

研究論文

大韓 熔接學會誌
第8卷第3號 1990年 9月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.8, No.3, Sep., 1990

컴퓨터수치제어(CNC) 플라즈마 아아크 절단장치 개발에 관한 연구

노태정* · 나석주* · 나규환**

A Study on Development of Plasma-Arc Cutting System with Computer-Numerical Control

T.J. Lho*, S.J. Na*, K.H. Na**

Key Words : Plasma Arc Cutting(플라즈마아아크절단), CNC(Computer-Numerical Control : 컴퓨터수치제어), Software Interpolator(소프트웨어보간기), Digital-Servo Control(디지털서어보제어), Reference Pulse(기준펄스), Part Program(절단형상 프로그램), BLU(Basic Length Unit : 최소지령단위), Kerf-Width(절단폭)

Abstract

Plasma arc cutting is a fusion cutting process in which a gas-constricted arc is employed to produce a high-temperature, high-velocity plasma jet on the workpiece. This process provides some advantages, such as increased cutting velocity, excellent working accuracy and the ability to cut special materials (widely used stainless steels and Al-alloys, for example), when compared with conventional oxyfuel gas cutting. From the view point of price and reliability of the power source, plasma arc cutting has also some distinct advantages over laser beam cutting.

High-speed machines with NC or CNC systems are needed for the plasma arc or laser beam cutting process, while for oxyfuel gas cutting, low-speed machines with copying templates or optical-shape tracking sensors can be applied. The low price and high flexibility of the microprocessor are contributing more and more the application of CNC system in the plasma arc cutting process, as in other manufacturing fields. From these points of view, a microprocessor-based plasma arc cutting system was developed by using a reference-pulse system, and its performance was tested. The interpolating routines were programmed in the assembly language for saving the memory volume and improving the computing speed, which has an intimate relationship with the available cutting velocity.

* 정회원, 한국과학 기술원 생산공학과

** 정회원, 중원기계주식회사

1. 서 론

플라즈마 아아크 절단법은 1950년대에 개발된 것으로서 수축된 플라즈마 아아크의 열로서 모재의 국부 면적을 녹여서 가스의 압력으로 제거시키는 절단공정이다. 작동원리는 일반적으로 고주파를 이용하여 우선 노즐과 전극봉사이에 파일럿 아아크(pilot arc)를 발생시키고 이 파일럿 아아크는 노즐 내를 흐르는 플라즈마 가스를 가열하여 이온화된 가스로 만든다. 이 가스는 노즐을 통과하면서 수축되어 전극봉과 모재 사이에 전도체로서 고밀도, 고온, 고열의 플라즈마 아아크를 발생시킨다¹⁾. 최근에는 공기를 플라즈마 가스로 사용하는 공기 플라즈마 절단이 많이 사용되고 있으며 절단 품질도 매우 양호하다. 고밀도 에너지 빔을 이용한 플라즈마 절단법은 산소 가스절단에 비하여 알루미늄, 스테인레스강등 특수 금속의 가공에도 사용 가능하고 부품의 정밀도 및 가공속도 면에서 유리하며, 또한 레이저 절단에 비하여 장치의 가격이 저렴하므로 현장에서 많이 요구되고 있는 공정이다. 컴퓨터원용 설계, 제조(CAD/CAM)를 통한 절단공정의 자동화는 생산성의 향상 및 제품의 고급화를 위해서도 필연적이며, CAD에 의하여 얻어지는 절단형상에 대한 정보가 수치제어(NC) 데이터변환 장치를 통하여 파트 프로그램(part program)으로 변환되고, 이것이 컴퓨터수치제어(Computer-Numerical Control:CNC) 플라즈마 절단장치에 입력되어 자동으로 복잡한 형상의 절단이 가능하다.

본 연구에서는 플라즈마 절단공정에 효과적으로 적용될 수 있는 CNC 컨트롤러인 마이크로 컴퓨터의 선정, 보간기(interpolator) 및 속도제어용의 소프트웨어 프로그램 개발, 디지털 서어보 제어기 설계, 2축 이송장치 설계, 제작 및 마이크로 컴퓨터와 구동부의 연결(interfacing) 등을 통하여 CNC 플라즈마 자동절단 장치를 개발하였다.

2. 컴퓨터 수치제어 플라즈마절단 시스템 개발

전체 제어시스템은 Fig.1에서 보는바와 같이 크게 CNC컨트롤러인 마이크로컴퓨터와, 편차카운터(up/down error counter), DA 변환기

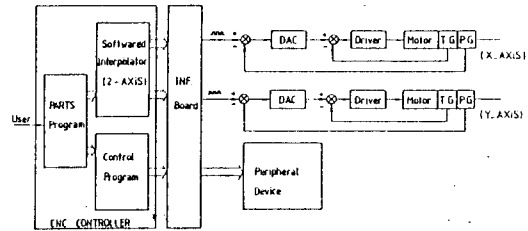


Fig. 1 Schematic diagram of the reference-pulse CNC system

(digital-to-analog converter) 및 서어보모우터 증폭기(servo-motor amplifier) 등으로 구성된 디지털서어보 제어기구와, 이송장치를 감속기를 통해 구동하는 서어보모우터(회전속도계(tachogenerator), 엔코더(encoder) 부착)로 구성되어 있다. 개발한 소프트웨어 프로그램은 절단형상을 나타내는 파트 프로그램의 입력으로 2축의 구동장치가 원하는 절단속도로서 절단형상의 윤곽을 따라서 제어되도록 서어보 제어기구에 펄스를 출력한다. 그리고 수동조작도 가능하며, 전기조작반의 각종 스위치 입력 및 NC의 보조기능등은 릴레이 시퀀스에 의하여 주변장치들을 제어하도록 하였다.

2.1. CNC용 마이크로 컴퓨터 및 디지털서어보 제어기구

CNC용 마이크로 컴퓨터는 16비트 MC-68000 마이크로프로세서가 내장되었고, 이것은 다른 16비트 마이크로프로세서에 비하여 빠른 시스템 클럭(=7.8MHz)과 32비트 연산이 가능하므로 부동점 처리기(floating point unit : FPU) 없이 $[-2^{31}, 2^{31}-1]$ 범위의 정수값을 빨리 연산할 수 있고 비트연산에 의한 논리 및 순차제어가 용이하므로 CNC 컨트롤러로 사용하기에 적합하다. 본 연구의 마이크로 컴퓨터에 내장된 CNC 컨트롤러용 소프트웨어는 파스칼 및 MC68000 어셈블리어를 사용하고 MPW(Macintosh Programmer's Workshop) Tool(Version 2.0)을 이용하여 개발하였다^{2,3,4)}. 파스칼로 구성된 주프로그램은 파트 프로그램의 입력 처리등을 주로 행하고, MC68000언어로서 소프트웨어 보간기 및 속도제어 알고리즘등을 구성한 서브 프로그램은 이송장치가 원하는 절단속도로 절단형상의 윤곽을 따라서 구동되도록 출력펄스를 발생시키는 역할을 한

Table 1 NC Code List

Code		Function	Others
G-code	G00	positioning(rapid traverse)	
	G01	liner interpolation	
	G02	circular acr interpolation(CW)	
	G03	circular arc interpolation(CCW)	
	G04	dwel time setting(--, - sec.)	G04 X--, -
	G40	Kerf-Width compensation off	
	G41	Kerf-Width compensation left	
G42	Kerf-Width compensation right		
G92	coordinate system setting		
F-code	F × × × ×	× × × × [mm/min]	
M-code	M02	Program Stop	M00, M01
	M03	Torch Up	
	M04	Torch Down	
	M05	Preheating ON	
	M06	Preheating OFF	
	M07	Cutting ON	
	M08	Cutting OFF	
	M09	Marking ON	
	M10	Marking OFF	
	other	D x x , xx	

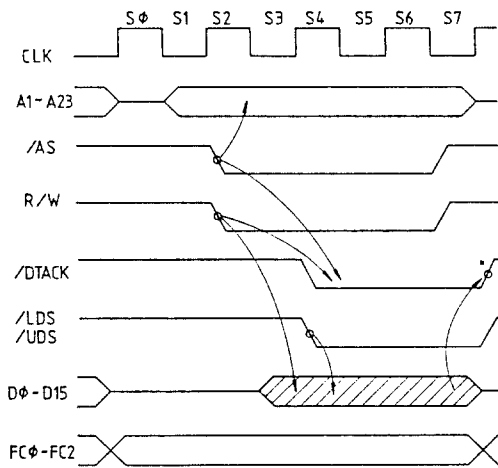


Fig. 4 Timing chart of a memory write cycle for MC68000 microprocessor

2.2. 2축 이송장치

본 연구에서 개발한 2축 이송장치의 전체적인 형상을 Fig.6에, 그 주요 사양을 Table 2에 각각 나타내었다. 이송부는 일반적인 열절단 시스템에 많이 사용되는 것으로서 적류 서어보 모우터로 구

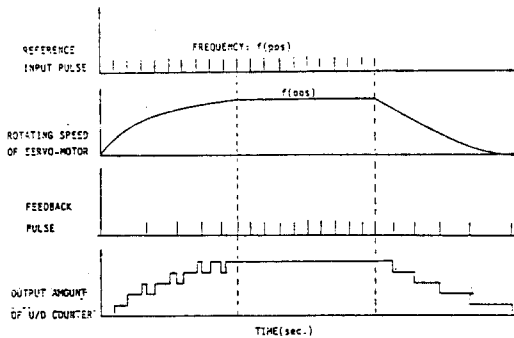


Fig. 5 Digital servo control mechanism

동되는 랙 및 피니언방식을 사용하였으며 위치정밀도는 약간 떨어지나 대형의 경우 제작가격이 저렴한 장점이 있다. 최소 지령단위(basic length unit)는 CNC 컴퓨터가 지령할수 있는 최소기본단위로서 보간기에서 1펄스 출력시 이송장치가 움직이는 변위로서 하드웨어의 정밀도와 더불어 위치결정 정도에 많은 영향을 미친다. 본 시스템의 최소지령단위는 0.003665mm이며 일반적인 플라즈마 절단시스템의 경우의 0.01mm에 비하여 작은 값으로서 충분한 위치분해능을 가진다.

Table 2 Main specifications of the developed X-Y table

Specificstions	Contents	Others
X-Y table length of X-axis length of Y-axis	1500mm 1000mm	
DC servo motor rated output power rated speed maximum speed rated torque instantaneous peak torque moment of inertia of rotor friction torque angle resolution of encoder output voltage of tachogen	200W 3000rpm 4000rpm 6.5kgf · cm 48kgf · cm $2.4 \times 10^{-3} \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2$ 0.4kgf · cm 1000P/T 3V per 1 krpm	
Rack/Pinion and Ball reducer module number of teeth diameter of pitch circle pressure angle reduction ratio	1.5 28 ea 42mm 20 degree 1/36	
Plasma cutting power source rating input power output current range maximum loading voltage	20 KVA, 16.5KW 40-100 volt 205 volts	

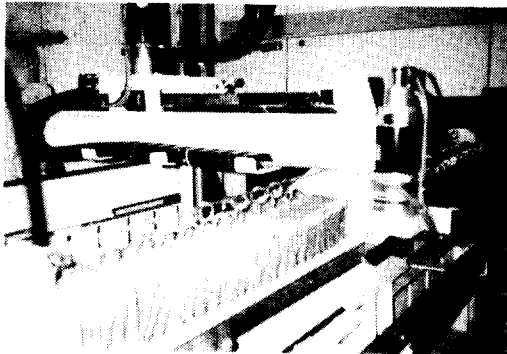


Fig. 6 Overall view of the developed X-Y table

2.3. 소프트웨어 보간기

일반적으로 보간기는 2축 이상의 구동시스템이 원하는 경로를 따라서 이동할수 있도록 필요한 지령을 내리는 것으로서 기존의 NC시스템에서는 디지털 집적회로로서 구성된 하아드웨어 보간기가 사용되었는데, 요즘은 마이크로컴퓨터의 발달에 따라서 CNC 시스템에서는 소프트웨어 보간기가 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 Bresenham

에 의해 제안된 컴퓨터 그래픽스용 알고리즘을 기본으로 하여 기준펄스(reference pulse)방식의 소프트웨어 보간기로 개선시킨 것으로서, 이 알고리즘은 더하기, 빼기, 비교 및 시프트(shift)연산으로만 구성되어 간단하고 처리시간이 적게 소요되므로 고속이송을 요하는 시스템에 적합하다. 여기에 사용되는 기본 알고리즘은 직선보간과 원호보간으로 구성되어 있고 상세한 내용은 아래와 같다.

2.3.1. 직선 보간(Linear Interpolation)

직선의 기울기가 0에서 1범위에 있고 출발점 (x_1, y_1) 에서 끝점 (x_2, y_2) 까지 직선을 따라 절단한다고 가정하자. 이때 출발점을 원점으로 하면 출발점 $(0, 0)$ 과 끝점 (dx, dy) 으로 되고, 여기서 $dx = x_2 - x_1$ 및 $dy = y_2 - y_1$ 이다(Fig. 7). 따라서 $s-t$ 는

$$s-t = 2(dy/dx)(r+1) - 2q - 1 \quad (1)$$

으로 표시된다. 그리고 dx 가 양수이므로 임의의 i -스텝에서의 결정변수(decision value) d_i 는 다음과 같이 표시된다.

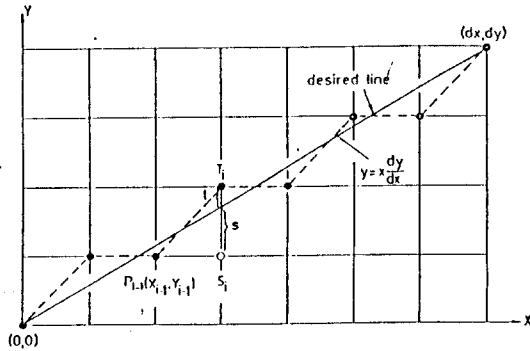


Fig. 7 Line generated by the linear interpolation algorithm

$$d_i = dx(s-t) = 2X_{i-1}dy - 2Y_{i-1}dx + 2dy - dx \quad (2)$$

식(2)로 부터 다음 단계의 결정 변수 d_{i+1} 은

$$d_{i+1} = d_i + 2dy - 2dx(Y_i - Y_{i-1}) \quad (3)$$

으로 표현된다 이상에서 만약 d_i 가 양수이면 다음 보간점은 T_i 가 선택되며, 따라서

$$d_{i+1} = d_i + 2(dy - dx) \quad (4)$$

으로 되고, 그렇지 않으면 S_i 가 선택되며

$$d_{i+1} = d_i + 2dy \quad (5)$$

으로 된다. 그리고 1보다 큰 기울기를 가진 직선에 대해서도 마찬가지로 결정할수 있다^{8,9)}. 파트 프로그램에 의하여 시점과 종점좌표가 입력되면 두 축(X, Y)의 이송방향, 기준축 및 두축의 소요펄스수등을 결정하여 두종류의 직선보간 알고리즘에 의하여 펄스를 출력시킨다.

2.3.2. 원호 보간(Circular Interpolation)

이 알고리즘은 원호의 중심을 원점(0, 0)으로 하여 원호를 따라서 두 축 동시에 또는 한 축만 1 BLU씩 증감시키면서 이루어지는 것으로서, 각 단계에서 실제 원호와 가장 근접한 보간점을 결정한다. 그리고 원호 C를 따라서 시계 방향으로 진행할 경우는 현재 위치 $P_{i-1}(X_{i-1}, Y_{i-1})$ 에서 다음 보간위치 S_i 와 T_i 중에서 실제 원호와의 오차가 적은 쪽을 택한다(Fig.8). 이 때 각각의 오차 $D(S_i)$ 및 $D(T_i)$ 로부터 결정 변수 d_i 는 아래와 같다.

$$d_i = ABS[D(S_i)] - ABS[D(T_i)]$$

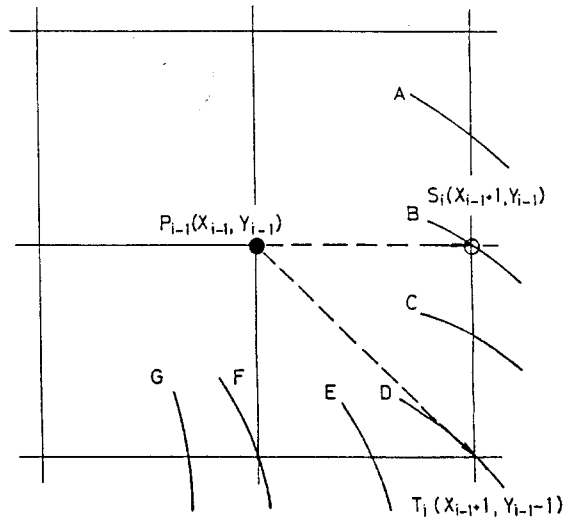


Fig. 8 Decision points for the circular interpolation algorithm

$$= 2X_{i-1}^2 + 4X_{i-1} + 2Y_{i-1}^2 - 2Y_{i-1} + 3 - 2R^2 \quad (6)$$

여기서 만약에 d_i 가 음수이면 S_i 가 선택되고, 다음 단계의 결정변수는 식(6)으로부터 다음과 같다.

$$d_{i+1} = d_i + 4X_i + 6 \quad (7)$$

또한 d_i 가 양수이면 T_i 가 선택되고 $X_i = X_{i-1} + 1$, $Y_i = Y_{i-1} - 1$ 으로 되며, 다음 단계의 결정변수는 위 식과 마찬가지로

$$d_{i+1} = d_i + 4(X_{i-1} - Y_{i-1}) + 10 \quad (8)$$

이 유도된다^{8,9,10)}. 그리고 최초결정변수 d_1 은 시작점(X_0, Y_0)에서 오차가 없다고 가정하면 식(9)로 표현된다.

$$d_1 = 4X_0 - 2Y_0 + 3 \quad (9)$$

이상에서 16가지의 경우(2방향 및 8개의 8분원)에 대해서도 마찬가지로 구할수 있고, 각각의 시계방향의 8분원에 대한 알고리즘은 반시계방향의 8분원에 대한 것과 공통점이 있으므로 실제 구성되는 알고리즘의 종류는 8가지가 된다. 그리고 파트 프로그램에 의하여 원호방향(CW, CCW), 시점, 시점과 중심점과의 거리 및 종점이 입력되면 8분원구역 및 방향, 시점, 이송방향 및 소요펄스수등을 결정하여 8가지 원호보간 알고리즘

에 의하여 펄스를 출력시킨다.

원호의 정밀도는 보간시 생성되는 원호의 반경 방향 표준 편차(standard deviation)에 의하여 측정되며 아래와 같이 표현된다.

$$S = [(1/N) \sum E_i^2]^{1/2} \quad (10)$$

여기서 S : 표준 편차

E_i : 실제원호와 보간점과의 반경방향 오차

N : 원호 형성에 필요한 보간 루틴 (routine) 수행횟수

반경이 1000BLU's인 8분원호의 보간시 표준편차를 비교하기 위하여 3가지 보간방법을 사용하여 시뮬레이션한 결과 DDA(digital differential analyser)방법과 Stairs approximation 방법은 각각 0.379, 0.472인데 반하여¹¹⁾, 본 연구에 사용된 보간법은 0.261로서 상기 두가지 방법에 비하여 보다 정밀한 원호를 생성함을 보였다.

2.4. 절단속도 제어 알고리즘

임의 형상의 열절단 가공에 있어서 토오치가 절단형상의 윤곽을 따라서 주어진 선속도로 이송하는 것은 양호한 품질을 얻는데 매우 중요한 역할을 한다. 절단 선속도는 펄스 1개 발생되는데 필요한 시간에 대한 이송장치의 실제 이송거리로 정의되는데, 개발된 보간기의 특성에 의하여 (a)한 축만 이송하는 경우 및 (b)두축 동시에 이송하는 경우의 두 가지로 구분할 수 있다. 즉 미시적으로 볼때 (b)의 경우는 펄스 한개 발생되는 시간에 두축이 동시에 1 BLU씩 이동하여 결과적으로 $\sqrt{2}$ BLU가 진행되기 때문에 한 축만 이동하는 (a)경우 보다는 선속도면에서 $\sqrt{2}$ 배 빠르다. 그러므로 두 경우에 대하여 같은 선속도를 유지하기 위하여 (b)의 경우는 (a)의 경우보다 $\sqrt{2}$ 배 작은 속도에 상당하는 수치를 사용토록 하였다. 따라서 개발된 시스템은 절단형상의 윤곽에 관계없이 항상 주어진 선속도를 유지할 수 있다.

보간기의 출력펄스 주파수는, Fig. 9에서 보는 바와 같이, 레지스터(register) P에 절단 속도의 상당값(P_k)을 넣고서 계속 더하여 오버플로우(overflow)가 발생하면 보간기에서 1 BLU에 해당하는 펄스가 출력되고 이 때 소요되는 클럭수로, 즉 소요되는 시간으로 속도가 제어된다. 일반

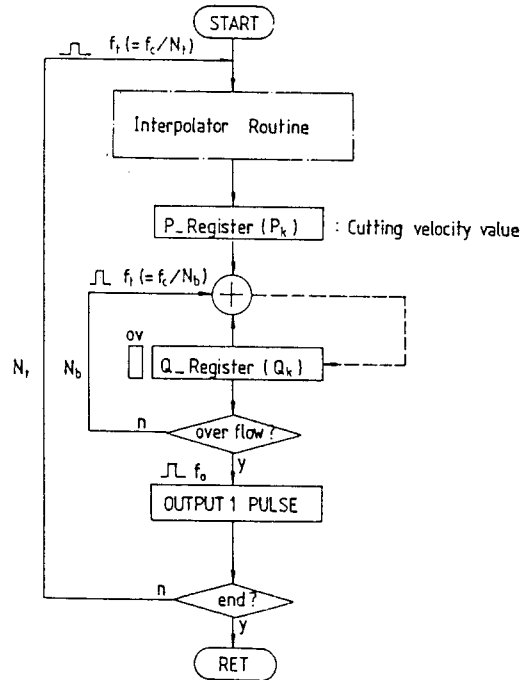


Fig. 9 Flowchart of the velocity control program

적으로 P_k 값은 2^{31} 에 비하여 매우 작은값이므로 아래와 같이 표현된다.

$$f_0 = f_c / [N_t + N_b \cdot 2^{n-1} / P_k] \quad (11)$$

여기서,

f_0 : 보간기의 출력펄스 주파수 (Hz),

f_c : 마이크로 컴퓨터 클럭 주파수 (Hz),

N_t : 펄스 출력에 소요되는 기본클럭수,

N_b : 속도 제어의 소요 클럭수이다.

출력펄스 주파수와 절단 속도와의 관계는 다음과 같이 나타낸다.

$$V = 60 \lambda f_0 L_b \quad (12)$$

여기서,

λ : 보정계수 (1축구동 경우 $\lambda=1$, 2축동시구동 $\lambda=1/\sqrt{2}$),

V : 절단속도 (mm/min),

L_b : 최소지령단위 (mm)이다.

결론적으로 P-레지스터의 상당 절단속도 수치는 식(11), (12)으로부터

$$P_k = \text{round} [N_b \cdot 2^{n-1} / (60 \lambda f_c L_b / V - N_t)] \quad (13)$$

로 된다. 실제 절단속도와 상당 절단속도 값의 관계는 개발된 장치에 사용된 32비트 연산의 경우가 16비트 경우보다 속도분해능이 더 좋으므로 더욱 더 정밀한 속도제어가 가능하다.

본시스템의 경우 $f_c=7.8336$ MHz, $1BLU=0.003665$ mm, $N_z=288$, $N_b=18$, $n=32$ 이므로 형상을 따라 절단할때 가능한 최대 출력 주파수 및 최대 절단속도는 각각 27.2KHz 및 5,980mm/min 이므로 속도면에서 불태 소프트웨어 보간기의 개발에 만족한 결과를 얻을수 있었다.

2.5. 절단폭(Kerf-width) 및 백래시(Backlash)의 보정

플라즈마 아아크 절단등과 같은 열절단에서 원하는 형상을 절단할때 실제로는 절단폭을 고려하여 절단폭 만큼 여유를 두어야 하는데 그 보정에 관한 기본 알고리즘은 문헌⁹⁾에 나타나있다.

그리고 백래시 현상은 토오치를 부착한 이송장치의 방향전환시 피니언(pinion)과 랙(rack)의 틈새에 의하여 모터에 직결된 피니언은 구동되나 토오치의 실질적인 이동이 없으므로 발생된다. 본 연구에서는 마이크로 컴퓨터에 백래시 량을 입력시켜 각 이송축의 방향전환시 그량에 해당하는 필스를 현재 진행방향으로 출력시켜 소프트웨어적으로 백래시를 보정해주는 방법을 사용하였다.

3. 절단 실험 및 결과

개발된 자동절단 장치를 사용하여 절단 토오치가 1000mm/min의 속도로서 Fig. 10의 절단형상에 대한 2.0mm의 절단폭 보상을 한 경로(path)를 따라서 움직이면서 절단 할수 있도록 NC언어로 작성한 파트 프로그램은 아래와 같다.

- F1000 ; 절단이송속도=1000mm/min 지정
- G00 X200 Y200 ; 급이송으로 +X, +Y방향 200mm이동.
- G92 X0 Y0 ; 토오치의 현재위치를 (X, Y)=(0, 0)로 좌표설정.
- M04 ; 토오치 하강(descent)
- M07 ; 토오치 스위치 ON(파이렛 아크 발생)
- G04, X5.0 ; 5초동안 정지(파이렛아크 발생후 약 3초후 절단아크 발생)
- G41 D2.0 ; 절단폭 2.0mm 좌측 보상

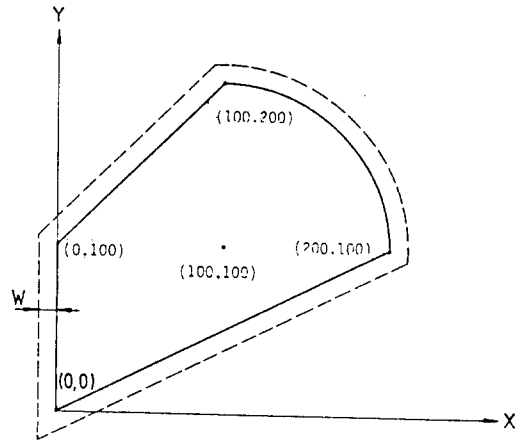


Fig. 10 Configuration of the part to be cut(W : kerf-width)

- G01 X0 Y100 ; 1000mm/min 절단속도로 (0, 0)-(0, 100)간 직선절단
- G01 X100 Y200 ; 1000mm/min 속도로 (0, 100)-(100, 200)간 직선절단
- G02 X200 Y100 I0 J100 ; 1000mm/min 속도로 (100, 100)을 중심으로 시점(100, 200)부터 종점(200, 100)까지 원호절단
- G01 X0 Y0 ; 1000mm/min 절단속도로 (200, 100)-(0, 0) 직선절단
- G40 ; 절단폭 보상 해제
- M08 ; 토오치 스위치 off(절단 아크 꺼짐)
- M03 ; 토오치 상승(Ascent)
- M02 ; 프로그램 완료(End of program)

개발한 절단시스템에 상기 파트 프로그램을 입력하여 절단한 후의 절단형상을 Fig. 11에 나타내었으며, 육안으로 판별하여 절단품질이 양호하였으며 절단시스템의 구동도 원활함을 알수 있었다. 특히 본 연구에서와 같이 편차카운터를 사용한 서보제어기구는 한축만 이송하는 직선의 모서리부분을 절단할 경우에는 한축의 감속과 다른 축의 가속이 동시에 이루어져 실제적인 경로는 약간의 원호가 되므로 보통 정지시간을 두어 이러한 현상을 방지한다(예를 들면, G01 X100 Y0, G04 X0 5, G01 X100 Y100와 같은 파트 프로그램을 작성한다.). 그러나 열적인 관점에서 보면 정지시 많은

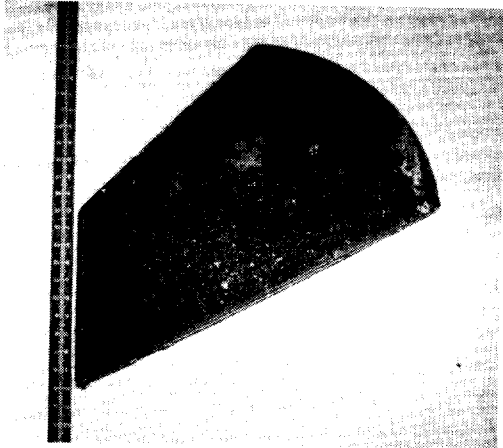


Fig. 11 Appearance of the part of Fig.9 after cutting

입열량으로 인한 절단폭이 커지는 현상이 생기므로 이러한 점들을 잘 고려해야 한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 플라즈마 절단공정의 자동화에 효과적으로 적용될 수 있는 CNC형 플라즈마 절단 장치를 개발하고, 이것을 사용하여 절단을 행하였는데 그 내용을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 임의의 절단형상을 절단시 위치 및 윤곽제어가 가능하도록 기준펄스 방식의 직선보간 및 원호보간의 기능을 갖는 소프트웨어 보간기를 개발하였다. 이 보간기는 간단한 정수연산만으로 가능하여 처리시간이 적게 소요되므로, 위치분해능을 0.003665mm로 하였을때 속도 분해능 약 5mm/min을 가진 절단이송속도 100mm/min-4000mm/min를 만족하였다.

2) 소프트웨어적으로 절단속도를 정밀하게 제어하고 절단형상에 관계없이 절단경로를 따라서 주어진 절단선속도가 유지되도록 하였는데, 이것은 열절단등과 같은 공정에서는 양호한 품질을 얻는데 매우 중요한 것이다. 개발된 자동절단장치를 사용하여 시험절단한 결과 절단성능이 양호함을 알 수 있었다.

3) 개발에 사용된 마이크로 컴퓨터는 내부적으로 32비트 연산이 가능하여 매우 큰 절단형상에도 제약을 받지 않으며, 또한 비트연산이 가능하여 논리 및 순차제어가 용이하므로 CNC컨트롤러로서

적합하였고, 구동부와의 연결(interfacing)회로를 자체적으로 설계하여 만족한 결과를 얻었으며 유사한 분야에도 응용이 가능하리라 생각된다.

4) 본 연구에서 구성한 디지털서보 시스템은 엔코더에 의하여 이송장치의 위치를 피이드백하여 위치 및 윤곽을 제어하고, 또한 회전속도계에 의한 모우터의 속도를 피이드백하여 속도제어 뿐만 아니라 전체 제어시스템을 안정하게 하였다. 랙(Rack) 및 피니언(pinion) 구동방식은 위치 정밀도는 약간 떨어지나 제작가격이 저렴하므로 플라즈마 절단공정에 적합하였으며, 특히 대형장치의 구성에 확대적용이 용이할 것이다.

5) 플라즈마 절단가공중에 모재가 열영향을 받아 변형되어 토오치의 팁(tip)과 모재간의 간격이 변하여 아아크가 꺼지거나 절단품질이 나빠지는 경우가 자주 발생하므로, 이 간격을 일정하게 유지할 수 있도록 높이제어(height control)가 절실히 요구되며 이에 대한 계속적인 연구가 요망된다.

후 기

본 연구개발은 상공부에서 시행한 공업기반 기술개발 사업의 일환으로 수행 되었으며 참여기업체인 중원기계(주)의 2축 이송장치 설계 제작의 협조에 깊은 감사를 드립니다. 또한 이송장치와 제어부의 설계, 제작에 많은 도움을 준 과학기술원 생산공학과 고밀도 에너지 가공시스템 연구실의 박수웅, 양영수, 엄두간씨에게도 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) American Welding Society: Recommended Practices for Plasma Arc Cutting, (1982), pp. 1-5.
- 2) Apple Computer: Macintosh Programmer's Workshop Reference(Version 2.0), July 20, (1987).
- 3) Apple Computer: Macintosh Programmer's Workshop PASCAL(Version 2.0), July 20, (1987).
- 4) Apple Computer: Macintosh Programmer's

- Workshop Assembler(Version 2.0), July 20, (1987).
- 5) 那順川德博 : 周邊 LSI とのインターフェース, トランジスタ 技術, Oct., 1988, pp.416-431
 - 6) Addison - Wesley : Macintosh Family Hardware Reference, (1987), pp.14.1-14.6.
 - 7) Y. Koren : Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw - Hill, (1983), pp.115-142.
 - 8) J.D. Foley and A. VAN Dam : Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Addison-Wesley, (1982), pp.432-445.
 - 9) S.J. Na, S.W. Park, S.H. Cho and T.J. Lho : A Microprocessor-based shape and velocity control system for plasma-arc cutting, Welding Journal, Vol.62(2), Feb., (1988), pp.27-33.
 - 10) J. Bresenham : A linear algorithm for incremental digital display of circular arcs, Communications of the ACM, Vol.20, (1977), pp.100-106.
 - 11) Y. Koren and O. Masory : Reference pulse circular interpolatos for CNC systems, Trans. of ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.103(1), Feb., (1982), pp.131-136.