

## 拇指琴之聲音特性探討

王栢村<sup>1</sup>、黃柏翔<sup>1</sup>、楊昶昱<sup>1</sup>、吳盈輝<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立屏東科技大學 機械工程系

<sup>2</sup> 國立內埔高級農工職業學校 機械科

### 摘要

拇指琴是一種具有特色的民俗樂器，將椰殼曬乾後加工製作為音箱，配合適當之長短鐵琴片便能以拇指撥動琴片彈出簡單的音階。本文針對具 7 個音階的拇指琴樂器進行聲音量測分析與有限元素分析，進而探討拇指琴發聲與振動的關聯性及彈奏時之聲音特性。首先，量測拇指琴演奏之聲音，量測每一琴片之時間域響應，以獲得聲音頻譜，探討其基音頻率之音準、泛音頻率組成之音色及聲音衰減率之持續度。為瞭解拇指琴音色之頻率特徵組成，利用有限元素分析針對單一琴片結構進行模態分析，可得到琴片模態自然頻率及其模態振型，得知琴片模態自然頻率是主要的發聲機制之一。另外，建構音箱結構與內外部空氣模型，進行音箱與空氣之聲振耦合分析，由音箱結構與空氣耦合模態特性，可解構拇指琴音箱有腔體內部空氣模態以及音箱結構與外部空氣耦合模態兩種型式，其中以腔體模態對整體聲音有明顯的影響，而腔體結構與外部空氣耦合模態僅些微影響，若琴片振動模態頻率與兩種空氣模態頻率相近時，琴片的模態頻率會有放大之效果。本文分別由實驗及分析方法解析拇指琴之聲音產生機制，包括琴片振動模態及音箱與空氣耦合模態之交互影響，所建立之方法也能應用於其他樂器之研究。

**關鍵字：**拇指琴、有限元素分析、聲振耦合分析、空氣腔體模態

### 1. 前言

拇指琴為非洲樂器，一種彈撥類型的體鳴樂器，屬於敲擊樂器。演奏時採雙手持握拇指琴，用雙手拇指同時或輪流彈奏，透過演奏技巧不同而有多層次的聲音呈現，能藉由拇指巧妙的控制加強段落及強拍處節奏，或在音孔上遮蔽來達到音樂的豐富性。

對樂器所產生出的聲音進行量測與探討以及指標定義，如王等人[1]對不同打擊樂器進行聲音量測，利用麥克風作為感測器與頻譜分析儀分析，求得打擊樂器之聲音頻譜，並分別探討有調打擊樂器及無調打擊樂器之聲音特性，以音高、音色、持續度三大方向作為指標。徐等人[2]驗證了影響樂器本身音色、特色、純淨度、音量的四個主要因素為泛音與基音間的協和性，也說明甜美的音色的重要條件就是純淨度，雜音太多絕對不好聽，經數據比較結果顯示，甜美的二胡具有柔軟的琴皮，其阻尼比較低，琴音也較持續悠揚。鐘等人[3]透過市面上的二胡，其穿透力常常不足，透過二胡的聲音特性進行主觀的評估與客觀的量測分析進而訂定出二胡的專屬樂音指標，初步推斷影響二胡穿透力的主要頻率為 2000 至 4000Hz 之間的聲壓值，也依據量測分析定義出穿透力之客觀指標，並

獲得主觀評價之一致肯定。

為探討樂器的聲音特性與結構振動分析之模態分析的關聯性，透過實驗與分析軟體進行聲音與振動特性探討，王與林[4]對鐵琴片之振動做一系列之探討，運用加速度計與麥克風當感測器，對鐵琴片進行實驗模態分析之比較與驗證，從比較結果得知麥克風與加速度計所量測之模態參數相當符合，因此確認麥克風作為感測器的可行性。王等人[5]為探討古鈸打擊聲音特性因此透過聲音量測與有限元素分析之模態分析，求得古鈸理論自然頻率及模態振型，並與實驗測得的聲音比對，得到三個主要發聲頻率。Park et al. [6]透過機器人手指進行小提琴按弦與彈奏，同時進行小提琴的聲音量測，探討在相同演奏條件下小提琴的聲音特性，進而確認小提琴的音調是否正確。

本文擬探討拇指琴結構振動與發聲機制之關係，應用聲音量測分析探討拇指琴之聲音特性分析，並透過有限元素分析對琴片與音箱結構振動模態分析，以及音箱結構與空氣結構耦合進行音場分析，探討拇指琴之發聲機制。

## 2. 拇指琴之聲音量測分析

### 2.1 拇指琴之實驗方法與步驟

本章節主要說明拇指琴之聲音量測方法，進而探討不同琴片之聲音特性，圖 1 為拇指琴之實際外型圖，圖 2 為拇指琴尺寸量測圖，拇指琴是由七片金屬琴片所組成，其直徑大小約 140 mm、音箱高度約 75 mm、音箱厚度約 5 mm，音箱上共七片金屬琴片依序由左至右，編號 01 為始，編號 07 為末，音箱本體有一直徑大小 25 mm 的音孔；圖 3 為拇指琴彈奏實際照片，演奏時雙手持握拇指琴本體，以雙手拇指同時或輪流彈奏。表 1 為拇指琴琴片結構尺寸總表，其 A 尺寸為琴片與琴橋相交處起算至琴片彈奏轉折處，琴片厚度皆為 1 mm，寬度皆為 3 mm，並由表 1 得知 04 琴片結構尺寸最長，長度為 56 mm，01 琴片結構尺寸最短，琴片長度為 33 mm。

圖 4 為拇指琴之聲音量測實驗儀器架設圖，本實驗以麥克風為感測器，透過筆電之聲音量測軟體進行聲音量測，以獲得時間域之聲音響應，將時間域之聲音響應訊號分別進行快速傅立葉轉換與短時傅立葉轉換，求得聲音頻譜圖、時間頻譜圖與衰減率圖，衰減率圖是利用平方根運算將時間響應訊號進行運算所得。

量測時以雙手持握拇指琴的方式量測，分別以拇指對琴片進行彈奏，並將麥克風架設於離拇指琴 15 公分水平處，需特別注意拇指琴量測時，所測得的聲音頻譜峰值需大於背景噪音 10 dB 以上，就表示不考

慮背景噪音之影響，所量得的聲音值才算有效。拇指琴量之聲音頻譜方程式系統輸入部分，設定取樣取樣時間為 3 秒、平均次數 2 次、重疊率 90 %、頻率解析度 1 Hz。在聲音頻譜輸出設定部分，設定平滑次數 2 次、分析頻率 0 至 5000 Hz。

## 2.2 拇指琴之聲音量測分析結果與探討

透過聲音量測分析求得聲音頻譜、時頻圖與衰減率圖，進而探討琴片之音準、音色、與持續度三大方向，表 2 為不同琴片之自然頻率總表，利用聲音頻譜得知發聲頻率之頻率與聲音壓力位準，且透過衰減率分析得知琴片之聲音持續度，表 3 為不同琴片之聲音頻譜、時頻圖與衰減率圖總表，表 4 為不同琴片與標準音階之自然頻率對照表，發聲頻率與標準音階知自然頻率對照，探討其聲音音準，觀察結果後可得以下幾點結論：

1. 針對拇指琴上的琴片結構長度區分可以得知，琴片長度越長其音階頻率越低，琴片長度越短其音階頻率越高，以第 04 號琴片長度為 56 mm，其頻率為 173 Hz，以第 01 號琴片長度為 33 mm，其頻率為 342 Hz。
2. 音準部分藉由彈奏拇指琴片，分別得到七個主要發聲的基音頻率，比對各音階頻率其誤差值皆大於標準的 $\pm 0.34\%$ ，其基音頻率誤差值介於 0.72 至 2.55%之間。
3. 泛音部分由分析得到，各琴片之峰值數在 4 至 6 之間不等，且各琴片間有著相同的泛音頻率，其中除了第 01 號與第 07 號琴片基音分別為 342 Hz 與 332 Hz 外，其餘琴片的第二峰值在 333 Hz 至 346 Hz 頻率區間內。
4. 透過衰減率分析得知拇指琴之衰減率聲音特性介於鐘琴與木琴之間，其中第 01 號與第 07 號琴片的聲音持續度 2.16 及 1.99 為最好，聲音響度 74.1 dB 及 74.3 dB 也最大。
5. 由本實驗結果得知，第 01 號與第 07 號琴片的聲音特性較大聲及持續度較久，可能是因為琴片結構本身之特性，也可能是音箱結構所貢獻。

## 3. 拇指琴片之結構模態分析

### 3.1 拇指琴片之有限元素分析

本節主要應用 ANSYS 軟體對拇指琴琴片進行有限元素分析，透過有限元素分析進行理論模態分析與簡諧分析，求得理論模態參數與頻率響應函數。

圖 5 為拇指琴之琴片實體結構示意圖，因琴片受壓板固定於琴枕上，故假設琴片之數學模型為壓板端設為固定邊界，琴枕相交處設為支點，將其假設之數學模型再經由繪圖軟體繪製琴片實體模型，圖 6 為拇指琴琴片之有限元素模型，利用有限元素分析軟體建構有限元素模型，假設材料具有等向性且為均質，並符合虎克定律之假設。以單一材料進行分析，其材料之楊氏係數為 215 GPa，蒲松比為 0.3，密度為 7850 kg/m<sup>3</sup>。元素分割總共有 270 個元素與 2171 個節點。邊界設定為模擬琴片之實際邊界下，則將琴片尾端面所有節點設定完全鎖固(UX=UY=UZ=0)，琴片與琴枕

之相交邊節點(UX=FREE、UY=FREE、UZ=0)，在簡諧分析中，將單位作用力設定於琴片頂端，以模擬實際彈奏情況，求得頻率響應函數，其結果與聲音頻譜互相比較驗證。

### 3.2 拇指琴片之有限元素分析結果與探討

表 5 為不同琴片之結構自然頻率與模態振型總表，經由聲音量測分析與有限元素分析之結果探討拇指琴片之振動模態特性，本文主要針對 0 Hz 至 5000 Hz 的頻率範圍進行討論，模態振型之物理意義分別以 x、y 與 z 表示，其中 x 軸方向之節線數，y 為側向方向之節線數，z 為垂直方向之節線數，圖 7 為第 01 號琴片之頻率響應函數與模態振型對照圖，圖 8 為第 01 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖，圖 9 為第 04 號琴片之頻率響應函數與模態振型對照圖，圖 10 為第 04 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖，頻率響應函數與聲音頻譜之峰值對應相似，琴片模態振型可發現主要發聲均屬於 Z 方向變形也是垂直方向，而變形最大位移量就在實際彈奏時的撥琴處，因此彈奏拇指琴片時即可得到最大響應。

在拇指琴屬於多樣部品組合而成的樂器，僅透過拇指琴琴片單體的有限元素分析所獲得的自然頻率，無法完全解讀實驗聲音量測分析所得的自然頻率，推估其餘頻率可能是由音箱結構所產生，第 4 章將利用有限元素分析之聲振耦合分析，確認音箱結構之影響，並對拇指琴之振動特性與發聲機制做探討與解析。

## 4. 拇指琴音箱之音場模態分析

### 4.1 拇指琴音箱之音場模態分析

本節針對音箱進行聲振耦合分析與音箱結構模態分析，探討音箱結構系統與空氣結構耦合系統之振動特性與聲音響應預測。

拇指琴之音箱結構主要透過 COMSOL 有限元素分析軟體進行聲振耦合分析，求得理論分析之結構系統與結構空氣耦合系統之模態參數，包含自然頻率、結構模態振型與音場模態振型，圖 11 為拇指琴音箱結構系統之有限元素模型圖，在結構系統主要針對對音箱結構進行模態分析，透過 COMSOL 軟體匯入音箱幾何模型，並設定材料參數，楊氏係數為 2 GPa、蒲松比為 0.3 與結構密度為 700 kg/m<sup>3</sup>，邊界部分則是採用自由邊界進行設定，進行模態分析求得結構系統之模態參數，圖 12 為拇指琴音箱空氣結構耦合系統之有限元素模型圖，結構空氣耦合系統在分析設定上，透過匯入音箱之幾何模型，且加入球體半徑為 140 mm 之空氣元素幾何模型，材料參數部分除了結構系統上的楊氏係數、蒲松比與結構密度外還需要加入空氣聲速為 343 m/s，邊界部分設定結構模型與空氣模型進行耦合，外部空氣設定為自由音場表面即為無限音場，進行空氣結構模態分析，求得理論空氣結構耦合系統之模態參數。

#### 4.2 拇指琴音箱之音場模態分析結果與探討

本小節主要說明音箱結構系統與空氣結構系統耦合分析之差異性探討，表 6 為音箱結構系統與空氣結構耦合系統之理論自然頻率總表，由表可知音箱結構系統與空氣結構耦合系統之自然頻率在相同網格分析結果顯示最大誤差為-1.067%，最小誤差則有 0.507%，表示在模擬結構與空氣結構狀況下，兩者略有影響，表 7 為有限元素分析之結構系統與空氣耦合結構系統對應模態振型總表，由表 7 可以得知音場與結構之模態振型對應良好，並發現在第一個結構模態振型頻率為 886.62 Hz，與音場模態振型頻率 890.64 Hz 對應，在空氣結構系統耦合分析中多了一個音場模態振型頻率為 328.39 Hz，其稱之為腔體模態，且得知音場模態振型主要為內部空氣腔體模態以及音箱結構與外部空氣耦合模態兩種型式，其中以腔體模態對整體聲音有明顯的影響。

#### 5. 拇指琴之聲音特性探討

本節將先前章節所得之琴片結構及音箱結構耦合空氣之理論分析結果與拇指琴聲音頻譜進行關聯性的探討，主要以第 01 號琴片與第 04 號琴片為例，圖 13 為第 01 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖，圖 14 為第 04 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖，觀察其結果綜合如下：

1. 由圖 11 可以看出第 01 號琴片之聲音頻譜第一峰值頻率為 342 Hz，由琴片結構第一模態及音箱結構耦合空氣之腔體模態貢獻，第二峰值頻率為 1016 Hz，由音箱結構與外部空氣耦合模態貢獻；第三峰值頻率為 1707 Hz 則由音箱結構耦合空氣之腔體模態貢獻，第四峰值頻率為 2149 Hz 由琴片結構第三模態以及音箱結構與外部空氣耦合模態貢獻。
2. 由圖 12 可以看出第 04 號琴片之聲音頻譜第一峰值頻率為 173 Hz，由琴片結構第一模態貢獻，第二峰值頻率為 346 Hz，由音箱結構耦合空氣之腔體模態貢獻，第三峰值頻率為 1015 Hz，由琴片結構第三模態及音箱結構與外部空氣耦合模態貢獻，第四峰值頻率為 2874 Hz，由音箱結構與外部空氣耦合模態貢獻，第五峰值頻率為 3046 Hz，由琴片結構第五模態貢獻，尚未解讀之聲音頻率峰值因本身的聲音響度較低，故不進行探討。

#### 6. 結論

本文主要針對拇指琴進行聲音量測分析與有限元素分析，求得聲音頻譜與理論之模態參數與頻率響應函數，探討拇指琴結構與空氣耦合系統之振動特性，且透過有限元素分析探討結構與空氣耦合系統之影響，綜合以上之實驗與分析結果可得下列幾點結論：

1. 拇指琴樂器的主要聲音特性是由琴片結構中第一個結構振動頻率產生，由琴片理論之頻率響應函數與聲音量測分析所得之峰值相符。

2. 亥姆霍茲共振 (Helmholtz resonance) 理論是指空氣在一個腔體中產生共振現象，進而產生聲音，由音箱結構系統與空氣耦合系統之振動特性，可發現 343 Hz 屬於音箱結構之腔體模態，可藉由聲振耦合分析求得。
3. 由音箱結構與空氣耦合模態特性，可解構拇指琴音箱有腔體內部空氣模態以及音箱結構與外部空氣耦合模態兩種型式，其中以腔體模態對整體聲音有明顯的影響，而腔體結構與外部空氣耦合模態僅些微影響，若琴片振動模態頻率與兩種空氣模態頻率相近時，琴片的模態頻率會有放大之效果。

#### 7. 參考文獻

1. 王栢村, 吳祥瑞, 徐秀娟, 高正賢, 不同打擊樂器聲音特性探討, 中華民國音響學會第二十四屆學術研討會, 台北, 論文編號: C10, 2011
2. 徐茂濱, 劉耿豪, 林昱廷, 甜美的二胡所具備之特性, 中華民國音響學會第二十四屆學術研討會, 新北, 論文編號: C12, 2011
3. 鍾欣樺, 徐茂濱, 林昱廷, 李十三, 二胡穿透力之客觀指標的探討, 中華民國音響學會九十八年會員大會暨第二十二屆學術研討會, 台北, 第 A60-A71 頁, 2009
4. 王栢村, 林怡馨, 鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討, 中華民國音響學會年會暨第二十屆論文發表會, 台北, 論文編號: C5, 2007
5. 王栢村, 吳祥瑞, 徐秀娟, 高正賢, 古箏打擊樂器聲音特性與設計分析, 中華民國振動與噪音工程學會第十九屆學術研討會論文集, 彰化, 論文編號: B-04, 2011
6. H. Park, B. Lee, and D. Kim, Violin Musical Tone Analysis using Robot Finger, *Procedia Computer Science*, Vol. 94, pp. 398-403, 2016

8. 圖表彙整



圖 1 拇指琴之實際外型圖

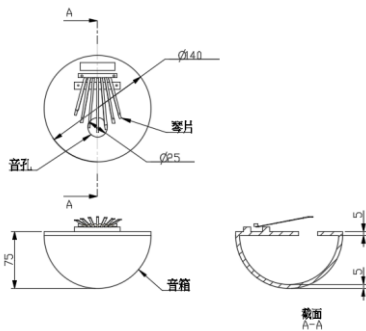


圖 2 拇指琴尺寸量測圖

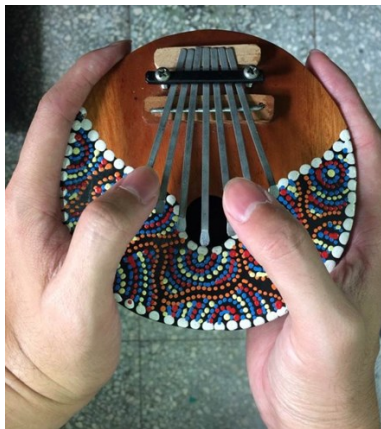


圖 3 拇指琴彈奏實際照片

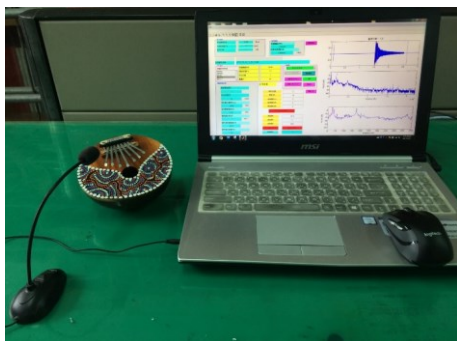


圖 4 拇指琴之聲音量測實驗儀器架設圖

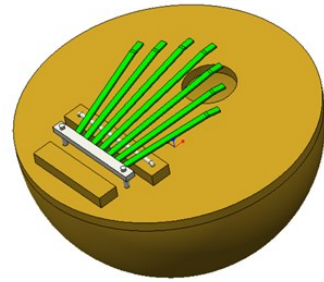


圖 5 拇指琴之琴片實體結構示意圖

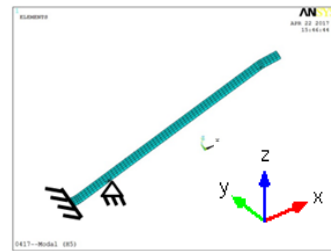


圖 6 拇指琴琴片之有限元素模型

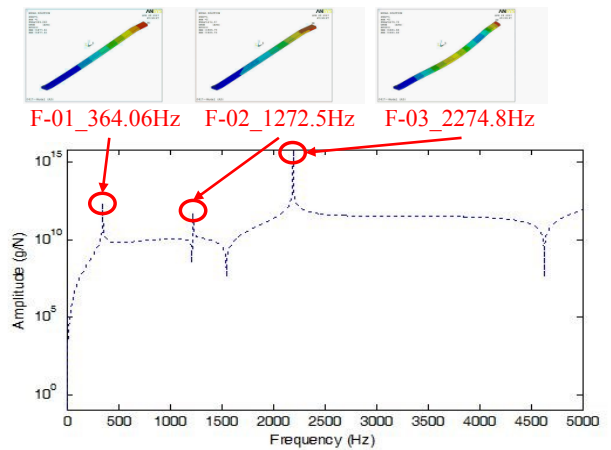


圖 7 第 01 號琴片之頻率響應函數與模態振型對照圖

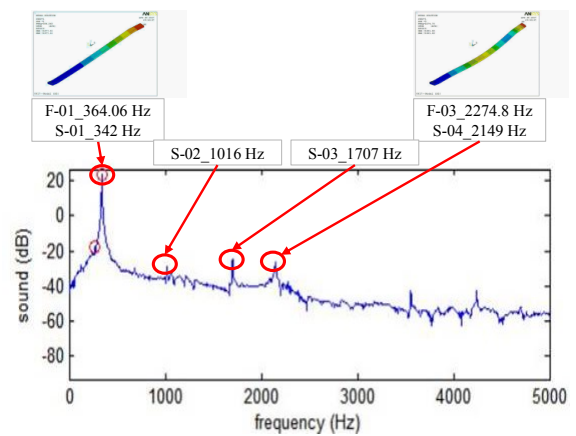


圖 8 第 01 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖

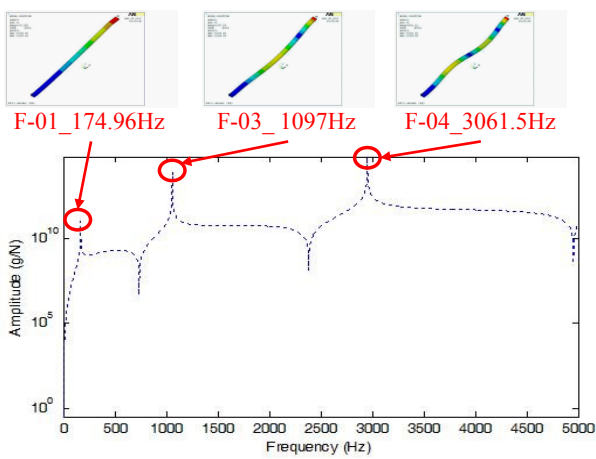


圖 9 第 04 號琴片之頻率響應函數與模態振型對照圖

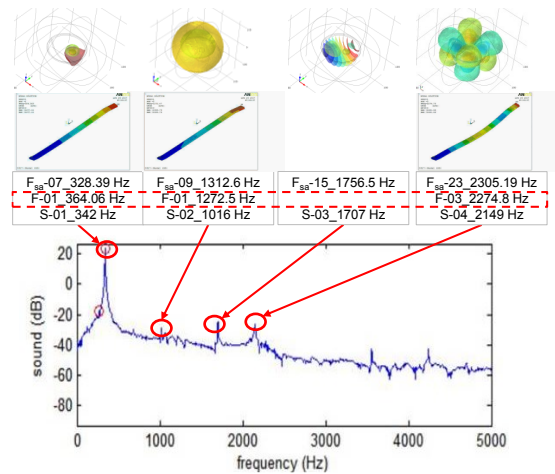


圖 13 第 01 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖

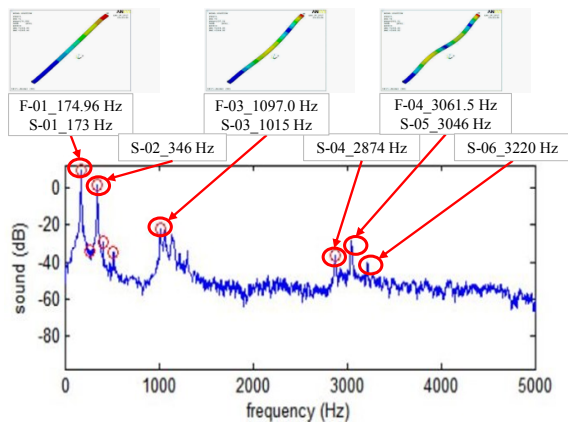


圖 10 第 04 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖

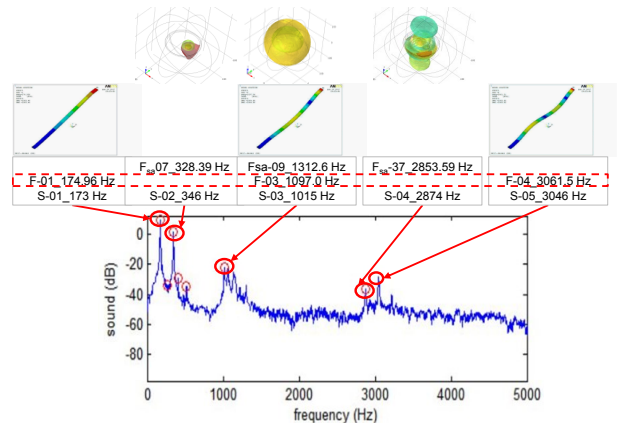


圖 14 第 04 號琴片之聲音頻譜與模態振型對照圖

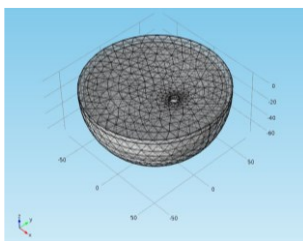


圖 11 拇指琴音箱結構系統之有限元素模型

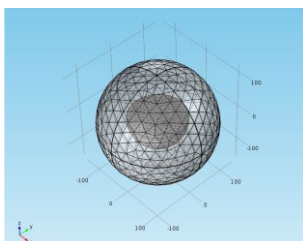


圖 12 拇指琴音箱空氣結構耦合系統之有限元素模型

表 1 拇指琴之琴片結構尺寸總表

編號	A 寸(mm)	B 寸(mm)
01	33	5
02	43	5
03	50	5
04	56	5
05	52	5
06	44	5
07	38	5



表 2 不同琴片之自然頻率總表

琴片編號		01		02		03		04		05		06		07	
Mode		發聲 頻率	頻率 比值	發聲 頻率	頻率 比值	發聲 頻率	頻率 比值	發聲 頻率	頻率 比值	發聲 頻率	頻率 比值	發聲 頻率	頻率 比值	發聲 頻率	頻率 比值
S1	發聲頻率 (Hz)	342	1	268	1	201	1	173	1	189	1	258	1	332	1
	聲音壓力 位準(dB)	74.1		63.9		58.6		59.5		61.3		61.9		74.3	
S2	發聲頻率 (Hz)	1016	2.97	343	1.28	344	1.71	346	2	344	1.82	333	1.29	997	3
	聲音壓力 位準(dB)	20.7		49		39.2		51.6		33.8		43.5		24.5	
S3	發聲頻率 (Hz)	1707	4.99	1072	4	1301	6.47	1015	5.86	1135	6	1069	4.14	1668	5.02
	聲音壓力 位準(dB)	24.3		14.4		30.4		28.2		31.1		14.5		22.9	
S4	發聲頻率 (Hz)	2149	6.28	1699	6.34	1703	8.47	2874	16.6	1703	9.01	1704	6.6	2153	6.48
	聲音壓力 位準(dB)	22.6		43		22		13.5		4.39		42.5		13.2	
S5	發聲頻率 (Hz)	3558	10.4	4690	17.5	3612	18	3046	17.6	3362	17.8	4655	18	3567	10.7
	聲音壓力 位準(dB)	7.54		2.57		25.4		21.5		2.86		1.14		8.84	
S6	發聲頻率 (Hz)	4243	12.4	--	--	4218	21	3220	18.6	--	--	--	--	4231	12.7
	聲音壓力 位準(dB)	6.94		10.4		9.37		7.99							
衰減率		2.16		4.21		8.06		4.5		4.48		4.13		1.99	
備註		原始聲音壓力位準(dB)均+50(dB) 頻率比值為發聲頻率 (S1、S2、S3...)除於第一個發聲頻率(S1)所得													

表 3 不同琴片之聲音頻譜、時頻圖與衰減率圖總表

琴片編號	聲音頻譜圖	時頻圖	衰減率圖
01	<p>量測次數: 1次</p> <p>Peak frequencies: s:342, s:1016, s:1707, s:2149, s:3558, s:4243</p>		<p>平方根值</p>
02	<p>量測次數: 1次</p> <p>Peak frequencies: s:268, s:343, s:1072, s:1699, s:4690</p>		<p>平方根值</p>
03	<p>量測次數: 1次</p> <p>Peak frequencies: s:201, s:344, s:1301, s:1703, s:3612, s:4218</p>		<p>平方根值</p>
04	<p>量測次數: 1次</p> <p>Peak frequencies: s:173, s:346, s:1015, s:2874, s:3046, s:5220</p>		<p>平方根值</p>
05	<p>量測次數: 1次</p> <p>Peak frequencies: s:189, s:344, s:1135, s:1703, s:5362</p>		<p>平方根值</p>
06	<p>量測次數: 1次</p> <p>Peak frequencies: s:258, s:333, s:1069, s:1703, s:4465</p>		<p>平方根值</p>
07	<p>量測次數: 1次</p> <p>Peak frequencies: s:332, s:997, s:1668, s:2153, s:3567, s:4231</p>		<p>平方根值</p>

表 4 不同琴片與標準音階之自然頻率對照表

琴片編號	基音頻率 (Hz)	音階	音階頻率 (Hz)	自然頻率誤差百分比 (%)
01	342	F4	349.2	-2.06
02	268	C4	261.6	2.44
03	201	G3	196	2.55
04	173	F3	174.6	-0.92
05	189	F3#	185	2.16
06	258	C4	261.6	-1.37
07	332	E4	329.6	0.72

表 5 不同琴片之結構自然頻率與模態振型總表

模態數 (mode)	模態振型	物理意義 (x,y,z)	01 琴片	02 琴片	03 琴片	04 琴片	05 琴片	06 琴片	07 琴片
			自然頻率 (Hz)	自然頻率 (Hz)	自然頻率 (Hz)	自然頻率 (Hz)	自然頻率 (Hz)	自然頻率 (Hz)	自然頻率 (Hz)
F-01		Z 方向 (1,1)	364.06	257.91	207.51	174.96	195.75	249.01	297.5
F-02		Y 方向 (1,1)	1272.5	868.58	663.53	551.12	638.77	834.51	1015.8
F-03		Z 方向 (2,1)	2274.8	1616.0	1300.6	1097	1227.6	1558.7	1861.0
F-04		Z 方向 (3,2)	5499.96	4205.1	3502.0	3061.5	3352.4	4073.2	4626.6
F-05		Y 方向 (3,2)	6955.72	4854.4	3753.1	3090.4	3584.7	4684.2	5755.24

表 6 音箱結構系統與空氣結構耦合系統之理論自然頻率總表

FEA(結構)		FEA(空氣結構)		自然頻率誤差 (Hz)	自然頻率誤差 (%)
模態數	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)		
--	--	F <sub>sa</sub> -07	328.39	--	--
F <sub>S</sub> -07	881.24	F <sub>sa</sub> -08	890.64	-9.40	-1.067
F <sub>S</sub> -08	1627	F <sub>sa</sub> -13	1614.6	12.40	0.762
F <sub>S</sub> -09	1675.90	F <sub>sa</sub> -14	1660.57	15.33	0.915
F <sub>S</sub> -10	2293.60	F <sub>sa</sub> -22	2281.96	11.64	0.507
F <sub>S</sub> -11	2319.80	F <sub>sa</sub> -23	2305.19	14.61	0.630
F <sub>S</sub> -12	2868.60	F <sub>sa</sub> -37	2853.59	15.01	0.523



表 7 有限元素分析之結構系統與空氣耦合結構系統對應模態振型總表

FEA(結構)		結構 物理意義 (r,θ)	FEA(空氣結構)		空氣結構 物理意義
自然頻率 (Hz)	結構模態振型		自然頻率 (Hz)	音場模態振型	
--	--	--	F <sub>sa-07</sub> 328.39		腔體內部空氣模態
F <sub>s-07</sub> 881.24		(1,0)	F <sub>sa-08</sub> 890.64		音箱結構與外部空氣耦合模態
F <sub>s-08</sub> 1627		(1,1)	F <sub>sa-13</sub> 1614.6		腔體內部空氣模態 (r,θ)=(1,2)
F <sub>s-09</sub> 1675.9		(1,1)	F <sub>sa-14</sub> 1660.57		腔體內部空氣模態 (r,θ)=(1,2)
F <sub>s-10</sub> 2293.6		(1,2)	F <sub>sa-22</sub> 2281.96		音箱結構與外部空氣耦合模態 (r,θ)=(1,2)
F <sub>s-11</sub> 2319.8		(1,2)	F <sub>sa-23</sub> 2305.19		音箱結構與外部空氣耦合模態 (r,θ)=(1,2)
F <sub>s-12</sub> 2868.6		(2,0)	F <sub>sa-37</sub> 2853.59		音箱結構與外部空氣耦合模態

## **Discussions on Sound Characteristics of Kalimba**

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Po-Hsiang Huang<sup>1</sup>,  
Chang-Yu Yang<sup>1</sup>, Ying-Hui Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and  
Technology

<sup>2</sup>National Nei-Pu Senior  
Agricultural-Industrial Vocational School of  
Machinery Division

### **Abstract**

Kalimba, also known as the thumb piano, is a kind of musical instrument. The coconut shell is dried and processed as the sound box for the speaker. The appropriate length of several steel sheets can be made and attached onto the top of the speaker. When one pulls a piece of steel sheet by thumbs, the kalimba can produce the sound amplified by the sound box. This work considers the kalimba with seven pieces of steel sheets for studying the sound generation mechanism and steel sheet vibration. First, Sound Measurement (SM) program is used to capture the kalimba play sound for each steel sheet, respectively. The time response of sound can be obtained and processed to get sound spectrum. The fundamental frequency, overtone frequencies and decay rate for continuity of kalimba play sound can then be determined. For calibration of frequency content, Finite element analysis (FEA) is also adopted to perform modal analysis on the steel sheets, so as to get natural frequencies and mode shapes. The vibration modes of steel sheet are major contributed frequencies to sound radiation. In addition, the sound box structure with interior and exterior air is constructed to perform vibro-acoustic coupling analysis. The coupling modes between sound box and air include the air cavity modes inside the box and the exterior air modes. The interior air cavity modal frequencies may significantly affect the radiated sound, while the exterior air modal frequencies contributed less effect. When the steel sheet's natural frequencies and sound box's air modal frequencies are close to each other, the sound radiation from the steel sheet's modal frequencies can be enlarged. This work presents numerical and experimental approaches to calibrate the kalimba play sound that can come from the steel sheet's vibration modes and structure-air coupling modes between sound box and air as well as their interaction effects. The developed numerical and experimental methodology can also be applied to other musical instruments.

**Keywords:** kalimba, finite element analysis (FEA), vibro-acoustic analysis, air cavity modes