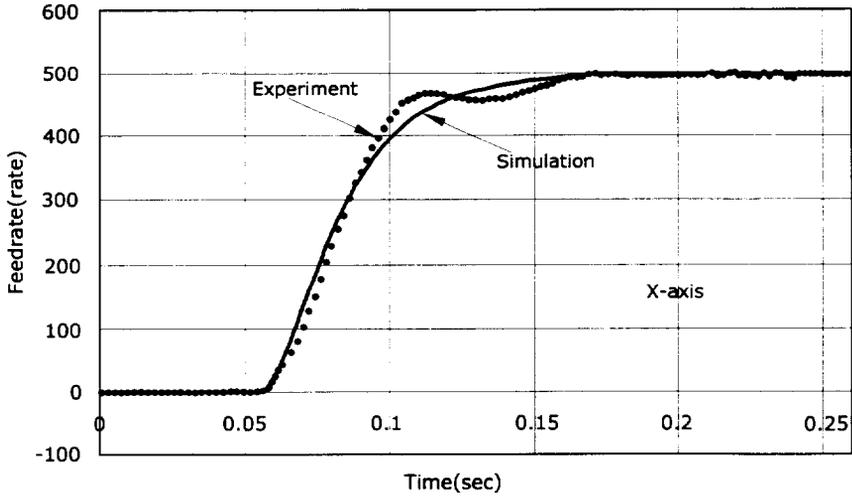


그림 3-2 X축의 계단응답에 대한 시뮬레이션 결과
(500mm/min)

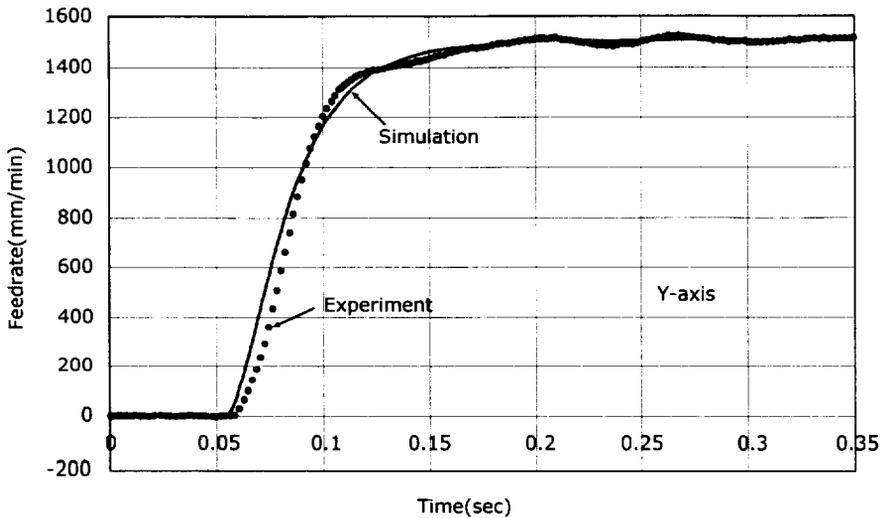


그림 3-3 Y축의 계단응답에 대한 시뮬레이션 결과
(1500mm/min)

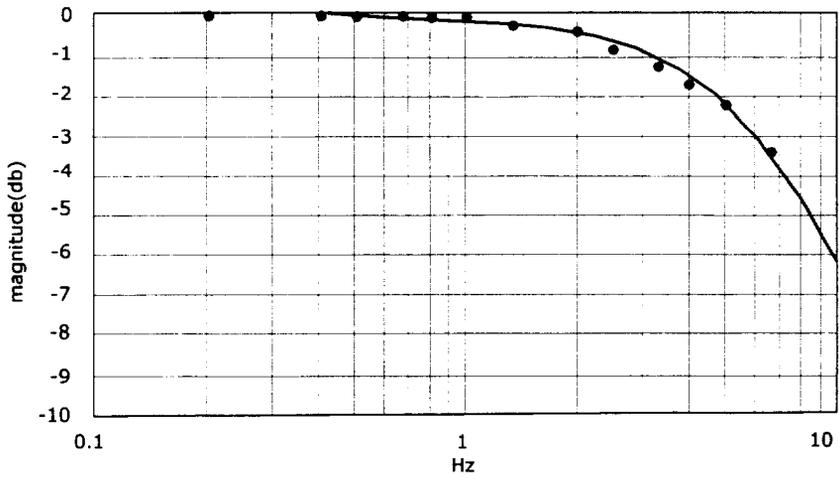


그림 3-4 X축의 주파수 응답에 대한 시뮬레이션 결과
 (U_{act} / U_{com})

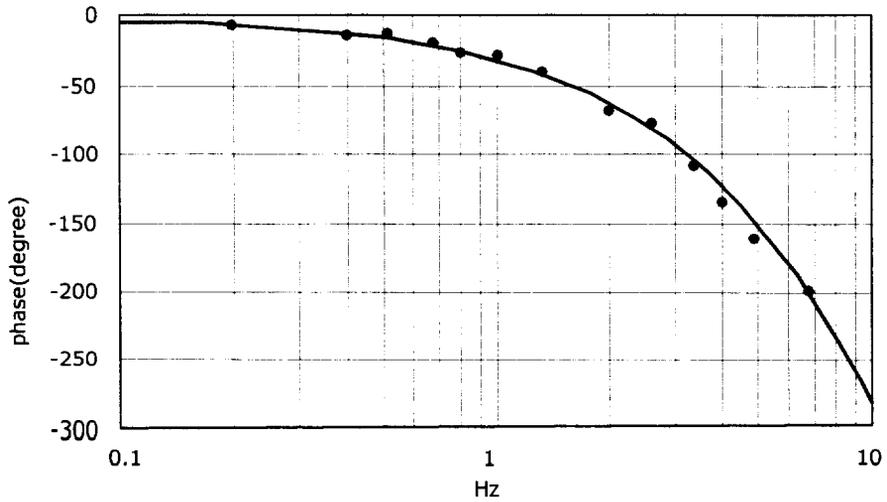


그림 3-5 X축의 주파수 응답에 대한 시뮬레이션 결과
 (U_{act} / U_{com})

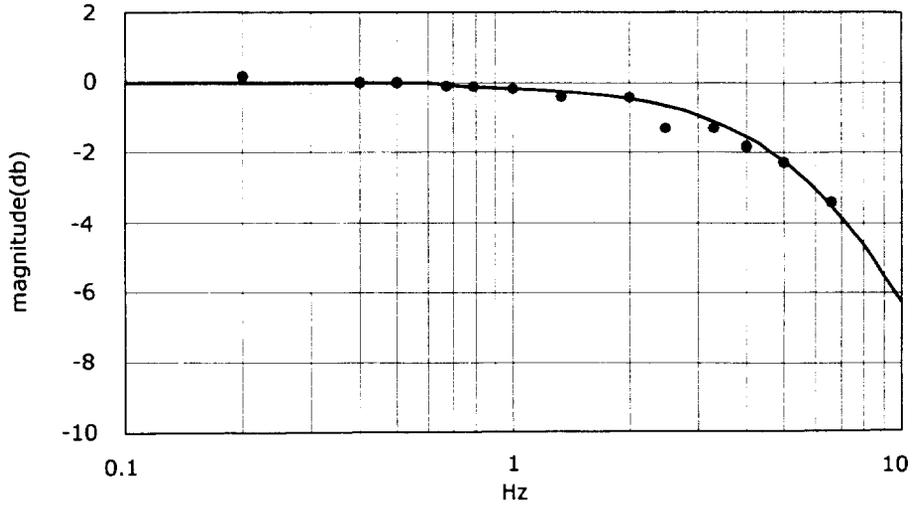


그림 3-6 Y축의 주파수 응답에 대한 시뮬레이션 결과 (U_{act} / U_{com})

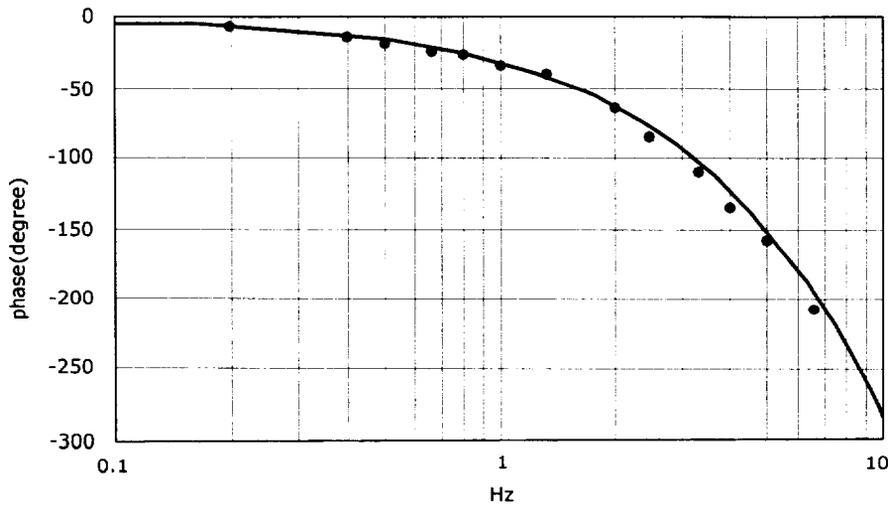


그림 3-7 Y축의 주파수 응답에 대한 시뮬레이션 결과 (U_{act} / U_{com})

3.2. 절삭공정 모델

이송계뿐만이 아니라 절삭공정 또한 전체 절삭력 적응제어 구조의 일부이다. 이송계 출력값인 이송속도에 대하여 절삭력과의 관계를 나타내기 위해서 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c = k_c' b h_{av} \quad \dots \dots \text{식(3-2)}$$

k_c' : material dependent constant (N/mm^2)

b : axial depth of cut

h_{av} : average chip thickness

여기서 $m = 1$ 로 가정하고 h_{av} 를 최대 칩 두께 h_{max} 로 하면

$$h_{max} = \frac{V_a}{NZ} \cdot \sin \theta_{max} \quad \dots \dots \text{식(3-3)}$$

V_a : actual feedrate (mm/sec)

N : spindle speed (rev/sec)

Z : number of teeth in the milling cutter

$$\theta_{max} = \cos^{-1}(1 - 2d/D) \quad \dots \dots \text{식(3-4)}$$

$$\max[\theta_{max}] = \pi/2 \quad \dots \dots \text{식(3-5)}$$

d : radial depth of cut

D : tool diameter

이고 식(3-2)의 절삭력은 최대값이 된다.

앤드밀링에서는 공구와 공작물 사이의 flexibility가 절삭깊이의 순간적인 변화가 있는 전이절삭구간의 칩 형성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

이러한 절삭공정의 동특성을 cutting stiffness($K_c b$)와 spindle stiffness(K_s)의 비에 의해 결정되는 시정수를 갖는 1차 시스템으로 가정하면 다음과 같은 선형식을 얻을 수 있다.[30]

$$\frac{F_c(s)}{V_a(s)} = \frac{K_c b}{1 + \tau_c s} \quad \dots \dots \text{식(3-6)}$$

$$\tau_c = \frac{K_c b}{K_s} \quad \dots \dots \text{식(3-7)}$$

$$K_c = \frac{k_c'}{NZ} \cdot \sin \theta_{\max} \quad \dots \dots \text{식(3-8)}$$

K_s : spindle/tool stiffness (N/mm)

3.3. 절삭력 측정시스템의 제어 시뮬레이션 (이산PID제어기)

식(3-6)의 이산 등가형태는 다음과 같다.

$$F_c(k) = b_1 V_a(k-1) + a_1 F_c(k-1) \quad \dots \dots \dots \text{식(3-9)}$$

$$b_1 = K_s(1 - e^{-T/\tau_c}) \cdot \tau_c$$

$$a_1 = e^{-T/\tau_c}$$

여기서 절삭공정 변수인 a_1 과 b_1 은 절삭조건에 따라서 변화하는 값이다.

이를 실시간으로 추정하기 위해서 최소오차 자승법(recursive least squares)을 이용한다.[31]

절삭공정 변수를 추정하였을 때, 미리 알고 있는 서보계와 함께 영차 홀딩 이산화(zero order hold discretizing)를 고려한 서보루프와 절삭공정의 전달 함수는 다음과 같다.

$$F_c(Z) = \frac{R(Z^{-1})}{L(Z^{-1})} V_{com}(Z) \quad \dots \dots \dots \text{식(3-10)}$$

$F_c(Z)$: cutting force

$V_{com}(Z)$: feedrate command

여기서

$$R(Z^{-1}) = r_1 Z^{-1} + r_2 Z^{-2} + r_3 Z^{-3} + r_4 Z^{-4}$$

$$L(Z^{-1}) = 1 + l_1 Z^{-1} + l_2 Z^{-2} + l_3 Z^{-3} + l_4 Z^{-4}$$

이 때 이산 PID 제어기의 전달함수는 다음과 같이 결정된다.[32]

$$G_{MD} = \frac{q_0 + q_1 Z^{-1} + q_2 Z^{-2} + q_3 Z^{-3} + q_4 Z^{-4}}{1 - Z^{-1}} \dots \dots \dots \text{식(3-11)}$$

여기서

$$q_0 = 1 / \sum_{i=1}^m r_i \quad \text{and} \quad q_i = l_i \cdot q_0$$

시뮬레이션은 MatLab을 이용하여 수행하였다. 절삭조건은 기준 절삭력 1000 [N], 주축 회전수 8000 [rpm], ϕ 10 [mm], 4날 엔드밀, k'_c (material dependent constant) 1380 [N/mm²], K_s (spindle/tool stiffness) 5230 [N/mm], 샘플링 주파수 500 [Hz] 이며 축 방향 절삭깊이가 10-20-30 [mm]로 변하는 경우와 반경방향 절삭깊이가 1-2-3 [mm]로 변하는 두 가지 경우이다.

고정 이득 방식과는 달리 다양한 절삭조건에 대해서 안정한 결과를 보였으며 그림 3-8부터 그림 3-11은 두가지 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다.

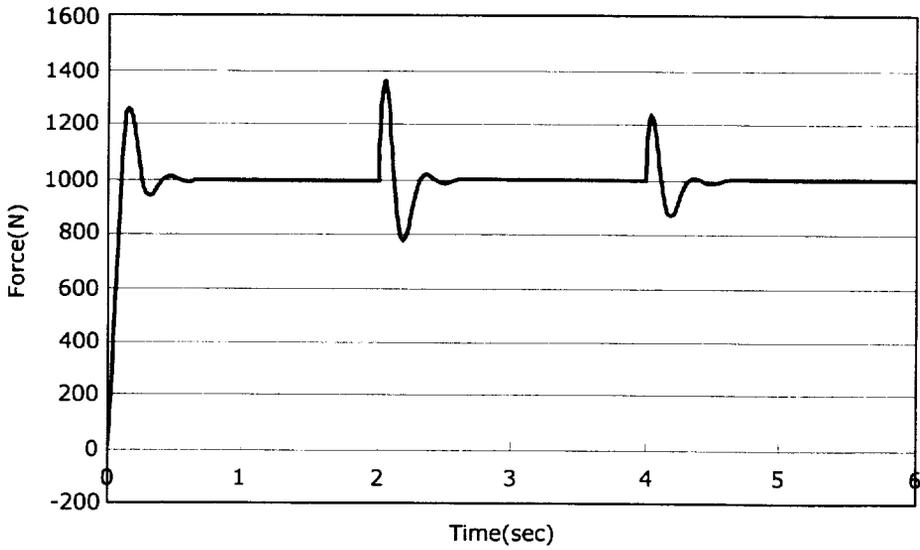


그림 3-8 축방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션
 <일반적인 절삭력 시뮬레이션>

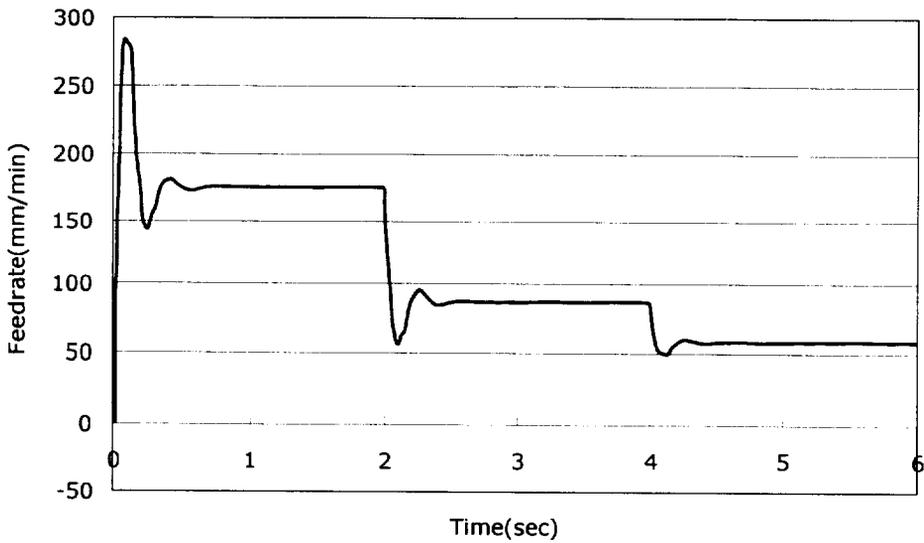


그림 3-9 축방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션
 <CNC 외란적응기의 절삭력 시뮬레이션>

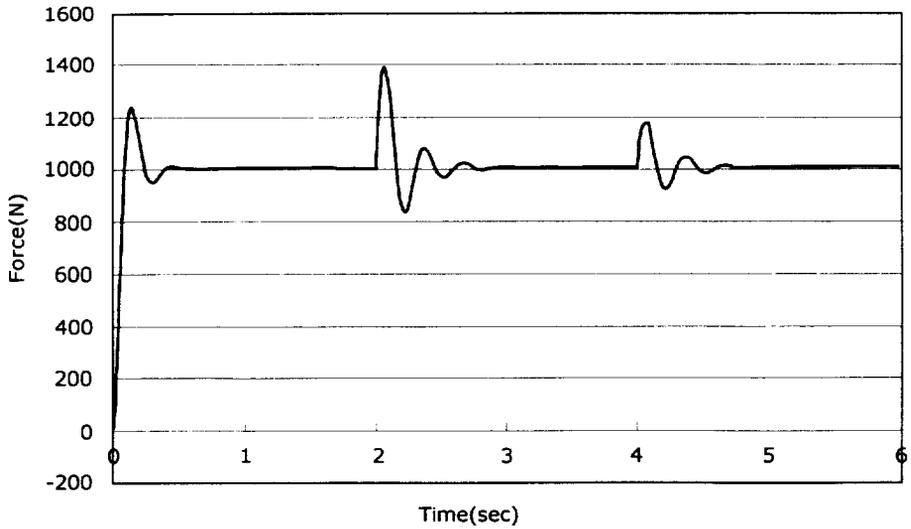


그림 3-10 반경방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션
 <일반적인 절삭력 시뮬레이션>

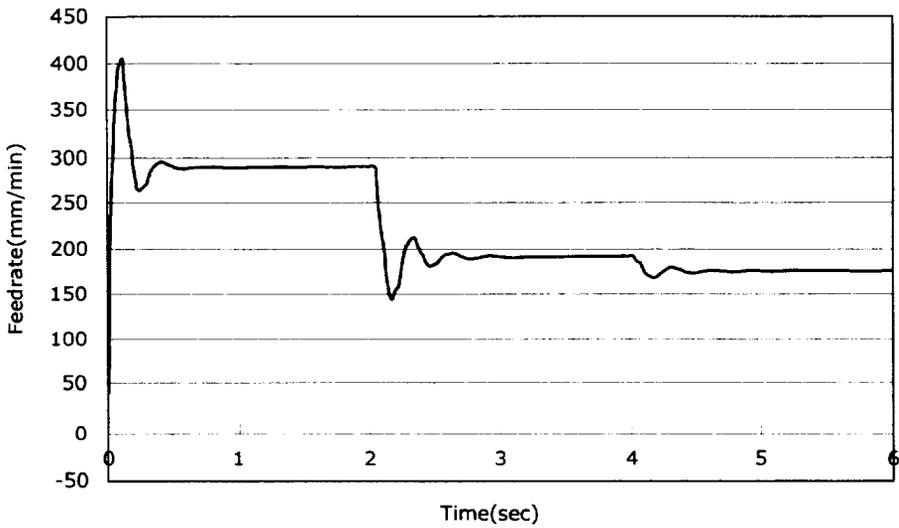


그림 3-11 반경방향 깊이에 대한 이산 PID 제어기의 시뮬레이션
 <CNC 외관적응기의 절삭력 시뮬레이션>

제 4 장 Tool Monitoring System 적용

4.1. 실험장치의 개요

이 장에서는 기존의 시스템에 부가적인 장치 및 다른 구조변경을 필요로 하지 않으면서 동시에 고가의 센서를 필요로 하지 않는 Tool Monitoring System을 이용한 절삭력 감시 시스템을 실제 절삭공정에 적용하기 위해 실험장치를 구성하였다. 그림 4-1은 실험장치의 구성도를 나타낸 것이며 그림 4-2는 실제 절삭 실험을 수행하는 것을 나타내었다. 실험에 쓰인 머시닝센터는 한국화낙의 소형 머시닝센터이다.

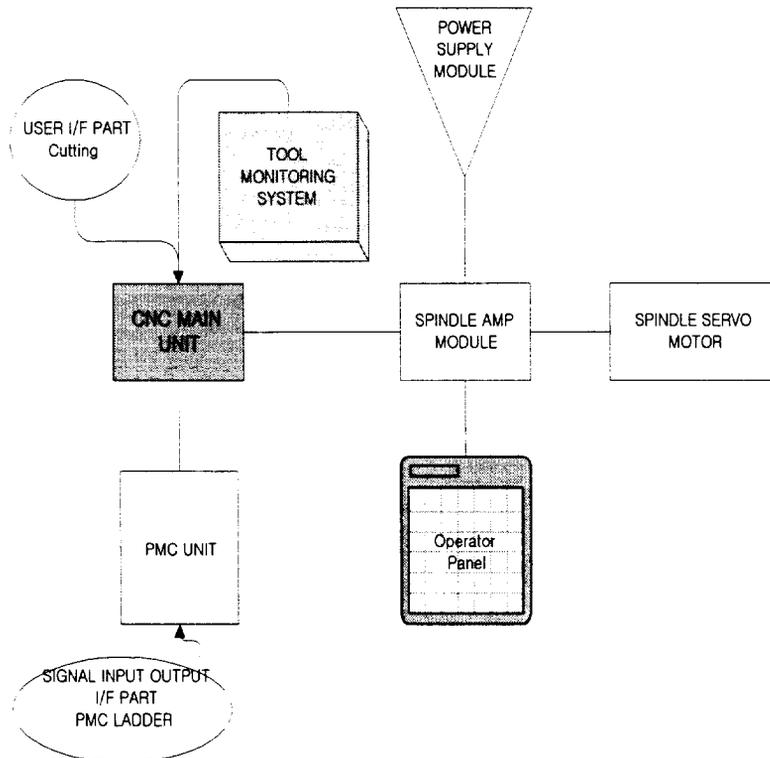


그림 4-1 실험 구성도

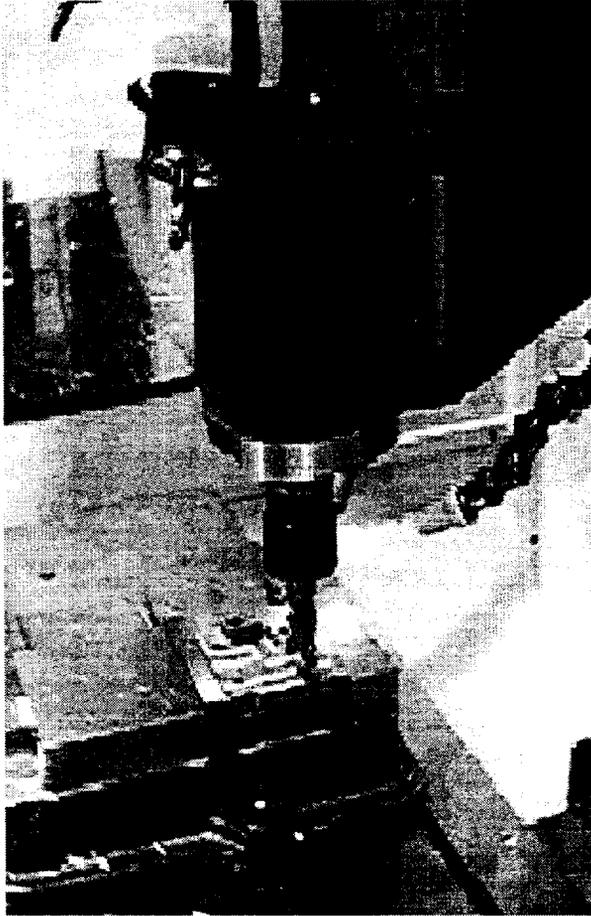


그림 4-2 절삭력 실험 장면

4.2. 실험장치의 구성 요소

CNC 제어기는 일본 FANUC제품인 FS-18MC를 사용하였다. 본 CNC에는 일반적으로 널리 알려진 Custom MACRO B Program 이외에 CNC의 Custom Software로 C-Language Executor와 MACRO Executor가 탑재 가능하며 CNC 제어기 내부에 보간 및 절삭부하 외란 적응제어기가 포함되어 있어서 제어 프로그램에 의해 생성된 이송률에 의해 Smooth한 절삭력 제어하의 가공공정을 수행할 수 있다.

스핀들 모터 및 서보모터는 일본 FANUC제품인 α Spindle Motor와 α Servo Motor를 사용하였다. Spindle Motor는 최대 8000rpm까지의 회전수를 낼 수 있으며 전용인버터에 의해 원하는 주파수로 구동이 가능하다.

그림 4-3 및 4-4는 X-Y Recorder와 Servo/Spindle Check Board를 나타낸 것이다. X-Y Recorder는 YOKOGAWA사의 TYPE-3314이며 FANUC Servo 및 Spindle Check Board에서 검출 가능한 A-D/D-A 신호를 가시화 시키는데에 사용되었고 또한 MACRO Program의 측정 파형을 검증하는데 사용하였다.

Y-axis terminal

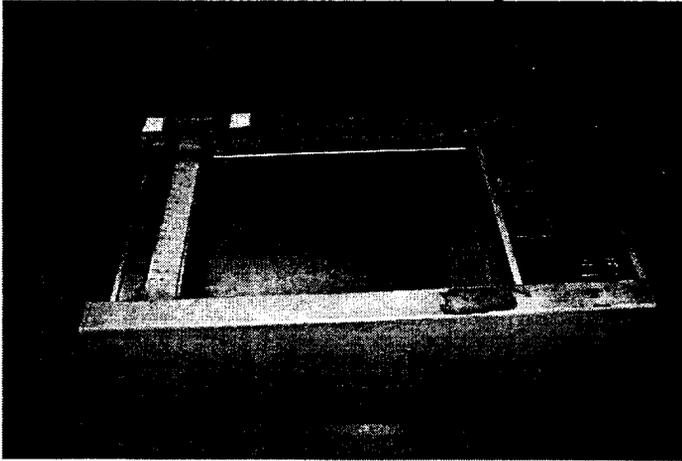


그림 4-3 X-Y RECORDER
YOKOGAWA ; TYPE-3314

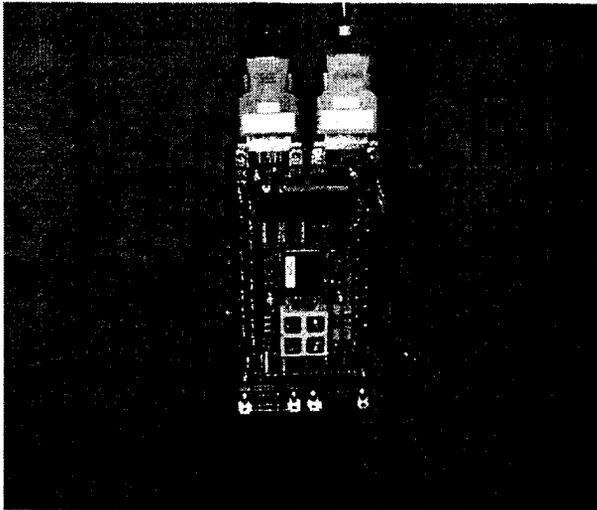


그림 4-4 Spindle Check Board(FANUC)

4.3. Tool Monitoring System 프로그램의 구성

그림 4-5는 구현된 Tool Monitoring System의 구현 알고리즘을 모식화한 Flow Chart이다. NC 기능이 수행되는 동안 실시간으로 background로 각종 처리가 가능한 MACRO Executor 기능을 사용하여 CNC화면에 부수적인 사용자 화면을 그림4-6과 같이 구성하였다.

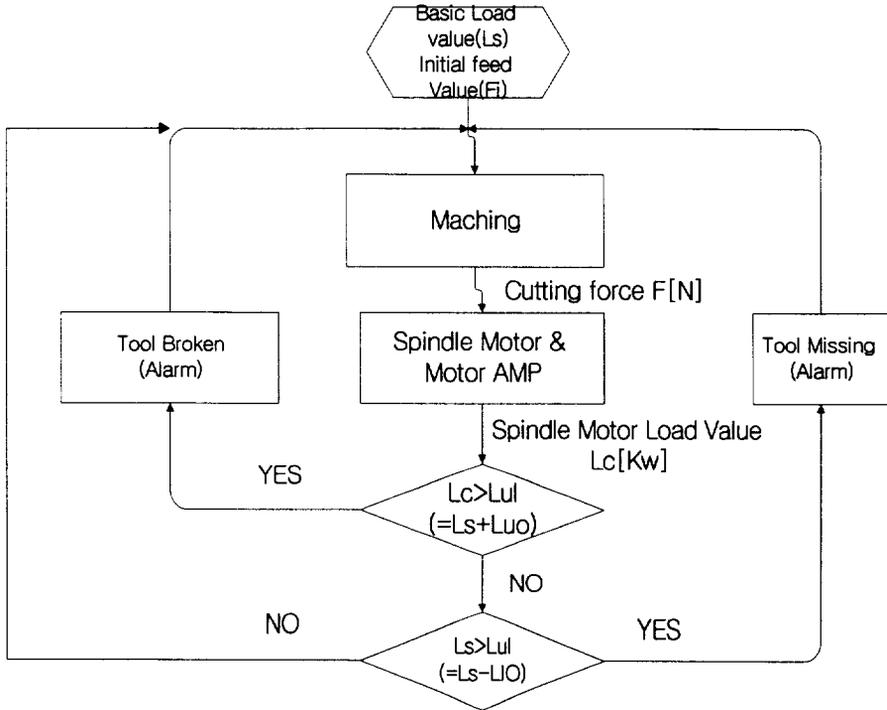


그림 4-5 Tool Monitoring System의 Flow Chart

그림 4-6은 NC기능이 수행되는 동안 실시간으로 CNC의 기능에 부가되어 나타나는 사용자화면을 나타낸 것이며 Background로 각종처리가 가능한 MACRO Executor 기능을 사용하였다.

Tool Monitoring System 프로그램은 Tool Monitor를 위한 각종 기본 설정값 등록을 위한 Parameter 화면, Motor의 전류값을 부하량으로 산정하여 표시하는 Tool Loadmeter 화면, 그리고 Tool Monitoring 동안 각종 Alarm 정보가 나타나는 Alarm History화면의 3가지 화면으로 구성하였다.

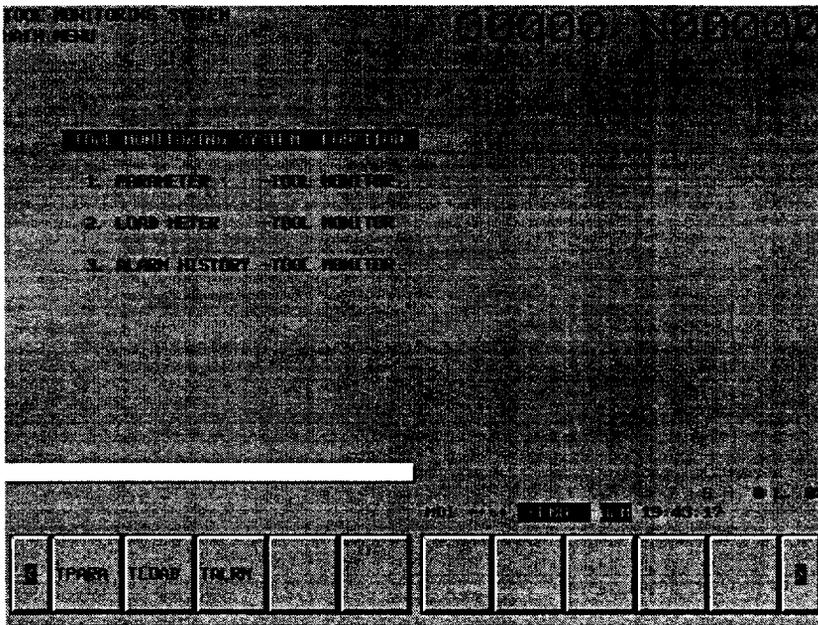


그림 4-6 Tool Monitoring System 화면
<Main 화면>

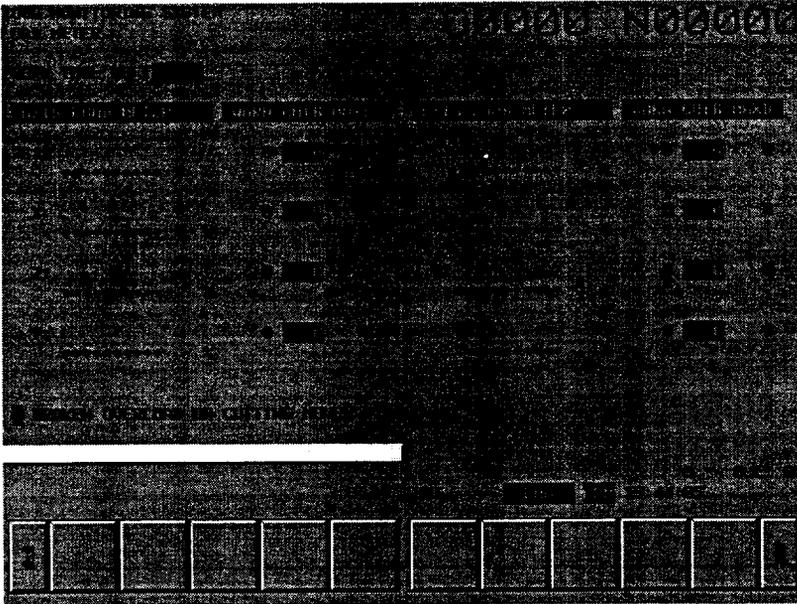


그림 4-7 Tool Monitoring System 화면
 <부하감시 화면>

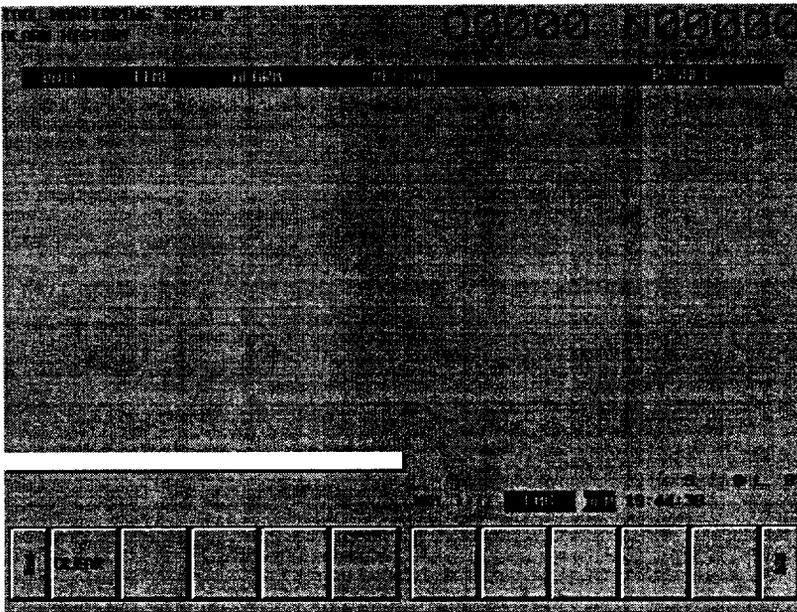


그림 4-8 Tool Monitoring System 화면
 <Alarm History 화면>

4.4. 실험결과

본 장에서는 본 논문에서 제시한 Tool Monitoring System의 성능을 확인하기 위해 X축의 단일 방향 이송에 대하여 주축모터의 절삭부하 측정실험을 수행함과 동시에 일반적인 이송률에서 절삭부하 측정실험을 하였다. 두 방식의 비교는 Tool Monitoring System의 적용으로 가공시에 발생하는 공구의 파손을 감지하여 사용자로 하여금 신속한 판단을 가능하게 하여 생산성의 향상에 기여한다는 것을 보여주고 있다. 이것은 급격한 힘의 변화를 사용자가 파악함으로써 공구 파손뿐만 아니라 장비의 효율적인 운영을 도모할 수 있다는 가능성을 보였다. 그림 4-9는 고정된 이송률하에서(Spindle Motor의 회전수가 $1500[\text{min}^{-1}]$ 일 경우) 공구가 파손되는 것을 측정한 사례이며 그림 4-10은 공구가 파손되었을 때 Tool Monitoring System을 이용하여 X, Y축 Motor의 절삭부하를 감시한 사례이다.

실험에 사용한 공구는 지름 10 [mm], 절삭인선이 4개인 엔드밀을 사용하였고 주축 회전수는 1000 [rpm]으로 설정하였으며 가공소재는 절삭저항의 저감을 고려하여 알루미늄을 사용하였다. 표 4-1은 실험에 적용된 절삭조건을 나타내었다. 가공공정이 이루어지는 동안에서의 절삭력 신호는 CNC 제어기 내부에서 MACRO Program에 의해 1 [msec]마다 계산되고 동시에 1 [msec]마다 평균값이 계산되어 기준 절삭력과 비교하기 위한 피드백 입력으로 사용된다. 기존 방식에서 주어지는 일률적인 이송률은 최대 절삭깊이에서 기준 절삭력의 값인 0.1 [Nm]가 나오는 이송속도로 정하였으며 절삭력 제어시의 기준 절삭력도 0.1 [Nm]로 할당하였다.

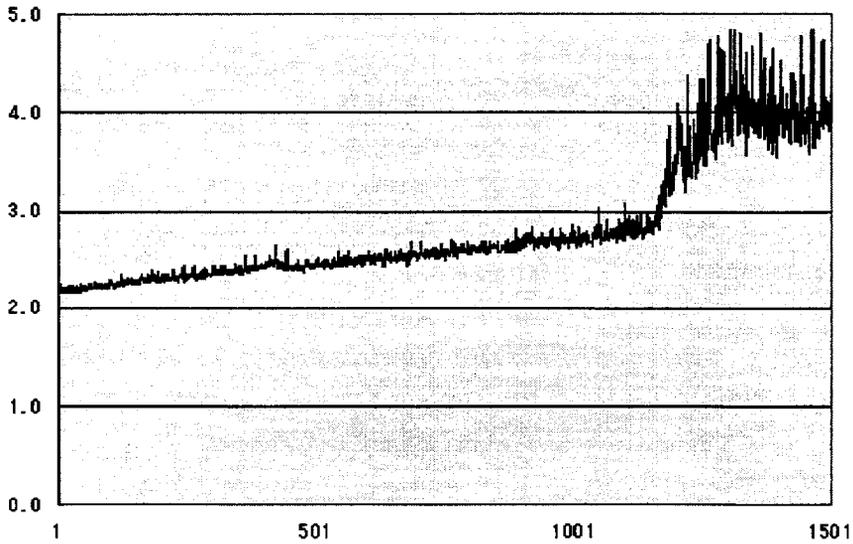


그림 4-9 고정된 이송률 하에서의 가공공정 실험
(Spindle Motor의 절삭 부하 측정)

WAVE DIAGNOS. (GRAPHIC)

00004 N00000

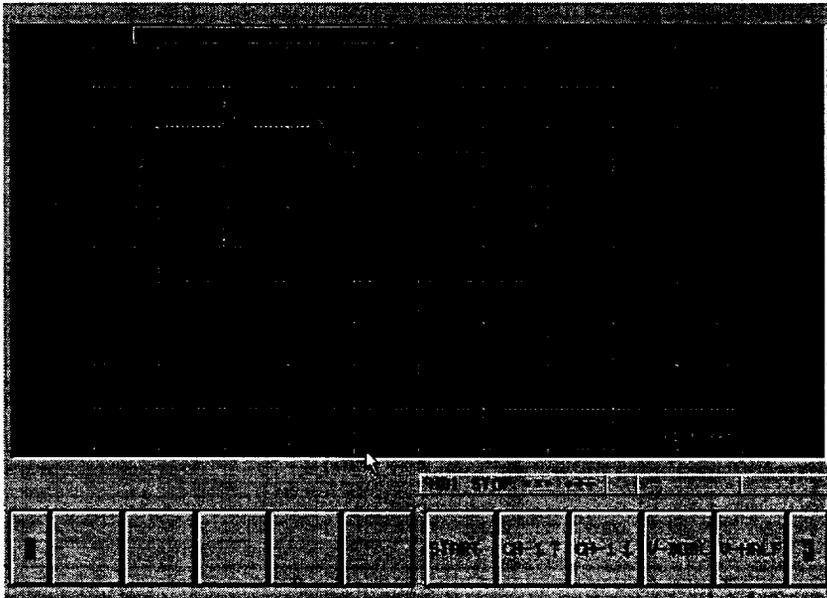


그림 4-10 Tool Monitoring System에서
이송모터 절삭력(CNC 내부에서 측정)감시화면

표 4-1 절삭 실험 조건

측정대상	Resultant Force(1000N)
이송률	80~100 mm/min
주축 회전수	1000 rev/min(min^{-1})
공구의 종류	\varnothing 10 mm HSS 4-tooth long end mil
Workpiece	Al-6061
Axial depth	1-2-3 mm
Radial depth	10-20-30 mm

본 장에서는 제안된 Tool Monitoring System을 이용하여 알루미늄 소재(Al-6061)의 시편에서 축방향 절삭깊이의 변화와 원호를 포함한 반경방향경로에 대한 절삭력 감시실험을 수행하였다.

4.4.1. 축방향 절삭깊이의 변화

공구가 중력방향 즉, Spindle Motor의 수직방향으로 공작물에 접근하게 되면 절삭력은 2장에서 제시한 Merchant의 절삭해석을 근거로 절삭력 측정하여야 한다. 하지만 이송축(X, Y축)보다 Spindle Motor 축(Z축)에서 공작물과 공구가 먼저 접촉하게되므로 공작물의 절삭깊이에 따라 상대적으로 Spindle Motor의 절삭저항이 이송축보다 높게 나타나는 것이 일반적이다.

또한 X축 방향으로 절삭 이송할 때 X축 이송모터의 전류는 3장에서 제시한 모델을 통해 간접측정에 적용될 수 있다. 그러나 정지하고 있는 Y축 모터의 경우에는 정지 모터의 특성을 파악해야만 한다. 일반적으로 CNC 머시닝 센터의 이송축 모터는 정지하고 있을 때 정지 직전의 토크 상황을 반영하여 정지 토크를 갖고 있다고 알려져 있다. 그러나 이 정지 토크를 예측하는 것은 매우 힘든 일이다. 따라서 Y축의 경우에는 절삭이 일어나기 직전에 측정한 전류를 정지 토크로 보고 이 값을 기준으로 전류 모델을 적용하였다.

그림 4-11과 4-12에서 Spindle Motor의 절삭저항이 절삭깊이의 변화에 따라 원호 이송구간인 25 [sec] - 60 [sec] 사이에서 Spindle Motor가 이송 Motor의 절삭저항보다 급격히 높게 형성되는 것을 알 수 있다.

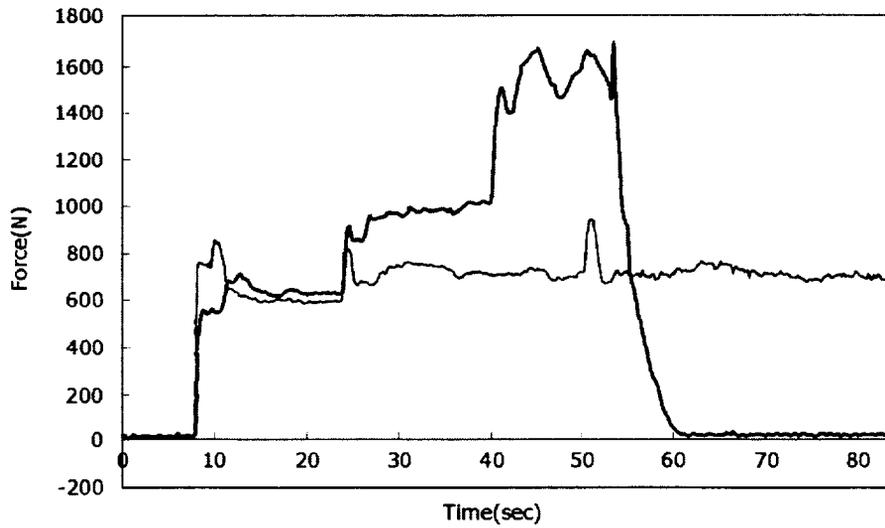


그림 4-11 축방향 절삭깊이 변화시의 Spindle Motor 절삭부하 측정

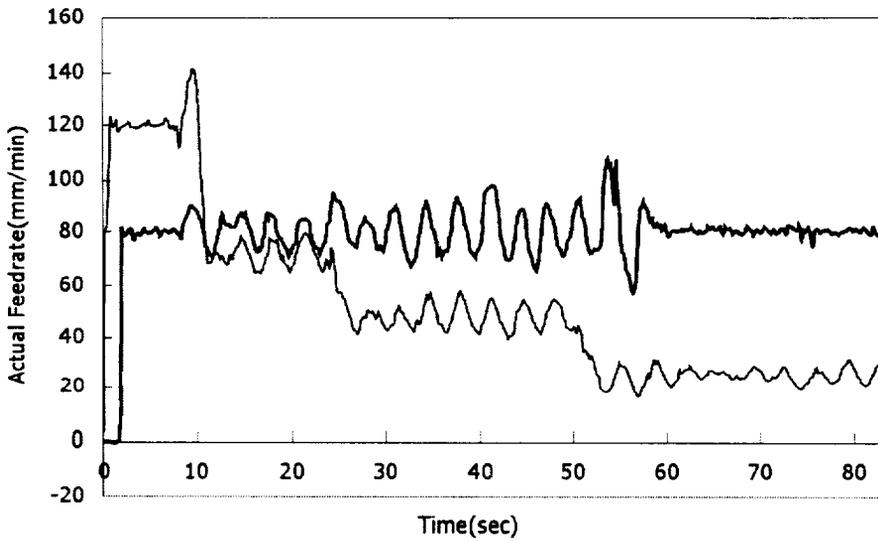


그림 4-12 축방향 절삭깊이 변화시의 X,Y 이송 Motor 절삭부하 측정

4.4.2. 원호를 포함한 반경방향경로 가공

공구가 반경방향에서 가공 데이터의 형상에 따라 절삭이 일어나는 경우에는 공작물의 가공 정밀도보다는 공구에 걸리는 합력에 절삭력 측정을 하여야 하므로 공작물의 관점에서 보면 황삭공정으로 간주하여야한다. 따라서 CNC 보간기에서는 합력을 우선적으로 제어하게 된다.

본 실험에서는 45° 의 각도로 X, Y축을 동시에 이송한 후 반경 25 [mm] 의 1/4 원호를 그리고 다시 45° 각도, X, Y축 동시 이송으로 빠져나가는 반경방향 가공시 절삭력을 측정하였다. 각 경로에서 반경방향 절삭깊이가 다르고 원호에서는 연속적으로 절삭깊이가 변화하는 과정을 보인다. 공구의 반경을 고려하면 실제 가공되는 원호는 반경 15 [mm] 가 된다.

그림 4-14를 보면, X, Y축 동시 이송 시에도 반경 방향 절삭깊이의 변화에 대해 절삭력 측정이 원활하게 모니터링 되고 있음을 알 수 있으며 원호 이송구간인 25 [sec] - 55 [sec] 사이에서는 CNC가 보간 지령을 하지 않은 결과에서 나타나는 절삭력의 측정이 안정적으로 수집되고 있음을 알 수 있다.

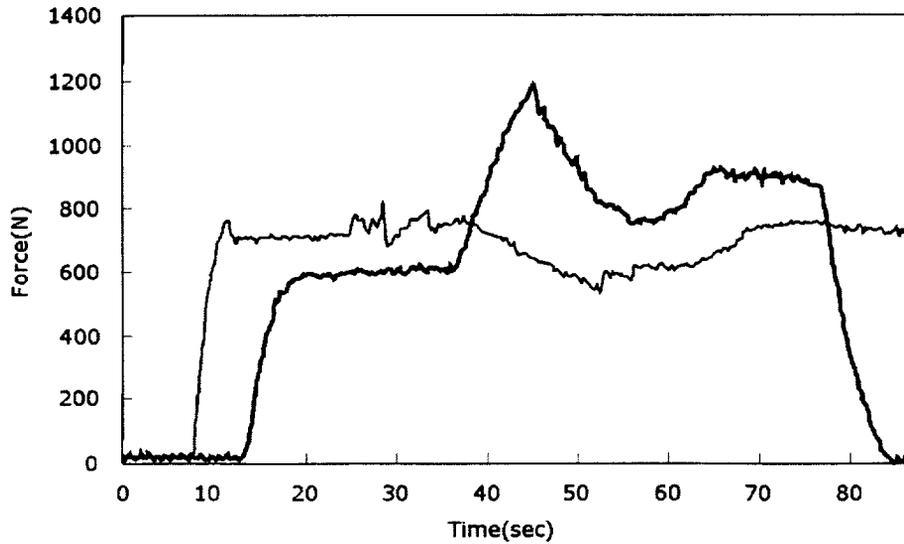


그림 4-13 반경방향 가공시의 Spindle Motor 절삭부하 측정

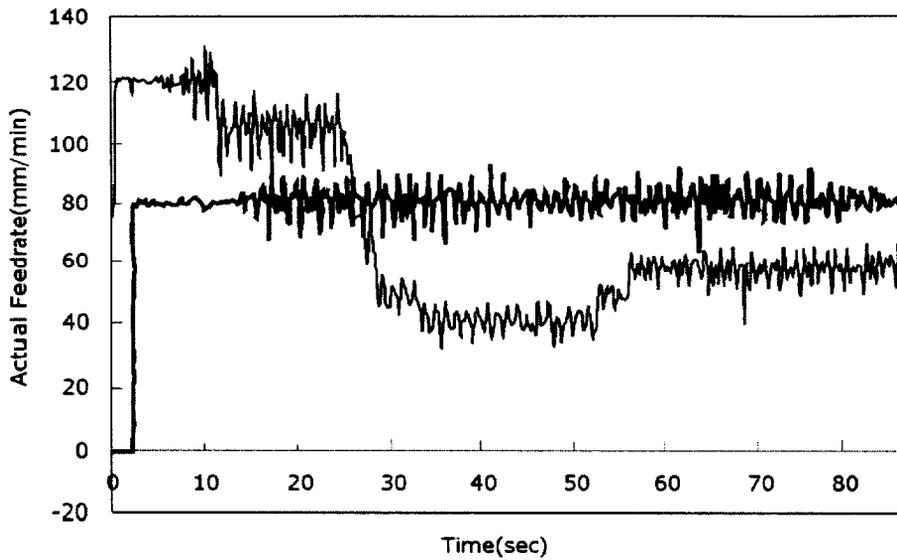


그림 4-14 반경방향 가공시의 X,Y 이송 Motor 절삭부하 측정

제 5 장 결 론

기계가공에서 절삭력을 측정하는 이유는 가공시간의 단축에 의한 생산성의 증가 외에도 공구 파손의 실시간 감지, 채터링의 감지 등 공장 자동화를 위한 기계의 상태 감시 분야에서 필요한 사항이기 때문이며 CNC의 고기능화 및 지능화와 자동화를 위해서도 필수적인 사항이기 때문이다. 또한 절삭력 측정을 위하여 제어 시스템이 갖추어야 될 사항으로는 설치가 용이해야 하면서 비용이 저렴해야 하고 가공하고자 하는 공작물의 형상에 제약을 받지 말아야 하며 기존의 공작기계 시스템과의 접목이 용이해야 한다. 절삭력에 대한 적응제어가 구현되지 않은 CNC시스템의 경우에는 별도의 적응제어기를 적용하기 위하여 절삭력을 측정해야 하는 과정이 요구되며 절삭력 측정 방법으로는 공구동력계를 이용한 방법과 주축 및 이송축에 흐르는 전류를 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 공구동력계나 가속도계를 이용하는 경우에는 비용 및 설치상의 문제, 센서 보호를 위해 절삭유 급유시 제약을 받는다는 점, 가공해야 할 공작물의 형상에 따라 센싱 위치가 바뀐다는 점, 이송 스트로크에 제약을 받는다는 점등을 단점으로 들 수 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 CNC 공작기계의 구조를 변경시키지 않고 모터의 전류를 단순히 CNC MACRO Program만을 사용하여 가공시 공구에 걸리는 절삭력을 간접 측정한 뒤 이를 이송률의 조정 Level에 이용하여 절삭 깊이나 재료의 변화에 상관없이 가공 중에 발생하는 실제 절삭력을 기준 절삭력과 비교 판단하도록 하여 공구 파손 감시 시스템을 구현하였다.

다음은 연구결과를 통해 얻은 결론이다.

- (1) 이송축모터와 주축모터의 전류를 CNC제어기 내부에서 실시간으로 측정·감시하고 이를 토크 변화량으로 계산하여 공구파손을 검출 하는 시스템의 타당성을 검증하였다.
- (2) 절삭력 감시를 통하여 가공 도중에 절삭력이 일정하게 유지될 경우 에 공구에 걸리는 급작스런 힘의 변화를 파악함으로써 공구 파손의 경향 및 공구 수명관리에 대한 대책이 수립될 수 있다는 가능성을 보였다. 실제로, 가공 도중에 일어나는 공구의 파손은 공작기계뿐만 이 아닌 공작물에도 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 절삭력 감시를 통해 얻을 수 있는 장점은 무척 중요하다.
- (3) 고가의 센서를 사용하지 않으면서 기존 공작기계의 구조변경이나 별도의 부가적인 장치 없이 공구부하 감시시스템(Tool Monitoring System)을 구현하였다는 점에서 실용화 및 상용화의 가능성을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 머시닝센터에 적용되는 공구의 종류가 다양함에도 불구하고 이론적으로 접근이 용이한 엔드밀만을 고려한 점이 미흡하다고 할 수 있다. 향후에는 범용 PC의 범주에서 CNC를 한 개의 디바이스(PC에 부가된 장치)처럼 접근할 수 있는 PC Based NC를 채택한다면 OMM(On Machine Measurement) System과 연동한 통합생산관리 시스템 구축을 위한 공구관리 DB 구축이 개발 가능할 것이라 판단된다. 그리고 CNC MACRO언어 외에 PC에서 운용이 가능한 범용 프로그래밍 언어(Visual C++, Visual Basic 등)를 통한 개발이 동시에 이루어진다면 보다 효율적이고 신뢰성 높은 Tool Monitoring System

으로 발전할 수 있으리라 기대된다. 또한 본 연구에서 MACRO Program 개발시 적용된 제어 알고리즘으로 PID 제어를 사용했지만 추후 가변구조제어 기법을 사용한다면 보다 효율적인 절삭력 측정 및 판단이 가능할 것이라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Jetry, S., "Measuring Cutting Tool Wear On-Line : Some Practical Consideration.", *Manufacturing Engineering*, July, 1984, pp.55~60.
- [2] 윤재용, 양민양, 박화영, "이중신호에 의한 공구 파손검출에 관한 연구", *대한기계학회 논문집 제 16권 제 4호*, 1992, pp.707~712.
- [3] J. H Tarn & M. Tomizuka, "On-line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling.", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, 1989, pp.206~212.
- [4] Y. Altintas & I. Yellowley, "In-process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models.", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, Feb. 1989, pp.149~157.
- [5] R. Rahman "In-process Detection of chatter Threshold.", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, Feb. 1988, pp.44~50.
- [6] T. Moriwaki, M. Tobito, "A New Approach to Automatics Detection of Life of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement.", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 212, Aug., 1990, pp.212~218.
- [7] Iwata, Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-process Sensing of Tool Wear.", *Annal of the CIRP*, Vol. 25, No.1, April, 1977, pp.21~26.

- [8] Y. Koren, Computer Control of Manufacturing Systems, 1983, McGraw-Hill.
- [9] 권원태, “모터전류를 이용한 공작기계 이상상태 감시”, ‘97 정밀가공 및 공작기계부문 기술세미나 - 제2회 기계상태 감시 및 이상진단 워크샵, 1997, pp.9-18.
- [10] Bryne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., Konog, W. and Teti, R., “Tool Condition Monitoring(TCM) - The Status of Research and Industrial Application.”, Annals of the CIRP, Vol. 44/2, 1995, pp.541~567.
- [11] 김기대, 이성일, 권원태, 주종남, “주축전류신호를 이용한 절삭력의 추정과 이송속도의 적응제어”, 한국정밀공학회 추계학술대회, 서울, 건국대학교, 1996.11, pp.150~156.
- [12] Y.S. Tarng, and S.T. Cheng, “Fuzzy Control of Feed Rate in End Milling Operation”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.33, No.4, 1993, pp.643~650.
- [13] L.K. Lauderbaugh, A.G. Ulsoy, “Model Reference Adaptive Force Control in Milling”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.111, 1989, pp.13~21.
- [14] Oren Masory, Yoram Koren, “Adaptive Control System for Turning”, Annals of the CIRP, Vol.29, 1980, pp.281~284.
- [15] 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, 1990, pp.611~617.

- [16] Dornfeld, D. A., Lan, M. S., "In-Process Tool Fracture Detection." ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, 1984, pp.111~118
- [17] Kannatey_Asibu, Jr., E., and Dornfeld, D. A., "Quantitative Relationship for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting." ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp.330~340
- [18] Lan, M. S., and Naerheim, Y., "In-Process Detection of Tool Breakage in Milling." ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, No.3, 1987, pp.300~302
- [19] Y. Altintas, "In-Process Detection of Tool Breakage Using Time Series Monitoring of Cutting Forces.", Int. J. Mach. Tool and Manufact. Vol. 28, No.2 1988, pp.157~172
- [20] T. Blum, I. Inasaki, "An Application of Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting process.", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, Aug., 1990, pp.203~211.
- [21] 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, Jan. 1995, pp.59~62.
- [22] Kim Jong-Won, "Adaptive Cutting Force Controller for Milling Processes by Using AC Servodrive Current Measurements", Proc. of the 11th KACC, Oct. 1996, pp.840~843.

- [23] 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, 1992, pp.386~392.
- [24] Matsushima, K., Bertok, P., and Sata, T., "In-Process Detection of Tool Breakage by Monitoring Spindle Motor Current of a Machine Tool." Measurement and Control for Batch Manufacturing. The Winter Annual Meeting of ASME, Phoenix, Arizona, Nov. 13-19, 1982, pp.14~19.
- [25] FANUC, FANUC MACRO Compiler/MACRO Executor Programming Manual, B-61803-1(1991), 1999年版
- [26] FANUC, FANUC AC Servo AMPLIFIER α Series 仕様説明書, B-65162-1(1994), 1998年版
- [27] 김태용, "견실한 적응제어기를 이용한 절삭력 제어에 관한 연구", 박사 학위논문, 서울대학교, 1995.
- [28] 서남섭 著, 金屬切削理論, 東明社, 1991, pp.58~61, 140~145, 223~223.
- [29] Y. Koren, and Lo, C. C., "Advanced Controllers for Feed Drives", Annals of the CIRP, Vol.41/2, Aug., 1992, pp.1~10.
- [30] Elbestawi, M. A. and Sagherian, R., "Parameter Adaptive Control in Peripheral Milling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.27, No.3, 1987, pp.399~414.
- [31] Isermann, R., "Parameter Adaptive Control Algorithms - A Tutorial", Automatica, Vol.18, No.5, 1982, pp.513~528.

- [32] Elbestawi, M. A., Mohamed, Y. and Liu, L., "Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining", Trans. of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.112, Dec. 1990, pp.611~617.
- [33] 오성훈, "절삭력 및 AE에 의한 엔드밀의 공구마모 및 파손검출에 관한 연구", 박사 학위논문, 전북대학교, 1998.
- [34] 김정호, 은용순, 조동일, "가변구조제어기를 사용한 CNC 공작기계의 절삭실험", Proc. Of the 11th KACC, Vol.2, Oct. 1996, pp.852~855.
- [35] 이재영, 권욱현, 박재현, "머시닝 시스템의 실시간 제어를 위한 개방형 구조 제어기", Proc. of the 11th KACC, Vol.2, Oct. 1996, pp.1324~1327.
- [36] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, Jr., "Mechanics of Materials", McGraw-Hill.
- [37] Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", Trans. of the ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.114, Nov., 1992, pp.386~392.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 감사를 드려야 할 분이 너무 많이 계십니다.

가장 먼저 학부 때부터 지금까지 부족한 저를 줄곧 일관된 모습으로 지켜주시며 지도해 주신 권순재 지도교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 주님께서 항상 권순재 지도교수님과 교수님 가정에서 함께 하시길 기도 드립니다. 그리고 항상 바쁘신 가운데도 보잘것 없는 논문을 세밀하게 심사해주시고 지도와 격려를 아끼지 않으신 안두성 교수님, 김상봉 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

학부 때부터 자상한 격려와 많은 가르침을 주신 이도형 교수님, 김일선 교수님, 김형자 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

꾸밈하게 실험실을 사수하며 내일을 준비하는 사랑하는 후배 면호군, 인수군, 이제는 이론이 아닌 현장에서 공작기계의 자동화 엔지니어가 된 창용이, 그리고 항상 후배들의 대변인이 되어 나를 괴롭히는(?) 신기수 이 모든분께 감사의 마음을 전합니다. - “야~! 니네들 똑바로 안해!”

후배들에게 항상 다정다감하신 박사과정의 손정기 선배님, 조학래 선배님 두분에게도 감사의 말씀을 드립니다. 두분의 남은 학기동안 실험과 결과정리가 원활히 잘 진행되길 소망합니다. 실험실의 막내이자 든든한 기둥인 종원군과 부식군에게는 항상 희망과 사랑으로 주어진 하루를 살아가자고 얘기하고 싶습니다.

끝으로 학부를 졸업하고 꽤 많은 시간동안 좌절하며 고민하며 복학과 휴학을 반복하는 동안 집안의 어려움에도 불구하고 늘 곁에서 용기와 희망으로 감싸주며 오늘을 있게 한 사랑하는 아내 남정란과 무척이나 아빠를 따르는 아들 건이 그리고 어느덧 5살이 되어버린 딸 현주, 이밖에 일일이 열거할 순 없지만 저를 아는 모든 분들에게 감사의 말씀 드립니다. 그리고 이마음 영원히 간직하도록 노력하겠습니다.

2002년 1월

김 태 화 올림