

剪切式同軸噴注器之霧化觀察分析

袁曉峰*，林建國，唐紹文**

國立成功大學航空太空工程研究所

E-mail: * yahn@mail.ncku.edu.tw, ** p4897101@mail.ncku.edu.tw

國科會計畫編號：NSC99-2221-E-006-060

摘要

本研究以水及空氣為工作流體，針對剪切式同軸噴注器(shear coaxial injectors)之幾何結構(面積比)及噴注速度(速度比)對霧化效果的影響作為研究目標。主要觀察霧化角(spray angle)、SMD 粒徑分布(droplet size distribution)、二維質量機率分布(2D Mass probability distribution)及均勻度(Patternation Index, P.I.)隨參數之變化；實驗採用(1)正面噴霧流場影像、(2) Malvern 粒徑分析及(3) PLIF 光學觀測等三種不同方式觀測霧化現象；從實驗結果顯示，霧化角受氣體動力作用力之影響，會隨著氣體流速增加而擴張，而氣層厚度的增加則使得霧化液滴受氣層包覆作用而縮減霧化角。SMD 粒徑分布則隨氣/液體速度比增加而粒徑減小，且因液滴持續之空氣動力不穩性，下游區域粒徑較上游端為小；而氣層厚度增加，則因氣層對液滴提供更具持續性之剪切力，其霧化液滴粒徑亦明顯減小。而 PLIF 觀察之液滴二維質量機率分布顯示隨著速度比增加及氣層厚度增加，其霧化液滴分布均勻度亦隨之增加。

關鍵字：同軸噴注器、霧化角、SMD、均勻度

The Observation of the Spray from Shear Coaxial Injectors

Tony Yuan, Jerry Lin, Marx Tang

Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University

Abstract

This research focused on the characterization of the sprays from water/air coaxial injectors. The spray angle, droplet size, and the mass distribution pattern were analyzed by images from digital camera, Malvern droplet size analyzers and PLIF techniques, respectively. Experiments at various velocity ratios (5~40) and different thickness of the annular air flows were conducted. The results showed that the spray angles increased with increasing air velocities as well as velocity ratios. With thicker annular air flows, the spray angles were smaller because of the increasing constrain from the air flow to the droplets. For droplet size observation, the SMD of water droplets decreased with increasing velocity ratio and down stream distance for the effect of aerodynamic instability. With thicker annular air flows, the SMD of water droplets were smaller because of the increase of the continuous interaction between high speed air flow and water droplets. The uniformities or patternation index (P.I.) of droplet mass distributions analyzed by PLIF were shown to increase with air/water velocity ratio as well as the thickness of the annular air flow of the coaxial injector.

The Keywords : Shear coaxial injectors, Spray angle, SMD, P.I.

一、前言

同軸噴注器普遍使用於以液態氫(LH₂)/液態氧(LOX)為推進劑的液態火箭上；其工作原理為利用內管液體氧化劑噴流與外圍高速燃料氣體的速度差所產生之剪力效應，造成噴流表面破裂進而產生霧化液滴；其目的為增加推進劑混合度及蒸發速率，並且提高其容積釋熱率(Volumetric heat release rates)，達到增加燃燒效率的效果[1]。

影響同軸霧化現象的參數極多，如噴注器的形式及結構設計、操作條件、環境壓力以及工作流體本身物理性質等；其中像是液體的黏滯性(viscosity)具有降低破碎速率及穩定霧化效應(damping)的影響[2]；增加液/氣間相對速度、環境壓力則能增強霧化現象[3]，造成霧化角度擴張並減小霧化液滴尺寸；通常在實驗分析時常整合所有參數，以無因次參數進行討論，如利用雷諾數(Reynolds number)、韋伯數(Webber number)等對同軸霧化的現象進行分類[4]。

同軸噴注器的設計對於液態火箭推進系統是非常重要的環節，因為噴注器霧化的現象控制著火焰的穩定性以及燃燒壁內的溫度分布；因此過去的研究特別將霧化的現象特徵化，如霧化角主要是表達霧化液滴的空間分佈，其原理為液滴顆粒的慣性力(inertia)使得液滴從液氣作用面的剪力邊界層脫離[5]；而破碎距離則是代表液注噴流從噴注面到液柱開始斷裂的距離，為設計燃燒室長度之重要參考依據；而液滴粒徑分布則與影響著火焰溫度的分布，主要是由韋伯數及相對速度為最主要影響參數，其他如工作流體之密度比、表面張力(surface tension)、黏滯力也會影響粒徑分布的現象[6]。

在 1940 年代即開始研究以液態氫及液態氧為推進劑組合的液態火箭，目前使用的如美國的太空梭主引擎(space shuttle main engine : SSME)、土星號的 F-1、歐洲亞利安火箭的主引擎(Ariane 5, Vulcain engine)及俄羅斯的 RD-180 火箭等；其優點為具極高的比衝值(I_{sp})及無毒的

特性，且主要推進器皆選用同軸噴注器(coaxial injector)作霧化及混合推進劑之用。

國內因缺乏高推力液態火箭的實驗研究，而國外這方面的文獻又列為機密取得不易，因此本研究針對上述所提及的實驗參數，設計多組不同內外孔徑(面積比)之同軸噴注器與液/氣操作流速組合，以水/空氣為工作流體在常壓下進行基礎冷流實驗觀察，透過拍攝正面霧化影像、Malvern 粒徑量測以及 PLIF 觀察霧化範圍等分析方式，建立基本霧化角、粒徑尺寸及粒滴質量分布一系列的研究分析，作為未來設計同軸噴注器及燃燒室的參考依據。

二、實驗設計

本研究以水及空氣為工作流體進行同軸噴注器之霧化混合觀察實驗，其實驗設備由同軸噴注器機構(圖 1)、液/氣體流量供應與控制系統、正面霧化影像觀察設、PLIF 光學量測及擷取系統及 Malvern 粒徑分析儀所組成。並以固定內管(1.4mm)搭配四組不同外管孔徑之面積比(表一)，及液/氣體操作流速組合(速度比)作為實驗參數(表二、三)，進行常壓下冷流霧化觀測實驗。

2.1 正面霧化影像觀察

本實驗利用數位相機(D90)搭配變焦鏡頭拍攝正面霧化流場影像(圖 1)，每次實驗皆固定位置及拍攝條件；可得解析度為 4288*2848 之正面霧化影像，經由影像分析軟體(Photoshop CS2) 進行去雜訊及背景值校正之後，接著利用 Matlab 程式語言軟體進行影像運算分析，可得各下游截面位置之霧化角(圖 1)，其霧化角計算公式如下[7]。

$$\theta = 2 \tan^{-1}(0.5W/L) \quad (1)$$

其中 W 為亮度高斯分布前 85%之寬度，L 則為下游距離(單位皆為公分)；由於上、下游角度各受三角函數運算特性及受重力的影響，僅沿中下游截面位置進行迴歸分析並繪出迴歸直線，可得脫

離迴歸直線之點(由下游往上之曲線斜率變化最大之起始點)，並將此點角度及距離定義成代表此操作條件之特徵霧化角及特徵霧化角位置，作為各組霧化表現之比較基準。

2.2 Malvern 粒徑量測系統

本研究針對面積比及速度比作為實驗參數，使用 Malvern 粒徑分析儀分別量測特徵霧化角位置及整體霧化範圍之 SMD 粒徑分布，量測範圍藉由 2.1 節所拍攝之正面霧化影像圖，沿軸、徑方向每隔 5mm 描繪參考線之方式去建立霧化範圍格點，可知霧化區範圍，進而擷取霧化範圍中所有格點之 SMD 粒徑。

2.3 PLIF 光學觀測系統

本研究以水/空氣作為工作流體並加入雷射染料進行冷流霧化實驗，由於 CCD 攝影機所拍攝影像之激發強度正比於液滴質量，影像經計算得觀測範圍之二維機率分布圖(2-dimensional probability distribution)，其機率公式如下。

$$P_{x,y} = \frac{m_{x,y}/\Delta x \Delta y}{\int_a^b \int_c^d (m_{x,y}/\Delta x \Delta y) dx dy} \quad (2)$$

此外，利用 Tate 提出的均勻度(patternation_Index, P.I.)[8]概念可得知觀測區域之霧化均勻程度，其公式如下：

$$P.I. = \sum_{x,y} \left| \frac{1}{N} - \frac{P_{x,y}}{\sum_{x,y} P_{x,y}} \right| \times 100 \quad (3)$$

其中 N 代表總質量前 95% 機率數，其代表意義為霧化面積內之各點霧化機率與總機率的差值總和，可以表達霧化範圍內霧化液滴質量分布之均勻程度，其 P.I. 值範圍為 0~200，P.I. 值為 0 時代表其霧化液滴質量分布情況最為平均。

三、結果及討論

本實驗觀察同軸噴注器霧化現象以霧化角、SMD 粒徑分布、質量分布及均勻度作為觀測目標，進行一系列針對不同速度比、面積比等參數的分析比較及收集系列數據，以此作為未來修正或設計同軸噴注器之參考。

3.1 噴注速度對同軸噴流特徵霧化角之影響

在常壓環境下，固定噴注器面積比為 5.9，分別拍攝固定液體流速 3、5、7m/s，隨氣體流速增加的正面霧化影像，進行影像分析並計算之後，可得各組條件之特徵霧化角。實驗結果顯示(如圖 2)，由於液/氣間相對速度提高使得空氣動力作用力增加，特徵霧化角會隨著氣體流速增加而逐漸擴張，但是當氣體流速增加到一定值之後(此操作條件下氣體流速為 90m/s)，其特徵霧化角增加的現象則漸漸趨緩，可說明當氣體流速增加到極限值時，多餘的氣體動力作用力並無法幫助霧化角度的繼續擴張；而液體流速至 5、7m/s 時(如圖 3)，由於相對速度增加量(與 3m/s 相比)較小，其空氣動力作用力增加量減少，造成其整體特徵霧化角較小；且由於氣體流速並未達到操作條件下之極限值，其特徵霧化角成長現象並未停止。

3.2 面積比對同軸噴流特徵霧化角之影響

由於本實驗所使用之內管直徑固定，因此面積比之增加可視為外層氣層厚度增加；在操作條件設定為三組液/氣流速組合，其速度比皆為 20 的操作條件下，實驗結果顯示(圖 4)，由於外圍未消耗之氣層仍有剩餘動能使得霧化液滴包覆其中，且液滴的慣性力不足以穿透過多餘氣層，其特徵霧化角隨面積比(包覆氣層之厚度)增加而收縮；因此當設計燃燒室時，就必須考量到面積比所帶來的影響。

3.3 速度比對同軸噴流特徵霧化角之影響

從 3.1 節知當液/氣相對速度不同時，會造成特

微霧化角有所差異，為了整合各種液/氣的速度組合對特徵霧化角的影響，本實驗利用速度比作為分析參數，其定義為氣體流速與液體流速之比值 V_g / V_l ，綜合四組面積比及多組流速組合的實驗結果顯示(如圖 5)，其特徵霧化角隨速度比之變化之趨勢，主要可分為兩個區域：(1) $V_r < 20$ ；此區域其特徵霧化角與速度比的關係為高度正相關，特徵霧化角隨速度比增加而提高，而面積比在此區域對於霧化角角度影響較小，可推論為此區域液/氣相對流速較低，其氣體動力作用力不足以完全霧化，因此面積比增加的影響相對來說較不顯著；可稱此區域為霧化成長區。(2) $V_r > 20$ ；此區域其特徵霧化角隨速度比增加而快速擴張，特徵霧化角呈現小幅度震盪，是由於中心噴流流速不同(相對速度差異)所造成之影響，且特徵霧化角隨面積比增加其角度漸縮，則與 3.2 的結果相同，是由於外圍未消耗之氣層仍有剩餘動能，使得霧化液滴包覆其中且無法穿透多餘氣層，也因此這區域中面積比的影響較為顯著；而當速度比增加至 30 時，呈現較平緩且穩定之狀態，特徵霧化角已不隨速度比之增加而急劇變化；可稱此區域為霧化穩定區。

3.4 速度比對於特徵霧化角位置之SMD粒徑分布之影響

本研究在 2.1 節已定義特徵霧化角位置為操作條件下霧化完全發展的參考位置，可作為霧化比較的基準；因此 SMD 粒徑分布的實驗設定面積比為 3.45，分別使用速度比為 25(液體流速 4m/s、氣體流速 100m/s, A 組)及 15(液體流速 4m/s、氣體流速 60m/s, B 組)為實驗參數，觀測各組特徵霧化角位置之 SMD 粒徑分布分析；作為速度比對內部霧化程度之比較，由實驗結果可知(如圖 6)，A 組的霧化液滴 SMD 粒徑較大，且可量測之霧化範圍僅為左右各 0.5cm；而 B 組的霧化液滴 SMD 粒徑較小，而可量測之霧化範圍為左右各 1.0cm，顯示較低的速度比，其氣體動力作用力所造成的剪力效果較低，霧化液滴的 SMD 粒徑較大，且粒徑分

布較不平均，而當速度比增加時，剪力效應造成霧化效果增加，霧化液滴的 SMD 較小，粒徑分部呈現較平緩分布的現象，且霧化範圍增加；因此可知相對速度(速度比)對於霧化液滴 SMD 粒徑大小及分布的具有強烈的影響。

3.5 面積比對於特徵霧化角位置之SMD粒徑分布之影響

而針對不同的面積比參數，進行的 SMD 粒徑分布實驗，其實驗操作條件則設定速度比為 25(液體流速 4m/s、氣體流速 100m/s)為固定參數，分別使用面積比為 3.45(A 組)及 12.76(B 組)的同軸噴注器，量測其特徵霧化角位置之 SMD 粒徑分布；從實驗結果顯示(如圖 6)，A 組的霧化液滴 SMD 粒徑較小，且可量測之霧化範圍僅為左右各 0.5cm；而 B 組的霧化液滴 SMD 粒徑較大，而可量測之霧化範圍為左右各 1cm；其原因為在速度比為 25 時，氣體動力作用力對液柱行強烈的剪力作用，具有較佳的霧化效果，因此 A、B 兩組霧化液滴的 SMD 粒徑較小且差異不大，僅由於 B 組的氣層厚度較大，可提供的氣體動力作用力較為充足，因此中心部分受到更多的剪力作用，其中中心霧化液滴的 SMD 粒徑較 A 組小，但是霧化範圍卻受外圍未作用氣層動能影響，霧化液滴無法穿透，其霧化範圍也較小；而 A 組則由於氣層厚度較薄，所能提供的氣體動力作用力較少，因此中心部份的霧化液滴 SMD 粒徑與左右差異較大，但霧化範圍卻因此較為擴張；此結果可作為設計燃燒室及同軸噴注器的重要參考。

3.6 霧化範圍整體SMD粒徑分布

而整體 SMD 粒徑分布的實驗，其操作條件為使用面積比 3.45 的同軸噴注器，以速度比 25(液體流速 4m/s、氣體流速 100m/s)的噴注速度下進行 SMD 粒徑量測，從實驗結果顯示(如圖 7)，可看出在其特徵霧化位置 2.8cm 時，其霧化液滴 SMD 粒徑值最大，隨著下游距離增加，霧化液滴 SMD 粒徑較小且逐漸呈現較為平緩的高斯分布情

形；而可量測之範圍也從2.8cm處的左右各1cm漸漸增加，至下游8cm位置已達左右各2cm的範圍。從此結果可推論，上游流場部分由於氣層的氣體動力作用力持續的對液柱進行剪力作用，中心及左右液滴持續破碎，其SMD粒徑不斷下降，且霧化液滴向外擴散；但隨著下游距離增加，外圍氣層已無足夠的動能使得霧化液滴繼續破裂，僅剩下液滴間相互的碰撞反彈及融合現象，保持著穩定的粒徑，因此越下游處左右各點SMD粒徑差異越小，且SMD粒徑分布均勻(分布較為平緩)。

3.7 同軸霧化現象之整體質量分布

本實驗最後利用PLIF光學觀測系統去觀察特徵霧化角位置其質量分布現象及均勻度(P.I.)隨速度比及面積比的實驗參數下之變化；實驗結果顯示(如圖9)，固定面積比為3.45(A組)時，隨著速度比增加，其二維質量分布面積向四周擴張，與3.1節所得之特徵霧化角隨速度比增加趨勢相同，可相互佐證；且速度比的增加，也使得霧化範圍內之質量機率分布較為平均，均勻度隨著速度比增加而增加(P.I.值下降)；而當面積比增加為9(如圖10)時，速度比對於二維質量機率分布的增加趨勢雖存在，但整體霧化範圍已較A組有明顯變小，其原因則與3.2節之結果相同，由於氣層厚度增加使得霧化液滴無法穿透氣層所致；而比較均勻度與速度比的關係，依然得到均勻度會隨著速度比增加而增加(P.I.值下降)的趨勢；另外從3.5節的結果可知，在相同速度比下，面積比(氣層厚度)的增加能提供較多的動能進行剪力作用，因此霧化效果增加，造成SMD粒徑較小且平均的結果，但從二維質量機率分布圖所計算出的均勻度進行比較，發現在相同速度比下，面積比的增加其均勻度不增反減(P.I.上升)，是因為P.I.值之計算公式(3)中有包含霧化面積(即N)參數的影響，所以均勻度(P.I.值)必須在相近的霧化面積下才能進行比較，若霧化面積差異過大，則P.I.值並無法作為霧化均勻程度的比較；綜合分析兩組的比較結果，可得霧化範圍及均勻度皆隨著速度比的增

加而有增加的趨勢，而面積比(氣層厚度)的增加，則會造成霧化範圍的內縮及中心區域質量較為集中的現象。

四、結論

本論文以同軸霧化器之面積比及速度比作為冷流實驗之參數，觀察噴流霧化之現象。實驗結果顯示(1) 在常壓下，固定面積比情況下，其特徵霧化角隨著氣體速度增加而擴張；而面積比(氣層厚度)增加時，在相同操作條件下，其特徵霧化角則隨氣層厚度增加而收縮；另外，特徵霧化角隨速度比增加具有明顯的段落分布趨勢；(2) 特徵霧化角位置SMD粒徑分布在固定面積比情況下，增加速度比時其霧化範圍內SMD粒徑減小，可量測範圍及徑向方向上之SMD粒徑差異較小；而當固定速度比情況下，增加面積比亦會造成霧化範圍內SMD粒徑減小，SMD粒徑分布較為平均但可量測霧化範圍則會減少，且面積比的改變對於SMD粒徑大小改變幅度並不如增加速度比之影響強烈；(3) 由整體霧化範圍內之SMD粒徑分布顯示，發現其中心SMD粒徑隨下游距離增加而下降，其SMD粒徑分佈平均，因此呈現較為平緩之高斯分布現象。(4) 由特徵霧化角位置之二維質量機率分布結果，可知霧化面積及均勻度均隨著速度比增加而增加(P.I.值下降)，而面積比(氣層厚度)的增加，霧化面積收縮，其霧化液滴質量主要集中於中心區域。

致謝

本研究承國家科學委員會計畫編號[NSC99-2221-E-006-060-]液態火箭同軸式噴注器之霧化混合研究補助謹此致謝。

參考文獻

- [1]Lefebvre, A. H, "Atomization and Spray", Hemisphere Publishing Corporation, pp3-60, 1989
- [2]Baoye Yang, Francesco Cuoco, Micalo Oswald, "Atomization and Flames in LOX/H₂- and

LOX/CH₄-Spray Combustion”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, No. 4, July-August 2007.

[3]Mayer, W. O. H., “Coaxial atomization of a round liquid jet in a high speed gas stream: A phenomenological study”, Experiments in Fluids, Vol.16, pp 401-410, 1994

[4]Lasheras, J. C., Hopfinger, E. J., “Liquid Jet Instability and Atomization In a Coaxial Gas Stream”, Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 32, pp. 275–308, 2000

[5]Lasheras, J. C., Villermaux E. and Hopfinger, E. J., “Break-up and Atomization of a Round Water Jet by a High-Speed Annular Air Jet”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 357, pp. 351-379, 1998

[6]Engelbert, C., Hardalupas, Y. and WhiteLaw, J. H., “Breakup Phenomena in Coaxial Airblast Atomizers”, Proc. R. Soc. Lond. A., Vol.451, pp 189-229, 1995

[7]Gautam, V., Gupta, A. K., ”Cryogenic Flow and Atomization from a Coaxial Injector”, Journal of Propulsion and power, Vol. 25, No. 1, 2009

[8]Tate, R. W., ”Spray patternation”, Industrial and Engineering chemistry, Vol.52, No.10, pp. 49A-53A, October, 1960

表 1 組合式同軸噴注器之面積比

內管管徑(mm)	外管管徑(mm)	面積比
1.4 (壁厚 0.4mm)	4.8	3.45
	5.6	5.9
	6.4	9
	7.2	12.76

表 2 實驗液氣體流速組合

V _g (m/s)	20	30	40	60	80	90	100	120
V _l (m/s)	3	4	5	6	7			

表 3 工作流體物理特性表

	水	空氣
密度(kg/m ³)	1.205 (293K)	1000 (298K)
表面張力 (N/m)		0.072
黏滯係數 (μPa*s)	15.11 (293K)	893

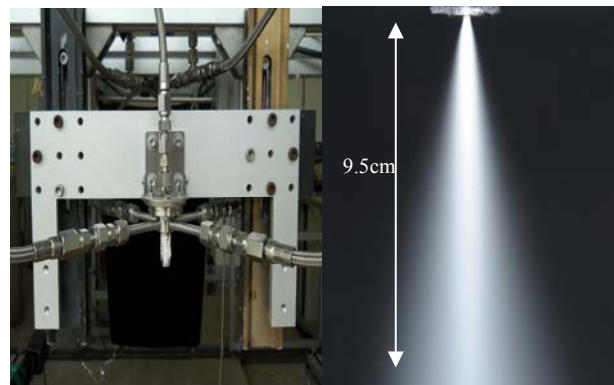


圖 1 同軸噴注器機構與正面霧化影像

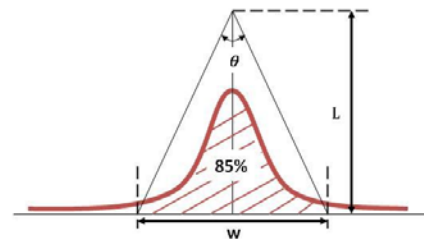


圖 2 霧化角公式示意圖

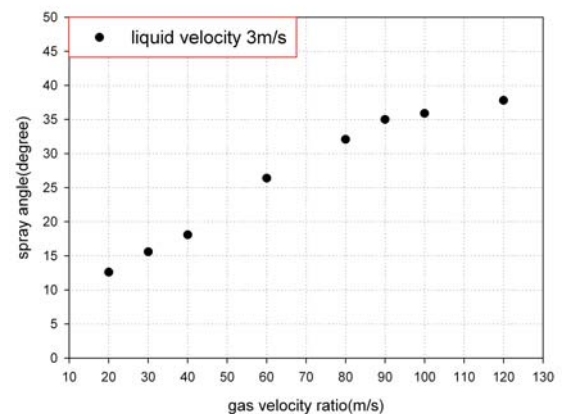


圖 3 固定液體流速 3m/s 隨氣體流速變化關係圖

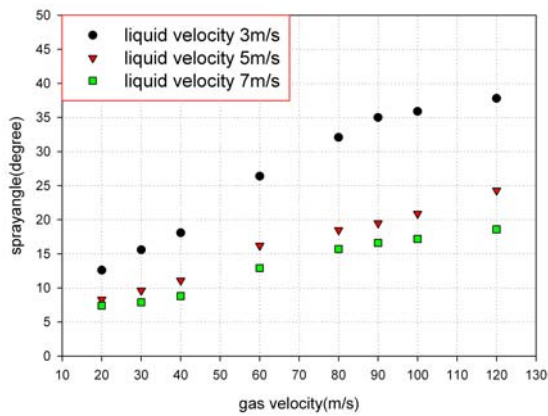


圖 4 液體流速增加隨氣體流速變化關係圖

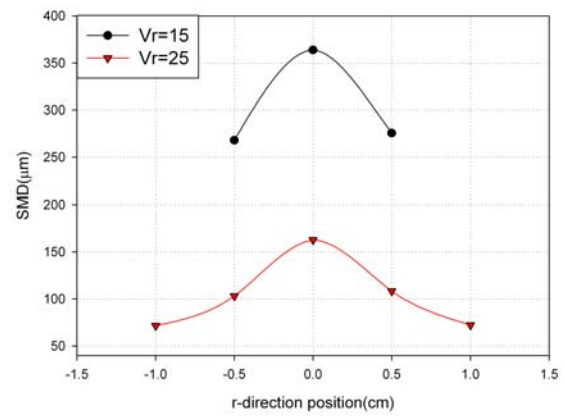


圖 7 速度比改變對特徵霧化位置內 SMD 粒徑分布圖

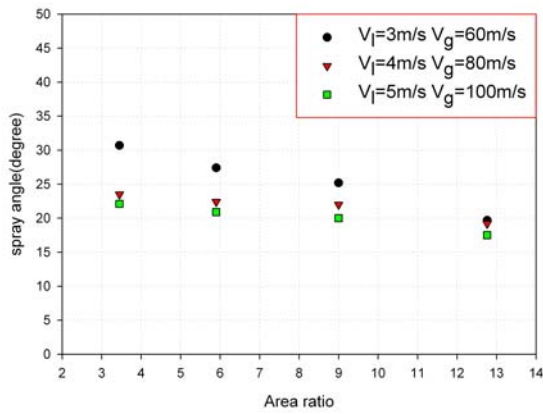


圖 5 固定速度比 20 隨面積比變化關係圖

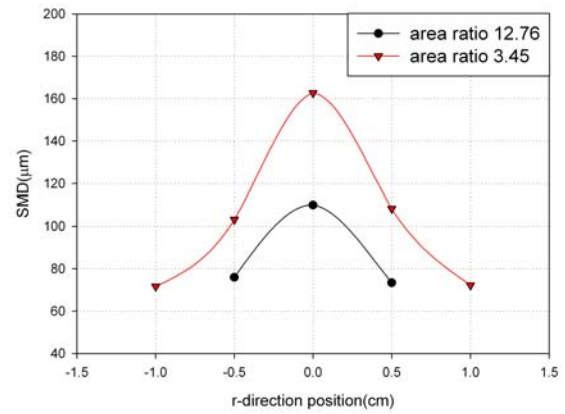


圖 8 面積比改變對特徵霧化位置內 SMD 粒徑分布圖

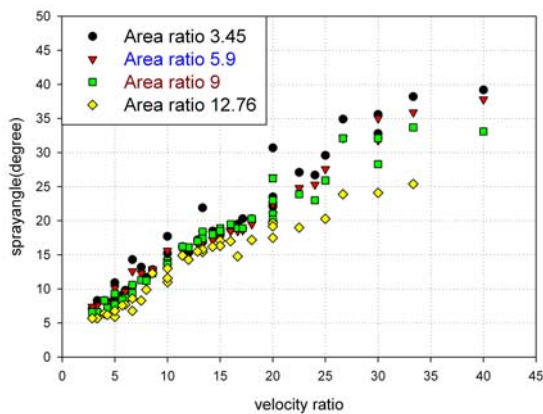


圖 6 特徵霧化角隨速度比變化關係圖

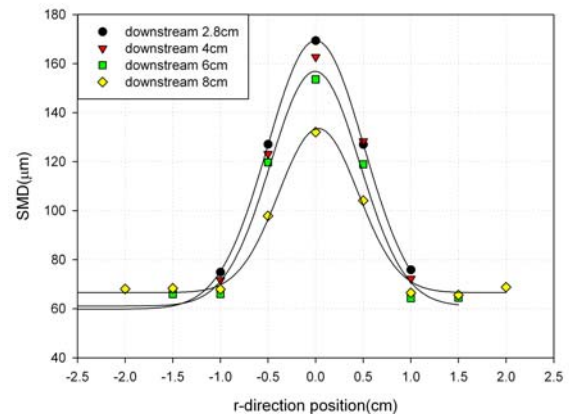


圖 9 整體霧化範圍位置內 SMD 粒徑分布圖

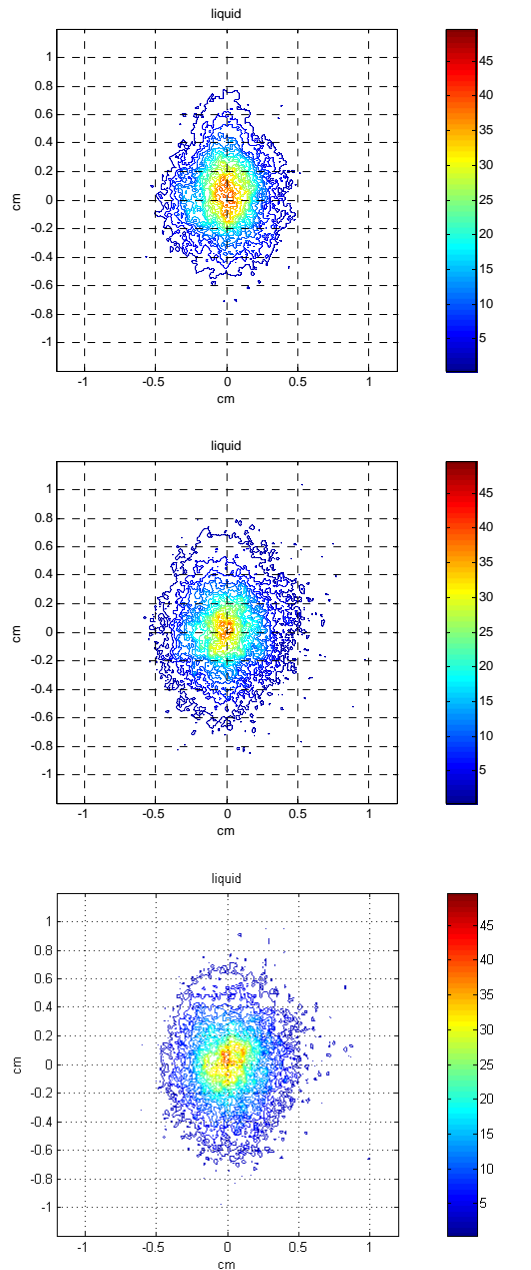


圖 10 面積比 3.45 之特徵霧化位置內二維質量機率分布圖(由上至下分別為速度比 15、25、30，P.I. 值分別為 92、89、80) (最外圈機率為 $4.2 \times 10^{-5} \text{mm}^{-2}$ ，並依此為間距向中心遞增)

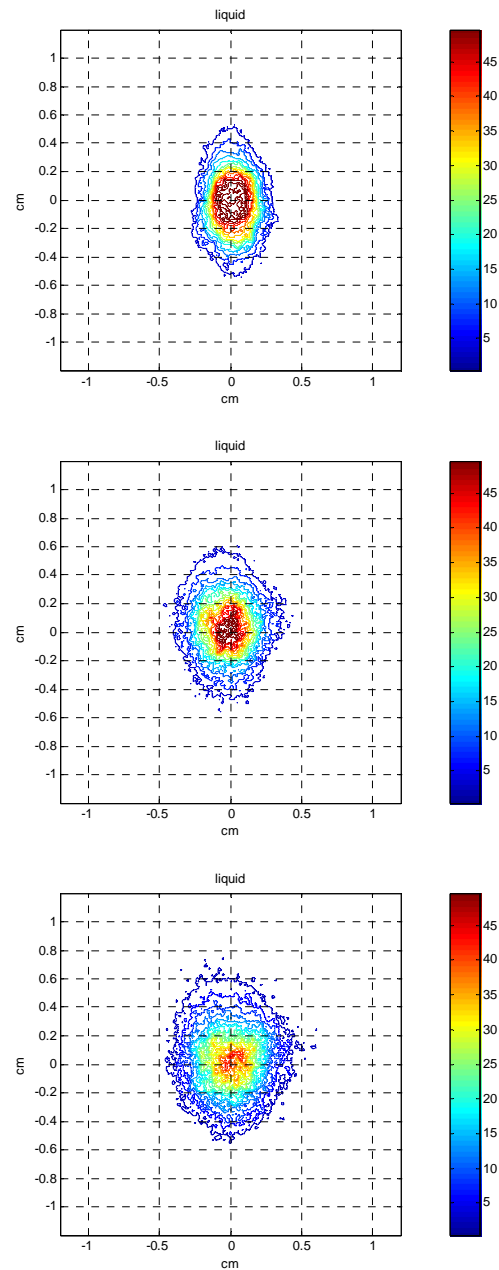


圖 11 面積比 9 之特徵霧化位置內二維質量機率分布圖(由上至下分別為速度比 15、25、30，P.I. 值分別為 95、94、88) (最外圈機率為 $4.2 \times 10^{-5} \text{mm}^{-2}$ ，並依此為間距向中心遞增)