

구조-음향 특성을 고려한 편경의 최적 형상 설계

이승목* · 강민석* · 이진우**†

* 경기과학고등학교, ** 아주대학교 기계공학과

Optimal Shape Design of Pyeongyeong Considering Structural and Acoustical Characteristics

Seungmok Lee*, Minseok Kang* and Jin Woo Lee**†

* Gyeonggi Science High School,

**Division of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received December 5, 2013 ; Revised December 28, 2013 ; Accepted December 31, 2013)

Key Words: Optimal Shape Design(최적 형상 설계), Natural Frequency(고유주파수), Pyeongyeong(편경), Sound(소리), Sensitivity(민감도)

초록: 한국 전통 악기인 편경을 체계적으로 설계하기 위한 최적 형상 설계 알고리즘을 제안한다. 편경은 16 개의 서로 다른 크기의 경편으로 구성되어 있다. 각 경편의 첫 번째 진동 고유 주파수는 전통 소리 튜닝 방법에 의해 결정되는 특정 주파수에 일치하여야 하고, 두 번째와 세 번째 진동 고유 주파수들은 첫 번째 진동 고유 주파수와 단 3 화음 관계(1:1.498:2.378)를 가져야 한다. 제안한 설계 알고리즘의 핵심은 경편의 각 변의 길이 변화에 따른 고유 주파수의 민감도를 구하고, 이를 이용하여 위 두 가지 설계 목적에 부합하는 경편의 치수를 결정하는 것이다. 제안하는 방법으로 5 개의 서로 다른 경편의 형상 치수를 결정하였다. 그리고, 제작 과정에서 발생할 수 있는 오차를 보상하기 위해, 경편의 국부적인 두께 변화에 따른 진동 고유 주파수의 변화에 대해서도 살펴보았다.

Abstract: An optimal shape design algorithm is suggested to systematically design a traditional Korean musical instrument, the Pyeongyeong. The Pyeongyeong consists of 16 different chime stones called Gyeongpyeons. The first natural vibration frequency of each Gyeongpyeon must be adjusted to its target frequency, which is determined by the traditional sound tuning method. The second and third natural frequencies must be proportional to the first natural frequency with a specific ratio (1:1.498:2.378). The key idea in our suggested design algorithm is to use the sensitivity of natural frequencies to the variation in the length of each side of a Gyeongpyeon. The dimensions of five different Gyeongpyeons are determined by following the suggested algorithm. Changes in natural frequencies with respect to local thickness variation are closely investigated to compensate for errors that may occur during manufacturing.

1. 서론

편경(編磬)은 나무 지지대에 매단 경편(磬片)을 각 퇴(角槌)로 타격하여 소리를 발생하는 타악기로 한 층에 8개의 경편이 두 층으로, 총 16개의 경편으로 구성된다(Fig. 1 참조). 경편은 경석(磬石)이라는 돌을 기억자 모양으로 깎아 만든다. 타격 시 각 경편의 진동 고유 주파수(vibration natural frequency)들에 해당

하는 소리가 발생한다. 편경은 환경에 따른 진동 고유 주파수 변화가 매우 적어서 국악에서 조율을 담당하는 역할을 한다. 또한, 경편의 1차/2차/3차 진동 고유 주파수들이 단 3화음을 이루어 고유한 음색을 갖는다.⁽¹⁾ 단 3화음이란 주파수의 비가 1:1.189:1.498 또는 1:1.498:2.378인 세 음으로 구성된 화음을 의미한다.^(2,3) 각 경편의 1차 진동 고유 주파수는 국악 전통 조율법인 삼분손익법(三分損益法)⁽⁴⁾에 의해 정해진다.

현재 편경 제작 방법은 악학레범에서 내려오는 제한된 정보를 바탕으로 국내 유일한 장인⁽⁵⁾에 의해 수

† Corresponding Author, jinwoolee@ajou.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

작업으로 제작되고 있다. 장인의 오랜 경험과 능숙함으로 1차 진동 고유 주파수가 삼분손익법을 만족시키도록 각 경편의 형상 치수가 결정되지만, 1차/2차/3차 진동 고유 주파수들의 비율까지 정확히 만족시키지는 못한다.⁽¹⁾ 이로 인해 편경의 음색이 제작 할 때마다 달라지는 것으로 알려져 있다. 따라서, 각 경편의 1차 진동 고유 주파수와 1차/2차/3차 고유 주파수비를 함께 만족시키는 체계적인 형상 설계 방법이 필요하다.

그 동안 경편 형상에 따라 발생하는 소리에 관련된 연구가 몇몇 연구자에 의해 진행되었다. 유준희⁽⁶⁻⁸⁾는 경편의 진동 고유 모드들을 측정하였고, 기역자 형태가 조율에 어떤 영향을 미치는지에 대해 연구했다. 또한 성평모⁽⁹⁾ 등과 함께 조선시대 편경 유물들의 소리 변화를 분석하여 시대별 아악 황중 음고를 추정하는 연구를 진행했다. 윤지원과 김준⁽¹⁾은 편경의 음색을 분석하여 얇은 경편일수록 1차/2차/3차 진동 고유 주파수들의 비율이 단 3화음과 가까워지며, 두꺼운 경편일수록 불협화음적인 비율이 높다는 결론을 얻었다. 그러나 이와 같은 실험적 연구 결과를 이용해 편경을 체계적으로 설계 및 제작하고자 하는 연구는 지금까지 진행되지 않았다.

한편 기계공학에서 널리 사용되는 진동/음향 해석 기법을 한국 종 설계에 적용하는 연구가 진행 되어 오고 있다. 김석현⁽¹⁰⁾은 성덕대왕 신종의 맥놀이 지도 제작 기법에 대해 연구하였고, 정원태,^(11,12) 강연준⁽¹³⁾ 등과 함께 범종의 진동특성에 대해 연구하였다. 김철희,⁽¹⁴⁾ 이장무,⁽¹⁵⁾ 정석주⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 등은 한국 종의 진동특성에 대해 연구하였다. 박선미,⁽¹⁹⁾ 박인석⁽²⁰⁾ 등은 한국 종에서 덩쇠(커다란 사발모양의 돌기)의 영향에 대해 연구한 바 있다. 이와 같은 일련의 연구들을 통해 한국 종은 그 설계 및 제작 과정이 어느 정도 정립이 되어있다. 하지만 편경 제작에 대해서는 위와 같은 연구가 거의 진행되지 않아 제작 및 설계 과정이 정립되어 있지 않고 장인의 기술에 크게 의존하고 있다.

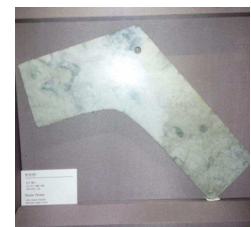
본 연구에서는 유한 요소 프로그램을 이용하여 경편의 형상을 체계적으로 설계하는 방법을 제시한다. 먼저, 경편 각 변의 길이 변화에 따른 1차/2차/3차 진동 고유 모드의 고유 주파수의 변화를 COMSOL Multi-physics 4.2를 이용하여 분석한다. 이 분석 결과를 이용하여, 경편의 형상에 따른 진동 고유 주파수의 변화를 간단한 수식으로 나타낸다. 이를 이용하여 삼분손익법과 단 3화음에 맞는 진동 고유 주파수를 갖도록 각 경편의 최적의 형상을 결정한다. 더불어, 제작 오차로 인한 고유주파수의 어긋남을 보상하기 위해 국부적인 두께 변화에 따른 1차/2차/3차 고유 주파수의 변화를 살펴본다.

Table 1 1st natural frequencies of each Gyeongpyeon determined by the Korean traditional tuning method⁽²³⁾

음명	주파수(Hz)	음명
황(黃)	532.62	C5
대(大)	563.21	C [#] 5
태(太)	593.34	D5
협(夾)	633.61	D [#] 5
고(姑)	667.50	E5
중(仲)	712.81	F5
유(蕤)	750.94	F [#] 5
임(林)	791.12	G5
이(夷)	844.81	G [#] 5
남(南)	890.00	A5
무(無)	950.41	A [#] 5
음(應)	1001.25	B5
청황(淸黃)	1065.23	C6
청대(淸大)	1126.41	C [#] 6
청태(淸太)	1186.67	D6
청협(淸夾)	1267.21	D [#] 6



(a) Pyeongyeong



(b) Gyeongpyeon

Fig. 1 Pyeongyeong and Gyeongpyeon

2. 설계 요구 조건

설계될 각 경편의 진동 특성은 다음 두 조건을 만족해야 한다. 첫 번째, 각 경편의 1차 진동 고유 주파수는 삼분손익법에 의해 결정되는 주파수를 만족해야 한다. 두 번째, 각 경편의 1차/2차/3차 진동 고유 주파수비는 단 3화음을 만족시켜야 한다. 더불어, 최종 설계된 경편의 형상 치수가 기존 경편의 모양을 유지해야 하므로 악학계법⁽²¹⁾에서 제시하는 치수를 초기 형상 치수로 사용한다.

2.1 삼분손익법

삼분손익법은 국악에서 기준 음을 결정하는 방법 중 하나이다. 먼저 모든 음의 기준이 되는 황중 율관(황중(C5, 532.62Hz)음을 발생하는 원통형 관)을 제

작한다. 이 황종 울관을 기준으로 삼분손일법과 삼분익일법을 여러 번 반복하여 음을 얻게 된다. 이때 삼분손일법은 울관의 길이를 2/3배로, 삼분익일법은 울관의 길이를 4/3배로 변화시키는 과정을 의미한다. 이와 같은 과정을 여러 차례 거치면 한 옥타브 안에서 서로 길이가 다른 12가지 울관을 얻을 수 있다. 최종적으로 각 울관에 해당하는 고유 주파수를 기준으로 정하게 된다. 이 방법을 따라 음들 사이 주파수 비율이 결정되어, 한 음의 음높이가 결정되면 나머지 음들의 주파수를 쉽게 결정할 수 있다. 이런 방법으로 각 경편의 1차 진동 고유 주파수가 결정된다.

지난 2011년 진행된 세종조 편경 복원작업에서는 남려가 890 Hz가 되도록 편경을 조율하되, 황종과 청황종 경편은 그 주파수를 17 cent 높여 조율했다. 여기서 cent란 주파수 비율이 $2^{1/1200}$ 인 단위를 말한다.⁽²²⁾ 즉, 17 cent 높여 조율했다는 것은 주파수를 $2^{17/1200}$ 배 높여 조율했다는 의미이다. 이렇게 구해진 각 경편의 1차 고유주파수를 Table 1에 수록하였다. 본 연구에서도 각 경편의 1차 고유 주파수가 이 수치와 일치하도록 설계할 것이다.

2.2 단 3 화음

단 3화음이란 화음의 기준 음에 대해 단 3도, 완전 5도 위의 음정관계를 갖는 음들이 모인 화음이다⁽³⁾. 평균율을 기준으로 하였을 때 단 3도는 고유 주파수가 1:1.189의 비율을 갖는 두 음 사이 관계를 의미하고, 완전 5도는 주파수가 1:1.498의 비율을 갖는 두 음 사이 관계를 의미한다⁽²⁾. 실제 편경에서는 각 경편의 1차 고유 주파수를 기준으로 완전 5도, 단 10도 위의 음정관계를 갖는 음들이 모여 있는데, 단 10도는 단 3도와 같은 화음으로 해석할 수 있어 이 역시 단 3화음이다.⁽²²⁾ 단 10도란 주파수가 1:2.378의 비율을 갖는 두 음 사이 관계를 의미한다.

3. 설계 변수에 따른 민감도 해석

3.1 사전 유한 요소 해석과 실험

경편 제작에 사용되는 경석은 혼합물로서 재료의 원산지에 따라 밀도, 영계수, 푸아송 비 등이 다른 것으로 알려져 있다. 따라서 유한 요소 해석에 필요한 경석의 밀도와 영계수, 푸아송 비를 결정하기 위해 길이 300 mm, 폭 60 mm, 두께 30 mm인 직육면체 경석 막대를 제작하였다(Fig. 2(a) 참조). 직접 측정된 질량과 길이(부피)로부터 경석의 밀도(density)를 계산하였다: $\rho = 2852 \text{ kg/m}^3$. 제작한 경석 막대에 대해 수행한 임팩트 해머 실험(Impact hammer test: Fig. 2(b)

참조)을 통해 얻은 주파수 응답함수(Fig. 3 참조)에서는 1차/3차 진동 고유 모드의 주파수를 쉽게 얻을 수 있었으나, 2차 진동 고유 모드를 나타내는 피크 주파수를 찾기 힘들었다. 같은 형상으로 제작된 유한 요소 모델의 1차와 3차 고유 주파수 값들이 실험 결과와 거의 일치하도록 영 계수(Young's modulus)와 푸아송비(Poisson ratio)를 결정하였다: $E = 98.0 \text{ GPa}$, $\nu = 0.32$. Fig. 4는 COMSOL에서 얻은 1차/3차 진동 고유 모드를 나타낸다.

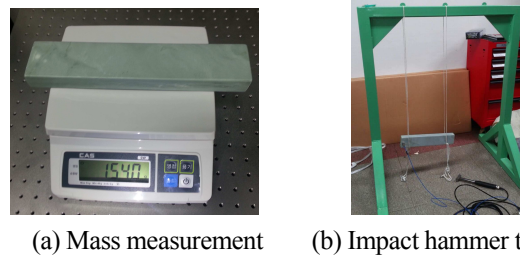


Fig. 2 Preliminary tests to obtain the density, Young's modulus and Poisson ratio of a chime

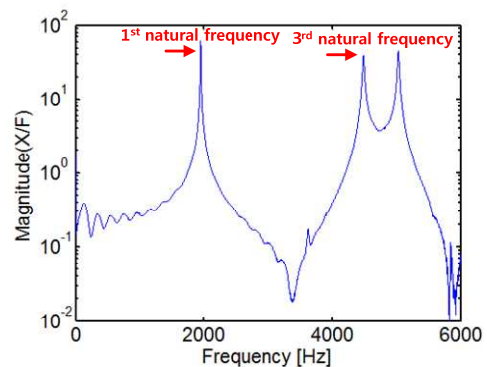
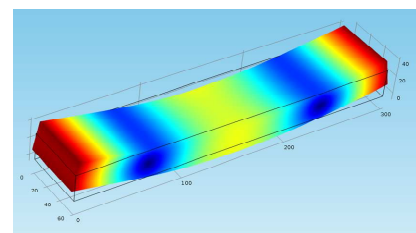
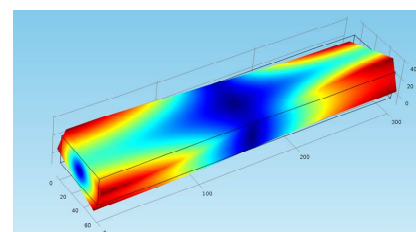


Fig. 3 Frequency response function



(a) 1st natural mode (1942.4 Hz)



(b) 3rd natural mode (4464.2 Hz)

Fig. 4 Natural modes of the specimen

3.2 각 변의 길이 변화에 따른 고유주파수 변화
 각 변의 길이 변화에 따른 경편의 1차/2차/3차 진동 고유 주파수 변화를 살펴보기 위해 Fig. 5에 보이는 해석 모델과 유한 요소 모델을 사용하였다. 유한 요소 해석 결과의 정확도를 높이기 위해, 충분히 작은 요소를 사용하였다. 사용경편의 두께를 균일하게 하고 각도를 고정시키면, 독립적으로 변화할 수 있는 변은 모두 5개(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)이다. 각 변에 대한 진동 고유 주파수의 민감도를 계산하기 위해, 각 변의 길이를 $\pm 4\text{mm}$ 범위 안에서 0.5mm 단위로 변화시켜 가며 고유 주파수 변화를 살펴보았다.

Fig. 6은 COMSOL로 구한 1차/2차/3차 진동 고유 모드를 나타낸다. 그리고, 각 변의 길이 변화와 1차/2차/3차 진동 고유 주파수 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보이듯이 해당 변의 길이가 증가하면, 1차/2차/3차 고유 주파수가 함께 증가하는 경우도 있고, 고유 모드의 차수에 따라 증가/감소 특성이 달라지기도 한다. 또한, 함께 증가/감소하더라도 증가/감소하는 정도가 모드 차수에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 이 결과를 설계에 사용하기 위해, Fig. 7의 각 그림에서 사용된 계산결과로부터 고유 모드 차수 별로 길이 변화와 고유 주파수 변화 사이의 관계식 (식 (1)과 (2) 참조)을 얻었다. i 번째 변의 길이 변화(Δl_i)와 j 차 고유 주파수의 변화(Δf_{ji}) 관계식의 계수(S_{ij})를 Table 2에 정리하였다.

$$\Delta f_{ji} = f_j(l_1, \dots, l_i + \Delta l_i, \dots, l_5) - f_j(l_1, \dots, l_i, \dots, l_5) \quad (1)$$

$$\Delta f_{ji} = S_{ij} \Delta l_i \quad (j=1,2,3, i=1,2,3,4,5) \quad (2)$$

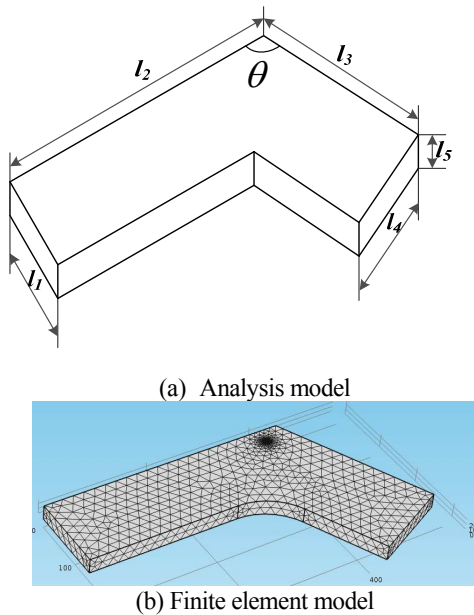


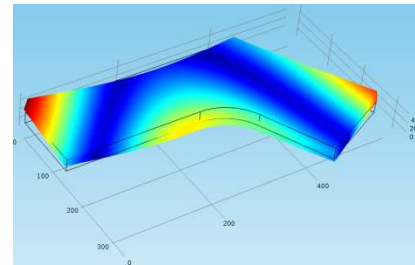
Fig. 5 Analysis model and finite element model for vibration analysis on a Gyeongpyeon ($\theta=114^\circ$)

3.3 국부적인 두께 변화에 따른 고유주파수 변화
 제작 과정에서 발생할 수 있는 각 경편의 진동 고유 주파수 오차를 보완하는 미세조율 과정이 필요할 수 있다. 본 연구에서는 제작된 경편의 두께를 국부적으로 조절하여 정확한 음정을 맞추는 방법을 고려했다. Fig. 8과 같이 경편의 윗면을 20개의 구역으로 나누고, 각 구역의 두께 변화에 따른 1차/2차/3차 고유 주파수의 변화를 살펴보았다. 각 구역의 가로와 세로의 길이는 각각 46mm 와 54.5mm 이다.

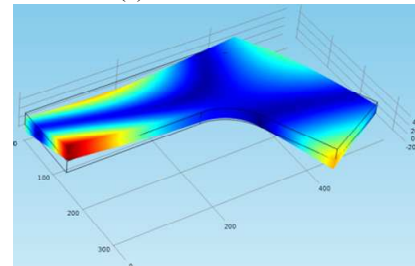
n 번째 구역의 국부적인 두께가 Δh_n 만큼 변화했을 때, j 차 고유 주파수가 변화한 값 Δf_{jn} 를 계산하였다. 계산된 단위 두께당 고유주파수 변화 $\Delta f_{jn}/\Delta h_n$ 를 Fig. 9에 나타내었다. 국부적인 두께 변화가 발생하는 위치에 따라 1차/2차/3차 고유 주파수가 함께 증가/

Table 2 Coefficients in the relationship equation (2)

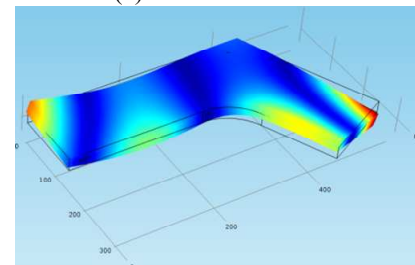
$S_{ij} = \frac{\Delta f_{ji}}{\Delta l_i} [\text{Hz/mm}]$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$
$j=1$	-0.1032	-1.8061	-0.7752	-0.4698	20.116
$j=2$	-2.4776	-1.8264	-1.7890	0.1302	29.078
$j=3$	1.2309	-3.3172	-3.1801	-1.9459	44.123



(a) 1st natural mode



(b) 2nd natural mode



(c) 3rd natural mode

Fig. 6 Vibration modal analysis results for a Gyeongpyeon

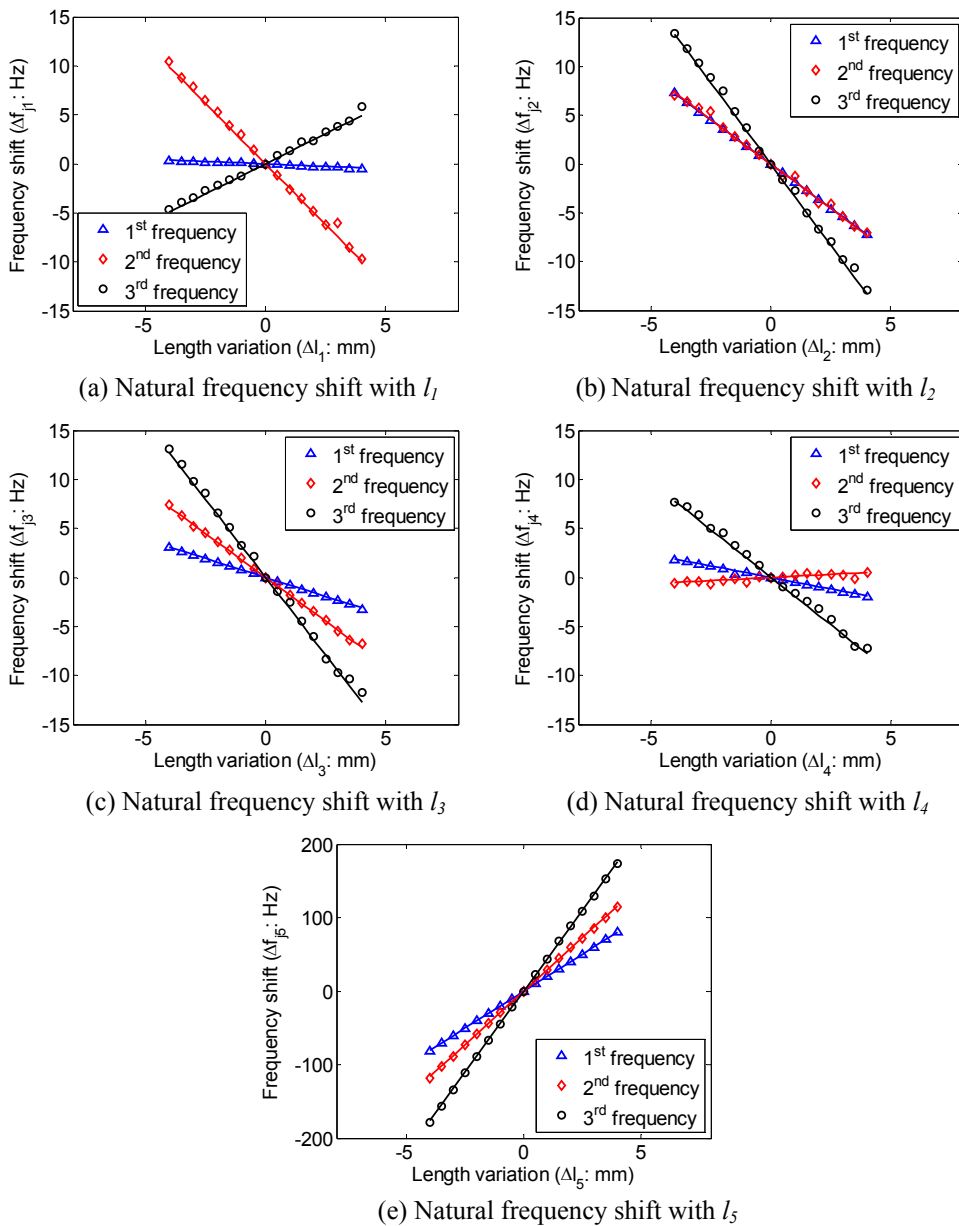


Fig. 7 Vibration natural frequency shift with each side length

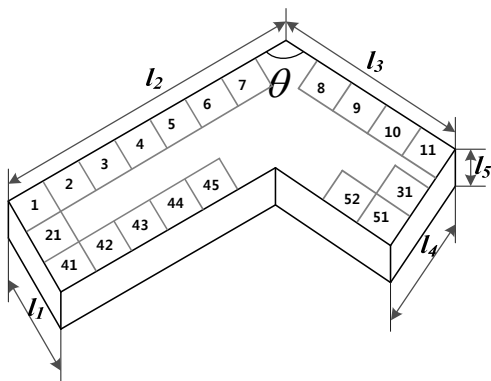


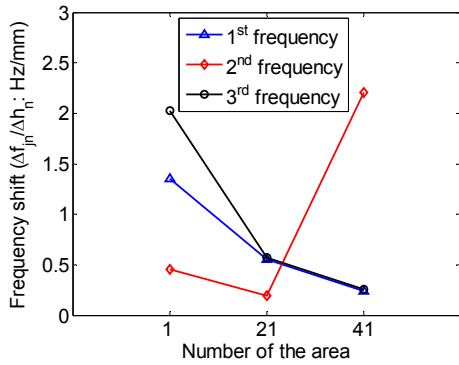
Fig. 8 Analysis model to investigate the effect of local thickness variation on natural frequencies

감소하기도 하고, 특정 주파수만 크게 변화하는 위치가 존재함을 알 수 있다.

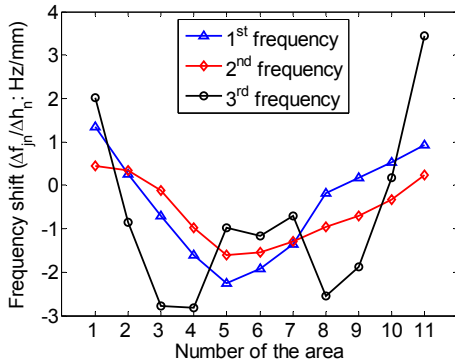
4. 경편 형상 설계

4.1 설계 알고리즘

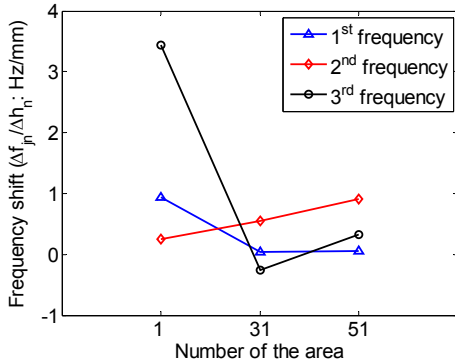
전체 설계 과정을 Fig. 10에 나타내었다. 먼저 약학레법에 기록된 형상 치수($l_1=142.41$ mm, $l_2=442.38$ mm, $l_3=296.94$ mm, $l_4=157.56$ mm) 를 초기 형상 치수로 사용하여 각 경편의 형상 설계를 시작한다. 먼저 두께(l_5)만 조절하여 경편의 1차 고유 주파수가 Table 1에 제시된 목표 값을 갖게 한다. 그 다음에



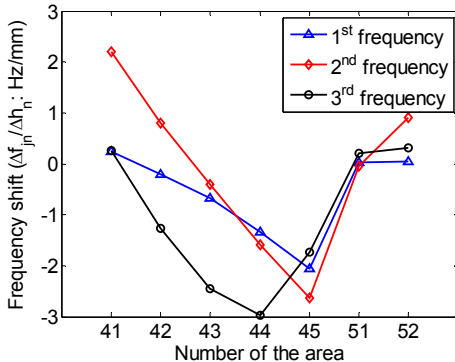
(a) Natural frequency shift with thickness variation in area 1, 21, 41



(b) Natural frequency shift with thickness variation in area 1~11



(c) Natural frequency shift with thickness variation in area 1, 31, 51



(d) Natural frequency shift with thickness variation in area 41~45, 51, 52

Fig. 9 Relationship between natural frequency shift and local thickness variation

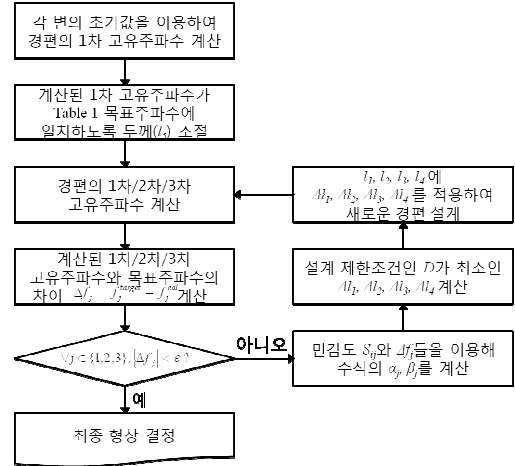


Fig. 10 Design algorithm for Gyeongpyeon

1차/2차/3차 고유 주파수가 단 3화음을 갖도록, 네 변의 길이(l_1, l_2, l_3, l_4)를 조절한다. 최종 변의 길이를 구하기 위해서는 몇 번의 반복 계산이 필요한데, 다음과 같은 방법을 사용한다.

각 변의 길이에 대한 1차/2차/3차 고유 주파수의 민감도는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 행렬식 (3)은 4개의 미지수 ($\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$)와 3개의 독립된 식으로 구성된 선형 연립 방정식이다. Δf_j 는 현재 변의 길이를 사용하여 구한 고유 주파수(f_j)와 이상적인 단 3화음이 되기 위한 목표 주파수의 차이를 나타낸다. 그 주파수 차이를 보상하기 위해 필요한 i 번째 변의 길이 변화를 Δl_i 로 나타내고, S_{ij} 는 Table 2의 값을 사용한다. 가우스 소거법을 이용하면, 식(3)의 행렬식은 식 (4)과 같은 형태로 나타낼 수 있다. 이 때 α_j 와 β_j 는 S_{ij} 와 Δf_j 들에 의해 결정되는 상수이고, 실제 설계 과정에서는 구체적인 치수를 대입하여 계산한다.

$$\begin{pmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{41} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} & S_{42} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{43} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \\ \Delta l_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta l_1 = \alpha_1 \Delta l_4 + \beta_1 \quad (4a)$$

$$\Delta l_2 = \alpha_2 \Delta l_4 + \beta_2 \quad (4b)$$

$$\Delta l_3 = \alpha_3 \Delta l_4 + \beta_3 \quad (4c)$$

그리고 약학계법에서 제시하는 치수에서 가능한 크게 벗어나지 않도록 하기 위해 각 변의 치수 변화가 최소가 되게 하는 조건(식 (5)참조)을 이용한다.

$$D = \Delta l_1^2 + \Delta l_2^2 + \Delta l_3^2 + \Delta l_4^2 \quad (5)$$

반복 계산에서 해의 수렴 여부를 판단하기 위해, 식 (6)을 사용한다.

$$|\Delta f_j| < \varepsilon \quad (6)$$

Δl_4 를 조금씩 변화(예: 0.5mm간격) 시켜가며 식 (5)와 같이 정의된 D 가 최소가 되는 Δl_4 을 찾고, 식 (4)를 이용하여 $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ 를 구해서 새로운 l_1, l_2, l_3, l_4 를 결정한다. 이렇게 결정된 각 변의 길이로 새로 만들어진 편경의 1차/2차/3차 고유 주파수를 계산한다. 새로 계산된 고유 주파수와 이상적인 단 3화음이 되기 위한 목표 주파수의 차이를 계산하여 식 (6)을 만족하는지 확인한다. 만족할 경우 최종 변의 길이가 결정되고, 그렇지 않을 경우에는 새로운 변의 길이를 찾는 과정이 반복된다.

4.2 설계 결과

편경 설계 알고리즘(Fig. 10 참조)을 따라, 5개의 편경(황종, 대려, 태주, 협종, 고선)의 최적 형상을 결정하여 Table 3에 정리하였다. 계산 과정에서 식 (4)의 Δl_4 를 ± 15 mm범위 내에서 0.5 mm 간격으로 변화시키면서 D 의 최소값을 구했으며, ε 을 1 Hz로 설정하였다. 얻어진 최종 편경의 1차/2차/3차 고유 주파수와 주파수간의 비를 Table 4에 정리하였다. 표에서 Δf_j 는 설계된 각 편경의 j 차 고유 주파수와 j 차 목표 주파수 사이의 차이를 나타낸다. 설계된 5개 편경의 고유 주파수 오차는 모두 1.0 Hz 미만이었으며, 주파수 비율도 단 3화음을 이룬다.

Table 3 Dimensions of 5 Gyeongpyeons obtained by following the design algorithm in Fig. 10 [Unit: mm]

음 이름	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
황종	150.80	445.73	289.57	152.56	25.06
대려	150.82	446.17	288.34	152.06	27.12
태주	150.49	447.33	285.99	152.06	28.62
협종	150.40	448.64	282.91	151.56	30.62
고선	149.21	449.19	282.93	148.31	32.33

Table 4 Vibration characteristics of 5 Gyeongpyeons obtained by following the design algorithm in Fig. 10 [Unit: Hz]

	f_1	f_2	f_3	Δf_1	Δf_2	Δf_3	주파수 비율 ($f_1:f_2:f_3$)
황종	532.63	798.35	1266.68	-0.01	-0.32	0.11	1:1.499:2.378
대려	563.53	843.42	1339.77	-0.32	0.27	0.67	1:1.497:2.377
태주	593.36	889.19	1411.38	-0.02	-0.37	0.77	1:1.499:2.379
협종	633.31	949.48	1508.25	0.3	-0.33	-0.26	1:1.499:2.382
고선	667.03	1000.26	1589.50	0.47	-0.345	-0.85	1:1.500:2.383

편경 제작 전문가에 의하면, 실제 제작시에는 1 mm이하의 오차는 충분히 발생할 수 있기에 Table 3에 제시된 수치대로 정확히 제작은 곤란하다고 한다. 따라서, 이런 오차로 인한 1차/2차/3차 고유 주파수가 Table 4에서 계산된 주파수 비율을 만족시키지 못할 경우에는 Fig. 9에 도시한 국부적인 두께 변화에 따른 1차/2차/3차 고유 주파수의 상대적인 변화를 고려하여 해당 단면을 그라인더(grinder)등을 이용하여 연삭하면 오차 발생한 것만큼 보상할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 진동/음향 해석/설계 기법을 전통 국악기인 편경에 적용하여 체계적으로 편경을 설계하는 방법을 제시하였다. 편경의 각 변 길이에 대한 진동 고유 주파수 민감도를 유한 요소 모델을 이용하여 계산하고, 이를 이용한 반복 설계 알고리즘을 제안하여, 설계 요구 조건을 만족시키는 5개 편경(황종부터 고선까지)의 최적 형상을 결정하였다. 또한 제작 과정에서 발생할 수 있는 제작 오차를 보상하기 위해 국부적인 두께 변화에 따른 고유 주파수의 변화 정도를 계산하여, 실제 제작의 정확도를 높이기 위한 자료를 제공하였다. 실제 적용에는 보다 정밀한 검증과정이 필요하겠지만, 현재 연구 결과가 편경의 최적 형상 설계에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 다양한 재질과 모든 음에 대해 현재와 같은 연구가 진행되어 나간다면 지금보다 더 좋은 음색을 갖는 편경을 설계해 계량된 편경을 실제로 제작할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2013학년도 경기과학고등학교 자율 연구: 심화 R&E 사업에 의해 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Yoon, J. W. and Kim, J., 2010, "A Study on the Timbre of Pyeongyoung," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 13, No. 11, pp. 1728~1738.
- (2) Paik, B. D., 2006, *College Music Theory* (3rd Edition), Hyundai Music Publication, Seoul, p. 21.
- (3) Paik, B. D., 1998, *Theory of Harmony*, Sumoondang, Seoul, pp. 40~43.
- (4) Lee, S. C., Kweon, D. W., Paik, I. H. and Hwang, H. J., 2008, *Introduction to the Traditional Music*(5th Edition), Poongnam, Seoul, pp. 18~26.

- (5) Lee, S. H. and Kim, H. G., 2008, *Pyeonjong Pyeongyeong Instrument Craftsmen 'Hyungon Kim'*, Korea Research Information, Paju
- (6) Yoo, J. H. and Rossing, T. D., 2006, "Geometrical Effects on the Tuning of Chinese and Korean Stone Chimes," *JASA Express Letters*, pp. 78~83.
- (7) Yoo, J. H., 2004, "Tuning Effect of L-Shape on Pyeon-Gyoung," *Proceedings of the Acoustical Society of Korea 2004 Spring Annual Conference*, Vol. 23, No. 2(a), pp. 287~290.
- (8) Yoo, J. H., 2006, "Vibrational Modes of Pyeongyeong," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 25, No. 3, pp. 121~128.
- (9) Yoo, J. H., Park, J. W., Bae, D. S., Kim, H. J., Sung, K. M., Noh, J. U. and Koh, H. W., 2011, "Estimation of Nominal Frequency of Whangjonggeum by Acoustical Analysis of Old Pyeongyongs," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 30, No. 8, pp.421~427.
- (10) Kim, S. H., 2003, "Beat Map Drawing Method of Bell Type Structures and Beat Maps of the King Seong-Deok Divine Bell," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 626~636.
- (11) Jeong, W. T., Kang, Y. J. and Kim, S. H., 2010, "An Experimental Study on the Influence of the Internal Cavity and Gap on the Bell Acoustics," *Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 822~827.
- (12) Jeong, W. T., Kang, Y. J. and Kim, S. H., 2010, "Acoustic Transmission Characteristics of Korean Temple Bell through the Partially Opened Area," *Proceedings of the KSME 2010 Spring Annual Conference: Dynamics and Control*, pp. 71~72.
- (13) Kang, Y. J., Jeong, W. T., Kim, J. S. and Kim, S. H., 2010, "Acoustic Transmission Characteristics of the Structural-Acoustic Coupled System for Temple Bell," *Proceedings of the KSNVE 2010 Spring Annual Conference*, pp. 622~623.
- (14) Kim, C. H., Lee, J. M. and Kang, Y. J., 1999, "The Sound Field Reconstruction of a Korean Bell Using an Error Minimization Scheme in the BEM-Based Acoustical Holography," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 131~140.
- (15) Lee, J. M., Cheon, S. H. and Kim, S. H. and Yum, Y. H., 1989, "A Study on the Vibrational Characteristics of Korean Bells," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, Vol. 13, No. 3, pp. 397~403.
- (16) Chung, S. C., Kong, D. C. and Yum, Y. H., 1986, "Modal Analysis of the Bell Type Sheel with Thickness and Asymmetric Effects," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 10, No. 3, pp. 383~391.
- (17) Chung, S. C., Kim, D. M. and Yum, Y. H., 1984, "An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of the Bell Type Structure," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 8, No. 4, pp. 368~374.
- (18) Jeong, S. C., 1996, "A Study on Dynamic and Acoustic Behavior of Bell Type Stricture Using Finite Element Method," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 447~456.
- (19) Park, S. M., Park, I. S. and Lee, J. H., Kim, S. H., 2012, "Vibrational mode extraction using ODS in a Korean bell," *Proceedings of the KSME 2012 Spring Annual Conference*, pp. 421~424.
- (20) Park, I. S., Lee, J. H. and Ann, Y. C., Park, S. M. and Kim, S. H., 2012, "Effect of an Artificial Dumshoi on the Beat Property of a Korean Bell," *Proceedings of the KSME 2012 Fall Annual Conference*, pp. 201~204.
- (21) Lee, H. G., 2000, *Illustrated Text on Traditional Music*, National Center for Korean Traditional Music, Seoul, pp. 360~367.
- (22) Kim, H. I., 2005, *Basic Theory of Music, Sumoondang*, Seoul, pp.186-187, pp. 51~53
- (23) Lee, D. B., 2011, *Research report for the Traditional musical instruments 2011*, National Center for Korean Traditional Music, Seoul, pp. 194~207.