

<解 說>

Laser流速計에 依한 流速測定

Flow Velocity Measurements by using Laser Doppler Velocimeter

趙 慶 國* · 鄭 仁 碩**

Kyung-Kook CHO, In-Seuck JEUNG

1. 序 言

Laser가 開發된지 10數年이 經過한 지금은 各種의 Laser가 市販되고 있으며 特히 空間的 時間的 干涉性이 좋고 高出力, 短時間 Pulse等의 從來에 使用하였던 光源에서 찾아 볼 수 없는 特色을 지니고 있어 流速計 測分野에도 表 1에서 볼 수 있는 것처럼 여러 方面에 Laser가 利用되고 있으며 아직도 이에 對한 새로운 利用方法의 開發이 進行되고 있다. 이 中에서도 Laser Doppler法은 1974年 最初로 그 方法이 發表되고 부터 많은 研究가 이루어졌다.

이 Laser Dopple流速計 (Laser Doppler Velocimeter, LDV)의 長點은 (1) 無接觸測定이므로 流體의 흐름에 攪亂을 주지 않고 (2) 流體의 屈折率(n) 以外的 物性值나 狀態量에 거의 影響을 받지 않으며 (3) 應答速度

가 빠르므로 流速의 實時間測定이 可能하다. (4) 測定 設定方向의 流速成分 (u)를 Cross term (v,w)의 影響을 받지 않고 測定할 수 있으며, 3次元流速成分(u,v,w)의 同時測定이 可能하다. (5) 流速과 Doppler 周波數와 의 關係가 直線的인 關係이므로 校正의 必要가 없으며 (6) 空間的 分解能이 높으므로 局小部分의 流速測定이 可能하고 超低速 (10⁻⁴cm/sec)로부터 超音速 (10⁸ m/sec)까지의 넓은 範圍에 걸쳐 流速測節이 可能하다. 그러나 短點으로는 (1) 光學系調整 및 信號處理의 電氣系統調整이 매우 귀찮고 (2) 雜音이 많고 不連續的인 Doppler信號의 處理方法이 힘들어서 亂流測定の 精度에는 問題點이 있다. (3) LDV는 流速의 크기만을 表示하므로 흐름의 方向을 알기 爲하여는 Frequency Shift System을 使用하여야만 한다. (4) 均一分布의 散亂用粒子를 供給(Seeding)할 必要가 있다.

지금까지 LDV에 關한 解說¹⁾²⁾³⁾ Symposium報告⁴⁾⁵⁾

表 1. Laser를 利用한 各種 流體計測法

	方 法	測 定 量	特 色	
波動光學的方法	干涉法, Moire法, Schlieren法	密度變化	調整簡單	
	Holography法	流速, 密度變化 粒子直徑	3次元測定	
	Spectrum法	流速	調整簡單	
散亂分光法	Laser Doppler 法	流速, 粒子直徑	瞬間流速測定, 高分解能	
	Rayleigh 散亂法	壓力, 溫度	散亂光이 弱함, Mie散亂影響	
	發 光 法	螢 光	壓力, 成分, 溫度	高分解能
		磷 光	擴散, 流速分布	分布測定
	Raman法	回轉·振動Mode	壓力, 成分, 溫度	高分解能, 散亂光이 弱함
Coherent Antistokes Resonant Raman		壓力, 成分, 溫度	高分解能, 散亂光이 強함	

* 正會員, 서울大學校 工科大學

** 서울大學校 大學院 航空工學科

및 專門書가(6)(7)(8) 많이 있으나 여기에는 重要한 몇가지 만 紹介한다.

2. 測定原理

LDV의 原理는 音波에 있어서 잘 알려져 있는 Doppler 効果와 마찬가지로 流體中에 存在하는 散亂粒子에 Laser 光을 入射하여 그 散亂光의 Doppler 周波數變化를 檢出하여 流體의 速度를 測定한다. 測定原理를 干涉縞方式(Fringe Mode, 測定光學系 Mode의 說明은 後述한다.)에 對하여 簡單히 說明한다. Fig. 1에 있는 入射 Laser 光線을 波面으로 表示하면, 光線의 交差部(測定體積)에는 交差角 2θ 의 2等分線에 平行한 干涉縞(Interference Fringe)가 생기고, 그 間隔 δ 는

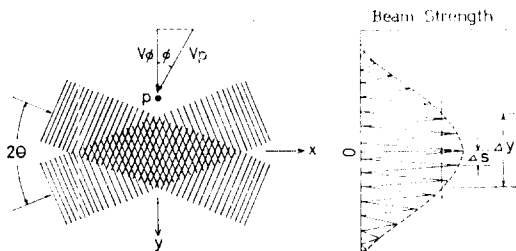


Fig. 1. 測定原理圖

$$\delta = \lambda_i / 2 \sin \theta$$

가 된다. 이 속을 微粒子가 速度 \vec{V}_p 로 通過할 때 明暗이 바뀌는 周波數 f 는

$$f = V_p / \delta = (2n / \lambda_o) \cdot V_p \sin \theta$$

로 表示된다.

단, $V_p = |\vec{V}_p| \cos \phi$, λ_i 는 入射光線의 波長, n 은 測定流體의 屈折率, λ_o 는 眞空中에서의 入射光의 波長(= $\lambda_i \cdot n$)이다. 여기서 λ_o , n 및 θ 가 一定하면 Doppler信號 f 와 流速 V_p 는 直線的인 比例關係가 있다는 것을 알 수 있다. 즉 測定하고자 하는 流速 V_p 는

$$V_p = \frac{\lambda_o f}{2n \sin \theta}$$

로 주어진다.

入射光斷面에서 光의 強度는 Gauss分布를 하고 있으므로, 測定體積의 크기를 光의 強度가 光線中心部光強度의 $1/e$ 이 되는 面으로 定義하면 測定體積 x, y 및 z 方向의 全長 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는

$$\Delta x = 4\lambda_i F / (\pi B \sin \theta)$$

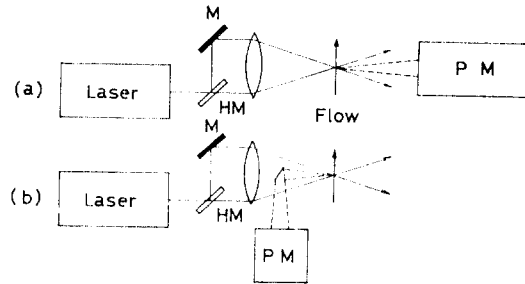
$$\Delta y = 4\lambda_i F / (\pi B \cos \theta)$$

$$\Delta z = 4\lambda_i F / (\pi B)$$

가 된다. 여기서 F 는 集光 Lens의 焦點距離, B 는 Lens面上的 光線의 直徑(光의 強度가 $1/e$ 되는 곳)이다

3. LDV 光學系

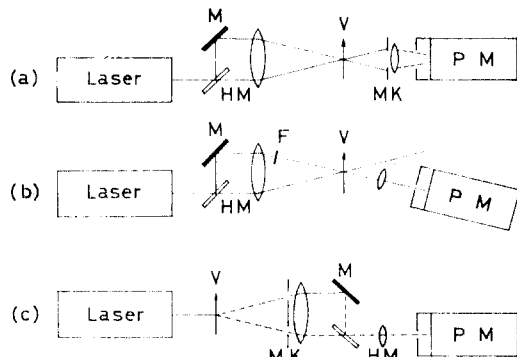
LDV의 入射光 및 散亂光의 周波數는 10^{14} Hz 정도이므로, 이 周波數를 直接電氣的으로 計測한다는 것은 不可能하다. 그러므로 이 光을 適當히 重合하여 얻은 兩者의 差의 周波數를 光電子倍增管(Photomultiplier, PM)을 通하여 檢出한다. 이와 같은 光學系의 配置는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 散亂光을 받는 位置에 따라 前方散亂形(Forward Scattered Type)과 後方散亂形(Backward Scattered Type)으로 分類되며 Laser光線의 重合方式에 따라서 干涉縞方式(Fringe Mode, 或은 Dual Beam Mode), 參照光方式(Reference Beam Mode) 單一光方式(Single Beam Mode)로 Fig. 3과 같이 3가지로 大別된다. 여기서는 이 3가지 光學系方式에 대해 簡略하게 言及한다.



HM; Half Mirror M; Mirror PM; Photomultiplier

(a) 前方散亂形 (b) 後方散亂形

Fig. 2. 光學系의 配置



F; Filter HM; Half Mirror M; Mirror MK; Mask PM; Photomultiplier

(a) 干涉縞方式 (b) 參照光方式 (c) 單一光方式

Fig. 3. 測定 Mode

3-1. 干涉縞方式

2개의 入射光에 의한 散亂光을 重合시켜 PM의 出力을 얻는 方式이다. 이 方式은 受光部의 觀察方向을 任意로 設定할 수 있기 때문에 光學系의 調整이 容易하고 Pin Hole도 比較的 크게 할 수 있으므로 散亂光이 弱한 경우에 有利하다. 特히 測定體積의 後方散亂을 檢出하면 測定部의 觀測窓을 1개로 할 수 있다. 또한 前方散亂을 檢出할 경우에도 觀測窓에 依한 光源의 散亂光을 회하기 爲하여 檢出方向을 光學系의 中心線에서 適當히 移動하면 S/N比를 改善할 수 있다.

3-2. 參照光方式

散亂光과 參照光을 重合한 方式이며 PM에 直接 들어오는 參照光의 強度를 減光 Filter를 使用하여 散亂光의 強度와 같은 정도로 맞추면 Visibility가 좋아진다. 粒子가 많고 散亂光이 강한 경우에 使用할 수 있으나 流體의 屈折率이 變化하여 參照光의 光路가 變化하는 경우에는 測定이 困難하게 되며 特히 過渡的인 溫度, 壓力變化가 나타나는 內燃機關의 燃燒室에는 應用할 수 없다.

3-3. 單一光方式

1개의 入射光線에 依하여 散亂되는 光線은 2方向的인 散亂光만을 檢出·重合시킨 것인데 散亂光의 檢出方向을 複數로 하면 多次元速度成分을 求할 수 있다.

4. 흐름方向的 測定

LDV는 散亂粒子에 依하여 散亂되는 光線의 Doppler 周波數變化로 流速을 測定하는 것이므로 流速의 크기만 알 수 있지 흐름의 方向은 알 수가 없으며 流體의 흐름 方向이 심하게 變化하는 경우에는 補助的인 手段이 없이는 測定不可能하다. 따라서 흐름의 方向을 포함한 流速을 計測하기 爲하여 入射光線의 한쪽 或은 양쪽에 各各 서로 다른 周波數 Shift를 주어 Fig. 1의 干涉縞를 空間的으로 移動시키면 Shift된 周波數範圍에서 흐름의 (+), (-)를 檢출할 수 있다.

入射 Laser 光線에 Shift를 주는 方法에는 回轉回折格子, Electro-Optic Cell 및 Bragg Cell 등이 있다. Bragg Cell에 依하여 Shift시키는 것은 進行超音波에 依하여 만든 位相格子에 依한 回折을 利用한 것인데, 매우 效率이 좋고, 또 運動部分이 없으므로 취급하기 간단하기 때문에 널리 使用되고 있다.

그리고 周波數 Shift를 使用하면 다음과 같은 利點이 생긴다. 즉 (1) 흐름 方向의 判別 (2) 粒子가 測定體積을 通過할 때의 低周波信號成分(Pedestal Signal)과

Doppler 周波數를 分離할 수 있다. (3) 高速流에서는 DC成分을 除外한 變動分을 擴大하여 얻을 수 있다. (4) 反對로 平均速度가 작고 變動周波數가 높을 때에는 變動分을 壓縮하여 信號處理裝置의 周波數應答性을 改善할 수 있다. (5) 測定體積內에 既知의 信號를 주어 놓았으므로 光學系나 信號處理回路의 調整이 容易하게 된다.

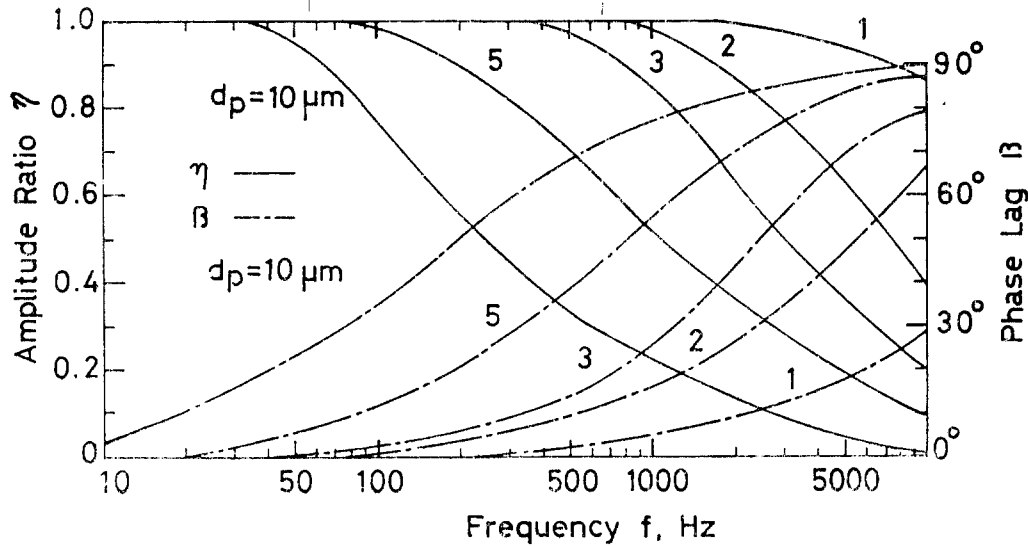
5. 散亂 粒子

LDV는 流體中에 浮遊해 있는 粒子의 速度로부터 流體速度를 測定하는 것이므로 粒子의 流體흐름에 對해 追從性, 그리고 流體內에 粒子의 供給 및 粒子로부터의 光散亂에 關한 性質等에 對하여 檢討할 必要가 있다.

散亂用 粒子의 條件으로는 (1) 流體의 흐름에 追從性이 좋을 것 (2) 散亂光이 강한 것 (3) 燃燒流의 測定을 爲하여는 高溫에서도 化學的으로 安定할 것 (4) 觀察窓을 더럽히지 않을 것 (5) 凝集이 힘들 것 (6) 流體의 흐름, 實驗裝置, 實驗者에게 影響을 주지 않을 것. (7) 形狀은 球狀이 좋음 등이 있으나, 흐름에 잘 追從하기 爲하여는 散亂粒子의 直徑이 작을수록 좋으나, 散亂光이 強하기 爲하여는 粒子直徑이 크지 않으면 안된다. 그러므로 散亂粒子의 크기는 使用하는 Laser 光源의 強度에 따라서 適切한 粒子의 크기를 選擇하여야 한다. 一般的으로 燃燒現象을 포함한 大部分의 測定流體內에 Silicone Oil, TiO₂, MgO, Al₂O₃, SiO₂, Baby Powder 등의 1 μ m 以下の 粒子가 使用되고 있으며 이 정도 크기의 粒子는 약 10KHz의 周波數應答性을 가지고 있다. Fig. 4에 JIS試驗用 Dust 8種의 周波數應答性에 關한 1例를 表示한다.

Fig. 5에는 散亂用 粒子의 供給量과 流速의 測定值를 Model化하여 表示한다.

(a)는 PM에서 出力되는 連續的인 Doppler信號이며 이 PM의 出力中에서 Doppler信號以外的 雜音을 除去하기 爲하여 信號處理裝置에서 어떤 最小測定限界值를 設定한다. 그래서 이 最小測定限界值를 넘어서는 入力만을 받아 들이므로 流速値는 계단적으로 얻어진다. 따라서 粒子의 供給量에 依하여 變動流의 近似精度가 달라지게 된다. 즉 粒子量이 적어지면 Doppler信號의 脫落(Drop-out)現象이 나타나고 또 한편 粒子供給量이 過多하여 測定體積內에 2個以上の 粒子가 存在하여 粒子間의 速度가 서로 相違하고 應答位相이 달라지면 周波數 Spectrum이 넓어지는 Ambiguity Noise가 나타나서 測定精度가 나빠게 된다. 理想的인 粒子量은 測定



(粒子: JIS試驗用 Dust 8種, 流體: 空氣, 20°C)

Fig. 4. 供給粒子的 動應答特性

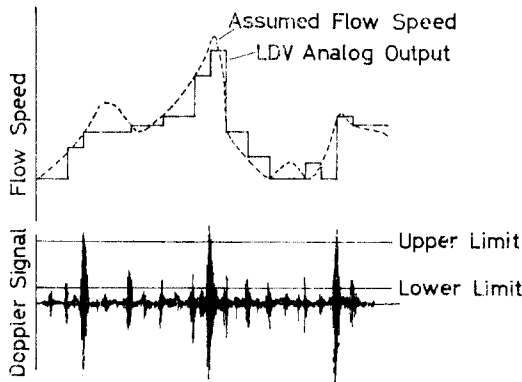


Fig. 5. 粒子的 供給量과 出力形態

體積內에 1個의 粒子가 있을 경우이며, 測定體積의 크기에 따라 $10^5 \sim 10^7$ 個/cm³ 程度이나 各者의 實驗狀態에 對應하여 調節하여야만 한다. 또한 경우에 따라서 粒子徑이 매우 큰 粒子를 使用할 때에는, (큰 粒子는 흐름에 對한 追從性이 나쁘고 應答遲延이 있기 때문에) 最大測定限界值를 設定하고 이것보다 強한 信號를 除外하는 方式을 取할 때도 있다.

6. Doppler信號의 處理方法

測定流體中에 있는 微粒子로부터의 散亂光을 PM를 通하여 記錄機에 依하여 觀察하면 어느 瞬間의 流速을

求할 수 있으나, 効率的으로 平均流速, 亂流 즉 變動流速을 實時間測定하기 爲하여는 適切한 Doppler信號 處理方式을 채택하지 않을 수 없다. 그러나 粒子가 測定體積을 通過하는 것이 不規則의이고 더욱이 有限한 時間동안만 Doppler信號를 얻을 수 밖에 없을 뿐 아니라 Doppler信號에 雜音이 섞여 들어가므로 信號處理가 상당히 힘들다. 現在 주로 使用되고 있는 信號處理方式은 다음 4가지로 크게 分類할 수 있다.

6-1. Spectrum Analyzer

入力되는 Doppler信號를 直接 周波數分析하면 中心周波數에 해당하는 平均流速과 Spectrum의 分布強度에 依하여 亂流成分을 求할 수 있으나 測定에 時間이 걸리므로 變動流나 過渡現象 등을 實時間測定하는 것은 無理이다.

6-2. Photon Correlator

Doppler 信號의 自己相關(Auto-Correlation)을 얻어, 그 相關函數의 周期로부터 平均流速을, 또 相關函數의 減衰率로부터 亂流成分을 求할 수 있다. 이 方式은 出力信號가 微弱한 大氣나 粒子의 供給이 困難한 Jet Engine 排氣 等의 測定에 利用할 수 있으나 信號 處理時間이 길기 때문에 變動成分이 激烈한 흐름에는 實時間測定이 困難하다.

6-3. Frequency Counter

一連의 Doppler信號을 얻고서, 設定時間 內에 Doppler信號가 零點을 交差하는 回數 N , 그렇지 않으면 反對로 設定零線交差數 N 에 到達하기까지 걸리는 時間 τ 를

測定하여 Dopple 周波數 $f=N/(2r)$ 를 求하는 것인데 精度의 觀點에서 보면 後者쪽이 더 낫다. D/A變換을 포함한 信號處理가 高速이므로 實時間測定이 可能하고 原理의 由로 볼 때는 다음에 說明할 Tracker와 같은 測定範圍의 制約이 없으나, 雜音이 많은 경우에는 測定이 困難하여 適當한 High Pass Filter 및 Low Pass Filter를 組合하여 使用하게 되므로 결국 測定範圍에 制限을 받게 된다.

6-4. Frequency Tracker

Fig. 6은 Frequency Tracker의 原理를 나타내고 있으며, 雜音이 섞인 Doppler信號 f 와 電壓制御發振器

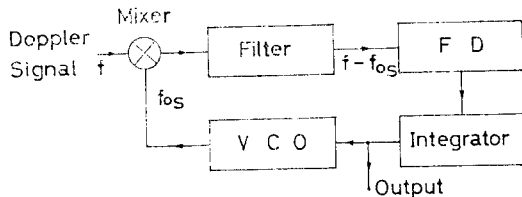


Fig. 6. Frequency Tracker의 原理圖

(Voltage Controlled Oscillator, VCO)의 周波數 f_{0s} 를 混合하여 Filter, Frequency Discriminator 및 積分器에 依하여 周波數差($f-f_{0s}$)가 없게 되도록 (혹은 一定許容誤差範圍內에 들어 오도록) VCO의 制御電壓을 變化시키는 Feedback方式이고, 이때의 制御電壓이 Doppler信號 f 에 比例한다. 이 方式에는 Phase Discriminator回路, Phase Locked Loop回路, 中間 Filter가 없는 Autodyne方式 등이 있으나 各各의 特徵이 있고, 使用의 利點도 서로 다르다. 使用者의 立場에서 보면, Doppler信號에의 追從性 및 應答性이 좋고, 雜音에 強하고 Seeding이 적거나 나쁘더라도 使用可能하고 測定流速範圍가 廣範圍할 것을 希望하고 있으나, 이 모든 點을 完全히 滿足시킨다는 것은 상당히 어려운 것처럼 보인다.

7. 測定例, 問題點

LDV는 이와같은 特色을 가지고 있어 工學, 醫學 및 農學에 까지 그 應用分野를 확장하고 있으나 여기서는 水流, (Water Flow) 空氣流(Air Flow), 2相流(2 Phase Flow), 및 燃燒流(Combustion Phenomena)에 對하여 그 應用例와 問題點등에 關하여 說明한다. 대체로 流體計測部門에서는 流速의 瞬間值, 平均流速, 亂流強度 相關關係, 亂流 Power Spectrum, Micro Scale, Macro Scale 등을 測定量으로 한다.

7-1. 水流

지금까지의 流體測定方法으로는 不可能하였던 境界層流⁹⁾, 高分子粒子에 依한 抵抗減少管内流 및 Sub Layer의 測定¹⁰⁾ 등이 LDV에 依하여 行해졌다. 여기서의 흐름을 測定할 때에는 큰 管内流, 開放流 등을 測定하는 경우에 나타나지 않는 問題點이 發生한다¹¹⁾. 즉 受光系의 位置를 取하는 方向에 따라 觀測窓 Glass에 依한 反射光, 管内의 汚物에 依한 散亂光과 Laser光線의 交差部(測定體積) 以外의 領域으로부터의 散亂光 등의 干涉을 받는다. 이와 같은 경우에 干涉縞方式에 依하여 測定하면 半周波數에 해당하는 곳에 餘分의 Spectrum이 생긴다. 이와 같은 問題點을 解決하기 爲하여는, 入射光線의 交差角을 될 수 있는 대로 크게 하고 受光係의 位置, 方向條件을 最適으로 하여, 可能한 限 交差部만 의 信號를 取하여 S/N比를 높여야만 한다. Fig. 7에는 $Re=850$ 인 때의 層流流速分布를 測定한 1例를 나타낸다.¹²⁾

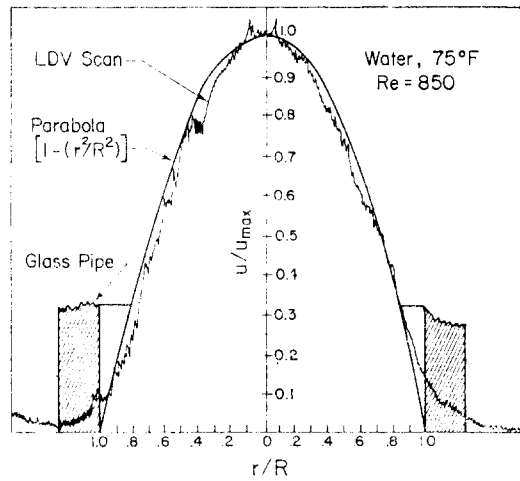


Fig. 7. 管内層流流速分布

7-2. 空氣流

氣流에서는 氣體와 散亂粒子의 比重差關係에서 散亂粒子의 供給이 水流에 比하여 상당히 힘들기 때문에 散亂粒子 및 粒子供給裝置의 選擇에 상당한 考慮가 必要하다. 特히 高速氣流에 對해서는 散亂粒子의 問題가 더욱 심각하다.¹³⁾ 즉 散亂粒子의 流體흐름에 對한 追從性, 出力應答性이 나빠지며, 粒子徑의 分布에 의해서도 Doppler信號의 Spectrum分布가 넓어지게 된다. 이런 點을 補完하기 爲하여 比重이 가깝고 粒子直徑도 작고 均一粒子徑의 粒子를 使用하여야 한다. 流速이 高速으로 되면 觀測光量이 弱하게 되어 Doppler信號의

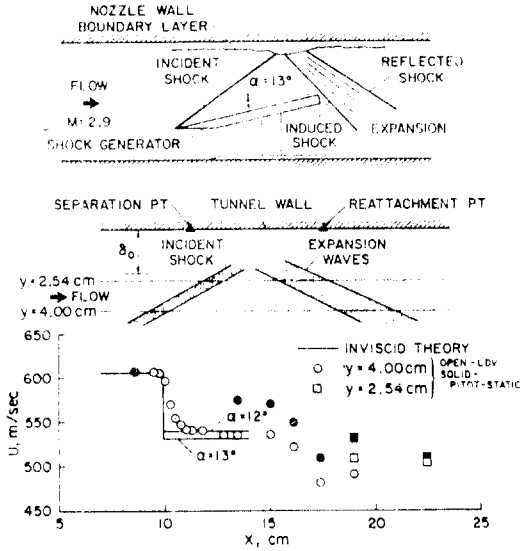


Fig. 8. 超音速에서의 流速分布

S/N비가 나빠지게 되므로 信號處理部分의 改良도 試圖되고 있다. 또한 Doppler周波數의 變化程度도 더욱 넓어지게 되므로 Fabry-Perot干涉計를 使用하면 有效한 結果를 얻을 수 있다. 超音速流에서는 Shock Wave에서 密度變化가 심하여 入射光線이 偏向되게 되므로, 干涉縞方式의 光學系를 使用하여 入射光의 交差角을 작게 하는 등의 注意가 必要하다. Fig. 8은 超音速流에 있어서 境界層外部의 流速分布를 測定한 1例이다.¹⁴⁾

7-3. 2相流

LDV를 使用하여 管内의 流速分布測定에 關聯된 實驗은 많이 이루어졌으나 2相流의 경우에 對하여는 그 例를 찾아 보기 힘든 形편이다. 2相流에는 氣體와 固體粒子 2相流, 液體와 固體粒子 2相流, 液體와 氣泡 2相流 등이 있으며 主流와 粒子流로 區別할 수 있다. 이 2相流의 測定에 있어서는 지금까지 說明했던 水流와 空氣流에 對한 測定時發生되었던 問題點뿐만 아니라 主流와 粒子流의 信號強度差와 粒子流의 응집現象 등이 새로운 問題點으로 나타났다. 理論적으로는 μm 정도의 粒子가 들어 있는 主流流速과 主流에 포함되어 있는 粒子에 比하여 그 크기가 매우 큰 粒子流速으로 分離되어 存在할 것이나 實際 Spectrum分析을 하면 두 信號強度差와 두 信號의 位相差, 速度絕對值의 差에 依한 干涉雜音 등에 依하여 Spectrum分布가 매우 넓어져서 主流에 해당되는 周波數와 粒子流에 해당되는 中心周波數의 區別을 매우 困難하다.¹⁵⁾¹⁶⁾ 現在까지는 前方散亂形을 使用하여 主流流速을, 後方散亂形을 使用하여 粒子流流速을, 同時測定하는 方法을 試圖하고 있

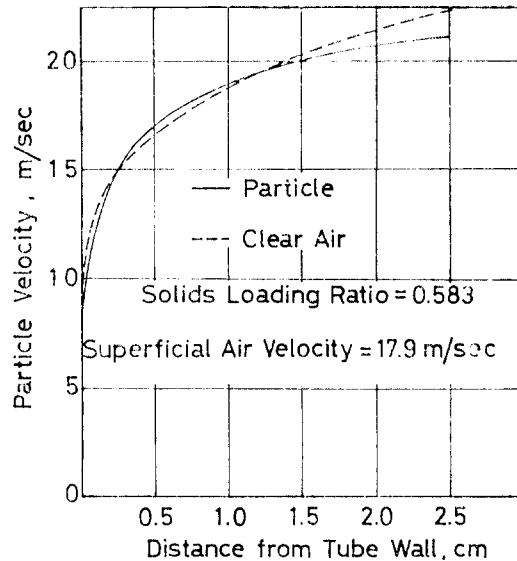


Fig. 9. 氣體-固體粒子 2相流

으나 아직도 2相流에 對한 LDV의 應用에는 많은 問題點이 남아 있다. Fig. 9은 氣體와 固體粒子 2相流의 경우에 對하여 氣流流速과 固體粒子速度를 測定한 1例이다.¹⁶⁾

7-4. 燃燒流

지금까지의 流速計로는 測定할 수 없었던 熱化學反應이 있는 燃燒現象에도 LDV를 應用하고 있다. 그 應用例로는 亂流擴亂火焰¹⁷⁾, 燈의 流速測定¹⁸⁾, 産業用 Burner의 流速分布測定,¹⁹⁾²⁰⁾ 點火時의 燃燒流²¹⁾ Engine內의 Gas流動²²⁾, Engine排氣 Gas流測定²³⁾ 등이 있다. Fig. 10에는 Swirl Flame에 對하여 測定한 1例을 나타낸다.²⁴⁾ 그러나 燃燒現象에 있어서는도 상당한 問題가 있으며 다음과 같은 代表的인 경우에 對하여 說明한다.

a) 燃燒火焰으로부터의 輻射

燃燒流에서는 火焰에서 나오는 輻射光이 있으므로 Doppler信號의 S/N비가 매우 나빠진다. 이 背後光을 除去하기 爲하여는, 高出力의 Laser를 使用하거나, 短波長의 Laser를 使用하여 散亂光을 強하게 하고, 測定體積을 光學적으로 擴大하여 背後燃燒輻射光을 PM의 感知值以下로 한다. 또는 Laser光만을 通過하는 狹帶域의 Filter를 使用하는 方法, 輻射光에는 없는 波長의 Laser를 使用하는 方法 등을 利用할 수 있다.

b) 觀測窓의 汚染

燃燒에 依하여 發生되는 그을름(Soot), 물방울과 散亂粒子 등이 觀測窓에 묻어서 觀測窓이 더러워지게 되

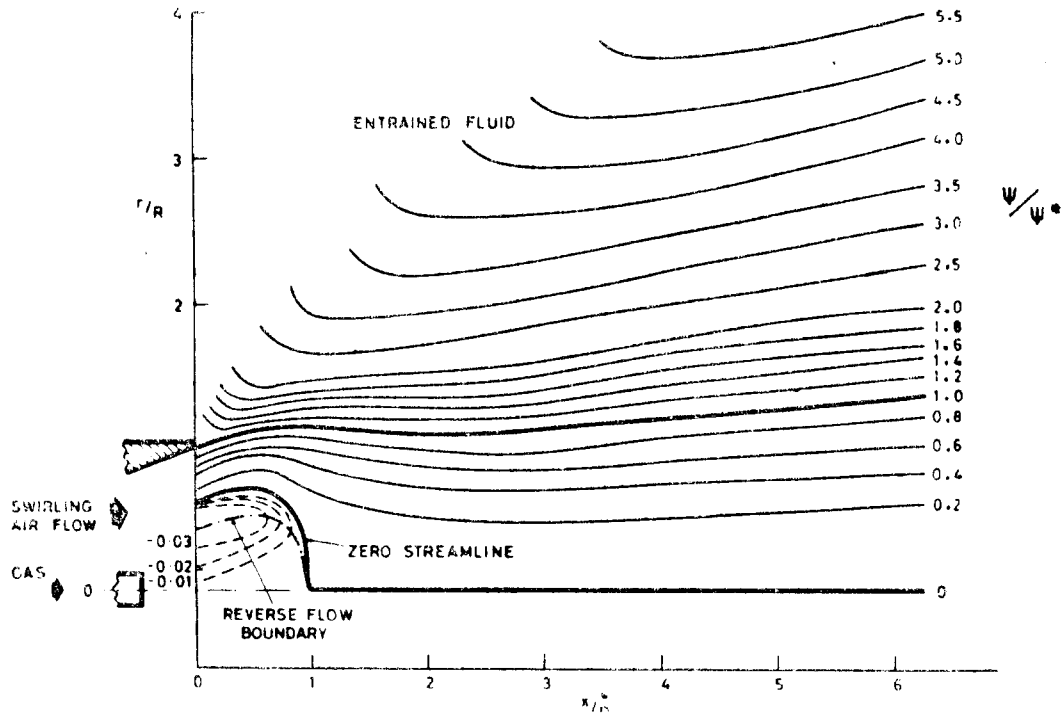


Fig. 10. Swirl의 Flame Skokes Streamline

고信號強度가 弱하게 되므로 S/N비가 나빠지게 된다
 특히 入射光側窓의 더러움은 干涉縞에 惡影響을 미치게
 되므로 窓유리의 溫度를 高溫으로 유지시켜 觀測窓
 의 汚濁을 줄이는 것이 좋다.

c) 屈折率의 變化

燃燒에 依하여 溫度, 壓力 및 Gas 組成이 變化하게
 되므로 屈折率도 當然히 變化한다. Gas를 空氣로 하고
 壓力이 一定한 경우에는, 溫度가 $t^{\circ}\text{C}$ 만큼 變化하였을
 때, 屈折率 n_t 는

$$(n_t - 1) = (n_0 - 1) / (1 + t/273)$$

로 주어진다.

여기서 n_0 는 0°C 에서의 屈折率이다. 또 溫度가 一定하
 고 壓力이 p 가 되었을 때는

$$(n_p - 1) = (n_0 - 1) \cdot p/p_0$$

이다. 여기서 p_0 는 基準狀態의 壓力이다. 따라서 溫度
 와 壓力이 同時에 增加하는 경우에는 相殺效果가 있
 으나 어느 한 쪽만 急激히 增加할 경우에는 屈折率도 큰
 變化를 가져온다. 이 경우 光線의 偏向에 의해서 測定
 點이 移動하거나, 入射光線이 交差하지 않게 되기도
 한다. 對策으로는 測定對象이 許容되는 限 入射光線의

交差角을 작게 하고, 干涉縞方式에서는 測定周波數가
 散亂光의 方向에 關係없기 때문에 受光側에서는 屈折
 率의 影響을 받지 않으므로 干涉縞方式의 光學系를 使
 用토록 한다. 그러나 아주 急激히 屈折率이 變化하는
 경우에는 아직도 解決策이 없다.

d) 測定體積의 極小化

그을름 (Soot)이 多量發生되는 경우에는, 入射 Laser
 光線의 交差部以外에 存在하는 다른 粒子로부터의 散
 亂光에 干涉을 받게 되므로 測定體積을 작게 하고 受光
 系를 適節한 位置로 移動하는 것이 좋다.

e) 其他

이 以外에도 燃燒의 경우에는 壓力, 溫度의 變化에
 依한 Biasing效果²⁵⁾, 散亂粒子의 選擇問題 등이 남아
 있다.

8. 結 言

Laser光은 單色性, 可干涉性, 指向性 및 高에너지密
 度等 優秀한 特徵을 가지고 있으므로 通信, 加工, 計
 測, 情報處理醫療等 多方面에 應用되고 있으나 여기서

는 其의 하나인 Laser流速計에 對해서 解説을 하였다. LDV는 前記한 바와 같은 長點이 많기 때문에 지금까지 測定不可能하리라고 생각되었던 分野의 流速測定도 可能하게 하고 있다. 따라서 今後의 LDV를 利用한 實驗의 發展이 期待되는 바이며 國內에서도 서울大工大에서 最初로 LDV를 購入하여 이를 利用한 研究가 몇가지 進行中에 있다.

끝으로 LDV를 利用한 實驗을 하는中, Laser光에 對한 눈의保護 散亂用粒子에 對한 呼吸器의 保護等에 對하여 留意할 必要가 있다는 것을 付記한다.

參 考 文 獻

- Self S.A., Whitelaw J.H.; *Combustion Science and Technology*, 13(1976)
- 小保方; 레이저流速計による筒内ガス流動의測定, 內燃機關, Vol.16, No.203(1977), pp.51~60.
- 中谷, 山田; 레이저도플러流速計とその應用, 日本機械學會誌, Vol.81, No.716 (1978), pp.650~656.
- Proceedings of the LDA-75 Symposium* (1975), Technical University of Denmark.
- Minnesota Symposium on Laser Anemometry*. (1975), University of Minnesota.
- Durst F. and et al.; *Principles and Practice of Laser Anemometry*(1976), Academic Press.
- Durrani T.S., Greated C.A.; *Laser Systems in Flow Measurement* (1977), Plenum Press.
- Watrasiewicz B.M., Rudd M.J.; *Laser Doppler Measurement* (1976), Butterworths.
- Reishman M.M., Tiederman. W.G.; *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.70, No. 2 (1975).
- Mizushima T., Usui H.; *Reduction of Eddy Diffusion for Momentum and Heat in Viscoelastic Fluid in a Circular Tube*, The Physics, of Fluids, Vol. 20, No. 10 (1977) pp. S100~S108.
- 中谷, 小西, 山田, 阪部; 可變周波數偏移레이저도플러流速計による純流體素子内の非常流의測定, 計測自動制御學會論文集, 第13卷, 第6號(1977), pp. 603~608.
- Griskey R.G., Balmer R.T., Brinkley J.L.; *An Automatic Scanning LDV System*, Ref. 5, pp. 217~230.
- Walsh M.J.; *Influence of Drag Coefficient Equations on Particle Motion Calculations*, Ref. 5, pp. 293~326.
- Johnson D.A., Bachalo W.D., Modarress D.; *Laser Velocimeter Supersonic and Transonic Wind Tunnel Studies*, Ref. 5, pp.68~82.
- Einav S., Lec S.; *Measurement of Velocity Distributions in Two-Phase Suspension Flows by the Laser-Doppler Technique*, Review of Scientific Instruments, Vol. 44, No. 10 (1973)
- Birchenough A., Mason J.S.; *Laser Anemometry Measurements in a Gas-Solid Suspension Flow*. Optics and Laser Technology, (1976) pp.253~258.
- 高城, 中; 亂流擴散火炎における流速とみだれの測定, 燃燒研究 (1978), pp. 17~27.
- Baker, R.J., Hutchinson P., Khalil E.E., Whitelaw J.H.; *Measurements of Three Velocity Components in a Model Furnace with and without Combustion*, 15th Symposium (International) on Combustion, (1974), pp. 553~559.
- Baker. R.J., Bourke P.J., Whitelaw J.H.; *Application of Laser Anemometry to the Measurement of Flow Properties in Industrial Burner Flames*, 14th Symposium (International) on Combustion, (1972), pp. 699~706.
- Baker R.J., Hutchison P., Whitelaw J.H.; *Velocity Measurements in the Recirculation Region of an Industrial Burner Flame by Laser Anemometry with Light Frequency Shifting*, Combustion and Flame, Vol. 23 (1974), pp. 57~71.
- Nakatani N., Konishi T., Yorisue R., Yamada T.; *A Laser Doppler Velocimeter with Variable Frequency Shift for Combustion Flow Measurement*, 1977 Tokyo Gas Turbine Congress, (1977), pp. 461~470.
- 小保方, 淺沼; 火花點火機關の燃燒室内におけるガス流動, 日本機械學會論文集, No. 770-9 (1977), pp. 121~126.
- Smart A.E., Moore C.J.; *Aero-Engine Application of Laser Anemometry*, AIAA Journal, Vol. 14, No. 3 (1976), pp. 363~370.
- Chigier N.A., Dvorak K.; *Laser Anemometer Measurements in Flames with Swirl*, 15th Symposium (International) on Combustion, (1974), pp. 573~585.

25. Asalor J.O., Whitelaw J.H.; *The Influence of Combustion-Induced Particle Concentration Variations in Laser-Doppler Anemometry*, Ref. 4, pp. 115~137.
26. Durao D., Durst F., Whitelaw J.H.; *Optical Measurements in a Pulsating Flame*, Imperial College of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, ET/TN/A/14, (1971) London.
27. Baker R.J., Bourke P.J., Whitelaw J.H.; *Measurements of Instantaneous Velocity in Laminar and Turbulent Diffusion Flames Using an Optical Anemometer*, Imperial College of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, ET/TN/A/11, (1971), London.
28. Durst f., Kleine R.; *Velocity Measurements in Turbulent Premixed Flames by Means of Laser Doppler Anemometers*, 6th German Flame Conference, (1973), SFB 80/EM/10.
29. Sparks Jr. G.W., Ezekiel. S.; *Laser Streak Velocimetry for Two-Dimensional Flows in Gases*, AIAA Journal, Vol. 15, No. 1, (1977), pp. 110~113.