

# 다기능의 통합 NC 제어시스템 개발

서석환 노성기 최용종

포항공과대학 산업공학과

## Development of An Integrated NC System for CAD/CAM/CNC

Suck-Hwan Suh Sung-Kee Noh Yong-Jong Choi

Department of Industrial Engineering  
POSTECH, Pohang-Korea, 790-600

### 요약

기존의 CNC Controller를 재구성하면 제어성과 절삭성의 제고에 큰 효과를 낼 수 있다. 현실적으로 시스템의 재구성은, 가) 시스템의 재구성으로 2축 CNC 기계를 다축으로 전환시킬 수 있고, 나) 모터의 직접제어에 의한 G-code 작성과 정의 생략이 가능하며, 다) NC 동작의 제어가 소프트웨어로(C 언어) 이루어 지기 때문에 사용자환경에 맞도록 고객화가 가능한 강점이 있다. 나아가서는 형상의 정의에서 NC 기계동작의 제어 및 온라인 모니터링에 이르는 전과정을 소프트웨어로 일식화시킬 수 있는 통합 NC 시스템의 구현이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 목적으로 연구되고 있는 INCS(Integrated NC System)의 개발현황을 소개한다. INCS는 PC-286, NC Controller, Drive Amplifier, Sensing Device의 하드웨어 시스템과 CAD, CAM 및 CNC 기능을 수행하는 소프트웨어 시스템으로 구성되어 있다. 그래픽 시뮬레이션 및 실제 절삭을 통하여 개발된 방식의 유효성과 효율성을 설명한다.

### 1. 서론

NC 머신은 1950 년대초에 MIT 에서 발명된 이래 하드웨어 및 컴퓨터기술의 발전과 더불어 근래에는 초정밀의 다축가공이 가능한 머시닝센터(Machining Center)가 개발되기에 이르렀다. 경제적측면에서 보면, 응용목적 및 구입비용을 감안하여 현장의 특성에 맞는 공작기계의 선정이 필요하다. 많은 현장에서는 2축 - 3축의 NC 기계로서 충분한 경우가 대부분이며, 혹은 도입환경의 변화로 기존의 NC 기계를 Upgrade 시켜 사용할 필요가 발생한다. 고가의 신모델을 구입하는 것보다 기존 기계의 성능을 제고시키는 것은 간이자동화의 한 방식으로서 경제적으로 장점이 많다. 본 논문에서는 이러한 목적을 실현할 수 있는 NC 시스템의 재구성방식을 소개하며, 소프트웨어 및 하드웨어의 일식화를 통해 사용자환경에 적합한 시스템을 개발할 수 있음을 개발사례를 통해서 설명한다.

본 연구팀의 실험실에 있는 Easimill 공작기계는 2축 동시제어가 가능한 CNC 기계로서 컨트롤러의 불안정성, NC 프로그래밍의 불편함, 제한된 동작제어모드 및 PC와의 인터

페이스등의 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해소하고, 곡면가공의 필요성에 따른 새로운 요구조건을 충족할 수 있도록 NC 제어시스템의 재구성을 시도하였다. 곡면가공은 종래의 수동프로그램방식으로는 거의 불가능하며, 이를 위해서는 형상정의, 공구경로산출 및 시뮬레이션을 컴퓨터에서 처리할 수 있는 CAD/CAM 기능이 필요하다. 뿐만아니라, 가공의 무인화 및 절삭의 정밀도를 유지하기 위해서는 공구의 파손 및 마모상태를 감지할 수 있는 온라인 모니터링시스템이 추가되어야 할 것이다. 나아가서는 절삭의 최적화를 구현할 수 있는 적응제어시스템(Adaptive Control)을 구성할 수 있도록 하는 점이 시스템 재구성시에 고려되었다.

비록 동기는 현존시스템의 고기능화를 위한 재구성에서 출발하였지만, 본 연구에서 시도된 방식은 CNC 기능에 CAD, CAM 및 온라인 모니터링을 통합처리하고자 하는 통합 NC 시스템의 구현을 도모하는 것으로서, 이는 종래의 Integration의 범주가 소프트웨어 측면의 CAD 및 CAM 기능에 국한되고 있는것에서 CNC 기능을 포함하는 확대된 Integration 개념(즉, CAD, CAM, CNC의 통합화)으로 볼 수 있다.

본 연구에서 개발된 통합 NC 제어시스템은 NC 머신의 동작을 소프트웨어로 제어하기 때문에 CAD/CAM 시스템과 일식화가 가능하며, 따라서 형상의 정의, 공구경로의 산출, 공구경로의 그래픽시뮬레이션의 오프라인 기능과 계획된 동작을 NC 기계에서 구현 및 제어의 온라인 기능을 일관처리할 수 있다. 이 방식은 사용자환경에 따라 필요한 기능을 자유자재로 포함시킬 수 있기 때문에 NC 시스템의 고객화(Customization)가 가능하다는 장점 외에도, CAD/CAM 기능과 CNC 기능이 소프트웨어로 결합되어 있기 때문에 G-code 변환 및 커뮤니케이션(Downloading) 과정을 생략할 수 있으며, NC 동작을 소프트웨어로 제어하기 때문에 다양한 동작의 다축가공을 구현할 수 있다. 나아가서는 공구파손 및 상태감지를 위한 센서를 인터페이스 시키고 분석함으로써 온라인 모니터링기능을 소프트웨어로 처리할 수 있다.

본 논문은 상기의 목적 및 취지에서 현재 개발되고 있는 다기능의 통합제어시스템을 소개하고 각 기능별 이론 및 알고리즘을 기술한다. 2절에서는 PC-286에서 C언어로 구현된 통합제어시스템의 소프트웨어 구조 및 모듈별 기능을 설명하

고, 3절에서는 통합제어시스템의 하드웨어 구조 및 구성원을 기술하고, 4절에서는 소프트웨어 및 하드웨어가 일식화된 통합제어시스템의 구현 상황과 실험결과를 도시한다. 본 논문은 5절의 결론 및 요약으로 끝을 맺는다.

## 2. INCS의 소프트웨어 시스템

### 2.1 개요

INCS 소프트웨어는 CAD/CAM/CNC 및 온라인 모니터링을 PC에서 통합, 관리하고자 만든 시스템으로서 형상의 정의에서부터 공구경로의 산출, 그리고 공구경로의 그래픽시물레이션의 기능과 함께, NC 컨트롤러에 경로정보를 다운로드하고 또한 절삭중에 NC 기계를 제어할 수 있는 온라인 모니터링 시스템도 보유하고 있다.

INCS 소프트웨어 시스템은 그림1과 같이 크게 5개의 모듈로 구성되어 있고, 큰 모듈안에 각각 여러개의 하위 모듈(Sub Module)을 포함하고 있다. CAD 모듈은 2차원, 3차원 등의 여러가지 가공형상을 정의하고, CAM 모듈은 CAD 모듈 데이터를 입력으로 하여 정삭및 황삭의 공구경로 산출 및 그래픽 시물레이션을 담당한다. CNC 모듈은 공구경로 데이터를 NC 컨트롤러에 다운로드하는 모듈, 키보드로 직접 NC 기계를 구동하는 모듈, 그리고 절삭상태를 점검하는 온라인 모니터링 모듈도 포함하고 있다. TYPER 모듈에서는 가공하고자 하는 문자셋을 정의하고, 그래픽 시물레이션을 수행한다. 그리고 시스템의 기능을 증가시키기 위하여 Misc 모듈에서는 형상의 모양을 시각에 따라 정의할 수 있는 View메뉴와, 기본적인 파일 입출력을 담당하는 메뉴도 포함한다.

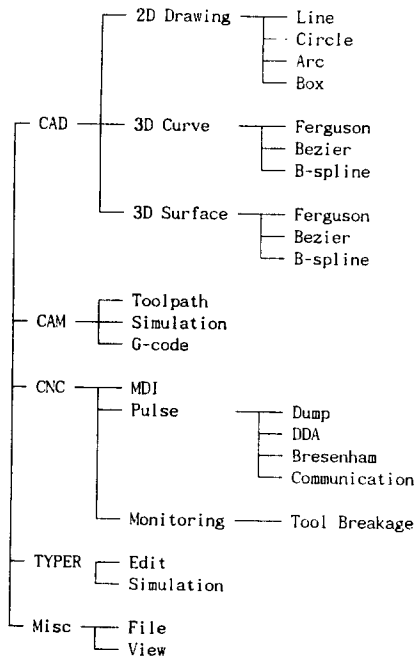


그림 1. INCS 소프트웨어 시스템 구성

### 2.2 CAD 모듈

CAD 모듈에서는 가공하고자 하는 형상을 사용자가 정의한다. 본 연구에서는 다양한 CAD 시스템중에서 제한된 범위의 형상을 처리한다. 현재 이 모듈에서는 Line, Arc, Circle, Box 등으로 구성되어 있는 2차원 기본 형상과 Bezier, B-spline, Ferguson의 3차원 곡선과, Bezier, NUBS 3차원 곡면 형상을 처리한다.

CAD 모듈에 들어가면 크게 3개의 서브 모듈로 구성된다. 사용자는 필요에 따라 적절한 메뉴를 선택하여 가공형상을 정의한다. 기본적인 2차원 형상을 지원하는 2D Drawing에서는 Line, Arc, Circle, Box등을 포함하고 있고, 이들의 조합형상도 표현된다. 그림2(a)는 이 메뉴에 의해서 구성된 조합형상을 화면상에 나타낸 것이다. 그리고 3D Curve는 3차원 공간상에서 파라메트릭 곡선을 정의하는 메뉴이며, 3D Surface 메뉴에서는 가공하고자하는 3차원 자유곡면을 각각의 필요에 따라 Bezier, NUBS 방식으로 나타낸다. 그림2(b)는 이 중에서 NUBS 방식으로 3차원 자유곡면을 표현한 모습이다. 이 형상은 8 X 8개의 콘트를 포인트로 정의한 Cubic NUBS(Non Uniform B-spline)[1]곡면이다.

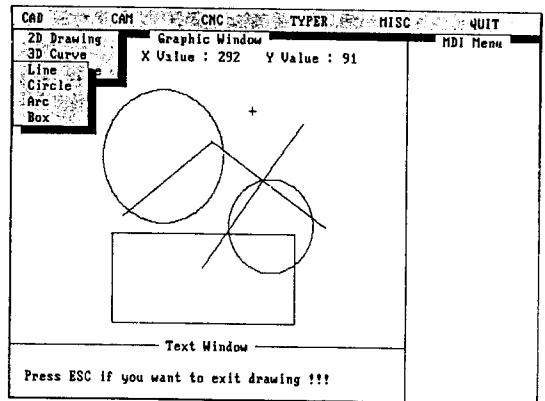


그림 2(a). 2D Drawing 메뉴를 이용한 조합형상표현

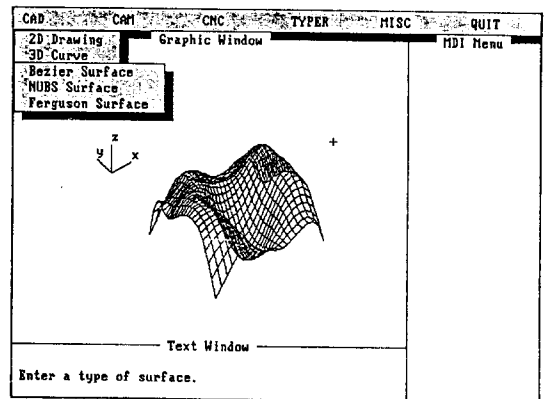


그림 2(b). NUBS를 이용한 3차원 자유곡면

위에서 정의한 형상은 파일로 저장할 수 있고 추후에 필요에 따라 로딩(Loading)할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 3차원 형상을 2차원 화면에 표시함에 따르는 가시화 문제를 해결하기 위하여, 곡면형상을 보는 시각을 임의대로 결정할 수 있도록 프로그램 되어 있고, 화면상의 형상의 크기를 마음대로 조절할 수 있는 윈도우기능도 추가되어 있다. 그림 2(c)는 View Point를 바꾸어서 본 3차원곡면의 모습이며 시각방향은 그림 상단의 좌표계를 참조하면 알 수 있다. 또한 그림2(c)는 윈도우기능을 이용하여 형상의 크기도 변화시켰다.

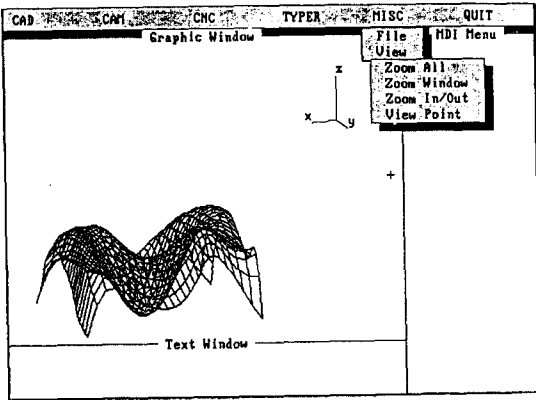


그림 2(c). View Point와 윈도우를 이용한 형상변환

### 2.3 CAM 모듈

CAM 모듈은 전절의 CAD 모듈에서 정의된 형상 및 가공조건을 입력으로 하여 공구경로를 산출하고, 공구경로의 타당성을 검증하는 시뮬레이션을 수행하는 모듈이다. 공구경로의 산출에는 황삭가공과 정삭가공 두가지로 분류되며, 황삭가공은 z 좌표값을 기준으로 하여 2.5축 가공방식을 사용하여 간단히 결정할 수 있으며, 곡면의 정삭가공의 경우에는 복잡한 형상을 가공하기 위한 문제, 즉 공구간섭이나 루프에서 발생하는 과다 절삭문제를 고려하지 않은 기본적인 알고리즘을 채택하였다. 즉 최종 형상의 곡면형상을  $P(u, v)$ 로 나타내며, 공구중심의 경로는  $P(u, v)$ 에서 공구반경  $d$  만큼 오프셋(Offset)된 곡면에 존재하며, CL-Data결정은, 공구중심의 경로에서 Overcut이나 Undercut을 방지하는 공구끝의 경로를 발견하는 것이다(그림3(a)참조). 최종식으로 나타내면,

$$Pc1 = Pcc + D * Ncc + [0 \ 0 \ 1]^T$$

가 된다.

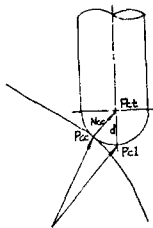


그림 3(a). 공구중심에서 공구끝점 산출

그림 3(b)는 NUBS곡면의 황삭 및 정삭의 CL data를 산출한 결과를 시뮬레이션 메뉴를 통하여 화면에 출력시킨 것이다.

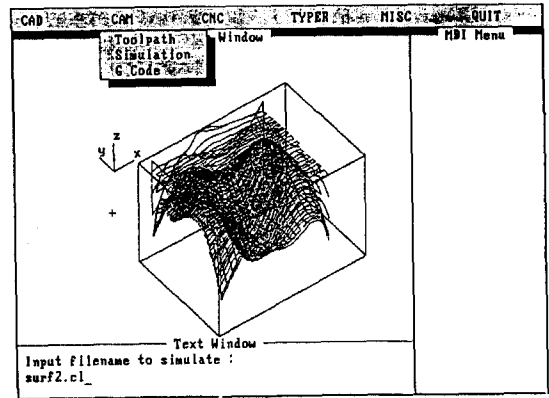


그림 3(b). 자유곡면의 황삭 및 정삭 시뮬레이션

### 2.4 CNC 모듈

CNC 모듈은 CAM 모듈에서 생성한 공구경로 데이터를 NC 기계에 전달하는 기능을 담당하거나, MDI 방식으로 지정한 키보드를 이용하여 NC 기계를 직접구동하고, 그리고 온라인 모니터링으로 절삭상태를 점검하는 3가지 모듈로 구성되어 있다.

종래의 NC 기계는 절삭을 위한 명령어 G-code라는 독립된 명령체계로 되어있다. 즉 각각의 컨트롤러에 맞는 형태로의 경로 데이터 전환이 필요하다. 이를 위해서는 사용하는 머진 컨트롤러에 맞는 포스트프로세싱 작업이 필요하게 된다. 그러나 본 통합 시스템에서는 경로 데이터를 포스트프로세싱을 통하지 않고 바로 펄스입력을 통하여 모터를 제어할 수 있도록 구성되어서 G-code변환이 생략가능하다. 즉, NC 기계가 움직여야 할 좌표를 경로 데이터로 부터 받아서 직접 모터신호로 바꾸어 주는 방식으로 설계되어 있다. 그러나 사용자의 편의를 위하여 다운로드 방식을 모터직접구동 방식과 포스트 프로세싱을 거쳐 G-code로 변환하여 RS-232 케이블을 통하여 전송하는 2가지 방식중 선택하게 하였다.

모터 직접구동방식은 크게 Dump방식과 DDA[2]방식, Bresenham[2]방식으로 분류할 수 있다. 각각의 방식은 다음과 같은 장단점을 가진다. Dump방식은 두 방식에 비해 하드웨어 의존도가 높아서 정확성과 신속성이 있는 반면에 응용하기가 조금 어렵다. 반면에 DDA와 Bresenham방식은 소프트웨어로써 처리하기 때문에 속도제어측면이나 응용성이 좋다.

G-code방식은 먼저 경로 데이터를 CAM 모듈에서 G-code로 변환시킨 후, 커뮤니케이션 메뉴에서 머진 컨트롤러에 다운로드시킨다. 커뮤니케이션 프로토콜(Protocol)은 기계 및 PC의 컨피규레이션에 따라 차이가 있기 때문에 이의 설정이 필요하다. 커뮤니케이션 프로토콜은 파라미터로 구성되며 사용자는 대화형 에디팅 방식에 따라 값들을 지정할 수 있다. 그림4(a)는 파라미터를 입력하는 화면을 보이고 있다.

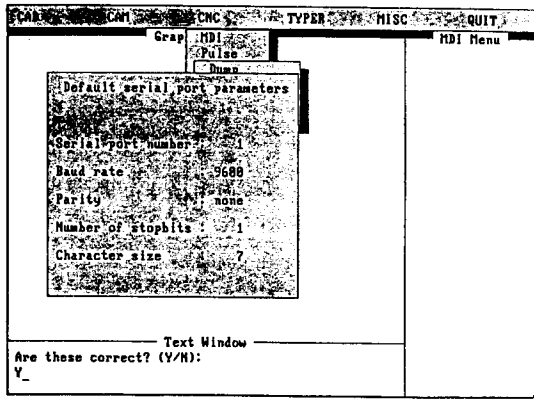


그림 4(a). 커뮤니케이션 프로토콜 입력에

MDI 모듈에서는 키보드를 통하여 직접적으로 공작기계의 동작을 제어한다. 그림4(b)에서 보듯이 MDI 메뉴는 화면 우측에 나타난다. 먼저 F1, F2의 평선키로써 Coolant On/Off를 제어하고, F3, F4, F5로써 Spindle On/Low, Spindle On/High, Spindle Off를 선택한다. +, -키는 수동동작의 Feedrate을 결정하며, 한번의 키 입력에 따른 이송거리는 i, d의 키를 사용하여 결정한다. 그리고 화면 하단에 나타난 것처럼 여러개의 애로우 키로써 이송되는 방향을 결정하고, 방향은 Direction메뉴에 도시된다. 그리고 Datum Position, Emergency Stop등의 기능도 수행하도록 구성하였다.

형상가공시 발생하는 문제중 공구파손을 온라인으로 모니터링 하기 위한 메뉴도 만들어 놓았다. 그러나 이 메뉴는 아직 구체적으로 응용되지 않았다.

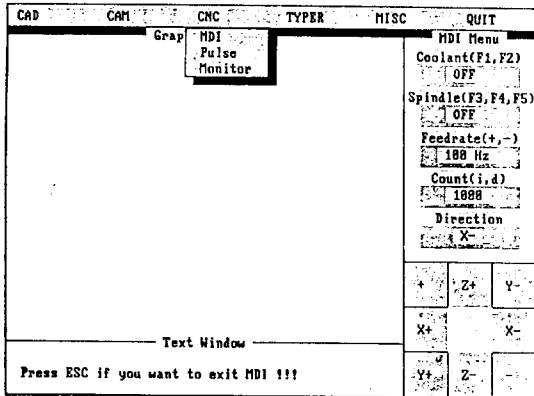


그림 4(b). MDI 메뉴 화면

## 2.5 TYPYR 모듈

TYPYR 모듈은 타이프라이터의 기능을 공작기계와 접목시키는 기능을 담당한다. 즉 키보드로부터 입력되는 문자(영문대, 소문자 및 숫자)를 화면상에 보여주고 이를 공작기계로 결삭할 수 있도록 CL data를 만들어 준다. TYPYR 모듈은 다음의 2가지 모듈로 구성되어 있다.

Edit 모듈에서는 가공하고자하는 공작물의 크기(가로, 세로)와 절삭 깊이를 사용자로부터 입력받고 커저를 이동하여 원하는 위치로 이동한 다음 원하는 문자를 키보드로 입력하면 실제로 가공되는 형상이 화면상에 나타난다. 이때 문자의 크기는 사용자가 임의로 결정할 수 있다. 그림5는 문자의 크기를 달리하여 편집한 화면이다. 편집이 끝나면 자동적으로 CL data를 화일로 만들어 준다.

Simulation 모듈은 생성된 CL data로부터 가공되는 공구경로를 3차원적으로 화면상에 나타내 준다. 이때 급속이송부분과 절삭이송부분을 색깔로써 구별하여 정상적인 절삭이 이루어지는지의 여부를 확인할 수 있다.

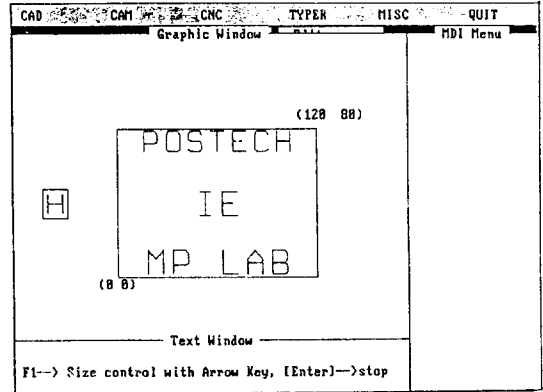


그림 5. TYPYR의 에디팅 화면

## 3. INCS 하드웨어 시스템

### 3.1 시스템 구조

INCS를 구현하기 위한 전체 하드웨어 시스템은 그림6과 같이 구성된다. 산출된 공구경로는 NC 콘트롤러를 통하여 모터구동에 맞는 펄스입력으로 전환되며, 이 신호가 파워 드라이버를 통하여 적당한 값으로 증폭, 조정된 후, 공작기계의 모터에 전달되어, 공작기계를 구동하는 시스템으로 되어있다. 또한 절삭작업시에 발생하는 여러가지 상황중에서 특히 공구파손을 점검하기 위한 하드웨어도 구성되어 있다. 가공중에 진동센서를 통하여 시그널을 입력받아 이것을 Op-amp로 증폭시킨 후에 A/D Converter를 통하여 디지털화하여 PC로 전달된다. 이 신호를 PC가 온라인으로 점검하여 공구파손을 감지하는 시스템으로 구성되어 있다.

### 3.2 NC 콘트롤러

NC 콘트롤러는 가공형상에 대한 공구경로를 입력으로 하여 각 모터 축에 맞는 펄스입력으로 전환한다. 대표적인 구성원 중 82C55 PPI(Programmable Peripheral Interface)[3]는 기본적인 데이터 입출력을 담당하는 칩으로써 3개의 입출력 포트와 1개의 콘트롤 포트로 구성되어 있다. 그래서 이 칩은 모터의 Up/Down의 방향지정과 가공시 필요한 Spindle과

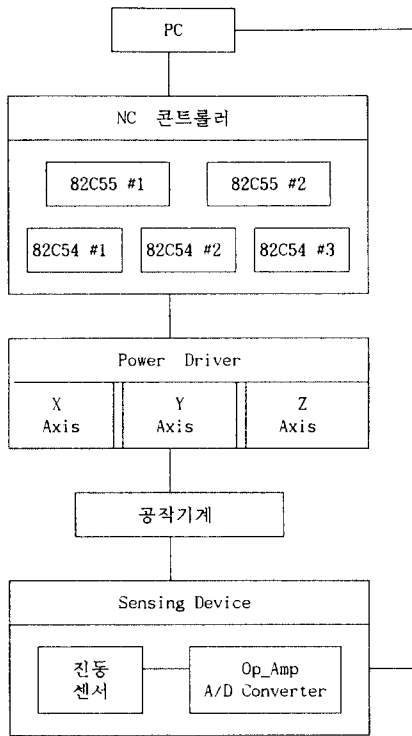


그림 6. INCS 하드웨어 시스템 구성

Coolant구동을 담당한다. 그리고 Datum Position을 알려주는 인터럽트와 Emergency Stop시의 신호전송, 그리고 온라인 모니터링시에 하드웨어 인터럽트 처리도 담당한다. 또한 82C54 PIT (Programmable Interval Timer)[3]는 크게 2가지 기능을 담당한다. 클록을 변조시키는 기능과, 카운터기능이 있다. 이 칩도 3개의 카운터와 1개의 콘트롤 포트로 구성되어 있으며, 모터의 회전거리와 회전속도를 결정하는 역할을 담당하고 있다.

### 3.3 Power Driver

파워 드라이버는 NC 콘트롤러에서 생성한 펄스파형을 각각의 모터입력에 맞는 입력파형으로 증폭 전환하는 기능을 수행한다. 본 모터는 4상 스텝모터이므로 이에 맞는 KSD-514 드라이버를 사용하였다. 그리고 이 드라이버는 여자방식절환 기능과 여자 오프기능도 보유하고 있다. 여자방식은 드라이버에 장착된 스위치를 조절함으로써 1상, 2상, 1-2상 방식 중에서 하나를 선택할 수 있으며, 무동작시 모터의 발열을 방지하고자 모터의 전류를 차단하는 기능을 여자 오프를 통하여 제어할 수 있다.

### 3.4 Sensing Device

Sensing Device는 형상의 절삭가공 중에 발생하는 공구파

손을 점검하기 위하여 만든 회로이다. 이 회로는 크게 가동시 공구의 진동을 검출해내는 진동 센서와 이 센서 입력을 증폭시켜주는 Op-Amp와 증폭된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 주는 A/D Converter로 구성되어 있다. 이렇게 변환된 디지털 신호는 PC로 전송되어 모니터상에서 On-Line으로 상태를 점검하는 시스템과 연결되어 있다.

## 4. System Implementation

### 4.1 시스템 구성

INCS의 전체 시스템은 그림7과 같이 구성되었다. INCS를 구현하기 위하여 PC-286을 목적기종으로 선택하였다. 프로그램은 이식성과 호환성이 뛰어난 C언어와 하드웨어 인터럽트를 처리하기 위한 어셈블러를 조합하여 사용하였다. 소프트웨어에서는 사용자가 편리하고 간편하게 이용할 수 있도록, 입력원으로는 주로 마우스를 사용하였고, 풀다운(Pull Down), 메뉴와 팝업(Pop Up)메뉴도 사용하였으며, 특히 추후의 확장성을 고려하여 프로그램의 모듈화에 중점을 두었다. 본 연구에 사용된 NC 기계는 Esimill로써 원래 동시 2축가공용이었다. 그러나 NC 콘트롤러를 직접 제작하여 사용함으로써 동시 3축을 제어할 수 있게 되었고, 그리하여 3차원 자유곡면의 절삭이 가능하게 되었다.

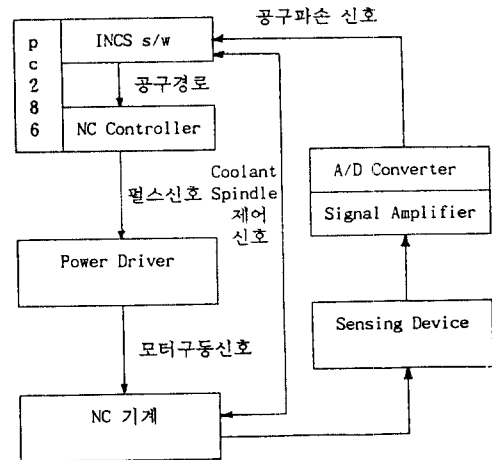


그림 7. INCS 전체 시스템 구성

### 4.2 시험절삭

본 연구의 유효성과 실용성을 검증하고, 3차원 형상의 절삭가능성을 증명하고자 그림8과 같은 자유곡면을 대상으로 하여 실험을 하였다. 시험절삭을 위한 형상은 CAD 모듈에서 그린 NUBS곡면이며, 반경 5mm인 엔드밀을 이용하여 절삭하였다. 절삭된 형상은 그림9와 같이 나타나며, 두 그림을 비교하면 두 형상은 일치됨을 알 수 있다. 정밀한 비교검토를 위해서는 3차원 측정기가 필요하며, 이 측정기는 가공중에서의 가공상태를 측정하는데도 이용할 수 있는 좋은 수단이 된다.

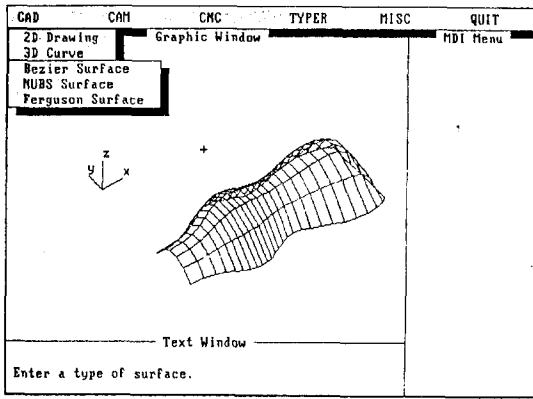


그림 8. NUBS를 이용한 절삭형상 모습

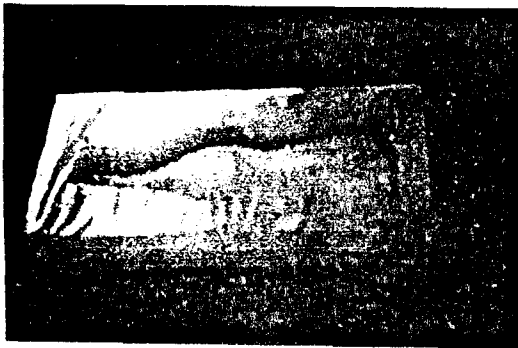


그림 9. 실제 절삭된 후의 모습

이 3차원 측정기와 CAD 모뎀간의 인터페이스 시키는 작업 또한 추후에 이루어져야 할 좋은 과제이다.

또하나의 예로써 TYPER에서 정의한 문자셋을 절삭한 모양은 다음 그림10과 같다. 본 연구가 행해진 실험실 이름을 시범예로 절삭하였다. 절삭은 G-code를 이용하지 않고 바로 펄스에 입력시키는 방식으로 행하였다.



그림 10. TYPER를 이용한 절삭 예

## 5. 결론

본 논문에서는 기존 NC 시스템의 재구성을 통하여 기능의 다양화 및 통합화를 PC에서 구현할 수 있는 방식을 소개하였으며, 실제의 소프트웨어 및 하드웨어를 개발하여 본 방식의 유효성 및 효율성을 입증하였다. 통합 NC 시스템 방식은 기존 NC 제어시스템의 Upgrade 수단으로서 뿐만 아니라, 사용자환경에 따라 쉽게 고객화 할 수 있는 장점이 있다. 나아가서 통합 NC 제어시스템 방식은 CAD, CAM, CNC 기능의 유기적 결합을 도모하며, 동작계획 및 하드웨어 제어를 일관화된 소프트웨어로 처리하는 형태로써 Integration 범주의 확장을 꾀한다.

통합 NC 제어시스템은 종래의 방식, 즉 동작계획은 오프라인으로 CAD/CAM 소프트웨어에서 처리하고 이를 CNC 제어기에 다운로드하여 그 이후의 동작은 CNC 제어기에 일임하는 것에 비해, 통합 NC 제어시스템은 파트의 형상데이터에서 부터 공구산출기능을 보유하기 때문에 NC 가공중에 이들 데이터가 필요하다든지, 공구경로의 보정을 요구하는 경우에 대처할 수 있다. 이러한 요청은 NC 가공 중에 가공형상을 측정하여 원래의 형상에 비해 예러 (공구마모, 셋업오류등에 기인)가 어느정도 발생하는지를 분석하여 이후의 가공경로를 보정할 수 있도록 함으로써, 가공형상의 제어를 가공 중에 도모할 수 있는 지능형 제어의 구현을 위해서는 필연적이다. 이러한 지능형 NC 제어시스템의 구현은 향후의 연구과제로 남아있다.

마지막으로, 개발된 시스템의 현장 활용성을 기술하던 기존의 NC 동작기계를 PC와 연결시켜 고기능화를 도모하는 간이자동화 방식으로서 활용가능하다. 3차원 CAD/CAM 기능과 3축동시제어를 통하여 곡면가공용이 가능하며, G-code 및 Downloading 과정을 생략함으로써 NC 제어시스템의 신뢰도를 높일 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] Ding Qiulin, *Surface Engineering Geometry for Computer-aided Design* John Wiley & Sons, USA(1987).
- [2] Donald Hearn, M. Pauline Baker *Computer Graphics* Prentice-Hall International Editions.
- [3] John Uffenbeck, *Microcomputers and Microprocessors* Prentice-Hall International Editions.