

高爾夫球模型驗證及振動特性探討

THE MODEL VERIFICATION AND DISCUSSION OF VIBRATION PROPERTIES FOR GOLF BALL

王栢村*, 李建興, 趙志燁
國立屏東科技大學 機械工程系

黃錫洲
富錫實業股份有限公司
*E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文以振動分析方法結合有限元素分析與實驗模態分析探討不同結構高爾夫球之機械性質，並比較其特性差異。首先對各不同高爾夫球素材建立材料參數之參考數據，以此材料參數進一步架構不同結構之高爾夫球之有限元素模型，同時進行實驗模態分析，經比對驗證可得不同結構之高爾夫球等效數學模型，並對其作振動特性進行差異性比較。本文主要建立高爾夫球產品之分析及實驗技術，並建立參數化設計之理念。未來可將球與高爾夫球頭進行碰撞虛擬測試，更可拓展應用到其他產品之設計開發，可縮短研發時程與成本，提昇產品性能與品質。

關鍵字：有限元素分析、實驗模態分析、等效數學模型、振動特性

1. 前言

在整個高爾夫球桿分析中，由單球桿的簡易分析，演變經由探討不同握把的影響、球頭甜蜜區分析、不同球頭聲音品質分析、球桿之等效模型建立等種種分析技術。但探討範圍僅只限定於球桿本身，於是希望藉由球與球桿之碰撞分析來深入探討球桿品質並瞭解高爾夫球性能。在此之前，則須先完成高爾夫球之模型驗證與瞭解其振動特性，以此所得資訊為基礎，再進一步模擬碰撞分析，更可對高爾夫球與球桿有所深入探討。

過去在高爾夫球生產製造技術方面，Kren[1]提到高爾夫球無論在何種生產過程，其中一部份係由 20 支小管經由高爾夫球赤道線四面八方深入約 0.04 英寸，而後將原料注入球模，待球形成後，其表面會產生一細縫，此便為瑕疵，因此便介紹發展一機器經由伺服控制器，進而提高高爾夫球機械生產之產能。Henson[2]介紹了高爾夫球的凹孔設計，使得球於擊球飛行時，如同 U-2 戰機般飛行，球落地後卻像貓落地般輕巧的“咬住”草皮，說明了球上凹孔的設計，可增加其滯空飛行力，提升高爾夫球之性能。Dvorak[3]則介紹了高爾夫球在設計過程中施行電腦模擬分析之必要性與效益，經電腦輔助工程分析軟體應用於高爾夫球結構特性探討，得知高爾夫球表面微凹孔之大小與深淺與開球的角度、球被擊出的初速度，以及球的後旋等因素，將影響擊球後球的飛行路徑，並以兩種不同品質之高爾

夫球進行 CAE 模擬，並與實際擊球表現作比較，目的在於確認軟體模擬之正確性與可行性。

就碰撞分析角度而言，Iwata et al. [4]利用有限元素軟體 Dyna 3D 分析高爾夫球與球頭在撞擊瞬間現象，並探討球桿應變量，與應變規量測之結果做一比較驗證，藉由電腦的幫助來分析，可在最短的時間決定球頭之最佳設計。Nagurka[5]主要設計一簡單實驗方法，利用牛頓第二運動定律推導出乒乓球飛行速度與空氣阻力之關係可得到一曲線，由此便可對實驗結果加以修正，模擬出球落下反彈之整體動態模型，並使用 acoustic emission signature 量測以探求乒乓球之動態特性與恢復係數(Coefficient of Restitution, COR)。Cross[6]分別考慮 Superball 與 Tennis Ball 之碰撞情形，並建立理論碰撞數學模型，探討兩種球分別與地面碰撞時，在平行分量的恢復係數(Coefficient of Restitution, COR)。Michal and Novak[7]提到擊球後，球飛行距離遠近的主要影響因素為高擊球初速度、球飛行期間旋轉效應及球桿與球之接觸時間，並探討球具與球之物理性質及材料性質等各項因素。Goodmill and Haake[8]主要設計一種實驗方法，分別將球拍設定於不同邊界狀態，針對網球與斜面作碰撞分析，並探討使用不同網線間，球與球拍間碰撞特性之差異性。

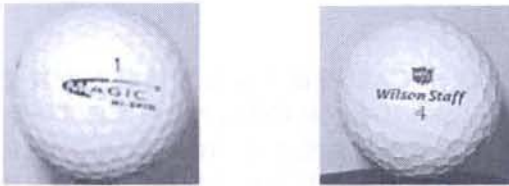
對球體動態飛行特性而言，Penner[9]對場地以二維空間假設，將一剛體平面之座標系傾斜一角度，用以模擬柔軟草地，架構球落地後的數學運動行為模型，以探討高爾夫球擊出落地後之運

動行為。Nowicki[10]對棒球之飛行路徑建立一理論數學模型，以軟體模擬球於立體空間中之飛行路徑，並與實驗所得結果作比較，並做進一步之分析探討球飛行時，外在環境因素之影響範圍。

在其他分析方面，Queen et al.[11]建立一理論數學模型以進一步針對不同年齡層之孩童對頂球動作之影響評估，主要針對 6-9 歲之兒童在以足球頂球時，探討球各方面因素，諸如膨脹壓、球的質量、尺寸大小、與孩童所受最大衝擊力、頭轉動的加速度、角加速度、接觸時間與 HIC(Head Impact Criteria)值之分析比較。

本文取兩不同結構高爾夫球如圖 1，幾何模型如圖 2，其剖面表示高爾夫球體為各種不同材質所構成，為了解高爾夫球之振動特性，對高爾夫球進行實驗模態分析，以求得實驗之模態參數。此外針對高爾夫球各層結構素材亦進行材料性質測定，主要建立材料模型探討，以提供日後參數化設計之參考依據。本文擬探討：

- (1) 高爾夫球結構素材之機械性質。
- (2) 高爾夫球等效數學模型建立。
- (3) 不同結構高爾夫球之振動特性探討。



(A) 3-piece (B) 2-piece
圖 1. 不同結構高爾夫球示意圖

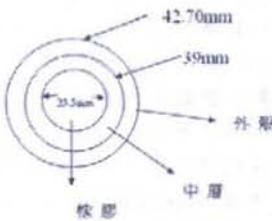


圖 2. 高爾夫球結構幾何示意圖

2. 有限元素分析

本文以 ANSYS 套裝軟體對高爾夫球素材試片與不同結構高爾夫球進行有限元素分析。圖 3 為高爾夫球素材與高爾夫球之有限元素模型，利用三維線性立體元素(Solid45)來架構素材試片與高爾夫球之有限元素模型，均假設為等向性材料模型，並以質量元素(Mass21)模擬加速度計於素材試片所產生之質量效應，其材料參數如表 1 所示。分割方式採用 Mapped Mesh 方式分割，均無任何外力負荷，素材試片之邊界條件為兩端固定

之，高爾夫球邊界條件則以三維線性旋轉彈簧元素(Combin14)模擬之。分別對素材試片與高爾夫球進行模態分析，主要目的在於求得其模態參數，其中包括自然頻率與模態振型。



(a) 素材試片 (b) 高爾夫球結構 (c) 1/8 球體
圖 3. 高爾夫球素材與高爾夫球之有限元素模型

表 1. 高爾夫球材質有限元素模型材料參數設定值

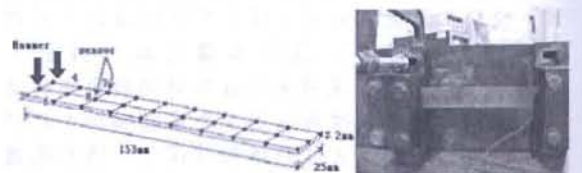
內層	楊氏係數 (N/m ²)	5.677×10 ⁸
	蒲松比	0.44
	密度 (kg/m ³)	1168.539
中層	楊氏係數 (N/m ²)	5.677×10 ⁸
	蒲松比	0.44
	密度 (kg/m ³)	1121.111
外層	楊氏係數 (N/m ²)	5.677×10 ⁸
	蒲松比	0.44
	密度 (kg/m ³)	934.212

3. 實驗模態分析

本文針對高爾夫球素材與不同結構高爾夫球進行實驗模態分析，因此配合待測物而設計不同實驗方式，其中包括高爾夫球結構素材測定與高爾夫球實驗模態分析。

3-1. 高爾夫球結構素材測定

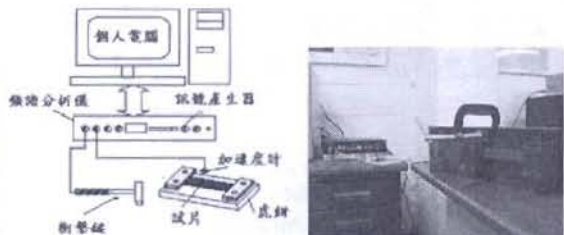
在素材測定中，取各種不同高爾夫球素材試片，表 2 為各素材試片之基本資料，分別對其進行傳統靜態實驗模態分析，圖 4 為量測點數規劃，圖 5 為實驗儀器設備示意圖，以衝擊錘為激振器，加速度計為感測器，僅以衝擊錘敲擊點 1、點 2，以加速度計量取點 7、點 8，當加速度計接收到激振訊號後，透過頻譜分析儀經快速傅立葉轉換，得到各試片之頻率響應函數，經曲線嵌合可擷取出素材之自然頻率與阻尼比。



(a) 素材點數規劃示意圖 (b) 實際量測圖
圖 4. 高爾夫球素材量測點數規劃

表 2. 高爾夫球結構素材基本資料

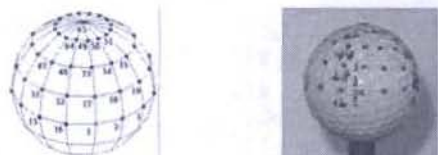
編號	重量(g)	體積 (ml)	密度 (kg/m ³)
(A)	12.752	13.65	934.212
(B)	12.740	13.65	933.333
(C)	12.215	13.575	899.816
(D)	12.535	13.585	922.709
(E)	12.262	13.5	908.296
(F)	15.135	13.5	1121.111
(G)	15.135	13.5	1121.111
(H)	15.220	13.5	1127.407
(I)	15.525	13.35	1162.921
(J)	15.520	13.35	1162.547
(K)	15.535	13.35	1163.670
(L)	15.600	13.35	1168.539
(M)	17.190	13.55	1268.635
(N)	15.475	13.525	1144.177
(O)	15.530	13.525	1148.244
(P)	15.195	13.525	1123.475
(Q)	18.095	13.5	1340.370
(R)	18.300	13.5	1355.556
(S)	18.365	13.5	1360.370



(a) 素材儀器架構示意圖 (b) 素材實驗設備圖
圖 5. 高爾夫球素材實驗設備架構圖

3-2. 高爾夫球機械性質測定與振動特性探討

將實際高爾夫球規劃量測點數如圖 6，並以振動激振器進行動態實驗模態分析，圖 7 為實驗儀器設備架構圖，利用振動激振器產生隨機信號，以加速度計為感測器，當感測器接收到信號，透過頻譜分析儀經快速傅立葉轉換可得到高爾夫球之頻率響應函數，經曲線嵌合軟體可擷取出模態參數，即自然頻率、模態振型與阻尼比。



(a) 3-piece 高爾夫球量測規劃點 (b) 實際量測模型
圖 6. 高爾夫球量測點數規劃



(a) 儀器架構示意圖 (b) 實驗設備圖
圖 7. 高爾夫球實驗量測設備圖

4. 最佳化分析



圖 8. 最佳化分析比對驗證流程

圖 8 為本研究中最佳化分析之流程與概念，由實驗模態分析經曲線嵌合所得的自然頻率為基準，與有限元素分析中的最佳化分析來做比對驗證，可得到素材試片之機械性質與建立高爾夫球之等效數學模型。目的在於建立不同結構高爾夫球之等效數學模型，其中以素材試片之材料機械性質參數為基準參考，主要包括內層、中層及外殼材料之楊氏係數。使有限元素分析出模態特性之自然頻率，與實驗模態分析量測出的自然頻率的誤差是在是當範圍內，以高爾夫球材質為非線性特性而言，理想誤差範圍為±10%。在最佳化分析中，所設定條件為：

(1) 目標函數：

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i - \hat{f}_i}{\hat{f}_i} \right)^2 \quad (1)$$

式(1)中，以最小誤差平方法使誤差範圍在±10%之間。其中， \hat{f}_i 為實驗所得之自然頻率， f_i 為有限元素分析所得之自然頻率。

(2) 設計變數：分別為不同高爾夫球結構中三種不同素材內層、中層及外殼材料之楊氏係數，分別各為 E_1, E_2, E_3 。

5. 結果與討論

由有限元素分析、實驗模態分析與最佳化分析，可針對高爾夫球素材試片數學模型建立、素

材試片機械性質探討、高爾夫球模型驗證與不同結構高爾夫球特性差異等四方面做討論。

表 3. 高爾夫球素材試片等效數學模型之振型對照

Mode	FEA Mode Shape	Mode	EMA Mode Shape	Meaning
F-1		E-1		1,1-Bending
F-2		E-2		2,1-Bending
F-3		E-3		1,2-Torsion
F-4		E-4		3,1-Bending
F-5		E-5		2,2-Torsion
F-6		E-6		4,1-Bending
F-7		-	-	1,1-Axis Bending
F-8		E-7		3,2-Torsion

5-1. 高爾夫球素材試片數學模型建立

在進行高爾夫球模型驗證之前，為取得高爾夫球結構中各素材之材料機械性質，首先架構素

材試片之有限元素模型，繼而建立試片之等效數學模型，在進一步作最佳化分析，以求得各試片之材料參數，即所謂楊氏係數。

利用有限元素法建立高爾夫球素材試片之等

效數學模型，以作為各素材試片之機械性質探討用，表 3 為高爾夫球素材試片等效數學模型之振型對照，討論如下：

- (1) 表中為材料素材試片於有限元素分析與實驗模態分析之模態振型對照，素材試片由完整實驗模態分析可確立有限元素分析所得等效數學模型之可靠性與正確性。
- (2) 由模態振型可定義對應之其物理意義，其中模態數 F-8 為 Axis Bending Mode，由於實驗點數規劃之因素，故於實驗模態分析中並無找到此對應之模態。
- (3) 綜合以上討論，確定了素材試片之等效數學模型，便可進一步針對各素材試片進行材料性質參數之探求，以完成素材試片之模型驗證。

5-2. 素材試片機械性質探討

目前市售高爾夫球其結構主要為 2-piece 與 3-piece，本文取其素材試片進行機械性質分析，將其模型驗證結果加以整理，表 4 為高爾夫球相同材質之材料性質參數表，討論如下：

- (1) 表中為高爾夫球結構各不同性質之一覽表，由於素材試片之非線性材料特性，致使其機械性質易受邊界、負荷、幾何甚至加工方式而有所影響，本研究中僅取現有

表 4. 高爾夫球素材之材料機械性質

素材編號	E_x 範圍 (N/m^2)	E_x 平均值 (N/m^2)	E_x 差異值 (%)	E_x 標準差	備註	綜合平均 累加阻尼 (%)
A · B	$6.1321 \times 10^8 - 8.9977 \times 10^8$	7.5561×10^8		1.4236×10^8	0.4	0.501
C-E	$4.3910 \times 10^8 - 6.2610 \times 10^8$	5.1371×10^8	68.54	6.7114×10^7	0.4	0.913
F-H	$1.2527 \times 10^8 - 2.1972 \times 10^8$	1.6161×10^8		3.7469×10^7	0.4	1.099
N-P	$1.1474 \times 10^8 - 2.145 \times 10^8$	1.5502×10^8	4.30	3.5273×10^7	0.4	1.471
Q-S	$1.1457 \times 10^8 - 2.0430 \times 10^8$	1.6199×10^8		3.3776×10^7	0.4	1.481
I-L	$1.0995 \times 10^8 - 1.4761 \times 10^8$	1.2394×10^8	24.65	1.2187×10^7	0.49	1.011
M	$1.6235 \times 10^8 - 1.6663 \times 10^8$	1.6449×10^8		2.1400×10^6	0.49	0.917

在高爾夫球素材試片模型驗證中，首先建立了試片之等效數學模型，利用最佳化分析完成了試片之模型驗證後，便可進一步針對不同結構高爾夫球進行高爾夫球之模型驗證。

5-3. 高爾夫球模型驗證

在高爾夫球之模型驗證中，在最佳化分析過程之目標函數主要設定為實驗所得自然頻率為基準，並與理論所得自然頻率兩者誤差範圍在士 10% 以內，於是實驗分析之可靠度與正確性便顯的相當重要。

就確認實驗結果之可靠度與正確性而言，圖 9 為高爾夫球於實驗模態分析經曲線嵌合所得之圖形。討論如下：

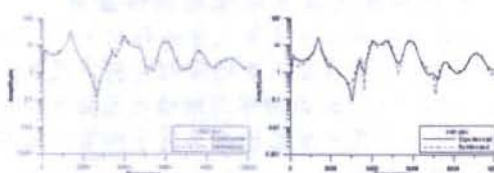
- (1) 圖中實線為實驗所量得之曲線，虛線為曲線嵌合軟體所合成之理論曲線。

之素材試片驗證其楊氏係數之概略性範圍、平均數、標準差及其綜合累加平均阻尼。

- (2) 比較各材質之楊氏係數部分，就同型素材而言，C-E 材質楊氏係數比 F-H 材質楊氏係數平均高出 68.54%；其他材料試片編號 Q-S 楊氏係數比試片編號 N-P 楊氏係數平均高出 4.30%，以其他同型素材來說，編號 M 材質楊氏係數又比 I-L 材質楊氏係數平均高出 24.65%。
- (3) 就各材質之綜合累加平均阻尼而言，各材質之平均累加阻尼均相當高，以中層材質觀察之，可明顯得到試片編號 C-E 與試片編號 F-H 之平均累加阻尼較為相近，其他中層素材中，試片編號 Q-S 與試片編號 N-P 之平均累加阻尼亦較為相近，進一步觀察內層材質，試片編號 I-L 與試片編號 M 值亦是相當接近。
- (4) 綜合以上討論，表中數據建立了高爾夫球素材之材料參數資料，經各類高爾夫球擊球表現之對應，則可利用表中之訊息進一步作為日後高爾夫球參數化設計之重大參考。

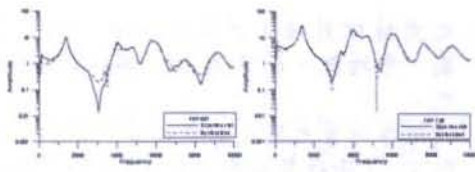
- (2) 由圖中可明確觀察到實驗與理論合成之曲線大致上均一致吻合，其中 FRF-64 由於於速度計位於球之赤道線上，與振動激振器所量測之方向成 90°，故實驗與理論合成曲線有些微偏移，但大致上吻合度仍然很高。

- (3) 綜合以上討論，由曲線嵌合的高吻合性，可確認高爾夫球之實驗模態分析所得之模態參數足以作為模型驗證中，最佳化分析中目標函數參考之基準。



(a)FRF-001

(b)FRF-064



(c)FRF-067 (d)FRF-128
圖 9. 曲線嵌合圖

確認了實驗分析結果之正確性後，接著配合有限元素分析進行最佳化分析，以完成高爾夫球之模型驗證，進而建立高爾夫球之等效數學模型。在最佳化分析中，主要針對 2-piece 與 3-piece 兩種不同結構高爾夫球進行模型驗證，表 5 為高爾夫球有限元素分析與實驗模態分析之比對驗證。討論如下：

- (1) 由表中可得之資訊為不同結構高爾夫球於有限元素分析與實驗模態分析中各對應模態之自然頻率誤差比較、各模態之阻尼與

- 累加平均阻尼之比較。
- (2) 表5(a)為2-Piece高爾夫球之各項參數對照，其中於有限元素中並無模態數與實驗分析對應，主要因素為剛體模態之出現導致理論分析中自然頻率均趨近於零，實驗分析中則由於邊界固定因素，由於阻尼比增高，而使剛體模態自然頻率值增高。表5(b)為3-Piece高爾夫球之各項參數對照，與2-Piece結構高爾夫球相同，由於邊界固定因素，由於阻尼比增高，使得剛體模態自然頻率值增高，由表5(a)與表5(b)觀察對應之模態，其自然頻率值誤差值範圍均在合理範圍±10%以內。
- (3) 綜合以上討論，利用最佳化分析得以完成不同結構高爾夫球模型驗證，以作為建立等效數學模型之基礎，更於碰撞模擬分析中扮演重要角色。

表 5. 高爾夫球有限元素分析與實驗模態分析之比對

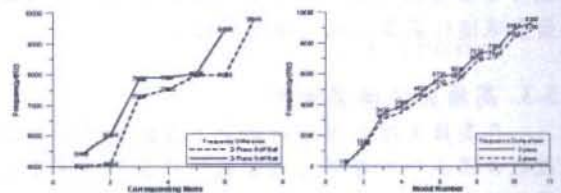
(a) 2-Piece Golf Ball						
Mode	FEA Freq.(Hz)	Mode	EMA Freq.(Hz)	EMA Err. (%)	Damp. (%)	AMD(%)
-	-	E-1	106	-	3.31	3.31
-	-	E-2	1230	-	7.2	5.26
-	-	E-3	3070	-	3.11	4.54
-	-	E-4	3520	-	3.36	4.25
-	-	E-5	4380	-	3.66	4.13
F-7	5013.7	E-6	5210	3.77	3.76	4.07
F-14	5094.2	E-7	5590	8.87	3.97	4.05
F-17	7298.1	E-8	6800	-7.33	3.68	4.01
F-20	7535.4	E-9	7040	-7.03	3.63	3.96
F-30	7983.8	E-10	8360	4.50	2.55	3.82
F-31	7984.7	E-11	8790	9.16	3.02	3.75
F-37	9814.1	E-12	9980	1.66	3.71	3.75

(b) 3-Piece Golf Ball						
Mode	FEA Freq.(Hz)	Mode	EMA Freq.(Hz)	EMA Err. (%)	Damp. (%)	AMD(%)
-	-	E-1	105	-	4.4	4.40
-	-	E-2	1380	-	4.61	4.51
-	-	E-3	3430	-	2.59	3.87
-	-	E-4	3940	-	2.62	3.56
-	-	E-5	4870	-	3.2	3.48
F-11	5415.2	E-6	5750	5.82	2.86	3.38
F-15	6023.9	E-7	6120	1.57	3.16	3.35
F-17	7881.7	E-8	7260	-8.56	2.93	3.30
F-21	7897.3	E-9	7550	-4.6	2.99	3.26
F-26	8036.3	E-10	8820	8.89	2.95	3.23
F-27	9495.7	E-11	9190	-3.33	3.15	3.22

完成高爾夫球模型驗證後，建立了高爾夫球之等效數學模型，同時，為了解不同材質組成高爾夫球之物理特性，因此由以上驗證所得之數據進一步以振動學觀點比較不同高爾夫球之振動特性差異。

5-4. 不同結構高爾夫球振動特性差異

在比較不同結構高爾夫球振動特性中，分別從有限元素分析角度與實驗量測分析角度來比較 2-piece 與 3-piece 兩種不同結構之高爾夫球，可從自然頻率差異、阻尼比差異與平均累加阻尼差異等三部分討論。



(a)有限元素分析 (b)實驗模態分析
圖 10. 自然頻率差異比較

就自然頻率差異而言，比較不同結構高爾夫球之有限元素分析與實驗模態分析，表 6 為不同結構高爾夫球自然頻率之比較。討論如下：

- (1) 表中有限元素分析於不同結構高爾夫球之

自然頻率比較，可得知每對應模態3-piece之自然頻率比2-piece之自然頻率來得高，平均差異為8.75%。

- (2) 實驗模態分析於不同結構高爾夫球之自然頻率比較部分，可得知每對應模態3-piece之自然頻率比2-piece之自然頻率來得高，平均差異為7.44%。

- (3) 經以上兩點討論，不同結構高爾夫球之自然頻率比較於理論分析與實驗分析其平均差異值相當接近，圖10為自然頻率差異比較，係由此表整理而得之，更可明確觀察此一特性。

表 6. (a) 不同結構高爾夫球之模態振型一覽表

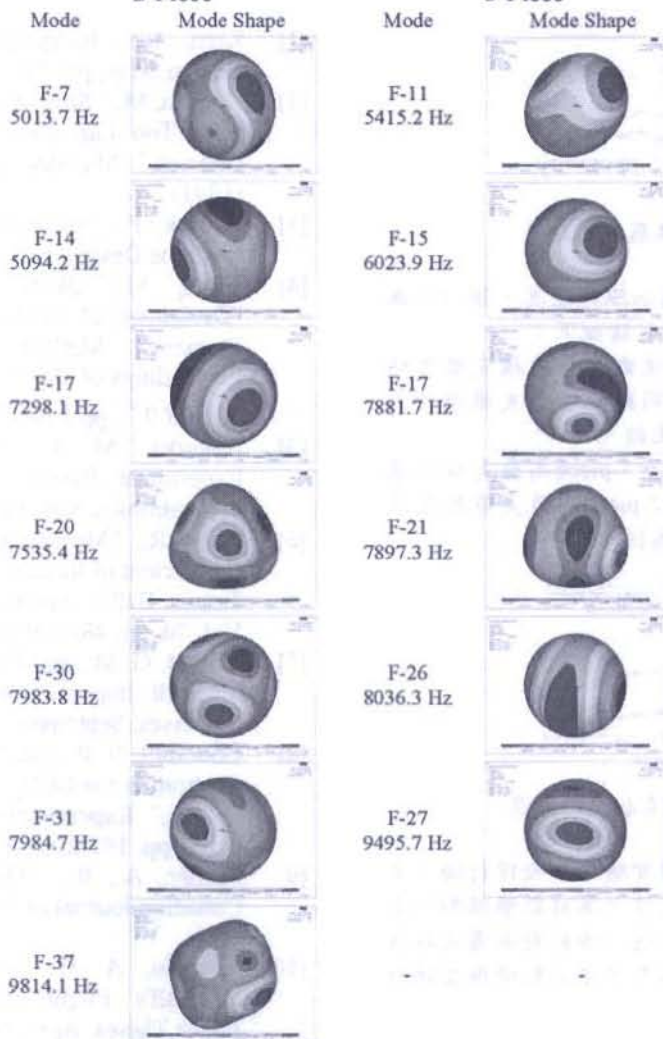


表 6. (b) 不同結構高爾夫球自然頻率比較

2-Piece		FEA			2-Piece		EMA		
Mode	Freq.(Hz)	Mode	Freq.(Hz)	Diff.(%)	Mode	Freq.(Hz)	Mode	Freq.(Hz)	Diff.(%)
-	-	-	-	-	E-1	106	E-1	105	-0.95
-	-	-	-	-	E-2	1230	E-2	1380	10.87
-	-	-	-	-	E-3	3070	E-3	3430	10.50
-	-	-	-	-	E-4	3520	E-4	3940	10.66
-	-	-	-	-	E-5	4380	E-5	4870	10.06
F-7	5013.7	F-11	5415.2	7.41	E-6	5210	E-6	5750	9.39
F-14	5094.2	F-15	6023.9	15.43	E-7	5590	E-7	6120	8.66
F-17	7298.1	F-17	7881.7	7.40	E-8	6800	E-8	7260	6.34
F-20	7535.4	F-21	7897.3	4.58	E-9	7040	E-9	7550	6.75
F-30	7983.8	F-26	8036.3	0.65	E-10	8360	E-10	8820	5.22
F-31	7984.7	F-27	9495.7	15.91	E-11	8790	E-11	9190	4.35
F-37	9814.1	-	-	-	E-12	9980	-	-	-
Average Difference (%)				8.57	Average Difference (%)				7.44

就各模態阻尼比差異而言，圖 11 為各模態阻尼比差異比較。討論如下：

- (1) 在阻尼部分，僅能由實驗分析得知，理論分析則無法估算出阻尼大小，故僅針對兩不同結構高爾夫球之阻尼差異進行概略性比較。
- (2) 由圖中可明顯觀察出 3-piece 高爾夫球之阻尼比相對的比 2-piece 高爾夫球阻尼比來的低，平均差異為 16.33%。

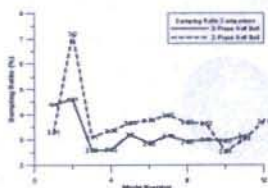


圖 11. 各模態阻尼比差

再進一步比較平均累加阻尼差異，圖 12 為平均累加阻尼差異比較。討論如下：

- (1) 由各模態阻尼並無法觀察出結構完整之特性，於是必須對不同結構高爾夫球進行累加平均阻尼之差異比較。
- (2) 由圖中可明顯觀察出 3-piece 高爾夫球之累加平均阻尼相對的 2-piece 高爾夫球阻尼比來的低，平均差異為 16.46%。

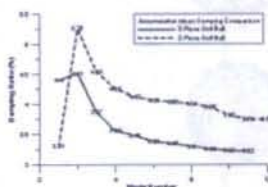


圖 12. 平均累加阻尼差異

綜合以上理論分析與實驗分析驗證討論，主要建立了不同結構高爾夫球之等效數學模型，在分析所得數據中，日後可進一步針對高爾夫球性能定義其性能指標，未來更可依此數學模型進行碰撞分析。

6. 結論

經本研究中對不同高爾夫球之分析與差異比較，主要建立了一實驗分析方法，針對各種不同高爾夫球做素材材料性質測定，以作為日後高性能高爾夫球開發之參考依據。此外，由各素材試片之機械性質參數之探求，建立了高爾夫球結構各層材料性質參數之範圍，亦可得結構不同材質之相對性比較，在未來更進一步的碰撞分析或參數化設計，均有極高之參考價值。另一方面在不同結構高爾夫球振動特性分析比較中，未來可針對分析數據進一步定義高爾夫球性能指標，以對

日後高爾夫球之生產研發能有一指標性參考。

誌謝

本研究承蒙富總實業股份有限公司提供研究經費，特此誌謝。

參考文獻

- [1] Kren, L., "Banging Out Balls," *Machine Design*, May, pp. 72-75 (2002).
- [2] Henson, M., "Small Company's New Golf Ball Flies Too Far, Could Obsolete Many Golf Courses," *Machine Design*, August, p. 56 (1991).
- [3] Dvorak, P., "Building A Better Golf Ball," *Machine Design*, November, p. 66 (2002).
- [4] Iwata, M., Okuto, N., and Satoh, F., "Designing of Golf Club Heads by Finite Element Method (FEM) Analysis," *Proceedings of the World Scientific Congress of Golf 9th*, pp.274-279 (1990).
- [5] Nagurka, M. L., "A Simple Dynamics Experiment Based on Acoustic Emission," *Mechatronics*, Vol. 12, pp. 229-239 (2002).
- [6] Cross R., "Measurements of the Horizontal Coefficient of Restitution for a Superball and a Tennis Ball," *American Journal of Physics*, Vol. 70, pp. 482-489 (2002).
- [7] Michal, G. M., and Novak, M. D., "Designing for Ball Impacts," *Advanced Materials and Processes*, September, pp. 31-35 (2001).
- [8] Goodmill, S. R., and Haake, S. J., "Ball Spin Generation for Oblique Impacts with a Tennis Racket," *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 195-206 (2004).
- [9] Penner, A., R., "The Run of Golf Ball," *Canadian Journal of Physics*, Vol. 80, pp. 931-940.
- [10] Nowicki, A. W., "Forces That Govern a Baseball's Flight Path," *Wooster Physics Junior Theses*, April, Ohio 44691 (1999).
- [11] Queen, R. M., Weinhold, P. S., Kirkendall, D. T., and Yu, B., "Theoretical Study of the Effect of Ball Properties on Impact Force in Soccer Heading," *Medicine Science in Sports Exercise*, Vol. 35, No. 12, pp. 2069-2076 (2003).