

# 밀링공정 중 절삭조건 변화에 따른 절삭력 추종제어를 위한 DSP보드 응용

오영탁\*, 권원태\*\*, 주종남\*\*\*

## DSP Board Application for Regulation of Cutting Force under Varying Cutting Conditions during Milling Process

Young Tak Oh\*, Won Tae Kwon\*\*, and Chong Nam Chu\*\*\*

### ABSTRACT

Spindle motor current is used to estimate the cutting force indirectly and control the feed rate for the cutting force regulation. The proposed algorithm is implemented to a DSP board based hardware for the industrial application. The software to make POP terminal communicate with the DSP board and POP server is coded under Windows 95 environment. Experiments under varying cutting conditions show that the DSP board recognizes the information of installed cutting tool and cutting conditions delivered from the POP server to use them for the proper control of the feed rate. The cutting force is regulated well during machining of tapered or stepped workpiece and circular shaped workpiece as well.

**Key Words** : Spindle motor current (주축모터 전류), Cutting force regulation (절삭력 추종제어), Feedrate control (이송속도 제어), DSP board application (DSP보드 응용), Communication with host computer (주전산기와 통신)

### 1. 서론

최근 자동화 및 무인화에 대한 관심이 급속도로 증가하면서 생산 현장에서의 자동화 및 무인화를 위한 FMS/CIM 시스템의 구축에 대한 연구가 학계 및 산업계에서 활발히 이루어지고 있다. 생산현장에 FMS/CIM이 완벽하게 구축될 경우 생산계획의 수립에서부터 생산공정의 관리, 최종 생산품의 검사 등의 과정이 완전히 자동화 될 수 있고 따라서 생산성 및 생산효율의 상승, 원가절감 및 손실의 감소와 같은 효과를 기대할 수 있다. 그러나 제반

기술의 부족으로 아직 완전한 FMS/CIM 시스템의 구축이 이루어지지 못하고 있다. 완전한 FMS/CIM 시스템의 구축을 위한 가장 기본요소 중의 하나가 절삭상태의 실시간 감시 및 제어기술이다. 이상상태가 발생하면 공작기계에 과부하가 가해지게 된다. 이로 인해 공작기계의 수명을 단축되고 공작물의 정밀도가 저하되며 심한 경우 공작물 자체가 파손되어 결국 생산효율의 저하 및 생산원가의 상승을 초래한다. 따라서 생산성의 향상을 위한 완전한 FMS/CIM 시스템의 구축을 위해서는 절삭상태의 실시간 감시 및 제어기술이 필수적이다.

\* 서울대학교 대학원

\*\* 서울시립대학교 정밀기계공학과

\*\*\* 서울대학교 기계설계학과

그 동안 절삭상태의 실시간 감시 및 제어를 위한 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 왔다. Altintas 등은 절삭력의 1차 차이 값(first difference)과 2차 차이 값(second difference) 및 이송전류 신호의 시계열(time series)분석을 이용하여 공구파손 검출이 가능함을 보였고<sup>(1, 2)</sup>, Takata 등은 스핀들 회전속도의 변화를 관찰하여 공구의 파손을 검출하는 연구를 수행하였다<sup>(3)</sup>. Yan 등은 복합센서를 사용하여 밀링 공정중의 공구파손 검출에 관한 연구를 수행하였으며<sup>(4)</sup>, Donfeld 등은 절삭력과 AE(Acoustic Emission) 센서를 이용하여 정면 밀링 시 공구마모의 검출에 대한 연구를 수행하였다<sup>(5)</sup>. Liu 등은 주축 유도모터의 전류측정을 통한 드릴파괴의 검출에 대한 연구를 수행하였고<sup>(6)</sup>, Lee 등은 내장형 절삭력 센서 및 AE 센서를 사용하여 선삭 공정 중 공구파괴 검출이 가능함을 제시하였으며<sup>(7)</sup>, Park 등은 주축모터의 동력의 측정을 통한 절삭상태 감시 알고리즘을 제시하였다<sup>(8)</sup>. 그러나 이런 활발한 연구에도 불구하고 실제 산업현장에서 적용될 수 있는, 실용적인 절삭상태 감시시스템의 개발은 아직 미진한 실정이다. 따라서 완전한 FMS/CIM 시스템의 구축을 위해서는 실용성 및 신뢰성이 보장되는 절삭상태 감시시스템의 개발에 대한 연구가 꾸준히 진행되어야 한다.

본 연구에서는 다양한 절삭조건에서의 절삭실험을 통해 시스템에 대한 신뢰성 및 안정성의 확보에 중점을 두었으며 알고리즘의 수정 및 개선을 통해 절삭 정보를 실시간으로 인식하고 이에 따라 과부하의 한계 값이 자동 설정될 수 있게 함으로써 실용성의 확보를 가능하도록 하였다. 또한 DSP Board의 프로그램을 수정하여 WIN95 환경에서 완벽하게 작동할 수 있는 시스템의 개발에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 과부하 검출 및 제어시스템

### 2.1 과부하 검출을 위한 감시 파라메터

DC 모터의 경우 모터 토크와 모터에 인입되는 전류는 서로 비례관계를 가진다. 하지만 최근에는 AC 서보 모터를 많이 사용하고 있다. 따라서 전류를 측정하여 AC 서보 모터에 걸리는 토크를 예측하기 위해서는 3상의 교류 전류를 등가 직류 전류로 환산하여야 한다. 환산 방법의 대표적인 것으로는 D-Q 변환과 평균자승법(root mean square)이 있

다. 본 연구에서는 평균 자승법을 이용하여 간접적으로 절삭력을 측정하였다.

### 2.2 시스템의 신뢰성 및 안정성 검증

평균 자승법으로 절삭력을 간접 측정된 이후 이송속도를 제어하여 절삭력을 추종 제어하는 방법이 이미 개발되었다. 개발된 기술이 공작물의 재질 및 형상, 가공 경로 등과 같은 다양한 절삭조건에 영향을 받지 않고 안정적으로 일관성 있게 작동하는지 확인하기 위하여 테이퍼 형상의 공작물에 대한 절삭실험, 실험, 계단적으로 변하게 보았다.

기하부하변화  
주축전류

### 2.3 실험장시 및 시스템구성

실제 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 시스템은 통일중공업(주)에서 제작한 MCH-10 수평형 머시닝센터에서 실험 및 연구를 진행하였다. DSP보드를 이용한 전체적인 실험장치 및 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다.

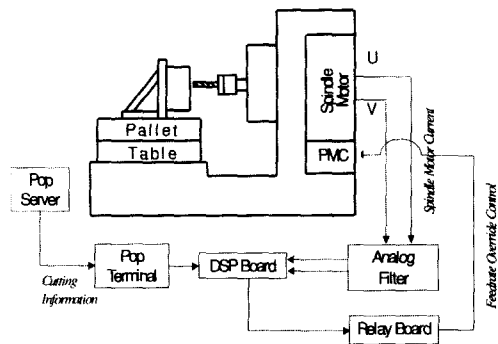


Fig. 1 Experimental set-up

본 시스템에 사용된 DSP보드는 Innovative Integration Co.에서 생산된 것으로 Texas Instrument사의 TMS320C32 칩을 CPU로 사용하고 있으며 4개의 아날로그 입력 채널과 16비트의 DIO 채널을 보유하고 있다. 주축 모터 동력 인입선에 전류센서를 부착하여 전류를 측정하였으며 측정된 전류 신호는 자체 제작한 analog filter(차단 주파수: 270Hz)를 통해 DSP 보드로 전달된다. 이송속도 제어 신호는 DSP 보드의 DIO 포트를 거쳐 PMC로 보내지며

NC 코드에서 설정된 이송속도의 255%까지 제어가 가능하다.

## 2.4 DSP보드를 이용한 절삭력 추종제어의 실험 및 결과

실제 공작기계를 이용하여 공작물을 가공할 경우 공작물의 재질 및 형상에 따라 사용하는 공구의 종류와 주축회전수, 절삭깊이, 이송속도 등 가공조건도 달라진다. 절삭공정 중 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 시스템이 실제 적용되기 위해서는 먼저 시스템의 안정성 및 신뢰성이 다양한 절삭조건에서 충분히 확보되어야 하기 때문에 다양한 절삭조건에서의 실험을 수행하였다.

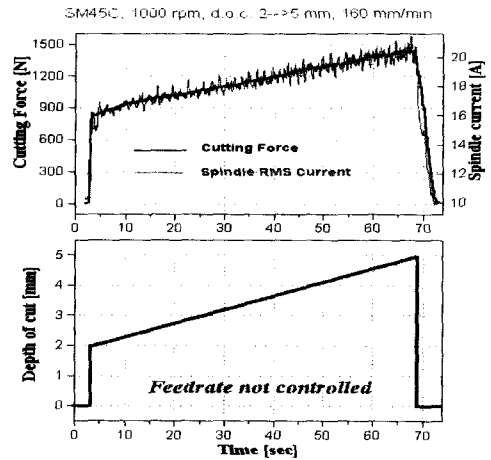
### 2.4.1 절삭깊이의 선형적 변화에 대한 절삭력 제어

절삭깊이가 선형적으로 변하는 공작물의 가공시 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 실험을 수행하였다. 공작물의 재질은 SM45C이며 절삭 깊이는 2mm에서 5mm까지 선형적으로 증가한다. 사용한 공구는 초경 평 엔드밀(직경: 20mm)이며 주축 회전속도는 1000rpm이고 이송속도는 175mm/min으로 설정하였다. Fig. 2는 절삭조건에서 이송속도를 제어하지 않은 경우와 제어하였을 경우의 각각에 대한 절삭력과 전류신호 및 이송속도의 변화를 나타내고 있다.

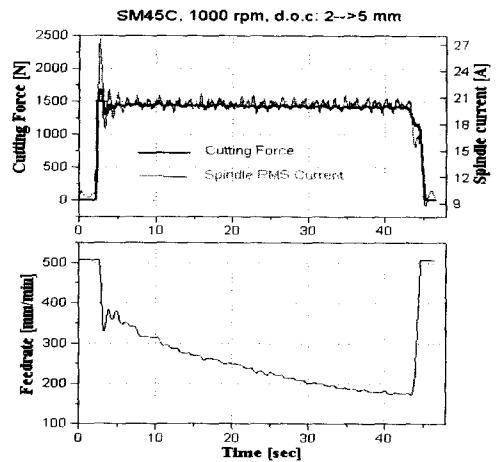
### 2.4.2 절삭 깊이의 단계적 변화 시 절삭력 제어

절삭 깊이를 1mm, 2mm, 3mm로 단계적으로 증가시켰다가 다시 2mm, 1mm로 단계적으로 감소시키면서 공작물을 가공할 경우에 대해 이송속도 제어 시스템을 적용하였다. Fig. 3은 (a)이송속도를 제어하지 않았을 경우와 (b)이송속도를 제어하였을 경우의 각각에 대한 절삭력과 전류신호 및 이송속도의 변화를 나타낸다. 절삭깊이가 갑자기 증가할 경우 절삭력이 급격히 증가하지만 이송속도가 제어되어 일정한 절삭력을 유지하게 되며 절삭 깊이가 갑자기 감소하는 영역에서는 이송속도를 증가시켜 과부하가 걸리지 않으면서 빠른 속도로 절삭함을 알 수 있다.

### 2.4.3 주축의 고속회전시 원호가공에서의 절삭력 제어



(a) Feedrate not controlled



(b) Feedrate controlled

Fig. 2 Cutting force and spindle motor current variations during taper machining

Fig. 4는 원호가공을 위한 공구와 공작물의 형상 및 가공시의 공구 경로를 나타내고 있다. 가공 경로를 설명하면 위치 A에서 위치 B까지는 공구가 공작물에 진입하면서 절삭하는 영역으로 절삭 깊이가 2mm인 상태에서 Y축 방향으로 직선 가공을 하게 되며 위치 B에서 위치 C까지는 시계 방향으로 원호가공을 하면서 절삭 깊이가 2mm에서 5mm까

지 선형적으로 증가한다. 위치 C에서 위치 B까지는 절삭 깊이가 5mm에서 2mm까지 선형적으로 감소하면서 절삭을 하고 다시 원위치 A로 돌아온다. 또한 이 실험에서는 준 정적 민감도가 높은 주축 모터 전류의 특성을 검증하기 위하여 주축 회전 속도를 3000rpm으로 비교적 높게 설정한 상태에서 절삭력을 일정하게 유지하도록 하였다.

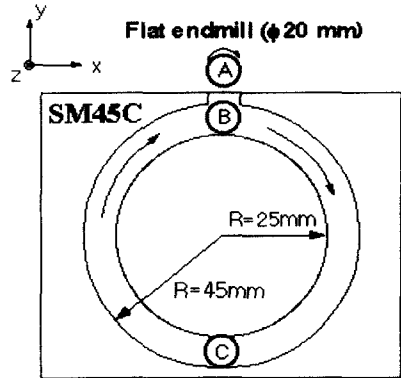
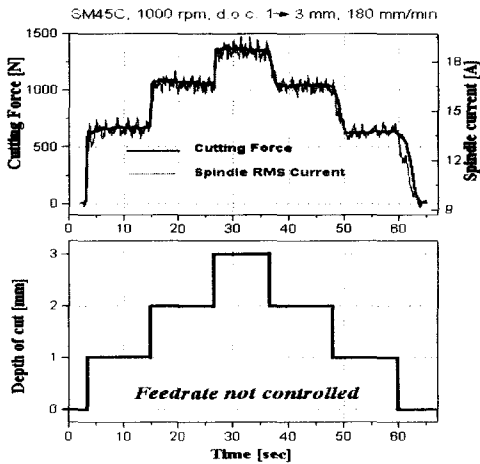
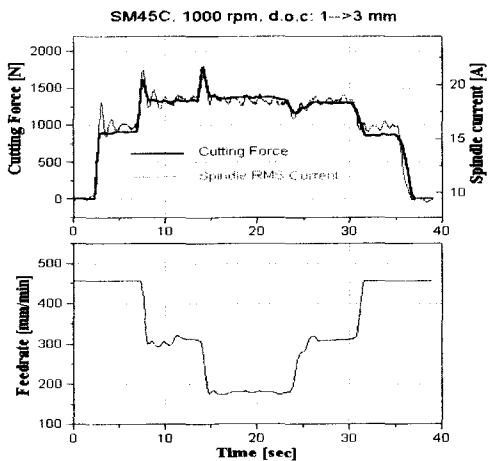


Fig. 4 Tool path in circular machining



(a) Feedrate not controlled



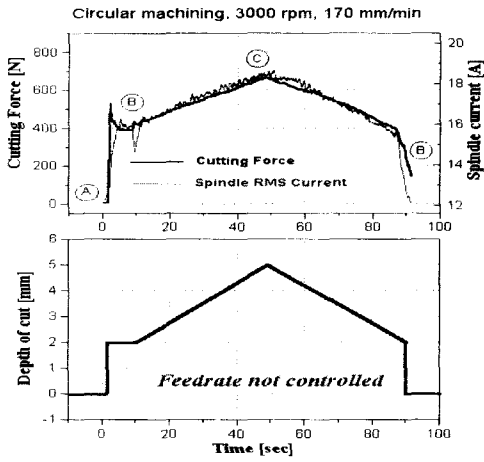
(b) Feedrate controlled

Fig. 3 Cutting force and spindle motor current variations during step machining

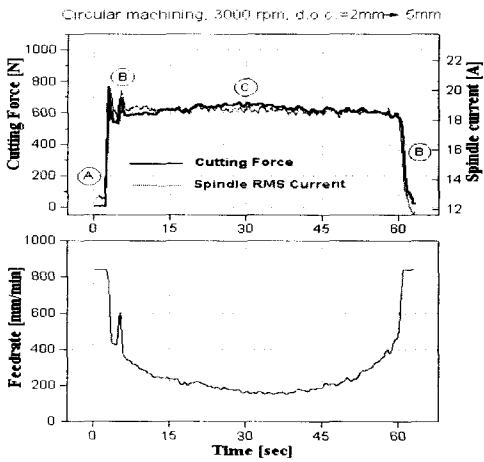
Fig. 5는 이송속도를 제어하지 않은 경우와 제어하였을 경우의 각각에 대한 절삭력, 주축 모터전류, 이송속도의 변화를 나타내고 있다. Fig. 5(a)를 살펴보면 위치 B에서 주축 모터전류가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 위치 B에서 순간적으로 이송이 멈추어 절삭 부하가 감소하기 때문이다. Fig. 5(b)를 보면 위치 B에서 주축 모터전류가 감소함으로 인하여 이송속도가 크게 증가하였으며 이로 인해 절삭력도 크게 증가하였다. 그러나 다시 이송속도가 감소함으로써 절삭력은 일정하게 제어됨을 알 수 있다. 이 실험을 통해 주축 모터 전류를 이용하여 공구의 과부하를 검출하고 이송속도를 제어할 경우 공구가 2축 이상의 가공 경로를 가지거나 주축 회전수가 높은 경우에 있어서도 절삭력을 일정하게 제어할 수 있음을 알 수 있다. 이 실험들을 통하여 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 시스템은 다양한 절삭조건에서 적용 가능함을 알 수 있었으며 그것의 신뢰성 및 안정성을 충분히 검증할 수 있었다. 또한 이송속도 제어 시스템을 적용한 경우의 가공 시간이 그렇지 않은 경우에 비해 단축됨으로 하여 생산성의 향상을 기대할 수 있었다.

### 3. 현장응용을 위한 시스템 구축 및 실험

#### 3.1 WIN95 환경에 적합한 DSP보드의 Host Programming 및 Target Programming



(a) Feedrate not controlled



(b) Feedrate controlled

Fig. 5 Cutting force and spindle motor current variations during circular taper machining

DSP보드의 동작을 위한 프로그램은 과부하 검출 및 이송속도 제어알고리즘이 수행되는 타겟 프로그램(target program)과 타겟 프로그램을 DSP보드에 다운로드(download) 시켜주는 호스트 프로그램(host program)으로 나눌 수 있다. 타겟 프로그램은 DSP보드에 설치되며 호스트 프로그램은 POP 단말기에 설치된다. 타겟 프로그램에는 호스트 프로그

램과의 통신을 위한 함수들이 포함된다. 호스트 프로그램에는 POP Server로부터 전송된 절삭 정보를 DSP보드로 전달하기 위한 통신 함수들이 포함되어 있으며 WIN95 환경에 적합한 Visual C++ 언어로 프로그래밍 되었다. DSP보드 프로그램에 필요한 함수는 보드 제작사인 Innovative Integration Co. 에서 제공하는 라이브러리(Library)를 Internet 상에서 다운로드 받아서 사용하였으며 이를 이용하여 절삭 중 타겟 프로그램이 과부하 검출 및 이송속도 제어 알고리즘을 수행하면서 호스트 프로그램과 통신이 실시간으로 이루어질 있도록 프로그램을 완성하였다. 또한 호스트 프로그램이 절삭 정보를 파일 형태로 인식하고 이를 타겟 프로그램으로 전송할 수 있도록 프로그래밍 하였다. 그리고 현장에서의 사용편의를 위하여 WIN95 화면상에서 별도의 창(window)을 생성하여 사용자가 원하는 시점에서 이송속도 제어 시스템을 동작시키고 종료시킬 수 있도록 하였다. DOS 환경에서는 이송속도 제어 시스템의 시작과 종료를 위해 사용자가 기계의 콘트롤 유닛부에 설치되어 있는 릴레이 보드의 스위치를 조작하여야 하였으나 이송속도 제어 시스템을 위한 별도의 창을 만들어 줌으로써 사용자는 간단한 마우스의 조작을 통해 이송속도 제어 시스템의 시작과 종료를 자유자재로 행할 수 있어 훨씬 편리하다.

### 3.2 절삭 정보의 인식

주축 모터전류를 이용한 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 시스템의 실용성을 확보하기 위해서는 제어 알고리즘이 현재의 공정에 적용된 절삭조건을 인식하여 이에 적절한 한계 값(threshold)을 자동으로 설정할 수 있는 기능을 보유하여야 한다. 이송속도 제어 시스템이 필요로 하는 절삭 정보는 현재 가공에 이용되고 있는 공구의 종류 및 커터(cutter)의 날 수, 그리고 주축 회전수 등이다. 절삭 정보의 인식이 이루어지기 위해서는 FMS 라인내의 셀(cell)을 통합 관리하는 POP Server에서 현재 공작기계에 적용되어 있는 절삭 정보를 파일(file) 형태로 POP 단말기에 전송하여야 한다.

### 3.3 절삭 정보의 실시간 인식과 공구의 과부하 검출 및 이송속도 제어

산업현장에서는 밀링 공정 중의 과부하를 피하

기 위해 이송속도를 필요 이상으로 적게 주어 가공을 하거나, 수 작업으로 이송속도 오버라이드(Override)를 조절해주어 절삭 깊이가 상대적으로 작아서 절삭력이 적게 부하되는 부분에서는 이송속도를 늘려주고, 절삭 깊이가 상대적으로 커서 절삭력이 많이 부하되는 부분에서는 이송속도를 줄여주는 방식으로 가공을 하고 있다. 공구 과부하의 기준은 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 가장 일반적인 방법으로 과부하의 기준을 공구에 부하되는 과도한 절삭력에 두었으며, 공구에 과도한 절삭력이 부하되거나 기준 절삭력 이하가 부하되면 이송속도를 제어하여 항상 일정한 절삭력으로 가공되게 하였다. 공구에 부하되는 절삭력의 측정은 정적민감도가 높은 주축모터 전류를 측정하여 주축전류와 절삭력 간의 선형적인 상관관계를 구한 후 정적 절삭력의 증가를 간접적으로 측정함으로써 실제 현장에 적용 가능하도록 하였다.

과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 시스템의 알고리즘을 Fig. 6에 나타내었다. 알고리즘에 대한 자세한 설명은 다음과 같다. 먼저 이송속도는 NC 코드에 입력된 이송속도에 대한 100% 값으로 초기화시킨다. 또한 공구의 종류, 주축 회전수, 커터 날수 및 최대 한계 값(maximum threshold)과 최소 한계 값(minimum threshold)을 임의의 값으로 초기 설정한다. 이후 호스트 프로그램으로부터 전송 받은 현재의 절삭 정보(공구의 종류, 주축 회전수, 커터 날수)를 인식하고 초기에 설정된 값과 다를 경우 현재의 절삭 정보를 토대로 새로운 최대 한계 값과 최소 한계 값을 설정한다. 또한 커터의 날수 및 주축 회전수에 대한 정보를 토대로 이동 평균(moving average)에 필요한 데이터의 수를 재조정한다. 절삭 정보의 인식은 시스템이 동작하는 동안 계속해서 이루어진다. 홀 센서를 통해 주축 모터의 U 상과 V 상 전류를 측정하여 이의 RMS 값에 대한 이동평균값을 구하고 공구 1회전 당 최대 값을 결정하여 이를 최대 및 최소 한계 값과 비교한 뒤, 비례 제어 알고리즘을 적용하여 한계 값과의 오차에 비례하는 양만큼 이송속도를 제어한다. 비례 제어시의 비례 이득 값(proportional gain)으로 0.5를 선택하였는데 이는 실험적으로 결정하였다. 이송속도를 제어한 후 절삭정보의 변화유무를 체크한 후 다시 위의 과정을 반복함으로써 절삭력이 계속적으로 일정한 값을 유지할 수 있다. 이러한 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어시스템의 적용목

적은 황삭 공정 시 공구의 과부하를 방지하고 가공시간의 단축에 그 목적을 두고 있다. 따라서 이송속도의 변화로 인한 공작물 표면 거칠기에 대한 영향은 무시하였다.

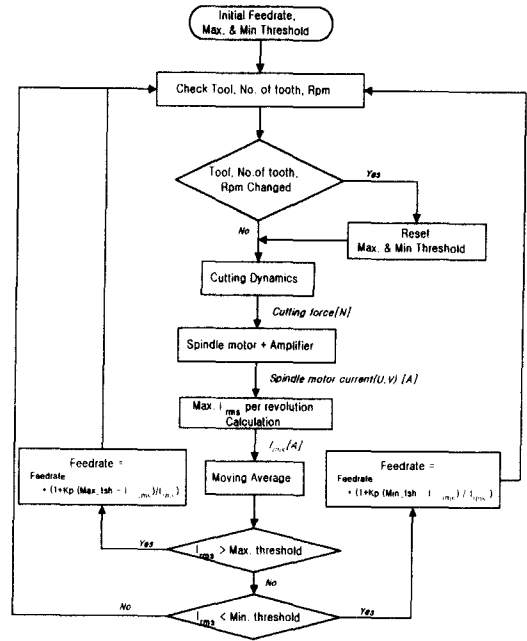


Fig. 6 Flowchart for cutting force regulation

### 3.4 적정 비례이득값의 결정

본 연구에서 비례 제어시의 비례이득(Proportional gain, Kp) 값은 실험적으로 결정하였다. 비례이득이 클 경우 시스템의 응답 속도는 빨라지나 오버슈트(Overshoot)가 심하게 발생하고 심한 경우 발산의 우려가 있다. 반면 비례이득이 작을 경우 오버슈트는 발생하지 않으나 응답속도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 적정한 비례이득의 결정이 중요한 요소가 된다. 그러나 비례이득을 해석적으로 알아내기 위해서는 주축 부의 모든 변수들 및 전달함수를 구해야 하는데 이는 현실적으로 불가능하다. 결과적으로 비례 이득 값은 실험적으로 구해졌다. 여러 가지 값의 Kp에 대하여 응답성을 측정한 결과 Fig. 7에 보여진 바와 같이 Kp를 0.5로 하여 제어한 경우 적정한 응답 속도를 가지면서 절삭력이 발산하지 않고 일정하게 제어됨을 알 수 있었다.

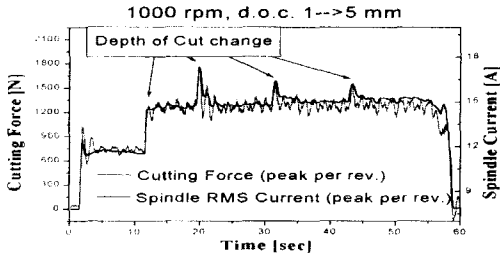


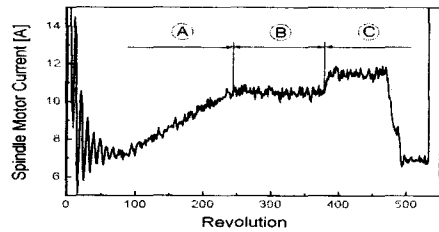
Fig. 7 Cutting force regulation pattern when  $K_p$  is equal to 0.5

### 3.5 현장 실험 결과

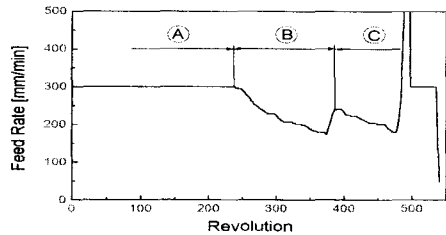
본 연구과정에서 사용한 586 PC 와 공작기계 사이의 인터페이스를 이용하여 절삭 중 실험 담당자가 절삭 정보를 입력하여 파일로 만들어 PC 에 저장하고 호스트 프로그램이 이 파일을 읽어들이 이를 DSP보드의 타겟 프로그램으로 전송하고 최대, 최소 한계 값을 자동으로 변경하여 변경된 한계 값에 맞게 절삭력 및 전류가 제어되는지 살펴 보았다.

Fig. 8은 절삭 깊이가 0mm에서 3mm까지 선형적으로 변하는 공작물에 대하여 직경 20 mm의 평엔드밀(커터 날수:2)로 주축 회전수는 600rpm, 이송속도는 300mm/min로 설정하여 가공하면서 절삭 도중 절삭 정보를 인위적으로 변화시켰을 때 주축 전류가 변화된 한계값을 추종함을 보여주고 있다. 그림에서 A부분은 절삭 깊이가 증가하면서 전류신호가 증가하게 되는 부분이다. 전류신호에 있어 앞부분의 신호가 크게 변동하고 있는 것은 주축이 회전하기 시작하는 부분이다. 그러나 이송속도를 보면 300mm/min로 일정한 것을 알 수 있는데 이는 주축 회전 이후 절삭 시작 시 이송속도가 높아질 경우 공구가 공작물에 진입하면서 충격으로 인하여 파손될 수 있는 위험을 방지하기 위해서이다. B부분은 전류 값이 초기에 설정된 최대 한계 값에 도달하면서 제어가 이루어지는 부분이다. 이송속도는 절삭 깊이가 깊어질수록 작아진다. 절삭 도중 실제 공구가 교환되지 않았지만 절삭정보에 대한 파일의 내용을 변경하여 공구가 교환되었다는 정보를 PC에 입력하였다. 이 경우 알고리즘은 새로 입력된 공구에 적합한 한계 값에 맞도록 절삭력 및 주축전류의 레벨(level)이 변경되어야 한다. C부분은 새로 설정된 전류 한계 값에 맞추어 절삭력 및 전류가 제어되고

있는 부분이다. 이송속도는 절삭력을 일정하게 유지하기 위해 일시적으로 증가한 후 절삭깊이의 증가에 따라 점진적으로 감소함을 알 수 있다. 공구가 공작물을 빠져나갈 때 절삭부하가 급격히 감소하므로 이송속도를 최대한 증가시켜 가공시간을 단축시킨다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 PC 에 변경된 절삭 정보에 대한 파일이 입력된 순간 제어되는 절삭력 및 주축전류 레벨이 변하는 것을 확인할 수 있다. 이는 호스트 프로그램이 PC에 저장된 절삭 정보파일을 읽어들이고 이를 타겟 프로그램으로 올바르게 전송하였음을 뜻하며 또한 알고리즘이 변경된 절삭정보를 인식하여 자동적으로 최대 및 최소 한계 값을 설정하였음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 개발한 알고리즘 및 프로그램이 올바르게 작동함을 알 수 있었다.



(a) Spindle motor current variation

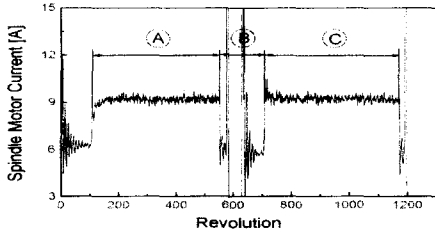


(b) Feedrate variation

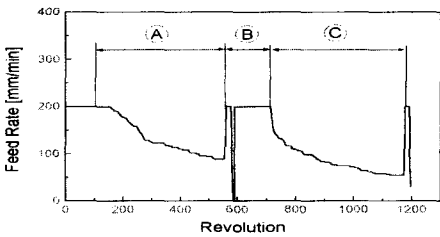
Fig. 8 Spindle motor current and feedrate variation according to the variation of machining information

Fig. 9는 평엔드밀(직경 20mm, 날 수 2개)을 사용하여 절삭 깊이가 2mm에서 4mm로 선형적으로 변하는 공작물에 대하여 이송속도는 200mm/min, 주축 회전수는 600rpm으로 가공을 한 후 동일한 절

삭조건하에서 주축회전수를 400rpm으로 변경하여 가공한 경우이다.



(a) Spindle motor current variation



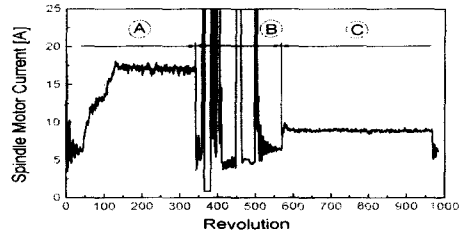
(b) Feedrate variation

Fig. 9 Spindle motor current and feedrate variations in case of spindle speed change

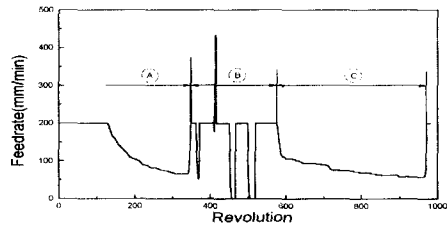
가공이 연속적으로 이루어지도록 NC코드를 프로그래밍 하였으며 회전수가 바뀔 때 이에 대한 절삭 정보를 PC에 입력하였다. 그림에서 A부분은 600rpm으로 가공할 경우의 절삭력 및 주축전류가 제어되는 패턴을 나타낸다. 이송속도는 절삭깊이가 깊어짐에 따라 감소하는 형태를 보인다. B부분은 주축 정지 후 공작기계의 각축이 원점으로 이동하여 주축이 다시 회전하기 시작하는 부분이다. 주축 모터전류가 크게 변동하는 것은 주축의 정지 및 회전 시 순간적으로 큰 동력이 필요하므로 이로 인해 전류가 급격히 증가되기 때문이다. 그러나 이송속도를 보면 공구가 공작물을 빠져나가면서 이송속도가 증가하다가 주축의 정지 및 회전을 인식하여 이송속도를 원래 NC코드에서 지령한 값으로 설정된다. 이것은 이송이 높은 상태에서 공구가 공작물로 진입할 경우 공구의 파손 위험을 피하기 위해서이다. 이후 C 부분은 주축 회전수가 400rpm으로 변

경된 상태에서 절삭력을 제어하고 있는 부분이다. 주축 회전수가 변경된 정보를 DSP보드상의 알고리즘이 인식하여 제어를 행하고 있다. 주축 회전수가 작아졌기 때문에 날 당 부하되는 절삭력은 600rpm에 비하여 더 커지게 되므로 이송속도의 제어가 빨리 시작되며 이송속도가 감소하는 비율도 600rpm에 비하여 증가함을 알 수 있다. 위의 실험 결과를 보면 주축 회전수의 변경 정보를 알고리즘이 자동으로 인식하여 주축 회전수의 변경에도 불구하고 절삭력이 동일하게 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 실제 하나의 절삭 공정이 종료된 후 공구가 교환되어 다시 절삭을 시작하는 경우에 대한 실험 결과이다.



(a) Spindle motor current variation



(b) Feedrate variation

Fig. 10 Spindle motor current and feedrate variation when cutting tool changed

절삭깊이가 2mm에서 4mm까지 선형적으로 변하는 공작물에 대하여 직경 100mm, 날 수 3개인 정면 밀을 이용하여 400rpm으로 가공을 한 후 공구를 직경 20mm, 날 수 2개인 평엔드밀로써 600rpm으로 공작물을 가공한다. 두 경우 모두 이송속도는 NC 코드에서 200mm/min으로 설정하였으며 공정이



연속적으로 이루어지도록 NC 코드를 프로그래밍 하였다. 정면 밀과 평면 밀 모두 절삭력이 900N에서 1000N사이에서 제어되도록 하였다. 그림에서 A 부분은 정면 밀로 가공한 경우를 나타낸다. 제어되는 절삭력 레벨은 약 900N정도이며 이때의 전류 신호 레벨은 약 17A 정도이다. 이송속도는 절삭 깊이가 증가함에 따라 점진적으로 감소함을 볼 수 있다. B 부분은 주축이 정지하고 각 축들이 기계 원점으로 복귀한 후 공구를 교환한 뒤 다시 주축이 회전하는 일련의 과정을 나타낸다. 이 부분의 전류 신호가 급격한 변동을 보이는데 이는 주축의 정지 및 회전에 필요한 동력의 증가 및 공구교환에 필요한 주축 고정 동력 때문에 전류가 급격히 증가되기 때문이다. 그러나 이송속도를 보면 원래 NC코드에서 지령한 값을 유지하고 있으며 이송 축이 정지할 경우 이송 속도는 0으로 나타낸다. 또한 주축의 재회전 후 공구가 공작물에 절입 되기 이전에는 원래의 이송속도를 유지함으로써 충격에 의한 공구파손의 위험을 회피하였다. C부분은 평면 밀로 가공하는 부분이다. 제어되는 절삭력 레벨은 약 1000N 정도이며 이때의 전류레벨은 약 9A 정도이다. 평면 밀과 정면 밀에 있어 제어되는 절삭력 레벨의 차이는 약 100N 정도로서 오차수준은 상당히 작은 편이다. 위의 그림에서 알 수 있듯이 동일한 절삭력을 유지하더라도 공구에 따라 전류의 레벨에는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 위의 실험 결과를 통해 절삭 공정 중 공구의 종류와 날 수 그리고 주축회전수가 달라지는 경우 알고리즘이 이를 실시간으로 인식하고 한계 값을 자동 설정하여 절삭력을 일정하게 제어하고 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 시스템에 대한 실용성의 확보가 가능함을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다양한 절삭조건 실험을 통하여 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 시스템의 안정성 및 신뢰성을 검증하였다.
- (2) WIN95 환경에서 공구 과부하의 실시간 검출 및 이송속도 제어 시스템이 완벽하게 작동할 수 있는 DSP보드 프로그램을 개발하였다.
- (3) 절삭 정보(공구의 종류, 커터의 날 수, 주축 회전수)를 PC에서 실시간으로 인식하고 이를 절

삭상태 감시 알고리즘이 작동하고 있는 DSP보드로 전송하는 프로그램을 개발하였다.

- (4) 실시간으로 인식된 절삭 정보에 따라 과부하 한계 값이 자동 설정되는 알고리즘을 개발하였고 이를 실험을 통해 검증함으로써 다양한 절삭조건에 대해 본 시스템의 적용이 가능함을 확인하였다. 따라서 충분한 데이터베이스를 확보할 경우 본 시스템의 실용성이 확장될 수 있음을 보였다.

#### 참고문헌

1. Altintas, Y., Yellowley, I. and Tlusty, J., "The Detection of Tool Breakage in Milling Operation," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, pp. 271-277, 1988.
2. Altintas, Y., "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 386-391, 1992.
3. Takata, S., Nakajima, T., Ahn, J. H. and Sata, T., "Tool Breakage by Means of Fluctuations in Spindle Rotational Speed," Annals of the CIRP, Vol. 36, pp. 49-52, 1987.
4. Yan, D., E-Wardany, T. I. and Elbestawi, M. A., "A Multi-Sensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling," Int. Jour. of Mach. Tools and Manufacture, Vol. 35, pp. 383-398, 1995.
5. Dornfeld, D. A., "Neural Network sensor Fusion for Tool Condition Monitoring," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 101-105, 1990.
6. Liu, H. S., Lee, B. Y. and Tarng, Y. S., "Monitoring of Drill Fracture from the Current Measurement of a Three Phase Induction Motor," Int. Jour. of Mach. Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 6, pp. 729-738, 1996.
7. Lee, J. M., Choi, D. K., Kim, J and Chu, C. N., "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp. 59-62, 1995.
8. Park, J. J. and Luca, S., "Cutting Torque Estimation Using Spindle Power Measurements," Transactions of NAMRI of SME, Vol. 24, pp. 85-90, 1994.