

分光學의 方法에 의한 Plasma Jet의 溫度分布 測定

論 文
26~2~9

Spectroscopic Measurement of Temperature Distribution in Some Plasma Jets

田 春 生* 朴 鏞 寬** 林 明 善***

(Choon Saing Jhoun, Yong Kwan Park, Myung Sun Lim)

Abstract

This paper investigates temperature distribution of plasma jets which used argon gas, and nitrogen gas mixed with argon as working fluids in spectroscopic method, and studies correlations between them.

Main results are as follows;

- 1) The temperature at the center of plasma jet increases with arc current and gas flow, and decreases with magnetic flux density along the axial direction.
- 2) The changing rate of temperature of plasma jet in the radial direction decreases rapidly beyond 2mm from central axis.
- 3) Temperature drop rate of plasma jet in the central axis direction appears most apparant beyond 13mm above the nozzle exit.
- 4) When argon gas mixed with a small amount of nitrogen, plasma temperature increases at same arc current compared with the case of argon gas only.

1. 序 論

氣體의 溫度測定에 關한 研究는 오래前부터 行해져 왔으며 특히 炭化水素等的 燃燒火煙에 對해서는 約 90 年間的 歷史를 가지고 있다.

近年에는 超音速飛行, plasma 加速器에 의한 空間 推進, MHD, pinch制御에 의한 超高溫 plasma의 發生等 plasma 科學의 急速한 發達과 關連하여 高溫領域에서의 重要性이 새삼스럽게 認識하게 되었다.

溫度는 plasma 中の 粒子의 에너지狀態를 記述하는 重要한 物理量이며 이것은 同時에 各粒子의 密度, 導電率의 諸量과도 密接한 關連이 있어 plasma 診斷上의 有力한 手段으로서 그 精密測定에 對한 要望이 점점 높아지고 있다.

溫度測定에는 여러가지 原理에 基礎를 둔 方法들이

있지만 光學的 및 分光學의 方法은 一般的으로 資料의 再現性이 良好하고 無接觸이고 非破壞의이고 條件에 따라서는 時間的 分解나 溫度分布의 解析도 할 수 있는 등 여러가지 利點을 갖고 있으므로 널리 利用되고 있다.

plasma jet의 溫度測定 技術의 發展에 關해서는 여러가지 경우가 있으나 그 結果는 Hettel⁽²⁾ 등의 報告書에 要約되고 있다.

分光學의 方法에 의한 溫度測定의 例로서는 連續 spectrum 等的 強度를 利用하는 方法, 連續 spectrum 의 2重線의 強度比를 利用하는 것, argon線의 輝線強度比, 線強度分布, 線絕對強度, Fowler-Milne의 方法, Boltzmann plot法 등이 있다.

또 Knopp等은 分光學의 溫度測定法에 對하여 概說하고 Tourin은 Ryan等이 行한 여러가지 方法에 의한 測定結果를 要約紹介하였다. 生井等은 分光學의 方法과 熱力學的 計算에 의하여 구한 溫度와의 사이에는 큰 差가 있는 것을 提示하였다. 以外에도 Doppler幅, Stark 幅에 의한 溫度測定, Thomson散亂에 의한 電子密度,

* 正會員: 仁荷大工大電氣工學科教授(工博)當學會編修委員

** 正會員: 大田工專 電氣科 教授

*** 正會員: 蔚山工專 電氣科 講師

接受日字: 1977年 2月 8日

電子溫度, ion溫度等の 測定, 電子線, α線, X線等の 吸收回轉 spectrum, 振動 spectrum 強度分析等에 의한 測定²⁾의 例가 있다.

本 論文에서는 以上の 分光學의 方法中 2輝線強度比^{1),2),3)}의 測定法을 채용하여 作動가스로 argon과 argon이 窒素를 混合한 氣體를 使用한 두가지 경우에 대하여 plasma jet의 溫度를 測定하였다. 즉, plasma jet의 溫度制御 變數로써 plasma arc 電流, 作動가스의 流量 및 軸方向 磁界의 세기를 취하고, 이들의 값을 變化시켰을 때의 plasma jet의 溫度分布의 變動을 半徑方向과 軸方向에 對하여 調査하였다.

2. 基本理論

分光學 方法에 의한 plasma jet의 溫度測定 方法을 理論的으로 解析하면 다음과 같다.

上位準位 n 으로부터 下位準位 m 으로의 遷位하는데 對한 輝線의 放射強度는 다음式으로 주어진다.

$$I_{nm} = N_n A_{nm} / \nu_{nm}^{6,11,13}) \quad (1)$$

式(1)에서 I_{nm} : 輝線의 放射強度

N_n : n 에너지狀態에 있는 單位體積當 原子의 數

A_{nm} : n 으로부터 m 으로의 遷位確率

h : Planck 常數

ν_{nm} : 振動數

만약 plasma 불꽃이 局部的 熱平衡狀態에 있다고 할때 單位體積當 勵起狀態의 原子數는 Boltzmann 分布에 依하여 다음과 같이 된다.

$$N_n = N_0 \frac{g_n}{Z_0} e^{-E_n/kT} \quad (2)$$

N_0 : 單位體積當 中性原子의 總數

Z_0 : 中性原子에 對한 모든 에너지狀態에 있어서의 內部分割函數

g_n : 上位에너지狀態에 있어서의 統計重價

E_n : 準位 n 의 勵起에너지

따라서 (1)式과 (2)式에 依해서 輝線의 放射強度는

$$I_{nm} = A_{nm} \nu_{nm} h N_0 \frac{g_n}{Z_0} e^{-E_n/kT} \quad (3)$$

로 주어진다.

여기서 I_{nm} 은 分光器를 利用해서 주어진 波長에 對한 에너지 세기를 起電力으로 變換하여 決定할 수 있고 또 ν_{nm} , g_n , E_n 등은 計算으로 求할 수 있는 것이지만 A_{nm} 은 지금까지 研究公表되고 있는 값을 採擇할 수 있다.

Abel變換^{1),2)}에 依하면 plasma 中에 있는 한 點에서 特定輝線의 세기가 最大가 되는 溫度를 T_m 라 하면

그밖의 點의 溫度는 이것에 對한 放射強度 크기의 比로부터 計算된다. 이것을 Lorentz方法^{2),4)}이라 부른다. 또 T_m 가 存在하지 않을 때에도 適當한 方法으로 plasma 中의 어떤 한 點의 溫度를 求한후 溫度와 輝線強度의 相關關係로부터 溫度分布를 求할 수 있지만 이 경우에는 壓力을 알고 狀態方程式, Saha^{2),6),11),14)}式等을 利用해서 計算으로 求해야 한다.

위의 方法은 溫度를 決定하기 爲해서 中性原子의 數 內部分割函數等을 決定해야 하는데 2輝線의 強度比法을 利用하면 이들의 量을 알 必要가 없다.

同一한 空間에서 放射된 2輝線의 強度比^{1),3),4),6)}를 取하면

$$\frac{I_{nm}}{I_{kg}} = \frac{g_n \nu_{nm} A_{nm}}{g_k \nu_{ki} A_{ki}} \exp\left(-\frac{E_n - E_k}{kT}\right) \quad (4)$$

가 되고 이때의 溫度는 다음式에서 求해 진다.

$$T = \frac{E_n - E_k}{k \ln(g_n \nu_{nm} A_{nm} I_{ki} / g_k \nu_{ki} A_{ki} I_{nm})} \quad (4,6,16,17)$$

이 方法은 波長差가 充分히 적게 될때 受光器의 波長感度特性을 無視할 수 있고 더욱이 2輝線의 強度가 大略 같은 程度가 되면 自己吸收에 依해 相殺되는 것이다.

그러나 이 方法의 短點은 遷移確率값이 不正確하기 때문에 대단히 큰 誤差가 생기게 된다. 이것을 피하기 爲해 Boltzmann plot法⁴⁾도 併用하여 使用한다.

즉 (3)式의 양변에 對數를 취하면

$$\log \frac{I_{nm}}{A_{nm} g_n \nu_{nm}} = -\frac{\log e}{kT} E_n + \text{const} \quad (5,15,17)$$

各 輝線에 있어서 $\log(I_{nm}/A_{nm} g_n \nu_{nm})$ 을 計算하고 E_n 에 對해 plot하면 그린 點들을 通過하는 平均的인 直線의 句配가 $-\log e/kT$ 가 되므로 이 勾配로부터 溫度를 求할 수 있다.

3. 實驗裝置

3-1. Plasma Jet 發生裝置⁹⁾,

plasma jet 發生器는 電氣의 入力을 供給하는 電源 回路, 作動氣體 供給用의 가스시린다 起動用 高周波發 生部, 冷却水 循環系統 및 發生器 本位로 構成되어 있다(Fig. 1).

電源은 3相 220(V), 200(A)의 交流電源을 整流할 수 있는 定格出力 400(V), 200(A)의 실리콘整流器를 利用하였으며 出力電壓은 作動氣體를 使用함에 있어 起動에 支障이 없게끔 한 것이다.

또 動作時의 電壓—電流에 適當한 垂下特性을 출 수 있게끔 電流容量 200(A)의 可飽和리액터를 使用하였 다.

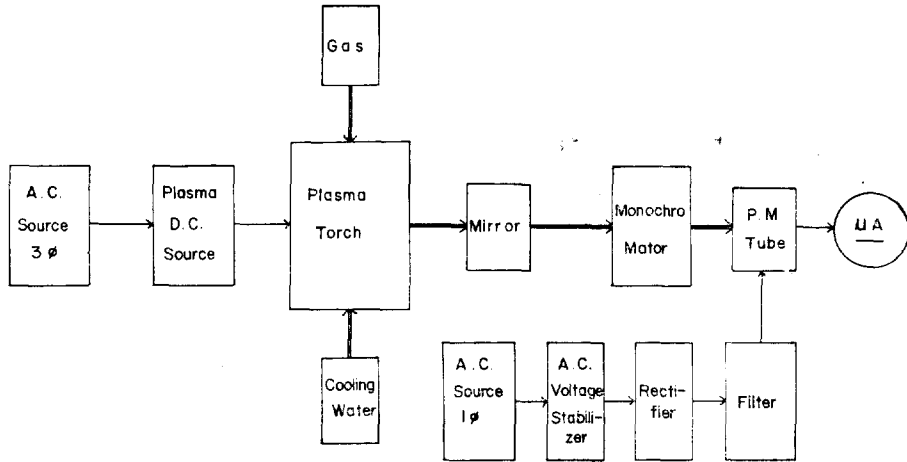


Fig. 1. Block diagram of experimental system

또, 電壓變動에 의한 plasma jet의 安定을 爲하고 整流器 出力電壓의 脈動率을 적게 하기 爲하여 L形 Filter를 使用하였다.

3-2. 分光器

本 實驗에서 使用한 分光器는 日本島津製作所 強力 monochromator (33-86-25)이며 이는 波長範圍가 350~800mμ이다. 또 分散도가 6.4mμ/mm, 크기가 33×33×3.2mm인 回析格子를 가지고 있다.

3-3. 磁界裝置

磁界 coil은 電流容量 150(A)의 vinyl 絕緣電線을 200회로 空心 solenoid形으로 감은 것이며 直徑 40cm, 높이 20cm 程度의 外形을 갖는다. 磁界變動을 極小化하기 爲하여 L形 filter를 使用하여 脈動率을 적게 하였다. 磁界變化는 流入하는 電流와 出口의 磁束密度를 미리 磁束計(日本 Yokogawa Co.製)를 使用하여 曲線으로 그려놓고 電源整流器의 電源電壓을 變化시켜 入力電流를 調整하였다.

3-4. 光電子 増倍管에 連結된 D.C. 電源裝置

本 實驗에서 plasma jet의 spectrum 強度를 測定하기 爲하여 使用한 光電子増倍管은 type RCA-5819이다.

이 増倍管이 必要로 하는 D.C. 電源裝置는 交流 100V를 整流할 수 있는 定格出力 50(mA), 400(V)의 다이오드를 bridge로 連結한 것이다. type RCA-5819 増倍管은 電子増倍率이 2×10^6 이므로 供給電壓을 安定化 시키기 爲하여 電壓安定器(General Electronics, 1919Y 140)를 使用하여 D.C. 1,000(V)를 供給하게 하였다.

3-5. Plasma流의 側面으로부터 Spectral 強度 profile을 얻기 爲한 測定裝置

Fig. 2에서 plasma 앞에 幅 1(mm)의 slit를 놓고 驅動裝置를 調整하여 움직이게 하였고 plasma flame의 中心에서 半徑方向에 따라 放射強度를 測定하면서 溫度를 求한다. 驅動裝置는 gear를 고정시켜 놓고 이 gear와 slit(幅 1mm, 길이 10mm)를 連結하여 gear를 돌리면 slit가 움직이게끔 한 것이다. 表面鏡은 두께 0.5(mm), 크기는 40×30(mm)이 알루미늄 眞空蒸着 시킨 것이다.

4. 實驗結果 및 考察

에너지 集中度가 比較的 좋은 plasma jet의 모양은 軸對稱이고 또 軸方向에 垂直한 斷面이 圓對稱이라고 볼 수 있다. 그러므로 jet의 溫度分布를 다음과 같이 半徑方向과 軸方向에 대해서 測定하였다.

4-1. Arc 電流와 溫度特性

Fig. 3은 口徑 5(mm)의 노즐電極에 對하여 argon 流量 및 argon, 窒素混合가스流量, 電極間隙을 固定시켰을 때 Arc 電流에 對한 plasma jet의 溫度, Arc 入力과의 特性을 나타낸 曲線이다. 여기에 Arc電流가 커지면 溫度는 거의 直線의으로 上昇하며 混合가스의 경우가 argon 가스인 境遇에 比하여 同一한 Arc 電流值에서 높은 값을 갖는다.

Arc 入力은 Arc 電流를 連續的으로 變化시켰을 때의 plasma jet의 入力에 相當하며 電源設備의 容量 때문에 電流는 140(A) 以下에서 測定하였다.

Arc 電流는 plasma의 溫度와 直接的인 關係가 있으므로 이에 關하여 解析해 보기로 한다.

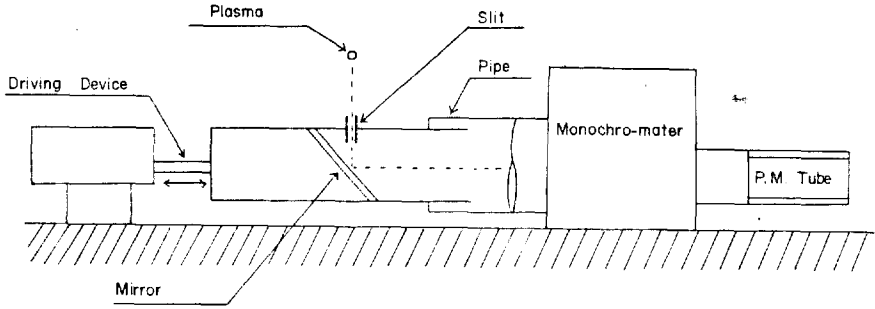


Fig. 2. Spectral intensity measuring system

半徑 r 의 Arc柱에 供給되는 單位 길이當의 電氣의 에너지는 電位傾度를 E , Arc 電流를 I 라고 하면 $E \cdot I$ 로 表示되며 이것은 Arc柱 外部로 放出한 熱損失과 平衡되어 다음과 같은 Elenbass-Heller^{9,10)}의 式이 成立한다.

$$\sigma E^2 - P_r(T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\kappa \frac{\partial T}{\partial r}) = 0 \quad (7)$$

여기서 κ : 熱傳導率 T : 溫度
 σ : 導電率 $P_r(T)$: 放射損失
 r : plasma柱의 半徑

一氣壓下의 Arc柱에서는 放射損失은 大略 全損失의 10%程度이므로 이것을 無視하면 式(7)은

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\kappa \frac{\partial T}{\partial r}) = 0 \quad (8)$$

가 된다.

式(8)에서 σ 와 κ 는 溫度에 의하여 變化하므로 이 解는 一般的으로 簡單하게는 求할 수 없다. 그러나 plasma jet의 半徑方向에 對한 溫度分布를 近似的으로 求하기 위하여 σ 와 κ 는 溫度에 無關하고 内部의 電流密度는 均一하다고 가정하면 式(8)은 다음式으로 된다.

$$-\kappa 2\pi r \frac{\partial T}{\partial r} = E \cdot I \frac{r^2}{r_a^2} \quad (9)$$

여기서 r_a : plasma jet의 半徑

式(9)에서 溫度分布를 求하면

$$T = \frac{E \cdot I}{4\pi\kappa} \left(1 - \frac{r^2}{r_a^2}\right) + T_a \quad (10)$$

式(10)을 보면 plasma jet 入力과 Arc電流가 增大하면 同一한 半徑 r 에 對하여 溫度가 上昇한다.

電流가 적을 때에는 作動氣體의 冷却氣流가 plasma jet柱中에 混入됨으로 그 熱을 吸收하는 效果가 커져 溫度低下를 招來한다.

電流가 增加하면 入力이 增大할 뿐만 아니라 磁氣의 pinch效果^{9,10)} 때문에 plasma jet의 收縮作用이 커져 에너지 集束度가 높아지므로 溫度가 上昇하게 된다고 볼 수 있다.

窒素가스 N_2 [20(c.f.h)]를 argon에 混合하여 plasma jet를 만들고 溫度를 測定하였더니 argon만인 境遇보다 溫度가 훨씬 높은 것을 알 수 있다. 이것은 同一한 Arc電流에 對하여 plasma jet 入力이 混合가스쪽이 argon가스인 境遇보다 增加한데 原因이 있다고 볼 수 있다.

그런데 N_2 가스의 解離電壓¹⁷⁾(9.1V)과 電離電壓¹⁸⁾(14.54V)의 合이 argon의 電離電壓¹⁷⁾(15.755V)에 比하여 훨씬 کم으로 安定한 plasma jet의 發生을 위해서는 이의 入力이 增大하지 않으면 안된다.

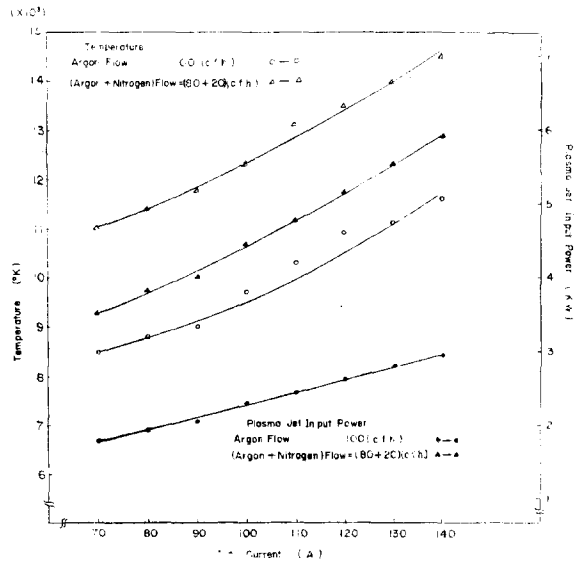


Fig. 3. Temperature and plasma jet input power distribution for Arc current

4-2. 作動氣體의 流量과 溫度特性

Fig. 4-a, b는 Arc電流가 100(A)일때 plasma jet의 溫度와 作動氣體의 流量과의 關係를 나타낸 曲線이다.

作動가스의 增加에 따라 溫度는 上昇하고 있으며 混

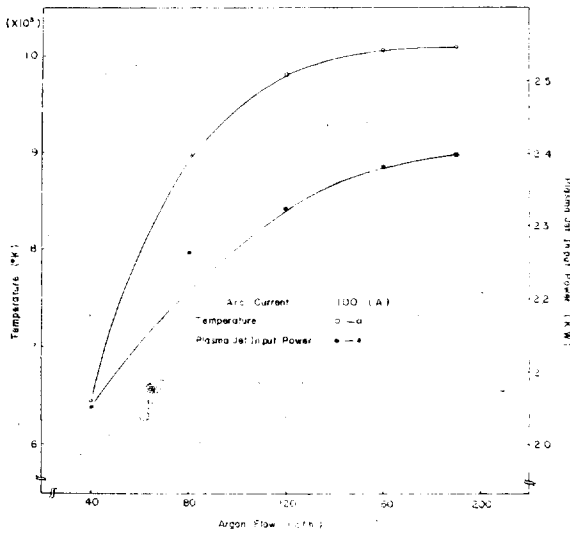


Fig. 4-a. Temperature distribuion for argon flow

합가스 쪽이 argon가스의境遇보다 높다.

流量이 많아지면 陽極點이 nozzle 出口가까이에 移動하고 이에 따라 jet가 伸張되고 또 jet周邊部에 對한 冷却作用이 甚하게 되어 熱 pinch 效果가 커지고 이 部分의 導電率이 떨어진다. 그러므로 荷電粒子들은 中心部에 集中되어 同一한 Arc電流를 흘리는데 要하는 plasma jet入力이 커지게 되고 이에 따라 溫度도 上昇하게 된다.

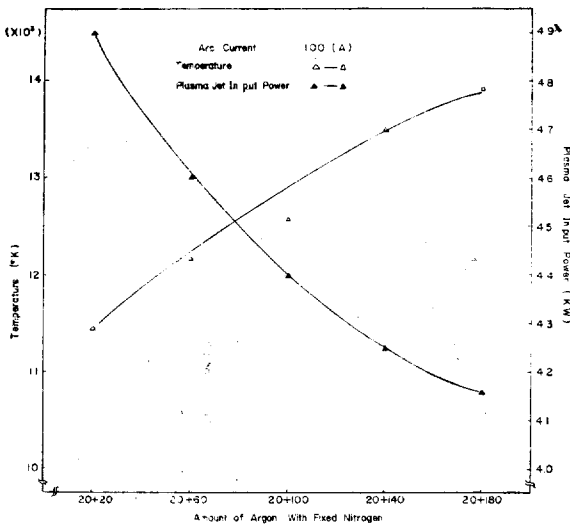


Fig. 4-b. Temperature and plasma jet input power distribution for amount of argon with fixed nitrogen

그러나 가스流量이 너무 過大하면 찬가스가 plasma jet의 溫度를 吸收하게 되어 오히려 溫度가 낮아진다. 즉 가스流量에는 臨界值가 存在함을 알 수 있다.

특히 Fig. 4-b에서 보는 바와 같이 一定한 窒素가스流量에 對하여 Argon가스의 流量을 增加시키면 Plasma Jet入力은 줄어들고 溫度는 上昇하고 있다.

이와같이 入力이 減少하는 것은 混合가스의 特性이 점차 argon가스에 接近하여 가는데 起因한다고 본다.

한편 argon가스의 流量을 一定하게 維持하고 窒素가스流量을 增大해 가면 反對現象이 일어난다는 것도 確認할 수 있었다.

4-3. 磁束密度와 溫度特性

Fig. 5는 Arc電流 100(A)일때와 plasma jet의 溫度와 軸方向磁界의 세기와와의 關係를 나타냈 結果인데 磁束密度가 커짐에 따라 溫度는 低下되고 있다.

plasma jet의 torch部分에서는 Arc電流는 直徑이 작은 tungsten陰極에서 면이 넓은 nozzle電極으로 擴大되어 흐르는데 여기에 軸方向 磁界를 加하면 磁界에 垂直한 電流成分에는 磁氣的 驅動力이 作用한다.

즉 plasma流는 $I \times B$ 의 힘을 얻어 電極間隙에서 回轉運動을 한다.

Marx는 plasma jet柱를 固體圓筒으로 假定하고 이의 走行速度를 다음과 같이 理論的으로 誘導⁹⁾하였다.

$$v \propto \frac{BI}{D} \propto BI^{0.5} \quad (11)$$

가 된다. 여기서 v : 速度 B : 磁束密度 I : Arc電流 D : plasma jet柱의 直徑

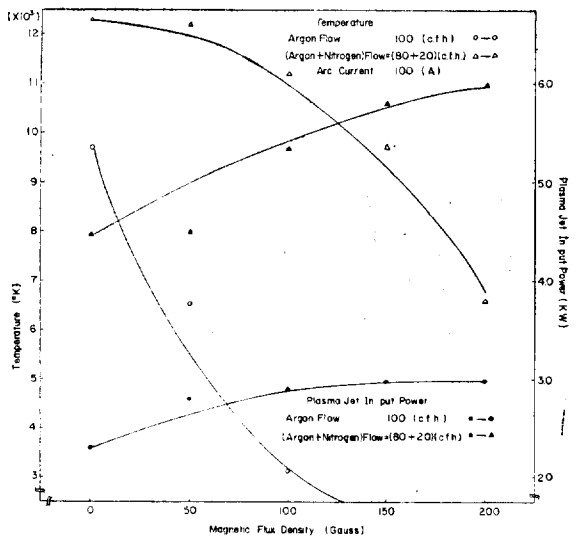


Fig. 5. Temperature and plasma jet input power distribution for magnetic flux density

磁束密度 B 가 커지면 複雜한 亂流現象을 일으켜 中心軸에 對한 jet의 에너지集束度가 弱해서 溫度가 低下된다고 생각 할 수 있다.

한편 plasma에 磁界가 作用치 않는 경우에는 이의 導電率 $\sigma^{(7)}$ 는

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m \nu_e} \quad (12)$$

가 된다. 여기서 e : 電子의 電荷

m : 電子의 質量 n_e : 電子의 密度

ν_e : 電子의 衝突周波數

plasma jet에 軸方向 印의 磁界를 加하면 電離作用의 主動的인 役割을 하는 電子가 旋回運動을 한다.

따라서 電子의 衝突周波數 ν_e 가 높아지고 또 이 때 문에 電界에서 얻은 에너지가 不充分하여 衝突電離作用도 적어진다.

윗 式에서 電子密度 n_e 가 적어지고 ν_e 가 커지므로 σ 가 減少한다.

$$J = \sigma E \quad (13)$$

여기서 J : Arc電流密度 E : 電界의 세기

式(13)에서 Arc電流가 커지면 Arc電壓이 높아지므로 plasma jet의 入力이 增加하게 된다.

4-4. plasma jet의 半徑方向에 對한 溫度特性

Fig. 6은 Arc電流의 作動氣體를 一定하게 놓았을때 plasma jet의 半徑方向에 對한 溫度分布를 測定한 結果이다.

中心軸에서 2(mm)까지는 溫度分布가 거의 變化가

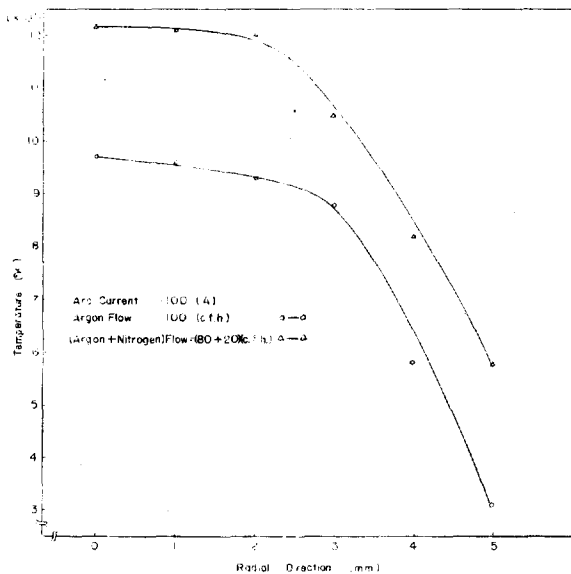


Fig. 6. Temperature distribution for radial direction

없지만 2(mm)以上에는 급격히 溫度가 低下함을 알 수 있다. 이 現象은 式(10)에서 r 가 增加함에 따라 T 가 적어지는 것과 거의 一致한다.

4-5. plasma jet의 軸方向에 對한 溫度特性

Fig. 7는 幅이 1(mm), 길이 10(mm)의 slit를 nozzle의 出口에서 軸方向으로 2(mm)씩 移動하면서 測定한 溫度分布이다.

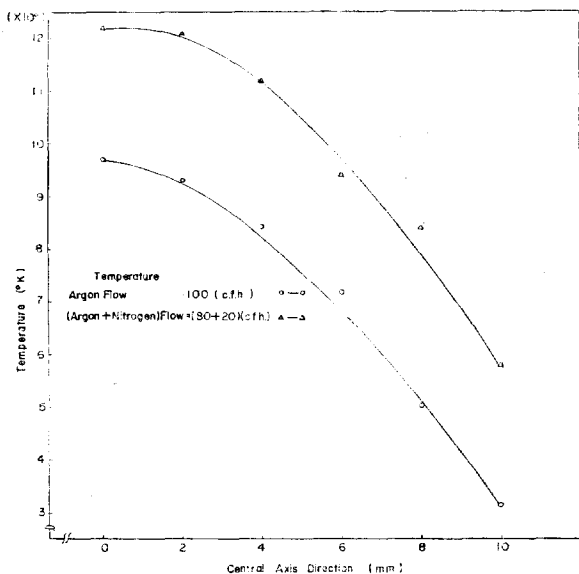


Fig. 7. Temperature distribution for central axis direction

nozzle出口에서 13(mm)까지가 가장 높고 이 範圍를 벗어나면 減少率이 갑자기 커짐을 볼 수 있는데 이는 plasma jet의 에너지가 nozzle出口에서 떨어짐에 따라 外氣의 影響을 받아 減少하는데 原因이 있다고 생각된다.

5. 結 論

分光學의 方法에 의하여 plasma jet의 溫度分布를 測定한 結果를 要約하면 다음과 같다.

- 1) plasma jet의 中心部의 溫度는 Arc電流와 가스 流量의 增加와 더불어 높아지고 軸方向에 가한 磁界의 세기를 크게 하게 하면 反對로 減少한다.
- 2) 半徑方向에 대한 plasma jet의 溫度減少는 中心軸에서 2(mm)以上에서 가장 급하다.
- 3) 軸方向에 대한 plasma jet의 溫度減少率은 nozzle 出口에서 13(mm)以上되는 곳에서 가장 甚하다.

4) Argon에 少量의 窒素를 混合한 가스를 使用하면 Argon가스만인 경우에 比하여 溫度는 높아진다. 이와같이 超高温 plasma jet에 대한 溫度分布는 分光學的方法으로 測定하므로 plasma jet物性的 端緒와 이의 有効한 利用法을 究明할 수 있다.

參 考 文 獻

- 1) 藤岡由夫：分光學，講談社 pp.287~296. (1967)
- 2) 木脇久智：“光學的方法による氣體溫度の測定”應用物理 38 pp.524~534. (1969)
- 3) 岡田實，荒田吉明：プラズマ工學(日刊工業新聞社) pp. 361. (1965)
- 4) 葛西彰等，武藤喜八，木脇久智：“高周波プラズマの溫度測定”應用物理 39 pp.168~172. (1970)
- 5) J.F. Bott：“The Physics of Fluids” 9 pp.1540. (1966)
- 6) Uman：“Quantitative Lightning Spectroscopy” I.E.E.E Spectrum(1966)
- 7) D. Van Houwelingen：“Transition Probabilities of Some Ar I and Ar III Spectral Lines” J. Quant. Spectrosc. Raa. Transfer, 11 pp. 1235~1243(1970)
- 8) Takakiyo Ito, Takayuki Kashima：“Characteristics of the Plasma flame in Metal-Cutting Apparatus of the Transferred-Type Plasma-

- Jet System.” IEEE Transactions on Industry and General Applications, 4 p.630(1970)
- 9) 田春生：軸方向 磁界下에서의 Plasma Jet特性에 미치는 制御變數의 影響에 關한 研究(1974)
- 10) 田春生：“小容量 MHD交流發電器에 대한 實驗的 研究”大韓電氣學會誌 25, No. 25 pp. 79~87. (1976)
- 11) A.B. Cambel：Plasma Pysics and Magneto-Fluid Mechanics, McGraw-Hill Co.(1963)
- 12) R.H. Huddleston and S.L. Leonard：“Plasma Diagnostic Techniques” Academic Press, New York(1965)
- 13) M. Fabry and J.R. Cussont：“Spectroscopic Measurements of Parameters in a Low-Density. Alkali-Metal Plasma” J. Appl. Phys. 43 pp.357. (1972)
- 14) Edward. S. Lamar, Albert. M. Stone and Karl. J. Compton：“The Positive Column of the Nitrogen Arc at Atmospheric Pressure” Physical Review, 35 pp.1235. (1939)
- 15) 日本電氣學會雜誌：プラズマジェットを用いた MHD發電機の實驗 Vol. 85-4, No.919(1965)
- 16) 星光一：“プラズマジェット加工”日本電氣學會雜誌 Vol. 85-5 No.920(1965)
- 17) 日本電氣學會編：放電ハンドブック, (1975)