

# PC-NC 제어 Water Jet 가공기의 개발과 티타늄의 시험 절삭

최병문\*, 홍성기\*, 유범상\*\*, 박상민\*\*\*

## Development of PC-NC Water Jet Cutting System and Cutting of Titanium

Byung-Mun Choi\*, Seong-Ki Hong\*, Beom-Sahng Ryuh\*\*, Sang-Min Park\*\*\*

### ABSTRACT

Water jet cutting is a new technology using very high pressure water as a cutting tool. Water jet cutting system consists of water preparation part, pressure generation part, cutting head, and motion part. A PC-based numerical controlled (PC-NC) X-Y table is developed and water jet cutting system is installed thereon. Water jet machining is applicable to various kinds of materials ranging from soft materials such as rubber and meat to hard-to-cut materials such as titanium. This paper shows the application of the abrasive waterjet system to titanium cutting.

**Key Words** : Abrasive water jet (연마제 워터젯), Water preparation part (물 공급부), Pressure generation part (압력 발생부), Cutting head and motion part(절삭 및 이송부), Titanium (티타늄)

### 1. 서론

워터젯 가공이란 고속 고압의 물을 가공 목적에 맞도록 활용하는 모든 기술을 총칭한다. 기존의 일반적인 절삭가공과 달리 워터젯 가공기술은 열에 의한 영향이 전혀 없고, 가공할 수 있는 재료의 범위가 고무, 육류, 빵 등 아주 연한 재료에서부터 레이저 가공으로도 어려운 두꺼운 철판(60mm 두께)까지 압력 등 절삭 조건을 바꾸어주면 자를 수 있는, 폭넓은 응용성과 유연성을 가진 가공기술이다.

일반적인 절삭가공이 가진 단점으로는 절삭속도의 제약, 날의 마모, 큰 절삭저항반력, Jig 와

Fixture 문제 등이 있다. 그런데, 가공물의 재질과 가공품의 형상이 다양해지면서 각각의 상황에 가장 적합한 새로운 가공 기술의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 신가공 기술 중에서 워터젯 가공은 복잡한 기하학적 형상을 가공할 수 있고 물리적 역학적 영향이 거의 없는 등의 장점을 보여준다.

워터젯 가공 시스템의 기본 구성 요소로는 물 공급부, 압력 발생부와 절삭 및 이송부가 있다. 절삭 및 이송부는 끝부분에 부착되어 실제 고압수를 발생시키고 사용목적에 따라 교체가 되는 내경 0.08-0.8mm 정도의 고압 노즐과 포커싱 튜브 등으로 이루어 진다. 워터젯 기술은 최근에야 국내에 보급되기 시작하였는데, 약 40 여대의 시스템 설치

\* 전북대학교 정밀기계공학과 대학원  
\*\* 전북대학교 기계공학부, 메카트로닉스 연구센터  
\*\*\* 전주공업대학 정밀기계과

실적이 보고되어 있고 극소수의 외국산 수입 실적  
이 있는 정도이다. 선진국에 비하여 상대적으로  
낙후되어 있는 우리나라의 워터젯 기술을 보급하  
고 연구할 필요성이 크다고 하겠다.<sup>[1]</sup>

본 연구에서는 이송부(X-Y table)를 자체 설계,  
제작하고 이에 PC-NC 제어를 장착하여 유연성  
과 확장성이 큰 시스템을 개발하였다. 여기에 워  
터젯 분사 시스템을 장착하여 순수 워터젯과 연마  
제 워터젯이 다 가능한 워터젯 가공 시스템을 개  
발하였다. 최근에 워터젯 기술은 재료의 가공 기  
술에서 가장 효과적인 대안의 하나로 떠오르고 있  
고, CAM을 이용한 워터젯 가공 기술은 높은 정밀  
도를 가지고 있으며, 로봇과 결합하여 다축의 가  
공이 가능하다. 또한, 정확성 높은 시뮬레이션 툴  
은 워터젯 가공의 최적화를 위한 수단이 되었다.  
앞으로 계속해서 가공 시간의 단축, 윤곽 절삭의  
정확성과 정밀도, 가공 표면의 정도의 향상을 위  
한 연구가 필요하다.

본 워터젯 절삭가공 시험의 재료로 사용되는  
티타늄은 가벼우면서도 강하고 내식성이 좋은 특  
성을 가진다. 아울러 티타늄 합금은 특수강과 강  
도가 동등하고 내식성은 스테인레스강보다도 뛰어나  
다. 또한 변질과 부식이 없으며 거의 100% 재생  
이 가능하여 리사이클링 비용을 최소화하며 지구  
환경을 오염시키지 않는 환경친화적 금속이다.<sup>[2]</sup>  
티타늄의 절삭가공에는 band saw, 톱치, 워터젯, 레이  
저 등이 사용될 수 있다. band saw는 직선 절단  
에 쓰이며 나머지는 형상절단에 쓰인다. 비교적  
워터젯과 레이저가 정확하면서도 신속한 형상절단  
이 가능하므로 가격이 비싼 티타늄 절단에 적합하  
다. 그런데, 국내에서는 현재 워터젯을 이용한 절  
단연구에 대한 사례가 거의 없어서 이에 대한 연  
구가 시급한 실정이다.

본 논문에서는 자체 설계, 제작한 이송부(X-Y  
table)에 공작물(티타늄시편)을 고정시킨 후 노즐의  
이동 경로와 이송 속도를 지정한 후 절단가공을  
수행하였다. 절단한 티타늄의 표면 정도와 깊이  
등을 측정하여 티타늄 절단시 절삭특성을 확인하  
고, 최적의 절삭조건을 찾아낼 수 있었다.

## 2. PC-NC 제어 워터젯 가공기의 개발

### 2.1 워터젯 발생기의 구조

워터젯 발생기는 크게 물 공급부, 압력 발생부

와 절삭 및 이송부로 구분된다. 워터젯 가공기는  
순수 워터젯과 연마제 워터젯에 다 사용하도록 되  
어 있다. 워터젯 발생기는 본 연구에서 개발된 부  
분은 아니나 기술자료로서의 완결성을 위하여 수  
록한다.

#### 2.1.1 물 공급부

연마제 워터젯 장치에 공급되는 물은 초고압  
으로 압축되기 때문에 수질이 중요하고, 원활한  
작동을 위해 여과된다. 보통 공급되는 물은 1 미크  
론 이하로 여과하고, 여과장치는 3 단계로 설치되  
는 것이 보통이다. 또 공급되는 물이 적정압(2bar  
이상)을 유지하도록 펌프를 사용한다. 작동유체로  
의 사용 이외에도 물은 유압장치의 냉각수로도 공  
급되기 때문에 순환되도록 설계된다.

#### 2.1.2 압력 발생부

압력 발생부는 설정된 압력을 발생시키고 유  
지하여야 한다. 높은 압력이 필요할 때는 증압기  
를 이용한 간접적인 가압방법으로 280MPa 이상  
압력을 발생시킨다. 증압기를 이용한 연마제 워터  
젯 시스템의 압력 범위는 250-400 MPa 정도이다.

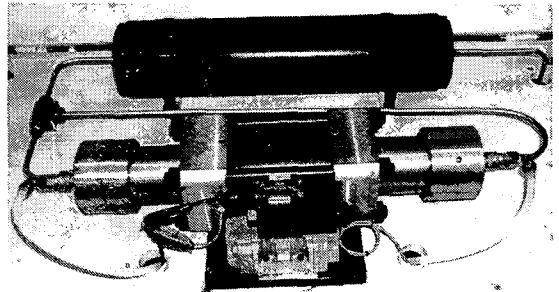


Fig. 1 Intensifier and accumulator of our water jet system

Fig. 1 은 증압기의 외관을 나타낸다. 증압기  
는 물 부분의 실린더와 유압 부분의 실린더와의  
횡단면의 비율에 비례하여 고압을 발생하게 되  
는데, 비율은 보통 1:10 ~ 1:25 사이이다.

#### 2.1.3 젯 형성기

고압 튜브의 끝에 장치된 오리피스는 보통 사파  
이어, 루비, 다이아몬드 등의 재료로 만들어지고  
구멍의 내경은 0.08-0.8 mm 정도이며 알루미늄 하

우정으로 싸여 있다. 이 오리피스를 통해 고압의 물이 분출되며, 연마제의 유입과 함께 포커싱 튜브를 지나면서 혼합 분사되어 재료를 절단한다.

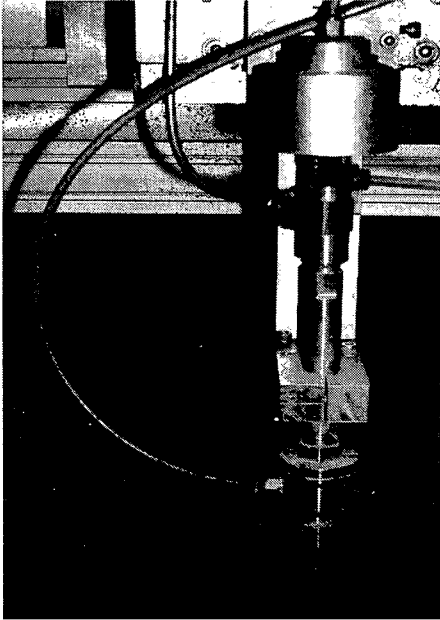


Fig. 2 Jet former

## 2.2 PC-NC 와 CAM

본 연구에서는 PC 내장형의 PC-NC 와 이에 연결된 CAM 시스템이 사용된다. 기존의 독립적인 CNC 컨트롤러를 도입하여 워터젯 시스템을 구성하면 제어와 프로그래밍을 위한 PC 가 별도로 필요하며 또한 CAM 시스템과의 확장성, 유연성 등에서 제약이 크다. PC-NC 는 일반 PC 의 확장 슬롯에 NC 기능을 갖는 보조 기판을 삽입해 개발된 형태로 NC 내장형 PC 라고 할 수 있다. Windows 95 나 NT 의 환경이어서 사용자가 쉽게 조작할 수 있으며 워터젯 시스템에 대한 적응성이 높고, 보수가 쉽다는 장점이 있다. 본 연구에서 사용된 PC-NC 는 간단한 명령어로 포맷되어 있고 PC 내에서 NC 와 PLC 프로그래밍을 함께 취급하여 간단한 조작으로 워터젯을 작동시킬 수 있고 시스템의 진단 및 상태를 점검하는 데에도 유용하게 쓰일 수 있다.

Fig. 3 은 본 워터젯 가공기에 사용하기 위하여 제작된 PC-NC 본체와 조작패널 및 제어기의 외관을 나타내고 있다. Fig. 4 는 본 시스템에서 사용하는 모니터 화면인데, G 코드로 원하는 경로를 생

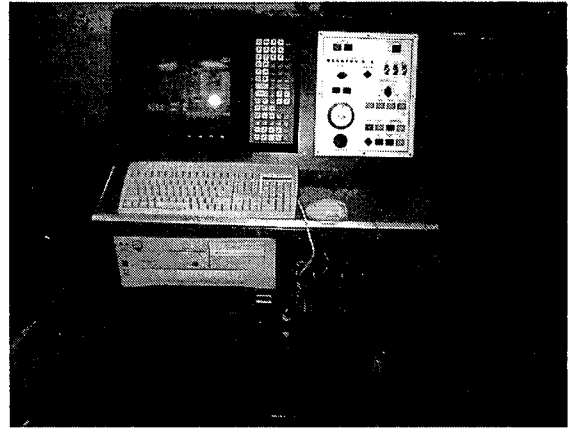


Fig. 3 PC-NC main frame and controller

성하고 가공을 위한 프로그램의 준비 상태를 보여 준다.

워터젯 가공에서 CAM 을 이용했을 때의 가장 중요한 기능은 공구 경로의 생성과 사용자의 편의, 그리고 가공 시뮬레이션 기능이다. 또한 NC-code 의 생성과 프로그래밍이 오프 라인으로 가능하여 가공 능력의 향상과 인력의 절약으로 연결된다.<sup>[3]</sup>

플로우, 벵갈, 큐맥스<sup>[4]</sup> 등의 회사에서 개발된 워터젯 전용 CAM 시스템은 절삭 모델을 정확하게 인식하며 사용자가 연마제 워터젯 시스템을 빨리 배우고 조작할 수 있도록 되어 있다. 또한 시뮬레이션 틀에 의한 가상 가공의 정밀도 향상으로 시제품의 생산부터 가공까지의 시간이 많이 단축되었다.

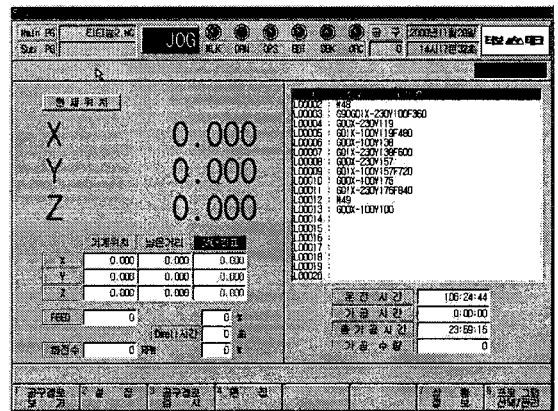


Fig. 4 Display for operation of PC-NC

## 2.3 워터젯 가공부

### 2.3.1 가공부 개발

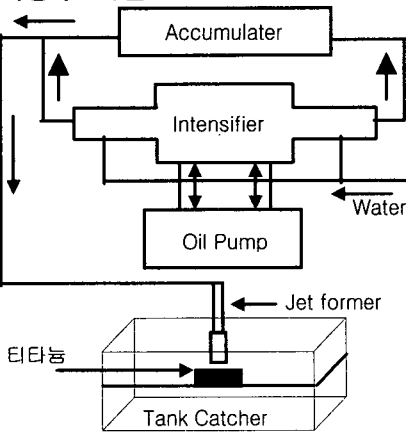


Fig. 5 Water jet cutting part

Fig. 5 는 티타늄 절단을 위한 워터젯 가공기의 구성을 보여 준다. 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 Water jet system specification

Water jet system	Max pressure 4000 kg / cm <sup>2</sup> Flow rate 2.1 l/min
PC-NC	Turbo FX-plus E CNC
CAM software	Turbo-mill program
X-Y Table stroke	X axis - 1000mm, Y axis - 700mm Z axis - 300mm

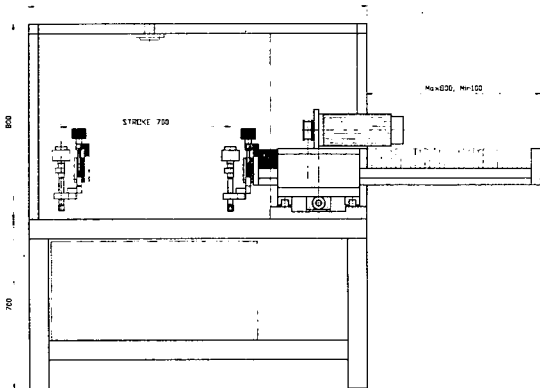


Fig. 6 3-axis PC-NC water jet cutting system

Fig. 6 은 본 연구에서 개발한 워터젯 절삭 시스템의 외관도이다. 본 시스템은 티타늄, composite

material, 석재 등의 경질재를 연마제 워터젯으로 절삭하고 또한 극연질 재료를 포함한 광범위한 재료의 순수 워터젯 절삭 연구 등 새로운 절삭 시스템 분야에 효과적으로 사용될 수 있는 시스템이다.

### 2.3.2 X-Y Table 설계 및 고려사항

Table 2 Specification of X-Y Table design

품명	규격
Servo motor	LG 0.9kw, 1000 r/min FMA-LF09-EA11
Thrust bearing	# 51103, #51109
Radial ball bearing	# 6303, #6007
Bellows	PPM film + PVC coating vinyl
Ball screw	1462L, 1240L
Guide rail	1645-203-31-1380 1645-803-31-1140

연마제 가루에 의한 Ball Screw 와 LM Guide 의 피해를 최소화하기 위해서 Y 축은 완전 밀폐형 알루미늄 자바라로, X 축은 알루미늄 자바라로 1 차 밀폐하고 다시 벨로우즈로 2 차 밀폐하였다.(Fig. 7)

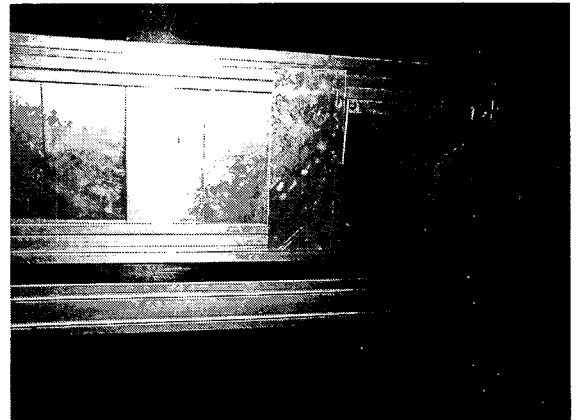


Fig. 7 Shielding of ball screw and LM guide

물에 의한 부식을 막기 위해서 테이블의 이송 부재로는 SUS 와 알루미늄을 사용하였으며 소음과 외부로의 물과 연마제의 비산을 막기 위해서 테이블을 완전 밀폐형으로 설계하였다. 사용한 물을 받기 위한 캐치부로는 수조를 사용하였는데 충분히 깊게 하여 파손과 에너지 흡수를 고려하였고,

수조안의 물의 교체를 위해 물 공급 입구 및 배출구를 만들었다. 고압수 공급시 코일형의 고압 튜브를 사용하여 유동성을 주었으며 연마제 공급기를 젯 형성기의 위에 설치하였다. Z 축의 이동은 수동으로서 2 단으로 분리 조절하도록 하였다.

제어기는 Fig. 3 과 같이 PC 를 내장하고, 워터젯 시스템 작동에 따른 출력신호를 직접 제어하기 위한 조작스위치를 전면에 설치하였다. 워터젯 펌프 작동을 NC 조작 패널에서 제어하기 위해 전기적 출력 신호를 PCNC 에 연결하는 릴레이 배선을 절삭 시스템과 워터젯 펌프 및 증압 시스템의 제어에 맞게 설정하고 이 파라미터를 따라 M code 를 수정하였다.

### 3. 티타늄 절삭실험

티타늄의 연마제 워터젯에 의한 절삭성과 최적 절삭조건을 찾기 위하여 절삭실험을 실시하였다. 절삭 시편을 두께 12 mm, 가로\*세로 100 mm 와 두께 35 mm, 가로\*세로 50 mm 로 준비하였다. 우선 전자의 시편을 워터젯 토출압력 2000, 2500, 3000 kg/cm<sup>2</sup> 로 절삭한다. 이때 노즐 이송속도를 100 에서 500 mm/min 까지 100 씩 증가 시키면서 절삭 실험을 실시하였다. 후자 절삭 시에도 토출 압력은 위와 같이 하고, 노즐 이송속도를 20 에서 50 mm/min 까지 10 씩 증가 시키면서 실험하였다. 연마제로는 Garnet # 80 을 사용하였다. 오리피스의 직경은 0.25 mm, 포커싱 튜브의 직경과 길이는 각각 0.75 mm 와 70 mm 를 사용하였으며, 절단각은 90° 를 유지하였다. 노즐 이격 거리는 4 mm 로 고정시켰다.

정해진 압력에서 노즐 이송 속도에 따른 절삭을 수행한 후 절삭 깊이를 측정하였다. 오차가 큰 시편 양 끝의 10 mm 는 각각 제외하고 각 시편에서 여러 곳의 깊이를 측정하였다. 노즐 이격 거리에 대한 영향을 측정하기 위한 실험은 펌프 압력을 2500 kg/cm<sup>2</sup> 로 하고, 노즐 이송속도를 200 mm/min 로 하여 실험하였다. 그리고 이 조건 하에서 노즐 이송횟수에 따른 영향을 실험하였다

### 3.1 절삭깊이 측정에 대한 결과 분석

#### 3.1.1 절삭 압력의 영향

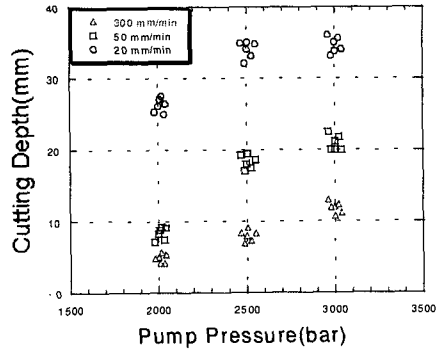


Fig. 8 Cutting depth vs. water pressure

Fig. 8 은 수압에 따른 티타늄 절삭 깊이의 추이를 보여준다. 노즐 이송속도가 같을 때 절삭압력이 증가함에 따라 절삭깊이도 깊어짐을 볼 수 있다. 이는 수류의 압력이 높을수록 균열벽면에 작용하는 압력이 증가하므로 균열 전파가 빠르고 멀리 이루어짐을 뜻한다. 티타늄을 절삭할 때 압력에 따른 절삭효율은 2500 kg/cm<sup>2</sup> 가 3 회의 서로 다른 이송속도에서 모두 좋은 결과를 보였다.

#### 3.1.2 노즐 이송속도의 영향

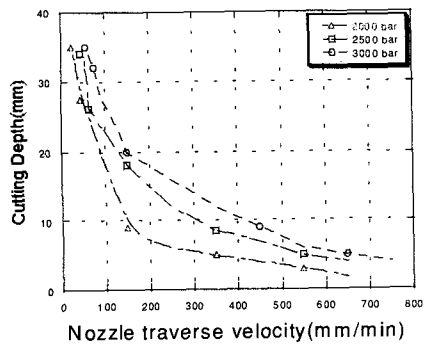


Fig. 9 Cutting depth vs. nozzle velocity

Fig. 9 는 위의 실험과는 반대로 노즐압력을 2000, 2500, 3000 kg/cm<sup>2</sup> 의 세 단계로 고정시킨 상태에서 노즐 이송속도를 단계별로 변화시켜가며 노즐 이송속도가 절삭깊이에 미치는 영향을 분석한 것이다. 노즐 이송속도는 절삭깊이와는 반비례 관계가 성립함을 알 수 있는데 이는 노즐 이송속도가 느릴수록 시편에 작용하는 연마제 입자의 양이 증가하기 때문이다.

### 3.1.3 노즐 이송횟수의 영향

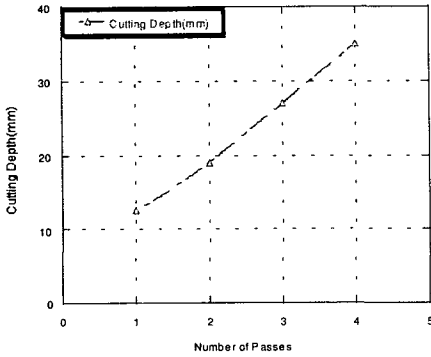


Fig. 10 Cutting depth vs. number of passes

압력을  $2500\text{ kg/cm}^2$  이송속도를  $200\text{ mm/min}$  이격거리를  $4\text{ mm}$  로 고정하고 이에 따른 노즐 이송을 단계적으로 반복시켜 절삭깊이의 변화를 실험하였다. Fig. 10 에서와 같이 이송을 4 회 반복하였으며, 절삭깊이는 한 번의 이송이 끝난 후에  $4\text{ mm}$  간격으로 측정하여 평균값을 나타냈다.

이송 반복횟수를 증가시켜도 절삭폭은  $1\text{ mm}$  로 거의 일정했으며, 절삭깊이는 노즐 이송 반복 횟수에 정비례하는 선형적인 변화를 보였다. 그러나 동일 깊이를 얻기 위해 노즐의 이송 반복 횟수를 증가시키는 것은 고압의 워터젯을 저속 이송하는 것보다 연마제의 사용이 늘어 비경제적이다.

### 3.1.4 노즐 이격 거리에 대한 영향

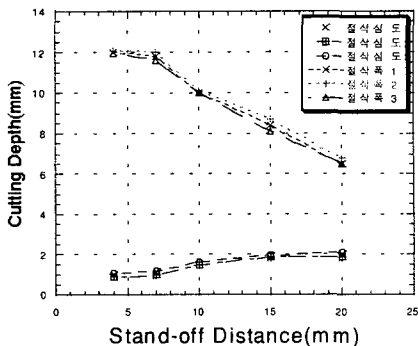


Fig. 11 Cutting depth vs. stand-off distance

이송속도를  $200\text{ mm/min}$  로 하고 압력을  $2500$

$\text{kg/cm}^2$  로 고정하여서 이에 따른 노즐 이격 거리를  $4\text{ mm}$  에서 시작하여  $20\text{ mm}$  까지 증가시키는 방법으로 실험하였다. 절삭깊이는 각 행정이 끝난 후에  $4\text{ mm}$  간격으로 측정하여 평균값을 나타냈다.

Fig. 11 에서와 같이 노즐 이격 거리는 절삭깊이와는 반비례하고 절삭폭은 증가시켰다. 절삭폭의 증가를 볼 때  $7\text{ mm}$  이하에서는 변화가 크지 않았으나 이후에는 급격히 증가하였다.

### 3.2 절단면 형상 비교

여기에서는 두께  $35\text{ mm}$  의 티타늄을 절삭할 때 워터젯 성능변수의 변화에 따른 절단면의 형상을 비교해 보았다. 변수는 각각  $2000\text{ kg/cm}^2$  에  $15\text{ mm/min}$ ,  $2500\text{ kg/cm}^2$  에  $30\text{ mm/min}$ ,  $3000\text{ kg/cm}^2$  에  $40\text{ mm/min}$  로 하였다. Fig. 12 는 절삭한 티타늄 단면의 형상을 보여주고 있다.

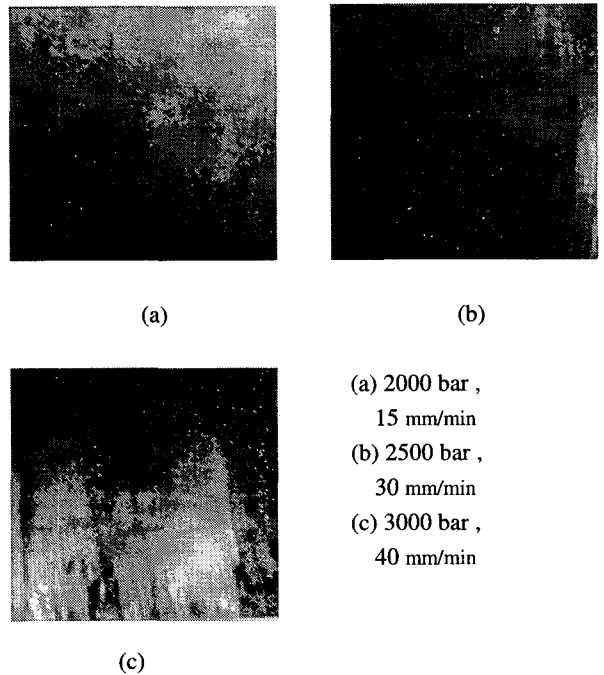


Fig. 12 Shape after water jet machining

Hashish 의 Step removal mechanism<sup>[5]</sup>에 의하면 절단면의 형상은 절삭마모 영역과 변형마모 영역으로 구분되어진다. 절삭마모 영역에서는 연마제 입자가 절삭 공구처럼 가공물을 절삭하고, 변형마모 영역에서는 절삭입자와 절삭면이 거의 직각으

로 충돌하는 충격 현상에 의해 소성변형이 일어난다. 티타늄에서 절삭마모 영역과 변형마모 영역의 구분은 이송속도가 빨라질수록 재료의 윗부분에 가까워짐을 보였다. 그리고 절삭마모 영역은 부드러우며, 방향성이 없는 표면을 보이고 변형마모 영역은 속도가 빨라질수록 방향성이 명확해지며, 큰 각을 나타내었다. 결국 처음 영역은 정상 상태의 절삭이 이루어지며, 둘째 영역은 비정상 상태가 된다.

### 3.3 고찰

PC-NC 를 적용시킨 워터젯의 절삭 실험에서 여러 가지 워터젯 성능변수에 의한 절삭 깊이의 측정을 해보았다. 절삭 깊이는 수류 압력과는 정비례 하는데 2500 kg/cm<sup>2</sup>에서 적정값을 나타내고, 이송속도와는 반비례의 관계를 나타내었다. 이송횟수의 경우 약 4 회 반복 행정 이후의 깊이 증가율이 급격히 감소함을 알았다. 이격거리의 경우 실험결과로부터, 노즐 직경의 약 100 배 정도까지는 절삭 심도에 큰 영향을 미치지 않는다는 Leach<sup>[6]</sup>와 Walk의 연구결과를 확인할 수 있었다.

Hashish<sup>[7]</sup>는 최대 이송율에서의 절삭 깊이는 대부분 변형 마모에 의해서 이루어진다고 보고 일반적인 재료의 전체 절삭깊이에 대한 식을 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{h}{d} = 0.282c \frac{N_4}{N_2 N_3} + \frac{(1 - N_1)^2}{\frac{N_2 N_3}{1 - c} + C_f (1 - N_1)} \quad (1)$$

$$N_1 = \frac{V_c}{V}, \quad N_2 = \frac{\epsilon \pi d^2}{2mV}, \quad N_3 = \frac{u}{V}, \quad N_4 = \frac{\epsilon}{\sigma}$$

- c 실험 인자, C<sub>f</sub> 입자속도의 지연상수
- m 연마제 유동율, ε 재료의 특정 에너지
- V 입자의 속도, d 노즐 직경
- u 이송 속도, C<sub>f</sub> 유동 응력
- h 절삭깊이 V<sub>c</sub> 임계 입자 속도

Hashish의 절삭 깊이 예상식에 위의 계수들이 주어지면 절삭 깊이에 대한 예상치를 얻을 수 있는데 실제로 티타늄을 절삭한 값과 비교하면 다음과 같은 Fig.13의 선도를 구할 수 있다.

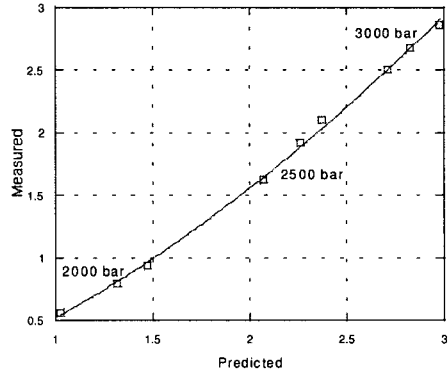


Fig. 13 Measured depth (cm) vs. predicted depth (cm) of cut for titanium

Table 3 Predicted and measured value with water pressure and nozzle velocity parameter

Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Velocity (mm/min)	Predicted (mm)	Measured (mm)
2000	50	1.023	0.56
	30	1.319	0.8
	20	1.473	0.94
2500	50	2.07	1.62
	30	2.26	1.92
	20	2.375	2.1
3000	50	2.712	2.5
	30	2.83	2.68
	20	2.98	2.86

각각의 압력과 노즐 이송속도에 따른 워터젯 가공기의 티타늄 절삭깊이 예상값과 측정값을 table 3에 정리하였으며 Fig. 13은 워터젯 가공기의 티타늄 절삭 깊이에 대한 선도로서 (1)식에 의한 예상값과 실제 절단시 실험값이 비교적 일정한 관계를 보여주고 있음을 알 수 있는데 이 선도를 curve fit 하여 실험치 y와 예상치 x에 대하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$y = 0.53 \times x^{1.65} \quad (2)$$

식(2)는 Garnet #80을 사용하였을 경우로서 티타늄의 절삭 깊이가 예상에 유용하게 쓰일 수 있다

#### 4. 결론

가장 최신의 절삭 기술중의 하나인 워터젯 시스템을 이용하여 다양한 재질과 다양한 형상을 가공할 수 있도록 PC-NC 제어를 이용한 워터젯 가공 시스템을 개발하였다. 국내에 워터젯 가공 기술에 관한 자료가 절대적으로 부족한 점을 감안하여 워터젯 가공기에 관한 일반적인 자료도 보완하였다. 개발된 시스템을 이용하여 난삭재인 티타늄을 절단하여 보았다. 티타늄 절단시의 압력과 노즐 이송속도, 이송횟수, 이격거리에 대한 영향을 살펴보았다. 절단면의 형상에 대한 해석으로써 워터젯 가공에서의 최적 파라미터 값을 검증해 보았다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PC-NC 를 사용한 워터젯 절단 가공 시스템을 개발하여 X, Y 축, 이송속도와 노즐의 on, off 등을 컴퓨터로 실시간 제어하고 실험을 수행하여 티타늄 가공에 대한 최적값을 얻었다.

2. 티타늄 절삭 시험에서, 절삭 깊이는 수류 압력과 정비례 하였으며 노즐의 이송 속도와 이격 거리와는 반비례 하였다. 4 회 이상의 이송은 깊이에 크게 영향을 주지 못했다.

3. 절삭한 티타늄의 단면은 Fig. 12 에서 확인되는 바와 같이 두 부분으로 나뉘어진다. 먼저 연마제 입자가 충격으로 재료를 절삭하는 절삭마모 영역과 약간의 각을 가진 충격으로 소성변형에 의한 절삭이 이루어지는 변형마모 영역으로 나뉜다.

4. 워터젯 절삭은 가공 기술에 문제점이 있는 신소재들, 요즘 많이 쓰이고 있는 금속인 티타늄 합금과 같은 난삭재의 절삭에 적합하다.

5. 앞으로 워터젯 가공 기술이 좀더 효율적이고 경제적으로 사용되기 위해서는 PC-NC, CAM 등의 사용과 시뮬레이션 툴 등의 개발을 통하여 실제 가공 전에 가공 조건의 최적화가 이루어지도록 많은 연구가 필요하다.

Line," Precise Processing by Advanced Water Jet Technology, Japanese-German Joint Seminar, Shimizu and Sendaj, Japan, 1995.

4. Qmax , Flow Jet Machining Series Catalogue.
5. Labus, T. J. and Hashish, M., "Fluid Jet Technology Fundamentals and Applications," section 4.0, Water Jet Technology Association, 1991.
6. Leach, S. J. and Jartman, J. L., "Hypothesis for the Mechanism of Rock Failure under Impact," 4 th Symposium, on Rock Mechanics, Pennsylvania State University, PA, pp. 221-228. 1961.
7. Hashish, M., "Prediction of Depth of Cut with Abrasive-Waterjet," Submitted for ASME Trans., J. Eng. Materials and Technology.
8. Turbo Tek FX-MCT Series Catalogue.

#### 참고문헌

1. 김형목, "워터젯을 이용한 암석의 절삭에 관한 연구," 서울대학교 석사학위논문, 1999.
2. 김주우, "순 Ti 및 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 성질에 미치는 용접 조건의 영향," 전북대학교 석사학위논문, 1998.
3. Kille, K., "CAD/CAM Integration into Production