

三維度魚道水理及魚體行進力能之數值模擬研究

Numerical Investigation on Three-Dimensional Fishway Hydrodynamics and Fish Passage Energetics

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士班研究生

顧可欣

Kc-Hsin Gu

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士班研究生

張高華

Kao-Hwa Chang

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張倉榮*

Tsang-Jung Chang

摘 要

本研究主要目的為研析上溯魚類在池堰式魚道流場中，採不同之上溯運動方式與不同上溯的路徑之行進力能比較。研究之魚種為粉紅鮭魚(pink salmon)，研究之魚道流場則使用三維度標準 $k-\epsilon$ 紊流模式計算模擬，搭配體積分率法來模擬具自由液面之二相流邊界條件，並再計算魚體在流場中逆流上溯所遭受之阻力與能量損耗。研究中先以 Ead (2004)所試驗之魚道縮尺模型，來驗證三種不同魚道設計在水流經堰體之流況與水位，繼而規劃真實尺寸之模式應用案例。本研究繼而藉由不同上溯路徑與上溯運動方式，透過魚體於水中力能之分析研究，並改良 Weihs (2000)提出的海豚跳躍前進耗能計算方式，將跳躍運動應用至魚道流場內，以進行各種上溯案例間能量損耗之比較。由研究結果顯示，池堰式魚道模式應用案例中，同一魚種之最省能之路徑，為魚體採跳躍上溯且近液面之路徑。

關鍵詞：池堰式魚道，標準 $k-\epsilon$ 紊流模式，自由液面，體積分率法。

ABSTRACT

The main purpose of this study is to discuss the trajectories of the migrating fish (pink salmon) tracing back to upstream through pool-and-weir fishway, and compares the energetics for various migrating motions. A 3-D standard $k-\epsilon$ turbulent model together with the volume of fraction (VOF) method is used to solve fishway hydrodynamics. The simulated flow-field results are next employed to estimate the force and energy acting on the fish body. The Numerical model is firstly verified by the reduced-scale experimental

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程系教授，10617 台北市大安區羅斯福路4段1號，tjchang@ntu.edu.tw

measurement of Ead *et al.* (2004). The numerical results are in good agreement with the experimental data in terms of water depths, flow velocities, and free surface profiles. A series of numerical scenario simulations are further conducted to simulate real-size fishways hydrodynamics. For the cases that fish is migrating in the pool-and-weir fishway, we modify the equations of dolphin dynamics (Weihs, 2000) to analyze the energy losses for various migrating motions. The simulated results show that the most economic fish energy passage in the pool-and-weir fishways is to take jump motion and to go through near the water surface.

Keywords: Pool-and-weir fishway, Standard $k - \epsilon$ turbulent model, Volume of fraction method (VOF), Free surface..

一、前言

台灣由於地勢陡峭、坡短流急且河川洪枯流量差異變化極大，為達到蓄水防洪的目的，於是在各河川中上游設置壩體擋水、防砂，卻也阻絕了洄游魚類上溯的途徑。根據林務局研究調查報告(1992)指出，1977年至1992年間台灣河川壩體興建約為3000座，但有設置魚道的壩體卻不滿100座。此種情況導致台灣原生洄游魚種無法溯游而瀕臨絕種，目前只剩十餘種洄游魚類可能使用魚道上溯遷徙，其餘皆僅出現在河口範圍內(胡等，1998)。

現階段魚道主要可分為三種類型，包括池堰式魚道(pool-and-weir type fishway)、豎孔式魚道(vertical-slot type fishway)和丹尼爾式魚道(Denil type fishway)等，如圖1所示。池堰式魚道亦可稱為階段式魚道，即在渠道中，以等距設置堰體，堰與堰間成池。由於池內呈滿水狀態才能提供上溯，故較適合設置於流量較大而穩定的河川，也因為迴游時需先越過堰體，故以採跳躍的方式進行上溯的魚類為主。本研究即採用池堰式魚道作為研究模擬之對象，針對三種不同設計形式之池堰式魚道進行流況水理驗證，並設計與現地大小相同之魚道進行魚體上溯跳躍力能之分析。

魚類上溯運動主要分為突泳(brust)、巡航(coasting)、跳躍(jump)、休息(rest)等四部份。一般來說，魚類突進泳速最大可達每秒10倍的魚

身長(10L公尺/秒)，巡航泳速則為每秒2-4倍的魚身長(2-4L公尺/秒)(林，1999)。目前台灣對洄游魚類之突進泳速、巡航泳速、跳躍高度、洄游分佈與魚種棲地習性等較無詳細的數據資料與討論，在魚類利用魚道上溯的研究方面，吳等(1998)以台灣石鱖(*Acrossocheilus paradoxus*，俗名石斑)為對象，探討其在池堰式魚道中不同位置所呈現之洄游泳速。林等(1999)則以池堰式魚道、潛孔式魚道、豎孔式魚道的水工模型試驗，來模擬在不同隔板設置與流量下的水位、速度與流場。其餘研究則多以實驗魚種成功上溯與否的隻數比例，來探討魚道在不同型式、坡度、流量下的適用性。如胡等(1998)在八寶圳階段式魚道的設計與試驗，討論有潛孔與無潛孔設計的階段式魚道，對於魚類上溯的比較與影響等等，多數研究以不停重複觀測，極為繁複之魚種上溯實驗來驗證魚道之設計，而少以魚道水理的觀點來對魚道內流場的狀況加以分析。而水理方面的資料也多以理論值亦或是經驗公式來計算，卻忽略了不同地區與不同環境下的限制。

魚道因人工構造物(堰體)的座落位置與設計，再加上坡度與流量的變化，使得魚道內部流場水理極為紊亂與複雜。由於成魚在逆流上溯時，須先累積足夠能量，來提供上溯過程中運動能量的消耗，在流速過快的魚道，常會導致魚類在上溯過程中，能量不足而無法成功迴游；但流速太慢、流量過小、亦或是坡度過於平緩的魚道，則無法吸引魚類上溯的意願。所以魚道內除

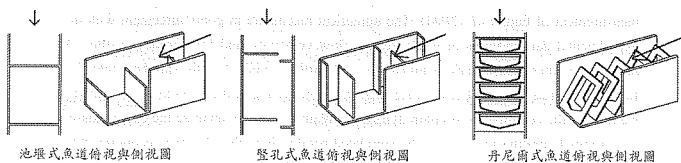


圖 1 魚道樣式示意圖

考量流速、流量與坡度的設計，也應將洄游魚種的上溯能量列入考慮，避免能量過度消耗而無法完成上溯運動。目前國內魚道水理方面的研究仍在初步發展的階段，而國外早在十九世紀中葉即開始魚道水理的分析研究。1988年，Rajaratnam與Katopodis進行池堰式魚道流況的分析，將池堰式魚道在不同流量、坡度、隔板高、隔板間距的情況下，依溢流水深的不同，而區分成跌水流(plunging flow)、表面流(streaming flow)與介於兩者間之過渡流況(transition flow)三種(如圖2所示)，並以無因次流量的經驗公式來定義各種流況可能發生的流量範圍。Ead等(2004)則繼續深入研究池堰式魚道所產生的流況，以速度剖面詳細呈現不同坡度、流量、隔板間距與隔板高度條件下的流場與水深，將先前定義的三種流況更細分為八種，並以實驗率定修改無因次流量經驗公式來重新定義其流況。

雖魚道水理研究已有長遠的歷史，但直至近年才逐漸發展數值計算模式來模擬魚道內的流場，用以與傳統需繁複實驗步驟，才能得到流場數據資料相較下，更為省時而經濟。但由於魚道中人工構造物的設置(隔板、堰體)與傾斜的坡度等不同條件，使得魚道內流場極易產生複雜的紊流環境，空氣與水交界面的變化非常劇烈，導致自由液面的模擬更為困難。Liu等在2002年同時進行實驗與二維數值模擬，在流場雷諾數相同下研究渠流通過三種不同堰高的半圓堰(semi-circular weir)後所造成的流場情況。並以VOF捕捉自由液面表面流、表面波動與跌水流的狀態，再以流場參數(水深、流速、雷諾數、福祿數)、分離點與聚合點、底床剪力分佈等等進行流場的分析與比較。

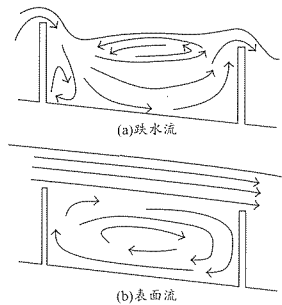


圖 2 池堰式魚道之流況剖面

李(2002)則進一步以三維CFD流體力學模組STAR-CD來計算明渠流碰撞堰體所造成不連續之自由液面。並以不同之福祿數來討論不連續自由液面其水位變化所採用的體積分率值。2004年，Faure等更進一步以開放式渠道計算三維自由液面流場，並發展二相流體，研究流體通過類似堰體的阻礙物，觀察水位的變化。

魚道數值模擬方面，許與蘇(2003)以白金漢無因次分析魚道參數，建立豎孔式魚道內無因次水深公式，再配合二維數值模式模擬魚道水深的變化。Khan(2006)則整合三維豎孔式魚道的CFD模擬，並加入自由液面的邊界條件來求解流場，他建立約五十萬個交錯式網格，用以模擬底床坡度10%，六組豎孔式擋板所隔成的七個連續池，結果並僅取用魚道中間第四池來討論，避免初始條件對流場的影響。為了研究多相流(multi-phase)與體積分率問題，Khan採用STAR-CD模組來表現自由液面，流場利用 $k-\epsilon$



紊流模式來進行模擬，並以二階的精準度來求解統御方程式(governing equation)。

利用數值模式模擬魚道流場，繼而分析結果及探討魚道水理，是現在研究主要發展趨勢，而上述多數研究模擬的結果與實際物理現象也頗為相近，證實利用數值模式來模擬魚道內水理的分析，應是未來魚道設計的一種主流。但多數魚道數值研究仍以豎孔式魚道為主，國內外針對池堰式魚道所進行之數值研究仍較不足，本研究針對三維池堰式魚道流場進行模擬分析，並搭配魚體上溯來分析魚種上溯之耗能與最佳化路徑的選擇。

除模擬魚道流況、進行水理分析外，目前以生物上溯配合魚道數值模擬的部份卻還未有深入的討論。最早研究魚體上溯之實驗是在 1963 年，Sundnes 以繩拖拽的方式，推估鮭(salmon)與鱈(herring)在流場雷諾數約為十萬時的阻力係數(C_d)。而在 2006 年，Khan 以數值模式模擬豎孔式魚道，並進一步研究洄游所需之耗能；首先 Khan 選擇三條可能上溯路徑，假設上溯泳速為定值，再以模擬流場的速度與假設泳速兩者間之相對速度，來推算上溯所需時間、所受之阻力、能量之損耗、功率等等，成功表現出三條路徑之差異。但 Khan 的研究只針對豎孔式魚道，而未對魚體以跳躍運動上溯來進行討論。故本篇將以數值模式模擬池堰式魚道之水理，並分析不同上溯運動型式耗能的比較。

跳躍上溯的研究方面，本研究參考 Au 與 Weihs (1980)提出海豚在高速前進時，採跳躍之運動方式可節省能量之觀點，假設魚身在空氣中所受之阻力會遠小於在水中之阻力，來計算魚身在水中之能量損耗對比於跳躍時所消耗之能量。其結果證實，在相同距離之下，跳躍所需附加能量之消耗，會小於在水中受阻力所消耗的能量。2002 年 Weihs 更進一步提出在魚體周圍流場流速為定值狀態下，海豚的前進運動，在跳躍出水時達到最大速度，在空中並無速度與能量之損耗，而以相同之最大速度入水，再進行減速；而減速時並未耗費能量，直至速度達到最低巡航速度為止開始進行加速，以此三種運動模式

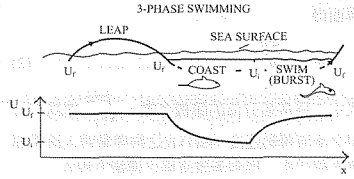


圖 3 海豚前進之運動模式(節錄自 Weihs, 2002)

成一循環為其運動模式，如圖 3 所示。

因此，本研究將針對 Weihs 所提出跳躍之觀點，並搭配 Khan 所估計魚體在水中所受阻力之計算，改良 Weihs 假設周圍流場為等流速之理想狀態，以三維計算流體動力學模組 Fluent6.1 所模擬出之流場流速，計算魚體在跳躍上溯時整體運動之耗能狀況，來進行分析與比較。

二、三維度魚道環境流場之模擬

1. 魚道平均流場統御方程式

由於魚道中人工構造物的設置(隔板、堰體)與傾斜的坡度，使得魚道內流場極易產生複雜的紊流環境，其中包含水流正面迎擊構造物時，上下自由液面劇烈的波動，及速度梯度和底床剪力的作用下，造成流場分離所引發的尾流等。紊亂的流況導致流場更難以分析，再加上水與空氣二相流的模擬，使自由液面產生阻尼效應(damping effect)。為了分析這些流況，本研究將採用 $k-\epsilon$ 紊流模式及體積分率法來表現。

為求解魚道紊流流場所採用之統御方程式包含連續方程式(continuity equation)與三個方向之動量方程式(momentum equation)，1895 年英國學者 Reynolds 提出紊流流場中所有物理量的瞬時變化(如速度、壓力等)均可用時間平均與擾動量來表示：

$$U_i = \bar{U}_i + u', \quad P_i = \bar{P}_i + p' \dots\dots\dots(1)$$

其中 U_i 為在 i 方向的速度， \bar{U}_i 為在 i 方向的平均速度， u' 為擾動速度， P_i 為在 i 方向的壓力， \bar{P}_i 為在 i 方向的平均壓力， p' 為擾動壓力項。其中瞬時變化之擾動量 u' 是由隨機之空間與時間計

算而得：

$$u' = \xi \sqrt{u_i'^2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

式中 ξ 為常態分佈的隨機參數， $\sqrt{u_i'^2}$ 則為均方根之紊流擾動速度。將(1)式之物理量帶入流場連續方程式後，得到紊流流場之連續方程式：

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

另將(1)式之物理量帶入動量方程式後，即可得到雷諾平均那維爾-史托克方程式(Reynolds-averaged Navier-Stokes equation)：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i' u_j'}) + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (4)$$

式中 ρ 為常數流體密度， ν 為黏滯係數， g_i 為重力項。而式中 $u_i' u_j'$ 項，是帶入紊流擾動速度後，所產生之雷諾剪力張量表示式(Reynolds stress tensor)，為紊流所造成的動量通量。

綜觀上述方程式，發現三維之紊流連續與動量方程式共四個方程式，但卻含有十個未知數 (\bar{U}_i 、 \bar{p} 、 $\overline{u_i' u_j'}$ 與 $u_i'^2$)，無法直接以四個方程式來求解流場。故應先建構計算紊流通量 ($\overline{u_i' u_j'}$ 、 $u_i'^2$) 之數值模組，才能再進一步求解平均速度與平均壓力，此問題又稱為紊流的閉合問題(朱，2003)。

計算紊流通量方面，Boussinesq (1877)建議可令紊流通量與速度梯度成正比：

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

式中 ν_T 為紊流黏滯係數(turbulent viscosity)；將上式替代紊流通量帶入(4)式，化簡後得到：

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_T \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) + g_i \quad \dots \dots \dots (6)$$

以上閉合問題解法將原本十個未知數，化減剩餘 5 個未知數後 (\bar{U}_i 、 \bar{p} 、 ν_T)，再進一步利用紊流模式計算流場。流場計算之模式方法很多，進行計算前須先將流場以網格進行切割，再利用數值方法進行求解，如有限差分法(finite difference method)、有限元素法(finite element method)、有限體積法(finite volume method)等等。目前工程最常見之紊流模式可分為兩種：只能解平均流場的混合長度模式(MLS)、 $k-\epsilon$ 模式(KES)、雷諾剪力模式(RSMS)，與可解瞬時流場的大渦流模式(LES)、直接數值模式(DNS)等。不同模式所適用的目的也盡不相同，LES 與 DNS 雖較 MLS、KES 與 RMSM 能模擬出瞬時的流場，但以目前電腦的容量與計算速度，LES 與 DNS 卻需耗費大量的運算時間，甚至是無法負荷的龐大計算量。故紊流模式的選擇，應以所需目的、精確度與流場狀況來決定。

Khan (2006)以標準 $k-\epsilon$ 紊流模式 (standard $k-\epsilon$ turbulent mode)配合有限體積法來模擬三維暨孔式魚道其流場之速度、水深等水理情況，其研究計算結果與實驗值對照相當吻合，故本研究沿用標準 $k-\epsilon$ 紊流模式來進行魚道流場的模擬，除連續方程式與三維動量方程式外，又新增紊流動能方程式(turbulent kinetic energy equation) (7 式)與動能消散率方程式(turbulent kinetic dissipation equation) (8 式)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{C_\epsilon} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \\ + \nu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{C_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ + C_{\epsilon_2} \frac{\epsilon}{k} \nu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon_3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

式中 k 為紊流動能(turbulent kinetic energy)、 ϵ 為紊流動能消散率(turbulent kinetic dissipation)，而

模式參數 $C_\mu = 0.09$, $C_{1r} = 1.44$, $C_{2r} = 1.92$, $C_{1r} = 1.0$, $C_\epsilon = 1.3$, 均為由實驗驗證所得之經驗值, 故標準 $k-\epsilon$ 紊流模式為半經驗式紊流模式 (Adams 等, 1990)。

又 Launder 及 Spalding (1974) 提出大渦流尺度 (l) 應與紊流動能及紊流動能消散率有關, 而紊流黏滯係數又為紊流動能及紊流動能消散率的函數, 其關係定義如下:

$$l = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(10)$$

故紊流動能 (k) 愈大或動能消散率 (ϵ) 愈小, 則紊流黏滯係數愈大 (朱, 2003)。而紊流擾動速度能反映出流場的流況, 當流體速度增加時, 紊流動能隨即增強, 故可藉由 $k-\epsilon$ 紊流模式求得之 k 值來分析魚道流場紊流情形:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad \dots\dots\dots(11)$$

最後, 包含連續、三方向之動量、紊流動能、紊流消散率、紊流黏滯係數, 七個方程式, 對應七個未知數 ($\overline{U_i}$ 、 \overline{p} 、 k 、 ϵ 與 ν_T), 即可進行流場之求解。

2. 自由液面平均流場之統御方程式

自由液面的邊界條件設置可分為兩種, (1) 對稱性邊界條件 (symmetry of boundary conditions), (2) 體積分率法 (volume of fluid technique)。對稱性邊界條件即假設通過此邊界的所有物理梯度量為零, 假設自由液面邊界不會隨時間變動, 僅與初始條件有關。但實際流場的自由邊界會隨著時間而改變, 必須經由控制方程式求解才能決定, 所以對稱性的固定液面對於自由邊界的模擬較不精確, 不符合魚道自由液面模擬的條件。

而體積分率法 (volume of fluid technique, VOF) 是由 Hirt 與 Nichols (1981) 所提出, 其原理利用空氣與水的流體控制方程式形式相同但因物理特性不同的差異, 以所佔比例方式帶入其控制方程式。如何決定控制體內物理性質所佔比例,

則需透過「體積分率」來決定。其定義如下 (Ma 等, 2002):

$$F = \frac{\delta\Omega_{water}}{\delta\Omega_{cell}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中, $\delta\Omega_{water}$ 為控制體積的大小, $\delta\Omega_{cell}$ 則為控制體積內水的體積, F 為水與空氣之質量比例。由上式可知, 當 $F = 1$ 時, 代表控制體積內充滿了水; 當 $F = 0$ 時, 則表示控制體積內充滿了空氣; 而當 $0 < F < 1$ 時, 及意味著在這個控制體積內有自由液面的存在。若要定義流體體積的函數, 則根據不可壓縮流理論及質量守恆定理知其物質導數必為零:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

計算時配合速度場及速度邊界條件, 可得流體體積在整個流場中的分佈情形, 藉由流體體積的輸送過程, 判斷自由液面的位置。使用體積分率法的優點, 在於避免了處理自由液面邊界的複雜設定, 同時又可以得到隨時間而變的自由液面邊界。但進行模擬時, 由於魚道內流場碰撞嚴重, 水與空氣接觸面收斂極不穩定而易發散, 往往要縮短時間間距 (time step), 使得模擬時間比對稱性邊界條件模擬多出五至六倍長的時間, 這是此方法最大的缺點 (陳, 2005)。

但由於魚道是包含兩相介質之區域模擬, 其空氣與水交界處的流場控制方程式, 除皆滿足連續方程式、動量方程式、紊流動能方程式及紊流動能消散率方程式之外, 應必須同時求解包含二相的複雜流場, 故搭配體積分率法可將自由液面平均流場之控制方程式改寫如下:

A. 連續方程式及動量方程式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{U_i}}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \overline{U_i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{U_i U_j}}{\partial x_j} = & -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \nu_T) \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \dots\dots(15) \end{aligned}$$

式中 t 代表時間, \overline{U}_i 代表 i 方向的平均速度 ($i=1, 2, 3$), \overline{P} 為平均壓力, ρ 為流體密度, g_i 為不同方向之重力加速度, k 為紊流動能, ϵ 為紊流動能消散率, ν_T 為紊流運動黏滯係數。為了同時求解包含二相介質的流場, 以上參數皆須符合下列規範:

$$\rho = \gamma_0 \rho_0 + \gamma_1 \rho_1 \quad \nu_T = \gamma_0 \nu_{T0} + \gamma_1 \nu_{T1}$$

$$\nu_T = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中, γ 為不同物理性質的介質體積相對於控制體積之比, 而 α 則代表不同之物理介質, 當 $\alpha=0$ 為空氣, $\alpha=1$ 則是為水; C_μ 等於 0.09, 為半經驗係數。

B. 紊流動能方程式及動能消散率方程式則改寫如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{U}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\rho \nu_T}{C_\mu} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$

$$+ \rho \nu_T \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{U}_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\rho \nu_T}{C_\epsilon} \right) \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right]$$

$$+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \rho \nu_T \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

.....(18)

其中, C_μ 、 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 為 Prandtl 常數, 分別為 1.3、1.44 與 1.92。

3. 底床邊界與邊牆函數

標準 $k-\epsilon$ 紊流模式採用時間平均來進行流場的分析, 只適用於計算非均質但等向性紊流。但在魚道流場模擬近邊壁處, 紊流擾動速度會受底床粗糙度、不可滑動邊界條件等因素影響, 導致急速變化的速度梯度而阻滯; 遠離邊壁之水平速度卻較不受影響, 使得流場呈非等向性。故在靠近邊壁處, 本研究採用邊牆函數(wall function)修正 $k-\epsilon$ 紊流模式近邊牆處的誤差:

$$\frac{\overline{u}_i}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y_b u_* E}{\nu} \right) \quad \dots\dots\dots(19)$$

上式中, \overline{u}_i 為平行邊牆方向之平均速度分量, u_* 為邊牆剪力速度 ($u_* = C_\mu^{1/4} \cdot k^{1/2}$), κ 為 Von Karman 常數(≈0.41), ν 為運動黏滯係數, y_b 為與邊牆之距離; E 為粗糙參數, 由 K_s^+ 粗糙雷諾數(roughness Reynolds number, $K_s^+ = \frac{K_s u_*}{\nu}$)所界定, 其中 K_s 為粗糙高度 (roughness height), 如底床非常平滑時, 則 K_s 為零, 而 E 定義如下:

$$E = \begin{cases} 9.0 & \text{if } K_s^+ \leq 5 \\ \frac{1}{0.11 + 0.033 K_s^+} & \text{if } 5 < K_s^+ < 70 \quad \dots\dots(20) \\ \frac{30}{K_s^+} & \text{if } K_s^+ > 70 \end{cases}$$

魚道為設置在斜坡上的渠道, 故其流速受原有速度再加上重力加速的影響, 但因與隔板的碰撞行為, 而造成能量的消耗, 進而減緩了休息池內的流場速度。不過因強烈的碰撞, 也相對導致流場的紊亂, 形成複雜而難以求解的參數。再加上自由液面可移動式邊界條件、二相流體模擬、不同設計模式的隔板與設置位置等等, 都加深網格切割的困難度與傳輸過程疊代誤差大的問題。

4. 數值方法與數值模擬架構

數值模擬分析的過程可分為三部分: 模型架構建置與網格劃分之前置作業、採用模組進行數值模擬之中期作業、與將模擬結果資料予以出圖, 並加以分析之後置作業。本研究之前置作業, 採用 Gambit 軟體來數化魚道模型, 並採交錯式格網(staggered building)來進行網格的劃分。由於網格切割的大小與密度, 會影響到模擬結果之精準度、時間間距的大小、模擬時間的長短、流場收斂程度、紊流的強度等等, 所以在網格的建構方面, 必須參考上述條件作為依據, 並在邊壁處網格進行加密處理, 以加強流場流經邊壁的正確性。

模型網格建置完成後, 即輸入至 Fluent 6.1 計算流體動力學模組來進行流場分析, 在非穩態

之流場下，採用離散法來求解，再搭配有限體積法與二相流的設定，來針對複雜而紊亂的流場進行計算。此外，要注意自由液面加上非穩態流場，容易導致運算結果收斂性不佳。疊代不穩定，為避免發散情形發生，紊流強度及瞬時流場的時間間距，必須適當加以控制。再搭配有限體積法的網格系統和交錯式配置方式控制體積之數值計算方法，即在網格幾何中心處定義壓力或其他純量計算，並在網格兩組對應邊界面上分別定義各座標方向對應的速度分量，控制體積的選取以交錯式配置方式，令壓力的節點與速度分量的節點為中心，使成為互相重疊且互相交錯的控制體積。此搭配方式可有效的避免在計算不可壓縮流時，非物理性的速度分量或壓力震盪現象發生(謝，2004)。

至於邊界環境設定方面，主要分成三種分別予以討論，(1)魚道渠底、邊壁及隔板堰體邊界環境設定。(2)自由液面邊界環境設定。(3)入流及出流邊界設定。在魚道渠底、邊壁及隔板堰體邊界環境設定上，均採用不滑動(non-slip)邊界之設定，亦即邊界設定為不滑動面，流體與其接觸面所呈現的流體速度皆為零($\vec{u} = 0$ 、 $\vec{v} = 0$ 、 $\vec{w} = 0$)，再搭配邊牆函數，使其吻合魚道流場情形(陳，2005)。而自由液面方面每前進一個時間間距進行疊代時(iteration)，都必須求解體積分率連續方程式，再繼續求解流場控制方程式。而為避免初使條件對流場之影響，在分析時採用較接近渠道中間之休息池，避免出入流設定對流場產生影響。

放鬆因子方面，李(2002)利用 Star-CD 在進行水躍模擬時，紊流動能與紊流動能消散率分別採用 0.014833 與 0.031613 (福祿數為 6.65 時)。但本研究進行 Fluent 模組模擬試驗時，卻發現 Fluent 模組使用過小之紊流動能與紊流動能消散率對流場之流況變化差異並不大，但卻造成流場的不穩定且極易發散，需縮短時間間距而導致雙倍以上之模擬時間。Fluent 6.1 使用者手冊提出，在模擬上利用離散法求解非穩態流場時，紊流動能與紊流動能消散率之取用，各以 0.5 為最佳值，故本研究之紊流動能與紊流動能消散率採用

0.5 來進行模擬，模擬驗證之流況與實際試驗狀況也頗為符合。

控制方程式的離散方法及收斂性方面，本模式壓力項採用 Body Force Weighted 法，較傳統 Standard 法更適合模擬二相流自由液面邊界，易於達到良好收斂的結果，並採用 PISO 法中的歪斜修正(skewness correction)及鄰近修正 (neighbor correction 或稱為 moment correction)來模擬複雜粗糙的網格及暫態的自由液面流場。因其中含有壓力修正方程式，在經過不斷反覆的迴圈計算中，使速度最終能滿足連續及動量方程式，並且修正了每個網格面的質量通量，即使是因為複雜的幾何圖形所造就的粗糙扭曲網格；雖較傳統 SIMPLE 法耗費模擬時間，但卻能讓收斂較迅速且減少疊代次數。再者，為了達到模擬最佳化，不同案例的時間間距設定為 0.001 秒，並且配合自由液面的疊代準確度，每個時間間距疊代 30 次，所有數值之運算結果(包含三個方向的速度分量、連續方程式、紊流動能及紊流消散率等等)，其前後誤差必須小於 10^{-6} ，並防止數據變化快速過大而導致發散。經過以上個個環節的設定，最後配合自由液面所需要的疊代穩定度，方能完善的模擬魚道非穩態之紊流流場。

5. 魚群上溯耗能之計算

魚類在不同流場、不同魚種亦或是不同型的設計，均會影響其上溯運動的組成。池堰式魚道因堰體的設置，除流量較大形成表面流時可能不需跳躍外，均須採用跳躍方式來洄游。故以下將以跳躍上溯與只需考慮在水中所受阻力之非跳躍上溯兩種運動方式，來探討能量的損耗。而真實魚體在上溯時多少會對局部流場產生影響，進行耗能分析前，本研究先行假設上溯運動對流場影響極小，並予以忽略。

(1)非跳躍方式上溯之耗能

此種方式只需考慮到魚體在水中所受阻力之影響，由前述之三維 CFD 模式，可模擬出魚道流場各位置之流速變化，再利用模擬結果配合力能分析，即可計算上溯能量之消耗。Vogel (1994)提出魚體於水中上溯所受的阻力可由下式

表示：

$$F = 0.5C_d \rho A_s (U_w - U_f)^2 \quad \dots\dots\dots(21)$$

式中 F 為魚上溯所受之阻力； C_d 為阻力係數，由摩擦阻力係數 C_f 與形狀阻力係數 C_p 所構成 ($C_d = C_f + C_p$)，一般來說 C_p 值小於 C_f 值，故在紊流流場中阻力係數通常可用 $C_d = C_f + C_p \approx 1.2C_f = 0.0888R_e^{-0.2}$ 來表示 (Pettersson 與 Bronmark, 1999; Vogel, 1994)； ρ 為液體密度， A_s 為迎水面面積； $U_w - U_f$ 為流場和魚上溯泳速間的相對速度。利用 CFD 所計算而得之流場流速，再配合魚體上溯之泳速，即可求得上溯所受之阻力。

而所消耗之能量 (E) 即為阻力對路徑 (S) 的積分值：

$$E = \int F ds \quad \dots\dots\dots(22)$$

(2) 跳躍方式上溯之耗能

跳躍運動上溯方式除需考慮到魚體在水中所受阻力之影響外，還需探討跳躍離開、進入水面時因質量附加所造成能量的損失。採跳躍前進所受阻力之計算是由 Weihs (2002) 所提出，假設流場流速為定值時，求出海豚在前進運動中，利用減速、加速、跳躍為一循環之運動方式之總耗能。本研究採用 Weihs 所提出跳躍之計算方式，並對於其研究中未考慮流場變化對魚體的影響加以改進，配合三維 CFD 所模擬出之魚道流場，進一步求得魚類上溯跳躍之耗能。

由 21 式中可知，魚體溯游時所受外部流體之阻力為 $F = 0.5C_d \rho A_s (U - U_f)^2$ (U 為流場的速度，在這裡分別為水或空氣中的速度)。在一般環境下，兩者因物理性質的不同 (如 $\rho_{air} / \rho_{water} = 1/800$ 等)，阻力比則為 $F_{air} / F_{water} = 1/10800$ ，可看出水與空氣兩者間阻力差異極大，可僅考慮在水中所受之阻力，忽略空氣中所受阻力 (Weihs, 2002)。而跳躍路徑是以拋物線來呈現，其跳躍距離 (L_j)、高度 (H_j)、時間 (T_j) 可以下表示：

$$L_j = \frac{U_f^2}{g} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$H_j = \frac{U_f^2}{2g} \sin^2 \theta \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$T_j = \frac{2U_f}{g} \sin \theta \quad \dots\dots\dots(25)$$

其中 U_f 為離開與進入水面時之速度 (因忽略能量之損耗，故離開與進入水面之速度視為相同)； θ 為跳躍之角度，一般跳躍角度大約介於 $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 。

雖因空氣阻力極小而可以忽略跳躍時在空氣中所受之阻力，能量的損失幾乎為零，但在離開與進入水面時，由於水面的潑濺與水所附加在魚體身上的質量，卻是造成跳躍時能量消耗的主因。故跳躍的能量損耗 (E_j) 為脫離水面與進入水面所耗能量之和：

$$E_j = \left(\frac{\beta m M U_f^2}{2} \right)_{exit} + \left(\frac{m M U_f^2}{2} \right)_{entry} \quad \dots\dots(26)$$

式中， β 為表現採上溯運動時阻力的比率 (為魚身長與魚身最大直徑之比；Fish 與 Hui, 1991)，一般約介在 1.5~4 之間 (Lighthill, 1971; Hui, 1989)， m 為附加質量係數 ($m \approx 0.2$)， M 則為魚體之質量。求得跳躍之耗能，再加上水中迴游因阻力所產生之能量消耗，即可得知魚體在跳躍上溯時所消耗之總能量。

三、魚道水理特性之驗證

本研究首先進行池堰式魚道之流場驗證，分析案例是以 Ead 等 (2004) 之縮尺模型試驗來作為驗證。Ead 等在 2004 年設計長、寬、高分別為 6 公尺、0.56 公尺和 0.6 公尺的池堰式魚道，渠中堰體隔板厚度為 0.01 公尺；在渠尾設置儲水槽，並利用幫浦自儲水槽抽取定流量注入渠道上游，以維持渠道中流量之穩定。渠道坡度可自行調整，最大坡度可調至 30%；而隔板高度有 1、3/4、1/2 三種表示方式，分別代表 0.141 公尺、0.106 公尺與 0.071 公尺；隔板間距則有 A、B、C、D 四種距離設定，分別代表 0.685 公尺、0.335 公尺、0.166 公尺、0.077 公尺；流量之施放可介於 0.005~0.165 立方公尺/秒，用以測定在不同流量、不同坡度、不同隔板高度與間距的情況下，池堰式魚道所產生之流況。在本研究中，網格的切割密度在接近構造物時予以適當加密，使邊界

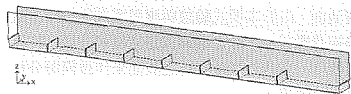
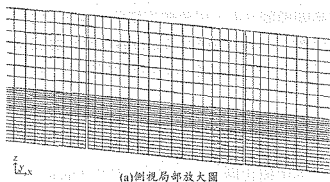
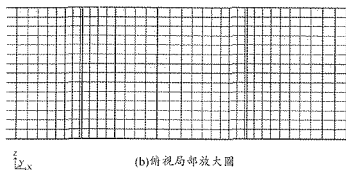


圖 4 池堰式魚道驗證建構圖(以 1WA10 為例)



(a)俯視局部放大圖



(b)側視局部放大圖

圖 5 池堰式魚道不均勻隔網建構圖(以 1WA10 為例)

層的擾動流況模擬的更為確實，並增加其收斂性和模擬真實性。

本驗證採用對照之試驗，分別為產生跌水流況之 3/4WA10-035 設計(其代表意義為 3/4:堰高 0.106 公尺，W:無潛孔之池堰式魚道，A:隔板間距為 0.685 公尺，10:渠道坡度為 10%，035:入流流量為 0.035 立方公尺/秒)與產生表面流況之 1WB10-065 設計兩種，魚道架構如圖 4 所示:考慮初始條件的影響，試驗與驗證均取較遠離出、入口之中間池來進行討論，而入口處採用自由堰流方式注入流量。將模擬而得之流速、水位高、流場分佈狀況與試驗進行比較，探討不同設計下池堰式魚道所產生的不同流況。

圖 5 則為池堰式魚道之網格俯視、側視配置圖，每一驗證網格均控制在 50,000 格以下，網格大小小至 0.01 公尺，最大不超過 0.1 公尺，接近構造物處之網格予以加密，以達到更精確之碰撞

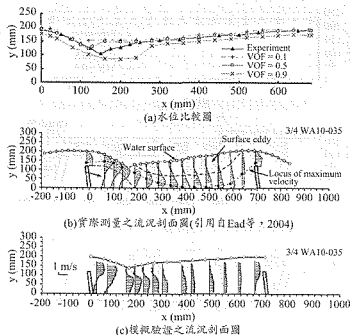


圖 6 試驗案例 3/4WA10-035 流場變化圖

波動模擬。圖 6a、7a 為 3/4WA10-035 與 1WB10-065 實驗與數值模擬驗證在 $y = 0.28$ 公尺(渠道中央)平面之水位比較圖; 6b 與 7b 為實驗在 $y = 0.28$ 公尺平面之流場剖面圖; 6c 與 7c 則為模擬驗證在 $y = 0.28$ 公尺平面之流場剖面圖。

由圖 6 可看出，當流量較小、隔板間距較大、亦或堰體高度較低時，渠流流經堰體會形成自由跌水流，堰流下方則易形成一順時針渦流區，依自由跌水位置之不同而影響下方渦流之大小。又因過堰時跌水流速增快形成超臨界流，使跌水流流至休息池時，呈現超臨界流進入亞臨界流的流況，而在兩種流況交界部分(接近液面處)形成液面水躍。但當流速增大，亦或隔板間距縮短、堰體高度較低時，堰流則以自由表面流的形式直接流過休息池而不會形成跌水狀態，池底則因表面流的帶動，呈現上下順時針方向的對流循環(如圖 7 所示)。

在水位方面，採用體積分率 (VOF) 為 0.1、0.5 與 0.9 三種體積分率值來進行數值模擬驗證與實驗的分析比較，結果發現水位趨勢與實驗極為吻合，其中又以體積分率 (VOF) 為 0.5 時之模擬液面最為接近實驗之水位高(參考圖 6a、7a)。而在流場分析方面，過堰流速的增加、堰後渦流的形成、整體流場流速的變化，大致均與實驗相符合，但在跌水流況液面水躍的渦流範圍方面，

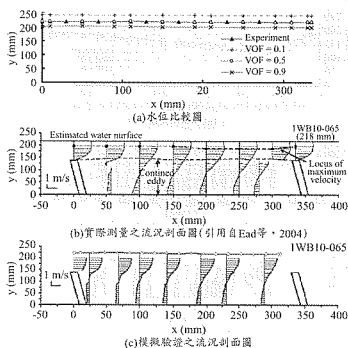


圖 7 試驗案例 IWB10-065 流場變化圖

卻不盡理想(如圖 6c、7c)。相較於實驗，模擬水躍之渦流所呈現的範圍略小，流況較類似於 Ead (2004) 所提出由跌水流況轉變為表面流況的過度流況(plunging transitional flow)。Sarker 與 David 在 2002 年曾提出，應用 Fluent 數值模組，採標準 $k-\epsilon$ 紊流模式與體積分率法來模擬二維液面水躍時，確實可得到與真實現象極吻合的結果，但在三維模擬分析方面，模擬結果卻不甚滿意。針對渦流範圍模擬誤差進一步討論，可推論由於本研究使用模組進行數值模擬時，對夾氣現象並未做詳細分析，而液面水躍的產生為水與空氣兩相間極劇烈的交替現象，致使模擬結果較真實現象產生誤差。

由以上驗證結果可知，大致上數值模擬的結果與試驗之物理現象均十分吻合。在水位方面，均極接近真實試驗之水位，其中又以體積分率 (VOF) 為 0.5 之體積分率值所呈現之自由液面最為接近實際液面。而李(2002)在其論文中提出，在兩種不同的福祿數(Froude Number)的流場情況下($Fr = 2.9$ 與 $Fr = 6.65$ 兩種流況)，較低福祿數之流場，其自由液面的呈現在不同體積分率下，水位變化差異不大，故可選擇 VOF 為 0.5 作為模擬液面；而福祿數較大之流場，則因低體積濃度值其波前之流場易受擴散效應影響的緣故，所以須取用較高之體積分率值(約 0.7 至 0.8)來表現模

擬液面。由於本模式驗證與應用案例所設計之流場福祿數較小，故之後模式應用案例方面，將採用體積分率(VOF)為 0.5 之液面來作為模擬分析之水位高度。

流場流況模擬方面，池堰式魚道在表面流流況的模擬亦相當一致，但對跌水流之液面水躍渦流範圍模擬方面，現象較不精確。故在之後模式應用案例方面，池堰式魚道將採用表面轉換流況來避免處理液面水躍，減少數值模擬所可能造成的誤差。

四、模式應用案例設計

經由模式驗證結果證實，利用 Fluent 6.1 模組模擬魚道流場，大致上均能完整的呈現出與真實流場極相似之流況，故在模式應用案例方面，將繼續使用此模組來作為模擬的工具。在探討不同流況與運動方式之上溯路徑中，本研究之案例設計為了更符合真實魚道之環境條件，模擬魚道均以現地尺寸之大小來進行設計。本研究重點將在不同上溯路徑與不同運動方式下，對魚體上溯之能量損耗情形進行分析與討論。並藉由路徑設計之軌跡長度、不同路徑所遭遇的流況、整體上溯所花費之時間、整體耗損之總能量、運動的方式與上溯所使用之功率等影響因素，來計算魚種洄游之較佳路徑。

1. 魚道設計與流況模擬分析

本研究進行池堰式魚道流場的模擬，採用 Khan (2006)試驗時所設計之尺寸大小，即渠道整體長、寬、高分別為 12 公尺、1.8 公尺與 3 公尺，渠道之坡度設為 10%，所劃分之休息池長度均為 3 公尺，堰體厚度為 0.15 公尺，堰高 1.5 公尺；入流處之流量亦使用 Khan 在試驗中所設計之流量，為 1.53 立方公尺/秒，並採用自由堰流之形式流入，其建構如圖 8 所示。

為兼顧數值準確性與計算效率，本研究採用不均勻格網建構方式進行數值計算，針對接近構造物(隔板與邊壁)區域，網格加密；反之，離構造物較遠處，則網格漸疏；且所有案例網格數皆控制在 10 萬格以下，如圖 9 所示。

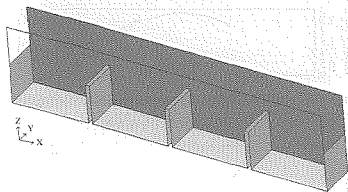
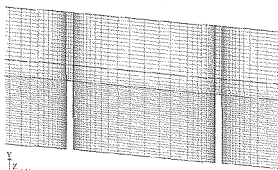
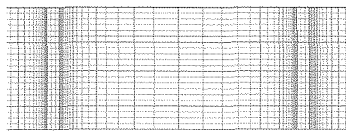


圖 8 研究案例之模型建構圖



(a)池堰式魚道網格建構圖(側視放大圖)



(b)池堰式魚道網格建構圖(前視放大圖)

圖 9 研究案例之網格建構圖

首先針對魚道流場流況進行分析，在池堰式魚道方面，由於入流處所給予的設定流量較大，故流況形成較接近於表面流之過度流況(可利用 Ead 在 2004 年所推出之經驗公式估計)，這樣不但避免流量太小而導致渠道無水可供上溯的情況；亦可避免模擬跌水流況時，液面水躍渦流範圍較不满意的誤差。對於流場之初始狀態分別以空池與滿池進行模擬，則發現兩者流況極為相似，為縮短模擬時間，故以滿池狀態為流場之初始條件來進行模擬，模擬之時間間距採用 0.001 秒，模擬時間以達到出入流平衡為止，約為 60 秒。而在水理方面，液面以體積分率值為 0.5 之模擬液面來呈現，堰上方水深平均約為 0.5 公

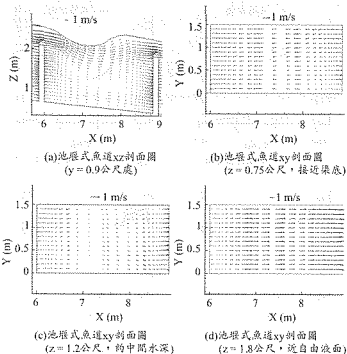


圖 10 池堰式魚道流場剖面圖

尺、堰後休息池平均水深為 1.7 公尺；流場最大流速約為 2.7 公尺/秒，產生於堰後近液面處，流場流況則呈現液面微有波動之表面轉換流。而池底則因上方表面流的帶動，產生順時針方向上下循環的渦流，如圖 10a 所示。為觀測池內流況在 xy 平面的變化，選擇 $z = 0.75$ 公尺(接近渠底)、 $z = 1.3$ 公尺(約位於中間水深)與 $z = 1.8$ 公尺(接近自由液面)三個不同深度位置之平面來進行討論(如圖 10 所示)，由圖中可發現池內流況沿寬度方向之流況變化量極小，可忽略 y 方向之流況變化而以二維 xz 平面進行規劃。故本研究在上溯分析將採用 $y = 0.6$ 公尺之 xz 平面來作為探討對象。

2. 上溯路徑之規劃

由於魚道流場在渠內各位置速度方向變化均不相同，所採用路徑之差異對於上溯能量之損耗亦有所影響。池堰式魚道魚體可以跳躍方式進行上溯，故本研究先假設一跳躍運動中，出水與入水的角度會相同，並忽略慣性作用力之影響，以及魚體會依照所規劃之路徑上溯；由於不同跳躍角度與入水深度均會影響其路徑長短與耗能多寡，故本研究設計出五種上溯路徑：

A：以 45 度角跳躍，入水後採較近液面表面

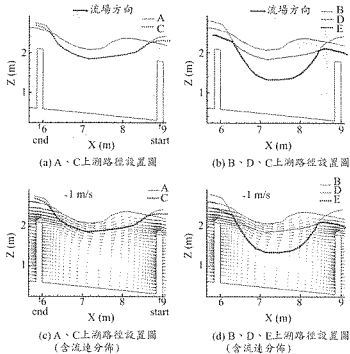


圖 11 池壩式魚道上溯路徑設置圖

流之路徑。

B：以 45 度角跳躍，入水後通過池內順時針渦流區之路徑。

C：以 30 度角跳躍，入水後採較近液面表面流之路徑。

D：以不跳躍方式進行上溯，採較近液面表面流之路徑。

E：以不跳躍方式進行上溯，採入水後通過池內順時針渦流區之路徑。

上述五種路徑如圖 11 所示，而圖 12 為不同路徑下，沿路徑所受流場之速度圖。

3. 模擬魚種特性介紹

不同魚類上溯，因其物種特有之運動習性、體型尺寸之大小、性別與環境流場的變化等等，均會對其上溯能力產生影響。台灣上溯魚種在物種特性方面的研究普遍缺乏，故本研究所採用之上溯魚種，將以物種特性資料較為充裕之粉紅鮭魚 (pink salmon, 亦稱為 humpback salmon) 為試驗對象。

粉紅鮭魚學名為 *Oncorhynchus gorboscha*，屬太平洋種鮭魚，在 2004 年科學 (Science) 期刊發表「養殖鮭魚含有機污染物的全球評估」爭議文章後而受到矚目，其生存最適水溫約為攝氏

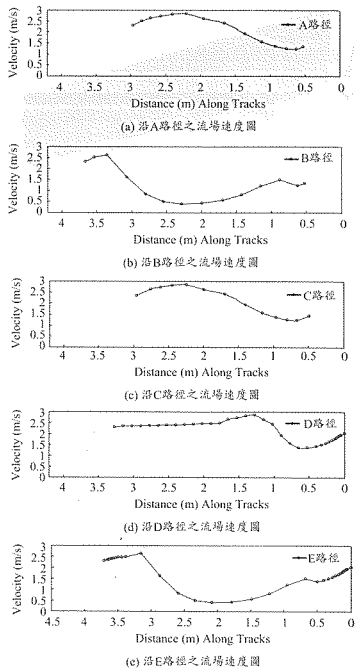


圖 12 池壩式魚道沿軌跡之流場速度分佈圖

10 度左右，主要分佈在北太平洋區，以浮游植物 (藻類) 與小魚為主食。幼魚自河川上游孵化後，順流而下至海洋生長，直至成魚後進行上溯返溪，屬於鮭魚類較小型之品種。此類魚種成魚體長一般約介於 0.45 公尺~0.6 公尺，質量約為 1.25~2 公斤，故本研究採用其平均體長 0.5 公尺作為上溯魚體長度，而上溯魚體質量則採用 1.7 公斤。迎水面面積則沿用 Webb (1971) 估計鮭魚品種魚體之迎水面經驗式 $A_f = 0.465L^{2.11}$ 來計算，其中 L 即為魚體長度。在泳速方面，本研究目前係假設為定值，並採用 pink salmon 突泳速度 3 公尺/秒 (pink salmon 之突進泳速約介於 2.3

表 1 池堰式魚道案例之設計參數

| 參數 | 案例路徑 | | | | | | | |
|--------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 案例一 | 案例二 | 案例三 | 案例四 | 案例五 | 案例六 | 案例七 | 案例八 |
| 路徑位置 | 液面 | 渠底 | 液面 | 液面 | 液面 | 液面 | 液面 | 渠底 |
| 跳躍上溯 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 | 否 | 否 |
| 跳躍角度(Degree) | 45 | 45 | 30 | 45 | 45 | 45 | | |
| 上溯泳速(m/s) | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| β 值 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 4 | | |

表 2 池堰式魚道案例計算之參數

| 參數 | 通過路徑 | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| | 案例一 | 案例二 | 案例三 | 案例四 | 案例五 | 案例六 | 案例七 | 案例八 |
| 軌跡長度(m) | 3.49 | 4.19 | 3.45 | 3.49 | 3.49 | 3.49 | 3.4 | 3.76 |
| 最大流場速度(m/s) | 2.9 | 2.6 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.6 |
| 平均流場速度(m/s) | 2.1 | 1.3 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 1.77 |
| 通過時間(s) | 6.3 | 2.99 | 6.3 | 2.1 | 6.3 | 6.3 | 6.4 | 3 |
| 最大阻力(N) | 9.6 | 9.1 | 9.6 | 13.2 | 9.6 | 9.6 | 9.7 | 9.06 |
| 平均阻力(N) | 3 | 2.4 | 2.8 | 4.3 | 3 | 3 | 8 | 7.24 |
| 總耗能(J) | 23.57 | 21.03 | 22.57 | 31.8 | 22.52 | 24.63 | 27.8 | 23.35 |
| 平均耗能(J/m) | 7.34 | 5.02 | 6.54 | 9.11 | 6.45 | 7.06 | 8.18 | 6.21 |
| 平均功率(W) | 3.74 | 7.03 | 3.64 | 15.1 | 3.57 | 3.91 | 4.34 | 7.78 |

公尺/秒~4.8 公尺/秒；Power 等，1986），由於是採用突進平均泳速為上溯泳速，故所估上溯時間會比實際時間為短，而耗能也會略為高估。

在本研究中， β 值(魚體長寬比)為 pink salmon 跳躍之參數，一般約介於 2-4 之間，其值對上溯跳躍的耗能有極大之影響，在進行池堰式魚道案例分析時，將配合前所規劃之四條上溯路徑，搭配 β 值為 2、3、4 三種情況，進而規劃出以下八種不同上溯案例：

案例一：上溯泳速為 3 公尺/秒， β 值等於 3，採 A 路徑上溯。

案例二：上溯泳速為 3 公尺/秒， β 值等於 3，採 B 路徑上溯。

案例三：上溯泳速為 3 公尺/秒， β 值等於 3，採 C 路徑上溯。

案例四：上溯泳速為 4 公尺/秒， β 值等於 3，採 A 路徑上溯。

案例五：上溯泳速為 3 公尺/秒， β 值等於 2，採 A 路徑上溯。

案例六：上溯泳速為 3 公尺/秒， β 值等於 4，

採 A 路徑上溯。

案例七：上溯泳速為 3 公尺/秒，採 D 路徑上溯。

案例八：上溯泳速為 3 公尺/秒，採 E 路徑上溯。

本研究將針對上列八種案例之軌跡長度、流場速度、通過時間、阻力、耗能與功率來進行探討。

五、結果與討論

根據數值境況模擬，影響魚類上溯耗能最主要的物理參數為上溯路徑之長短、流場流速的分佈、上溯運動方式、上溯泳速、阻力形狀參數 β 值等五種，以下將針對這些不同參數的組合(如表 1 所示)，來進行耗能的探討。

由表 2 得知，路徑長度以案例二之 4.19 公尺最長，案例八之 3.76 公尺次之，其餘均約在 3.4 公尺~3.5 公尺左右。此結果顯示，以靠近液面之路徑而言，不論是採跳躍運動為上溯之方式(路徑 A、C、D)，其路徑之長度差異不大(最

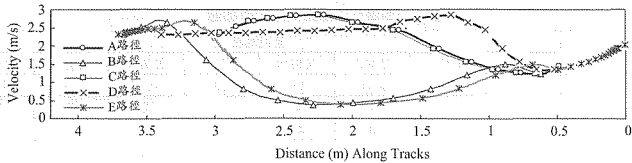


圖 13 池堰式魚道沿上溯路徑之流場速度比較圖

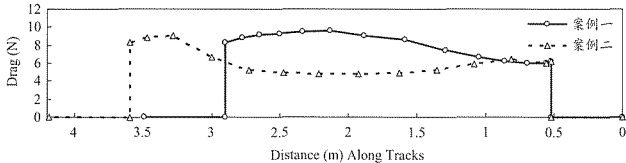


圖 14 池堰式魚道案例一與案例二之阻力比較圖

長與最短路程僅差 0.09 公尺)。但對於潛入池底為上溯途徑者(路徑 B、E)，不僅平均路徑較靠近液面路徑為長，且採跳躍運動之路徑又明顯長於非跳躍運動之路徑(案例二與案例一兩者相差約 0.43 公尺)。

池堰式魚道其流場分佈以液面之流速較快，又以過堰後形成臨界流(或超臨界流)而達到最大速度(本案例設計之型式，最快速度產生在堰後約 1 公尺處)；直至與池中速度較緩之亞臨界流流況相遇，產生能量的消耗而導致流速的減緩。故各路徑通過之平均流速與最大流速方面，近液面之路徑 (A、C、D)均大於潛入池底之路徑(B、E) (流場速度比較如圖 13 所示)。由於魚體上溯泳速與流場速度間之差值為計算阻力之參數，故就以速度場比較而言，路徑 B 所通過之相對速度最小，在流場中平均阻力亦為最小。

綜合以上敘述，雖然路徑 A、C、D 之軌跡長度較短，但其所遭遇之流場速度卻也相對 B、E 路徑為大，故很難單由路徑長短與流場流速來分析比較魚類上溯之耗能。以下將進一步針對不同案例間物理參數的差異，對通過時間、阻力、總耗能與功率進行討論。

(1) 近液面路徑與潛入渠底路徑的比較：

由案例一與案例二來看，觀察相同跳躍角度、相同上溯泳速、 β 值亦相同的狀況下，路徑的選擇則分為近液面之路徑 A 與近渠底之路徑 B 兩者來進行比較。整體而言，案例二雖較案例一路徑長度稍長，但其所遭遇之流場速度小，故在上溯泳速均為定值 3 公尺/秒的情況下，案例二通過所花費的時間只為案例一的一半，最大阻力(9.1 牛頓)與平均阻力(2.4 牛頓)均較案例一(最大阻力 9.4 牛頓、平均阻力 3 牛頓)為小(沿路徑之阻力比較如圖 14 所示)；在耗能方面案例二總耗能與平均耗能在比較下略小(如圖 15 所示)，但因案例二上溯所費時間較短，故單位時間之耗能(功率)稍大，較案例一多出 3.3 瓦左右，代表案例二之瞬時功率大，需考慮到是否為魚體可負荷之瞬間能量消耗量。

(2) 不同跳躍角度的比較：

而同為靠近液面之上溯路徑、泳速與 β 值均相同但跳躍角度不同的情況下，案例一與案例三兩路徑所遭遇之最大流場速度、最大阻力均相同，但因案例三採 30 度跳躍，較案例一採 45

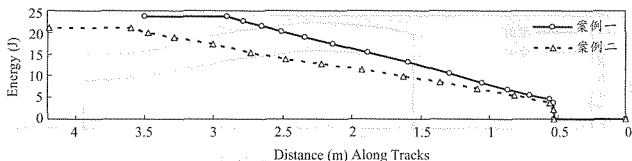


圖 15 池堰式魚道案例一與案例二之耗能比較圖

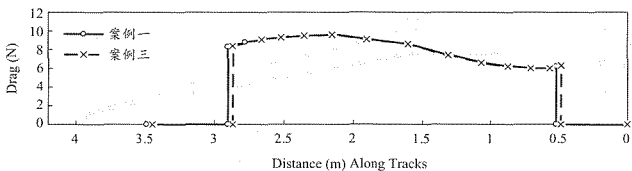


圖 16 池堰式魚道案例一與案例三之阻力比較圖

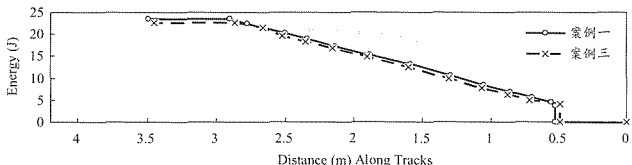


圖 17 池堰式魚道案例一與案例三之耗能比較圖

度跳躍時之高度為低、跳躍之水平距離較長，整體軌跡在水中較短；由於在空中所受之阻力可忽略，而跳躍動作之耗能僅考慮水面激濺和附加質量的作用，無關跳躍角度，故案例三沿路徑之平均阻力與耗能均略小於案例一（由圖 16、17 所示），主要原因是案例一在水中路徑較長，遭遇較多的阻力影響。但由表 2 數據顯示，案例一與案例三之耗能差異其實並不大，跳躍角度的不同雖對耗能多寡多少有所影響，但結果不明顯；故在跳躍角度的選擇方面，應以能否成功上溯為優先考量，而能量消耗則次之。

(3) 不同上溯泳速的比較：

相同路徑、相同 β 值，與採相同跳躍角度的情

況下，案例一與案例四在泳速方面做出區別，討論不同上溯泳速對耗能之影響。由表 2 可得知，因為同一路徑，所以在路徑長度、遭遇之流場速度方面兩案例均相同，但案例四採用上溯泳速為 4 公尺/秒，故通過時間僅為案例一（採上溯泳速為 3 公尺/秒）的三分之一，但因與流場流速之相對速度較案例一為大，故所受阻力與能量的消耗方面亦較大（如圖 18、19 所示），而平均功率方面案例四更約為案例一的五倍，顯示在同一單位時間內，案例四需耗費極大的能量來進行上溯。

(4) 不同 β 值的比較：

案例一、案例五與案例六則是在 β 值各為 2、3、4，其餘物理環境條件均相同的情況下來進

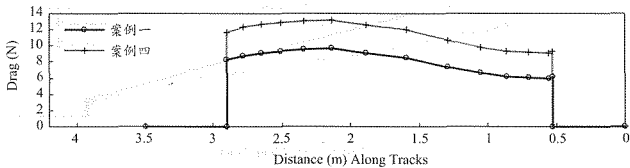


圖 18 池堰式魚道案例一與案例四之阻力比較圖

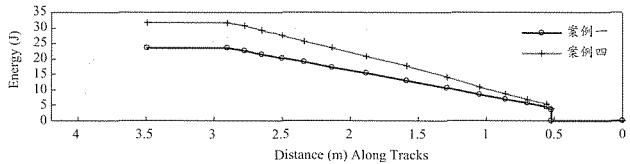


圖 19 池堰式魚道案例一與案例四之耗能比較圖

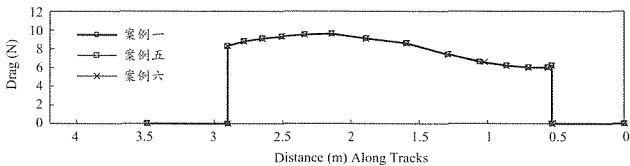


圖 20 池堰式魚道案例一、案例五與案例六之阻力比較圖

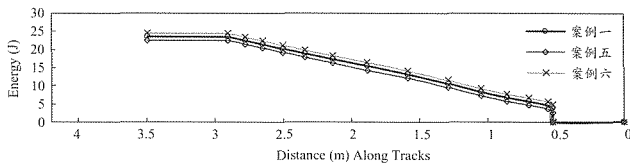


圖 21 池堰式魚道案例一、案例五與案例六之耗能比較圖

行比較。一般鮭魚魚種 β 值約介於 2~4 之間，由公式 26 可知， β 值會直接影響跳躍出水之耗能大小， β 值越大，耗能亦越多；故三案例因所走路徑相同，所受阻力亦均相同(如圖 20 所示)，但在耗能方面則以案例六 β 值為 4 時最大，平均功率的耗費也最多(如圖 21 所示)。

(5) 跳躍與非跳躍運動上溯方式的比較：

針對採跳躍方式與非跳躍方式兩種上溯方法，一個除須考慮抵抗水中阻力之耗能，還需加入跳躍出入水之能量損耗；另一則單須考慮抵抗水中阻力之耗能即可，可由案例一與案例七看出運動方式不同的差異性。案例七為不

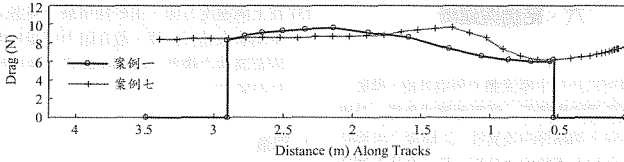


圖 22 地堰式魚道案例一與案例七之阻力比較圖

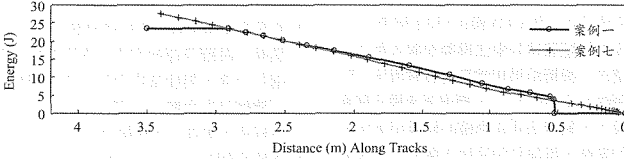


圖 23 池堰式魚道案例一與案例七之耗能比較圖

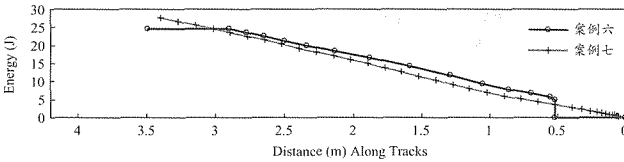


圖 24 池堰式魚道案例六與案例七之耗能比較圖

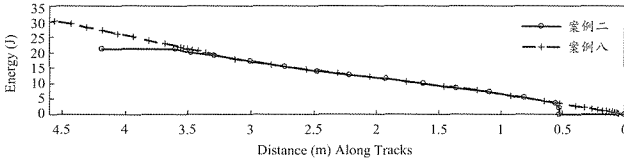


圖 25 池堰式魚道案例二與案例八之耗能比較圖

跳躍方式上溯，在路徑長度、流場速度與通過時間方面，與跳躍上溯之案例一差異不大，但在平均阻力上，卻明顯看出案例七遠大於案例一(圖 22 所示)，雖然案例一在總耗能須加上跳躍出入水時能量之損耗，但仍小於案例七之總耗能(圖 23 所示)。若採 β 值較大之案例六與案例七相較，雖然 β 值導致案例六耗能變

大，但依舊較案例七所消耗之能量來的小(圖 24 所示)。又若採潛入渠底的路徑來觀察(案例二與案例八的比較)，結果亦同(如圖 25 所示)，採非跳躍方式上溯仍較跳躍上溯來的耗能。由以上可歸納出：在池堰式魚道，採跳躍前進的方式，會較不跳躍上溯來的省能。

六、結論與建議

1. 結論

本研究以計算生態流體力學為基礎，模擬三維度紊流魚道流場流況，針對池堰式魚道，分別比較其不同上溯路徑的差異性，以模擬之流場結果來進行魚類上溯耗能之分析計算，推估上溯能量之消耗與功率。模擬結果與分析可歸納出以下結論：

- (1) 本研究成功以三維 CFD 模組，利用標準 $k-\epsilon$ 紊流模式搭配體積分率法模擬池堰式魚道之流場情形，模擬結果相當符合真實流況。除在模擬跌水流部份， $k-\epsilon$ 標準紊流模式與實驗相較下，較無法非常準確的模擬出近水面渦流的範圍，推論是因液面水躍產生了夾氣現象，但在進行模擬時，並未加以考慮夾氣，故產生模擬上的誤差。
- (2) 本研究魚道之設計在模擬介於跌水流與表面流之轉換流況方面，由驗證案例可證明，Fluent 模組在模擬轉換流有高度的準確性，能減低其模擬誤差。
- (3) 由於本研究所設計之流場福祿數較小，故以模式案例之驗證與李(2000)之研究結果，在體積分率值方面採用 $VOF = 0.5$ 來做為自由液面之呈現。在流場方面，流速與流向沿 y 方向變化差異不大，故在進行路徑規畫時，池堰式魚道可採用二維 xz 平面($y = 0.9$ 公尺之平面)來進行設計。
- (4) 由池堰式魚道的五種上溯路徑，所規劃出八種上溯案例可得：採跳躍之方式上溯會較不跳躍上溯省能；潛入池底之路徑其所耗費之能量較靠近液面者為低；而跳躍角度對總耗能之影響不大，但仍可看出越小之跳躍角度，其所耗能量會較跳躍角度大者為低；但跳躍之角度，仍須以溢流水深之高低來決定，避免角度過小無法上溯之情況；而其長寬比 β 值由結果亦可看出， β 值越大之耗能亦越大。由以上結果可推論，同一魚種之最省能之路徑，為魚體採跳躍上溯且潛入池底之路徑。

- (5) 在上溯速度方面，由於採用最大突進流速之平均值來進行計算，故在阻力與能量推估上均有高估之趨勢，流場所設定之速度較快也是影響原因之一。

2. 建議

- (1) 在魚道模擬跌水流部份，因夾氣問題而產生渦流模擬不完全之現象，未來可將夾氣之方程式加入模組中，降低模擬跌水流時之誤差。
- (2) 在魚類上溯方面，真實情況應有突泳、減速、巡航、跳躍等運動方式，本研究採用等速來進行上溯，對能量之消耗有高估現象，未來可繼續針對魚體進行進習性，修正上溯與跳躍方程式，更進一步模擬分析其結果。
- (3) 本研究假設在較高流速的流場下，魚體上溯時對局部留場並不會產生影響，但實際情況下魚體上溯時應會造成流場更紊亂的擾動；未來研究時，可針對流場之動量方程式與能量方程式，加入魚體擺動參數，進行流場方程式之修正與探討。
- (4) 在魚體耗能部份，本研究僅考慮外部流場對魚體產生的阻力來作為計算耗能的依據，未考慮到魚體本身內部能量的消耗，未來可以試驗來觀測魚體在上溯與跳躍時能量的損耗。
- (5) 在上溯耗能方面，由於目前尚未有粉紅鮭魚與本研究試驗案例同樣流場狀況下，上溯時之試驗資料，故未能深入探討真實魚體在本研究設計之流場阻力下，能否承受而進行上溯之數據；僅先以設計流場來進行上溯耗能之計算，未來應搭配渠道試驗來進一步深入討論。
- (6) 本研究是以力能觀點進行上溯耗能分析之初步研究，現今目標先以規劃路徑作為假定上溯路徑，未來將考慮魚種習性、適應環境、喜好分佈等因素，搭配力能分析，進一步分析魚體在魚道中之真實情況。

參考文獻

1. 林務局，1992。「台灣省近期防砂壩現況調

- 查報告」。
2. 胡通哲、張世倉、葉明峰，1998。「河川攔河堰及防洪防砂設施對生態影響改善研究與宣導訓練計畫-第一階段研究成果報告」，台灣特有生物研究保育中心。
 3. 胡通哲、張世倉、李訓煌，1998。「八寶圳階段式魚道之設計與試驗」，中華水土保持學報，30 (1): 25-32。
 4. 吳富春、李國昇、鄭武慎，1998。「魚道水理特性對魚類溯游行為影響之研究」，行政院國家科學委員會專題 究計畫成果報告。
 5. 林家愈，1999。「魚道之水理研究」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
 6. 李家和，2002。「泛用性三維計算流體力學模式應用於明渠流之研究」，國立交通大學土木工程學研究所碩士論文。
 7. 許銘熙、蘇騰鉉，2003。「豎孔式魚道水理分析」，台灣水利，51 (4): 21-28。
 8. 朱佳仁，2003。「環境流體力學」，科技圖書。
 9. 謝怡芳，2004。「三維度紊流大渦模擬在多區間建築物室內環境風場之應用研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
 10. 陳均美，2005。「人工濕地對懸浮微粒固體排除機制之數值模擬」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
 11. 顧可欣，2007。「三維度魚道水理及魚體行進力能之數值模擬研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
 12. Adams, E.W., W. Rodi, 1990. Modeling flow and mixing in sedimentation tanks. *J. of Hydraulic Engineering*, 116(7): 895-913.
 13. Au, D., D. Weihs, 1980. At high speeds dolphins save energy by leaping. *Nature*, 284: 548-550.
 14. Bainbridge, R., 1958. The Speed of Swimming of Fish as Related to Size and to Frequency and Amplitude of The Tail Beat. *The Journal of Experimental Biology*, 35: 109-133.
 15. Ead, S.A., C. Katopodis, G.J. Sikors, N. Rajaratnam, 2004. Flow Regimes and Structure in Pool and Weir Fishways. *Journal of Environment and Engineering*, 3: 379-390.
 16. Faure, J.B., N. Buil, B. Gay, 2004. 3-D Modeling of Unsteady Free-Surface Flow in Open Channel. *Journal of Hydraulic Research*, 42(3): 263-272.
 17. Fish, F.E., C.A. Hui, 1991. Dolphin Swimming-A Review. *Mammal Review*, 21(4): 181-195.
 18. Hirt, C.W., B.D. Nichols, 1981. Volume of fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39: 201-225.
 19. Hui, C.A., 1989. Surfacing Behavior and Ventilation in Free-Ranging Dolphins. *Journal of Mammalogy*, 70(4): 833-835.
 20. Khan, L.A., 2006. A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) Model Analysis of Free Surface Hydrodynamics and Fish Passage Energetics in a Vertical-Slot Fishway. *North American Journal of Fisheries Management*, 26: 255-267.
 21. Liu, C., A. Huhe, W. Ma, 2002. Numerical and Experimental Investigation of Flow Over a Semicircular Weir. *ACAT Mechanica Sinica*, 18(6): 594-602.
 22. Liu, M., N. Rajaratnam, Z.Z. David, 2006. Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8): 765-777.
 23. Launder, B.E., D.B. Spalding, 1974. The numerical computation of turbulent flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 269-289.
 24. Ma, L., P.J. Ashworth, J.L. Best, L. Elliott, D.B. Ingham, L.J. Whitcombe, 2002. Computational fluid dynamics and the physical modeling of an upland urban river. *Geomorphology*, 44: 375-391.
 25. Powers, P.A., J.F. Orsborn, T.W. Bumstead, S.K. Kingsley, W.C. Mih, 1986. Fishways: An Assessment of Their Development and Design. *Bonneville Power Administration*, Project 82-14,

- Portland, Oregon. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8): 939-944.
26. Rajaratnam, N., C. Katopodis, 1988. Plunging and Streaming Flows in Pool and Weir Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8): 939-944.
27. Sarker, M.A., R.G. David, 2002. Physical Modelling and CFD Applied to Hydraulic Jump. IAHR e-library, http://www.iahr.org/e-library/beijing_proceedings/Theme_D/PHYSICAL%20MODELLING%20AND%20CFD%20APPLIED.html
28. Sundnes, G., 1963. *FiskDir. Skr.* (Bergen), 13: 126.
29. Teijeiro, T., J. Puertas, L. Pena, 2006. Evaluating Vertical-Slot Fishway Designs in Terms of Fish Swimming Capabilities. *Ecological Engineering*, 27: 37-48.
30. Vogel, S., 1994. *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton. New Jersey.
31. Webb, P.W., 1971. The Swimming Energetics of Trout. *The Journal of Experimental Biology*, 55: 489-520.
32. Weihs, D., 2002. Dynamics of olphin Porpoising Revisited. *Integrative and comparative biology*, 42: 1071-1078.

收稿日期：民國 97 年 4 月 24 日

修正日期：民國 97 年 6 月 27 日

接受日期：民國 97 年 7 月 2 日