기술논문

타이타늄 스크랩을 활용한 페로-타이타늄 전처리 공정 적용 모합금 주조

이초롱 · 박종범[†] · 강태웅 · 민태식 · 전수혁 · 노윤경

㈜동아특수금속

Ingot Casting with Ferro-Titanium Pretreatment Process using Ti Scrap

Cho-Long Lee, Jong-Bum Park[†], Tae-Woong Kang, Tae-Sik Min, Soo-Hyeok Jeon and Yoon-Gyeong Ro

Dong-A Special Metal Co., Ltd., Changwon 51234, Republic of Korea

초 록

타이타늄 합금 중 페로-타이타늄은 철강 업계에서 철강과 스테인리스강을 생산하는데 사용되는 주요 첨가물이다. 본 연구에서는 고품질의 페로-타이타늄 합금을 주조하기 위해 경제적인 면을 고려한 저비용 타이타늄 스크랩을 활용하고자 하였다. 먼저 재활용 타이타늄 스크랩의 표면에 형성되어 있는 절삭유 및 불순물을 제거하기 위한 최적의 전처리 공정을 연구하였다. 일반적인 세척 방법인 산이나 유기용제는 세척이 용이하나 환경적으로 문제가 되므로 친환경적인 방법을 고안하여 적용하고자 하였다. 또한, 타이타늄 스크랩을 활용하여 고품질의 페로-타이타늄 잉곳을 제조하고 성분 분석을 통해 불순물과 특성을 상용 소재 규격과 비교 분석하였다.

핵심용어; 타이타늄 스크랩, 주조, 페로-타이타늄 합금, 전처리 공정 적용 스크랩, 초음파 세척.

Abstract

A type of titanium alloy, ferro-titanium, is the main material used to manufacture steel and stainless steel. Considering economic aspects, ferro-titanium ingots are intended to be manufactured using low-cost titanium scrap, and the best pretreatment process for removing impurities from recycled titanium scrap surfaces was studied here. Instead of ordinary acid or organic solvents, eco-friendly methods were researched and applied, and chip scrap materials were used. A high-quality ferro-titanium ingot was manufactured from titanium scrap after a pretreatment process was applied, and the impurities and properties were analyzed and compared with commercial material standards through a component analysis.

Key words; Ti scrap, Casting, Ferro-Titanium alloy, Pretreatment scrap and Ultrasonic cleaning.

- 이초롱, 박종범, 강태웅, 민태식, 전수혁, 노윤경: 선임연구원

Received: Dec. 2, 2020 ; Revised: Jan. 16, 2021 ; Accepted: Jan. 22, 2021
[†]Corresponding author: Jong-Bum Park (Dong-A Special Metal Co., Ltd.)
Tel: +82-70-4449-4797, Fax: +82-55-586-7393
E-mail: jbpark@dongaspecial.co.kr

Journal of Korea Foundry Society
2021. Vol. 41 No. 2, pp. 139~143
http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2021.41.2.139
pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© Korea Foundry Society, 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

타이타늄 합금은 비강도, 내식성 등에서 우수한 기계적 특성을 가지므로 국방 산업뿐만 아니라, 항공·우주·의료·스포츠 등 생활소비재에서도 활용되고 있다[1,2]. 국내의 타이타늄 산업에서 타이타늄 원재료는 90%이상 수입에 의존하고 있으며, 최근에 타이타늄 수입량은 크게 증가하고 있다[3]. 타이타늄은 경량금속으로 고비강도와 내식성이 매우 뛰어난 신소재이며[4,5] 연비 향상을 위해 자동차 부품 적용을 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 타이타늄이 갖는 우수한 기계적 물성에도 불구하고 고융점·고반응성·난가공성 등의 단점이 있어, 제조공정이 복잡하고 장시간이 소요되어 제조원가가 타 구조용 재료에 비해 매우 고가이다[3].

타이타늄 합금 중 페로-타이타늄은 철강 업계에서 철강과 스테인리스강을 생산하는데 사용되는 주요 첨가물로서 타이타늄 스크랩을 통해 제조된다[6]. 페로-타이타늄은 타이타늄이 주요 성분인 합금으로 특수강의 합금 또는 스테인리스강 제조 중 미세 구조의 탄소와 크롬 탄화물의 형성을 억제하여 예민화를 최소화하는 필수 중간재로 사용된다[7,8]. 기존 연구 중에 로드와 파이프가 재활용된 타이타늄 스크랩을 다시 재활용하는 연구가 진행되었으나[9], 타이타늄 스크랩을 세척하여 페로-타이타늄 합금을 제조하는 연구는 거의 없는 실정이다[10].

따라서, 본 연구에서는 고품질의 페로-타이타늄 합금을 주조하기 위해 경제적인 면을 고려한 저비용 타이타늄 스크랩을 활용하고자 하였고, 재활용 타이타늄 스크랩의 표면에 형성되어 있는 절삭유 및 불순물을 제거하기 위한 최적의 전처리 공정을 연구하였다. 일반적인 세척 방법인 산이나 유기용제는 세척이 용이하나 환경적으로 문제가 되므로 친환경적인 방법을 고안하여 적용하고자 하였다. 특히 전처리 공정의 효과를 극대화하기 위해 벌크, 퍽, 칩 등 다양한 형태의 타이타늄 스크랩 중에서도 경제적인 면을 고려하여 가장 저가인 칩 스크랩을 이용하였다. 또한, 타이타늄 스크랩을 활용하여 고품질(Low-N)의 페로-타이타늄 잉곳을 제조하고 성분 분석을 통해 불순물과 특성을 상용 소재 규격과 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 스크랩 전처리 공정

저비용 타이타늄 스크랩을 활용하여 페로-타이타늄 잉곳을 제작하기 위해 다양한 형태의 스크랩 중 가장 저가이며, 표면 단면적이 넓고 곡선화되어 있어 불순물 제거가 어려운 칩 스크랩을 사용하였다. 최종 철강 소재 품질을 위해 가스원소(N, C, O, S)가 많이 함유되어 있을 경우 최종 제품에서 다양한 불량 문제를 야기하기 때문에 가스원소의 함량제어는 필수적인 조건다. 페로-타이타늄 제조시 사용되는 스크랩 소재의 표면에 잔존하는 다량의 절삭유 및 불순물로 인해 용해 및 주조 시 화재 위험과 합금 소재 내 탄소함량이 증가할 수 있다. 또한, 절삭유의 대부분 성분은 탄소이므로 탄소 함량을 제어하는 것이 중요하다. 따라서, 스크랩 소재 표면의 불순물을 제거하기 위해 세척 공정을 적용하여 용해 공정의 안전 성과 용탕의 청정성 확보 및 페로-타이타늄 합금 내 탄소함량을 저감하고자 하였다. 세척제는 불순물 분리에 용이한 피로인산 나트륨을 일반 세제와 섞어 사용하였다. 본 연구에서는 원심 탈수 세척과 초음파 세척의 두 가지 방법을 적용하여 스크랩을 세척하였으며, 조건은 Table 1~2에 나타내었다.

원심 탈수 세척은 세척 30min, 헹굼 30min을 한 사이클로 진행하였으며, 세정제는 총 투입 스크랩 대비 10%를 첨가하였다.

초음파 세척은 다조식 초음파 세척 장비(Fig. 1)로 수행하였다. 해당 장비는 1조에서 스크랩을 세척한 후 2,3조에서 헹구는 단계와 4조에서 고온 에어로 건조하는 단계로 구성하

Table 1. Scrap cleaning conditions

	Conditions	Temperatre (°C)	Time (min.)
1	No	-	-
2	Centrifugal dehydration cleaning	25	60
3		100	60
4		100	120

Table 2. Ultrasonic cleaning conditions (Variable: Temperature, Solvent cleaner weight, Cleaning time)

	Conditions	Temperature (°C)	Solvent cleaner (kg)	Cleaning time (min.)
1	No	-	-	-
2	Ultrasonic cleaning	25	X	-
3			1	5
				10
				15
4			2	5
				10
				15
5			3	-
6		50	X	-
7			1	-
8			2	-
9			3	5
				10
				15

Fig. 1. Multiple ultrasonic cleaning equipment.

Table 3. Optimal scrap cleaning conditions

	Temperature (°C)	Solvent cleaner (kg)	Cleaning time (min.)
1	25	2	15
2	50	3	15

였다. 세척 조건은 세척수의 온도를 25°C, 50°C로 고정하여 세척시간 및 세제 양에 따른 스크랩 표면의 주요 불순물(N, O, C, S)의 가스 분석을 수행하였다.

각 조건에 따른 세척 후 성분 분석 결과를 확인한 후 최종 세척 조건 두가지를 확립하였다(Table 3). 각 조건의 재현성을 확인하기 위해 20번 반복 세척 후 세척시마다 가스 분석기로 스크랩 표면의 불순물 잔여 함량을 분석하고 평균값으로 나타내었다. 스크랩 표면의 불순물은 대부분 절삭유로 주요 성분이 탄소(C)이므로, 세척 효과는 탄소 저감율로 확인하였다.

2.2 타이타늄 스크랩 적용 잉곳 주조

스크랩 전처리 공정 결과를 통해 탄소 저감률이 가장 높은 조건을 적용하고 Ti-6Al-4V의 칩형 스크랩으로 페로-타이타늄 잉곳을 대기용 고주파 유도 용해로(Air Induction Melting)를 활용하여 제조하였다. Fig. 2는 페로-타이타늄 제조를 위해 사용한 칩형 타이타늄 스크랩의 형태이다.

Fig. 2. Ti chip scrap.

Fig. 3. Spectro MAXx (left), VAR sample (right).

용해 전 칩형 타이타늄 스크랩의 성분을 정확하게 분석하고 추후 주조한 페로-타이타늄 잉곳 성분과 비교 분석하기 위해 VAR 용해 후 분광분석기를 이용하였다(Fig. 3).

3. 실험 결과

3.1 스크랩 전처리 공정 결과

Table 4는 세척 방법에 따른 스크랩 표면의 가스 분석 결과이다. 원심 탈수 세척은 세척수 온도 25°C 1회, 100°C에서 1회 및 2회를 진행하였으며, 초음파 세척은 50°C에서 10분, 20분, 30분을 수행하였다. 세척 조건은 스크랩 세척 결과 불순물 함량이 원심 탈수 세척 방법보다는 초음파 세척이 시간적인 면에서나 탄소(C) 함량 수치 저감에 대해서도 훨씬 좋은 효과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 원심 탈수는 스크랩이 일정 방향으로 돌아가며 세척되어 칩 스크랩이 말려 있는 부분이나 스크랩끼리 맞닿아 있는 면이 제대로 세척되지 않은 것으로 사료되지만, 초음파 세척은 물 분자의 진동으로 세척되므로 좁은 틈까지 세척이 유효하게 진행된 것으로 사료된다. 따라서 세척 방법은 초음파 세척으로 고정하여 추가적인 변수에 따른 불순물 함량을 확인하였다.

초음파 세척은 25°C(냉수)와 50°C(온수)의 두 조건의 온도와 세제 양에 따른 세척 효과를 확인하였다. 25°C의 경우 세제를 3kg 투입했을 때 시험 종료 후에 바닥면에 많은 세제가 잔존해 있는 것을 확인하여, 2kg 정도가 포화점인 것을 알 수 있었다. 50°C의 경우는 세제 3kg를 투입해도 모두 용해했으며, 세척 결과 탄소 농도가 25°C에서는 2kg, 50°C

Table 4. Gas analysis results according to cleaning conditions

	Conditions	N (wt.%)	O (wt.%)	C (wt.%)	S (wt.%)
1	No	0.033	0.246	0.722	0.056
2	Centrifugal dehydration cleaning	0.029	0.218	0.531	0.046
3		0.024	0.256	0.286	0.014
4		0.027	0.241	0.275	0.016
5	Ultrasonic cleaning	0.035	0.247	0.159	0.002
6		0.032	0.256	0.107	0.002
7		0.026	0.237	0.051	0.002

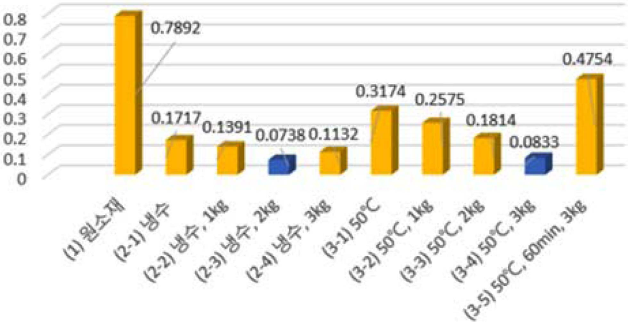

Fig. 4. Carbon content according to ultrasonic cleaning conditions.

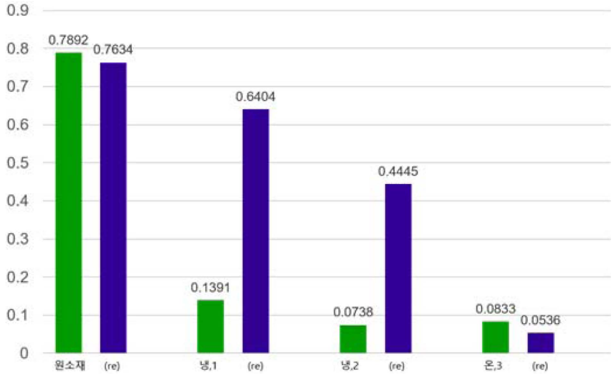

Fig. 5. Verify repeatability of ultrasonic cleaning (■: 1st test results, ■: 2nd test results).

에서는 3kg일 경우 가장 양호한 결과를 보였다(Fig. 4).

위의 결과를 토대로 탄소 함량이 낮은 조건 세 가지(냉수-2kg, 냉수-3kg, 온수-3kg)를 선택하고 재현성을 확인하기 위해 반복 시험을 20회씩 진행하였으며, 결과는 평균값을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 냉수의 경우 반복시험 결과값과 초기 실험값에서 많은 차이가 있었으며, 초기 실험시에는 시험 횟수가 3회로 적어 많은 차이를 보인 것으로 사료된다. 반면 온수의 경우 재현성 실험에서 탄소가 더 낮은 수치를 나타냈으며, 세부 조건에 변수를 두고 추가 시험을 진행하였다.

Fig. 6은 세척 시간에 따른 탄소 함량 변화이다. 세척은 각 10회씩 반복 시험하였으며, 25°C와 세제 1kg의 경우는 5분, 25°C와 세제 2kg는 10분, 50°C와 세제 3kg는 15분으로 세척 시간을 진행했을 때 탄소 함량 평균값이 가장 낮은 수치를 나타냈다.

세척 중 세척 수 위로 뜨는 부유물을 제거하며 세척한(오버플로우 적용) 스크랩의 탄소 함량을 Fig. 7에 나타내었다. 최적의 세척 조건을 확립하기 위해 동일한 세척수에 오버 플로우를 하며 10회 이상의 재현성 테스트를 진행하였으며, 각 세척시마다 탄소 함량을 측정하였다. 오버 플로우를 적용한 경우 각 세척 결과가 비슷한 경향을 나타냈으며, 동일 세척 수로 10회 이상을 세척해도 불순물 제거가 용이하다는 것을

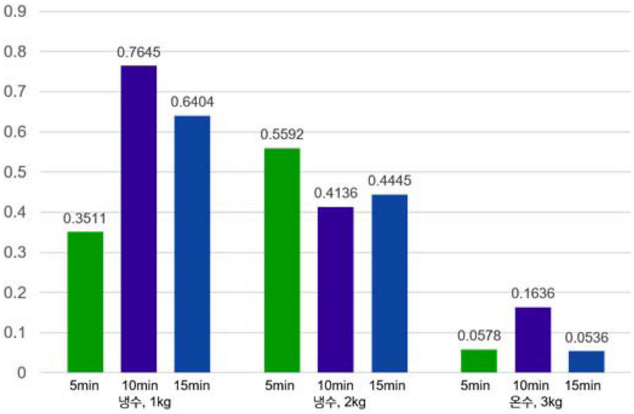

Fig. 6. Carbon content according to cleaning time (■: 5min, ■: 10min, ■:15min).

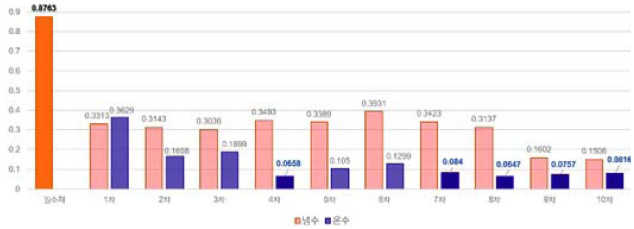

Fig. 7. Carbon content of overflow application (■: raw material, ■: 25°C, ■: 50°C).

확인하였다.

3.2 타이타늄 스크랩 적용 잉곳 주조

칩 형태의 타이타늄 스크랩 세척 후 불순물 의 함량이 가장 우수한 50°C, 세제 3kg 및 15min 초음파 세척 공정을 적용하여 세척하였다. 세척 후 페로-타이타늄 잉곳을 주조한 후 성분 분석을 통해 상용 소재(벌크 및 퍽 형태)와 비교하여 건전성 여부를 확인하였다(Table 5).

일반적으로 스크랩을 이용한 타이타늄 합금의 주조는 주조 시 공기와의 접촉을 최소화시켜 주조품의 품질을 향상시키고자 벌크 및 퍽 형태의 스크랩을 사용한다. 하지만 본 연구에

Table 5. Casting ingot component analysis results according to scrap type (unit: wt.%)

	Ti	Fe	Al	V
Bulk	66	25.7	4.2	3.1
Puck	71.9	18.5	5.76	2.98
Chip	72.28	19.8	4.6	3.2
	Si	O	N	C
Bulk	0.21	0.92	0.39	0.029
Puck	0.53	0.874	0.687	0.055
Chip	0.022	0.83	0.41	0.066

서는 초음파 세척 공정을 개발 및 적용하여 칩 형태의 스크랩으로도 용해 시 불순물 때문에 생성이 촉진되는 질화물의 함량이 적은 주조품을 제작하고자 하였다. 칩 스크랩을 이용한 주조 잉곳의 성분 분석 결과 벌크 형태의 스크랩을 이용한 주조품의 질소 함량과 유사한 수치임을 확인하였다. 따라서 페로 타이타늄 주조 시 벌크나 퍽 형태가 아닌 칩 스크랩을 활용하여 최적의 전처리 공정을 적용하면 최종품 규격에 문제가 없음을 확인하였으며, 이를 활용하면 추후 경제적인 면에 큰 도움을 줄 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 스크랩 표면의 불순물 및 산화물을 제거하는 전처리 공정 기술을 개발하고, 최적의 공정을 적용한 스크랩의 가스 분석 결과를 토대로 절삭유의 대부분 조성인 탄소 저감율을 중점적으로 확인하였다. 50°C에서 세제를 3kg가량 투입한 조건에서 탄소 함량이 가장 저감되었으며 이를 전처리 최종 조건으로 확립하여 적용하였다. 전처리를 완료한 스크랩과 철 합금을 고주파 유도 용해로를 활용하여 대기 주조를 진행하고 성분 분석한 결과 스크랩 전처리 공정 후 탄소 함량은 1,000ppm을 넘지 않음을 확인하였다. 또한, 일반적으로 사용되는 벌크나 퍽 형태의 스크랩 대신 칩 형의 스크랩을 적용한 페로-타이타늄 합금에서 전처리 공정으로 인해 용탕의 청정도와 주조 시 주조성 및 내부 가스불순물 저감도 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 에너지기술평가원이 지원하는 에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] G. Lütjering and J. C. Williams, “Titanium Chapter 10 - Special Properties and Applications of Titanium”, Springer, Berlin (2007) 383.
[2] Lee YT, “Titanium”, Steel & Metal Media, Korea (2009).
[3] Oh JM, Kwon H and Lim JW, Clean Tech., **19**(2) (2013) 75.
[4] Oh JM, Lee BG, Cho WW, Lee SW, Choi GS, and Lim JW, Met. Mater. Int., **17**(5) (2011) 733.
[5] G. Lutjering and J. C. Williams, “Titanium”, Springer, Berlin (2003) 34.
[6] Oh JM, Lee BK, Suh CY and Lim JW, J. Alloy. Compd., 574 (2013) 1.
[7] W. Gordon and A. Bennekom, Mater. Sci. Technol., 12 (1996) 126.
[8] M. Panigrahi, R. K. Paramguru, R. C. Gupta, E. Shibata and T. Nakamura, High Temp. Mater. Proc., 29 (2010) 495.
[9] Oh JM, Lee BK, Choi GS, and Lim JW, J. Korean Inst. Resource. Recycling, **21**(1) (2012) 60.
[10] Lee JE, Cho NC, An CM, Noh JS and Moon JH, Clean Technology, **19**(3) (2013) 264.