

結構聲音輻射預測之驗證與應用

王栢村¹、張年華²、簡孝名²、黃裕仁³、陳詠升³

¹ 屏東科技大學機械工程系教授

² 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

wangbt@mail.npust.edu.tw [聯絡人：王栢村]

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量測，並結合 CAE 技術導入 VL-ACOUSTICS 聲音預測分析軟體，運用結構音場分析模組，進而得到理論預測之結構聲音響應，最後以實驗量測所得之聲音響應進行比對，以驗證評估理論之聲音預測方法之可靠度。結果顯示理論預測之模態參數主導了結構之頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)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，因此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靠度。

關鍵詞：有限元素分析、實驗模態分析、結構音場分析、頻率響應函數。

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]主要利用有限元素分析與實驗模態分析，針對高爾夫木桿鉸球頭進行模型驗證，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[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部分與好處。

結構噪音分析與改善設計方面，邱等人[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 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。

應用不同實驗方式針對不同性質結構做探討，Hocknell et al.[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[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好處。Wicks et al.[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 於全理論分析之聲音預測模式，以達到快速預測球頭結構音場來減少樣品製作次數。

2. 結構聲音預測流程

圖 1 為本文建立應用 VL-ACOUSTICS 之聲音預測分析流程圖，主要將 CAD 圖形匯入 CAE 套裝軟體 ANSYS 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 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為欲達到之情況，以完成聲音響應預測分析。

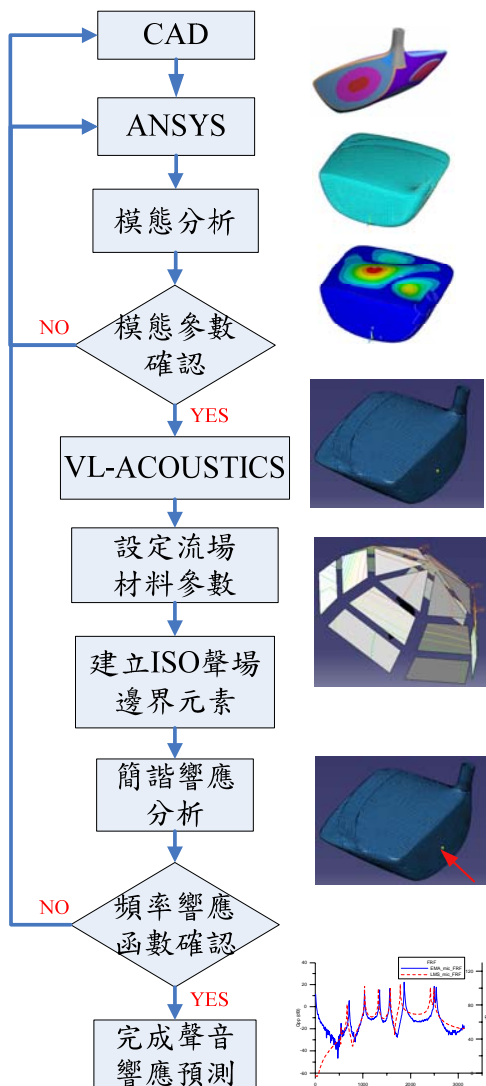


圖 1 應用 VL-ACOUSTICS 之聲音預測分析流程圖

3. 平板結構之聲音預測與驗證

首先要驗證與評估此全理論預測方法應用於結構之聲音預測，主要先以一簡易平板結構做為聲音預測之分析目標，圖 2 為結構聲音預測與驗證流程圖，主要先針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 裡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，確認此全理論預測方法應用於 VL-ACOUSTICS 聲音模擬預測分析結果之可靠性。

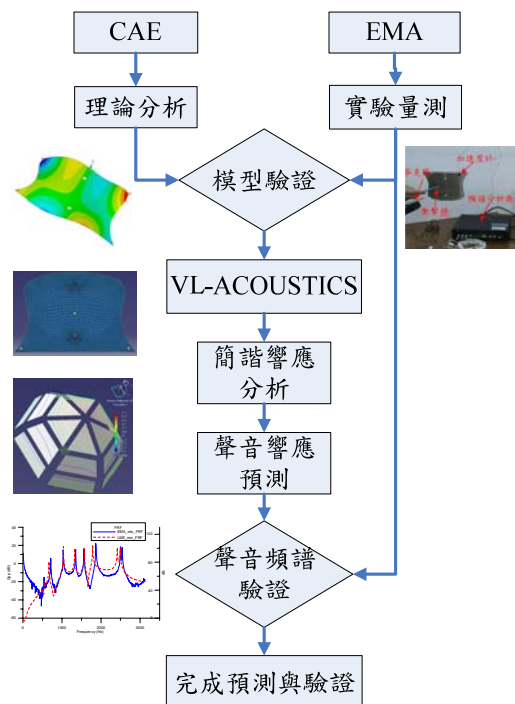


圖 2 結構聲音預測與驗證流程圖

3.1 有限元素分析

圖 1 為平板結構有限元素模型圖，表 2 為平板結構參數設定表，其有限元素模型之設定如下：

假設平板結構為等相性材料，結構整體以線性四邊形殼元素(Shell63)來建構，分割以每邊長 0.003m 為一單位進行分割，共分為 2280 個節點與 2116 個元素，以自由邊界及無任何外力下進行模態分析。

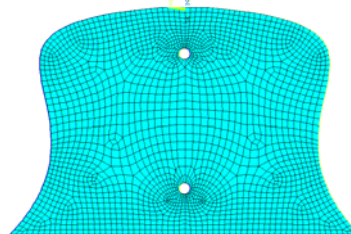


圖 5 平板結構有限元素模型圖

表 2 平板結構參數設定表

長×寬×高 (m)	楊氏係數 (GPa)	密度 (kg/m ³)	浦松比
0.182×0.122×0.003	192.95	7782.92	0.27

3.2 實驗模態分析

圖 2 為平板結構實體圖，主要以衝擊錘對平板結構 A 點處進行敲擊，並於 B 點處為加速度計之放置位置，圖 3 為實驗量測架設圖，實驗中以加速度計及麥克風兩種感測器，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。

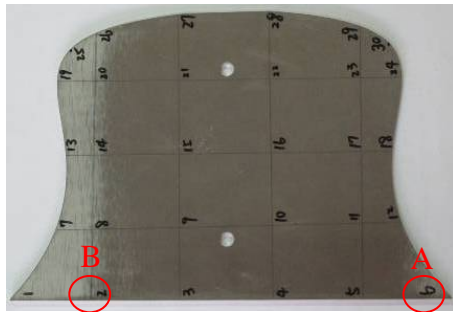


圖 2 平板結構實體圖

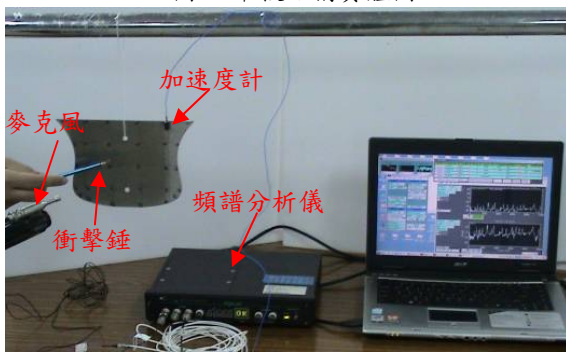


圖 3 實驗量測架設圖

3.3 模型驗證結果

表 7 為平板結構模態參數比較表，經由比對可發現 FEA 與 EMA 所獲得之自然頻率非常接近，因此顯示自然頻率的比對是成功的，而在模態振型方面，由模態振型圖顯示理論分析與實驗量測的模態振型具有相當的吻合性，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。

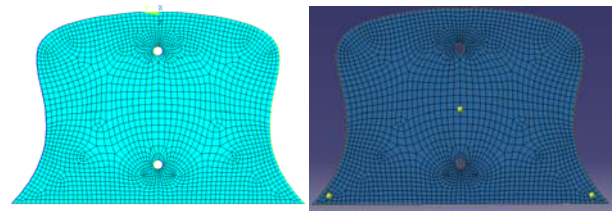
表 6 平板結構模態參數比較表

模態振型	FEA			EMA(加速度計)			EMA(麥克風)		
	模態	自然頻率	Mode shape	模態	自然頻率	Mode shape	模態	自然頻率	Mode shape
(2,2)	1	536.99		1	537.5		1	540.6	
(1,3)	2	664.98		2	712.5		2	709.4	
(3,1)	3	1035.2		3	1028.1		3	1031.3	
(,)	4	1322.8		4	1346.9		4	1350.0	
(3,2)	5	1572.8		5	1559.4		5	1562.5	
(1,4)	6	1784.7		6	1868.8		6	1868.8	

3.4 VL-ACOUSTICS 聲音預測

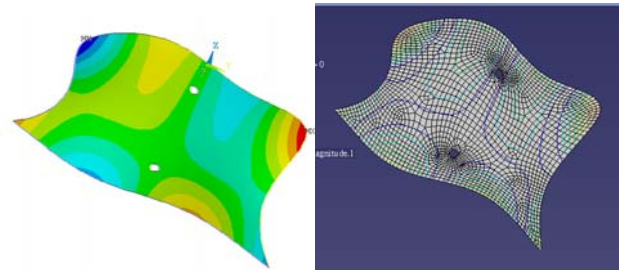
3.4.1 模態參數確認

將 ANSYS 軟體進行模態分析後之結果檔匯入 VL-ACOUSTICS 軟體，圖 4 為不同軟體介面之有限元素模型圖，圖 5 為模態分析結果呈現圖，然而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。



(A)ANSYS (B)VL-ACOUSTICS

圖 4 不同軟體介面之有限元素模型圖



(A)ANSYS (B)VL-ACOUSTICS

圖 5 模態分析結果呈現圖

3.4.2 頻率響應函數確認

在軟體裡於圖 6 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(FRF)之輸出點，進行簡諧響應分析，並與實驗模態分析(EMA)之頻率響應函數值進行比較，圖 7 與表 1 為實驗與預測之頻率響應函數比較圖表，藍色實線為實驗量測值，紅色虛線為 VL-ACOUSTICS 理論預測值，綠色波折線為 ANSYS 理論預測值，可發現兩不同軟體所預測之頻率響應函數值一樣，顯示軟體間簡諧響應分析之正確性，而理論值與實驗值則是相當接近，但在 2500Hz 左右之高頻處有較大之誤差，但整體誤差率尚在合理範圍內，表示有限元素模型尚有改善之空間。

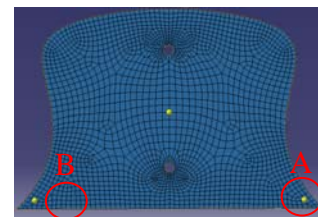


圖 6 平板結構之有限元素模型圖

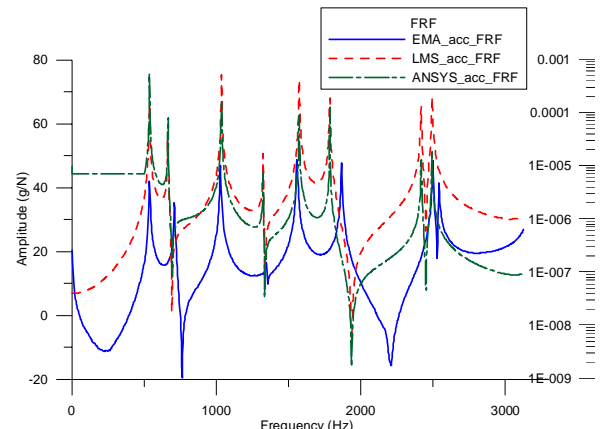


圖 7 實驗與預測之頻率響應函數比較圖

表 1 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
1031.0	1035.0	1035.0	0.39
1350.0	1323.0	1323.0	-2.00
1563.0	1573.0	1573.0	0.64
1869.0	1785.0	1785.0	-4.65
2500.0	2417.0	2417.0	-3.32
2541.0	2492.0	2492.0	-1.93

3.4.3 聲學音場預測確認

圖 8 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 9 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，以其聲音頻譜數值做為比較，可發現所預測之聲音頻譜數值與實驗數值相當接近，但在高頻處之對應性可看到些許之誤差，此現象可由圖 5 之頻率響應函數之預測值，發現此有限元素模型在高頻處之響應預測尚有改善之空間，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愈趨於實際結構 VL-ACOUSTICS 軟體所預測之聲音頻譜分析結果愈有其可靠性。

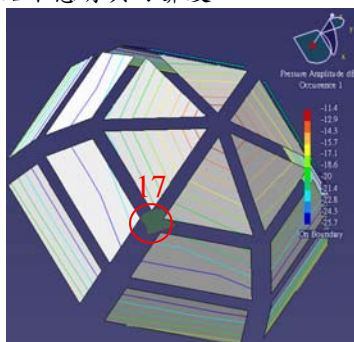


圖 8 平板結構之聲學音場建構圖

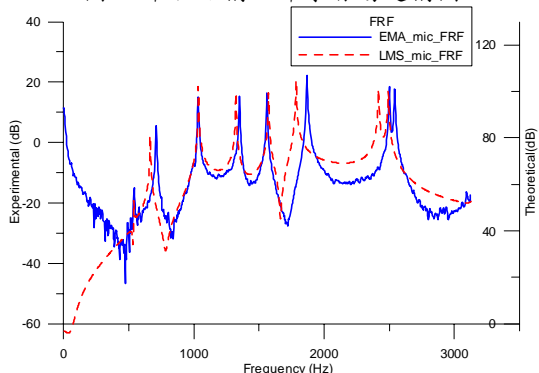


圖 9 實驗與預測之聲音頻譜比較圖

3.4.4 振動模態對聲音貢獻度探討

主要經由 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，了解是由哪些模態主導聲音之響應，以利用貢獻度之多寡並配合模態振型進行結構變更之考量。圖 10 為各模態於 1035Hz 接近第三模態時之聲音振幅貢獻度圖，可發現除了在第 3 模態影響最多之外，其他模態也有其影響程度。

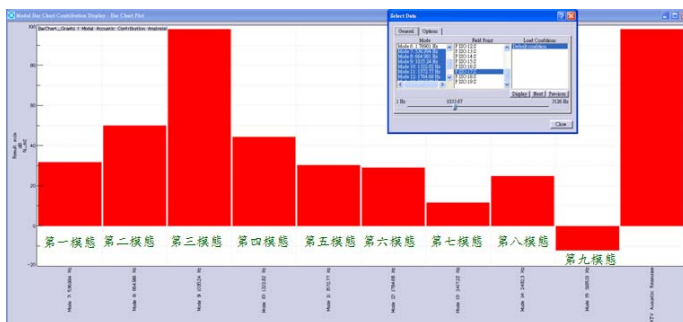


圖 10 各模態於 1035Hz 時之聲音振幅貢獻度圖

4. 高爾夫球頭揮擊聲音之預測

4.1 有限元素分析

圖 4 為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(Shell63)建構，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。

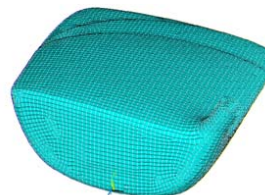


圖 12 高爾夫球頭有限元素模型圖

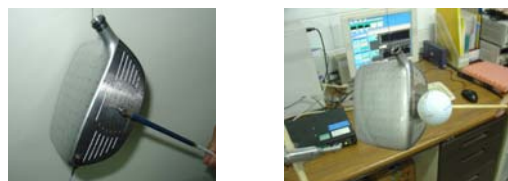
4.2 實驗模態分析

圖 3 為敲擊點規劃圖，分別於球頭打擊面、頂蓋及底蓋 3 個部份，各規劃了 121 點作為量測點，因此共 363 個量測點，圖 4(a)與圖 4(b)分別為球頭振動量測實驗及衝擊音量測圖，主要以棉懸吊起模擬自由邊界，加速度計與麥克風作為感測器，再分別以鋼頭衝擊錘進行球頭激振及高爾夫球衝擊錘量測衝擊音，並由圖 4(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 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。



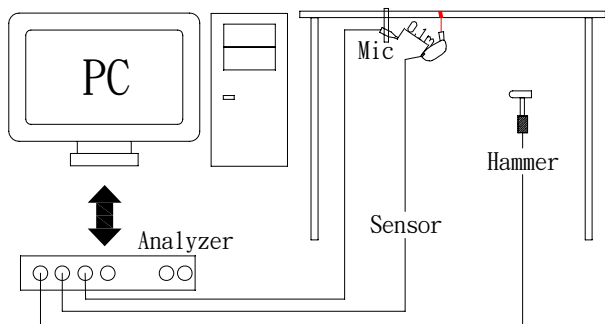
(a)打擊面 (b)頂蓋 (c)底蓋

圖 3 敲擊點規劃圖



(a)球頭振動量測圖 (b)球頭衝擊音量測圖

圖 4 球頭振動與聲音量測圖



(c) 球頭振動與聲音量測架設示意圖
圖 4 球頭振動與聲音量測圖(續)

4.3 VL-ACOUSTICS 聲音預測

4.3.1 球頭頻率響應函數確認

圖 12 為不同軟體介面之有限元素模型圖，而在 VL-ACOUSTICS 軟體裡於打擊面中心處 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(FRF)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 13 與表 3 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 4000Hz 以下有良好之對應性，而高頻部分尚可在有限元素模型進行改良，增進 4000Hz 以上自然頻率之頻率響應函數準確性。

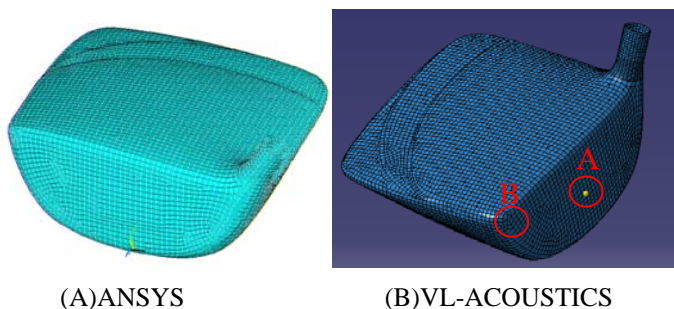


圖 12 不同軟體介面之有限元素模型圖

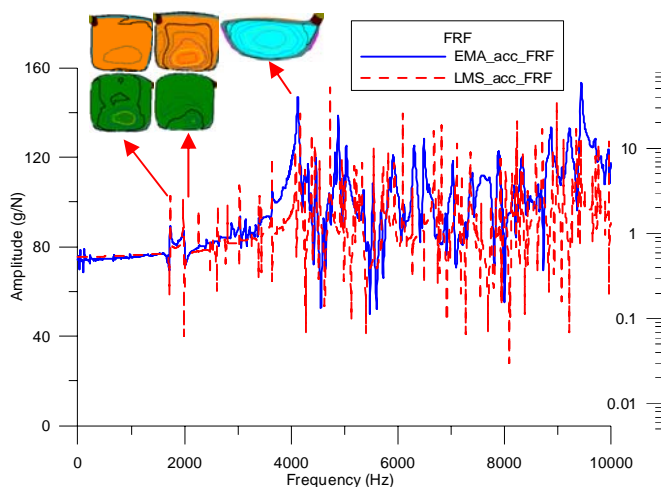


圖 13 實驗與預測之頻率響應函數比較圖

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)	頻率誤差率 (%)
1731.3	1732.3	0.06
2000.0	1972.9	-1.36
4121.9	4163.5	1.01

4.3.2 球頭聲學音場預測確認

圖 14 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 15 與表 4 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，而理論預測值，主要是擷取 VL-ACOUSTICS 軟體之音場邊界元素中與實驗量測時，麥克風放置位置接近處之聲音頻譜分析結果做為比較，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誤差率尚在合理範圍內，但實驗值因有背景噪音之影響，使得量測數值有些峰值較不明顯。

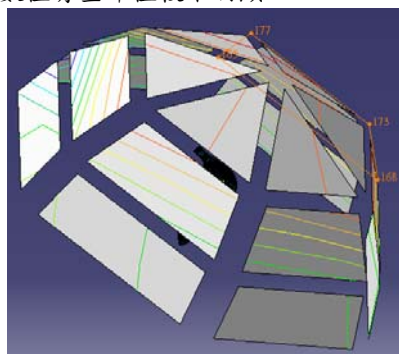


圖 14 球頭之聲學音場建構圖

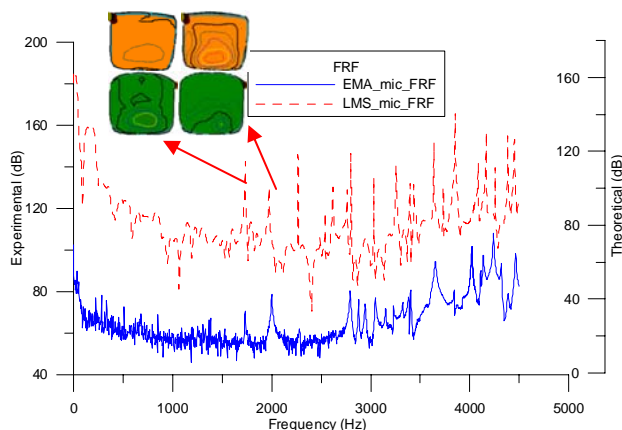


圖 15 實驗與預測之聲音頻譜比較圖

表 4 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 (%)
1731.3	1732.3	0.06
2000.0	1972.9	-1.36

5. 結論

本文採用商業軟體 ANSYS、VL-ACOUSTICS 及一套訊號擷取裝置，旨在發展建立全理論分析之高爾夫球

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，應用於全理論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。

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，2008，「結合有線元限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，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。
- [3] 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。
- [4] 邱武耀，楊淳守，賴姿吟，潭世偉，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。
- [5] 莊肯堯，翁榮源，徐茂濱，李十三，2006，「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，論文編號：C16。
- [6] 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。
- [7] 許榮均，朱旭，黃建達，鄭傑元，2006，「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，論文編號：F1。
- [8] 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.
- [9] Dvorak, P., 2002, "Building a Better Golf Ball," *Machine Design*, p. 66.
- [10] Wicks, A. P., Knight, C. E., and Neighbors J., 1993, "The Comparison of Forged Heads to Cast Heads for Golf Clubs," *Proceedings of the International Modal Analysis Conference*, Vol. 2, pp.

1797-1802.

Structural Sound Radiation Prediction and its Verification and Application

Bor-Tsuen Wang¹, Nian-Hua Zhang²,
Xiao-Ming Jian², Yu-Ren Huang³,
Yong-Sheng Chen³

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

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

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

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 'VL-ACOUSTICS' 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 theoretically 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 all as a golf club head and can further applied to other structures.

Keywords: Computer Aided Engineering, Experimental Modal Analysis, Structural Sound Field Analysis, Frequency Response Function.