

## 3축 파이프 형상 절단기의 성능평가에 관한 연구

노태정<sup>1\*</sup>, 이욱진<sup>1</sup>, 김화일<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>동명대학교 메카트로닉스공학과

### A Study on Performance Evaluation of 3-Axis Pipe Profile-Cutting Machine

Tae-Jung Lho<sup>1\*</sup>, Wook-Jin Lee<sup>1</sup> and Hwa-Il Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechatronics Engineering, Tongmyong University

**요 약** CNC 3축 파이프 형상절단기의 성능은 이송계의 위치결정 정밀도와 공작물의 가공 정밀도를 측정하고 검증함으로써 평가되었다. 위치결정 정밀도는 PLC의 모션 컨트롤러에 의하여 구동된 이송 거리와 레이저 간섭계를 이용한 실제 이송 거리를 측정 비교하여 오차를 확인하였다. 그리고 가공 정밀도는 절단된 공작물을 스캐닝하고 3D 모델링하여 가공형상을 확보하고, 절단궤적에 해당하는 CL 데이터와 비교하여 오차를 확인하였다.

**Abstract** A performance of CNC 3-axis pipe profile-cutting machine we developed was evaluated by measuring and verifying a positioning accuracy of its feeding unit and a cutting shape accuracy of pipe workpiece. The positioning accuracy was verified by comparing moving distance actuated by PLC motion controller with actual one measured by a laser interferometer. The cutting shape accuracy was also verified by comparing a cutting shape obtained through scanning and 3D modeling the pipe workpiece with that through CL data.

**Key Words** : Performance evaluation, Pipe profile-cutting machine, Positioning accuracy, Cutting shape accuracy, Laser interferometer, Scanning, 3D Modeling, CL(Cutter Location) data

## 1. 서 론

육상 트러스, 선박 및 해양플랜트의 구조물이나 열교환기에 필수적인 파이프의 접합은 일반적인 평판 접합과는 달리 곡면에 대한 접합이 이루어지므로 그 형상이 복잡하다. 또한 이러한 가공은 주로 수가공으로 이루어져 숙련된 인력이 필요하여 고질적인 인력난을 겪고 있으며 수가공시 필연적으로 발생하는 불량률의 증가와 표준화의 어려움은 실제 조선, 플랜트, 열교환기 등의 정밀한 제품에 적용될 경우 그 제품의 신뢰성을 확보하기가 어렵다.

이에 수식화된 접합궤적을 확보하고 이를 바탕으로 절단궤적을 생성할 수 있는 파이프 절단 전용 CAM 프로그램 및 CNC 3축 파이프 형상 절단기를 개발하였으며

[1-2], 실제로 다양한 형태로 개발된 장비의 성능과 가공품의 성능을 평가하기 위한 연구가 많이 진행되었으며 [3-5], 가공된 제품의 정밀도를 보다 편리하게 검사하는 연구[6]가 최근에 이루어지고 있다.

이에 대하여 본 연구에서는 실제로 개발된 CNC 3축 파이프 형상 절단기[2]의 이송계의 위치결정 정밀도와 공작물의 가공 정밀도를 측정하여 개발된 기계의 성능을 검증하였다.

## 2. 3축 파이프 형상절단기 개요[2]

그림1은 실제로 설계된 도면을 바탕으로 제작된 3축 파이프 형상 절단기의 외관이다.

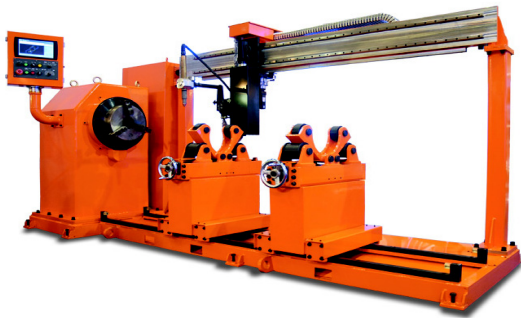
본 논문은 지정부의 지역산업기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

\*교신저자 : 노태정(tjlho@tu.ac.kr)

접수일 10년 02월 23일

수정일 (1차 10년 05월 20일, 2차 10년 06월 07일)

게재확정일 10년 06월 18일



[그림 1] 3축 파이프 형상 절단기의 시제품 외관

3축 파이프 형상절단기에서 CAM 프로그램은 터치패널로 구성되어 작업자가 다양한 값을 입력, 설정할 수 있으며, 먼저 각각의 접합형상에 따라 데이터베이스에 입력된 수식을 통해 CL(Cutter Location) 데이터를 생성한다. 개발된 조작반(operation panel)은 그림2와 같이 작업자가 가공하고자 하는 형상을 터치패널에서 선택하고 파이프의 크기와 파라미터를 입력한다.



[그림 2] 조작반의 접합패턴 설정 선택창

그림3과 같이 입력된 값들을 바탕으로 CL 데이터를 생성하고 토치가 구동되지 않는 상태에서 가공경로를 확인할 수 있는 ghost 기능을 제공하여, 작업자가 실제로 가공하기 전에 가공경로를 확인할 수 있도록 하였다.

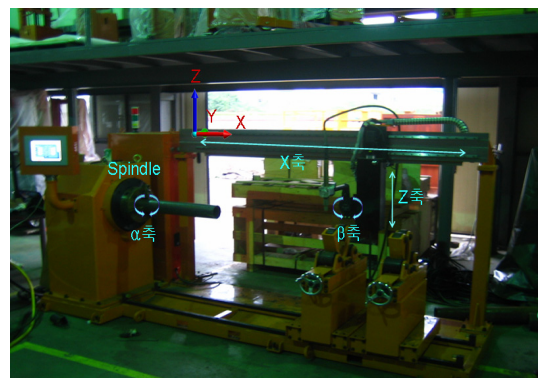
PLC는 RS-485 통신을 통하여 상부의 터치패널로부터 보정값을 고려하여 계산된 CL 데이터를 받아서 동시 3축 모션제어 컨트롤러를 통해 각 축의 모터드라이브에 전송하고 각 모터를 이용하여 동시 3축 형상절단 제어를 한다.



[그림 3] 조작반의 CL Data 및 Ghost기능 확인창

### 3. 이송부 위치결정 정밀도 측정

그림4와 같이 이송부는 척(chuck)을 회전하는  $\alpha$  축, 파이프의 중심축과 수평방향으로 토치를 움직이는 X축, 파이프의 수평방향으로 토치를 좌우 45° 방향으로 틸팅(tilting)하는  $\beta$  축으로 구성된다. Z축 이송은 절단 개시 전에 토치의 높이를 조절하는 기능으로 가공 시에는 구동되지 않는다.



[그림 4] 이송축의 방향 및 위치결정 정밀도 측정

이송부의 위치결정 정밀도(positioning accuracy)의 측정은 레이저 간섭계(laser interferometer)인 FARO사의 Laser Tracker X를 사용하였으며, 그의 주요 사양은 표1과 같다.

[표 1] FARO Laser Tracker X의 주요 사양

항 목		성능 사양
Distance Measurement Performance	Resolution	0.5 um
	Sample Rate	10,000 samples/sec
	Accuracy	10um +0.4 um/m
	R0 Parameter	10 um
Angle Measurement Performance	Angle Accuracy	18um +3 um/m
	Max Angular Velocity	180 °/sec
	Optimal Precision Level Accuracy	± 2 arcseconds

이 장비를 사용하여 PLC Motion Control Module의 이송 목표위치와 실제로 이동한 위치를 측정하여 비교할 수 있다. 총 4개의 이송축은 일정 거리로 반복 이송하여 실제로 이송한 거리를 측정하였다. 토치가 X축 방향으로 이동시 Z, Y방향 변화량 측정하여 X축의 진직도(straightness)를 측정하고, 토치가 Z축 방향으로 이동시 X, Y방향 변화량을 측정하여 Z축의 진직도를 측정하여 처짐의 영향을 알아보았다.

이송부의 정밀도 및 진직도 측정에서는 총 10회를 측정하였으나 거의 비슷한 경향을 나타내는 바 그 중 1개를 표본으로 추출하여 데이터로서 제시하였다.

### 3.1 α 축 위치결정 정밀도 측정

α 축의 위치결정 정밀도는 60°간격으로 6개 구간으로 나누어 척 회전으로 위치결정한 후 실제의 회전 각도를 측정하였다. 표2는 각 구간별로 목표위치, 실제 회전위치(측정치) 및 오차를 나타내었으며, α 축의 구간별 위치결정 정밀도는 0.0565°이며, 원점 위치결정 반복정도는 0.142°임을 알 수 있다.

[표 2] α -Axis의 위치결정 측정 데이터

목표치[°]	측정치[°]	오차[°]
0° → 60°	59.878	-0.122
60° → 120°	119.998	-0.002
120° → 180°	179.980	-0.020
180° → 240°	239.985	-0.015
240° → 300°	299.990	-0.010
300° → 360°	360.170	0.170
0° → 360° (원점 반복정도)	360.142	0.142

### 3.2 X축 위치결정 정밀도 및 진직도 측정

X축의 위치결정 정밀도는 전체 구간 0 ~ 1,800mm를 200mm 단위로 9개 구간으로 나누어 실제 이송거리를 측정하였다. 표3은 각 지점별로 목표위치, 실제 이송위치(측정치), 오차를 나타내었으며, X축의 지점별 위치결정 정밀도는 0.0678mm 임을 알 수 있다.

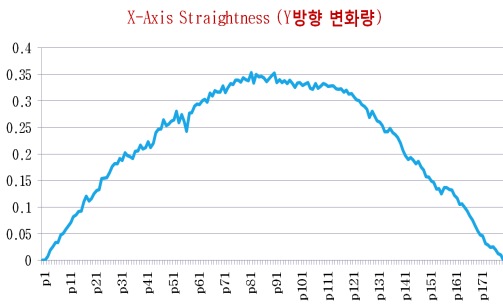
[표 3] X-Axis의 위치결정 측정 데이터

목표치[mm]	측정치[mm]	오차[mm]
0 → 200	199.9559	-0.0441
200 → 400	399.9660	-0.034
400 → 600	600.0032	0.0032
600 → 800	800.0267	0.0267
800 → 1000	1000.2522	0.2522
1,000 → 1,200	1199.9989	-0.0011
1,200 → 1,400	1400.0456	0.0456
1,400 → 1,600	1600.0655	0.0655
1,600 → 1,800	1800.1376	0.1376

그림5와 그림6은 X축이 0mm부터 최대 1800mm까지 이송하면서 10mm 단위로 180개의 지점별로 Z, Y방향의 변화량을 측정하여 X축의 진직도를 나타냈으며, 그래프의 횡축은 X축의 180개 지점이며, 종축은 X축의 각 지점에서의 Z, Y방향의 각각 변화량이며, 단위는 mm이다. 토치가 X축으로 이송할 때 X축의 중앙 구간에서 Z, Y방향으로 가장 큰 변화량이 있고, 이때 Z방향 최대 변화량은 -0.1mm이고, Y방향 최대 변화량은 0.35mm인 것을 알 수 있다.



[그림 5] X-Axis의 Straightness(Z축 방향 변화량)



[그림 6] X-Axis의 Straightness(Y축 방향 변화량)

### 3.3 β 축 위치결정 정밀도 측정

토치가 용접부의 개선탄을 가공하기 위한 축인 β 축 이송은 실제로 가공시 사용되는 최대각인 -45° ~ +45°의 범위로 15° 간격으로 6개 지점으로 나누어 실제의 위치 결정 회전각도를 측정하였다. 표4는 각 지점별로 목표위치, 실제 회전위치(측정치) 및 오차를 나타내었으며, 그 결과 지점별 위치결정 정밀도는 0.013° 임을 알 수 있다.

[표 4] β -Axis의 위치결정 측정 데이터

목표치[°]	측정치[°]	오차[°]
-45° → -30°	-30.004	0.004
-30° → -15°	-15.013	0.013
-15° → 0°	0.016	0.016
0° → 15°	15.035	0.035
15° → 30°	30.008	0.008
30° → 45°	45.002	0.002

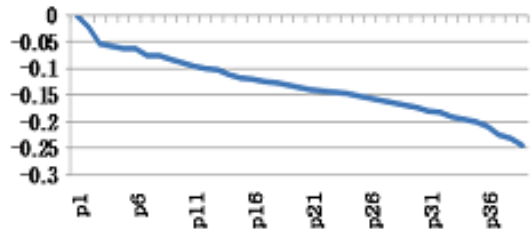
### 3.4 Z축 위치결정 정밀도 및 진직도 측정

토치의 초기 높이위치를 설정하는 Z축은 0~200mm 이송하면서 40mm 단위로 5개 지점별로 측정하였고, 표5는 그 측정 결과이며 Z축의 위치결정 정밀도는 0.1359mm임을 알 수 있다.

[표 5] Z-Axis의 위치결정 측정 데이터

목표치(mm)	측정치(mm)	오차(mm)
0 → 40	40.0842	0.0842
40 → 80	80.1487	0.1487
80 → 120	120.1683	0.1683
120 → 160	160.1543	0.1543
160 → 200	200.124	0.124

그림7과 그림8은 Z축이 0mm부터 최대 400mm까지 이송하면서 10mm 단위로 40개의 지점별로 X, Y방향의 변화량을 측정하여 Z축의 진직도를 나타냈으며, 그래프의 횡축은 Z축의 40개 지점이며, 종축은 Z축 지점별로 X, Y방향의 각각 변화량이며, 단위는 mm이다. 토치가 Z축 방향으로 이송할 때 X방향 최대 변화량은 Z축의 끝단에서 -0.25mm이며, Y방향 최대 변화량은 Z축 중앙구간에서 0.16mm인 것을 알 수 있다.



[그림 7] Z-Axis의 Straightness(X축방향 변화량)

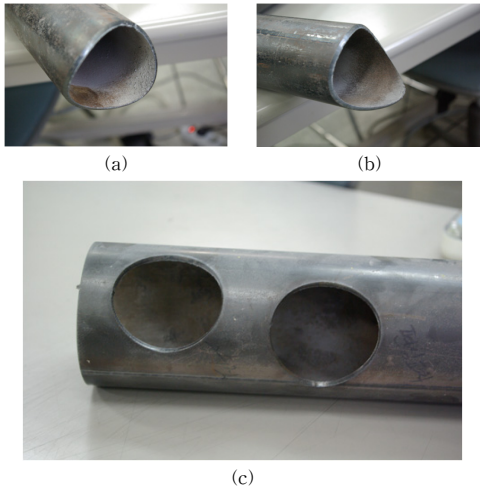


[그림 8] Z-Axis의 Straightness(Y축방향 변화량)

## 4. 형상가공 정밀도 측정

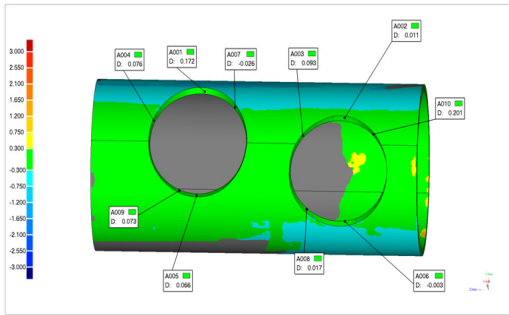
개발한 자동 파이프 형상 절단기를 통하여 가공된 파이프의 형상이 계산된 CL 데이터와 얼마나 유사한지를 비교하여 절단가공 정밀도(cutting shape accuracy)를 확인하였다. 실제 CL 데이터와 같은 방법으로 외경의 좌표값, 두께의 중심에 대한 좌표값, 내경에 대한 좌표값을 구하여 실제 가공물과 비교하였다. 독일 Steinbichler사의 COMET-V 4M의 3D 스캐너를 이용하여 실제 가공물을 스캔하여 다양한 지점에 대한 좌표값을 확인하였다.

파이프는 수직교차절단과 편심수직교차절단에 대하여 실제 가공을 진행하였다. 가공된 파이프의 모관과 지관에 대한 실제 형상은 그림9와 같다.

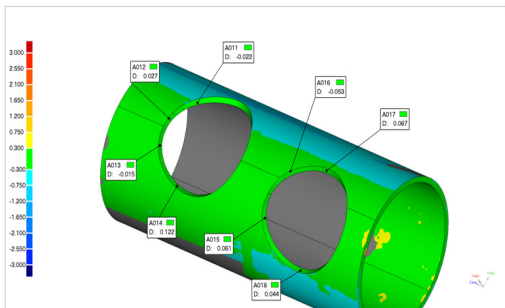


**[그림 9]** 실제 가공된 파이프의 형상  
(a)수직교차절단(지관), (b)편심수직교차절단(지관),  
(c)수직교차절단과 편심수직교차절단(모관)

가공된 파이프를 3D 스캐너를 이용하여 3D 모델링으로 형상을 확보하여 가공시에 적용된 CL 데이터의 좌표값과 비교하여 그 오차를 측정하였다. 그림10, 11과 같이 모관의 경우 하나의 파이프에 두가지 형상이 가공되어있기 때문에 하나의 형상으로 작업하여 외경, 파이프 두께의 중심, 내경에서 총 18개의 지점을 비교하였다.

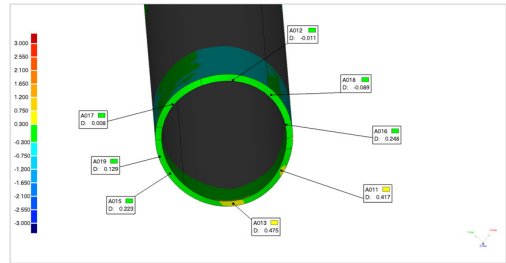


**[그림 10]** 스캐닝 가공형상과 CL Data의 비교(1)

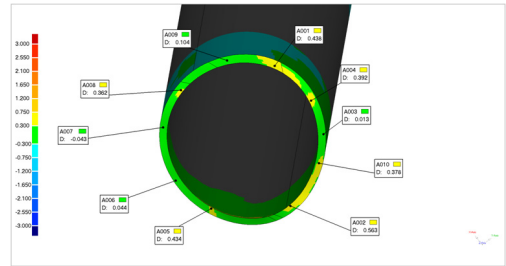


**[그림 11]** 스캐닝 가공형상과 CL Data의 비교(2)

지관의 경우 그림12, 13과 같이 수직교차절단과 편심 수직교차절단의 가공물을 상기의 모관 측정방식과 같은 방법으로 CL 데이터와 비교하였다. 수직교차절단은 총 8개 지점을 측정하였고, 편심수직교차절단은 10개 지점에서 측정하였다.



**[그림 12]** 스캐닝 가공형상과 CL Data의 비교(3)



**[그림 13]** 스캐닝 가공형상과 CL Data의 비교(4)

각각의 접합형상에 대해 측정된 평균값과 최대값, 최소값은 다음의 표6과 같다.

**[표 6]** 3D 모델링과 CI Data의 오차값

	Avg. (mm)	Max. (mm)	Min. (mm)
수직교차절단(모관)	0.053	0.172	-0.015
편심수직교차절단(모관)	0.048	0.201	-0.003
수직교차절단(지관)	0.175	0.417	-0.011
편심수직교차절단(지관)	0.268	0.563	0.013

표6과 같이 각 절단형상별 가공형상 오차의 최대값이 0.563mm로서 설계 목표치인 1mm 이내로 측정되어 플라즈마 절단을 사용하는 장비의 특성상 상당히 작은 오차 범위의 가공이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

PLC의 위치결정제어 모듈을 사용하여 개발한 동시 3축 자동 파이프 형상 절단기를 통하여, 기계 이송부의 위

치결정 정밀도와 공작물의 가공 정밀도를 측정하였으며, 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 위치결정 정밀도는 목표위치와 실제 이송위치를 비교하여 오차를 분석하였다.  $\alpha$  축 구간별 회전 위치결정 오차는  $0.0565^\circ$ 이며 원점 위치결정 반복정도의 오차는  $0.142^\circ$ 로서 설계 목표치인  $\pm 0.2^\circ$  이내이며,  $X$ 축 구간별 이송의 오차는  $0.0678\text{mm}$ 로서 설계 목표치인  $\pm 0.2\text{mm}$  이내이며,  $X$ 축의 진직도는  $Z$ 방향으로 최대  $-0.1\text{mm}$ 이고,  $Y$ 방향으로 최대  $0.35\text{mm}$ 이며,  $\beta$  축 이송의 구간별 위치결정 정밀도는  $0.013^\circ$ 로서 설계 목표치인  $\pm 0.1^\circ$  이내이며,  $Y$ 축 이송의 구간별 위치결정 정밀도는  $0.1359\text{mm}$ 이며  $Y$ 축 이송의 진직도는  $X$ 방향으로 최대  $-0.25\text{mm}$ 이며  $Z$ 방향으로 최대  $0.16\text{mm}$  임을 확인할 수 있었다.
- 2) 가공 정밀도의 경우 실제 가공된 파이프를 스캐닝하고 3D 모델링으로 형상을 확보하여 각 지점의 좌표값과 가공에 적용되는 CL 데이터를 비교한 결과 최대 오차값이  $0.563\text{mm}$ 로서 설계 목표치인  $1\text{mm}$ 의 오차범위 내로 나타나 후가공인 용접에 적용이 가능한 것을 확인 할 수 있었다.
- 3) 따라서 기계 위치결정 정밀도와 가공정밀도 모두 설계 목표치에 부합되므로 개발된 동시 3축 자동파이프 형상 절단기는 절단궤적과 개선각을 동시에 가공할 수 있는 장점을 바탕으로 상용화될 경우 산업에 상당히 기여가 가능할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] 노태정, 이육진, “6축 CNC 파이프 코스터 전용 CAM 프로그램 구현”, 한국산학기술학회논문지, 제10권 제9호, pp.2202-2209, 2009.
- [2] 노태정, 김화일, “PLC를 이용하여 궤적절단과 동시에 용접부 개선이 가능한 자동 3축 파이프 형상절단 시스템 개발”, 한국산학기술학회논문지, 제10권 제11호, pp.3066-3073, 2009.
- [3] 고해주, 정운교, “복합공작기계의 이송계 운동정밀도 측정의 연구”, 한국기계가공학회지, 제6권 제3호, pp.112-118, 2007.
- [4] 이찬홍, 김경호, 장태성, “다계통 e-CNC 장치의 성능평가 기술 및 적용”, 한국정밀공학회지 제26권 제4호, pp.39-46, 2009.
- [5] 김현석, 이대길, “신소재 경면가공용 CNC연삭기의 가공성능 평가”, Proc. of 1995 KSPE Fall Conference, pp.92-97, 1995.
- [6] 엄상인, 이영진, 김경수, 배종일, 이만형, 김정석, 강

명창, “CNC형 3축 구동 3차원 자동검사 시스템 개발”, Proc. of 1999 KSPE Spring Conference, pp741-744, 1999.5.

### 노 태 정(Tae-Jung Lho)

[정회원]



- 1984년 2월 : 부산대 기계설계학과(공학학사)
- 1986년 2월 : KAIST 생산공학과(공학석사)
- 1992년 8월 : KAIST 정밀기계공학과(공학박사)
- 1986년 2월 ~ 1999년 2월 : 삼성중공업 기전연구소(수석연구원)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 부교수

<관심분야>

Mechatronics, Robotics, CNC & CAM, 제어 및 자동화 등

### 이 육 진(Wook-Jin Lee)

[준회원]



- 2008년 2월 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 (공학사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 석사과정

<관심분야>

Mechatronics, 디지털제어, 구조해석, Robotics, CNC & CAM 등

### 김 화 일(Hwa-il Kim)

[준회원]



- 2008년 2월 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 (공학사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 석사과정

<관심분야>

Mechatronics, PLC제어, 구조해석, CNC & CAM