

타이타늄 터닝 스크랩 내 절삭유 제거를 위한 초음파 침지-스팀 및 고온 건조 공정

채지광 · 유수환 · 오정민 · §임재원

전북대학교 신소재공학부

Ultrasonic Immersion-steam Cleaning and High Temperature Drying Process for Removing Cutting Oil on Titanium Turning Scraps

Jikwang Chae, Suhwan Yoo, Jung-Min Oh and §Jae-Won Lim

Division of Advanced Materials Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, 54896, Republic of Korea

요 약

타이타늄 터닝 스크랩을 재활용하기 위해서는 표면에 남아있는 절삭유나 기타 오염물을 제거해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 초음파 침지-스팀의 복합 세척 공정을 활용하여 타이타늄 스크랩을 세척하고, 건조 조건을 달리하여 절삭유를 제거하는 실험을 진행하였다. 또한 절삭유 제거 메커니즘 확인을 위한 접촉각 측정을 통해 타이타늄 터닝 스크랩의 침지 용액 최적 농도를 확인하였다. 피로인산나트륨 용액에 침지 세척 시 50°C에서 절삭유 내 탄소 제거율이 가장 높았으며, 스팀 세척-초음파 침지-스팀 세척 순으로 진행되는 것이 초음파 침지 후 스팀 세척을 실시하는 것보다 탄소 함량이 낮은 것을 확인했다. 타이타늄 스크랩의 TGA 분석을 통해 산화 및 절삭유의 분해 거동을 조사하고 고온 건조에 적용하였다. 건조 후 탄소와 산소 함량을 고려 시 200°C에서 2시간 건조를 하는 것이 최적의 조건임을 확인하였다.

주제어 : 타이타늄, 터닝 스크랩, 스팀 세척, 탄소, 산소

Abstract

The recycling of titanium turning scraps requires the removal of cutting oil and other contaminants remaining on the surface. In this study, an experiment was conducted in which titanium scraps were cleaned by a combination of ultrasonic immersion-steam cleaning and subsequent drying at high temperature. To determine the removal mechanism of cutting oil, the contact angle between titanium surface and cutting oil was measured. The result confirmed the optimum condition of the immersion solution of the titanium turning scraps. In the case of immersion cleaning of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ aqueous solution, the degree of carbon removed in the cutting oil was the highest at 50°C, and it was confirmed that the carbon content obtained from the combination of steam cleaning and ultrasonic immersion-steam cleaning was lower than that from steam cleaning after ultrasonic immersion. The oxidation and decomposition behaviors of cutting oil were investigated using Thermogravimetric analysis (TGA) and the result was applied in the high temperature drying process. From the results of the high temperature drying tests, it was concluded that 200°C is the optimal drying temperature.

Key words : Titanium, Turning scraps, Steam cleaning, Carbon, Oxygen

· Received : November 23, 2020 · 1st Revised : December 30, 2020 · 2nd Revised : January 22, 2021 · Accepted : January 27, 2021

§ Corresponding Author : Jae-Won Lim (E-mail : jwlim@jbnu.ac.kr)

Division of Advanced Materials Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, 54896 Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

타이타늄은 알루미늄과 비슷한 경량금속이며, 높은 비강도와 부식저항성 뿐만 아니라 좋은 생체 적합성 등을 가진 신소재로 알려져 있다¹⁻³⁾. 국내 타이타늄 피와 분말의 수출입 상황은 2018년에 수출 1.9톤, 수입 7,020톤이고, 2019년에는 수출 1.3톤, 수입 6,833톤으로 수출량보다 수입이 많아 거의 대부분 수입에 의존하고 있다. 타이타늄의 스크랩은 2018년에 수출 2,232.3톤, 수입 845톤, 2019년에는 수출 2,579톤, 수입 2,577톤으로 2018년에는 수입보다 수출이 더 많았다⁴⁾. 2019년에는 수입량이 증가하였지만 이는 제강 조업 시 탈산제나 첨가제로 사용하기 위한 것으로 타이타늄 잉곳 등, 제품으로 재활용하기 위한 것은 아니었다. Norgate 등은 타이타늄을 생산하는데 드는 에너지는 동일한 무게의 강철을 생산하는 것보다 16배나 많은 에너지가 필요하며, 알루미늄보다 70% 더 많은 에너지가 필요한 것을 보여주었다⁵⁾. 타이타늄의 높은 산소 친화성 때문에 타이타늄 산화물을 금속 타이타늄으로 제련 하는 데는 상당히 많은 양의 에너지가 필요하다. 그러므로 기업 및 많은 연구자들이 타이타늄 스크랩을 활용한 재활용 연구에 많은 노력을 쏟고 있다⁶⁻⁸⁾.

항공용 타이타늄 소재에 사용되는 타이타늄 잉곳에서 실제 제품의 무게는 잉곳 무게의 10%~20% 정도이며, 80%~90%가 타이타늄 스크랩으로 발생하며, 이중 대부분은 터닝 칩의 형태로 발생한다⁹⁾. 타이타늄은 대표적인 난삭재로 높은 반응성과 낮은 열전도율로 인해 공구 수명의 저하를 일으키기 때문에 절삭유의 사용이 반드시 필요하며, 다량의 절삭유 사용으로 인해 높은 탄소 함량을 나타낸다. 타이타늄 스크랩을 재활용하기 위해서는 절삭유의 제거가 반드시 필요하다.

철강 또는 비철금속 터닝 스크랩의 경우 원심 분리를 통해 수분과 절삭유 성분을 일부 제거하고 고온 건조를 통해 잔여 유기성분을 제거한다¹⁰⁾. S.C. Lim 등은 알루미늄 재활용에서 절삭유의 분해 속도와 산화에 대해서 연구하였고¹¹⁾, Jirang Cui 등은 열분석을 통해 알루미늄 스크랩의 무게 변화와 분해되어 나오는 가스의 종류와 양에 대해 연구했다¹²⁾. 지르코늄 스크랩 재활용에 있어서 이지은 등은 염기성 수용액에서 초음파 침지를 통해 오염물을 제거하고 세정성 평가와 오염물 분석을 했다¹³⁾.

타이타늄 스크랩에 있는 절삭유의 제거를 위해 기존에

는 산성, 염기성 용액 및 유기 용매를 일반적으로 사용된다. 타이타늄 스크랩의 산성용액에 의한 세척은 불산을 사용하며¹⁴⁾, 유기용매에 의한 세척은 일반적으로 알코올, 트리클로로에틸렌(TCE) 등이 사용된다. 산성 용액의 경우, 타이타늄 터닝 스크랩의 높은 비표면적으로 인해 폭발의 위험성이 있고, 불산의 경우 취급이 까다롭다. TCE는 발암물질로 알려져 있어, 세척 조업 시 작업자의 안전과 환경문제가 우려된다. 또한 산소 친화도가 높은 타이타늄의 경우 고온 건조 시 산화의 우려가 있지만 재활용 시 터닝 칩에 대한 연구는 미비하다. 이전 타이타늄 스크랩의 세척 연구¹⁵⁾에서 NaOH 수용액에 피로인산나트륨(Na₄P₂O₇)을 첨가한 용액으로 최적 세척 조건을 도출하였지만, 제시된 세척 조건은 고농도의 NaOH 용액을 사용하였기 때문에 본 연구에서는 NaOH를 사용하지 않고 피로인산나트륨에 계면활성제를 첨가하여 세척액의 농도를 저감시키고자 하였다. 또한 타이타늄 스크랩 표면의 절삭유 제거 메커니즘 확인을 위하여 접촉각 측정을 진행하여 세척 수용액의 최적 조건을 확립하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 수행한 초음파 침지-스팀 복합 세척 공정 및 고온 건조 실험과정을 Fig. 1에 흐름도로 나타내었다. 또한, 실험에 사용된 타이타늄 스크랩과 스팀 세척 장치의 모습을 Fig. 2에 나타내었다. 이 때 사용된 타이타늄 터닝 스크랩의 탄소 함량은 12,000ppm 이었다. 침지 세척에 사용할 최적 용액의 조성을 확인하기 위한 실험을 먼저 진행하였다. 비이온 계면활성제인 Tergitol™ type 15-s-15를

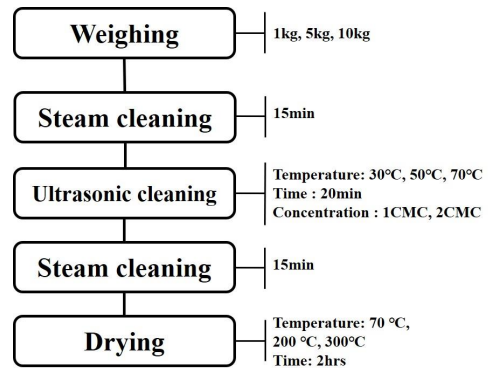


Fig. 1. Flow diagram of the pretreatment experimental procedure.

사용하여, 침지 시, 타이타늄 스크랩의 계면활성제 농도에 따른 탄소 변화를 분석하였다. 10g의 타이타늄 터닝 스크랩을 계면활성제 1CMC(Critical Micelle Concentration), 2CMC, 4CMC, 10CMC 용액에 각각 넣고 세척 및 수세 후 탄소 농도를 측정하였다. 침지 용액의 염기성 첨가물은 피로인산나트륨을 사용하였고, 피로인산나트륨 농도에 따른 타이타늄 표면의 기름방울의 변화를 관찰하기 위해 접촉각 측정을 하였다. 접촉각 측정 장치와 그 개략도를 Fig. 3에 도시하였다. 접촉각 측정은 타이타늄 잉곳을 사포로 #2000까지 연마 한 후, 추가적으로 알루미늄으로 0.05 μ m까지 연마하였다. 피로인산나트륨($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) 1g/L~20g/L 용액에 연마한 잉곳을 담그고, 주사기의 절삭유를 마이크로미터로 일정량 용액 안의 잉곳에 떨어뜨려 접촉각을 측정했다. 접촉각은 ImageJ의 DropSnake¹⁶⁾ 플러그인을 사용하여 접촉각을 측정했다. 그 이후 1kg의 타이타늄 터닝 스크랩을 가지고 침지 후 스팀 세척을 실시하였다. 침지 세척은 계면활성제 1CMC, 2CMC 두 가지 농도에서 진행하고, 피로인산나트륨 10g/L 용해시켰으며, 온도는 30°C, 50°C, 70°C에서 20분간 침지하여 세척하였다. 그 후 스팀 세척을 15분간 실시하였으며, 스팀 세척 후 70°C에서 2시간 동안 건조하였다. 건조된 시편은 탄소, 산소 분석을 실시하였다. 탄소 제거율이 가장 높은 조건으로 타이타늄 스크랩 5kg 세척을 진행하였다. 세척의 진

행 순서는 초음파 침지 후 스팀 세척, 스팀 세척 후 초음파 침지 세척 그리고 마무리 스팀 세척을 진행하였다. 스팀 세척 시간은 모두 15분으로 동일하고 초음파 침지 시간은 20분 동안 실시하였다. 세척 후 70°C로 2시간 동안 건조 하였으며, 건조 후 탄소, 산소, 질소 분석을 실시하였다. 최종적으로 10kg으로 규모를 확대하여 세척을 실시하였다. 스팀 세척 15분 후 초음파 침지 20분, 스팀세척 15분 후 대기 중에 건조를 실시하였고 건조는 70°C, 200°C, 300°C에서 2시간 진행하였다. 건조 후 타이타늄 스크랩은 탄소와 산소 함량 분석을 실시하였다. 세척하지 않은 타이타늄 스크랩과 아세톤으로 세척한 타이타늄 스크랩을 대기분위기에 서 TGA (Thermogravimetric analysis) 분석을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

침지 용액 최적 조성을 찾기 위한 실험에서 10g의 타이타늄 스크랩을 계면활성제에 넣고 침지 세척 했을 시 실험 결과를 Table 1에 나타내었다. 1CMC~4CMC 까지 탄소 함량은 각각 500ppm, 505ppm, 495ppm으로 유의미한 변화를 나타내지 않았고, 10CMC에서 395ppm으로 약간 줄어드는 경향을 보였다. 이것은 계면활성제가 1CMC 이상에서는 계면활성제가 이미 계면에 모두 흡착되고 수용액 내에 미셀(Micelle)을 형성하기 때문에 1CMC~4CMC 농도에서는 세척력에 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 10CMC에서 탄소농도가 조금 감소한 것은 계면활성제 농도 증가에 따른 약간의 세척력 증가로 인해 나타난 것으로 보인다.

타이타늄 스크랩 표면에서의 절삭유 제거 메커니즘을 확인하기 위하여, 피로인산나트륨 농도에 따른 기름방울의 타이타늄 표면 접촉각 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 TSPP 1g/L의 농도 일 때, 접촉각을 나타냈으며 이때 접촉각은 93°을 나타냈다. Fig. 4(b)의 TSPP 5g/L 용액에서 접촉각은 118°도 이었으며, Fig. 4(c)와 (d)는 각각 TSPP 10g/L, 20g/L로 기름방울들이 자발적으로 비중 차에 의해서 상부로 떠올랐다. 용액 속에서 타이타늄과 기름방울의 부착 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

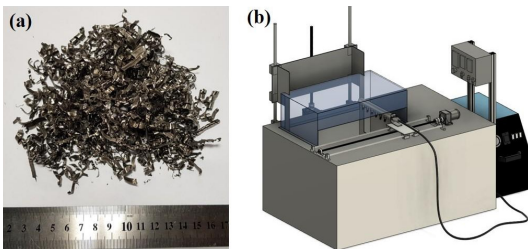


Fig. 2. Appearance of (a) raw titanium turning scraps and (b) steam cleaning system.

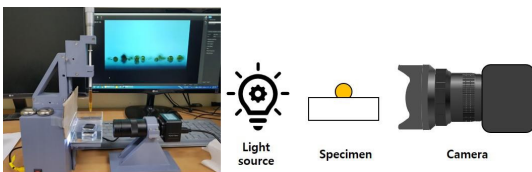


Fig. 3. Appearance of contact angle measurement apparatus and schematic diagram.

Table 1. Carbon concentration of titanium scraps according to critical micelle concentration (ppm)

	1CMC	2CMC	4CMC	10CMC
Carbon concentration	500	505	495	395

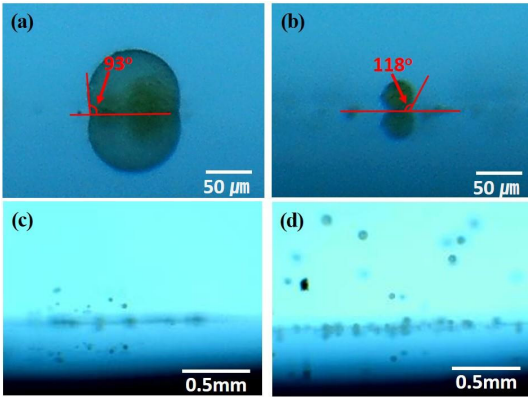


Fig. 4. Contact angle measurement of cutting oil on titanium surface in TSPP solution. (a) 1g/L of TSPP solution, (b) 5g/L of TSPP solution, (c) 10g/L of TSPP solution, (d) 20g/L of TSPP solution.

$$Wa = \gamma_{ow}(\cos\theta+1)$$

γ_{ow} 는 물과 기름방울 간의 계면장력이다. 부착 힘은 접촉각이 180°에 가까워질수록 부착 힘이 0에 수렴한다. TSPP의 농도가 증가 할수록 접촉각이 커졌으며, 결국 10g/L 농도 이상에서는 접촉각이 180°도가 되어 자발적으로 분리되었다. Carlos Drummond¹⁷⁾는 원유와 수용액 속의 pH 및 Na⁺ 이온의 농도와와의 관계에서 본 연구에서 실험한 피로인산나트륨 수용액 농도와 유사한, pH 9~10, 10⁻³~10⁻² Na⁺ 몰 농도 범위에서 물의 젖음성이 최대가 되는 구역과 유사한 실험 결과를 보였다. 이것은 pH가 높을 경우, 고체 표면과 기름방울이 음전하를 띄게 되고, 서로 반발하여 부착 힘을 감소시키기 때문이다.

1CMC~4CMC 농도에서 탄소 함량의 변화가 크지 않았기 때문에 1CMC와 2CMC의 계면활성제 농도로 스팀 침지 세척의 온도 변화에 따른 탄소 함량과 산소 함량, 그리고 원재료 대비 탄소 제거율을 Table 2에 나타냈다. 1CMC 농도에서 30°C에서는 탄소농도 1210ppm, 50°C에서는 960ppm, 70°C에서는 1050ppm을 나타냈다. 2CMC 농도에서 30°C에서는 탄소농도 1120ppm, 50°C에서는 850ppm, 70°C에서는 1090ppm을 나타냈다. 1CMC와 2CMC에서 모두 50°C에서 낮은 탄소 함량을 보였다. 이것은 절삭유에 사용되는 유화제로 지방산 에톡실레이트, 지방 알코올 에톡실레이트, 알킬 페놀 에톡실레이트 등 비이온 계면활성제가 사용되는데¹⁸⁾, 비이온계 계면활성제

Table 2. Carbon and oxygen concentrations of titanium scraps according to critical micelle concentration and temperature (ppm)

	1CMC			2CMC		
	30°C	50°C	70°C	30°C	50°C	70°C
Carbon	1210	960	1050	1120	850	1090
R.D.	78.9%	83%	81.7%	80.5%	85.2%	81%
Oxygen	2070	2010	2550	2060	2200	2260

Table 3. Carbon, oxygen and nitrogen concentrations depending on the pretreatment procedure of 5kg titanium scraps (ppm)

	Carbon	Oxygen	Nitrogen
Steam cleaning	3,100	2,280	70
Ultrasonic immersion-steam cleaning	1,010	1,970	44
Steam cleaning-ultrasonic immersion -steam cleaning	880	2,140	68

는 온도가 운점(Cloud Point) 이상으로 증가 시 친수기인 폴리옥시에틸렌(POE)가 탈수화되어 친수성이 감소하여 계면활성제 효과가 감소한다¹⁹⁾. 실험에 사용한 Tergitol™ 15-S-15는 운점이 102°C로 온도조건에서 분해되지 않지만 기존 포함되어 있던 절삭유에 포함된 유화제의 운점은 50°C와 70°C 사이에 있어, 70°C에서는 운점 이상의 온도로 세척 효과가 50°C에서보다 감소하여 탄소 함량이 높아진 것으로 보인다. 산소 함량은 세척 후에 특별한 경향성이 관찰되지 않았다.

타이타늄 스크랩 5kg을 세척 종류에 따라 세척하고 난 결과를 Table 3에 나타냈다. 스팀 세척의 효과를 확인하기 위하여 타이타늄 스크랩(탄소 함량: 12,000ppm)의 단순 스팀 세척 후 탄소 함량을 확인한 결과 3100ppm으로 감소하여 스팀 세척의 기본적인 효과를 확인하였다. 이러한 스팀 세척을 초음파 침지와 결합하여 초음파 침지-스팀 세척을 진행하였을 경우 탄소 함량이 1,010ppm까지 감소하였고, 또한 추가로 스팀 세척-초음파 침지-스팀 세척의 경우 탄소 함량이 880ppm까지 감소함을 확인하였다. 타이타늄 스크랩의 세척 후 산소 및 질소 함량의 변화는 확인되지 않았다. 5kg 타이타늄 스크랩의 스팀 세척-초음파 침지-스팀 세척 공정 후 탄소 제거율은 92.7%를 보였다.

타이타늄 스크랩의 스팀 세척-초음파 침지-스팀 세척 공정을 통하여 탄소 함량 880ppm까지 저감하였고, 추가

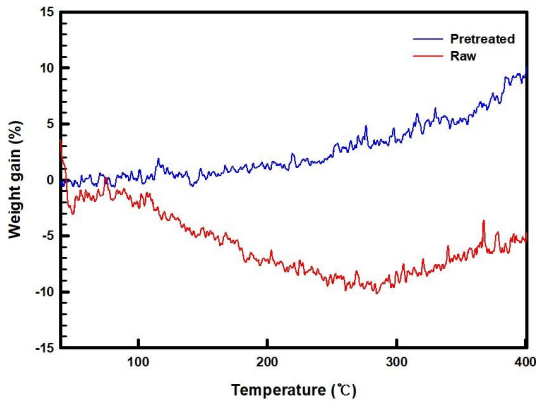


Fig. 5. TGA analysis of raw titanium and pretreated titanium scraps under air atmosphere.

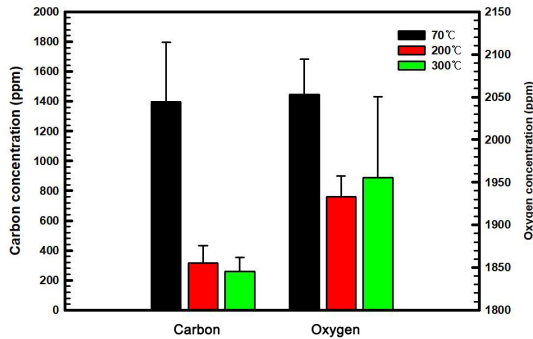


Fig. 6. Changes in carbon and oxygen concentrations according to the drying temperature of 10kg titanium scraps.

적으로 ASTM 규격²⁰⁾의 800ppm 이하의 탄소 함량을 달성하기 위해서 고온 건조 공정을 적용하였다. 원재료와 아세톤으로 세척된 타이타늄 스크랩을 가지고 TGA 분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 아세톤으로 세척된 타이타늄 스크랩은 온도가 증가함에 따라 무게 증가가 가속되었고, 전처리를 하지 않은 타이타늄 스크랩은 약 280°C 부근까지 무게가 감소하다 다시 증가하였다. 전처리를 하지 않은 타이타늄 스크랩 표면에 있는 기름 성분이 열에 의해 분해되어 무게가 감소하고, 280°C 이상에서 기름이 대부분 분해되어 사라지고 산화가 진행해서 무게가 다시 증가하는 것으로 보인다. 10kg의 타이타늄 스크랩을 세척 및 건조 후 탄소와 산소 함량을 Fig. 6에 나타내었다. 70°C에서 건조할 경우 탄소가 1398ppm을 보였으나 200°C의 경우 316ppm, 300°C의 경우 260ppm을 나타냈다. 앞선 TGA 분석과 마찬가지로 300°C로 건조했을 경

우 가장 낮은 탄소 함량을 보였다. 하지만 산소의 경우 70°C에서 2053ppm, 200°C에서 평균 1933ppm, 300°C에서 평균 1955ppm으로 300°C에서 산소 함량이 200°C에서보다 산소 함량이 소폭 증가하였다. 탄소 함량이 300°C에서 더 낮았지만, 산소 함량의 편차가 300°C에서 200°C보다 큰 것으로 보아 세척 후 질삭유가 제거되고 타이타늄 표면이 노출된 곳에서 산화가 200°C보다 더욱 진행되어 산소 함량 편차가 200°C보다 큰 것으로 보인다. 타이타늄의 물리적 특성에 탄소 함량보다 산소 함량이 미치는 영향이 더 크므로 300°C보다 200°C가 보다 최적의 건조 조건으로 판단하였다. 200°C 건조 시 타이타늄 스크랩의 원재료부터의 탄소 제거율은 97.4%로 나타났다.

4. 결 론

타이타늄 터닝 스크랩을 재활용하기 위해 세척을 진행하였다. 집축각 측정을 통한 침지 세척 용액의 피로인산나트륨의 최적용액 농도는 10g/L로 나타났다. 질삭유에 포함된 유화제의 운점으로 인해 타이타늄 스크랩 세척 시 70°C보다 50°C에서 더 낮은 탄소 함량을 보였으며, 2CMC, 50°C, 피로인산나트륨 10g/L에서 탄소 농도 850ppm으로 가장 낮은 탄소농도를 보였다. 5kg으로 규모를 좀 더 확대했을 때 초음파를 도입해도 세척 효과가 조금 감소했으며, 초음파 침지전 1차 스팀세척과 초음파 침지 후 2차 스팀세척을 적용했을 시, 탄소농도는 880ppm으로 침지 세척과 비슷한 효과를 나타냈으며 탄소 제거율은 92.7%였다. 최적 건조 조건을 보기 위해 70°C, 200°C, 300°C 건조를 실시했으며 300°C에서 탄소 함량이 가장 낮았으나 200°C보다 산소 함량이 높아 최적의 건조 조건은 200°C 2시간이었고, 이때의 타이타늄 터닝 스크랩 내 탄소 함량은 316ppm이며 원재료부터 탄소 제거율은 97.4%였다. 결과적으로 초음파 침지-스팀 세척 및 고온 건조 후 ASTM 규격인 탄소 함량 800ppm 이내 기준을 충족할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20185210100030).

References

1. G. Lutjering, J.C. Williams, 2007 : Traditional and Emerging Applications, Titanium (Engineering Materials and Processes), pp.8-11, 2nd Edition, Springer, Berlin.
2. J. Lu, Y. Zhang, W. Huo, et al., 2018 : Electrochemical corrosion characteristics and biocompatibility of nano-structured titanium for implants, Appl. Surf. Sci., 434, pp.63-72
3. H. Asgar, K.M. Deen, Z.U. Rahman, et al., 2019 : Functionalized graphene oxide coating on Ti6Al4V alloy for improved biocompatibility and corrosion resistance, Mater. Sci. Eng., C 94, pp.920-928
4. Korea Customs Service, Trade Statistics, <https://unipass.customs.go.kr>
5. T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W.J. Rankin, 2007 : Assessing the environmental impact of metal production processes, J. Clean. Prod., 15, pp.838-848
6. J. Reitz, C. Lochbichler, B. Friedrich, 2011 : Recycling of gamma titanium aluminide scrap from investment casting operations, Intermetallics, 19, pp.762-768
7. K. Topolski, W. Bochniak, M. Lagoda, et al., 2017 : Structure and properties of titanium produced by a new method of chip recycling, J. Mater. Process. Technol., 248, pp.80-91
8. J.M. Oh, K.H. Heo, W.B. Kim, et al., 2013 : Sintering properties of Ti-6Al-4V alloys prepared using Ti/TiH₂ powders, Mater. Trans., 54, pp.119-121
9. Osamu Takeda, Toru H. Okabe, 2019 : Current Status of Titanium Recycling and Related Technologies, JOM, 71, pp.1981-1990.
10. Kurdyukov, V. A., A. A. Sergeev, and A. A. Reznayakov., 1997 : Efficient methods of processing metal chips, Metallurgist, 41, pp.331-335.
11. S. C. Lim, D. H. Kim, E. P. Yoon, et al., 1997 : Decomposition kinetics of machining oil and oxidation of A356.2 aluminium alloy in aluminium recycling process, Mater. Sci. Technol., 13, pp.859-864
12. Jirang Cui, Anne Kvithyld, Hans Jørgen Roven, 2010 : Degreasing of aluminum turnings and implications for solid state recycling [C], In: TMS Annual Meeting, Seattle. pp. 675-678.
13. J. E. Lee, N. C. Cho, J. H. Moon, et al., 2013 : A Study of Cleaning Technology for Zirconium Scrap Recycling in the Nuclear Industry. Clean Technology, 19(3), pp.264-271.
14. S. Y. Park, J. H. Song, 2018, KR, 10-1850967.
15. J. Chae, J. M. Oh, J. W. Lim, et al., 2019 : Eco-Friendly Pretreatment of Titanium Turning Scraps and Subsequent Preparation of Ferro-Titanium Ingots. Korean J. Met. Mater., 57(9), pp.569-574.
16. A.F. Stalder, G. Kulik, D. Sage, et al., 2006 : A Snake-Based Approach to Accurate Determination of Both Contact Points and Contact angles, Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp., 286(1-3), pp.92-103
17. Carlos Drummond, Jacob Israelachvili, 2002 : Surface forces and wettability, J. Pet. Sci. Eng., 33, pp.123-133
18. Jean C. Childers, 2006 : The Chemistry of Metalworking Fluids, Metalworking Fluids, 2nd Edition, Jerry P. Byers, pp.133, Taylor & Francis, New York.
19. Milton J. Rosen, 2004 : Surfactants and Interfacial Phenomena, pp.53, 3rd Edition, Wiley, New Jersey.
20. ASTM B977/B977M-19, Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Ingots.

채 지 광

- 현재 전북대학교 금속공학과 석사과정
-

유 수 환

- 현재 전북대학교 금속공학과 석사과정
-

오 정 민

- 충남대학교 응용소재공학과 공학석사
 - 전북대학교 금속공학과 공학박사
 - 현재 전북대학교 신소재공학부 연구교수
-

임 재 원

- 일본 동북대학 금속공학전공 공학박사
 - 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
 - 현재 전북대학교 신소재공학부 부교수
-