

適用在黑潮洋流發電之水渦輪機葉片

潘煌鏗¹ 李傳宗¹ 李柏昌¹ 吳昱璇¹

¹高雄應用科技大學土木工程系

E-mail: pam@cc.kuas.edu.tw

摘要

目前國外的海流能發電所設計之水輪機啟動流速絕大多數均在 0.7m/s 以上，且額定流速均在 2m/s 以上，較不適合用在黑潮發電。針對台灣海流發電要進行商業運轉需要解決的關鍵性技術，提出一種適合於黑潮發電之 0.9 m/s ~ 1.5m/s 低流速的高效率水渦輪機，有別於工研院提出固定翼之包覆型海流渦輪機、中山大學發表之水平軸海潮發電系統離型機及臺灣海洋大學之垂直翼海流發電機，這裡提出的水渦輪機葉片之機械結構採太陽行星式設計，其渦輪機葉片可以隨著轉動位置不同而自轉，並繞著轉軸公轉。本研究計算在流速 1.0m/s 時所做的功及葉片受力，並利用有限元素分析葉片的結構強度。水渦輪發電機之行星式葉片在水流發電時，因位於無效區作功之葉片呈現水平狀態，使得有效區作功遠大於無效區，可以提高能量轉換。在流速 1.0m/s 之水渦輪機轉速 15rpm 時，得知渦輪機的總輸出功率可達到 4.22 kW，葉片的最大等效應力只有葉片強度的 3.27%，葉片最大總變形量 2.31mm，撓度只有 1/1731.6。

關鍵詞：葉片、水渦輪機、黑潮發電、太陽行星式。

1. 前言

近年來世界能源資源短缺及國際油價上揚，加上我國自產能源不足，進口能源依存度高達 99.3 % [1]，對民生及產業有嚴重的財政負擔，且對國家能源的安全來源形成不穩定。為達能源自主與安全的目標，並兼顧環境、經濟及永續經營的目的，再生能源的可利用性與可替代性具有永續發展的優點。在 2009 年的「全國能源會議」對再生能源訂有具體的推廣目標，例如於 2010 年再生能源發電裝置容量達到 513 萬瓩，2020 年達到 700 至 800 萬瓩，2025 年更達到 800 至 900 萬瓩，未來希望以達成我國總發電裝置容量的 12% 為目標 [1]。所謂再生能源包括風能、太陽光電、太陽熱能、生質能（含固態廢棄物衍生燃料、酒精汽油、生質柴油等）、地熱能、海洋能（含海流、潮汐、波浪、海洋溫差）及水力能等。

海流能發電是利用海流之穩定流速推動水渦輪發電機組來發電，與太陽能、風能等再生能源的發電方式相比，其能源來源比較穩定。目前世界上先進國家都在從事海流和潮流能源的研究，期待利用海流和潮流能源將來有可能做為替代核能、火力等能源的「新能源」，尤其在 2011 年 3 月 11 日的日本大地震引起

福島核災後，更引起大家對於海流和潮流發電的重視。台灣四面環海，估計台灣地區可供開發的海流發電之海流，以黑潮(Kuroshio)流經處和澎湖水道為佳 [2]，而兩者中，黑潮流經處之四個潛力海流發電場址(蘇澳外海、花蓮外海、綠島及蘭嶼)的發電潛能又高於澎湖水道。台灣有得天獨厚適合黑潮洋流發電的海域，在流經最靠近岸邊的台灣與綠島間的洋流厚度約為 200m~500m，流速約在 0.3m/s~1.6m/s，平均流速達 0.9m/s，在此條件下，初估台灣東部的黑潮流域具有 GW 級的發電潛能，例如黑潮在台東與綠島之間(北緯 23 度)、花蓮附近(北緯 23.5 度)、蘇澳附近(北緯 24 度)的洋流能量約 5.5GW [3]，相當於兩座核四電廠的發電量，若能加以開發利用，可取代部分的核能發電。

目前利用海流發電的理論是可行的，惟尚未達到可以商業開發的層次，若要大規模商業化地開發海流的能源，仍有待開發相關的水下技術與發電技術。針對黑潮發電，能在低流速(0.9m/s 至 1.5m/s)下發電的高效率水輪發電機組仍在持續發展中。

本研究提出一種適用在低流速的高效率發電機組之水渦輪機葉片，利用商用 CFD 套裝軟體，計算海流在 1m/s 均勻流場的水渦輪機葉片受力，並利用有限元素分析法使用來計算水渦輪機葉片所需的結構強度做為在黑潮發電水渦輪機葉片設計使用參考。

2. 海流水渦輪機發展

根據海流能量擷取轉換方式的不同，目前海流水渦輪機發電機組技術主要有垂直軸式和水平軸式等二種，技術內容大都不公開。垂直軸海流發電機組常被稱為潮汐柵欄式(tidal fence)結構，目前世界上已開發的垂直軸海流發電機組有加拿大 Blue Energy 公司提出一種 Davis 概念的四葉片垂直軸渦輪機 [4]，美國 GCK 公司提出 Gorlov 螺旋式渦輪結構 [5]，義大利 Ponte di Archimede 公司提出 Enermar 垂直軸潮流發電機 [6]，英國 Neptune Renewable Energy 公司的 Neptune Proteus NP1000 發電系統 [7] 等。而水平軸海潮流發電機組的原理是利用水平旋轉的葉輪機構在水流作用下旋轉，並帶動發電機進行發電，世界上目前發展水平軸海流發電機組以英國為主，有 Marine Current Turbine 公司的 Sea flow 發電系統及 Sea Gen 發電系統 [8]，SMD 公司發展的 TidEL 系統 [9]，Lunar Energy 公司發展的 RTT(Rotech Tidal Turbine)發電裝置 [10]，Tidal Generation 公司發展的 DeepGen Tidal Stream

Turbine [11]，另外在愛爾蘭的Openhydro公司也發展Open-Centre Turbine系統[12]。

至於我國洋流發電主要是針對台灣東部之黑潮發電為主，目前發展現況有工研院於2008年提出固定翼之包覆型海流渦輪機[13]；臺灣海洋大學於2011年發表垂直軸海流發電機，採用全沒水式的潮流發電機組，水渦輪扇葉的直徑80公分，潮流流動時可推動水輪扇葉轉動，經傳動系統轉動發電機發電，發電功率達到3kW [14]；中山大學於2012年發表的海潮流發電系統離型機，該系統採水平軸設計，葉片直徑60cm，最大發電功率可達1.5kW [15]。

但是目前國內和國外所設計的水渦輪機啟動流速絕大多數均在0.7m/s以上，且額定流速均在2.0m/s以上，比較不適合用在台灣黑潮發電。

3. 黑潮水渦輪機設計

目前海流水渦輪機無法應用在台灣黑潮發電的原因是水渦輪的發電效率不高，以習知的水車機構為例，圖1是傳統的水車機構，水車的一部份置放入水中，另一半在空氣中，當位於水面下方之水車葉片的正面迎向水流時，其所受的推力最大；另外，在水車上方之葉片位於空氣中(水面上方)，因空氣的阻力遠比水面下的阻力小，利用水車上下兩部份的葉片阻力不同，得以使水車容易轉動，故水流施力於葉片時可轉動葉片進而使該水車機構作功(work done)。然而，水車雖可轉動使用，但其實際所作的功則只限於下方有水流作用部分，效率無法完全發揮。

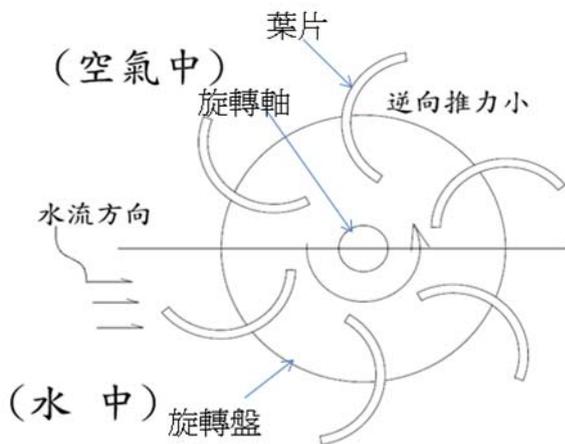


圖1 一半在水中的傳統水車機構

要應用於洋流發電時，帶動發電機組的傳統水車機構需要完全沒入水中，如圖2所示，此時位於水車下半部葉片在正面迎向水流時所受之推力為最大；而位於水車上半部的葉片亦正面對著水流，其所受之推力正巧與水車下半部之葉片的推力約略相同但方向相反，使得水車轉動軸的轉動形成相互抵銷作用，導致水車轉動的效率不彰，甚至無法轉動。

為解決上述問題以便提高發電機組的發電效率，並針對台東與綠島之間的黑潮最佳放置位置(海

面下約20m至50m，流速約0.9m/s至1.5m/s) [16]，這裡提出一種新式之水渦輪機葉片，有別於工研院之固定翼包覆型海流渦輪機、中山大學之水平軸海潮發電系統離型機及臺灣海洋大學之垂直翼海流發電機。

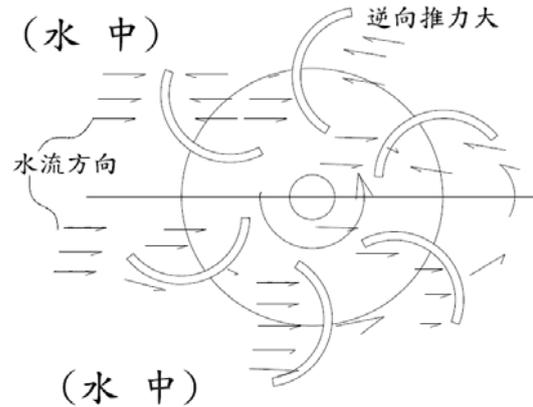


圖2 完全沒入水中的傳統水車機構

該水渦輪機葉片之機械結構採用太陽行星式設計，水渦輪機葉片可以隨著轉動位置不同而自轉，並繞著轉盤的轉軸公轉，如圖3的新型水車機構，水車的轉盤中心有轉軸，在轉盤的外緣設置可自行轉動的葉片。當新型水車機構完全沒入黑潮的水中時，位於水車下半部葉片會隨著轉盤公轉而自轉，利用自轉機構來改變葉片的角速度使形成正面對著水流，讓葉片具有較大的推力；此時，位於水車上半部葉片也同時利用葉片自轉改變角度，使其在水中的迎水面積減小，具有降低如圖2之傳統水車上半部葉片的逆向推力(無效區)功能，可增加水車作功效率。

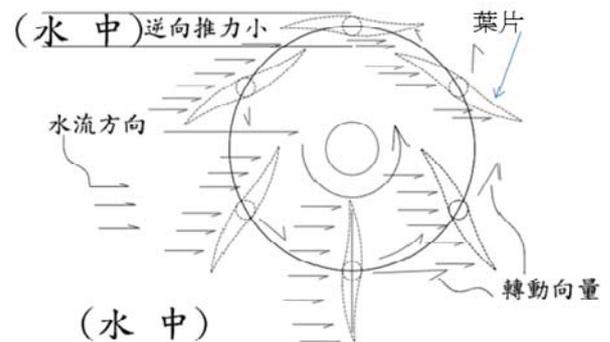


圖3 太陽行星式葉片的水車機構

行星式葉片的水車在位於轉盤上半部葉片會因自轉形成水平(平行於水流)，在設計水車機構時可節省水車機構的導管(duct)體積，而當導管的體積空間縮小時，會使葉片旋轉半徑變小，可提高葉片旋轉中心軸之旋轉速度。當應用於低流速之洋流(黑潮)發電時，有較高的旋轉速度是有助於提昇發電機組的發電效率。另外，也因導管體積空間縮小，能降低水車機構對洋流流速影響，減少洋流自然環境的破壞。

4. 黑潮水渦輪機計算

為獲得太陽行星式水渦輪機葉片的發電功率及葉片結構強度，使用的發電機有2組行星式葉片之水渦輪機，每組水渦輪葉片數量各有9片葉片，分別以等角度佈置在水車轉盤邊緣，葉片的高度334mm，葉片的長度4000mm，導管水流的入口高度2580mm，轉盤的旋轉直徑999mm。首先利用商用CFD套裝軟體(Fluent)，計算海流在1m/s均勻流場之水渦輪機葉片受力及水渦輪機總輸出功率，並將計算的葉片受力做為有限元素分析法的條件，分析水渦輪機葉片所需的結構強度，可提供黑潮發電之水渦輪機葉片設計參考。

4.1. 流體力學計算

利用 GAMBIT 軟體採二維(2D)非結構性網格，網格元素為三角形，使用 Sizing Function 於葉片周圍進行局部加密，如圖 4 所示，計算範圍為 $8.1 \times 6.7 \text{ m}^2$ ，網點數目有 1.7×10^5 點。在水流入口流速為 1.0 m/s 時的轉盤公轉轉速是 15 rpm，利用 Fluent 軟體的非穩態計算方式計算葉片受力及發電輸出功率。

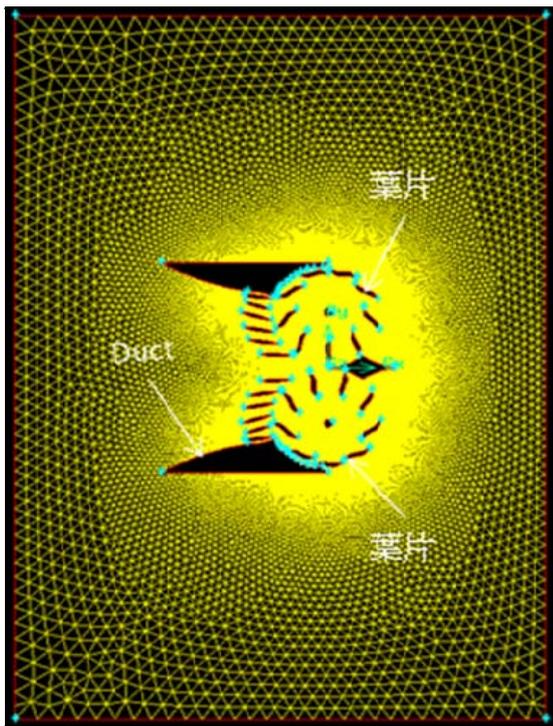


圖 4 二維局部加密非結構性網格(範圍 $8.1 \times 6.7 \text{ m}^2$)

經 Fluent 軟體數值計算後，圖 5 是單一葉片的輸出扭矩(N-m)，為單一葉片從 0 度位置到 360 度所作的功，其中 0 度表示葉片與水流垂直，依序逆時鐘旋轉增加葉片角度，直到葉片回復到垂直水流的 360 度。當扭矩為負值時表示葉片作正功，扭矩為正值時則葉片作負功，而正功對水車的旋轉有利。很明顯看出，在葉片約 40 度時的扭矩值最大。圖 6 為流速 1.0

m/s 時單一葉片從 0 度到 360 度方位所受的力，負值表示葉片承受推力。由圖 6 可得知葉片之最大受力為角度在 39.96 度時受 -1394.8N。

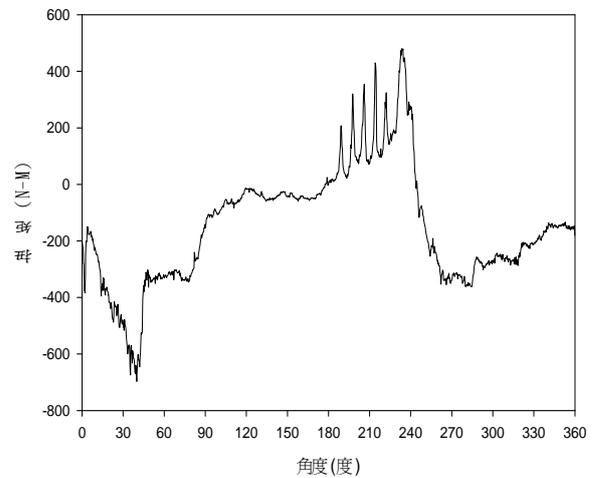


圖 5 單一葉片輸出扭矩

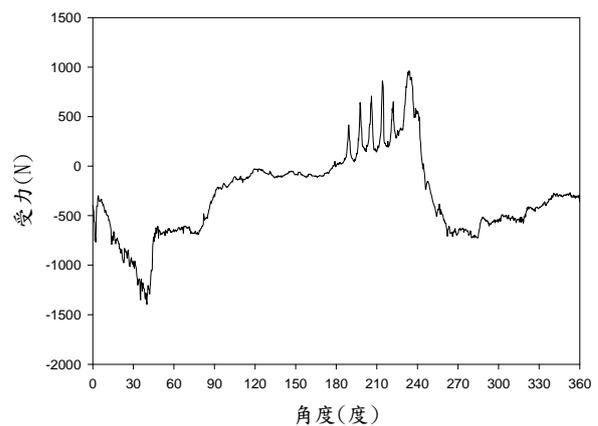


圖 6 單一葉片受力

因水渦輪機有 9 片之等角度佈置的葉片，經由圖 5 單一葉片結果推算水渦輪機之總輸出扭矩，顯示在圖 7。因水車轉盤的轉速是 15 rpm，每 4 秒一個週期，圖 7 是 9 個葉片在不同角度時的平均輸出扭矩，輸出扭矩有週期性，可做為葉片及水渦輪機設計參考。由圖 7 得知平均輸出扭矩 2689.47N-m 經由扭矩轉換功率公式： $P = T * N / 9551$ (其中 T 為扭矩 N-m, P 為輸出功率 kW)，算出水渦輪機的總輸出功率為 4.22 kW。與台灣已知水渦輪扇葉直徑 800mm 的垂直軸海流發電機發電功率 3kW [14] 或葉片直徑 600mm 之水平軸海流發電機最大發電功率 1.5kW [15] 比較，雖然水渦輪機的葉片結構型式不同且流速不同(額定流速均在 2.0m/s 以上)，但行星式葉片的水渦輪機在流速 1.0m/s 時之輸出功率為 4.22 kW，顯示行星式葉片可提高海流發電效率。

圖8 是水渦輪機輸出總壓力圖，單位Pa，得知導管內之水車前面對水流的壓力(橘色區)比水車後端背對水流(綠色區)的壓力大，顯示水渦輪機在水流1.0 m/s作用下能夠順利運轉，並輸出扭矩。當水渦輪機前後端的壓差越大，轉速越快，輸出的能量越大。圖8顯示，導管前端並未有嚴重的紊流產生，不會對導管產生太大的危害，且不會妨礙黑潮原有的流速，因此本文提出行星式葉片之黑潮水渦輪機是可行的。

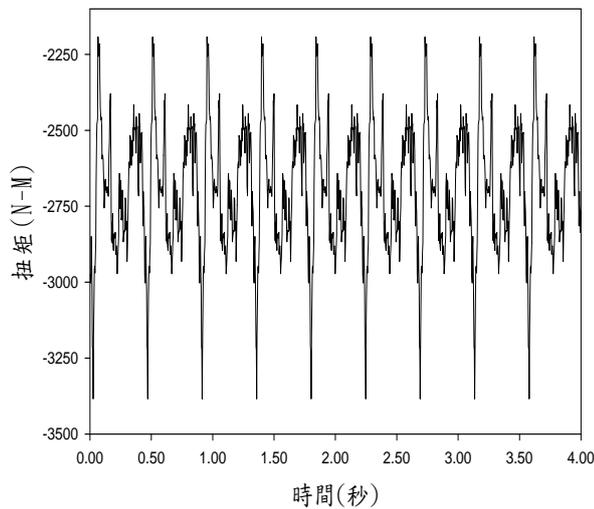


圖7 水渦輪機輸出扭矩

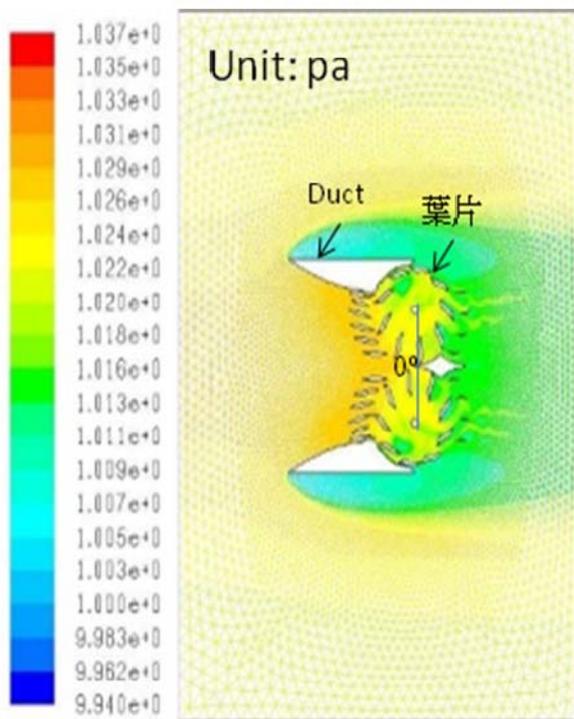


圖8 水渦輪機輸出總壓力

4.2. 葉片強度計算

由 1.0m/s 均勻流場中的水渦輪機葉片受力(圖

6)，選取單一葉片的最大受力-1394.8N 做為計算葉片強度的外力，其中負值表示推力。結構分析是用有限元素套裝軟體 ANSYS Workbench 13 之靜態結構 (Static Structure) 模組，計算葉片受力所需的結構強度。

葉片材料選用鋁合金(aluminum alloy)，材料密度 2.770 e-006 kg/mm³，降伏應力 280MPa，抗張強度 310MPa。葉片長度 4000mm，弦長(葉片高度) 334 mm。計算時葉片的支點有 2 點，其中支點 1 為固定端，設定為 Fixed Support，而支點 2 為活動端，設定為 Displacement。

計算之葉片網格採用 ANSYS 內部網格設定，網格精細度(relevance)設定為 100，網格大小設定為 50mm，因此葉片有 64164 網點，元素數目 35613 個，圖 9 為本計算之葉片結構計算網格，其中葉片的 X 面長度 4000mm，寬度 334 mm，葉片轉軸沿著長向 (Z 軸) 旋轉。

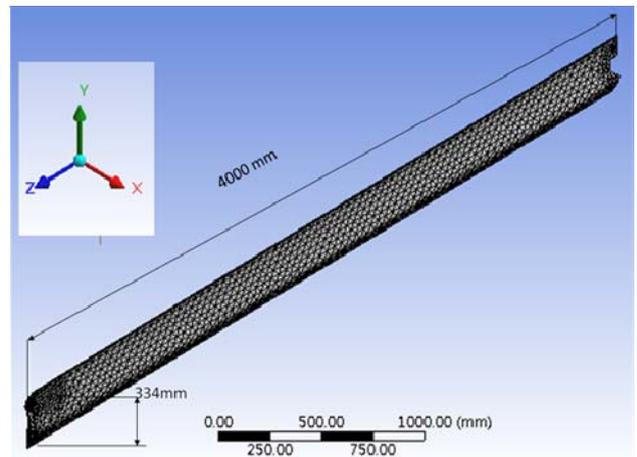


圖9 葉片結構計算網格

葉片(舵片)的施力設定以舵片之上面(+X)方向當作受力面，在X方向之受力面施加-1394.8N，在Y軸及Z軸的葉片受力則為0N，如圖10所示。

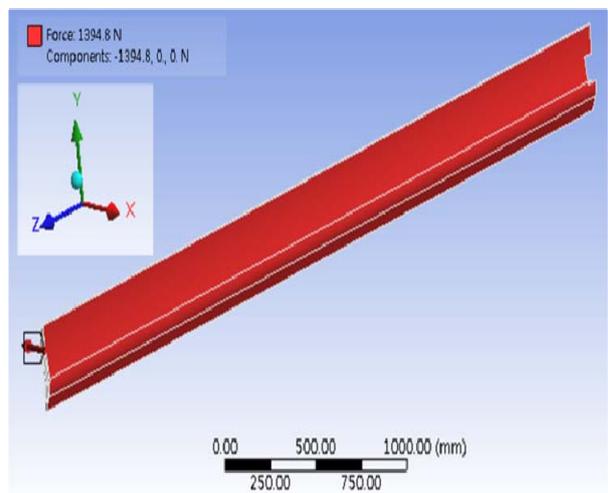


圖10 葉片施力

經過計算得到水渦輪機葉片在流場 1.0m/s 作用的等效應力(von Mises stress)分佈如圖 11，葉片轉軸(葉片長向中心區)附近的應力比較大，且葉片靠近轉盤之支點 1 的應力比葉片遠離轉盤之支點 2 的大。葉片的最大等效應力為 9.18MPa 小於材料的降伏應力 280MPa，約只有強度的 3.27%而已，故葉片的受力在彈性範圍內。

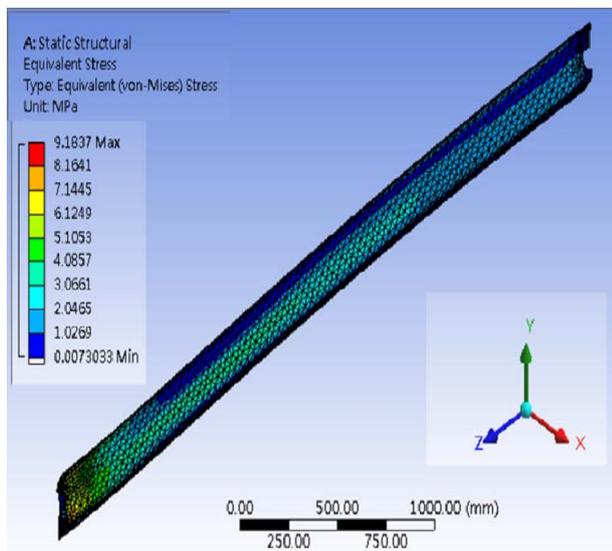


圖 11 葉片的等效應力

受水流最大推力-1394.8N作用的水渦輪機葉片的變形量如圖12所示，因靠近支點2之葉片的水流限制較少，葉片容易變形，所以遠離支點1端的變形(紅色區)最大，即越靠近支點1的變形量(藍色區)越少。如圖12所示，葉片的最大總變形量為2.31mm，若以葉片長度4000mm計算，得到葉片的變形量比值為 $2.31/4000 = 1/1731.6$ ，變形比非常小，表示水渦輪機之行星式鋁合金葉片能夠使用在黑潮發電。

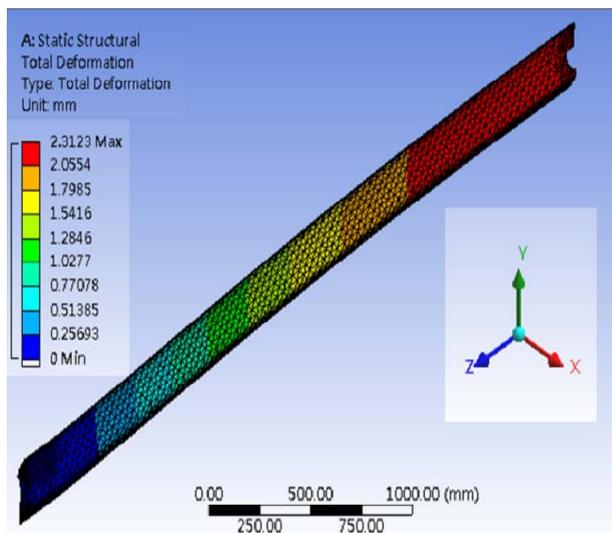


圖 12 葉片的變形量

5. 結論

本研究提出適用在黑潮發電之水渦輪機葉片，水渦輪葉片有 9 片，以等角度配置在水車轉盤邊緣，葉片高度 334mm，葉片的長度 4000mm，導管的水流入口高度 2580mm，水渦輪機的轉盤直徑 999mm，以黑潮之低流速 1.0m/s 流場通過葉片，模擬葉片的受力與強度，計算水渦輪機的輸出功率，得到下面結論：

- (1) 水渦輪機轉盤能夠公轉，轉盤上的葉片也可以自轉，是一種太陽行星式葉片，在流速 1.0m/s 之水渦輪機轉速 15rpm 時，葉片在 39.96 度方位有最大受力為-1394.8N。
- (2) 在葉片承受最大推力時，葉片的最大等效應力為 9.18MPa，只有葉片強度的 3.27%；而葉片最大總變形量 2.31mm，撓度只有 1/1731.6，在黑潮發電時之葉片保持在彈性範圍內。
- (3) 行星式葉片的水渦輪機在低流速 1.0m/s 時之總輸出功率可達 4.22 kW，顯示行星式葉片可提高海流發電效率。
- (4) 在海流發電時，水渦輪發電機之行星式葉片因位於無效區的葉片呈現水平狀態，使得有效區作功會大於無效區，是一種可以提高能量轉換效率的葉片結構。

致謝

本研究承蒙萬機鋼鐵公司白俊彥董事長的協助及幫忙，研究過程對水渦輪機設計與模擬提供相當寶貴意見；國科會 NSC 100-2625-M-151-001 提供部分經費，一併致謝。

參考文獻

- [1] 經濟部能源局，“我國重點能源產業技術發展動向及策略”，2010 年能源產業技術白皮書，pp.220，2010。
- [2] 徐谷、劉倬騰、劉家瑄、許明光，“台灣東部黑潮發電之芻議”，台電工程月刊，Vol. 624，No. 3，pp. 81-89，1999。
- [3] F. Chen, “Kuroshio Power Plant Development Plan”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, pp.2655-2668, 2010。
- [4] <http://www.blueenergy.com/Technology.htm>
- [5] http://www.masstech.org/project_detail.cfm?ProjSeq=419
- [6] http://www.dias.unina.it/adag/english/research/renewable_energy.html
- [7] <http://www.neptunerenewableenergy.com/gallery/?album=1&gallery=11>
- [8] <http://www.marineturbines.com/>
- [9] <http://www.smd.co.uk/products/renewables/design-development.htm>
- [10] <http://www.lunarenergy.co.uk/productOverview.htm>
- [11] <http://www.tidalgeneration.co.uk/products/>
- [12] <http://www.openhydro.com/home.html>

- [13] 郭啟榮、徐泊樺、顏志偉，“海流渦輪機之最新發展”，*機械月刊*，7 月，396 期，pp.18-29，2008。
- [14] <http://www.nsysu.edu.tw/files/14-1000-62963,r15-1.php>
- [15] http://blog.ntou.edu.tw/oceannews/2011/11/post_321.html
- [16] T. Y. Tang, “Multi-Disciplinary Study on the Natural Resources in the Ocean East of Taiwan (I) Detailed Investigation of Current, Topography, Geology, Hydrography and Ecology of Lutao Area”, Report for National Science Council, 2010。