

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

利用磁場促進生物流体化床反應器性能之探討 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 96-ET-7-002-009-ET
執行期間：96年01月01日至97年03月31日
執行單位：國立臺灣大學化學工程學系暨研究所

計畫主持人：呂理平

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：徐偉華、盧廷政

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年04月14日

行政院國家科學委員會/經濟部能源局
「能源科技學術合作研究計畫」成果報告

利用磁場促進生物流体化床反應器性能之探討

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC96-ET-7-002-009-ET

執行期間：96 年 01 月 01 日 至 97 年 03 月 31 日

計畫主持人：呂理平

計畫參與人員：徐偉華、盧廷政

成果報告類型：完整報告

處理方式：一年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學化學工程學系

中華民國九十七年五月

摘要

本論文在探討有外加磁場作用下，液、固流體化床之流動模式、分散行為與傳統液、固流體化床之差異。流體化床採用內徑 0.05 m 高約 0.75 m 壓克力管，固相以平均粒徑 274 μm 之鐵粒子為磁性粒子，液相為水及濃度分別為 0.03 wt%、0.1 wt% 與 0.2 wt% 之 CMC(carboxymethyl cellulose) 溶液。床體外部利用漆包線纏繞成的兩螺線管來產生穩定的軸向磁場，使其作用於床體內部之粒子。利用壓力轉換器測量所得之單點壓力降對流體速度之曲線圖，來界定各流態間轉變之速度。並且利用追蹤劑技術分析不同流態區域下的軸向分散情況。

單點壓降實驗中，藉由 Leva 法所得鐵砂粒子之最小流體化速度 $U_{mf}(L)$ 並不會受磁場強度影響；而以 Davidson and Harrison 法所得之最小流體化速度 $U_{mf}(DH)$ 則會隨磁場強度上升而增加。磁滯現象的形成即可決定移轉速度 $U_t(P)$ ，且隨著磁場強度上升而增加。

實驗結果顯示液、固磁流體化床共有四種不同流域，分別為固定床區、過渡區、磁穩定區和不穩定區；由低流速至高流速區分，其間之分隔分別是最小流體化速度 $U_{mf}(L)$ 、最小流體化速度 $U_{mf}(DH)$ 與移轉速度 $U_t(P)$ 。當 CMC 溶液濃度上升，固定床區、過渡區與磁穩定區

的範圍將隨之縮小，而不穩定區即相對擴大。

在軸向分散行為方面，軸向分散係數會隨流體速度上升而增加，而磁流體化床相較傳統流體化床有著較低之軸向分散係數。在使用水 (Newtonian)或 CMC(non-Newtonian)溶液的磁流體化床中，其軸向分散係數均隨磁場強度增加而下降。此外，磁場影響軸向分散係數的效果隨著 CMC 溶液濃度提升而逐漸減弱。

關鍵字：磁流體化床、生物反應器、磁場、非牛頓流体、軸向分散係數

Abstract

In this study, the difference of hydrodynamic and dispersion behavior between the liquid-solid magneto-fluidized (0.05 m i.d. \times 0.075 m height) bed and the liquid-solid traditional fluidized bed was investigated. The sphere iron particles of 274 μm average diameter were used as the solid phase, water and CMC (carboxymethyl cellulose) (0.03 wt%, 0.1 wt% and 0.2 wt%) solution were used as the liquid phase. A magnetic solenoid coiled by the magnet wire was applied to generate axially magnetic field. The dependency of pressure drop on the velocity was used to establish transition velocities between various regimes. The axial dispersion of various regimes was analyzed by the tracer input-response technique.

By Leva's method, the minimum fluidization velocity $U_{mf}(L)$ was not affect by magnetic force. However, by Davidson and Harrison's method, the minimum fluidization velocity $U_{mf}(DH)$ was increased with increasing magnetic field intensity. Further more, the transition velocity $U_t(P)$ determined by the hysteresis phenomenon was increased with increasing magnetic field intensity.

The experimental results show that there were four flow regimes in a magneto-fluidized bed: fixed bed, transition, magnetically stabilized and unstable regime. The boundaries were minimum fluidization velocity $U_{mf}(L)$, minimum fluidization velocity $U_{mf}(DH)$ and transition velocity $U_t(P)$. When the concentration of the CMC solution increased, the range

of fixed bed, transition and magnetically stabilized regime was narrowed down, the unstable regime was enlarged.

Both in the magnetic and the traditional fluidized beds, the axial dispersion coefficient was increased with the enhancing fluid velocity. The axial dispersion coefficient of the magnetic fluidized bed was lower than the traditional fluidized bed. The dispersion coefficient of the water (Newtonian) and the CMC solutions (non-Newtonian) both were decreased with the enhancing magnetic field intensity. Besides, the effect of magnetic field on the dispersion coefficient was decreased with the increasing concentration of CMC solution.

Keywords: magnetic fluidized bed, bio-reactor, magnetic field,
non-Newtonian fluid, axial dispersion

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
目 錄.....	V
圖表索引.....	VIII
第一章 緒論.....	1
第二章 文獻回顧.....	5
2-1. 磁穩定作用	
2-2. 液、固磁穩定流體化床之描述和應用	
2-3. 液、固磁流體化床中最小流體化速度與移轉速度之決定方法.	
2-4. 液、固磁穩定流體化床之軸向分散行為	
2-5. 非牛頓流體之相關研究	
第三章 理論背景.....	21
3-1. 磁性物質之分類	
3-2. 電流與磁場軸向分散係數之預估	
3-3-1 刺激-響應(stimulus-response)法	

3-3-2 數學工具	
3-3-3 分散模式(分散住狀流動模式)	
第四章 實驗裝置與步驟.....	30
4-1. 實驗裝置	
4-1-1 實驗裝介	
4-2. 實驗操作變數	
4-1-2 實驗裝置說明	
4-3. 實驗步驟	
4-3-1 單點壓降測量	
4-3-2 軸向分散實驗	
第五章 結果與討論.....	39
5-1. 液、固磁流體化床單點壓降分析	
5-1-1 磁場對流體化床之作用	
5-1-2 磁場對最小流體化速度之影響	
5-1-3 磁場對移轉速度之影響	
5-1-4 非牛頓流體對於最小流體化速度與移轉速度之影響	
5-2. 液、固磁流體化床之相圖	
5-2-1 液、固磁流體化床之區域流態	
5-2-2 牛頓與非牛頓流體之相圖比較	

5-3. 液、固磁流體化床之軸向分散實驗	
5-3-1 牛頓流體之軸向分散實驗	
5-3-2 非牛頓之軸向分散實驗	
第六章 結論	88
第七章 符號說明.....	90
第八章 參考文獻.....	94
第九章 附錄	
Appendix 1. NaCl 濃度與電導度之關係.....	101
Appendix 2. Lab-view 擷取平均壓力數據程式.....	102
Appendix 3. Labview 擷取追蹤劑濃度程式與濃度曲線圖.....	103
Appendix 4. 軸向分散係數計算方式.....	105
Appendix 5. CMC 流體之物性.....	106

圖表索引

Fig. 1-1	Liquidlike behavior of gas fluidized beds (Kunii and Levenspiel, 1991).	2
Fig. 2-1	Illustration of uniform and divergent magnetic field induced by a solenoid (Liu et al., 1991).	6
Fig. 2-2	(a) The bed at minimum fluidization, (b) the MSB and (c) the bubbling bed (Jaraiz-M et al., 1983).	7
Fig. 2-3	The structure of MSB and fluidization bed (Syutkin and Bologna, 1976).	7
Fig. 2-4	Determination of U_{mf} by method of (A), (B), (C), (D) and (F).	13
Fig. 2-5	Pressure drop in an ideal fluidized bed system and bed voidage vs. superficial velocity.	13
Fig. 2-6	Determination of transition velocity by (a) pressure drop curve method (Cohen and Tien, 1991) and (b) voidage method (Casal and Arnaldos, 1991).	17
Fig. 3-1	The description of wire and magnetic.	23
Fig. 3-2	The typical magnetization curves of, (1) diamagnetic material, (2) paramagnetic material and (3) ferromagnetic material (Cullity, 1972).	23
Fig. 3-3	The various curves of input and output for stimulate-response (Levenspiel, 1972).	26
Fig. 3-4	Typical downstream signal, called the E curve, in response to an upstream δ -function input signal (Levenspiel, 1972).	26
Fig. 4-1	Experimental setup.	31
Fig. 4-2	(a) Distributor and (b) tracer distributor.	33
Fig. 4-3	Magnetic field intensity as the function of (a) axial and (b) radial positions.	35
Fig. 5-1	Pressure drop vs. water velocity at various magnetic field intensities (a)~(d).	40
Fig. 5-1	Continued (e)~(h).	41
Fig. 5-2	Structure of the fluidized bed by observed at various magnetic field intensities, (a) various magnetic field	42

	intensities, (b) without magnetic force, (c) weak magnetic field intensities, (d) moderate magnetic field intensities and (e) strong magnetic field intensities.	
Fig. 5-3	Comparison of pressure drop at various magnetic field intensities (a) increasing velocity and (b) decreasing velocity.	46
Fig. 5-4	Determination of minimum fluidization velocity (a) Leva's method at various magnetic field intensities, (b) Davidson-Harrison's method, (c) Davidson-Harrison's method at various magnetic field intensities and (d) Leva's and Davidson-Harrison's methods with Casal's data.	47
Fig. 5-5	Determination of minimum fluidization velocity by various methods at 0 A/m and 3631 A/m magnetic field intensities, (a) method by Colberg and Liu (1988) as well as Hamby and Liu (1991), and (b) method by Cohen and Tien (1991).	49
Fig. 5-5	Continued (c) method by Penchev and Hristov (1990a, b), and (d) method by Arnaldos et al. (1983), Filippov (1960) and Lee (1983, 1991).	50
Fig. 5-6	Regression of relation between U_{mf} and magnetic field intensity in (a) gas-solid magneto-fluidized bed and (b) liquid-solid magneto-fluidized bed.	54
Fig. 5-7	Determination of transition velocity with pressure drop method at various magnetic field intensities.	57
Fig. 5-8	Determination of transition velocity with voidage method at various magnetic field intensities.	58
Fig. 5-9	Relation between minimum fluidization velocity and viscosity from Ergun equation.	61
Fig. 5-10	Pressure drop vs. liquid velocity with various magnetic field intensities for 0.03 wt% CMC solution.	62
Fig. 5-11	Pressure drop vs. liquid velocity with various magnetic field intensities for 0.1 wt% CMC solution.	63
Fig. 5-12	Pressure drop vs. liquid velocity with various magnetic field intensities for 0.2 wt% CMC solution.	64
Fig. 5-13	The phase diagram of various fluids solution, (a) water, (b) 0.03 wt% CMC, (c) 0.1 wt% CMC and (d) 0.2 wt% CMC.	68
Fig. 5-14	(a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for water.	72
Fig. 5-14	(b) The phase diagram of water.	73

Fig. 5-15	Comparison of axial dispersion coefficient.	75
Fig. 5-16	(a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for 0.03 wt% CMC solution.	79
Fig. 5-16	(b) The phase diagram of 0.03 wt% CMC solution.	80
Fig. 5-17	(a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for 0.1 wt% CMC solution.	81
Fig. 5-17	(b) The phase diagram of 0.1 wt% CMC solution.	82
Fig. 5-18	(a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for 0.2 wt% CMC solution.	83
Fig. 5-18	(b) The phase diagram of 0.2 wt% CMC solution.	84
Fig. 5-19	Comparison of Da and of magnetic field intensity in various fluids solution.	86
Fig. A-1	Concentration of NaCl vs. conductivity.	100
Fig. A-2	(a) Concentration vs. time and (b) the E curve at fluid velocity equal 0.0129 m/s.	103
Fig. A-3	Shear stress vs. shear rate, (a) the original data and (b) the common logarithm of the original data.	105
Table 2-1	The influence of magnetic field on U_{mf} .	16
Table 3-1	Calculation of dimensionless time and variance in different boundaries (van der Lann, 1957).	29
Table 4-1	The property of iron particles.	38
Table 4-2	The property of CMC solution at 24 .	38
Table 5-1	Summary of U_{mf} with different methods at various magnetic field intensities.	52
Table 5-2	Summary of U_t with different methods at various magnetic field intensities.	59
Table 5-3	Summary of U_{mf} and of U_t with different methods at various magnetic field intensities and CMC solutions.	65
Table 5-4	Comparison of \bar{t}_{ideal} , \bar{t}_{real} and D_a in magnetic fluidized bed at various water velocities.	71
Table 5-5	Comparison of \bar{t}_{ideal} , \bar{t}_{real} and D_a in magnetic fluidized bed with various fluid(CMC) velocities and concentrations.	77

一、緒論

在各種不同類型的液、固與氣、固接觸反應器裝置中，固定床可說是一種最簡單經濟的反應器，具有液、固與氣、固間質傳係數高及流體滯留時間分佈窄之特點，即適用於需要高反應轉化率或大量傳送之單元操作處理程序中。但因粒子裝卸困難，且不易連續操作而使其發展備受限制，而流體化(fluidization)床則是克服固定床操作上的缺失與限制。

而所謂流體化之行為，是指當流體通過固體粒子的填充床時，流體與粒子間因為摩擦作用而產生拖曳力(drag force)。此拖曳力隨著流體流速的增加而增加，當克服固體粒子本身重量與浮力時，固體粒子即開始移動並懸浮在流體中，即稱此速度為最小流體化速度(minimum fluidization velocity)。並且當床體達成流體化時，被流體化的固體粒子會有類似液體之行為，如 Fig. 1-1 所示：

1. 低密度物質會漂浮於床體表面；
2. 床體傾斜後，床體表面會如液體維持水平；
3. 若床壁有開口，則粒子會從壁端的開口流出；

4. 兩不同水平面之床體相鄰，當開口連接後，高水平面之床體流會流向低水平面之床體，最後兩者床體高度趨於一致；
5. 床中任兩點間之壓降會等於兩點間床的重量；

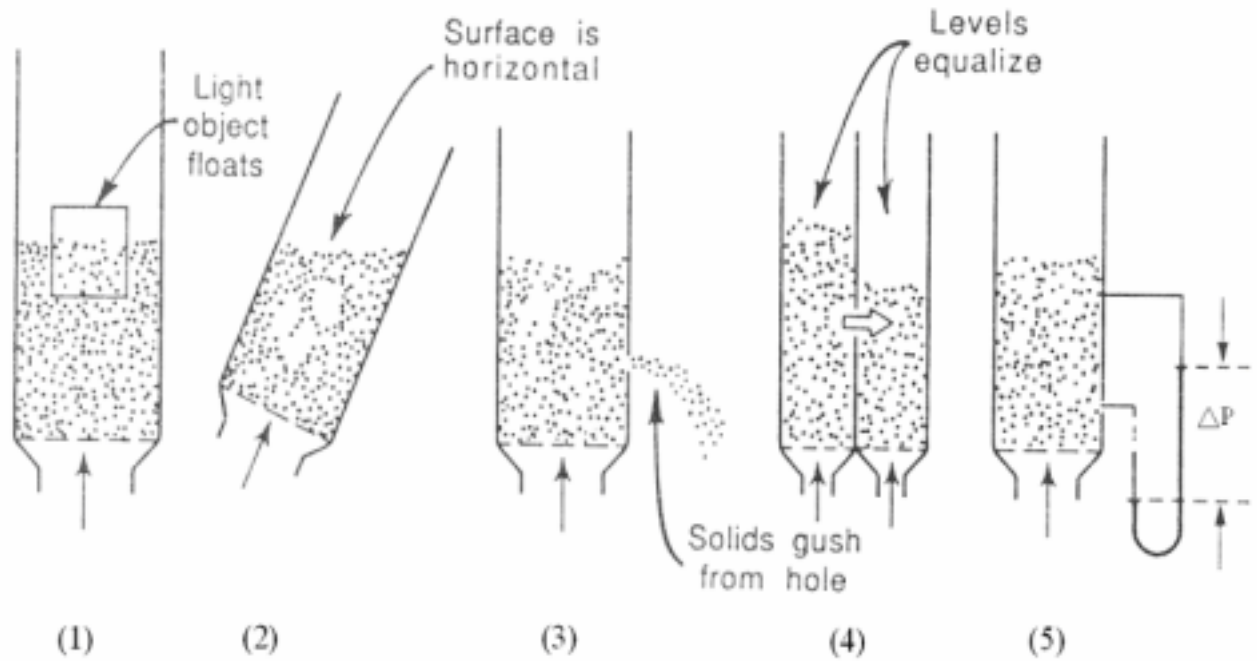


Fig. 1-1. Liquidlike behavior of gas fluidized beds (Kunii and Levenspiel, 1991).

然而流體化床粒子間碰撞頻繁，確實提供更多的接觸空間以利於反應操作或分離程序，但因粒子間的自由碰撞會使其產生磨損，以及較大的分散行為所造成產物品質上不易控管，故需將流體化床做更進一步的改善。

磁流體化床(magnetofluidization bed, MFB)為上述改善目標之選擇對象之一。此系統構造簡單，僅需在傳統式流體化床的外部施加一磁場，產生與流體同向之磁力，即可使床體中可磁化粒子受到磁場影響，進而使流體化床更趨於穩定(Liu et al., 1991)。因為可以維持流體化形式且沒有紊流式的固體混合(Siegell, 1987)，所以液、固磁流體化床極適合用於過濾操作及化學反應器。

在磁流體化床發展回顧一文中(Liu et al., 1991)，首先提到俄國人Filippov (1960, 1961)提出磁力對流體化床中之粒子影響流動行為的研究報告，隨後近二十年間僅有少數文獻提及有關此方面之研究，直到 1970 年代末期才漸漸有較多研究人員投入此研究。一般研究大多著重在氣、固磁流體化床方面(Liu et al., 1991)，其研究方向主要有粒子的流動性質(Lee, 1983)、流體和粒子間的接觸效率(Siegell, 1982)與

熱傳及質傳上(Arnaldos et al., 1985)。近年來更將領域擴展到粒子與粒子間分離(Rosenweig et al., 1987 ; Chetty et al., 1991)、氣體過濾除塵(Albert and Tien, 1985 ; Cohen and Tien, 1991)以及氨合成(Zrunchev and Popova , 1991)一等。

液、固磁流體化床的發展，主要研究方向有物質分離(Burns and Graves, 1985)、蛋白質分離(Sada et al., 1980 ; Chetty et al., 1991)與蛋白質之吸附(Tong and Sun, 2003 ; Ding and Sun, 2005)。Siegel (1987)、Burns and Graves (1988)、Nishio et al. (1991)、Goto et al. (1995)以及 Hou and Williams (2002)多位學者則對液、固磁流體化床之流動情形和穩定情況做了詳細探討。

以上說明可以瞭解液、固磁流體床發展史以及工業程序上的應用，其中又以物質分離操作與生物程序最為廣泛使用。雖然文獻中對於液、固磁流體化床的流態做了不少研究與陳述，但對於不同區域內之軸向分散情況仍需深入探討。本論文主要分析液、固磁流體化床的流態行為和不同區域內之軸向分散情況，而大多數工業程序及生物工程中的操作流體多半為非牛頓流體，故在本論文中使用不同液相濃度之非牛頓流體，以探討流體性質是否會對液、固磁流體化床產生影響。

二、文獻回顧

2-1. 磁穩定作用

Rosensweig (1979a)對磁穩定流體化床(magnetically stabilized fluidized bed, MSFB)作了基本描述。如 Fig. 2-1 所示，床體是由鐵性粒子與非鐵性粒子所構成，因粒子受限於與平行氣體的外加均勻磁場，故可防止氣泡(bubbles)與紊流(turbulent)行為的產生。

在 MSFB 中，床體之行為等於傳統氣泡床達到初期流體化之點，在表面氣體速度高於最小流體化速度時，此時單位床橫截面積之床重的壓降會維持常數，MSFB 之行為開始不同於氣泡床。當氣體速度增加時，床體粒子受限於外加磁場的作用，導致粒子的排列與運動情況產生變化，而床體粒子的排列方式會抑止氣泡之形成，並以活塞移動方式膨脹，此膨脹的流體化床稱為 MSFB。

當外加磁場強度增大時，MSFB 可存在廣泛的氣體速度範圍。磁穩定床相對速度之上限稱為移轉速度。在此速度以上，磁場則無法再抑制氣泡形成，此時床體壓降的擾動情況會隨其變大，且超過轉移速度，床體行為等於傳統流體化床的氣泡行為，如 Fig. 2-2 所示。MSFB

和一般流體化床粒子排列方式之比較如 Fig. 2-3 所示。

2-2. 液、固磁穩定流體化床之描述和應用

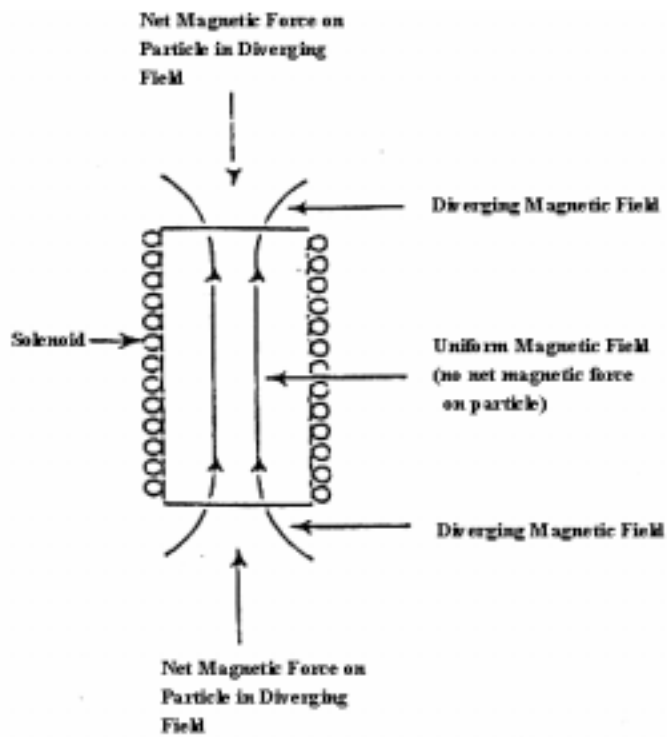


Fig. 2-1. Illustration of uniform and divergent magnetic field induced by a solenoid (Liu et al., 1991).

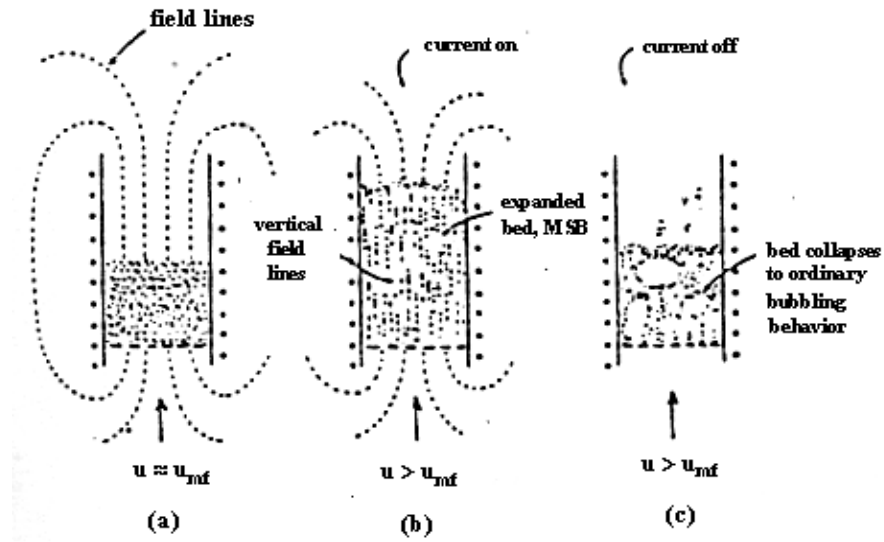


Fig. 2-2. (a) The bed at minimum fluidization, (b) the MSB and (c) the bubbling bed (Jaraiz-M et al., 1983).

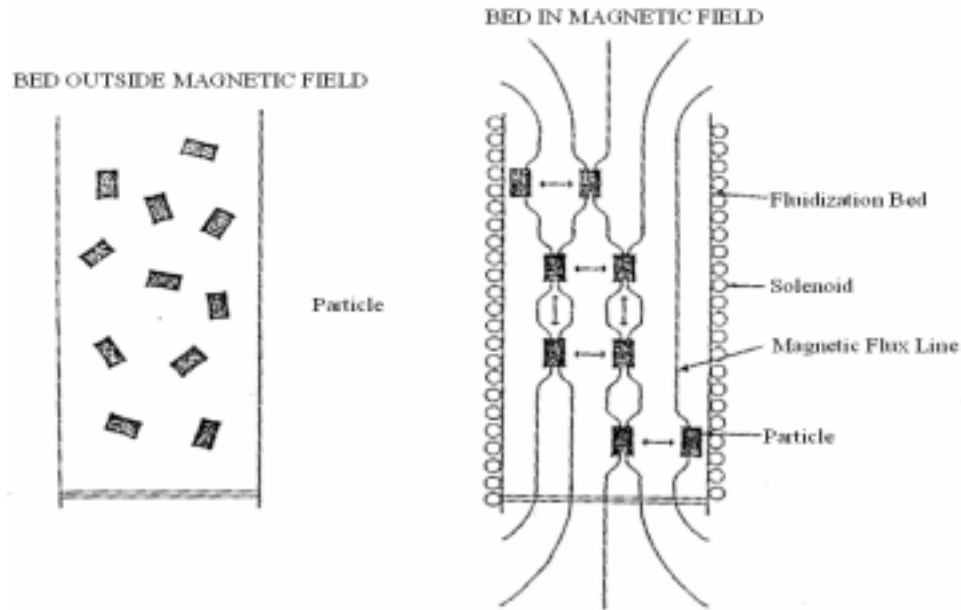


Fig. 2-3. The structure of MSB and fluidization bed (Syutkin and Bologna, 1976).

Ma and Kwauk (1983)在液、固磁流體化床的研究結果中，以固相為鋼鐵珠、鎳和陶瓷的混合，並定義三個區域於液、固磁流體化床的操作範圍：

1、粒子流體化區域；

在低磁場強度下，形成粒子的流體化區域，其床內磁性粒子的行為為像一般流體化床，床空隙度保持不變。

2、鏈狀區域；

在鏈狀區域中，床體粒子形成雙重、三重鏈或短鏈狀的擬態高分子狀態，鏈狀會沿著磁力線方向排列，且空隙度隨著磁場強度增大而減少。

3、磁凝結區域；

當磁場強度超過低磁場強度時，粒子的流體化區域即到達鏈狀區的始端，再持續增大磁場強度，聚合的鏈狀則彼此吸引，最後磁性粒子形成一團凝固之空隙度甚小且不變的團塊(mass)，而這團塊形成之後即不再流體化。

Siegell (1987)發表了有關於液、固磁流體化床的流態行為，在此磁流體化床中的可分成四個區域：

1、非流體化區(流速小於最小流體化區域)；

未達到最小流體化速度前，床體行為即為一般固定床區。

2、穩定區域；

達到最小流體化速度後，床體粒子受磁場作用固定不動，且粒子喪失其流動性。

3、粒子滾動(roll-cell)區域；

此區粒子運動方式，是由管壁一端上升後再由另一端落下的流動行為。

4、不規則區域；

即類似於一般流體化的模式。

之後 Goto et al. (1995)發表了關於液、固磁流體化床的研究，其磁流體化床所產生之區域行為與 Siegell (1987)結果相符，而一般學者將粒

子滾動區和不規則區歸納為一個不穩定的流態區域。

液、固磁穩定流體化床在生化分離領域的應用備受肯定，在磁穩定流體化床中能過濾溶液所含一定量的蛋白質或生物分子，且床中粒子可連續操作攜出，再以鹽類、酸鹼物或其他物質來分離所欲分離的生物分子。如 Burns and Graves (1985, 1988)所描述之操作方法，在液、固磁穩定流體化床的操作下，以粒子向下流動，流體向上流動的逆向流動操作方法，來探討生物分離技術的改善。其優點之一為可以連續操作，且省去粒子的填裝和拆卸，並對於蛋白質的回收與細胞過濾其效果均優於傳統式流體化床。Tong and Sun (2003)以一種新的磁瓊膠來製作載體，其應用於液相磁穩定的流體化床。此載體由油水乳化方法，將瓊膠溶液與奈米級超順磁 Fe_3O_4 的粒子混合製作。MAS 在磁場中顯示良好的超順磁特性。一種 Triazine dye, CB 與此瓊膠粒子結合，形成有 CB 修飾的磁瓊膠載體 CB-MAS。結果顯示 CB-MAS 於磁流體化床之操作下，可以作為蛋白質的吸附。Ding and Sun (2005)以一濃稠的小尺寸磁薄膜載體 MPS 應用於磁穩定流體化床的蛋白質吸附，用磁性膠體與玻璃小球在 4%的瓊膠溶液中乳化製程中，此時以磁流體化床操作會有較低的混合情形，在適當的外加磁場與高流速下，磁穩定流體化床吸附行為較優於膨脹床。

Sada et al. (1980)探討磁場對酵素反應器的影響，結果顯示磁場可

有效降低液相中的質傳阻力。Sada et al. (1981)則是探討尿素中磁穩定流體化床中之轉化率，而磁穩定流體化床可在較高流體速度下進行，且和固定床具有相同的轉化率。Graham et al. (2006)以磁流體化床反應器應用於氯酚去鹵之過程，在磁流體化床操作下，具有提高質傳速率的效果，並且固體污染物可在床體內部循環使用。

2-3. 液、固磁流體化床中最小流體化速度與移轉速度之決定方法

磁流體化床中，磁穩定區操作的範圍是在最小流體化速度與移轉速度之間，而文獻上在描述最小流體化速度之定義與觀點上有些分歧，故在此詳細討論。液、固磁流體化床在這方面的參考文獻並不廣泛，然而 Filippov (1960)指出：床體行為不會因為由液體改變成氣體而產生較大差異，有鑑於此論述吾人引用學者在氣、固磁流體化床之結論套用於液、固磁流體化床。

理論上，在最小流體化速度時，流體通過床體的壓力差等於單位床橫截面積的床重減掉排開流體的浮力，如式(2-1)所示。

$$\frac{\Delta P}{L_0} = g(1 - \varepsilon_0)(\rho_p - \rho_f) \dots\dots\dots (2-1)$$

其中 L_0 為靜床高， ε_0 為固定床空隙度

對於最小流體化之計算公式，可由下式(2-2) Ergun equation 計算：

$$\frac{1.75}{\Phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\Phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\mu^2} \dots\dots\dots (2-2)$$

文獻上由床壓降對氣體流速作圖來決定最小流體化速度的方法可分為六大類：

1. 方法 A

又稱 Leva (1959)法，以增速時的固定床壓降斜直線與水平壓降線之交點，其交點下所得之流體速度定為最小流體化速度 $U_{mf}(L)$ ，如 Fig. 2-4 中之 A 點。Rosensweig (1979a, b)、Rosensweig et al. (1981)、Resnick et al. (1988)、Saxena and Shrivastava (1990; 1991)與 Contal et al. (1992)均採用此法。Contal et al.所得之最小流體化速度會受磁場影響，且隨磁場增加而增大，使用的磁場方向為橫向；而其他作者磁場操作均為軸向，所得最小流體化速度不會受磁場影響。

2. 方法 B

以增速時的固定床壓降斜直線與流體化後壓降斜直線之交點，其交點下所得之流體速度定為最小流體化速度 U_i ，如 Fig. 2-4 中之 B 點。僅 Colberg and Liu (1988)與 Hamby and Liu (1991)採用此法，其最小流體化速度會受磁場影響，且隨磁場增大而增大。

3. 方法 C

以增速時固定床壓降達到最大值時之流體速度，定為最小流體化

速度 U_{\max} ，如 Fig. 2-4 中之 C 點。僅 Cohen and Tien (1991)採用此法，其最小流體化速度不受磁場影響。

4. 方法 D

以磁滯現象(hysteresis)出現時的流體速度，定為最小流體化速度 U_d ，如 Fig. 2-4 中之 D 點。僅 Penchev and Hristov (1990a, b)採用此法，最小流體化速度會受磁場影響，且隨磁場增大而增大。

5. 方法 E

以增速操作下，固定床之高度開始變大時之流體速度，定為最小流體化速度 U_{me} 。Arnaldos et al. (1983)、Filippov (1960)、Lee (1983,

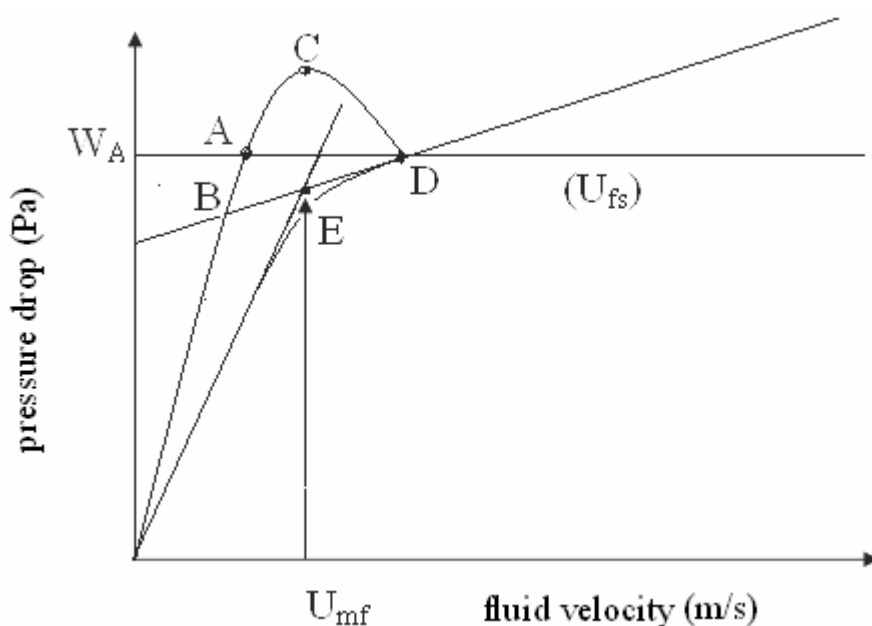


Fig. 2-4. Determination of U_{mf} by method (A), (B) (C), (D) and (F).

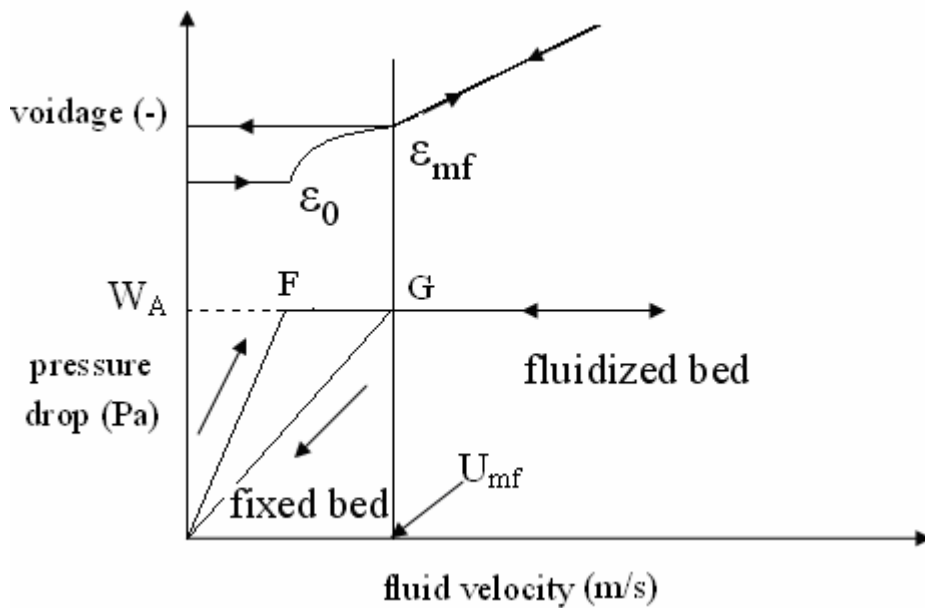


Fig. 2-5. Pressure drop in an ideal fluidized bed system and bed voidage vs. superficial velocity.

1991)均採用此法，其中 Arnaldos et al.認為 U_{mf} 不受磁場影響，但 Filippov 與 Lee 認為最小流體化速度會受磁場影響。

6. 方法 F

又稱 Davidson and Harrison (1971)法，Bologa and Syutkin (1977) 及 Jovanovic et al. (1989)採用此法，而 Penchev and Hristov (1990a)以此法套用於 Casal (1984)數據結果。其最小流體化速度會受磁場影響，且隨磁場增大而增大。Davidson and Harrison 指出理想流體化時其床壓降對流速之圖，如 Fig. 2-5 所示。其中 F 點表流速剛達到床重/床橫截面積時，當流速繼續增加，則床中粒子開始輕微地向上移動，即粒子開始重排，減輕流體通過床時的阻力，此時空隙度開始增加，

直到部分粒子離開床體而自由移動。在理想的流體化系統中，床壓降依然保持不變，此時流體化稱為初期流體化(incipient fluidization)，而此時之流速在 Fig. 2-5 上即為 G 點稱最小流體化速度(minimum fluidization velocity) U_{mf} 。Davidson and Harrison 也對理想流體化的偏差做了修正。即在一般真實流體化中，Fig. 2-5 上 F 點到 G 點之間常有過渡區的發生。其發生原因是由於管壁對粒子間造成了部分架橋(bridging)現象，粒子的不規則排列與川流等原因所造成，此現象以氣、固系統最易發生。如 Fig. 2-5 所示，其中 U_{fs} 為完全負載速度(full supporting velocity)，此點乃表示床體開始完全被流體化。但由於 U_{fs} 不容易由壓降對流速的圖形來正確的決定，因此以減速操作下，固定床壓降斜直線與壓降水平線交點之氣體速度 $U_{mf}(DH)$ 為最小流體化速度，如 Fig. 2-4 中之 E 點。

Table 2-1 所示，文獻學者使用上述不同的方法，來得到磁流體化床中之最小流體化速度之值，並在此分類最小流體化速度是否受磁場影響。

移轉速度則無太大的爭議，其移轉速度隨磁場強度增加而增加。決定磁流體化床中的移轉速度，可由觀察法(Rosensweig, 1979a)、壓力曲線圖法(Cohen and Tien, 1991)和空隙度法(Casal and Arnaldos, 1991)三種方法量測。觀察法是以磁穩定區後床體表面開始有不安定

的行為，此時速度定為移轉速度。如 Fig. 2-6(a)所示，壓力曲線法則由壓力對流速曲線圖中，以減速操作中所得之壓力降，開始與增速操作所得之壓力降產生分歧點時之速度定為移轉速度。如 Fig. 2-6(b)所示，空隙度法即為空隙度對流速圖中，減速操作中所得之空隙度，開始與增速操作中所得之空隙度產生分歧點時之速度定為移轉速度。另外 Hou and Williams (2002)在液、固磁流體化床的研究中，以理論推導建立出一套模式，此模式可以預測磁流體化床中移轉速度的出現點，且由研究發現磁場強度、粒徑大小與流體性質是影響移轉速度的主因。

Table 2-1. The influence of magnetic field on U_{mf} .

symbols	the definition of the minimum fluidization velocity						effected by magnetic field*
	$U_{mf}(L)$	U_i	U_{max}	U_{me}	$U_{mf}(DH)$	U_d	
Arnaldos et al. (1983)				▼			N
Bologa and Syutkin (1977)					▼		Y
Cohen and Tien (1991)			▼				N
Colberg and Liu (1988)		▼					Y
Contal et al. (1992)	▼						Y
Filippov (1960)				▼			Y
Hamby and Liu (1991)		▼					Y
Jovanovic et al. (1989)					▼		Y

Lee (1983, 1991)				✓			Y
Penchev and Hristov (1990a, b)				✓		✓	Y
Resnick et al. (1988)	✓					✓	N
Rosensweig (1979a, b)	✓						N
Rosensweig et al. (1981)	✓						N
Saxena and Shrivastava (1990, 1991)	✓						N

* N : have nothing to do with magnetic field
Y : under the influence of magnetic field

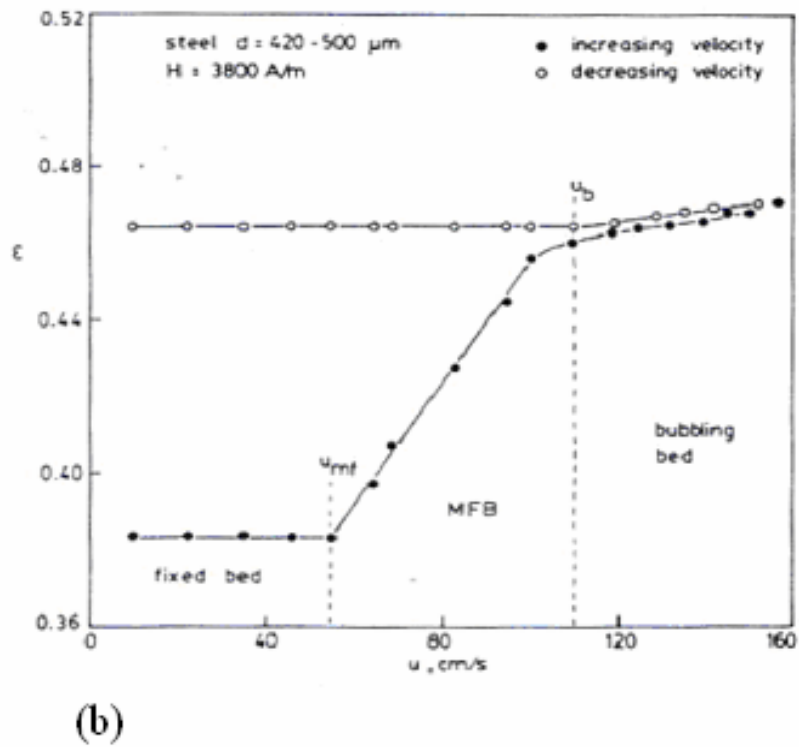
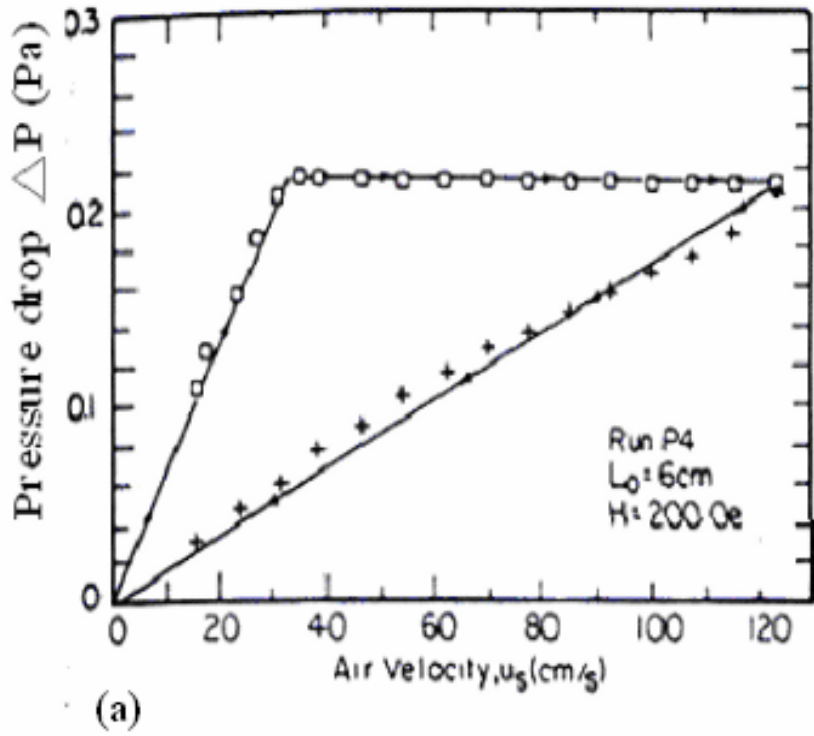


Fig. 2-6. Determination of transition velocity by (a) pressure drop curve method (Cohen and Tien, 1991) and (b) voidage method (Casal and Arnaldos, 1991).

2-4. 液、固磁穩定流體化床之軸向分散行為

Siegell (1987)以混合非磁性粒子和不鏽鋼粒子為床體，以 KCl 為追蹤劑，探討磁穩定流體化床之軸向分散行為。在磁穩定區中，其軸向分散行為和固定床具有相同之效果，與施加磁場於床中的順序無關。

Goetz and Graves (1991)使用平均粒徑 20-45 μm 和 95 μm 的鎳粒子為床體，於兩種不同系統操作下，其內徑分別為 1/4 和 3/8 英吋，而兩個電極距離位置分別為 3.95 cm 和 5.3 cm，並以 KCl 為追蹤劑，濃度為 0.025N 和 0.03N 使用在兩種不同的管徑內。系統的皮克列特 (Peclet)數則使用 open open 為計算方式而得。並比較 Siegell (1987)

$$Pe^{-1} = \frac{D_a}{U_1 L} = \frac{1}{8}(\sqrt{(8\sigma_0^2 + 1)} - 1) \dots\dots\dots (2-3)$$

在磁穩定流體化床中所得軸向分散係數的結果，指出在未達成流體化之前，磁場對分散效果並無直接影響，而當流體化後，磁流體化床之分散效果比傳統式流體化床低，且當管內徑和粒子直徑比(D/d_p)越大時軸向分散係數越大。

Nishio et al. (1991)以平均粒徑 720 μm 作為流體化床床體，液相則為水，床體外用一個銅線圈所纏繞成的螺線管以產生軸向磁場。少量 KCl 溶液當追蹤劑，並以脈衝注射方式將追蹤劑於玻璃珠所構成的固定床下方注入，床體上下方相距 110 mm 之接觸電極來測定追蹤

劑濃度。分別以 0 A/m、360 A/m 和 5730 A/m 磁場強度操作。當磁場強度較大時，濃度輸出的應答曲線(output response curve)分佈越窄，濃度分佈曲線會類似於鐘形。傳統流體化床與磁流體化床所得之軸向分散係數，磁流體化床具有降低軸向分散係數之效果。且不論傳統式流體化床或磁穩定流體化床，軸向分散係數均隨流速增加而增加。

2-5. 非牛頓流體之相關研究

Brea et al. (1976)發表了關於非牛頓的泥漿流體流經固定床與流體化床之研究，研究重點著重於如何有效的預測最小流體化速度，及其適用範圍。

Machac et al. (1986)研究在於 power law 流體與空隙度的關係。藉由流速與空隙度的關係，當流速增加至某一程度時，床體高度則不再受流速影響，空隙度維持在一特定值，而研究發現階層(n)越低之流體其床體之最大空隙度也越低。

Miura and Kawase (1998)探討非牛頓流體的最小流體化速度在兩相及三相流體化床系統中。結果顯示出濃度越高之 CMC 流體與 Xanthan gum 流體，其床體所需最小流體化的速度會變小，並且氣體流速的增加會導致液體之最小流體化速度隨之降低。之後 Miura et al. (2001)又詳細討論液相、固相與空隙度三者關係，液相分別為水、glycerol 流體、CMC 流體與 Xanthan gum 流體，固相分別為 3 mm、5

mm 與 7 mm 之玻璃球。濃度越高的流體其空隙度與拖曳力相對提昇，而粒徑較大之粒子其空隙度越低。

陳(2000)於氣-液-固三相磁流體化床中質傳與流力行為之探討。利用光纖探針與閥開關技術，觀察氣體在系統之徑向位置與整體的滯留情況，而以提氣溶氧法技術計算其系統質傳係數，液相黏度的提升會有效降低其質傳係數與氣體滯留的行為。

三、理論背景

3-1. 磁性物質之分類

一般物質可略分類為抗磁性物質(diamagnetic material), 順磁性物質(paramagnetic material)及鐵磁性物質(ferromagnetic material)三種。

1、抗磁物質

此類物質於磁場內會受一微弱的排斥力, 如水、石英等。外加磁場能夠使抗磁性物質磁化, 建立一與磁場方向相反的磁距(magnetic moment), 其磁化現象與溫度無關。

2、順磁物質

此類物質於磁場內會受到一微弱吸引力, 如鈉、鋁及液態氣體等。外加磁場能使順磁性物質磁化, 建立一與磁場方向相同的磁距, 其磁化現象與溫度有關。

3、鐵磁物質

此類物質包括鐵、鈷、鎳等元素, 其原子內具備永久磁偶極距, 即使在微弱的磁場內也會造成很大的磁化現象。在低溫時, 有些元素以及成分中沒有強磁元素的一些合金也會呈現這些效應。

3-2. 電流與磁場

1820 年丹麥物理學家 Oersted 發現將一根磁針平行置於一有電流

通過之導線上時，磁針會發生偏轉，導線上電流相反時磁針方向也隨之相反，這說明了由電生磁的現象，如 Fig. 3-1 所示。

當電流通過一螺線圈(solenoid)時，電流與線圈上纏繞圈數之乘積稱為磁動勢(magnetomotive force)，單位線圈長度上之磁動勢稱為磁場強度(magnetic intensity)H，而放置在磁場中之物質所受之磁化強度(magnetization)M，乃指材料中的分子磁距沿一特定方向排列程度。磁化強度與磁場強度本身之磁化率(magnetic susceptibility) X_m 有關，H及 X_m 越大時磁化強 M 度也越大。一般而言，鐵性物質之磁化率極大，僅需很小的磁場強度既可造成相當大的磁化強度。溫度也是一個影響磁化強度的重要因素，且鐵磁性物質之飽和磁化強度(saturation magnetization) M_s 也隨溫度升高而降低。從 Fig. 3-2 比較並了解抗磁性、順磁性和鐵性物質的磁場強度 H 和磁化強度 M 之關係，其中抗磁物質和順磁物質並無磁滯現象發生，即當磁場強度 H 達到某一定值在減低到零時，則磁化強度會循原路徑減低到零，如 Fig. 3-2 之(a)。當鐵磁性物質的磁場強度 H 達到一定值時，磁化強度達到最大值 M_s ，再將磁場強度減低到零時，則磁化強度並未出循原來路徑減低到零，如 Fig. 3-2 之(b)。此即磁滯現象的產生。

以下則說明 Oe (Oersted)與 A (Ampere)/m 之關係：磁力(F_m)為磁極強度(P)和磁場強度(H)的乘積， $F_m=PH$ 。在 MKSA 制，磁場強度單

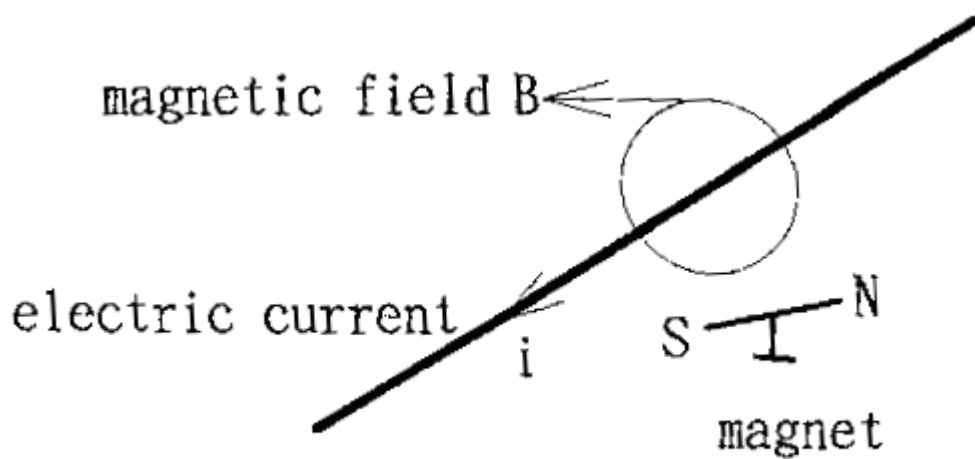


Fig. 3-1. The description of wire and magnetic.

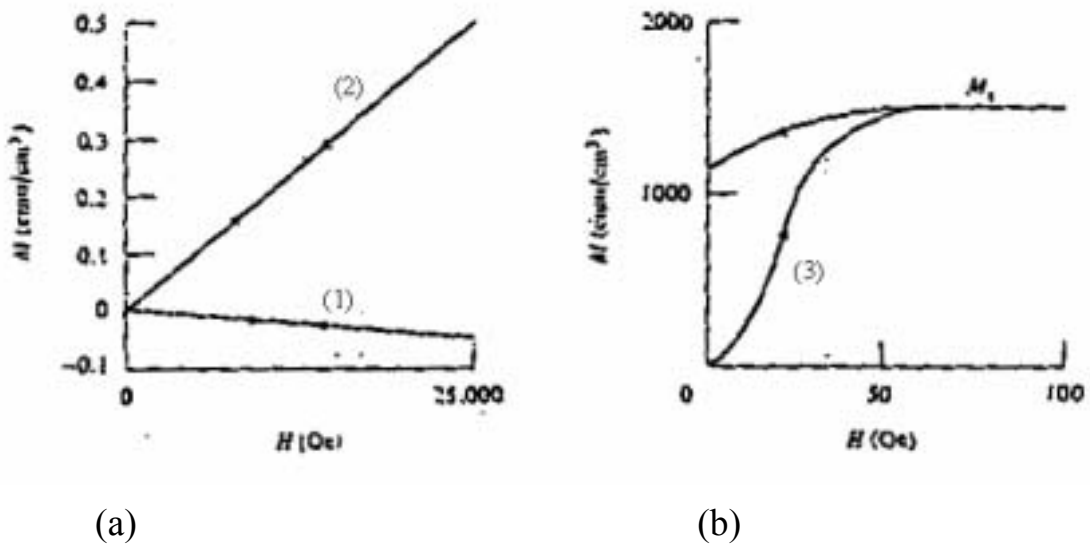


Fig. 3-2. The typical magnetization curves of, (1) diamagnetic material, (2) paramagnetic material and (3) ferromagnetic material (Cullity, 1972).

位為 N/Wb (Weber) = A/m，而 1 A/m 的磁場強度定義為讓 1 韋伯的磁極擁有 1 牛頓磁力所需的磁場強度。CGS 制的磁場強度單位 Oe, 1 Oe 的磁場定義為讓 1 單位磁極擁有 1 達因磁力所需的磁場大小。至於 Oe 和 A/m 之間的換算可由 Oe 的定義及單位磁極和韋伯的關係導出

$$1 \text{ Oersted} = 1 \left(\frac{\text{dyne}}{\text{unit pole}} \right) = \frac{10^{-5}}{4\pi \times 10^{-8}} \left(\frac{\text{N}}{\text{weber}} \right) = \frac{10^3}{4\pi} (\text{Ampere/m})$$

以漆包線纏繞於螺線管上並提供電源，螺線管內部即產生一磁場，而欲用兩螺線管來產生穩定的磁場，則以 Helmholtz coil 排列方式是最為廣泛使用的。Helmholtz coil 排列方式為兩平行螺線管中心點位置間距要等於螺線管內之半徑，以此方式排列可在兩螺線管內得一穩定均勻的磁場。

3-3. 軸向分散係數之估算

3-3-1 刺激-響應(stimulus-response)法

一般對於軸向分散係數的實驗方法中，流動系統常以刺激-響應(stimulus-response)法分析。所謂刺激乃一追蹤劑被打入流體容器中，而響應乃為追蹤劑從容器流出時之濃度與時間的關係，任何物料可被探測且不擾亂容器內的流動方式，均可作為追蹤劑。

反應器內若無追蹤劑的存在情況下，將濃度 C_0 之追蹤劑以階梯信號(step)輸入，出口追蹤劑濃度以 C/C_0 量度表示，而對時間紀錄稱

之為 F 曲線。若以一理想化之瞬間脈衝信號(pulse)輸入追蹤劑，其信號之為脈衝函數 $\delta(t)$ ，Fig. 3-3 以不同信號輸入於系統內所得之應答行為。

$$\text{其中 } \delta(t-t_0) = \infty \quad \text{當 } t = t_0 \text{ 時}$$

$$\delta(t-t_0) = 0 \quad \text{當 } t \neq t_0 \text{ 時}$$

將已量得之濃度除以時間曲線下之面積 A_c 即為 E 曲線，如 Fig.

3-4。

$$\text{即 } E = \frac{C}{A_c} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$A_c = \int_0^{\infty} C dt$$

3-3-2 數學工具

平均值或分配之幾何平均形心，乃測量曲線之分配平均位置。對

於 C 對 t 曲線之平均值為：

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \dots\dots\dots (3-2)$$

而分配範圍以異變數(variance) σ^2 表示，其定義為：

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 \cdot C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \dots\dots\dots (3-3)$$

3-3-3 分散模式(分散柱狀流動模式)

考慮某流體之柱狀流動，其流體之軸向混合可表為下式：

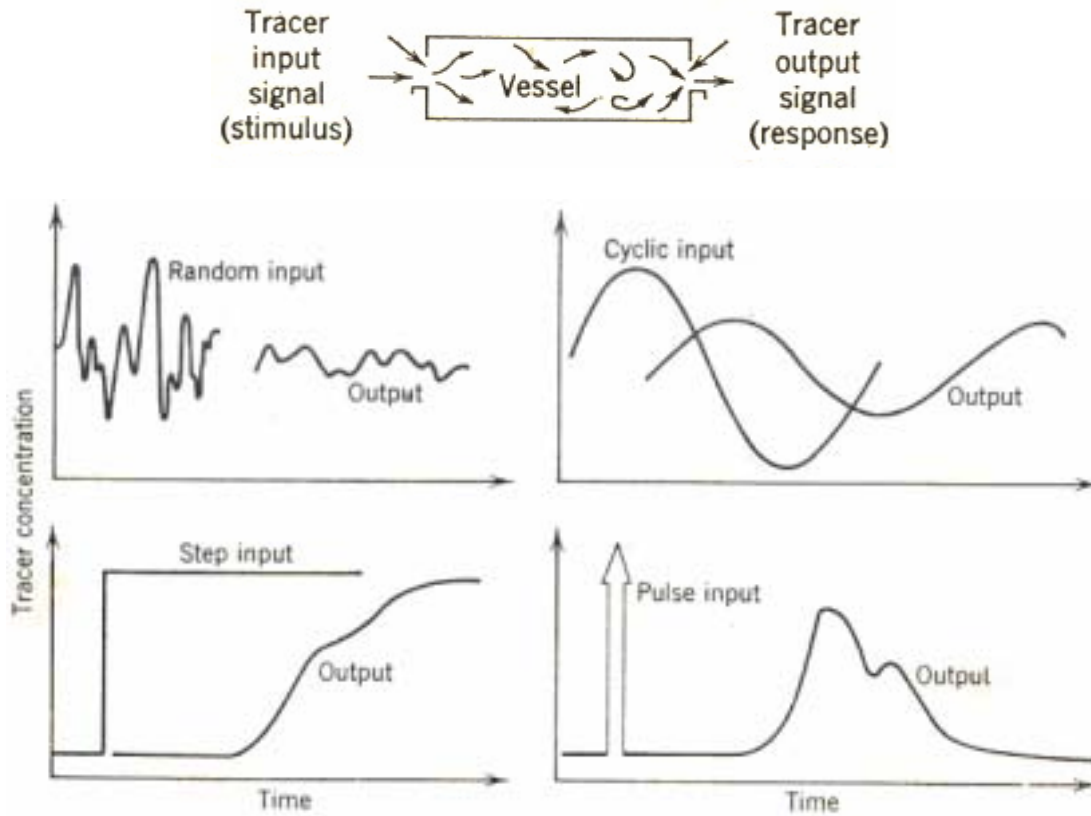


Fig. 3-3. The various curves of input and output for stimulate-response (Levenspiel, 1972).

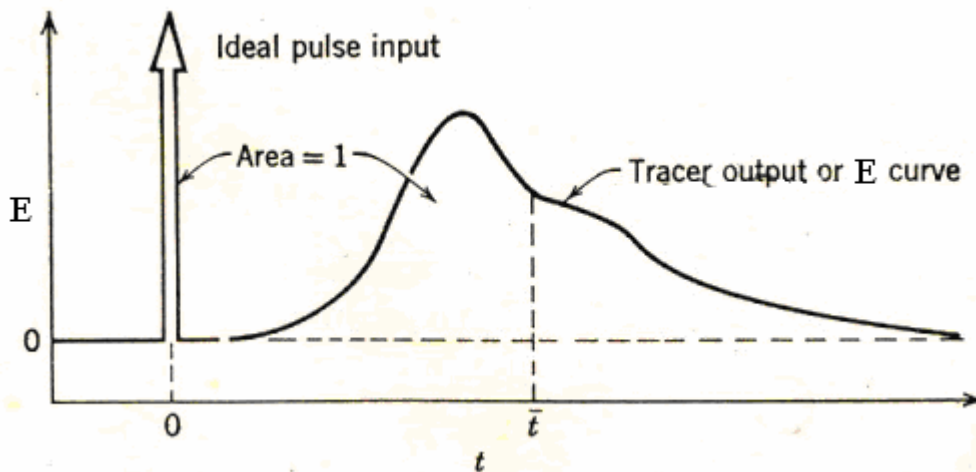


Fig. 3-4. Typical downstream signal, called the E curve, in response to an upstream δ -function input signal (Levenspiel, 1972).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3-4)$$

其中 D_a 為軸向分散係數(axial dispersion coefficient), 若考慮由於速度梯度所造成的軸向混合, 則分散模式改為:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U_1 \frac{\partial C}{\partial x} \dots\dots\dots (3-5)$$

若在 closed-closed 系統操作下, 則邊界條件如下:

$$\left. \begin{array}{l} x = 0 : \quad n_0 \delta(t) = U_1 A C - D_a A \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{x=0^+} \\ x = L : \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \\ t \leq 0 : \quad C = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3-6)$$

n_0 = 追蹤劑注入時之濃度(mol)

由式(3-5)與式(3-6)可解得 C , 及利用式(3-2)與式(3-3)可求得 \bar{t} , 進而計算出 $\bar{\theta}_E, \sigma_\theta$, 如下式(3-7)與式(3-8)所示:

$$\bar{\theta}_E = \frac{\bar{t}_E}{\bar{t}} = 1 \dots\dots\dots (3-7)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = \frac{2}{Pe^2} (Pe - 1 + e^{-Pe}) \dots\dots\dots (3-8)$$

對於量測雙點而言: $\sigma^2 = \sigma_2^2 - \sigma_1^2$

\bar{t}_E 為追蹤劑的濃度-時間圖形所得之平均滯留時間。

σ_1^2 為第 1 測量點的變異數。

σ_2^2 為第 2 點測量的變異數。

對於單點測量而言，若追蹤劑的注射為脈衝式，則第一測量點的變異數 σ_1^2 為零。

van der Lann(1957)對於(3-5)式不同邊界的分析，得到不同變異數 σ^2 和平均無因次時間 $\bar{\theta}$ ，如 Table 3-1。

Table 3-1 Calculation of dimensionless time and variance in different boundaries (van der Lann, 1957).

	θ	σ^2
I	$1 + \frac{1}{Pe} \left[2\alpha - (1-\alpha)e^{-Pe z_0} - (1-\beta)e^{-Pe(z_1-z_m)} \right]$	$\frac{1}{Pe^2} \left[2Pe + 8 + 2(1-\alpha)(1-\beta)e^{-Pe z_1} - (1-\alpha)e^{-Pe z_0} \left(4z_0 Pe + 4(1+\alpha) + (1-\alpha)e^{Pe z_0} \right) - (1-\beta)e^{-Pe(z_1-z_m)} \left(4(z_1-z_m)Pe + 4(1+\beta) + (1-\beta)e^{Pe(z_1-z_m)} \right) \right]$
II	$1 + \frac{1}{Pe} \left[2 - e^{-Pe z_0} - e^{-Pe(z_1-z_m)} \right]$	$\frac{1}{Pe^2} \left[2Pe + 8 + 2e^{-Pe z_1} - e^{-Pe z_0} \left(4z_0 Pe + 4 + e^{Pe z_0} \right) - e^{-Pe(z_1-z_m)} \left(4(z_1-z_m)Pe + 4 + e^{Pe(z_1-z_m)} \right) \right]$
III	$1 + \frac{1}{Pe} \left[\alpha + \beta \right]$	$\frac{1}{Pe^2} \left[2Pe - 2 + 2e^{Pe} + 2(\alpha + \beta)(1 - e^{Pe}) + 3(\alpha^2 + \beta^2) + 2\alpha\beta e^{-Pe} \right]$
IV	1	$\frac{2}{Pe^2} \left[Pe + 1 + e^{Pe} \right]$
V	$1 + \frac{1}{Pe} \left[2 - (1-\alpha)e^{-Pe z_0} \right]$	$\frac{1}{Pe^2} \left[2Pe + 8 + (1-\alpha)e^{-Pe z_0} \left(4z_0 Pe + 4(1+\alpha) + (1-\alpha)e^{Pe z_0} \right) \right]$
VI	$1 + \frac{1}{Pe} \left[2 - (1-\beta)e^{-Pe(z_1-z_m)} \right]$	$\frac{1}{Pe^2} \left[2Pe + 8 + (1-\beta)e^{-Pe(z_1-z_m)} \left(4(z_1-z_m)Pe + 4(1+\beta) + (1-\beta)e^{Pe(z_1-z_m)} \right) \right]$
VII	$1 + \frac{2}{Pe}$	$\frac{1}{Pe^2} \left[2Pe + 8 \right]$
VIII	$1 + \frac{1}{Pe}$	$\frac{1}{Pe^2} \left[2Pe + 3 \right]$

$$Pe = \frac{U(x_m - x_0)}{D} \quad \alpha = \frac{Dz_0}{D}$$

$$z = \frac{x}{x_m - x_0} \quad \beta = \frac{Dz_1}{D}$$

四、實驗裝置與步驟

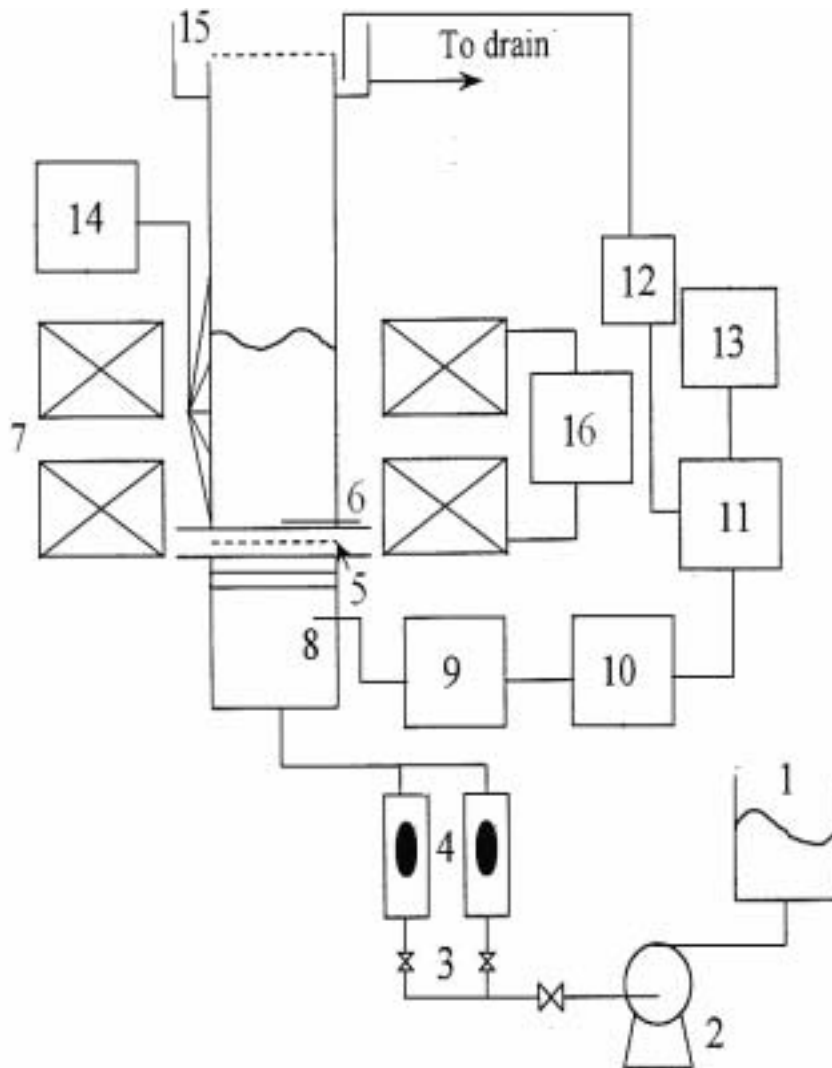
四、實驗裝置

4-1-1 實驗裝置簡介

本實驗裝置如 Fig. 4-1 所示，床體由透明的壓克力所製，其床體為內徑 0.05 m、厚 0.005 m、高 0.5 m。操作流程為先將流體備於儲存槽(1)中，經離心泵(2)注入於床體中，之後經溢流槽回流至儲水槽(1)中，其流量可由浮子流量計(4)測得。

4-1-2 實驗裝置說明

1. 流體儲存槽(liquid storage tank)
2. 離心泵(centrifugal pump)：為入口直徑 3/4 吋與出口直徑 1/2 吋、流量範圍為 9~35 GPM、最大揚程為 58 ft、轉速 3480 rpm、1/2 馬力之離心泵。用於提供液體移動所需之揚程。
3. 球閥(globe valve)
4. 浮子流量計(rotameter)：廠牌為 Gilmont Instruments，型號為 40499 與 E8012、流量範圍在 0.09~4.3 L/min。用於量測液體之流量，而於不同流體操作前，需校正其刻度與流體流量之關係。
5. 分散板(distributor)：直徑為 0.1 m，厚度為 0.005 m 之壓克力圓板在上鑿有 50 個直徑 0.001 m 之圓孔，並分佈於直徑 0.05 m 的圓



- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1. liquid storage tank | 9. pressure transducer |
| 2. centrifugal pump | 10. amplifier |
| 3. globe valve | 11. AD/DA card |
| 4. rotameter | 12. conductivity meter |
| 5. distributor | 13. personal computer |
| 6. tracer distributor | 14. Gauss meter |
| 7. magnetic field | 15. screen |
| 8. pressure probe | 16. DC power supply |

Fig. 4-1. Experimental setup.

形範圍內，且其開孔率 2.4% 的設計使得流體均勻通過床體且不會造成川流等現象，詳細見 Fig. 4-2(a)。

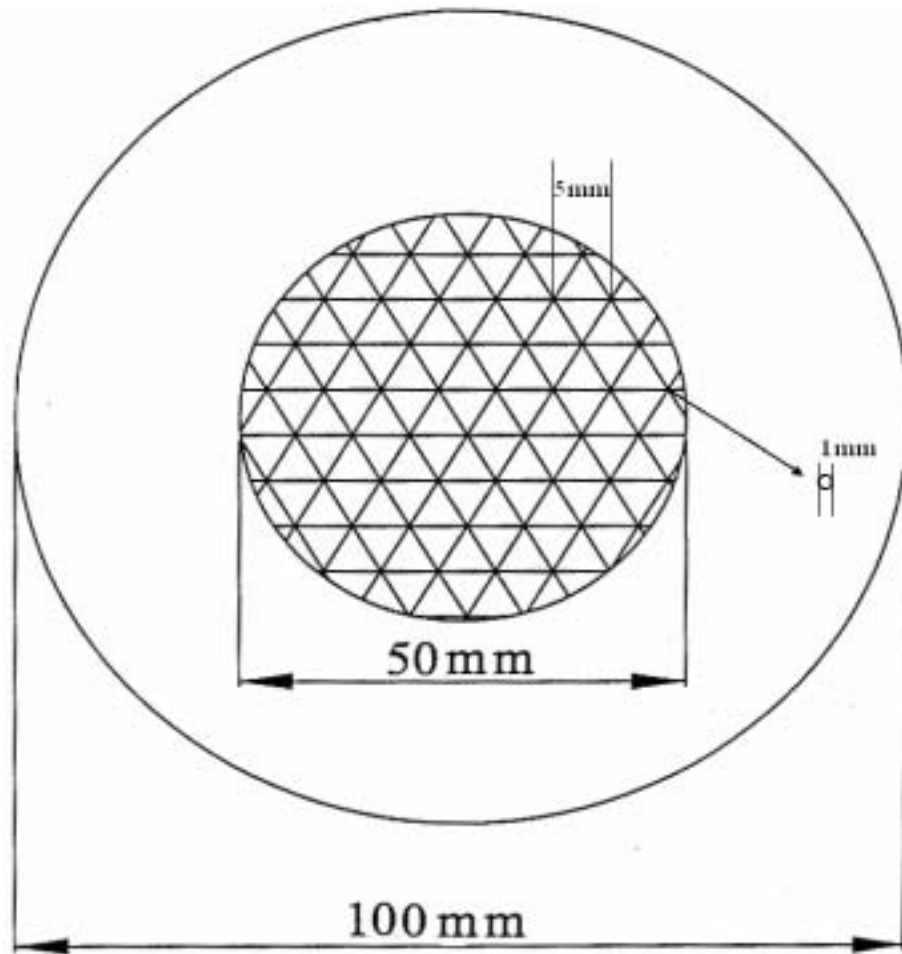
6. 追蹤劑分散器(tracer distributor)：材質為鋁管，並置於分散板上方約 1 cm 處，鋁管的內、外徑分別為 0.003、0.005 m。為使分散劑能均勻分佈於系統中，故在管壁上鑽數各約 1 mm 的小孔以使 tracer 進入床體中，並將鋁管前端密封，詳細見 Fig. 4-2(b)。

7. 磁場(magnetic field)：於內徑 0.16 m 高 0.07 m 之無縫不鏽鋼管外纏繞內徑 1.5 mm 之漆包線共 1,950 圈，將製成線圈通入電流即可產生本實驗所需之磁場。用 Helmholtz coil 排列方式可使兩線圈內部產生穩定的磁場，其排列方式為兩平行螺線管中心點位置間距要等於螺線管內之半徑，而為使兩線圈排列方式符合 Helmholtz coil 之形式，故排列兩線圈使其中心點相距 0.08 m。

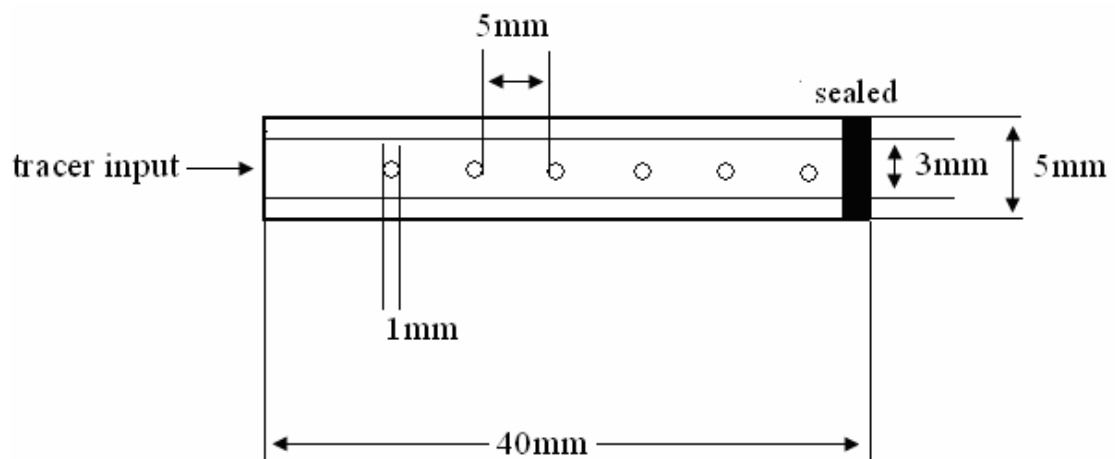
8. 壓力探針(pressure probe)：以長 8 cm、外徑 3 mm 之黃銅管製成的壓力探針量測床內壓力擾動訊號，並在銅管前端覆蓋一層 325 mesh 篩網，避免粒子進入堵塞銅管。

9. 壓力轉換器(pressure transducer)：由日本 Kyowa 公司出品，PD-200GA 型，可將壓力訊號轉換成電壓訊號，誤差值範圍為 $\pm 0.3\%$ 。

10. 放大器(amplifier)：為日本 Kyowa 公司出品，DPM-612A 型，除了供應壓力轉換器的電源外，並將壓力轉換器的電壓訊號予以調整



(a)



(b)

Fig. 4-2. (a) Distributor and (b) tracer distributor.

放大，經放大器放大後輸出電壓值之範圍為 ± 5 V。

11. AD/DA 卡(AD/DA card): 電腦內部有美國 National Instruments 公司 Lab-PC+型 AD/DA 卡(14bit, +8.5V), 可將類比式訊號, 經電腦中 AD/DA 卡取樣, 信號則經由 AD/DA 卡介面截取至個人電腦中。此截取信號之存取方式是由 Lab-view 程式寫成, 然後轉換成數位訊號並且儲存起來, 詳細可見九附錄 Appendix 2 與 Appendix 3。

12. 電導度計(conductivity meter): 德國 WTW 公司出品, 型號 LF539 之電導度計, 信號以 on-line 方式輸出, 誤差範圍約 ± 0.5 %。九附錄 Appendix 1 所示為不同流體(water, 0.03 wt%, 0.1 wt%, 0.2 wt%) 之 NaCl 濃度與電導度之關係, 而本實驗量測範圍為 1-15 ms/cm (s: siemens 等同於 mho)。

13. 個人電腦(personal computer): 為 Windows XP 相容並由 Lab-view 視窗截取數據, 本實驗所得實驗數據為壓力擾動平均值、濃度和時間關係與最後數據處理計算。其訊號截取程式與計算可參考九附錄中 Appendix 2、Appendix 3 與 Appendix 4。

14. 高斯計(Gauss meter): F. W. Bell 公司出品, 型號 Model 9200 之 Gauss meter, 其誤差範圍約 ± 0.5 %, 於實驗進行前量測其軸、徑向磁場強度, 如 Fig. 4-3 所示。

15. 篩網(screen): 液相液體循環至儲液槽中, 並在管上端加裝篩

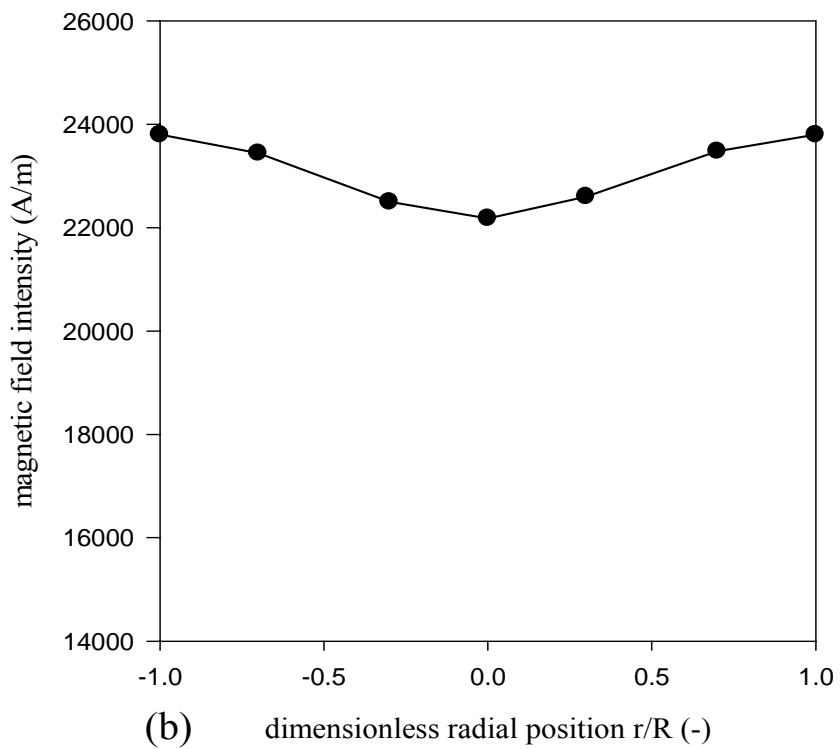
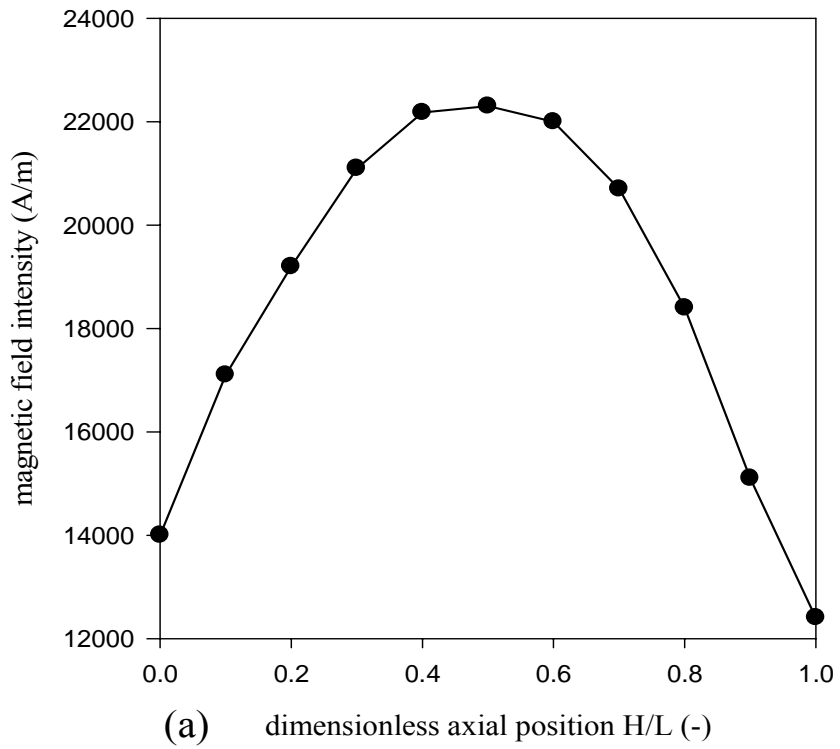


Fig. 4-3. Magnetic field intensity as the function of (a) axial and (b) radial positions.

網避免粒子溢出。

16. 直流電源供應器(DC power supply)：Takasago 公司出品，型號 EX-375L，輸出功率為 375 W，提供產生磁場線圈所需的電源。

4-2. 實驗操作變數

本論文中之固、液磁流體化床實驗中，所使用之固相為鐵粒子，而 Table 4-1 為固體粒子之物性。400 g 鐵粒子置於床體內，且液相流體分別為水及不同濃度之羧甲基纖維素 (CMC-carboxymethyl cellulose) 溶液。羧甲基纖維素為和光純藥工業(Wako)出品，內含 6.5~8.5%之鈉金屬。Table 4-2 所示為 CMC 濃度與流體物性的關係，其利用旋轉黏度計求得 CMC 溶液之 shear stress 與 shear rate 的關係，詳細可見九附錄 Appendix 5。磁場強度的操作範圍為 0~13500 A/m。

4-3. 實驗步驟

4-3-1 單點壓降量測

本實驗中所得之壓力降，為粒子與液相之單點絕對壓力扣除液相之單點絕對壓力，遂又稱為單點壓降。

1. 將流體注入系統內部，讓系統中的氣泡排出並使系統內充滿流體，預測壓力前需將壓力轉換器內部注滿水。
2. 增加流速待其穩定時測量床體的單點絕對壓力，並記錄之。

3. 將 400 g 鐵粒子置於床中，開閥使粒子流體化後關閥靜置。
4. 打開閥增加流速，待其穩定測量床體的單點絕對壓力，並記錄之。
5. 打開直流電源供應器，控制電壓(電流)使螺線管提供所需之不同軸向磁場。並重複步驟 4-5。
6. 改變流體種類與濃度，重複步驟 4-6。

4-3-2 軸向分散實驗

1. 將 400 g 鐵粒子注入於床中，開閥使粒子流體化後關閥靜置。
2. 調整流速至一定速度，由分散板上方快速注入 1 cm^3 之 1 N NaCl 作為追蹤劑。
3. 由置於床體上方之電導度計偵測追蹤劑在系統之情形，此時由個人電腦記錄追蹤劑濃度與時間關係。
4. 打開直流電源供應器，控制電壓(電流)使螺線管提供所需之不同軸向磁場，重複步驟 2-3。
5. 改變流體種類與濃度，重複步驟 1-4。

Table 4-1. The property of iron particles.

solid particles	iron particles
particle size d_p , (d_{avg}) (μm)	250-297, (274)
density, ρ_p (kg/m^3)	7780
minimum fluidization velocity, U_{mf} (m/s) ^a	1.57×10^{-3}
minimum fluidization velocity, U_{mf} (m/s) ^b	4.18×10^{-3}

a : Calculated by Ergun eq.

$$\frac{1.75}{\Phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\Phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\mu^2}$$

b: By experiment.

Table 4-2. The property of CMC solution at 24 .

liquid	n	k(Pa s ⁿ)	ρ_f (kg m ⁻³)
tap water	1	0.0008	997
0.03 wt.% CMC	0.98	0.002	998
0.1 wt.% CMC	0.96	0.0049	999
0.2 wt.% CMC	0.93	0.0097	997

$$\tau = k \times \gamma^n \quad (\text{calculated in Appendix 5})$$

五、結果與討論

5-1. 液、固磁流體化床單點壓降分析

以 400 g 鐵粒子填充於床體內部，床體粒子高為 5.9 cm，外加磁場由兩螺線管以 Helmholtz 方式排列，以產生穩定的磁場作用於床體粒子。

5-1-1 磁場對流體化床之作用

Fig. 5-1 表示為單點壓降對流速之曲線圖在不同磁場強度下，而 Fig. 5-2 所示為以目測觀察液、固磁流體化床床體的表面情形。首先 Fig. 5-1(a)由圖中可知，起初流體通過床體，粒子與流體互相作用，產生流體向上作用力，其作用力太小無法克服粒子本身之重量，即床體粒子固定不動因而稱之為固定床，如 Fig. 5-2(a)所示，此時單點壓降與流速幾乎呈正比關係如式(5-1) Ergun equation 所示。若流速持續增加

$$\frac{\Delta P}{h} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_0)^2}{\epsilon_0^3} \frac{\mu \cdot U_0}{(d_p \cdot \Phi_s)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon_0}{\epsilon_0^3} \frac{\rho_f \cdot U_0^2}{(d_p \cdot \Phi_s)} \dots\dots\dots(5-1)$$

，可以發現床體表面粒子開始有不安定的情況，而管壁附近會產生類似川流之現象，如 Fig. 5-2(b1)所示，則開始有流體化的行為(即向上

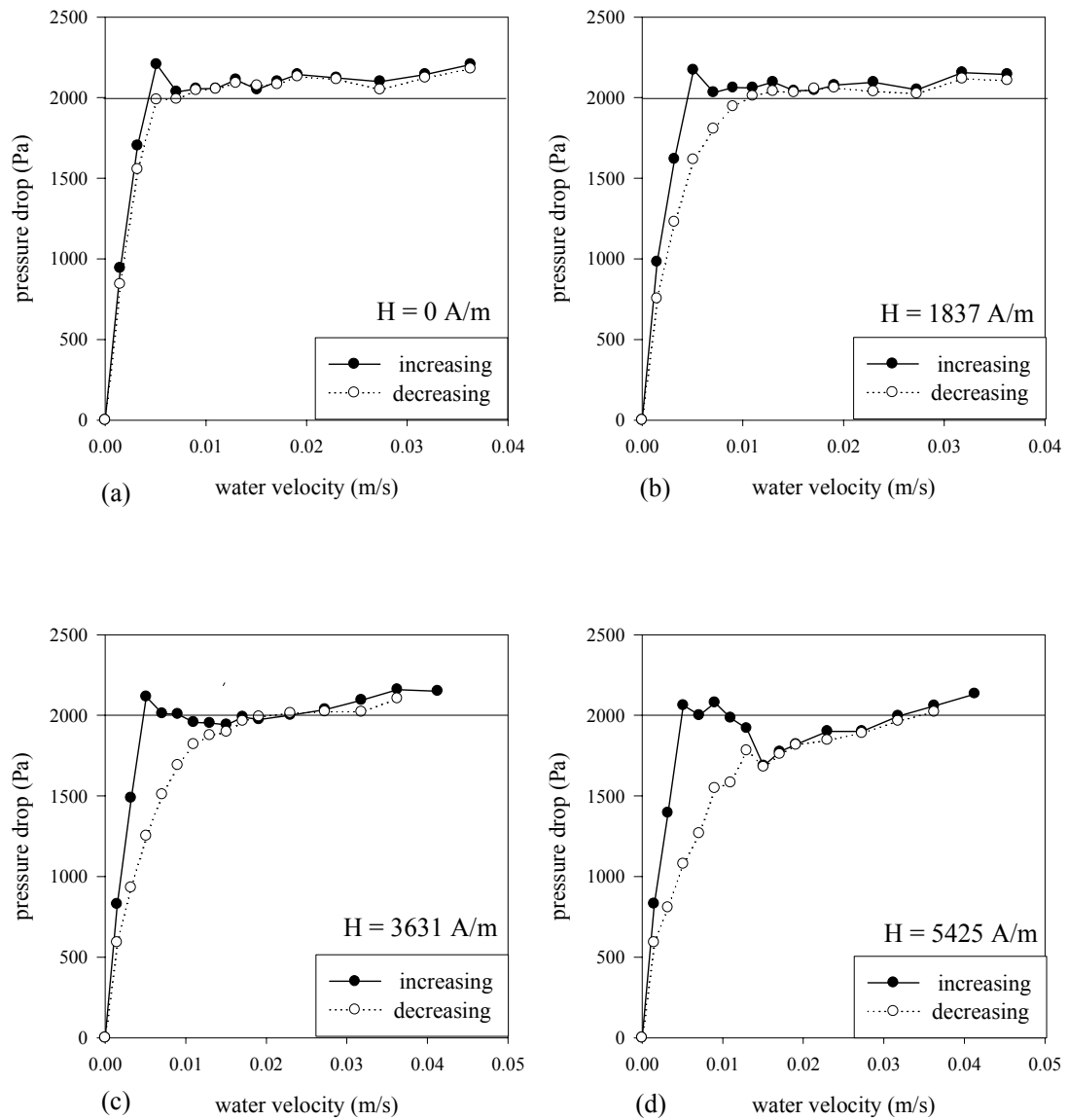


Fig. 5-1. Pressure drop vs. water velocity at various magnetic field intensities (a)~(d).

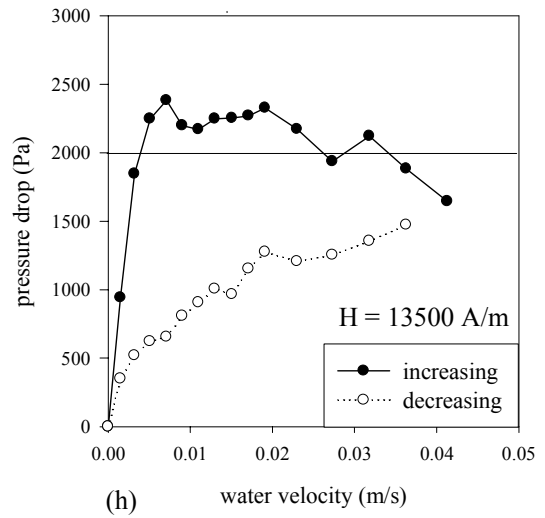
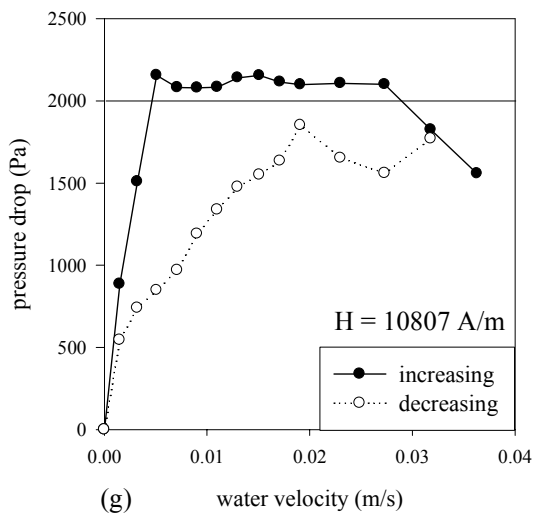
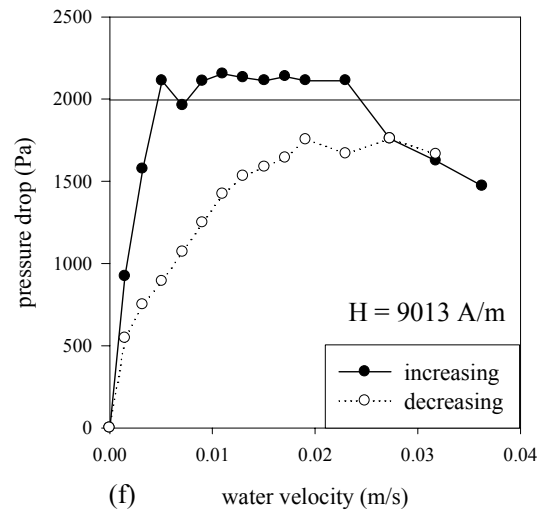
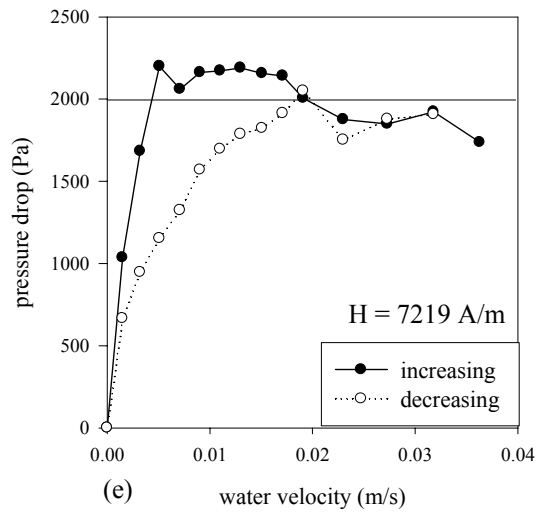


Fig. 5-1. Continued (e)~(h).

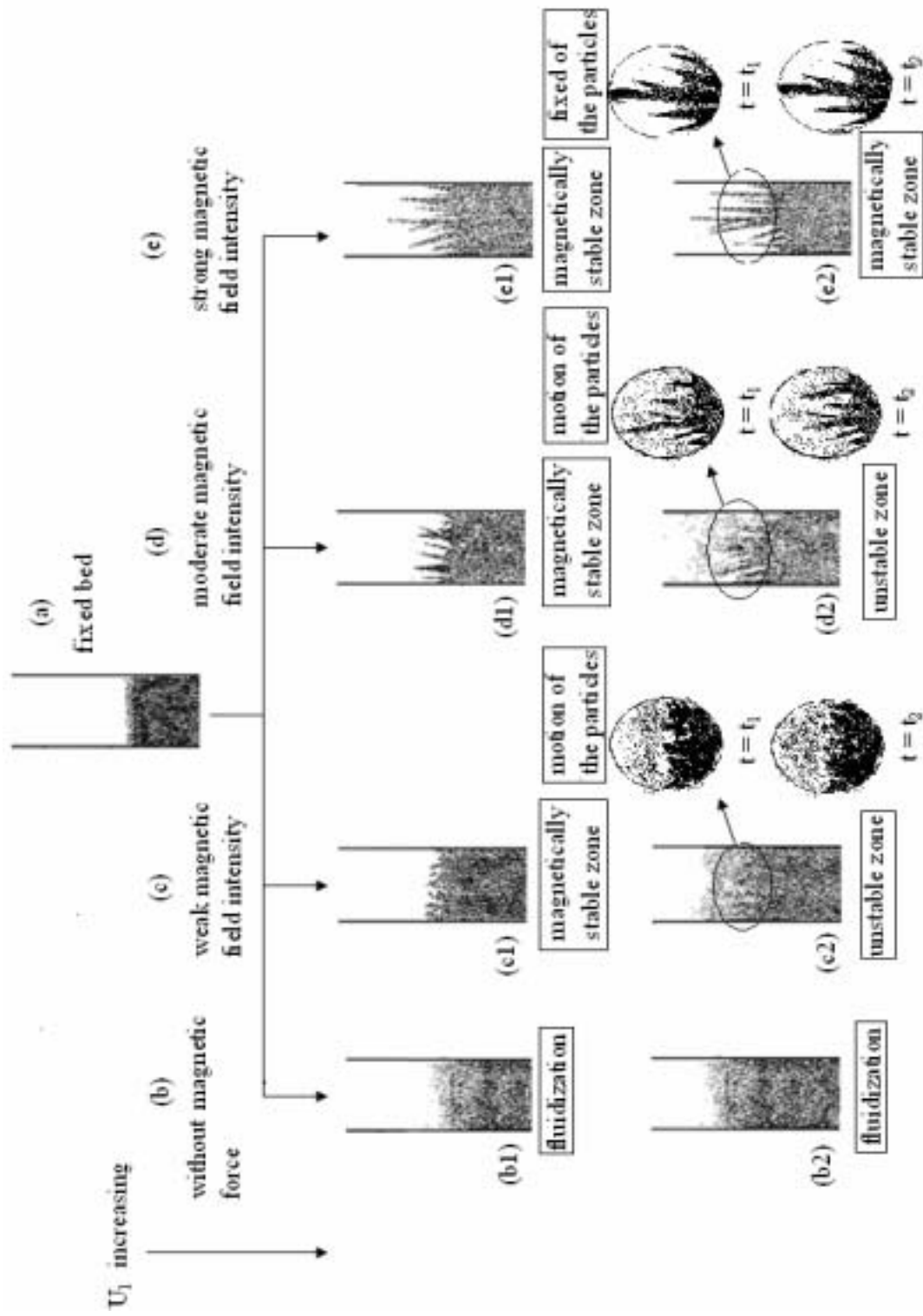


Fig. 5-2. Structure of the fluidized bed by observed at various magnetic field intensities, (a) various magnetic field intensities, (b) without magnetic force, (c) weak magnetic field intensities, (d) moderate magnetic field intensities and (e) strong magnetic field intensities.

浮力及拖曳力與向下重力三者作用力達平衡)，此行為下所得的流體化速度稱之為最小流體化速度 U_{mf} 。之後流速持續增加可以發現床體開始膨脹，床內粒子擾動情況會逐漸增大，且床體表面粒子呈現週期性的波浪狀，部分粒子會離開床體，如 Fig. 5-2(b2)所示。在上述情況下，單點壓降將維持一固定值而不受流速所影響，此一固定值為單位床橫截面積之床重 W_A (床體粒子淨重/單位床橫截面積)。另外由 Fig. 5-1(a)可以發現增速與減速操作過程中，單點壓降對流速之曲線圖大致相符，並無明顯的磁滯現象。

當床體外部有磁場作用力時，會在床體內部產生均勻穩定的磁力線，進而使鐵粒子變成暫時性的磁性物質。而本實驗磁場操作的範圍為 0-13500 A/m，將此磁場強度細分成三個磁場範圍並詳細說明之；即為弱磁場強度(0-4080 A/m)、中磁場強度(4080-8116 A/m)以及高磁場強度(8116-13500 A/m)。

1. 弱磁場強度：如 Fig. 5-1(b)及(c)所示。在弱磁場強度下對於開始流體化的床體內部粒子影響甚少，此時系統的單點壓降維持在同一水平線上，僅可發現在床表面粒子會有凝聚的情形，而無鏈狀行為，如 Fig. 5-2(c1)所示，至於床整體流動模式與上述無磁場時大致相同。不過在 Fig. 5-1(b)及(c)中觀察減速操作時，可以發現磁場作用力在特定流速後會產生一定的束縛效果，壓制床體粒子使其磁滯現象越來越

明顯。

2. 中磁場強度：如 Fig. 5-1(d)及(e)所示。吾人由目測觀察磁場對床體的作用力後，發現床體粒子本身因磁場作用變成磁性物質，因而粒子的凝聚性明顯增加，在此床體會以活塞的運動方式膨脹，且表面粒子會形成鏈狀，如 Fig. 5-2(d1)，並隨著外加磁場強度的提升，上述現象會更加明顯。當流速持續增加，床體會開始有不穩定的行為，又因粒子間受磁場作用力甚有效果，這時床體會以鏈狀的行為持續擾動，會逐漸有粒子離開床體並依循磁力線的軌跡循環運動，此時床體結構為不穩定區，如 Fig. 5-2(d2)所示。分析 Fig. 5-1(d)及(e)增速操作時，在部份流速區域下，因川流行為導致床體之單點壓降小於水平壓力線上。在減速操作下，磁滯現象的發生隨磁場強度增強而更加明顯。

3. 高磁場強度：如 Fig. 5-1(f), (g)及(h)所示。床體粒子處在高磁場強度下，床體流態多半是以磁穩定床的方式出現，而床體表面波動與擾動等不安定之行為需在很高流速下才會發生，其行為類似於中磁場強度下 Fig. 5-2(d2)之行為。當流速超過最小流體化速度，床體隨其膨脹且表面粒子因磁場作用力緊密連接成鏈狀，如 Fig. 5-2(e1)所示，並且以類似活塞狀的方式移動，而流速增加也無法使粒子分離移動，此現象在中磁場強度較不易發生，如 Fig. 5-2(e2)所示。Fig. 5-1(f)所示，發現流速在 0.025 m/s 之後，可能因川流行為嚴重，以致於床體

之單點壓降有下降的趨勢，此流速會隨磁場強度的增加而逐漸增加。高磁場強度下，減速操作所得之結果與在中磁場強度操作下所得之結果相去不遠。

Fig. 5-3 表示為流體化床在無磁場、弱磁場、中磁場和高磁場下所得之結果。在增速操作下，如 Fig. 5-3(a)所示，固定床之單點壓降不會因為外加磁場的作用而有太大的差異性。床體的流體化區域，在特定速度區域下的單點壓降低於水平壓力線，此特定速度區域隨磁場強度增加而延後發生。Saxena and Shrivastava (1991)討論此區發生之行為乃肇因於高磁場強度具有限制粒子運動的效用，床體粒子會沿著磁場所產生之磁力線排列，形成一特定路徑導致發生川流現象。在減速操作下，如 Fig. 5-3(b)所示，床體之單點壓降會隨外加磁場強度的提升隨之遞減，且逐漸遠離水平之壓力線。

5-1-2 磁場對最小流體化速度之影響

有關磁流體化床的最小流體化速度和磁場關係，在本文第二章文獻回顧中曾提出諸多看法與論點。其中以增速操作所得之單點壓降線交於水平壓力線之交點，此速度即為最小流體化速度 Leva (1959)法，有 Rosensweig (1979a, b)、Resnick et al. (1988)、Saxena and Shrivastava (1990, 1991)、Contal et al. (1992)採用此法求得最小流體化速度。Fig. 5-4(a)所示為以 Leva 法於本實驗中定義最小流體化速度，且可發現

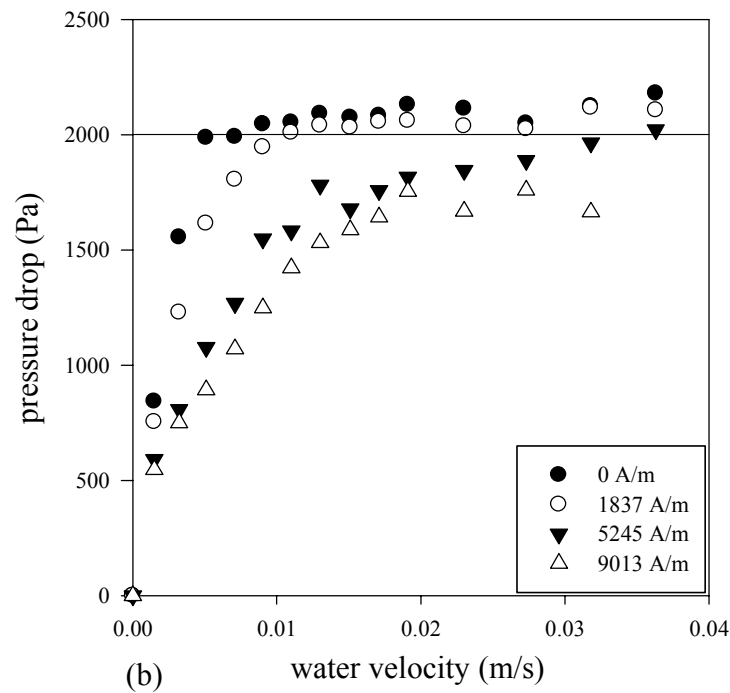
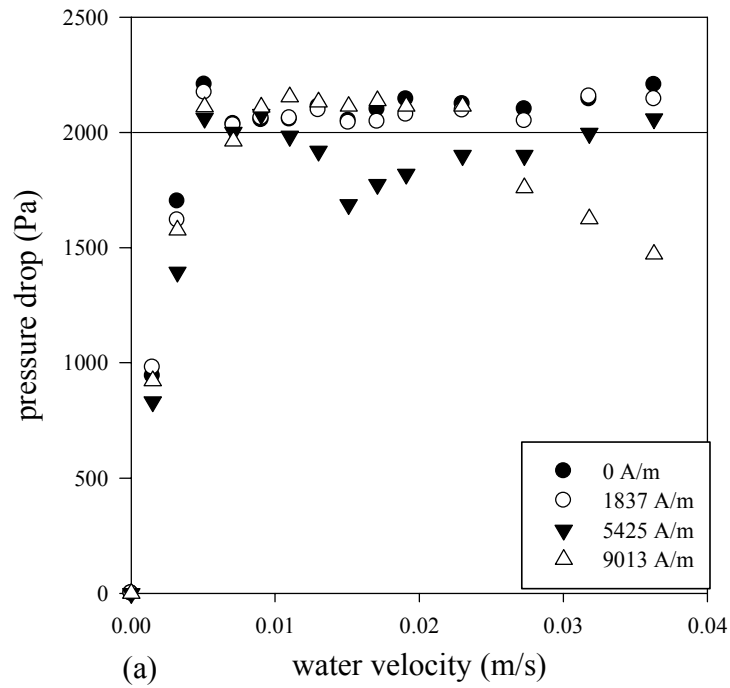


Fig. 5-3. Comparison of pressure drop at various magnetic field intensities for (a) increasing velocity and (b) decreasing velocity.

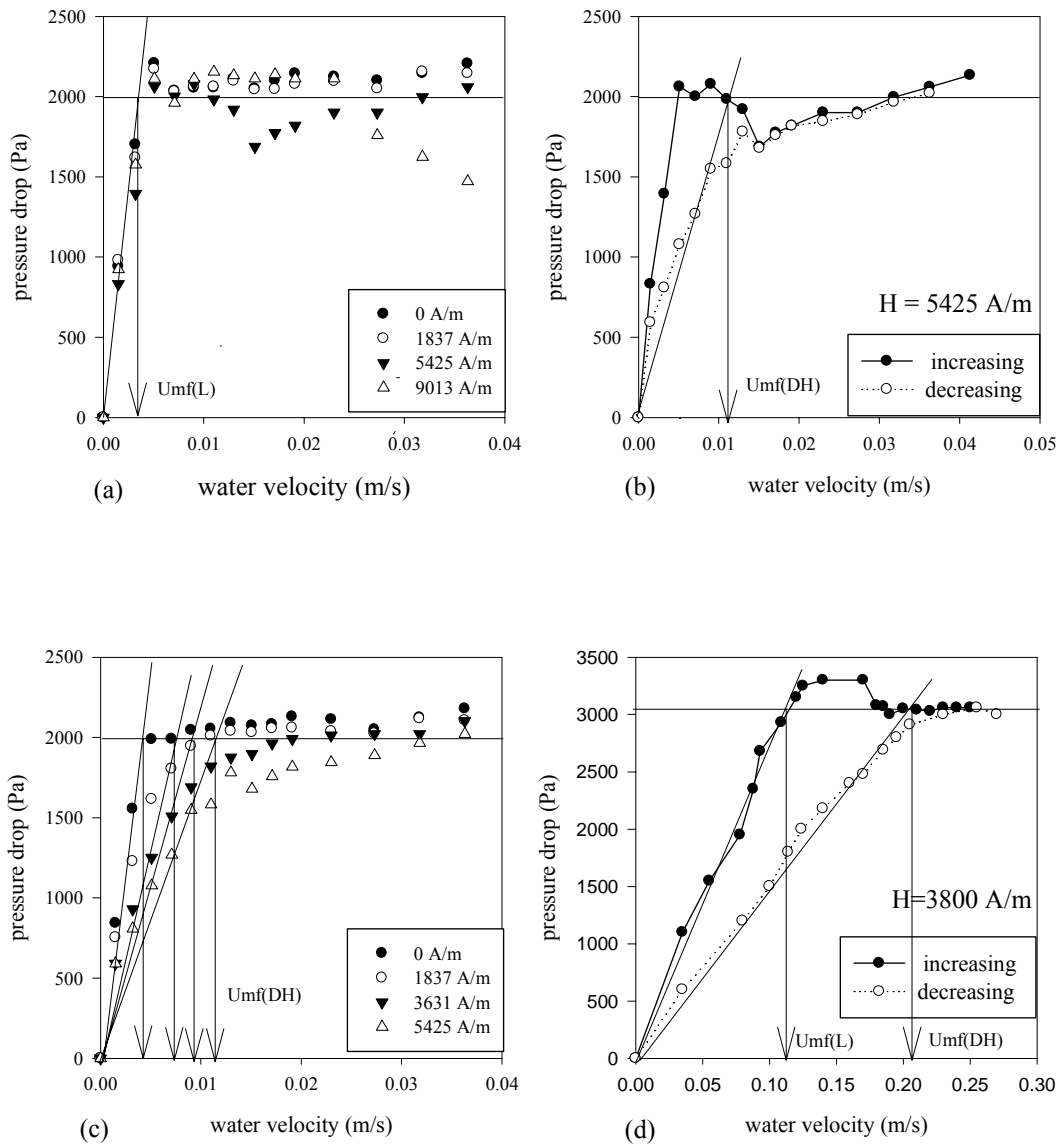
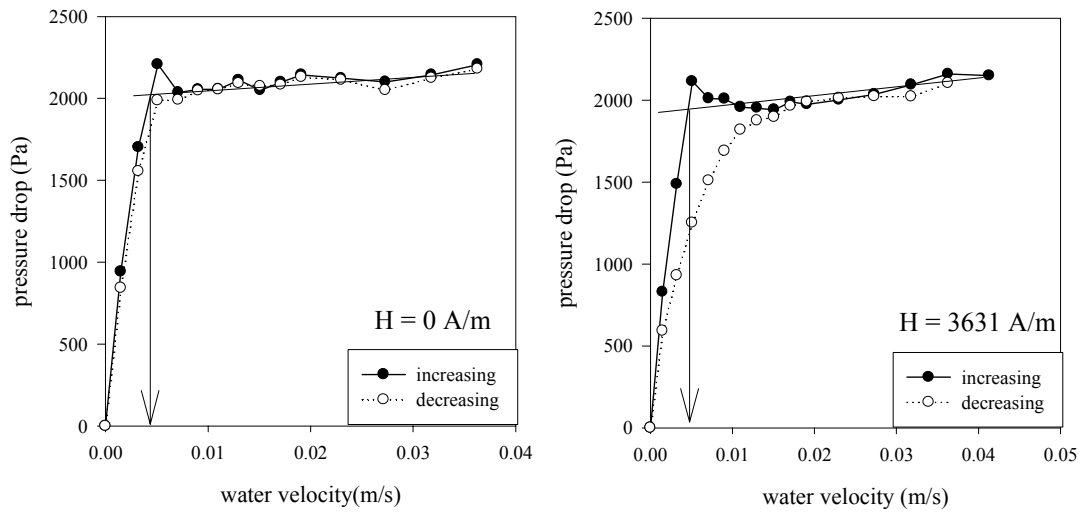


Fig. 5-4. Determination of minimum fluidization velocity (a) Leva's method at various magnetic field intensities, (b) Davidson-Harrison's method, (c) Davidson-Harrison's method at various magnetic field intensities and (d) Leva's and Davidson-Harrison's methods with Casal's data.

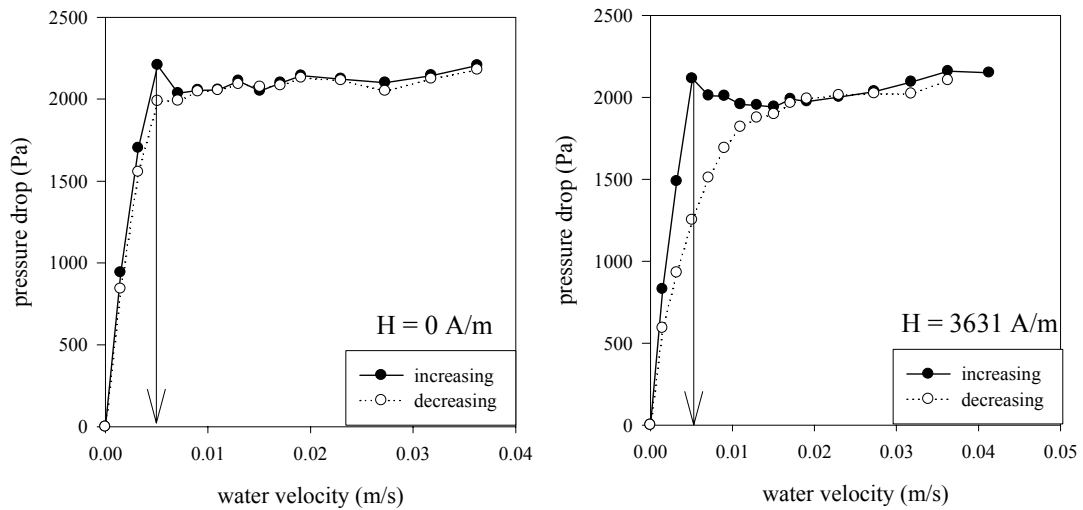
最小流體化速度並不受磁場強度影響。

上述論點的爭議之處在於增速操作中，當床體粒子開始排重時，須克服粒子間所產生之最大靜摩擦力，以致於最小流體化速度的認定上較不客觀。進而開始有部分學者提出以減速操作所得之壓力曲線圖，又以 Davidson and Harrison (1971)法最常為學者所使用，如 Fig. 5-4(b)所示。首先以作用力的角度觀察，床體中粒子與粒子間互相作用的能力較增速操作時低，因此粒子會以自然沉降的運動方式從流體化床回歸至固定床。但於磁流體化床之操作下，磁滯現象隨磁場強度增加而增大，故引用此法所得之最小流體化速度會與磁場成正比關係，如 Fig. 5-4(c)所示。至於文獻回顧所提及另外四種方法，吾人引用這些方法套入本實驗中所得之結果與文獻結果大致相符，如 Fig. 5-5 所示。

各學者在最小流體化速度認知上皆有各自的立足點與看法，導致在定義最小流體化速度時產生分歧。Penchev and Hristov (1990a)就提到使用 Leva 法與 Davidson and Harrison 法結果上的差異。其中 Filippov (1961)和 Rosenswieg (1979, 1981)兩人用 Leva 法所得之結果為最小流體化速度並不受磁場強度所影響；Bologa and Syutkin (1977)則以 Davidson and Harrison 法來求得最小流體化速度，且最小流體化速度會與磁場強度成正比關係；Sonoliker et al. (1972)以床體粒子開始

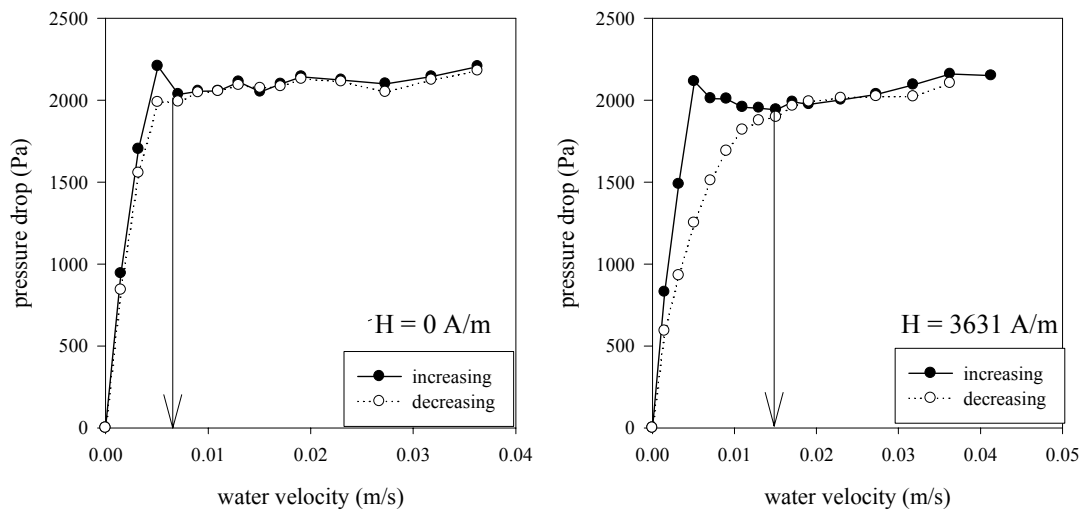


(a)

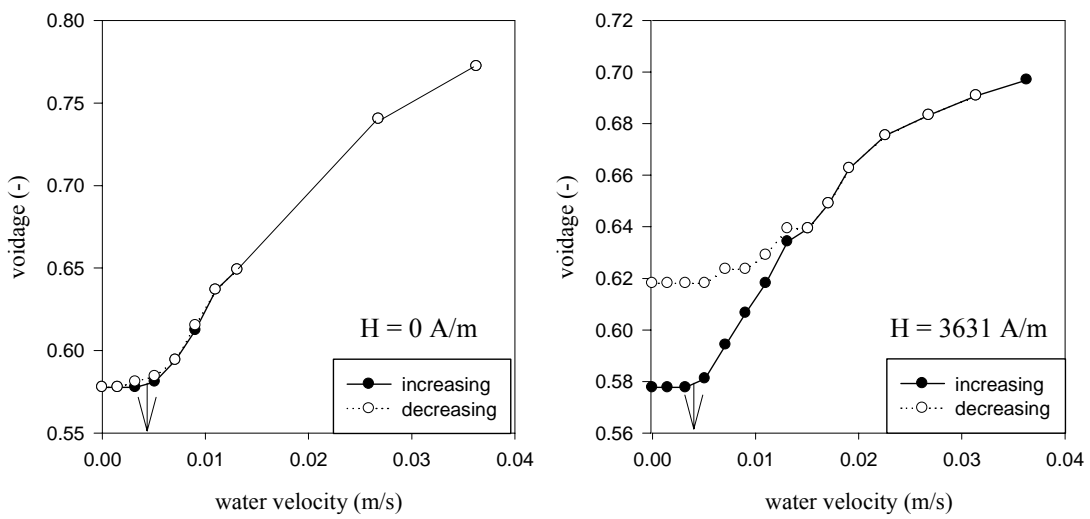


(b)

Fig. 5-5. Determination of minimum fluidization velocity by various methods at 0 A/m and 3631 A/m magnetic field intensities, (a) method by Colberg and Liu (1988) as well as Hamby and Liu (1991), and (b) method by Cohen and Tien (1991).



(c)



(d)

Fig. 5-5. Continued (c) method by Penchev and Hristov (1990a, b), and (d) method by Arnaldos et al. (1983), Filippov (1960) and Lee (1983, 1991).

擾動時即為最小流體化速度，更斷言最小流體化速度與磁場強度成指數關係。Fig. 5-4(d)表示，以 Casal (1984)所得數據利用 Leva 法與 Davidson and Harrison 法，其結果驗證 Leva 法與 Davidson and Harrison 法所定義最小流體化速度的差異性。Hristov (2002)將眾多文獻整理比較，多數學者以壓力曲線圖來界定最小流體化速度，並提出三種方法來敘述最小流體化速度：Leva 法、Davidson and Harrison 法與磁滯現象發生的開始，而後補充說明以磁滯現象的開端作為定義最小流體化速度的方法是不適合的。最後文中並提到以壓力曲線圖作為判斷床體粒子是否流體化還是會有爭議的，因為上述論點無法證明粒子運動是在床體粒子被流體化的情況，在有外加磁場作用下，確實顯現出床體粒子運動行為受限磁場作用力，如 Fig. 5-2 所示。

由上述實驗數據與文獻比較後，吾人認為學者們在認定磁流體化床中最小流體化速度還是無法有一致性的論點，其中就以 Leva 法與 Davidson and Harrison 法來定義最小流體化速度上，就會產生明顯的差異。故此吾人分別以 Leva 與 Davidson and Harrison 法求得最小流體化速度 $U_{mf}(L)$ 和 $U_{mf}(DH)$ ，在這兩個流速中間的區域定義為過渡區 (transition regime)，固定床區至磁穩定區需經由一過渡的區域，而不是一線之隔，且此過渡區性質可能為固定床區或磁穩定區。Table 5-1 所示為 Leva 法與 Davidson and Harrison 法所得之最小流體化速度，

Table 5-1. Summary of U_{mf} with different methods at various magnetic field intensities.

U_{mf} (m/s) H(A/m)	$U_{mf}(L)$	$U_{mf}(DH)$
0	0.00418	0.00418
1837	0.0042	0.0078
3631	0.00418	0.0094
5425	0.00411	0.0111
7219	0.00418	0.0105
9013	0.00413	0.013
10807	0.00418	0.015
13500	0.00412	0.0174

$$U_{mf}(L) \neq f(H)$$

$$U_{mf}(DH, \text{ m/s}) = 4.26 \times 10^{-3} \exp[7.52 \times 10^{-5} H (\text{ A/m})]$$

再次強調以這兩種方法去定義最小流體化速度時所衍生的差異。比較 Leva 法與 Davidson and Harrison 法所得結果，吾人認為以 Davidson and Harrison 法之描述較適合於磁流體化床中。磁性粒子的運動行為隨磁場強度增加而逐漸變小，故使其流體化的速度理應增加。

另外 Arnaldos (1985)以理論推導出氣、固磁流體化床中，氣泡產生速度和磁場強度為一指數關係；Jovanovic et al. (1989)實驗所得最小氣泡生成速度與磁場強度關係如式(5-2a)。另外吾人用 Davidson and

$$U_{mf}(DH) = U_{mf0} \exp[3.10 \times 10^{-4} H] \dots\dots\dots(5-2a)$$

$$U_{mf}(DH) = U_{mf0} \exp[2.33 \times 10^{-4} H] \dots\dots\dots(5-2b)$$

Harrison 法於 Casal and Arnaldos (1991)之實驗數據，所得結果如式(5-2b)，而 Fig. 5-6(a)為 Jovanovic et al. (1989)與 Casal and Arnaldos (1991)之實驗數據經回歸所得結果；在液、固磁流體化床方面，柯(1993)實驗所得最小流體化速度與磁場強度關係如式(5-2c)；吾人以本實驗

$$U_{mf}(DH) = U_{mf0} \exp[1.73 \times 10^{-4} H] \dots\dots\dots(5-2c)$$

根據 Davidson and Harrison 法所得之最小流體化速度與磁場強度關係得到式(5-2d)，而 Fig. 5-6(b)所示為柯(1993)與本研究之實驗數據經回

$$U_{mf}(DH) = U_{mf0} \exp[7.52 \times 10^{-5} H] \dots\dots\dots(5-2d)$$

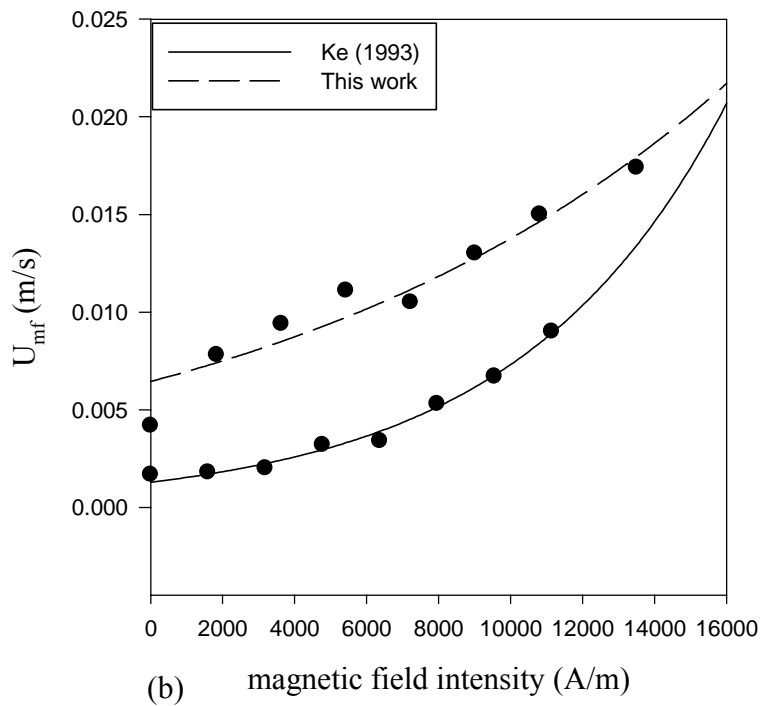
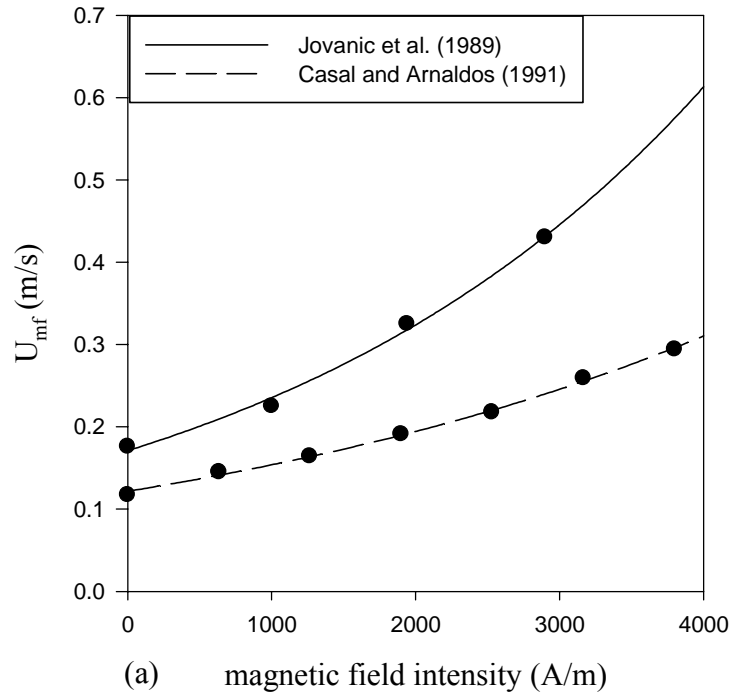


Fig. 5-6. Regression of relation between U_{mf} and magnetic field intensity in (a) gas-solid magneto-fluidized bed and (b) liquid-solid magneto-fluidized bed.

得歸所結果。上述各學者與本研所得之結果，顯示出最小流體化速度與磁場強度呈指數的正比關係，且氣、固磁流體化床之最小流體化速度受磁場之影響性高於液固磁流體化床。但上述之結果與 Siegell (1987)，Burns and Graves (1988)以及 Rosensweig and Ciprios (1991)所得之最小流體化速度不受磁場影響的結果不同。

5-1-3 磁場對移轉速度之影響

磁流體化床與傳統流體化床不同之處，在於傳統流體化床當開始發生流體化的行為，最小流體化速度與移轉速度(transition velocity)即同時發生；藉由磁場的作用，最小流體化速度與移轉速度會逐漸分離，在這兩個流速間所產生之區域定義為磁穩定區，而床體流態從磁穩定床區到不穩定床區的交界速度稱為移轉速度。液、固磁流體化床可直接以目測觀察床體內部之行為，定為移轉速度，Siegell (1987)在液、固磁流體化床實驗中就以此方法觀察移轉速度。以下為吾人界定移轉速度的三種方法：

1. 以目測觀察床體表面是否開始有擾動或波動等行為時之流速 $U_t(\text{vis})$ ，如 Fig. 5-2 所示。
2. 由床體粒子的單點壓降對流速之曲線圖中，所發生磁滯現象時對應之流速 $U_t(\text{P})$ ，如 Fig. 5-7 所示。
3. 由床體粒子的空隙度對流速圖中，所發生磁滯現象時對應之流速

$U_t(\varepsilon)$ ，如 Fig. 5-8 所示。

單點壓降對流速之曲線圖中，減速操作下所得之單點壓降開始與增速操作下所得之單點壓降產生分歧之點，此時流體速度即為移轉速度。由空隙度與流速關係圖中，利用式(5-3)說明床高與空隙度之關係，而減速操作下所得之空隙度曲線開始與增速操作下所得之空隙度曲線產生分歧之點，即認定為移轉速度。隨著磁場強度增加床體粒

$$\varepsilon = 1 - \frac{W_A}{\rho_p g h} \dots\dots\dots(5-3)$$

子移動行為會逐漸受到限制，使其膨脹性逐漸降低；當減速操作時，外加磁場作用力使床體粒子抑制在固定高度下，而空隙度不受流速影響，且抑制的情況會隨磁場強度增加而變大。Table 5-2 表示為此三種方法所得之速度，三者比較後可以發現以單點壓降曲線圖法與目測法所得結果較為接近，而空隙度法與前兩者之結果差異甚大，主要原因為目測磁穩定區量測其床高時，若磁場強度高於低磁場強度時，此時床體表面粒子會凝聚成鏈狀較不易觀察實質床高，如 Fig. 5-2(d)及(e)所示，以致有些許的偏差；因此吾人以單點壓降曲線圖法所得結果作為移轉速度的指標。在較大磁場下皆為磁穩定區故無法觀測移轉速度。

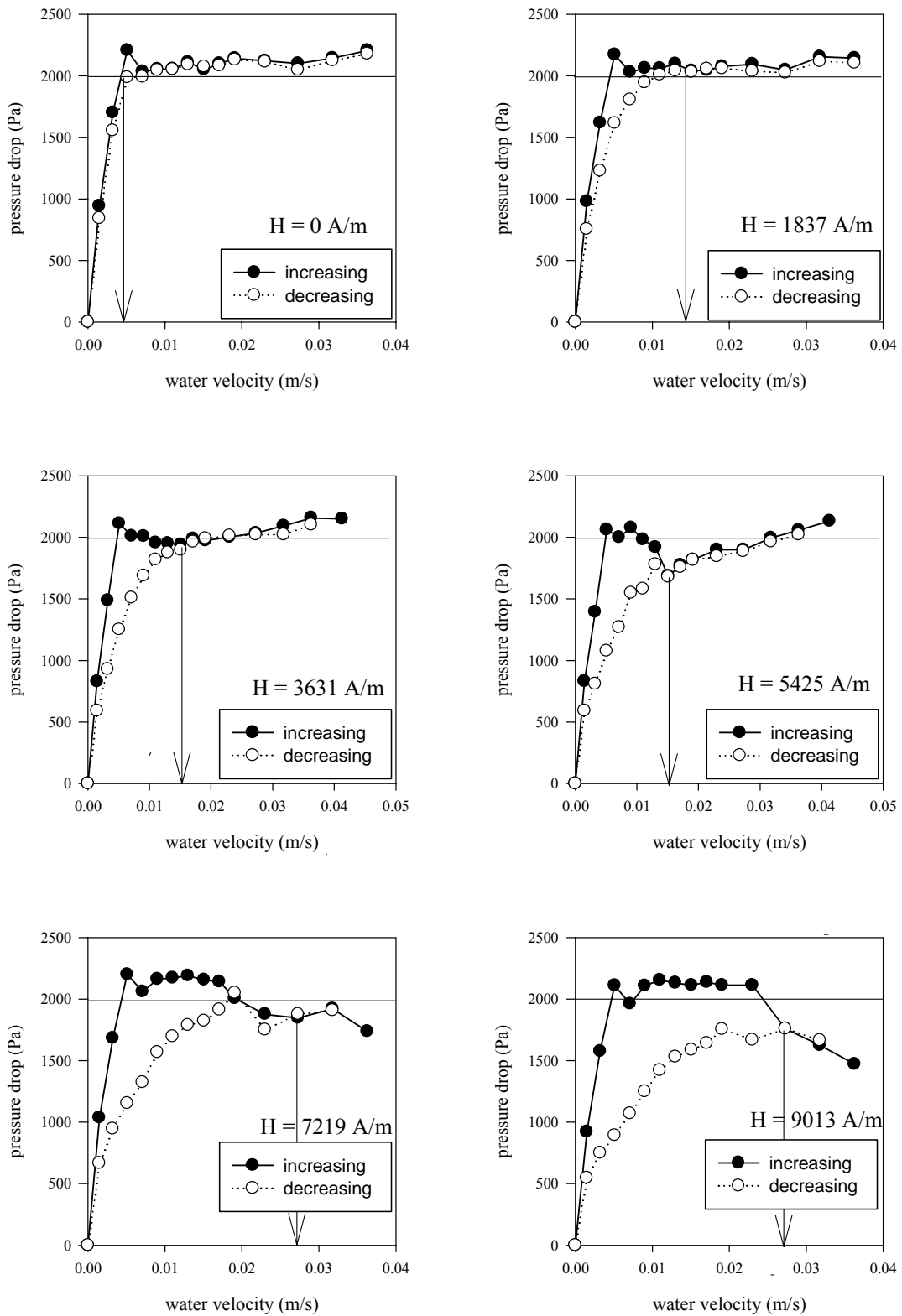


Fig. 5-7. Determination of transition velocity with pressure drop method at various magnetic field intensities.

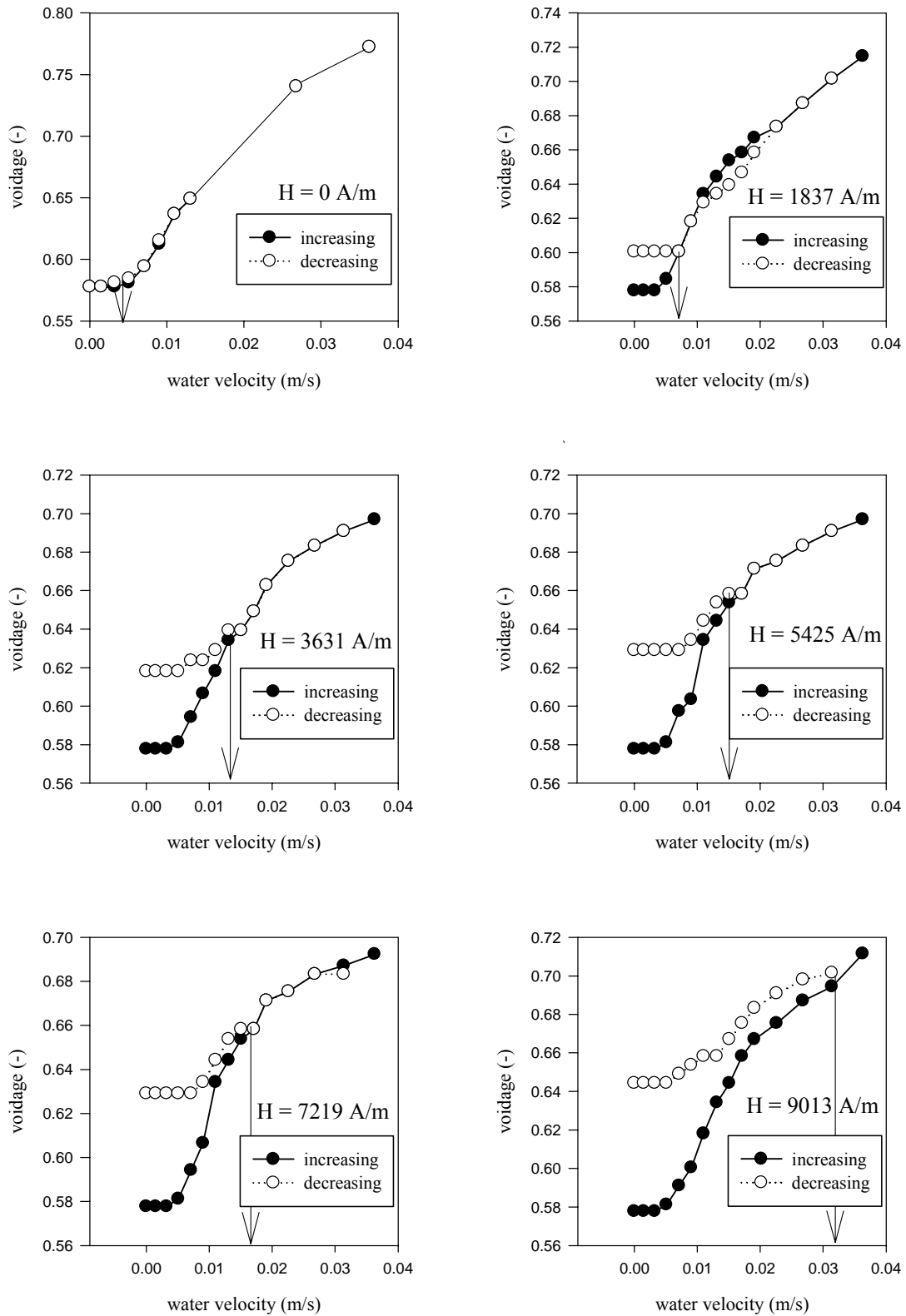


Fig. 5-8. Determination of transition velocity with voidage method at various magnetic field intensities.

Table 5-2. Summary of U_t with different methods at various magnetic field intensities.

U_t (m/s) H(A/m)	U_t (vis)	U_t (P)	U_t (ϵ)
0	0.00418	0.00418	0.00418
1837	0.0151	0.0140	0.0073
3631	0.0151	0.0151	0.0121
5425	0.0171	0.016	0.0153
7219	0.0247	0.026	0.0173
9013	0.0300	0.028	0.032
10807	-	0.031	-

- : out of range for $U_1 = 0.035$ m/s

5-1-4 非牛頓流體對於最小流體化速度與移轉速度之影響

將 0.03, 0.1 及 0.2 wt% CMC 流體通入床體內部，觀察流體性質影響床體粒子的情況。流體黏度與向上托曳力隨液相濃度增加而上升，作用力增加導致床體所需流體化的速度減少，故此最小流體化速度隨液相濃度上升而減少。式(5-4)所示最小流體化速度與黏度的關係，並將 Table 4-1 之參數與不同黏度(假設值)代入式(5-4)計算，結果如 Fig. 5-9 所示，並可發現黏度上升確實會減少最小流體化速度。另外使用非牛頓流體於磁流體化床情況中，如 Fig. 5-10, 5-11 及 5-12 所示，其

$$\frac{1.75}{\Phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\Phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\mu^2} \dots\dots (5-4)$$

整體趨勢與牛頓流體相符。另外由目測觀察床體粒子的膨脹情況，其膨脹性會隨著液相濃度上升而激增，但還是可以發現此時磁場壓制床體粒子的效果仍是相當顯著。

如 Table 5-3 所示，使用不同濃度下非牛頓流體於磁流體化床中，所得之最小流體化速度、移轉速度與磁場強度關係。非牛頓流體之最小流體化速度還是會因界定方式的不同產生差異，其結果與牛頓流體所得結果是相同的，且液相濃度上升最小流體化(Leva 法及 Davidson and Harrison 法)速度均下降，此結果與 Miura et al. (1998)之結果相符。移轉速度隨非牛頓流體濃度上升而減小，此結果與 Hou and

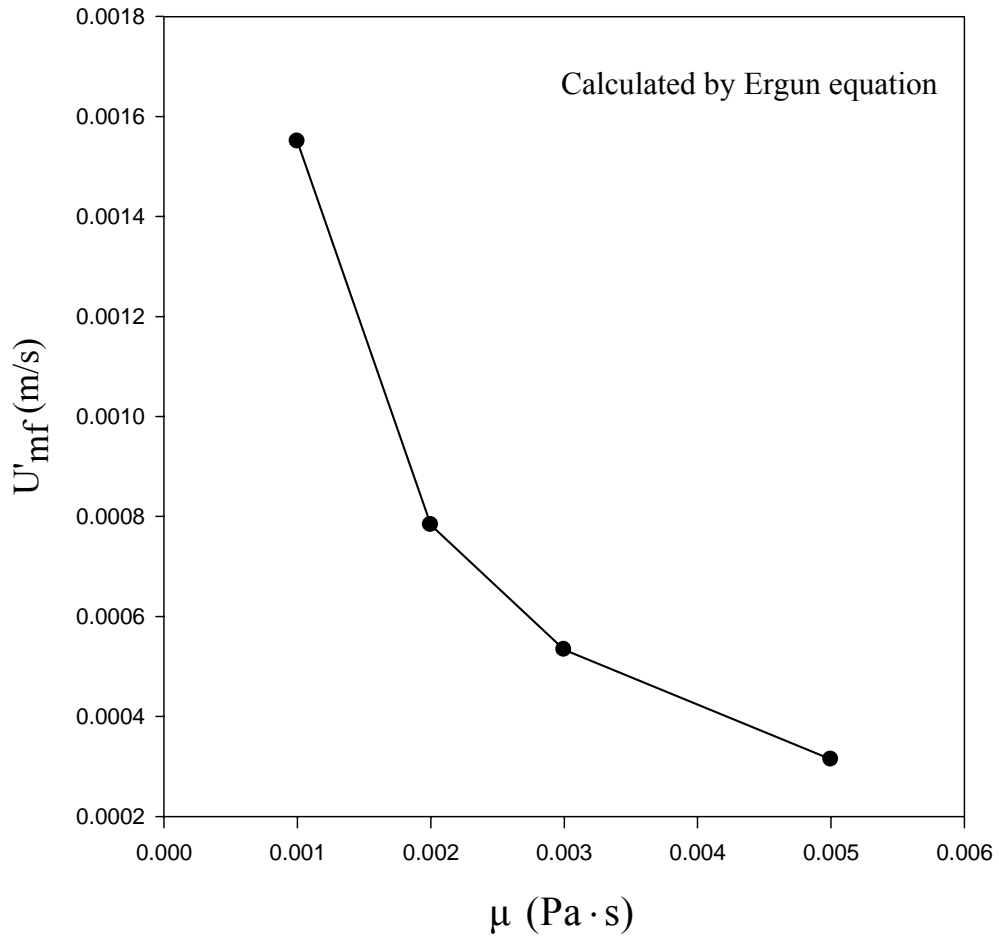


Fig. 5-9. Relation between minimum fluidization velocity and viscosity from Ergun equation.

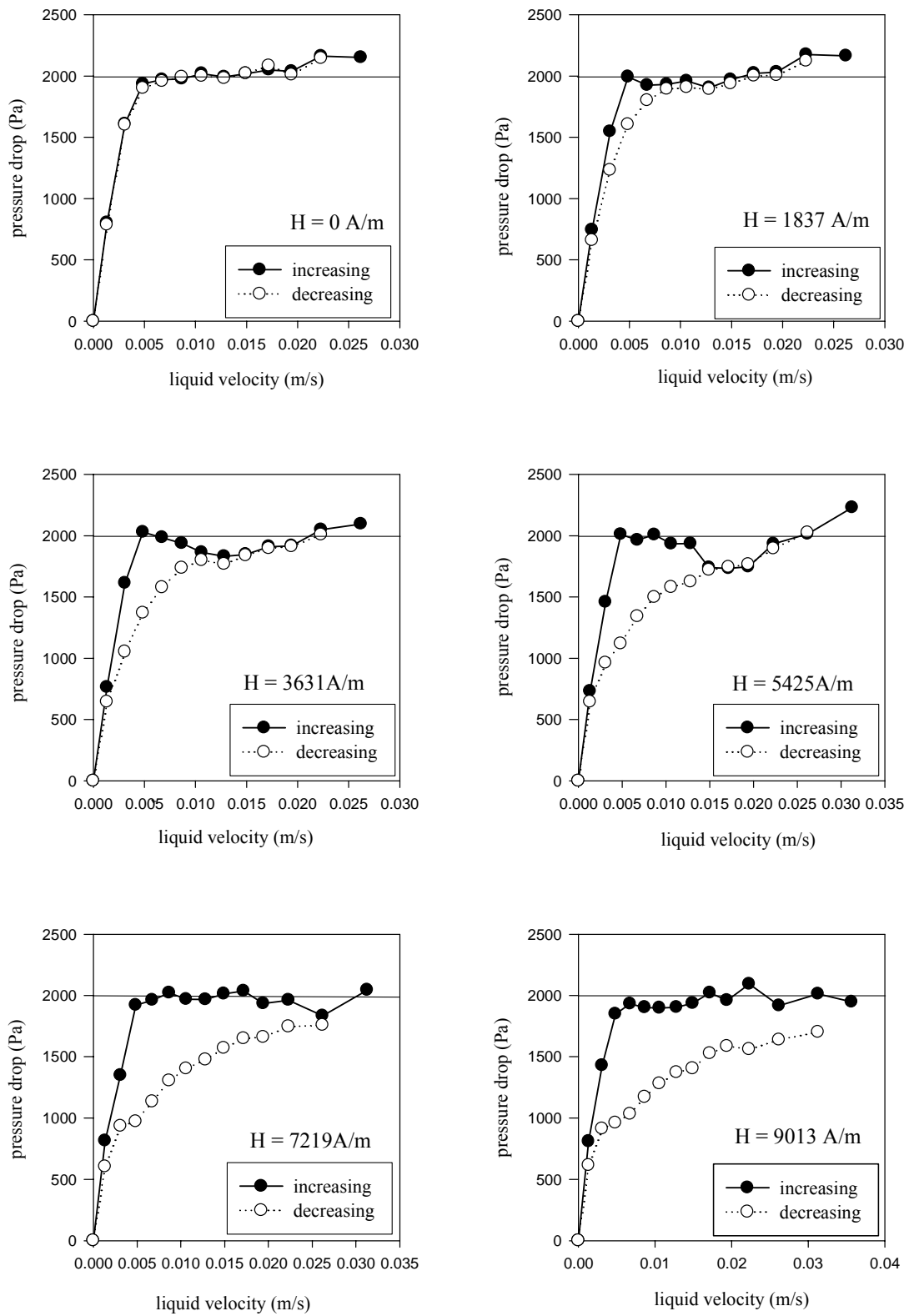


Fig. 5-10. Pressure drop vs. liquid velocity with various magnetic field intensities for 0.03 wt% CMC solution.

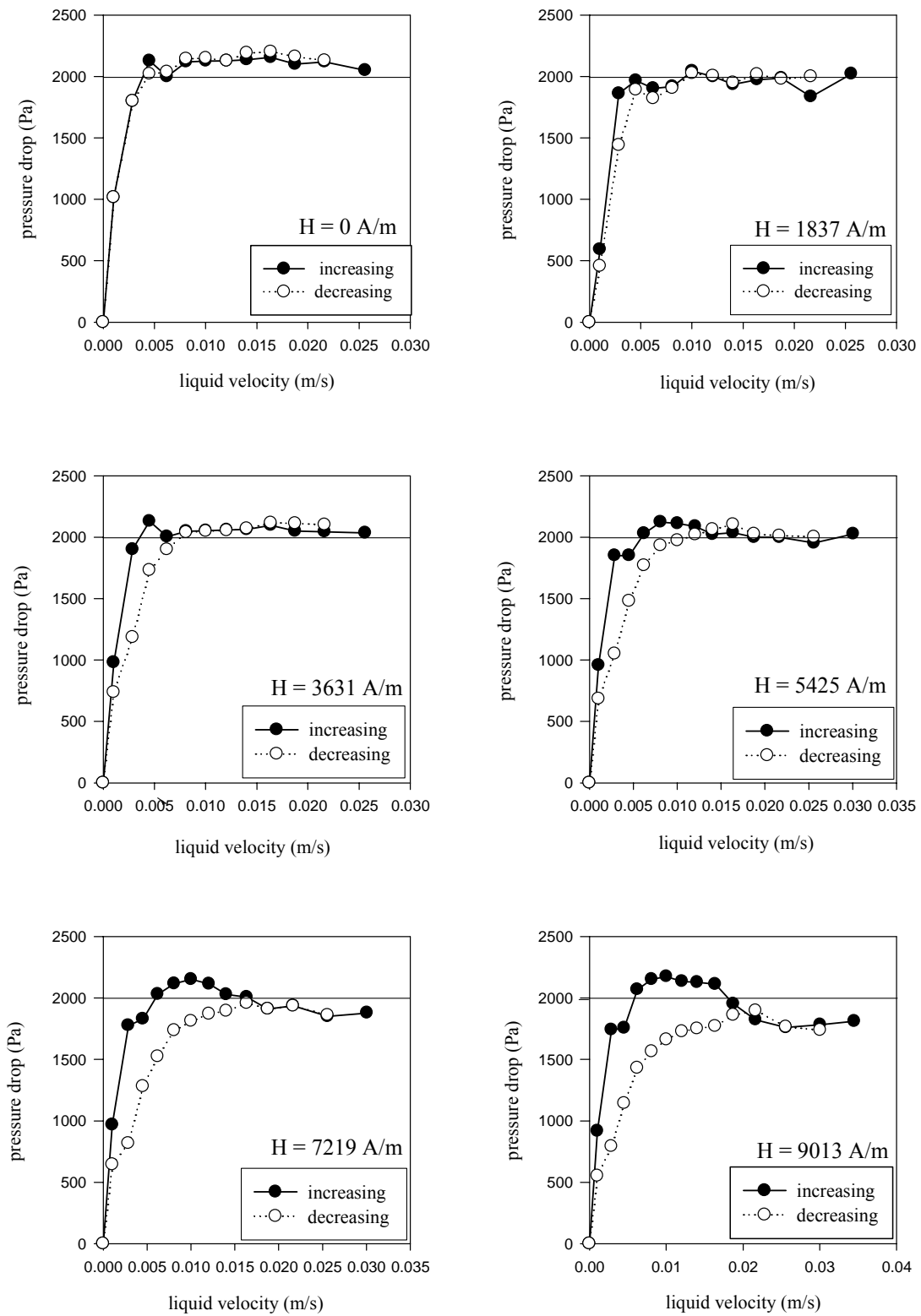


Fig. 5-11. Pressure drop vs. liquid velocity with various magnetic field intensities for 0.1 wt% CMC solution.

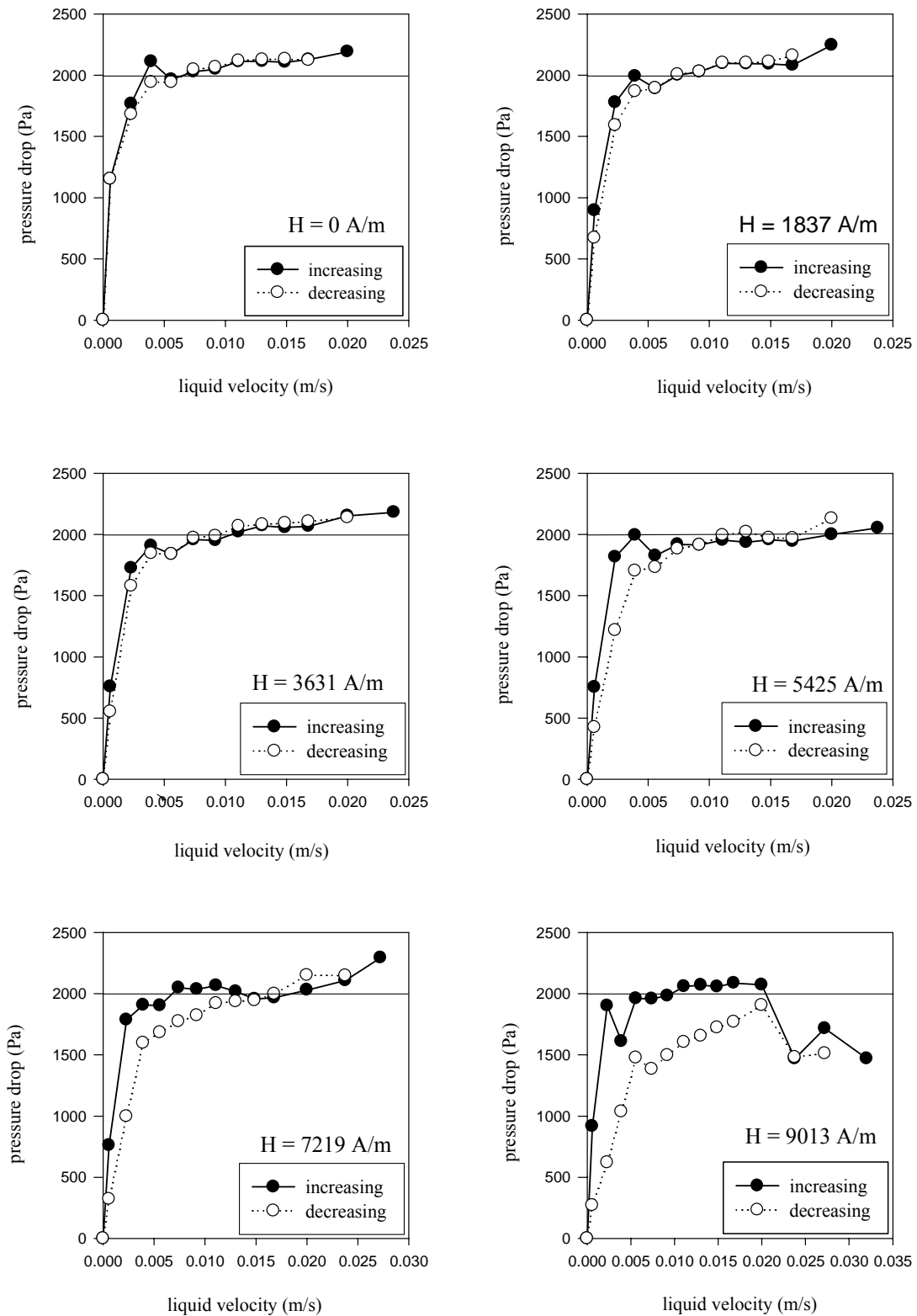


Fig. 5-12. Pressure drop vs. liquid velocity with various magnetic field intensities for 0.2 wt% CMC solution.

Table 5-3. Summary of U_{mf} and of U_t with different methods at various magnetic field intensities and CMC solutions.

CMC		0.03 wt% CMC			0.1 wt% CMC			0.2 wt% CMC					
H(A/m)		$U_{mf}(L)$	$U_{mf}(DH)$	$U_t(P)$	$U_{mf}(L)$	$U_{mf}(DH)$	$U_t(P)$	$U_{mf}(L)$	$U_{mf}(DH)$	$U_t(P)$			
fluid velocity (m/s)×10 ³		$U_{mf}(L)$	$U_{mf}(DH)$	$U_t(P)$	$U_{mf}(L)$	$U_{mf}(DH)$	$U_t(P)$	$U_{mf}(L)$	$U_{mf}(DH)$	$U_t(P)$			
0		4.06	4.06	4.06	3.17	3.17	3.17	2.6	2.6	2.6			
1837		4.06	6.34	8	3.14	5.60	8.0	2.6	4.7	5.6			
3631		3.94	9.2	11	3.14	5.80	8.0	2.8	4.84	5.6			
5425		4.14	10.3	14.9	3.10	6.45	13.3	2.54	5.4	9.0			
7219		4.06	12	26.3	3.03	7.40	18.6	2.67	5.75	15			
9013		4.14	13	-	3.30	8.70	21	2.59	7.6	23			
10807		4.40	17.1	-	3.20	9.60	34	2.61	8.6	29			
$a \times 10^3$	$b \times 10^4$	5.437		1.05		3.56		0.893		2.8		1.33	
relation between $U_{mf}(DH)$ (y) and magnetic field intensity(H) : $y = a \cdot e^{bH}$													

- : out of range for $U_1 = 0.035$ m/s

Williams (2002)相符。其原因為非牛頓流體作用力(拖曳力與黏滯力)較大導致外加磁場穩定床體之能力降低。液相濃度增加會導致磁場的作用逐漸失效，因此高黏滯性流體應用於磁流體化床之操作，則需要較高的磁場強度穩定床體內部情況。

5-2. 液、固磁流體化床之相圖

Siegell et al. (1987)與 Goto et al. (1995)討論液、固磁流體化床中床體情況，分為固定床區、磁穩定區、粒子滾動區(roll-cell zone)與不穩定區。但學者們以 Leva 法來界定最小流體化速度，此最小流體化速度不受磁場影響而改變，固定床區經最小流體化速度後即為磁穩定區，遂無本研究所述之過渡區；本研究則考量到磁場強度影響最小流體化之可能性，故再以 Davidson and Harrison 法來確定最小流體與磁場強度之關係並劃分出過渡區，此區行為類似於固定床區或磁穩定區。Siegell et al. (1987)及 Goto et al. (1995)所發現的粒子滾動區在本實驗則不明顯。

5-2-1 液、固磁流體化床之區域流態

由上述 5-1.節所得最小流體化速度(Leva 法, Davidson and Harrison 法)與移轉速度，並依照所觀察到的流速可劃分出四個區域，如 Fig. 5-13(a)所示：

(1) 固定床區(fixed bed regime) : $U_1 < U_{mf}(L)$

流體通過床體時，床體粒子固定不動且床體無膨脹之行為。

(2) 過渡區(transition regime) : $U_{mf}(L) < U_1 < U_{mf}(DH)$

Leva 法與 Davidson and Harrison 法所得之最小流體化速度，將最小流體化速度以區域範圍來討論。在床體流態可能為固定床區或磁穩定區，而又無法有效界定最小流體化的情況下，故以過渡區來解釋。此區床體的整體行為與穩定性類似於固定床，當流速逐漸增大，床體粒子因磁場作用力的限制，僅會有少許的膨脹行為，之後床體表面粒子會有凝聚成鏈狀的行為，類似於磁穩定區。

(3) 磁穩定區(magnetically stabilized bed regime): $U_{mf}(DH) < U_1 < U_t(P)$

流體通過床體時，床體粒子固定不動但床體運動會有類似活塞之膨脹情況，而在高磁場強度下床體粒子會因磁場作用力而緊密束縛。

(4) 不穩定區(unstable bed regime) : $U_t(P) < U_1$

流體通過床體時，磁場作用力無法壓制粒子於固定區域內，即床體表面有不安定與波動的情況。

5-2-2 牛頓與非牛頓流體之相圖比較

Fig. 5-13 所示為牛頓流體與非牛頓流體的相圖，在此發現非牛頓流體的區域性質與牛頓流體的區域性質相近，也分為固定床區、過渡區、磁穩定區與不穩定區。非牛頓流體與牛頓流體之相圖最大的差異

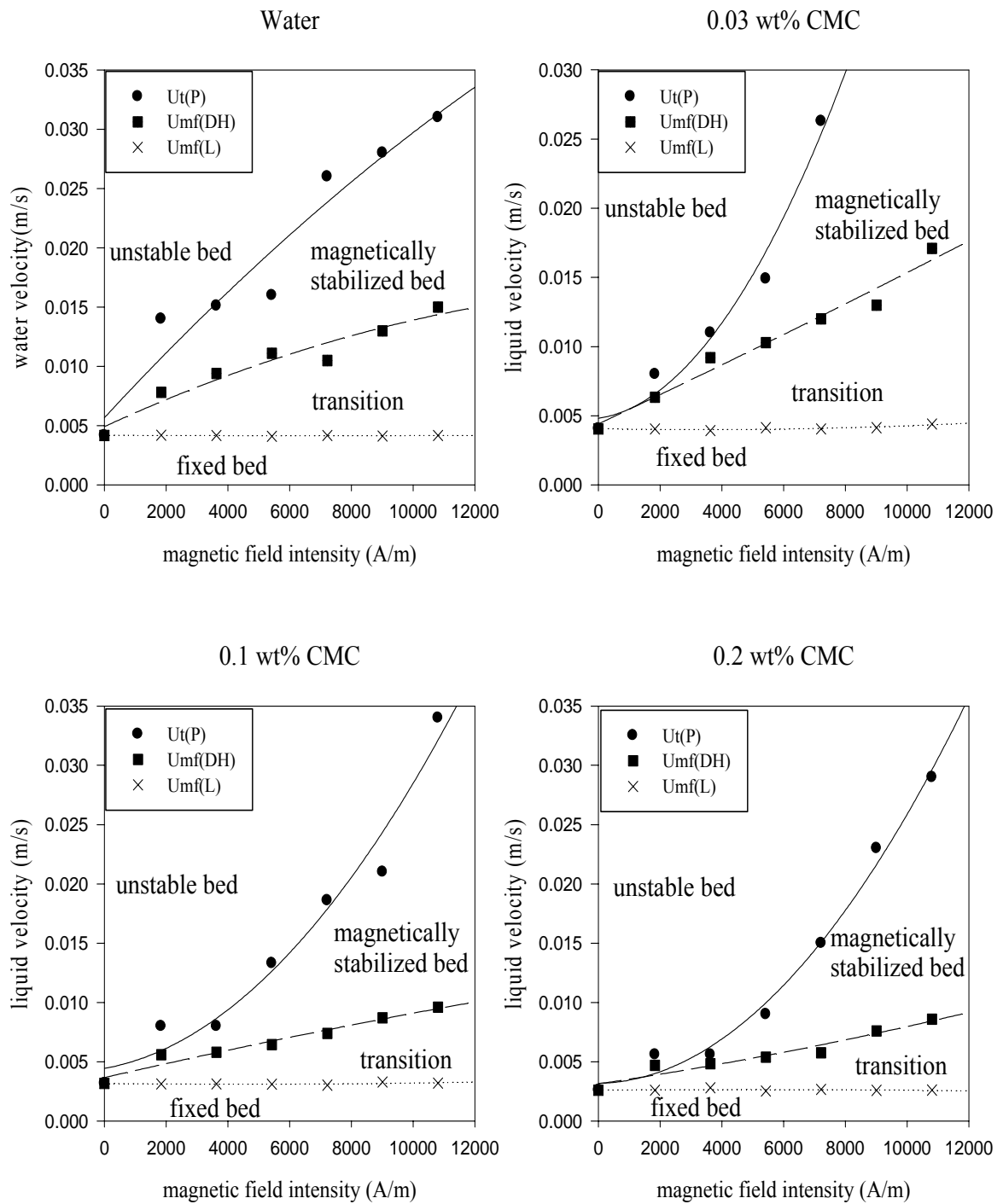


Fig. 5-13. The phase diagram of various fluids solution, (a) water, (b) 0.03 wt% CMC, (c) 0.1 wt% CMC and (d) 0.2 wt% CMC.

在於液相流體之性質對於流態之區域行為是有影響的，當液相溶液濃度上升其固定床區、過渡區、磁穩定區的範圍會逐漸縮小，不穩定區域則相對擴張。由此結果顯示出磁場壓制粒子的效果會隨著液相濃度上升而下降，即液相濃度對於磁流體化床體的區域流態確實有相當程度的影響性。

5-3. 液、固磁流體化床之軸向分散實驗

本研究以 closed-closed 系統形式，首先由分散板上方快速注入 1 cm³ 之 1 N NaCl 追蹤劑以滿足脈衝形式，在床體上方出口處以 mixing cup 方式處理，此時可由電導度計觀察追蹤劑濃度與時間的關係，如附錄九 Fig. A-2(a)所示，由追蹤劑在系統內部平均滯留時間 \bar{t} 與變異數 σ^2 ，可計算出軸向分散係數。而 E curve 則如附錄九 Fig. A-2(b)所示，本實驗計算真實滯留時間 \bar{t}_{real} 、理想滯留時間 \bar{t}_{ideal} 與變異數 σ^2 公式如下：

$$\bar{t}_{\text{real}} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \dots\dots\dots (5-5)$$

$$\bar{t}_{\text{ideal}} = \frac{L}{U_1} \dots\dots\dots (5-6)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 \cdot C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \dots\dots\dots (5-7)$$

5-3-1 牛頓流體之軸向分散實驗

在本實驗中分別以 0.0085、0.0129、0.0191 與 0.0268 m/s 流體速度下進行分析，而 Table 5-4 所示為真實滯留時間與理想滯留時間，及不同流速與磁場強度下的軸向分散係數與床體區域。由 Table 5-4 顯示出，部分流速下真實滯留時間稍大於理想滯留時間，此不合理行為應為實驗上之誤差，來源大概為注入追蹤劑的時間無法均一。

Fig.5-14 所示為軸向分散係數與流速關係、及先前壓力曲線圖所得之相圖。從 Fig. 5-14(a)可瞭解到軸向分散係數與流速成正比關係，在相同流速下軸向分散係數隨磁場強度增加而下降，該原因為粒子在流體化床區或不穩定區時之行為，粒子間碰撞程度增大進而使追蹤劑與粒子接觸面積增大，以致於在流體化床區或不安定區會有較大的軸向分散係數，此結果與 Nishio et al. (1991)、Sajc et al. (1994)、Goto et al. (1995)、柯(1995)和陳(2000)是相符合的。Siegele et al. (1987)、Goto et al. (1995)與陳(2000)以他們的實驗提出當床體在磁穩定區下，軸向分散係數均不受磁場強度影響。本實驗所得之軸向分散係數，在 0.0085 m/s 與 0.0129 m/s 流速下，在這兩個磁場強度下均相同，並沒有受到磁場強度增大導致軸向分散係數的下降。磁穩定區下，軸向分散係數較不受制於磁場強度影響，其原因為床體粒子受到磁場穩定的作用下性質類似於膨脹的固定床區，而在 5425 與 9013 A/m 磁場強度下，追

Table 5-4. Comparison of \bar{t}_{ideal} , \bar{t}_{real} and D_a in magnetic fluidized beds at various water velocities.

H(A/m) U _l (m/s)		0	5425	9013
	0.0085	\bar{t}_{ideal} (s)	70.6	
\bar{t}_{real} (s)		70.1	71	70.1
D_a (m ² /s)		5.1×10^{-4}	4.4×10^{-4}	4.4×10^{-4}
regime		F	Tran.	Tran.
0.0129	\bar{t}_{ideal} (s)	46.5		
	\bar{t}_{real} (s)	47	48	47
	D_a (m ² /s)	8.0×10^{-4}	6.0×10^{-4}	6.1×10^{-4}
	regime	F	M	Tran.
0.0191	\bar{t}_{ideal} (s)	31.4		
	\bar{t}_{real} (s)	32	30.1	31.5
	D_a (m ² /s)	1.02×10^{-3}	8.7×10^{-4}	8.0×10^{-4}
	regime	F	U	M
0.0268	\bar{t}_{ideal} (s)	22.4		
	\bar{t}_{real} (s)	22	23.3	22
	D_a (m ² /s)	1.41×10^{-3}	1.11×10^{-3}	1.06×10^{-3}
	regime	F	U	M

F : fluidized, M : magnetically stabilized , Tran. : transition, U : unstable

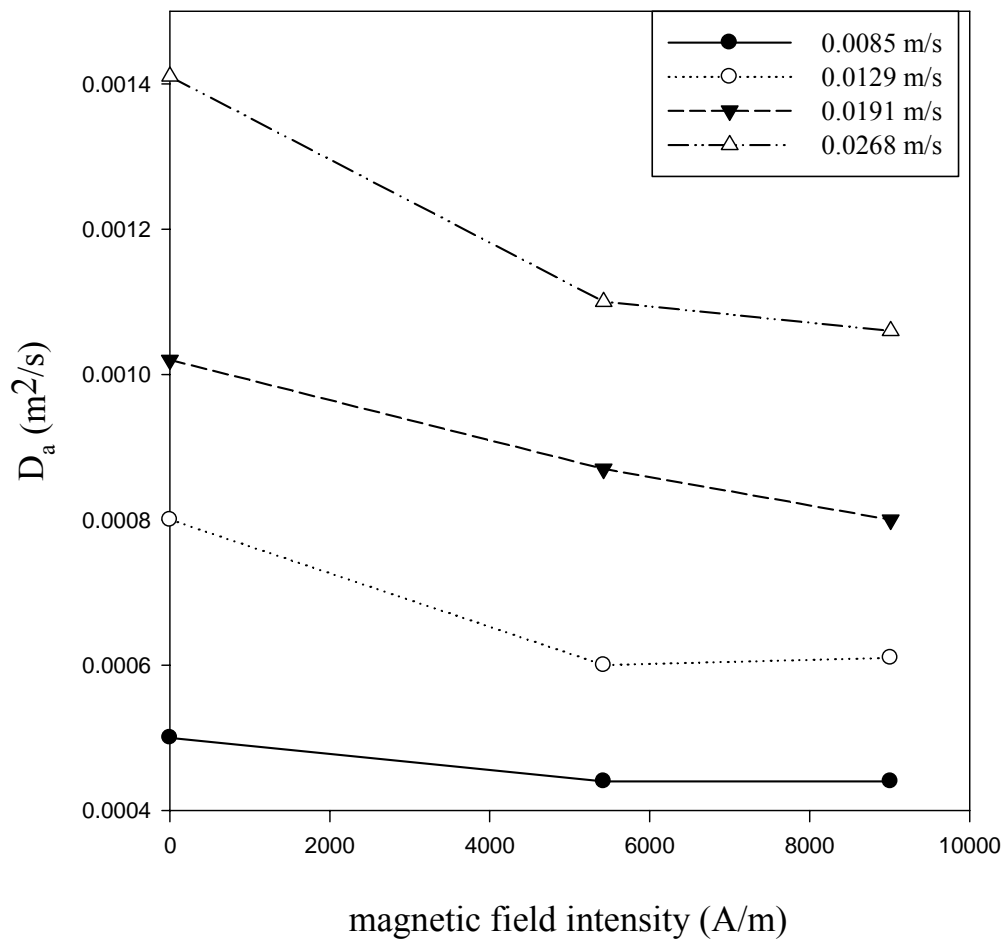


Fig. 5-14. (a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for water.

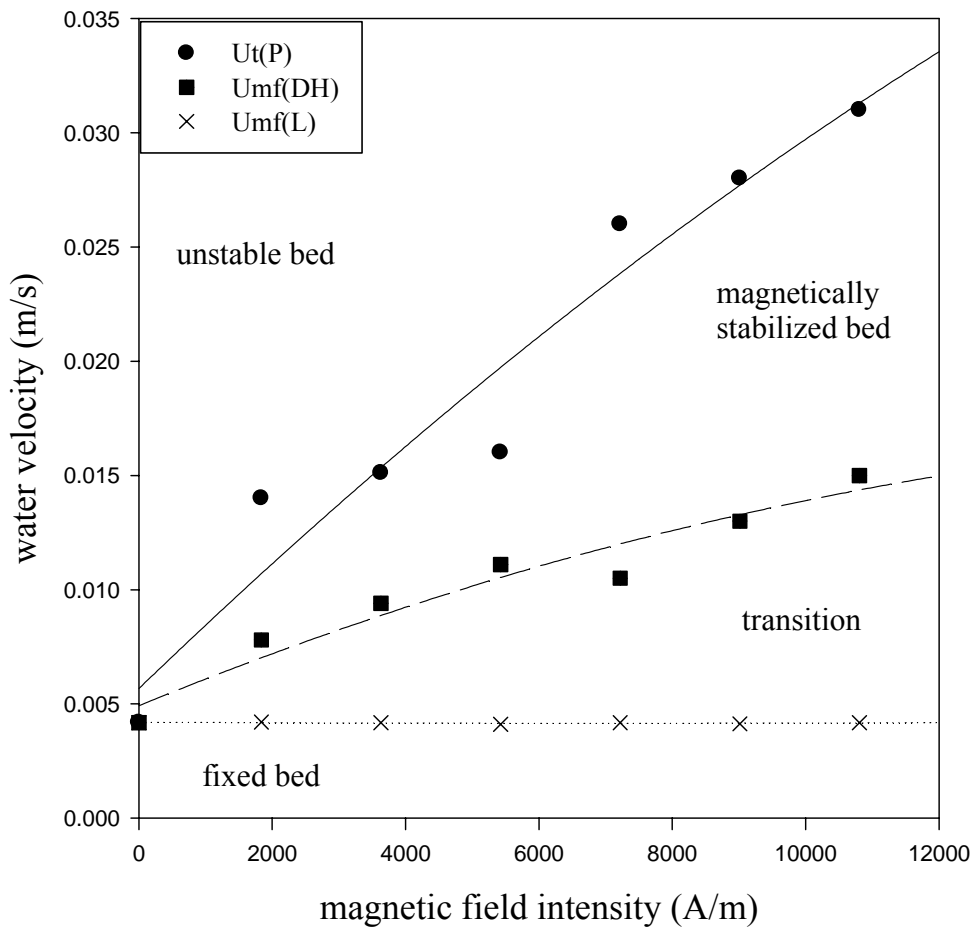


Fig. 5-14. (b) The phase diagram of water.

蹤劑所接觸粒子的表面積大致上是相同的(可參考 Fig. 5-8 空隙度與流速在不同磁場下之關係)，由此推論可知在這兩各磁場強度下床體性質是相近的，以致於磁場影響軸向分散係數的效果並不明顯。上述結果用於 0.0085 m/s 流速下會產生些許的差異，以當時床體流態觀察，如 Fig. 5-14(b)所示，在兩磁場強度下分別為過渡區，而不為前述學者所提之磁穩定區，不過早先對於過渡區的區域流態應相近於固定床區或磁穩定區，而在此過渡區下軸向分散係數均相同，由此驗證吾人先前對於過渡區的論述應是合理的。

最後將 Nishio et al. (1991)、Sajc et al. (1994)、柯(1995)及陳(2000)，採用 open-open 系統所得之傳統流體化床和磁流體化床軸向分散係數結果，與本實驗採用 closed-closed 系統的軸向分散係數結果比較，如 Fig. 5-15 所示，軸向分散係數與流速成正比，與磁場強度成反比。

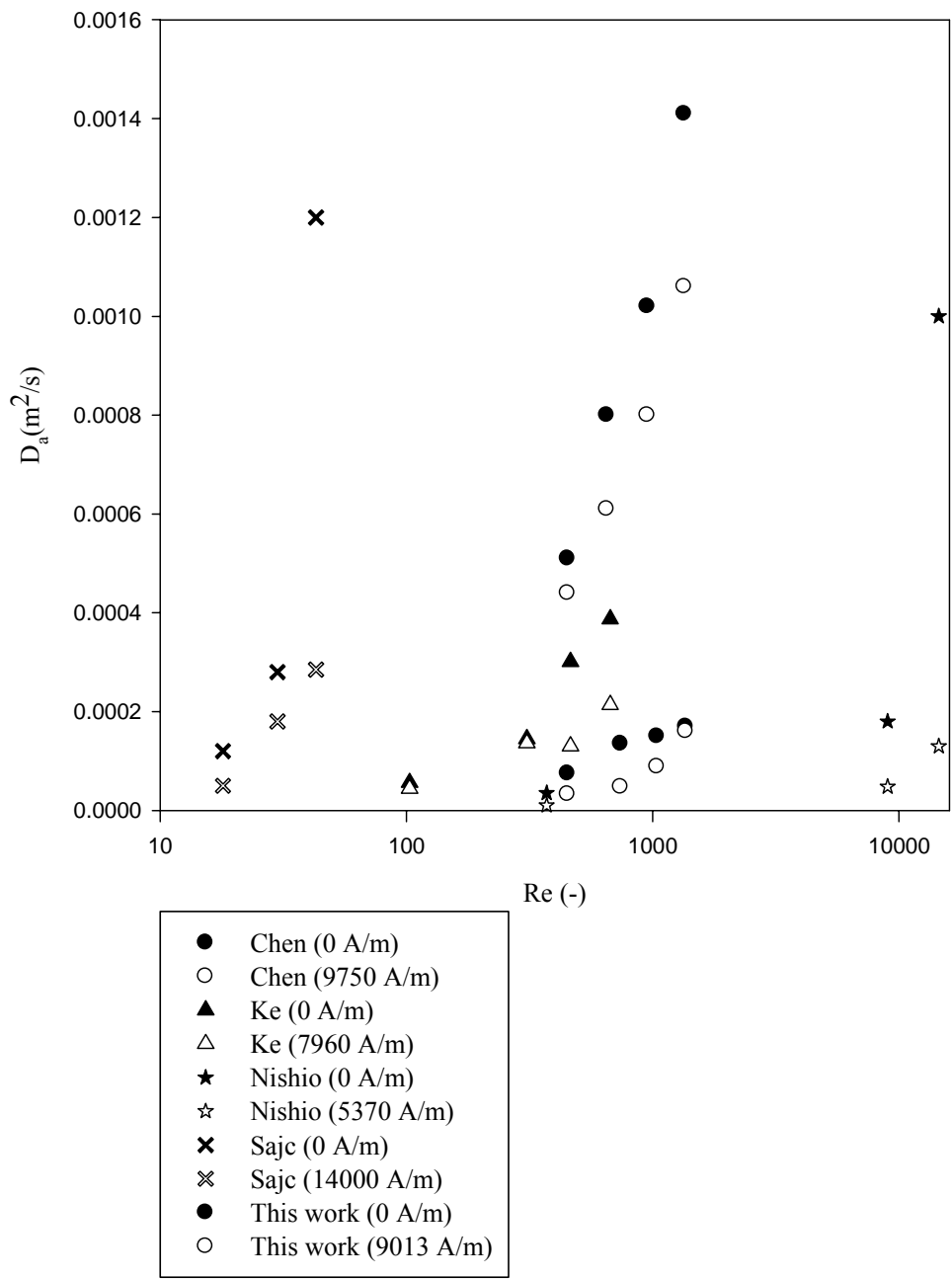


Fig. 5-15. Comparison of axial dispersion coefficient.

5-3-2 非牛頓之軸向分散實驗

Table 5-5 所示為三種 CMC 溶液濃度中真實滯留時間、理想滯留時間，及不同流速與磁場強度下的軸向分散係數與當時床體區域。由於 CMC 溶液為 power law 流體，故對於軸向分散係數的計算式需修正，如下式(5-8)：

$$\begin{aligned}
 Pe &= Re \cdot Sc \\
 &= \frac{L^n U_1^{2-n} \rho}{8^{n-1} \cdot k} \left(\frac{4n}{1+3n} \right)^n \cdot \frac{k}{D_a \cdot \rho} \\
 \Rightarrow D_a &= \frac{L^n U_1^{2-n}}{8^{n-1}} \left(\frac{4n}{1+3n} \right)^n \cdot \frac{1}{Pe} \dots\dots\dots(5-8)
 \end{aligned}$$

由 Table 5-5 所示真實的滯留時間與理想的滯留時間還是有部分誤差，此誤差來源為等同於牛頓流體之情形。

而在非牛頓流體的軸向分散行為上，軸向分散係數與流速還是成正比關係並且隨磁場強度增大而變小，這部分結論和行為模式均與牛頓流體相同。由 Fig. 5-16, 5-17 及 5-18 所示為不同濃度之非牛頓流體的軸向分散係數與相圖。從床體的流態情況觀察軸向分散係數，當磁場達磁穩定區時，軸向分散係數即不受磁場強度所影響，0.03 wt%與 0.1 wt% CMC 與牛頓流體之結果是互相吻合的；而由 Fig. 5-18 的相圖中發現在 0.0085 m/s 流速下，此一流態介於磁穩定區與不穩定區

Table 5-5. Comparison of \bar{t}_{ideal} , \bar{t}_{real} and D_a in magnetic fluidized beds with various fluid(CMC) velocities and concentrations.

fluid		0.03 wt% CMC			0.1 wt% CMC			0.2 wt% CMC		
H(A/m)	U _I (m/s)	0	5425	9013	0	5425	9013	0	5425	9013
		\bar{t}_{ideal} (s)	70.5							
0.0085	\bar{t}_{real} (s)	71.5	70.2	67	68.9	68	68.5	69	70	67
	$D_a(m^2/s) \times 10^4$	6.6	4.56	4.5	7.53	4.76	4.3	7.15	5.6	4.1
	regime	F	Tran.	Tran.	F	M	Tran.	F	M	M
	\bar{t}_{ideal} (s)	46.5								
0.0129	\bar{t}_{real} (s)	48	47.5	43.5	46	44.5	44	44.2	44	44.3
	$D_a(m^2/s) \times 10^4$	7.78	7.0	7.1	8.54	7.88	7.31	8.16	6.05	5.9
	regime	F	M	M	F	M	M	F	U	M
	\bar{t}_{ideal} (s)	31.4								
0.0191	\bar{t}_{real} (s)	30	30.2	31	31.5	31.5	29.9	30	31.5	31.1
	$D_a(m^2/s) \times 10^4$	10.1	8.73	8.23	9.85	8.46	7.91	9.93	8.37	7.84
	regime	F	U	M	F	U	M	F	U	M

0.0268	$\bar{t}_{\text{ideal}} \text{ (s)}$	22.4								
	$\bar{t}_{\text{real}} \text{ (s)}$	22	21	23	23	23	22.5	22.9	22.5	21
	$D_a(\text{m}^2/\text{s}) \times 10^4$	14.1	10.1	10.3	14.2	14.4	11.2	14.4	14.5	12.7
	regime	F	U	M	F	U	U	F	U	U

F: fluidized, Tran.: transition, M: magnetically stabilized, U: unstable

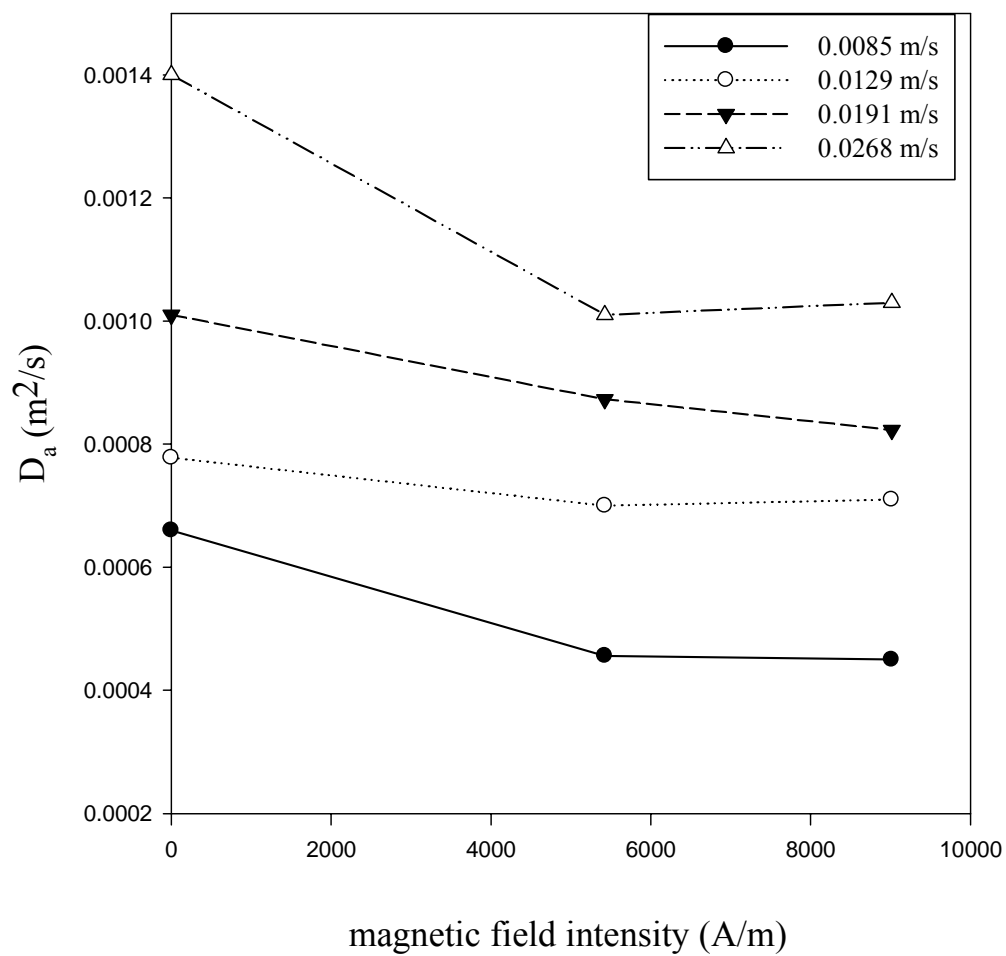


Fig. 5-16. (a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for 0.03 wt% CMC solution.

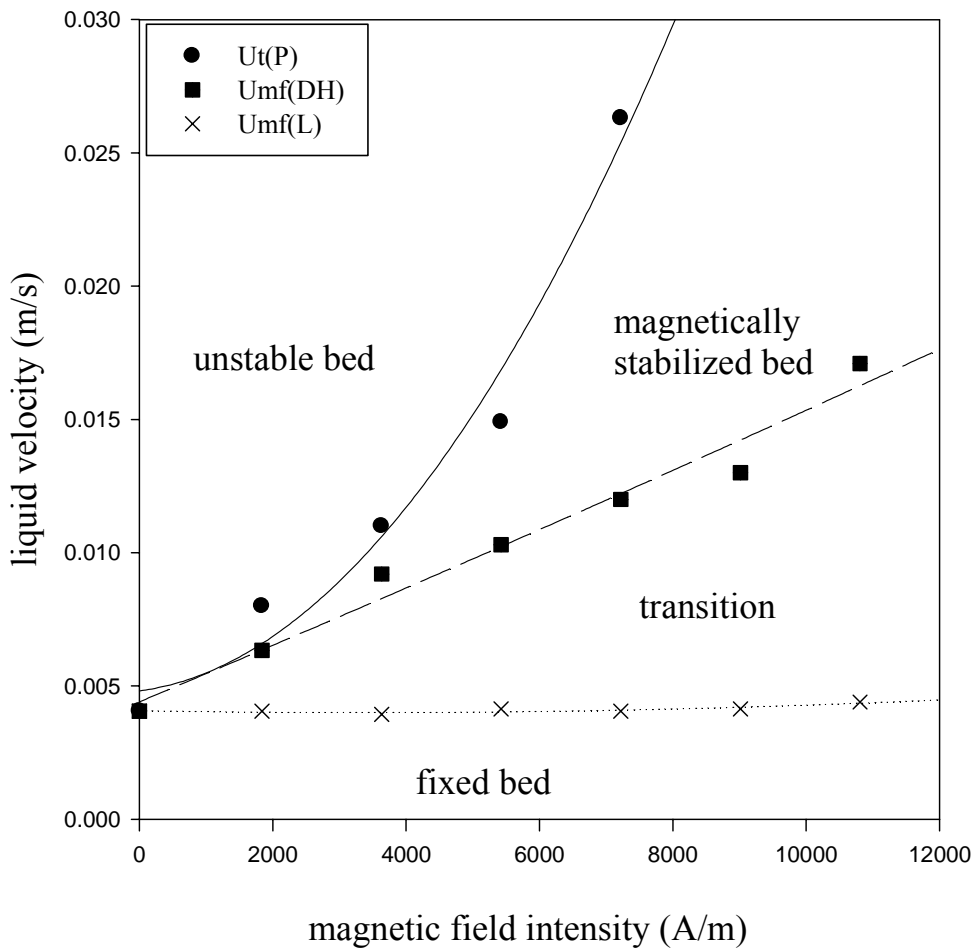


Fig. 5-16. (b) The phase diagram of 0.03 wt% CMC solution.

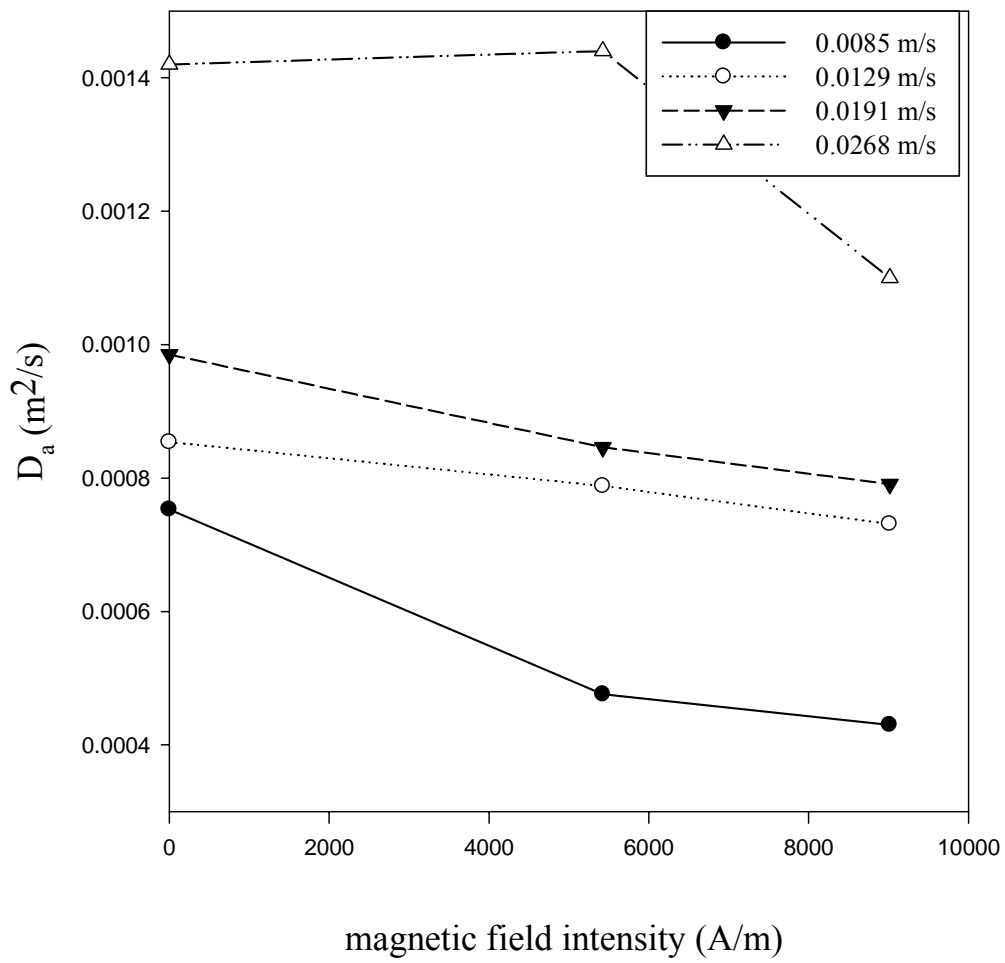


Fig. 5-17. (a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for 0.1 wt% CMC solution.

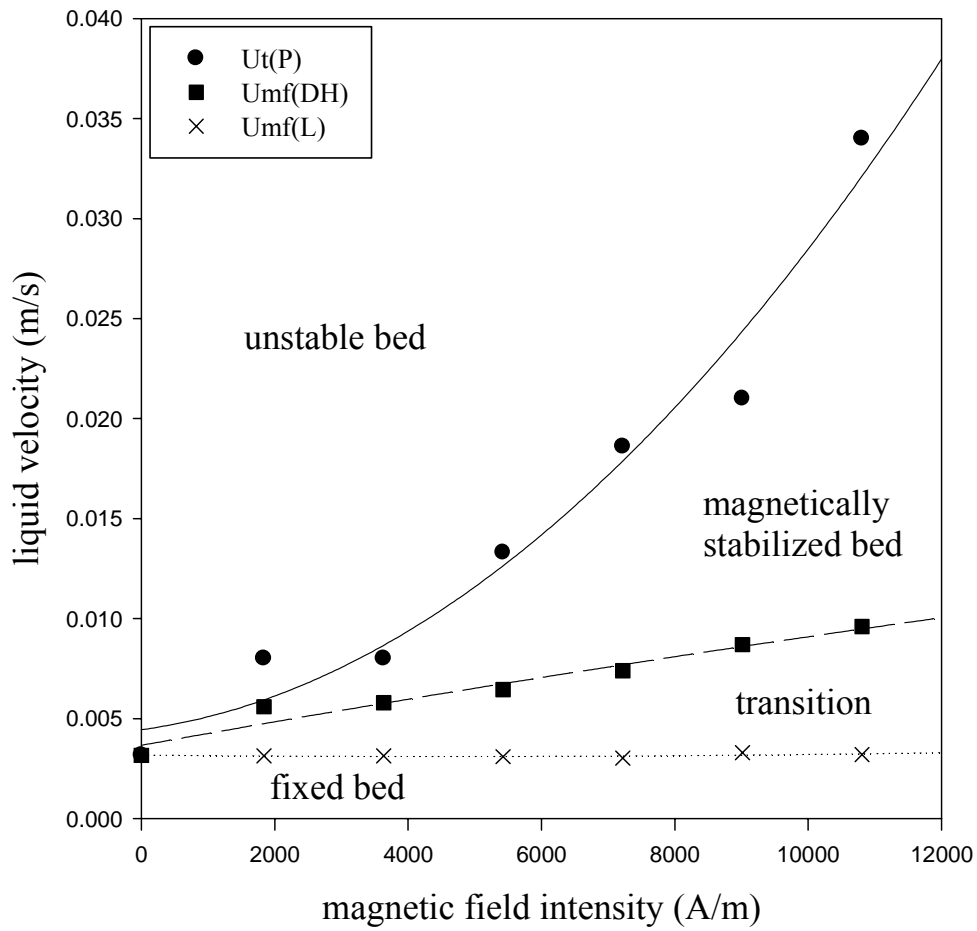


Fig. 5-17. (b) The phase diagram of 0.1 wt% CMC solution.

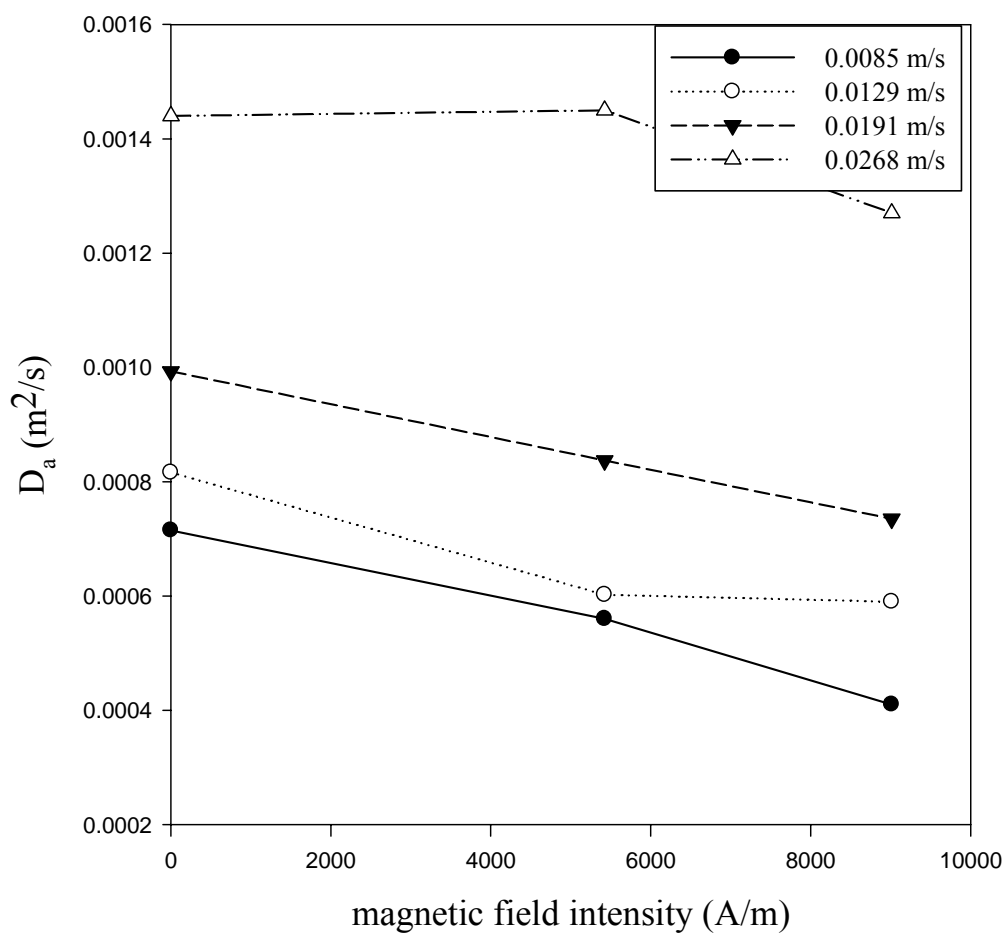


Fig. 5-18. (a) The D_a vs. magnetic field intensity with various velocities for 0.2 wt% CMC solution.

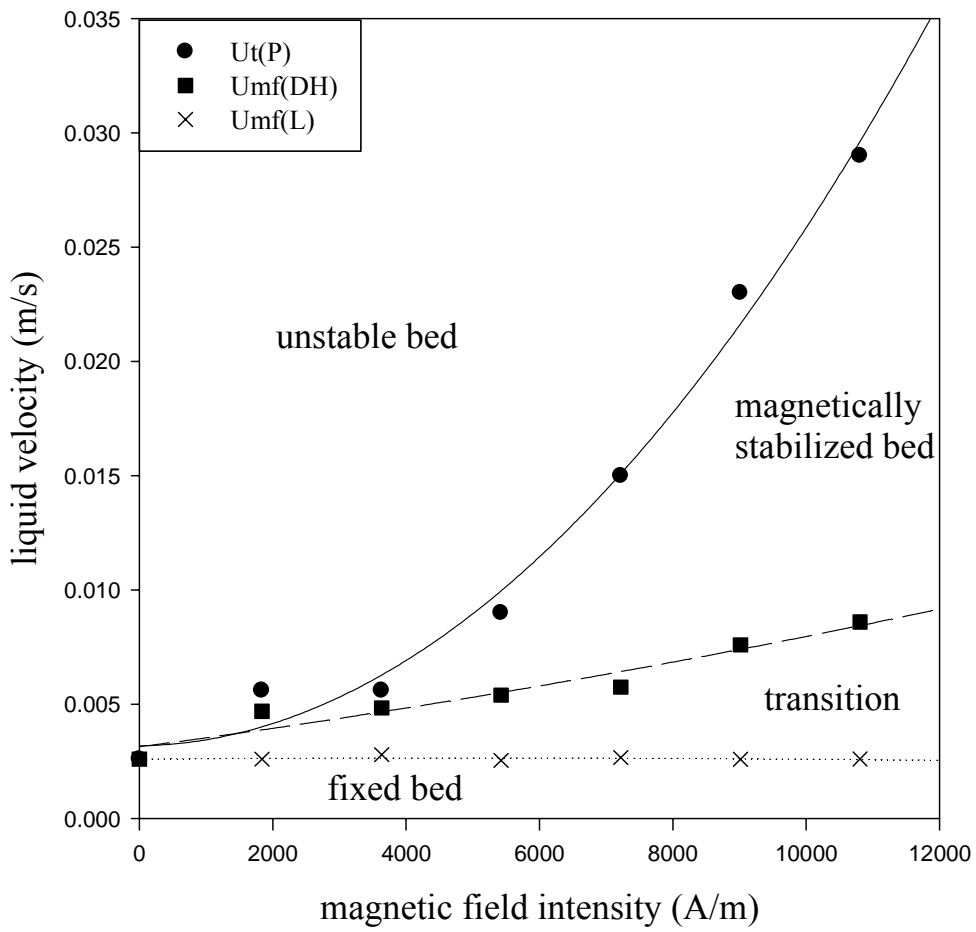


Fig. 5-18. (b) The phase diagram of 0.2 wt% CMC solution.

間，故磁穩定的效果不太明顯，進而導致 0.2 wt% CMC 與其結果較不符合。另外 0.2 wt% CMC 在高流速時磁場強度無法有效降低其軸向分散係數，需以更大的磁場強度方能有效控制床體，以降低軸向分散係數。Fig. 5-19 為水與不同濃度下磁場強度與軸向分散係數的關係。在傳統流體化床操作下，可以發現到隨著液相溶液濃度上升，軸向分散係數不會有太大變化。以磁流體化床操作下，當液相濃度越高，伴隨著作用力(黏滯力、向上拖曳力)效果遂逐漸增加，其作用力均會使床體更不安定，即粒子運動性、擾動與碰撞效果增大，導致磁場影響床體粒子的效果逐漸變弱，此時所得之軸向分散係數受磁場影響是有限的。另外，再將軸向分散係數與床體區域範圍比較分析(對照 Fig. 5-13 與 Fig. 5-19)後，遂可發現到過渡區與磁穩定區的軸向分散行為相近，不穩定區與流體化床區則明顯高於上述兩者，即顯示出過渡區或磁穩定區下，床體粒子受到外加磁場的作用力，導致床體粒子排列整齊而無紊流之行為，進而降低床體內部軸向分散行為；而床體區域的範圍雖會受流體濃度產生變化，但床體區域的性質則不受流體濃度所影響。

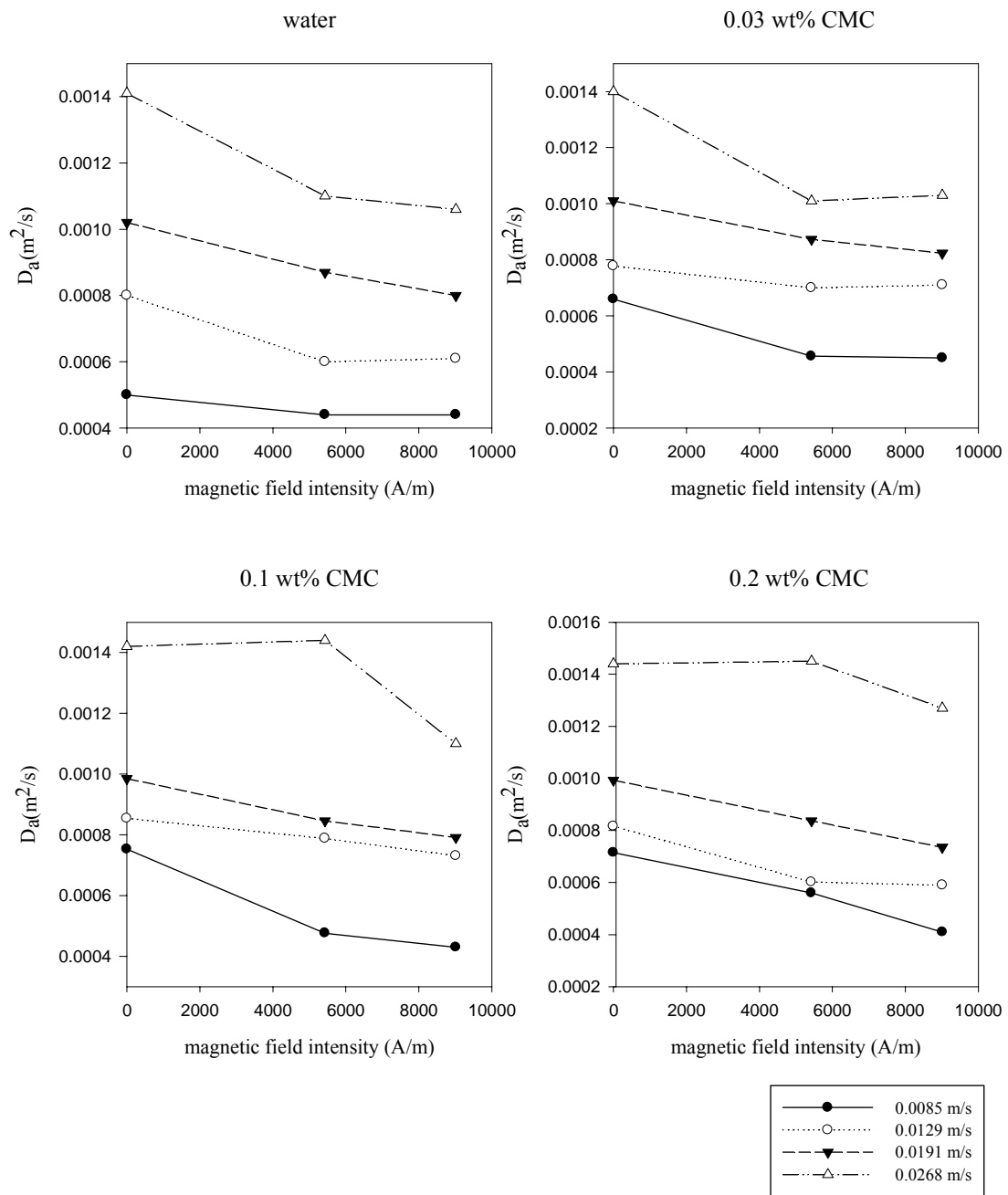


Fig. 5-19. Comparison of D_a and of magnetic field intensity in various fluids solution.

六、結論

本研究是在內徑 0.05 m 高約 0.75 m 之壓克力管所構成之流體化床中，以平均粒徑 274 μm 之球型鐵粒子為固相粒子，水與 0.03、0.1 及 0.2 wt% CMC 溶液為液相，外部由 Helmholtz coil 產生穩定的軸向磁場。探討有外加磁場的作用下，液、固磁流體化床之流動與分散行為的變化，得到以下之結論：

1. 觀察單點壓降對流速之關係曲線圖中，可發現最小流體化速度會因定義方式不同而產生偏差。以 Leva 法所得之最小流體化速度不受磁場強度增減而改變，而 Davidson and Harrison 法所得之最小流體化速度則與磁場強度成指數之正比關係。吾人認為最小流體化速度應會受磁場強度改變，粒子受外加磁場的作用力，確實會降低粒子的運動情況。此外移轉速度則是定義在磁滯現象開始發生之際，並且隨外加磁場增加而提升。
2. CMC 溶液於液、固磁流體化床的操作上，液相溶液濃度上升流體之黏滯力與拖曳力即相對提高，故最小流體化速度與移轉速度會隨液相溶液濃度上升而變小。
3. 牛頓與非牛頓流體的相圖中，大致可分為固定床區、過渡區、磁穩定區、不穩定區四個區域。以非牛頓流體操作下，當液相溶液濃度上升，固定床區、過渡區與磁穩定區的範圍隨之變小，不穩

定區之範圍則相對變大，故此顯示出磁場對於床體的作用會逐漸減弱。

4. 在軸向分散行為方面，軸向分散係數會隨流體速度上升而增加，其中磁流體化床的軸向分散係數較低於傳統流體化床的軸向分散係數。在牛頓與非牛頓流體的磁流體化床軸向分散係數上，兩者均隨磁場強度增加而下降。此外，高流速下之磁流體化床，因磁場穩定床體粒子的效果會隨著液相溶液濃度提升而減弱，以致於磁場影響軸向分散係數的情形也會隨之減弱。

七、符號說明

A	cross section area	[m ²]
A _c	area under E curve	[mol s/m ³]
C	tracer concentration	[mol/m ³]
C ₀	initial tracer concentration	[mol/m ³]
d _{avg}	mean particle diameter	[m]
d _p	particle diameter	[m]
D	inside column diameter	[m]
D _a	axial dispersion coefficient	[m ² /s]
E	E curve	[1/s]
F	F curve	[-]
F _m	magnetic force	[N]
g	acceleration of gravity	[m/s ²]
g _c	Newton's 2 nd law proportionality factor	[1kg-m/N-s ²]
H	magnetic field intensity	[A/m]
h	bed height	[m]
k	consistency index in power-law model	[Pa s ⁿ]
L	distance between injection point and detection point	[m]

L_0	static bed height	[m]
M	magnetization	[Weber/m ²]
M_s	saturation magnetization	[Weber/m ²]
n	flow index in power-law model	[-]
n_0	the amount of the pulse	[mol]
P	magnetic pole strength	[Weber]
ΔP	pressure drop	[Pa]
Pe	Pelect number	[-]
Sc	Schmidt number	[-]
t	time	[s]
t_0	time of the delta function input signal	[s]
\bar{t}	the mean residence time in real reactor	[s]
\bar{t}_E	the mean residence time from E curve for open-open or closed-closed system	[s]
\bar{t}_{ideal}	the mean residence time of tracer in ideal reactor	[s]
\bar{t}_{real}	the mean residence time of tracer in real reactor	[s]
U_0	fluid velocity	[m/s]
U_d	fluid velocity at appear of hysteresis loop	[m/s]
U_{fs}	fully supporting velocity	[m/s]
U_i	fluid velocity at the intersection of fluidization	[m/s]

curves for fixed bed and bubbling bed

U_1	superficial liquid velocity	[m/s]
U_{\max}	fluid velocity at maximum pressure drop	[m/s]
U_{me}	fluid velocity at the initial expansion of bed	[m/s]
U_{mf}	minimum fluidization velocity	[m/s]
$U_{\text{mf}0}$	minimum fluidization velocity without magnetic force	[m/s]
U'_{mf}	minimum fluidization velocity calculated by Ergun equation	[m/s]
$U_{\text{mf}}(\text{DH})$	minimum fluidization velocity determined by Davidson and Harrison's method	[m/s]
$U_{\text{mf}}(\text{L})$	minimum fluidization velocity determined by Leva's method	[m/s]
U_t	transition velocity	[m/s]
$U_t(\text{P})$	transition velocity determined by hysteresis of pressure curve	[m/s]
$U_t(\text{vis})$	transition velocity determined by vision	[m/s]
$U_t(\epsilon)$	transition velocity determined by hysteresis of voidage	[m/s]
W_A	weight of solid particles per unit area of the column across cross section	[Pa]
x	axial distance	[m]
X_m	magnetic susceptibility	[Weber / A m]

Greek Symbol

Λ	conductivity	[mho/m]
Φ_s	sphericity	[-]
γ	shear rate	[1/s]
$\delta(t)$	delta function	[1/s]
$\delta(t-t_0)$	delta function occurring at time t_0	[1/s]
ε	bed voidage	[-]
ε_0	bed voidage at incipient bed expansion	[-]
ε_{mf}	bed voidage at minimum fluidization velocity	[-]
$\bar{\theta}$	the mean dimensionless time	[-]
$\bar{\theta}_E$	the mean dimensionless time from E curve for open-open or closed-closed system	[s]
μ	viscosity	[Pa s]
ρ_f	fluid density	[kg/m ³]
ρ_p	particle density	[kg/m ³]
σ^2	total variance	[s ²]
σ_1^2	variance for first measured point	[s ²]
σ_2^2	variance for second measured point	[s ²]
σ_0^2	dimensionless variance	[-]

τ

shear stress

[Pa]

八、參考文獻

Albert, R. V. and C. Tien, "Particle Collection in Magnetically Stabilized Fluidized Filters", *AIChEJ.*, 31, 288-295 (1985).

Arnaldos, J., J. Casal and L. Puigjaner, "Le Lit Fluidise Stabilise Magnetiquement: Caracterisques et Possibilities D'application", *Powder Technol.*, 36, 33-38 (1983).

Arnaldos, J., J. Casal, A. Lucas and L. Puigjaner, "Magnetically Stabilized Fluidization: Modelling and Application to Mixtures", *Powder Technol.*, 44, 57-62 (1985).

Bologa, M. K. and S. V. Syutkin, "Electromagnetic Field Effect on the Structure and the Hydrodynamic of a Fluidized bed", *Elektron. Okrab. Mater.*, 1, 37-42 (1977) [cited by I. P. Penchev and J. Y. Hristov, *Powder Technol.*, 61, 103-118 (1990a)].

Brea, F. M., M. F. Edwards and W. L. Wilkinson, "The Flow of Non-Newtonian Slurries Through Fixed and Fluidised Beds", *Chem. Eng. Sci.*, 31, 329-336 (1976).

Burns, M. A. and D. J. Graves, "Continuous Affinity Chromatography Using a Magnetically Fluidized Stabilized Bed", *Biotechnol. Prog.*, 1, 95-103 (1985).

Burns, M. A. and D. J. Graves, "Structural Studies of a Liquid-Fluidized Magnetically Stabilized Fluidized Bed", *Chem. Eng. Comm.*, 67, 315-330 (1988).

Casal, J., "Doctoral Thesis", Univ. Barcelona (1984) [cited by I. P. Penchev and J. Y. Hristov, *Powder Technol.*, 61, 103-118 (1990a)].

Casal, J. and J. Arnaldos, "The Structure of Magnetized-Fluidized Beds", *Powder Technol.*, 64, 43-48 (1991).

Chetty, A. S., D. H. Gibis and M. A. Burns, "Overcoming Support Limitations in Magnetically Stabilized Fluidized Bed Separators", *Powder Technol.*, 64, 165-174 (1991).

Cohen, A. H. and C. Tien, "Aerosol Filtration in a Magnetically Stabilized Fluidized

Bed”, Powder Technol., 64, 147-158 (1991).

Colberg, R. D. and Y. A. Liu, “Studies in Magnetochemical Engineering: Part V. An Experimental Study of Fluidized Beds With Screen Packing and Applied Magnetic Field”, Powder Technol., 56, 279-292 (1988).

Contal, P., Y. Gonthier, A. Bernis and G. Lacour, “Etude d’un Lit Fluidise Gaz-Solid Stabilise Magnetiquement Par Des Aimants Permanents”, Powder Technol., 71, 101-105 (1992).

Cullity, R. D., “Introduction to Magnetic Materials”, pp. 1-18, Addison-Wesley Press, MA (1972).

Davidson, J. F. and D. Harrison, “Fluidization”, pp. 32-35, Academic Press, London and NY (1971).

Ding, Y. and Y. Sun, “Small-Sized Dense Magnetic Pellicular Support for Magnetically Stabilized Fluidized Bed Adsorption of Protein”, Chem. Eng. Sci., 60, 917-924 (2005).

Filippov, M. V., “The Effect of a Magnetic Field on a Ferromagnetic Particle Suspension Bed”, Prik. Magnit. Lat. SSR, 12, 215-236 (1960) [cited by Y. A. Liu, R. K. Hamby and R. D. Colberg, Powder Technol., 64, 3-41 (1991)].

Filippov, M. V., “Resistance and Expansion of a Fluidized Bed of Magnetite in a Magnetic Field”, Latv. PSR Zinat. Akad. Vestis, 12, 47-51 (1961) [cited by Y. A. Liu, R. K. Hamby and R. D. Colberg, Powder Technol., 64, 3-41 (1991)].

Goetz, V. and D. J. Graves, “Axial Dispersion in a Magnetically Stabilized Fluidized Bed Liquid Chromatography Column”, Powder Technol., 64, 81-92 (1991).

Goto, M., T. Imamura and T. Hirose, “Axial Dispersion in Liquid Magnetically Stabilized Fluidized Beds”, J. Chromatography A, 690, 1-8 (1995).

Graham, L. J., J. E. Atwater and G. N. Jovanovic, “Chlorophenol Dehalogenation in Magnetically Stabilized Fluidized Bed Reactor”, AIChEJ., 52, 1083-1093 (2006).

Hamby, R. K. and Y. A. Liu, “Studies in Magnetochemical Engineering: Part VI. An Experimental Study of Screen-Packed and Conversional Fluidized Beds in Axial and

- Transverse Magnetic Fields”, *Powder Technol.*, 64, 103-113 (1991).
- Hou, Y. Y. and R. A. Williams, “Magnetic Stabilisation of a Liquid Fluidised Bed”, *Powder Technol.*, 124, 287-294 (2002).
- Hristov, J. Y., “Magnetic Field Assisted Fluidization a Unified Approach”, *Review in Chem. Eng.*, 18, 327-401 (2002).
- Jaraiz-M., E., O. Levenspiel and T. J. Fitzgerald, “The Uses of Magnetic Fields in the Processing of Solids”, *Chem. Eng. Sci.*, 38, 107-114 (1983).
- Jovanovic, G. N., Z. R. Jovanovic, G. Vunjak-Novakovic and D. V. Vokovic, “Bubble Size in Magnetically Controlled Fluidized Beds”, in J. R. Grace, L. W. Shemilt and M. A. Bergoumou (eds.), *Fluidization IV*, Engineering Foundation, New York, NY (1989).
- Kunii, D. and O. Levenspiel, “Fluidization Engineering”, pp. 3-4, Butterworth-Heinemann, Boston, MA (1991).
- Lee, W. K., “The Rheology of Magnetically Stabilized Fluidized Solids”, *AIChE Symp. Ser.*, 79 (222), 87-96 (1983).
- Lee, W. K., “A Review of the Rheology of Magnetically Stabilized Fluidized Beds”, *Powder Technol.*, 64, 69-80 (1991).
- Leva, M., “Fluidization”, McGraw-Hill, New York, NY (1959).
- Levenspiel, O., “Chemical Reaction Engineering”, pp. 256-257, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY (1972).
- Liu, Y. A., R. K. Hamby and R. D. Colberg, “Fundamental and Practical Developments of Magnetofluidized Beds: A Review”, *Powder Technol.*, 64, 3-41 (1991).
- Ma, X. and M. Kwauk, “Particulate Fluidization of Ferromagnetic Particles in a Uniform Magnetic Field”, Pacific Regional Meeting, Fine Particle Society, Honolulu, HI, August (1983) [cited by Y. A. Liu, R. K. Hamby and R. D. Colberg, *Powder Technol.*, 64, 3-41 (1991)].

Machac, I., M. Balcar and Z. Lecjaks, "Creeping Flow of Non-Newtonian Liquids Through Fluidized Beds of Spherical Particles", *Chem. Eng. Sci.*, 41, 591-596 (1986).

Miura, H. and Y. Kawase, "Minimum Liquid Fluidization Velocity in Two- and Three-Phase Fluidized Beds With Non-Newtonian Fluids", *Powder Technol.*, 97, 124-128 (1998).

Miura, H., T. Takakashi, J. Ichikawa and Y. Kawase, "Bed Expansion in Liquid-Solid Two-Phase Fluidized Beds With Newtonian and Non-Newtonian Fluids Over the Wide Range of Reynolds Numbers", *Powder Technol.*, 117, 239-246 (2001).

Nishio, M., R. M. Serikawa, S. Kaguei and N. Wakao, "Axial Fluid Dispersion in Water-Fluidized Beds Subjected to a Magnetic Field", *Chem. Eng. Comm.*, 99, 129-138 (1991).

Penchev, I. P. and J. Y. Hristov, "Behavior of Fluidized Beds of Ferromagnetic Particles in an Axial Magnetic Field", *Powder Technol.*, 61, 103-118 (1990a).

Penchev, I. P. and J. Y. Hristov, "Fluidization of Beds of Ferromagnetic Particles in an Transverse Magnetic Field", *Powder Technol.*, 62, 1-11 (1990b).

Resnick, W., Y. Zimmels and D. Boadi, "Magnetic Structural Effects on Flow Through Beds of Magnetizable Particles", *IEEE Transactions on Magnetics*, 24, 757-760 (1988).

Rosensweig, R. E., "Fluidization: Hydrodynamic Stabilization With a Magnetic Field", *Science*, 204, 57-60 (1979a).

Rosensweig, R. E., "Magnetic Stabilization of the State of Uniform Fluidization", *Ind. Eng. Chem. Funda.*, 18, 260-269 (1979b).

Rosensweig, R. E., J. H. Siegel, W. K. Lee and T. Mikus, "Magnetically Stabilized Fluidized Solids", *AIChE Symp. Ser.*, 77 (205), 8-16 (1981).

Rosensweig, R. E., W. K. Lee and J. H. Siegel, "Magnetically Stabilized Fluidized Beds for Solids Separation by Density", *Sep. Sci. Technol.*, 22, 25-45 (1987).

Rosensweig, R. E. and G. Ciprios, "Magnetic Liquid Stabilization of Fluidization in a Bed of Nonmagnetic Sphere", *Powder Technol.*, 64, 115-123 (1991).

Sada, E., S. Katoh and M. Terashima, "Performance of an Enzyme Reactor Utilizing a Magnetic Field", *Biotech. Bioeng.*, 22, 243-246 (1980).

Sada, E., S. Katoh, M. Shiozawa and T. Fukui, "Performance of Fluidized-Bed Reactors Utilizing Magnetic Fields", *Biotech. Bioeng.*, 23, 2561-2567 (1981).

Sajc, L. M., Z. R. Jovanovic, G. Vunjak-Novakovic, G. N. Jovanovic, R. D. Pesic and D. V. Vukovic, "Liquid Dispersion in a Magnetically Stabilized Fluidized Bed (MSFB)", *Trans. IChemE*, 72, 236-240 (1994).

Saxena, S. C. and S. Shrivastava, "The Influence of an External Magnetic Field on an Air-Fluidized Bed of Ferromagnetic Particles", *Chem. Eng. Sci.*, 45, 1125-1130 (1990).

Saxena, S. C. and S. Shrivastava, "Some Hydrodynamic Investigations of a Magnetically Stabilized Air-Fluidized Bed of Ferromagnetic Particles", *Powder Technol.*, 64, 57-67 (1991).

Siegell, J. H., "Radial Dispersion and Flow Distribution of Gas in Magnetically Stabilized Beds", *Ind. Eng. Chem. Pros. Des. Dev.*, 21, 135-141 (1982).

Siegell, J. H., "Liquid-Fluidized Magnetically Stabilized Beds", *Powder Technol.*, 52, 139-148 (1987).

Sonoliker, R. L., S. G. Ingle, J. R. Giradrakar and R. S. Mere, "Influence of Magnetic Field on Fluidization of Fe Particles". *Ind. J. Technol.*, 10, 377-379 (1972) [cited by I. P. Penchev and J. Y. Hristov, *Powder Technol.*, 61, 103-118 (1990a)].

Syutkin, V. and M. K. Bologna, "Effect of Magnetic Field on Heat Transfer in Fluidized Bed", *Elektron. Okrab. Mater.*, 6, 61-67 (1976), [cited by Y. A. Liu, R. K. Hamby and R. D. Colberg, *Powder Technol.*, 64, 3-41 (1991)].

Tong, X. D. and Y. Sun, "Application of Magnetic Agarose Support in Liquid

Magnetically Stabilized Fluidized Bed for Protein Adsorption”, *Biotechnol. Prog.*, 19, 1721-1727 (2003).

van der Lann, E. T., “Note on Diffusion-Type Model for the Longitudinal Mixing Flow”, *Chem. Eng. Sci.*, 7, 187-191 (1957).

Zrunchev, I. A. and T. F. Popova, “Ammonia Synthesis in a Magnetically Fluidized Powdery Catalyst Bed Under a Low Pressure”, *Powder Technol.*, 64, 175-181 (1991).

柯直孝(Ke Zhi Xiao), “液、固磁流體化床不同區域內軸向分散行為之探討”, 國立台灣大學化學工程研究所碩士論文, 台北, 台灣 (1995)。

陳家民(Chen Jia min), “氣、液、固三相磁流體化床中質傳與流力行為探討”, 國立台灣大學化學工程研究所博士論文, 台北, 台灣 (2000)。

九、附錄

Appendix 1. NaCl 濃度與電導度之關係

本實驗所使用固體粉末之 CMC 含有少許的 Na 金屬，所以在準備不同流體濃度(water, 0.03 wt%, 0.1 wt%, 0.2 wt%)時，會有不同 NaCl 濃度 C 與電導度 Λ 之關係。

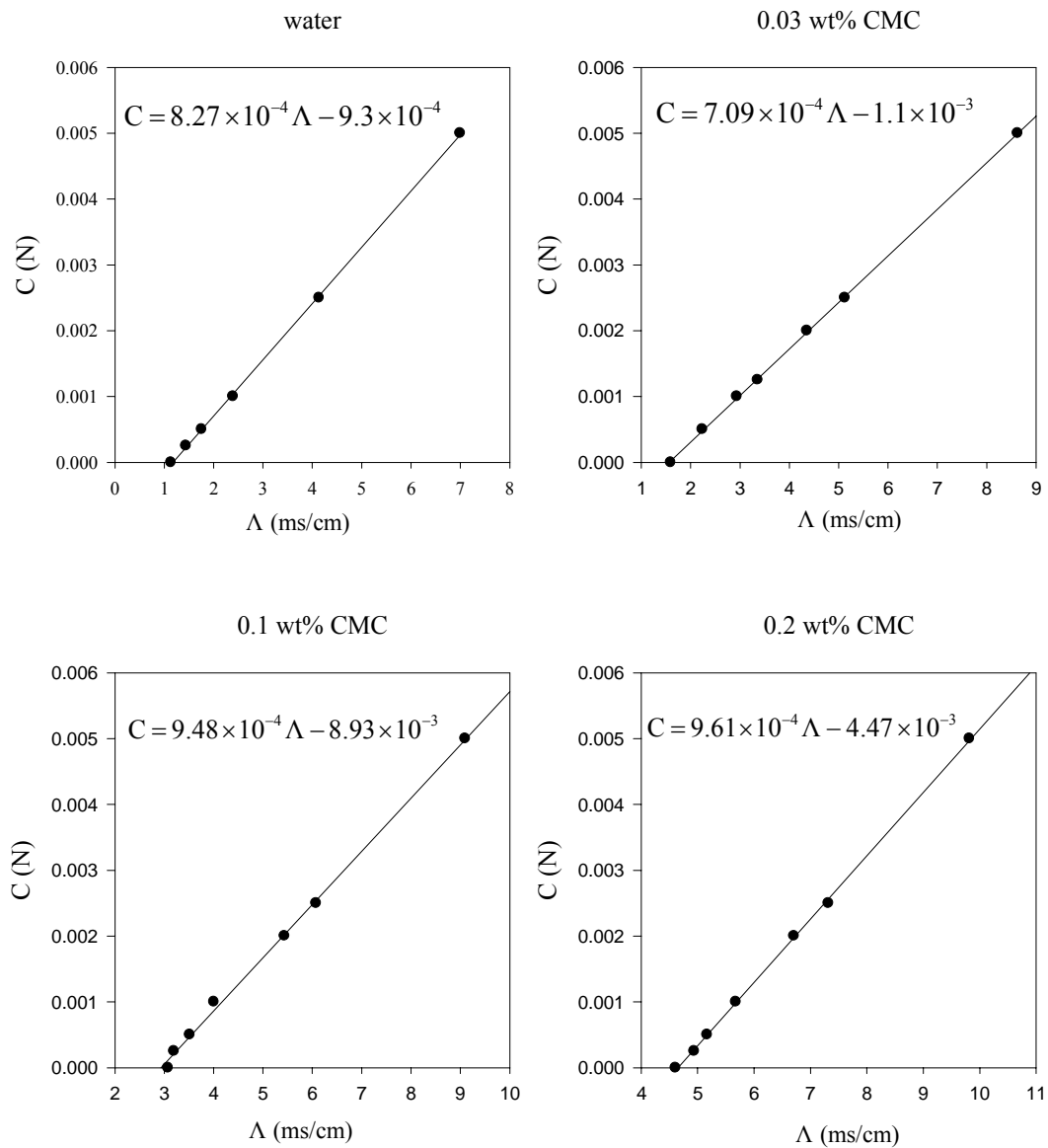
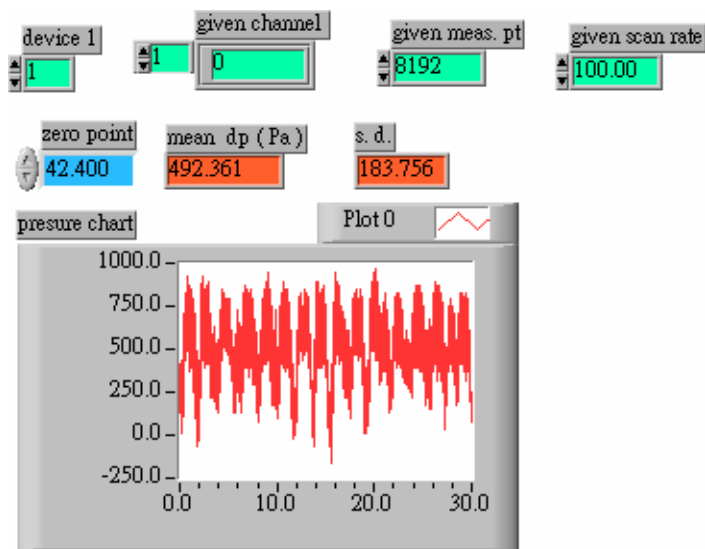


Fig. A-1. Concentration of NaCl vs. conductivity.

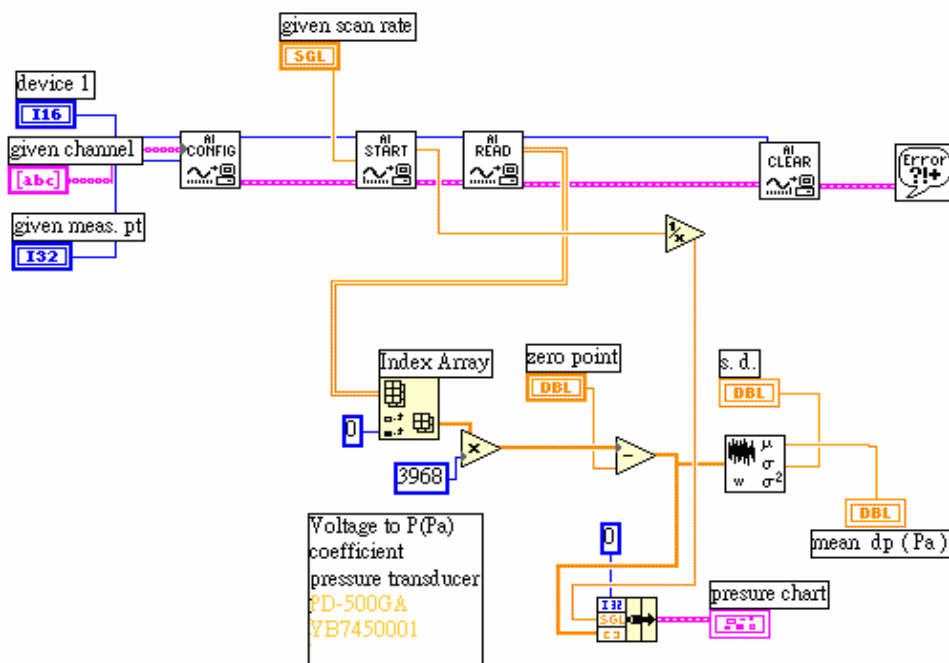
Appendix 2. Labview 擷取平均壓力數據程式

(a). 本程式系統處理介面，此介面操作變數可分為：歸零點、設定 1 秒鐘內取樣點數、一次實驗流程所需的點數與頻道 0 號作為訊號接收。介面顯示則為平均壓力值、平均壓力的偏差值與壓力擾動圖。

(b). 本程式系統流程。



(a)

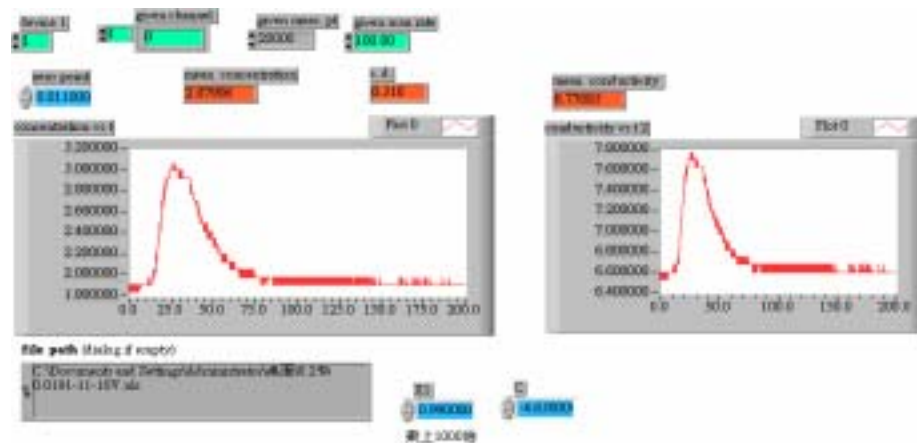


(b)

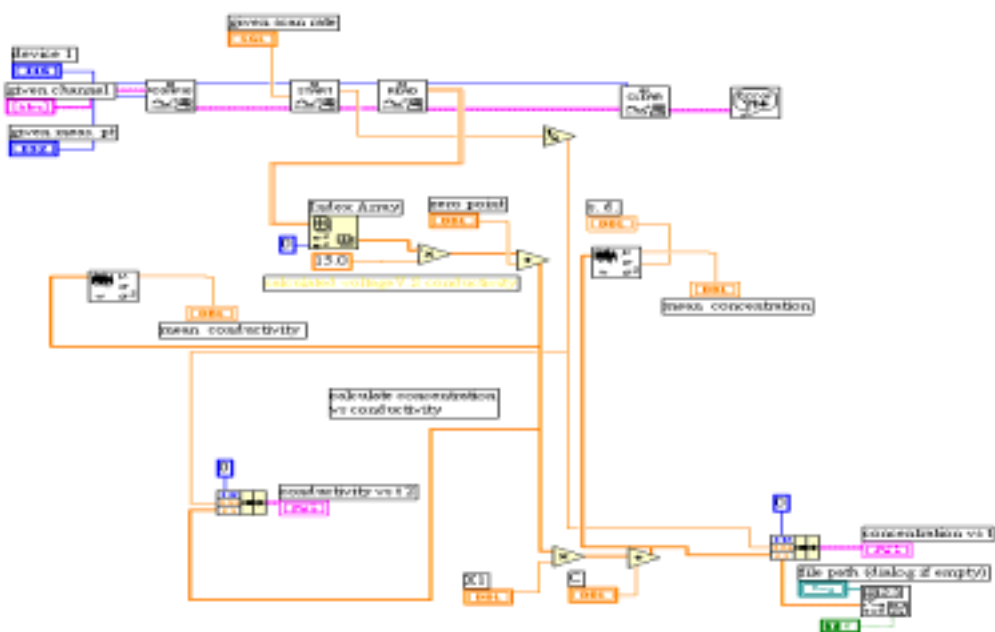
Appendix 3. Labview 擷取追蹤劑濃度程式與濃度曲線圖

(a). 本程式系統處理介面，此介面操作變數可分為：大部分與均同 Appendix 1. 並增加不同流體下與電導度關係(X1, C)。介面顯示則為平均電導度值、平均濃度值、平均濃度偏差值、電導度與時間關係跟濃度與時間關係圖。濃度和時間關係圖與 E-curve 圖如 Fig. A-2 所示(以 sigmaplot 所描繪)。

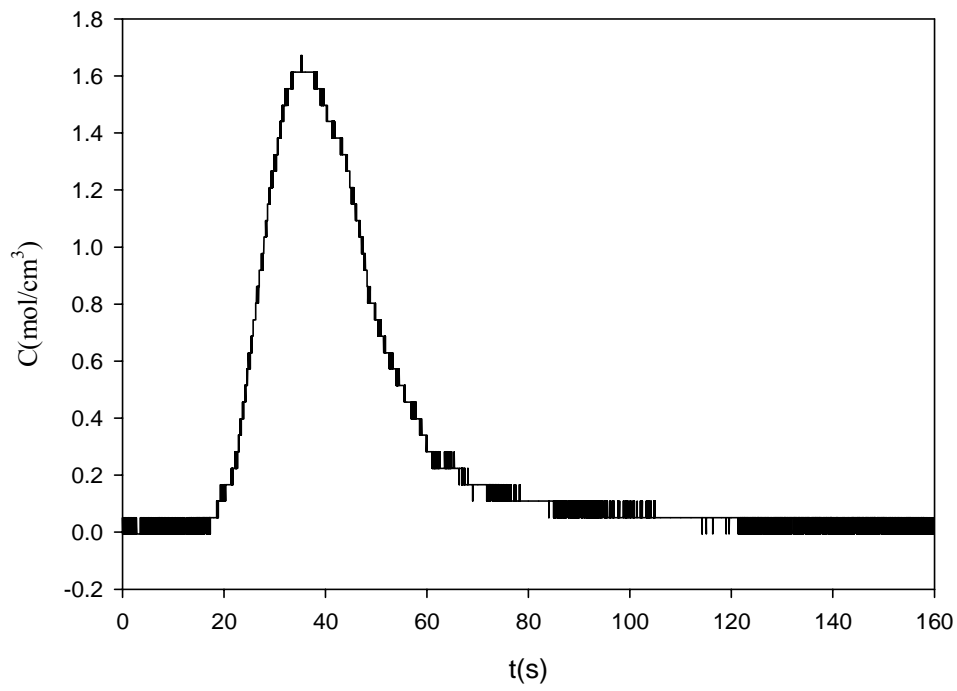
(b). 本程式系統流程。



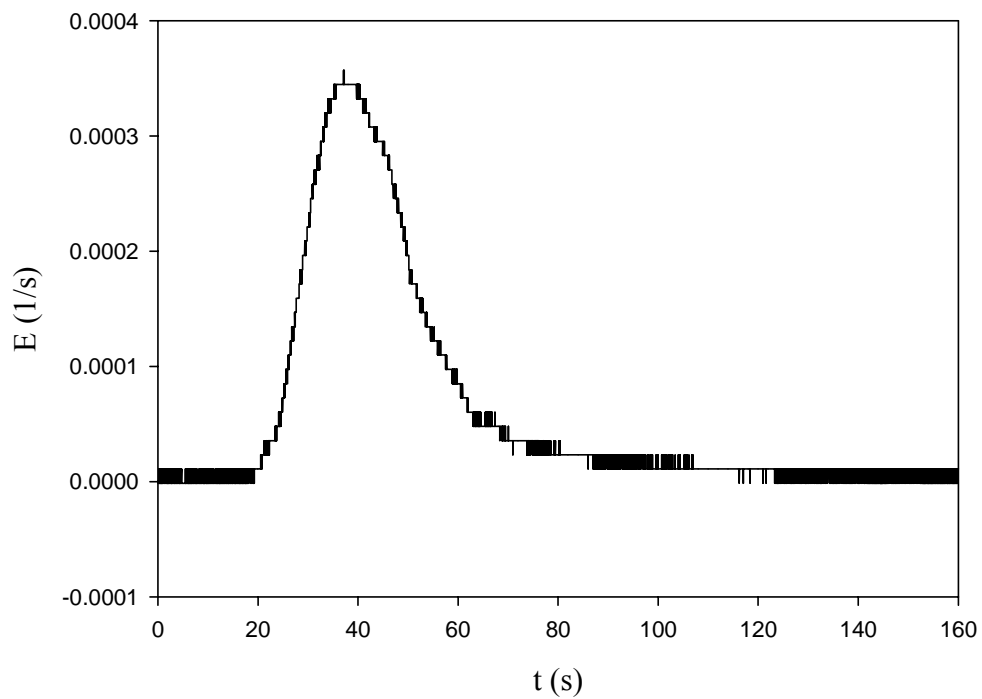
(a)



(b)



(a)



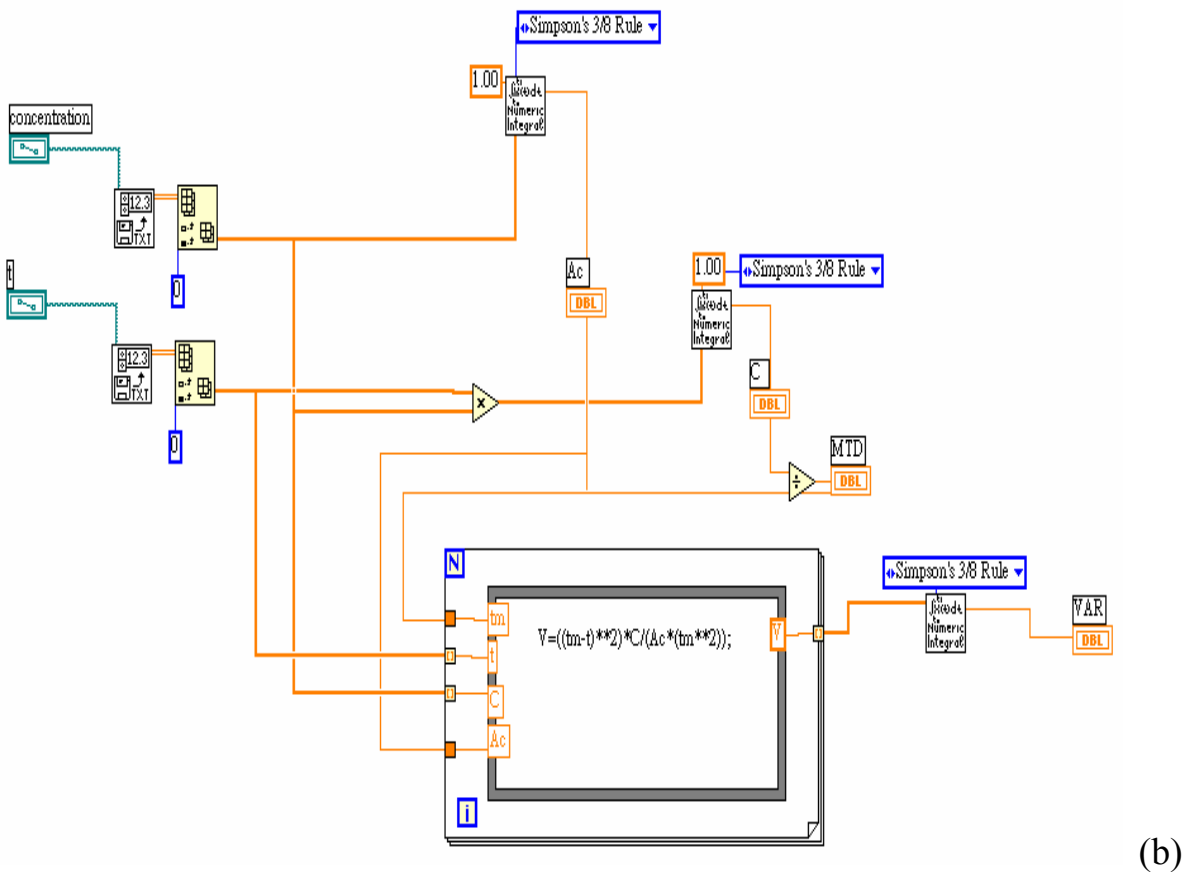
(b)

Fig. A-2. (a) Concentration vs. time and (b) the E curve at fluid velocity equal to 0.0129 m/s.

Appendix 4. 軸向分散係數計算方式

(a). 本程式系統處理介面，設定所需計算的檔案來源，即為濃度與時間關係圖。結果為曲面下係濃值、濃度與時間乘積、平均滯留時間與變異數，並以 Simpson's 3/8 method 為數值積分計算。

(b). 本程式系統流程。



Appendix 5. CMC 流體之物性

CMC 溶液是由 Brook Field 公司出品，型號為 Model DV-III 之旋轉黏度計量測，並可測得 shear stress τ 與 shear rate γ 關係，經由作圖回歸繪得一直線，故為 Power law fluid 模式之方程式，如下圖所示(註：由於轉指(spindle)量測範圍約為 1~2000 cP，而水之黏度在 20 恰好為 1 cP，故此儀器測水之黏度值時誤差可能較大)。

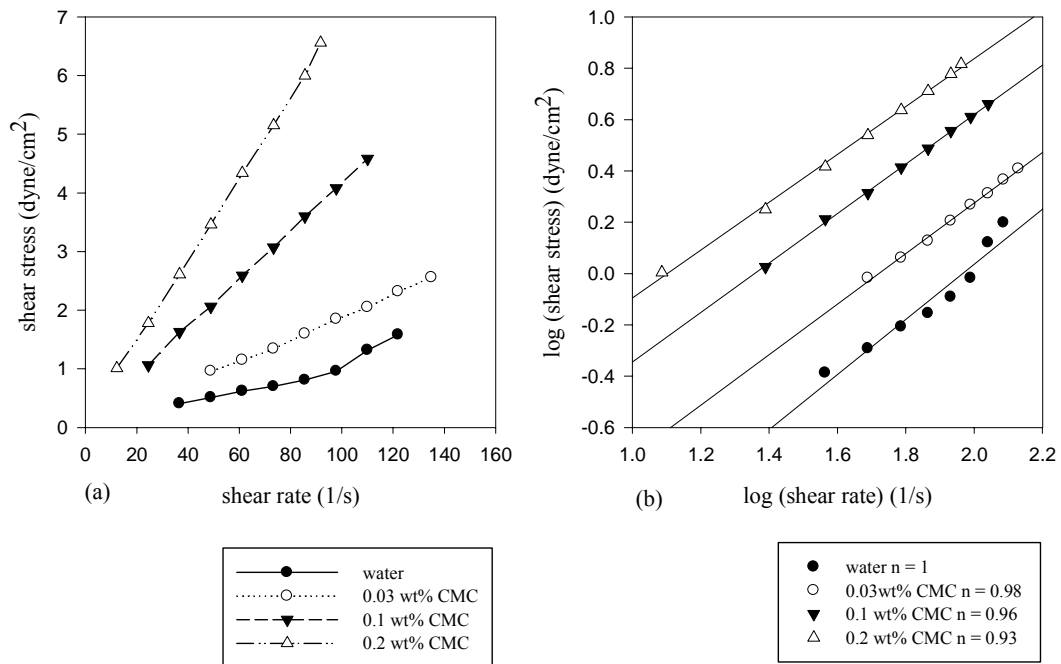


Fig. A-3. Shear stress vs. shear rate for (a) the original data and (b) the common logarithmic plot of the original data.