

# 입자 워터 제트의 이송속도가 공작물의 치수정밀도에 미치는 영향

곽재섭\*, 하만경<sup>+</sup>

(논문접수일 2003. 10. 20, 심사완료일 2004. 2. 11)

## Effects of Traverse Speed on Dimensional Error in Abrasive Water-Jet

Jae-Seob Kwak\*, Man-Kyung Ha<sup>+</sup>

### Abstract

Abrasive water-jet(AWJ) machining can cut various materials such as metal, glass and plastics. However, the AWJ machining has some troubles including kerf, rounding and side taper. In this study, we experimentally investigated the correlation between the traverse speed of the abrasive water-jet and the dimensional error of the workpiece according to the thickness and the types of the material. The specimen was the stainless steel and the mild steel and the predetermined contour cutting was conducted. A corner radius error, an uncut width and a kerf were measured and evaluated.

**Key Words :** Abrasive Water-Jet(입자 워터 제트), Kerf(물결무늬), Uncut Width(미절단 폭), Corner Radius Error(코너반경 오차), Traverse Speed(이송속도), Contour cutting(윤곽절단)

## 1. 서론

고압으로 압축된 물에 가넷(Garnet)이나 실리카 샌드(Silica sand)와 같은 연마 입자들을 혼합하여 공작물에 고속으로 분사하는 빔 가공의 일종인 Abrasive Water-Jet(AWJ)이 도입되면서 기존의 절단가공의 취약점을 보완해 왔다. 특히 인코넬, 티타늄과 같이 열에 민감한 금속을 레이저나 플라즈마로 절단할 경우, 재료에 작용된 열에 의해 변형, 변성, 가스화되는 등의 문제가 발생하기 때문에 전통적인 절삭으로 절단하던 것을 AWJ이 대체할 수 있게 되었

다. AWJ은 레이저나 플라즈마 가공으로 절단하기 까다로운 금속, 유리, 석재 등의 재료절단에서 열에 의한 변형, 변성을 일으키지 않으므로 비교적 두꺼운 재료의 절단 가공을 할 수 있다.

최근의 AWJ 가공은 로봇 및 제어 기술의 발달과 더불어 PC-NC 제어 기술과 결합하여 더욱 정밀한 작업을 수행할 수 있게 되었다. 또한 AWJ의 응용 분야도 소재의 절단뿐만 아니라 표면 세척, 디버링 등으로 점차 확대되는 추세이며 기계 산업뿐만 아니라 광산, 토목 등 다양한 산업에 접목하려는 시도가 행하여지고 있다<sup>(1,2)</sup>.

\* 부경대학교 기계공학부 (jskwak5@pknu.ac.kr)

주소: 608-739 부산시 남구 용당동 산 100

+ 부경대학교 기계공학부

그러나, 통상적으로 빔 가공을 할 경우 공작물의 표면에는 테이퍼, 라운딩, 절단 흔적 등이 발생하여 가공정도가 좋지 못한 편이다. AWJ의 경우에도 적용한 공정변수들의 영향에 따라서 공작물의 표면품질이 많은 차이를 나타낸다<sup>(3)</sup>. 이러한 AWJ 가공된 공작물 표면특성을 파악하기 위한 연구들이 지속적으로 이루어져 왔다. 특히, Momber<sup>(4)</sup>와 Hashish<sup>(5)</sup>는 AWJ 가공을 할 때 가공 조건에 따른 공작물의 특성과 AWJ 가공을 위한 수학적 모델을 제시하였으며 Geskin<sup>(6)</sup>은 연질재료의 AWJ 가공시 공작물 표면에 생성되는 물결 무늬(Kerf)를 예측하기 위한 연구를 실시하였다.

본 연구에서는 AWJ의 이송속도와 속도비에 따른 절단깊이를 수학적으로 모델링하여 적정 이송속도를 구하였고, 스테인레스강(STS304)과 연강(SS41)의 윤곽절단에 있어서 절단조건에 따른 공작물의 표면특성과 공작물의 치수오차의 관계를 실험적으로 규명하였다.

## 2. AWJ의 개요 및 절단깊이

### 2.1 AWJ 장치의 구조

일반적으로 AWJ 가공기는 NC 제어부, 수압 증강장치,

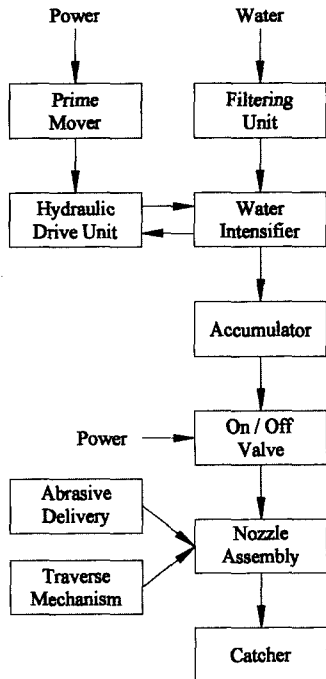


Fig. 1 Schematic drawing of abrasive water-jet system

입자 공급장치, 노즐, 사용된 물과 연마입자를 받아내기 위한 수조로 구성된다. Fig. 1은 AWJ 장치의 구성을 나타내는 개략도이다. 보통 60~70Hp의 전기 모터가 수압 구동장치와 연결되고, 수압 구동장치는 수압 증강장치와 연결이 된다. 공급되는 물에 불순물이 섞여 펌프 및 오리피스를 손상 또는 마모시키는 것을 방지하기 위하여 필터를 거친 다음 압력 증강장치로 공급된다. 수압 증강장치는 단일 또는 여러 개를 병렬 연결하여 사용할 수 있으며, 두 피스톤의 직경의 차이에 의하여 고압을 발생시킨다. 축압기는 분사되는 Jet의 압력 변동을 최소화하기 위하여 수압 증강장치와 연결된다. 노즐의 내부는 물과 연마입자를 섞는 믹싱 튜브와 오리피스로 구성되어 있으며, 이송장치 및 연마제 공급장치와 결합되어 있다. 이송장치는 광학 추적장치와 NC 콘트롤러에 의해 위치가 제어되어 공작물을 절단한다. 절단된 칩과 연마제는 수조에서 분리 및 폐기처리 된다.

### 2.2 AWJ의 이송속도에 따른 절단깊이

Fig. 2는 AWJ의 절단 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 노즐에서 분사된 Jet이 소재와 90° 각도를 이루면서 절단을 하다가 소재의 하단부로 가면서 침투 속도 비율이 상단부와 달라지면서 소재 내부에서는 Jet이 굴곡된다. 절단이 진행되는 동안 Jet은 노즐의 이송 방향과 반대로 굴곡된다. 이러한 굴곡현상은 이송속도가 빠를수록 커지게 되고 결국은 제품의 치수 오차를 유발하는 중요한 요인이 되기도 한다. 그러나, 공작물의 끝단에서는 Jet의 굴곡방향이 노즐의 이송 방향과 같은 방향으로 바뀌게 된다. 따라서, 공작물의 끝단 부근에서는 제품이 소재로부터 완전히 절단되지 않는 미절

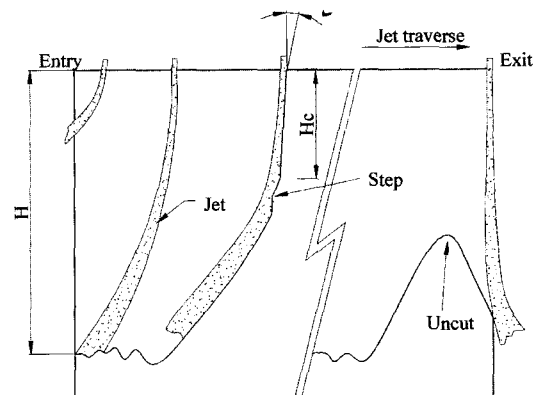


Fig. 2 Cutting mechanism in AWJ

단 부분(Uncut)이 생기게 된다. 또한 변형 마모영역에서는 Jet의 굴곡으로 인하여 스텝이 생기게 되고, 생성된 스텝은 절단이 진행되는 동안 소재의 하단부로 이동하며 이동 흔적인 물결무늬를 형성하게 된다.

물결무늬의 각도와 거친 정도는 노즐의 이송속도에 따라서 달라진다. 노즐의 이송속도가 빠를 수록 공작물 상단부와 가까운 곳에서 스텝이 형성되어 하단부로 이동한다. 따라서, 물결무늬는 뚜렷하게 방향성을 가지게 된다. 이는 노즐의 이송속도가 빠르면 공작물 하단부에서 Jet의 충격 각도가 더 완만해지기 때문이다. 노즐의 이송속도가 느릴수록 물결무늬의 결은 수직에 가까워지며, 절단 마모영역의 깊이  $H_c$ 가 깊어지기 때문에 절단면의 품질도 개선된다.

Momber<sup>(4)</sup>는 그의 연구에서 절단 단면을 절단 마모영역과 변형 마모영역으로 구분하였다. 변형 마모영역에서는 표면에 거칠기와 구분되는 절단흔적인 물결무늬가 생성된다. 절단 마모영역에서의 재료 제거량은 다음과 같다.

$$\delta_v = \frac{14\partial m}{\pi\rho} \left(\frac{V_a}{V_i}\right)^{2.5} \alpha^{1.5} \quad (1)$$

여기서  $\partial m$ 는 연마 입자의 미소 질량유량이다.  $\rho$ 는 연마 입자의 밀도이고,  $V_a$ 는 노즐을 통과한 Jet의 속도이며,  $V_i$ 는 입자와 소재의 특성을 포함하는 공작물 내부에서의 Jet의 속도이다. 속도비  $\left(\frac{V_a}{V_i}\right)$ 의 지수는 실험적으로 구해지는 값으로 일반적으로 2.5정도이다. 또한  $\alpha$ 는 공작물 내부에서 Jet이 공작물과 이루는 각도이며, 절단에 관여한 연마 입자의 비율  $c$ 를 고려하면 다음과 같다.

$$\alpha^{1.5} = \frac{c}{2.5} \quad (2)$$

한편, 공작물 내부의 Jet 속도  $V_i$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = \left(\frac{3\sigma R^3}{\rho}\right)^{1/2} \quad (3)$$

여기서  $\sigma$ 는 유동응력이고,  $R$ 는 아래의 식으로 정의되는 입자의 원형요소다.

$$R = \frac{d_c}{d_a} \quad (4)$$

여기서  $d_c$ 는 연마 입자의 코너부분의 지름이며,  $d_a$ 는

연마 입자의 지름이다. 재료 제거량으로부터 AWJ에 의한 절단깊이를 계산하기 위하여 체적 제거율과 체적 변형율이 같다고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta\nu = \partial h u d \quad (5)$$

여기서  $\partial h$ 는 미소한 침투 깊이,  $u$ 는 노즐의 이송속도, 그리고  $d$ 는 Jet의 지름이다. 식 (1)에 식 (5)를 대입하여 적분을 취하면 다음과 같다.

$$\int_0^{H_c} \frac{dh}{(V_a/V_i)^{2.5}} = \frac{cd}{2.5} \left(\frac{14m}{\pi u d^2 \rho}\right) \quad (6)$$

식 (6)을  $H_c$ 에 대하여 정리하면 식 (7)로 나타낼 수 있다. 식 (7)로부터 AWJ 가공에서 절단 마모영역에서의 절단 깊이  $H_c$ 를 구할 수 있다.

$$H_c = \frac{cd}{2.5} \left(\frac{14m}{\pi u d^2 \rho}\right) \left(\frac{V_a}{V_i}\right)^{2.5} \quad (7)$$

Fig. 3은 노즐의 이송속도와 속도비에 따른 침투깊이를 이론적으로 구한 것이다. 여기서 속도비는 대략 2.5정도로 알려져 있으므로 재료의 두께에 따른 적정 이송속도를 구할 수 있게 된다. 이러한 결과로부터 본 연구에는 공작물의 두께가 10mm일 때는 60~80mm/min, 두께가 20mm일 때는 노즐의 이송속도를 20~40mm/min의 범위로 결정하여 적용하였다.

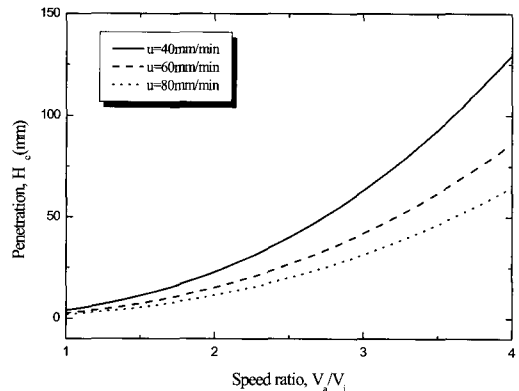


Fig. 3 Theoretical relationship between speed ratio and penetration in AWJ

### 3. 실험 및 고찰

#### 3.1 시편의 형상 및 가공조건

본 연구에서 적용한 윤곽절단할 시편의 형상 및 주요치수는 Fig. 4에 나타내었고, 실험에 사용된 AWJ 가공기의 주요장치는 Photo. 1에 나타내었다. 절단할 윤곽형상은 반경이 다른 두 부분의 곡선 구간과 각도가 다른 두 부분의 코너 구간, 그리고 직선 부분을 조합하였다.

시편의 재질은 기계산업 전반에 널리 사용되고 있는 SS41과 STS304를 사용하였으며, 두께에 따른 특성을 관찰하기 위하여 시편의 두께를 10mm와 20mm의 두 종류로

실험을 하였다. 가공조건은 압력을 3200bar로 고정하고 노즐의 이송속도를 변화시켜 실험을 하였다. 노즐의 이송속도는 두께 10mm의 시편은 60~80mm/min까지 변화를 주었고 20mm의 시편은 20~40mm/min로 각각 5mm/min씩 변화를 주면서 실험하였다. 노즐과 소재 사이의 거리는 5mm로 설정하였으며, 연마입자는 Garnet으로 입도는 #80을 사용하였다.

AWJ의 윤곽절단 특성평가는 Fig. 4에서 10mm로 설정한 A부분의 거리, 절단의 시작점이자 절단이 끝나는 B부분에서의 미절단량, 30mm로 설정한 C부분의 거리, 작은 곡선 부분인 D의 형상, 그리고 큰 곡선 부분인 E의 표면을 관찰하였다. 각 부분의 측정 결과는 동일한 조건으로 5회 측정하여 평균값을 취하여 나타내었다.

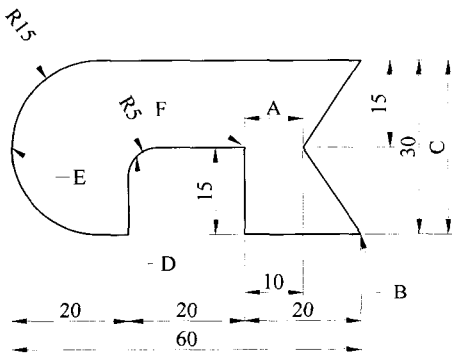


Fig. 4 Dimension and geometry of workpiece

#### 3.2 결과 및 고찰

시편 각 부분의 형상이나 치수는 노즐의 이송속도에 많은 영향을 받는다. 노즐의 이송속도가 느려질수록 표면에 나타나는 물결무늬의 방향성과 치수 오차가 줄어드는 것을 예비 실험을 통해서 관찰 할 수 있었다. 한편 공작물의 각 부분에서의 치수오차는 공작물의 하단부에서 문제가 되므로 본 연구에서 나타난 치수오차의 평가는 공작물의 하단부에서 측정된 결과이다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 A로 나타난 거리의 치수오차를 노즐의 이송속도 변화에 따라서 나타난 것이다. 그 결과를 살펴보면 노즐의 이송속도가 빨라질수록 치수오차도 증가하였고, 소재의 두께가 두꺼워질수록 치수오차가 크게 나타났다. 이는 절단 과정 중에 노즐의 이송속도가 빨라지면, 공작물의 하단부로 내려갈수록 Jet의 편향이 커지고 공작물 하단부의 절단 위치는 노즐의 후방에 위치하게 된다. 따라서, 공작물의 상단부와 하단부에서 절단되는 위치가 서로 다르며, 이 위치 차이는 노즐의 이송속도가 증가할수록 더 커진다. 그러므로, 시편의 절단 방향이 바뀌게 되는 각종 코너 구간에서는 공작물의 하단부에 노즐 이송 방향의 반대 방향으로 오차가 생기게 된다.

Fig. 6은 Fig. 4에서 B로 나타난 부분으로 절단이 시작되고 끝나는 지점에서 노즐의 이송속도에 따른 미절단 부분의 폭을 측정하여 나타낸 그래프이다. 이와 같이 미절단 부분이 생기는 요인으로는 공작물의 상단부에서는 노즐이 이미 공작물의 절단을 완료하였으나, 하단부에서는 Jet의 편향으로 아직 절단이 완료되지 않은 상태에서 Jet이 공작물의 상단부에서 하단부로 연속적으로 유지 될 수 없기 때문에 발생한다. 실험결과 소재의 두께가 10mm일 때는 그 값이 무

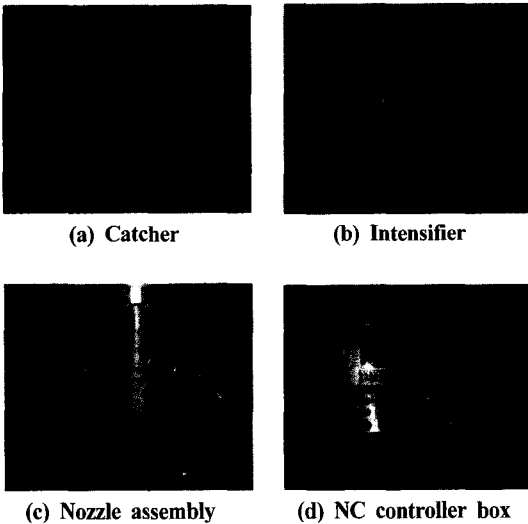
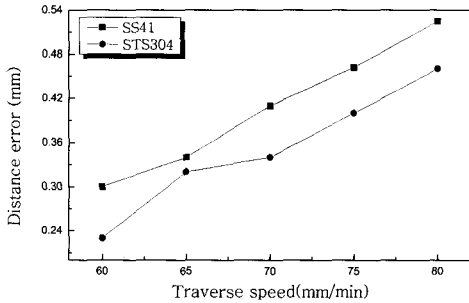


Photo. 1 AWJ units used in this study

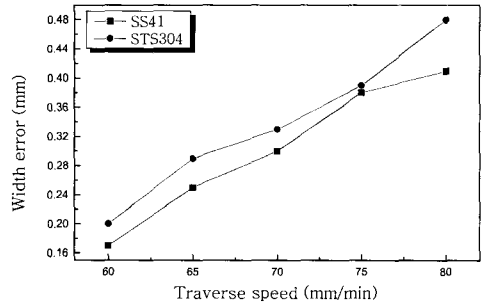
시할 수 있을 정도로 큰 문제가 되지 않았다. 그러나, 두께가 20mm인 시편에서는 Fig. 6과 같이 미절단 부분이 발생하였고 미절단 부분의 폭은 노즐의 이송속도에 비례하여 증가하였다. 이는 노즐의 이송속도가 빨라질수록 Jet의 편향

이 심해진다는 것을 반영하는 것이다.

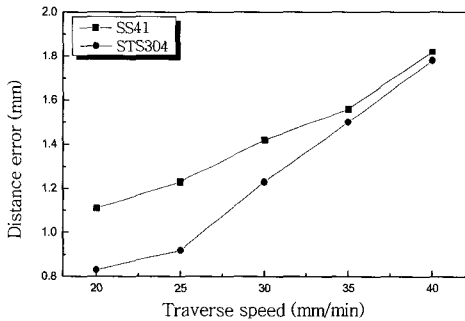
Fig. 7은 공작물 폭의 치수오차를 나타낸 것으로 노즐의 이송속도와 재료의 두께에 비례하여 치수오차가 증가하였다. 이는 공작물 내부의 재료특성과 연마 입자와 공작물의



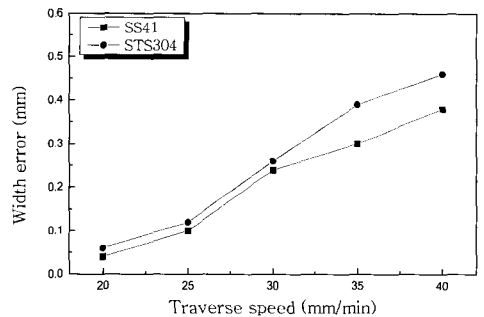
(a) Thickness : 10mm



(a) Thickness : 10mm



(b) Thickness : 20mm



(b) Thickness : 20mm

Fig. 5 Distance error according to traverse speed at A

Fig. 7 Width error according to traverse speed at C

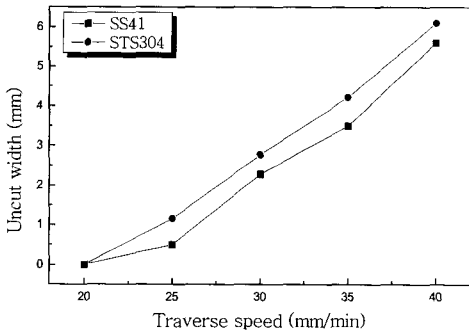


Fig. 6 Uncut width according to traverse speed at B (Thickness : 20mm)

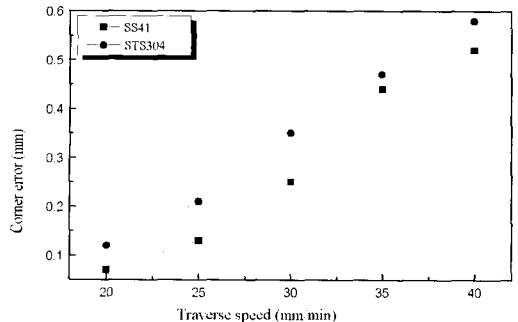


Fig. 8 Corner error according to traverse speed at D (Thickness : 20mm)

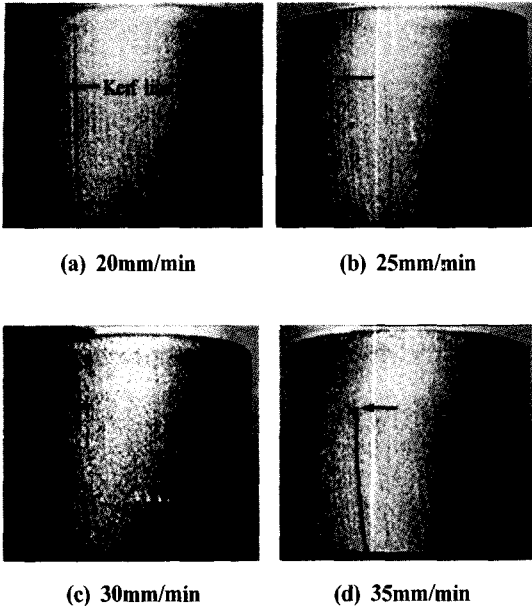


Photo. 2 Relation between kerf geometry and traverse speed

상호작용, 그리고 공작물 내부에서 Jet의 속도 변화로 인하여 공작물에 테이퍼가 생성되기 때문이다.

Fig. 8은 코너반경 5mm를 갖는 작은 곡선구간에서의 치수오차를 측정한 그래프이다. 노즐의 이송속도가 증가할수록 코너부의 치수오차가 커지고 있으나, Fig. 7에 나타낸 공작물 폭의 치수오차와 비교할 때 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이로부터 공작물의 형상이 급변하지 않고 적당한 코너반경을 갖게 되면 AWJ의 절단특성은 크게 변하지 않는다는 것을 보여주고 있다.

Photo. 2는 Fig. 4에서 코너반경 15mm를 갖는 큰 곡선구간에서 노즐의 이송속도 변화에 따라 공작물에 생성되는 물결무늬를 나타낸 것이다. 이러한 물결무늬는 직선구간에 비하여 곡선구간에서 더 크게 나타났다. 또한 공작물의 두께가 커질수록, 노즐의 이송속도가 빨라질수록 물결무늬의 각도가 커짐을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 곡선구간에서는 이송속도를 조절하는 것이 표면품위를 다소 향상시킬 수 있을 것이라 생각된다.

AWJ 절단에서 비교적 완만한 곡선구간의 절단과는 달리 형상이 급격히 변하는 구간에서는 Jet의 편향으로 인해 노즐의 이송속도에 따라서 미절단 또는 과절단이 발생하게 된다. 노즐의 이송속도가 빨라지면 이미 설명한 바와 같이 미



Photo. 3 Rear view of specimen and scrap at F

절단 부분이 남게되고, 반대로 이송이 느려지면 Photo. 3과 같은 과절단이 이루어 지게 된다. Photo. 3에 나타낸 것과 같이, 노즐의 이동방향이 왼쪽에서 오른쪽으로 경로를 따라 천천히 바뀌게 되면 Jet의 편향으로 시편과 스크랩에는 침식으로 인한 과절단 되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 극복하기 위해서는 향후 연구를 통해서 각 구간별로 노즐의 이송속도를 선정하여 제어하여 주는 것이 필요하리라 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 AWJ 절단에서 노즐의 이송속도와 공작물의 재질 및 두께에 따른 윤곽절단 특성을 실험적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) AWJ 절단의 수학적 모델링을 통하여, 공작물의 두께에 따른 노즐의 이송속도를 이론적으로 구할 수 있었다. 공작물의 두께가 10mm일 때는 60~80mm/min, 두께가 20mm일 때는 노즐의 이송속도를 20~40mm/min의 범위로 선정하였다.
- (2) 절단이 시작되고 끝나는 지점에서는 노즐의 이송속도에 따른 미절단 부분이 나타났고, 이와 같은 미절단 부분이 생기는 요인으로는 Jet이 공작물의 상단부에서 하단부로 연속적으로 유지 될 수 없기 때문에 발생하였다. 미절단 부분의 폭은 노즐의 이송속도에 비례하여 증가하였다.
- (3) 적당한 코너반경을 갖는 곡선구간에서의 치수오차는 노즐의 이송속도가 증가할수록 크게 나타났으나, 직선구간의 치수오차와 비교할 때 큰 차이가 없음을 알 수 있다.
- (4) 비교적 완만한 곡선구간의 절단과는 달리 형상이 급격히 변하는 구간에서는 Jet의 편향으로 인해 노즐의 이송

속도가 빨라지면 미절단 부분이 남고, 노즐의 이송속도가 느려지면 과절단이 발생하였다. 이러한 현상을 극복하기 위해서는 최적의 노즐 이송속도를 결정하는 것이 필요하리라 생각된다.

## 후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업의 지원하에 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Brattberg, T., and Chanson, H., 1998, "Air entrapment and air bubble dispersion at two dimensional plunging water jets," *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 24, pp. 4113~4127.
- (2) Bingmann, D., Wiemann, M., and Wittkowski, W., 2000, "Cutting of living hippocampal slices by a highly pressurised water jet," *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 102, No. 10, pp. 1~9.
- (3) Madhusarathi, M., and Thomas, J. K., 2002, "The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 12, pp. 615~623.
- (4) Momber, A. W., 1998, "The kinetic energy of wear particles generated by abrasive water jet erosion," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 8, pp. 121~126.
- (5) Hashish, M., 1989, "A Model for Abrasive Water-Jet Machining," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 111, No. 7, pp. 154 ~162.
- (6) Geskin, A., 1992, *Jet Cutting Technology*, Kluwer Academic Publishers, pp. 525~541.