

簡諧倍頻玻璃琴組之聲音品質評估

王栢村¹ 蔡有倫² 陳柏儂³ 余冠德³ 張弘毅³

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系所指導教授

² 國立屏東科技大學 機械工程系所研究生

³ 國立屏東科技大學 機械工程系所大學部學生

wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文主要對具有特殊設計之簡諧倍頻音玻璃琴組，有2組8度音，進行聲音品質之客觀評估。首先藉由量測一片玻璃琴片之打擊聲音頻譜，探討其聲音特性，玻璃琴片的音準由第一個模態頻率界定，而第二模態頻率與第三模態頻率成整數倍數則為其泛音之組成，藉由探討玻璃琴片打擊聲音之音準、音色及持續度探討其發聲之物理機制，同時也探討不同材質的墊片架設玻璃琴片下對聲音頻譜之影響。此玻璃琴組之各音階玻璃琴片均呈現良好的音準，同時具有三個簡諧倍頻之泛音特性，此泛音頻率與音階之基礎頻率呈現整數比。此玻璃琴組之打擊聲音確實有不錯的泛音特性。本文探討對玻璃琴組之聲音品質客觀評估，未來也可應用到其他打擊樂器。

關鍵詞：簡諧倍頻音、玻璃琴、聲音品質、不同材質墊圈。

1. 前言

在市面上常見的玻璃琴，大多都是利用水當媒介敲擊或是用撥的而發出聲音。如果去除水這個媒介，仍可以得到好聽的泛音特性故此玻璃打擊樂器是為創新性之嘗試。王與簡[1,2]設計出具有簡諧倍頻音之特殊外型並獲得中英文專利，Wang *et al.* [3]後續將簡諧倍頻音鐵琴片組的外型設計套入玻璃材質，而設計製作出2個8度音簡諧倍頻玻璃琴組，為了使簡諧倍頻音玻璃琴組得以商品化，並需建立一套簡諧倍頻玻璃琴組之聲音品質評估。

王和林[4]探討鐵琴片振動特性與聲音之關聯性，此報告是以 ANSYS 分析軟體對鐵琴片進行理論有限元素分析，取得理論模態參數，並與實驗所得之模態參數比較驗證，獲得等效於實際結構之有限元素模型。

王和簡[5]鐵琴樂器之聲音特性分析與驗證，此篇文獻是探討12片不同音階鐵琴片敲擊後之敲擊音的聲音特性，並對其進行有無加速規於實際與自由邊界下之模型驗證，藉以建構出參數化之鐵琴片有限元素模型，並對不同音階尺寸之鐵琴片進行分析。

王等人[6]有調與無調打擊樂器，兩者的差別在於樂器經敲擊後是否會有明顯音階變化，利用麥克風為感測器與頻譜分析儀，量測不同打擊樂器經敲擊過後的聲音，探討其音色、音高及持續度此三大方向。

王等人[7]聲音模擬程式之發展與應用，本文以自由

度振動系統響應特性，分別以各模態之聲音振幅、頻率、衰減率等參數，進而由實驗或分析求得之多個模態特性參數，以模擬合成結構之聲音輻射聲音，可藉以做為聲音品質特性之評估，以銅鑼來探討這些聲音模擬方式的可行性，模擬了一些結構的振動所發出來的結構振動聲音的頻率來加以探討並分析此頻率。

王等人[8]特殊設計簡諧倍頻鐵琴組之聲音品質評估，以不同的敲擊錘進行聲音的量測，並對鐵琴片的音準、音色、持續度去做客觀的品質評估。也請音樂系同學來做敲擊測試並做琴片迴響度及音準度的主觀評估。

王和蘇[9]進行實驗模態測試以求得實際吉他弦之實驗模態參數，並進行模型驗證，從聲音量測中，木吉他弦之聲音頻譜包含了音箱結構之振動模態效應，證明木吉他靠著音箱結構來產生擴音的效果及音箱之特性頻率。

本文針對簡諧倍頻玻璃琴片製作2個8度音，進而量測其聲音頻率做數據比對，並探討簡諧倍頻音玻璃琴片聲音特性，包括：音準、音色與持續度等；並探討不同材質的墊片架設在琴片下，對簡諧倍頻音玻璃琴片之影響；製作完成2個8度音之簡諧倍頻音玻璃琴組，經由客觀量測評估做比較，探討其聲音品質特性，未來也可作為評估或製作打擊樂器的依據。

2. 簡諧倍頻玻璃琴片之聲音特性

表 1 為音階頻率總表，F6 音階之聲音頻率為 1396.91(Hz)。圖 1 所示為 F6 簡諧倍頻音玻璃琴片，本節將量測與探討其聲音特性，圖 2 為此實驗聲音量測的量測設備與量測方式，運用筆記型電腦(含 MATLAB 軟體與聲音量測程式)、一般麥克風與敲擊槌，將 F6 簡諧倍頻音玻璃琴片架設在墊片上，墊片固定於琴片的節線上模擬自由邊界進行聲音量測。

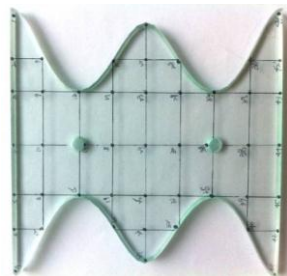


圖 1 F6 簡諧倍頻音鐵琴片實體圖

表 1 音階頻率總表

音名	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	比例關係
C	16.352	32.70	65.41	130.81	261.63	523.25	1046.50	2093.00	4186.01	8372.02	1
C [#] /D ^b	17.324	34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46	4434.92	8869.84	1.059463
D	18.354	36.71	73.42	146.83	293.66	587.33	1174.66	2349.32	4698.64	9397.27	1.122462
D [#] /E ^b	19.445	38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02	4978.03	9956.06	1.189207
E	20.602	41.20	82.41	164.81	329.63	659.26	1318.51	2637.02	5274.04	10548.08	1.259921
F	21.827	43.65	87.31	174.61	349.23	698.46	1396.91	2793.82	5587.65	11175.30	1.33484
F [#] /G ^b	23.125	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96	5919.91	11839.82	1.414214
G	24.500	49.00	98.00	196.00	392.00	783.99	1567.98	3135.96	6271.93	12543.85	1.498307
G [#] /A ^b	25.957	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44	6644.88	13289.75	1.587401
A	27.500	55.00	110.00	220.00	440.00	880.00	1760.00	3520.00	7040.00	14080.00	1.681793
A [#] /B ^b	29.135	58.27	116.54	233.08	466.16	932.33	1864.66	3729.31	7458.62	14917.24	1.781797
B	30.868	61.74	123.47	246.94	493.88	987.77	1975.53	3951.07	7902.13	15804.27	1.887749



圖 2 量測設備與量測方式

表 2 F6 玻璃琴片在自由邊界下量測之時間域與頻率域圖

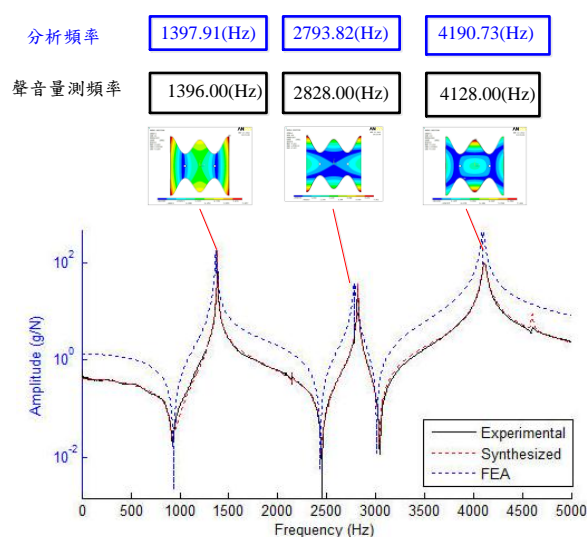
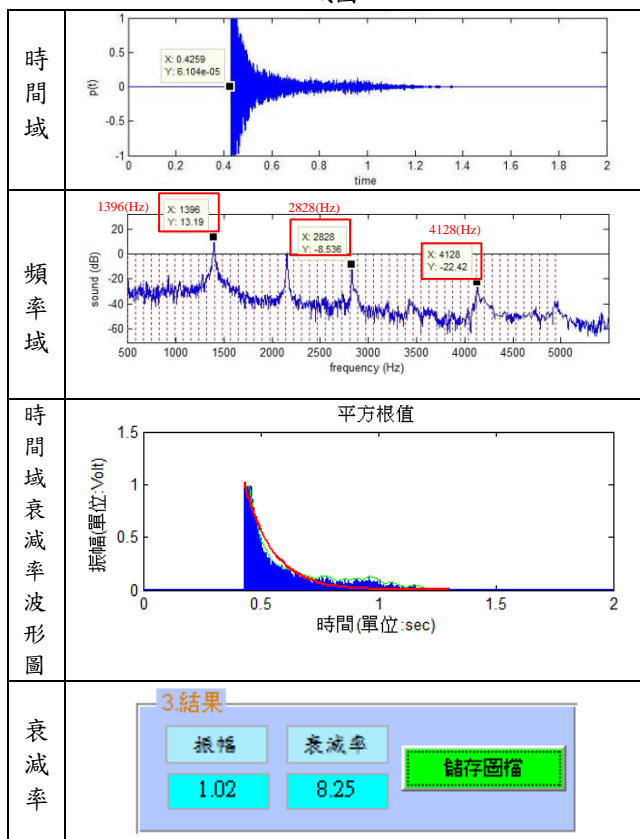


圖 3 F6 玻璃琴片之頻率響應函數圖

透過敲擊槌敲擊簡諧倍頻音玻璃琴片中心位置，利用一般麥克風接收聲音，經由聲音量測軟體進行聲音頻率解析，得到如表 2 的 F6 簡諧倍頻音玻璃琴片量測的結果表，將實驗量測得到的時間域，經由聲音量測程式進行快速傅立葉轉換進行解析，得到頻率域與時間域衰減率波形圖。而由頻率域可看出簡諧倍頻音玻璃琴片前三個聲音頻率峰值較為明顯，且其具有整數倍頻之關係，符合簡諧倍頻音之聲音特性。

圖 3 為 F6 玻璃琴片之頻率響應函數圖，當敲擊中心點可激發如圖中顯示前三個模態之模態振型。針對分析與實驗量測的前三個聲音頻率進行比對，統整如表 3 為量測 F6 玻璃琴片之聲音頻率比較表。由表 3 可看出分析與玻璃琴片之聲音基礎頻率誤差百分比在 ±1% 以內，而分析和實驗的模態振型對應良好，代表分析的模態參數有等效於實際結構的模態參數，並解析得此自由邊界狀態下之玻璃琴片衰減率為 8.25。

表 3 量測 F6 玻璃琴片之聲音頻率比較表

模態	分析頻率 (Hz)	量測頻率 (Hz)	倍率關係	頻率誤差值(Hz)	誤差百分比 (%)	容許誤差百分比(%)	容許差異值 (Hz)	衰減率
1	1396.91	1396.00	1.00	-1.91	-0.13	± 0.346	± 4.85	8.25
2	2793.82	2828.00	2.02	34.17	1.22	± 0.346	± 9.70	
3	4190.73	4128.00	3.00	-62.73	-1.49	± 0.346	± 14.55	

由量測聲音頻率進一步對 F6 簡諧倍頻音玻璃琴片，探討其聲音品質(包括：音準、音色與持續度)。

- 音準：音階 F6 對應之聲音主頻率為 1396(Hz)，由表 3 可得知實際量測得到的聲音頻率符合容許範圍內，故音準是為準確的。
- 音色：除了第 1 個模態聲音頻率為基音，其餘明顯的模態聲音頻率皆稱為泛音。而具簡諧倍頻音玻璃琴片目的為設計出具有倍頻特性之泛音，由表 3 可得知 F6 簡諧倍頻音玻璃琴片確實有此特性。
- 持續度：為聲音持續的時間，由衰減率所影響，衰減率越小則聲音持續度越長，迴響越好；衰減率越大則反之。此懸掛模擬自由邊界得到之衰減率為 8.25。



(b) 塑膠墊

圖 4 不同材質的墊片

3. 不同材質墊片對玻璃琴片影響之比較

圖 4 為不同材質之墊圈，分別為泡棉墊和塑膠墊兩種，敲擊同一片簡諧倍頻音玻璃琴片(F6)進行聲音量測，得表 4 與表 5 不同材質墊片架著 F6 玻璃琴片之時間域圖與頻率域圖及衰減率圖，由頻率域圖可看出主要發聲的聲音頻率皆有所對應。衰減率圖可看到塑膠的衰減率大於泡棉，可知泡棉墊片對於玻璃琴片的邊界影響較塑膠墊片小，泡棉墊片所敲擊出來的聲音比塑膠墊片來的好聽。



(a) 泡棉墊

表 4 F6 玻璃琴片在泡棉墊片上的聲音量測結果

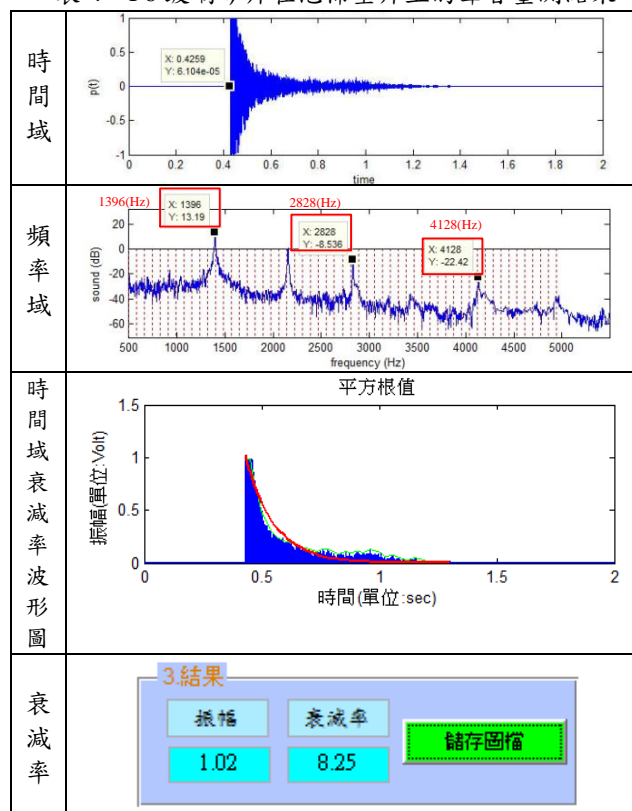


表 5 F6 玻璃琴片在塑膠墊片上的聲音量測結果

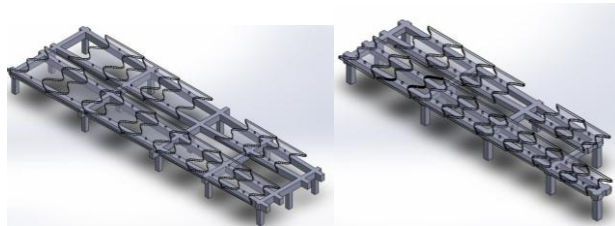
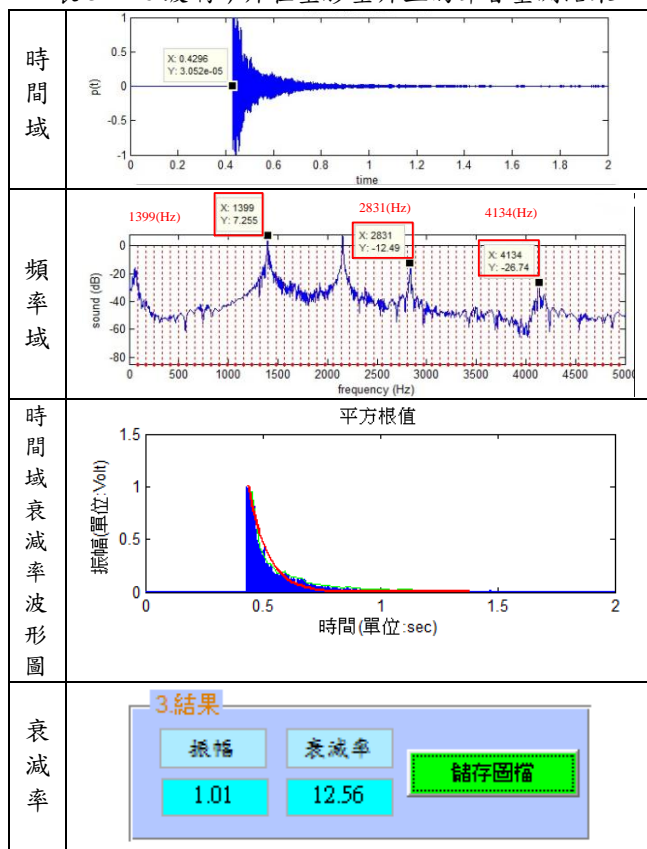


圖 5 2 個 8 度音簡諧倍頻音玻璃琴組

5. 結論

本文針對新型設計之簡諧倍頻音玻璃琴組完成製作，並將敲擊後的聲音特性以音準、音色與聲音持續度進行探討。

- 音準方面，各音階的聲音頻率容許誤差百分比沒有在 $\pm 0.346\%$ 以內，原因是玻璃琴片是由水刀加工切出來的，會有加工誤差，表示量測頻率需做外型大小修正來做微調，音準方面還在調整中。
- 音色方面，如表 6 所示，設計具簡諧倍頻音聲音特性之玻璃琴片，目的為經敲擊後，可產生具有倍頻的聲音特性。由結果可得知，每片玻璃琴片皆有趨近於 1:2:3 的聲音倍頻關係，確定有簡諧倍頻的效果。
- 聲音持續度方面，為使聲音得以持續長久，須減少邊界效應。針對不同材質的墊片對琴片之影響由結果可發現泡棉墊架設在琴片下衰減率比塑膠墊影響較小，聲音聽起來泡棉墊的敲起來比較好聽。

簡諧倍頻音玻璃琴組在客觀聲音量測評價中，音色與持續度等皆有良好的數據顯示，音準的部分因為有加工的誤差，需修正外型大小來做微調，如表 7 所示，B5、F6、G6 三片玻璃琴片皆達到容許誤差之標準。

衰減率方面，自由邊界的情況下自 A6 開始逐漸提高；在泡棉墊的設置情況下，衰減率較自由邊界情況下低，而泡棉墊與塑膠墊兩種設置情況下之衰減率比較結果，泡棉墊皆小於塑膠墊之衰減率。

未來在音準的部分調整好後，請音樂老師來做敲擊測試，並建立聲音的主觀評估，期望能使簡諧倍頻音玻璃琴組，得以作為演奏用之打擊樂器組。

6. 致謝

感謝慈峰玻璃股份有限公司，提供玻璃試片做為實驗分析的材料依據；由於調音的過程繁雜，需反覆製作並測試琴片的音準，由衷感謝慈峰公司不厭其煩地加工製作，使得玻璃琴組順利完成。

7. 參考文獻

- [1] 王栢村，簡孝名，2012，「具有簡諧倍頻音之音板結構」，中華民國發明專利，發明第 I 377556 號。(專利權期間：2012 年 11 月 21 日至 2030 年 9 月 9 日)

4. 簡諧倍頻音玻璃琴組聲音特性品質評估

圖 5 為完成製作的 2 個 8 度音簡諧倍頻音玻璃琴組，而 2 個 8 度音範圍如表 1 音階頻率總表圈選之 F5~F7，本節對此琴組進行實驗量測並統整聲音頻率作為聲音品質客觀評估的依據。

由各簡諧倍頻音玻璃琴片量測之聲音頻率，進一步探討所製作之簡諧倍頻音玻璃琴組之音準、音色與持續度等，作為客觀聲音品質評估方式。

- 音準：各音階的聲音頻率容許誤差百分比沒有在 $\pm 0.346\%$ 以內，由表 4 簡諧倍頻音玻璃琴組之聲音主頻率比對結果，可看出各簡諧倍頻音玻璃琴片之聲音主頻率，沒有都在誤差範圍內。
- 音色：由表 5 簡諧倍頻音玻璃琴組之各音階聲音頻率表，以聲音主頻率為基準，第二聲音頻率約 a~b，第三聲音頻率約 a~b，故在音色方面接近 1、2、3 之倍率關係，是為符合簡諧倍頻音玻璃琴片之設計目標。
- 持續度：由表 4 簡諧倍頻音玻璃琴組之衰減率數據中，以泡棉墊為架設琴片的墊圈量測出來的衰減率都低於塑膠墊。由此結果可看出泡棉墊片較不影響架設玻璃琴片的邊界效應。

- [2] Wang, B. T., Chien, H. M., 2012, "Board Capable of Generating a Harmonic Sound," United States Patent No.: US 8,299,342 B2, Date of Patent: 10/30/2012, Effective Date: 3/15/2032.
- [3] Wang, B. T., Tsai, Y. L., Chen, P. H., Chang, H. Y., and Yu, K. T., 2013, "Design and Percussion Sound Evaluation of Harmonic Glass Plate," 20th International Congress on Sound and Vibration, Bangkok, Paper No.: #431.
- [4] 王栢村, 林怡馨, 2007, 「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」, 2007 中華民國音響學會年會暨第二十屆論文發表會, 臺北, 論文編號: C5。
- [5] 王栢村, 簡孝名, 2010, 「鐵琴樂器之聲音特性分析與驗證」, 機械技師學刊, 第 3 卷, 第 2 期, 第 1-7 頁。
- [6] 王栢村, 吳祥瑞, 徐秀娟, 高正賢 2011, 「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, 新北市, 論文編號 C10。
- [7] 王栢村, 陳品豪, 吳銘峰, 董時沛, 2010, 「聲音模擬程式之發展與應用」, 中華民國音響學會第二十三屆學術研討會, 台中市, 論文編號: 26。
- [8] 王栢村, 董時沛, 徐秀娟, 高正賢, 2012, 「特殊設計簡諧倍頻鐵琴組之聲音品質評估」, 第二十屆中華民國振動與噪音工程學術研討會, 彰化, 論文編號
- [9] 王栢村, 蘇集銘, 2006, 「吉他弦之振動與聲音特性探討」, 中華民國音響學會第十九屆學術研討會論文集, 台南, 論文編號: A7

special effect as well as the glass material. This work provides an objective evaluation on the HGPI that is potential for commercial product.

Keywords : harmonic sound, glass plate, sound quality, different fixed conditions

Sound Quality Evaluation for Harmonic Glass Percussion Instrument

Bor-Tsuen Wang¹, You-Luen Tsai², Po-Hao Chen³,
Kuan-Te Yu³, Hung-Yie Chang³

Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology
Pingtung, 91201, Taiwan

Abstract

This work aims to discuss the percussion sound characteristics for the harmonic glass percussion instrument (HGPI) that contains two complete octave notes. First, a harmonic glass plate (HGP) is evaluated for its percussion sound. The fundamental frequency of the HGP that is the first mode of the plate denotes the pitch of a note. The second and third modes of the HGP have the multiple harmonic effects and consist of the overtone. The percussion sound of HGP is characterized by the pitch, overtone (or timbre) and continuity as well as the modal characteristics. The percussion sounds of HGPIs in free boundary and different fixed conditions are also measured to discuss the effect of bonding materials. The set of HGPI reveals quite good sound quality in terms of the pitch and timbre as well as the continuity of percussion sound. In particular, the harmonic sound is the

表 6 簡諧倍頻音玻璃琴組之各音階聲音頻率表

音階	第一聲音頻率(f_1)		第二聲音頻率(f_2)		第三聲音頻率(f_3)	
	量測頻率 (Hz)	音階比例 (f_1 / f_1)	量測頻率 (Hz)	音階比例 (f_2 / f_1)	量測頻率 (Hz)	音階比例 (f_3 / f_1)
F5	693	1.00	1392	2.01	2050	2.96
F[#]5/G^b5	732	1.00	1472	2.01	2170	2.96
G5	772	1.00	1552	2.01	2287	2.96
G[#]5/A^b5	819	1.00	1654	2.02	2426	2.96
A5	872	1.00	1758	2.02	2584	2.96
A[#]5/B^b5	921	1.00	1856	2.02	2729	2.96
B5	986	1.00	1984	2.01	2917	2.96
C6	1051	1.00	2121	2.02	3114	2.96
C[#]6/D^b6	1117	1.00	2256	2.02	3305	2.96
D6	1162	1.00	2344	2.02	3435	2.96
D[#]6/E^b6	1235	1.00	2495	2.02	3651	2.96
E6	1311	1.00	2664	2.03	3867	2.95
F6	1398	1.00	2828	2.02	4128	2.95
F[#]6/G^b6	1470	1.00	2971	2.02	4328	2.94
G6	1563	1.00	3174	2.03	4610	2.95
G[#]6/A^b6	1648	1.00	3339	2.03	4875	2.96
A6	1747	1.00	3537	2.02	5153	2.95
A[#]6/B^b6	1844	1.00	3733	2.02	5436	2.95
B6	1959	1.00	3960	2.02	5767	2.94
C7	2071	1.00	4195	2.03	6099	2.94
C[#]7/ D^b7	2199	1.00	4451	2.02	6468	2.94
D7	2323	1.00	4729	2.04	6833	2.94
D[#]7/ E^b7	2464	1.00	5031	2.04	7228	2.93
E7	2603	1.00	5327	2.05	7657	2.94
F7	2759	1.00	5633	2.04	8106	2.94



表 7 簡諧倍頻音玻璃琴組在不同邊界效應之聲音主頻率及衰減率比較表

音階	目標頻率 (Hz)	量測頻率 (自由邊界) (Hz)	量測頻率 (泡棉墊) (Hz)	量測頻率 (塑膠墊) (Hz)	目標與自由頻率誤差百分比(%)	目標與泡棉墊頻率誤差百分比(%)	目標與塑膠墊頻率誤差百分比(%)	衰減率(自由邊界)	衰減率(泡棉墊)	衰減率(塑膠墊)
F5	698.46	692	693	695	-0.92	-0.78	-0.50	2.77	8.38	14.36
F [#] 5/G ^b 5	739.99	732	732	735	-1.08	-1.08	-0.67	3.26	6.80	16.45
G5	783.99	772	772	773	-1.53	-1.53	-1.40	2.14	6.22	13.23
G [#] 5/A ^b 5	830.61	819	819	820	-1.40	-1.40	-1.28	3.07	6.26	11.60
A5	880.00	873	872	873	-0.80	-0.91	-0.80	2.31	6.33	10.44
A [#] 5/B ^b 5	932.33	922	921	922	-1.11	-1.22	-1.11	3.04	7.21	8.23
B5	987.77	987	986	987	-0.08	-0.18	-0.08	2.52	3.67	7.07
C6	1046.50	1054	1051	1052	0.72	0.43	0.53	3.26	5.07	10.68
C [#] 6/D ^b 6	1108.73	1117	1117	1115	0.75	0.75	0.57	3.31	6.98	12.46
D6	1174.66	1163	1162	1162	-0.99	-1.08	-1.08	3.28	3.79	7.28
D [#] 6/E ^b 6	1244.51	1235	1235	1235	-0.76	-0.76	-0.76	3.72	4.71	8.24
E6	1318.51	1312	1311	1312	-0.49	-0.57	-0.49	3.37	6.60	7.00
F6	1396.91	1396	1398	1395	-0.07	0.08	-0.14	3.65	8.25	12.56
F [#] 6/G ^b 6	1479.98	1471	1470	1470	-0.61	-0.67	-0.67	6.01	5.07	5.79
G6	1567.98	1563	1563	1565	-0.32	-0.32	-0.19	4.75	5.25	5.34
G [#] 6/A ^b 6	1661.22	1649	1648	1649	-0.74	-0.80	-0.74	7.80	10.45	11.23
A6	1760.00	1749	1747	1749	-0.63	-0.74	-0.63	6.21	6.01	8.82
A [#] 6/B ^b 6	1864.66	1846	1844	1845	-1.00	-1.11	-1.05	6.24	5.97	7.13
B6	1975.53	1958	1959	1958	-0.89	-0.84	-0.89	8.97	6.46	8.74
C7	2093.00	2073	2071	2073	-0.96	-1.05	-0.10	8.66	6.93	10.27
C [#] 7/D ^b 7	2217.46	2200	2199	2200	-0.79	-0.83	-0.79	11.77	5.92	7.81
D7	2349.32	2327	2323	2329	-0.95	-1.12	-0.86	12.59	6.84	8.10
D [#] 7/E ^b 7	2489.02	2465	2464	2464	-0.97	-1.01	-1.01	15.39	7.38	11.08
E7	2637.02	2608	2603	2608	-1.10	-1.29	-1.10	14.97	7.21	12.95
F7	2793.83	2760	2759	2760	-1.21	-1.25	-1.21	16.72	5.55	10.98