

網球拍纖維強度之振動特性分析

江勁彥 國立彰化師範大學

江勁政 長庚技術學院

陳帝佑 國立彰化師範大學

摘要

網球運動之擊球過程乃藉由前臂傳達力量至球拍與球相互接觸始完成擊球動作；在擊球瞬間，若使用的球拍不合適，將增加手臂之負擔，因此球拍纖維強度比例是運動員一項極為重要的參考指標，而人體在球拍揮擊的過程中，唯有選擇最佳化球拍之狀態下，才能有效地發揮肌肉動力，以完成動作並預防預防傷害之產生。本文以不同比例的高強度碳纖維製成之網球拍，藉由鉗鉗固定球拍方式，分析球拍拍柄部位所受振動的差異，五支網球拍的重量、網線張力和平衡點位置皆在相同控制下，進行網球拍面中心、上端與下端撞擊的振動測試。振動特性定量評估方式以高強度碳纖維與一般碳纖維其混合比例分別為 1:0、3:1、1:1、1:3、和 0:1 為測試的對象。實驗數據之採集以 BioPAC AcqKnowledge 的訊號處理系統和 BioPAC ($\pm 50g$) 的加速規進行，採樣頻率為 2000Hz，而網球的撞擊速度約為 15 ± 2 公尺/秒。研究結果顯示：在上端撞擊時，球拍振動波之最大振幅較大，也因此消耗較多撞擊過程之總力學能，所以測得振動波在球拍柄的結果有最大之反應，推論其造成手臂之負荷較大，傷害之罹患率也會相對提高；再者，高強度碳纖維的物性並不足以改變一般碳纖維網球拍的勁度，因此當球拍勁度在相同條件下，球拍撞擊所產生振動波的最大振幅並未達顯著差異。

關鍵詞：網球拍、振動

壹、前言

現代運動型態因追求更高、更快、更遠等特質，進而使運動與高科技相結合成為世人矚目的焦點，回顧近二十年來的歷屆四大網球公開賽、奧運會、世界盃足球賽等大型運動賽會能吸引全球大眾的目光，不外乎運動員速度愈跑愈快與競賽獎金屢創新

高，然而這些成就不僅止於運動員堅毅不拔持續訓練的結果，另一方面，運動與科學的科技整合更扮演關鍵的角色，其中運動器材功能的研究與開發、運動訓練方式的改變、運動科學研究的不斷創新與建構等等，才能創造如此亮麗的光景。網球是所有運動項目中必須透過運動器材的輔助才能進行練習或比賽，而運動器材的研發訴求除了提昇運動表現之外，同時兼具預防運動傷害的產生（Groppe, 1992）；有鑑於此，運動器材與相關輔助器材的功能、創新與使用，諸如：網球拍、網線、避振器、球鞋、運動服裝、比賽用球、比賽場地...等，即成為影響運動表現與預防運動傷害的重要因素。

網球運動是屬於持拍性運動項目之一，擊球過程必須藉由前臂傳達力量至球拍與球相互接觸始能完成動作，因此，在擊球瞬間若選用的球拍不合適或動作姿勢不正確，將增加手臂之負擔，嚴重者導致手肘負荷過大而引起手肘病變（Galloway, 1992），因此網球拍的選擇是所有網球運動器材中最重要之關鍵；伴隨科技的進步與運動科學的迅速發展，網球拍本體材質的發展歷程從70年代的木製、80年代的鋁合金等天然複合材料，一直到二十一世紀初應用在太空飛行器製造上的人工合成複合材料也被運用在網球拍的製作，人工合成之複合材料被學術與科技業界大量使用的理由在於具備輕量化、高彈性、高強度等優點，這是先前使用天然複合材料所達不到的特性（Brody, 2000）。因此，網球拍設計時所考量的功能性與安全性，就成為運動表現與傷害預防之重要因子。

網球運動近來在強力上旋轉球（top spin）打擊的趨勢帶動下，使網球運動者擊球節奏與揮拍速度愈來愈快，若沒有選用合適球拍與正確的擊球觀念、充足之暖身活動等，便很容易產生網球之運動傷害。在所有的網球動作執行中，皆必須透過球拍傳達始能達成擊球目的，而網球拍之握柄是唯一與人體接觸之部位，因此擊球過程中，網球拍振動產生之能量皆由握柄傳至人體的前臂；球拍框之振動對人體產生直接的影響；人體輸出之能量也是由前臂傳至球拍，再經由碰撞轉換成球之動能，因此球拍框之振動可直接影響人體之舒適及安全（Brody, 1995），換言之，網球拍的振動影響握拍的感覺及舒適程度最大，因為振動能量勢必由握拍之手臂所吸收，造成手臂的負荷而產生疲勞甚至傷害（相子元, 1997）。

長期從事網球研究學者Hennig、Rosenbaum和Milani（1992）指出形成網球肘的因素包括球拍振動、年齡、肌力、動作姿勢、球擊至拍面準確度及握拍緊度等等。台灣著名的生物力學學者韓毅雄（1983）更早在二十年前即推論導致網球肘的主因為退

化性病變，而此一病變可能因為球拍不適或打球過度，肌腱疲勞而造成。運動傷害防護學者黃啟煌（1996）認為近年來網球比賽已逐漸進入速度化及強打型的比賽，因快速強力的打擊就會增加手肘負擔，打擊時球傳過來的力量，通過手腕及手肘，結果很容易造成手肘疼痛。

日來Roetert、Brody、Dillman、Groppe和Schultheis（1995）詳細研究以解剖學的角度指出網球肘其主要是因為球拍與球的碰撞所產生的振動轉移至手臂，因為振動時腕部肌肉必須收縮及握緊，另外離心收縮所造成的微小肌肉群的撕裂，再加上重複使用所造成慢性的過度使用而促使手肘受傷，由先前的文獻中得知，網球肘的諸多成因中，包括球拍材質因素所影響的振動問題，愈來愈受大眾所關注。對網球拍有深入研究的學者Elliott（1982）指出球拍框的材質種類、拍面積大小、幾何形狀等，皆會影響擊球後之反彈球速和球拍的轉動慣量。國際網球總會(ITF)運科委員會召集人Brody（2000）則認為，當今網球拍和過去最大的不同在於材質的選用與拍框內部結構的創新設計，探究其原因乃在於勁度高的網球拍比勁度低的網球拍產生的反彈球速快，其主要機轉為較高勁度的球拍與球在碰撞過程中，球拍結構體的形變量較少，使球之能量耗損較少，因此勁度高的球拍反彈球速會較高；反之，勁度低的球拍，因形變量較大，會失去較多的能量，而這些能量無法再傳回到球上，所以就減慢了反彈球速。

由研究文獻的回顧中，我們得以瞭解，以往關於振動造成網球肘的研究多著重於握拍緊度、前臂伸肌肌力、動作姿勢及球體撞擊拍面準確度，而對於球拍材質與結構造成振動變化的問題，仍屬缺乏。事實上，網球拍的材質種類對球拍的勁度與振動有很大的關係；因複合材料中纖維的種類和比例有所不同，其構成網球拍結構體的物性也就不同，故在撞擊後所引起振動的特徵也就有所差異（Hennig，2001）。

另一方面，現今人工合成之複合材料應用在網球拍的開發設計，朝向質量輕、低振動與高回復係數...等特徵改良，希望能增加反彈球速並儘可能減低對手臂所帶來的衝擊。種類繁多的人工合成複合材料中，如玻璃纖維、碳纖維、硼纖維和醃胺纖維...等，由於碳纖維兼具質量輕、强度高及剛度強的優越特性（Smith，1994），因此，碳纖維是目前產業界最常使用來製造網球拍的人工合成複材。而目前球拍的製作上，為了迎合強力網球的需求，進而使用高強度碳纖維，此種纖維材質相較於一般碳纖維，有較高之纖維強度與剛性，但相對地此種材質的改變對一般碳纖維網球拍原有之振動特性有何影響，亦是網球運動員所深切體認的焦點。

依據上述的研究，網球拍材質的使用，確切地影響其回擊球速、控球與人體負荷的種種問題。先前研究中常常缺乏網球拍本體組成材質的相關研究，然而其組成的材質結構才是真正決定網球拍力學特徵的根本問題。所以，本研究將藉以一般碳纖維網球拍之振動研究為基礎，並加以混合不同比例的高強度碳纖維，以探究網球拍振動的變化，希望能將研究結果提供教練、選手比賽及訓練時之參考。

貳、方法與步驟

一、研究對象：

本研究採用Dunlop牌100G系列中型拍面網球拍的框形，參與實驗的五種球拍之高強度碳纖維與一般碳纖維比分別為1：0、3：1、1：1、1：3、和0：1等。

二、實驗時間與地點：

中華民國九十二年二月十日至二月十六日於國立彰化師範大學體育學系運動生物力學實驗室。

三、測試儀器與設備：

本研究進行之儀器與設備分為測量、球拍基本資料與資料處理三部份。

(一)測量部分：

- 1、BioPAC三軸向加速規（Accelerometer）一個（收訊範圍為 $\pm 50g$ ）。
- 2、586個人電腦一部、BioPAC System Acqknowledge 3.7.4版分析軟體與BioPAC System MP100介面卡各一個。
- 3、BioPAC System Model MP100訊號轉換器、同步系統各一台。
- 4、Lob-Ster牌網球發球機一台與全新Slazenger牌網球一箱。
- 5、Babolat牌網球拍線測量機一台。
- 6、虎頭鉗鉸一台和水平儀一個。

(二)實驗球拍基本資料部分：

表2-1 實驗球拍基本資料

球拍總長	網線張力	球拍重量	平衡點	轉動慣量
86	56	257	327	0.0305
(mm)	(lb)	(g)	(mm)	(kg-m ²)

表2-2 高強度碳纖維與一般碳纖維之物性比較

物理性質	高強度碳纖維	一般碳纖維
抗拉強度(kg/mm ²)	590	500
拉伸模數(10 ³ kg/mm ²)	29	23.5
伸長率(%)	2.0	2.1
纖維密度(g/cm ³)	1.8	1.8

(三)資料處理部份：

- 1、Acqknowledge 3.7.4版訊號擷取系統。
- 2、Origin 7.0版資料分析系統。
- 3、Microsoft Excel 2000版資料分析系統。
- 4、SPSS for Windows 8.00版統計分析軟體。

四、實驗步驟：

本研究在完成預備實驗後，經綜合檢討分析整個實驗流程之瑕疵（包括：虎頭鉗鉗穩定度、加速規的擺設位置、發球機與拍面之夾角、撞擊位置重複校正），修正後始得進行正式實驗。實驗場地的佈置所述如後(圖2-1)：將待測試的網球拍距握把底端3公分處以虎頭鉗鉗夾實，加速規黏貼於距握把底端15公分處，並以水平儀量測調整球拍三軸向之平衡點，使球拍面（face）垂直於地面，再將網球發球機置於球拍面的正前方120公分處，並利用置於發球機出口處之光筆對準撞擊目標，設定網球以約15±2 公尺/秒的球速，分別正面撞擊至球拍面的中心標示處（向心撞擊，center impact）及中心之外的標示處（上、下偏心撞擊，off-center impact）各5次；每支球拍均擷取網球正確擊中網球拍之標示處的資料5次，AcqKnowledge的採樣頻率（Sample Rate）設定為2000Hz。實驗儀器的架設如圖2-1所示。

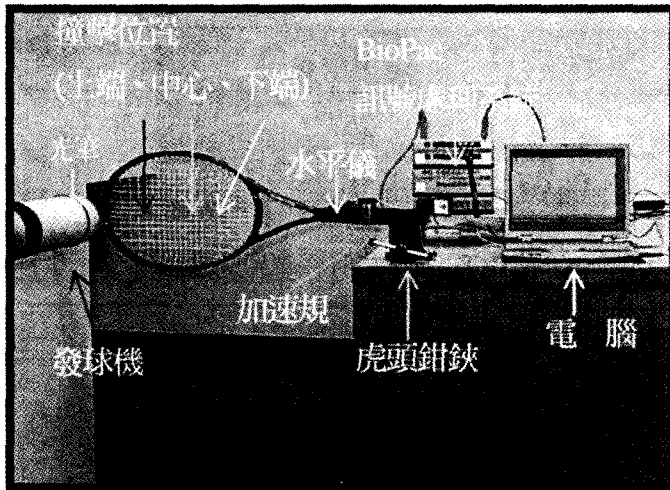


圖2-1 實驗儀器架設連線圖

五、資料處理與統計分析：

(一)資料處理

在網球拍振動特性的測試中，每一次撞擊的實驗資料，都需經過BioPAC System Acqknowledge 3.7.4版分析軟體版的軟體分析處理。其處理的過程在修勻 (filtering) 方面，我們先將原始資料 (raw data) 經快速傅立葉轉換成頻率域之資料，而得到第一自然頻率介於130Hz至160Hz；因此，收集到的原始資料都需先經過低通濾波 (low pass filtering) 的修勻處理 (Winter & Patla, 1997)，截止頻率 (cutoff frequency) 設定為300 Hz；轉換使用的窗形 (window) 採用Hamming法。修勻後的資料方用以記錄每次撞擊的振動波之振幅值。

(二)統計分析

本研究是以獨立樣本單因子變異數分析 (one-way ANOVA)，考驗網球拍高強度碳纖維比例，對於加速規在拍柄位置所擷取振動波訊號之最大振幅的影響。當變異數分析結果達 $\alpha = .05$ 的顯著水準時，即以最小顯著差異法 (LSD Method) 進行事後比較 (Kirk, 1995)。統計的軟體以SPSS 8.00版計算之。

參、結果與討論

由於本研究所使用的網球拍主要是改變球拍本體結構之複合材質比例，亦即高強度碳纖維的比例從0%、25%、50%、75%、100%分為五個等級，0%的球拍完全以一般碳纖維組成；而25%的球拍是以25%的一般碳纖維搭配75%的高強度碳纖維的組合構成；依此類推至100%的球拍是完全由高強度碳纖維所組成，因此五支網球拍構造除了高強度碳纖維含量有所不同外，其餘如球拍長度、重量、平衡點位置、框面大小、網線張力等變異均調整至相同條件。藉由網球的正向撞擊測試後，以拍柄位置（非節點）的加速規所擷取到第一模態（First Mode）振動波的資料，經採集其振動波的最大振幅，藉此評比各網球拍振動的差異，其結果與討論分為三部份加以說明：一、網球拍拍柄位置的最大振幅；二、不同高強度碳纖維比例之最大振幅分析；三、綜合討論。

一、網球拍拍柄位置的最大振幅

表3-1為實驗測試的五種網球拍在球拍面中心、上端和下端位置之偏心撞擊時，由球拍柄位置所測得振動波之最大振幅。

此結果經獨立樣本單因子變異數分析後，得知球拍含高強度碳纖維比例在中心（ $F_{(4,20)}=0.080$ ， $p>.05$ ）、上端（ $F_{(4,20)}=1.056$ ， $p>.05$ ）和下端（ $F_{(4,20)}=0.003$ ， $p>.05$ ）之偏心撞擊時，對於振動波之最大振幅皆未達顯著差異水準，其結果詳列於表3-2、表3-3和表3-4。

由五種網球拍在拍面中心、上端和下端撞擊時，拍柄位置最大振幅的統計表中(表3-2、表3-3、表3-4)，顯示出撞擊相同的位置，對每支球拍均沒有顯著的差異性($p>.05$)。然而在不同撞擊位置所產生的最大振幅值則達顯著差異，從表3-1中可發現每支球拍的中心撞擊位置的最大振幅值約在35g左右，低於上端約41g的現象，兩者相差約6個g值，這表示當擊球者揮擊過程中，若能準確的將球瞄準於拍面中心位置，此時在拍柄位置所承受的振動波小於上端位置，相對會帶給持拍者有較佳的擊球舒適感。在中心撞擊時，當高強度碳纖維比例在75%至100%之最大振幅，有較高的趨勢；然而在上端及下端位置卻沒有隨著高強度碳纖維比例的增加，而造成最大振幅值增加或減少的趨勢。

另一方面，比較中心撞擊與下端撞擊時，不同的高強度碳纖維比例之下端撞擊的

最大振幅值約為30g，相較於中心撞擊約35g，下端有低於中心位置之趨勢，這說明了雖然打擊在下端位置會有較小的振幅值，但是不論是選手層級或休閒的網球運動者，於每次實際擊球過程中直接打擊在拍面下端位置的機率，顯然是少於中心位置，這個現象乃由於下端撞擊位置較接近球拍的重心位置所造成的結果，再者，相較於中心或上端位置更接近於持拍部位，因此握把至撞擊點的作用力臂位置是最短，所以球拍撞擊瞬間之最大振幅值相對減少了許多。

二、不同高強度碳纖維比例之最大振幅分析

圖3-1為五種高強度碳纖維比例之網球拍，於撞擊時的最大振幅曲線圖，在中心撞擊時，高強度碳纖維比例以75%時的最大振幅值（35.47g）有高於其它比例之趨勢；再由上端撞擊之曲線圖顯示高強度碳纖維比例在50%時的最大振幅值最大（41.76g），球拍含高強度碳纖維比例超過75%時（41.02g）則呈遞減的現象，由於事後比較的結果並未達顯著差異，因此推論可能是實驗過程所產生之變異；當下端撞擊時，最大振幅值在各不同比例下，始終保持在相同之最大振幅值，亦即高強度碳纖維比例的增加或減少均不會改變下端撞擊位置的最大振幅值。

表3-1 五種高強度碳纖維比例之網球拍在拍柄位置的最大振幅平均數和標準差。

高強度碳纖維比例	100%	75%	50%	25%	0%
撞擊位置					
中心區	35.28 (1.85)	35.47 (1.48)	35.03 (1.13)	35.03 (1.13)	35.15 (1.60)
上端區	40.59 (0.95)	41.02 (1.14)	41.76 (1.07)	41.00 (1.15)	40.49 (1.13)
下端區	30.44 (1.42)	30.46 (1.69)	30.52 (1.56)	30.52 (1.51)	30.53 (2.02)

單位：g

*p<.05

表3-2 五種網球拍在中心撞擊時，拍柄位置最大振幅之獨立樣本單因子變異數分析摘要表。

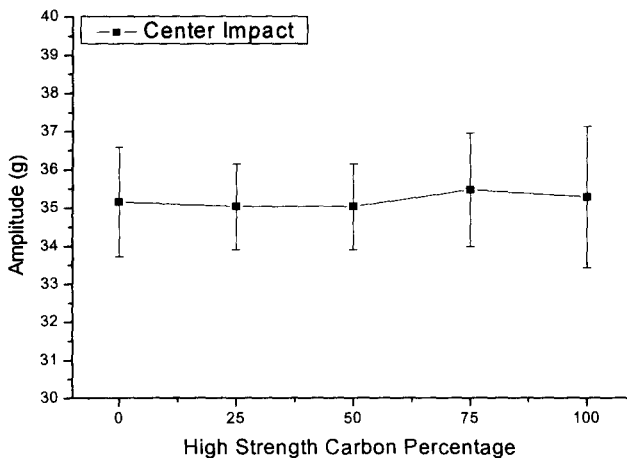
變異來源	自由度	離均差平方和	均方	F值
組間	4	0.687	0.172	0.080
組內	20	42.887	2.144	-
總和	24	43.573	-	-

表3-3 五種網球拍在上端撞擊時，拍柄位置最大振幅之獨立樣本單因子變異數分析摘要表。

變異來源	自由度	離均差平方和	均方	F值
組間	4	5.025	1.256	1.056
組內	20	23.794	1.190	-
總和	24	28.819	-	-

表3-4 五種網球拍在下端撞擊時，拍柄位置最大振幅之獨立樣本單因子變異數分析摘要表。

變異來源	自由度	離均差平方和	均方	F值
組間	4	0.031	0.007	0.003
組內	20	54.647	2.732	-
總和	24	54.679	-	-



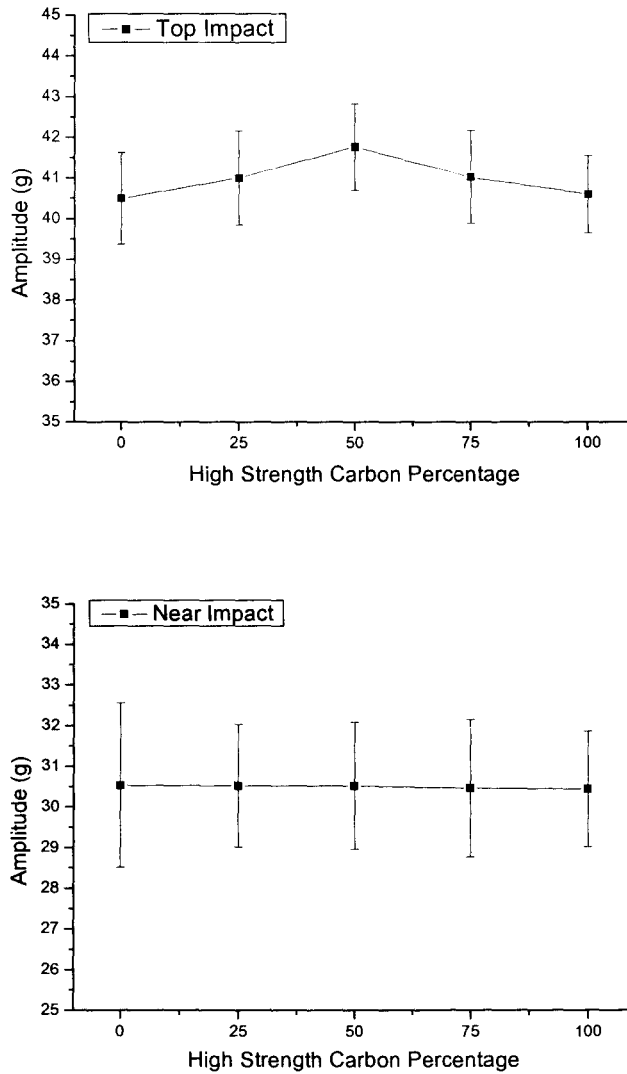


圖3-1 五種高強度碳纖維比例網球拍在拍柄位置的最大振幅曲線圖

三、綜合討論

觀察每支球拍中心撞擊位置的最大振幅值約35g；上端撞擊位置的最大振幅值41g；下端撞擊位置的最大振幅值約30g，這表示當擊球者揮擊過程中，若能準確的球瞄準於拍面中央位置時，在拍柄位置所承受的振動波小於上端撞擊，相對會帶給拍者有較佳的擊球舒適感。進一步比較中心撞擊與下端撞擊時，不同的高強度碳

比例在下端撞擊之最大振幅值有低於中心位置之趨勢，然而網球運動的實際擊球過程中擊至拍面下緣區域的機會，總是少於拍面中心與上端位置，此現象乃由於下端撞擊位置相較於中心或上端兩者，較靠近球拍的重心位置，因而有較小的振幅產生（Brody，1995），再者，此位置也因較接近於持拍部位，因此握把至撞擊點的力臂最小，所以球拍撞擊瞬間之最大振幅值相對減少了許多。此現象亦說明球拍振動波的振幅愈大，將因此消耗更多撞擊過程之總力學能，所以測得振動波在球拍柄的結果呈現較大的趨勢，推論其造成手臂之負擔也愈大，傷害之罹患率也會相對提高。此結果與Hatze（1993）所闡述之能量守衡數學模式中的說法相呼應，即球拍和球接觸的過程中，球拍結構體的變形是損耗總力學能的主要原因。由於激烈的比賽或訓練過程中，球拍的平均揮擊次數多達千次以上，如此反覆的衝擊力對手臂來說是相當大的負荷，因而必須從球拍本體結構上加以改良，以降低撞擊力所帶來的負面效應。

肆、結論與建議

本研究所量測球拍之上端撞擊位置的最大振幅值最大（約41g）；中心撞擊位置的最大振幅值次之（約35g）；而下端撞擊位置由於較靠近球拍重心，且撞擊力的力臂最小，所以球拍撞擊瞬間之最大振幅值為三者中最小，因此若球拍的使用在無其他因素影響下，應儘可能使球拍重心靠近球拍面中心位置，才能有效提昇擊球表現；另一方面，球拍含高強度碳纖維比例並未影響球拍撞擊所產生之最大振幅，主要原因乃高強度碳纖維的物性並不足以明顯改變碳纖維網球拍的勁度，因此建議日後的研究有必要從振動波的衰減程度來檢驗纖維種類對球拍振動所造成的實際效果。

參考文獻

1. 相子元（1997）。網球拍振動之有限元素分析。國立體育學院論叢，7(2)，29-38頁。
2. 黃啟煌（1996）。網球肘的預防與治療。國際網球雜誌，六期，70-72頁。
3. 韓毅雄（1983）。網球肘。健康世界，86期，24-27頁。

4. Brody, H. (1995). How would a physicist design a tennis racket? *Physics Today, March*, 26-31.
5. Brody, H. (2000). An overview of racket technology. In S.J. Haake & A. Coe (Eds.), *Proceedings of 1st International Congress of Tennis Science & Technology* (pp.43-48). London: University of Surrey.
6. Elliott, B. (1982). Tennis: the influence of grip tightness on reaction impulse and rebound velocity. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 14*, 348-352.
7. Groppel, J.L. (1992). *High Tech Tennis* (2nd ed.). Champaign, IL: Leisure Press Inc. pp.15-27.
8. Galloway, M., Demaio, M., & Mangine, R. (1992). Rehabilitative techniques in the treatment of medial and lateral epicondylitis. *Orthopedics, 15*, 1089-96.
9. Hatze, H. (1993). The relationship between the coefficient of restitution and energy losses in tennis rackets. *Journal of Applied Biomechanics, 9*, 124-142.
10. Hennig, E. M., Rosenbaum, D., & Milani, T. L. (1992). Transfer of tennis racket vibration onto the human forearm. *Medicine and Science Sports and Exercise, 24* (10), 1134-1140.
11. Kirk, R. E. (1995). *Experimental Design: Procedures for the Behavioral Sciences* (3rd ed.). NY: Brooks/Cole. pp.154-159.
12. Roetert, E. P., Brody, H., Dillman, C. J., Groppel, J. L., & Schultheis, J. M. (1995). The biomechanics of tennis elbow. *Clinics in Sports Medicine, 14* (1), 47-57.
13. Smith, W. F. (1994). *Foundations of Materials Science and Engineering* (2nd ed.). N.Y.: McGraw-Hill Inc.
14. Winter, D. A. & Patla, A. E. (1997). *Signal Processing and Linear Systems for the Movement Sciences*. Canada: Waterloo Biomechanics. pp.24-66.

The Vibratory Analysis of Tennis Rackets Made By High Strength Carbon Fiber

Jinn-Yen Chiang, Cheng-Ching Chiang*, Ti-Yu Chen

Abstract

Nowadays, tennis players and coaches even scientist dream of finding the excellent racket that will immediately transform them improving high performance and reduce occur sports injury. Tennis is one of the racket-holding sports that the process of playing is not accomplished until the strength is conveyed to the racket with forearm to touch the ball. Several biodynamical properties of tennis rackets such as vibratory characteristics were affect athlete performance. The vibratory of rackets frame is absorbed by human arm which are distracting and uncomfortable, and even cause fatigue or injury. This study aimed at analyzing the vibratory of various tennis rackets, which were composed by the mixture of high strength carbon fiber and general carbon fiber. This study was also to investigate how the racket grips were affected by the racket vibratory. There were five different kinds of tennis rackets, composed by high strength carbon fiber and general carbon fiber in the ratio of 1 to 0, 3 to 1, 1 to 1, 1 to 3 and 0 to 1. The rackets had the same weight, string tension and balance. In this study, the experiment was to the vibratory in the grip of every tennis rackets of participant. One accelerometers (± 50 g) and AcqKnowledge system were attached to each racket to acquire the vibratory signals. The impact of the tennis ball was set in the velocity of 15 ± 2 m/s. The selected variables in the experiments were tested by one-way ANOVA at $\alpha = .05$ significant level. The results of this study indicated that the value of max amplitude were not increasing significantly on the grip as the content of high strength carbon fiber in the rackets was increasing. One the other hand, the max amplitude on top impact had the highest value. Therefore, when a player hit in top location of racket face, the

tennis rackets would lose more mechanical energy. Thereby, the players might bear extra load in the arm and affect his/her performance in long term consideration.

Key words: tennis racket, vibration