

定型渠道應用表面流速法推估垂向平均流速及流速特性之研究

Experimental Study on the Application of the Estimation of
Average Vertical Flow Velocity and Characteristics of Flow Velocity By
Using Surface Flow Velocity Method in Prismatic Channels

財團法人農業工程研究中心
研究員

陳豐文*
Feng-Wen Chen

財團法人農業工程研究中心
副研究員

林修德
Hsiu-Te Lin

財團法人農業工程研究中心
助理技師

卓宇謙
Yu-Chien Cho

財團法人農業工程研究中心
副研究員

張雅婷
Ya-Ting Chang

財團法人農業工程研究中心
助理研究員

譚允維
Yun-Wei Tan

財團法人水利研究發展中心
組員

蔡慶儒
Ching-Ju Tsai

摘要

非接觸式觀測方法為新穎的流速測定法，手持式雷達波流速儀 (RSV) 為表面流速觀測的主要應用設備，應用本法需事先進行垂向平均流速推估式之建立；本研究於 2017 ~ 2019 年透過現地試驗方式，分別應用 RSV 及聲波都卜勒剖面流速儀 (ADP) 量測表面流速與垂向平均流速，針對臺中灌區定型渠道分析及探討表面流速與垂向平均流速間之關係並進而建立修正公式，成果顯示以灌溉為用途的定型渠道圳路應用 RSV 測定流速時，可簡易應用單一修正係數 K_{AV} 為 1.099；若根據渠道規模進行區分，幹線系統之修正係數 K_{AV} 為 1.040、支線系統為 1.168、分線系統為 1.112、小給水路之修正係數 K_{AV} 為 1.075；應用表面流速測定值修正後之流速與應用 ADP 測定之垂向流速相較之偏差可分別縮小至 2.18 %、0.32 %、7.36 %、4.07 %。其次，本研究以表面流速與垂向流速比值 K_U 評估其與渠道斷面深寬比 (d/W) 之關聯性，結果顯示 K_U 與 (d/W) 成反比， K_U 隨著 (d/W) 遞減程度的數學式為 $K_U = -0.172(d/W) + 0.904$ 。

關鍵詞：表面流速、非接觸式觀測、流速分布、定型渠道。

* 通訊作者，財團法人農業工程研究中心研究員

32061 桃園市中壢區合江路 18 號，chenfw@aerc.org.tw

EXPERIMENTAL STUDY ON THE APPLICATION OF THE ESTIMATION OF AVERAGE VERTICAL FLOW VELOCITY AND CHARACTERISTICS OF FLOW VELOCITY BY USING SURFACE FLOW VELOCITY METHOD IN PRISMATIC CHANNELS

Feng-Wen Chen*

Agricultural Engineering
Research Center

Hsiu-Te Lin

Agricultural Engineering
Research Center

Yu-Chien Cho

Agricultural Engineering
Research Center

Ya-Ting Chang

Agricultural Engineering
Research Center

Yun-Wei Tan

Agricultural Engineering
Research Center

Ching-Ju Tsai

Agricultural Engineering
Research Center

ABSTRACT

The non-contact observation is a novel method for measuring flow velocity. Radar surface velocimeter (RSV) is the main application equipment for surface flow velocity observation. The application of this method requires the establishment of the average vertical flow velocity estimation formula in advance. This research conducted on-site test methods by using RSV and Acoustic Doppler Velocimeter (ADP) to measure surface flow velocity and vertical average flow velocity, respectively, and further to analyze the relationship between surface flow velocity and the average vertical flow velocity to establish a correction formula in Taichung during 2017-2019. The results show that a single correction coefficient K_{AV} can be easily applied to 1.099 by using RSV to measure the flow velocity in prismatic channels. Moreover, the correction factor K_{AV} for the main, the secondary, the branch, and the supply canals are 1.040, 1.168, 1.112, and 1.075 respectively. Comparing with the vertical flow velocity of ADP, the deviation of the modified surface flow velocity can be reduced to 2.18 %, 0.32 %, 7.36 %, 4.07 %, respectively. Secondly, the ratio of surface velocity to vertical velocity, K_U , was used to evaluate its correlation with channel section aspect ratio (d/W). The results show that K_U is inversely proportional to (d/W), and the mathematical formula of K_U decreasing with (d/W) is $K_U = -0.172(d/W) + 0.904$.

Keywords: Surface velocity, Non-contact observation, Flow velocity distribution, Prismatic channel.

一、前言

1.1 研究緣起及目的

臺灣雨量豐沛，但是降雨時空分布不均及臺灣地形陡峻的限制，導致臺灣為全球第 18 位缺水國家，以 2018 年為例，可用水資源量為 167.13 億噸，用水標的依使用量大小依序為農業用水 (118.90 億噸、71.14 %)、生活用水 (31.56 億噸、18.88 %)、工業用水 (16.67 億噸、9.98 %)，其中臺灣各河川重要渠段的流量測定及監測為國內枯水期間進行水資源調配及豐水期間水利防汛之作業評估及決策的重要基礎；農田水利事業使用灌溉水量約為 109.83 億噸，約為國內總用水量之 65.72 %，為調度及分配有限農業水資源，流量資訊的掌握儼然為重要關鍵課題；顯見河川及各級渠道的流量測定為國內水情評估及水資源分配的重要工作項目之一；面對氣候變遷的衝擊及不同時期的水情需求及變化，水量(流量)的掌握必須提高即時性及準確性，豐水期間因應防災的颱風水量估測及枯水期間因應乾旱情境的精準配水須更具機動性而準確的量測方法；其中河川具備動床及通水斷面形狀易變的複雜特性，而灌溉水路則通常為坡度固定且特定斷面形狀 (矩形或梯形) 之定型渠道，本研究以定型渠道為研究對象，應用非接觸式的表面流速測定的理論及方法，選定臺灣中部大安溪、大甲溪及烏溪等 3 大流域分布之定型灌溉渠道為研究試驗區域，採用手持式雷達波流速儀 (RSV) 及聲波都卜勒剖面流速儀 (ADP) 等流速儀設備，於 2017-2019 年期間 (歷時 3 年)，實施定型渠道之流速測定試驗，藉由多處定型渠道之現地試驗方式，分析於定型渠道條件下，表面流速及垂直水平面之垂向平均流速之關聯性，並歸納評估不同渠道斷面規模等級之適合的表面流速修正公式 (係數) 及廣泛型的單一適用修正公式 (係數)；其次，分析定型渠道的通水斷面於不同深寬比 (d/W) 條件下之表面流速與垂向平均流速關係式，上述研究重點及成果期能作為後續定型渠道快速準確測定流速 (間接推估流量) 之方法及了解淺水寬渠型水流斷面之流速水理特徵及其表面流速修正公式適用的範圍。

1.2 文獻回顧：流量測定方法歸納

流速觀測為現階段流量測定過程之重要一環，流速資料取得的準確性影響流量的測定成果，然而流量

的推估不受限於流速測定途徑，尚有以水位為推估途徑的構造物、流速理論計算、現地測定方法、數理模式推估 (Pektas, 2015) 均被提出及應用；歸納說明如下：

1. 水工量水構造物：通常為有效掌握進水量或分水量等需求，於定型渠道設置具量水功能的水工構造物，例如灌溉系統的渠首工、渠道分水點、自來水廠、發電廠進水渠道，其前提為定型渠道；一般而言，定型渠道因有固定的通水斷面，不同水深及流量的對應關係容易掌握，相較於非定型渠道之河川，流況相對穩定，因此僅需於合適渠段設置固定式水工量水構造物，量水構造物並非測定流速再轉換為流量，而是利用水頭參數推估流量的方式，因此適合安裝於須掌握水量資訊的圳路上游或分水點，由於水工量水構造物事先於實驗室完成流量及水深參數之關係率定，因此僅需透過水尺輔助觀測水深，即時獲得對應的高準確性流量資訊。常見的水工量水構造物包含短喉道量水槽巴歇爾量水槽 (Parshall Flume) (許盈松等, 2000; Asawa, 2008)、矩形堰；撒普利地堰及標準 90 °V 型缺口三角堰等各類量水堰 (Weir) (USBR, 2001)、潛孔口 (臺灣省水利局, 1978)、寬頂堰 (Madadi *et al.*, 2014) 等。
2. 流速面積法 (Velocity-Area Method)：流量之基本定義即是單位時間 (t) 內通過的水體積 (W_v)，稱之為流量 (Q)；流速面積法乃基於水連續方程式，通過某一橫斷面之渠道流量即可依據 (1) 式獲得 (Chitale, 1974)。基於 (1) 式的水連續方程式，於通水斷面積已知後，僅須透過流速的推求，即可迅速獲得流量。因此流速資料為關鍵參數；流速資料取得方式基本上可區分為理論計算、現場測定等兩大類型。流速理論計算方法包含應用於明渠流的曼寧公式 (Manning Formula)、蔡司公式 (Chézy Formula) 及管流的哈臣-威廉公式 (Darcy-Weisbach Formula) (Chanson, 2004)。現場測定的方式則包含量測流速及斷面參數，現場測定通常採用中斷面法 (Mid-Section method) 或平均斷面法 (Mean-Section method) 將通水橫斷面劃分為 n 個小斷面；量測各子斷面之水深、水面寬及流速後，依 (1) 式概念推估各小斷面之流量 q_i ，累加後為總流量。流速為流量推估準確與否的關鍵因子，而流速測定多數為接觸式的觀測方法，亦即需與水體接觸，測定過程易受漂流物的干擾或受高流速的牽引而降低觀測準確度及歷經過長的觀測時間，導致觀測期間流量容易變動 (已非定值) 之缺點，因此量測表面流速的非接觸式測定方式，尚屬於新提出的流速測定方式，惟

使用上仍有表面流速不同於通水斷面的垂向平均流速之限制，因此若能建立特定區域性、廣泛簡易通用性、或於特定水理條件下之表面流速修正公式，即可利用非接觸式流速測定方式，使用手持式設備，縮短觀測時間並同時維持流速（流量）的測定品質。

$$\begin{cases} Q = \int_A v dA \text{ (積分型式)} \\ Q = V_{AV} \cdot A \text{ (算術型式)} \\ Q = q_1 + q_2 \dots + q_n = a_1 v_1 + a_2 v_2 \dots + a_n v_n \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

式中：A 是渠道量測面之通水橫斷面積，v 是水流區橫斷面任一點之流速， V_{av} 是通水橫斷面的平均流速； q_n 為第 n 個子斷面的流量； v_n 為第 n 個子斷面的平均流速； a_n 為第 n 個子斷面的通水面積。

二、材料與方法

2.1 流速儀分類及設備選定

2.1.1 流速儀分類及特性

流速觀測已具百年以上歷史，隨著科技發展，流速觀測技術日新月異，但仍是屬於密集勞力及耗時的方式 (Pektas, 2015)，許多流速觀測儀器及其觀測方法已被提出及廣泛應用。根據量測過程是否與被量測對象（水體）接觸而可分類為接觸式流速儀及非接觸式流速儀，其中浮標法 (Float) 為最傳統的接觸式量測方法，同時兼表面流速測定的特點，然而浮標法易受風速影響，準確性不佳 (李寶根, 1966；Rantz, 1982)，Dobriyal *et al.* (2017) 提出因該法操作簡單，建議適用於小河川；機械式流速儀包含豎軸式流速儀 (Horizontal-Axis Current Meter) 與水平軸式流速儀 (Vertical-Axis Current Meter)；應用最為廣泛的豎軸式流速儀為普萊氏 (Price Type AA Meter) 流速儀 (USBR, 2001)，流速過高、太低或淺水條件均不利於應用 (賴建信等, 2004；陳彥璋等, 2008)。其餘諸如電磁式流速儀 (黃偉哲, 2002) 及聲波式流速儀，例如聲波都卜勒流速儀 (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV)、超音波數位流速儀 (Acoustic Digital Current Meter, ADC)、聲波都卜勒剖面流速儀 (Acoustic Doppler Profiler, ADP) 均屬接觸式流速儀。ADC 經實驗驗證適合淺水流況之涉水觀測 (楊翰宗, 2012)；ADP 應用於定型渠道及河川流量測定均較傳統機械式流速儀具備更佳的穩定性與精度 (王傳益等,

1998；農業工程研究中心, 2008)；Jourdain de Thieulloy *et al.* (2020) 經由實驗，使用 ADP 即時測定 54 個節點之剖面流速與 ADV 單點流速精密測定後之平均流速，兩者的相對偏差值僅 2%，顯見 ADP 測定剖面流速的高準確性及即時性。

非接觸式流速儀應用層面較不普及，包含光波式流速儀，以雷射都卜勒測速儀 (Laser Doppler Velocimeter, LDV) 為代表，常用於實驗室高精度量測單點流速 (黃偉哲, 2002)；常應用於野外量測者為雷達波流速儀，雷達波流速儀依發射波之頻率分為微波雷達與無線電波雷達，測速原理與聲波、光波相同，均為都卜勒效應，雷達波流速儀多為微波雷達，都卜勒雷達技術之優勢為日夜均可使用、適合高流量觀測 (李明靜, 2003；Plant *et al.*, 2005)。朱木壽等 (2010) 使用微波雷達表面流速儀觀測颱風洪流量的結果顯示微波雷達系統觀測流量誤差平均低於 10%。惟手持式雷達波流速儀之觀測俯角與水平方向為極敏感之控制條件，若俯角超過 40 度或未與河川流向垂直正交，其觀測誤差將明顯增大 (許盈松等, 2006；Plant *et al.*, 2005)。

2.1.2 流速測定設備選定

本研究於定型渠道條件下，為評估表面流速及垂直水平面之垂向平均流速的關聯性，茲分別採用不同流速儀器進行流速測定，其中表面流速測定採用手持式雷達波測速槍測定，屬於非接觸式量測方法；而垂直水平面之垂向平均流速的測定則採用聲波都卜勒剖面流速儀 (ADP)，為接觸式的量測方式。

表面流速測定使用之設備為美國 Stalker 公司生產之手持式雷達波流速儀 (RSV)，其具有體積小、重量輕、便於攜帶等特點，俗稱雷達測速槍因手持式的特性，可因應高流量及流路改變，具備因應現地條件以機動調整觀測方式，亦便於涉水測定或於路面（橋面）測定渠道流速；該設備之雷達波屬於連續波雷達，操作過程會即時傳回表面流速值，並即時顯示觀測時間內之表面流速平均值，表面流速穩定者，則數值變動幅度小，當表面流況複雜時，流速瞬時變化幅度大，則需延長測定時間或重新觀測以維持準確性。

垂向平均流速測定採用之 ADP 設備為聲波式流速儀，其原理為聲納發射器發射固定頻率之聲束進入水體，再利用聲納接收器接收回聲，分析其頻率變化，即可測得水流垂向平均流速，本研究採用之 ADP 為德國 NIVUS 公司生產之型號 PCM 4 的攜帶型超音波流量儀，量測流速範圍為 -1 ~ + 6 m/s；量測時將 ADP 以測桿方式固定於水面下，ADP 可量測水

表 1 RSV 及 ADP 流速儀規格一覽

No.	項目	手持式雷達波 流速儀(RSV)	聲波都卜勒剖面 流速儀(ADP)
1	流速測量範圍	0.2 ~ 18.0 m/s	-1-6 m/s
2	流速測量精度	± 0.03 m/s	1 ~ 3 %
3	剖面分層數	—	16 層
4	水深測量範圍	—	0.05 ~ 3 m
5	計時範圍	0 ~ 99.9 sec	—
6	計時精度	0.1 sec	—
7	最大作業範圍	100 m	14 m
8	發射功率	50 mW	—
9	發射頻率	Ka band, 34.7 GHz	1 MHz
10	工作溫度	-30 ~ + 70 °C	-20 ~ + 50 °C

註：「—」表示儀器無該項目規格。

面至渠底 (同一垂線) 距離並即時發射聲波，等距量測 16 個節點 (Nodes) 的點流速，並換算為該剖面線之垂向平均流速值。本研究採用之 RSV 及 ADP 流速儀規格如表 1。

2.2 表面流速與垂向平均流速之測定原理與修正方式

垂向平均流速的測定對於流量推估甚為重要與關鍵。現地流量測定主要的兩項參數為流速 V 及斷面 A 參數。由於渠道橫斷面 (水平向) 及縱斷面 (垂向) 各點流速分布不盡相同，為獲得通水斷面之整體平均流速為一項挑戰。以推估流量為目的之流速測定最主要的目標乃直接或間接測得垂向平均流速，流速測定方式的類型包含點流速 (包含水體表面或水面下任一點)、剖面 (垂向) 平均流速。水體表面下的點流速觀測為應用最廣泛的流速測定方式，亦為渠道或河川獲得垂向平均流速的傳統方法，應用點流速測定推估垂向平均流速可依據水深或準確度的要求實施單點法、二點法、三點法的觀測，即量測點位置為水面下 0.2 倍、0.6 倍、0.8 倍水深 (h) 處測定點流速後，簡易加權平均為垂向平均流速。而都卜勒流速儀 (ADP) 可改善上述耗時的點流速測定方法，於觀測過程向垂向水深的不同節點處同時發射聲波，將多個點流速直接平均計算為垂向平均流速 (陳豐文等, 2016)。

表面流速之測定，早期常利用浮標法快速測得，但測定過程易受風速及風向干擾導致準確性不佳，USBR (1997) 以表列修正係數的方式，修正浮標法之表面流速為垂向平均流速，惟流量誤差仍高達 15 ~ 20 %；表面流速之測定除上述簡易浮標法外；表面流速測定之不同新穎技術亦有所發展，例如 Weitbrecht *et al.* (2002) 提及的粒子影像測定法 (Particle Image

Velocimetry, PIV) 即適用於大型河川 (Dobriyal *et al.*, 2017)、Fujita (1998) 首度提出的大尺度粒子影像測定法 (Large-scale particle Image Velocimetry, LSPIV) 及後續應用於不同類型的河川或渠道流量觀測 (Harpold *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2010)、Dal Sasso *et al.* (2018) 提出使用粒子追蹤流速測定法 (Particle Tracking Velocimetry, PTV) 配合固定式攝影機或無人航空系統量測 (UASs) 推估表面流速的時空分布技術、Eltner *et al.* (2020) 提出一種基於 PTV 為基礎的自動表面流速推估法，並以德國襯砌渠道及天然河川為案例，襯砌渠道的流速及流量偏差值僅 5 % 及 4 %、天然河川流量誤差則高達 31 %，顯見定型渠道及河川因具不規則斷面及複雜流況的特性，使得表面流速測定的應用具有準確性差異極大的特性。

比較上述傳統及新穎的表面流速測定方法顯示傳統方法存在耗時耗力、準確性的疑慮，其他新進的技術則有人員廣泛性應用及機動性的限制；因此本研究基於人員機動性、操作便利性、量測時間快速性、流速準確性等實用前提，採用新穎的雷達波流速儀 (Radar Surface Velocimeter, RSV) 於野外以非接觸方式快速測定表面流速，惟實測的表面流速並非等同於該測點的垂向平均流速，需進一步確認表面流速與垂向平均流速之關係式以推求簡易修正公式 (或係數)，透過現地快速的表面流速測定，後續輔以修正公式調整為垂向平均流速，預期能有效縮短流速測定作業時間，仍能保持高準確性，以確保垂向流速及流量推估的代表性及實用性。

因此本研究進行野外流速測定試驗，主要為於同一試驗場址測點進行表面流速 (V_{RSV}) 及垂向平均流速 (V_{ADP}) 的測定作業及比較，其中表面流速 (V_{RSV}) 使用 RSV 進行非接觸式的測定，而垂向平均流速 (V_{ADP}) 則使用 ADP 進行接觸式的測定；RSV 測定之表面流速可進一步應用 (2) 式或 (3) 式進行修正，修正後的流速 (V_{RSV*}) 即代表該測點垂向平均流速值，其中 (2) 式為線性迴歸方式，並於迴歸分析過程將截距設為零以符合兩種設備觀測到零流速應相等 (原點) 的基本假設，前項係數 a 則可視為簡易修正係數，或解釋為垂向平均流速與表面流速之比值，其可快速簡易說明兩者之關聯性；(3) 式則為多項式型態的迴歸分析，其前提為假設表面流速與該剖面之垂向平均流速於不同流速範圍時具有不同比例之關係，亦即兩者之比值會隨著流速調整而變化 (非呈現定值狀態)。

$$\text{線性迴歸: } V_{ADP} = V_{RSV*} = aV_{RSV} \pm b \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{多項式迴歸: } V_{ADP} = V_{RSV*} = aV_{RSV}^2 \pm bV_{RSV} \pm c \dots (3)$$

式中： V_{ADP} 為 ADP 實測垂向平均流速 (m/s)、 V_{RSV^*} 為 RSV 原始實測表面流速值經迴歸分析校正後之修正流速 (m/s)、 V_{RSV} 為 RSV 流速儀原始實測表面流速值 (m/s)、 a, b, c 均為迴歸係數。

2.3 性能評估指標

本研究將 RSV 的非接觸式測定法觀測所得之表面流速 (V_{RSV}) 視為受測流速值 (V_0)，由於 ADP 可快速直接多重複的量測特定測點之垂向平均流速，流速值具備剖面平均流速及高準確性的優點，因此本研究將 ADP 測定之垂向平均流速 (V_{ADP}) 視為標準流速值 (V_T)，進行原始表面流速測定誤差特性評估及表面流速經由 (2) 式修正為垂向平均流速後之準確性性能表現評估。其中受測流速及標準流速之差異性 (流速誤差, $e(i)$)、流速誤差率 $R(i)$ 為單一處測點 (第 i 處) 的誤差評估指標；本研究進一步採用平均均方誤差 (MSE) 及均方根誤差 ($RMSE$) 作為表面流速修正前後之準確性性能評估指標；其中平均均方誤差 (Mean Squared Error, MSE) 是受測者誤差平方的平均值， MSE 值之大小可表示受測值與準確值之平均離散程度，其值愈小表示推估值的準確性愈高，因有平方處理的緣故，除了可突顯極端測定事件，亦可能被極端事件主導整個問題；均方根誤差 (Root Mean Square Error, $RMSE$) 是受測值與標準值偏差的平方和觀測次數 N 比值的平方根；亦為廣義的標準偏差。

本研究為進一步評估 1.應用 RSV 現地實測表面流速 (原始值) 與 ADP 垂向平均流速的差異特性、及 2.RSV 的表面流速經 (2) 式修正為垂向平均流速後之準確性的表現；則流速誤差 $e(i)$ 可基於條件 1、2.考量進一步統計樣本數據後修正為平均誤差量，如 (4) 式及 (5) 式所示；流速誤差率 $R(i)$ 於條件 1、2.下的平均誤差率可表示如 (6) 式及 (7) 式所示；平均均方誤差 (MSE) 於條件 1、2.下可表示如 (8) 式及 (9) 式所示；均方根誤差 ($RMSE$) 依據條件 1、2.可表示如 (10) 式及 (11) 式所示。

$$e_{AV}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{RSV}(i) - V_{ADP}(i)) \dots\dots\dots(4)$$

$$e_{AV}^{**} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{RSV^*}(i) - V_{ADP}(i)) \dots\dots\dots(5)$$

$$R_{AV}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_{RSV}(i) - V_{ADP}(i)}{V_{ADP}(i)} \right) \dots\dots\dots(6)$$

$$R_{AV}^{**} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_{RSV^*}(i) - V_{ADP}(i)}{V_{ADP}(i)} \right) \dots\dots\dots(7)$$

$$MSE^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{RSV}(i) - V_{ADP}(i))^2 \dots\dots\dots(8)$$

$$MSE^{**} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{RSV^*}(i) - V_{ADP}(i))^2 \dots\dots\dots(9)$$

$$RMSE^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{RSV}(i) - V_{ADP}(i))^2} \dots\dots\dots(10)$$

$$RMSE^{**} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{RSV^*}(i) - V_{ADP}(i))^2} \dots\dots\dots(11)$$

式中： $V_{RSV}(i)$ 為 RSV 測定第 i 處流速值； $V_{ADP}(i)$ 為 ADP 測定第 i 處垂向流速平均值(m/s)； $V_{RSV^*}(i)$ 為第 i 處 RSV 經過修正之流速值； e_{AV}^* 與 e_{AV}^{**} 分別為 N 處實測及修正後之流速誤差平均值(m/s)； R_{AV}^* 與 R_{AV}^{**} 分別為 N 處實測及修正後之流速誤差率平均值(%)； MSE^* 為平均均方誤差； $RMSE^*$ 為均方根誤差。

三、研究區域及試驗規劃

3.1 研究區域選定

本研究區域選定臺灣中部的大安溪、大甲溪及烏溪等 3 條流域的灌區渠道，上述研究區域之管轄機關為行政院農業委員會農田水利署臺中管理處，負責灌溉管理營運事務；灌溉渠道等級可依灌溉系統分類為自河川取水後之幹線、支線、分線及田區前的小給水路等四種，除了小給水路數量龐大以外，其餘幹線、支線、分線等渠道共計 205 條 (幹線 49 條、支線 106 條、分線 50 條)，分別為大安溪 (幹線 18 條、支線 56 條、分線 18 條)、大甲溪 (幹線 21 條、支線 44 條、分線 31 條) 及烏溪 (幹線 10 條、支線 6 條、分線 1 條)，研究範圍及渠道點位空間分佈如圖 1 所示。

3.2 試驗設計與流程規劃

本研究為評估非接觸式表面流速法的適用性，其表面流速如何轉換為垂向平均流速為重要關鍵，因此

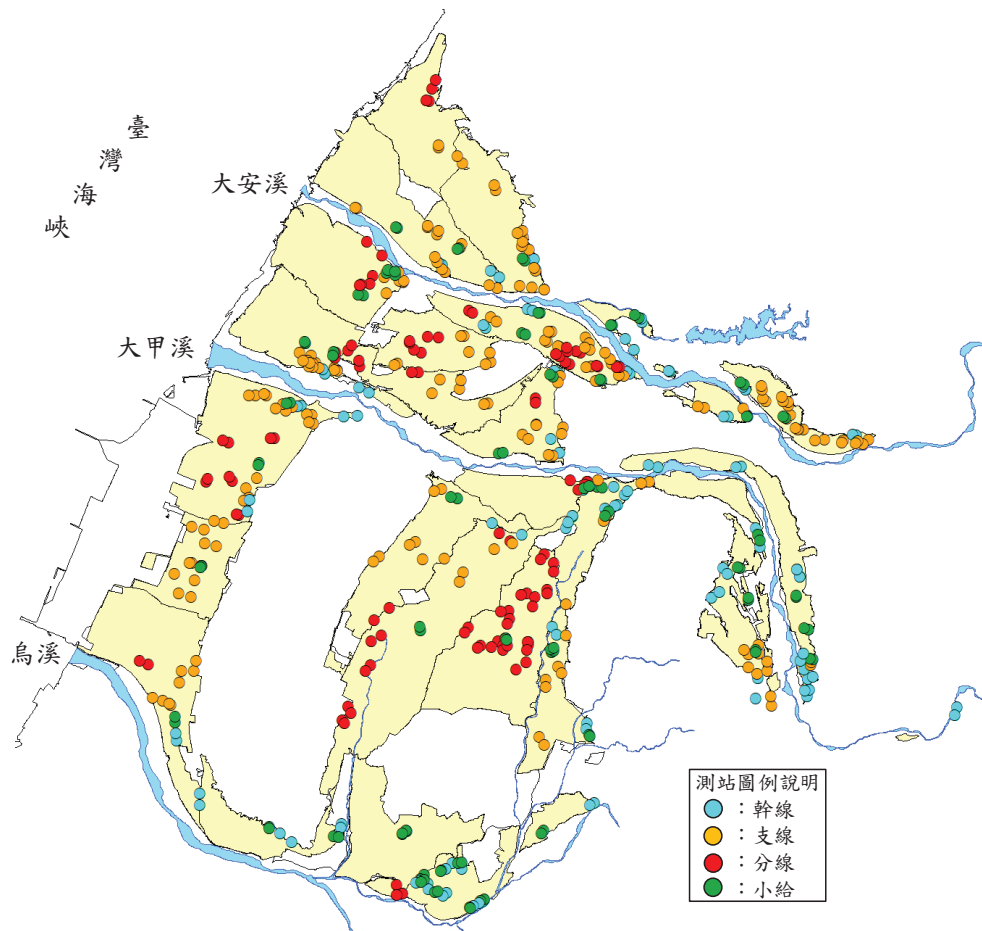


圖 1 本研究區域與試驗渠道選點空間分布

本研究針對定型渠道為試驗對象，透過現地試驗方式，分析及探討表面流速與垂向流速間之關聯性並進而建立修正公式（係數），流速試驗設計內容主要為利用 2 種不同流速儀設備（RSV 及 ADP）分別同時測定表面流速及垂向（剖面）平均流速，並歸納不同試驗場址（渠道橫斷面）的試驗數據進行特性分析、誤差分析，探討兩者之關聯性、並據以建立表面流速法之修正公式。試驗設計及流程規劃包含：1.試驗場址選定、2.試驗時間及測定操作方式。

3.2.1 試驗場址選定

本試驗以定型渠道為流速試驗施測場址，因此選定以輸配灌溉用水的定型灌溉渠道為試驗場址，有別於非定型渠道（河川）易受豐枯水量影響，導致渠床高程、水流股數、水流方向容易改變的特性，定型渠道因施設混凝土內面工、橫斷面及坡度條件於無地震等外力破壞下均屬固定，因此水理特性相對穩定性高；本研究試驗之定型渠道橫斷面以矩形為主，流速測定斷面擇定斷面條件佳、渠段筆直處作為流速測定

的試驗場址，其中幹線系統擇定 121 處（19.8 %）、支線系統擇定 286 處（46.9 %）、分線系統擇定 116 處（19.0 %）、小給水路擇定 87 處（14.3 %）；總計流速試驗測定點位共計 610 處。

3.2.2 試驗時間及測定方式

基於流速試驗場址數量高達 610 處，為使流量測定成果不受其他人為及氣象天氣之干擾，試驗過程之各項原則均須嚴格統一規劃，將 610 處之流速試驗於相同控制條件下進行，控制條件包含：1.全數試驗均由相同的試驗人員進行、2.試驗僅於非降雨日進行、3.子斷面切割原則一致：每一試驗場址之渠道橫斷面的流速測定時，均統一以平均斷面法為子斷面切割方式；幹線、支線及分線等渠道系統因斷面規模均具備渠道寬度 1 m 以上之條件，因此渠道橫斷面切割數量以 10 個子斷面為基準，小給水路因渠道寬小於 1 m，渠道橫斷面切割數量以 5 個子斷面為基準；幹線、支線及分線系統之試驗場址，測定流速時，統一由渠道左岸量測至右岸進行流速測定，每一處橫斷面劃分

10 個子斷面，共 11 筆流速資料；小給水路則每一處橫斷面劃分 5 個子斷面，共 6 筆流速資料。4. 現地流速量測時間：應用 RSV 測定每一處之表面流速時，因試驗渠道為灌溉用途之定型渠道，流況穩定性佳，每次表面流速測定時間均統一設定為 1 分鐘，亦即每一筆表面流速值均為 1 分鐘測定時間之平均表面流速值；應用 ADP 測定垂向流速之測定時間亦為 1 分鐘，惟考量 ADP 設備置入水面下後約須 10 秒鐘後始達穩定流速，因此每一處應用 ADP 量測操作時，均保留設備穩定時間 10 ~ 20 秒後，開始記錄 1 分鐘之連續垂向流速平均值，以確保每一處流速數據之穩定性及客觀性；流速測定前，先完成渠道橫斷面及水深資料量測；上述流速測定試驗於 2017 ~ 2019 年期間，歷時 3 年時間完成所有流速測定作業。

四、結果與討論

4.1 表面流速與垂向平均流速測定成果及其關聯性

本研究於大安溪、大甲溪及烏溪流域之灌溉定型渠道進行 610 處場址流速測定試驗後，每一場址（渠道橫斷面）分別應用 ADP 及 RSV 由渠道橫斷面左側至右側量測垂向平均流速及表面流速的點位為 11 點位（幹線、支線、分線系統）及 6 點位（小給水路），估算該場址渠道橫斷面之垂向流速平均值時，考量兩側渠壁的二次流效應對渠壁流速產生干擾影響，因此渠道兩側渠壁的流速數據均統一不列入計算，因此幹線、支線、分線系統每一場址採用 9 筆橫向點位流速資料平均後代表該場址通水斷面之平均流速（ADP 量測者）及表面流速平均值；小給水路渠道則採用 4 筆橫向點位流速數據加權平均計算。

本研究流速試驗測定場址 610 處，依據幹線、支線、分線及小給水路系統分別試驗 121 處、286 處、116 處、87 處；上述各級渠道系統經 2017-2019 年實施現地實測完成後，首先將各處的橫斷面流速值加權平均為該處的流速代表值進行分析，以下茲區分為 1. 全部渠道測點、2. 幹線系統、3. 支線系統、4. 分線系統、5. 小給水路等五種分群進行流速實測成果說明，首先應用 RSV 測定橫斷面表面流速之試驗數據顯示流速分布範圍、平均流速、變異係數 CV 值分別如下：1. 全部渠道測點(610 處)：0.06 ~ 2.58 m/s、0.61 m/s、72.2 %；2. 幹線系統(121 處)：0.06 ~ 2.15 m/s、0.75 m/s、62.8 %；3. 支線系統 (286 處)：0.06 ~

2.58 m/s、0.65 m/s、66.9 %；4. 分線系統(116 處)：0.07 ~ 2.36 m/s、0.49 m/s、77.9 %、5. 小給水路 (87 處)：0.08 ~ 1.49 m/s、0.42 m/s、61.3 %。應用 ADP 測定的橫斷面垂向平均流速值之試驗數據顯示流速分布範圍、平均流速、變異係數 CV 值分別如下：1. 全部渠道測點 (610 處)：0.05 ~ 4.50 m/s、0.70 m/s、72.2 %；2. 幹線系統 (121 處)：0.06 ~ 2.13 m/s、0.80 m/s、59.4 %；3. 支線系統 (286 處)：0.05 ~ 4.50 m/s、0.78 m/s、71.0 %；4. 分線系統 (116 處)：0.08 ~ 2.60 m/s、0.59 m/s、75.1 %、5. 小給水路 (87 處)：0.09 ~ 1.96 m/s、0.47 m/s、69.4 %。

整體而言，上述 610 處場址的試驗成果，流速分布範圍廣，其中就平均流速而言，無論表面流速或垂向平均流速均隨著渠道系統規模由大而小呈現流速降低的現象，例如主要負責輸水功能的幹線系統的垂向平均流速由 0.8 m/s 降至小給水路的 0.47 m/s，表面流速亦具備相同現象；其原因為輸水系統（幹線、支線及分線渠道）注重輸水效率，渠道容量（規模）大、設計流速較快，以利迅速輸水，而散布於各田區前的小給水路，其功能為提供農民引導水流至田區灌溉，因此渠道容量小、流速亦相對緩慢。因此本研究之 610 處流速實測成果與渠道等級設計原則相符。其次，由標準差及變異係數的分析結果可以展現本研究試驗的流速分散的程度，整體而言（不分渠道系統），垂向平均流速與表面流速之變化範圍約為 0.51 m/s 及 0.42 m/s，並由其變異係數 CV 值 78.18 % 及 70.09 % 顯示 610 處的流速變值分散程度較大。為探討表面流速與垂向平均流速之關聯性，針對 610 處的整體平均流速值進行比較，試驗成果顯示不同規模級別之定型渠道測定的表面流速均呈現微幅低於垂向平均流速的現象，流速差異的幅度約 13.82 %。

本研究進一步使用第 1 四分位數 (Q_1)、第 2 四分位數 (Q_2)，亦即中位數、第 3 四分位數 (Q_3)、最大值及最小值等 5 項簡單統計參數針對前述五種分群（1. 幹線系統、2. 支線系統、3. 分線系統、4. 小給水路、5. 不分渠道級別（全部測點））進行統計分析及盒鬚圖 (Box-whisker Plot) 繪製，成果如表 2、圖 2 ~ 圖 3，成果顯示五種分群的表面流速中位數均低於平均值，垂向平均流速的成果亦有相同現象；針對全部測站的數據，整體評估而言，圖 2 及圖 3 顯示無論使用 ADP 測定渠道垂向平均流速亦或使用 RSV 測定表面流速，過半的流速測定條件偏向 V_{Q1} 居多。表面流速的測定，有一半的流量數據介於 V_{Q1} 與 V_{Q3} 之間，即 0.30 ~ 0.78 m/s 的流速範圍，垂向平均流速則是介於 0.33 ~ 0.93 m/s。針對灌溉系統的規模（由大而小）而

表 2 應用 RSV 及 ADP 測定表面流速及垂向流速之試驗成果簡易統計參數一覽

流速類型	簡易統計指標	渠道系統及試驗場址數量分群				
		不分渠道級別 (全部測點)	幹線系統	支線系統	分線系統	小給水路
		610 處	121 處	286 處	116 處	87 處
表面流速 (RSV 測定)	$V_{\max}$	2.58	2.15	2.58	2.36	1.49
	V_{Q3}	0.78	1.00	0.84	0.58	0.51
	V_{Q2}	0.50	0.65	0.54	0.41	0.35
	V_{Q1}	0.30	0.37	0.34	0.25	0.26
	$V_{\min}$	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08
垂向平均流速 (ADP 測定)	$V_{\max}$	4.50	2.13	4.50	2.60	1.96
	V_{Q3}	0.93	1.15	1.03	0.73	0.53
	V_{Q2}	0.55	0.63	0.66	0.48	0.39
	V_{Q1}	0.33	0.42	0.38	0.28	0.27
	$V_{\min}$	0.05	0.06	0.05	0.08	0.09

備註： $V_{\max}$ 為實測流速之最大值； V_{Q3} 為實測流速之第 3 四分位數； V_{Q2} 為實測流速之之中位數； V_{Q1} 為實測流速之第 1 四分位數； $V_{\min}$ 為實測流速之最小值；本表單位為 m/s。

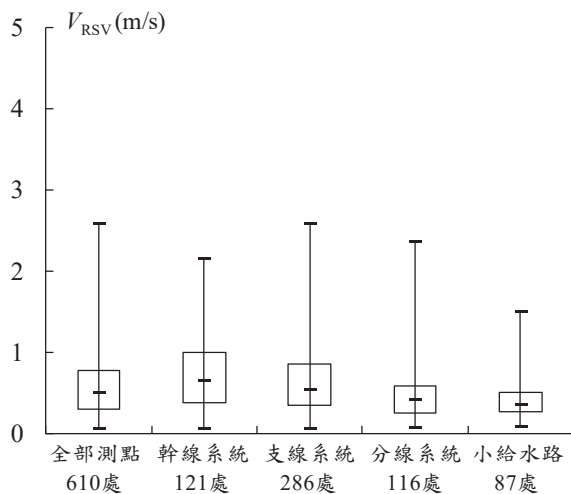


圖 2 RSV 表面流速測定成果之盒鬚圖

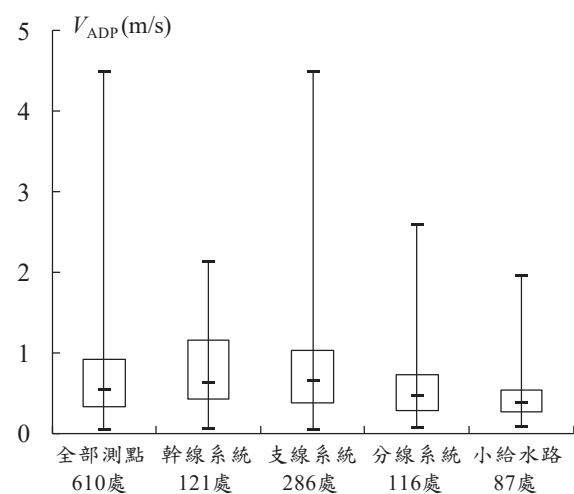


圖 3 ADP 垂向流速測定成果之盒鬚圖

言，由 V_{Q1} 與 V_{Q3} 之數值範圍視為流速主要測定範圍進行探討，其中幹線、支線、分線、小給水路系統的表面流速測定分布範圍，分別為 0.37 ~ 1.00 m/s、0.34 ~ 0.84 m/s、0.25 ~ 0.58 m/s、0.26 ~ 0.51 m/s，顯示流速範圍隨著渠道等級規模變小呈現縮小及流速值降低的現象；而垂向平均流速的測定亦有相同的趨勢，其主要流速測定分布範圍，分別為 0.42 ~ 1.15 m/s、0.38 ~ 1.03 m/s、0.28 ~ 0.73 m/s、0.27 ~ 0.53 m/s。

4.2 表面流速法之修正公式建立及驗證

RSV 為採用表面流速點測定的方式，但同時具備非接觸式觀測的特性，流速測定過程僅需觀測表面流速，若要取代其他傳統流速測定方式，藉以快速準

確獲得垂向或通水斷面之整體平均流速值，則需應用表面流速與垂向平均流速數據，以迴歸分析方法 ((2) 式或 (3) 式) 建立表面流速修正公式，作為應用 RSV 量測表面流速準確推估垂向平均流速及進一步計算流量之關鍵依據。

本研究為建立表面流速之修正公式並驗證其流速校正效能，茲將流速測定數據區分為建立公式的率定組及驗證組，並分別依據四種渠道規模級別 (幹線、支線、分線及小給水路系統)，區分 4 群，獨立設置率定組及驗證組，其中率定組使用的數據來源及筆數乃於該分群內採用隨機選取方式，選定 50 處場址測定的表面流速及其對應的垂向平均流速數據，進行迴歸分析以推估表面流速修正公式，該分群之其餘場址的試驗數據則作為驗證組使用，另外考量野外實際應

用修正公式時之便利性，茲建立「不區分渠道級別」之單一修正公式及驗證，其中率定組採用上述幹線、支線、分線及小給水路個別以隨機方式選定之 50 處場址數據，總計 200 處場址測定數據進行「不區分渠道級別」的單一修正公式建立，主要考量四種級別渠道的試驗數據均能採用相等數量筆數 (50 筆) 的數據進行迴歸分析建立公式，對於實務上應用於各種渠道條件時，較具客觀性。因此茲將五種分群的試驗數據之總筆數、率定組及驗證組採用之筆數分別說明如下：1. 幹線系統：總試驗筆數 121 筆，率定組 50 筆，驗證組 71 組、2. 支線系統：總試驗筆數 286 筆，率定組 50 筆，驗證組 236 組、3. 分線系統：總試驗筆數 116 筆，率定組 50 筆，驗證組 66 組、4. 小給水路：總試驗筆數 87 筆，率定組 50 筆，驗證組 37 組、5. 不區分渠道級別：總試驗筆數 610 筆，率定組 200 筆，驗證組 410 組。

本研究基於快速而準確測定流速之實務應用需求，採用 (2) 式並設定截距為 0，以獲得簡易修正係數 (K_{AV})，如 (12) 式，則渠道規模由大而小的幹線、支線、分線系統及小給水路之修正公式依上述流程迴歸分析所得之 K_{AV} 分別為幹線系統 $K_{AV} = 1.040$ 、支線系統 $K_{AV} = 1.168$ 、分線系統 $K_{AV} = 1.112$ 、小給水

路系統 $K_{AV} = 1.075$ 、及不分渠道級別之單一修正係數 $K_{AV} = 1.099$ ；相關係數如 (13) 式。進一步依序將幹線、支線、分線、小給水路系統的修正係數 K_{AV} 個別代入該渠道系統隨機選定的 50 處表面流速數據 (公式建立組)，並個別將經修正後 50 處表面流速值 V_{RSV}^* 與垂向平均流速 V_{ADP} 繪製於等距圖，其中表面流速修正後流速值 V_{RSV}^* 為橫軸、垂向平均流速 V_{ADP} 視為標準值，置於縱軸，並繪製對角線，進行表面流速修正後之數據是否與 ADP 測定值比較，評估其擬合及分散的程度，如圖 4。成果顯示幹線、支線、分線及小給水路系統各自的率定組 50 筆 RSV 測定的表面流速經由公式修正後均具有良好的擬合效果，圖 4 的流速點若發生於對角線上，表示修正後的表面流速等同於垂向平均流速，反之，流速點偏離該對角線愈遠，代表表面流速修正後的流速值 V_{RSV}^* 仍與垂向平均流速 V_{ADP} 差異愈大，亦即修正效果不佳；若流速點位於對角線以下，代表修正後之表面流速高於垂向平均流速 V_{ADP} ，反之，位於對角線以上，代表修正後之表面流速 V_{RSV}^* 低於垂向平均流速 V_{ADP} 。圖 4 顯示四種不同等級之渠道系統的率定組 (50 筆流速值數據) 經各自修正公式修正後所得表面流速修正值 V_{RSV}^* 流速均能貼合對角線，僅幹線及支線系統的部分

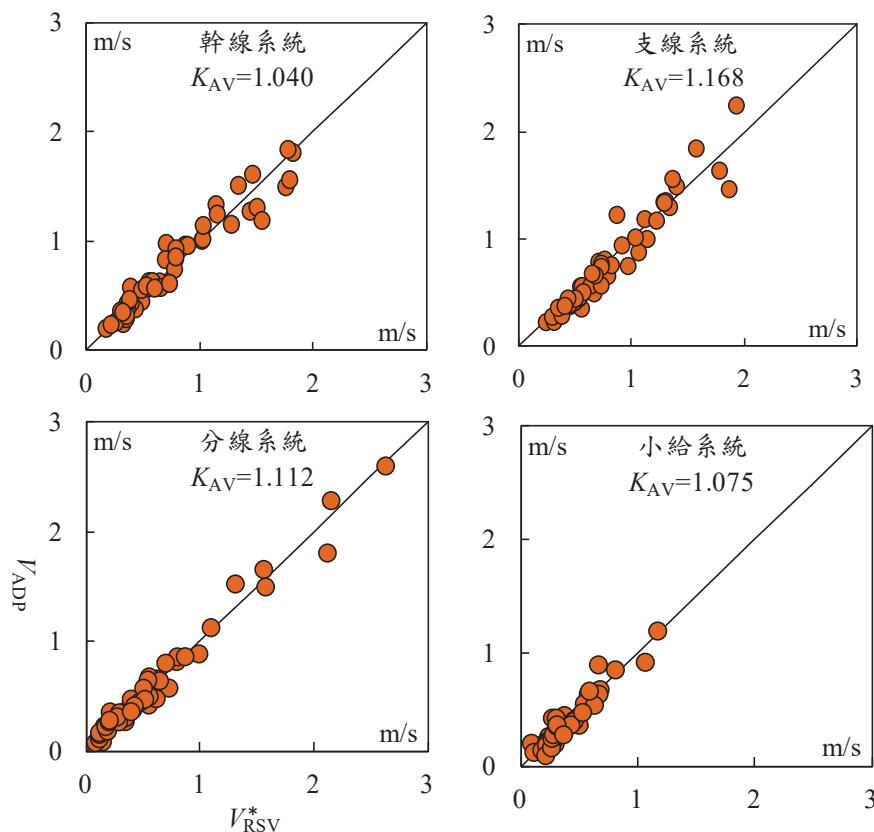


圖 4 四種級別渠道率定組表面流速修正值與 ADP 垂向平均流速對應比較圖

流速值的點 (流速範圍 1 ~ 2 m/s)相對較為偏離對角線，然而整體而言，表面流速經修正公式調整後之流速值已具良好成果。

$$K_{AV}=V_{ADP}/V_{RSV} \dots\dots\dots(12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{幹線系統: } K_{AV} = 1.040; R^2 = 0.923 \\ \text{支線系統: } K_{AV} = 1.168; R^2 = 0.924 \\ \text{分線系統: } K_{AV} = 1.112; R^2 = 0.974 \\ \text{小給水路: } K_{AV} = 1.075; R^2 = 0.890 \\ \text{不分渠道級別(全部測點): } K_{AV} = 1.099; R^2 = 0.942 \end{array} \right. \dots\dots(13)$$

為驗證各種規模定型渠道系統的表面流速修正係數 (K_{AV}) 的實用性，除了前述將由率定組數據透過迴歸分析建立之修正公式，並各自將修正公式代入率定組修正表面流速，與 ADP 測定之垂向流速可獲得良好之擬合 (修正) 效果；然而為了進一步確認本研究建立之修正公式 (13) 式後續是否具備實務應用的可行性 (準確性)，因此進一步將未納入進行建立公式過程使用之驗證組數據進行驗證測試，藉以評估修正係數之準確性；上述五種分群 (1.幹線系統、2.支線系統、3.分線系統、4.小給水路、5.不分渠道級別 (全部測點)) 之驗證組採用場址數量則分別為 71、236、66、37 處、410 處，茲將驗證組場址的表面流速原始數據經由代入幹線系統 $K_{AV} = 1.040$ 、支線系統 $K_{AV} =$

1.168、分線系統 $K_{AV} = 1.112$ 、小給水路系統 $K_{AV} = 1.075$ 、不分渠道級別之單一修正係數 $K_{AV} = 1.099$ 修正後，成果顯示流速準確性明顯獲得改善，例如幹線系統使用 RSV 量測表面流速的原始流速平均值 0.75 m/s，經由幹線系統 $K_{AV} = 1.040$ 修正為垂向平均流速為 0.78 m/s，已接近使用 ADP 測定之垂向平均流速值 0.80 m/s；其餘支線、分線系統及小給水路亦均有相同改善效果 (詳表 3)，並茲將渠道驗證組四種渠道規模級別 (幹線 71 處、支線 236 處、分線 66 處、小給水路 37 處) 的表面流速經修正式改善後與 ADP 垂向平均流速對應如圖 5，圖 5 顯示表面實測流速 (V_{RSV}) 經 (13) 式修正後之表面流速修正值 (V_{RSV}^*) 與垂向平均流速 (V_{ADP}) 的擬合或分散程度，無論採用 50 組數據的率定組或是幹線、支線、分線、小給水路分別採用 71、236、66 及 37 組數據的驗證組，僅小給水路系統呈現無論流速高低，修正後之表面流速值與垂向平均流速之誤差幅度無明顯變大或縮小的現象；而幹線、支線及分線系統之誤差幅度於修正後仍有隨流速成正比的現象。表 3 顯示以流速誤差量而言， e_{AV}^* 為上述驗證組 (1.幹線系統 71 處、2.支線系統 236 處、3.分線系統 66 處、4.小給水路系統 37 處、5.不分渠道級別 (全部測點 410 處)) 應用 RSV 量測表面流速原始數據與 ADP 量測垂向平均流速之差

表 3 定型渠道表面流速試驗成果及修正式驗證一覽

編號	項次	定型渠道				
		不分渠道級別	幹線系統	支線系統	分線系統	小給水路
試驗場址 採用數量	總數量	610	121	286	116	87
	率定組	200	50	50	50	50
	驗證組	410	71	236	66	37
率定組	V_{ADP}	0.65	0.80	0.80	0.61	0.40
	V_{RSV}	0.59	0.75	0.70	0.54	0.37
	V_{RSV}^*	0.65	0.78	0.81	0.60	0.40
驗證組	V_{ADP}	0.73	0.80	0.78	0.57	0.55
	V_{RSV}	0.61	0.75	0.64	0.44	0.50
	V_{RSV}^*	0.67	0.78	0.75	0.49	0.54
表面流速修正式 K_{AV}		1.099	1.040	1.168	1.112	1.075
e_{AV}^* (m/s)		-0.12	-0.05	-0.14	-0.12	-0.06
e_{AV}^{**} (m/s)		-0.05	-0.02	-0.03	-0.07	-0.02
R_{AV}^* (%)		-12.51	-5.91	-14.11	-16.69	-3.19
R_{AV}^{**} (%)		-3.45	-2.18	0.32	-7.36	4.07
MSE^*		0.080	0.016	0.118	0.045	0.018
MSE^{**}		12.000	0.015	0.099	0.033	0.012
$RMSE^*$		0.282	0.128	0.343	0.213	0.135
$RMSE^{**}$		3.464	0.121	0.315	0.181	0.109

備註：本表流速單位為 m/s。

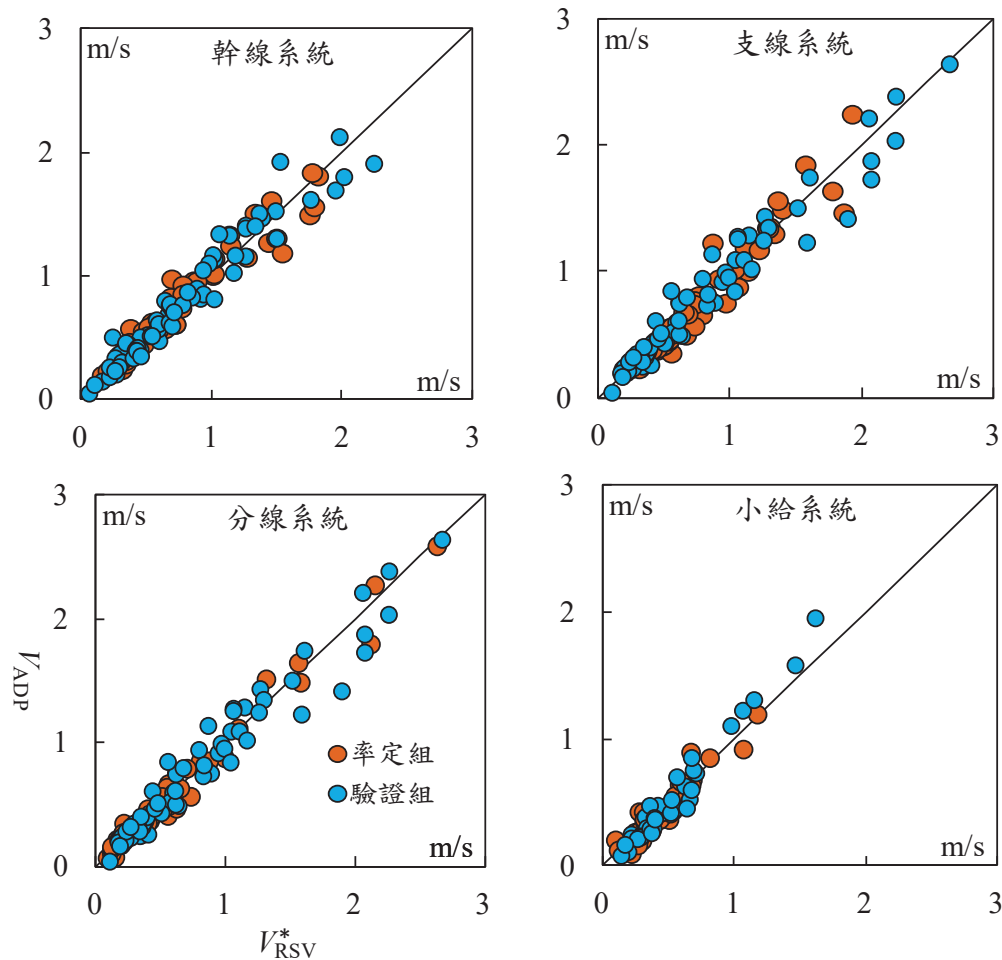


圖 5 四種級別渠道全數表面流速修正值與 ADP 垂向平均流速對應比較圖

異，負值表示表面流速低於垂向平均流速，其中若不分渠道級別，整體平均流速差異量約為-0.06 m/s，若比較不同渠道級別的差異，結果顯示平均流速差異量約為-0.05 ~ -0.14 m/s，均顯示表面流速低於垂向平均流速的現象，以支線及分線的誤差量較大，幹線及小給水路最小；RSV 的原始表面流速經由 (13) 式修正後之誤差量，若不分渠道級別，整體平均流速差異量明顯由-0.12 m/s 縮小至-0.05 m/s，流速改善的修正量為 0.07 m/s；，若比較不同渠道級別的流速改善差異，結果顯示表面流速修正後略低於 ADP 之垂向流速約 0.02 ~ 0.07 m/s，表面流速誤差修正改善效果最大者為支線系統 (由-0.14 m/s 修正至-0.03 m/s)，誤差修正量達 0.11 m/s。

本研究進一步用流速相對誤差率 R_{AV}^* 、 R_{AV}^{**} (%) 來表達表面流速原始數據 (V_{RSV}) 及修正值 (V_{RSV}^*) 與 ADP 垂向平均流速 (V_{ADP}) 的差異百分比來表達，其中若不分渠道級別，RSV 量測的表面流速未修正前之平均流速 (V_{RSV}) 與垂向平均流速 (V_{ADP}) 之相對誤

差率整體平均約為-12.51 %，若比較不同渠道級別的差異範圍，約為-3.19 ~ -16.69 %；RSV 測定之表面流速均略低於 ADP 測定之垂向流速流速； R_{AV}^{**} 分析成果顯示若不分渠道級別，渠道表面流速經修正後之相對誤差率整體平均約為-3.45 %，誤差率大幅降低，修正幅度達 9.06 %，若比較不同渠道級別經修正後的誤差率約介於-7.36 ~ 4.07 %，表面流速準確性的改善效果由高而低分別為支線系統改善效果最佳，相對誤差率由-14.11 %改善為高估僅 0.32 %，準確性改善幅度高達 13.79 %、其次為分線系統，相對誤差率由-16.69 %改善為-7.36 %，準確性改善幅度高達 9.33 %、幹線系統，相對誤差率由-5.91 %改善為-2.18 %，準確性改善幅度為 3.73 %，因幹線系統原始誤差量就小，改善後的誤差量及相對誤差率仍然很低、小給水路系統則有別於其他三種規模的渠道，相對誤差率由表面流速低估現象的-3.19 %經修正為高估現象的 4.03 %，因此由相對誤差率無法判定有準確性提升的效果；進一步經由 MSE 及 RMSE 評估驗

證組多處 RSV 實測的表面流速數據經修正式改善後 (V_{RSV}^*) 與未經修正式改善前之原始表面流速 (V_{RSV}) 比較, 準確性提高及離散程度縮小; 上述驗證評估, 整體而言, 四種不同級別規模的定型渠道, 表面流速若未經修正, 僅一種灌溉渠道系統 (小給水路) 的流速誤差率 $< 5\%$, 有兩種系統 (支線及分線) 的流速誤差率 $> 10\%$ 、一種渠道系統 (幹線) $> 5\%$; 然而, 表面流速經由修正式後, 即可視為垂向平均流速使用, 僅分線系統由 16.69% 改善至 7.36% 以外, 其餘三種渠道系統 (幹線、支線及小給水路) 均能控制流速誤差率 $< 5\%$; 若不分渠道級別, 僅使用單一修正係數, 410 處的修正效果顯示誤差率可縮小至 3.45% , 顯見表面流速測定後再透過率定公式修正, 可顯著提高表面流速的正確性, 亦即修正後表面流速值 (V_{RSV}^*) 具備垂向流速 (V_{ADP}) 的代表性。

相較於其他表面流速修正的相關研究, Hudson (1993) 指出應用浮標法測定之表面流速可乘上修正係數 0.8 即可約略修正為平均流速, 一般而言, 早期因認為表面流速大於平均流速, 所以建議野外簡易量測表面流速時, 給予 $0.8 \sim 0.9$ 的修正係數範圍 (渠壁由粗糙至光滑的條件), 通常採用 0.85 , 然而 Genç *et al.* (2015) 於土耳其中部小河川的案例顯示修正係數僅 0.552 ; 陳豐文等 (2016) 以臺灣中部 10 處不同河川渠段 (坡度陡峭與平緩) 為例進行試驗, 不同河川渠段的修正係數分布差異甚大, 修正係數範圍介於 $0.62 \sim 0.95$, 上述案例顯見天然河川因不規則斷面、河床礫石粒徑組成及均勻分布情形、流況的複雜性、深槽型或淺水流等多項複雜因素綜合導致表面流速與垂向平均流速差異性甚大, 因此通常建議採用因地制宜原則, 不同河段採用個別專屬的修正係數。此外, 表面流速通常並非最大流速發生點 (French, 1985; Binesh and Bonakdari, 2016), 許多實驗室及野外的試驗顯示最大流速發生於水面下 $5 \sim 25\%$ 水深處 (Marjang, 2008), 而本研究試驗對象為矩形定型渠道, 每一試驗場址內面工固定、坡度固定、流況穩定的條件下, 表面流速修正係數介於 $1.040 \sim 1.168$; 若僅能以單一修正係數當代表, 則表面流速修正係數為 1.099 。

4.3 渠道斷面深寬比與表面流速、垂向平均流速之關聯性分析

渠道斷面因子 (渠寬及渠深的比例) 是否會影響流速的分布特性, 過去已有類似的相關水力研究 (Bonakdari *et al.*, 2008; Marjang, 2008; Binesh and Bonakdari, 2016), 本研究進一步以 610 處矩形定型渠

道場址於流速試驗時之渠道寬度 (W)、水深 (d)、RSV 量測的表面流速 (V_{RSV})、ADP 量測的垂向平均流速 (V_{ADP}) 等四種參數數據, 進一步轉換為渠道深寬比 (d/W) 及表面流速與垂向流速之比值 K_U (14 式) 等兩項參數, 並將 610 處流速測定時之渠道深寬比 (d/W) 進行分組, 分組間距設定為 $d/W = 0.1$, 總計分成 11 組, 依序為第 1 組 ($d/W = 0 \sim 0.1$)、第 2 組 ($d/W = 0.1 \sim 0.2$)、第 3 組 ($d/W = 0.2 \sim 0.3$)、第 4 組 ($d/W = 0.3 \sim 0.4$)、第 5 組 ($d/W = 0.4 \sim 0.5$)、第 6 組 ($d/W = 0.5 \sim 0.6$)、第 7 組 ($d/W = 0.6 \sim 0.7$)、第 8 組 ($d/W = 0.7 \sim 0.8$)、第 9 組 ($d/W = 0.8 \sim 0.9$)、第 10 組 ($d/W = 0.9 \sim 1.0$)、第 11 組 ($d/W = 1.0$ 以上), 其符合各分組條件之流速測定數量及其分析成果如表 4 所示, 全體的表面流速值為 0.45 m/s , 垂向平均流速值為 0.56 m/s , 表面流速與垂向流速比值為 0.81 , 圖 6 為不同渠道深寬比對應的表面流速與垂向流速比值 K_U 變化趨勢, 由表 4 之 K_U 數據及圖 6 趨勢線很清楚顯示表面流速與垂向流速比值 K_U 與 (d/W) 成反比, 亦即水深極淺時, 表面流速近似於垂向平均流速, 隨著水深的增加, 表面流速愈小於垂向平均流速, 當渠道深寬比 (d/W) = 1 時, K_U 約為 $0.70 \sim 0.76$, 亦即表面流速約僅為垂向平均流速的 $0.7 \sim 0.76$ 倍; K_U 隨著 (d/W) 遞減程度的數學式可表示為 $K_U = -0.172(d/W) + 0.904$ 。

$$\begin{cases} K_U = V_{RSV} / V_{ADP} \\ K_U^* = V_{RSV}^* / V_{ADP} = V_{RSV} \cdot K_{AV} / V_{ADP} \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

式中: K_U 為表面流速實測值與垂向流速之比值; K_U^* 為表面流速修正值與垂向流速之比值; V_{ADP} 為使用 ADP 施測之垂向流速平均值 (m/s); V_{RSV} 為使用 RSV 施測之表面流速實測值 (m/s); 本處之 K_{AV} 為不分渠道級別 (全部測點) 之單一修正值, $K_{AV} = 1.099$ 。

本研究為評估表面流速測定 (V_{RSV}) 經由單一修正係數 $K_{AV} = 1.099$ 統一修正後之表面流速值 (V_{RSV}^*) 於前述 11 種不同渠道深寬比 (d/W) 條件下之修正準確性。進一步將單一修正係數 $K_{AV} = 1.099$ 代入表 4 所列 11 組 (610 處) 不同渠道深寬比 (d/W) 條件下對應之原始測定的表面流速 (V_{RSV}), 修正後得到 11 組修正後的流速值 (V_{RSV}^*); 610 處的表面流速整體平均值由修正前的 $V_{RSV} = 0.45 \text{ m/s}$ 提升為 $V_{RSV}^* = 0.50 \text{ m/s}$, 接近垂向平均流速 $V_{ADP} = 0.56 \text{ m/s}$ 。

因此另以 14 (式) 所列之 K_U^* 值評估表面流速 (V_{RSV}) 經修正為可代表為垂向平均流速值 (V_{RSV}^*), 並將 V_{RSV}^* 與 ADP 量測之垂向流速值 (V_{ADP}) 進行比較, 即可評估不同渠道深寬比 (d/W) 條件下表面流速修正之準確性, 若 $K_U^* = 1$ 表示表面流速修正後已等同於

表 4 渠道深寬比與表面流速/垂向平均流速比值關聯性分析成果一覽

組別	數量(處)	渠道深寬比 d/W		流速(V)			V_{RSV}/V_{ADP}	V_{RSV}^*/V_{ADP}
		範圍	平均值	V_{ADP}	V_{RSV}	V_{RSV}^*	K_U	K_U^*
第 1 組	146	0.0 ~ 0.1	0.06	0.73	0.64	0.71	0.92	1.01
第 2 組	141	0.1 ~ 0.2	0.14	0.82	0.67	0.74	0.87	0.96
第 3 組	98	0.2 ~ 0.3	0.24	0.67	0.56	0.61	0.86	0.94
第 4 組	78	0.3 ~ 0.4	0.34	0.63	0.51	0.57	0.82	0.90
第 5 組	47	0.4 ~ 0.5	0.44	0.50	0.40	0.44	0.80	0.88
第 6 組	40	0.5 ~ 0.6	0.54	0.58	0.48	0.53	0.81	0.89
第 7 組	25	0.6 ~ 0.7	0.66	0.64	0.52	0.57	0.83	0.91
第 8 組	13	0.7 ~ 0.8	0.73	0.30	0.23	0.25	0.76	0.83
第 9 組	9	0.8 ~ 0.9	0.87	0.35	0.28	0.30	0.77	0.84
第 10 組	5	0.9 ~ 1.0	0.92	0.54	0.41	0.45	0.76	0.83
第 11 組	8	1.0 ~	1.10	0.40	0.27	0.30	0.70	0.77
平均				0.56	0.45	0.50	0.81	0.89

備註：本表流速單位為 m/s。

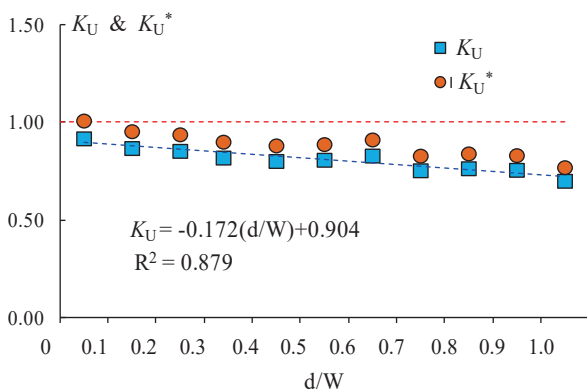


圖 6 表面流速與垂向平均流速比 (K_U) 與渠道深寬比 (d/W) 之關係

垂向平均流速，若 $K_U^* > 1$ 則表示表面流速值過度修正，修正後的流速值 (V_{RSV}^*) 有偏大的現象；表 4 所列分析成果顯示整體而言，表面流速實測值 (未修正前) V_{RSV} 與垂向平均流速 V_{ADP} 的比值 K_U 為 0.81；經修正後之表面流速值 (V_{RSV}^*) 與垂向平均流速 V_{ADP} 的比值 K_U^* 比值提升為 0.89。若分析不同渠道深寬比 (d/W) 的表面流速修正效果，表 4 顯示渠道深寬比僅 (d/W) < 0.1 條件下發生輕微過度修正的現象；整體而言，上述研究成果顯見現地施測表面流速後，經由適當的修正係數調整後，做為該測點斷面的垂向平均流速具有代表性，也有助於提升後續流量推估的準確性。惟不同的渠道深寬比 (d/W) 的條件下應用單一修正係數進行表面流速修正， K_U 提升為 K_U^* 之差異值約 0.07 ~ 0.09；由於深寬比 (d/W) 較低時的淺水流況，表面流速較趨近垂向平均流速，而 (d/W) 提高後趨向窄深型流況時，表面流速與垂向平均流速的差異變

大；基於不同寬深比的流速改善幅度相似，因此若不考量渠道系統規模，僅應用單一修正係數進行表面流速之修正，修正後的表面流速作為垂向平均流速的代表性於淺水流況 (低 d/W) 時優於窄深型流況 (高 d/W)。

4.4 本研究應用限制

本研究費時 3 年於 610 處矩形定型渠道場址進行流速試驗，並藉由試驗數據的分析及統計可歸納獲得表面流速及垂向平均流速之修正公式及渠道寬深比 (d/W) 對於表面流速與垂向流速比 (K_U) 之影響。然而考量本研究所有試驗均於野外實施，試驗渠道分布點位散布於臺中山區、平地及沿海各灌區，即使所有渠道場址事先經過嚴格篩選，但 610 處渠道場址之渠道條件仍存有差異性，例如渠道內面工新舊程度、渠道坡度不同、渠壁植生狀況、渠底淤積與否等條件的微幅差異；其次單一渠道場址僅能獲得單一流速成果，無法透過人為操作進行流速條件的調整，因此利用流速值高低或渠道寬深比進行分組，不同組別之試驗次數受限於 610 處試驗場址自身的條件，樣本數量無法獲得均勻分配的期待；因此本研究之分析成果乃基於特定條件下完成，修正係數應用的適用性仍應有其限制，例如不分渠道級別之單一修正係數 K_{AV} 適用的流速範圍為 0 ~ 3 m/s；幹線、支線系統應用的流速範圍為 0 ~ 2 m/s、分線為 0 ~ 3 m/s 及小給水路系統為 0 ~ 1.5 m/s；因此考量應用的通用性 (Universal)，本研究建議後續之渠道試驗，可進一步透過室內型標準化的渠槽，擴大試驗流速範圍及次數，以獲得更完整

的試驗資料，達成通用性之目標。

五、結論與建議

國內因應汛期及枯水期不同水情條件下的流量測定需求甚大，傳統的接觸式流量測定方法有其優點及限制；天然河川及定型灌溉渠道的流量測定作業的精進方向均為量測時間縮短、維持高準確性、移動測定的機動性等重要關鍵因子，本研究以手持式雷達波流速儀 (RSV) 為表面流速觀測的主要應用設備，選定臺灣中部大安溪、大甲溪及烏溪灌區內各級灌溉專用圳路 (幹線、支線、分線、小給水路)，以矩形定型渠道為流速測定試驗場址，經 2017 ~ 2019 年 (共 3 年) 試驗期間完成之 610 處流速試驗，應用 RSV 及 ADP 分別量測表面流速及平均垂向流速；透過評析表面流速與垂向流速間之關係後進而應用線性迴歸分析推估定型渠道廣泛通用性的表面流速單一修正係數 K_{AV} 為 1.099；若根據渠道規模進行區分，則幹線、支線、分線、小給水路系統之修正係數 K_{AV} 分別為 1.040、1.168、1.112 及 1.075；修正後之表面流速與垂向流速相較之偏差可分別縮小至 -2.18 %、0.32 %、-7.36 %、4.07 %。其次本研究經由 610 處流速試驗成果依據渠道深寬比 (d/W)、表面流速與垂向流速比值 (K_U) 之關聯性分析成果顯示直接應用 RSV 測定表面流速 (無修正程序)，若直接應用於流量推估，則淺水流況之準確性優於窄深型流況，隨著深寬比 (d/W) 提高，流速或流量的誤差會隨之提高；本研究建議後續可針對渠道水流為窄深型渠道 ($d/W > 1$) 進行試驗，以期擴充定型渠道於不同渠道深寬比條件下之表面流速修正方法及使得適用範圍更具完備。整體而言，本研究透過大規模的現地試驗確認矩形定型渠道應用手持式雷達波流速儀 (RSV) 以非接觸式量測表面流速法經由簡易修正程序可以有效提高表面流速用於推估流量的準確性及實用性。

參考文獻

1. Asawa, G. L., Irrigation and Water Resources Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee. New age international (P) limited, Publishers, 2008.
2. Bonakdari, H., Larrarte, F., Lassabatere, L. and Joannis, C., "Turbulent Velocity Profile in Fully-Developed Open Channel Flows", *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 1-17, 2008.
3. Binesh, N., and Bonakdari, H., "Evaluating Mathematical Models for Velocity Distribution and Dip Phenomenon in Rectangular Open Channels", *Computations and Materials in Civil Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 99-108, 2016.
4. Chanson, H., *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*, 2nd Edition, University of Queensland, Australia, 2004.
5. Chitale, S. V., "Discharge Measurement-Technology and Data Analysis, Hydraulics of Alluvial Streams, Central Board of Irrigation and Power, a Status Report 3, pp. 13-24, New Delhi, 1974.
6. Dal Sasso, S. F., Pizarro, A., Samela, C., Mita, L., and Manfreda, S., "Exploring the Optimal Experimental Setup for Surface Flow Velocity Measurements Using PTV", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 190, No. 460, <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6848-3>, 2018.
7. Dobriyal, P., Badola, R., Tuboil, C., and Hussain, S. A., "A Review of Methods for Monitoring Streamflow for Sustainable Water Resource Management", *Applied Water Science*, Vol. 7, pp. 2617-2628, 2017.
8. Eltner, A., Sardemann, H., and Grundmann, J., "Technical Note: Flow Velocity and Discharge Measurement in Rivers Using Terrestrial and Unmanned-Aerial-Vehicle Imagery", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 24, pp. 1429-1445, 2020.
9. French, R. H., *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1985.
10. Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A., "Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Engineering Applications", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No.3, pp. 397-414, 1998.
11. Genç, O., Ardiçlıoğlu, M., and Ağralıoğlu, N., "Calculation of Mean Velocity and Discharge Using Water Surface Velocity in Small Streams", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 41, pp. 115-120, 2015.
12. Harpold, A. A., Mostaghimi, S., Vlachos, P. P., Brannan, K. M., and Dillaha, T. A., "Stream Discharge Measurement Using a Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) Prototype", *Transactions of the ASABE*, Vol. 49, No. 6, pp. 1791-1805, 2006.
13. Hudson, N. W., *Field Measurement of Soil Erosion and*

- Runoff, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, Rome, 1993.
14. Madadi, M. R., Dalir, A. H., and Farsadizadeh, D., "Investigation of Flow Characteristics Above Trapezoidal Broad-Crested Weirs", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 38, pp. 139-148, 2014.
15. Marjang, N., Calculated Surface Velocity Coefficients for Prismatic Open Channels by Three-Dimensional Hydraulic Modeling, Ph.D., Thesis, Irrigation Engineering, Utah State University, 2008.
16. Pektas, A. O., "Computational Modeling with Sensitivity Analysis: Case Study Velocity Distribution of Natural Rivers", *Neural Computing and Applications*, Vol. 26, pp. 1653-1667, 2015.
17. Plant, W. J., Keller, W. C., Hayes, K., "Measurement of River Surface Currents with Coherent Microwave Systems", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 43, No. 6, pp. 1242-1257, 2005.
18. Rantz, S. E., Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of Discharge, Geological Survey Water-Supply Paper, 2175. U.S. Government Printing Office, Washington, 1982.
19. Sun, X., Shiono, K., Chandler, J. H., Rameshwaran, P., Sellin, R. H. J., and Fujita, I., "Discharge Estimation in Small Irregular River Using LSPIV", *Water Management*, Vol. 163, Issue WM5, pp. 247-254, 2010.
20. Jourdain de Thiulloy, M., Dorward, M., Old, C., Gabl, R., Davey, T., Ingram, D. M., and Sellar, B. "On the Use of a Single Beam Acoustic Current Profiler for Multi-Point Velocity Measurement in a Wave and Current Basin", *Sensors*, Vol. 20, Issue 14, 3881, 2020.
21. USBR, U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation., Water Measurement Manual, Water Resources Publications Inc., Highlands Ranch, Colo, 1997.
22. USBR, U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation., Water Measurement Manual, Revised Reprinted. Washington, DC, 2001.
23. Weitbrecht, V., Kühn, G., and Jirka, G. H., "Large Scale PIV-Measurements at the Surface of Shallow Water Flows", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 13, pp. 237-245, 2002.
24. 王傳益、盧昭堯、徐享崑、馮德榮、蘇志強「聲波杜卜勒流速儀於臺灣河川流量」，*中華水土保持學報*，第 29 卷，第 1 期，23-32 頁，1998。
25. 臺灣省水利局，灌溉工程設計（下冊），中國農村復興委員會特刊，新 28 號，1978。
26. 朱木壽、黃煌輝、呂珍謀、宋長虹、蘇俊明，「非接觸式量測系統於河川流量觀測之應用」，*臺灣水利*，第 58 卷，第 3 期，26-33 頁，2010。
27. 李明靜，「河川表面流速與流量非接觸式量測方法之發展與應用」，國立成功大學水利及海洋工程學系博士論文，2003。
28. 李寶根，「流量測量時之浮標觀測法」，*臺灣水利*，第 13 卷，第 4 期，36-37 頁，1966。
29. 許盈松、連惠邦、林柏壽，「桃園大圳灌溉系統量水設備運用檢討改進之研究」，*臺灣水利*，第 48 卷，第 2 期，81-92 頁，2000。
30. 許盈松、童琮志、周湘俊、張國強，「微波雷達流速儀觀測特性研究」，*臺灣水利*，第 54 卷，第 3 期，82-91 頁，2006。
31. 陳彥璋、楊翰宗、郭振泰、郭廷鳴，「應用手持式聲波都普勒流速儀量測低水位之流量」，*臺灣水利*，第 56 卷，第 3 期，70-77 頁，2008。
32. 陳豐文、林修德、洪若彬、張雅婷，「非接觸式流速測定法之修正：表面流速及垂向流速之試驗分析」，105 年度農業工程研討會論文集，2016。
33. 黃偉哲，「水流通過透式橋墩保護工之流況分析」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，2002。
34. 楊翰宗、江介倫、陳彥璋，「河川於淺水流時流速儀涉水量測流量之研究」，*農業工程學報*，第 58 卷，第 4 期，23-32 頁，2012。
35. 農業工程研究中心，「山腳工作站苑裡圳流量率定」，AERC-08-RR-15，農業工程研究中心研究報告，2008。
36. 賴建信、許盈松，「普萊氏流速儀率定關係之研究」，*臺灣水利*，第 52 卷，第 1 期，83-92 頁，2004。

收稿日期：民國 110 年 01 月 05 日
修改日期：民國 111 年 03 月 16 日
接受日期：民國 111 年 03 月 31 日