

高温 플라즈마 技術의 에너지 절약 응용

황 기 응

(서울대 공대 전기공학과 부교수)

1. 머릿말

現在 人類가 매일 사용하는 에너지의 대부분은 石炭 이나 石油과 같은 火石燃料나 核燃料로부터 얻어지고 있으나, 核燃料은 연소시 생기는 방사능 물질때문에 지금 이용되고 있는 방식으로서는 우리가 100% 原子力에너지에 의존하기에는 부적합하고, 훨씬 안정된 방식이나 核融合 에너지와 같은 새로운 에너지원이 나타날 때까지는 당분간 火石燃料에 의존해야 될 전망이다. 그러나 石炭은 비교적 풍부한 매장량이 지구상에 있으나 產地가 몇몇 나라에 편재해 있고, 채탄과 수송과정에서 많은 환경공해를 일으키고, 연소시 내는 일산화탄소는 지구에 온실효과를 일으켜 기상에 많은 나쁜 영향을 주고 있는 것으로 염려되고 있으며, 石油은 최근에 소비량이 둔화되고 있기는 하나 2050년경에는 지구상에서 고갈이 될 전망이다.

石油은 대부분이 수송이나 석유화학 원료로 사용이 되나, 核에너지나 石炭은 대부분이 최종적으로 電氣에너지 형태로 공급이 되어진다. 따라서 세계적인 에너지부족문제를 생각할 때 사용 전기에너지의 절약뿐 아니라, 사용에 있어서 效率的 측면이 검토되어야 한다.

이와 관련하여 本橋에서는 高温熱源으로써 熱 플라즈마를 금속의 Melting/Remelting이나 Extractive Metallurgy에 이용할 때 얻을 수 있는 에너지 절약효과와 경제적인 利得 및 工程상의 長點 등을 소개하고자 한다.

2. 본 문

2.1 熱플라즈마의 定義 및 性質

플라즈마는 대충 '이온화된 가스'라고 이야기 할 수 있으며, 중성 가스 분자, 이온 및 전자로써 구성이 되며, 그림 (1)에서와 같이 온도와 밀도에 의해서 대별이 되어진다. 플라즈마는 가스에 電場이나 磁場을 인가해서 가스속으로 전류를 흘려서 Ohmic가열에 의해 전기에너지를 열에너지로 변환시키면서 동시에 이온화과정을 계속해서 플라즈마를 형성하게 된다.

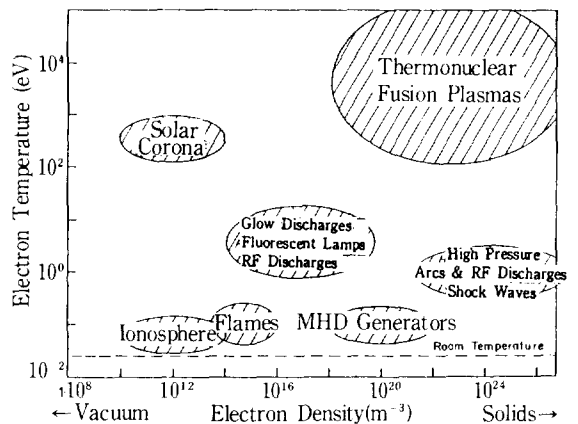


그림 1. 온도, 밀도에 따른 플라즈마의 분류.

에너지와 관련된 플라즈마는 크게 초고온 플라즈마, 熱플라즈마 및 低温 플라즈마로 나눌 수 있다. 초고온 플라즈마로부터는 核融合 에너지를 얻을 수 있으며 수천만도 이상의 온도를 갖는다. 熱플라즈마는 밀도가 높아서 (10^{16}cm^{-3} 이상) 이온, 전자간에 충돌이 활발해서 같은 온도를 갖으며 LTE (Local Thermodynamic Equilibrium)이 만족되고, welding arc, arc furnace, plasma torch 같은 것들에 찾아볼 수 있다. 低温 플라즈마는 밀도와 온도가 낮아서 이온과 전자의 온도가 서로 크게 다르고, 비평형상태에 있는 플라즈마로써 plasma etching, plasma deposition 등에 이용되는 glow discharge에서 형성되는 플라즈마가 이에 해당이 된다.

LTE를 만족하는 평형상태에 있는 熱플라즈마는 아래의 성질을 갖는다.

- (1) 플라즈마를 구성하는 이온, 전자, 중성가스분자들은 각각 Maxwell속도 분포를 갖는다.
- (2) 電場의 효과가 매우 적고, 압력과 온도가 높아서 전자와 가스의 온도가 같다.
- (3) 여기(Excitation)와 이온화는 충돌을 통해 이루어진다.
- (4) 공간적성질 변화는 매우 작다.

2. 2 熱플라즈마의 發生

熱플라즈마는 電氣的인 방법으로 만들어지며 DC, AC (60Hz), RF를 주로 이용한다. 그림(2)에 DC에 의해 플라즈마를 발생하는 장치가 보여지고 있다. 양극과 음극 사이에 대전류(>50A), 저전압 DC 전원을 연결하고, 가스를 충분히 흘리면 빠른속도로 분사되는 高温의 플라즈마가 형성된다. 電流密度가 높아지면, 플라즈마의 길이가 길어지면 플라즈마가 不安定하게되며 차가운 벽이나, 가스에 Vortex를 형성시키거나, 磁場을 이용해서 安定化를 시킨다.

그림 (B)에는 RF에 의해 熱플라즈마를 발생시키는 방법

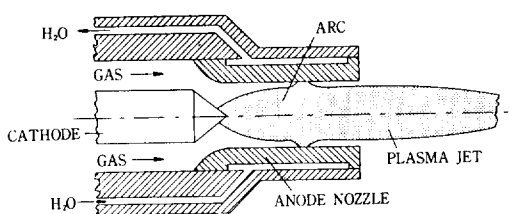


그림2. 전형적인 DC 아크 플라즈마 토치의 단면도

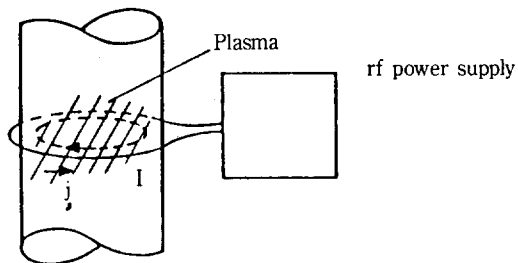


그림3. RF에 의한 플라즈마 발생장치의 개략도

의 개략도를 보여주고있다. RF코일에 흐르는 전류에 의해 형성되는 축방향의 시간에 따라 변하는 磁場에 의해 플라즈마에서 電場이 유도되는 원리에 의하며, 접촉하는 電極이 없기 때문에 전극물질로부터의 오염이 문제가 될 때 주로 이용하게 되는 장치이다.

本橋에서 검토될 熱플라즈마를 금속의 溶解나 冶金에 熱源으로서 사용할 때 이용이 되는 플라즈마는 그림(4)에서와 같은 구조의 플라즈마 토치가 주로 사용이 되며, Transferred Plasma Torch라고 부르고 통상 피처리물이 陽極의 일부분이 된다.

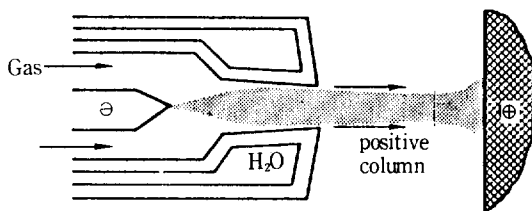


그림4. DC, transferred plasma torch

2.3 熱플라즈마를 利用한 Melting/Remelting 技術

工業과 技術水準이 高度化할수록 사용되는 에너지중에서 電氣에너지가 차지하는 비중이 점점 높아지며, 따라서 電氣에너지 利用의 効率 向上에 대해 특히 2번에 걸친 유류 파동 이후로 세계 각국에서 관심을 갖기 시작했다.

電氣 에너지를 熱에너지로 바꾸어서 금속의 溶解/再溶解에 이용하는 기술은 기존의 電氣爐, 電子빔 溶解爐, 진공아크爐 등에서 이용이 되고 있으나 최근에 美國, 캐나다, 일본, 소련, 동독등에서 플라즈마를 熱源으로 사용할 때 이들 기존의 爐등이 갖고 있는 여러가지 단점을 보완 하면서 電氣에너지 利用에서 훨씬 높은 효율과 낮은 생산원가를 얻을 수 있는 것을 보여주고 있으며, 실험규모의 소규모 장치를

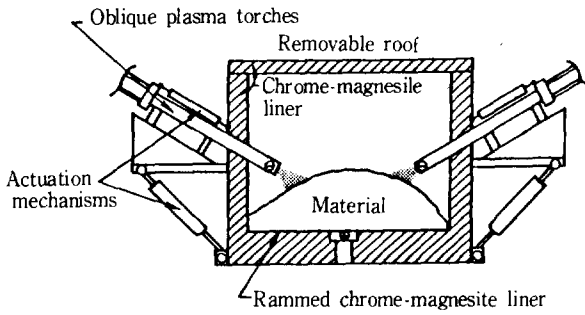


그림 5. GDR 플라즈마 용해로

에서 벗어나 대규모의 생산장비로써 투입이 시작되고 있다. 한 예로써 그림(5)에 동독의 VEB Edlestaahlwerks 에서 강철, 니켈계 합금, 스테인레스강, 특수공구강을 알곤 분위기에서 용해시키기 위해 개발한 30T 용량의 플라즈마 아크 용해로를 보여주고 있다. 소모전력은 20MW로써, 시간당 20T 을 용해시킬 수 있어서 톤당 소모에너지(Specific energy consumption)는 종래의 아크로와 같다. 그러나 플라즈마 용해로는 아크플라즈마의 온도가 8000~30000°K의 고온에 이르기 때문에 용해에 걸리는 시간이 화학연료의 연소시 생기는 화염이나 저항가열을 이용하는 경우에 비해 훨씬 짧고, 용해로의 분위기를 높은 압력의 불활성 가스로 채울 수 있으므로 생제품의 불순물 오염과 산소와 수소의 잔류량을 낮출 수 있고, 높은 증기압을 갖는 합금성분물질의 손실이 적고 철의 손손실이 2%이하로 작으며, 침탄(Carburization) 정도도 매우 적다. 또한 질소가스를 용해로로 주입할 경우 용해에서 바로 합금을 만들 수 있으므로 비싼 질소를 포함하는 ferroalloy를 사용할 필요가 없고, 반응가스를 주입할 경우 즉석에서 화학처리를 할 수 있다. 또한 수축시 생기는 공동이 없는 고밀도의塊를 만들 수 있으며, 표면 상태가 좋고, flicker나 surge가 없어서 전력부하 상태가 매우 부드러우며, 소음을 내지 않는다. 또한 VAR(Vacuum Arc Remelt)나 EB(Electron Beam)용해로에 비해 고가의 진공장치가 불필요하고, VAR장치와는 달리 용해율이나 용융 평열에 더해지는 열(Superheat)은 전극의 삽입정도에 무관하며, 훨씬 긴 전극수명을 갖는 장점등을 갖고 있어서, 금속의 용해/재용해에 열플라즈마 반응로를 사용할 경우 기존의 여러 장치들에 비해 소형의 장치로써 훨씬 처리 속도가 빠르고 높은 전기/열적 효율을 얻을 수 있다.

그림(6)에는 일본의 Daido에서 steel, superalloy, non-ferrous 금속의 재용해에 사용하기 위해 개발한 2T 짜리 플라즈마아크용해로를 보여주고 있다. 이장치에서는 열원으로

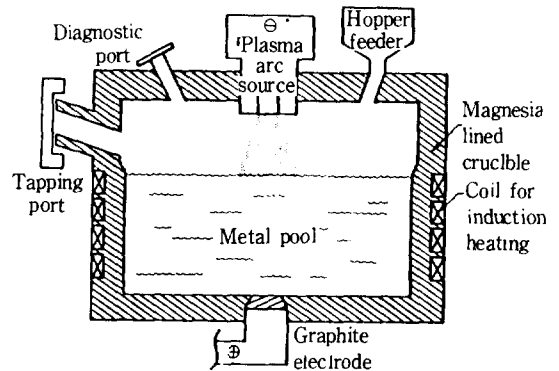


그림 6. Daido 플라즈마 유도 용해로

표 1. VIF와 PIF의 비교

Characteristic	VIF	PIF
Volatilization	High	Low
Mechanical property	Good	Good
Workability	Excellent	Good
Yield (melting)	98	98.9
Product yield(total)	75	85
Melting cost(index)	100	59
O	5-15 ppm	8-25 ppm
N	10-30 ppm	10-50 ppm
H	1 ppm	2-5 ppm
Desulfurization	10 percent	50-85 percent
Decarburization	90 percent	70 percent

써 플라즈마 아크(400KW)와 유도가열(600KW)두가지 방법을 이용하며, 추가로 200KW가 Induction Stirring 에 소모된다. 약 200T/월의 처리 능력을 갖으며, 1MW-hr/T의 에너지 소모율을 갖는다. 표 1에 VIF(Vacuum Induction Furnace)와 PIF(Plasma Induction Furnace)의 장단점이 비교되어 있으며, PIF가 갖는 장점으로써는 여러

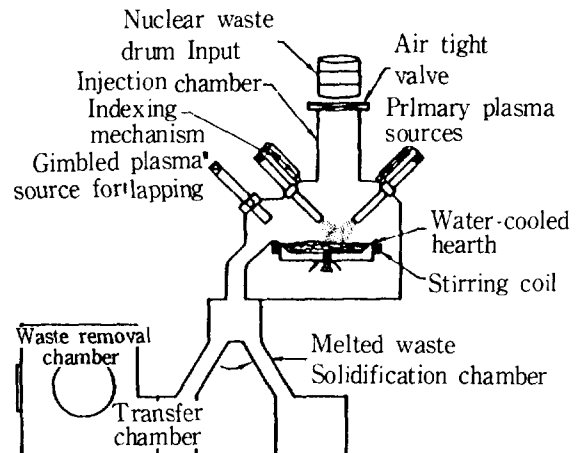


그림 7. Daido의 핵폐기물 처리를 위한 플라즈마 반응로

종류의 합금용해에 사용될 수 있으며, slag의 재처리 능력이 좋고, 처리단가가 낮으며, 높은 생산성 등이다.

플라즈마 아크爐가 갖는 높은 온도, 爐내의 분위기 가스의 자유로운 조절, 짧은 처리시간, 높은 효율등은 이외에도 핵폐기물의 재처리, 위험한 쓰레기의 燒却, Ti scrap의 agglomerating, refractory금속, 고융점 카바이드, 금속의 단결정 성장에 이용이 되고있다.

그림 (7)에는 일본의 Daido에서 핵발전소에서 나오는 폐기물의 제적감소와 비연소 고형물질의 安定化를 위해 개발한 熱플라즈마 장치이다. 이장치는 300KW의 電力을 소모하며, 연간 200T의 처리 능력을 갖고 있고, 처리된 폐기물은 0.3m 입방체나 0.1~0.7cm직경의 丸으로 만들거나 보관용기내로 직접 固形化 시킬 수 있다. 이장치가 갖는 장점으로서 5000°K이상의 高温 플라즈마를 熱源으로 하므로 대기압 분위기에서 모든 종류의 금속과 유·무기물질을 녹일 수 있고, 熱源이 피처리물과 완전히 독립적으로 운용할 수 있는 점 등이다.

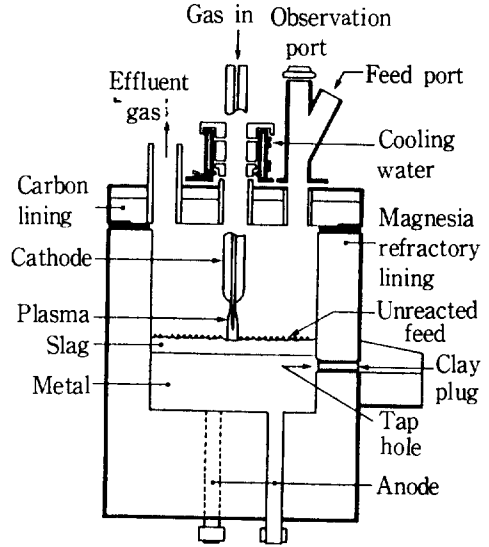


그림 8. 남아공화국의 Mintek 플라즈마 爐

2.4 熱플라즈마를 利用한 Extractive Metallurgy 技術

前節에서 살펴본대로 플라즈마爐는 Iron이나 steel 産業分野에서는 이미 동독에서는 30T짜리가 1977년 이후로 가동 중이고, 소련에서는 100T짜리가 생산용으로 사용이 되어지고 있으며, 기존의 電氣爐에 비해 여러가지 운용상의 장점이 확인되어져 보급이 급속히 늘고있다.

최근에 들어 플라즈마爐가 갖는 高温 特性과 플라즈마 가스 자체가 反應物으로써 작용을 할 수도 있는 特性때문에 refractory금속(zirconium, titanium, niobium, vanadium, tantalum, chromium, molybdenum, tungsten)의 생산에 이용이 검토되어져 남아프리카 공화국의 Mintek(Council of Mineral Technology)에서는 그림 (8)에 있는 장치(0.55MW)를 ferrochromium 생산에 사용하고 있으며, 최근에는 20MW짜리 플라즈마爐를 가동시켜 전세계 ferrochromium 생산량의 65%를 남아공화국에서 생산하게 되는등 실제 生産에 이용이 되기 시작하고있다.

Ferro chrome을 플라즈마爐를 사용해서 生産할 때 종래의 電氣爐에 비해 얻을 수 있는 장점으로서 電極의 소모가 적기 때문에 소모된 전극의 교체비용이 절감되고, 잦은 교체 때문에 생기는 가동중지 시간이 훨씬 짧아서 生産성이 높고, 비싼 冶金用 코크가 필요 없으며, 炭素質의 환원재와

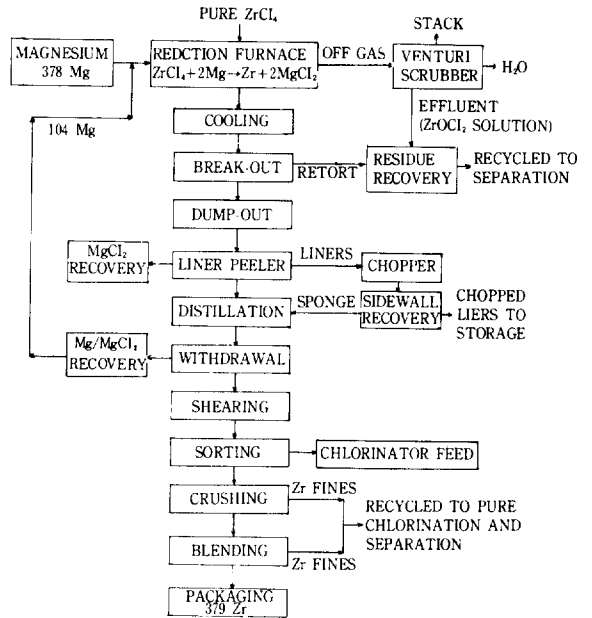


그림 9. Zirconium의 재래식 생산방법에서의 마지막 Kroll 공정

스래그의 전기전도도 때문에 생기는 전기적인 문제가 없고, 電力공급에 필요한 비용이 약절반(플라즈마爐의 경우 \$165/KW, 電氣爐의 경우 \$360/KW)정도가 되는 점 등이다.

Zirconium은 Zircon($ZrSiO_4$)으로부터 얻으며 原子爐에서 燃料 펠렛제조 등에 사용이 되며, 原子力 産業에서

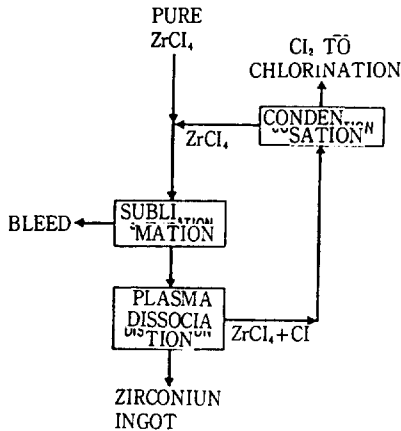


그림10. 플라즈마를 이용한 Zirconium 생산공정

hafnium의 함량이 50ppm 이하가 될 것을 요구하기 때문에 60여 단계를 거치는 복잡한 공정에 의해 얻어진다. 그림(9)에 이공정의 마지막 부분(Kroll공정)의 보여주고 있으며 비싼 magnesium과 helium을 사용하는 복잡한 공정이다. 최근에 캐나다의 McGill대학과 IMRI(Industrial Materials Research Institute)^{2) 3)}에서 플라즈마 공정으로서 이 Kroll공정을 대체하는 연구를 수행하여 가능성을 보여주고 있다.

그림(10)에 플라즈마 공정에 의해 Zirconium을 생산하는 과정을 보여주고 있으며 훨씬 공정이 간단하고, 값싸게 얻을 수 있는 것을 쉽게 볼 수 있다.

Titanium도 商業的으로 Kroll공정($TiCl_4$ 를 magnesium으로 환원)이나 Hunter공정($TiCl_4$ 를 sodium으로 환원)에 의해 生産되고 있으나 zirconium 생산에서와 마찬가지로 매우 복잡하고 費用이 많이 드는 공정들이다. 최근에 영국의 ECRC(Electricity Council Research Center)에서 고온의 수소플라즈마를 이용해서 $TiCl_4$ 를 sodium과 함께 일단계의 氣相환원에 의한 연구결과를 보고하고 있으며,⁴⁾ 캐나다의 McGill-IMRI에서도 이에 대한 연구가 수행되고 있다.

Molybdenum은 특수강이나 HSLA Steel 제조에서 중요한 첨가제이다. Molybdenum을 얻는 종래의 방법은 molybdenite(MoS_2)를 구워서 MoO_3 와 SO_2 로 산화시킨 후, SiO_2 를 제거하고 알루미늄과 ferrosilicon으로 MoO_3 를 환원시켜서 만드는 매우 복잡한 공정이다. 이를 고온 플라즈마를 이용해서 MoS_2 를 곧바로 Mo와 gaseous sulfur로 분해하는 방법이 개발되어⁵⁾ 0.085%의 sulfur 함량을 갖는 Mo가 生産될 수 있는 공정이 개발되어 있다.

3. 맺음말

高温 플라즈마를 熱源으로 사용해서 금속의 溶解에 이용할 때 종래의 電氣爐에 비해 훨씬 비용이 절감되고, 電氣 에너지의 利用效率이 높으며, 금속의 회수율이 높고, 처리 시간이 짧으며, flicker, surge, 소음이 없어서 電力 시스템이나 환경에 미치는 영향이 적은 여러가지 장점 때문에 美國, 日本, 독일, 소련 등에서는 이미 100T 규모의 生産설비가 가동 중이며, 특히 2차례의 유류파동 이후 에너지 및 자원절약에 대한 관심이 높아지면서 이의 이용이 급격히 늘어나고 있다.

또한 플라즈마를 금속의 冶金 특히 refractory metal의 冶金에 이용할 때 종래의 방법에 비해 훨씬 간단하면서도 싼 가격으로 고순도의 금속을 얻을 수 있어서 chromium의 경우 이미 대규모의 生産에 플라즈마爐가 이용되고 있다.

熱플라즈마를 금속의 溶解나 冶金에 이용하는 것은 같은 電氣 에너지를 좀더 효율적으로 이용해서, 고순도의 금속을 얻는 기술로써, 이는 巨視的이고 長期的인 에너지 및 資源需給계획에서 검토되어야 할 가치가 충분히 있는 기술로 사료되어진다.

참 고 문 헌

- 1) Ward Roman, "Thermal Plasma melting/remelting technology" in "Plasma Processing and Synthesis of materials" MRS Symposia Proceeding Vol 30(1984) Elsevier Science Publishing co.
- 2) A. Kyriacou, "Characteristics of Thermal Plasma Containing Zirconium Tetrachloride", M. Eng Thesis (McGill University) (March 1982)
- 3) O. Biceroglu and W. Gauvin, "Chlorination Kinetics of Zirconium in an R.F. Plasma Flame", AIChE, 26, No.5, p.743 (September 1980)
- 4) K.A. Bunting, "Sodium and Titanium Tetrachloride Feed System for a Plasma Route to Titanium", Proceeding of the 6th International Symposium on Plasma Chemistry, Montreal, p.193 (July 1983)
- 5) R.J. Munz and W.H. Gauvin, "The Decomposition Kinetics of Molybdenite in an Argon Plasma", AIChE Journal, 21, No6, p.1132-1162(1975)