

전자빔용해 및 플라즈마아크용해에 의한 티타늄 스크랩의 재활용

최국선¹, 박종범¹, 오정민², 문영희², 엄태경³, 김영석³, 김영록³

¹한국지질자원연구원 자원활용소재연구부, ²한밭대학교 신소재공학부, ³(주)엠시스

The recycle of titanium scrap by electron beam melting and plasma arc melting process

Good-Sun Choi¹, Jong-Bum Park¹, Jung-Min Oh², Young-Hee Moon²,
Tae-Kyung Um³, Young-Suk Kim³ and Young-Rog Kim³

¹Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience &
Mineral Resources (KIGAM)

²Advanced Materials Engineering DIV, Hanbat National University

³Material Technology Systems Co. Ltd., Kyungki-Do.

요 약

In 2005, the imports of titanium metals was about 22.8 million US\$(7,700 tons) in Korea. New scrap produced was estimated to be 359 tons and the exports were about 352 tons. Generally scrap is recycled into titanium ingot either with or without virgin metal using traditional vacuum-arc-melting and cold hearth melting. In Korea, there is no titanium ingot producers(recyclers). In this paper, the brief summary of major titanium melting technology, such as vacuum arc remelting(VAR), electron beam melting(EBM), plasma arc melting(PAM) is given and discussed. In view of titanium market situation of Korea, the technological development of ingot production from scrap is big problem to be solved in order to realize extensive cost reduction for titanium products.

1. 서론

티타늄 금속이 갖는 고용점과 높은 화학적 활성은 제련/정련/용해에 특수한 장비와 고도의 기술, 그리고 많은 에너지를 소모하게 하여 소재 자체의 난가공성과 더불어 제조비용을 높이고 범용화의 장애 요소로 지적되어 왔다¹⁾.

한국무역통계에 의하면 티타늄 수입 규모는 2002년 7,500만불(4,300톤)에서 2005년 21,800만 \$(7,700톤)로, 물량면에서는 년평균 22%, 금액으로는 46%로 급증하고 있다. 특히 2004년 대비 2005년의 경우, 물량증가는 24% 임에 비하여 금액으로는 93% 증가하였으며, 이는 국제적인 티타늄 수급불안을 대변하여 주는 것으로 현재 국내에 까지 그 영향이 파급되고 있음을 나타내고 있다. 국내 산업을 살펴보면 스폰지 티타늄을 제조하는 티타늄 제련 산업이 전무하고 대형 티타늄 잉고트를 대량으로 제조하는 산업도 태동단계에 있다. 연간 359톤정도 발생하고 있는 국내 티타늄 스크랩에 대한 효율적인 재활용 기술이 개발된다면 국내 티타늄 소재의 수급에 일부 기여할 뿐만 아니라 티타늄 부품·소재 산업의 원천기술로 활용되어 티타늄 산업 전체의 경쟁력을 높일 수 있는 계기가 될 것으로 판

단된다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 티타늄 스크랩의 재활용의 핵심공정인 각종 특수 용해방법(VAR, EBM, PAM 등)의 장단점에 대해 조사를 하였으며, 이를 통해 재활용법에 의한 티타늄 스크랩의 재활용 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 티타늄 금속의 용해 기술

현재 산업적으로 보급되어 있는 티타늄과 같은 고용점-활성금속의 용해법을 대별하면 진공아크재용해(VAR, Vacuum Arc Remelting), 전자빔용해(EBM, Electron Beam Melting), 플라즈마아크용해(PAM, Plasma Arc Melting)로 대별된다. 여타 ESR(Electroslag Remelting), Induction Slag Melting, Induction Skull Melting 등이 알려져 있으나 산업적 활용은 미미하다. 또한 피용해재를 장입/조업하는 방법에 따라 소모전극 및 비소모전극식으로 분류된다.

가. 진공아크재용해(VAR, Vacuum Arc Remelting)

스폰지 티타늄으로부터 순티타늄 또는 합금 티타늄 잉고트를 만드는 대표적인 공정인 VAR은, Fig. 2에 보인 바와 같이 스폰지 티타늄에 합금원소를 첨가한 다음 압축-성형하여 제작한 부리켓을 용접하여 1차용해용 전극을 만든다. 이를 진공 또는 불활성 가스 분위기에서 아크를 발생시켜 수냉동 도가니에서 용해하여 잉고트를 만들고, 이후 제조된 잉고트 내의 화학적 조성 균질화를 위하여 제조된 잉고트를 소모전극으로 하여 2~회 재용해 하여 건전한 잉고트로 제조한다. 세계적으로 상업생산되는 대부분의 티타늄 잉고트는 VAR 방법으로 제조되고 있는데, 이는 다른 용해법에 비하여 취급이 용이하고 경제적인 면에서 유리하며, 또한 잉고트 품질의 재현성에 있어서도 우수하기 때문이다. 항공기 부품과 같은 엄격한 품질 조건을 만족시키는 잉고트 제조법으로 오랜 역사를 갖고 있는 VAR 용해법은 앞으로도 티타늄의 용해에 보다 널리 이용될 것이며, 실제 작업에서는 1차전극 제조시 티타늄 스크랩을 50% 정도 사용하고 있다²⁾.

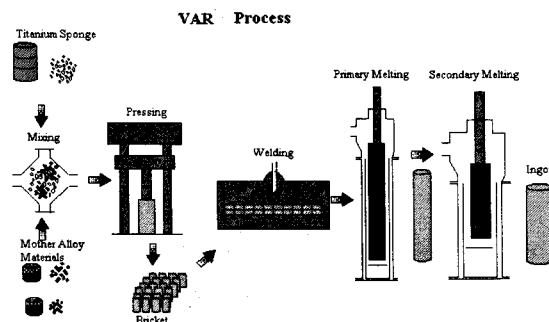


Fig. 2. Consumable electrode vacuum arc remelting(VAR) process³⁾

소모식 VAR법은 생산비용이 적고 대형 잉고트제조에 적합하다는 장점으로 인하여 널리 사용되고 있지만 용해속도조절의 어려움, 성분원소의 편석, 전극제작시 침입형 불순물의 오염 등의 단점이 있다. 또한 최근 산업의 발전에 따라 희유금속 소재의 불순물 함량에 대한 규제를 강화하고 있는 데 이러한 요구를 충족시키기 위해 PAM 및 EBM이 주목받고 있다⁴⁾.

나. 전자빔용해(EBM, Electron Beam Melting)

1905년 EBM 기술에 개발되어 탄탈륨 용해에 적용된 이래 기술이 발전하여 1970년대에 이르러 티타늄 스크랩의 재활용에 적용되어 상용화되었으며, 티타늄 용해용으로 사용되는 전자빔 용해로는 수냉 hearth가 부착되어 있어 EBCHR(Electron Beam Cold Hearth Melting)라 불린다⁵⁻⁶⁾. 스폰지 티타늄

이나 스크랩을 압축-성형-용접을 거치지 않고 직접 수냉식 도가니에 넣으면서 전자빔 토치를 이용 hearth 윗부분을 선화하며 용해하고, 수냉 몰드 내에 용탕을 주입하는 연속주조 방법으로 잉고트를 제조하므로 VAR에서 침범 재용해를 할 필요가 없이 1회의 용해만으로 건전한 잉고트를 얻을 수 있다. VAR에서 처럼 몰드의 형상이 환형일 필요가 없이 단면이 직각사각형인 잉고트를 바로 제조할 수 있음. 특히 고밀도 게재물과 티타늄 질화물 등의 저밀도 게재물을 제거할 수 있어 저급 타타늄 스크랩도 재활용 가능하다. 고진공 분위기 하에서 용해되므로 높은 증기압을 갖는 합금원소의 증발 손실이 있으며 그로 인한 합금의 성분조절이 어렵다는 단점이 있다. 더욱이 여타 금속용해설비에 비해 설비비용이 높고 운영이 어렵다.

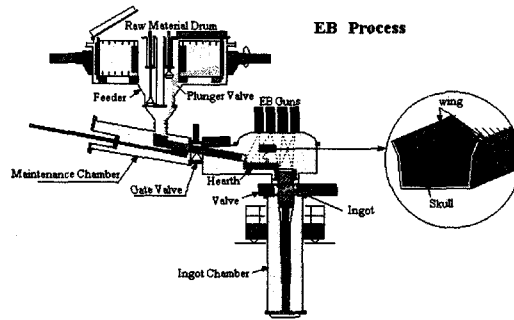


Fig. 3. Electron beam cold hearth melting(EBCHM) process³⁾.

다. 플라즈마아크용해(PACHM, Plasma Arc Melting)

PAM 기술은 용해분위기를 자유롭게 바꿀 수 있는 EBM의 높은 정련효과와 VAR의 합금제조능력을 겸비한 방법으로 상기 Fig. 3에서 EB 건 대신에 플라즈마 토치를 장착하였다는 점외에 유사하며, 수냉 hearth가 부착되어 있는 PACHM(Plasma Arc Cold Hearth Melting)도 널리 이용되고 있다. 산업적으로는 비소모성 전극 주위에 Ar 같은 불활성 기체를 흘려주면서 직류 또는 교류 아크 열플라즈마로 수십 MW까지 얻어내는 비이송식 또는 이송식 플라즈마로가 주류를 이루고 있다⁵⁻⁶⁾. PAM의 장점은 종래 아크로에 비해 용융 효율이 높고, 전극물질의 침식에 의한 불순물 오염의 걱정이 없으며, 높은 압력의 분위기 가스를 제어하면서 용융이 이루어져 산화 오염이 줄어들고, 높은 증기압으로 구성물질의 손실을 최소화하여 생산 수율이 높고, 아크의 불안정성이나 소음이 상대적으로 적으며, 간편하게 장치를 구성하여 전기 이용율을 최대화할 수 있어 산업적 활용도가 높다고 알려져 있다²⁾.

라. 용해법에 대한 경제성 비교

티타늄의 용해에 있어 전자 빔 용해, 플라즈마 용해 중 어느 쪽이 더 유리한가는 원료사정, 최종제품의 요구품질 및 가공비용 등을 종합적으로 검토·판단해야 한다. 이에 언급된 3가지 티타늄 용해기술에 대하여 경제성에 대한 기존 연구결과⁷⁾를 Table 1.에 인용하였다. 전체적으로 제조원가, 투자규모, 생산비용명에서 VAR이 압도적으로 우세하나 티타늄 스크랩 혼용율이 최대 50%라는 점과 고품질의 잉고트를 얻기 위해서는 2~3회의 반복용해가 필요하다는 면에서 불리한 것으로 평가되고 있다. 이에 비하여 수냉도도가니가 장착된 EBCHM 및 PACHM은 고품질의 잉고트를 1회의 용해에 의해 얻을 수 있으며, 소구경의 잉고트 제조에 유리하고, slab 형태의 잉고트로 직접 제조할 수 있는 장점이 있다. 특히 100% 티타늄 스크랩을 사용할 수 있는 기술이 개발되어 1990년대부터 본격적으로 실용화되었다.

Table 2. Comparison of different smelting processes of titanium waste recycling⁷⁾.

	Parameter	Type of smelting process			
		VAR	PAM	EBCHM	PACHM
1.	Specific electricity consumption, KWh/t	1,100	1,760	3,000	3,000
2.	Consumed capacity, KVA	2,000	1,200	2,500	2,500
3.	Water consumption, litre/min	1,150	1,515	2,275	2,275
4.	Water loss litre /t	-	-	-	-
5.	Environment protection cost, US\$/kg	-	-	-	-
6.	Scrap suitability for the process, %	80	70	50	62
7.	Specific scrap content in the consumable electrode, %	45	100	100	100
8.	Required number of remelting	2	1	1	1
9.	Output of good product (Single remelting/ Double remelting)	87.5 /75.7	99.5	93.0	99.0
10.	Number of operators	1	2	3-4	3
11.	Capital cost (VA-1.0)	1.0	1.5	2.5	2.1
12.	Cost of production US\$/kg	1.2	1.4	3.3	2.4

3. 티타늄 스크랩의 재활용 현황

가. 외국의 사례

80년대에 이르러 티타늄 금속을 매우 주요한 자원으로 인식하고 스크랩회수 시스템, 재활용 기술, 설비 등 관련 산업에 많은 투자로 티타늄 금속 제조와 가공 공정에서 발생하는 new scrap은 대부분 재처리 되고 있으나 사용후 해체품에서 발생하는 old scrap의 재활용은 아직도 미미하다. 우주항공용으로 고품질 잉고트가 필요한 미국의 경우에는 EBCHM 및 PACHM 기술이, 민생용 중저품질의 경제적인 잉고트를 제조하는 일본에서는 주로 VAR 기술에 의해 재활용되고 있다. 대부분의 티타늄 스크랩은 VAR, EBCHM, PACHM에 의해 잉고트로 재활용 되므로 스크랩은 완전한 선별, 탈지, 탈스케일과 함께 일정 사이즈(예를 들어 25×25 mm)이하로 절단하여 처리되고 있다. VAR의 경우, 스폰지 티타늄에 50%까지 스크랩을 첨가할 수 있으며 EBCHM 및 PACHM에서는 100% 스크랩을 이용하는 기술이 개발되어 1990년대부터 본격적으로 상용화되어 고품위 티타늄 잉고트가 제조되고 있다²⁾.

미국의 경우, 2004년 전체 잉고트 생산 능력 85,300톤중 20%가 EBCHM 또는 PACHM이고 나머지 80%가 VAR 이 점유하고 있다. 2005년도 미국에서 티타늄 스크랩 재활용 잉고트 생산은 25,000톤으로 전체 티타늄 잉고트 생산량의 30%를 점하고 있다.

나. 국내의 사례

국내 티타늄 스크랩의 회수, 선별-분리는 주로 완성품 메이커의 가공공정 중에 발생하는 관리 가능한 스크랩(new scrap)을 대상으로 하며 2005년도 359톤 정도로 발생되는 것으로 추정된다. 티타늄 스크랩의 스크랩회수, 선별-분리는 일부 전문기업에서 주도적으로 행하고 있으나 채용해를 위한 재처리 및 채용해기술은 거의 전무한 실정에 있다. 같은 해 티타늄 웨이스트와 스크랩의 수출은 352톤(430만 불)으로 수출 비중이 압도적으로 높은 데, 이는 국내 재활용 기술 및 관련 산업기반이 취약하다는 것을 나타내고 있다.

Table 3. Estimated amount of domestic titanium scrap.

(unit: ton)

		Applications	Shape	2002	2003	2004	2005
New Scrap	high pure Ti	Targets for semiconductor	bulk	15	18	22	24
	CP Ti	Targets for decoration	bulk	5	6	7	8
		Wrought, Pipe, Sheet	Chip(weldable) Turning Chip	60	83	95	118
	Alloy (Ti-6Al-4V)	Aerospace parts	Turning Chip	120	147	165	209
		Sports	Chip(weldable)				
(total)				200	254	289	359

* Old Scrap : not estimated

티타늄 스크랩의 국내 이용현황은 제강용 탈산재, Al 모합금제조, HDH(Hydride De-Hydride) 법에 의한 Ti 분말제조⁸⁾에 일부 스크랩을 이용하고 있으나, 국내 발생량의 대부분을 저가에 외국으로 수출하고 있는 실정에 있다.

5. 결 론

티타늄 스크랩으로부터 티타늄 및 티타늄 합금을 제조하는 기술은 자원 재활용 뿐만 아니라, 재료 개발 측면에서 매우 중요하다. 국내 현실을 감안하면 대형 잉고트를 제조해야 경제성 있는 VAR 보다는 티타늄 주조용 소형 잉고트(직경 300 mm 이내)를 제조하고 이를 고부가가치 소재화하는 중소기업형 티타늄 재활용 기술의 개발이 필요하다.

PACHM 기술의 경우 플라즈마 토치, 전원과 같은 핵심기술을 포함하여 전체 설비를 국산화가 가능할 뿐 아니라 실제 시스템 운용도 중소기업에서 충분히 가능한 것으로 판단된다. 이러한 한국지질자원연구원에서 2003년부터 3년동안 자원재활용기술개발사업 2단계 연구의 일환으로 EBCM 및 PACM법에 의한 티타늄 재활용 기술에 대한 기초연구를 수행한 바 있으며 향후 상용화를 위한 실증단계의 연구를 계속 진행할 예정에 있다.

감사의 글

이 연구는 21C 프론티어사업 자원재활용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김대형, 이경한, 최걸, 유옥중, 김지환, 이현복, 박찬호, "핵심 소재자원 유통분석과 지질자원 법제화 연구", 한국지질자원연구원 보고서, (2003).
2. T. Kusamichi and N. Mitsui, *Kobe Steel Engineering Report*, **49**, 13 (1999).
3. Toho Titanium Co. homepage, <http://www.toho-titanium.co.jp/eg/index.html>5.
4. R. Knight, R.W. Smith and D. Apelian, *Int. Meter. Rev.*, **36**, 221 (1991).
5. D. Apelian and C.H. Entekin, *Int. Meter. Rev.*, **31**, 77 (1986).
6. R. Burkhard et al, *Conservation and Recycling*, **10**, 11 (1994).
7. B.I. Medovar, *Information on ICVM-II Problem of SEM*, **3**, 105 (1992).
8. Sang Youl Kim et al, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **40**, 915 (2002).