

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

實驗與理論探討上下振動式U型管道內混合對流之研究(第 2年) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 97-2221-E-009-144-MY2
執行期間：98年08月01日至99年07月31日
執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

計畫主持人：傅武雄

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：黃耘
碩士班研究生-兼任助理人員：王元盈
碩士班研究生-兼任助理人員：鄭為陽
碩士班研究生-兼任助理人員：侯泳良
博士班研究生-兼任助理人員：李崇綱
博士班研究生-兼任助理人員：黃玠超
博士班研究生-兼任助理人員：王威翔

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 07 月 02 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

實驗與理論探討上下振動式U型管道內混合對流之研究 2/2

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 97-2221-E-009-144-MY2
執行期間：98年08月01日至99年07月31日

計畫主持人：傅武雄

共同主持人：

計畫參與人員：李崇綱、黃玠超、王威翔、王元盈、黃耘、
鄭為陽、侯泳良

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

中華民國 2010年 07 月 31 日

摘要

本研究主要目的在以實驗方法去探討混合對流在一振動U型渠道內對壁面熱傳效率之影響情形，並搭配數值模擬來提高實驗之可信度。實驗設備大致上可以分為三部份：冷卻渠道、往復運動機構、溫度控制系統，工作流體為空氣。另外使用放煙線法進行流場可視化的拍攝，以實際流場變化情形與數值模擬之流線圖互相驗證，兩者結果非常吻合。

實驗針對不同的進口流體雷諾數和渠道無因次往復振動頻率及不同溫差下來進行討論，由結果得知熱傳效率會因為渠道振動而提高，熱傳增益受到自然對流的效應影響較進口流體雷諾數增加影響較大，相較之下渠道低無因次振動頻率增加及進口流體雷諾數增加影響較不明顯，所得到最大熱傳增益在 51% 以內。且溫度增加會使得自然對流效應增強，使部分加熱區熱傳效率增加，且流體進口與重力相反的情況下受自然對流的影響較重力同向明顯。整體看來混合對流其熱傳效率較強制對流來的好。

In order to investigate the heat transfer phenomena in a U-shaped channel with reciprocating motion, an experimental work is conducted and validated by an auxiliary computational procedure simultaneously. The experimental apparatus consist of three parts, a cooling channel, reciprocating mechanism and heating control. The working fluid is air and the parameters of Reynolds number, temperature and oscillating frequency are varied. In addition, a flow visualization using the

Smoke-wire method is adopted to indicate the flow field and compared with the streamline of the numerical results. The comparisons between experimental and numerical results are consistent well. The results show that the heat transfer rate is mainly dominated by nature convection effect, and less affected by increasing the low oscillating frequency and Reynolds number. The enhancement of the heat transfer is confirmed and within 51% in this study. In general, the aid of mixed convection is to remove more heat than force convection.

一、緒論

近年來因應許多工程上的需要，機械元件所需承受的熱負載也是不斷增加，當元件處於高溫高壓下會縮短其使用的年限並且容易發生破損的現象，為解決此現象所衍生的元件損害與故障，機構熱傳效率的提昇一直是重要的研究課題。在許多機器運轉操作前，事前熱機一方面是工作安全起見，另一方面是為了使機器有更高的熱效率，而為解決機器所能承受的高熱力循環壓力與高溫以確保使用壽命，除了使用能承受更高溫高壓的材料外，更有效率的冷卻散熱系統也是一件刻不容緩的工作。

舉例來說，船舶的引擎為船舶推進的動力來源，假設引擎發生故障，將造成船舶無法正常繼續運作。而位於引擎燃燒室附近之機械元件，因長期處在高溫高壓的熱負載狀態下，容易且經常發生故障。燃燒室內之活

塞，其頂部直接與汽缸內之火焰接觸，除了承受爆炸瞬間的極大壓力外，亦從燃氣中吸收了大量的熱量，若活塞頂部溫度過高，又不能及時冷卻，使用日久，將造成活塞燒損或龜裂，這不只使引擎無法正常運轉，發揮其最大效率，引擎結構複雜，維修不易，也會使維修營運成本增加。

為因應全世界都面臨嚴重的能源危機，除了致力於發展替代能源之外，節約能源政策已在全世界所有國家努力下執行。對於船舶引擎來說，不斷攀升的石油價格增加燃油成本的花費，因此為了降低燃油成本在航運成本所佔的高比例，船舶引擎的發展將朝向低引擎轉速、高溫高壓之熱力循環等方向邁進。為了使船舶的引擎效率提昇，以最少的消耗油量產生最大的輸出動力，勢必要提高燃燒壓力，也因此增加了燃燒溫度。目前船舶柴油主機推進引擎，其內部燃燒室之最大循環壓力與溫度（Maximum cycle pressure and temperature）已高達 120 bar 及 1500°C，活塞在此高溫高壓工作環境下，經常會有損壞的情形。

由於活塞冷卻通道內之冷卻流體會隨活塞作往復運動，其流場與其熱傳特性除與管道的幾何形狀有關外，也會受系統往復運動時所產生的往復力影響，形成脈衝流(pulsatile flow)。在過去，Grassmann and Tuma[1]在 1979 年以實驗量測一受脈動力之平滑管流，於紊流狀態下之質傳特性。結果證明其 Sh No. (Sherwood number)可增加至一般穩態管流的 250%。Patera and Mikic[2]指出此現象是因為流體受脈動力影響，自壁面處產生分離(separation)及回流(flow reversal)

兩種混合(mixing)現象，進而增加了流場的不穩定性(hydrodynamics instability)所造成的效果。Kim[3]等人更利用數值模擬方法，發現受脈動力影響之流場，其熱傳特性也會受其所施的脈動力大小不同而有所差異。Nishimura[4-6]實驗與模擬，利用波浪形管道取代平滑管道研究脈動流的熱傳變化，發現隨著雷諾數增加熱傳率也有顯著的增加，其流動的型態則直接影響熱傳速率，且與往復頻率有關。Bergles[7]在 1996 年的美國國家熱傳會議邀請演講中，指出近年來工業界提昇熱傳性能的技術有環形管流(coiled tubes)、表面粗糙法(rough surface)、衝擊噴射(jet impingement)等實用技術。其中以表面粗糙法之內設凸起物(rib)較被廣泛採用，於工業應用中，很多熱交換器及燃器渦輪葉片內，即利用各種不同形式之凸起物來提昇熱傳性能，因為凸起物本身穿透流場次邊界層(sub-layer)，並引生渦流(eddy)及增加紊流強度(turbulence intensity)，使得熱傳性能得以提昇。而自 60 年代即有許多有關此方面的研究，例如 Webb[8]以實驗量測來探討於平滑管中加裝凸起物對熱傳性能的影響，結果證明其熱傳效果都遠比平滑管來得好。Han[9]以雷諾數從 7000 至 9000 之紊流流場在內設凸起物之方管中進行實驗，發現因加裝凸起物所受的影響，其局部 St 數(local Stanton number)可增加至平滑管的 150% -220%，往後持續性的研究大都朝向改變入口區的形狀、長度，以及改變凸起物的幾何形狀與裝設位置等方面進行。Mackley、Tweddle and Wyatt[10]利用脈衝流流經內有嵌

入擋板的管道中，結果發現 Nu. no. (Nusselt number)跟穩流流經光滑的管壁相比明顯地增加，Mackley and Ni[11]利用脈衝流流經安插週期性擋板的管道，結果發現軸向混合 (radial mixing)效果相當良好，Chang[12]利用實驗量測方法，比較內設凸起物之靜止流場與受往復運動之動態流場的熱傳性能。結果發現往復運動下的熱傳效果，會隨著往復運動速度的增加而提昇，當達到其實驗中的最高往復運動速度時，熱傳效果可比在靜止流場中增加 45%。之後 Chang[13]又對往復平滑面反重力式盲管進行熱傳實驗，發現於往復管中慣性力相對強度提升可提高熱傳但亦增加無因次壁溫，視管壁區間及往復數範圍，增加往復力相對強度可提高或降低無因次壁溫。

比較上述各種增加熱傳量的方法，利用被動式方法是由於受到流場在熱傳面上形成的速度與溫度邊界層妨礙熱量傳出的影響，因此熱傳效率的增加受到限制。根據熱傳導的傅利葉定律，在溫度梯度小的情況下，熱傳量也比較小。因此，溫度邊界層的存在將限制壁面所能傳出之熱傳量。為了大幅提高高溫壁面的熱傳效率，必須移除熱傳面上的邊界層，使高溫壁面直接與低溫流體接觸，進而提高壁面與流體之間的溫度梯度，達到增加壁面熱傳量的目的。因此，Fu et al.[14]採用在加熱壁面上裝置移動薄塊的方式，藉由薄塊在加熱壁面上快速地往復運動有效掃除壁面的邊界層，有效增加管道內的熱傳效果，結果顯示最大的熱傳可以增加98%；之後 Florio[15]也做過類似的模擬，利用一個平板在凸塊前往復振動探討自然對

流熱流的變化，發現熱傳效益在凸塊前有平板振動比沒有平板振動的情況下提升了52%。但是利用薄塊掃除溫度邊界層以增加熱傳效果的方法，由於受限於往復機構必須在溫度邊界層內才能達到要求的熱傳效益，因此無法有效的應用在具有凹槽、凸塊以及複雜幾何形狀外型的管道內壁。以上是利用振動讓熱傳增加，所以有人提出振動對熱傳的影響。例如Fu et al.[16-17]即針對密閉環境中變動加速度和振動對自然對流的影響加以探討，並發現簡明的修正公式以預測共振頻率及紐塞數的變化。Kim[18]在實驗中，發現了振動頻率變化會影響熱傳的傳遞，但是往往熱傳率的最大值不一定是在頻率最大的時候，而是會在一個特定的自然頻率下產生共鳴，稱之為共振頻率。Fu 與Huang[19-20]利用數值分析的方法探討垂直通道中，加熱振動面之振動頻率、振幅以及雷利數 (Rayleigh number) 對於自然以及混合對流的影響；在相同的雷利數下，加熱面以不同的振動頻率與振動幅度之組合下，其熱傳速率有可能會小於固定不動的狀態，也就是在不同的振動頻率與雷利數組合之下可以找到一臨界振動頻率，並可利用振幅與雷利數來表示之。

對於如何改善活塞頂面溫度，在實際物理模式下廖[21]對於活塞頂部高溫面下方加裝一冷卻流道，並採取二維 ALE 方法進行數值分析，並針對不同噴入氣流的雷諾數，活塞震盪頻率，活塞振幅，比較其熱傳效益。其結果顯示當雷諾數愈高，流體可以帶走愈多的熱；另外當活塞振動頻率愈高時，隨時間的平均熱傳率會增高；

當振幅增高時，一個週期內的最高熱傳率會增高。賴[22]的研究認為，實際的活塞頂部受到引擎室爆炸的影響溫度非常之高，該區流場受溫度效應影響的比例非常大，因此自然對流效應不容忽視。因此賴模擬的過程中，加入了溫度對於自然對流的影響，並針對不同噴入氣流的雷諾數、活塞震盪頻率、活塞振幅、重力方向，比較其熱傳效益。其結果顯示當重力方向和進口流相反時，活塞頂部的流體容易由於高溫而形成溫度層化，導致活塞頂部熱傳效率降低；當進口流體雷諾數變大時，除了導致流體衝擊高溫壁面的現象更加明顯外，流體隨活塞做往復運動期間，流道內部流場的擾動也會隨著雷諾數增加而變大，因此活塞頂部高溫壁面的熱傳效益會明顯的隨著流體雷諾數的增加而增加；而當重力方向和流體的進口方向相同時，由於浮力效應會將高溫流體帶離高溫壁面，因此增加了管道內冷流體接觸高溫壁面的機會，而有使熱傳效率增加的情形。連[23]則是在冷卻渠道上加上一層多孔性介質以探討其熱傳效應，結果顯示加入多孔性介質後的確能有效改善活塞頂部高溫壁面的熱傳；活塞開始振動時，在低浮力效應下的平均紐塞數變化較大，但其對整體時間平均的紐塞數而言還是比高浮力狀況下來的大，這也就說明浮力效應加強將會使冷卻熱傳效應降低。

余[24]跟陳[25]將廖[21]的模擬做實驗的驗證，其管道與地面水平放置，所對應之 Gr/Re^2 值範圍為 0.03~0.23 之間，未考慮重力影響之自然對流，主要以強制對流為主，靜止的狀態下其頂部之強制對流熱傳效率

以前段最好、中段次之、後段加熱區最差；在相同的雷諾數下，熱傳效率並不會因為震動頻率升高而呈現逐漸增加或減少的趨勢，但是內部流場存在一個自然頻率，在此頻率下可以大幅度的提升頂部熱傳；在相同的振動頻率下，熱傳效率會因雷諾數的提升有增加的趨勢。

林[29]將賴[22]的模擬做實驗的驗證，也考慮到實際引擎運轉方向也與地面垂直，將根據自然對流引發的浮力效應做混合對流之實際的驗證，並與模擬相互對照，且在考慮重力的影響下 Gr/Re^2 值的範圍為 0.8~6.47 之間，將 U 型渠道垂直擺置，探討進口流體與重力方向同向來進行熱傳效率分析，實驗結果可發現渠道振動之後依然是前段最好、中段次之、後段加熱區最差，且在各個振動頻率下，隨著雷諾數增加其紐塞數也增大，熱傳效益也更好。

比較林[29]和陳[25]的實驗，林[29]有考慮重力影響下之實驗，故自然對流與強制對流效應皆列入考慮與陳[25]的實驗比較，其實驗設備水平放置重力影響較小，且溫度差範圍只有 5 °C，故自然對流效應更小，主要為強制對流，結果得知在開放流道同一雷諾數下，自然對流對於紐塞數的變化有增益的效果，故考慮重力影響之垂直渠道混合對流的散熱效果，比不考慮重力影響之水平實驗較為理想。

二 實驗設備

本實驗將探討活塞內部冷卻渠道之冷卻流體隨活塞進行往復運動對活塞壁面散熱效率影響情形，圖 2-1 (b) 為活塞加裝一冷卻渠道在汽缸內作往復

運動之示意圖，由於活塞會上下進行往復運動，在壁面附近留有一冷卻渠道會隨著活塞進行運動，所以本實驗將實驗設備架設與地面垂直，進一步考慮了重力的影響，從流體進口速度與重力方向同向觀察，希望藉此往復機制可以增加活塞高溫壁面的熱傳效率。為了進行此實驗分析，實際架設一設備如圖 2-2 所示，進行進口速度與重力方向同向之實驗，首先是冷卻流體部份，利用送風機 (1) 提供穩定且連續的空氣來作為工作流體，用以冷卻高溫壁面，空氣經由風機送出以後，利用圓管輸送經方形轉接頭進入冷卻渠道 (4)，冷卻渠道分為延長渠道 (41)、方形套管 (42) 和 U 型渠道 (43)，其中 U 型渠道為本實驗之測試段，因此在渠道的頂部壁面放置自製加熱片，用以提供熱量作為模擬活塞內部的高溫壁面，並方便於實驗時計算壁面紐塞數，進而了解壁面的熱傳效率，並將此部份渠道固定在一往復機構 (5) 上，當往復機構開始運作時，渠道會隨之進行往復運動，此時裡面的冷卻流體受到振動影響，對壁面散熱也會有不同的效果，最後利用個人電腦擷取各項所需數據，經過處理以後進行壁面的熱傳分析。

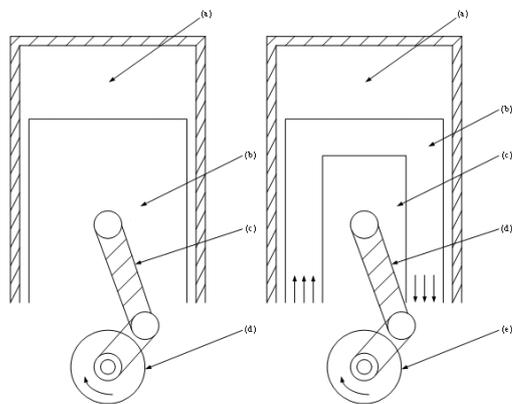


圖 2-1 引擎活塞機構示意圖

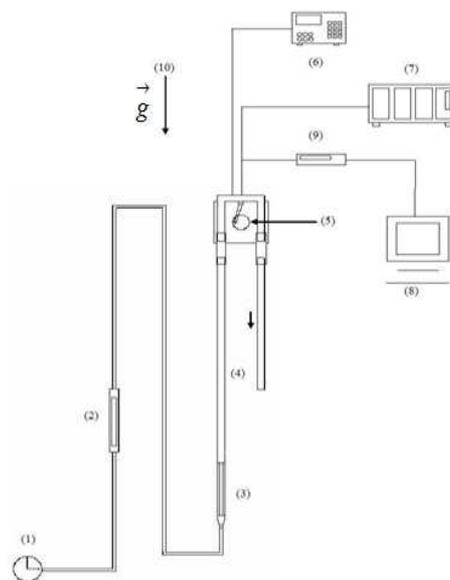


Fig 2-2 實驗設備總圖

由於數值模擬部份設定渠道進行正弦波之往復運動，以下說明為渠道進行正弦波往復運動之原理：

s ：滑塊與連桿接點至套筒圓心之距離
渠道運動位置方程式

$$S = \frac{s}{W} = L_c \sin(2\pi F_c \tau) - \sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2} \quad (2-1)$$

S 的運動範圍為 $-L_c - L \leq S \leq L_c - L$

定義新的座標： $S_p = S + L$

$$S_p = S + L = L_c \sin(2\pi F_c \tau) - \sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2} + L \quad (2-2)$$

S_p 的運動範圍為 $-L_c \leq S_p \leq L_c$

將位置方程式對時間取一次微分可得渠道運動速度方程式

$$V_c = \frac{v_c}{u_0} = 2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau) - 2\pi F_c L_c^2 \frac{\cos(2\pi F_c \tau) \sin(2\pi F_c \tau)}{\sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2}} \quad (2-3)$$

圖 2-6 為式 (2-3) 之結果，橫座標為時間軸，縱座標為無因次渠道振盪速度，當 l/l_c 趨近於無限大，也就

是說連桿長度無限長，渠道往復運動將會呈現正弦波 $S = L_c \sin(2\pi F_c \tau)$ 振盪，一次微分的無因次振盪速度方程式則為 $V_c = 2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau)$ ，當 $l/l_c = 1.5$ 時的速度方程式與理想的弦波振盪則有一段差距，此實驗機構 $l/l_c = 4$ ，由圖觀察得知與正弦波振盪差異甚小。

為得到較佳的高溫壁面與方便量測各點溫度用以計算此實驗之紐塞數，以銅片、鎳鉻絲及巴沙木等材料製成加熱片，並由電源供應器提供電能，使鎳鉻絲發熱產生熱量每片加熱片上均黏有熱偶線，用以量測該點溫度。各組加熱區塊詳細位置如圖 2-8 所示，依流體入口方向加熱區分為前、中、後段加熱區，各個加熱區塊僅中間加熱片為實驗計算所用，上下左右四塊加熱片則為熱保護用。為了減低熱量從組合間縫隙散失，在加熱區塊周圍及後方貼附絕熱泡棉。

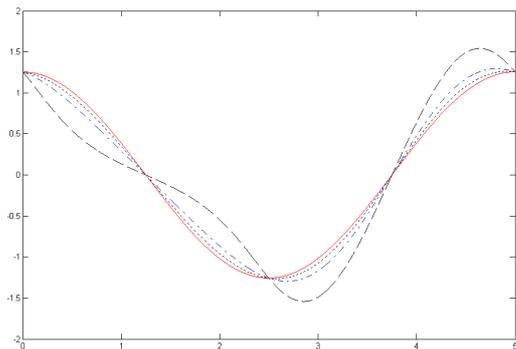


圖 2-6 渠道振盪速度圖

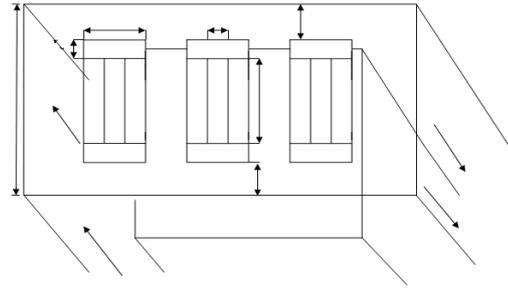


圖 2-8 加熱區段位置圖

(一) 無因次參數

本研究討論的實驗參數，其定義如下：

(a) 雷諾數：

$$Re_w = u_0 \cdot W / \nu$$

W 為 U 型渠道寬度

$u_0 = Q/A$ 為流體平均速度

Q 為空氣流量

A 為渠道截面積

ν 為空氣動黏滯係數

(b) 無因次振動幅度：

$$L_c = l_c / W$$

l_c 為 U 型渠道進行往復運動的振幅

(c) 無因次振動頻率：

$$F_c = f_c \cdot W / u_0$$

f_c 為 U 型渠道進行往復運動的頻率

(d) 參數

$$V_c = \frac{v_c}{u_0} = 2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau) - 2\pi F_c L_c^2 \frac{\cos(2\pi F_c \tau) \sin(2\pi F_c \tau)}{\sqrt{L_c^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2}}$$

(3-4)

v_c 為 U 型渠道進行往復運動的速度

(e) 參數

$$Gr / Re_w^2 = g \times \beta \times \Delta T_w \times W / u_0^2$$

(3-5)

β 為空氣熱膨脹係數

g 為重力係數

三、結果與討論

本章節為探討渠道靜止狀態下及

渠道進行往復運動，對於U型渠道頂部壁面的熱傳效率影響，共分為渠道處於靜態與動態狀態下來進行研究，各項實驗參數的組合情形如表 4-1 所示，而各項參數之不準度分析已於前一章討論，詳細結果則說明於附錄。

實驗完成後先量測靜止狀態下U型渠道頂部壁面溫度，並換算成紐塞數與數值計算做比對，以驗證實驗機構的完備性且增加實驗可信度，隨後再著手討論U型渠道於往復運動狀態下頂部的熱傳效率分析，靜態實驗的流體進口雷諾數範圍從 300、200 到 100，配合溫差 10°C~40°C，每增加 10°C 進行一次實驗；動態實驗的部分，進口流體雷諾數則分別為 300、200，配合溫差 10°C 及 40°C，再搭配無因次振動頻率為 0.2、0.4 進行實驗。由於步進馬達此機構當初設計時的限制故不能進行太高馬達轉速之實驗，最高的轉速大略估計為一秒鐘運轉 3 圈左右，換算成進口流體雷諾數 300 時，無因次頻率為 0.4 已是極限，其他雷諾數因為相對的無因次振動頻率其實上的渠道振盪速度較快，機構強度不足無法負荷長時間的運轉，若是要再加快頻率，機構強度不足，不堪長時間運轉可能會造成往復機構損壞。

實驗首先進行渠道處於靜止狀態下之頂部壁面熱傳分析，此結果用以與渠道進行振動下相互比較以了解振動對於渠道內部熱傳增益情形，進口流體雷諾數從 300、200 和 100，配合溫差由 10°C 增至 40°C，每增加 10°C 進行一次實驗。

在相同的雷諾數下，因為渠道的幾何形狀限制影響下，可以發現U型

渠道頂部之熱傳效率以前段加熱區最好，中段加熱區次之，後段加熱區為最差。為了瞭解其原因由數值模擬得到 $Re_w=300$ ， $F_c=0.0$ ， $\Delta T_w=40^\circ\text{C}$ 之流場的流線圖，如圖 4-2 所示，觀察其原因得知，前段加熱區位於流場入口的位置，受到流體進口直接衝擊的影響且加上浮力的效應，有效的破壞此區域的溫度邊界層，移除熱傳面上的邊界層，使高溫壁面直接與低溫流體接觸帶走了大部分的熱量，壁面與流體之間的溫度梯度增加，達到增加壁面熱傳量的目的，故熱傳效果為三片中最為理想的，平均紐塞數最大；中段加熱區為流體轉彎後較為平順的流過，雖可平穩的帶走熱，但無法破壞熱邊界層，熱傳效果相較第一片較差，平均紐塞數降低；後段加熱區則處於流體將要轉向流向出口，在途中將會發生與壁面分離的現象，在渠道角落的地方則發生迴流現象，當此迴流一旦發生會導致的結果，迴流在角落盤旋且浮力效應，熱也跟著流體在此滯留囤積，導致U型渠道後段熱無法被流體帶走，此區域的流體速度也較低，自然對流效應增強，此時的流場的強制對流效應該無法發揮功用，故熱量只能藉由空氣和巴沙木熱傳導散逸，再者由實驗數據觀察可以明顯看出當熱傳效率降低時，也就是平均紐塞數較低時，其巴沙木熱傳導帶走的比率增大， $Re_w=300$ ， $F_c=0.0$ ， $\Delta T_w=10^\circ\text{C}$ 的後段加熱區其巴沙木熱傳導帶走比率高達 50%，故了解渠道內部的冷卻流體並無法發揮效能。圖 4-3 則為 $Re_w=300$ ， $\Delta T_w=40^\circ\text{C}$ 等溫線分佈圖，前段加熱區的等溫線分佈較密集，表示此區域的溫度變化較劇

烈，溫度梯度較大，故熱傳效果最好，後段加熱區之等溫線分佈相較之下稀疏，故熱量容易累積在此，熱傳效率較差，中段加熱區則介於兩者之間。 $Re_w=300$ ， $\Delta T_w=10\sim 40^\circ\text{C}$ 實驗結果與數值模擬之紐塞數分佈於圖 4-4 至圖 4-7 所示，可看出實驗與數值模擬趨勢大致上相同，都是前段加熱區最高，中段後段加熱區依序次之。

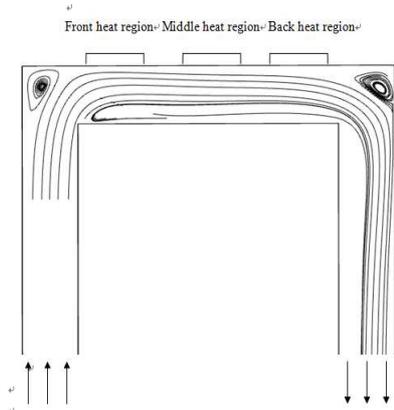


圖 4-2 $Re_w=300$ ， $\Delta T_w=40^\circ\text{C}$ 流線圖

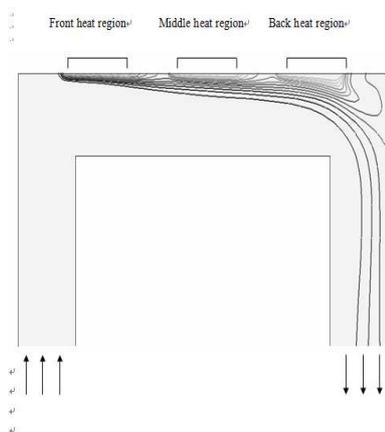


圖 4-3 $Re_w=300$ ， $\Delta T_w=40^\circ\text{C}$ 等溫線分佈圖

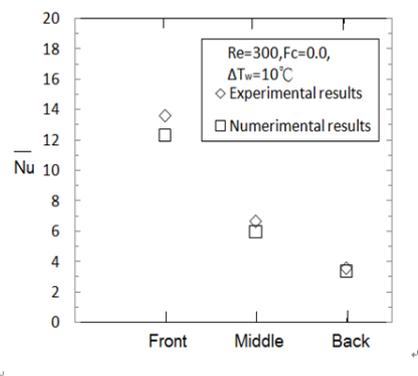


圖 4-4 $Re_w=300$ ， $Gr/Re_w^2=0.40$ ， $\Delta T_w=10^\circ\text{C}$ 靜態實驗與模擬紐塞數(\overline{Nu})分佈

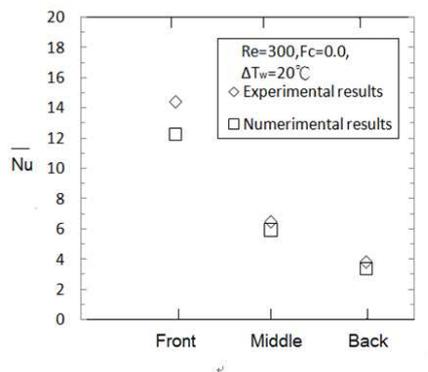


圖 4-5 $Re_w=300$ ， $Gr/Re_w^2=0.81$ ， $\Delta T_w=20^\circ\text{C}$ 靜態實驗與模擬紐塞數(\overline{Nu})分佈

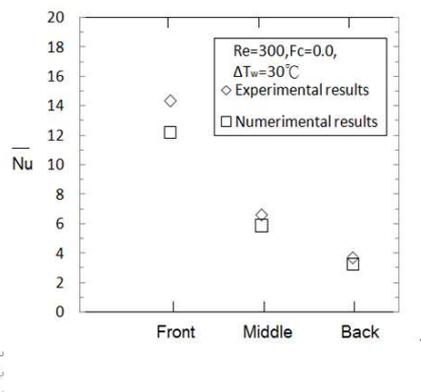


圖 4-6 $Re_w=300$ ， $Gr/Re_w^2=1.21$ ， $\Delta T_w=30^\circ\text{C}$ 靜態實驗與模擬紐塞數(\overline{Nu})分佈

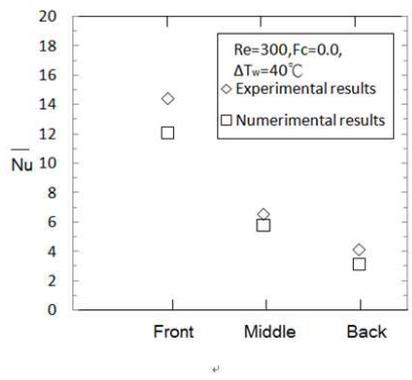


圖 4-7 $Re_w=300$ ， $Gr/Re_w^2=1.62$ ， $\Delta T_w=40^\circ\text{C}$ 靜態實驗與模擬紐塞數(\overline{Nu})分佈

表 4-5 (a) 為進口流體雷諾數 300，無因次振動頻率在 0.2 及 0.4 下之數值模擬和實驗結果之平均紐塞數，並且比較其差異度將其列出，如表所示。

以往復運動下的結果來看，渠道振動之後仍然維持跟靜態時的趨勢一樣，前段散熱最好，中段次之，後段最差，表 4-6 為不同雷諾數下各無因次振動頻率之紐塞數增加率 (En)，其計

算方式為

$$En = (\text{振動下之平均紐塞數} - \text{靜態下之平均紐塞數}) / \text{靜態下之平均紐塞數} \times 100\%$$

表 4-5 動態實驗與數值模擬之結果^(a)

$Re_w = 300$ $F_c = 0.2$	Gr/Re_w^2	0.40			1.62		
	ΔT_w (°C)	10			40		
	heat region	F.	M.	B.	F.	M.	B.
	\overline{Nu} (numerical results)	14.08	6.71	4.56	13.64	6.27	3.96
	\overline{Nu} (experimental results)	15.52	8.06	5.55	16.08	6.76	5.21
	ε (deviation)	9.2%	15.6%	17.8%	15.1%	7.3%	23.9%

表 4-6 渠道在振動下平均紐塞數增益情形^(a)

$Re_w = 300$	F_c	0.2	0.4
$Gr/Re_w^2 = 0.40$	Total russelt number	9.47	10.17
$\Delta T_w = 10^\circ C$	En (enhancement)	19.26%	28.0%

(b)

$Re_w = 200$	F_c	0.2	0.4
$Gr/Re_w^2 = 0.91$	Total russelt number	8.67	8.91
$\Delta T_w = 10^\circ C$	En (enhancement)	36.5%	40.3%

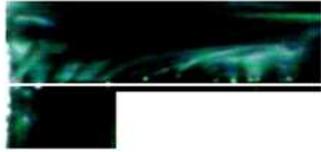
為了印證模擬之真實性，使用放煙線法來進行流場可視化，觀看實際流場是否與數值模擬有相同的現象，而數值模擬是由實驗室 STAR-CD 計算，由於放煙線法不能在流速太快之流場中使用，會造成煙線稀疏難以觀察，同時由於 DV 攝影機進行動態拍攝時一秒鐘只能擷取 30 張圖，故振動頻率太快時擷取出來的圖片會模糊不清，基於以上考量，選定 $Re_w = 300$ ， $F_c = 0.2$ ， $\Delta T_w = 40^\circ C$ 之流場，來進行流場觀測並配合數值模擬在相同狀況下，所得到之流線圖來討論當渠道進行往復運動時流場瞬間變化情形，渠

道的振動由最低點到最高點在到最低點為一個週期。

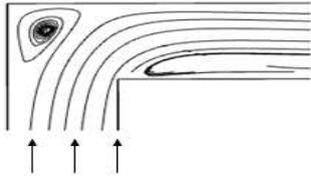
圖 4-31 (b) 為數值模擬得到之靜態 U 型渠道入口處的流場圖，當渠道處於靜態時，由於受到渠道幾何形狀的影響，角落會產生迴流，而圖 4-31 (a) 為流場可視化拍得之結果，左上角出現迴流，大致與數值計算的現象相似。

由數值模擬得知當渠道從最高處向下運動時 ($t=3/4$) 之瞬間流場圖，由圖 4-21 (b) 所示，渠道因向上移動所以靠近 U 型渠道上部附近流體會因為渠道的移動，流體受壁面牽引而去填補因偏離所造成的空洞區域，所以當渠道向下時空洞中會產生流體填補的作用，此時也因流體的流動，而能帶走熱。由圖 4-32 (a) 所示流場中之煙線之空洞區與填補之流體現象與數值模擬之流線非常吻合。

圖 4-33 (b) 為渠道在振動最高點 ($t=2/4$) 時數值計算得到之流線圖，流體順著渠道流到轉角處時，在渠道角落則出現迴流區的現象，此時熱容易囤積，為熱傳效益最為不理想的狀態，須藉由渠道向下振動，使流體向右牽引，才能將熱帶走，大大的提高熱傳效益，其實驗結果為圖 4-33 (a) 所式，其迴流區的現象非常吻合。



(a) 流場可視化

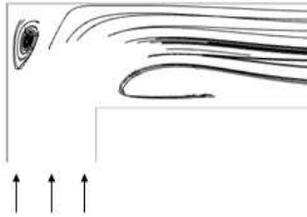


(b) 模擬之流場

圖 4-31

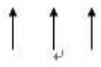
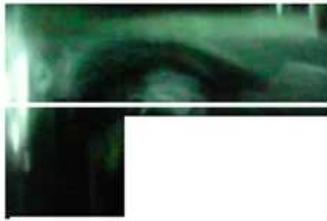


(a) 流場可視化



(b) 模擬之流場

圖 4-33



(a) 流場可視化



(b) 模擬之流場

圖 4-32