

# 結構聲音輻射預測之驗證與應用

## Structural Sound Radiation Prediction and Its Verification and Application

王栢村<sup>1</sup> 張年華<sup>1</sup> 簡孝名<sup>1</sup> 黃裕仁<sup>2</sup> 陳詠升<sup>2</sup>

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Nian-Hua Zhang<sup>1</sup>, Xiao-Ming Jian<sup>1</sup>, Yu-Ren Huang<sup>2</sup>, Yong-Sheng Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立屏東科技大學機械工程系

Department of Mechanical Engineering

National Pingtung University of Science and Technology

<sup>2</sup> 大田精密工業股份有限公司研發中心

Research and Development Center

O-TA Precision Industry Co., Ltd

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

### 摘要

本文主要利用電腦輔助工程分析 (computer aided engineering, CAE) 及實驗模態分析 (experimental modal analysis, EMA)，除了針對一完成模型驗證之平板結構，同時也對高爾夫球頭進行擊球之聲音預測，並結合 CAE 技術導入聲音預測分析軟體，運用結構音場分析模組，進而得到數值分析之結構聲音響應，最後以實驗量測所得之聲音響應進行比對，以驗證評估數值分析聲音預測方法之可靠度。結果顯示數值分析之模態參數主導了結構之頻率響應函數也影響了聲音預測之準確性，而當有限元素模型愈等效於實際結構，模態組合預測之頻率響應函數愈趨於實際結構之響應情況，所預測之聲音頻譜愈有其可靠度。因此也驗證了聲學模擬軟體應用於聲音預測的音場分析能力之可行性。

**關鍵字：**有限元素分析、實驗模態分析、結構音場分析、頻率響應函數

### Abstract

This work applies computer aided engineering (CAE) and experimental modal analysis (EMA) techniques to perform structural sound radiation prediction for the plate structure that is experimentally verified. The hitting sound simulation of a golf club is

also shown. The sound field analysis software is adopted to theoretically predict the structural sound radiation spectrum. The experimentally measured sound spectrum of the mechanically excited structure is used to verify the correctness of predicted sound. Results show that the numerically obtained modal parameters dominate the prediction accuracy of structural frequency response function and thus affect the correctness of structural sound radiation prediction. This work validates the sound field analysis software for the prediction of sound radiation of the plate as well as a golf club head and can be further applied to other structures.

**Keywords:** Computer Aided Engineering (CAE), Experimental Modal Analysis (EMA), Structural Sound Field Analysis, Frequency Response Function

### 1. 前言

利用結構的振動特性與聲音頻譜間之關聯性分析，並將其應用在各種不同結構或高爾夫球頭設計上，以減少振動及改變聲音響應的實務分析上，進而使產品的品質提高，減少結構因共振產生破壞，更能對結構作變更設計預測其聲音響應，使產品聲音達到優化，所以有必要利用聲音模擬預測方法，來預測及改善高爾夫球具之擊球聲音。

過去對高爾夫球具之相關研究中，在結構之振動模態測定與聲音特性間關聯性之分析評估方面，王栢村等人 [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，進而瞭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。王栢村等人 [2] 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。謝裕忠 [3] 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，也都會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優點。

結構噪音分析與改善設計也是重要議題，邱武耀等人 [4] 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。莊肯堯等人 [5] 主要針對二胡的聲音制定一套評估指標，並藉由純淨度、均衡度、渾厚度、尖銳度指標，對琴皮的彈性、燙皮、浸泡、缺陷等特性及製作過程，來探討其對聲音之影響。許榮均等人 [6] 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。許榮均等人 [7] 主要應用 RAYNOISE 聲場分析軟體，利用射線模擬及幾何聲學理論之方式，分析計算捷運行駛中軌道噪音之最大之音量及以國家技術情報服務處 (National Technical Information Service, NTIS) 模式評估小時均能音量，並分別進行實驗與效驗兩種噪音評估模式。

針對不同性質結構可應用不同實驗方式做探討，Hocknell 等 [8] 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

測與數值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 4.5-7.5k Hz 所產生之加速度與頻譜間之差異。Dvorak [9] 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優點。Wicks 等 [10] 探討由兩種不同方法製造之鍛造 (forged heads) 及鑄造 (cast heads) 類型之高爾夫球頭，利用實驗模態分析方法得到球頭之頻率響應函數與擊球之聲音頻譜，比較其擊球感覺之差異性。

近年來合金與複合材料的快速發展，以及球具使用者對揮桿舒適度與擊球聲音悅耳度之要求日漸增高，但因球頭設計為複雜的過程，其球頭之幾何設計參數相當多，很難利用簡易的實驗歸納法或試誤法配合球桿，設計或改善球頭參數與造型。因此本文中將驗證電腦輔助工程分析方法，應用 VL-ACOUSTICS ver. 9 軟體於全數值分析之聲音預測模式，首先介紹結構聲音預測分析流程，並以一簡易平板結構做基準 (benchmark) 驗證分析，接著探討一實際高爾夫球頭結構之音場預測分析與實際結果之比較，證實結構音場預測分析之可行性。

## 2. 結構聲音預測流程

圖 1 為本文建立應用 VL-ACOUSTICS ver. 9 軟體之聲音預測分析流程圖，主要將 CAD 圖形匯入 CAE 套裝軟體 ANSYS ver. 10 建構有限元素模型，進行模態分析求得結構之模態參數，並確認其模態參數之自然頻率及模態振型結果後，再將其模態分析後之結果 .rst 檔匯入 VL-ACOUSTICS，接著設定流場材料參數及建構 ISO (International Organization for Standardization, 國際標準化組織) 聲場邊界元素，最後進行簡諧響應分析求得頻率響應函數 (FRF)，並確認此頻率響應函數是否正確，最後完成聲音響應預測分析。

## 3. 平板結構之聲音預測與驗證

首先要驗證與評估 VL-ACOUSTICS ver. 9 軟體數值分析預測方法於結構之聲音預測，主要以一簡易平板結構做為聲音預測之基準分析 (benchmark study) 驗證，圖 2 為結構聲音預測與驗證流程圖，主要先針

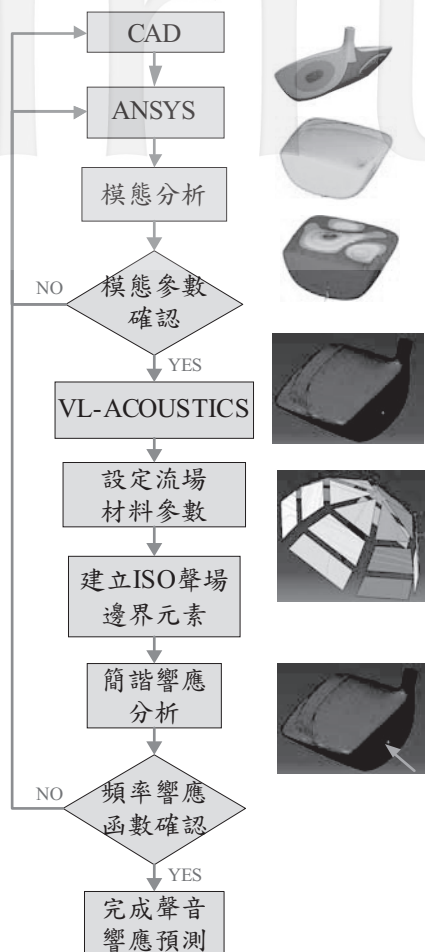


圖 1 應用 VL-ACOUSTICS 之聲音預測分析流程圖

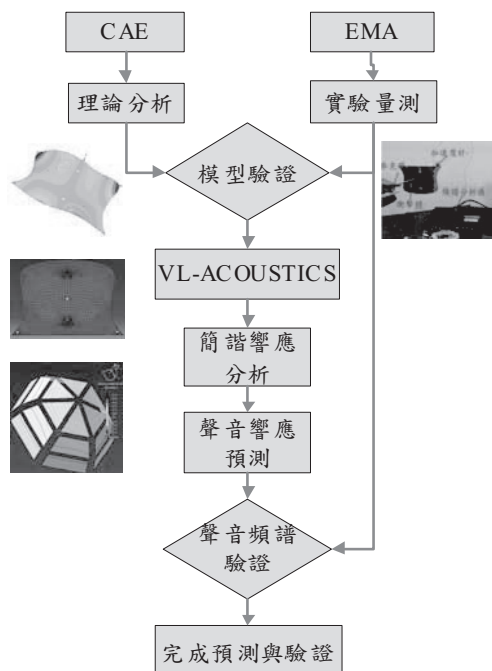


圖 2 結構聲音預測與驗證流程圖

對平板結構利用電腦輔助工程分析 (CAE)，及應用實驗模態分析 (EMA) 方法，對實際結構進行完整之實驗分析與聲音量測，以求得實際結構之模態參數及頻率響應函數，作為有限元素模型驗證之依據，再將驗證完成之有限元素模型匯入 VL-ACOUSTICS 軟體，進行簡諧響應分析及聲音響應預測分析，最後利用 VL-ACOUSTICS 與實驗所得之聲音頻譜結果進行比較驗證，確認 VL-ACOUSTICS 此數值分析預測方法應用於聲音模擬預測分析結果之可靠性。

### 3.1 有限元素分析

圖 3 為平板結構有限元素模型圖，表 1 為平板結構參數設定表，其有限元素模型之設定如下：假設平板結構為等向性材料，結構整體以線性四邊形殼元素 (Shell63) 來建構，分割以每邊長 0.003 m 為一單位進行分割，共分為 2,280 個節點與 2,116 個元素，以自由邊界及無任何外力下進行模態分析。

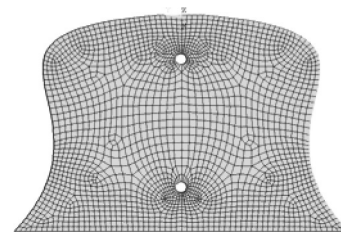


圖 3 平板結構有限元素模型圖

表 1 平板結構參數設定表

長 × 寬 × 高 (m)	楊氏係數 (GPa)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	浦松比
0.182 × 0.122 × 0.003	192.95	7,782.92	0.27

### 3.2 實驗模態分析

圖 4 為平板結構實體圖，主要以衝擊錘 (PCB-086C03) 對平板結構如 A 點及其他所有規劃點分別進行敲擊，並於 B 點處為加速規 (Kistler 8732A500) 之放置位置，圖 5 為實驗量測架設圖，實驗中以加速規及麥克風 (PCB-130D20) 兩種感測器，量測敲擊後所激發之聲音與振動之響應，接著透過頻譜分析儀 (SigLab) 求得結構之頻率響應函數，最後將實驗所獲得之結構頻率響應函數經由曲線嵌合軟體 (ME'Scope VES) 擷取出結構之模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比。

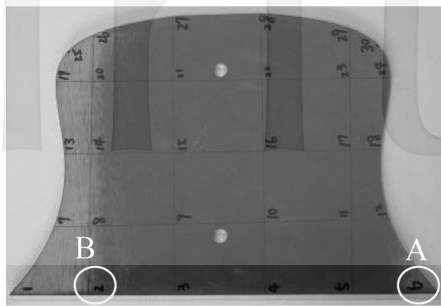


圖 4 平板結構實體圖

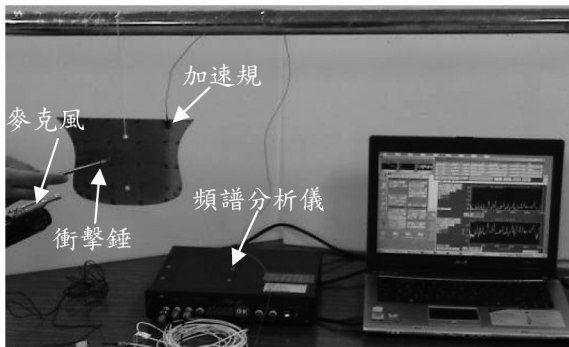


圖 5 實驗量測架設圖

### 3.3 模型驗證結果

表 2 為平板結構模態參數比較表，其中 EMA 分別以加速規與麥克風進行獨立實驗，由兩者所得之平板自然頻率差異均在 3 Hz 左右，表示加速規質量效應相當小，又與 FEA 數值分析自然頻率最大誤差為 6.67%，再觀察模態振型圖各模態物理意義相同，而 MAC (modal assurance criterion) 為模態保證指標均達 0.8 以上，表示模態吻合度佳，由此確認此平板結構模型驗證是成功的，故可判定此有限元素模型相當等效於實際結構。

### 3.4 VL-ACOUSTICS 聲音預測

#### 3.4.1 模態參數確認

將 ANSYS 軟體進行模態分析後之結果檔 (\*.rst) 匯入 VL-ACOUSTICS 軟體，圖 6 為不同軟體介面之有限元素模型圖，圖 7(a) 及 7(b) 分別為兩種軟體之模態分析 (3,2) 模態振型圖，可觀察完全對應，藉由有限元素模型之節點與元素的數目，及其模態分析結果之自然頻率與模態振型確認，可發現兩軟體間結構模型與分析資料轉換之正確性。

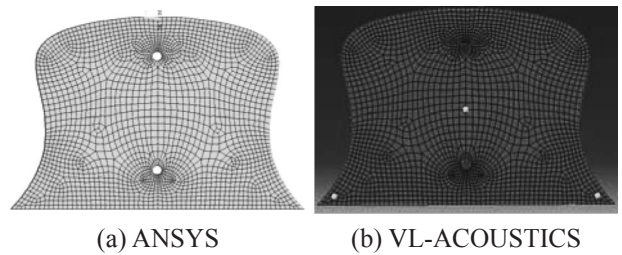


圖 6 不同軟體介面之有限元素模型圖

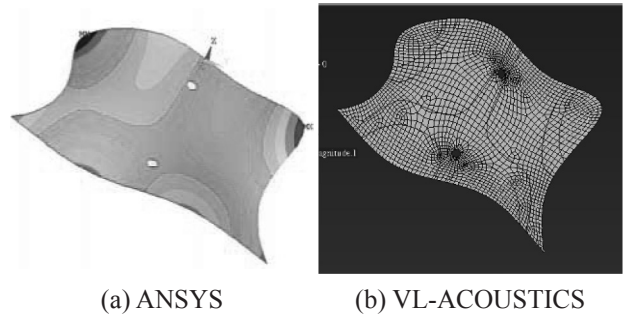


圖 7 模態分析之 (3,2) 模態振型圖

#### 3.4.2 頻率響應函數確認

在 VL-ACOUSTICS 軟體如圖 8 平板結構之有限元素模型圖，A 點處模擬一單位點力之輸入，並於模型 B 點處模擬為其頻率響應函數之輸出點，進行簡諧響應分析，並與實驗模態分析之頻率響應函數值進行比較，圖 9 與表 3 為實驗與預測之頻率響應函數比較圖表，實線為實驗量測值，虛線為 VL-ACOUSTICS 數值分析預測值，具圓圈線為 ANSYS 數值分析預測值，可發現兩不同軟體所預測之頻率響應函數趨勢相當吻合，顯示軟體間簡諧響應分析之正確性，由表 3 兩種軟體所得自然頻率相等，而數值分析值與實驗值則是相當接近，但在 2,000 Hz 左右之高頻處有較大之誤差在 -4.65% 及 -3.32%，使得 FRF 之波峰值略有差異。整體而言，由數值分析與實驗模態參數與 FRF 比較結果，平板結構有限元素模型可獲得合理驗證等效於實際結構。

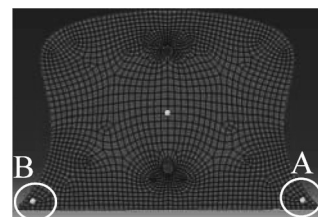









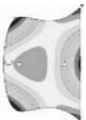










圖 8 平板結構之有限元素模型圖

表 2 平板結構模態參數比較表

模態 振型	FEA			EMA (加速度規)				EMA (麥克風)			
	模態	自然 頻率	Mode shape	模態	自然 頻率	Mode shape	Err (%) / MAC	模態	自然 頻率	Mode shape	Err (%) / MAC
(2,2)	1	536.99		1	537.5		0.09 / 0.947	1	540.6		0.67 / 0.748
(1,3)	2	664.98		2	712.5		6.67 / 0.824	2	709.4		6.26 / 0.829
(3,1)	3	1,035.2		3	1,028.1		-0.69 / 0.874	3	1,031.3		-0.38 / 0.866
(2,3)	4	1,322.8		4	1,346.9		1.79 / 0.959	4	1,350.0		0.949 / 2.01
(3,2)	5	1,572.8		5	1,559.4		-0.86 / 0.910	5	1,562.5		0.859 / -0.66
(1,4)	6	1,784.7		6	1,868.8		4.50 / 0.892	6	1,868.8		0.895 / 4.50

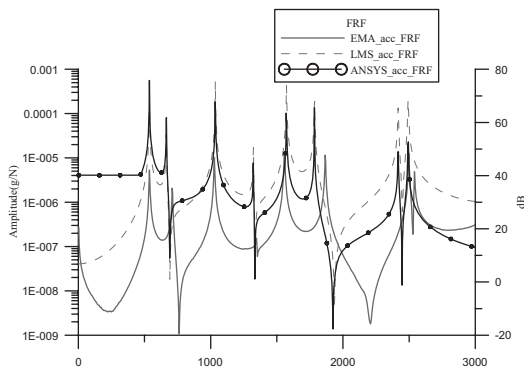


圖 9 實驗與預測之頻率響應函數比較圖

表 3 實驗與預測之頻率響應函數比較表

EMA 實驗值 (Hz)	VL- ACOUSTICS 預測值 (Hz)	ANSYS 預測值 (Hz)	實驗與預測 頻率誤差率 (%)
540.6	538.5	538.5	-0.39
712.5	663.5	663.5	-6.90
1,031.0	1,035.0	1,035.0	0.39
1,350.0	1,323.0	1,323.0	-2.00
1,563.0	1,573.0	1,573.0	0.64
1,869.0	1,785.0	1,785.0	-4.65
2,500.0	2,417.0	2,417.0	-3.32
2,541.0	2,492.0	2,492.0	-1.93

### 3.4.3 聲學音場預測確認

圖 10 為平板結構之聲學音場建構圖，主要於平板模型四周建構 ISO 聲場邊界元素，以模擬並觀看聲場變化之情形，圖 11 為實驗與預測之聲音頻譜比較圖表，主要擷取與實驗量測時，麥克風放置位置接近處之第 17 點音場元素結果，以其聲音頻譜做為比較，可發現所預測之聲音頻譜與實驗量測頻譜相當接近，但在高頻處之對應性可看到些許之誤差，此現象係源自圖 9 頻率響應函數之峰值差異，亦即數值分析模態自然頻率之誤差，因而造成 VL-ACOUSTICS 軟體在高頻之聲音頻譜預測之誤差，由此結果顯示有限元素模型之模態分析預測愈趨於實際結構之模態特性，則 VL-ACOUSTICS 軟體所預測之聲音頻譜分析結果愈有其可靠度。

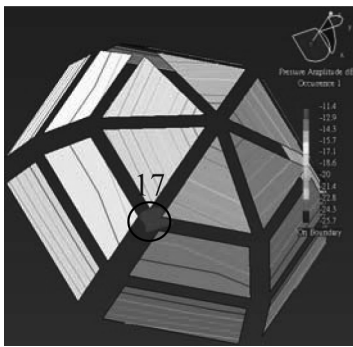


圖 10 平板結構之聲學音場建構圖

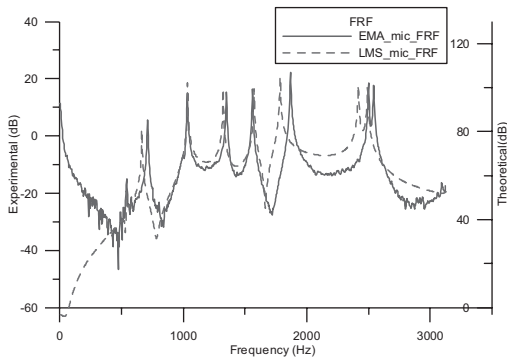


圖 11 實驗與預測之聲音頻譜比較圖

### 3.4.4 振動模態對聲音貢獻度探討

經由 VL-ACOUSTICS 軟體求解聲學音場響應結果後，可藉由各模態在不同頻率下之聲音振幅貢獻度圖，針對聲音響應較大之頻率響應位置，瞭解是由哪些模態主導聲音之響應，可由各模態貢獻度之多寡並配合模態振型進行結構變更之考量。圖 12 為各模態於 1,035 Hz 接近第三模態時之聲音振幅貢獻度圖，可發現除了第三模態影響最多之外，遠離此頻率之其他模態其影響程度較小。

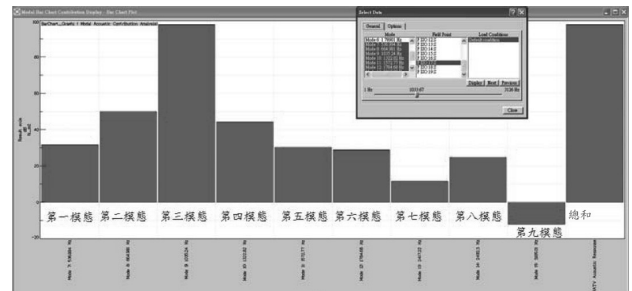


圖 12 各模態於 1,035 Hz 時之聲音振幅貢獻度圖

## 4. 高爾夫球頭揮擊聲音之預測

本節應用前節平板結構基準分析之方法流程，對一高爾夫球頭之衝擊音進行預測分析。

### 4.1 有限元素分析

圖 13 為高爾夫球頭材料性質位置分佈圖，表 4 為各對應位置之高爾夫球頭材料參數，圖 14 高爾夫球頭有限元素模型，假設高爾夫球為等向性材料，球頭整體利用線性殼元素建構，模型分割採用 Mapped Mesh 方式進行分割，共分為 7,661 個節點與 7,243 個元素，以自由邊界及無任何外力下進行模態分析。

表 4 球頭材料性質

位置	E1	E2	E3	E4	E5
	A1-A4	A5-A53, A73	A65, A67, A68, A71, A72	A60-A64	A54-A59, A69, A70
楊氏係數	106.23	124.55	137.84	141.35	132.56
浦松比	0.322	0.323	0.31	0.34	0.33



圖 13 高爾夫球頭材料性質位置分佈圖

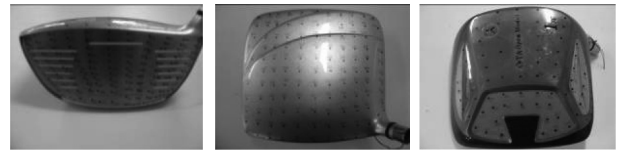


圖 15 敲擊點規劃圖



圖 14 高爾夫球頭有限元素模型圖

### 4.2 實驗模態分析

圖 15 為敲擊點規劃圖，分別於球頭打擊面、頂蓋及底蓋 3 個部分，各規劃了 121 點作為量測點，因此共 363 個量測點，圖 16(a) 與圖 16(b) 分別為球頭振動量測實驗及衝擊音量測圖，主要以棉線懸吊起模擬自由邊界，加速規 (KisHer 8732A500) 與麥克風 (PCB-130D20) 作為感測器，再分別以鋼頭衝擊鎚 (PCB-086C03) 進行球頭激振及高爾夫球衝擊鎚量測衝擊音，並由圖 16(c) 所示，訊號經由導線傳輸到頻譜分析儀，進行快速傅立葉轉換，可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 (autospectrum)，再進一步藉由 ME'Scope VES 軟體做曲線嵌合，可得到球頭之模態參數，即模態振型、自然頻率與模態阻尼比。



圖 16 (a) 球頭振動量測圖 (b) 球頭衝擊音量測圖

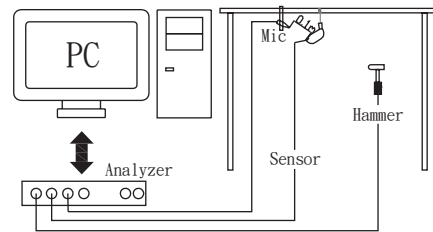


圖 16 (c) 球頭振動與聲音量測架設示意圖

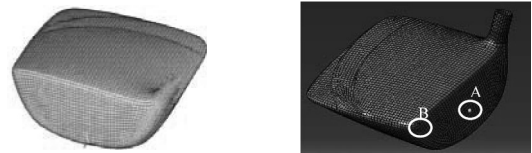


圖 17 不同軟體介面之有限元素模型圖

### 4.3 VL-ACOUSTICS 聲音預測

#### 4.3.1 球頭頻率響應函數確認

圖 17 為不同軟體介面之有限元素模型圖，而在 VL-ACOUSTICS 軟體於打擊面中心處 A 點處模擬一單位點力之輸入，並於模型 B 點處模擬為其頻率響應函數之輸出點，並與實驗模態分析之頻率響應函數值進行比較，圖 18 與表 5 為實驗與預測之頻率響應函數比較圖表，可發現所預測之頻率響應函數值與實驗值之峰值位置在 4,000 Hz 以下有良好之對應性，而高頻部分由於球頭結構振動模態多且複雜，FRF 比對未達理想，因球頭主要發聲頻率，與人耳感受靈敏

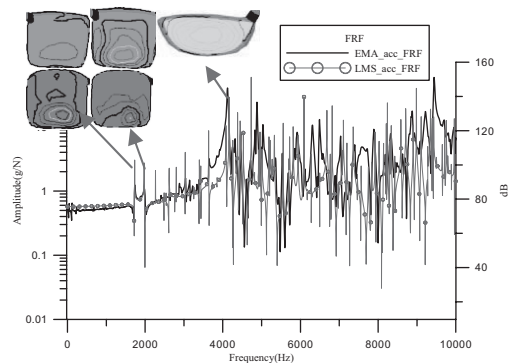


圖 18 實驗與預測之頻率響應函數比較圖

之頻寬也在 4,000 Hz 以下，故以此驗證之有限元素模型進行後續之聲場預測。

表 5 實驗與預測之頻率響應函數比較表

EMA 實驗值 (Hz)	VL-ACOUSTICS 預測值 (Hz)	頻率誤差率 (%)
1,731.3	1,732.3	0.06
2,000.0	1,972.9	-1.36
4,121.9	4,163.5	1.01

#### 4.3.2 球頭聲學音場預測確認

圖 19 為球頭之聲學音場建構圖，於球頭模型打擊面四周建構 ISO 聲場邊界元素，以模擬並觀看聲場變化之情形，圖 20 與表 6 為實驗與預測之聲音頻譜比較圖表，實驗數值乃是利用麥克風進行實驗模態分析量測所得，而數值分析預測值，主要是擷取 VL-ACOUSTICS 軟體之音場邊界元素中與實驗量測時，由麥克風量測聲音頻譜主導的兩個主要聲音頻率與預測之聲音頻譜結果進行比較，由兩者所得之球頭頻率誤差為 -1.36%，可發現所預測之聲音頻譜數值與實驗量測數值之峰值頻率位置相當接近在合理範圍內，但實驗值因有背景噪音之影響，使得在低頻頻譜量測數值有些峰值較不明顯。而數值分析預測之高頻的頻譜響應較大，係假設白噪音 (white noise) 之理想衝擊點力，而實際外力為三角力，高頻激振效果較低所致，如何模擬高爾夫球頭與球之衝擊力頻譜特性，亦為未來可進一步探討之議題。

## 5. 結論

本文採用商業軟體 ANSYS ver. 10 及 VL-ACOUSTICS ver. 9 及一套訊號擷取裝置，旨在發展建立全數值分析之高爾夫球具擊球聲音預測模式，得到以下結論：

- (1) 建立應用 ANSYS 及 VL-ACOUSTIC 軟體，發展高爾夫球具擊球聲音預測方法，經由此方法可在變更有限元素模型設計後，便能快速地預測出球具擊球聲音品質特性，以便快速的針對結構進行修改，改善擊球聲音特性。
- (2) 引進 VL-ACOUSTICS 聲學模擬軟體，應用於數值分析方法之聲音預測模式，並針對其聲音預測分析之結果進行評估，主要以平板結構驗證了此軟體的音場分析能力其可靠度相當高，且發現當有限元素模型愈等效於實際結構，所預測之聲音頻譜愈有其可靠度。

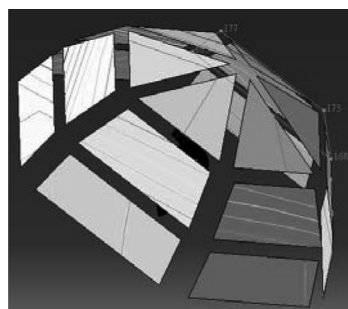


圖 19 球頭之聲學音場建構圖

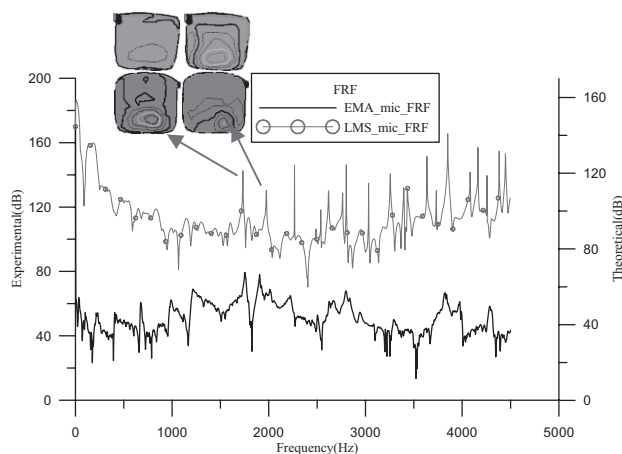


圖 20 實驗與預測之聲音頻譜比較圖

表 6 實驗與預測之聲音頻譜比較表

EMA 實驗值 (Hz)	VL-ACOUSTICS 預測值 (Hz)	頻率誤差率 (%)
1,731.3	1,732.3	0.06
2,000.0	1,972.9	-1.36

- (3) 本文也將此聲場預測方法，應用到高爾夫球頭衝擊音之預測，能合理求得與實驗量測頻譜相近之球頭衝擊音，有助於爾後高爾夫球頭結構變更設計之聲場響應特性評估。

## 6. 致謝

本研究承蒙 98 年度教育部產學園區計畫，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。



## 7. 參考文獻

- [1] 王栢村、陳又毓、丁國基、黃裕仁、陳詠升。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, 臺北。2008; 6-1。
- [2] 王栢村、丁國基、黃裕仁、陳詠升。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。2008; MB0807。
- [3] 謝裕忠。高爾夫球頭電腦輔助分析技術概論。工業材料, 1995, 104 期, 114-126 頁。
- [4] 邱武耀、楊淳守、賴姿吟、潭世偉、陳彥伊、吳伯毅。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, 臺北。2008; D-5。
- [5] 莊肯堯、翁榮源、徐茂濱、李十三。二胡樂音指標之建立與蟒皮對於音色之影響。第十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會, 宜蘭。2006; C16。
- [6] 許榮均、陳志豪、王志全。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。2006; G2。
- [7] 許榮均、朱旭、黃建達、鄭傑元。軌道噪音之環境音量評估。第十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會, 宜蘭。2006; F1。
- [8] Hocknell A, Mitchell S R, Jones R, Rothberg S J. Hollow golf club head modal characteristics: Determination and impact applications. *Experimental Mechanics*, 1998; 38: 140-146.
- [9] Dvorak P. Building a better golf ball. *Machine Design*, 2002; November: 66.
- [10] Wicks A P, Knight C E, Neighbors J. The comparison of forged heads to cast heads for golf clubs. in the *International Modal Analysis Conference*. Bethel, CT, 1993; 1797-1802.