

타이타늄 파이프의 내면 자기연마 가공에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Internal-Face Magnetic Abrasive Finishing for Titanium Pipe

이여해¹, 문상돈^{2,✉}, 김영환², 박원기¹, 양균의¹
Li Hai Li¹, Sang Don Mun^{2,✉}, Young Whan Kim², Won Ki Park¹ and Gyun Eui Yang¹

¹ 전북대학교 기계공학과 (Department Mechanical Engineering, Chonbuk National Univ.)

² 전북대학교 기계설계공학부 (Faculty of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National Univ.)

✉ Corresponding author: msd@jbnu.ac.kr, Tel: 063-270-4762

Manuscript received: 2010.9.20 / Revised: 2011.1.12 / Accepted: 2011.3.29

Although Titanium material has superior properties, it belongs to difficult-to-machine materials. The present research applies magnetic abrasive finishing to precision machining of internal-face of titanium pipes, and analyzed & assessed the influence of grinding conditions on magnetic abrasive effects through the removed amount and surface roughness of materials. There was the influence on grinding properties according to change of rotational speed, a total input of mixed powder and an input of grinding liquid, and when the total input, rotational speed and ratio of electrolytic iron versus magnetic abrasives are 8g and 1000rpm, it was most advantageous in aspects of surface roughness and material removal amount, and the grinding liquid remarkably improved the surface roughness and material removal amount only with addition of trace amounts of light oil rather than dry machining conditions. And a result of considering the influence on grinding properties by using an inert gas (Argon gas) for improving grinding properties of the internal-face of titanium pipe, the present research has obtained improvement effects in the removal amount and surface roughness through utilization of an inert gas.

Key Words: Magnetic Abrasive Finishing (자기연마), Mixed Particle (혼합입자), Removal Amount (연마량), Wet Machining (습삭가공).

1. 서론

타이타늄이 본격적으로 생산되기 시작된 지 약 50 년이 경과된 지금 타이타늄은 항공우주, 화학공업 등의 분야 뿐만 아니라 안경, 시계, 골프 용구 등 생활에 밀접한 분야에도 다양하게 사용되어 일반인들에게도 잘 알려지고 있다.¹ 타이타늄은 원료로 사용되는 산화 타이타늄이 지각 중에 다량 존재하고 가벼우면서도 강하고 내식성이 좋은 특징을 지니고 있다. 그러나 강도가 높아 공구의 파손과 칩핑 등이 발생하기 쉽고, 탄성계수가 작아 절

삭력에 의한 변형으로 정밀가공이 어려운 금속중의 하나이다. 그리고 화학적 활성화가 크고 가공과정 중 온도상승으로 공구와 반응하기 쉽다. 특히 표면을 처리하는 과정에서 열전도율이 작기 때문에 가공으로 인한 열이 가공부에 축적되어 공구마모가 발생하고 표면이 거칠게 될 뿐만 아니라, 표면에 균열이 발생할 수 있다.²⁻⁵ 이와 같은 이유들로 타이타늄은 고품위 정밀가공면을 얻는 것이 어려운 재료의 하나로 분류되어 정밀가공에 대한 많은 연구들이 수행되고 있지만 주로 절삭 및 선삭에 집중되어 있다.⁶⁻⁸ 그러나 표면가공에 대한 연

구는 상대적으로 미미하여, 정밀가공을 위한 다양한 기술들과 장비들에 대한 연구가 더욱 집중적으로 필요한 실정이다.^{9,11}

그 중 자기연마법은 자성입자의 자기화 성질과 연마재의 연마특성을 이용한 방법으로 자기 유도자에 자기장 형성 시 자기력선의 응집현상으로 자성연마입자들이 브러시 역할을 하게 되어 연마효과가 발생한다. 이와 같은 연마법은 공작물의 형상에 구속되지 않고 제품의 형상 정밀도 보다는 표면상태를 양호하게 하는 데 매우 효과적이기 때문에 최근에 초정밀을 요구하는 가공에 많이 응용되고 있다. 그리고 기존의 연삭가공과 같은 전통적인 가공방법으로는 파이프 내면과 같은 소재의 특정 부위에 대하여서는 연삭하기가 힘들지만 자성연마입자를 공구로 공작물의 표면을 압착, 연마하는 자기연마가공은 생성된 자기 브러시의 유연한 특징 때문에 공작물의 형상에 구속되지 않는다. 그리고 파이프 내면과 같이 연마하기 어려운 부분을 연마할 수 있는 장점을 지니고 있어 부품의 형상에 따라 맞춤형 장치들이 개발되어 비철금속부품, 플라스틱, 세라믹과 같은 성형품의 미소 버(burr) 제거나 연마에도 적용되고 있다.^{12,13}

타이타늄 파이프는 인력 부족 및 에너지 절감 시대에 스테인리스강보다 우수한 내식성을 가지는 특성을 이용하여 특히 화학, 석유분야에서는 부식성이 강한 고순도의 액체나 기체를 운송하는 배관 용도로 사용되고 있다. 이러한 고순도의 액체나 기체를 운송하는 배관은 내면의 가공정밀도가 매우 중요하며 운송, 저장 중에 오염이 발생하면 안 된다. 내면의 표면거칠기가 좋지 않으면 내면의 미세한 요철 면에 오염물이 축적되어 부식이 발생될 수 있으며 나아가서는 균열의 원인이 될 수 있다. 특히 원자력과 관련된 산업에서는 방사성 물질이 유출될 시 큰 사고를 유발할 수 있다. 따라서 이러한 배관에 사용되는 파이프의 내면에 오염물질의 잔류를 방지하기 위하여 내면의 경면화 가공은 필수적이다.^{14,17}

따라서 본 연구에서는 난삭재인 타이타늄 파이프 내면의 고품위 정밀가공면을 얻기 위하여 자기연마법을 적용하고 연마속도, 연마액의 첨가량, 연마재의 투입량 등 여러 가지 연마조건의 변화에 따른 연마량 및 표면거칠기를 측정하여 연마조건이 표면품질에 미치는 영향을 분석하고 최상의 연마 면을 얻을 수 있는 최적의 연마조건 설정에 있어서 객관적 자료를 확보하고자 한다. 그리고 질소와 산소에 활성이 강한 순 타이타늄이 공기 중

에 노출되면 표면에 강한 산화층이 형성되어 연마의 어려움이 더 한층 심화되며 자기연마와 같은 미량의 가공으로 표면을 개선하는 연마작업에서는 그 영향이 있다고 생각되어 연마과정 중 파이프 내면에 아르곤 가스를 투입하여 연마효율을 향상시키고 그 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험장비 및 방법

2.1 실험 장치 및 시편

본 실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 1 과 같이 주축의 회전수가 0~2500 rpm 인 소형 선반을 개량한 것이다. 연마효율을 증대시키기 위하여 축 방향 왕복장치를 추가하였으며, 불활성기체 투입으로 연마특성을 파악하기 위하여 아르곤 가스 투입 장치를 추가하였다. 자기력 발생장치는 영구자석을 이용하였으며, 자극 선단부의 형상은 Fig. 2 와 같이 자기장을 중앙으로 집중시키기 위하여 위하에 끝이 뾰족한 형상으로 제작하였으며 자극배치는 자극 3 개(N-S-N)를 이용하여 N 극을 양쪽에 배치하고 중앙에 S 극을 배치하였다. 그리고 축 방향 왕복 직선운동을 증가시키기 위하여 영구자석을 스크루 식 왕복이송테이블위에 장착하여 파이프를 따라서 움직일 수 있도록 하였으며, 연마과정 중 공기차단의 목적으로 파이프 내면에 아르곤 가스를 투입하는 장치를 추가하였다.

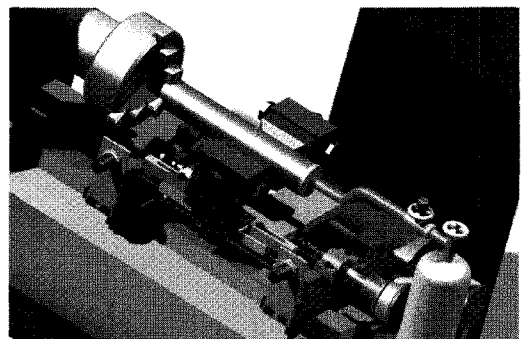


Fig. 1 Schematic of magnetic abrasive machine

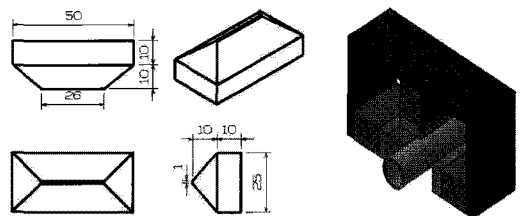


Fig. 2 Schematic of magnetic pole shape and generator

Fig. 3 과 Fig. 4 는 실험에 사용된 산화알루미늄이 부착된 자성연마입자와 전해철분의 형상을 보여준다. 실험에 사용된 시편은 열교환기에 사용되는 타이타늄 파이프이고 Fig. 5 와 같은 치수로 제작되었다. 파이프 내면의 초기 표면 거칠기 Ra 값은 0.35~0.45 μm 이고 화학적 조성성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2 와 같다.

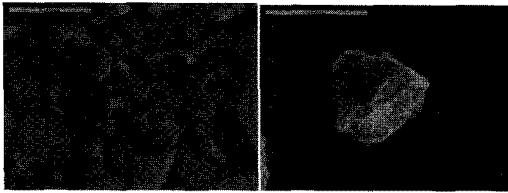


Fig. 3 Magnetic abrasive

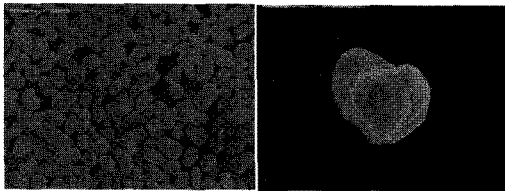


Fig. 4 Iron particle

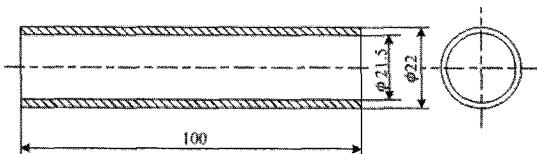


Fig. 5 Geometry and dimension of specimen

Table 1 Chemical composition of specimen

Workpiece material	Chemical compositions (MAX. %)				
	N	C	H	Fe	O
Titanium	0.03	0.1	0.015	0.3	0.25

Table 2 Mechanical properties of Titanium pipe

Workpiece material	Ti
Tensile strength (MPa Min. 240)	450
Yield strength (MPa)	275-450
Elongation (% min)	20
Hardness (HV)	160-200
Specific gravity (g/cm^3)	4.51
Young's modulus (GPa)	108.5
Poisson's ratio	0.34
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	1668
Thermal conduction rate($\text{cal}/\text{cm, sec, }^{\circ}\text{C}$)	0.04

2.2 실험방법

본 실험에서 자기연마법을 이용하여 비자성 타이타늄 파이프의 내면을 연마가공하는 방법은 자성연마제와 강자성체인 전해철분을 기계적으로 혼합하여 파이프 내면에 충전하고, 파이프 외벽에 자극을 두어 연마제에 자력을 부여하여 파이프 내부에 연마압력을 발생시켜 브러시를 형성한다. 파이프를 회전시켜 상대 운동을 일으킴으로써 초정밀 연마 가공이 진행된다. 혼합입자의 총 투입량, 연마속도, 연마액의 투입량 및 아르곤 가스 사용 미사용 조건에서 표면거칠기와 연마량 실험을 통한 자기연마특성을 알아보기 위해 실험장치를 구성하고 측정된 데이터를 통해 가공 특성을 확인하였다. 실시간 연마과정을 체크하기 위하여 2분 간격으로 총 10분 연마를 실시하면서 표면거칠기와 연마량을 측정하였다. 본 실험에서는 자기연마 전후 파이프 내면에 자성연마제의 잔류에 의한 측정오차를 줄이기 위하여 2분씩 자기연마를 진행 후 파이프를 세척, 건조시킨 후 고정밀 분석용 전자저울(AUW220D, SHIMADZU)을 이용하여 가공 전후의 무게차를 측정하여 연마량을 계산하였으며, 접촉식 표면거칠기 측정기(SJ400, MITUTOYO)와 광학식 형상측정기(VEECO WYKO NT-1100)를 이용하여 표면거칠기 값을 측정하였다. Table 3 은 본 실험에서의 구체적인 실험조건이다.

Table 3 Experimental conditions

Workpiece	Ti pipe $\phi 22 \times 0.5 \text{ t} \times 100$
Magnetic abrasives	Iron particles(#200), magnetic abrasives(#320)
Mixed ratio	1:3 (Magnetic abrasives : Iron particles)
Supply amount (g)	4, 6, 8, 10
Machining fluid (ml)	Light oil 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Magnetic pole	Fe-Nd-B permanent magnetic $25 \times 25 \times 50 \text{ mm}$ Arrangement N-S-N
Argon gas	Used, Unused
Rotational speed (RPM)	100, 400, 700, 1000, 1300
Magnetic density (Tesla)	0.35
Processing time (min)	10
Finishing gap (mm)	1
Frequency (Hz)	1.1
Amplitude (mm)	5

3. 실험결과 및 분석

3.1 총 투입량에 따른 연마특성

연마재의 투입량의 변화에 따른 가공특성을 파악하기 위하여 총 투입량을 각각 4, 6, 8, 10g 으로 공급하고 연마속도는 1000rpm, 연마액(Light oil)은 0.4 ml를 첨가하였다. Fig. 6 은 혼합입자의 총 투입량 변화에 따른 연마량과 가공시간과의 관계이다. 총 투입량에 따른 연마량은 전체적으로 보면 0~4 분 사에서 초기 연마량은 투입량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나 투입량이 10g 일 때는 4 분 후에는 연마량의 기울기가 점차 감소하는 경향이 있었다. 이는 과도한 분말의 사용은 절삭거동을 저해하는 결과를 초래하기 때문이다. 실험을 통하여 8g 의 투입량 일 때 지속적으로 현저한 질량 감소를 확인 할 수 있었는데 이는 총 투입량이 8g 일때 타이타늄 파이프 내면가공에서 가장 효과적임을 알 수 있다. 그리고 Fig. 7 은 표면 거칠기(Ra)의 변화이다. 혼합분말의 총 투입량과 상관없이 초기 0~2 분 사이는 초기의 요철제거로 인하여 가공면의 표면거칠기 값은 모두 급격히 개선되었으며 혼합분말의 투입량이 8g 일 때 4 분 부근에서 표면거칠기 값은 0.1 μm 이하로 개선되었으며, 6g 일 때는 8 분 부근에서 0.1 μm 이하로 개선되었으며, 4g 과 10g 일 때는 가공시간이 길어져도 0.1 μm 이하로는 개선되지 않았다. 가공성 측면에서는 시간이 길어지면 재료제거량은 점차 많아지지만 효율적으로 정밀가공면을 얻기 위하여 표면거칠기를 고려하면 혼합분말의 투입량은 8g 으로 6 분 정도가 적당하다.

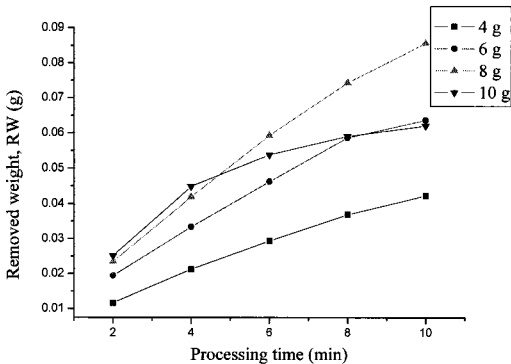


Fig. 6 Metal removal according to supply amount

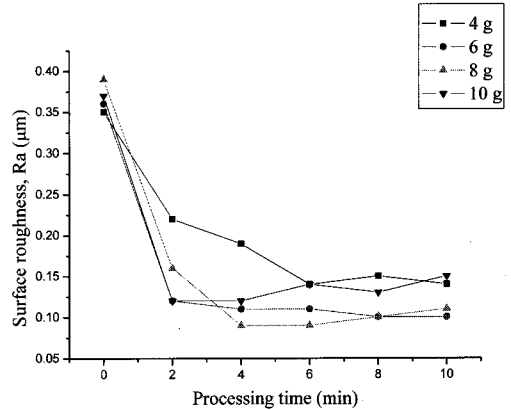


Fig. 7 Surface roughness (Ra) according to supply amount

3.2 연마액의 투입량에 따른 연마특성

자기연마에서 연마액은 재료 제거율이나 표면정밀도 개선 면에서 모두 중요한 역할을 한다. 따라서 연마액의 투입량에 따른 타이타늄 파이프 내면의 표면거칠기와 연마량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연마속도는 1000rpm, 총 투입량은 8g 으로 하였으며, 연마액의 투입량은 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ml로 변화를 주면서 실험을 실시하였다.

Fig. 8 은 연마액의 투입량 변화에 따른 타이타늄 파이프 내면의 연마량의 변화를 보여준다. 연마액의 투입으로 인하여 건식(dry)조건에서보다 연마량은 현저히 증가하였으며 0.4 ml 일 때 지속적인 연마량이 가장 우수하였다. 그리고 연마액을 미량만 투입하여도 연마량은 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 0.2 ml의 투입만으로도 건식조건보다 우수한 향상 효과를 얻었고 0~4 분 사이의 초기 단계에서는 0.4 ml를 투입하였을 때와 거의 같은 연마량을 얻었지만 연마가 진행됨에 따라 연마액의 휘발 등으로 인한 소모로 6 분 후에는 연마량이 급격히 하락하는 경향이 있었다. 연마액을 0.6, 0.8 ml 투입하였을 때는 건식조건에서보다 연마량이 대폭 증가하였지만 0.4 ml를 투입하였을 때보다 초기 연마량과 시간당 제거량이 적음을 알 수 있다. 이는 연마액의 과도한 투입은 연마과정 중 연마액의 유회 역할이 증가하여 연마량에 영향을 미쳤다고 판단된다.

한편 자기연마에서 습식연마가 건식연마보다 재료제거율이나 표면정밀도 측면에서 모두 우수하

여 단순히 유회과 냉각 작용만으로는 해석하기에는 어려움이 있다. 연마액의 투입으로 자기연마재 사이에는 입자의 돌출부위가 서로 접촉하는 것 뿐만 아니라 자기입자의 표면전체가 점성이 있는 액체에 포위되어 있다. 연마입자가 회전하는 추세가 있으면 입자 표면에 있는 액체는 이 상대운동을 저해하는 감쇠력(damping force)이 발생하여 자기입자가 받은 접선방향의 분력을 감소하는 역할을 하여 자기입자의 회전운동 대신 미끄럼운동 혹은 절삭상태로 변하게 한다. 이 때문에 습식조건에서 재료의 제거율은 상승한다.

연마액의 투입량에 변화를 주면서 자기연마를 수행하여 타이타늄 파이프 내면의 표면거칠기 값의 변화를 Fig. 9 에 나타내었다. 건식조건에서는 자기연마 후 타이타늄 파이프 내면의 표면거칠기의 개선은 미미하였으며 연마액의 투입으로 인하여 표면거칠기는 우수한 개선 효과가 있음을 알 수 있다. 연마액의 투입량이 0.4 ml를 제외하고는

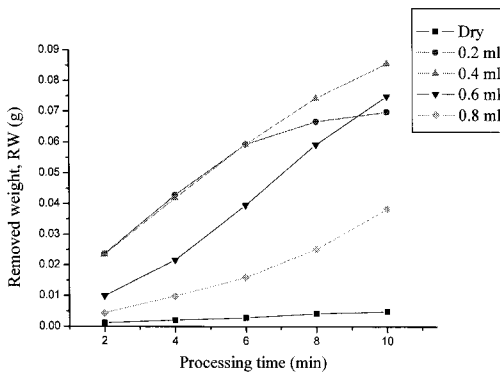


Fig. 8 Metal removal according to processing condition

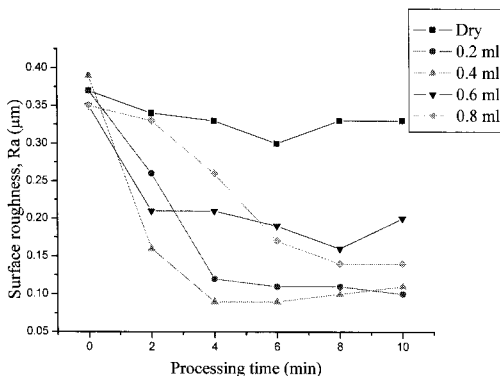


Fig. 9 Surface roughness (Ra) according to processing condition

표면거칠기는 값은 0.1 μm 이하로 개선되지 않았다. 그리고 0.4 ml에서는 4 분정도에서 0.1 μm 이하로 개선되었으며 가공시간이 길어짐에 따라 8 분후에는 표면거칠기 값이 상승하였다. 이는 가공초기에 요철부분의 산봉우리가 깎아지고 가공시간이 길어짐에 따라 연마액이 요철의 오목부분에 채워져 있는 입자 등을 씻어냄으로써 연마재에 의하여 골이 연삭되고 점차 깊어지고 표면거칠기 값이 상승한 것으로 판단된다. 그리고 과대한 연마액의 투입은 연마과정중 연마액의 유회작용이 커지고 가공표면에 형성한 유막으로 인하여 미소절삭효과가 낮아져 재료제거량이 줄어들고 표면거칠기의 개선에도 영향이 미쳤다고 생각된다. 표면거칠기 측면에서 0.4 ml의 투입량이 가장 우수하였는데 이는 재료제거량 측면의 결과와 같다. 따라서 연마액의 투입량은 0.4 ml가 최적임을 알 수 있고, 가공시간은 표면거칠기 측면에서 고려하면 6 분정도가 최적임을 알 수 있다.

3.3 회전속도에 따른 연마특성

회전속도의 변화에 따른 파이프 내면의 표면거칠기와 연마량의 변화를 파악하기 위하여 투입량을 8g 으로 하였으며, 연마액은 0.4 ml를 투입하였다. 그리고 회전속도는 100~1300rpm 사이에서 300rpm 씩 간격을 두면서 실험을 실시하였다.

Fig. 10 은 회전속도의 변화에 따른 가공시간과 연마량과의 관계이다. 회전속도가 증가함에 따라 연마량은 증가하는 경향이 있었으며 1300rpm 에서 0~6 분 사이에 초기 제거량이 가장 많았으며 6 분 이후에는 기율기에서 알 수 있듯이 시간당 연마량이 감소하였다. 1000rpm 에서는 초기 제거량이 1300rpm 에서보다 적었지만 시간당 연마량이 비교적 일정하였다.

회전속도의 변화에 따른 표면거칠기 값의 변화를 Fig. 11 에 나타내었다. 1300rpm 을 제외하고 100~1000rpm 에서는 회전속도가 증가함에 따라 타이타늄 파이프 내면의 표면거칠기는 점차 향상하는 경향이 있었으며 이는 연마가공 속도가 증가할수록 가공효율이 증가하므로 표면거칠기가 개선되었다. 그러나 일정속도 이상(1300rpm)에서는 과절삭으로 인해 스크래치가 보다 깊기 때문에 표면거칠기가 개선되지 않았다고 판단된다. 회전속도가 증가함에 따라 100~1000rpm 사이에서는 재료제거량이 증가함에 따라 표면거칠기가 선형적으로 개선되다가 1300rpm 에서는 재료제거량이 증가했

지만 표면거칠기가 보다 개선되지 않은 원인은 가공초기에 요철부분의 비교적 높은 산봉우리들이 신속히 깎아지고 오목부분의 골에 채워져있던 연마입자들이 보다 빠른 속도로 밀려나가고 또 채워지는 과정을 반복하여 골이 깊어짐으로써 가공 초기부터 재료제거량은 많지만 표면거칠기는 더는 개선되지 않았다고 판단된다. 그리고 전반적으로 가공이 진행됨에 따라 1000rpm 을 제외하고는 Ra 값은 0.1 μm 이하로 개선되지 않았으며, 4 분정도에서 최소값을 가지고 더는 개선되지 않았으며 6 분정도까지 지속적으로 최소값을 유지하다가 8 분후에는 악화되었다. 가공성 측면에서 고려하면 재료제거량이 많은 높은 회전속도가 좋지만, 표면거칠기를 고려하면 빠른 시간내에 정밀가공면을 얻을 수 있는 1000rpm 으로 6 분정도가 적당하다.

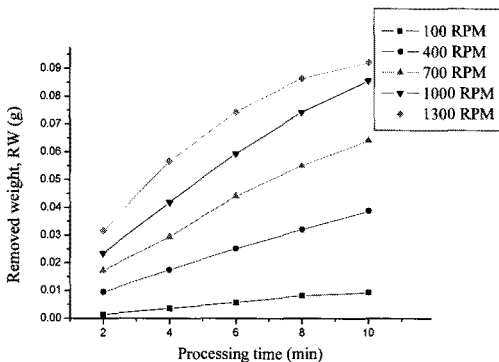


Fig. 10 Metal removal according to rotation speed

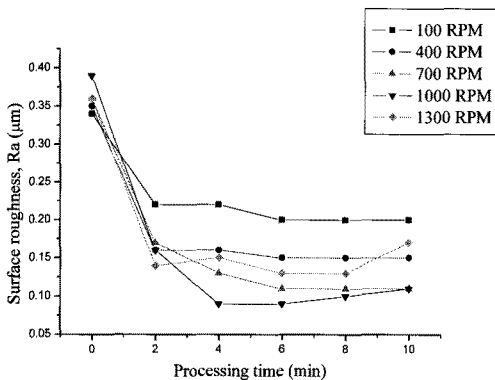


Fig. 11 Surface roughness (Ra) according to rotation speed

3.4 불활성기체 투입에 따른 연마특성

타이타늄 재료가 내마모성 등 장점을 가지고 있는 원인 중 하나는 공기 중의 산소, 질소 등에 활발히 타이타늄이 반응하는 성질때문에 순수 타이타늄 재료가 공기 중에 노출되는 즉시 산소, 질소와 반응하여 극히 얇은 산화막이 생성되어 그 산화막에 의하여 강한 내마모성을 가지게 된다. 하지만 극히 적은 양의 재료를 제거하면서 표면정밀도를 개선시키는 자기연마 방식에서는 연마가공 과정 중 산화막의 생성은 표면개선에 악영향이 미칠 것으로 예상되어, 산화막의 생성을 방지하기 위하여 공기를 차단하고 빛 발생열의 감소의 목적으로 불활성기체인 아르곤 가스를 투입하여 타이타늄 파이프 내면의 표면거칠기와 연마량에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 총 투입량을 8g 으로 하였으며, 연마액은 0.4 ml로 첨가하였다. 그리고 회전속도를 1000rpm 으로 하고, 아르곤 가스의 투입 시와 미 투입 시의 연마량 및 표면거칠기를 비교평가 하였다.

Fig. 12 는 자기연마가공 과정 중 파이프 내면에 아르곤 가스 투입과 미 투입 시의 연마량의 변화를 나타낸 것이다. 2 가지 가공조건에서 연마량은 차이가 있었으며, 아르곤 가스 사용으로 연마량이 증가되는 경향을 보였다. 표면거칠기 값의 변화를 Fig. 13 에 나타내었다. 아르곤 가스의 사용으로 표면거칠기는 아르곤 가스 미 사용시와 큰 차이는 없었지만 미소하게 향상되는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 비접촉식 표면거칠기 측정기를 통해 측정된 형상 값을 2D, 3D 로 도식화시킨 Fig. 14 에서도 아르곤 가스의 투입으로 미 투입 시 보다 표면거칠기가 개선되었음을 확인하였다.

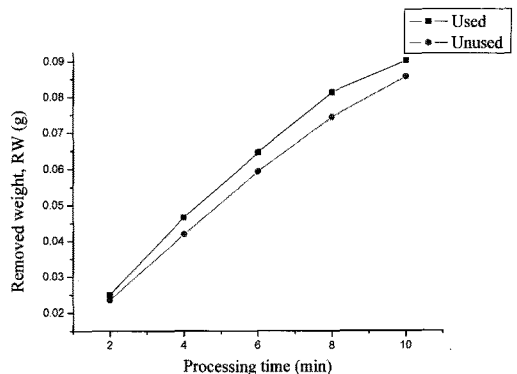


Fig. 12 Metal removal according to argon gas

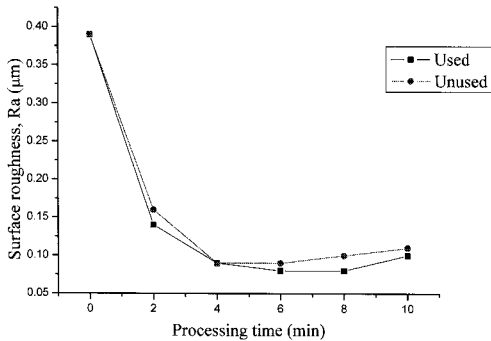


Fig. 13 Surface roughness (Ra) according to argon gas

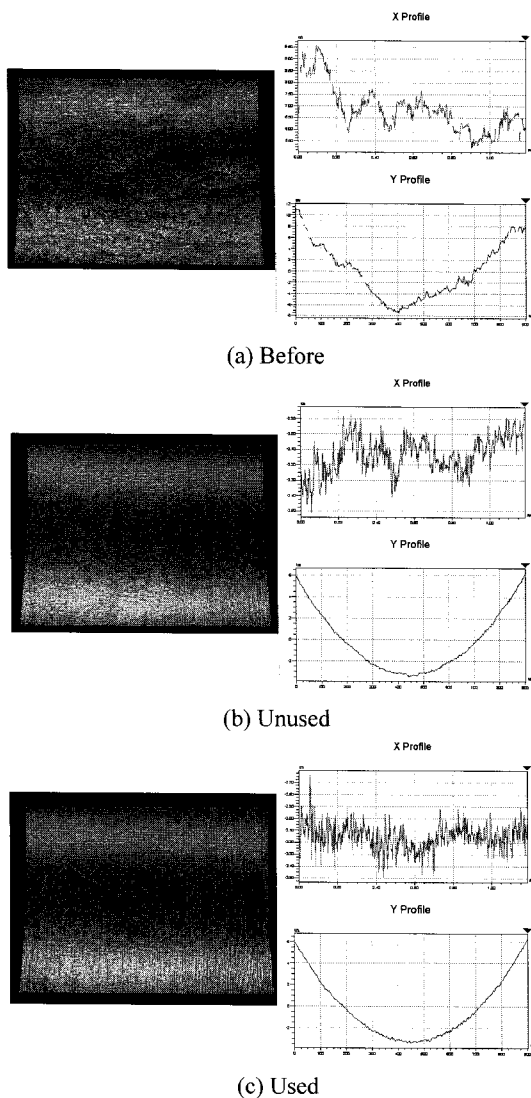


Fig. 14 Surface texture generated on the workpiece according to argon gas

4. 결론

본 논문에서는 타이타늄 파이프 내면의 자기연마 가공에서 연마조건이 연마특성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 회전속도, 혼합입자의 총 투입량, 연마액의 첨가량, 아르곤 가스의 투입에 변화를 주면서 표면거칠기, 연마량 실험을 실시하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 타이타늄 파이프의 내면 자기연마에서 투입량에 따라 연마량 및 표면거칠기에 영향이 있었으며, 투입량이 8g 일 때 연마량과 표면거칠기가 가장 우수하였다.

2) 파이프의 회전속도가 증가함에 따라 연마량이 점차 증가하였으며 1300rpm 에서 연마량이 가장 많았다. 그렇지만 표면거칠기는 1000rpm 의 조건에서 가장 우수 하였다. 이는 회전속도가 일정 속도 이상으로 초과하면 연마량은 증가할 수 있지만 표면거칠기의 개선에는 오히려 악영향이 있음을 확인하였다.

3) 연마액의 미량의 투입만으로 건식조건보다 연마효과가 우수한 향상 효과를 얻었으며, 연마액의 투입량에 따라 연마량과 표면거칠기에 차이가 있었고 연마액의 투입량이 0.4 ml 일 때 가장 우수 하였다.

4) 공기차단의 목적으로 불활성 기체 아르곤가스의 투입은 연마특성에 영향이 있었으며, 재료 제거량과 표면거칠기의 개선은 아르곤가스를 사용하지 않은 경우와 큰 차이는 없었지만 미소하게 향상 효과를 얻었다. 이는 극히 미소량으로 연마를 진행하여 표면을 개선하는 자기연마가공에서는 표면향상을 위하여 불활성 기체의 사용을 고려해 볼만한 사항이다.

참고문헌

1. Lee, Y. T. and Hyun, Y. T., "Titanium parts for automobile," Journal of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 8-13, 1993.
2. Choi, J. G., Kim, H. S. and Chung, J. O., "Turning Characteristics of Various Tool Materials in the Machining of Ti-6Al-4V," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 38-44, 2008.
3. Kim, H. S., Choi, J. G., Kim, D. M. and Lyu, M. Y., "Machining Characteristics of Ti-6Al-4V Thread,"

- Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 18, No. 5, pp. 514-520, 2009.
4. Kim, N. Y., Ko, J. B. and Lee, D. J., "A Study on the Machining Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 20-28, 2003.
 5. Hong, W. P., Kim, H. C. and Lee, D. J., "Machining Characteristics of Ti-6Al-4V Titanium Alloy," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 818-822, 2000.
 6. Choi, B. M., Hong, S. K., Ryuh, B. S. and Park, S. M., "Development of PC-NC Water Jet Cutting System and Cutting of Titanium," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 53-60, 2001.
 7. Kim, S. H., Lim, J. G., Ha, S. B., Choi, H. and Lee, J. C., "A Study on the Grinding of Titanium Alloy Part 1 : Grinding force, Specific grinding energy, Surface roughness, G-ratio," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 870-874, 2000.
 8. Ha, G. H., Ku, S. J., Kang, M. C., Kim, J. S., Ha, J. H. and Yang, S. C., "Tool wear monitoring of end mill in slot machining of titanium alloy," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 101-104, 1997.
 9. Kim, N. Y., Ko, J. B. and Lee, D. J., "A Study on the Tool Wear and Cutting Characteristics in the Machining of Ti-6Al-4V Using Tungsten Carbide Tool," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 2, pp. 9-16, 2002.
 10. Heo, S., Kim, W. I., Wang, D. H. and Lee, Y. K., "Characteristics of Surface Grinding for Heat Treated Titanium Alloy," Proc. of the Korean Society of Machine Tool Engineers Autumn Conference, pp. 349-354, 2000.
 11. Kim, J. S., Park, G. B., Shin, O. C. and Jung, Y. G., "A Study on Superfinishing Characteristics of Titanium Using Polishing Film," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 259-260, 2009.
 12. Mun, S. D., "Micro Machining of High-Hardness Materials Using Magnetic Abrasive Grains," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 5, pp. 763-770, 2010.
 13. Kim, T. W. and Kwak, J. S., "A Study on Deburring of Magnesium Alloy Plate by Magnetic Abrasive Polishing," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 2, pp. 189-194, 2010.
 14. Shinmura, T., Takazawa, K., Hatano, E. and Matsunaga, M., "Study on Magnetic Abrasive Finishing," Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 325-328, 1990.
 15. Shinmura, T. and Yamaguchi, H., "Precision Surface Finishing of Si₃N₄ Fine Ceramic Components by the Application of Magnetic Abrasive Machining Process," Journal of the JSME, Vol. 67, No. 12, pp. 1986-1990, 2001.
 16. Im, I. K., Mun, S. D. and Oh, S. M., "Micro Machining of an STS 304 Bar by Magnetic Abrasive Finishing," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 7, pp. 1982-1988, 2009.
 17. Maiboroda, V. S., Stepanov, O. V., Taranenko, N. L. and Vermenko, V. Y., "Rheological Characteristics of Magnetic-Abrasive Powders in a Magnetic Field," Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 33, No. 1-2, pp. 57-60, 1994.