

## 탄소강, 합금강 및 Ni 합금의 유도로 용해법(I)

김 봉 완\*

Induction Melting of Carbon Steel, Alloy Steel and Ni-base Alloys.

B. W. Kim \*

많은 주물공장에서 각종의 강주물은 물론 Ni 합금도 유도로에서 흔히 생산하고 있으나, 유도로 용해기술이 확실하게 확립되어 있지 못하여 여러 가지 문제점을 경험할 뿐 아니라, 이에 기인하는 불량을 계속 반복하는 상태이다.

따라서, 양질의 제품을 만족하게 생산할 수 있도록 하기 위하여 이들 합금의 유도로 용해기술을 상세히 기술하는 것이 필요하게 되었다. 특히, 저합금강은 물론 Ni 합금을 포함한 고합금강의 용해에는 일반적으로 생각하지 못하고 간과하는 여러 가지 요인들이 재질의 양부에 지대한 영향을 미치므로, 유도로 용해에 있어 실무조업요령을 세워 놓는 것은 무엇보다 중요한 것이라 할 수 있다. 올바른 용해기술은 바로 좋은 제품을 의미하기 때문이다.

근래에 우리 주물업체에서도 유도로의 사용이 거의 일반화 되었을 뿐 아니라 용해강종도 점차 많아지고 있으나, 이들 재료가 요구하는 용해조건 또는 조업조건을 만족시키지 못하고 있어 애로를 겪고 있는 것이다.

이러한 문제를 하루 빨리 해결할 수 있는 방법의 하나로써 각종 재질의 용해에 대한 표준용해법을 제시하여 주물공장에서 자기조건을 맞추어 쉽게 응용할 수 있게 하는 것이다.

이를 위하여 기술문헌자료를 검토하고 실험공장에서의 실제조업 결과를 중심으로 실제조업 조건을 제시하고자 하였다.

### 설 비

유도로는 한때 주강용해에 있어서 중요한 역할

을 하였는데, 바로 주파수를 변환할 필요가 없어졌고 효율과 조업상의 신뢰성을 높일 수 있었기 때문이다.

저주파로에서는 효과적인 가열용해작업을 위하여는 큰 용량의 노체가 필요하다. 유도자장에 의한 용탕의 교반작용이 특히 현저하다. 중주파와 고주파로(500-100Hz)에서는 고철의 크기와 밀도는 용탕까지 그다지 심각하지 않다. 그러나, 대용량의 용해로에서는 고주파는 적절한 교반, 혼합작용을 얻지 못하므로 이러한 조건하에서는 합금의 편석과 불균일한 용탕 온도가 초래된다.

반도체소자 제어식으로 개발된 유도용해로는 광범위한 주파수변환이 가능하고, 어느 범위의 로내장입조건에 걸쳐서는 고도의 용해율을 얻기 위한 전전력의 적용도 가능하다.<sup>1,2)</sup> 100내지 1000Hz의 범위에서는 많은 종류의 유도로방식이 4.2 lbs/hr/kw의 주강용해율을 보증하고 제작되고 있다. 그림 1은 특수한 라이닝의 무철심 유도로에 대한 용해율을 보여주는 것이다.<sup>3)</sup> 예로서, 1500KW 전력공급능력의 2Ton 용량의 유도로에서 장입물의 용해와 1650℃의 용탕승온에 걸리는 시간은 38분으로서 3Ton/hr의 용해율을 공급자는 보증하고 있다.

### 내 화 물

무철심 유도로에는 벽돌, 다짐, 소결형 라이닝 또는 성형 도가니가 쓰일 수 있다.

기타의 용해와 정련로에서 처럼, 내화물의 형태(산성, 염기성 또는 중성)에 따라 형성될 수 있는 야금학적 반응과 스라그-금속 반응에 영향을 미친다. 유도로에서 내화물선택의 유일한 방향은 수

\*중소기업진흥공단

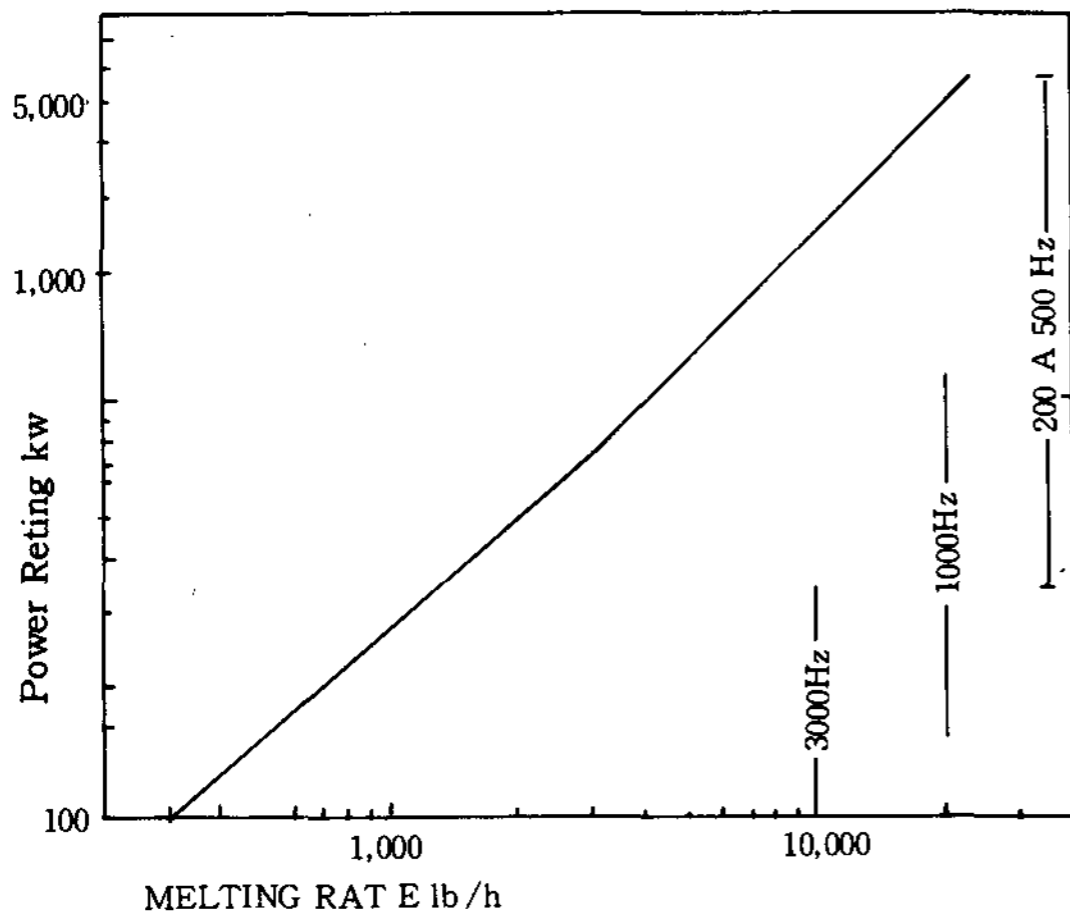


그림 1. Dependence of steel melting rate on power supply rating in the range of 200 to 300 Hz. Graph developed from supplier brochure.<sup>3</sup>

냉유동코일을 용융금속과의 접촉과 코일사이의 아아크발생으로부터 보호하는 중요성에 있다. 이와 같은 아아크(Arc) 발생은 코일누수를 초래하고 폭발의 가능성도 있다.

코일을 보호하는 임무는 많은 다른 용해로나 반응로등에서처럼, 용해효율의 손실을 초래하지 않고는 내화물 두께를 증가시킬 수는 없다는 사실로 인하여 더욱 복잡하여 진다.

코일의 보호는 Coil Grout의 선택과 적용으로 시작된다. Grout는 Coil을 지지하고 절연시켜 준다. 이는 역시 주내화물 Lining의 최종 뒷받침벽으로서 작용한다. 코일을 절연하려면, 코일사이의 아아크발생을 방지하고 Grout의 전기저항을 높히 유지하기 위하여 Grout 재료는 물과 증기에 대한 저항성이 있어야 한다. 아루민산 칼시움(Calcium Aluminate)를 점결제로한 Alumina가 이런 요구조건을 만족시킨다. 수분과 증기에 저항능력은 새로운 Lining, 특히 습식 중진형을 건조하는 공정을 복잡하게 한다.

만일 Grout가 주내화물 Lining에 직접적으로 점결되게 하면, 용탕-Lining간의 계면으로부터 발달하는 균열은 용융금속이 코일까지 이르게 하는 원인이 된다. 왜냐하면 균열은 단단하게 결합된 내화물계면을 통하여 쉽게 발달하기 때문이다. 균열의 발달을 막기 위한 계면으로서 Fiberglass섬유포가 흔히 사용된다. 건식의 진동중진형 내화물의 비소결부분은 균열의 발달을 막기 위하여 계면

으로서 Lining을 침투하는 액체금속의 전진을 차단하고 구속한다.

이외에도 비소결층은 코일은 물론 소결층을 보호하는 쿠션(Cushion) 재로서 작용한다. 가열중에는 내화물의 Lining은 팽창한다. 만일 Lining의 뒷받침지지부가 튼튼하다면 코일에 대한 잔류응력과 Lining의 소결층 내부의 내부의 압축응력이 발생된다.

코일과 Lining 내화물의 비틀림과 Lining의 소결작업층의 균열 및 쪽떨어짐이 일찍부터 시작된다.

미국에서는 70 내지 95%의 Alumina를 배합한 건식 충전배합제가 가장 일반적으로 쓰이는 것이다.<sup>4,5)</sup> 이를 재료는 낮은 열팽창율, 내균열성 및 Slag에 대한 내침식성을 훌륭하게 갖추고 있다.<sup>6,7)</sup> Magnesia는 가열중에 수축한다. 그래서 Magnesia는 70% Magnesia와 30% Alumina에서 가열중 팽창하는 Spinel 광물을 형성하므로 Alumina와 흔히 배합하여 사용한다.

약간의 팽창은 균열을 밀착시키고 금속이 침투할 수 있는 기회를 감소시키기 때문에 바람직한 것이다. Magnesia Lining은 염기성 Slag에 대하여 Alumina보다 우수한 내침식성을 갖는다.

그러나, Magnesia Lining은 단속적인 용해로 조업에서는 더욱 용이하게 균열을 형성한다. 주물공장에서 대표적으로 이루어지는 단속조업에서는 균열은 상당량의 잔류금속을 보유하므로 이어지는 다음 용해조업으로 합금원소를 넘겨주게 된다. 이러한 특성은 다른 조성의 용해를 계획할 때에는 바람직하지 못하다. 이러한 조건에서는 세척목적의 중간용해가 필요하게 된다.

그러므로, Magnesia는 그의 높은 연화온도로 인하여 연속조업에 대하여 우선적으로 적합한 내화물이다.

표1은 내화물의 특성 및 일반주강, 합금과 이들의 용해조건에 대한 적합성을 간단하게 설명하는 도표이다.<sup>4)</sup> 기타의 내화물은 극소량 사용된다. 이들은 값싼 Silica, Zircon(특히 Stainless steel 용) 및 Chromite의 사용에 대하여는 다른 문헌에 더욱 자세히 언급되었다.

무철심 유도로의 작업내면 Lining은 시간-온도곡선에 규정된 시간동안 장입물을 가열, 보온 유지 함으로써 건조 및 소결된다. 충분히 두꺼운 Lining층을 소결하기 위하여 1650°C에서 30-60분이면 된다. 소결율은 내화물, 소결보조배합물

표 1 Selection Chart for Coreless Steel Melting Refractories\*

Alloys & Melting

Plain carbon, low & high alloy steels, Mn-austenitics, Hastalloys	Stainless steels, Inconels, Monels super-alloys	Plain carbon, low & alloy steels, stainless steels, gray and ductile irons
From hotrolled, and rusty scrap	Dead-melting from scrap that requires only minor compositional adjustments	From a combination of dead-melting, and major alloying

Temperatures

Often high 3100F (1700C)	Low superheats except for thin sections	variable
--------------------------	---	----------

Oxidation Levels

Extensive slag & suspended oxides	Low incoming oxygen little slag, high recovery	variable
-----------------------------------	--	----------

Slag Basicity

Basic, tending towards reducing conditions	Neutral, acid at low temperatures, basic at high temperatures	Variable
--	---	----------

Refractory Choice

Dry heat-setting high magnesia: for intermittent operation or case of serious thermal shock conditions. forming bond. 4-9% MgO, preferable.	Dry heat setting alumina based, with a bond that can range from mullite in the austenitic grades, to a magnesia bond where extensive use of Mn, Mo, and V is made in alloying.	Dry heat setting refractory. If deadmelting predominates a magnesia is best, If heavy alloying predominates a should be considerece. Alloying could favor chrome-Alumina. Gray cast iron shift the balance towards acid conditions : Ductile iron towards reducing conditions. No change for malleable irons. malleable irons
---	--	--

및 내화물의 입도에 따른다. 작은 입자는 소결이 빠르다. 이어지는 용해가열에서 소결층은 점진적으로 Coil을 향하여 바깥쪽으로 전진하고 반면 Lining은 금속 및 Slag와 반응하고 이들에 의하여 침투받게 된다. 또한, Lining 은 화학적으로 금속이 과열될 때, 더욱 얇아진다.

Slag층 이상의 노체부분에는 다른 종류의 내화물의 접촉을 추천하기도 한다. Slag 선 이상의 내화물은 복사에 의하여 가열되고 Slag선 이하에서 경험하는 온도에는 이르지 않는다.

Slag선 이상에서는 소결은 더욱 낮은 온도에 형성되고 높은 온도구역인 하부의 용해대에서도 같은 비율로 진행되어야 한다. 노체 Lining의 상부 50mm 부분과 주입주둥이는 Plastic 형의 공기

경화성 배합이 사용된다.

유도로에 있어서의 내화물 Lining 작업은, 여러 가지 형식의 용해로에 적절한 두께제한과 유도가 열에 대한 영향등으로 중요하다. Lining 의 두께와 Coil에 관련된 중심잡기는 정밀하여야 한다.

여러가지 특수 치공구와 다짐장비가 쓰인다. 이들의 사용에 대하여는 여러가지 많은 자료에 언급되어 있다.<sup>4,6)</sup> 외에도 각각의 유도로에 대한 자세한 지침서를 참조하는 것이 내화물의 만족할 만한 성능을 보증할 수 있다.

습식의 Lining은 싼값으로 할 수 있다. 금속-내화물의 접촉부분에서는 제강조업용으로 일반적인 권할 수 없다. 습식 Lining을 위한 건조 및 소결공정은 건식의 진동다짐 재료에 대한 공정과

는 달리, 더욱 느리게 실행되어야 한다. 즉, 증기로부터 금속의 수소상승을 최소화하여 증기의 배출 통로형성(Pinhole)을 막는다. 특성적인 시공법은 사용되는 내화물의 배합에 따라 다르므로, 내화물 공급자의 지침서를 자세히 따르는 것이 최선의 방안이다.

내화물보수는 흔히 있는 작업이며, 새로운 Lining에서 최초 30회 조업후에 가끔 보수하기도 한다. 금속, Slag 및 침투된 내화물은 보수전에 끌로 제거하여 기지 내화물과 보수재의 접합을 좋게하고, 이어지는 조업에서의 가열시 유동상(Liquid)이나 연화구역의 형성을 방지하여야 한다.

Plastic형 보수재는 압력을 가하여 틀어 막아도 기지내화물의 작은 구멍을 침투할 수는 없다. 그래서 보수재의 접착과 이후의 접합을 확실하게 하기 위하여 초벌도포제(Primer)로서 현탁액이 일차 적용된다. 보수재의 크기와 체적에 따라 주의 깊게 건조 및 소결절차를 따라야 한다.

### 재료장입

효율적인 용락을 위하여는 장입재료의 크기는로의 주파수에 알맞아야 한다. 장입물의 조건, 녹, 기름 및 회수재에 묻어있는 주행재료는 용해로의 주파수는 물론 바라는 강종의 최종품질에 따라 안전상의 이유로 반드시 관리되어야 한다.

용락은 저주파로에서는 잔탕조업으로 극적으로 촉진된다. 크고 두꺼운 고철로 150-200mm 단면의 것이 저주파로에서는 가장 좋다. 교반작용은 저주파에서 격심하며, 앞서 장입된 재료가 용탕 밑으로 내려가면서 약간의 예열과 함께 이 위로 넘쳐 흐르게 한다. 만일 고철이 젖거나 기름이 묻어 있으면, 폭발이나 심한 검은 연기의 발생이 이어 일어날 것이다.

그러므로, 고철은 깨끗하고 건조되어야 한다. 녹, 수분 및 기름은 강종이 쉽게 흡수하는 수소의 발생 근원이 된다. 그러므로, 이들의 제거는 최종제품에 대한 품질개선은 물론 안전을 보증하는 것이요, 특히 무산화용해에서 더욱 중요하다. 기름, 특히 절삭유는 유황분을 가져오므로, 부적당한 기름오염은 저유황증가의 원인이 된다.

중주파와 고주파에서는 고철용해를 시작하기 위한 잔탕은 전력을 어느정도 절약하나, 밀도가 높게 장입하는 것이 장입물내에서 용해하는데 필요한 시간을 단축시키기 위하여 중요하다.

만일 장입물이 작은 조각으로 구성되어 있다면, 조각의 모서리가 가열되어 서로 용접되므로, 얽혀 걸림의 위험이 커지게 된다. 이런 현상은 가공실에서 쉽게 일어난다. 장입물의 얽혀 젖은 재료가 갑자기 용융금속내로 잠길 때 폭발을 초래하게 된다.

얽혀걸림을 막도록 장입물을 솜씨있게 다루거나 이러한 조건을 감지하는데 익숙되지 않은 사람은 특히 위험하다. 감지되지 않고 넘어간 걸림은 의도하지 않은 과열의 원인이 된다. 이것은 걸림이 무너질 때 일어나는 반응을 더욱 격렬하게 만든다. 이외에도 과열된 용탕에 지나치게 오랫동안 노출될 때 내화물의 Lining이 손상된다.

Slag를 형성하는 물질을 용해로 바닥에 우선 깔아놓는 것도 흔히 행한다. 특히 산성 Lining에서는 모래나 유리를 약간의 점토와 함께 초기에 사용하면 Lining의 침식을 최소화할 수 있다.

### 접지검출선

유출감지선은 내화물의 마멸과 균열에 의한 손상을 감시하는 정상적인 절차를 보완하는 것이다.

코일의 중심을 기준하여 주의깊게 맞출 수 있는 치구(Jig)를 쓰면 마모범위를 결정하는데 아주 편리하다. 정상적인 방법으로는 자장의 밀도와 이로 인한 유도전류가 코일로부터의 거리와 더불어 변하는 것을 이용하여 전기적인 또는 가열특성을 감지하는 방법이 있다.

접지검출선에는 적어도 두가지 형식이 있다. 가장 일반적인 형식에서는 여러개의 가닥을 한끝에 연결한 도선, 일명 거미발 검출선을 로내 Lining의 바닥에 설치하여 Lining이 일정한 높이에서 용융 금속과 접촉되도록 한다. 이 도선은 접지되고(그림 2) 낮은 주파수의 전류나 직류전류가 공급되게

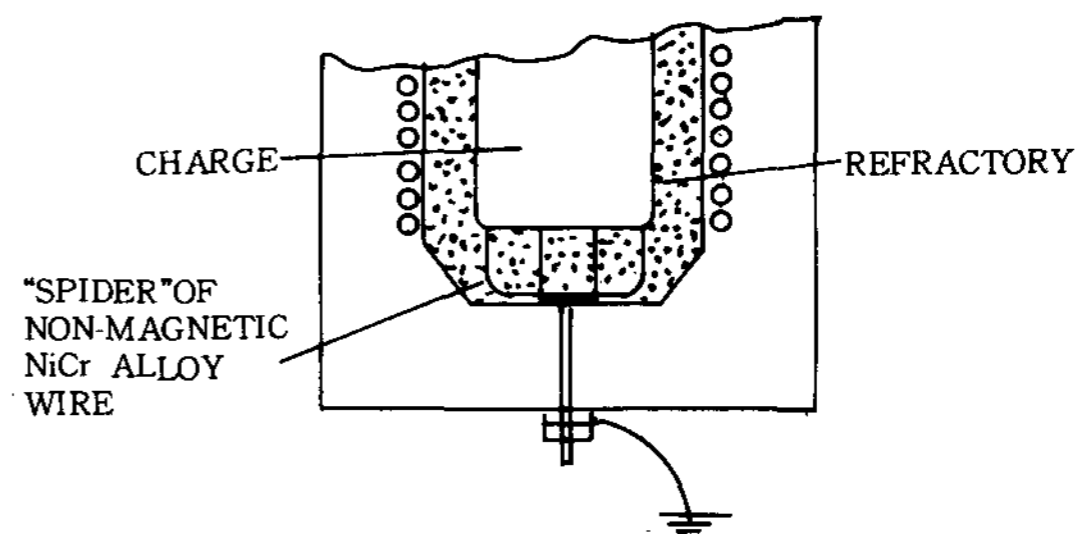


그림 2 Schematic illustration of grounded earth leak detector installation<sup>7</sup>

한다. Lining과 용융금속을 통하는 전류가 거미발 검출선을 통하여 Lining으로부터 유출되는 것을 전기적인 측정회로로 검출한다.

경보음장치를 연결하여 작업자에게 알리도록 자동적으로 전력이 차단되게 하는 것이 일반적이다. 경보는 로바닥에의 조건에만 적용되고 옆면벽에는 적용되지 않는다는 잘못된 생각에서 이 안전장치가 무시되어서는 안된다. 접지검출선은 용금과 코일 사이의 내화물벽의 일반적인 마모에도 감응한다. 물론 국부적인 내화물의 손상, 균열 또는 가는 구멍으로 인하여 금속이 코일과 접촉하거나 전류가 얇아진 내화물 단면에 가교(bridge)를 이룰 수 있을 때에도 감응한다.

또 하나의 장치는 보조장치로 쓰이며 코일과 어떤 거리만큼 떨어져 설치된 전기도선의 망(Mesh)으로 구성되어 있다. 전기적인 감지회로는 금속이 코일에 이르기전에 도선망과 국부적으로 직접 또는 아주 근접하게 접촉되었을 때 감응한다.

### 무산화용해

무산화 용해의 작업방법은 복잡하지 않다. 고철과 산화되지 않는 원소는 함께 장입하고, 산화성 원소는 초기장입물 용탕의 교반작용이 심하여지고 첨가물을 용탕속으로 잡입시키는 후기에 첨가한다. 이렇게 함으로써 합금의 회수율을 높일 수 있다. 대부분의 무산화용해법에서는 원소의 산화는 아주 적고, 회수율은 95%이상이다. 장입재료와 첨가제의 분석 및 증량의 정확도에 따라 여러 경우에 있어 예비분석은 필요없다. 용탕은 신속하게 출탕온도까지 승온되어야 한다. 탈산은 흔히 두 단계로 행하여진다. 소량을 로내에 첨가하고 나머지를 출탕시 용탕이 Ladle의 2/3정도차고 용탕의 교반으로 용해와 혼합이 잘 이루어질 때 용탕의 흐름에 투입한다.

무산화용해에서는 정련작용이 없으므로, 용탕의 조성은 완전히 첨가제와 회석작용에 의하여 조종되어야 한다. 잔여의 기타 원소들은 주요합금원소로써 위와 같은 방법으로 즉 용탕량과 첨가량을 결정함으로써 조절된다. 합금의 첨가는 다음의 공식으로 계산된다.

$$\text{Ferroalloy (Kg)} = \frac{\% \text{ 목표성분} \times \text{용해량(kg)}}{\% \text{ 합금회수율} \times \% \text{ 첨가합금성분}}$$

예비분석을 하지 않고 미리 계산을 행할 때에는 한가지 또는 여러가지 합금의 첨가와 함께 부수적으로 들어가는 원소들을 고려해 넣어야 한다. 그와 같은 고려사항은 가끔 반복작업을 요구하므로 너무 성가시어 손작업으로 실행할 수 없다. 전산화계산이 속도와 정확성을 고려할때 효과적이다. 더욱 중요한 것은 용해와 구매부서로하여금 여러가지 잡재료와 합금을 혼합사용하여 용해비용을 줄일 수 있게 한다.

건조되고 깨끗한 기름이 묻지 않은 고철, 신속한 용해, 불필요한 시간 지연 및 과열의 방지는 Gas 흡수를 최소화하기 위하여 절대 필요하다. 높은 비율의 공장회수재 배합 어떤 종류의 고철, 특히 Cr 이 풍부한 재료는 Gas 함량과 주물에서의 기포 같은 결함을 증가시키는 경향이 있다. 회수재를 장입의 50%까지 제한하는 것이 여러가지 목적을 위하여 적당하고, 정상적으로 발생하는 탕구, 압탕과도 개략 일치한다.

수소와 관련된 균열발생이 흔히 일어나는 합금, 특히 Ni-Cr 및 Ni-Cr-Mo저합금강에 대하여는 이러한 주의로는 충분하지 못하다. 이러한 합금종류를 위하여는 산화용해조건이나 약간의 탄소비등조업을 몇몇 주물공장에서 이용되고 있다. 가능하면 회수재와 고철은 발생근원별 유도로, Arc로, AOD로 구분되어야 한다. Arc로 용해와 특별히 AOD 처리된 재료에서 발생된 고철이나 회수재는 Gas와 잔류원의 함량이 낮기 때문에 우선적이다. 어떤 주물공장에서 보고된 Gas 함량이 분석예를 표 2에서 열거하였다.<sup>32)</sup>

Easterly<sup>33)</sup>는 본래 AOD 재료로 생산된 주물을 유도로에서 반복하여 용해하였다.

Martensite조직의 Stainless steel CA6NM에 대하여는 상온에서 약 4Kg·m라는 상당한 양의 충격에너지 감소가 확인되었다. 탕구와 압탕만으로 주물을 만들었을 때, 압탕발열 Sleeve 재료에 들어있는 유기, 탄소질 점결제의 반응에서 표면침탄이 일어나므로 제품은 탄소성분에서 규격불합격이었다. 완전 Austenite조직의 Stainless Steel CN7M에 대하여는 원래의 AOD재료에서 보다 충격치가 약간 부족한 것이 보고 되었다. 재용해된 것은 인장강도는 더욱 높았다. 원인이 밝혀지지는 않았으나 예상되는 질소의 증가가 이러한 효과를 가져오는 것으로 보고 있다.

Slag는 로 Lining과 장입재료에 따라 달라진다. 규사로부터 생기는 산성 Slag에 의한 중성 및 염

표. 2 Average Gas Contents in the Ladle, ppm<sup>32)</sup>

Carbon steel, WCB			
Induction	4.0	90	105
Basic Arc	3.6	80	110
AOD	2.8	55	45
Low Alloy Steel			
Induction	4.1	110	110
Basic Arc	3.7	80	110
AOD	2.7	55	45
Aust. Stiss.. CCA6NM			
Induction	2.1	195	190
Basic Arc	3.1	170	
AOD	2.5	95	75
AUST. Stless..CF8M			
Induction	5.3	620	275
Basic Arc	6.3	250	200
AOD	3.1	520	60

\*0.264C, 0.83Mn, 0.47Si, 0.009P, 0.002S, 0.28Mo, 0.56Cr 0.13Ni, 0.43Al

기성 Lining의 부수적인 침식과 Slag의 형성을 감소시키기 위하여는 회수재는 Shot-Blasting에 의하여 철저히 청소되어야 한다. 산화철이 많은 Slag로부터 Silica Lining을 보호하기 위하여는 재료장입 항목의 앞절부분에서 언급된 바와 같이 소량의 모래를 장입물에 첨가한다. Slag는 역시 Ladle 과 주형내부로 흘러들어가는 것을 피하기 위하여 출탕전에 제거되어야 한다. 시판되는 Slag 응집제가 Slag제거작업에 흔히 쓰인다.

대기와의 직접접촉, 수소와 산소의 증가로부터 금속을 보호하고 열손실등을 방지하기 위한 Slag 층의 두께는 금속의 교반작용에 의하여 이들 Gas 가 용탕내로 운반되지 않을 정도까지만 유효하다. 교반은 전력입력과 더불어 증가하고 주파수의 평방근의 역수 (1/주파수)로 감소한다.

무산화용해 조업의 실예는 탄소 및 저합금에 대하여는 부록 A에, Stainless steel에 대하여는 부록 B에, 그리고 Ni계 합금은 부록 C에 설명되었다.

무산화용해된 탄소강 및 특히 저합금강의 탈산은 질화Al(AlN)과 관련된 Rock candy파열의 형성을 피하기 위하여 주의 깊게 관리되어야 한다. 일반적으로 지침은 전체 Al함량이 0.06내지 0.08%의 범위내에 들어가는 정도까지 Al의 첨가를 제한하는 것이다. 개별적인 경우에는 훨씬 낮은

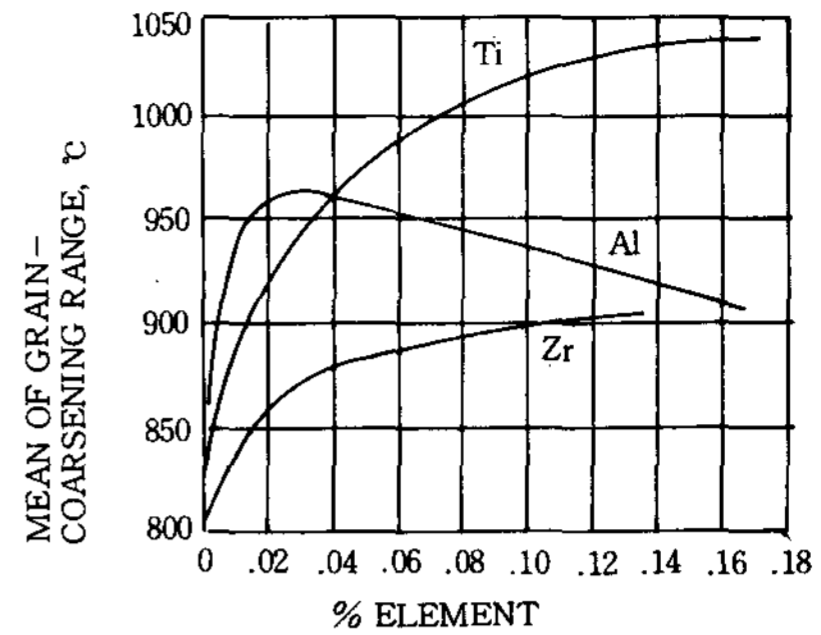


그림 3. Effect of titanium, aluminum, and zirconium on grain coarsening temperature of 0.25-0.35 low alloy En-5 type steel.<sup>13)</sup>

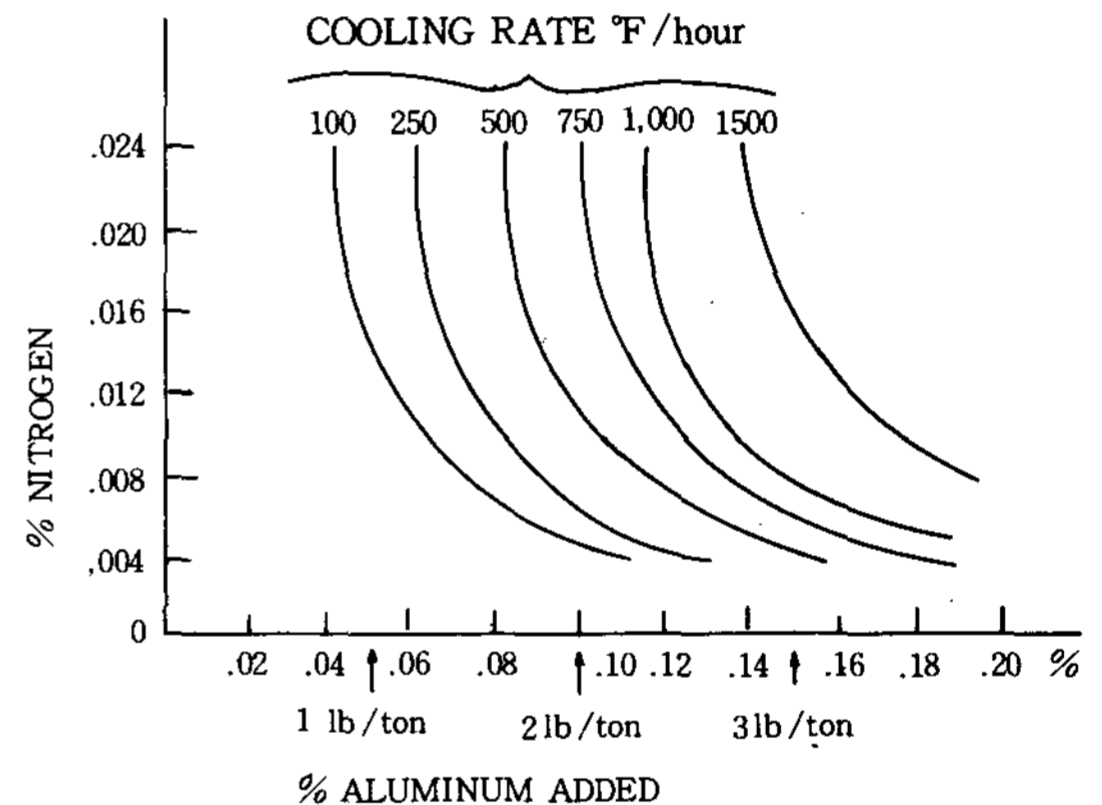


그림 4. Approximate limits of nitrogen and aluminum that may be tolerated in a base analysis containing 0.30%C, 1.60% Mn, 0.5% Si, 0.5% Cr, and 0.35% Mo without development of intergranular type fracture.<sup>14)</sup>

한계가 필요한 것으로 판명되었다.

Rock candy 파열은 Zr, Ti 및 기타 원소의 질화물로부터 초래하는 것으로 발견되었다. 소량의 미세한 질화물은 Austenite입자성장을 억제하므로 결정입자의 크기를 미세화하는 경향이 있다(그림 3).<sup>13)</sup> 그러나, 더욱 많은 석출은 탄소강, 저합금강은 물론 고합금강에서 취약한 Rock candy파열을 일으킨다. Lorig와 Elsea는 Rock Candy형성이 질소와 Al은 물론이고 주물의 냉각속도의 수준정도에 의존하는 것을 보고 하였다. (그림 4)<sup>14)</sup>

Austenite내의 Al의 질화물의 용해도연구에 대한 한가지 예를 그림 5에서 보여준다.<sup>15)</sup>

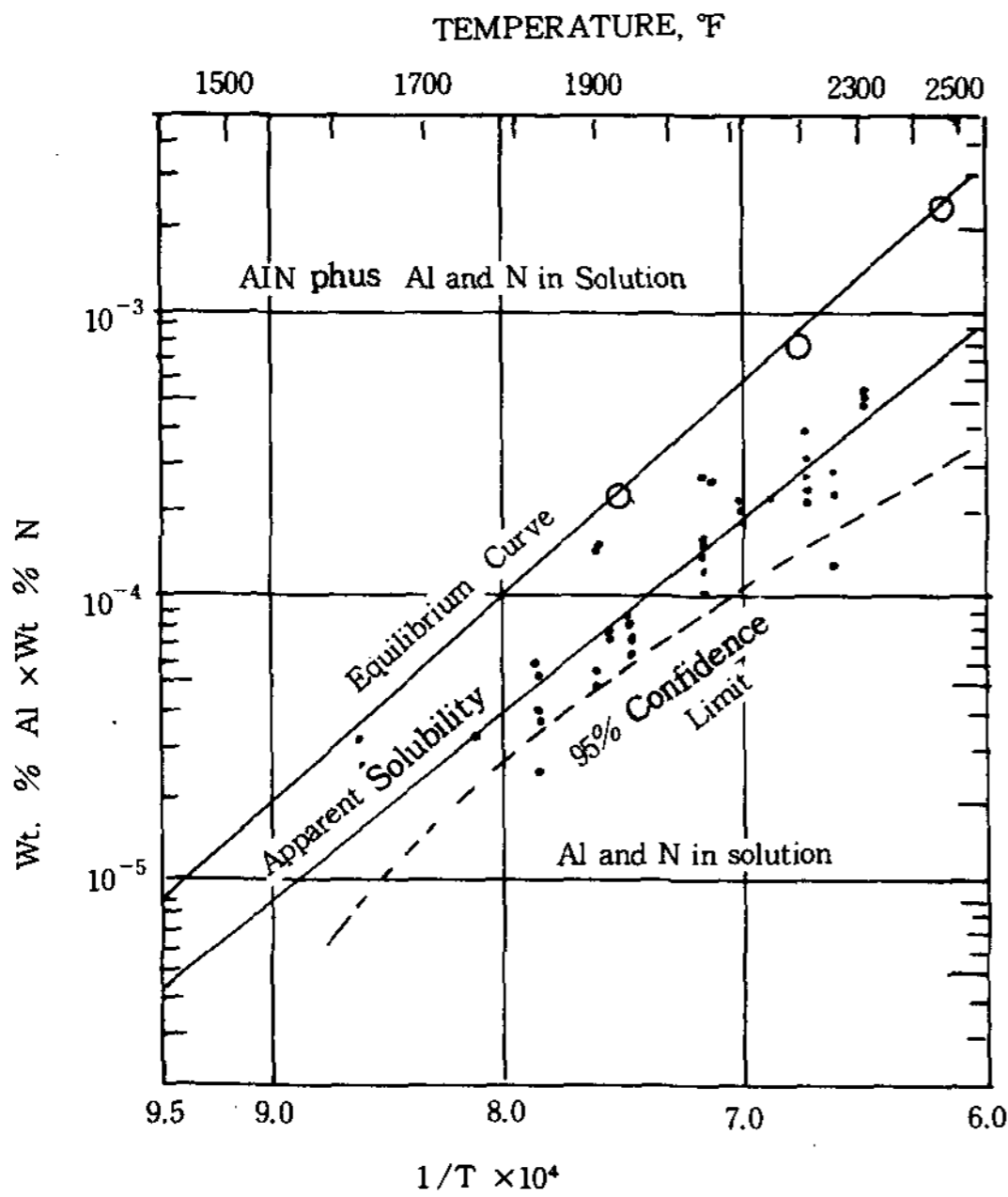


그림. 5 Equilibrium and apparent solubility of AlN in austenite.<sup>15)</sup>

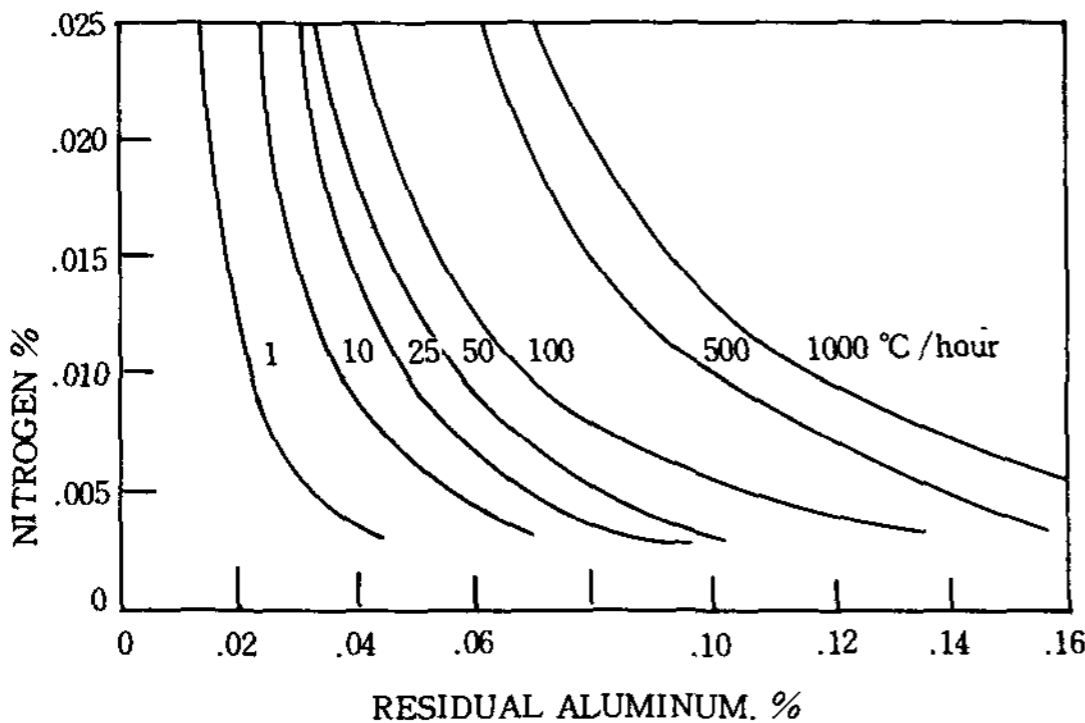


그림. 6 Calculated relationship between residual aluminum and the nitrogen content and cooling rate.<sup>16)</sup>

전체의 Al의 함량보다는 오히려 산용해성 Al이 조사되었다. 질화물 (Nitrides)을 용해하기 위하여는 열평형 이상의 온도가 필요함을 Leslie는 확인하였다. 수많은 조사자들이 Rock candy균열형성과 평형에 대한 연구를 경쟁적으로 행하였으며, 이들 중 하나를 그림 6에 보여준다.<sup>16)</sup> 이결과는 질화물 석출역학을 고려해 놓고 있다. 냉각속도의 영향을 고려하지 않은 몇몇 조사자의 결과요약 도표

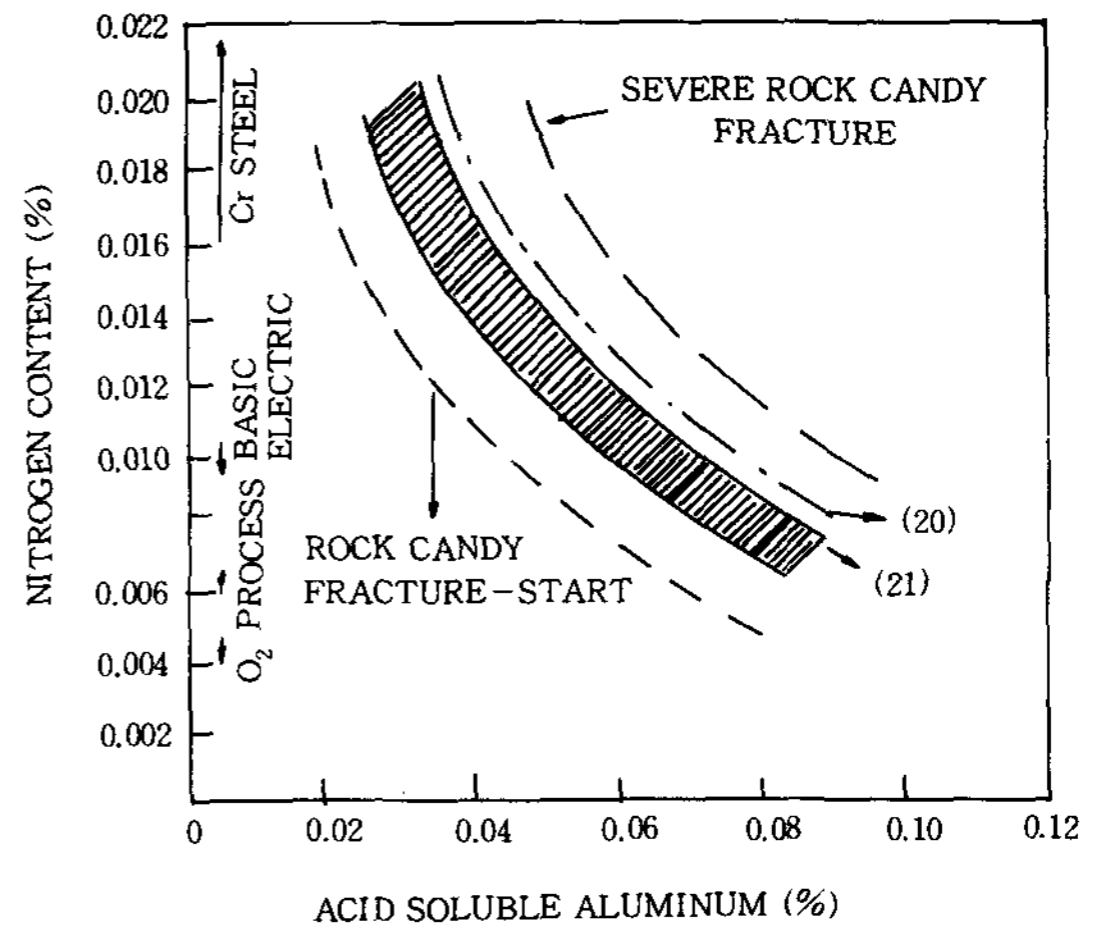


그림 7. The effect of nitrogen and acid soluble aluminum on the formation of rock candy fracture.<sup>17)</sup>

표. 3 Deoxidation Effects on the intergranular Fracture of Annealed, Quenched and Tempered Alloy Steel Casting<sup>28)</sup>

steel	Deoxidation Addition	Beeghly Nitride-%	Intergranular Fracture-%
1%Cr-No	0.2CaSi+0.2Al	0.022	10
	0.3SiZr	<0.01	0
2.5%NiCr-Mo	0.035CaSi+0.2Al	0.011-0.014	100
	0.2CaSi+0.2Al	0.004	50
	0.3CaSi+0.2Al	0.009	5-
3%NiCrMo	0.3SiZr	<0.001	0
	0.2CaSi+0.25Zr	<0.001	0

\* Esther-halogen Method

를 그림 7에 보여준다.<sup>22)</sup> Al질화물의 출현은 단면 크기에 의존하며 합금량에 따라 변하므로, 이들 관계는 정밀한 지시계라기보다는 일반적인 지침으로서 더욱 유용하게 쓸수 있다. 예로서, Ni은 질화물 (Nitrides)에 대한 용해온도를 높이는 것으로 알려졌다<sup>22)</sup> 반면 Mo은 AlN의 석출을 방해한다.<sup>10)</sup> 이외에도, 경도 측, 열처리의 균열시 Rock Candy의 특징출현에 중요하게 영향을 미친다.(표 3)<sup>23)</sup>

### 산화용해

용락중 또는 용락직후의 산화조건 또는 약한 비등을 얻을 수 있는 산소공급원으로서 Gas 상태의 산소보다는 도리어 산화물(Oxides)이 유리하다. 압연산화 부스러기 (mill scale), 산화니켈, 산화철

또는 철광석이 일반적으로 쓰인다. 철광석인 경우 1-2%를 산화조건이나 완만한 비등을 얻기 위하여 보통 사용한다. 산화조건에 유지하려는 합금, 바라는 비등의 정도 및 산화물 형태에 따라 다소간의 산화물이 필요하다. 표 4에 다른 원소의 제거에 필요한 이론 산소 요구량과 Ni 및 여러가지 철 산화물에 대한 해당 산화물증량을 열거하였다.

아-크 전기로에서 흔히 쓰이는 격심한 비등과는 달리, 이러한 형태의 산화기와 완만한 비등은 매우 적은 양의 탄소감소를 가져온다. 완만한 광석비등조업으로 인한 주강내의 수소와 산소함량의 감소는 그림 8과 9에 나타내었다.

보다 낮은 Gas 함량을 얻을 수 있는 외에도 이러한 조업법은 고철사용량에 더 많은 신축성을 가져다 준다. 고철의 건조와 녹슨 고철도 덜 위험하다. 더 많은 비율의 회수철을 사용할 수 있다.

표 4 Theoretical Oxygen and Equivalent Oxide Requirements for the Oxidation of Iron, Manganese, Silicon and Carbon

For removal of 1 lb of	Oxygen 1b	NiO 1b	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 1b	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1b
iron	0.28	1.3	1.0	0.9
manganese	0.28	1.4	1.1	1.0
silicon	1.14	5.2	4.1	3.8
carbon	1.33	6.3	4.8	4.4

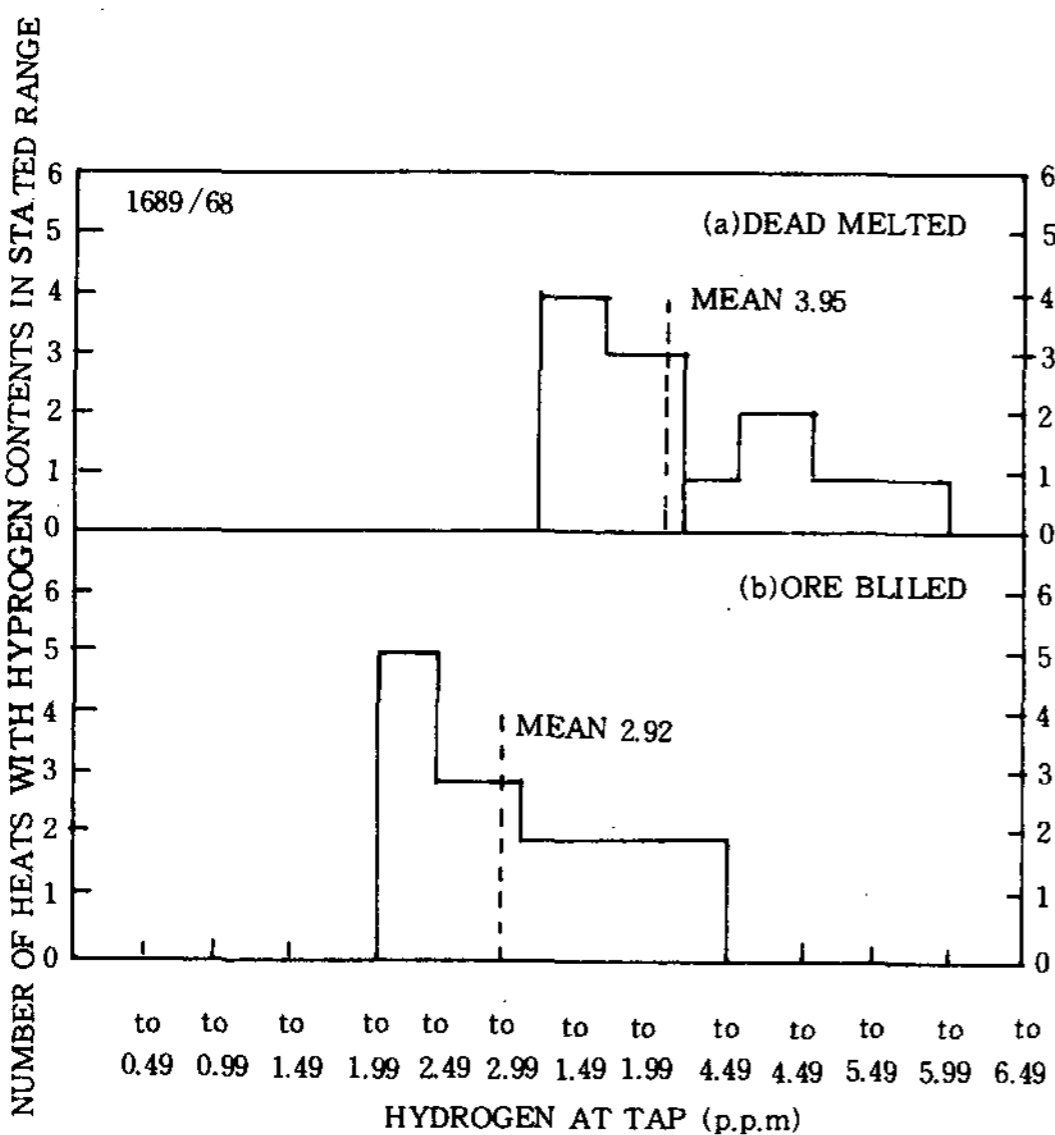


그림 8. Hydrogen contents at tap for dead melted and ore boiled low alloy steel.<sup>34)</sup>

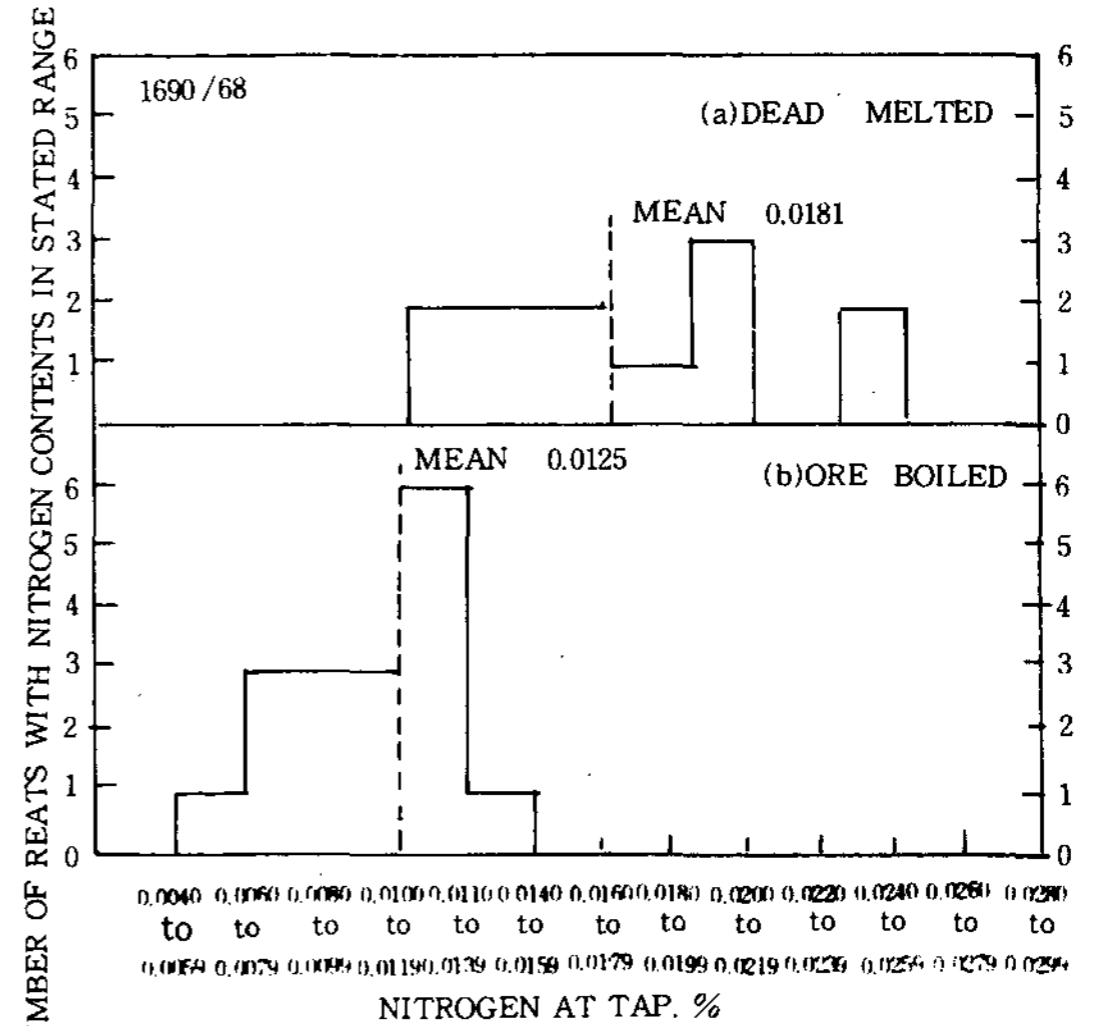


그림 9. Nitrogen contents at tap for dead melted and ore boiled low alloy steel.<sup>34)</sup>

산화조건에서의 혹은 광석비등이 일어나는 유도로 용해조업은 기공결합이나 수소 관련 균열의 경향이 있는 합금에 대하여 더욱 일반적이 되어 왔다. 고강도 수준의 Ni를 함유하는 Stainless steel CA6 NM 및 고탄소를 함유하는 주조 Ni과 Ni-Cu 합금에 대하여 사용된다. 이들 부류의 각각에 대한 조업례와 사내규격은 부록 A에서 C까지에 설명하였다.

Slag-금속간 반응과 정련

S와 P를 제거하기 위한 Slag-금속반응에 의한 정련은, 지금 논의되고 부록 A-5에 보여주는 바와 같이 비록 가능하다 할지라도, 일반적으로 실행되는 것은 아니다. 유도로에서 처리될 수 있는 Slag의 양은 제한되어 있고, 이 Slag는 Arc로 용해 Slag에 비하여 온도가 낮다. 결과로 Slag형성 시간이 길어진다. 또한, 이를 Slag는 용해로 내화물에 대하여 침식을 더해준다.

유도로에서는 Arc로나 AOD로의 경우에서와 같이 내화물을 축조하여 마모와 침식을 보상할 수가 없다. 수냉유도코일과의가능성 있는 Slag 또는 금속의 접촉으로 야기되는 여러가지 위험으로 인하여 유도로에서의 이들 정련반응을 광범위하게 이용할 수 없게 된다.

S와 P를 효과적으로 제거하려면 기본적인 조건이 요구된다. 용해로Lining의 침식을 최소로 하기



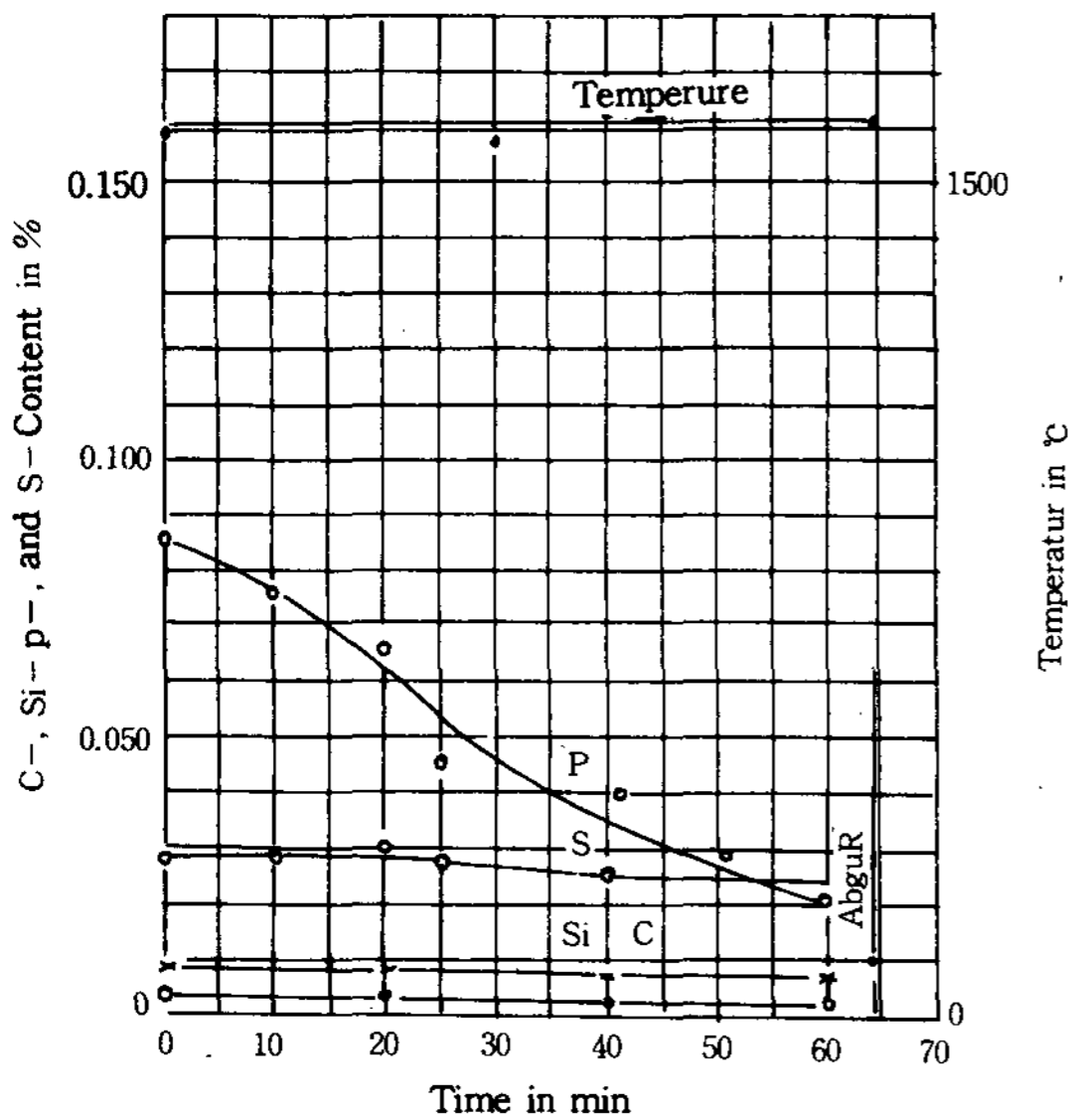
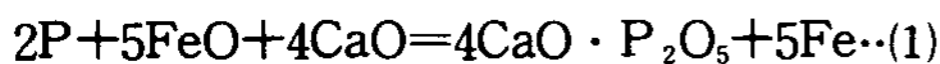


그림 10.

찌기 1940년대에 개발되었다. 그러나, 이들 방법은 널리 보급되지는 못하였다.

0.03%까지의 탈인작업결과를 그림 10에 보여준다. 석회와 철광석으로부터 만들어진 흑색 Slag가 순수유도로에서 사용되었다. 시간을 절약하고 조업초기의 낮은 온도의 잇점을 이용하기 위하여 탈인작업을 용해조업의 용략기에 시작될 수 있다. Hubbard는 80% CaO, 15% CaF 및 5% FeO의 조성으로 만들어지는 유동성 Slag를 제안하였다. 탈인을 위하여는 산화분위기가 필요하다. Slag 중의 석회(CaO)와 산화철(FeO)는 금속에 들어있는 P와 아래 반응식과 같이 반응한다.



인(P)은 고온에서 금속용탕으로 용이하게 복귀하므로 용탕온도가 약 1540°C를 넘기전에 제거되어야 한다. 인의 제거 역시 로에서와 Ladle에서의 분출법에 대하여 표 5에 보여주었다.<sup>17)</sup>

환원 Slag로 저합금강의 S를 제거하는 작업은 부록 C에 설명하였다 탈황작업은 CaC, CaC+CaO의 혼합물 또 CaO만으로 분출법으로 행하며 표 6에 그 결과를 보여준다.<sup>25)</sup>

질소 Gas(N)를 운반 Gas로 사용되며, 이는 공기와의 접촉에서 오는 CaCN(Calciumcyanamide)의 형성과 이의 불안정으로 인한 용강의 앞서 언급한 질소증가를 최소로 할 수 있다. 이러한 작업에 얻어지는 끈적끈적한 비반응성의 Slag의 유

표 5. Phosphorus Removal with Injection Methods. C-Steel Lime-Ironoxide Mix, 2730-2820F (1500-1550C)<sup>17)</sup>

metal 1 bs	% P carrier		gas	atm	vol. cft	time sec	slag condition
	init	final					
2000*	0.085	0.031	N <sub>2</sub>	5 ata	40 cf	65 sec	soild
3000**	0.076	0.032	O <sub>2</sub>	5 ata	36 cf	80 sec	stiff

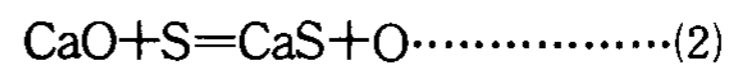
\* furnace injection with 220 kw power input

\*\* ladle injection

표 6. Desulfurization of Steel in a Net-Frequency induction Furnace by induction Techniques<sup>17)</sup>

metal lbs	% S Init	% S finel	agent %	vol · N <sub>2</sub> cft	time sec	slag condition
3000	0.061	0.035	0.08%CaC <sub>2</sub>	113	38	crumbly
3000	0.035	0.011	0.08%C+L	198	50	stiff
3000	0.020	0.007	0.08%Time	184	62	solid

동성을 주기 위하여 추천하고 있다. Slag의 부피는 중요하다. 금속중량의 2-4%를 제안하고 있다. Slag의 부피는 제거되어야 할 유황의 양 및 Slag를 용탕과 철저히 혼합할 수 있는 능력에 관계된다. 잘 혼합하여 Slag의 CaO가 용탕의 유황과 아래식과 같이 반응할 수 있는 Slag-Metal계면을 크게 만들어 줄 필요가 있다.



탈인 작업과는 반대로, 탈황을 위하여는 고온(1590°C이상)과 환원성이 필요하다. 또한 조심스러운 Slag 제거작업이 요구된다. Ladle로의 Slag의 이동은 용탕온도가 Ladle에서 떨어질 때 유황의 복귀를 초래한다. (용해조업 표준은 다음호에 계속)

참 고 문 헌

1. H. G. Heine : "Coreless induction Furnaces." paper 3 of session V of proceedings of the AF Electric Iron Metting Conference, Nov (1969).
2. R.O.Stefano ; "Batch /Batch /Buttrfly induction Melting." p 74
3. VIP Power Trak Induction Melting Systems, Inductotherm
4. R.O.Stark : "Monolithic Refractosi of Steel." Electric Furnace Conference Proceedings, AIME, Vol 41, p 221(1983)

5. R. Duncan; "Coreless Induction Melting in Steel Foundries."
6. S.L. Gertsman and R.W. Buhr. "Induction Melting of Carbon and Low Alloys Steels." p 43 of Steel Foundry Melting Practice. R. Zillman, E. Gall, editors. SFSA(1973).
7. M. W. Hubbard: "Steel Making for Steel Foundries." Monograph I. SCRATA(1972).
8. Basic Open Hearth Steelmaking edited by G. Derge. AIME, New SCRATA(1972)
9. D. J. Carney, J. Chipman, and N. Grant: "An Introduction to Gases in Steel," Proceedings Electric Furnace Steel Conference. AIME. vol 6. p 34(1948).
10. M. W. Hubbard and J. Holt: SCRATA unpublished work.
11. R. D. Pehlke and J. F. Elliott: "Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys." Trans. Met. Soc. AIME. vol 218. p 1099(1960).
12. D. R. Callihan and D. R. Moyer. "Gas Level Analysis in Cast Steels." steel Foundry Facts. No. 336. p 11, Mer (1980).
13. J. W. Hallye: Trans. AIME. vol 167. P. 226 (1946.)
14. C. H. Lorig and R.R. Elsea: AFST transactions. vol 55. p 160(1947).
15. W.C. Leslie, et. al.; ASM Transactions. vol 55. p160(1954).
16. N.E. Hannerz: "Influence of Cooling Rate and Composition on intergranular Fracture of Cast Steel." Metal Science J. vol 2. p147. July(1968).
17. K Roesch and K. Zimmermann: "Stahlguss." vol 17, Stahleisen M. B. H, Duesseldorf(1960).
18. F. K. Naumann and E. Hengler, "Rock-candy Fracture of Steel. Causes and Conditions of Formation," Stahl Eisen. vol 82. p 612(1962).
19. R. F. Harris and G. D. Chandley: "Embrittlement of High Strength Cast Steel Due to Aluminum Nitride." 29th International Casting Congress. Detroit. MI(1962).
20. Ibid. Modern Casting, vol 41. p 97(1961).
21. Ibid., Giesserei. vol 50. p 60(1963).
22. L. Erasmus: JISI. vol 202. p 32(1964).
23. S. E. Mahmaouj. P. C. Rosenthal, and R. G. Gilliland: "The Morphology of Brittle, Intergranular Fracture of Steel castings and the Effects of Processing Variables on its Occurrence." SFSA, Special Report 12 (1975).
24. Electric Furnace Steelmaking, vol II. C. Sims Editor. Interscience Publishers(1963).
25. C. K. Donoho: "Steels with Higher than Normal Silicon Content." Electric Furnace Proceedings, AIME. vol 5. p 151(1947).
26. E. T. Turkdogan: Physical Chemistry of High Temperature Technology, Academic Press(1980).
27. E. Ploekinger and M. Wahlster: Stahl & Eisen. vol 180. p 659(1969)
28. W. J. Jackson: "Steelmaking for Steel Foundries." Monograph 8. SCRATA(1977)
29. E. T. Turkdogan: "Deoxidation of Steel. What Happens from Tap to Solidification," Journal of Metals. p 38, Jan(1967).
30. R. Kiessling and N. Lange; Non-metallic Inclusions in Steel. The Metals Society (1978).
31. A / More: "Formation and Growth of Oxide inclusions in Austenitic Cr-Ni Steel." Radex Rundschau, no. 2. p 524 (1969).
32. L. Long: "Quality Casting Production," SCRATA Proceedings(1980).
33. W. C. Easterty, R. B. Fisher, and M. McGrath: "Experience with AOD Metal After Repeated Induction Melting." Steel Foundry Facts. No. 336, p 1(1980).
34. M. W. Hubbard and J Holt: SCRATA unpublished work.
35. W. C. Easterty, R. B. Fisher, and p. Bardenheuer, "Basic Coreless Induction Furnaces," Mitt, K. Wilh. Inst. Eisenforschung. vol 24. p 7(1942).
36. M. W. Hubbard: "Refining Steels in an Induction Furnace." Focus no. 13 Induction Furnace Operation, SCRATA
37. "Induction Melting," Electric Furnace Steelmaking, vol. p 363. C. E. Sims Editor,

- AIME(1962)
38. W. C. Easterly and R. B. Fiscer. "Process Controls and Procedures for the Induction Melting of Steel," AFSTransactions. p 553 (1981).
39. C. Dance: "Induction Melting of Carbon and Low Alloy Steel." SFSA Proceedings. T & O Conference. No. 348. p 10(1982).
40. W. M. Spear: "Production of Nickel Base Corrosion Related Cast Alloys." Electric Furnace Proceedings. AIME. vol 38. p 155 (1980)

## 國內外鑄物關係行事

### 1990

11월26일~11월27일

The Institute of British Foundrymen  
Current status of computer Applications

3re Floor, Bridge House, 121Smallbrook Queensway,  
Birmingham B5 4JP. England

Post House Hotel in Newcastle,  
Trentham  
North Staffordshire England

11월22일~11월23일

한국주조공학회  
제15회 정기총회, 추계학술발표 및 기술강연대회

90주조 종합전시회  
스위스그랜드 호텔, 서울

11월7일~11월8일

FMJ International publications Ltd  
Castings & Foryings Exhibition 90

### 1991

9월15일~9월20일

Association Technical of Foundry (ATF)

58° Congres Mondial DE Fonderiel  
Paris Cedex 16

FMJ International Publications Ltd,  
Metds Engineering'91

3월12일~3월14일

American Foundrymen's Society, Ine.  
World conference on Austempered Ductile Iron  
Chicago, U.S.A

10월7일~10월11일

Deutsche Gesellschaft Für Materialkunde eu

6th International Aluminium-Lithium Conference

Garmisch, West Germaay  
Notional Exhibition Centre, Birmingham England.

9월2일~9월6일

(자세한 내용을 원하시면 학회로 연락바람)