

技術解説

鑄鐵에 應用된 Plasma技術

(I)

김 동 의*

1. 序 論

Plasma 技術은 지난 수십년간 金屬分野에 이용되어 커다란 진전을 보게 되었으며 특히 금속의 熔接, 切斷, 熔射의 가공분야와 鐵鑛石의 還元, 合金鋼의 熔解 그리고 合金鐵 製造등 철강제조분야에 많이 응용되고 있다. 그리고 최근에 이르러 TiN¹⁾, TiC 그리고 超微粒子 粉末製造에 많은 연구를 진전시키고 있다.

1950 년대에 U²³⁵ 을 이용한 商業用 原子爐가 가동된 이후, 다른 하나의 에너지원으로서 核融合에 의한 에너지를 利用하기 위하여 미국과 소련을 중심으로 많은 연구가 진행되었다. 즉 중수소핵을 융합시키려면 높은 온도가 필요하였으며 電氣放電에 의하여 plasma가스체를 한곳에 집속시켜 고온을 얻고자 하는 연구가 중점적으로 연구되어 왔다.

1960 년대에는 단순한 금속의 熔接, 熔射²⁾ 등에 利用하기 시작하였으며 특히 산소절단이 불가능한 stainless steel, Cu, 비철금속의 切斷에 이용해 왔다. EB (electron beam) 절단 다음으로 절단면이 美麗하며 50mm 이상의 두께까지도 절단이 가능하다.

金屬의 plasma 熔解는 용접이나 절단에 비하여 大電力의 plasma 전원이 필요하며, 따라서 大電力 arc 발생장치가 필요하게 되었다. 또한 대전류에 견딜 수 있는 plasma torch의 제작과 사용시간 연장이라는 難題에 逢着하게 되었다. 그러나 서독, 동독, 소련, 미국등지에서 계속된 연구로 많은 발전을 보게 되었으며 현재 pilot plant 및 特殊鋼의 경우 量産體制에 돌입한 회사도 속출하고 있다.

본 해설에서는 plasma에 대한 일반의 기초이론과 Plasma process의 주철분야³⁾에 응용 그리고 제철 제강분야에 이용되고 있는 예, 즉 Krupp社의 A-C plasma 爐, Voest-Alpine (Austria)의 제강용 전기로, SKF社의 plasmamelt, Westing house社의 Mesabi Metal Project 등의 광석환원에 관하여 기술코저 한다.

2. 프라즈마의 基礎理論

Plasma란 자유로이 움직이는 陰陽의 荷電粒子가 共存하여 전체적으로는 中性을 띠우고 있으나 외부전위에 의하여 電氣傳導性을 가지는 가스체를 말한다.

기체중에 거의 같은 밀도로서 正이온과 전자가 잘 섞여 있고 원자나 분자 전체로서는 중성에 가까운 상태에 있는 가스체를 電離氣體 (ionized gas), 또는 plasma라 한다. 中性氣體와 다른점은 plasma기체는 電氣傳導性을 가지는 점이다. 입자들의 mobility가 크므로 熱傳導性이 우수하며, 또한 10~10² ohm⁻¹ cm⁻¹ 정도의 전기전도도를 가지고 粘度가 높은 특징을 가지고 있다.

19세기 말부터 여러 과학자들은 종래 알려졌던 물질 즉, 기체, 액체, 고체의 어느 것보다도 성질이 다른 제 4의 상태 즉, plasma 상태가 존재할 수 있음을 지적하였다. 1928년 Langmuir가 보통의 회박기체 방전관의 陽光柱 부분에 발생하는 陽荷電體와 陰荷電體 粒子들의 集合體 즉 plasma를 실험으로 증명하였으며, 그 때부터 plasma란 용어가 나오게 되었다.

Ar이나 He과 같은 單原子기체는 에너지를 얻어 勵起되어 전자를 방출하고 이온화된다. 그러나 H₂, N₂와 같은 가스체는 강하게 공유결합된 이원자분자로서 에너지를 받으면 여기되어 우선 각각의 원자로 解離되며, 이 때 필요한 에너지를 해리에너지 (dissociation energy)라 한다. 이 해리된 원자들이 에너지를 더 받으면 단원자기체에서와 같이 H⁺, N⁺ 이온과 전자로 이온화되며 이때 필요한 에너지를 이온화 에너지 (ionization energy)라 한다. 그림 1에는 H₂ 분자의 해리와 이온화⁴⁾를 나타내고 있으며, 그림 2에는 여러 가스체들의 해리 또는 이온화에너지 그리고 그 온도가 함께 표시되어 있다.

대기압하에서 모든 기체는 5~24eV에서 거의 모두 이온화 된다. 즉 온도로 환산하면 5,000~25,000°K에서는 모든 기체는 이온화된다. 금속분야에 사용되는 프라즈마 제너레이터의 온도를 약 10,000°K로 본다면 50~60% 이상이 이온화된다. 그러므로 반응

* 경북대학교 공과대학 금속공학과 교수

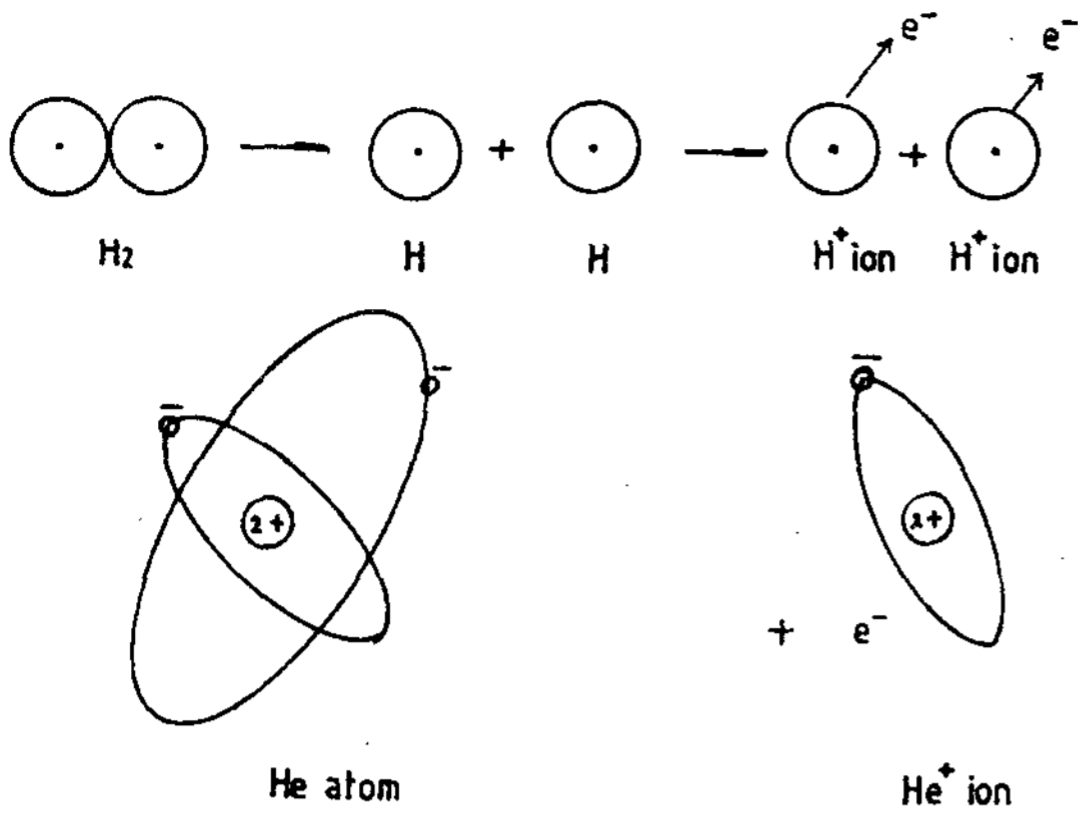


그림.1 Dissociation and ionization of H_2 molecule and He atom.

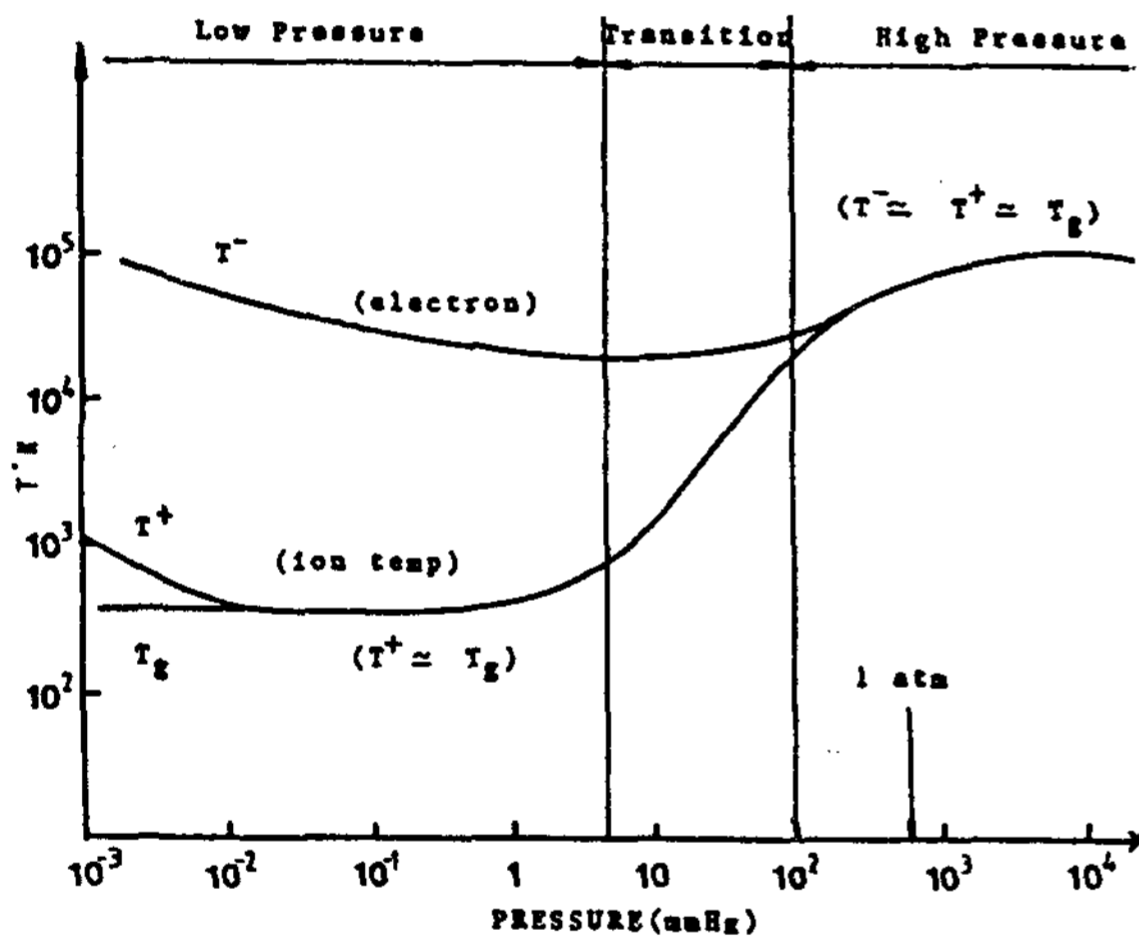


그림 3. Low and high pressure plasma arc and thermodynamic equilibrium.

가스를 이온화하여 反應速度를 증가시키거나 종래에는 불가능했던 반응을 가능케 하도록 연구하고 있다.

물질에는 또 다른 성질로서 低溫일지라도 높은 압력을 가하면 전자각이 파괴되어 전자와 핵의 혼합체를 이루는데 이것을 pressure ionization이라 한다. 1 기압은 약 10^5 Pa로서 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 높은 압력하에서는 전자와 이온의 온도가 동일하지만 低壓⁵⁾에서는 이온에 비하여 전자의 온도가 훨씬 높다.

3. 프라즈마 제너레이터

통상 전기 arc의 온도는 사용하는 전극재질의 融點이상의 온도는 기대할 수 없었으나 1923년 Gerdien H와 A.Lotz에 의하여 전극을 강제냉각 하므

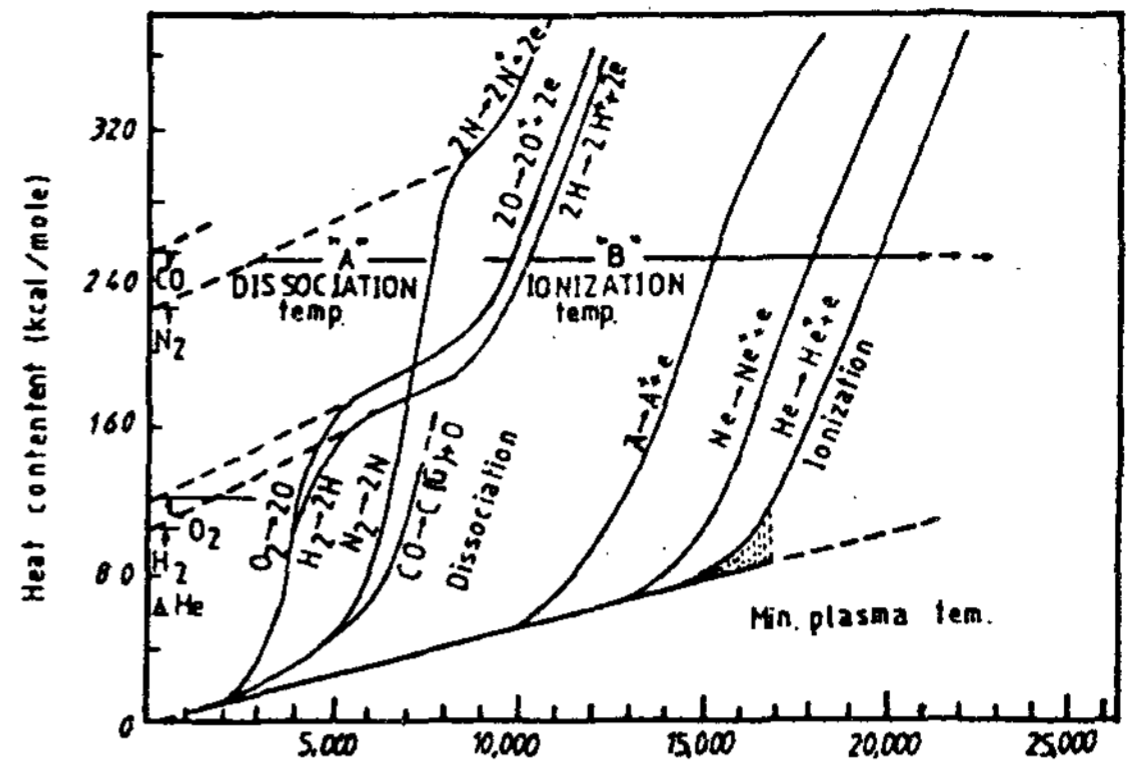


그림.2 Heat Content of monatomic and diatomic gases as a function of temperature of 1 atm.

로서 보다 고온의 arc를 얻을 수 있었다.

Canada의 union carbide⁶⁾社에서 처음으로 이와 같은 plasma jet를 금속의 精鍊에 이용하기 시작하였다. plasma를 좁은 통로 즉 노즐 (nozzle)부를 흐르게 하므로서 열의 集積 (thermal pinch effect) 효과와 magnetic pinch 효과가 이루어져 수만도의 高溫을 얻을 수 있다.

Thermal pinch effect.....직류를 사용하면 보다 안정한 arc를 얻을 수 있다. 그림 4와 같이 arc를 발생시켰을 때 arc stream이 발생한다. 가스를 노즐의 길고 좁은 통로를 통과시키면 熱의 集積으로 고온부가 발생하며 통과하는 가스는 해리하고 이온화되어 plasma flame으로 분출된다. 그러나 노즐은 강제냉각되고 있어 노즐벽부를 흐르는 가스는 칠링으로 냉각되어 중성가스로 되며 중성인 표피층을 만들어준다. 그러므로 arc stream은 노즐벽과 arc가 일어나는 등의 電氣的으로 아무런 제약을 받지 않고 노즐을 무난히 빠져 나와 flame를 이룬다. 오직 stream의 내부만은 이온체들이 강하게 흐르게 되며, 전류가 보다 안쪽으로 흐르게 되어 내측의 온도가 높아지는 현상을 thermal pinch effect라 한다.

Magnetic pinch effect 왼손의 엄지(F: 힘), 둘째손가락 (B: 자기장), 세째손가락 (i: 전류)을 서로 직각으로 펴면 플레밍의 왼손법칙이 된다. 즉 어떤 도선에 전류가 흐르게 되면 자기장이 발생하고 전류운반자는 구심력을 받아 내부로 조여지게 되며 전류밀도와 온도가 상승한다. 이러한 현상을 magnetic pinch effect (z-pinch)라 한다.

Plasma flame 중에 들어 있는 이온화 된 입자들

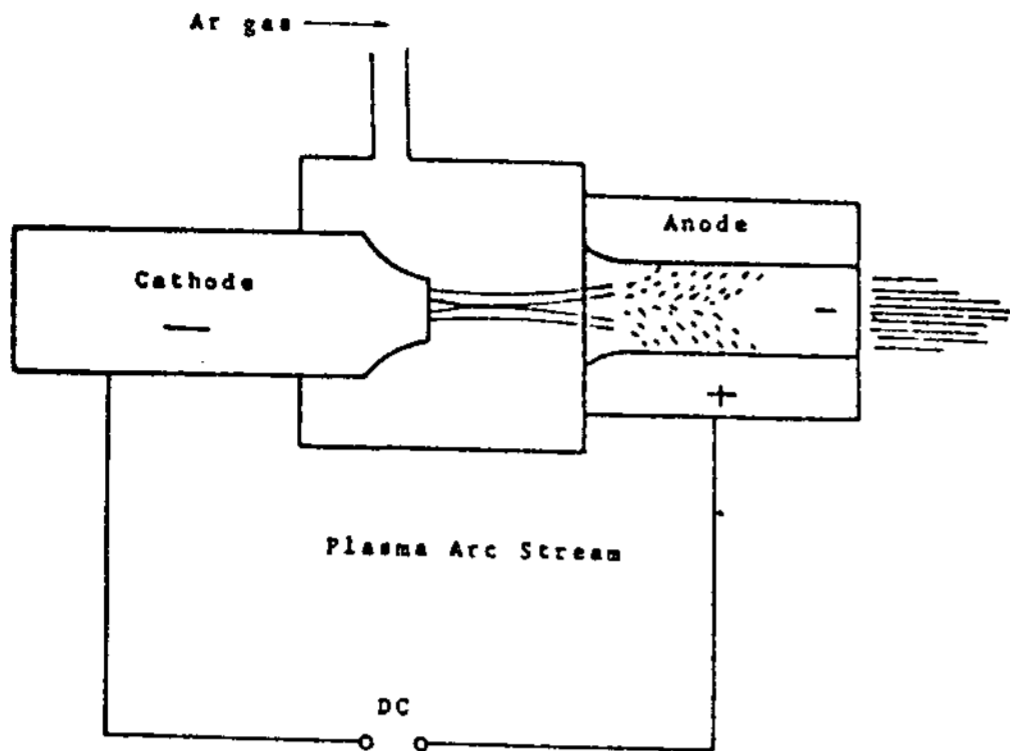
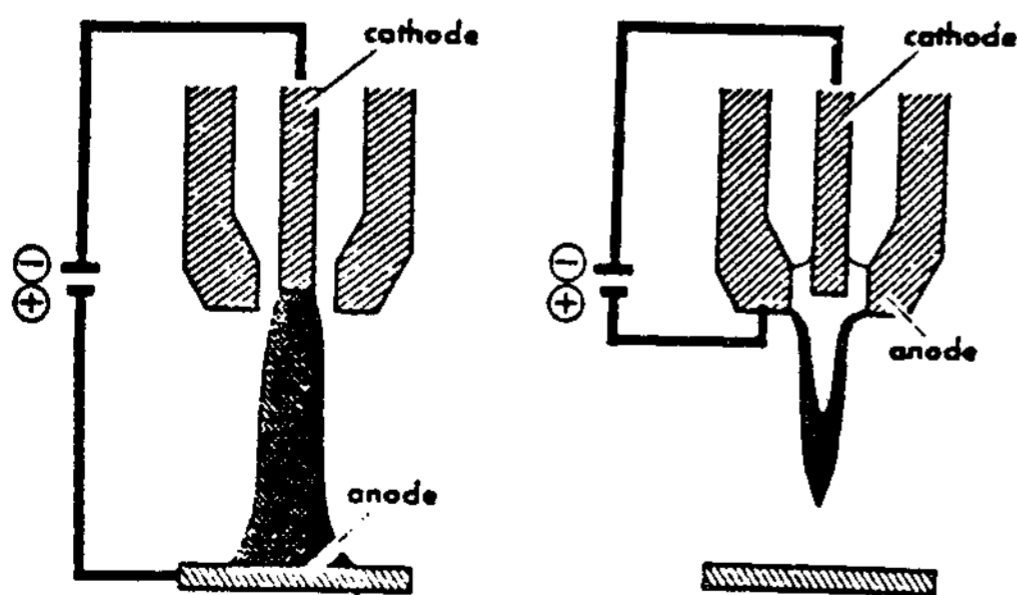


그림.4 Plasma generator

이 목적물에 충돌하면 이온과 전자들이 再結合하여 이온화에너지를 발산(Ar,He) 한다. N₂ 와 H₂ 와 같은 이원자분자들은 이온화에너지 이외에 결합에너지도 함께 발산하여 피가열물체를 가열한다. 이와같이 電氣에너지를 熱에너지로의 전환효율이 무려 80 ~ 85%에 이른다.

Plasma generator에는 여러가지 종류가 있으나 크게 나누어 移行型(transfer)과 非移行型(non-transfer) ⁷⁾ 으로 나눌 수 있다. 그림 5의 (a)와 같이 가열물체와 W陰極間에 arc가 일어나는것을 移行型이라 하며, (b) 그림과 같이 W-음극과 노즐간에 arc가 발생되는 plasma를 非移行型이라 하며 非傳導性 물질의 용해나 분사에 사용된다. plasma 발생을 돕기 위하여 점화초기에는 W음극과 노즐사이에서 Arc를 발생시켜 plasma를 일으킨 다음 이행형으로 Switch를 전환하여 사용하는 예도 있으며, 일반적으로 高周波스타터를 사용하고 있다.



(a) Transferred arc (b) Non-transferred arc

그림 5 Transfer (a) and non-transfer (b) plasma arc type.

Plasma 전원으로로서 DC를 사용해 왔으나 최근 Krupp社에서는 3相의 a-c plasma 발생기를 제작하였다. Plasma torch(generator)로서는 그림 6-(a)와 같이 W-棒을 수냉시켜 사용하고 있으며 노즐은 Cu合金으로서 역시 수냉시키고 있다. 그 이외에도 RF (radio frequency) ⁸⁾를 이용하여 그림 6-(b)와 같이 plasma를 발생시키는 예도 있으며, 粉體의 반응에 이용되고 있다.

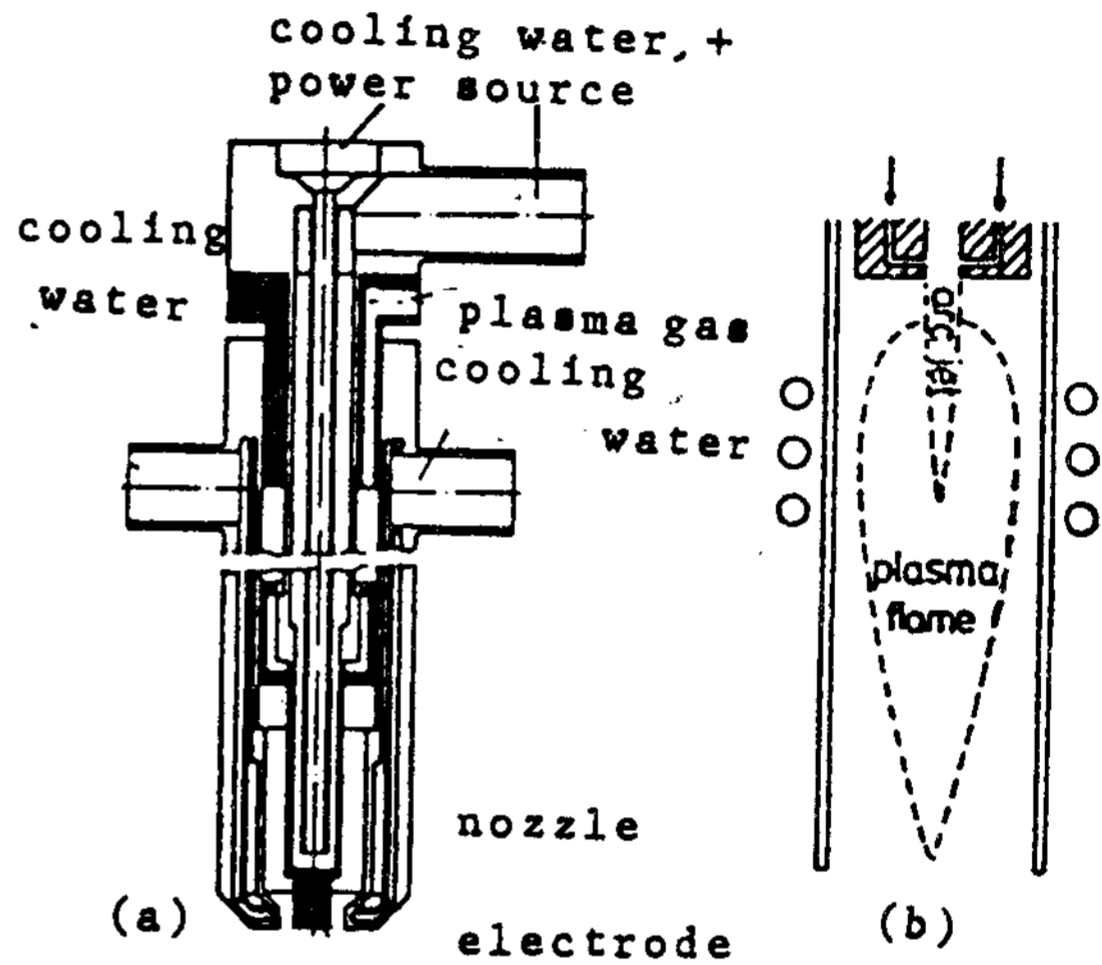


그림 6 Plasma arc type generator (a) and RF type plasma generator (b).

4. Plasma-fired Cupolas

Plasma는 고온을 얻을 수 있으므로 鐵鋼工業 즉, 금속의 切斷, 熔接, 熔射, 熔解 등에 이용되기 시작 이래, 최근에 이르러 주철의 용해에까지 이용되기 시작하였다. 1983년 Westinghouse⁹⁾社는 철삭소철을 주로 용해하는 60t/hr 규모의 cupola를 개조하였다. 또한 1985년 Westinghouse社와 EPRI는 그림 7과 같이 2.5t/hr 용량의 cupola를 설계제작하여 시험 운전하고 있다.

Plasma를 주철의 용해에 이용하므로써 코크스를 절감할 수 있으며, 공해문제를 해결할 수 있다. 1983년에 Westinghouse에서 고안(Westmelt)한 lathe chip 용해용 cupola와 재래식 cupola의 장단점을 원가면에서 비교검토코저 한다.

60ton 용량의 cupola를 plasma-fired cupola system으로 개조하였다. 즉 그림 8과 같이 기존의 cupola에 lathe chip 예열장치, 가스순환장치, 20 MW plasma system, chip장입장치 등을 부대시설

로 갖추었다. Plasma torch¹⁰⁾에 cupola의 환원가스 (CO+H₂)를 순환시킴으로서 용해대에還元性분위기를 유지할 수 있다. 또한 plasma가스는 순환되어 chip의 건조, 예열 및 예비환원 등에 사용된다.

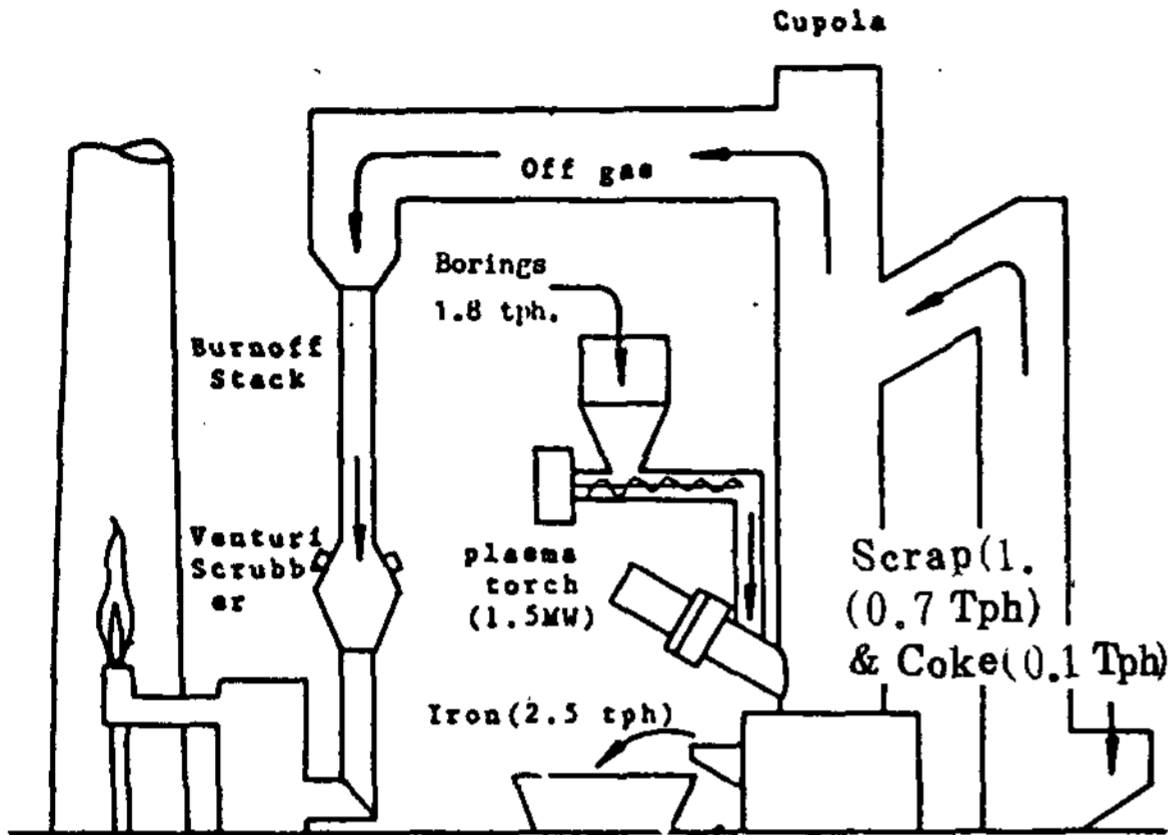


그림 7 Plasma fired cupola (WESTMELT... 2.5 TPH)

그림 8의 plasma-fired cupola의 작업순서를 보면 chip은 rotary drum形의 예열기에 장입되고 chip에 부착된 기름이나 산화물 등은 건조되고 환원되며 약 550°C로 가열된다. 예열된 chip은 순환가스에 의하여 보호되며 plasma stream의 상부에 기계적으로 장입된다. 장입구 직하의 환원가스를 회수하여 청정하고 냉각시켜 chip의 예열에 사용하며, 풍구에 다시 사용하고 있다. 이와같이 chip은 약 70% 사용하며 나머지 30%는 古鐵로서 장입구에 장입한다.

Plasma의 고온으로 cokes를 절감할 수 있는 동시에 공기사용량이 대폭 감소되며 따라서 공기청정비용이 절감된다. 또한 plasma 고열에 의한 SiO₂의 환원으로 Si가 증가되어 Fe-Si 사용량이 절감된다.

(표 1) 재래식 Cupola와 Plasma Cupole의 용해 원가 대비표

	Cupale		Cost. \$	Plasma Cupole	
	unit cost	Amount		Amount	Cost. \$
Ccke	\$165/ton	285 lb/THM	23.60	92 lbs/THM	7.59
Electricity (plasma)	\$.035/kwhr	395 kwhr	13.83
Natural gas	\$4/MBtu	0.46 MBtu	1.87	0.079 MBtu	0.32
Briquetting	\$13/ton	0.77 tons	10.00
Melt loss	\$68/ton	0.05 tons	2.38
Silicon	\$0.50/lb	54.1 lbs	27.06	48.4 lbs	24.21
Limestone	\$10/ton	0.043 tons	0.43	0.014 tons	0.13
Exhaust fan	\$.035/kwhr	18.6 kwhr	0.65	7.46 kwhr	0.26
Melling costs/THM			\$65.99		\$46.34
cost savings = \$19.65/ton					

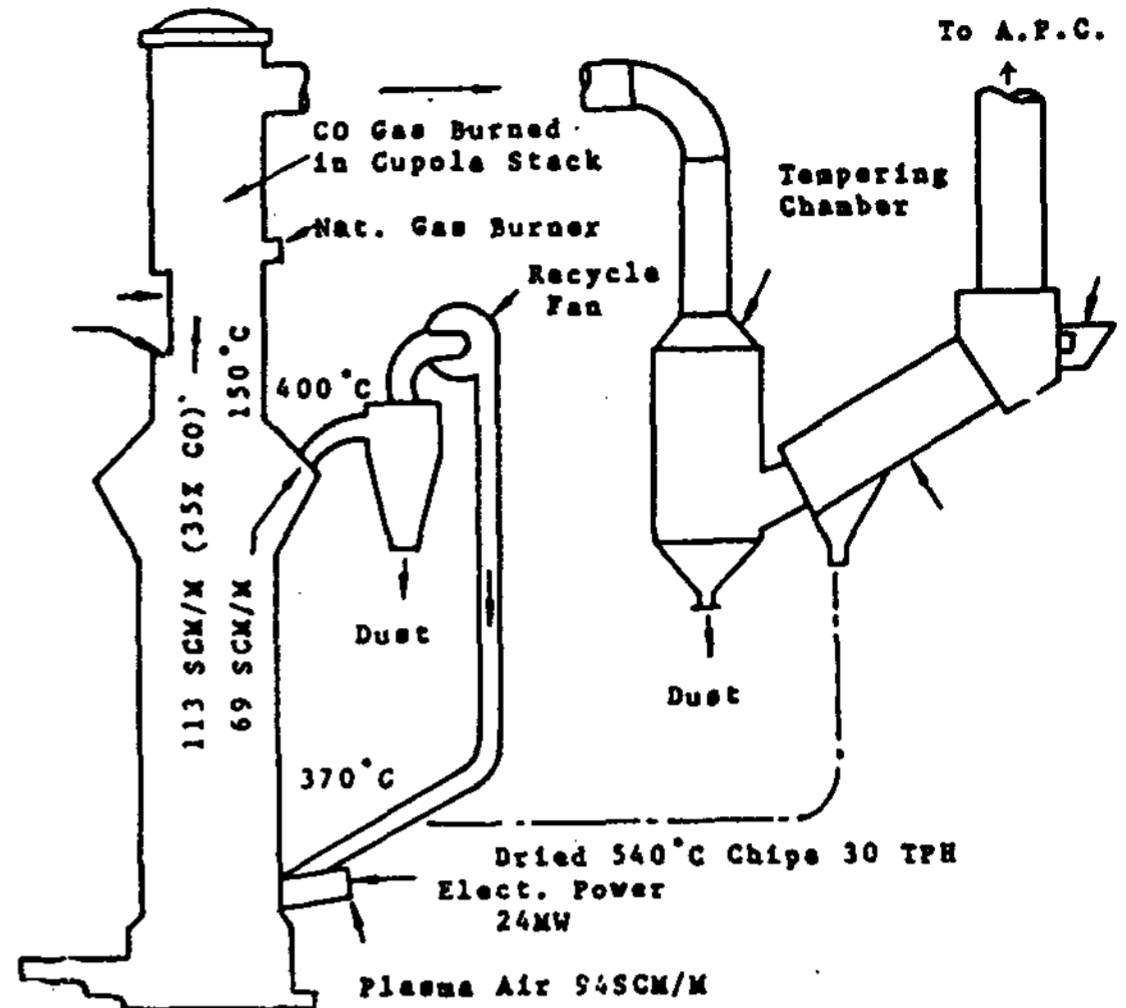


그림 8 WESTMELT plasma fired production cupola.

전체적으로 보아 生産性이 급격히 증가한다.

재래식 cupola를 plasma-fired cupola를 改良하는데 비용이 든다. tuyere를 plasma system으로 바꾸어야 하고 예열장치, 가스순환장치등을 새로 제작하여야 한다. 또한 plasma 발생전원시설과 가스순환시설의 동력, 자동제어에 필요한 전자설비를 갖추어야 한다. chip을 briquetting하거나 기름등의 汚物을 제거하는 費用을 가산한다면 2년 이내에 施設費를 充당할 수 있다.

표 1은 60ton/hr 용량 cupola의 생산원가 대비표이며, 1일 2교대로서 13.6 hr/D (240 D/Y), 70% chip와 30% 고철을 사용할 경우이다. 주철용량 1ton (1 THM)을 기준으로 하였음에 주의하여야 한다. 재래식 cupola와 plasma cupola의 생산원가 차이는 약 \$19.65/ton 정도의 차이를 나타낸다. 년

간 약 20 만톤의 생산량일 때, 연간 약 3.8M\$의 원가 절감을 가져온다. 그러므로 cupola 개조비용, plasma 전기발생장치 비용을 합하여 약 7.5M\$ 이라 한다면, 2~3 년이면 건설비용을 인출할 수 있다.

5. 결 론

두차례에 걸친 에너지과동 이후, 산업계는 에너지의 절약 방안과 새로운 에너지원의 발굴에 온힘을 기울여 왔다. 그 일환으로 plasma에 의하여 전기에너지를 열에너지로 전환하는 방법을 연구하게 되었다. Plasma가 제련분야에 이용되기 시작한 것은 최근의 일이며, 특히, 용사용접과 특수강의 용해에 커다란 진전을 보이고 있다. 더우기 고철을 용해하는 cupola에 까지 이용하기에 이르렀으며 고온을 얻을 수 있어 앞으로 고급주철의 용해에 적용될 전망이다. 최근에 들어 공해 문제가 크게 대두되고 있으며 plasma process는 폐기가스의 양이 극히 적으므로 공기의 오염이 적어 앞으로의 전망이 밝다.

参 考 文 献

- 1) 福原幹夫, 永井宏, 三谷裕康 : 日本金屬學會誌 第 42 卷 (1978) 588.
- 2) 掘井建男, 磯野穰 : 金屬 48(3)(1978) 30.
- 3) Thunberg S.L, W.J. Melilli and W.H. Reed : Iron and steel Int., Dec(1983) 207.
- 4) 金台東, 曹龍煥, 金東義 : 대한금속학회지 24(2) (1986) 176.
- 5) Chang C.W. and J.Szekely : J. of Metals, Feb(1982) 57.
- 6) Magnolo G. : The Can. Min. and Met. Jan(1964) 57.
- 7) Neuschutz D. : H.Rossner, H.J. Bebbber, J.Hartwig ; Iron and steel Engineer, May(1985) 27.
- 8) 吉田豊信, 明石和夫 : 鐵と鋼 68(10) (1982) 1498
- 9) Fey M. G : Iron and steel Eng. : May (1985) 38.
- 10) Demborsky V : Plasma Metallurgy, Elsevier SC. Publishing Co., INC, (1985) 237.

國內外 鑄物關係行事

◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆
1986 年
◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

7月18日~7月19日
韓國鑄造工學會
86年度 優秀鑄物技術講演會
경주코오롱호텔, 慶州市 韓國
8月1日~8月2日
大韓金屬學會
86年度 優秀學術講演會
韓國機械研究所, 昌原市 韓國
9月1日~9月5日
International Symposia and Exhibitions, Ltd
Metals Engineering '86
National Exhibition Centre, Birmingham, England

9月7日~9月12日
International Committee of Foundry Technical Associations 53rd International Foundry Congress
Prague, Czechoslovakia
9月26日~9月29日
日本鑄物協會
第110回全國講演大會
秋田文化會館, 秋田市, 日本
10月20日~10月23日
Foundry Institution of the Chinese Mechanical Engineering Society
International Foundry Conference and Exhibition Beijing, People's Republic of China.