

아크용 消耗性 電極 製造를 위한 타이타늄 旋削 스크랩의 再活用

吳貞敏 · *林載元

韓國地質資源研究院 鑛物資源研究本部

Recycling of Ti Turning Scraps for Production of Consumable Arc Electrode

Jung-Min Oh and *Jae-Won Lim

Mineral Resource Research Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

요 약

본 연구는 타이타늄 선삭 스크랩을 진공 아크 용해에 의해 건전한 버튼형 잉곳으로 제조하여 아크 발생용 소모성 전극으로의 재 활용을 위해 타이타늄 내 불순물의 거동 및 특성을 평가하였다. 먼저 가스불순물인 산소는 진공 아크 용해에 의해 초기 표면의 산화층에 의해 제거되지만 이후 타이타늄에 고용된 산소는 제거되지 않는 것으로 확인되었다. 타이타늄 스크랩의 대표 금속불순물인 철의 경우 타이타늄과의 증기압 차이로 인해 진공 아크 용해에 의해 최종 20분간 용해시 약 43%의 제거율을 보이며, 최종 제조된 타이타늄 버튼형 잉곳은 ASTM 규격의 순 타이타늄 등급 3에 해당하는 순도를 보여 VAR(Vacuum Arc Remelting)용 소모성 전극의 제조에 가능한 것으로 확인하였다.

주제어 : 타이타늄, 선삭 스크랩, 진공 아크 용해, 산소, 철

Abstract

Ti button type ingots were prepared by recycling of Ti turning scraps using vacuum arc melting process for production of consumable arc electrode. The behavior of impurities such as Fe, W, O, and N in the Ti button ingots was investigated and the properties of the Ti button ingots were also evaluated. In the case of oxygen gaseous impurity, the oxygen layers on the surface of the Ti turning scraps were easily removed by the first vacuum arc melting. On the other hand, the solute oxygen in the Ti turning scraps was not removed by the next melting. In the case of Fe, major impurity in the Ti turning scraps, the removal degree in the final Ti button ingot refined by vacuum arc melting for 20 minutes was approximately 43 %, which is due to the vapor pressure difference between Ti and Fe. As a result, the Ti button ingots with ASTM grade 3 could be obtained by multiple vacuum arc melting from the Ti turning scraps. Therefore, it was confirmed that the preparation of consumable electrode for vacuum arc remelting could be possible by recycling of Ti turning scraps.

Key words : Titanium, Turning Scrap, Vacuum arc melting, Oxygen, Iron

* Received : July 5, 2012 · Revised : August 20, 2012 · Accepted : September 11, 2012

*Corresponding Author : Jae-Won Lim (E-mail: flashlim@kigam.re.kr)

Mineral Resource Research Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Gwahang-no 124, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

Tel : +82-42-868-3635 / Fax : +82-42-868-3418

©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

국내의 타이타늄 산업에서 타이타늄 원재료는 전량 수입에 의존하고 있으며 최근 3년 새 타이타늄의 수입량은 크게 증가하고 있다. 한국무역통계에 따르면 2009년 약 243,000 톤에서 2011년 약 324,000 톤으로 약 34%가 증가하였다. 이와 동시에 타이타늄의 수입가격 또한 크게 오르고 있으며 2009년에서 2011까지 타이타늄의 수입 증량은 34%가 증가하였지만, 그 수입가격은 약 220% 이상이 증가하였다.¹⁾ 타이타늄은 경량고속으로 고비강도와 내식성이 매우 뛰어난 신소재로 알려져 있다.²⁾ 그러나 타이타늄이 갖는 우수한 성질에도 불구하고 타이타늄의 제조공정이 복잡하고 장시간이 소요되어 제조원가가 타 구조용 재료에 비해 매우 고가이며, 고용점·고반응성·난가공성 등의 단점이 있어, 외국의 경우 타이타늄 및 타이타늄 합금 스크랩의 재활용 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다.³⁾ Zheng⁴⁾ 등의 연구에서는 타이타늄 화합물 스크랩을 이용한 염화타이타늄의 회수 공정을 개발하였다. 이와 더불어 타이타늄 스크랩의 재활용 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있는데, 특히 타이타늄의 용해 중 고반응성으로 인해 전자빔 용해법, 진공 유도 용해법, 플라즈마 아크 용해법 등과 같이 진공 및 불활성 가스 분위기에서의 용해 연구가 활발히 진행되고 있다.^{5,6)} 국내의 경우에도 봉상형 치과용 타이타늄 스크랩을 이용해 Ti-6Al-4V 합금의 제조 연구를 진행하였다.⁷⁾ 하지만 이외에는 국내의 경우 타이타늄 및 타이타늄 합금 스크랩의 재활용 기술은 전무하여 한국무역협회의 자료에 따르면 2011년 국내의 타이타늄 산업에서 발생된 타이타늄 스크랩의 90% 이상인 2,336 톤이 해외로 수출되고 있는 실정이다. 이러한 타이타늄 스크랩의 수출량은 최근 3년새 크게 늘어 2009년 318 톤에서 2010년 1,329 톤, 2011년 2,336 톤으로 약 7배 이상 증가하였다. 또한 2011년 타이타늄 스크랩의 주요 수출국은 일본과 미국으로 약 80% 이상

이 수출되어 낮은 가격으로 수출된 후, 비싼 가격의 고순도 금속이나 공업원료로 재수입되는 악순환이 발생하고 있다.

한편 타이타늄 스크랩의 재활용에 있어서 가장 큰 문제점은 가공중 발생하는 산소 및 철의 오염으로 이러한 불순물은 타이타늄의 물성에 큰 영향을 끼치기 때문이다.⁸⁾ Table 1에 순 타이타늄의 ASTM 규격표를 나타내었다. 표에서도 알 수 있듯이 타이타늄내 타 원소보다도 산소와 철의 함량을 규제하는 것을 알 수 있다. Lu⁹⁾ 등의 연구에서 타이타늄 스크랩의 재활용 용도로는 최종 제품의 제조보다는 VAR(Vacuum Arc Remelting)용 소모성 전극으로의 제조가 유리한 것으로 보고하였다. 따라서 타이타늄 스크랩내 불순물의 제거를 통해 VAR용 소모성 전극의 제조가 가능할 것으로 사료된다(Table 1).

이에 본 연구에서는 타이타늄 스크랩의 종류 중에서 가장 가격이 저렴한 것으로 알려져 있는 선삭 스크랩을 원재료로 이용하여 진공 아크 용해에 의해 버튼형 잉곳을 제조하였다. 또한 타이타늄 스크랩과 거동을 비교하기 위하여 상용 타이타늄 스폰지를 같은 방법으로 버튼형 잉곳을 제조하여 불순물 및 특성을 분석하여 비교하였다. 본 연구의 결과를 타이타늄 선삭 스크랩의 재활용 및 VAR용 소모성 전극 제조에 있어서 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 수행한 실험과정을 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 본 실험에서 모재가 되는 타이타늄 스크랩은 선반 가공 후 발생하는 타이타늄 스크랩으로 산업에서 가장 많이 발생하게 된다. 또한 이와 상호 비교를 위해 상용 타이타늄 스폰지(99.9%, 고순도화학)를 사용하여 동일한 방법으로 실험을 진행하였다. 본 실험의 원재료인 타이타늄 선삭 스크랩의 외형을 타이타늄 스폰

Table 1. Chemical composition of commercial pure Ti in ASTM specifications

Classification	Official Standards	Nominal Composition	Chemical Composition, wt%					
			N (Max)	C (Max)	H (Max)	O (Max)	Fe (Max)	Main Element
Commercial Pure Ti	ASTM Gr. 1	Ti-Fe-O	0.03	0.08	0.015	0.18	0.20	Ti
	ASTM Gr. 2		0.03	0.08	0.015	0.25	0.30	Ti
	ASTM Gr. 3		0.05	0.08	0.015	0.35	0.30	Ti
	ASTM Gr. 4		0.05	0.08	0.015	0.40	0.50	Ti

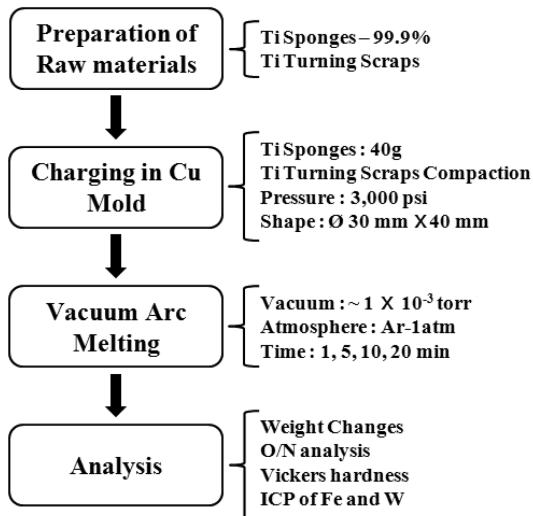


Fig. 1. Flow diagram of the experimental procedure.

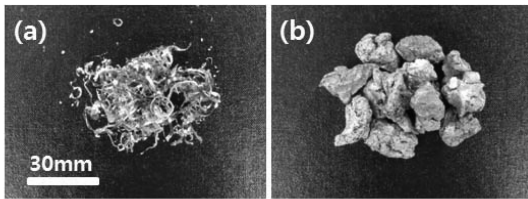


Fig. 2. (a) Photograph of the Ti turning scraps, and (b) the Ti sponges.

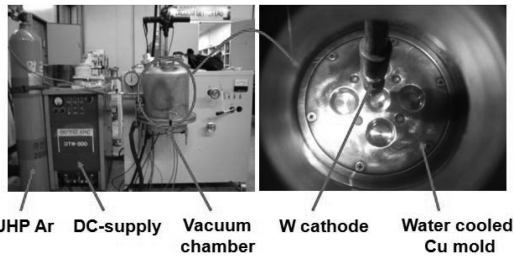


Fig. 3. Photographs of vacuum arc melting system.

지와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험에서는 연구실용 전극식 진공 아크 용해로를 사용하였다. 진공 아크 용해로의 수냉식 이중 진공 챔버 하단에는 수냉식 동 몰드를 결합하여 버튼형 잉곳을 제조할 수 있다. 본 실험에서는 버튼형 잉곳의 지름이 $\phi 45$ mm 크기의 수냉식 동 몰드를 사용하였다. 본 실험에 사용된 진공 아크 용해로의 외형을 Fig. 3에 나타내었다.

실험은 먼저 타이타늄 스크랩의 원활한 용해를 위해 세척을 포함한 전처리 과정을 거치게 된다. 타이타늄 선

삭 스크랩의 경우 많은 양의 가공유를 포함하고 있어, 이를 제거하기 위해 탈지제를 사용하여 수회 반복 세척하였고 이후 아세톤과 에틸 알콜을 이용해 수회 반복 세척하였다. 이후 약 40 g 씩 칭량하여 스틸 컴팩션 몰드($\phi 30$ mm)를 이용하여 약 3,000 psi의 가압력으로 성형체를 제조하였다. 제조된 타이타늄 스크랩 성형체는 진공 아크 용해로의 수냉식 동 도가니에 시료를 장입한 후 약 1×10^{-3} torr까지 진공배기하였다. 챔버의 진공배기가 끝난 후 초고순도 Ar(99.9999%) 가스를 1기압까지 주입하였고 용해 시간을 1, 5, 10, 20 분간 달리하여 용해하였다. 이때 진공 아크 용해의 전기적 조건은 350 A, 10 V 가 사용되었다.

타이타늄 스크랩의 용해가 완료된 후 용해시간에 따른 버튼형 잉곳의 무게변화를 측정하였다. 또한 원재료인 타이타늄 스크랩과 용해 시간에 따라 제조된 타이타늄 버튼형 잉곳들은 산소/질소 함량 분석을 하였다. 산소/질소 함량 분석은 LECO 사의 TC-436 분석기를 이용하였다. 또한 타이타늄 스크랩 및 버튼형 잉곳들의 Fe와 W의 함량변화를 분석하기 위해 유도 결합 플라즈마 질량 분석기 (Inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS, ELAN 6000, Perkin-Elmer)를 이용하였다. 또한 용해 시간에 따른 타이타늄 버튼형 잉곳들의 중심부로 두께 5 mm의 시편을 채취하여 경도의 변화를 조사하였다. 경도는 비커스 시험법 Akashi 사의 MVK-E 분석기를 이용하였고, 모두 10회 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 타이타늄 버튼형 잉곳의 무게 변화

먼저 타이타늄 스크랩과 스폰지의 진공 아크 용해에 의해 용해시간에 따른 버튼형 잉곳의 무게 변화를 분석하였다. 용해된 타이타늄 스크랩 및 스폰지의 버튼형 잉곳은 원재료에 비하여 무게가 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히 타이타늄 스크랩의 경우 초기 1회 용해에서 약 1.2%의 무게가 감소하였다. 이는 진공 아크 용해에 의해 타이타늄 및 불순물의 증발/정련에 의해 무게가 감소한 것보다는 스크랩 표면의 불순물들이 아크에 의해 제거된 것으로 사료된다. 이후 5분, 10분, 20분간 용해하였을 때 약 1.25%, 1.27%, 1.3%의 무게가 감소되는 것을 확인하였다. 타이타늄 스크랩과 더불어 타이타늄 스폰지의 경우에는 5분, 10분, 20분간 용해하였을 때 약 0.12%, 0.13%, 0.15%의 무게가 감소함을 확인

하였다. 원재료가 타이타늄 스크랩과 스폰지 모두 초기 1분 용해 이후에는 모두 같은 경향의 무게 감소를 나타내었다. 이러한 무게 감소는 진공 아크 용해를 통해 높은 용해 온도에 의하여 타이타늄보다 증기압이 높고 용해온도가 낮은 불순물과 타이타늄이 동시에 증발되기 때문으로 사료된다.¹⁰⁾

3.2. 타이타늄내 금속 불순물 변화

다음으로 타이타늄 스크랩과 스폰지의 진공 아크 용해 시간에 따른 버튼형 잉곳 내 Fe 함량의 변화를 분석하였고, 그 함량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 원재료의 타이타늄 스크랩은 전처리를 수행한 후 ICP-AES 분석법에 의해 초기 Fe의 함량을 분석하였다. 초기 타이타늄 스크랩의 Fe 함량은 0.12 wt%로 분석되었다. 이후 초기 1분의 진공 아크 용해에 의해 제조된 버튼형 잉곳 내 Fe의 함량은 0.085 wt%로 감소하였다. 이후 5분, 10분, 20분간 용해하였을 때 버튼형 잉곳 내 Fe의 함량은 각각 0.072 wt%, 0.069 wt%, 0.068 wt%로 감소량이 줄어들음을 확인하였다. 이러한 결과는 위의 용해 시간에 따른 무게감소와 비슷한 경향을 나타내었다. 초기 1분간의 진공아크용해에 의해 버튼형 잉곳 내 Fe 함량의 감소가 크게 나타나는데, 이는 타이타늄 내 고용된 Fe의 정련된 효과라기보다는 스크랩의 표면에 있는 Fe의 불순물들이 전처리에 의해 완전히 제거되지 않고 잔존하여 초기 아크 용해에 의해 제거된 것으로 사료된다. 이후 용해시간이 증가하였을 때는 타이타늄 버튼형 잉곳내 고용되어 있는 Fe가 타이타늄보다 높은 증기압에 의해 휘발/제거된 것으로 사료된다. 다음으로 타이타늄 스폰지 내 Fe 함량 또한 5분, 10분, 20분간 용해하였을 때 타이타늄 스크랩과 유사한 감소 경향을 보였다. 타이타늄 내 Fe의 함량이 제거되는 정도는 제거율로 알 수 있으며, 그 불순물에 대한 제거율은 다음 식에 의해 정의된다.¹¹⁾

$$RD (\%) = 100 (C_i - C_f) / C_i$$

위 식에서 C_i 는 초기 타이타늄 내 Fe의 함량이며 C_f 는 타이타늄 내 Fe의 최종 함량을 나타낸다. 각각의 제거율을 보면 타이타늄 스크랩의 경우 진공 아크 용해에 의해 최종 20분간 용해 시 약 43%의 제거율을 나타내었으며, 타이타늄 스폰지의 경우 최종 20분간 용해 시 약 32%의 제거율을 보였다. 이러한 최종 제거율만 고려하면 타이타늄 스크랩의 경우가 더 큰 제거율을 나타

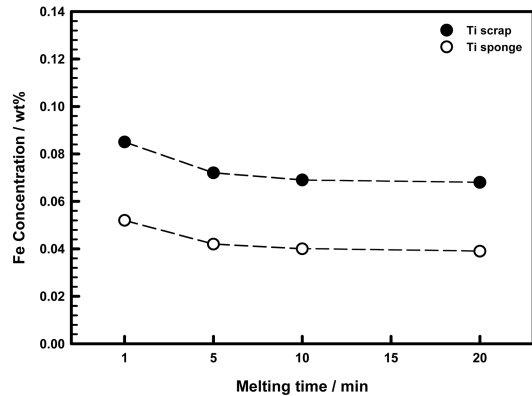


Fig. 4. Concentration changes of Fe in the Ti button ingots re-melted by vacuum arc melting as a function of melting time.

내지만 위에서 언급했듯이 초기 1분 이후 용해에서는 두 원재료 모두 약 20%의 제거율을 나타내 비슷한 제거율을 보이는 것으로 확인되었다. 다음으로 타이타늄 내 W의 함량 변화를 분석하여 Fig. 4에 나타내었다. 초기 타이타늄 스크랩과 스폰지의 W의 함량은 각각 0.01 wt%, 0.003 wt%로 나타났다. 이러한 차이는 타이타늄 스크랩의 경우 선반 및 기계가공시 가공공구내 W이 포함되어 있어서 가공 중에 W이 오염된 것으로 사료된다. 타이타늄 스크랩의 초기 1분 용해시 W의 함량이 0.007 wt%로 감소된 것으로 나타났다. 이는 위의 Fe의 결과와 유사한 것으로 타이타늄 스크랩 표면의 W이 아크에 의해 제거된 것으로 사료된다. 이후 5분, 10분, 20분간 용해 시에는 약 0.002 wt%의 W 함량이 증가하였는데, 이는 타이타늄 스폰지의 경우도 동일하게 최종 20분간 용해 시에 약 0.002 wt%의 W 함량이 증가함을 확인하였다. 이러한 타이타늄 내 W의 함량 증가 이유는 진공 아크 용해로의 전극으로 W 봉을 사용하기 때문에 용해시 전극으로부터 오염된 것으로 사료된다. 또한, 용해시 불순물 제거 및 타이타늄 무게 감소에 따른 W 함량의 농축으로 인한 요인도 포함된다. 일반적으로 고용점 금속의 용해/정련에 의해서는 W 불순물이 제거되지 않으므로 화학적 방법에 의해 우선적으로 W를 제거한 후 용해/정련 과정을 거치는 것이 필요하다.¹²⁾

3.3. 타이타늄내 가스 불순물 변화

이후 타이타늄 스크랩과 스폰지의 진공 아크 용해에 의해 제조된 버튼형 잉곳 내 산소 및 질소 가스불순물 함량 변화를 분석하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내

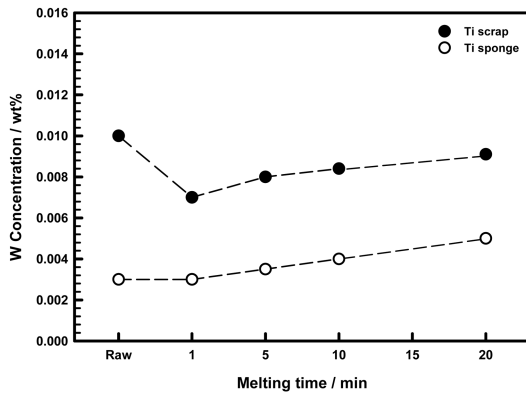


Fig. 5. Concentration changes of W in the Ti button ingots re-melted by vacuum arc melting as a function of melting time.

었다. 타이타늄 스크랩의 경우 초기 산소 및 질소의 함량은 0.85 wt%, 0.065 wt%로 분석되었다. 이후 초기 1분간 용해하였을 때 버튼형 잉곳 내 산소의 함량은 크게 제거되어 0.62 wt%, 0.009 wt%로 분석되었다. 이후 5분, 10분, 20분간 용해를 진행하였을 때 0.32 wt%, 0.33 wt%, 0.32 wt%로 분석되었다. 또한 질소의 경우 최종 20분간 용해시 0.005 wt%의 함량이 분석되었다. 타이타늄 스폰지의 경우, 초기 산소 및 질소의 함량은 0.22 wt%, 0.005 wt%로 분석되었으며, 최종 20분간 용해시에는 산소 0.24 wt%, 질소 0.003 wt%로 분석되었다. 타이타늄 스크랩의 경우 선반 및 기계가공시 새로운 산소-타이타늄 계면이 형성되며, 가공과정에서 발생하는 900-1,000°C의 높은 열에 의하여 계면을 통한 산소 및 질소의 오염 및 표면 산화피막의 형성 등에 의하여 산소함량이 증가하는 것으로 알려져 있다.¹³⁾ 이러한 타이타늄 스크랩을 진공 아크 용해에 의해 초기 용해시 얇은 면에 형성되어 있는 산화피막은 쉽게 제거되지만 이후 버튼형 잉곳으로 제조되면서 산소가 타이타늄 내로 고용되면서 타이타늄의 강한 산화 친화력으로 인해 쉽게 제거되지 않는다. 이러한 결과는 타이타늄 스폰지에서조차 마찬가지로 용해시간이 증가하여도 고용된 산소의 함량은 제거되지 않았다.

3.4. 타이타늄 버튼형 잉곳의 경도 변화

각 버튼형 잉곳 시편들의 경도 측정은 비커스 경도기를 이용하였다. 측정조건은 0.5 kgf 하중으로 10초간 유지하였다. 타이타늄 스크랩과 스폰지의 버튼형 잉곳의 경도 변화를 Fig. 6에 그래프로 나타내었다. 타이타늄

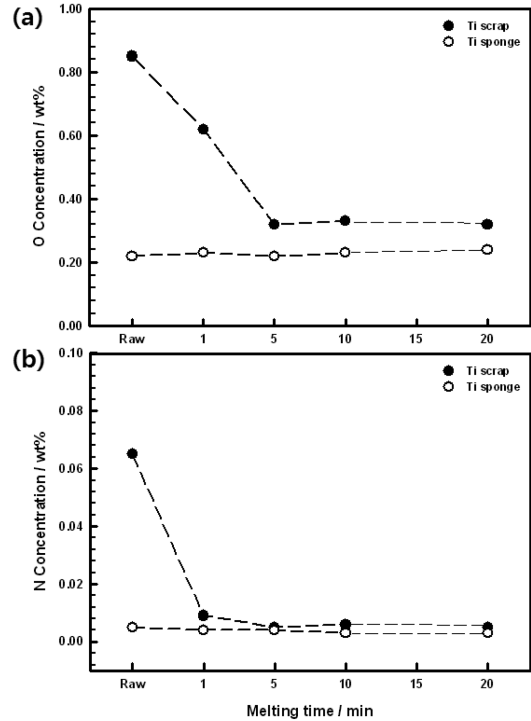


Fig. 6. Concentration change of (a) oxygen and (b) nitrogen in the Ti button ingots re-melted by vacuum arc melting as a function of melting time.

스크랩의 경우 1분간 용해된 버튼형 잉곳은 285 Hv이었으며 이후 용해시간이 증가하면서 261, 252, 250 Hv로 경도가 감소하였다. 또한 타이타늄 스폰지의 경우에도 경도값이 초기 222 Hv에서 용해시간에 따라 220, 212, 209 Hv로 감소하는 경향을 나타내었다. 타이타늄 스크랩의 경우 타이타늄 스폰지의 경도보다 전체적으로 약 40 Hv 높은 것으로 측정되었다. 이는 타이타늄 잉곳 내 불순물의 함량의 차이에서 비롯된 것으로 보인다. 오정민⁷⁾, 심건주¹⁴⁾ 등의 연구에 의하면 타이타늄 및 타이타늄 합금에 있어서 산소 및 Fe의 함량과 경도사이에 선형적인 관계가 있다고 보고된 바 있다. 산소와 더불어 질소 또한 타이타늄의 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다.¹⁵⁾ 또한 타이타늄내 가스 불순물 이외에 금속 불순물중에서 Fe의 함량이 경도에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Sibum¹⁵⁾의 연구에서도 타이타늄 내 가스 불순물 및 금속 불순물이 경도에 미치는 연구결과를 나타내었다. 위의 Sibum의 연구결과에 따르면 타이타늄내 질소가 경도증가에 미치는 영향은 크지만 공업용 타이타늄에서 질소 함량은 수

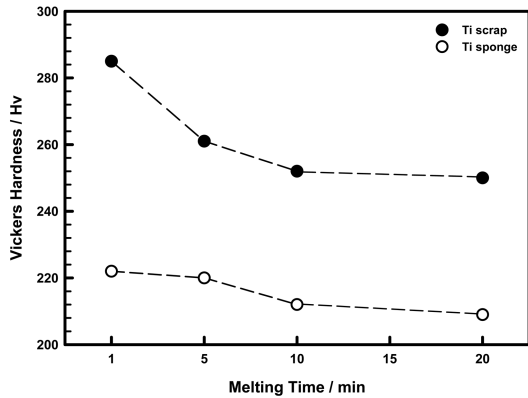


Fig. 7. Variation of Vickers hardness of the Ti button ingots re-melted by vacuum arc melting as a function of melting time.

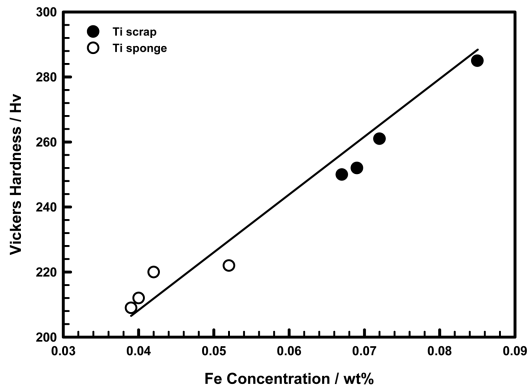


Fig. 8. Hardness changes in the Ti button ingots with Fe concentration.

십 ppm으로 유지되고, 본 실험에서도 타이타늄 스크랩과 스폰지의 버튼형 잉곳 내 질소 함량의 차이가 크지 않기 때문에 경도변화에 미치는 인자에서 배제하였다. 또한 본 실험의 결과에서 알 수 있듯이 산소 함량의 변화는 5분 이상의 용해시간에서는 큰 변화를 보이지 않기 때문에 경도에 미치는 인자에서 배제하고 타이타늄 내 금속 불순물인 Fe의 함량과 경도의 변화를 알아 보았다. Fig. 7에 Fe의 함량에 따른 타이타늄 버튼형 잉곳의 경도 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Fe의 함량에 비례하여 경도 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 ASTM 규격에서도 순 타이타늄의 등급에 있어서 금속 불순물에서는 타 원소보다도 Fe를 규제하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 타이타늄 스크랩의 재활용 원료로서 가장 경제적인 장점을 갖는 선삭 스크랩을 진공 아크

용해하여 건진한 버튼형 잉곳을 제조하였다. 제조된 버튼형 잉곳은 순 타이타늄 ASTM 규격의 등급 3에 해당하는 순도를 갖는 것으로 본 연구에서 제시한 VAR(Vacuum Arc Remelting)용 소모성 전극으로의 활용이 가능한 것으로 확인하였다.

4. 결 론

타이타늄 선삭 스크랩을 진공 아크 용해에 의해 버튼형 잉곳을 제조하고, 잉곳 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 선반 및 기계가공 중에 발생하는 타이타늄 선삭 스크랩은 산소의 오염이 동반되며 이는 전처리 과정에서 제거되지 않으며, 진공 아크 용해에 의해 초기 큰 폭으로 제거되지만 이후 고용된 산소 함량은 제거되지 않는 것으로 확인되었다.

2) 타이타늄 스크랩내 가스불순물 외 Fe와 W 선반 및 기계가공 중에 스크랩에 오염되는 것으로 나타났으며, Fe의 경우 타이타늄과의 증기압 차이로 인해 진공 아크 용해에 의해 최종 20분간 용해시 약 43%의 제거율을 보이며, W의 경우 진공 아크 용해에 의해 제거되지 않고 오히려 W 전극봉으로부터 용해시간에 따라 소폭 증가하는 것을 확인하였다.

3) 최종 제조된 타이타늄 버튼형 잉곳의 ASTM 규격의 순 타이타늄 등급 3에 해당하는 순도를 보이며, VAR(Vacuum Arc Remelting)용 소모성 전극으로의 재활용이 가능한 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. The Korea International Trade Association, Homepage <http://www.kita.net>.
2. Oh J. M. et al., 2011: *Oxygen Effect on the Mechanical Properties and Lattice Strain of Ti and Ti-6Al-4V*, *Met. Mater. Int.*, **17**(5), pp. 733-736.
3. Reitz J. et al., 2011: *Recycling of gamma titanium aluminide scrap from investment casting operations*, *Inermetallics*, **19**, pp. 762-768.
4. Zheng H. et al., 2008: *Recovery of titanium metal scrap by*

- utilizing chloride wastes, *J. Alloys Compds.*, **461**, pp. 459-466.
5. Vutova K. et al., 2010: *Investigation of electron beam melting and refining of titanium and tantalum scrap*, *J. Mater. Processing Technology*, **210**, pp. 1089-1094.
 6. Burkhard R. et al., 1994: *Recycling of metals from waste with thermal plasma*, *Resources, Conservation and Recycling*, **10**, pp. 11-16.
 7. Oh J. M. et al., 2012: *Preparation and oxygen control of Ti-6Al-4V alloys by recycling dental pure Ti scraps*, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, **21**(1), pp. 60-65.
 8. Wasz M. L. et al., 1989: *The effect of hydrogen on mechanical properties of oxygen-strengthened titanium*, *Scripta Metallurgica*, **23**(12), pp. 2039-2042.
 9. Lu. X. et al., 2012: *Thermodynamic analysis of separation of alloying elements in recycling of end-of-life titanium products*, *Sep. Purif. Tech.*, **89**, pp. 135-141.
 10. Choi G. S. et al., 2009: *Preparation of 5N grade tantalum by electron beam melting*, *J. Alloys Compds.*, **469** pp. 298-303.
 11. Lim J. W. et al., 2010: *Hydrogen effect on refining of Mo metal by Ar-H₂ plasma melting*, *Mater. Lett.*, **64** pp. 2290-2292.
 12. Choi G. S. et al., 2009: *Purity evaluation of Ta metal refined by Ar/H₂ plasma arc melting*, *Met. Mater. Int.*, **14**(4) pp. 539-543.
 13. Choi G. S., 2009: *A technological development for utilization of the titanium scrap recycling*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Final Report.
 14. Shim G. C. et al., 1995: *Effects of Changes in O/Fe Contents on Mechanical Properties of Commercially Pure Titanium*, *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.*, **33**(1) pp. 14-20.
 15. H. Sibum, 2003: *Titanium and Titanium alloys*, *Adv. Eng. Mater.*, **5**(6) pp. 393-398.

吳 貞 敏

- 한밭대학교 응용소재공학과 학사
- 충남대학교 응용소재공학과 석사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 연구원

林 載 元

- 성균관대학교 금속공학과 학사
 - 성균관대학교 신소재공학과 석사
 - 일본 Tohoku대학 금속공학전공 박사
 - Tohoku대학 금속재료연구소 COE Fellow
 - 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
-