

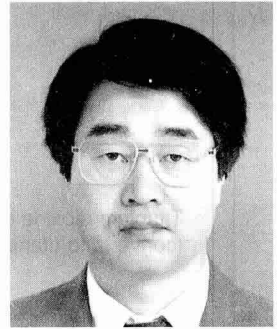
지상장비를 위한 타이타늄 재료연구 및 응용추세 (2)



許善茂
國科硏 책임연구원
공학박사



沈仁玉
國科硏 책임연구원
공학박사



白雲炯
國科硏 책임연구원
공학박사

높은 비강도와 산화성 및 환원성 분위기에서의 탁월한 내식성 등으로 무기체계에 적합한 소재인 타이타늄은 1790년 영국의 목사 Gregor가 원소를 발견한지 156년이 지난 1946년에서야 비로소 첫 방탄시험이 미국의 실험실에서 이루어지게 되었다.

그러나 타이타늄의 높은 화학반응성과 높은 융점(1670°C)때문에 상업적으로 광범위하게 사용 되는 것은 더디게 진행되어 왔다.

최근 선진국에서는 타이타늄 재료의 지상무기체계 적용이 광범위하게 검토되어 진행되고 있다.

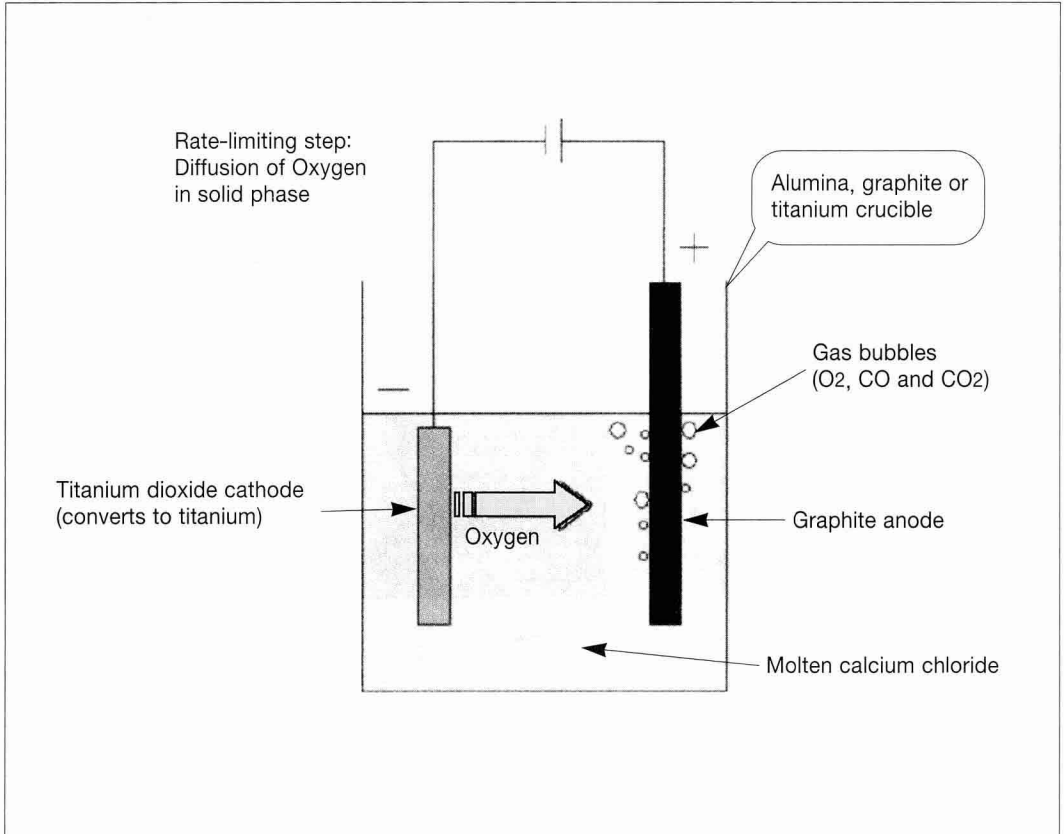
-필자 주-

● 타이타늄 광석의 직접 환원법

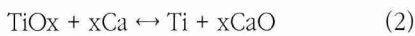
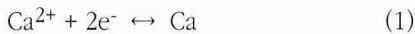
타이타늄 스폰지의 제작공정은 2월호에서 언급한 것처럼 화학적으로 여러 복잡한 공정을 거치지 않고 한번에 용융염 전기 화학적 분해를 통해서 타이타늄 스폰지를 얻는 방법으로 용융 calcium chloride (850°C ~ 950°C)에서 TiO₂를 전기 화학적으로 직접 Ti으로 환원시키는 것이다.

전해조로는 알루미늄, 흑연 또는 타이타늄을 사용하고, 여기에서 반응을 제어하는 단계는 고상(solid phase)에서 산소의 확산¹⁾으로 알려져 있다.

타이타늄 광석의 전기 화학적 직접환원

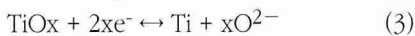


*Deposition of Calcium at a more cathodic potential, E°_1



alternatively

*Ionization of oxygen at a less cathodic potential, E°_2



산소가 용융염 중에 이온화된 후 용해되어 anode에서 방전이 되고 cathode에서는 순 타이타늄을 석출시킨다.

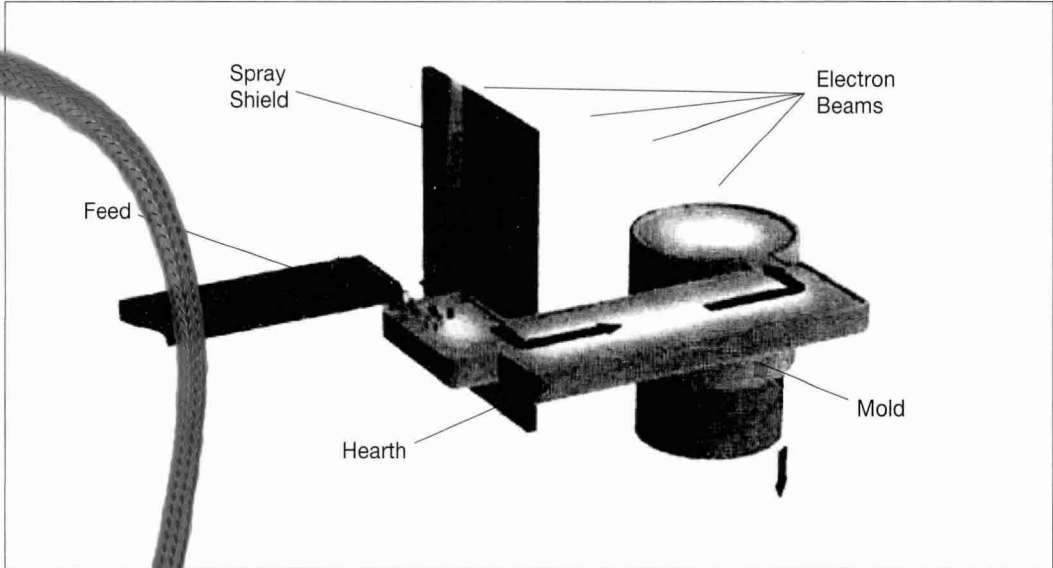
이는 아직 생산을 위해 적용되기 이전의 단계이지만 상당한 가능성이 있다고 알려져 있다.

● Electron-Beam Cold-Hearth Melting (EBCHM)

이는 이론적으로 기계 가공칩, 스크랩, 압연 및 단조시 스크랩 등을 모합금과 함께 스폰지와 섞어 사용함으로써 저가의 원료를 사용하고, VAR에서 세번 재용해하는 과정을 한번 재용해로 끝내는 방법이다.

10^{-5} Torr 이상의 진공에서 작업이 이뤄지므로 증기압이 큰 Al같은 원소는 증발 손실분을 보충해 줘야 한다. 한 예로 76cm 직경의 3,994kg짜리 Ti-6Al-4V잉고트를 3.2 megawatt로에서 재용해(P.53 위의 그림 참조)하는데, 총 5개의 전자총이 하나는 장입물에, 하나는

Schematic Electron-Beam Cold-Hearth Melting(EBCHM)³⁾



최초 용해조와 두 개는 정련조에 그리고 나머지 하나는 잉곳트 몰드에 초점이 맞춰져 있다. 그러나 이 방법은 전기소모량이 많기 때문에

전체적으로 비경제적이라는 분석도 있다. 또한 한번의 재용해로 끝내기 때문에 산소 등 불순물 제어가 어려운 점이 있다.

Comparison of different smelting process of Titanium waste recycling (V.Fedrov et al)

Parameter	Type of smelting process				Ingot EBM JS "FIKO"	
	VAR	PA	EBCH	PACH	φ 400	φ 640
Specific electrical consumption (Kwh/t)	1,100	1,760	3,000	3,000	2,866	2,043
Consumed capacity (KVA)	2,000	1,200	2,500	2,500	500	700
Water consumption (liter/min)	1,150	1,515	2,275	2,275	1,000	1,000
Water loss (liter/h)	—	—	—	—	17,000	10,000
Environment protection cost (US \$/kg)	—	—	—	—	0,0009	0,0012
Scrap suitability in the process (%)	80	70	50	62	60~70	60~70
Specific scrap content in the consumable electrode (%)	45	100	100	100	100	100
Required number of remelting	2	1	1	1	1	1
Yield, single melting/double melting (%)	75.5/75.7	99.5	93.0	99.0	90.8	89.6
Number of capacitors	1	2	3~4	3	3	3
Capital cost (KVA ≡ 1,0)	1.0	1.5	2.5	2.1	2.4	2.5
Cost of production (US \$/kg)	1.2	1.4	3.3	2.4	1.8	1.35

EBCH and PACH are Electron Beam and Plasma arc cold hearth remelting

P.53 아래 표에 각종 채용해법의 경제성 분석표가 나와 있다. 물론 각 지역에 따라 단위 원가가 차이날 수는 있지만 이 표를 작성한 V.Fedrov 등²⁾의 분석에 의하면 EBCHM법보다 VAR법이 더 경제적이라는 말이 된다.

● 용 접

방탄재는 용접이 용이하지 않을 경우 그 실용성에 중대한 타격을 주게 되는 것이 일반적

인 상식이다.

타이타늄 방탄재 경우 통상 타이타늄이 주변 기체와 급격하게 반응하는 극히 반응성이 크기 때문에 진공 챔버에서 원격 조정에 의한 전자빔 용접이나, 불활성기체로 용접부주변의 공기를 차단하고 용접하는 TIG 용접이 실제 실용적인 용접법으로 알려져 왔다.

그러나 전자빔 용접은 진공 챔버의 제한 등의 이유로 TIG용접법이 주류를 이뤄왔으나 방

Technologies to manufacture Titanium Armor

기술 분야	소 요 세 부 기 술
합금 설계 및 분석	1. 요구 성능 분석 및 합금 설계 2. 장입 원소와 잉고트 성분과의 상관관계 3. 타이타늄 합금 방탄재 성분설계
재 용 해 V A R 운 용 I N G O T 제작	1. 스폰지 타이타늄 압착 및 용접을 통한 소모성 전극 제조 2. 전압 및 전류 조절을 통한 잉고트 제조 및 가공 3. 잉고트 산화 방지, 잉고트내의 화학적 편석 및 결함 최소화 방안
조 직 제 어, 성 형 및 평 가 열 처 리 단 조 압 연 교 차 압 연 (X-rolling) Stretching	1. 잉고트 단조공정 인자 및 조건 2. 단조, 압연시 가열로 분위기, 소재 온도관리 및 산화 방지 대책 3. 압하율 변화에 따른 가공성 재현 4. 방향성 요구조건 충족을 위한 교차압연 공정 변수 5. 압연 저항성/산세/재가열 등 공정변수 6. 압연재 소둔 열처리 조건/Descaling/Stretching 처리조건 7. 비파괴 검사를 통한 제품의 내부 건전도 평가 8. 공정별 제품의 기계적 성질 평가 9. 내 충격, 피로 및 파괴특성 평가
내 고속 충격 특성분석 및 평 가 방 탄 시 험 용 접 부 방 탄 시 험 동적 변형 특성분석 방탄성능 분석 및 평가	1. 방탄시험 2. 용접부 방탄시험 3. 경도와 내 충격 특성과의 관계 4. 경도와 방호 한계 속도와의 관계 5. 판재 두께와 방호 한계 속도와의 관계 6. 내 충격 성능과 방호 한계 속도와의 관계 7. 동적 변형 특성과 방호 한계 속도와의 관계 8. 방탄 성능 분석 및 평가
용접성 분석 및 평가 용접 구조물 제작 용접성 분석 및 평가	1. 용접 조건 설정 및 용접 2. 용접 구조물 제작 3. 용접성 분석 및 평가

탄재가 본격 적용되기 위해서는 이 방법도 특별한 연구를 통해서 생산성의 증대가 필요하게 되었으며 특히 전장에서 손상을 야전 보수하는 옥외 용접법이 필요하게 되어 美 육군에서는 벌써부터 타이타늄 용접에 대해 연구를 진행시켜왔다.

일반적으로 타이타늄 용접은 Ar과 He의 혼합기체를 이용해 용접 토오치와 또 2차 차폐 및 3차 차폐를 통해 용접을 수행하여야 한다.

GD(General Dynamics)와 ARL(Army Research Laboratory)은 모재의 절단법, 용접 부위 설계, 불활성기체 차폐의 종류 및 용접재와 금속 모재간 화학적 반응 등이 방탄성 및 기계적 성질 등에 미치는 영향에 대해서 평가를 마쳤다.

고속 용접법이 개발되었으나 RHA용접과 같이 용이하고 싼값으로 타이타늄 용접을 하는 것은 불가능하다는 결론을 내렸다. 그 이유는 불활성 가스 차폐술이 복잡하기 때문이다³⁾.

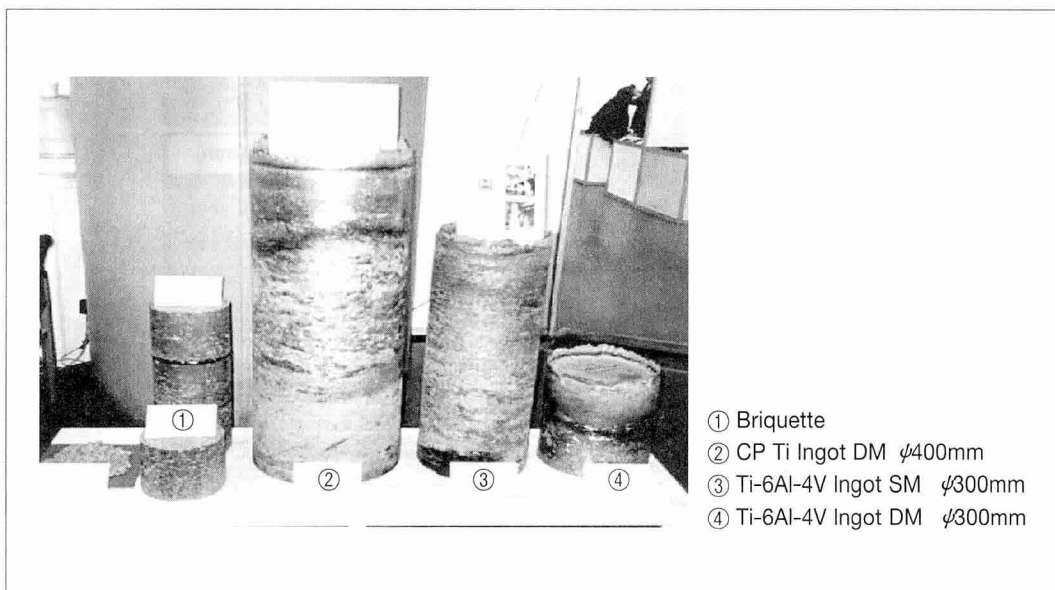
타이타늄 장갑의 야전 보수는 추가적으로 불활성 차폐가스를 위한 군수지원에 의존하면 안 되는데 ARL과 Edison Welding Institute, Dayton, Ohio는 불활성 가스 차폐가 필요 없는 용접봉 중심부에 Flux를 갖는 타이타늄의 야전 보수 용접법을 개발 중이다³⁾.

타이타늄 방탄재 제조기술 및 국내현황

타이타늄 방탄재 제조기술은 현재 세부적으로 알려진 것은 없다. 다만 현재도 더 경제적이면서 방호능력이 좋은 방탄재를 위해 계속 연구개발이 진행중이다. p.54 아래 표에 현재 산발적으로 알려진 방탄재 제조 소요기술을 정리하였다.

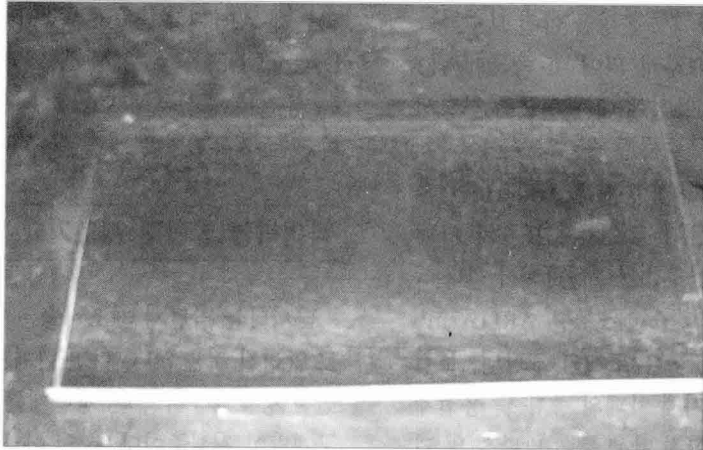
현재 수입된 타이타늄 재료를 이용한 가공 공정개발은 상당한 단계에 접어들고 있지만, 국내에서 타이타늄 소재 개발 연구(www.dutc.re.kr)는 최근 들어 이루어지기 시작하였다.

국내에서 최초(2001. 12. 5)로 시제된 타이타늄 소재 시제품



- ① Briquette
- ② CP Ti Ingot DM ϕ 400mm
- ③ Ti-6Al-4V Ingot SM ϕ 300mm
- ④ Ti-6Al-4V Ingot DM ϕ 300mm

국내에서 최초로 교차 압연된 Ti-6Al-4V 판재 시제품

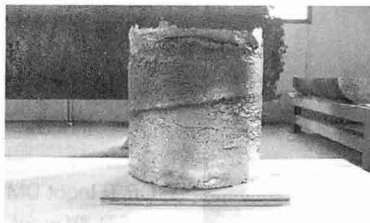


Ti-6Al-4V, X-Rolled Plate (t=14.8mm, 340×400)

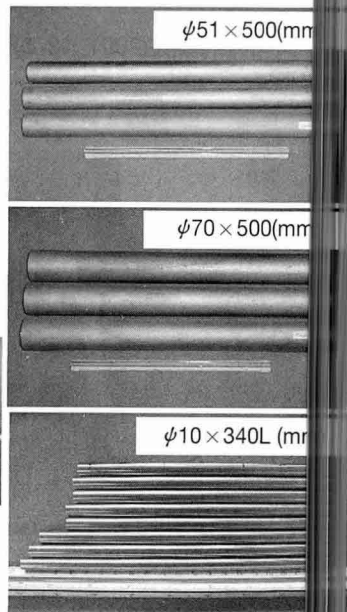
p.55 아래 그림에 국내에서 최초로 시제된 순 타이타늄 브리켓, 전극, 2차 용해된 순 타이

타늄 잉고트와 1차 및 2차 용해된 Ti-6Al-4V 금 잉고트 시제품이 나와 있

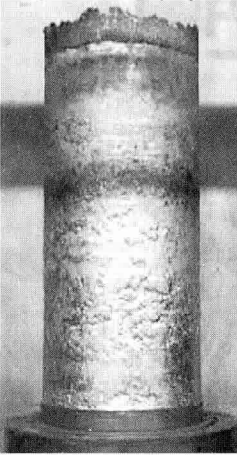
국내에서 개발된 최초의 Ti-6Al-4V DM 잉고트 및 봉재



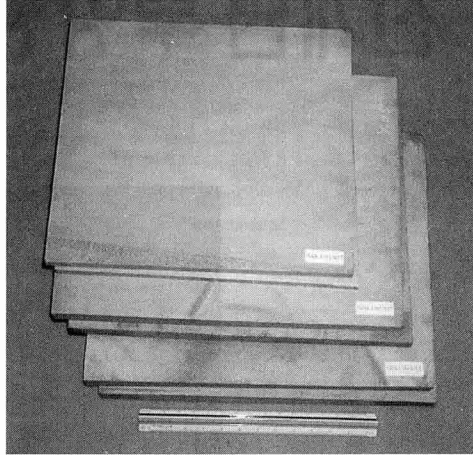
Ti-6Al-4V (φ300×340L)
DOUBLE MELTED INGOT



국내에서 설계 및 제조된 방탄합금 잉고트(2차 용해)와 이를 사용한 방탄 판재 시제품



φ400mm × 680L (384kg) Ingot
Double Melted New Ti Alloy



12.7t × 300w × 400L (mm), 19.05t, 25.4t × 300w × 460L (mm)

이중 순 Ti 잉고트 및 Ti-6Al-4V합금 잉고트는 국내에서 내수용으로 매출이 발생되고 있다. P.56 위, 아래 그림, 위의 그림에 국내에서 최근 시제 개발된 타이타늄 소재가 제시되어 있으며 이는 미국보다 약 50여 년, 일본보다 약 40여 년 뒤떨어져 있는 상태이다.

게이며 경제성을 고려한 연구개발이 필요하다고 하겠다. 防

맺 는 말

지상장비를 위한 타이타늄 재료연구는 소재를 저가로 획득하기 위한 공정의 개발과 소재를 더 경제적으로 가공할 수 있는 가공공정의 연구 등 저가를 위한 연구가 주종을 이루고 있으며 옥외 용접 등 기술적으로 좀더 광범위한 적용을 위한 연구가 진행 중이다.

국내의 타이타늄 소재 개발은 이제 초기 단

註

- 1) George Zheng Chen, Derek J.Fray & Tom W.Farthing NATURE VOL 407 21 SEPTEMBER 2000 pp.361~363.
- 2) V.Fedorov, N.Lashuk, V.Schekin-Krotov, Proc. of the ITC '99 Edited by I. V. Gorynin and S. S. Ushkov, Central Research Institute of Structural Materials (CRISM) "PROMETHEY" Saint-Petersburg, Russia 7-11 June 1999, pp.1406~1407.
- 3) Jonathan S. Montgomery and Martin G.H. Wells JOM 2001 April, pp.29~32.