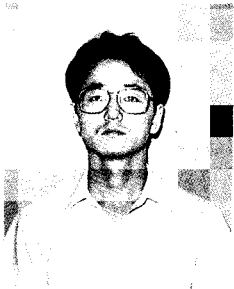


# 초청정 대형강괴의 제조기술



김성준

(내식재료실 선임연구원)

- '76-'80 서울공대 금속공학과(학사)
- '80-'82 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '85-'90 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign  
재료공학과(박사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



김정태

(한국중공업(주) 기술연구소)

- '75-'79 경북대학교 금속공학과(학사)
- '80-'82 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '85-'92 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '82-'83 한국중공업(주) 주조공장
- '84-현재 한국중공업(주) 기술연구소

## 1. 서 론

수력, 화력 및 원자력 발전소용 Rotor Shaft, 화학 설비의 압력용기, 원자력 발전소용 반응용 압력 용기, 압연설비의 Work-roll, 해양구조물 그리고 가스 터빈용 Rotor Wheel 등에 많이 사용되는 단조용 대형강괴의 사용조건이 매우 까다로워지고 대형화 됨에 따라 비금속 개재물의 제어조건, 편석 및 기공과 같은 내부결함의 방지 또는 최소화 할 수 있는 여러가지 기술들이 개발되어 실제 조업에 적용되고 있다. 대형강괴 제작의 첫 순서인 전기로 용해에서 시작하여 로외정련, 진공탈가스와 같은 기술 뿐 아니라 보통조괴법을 변형시켜 제품의 요구에 대응 가능한 특수조괴법도 많이 개발되고 있다.

한편 일반적인 용해방법이 아닌 재용해법에 있어서도 장치의 대형화 및 적용강종의 확대와 더불어 기존의 기본기술을 응용한 새로운 기술 들의 개발과 진보가 착실히 이루어지고 있다. 본 고에서는 이러한 대형강괴와 강주물의 최근의 제조기술 중 재용해법을 제외한 여러 분야에서의 발전 현황을 서술하고자 하며 재용해법에서의 기술진보 현황은 다음 기회에 발표하고자 한다.

## 2. 대형강괴 제조기술

### 2.1. 대형강괴 제조기술의 진보역사

1950년대 이전에는 거의 용해로에서 용해와 정련 두 공정이 모두 이루어졌으나 50년대 중반 실제 사용중이던 많은 제품들이 수소에 기인한 Flaking에 의해 파손됨에 따라 보다 향상된 제강법의

필요성이 절실하게 대두되었다. 이에 1958년 진공탈가스(V.D.; Vacuum Degassing)가 도입되고 그 효과가 입증됨에 따라 이후 전기로 제강(Basic electric furnace)과 진공탈가스의 채택이 거의 모든 대형강괴의 제조에 적용되고 있다. 특히 진공조괴법(Vacuum Stream Degassing; VSD)은 현재까지도 가장 많이 사용되고 있는 대형강괴의 조괴 방법이다. 1950년대 후반 대형강괴를 이용하여 만든 제품의 설계와 재료설계에 파괴역학을 도입하고 초음파 탐상법을 확립하여 강괴의 건전성을 파악할 수 있게 됨에 따라 대형강괴의 제조가 시작되었다. 그리고 발전소에서 사용되는 Rotor류 제품의 인성과 고온취성 문제가 심각하게 거론됨에 따라 강의 질적인 향상이 필수적인 과제로 대두되었다. 60년대와 70년대에는 대개 이러한 요구가 전기로제강 및 진공조괴법에 의해 만족되었으며 이후 2차 정련공정의 발달과 여러가지 제강 기술의 발전으로 P와 S 함량을 0.010% 이하로 낮춘 고품위의 청정강이 보급되게 되었다.

화력발전소와 특히 대형 설비부품을 사용하는 원자력 발전소 크기의 증가에 따라 대부분의 제강회사에서는 여러차례 전기로 작업에서 만들어진 용강을 합탕하는 기술을 개발하게 되었고 1970년대 이후 로의정련 기술이 도입됨에 따라 약 500 ton 크기의 대형 강괴까지 생산하는 것이 쉽게 이루어지고 있다. 그리고 로의정련 기술은 대형강괴를 생산할 수 있을 뿐 아니라 강한 탈황 및 탈가스, 우수한 온도 조절능력 및 성분 조절 등도 가능한 금속학적인 장점을 지니고 있다.

청정강을 생산하는데 있어 빼 놓을 수 없는 최근의 ladle 기술은 아르곤을 이용한 교반기술이다. 이는 ladle 측면 또는 바닥에 Porous plug를 설치하고 이 plug를 통해 아르곤을 주입시킴으로써 용강을 교반시키고 용강과 슬래그의 접촉을 원활하게 하며 불순물 가스를 뽑아내는 것이다. 전기로에서 이루어지는 산화기 제강은 CO 가스 발생과 함께 자연교반이 이루어지므로 큰 문제가 되지 않으나 반응이 매우 조용한 환원기 작업에서는 가스 생성이 작고 Metal-slag 접촉 면적이 적어 탈산과 탈황이 비교적 천천히 진행된다. 용강교반의 가장 큰 목적은 슬래그와의 화학 반응을

가속시키고 용강내의 온도분포를 균일하게 하는 것이다.

위에서 언급된 일반 전기로 제강 외에도 60년대와 70년대를 통해 Electroslag Remelting(ESR) 기술이 큰 주목을 끌게 되었다. 그리고 용해 및 정련기술의 진보와 함께 Ingot casting 및 응고기술도 많이 발전되었는데 이들을 결정하는 요소들은 대개 진공처리, 용강온도, 주입속도, Ingot-mold와 Hot-top 설계 그리고 Hot-topping 방법으로 열거된다. 최근들어 이룩된 제강기술 발달사에서 빼 놓을 수 없는 큰 사건은 Superclean Rotor Steel의 개발이다. 1980년대 초 미국전력연구협회(EPRI) 주도하에 이루어진 Superclean Rotor Steel의 개발은 일본과 독일을 비롯한 여러회사에서 성공적으로 수행되어 지금은 대부분의 Rotor

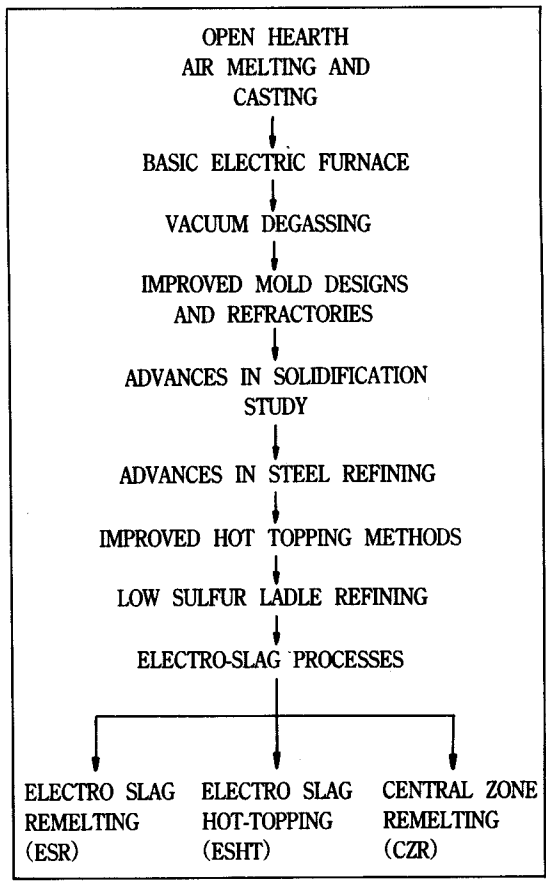


그림 1) Developments in steel and ingot making technology.

제작사들이 Superclean Rotor Steel을 제작하고 있다. 그림 1은 지금까지 소개한 제강기술의 진보역사를 도식적으로 나타낸 것이며 그림 2는 합탕법을 이용하여 대형강괴를 제조하는 과정을 개략적으로 보여주는 것이다.

## 2.2. 대형강괴의 품질결정요소

연속주조에 의해 생산되는 대부분의 고품위 강과 마찬가지로 대형강괴의 품질은 화학조성 (Chemical Composition), 청정도(Cleanliness), 건전성(Soundness) 그리고 균질성(Homogeneity)에 의해 좌우되며, 결국 이들을 조절하는 것이 대형강괴 제조의 핵심기술이다.

이 장에서는 대형강괴의 품질을 결정하는 위의 요소들에 영향을 미치는 수소, 산소, 유황, 인 그리고 망간 등과 같은 불순물 조절에 대한 금속학적 기본 개념과 V편석 및 A편석과 같은 응고결함, 그리고 기계적 성질의 균질성 등을 고찰해 보았다.

### 2.2.1. 불순물 원소

불순물 원소들이 Rotor재의 품질중 가장 크게 영향을 미치는 인자는 취성파괴, 충격특성 그리고 파괴인성이다. 이들 원소중 H, Mn, Si, Sn, P 등이 결정적인 영향을 미치며 산소와 황은 비금속 개재물의 생성에 커다란 영향을 미친다.

수소는 Rotor재의 열균열과 flaking을 유발하여 치명적인 해를 끼치는 원소로 잘 알려져 있는데 주로 원자재, 첨가제 및 내화물 내의 수분들과 전기로 분위기 내의 증기 등에 의해 유입된다. 그러나 지난 30여년간에 걸친 진공탈가스법의 발달로 대부분의 수소는 ladle 내에서 제거되며 특히 진공조괴(VSD)가 도입된 이후로는 수소로 인한 큰 문제는 거의 발견되지 않고 있다. 인은 주로 전기로에 장입된 재료에 함유되는 경우가 대부분인데 0.002% 정도의 매우 낮은 P 함량이 요구되는 경우에는 장입재료의 일부로 이미 탈인이 된 용융금속을 사용한다. 인을 제거하기 위해서는 매우 높은 염기도를 지닌 슬래그가 필요하며 특히 장입재료의 실리콘 함량을 가능한한

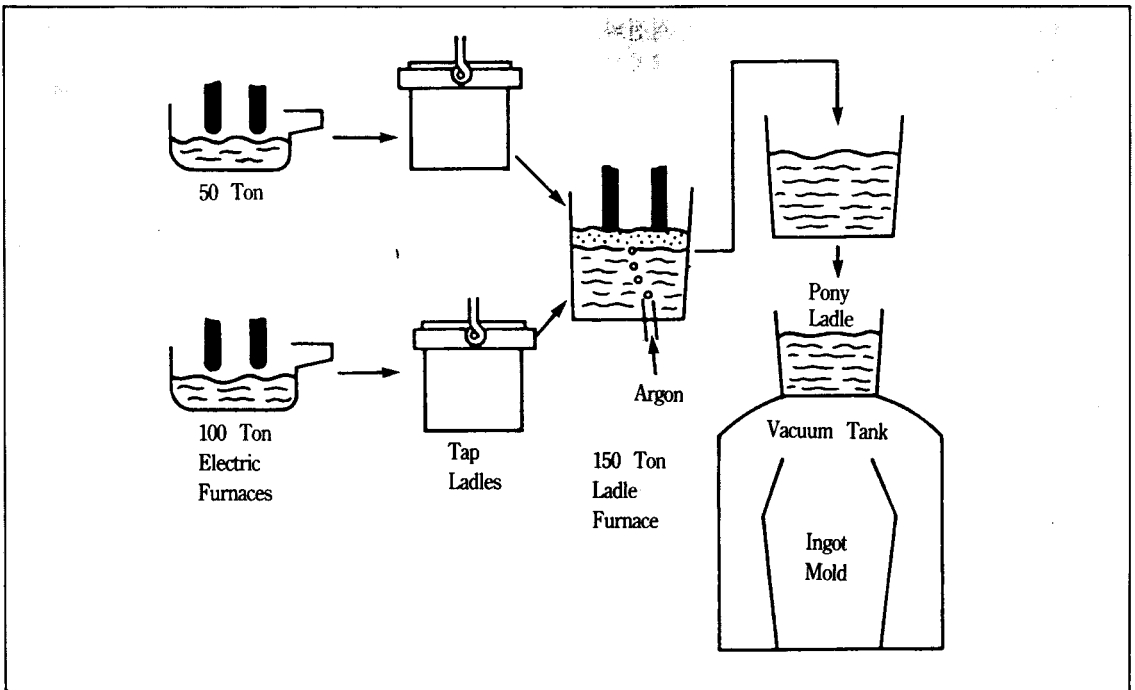


그림 2) Schematic diagram of melting, refining and casting of the low sulfur ingot.

낮게 유지하는 것이 중요하다. 1960년대 초 VCD가 소개되기 이전에는 대부분의 단조용 Rotor 강은 실리콘을 이용하여 탈산되었으므로 0.15-0.30% 실리콘을 함유하는 것이 규격이었다. 그러나 실리콘량이 낮을 경우 NiCrMoV 강의 고온취성이 없어지고 또 부수적으로 응고시 dendrite 크기 및 mushy zone의 크기가 작아지는 이점도 있어 최근에는 VCD를 이용한 실리콘의 제거가 한층 강조되고 있다. 아울러 실리콘 함량을 낮출 경우 편석이 최소화 하며 균질성이 향상되고 장시간 크립 성질도 좋다는 것이 확인되었다.

산소는 장입 철광석, 대기중 산소 그리고 취입되는 산소 가스 등이 주공급원이다. 산소는 불순물을 산화시키는데 필수적인 원소이지만 강괴 내 blow hole이나 비금속 개재물의 주원인이기도 하므로 불순물의 산화 이후에는 반드시 제거시켜야 하는 원소이다. 그러므로 제강작업이 끝난 후의 목표는 tapping시 용존 산소를 낮추거나 강괴 내 잔류산소를 무해한 형태로 만드는 것이다. 산소는 탄소와의 반응에 의한 CO 가스 발생과 첨가된 탈산제로 부터 만들어진 안정한 산화물에 의해 ladle 내의 용강으로부터 또는 주입하기 직전의 용강으로부터 제거된다. 그러나 근래에는 제강설비가 진보함에 따라 용강내에 잔류할 가능성이 있는 탈산제의 첨가는 가능한한 지양하고 탄소와의 반응에 의해 대부분의 산소를 제거하고 있다.

2.2.2. 응고결합

대형강괴를 제작할 때 응고과정에서 일어나는 여러가지 현상중 강의 성질에 악영향을 미치는 응고수축공, 기공, 거시 및 미시편석(Macro- & microsegregation), 산화물의 석출 등은 어떠한 형태로이던지 존재하게 되며 이들을 줄이고자 하는 노력이 금속학자들의 가장 큰 관심사 중의 하나이다. 이들 응고결합은 합금의 조성, 용해 및 조괴방법 그리고 주조시 열전달 방향과 속도 등에 의해 좌우되며 기계적 성질의 균질에 가장 직접적인 영향을 미친다.

대형 강괴 내에서 발생하는 거시편석(Long-range segregation)은 단조 후의 기계적 성질과 고온취성에 악영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다. 대형 주괴에서 일반적으로 관찰되는 전형적인

거시편석의 모양을 그림 3에 나타내었다. 그림에 제시된 모양 이외에도 합금성분과 불순물의 농도가 강괴의 바닥에서부터 위쪽으로 증가하는 경향이 있고 표면에서 내부로 접근할 수록 증가하는 경향도 관찰되고 있다.

강괴의 크기가 증가할 수록 응고결합은 심해지며 이를 줄이고자 주형의 높이/직경비를 줄이고, Hot-top의 모양을 변경시키며 강괴 상부 용강의 특수한 처리법이 개발되는 등 여러가지 노력이 시행되고 있다. 근래의 노력중 가장 특기할 만한 사항은 강괴의 거시편석에 가장 큰 영향을 미치는 원소 중 하나인 실리콘의 함량을 낮추고 아울러 H, C, O 등의 가스 함량도 낮추어 주는 VCD 공정의 개발이다. VCD를 이용하여 강괴의 V 및 A 편석을 상당히 줄일 수 있는 것이 확인되었으며 이후 망간과 황을 줄이는 2차 정련법의 발달로 거시편석 문제는 해결되어 가고 있다.

합금의 응고는 응고전면(solidification front)의 과냉된 액상으로 dendrite가 성장함에 따라 이루어진다. 이들 dendrite가 성장함에 따라 합금성분과 불순물들은 액상과 과상속으로 재분배 되는데 이 과정에서 대부분의 경우 dendrite들 사이의 액상

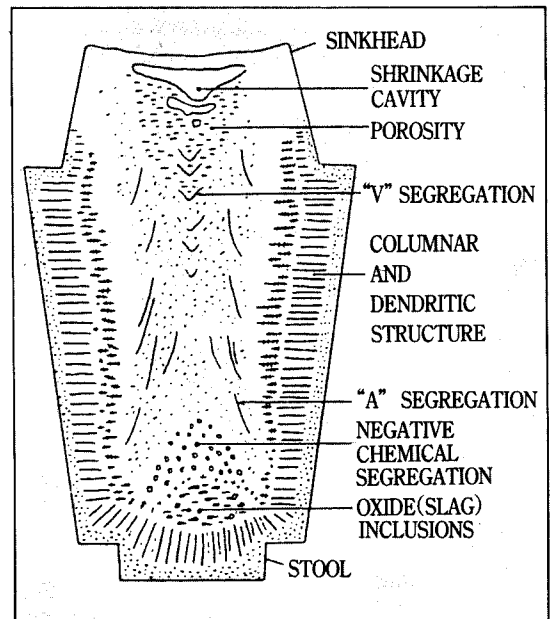


그림 3) Schematic diagram of typical quality conditions in a large ingot.

농도가 높아진다. 따라서 응고가 늦어지는 부분의 농도가 더 높아지는 미시편석(micro-segregation)이 발생하게 되며 농도차 뿐 아니라 입자크기도 불균일해져 최종제품의 고온취성에 대한 저항성을 떨어뜨리고 인성에 악영향을 미친다. 미시편석 역시 거시편석과 마찬가지로 강괴의 크기가 증가함에 따라 미시적 불균일 경향이 증가된다.

여러 제강회사에서 연구한 결과에 따르면 미시편석도 VCD공정을 이용하여 상당히 줄일 수 있으며 VCD 처리한 강괴의 dendrite 조직이 Si 또는 Al을 이용하여 탈산한 강괴 보다 훨씬 미세한 것도 확인되었다.

### 2.3. 대형강괴 제강기술

Rotor 재의 품질을 결정하는 조성, 균질성, 건전성, 청정성 및 기계적 성질 등이 제강설비, 기술 및 관련 공정에 의해 거의 좌우된다는 것은 잘 알려진 바이다. 특히 관련 공정중 용해방법, 정련방법, 용강의 취급 및 조괴방법 등의 선택이 매우 중요하므로 본장에서는 대형단강품의 제강 방법 및 새로운 공정 등을 소개한다.

#### 2.3.1. 용해

대형 Rotor 생산을 위해서 용해기에 고려해야 할 가장 중요한 요소들은 탈황, 탈인 그리고 잔류원소들의 조절이다. 이와 함께 경제적 인자 등이 고려되어 용해 방법이 결정되는데 거의 모든 회사들이 전기로 제강법을 택하고 있다.

As, Sb, Sn 등의 불순물 잔류원소들은 전기로 용해과정에서 제거가 거의 불가능하므로 장입원

료를 엄격히 선택하는 것이 가장 중요하고 탈인, 탈탄도 용이하므로 전기로 제강의 선택이 보편화 되어 있다.

#### 2.3.2. 정련(Refining)

용해에서와 마찬가지로 정련과정에서도 금속학적, 경제적, 논리적 인자들을 고려해야 하지만 정련된 용강이 갖추어야 할 가장 필수적인 두 요소는 정확한 조성과 적합한 온도이다. 이 두 요소를 조절하는데 영향을 미치는 여러가지 인자들을 요약하면 아래 표 1과 같다.

위의 여러가지 원소들 중 주요 불순물 잔류원소의 하나인 P는 용해과정에서만 대부분 제거되므로 정련과정에서는 복원(reversion)을 유의하여야 하고 정련시 제거된 수소 역시 복원을 피하기가 힘들기 때문에 주입시 탈가스에 의해 복원을 피하는 것이 유일한 방법이다. 그리고 제강공정 중 합금 원소들과 관련하여 정련과정에서 가장 중요한 분야는 산소의 제거이다.

한편 대형주강품의 제작시 용강의 온도는 청정도, 건전성 및 균질성에 상당한 영향을 주므로 조괴 직전 용강의 온도를 어느 정도로 유지하는가가 매우 중요하다.

본 장에서는 현재 청정 강괴 제조에 채택되고 있는 정련방법들과 앞으로 이들 청정강 제조에 응용 가능한 새로운 정련공정들을 간단히 소개한다.

##### (1) 전기로 정련

전기로 정련은 현재 고품위 철강 제조에 가장 많이 사용되고 있는 조업 방법이며 심지어 로의 정련 설비를 갖추고 있는 많은 제조 공장에서도

표 1) Factors Critical to Large Ingot Quality that are influenced by Refining Processing

◆ Composition
- Specified alloying element control—C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, V and other possible base alloying elements.
- Specified residual element control—P, S, and H.
- Process-related element control—O and N.
◆ Temperature

상당량의 생산품은 Ladle 정련을 거치지 않고 전기로에서 정련되고 있다. 가장 큰 이유는 대부분의 대형제품 제조회사들이 70년대 이전의 재래식 전기로를 사용하여 정련한 경우 경제적인 손실이 없기 때문이다. 둘째로 전기로 정련으로 0.004-0.009% 범위 내에서의 탈황이 무리없이 가능하기 때문이며 마지막으로 합금성분 조절, 유해원소 제거 및 산소농도 조절이 쉽게 이루어지기 때문이다.

전기로에서의 정련작업은 우선 용해기 후의 슬래그를 완전히 제거하고 Carbodic limesilica 슬래그를 만들며 목적하는 바의 탈유작업을 끝낸 뒤 tapping을 위한 화학성분 조절과 최종온도 조절로 이루어진다. 환원기 슬래그의 가장 큰 역할은 탈황이며 탈황 작업은 가열시의 생석회와 CaF<sub>2</sub> 첨가, bath의 교반 등에 의해 향상된다.

## (2) Ladle 정련

Ladle-refining 또는 Ladle-holding furnace는 여러가지 Ladle 정련 공정중 현재 가장 많이 채택되고 있으며 가장 다양하고 발달된 공정이다. 따라서 전기로에서 넘어온 용강의 온도에 엄격한 제한없이도 매우 엄격한 범위의 성분조절과 주입온도 등을 만족시킬 수 있다. 그리고 전기로 작업에서의 정련정도나 합금성분 조절 정도도 크게 중요하지 않다.

Ladle-refining은 아르곤 교반과 자기유도 교반을 각각 또는 함께 사용할 수 있으며 슬래그를 제거하기 위해 ladle-tilting 장치도 설치할 수 있다. 또 ladle 내에서 용강을 재가열 할 수 있기 때문에 새로운 슬래그를 조제하여 탈황의 정도를 극대화할 수 있는 장점이 있다. 진공설비를 이용하는 경우에는 Al과 같은 강력한 탈산제를 쓰지 않고도 탄소와의 반응을 이용하여 상당한 탈산을 이룰 수 있는 장점도 있다. 정련의 가장 큰 목적이 조성과 온도의 조절이라는 관점에서 보면 진공설비를 갖춘 ladle-refining이 여러가지 공정중 가장 효율적이며 경제적인 측면에서도 진공설비를 갖춘 회사에서는 전기로 정련비용의 반 만으로 Ladle-refining furnace를 운용할 수 있는 장점이 있다. 진공하에서 아르곤 교반을 해주면서 정련할 경우 정련반응 속도는 전기로에서의 환원속도보다 훨씬

가속되므로 생산성도 증가된다.

대형강괴의 생산을 위한 Ladle-refining의 중요한 잇점은 holding 능력으로서 몇 차례의 연속전기로 조업을 조합하여 매우 큰 강괴를 생산할 수 있다는 것이다. 대형 ladle내의 용강은 대개 분당 0.5°C보다 낮은 속도로 천천히 냉각하기 때문에 연속적으로 여러 charge를 녹여 한 강괴를 만들 경우 later heat이 용해되는 동안 Ladle-furnace 내에서 정련이 되는 잇점이 있다.

## (3) Vacuum Degassing

수소가 철강의 성질에 영향을 미치는 문제는 약 100년전부터 알려져 왔다. 이후 Thermal flaking, 여러가지 형태의 취성, 담금질 균열에 대한 높은 민감도 등이 수소에 상당히 많은 영향을 받는 것으로 밝혀졌으며, 2차 대전 이후 해결책들이 제시되고 특히 대형강괴에 있어서의 수소 문제가 본격적으로 거론되었다. 실제로 1950년대 미국 Ridgeland와 Arizona에서 발생한 Rotor의 파손은 Thermal flaking에 기인한 것으로 밝혀졌다.

다행히 진공탈가스법이 1950년대 초 독일의 Bochumer-Verein사에 의해 소개되자 이를 응용한 많은 공정이 출현되었으며 1956년에는 Bethlehem steel에서 진공조괴법(Vacuum Stream Degassing)을 도입했고 이후 몇 년 이내에 전세계의 주단강 회사들이 진공처리 장치를 채택하게 되었다. 한편 진공처리하는 현대의 ladle 정련 공정에도 자주 응용되고 있는데 이미 앞서서도 여러번 거론된 바와 같이 진공을 이용하여 VCD, VOD, 교반의 가속화, 수소와 질소의 제거 등을 얻을 수 있다. 일반적으로 제강 과정에서 진공의 도입이 빠를수록 최종 제품의 수소 함량 조절은 어려워진다. 다시 말하면 제강 과정의 후반부에 진공을 채택함으로써 정련에서의 진공의 역할은 감소하고 최종 수소 함량을 조절하기는 쉽다. 진공처리 역시 Tap degassing, Ladle degassing 및 진공조괴법 등의 여러가지 방법이 있다.

## (4) Vacuum Carbon Deoxidation(VCD)

VCD는 저기압하의 용강내에 있는 탄소가 Si보다 강력한 탈산제로 작용하는 원리를 이용한 공정으로서 1960년 Danner와 Tylen에 의해 개발되었다. VCD가 개발되기 전까지 모든 대형강괴의

탈산은 Si-killed법을 이용하여 제조되었으며 0.25% 정도의 Si를 함유하고 있었다. VCD 조업 개발의 목적은 Si-killing process를 거치지 않음으로써 탈산과정의 부산물로 개재물이 생길 수 있는 가능성을 없애고, 거시편석의 주요원인인 Si 함량을 줄이며 진공 tank 내에서 저기압을 유지하며 적은 양의 탄소를 이용하여 탈산시키는 것이다. 탈산의 부산물인 CO 가스는 진공내에서 용강을 통과하여 부상하고 수소의 제거를 가속시킨다.

초창기의 VCD 공정에서는 Si 함량이 0.01-0.03%일 경우 주입되는 용강의 비산(飛散)이 너무 심하고 주형 내에서 용강이 끓는 정도가 매우 격렬한 것이 발견되었다. 이 문제를 해결하기 위해 tapping 하기 전에 전기로에서 Si으로 강을 일부 탈산시키는 방법이 이용되고 있다.

잔류 Si 양이 0.05-0.07% 정도이면 진공 chamber 내에서 알맞은 조괴조건을 유지할 수 있게 하는 탈산의 정도가 된다. 산소의 양이 100-130 ppm 정도 되도록 Si으로 탈산된 강은 이어지는 VCD 조업에 의해 산소의 양을 50 ppm까지 줄일 수 있으며 stream의 퍼짐정도도 알맞은 작업조건 내에서 해결이 가능하다.

VCD 조업으로 저유황을 얻게 되면 강의 인성을 증가시키고 편석을 줄이게 된다. 따라서 VCD는 인성이 특히 중시되는 강종에 즉시 적용되었으며 VCD에 의해 황이 적고 산소 함량이 낮아짐에 따라 강괴의 응고 중에 mushy zone의 두께가 작아져 A 편석과 편린현상이 급격히 줄어들게 되었다. VCD를 거치는 대개의 강은 0.05%의 Si를 함유한다.

### 2.3.3. 조괴(Casting)

용해와 정련과정의 진보를 동반한 제강과정이 대형 Rotor 강괴의 생산에 지대한 영향을 미치는 것은 사실이지만 강괴의 품질에 결정적인 영향을 미치는지는 않는다. 즉, 성분조절을 제외한 대형강괴의 Acceptability는 거의 대부분 조괴과정(Casting Practice)에 의해 결정되며 제강작업과는 거의 무관한 관계를 가진다. 강괴의 균질성, 건전성, 청정도 및 Thermal flaking의 제거 등이 조괴작업에 의해 결정되며 품질에 영향을 미치는 여러가지 조괴 변수 중 오직 온도와 탈산정도 만이 제강과 약간 관계가 있다.

대형강괴의 조괴작업에 큰 영향을 미치는 세 가지 과정은 주입(Teeming 또는 Pouring), Hot-topping, Ingot-mold design으로 나눌 수 있으며 이들을 아래에 서술하였다.

#### (1) 주입

대형강괴의 조괴작업은 상주(Top-pouring)와 하주(Bottom-pouring)로 나뉘는데 하주법의 경우는 강괴표면이 깨끗한 장점이 있어 몇몇 회사가 사용하고 있기는 하나 크기에 제한이 많아 150 ton 이하의 강괴 제조에만 사용되고 있다. 상주법이 VSD를 겸하기에는 더욱 이상적이므로 수소의 조절이나 재산화의 방지에 훨씬 용이한 잇점이 있다. 그림 4는 상주법을 채택하고 VSD를 적용한 경우의 주형과 Ladle 설치에 대한 개략도를 나타낸 것인데 현재 대부분의 대형 주단강 제조회사들이 이와 비슷한 방법을 채택하고 있다.

대형 강괴의 조괴에 있어서는 주입온도가 대단히 중요한 요소로 작용한다. 일반적으로 주입 온도가 높고 주입속도가 빠를 수록 응고시 편석은 심해지지만 응고수축공이 작아지고 비금속개재물

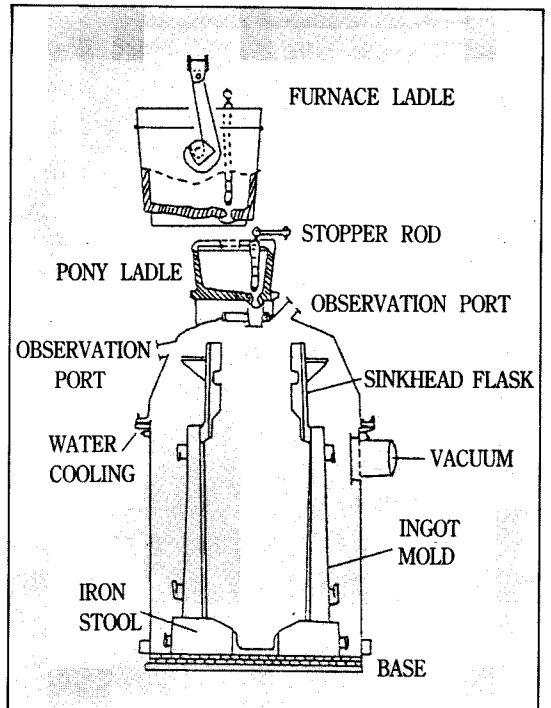


그림 4) Cross-section of vacuum tank and ingot mold.

의 entrap이 적어지는 장점이 있으며, 주입속도가 낮으면 진공조괴시 진공탈가스의 효과는 증대된다.

(2) Hot-topping(conventional)

대형강괴 제조를 위한 Hot-top 방법은 제강회사마다 매우 다양한 공정을 채택하고 있으나 발열제 및 보온제를 사용하는 점은 대동소이하다. 그러나 Hot-top의 H/D비(height-to-diameter ratio)는 0.3 정도로 낮을수록 효과적인 것으로 알려져 있다.

Basevi 등이 Computer simulation 방법을 이용하여 얻은 결론에 의하면 Hot-top의 모양은 병목(bottle neck) 형상보다는 원통형이 효과적이며 Hot-top 부분에 단열벽을 설치하면 수축공의 위치가 강괴 상부로 이동된다. 그리고 Hot-top의 양이 전체 강괴의 23% 이하가 되면 강괴 내부결함이 급격히 증가되므로 Hot-top 부피를 최소한 23% 이상으로 유지하도록 하고 있다. 그러나 응고과정에서 가장 큰 영향을 미치는 인자는 오히려 주입직후 부터 Hot-top에 보온제, 발열제 등을 투입하여 Hot-top을 완전히 공기로 부터 차단하는데 걸리는 시간이 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

(3) ESHT

ESHT(Electroslag Hot Top)는 주입이 끝난 강괴의 상부에 발열제나 보온제를 투입하는 대신 전극을 사용하여 액체 슬래그의 저항열을 통해 보온 내지는 재가열 시켜주는 방법으로 그림 5에 개략적인 모습을 나타내었다.

이 방법의 주 목적은 주입후 응고가 끝날 때까지 강괴의 상부 표면을 액체로 유지시켜 주는 것이다. 전극은 소모성 또는 비소모성 전극중 어느 것도 사용 가능하나 소모성 전극을 사용하는 경우 전체 강괴 무게의 약 3% 정도가 응고되는 강괴를 위해 채용해 된다.

ESHT는 금속학적인 관점에서 보면 대단히 효과적인 공정이며 경제적인 측면에서도 상당한 잇점이 있어 독일에서는 이미 20년 전부터 ESHT를 채택하고 있고 이태리, 일본 등에서도 실험적인 생산을 끝내고 본격적인 채택을 준비하고 있다.

ESHT의 가장 큰 장점은 강괴 내에서 응고가 진행되고 있는 동안 Hot-top에 열을 가해줄 수 있는 것이며 이와 함께 강괴 상부의 황의 함량을

대단히 낮게 조절할 수 있고, 강괴 표면에서 생성된 등축정(equiaxed crystallite)의 자유낙하를 방지함으로써 강괴하부의 역편석(negative segregation)을 줄일 수 있으며, 비금속 개재물의 부상을 현저히 증가시키고, 마지막으로 supplemental heat으로 강괴 상부의 crust 생성을 방지함으로써 이들이 깨어져 강괴내부로 가라앉아 제품이 폐기되는 사례를 방지할 수 있는 여러가지 장점이 있다.

(4) Ingot-Mold 설계

Ingot-mold 설계에는 여러가지 변수가 있으며 H/D ratio, 내부 표면모양(직선형, corrugate, fluted), taper의 정도, mold-wall 두께 그리고 mold casting 및 conditioning정도 등에 연구가 많이 진행되어 왔다. Ingot-mold 설계는 각 제작사가 연구와 경험을 기초로 한 고유한 방법을 택하고 있다. 강괴 무게는 급격히 증가하는 추세이나 강괴 높이의 증가는 현격하지 않았기 때문에 H/D비는 크게 감소하여 대부분의 공장에서 사용하고 있는 H/D비의 범위는 0.9-1.4 정도이다. 크기가 작은 강괴의 경우 H/D=2.0 또는 더 큰 H/D 비를 채택하는

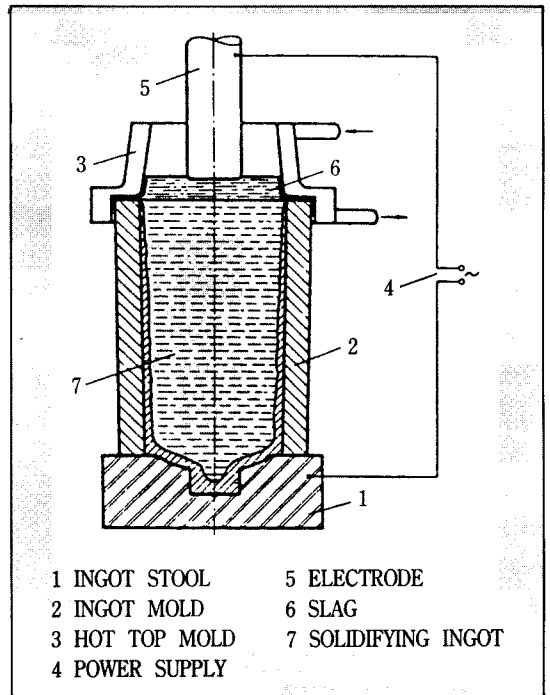


그림 5) Schematic drawing of electroslag hot-topping (ESHT) process.



경우도 있다. 지난 30여년간 대형 강괴의 건전성과 균질성 연구, 강괴 응고에 관한 이론적인 계산 등으로부터 H/D가 0.9-1.4인 경우가 가장 적당한 것으로 인정되고 있으며 소형 강괴의 경우 약간 높은 H/D 비가 적용가능한 것으로 보고되고 있다. 그러나 일본에서는 단조 press의 용량이 충분할 경우 약 250 ton까지의 대형 강괴 일지라도 H/D가 1.5 이상인 주형을 사용하고 있다.

### 3. 결 론

지금까지 살펴본 바와 같이 초청정 대형 강주물의 제조에는 전기로에서의 탈인과 신속조업, 정련과정에서의 효과적인 탈황 및 탈산을 위한 설비와 기술, 그리고 조괴과정 등 매우 복잡하고 다양한 기술이 필요하며 이중 어느 한 공정이라도 소홀히 하면 목적하는 청정강을 얻을 수 없다. 한편 제강, 조괴기술과 응고이론의 발달에 의해 500 ton에 이르는 초대형강괴의 제조가 가능해졌으나 성분분석과 역편석의 문제는 아직 완전히 해결되지 않고 있기 때문에 응고현상에 대한 보다 깊은 연구가 필요한 실정이다. 재료의 고급화와 고품질화에 완벽하게 대응하기 위해서는 아직도 많은 문제가 남아 있기는 하나 끊임없는 연구개발에 의해 좋은 결과가 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] V.P. Swaminathan, et al., "Advanced Rotor Forgings for High-Temperature Steam Turbines, Vol. I: Ingot and Forging Production and Vol. II: Mechanical Property Evaluation", Final Report, EPRI CS-4516, May 1986.
- [2] J.E. Steiner et al., "Advanced Steelmaking Processes for Rotor Forgings", Final Report, EPRI RD-3336, December 1983.
- [3] R.H. Richman and W.P. McNaughton, "Super-clean Steel Development: Status Report", Interim Report, EPRI GS-6610, RP 1403-32, December 1989.
- [4] Proceedings of an International Conference: "Advances in Material Technology for Fossil Power Plants", Eds., R. Viswanathan and R.I. Jaffee, EPRI and ASM, Chicago, September 1987.
- [5] Proceedings of the Third International Conference on Improved Coal-Fired Power Plants, San Francisco, April 1991.
- [6] Workshop Proceedings: "Superclean Rotor Steels", R.I. Jaffee, Ed., EPRI GS-6921, Pergamon Press, Sapporo, Japan, August 1989.
- [7] K. Ruttinger, H.D. Seghezzi and K. Koslin, "Vacuum Metallurgy", O. Winkler and R. Bakish, Eds., Elsevier Publishing Company., New York, 1971, Pages, 337-516.
- [8] R.B. Snow, "Source of Inclusions in Forging Ingots", Iron and Steel Engineer, 1973, No. 9, Pages 98-105.
- [9] M.C. Flemings, "Principles of Control of Soundness and Homogeneity of Large Ingots", Scand. J. Metallurgy, Vol. 5, 1976, Pages 1-15.
- [10] K. Suzuki, K. Taniguchi and T. Takenouchi, "Behavior of Slag Inclusions during Solidification of a Large Forging Ingot", Tetsu-to-Hagane, Vol. 62, 1976, Pages 817-826.
- [11] K. Tashiro, S. Watanabe, I. Kitagawa and I. Tamura, "Influence of Mould Design on the Solidification and Soundness of Heavy Forging Ingots", Tetsu-to-Hagane, Vol. 67, 1981, Pages 103-112.
- [12] H. Yamada, T. Sakurai, T. Takenouchi and Y. Iwanami, "Estimation of Forming Condition of Center Porosity in Forging Ingot", Tetsu-to-Hagane, Vol. 73, 1987, Pages 1706-1713.
- [13] Y. Suzuki and T. Kuwabara, "Secondary Steelmaking: Review of the Present Situation in Japan".