

티타늄의 VAR 용해 기술



현 용 택

(KIMM 재료공정연구부)

- '89 인하대학교 금속공학과(학사)
- '91 인하대학교 금속공학과(석사)
- '01 창원대학교 재료공학과(박사)
- '91 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



김 하 식

(KIMM 재료기술연구부)

- '00 창원기능대 생산자동화학과(학사)
- '87 - 현재 한국기계연구원 주입기술기원



이 용 태

(KIMM 분원장실)

- '74 서울공대(학사)
- '76 한국과학기술원(석사)
- '76 - '80 국방과학연구소(선연 및 연구원)
- '85 Case Western Reserve Univ. 재료공학(박사)
- '85 - '90 독일 항공우주연구소(DLR) 연구원
- '90 - 현재 한국기계연구원 책임연구원(분원장)

1. 머리말

국내에서 티타늄 소재는 주로 화학 공장 및 발전소의 열교환기용 소재로 이용되어 왔으나, 최근에는 의료용 및 스포츠용품 등에 이르기까지 그 응용 범위가 확대되면서 사용량도 해마다 점차적으로 증가하고 있다. 이에 따라 티타늄 재료의 수입량도 1998년 2,712톤에서 2000년도에는 4,042톤으로 증가하여 약 725억원이 지불되었다.^[1] 현재까지 국내에서 사용되어지고 있는 티타늄 소재는 전량 수입에 의존하고 있는 실정으로 소재의 원활한 공급과 경제성의 관점에서 티타늄 소재의 국산화는 필수적이라 할 수 있다.

일반적으로 사용되고 있는 티타늄 소재는 스폰지 티타늄 및 첨가 원소 등이 혼합된 원소재를 용해하여 우선 티타늄 주괴(ingot)를 제조하고, 그 후 단조·압연 등의 가공 공정을 거쳐 판, 관, 봉 등의 형태로 제조된다. 티타늄 주괴를 제조하기 위한 용해 방법으로는 사용되는 열원에 따라 크게 진공 아크 용해법(VAR, Vacuum Arc Remelting), 전자빔 용해, 플라즈마 아크 용해법 등으로 나눌 수 있는데, 이 중에서 일반적으로 널리 사용되는 방법은 진공 아크 용해법이다. 티타늄의 다양한 용해법에 대해서는 이미 소개된 적이 있으나, 여기서는 최근 당 연구 부서에서의 보다 다양한 VAR 용해 기술에 관한 경험을 바탕으로 보다 구체적으로 티타늄의 VAR 용해 기술에 대하여 소개하고자 한다.^[2]

오늘날 티타늄이 산업용 재료로 널리 이용될 수 있게 된 것은 1960년대 이래 미국, 일본, 러시아 등의 국가에서 소모전극식 진공 아크 용해법이 실

용화되어 10톤이 넘는 대형 주괴 제조가 가능하게 되면서 부터이다. VAR 용해 기술은 선진국에서는 이미 확립되어 있는 기술로서 최근에는 용해로 설비를 개량하여 용해 시간, 소비 전력 및 전극 제조 비용 등을 줄일 수 있는 고효율 VAR 용해법이 개발되어 실용화 되고 있다. 그러나 국내에서는 아직까지도 티타늄 주괴 제조를 위한 용해로 등의 설비도 미약하고 여러 기술적 어려움 등으로 인하여 티타늄 소재 제조기술은 초보적인 단계에 있다고 할 수 있다. 국내의 VAR 용해기술은 그동안 일부 대학에서 합금설계 등의 연구를 위하여 비소모전극식 VAR 설비를 이용하여 한정된 크기의 시편을 제조한 실적이 있고, 업체로는 KPC(주)에서 최근 직경 300mm~500mm급의 주괴를 제조할 수 있는 대형 VAR 설비를 갖추어 시험 용해 중에 있다. 정부 출연 연구소에서는 자원연구소에서 1990년대 초반에 자체 제작한 VAR 장비를 이용하여 약 100mm 직경의 티타늄 주괴를 제조한 적이 있으며,^[3] 한국기계연구원에서는 비소모전극식 VAR을 이용하여 티타늄합금 개발 및 특성 평가

관련 연구를 수행하여오다가 1997년에 직경 200mm의 티타늄 주괴를 제조할 수 있는 소모전극식 VAR 장비를 구비하여 국내 최초로 약 100kg급의 티타늄 주괴를 제조하였다. 최근에는 실제 양산 공정에서의 건전한 티타늄 주괴를 제조하기 위해 VAR 용고 해석, 결합 제어 및 미세조직 제어 기술에 관한 연구를 수행 중에 있다.

본 글에서는 티타늄 소재 제조의 가장 기본적인 공정으로 티타늄 주괴 제조를 위한 티타늄의 VAR 용해 공정에 대하여 살펴보고, 아울러 그동안 한국기계연구원에서 수행하였던 VAR 용해 연구 결과들에 대해서도 함께 서술하고자 한다.

2. 티타늄의 VAR 용해 공정

티타늄 및 특수합금의 용해에 일반적으로 이용되는 소모전극식 VAR 용해로의 구조와 약 100kg의 티타늄 주괴를 제조할 수 있는 한국기계연구원이 보유하고 있는 VAR 장비를 그림 1에 나타내었다. 용해 장비는 수냉 동 도가니(Cu crucible),

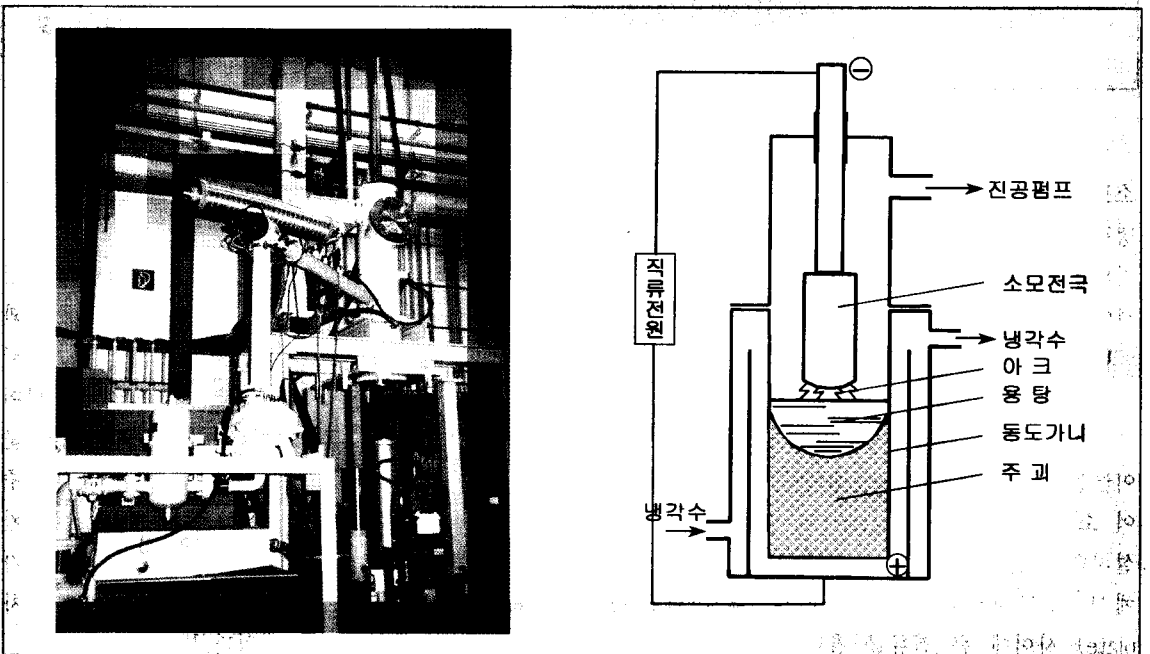


그림 1. VAR 용해로(KIMM 보유) 및 개략도

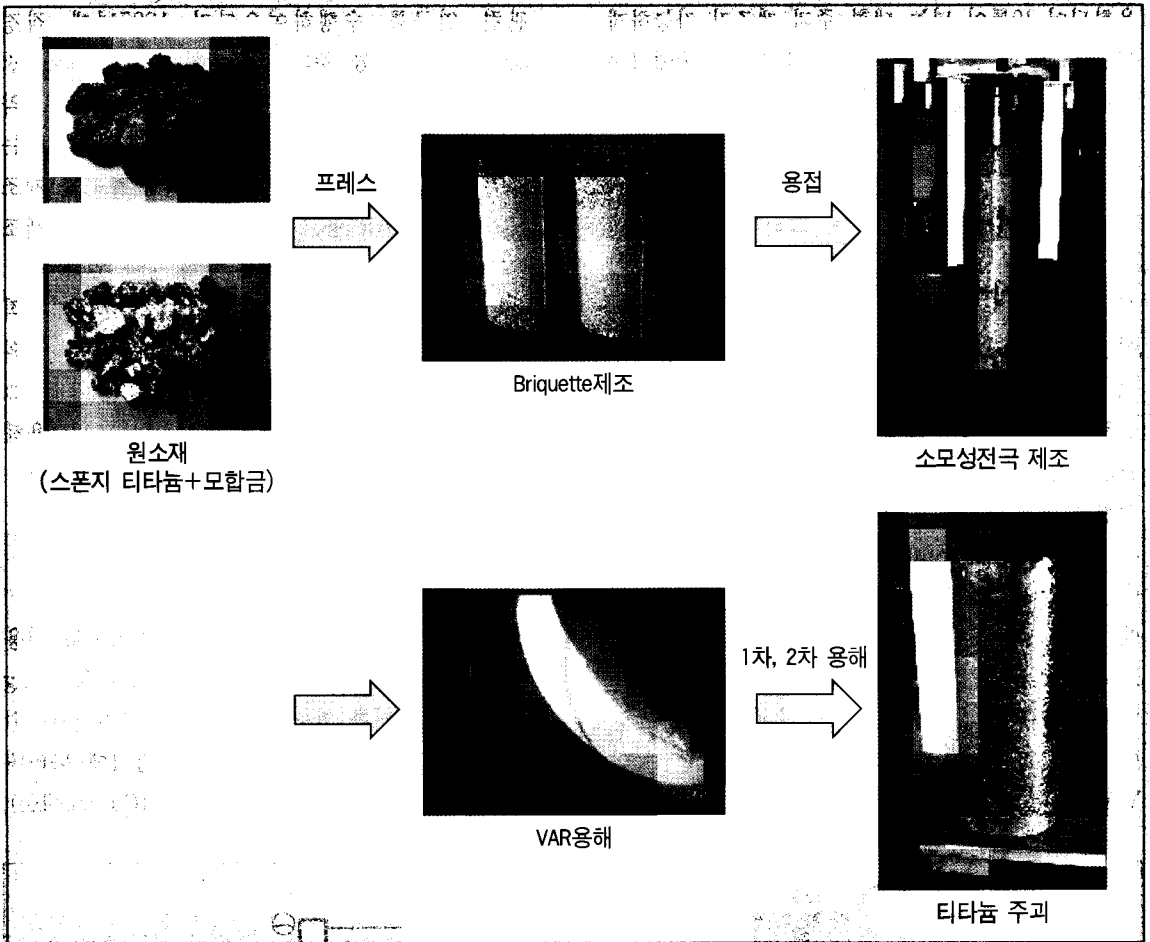


그림 2. 티타늄의 VAR 용해 공정

소모 전극의 송강 기구, 진공 시스템, 직류 전원, 냉각 시스템, 제어 계통 등으로 구성되어 있다. 전기의 통전은 소모 전극을 음극, 주괴를 양극으로 하여 용해한다.

티타늄의 전형적인 VAR 용해 공정은 그림 2에 나타낸 것처럼 원료인 스폰지 티타늄과 모합금을 프레스로 성형하여 브리켓(briquette)을 만들고, 이들을 용접해서 봉상의 소모 전극을 제조한다. 이 소모 전극은 수냉 동 도가니 용해로의 중앙에 설치하여 불활성 가스 분위기 또는 진공 분위기에서 소모전극과 용해 스타트 재료(starter plate) 사이에 큰 전류를 흘려 아크를 발생시킴으로써 그 아크열에 의해 소모 전극의 용해가

시작된다. 소모 전극 선단에서 용융된 금속은 표면 장력에 의해 메탈 방울이 형성되면서 낙하하여 수냉 동 도가니 내에 쌓여 metal pool을 형성한다. 이 metal pool은 밑면 및 측면의 수냉 동과 접하면서 용고되어 주괴가 형성 된다. 소모 전극의 용해 과정에서 불순물 성분이 증발 제거되어 정련이 이루어지지만 1차 용해만으로는 불충분한 경우가 있으므로 통상 1차 용해에서 얻은 주괴를 소모 전극으로 해서 다시 용해를 한다. 완전한 불순물 성분 제거와 합금 성분의 균일화가 요구되는 항공기용 티타늄 합금의 경우에는 3차 용해를 실시하는 경우도 있다.^[4]

티타늄의 VAR 공정에서는 소모전극(1차 용해

용)의 제조, 용해조업 조건의 최적화가 중요하고, 더욱이 VAR에 있어서 스크랩 원료의 이용 기술, 티타늄합금 주괴의 결함방지 대책 등이 중요한 과제가 되고 있다.

2.1 원소재

공업용 순수 티타늄이나 티타늄합금 등의 주괴 제조에는 용해원료로서 스폰지 티타늄, 스크랩, 합금 성분을 조절하기 위한 모합금 등이 이용된다. 스폰지 티타늄은 주요한 티타늄 원료이고, 최근에는 자원을 효과적으로 활용하기 위하여 스크랩도 적극적으로 활용되고 있다. 원소재 품질은 주괴의 품질에 직접적인 영향을 미치고, 아울러 조업의 안정성 등에도 밀접한 관련이 있기 때문에 그에 대한 품질관리가 매우 중요하다.

2.1.1 스폰지 티타늄

스폰지 티타늄의 주된 공업적 제조방법으로는 Kroll법(Mg 환원법)과 Hunter법(Na 환원법)이 있는데, 현재 선진국에서는 대부분 Kroll법이 이용되고 있다. 스폰지 티타늄 중에는 표 1에 나타낸 것과 같이 불순물로서 철(Fe), 염소(Cl), 규소(Si), 질소(N), 탄소(C), 수소(H), 산소(O) 등이 있고, Kroll법에 의해 제조된 스폰지 티타늄에서는 마그네슘이, Hunter법으로 제조된 스폰지 티타늄에서는 나트륨이 소량 포함되어 있다. 이

들 불순물들 중에서 수소, 염소, 마그네슘, 나트륨 등은 용해 시 제거할 수 있지만 철, 질소, 산소 등은 제거하기가 힘들기 때문에 철저한 원소재 관리가 중요하다. 일반적으로 이들 불순물의 양은 적을수록 좋지만, 최종 제품의 규격에 맞는 품질의 스폰지 티타늄을 사용하기도 한다.

스폰지 티타늄 중의 마그네슘, 나트륨, 염소 등의 일부는 $MgCl_2$, NaCl 등의 미소한 염화물 결정의 형태로 티타늄에 산재되어 있다. 염화물의 용점은 $MgCl_2$ 의 경우 1691K, NaCl은 1738K로, 티타늄의 용점(1943K)보다 낮기 때문에 스폰지 티타늄의 용해 조업중에 염화물이 기화되어 용융 금속을 비산시키게 된다. 이들 비산된 입자들은 수냉 동 도가니에 부착되어 주괴의 표면 품질을 떨어뜨리고, 또한 진공 펌프에 부착되어 진공 설비를 부식시키는 등 용해 장비에도 나쁜 영향을 미친다. 그리고 이들 염화물은 흡습성이 있기 때문에 용해 전 스폰지 티타늄 원료의 보관에도 많은 주의를 기울여야 한다. 이는 흡수된 수분이 용해 시 용융 티타늄과 반응하여 주괴 중의 산소 함량을 높일 우려가 있기 때문이다. 특히 제트 엔진용 티타늄합금의 경우 최종 제품 중에 질화물이 존재할 경우 부품에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 원소재 중의 질화물은 티타늄과 비중 차이가 작기 때문에 용해 시 완전히 분리 제거하는 것이 어렵다. 이론적으로는 티타늄에 대한 질소의 용해도가 크기 때문에 질화

표 1. 스폰지 티타늄의 종류와 화학 조성^[5]

종류	기호	화 학 성 분 %										경도 HB(10/1500)
		Fe	Cl	Mn	Na	Si	N	C	H	O	Ti	
1종 M	TS-105M	0.10이하	0.10이하	0.01이하	-	0.03이하	0.02이하	0.03이하	0.005이하	0.08이하	99.6이하	105이하
1종 S	TS-105S	0.03이하	0.15이하	-	0.10이하	0.03이하	0.01이하	0.03이하	0.010이하	0.08이하	99.6이하	105이하
2종 M	TS-120M	0.15이하	0.12이하	0.07이하	-	0.03이하	0.02이하	0.03이하	0.005이하	0.12이하	99.4이하	105~120
2종 S	TS-120S	0.05이하	0.20이하	-	0.15이하	0.03이하	0.01이하	0.03이하	0.010이하	0.12이하	99.4이하	105~120
3종 M	TS-140M	0.20이하	0.15이하	0.08이하	-	0.03이하	0.03이하	0.03이하	0.005이하	0.15이하	99.3이하	120~140
3종 S	TS-140S	0.07이하	0.20이하	-	0.15이하	0.03이하	0.03이하	0.03이하	0.015이하	0.15이하	99.3이하	120~140
4종 M	TS-160M	0.20이하	0.15이하	0.08이하	-	0.03이하	0.03이하	0.03이하	0.005이하	0.25이하	99.2이하	140~160
4종 S	TS-160S	0.07이하	0.20이하	-	0.15이하	0.03이하	0.03이하	0.03이하	0.015이하	0.25이하	99.2이하	140~160

물을 티타늄 용탕중에 용해시켜 질화물을 제거하는 것이 가능하지만, 질화물의 용점이 매우 높기 때문에 질화물의 용해에는 상당한 시간이 필요하다. 스폰지 티타늄에 질화물이 형성될 가능성이 있는 것은 Kroll법에서 환원 공정 및 진공 분리 공정 시 공기의 유입이나 오염된 마그네슘을 사용한 경우 등으로, 이와 같은 문제가 발생하지 않도록 원소재 준비 단계에서 질화물이 없는 스폰지 티타늄을 사용하는 것이 중요하다.

2.1.2 스크랩

티타늄 스크랩은 판재, 선재 및 관 등의 가공 시에 주로 발생한다. 스크랩은 그 발생과정에서 절삭 공구의 여러 가지 이물질이 혼합될 가능성이 있다. 이들 이물질의 주성분인 철, 고융점 금속, 탄소 등은 용해 시에 제거하는 것이 어렵기 때문에 원료 단계에서의 충분한 정제가 중요하다. 스크랩의 정제법으로 판재는 염욕, 산세에 의해 산화막을 제거하며, 괴상 스크랩은 shot blast에 의해 산화막을 제거한 후에 산세하며, 판부스러기나 작은 조각들은 산세만을 실시하고, 절삭 칩은 탈지만을 행한다는 보고 예가 있다.^[6]

스크랩 중의 산소, 질소 함유량은 제품보다 높은 경우가 대부분이기 때문에, 이를 원료로 재활용할 경우에는 스폰지 티타늄과 혼합해서 소정의 성분 규정을 만족하도록 배합한다. 티타늄합금 스크랩을 사용할 때에는 고밀도 개재물(HDI: High Density Inclusion)의 원인이 되는 이물질이 없는 것이 중요하기 때문에, X선 투과검사 등으로 확인한 다음에 사용되고 있다. 스크랩을 원료로 사용하는 경우도 스폰지 티타늄과 마찬가지로 품질 관리면에서 충분한 주의가 필요하다.

2.1.3 모합금

단일 금속으로 티타늄보다 용점과 밀도가 높은 금속, 예를 들면 Mo, Nb, Ta 등의 고융점 금속이 합금 성분으로 포함된 티타늄 합금을 제조하려고 하는 경우, 이들을 단일 금속으로 첨가해서는 용해가 어렵기 때문에 티타늄 모재 내로 균일하게 합금화가 어렵다. 이러한 경우에는 모합금을 제조하여 합금화한다. 모합금은 티타늄 합금을 구성하는 주요한 성분인면서, 동시에 용점도 낮은 알루미늄을 고융점 금속과 합금화시켜 용점을 티타늄과 비슷한 정도까지 낮춰 용해

표 2. 모합금의 종류와 적용된 티타늄합금의 예^[7]

GfE-Masteralloy		Application for Titanium-Alloys
V Al	45-49 V	V-containing Ti-Alloys (ex. Ti-6Al-4V)
V Al	50-54 V	
Mo Al	50-55 Mo	Mo-containing Ti-Alloys (ex. Ti-8Al-1Mo-1V)
Mo Al	63-67 Mo	
Cr Al	65:35	Cr-containing Ti-Alloys (ex. Ti-17)
V Al Fe	69:19:11	Ti-3Al-10V-2Fe
Al V Sn	43:43:14	Ti-6Al-6V-2Sn
Al Nb Ta	50:33:17	Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo
Al Nb		Nb-containing Ti-Alloys
Al Nb Si Ti	50:25:5:20	IMI 829
Al Sn Zr Mo	43:14:28:14	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
Al Sn Zr Mo (Si)	42:14:28:14(0.5Si)	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-(Si)
Al Sn Zr Mo	33:11:22:33	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo
Al Sn Zr Mo Cr	30:12:12:23:23	Ti-5Al-2Sn-2Zr-2Mo-4Cr (Ti-17)

시 합금 성분의 용해를 용이하게 하기 위해 사용된다. 티타늄 합금용 모합금의 예를 표 2에 나타내었는데, 현재 가장 많이 이용되고 있는 것은 대표적인 티타늄합금인 Ti-6Al-4V합금을 제조하기 위한 Al-V 모합금이다.

2.2 전극 제조

소모전극식 VAR 용해법으로 티타늄 주괴를 제조하기 위해서는 원료로 스폰지 티타늄, 모합금 등을 혼합하여 긴 봉상의 소모 전극을 제조하여야 한다. VAR법은 용해 원료를 일단 전량 용해 한 후에 주조해서 주괴를 만드는 공정과는 달리, 소모전극을 연속적으로 용해해서 metal pool을 형성시키고, 동시에 용고를 진행시켜 주괴를 연속적으로 제조하는 공정이다. 이 때문에 일차 용해용 소모전극의 합금 성분이 불균일하게 되면, 대개 주괴의 높이 방향의 성분이 불균일하게 된다. 따라서 일차 전극은 될 수 있는 한 조성이 균일한 것이 바람직하다. 또 소모전극을 매달아서 사용하기 때문에 어느 정도의 기계적 강도도 필요하다.

소모 전극의 제조 공정은 그림 2에 나타낸 것처럼 원료의 혼합, 브리켓 제조, 브리켓 용접 등의 공정을 거치는데, 각각의 공정에 많은 주의 사항이 있다. 또한 목표 조성의 원료를 배합할 때에는 비교적 증기압이 높은 합금 성분의 증발 손실 등을 고려하여 배합할 필요가 있다.

브리켓은 후공정에서의 용접이 가능한 형태로 만들 필요가 있다. 소모 전극으로는 일반적으로 환형이 많기 때문에 환형이나 부채꼴 형상의 브리켓이 많이 이용되고 있지만, 각형 브리켓도 이용된다. 브리켓의 제조에는 프레스가 이용되는데, 밀도는 3.5g/cm³ 정도(이론 밀도의 약 78%)까지 성형하는 것이 바람직하다. 그리고 균일한 성분의 주괴를 제조하기 위해서 브리켓의 크기는 작은 것이 선호된다. 브리켓의 용접에는 GTAW, 플라즈마 용접(PAW) 등이 이용되지

만, GTAW 용접을 할 경우 텅스텐 전극으로 부터의 오염에 의한 고밀도 개재물이 혼입될 가능성이 있으므로 이를 방지하기 위해 일반적으로 플라즈마 용접을 실시한다.

2.3 VAR 용해

티타늄 및 티타늄 합금의 VAR 공정은 합금 성분이 균질하며, 수축공이나 기공 등의 결함이 없고, 동시에 표면상태도 양호한 주괴를 제조하는 것이 목적이다. 따라서 최적의 용해 조업 조건을 설정하는 것이 중요하다. 용해 조업 시 주의해야 할 항목에 대해서 간단히 서술하면 다음과 같다.

2.3.1 starter plate

용해를 시작할 때 수냉 동 도가니 바닥이 직접적으로 아크에 의해 가열되어 용손되는 것을 방지하기 위해서 starter plate를 사용한다. starter 재의 일부는 용해되어 소모 전극이 용해되면서 형성되는 metal pool과 혼합되기 때문에 용해하려고 하는 조성과 거의 같은 재질을 사용하는 것이 바람직하다. 본 실험실에서는 직경 150mm의 전극을 이용할 경우, 같은 직경으로 두께 약 10mm의 starter plate를 이용하고 있다.

2.3.2 용해 전류

티타늄 용해에 일반적으로 이용되는 전류 값과 주형 직경과의 관계를 그림 3에 나타냈다. 티타늄합금은 철기 합금과 니켈기 합금의 VAR 용해 전류값에 비해서 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 티타늄 및 티타늄 합금의 경우 일차 전극으로서 성분이 불균일한 브리켓 용접 전극을 이용할 필요가 있고, 가능한 한 metal pool을 깊게 해서 합금 성분을 균일하게 하여야 하기 때문이다. VAR에 있어서 소모 전극의 용해 속도는 대개 용해 전류에 비례하는데, 비용해 속도(kg/kA/min)는 Nb, Mo 합금의 경우 0.25~0.32, 티타늄

은 0.55, 철 및 니켈기 합금은 0.56~0.7, 동의 경우는 0.7정도의 값이 보고되고 있다.^[8]

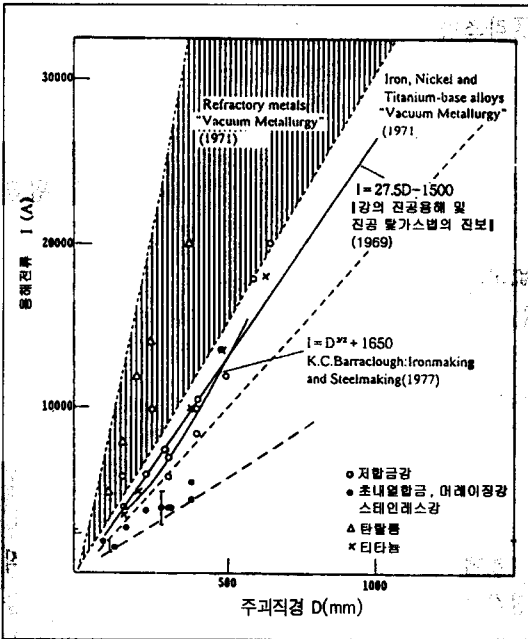


그림 3. VAR 주괴 직경과 용해 전류와의 관계

metal pool의 깊이(h, cm)도 용해 전류(I, kA)가 클수록 깊어지는 경향을 나타내는데, 철강 재료에서는 주형 직경에 관계없이 $h=5.72 \times I^{0.745}$ 의 관계식으로 나타내어진다는 보고가 있다.^[9] 일반적으로 티타늄의 용해 전류는 철강 재료에 비해서 크고, metal pool도 철강의 경우보다 깊은 것이 보통이다. 철기와 니켈기 합금의 경우는 metal pool이 깊어지면서 freckel 편석 등과 같은 국부적인 성분 편석을 일으키기 쉬운 반면, 티타늄 합금 등에서는 비교적 성분 편석이 쉽게 발생하지 않는다. 이와 같이 티타늄은 어느 정도 깊은 metal pool을 형성시켜도 편석의 문제가 생기지 않기 때문에 큰 전류로 용해가 가능하다. 그러나 티타늄 합금에서도 β 안정화 원소가 부분적으로 편석된 β fleck이라 불리는 거시 편석이 발생할 수도 있으므로, 성분 편석을 일으키기 쉬운 원소(예를 들면, Fe, Cu, Cr 등)를 함유하는 합금의 경우는 티타늄 합금에서도 전류 값을 낮

게 해서 metal pool의 깊이를 작게 할 필요가 있다.^[10] 한편 주괴의 표면 품질은 용해 전류가 크고, 수냉 동 도가니 부근까지 안정하게 metal pool이 형성되는 것이 바람직하다. 따라서, 실제 조업에 있어서는 성분의 균일화, freckel 편석의 방지, 수율 향상을 위한 표면 품질 등을 고려하여 최적의 용해 전류 값을 설정하여야 한다.

2.3.3 아크의 길이 및 안정성

티타늄 아크 용해에 있어서 아크 길이(소모전극과 metal pool 사이의 간격)와 용해 전압과의 관계를 그림 4에 나타내었다.^[8] 티타늄 아크 용해의 경우 아크 전압은 대개 아크 길이에 비례하기 때문에, 아크 전압을 일정하게 유지시켜 아크 길이를 제어할 수 있다. 아크 전압을 너무 높게 하면 전극과 측면 동 도가니 사이에 아크(side arc)가 발생하여 폭발 위험성과 함께 주괴 표면 품질도 떨어진다. 반면에 아크 전압이 너무 낮으면 반 단락 상태에서 조업이 일어나게 되므로 열효율이 떨어진다. 따라서 실제 조업시에는 주괴의 크기와 합금 종류 등에 따라서 적절한 아크 전압으로 작업을 해야 한다.

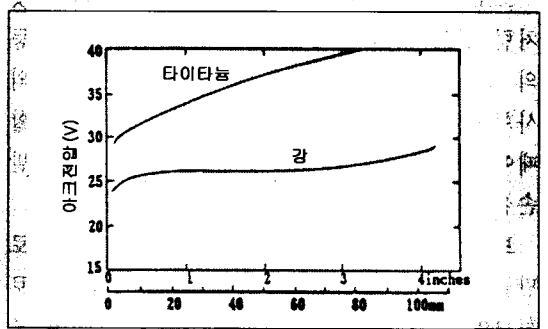


그림 4. 아크 전압과 아크 길이와의 관계

아크가 불안정하게 되면 조업시 열 발생이 불안정하게 되고, 주괴의 품질이 떨어지며, 경우에 따라서는 동 도가니의 용손, 증기 폭발 등의 치명적인 사고를 일으킬 가능성이 있으므로 아크를 안정하게 유지하는 것은 매우 중요하다. 아크의 안정성은 분위기 압력(진공도)에 큰 영향을

받는데, 대기압에서 약 4kPa(30torr)까지의 범위에서는 안정한 아크가 형성되지만, 4kPa에서 67~13Pa(0.5~0.1torr) 정도의 범위에서는 glow 방전과 유사한 아크가 되어 side arc가 자주 발생하므로 매우 위험하다. 그러나 67~13Pa 보다 고진공의 범위에서는 안정한 아크가 발생한다. 아크 기둥 내에서 전하를 운반하는 것은 진공 아크에서는 증발한 금속원자의 이온이며, 대기압 아크에서는 분위기 중의 가스이다. VAR 용해로의 조업에서는 glow 방전 영역이 되지 않도록 분위기를 제어하는 것이 중요하다.

2.3.4 용탕의 전자기 교반

VAR법에서는 용해 시 큰 전류를 이용하기 때문에 전류와 자계와의 상호작용을 이용해서 용탕의 교반이 가능하다. 전자기 교반은 일반적으로 동 도가니 주위에 솔레노이드 코일을 감아 수직 방향의 자기장을 발생시켜 용탕 표면의 방사상(수평 방향)으로 흐르는 전류와의 전자기 작용에 의해 용융 금속을 회전시키는 방법이다. 용탕을 회전시키면 수냉 동 도가니 주위에 안정한 metal pool을 형성시킬 수 있고, 또 metal pool의 교반 효과도 있기 때문에 주괴 표면 품질의 향상과 합금 성분 균일화 등의 효과도 기대할 수 있다.

그러나 보통 강과 니켈계 초내열합금의 경우에 부적절한 전자 교반을 행하면 freckle 편석이 발생하기 쉽고, 티타늄 합금의 경우도 주괴가 대형이거나, 편석되기 쉬운 성분을 함유할 경우에는 마찬가지로 편석이 생길 가능성이 높다.

2.3.5 Hot top

티타늄의 VAR 용해에 있어서는 편석이 없는 균질한 조성을 갖는 주괴를 제조하는 것이 가장 중요하기 때문에 작업 시 metal pool 중심부의 깊이가 주괴의 직경 이상이 되도록하는 경우가 많다. 이와 같은 상태로 전원을 끄면 아래쪽 및 측면에서의 응고 뿐 아니라, metal pool 표면에서의

응고도 진행되기 때문에 그림 5에 나타난 것과 같은 주괴 윗부분의 제법 깊은 위치에 큰 응고 수축공(shrinkage cavity)이 형성된다. 응고 수축공이 존재하면 후공정에서의 가공이 어렵기 때문에 대부분 이 부분을 잘라내어 버리므로 수율이 떨어지게 된다. Hot topping은 이 응고 수축공의 위치를 최대한 주괴의 윗 부분에 형성되게 하여 주괴의 수율 향상을 꾀하기 위해 행해진다. 그림 6은 VAR 용고 공정에 따른 티타늄 주괴 내의 온도 분포를 응고해석 상용 프로그램인 ProCAST™로 해석한 결과를 보여주고 있다. 해석 결과 그림 6(c)의 최종 응고 부위가 그림 5의 실제 주괴의 수축 결함과 일치함을 알 수 있다. 그림 7에 나타난 것과 같이 실제의 조업에 있어서는, 용해 후기에 서서히 용해 전류를 낮추면서 소모전극의 용해속도와 metal pool로의 입열량을 감소시키는 방법이 이용된다.^[8] 그러나 hot topping을 실시하면 응고 편석이 커지는 안좋은 효과도 있기때문에 실제 조업에 있어서는 각 합금의 종류, 주괴 크기에 따라서 적당한 hot topping을 할 필요가 있다.

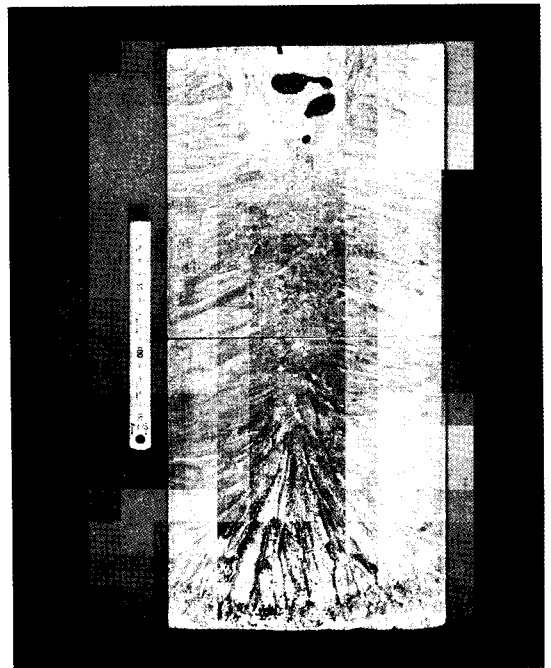


그림 5. 티타늄합금 주괴 결함 - 수축공

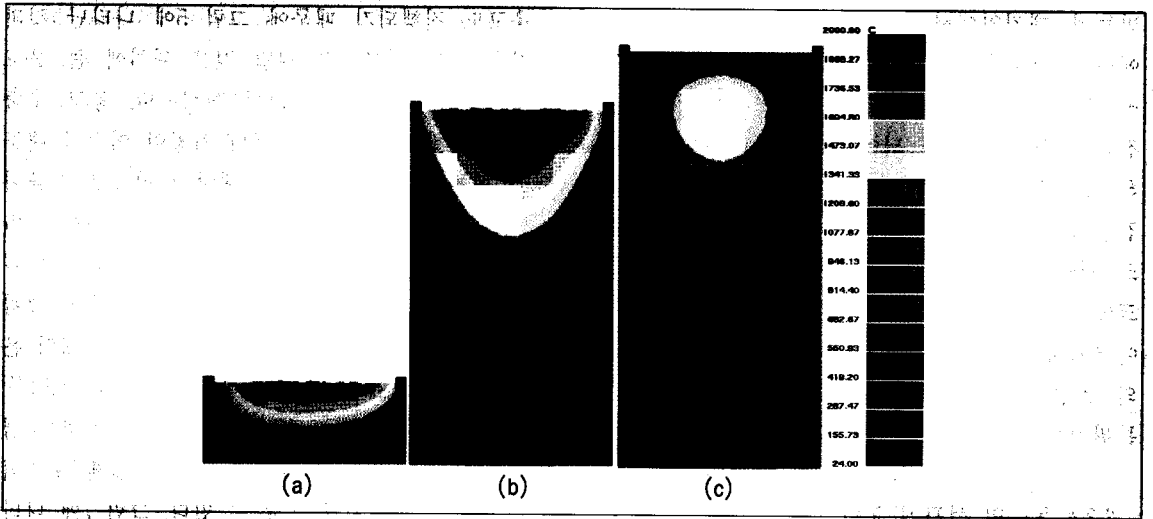


그림 6. VAR 용고 공정에서 주괴 내의 온도 분포해석
(a) 용해시작 8분후, (b) 38분후, (c) 44분후

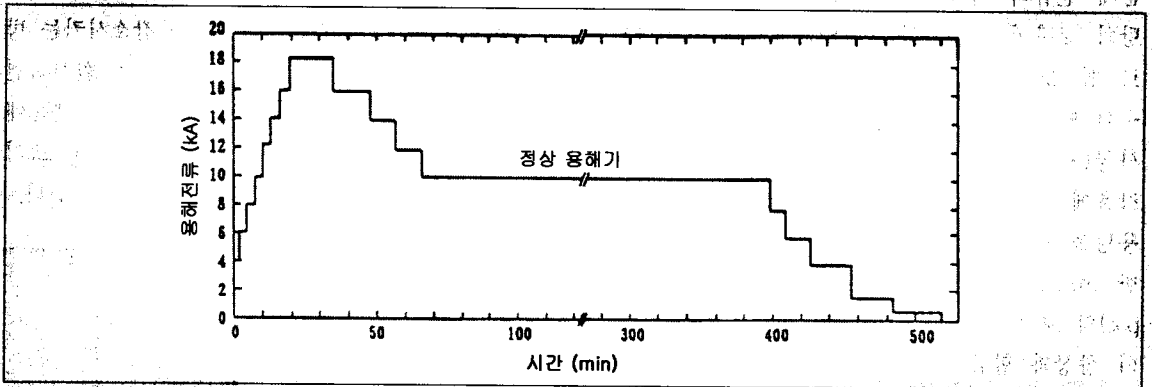


그림 7. VAR에 있어서 hot top 전류 변화의 일례(500φ 강 주괴)

3. 티타늄 주괴의 결함과 대책

티타늄 주괴의 결함으로는 용고 수축공, 성분 편석, 개재물과 표면 상태 등이 문제가 된다. 용고 수축공은 주괴 상부에 형성되어 수율에 문제가 되지만, 용해 시에 hot topping을 해주어 수율을 높일 수 있다. 성분 편석에는 주괴 상부와 중심부에 합금 성분이 농축된 macro 편석과 β fleck 등이 문제가 된다. 일반적으로 티타늄의 경우에는 특수강이나 초합금에 비해 편석이 크지 않지만, 일부 티타늄 합금에는 편석을 방지하기 위한 용해 조건의 적정화가 필수적이다. VAR

방법으로 티타늄 합금을 용해 시 불균일한 조성의 전극을 사용하여 용해하는 경우 티타늄 주괴에 마크로 편석이 종종 관찰되는데, 이는 2차 용해시 용탕 pool을 크게 하여 편석 정도를 경감시킬 수 있다.^[11]

개재물은 최근에 특히 주목을 받고 있다. 고밀도 개재물(HDI)은 티타늄 보다 비중이 크고 용점도 높은 물질이 티타늄 용탕중에 용해되지 않고 그대로 침강하여 용고상으로 남아 개재물이 되는 것으로, 티타늄의 합금성분인 Mo, Ta, 스크랩 원료 중에 포함된 질삭 공구에서 나온 텅스텐 카바이드(WC) 등을 들 수 있다.

Mo, Ta에 대해서는 티타늄 욕 중에 용해되기 쉽게 하기 위해 분말 형태의 원료를 사용한다는 지 모합금으로 첨가하는 방법을 이용하고 있다. 또한 용해 횟수를 늘리는 방법도 행해진다. WC에 의한 비금속 개재물의 생성을 방지하기 위해서는 철저한 공정 관리를 통하여 혼입을 방지하는 것이 중요하다. 한편 저밀도 개재물(LDI)은 티타늄 질화물이 주원인인 것으로 알려져 있다. 이를 방지하기 위해서는 원료인 스폰지 티타늄의 제조, 소모전극의 성형, 용해의 각 공정에서 질화물의 방지와 질화된 부분을 제거하는 것이 중요하다. VAR 용해법에서는 용해 시 개재물을 제거하는 것이 어렵기 때문에 원료 준비 단계에서 철저한 공정 관리를 할 필요가 있다.

4. VAR 용해로의 개선 동향

VAR 용해 기술은 티타늄뿐만이 아니라 특수강 및 Ni기 초내열합금 등의 주된 용해법으로 발전하여 왔고, 이와 같은 소재들의 제조에 적합하도록 꾸준히 설비의 개량이 진행되어 왔다. 티타늄이나 초내열합금에서는 용고 편석의 억제가 큰 과제가 되고 있는데, 이를 해결하기 위해 다음과 같은 여러 가지 개선이 이루어져 왔다.^[12,13]

① 아크 길이 제어 : 초기에는 아크 전압에 의하여 제어를 하였지만 소모 전극에서 용융 금속 방울이 낙하 할 때의 단락 빈도를 이용해서 제어하는 방법도 이용되고 있다.

② 전극의 용해 속도 제어 : Load cell을 이용해서 전극의 소모 중량을 측정해 용해 속도를 구 한다.

③ 전극의 심 위치 제어 : 로의 상부에 전극이 매달린 위치를 XY 방향으로 이동시켜서 전극 선단을 중심으로 위치하게 한다. 이것에 의해 약간 휘어진 전극도 사용 가능하게 한다.

④ 동축 배치 : 통전 케이블이나 로 본체에서의 불필요한 자장 발생을 방지하기 위해 전극과 동도가니·로 본체를 동축으로 배치하고 더욱이 부

스마와 케이블에 의하여 구성되는 loop를 최소화 하는 구조로 한다. 이것에 의해 용탕에 작용하는 제어되고 있지 않는 전자기력을 최소화 하여 불필요한 용탕의 교반을 방지 할 수 있다.

⑤ 용탕 교반 : 도가니 바깥쪽에 코일을 설치하여 이것에 직류전류를 흘려 발생하는 자장에 의해 용탕을 회전시키는 것이 가능하다. freckle 편석 방지를 위해 회전 방향을 주기적으로 변경할 수도 있다. 이것에 의해 결정립 사이즈를 미세화 할 수 있다.

⑥ 로 본체 배치 : 로 본체의 전극 구동기구 1 세트에 동 도가니는 2개를 설치한 1Head - 2Stations 방식이 이용되고 있다. 이것에 의해 한 쪽에서 주괴 냉각중에 다른 쪽에서 용해를 할 수가 있어 생산성을 향상시킬 수 있다.

그렇지만 이들 개발된 로의 전부가 티타늄 용해에 적용되고 있는 것은 아니다. 티타늄 용해의 경우 아크 길이 제어는 단락 회수에 의한 제어(drip control)가 아니라 전압 제어(voltage control)에 의하여 행하여지고 있다. 그 이유는 티타늄 용해의 경우 용해전류가 니켈기 초내열합금 등에 비해서 높은 경우가 많고, 순간적인 단락이 일어나지 않고 완전한 단락 현상이 되기 때문이다. 또 전극 위치의 X-Y 이동 방식도 용해 중에는 적용되지는 않는다. 이것은 오동작으로 인하여 전극이 한쪽으로 쏠리게 되면 전극과 도가니와의 사이에 아크가 발생해서 도가니가 용손되면 증기 폭발을 일으킬 위험성이 있기 때문이다. 그러나 용해 준비 시 전극을 도가니 중심으로 설치할 때는 유용하게 적용되고 있다.

5. VAR 용해로의 폭발 방지 대책

티타늄의 VAR 용해 시 세계적으로 몇 번의 폭발 사고가 있었는데, 이들의 공통적인 현상은 2번의 폭발이 연속적으로 일어났다는 것이다. 최초의 폭발은 장비를 파손 시킬 정도의 위력을 갖고 있지만, 최초의 폭발에서 수 초 내지 수십 초

후에 평음과 함께 파란 화염을 동반한 두 번째의 큰 폭발이 일어나 장치와 구조물을 파괴한다. 최초의 폭발은 동 도가니 내의 용탕에 냉각수가 접촉되어 발생하는 수증기의 팽창에 의해서 일어나는 증기 폭발이며, 두 번째의 폭발은 티타늄과 물과의 반응에 의해서 생긴 수소와 초기의 폭발로 파손된 로의 누설 부위에서 침입한 공기와의 혼합에 의한 수소 폭발로 해석되고 있다.

티타늄의 VAR 용해에 있어서 이와 같은 폭발을 방지하기 위해서 최근에는 알곤 용해에서 진공 용해로를 채용하는 경향이 증가하고 있으며, 용해작업 시 아크 길이를 작게하고, 전극과 동 도가니 사이의 거리를 주피 크기에 따라 다르지만 일반적으로 50mm 정도를 확보해야 한다. 그 외에도 동 도가니의 냉각수를 액체 금속의 NaK로 대체하여 사용하는 방법도 있다. 이 방법은 수소 폭발에 대해서 완벽한 대책이 되지만, 건설비와 운전 비용이 커 그다지 널리 보급되어 있지는 않다.

미국의 TDA(Titanium Development Association)에서 VAR의 폭발을 방지하기 위해 제안한 주된 내용을 상기 언급한 것은 제외하고 열거하면 다음과 같다.^[14]

- ① 냉각수가 중단된 경우 전원이 긴급 차단되어야 함.
- ② 냉각수 출구 온도의 관리. 입구 온도와 20℃ 이상의 온도차는 위험함.
- ③ 최소 2계통 이상의 냉각수 시스템을 채용하고, 그 중 하나는 자연 낙하 이용이 바람직함.
- ④ 로내 압력이 상승해도 계속 작동하는 진공 시스템을 갖출 것.
- ⑤ 각 로 본체로의 폭발구를 설치하고 공기의 역류를 막는 것이 좋음.
- ⑥ 작업중에 로 가까이에서의 장시간 작업을 피할 것.
- ⑦ 로를 해체하기 전에 불활성 가스 봉입.
- ⑧ 쇼트 아크 콘트롤 시스템의 도입.
- ⑨ 전극의 진직성과 stub, ram 체결부의 동심성.

⑩ 괴상 스크랩 전극의 용접 조립시에 동 도가니로의 아크 방지.

이상에서와 같이 VAR의 폭발 대책으로는 우선 냉각수가 동 도가니내로 유입이 되지 않도록 도가니의 아크 손상과 용손의 방지를 고려한 안전 조업이 가장 중요하다. 다음에 냉각수가 침입한 경우의 수소 폭발로의 확대 방지, 최후로 수소 폭발 시의 신체의 보호와 장치 손상을 최소화의 3 단계로 나눌 수 있다. 현재의 기술로는 동 도가니의 아크에 의한 손상과 용손이 완전한 신뢰성을 가지고 방지 할 수 있는데까지는 이르지 않았기 때문에, 2단계, 3단계 제의 대책이 중요하다.

6. 맺음말

티타늄의 우수한 특성을 이용하여 산업용, 군수용 및 일반 생활용품에 이르기까지 그 응용 분야가 확대되면서 국내의 티타늄 사용량도 점차적으로 증가되고 있다. 그렇지만 현재까지도 국내에서 사용되는 모든 티타늄 소재는 전량 수입에 의존하고 있고, 그에 따른 막대한 외화를 지불하고 있는 실정이다. 따라서 티타늄 소재의 국산화는 필수적이라 할 수 있고, 이를 위해서는 티타늄 소재를 생산하기 위한 설비, 제조 기술과 더불어 많은 경험이 필요하다. 본 글에서는 티타늄 주피를 제조하는데 가장 널리 이용되는 VAR 용해 기술에 대하여 살펴보았다. 건전한 티타늄 주피 제조를 위해서는 원소재 준비 단계에서부터 최종 주피 제조 시까지 철저한 공정 관리와 더불어 많은 주의를 기울여야 한다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 용해 공정 모사 등을 통하여 결합 제어, 조직 제어 기술이 일반화되고 있다. 특히 자원 재활용의 차원에서 티타늄 스크랩 등을 보다 용이하게 활용할 수 있는 기술 등이 개발된다면 VAR 용해 기술은 향후에도 지속적으로 티타늄 소재를 제조하는 기본 기술로 발전하게 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.customs.go.kr> : 관세청 무역통계 자료(2000).
- [2] 박노광, 이용태 : 기계와재료, Vol.3, No.1 (1991) 106.
- [3] 장대규, 심건주, 이강인, 서창열 : 제6회 첨단 광물소재 및 분석워크샵 논문집(1994) 165.
- [4] C. E. Shamblen and G. B. Hunter : Proc. of Vac. Met. Conference, (1989) 3.
- [5] 일본규격협회 : JIS H2151.
- [6] 岡 勉, 前義治 : 鐵と鋼, Vol.73, No.3(1987) 20.
- [7] R. Hähn, H. Andörfer, H. J. Retelsdorf : Proc. of the 5th Int. Conf. on Titanium, Munich FRG (1984) 109.
- [8] O. Winkler and R. Bakish : Vacuum Metallurgy, (1971).
- [9] K. Bungardt and H. Vollmer : Arch. Eisenhüttenw., Vol.35 (1964) 725.
- [10] H. B. Bomberger and F. H. Froes : J. of Metals, November (1984) 40.
- [11] 梅田洋一, 池田降果, 市橋弘行 : Titanium & Zirconium Vol.32 (1984) 25.
- [12] 일본특허 259671호(1958).
- [13] 高尾善一郎, 草道英武, 八木芳郎 : 鐵と鋼, Vol.44 (1958) 1294.
- [14] E. R. Pulsen et. al. : Proc. of the 7th Int. Conf. on Titanium, San Diego (1992).