

## Plasma Arc Remelting에서 활성 금속 Scrap 재활용에 미치는 공정인자의 연구

§정재영\* · 손호상\*\*\*

\*경북대학교 자동차부품소재연구소, \*\*경북대학교 공과대학 신소재공학부

### A Study of Process factors on the Recycling of Reactive Metal Scraps in Plasma Arc Remelting

§Jae-Young Jung\* and Ho-Sang Sohn\*\*\*

\*Automobile Parts & Materials Research Center, Kyungpook National University,  
80 Daehak-ro, Buk-Gu, Daegu 41566, Korea

\*\*School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University,  
80 Daehak-ro, Buk-Gu, Daegu 41566, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 anode로 Kroll 공정 처리된 Ti 스폰지를 사용하여 아크 전류, 아크 전압, 플라즈마 가스 종류에 따른 플라즈마 아크 재용해 거동을 조사하였다. 진공펌프의 토출 압력 범위(200~300 kgf/cm<sup>2</sup>)에서는 토출 압력 증가에 따라 주어진 아크 길이에서 아크 전압이 크게 달라지지 않았다. 이것은 작업하는 동안 진공챔버내 압력이 거의 변화하지 않고, 주어진 분위기 압력을 잘 유지함을 의미한다. 여러가지 아크 전류 조건(700~900A)에서, 아크 전류 증가에 따라 아크 전압이 약간 증가하였고, anode 재료변화에 대한 효과도 이전 연구결과와 비교하였다. 분위기 가스가 Ar에서 He으로 변경되는 경우에는 정상상태의 출력이 2배 정도 향상되는 효과가 관찰되었다. 플라즈마 아크 장치의 출력 증가는 Ti 스폰지의 재용해 속도 증가와 함께 잉곳 표면도 양호해졌다. New 스크랩인 타이타늄과 old 스크랩인 지르코늄 합금을 플라즈마 아크 재용해한 결과, 매우 양호한 표면을 갖는 잉곳을 제조할 수 있었다.

주제어 : 플라즈마 아크 재용해, 타이타늄, 지르코늄, 스크랩, 아크 전압, 아크 전류, 아크 길이

#### Abstract

In this study, plasma arc remelting behaviors according to arc current, arc voltage, and types of plasma gas were investigated using Kroll processed Ti sponges as anode. In the discharge pressure range of vacuum pump (200~300 kgf/cm<sup>2</sup>), the arc voltage did not vary greatly with the increase of discharge pressure at a given arc length. This means that the pressure in the vacuum chamber during operation hardly changes and the atmospheric pressure maintains. Under various conditions of arc currents (700~900A), the arc voltage slightly increased with arc current. The effects of anode materials and operational variables on the arc length-arc voltage relationship were compared with the results in previous studies. When the atmospheric gas changed from argon to helium, double effect of improvement on the output of the steady state was observed. The increase of output in the plasma arc device was accompanied by an increase in the melting rate of the Ti sponge and the quality of the ingot surface was also improved. The plasma arc remelting of the new scrap titanium and the old scrap zirconium alloy could result in the fabrication of an ingot with high surface quality.

· Received : August 8, 2017 · 1st Revised : September 20, 2017 · 2nd Revised : October 20, 2017 · Accepted : October 23, 2017

§ Corresponding Author : Jae-Young Jung (E-mail: jaeyjung7@gmail.com)

Automobile Parts & Materials Research Center, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, 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.

**Key words :** Plasma arc remelting, Titanium, Zirconium, Scrap, Arc voltage, Arc current, Arc length

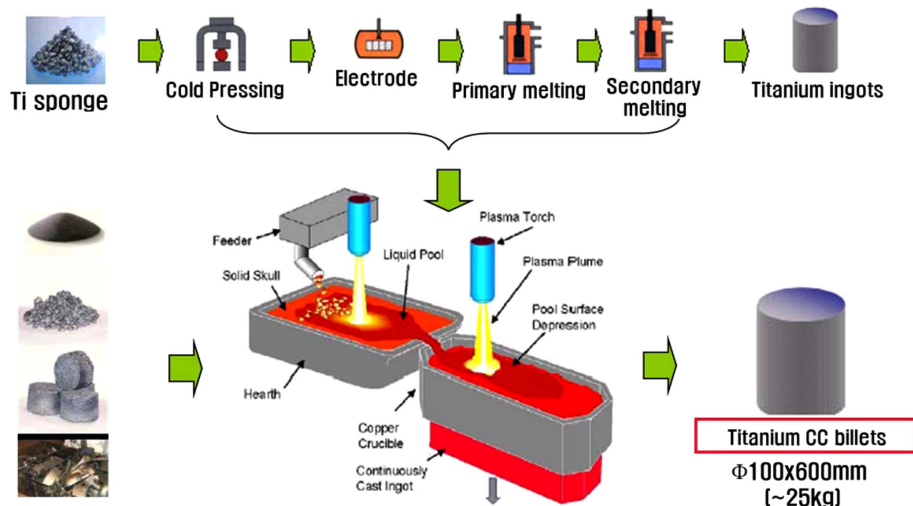
## 1. 서 론

전략소재인 타이타늄은 다양한 산업분야에서 독보적인 물성을 보유하고 있어 사용할 수 밖에 없는 특정 용도를 중심으로 적용되고 있다. 그러나 가격이 비싸다는 단점으로 널리 활용되고 있지 않다. 그래서 소재가격의 약 15%를 차지하는 용해공정 단계를 혁신적으로 개선하기 위한 cold hearth 기반의 용해기술 확보를 위해 전문가들은 노력하고 있다. 기존의 소모식 진공아크 용해(VAR)법은 생산비용이 적고 대형 잉곳 제조에 적합하다는 장점으로 인하여 널리 사용되고 있지만 소모전극 제조, 스크랩 재활용의 어려움, 성분원소의 편석, 전극제작 시 침입형 불순물의 오염 등의 단점이 있다. 반면에 Ti 스크랩 활용이 용이하고 불순물 제어가 용이한 플라즈마 cold hearth 용해(PACHM) 및 전자빔 cold hearth 용해(EBCHM) 방법이 신기술로 주목받고 있다<sup>1,2)</sup>.

플라즈마 아크 용해기술은 주로 다형상(저원가 분말, 스폰지, 스크랩 등) 타이타늄 원료와 저가의 합금원소를 활용한 균질한 조성의 고품위 타이타늄 합금화 기술과 cold hearth 용해 기반에 의해 잉곳을 연속적으로 제조하는 신기술 등으로 나뉜다. 이들 기술은 현재 전통적인 타이타늄 소재강국인 미국, 일본, 러시아는 물론

이고 영국, 이탈리아, 독일을 중심으로 항공용 부품 수요가 많은 나라에서는 항공 소재 재활용 니즈가 높아져 별도의 재용해 잉곳사업을 영위하는 회사를 보유하고 있다<sup>3)</sup>.

타이타늄은 해수담수설비, 해양플랜트, 자동차 등 주력산업용 핵심소재로도 널리 사용되고 있으며, 우주·항공, 국방, 의료, 에너지·환경, 그리고 레저·스포츠 등의 미래 산업용 소재로도 각광을 받고 있다. 그러나 타이타늄의 높은 가격과 합금의 공급제한 등의 문제로 시장 확대에 걸림돌이 되고 있으며, 또한 일부 합금은 전략소재로 수입이 제한되고 있어 국산화가 반드시 필요한 핵심소재이다. 타이타늄 및 타이타늄 합금 스크랩의 재활용은 저가 원료를 사용한다는 점에서 단가를 낮출 수 있어 국내뿐만 아니라 해외 시장에서도 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 보인다. 또한 타이타늄 합금 스크랩의 재용해 과정 중 산소 저감이 가능하다면 스크랩의 전처리 공정인 탈산 작업을 최소화할 수 있으므로 스크랩 활용의 극대화가 가능하다. 특히 국내에서도 관련 플라즈마 아크 용해연구가 특정연구그룹<sup>4-8)</sup>에서 주로 진행되어왔으나 지속적인 기초 연구수행 결과를 바탕으로 산업화가 필요한 시점이 되었다. 이러한 플라즈마 아크 재용해는 Fig. 1에서 예시하는 바와 같이 기존 진공 아크 재용해(VAR)법에 비해 여러가지 장점이 예상되기



**Fig. 1.** Schematic diagrams showing the effects of introduction by plasma arc remelting process instead of vacuum arc remelting process.

때문에 특히 최근 사업화 가능성에 대해 관심이 많아졌고 일부 중소기업은 정부과제 지원으로 연구를 진행하고 있다.

따라서 본 연구에서는 Ti 스폰지, new 및 old 스크랩을 이용하여 플라즈마 아크 재용해 기술에 대한 실험적 연구를 하고자 한다. 그 이유는 플라즈마 아크 용해(PAM) 공정이 대기압 하에서의 초고온의 플라즈마 가스가 정련이나 원료 문제 해결에 많은 장점을 갖기 때문이다. 특히, 타이타늄 합금을 용융시킬 때, 플라즈마 아크 용융 공정은 합금 성분의 증발 손실이 적고, 조성 제어가 비교적 용이하며, 재료 형태에 대한 제약도 적다. 그래서 아크 조건에 관한 기초 연구가 진행되었고 활성금속 스크랩 재용해 시험연구를 수행하였다. 특히 본 연구에서는 아크전류, 아크전압, 플라즈마 가스종류에 따른 플라즈마 아크 용해 거동을 조사하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에 플라즈마 아크 재용해로는 국내 기술로 자체적으로 제작한 장치로써 약 100 mm 직경으로 타이타늄 잉곳을 제조할 수 있었다. 본 장치는 1,000A 전류, 150 V 전압 범위로 조절가능하여 최대 150 kW까지 출력을 낼 수 있다. 대부분의 시험은 하기의 작업 조건에서 용해되었다. Fig. 2는 본 장치에 대한 모식도이고 Fig. 3은 본 장치가 정상적으로 작동되는 동안 발생하는 플라즈마 토치와 아크 발생 모양을 보여준다.

실제로 산업현장에서는 150SQ의 빌렛을 사용하므로 현재 연구장비를 3~4배 정도로 스케일업 하면 상용화가 가능할 것으로 보고 있다.

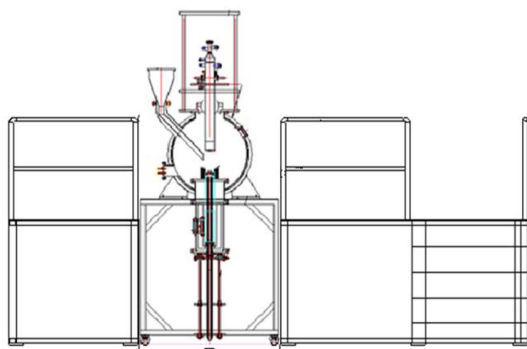


Fig. 2. A schematic diagram showing the plasma arc remelting apparatus with steel structure frames.

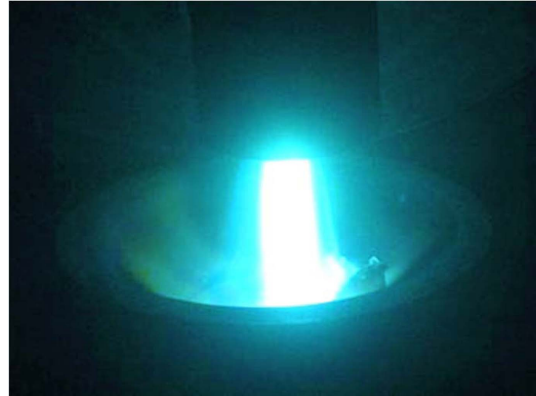


Fig. 3. A photograph showing the plasma flame and plasma torch in plasma arc remelting process.

Table I. Experimental conditions

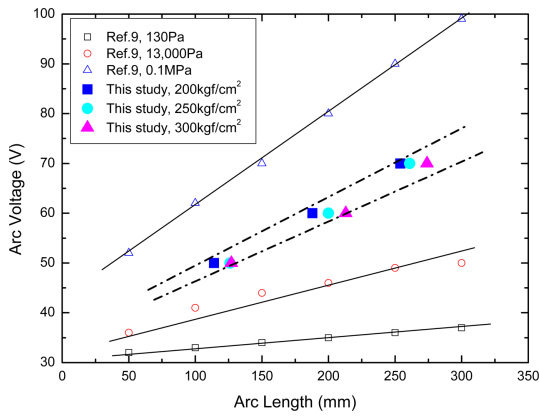
Item	Condition
Atmospheric pressure	0.8~0.9 atm
Arc current	600~1,000A
Arc length	100~230 mm
Gasflow rate	1.8~2.4 Nm <sup>3</sup> /h
Copper mold configuration	Ø100 mm

## 3. 실험결과 및 고찰

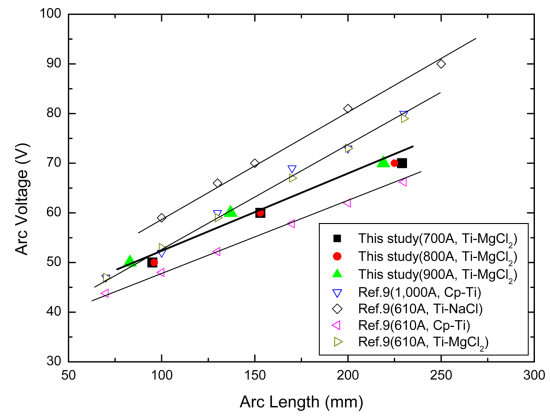
### 3.1. 아크 전류와 분위기 압력의 효과

본 연구에서는 용해 효율에 영향을 미치는 아크 길이의 변화를 이해하기 위하여, 아크 전압, 아크 전류, Ar 가스압력 변화에 대한 효과를 측정하였다. 상기의 여러 가지 운전 조건하에서 조사한 결과, 플라즈마 아크 길이는 아크 전압에 따라 선형적으로 변화한다는 사실을 알게 되었다(Fig. 4, 5, 6). 본 연구에서 아크 전압은 anode로써 Kroll 공정 처리된 Ti 스폰지를 이용하여 측정하였다.

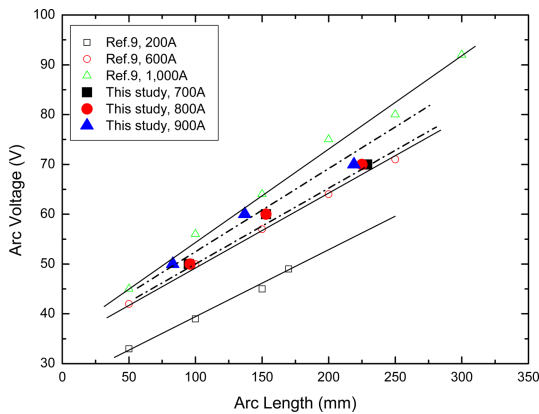
본 실험은 Ar을 토치 가스로 사용했을 때, 주어진 아크 전류 800A와 0.8~0.9기압의 분위기 압력(~0.08 - 0.09 MPa) 조건에서 진공펌프의 토출 압력(200~300 kgf/cm<sup>2</sup>)에 따른 아크 길이 의존성을 측정하였다. 이 실험의 목적은 건전한 아크가 지속적으로 발생하도록 Ar 가스를 지속 공급과 배출되어야 하는 환경하에서 아크 전압과 아크 길이의 상관성 변화가 중요하기 때문이다. Fig. 4는 주어진 진공펌프의 토출 압력이 증가함에 따라 아크 전압에 대한 아크 길이의 의존성이 약간씩 차이가 있지만 크게 변하지 않음을 보여준다. 그리고 주



**Fig. 4.** The variations of arc length as a function of arc voltage in this study ( $\sim 0.08\text{--}0.09$  MPa) and the results of previous study (Ref.9) with various atmosphere pressures.



**Fig. 6.** The variations of arc length as a function of arc voltage in this study and the results of previous study (Ref.9) using various anode materials.



**Fig. 5.** The variations of arc length as a function of arc voltage in this study (700~900A) and the results of previous study (Ref.9) with various arc currents.

어진 분위 압력하에서 아크 전압에 대한 아크 길이의 변화 기울기도 큰 차이가 없었다. 반면에 Seiji Nishi 등이 Ti-6Al-4V합금을 anode로 하여 아크 전류 1000A 조건에서 연구한 결과<sup>9)</sup>는 분위기 압력증가에 따라 크게 달라진다. 본 시험의 결과는 진공펌프의 토출 압력 변화가 실제 시험작업시 진공챔버내 압력 변화에는 큰 영향을 미치지 않고 설정된 분위기 압력을 잘 유지하는 것으로 판단된다.

또한 여러가지 아크 전류 조건(700~900A)에서 아크 전압과 아크 길이 사이의 관계는 Fig. 5에 도식화하였다. 아크 전류가 증가함에 따라 주어진 아크 길이에서

아크 전압이 약간 증가함을 보여준다. Seiji Nishi 등이 Ti-6Al-4V합금을 anode로 하여 Ar 0.1 MPa 압력하에서 연구한 결과<sup>9)</sup>도 함께 도식화하였으며 압력조건과 anode가 서로 상이함에도 불구하고 아크 전류 증가에 따라 아크 전압과 아크 길이 상관곡선이 주어진 아크 길이에서 아크 전압이 높아지는 쪽으로 이동한다.

또한 Fig. 6은 anode 재료의 변화에 대한 관점에서 아크 전압과 아크 길이 사이의 관계를 도식화하였다. Seiji Nishi등의 연구결과<sup>9)</sup>에서는 타이타늄 스폰지가 녹을 때 내재된  $\text{MgCl}_2$ 이나  $\text{NaCl}$  염화물 증기에 의해 크게 변동하는 것으로 보고하고 있다. 그 이유는 본 연구의 Ti 스폰지의 경우, Kroll법으로 제조된 것이므로 환원제인 Mg과 결합한  $\text{MgCl}_2$ 가 잔류하고 있고, Hunter법으로 제조한 Ti 스폰지는 환원제인 Na으로부터 생성되는  $\text{NaCl}$ 이 잔류하기 때문이다. 특히 Hunter법으로 제조된 Ti 스폰지의 경우, Kroll법에 의해 제조된 Ti 스폰지와 비교하여 아크 전압-아크 길이 변화선이 상이한 의존성을 보인다고 보고하고 있다<sup>9)</sup>. 그러나 본 연구결과는 이전 연구결과<sup>9)</sup>인 610A과 Ar 0.1 MPa ( $\sim 1$  기압) 압력에서 Kroll 공정 처리된 Ti 스폰지로 용해시 얻은 아크 전압과 아크 길이 사이의 상관곡선과 비교하여 아래에 위치하고 있다(Fig. 6). 아마도 본 연구가 이전 연구결과보다 다소 낮은 분위기 압력하에서 낮았기 때문이거나 잔류  $\text{MgCl}_2$  수준이 낮기 때문으로 판단된다. 특히 본 실험의 anode가 잔류  $\text{MgCl}_2$  수준이 낮을 가능성은 이전 연구보다 훨씬 근래에 만들어진 상업용 Ti 스폰지이기 때문이다.

### 3.2. 분위기 가스의 효과

플라즈마 토치 가스에 Ar과 He을 사용해보면, 플라즈마 아크 전압은 He의 경우가 더 높고, 용융 풀에 전달되는 열전달도 같은 경향을 나타낸다. 토치 가스로서 Ar에서 He으로 대체함으로써, 용융물에 대한 아크 전압 및 열효율의 증가로 인해 정상상태의 출력이 두 배 정도로 증가하였다.

Fig. 7의 타이타늄 스폰지를 이용한 잉곳 제조사진은 900A, 50V, 40LPM, 0.8기압 조건에서 얻어진 것으로 외관이 매우 거칠거칠한 모습을 갖는다. 이 때 구현된 정상출력은 45 kW 수준이었다. 반면에 He을 토치 가스로 사용되는 경우, Ar 가스보다 더 높은 아크 전압을 나타낸다. Fig. 8의 타이타늄 스폰지를 이용한 He 가스를 활용한 플라즈마 아크 용해된 잉곳 사진은 900A, 90V, 40LPM, 분위기 0.8기압 조건에서 제조되었으며 외관은 상대적으로 건전한 표면을 보인다. 이 때 구현된 출력은 80 kW 수준이었다.

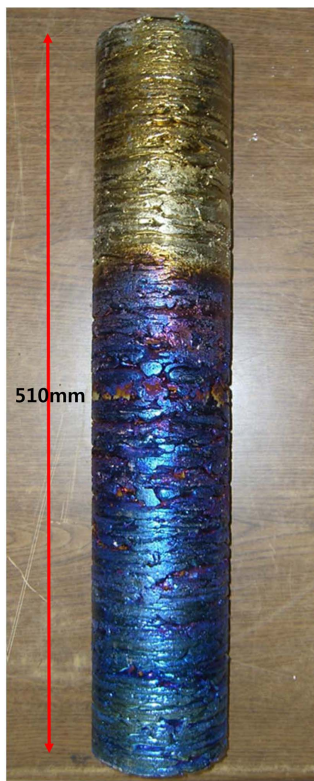


Fig. 7. Photograph showing the titanium ingot produced by plasma arc melting process using Kroll processed Ti sponges. (Ar gas atmosphere)

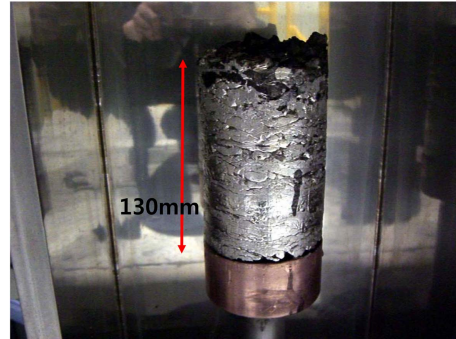


Fig. 8. Photograph showing the titanium ingot produced by plasma arc melting process using Kroll processed Ti sponges. (He gas atmosphere)

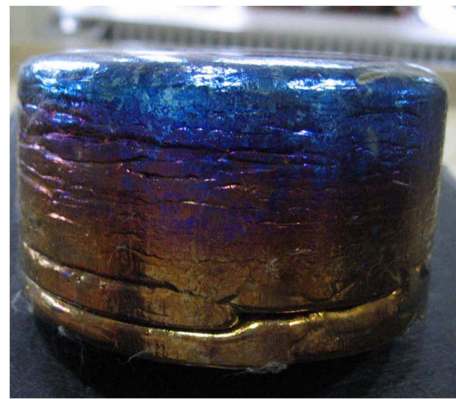


Fig. 9. Photograph showing the titanium alloy ingot produced by plasma arc remelting process using Ti alloy of new scraps. (Ar gas atmosphere)

### 3.3. 스크랩 활용 Ti, Zr 용해시험

New 및 old 스크랩을 이용하여 Table1에 준하는 조업조건에서 플라즈마 아크 용해를 수행하였다. Ti 스폰지를 용해한 경우와는 달리 주조상태의 new 스크랩을 활용하여 플라즈마 아크 용해된 Ti 합금 잉곳은 매우 깨끗한 외관을 보여주었다(Fig. 9). 이는 아마도 new 스크랩이 Ti 스폰지와는 달리 가스나 염화물이 제거된 1차 용해 및 가공된 소재라서 건전한 외관을 보이는 것으로 이해된다.

특히 old 스크랩을 이용하여 플라즈마 아크 용해된 Zr 합금 잉곳의 경우에도 별도로 산세 등을 하지 않았음에도 불구하고 매우 건전한 상태의 합금 잉곳을 얻을 수 있었다(Fig. 10). 본 조업조건은 아크전류 900-1000A, 아크전압 50-55V이었고, 가스유량은 30LPM을



**Fig. 10.** Photograph showing the zirconium alloy ingot produced by plasma arc remelting process using Zr alloy of old scraps. (Ar gas atmosphere)

적용하여 제조하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 anode로 Kroll 공정처리된 Ti 스폰지를 사용하여 아크 전류, 아크 전압, 플라즈마 가스 종류에 따른 플라즈마 아크 재용해 거동을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 진공펌프의 토출 압력 범위(200~300 kgf/cm<sup>2</sup>)에서는 압력 증가에 따라 주어진 아크 길이에서 아크 전압은 크게 달라지지 않았다.
2. 여러가지 아크 전류 조건(700~900A)에서는 아크 전류가 증가함에 따라 주어진 아크 길이에서 아크 전압이 약간 증가하였고, anode 재료변화에 대한 효과도 이전 연구결과와 비교하였다.
3. 분위기 가스가 Ar에서 He으로 변경되는 경우, 정상상태의 출력이 2배 정도 향상되는 효과가 관찰되었다. 이러한 출력의 증가는 Ti 스폰지를 용해하는데 있어서 용해속도 증가는 물론이고 잉곳 표면등도 양호해졌다.
4. New 스크랩인 타이타늄과 old 스크랩인 지르코늄

합금을 플라즈마 아크 용해한 결과, 매우 양호한 표면을 갖는 잉곳을 제조할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 연구비 지원(과제번호 10063143)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

1. Vutova, K., Vassileva, V., Koleva, E., Georgieva, E., Mladenov, G., Mollov, D., and Kardjiev, M., 2010 : Investigation of Electron Beam Melting and Refining of Titanium and Tantalum Scrap, J. Mater. Proc. Technol., 210, pp.1089-1094.
2. Reitz, J., Lochbichler, C., and Friedrich, B., 2011 : Recycling of Gamma Titanium Aluminide Scrap from Investment Casting Operations, Intermetallics, 19, pp.762-768.
3. <http://www.timet.com/capabilities/global-manufacturing/melt-operations/toll-melting.html>

4. Jae-Young Jung et al., 2007 : Development of Low Elastic Modulus Titanium Materials for Biomedical Implant(I), RIST Research report, pp.1-138.
5. Jae-Young Jung et al., 2008 : Development of Low Elastic Modulus Titanium Materials for Biomedical Implant(II), RIST Research report, pp.1-112.
6. Good-Sun Choi and Jae-Won Lim, 2008 : Progress and Status of Titanium Melting Technology, Trends in Metals & Materials Engineering, 21(1), pp.24-28.
7. Jung-Min Oh, Jae-Won Lim, 2012 : Recycling of Ti Turning Scraps for Production of Consumable Arc Electrode, J. the Korean Inst. of Resources Recycling, 21(5), pp. 58-64.
8. Jung-Min Oh, Back-Kyu Lee, Good-Sun Choi, and Jae-Won Lim, 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.
9. Seiji Nishi, Tatsuhiko Kusamichi, and Toshio Onoye, 1995 : Arc Voltage and Heat Efficiency during Plasma Arc Melting of Titanium, ISIJ International, 35(2), pp.114-120.

---

### 정 재 영

- KAIST 재료공학 박사
  - 포항산업과학연구원 수석연구원
  - ㈜메디엘 대표/기술이사
  - 현재 경북대학교 자동차부품소재연구소 초빙교수
  - 당 학회지 제25권 4호 참조
- 

---

### 손 호 상

- 현재 경북대학교 신소재공학부 교수
  - 당 학회지 제11권 6호 참조
-