

結合有限元素分析於高爾夫球具結構變更與聲音預測

Application of Finite Element Analysis to Structural Modification and Sound Prediction of Golf Club

¹王栢村²陳又毓²丁國基³黃裕仁³陳詠升

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

Email: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文目的在於應用 ANSYS 軟體簡諧響應分析功能，發展高爾夫球具擊球聲音預測虛擬測試技術，藉由 ANSYS 軟體所建立之有限元素分析模型，變更球頭結構以求得其頻率響應函數，以預測了解擊球聲音品質特性探討。首先利用球具結構振動與擊球聲音之關聯性，對建立之理論與實驗聲音預測程式進行驗證，進一步由虛擬測試技術預測球頭結構之擊球聲音特性，以評估球頭結構設計之適當性，透過反覆虛擬測試，可以開發建構吻合擊球聲音特性設計目標之新型式球頭。由結果得知，發展之聲音預測模式確實有其可行性，理論聲音預測準確度，取決於球具模型驗證之頻率響應函數預測品質，而變更球頭不同部位厚度，則影響結構模態特性，進而改變了擊球聲音特性。本文所發展之聲音預測程式，對高爾夫球頭設計，將可有效率及系統化探討球頭結構參數對擊球聲音特性之影響，並可降低樣品反覆製作與測試之成本，縮短球頭設計開發時程，以及掌握擊球聲音特性與球頭設計準則。

關鍵詞：虛擬測試、擊球聲音、聲音預測、頻率響應函數。

1 前言

目前國內已完成球場約六十座，高爾夫運動人口約百萬人，運動成績上也有相當不錯的水準，在各種國際比賽中常有優異表現為國爭光，而高爾夫在今天已成為全民運動，同時愈來愈多來自各行各業以及不同年齡的男女老少喜愛這項運動，然而市面上之球具論打擊性能與揮桿舒適度已有相當水準之發展，因此對於擊球之聲音，這項新的領域非常講究，也是目前國內積極發展之重點。

在擊球聲音品質方面，王等人[1]對一高爾夫球頭素片進行實驗模態分析，結合最佳化分析求得球頭之機械性質，並進一步對球頭做模型驗證，接著探討聲音與振動模態之關連性，結果發現在打擊面、頂面及底面，三個面之振動模態皆有與聲音較大之關連性。王等人[2]進行球頭及球桿聲音量測，探討球頭與球具聲音關聯性以及室內與室外球具擊球聲音之差異，發現由於室內敲擊力與室外不同，導致室內擊球聲音較低，且發現所研究之高爾夫球桿，於球頭與球具在振動及聲音之響應曲線圖皆很相似表示此球桿不因球頭組桿後對振動及聲音無顯著的影響。王等人[3]對一高爾夫木桿球頭進行有限元素分析與實驗模態分析進行模型驗證，以確認等效數學模型，在進行實驗模態量測同時，擷取球頭聲音信號，進而探討球頭聲音與振動特性之關聯性。Hocknell et al.[4]利用非接觸式之雷射振動儀對空心球頭之三種曲面進行實驗模態分析，同時進行有限元素分析得到模態參數，與實驗進行量測數據比對，得到模態特性，進一步探討球頭中心擊球與非中心擊球所產生之加速度與頻譜，從中觀察球頭模態與聲音之關聯性。Roberts et al.[5]結合主觀資料量測及客觀資料量測，針對高爾夫

擊球聲音與感覺之關聯性探討，主觀量測中，定義高爾夫擊球聲音特性並提出五種問題，利用問卷方式以皮爾森法進行分析，客觀量測中，在室外進行實際擊球，以噪音計做為感測器量測，最後比較主觀及客觀量測之數據，得到高爾夫擊球聲音特性之量化。王和黃[6]主要探討敲擊三種不同球頭高爾夫球桿的聲音，利用感覺噪音級(PNL)、語言干擾位準(SIL)、優先語言干擾位準(PSIL)、響度級(LL)來比較其聲音的特性與品質的差異。翁和康[7]針對九種不同廠牌之1號木桿球頭之擊球聲音，利用擊球聲音頻譜與人耳聽覺判別擊球聲音品質，以建立球頭擊球好聽與否之鑑別方法。Wicks et al.[8]比較高爾夫桿鍛造球頭(Forged Heads)與鑄造球頭(Cast Heads)對擊球感覺差異性之探討，進行實驗模態分析與球頭聲音頻譜量測，藉此定義高爾夫擊球感覺指標。在擊球振動品質方面，王和黃[9]經由實驗模態分析所得有握把與無握把高爾夫球桿之模態參數，包含自然頻率、阻尼比及振型，來探討握把對三種高爾夫桿之影響。Roberts et al.[10]結合主觀量測資料與客觀量測資料以探討高爾夫球擊球的感覺，主觀量測分為五種擊球感覺特性以皮爾森法分析，客觀量測中，在室外進行實際擊球，以加速度計為感測器量測，最後比較主觀及客觀量測之數據，得到高爾夫擊球振動特性之量化。

本文目的在發展高爾夫球具擊球聲音預測虛擬測試技術，並藉由虛擬測試降低樣品反覆製作與測試之成本，縮短球頭設計開發時程，以及掌握擊球聲音特性與球頭設計準則。

2 有限元素模型

本文以 ANSYS 套裝軟體對高爾夫球具進行

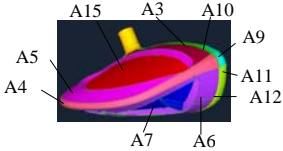
有限元素分析。圖 1 為高爾夫球具實際結構示意圖，而圖 2 為球頭各部位示意圖，共分為 15 部分，表 1 為各部位之材料與厚度表，圖 3 為高爾夫球頭之有限元素模型，利用線性殼元素(Shell63)架構高爾夫球頭，而球頭內的三根肋則是以樑元素(Beam4)建構之有限元素模型，除碳纖維材料假設為正向性材料模型，其餘均假設為等向性材料模型，分割方式採用 Mapped Mesh 方式分割，其中高爾夫球具共有 7111 個元素，均無任何外力負荷，高爾夫球頭頂蓋碳纖維素材與高爾夫球頭邊界條件均採用自由邊界。對高爾夫球頭進行模態分析與簡諧分析。



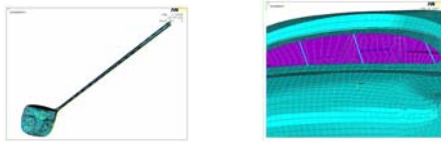
圖1高爾夫球頭實際結構圖



(a)球頭打擊面示意圖 (b)球頭內部示意圖



(c)球頭後部示意圖
圖2高爾夫球頭示意圖



(a)高爾夫球具結構 (b)內肋結構
圖3高爾夫球頭之有限元素模型

表1球頭各部位之材料與厚度

部位	材料	厚度(mm)
A1	碳纖維+鈦 64	0.7
A2	鈦 64	2.7
A3	鈦 64	0.8
A4	鈦 64	0.7
A5	鈦 64	0.7
A6	鈦 64	0.7
A7	鈦 64	1.3
A8	鈦 64	0.7
A9	鈦 64	2.0
A10	鈦 64	1.3
A11	鈦 64	2.0
A12	鈦 64	1.3
A13	鈦 64	1.0
A14	鈦 2041	3.05
A15	碳纖維	0.8

3 擊球聲音預測程式

3.1 實際擊球聲音預測

圖 4(a) 為實驗聲音預測流程圖，其中 \hat{f}_c 代表球具室內衝擊力、 \hat{a}_c 代表球具加速度、 \hat{p}_c 代表球具室內衝擊音及 \hat{p}_c 代表球具室外擊球聲音，將實驗聲音預測流程圖分為六個步驟，各步驟說明如下：

1. 步驟(1)求 $H_{\hat{a}_c \hat{f}_c}$:

$H_{\hat{a}_c \hat{f}_c}$ 為球具室內衝擊力輸入與球具室內加速度輸出之 FRF，其定義如下：

$$H_{\hat{a}_c \hat{f}_c} = \frac{\hat{A}_c(f)}{\hat{F}_c(f)} \quad (1)$$

其中， $\hat{F}_c(f)$ 及 $\hat{A}_c(f)$ 分別為球具室內衝擊力及球具室內加速度之傅立葉頻譜，係由時間域響應 $f_c(t)$ 及 $\hat{a}_c(t)$ 分別進行快速傅立葉轉換求得。

2. 步驟(2)求 $H_{\hat{p}_c \hat{a}_c}$:

$H_{\hat{p}_c \hat{a}_c}$ 為球具室內加速度輸入與球具室內衝擊音輸出之 FRF，其定義如下：

$$H_{\hat{p}_c \hat{a}_c} = \frac{\hat{P}_c(f)}{\hat{A}_c(f)} \quad (2)$$

其中， $\hat{A}_c(f)$ 及 $\hat{P}_c(f)$ 分別為球具室內加速度及球具室內衝擊音傅立葉頻譜，係由時間域響應 $\hat{a}_c(t)$ 及 $\hat{p}_c(t)$ 分別進行快速傅立葉轉換求得。

3. 步驟(3)求 $H_{\hat{p}_c \hat{f}_c}$:

$H_{\hat{p}_c \hat{f}_c}$ 為球具室內衝擊力輸入與球具室內衝擊音輸出之 FRF，其中 $H_{\hat{p}_c \hat{f}_c}$ 有兩種求法，其定義如下：

$$H_{\hat{p}_c \hat{f}_c} = \frac{\hat{P}_c(f)}{\hat{F}_c(f)} \quad (3)$$

或

$$H_{\hat{p}_c \hat{f}_c} = H_{\hat{p}_c \hat{a}_c} \times H_{\hat{a}_c \hat{f}_c} \quad (4)$$

其中， $\hat{F}_c(f)$ 及 $\hat{P}_c(f)$ 分別為球具室內衝擊力及球具室內衝擊音之傅立葉頻譜，係由時間域響應 $f_c(t)$ 及 $\hat{p}_c(t)$ 分別進行快速傅立葉轉換求得。

4. 步驟(4)求 $H_{\hat{p}_c \hat{p}_c}$:

$H_{\hat{p}_c \hat{p}_c}$ 為球具室內衝擊音輸入與球具室外擊球聲音輸出之 FRF，其定義如下：

$$H_{\hat{p}_c \hat{p}_c} = \frac{\hat{P}_c(f)}{\hat{P}_c(f)} \quad (5)$$

其中， $\hat{P}_c(f)$ 及 $\hat{A}_c(f)$ 分別為球具室內衝擊力及球具室內加速度之傅立葉頻譜，係由時間域響應 $\hat{p}_c(t)$ 及 $\hat{a}_c(t)$ 分別進行快速傅立葉轉換求得。

5. 步驟(5)求 $H_{\hat{p}_c \hat{f}_c}$:

$H_{\hat{p}_c \hat{f}_c}$ 為球具室內衝擊力輸入與球具室外擊球聲音輸出之 FRF，其定義如下：

$$H_{\hat{p}_c \hat{f}_c} = \frac{\hat{P}_c(f)}{\hat{F}_c(f)} \quad (6)$$

或

$$H_{\hat{p}_c \hat{f}_c} = H_{\hat{p}_c \hat{p}_c} \times H_{\hat{p}_c \hat{a}_c} \times H_{\hat{a}_c \hat{f}_c} \quad (7)$$

其中 $\hat{F}_c(f)$ 及 $\hat{P}_c(f)$ 分別為球具室內衝擊力及球

具室外擊球聲音之傅立葉頻譜，係由時間域響應 $f_c(t)$ 及 $\hat{p}_c(t)$ 分別進行快速傅立葉轉換求得。

6. 步驟(6)求 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f)$:

$G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f)$ 為球具室外擊球聲音之自身功率頻譜密度函數，其定義如下：

$$G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f) = \left| H_{\hat{p}_c\hat{f}_c} \right|^2 \times G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}(f) \quad (8)$$

其中， $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 為球具室內衝擊力輸入與球具室外擊球聲音輸出之 FRF， $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}(f)$ 為球具衝擊音之自身功率頻譜密度函數，將 $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 平方再乘上 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}(f)$ 則為 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f)$ 。

3.2 理論擊球聲音預測

圖 4(b) 為理論聲音預測流程圖，其中 f_c 代表理論分析中施於球具一個單位衝擊力、 a_c 代表理論分析中得到之球具加速度、 \hat{a}_c 代表球具加速度、 \hat{p}_c 代表球具室內衝擊音及 \hat{p}_c 代表球具室外擊球聲音，將理論分析聲音預測流程圖分為五個步驟，在理論分析中之 a_c 無法得知，因此假設 a_c 與 \hat{a}_c 相同，以 \hat{a}_c 取代 a_c ，各步驟說明如下：

1. 步驟(1)求 $H_{\hat{a}_c\hat{f}_c}$:

$H_{\hat{a}_c\hat{f}_c}$ 為理論分析中施於球具一個單位衝擊力輸入與球具室內加速度輸出之 FRF，其定義如下：

$$H_{\hat{a}_c\hat{f}_c} = \frac{\hat{A}_c(f)}{F_c(f)} \quad (9)$$

其中， $F_c(f)$ 及 $\hat{A}_c(f)$ 分別為理論球具一單位衝擊力及球具室內加速度之傅立葉頻譜，分別進行快速傅立葉轉換求得預測之時間域響應 $f_c(t)$ 及 $\hat{a}_c(t)$ 。

2. 步驟(2)求 $H_{\hat{p}_c\hat{a}_c}$:

此步驟同實驗聲音預測流程圖中之步驟 2。

3. 步驟(3)求 $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$:

此步驟同實驗聲音預測流程圖中之步驟 4。

4. 步驟(4)求 $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$:

$H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 為球具室內衝擊力輸入與球具室外擊球聲音輸出之 FRF，其定義如下：

$$H_{\hat{p}_c\hat{f}_c} = \frac{\hat{P}_c}{F_c} \quad (10)$$

或

$$H_{\hat{p}_c\hat{f}_c} = H_{\hat{p}_c\hat{a}_c} \times H_{\hat{a}_c\hat{f}_c} \quad (11)$$

其中其中 $F_c(f)$ 及 $\hat{P}_c(f)$ 分別為理論球具一單位衝擊力及球具室外擊球聲音之傅立葉頻譜，分別進行快速傅立葉轉換求得預測之時間域響應 $f_c(t)$ 及 $\hat{p}_c(t)$ 。

5. 步驟(5)求 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f)$:

$G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f)$ 為球具室外擊球聲音之自身功率頻譜密度函數，其定義如下：

$$G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f) = \left| H_{\hat{p}_c\hat{f}_c} \right|^2 \times G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}(f) \quad (12)$$

其中， $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 為理論球具一單位衝擊力輸入

與球具室外擊球聲音輸出之 FRF， $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}(f)$ 為作用於球具衝擊力之自身功率頻譜密度函數，將 $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 平方再乘上 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}(f)$ 則為 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}(f)$ 。

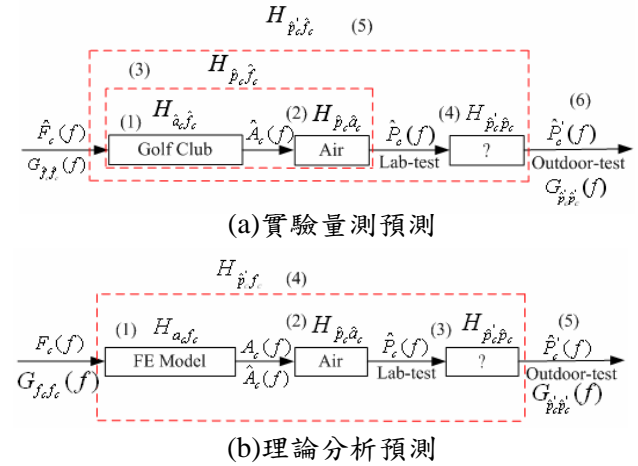


圖 4 聲音預測程式之驗證圖

3.3 擊球聲音預測之驗證

利用發展之實驗預測程式如圖 4(a) 與理論預測程式如圖 4(b)，經由圖 4(a) 之各步驟進行聲音預測程式之驗證，表 2 為實驗量測聲音預測程式之各步驟驗證結果，討論如下：

1. 步驟(1)得到 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 與 $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 關係及 $H_{\hat{a}_c\hat{f}_c}$ 之線性頻譜：

首先將實驗量測到之 $\hat{f}_c(t)$ 與 $\hat{a}_c(t)$ 皆經過快速傅立葉轉換分別得到 $\hat{F}_c(f)$ 與 $\hat{A}_c(f)$ ，將 $\hat{A}_c(f)$ 除以 $\hat{F}_c(f)$ 則得到 $H_{\hat{a}_c\hat{f}_c}$ ，且 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 與 $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 分別為 $\hat{F}_c(f)$ 與 $\hat{A}_c(f)$ 方程式轉換所求得，如分析結果欄所示，圖(a)為 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 及 $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 線性頻譜圖，其中 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 代號為 Gfch,fch， $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 代號為 Gach,ach，圖(b)為 $H_{\hat{a}_c\hat{f}_c}$ 線性頻譜圖，其中 $H_{\hat{a}_c\hat{f}_c}$ 代號為 Hach,fch。

2. 步驟(2)得到 $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 關係及 $H_{\hat{p}_c\hat{a}_c}$ 之線性頻譜：

首先將實驗量測到之 $\hat{a}_c(t)$ 與 $\hat{p}_c(t)$ 皆經過快速傅立葉轉換分別得到 $\hat{A}_c(f)$ 與 $\hat{P}_c(f)$ ，將 $\hat{P}_c(f)$ 除以 $\hat{A}_c(f)$ 則得到 $H_{\hat{p}_c\hat{a}_c}$ ，且 $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 分別為 $\hat{A}_c(f)$ 與 $\hat{P}_c(f)$ 方程式轉換所求得，如分析結果欄所示，圖(a)為 $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 及 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 線性頻譜圖， $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 代號為 Gach,ach， $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 代號為 Gpch,pch，圖(b)為 $H_{\hat{p}_c\hat{a}_c}$ 線性頻譜圖，其中 $H_{\hat{p}_c\hat{a}_c}$ 代號為 Hpch,ach。

3. 步驟(3)得到 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 關係及 $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 之線性頻譜：

首先將實驗量測到之 $\hat{f}_c(t)$ 與 $\hat{p}_c(t)$ 皆經過快速傅立葉轉換分別得到 $\hat{F}_c(f)$ 與 $\hat{P}_c(f)$ ，將 $\hat{P}_c(f)$ 除以 $\hat{F}_c(f)$ 則得到 $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ ，且 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 分別為 $\hat{F}_c(f)$ 與 $\hat{P}_c(f)$ 方程式轉換所求得，如分析結果欄所示，圖(a)為 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 及 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 線性頻譜圖，其中 $G_{\hat{f}_c\hat{f}_c}$ 代號為 Gfch,fch， $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 代號為 Gpch,pch，圖(b)為 $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 線性頻譜圖， $H_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 代號為 Hpch,fch，圖(c)為 $\hat{H}_{\hat{p}_c\hat{f}_c}$ 線性頻譜比對圖，其中 Hpch,fch-1 為式(3)求得，Hpch,fch-2 為式(4)求得。

4. 步驟(4)得到 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 關係及 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 之線性頻譜：

首先將實驗量測到之 $\hat{p}_c(t)$ 與 $\hat{p}_c(t)$ 皆經過快速傅立葉轉換分別得到 $\hat{P}_c(f)$ 與 $\hat{P}_c(f)$ ，將 $\hat{P}_c(f)$ 除以 $\hat{P}_c(f)$ 則得到 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ ，且 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 分別為 $\hat{P}_c(f)$ 與 $\hat{P}_c(f)$ 方程式轉換所求得，如分析結果欄所示，圖(a) $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 及 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 線性頻譜圖，其中 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Gpch,pch， $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Gpchp,pchp，圖(b)為 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 線性頻譜圖， $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Hpchp,pch。

5. 步驟(5)得到 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 之線性頻譜：

將步驟(1)、(2)、(4)分別所得 $H_{\hat{a}_c, \hat{a}_c}$ 、 $H_{\hat{p}_c, \hat{a}_c}$ 、 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 相乘則得到 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ ，如分析結果欄所示，圖示為 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 線性頻譜圖， $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Hpchp,fch，下一步驟將利用此關係式預測室外實際擊球聲音頻譜。

6. 步驟(6)得到 $G_{\hat{f}_c, \hat{f}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 之關係並做線性平滑化：

利用室內衝擊力之自身功率頻譜密度函數 $G_{\hat{f}_c, \hat{f}_c}$ 預測出室外擊球聲音之自身功率頻譜密度函數 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ ，將與室外實際擊球聲音之 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 進行驗證並做平滑化，如分析結果欄所示，圖(a)為未平滑化之 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 驗證，其中未平滑化之 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Gpchp,pchp-1，圖(b)則為平滑化之 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 驗證，其中經過平滑化之 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Gpchp,pchp-2，在經過平滑化之 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 能明顯看出預測出室外擊球聲音與實際擊球聲音之吻合度。

經由圖4(b)之各步驟進行聲音預測程式之驗證，表4-2為理論分析聲音預測程式之驗證表，各步驟討論如下：

1. 步驟(1)得到 H_{a_c, f_c} 之線性頻譜：

利用理論分析軟體 ANSYS 進行簡諧響應分析得到 H_{a_c, f_c} ，如分析結果欄所示，圖(a)為 H_{a_c, f_c} 線性頻譜圖， H_{a_c, f_c} 代號為 Hac,fc，由於 $a_c(t)$ 實際上是得不到其值，將 $a_c(t)$ 假設與 $\hat{a}_c(t)$ 相同，先決條件是模型驗證非常吻合之情況下。

2. 步驟(2)得到 $G_{\hat{a}_c, \hat{a}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 關係及 $H_{\hat{p}_c, \hat{a}_c}$ 之線性頻譜：

由於理論分析無法取得 $a_c(t)$ 之值，因此假設 $a_c(t)$ 與 $\hat{a}_c(t)$ 相同，用 $\hat{a}_c(t)$ 代替 $a_c(t)$ ，而此步驟與表4-1實驗量測聲音預測之驗證之步驟(2)相同，如分析結果欄所示。

3. 步驟(3)得到 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 與 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 關係及 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 之線性頻譜：

此步驟與表4-1實驗量測聲音預測之驗證之步驟(4)相同，如分析結果欄所示，圖(a)為 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 及 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 關係圖，其中 $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Gpch,pch， $G_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Gpchp,pchp，圖(b)為 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 線性頻譜圖，其中 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Hpchp,pch。

4. 步驟(4)得到 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 之線性頻譜：

將步驟(1)、(2)、(3)分別所得 H_{a_c, f_c} 、 $H_{\hat{p}_c, \hat{a}_c}$ 、 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 相乘則得到 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ ，如分析結果欄所示，圖(a)為 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 線性頻譜圖，其中 $H_{\hat{p}_c, \hat{p}_c}$ 代號為 Hpchp,fch，下一步驟將利用此關係式預測室外實際擊球聲音頻譜。

5. 步驟(5)為理論分析預測與室外實際擊球之聲音頻譜進行比對：

將理論分析預測之聲音頻譜與室外實際擊球之聲音頻譜進行比對，如分析結果圖所示，可以發現理論預測之聲音頻譜與室外實際擊球之聲音頻譜沒有重疊，但整體有一致性之趨勢，代表理論預測程式之可行性高，因此理論分析模型越符合實際結構，所預測之聲音準確性越高。

4 球頭設計變更之構想

由過去所研究累積之經驗得知，以球頭打擊面為影響擊球聲音之主要部位，本文所探討之球頭以頂蓋為影響擊球聲音之主要部位，因此球頭結構除了對球頭打擊面進行變更外，也對球頭碳纖維頂蓋結構進行變更，如圖1所示，分別對打擊面 A14 之厚度由原本 3.05mm 加厚為 3.25mm 及碳纖維頂蓋 A15 之厚度由原本 0.8mm 變薄為 0.6mm 以進行變更，如表4-3球頭結構變更表，分別對 A14 加厚為 3.25mm 及 A15 變薄為 0.6mm 之有限元素模型進行簡諧分析，分別得到 FRF，將 FRF 代入圖4(b)理論分析預測程式流程圖，將預測出室外擊球聲音，如表4理論分析預測聲音之頻率與物理意義表，其中分為 Case O 原始球頭、Case A 打擊面 A14 加厚 3.25mm 及 Case B 碳纖維頂蓋 A15 之厚度變薄為 0.6mm，而圖5為理論變更結構之聲音預測線性頻譜圖，其討論如下：

Case O 之特性：

- 表4(a)為 Case O 理論分析預測聲音之頻率與物理意義表，可以觀察到在聲音最高之頻率為 1625Hz 之 121.4dB，若以 ± 10 dB 為可聽之範圍則沒有分別其他聲音大之頻率，因此將聲音超過 90dB 視為主導擊球聲音大之頻率，分別有 4300Hz 之 100.5dB、5631Hz 之 94.2dB、5756Hz 之 97.3dB 及 7400Hz 之 97.2dB。
- 圖5(a)為 Case O 理論變更結構之聲音預測線性頻譜圖，將表4(a)中所得聲音高之頻率所對應之振動模態有打擊面及頂蓋之(1,1)模態，初步推判影響此球具擊球聲音之部位為打擊面與頂蓋皆有所影響，因此接著對打擊面及頂蓋進行厚度變更之聲音變異探討。

Case A 之特性：

- 表4(b)為 Case A 理論分析預測聲音之頻率與物理意義表，變更打擊面 A14 後，聲音高之頻率變更為 2188Hz 之 103.9dB、4231Hz 之 91.9dB、4300Hz 之 97.6dB、5638Hz 之 92.7dB、7038Hz 之 91.0dB、7138Hz 之 93.9dB 及 7325Hz 之 102.1dB。
- 圖5(b)為 Case O 理論變更結構之聲音預測線性頻譜圖，將表4(b)中所得聲音高之頻率所對應之振動模態有打擊面及頂蓋之(1,1)、(2,1)模態，推判影響此球具擊球聲音之部位為打擊面與頂蓋皆有所影響。

Case B 之特性：

- 表4(c)為 Case B 理論分析預測聲音之頻率與物理意義表，變更碳纖維頂蓋 A15 後，聲音高之頻率變更為 1625Hz 之 94.8dB、2181Hz 之 104.0dB、4213Hz 之 92.3dB、4300Hz 之

98.1dB、5463Hz 之 100.7dB、5556Hz 之 90.4dB、5694Hz 之 91.3dB 及 7169Hz 之 93.1dB。

2. 圖 5(c)為 Case B 理論變更結構之聲音預測線性頻譜圖，將表 4(c)中所得聲音高之頻率所對應之振動模態有打擊面及頂蓋之(1,1)、(2,1)模態，推判影響此球具擊球聲音之部位為打擊面與頂蓋皆有所影響。

5 結果與討論

表 8 為原始球頭與球頭變更後之聲音與物理意義比對表，進行兩種不同部位 Case A 及 Case B 之厚度變更後與原始球具 Case O 進行比較，初步了解結構之變更對於影響聲音之頻率也會有所變動，故接著觀察原始球具與變更後之球具對於聲音之差異性，圖 8 為理論分析聲音預測變更前後之聲音比對圖，分別進行 Case O(14_3.05)&CaseA(14_3.25 及 Case O(15_0.8)&Case B(15_0.6)變更前後差異性之探討，綜合討論如下：

1. 在圖 4-7(a)中，實線為原始球具之預測聲音線性頻譜，虛線為 Case A 變更打擊面厚度後之預測聲音線性頻譜，在 1625Hz 為 Crown(1,1)模態，變更後之聲音降低了約 30dB，而 2181Hz 為 Crown(2,1)模態，則升高約 20dB 左右。
2. 在圖 4-7(b)中，實線為原始球具之預測聲音線性頻譜，虛線為 Case B 變更碳纖維頂蓋(Crown)厚度後之預測聲音線性頻譜，在 1625Hz 為 Crown(1,1)模態，變更後之聲音降低了約 20dB，而 2181Hz 為 Crown(1,1)模態，則升高約 20dB 左右，與變更打擊面時有相同情形，判斷此球具之擊球聲音若同時改變碳纖維頂蓋與打擊面之厚度，對於聲音大小與頻率之變動會有很大之關聯性。

6 結論

本文主要發展高爾夫球具擊球聲音預測虛擬測試技術，將可有效率及系統化探討球頭結構參數對擊球聲音特性之影響，並可降低樣品反覆製作與測試之成本，縮短球頭設計開發時程，以及掌握擊球聲音特性與球頭設計準則，主要討論如下：

1. 發展之預測模式有其可行性，其中基於 a_c 與 \hat{a}_c 之相同假設，因此取決於球具模型驗證之 FRF 預測品質。
2. 變更球頭不同部位厚度，將影響結構模態特性，進而改變了擊球聲音特性。
3. 由於球頭結構之複雜性，將局部之結構變更，對於擊球聲音有截然不同之頻率響應。
4. 由擊球聲音與振動模態可知，與 face(1,1)、(2,1)及 Crown(1,1)、(3,1)模態通常有較高之聲音響應。
5. 未來定義好的聲音品質特性，將可根據本章所發展方法進行球頭之變更設計。

7 參考文獻

- [1] 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」，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。

- [2] 王栢村，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。
- [3] 王栢村，林昆正，徐川洋，2003，「高爾夫球頭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。
- [4] 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.
- [5] Roberts, J. R., Jones, R., Mansfield, N. J., and Rothberg, S. J., 2005, "Evaluation of Impact Sound on the 'Feel' of a Golf Shot," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 287, pp. 651-666.
- [6] 王栢村，黃瑞光，2000，「不同球頭之高爾夫球桿聲音品質分析」，中華民國音響學會第十三屆學術研討會論文集，台南，A47-54。
- [7] 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，第三期，第 26-39 頁。
- [8] Wicks, A. L., Knight, C. E., and Neighbors J., 1993, "The Comparison of Forged Heads to Cast Heads for Golf," *The Proceedings of the International Modal Analysis Conference*, Vol. 2, pp. 1797-1802.
- [9] 王栢村，黃瑞光，2000，「握把對高爾夫球桿振動特性影響之分析」，中華民國力學學會第 24 屆學術研討會論文集，桃園，J109-116。
- [10] Roberts, J. R., Jones, R., Mansfield, N. J., and Rothberg, S. J., 2005, "Evaluation of Vibrotactile Sensations in the 'Feel' of a Golf Shot," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 285, pp. 303-319.

Application of Finite Element Analysis to Structural Modification and Sound Prediction of Golf Club

Bor-Tsuen Wang¹, Y-Y Chen², Kao-Chi Ting³,
Yu-Ren Huang³, Yong-Sheng Chen³

Department of Mechanical Engineering of
Science and Technology National Pingtung
University

O-TA Precision Industry Co., Ltd

1 Professor

2 Graduate student

3 Engineer

Abstract

This work aims to apply the harmonic response analysis of ANSYS software to develop the virtual testing technique for impact sound prediction of a golf club. From the finite element model constructed in ANSYS software, the structure of the golf club can be easily modified and determined its frequency response function (FRF) so as to predict the impact sound of the golf club. The golf club impact sound is firstly studied to correlate to the structural vibration characteristics and verified for the prediction models from both theoretical and experimental approaches, respectively. The golf club impact sound can then be predicted through the developed virtual testing technique to evaluate different club head designs. Results show that the prediction model is feasible and the prediction accuracy, in particular, depends on the FRF quality. The variation of club head thickness affects the structural vibration modes and so forth alters the impact sound response. The developed algorithm for impact prediction will be beneficial to understand the golf club head design in sound quality consideration and thus reduce the effort in making the prototype and testing cost and time.

表 2 實驗聲音預測驗證表


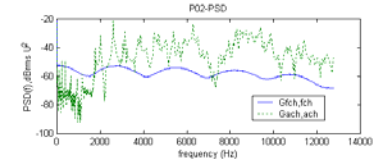
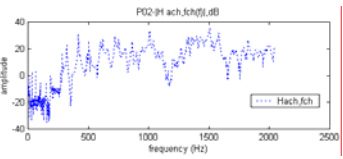

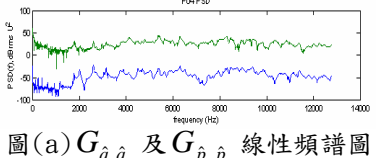
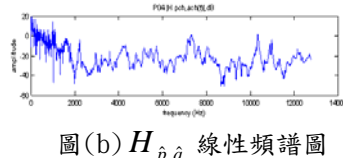

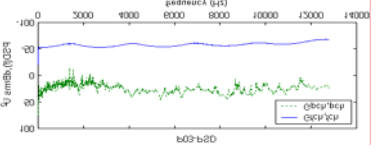
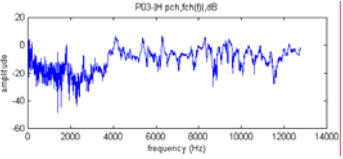
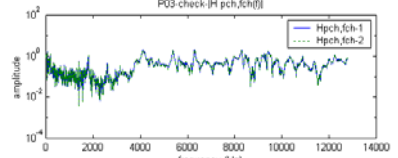

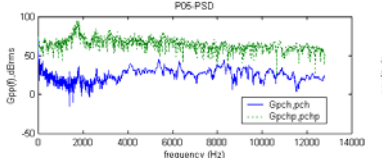
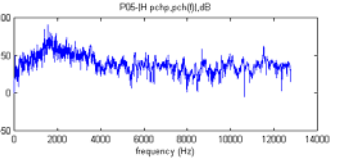

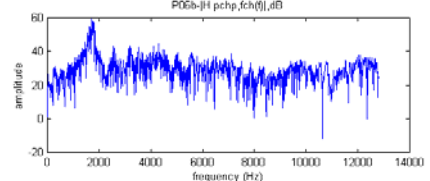
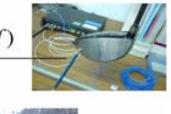
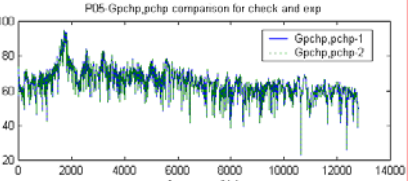
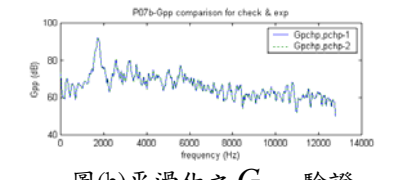
步驟	方塊圖	實驗示意圖	分析結果欄
1	$\hat{j}_c(f) \xrightarrow{H_{\hat{a},\hat{j}}} \hat{a}(f)$ $H_{\hat{a},\hat{j}} = \frac{\hat{A}_c(f)}{\hat{F}_c(f)}$		  <p>圖(a) $G_{\hat{f}_c\hat{j}_c}$ 及 $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 線性頻譜圖</p> <p>圖(b) $H_{\hat{a}_c\hat{j}_c}$ 線性頻譜圖</p>
2	$\hat{a}_c(f) \xrightarrow{H_{\hat{p},\hat{a}}} \hat{p}_c(f)$ $H_{\hat{p},\hat{a}} = \frac{\hat{P}_c(f)}{\hat{A}_c(f)}$		  <p>圖(a) $G_{\hat{a}_c\hat{a}_c}$ 及 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 線性頻譜圖</p> <p>圖(b) $H_{\hat{p}_c\hat{a}_c}$ 線性頻譜圖</p>
3	$\hat{j}_c(f) \xrightarrow{H_{\hat{p},\hat{j}}} \hat{p}_c(f)$ $H_{\hat{p},\hat{j}} = \frac{\hat{P}_c(f)}{\hat{F}_c(f)}$ $H_{\hat{p}_c\hat{j}_c} = H_{\hat{a}_c\hat{j}_c} \times H_{\hat{p}_c\hat{a}_c}$		   <p>圖(a) $G_{\hat{f}_c\hat{j}_c}$ 及 $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 線性頻譜圖</p> <p>圖(b) $H_{\hat{p}_c\hat{j}_c}$ 線性頻譜圖</p> <p>圖(c) $H_{\hat{p}_c\hat{j}_c}$ 線性頻譜比對圖</p>
4	$\hat{p}_c(f) \xrightarrow{H_{\hat{p},\hat{p}}} \hat{p}'_c(f)$ $H_{\hat{p},\hat{p}} = \frac{\hat{P}'_c(f)}{\hat{P}_c(f)}$		  <p>圖(a) $G_{\hat{p}_c\hat{p}_c}$ 及 $G_{\hat{p}'_c\hat{p}'_c}$ 線性頻譜圖</p> <p>圖(b) $H_{\hat{p}'_c\hat{p}_c}$ 線性頻譜圖</p>
5	$H_{\hat{p}'_c\hat{j}_c} = H_{\hat{a}_c\hat{j}_c} \times H_{\hat{p}_c\hat{a}_c} \times H_{\hat{p}'_c\hat{p}_c}$		 <p>圖 $H_{\hat{p}'_c\hat{j}_c}$ 線性頻譜圖</p>
6	$\hat{j}_c(f) \xrightarrow{H_{\hat{p},\hat{j}}} \hat{p}'_c(f)$ $G_{\hat{p}'_c\hat{j}_c}(f) = H_{\hat{p},\hat{j}} ^2 \times G_{\hat{j}_c\hat{j}_c}(f)$		  <p>圖(a) 未平滑化之 $G_{\hat{p}'_c\hat{j}_c}$ 驗證</p> <p>圖(b) 平滑化之 $G_{\hat{p}'_c\hat{j}_c}$ 驗證</p>

表 3 理論分析聲音預測驗證表

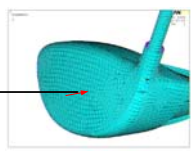
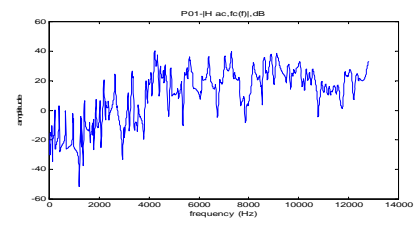
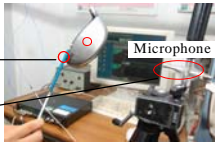
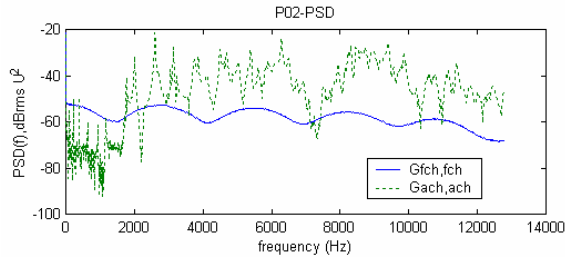
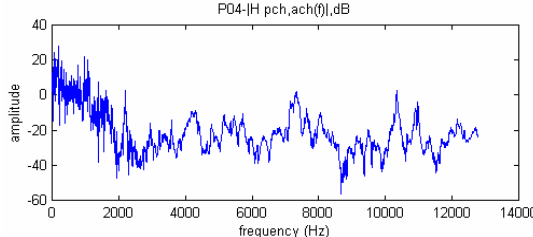

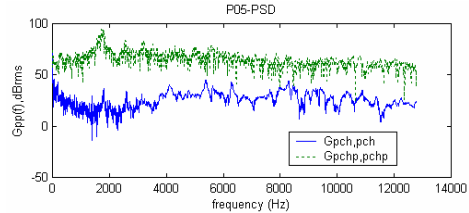

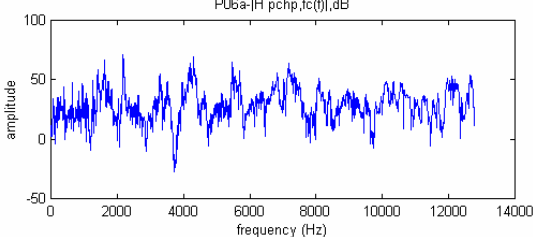

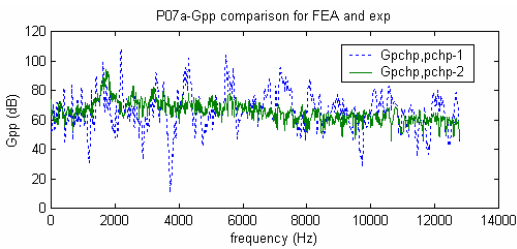
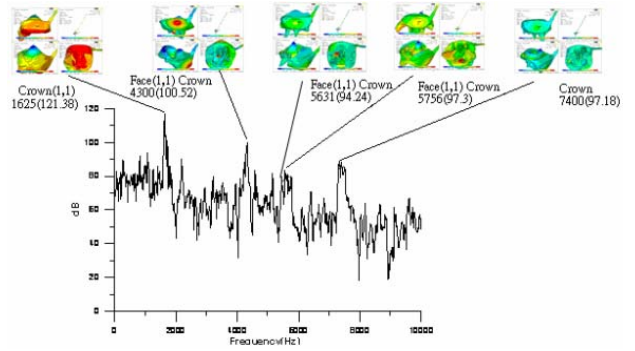
步驟	方塊圖	實驗示意圖	分析結果欄
1	$f_c(t) \xrightarrow{H_{a,f}} \begin{matrix} a_c(t) \\ \hat{a}_c(t) \end{matrix}$ $H_{\hat{a},f_c} = \frac{\hat{A}_c(f)}{F_c(f)}$	 <p>$f_c(t)$</p>	 <p>圖(a) H_{a,f_c} 線性頻譜圖</p>
2	$\begin{matrix} a_c(t) \\ \hat{a}_c(t) \end{matrix} \xrightarrow{H_{p,\hat{a}}} \begin{matrix} \hat{p}_c(t) \\ \hat{p}_c(f) \end{matrix}$ $H_{\hat{p},\hat{a}} = \frac{\hat{P}_c(f)}{\hat{A}_c(f)}$	 <p>$\hat{a}_c(f)$ $\hat{p}_c(f)$</p>	 <p>圖(a) $G_{\hat{a},\hat{a}}$ 及 $G_{\hat{p},\hat{a}}$ 線性頻譜圖</p>  <p>圖(b) $H_{\hat{p},\hat{a}}$ 線性頻譜圖</p>
3	$\begin{matrix} \hat{p}_c(t) \\ \hat{p}_c(f) \end{matrix} \xrightarrow{H_{p,\hat{p}}} \begin{matrix} \hat{p}'_c(t) \\ \hat{p}'_c(f) \end{matrix}$ $H_{\hat{p}',\hat{p}} = \frac{\hat{P}'_c(f)}{\hat{P}_c(f)}$	 <p>$\hat{p}'_c(t)$</p>	 <p>圖(a) $H_{\hat{p}',\hat{p}}$ 線性頻譜圖</p>
4	$H_{\hat{p}',f_c} = H_{\hat{a},f_c} \times H_{\hat{p},\hat{a}} \times H_{\hat{p}',\hat{p}}$	 <p>$f_c(t)$ $\hat{p}'_c(t)$</p>	 <p>圖(a) 為 $H_{\hat{p}',f_c}$ 線性頻譜圖</p>
5	$\text{Golfer} \xrightarrow{G_{p,\hat{p}}} \begin{matrix} G_{p,\hat{p}}(f) \\ G_{\hat{p},\hat{p}}(f) \end{matrix}$ $G_{\hat{p},\hat{p}}(f) = H_{\hat{p},f_c} ^2 \times G_{f,f}(f)$	 <p>Golfer $G_{\hat{p},\hat{p}}(f)$</p>	 <p>理論分析預測之 $G_{\hat{p},\hat{p}}(f)$ 與 室外擊球聲音 $G_{\hat{p},\hat{p}}(f)$ 比對圖</p>

表 4 理論分析預測聲音之頻率與物理意義

(a)Case O

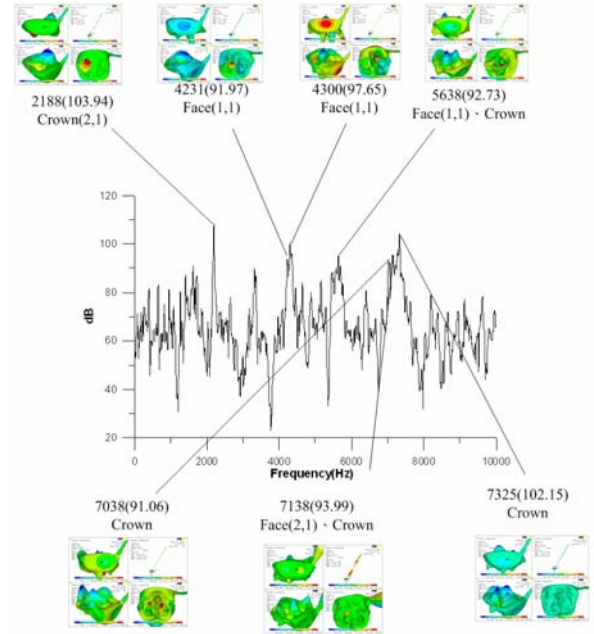
Frequency	dB	物理意義
1406	81.22	Shaft : 7 th Z-bending
1625	121.38	Crown(1,1)
1844	82.93	Crown(1,1)
4300	100.52	Face(1,1)
4581	81.42	Face(1,1)
5156	88.00	Face(2,1)
5463	82.84	Crwon(2,1)
5631	94.24	Face(1,1) 、 Crown
5756	97.35	Face(1,1) 、 Crown
6831	82.75	Face(1,1)
7025	81.66	Crown
7144	83.81	Crown
7400	97.18	Crown
7500	89.71	Crown
11944	80.76	Face(3,1)



(a)Case O

(b)Case A

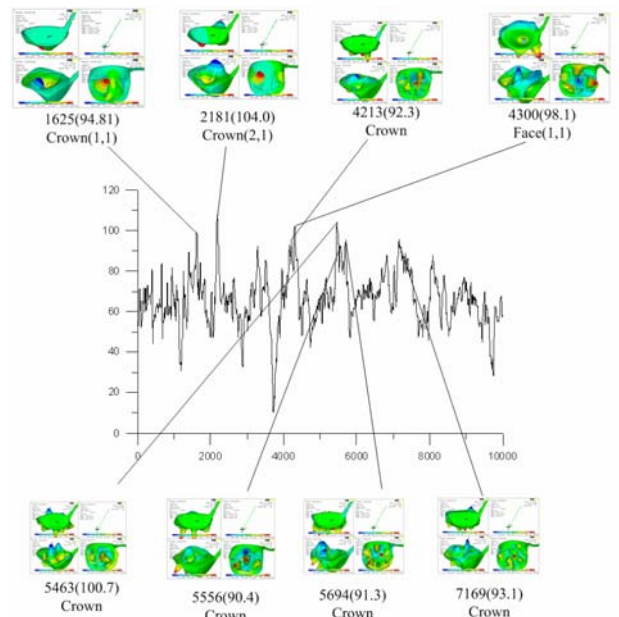
Frequency	dB	物理意義
1412	83.55	Shaft : 7 th Z-bending
1619	87.28	Crown(1,1)
1719	83.93	Crown(1,1)
2188	103.94	Crown(2,1)
3325	86.79	Crown(3,1)
4231	91.97	Face(1,1)
4300	97.65	Face(1,1)
4638	80.49	Face(1,1)Crown(2,1)
5156	81.66	Face(2,1)
5469	86.02	Crwon(2,1)
5638	92.73	Face(1,1) 、 Crown
7038	91.06	Crown
7138	93.99	Face(2,1)
7325	102.15	Crown
10081	85.12	Face(3,1)
10381	80.85	Face(3,1)



(b)Case A

(c)Case B

Frequency	dB	物理意義
1412	85.44	Shaft : 7 th Z-bending
1625	94.81	Crown(1,1)
1719	81.28	Crown(1,1)
2181	104.0	Crown(2,1)
3287	88.75	Crown(3,1)
3513	82.22	Crown(1,2)
4213	92.3	Crown(1,2)
4300	98.11	Face(1,1)
5463	100.7	Crown
5556	90.42	Crown
5694	91.34	Crown
6825	85.86	Crown
7169	93.18	Crown
7394	84.49	Crown
8088	85.22	Crown
10113	80.45	Face(3,1)



(c)Case B

圖 5 理論變更結構之聲音預測線性頻譜圖

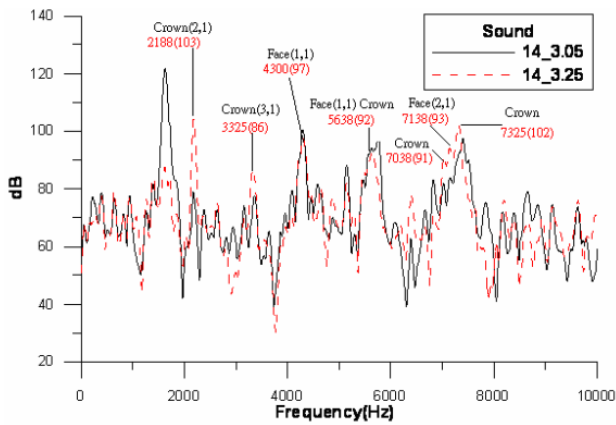
表 6 原始球頭與球頭變更後之聲音與物理意義比對表

(a) Case O 與 Case A 之比較

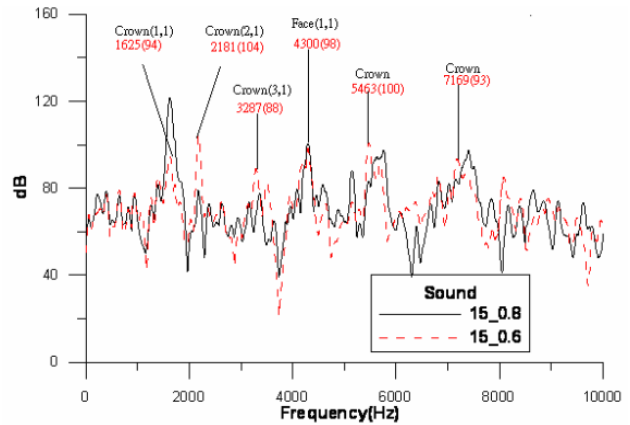
Frequency	dB	物理意義	Frequency	dB	物理意義
1406	81.22	Shaft : 7 th Z-bending	1412	83.55	Shaft : 7 th Z-bending
1625	121.38	Crown(1,1)	1619	87.28	Crown(1,1)
1844	82.93	Crown(1,1)	-	-	-
-	-	-	1719	83.93	Crown(1,1)
-	-	-	2188	103.94	Crown(2,1)
-	-	-	3325	86.79	Crown(3,1)
-	-	-	4231	91.97	Face(1,1)
4300	100.52	Face(1,1)	4300	97.65	Face(1,1)
4581	81.42	Face(1,1)	-	-	-
5156	88.00	Face(2,1)	5156	81.66	Face(2,1)
5463	82.84	Crwon(2,1)	5469	86.02	Crwon(2,1)
5631	94.24	Face(1,1) ∨ Crown	5638	92.73	Face(1,1) ∨ Crown
5756	97.35	Face(1,1) ∨ Crown	-	-	-
6831	82.75	Face(1,1)	-	-	-
7025	81.66	Crown	7038	91.06	Crown
7144	83.81	Crown	7138	93.99	Face(2,1)
-	-	-	7325	102.15	Crown
7400	97.18	Crown	-	-	-
7500	89.71	Crown	-	-	-
-	-	-	10081	85.12	Face(3,1)
11944	80.76	Face(3,1)	-	-	-

(b) Case O 與 Case B 之比較

Frequency	dB	物理意義	Frequency	dB	物理意義
1406	81.22	Shaft : 7 th Z-bending	1412	85.44	Shaft : 7 th Z-bending
1625	121.38	Crown(1,1)	1625	94.81	Crown(1,1)
-	-	-	1719	81.28	Crown(1,1)
1844	82.93	Crown(1,1)	-	-	-
-	-	-	2181	104.0	Crown(2,1)
-	-	-	3287	88.75	Crown(3,1)
-	-	-	3513	82.22	Crown(1,2)
-	-	-	4213	92.3	Crown(1,2)
4300	100.52	Face(1,1)	4300	98.11	Face(1,1)
4581	81.42	Face(1,1)	-	-	-
5156	88.00	Face(2,1)	-	-	-
5463	82.84	Crwon(2,1)	5463	100.7	Crown
-	-	-	5556	90.42	Crown
5631	94.24	Face(1,1) ∨ Crown	-	-	-
-	-	-	5694	91.34	Crown
5756	97.35	Face(1,1) ∨ Crown	-	-	-
6831	82.75	Face(1,1)	6825	85.86	Crown
7025	81.66	Crown	-	-	-
7144	83.81	Crown	7169	93.18	Crown
7400	97.18	Crown	7394	84.49	Crown
7500	89.71	Crown	-	-	-
-	-	-	8088	85.22	Crown
-	-	-	10113	80.45	Face(3,1)
11944	80.76	Face(3,1)	-	-	-



(a) Case O & Case A



(b) Case O & Case B

圖 6 理論分析聲音預測變更前後之聲音比對圖