

Abrasive Water-Jet 가공에서 공작물의 절단특성

장현석*(부경대 대학원), 하만경, 곽재섭(부경대), 박후명(울산기능대), 이상진, 이기백(창원기능대)

Cutting Characteristics of Workpiece Using Abrasive Water-Jet Machining

H. S. Chang(Graduate., PKNU), M. K. Ha, J. S. Kwak(PKNU), H. M. Park(UPC), S. J. Lee, G. B. Lee(CPC)

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.

Key Words : Abrasive water-jet (입자 워트젯), Kerf(물결무늬), Uncut width (미절단 폭), Conner radius error (코너 반경오차), Traverse speed (이송속도)

1. 서론

1980년대 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 재료를 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 배출되어 소재의 절감 효과를 기대하기 어려운 반면에 AWJ 가공은 임의의 점에서 시작하여 일정한 형상을 절단할 수 있다는 특징을 가지고 있다.

그러나, AWJ 가공의 특성상 절단된 공작물의 형상 및 표면 품질이 전통적인 기계가공에 미치지 못하는 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 일정한 형상을 절단할 경우 발생하는 각종 현상이나 절단특성들을 실험을 통하여 살펴보았다.

2. AWJ 구조 및 절단이론

2.1 AWJ 장치의 구조

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

Fig. 1은 AWJ 장치의 구성을 나타내는 개략도이다. 보통 60~70Hp의 전기 모터가 수압 증강장치를 구동하기 위해 수압 구동장치로 연결되며, 수압 구동장치는 수압 증강장치와 연결이 된다. 공급되는 물에 불순물이 섞여 펌프 및 오리피스의 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 컨트롤러에 의한 로봇이나 간단한 단축 이동 장치에 의하여 위치가 제어되어 공작물을 절단한다.

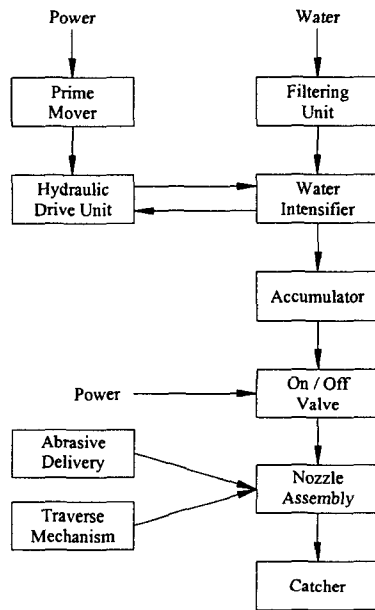


Fig. 1 Block diagram of abrasive water-Jet system.

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. 그의 연구에 의하면

절단 마모 영역의 깊이 H 는 아래의 식으로 표현된다.

$$H = \frac{c d}{2.5} \left(\frac{14 m}{\pi u d^2 \rho} \right) \frac{V_a}{V_c} \quad (1)$$

여기서 c 는 절단에 사용된 연마입자의 양, d 는 Jet의 지름, m 은 연마 입자의 유량, u 는 노즐 이송 속도, ρ 는 연마 입자의 밀도, V_a 는 Jet의 속도, 그리고 V_c 는 임계속도이다.

또한 노즐에서 분사된 Jet이 소재와 90° 각도를 이루면서 절단을 하다가 소재의 하단부로 가면서 침식 속도 비율이 상단부와 달라지면서 Jet이 굴곡된다. 굴곡된 Jet은 소재에 스텝을 형성하게 되고, 형성된 스텝은 절단이 진행되는 동안 소재의 하단부로 이동을 한다.

Fig. 2는 스텝의 형성 과정을 나타낸 그림이다. 이러한 스텝은 소재의 절단면에 형성되는 절단 흔적과 밀접한 관계가 있다. Jet이 굴곡 되지 않고 소재와 직각으로 절단되는 절단 마모 영역에서는 스텝이 생성되지 않으며 물결무늬 또한 생성되지 않는다. 변형 마모 영역에서는 Jet의 굴곡으로 인한 스텝이 생기고 소재의 하단부로 이동한 흔적인 물결무늬가 형성된다.

물결무늬의 각도는 노즐의 이송 속도에 따라서 달라지는데, 노즐의 이송 속도가 빠를수록 물결무늬는 뚜렷하게 방향성을 가지게 되며, 노즐의 이송 속도가 느릴수록 수직에 가까워지며 절단면의 품질도 개선된다.

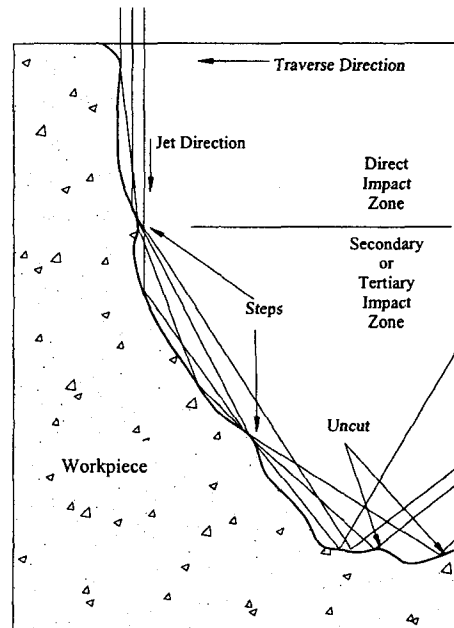


Fig. 2 A hypothesis for the step formation.

3. 실험 및 고찰

3.1 시편의 형상 및 가공조건

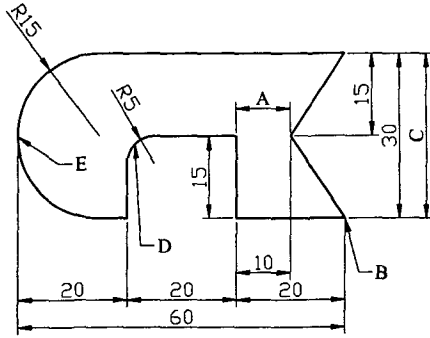


Fig. 3 Geometry of specimen.

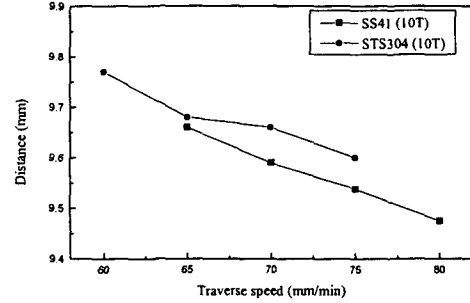
Fig. 3은 가공할 시편의 형상을 나타낸 것이다. 시편에는 반경이 다른 두 부분의 곡선 구간과 각도가 다른 두 부분의 코너 구간, 그리고 직선 부분을 조합하였다. 시편의 재질은 기계산업에 널리 사용되는 SS41과 STS304를 사용하였으며 두께에 따른 특성을 관찰하기 위하여 시편의 두께를 10mm와 20mm의 두 종류로 실험을 하였다. 가공조건은 압력을 3200bar로 고정하고 노즐의 이송 속도를 변화시켜 실험을 하였다. 노즐의 이송 속도는 10mm 두께의 SS41 시편은 80mm/min부터 65mm/min, STS304는 75mm/min부터 60mm/min 까지 각각 5mm/min씩 변화를 주었다. 20mm 두께의 SS41은 40mm/min부터 25mm/min로 설정을 하였으며, STS304는 35mm/min부터 20mm/min 까지 10mm 시편과 같이 5mm/min씩 변화를 주었다. 노즐과 소재 사이의 거리는 5mm로 두었으며, 연마입자는 Garnet으로 입도는 Mesh 80을 사용하였다.

가공 후 시편의 특성 평가는 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.

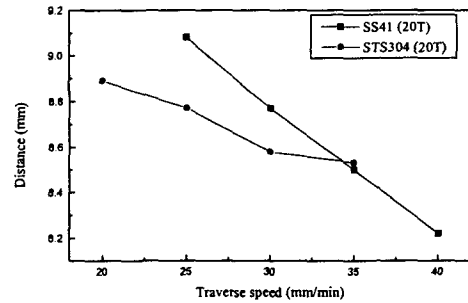
3.2 결과 및 고찰

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

Fig. 4는 소재의 종류와 두께에 따른 노즐 이송 속도의 변화에 대한 A부분의 폭을 측정하여 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는바와 같이, 소재의 두께가 두꺼워질수록 10mm로 설정한 A부분에서의 폭의



(a) Material thickness 10T.



(b) Material thickness 20T.

Fig. 4 Relation between distance and traverse speed at A according to specimen.

오차가 커졌으며, 노즐의 이송 속도가 빨라질수록 폭이 좁아졌다.

Fig. 5는 절단의 시작되고 끝나는 부분인 B지점에서 노즐의 이송 속도에 따른 공작물이 절단되지 않고 남아있는 부분의 폭을 나타낸 그래프이다. 소재의 두께가 10mm일 때는 그 값이 무시할 수 있을 정도로 극히 작았지만, 20mm의 경우에는 절단이 이루어지지 않는 부분이 발생하였다.

Fig. 6은 30mm로 설정한 공작물의 폭 C를 측정하여 나타낸 그래프이다. C부분도 노즐의 이송속도와 재료의 두께에 비례하여 치수의 오차가 증가함을 알 수 있었다.

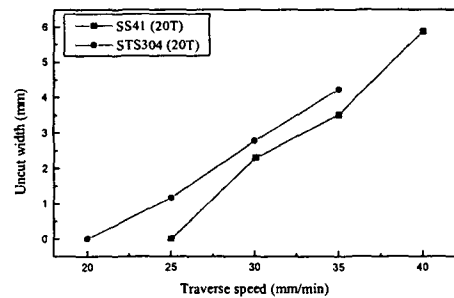
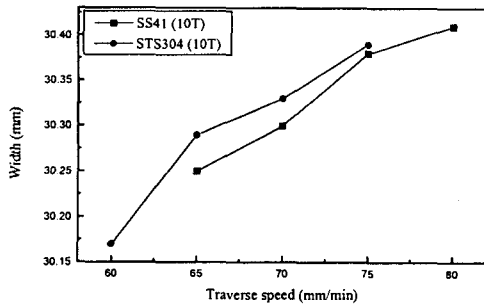
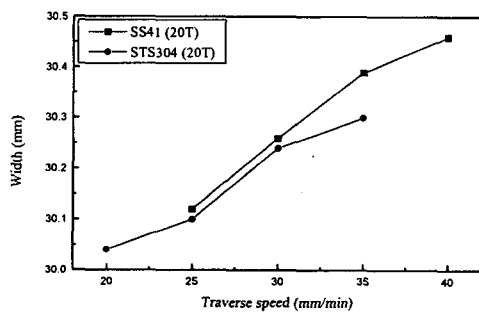


Fig. 5 Uncut versus traverse speed at B (20T).



(a) Material thickness 10T.



(b) Material thickness 20T.

Fig. 6 Width versus traverse speed at C.

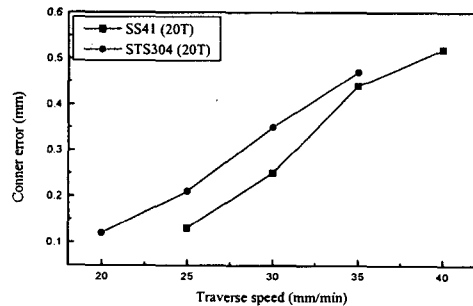
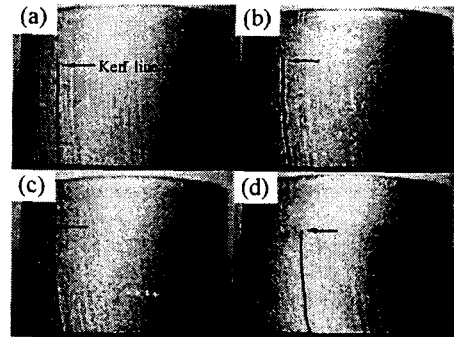


Fig. 7 Depth versus traverse speed at D (20T).

Fig. 7은 작은 곡선 구간 D의 하단부의 치수 오차를 측정된 그래프이다. D의 하단부는 Jet의 영향으로 인하여 상단부 보다 마모가 일어났음을 알 수 있다. 노즐의 이송속도에 비례하여 하단부의 치수오차가 커짐을 알 수 있다.

Fig 8은 큰 곡선 구간인 E부분의 물결무늬를 나타낸 사진이다. 10mm 두께의 시편들은 노즐의 이송 속도에 따른 물결무늬가 크게 차이가 나타나지 않았으나, STS304 두께 20mm 시편의 경우에는 노즐의 이송 속도가 빨라질수록 물결무늬의 각도가 커짐을 알 수 있었다. 이는 곡선 구간에서 이송 속도를 조절하는 것이 표면 품질을 향상시킬 수 있음을 보여주는 것이다.



(a) Traverse speed 20mm/min.
 (b) Traverse speed 25mm/min.
 (c) Traverse speed 30mm/min.
 (d) Traverse speed 35mm/min.

Fig. 8 Relation between kerf geometry and traverse speed at E.

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) 노즐의 이송 속도가 빠를수록 A의 하단부 거리는 짧아졌다. 또한 하단부 거리는 시편의 두께가 두꺼워질수록 짧아졌다. 이는 Jet의 편향으로 인하여 이미 절단된 부분으로 마모가 일어났기 때문이다.
- (2) 시편의 두께가 두꺼울 경우 절단가공의 마무리 부분에서 Jet의 편향의 방향의 변화로 인한 미절단 부분이 남게 되며, 그 폭은 노즐의 이송 속도에 비례한다.
- (3) D부분의 하단부는 Jet의 영향으로 마모가 일어났고, 그 치수 오차는 노즐 이송 속도에 따라서 차이를 있음을 알 수 있었다. 오차의 크기는 노즐의 이송 속도와 비례하여 증가하였다.

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.