



實驗模態分析與聲音量測技術於鈦高爾夫球具之探討

王栢村¹、丁國基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

E-mail:wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文乃應用實驗模態分析與聲音量測技術對鈦高爾夫球具進行分析。分別對高爾夫球頭與高爾夫球具於自由邊界下使用鋼質與高爾夫球兩種衝擊錘為激振器再以加速度計、麥克風進行振動與聲音訊號量測，並對高爾夫球頭與高爾夫球具振動特性進行比較，同時也應用聲音量測技術至室外量測實際擊球聲音，以掌握實際擊球之聲音特性，同時也對球具於不同環境下聲音頻譜之探討。結果得知高爾夫球頭與高爾夫球具振動特性相似，且擊球聲音峰值頻率與振動模態有重大之關連性，其中以高爾夫球衝擊錘敲擊所得到之聲音頻譜與室外擊球有一致趨勢。本文所發展之振動與聲音量測技術可用於爾後不同球具分析，而此鈦球具之分析結果更可作為爾後高爾夫球頭設計之參考價值。

關鍵字：實驗模態分析、聲音量測

1. 前言

高爾夫球已是現代相當受歡迎的運動項目之一，因此各家廠商也無時無刻積極開發新產品，以因應消費者之需求，而開發新產品逐漸以電腦模擬技術以縮短開發時間及成本，然而確認結構等效模型往往決定分析之可靠度，因此須以實驗方式進行驗證，而實驗方法之一為實驗模態分析，其方法可得到結構之振動特性，此方面之相關研究也被深入探討，本文應用此分析技術對目標高爾夫球具進行特性分析。

在高爾夫球衝擊聲音探討，王等人[1]進行高爾夫木桿球頭，進行理論有限元素分析與實驗模態分析，進行實驗同時量測聲音，最後建立分析與量測方法，以提供未來球頭設計參考。王等人[2]將市售5種不同高爾夫球桿進行室外擊球聲音量測，將所量測到之聲音頻譜以樂音的角度進行差異性探討，而由分析結果得知擊球聲音頻譜較高之峰值比例在2、1.5個全音之球桿有較佳之擊球聲響。王等人[3]進行高爾夫球頭聲音與振動關聯性分析，得知球頭打擊面、頂蓋以及底蓋主要(1,1)模態皆與聲音有重大關聯性。王等人[4]對一典型高爾夫球進行室內敲擊聲音與振動關聯性探討，進而至室外實際揮杆擊球聲音做深入探討，由結果發現球具聲音由頂蓋主導，與以往經驗由打擊面為主導並不相同。Wicks et al.[5]對鍛造及鑄造高爾夫球頭鐵桿進行擊球感覺之實驗與擊球聲音量測，經

實際揮桿擊球後仍有不同擊球感覺，推測因球頭模態振型節線位置有些許不同而有此現象。

結合有限元素分析與實驗模態分析之應用方面 Swider and Ferraris[6]進行理論與動態實驗模態分析，以模仿人握住球桿的情況，使用一激振器產生隨機激振，量測球桿模態振型，結果發現扭轉模態對擊球者擊球性能與舒適性造成重大的影響。王與黃[7]以樑元素及質量元素建構出三種不同高爾夫鐵桿有限元素模型進行模態與簡諧響應分析，並與實驗模態分析進行比對，得知單以樑元素架構高爾夫鐵桿有最佳之比對結果。王與黃[8]探討握把對三種不同高爾夫球桿有無握把振動特性影響，發現有握把會使球桿自然頻率降低、節點位置改變及握把處能量減少，使擊球者舒適度增加。王與黃[9]對三種不同高爾夫球桿以有限元素分析與實驗模態分析進行振動特性分析，探討節點位置、握把處振型以判斷球桿擊球品質，結果得知理論與實驗三種球具之模態振型握把處累加值越小，推測擊球舒適度會較佳。

Friswell et al.[10]則對典型高爾夫球具木桿及鐵桿以實驗模態分析結果為基準對有限元素模型進行參數修正，以求得等效模型並比較木桿及鐵桿自然頻率之差異。王等人 [11]以實驗模態分析求得一高爾夫球鐵桿之模態參數，並找出球頭振型節點位置，以確認球桿打擊之甜蜜區，結果顯示甜蜜區位於打擊面中央上方與一般認知相符合。王與吳[10]以有限元素分析分別進行單獨球頭與整支球具自由、固定與彈簧三種不同邊界下之振動特性分析，分析結果發現球頭與球具自然頻率約相差14%，而球具彈簧邊界之彈簧長數很大時其結果與固定邊界效應相近。

王與吳[12]則結合有限元素分析與實驗模態分析進行高爾夫球桿於自由、手握、及固定邊界三種不同邊界條件下之探討，從研究結果得知理論球桿三種不同邊界條件下與實驗皆有良好對應，可得到球具之等效模型，並由實驗得知以手握之邊界會有較高阻尼效應且推斷出手握球桿力量小時會有較高之阻尼效應。Hocknell et al.[13]利用雷射振動儀對中空高爾夫球頭進行實驗模態分析，同時建構球頭有限元素模型並對球頭有限元素模型進行驗證。

本文之目的對鈦材質高爾夫球具結合實驗模態分析與聲音量測技術探討其特性，並建立以此實驗分析技術之流程，同時建構相關資料以供爾後球頭設計之參考。



2. 實驗步驟與方法

圖1為實驗分析流程圖，首先對高爾夫球頭振動模態與聲音進行量測，進而探討球具振動模態與聲音關聯性，再進一步對球頭與球具振動特性做比較，以了解兩者振動特性之差異，最後針對室外擊球聲音與球具振動模態進行了解，以期得到此高爾夫球具擊球聲音特性。

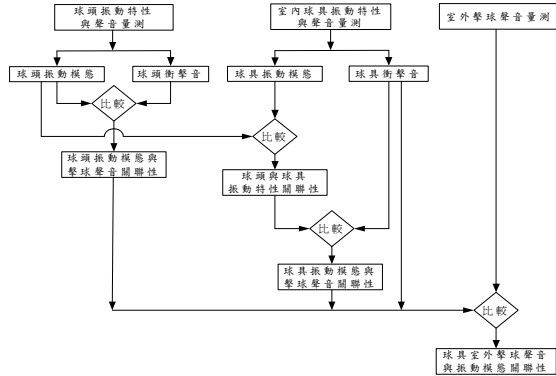


圖1 高爾夫球具實驗分析流程圖

2.1 球頭實驗模態分析與聲音量測

本文旨在建立球頭實驗模態分析與聲音量測技術於高爾夫球具振動與擊球聲音探討，分述如下：

- (1) 實驗模態分析在取得球頭之頻率響應函數與關聯性函數，為得知打擊面、頂蓋及底蓋之振動模態特性因此於三面各規劃如圖2之121實驗量測點，因此共量測363點，圖3(a)為高爾夫球頭實驗架構，使用棉線懸吊模擬自由邊界，以加速度計作為感測器固定於打擊面，再以衝擊錘做為激振器對球頭進行激振，透過頻譜分析儀將量測振動訊號由快速傅立葉轉換可得到頻率響應函數，並利用曲線嵌合軟體求得球頭模態參數，即自然頻率、模態振型。
- (2) 聲音量測於高爾夫球頭擷取振動訊號同時架設麥克風於球頭頂蓋60°角距離0.1m處做為感知器，同時用圖3(b)鋼質與高爾夫球頭兩種衝擊錘為激振器對球頭打擊面圖3(c)之中心位置進行敲擊，量測擊球聲音訊號經由頻譜分析儀做快速傅立葉轉換，可得到自身功率頻譜密度函數 (autospectrum)，此即為高爾夫球頭衝擊音之線性頻譜。

2.2 球具實驗模態分析與聲音量測

在得到球頭之特性後，也對高爾夫球具進行實驗模態分析，整體規劃點分為球頭打擊面121個規劃點、球桿與握把處有20個規劃點、球頭與球桿接合處有3個規劃點，因此高爾夫球具總計144個規劃點，如圖4，並以衝擊錘為激振器進行實驗模態分析，圖5(a)為高爾夫球具實驗架構圖，利用衝擊錘激振球頭結構，加速度計為感測器，以棉線懸吊模擬自由邊界，當感測器接收到訊號，透過頻譜分析儀快速傅立葉轉換可得到高爾夫球具之頻率響應函數，並與球頭頻率

響應函數進行比對，以確認球具點數規劃適當性，最後利用曲線嵌合軟體取得高爾夫球具之模態參數，即自然頻率、模態振型及阻尼比。

於量測高爾夫球具振動訊號同時也架設麥克風，架設於球頭頂蓋60°角距離0.1m處做為感知器，同時應用與球頭量測相同之鋼質與高爾夫球頭兩種衝擊錘為激振器對球頭打擊面圖5(b)之中心位置進行敲擊，量測擊球聲音訊號經由頻譜分析儀做快速傅立葉轉換，可得到自身功率頻譜密度函數 (autospectrum)，此即為高爾夫球頭衝擊音之線性頻譜。

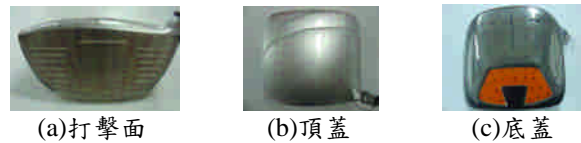


圖2 球頭敲擊點規劃示意圖



圖3 球頭振動模態與聲音量測架構圖

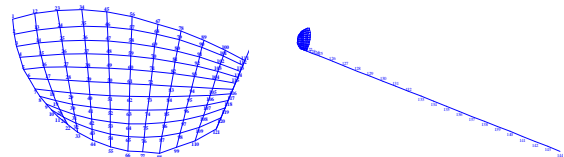


圖4 高爾夫球具敲擊點規劃示意圖

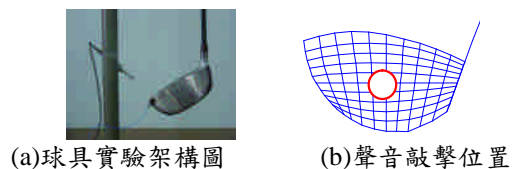
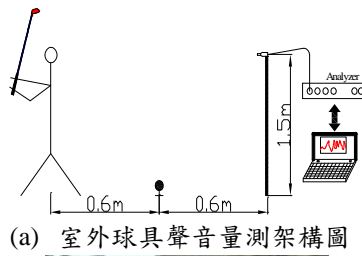


圖5 球具振動模態與聲音量測架構圖

2.3 球具室外擊球聲音量測

圖6(a)為室外擊球聲音量測示意圖，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投影點與高爾夫球水平距離0.6m處，經實際揮桿後將打擊面中心點圖6(b)量測訊號透過頻譜分析儀，轉快速傅立葉運算可得到自身功率頻譜密度函數 (autospectrum)，此即為高爾夫球具室外擊球聲音之線性頻譜，其量測目地主要在於了解球具於室內與室外兩種不同環境下衝擊音之差異。



(a) 室外球具聲音量測架構圖



(b) 室外球具聲音量測示意圖

圖6 球具室外擊球聲音量測圖

3. 結果與討論

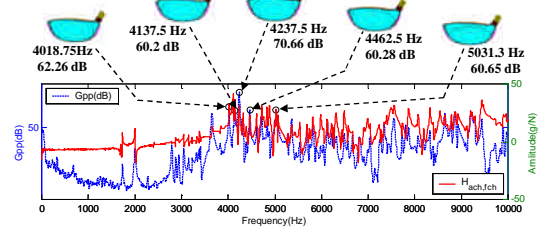
本文所探討之高爾夫球具其幾何形狀與文獻[3]相似，而由文獻[3,4]得知球具振動特性與擊球聲音有重大之關連性，而經由以上之實驗量測可得知此球具振動特性與擊球聲音確實有其關連性，將其關連性做以下之討論。

3.1 球頭振動特性與擊球聲音關聯性

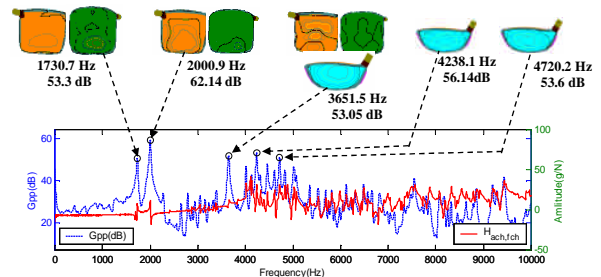
經由球頭實驗模態分析與聲音量測，將球頭特性彙整為圖7球頭振動與聲音線性頻譜比較及表1高爾夫球頭振動與聲音頻率對應表，討論如下：

- 圖7(a)為以鋼衝擊頭所量得之頻率響應曲線與聲音線性頻譜，得知聲音線性頻譜在頻率4018.75Hz、4137.5 Hz、4237.5 Hz、4462.5 Hz、5031.3 Hz有較大之擊球聲響，分別為62.26 dB、60.2 dB、70.66 dB、60.28 dB、60.65dB，且都為球頭打擊面(1,1) 振動模態。
- 圖7(b)為以高爾夫球衝擊頭所量得之頻率響應曲線與聲音線性頻譜中，可發現較大擊球聲響分佈在頻率1731.25Hz、2000Hz、3651.5Hz、4238.1Hz、4720.2Hz，其中又以2000Hz之聲響為最大達到62.14dB，而聲響較大之頻率峰值不但涵蓋打擊面、頂蓋與底蓋 (1,1)模態，也包括頂蓋(3,1)及底蓋(1,3)模態，因此可推測以高爾夫球做為衝擊頭，三個球頭面face、crown、sole之(1,1)、(3,1)、(1,3)模態會主導擊球聲音可能性相當大。
- 對鋼質及高爾夫球衝擊頭進行衝擊聲音線性頻譜比較，可由圖7(c)可明顯看出鋼質衝擊頭衝擊時與球頭接觸時間短，導致激發頻寬高，使得在高頻4000~10000Hz激發出較高之聲響，反之，高爾夫球衝擊頭接觸時間長，使得低頻頻率被激發出較高之聲響。
- 而由表1為球頭振動模態與聲音頻率對照表，可看出兩種衝擊頭所激發聲音皆與振動模態相互對

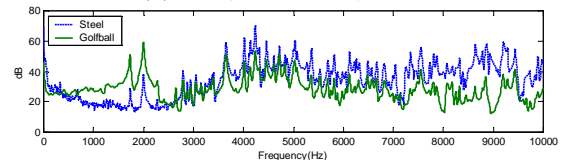
應，都涵蓋打擊面(1,1)模態，且鋼質較高爾夫球衝擊頭衝擊聲響平均高出8~9dB，顯示鋼質衝擊頭可激發出較高之衝擊聲響。



(a) 鋼衝擊錘.



(b) 高爾夫球頭衝擊錘.



(c) 鋼與高爾夫球衝擊錘聲音線性頻譜比較圖

圖7 球頭振動與聲音線性頻譜比較圖

表1 高爾夫球頭振動與聲音頻率對應表

物理意義	振動頻率	高爾夫球衝擊頭		物理意義	振動頻率	鋼衝擊頭			
		聲音頻率	dB 值			聲音頻率	dB 值		
Crown(1,1)	E02	1730.7	1731.25	53.3	Face(1,1)	E20	4019.1	4018.75	62.26
Sole(1,1)	E04	2000.9	2000	62.14	Face(1,1)	E22	4135.8	4137.5	60.2
Crown(1,1)	E17	3651.5	3646.88	53.05	Face(1,1)	E23	4238.1	4237.5	70.66
Sole(3,1)	E23	4238.1	4234.38	56.14	Face(1,1)	E26	4461.8	4462.5	60.28
Face(1,1)	E29	4720.2	4718.75	53.6	Face(1,1)	E34	5030.6	5031.3	60.65

3.2 球頭與球具振動特性關聯性分析

在已得知球頭振動模態與擊球聲音之關聯性，也進行球具之特性量測，然而對球具進行聲音進行振動模態與擊球聲音探討前，須先了解球頭與球具兩者振動特性之差異，以確認影響球具擊球聲音之部位，本節將兩者之振動特性整理成表2為高爾夫球頭與球具振動頻率及模態保證指標(MAC)對應表與圖8球具與球頭頻率響應比對圖，其中j代表衝擊錘之施力點位置，i為加速度計量測點位置，討論如下：

- 圖8球具與球頭頻率響應比對中，有兩條曲線分別為球頭與球具FRF，可明顯看出在同點與不同點兩條FRF幾乎重疊，顯示球頭不因組桿後有重大變化，即球頭與球具振動特性相似。
- 更進一步由表2高爾夫球頭與球具振動頻率及模



態保證指標(MAC)對應可發現,球頭與球具自然頻率誤差在±0.4%以內,其中球具2404.5Hz、2877.1Hz、4318.1Hz、5534.6Hz、5693.6Hz、6571.6Hz、9965.8Hz頻率與球頭頻率誤差更是在0.01以內,顯示在自然頻率可說是幾乎完全對應,此與先前研究幾何形狀相似球頭有相同之現象。

- 從模態振型來看,其MAC值越接近1代表兩模態振型對應性越高,球具在E01~E11為球桿模態故無法與球頭對應,而球頭與球具自然頻率相對應之模態其模態振型保證指標(MAC)值對應大都在0.85~0.98之間,其中與聲音相互對應之1726.9 Hz、1993.5 Hz、3641.2 Hz、4238.6 Hz、4720.5 Hz、5032.4 Hz頻率MAC值都在0.95以上,表示在振型有一致對應性。

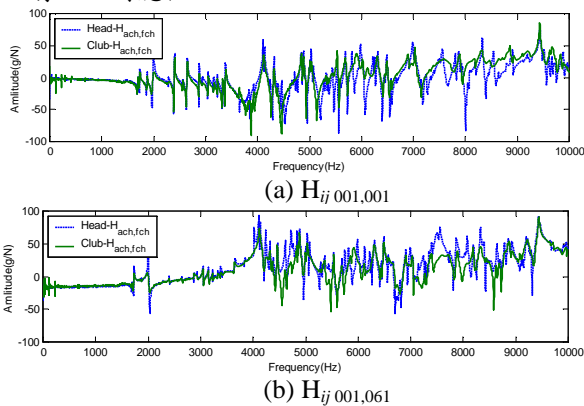


圖8 球具、球頭振動與聲音線性頻譜比對圖

表2 高爾夫球頭與球具振動頻率及模態保證指標(MAC)對應表

Head		Club		Err %	MAC	Head		Club		Err %	MAC
Mode	Freq. (Hz)	Mode	Freq. (Hz)			Mode	Freq. (Hz)	Mode	Freq. (Hz)		
E02	1730.7	E12	1726.9	-0.22	0.974	E38	5361.2	E43	5360.7	-0.01	0.953
E03	1869.4	E13	1869.1	-0.02	0.951	E39	5436.2	E44	5447.7	0.21	0.7
E04	2000.9	E14	1993.5	-0.37	0.984	E40	5534.7	E45	5534.6	0.00	0.93
E05	2285.2	E15	2280.3	-0.21	0.835	E41	5693.8	E46	5693.6	0.00	0.94
E06	2404.7	E16	2404.5	-0.01	0.98	E42	5751.1	E47	5764.0	0.22	0.866
E07	2550.5	E17	2551.8	0.05	0.868	E44	5875.4	E48	5866.1	-0.16	0.816
E08	2649.8	E18	2650.5	0.03	0.975	E45	5934.2	E49	5905.9	-0.48	0.563
E10	2877.3	E19	2877.1	-0.01	0.881	E47	6048.6	E50	6021.4	-0.45	0.978
E11	2923.6	E20	2939.2	-0.13	0.933	E48	6124.4	E51	6117.9	-0.11	0.817
E12	3048.1	E21	3048.5	0.01	0.971	E51	6311.8	E52	6305.1	-0.11	0.982
E13	3151.7	E22	3153.4	0.05	0.961	E52	6441.2	E53	6439.5	-0.03	0.828
E14	3229.8	E23	3231.0	0.04	0.918	E53	6489.4	E54	6488.7	-0.01	0.982
E15	3323.6	E24	3325.5	0.06	0.888	E54	6571.7	E55	6571.6	0.00	0.965
E16	3383.2	E25	3385.5	0.07	0.93	E55	6670.0	E56	6674.7	0.07	0.849
E17	3651.5	E26	3641.2	-0.28	0.986	E57	6905.0	E57	6905.8	0.01	0.977
E18	3841.4	E27	3840.7	-0.02	0.951	E59	7022.7	E58	7033.9	0.16	0.719
E19	3926.5	E28	3916.4	-0.26	0.821	E61	7141.3	E59	7124.3	-0.24	0.809
E22	4135.8	E29	4122.6	-0.32	0.958	E63	7281.3	E60	7273.0	-0.11	0.697
E23	4238.1	E30	4238.6	0.01	0.994	E64	7340.1	E61	7325.0	-0.21	0.867
E24	4318.3	E31	4318.1	0.00	0.815	E65	7402.0	E63	7400.1	-0.03	0.698
E25	4384.0	E32	4366.4	-0.40	0.872	E70	7868.9	E66	7890.4	0.27	0.742
E26	4461.8	E33	4459.5	-0.05	0.996	E73	8194.7	E69	8188.5	-0.08	0.734
E27	4612.6	E34	4608.9	-0.08	0.977	E74	8327.7	E71	8320.2	-0.09	0.895
E28	4668.5	E35	4658.0	-0.22	0.873	E77	8644.3	E74	8629.7	-0.17	0.537
E29	4720.2	E36	4720.5	0.01	0.949	E79	8857.8	E76	8874.1	0.18	0.535
E31	4835.7	E37	4833.9	-0.04	0.862	E83	9222.1	E79	9220.2	-0.02	0.782
E32	4885.2	E38	4881.4	-0.08	0.971	E85	9436.1	E80	9435.2	-0.01	0.927
E33	5005.2	E39	4998.3	-0.14	0.826	E88	9666.1	E82	9659.1	-0.07	0.782
E34	5030.6	E40	5032.4	0.04	0.934	E91	9881.4	E84	9838.6	-0.43	0.646
E36	5278.4	E41	5265.0	-0.25	0.915	E92	9964.5	E86	9965.8	0.01	0.868

3.3 球具振動模態與室內擊球聲音關聯性

在得知球頭與球具在自然頻率與振動模態皆有一致對應性,可將球頭之振動模態視為此球具振動模態後,將球具量測到之聲音特性與振動模態彙整成圖9 球具振動與聲音線性頻譜比較圖與表3 高爾夫球具振動與聲音頻率對應表,進行以下討論:

- 圖9(a)為以鋼衝擊頭所量得之頻率響應曲線與聲音線性頻譜,可發現其聲音來源,包括3640.6 Hz~5032.2 Hz之打擊面(1,1)模態、6117.9 Hz與6488.7 Hz之打擊面(2,1)模態以及8853.1Hz、9231.2Hz、9440.6Hz之打擊面(3,1)模態,表示以鋼衝擊頭所激發之聲響以打擊面模態為主。
- 圖9(b)為以高爾夫球衝擊頭所量得之聲音線性頻譜,在與振動頻率響應比對中,可發現擊球聲響分佈在頻率1728.1Hz、1993.7Hz、3640.6Hz、4121.9Hz、4459.4Hz,其中又以1728.1Hz之聲響為最大達到69.1dB其次為1993.7Hz達63.7dB,此頻率峰值與球頭相似不但涵蓋打擊面、頂蓋與底蓋(1,1)模態,也包括頂蓋(3,1)及底蓋(1,3)模態,因此也可推測以高爾夫球為衝擊頭,三個球頭面face、crown、sole之(1,1)、(3,1)、(1,3)模態會主導擊球聲音可能性相當大。
- 圖9(b)可看出聲音線性頻譜在1182.1Hz有一聲響較大之峰值頻率而頻率響應函數卻無此峰值頻率,乃因量測振動特性時為自由邊界且加速度計固定於打擊面左上方角落與球桿Swing平面垂直因而無法得到其振動訊號,而麥克風量測方向與



球桿Swing平面平行且距離只有0.1m，因此可量測到其振動所發出之聲音，而室外擊球為手握邊界狀態且麥克風距離擊球位置較遠，因此無此峰值頻率出現，由此可推測出1182.1Hz聲音來源為球桿所致，並非由球頭模態所產生之聲響。

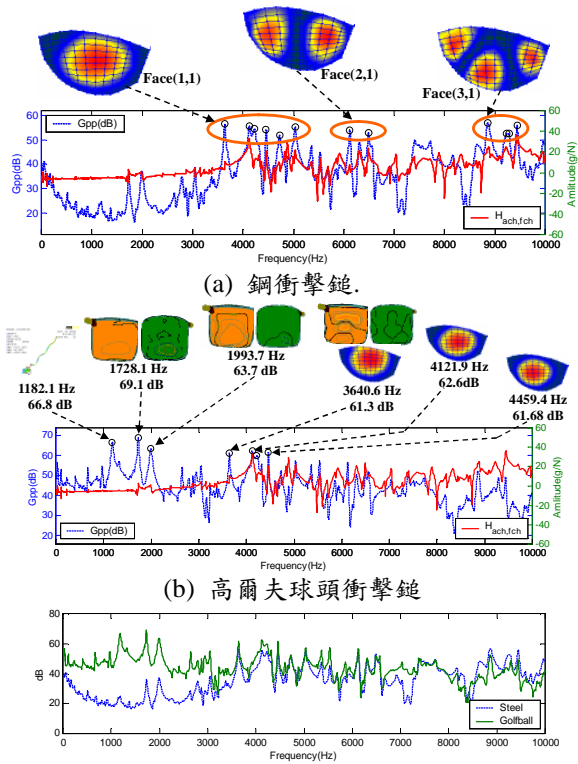
4. 圖9(c)為鋼質及高爾夫球衝擊頭進行衝擊聲音線性頻譜比較，可明顯看出鋼衝擊頭衝擊在高頻8000~10000Hz激發出較高之聲響與球頭鋼衝擊頭衝擊在高頻4000~10000Hz有所不同，而高爾夫球衝擊頭擊球之聲響也有相同現象，顯示在相同振動模態下，球頭產生之聲響因組桿後而有所不同。
5. 而由表3為球具振動模態與聲音頻率對照表，可看出兩種衝擊頭所激發聲音皆與振動模態相互對應，都涵蓋打擊面(1,1)模態，其高爾夫球衝擊頭較鋼質衝擊頭衝擊聲響平均高出5~9dB，顯示高爾夫球衝擊頭可激發出較高之衝擊聲響，此與球頭剛好呈現相反現象。

物理意義	振動頻率	高爾夫球衝擊頭		物理意義	振動頻率	鋼衝擊頭			
		聲音頻率	dB 值			聲音頻率	dB 值		
Shaft-bending		1181.2	66.82	Face(1,1)	E26	3641.2	3640.6		
				Crown(1,3)					
				Sole(3,1)					
Crown(1,1)	E10	1726.9	1728.1	68.99	Face(1,1)	E29	4122.6	4125	55.52
Sole(1,1)					Face(1,1)	E30	4238.6	4228.1	54.44
Face(1,1)					Face(1,1)	E33	4459.5	4459.4	54.21
Crown(1,3)	E26	3641.2	3640.6	61.3	Face(1,1)	E36	4720.5	4725	51.82
Sole(3,1)					Face(1,1)	E30	4238.6	4215.6	59.95
Face(1,1)	E29	4122.6	4121.9	62.55	Face(1,1)	E36	4720.5	4725	51.82
Face(1,1)	E30	4238.6	4215.6	59.95	Face(1,2)	E40	5032.2	5034.4	55.21
Face(1,1)	E33	4459.5	4459.4	61.68	Face(2,1)	E51	6117.9	6121.9	53.8
					Face(3,1)	E79	9220.2	9.2312	52.64
					Face(3,1)	E80	9435.2	9440.6	55.77

3.4 球具室外擊球聲音與球具振動模態及室內聲音關聯性

當掌握球具之室內特性後，即進行室外擊球聲音量測，並與室內擊球聲音進行比較，其目的在於了解不同量測環境下擊球聲音之差異，因此以圖10球具振動與室外擊球聲音線性頻譜比較圖與圖11球具室內集球與室外擊球聲音線性頻譜比較圖做一探討，討論如下：

- 圖10可看出主導室外擊球聲音主頻率為1706.3Hz與1996.9Hz，其與球頭振動頻率對應為頂蓋與底蓋(1,1)模態，以聲學角度來看，一般結構振動以(1,1)振動模態對聲音輻射效益較大，因此可推測出室外擊球聲乃是由頂蓋與底蓋(1,1)模態所主導。
- 圖11(a)為鋼質衝擊頭與室外擊球聲音比對，可看出室內鋼質衝擊頭衝擊硬度較高，在低頻不易激發出聲音因此在3500Hz前峰值相對較小，相對的室外量測是以實際擊球激出聲音，而球的硬度較低，因此激出來的聲音線性頻譜會有明顯的聲音落差。
- 圖11(b)為高爾夫球衝擊頭與室外擊球聲音比對，兩條曲線整體而言有一致趨勢，其最大擊球聲響去除1182.1Hz球桿模態所發出之聲音，皆來自於1706.3Hz與1996.9Hz之(1,1)振動模態，而在室內敲擊球具的力道較小，而室外實際擊球的力道相當大，因此室內衝擊音相較於室外實際擊球聲音低13~20dB。



(c) 鋼與高爾夫球衝擊聲音線性頻譜比較圖

圖8 球具振動與聲音線性頻譜比較圖

表3 高爾夫球具振動與聲音頻率對應表

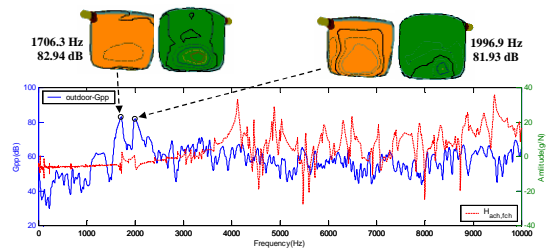
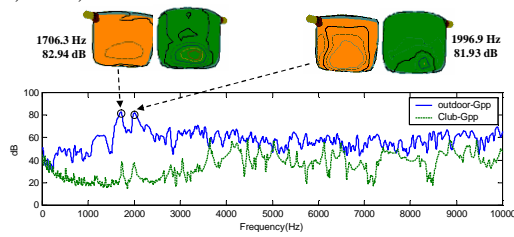
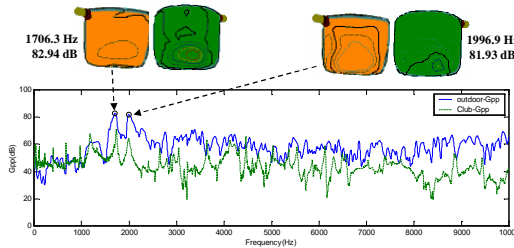


圖10 球具振動與室外擊球聲音線性頻譜比較圖



(a) 鋼衝擊鏈



(b) 高爾夫球頭衝擊鏈

圖11 室內球具聲音與室外擊球聲音比較圖

5. 結論

本文對鈦高爾夫球具進行完整振動與擊球聲音特性量測及分析，有以下幾點結論：

1. 由球頭與球具振動特性分析結果得知，兩者自然頻率在0.4%以內而模態振型大都在0.85以上，表示球頭與球具振動特性對應高，可將球頭振動模態視為球具之振動模態，此現象與文獻[3]相似，因此可推測若球頭類型為寬扁型之球具只要了解其球頭振動特性後可大致掌握球具之特性。
2. 球具於室內利用自製高爾夫球衝擊鏈，敲擊所發出聲音線性頻譜相較於鋼質衝擊鏈與室外實際擊球之聲音線性頻譜，在整體而言有一致趨勢且最大聲響皆出現在1706.3Hz與1996.9Hz兩峰值頻率，爾後可用此方法進行室內敲擊聲音量測，可大致掌握室外擊球之聲音特性。
3. 本文所應用之實驗模態分析與聲音量測技術可分別掌握高爾夫球頭與球具之結構特性，爾後更可結合有限元素分析建構等效數學模型進行虛擬測試，以減少樣品製作次數。

6. 致謝

本研究承蒙97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，特此致謝。

7. 參考文獻

1. 王柏村，林昆正，徐川洋，2003，「高爾夫球頭振動與聲音相關聯性之探討」，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。
2. 王柏村，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十九屆學術研討會論文，台南，第67-73頁。
3. 王柏村，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」，2007『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. 王柏村，陳又毓，高毓廷，黃裕仁，陳詠升，2007，「高爾夫球具擊球聲音與振動模態關聯性探討」，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：048。
5. Wicks, A. L., Knight, C. E., and Neighbors J., 1993, "The Comparison of Forged Heads to Cast Heads for Golf," Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, Auckland, pp. 1979-1802.
6. 王柏村，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，新竹市，第1-8頁。
7. 王柏村，黃瑞光，2000，「握把對高爾夫球桿振動特性影響之分析」，中華民國第二十四屆全國力學會議，桃園，論文編號：J-17。
8. 王柏村，黃瑞光，2000，「不同球頭之高爾夫球桿振動特性及品質之探討」，中華民國振動與噪音工程學會第八屆學術研討會，屏東，第209~216頁。
9. Friswell, M. I., Smart, M. G., and Mottershead, J. E., 1997, "Updating Finite Element Models of Golf Clubs," Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, USA, pp. 155-161.
10. 王柏村，劉健峰，黃必偉，2001，「高爾夫球桿甜蜜區之分析」，中華民國振動與噪音工程學會第九屆學術研討會論文集，新竹，第142-148頁。
11. 王柏村，吳國偵，2004，「高爾夫球木桿之模態分析」，第十二屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，台北，第58-63頁。
12. Wang, B. T., and Wu, G. Z., 2005, "Modal Properties of Golf Club Wood Driver in Different Boundary Conditions," The 13th National Conference on the Society Sound and Vibration, Zhanghua, Paper No: C10.
13. Hocknell, A., Mitchell, S. R., Jones, P., and Rothberg, S. J., 1998, "Hollow Golf Club Head Modal Characteristics: Determination and Impact Applications," Experimental Mechanics, Vol. 38, pp. 140-146.

Application of Experimental Modal Analysis and Sound Measurement Techniques to Characteristic Study of a Golf Club

Bor-Tsuen Wang¹, Kuo-Chi Ting², Yu-Ren Huang³,
Yung-Sheng Chen³

Professor



² Graduate student

^{1,2} Department of Mechanical Engineering National
Pingtung University of Science and Technology

³ Engineer

³ O-TA Precision Industry Co., Ltd

Abstract

This work applies experimental modal analysis (EMA) and sound measurement techniques to study the sound and vibration characteristics of the golf club made by the titanium club head and fiber-reinforced plastic shaft. The club head and golf club are tested in free boundary conditions. The structures are excited by the impact hammer and measured by the accelerometer and microphone, respectively, to perform vibration and sound measurement. Both the characteristics of the club head and golf club are compared. The outdoor sound measurement for the golf club in practical swing is also carried out to understand the impact sound of the golf club. Results show that the vibration properties are similar between the club head and golf club. The peak frequencies of the golf club impact sound are strongly correlated to the vibration modes. In particular, the golf ball induced sound spectrum in the laboratory reveals the same tendency as that in the outdoor test. This work develops the sound and vibration measurement techniques to study the golf club characteristics and can be adopted for others as well. The present study will be beneficial to the design of the golf club.

Keywords: experimental modal analysis (EMA), sound measurement