

自動注入式施肥灌溉系統 使用於介質槽耕栽培胡瓜之研究¹

陳令錫²、戴振洋²、田雲生²、何榮祥²

摘 要

本研究具有節能減碳的功能，運送適量的肥料與灌溉水到作物根部區域，提供作物生長所需，減少肥料與水資源浪費。採用養液即時注入式之養液自動化輸送管理系統，4種養液藉由幫浦即時注入送水管路，經過過濾器直達田區，經試驗，主管路幫浦流量約195 l/min，養液幫浦流量約0.5~5 l/min，不同養液輸出百分比於各養液管路流量之標準差均在0.35以內，本系統之年灌水量僅為傳統淹灌方式的43.4%，節省灌溉水達56%。本系統每日少量多次自動肥灌6至8次之電力消耗每天約8 kWh，調查胡瓜產量、果實性狀、葉片性狀等均在水準之上，顯示自動施肥灌溉系統能夠充分發揮省工、省水、省肥之效益。

關鍵字：自動化、肥灌、節水、胡瓜。

前 言

現今全球水資源緊缺，各國開發水資源外，節水灌溉與缺水條件下的灌溉方法漸受重視，現代灌溉技術的肥灌(fertigation)根據作物生育需要，藉灌溉設備或技術將灌溉水與肥料混合輸送到田間同步進行灌溉施肥^(3,5,8,14)。

台灣農業伴隨資訊工業經過十餘年的發展，在農林漁牧各產業之自動化均有長足進步⁽⁵⁾，尤其地球暖化造成極端氣候在全球各地輪番發生，台灣2009年7月乾旱使得各地水庫儲水量逼近下限，八月遭逢莫拉克颱風帶來超過2,000 mm累積雨量⁽²⁾，雖然補注水庫的儲水量，但是造成南台灣嚴重水災，台灣雖然年降雨量高，但是下雨時機集中在颱風季節，加上地形呈南北走向，河流呈東西走向，及3,000 m高中央山脈的高程作用，雨水落到地面很快的流入大海，台灣仍受缺水危機嚴重威脅，需要注重提升水資源利用率之研究。

灌溉方法分為淹灌、噴灌、微噴灌、滴灌與地下滴灌(SDI, subsurface drip irrigation)^(8,11,13)，農業灌溉及過量施肥會導致營養素污染地下水與地表水，普遍採用的淹灌，水的使用效率低，1/3到1/2的灌溉水流失，帶走可觀的養分，施肥與灌溉結合成肥灌系統之效率較高，約從70%到95%，水和養分的流失可以獲得較佳控制，具有減低肥料對環境污染之效果。肥灌可以藉由滴灌頻繁的供給作物養分，根據作物之需要管理灌溉水量，準確且均勻的施用養

¹行政院農業委員會臺中區農業改良場研究報告第 0719-1 號。

²行政院農業委員會臺中區農業改良場助理研究員、副研究員、助理研究員、副研究員。

分到有效根聚集的潮濕區域，調整肥料濃度達成作物產量與品質最大化，根部下方的滲流損失最小化^(13,14)。1994年以色列需要灌溉的園藝作物有90%通過灌溉進行施肥，其溫室種植全部採用微灌，以滴灌為主，其溫室滴灌的最高水分利用率可達95%^(3,13)。SDI比噴灌少24%的滲漏損失，相同產量條件下，SDI之用水量較少，時間定時灌溉的土壤水分變動較大⁽¹¹⁾。

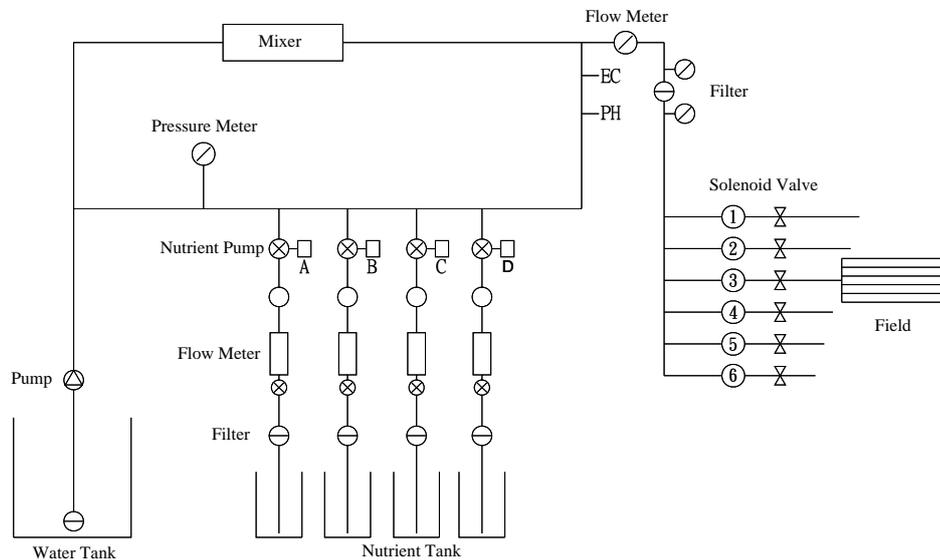
現有農民設施花卉蔬果之灌溉施肥方式，大略分為3種，第一為大型混合桶傳統機電配盤方式、第二為大型混合桶PLC機電配盤方式，第三為即時注入式PLC機電配盤方式。分析其優缺點為大型混合桶之混合時間佔作業時間之比例高，不利肥灌頻率之高之操作，養液停留於混合桶之時間長，桶內化學物質相互間結晶沉澱情形，導致管路堵塞的機率增高，同時大型混合桶與周邊進水管與幫浦之成本與空間，於即時注入式卻不存在，所以即時注入式之機構組成較精簡。

灌溉水源必須滿足兩方面的要求：在水量方面，應該滿足在作物需水高峰期能夠足量供水；在水質方面，除了考慮水中是否含有有害的化學成分之外，還應考慮可能導致灌溉施肥設備(如滴頭、噴頭、過濾器、電磁閥、水泵等)堵塞或損傷的各種物理的、化學的、生物的因素，必要時灌溉水進入灌溉設施前需經過水處理程序⁽⁸⁾。因此，肥灌系統所提供水與肥的使用效率較高，限制條件為初期設置與維護成本高，需要專人操作。目前常見之傳統式設施養液調配輸送管理系統採用養液混合桶方式，以人工調製濃縮養液，依據養液配方抽送濃縮養液至養液混合桶與清水攪拌，再將混合液輸送至田區，每噸水由養液混合桶抽入與抽出至田區約耗費10分鐘，養液介質耕之介質含水率不能過於乾燥，每天的肥灌次數較多，因此，運用該方式之作業時間較長，操作耗費人力。本研究目的為運用自動化技術⁽⁷⁾建構農業精準施肥灌溉系統，完成精準施肥灌溉系統之設置技術與分析瓜果類蔬菜作物種植之成效。

材料與方法

一、材料

- (一)溫室：於台中區農業改良場之試驗溫室設置注入式施肥灌溉系統一套，該溫室為玻璃屋頂，裝設水牆、抽風扇、外遮陰網、內循環風扇、側邊捲揚塑膠布等通風遮陰設備。
- (二)植床：溫室內南北向設置5個植床，以鍍鋅鋼管與黑色塑膠布圍起長20 m，寬0.45 m之介質槽，介質表面距地面高度為0.5 m，介質深度約0.4 m，植床中心距離1.6 m。
- (三)注入式施肥灌溉系統如圖一所示，包含一只5 m³水桶供應清水，四只0.25 m³養液桶調製濃縮養液，四組直流馬達驅動之隔膜幫浦負責輸送養液注入主管路與清水混合，四只3/8孔徑流量計檢測養液輸出量，一只2 HP孔徑38 mm (1.5 in)離心式幫浦裝設於主管路輸送混合養液至指定田區，一只38 mm(1.5 in)孔徑流量計檢測混合液輸出量，一組PLC控制系統負責執行養液與灌溉水量之參數設定與程序輸出。本系統設計可應付6田區之肥灌需求，每田區之面積按照噴/滴頭種類，計算出總噴/滴頭數量所決定。
- (四)供試胡瓜為購自和生種苗公司的“秋之收(V21404)”品種進行試驗。在2009年2月3日播種於128格穴盤苗，於2009年2月23日定植在台中場溫室內，瓜苗為21日苗齡之穴盤苗。



圖一、注入式施肥灌溉系統配置圖。

Fig. 1. The scheme of injective type of fertigation system.

二、方法

- (一) 養液輸出量校正：注入式施肥灌溉系統之養液輸出採用直流隔膜幫浦調整輸出量，該幫浦之輸出量由PLC控制系統輸出DC0-10 V控制訊號給DC馬達驅動器，該驅動器按照控制訊號之大小輸出DC0-90 V之馬達驅動電源給直流隔膜幫浦，完成養液量之輸出調整。有鑒於電源電壓之變動、DC馬達之製造誤差，因此試驗之前須進行養液輸出量之校正，降低不同隔膜幫浦之輸出誤差。試驗方法為PLC控制系統設定某一固定的輸出百分比，調整驅動器上速度微調的可變電阻，使得流量計檢測養液之輸出量一致時，表示完成校正。校正完成後設定其他的輸出百分比，計算各設定值之標準差，據以判斷此校正過程之適用性，若標準差縮小至可接受範圍，紀錄最大養液輸出量，並設定PLC控制系統最大養液輸出量之數值。
- (二) 養液與清水輸出量試驗：於養液輸出量校正之後，進行養液與清水輸出量試驗，目的為了解PLC控制系統上不同的養液輸出設定值與實際輸出量之關係，及單位時間主管路清水之輸出量。使用者根據本試驗結果，調製濃縮養液之濃度、設定養液輸出量及與清水之稀釋比例。試驗方法為PLC控制系統設定某一固定的輸出值，以碼表控制運轉時間30 sec，紀錄養液流量計檢測之輸出量、主管路流量計檢測之輸出量、機械式水表之數值與壓力計之數值，據以分析養液輸出性能。
- (三) 電力消耗量：以數位式電表SPM-8紀錄溫室環控降溫與養液系統之消耗電力，分析電力消耗與農產品產量與產值之比例。

- (四)施肥量灌溉量與產量：紀錄栽培全程之肥料與清水使用量，以及農產品之產量，獲得投入與產出之比例，試驗處理採逢機完全區集，三重複。栽培槽寬0.45 m、深0.4 m，栽培槽內介質購自福壽公司之泥炭土(3070P)，走道寬1.15 m，小區栽培槽長20m，栽培槽內採雙行三角定植方式，株距0.45 m，每小區栽培80株，採直立式單蔓整枝，整枝處理以母蔓及子蔓留果，分別選留果型端正，外表優美的幼果，子蔓則留果後再留1葉摘心，母蔓待生長至22~25節則摘心，養液處理則隨灌溉系統以微噴灌方式，養液配方修正自山崎配方⁽¹⁾，每噸水硝酸鉀610 g、硝酸鈣830 g、硫酸鎂500 g、磷酸1鉀150 g、EDTA鐵20 g、綜合微量元素30 g，灌溉次數依生長及氣候加以調整，其他栽培管理依設施胡瓜傳統栽培法實施⁽⁹⁾。
- (五)分析項目與方法：胡瓜定植後，不同處理之果實品質調查於2009年4月15日及5月1日採收時取樣，調查項目包括果長、果徑及單果重等項目，並將小區產量換算每公頃之產量(22,000 plants/ha)。

結果與討論

自動注入式養液灌溉控制系統於本場溫室設置試驗與試用，內含溫室內5植畦，由一只1.5 in電磁閥控制肥灌動作，試驗溫室種植胡瓜，於各生長階段調整適度養分輸出，胡瓜生長良好。

一、養液輸出量校正

PLC控制系統設定養液輸出百分比設定為65%，調整各養液管路直流馬達驅動器上速度微調的可變電阻，使得流量計檢測養液之輸出量一致，約為3.0 l/min時，完成校正。校正完成後，分別設定PLC控制系統設定養液輸出百分比為25%、45%、65%、85%及100%，紀錄各養液管路流量計數據，處理三重複，利用EXCEL軟體程式之統計功能，計算各養液輸出百分比各養液管路流量之標準差，如表一，標準差在0.35以內，最大流量約5.0 l/min，為可接受範圍，表中設定值為100%之結果為各養液管路最大養液輸出量之數值，輸入於PLC控制系統中最大養液輸出量之位置，作為調整養液輸出量比率之計算依據。

表一、養液流量校正與最大流量

Flow rate	Flow rate setting (%)				
	25	45	65	85	100
Nutrient A	0.34	1.70	3.05	4.42	5.18
Nutrient B	0.63	1.82	3.03	4.07	4.60
Nutrient C	0.65	1.85	3.02	4.03	4.93
Nutrient D	0.45	1.79	3.13	4.49	5.42
Average	0.52	1.79	3.06	4.25	5.03
STD	0.15	0.06	0.05	0.24	0.35

二、養液與清水輸出量試驗

PLC控制系統上不同的養液輸出設定值與實際輸出量之關係，及單位時間主管路清水之輸出量，如表二。其中設定值與養液流量的關係式為：養液流量=設定值/5。使用者必須根據表二試驗結果，調製濃縮養液之濃度、設定養液輸出量及與清水之稀釋比例。分析表二養液輸出性能發現，各養液流量輸出隨設定值減少而降低，呈線性變化，但是線性結果不一致，此乃養液注入式幫浦之機械性能與直流驅動器電器性能在製造公差之差異所造成的結果。標準差最大值為0.43，最小值為0.25，顯示此種養液注入幫浦之輸出量差異大，但是觀察田間作物生長的表現，該養液注入幫浦之性能已經足夠運用在農業介質耕與土耕之生產。

表二顯示數位式流量計與機械式流量計測量主管路流量之性能，數位式流量計測得流量為194 l/min，機械式流量計流量為197 l/min，其差異在本應用場合可以忽略，主管路流量以195 l/min計算養液稀釋比例。

表二、養液輸出設定值與養液輸出流量之關係與主管路流量計性能

Table 2. The relationship of setting value and flow rate of nutrients, and flow performance of digital and mechanical meters of main pipeline

Setting value l/5 min	Nutrient flow rate (l/min)						Main pipe flow rate (l/min)	
	Nutrient A	Nutrient B	Nutrient C	Nutrient D	Average	STD	Digital	Mechanical
20	4.10	4.12	3.98	3.58	3.95	0.25	194.34	196
18	3.64	3.72	3.68	3.08	3.53	0.30	195.24	198
16	3.04	3.24	3.14	2.56	3.00	0.30	195.44	196
14	2.50	2.76	2.60	2.06	2.48	0.30	193.76	196
12	1.92	2.62	2.08	1.58	2.05	0.43	193.60	198
10	1.36	2.00	1.62	1.08	1.52	0.39	193.70	194
8	0.84	1.38	1.20	0.64	1.02	0.34	194.36	198
7	0.56	1.08	0.90	0.40	0.74	0.31	193.92	196

三、電力與水資源之消耗量

數位式流量計之累積用水量為56.76 ton，機械式流量計之顯示值由25.058 ton變成82.561 ton，累積用水量為57.503 ton，因此該期作胡瓜生產之用水量約57 ton，試驗溫室種植面積175 m²，換算單位面積生產胡瓜之用水量為3,257 ton/ha，一年三期作計算，年灌水量達9,771 ton/ha。與設施栽培蔬菜一年多期種植，年灌水量達22,500 ton/ha以上⁽³⁾相比，本試驗養液介質耕肥灌系統之年灌水量僅傳統灌溉方式的43.4%，節省灌溉水高達56.6%，與滴灌可減少灌溉水量30~40%之結果相符⁽³⁾且更優異，原因是水分和肥料利用率高，灌溉水利用率可達95%，水肥直接輸送到根區土壤⁽³⁾。正規操作下，節省灌溉用水同時節省施肥量，與前人試驗結果，滴灌施肥與溝灌沖肥相比，節省化肥35~50%⁽³⁾之結果相符。

利用2只數位式電表SPM-8分別紀錄溫室環控降溫與養液系統之消耗電力，根據試驗期間收集的紀錄觀察，溫室環控降溫之日消耗電力約32 kWh，養液系統之日消耗電力約8 kWh。

本期作種植期間為春末夏初，環控降溫之日消耗電力已經很大，顯示水牆風扇玻璃屋頂溫室在中部平地之日間熱累積嚴重，用於降溫散熱之電力消耗大，若種植期間為夏季則環控降溫之日消耗電力當更大。相較之下，養液系統每日少量多次自動肥灌6至8次之電力消耗很少，發揮的省工、省水、省肥之效益大。

養液系統每日少量多次自動肥灌之作業方式需要藉助自動化技術達成，提高肥灌頻率是增加產量的有效方法，乃藉由改善植物吸收移動性較低的P和K養分、增加水分的有效性等因素。作用機制為頻繁的補充養液到與根部表面相鄰的水肥消耗區域，提升養分輸送質流運輸⁽¹³⁾。

四、肥料用量

本試驗種植一期胡瓜，紀錄四桶養液之用量為A桶656公升、B桶637公升、C桶597公升、D桶566公升。根據肥料調製稀釋倍數，換算得到各種肥料用量分別如表三所示，合計肥料費用新台幣2,744元。

表三、胡瓜期作各種肥料用量、費用與氮肥施用量

Table 3. The amount and cost of fertilizers for growing cucumber and nitrogen consumption

Fertilizer	KNO ₃	KH ₂ PO ₅	Ca(NO ₃) ₂	MgSO ₄	OL+Mix
Nutrients consumption (L)	656.0	656.00	637.00	597.00	566.00
Fertilizer consumption (kg)	20.0	4.92	26.44	14.93	0.85
Price (\$NT/kg)	60.0	70.00	28.00	16.00	260.00
Cost (\$NT)	1200.0	344.00	740.00	239.00	221.00
Nitrogen consumption (kg)	8.4	0.00	4.76	0.00	0.00
Nitrogen consumption (kg/ha)	480.0	0.00	272.00	0.00	0.00

本試驗氮肥使用量合計13.16 kg，換算每期作每公頃氮肥使用量約752 kg/ha，與以色列集約耕作的溪谷，氮肥使用量在1936年開始的50年間由42增加到153 kg/ha⁽¹³⁾相比較，氮肥使用量明顯偏高，氮肥吸收率與氮肥流失率需要進一步追蹤探討。控制氮肥流失的方法包括施用方式、用量與肥料型態，依據作物需要供應適量氮肥到灌溉水中，施肥給作物而非土壤，或使用緩效性肥料⁽¹²⁾。

五、胡瓜生長性狀與產量

本研究之目的擬嘗試以自動化注入式施肥灌溉系統，利用介質槽栽培胡瓜，評估其對胡瓜生育之影響，期能建置出完整自動化施肥灌溉系統，應用於設施胡瓜生產模式之可行性評估，以供日後推廣應用之參考。研究顯示以胡瓜“秋之收”於2009年2月23日定植在台中場溫室內，4月7日開始採收至5月4日採收結束。在產量方面，平均單株產量在957 g，平均單株採果量在9.1果，以每0.1公頃種植2,200株換算，每0.1公頃產量為2,105 kg/ 0.1ha，總結果數為20,020果/0.1 ha。在胡瓜果實性狀方面，如表四所示，在生育初期(4月15日)之單果重、果長及果徑分別為109.7 g、20.2 cm及2.78 cm；在生育後期(5月1日)之單果重、果長及果徑分別為99.9 g、22.2 cm及2.44 cm。在葉片性狀方面，其葉面長為24.1 cm，葉面寬為27.8 cm，葉柄長為30.5

cm。綜合以上調查顯示利用自動化注入式施肥灌溉系統生產胡瓜方式，具有節省人工調配及灌溉等費用，降低生產之成本，且可達到穩定生產胡瓜之目的，有助於提昇市場競爭力與效益。

表四、胡瓜果實性狀

Table 4. The fruit characteristics of cucumber

Date	Fruit weight (g / fruit)	Fruit length (cm)	Fruit diameter (cm)
4/15	109.7±17.5	20.2±1.40	2.78±0.12
5/01	99.9±9.9	22.2±1.06	2.44±0.06

發揮自動肥灌系統功效之前提為必須依照配方設定施肥量，自動肥灌系統能依據生長期的肥灌設定數據，定時定量輸出灌溉水與養液。但是自動肥灌系統的服務對象是作物，作物在不同天候對水分與養分的需要量不同，需要隨天候的陰晴隨機調節，為提高自動化層次，此部分需要結合作物生理專家找出控制條件，建立環控肥灌專家系統。因此肥灌系統有必要進一步與環控系統連結，收集的溫度、溼度、照度、蒸氣壓、作物蒸散量、作物莖桿液體流量、量測葉片內的水分潛勢⁽¹⁰⁾，莖/果實的膨脹與縮小⁽⁴⁾、植物體組織電阻抗測量⁽⁶⁾等資料經決策系統研判後作出灌溉量、施肥量與施肥時機之輸出動作。

結 論

養液輸出量校正試驗設定PLC控制系統之養液輸出百分比，不同養液輸出百分比於各養液管路流量之標準差在0.35以內，於農業運用為可接受範圍。養液與清水輸出量試驗，主管路幫浦流量195 l/min，養液幫浦最大流量約5 l/min，各養液流量輸出隨設定值減少而降低，呈現不一致的線性變化，此乃養液注入式幫浦之機械性能與直流驅動器電器性能在製造公差之差異所造成的結果。標準差最大值為0.43，最小值為0.25，顯示此種養液注入幫浦之輸出量差異大，但是觀察田間作物生長的表現，該養液注入幫浦之性能已經足夠運用在農業介質耕與土耕之生產。

本試驗養液介質耕肥灌系統之年灌水量僅傳統灌溉方式的43.4%，節省灌溉水高達56%。水牆風扇玻璃屋頂溫室在中部平地之日間熱累積嚴重，用於降溫散熱之電力消耗大，相較之下，養液系統每日少量多次自動肥灌6至8次之電力消耗很少，發揮的省工、省水、省肥之效益大。

本試驗調查胡瓜產量、果實性狀、葉片性狀等均在水準之上，顯示利用自動化注入式施肥灌溉系統生產胡瓜方式，具有節省人工調配及灌溉等費用，降低生產之成本，且可達到穩定生產胡瓜之目的，有助於提昇市場競爭力與效益。

發揮自動肥灌系統功效之前提為必須依照配方設定施肥量，自動肥灌系統能依據生長期的肥灌設定數據，定時定量輸出灌溉水與養液。但是自動肥灌系統的服務對象是作物，作物

在不同天候對水分與養分的需要量不同，需要隨天候的陰晴隨機調節，為提高自動化層次，此部分需要結合作物生理專家找出控制條件，建立環控肥灌專家系統。

參考文獻

1. 山崎肯哉 1982 養液栽培全編 博友社 東京日本。
2. 臺灣環境資訊中心 2009 <http://e-info.org.tw/node/45918>。
3. 李俊良、金聖愛 2008 蔬菜灌溉施肥新技術 化學工業出版社。
4. 林平、方煒 2009 植物體感測在自動灌溉管理的應用。
<http://ecaaser3.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/eBook/%B4%D3%AA%AB%C5%E9%B7P%B4%FA.pdf>。
5. 盛中德 2002 設施生產自動化技術 第九章 灌溉與施肥自動化 「國立臺灣大學農業機械工程學系」出版 <http://www.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/Hort/default.htm>。
6. 張文信、陳澤明、邱瑞湧、林啓明 2005 多點式植物體組織電阻抗非破壞感測裝置與運算機制之試製與研究 p.247-248 中華農業機械學會2005年度農機與生機論文發表會論文摘要集 屏東科技大學生物系統工程學系。
7. 陳令錫 2007 設施養液自動輸送控制系統之開發研究 p.143-144 中華農業機械學會2007年度農機與生機論文發表會論文摘要集 臺灣大學生物產業機電工程學系。
8. 郭彥彪、劉蘭生、張承林 2007 設施灌溉技術 第一版 化學工業出版社 北京。
9. 詹惠雯、李文汕 2006 有機介質簡化養液栽培對胡瓜‘夏迪’生長發育之影響 興大園藝 31(3): 43-56。
10. 蕭世傑、陳世銘、楊宜璋、陳加增、陳碧吟 2005 利用葉綠素螢光影像分析葉片之含水率 p.267-268 中華農業機械學會2005年度農機與生機論文發表會論文摘要集 屏東科技大學生物系統工程學系。
11. Dukes, M. D. and J. M. Scholberg. 2005. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. *App. Eng. Agric.* 21: 89-101.
12. Freney, J. R. 1997. Strategies to reduce gaseous emissions of nitrogen from irrigated agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 48: 155-160.
13. Hagin, J. and A. Lowengart. 1996. Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. *Fert. Res.* 43: 5-7.
14. Patricia, I. 1999. Recent techniques in fertigation of horticultural crops in Israel. *Recent Trends in Nutrition Management in Horticultural Crops Workshop, Dapoli, Maharashtra, India.*

The Study on Automatic Injective Type of Fertigation System for Growing Cucumber in Protected Facility¹

Ling-Hsi Chen², Chen-Yang Tai², Yun-Sheng Tien² and Jung-Hsiang Ho²

ABSTRACT

The traditional nutrient feeding system was both time and energy inefficient in liquefying and diluting fertilizers with water at each fertigation process. The newly developed PLC type of fertigation system can manipulate the output volume of 4 nutrient injection pumps that inject nutrients into the main pipe directly. The nutrients can be mixed in the path by the following filter and pipe lines before being dripped /micro-sprayed into the plant root area. The main pipe flow rate is 195 l/min. The nutrient flow rate can be adjusted between 0.5 ~ 5 l/min, its standard deviation is under 0.35. The amount of annual irrigation water is only 43.4% compared to the traditional pond-irrigation method. The new system, operating 6 to 8 times daily, only consumes 8 kwh of power. Survey the cucumber yield, fruit and leaf characteristics are all above level. This automatic fertigation system can facilitate cucumber growth while saving labors, fertilizers and water, thus effectively saving energy and reducing carbon emissions.

Key words: automation, fertigation, water saving, cucumber.

¹Contribution No. 0719-1 from Taichung DARES, COA.

²Assistant Researcher, Associate Researcher, Assistant Researcher, Associate Researcher of Taichung DARES, respectively.