

(1)

成 英 權*
(Young Kwon Sung)

머 리 말

1960년대에 들어가서 核融合의 연구에 자극되어 세계 각국에서 plasma의 연구가 급속히 활발해졌다. 특히 이 plasma가 새로운 에너지源, 또는 에너지變換의 媒體로서 여러가지 가능성을 가지고 있기 때문에 더욱 그렇다. 예를들면 plasma에 의한 核融合 반응장치라던지 plasma jet에 의한 재료가공, plasma rocket, plasma를 이용한 micro波 회로소자, 電磁流體적접발전 (magneto hydro dynamic 즉 MHD 발전)등 “plasma”라는 말이 전기, 전자, 통신공학 등은 물론 기계공학, 우주공학, 원자력공학등 여러 분야에서 화제되고, 특히 새로운 에너지源의 개발이라는 見地에서 대단히 중요한 과제로 등장하고 있다. 예를 들어 MHD 발전을 본다면 總合능율이 이론적으로 70% 이상에 달하고 실용적으로도 55~60%의 고능율(최신예 火力발전이라도 40%정도)이 기대되는 것에서 大出力발전에 이용하고자 제법 급속히 실용화에의 연구가 진행되고 있다.

따라서 本講에서는 이러한 plasma가 지니는 여러가지 과제의 전망과 이들에 공통한 plasma 물성의 기초를 전기공학과 관련시켜서 내다볼까 한다.

1. Plasma의 역사와 그 응용의 전망

Plasma라는 것은 널리알려지고 있는 바와 같이 많은 positive ion과 negative electron 등의 電荷 입자의 모임으로 이루어지고 전체로서는 거의 전기적으로 중성을 지니면서 높은 전기전도도를 나타내는 물질상태의 총칭이다. 옛날부터 알려져있는 기체방전에 의하여 생기는 기체 plasma도 그 一例이나, 금속, 반도체등의 전기전도도도 고체 plasma라고 볼수가 있다. 이와 같은 plasma상태는 기체, 액체, 고체등의 물질의 3態에 이어 제4의 물질의 상태라고 볼수 있으며 태양을 비롯하여 우주에 존재하는 물질전체의 99.9%를 차지하고 있다고 한다. 이 plasma라는 말자체는 1839년 켈코의 생물학자인 J. Purkynic라는 사람이 생물의 세포체를 구성하고 있는

제 1 표 plasma 연구의 역사

定 性 的 的 高 찰		
1831~35	Faraday	Glow방전의 관측
1879	Crookes	음극선의 관측
1897	J.J. Thomson	e/m의 측정과 전자의 발견
mean free path와 충돌		
1903	Townsend	電離係數 $\alpha(E/p)$ 의 측정 Conduction of Electricity의 발행
1905	Langevin	이온 移動度의 이론
1905	Lorentz	Beltzmann이론을 Lorentz 기체에 적용
1913	Frank & Hertz	散亂실험과 에너지 level의 발견
space charge		
1913	Langmuir	空間電荷전도론
1920	Saha	熱電離平衡式
1924	Langmuir	探針理論
1928	Langmuir & Tonks	plasma 진동
1930	Druyvesteyn	電子分布
우주의 電離 plasma		
1932	Cowling	磁場속의 전도도
1937	Alfvén	은하계의 磁場
1938	Vlasov	plasma 電子波
1942	Alfvén	MHD波와 黑點
1948	Baily	비임 plasma 不安定性
1954	Kruskal & Schwarzschild	plasma 柱의 不安定性

원형질에 이름 붙인것이 시작이라고 한다.

이와 같은 plasma에 대해서 전기관계에 관련된 연구는 제1표에 나타낸것처럼 진공펌프와 더불어 시작하여 1831년~1835년 Faraday에 의해 glow방전이 관측되었다

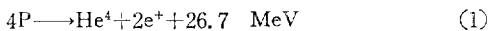
* 正會員：高火 理工大 電氣工學科 教授

럼프의 진공도가 높아짐에 따라 Crookes 암부, 곧 이어 1897년 J.J. Thomson 에 의한 음극에서의 빔, 즉 전자의 발견이 잇따라 소위 근대물리학 탄생의 실마리로 되어 있던 것이다. 1900년 이후 J.S. Townsend 가 전자의 눈사태 (electron avalanche)에 의거하는 기체절연과파 이론을 완성하고 mean free path, mobility, diffusion coefficient 등의 기체운동론의 기초를 세웠다. 그 뒤 1918년~1930년대에 있어서의 Langmuir 에 의한 space charge theory, sheath, Langmuir 探針, Langmuir paradox 와 plasma 진동의 발견등을 겪어 1930년~1950년대에 이르러 Ionosphere 중의 전파傳播이나 星間物質의 운동등의 天體물리에 관해서 Alfvén 등의 天文학자들에게 의해 자장중의 plasma 가 이론적으로 추구되고 1950년 이후에 드디어 核融合, 宇宙비행을 위한 plasma 추진rocket, MHD 발전등에 의한 에너지 변환이 등장하게 되자 plasma 가 또다시 화려하게 脚光을 받아 이 방면의 기초, 응용연구가 전진 여러나라에서 급격히 활발해졌은 널리 알려져와 같다. 특히 최근에와서는 高溫, 高電離 plasma 의 behavior 에 관심이 쏟아지고 있는 현상이다.

여기에서는 최근의 plasma 응용의 기초를 특히 기체 plasma 와 고체 plasma 와의 상호관계를 생각하면서 서설코져 한다.

우선 plasma 를 생성시키기 위해서는 여러가지 방법이 있으나 요는 많은 중성분자나 원자를 電離시키면 되니까 그 電離 방법만을 잘 강구하면 된다. 즉 衝突電離, 光電離 熱電離등이 있으나 대표적인 것은 제 2 표와 같다. 제 2 표는 plasma 의 생성법(電離法)과 그에 의해서 생긴 plasma 의 특징을 나타낸 것이다.

가령 태양은



라는 核融合反應을 일으키는 자연계의 초고온 plasma 核融合爐로서 밀도 $10^{14}/cc$ 이상의 完全電離 plasma 로 이루어져 이들의 고온입자는 태양자신의 重力場에 의해 갇혀지고 있다. (confinement) 이 고온 plasma 로부터 막대한 輻射가 우주에 방사되어 그중의 短波長성분 (X선, 자외선등) 이 지구위의 大氣層을 電離해서 일종의 plasma 인 ionosphere 를 형성 한다. 이 ionosphere 의 外側에도 우주선에 의해서 생긴 전자-proton 이나 태양으로부터 나온 plasma 流가 지구磁場에 갇혀지고 있는 van Allen 帶가 있다. 大氣層을 통과한 나머지 태양 輻射에너지는 지구위에 쏟아져 낮의 照明源이 되고 海水를 증발시켜서 비를 내리게 하거나 석탄, 석유등의 化石鑛物을 만듦으로써 지구상의 근원적인 에너지源으로되고 있다. 따라서 현재까지의 대다수의 공업적인 에너지源이 태양 plasma 의 간접, 또는 직접적인 응용에 의태하고

제2표 plasma 생성법과 그 특징 (단(T, T:는 각각 전자 이온의 온도))

생 성 법	기 체	고 체	특 징
熱 電 離	C _s plasma	보통의 반도체 plasma	熱平衡 T _e =T _i
	K plasma		Boltzmann分布
	火焰 plasma		
	大電流 arc MHD plasma		
衝突電離	보통의 glow 방전	PN接合속의 micro plasma	非熱平衡 T _e >T _i Druryvesteyn 分布
	螢光燈	cryosar	不安定
核融合熱	P-P, D-D, D-T 반응태양 지상의 融合爐		T _e =T _i 超高溫 10 ⁷ °K (완전電離)
방 사 선	ionosphere 방사선 plasma	光電導體속의 plasma	非熱平衡 T _e >T _i
Schock wave	비행체突入時의 plasma sheath Schock tube 속의 plasma		非熱平衡 T _e >T _i

있는 것이다. 따라서 지구상에서 완전電離 plasma 에서의 D-D, D-T 反應 (D: 重水素, T: tritium)으로 小型의 태양에 해당하는 核融合爐를 만들어서 에너지源으로 삼으려고 하는 核融合의 연구가 시작되어 장래에 전망되는 막대한 에너지 需要의 증가와 연료자원의 고갈에 대처하기 위해 큰 연구제목으로 지목되었으나 현재 그 磁場에 의한 confinement 하는 방법이나 融合반응을 點火하는 데 필요한 數億度의 온도까지 plasma 를 가열 (heating) 하는 방법등의 점에서 여러가지 곤란한 문제를 안고 있어서 결국 아직 근본적으로 plasma 물리를 추구해서 고온 plasma 의 本性을 밝히는 것이 현단계에서는 필수 조건이라는 것이다. 이 외에도 照明을 위시하여 plasma 의 응용은 여러가지 생각할 수가 있으나 그 대체적인 분류를 나타내면 제 3 표와 같다. 이들의 응용으로 최근에는 우주 개발에 관해서 특히 plasma 와 電磁波의 상호작용이 문제로 되어 있다. 즉 우주 rocket 나 우주선 등이 大氣圈에 突入할 때와 같이 超音速비행체가 저기압 gas 속에 들어가면, 그림 1 처럼 그 shock wave 의 電離作用으로 생긴 plasma sheath 와 wake 에 둘러 쌓아 버린다.

이와 같은 plasma 는 後述하는 plasma 진동수

$$\omega_p = (ne^2/\epsilon_0 m)^{1/2} \quad (2)$$

(단 n: 전자밀도, m: 전자질량, e: 전자전하 ϵ_0 : 진공유전율) 이하의 주파수의 전파를 반사하기 때문에 rocket 와 지

제 3 표 plasma 의 응용

		기 체	교 체
a	전기전도도 및 switching 을 이용하는 것	수은 정류기 Thyratron MHD 발전 plasma熱電發電 G.M counter 定電壓방전관	반도체 정류기 SCR Cryosar Zener diode SiC 피뢰기 Silicon controlled
b	輻射를 이용하는 것	형광등 수은등 잡음표준 plasma laser	E.L PN 접합반도체 laur
c	電磁波와의 상호작용을 이용하는 것	plasma 증폭 주파수 제배 cérenkov 발진기 ionosphere의 반사를 이용한 통신 TR관 이상기, 감쇠기 plasma 도파관	감쇠 Oscillator Trinsperitter
d	核融合에 너지를 이용하는 것		
e	plasma jet의 운동등을 이용하는 것	plasma 추진 rocket	
f	기 타	이온源 (Duo-plasmatron)	PN접합plasma源

우주선이 보통의 화학적 rocket 연료를 사용해서 일단 지구의 重力場밖으로 나가면 그때는 큰 推力은 필요 없고 오히려 장거리宇宙 비행에서의 연료경제가 문제시 된다. 이때문에 plasma jet등의 전기적 추진이 유리하게 된다. 그림 2는 연료의 단위중량당의 힘과 단위중량당의 力積과의 관계를 나타낸 것으로 우주추진에는 ion rocket 등이 specific impulse 의 점에서 유리하다는 것을 알 수가 있다. 이와 같은 plasma jet 의 방식으로 다음 두가지 를 생각할 수 있다,

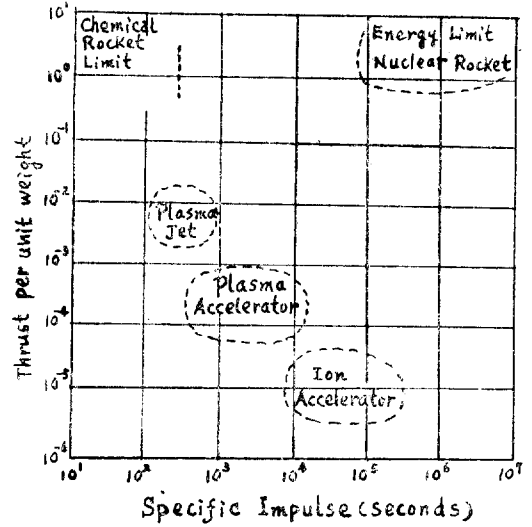


그림 2. Impulse-thrust relation

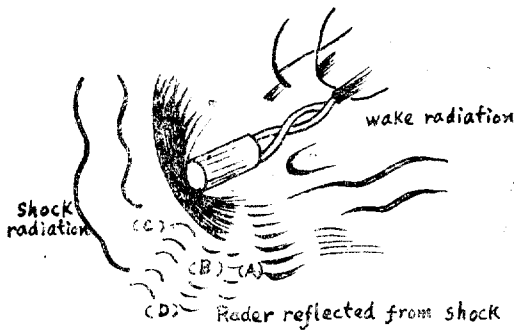


그림 1. Plasma sheath와 wake

상과의 통신이 불가능해져서(black out)rocket등의 제어가 안되게 된다. 또 plasma sheath가 발생하면 rocket의 radar波의 斷面積이 변화한다.

다음에 우주선등의 plasma 추진에 대해서 생각해 본다.

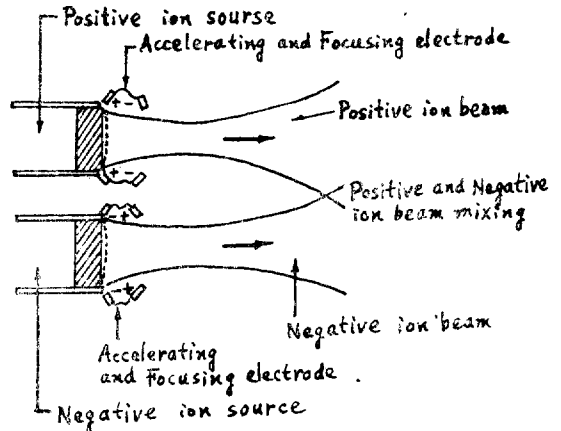


그림 3. Ion rocket

(1) ion의 靜電加速에 의한것, 또는 ion rocket

그림 3과 같이 C₆₀ 등의 熱電離로 인해 생긴 正 ion과 空間電荷中和용의 負 ion(전자)를 靜電界에서 분출시킨다. 이외에도 그림 4와 같은 Duoplasmatron을 사용한 rocket도 생각할 수가 있다.

로 분출시키는 것으로 그 예를 나타내면 그림 5와 같다.

참고로 실험실용 plasma jet의 발생장치를 그리면 그림 6과 같은 것으로서 충분하며, 그 전원은 arc의 극성

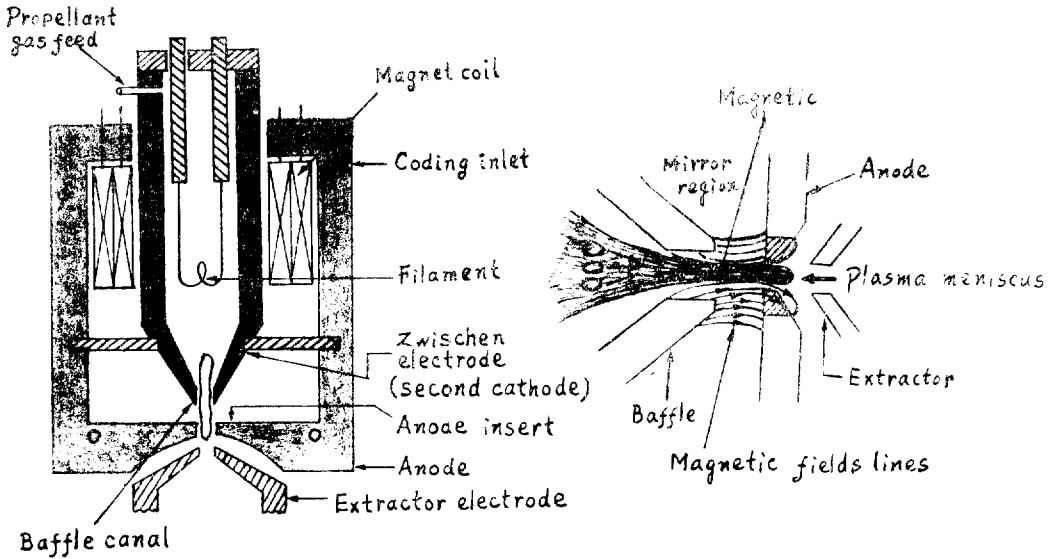


그림 4. Duoplasmatron rocket

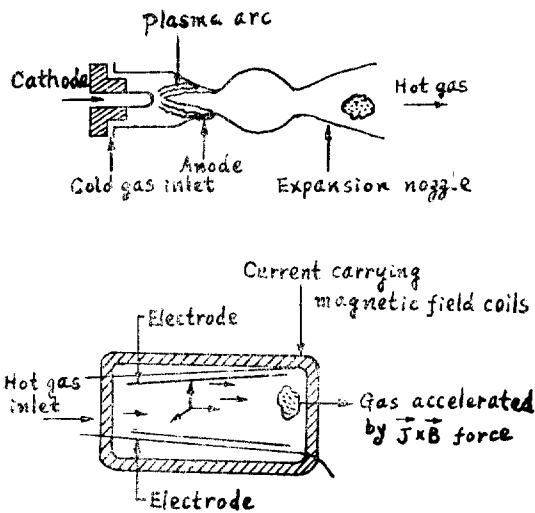


그림 5. MHD

(2) MHD 추진

전체로서 중성의 plasma를 연맹장이나 磁界의 힘으

에 적합한 것이 사용된다. 그 발생 장치의 내부는 圖示한 바와 같이 간단하고 전극에는 탄소, 텅스텐 또는 구리가 사용되며 모두 水冷해야 한다. 음극의 중심에는 작은 구멍이 뚫어져 있어 이곳부터 plasma가 분출하는 것이다. 극성은 때에 따라서 역으로 하는 경우도 있다. 보통 고주파방전에 의해 기동하고 양극간에 arc를 點火시켜 그림의 오른쪽 위의 파이프로 부터 넣은 냉각가스의 선회 기류에 의해 arc plasma의 주위를 냉각한다. arc plasma는 표면이 냉각하면 가늘하게 되고 (이것을 熱 pinch 효과라고 한다), plasma내부의 전류 밀도가 증대해서 기열효과가 높아져서 온도가 상승한다. 선회 기류에 의해 안정화 되고 아울러 고온도로 되면 전극의 작은 구멍부터 plasma가 분출하여 plasma jet가 형성된다.

이러한 plasma jet를 사용하면 약 1만도~5만도 정도의 고온 plasma를 정상적으로 발생시킬 수 있기 때문에 앞서 말한 rocket, missile 외에도 plasma 자체의 연구역의 이용, 금속 비금속의 용해, 용사, 용접, 용관 또는 저로 시험등에 널리 응용되고 있다.

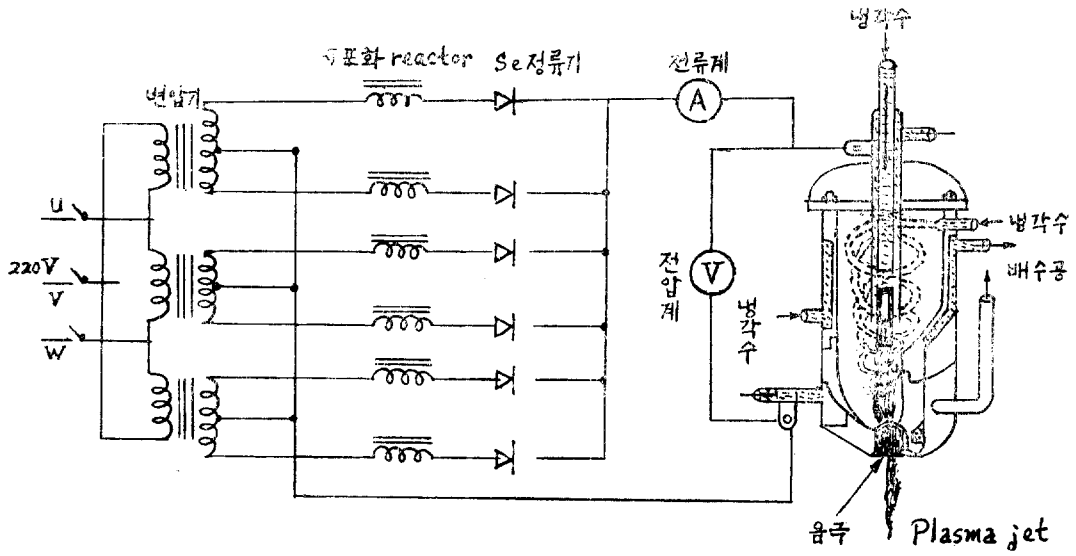


그림 6. plasma jet 발생장치