

高爾夫球頭變更設計之聲音預測與驗證

王栢村¹、張年華²、黃裕仁³、張佐銘³

¹ 國立屏東科技大學機械工程系

² 國立屏東科技大學機械工程系研究所

³ 大田精密工業股份有限公司

摘要

高爾夫球具揮擊聲音之預測分析有利於提升球頭設計需求，本文應用已發展之半理論半實驗聲音預測方法，探討變更球頭結構不同部位厚度於高爾夫球具揮擊聲音之聲音頻譜預測，將一高爾夫球具利用 ANSYS 軟體，建構其原始之有限元素模型，之後將原始有限元素模型改變結構厚度，做不同設計變更來進行模態分析及簡諧響應分析，求得其頻率響應函數 (frequency response function, FRF)，並以原始球具之實驗敲擊聲響，來預測改變厚度後球頭之擊球聲響，最後對改變結構厚度之球頭，利用實驗模態分析 (Experimental Modal Analysis, EMA) 方法及實際室外擊球聲音量測，得到實際改變厚度球具之擊球聲響。再將改變厚度球具之實際聲響與利用此半理論半實驗聲音預測方法所預測之擊球聲響，兩者相互比較，以驗證此半理論半實驗聲音預測流程之準確性，使高爾夫球具結構在有一原始設計之情形下，便能在只改變結構厚度設計，使球具尚未製作出時就能準確地預測球頭擊球聲響之聲音品質，以快速地改善並設計出高爾夫球具。

關鍵字： 聲音預測方法、簡諧響應分析、頻率響應函數、實驗模態分析

1. 前言

近年來接觸高爾夫球這項運動的人越來越多，球員們也開始講究球具之各樣品質，除了在揮擊的感覺要舒適外也要打的遠，更在聲音品質上也逐漸的受到重視。然而每個球頭設計，都有其優越之性能，而在想要針對一良好設計之球具做結構變更，使擊球聲響達到改善，都必須消耗大量的設計試誤時間及樣品製作成本，所以有必要利用有限元素分析軟體配合聲音模擬分析程式，來快速改善並預測變更設計後高爾夫球具之擊球聲響，以達到將原有設計之球具在擊球聲響改善之目標。

應用有限元素分析與實驗模態分析於高爾夫球具結構及材料之分析及實驗方面王等人[1]應用 ANSYS 軟體，對高爾夫球具進行簡諧響應分析，求得其頻率響應函數，以預測球頭結構之擊球聲音，並

將球頭之有限元素模型改變部分厚度，進而了解厚度改變對擊球聲音品質之影響，如此將可有效率之對球頭結構參數與擊球聲音特性間之關聯性進行探討。王等人[2]主要對 3 個不同厚度之高爾夫球頭進行實驗模態分析，藉此觀察這三個球頭結構厚度不同，對球頭振動模態特性的影響，結果顯示，不同結構厚度將影響結構自然頻率及對應之模態振型，進而改變球頭之衝擊聲音頻譜特性，包括峰值頻率對應之結構振動模態與音量大小。王等人[3]主要以最佳化分析方法，來求得高爾夫球頭頂蓋碳纖維之等效材料參數，使 FEA 與 EMA 之自然頻率驗證能相吻合，並由其聲音頻譜圖觀察球具之聲音峰值頻率與振動模態間之關聯性。邱等人[4]主要以實驗模態測試方法對高爾夫球具，在組桿前與組桿後進行聲音模態分析，以探討高爾夫球具有無組桿對聲音特性之差異。王等人[5]主要利用有限元素分析與實驗模態分析，針對高爾夫木桿鈦球頭進行模型驗證，並使用不同衝擊頭量測其聲音線性頻譜，最後探討球頭衝擊音與振動模態間之關聯性。謝[6]主要是介紹許多影響高爾夫球具性能重要之設計參數，其幾何設計參數相當多且造型複雜，而結構設計、重量分佈、重心位置及轉動慣量，也都是影響揮桿與擊球之重要因素，最後說明了可利用電腦輔助設計分析技術之部分與好處。

於結構噪音分析與改善設計方面，以期望能針對球頭進行擊球聲音改善，Hocknell et al.[7]主要使用非接觸式雷射振動儀，對中空球頭之三個主要的表面進行實驗模態分析，並利用有限元素模型進行有限元素分析，以驗證其實驗量測與理論分析模型之模態參數特性，並探討打擊時中心與偏心兩種不同位置在頻率 4.5~7.5kHz 所產生之加速度與頻譜間之差異。Dvorak[8]主要介紹高爾夫球在設計過程中，其幾何設計與其效應之間的關係，並說明以電腦模擬分析技術來結合設計過程之好處。邱等人[9]主要針對渦流風扇，利用田口實驗方法對上下進風口、流道幾何設計、入風口間隙、扇葉後掠切線距離進行降低噪音之最佳化設計分析，更配合 Fluent 電腦軟體模擬風量及噪音值與實際量測值進行驗證。許等人[10]主要針對音源採二維麥克風陣列之方式量測其聲場資料，並經由聲場空間轉換法 (Spatial transformation of Sound Field, STSF) 之技巧，也就是應用 LMS 公司之 Cada-x 軟體聲音全像術分析 (Acoustic Holography

analysis)，以二維非接觸式的聲壓量測來推算整個三維空間聲源表面聲場資料，包括近場與遠場之聲壓及聲強。

在高爾夫球具聲音品質改善設計過程中，仍須將微型修改之高爾夫球具製出，並藉助試打員實際揮擊來觀察擊球聲響改善之情形，在這些過程中不僅造成時間與成本的浪費，也不一定得到改善之方法。因此本文中以半理論/半實驗之聲音模擬分析程式[1]，配合有限元素分析方法，將同一類型之球具以些微修改之設計進行聲音預測，還能準確的預測出球具變更後之擊球聲響，以驗證此半理論半實驗聲音與測方法之準確性。

2. 研究方法與步驟

圖 1 為球具變更設計之聲音預測流程圖，本文擬對一高爾夫球具利用 ANSYS 軟體，建構其原始控制組之有限元素模型，再將控制組之有限元素模型改變結構厚度做不同設計變更，作為實驗組來進行模態分析，求取實驗組球頭之模態參數，再進行簡諧響應分析，得到實驗組球頭之頻率響應函數(FRF)，並以原始控制組球具之室外擊球聲音數據，來預測改變厚度後球頭之擊球聲響，最後對實際改變結構厚度之實驗組球頭，利用實驗模態分析方法及實際室外擊球聲音量測，得到實驗組球頭實際擊球聲音頻譜[2]，相互比較以了解此預測方法與實際之打擊聲音頻譜之差異性，以驗證此半理論半實驗變更設計聲音預測流程之準確性，並藉由控制組與實驗組之聲音特性差異，得知影響此聲音預測方法之關聯性。

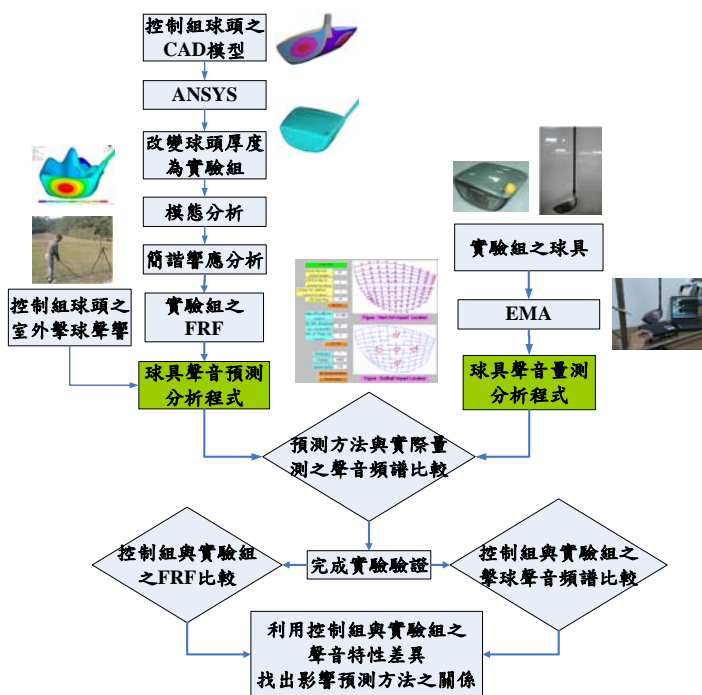


圖 1 球頭變更設計之聲音預測流程圖

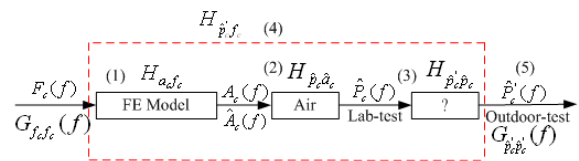


圖 2 聲音預測流程圖[1]

圖 2 為聲音預測流程圖，其符號代表之意義為時間域之響應， f_c 代表一單位衝擊力、 a_c 代表理論分析之加速度、 \hat{a}_c 代表球具加速度、 \hat{p}_c 代表球具室內衝擊音、 \hat{p}'_c 代表球具室外擊球聲音， a_c 而理論分析中之 a_c 無法得知，因此假設 a_c 與 \hat{a}_c 相同，即 $a_c = \hat{a}_c$ ，並將時間域之響應分別進行快速傅立葉轉換，求得其各別之傅立葉頻譜，以預測出所建立球具之有限元素模型實際擊球聲響，但半理論半實驗預測方法，主要是在(1)FE Model之預測過程中，將原始控制組球具換成實驗組球具之模型，而(2)、(3)、(4)、(5)過程中所使用之數據，皆還是以原始控制組球具之實際量測結果來預測，以期能快速地預測出結構厚度變更後之擊球聲響。

2.1 有限元素分析

圖 3 為高爾夫球具實體圖，球頭本體材質為 Ti-64，本文以 ANSYS 套裝軟體對高爾夫球具進行有限元素分析，圖 4 為高爾夫球具有限元素模型圖，主要將球頭打擊面、頂蓋及底蓋共分為 73 個不同厚度區塊，其中 A1~A4 區塊為打擊面(face)，A5~A53 及 A73 區塊為頂蓋(crown)，A54~72 區塊為底蓋(sole)，圖 5 為球頭厚度位置分佈示意圖，主要厚度變異較大之位置為 C1、C2 及 S1，因此分別將三個不同結構厚度之球具分為控制組 Type-1 與對照組 Type-2 及 Type-3，而 Type-1 為原始實際球頭，Type-2 與 Type-3 為利用有限元素模型變更厚度之球頭模型，表 1 為高爾夫球頭厚度表，其有限元素模型設定如下說明：

假設高爾夫球頭之材料性質為等向性材料，並將球頭以線性殼元素(Shell63)建構，而球頭內部有三根肋狀結構以三維樑元素(Beam4)建構，且在球桿與球頭間之接合處以彈簧元素(Combin14)模擬，模型分割採用 Mapped Mesh 方式進行分割，共分為 7661 個節點與 7243 個元素，以自由邊界及無任何外力下進行模態分析，而簡諧響應分析時是在打擊面的中心點模擬以 1 單位之外力進行分析。

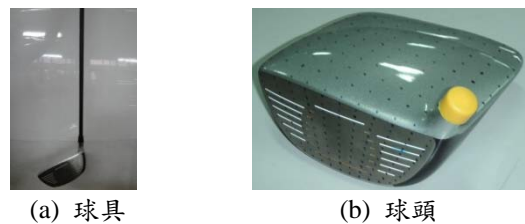


圖 3 高爾夫球具實體圖

表1 高爾夫球頭厚度表

分佈位置	Type-1 (194.7g)	Type-2 (193.3g)	Type-3 (191.3g)
	厚度(mm)	厚度(mm)	厚度(mm)
A1	3.3	3.3	3.3
A2	3.14	3.14	3.14
A3	2.8	2.8	2.8
A4	1.5	1.5	1.5
A5	1.3	1.3	0.7
A6	0.58	0.32	0.56
A7	0.6	0.34	0.6
A8	0.72	0.52	0.57
A9	0.72	0.52	0.62
A10	1	0.68	0.79
A11	0.82	0.74	0.78
A12	0.58	0.37	0.52
A13	0.72	0.38	0.48
A14	0.78	0.36	0.51
A15	0.84	0.31	0.61
A16	1	0.69	0.81
A17	0.64	0.79	0.53
A18	0.57	0.53	0.47
A19	0.67	0.56	0.41
A20	0.62	0.56	0.45
A21	0.67	0.49	0.52
A22	0.84	0.83	0.76
A23	0.6	0.58	0.61
A24	0.54	0.57	0.48
A25	0.65	0.6	0.32
A26	0.74	0.65	0.44
A27	0.81	0.64	0.46
A28	1.05	0.84	0.86
A29	0.58	0.58	0.53
A30	0.6	0.58	0.45
A31	0.52	0.68	0.32
A32	0.78	0.64	0.53
A33	0.65	0.75	0.59
A34	1.05	0.89	0.9
A35	0.57	0.72	0.75
A36	0.65	0.85	0.53
A37	0.62	0.7	0.49
A38	0.73	0.78	0.58
A39	0.63	0.81	0.7
A40	1.05	0.95	0.94
A41	1.05	0.84	0.87
A42	0.82	0.75	0.85
A43	0.71	0.62	0.62
A44	0.63	0.65	0.56
A45	0.7	0.73	0.64
A46	1.05	0.94	0.93
A47	1.05	0.88	0.9
A48	0.93	0.78	0.93
A49	0.8	0.7	0.72
A50	0.8	0.67	0.7
A51	1.05	0.85	0.88
A52	0.85	1	0.85
A53	0.9	1	0.9
A54	0.8	0.86	0.8
A55	0.9	0.9	0.9
A56	0.8	0.8	0.8
A57	0.9	0.9	0.9
A58	0.8	0.8	0.8
A59	0.8	0.85	0.82
A60	0.88	0.98	0.98
A61	0.78	0.85	0.79
A62	0.8	0.87	0.85
A63	0.72	0.92	0.74
A64	0.72	0.84	0.88
A65	0.8	0.9	0.82
A66	1.1	1.1	1.1
A67	1.36	1.29	1.29
A68	1.3	1.07	1.18
A69	0.72	0.8	0.86
A70	0.85	0.85	0.86
A71	0.8	0.83	0.85
A72	1.36	0.84	0.86
A73	0.7	0.8	0.7

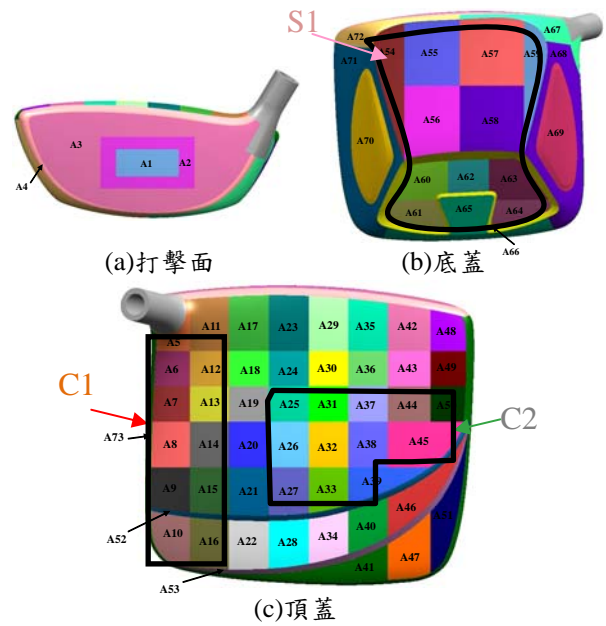


圖 5 球頭厚度分佈示意圖

2.2 實驗量測步驟

圖 6 為球頭實驗量測敲擊點規劃圖，主要針對球具進行實驗模態分析，分別於球頭打擊面、頂蓋及底蓋三個部份，各規劃了 121 點作為量測點，因此共 363 個量測點，圖 7 為球具實驗量測架設圖，主要將球具以棉線懸吊模擬自由邊界，並使用加速度計與麥克風作為感測器，再使用鋼頭衝擊錘進行球頭激振，量測高爾夫球具振動及聲音之響應，以得到球頭之頻率響應函數與聲音線性頻譜，即自身功率頻譜密度函數，圖 8 為室外擊球聲音量測圖，室外擊球聲音量測時以麥克風為感測器架設距地面垂直高度 1.5m 與高爾夫球水平距離 0.6m 處，經實際在打擊面之中心點擊球後，因此麥克風可量測到聲音訊號，而透過頻譜分析儀可得到自身功率頻譜密度函數，即為高爾夫球具室外擊球聲音之線性頻譜。

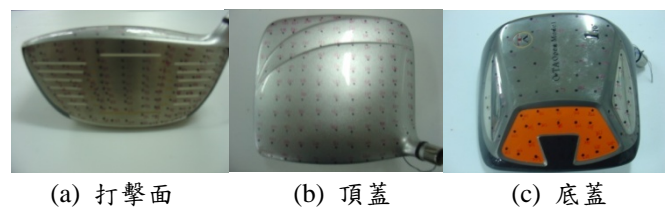


圖 6 球頭實驗量測敲擊點規劃圖



圖 7 球具實驗量測架設圖 圖 8 室外球具聲音量測圖



圖 4 高爾夫球具有有限元素模型圖

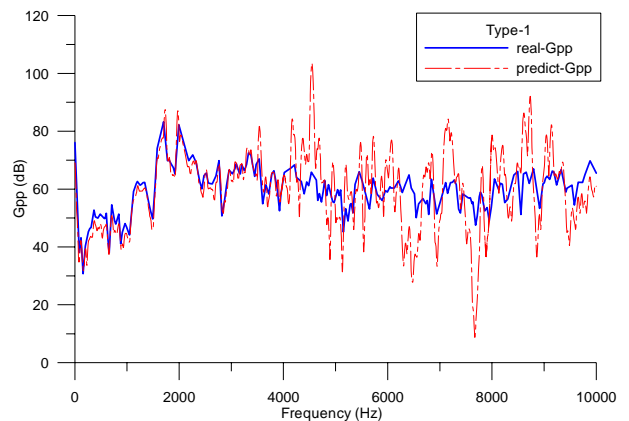
3. 結果與討論

將球頭之厚度區塊經由有限元素模型修改後，進行模態分析及簡諧響應分析後，並透過室外擊球聲音量測與聲音模擬預測程式，將可得到實際量測與預測之聲音響應參數，其中 Type-1 為控制組球具，而 Type-2 及 Type-3 為實驗組球具利用此半理論半實驗聲音預測方法[5]，所得之聲音線性譜頻結果，並歸納出下列幾點討論：

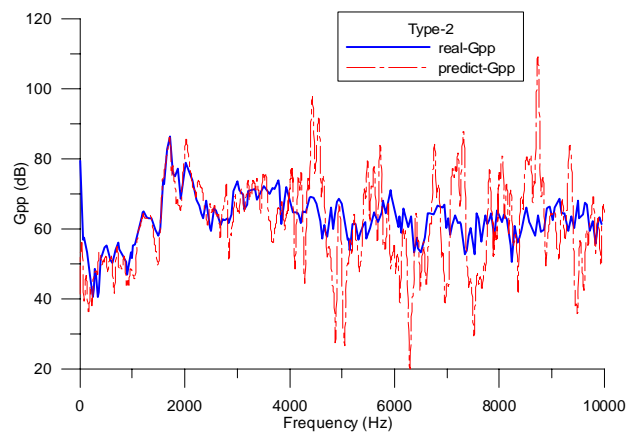
- (1) 由圖 9 及表 2 實際擊球與預測方法之聲音頻譜比較圖表，可發現控制組與實驗組之主要聲音峰值頻率變化情形。
- (2) 由圖 10 及表 3 實際球具量測之頻率響應函數比較圖表，可瞭解球具在 10000Hz 以下 Type-1 球具與各球具間之振動振幅分佈情形。
- (3) 由 Type-1 控制組可看出，所量測與預測之聲音頻率，在 4000Hz 以下低頻部份有良好對應性，並可發現預測之聲音峰值頻率之誤差率在 2% 以內，而聲音振幅預測雖較實際值為高，但兩振幅間有其相對性皆高於實際值約 5dB，顯示此聲音預測程式有其準確性。
- (4) 而 4000Hz 以上高頻部分，主要因為有限元素模型在 FRF 之模擬分析結果，與實驗結果尚未達到完全等效，因此高頻部分之聲音預測尚有改善之空間。因為進行簡諧響應分析時，在模擬力響應之輸入為 white noise 輸入，但實際上的衝擊力會產生衰減，因此高頻之理論 FRF 值模擬皆高於實驗值而產生誤差。
- (5) 由 Type-2 實驗組，可看出 Type-1 與 Type-2 球具在實際量測聲音頻率值差異量很小，因而所模擬之聲音頻率值與實際值相當接近，而第二個峰值之聲音振幅其預測值較實際值大約 6.6dB，主要因素可在實際聲音量測之聲音振幅發現 Type-1 與 Type-2 在第二個聲音峰值振幅之差異量較大，因而使得半理論半實驗方法所預測之第二個峰值振幅值產生偏高之現象。
- (6) 由 Type-3 實驗組，可看出在第二個聲音峰值頻率誤差率約 8%，主要因素可在實際聲音量測之聲音頻率發現 Type-1 與 Type-3 在第二個聲音峰值頻率之差異量較大，因而使得半理論半實驗方法之頻率預測值產生偏高之現象，而所預測之聲音振幅值與實際值相當接近。

表2 實際擊球與預測之聲音峰值頻率比較表

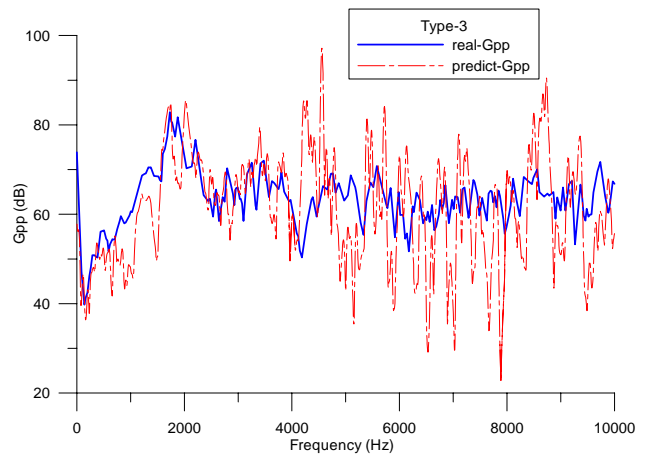
	實際聲音量測		程式聲音預測		頻率誤差 (%)	振幅誤差 (dB)
	聲音頻率 (Hz)	聲音振幅 (dB)	聲音頻率 (Hz)	聲音振幅 (dB)		
Type-1	1703.1	83.28	1731.2	87.45	1.65	-4.17
	1993.7	82.19	1975.0	87.09	0.94	-4.90
Type-2	1721.8	86.29	1709.4	86.04	0.72	0.25
	2015.6	78.90	2025.0	85.47	0.47	-6.57
Type-3	1728.1	82.86	1743.8	84.91	0.91	-2.05
	1875.0	81.72	2025.0	85.51	8	-3.79



(a) Type-1



(b) Type-2

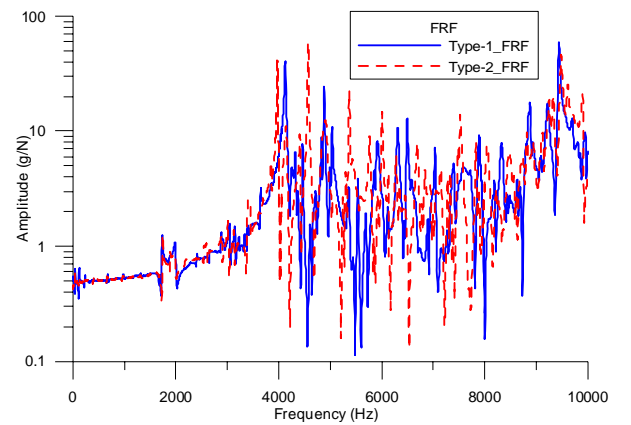


(c) Type-3

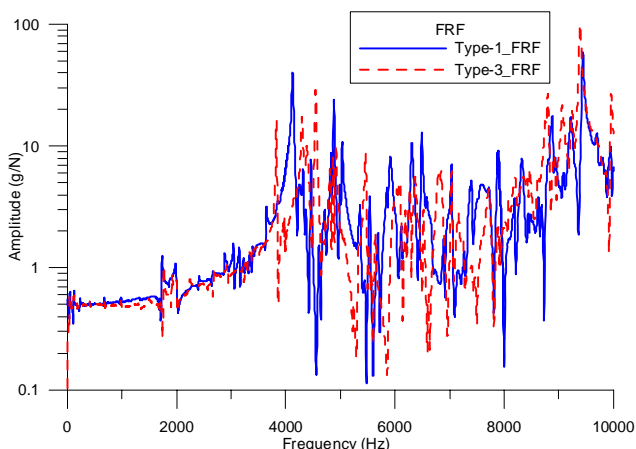
圖9 實際擊球與預測方法之聲音頻譜比較圖

表 3 球具量測之峰值頻率響應函數比較表

	自然頻率 (Hz)	振幅 (g/N)	自然頻率 (Hz)	振幅 (g/N)	頻率誤差 (%)	振幅誤差 (g/N)
Type-1_Type-2	1734.4	1.245	1743.8	1.270	0.54	0.025
	1981.3	1.085	1890.6	0.893	-4.58	-0.192
Type-1_Type-3	1734.4	1.245	1765.6	1.035	1.80	-0.210
	1981.3	1.085	1918.8	0.870	-3.15	-0.215



(a) Type-1_Type-2



(b) Type-1_Type-3

圖 10 球具量測之頻率響應函數比較圖

4. 結論

本研究對一高爾夫球頭利用有限元素模型，將同一類型之球具以些微修改之設計變更，並以半理論半實驗聲音模擬預測方法，模擬打擊時之聲響，在球具不用製出之情況下，以期能準確並快速地預測擊球聲響，綜合分析結果有下列幾點結論：

- (1) 由球具聲音量測分析程式，可快速的利用實驗之頻率響應函數(FRF)與室外擊球聲音之功率頻譜密度(PSD)函數，得到球具之聲音線性頻譜資料。
- (2) 在聲音預測分析上，未來可在有限元素模型及分析設定進行改良，增進4000Hz以上自然頻率及頻率響應函數準確性，使此聲音預測程式能有更好的展現性。
- (3) 以此半理論半實驗聲音模擬預測方法，由結果可看出，能夠約略得到其聲音頻譜及振幅之改變趨勢。
- (4) 經由此變更設計之聲音預測流程，可快速的針對結構進行微型修改，以初步地改善並預測出

球具聲音品質特性。

- (5) 本文對結構變更之聲音預測方法，在未來進行聲音與結構變更研究上，可藉由瞭解此一方法，以減少試誤之過程。

5. 誌謝

本研究承蒙 98 年度教育部產學園區計畫編號：98E-06-082 及大田精密工業股份有限公司提供研究經費，特此誌謝。

6. 參考文獻

1. 王栢村, 陳又毓, 丁國基, 黃裕仁, 陳詠升, 2008, 「結合有限元分析於高爾夫球具結構變更與聲音預測」, *Taiwan ANSYS/Fluent Conference*, 台北, 論文編號: 6-1。
2. 王栢村, 丁國基, 張年華, 王文志, 謝嘉展, 黃裕仁, 陳詠升, 2008, 「不同結構厚度之振動模態與聲音關聯性探討」, *中國機械工程學會第二十五屆全國學術研討會*, 彰化, 論文編號: B10-24。
3. 王栢村, 陳又毓, 許燕吉, 高毓廷, 黃裕仁, 謝佳雄, 2007, 「高爾夫球頭聲音與振動模態關聯性探討」, *屏東科技大學暨北京科技大學第二屆學術交流研討會*, 屏東, 論文編號: C006。
4. 邱武耀, 鐘志邦, 洪研庭, 林建璋, 2005, 「高爾夫球木桿組桿前後之聲音特性探討」, *第十三屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*, 彰化, 論文編號: C14。
5. 王栢村, 丁國基, 黃裕仁, 陳詠升, 2008, 「高爾夫木桿鈦球頭於振動模態與敲擊聲音之關連性探討」, *屏東科技大學暨北京科技大學第三屆學術交流研討會*, 北京, 論文編號: MB0807。
6. 謝裕忠, 1995, 「高爾夫球頭電腦輔助分析技術概論」, *工業材料*, 第 104 期, 第 114-126 頁。
7. Hocknell, A., Mitchell, S. R., Jones, R., and Rothberg, S. J., 1998, "Hollow Golf Club Head Modal Characteristics: Determination and Impact Applications," *Experimental Mechanics*, Vol. 38, pp. 140-146.
8. Dvorak, P., 2002, "Building a Better Golf Ball," *Machine Design*, p. 66.
9. 邱武耀, 楊淳守, 賴姿吟, 譚世偉, 陳彥伊, 吳伯毅, 2008, 「應用田口法之渦流風扇噪音研究」, *第十六屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*, 台北, 論文編號: D-5。
10. 許榮均, 陳志豪, 王志全, 2006, 「近場聲音全像術應用於噪音源的辨識」, *第十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*, 宜蘭, 論文編號: G2。

Sound Prediction and Verification for Golf Club Head Design Modification

Bor-Tsuen Wang¹, Nian-Hua Zhang², Yu-Ren Huang³, Zuo-Ming Zhang³

¹ Professor, Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology

² Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology

³ Engineer, O-TA Precision Industry Co., Ltd

Abstract

The predication of impact sound for golf club is beneficial to the need of club head design. This work applies the developed semi-theoretical and semi-experimental sound prediction method to predict the sound spectrum of the golf club by the variation of the head thickness at different locations. The finite element (FE) model of the golf club is first constructed by the commercial FE software, ANSYS. The club head model can be easily changed to simulate different head thickness and performed modal analysis and harmonic response analysis. The frequency response frequency (FRF) of the golf club can then be obtained and used to predict the swing impact sound spectrum in conjunction with the measured sound spectrum for the original design club head. The predicted sound spectrum for the design modification of the golf clubs is compared with the on-site measured hitting sound for the golf clubs. Results show that the semi-theoretical and semi-experiment sound prediction method can reasonably predict the hitting sound spectrum from the theoretically determined FRF by FE software. The sound predication method is useful for minor structural modification such the variation of club head thickness. This work lays out the methodology in predicting the impact sound in design stage and thus enhances the design tools for the golf club in considering the sound quality.

Keywords : Sound Prediction Method, Harmonic Response Analysis, Frequency Response Function, Experimental Modal Analysis