

## DC-ESR法을 이용한 타이타늄 스크랩의 再熔融에 관한 研究<sup>†</sup>

徐領得 · 李鎬成 · <sup>†</sup>孫豪祥

慶北大學校 金屬新素材工學科

## Study on the Remelting of Titanium Scrap by DC-ESR Process<sup>†</sup>

Young-Deuk Seo, Ho-Seong Lee and <sup>†</sup>Ho-Sang Sohn

Department of Materials Science and Metallurgy, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

### 요 약

직류 ESR(Electro Slag Remelting) 장치를 이용하여 타이타늄 스크랩의 재용해 및 정련에 관한 기초연구를 수행하였다. 비소모성 양극으로는 흑연봉을, 슬래그로는  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2$  계를 사용하였다. 재용해한 타이타늄 잉곳의 형상 및 산소 함량에 미치는 슬래그 조성의 영향을 검토하였다.  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2$ 계 슬래그에서는 잉곳 내부에 슬래그의 혼입이 없는 매우 양호한 형상의 타이타늄 잉곳이 형성되었으며, 산소 함량도 타이타늄스크랩보다 낮은 값을 나타내었다.  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2$ 계 슬래그에 CaO를 첨가한 경우 잉곳 내부에 슬래그가 혼입되었으며, 산소 농도도 Ti 스크랩 보다 높은 값을 나타내었다.

주제어 : ESR, 재활용, 타이타늄 스크랩, 타이타늄 잉곳

### Abstract

Titanium scrap was re-melted and refined by using a DC-ESR (Direct Current Electro Slag Remelting) apparatus. A graphite rod was used as an anode. The used slag was  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-CaO}$  slag system. The effect of slag composition on the shape and oxygen content of re-melted ingot was studied. The titanium ingot was produced very well from the  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2$  slag system, and the oxygen content of the ingot was less than that of titanium scrap. The addition of CaO into  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2$  slag system made the bad shape of titanium ingot. The oxygen content of the ingot was also higher than that of titanium scrap.

Key words : ESR, recycling, titanium scrap, titanium ingot

### 1. 서 론

타이타늄(이하 Ti)은 비강도가 크며 내식성이 우수하여 그 수요가 점점 증가하고 있다. Ti은 지각을 구성하고 있는 원소들 중 9번째로 풍부한 자원 중의 하나지만 용융점이 높고(1668 °C) 산소, 질소, 탄소와의 반응성과 친화력이 매우 크다. 따라서 Ti은 대부분 진공 분위기 하에서 용해하고 있으며, 또 내화재 도가니와도 반응하여 용탕이 오염되므로 Ti 용해에는 일반적으로 도가니 대신에 수냉 동 주형을 사용하고 있다. 이와 같이 용해가 힘들고 Ti 자체의 가공도 어렵기 때문에 Ti 소재의

범용화에 장애적인 요소로 작용하고 있다.

기존의 Ti 재용해법으로는 진공 아크 재용해법(VAR, Vacuum Arc Remelting), 플라즈마 아크 용해법(PAM, Plasma Arc Melting), 전자 빔 용해법(EBM, Electro Beam Melting) 등이 있다.<sup>1,2)</sup> 이러한 프로세스는 수냉 동 몰드를 사용하여 도가니로부터의 오염을 방지할 수 있기 때문에 널리 이용되고 있다. VAR은 제련공정에서 제조된 스폰지 Ti을 압축성형한 후 용접에 의해 일정한 길이의 소모성 전극을 만들어서 사용하고 있다. 그러나 스크랩은 형상이 다양할 뿐만 아니라 스폰지 Ti과는 달리 압축 성형에 의해서 별도의 소모성 전극을 만드는 것이 곤란하다. 그리고 PAM 이나 EBM법은 VAR과 마찬가지로 진공 하에서 용해하는 방법으로 다양한 형태의

<sup>†</sup> 2007년 5월 25일 접수, 2007년 7월 25일 수리

\* E-mail: sohn@knu.ac.kr

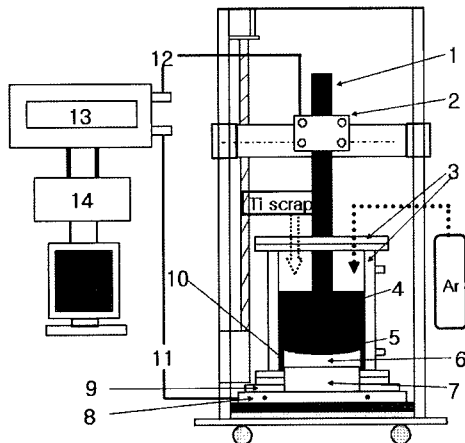
스크랩을 용해할 수 있는 장점이 있다. 그러나 불순물(산소 등) 함유량이 높은 스크랩의 경우에는 정련 작업이 어려워 스크랩보다 순도가 높은 Ti을 얻기가 곤란하다.

ESR (Electro-Slag Remelting) 법은 다른 용해법으로 용제한 모재를 소모전극으로 사용하여 수냉식 주형 내의 슬래그 층에 침지하고, 슬래그의 저항 가열에 의해 용해하는 것으로, 고급강의 공업적 용해법으로 발전해왔다. 철강산업에서 ESR을 이용하는 장점은 적층응고에 의해 편석이 적은 치밀한 조직을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 슬래그에 의한 정련 효과에 의해 비금속 개재물의 저감 등 고순도화에 매우 효과적인 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup>

한편, Takenaka 등<sup>4)</sup>은 직류 ESR장치를 이용한 용융염 전해에 의해 직접 Ti 잉곳을 얻기 위한 연구를 시도하여 금속상의 Ti을 얻었으나, 완전한 용융에 의한 잉곳은 만들지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 ESR법에 의한 슬래그의 저항열과 직류에 의한 용융염 전해효과를 복합한 Ti 스크랩의 재용해와 정련 반응에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내



- 1 : Graphite rod (anode)
- 2 : anode water cooling device
- 3 : Copper mold
- 4 : Molten slag
- 5 : Molten titanium pool
- 6 : Solidified titanium
- 7 : Copper base-plate
- 8 : Copper plate (anode)
- 9 : Insulator
- 10 : Solidified slag
- 11 : (-) Electrode
- 12 : (+) Electrode
- 13 : Power supply
- 14 : A/D converter

Fig. 1. Schematic diagram of the DC-ESR apparatus.

었다. 원통형 몰드의 높이는 300 mm이며, 상부의 내경은 90 mm이고 하부의 내경은 100 mm로써 실험 후 형성된 잉곳을 쉽게 분리할 수 있도록 제작하였다. 비소모성 양극(anode)으로는 직경 50 mm의 흑연봉을 사용하였으며, 음극(cathode)으로는 400 mm×400 mm×10 mm의 구리판을 사용하였다. 음극 구리판을 보호하기 위해 직경 95 mm, 두께 20 mm 인 구리 base-plate를 음극 구리판 상부에 장착하였다. 양극인 흑연봉은 일정한 속도로 상하로 움직일 수 있도록 하였다. 음극인 구리판 및 몰드는 수냉하였다. DC power supply의 최대 전류는 2500 A이고 최대 전압은 50 V이며, 실험 중 전류, 전압 변화를 실시간으로 측정하여 기록하였다.

실험에 사용한 슬래그 조성을 Table 1에 나타내었다. 슬래그는 CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>계를 기본으로 하고, CaO를 일정량 첨가하여 조제하였으며, 고주파 유도 용해로를 이용하여 흑연 도가니 내에서 미리 용해한 것을 응고 후 파쇄하여 사용하였다. 한편 실험에 사용한 Ti 스크랩은 봉상의 것으로 직경은 5~8 mm 정도이며, 약 1~2 cm 정도의 길이로 절단하여 사용하였으며, Fig. 2에 사용한 스크랩의 형상을 나타내었다. 조성은 Table 2에 나타내었으며 산소 함유량은 0.33 mass%이다.

우선 흑연봉을 하강시켜 구리 Base-plate와 접촉시킨 후, 일정량의 슬래그를 ESR 몰드에 장입하여 실험 준비를 마쳤다. 이후 Ar 분위기 하에서 통전하여 아크가 발생하면 흑연 전극을 상승시키면서 초기 첨가한 슬래그를 용융하였고, 완전히 용융한 후 나머지 슬래그를 장입하였으며, 전체 슬래그의 장입량은 약 1.5 kg이다. 슬래그의 완전한 용융을 확인한 후 준비된 Ti 스크랩을 약 7 g/min의 속도로 장입하였다. 실험 중에는 지속적으로 극간 거리를 측정하면서 power supply의 전류값

Table 1. Chemical composition of slag. (mass%)

Slag	Slag composition		
	CaF <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO
A	100	0	0
B	95	5	0
C	90	10	0
D	80	20	0
E	90	5	5
F	85	5	10
G	75	5	20

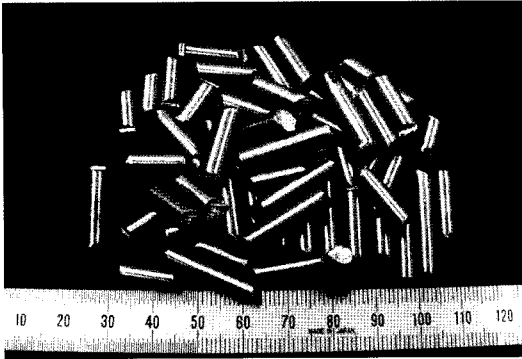


Fig. 2. Typical appearance of Ti scrap.

Table 2. Chemical composition of Ti scrap (mass%).

Fe	C	H	N	O	Ti
0.15	0.052	0.0034	0.0045	0.33	Bal.

을 제어하였다. 약 2 시간 정도 통전 후 전원을 차단하고 몰드와 형성된 Ti 잉곳을 분리하였다.

실험결과 형성된 Ti 잉곳의 형상과 단면을 디지털 카메라로 촬영한 후, 잉곳의 중앙부를 일정한 크기로 절단하여 산소농도(ELTRA ON 900)를 분석하였다. 일부 시편에 대해서는 탄소농도(LECO CS-444)를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 열 수지 계산

Ti를 재용해하여 잉곳을 제조하기 위해서는 용탕이 형성되어야 하므로 열 수지를 검토하였다. 출열( $Q_{out}$ )은 슬래그 용융( $Q_{slag}$ ), 스크랩 용융( $Q_{scrap}$ ), 냉각수에 의한 열손실( $Q_{water}$ ) 그리고 슬래그 표면의 복사 열손실( $Q_{rad}$ ) 등을 고려하여야 한다. 우선 슬래그의 온도를 Ti의 용점(1941 K)보다 약 30 K 높은 1973 K로 가정하여 각 성분의 용융에 필요한 열량을 계산하면  $CaF_2$ 는 2.476 kJ/g,  $TiO_2$ 는 1.51 kJ/g,  $CaO$ 는 1.6 kJ/g의 열량이 필요하다. 따라서  $CaF_2$ -5 mass% $TiO_2$ -5 mass% $CaO$ 의 슬래그 1500 g을 2시간 동안 용융상태로 유지하기 위해 필요한 단위 시간당 열량은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{slag} = \frac{3342.6[kJ](CaF_2) + 113.25[kJ](TiO_2) + 120[kJ](CaO)}{60 \times 60 \times 2[s]} = 0.497[kJ/s] \quad (1)$$

그리고, Ti 용융에 필요한 열량  $\Delta H_{Ti, 1973} = 1.556 \text{ kJ/g}$  이므로 스크랩 공급속도( $F_{Ti}$ )를 7 g/min로 가정하면 Ti 스크랩의 용융에 필요한 단위 시간당 열량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{scrap} = \Delta H_{Ti, 1973} \times \frac{F_{Ti}}{60} = 1.556[kJ/g] \times \frac{7[g/min]}{60} = 0.182[kJ/s] \quad (2)$$

냉각수에 의한 열손실은 냉각수 공급속도( $R_{water} = 150 \text{ g/s}$ )와 냉각 전후의 온도차( $\Delta T = 40 \text{ K}$ )를 이용하여 다음 식으로 계산하였다.<sup>4)</sup>

$$Q_{water} = R_{water} \cdot C_{p, H_2O} \cdot \Delta T = 150[g/s] \times 4.184[J/gK] \times 40[K] = 25.104[kJ/s] \quad (3)$$

슬래그 표면의 복사에 의한 열손실은 입열량의 약 10%로 추정할 수 있으므로<sup>5)</sup> 필요한 전체 열량은 다음과 같다.

$$Q_{out} = \frac{Q_{slag} + Q_{scrap} + Q_{water}}{0.9} = \frac{25.782}{0.9} = 28.647[kJ/s] \quad (4)$$

따라서 약 29 kJ/s의 열량이 공급되어야 Ti 스크랩의 용융이 가능함을 알 수 있으며, 전체 열량의 약 88%는 냉각수에 의해 손실되는 것으로 계산된다.

한편, 입열량( $Q_{input}$ )은 Mitchell 등<sup>5)</sup>의 보고에 의하면 전력량으로 추정할 수 있으므로, 평균 전류값( $I_m$ )과 평균 전압값( $E_m$ )으로 부터 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{input} = I_m \cdot E_m \quad (5)$$

그리고 예비실험에서 평균 전압값은 약 25 V를 나타내었으므로, 식(4) 및 (5)로부터 최소한 1146 A의 전류

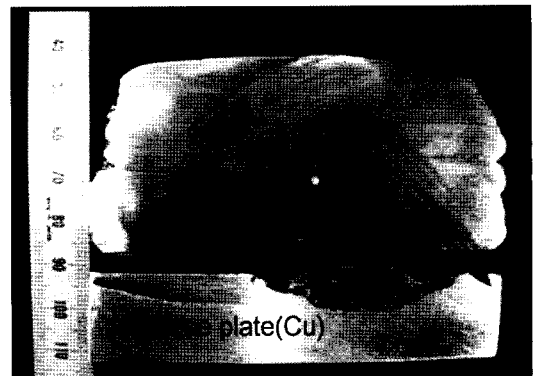


Fig. 3. Cross section of the copper base plate and the steel ingot remelted.

를 통전하여야 Ti 스크랩의 용융이 가능할 것으로 생각된다. 이러한 결과를 확인하기 위하여 비교적 용융이 쉬운 철스크랩(철못) 2000 g을  $\text{CaF}_2$ -10 mass% $\text{TiO}_2$  슬래그 중에 분할 투입하여 재 용해 실험을 하였으며, 이때 얻어진 잉곳의 단면을 Fig. 3에 나타내었다. 철 스크랩을 투입하는 동안의 평균 전류값은 약 1290 A, 평균 전압은 약 24.6 V를 나타내었다. 실험 후 잉곳의 단면 사진(Fig. 3) 관찰에서 확인 되듯이 매우 양호한 잉곳이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 적절한 조건으로 Ti 스크랩을 재용해하여 잉곳을 형성하는 것이 가능할 것으로 생각되었다. 그리고, 재용해 전의 철 스크랩과 재용해한 잉곳의 산소농도를 분석한 결과 각각 320 및 45 ppm을 나타내었다.

### 3.2. 전류 전압 변화

Fig. 4는  $\text{CaF}_2$ -5 mass%  $\text{TiO}_2$ 계 슬래그에서 Ti 스크랩을 재용해시 실시간으로 측정된 전류와 전압 변화의 예를 나타낸 것이다. 초기의 약 5분까지는 전류의 진폭이 적으며, 이 구간에서 base-plate와 흑연 전극 사이에서만 전기 아크가 발생한다. 약 5분 이후 전류의 진폭이 커졌으며, 용융 슬래그의 splash 현상이 발생하기 시작하였다. 약 20분 후 슬래그의 완전한 용융을 확인하였으며, 이후 일정한 전류값으로 제어하면서 Fig. 2에 나타낸 스크랩을 투입하기 시작하였다. 전압은 통전 후부터 base-plate와 흑연전극 사이의 거리에 상관없이 약 25 V로 일정한 값을 나타내었다. 강을 ESR에서 재용해 하는 경우, 전류는 거의 안정하고 용융염의 splash 현상도 그렇게 심하지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 본 실험에서는 심한 전류 진동과 용융 슬래그의

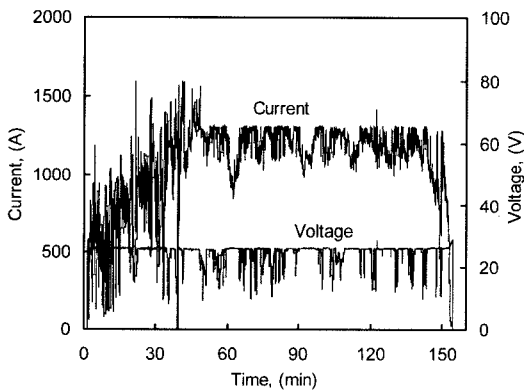


Fig. 4. The example of the changes in current and voltage during DC-ESR. ( $\text{CaF}_2$ -5 mass% $\text{TiO}_2$ ).

splash 현상이 발생하고 수냉 몰드의 상부에서 청색의 불꽃이 관찰되었다. 이러한 splash 및 청색 불꽃은 Takenaka 등<sup>4)</sup>의 DC-ESR에 의한 용융염 전해에서 관찰된 것과 동일한 것으로, 용융염과 흑연전극의 반응에 의한 CO 가스 생성에 의한 것으로 생각된다.

### 3.3. 슬래그 조성에 따른 잉곳 형상

Fig. 5에는  $\text{CaF}_2$ -10 mass%  $\text{TiO}_2$  슬래그를 이용하여 Ti 스크랩을 용융한 후 ESR 몰드에서 분리된 Ti 잉곳과 슬래그의 형상을 나타내었다. 최하부에는 Cu base plate, 중간부분에는 Ti 잉곳이 있으며 최상부는 슬래그로 덮여있다. 또한 외각부에는 얇은 슬래그 층이 덮여 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는  $\text{CaF}_2$ - $\text{TiO}_2$ 계 슬래그의 조성에 따른 Ti 잉곳의 형상 및 단면의 변화를 나타내었다. 생성된 Ti 잉곳은 첨가한 스크랩 량에 따라 크기가 약간씩 다르지만 Ti 잉곳을 덮고 있는 얇은 슬래그 층과의 분리는 매우 양호하였다.  $\text{TiO}_2$ 를 전혀 첨가하지 않은 경우에는 일부는 용융되지 않고 Ti 스크랩의 형상을 유지한 채로 잔존하고 있고, 잉곳 내부에 슬래그가 혼입되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 한편  $\text{TiO}_2$ 를 5 및 10 mass% 첨가한 경우에는 잉곳 내부에 슬래그의 혼입이 없는 매우 양호한 잉곳을 형성한 것을 알 수 있다. 이것은  $\text{CaF}_2$  단독의 경우에는 강(steel)을 용해하기에는 충분한 전기 저항을 가지고 있으나<sup>3)</sup>, 용점이 높은 Ti 스크랩의 용융을 위해서는 열량이 부족하였기 때문으로 추정된다. 그리고  $\text{CaF}_2$ 에  $\text{TiO}_2$ 를 첨가한 경우에는 전기전도도 감소에 의한 슬래그의 전기저항 증가에 의해 발열량이 많아졌기 때문으로 생각된다.<sup>6-8)</sup> 그러나  $\text{TiO}_2$  첨가량이 20 mass%로 증가한 경우에는 잉곳의 성장이 곤란하였다.

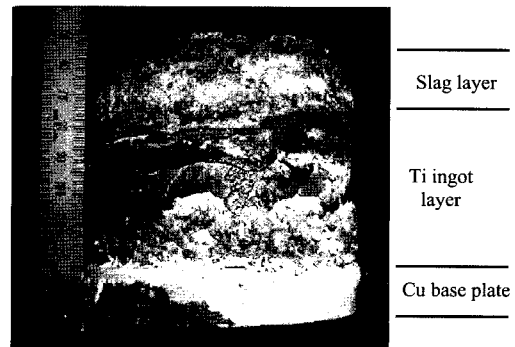


Fig. 5. The typical appearance of titanium ingot and slag after running. ( $\text{CaF}_2$ -10mass%  $\text{TiO}_2$ ).

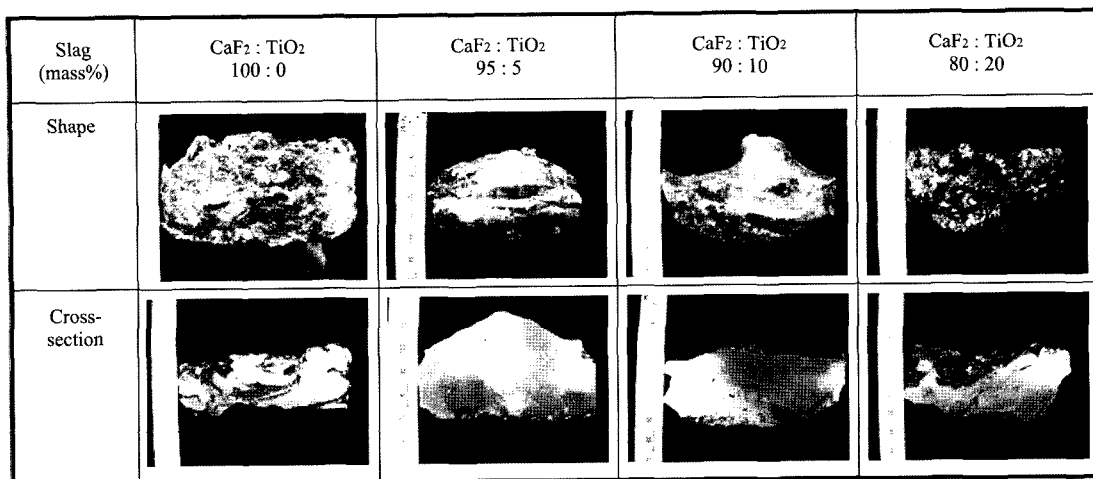


Fig. 6. The shapes and cross-sections of titanium ingot formed in the CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> slag system.

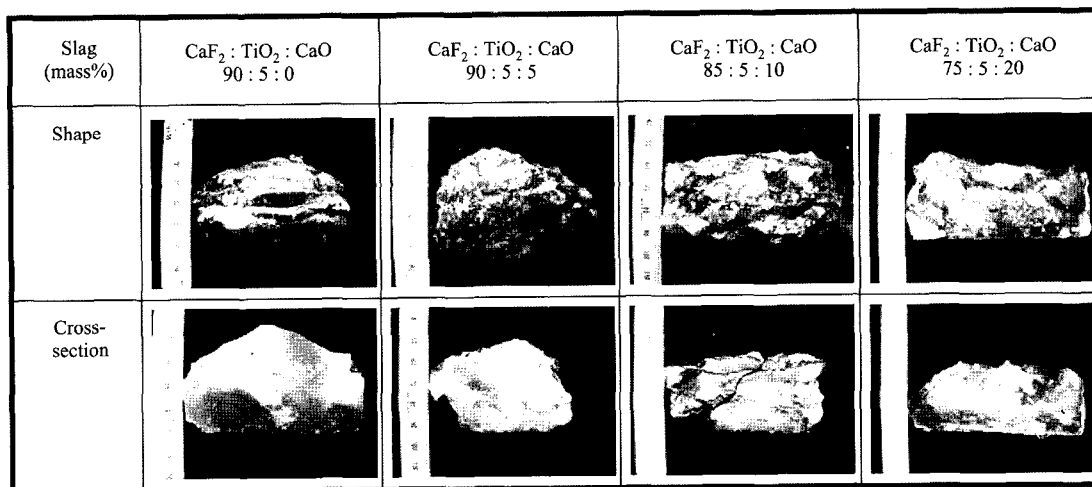


Fig. 7. The shapes and cross-sections of titanium ingot formed in the CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-CaO slag system.

이러한 원인으로는 TiO<sub>2</sub>의 과다한 첨가에 의한 슬래그의 점도 상승<sup>6)</sup> 및 슬래그의 산화도 증가에 따른 Ti 스크랩의 산화 등에 의한 것으로 추정된다.

Fig. 7에는 CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>계 슬래그에서 CaO 첨가량을 달리하여 얻은 Ti 잉곳의 형상 및 단면을 CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>계 슬래그와 비교하여 나타내었다. CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>계 슬래그에 CaO가 5 mass% 첨가된 경우 잉곳 내부에 슬래그의 혼입이 없는 비교적 양호한 형상의 잉곳이 생성되었으나, CaO 농도가 증가할수록 잉곳 내부에 슬래그가 혼입되어 잉곳이 쉽게 부서졌다. 이것은 CaO의 과다한 첨가에 의한 슬래그의 전기 전도도 증가로 전기저항이 감소하여 발열량이 감소하고, 점도가 증가하여 실험 중 용융

Ti와 슬래그의 분리가 곤란하였기 때문으로 생각된다.<sup>6)</sup>

#### 3.4. Ti 잉곳의 산소농도

Fig. 8에는 CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>계 슬래그를 이용하여 재용해한 Ti 잉곳의 산소 농도를 분석한 결과를 나타내었다. Ti 스크랩의 산소농도는 약 0.33 mass%였으나, 슬래그 중 TiO<sub>2</sub> 농도가 10 mass% 이하인 경우 산소농도는 0.25 mass% 이하로 스크랩 보다 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 Fig. 6에 나타난 잉곳의 단면관찰 결과와도 잘 일치하는 것으로 생각된다. 한편, 20 mass% TiO<sub>2</sub>를 첨가한 경우 잉곳의 산소농도는 1.4 mass%로 스크랩 보다 매우 높은 산소농도를 나타내었다. 이것은 Fig. 5

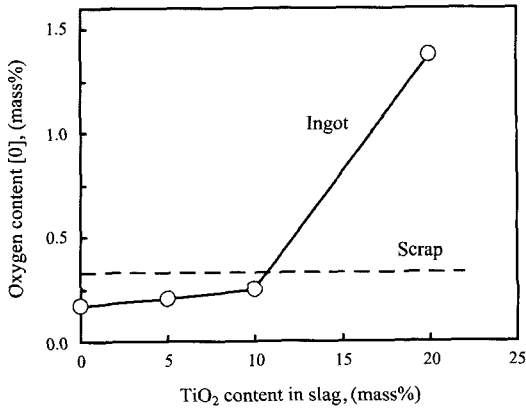


Fig. 8. The effect of TiO<sub>2</sub> content in the CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> slag on the oxygen content of Ti ingot.

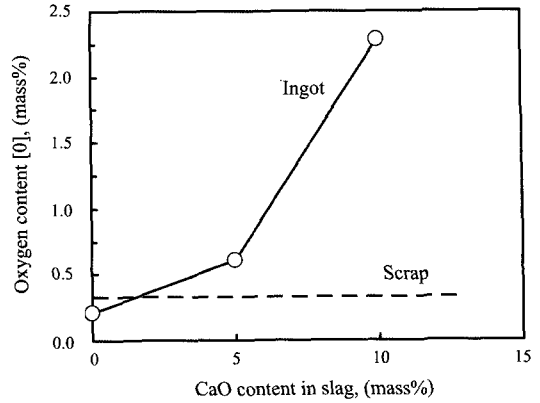
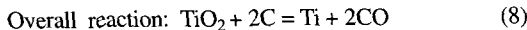
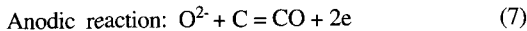


Fig. 9. The effect of CaO content in the CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-CaO slag on the oxygen content of Ti ingot.

에서 설명한 바와 같이 TiO<sub>2</sub>의 과다한 첨가에 의해 점도가 상승<sup>6)</sup>하여 용융 실험 중 Ti 용체와 슬래그의 비중 분리가 곤란하여 슬래그가 잉곳 내부로 혼입된 것으로 추정된다. 그리고 슬래그의 산화도 증가에 의해 Ti 스크랩이 슬래그와 반응하여 산화되었기 때문으로 생각된다.

한편, 슬래그 중 TiO<sub>2</sub> 농도가 10 mass% 이하인 경우, 재용해한 잉곳의 산소농도가 스크랩 보다 낮은 것은 식(6)~(7)에 나타난 용융염 전해<sup>4)</sup>에 의한 정련반응이 일어났기 때문으로 생각된다.



그리고 CaF<sub>2</sub>-10 mass% TiO<sub>2</sub>계 슬래그 중에서 재용해한 잉곳의 탄소농도를 분석한 결과 약 1.2 mass%를 나타내어 스크랩의 0.05 mass% 보다 매우 높은 값을 나타내었다. Kawakami 등<sup>9)</sup>은 DC-ESR 장치에서 비소모성 탄소전극을 이용한 Ti의 용융염 전해에서 얻어진 금속 Ti의 탄소농도가 약 1.7 mass%로 보고하였다. 이러한 결과는 탄소봉을 비소모성 전극으로 사용하였고, 극간 거리가 2~3cm 정도로 매우 짧았기 때문으로 생각된다.

Fig. 9에는 CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-CaO계 슬래그에서 CaO 농도에 따른 잉곳 중의 산소농도를 분석한 결과를 나타내었다. 5 mass%CaO를 첨가한 경우 스크랩 보다는 높으나 비교적 낮은 산소농도를 나타내었다. 그러나 CaO 첨가

량이 10 mass%로 증가하면 잉곳 중의 산소농도가 약 2.3 mass%로 급격하게 증가하였다. 이러한 결과는 CaO의 과다한 첨가에 의한 슬래그의 점도 상승 등<sup>6)</sup>에 의해 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 잉곳 중에 슬래그가 혼입되었기 때문으로 생각된다.

한편, Kawakami 등<sup>9)</sup>은 CaF<sub>2</sub>-20mass%CaO 계 슬래그 중에 10 mass%의 TiO<sub>2</sub>를 첨가하여 비소모성 탄소전극을 이용한 DC-ESR 장치에 의해 용융염 전해를 한 결과, 생성된 Ti 중 산소 농도가 약 6.6 mass%를 나타내었다고 보고하였다. 그리고 소모성 Ti anode를 사용하여 잉곳을 제조한 경우에는 슬래그가 대기 중의 산소를 흡수하여 Ti의 용점이 상승하였기 때문에 충분한 용융 풀을 형성하지 못한 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 슬래그 조성은 다르나 TiO<sub>2</sub> 농도가 10 mass% 이상으로 증가하거나 CaO가 다량으로 첨가되면 급격하게 산소농도가 증가하였다. 이러한 결과는 대기 중의 산소 영향보다는 슬래그의 전기전도도, 밀도 및 점도 등의 물성변화와 산화도의 영향이 보다 큰 것으로 생각된다. 특히 CaF<sub>2</sub>계 슬래그에 CaO가 약 15 mass% 이상 첨가될 경우 점도가 급격하게 상승<sup>6)</sup>하는 것으로 보고되어 있다. 이러한 점도 상승으로 용융 실험 중 용융금속과 슬래그의 비중분리가 완벽하게 이루어 지지 않았고, CaO의 과다한 첨가에 의해 슬래그의 전기저항이 감소하여<sup>8)</sup> 발열량이 충분하지 못하였기 때문에 잉곳 내부로 슬래그가 혼입되어 건전한 잉곳의 생성을 방해한 것으로 생각된다.

4. 결과 종합

본 연구는 Ti 스크랩을 재용해하여 잉곳을 제조하기 위해 DC-ESR 법을 적용한 것으로 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 스크랩 투입 중의 평균 전압이 약 25 V이므로, 열수지 계산 결과 약 1150 A 이상의 전류를 흘려주면 Ti 스크랩의 용해가 가능할 것으로 판단되었다.

2) CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 슬래그 계에서 TiO<sub>2</sub> 농도가 10 mass% 이하인 경우 슬래그의 혼입이 없는 양호한 Ti 잉곳이 형성되었으며, 산소농도도 약 0.25 mass% 이하로 스크랩의 0.33 mass% 보다 낮은 값을 나타내어 본 슬래그계에 의한 Ti 스크랩의 재용해와 전해 정련이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

3) CaF<sub>2</sub>-5 mass% TiO<sub>2</sub>계에 CaO를 10 mass% 이상 첨가한 경우 용융 스크랩에 슬래그가 혼입되어 양호한 잉곳을 형성할 수 없었으며, 잉곳의 산소농도도 높게 나타났다.

4) 본 연구의 DC-ESR 법에 의해 Ti 스크랩을 재용해하기 위해서는 점도가 낮으면서 전기전도도가 낮은 슬래그를 사용하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 에너지지원기술개발 사업 중 자원기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박표준, 최창우, 홍준표, 1991 : *Plasma Arc Melting 법에 의한 타이타늄 및 TiAl 금속간 화합물의 연속주조에 관한*

연구, 대한금속학회지, 29(4), pp. 416-423.  
 2. 심건주 등, 1990 : 國產 消耗性 電極 眞空 아르 鎔解爐의 開發 및 그를 利用한 스폰지 타이타늄의 鎔解 研究, 대한금속학회보, 3(4), pp. 343-350.  
 3. C. Bodsworth and H.B. Bell, 1972 : *Electro-slag refining (ESR)*, Physical chemistry of iron and steel manufacture, pp.300-305, Longman Group Limited, London.  
 4. T. Takenaka et al., 1999 : *The New Concept for Electrowinning Process of Liquid Titanium Metal in Molten Salt*, Electrochemistry, 67(6), pp. 661-668.  
 5. A. Mitchell and S. Joshi, 1973 : *The Thermal Characteristics of the Electroslag Process*, Metall. Trans., 4(3), pp. 631-642.  
 6. K.C. Mills and B. J. Keene, 1981 : *Physicochemical properties of molten CaF<sub>2</sub>-based slags*, International Metals Reviews. 26(1), pp. 21-69.  
 7. Yu. V. Sveshkov et. al., 1977 : *Influence of Y, La, and B Oxide on the Electrical Conductivity of Fused CaF<sub>2</sub>*, Inorganic materials. 13, pp. 850-852.  
 8. Wei Chiho and Xiang Shunhua, 1993 : *Electrical Conductivity of Molten Slags of CaF<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaF<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO Systems for ESR*, ISIJ International. 33(2), pp. 239-244.  
 9. M. Kawakami et al., 2006 : *An Attempt at Direct Ingot Making of Titanium by the Electro-Winning from Molten Slag with DC-ESR Unit*, Sohn International Symposium, Advanced Processing of Metals and Materials, 7, F. Kongoli and R.G Reddy, pp. 373-381, TMS, Sandiago, August, 2006, Printed in USA.

徐 領 得



- 2005년 경북대학교 금속공학과 공학사
- 2007년 경북대학교 금속신소재공학과 대학원 공학석사

李 鎬 成



- 1997년 연세대학교 세라믹공학과 공학사
- 1999년 한국과학기술원 재료공학과 대학원 공학석사
- 2003년 한국과학기술원 재료공학과 대학원 공학박사
- 현재 경북대학교 금속신소재공학과 교수

孫 豪 祥



- 1983년 경북대학교 금속공학과 공학사
- 1985년 경북대학교 금속공학과 공학석사
- 1993년 Kyoto Univ. 금속공학과 공학박사
- 1994년 (주)영풍 석포제련소 기술연구소
- 2001년 포스코 기술연구소 책임연구원
- 현재 경북대학교 금속신소재공학과 교수