

## 중첩가공에 의한 워터젯 밀링의 가공면 특성

박승섭<sup>a</sup>, 김화영<sup>b</sup>, 안중환<sup>a\*</sup>Characteristics of Abrasive Water Jet Milled Surface  
by Overlap CuttingSeung Sub Park<sup>a</sup>, Hwa Young Kim<sup>b</sup>, Jung Hwan Ahn<sup>a\*</sup><sup>a</sup> School of Mechanical Engineering, Pusan National University,  
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea<sup>b</sup> Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University,  
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	21	January	2016
Revised	19	February	2016
Accepted	28	March	2016

## Keywords:

Abrasive water jet (AWJ) milling  
Overlap cutting  
Step over  
Surface profile

## ABSTRACT

Overlap cutting is a fundamental method of applying abrasive water jet (AWJ) machining to milling to produce a wider surface because the nozzle outlet is approximately 1.0 mm wide. In this study, the effects of overlap cutting on the depth profile and surface roughness are investigated. The overlapping area depends on the amount of step over, which is controlled in the pick-feed direction. If the step over is equal to or larger than the diameter of the nozzle, no overlap cut occurs but large cusps remain between the cut paths. A step over as small as one-thirds of the nozzle diameter may lead to triple-overlap cutting resulting in an extraordinary depth. By using pocket milling experiments with a step over of 0.46 (or 0.47), it is verified that AWJ can produce a milled surface of titanium, one of the hard-to-cut materials, with 76  $\mu\text{m Ra}$ .

## 1. AWJ 가공 및 밀링의 동향

연마재 워터젯(AWJ: abrasive waterjet) 가공은 원래 난삭재의 절단에 사용된 특수 가공법으로 가공열이 없어 열응력이 안 생기고 공작물과 워터젯의 접촉 시 절삭력이 작아 응력변형이 안 생기는 특징이 있다. 이런 장점 때문에 제품불량을 초래할 가능성이 적고, 난삭재뿐 아니라 부드러운 재료까지 다양한 소재에 적용할 수 있어 전자, 항공, 의료 등의 산업으로 적용범위가 점점 커져 왔다. 최근 일부 산업에서 제품 경량화 요구에 부응해서 단단하고 강한 난삭재가 많이 사용되면서 형상가공에 필요한 공구비용이 크게 증가하게 되었다. 이에 대한 대책으로 AWJ를 선반이나 밀링에 적용하고자

하는 요구가 커지고 있다<sup>1-3)</sup>.

3차원 형상을 가공하려면 가공깊이와 가공폭을 제어하여야 하는데 워터젯의 공구는 일반 기계가공의 고정공구와 달리 연마재와 물의 혼합체로 깊이와 폭을 자유자재로 제어하기 힘들기 때문에 이를 해결하려는 연구들이 시도되고 있다. 노즐이 한번 지나가면 노즐직경 정도의 폭의 흠이 만들어지는데 가공깊이와 가공폭이 워터젯 가공변수와 어떤 관계가 있는지 모델링한다든지, 워터젯 가공면의 생성과정은 어떠한지, 가공면의 특성은 어떠한지, 경로를 중첩하여 밀링을 하는데 중첩가공이 가공깊이나 폭에 어떤 영향을 미치는지, 또 포켓가공에 적용하여 재료제거 기구(metal removal mechanism)와 가하학적 정밀도나 표면품질을 조사하여 밀링가공

\* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2333

Fax: +82-51-514-0685

E-mail address: jhwahn@pusan.ac.kr (Jung Hwan Ahn).

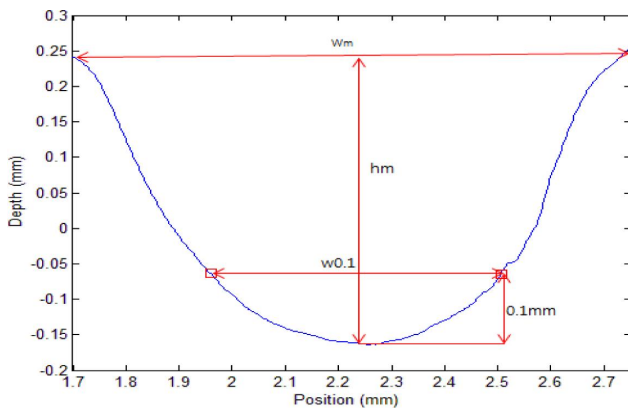
의 가능성을 평가한다든지 등에 관심을 가지고 연구들이 이루어져 왔지만<sup>[4-10]</sup> 3차원 형상가공에 적용하기에는 아직 많이 부족한 상태이다.

특히 워터젯이 혼합 유동체로 형태가 일정하지 않고 통계적 가변성을 포함하고 있어 가공깊이나 폭을 모델링하거나 실험 데이터를 분석할 때 어려움이 더 커진다.

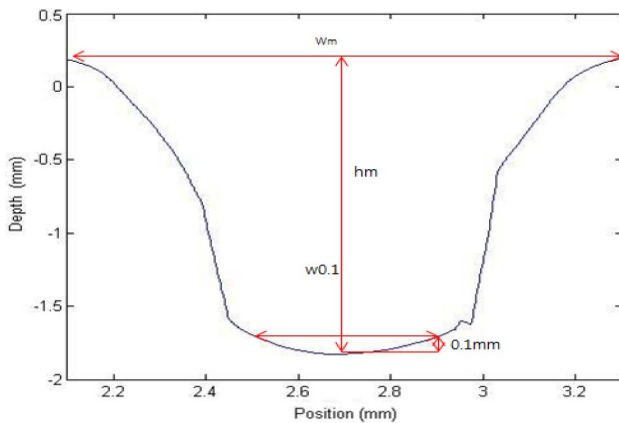
본 연구에서는 중첩경로를 이용한 AWJ 포켓밀링에서 중첩량이 깊이와 표면거칠기에 어떤 영향을 주는지 실험적으로 조사하고, 이를 바탕으로 적절한 가공조건과 중첩량을 찾는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. AWJ 가공의 깊이 형상(depth profile)

AWJ를 밀링에 적용하기 위해서는 절단 때와는 달리 가공조건을 약하게 조정해서 밀링에 적합한 깊이를 맞추어야 한다. Fig. 1은 AWJ으로 한 줄을 가공할 때 깊이의 단면형상을 나타내는데 얇은 것(Fig. 1(a))은 포물선, 깊은 것(Fig. 1(b))은 중간에 급경사의 테이퍼 형상을 보인다. 얕을수록 형상이 완만하고 밀면도 오목한 특징을



(a) Shallow



(b) Deep

Fig. 1 Feature of depth profile by AWJ cutting

나타낸다. 여기서 hm는 최대깊이, wm는 최대폭, w0.1은 밀면에서 높이 0.1 mm인 지점의 가공폭을 나타낸다. wm은 노즐직경과 비슷하거나 약간 큰데, 노즐이 가공면에서 떨어져 있는 거리(SOD: stand off distance)가 클수록 커진다. 이들 형상 특징을 AWJ 가공변수에 대해 실험식으로 구한 연구들이 많이 이루어졌다<sup>[7,11]</sup>.

선행연구에서 티타늄(Ti6Al4V)의 가공깊이(h)와 가공폭(w0.1)을 절삭변수에 대해 실험 데이터를 바탕으로 모델링하여 다음과 같은 결과를 얻었다<sup>[11]</sup>.

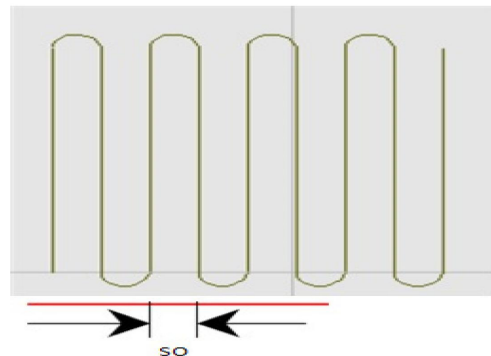
$$h = 10^{-3.204} P^{2.03} f^{-1.392} m^{0.339} \quad (1)$$

$$w0.1 = 10^{0.234} P^{-0.458} f^{0.387} m^{-0.104} \quad (2)$$

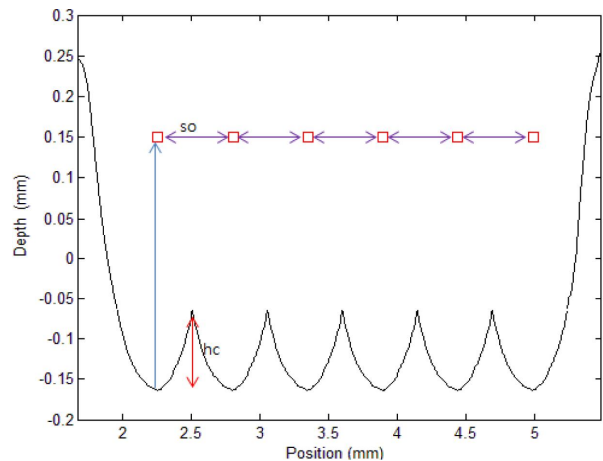
## 3. 중첩(overlap)을 이용한 AWJ 밀링

### 3.1 중첩 가공경로와 이론적 밀링면의 형상

Fig. 2(a)는 step over에 의한 AWJ 가공의 경로를 나타내는데, 한 줄 가공한 뒤 옆으로 step over량(so)만큼 이동해서 또 한 줄 가공하는 것을 반복한다. so가 최대폭 wm 보다 작으면 중첩가공



(a) Cut path with step over



(b) Cross section of ideally milled cavity

Fig. 2 AWJ milling by overlap with step over (so)

영역이 생기는데 Fig. 2(b)는 step over를 5회 반복하면 물결 모양의 작은 cusp가 있는 면이 이론적으로 생성됨을 보여준다. 여기서 hc는 cusp의 최대높이를 나타내며 hc가 클수록 거친 면이 되고 작을수록 면이 고와진다. step over량이 커질수록 hc가 커질 것으로 예상된다. AWJ 밀링에서 step over량과 가공조건은 요구되는 표면거칠기와 가공깊이에 따라 실험 데이터에 근거하여 산출하여야 한다.

### 3.2 AWJ 중첩가공에 의한 가공깊이 형상 변화

Fig. 3은 워터젯 중첩가공(overlap cutting)이 일어나는 영역을 도식적으로 나타낸 것으로<sup>[7]</sup>, 워터젯 속의 입자가 충격력으로 공작물을 떼어내기 때문에 중첩가공 영역에서는 운동에너지를 가진 입자가 이미 1차 가공된 부분에 충돌하여 추가가공이 일어난다. 이 경우 추가 가공되는 깊이에 대한 이론적 연구는 쉽지 않고 일부 있더라도 실용성이 부족하여, 결국 실험을 통해서 확인하지 않으면 알 수 없고 아직 많은 연구가 필요한 부분이다.

본 연구에서는 so의 크기에 따라 AWJ의 중첩가공이 깊이에 어떤 영향을 주는지 조사하였다. 타타늄 합금(Ti6Al4V: yield strength 910 MPa, tensile strength 1,000 MPa, density 4.43 kg/m<sup>3</sup>)을 대상으로 한 선행연구<sup>[11]</sup>의 데이터를 참고하여, 깊이가 1.9 mm 정도인 조건 - 압력 150 MPa, 연마재유량 300 g/min, 이송속도 600 mm/min - 에서 실험하였다. step over량은 노즐 직경의 1/3, 2/3, 3/3에 해당하는 0.33, 0.66, 1.0 mm이다. 워터젯 관련 조건을 포함한 모든 가공조건은 Table 1과 같고, 실험에 사용된 기계는 (주)티오피에스의 SUPER JET 3015이다.

깊이 형상 측정은 Fig. 4와 같이 xy 스테이지에 레이저를 설치한 장치로 하였으며, 센서 이송속도 0.2 mm/s, 샘플링 속도는 100

Hz이다. Fig. 5와 같이 세 가지 step over로 세 줄을 300, 200, 100 mm 가공하여 1회, 2회, 3회 가공한 부분을 5 mm 간격으로 4번 측정하였으며 각각의 대표적 깊이형상 측정결과는 Fig. 6과 같다. 각 그림에서 같은 조건이라도 single, double, triple path의 측정 위치가 다르기 때문에 깊이나 형상이 좀 다를 수 있지만 전반

Table 1 AWJ parameters for overlap cutting

Parameter (unit)	Value
SOD (mm)	5
Abrasive	Garnet (#80)
Nozzle diameter (mm)	1.016
Nozzle length (mm)	76.2
Orifice diameter (mm)	0.33
Pressure (MPa)	150
Abrasive flow rate (g/sec)	300
Feedrate (mm/min)	600
Pick-feed (mm)	0.33, 0.66, 1.0

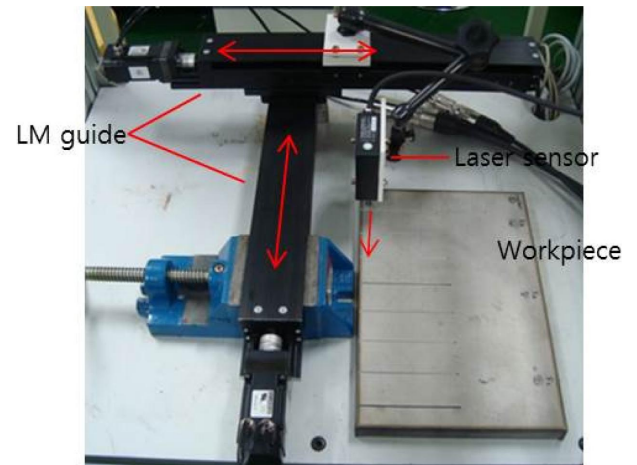


Fig. 4 Laser scanning system for measuring depth profile

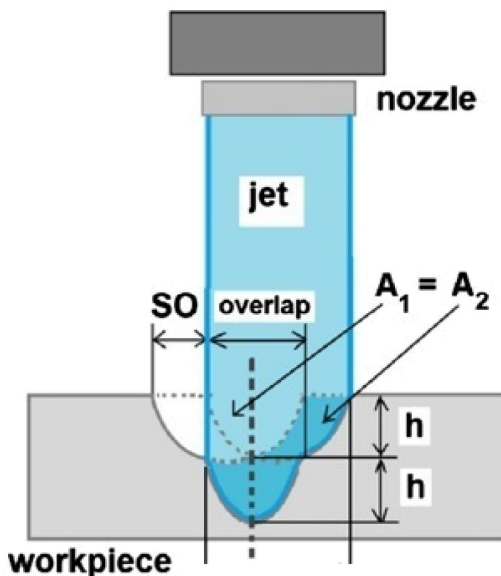


Fig. 3 Schematic depth profile by AWJ overlap cutting<sup>[7]</sup>

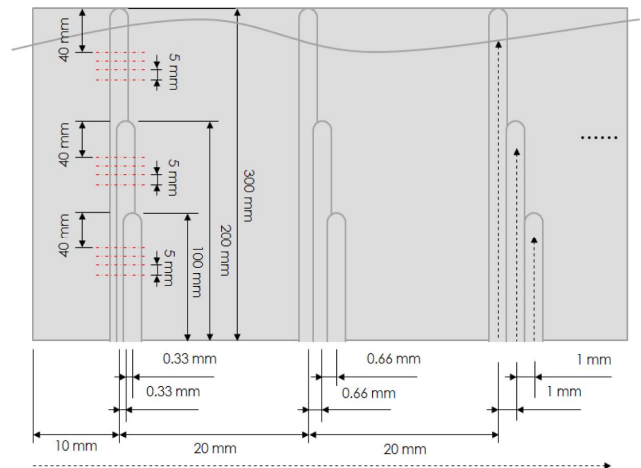


Fig. 5 Three cut paths with different step over

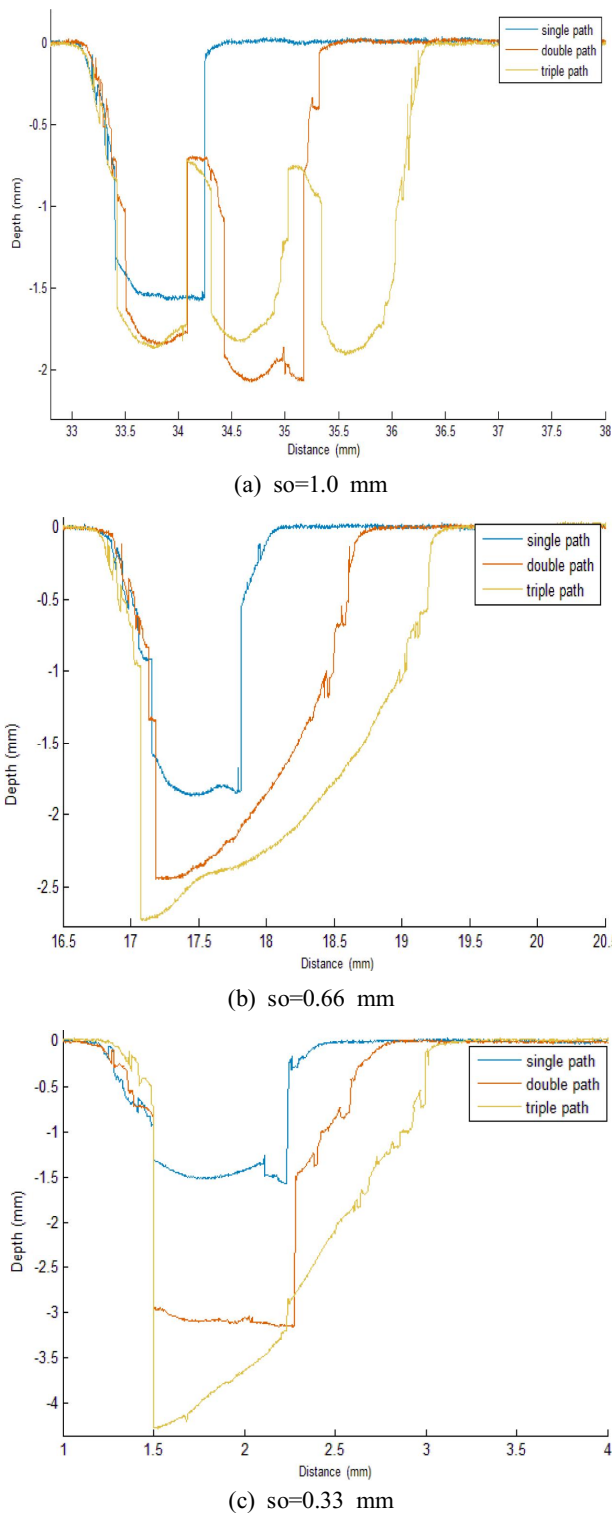


Fig. 6 Depth profiles by overlap cutting with different step over

적인 경향을 알 수 있다. Step over가 노즐의 직경과 비슷한 1 mm 일 때 Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 두 번째 또는 세 번째 가공이 직전 경로에서 형성된 깊이에 영향을 주지 않지만 경로사이에 깊이의 60% 정도 높이의 cusp가 남게 되어 밀링면으로는 적절하지 않다. step over가 작으면 직전 가공깊이에 영향을 미치는데 Fig.

6(b), (c)를 비교하면 0.66 mm가 0.33 mm보다 중첩부분이 적어 두 번째 가공에서 깊이가 1.5-2배로 되지만 세 번째 가공에 의한 첫 번째 가공깊이의 변동이 훨씬 적다. 0.33 mm 경우 1차 중첩가공에서도 첫 번째 깊이만큼 깊이가 누적되어 깊이가 2배 정도 되고, 세 번째 경로가공에서도 중첩가공이 추가로 이루어져 깊이가 1차 가공의 2.5배 이상 커짐을 알 수 있다. 이 또한 밀링면으로는 적절하지 않다. 따라서 삼중첩 가공은 피해야 하고, 중첩가공으로 인한 깊이 변동이 심하지 않도록 step over량을 설정하여야 한다.

#### 4. 중첩을 이용한 AWJ 포켓 가공

##### 4.1 깊이와 표면거칠기

AWJ 밀링가공으로 30\*40\*2 mm의 3면 포켓가공을 하였다. 포켓깊이 2 mm이므로 중첩가공의 영향을 고려하여 워터젯 가공깊이는 1 mm로 한다. 깊이 1 mm를 얻기 위한 가공조건은 식 (1)에서 여러 가지가 있을 수 있는데 여기서는 두 가지를 취하였다. 첫째 조건은 (압력, 연마재유량, 이송속도)가 (150 MPa, 200 g/min, 781 mm/min)이고, 둘째 조건은 (200 MPa, 200 g/min, 1,182 mm/min)이다. 그리고 선행연구<sup>[11]</sup>에서 cusp 0.1 mm에 해당하는 폭(w0.1)을 step over량의 기준으로 하였는데 식 (2)에서 구한 w0.1 은 각각 0.47 mm, 0.46 mm이다. 그 외 워터젯 관련 조건은 Table 1과 같다. 두 조건으로 AWJ 포켓 가공한 샘플은 Fig. 7과 같고, 각 샘플의 포켓면 형상을 이송의 직각방향(step over 방향)으로 세 군데 측정된 결과 중 한 개씩을 Fig. 8에 나타낸다. 이 형상 데이터의 중앙부 20 mm 부분을 가지고 평균깊이를 계산한 결과 첫째와 둘째 조건에서 모두 2.3 mm로 목표깊이 2 mm보다 약간 컸다. 표면거칠기(Ra, Rmax)는 각각 (85, 479)  $\mu\text{m}$ , (76, 428)  $\mu\text{m}$ 로 비교적 크게 나타났는데, 이것은 전통적인 기계가공보다 거칠고 주물부품의 거칠기에 해당하는 정도이다. 두 가지 조건을 비교하면 고압에 이송속도 큰 쪽이 저압에 이송속도 작은 쪽보다 표면거칠기가 10% 정도 좋고, 가공속도가 1.5배 정도 빠르므로 고압에 빠른 이송인 둘째 조건이 훨씬 유리함을 알 수 있다.

##### 4.2 밀링면의 주파수 특성

Fig. 8의 형상데이터를 자세히 살펴보면 약 0.5 mm 진폭의 파형이 약 2.5 mm 간격으로 있고 그 위에 작은 진폭의 파형이 얹혀 있는데 이들이 평균깊이와 표면거칠기를 결정하게 된다. 여기서는 step over량(0.46, 0.47 mm)의 영향이 밀면에 남아 있는지를 알아보기 위하여 밀면 데이터 중 중앙부의 4,096개 데이터(길이 8.2 mm 상당)에 대하여 anti-aliasing을 위한 저주파필터(40 Hz cut-off 주파수)를 거친 후 FFT 분석을 하였다. Fig. 9(a), (b)는 Fig. 8(a)를 대상으로 한 데이터와 FFT분석 결과를 나타낸다. Fig. 9(a)를 보면

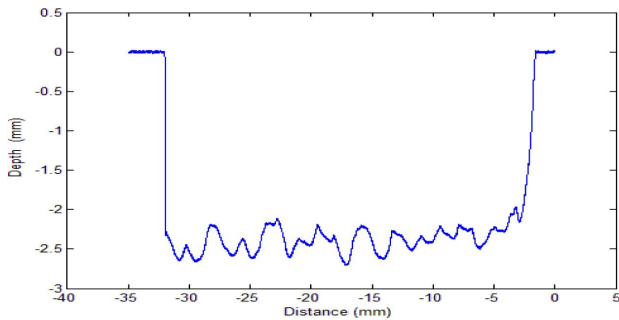


(a) 150 MPa, 781 mm/min, so=0.47 mm

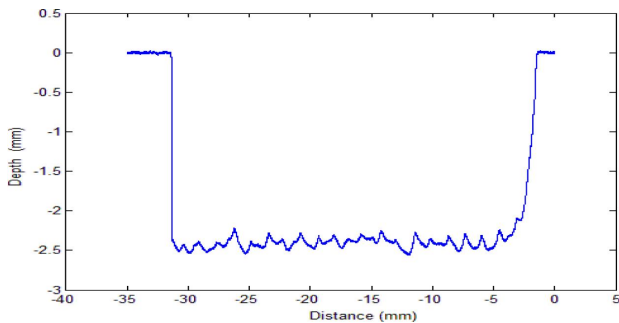


(b) 200 MPa, 1,182 mm/min, so=0.46 mm

**Fig. 7** Surface of pockets on titanium alloy by AWJ overlap cutting with abrasives flow rate of 200 g/min



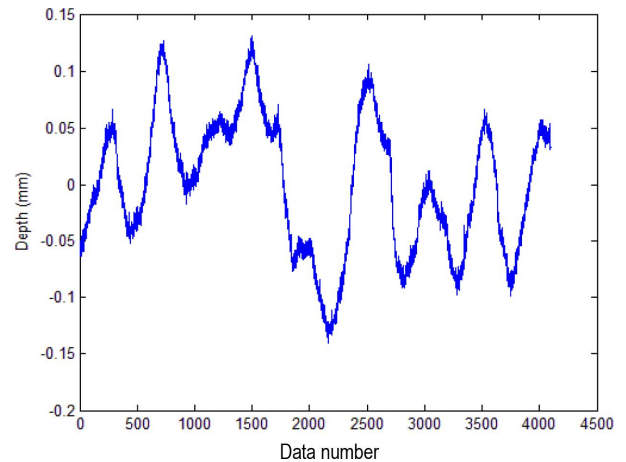
(a) 150 MPa, 781 mm/min, so=0.47 mm



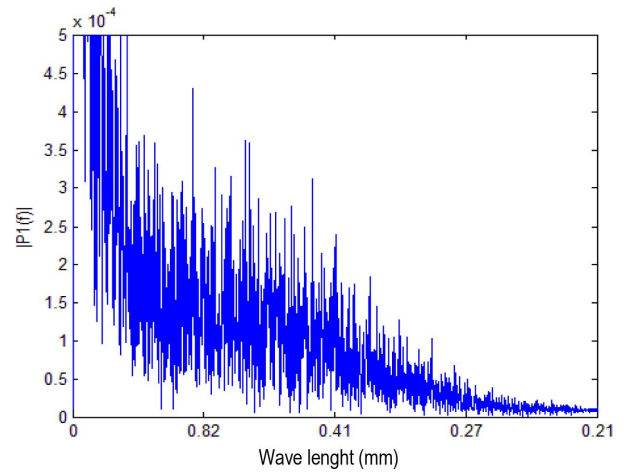
(b) 200 MPa, 1182 mm/min, so=0.46 mm

**Fig. 8** Measured profiles of pocket surface along step over direction

470-480개마다 파형이 하나씩 보이는데, 1차 가공 후 2차 가공에서 더 파인 깊이의 형상에 해당한다. 이것은 0.002 mm 간격 샘플링에서 step over량 0.47 mm는 235개이고 약 그 2배에 해당한다. 이것



(a) 4,096 sampled data



(b) Power spectrum

**Fig. 9** Data and power spectrum of pocket surface profile along step over direction (150 MPa, 781 mm/min, so=0.47 mm)

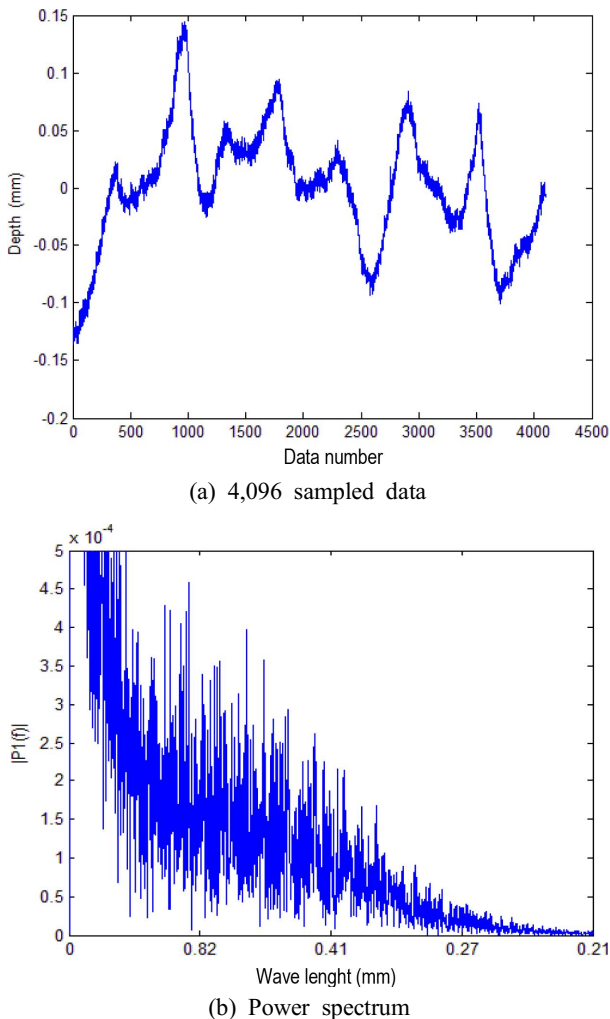
의 길이는 0.94 mm에 해당하는데, Fig. 9(b)에서 파장 0.94 mm에서 비교적 큰 파워 성분을 확인할 수 있다. 또한 step over량 0.47 mm에 해당하는 파장과 이의 1.5배에 해당하는 0.70 mm에서 큰 파워 성분도 모두 step over량과 연관된 것으로 볼 수 있다. 마찬가지로 Fig. 8(b)를 대상으로 위와 같은 처리를 하면 Fig. 10(a), (b)와 같고 step over량 0.46 mm과 연관된 파장 - 0.46, 0.69, 0.92 mm - 근처에서 큰 파워 성분이 나타남을 알 수 있다.

Step over의 2배마다 파형이 드러나 보이는 이유는 중첩가공 영역의 왼쪽은 1차 가공 영역, 오른쪽은 비가공 영역인데 워터젯이 끝에서 약간 퍼져서 또는 부딪힌 연마재가 왼쪽으로 흘러서 왼쪽 cusp를 상당 부분 깎아버렸기 때문으로 생각된다. 결국 step over량이 AWJ 밀링면의 품질에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

중첩경로를 이용해서 난삭제인 티타늄 합금(Ti6Al4V)에 대해





**Fig. 10 Data and power spectrum of pocket surface profile along step over direction (200 MPa, 1,182 mm/min, so=0.46 mm)**

워터젯 밀링을 수행하였으며, step over 량에 따른 중첩가공의 영향과 밀링면의 특성을 조사하는 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) step over 량은 중첩이 일어나되 3중첩 가공이 생기지 않도록 노즐폭을 고려하여 설정하여야 한다.
- (2) 동일한 조건으로 중첩가공하면 가공깊이가 1회 가공한 것보다 2배 정도 되었다.
- (3) 동일한 깊이를 밀링할 때는 저압보다 고압으로 하는 것이 이송속도가 높아져 가공면 품질이나 생산성에서 유리하다.
- (4) step over 2배 주기의 요철이 가공면에 나타났으며, 이것이 워터젯 밀링면의 품위를 결정한다.

## 후 기

본 연구는 “산업통상자원부”, “한국산업기술평가원”, “우수기술

연구센터사업(워터젯을 이용한 난삭재 3D 형상 가공 시스템 기술 개발)”으로 수행된 연구 결과입니다(10048626).

## References

- [1] Park, Y. K., Park, K. S., Kim, H. H., Shin, B. S., Ko, J. S., Ko, J. S., 2008, Evaluation of Efficiency on Glass Precision Machining by using Abrasive Water-jet, 2008 Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 27:7 87-93.
- [2] Hashish, M., 1987, Milling with Abrasive-Waterjets-A Preliminary Investigation, Proceedings of the 4th U.S. Water Jet Conference, 01-20.
- [3] Tobgy, M. E., Ng, E. G., Elbestawi, M. A., 2005, Modelling of Abrasive Water Jet Machining: A New Approach, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 54:1 285-288.
- [4] Kong, M. C., Axinte, D., Voice, W., 2010, Aspects of Material Removal Mechanism in Plain Waterjet Milling on Gamma Titanium Aluminide, Journal of Materials Processing Technology, 210:3 573-584.
- [5] Escobar-Palafox, G. A., Gault, R. S., Ridgway, K., 2012, Characterisation of Abrasive Water-jet Process for Pocket Milling in Inconel 718, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, 404-408.
- [6] Gupta, T. V. K., Ramkumar, J., Puneet Tandon, N., Vyas, S., 2013, Role of Process Parameters on Pocket Milling with Abrasive Water Jet Machining Technique, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 7:10 946-951.
- [7] Billingham, J., Miron, C. B., Axinte, D. A., Kong, M. C., 2013, Mathematical Modelling of Abrasive Water Jet Footprints for Arbitrarily Moving Jets: Part II- Overlapped Single and Multiple Straight Paths, 2013 International Journal of Machine Tools & Manufacture, 68 30-39.
- [8] Alberdi, A., Rivero, A., Lopez de Lacalle, 2011, Experimental Study of the Slot Overlapping and Tool Path Variation Effect in Abrasive Water Jet Milling, Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 133:3 4-8.
- [9] Kong, M. C., Axinte, D., Voice, W., 2001, An Innovative Method to Perform Maskless Plain Waterjet Milling for Pocket Generation: A Case Study in Ti-based Superalloys, International Journal of Machine Tools and Manufacture; 51:7/8 642-648.
- [10] Fowler, G., Pashby, I. R., Shipway, P. H., 2009, The Effect of Particle Hardness and Shape when Abrasive Water Jet Milling Titanium Alloy Ti6Al4V, Wear, 266:7-8 613-620.
- [11] Park, S. S., Kim, H. Y., Ahn, J. H., 2016, Modeling of Depth/Width of Cut for Abrasive Water Jet Milling of Titanium, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 25:1 83-88.