



타이타늄의 용해와 결함방지 기술

이용태, 이동근 | 재료연구소

1. 서론

타이타늄과 그 합금(이하 타이타늄)은 용점이 높고(1,668°C), 고온에서 산소(33 원자질량), 질소(22 원자질량), 수소(67 원자질량), 탄소(0.6 원자질량) 등과 같은 가스상의 고용도가 높을 뿐만 아니라, 일단 유입된 산소와 질소는 결함으로 작용하나 제거할 수 없기 때문에 엄격한 용해공정이 요구된다. 또한 타이타늄과 가스상과의 높은 화학적 활성 ($P_{O_2} = 6 \times 10^{-19}$ 기압) 때문에 진공에서 특수한 장치를 이용하여 제련, 정련, 용해 등의 공정으로 제조되어야만 한다. 따라서 철강과 같은 일반 금속의 용해공정에 비하여 단속적인 공정으로 조업을 수행하면서 고가의 특수한 장비와 고도의 기술이 요구되며, 또한 많은 에너지를 소모하게 되어 소재의 원가가 높아지는 직접적인 원인이 된다. 이러한 에너지 소모가 많은 특수한 용해공정은 타이타늄 소재 자체의 난가공성과 더불어 소재의 가격을 상승시키는 요인이 되고, 따라서 타이타늄을 범용으로 사용하는데 장애 요소가 되어 왔다¹⁾.

국내에서는 스폰지 타이타늄을 제조하는 제련 산업이 전무하고 대형 타이타늄 잉고트를 대량으로 용해, 제조하는 산업도 태동단계에 있기 때문에 국내 산업에 소요되는 연간 소요량 (약 7,000톤, 약 2,000억원, '07년 관세청 통계)을 매년 전량 수입에 의존하고 있고, 해마다 15% 이상씩 수요가 증가하고 있다. 최근 들어 국내업체들에서 수입된 스폰지를 용해하여 대형 잉고트를 제조하고 압연하고자 하는 대형과제를 구상하고 있으며, 이에 따라 특수 용해 공정기술과 장비에 대한 상세한 기술적 요구가 현실화되고 있다. 이에 더하여 다양한 특수용해를 위한 장비의 가격과 조업 원가, 기술의 난이도 등에 대한 장단점에 대한 비교를 통하여 향후 장비의 선정과 투자를 통하여 경제성이 높은 사업 영역을 구축하고자 하는 시도가 점증하고 있다.

일반적으로 대형 잉고트를 제조하기 위한 타이타늄 스폰지의 크기는 25mm 정도의 불규칙한 형상으로, Kroll 공정으로 생산되어지기 때문에 원재료 내에 NaCl, MgCl₂ 등과 같은 불순물을 함유하고 있다. 이에 더하여 스폰지 내에 공존하고 있는 산소, 질소, 수소, 철, 실리콘 등과 같은 불순물과 비소모성 전극에서 유입되는 텅스텐 등을 적절히 제거하지 못하면 다양한 결함이 잉고트 내에 잔존하게 되어 판재 등과 같은 최종 제품의 연신률과 충격치, 피로강도 등과 같은 물성을 낮추기 때문에 적절한 용해 장비와 결함 방지 기술에 대한 고려가 필수적이다. 최근에는 경제성을 향상시키기 위하여 스크랩을 다량 사용하는 추세에 있는데, 이때 스크랩과 함께 유입되는 표면산화층, 마모된 공구조각, 절삭유와 같은 이물질 등이 적절히 선별되고, 또한 용해과정에서 제거되어야 최종제품의 결함을 방지할 수 있다.

본 글에서는 타이타늄 잉고트를 제조하는데 주로 사용되는 특수용해 방법(VAR, EBM, PAM, ISM 등)에 대한 기술적 소개와 아울러 이들 용해기술과 장비를 운용하는데 있어서의 경제성에 대해 상호 비교하고자 한다. 이에 더하여 원소재 스폰지 등에서 유입되는 다양한 불순물에 의한 결합의 종류와, 용해과정 및 빌렛 가공 중에 생기는 결합의 종류와 이들을 제거하기 위한 결합방지 대책에 대해서 설명하고자 한다.

2. 타이타늄의 용해 방법

현재 공업적으로 보급되어 있는 타이타늄과 같은 고용점 활성금속의 용해하는 방법을 대별하면 사용하는 열원에 따라 진공아크 재용해(VAR, Vacuum Arc Remelting), 전자빔 용해(EBM, Electron Beam Melting), 플라즈마 아크용해(PAM, Plasma Arc Melting)이 주로 이용된다. 이에 더하여 철강이나 특수금속의 정련 용해에 사용되는 ESR (Electro Slag Remelting), ISM (Induction Skull Melting) 등이 사용되고 있으나 경제성의 관점에서 대형 잉고트를 제조 하는 데는 이들 기술의 활용은 상대적으로 미미하다. 또한 스폰지를 장입/조업하는 방법에 따라, 전극의 용해에 따라 소모전극 또는 비소모 전극식으로 분류된다. 이들 용해방법 중 경제성 있는 대형 잉고트의 제조에 사용되는 VAR, EBM, PAM에 대하여 보다 상세하게 소개하고자 한다.

2.1 진공 아크 재용해 (VAR, Vacuum Arc Remelting)

VAR은 현재 대부분의 생산국에서 스폰지로부터 잉고트를 용해하는데 가장 보편적으로 사용하는 방법이다. 이 공정은 Fig. 1에 도시한 것과 같이 압착, 전극용접, 용해 공정을 통하여 잉고트를 생산하게 된다. 타이타늄 합금을 제조하기 위해서는 스폰지에 합금원소를 첨가한 다음 압착하여 제작한 briquette (최소밀도 3.5 g/cm^3)을 전극의 크기로 만들기 위하여 진공 또는 불활성 분위기 하에서 여러 개를 용접하여 1차 용해용 전극을 만든다. 이를 진공 분위기(진공도 0.25-0.9기압)에서 아크를 발생시켜(아크길이 2.5-5 cm) 수냉동 도가니 내에서 용해하여 잉고트를 제조한다. 제조된 잉고트 내의 화학적 조성 균질화를 위하여 잉고트 표면의 산화층을 황삭하여 제거한 다음, 이를 소모전극으로 하여 2 ~ 3회 재용해 하여 건전한 잉고트로 제조한다. 현장에서는 2회의 재용해로 화학적으로 균질한 잉고트를 제조할 수 있기 때문에 잉고트를 장시간의 균질화 처리하지 않고 바로 코킹 공정을 거쳐 판재 압연을 수행하고 있다. Fig. 2에 재료연구소(KIMS)에서 작업하고 있는 VAR 장비와 각 작업과정을 도시하였다. 아울러 Fig. 3에 VAR 용해작업의 진행 정도와 작업 중의 온도구배와 냉각속도를 모사한 과정을 도시하였다. 마지막 사진은 실제 작업한 후에 단면을 절단하여 온도구배에 따른 미세조직의 변화와 모사와 비교검토 하였고, 잉고트의 상부 직하에 수축공이 생성된 것을 Fig. 2와 3에서 볼 수 있다.

상업적으로 생산되는 대부분의 잉고트는 VAR로 제조되고 있는데, 이는 다른 용해 방법에 비하여 장비의 가격이 상대적으로 저가이며, 오랜 조업을 통하여 작업조건이 표준화되어 있고, 장비의 취급이 용이하며, 전력이 상대적으로 적게 소요되고, 잉고트 품질의 재현성도 우수하여 경제적으로 유리하기 때문이다. 화학용기 등과 같은 정적 구조물에 사용되는 타이타늄은 VAR로 2회 재용해한 소재를 사용하는 반면에, 항공기 부품과 같이 동적 구조물에 사용되는 소재는 VAR로 3회 재용해 하여 화학적 균질성과 결합이 제거된 엄격한 품질 조건을 만족시키는 잉고트를 사용하여 제조하고 있다.

최근에는 수율을 높이기 위하여 전극을 원형으로 하는 대신 60% 단면적을 가지는 반원 형태 (최소 안정적 아크

단면적)로 압착한 다음 선별된 스크랩을 용접하여 1차 전극으로 사용하여 스크랩을 최대 50% 정도까지 재활용하고 있다²⁾. 그러나 항공기 부품에 사용하기 위한 소재는 불순물의 유입을 방지하여 피로균열 소스로 작용하는 결함을 방지하기 위하여 스크랩의 사용을 제한하고 있으며, 특별한 경우에 한하여 항공기 부품제조사의 승인 하에 소량의 스크랩 사용이 인정되고 있다.

소모식 VAR법은 생산비용이 적고 10톤 이상의 대형 잉고트 제조에 적합하다는 장점으로 인하여 상업적으로 널리 사용되고 있지만 용해속도 조절의 어려움, 성분원소의 편석, 전극 제작시 침입형 불순물의 오염 등의 단점도 있다. 또한 최근 산업의 발전에 따라 희유금속 소재의 불순물 함량에 대한 규제를 강화하고 있는데 이러한 요구를 충족시키기 위해 새로운 용해방법인 PAM 및 EBM이 주목받고 있다⁴⁾.

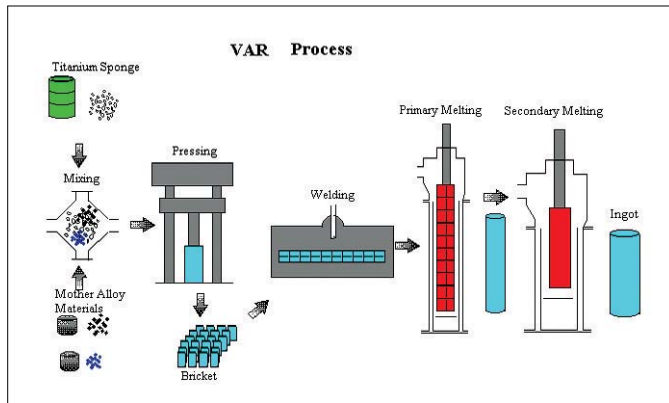


그림 1. Consumable electrode vacuum arc remelting (VAR) process³⁾

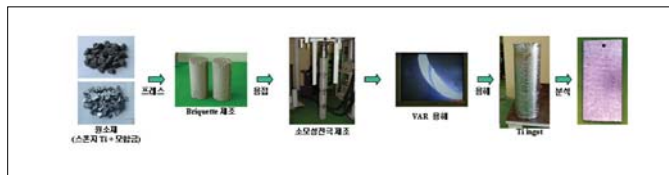


그림 2. VAR process operated in KIMS (80 kg/batch)

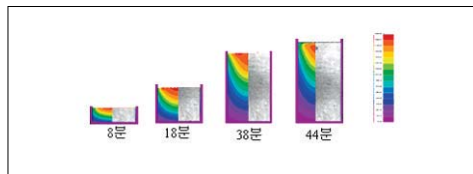


그림 3. Computer simulation of the temperature distribution during the VAR melting process

2.2 전자빔 용해 (EBM, Electron Beam Melting)

열원으로 전자빔을 사용하면 보다 높은 온도와 전자기적 조절에 의한 열원의 위치 이동이 용이하기 때문에 고품

점을 가지는 금속의 용해에 이용되고 있다. 1905년 EBM 기술이 개발되어 탄탈륨 용해에 적용된 이래, 기술적으로 안정된 전자총을 제조하는 기술이 발전하여 1970년대에 이르러 타이타늄 스크랩을 재용해하는 상용화 공정에 적용되었다. 타이타늄 용해용으로 사용되는 전자빔 용해로는 수냉 hearth가 부착되어 있어 EBCHR (Electron Beam Cold Hearth Melting)라 불린다⁵⁻⁶⁾. 이 장치를 사용하면 스폰지나 스크랩을 압착하여 전극을 만드는 공정을 생략하고 원소재를 다양한 형태로 장입하여 용해할 수 있다.

EBM 장치는 Fig. 4에 도시한 것과 같이, 원소재를 직접 수냉식 도가니에 장입한 다음 전자빔 토치를 이용 hearth 윗부분을 선회하며 용해하고, 수냉 몰드 내에 용탕을 주입하는 연속주조 방법으로 잉고트를 제조하므로 VAR 조업과 같은 제조된 잉고트를 재용해를 할 필요가 없이 1회의 용해만으로도 건전한 잉고트를 얻을 수 있다. 또한 VAR 장치와 같이 몰드의 형상이 균일한 아크 생성을 위한 원형일 필요가 없이 단면이 직각사각형인 잉고트를 바로 제조할 수도 있다. 따라서 제조된 잉고트는 코깅공정을 생략하고 바로 압연공정으로 이송될 수 있기 때문에 경제적으로 유리하다. 또한 원소재를 수차례에 걸쳐 장입할 수 있도록 보조장치를 부착함으로써 일회 작업으로 10톤 이상의 대형 잉고트를 생산할 수도 있고, 이를 통하여 경제성을 향상시키고자 하는 장비개발이 이루어지고 있다. 이에 더하여 용해작업 중에 원소재 내에 존재하는 휘발성 불순물을 날려 보낼 수 있기 때문에 잉고트 내에 존재하는 고밀도 게제물과 타이타늄 질화물 등의 저밀도 게제물을 제거할 수 있어 저급 타이타늄 스크랩도 재활용 가능하다.

EBM에서의 용해작업은 고진공 분위기 하에서 이루어지므로 용융상태에서 높은 증기압을 갖는 알루미늄 등과 같은 경량합금원소의 증발 손실이 발생되기 때문에 최종 제품의 합금 성분조절이 어렵다는 단점이 있다. 반면에 중금속이나 고밀도 불순물은 조업 중에 타이타늄과의 비중 차에 의하여 Hearth 하부에 분리되어 잉고트에서 배제되는 장점도 있다. 그러나 여타 금속 용해설비에 비해 설비비용과 조업비용이 고가이고 장비운영이 어렵다는 단점도 있다. 아직까지도 경제적인 전자총의 생산과 안정적인 전자빔의 조절이 용이하지 않으며, 조업 중에 휘발되는 불순물 등이 진공 라인을 막게 되어 주기적인 청소와 관리가 필요하다. 또한 생산된 잉고트 내에 수축공 등이 존재할 수 있기 때문에 압연 전에 초음파나 X 선 검사를 통하여 제품의 안전성을 확인하여야 한다.

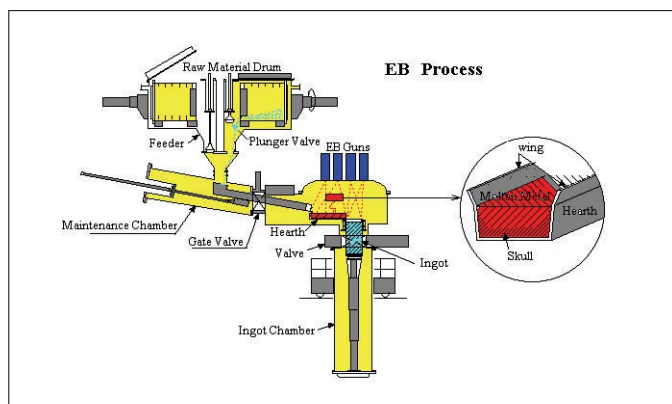


그림 4. Electron beam cold hearth melting (EBCHR) process³⁾.

2.3 플라즈마 아크 용해 (PAM, Plasma Arc Melting)

PAM 기술은 열원으로 플라즈마 아크를 사용함으로써 용해 분위기를 자유롭게 바꿀 수 있는 EBM의 높은 정련 효과와 VAR의 합금제조 능력을 겸비한 방법으로 상기 Fig. 4에서 소개한 전자총 대신에 플라즈마 토치를 장착하였다는 점 외에는 대부분 유사하며, 수냉 hearth가 부착되어 있는 PACHM (Plasma Arc Cold Hearth Melting)도 널리 이용되고 있다. 산업적으로는 비소모성 전극 주위에 아르곤(Ar)과 같은 불활성 기체를 흘려주면서 직류 또는 교류 아크 열플라즈마로 수십 MW까지 얻어내는 비이송식 또는 이송식 플라즈마가 주류를 이루고 있다⁵⁻⁶⁾.

PAM의 장점으로 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⁾.

그러나 아직까지는 대형 용해설비의 제작과 조업 역사가 일천하기 때문에 용해장비의 설치가 한정적이고, 작업 표준화가 되어 있지 않아서 생산 현장에서 이 장비를 이용한 잉고트의 생산량은 상대적으로 많지 않은 상황이다. Fig. 5에 PAM 장비의 모식도를 나타내었다.

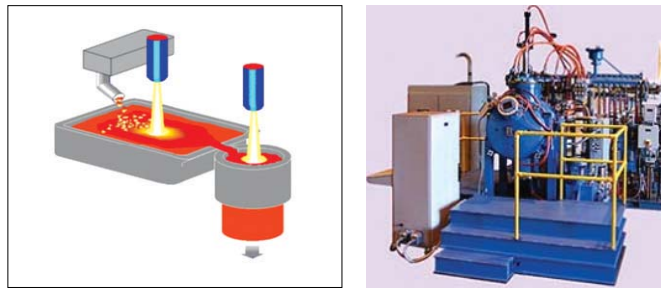


그림 5. Schematic Plasma Arc Melting (PAM) furnace and PAM equipment.

2.4 유도 용해 (ISM, Induction Skull Cold Crucible Melting)

ISM 방법은 열원으로 유도전기를 이용한다. 용해로는 전기전도도가 좋은 구리 내부에 수냉을 시키면서 eddy current를 최소화하기 위하여 수냉 path가 있는 구리를 조각으로 구성하고, 수냉 구리조각 사이에 부도체를 삽입하여 간극을 유지하면서 도가니를 구성할 수 있도록 제조되어 있다. 가열방식은 전자기적 유도전기가 흘러 장입된 금속이 도가니와 접촉하지 않는 상태에서 장입된 금속을 용해하는 방식이다. ISM으로 용해하는 경우에는 수냉에 의해 용융금속이 즉시 얇은 skull을 형성함으로써 도가니와 접촉을 하지 않은 상태에서 활성금속들을 용해할 수 있기 때문에 도가니와의 반응이 없을뿐더러 전자기적 힘에 의하여 강력하게 저어가면서(intensive stirring) 여러 번 반복하여 사용할 수 있기 때문에 첨가원소를 균일하게 합금화 하면서 작업을 수행할 수 있어서 다른 용해 방법에 비하여 경제적으로 용해 및 주조작업을 할 수 있다. 반면에 수냉동 도가니로 이루어진 용기의 용량이 적기 때문에 소량의 전도성 금속을 녹여서 소형품을 주조하는데 용이한 장비이다. Fig. 6에 KIMS에서 운용하고 있는 타이타늄 5 kg을 용해하여 3 kg까지의 주조품을 제조할 수 있는 장비를 이용한 작업과정을 나타내었다.

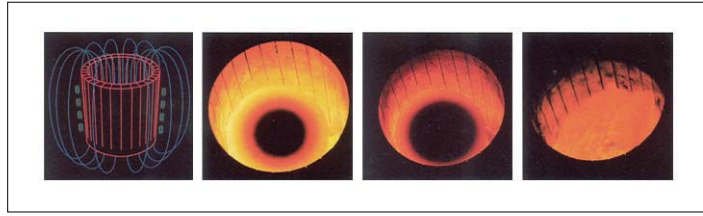


그림 6. Operation process of the ISM located in the KIMS

3. 경제성 비교

앞에서 소개한 다양한 타이타늄의 용해 방법 중에서 어느 쪽이 경제적으로 더 유리한가는 스펀지의 국제시세, 스크랩 시세 및 활용양, 전력요금, 최소 생산량, 최종제품의 요구품질 및 가공비용, 장비의 보수유지 비용 등등을 종합적으로 고려하여 비교 판단해야 한다. 먼저 앞에서 소개한 4 가지 용해기술에 대하여 경제성에 대한 기존 연구결과⁷⁾를 Table 1.에 인용하였다. 전체적으로 제조원가, 투자규모, 생산비용 면에서 VAR이 압도적으로 우세하나, 저가로 스크랩을 구입할 수 있는 경우에는 다른 용해방법도 경쟁이 가능하다. 다만 스크랩이 적은 국내 실정으로는 VAR로 조업하는 것이 가장 경제적일 수 있다. 또한 생산요구량이 많지 않은 국내실정으로는 여유시간에 인바나 니켈합금, 특수강 등을 다양하게 용해할 수 있는 VAR이 경제성이 높을 것으로 판단된다. 또한 작업조건이 비교적 단순하고 고장이 적고 수리가 용이한 VAR 장비의 특성상 초기 투자가 고려되는 국내실정에 더욱 유리할 것으로 생각된다. 반면에 고품질의 잉고트나 소량의 특수 타이타늄 합금을 VAR로 제조하기 위해서는 2 ~ 3회의 반복 용해가 필요하다는 점에서 다른 용해방법도 경쟁력이 있을 수 있다.

각 용해공정을 간단히 비교하기 위해서는 Table 2에 나타난 비교표(90년대 가격기준)도 의미가 있을 것으로 생각된다. 장비의 가격이나 조업 원가는 상황에 따라 약간씩 변하기 때문에 현 시점에서의 정확한 가격이라기보다는 상대적인 비교치로 이해해 주기를 바란다.

VAR 공정에 비하여 수냉동 도가나가 장착된 EBCHM 및 PACHM은 고품질의 잉고트를 1회의 용해에 의해 얻을 수 있으며, 소구경의 잉고트 제조에 유리하고, 슬라브 형태의 잉고트로 직접 제조할 수 있는 장점이 있으며, 최근에는 대용량의 잉고트를 제조할 수 있는 설비가 가능해짐에 따라 보다 경제성이 향상된 최종제품을 얻을 수 있다. 특히 전량 타이타늄 스크랩을 사용하여 10 톤 이상의 대형 잉고트를 제조할 수 있는 전자빔 용해장비와 전자총을 3개 이상 장착하여 온도분포를 고르게 조절할 수 있는 기술이 개발되어 1990년대부터 본격적으로 실용화되어 경제성이 많이 향상되었다.

4. 잉고트 결함의 종류와 방지대책¹¹⁻¹³⁾

타이타늄의 잉고트 및 빌렛 제조과정 중에 발생하는 결함은 원소재와 함께 유입되는 불순물에 의하여, 부적절한 용해작업에 의하여, 또한 열간 가공 중에 나타나게 된다. 이들 결함의 원인과 종류를 Table 3.에 요약하였다.

먼저 원소재에서 유입되는 불순물에 의한 대표적인 결함으로 Type I 이 있다. 이러한 결함으로는 LDI (Low Density Inclusion), HID (High Interstitial Defect), Hard Alpha 등이 있다. 이러한 결함은 원재료로부터 또는 조

표 1. Comparison of different smelting processes of titanium waste recycling^{7-10).}

	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

표 2. Comparison of the various furnaces for melting of the titanium alloys⁹⁾

	Electricity (kWh/kg)	Productivity (kg/h)	Capital cost (10 ⁶ \$)	Operating cost (\$/kg)
VAR	1.1	320	1.5	0.55
Non-c. Arc	1.8	200	2.0	1.1
EB	3.3	200	3.0	2.0
Plasma arc	2.2	300	3.0	>1.5
Cold crucible	1.4	300	1.1	0.7

업 중에 공기 또는 수분이 스며들어 이를 구성하는 산소, 질소 등이 용융 타이타늄과 반응하여 생기는 결함이다. Type I 결함은 Alpha 상을 안정화시키는 원소에 의해 발생되기 때문에 국부적으로 Alpha 상이 편중되고 공공 또는 미세균열이 동반되는 결함이다. 이러한 결함은 유입된 가스 상이 응고가 완료된 고상 내에서 분압을 가짐으로써 국부적으로 공기 또는 가스 포켓이 형성되기 때문이다. 이러한 Type I 결함이 잉고트 내에 존재하면 낮은 변형 양에서도 균열이 쉽게 일어나기 때문에 가공된 판재에서 피로강도가 현저히 저하된다. 이 결함은 한번 유입되면 후 공정에서 제거 할 수 없기 때문에 원재료 스폰지의 철저한 관리를 통하여 수분, 산소, 질소 등의 유입을 차단함으로써 막을 수 있다.

Type II 결함은 HAD (High Aluminium Defect)라고도 불리는데, 알루미늄이나 주석과 같이 증발이 용이한 저융점 합금원소에 의하여 응고수축부에 응축되어 나타나게 된다. 이 결함은 Alpha 상을 유발하나 강도가 모재에 비하여 크게 높지 않기 때문에 덜 유해하나, 이러한 결함이 존재하면 반복사용 중에 피로균열 크랙이 비교적 쉽게 생성되어 재료의 고주기피로 성질이 저하된다. 주로 잉고트가 최종 응고하는 부위에서 발생하기 때문에 응고수축부를 제거하거나 응고시 여분의 열을 가하여 최종 수축부의 응고속도를 늦춤으로써 발생빈도를 낮출 수 있다.

Alpha 상 안정화 원소 (Al, Sn, 등)가 미세편석을 일으킴에 따라 국부적으로 Beta 상 변태온도가 높아져서 생성

되는 Alpha 상에 의한 결함을 Blocky Alpha 결함이라고 부른다. 이러한 결함은 소재의 기계적 성질에는 크게 영향을 미치지 않는다. 그러나 초음파 검사로 쉽게 찾아지며, 성형공정 중에 Beta 상 변태온도 근처에서 서서히 승온 및 냉각시키면 없어지게 된다.

Beta Fleck 결함은 잉고트 중에 Beta 상 안정화원소 (Fe, Cr, Ni, Mn, Cu, 등)가 국부적으로 존재하는 경우에, 이 영역에서 변태온도가 낮아져서 생기는 결함이다. 잉고트의 직경이 커질수록 발생빈도가 증가한다고 알려져 있다. 이 결함이 존재하면 피로균열의 시작점으로 작용하여 향후 가공 단조품의 피로강도를 저하시킬 수 있으므로 피해야 한다. 이 결함은 Blocky Alpha와 마찬가지로 Beta 상 재결정 및 동적 재결정 과정에서 확산에 의하여 제거될 수 있다.

잉고트 응고시 형성되는 조대한 수지상정(Coarse Dendrite)은 가공 중에 수지상정 경계면에서 균열을 유발시키므로 적절히 제거되어야 하는 결함이다. 코킹 중에 균열이 발생될 때에는 이 균열의 지속적인 성장을 방지하기 위하여 연마에 의해 초기균열 부위를 제거한 후에 열간 소성가공을 수행해야 한다. 이 결함을 방지하기 위해서는 잉고트 제조시 냉각속도의 조절에 의하여 조대한 수지상이 생성되지 않도록 해야 한다.

미세수축공(Micro Shrinkage)은 응고시 수지상정 가지 사이에서 액상 금속의 공급이 충분하지 못한 경우에 생성되는 결함이다. 또한 연화물이 다량 잔류하는 스폰지를 사용하는 경우에도 잉고트 내에 둥근 모양의 미세수축공이 생성된다. 용해조업 중에 진공도가 낮은 경우에도 유입되는 잔존 산소나 질소에 의해서 미세수축공이 형성될 수 있다. 진공상태인 미세수축공은 그 크기가 비교적 소형인 경우에는 열간 소성가공 중에 가공량이 충분한 경우에는 용착에 의하여 대부분 제거된다.

HDI(High Density Inclusion) 결함은 주로 스크랩 중에 유입되는 절삭 바이트를 구성하는 고용점 불순물 (WC, Mo, Ta, Nb, 등)이 혼입되거나, 브리켓을 용접하는 과정에서 혼입된 비소모성 용접봉 재료 (주로 W) 등이 타이타늄의 용해온도에서 녹지 않고 고체상태로 존재함으로써 발생하는 고용점 원소 개재물에 의한 결함이다. 이러한 결함은 사용 중에 응력집중에 의한 피로균열 크랙의 초기 생성지로 작용하여 저주기 및 고주기 피로강도를 낮추기 때문에 작업 중에 불순물 유입을 엄격히 관리함으로써 방지할 수 있다.

응고의 말기에 적절한 열이 유입되지 않으면 표면이 먼저 응고한 후 내부에서 응고수축이 일어남에 따른 수축공(Shrinkage hole)이 표면 직하에서 발생하게 된다. 수축공의 크기는 일반적으로 잉고트의 크기에 비례하여 생성되는데, 직경이 3cm 이상 되는 수축공은 차후 압연과정에서 압착되지 못하고 연신되어 긴 결함을 발생시키기 때문에 판재의 수율이 낮아지게 된다. 대부분의 공장에서는 비파괴검사에 의하여 잉고트 내의 수축공 결함의 크기와 위치를 확인한 다음 건전한 부위만 남도록 절단한 후 코킹과 압연공정에 넘어가게 된다. 또한 냉각 속도가 비교적 빠른 경우에도 잉고트 내부에 수축공이 발생된다. 수축공은 잉고트의 수율을 낮추기 때문에 피해야 하는 결함 중의 하나로, 이를 방지하기 위해서는 최종 응고 시에 예열을 하여 응고속도가 적절히 조절됨으로써 수축공이 표면에 생기게 유도하는 방법이 있다. 또한 용해 작업이 끝나가는 시점에 예열 시간을 주어 Hot Topping에 의한 냉각속도의 조절로 수축공이 생성되는 것을 방지하기도 한다. Fig. 3에 응고가 진행됨에 따른 고체/액체 계면의 이동에 관한 전산모사 그림과 실제 단면적에서 나타난 결함을 Fig. 2에서 볼 수 있다.

이상과 같은 잉고트 용해 중에 나타날 수 있는 결함의 종류와 원인, 제거대책을 Table 4에 요약하였다. 아울러 용해 중에, 그리고 가공 공정 중에 나타날 수 있는 잉고트 내에 존재하는 결함의 종류와 이들 결함이 생성되는 원인과 방지대책을 Table 5에 요약하였다. 일반적으로 용해공정에서 발생하는 결함은 부적절한 이물질이 원재료와

함께 유입되어서 생기는 결함과, 합금원소들의 편석에 의한 결함, 부적절한 응고속도에 의한 결함 등으로 대별될 수 있으므로, 작업 공정의 표준화를 통하여 이들 결함이 최소화 할 수 있도록 노력하는 것이 중요하다.

표 3. Titanium Ingot Defects and Causes

Processing	Origin of Defects	Type of Defects
Materials	<ul style="list-style-type: none"> - Raw Materials <ul style="list-style-type: none"> * Sponge Contamination * Recycled Titanium * Matster Alloy Contamination * TIG Welding - Ingot <ul style="list-style-type: none"> * Aggressive Grinding 	Type I (LDI, HDI, HA) Type I , HDI (High Density Inclusion) Type I Type I , HDI Type I
	<ul style="list-style-type: none"> - Solidification <ul style="list-style-type: none"> * Segregation * Microstructure * Shrinkage - Processing <ul style="list-style-type: none"> * Air leak, Water leak * Arc Power Level Variation 	Type II (HAD) Beta fleck, Blocky Alpha Large Dendrite Shrinking Pipe, Porosity Type I Type II , Beta Fleck, Blocky Alpha
Forming	<ul style="list-style-type: none"> * Heating Process * Microstructure * Strain rate * Oxide Inclusion * Super Cooling 	Alpha Case Elongated Alpha SIP (Strain Induced Porosity) Fold (Alpha case Folding) Crack in Corner

표 4. Defects and causes formed during the melting process

Defects	Defects	Cause	Phenomena
Type I	LDI (Low Density Inclusion) HID (High Interstitial Defect) HA (Hard Alpha)	<ul style="list-style-type: none"> - Air/Water - Oxide, Nitride - Porosity 	<ul style="list-style-type: none"> - Micro crack due to low ductility - Lower Fatigue Strength - Multi - Melting Processing
Type II	HAD (High Aluminium Defect)	<ul style="list-style-type: none"> - Al, Sn Low melting Alloying Elements 	<ul style="list-style-type: none"> - Easy Fatigue Crack Initiation - Lower Fatigue Strength
Blocky Alpha		<ul style="list-style-type: none"> - Al, Sn Microsegregation 	<ul style="list-style-type: none"> - Local Transus temperature Increase
Beta Fleck		<ul style="list-style-type: none"> - Fe, Cr, Ni, Mn, Cu 	<ul style="list-style-type: none"> - Melting Temperature Increase - Beta Phase Segregation

Defects	Defects	Cause	Phenomena
Cause Dendrite		- Non uniform solidification	- Crack during processing
Micro Shrink-age		- Non uniform solidification	- Microstructural Defect
HDI		- Recycled HD elements WC, Mo, Ta, Nb	- Microstructural In homogeneity

표 5. Defects produced during the melting and solution for the defects elimination

Processing	Defects	Reasons	Solution
Solidification Defects	Type I	N, O	Raw materials Control, Triple melts
	Type II	Solidification Shrinkage	Triple melt, Top Cutting
	Blocky Alpha	Micro solidification Segregation	Diffusion of the billet
	Beta Fleck	Local Heating, Over Heating	Diffusion of the billet
	Dendrite	In proper solidification	Equiaxed microstructure
	Micro Shrinkage	Local solidification	Shrinkage Mechanical Welding
	Micro Porosity	Cl, N, O	Raw material control
	HDI	W, Ta, WC, Nb	Screening the HMM
Processing Defects	Alpha Case	Oxidation	Shot Blasting, Chemical Milling
	Elongated Alpha	In Sufficient Recrystallization	Sufficient Plastic deformation
	SIP	Non uniform Deformation	Uniform microstructure
	Fold	Folding the Ingot	Die Design
	Corner Crack	Local Cooling	Edge cutting, Local Heating

5. 빌렛 결함과 방지대책

앞에서 소개한 다양한 용해방법에 의해 제조된 잉고트는 분괴 또는 코킹 등의 작업을 통하여 다양한 형태로 가공되어져야 일반 산업분야에 사용되는 소재로 가공된다. 타이타늄 잉고트를 가공하는 과정에서 생길 수 있는 결함으로는 가공과정 중에 유입되는 표면 산화물, 불충분한 소성가공에 의한 미세조직의 불균일과 내부의 결함의 지속 존속, 낮은 가공온도와 심한 가공량에 기인하는 균열 등의 결함이 생성될 수 있다. 빌렛 가공 중에 생성되는 결함의 종류와 방지대책을 Table 6에 요약하였다.

먼저 타이타늄은 공기 중에서 산소와의 친화력이 크기 때문에 가공 중에 항상 산화피막이 존재하게 된다. 잉고트의 냉각 중에, 또한 코킹이나 압연을 위하여 잉고트를 장시간 가열하게 되면 고온에서의 타이타늄과 공기 중에 존재하는 산소와 질소 등과의 반응에 의하여 두꺼운 Alpha Case가 생성된다. 생성된 alpha case는 주로 타이타늄 산화물로 단단하고 취성이 높은 세라믹의 특징을 지니고 있기 때문에 비파괴 검사에 의해서 발견하기 어렵고, 이러한 내부결함이 존재하면 가공이 어렵게 하기 때문에 압연 등과 같은 가공과정 전에 반드시 제거 되어져야 한다. 잉고트 상태에서는 선반에 의한 황삭가공에 의하여 표면을 벗겨냄으로써 제거가 가능하다. 가공된 잉고트는 압연

작업 전에 모래에 의한 Short Blast나 화학적 밀링에 의한 방법으로 Alpha case를 제거하기도 한다.

잉고트를 충분히 높은 온도(alpha+beta 변태온도 이하)에서 가열하지 않으면 동적재결정에 의한 2차 alpha+beta 상이 충분히 생성되지 못하고, 상온에서 존재하던 alpha 상이 존속하면서 가공 방향으로 연신되면서 Elongated Alpha라는 결함이 압연재 내에 존재하게 된다. 이러한 결함이 판재 내에 존재하면 미세조직 상의 texture가 내재하여 기계적 성질에 이방성을 나타내게 되어 소재결함으로 작용하게 된다. 이러한 결함을 막는 방법으로는 압연작업을 alpha+beta 변태온도 이상에서 수행하던지, 변태온도 이하에서 압연을 하는 경우에는 가공량을 충분히 많이 주어 상대적으로 낮은 온도에서도 동적 재결정이 일어나게 하여 연신된 초정 alpha 상을 제거하여야 한다.

잉고트를 비교적 낮은 온도에서 열간 가공하게 되면 잉고트 내의 미세조직 차이에 의하여 국부적인 영역에서 변형이 집중되면서 미세기공 등과 같은 결함이 생성된다. 이러한 결함을 SIP (Strain Induced Pore)라 한다. 이 경우, 상 경계에 미세기공이 정렬하게 되어 최종 판재의 동적 기계적 성질을 현저히 낮추게 된다. 이러한 결함을 제거하기 위해서는 압연 가공 중에 가공온도를 적절하게 높이던지, 변형속도를 낮추면서 가공량을 충분히 많이 주어 야 한다.

표면에 생성된 산화피막을 충분히 제거하지 않고 소성가공이나 단조 작업을 수행하면 산화피막이 접쳐서 소재 내에 유입되어 미세조직 상에 불균일한 결함을 유발한다. 이와 같은 결함을 Fold 또는 Lap이라고 부르며, 이러한 결함이 최종 제품 내에 존재하면 미세조직의 불균일에 의하여 정적 및 동적 기계적 물성이 국부적으로 현저한 차이가 나기 때문에, 이러한 소재로 가공된 부품을 사용하는 경우에 때때로 예측하지 못하고 급격한 파단에 이르는 사고를 유발할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 고온성형 할 때 표면 산화피막을 충분히 제거한 다음에 작업을 수행함으로써 가능하다.

잉고트를 고온 성형할 때 모서리와 같이 냉각이 빨리되는 부위는 압연 작업 중에 적정 가공온도 이하로 냉각되어 모서리 균열이 유발되기도 한다. 잉고트의 모서리에 균열 등과같은 결함이 존재하면 압연가공 중에 모서리에 균열이 생기면서 연신되기 때문에 조업을 중단해야 하는 사고를 유발한다. 이러한 결함을 제거하기 위해서는 잉고트의 모서리를 치거나 원형으로 적절히 가공하여 모서리에서도 냉각이 서서히 이루어지게 기계가공하거나, 최종 가공온도를 적정온도 이상에서 종료함으로써 이와 같은 결함을 막을 수 있다.

표 6. Defects produced during billet processing

Defects	Causes	Solution
Alpha Case	Surface oxides	Maching, Chemical milling
Elongated Alpha	Insufficient deformation	Microstructural inhomogeity
SIP	Strain induced pore, local deformation	High temperature deformation
Fold	Folded oxides	Elimination of the oxides
Corner cracking	Nonuniform cooling	Corner rounding

6. 맺음말

타이타늄을 국내에서 생산하기 위한 노력이 현실화되고 있다. 경제성의 관점에서 타이타늄 산업의 국산화는 압연재와 같은 최종 소재의 공급부터 시작하여 점차 스폰지 생산에 이르기까지 일관된 산업시설이 이루어져야 한다. 현 시점에서는 스폰지를 수입하여 용해와 압연 공정을 거쳐 소재를 생산하는 작업이 우선적으로 고려되어야 할 것이다. 이를 위해 먼저 타이타늄의 용해를 위한 기술과 장비에 관한 심도 있는 조사가 이루어져야 할 것이다. 전 세계적으로 타이타늄의 용해는 주로 VAR 설비를 이용하고 있다. 그러나 최근 들어서 전자장비의 기술적 발전과 가격 안정성에 의한 Electron Beam 또는 Plasma를 열원으로 사용하여 대용량의 용해를 하는 기술과 장비가 가동되고 있다. 이에 다양한 용해기술에 관한 설명과 더불어 이들의 경제성을 비교해 보았다.

타이타늄의 용해과정과 빌렛을 가공하는 과정에서 생기는 다양한 결함의 종류와 이를 방지하기 위한 대책에 대해서도 이미 발표된 문헌들을 중심으로 고찰해 보았다. 용해 중에 생기는 결함을 방지하기 위해서는 우선 정선된 원소재와 표준화된 공정에 의한 편석과 응고조건을 확립함으로써 결함을 최소화 할 수 있다. 빌렛 가공 중에 생기는 결함을 최소화하기 위해서는 표면에 형성된 산화피막을 제거하고, 적절한 가공온도에서 조업함으로써 가능하다.

❖ 참고 문헌

- [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.htm>15.
- [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).
- [9] K. Suzuki, POSTEC Lecture (2004)
- [10] 최국선, 임재원, 재료마당, will be published, Jan. (2008)
- [11] 박중수, 송영범, 임태홍, 홍성식, 이흥렬, 심인옥, 재료마당 제 19권 제5호, pp32-40, (2006)
- [12] A. Mitchell, Mat.Sci.Eng. A243, pp257-262 (1998)
- [13] C.E. Shamblen, A.P. Woodfield, 16th Electron Beam Melting and Refineing Conference, Reno, Nevada (2000)



이 용 태

- 재료연구소 융합공정연구부 특수합금연구그룹 책임연구원
- 관심분야 : 타이타늄합금 응용연구, 항공기 엔진용 고온재료, 구조재료 성형연구
- E-mail : ylee@kims.re.kr



이 동 군

- 재료연구소 융합공정연구부 특수합금연구그룹 선임연구원
- 관심분야 : 타이타늄합금 응용연구 및 접합기술, 특성향상기술, 동적물성과 파괴 및 변형거동
- E-mail : leechodg@kims.re.kr