

연삭가공조건에 따른 티타늄 합금의 물성치 향상에 관한 연구 A Study on the Improvement of Physical Properties for Titanium Alloy by the Grinding Conditions

김원일*, 이윤경*, 왕덕현*, 허순**

Won Il Kim*, Yun Kyung Lee*, Duck Hyun Wang*, Soon Heo**

<Abstract>

Ti-6Al-4V alloy can be obtained the stability of organization and product measure, the evaluation of the cutting ability and the mechanical characteristics after the heat treatment of annealing, solution and aging. The difficulty in machining titanium alloy is how treat the heat generated during the process. Because the heat conductivity of titanium alloy is regardfully low, the heat generated during grinding is accumulated in workpiece, and it causes the increasing of grinding wheel grits' wear and makes the ground surface rough. So, these characteristics in grinding of titanium alloy will change the mechanical properties of the titanium alloy. From this study, the mechanical characteristics of annealed one and solution and aging one treated Ti-6Al-4V alloy after grinding was concerned with checking out the bending strength and hardness. For the result, both of bending strength and hardness were increased at the burned area on the surface. Roughness value was remarkably high at the table speed of 10m/min.

**Key Words : Annealing , Solution , Aging , SEM ,
Surface Roughness , Bending Strength**

1. 서론

티타늄 합금은 비교적 새로운 구조용 재료로써 그 용도가 매우 다양해지고 있다. 내식성 재료로서 비료공장의 합성탑, 각종 밸브와 그 기

관, 계측기류, 열교환기 등에 이용되고, 또 석유정제, 석유화학공업관계 기타 합성섬유공업, ClO₃표백장치, 소다공업, 유기약품공업 등에도 이용되어 가고 있다.

Jingxin Ren 등¹⁻⁴⁾은 연구를 통해서 티타늄 연삭시 최적의 슷돌과 가공조건 등을 제시하였

* 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부 교수

* Professor, Division of Mechanical Automation Engineering Kyungnam University, 449 Wolyoungdong, Masan, Kyungnam. 631-701

* 정회원, 경남대 대학원 기계공학과

* Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School Kyungnam University, 449 Wolyoungdong, Masan, Kyungnam. 631-701

다. 슷돌로는 탄화규소계인 GC스틀이 티타늄 합금의 가공시 최적의 슷돌이며, 가공중 연삭열이 심하게 생성되므로 이송을 적게 하여야 한다. 무기염의 수용액은 티타늄의 연삭액으로 효과적인 것으로 알려져 있다. 이에 Dwell 등⁵⁾은 Ti-6Al-4V 합금의 연삭에서 인산염액을 사용하여 역학을 해석하여 산화 알루미늄과 탄화규소로 코팅된 연마 벨트를 적용하면 산화 알루미늄이 빠른 침투와 절삭작용을 원활히 함과, 탄화규소는 연마 벨트의 내구성을 향상시키는 것을 밝혀 냈다.

티타늄의 연삭가공에 있어서의 포인트는 연삭열을 어떻게 하는가에 달려있다. 티타늄은 열전도율이 매우 작기 때문에 연삭열이 가공점에 축적되어 슷돌 입자의 마멸이 크게 되며 그 결과 연삭과열이 발생하여 표면이 거칠게 될 뿐만 아니라, 표면에 균열이 생긴다.⁶⁾ 이러한 특성들로 인해 티타늄합금의 연삭가공시 표면의 균열과 가공시 발생하는 열로 인한 표면의 금속 조직 변화로 그 기계적 특성이 변하여 티타늄합금 제품의 품질에 크게 영향을 미칠 것으로 추정된다.

본 논문에서는 플립처리한 Ti-6Al-4V 합금과 용체화+시효 처리한 Ti-6Al-4V 합금을 테이블 이송속도와 절입깊이를 달리하여 연삭가공한 후 표면 조도기로써 가공면의 거칠기를 측정하였고 주사전자현미경을 사용하여 조직의 미세구조 관찰 및 성분분석을 하였으며 입체현미경으로써 표면상태를 심층 분석하였다. 그런후, 굽힘응력과 경도를 측정하여 기계적 성질의 변화를 관찰하였다.

2. 표면 거칠기 특성

2.1 플립처리한 시편

다음은 플립처리한 Ti-6Al-4V시편의 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 먼저 Fig. 1은 절삭방향으로의 중심선 평균거칠기를 나타낸 것이다. 그래프에 나타난 일반적인 경향은 테이블 이송속도가 증가함에 따라 표면 거칠기 역시 나빠짐을 보여준다. 그림 (a)에서 보면 이송속도가 5m/min 일 때 보다 10m/min 일 때 표면거칠기가 월등히 높아져 15m/min 일 때의 거칠기 값과 근사해 짐을 알 수 있다. 그림 (b)에서는 테이블 이송속도가 10m/min을 넘으면서부터 절입깊이 10 μ m 이하와 15 μ m 이상에서의 표면거칠기 값이

뚜렷한 차이를 나타낸다. 원인은 서론에서 언급한 것과 같이 티타늄의 가공특성을 보면 추정할 수 있다. 티타늄은 열전도율이 매우 낮은 금속이므로 가공시 열이 가공부에 축적되어 가공성을 떨어뜨린다. 이로부터, 테이블 이송속도가 10m/min일 때는 5m/min일 때보다 과부하로 인한 절삭열이 발생하여 표면이 갑자기 나빠진 것이고, 이송속도가 15m/min일 때는 이송속도가 빨라 선가공에서 발생한 열이 직접적으로 영향을 미치지 못한 것이라 추정된다.

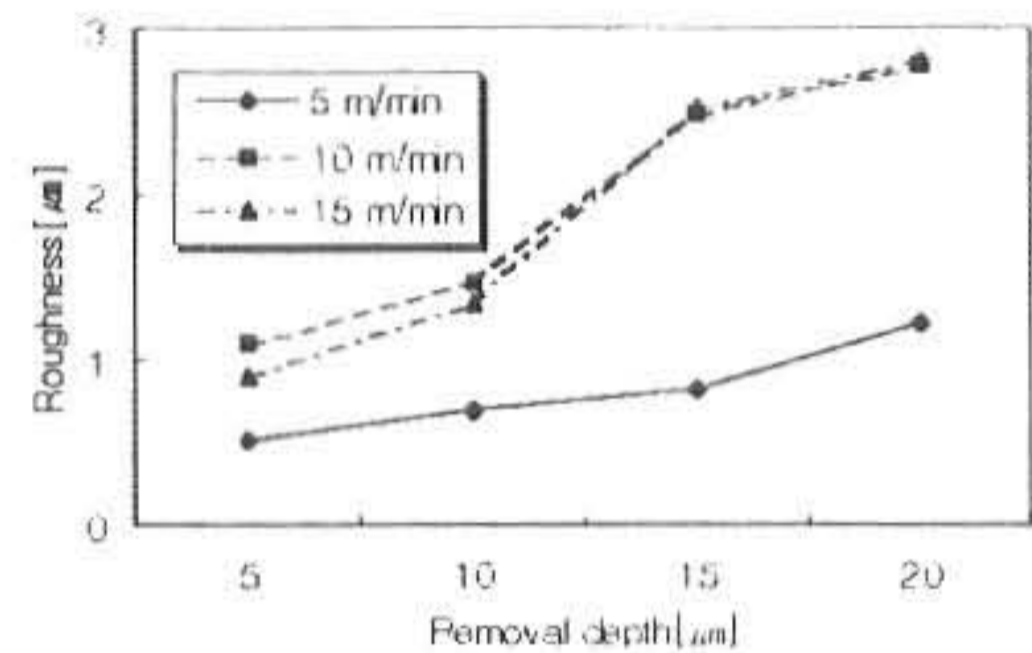


Fig. 1 Centerline average height roughness at cutting direction

Fig. 2는 가공방향에 수직한 방향으로의 중심선 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 테이블 내에서의 전반적인 경향은 Fig. 1과 같이 테이블 이송속도와 절입깊이가 증가 할수록 표면이 나빠지는 것을 보여주고 있지만, 표면 거칠기 값의 차이가 커지면서 가공특성을 좀더 명확히

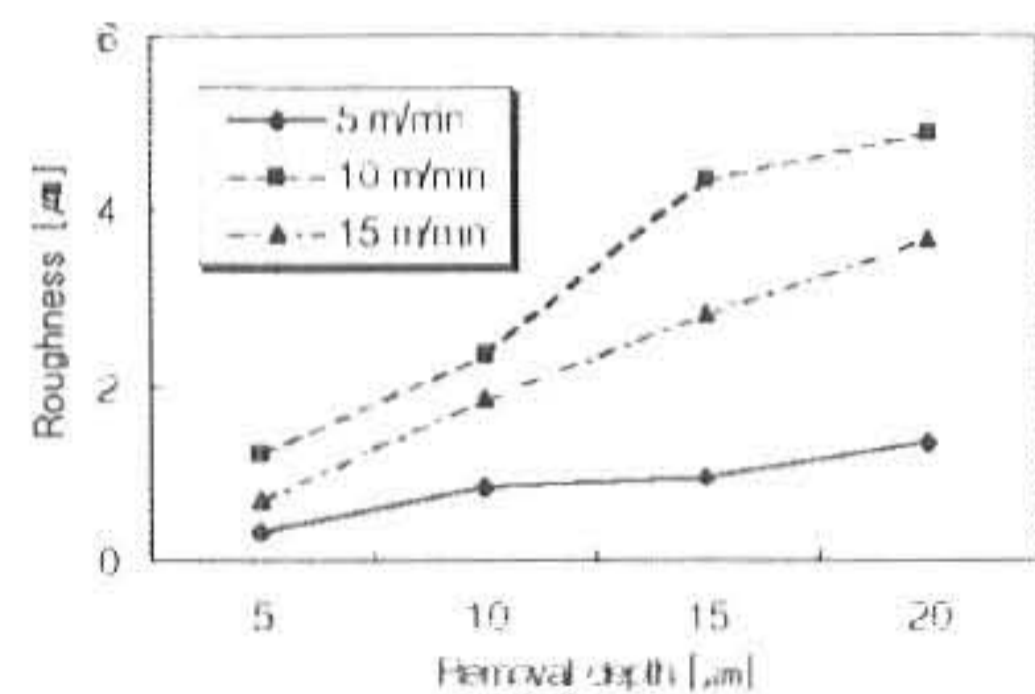


Fig. 2 Centerline average height roughness at vertical direction of cutting direction

보여주고 있다. Fig. 1의 가공방향으로의 거칠기와 비교하면 이송속도 10m/min에서 테이블 이송속도 15m/min 보다 더 표면이 거칠어짐을 알 수 있다. 이 역시, 열의 누적으로 인한 연소 현상의 결과로 보아지며, 특히 그림 (b)를 보면 절입깊이가 10에서 15 μ m으로 증가 할 때, 표면이 심하게 거칠어 진다.

Table 1. Surface roughness along the cutting direction, at 15m/min table speed

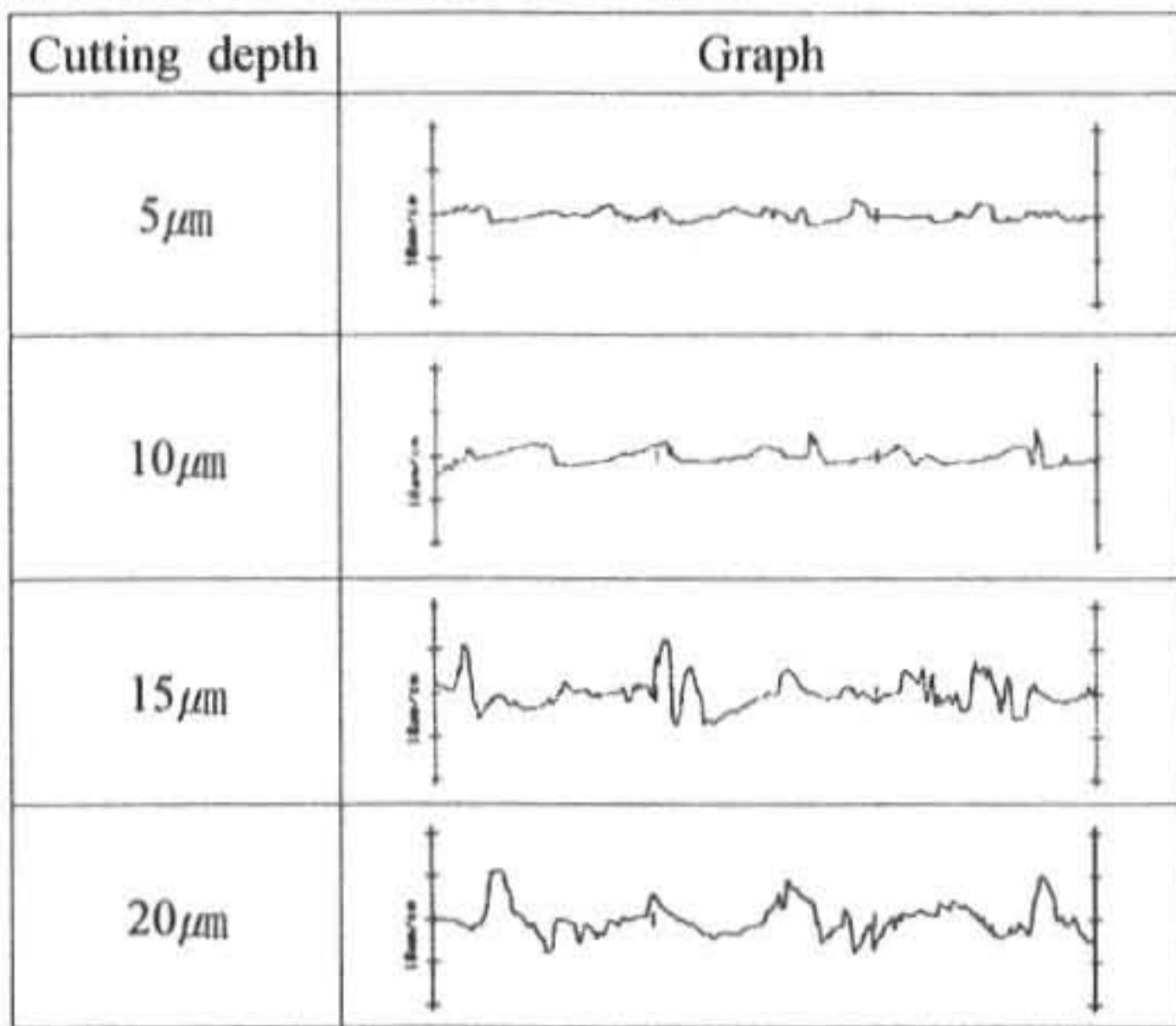


Table 1은 15m/min의 같은 테이블 이송속도에서 절삭 방향의 표면 거칠기를 그래프로 나타낸 것이다. 절입깊이가 5에서 10, 15, 20 μm 으로 증가 할수록 표면이 거칠어짐을 시각적으로 잘 보여준다.

Table 2. Surface roughness along the cutting direction, at 15 μm cutting depth

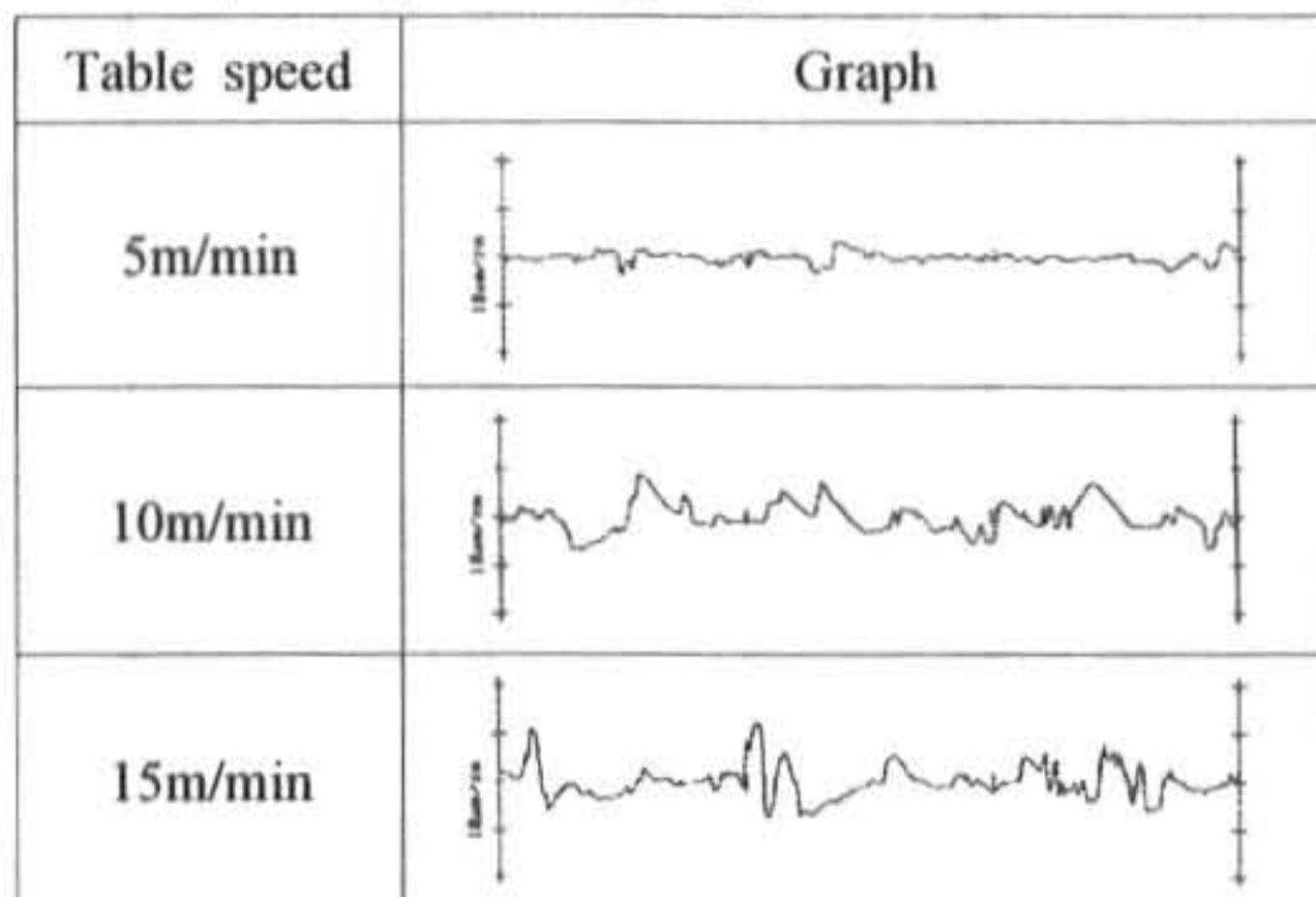


Table 2는 15 μm 의 같은 절입깊이에서 테이블 이송속도에 따른 표면 조도의 변화를 보여준다. 측정 방향은 Table 1과 같이 가공방향이다. 이송속도가 증가함에 따라 면이 거칠어지고 있다. 여기서 주목할 부분은 이송속도가 증가 함에 따라 그래프가 점점 주기성을 띠는 것이다. 이송속도 15m/min의 그래프를 보면 세 개의 높은 피크 군이 뚜렷이 구분된다. 이송속도가 너무 빨라 슛돌 입자가 시편을 깎아내지 못하고 시편이 슛돌에 밀려 물결 모양으로 퇴적된 것으로 본다. 다시 Table 1을 보면 그래프에서 주변에 비해 상하폭이 큰 피크들, 즉 칩의 퇴적층을 역시 확인 할 수 있고, 그 간격이 5 μm , 10 μm , 15 μm , 20 μm 에서 모두 비슷한 간격임을 확인 할 수 있다.

2.2 용체화+시효 처리한 시편

용체화 처리한 후 시효 처리한 Ti-2Al-4V 합금을 테이블 이송속도와 절입깊이를 변화시키면서 연삭가공한 뒤 획득한 표면거칠기값을 Fig. 3, 4에서 비교하여 나타내었다. 먼저, Fig. 3의 (a)는 가공방향의 중심선 평균거칠기값을 각각의 테이블 이송속도에 따라 비교한 것이다. 테이블 이송속도 5m/min에서는 절입깊이의 변화에 따른 표면거칠기의 변화는 거의 없었다. 테이블 이송속도 10과 15m/min에서는 절입깊이가 깊어 질수록 표면이 고아지는 것을 확인할 수 있었다.

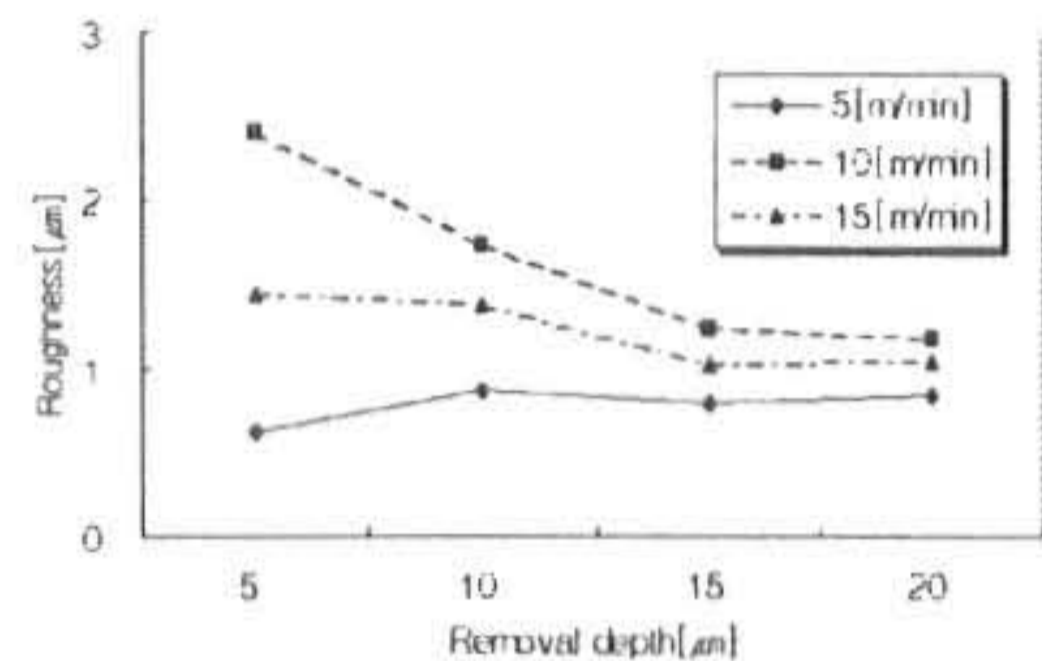


Fig. 3 Centerline average height roughness at cutting direction

Fig. 4는 가공방향에 수직인 방향의 중심선 평균거칠기를 나타내고 있다. 전체적 경향이나 표면 거칠기값은 가공방향에서의 것과 비슷한 결과를 나타내었다. 단, 절입깊이 5 μm 이고 테이블 이송속도가 10m/min일 때의 거칠기 값은 가공방향에서 보다 1 μm 정도 높게 나타났다.

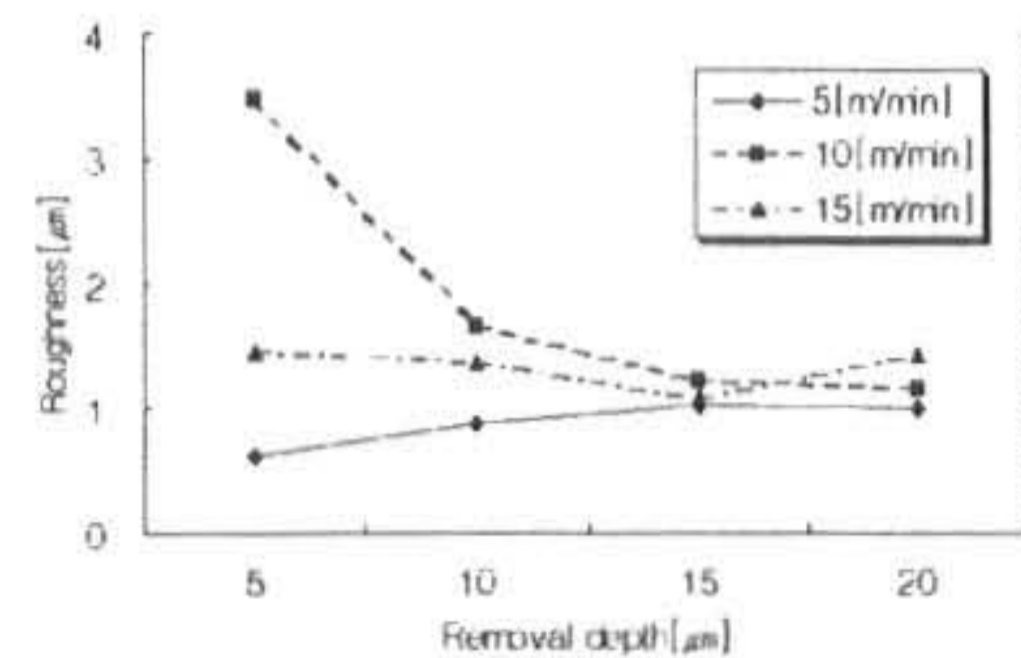


Fig. 4 Centerline average height roughness at vertical direction of cutting direction

Fig. 5는 절입깊이 10 μm 으로 연삭가공한 후, 시편 위를 가공방향으로 9곳을 측정하여 얻은 표면거칠기값의 최대값과 최소값 그리고 평균값을 보여주는 그래프이다. 테이블 이송속도가 증가함에 따라 각 조건에서의 최대값과 최소값의

차이는 커지고, 그 평균값도 역시 증가하였다.

Fig. 6은 테이블 이송속도 10m/min으로 연삭 가공한 후, 가공방향에 수직인 방향으로 표면거칠기 값을 측정하였다. 절입깊이의 증가에 따라 각 조건에서의 최대 거칠기와 최소거칠기의 차이가 불규칙적으로 증가 감소 하였다. 이는 첫 번째 스파크 아웃 후, 두 번째 스파크 아웃시, 첫 번째 절삭시 미삭된 부위를 두 번째 절삭시 가공하면서 생성되는 가공의 면적이 각 조건에서 불규칙적으로 생성되었기 때문이다.

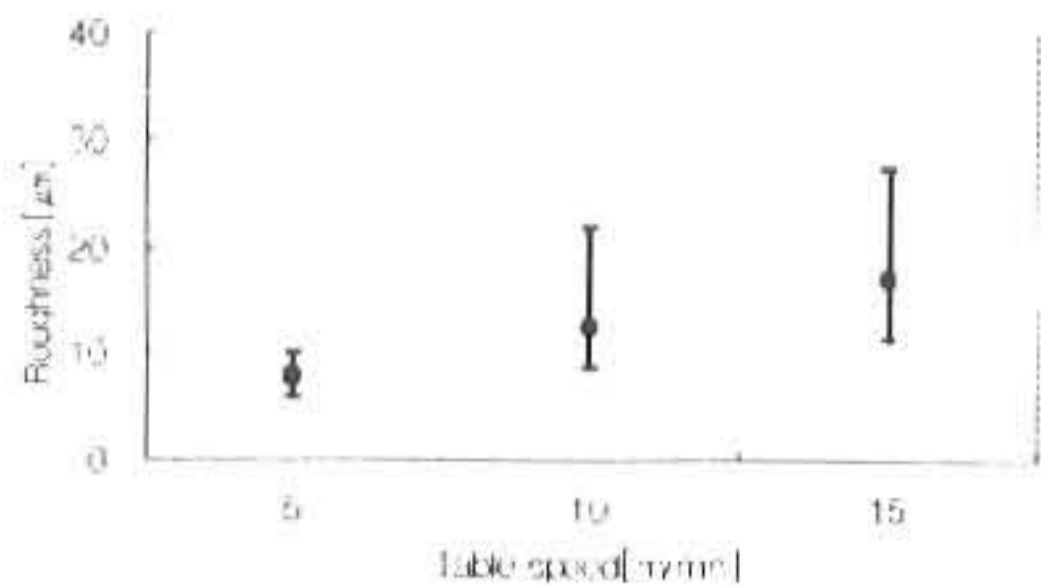


Fig. 5 Maximum height roughness at cutting direction and cutting depth 10µm

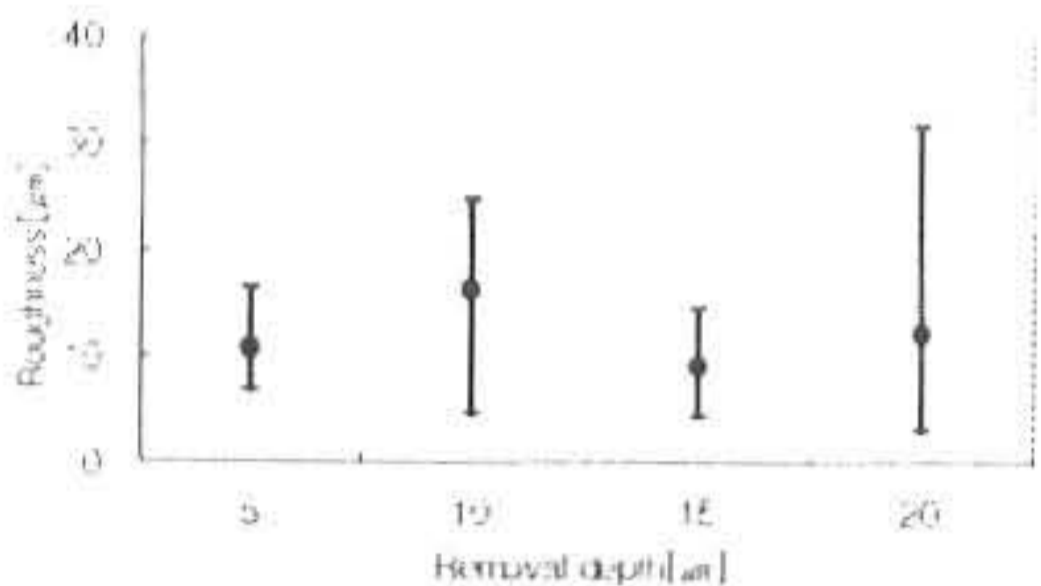


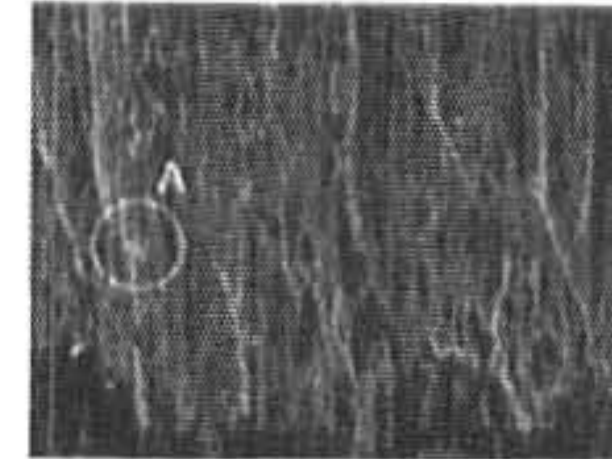
Fig. 6 Maximum height roughness at vertical direction of cutting direction and cutting speed 10m/min

3. 표면 특성

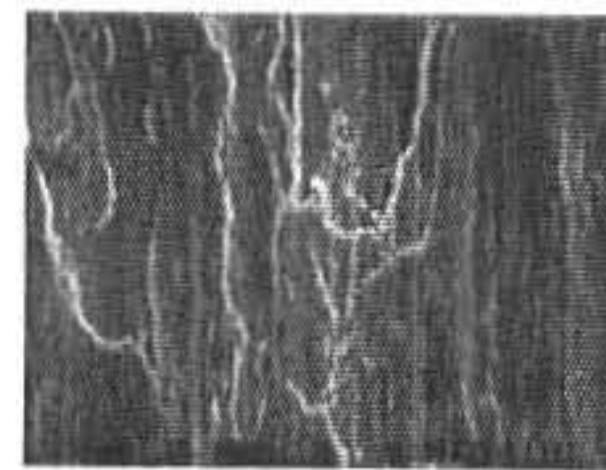
Fig. 7은 용체화 처리한 후 시효처리한 Ti-6Al-4V 합금을 테이블 이송속도 15m/min, 절입깊이 15µm의 조건으로 연삭가공한 것을 주사전자현미경으로 얻은 영상이다. (a)는 배율을 100배로 하여 얻은 영상이고, (b)는 (a)의 동그라미친 부분인 A부분을 배율 500배로 확대한 것이다. (c)는 그것을 다시 1500배의 배율로 확대하여 얻은 영상이다. 이 그림들을 보면 시편의 표피 부분이 계단식으로 차곡차곡 쌓여서 이루어진 것을 볼 수 있다. 이는 연삭깊이가 너무 깊어 연삭 칩이 퇴적되어 쌓인 부분을 나타낸다.

Fig. 8은 용체화 처리한 후 시효처리한 Ti-6Al-4V

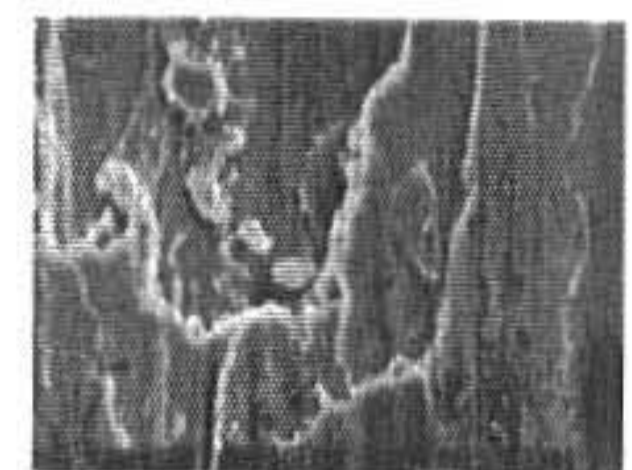
합금을 테이블 이송속도 5m/min, 절입깊이 20µm의 조건으로 연삭가공한 것을 주사전자현미경으로 얻은 영상이다. (a)는 연소가 일어난 부분을 배율 100배로 확대한 모습이다. (b)는 (a)의 동그라미친 A부분을 배율 1000배로 확대한 사진이며, 연소로 인해 용융된 모습이다.



(a) Magnification 100



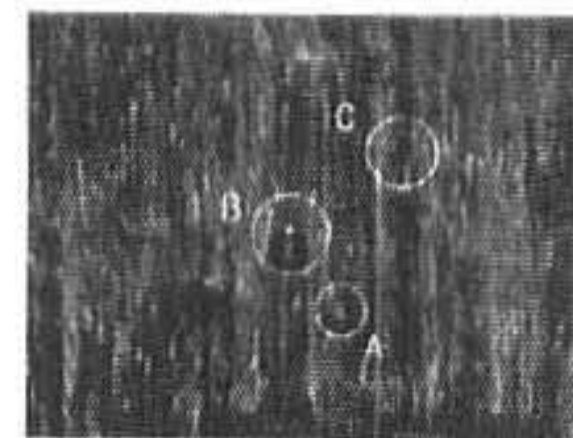
(b) Magnification 500



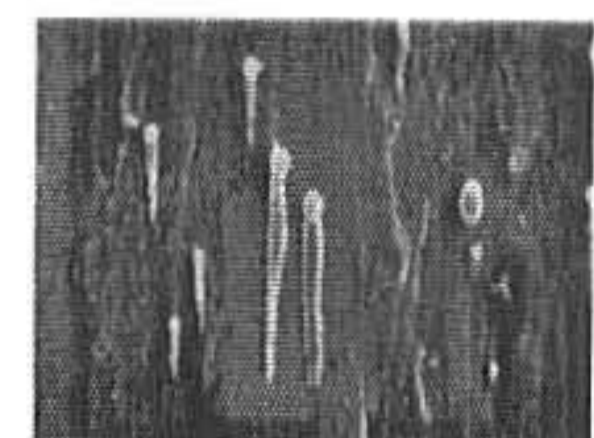
(c) Magnification 1500

Fig. 7 SEM micrographics of the workpieces at table speed 15m/min, cutting depth 15µm

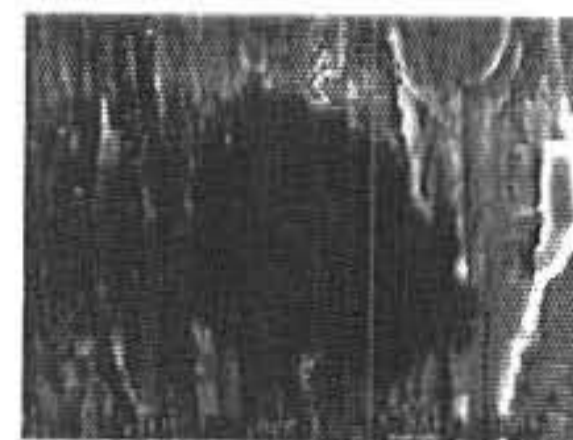
(c)는 (a)의 동그라미 B부분을 2000배의 배율로 확대한 것으로서 연삭유 같은 기름때가 묻은 것이다. (d)는 (a)의 동그라미 C부분을 4000배의 배율로 확대한 것이며, 연삭 슛돌 입자이다.



(a) Mag. 100



(b) Area A (Mag. 1000)



(c) Area B (Mag. 2000)



(d) Area C (Mag. 4000)

Fig. 8 SEM micrographics of the workpieces at table speed 5m/min and cutting depth 20µm

Fig. 9는 Fig. 8 (a)부터 Fig. 8 (d)까지의 네 부분에 대한 성분 분석을 한 그래프이다. (a)를 보면 Ti-6Al-4V 합금을 원소인 티타늄과 알루미늄, 바나듐 등이 검출되었다. 질소(N)는 티타

늄합금의 산화로 인하여 생성된 것이다. (b)는 전체적으로 (a)와 같다. 그러므로, Fig. 8의 (b)부분은 티타늄이 용융된 것이라 할 수 있겠다. (c)는 K, Cl, S, Cu, Zn 등이 검출되는 것으로 봐서, 절삭유 따위의 노폐물이 묻은 것이라 하겠다. (d)는 Si가 대부분을 차지하며, V, Cl, C 등이 검출되는 것으로 보아 탄화 규소계의 GC숫돌 입자라 하겠다.

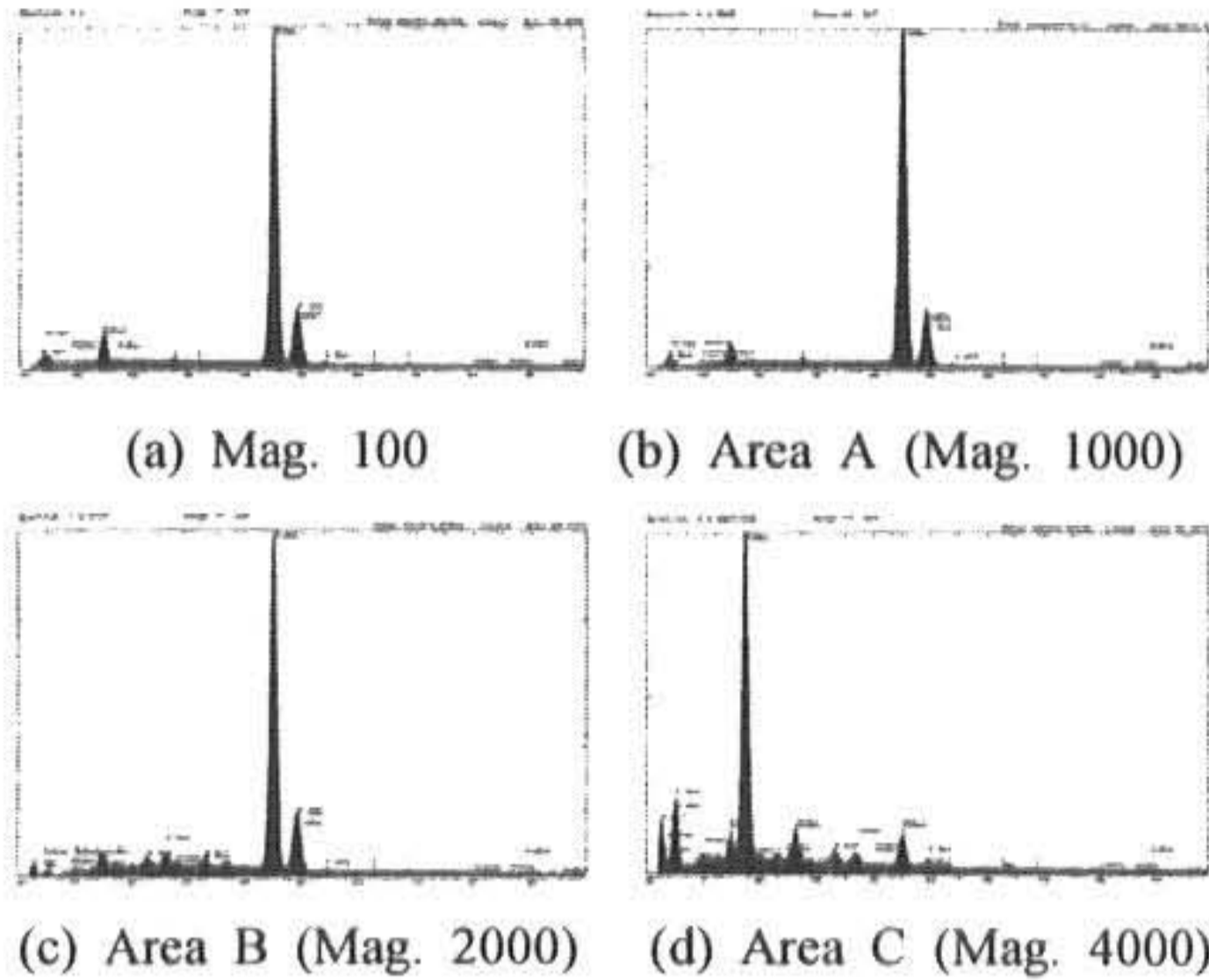


Fig. 9 EDS of the workpieces at table speed 5m/min, cutting depth 20µm

4. 굽힘응력 및 경도 특성

4.1 굽힘응력 특성

Fig. 10은 Ti-6Al-4V 합금의 굽힘응력 변형률 선도이다. 130kg/mm²까지 탄성변형 하다가, 그 범위를 넘어서면서부터 소성변형하여 207kg/mm² 부근에서 최대로 올라갔다가 파단되어 응력이 급속히 떨어지는 것을 보여주고 있다.

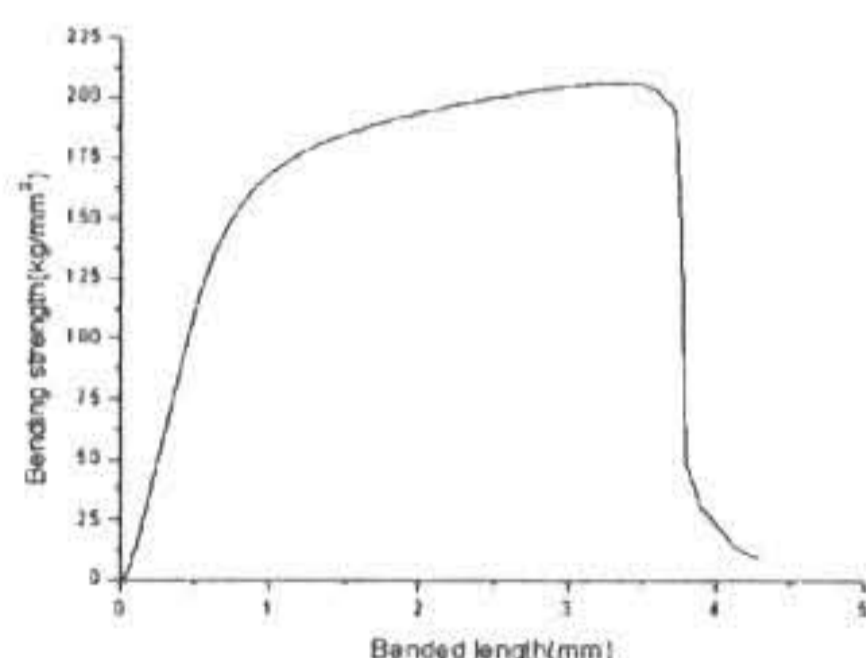


Fig. 10 Bending strength at cutting depth 5µm and table speed 5m/min

다음의 Fig. 11은 테이블 이송속도 5와 10m/min에서의 굽힘응력의 변화를 보여주고 있다. 5m/min에서는 절입깊이가 증가할 수록 굽힘응력 값이

증가하였고, 10m/min에서는 절입깊이가 15에서 20µm으로 증가할 때 굽힘응력 값이 떨어졌다.

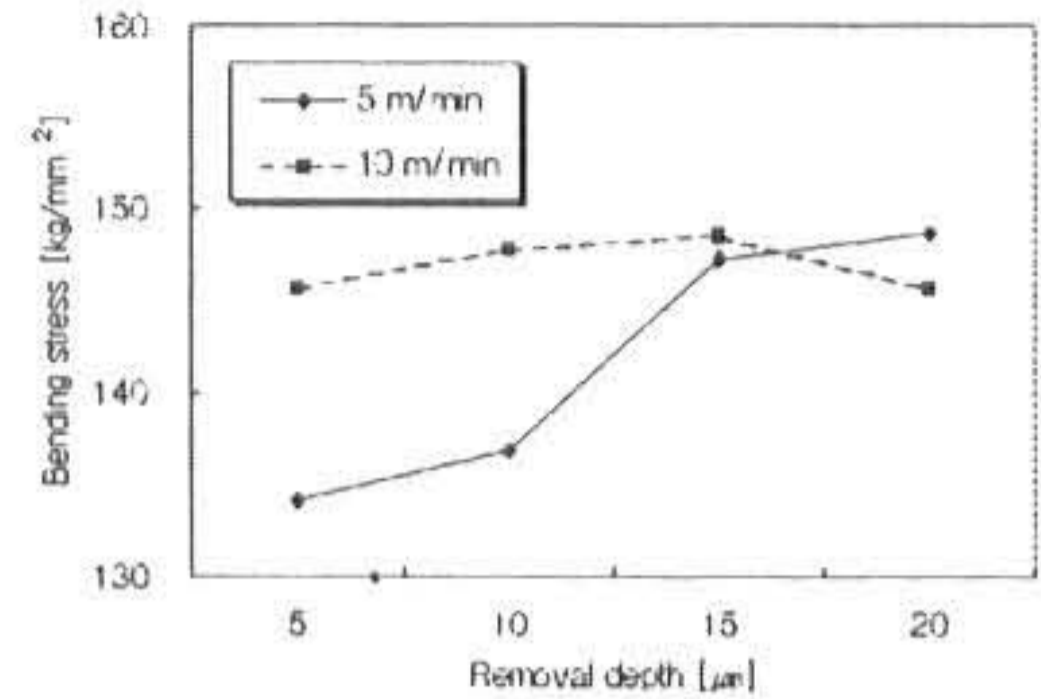


Fig. 11 Bending stress graph according to the change of removal depth

4.2 경도 특성

Fig. 12은 테이블 이송속도 5와 10m/min에서의 절입깊이에 따른 경도 값의 변화를 보여주고 있다. 양 쪽 이송속도 모두, 절입깊이가 증가함에 따라 경도 값이 상승하다가 절입깊이가 20µm에 이르렀을 때 경도 값이 다시 떨어졌다. 앞 절의 굽힘응력 값의 변화와 비교해 볼 때 그 경향이 상당히 비슷한 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인은 절입깊이가 증가함으로써 가공시 열발생이 심해져 이것이 시편의 표면을 열경화시켰으리라 본다.

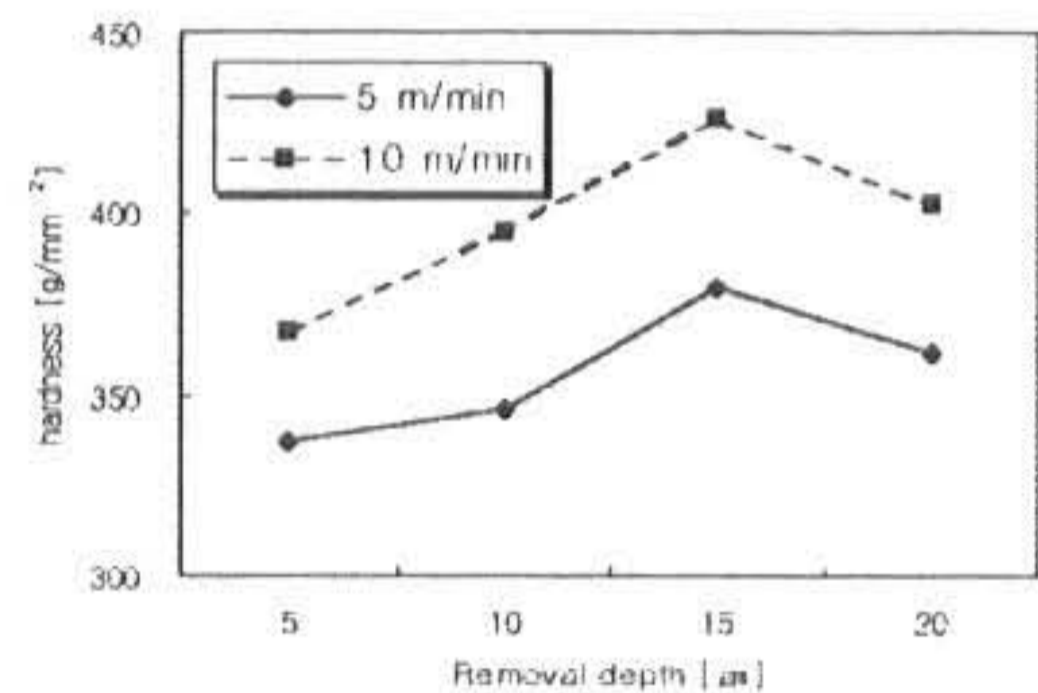


Fig. 12 Hardness graph according to the change of removal depth

5. 결론

본 연구에서는 풀림치리(annealing)와 용체화+시효치리한 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 테이블 이송속도와 절입깊이를 달리하여 연삭가공한 것을 표면조도기와 열전계 방사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 표면을 시각적 수치적으로 분석하였고, 굽힘응력 시험기와 경도 측정기를 이용하여 각 조건에서의 시편의 기계적 성질을 비교하였다.

1. 연삭깊이와 이송속도가 증가함에 따라 표면거칠기는 나빠지는 경향을 보였다. 단, 이송속도가 10m/s일 때, 이송속도가 15m/s였을 때 보다 표면 거칠기가 나빴다. 이는 열전도율이 매우 낮은 티타늄의 특성 때문으로 연삭열이 누적되어 시편이 타버린 결과이다.

2. 테이블의 이송속도를 높이면 슷돌이 소재를 제때 제거하지 못 하여 시편이 슷돌에 밀려 물결 모양을 형성하고, 그 물결문양의 간격은 이송속도의 증가에 따라 멀어진다. 절삭깊이를 깊이하면 재료가 가공방향으로 깊이 패이고 연소되기 쉽다.

3. 절입깊이가 증가할 수록 굽힘응력은 증가한다. 연소가 발생한 부분의 경도는 그렇지 못한 부분보다 경도가 높았다. 절삭시 발생하는 열로 인해 시편이 경화된 것으로 추정된다.

후 기

본 논문은 2000년도 경남대학교 부설연구소 연구비 지원에 의하여 쓰여진 것임.

참고문헌

- 1) Kumar, K. V. : Grinding titanium Aerospace Engineering (Warrendale, Pennsylvania), Vol.11, No.9, pp.17-19, (1991)
- 2) Jingxin, R., Dingan, H. : Improvement of titanium alloy grindability, Journal of Northwestern Polytechnical University, Vol.7, No.4, pp.355-363, (1989)
- 3) Matyukha, P. D., Tsokur, V. P. : Efficiency of a diamond wheel in various methods of grinding titanium alloys, Soviet Journal of Superhard Materials, Vol.10, No.1, pp.67-71, (1998)
- 4) Sayutin, G. I., Tatarinov, A. P. : Selecting a wheel material for grinding titanium alloy, Soviet Engineering Research, Vol.5, No.7, pp.75-77, (1985)
- 5) Duwell, E. J., Cosmano, R. J. : Grinding titanium with coated abrasives under an aqueous solution of inorganic phosphate salts. ASME, Vol.16, pp.251-259, (1985) "Grinding Technology", Society of Manufacturing E

(2001년 5월3일 접수, 2001년 8월22일 채택)