

Abrasive Water-Jet이 가공물의 형상에 미치는 영향 Influence of Abrasive Water-Jet on Workpiece Geometry

장현석 *, 하만경 **, 류인일 **, 곽재섭 **, 이상진 ***, 이기백 ***

* 부경대학교 대학원

** 부경대학교 기계공학부

*** 창원기능대학

Abstract

Abrasive water-jet(AWJ) machining is a new cutting technology. The AWJ can cut various materials such as metal, glass and stone. However, the AWJ machining makes troubles including kerf, rounding and side taper. In this study, we investigated the correlation between parameters of abrasive water-jet machining and cutting characteristics. The machining parameters were the material thickness and the traverse speed. The experiment was conducted to cut the stainless steel(STS41) and the mild steel(SS41) specimens. The results of the experiment were presented as the relation between cutting conditions and troubles of a dimension error, a conner error, an uncut width and a kerf.

Keywords : Abrasive water-jet, Uncut width, Kerf, Conner radius error, Traverse speed.

1. 서론

고압으로 압축된 물에 Garnet이나 Silica Sand 같은 연마 입자를 섞어 고속으로 분사하는 빔 가공의 일종인 Abrasive Water-Jet(AWJ)이 도입되면서 기존의 절단 가공의 취약점을 보완해왔다. 특히 열에 민감한 인코넬, 티타늄 같은 특수한 금속의 절단은 레이저 가공이나 플라즈마 가공으로 절단할 경우, 재료가 열에 의한 변형, 변성, 가스화를 일으키는 문제로 인하여 전통적인 절삭으로 가공을 해왔다. AWJ은 금속, 유리, 석재 등의 재

료를 열에 의한 변형, 변성을 일으키지 않으며, 레이저나 플라즈마 가공으로 절단하기 까다로운 비교적 두꺼운(50mm) 재료의 절단 가공을 할 수 있다.

최근의 AWJ 가공 산업은 로봇, 제어 기술의 발달로 인하여 PC-NC 제어 기술과 결합하여 더욱 정밀한 작업을 수행 할 수 있게 되었다. 또한 AWJ의 응용 분야도 소재의 절단뿐만이 아니라 표면 세척, 디버링 등으로 점차 확대되는 추세이며 기계 산업뿐만 아니라 광산, 토목 등 다양한 산업에 접목하려는 시도가 행하여지고 있다.

그러나, 모든 빔 가공을 할 경우 공작물의 표면에 발생하는 테이퍼, 라운딩, 절단흔적 등으로 인하여 가공의 정도가 좋지 못한 편이다. AWJ의 경우에도 작업 변수들의 영향으로 인하여 공작물의 표면 품질이 많은 차이를 나타내는 실정이다. 이러한 AWJ 가공된 표면의 특성을 파악하고 예측하기 위한 연구가 과거로부터 진행되어져 왔다. Hashish⁽¹⁾는 AWJ 가공을 할 때 가공 조건에 따른 공작물의 특성과 AWJ 가공을 위한 모델을 제시했으며 Geskin⁽²⁾은 연질재료의 AWJ 가공시 공작물 표면에 생성되는 물결무늬를 예측하기 위한 연구를 하였다.

일반적인 절삭가공의 경우 소재의 대부분이 칩으로 배출되기 때문에 소재의 절감 효과를 기대하기 어려운 반면에 AWJ 가공은 임의의 점에서 시작하여 정해진 형상을 절단할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 그러나, AWJ 가공의 특성상 절단된 공작물의 형상 및 표면 품질이 전통적인 기계가공의 결과에 못미치는 실정이다. 특히 노즐의 이송 속도에 따라서 가공된 표면의 특성이나 공작물의 치수에 오차가 발생한다. 따라서 AWJ 가공에서 공작물의 절단특성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 AWJ 가공에서 노즐의 이송 속도와 소재의 두께가 변할 때 정해진 형상을 절단할 경우 발생하는 각종 형상이나 절단특성들을 실험을 통하여 살펴보았다.

2. AWJ 구조 및 절단이론

2.1 AWJ 장치의 구조

AWJ 가공기는 NC 제어부, 필터, 수압 증강 장치, 입자 공급장치, 노즐, 왕복장치, 사용된 물과 연마입자를 받아내기 위한 수조로 구성된다.

Fig. 1은 AWJ 장치의 구성을 나타내는 개략도이다. 보통 60~70Hp의 전기 모터가 수압 증강 장치를 구동하기 위해 수압 구동장치로 연결되며, 수압 구동 치는 수압 증강장치와 연결이 된다. 공급되는 물에 불순물이 섞여 펌프 및 오리피스 손상이나 마모를 방지하기 위하여 필터를 거친 다음 압력 증강장치를 거치게 된다. 증강장치는 단일 또는 여러개를 병렬 연결하여 사용할 수 있으며, 증강장치는 두 피스톤의 직경의 차이에 의하여 고압을 발생시킨다. Accumulator는 분사되는 Jet의 압력 변동을 줄이기 위하여 수압 증강장치와 연결된다. 노즐은 내부에 물과 연마입자를 섞는 믹싱 튜브와 오리피스로 구성되어 있으며, 왕복장치, 연마제 공급장치와 결합되어 있다. 왕복장치는 광학 추적장치, NC 콘트롤러에 의한 로봇이나 간단한 단축 이동 장치에 의하여 위치가 제어되어 공작물을 절단한다

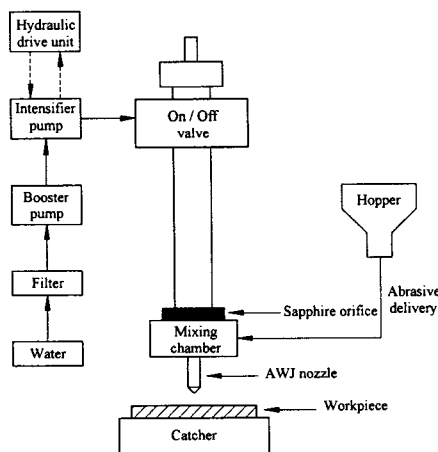


Fig. 1 Schematic of abrasive water-jet system.

2.2 AWJ 절단이론

Hashish⁽³⁾는 그의 연구에서 절단 단면을 절단 마모 영역과 변형 마모 영역으로 구분하였다. 변형 마모 영역에서는 표면에 거칠기와 구분되는 절단흔적인 물결무늬(Kerf)가 생성된다. 절단 마모 영역에서의 재료 제거량은 다음과 같다.

$$\delta_v = \frac{14\delta m_a}{\pi\rho_a} \left(\frac{V_a}{V_i}\right)^{2.5} a^{1.5} \quad (1)$$

여기서 δm_a 는 연마 입자의 미소한 질량 유량이다. ρ_a 는 연마 입자의 밀도이며, 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 구해진 값으로 2.5이다. 또한 a 는 공작물 내부에서 Jet이 공작물과 이루는 각도이며, 절단에 관여한 연마 입자의 비율 c 를 고려하면 다음과 같다.

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

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

$$V_i = \left(\frac{3\sigma_f R_f^3}{\rho_a}\right)^{1/2} \quad (3)$$

여기서 σ_f 는 유동응력이며, R_f 는 아래의 식으로 정의되는 입자의 원형 요소이다.

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

여기서 d_c 는 연마 입자의 코너부분의 지름이며, d_a 는 연마 입자의 지름이다. 재료 제거량으로부터 AWJ에 의한 절단 마모 침투 깊이를 계산하기 위하여 체적 제거율과 체적 변형율이 같다고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta v = \partial h u d_j \quad (5)$$

여기서 ∂h 는 미소한 침투 깊이, u 는 노즐의 이송 속도, 그리고 d_j 는 Jet의 지름이다. 식(1)에

식(5)를 대입하여 적분을 취하면 다음과 같다.

$$\int_0^{H_c} \frac{dh}{(V_a/V_i)^{2.5}} = \frac{cd_j}{2.5} \left(\frac{14m_a}{\pi u d_j^2 \rho_a} \right) \quad (6)$$

식(5)를 H_c 에 대하여 정리하면 식(6)으로 나타낼 수 있다. 이 결과식으로 절단 마모에 의한 절단 깊이 H_c 를 구할 수 있다.

$$H_c = \frac{cd_j}{2.5} \left(\frac{14m_a}{\pi u d_j^2 \rho_a} \right) \left(\frac{V_a}{V_i} \right)^{2.5} \quad (7)$$

Fig. 2는 AWJ 절단 과정을 나타낸 그림이다. 노즐에서 분사된 Jet이 소재와 90° 각도를 이루면서 절단을 하다가 소재의 하단부로 가면서 침투 속도 비율이 상단부와 달라지면서 Jet이 굴곡된다. 절단이 진행되는 동안 Jet은 노즐의 이송 방향과 반대로 굴곡된다. 그러나, 공작물의 끝단에서는 Jet의 굴곡의 방향이 노즐의 이송 방향과 같은 방향으로 바뀌게 된다. 따라서, 가공의 끝부분에서 공작물이 소재에서 완전히 절단이 이루어지지 않는 미절단 부분(Uncut)이 생기게 된다. Jet이 굴곡 되지 않고 소재와 직각으로 절단되는 절단 마모 영역에서는 스텝(Step)이 생성되지 않으며, 절단이 진행되면서 스텝이 하단부로 이동한 흔적인 물결무늬 또한 생성되지 않는다. 변형 마모 영역에서는 Jet의 굴곡으로 인하여 스텝이 생기게 되고, 생성된 스텝은 절단이 진행되는 동안 소재의 하단부로 이동하며 이동 흔적인 물결무늬가 형성된다.

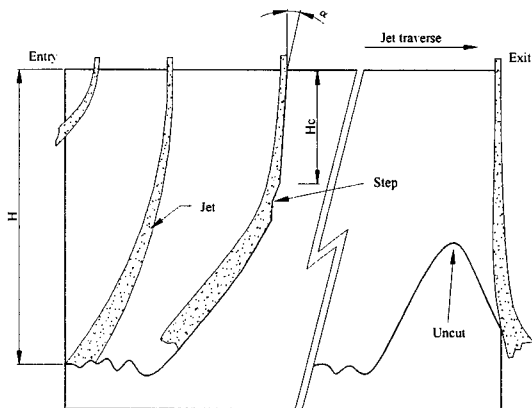


Fig. 2 Cutting mechanism at AWJ.

물결무늬의 각도와 거친 정도는 노즐의 이송 속도에 따라서 달라진다. 노즐의 이송 속도가 빠를수록 공작물 상단부와 가까운 곳에서 스텝이 형성되어 하단부로 이동한다. 따라서, 물결무늬는 뚜렷하게 방향성을 가지게 된다. 이는 노즐의 이송 속도가 빠르면 공작물 하단부에서 Jet의 충격 각도가 더 완만해지기 때문이다. 노즐의 이송 속도가 느릴수록 물결무늬의 결은 수직에 가까워지며, 절단 마모 영역의 깊이 H_c 가 깊어지기 때문에 절단면의 품위도 개선된다.

3. 실험 및 고찰

3.1 시편의 형상 및 가공조건

본연구에서 가공할 시편의 형상과 사용한 AWJ 가공기의 사진을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 시편에는 반경이 다른 두 부분의 곡선 구간과 각도가 다른 두 부분의 코너 구간, 그리고 직선 부분을 조합하였다. 시편의 재질은 기계산업에

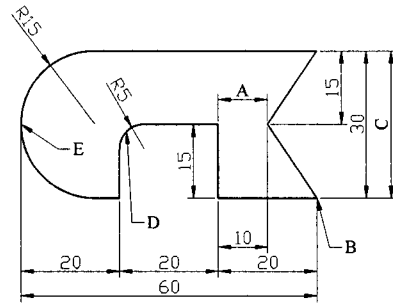


Fig. 3 Geometry of specimen.

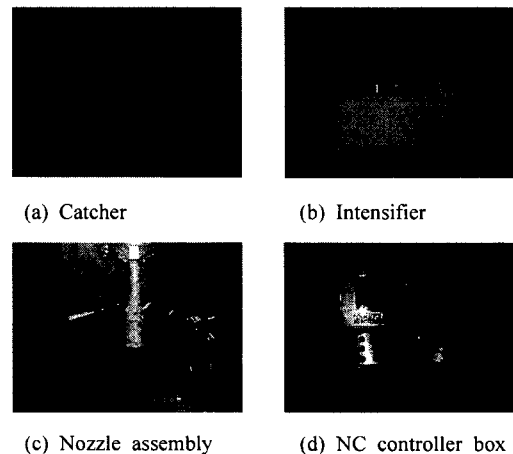


Fig. 4 Photograph of AWJ unit.

널리 사용되는 SS41과 STS304를 사용하였으며, 두께에 따른 특성을 관찰하기 위하여 시편의 두께를 10mm와 20mm의 두 종류로 실험을 하였다. 가공조건은 압력을 3200bar로 고정하고 노즐의 이송 속도를 변화시켜 실험을 하였다. 노즐의 이송 속도는 10mm 두께의 SS41 시편은 65~80mm/min, STS304는 60~75mm/min 까지 각각 5mm/min씩 변화를 주었다. 20mm 두께의 SS41은 25~40mm/min로 설정을 하였으며, STS304는 20~35mm/min 까지 10mm 시편과 같이 5mm/min씩 변화를 주었다. 노즐과 소재 사이의 거리는 5mm로 두었으며, 연마입자는 Garnet으로 입도는 Mesh 80을 사용하였다.

공작물의 특성 평가는 Fig. 3에서 10mm로 설정한 A부분의 거리, 절단의 시작점이자 절단이 끝나는 부분인 B의 미절단, 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 취하였다.

3.2 결과 및 고찰

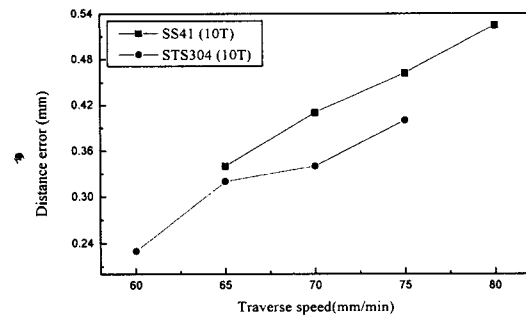
시편 각 부분의 형상이나 치수는 노즐의 이송 속도에 많은 영향을 받는다. 노즐의 이송 속도가 느려질수록 표면에 나타나는 물결무늬의 방향성과 치수 오차가 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5는 소재의 종류와 두께에 따른 노즐 이송 속도의 변화에 대한 시편의 직각으로 꺾이는 부분과 둔각으로 꺾이는 부분의 공작물 하단부 거리의 오차를 측정하여 나타낸 그래프이다. 노즐의 이송 속도가 빨라질수록 Jet의 편향의 정도가 증가하게 되어 치수 오차도 증가하였고, 소재의 두께가 두꺼워질수록 오차가 커졌다.

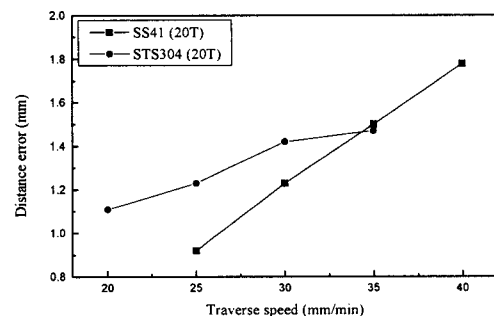
이는 절단 과정에서 노즐의 이송 속도가 빨라지면, 공작물의 하단부로 내려갈수록 Jet의 편향이 커지고, 공작물 하단부의 절단 위치는 노즐의 후방에 위치하게 된다. 따라서, 공작물의 상단부와 하단부에서 절단되는 위치가 서로 다르며, 이 위치 차이는 노즐의 이송 속도가 증가할수록 더 커진다. 그러므로, 시편의 절단 방향이 바뀌게 되는 각종 코너 구간에서는 공작물의 하단부에 노즐 이송 방향의 반대 방향으로 오차가 생기게 된다. 이러한 현상은 공작물 하단부에서 편향된 Jet이 코너 부분에서 노즐 이송 방향의 반대쪽 부

분으로 침투하여 공작물을 침식시키기 때문이다. 공작물 상단과 하단의 절단 위치는 Jet이 편향되는 정도에 비례하여 증가하고, Jet의 편향의 정도는 노즐의 이송 속도에 비례한다. 또한 Jet의 편향 정도가 같다 하더라도 시편이 두꺼울수록 얇은 두께의 공작물에 비해 공작물 상단부와 하단부의 절단 위치의 편차는 증가한다. 따라서 노즐의 이송 속도가 증가할수록, 시편의 두께가 두꺼워질수록 공작물의 코너 부분의 하단부에서의 치수 오차는 증가한다.

Fig. 6은 절단이 시작되고 끝나는 지점에서 노즐의 이송 속도에 따른 미절단 부분의 폭을 측정하여 나타낸 그래프이다. 소재의 두께가 10mm일 때는 그 값이 무시할 수 있을 정도로 극히 작았다. 그러나, 20mm 시편에서는 절단이 이루어지지 않는 미절단 부분이 발생하였다. 미절단 부분의 폭은 노즐의 이송 속도에 비례하여 증가하였다. 이는 노즐의 이송 속도가 빨라질수록 절단의 마무리 부분에서 Jet의 편향 방향이 노즐의 이송 방향으로 더 빨리 전향되기 때문이다.



(a) Material thickness 10T.



(b) Material thickness 20T.

Fig. 5 Distance error versus traverse speed at A.

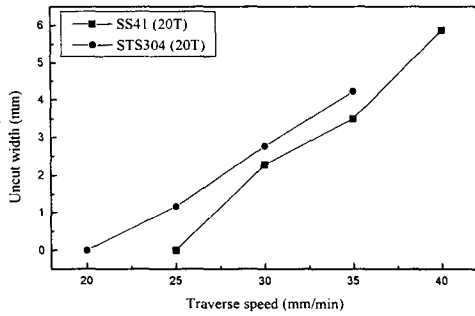


Fig. 6 Uncut width versus traverse speed at B (20T).

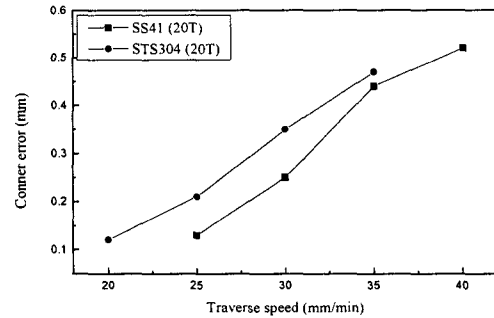
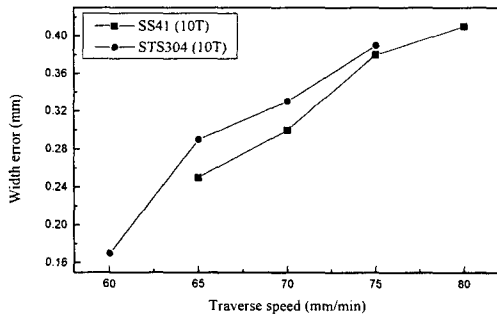
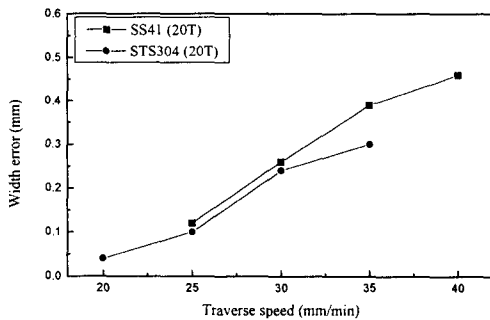


Fig. 8 Corner error versus traverse speed at D (20T).



(a) Material thickness 10T.



(b) Material thickness 20T.

Fig. 7 Width error versus traverse speed at C.

Fig. 7은 공작물 폭의 치수 오차를 측정하여 나타낸 그래프이다. 공작물 폭의 치수 오차는 노즐의 이송속도와 재료의 두께에 비례하여 증가하였다. 공작물 하단부의 치수가 설정한 치수보다 크게 측정되었다. 이는 공작물 내부에서의 공작물 고유의 특성과 연마 입자와 공작물의 상호작용, 그리고 공작물 내부에서의 Jet의 속도 변화로 인하여 공작물에 테이퍼가 생성되기 때문이다.

Fig. 8은 작은 곡선 구간 하단부의 치수 오차를 측정한 그래프이다. 공작물의 하단부는 절단 방향의 반대 방향으로 편향된 Jet의 영향으로 인

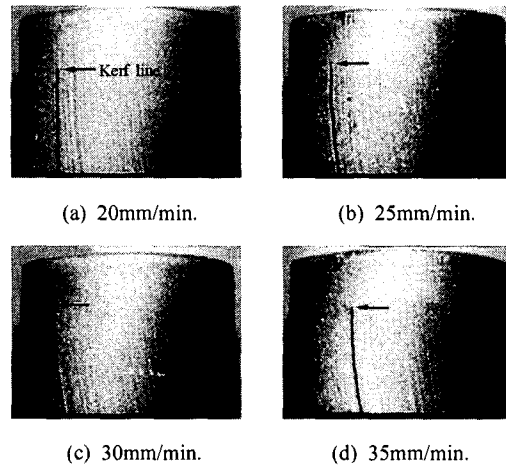


Fig. 9 Relation between kerf geometry and traverse speed at E.

하여 상단부 보다 마모가 일어났으며, 노즐의 이송속도에 비례하여 하단부의 치수 오차가 증가함을 알 수 있다.

Fig 9는 큰 곡선 구간의 물결무늬를 나타낸 사진이다. SS41과 STS304 두께 20mm 시편의 경우에 노즐의 이송 속도가 빨라질수록 Jet의 편향으로 인하여 물결무늬의 각도가 커짐을 알 수 있었다. 이는 곡선 구간에서 이송 속도를 조절하는 것이 표면 품질을 향상시킬 수 있음을 보여주는 것이다.

4. 결론

재질이 다른 시편을 AWJ 절단 가공을 하였을 때, 노즐의 이송 속도와 시편의 두께에 따른 절단 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 직각으로 꺾이는 부분과 둔각으로 꺾이는 부분의 공작물 하단부 거리의 치수는 노즐의 이송 속도가 빠를수록 오차가 증가하였다. 또한, 하단부 치수 오차는 시편의 두께가 두꺼워질수록 증가하였다. 이는 절단되는 방향이 꺾일 때 공작물 하단부의 편향된 Jet이 공작물의 하단부로 침투하기 때문이다.
- (2) 시편의 두께가 두꺼울 경우 절단가공의 마무리 부분에서 Jet의 편향의 방향이 절단 방향의 반대 방향에서 절단 방향으로 변한다. 이로 인하여 미절단 부분이 남게 되며, 그 폭은 노즐의 이송 속도에 비례한다.
- (3) 작은 코너 부분의 하단부는 절단 방향의 반대 방향으로 편향된 Jet이 절단 방향이 변할 때 공작물로 침투하여 치수 오차가 발생하였고, 그 치수 오차는 노즐 이송 속도에 비례하여 증가한다.
- (4) 공작물 각 부분의 치수 오차는 노즐의 이송 속도에 따라서 큰 변화를 보여주고 있다. 따라서 노즐 이송 속도를 조절하는 것이 공작물 표면 품질과 치수 정밀도를 높일 수 있다.

참고문헌

1. Hashish, M., "Prediction of Depth of Cut with Abrasive Water-Jet," *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1988.
2. Geskin, A., "Jet Cutting Technology," Kluwer Academic Publishers, pp. 525-541, 1992.
3. Hashish, M., "A Model for Abrasive Water-Jet Machining," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 111, pp. 154-162, 1989.