

## 低造價溶氧感測器之研發

# Research and Development of Low-Cost Dissolved Oxygen Sensor

國立台灣大學生物環境系統工程學系副教授

國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士

侯文祥

游政勳

Wen-Shang Hou

Chen-Hsun Yu

### 摘 要

由於水中溶氧量及其變化為判斷任一種水體水質優劣的重要指標之一，尤其是從事生物生產的養殖水體。為了確保水產物的順利收成，養殖過程中建立持續的水質監測系統是必要的；由於水體內溶氧有分佈不均現象，尤其在近底泥層處，因此需要多量的感測器以便進行多處同步監測。然而國內使用之溶氧感測器至今均仰賴國外進口產品，僅感測頭部份的單價即約需 0.5~2 萬元間，故建立一個養殖空間之監測系統，單在溶氧感測器購入即為一龐大費用；因此本研究探討溶氧感測器的設計與製作原理，研發出低造價溶氧感測器。以電池原理之電氣化學反應作為設計基礎，根據氧化還原反應所產生之電壓大小與水中氧氣量成正比，可推測水中的溶氧量。共探討五個設計變化模組，分別改變電極材料、透氣膜、感測面積、電流導線長度及導線材質等五個變因，共製作約 100 個感測器，分別求得增氧與耗氧過程之檢量線斜率、相關係數、靈敏度、材料單價等，並以市售美製 Oxygard 溶氧感測器之資料作為對照組，比較其優缺點，以判斷不同設計模組的特徵及適用性。結果得知，適用的自製低造價溶氧感測器使用電極材料是以 Ag+Zn 電極組合，透氣膜採用 PE 保鮮膜，電解液使用 1M KCl<sub>(aq)</sub>，感測器外殼為委外精緻加工之耐撞硬管材質，以一般電線 5<sup>m</sup> 長度作為電流導線等組合而成，製作一個感測器的材料成本約為 300 元。日後，可提供養殖業者不同的產品選擇，且擴大應用至不同水域之溶氧水質監測目的。

**關鍵詞：**感測器，溶氧，低造價，電氣化學。

### ABSTRACT

In order to ensure the successful cultivation of aquaculture, it is necessary to establish the water quality monitoring system. Because it is often a non-uniform distribution of dissolved oxygen in water quality, we need many sensors to detect the

distribution. Since the dissolved oxygen sensor is very expensive, it would cost abundant expenditure to establish a monitoring system for cultivation. Therefore, the study focuses on developing a lower cost dissolved oxygen sensor by using the principle of fabrication and design.

The basic principle of a dissolved oxygen sensor is Galvanic cell. The voltages magnitude and the dissolved oxygen is direct ratio according to oxidation-reduction reaction. The study has five factors, which are difference of metal electrode, material of membrane, measured membrane area, wire length and material. Trend line slope, related coefficient, sensitivity, according to increasing oxygen and reducing oxygen process device from experiment obtained, that determined the suitability and characteristic for each factors. Finally, the artificial dissolved oxygen sensor's materials include Ag + Zn electrode, P.E. membrane, KCl solution, manufactured acrylic tube and general wire 5 meter. It cost about NT 300 dollars totally. The results of the study can provide the aquaculture industry more economic products in future and they are applicable to different type of water.

**Keywords:** Sensor, Dissolved oxygen, Lower cost, Electrical chemistry.

## 一、前言

不論養殖或水耕等生物生產環境、池槽坑之安全勞動環境、水質處理或水環境保護等過程，確保與生物生命安全有直接關係的氧氣濃度充足為最重要的需求。在水產蛋白質營養需求方面，由於近年來的需求持續增加，國內養殖漁業生產主要養殖鰻、蝦、鯛、鱸等高經濟價值魚類，採用高放養密度方式養殖，利用攪水式(如水車)或噴氣式(如微細氣泡機)來增加水中溶氧。為了解這些高經濟價值之魚類生活狀況，於氣候、水質及底質等環境均有感測器監測，以確保水中魚類能順利成長。在水體環境管理中，溶氧資料對水中生物是非常重要的影響因子，水中溶氧必須到達生物之基本耗氧量才能維持其生存，若水中溶氧供給量不足，無法達到其基本耗氧量，水中生物會在短時間內發生斃死。

目前國內所使用之溶氧感測器均仰賴國外進口產品，如丹麥製 OxyGuard、日製 KRK、美製 pHOX 等感測器等，單價約為 0.5~2 萬元；由於溶氧不易自上層傳遞至下層，尤其底層有有機物堆積，消耗溶氧更為迅速，故有上下水層分佈不均現象。因此，即使單一測點在不同水深處即需要有多個感測器，一個監控系統往往就需要 10

個以上溶氧感測器，光是溶氧感測器部份約需花費 10~40 萬元。由於價格昂貴、維修費時且連續使用的使用年限僅約一個月至一年不等，對養殖生產業者而言，為極大環控設備支出負擔。

因此，國內如能自行研發生產低造價之溶氧感測器，明確化其設計與製作原理，將對國內各種環境空間的溶氧監測，提供一個低造價之管理環境。本研究利用伽瓦尼電池(Galvanic cell)原理，研發出一低造價之溶氧感測器；且以商用感測器(OxyGuard)作為對照組，探討不同設計之靈敏度、精確性、穩定度及造價等，提出一符合生產經濟及適用的低造價溶氧感測器研發。

## 二、文獻探討

### 2.1 溶氧、環境與生物關係

氧是自然界中含量最多和分佈第一廣的元素，所有生物幾乎均需要仰賴它而藉以生存。水中生物即靠水中之溶氧進行呼吸作用。溶氧(Dissolved Oxygen, DO)是指氧氣溶解於水體之中且以氧分子狀態呈現，以溶氧量 ppm、mg/L 表示或溶氧飽和度%表示。一般而言，在空氣中，氧氣之飽和度定為 100%；在 25°C，一大氣壓時，純水中的溶氧量約為 8.24ppm。一般水體中的溶氧量會受水體中之溫度、鹽度、水面上氣壓、有

機物質分解及生物體消耗等因素所影響，隨著溫度增加，水中溶氧量會相對減少；而水中鹽度愈高時，則水體之溶氧量更是低於純水。在常溫下水中溶氧量約 4~7mg/L (酒井信，1992)。

魚類長時間適應了某種溶氧量，在此溶氧量下，可以做最有效率之呼吸代謝，而當溶氧量高於或低於此常態值，對魚體也會造成某種程度上的影響。Swingle (1969)曾指出魚類不能在溶氧量小於 0.3mg/L 的水中長期生長，1mg/L 為其最少需氧量；Raible (1975)指出溶氧過低的水會使魚類的活動力減低，胃口也不好，相反的溶氧高則攝食率大；Simco (1976)指出溶氧降至 3mg/L 時魚的攝食量會減少，降至 2mg/L 則會停止攝食，低到 2mg/L 時，只能維持魚本身的循環系統和神經系統，在高溫狀況下，缺氧情形將更為明顯；徐(1997)指出為維持魚類最佳成長，在溫水養殖系統中的溶氧濃度至少要保持 5ppm 以上。合適的溶氧濃度亦可提供氨及亞硝酸鹽最大的分解效率，若溶氧低於 2ppm，則硝化菌的硝化作用會停止。由上述得知，水中之溶氧高低，將會直接影響養殖生物之活動力、覓食量及存活率等，因此，溶氧監測系統之建立對養殖業者之生產管理是息息相關的。

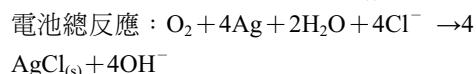
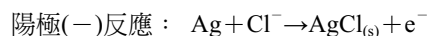
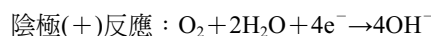
## 2.2 溶氧感測器設計原理

本研究利用隔膜交換式之電氣化學 (electrochemical cell) 反應，並且以 Galvanic Cell 原理當作整個試驗設計之基礎。Olmsted & Williams (1997)提及，Galvanic Cell 是根據金屬活性大小來決定正負極，當氧化電位  $E^\circ$  較高的電極易放出電子，定義為陽極(一負極, anode)，反之，氧化電位  $E^\circ$  較小易接受電子，定義為陰極(+正極, cathode)。氧化電位的電極數值由大至小排列如下:  $\text{Li} > \text{Rb} > \text{K} > \text{Cs} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Fe} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Sn} > \text{Pb} > \text{H}_2 > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Ag} > \text{Pt} > \text{Au}$ 。選定金屬電極後，將電解液灌入，並以一薄膜將電極及電解液包住，以隔絕待測溶液。溶液無法透過膜片，但溶液中的氧氣分子得以透過膜片並在陰極(+)產生還原，陽極(-)發生氧化。實驗原理是根據

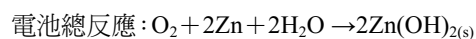
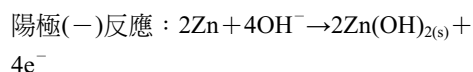
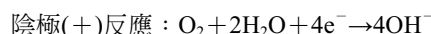
$E^\circ_{(0)}$ (電表所測得的電壓值) =  $E^\circ_{(1)}$ (參考電位電壓值) +  $E^\circ_{(2)}$ (在不同氧氣濃度下所產生的電壓值)，其中，參考電位的電壓值受到所採用的金屬電極以及電解液的濃度所影響，實驗過程中，我們必須讓參考電位的電壓維持定值，並且根據氧化還原反應所產生之電壓大小與水中氧氣量成正比，以推測水中的含氧量，也就是說電表測得的電壓與在不同氧氣濃度下所產生的電壓值呈現線性，並不受參考電位的影響。

電氣化學反應方式擬用  $\text{Au} + \text{Ag}$  和  $\text{Ag} + \text{Zn}$  等兩組電極，電解液為 1M 的氯化鉀  $\text{KCl}_{(\text{aq})}$  進行製作與測試。 $\text{Au} + \text{Ag}$  組與  $\text{Ag} + \text{Zn}$  組金屬電極之電氣化學反應式如下：

### 1. $\text{Au}(+) \& \text{Ag}(-)$ :



### 2. $\text{Ag}(+) \& \text{Zn}(-)$ :



由上述反應式可以看出，氧氣在正極反應時消耗  $\text{H}_2\text{O}$  產生  $\text{OH}^-$ ，而負極則消耗溶液中的陰離子  $\text{OH}^-$  或  $\text{Cl}^-$  產生沉澱  $\text{Zn}(\text{OH})_{2(\text{s})}$  與  $\text{AgCl}_{(\text{s})}$ ，負極產生的鋅離子或銀離子是與氫氧根離子或氯離子作反應，是根據化學中的 Ksp 法則來判定上述陽離子與何種陰離子產生沉澱。由“CHEMISTRY”得知  $\text{ZnCl}_2$  是溶於水的溶液並無沉澱， $\text{Zn}(\text{OH})_{2(\text{s})}$  的 Ksp 為  $3 \times 10^{-17}$ ， $\text{AgCl}_{(\text{s})}$  的 Ksp 為  $1.8 \times 10^{-10}$ ；而  $\text{AgOH}_{(\text{s})}$  在溶液中易反應生成棕色的  $\text{Ag}_2\text{O}$  沉澱，與實驗結果所產生的白色沉澱不符合，故在以  $\text{Ag}(+) \& \text{Zn}(-)$  作為電極時，負極產生  $\text{Zn}(\text{OH})_{2(\text{s})}$  沉澱；在  $\text{Au}(+) \& \text{Ag}(-)$  電極中，負極則產生  $\text{AgCl}_{(\text{s})}$  沉澱。因此在理想的電池反應狀態下，電池內部的電解液濃度基本上可以維持不變，故參考電位可為定值，此為溶氧感測器具有高穩定性之主要因素。

一般而言，溶氧感測器是指對環境中的氧有

表 1 市售溶氧感測器之比較(本研究彙整)

功能/特性 /材料	廠 牌								
	Oxyguard Probe <sub>(7)</sub>	Oxyguard probe420 <sub>(7)</sub>	KRK <sub>(6)</sub>	pHOX640 <sub>(4)</sub>	Royce	Contronic	Orion/WTW <sub>(8)</sub>	Hydrolab <sub>(4)</sub>	Automata Inc. D.O.-WATCH
測量原理	Galvanic	Galvanic	Galvanic	Galvanic	Galvanic	Galvanic	Polarographic	Galvanic	Galvanic
電極	Ag+Zn	Ag+Pb	Pt+Pb	Ag+Pb	Pt+Pb	Pt+Pb	Au+Ag	Au+Pb	Au+Pb
電解液	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	KOH	膠質 KHCO <sub>3</sub>	KCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	—	—	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
透氣膜	0.05mm , Teflon PTFE	0.05mm , Teflon PTFE	Teflon	0.04-0.06mm , Teflon FEP	0.025mm	0.04-0.13mm , Teflon	0.0125mm , Teflon FEP	0.02mm , Teflon	Teflon ( $\phi$ 2 $\mu$ m)
應答時間	60 秒內 達到 90%	60 秒內 達到 90%	15 秒內 達到 90%	30 秒內 達到 90%	30 秒內 達到 99%	3 分鐘內 達到 90%	10 秒內 達到 90%	—	60 秒內 達到 95%
最低流速	2.5cm/s	2.5cm/s	—	—	4.6cm/s	—	15cm/s	—	—
使用壽命	數年	數年	1-6 月	18-24 月	—	—	—	數年	—
產品外部 尺寸 D 直 徑, H 高	D : 58mm H : 59mm	D : 58mm H : 88mm	D : 22mm H : 17mm	D : 60mm	—	D : 45mm H : 85mm	H : 145mm	—	—
重量	350g	—	—	500g	—	含浮筒 8kg	—	—	—
訊號範圍	—	4~20mA	0~10mv (1k $\Omega$ )	—	—	—	—	—	4~20mA (0.7k $\Omega$ )
導線標準 長度	3m	3m	3m	—	—	—	—	4m	7.5m
售價(NT)	約 1.5 萬元	約 1.5 萬元	約 0.5 萬元						約 1.8 萬元

相當高之感測，利用電氣化學原理製造兩電極間之電位差。如銀(Ag)和鋅(Zn)金屬，活性較高的負極(Zn)與活性較低的正極(Ag)於電解液氯化鉀 KCl<sub>(aq)</sub>內，即會產生電池式電流，故量測時不需要外加電壓即可使用。

### 2.3 溶氧感測器簡介

感測器原為“sense”是感覺、知覺意思之拉丁語。爲了了解市場上溶氧感測器之功能及特性，本研究將國外市售產品中常見的感測器之規格、特性等整理於表 1，雖然表中可提供之資料相當有限，但是仍可檢討其設計及比較其功能。

由表 1 中可明顯看出，各家廠牌之量測原理幾乎均採用 Galvanic Cell 原理，可能因爲以 Galvanic Cell 爲原理之感測器操作時，不需要外掛電源供應器即可使用。另外，與 Polarographic 式感測器相比，連續性量測感測器的氧氣透過膜均較厚，很明顯是因爲連續性感測器的環境需求，需要比較耐用的透氣膜。在表中，Polarographic 式感測器在應答時間上明顯優於其

他 Galvanic 式感測器，以實驗室單點量測對時間短的需求來看，這是不難理解的。至於在最低流速方面，Polarographic 式感測器明顯高於其他廠牌的，顯然比較不適合連續性量測的環境狀況。

表 1 彙整出七種 Galvanic 式溶氧感測器的比較，其中部分資料取自朱等(1997)。顯然 OxyGuard 感測器在最低流速的限制優於 Royce。OxyGuard 感測器在尺寸上優於 pHOX 及 Contronic。雖然其他感測器有一些獨到的功能，例如 Royce 的應答時間較快且具有自動壓力和鹽度補償，而 Contronic 有自動清潔和校正功能，但應用在一般生物生產業者使用需求，這些特色均比不上 OxyGuard 在最低流速和尺寸上的優勢來得重要。因此，本研究以市售 OxyGuard 感測器做爲對照組。

### 2.4 自製感測器相關材料

#### (1) 電極材料

選擇兩種電極金屬時應避免使用同一種類金屬，如金(Au)有良好之催化氧氣之特性，但當

表 2 市面上各金屬之規格與單價表(2004 年 11 月調查)

金屬	Pt	Cu	Cu	Cd	Ag	Ag	Pb
$\psi$ (mm)	0.6	0.5	0.7	0.7	0.6	2	0.3
單價	40 元/公分	450 元/公斤	550 元/公斤	30 元/公尺	250 元/公尺	900 元/公尺	300 元/公尺

表 3 透氣膜材質比較表

材 質	耐熱溫度(°C)	透氣率(ml/m <sup>2</sup> ·h)	透水性(g/m <sup>2</sup> ·24h)	單 價	產地
FEP 膜	205	116000	6.2	600 元/6 <sup>cm</sup> ×6 <sup>cm</sup> ×10 片	美國
PVDC 保鮮膜	140~155	2	10~20	100 元/30 <sup>cm</sup> ×20 <sup>m</sup>	日本
PE 保鮮膜	100~110	350~400	20~50	17 元/30 <sup>cm</sup> ×30 <sup>m</sup>	台灣
PVC 保鮮膜	130	140~150	200~250	60 元/30 <sup>cm</sup> ×20 <sup>m</sup>	台灣

兩電極同時使用金作為電極，又在潮濕環境中，在電氣化學反應下易發生腐蝕現象。

本研究曾於 2004 年 11 月調查國內採購多種金屬材料之難易性及其尺寸與單價，列如表 2。

#### (2) 透氣膜

一般溶氧感測器之透氣膜材料大多為 FEP (Fluorinated Ethylene Propylene, 四氟乙烯和六氟丙烯之共聚物, 極高透氣性與低透水性), 本研究使用之 FEP 為美國 YSI 公司製造, 孔隙為  $\psi$  4.7 $\mu$ m, 尺寸方形 6<sup>cm</sup>×6<sup>cm</sup>, 每包 10 片, 價格為 600~800 元, 其特性為光滑的表面, 完全不受各種腐蝕的化學藥劑作用, 在六種鐵氟龍中擁有最佳的透氣能力; 而本試驗之對照組 Oxyguard 使用之透氣膜為 PTFE (Polytetrafluoroethylene 聚四氟乙烯)。

市面上找尋可透氣不透水之薄膜材質並不多, 而保鮮膜與上述要求條件相近, 因此, 可做試驗加以探討。市售常見之三種保鮮膜與本試驗使用之 FEP 的物性資料比較如表 3, 由於 FEP 要求條件為高透氣低透濕材質, 並且透氣率是所有鐵氟龍中最高的, 因此, 我們選用單價較低之 PVDC (Polyvinylidene chloride 聚偏二氯乙烯, 可透氣且低透濕性)保鮮膜與 PE (polyethylene, 聚乙烯, 高透氣率且與 PVDC 相較之下有較高的透濕性)保鮮膜與單價高的 FEP 作為對照比較實驗的半透膜材料。

因選用之透氣膜不同, 各種膜的透水量亦不盡相同, 為了避免電解液濃度因透水而改變, 依

照表 3 中所提及各透氣膜之透水量, 換算成試驗使用之管徑大小, 得到各管徑尺寸下每種透氣膜每日透水量可能所造成的誤差, 結果列於表 4。由表 3 可知, FEP-Teflon 因為它的透水性最小, 外部水樣不易進入管內, 因此對電解液造成的影響最小; 而 PE 保鮮膜的透水性最大, 對電解液造成的影響最大, 但經由表 4 中換算後, 各種透氣膜對電解液所造成的誤差值均很小, 誤差值小於 0.5% 為可接受範圍。

#### (3) 電解液

電解液是指電化電池反應時, 使產生的離子發生移動而使電解液能保持電中性, 它可能為活性物質, 亦可能為不發生作用的電解質。由表 1 得知, 各廠牌使用之電解液有 NaCl、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KOH、KHCO<sub>3</sub> 及 KCl 等五種, 是依不同電極反應而定。而台灣市售電解液, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 單價為 80 元/罐, KCl 單價為 90 元/500g, KOH 單價為 100 元/500g; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 與 KOH 分別為強酸與強鹼, 具有強烈的氧化力和還原力, 為強解離性之電解液, 相對的腐蝕性亦很強, 為避免填裝過程不便, 故本研究擬用偏中性之 KCl 做為試驗之電解液。

#### (4) 感測面積之影響

當待測水體以一定之流速流過溶氧感測器表面時, 水中的溶氧亦一同通過感測器, 水中之各種氣體均可通過感測器之透氣膜, 但只有氧氣可造成內部電極與電解液之還原反應; 當感測器管徑面積愈大時, 通過透氣膜的水中溶氧量亦會

表 4 不同管徑尺寸下各種透氣膜每日透水量之誤差表

管徑尺寸	大 (內徑 18.5mm)	小 (內徑 12.2mm)
與待測水樣接觸面積 $A(\frac{\pi D^2}{4})$	2.688cm <sup>2</sup>	0.8956cm <sup>2</sup>
管內容納電解液體積 $V(A \times h)$	2.688cm <sup>3</sup>	0.8956cm <sup>3</sup>
FEP-Teflon 每日透水量 $Q(\frac{6.2 \times A}{10^4})^*$	1.67×10 <sup>-3</sup> g/day	5.55×10 <sup>-4</sup> g/day
FEP-Teflon 對電解液的誤差( $\frac{Q}{V}$ )	0.062%	0.0619%
PVDC 保鮮膜每日透水量 ( $\frac{15 \times A}{10^4}$ )**	4.03×10 <sup>-3</sup> g/day	1.34×10 <sup>-3</sup> g/day
PVDC 保鮮膜對電解液的誤差( $\frac{Q}{V}$ )	0.1501%	0.1496%
PE 保鮮膜每日透水量( $\frac{35 \times A}{10^4}$ )***	9.41×10 <sup>-3</sup> g/day	3.13×10 <sup>-3</sup> g/day
PE 保鮮膜對電解液的誤差( $\frac{Q}{V}$ )	0.350%	0.349%

註：\* 6.2 為 FEP-Teflon 之透水量

\*\* 15 為 PVDC 保鮮膜之平均透水量

\*\*\* 35 為 PE 保鮮膜之平均透水量

相對提高，而得到電氣化學反應的電壓值應會大於小管徑面積者。如表 1 為多種市售感測器的薄膜接觸面積直徑約 12~15mm。因此，本試驗擬比較兩種不同接觸面積的設計，內徑分別為 12.2mm 及 18.5mm 等兩種尺寸進行比較分析。

#### (5) 電流導線標準長度

在一般導體之導線兩端接上可變的電位差 V，利用電阻 R 使導線兩端電位差 V 與電流 I 成線性關係時的比例常數，金屬導體皆有此重要的結果。

導線上電阻 R 與材料特性關係可由公式 1 表示：

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots(1)$$

可視為導線電阻的一般定義。ρ 為導線材料的電阻率，L 為導線長度，A 為導線截面積，電阻單位為歐姆(ohm，符號為 Ω)。由此可知，導線上的電阻就某一材料而言，線徑(即截面)越小，電阻愈大，而長度越長電阻也越大。導線材料上的電阻率 ρ 的倒數 1/ρ 稱為導電率 σ。因此

在取材上盡量使用高導電率，即低電阻率，則其電阻就愈小。

因此，本研究試驗的電流導線長度介於各廠牌之間，包括 2m、3m、4m 及 5m 等四種長度，探討各種長度與所測得電壓值是否有直接影響。

#### (6) 電流導線材質

一般市售的溶氧感測器均使用具有隔離訊號功能的導線，本研究測試一種功能相近的導線，為採用鋁箔銅網雙層遮蔽避免電壓受到干擾，適用於量測極微小電流，但缺點為不易取得；因此，也測試另一種容易取得的一般電線，作為對照試驗參數。

### 2.5 感測器之適用性

一般而言，感測器之優劣及其適用性通常可依以下四項主要特性作概略判定。

- (1) 應答時間(response time)：被測物質進入感測系統後並傳出訊號且達到穩定狀態(steady state)的 90%所需時間。
- (2) 靈敏度(sensitivity)：感測系統對單位待測

物所產生之訊號大小；對溶氧感測器而言，即為每單位待測物濃度(ppm)產生一毫安培的電流(mA)，亦即 mv(或 mA)/ppm 關係。不穩定的因素也包含溫度、溼度及感測器的老化等，會對其造成影響。

- (3) 穩定性(stability)：感測系統在使用一段時間後，系統的基準線是否有偏離原點的現象。
- (4) 選擇性(selectivity)：除被測物質外，尚有其他物質對在感測系統中產生訊號，因此選擇性的定義為感測器對偵測物質的訊號佔總訊號的比例。

綜合以上敘述，本研究歸納出一個良好之溶氧感測器，最重要的就是必須同時擁有精確性、高靈敏度及良好之穩定度等特性，本研究即以這些特性來判別自製感測器之適用性。

### 三、試驗設備及方法

#### 3.1 感測器製作

1. 感測器製作材料
  - (1) 電解液：氯化鉀 KCl，單價 90 元/罐。
  - (2) 金屬電極：Au+Ag 及 Ag+Zn 兩種組合。金銀電極組，單價 420 元/支；銀鋅電極組，單價 200 元/支。以上材料為訂製價格。
  - (3) 透氣膜：FEP-Teflon 膜(美 YSI 公司)、PVDC 保鮮膜(日本)及 PE 保鮮膜(台灣)等三種。以每片  $6\text{cm}\times 6\text{cm}$  估價，FEP-Teflon 材約需 60 元，PVDC 材僅需 0.6 元，PE 材需 0.003 元。PVDC 材單價為 Teflon 材的百分之一，而 PE 材單價僅為 PVDC 材的兩百分之一。
  - (4) 電流導線：雙層遮蔽電腦線(鋁箔銅網)，單價 3.7 元/公尺；一般電線，單價 4.6 元/公尺。
  - (5) 感測器外殼：塑膠水管 PVC 材質硬質，內徑為  $18.5\text{mm}$ ，購入水管需自行裁製加工，單價為 0.05 元/個；壓克力材質圓管，內徑為  $12.2\text{mm}$ ，委外加工裁製雙凹槽及刨光等，單價 80 元/個。
  - (6) 電阻： $1\text{k}\Omega$ ，單價 0.2 元/個。

- (7) “o”型橡皮環：固定透氣膜用，固定於外殼雙凹槽內。
- (8) 鉀槍、鉀錫：電流導線與金屬電極之連接。
- (9) 矽立康(silicone)：固定各種材料用途，75 元/罐(260g)。
- (10) 多功能電錶：BRYMEN，BM850，最小讀數 $\pm 0.01\text{mv}$ 。
- (11) 定積瓶：調配電解液之水溶液。

#### 2. 製作步驟

- (1) 將活性較低的陰極(+，cathode)金屬及活性較高的陽極(-，anode)金屬與電流導線連結，並以塑膠材料之支撐基座與感測器外殼相連結。
  - (2) 以矽立康灌入感測器內，固定電極基座與電流導線，如圖 1 所示，約放置半日以上，待其凝固後，將電解液充填入兩金屬之間之空隙。
  - (3) 將透氣膜被覆於該斷面上，使正極緊貼於透氣膜上，盡量避免有氣泡產生以免影響電流讀值，再以“o”型橡皮環固定透氣膜。
  - (4) 在電流導線另一端正負極，加上  $1\text{k}\Omega$  電阻連接，可將電氣化學反應產生之電流訊號強度轉化為電壓訊號，並藉以放大電壓強度，日後可以電壓自動記錄器進行自計監測工作。每一個模組分別製作 16~40 個不等。
  - (5) 感測器完成後，需浸於純水中一天，使金屬與電解液達成系統的平衡穩定，才可繼續做檢量線的試驗。
- 自製溶氧感測器構造示意圖如圖 1 所示。

#### 3.2 mv-ppm 檢量線試驗

##### 1. 試驗設備

##### (1) 試驗藥品：

- a. 脫氧劑：亞硫酸鈉  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ，單價為 210 元/罐。
- b. 蒸餾水

##### (2) 儀器與設備：

- a. 多功能電錶：BRYMEN，BM850，最小讀數 $\pm 0.01\text{mv}$ 。

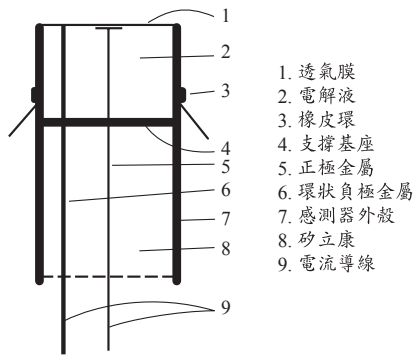


圖 1 自製溶氧感測器構造示意圖

- b. 丹麥製溶氧感測器：OxyGuard Dissolved Oxygen Probe，對照組用。
- c. 攪拌器：Fargo instruments co.，MS-90，提供燒杯內樣本水最小流速。
- d. 打氣機：Rambo，EP-9000，增加溶氧量。
- e. 精準溫度計：溫度範圍 0~50°C，±0.01°C，量測水溫。
- f. 燒杯(1000ml)：盛裝不同溶氧濃度水樣。

## 2. 檢量線試驗

- (1) 以打氣機與脫氧劑分別調配飽和溶氧水及脫氧水兩種，利用此兩種水樣調配出約 25%、50%及 75%等三種不同溶氧飽和度之水樣，共有四種代表低、中、高及飽和等不同溶氧濃度的水樣，分別以不同燒杯盛裝。
- (2) 將自製感測器與對照組丹麥製感測器 (OxyGuard)置於同一燒杯內，燒杯底下以攪拌機維持最低流速，待其電壓值穩定後，分別測其電壓值(mv)、溫度(°C)，完畢後換到下一燒杯計測。
- (3) 先由低溶氧燒杯依序計測至高溶氧燒杯，此為增氧檢量線。再由高溶氧燒杯依序計測至低溶氧燒杯，此為耗氧檢量線。以上將探討兩條不同變化斜率的差異性。以因應現實環境中，溶氧增加或減少的實際變化，提供日後發展自記監測儀器時，更切合真值的能力。
- (4) 以 OxyGuard 感測器測值為對照值，測出自製感測器之溶氧飽和度檢量線，依該水

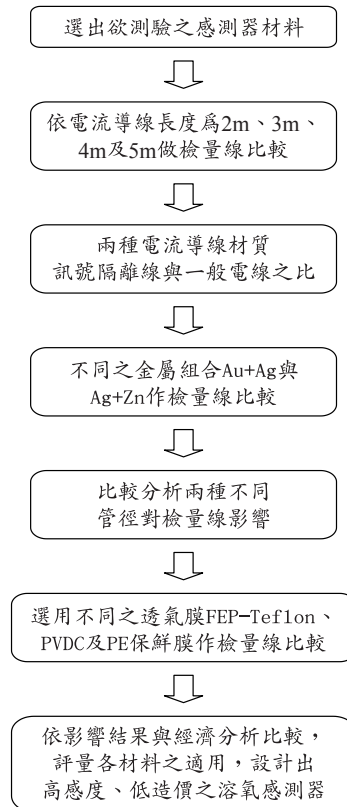


圖 2 試驗流程圖

溫，可由表找出飽和溶氧量，再依溶氧飽和度之比例，即可算出各杯水樣之溶氧量 (ppm)。

- (5) 分別製作增氧檢量線與耗氧檢量線，分別以 mv - ppm 與 mv - %表示，即  $y(\text{ppm}) = ax(\text{mv}) + b$  與  $y(\%) = ax(\text{mv}) + b$  之線性方程式關係，且計算各相同模組的斜率 a 之相關係數( $R^2$ )與靈敏度(mv / ppm)。

## 3.3 感測器材料改變設計試驗

圖 2 為本試驗之流程圖。先探討電流導線長度改變對檢量線之影響，由影響大小評估其長度之適用性，決定最適導線長度後，後續試驗即以此長度為基準。對每一欲改變之材料分別作增氧、耗氧檢量線試驗，探討每一個變數對所得的電壓之影響，判斷其靈敏度、精確度及相關係數之變化，以評估各種不同材料適用性。



表 5 感測器試驗材料及製作個數表

模組	改變材料	製作個數
導線長度	2m	10
	3m	10
	4m	10
	5m	10
導線材質	訊號隔離線	10
	一般電線	9
電極材料	Au+Ag	8
	Ag+Zn	8
感測面積	12.2mm	8
	18.5mm	9
透氣膜	FEP-Teflon	9
	PVDC 保鮮膜	11
	PE 保鮮膜	12

本試驗改變感測器內部五種材料，包括電流導線長度、電流導線材質、電極材料、透氣膜及感測面積等五種改變，整理如表 5，以下分別敘述各材料改變之影響。

#### 1. 電流導線長度改變

由表 1，可知連接溶氧感測器之電流導線標準長度均在 2~7m 之間，而電流導線之長度是依現地環境量測需要而決定的；而電流長度愈長會增加電阻，固然會影響所得的電壓值，由公式 1 來看，影響似乎不大。以銅導線為例，其電阻率  $\rho=1.7 \times 10^{-8}$  歐姆·m，若將電流導線長度定為 5m，導線直徑大小為 2mm，其電阻僅為  $6.75 \times 10^{-3}$  歐姆，由此可知，所產生之電阻增加比是很微小的；故本研究將電流導線之長度裁剪為 2m、3m、4m 及 5m 等四種長度分別作檢量線，並觀察導線長度對電流變化之影響。

#### 2. 電流導線材質

一般使用溶氧感測器均採用良好之隔離訊號導線，但由於此種導線不易取得，且使用久了容易斷裂，而溶氧感測器所傳輸之電壓值均為微小電壓，因此，本試驗採用雙層遮蔽電腦線(鋁箔銅網)與日常生活常用之電線相作比較，觀察兩者之間所得之電壓值是否會有差異，若不失其電壓真值，將能以一般電線取而代之。

#### 3. 電極材料改變

兩金屬電極發生反應時所產生之電位差，以其電壓值之差異大小來判斷其金屬選擇之優劣。由於一般貴金屬，如金、銀等，有良好的催化氧氣之特性，因此，本研究依此兩種金屬做不同組合搭配，如 Au+Ag 與 Ag+Zn 等兩種電極金屬，比較其檢量線之相關性、靈敏度及精確度之高低。

#### 4. 感測面積改變

由於水中溶氧與接觸面積呈正相關，且與可使用時間長短有關，因此，本研究欲判別接觸面積大小可否影響感測器之靈敏度及精確度。於是本試驗配合市售 PVC 水管規格尺寸，選取內徑 18.5mm 及壓克力材質圓管內徑 12.2mm 等兩種尺寸，分別探討其相對應檢量線差異。

#### 5. 透氣膜改變

一般之溶氧感測器是以透氣薄膜式設計，大約每 1~3 個月即須更換薄膜及補充或更新電解液，由於市售之 FEP-Teflon 價格單價並不便宜且為有時效性之耗材，因此，本研究探討是否能以價格低廉之 PVDC 保鮮膜或 PE 保鮮膜取代，比較不同透氣膜的感測能力，以降低此方面材料成本。

### 3.4 資料整理與分析

將各組試驗後得到的數據以 OxyGuard 為基準，算出各杯水樣之溶氧量(ppm)，再依照感測器的電壓值與溶氧量之關係，求得電壓與溶氧量的檢量線。

#### 1. 增氧、耗氧檢量線比較

為了探討增氧與耗氧檢量線是否有遲滯現象，本試驗分別量測增氧及耗氧檢量線來比較，將增氧檢量線與耗氧檢量線之斜率相除得到比值再取標準差，藉以找出每一個測量值對增氧過程與耗氧過程之比值平均值可能偏差的程度。

#### 2. 數據整理

依照電壓與溶氧量之關係，得到檢量線  $y(\text{ppm})=ax(\text{mv})+b$  及相關係數 R 值，每一組相同製作產品所得的 a 值及 R 值分別作平均，可得到檢量線之平均相關係數(R)與平均靈敏度(1/a)。相關係數平均值高低決定電壓與溶氧量是否有良

好的線性相關及適用性，靈敏度平值大小可知該材料組合有無較好的電壓反應。

### 3. 經濟分析

試驗各種材料後，分析各材料之適用度，利用較佳的材料組成溶氧感測器之最佳模組，利用自製溶氧感測器對水中溶氧反應的速度找出應答時間，並與其他廠牌進行使用材料的比較及成本的差異。

## 四、結果與討論

將各種材料之變因做逐步探討，依各組試驗之檢量線相關係數、靈敏度、材料單價及其優缺點等因素，判別材料優劣及適用性，且以材料成本比較其經濟性。各項結果如下：

### 4.1 電流導線長度改變

#### 1. 導線長度改變之影響

本單元變因為電流導線長度，其中，感測器的電流導線長度分別為 2m、3m、4m 及 5m 等四種長度的訊號隔離線各 10 條，其他固定設計是以 FEP-Teflon 膜、Ag+Zn 的電極搭配、KCl 電解液及內徑 12.2<sup>mm</sup> 的小尺寸管徑等組合而成。先製作 40 個溶氧感測器，依電流導線，觀察其長度改變對電壓測值之影響。

取增氧檢量線的相關係數( $R^2$ )及靈敏度(單位為 mv/ppm)作圖於圖 3，就相關係數而言，改變電流導線長度對其影響不大，每種長度都具有極良好的線性關係，自 2m、3m、4m、5m 長分別為 0.97、0.993、0.991、0.996；以靈敏度觀察，發現長度的變化與靈敏度(1.117、0.874、0.784、1.062)亦無互相對應關係。考慮在現地測量時經常需要較長的導線，因此，本研究後續試驗之導線長度皆統一使用 5m 作設計。

#### 2. 增氧與耗氧檢量線之差異性

為了探討增氧與耗氧檢量線是否有遲滯現象，本試驗分別量測增氧及耗氧檢量線來比較，將增氧檢量線與耗氧檢量線之斜率相除得到比值再取標準差(standard deviation)，藉以找出每一個測量值對增氧過程與耗氧過程之比值平均值可能偏差的程度，得到結果如表 6 所示。

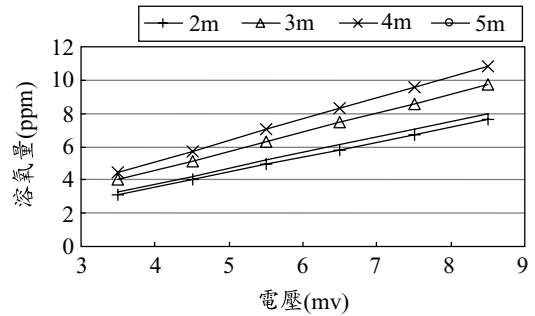


圖 3 不同導線長度之感應電壓強度與溶氧量關係圖

表 6 增氧與耗氧檢量線斜率比值之平均與標準差

電流導線長度	2m	3m	4m	5m
增氧斜率 耗氧斜率	平均±標準差 (n=10)	平均±標準差 (n=10)	平均±標準差 (n=10)	平均±標準差 (n=10)
溶氧飽和度 (%)	1.005 ± 0.047	0.998 ± 0.109	1.044 ± 0.054	0.988 ± 0.043
溶氧量 (mg/L)	0.994 ± 0.054	0.999 ± 0.126	1.051 ± 0.056	0.995 ± 0.047

表 6 中，依照平均及標準差可知增氧與耗氧之斜率的變化量很小，可視為同一條檢量線，因此，後續試驗將合併增氧及耗氧檢量線，均以一條檢量線來表示。對於反應現場溶氧增剪變化，有簡易反應的正面效益。

### 4.2 不同電流導線材質之影響

將電流導線材質種類當成變因，本研究比較訊號隔離線及一般電線的訊號感應差異。在 19 組的試驗中，包括訊號隔離線 10 組及一般電線 9 組，其他固定設計為使用 FEP-Teflon 膜、Ag+Zn 的電極搭配、KCl<sub>(aq)</sub> 電解液、內徑 12.2<sup>mm</sup> 的小尺寸管徑及 5m 的電流導線等組合而成。將測得檢量線試驗結果繪得圖 4。得知，將兩種電流導線經相關係數及靈敏度比較，發現兩種導線的平均相關係數相差很小(訊號隔離線 0.996、一般電線 0.974)，但一般電線的靈敏度(mv/ppm)為 1.579 稍高於訊號隔離線的 1.062；兩條線單價相差不大，但訊號隔離線不易取得、且靈敏度較一般電線低，因此，後續試驗均使用一般電線作為電流導線。

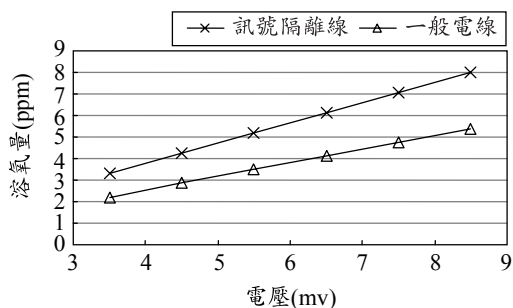


圖 4 不同導線材質之感應電壓強度與溶氧量關係圖

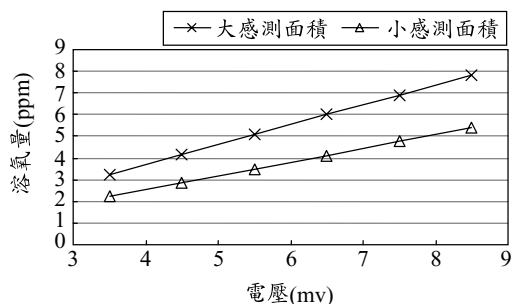


圖 6 不同感測面積之感應電壓強度與溶氧量關係圖

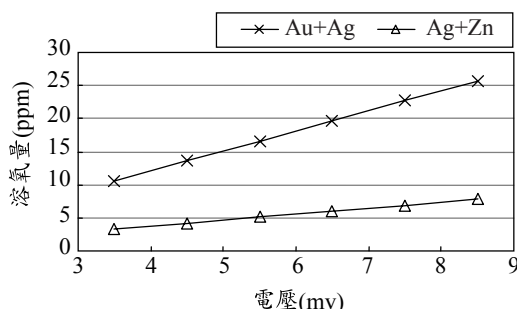


圖 5 不同電極之感應電壓強度與溶氧量關係圖

### 4.3 不同金屬電極組合之影響

當設計變因為金屬電極時，本研究以 Au (+) 與 Ag (-) 及 Ag (+) 與 Zn (-) 等兩組進行檢量線試驗，各製作 8 組，一共製作了 16 組；其固定設計為使用 FEP-Teflon 膜、 $KCl_{(aq)}$  電解液、內徑 18.5<sup>mm</sup> 的大尺寸管徑及 5m 的一般電線等組合而成，試驗結果示於圖 5。得知，Au + Ag 與 Ag + Zn 均有良好之相關係數(0.959 與 0.977)，即電壓值與溶氧量之線性關係都很好。Au 的穩定性高，且具良好催化氧氣之特性，但 Au + Ag 組合的靈敏度(單位為 mv/ppm)低(0.331)，原因為金屬活性相近，氧化電位  $E^{\circ}$  位置數值很接近，因此，產生之電動勢相對較小，試驗時量得的電壓範圍都不超過 2mv；反觀 Ag + Zn 組合的靈敏度高(1.085)、單價低及量得的電壓範圍大等優點。得知，與 Au + Ag 組合相比，Ag + Zn 組合較適合當溶氧感測器的電極。

### 4.4 與電解液之接觸面積大小的影響

分別以內徑 18.5mm 及內徑 12.2mm 的兩種

大小的管徑為設計變因，共製作 17 組試驗，包含大管徑面積 8 組及小管徑面積 9 組，作檢量線試驗。其他固定設計為使用 FEP-Teflon 膜、Ag + Zn 的電極搭配、 $KCl_{(aq)}$  電解液及 5m 的一般電線等組合而成。所得結果示於圖 6。可知，大、小兩種感測面積的 mv-ppm 關係均有良好的相關係數(0.997 與 0.974)，即其所對應的檢量線公式均可適用；在靈敏度(單位為 mv/ppm)方面，小尺寸管徑靈敏度(1.579)高於大尺寸管徑(1.085)。由於小尺寸管材為委外加工過的產品，所以在製作、組裝感測器時較方便且美觀，但相對的單價則較高(80 元/個)；反觀大尺寸為一般 PVC 塑膠水管，雖單價低(0.05 元/個)、但除了靈敏度較低外、因自行加工製作費時、難度較高、電解液容易滲漏、甚至有失敗風險存在。綜合上述評估，本研究建議不論使用何種尺寸管徑當感測器之外殼，均應有較高品質的加工技術。

### 4.5 不同透氣膜選擇之影響

本單元改變透氣膜為設計變因，本研究採用 FEP-Teflon、PVDC 保鮮膜及 PE 保鮮膜等三種透氣膜試驗，包括 FEP-Teflon 製作 9 組，PVDC 保鮮膜製作 11 組，PE 保鮮膜製作 12 組，一共製作了 32 組感測器。其他固定設計為使用 Ag + Zn 電極、 $KCl_{(aq)}$  電解液、內徑 12.2<sup>mm</sup> 的小尺寸管徑及 5m 的一般電線等組合而成。試驗結果示於圖 7。得知，使用 PVDC 保鮮膜之感測器讀得的 mv-ppm 關係之相關係數並不高(0.584)，主要原因為 PVDC 保鮮膜之透氧率僅有  $2 \text{ ml/m}^2 \cdot \text{h}$ ，氧

表 7 自製感測器的材料成本與市售產品比較

項目	自製溶氧感測器		Oxyguard Probe <sup>(#)</sup>	Oxyguard probe420 <sup>(#)</sup>	KRR <sup>(#)</sup>	Automata Inc. D.O.WATCH <sup>(*)</sup>
	種類	價格				
電極	Ag+Zn*	200 元	Ag+Zn	Ag+Pb	Pt+Pb	Au+Pb
透氣膜	PE	0.003 元	PTFE Teflon	PTFE Teflon	Teflon	Teflon
電解液	KCl <sub>(aq)</sub>	0.013 元	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	KOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
感測器外殼	小尺寸圓管**	80 元	訊號隔離線	訊號隔離線	—	—
電流導線	一般電線 5 <sup>m</sup>	23 元	—	—	—	—
備註	矽立康、電阻	0.8 元	—	—	—	—
應答時間	—	30 sec	60 sec	60 sec	15 sec	60 sec
單價	—	約 300 元	約 1.5 萬元	約 1.5 萬元	約 0.5 萬元	約 1.8 萬元

註：\*表委外加工裁製的電極材料價格。 \*\*表委外加工裁製的壓克力材料外殼單價。  
其餘材料均為自行購入單價。

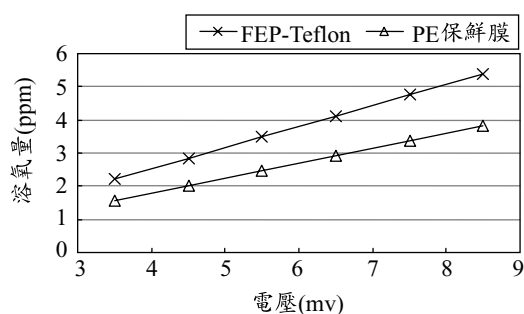


圖 7 不同透氣膜之感應電壓強度與溶氧量關係圖

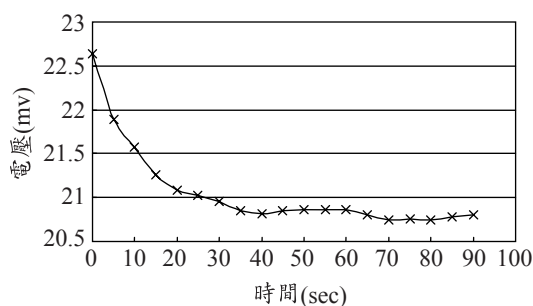


圖 8 自製溶氧感測器反應電壓與反應時間關係圖

氣不容易透過膜進入管內與金屬電極、電解液發生反應，導致電壓值與溶氧量並沒有以線性關係反應。因此，我們判斷 PVDC 保鮮膜並不適用。而 FEP-Teflon 與 PE 保鮮膜兩者均有良好之線性關係(0.974 與 0.973)；在靈敏度(mv/ppm)方面，PE 保鮮膜(2.376)比 FEP-Teflon 保鮮膜(1.579)靈敏，再加上 PE 保鮮膜單價低、易取得及安裝容易等優點，為一個良好之透氣膜材料選擇。

#### 4.6 感測器最佳模組

##### 1. 應答時間

由以上試驗結果得到自製溶氧感測器最佳模組，使用材料是以 Ag+Zn 電極組合，透氣膜採用 PE 保鮮膜，電解液使用 KCl<sub>(aq)</sub>，感測器外殼為委外加工壓克力圓管，以一般電線(5<sup>m</sup>)當電流導線等組合而成。

以此組合，在一高溶氧水樣中，測試反應電壓與反應時間之關係圖，圖 8 為其中一結果例，從進入感測水體後至達到 90%反應所須的應答時間為約 30 sec。僅為表 1 所示，Oxyguard 市售產品須 60 sec 的一半而已。

##### 2. 經濟分析

整理於表 7，平均一個自製溶氧感應器的成品所需材料成本不包含人工費用，所需要的材料成本約為 300 元；單以成本與市售產品互相比較，所用的材料相差不遠，但價格卻貴上 16~60 倍不等，則有效地降低產品單價。雖自製溶氧感測器檢測工作並未完全執行完畢，但後續檢測完畢後，產品亦將日趨完善，以達成低造價溶氧感測器，可以提供多一種產品選擇。

## 五、結論與建議

### 5.1 結論

1. 自製溶氧感測器使用材料是以 Ag+Zn 電極組合，透氣膜採用 PE 保鮮膜，電解液使用  $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ ，感測器外殼為委外加工壓力圓管，以一般電線(5<sup>m</sup>)當電流導線等組合而成，各材料成本總價約為 300 元。
2. 本研究最佳模組共製作 12 個組數，此自製感測器的 mv-ppm 關係式為  $y(\text{ppm})=0.421x(\text{mv})-1.805$ ， $R^2=0.973$ 。
3. 自製溶氧感測器之反應快速，比丹麥製 OxyGuard 的 60 秒達 90%快。應答時間約為 30 秒，亦適合實際使用需要。
4. 經分析比較後，自製溶氧感測器的增氧檢量線與耗氧檢量線相差甚小，並無明顯的遲滯現象，因此，可簡易的準確反應現場水樣的溶氧變化。
5. 於製作感測器過程中發現，若於感測器作好當天立即做檢量線試驗，所讀取值較真值較低，且電壓值容易激烈跳動較不穩定，mv-ppm 檢量線之相關係數亦較浸水一日後的感測器低。因此，在灌完電解液後，需將感測器浸泡於純水中一日夜，待其內部電極與電解液達成穩定後，再進行檢量線試驗。

## 5.2 建議

1. 建議可探討使用飽和濃度的  $\text{KCl}_{(\text{aq})}$  電解液 (3M)，由於高濃度的電解液可以延緩溶液中陰離子的下降速率，以維持參考電位的穩定性並且延遲老化時間。
2. 後續可進行老化實驗，以確定丹麥製與自製感測器穩定性的差異。可用較高的溫度來作實驗，以增快金屬、電解液與氧氣的反應速率，減少老化試驗所需的反應時間。
3. 建議持續加入 PTFE 膜探討，雖然應答時間可能會增加，但檢量線之相關係數高、穩定度佳且價格低廉，應可作為良好之透氣膜。
4. 日後可持續探討不同電解液與金屬之反應搭配，比較電解液造成檢量線之靈敏度、精確度，並檢討其經濟性。

5. 由於透氣膜材料已改用便宜的 PE 保鮮膜替代，感測器成本亦隨之降低。若感測器久未使用，建議可將電解液放空，以免電解液與電極不斷反應，降低感測器使用壽命。
6. 在使用溶氧感測器時，可能常有碰撞發生，故在設計時，於感測面積部位應有良好的保護措施以增加耐撞程度。

## 參考文獻

1. 工業技術研究院環境與安全衛生技術發展中心，1993，“氣體監測器選用指引”，全華科技圖書股份有限公司。
2. 朱元南、侯文祥、熊光濱，1997，“養殖漁業水質監測系統架構與整合—感測器組”，行政院農業委員會漁業處成果報告。
3. 林景崎、蘇茂華、洪宜芳，2003，“電子材料之腐蝕與防蝕”，材料會訊，11(1):4~8。
4. 林嘉龍，2002，“設計微溶氧感測器之理論分析與模擬”，國立臺灣大學生物產業機電工程學研究所碩士論文。
5. 卓聰吉，2000，“水產養殖用多功能微感測器之研究設計”，國立臺灣大學農業機械工程學研究所碩士論文。
6. 侯文祥、廖中明，1996，“應用卡門濾波預警養殖池溶氧通量”，台灣水產學會刊，23(1)：17~29。
7. 徐崇仁，1997，“自動化超集約循環水養鰻專輯”，台灣省水產試驗所養殖漁業生產自動化技術服務團，p.33~35。
8. 郭家豪，2003，“以氧氣感測計及市售溫控器控制氮基爐氣之碳勢”，國立臺灣大學機械工程學研究所碩士論文。
9. 簡卉菁，2004，“利用微加工技術製造溶氧感測器”，國立成功大學化學工程研究所碩士論文。
10. 酒井信，1992，“膜を通じた酸素の水による吸收速度”，北海道大學水產彙報，43(4)：193~201。
11. Janata, J. (1989), “Principles of Chemical Sensors”, Plenum Press, New York.

12. Lide, D. R. (1995~1996), "Handbook of Chemistry and Physics", CRC, 76th Edition.
13. Olmsted & Williams (1997), "CHEMISTRY", third edition, Wiley.
14. Raible, R.W. (1975). "Survial and growth rate of channel catfish as a function of dissolved-oxygen concentration". Water Resources Research Center Publ. No. 33. Uni. Ark. Fayetteville. p.35.
15. Simco, B.A. (1976). "The reuse of water in commercial raising of catfish: phase two". Univ. Tenn. Water Res. Ctr. Res. Rep. No. 52. p .66.
16. Swingle, H.S. (1969). "Methods of analysis for waters, organic matter, and pond bottom soils used in fisheries research". Auburn Univ., Auburn, Ala. p.119.
17. T.J. Kim, T.H. Jurng, U.H. Chung, S.I. Hong (2001), "Simultaneous determination of oxygen transport characteristics of six membranes by hexagonal dissolved oxygen sensor system", Sensors and Actuators, B 72, p.11~20.

收稿日期：民國 94 年 8 月 31 日

修正日期：民國 94 年 9 月 29 日

接受日期：民國 94 年 10 月 24 日