

高爾夫球頭結構變更之聲音特性探討

王栢村¹、吳德和¹、張年華²、黃裕仁³、陳詠升³

¹國立屏東科技大學 機械工程系 教授

²國立屏東科技大學 機械工程系 研究生

³大田精密工業股份有限公司研發中心

wanbt@mail.npust.edu.tw [王栢村]

摘要

本文旨對一高爾夫球頭利用有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)及所發展之聲音模擬分析程式,對球頭結構作一設計變更,以探討球具之打擊聲響特性。首先利用 ANSYS 軟體對球頭建構有限元素模型,進行模態分析求取球頭之自然頻率及模態振型,再利用聲音模擬分析程式擷取其聲音頻譜參數,包括聲音峰值頻率、峰值頻率對應之振幅及模態阻尼比。引用田口法進行球頭厚度參數變更之振動模態特性分析,由改變球頭之有限元素模型,探討其模態參數之特性變化,並以聲音模擬分析程式確認改變之有限元素模型之打擊聲響。結果發現調整球頭部分結構,使其自然頻率改變,確實能影響打擊聲響。而本文之結構變更分析及聲音預測流程,對未來在進行聲音與結構變更研究上,可作為參考依據,以縮短基於球具揮擊聲音特性變更設計之時間。

關鍵詞: 有限元素分析、模態分析、聲音頻譜、自然頻率、田口法。

1. 前言

隨著高爾夫球這項運動漸漸的流行,越來越多的人開始觀看球賽,所以在高爾夫球打擊時的性能及聲音的悅耳性方面逐漸的開始受到重視,然而在各種需求中想開發好聽聲音之新式球具,都必須消耗大量的設計時間及樣品製作成本,所以有必要利用聲音模擬分析方法,來預測及改善高爾夫球具之擊球聲音,以符合現代人對聲音品質的需求,並降低球頭設計時所需之時間及成本。

高爾夫球具模態測定與分析評估方面,王和黃[1]是對一高爾夫球鐵桿進行有限元素分析與實驗模態分析,分別求取其球桿頻率響應函數及模態參數。利用有限元素法架構三種不同有限元素模型,主要是為了看出以不同方式架構有限元素模型所帶來的差異,分別求取這三種模型之模態參數,並與實驗模態分析求取之模態參數做比較,同時亦進行簡諧分析求取頻率響應函數並與實驗模態分析之值做比較,最後進行有限元素模型之修正,並探討不同模型之適應性。王和吳[2]主要對高爾夫球桿及單獨球頭分別進行有限元素分析,將所得之模態參數,進行比較及關聯性之探討以了解其振動特性,且在握把處設定三種不同邊界條件,自由、固定、彈簧等邊界進行分析,預期找出不同邊界對模態參數之影響和各邊界間之關聯性。Swider, P et al.[3]主要是應用有限元素法與實驗模態分析對一高爾夫球進行分析,並觀

察模態振型及對應之平面。

高爾夫擊球聲音品質分析中,翁和康[4]主要針對8種不同品牌之高爾夫1號木桿球頭之擊球聲音,配合人耳聽覺與擊球聲音頻譜分析而找到辨別擊球聲音好聽與否之鑑別方法,以此來規劃出一套設計木桿頭的流程。康等人[5]針對不同品牌之高爾夫球桿進行擊球聲音頻譜分析,同時對球頭與高爾夫球以有限元素軟體進行碰撞分析,利用整體碰撞模型所產生之加速度進行快速傅立葉轉換所得之頻譜圖,藉以探討球頭結構與擊球聲音頻譜之關聯性,以建立高爾夫擊球聲音評估之方法。王等人[6]主要對不同之高爾夫球桿進行擊球聲音測試,量測其不同球桿擊球時之聲音頻譜,並利用套裝軟體進行運算取得 1/3 八音頻帶頻譜及 1/1 八音頻帶頻譜,最後套入室內噪音評估指標進行綜合比較,以瞭解不同高爾夫球桿擊球音頻之特性。王和黃[7]此文主要是利用不同高爾夫球桿,量測敲擊所產生之聲音頻譜,藉由各種對聲音的評估指標,來比較不同球桿間聲音頻譜之特性及聲音品質之差異,實驗結果顯示不同評估指標對聲音品質皆呈一致性,表示此種量測方法及評估可用在高爾夫球桿的擊球聲音量測與聲音品質分析。王等人[8]對高爾夫球木桿球頭,進行有限元素分析及實驗模態分析,以求得球頭之振動模態特性,並量測球頭表面之加速度及聲音信號,以對球頭的振動模態及聲音輻射之關聯性作探討。王等人[9]對高爾夫球具之有限元素模型進行球頭結構變更,求得其頻率響應函數,並用於預測球頭結構之擊球聲音,以有效率的探討球頭結構與擊球聲音間之關聯性。王等人[10]對同樣式但不同厚度之高爾夫球頭,進行實驗模態分析並量測其衝擊音之聲音頻譜,以探討不同結構厚度之聲音頻譜特性與振動特性間之關連性。

本文主要目的是對一高爾夫球頭利用其有限元素模型,改變頂蓋結構厚度,並以聲音模擬分析方法來預測其擊球聲響,使高爾夫球頭結構在變動最少下及尚未製作出時,便能預測球頭擊球聲響之聲音品質,以改善並設計出悅耳聲響之高爾夫球具。

2. 研究方法與步驟

本文擬對圖 1 之高爾夫球頭進行球頭結構厚度變更,球頭本體材質為 Ti64,而將球頭之打擊面、頂蓋及底蓋共分為 73 個不同厚度區塊,圖 2 為球頭厚度分佈區塊圖,而由過去研究[10]可知頂蓋(1,1)模態之自然頻率為擊球聲響最大之頻率,因此推測主導擊球聲響區域為頂蓋,因而將球頭頂蓋之結構分出 A、B、C、D 四



個區域，再經由田口方法可得知厚度改變會影響1750Hz之振動頻率最大的區域為C，因此對C區域進行球頭結構厚度變更。

2.1 球頭變更設計流程

圖3為基於聲音特性需求之球頭變更設計流程圖，(1)首先建構球頭之CAD模型，(2)利用ANSYS軟體對球頭之有限元素模型，進行模態分析求取球頭之模態參數，(3)確認球頭之振動頻率特性，(4)對球頭之有限元素模型進行簡諧響應分析，求得球頭之頻率響應函數，(5)利用聲音模擬分析程式擷取球頭聲音頻譜參數，接著改變球頭之有限元素模型，並進行擊球聲音預測，(6)確認打擊聲響為所需之聲音，若不符合則可繼續改變有限元素模型，(7)製作出球具，(8)進行實際擊球聲音量測，(9)與聲音預測程式所得之聲響進行比較驗證，(10)完成實驗驗證。本文獻對此基於聲音特性需求之球頭變更設計流程探討至第6步驟。

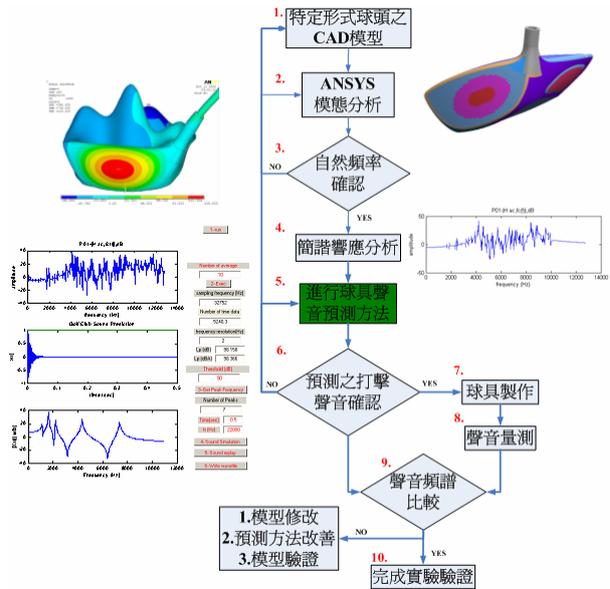


圖3 基於聲音特性需求之球頭變更設計流程圖



圖1 球頭實體圖

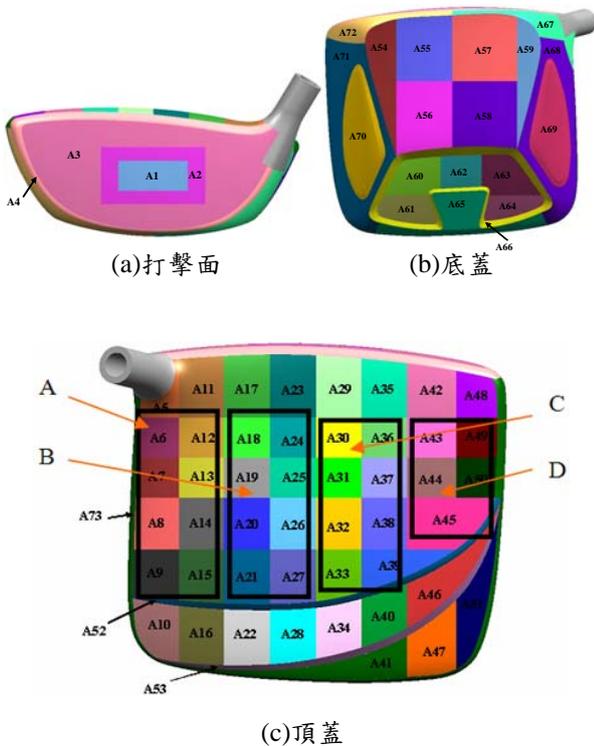


圖2 球頭厚度分佈區塊圖

表1 高爾夫球頭厚度表

分佈位置	厚度 (mm)	分佈位置	厚度 (mm)
A1	3.3	A38	0.58
A2	3.14	A39	0.7
A3	2.8	A40	0.94
A4	1.5	A41	0.87
A5	0.7	A42	0.85
A6	0.56	A43	0.62
A7	0.6	A44	0.56
A8	0.57	A45	0.64
A9	0.62	A46	0.93
A10	0.79	A47	0.9
A11	0.78	A48	0.93
A12	0.52	A49	0.72
A13	0.48	A50	0.7
A14	0.51	A51	0.88
A15	0.61	A52	0.85
A16	0.81	A53	0.9
A17	0.53	A54	0.8
A18	0.47	A55	0.9
A19	0.41	A56	0.8
A20	0.45	A57	0.9
A21	0.52	A58	0.8
A22	0.76	A59	0.82
A23	0.61	A60	0.98
A24	0.48	A61	0.79
A25	0.32	A62	0.85
A26	0.44	A63	0.74
A27	0.46	A64	0.88
A28	0.86	A65	0.82
A29	0.53	A66	1.1
A30	0.45	A67	1.29
A31	0.32	A68	1.18
A32	0.53	A69	0.86
A33	0.59	A70	0.86
A34	0.9	A71	0.85
A35	0.75	A72	0.86
A36	0.53	A73	0.7
A37	0.7		

2.2 有限元素分析

目前在開發設計好聽聲音品質之高爾夫球具方面，在設計過程中仍須將球具之樣品製出，並借助試打員實際揮擊來判別擊球聲音的好壞，使得過程相當耗費人力物力。因此在本文中ANSYS套裝軟體對高爾夫球頭進行模態分析，並利用其模態參數配合聲音模擬分析方法[9]，使球頭在尚未製出時便能預測其聲音品質，

表1為高爾夫球頭厚度表，圖4為高爾夫球頭有限元素模型，其有限元素模型設定如下：

假設高爾夫球為等向性材料，球頭整體利用線性殼元素(Shell63)建構，而內部有三根肋狀結構以三維樑元素(Beam4)建構，並在球桿與球頭接合處以彈簧元素(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分析。



圖4 高爾夫球頭有限元素模型

2.3 聲音預測流程

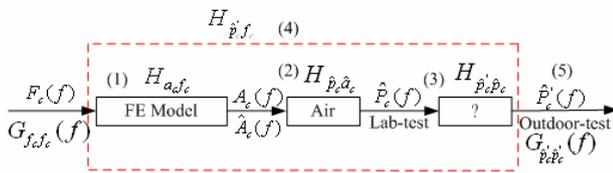


圖5 理論分析聲音預測流程圖[9]

圖5為理論分析聲音預測流程圖，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，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各別之傅立葉頻譜。

理論分析聲音預測流程圖分為五個步驟，各步驟說明如下：

- (1) 求 $H_{\hat{a}_c f_c}$ ，為輸入球具一單位衝擊力與輸出球具室內加速度之頻率響應函數(FRF)。
- (2) 求 $H_{\hat{p}_c \hat{a}_c}$ ，為輸入球具室內加速度與輸出球具室內衝擊音之 FRF。
- (3) 求 $H_{\hat{p}_c' \hat{p}_c}$ ，為輸入球具室內衝擊音與輸出球具球具室外擊球聲音之 FRF。
- (4) 求 $H_{\hat{p}_c' f_c}$ ，為輸入球具一單位衝擊力與輸出球具室外擊球聲音之 FRF。其定義為：

$$H_{\hat{p}_c' f_c} = H_{\hat{p}_c' \hat{p}_c} \times H_{\hat{p}_c \hat{a}_c} \times H_{\hat{a}_c f_c} \quad (1)$$
 可利用此步驟來驗證前3個步驟所求之FRF值之可靠度。
- (5) 求 $G_{\hat{p}_c' \hat{p}_c}$ ，為球具室外擊球聲音之自身功率頻譜密度函數(auto PSD)，其定義為：

$$G_{\hat{p}_c' \hat{p}_c}(f) = \left| H_{\hat{p}_c' \hat{p}_c} \right|^2 \times G_{f_c f_c}(f) \quad (2)$$

3. 球頭自然頻率之田口方法分析

對高爾夫球頭結構厚度進行分析時，可發現改變球頭結構厚度對高爾夫球頭的振動特性會有大幅影響，在此主要針對高爾夫球頭結構厚度，以田口方法之望大特性進行最佳化分析，目的在於得到影響球頭自然頻率最大之位置，以作為球頭結構變更時的參考依據，使結構能在變動最少下，快速的將擊球聲音品質達到改善。

3.1 控制因子選擇

圖6為球頭振動與聲音頻譜圖，而在過去研究[10]中發現此型球頭之聲音與振動特性，主要是由打擊面及頂蓋主導擊球之聲音，而主導球頭頂蓋聲音之振動模態為頂蓋(1,1)模態之自然頻率位置，且此頻率更是球頭擊球聲響最大之聲音頻率位置，經由以上之因素，故選擇將頂蓋分出如圖2之A、B、C、D區塊，並以頂蓋(1,1)模態之振動模態做為分析探討之標的。

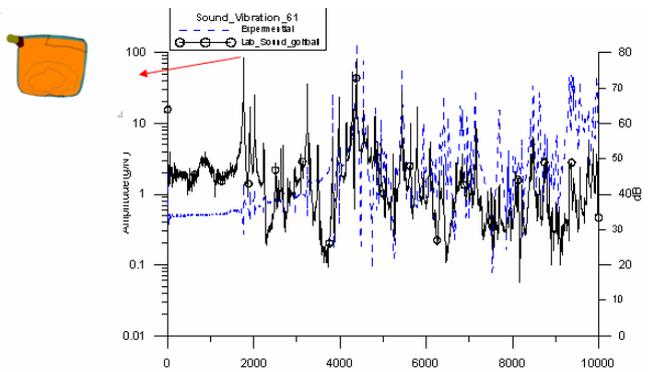


圖6 球頭振動與聲音頻譜圖[10]

表2 水準數定義表

	Level1	Level2	Level3
頂蓋位置A厚度	-0.2mm	基準厚度	+0.2mm
頂蓋位置B厚度	-0.2mm	基準厚度	+0.2mm
頂蓋位置C厚度	-0.2mm	基準厚度	+0.2mm
頂蓋位置D厚度	-0.2mm	基準厚度	+0.2mm

3.2 分析方法

本文建構高爾夫球頭結構之有限元素模型，配合田口法之 $L_9(3^4)$ 直交表，以基準厚度來進行頂蓋不同位置之厚度變更，表2為水準數定義表，並對不同厚度之有限元素模型進行模態分析，求取結構之自然頻率，而從求得之自然頻率與基準球頭結構之自然頻率作比較，可發現影響球頭之自然頻率最大之發生位置，為此球頭頂蓋厚度變異位置A、B、C、D其中一處。

3.3 田口法分析結果

表3為 $L_9(3^4)$ 直交表分析結果，表中之品質特性為球頭有限元素模型進行模態分析後，原始球頭與不同水準參數組合之球頭頂蓋(1,1)模態自然頻率相減所得，即品質特性 $\Delta f = f_1 - \bar{f}_1$ ，而望大特性之信號雜音比(signal noise ratio, SN) 定義如下：

$$SN = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3)$$

本文主要的目的是同時考量，品質特性的平均值要與目標值一致，並使品質特性之變異性愈小愈好。而由表 3 可發現 A1、B3、C3、D3 水準之組合為此次分析之最佳組合。

表 4 及圖 7 為 SN 因子反應圖表，可發現球頭頂蓋改變 C 位置之厚度時，會使球頭的自然頻率產生最大之影響，且當 D 位置厚度減少時，亦會對自然頻率產生較大之影響，最後由確認實驗中找出之最佳組合 A3、B3、C3、D1，所對自然頻率的影響，比原始分析之任一組合影響大，顯示此田口法結果之合理性及正確性。

表 3 L₉(3⁴)直交表分析結果

Exp	A	B	C	D	品質特性	SN
1	1	1	1	1	7.9	17.9525
2	1	2	2	2	-0.7	-3.098
3	1	3	3	3	-25.3	28.0624
4	2	1	2	3	-1.6	4.0824
5	2	2	3	1	-15	23.5218
6	2	3	1	2	1.2	1.5836
7	3	1	3	2	-17.4	24.811
8	3	2	1	3	5.9	15.417
9	3	3	2	1	-7.7	17.73

表 4 SN 因子反應表

	A	B	C	D
Level1	14.3056	15.153	11.651	19.7347
Level2	9.7292	11.9469	6.2381	7.7655
Level3	19.3193	15.792	25.465	15.8539
Effect	9.5901	3.8451	19.227	11.9692
Rank	3	4	1	2

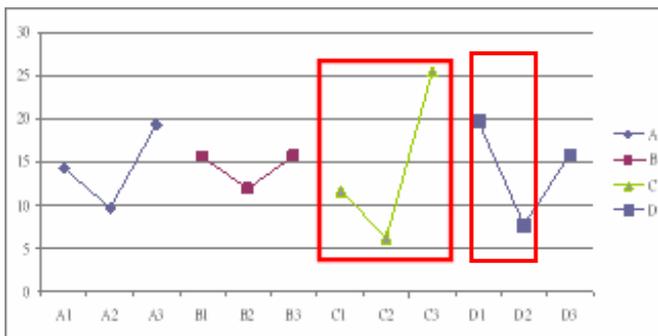
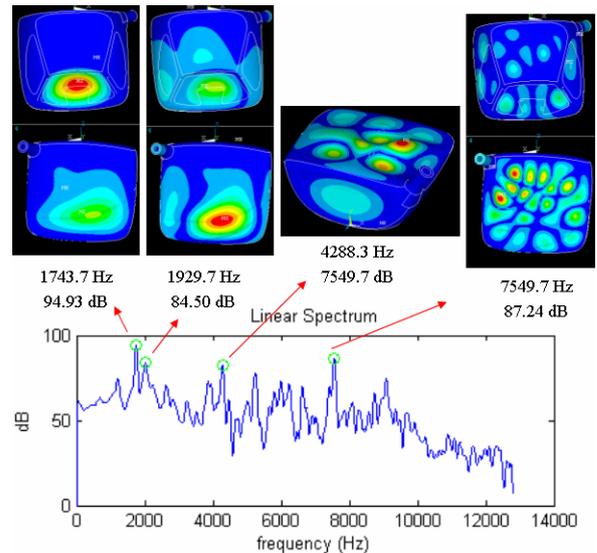


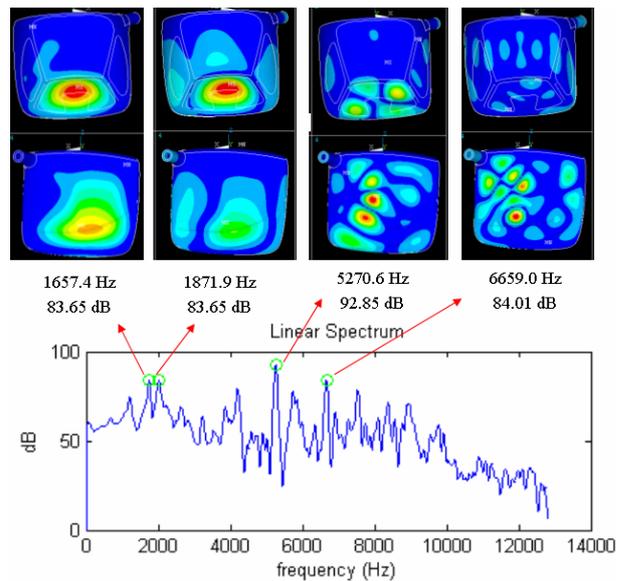
圖 7 SN 因子反應圖

表 5 球頭自然頻率比例表

Golf Club	模態	Frequency(Hz)	dB	頻率比例	MAC
原始球頭 C	F01	1743.7	94.93	—	—
	F02	1929.7	84.50	1.106	—
	F20	4288.3	83.57	2.46	—
	F57	7549.7	87.24	4.33	—
修改球頭 C_0.6	F01	1687.6	84.51	—	0.98
	F02	1886.0	83.94	1.117	0.97
	F28	5224.2	86.98	3.095	—
	F52	7541.1	83.72	4.468	0.15
修改球頭 C_0.68	F01	1678.8	84.24	—	0.98
	F02	1881.4	83.92	1.12	0.97
	F28	5243.8	88.76	3.12	—
	F52	7583.3	79.69	4.517	0.2
修改球頭 C_0.8	F01	1657.4	83.65	—	0.97
	F02	1871.9	83.66	1.13	0.95
	F28	5270.6	92.85	3.18	—
	F41	6659.0	84.01	4.01	0.28



(a) 原始球頭



(b) C區塊加厚0.8mm

圖 8 球頭聲音線性頻譜圖

4. 球頭變更之結果與討論

將球頭有限元素模型之 C 區塊，經過厚度修改及分析後，可整理出表 5 球自然頭頻率比較表及圖 8 球頭聲音線性頻譜圖，並歸納出下列幾點：

- (1) 從表 5 可看出，將 C 區塊的厚度增加會造成自然頻率的下降，因而造成整體模態數減少，且其頻率因 C 區塊厚度之增加量，而呈現一定下降趨勢。
- (2) 聲響較大之自然頻率 4288Hz，經過 C 區域厚度增加後變成 5200Hz 左右之自然頻率。
- (3) 由於 C 區塊厚度漸漸增加，響度最大之自然頻率位置從 1750Hz 變成 5200Hz，且響度漸趨上升。
- (4) 由 MAC 值可發現球頭頂蓋主要的聲音模態，其 MAC 值都相當接近於 1，顯示修改過後球頭的模態振型與原始球頭相當接近。
- (5) 由圖 8 可看出球頭厚度改變對聲音線性頻譜及聲音峰值與振動模態間之關連性。

5. 結論

本研究對一高爾夫球頭建構其有限元素模型，改變結構厚度並以聲音模擬分析方法，模擬打擊時之聲響，使球頭在尚未製出時便能預測其聲音特性，綜合本文之分析結果有下列幾點結論：

- (1) 分析結果驗證，藉由修改球頭部份結構來調整球頭結構之振動頻率，確實能影響擊球聲響。
- (2) 由模態振型保證指標(MAC)之結果可驗證，利用田口方法分析所得知，影響球頭振動頻率最大之位置，來對結構做設計變更有其可行性，且符合預期減少結構的變動，而維持球具原有之特性，並能將擊球聲響改善之目標。
- (3) 由田口法所得知，當位置 C 厚度增加，而 D 位置厚度減少時，皆會對振動頻率產生較大之影響，可利用此分析結果來對高爾夫球頭做結構變更，使球頭之重量能符合設計之所需。
- (4) 經由聲音模擬分析程式所呈現之擊球聲響，即可由主觀評斷之方法探討變更設計球頭之聲音品質特性。
- (5) 本文之結構變更分析及聲音預測流程，對未來在進行聲音與結構變更研究上，可作為參考依據，以縮短變更結構設計所需之時間。

6. 致謝

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

7. 參考文獻

- [1] 王栢村，黃瑞光，1999「高爾夫球桿振動模態參數之測定」，中華民國力學學會第二十三屆全國力學會議論文集，新竹，第 457-464 頁。
- [2] 王栢村，吳國禎，2004「高爾夫球木桿之模態分析」，中華民國振動與噪音工程學會第十二屆學術研討會，台北，論文編號:A3-2。
- [3] Swider, P., Ferraris, G., and Vincent, B., 1994,

“Theoretical and Experimental Dynamic Behavior of a Golf Made of Composite Material,” *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 9, pp. 57-69.

- [4] 翁焜煌，康淵，2003，「高爾夫 1 號木桿頭打擊聲響品質之頻譜分析研究」，*大專高爾夫學刊*，第 2 期，第 26-39 頁。
- [5] 康淵，溫柏青，鍾文仁，張永鵬，王俊傑，2003，「高爾夫球木桿力學與音響」，*中華民國第二十屆機械工程研討會論文集*，台北，第 1009-1016 頁。
- [6] 王栢村，李建興，許燕吉，高毓廷，謝佳雄，2006「不同高爾夫球桿擊球之音頻特性分析」，*中華民國音響學會第十六屆學術研討會論文集*，台南，論文編號：A8。
- [7] 王栢村，黃瑞光，2002，「不同球頭之高爾夫球桿聲音品質分析」，*中華民國音響學刊*，第 8 卷，第 2 期，第 53-62 頁。
- [8] 王栢村，林昆正，徐川洋，2003，「高爾夫球振動與聲音關聯性之探討」，*中華民國音響學會第十六屆學術研討會論文集*，台北，第 212-219 頁。
- [9] 王栢村，陳又毓，丁國基，黃裕仁，陳詠升，2008，「結合有限元素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。
- [10] 王栢村，丁國基，張年華，王文志，謝嘉展，黃裕仁，陳詠升，2008，「不同結構厚度高爾夫球頭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論文集*，彰化，論文編號：1044。

Discussions on Sound Characteristics for Design Modification of Golf Club Head

Bor-Tsuen Wang¹, Nian Hua Zhang², Yu Ren Huang³, Yong Sheng Chen³

¹Professor, ²Graduate student
Department of Mechanical Engineering
National
Pingtung University of Science and
Technology
³Engineer
O-TA Precision Industry Co., Ltd

Abstract

This paper aims to apply finite element analysis (FEA) and the developed sound prediction method to study the hitting sound characteristics of a golf club head after

design modification. First the finite element model in constructed by the ANSYS software and performed modal analysis to obtain natural frequency and mode shape of the golf club head. The sound prediction method in adopted to simulate the hitting sound spectrum and obtain the peak resonant frequencies, their corresponding amplitude and model damping ratios. The Taguchi method in employed to study the modal properties of the golf club head by changing the head thickness. Through the modification of FE modal to determine the club head modal predicted, the hitting sound for the modified structures can also be predicted. Results show the change of head thickness will alter the structural natural frequencies and thus effect the hitting sound spectrum. This work layouts the design modification prows for the hitting sound prediction and will be beneficial to the design modification base on the head for the desired sound characteristics.

Keywords: finite element analysis, modal analysis, sound spectrum, natural frequency, Taguchi method.