

첼로 현의 진동분석

Analysis of String Vibration in Cello

최 기 상*
(Gi Sang Choi*)

*서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
(접수일자: 2008년 9월 1일; 채택일자: 2008년 11월 17일)

바이올린, 비올라, 첼로, 콘트라베이스 등 비올족 현악기는 현의 진동이 브리지를 통해 몸체로 전달되고 공명을 일으켜 큰 소리를 내게 되어 있다. 즉 현악기에서는 현의 진동이 음원이 되며 현의 재질, 구조와 경계조건이 음색에 결정적 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 첼로에서 한쪽 끝은 고정되고 다른 끝은 손가락에 의해 운지된 현의 진동을 양 끝이 고정된 개방현의 진동과 비교하여 해석하고 실험하였다. 해석과 실험의 결과는 운지된 현의 진동이 양단이 고정된 개방현의 진동과 크게 다른 것을 보여준다. 또 운지된 현에서 손가락 끝과 현의 접촉 조건에 의해서도 음색이 크게 달라지므로 접촉조건을 조절함으로써 악기의 음색을 바꿀 수 있음을 설명해 준다.

핵심용어: 첼로, 현의 진동

투고분야: 음악음향 및 음악심리 분야 (8.1)

In viol family string instruments vibration of string is transmitted to the front plate through bridge to cause resonance of the instrument body. Therefore, the vibration of string is the source of sound and the properties, the structure, and the boundary conditions of string are expected to have significant effect on the sound. In this study the vibration of strings in cello when one end is fixed and the other end is pressed with finger tip is studied and compared with the case of the fixed-fixed ends. The result of analysis and experiment shows that the vibration of the string that is fixed at one end and pressed with finger tip at the other end is significantly influenced by the contact condition of the string with the finger tip and also quite different from that of the fixed-fixed string. It also suggests that the sound of a cello can be significantly influenced by the contact condition between the string and the finger tip in the fingered string.

Keywords: Cello, Vibration of String

ASK subject classification: Musical Acoustics and Psychoacoustics (8.1)

I. 서론

바이올린, 비올라, 첼로, 콘트라베이스 등 비올족 현악기는 연주 시 활이 미끄러지면서 현을 진동시키면, 현의 진동은 브리지의 진동을 일으키고, 이는 다시 앞판으로 전해져서 악기 전체를 울리게 되며, 몸통의 진동은 주위의 공기를 진동시켜 소리를 내게 된다. 이때 몸통은 소리를 직접 방사하며, 또한 몸통이 공진하게 됨에 따라 소리를 증폭시키는 역할도 하게 된다. 그림 1은 대표적인 비올족 현악기인 첼로의 각 부분을 보여준다. 첼로는 공명을 일으키는 몸통, 현과 현을 지지하기 위한 목(neck),

튜닝페그(tuning peg), 테일피스(tailpiece), 브릿지(bridge) 등의 주요 부분으로 구성되어 있다. 이 중 몸통은 앞판과 뒷판 그리고 리브(rib)로 구성된다. 앞판은 스프러스(spruce)를 조각해서 아치형태로 만들어지며 2개의 f 홀을 가지고 베이스 바(base bar)에 의해서 강화되고 사운드 포스트(sound post)에 의해 지지된다. 앞판의 테두리는 단풍나무(maple) 소재의 6개의 블럭으로 구성된 리브(rib)에 접착되어 있다. 뒷판도 아치 형태로 조각된 단풍나무 소재이며 리브에 접착되어 있다. 사운드 포스트는 앞판과 뒷판 사이에 끼워져서 앞판의 진동을 뒷판에 직접 전달하는 역할을 하며 필요에 의해 그 위치를 조절할 수 있다. 첼로의 대체적인 크기는 몸통 길이가 75 cm, 개방현의 길이는 69 cm 정도가 된다 [1-3].

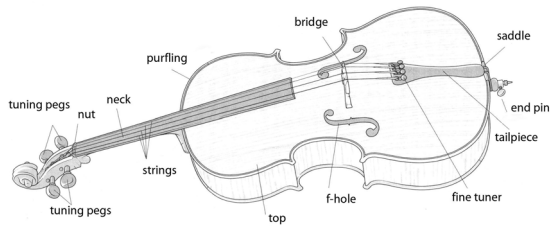


그림 1. 첼로의 부품들
Fig. 1. Cello parts.

현악기의 소리에 대한 평가는 주관적이기 때문에 일반적인 척도를 제시하기는 어려우나, 대체로 공명이 크고, 오래 지속되며 주파수 특성이 좋아야 한다. 현악기의 공명은 몸통의 진동역학과 관련되고, 악기의 음색은 몸통과 현의 음향학적 특성에 의해 크게 좌우되지만 기본적으로 현의 진동이 소리의 원천이므로 현이 악기의 음색결정에 가장 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다.

현은 단위길이당 질량(밀도)이 클수록, 또 인장강도가 낮을수록 낮은 음을 낸다. 따라서 첼로에서 A₃(기본주파수: 220 Hz), D₃(146.8 Hz), G₂(98.0 Hz), C₂(65.4 Hz) 등의 비교적 낮은 음을 내기 위하여 현은 상대적으로 인장강도는 유지하고 밀도는 높게 만들어져야 하며, 가는 코어(core)에 와인딩 재료를 감아서 제작되는 것이 보통이다. 이렇게 와인딩된 현의 인장강도는 코어의 인장강도와 거의 비슷하지만 단위길이당 밀도는 높아지게 된다 [3]. 현은 전통적으로 양의 내장을 말린 거트(gut)로 만들어졌으나 20세기에 들어와서 재료기술이 발전하면서 코어로는 스틸이 널리 쓰이게 됐으며 최근에는 거트와 비슷한 기계적 성질을 갖는 합성재료도 쓰이고 있다. 또, 와인딩 재료로는 알루미늄, 스틸, 은, 텅스텐(wolfam) 등이 쓰인다 [3-4].

그림 2는 첼로 현의 경계조건을 보여준다. 현의 한 쪽 끝은 그림 2 (a)와 같이 테일피스에 고정되어 브릿지에 의해 받쳐지고, 다른 쪽 끝은 튜닝 페그에 감기고 너트 위로 받쳐져서 양단이 고정된 것으로 볼 수 있지만 연주 중에 다양한 높이의 음을 내기 위해서는 현의 적절한 위치를 손가락 끝으로 눌러주어야 한다. 즉, 그림 2 (b)와 같이 한 쪽 끝은 너트 위로 고정되지만 다른 한쪽 끝은 손가락에 의해 운지된다. 이 경우 손가락 끝으로 눌러진 쪽은 경계조건을 고정된 것으로 볼 수 없으며, 현의 진동이 양단이 고정된 경우와 현저히 달라지게 된다. 실제 비교 시청하면 손가락으로 운지한 경우 훨씬 부드러운 소리를 내고 비브라토(vibrato)가 가능하기 때문에 많은 연주자들이 같은 높이의 음이라도 개방현 보다 손가락 끝으로 운지해서 내는 것을 선호한다.

바이올린 몸통의 진동학적 해석은 이미 여러 연구자에 의해 수행된 바 있다 [2-3, 5-8]. 비올족 현악기에서 현의 진동에 관해서도 여러 연구자들의 연구가 선행되었으며 [9-11] Schelleng [12], McIntyre [13], Cremer [3]는 이러한 연구의 결과들을 잘 요약한 바 있다. 현의 진동에 관한 연구는 대개 현이 브릿지와 너트사이에 고정되어 있는 것으로 보고 모드해석을 하였으며, 이러한 방법은 현의 진동의 전형적인 패턴을 잘 보여준다. 한편 Inacio [14]의 연구는 양단이 고정된 현과 악기 몸통의 진동을 동시에 고려하여 모드해석을 하였다. 그러나 실제 비올족 현악기 연주 시에 개방현으로 소리를 내기보다는 주로 손가락으로 운지된 현으로 소리를 내게 되는데, 운지된 현과 개방현의 진동을 비교 분석하려는 시도는 거의 없었다. 현을 운지한 경우 경계조건을 정확하게 모델링하는 것이 어렵다는 것도 그 이유 중의 하나일 것이다.

본 연구에서는 양단이 고정된 경우와 한 끝은 고정되고 다른 끝은 손가락으로 운지된 현의 진동을 비교 분석하였다. 손가락 끝으로 눌러진 현의 경계조건을 종방향으로 그림 2 (c)와 같이 선형의 탄성과 댐핑이 작용하는 것으로 모델링하고 이 경우 현의 진동특성을 양단이 고정된 개방현의 경우와 수치해석을 통하여 비교 분석하였으며, 실제로 실험을 통하여 두 경우의 진동특성 차이를 측정하여 보았다. 마지막으로 이러한 결과들로부터 첼로 연주 시 운지의 효과를 알아 보고자 한다.

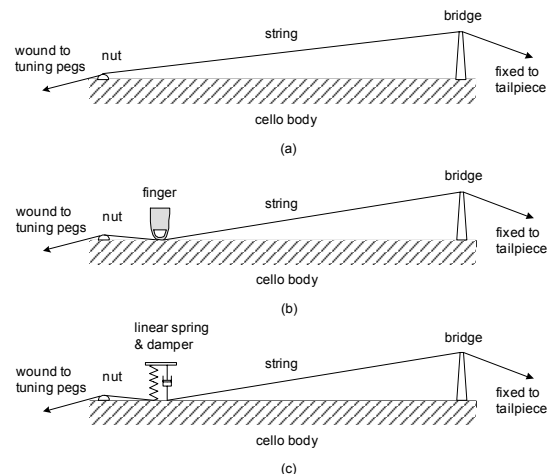


그림 2. 첼로 현의 경계조건: (a) 양 끝이 고정된 개방현, (b) 브릿지 쪽의 한 끝이 고정되고, 너트 쪽의 끝이 운지된 현, (c) (b)의 경우에 대한 간단한 모델

Fig. 2. The boundary conditions for cello string: (a) Both ends are fixed, (b) One end at bridge is fixed whilst the other end is fingered, (c) A simple model for the case of (b)

II. 현의 진동 해석

탄성체인 현의 횡진동 $y(x,t)$ 는 T, ρ, t, x 가 각각 장력, 밀도 (단위길이 당 질량), 시간, 그리고 종방향의 좌표일 때 다음과 같은 1차원 파동 방정식에 의해 해석할 수 있다 [15].

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad c^2 = \frac{T}{\rho} \tag{1}$$

현이 $x = 0$ 에서 고정되고, $x = L$ 에서 횡방향으로 선형의 탄성과 댐핑 (탄성계수 K_m , 댐핑계수 R_m) 이 작용하는 경우에 대하여 경계조건을 다음과 같이 모델링한다.

$$y(0,t) = 0, \quad \forall t \tag{2}$$

$$T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) (L,t) + R_m \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) (L,t) + K_m y(L,t) = 0, \quad \forall t \tag{3}$$

이 경우 현의 한쪽 끝에 선형의 댐핑이 작용하기 때문에 현은 시간에 대해 정현파 형태의 진동을 하면서 동시에 이러한 진동은 지수적으로 감쇠한다고 볼 수 있을 것이다. 또한, 댐핑에 의한 감쇠는 현의 경계점에서 일어나므로 현의 진동은 $0 < x < L$ 에서 파동방정식 (1)을 만족시켜야 한다. 이러한 해는

$$y(x,t) = A \exp(j(at - bx)) + B \exp(j(at + bx)) \tag{4}$$

$$a = \omega_i + j\alpha_i \tag{5}$$

$$b = \frac{a}{c} = \frac{1}{c}(\omega_i + j\alpha_i) \equiv \omega_x + j\alpha_x \tag{6}$$

의 형태가 된다 [15]. 이러한 해에 $x = 0$ 에서의 경계조건 (2)를 적용하면

$$y(x,t) = -2jA \exp(jat) \sin(bx) = C \exp(jc bt) \sin(bx) \tag{7}$$

이 된다. 또, $x = L$ 에서의 경계조건 (3)을 적용하면

$$\frac{Ta}{c} \cos \frac{aL}{c} + (K_m + jR_m a) \sin \frac{aL}{c} = 0 \tag{8}$$

이며 (8)은 다음 두 식과 같이 다시 쓰일 수 있다.

$$\frac{T\omega_i}{c} + \frac{T\alpha_i}{c} \tan \frac{\omega_i L}{c} \tanh \frac{\alpha_i L}{c} + (K_m - R_m \alpha_i) \tan \frac{\omega_i L}{c} - R_m \omega_i \tanh \frac{\alpha_i L}{c} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{T\alpha_i}{c} - \frac{T\omega_i}{c} \tan \frac{\omega_i L}{c} \tanh \frac{\alpha_i L}{c} + (K_m - R_m \alpha_i) \tanh \frac{\alpha_i L}{c} + R_m \omega_i \tan \frac{\omega_i L}{c} = 0 \tag{10}$$

(9)와 (10)은 α_i 와 ω_i 에 관한 연립비선형대수방정식이다. 일정한 장력, 현의 길이, 현의 밀도, 그리고 경계점에서의 탄성계수와 댐핑계수 T, L, c, K_m, R_m 에 대하여 (9), (10) 두 식을 만족시키는 특성치 (eigenvalue) $(\alpha_i)_i$ 와 $(\omega_i)_i, i = 1, 2, 3, \dots$ 를 구할 수 있다면 $a_i = (\omega_i)_i + j(\alpha_i)_i$ 와 $b_i = a_i / c$ 가 결정되며, 파동방정식 (1)과 경계조건 (2-3)을 만족시키는 일반해는

$$y(t,x) = \sum C_i \exp(ja_i t) \exp(jb_i x) \tag{11}$$

가 된다. 여기서 상수 C_i 는 초기조건으로부터 결정할 수 있다.

III. 수치해석

운지된 첼로 현의 진동 특성을 알아보기 위해 수치해석을 실시하였다. 구체적으로 한쪽 끝이 고정되고 다른 끝에는 선형의 탄성과 댐핑이 작용하는 탄성현이 진동할 때 진동의 모드가 양쪽 끝이 다 고정된 경우와 어떻게 달라지는지를 알아보려고 하였다. 또 한 쪽 끝에 탄성과 댐핑이 작용하는 경우 그 곳에서의 횡방향 탄성계수 K_m 과 댐핑계수 R_m 이 진동의 주파수 ω_i 와 감쇠계수 α_i 에 미치는 영향도 알아보았다.

운지된 현을 모델링한 한 끝은 고정되고 다른 한 끝에는 횡방향으로 선형의 탄성과 댐핑이 작용하는 현의 진동에 대하여 특성방정식 (9), (10)을 만족시키는 특성치를 Matlab을 이용한 수치해석을 통하여 구했다. 현의 길이는 69 cm로 고정하였고, 표 1의 첼로 현 밀도데이터 [3]와 표 2의 장력데이터 [14]를 이용하였다.

양 끝이 고정된 현에 대한 파동방정식 (1)의 일반해는

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} t + B_n \sin \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} t \right) \sin \frac{n\pi x}{L} \tag{12}$$

가 되며, Spirocore A₃ 현의 경우 기본주파수 (fundamental frequency)는

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} = \frac{1}{2 \times 0.69(m)} \sqrt{\frac{14.8 \times 9.81(kg \cdot m / sec^2)}{1.58 \times 10^{-3}(kg / m)}} \quad (13)$$

$$= 220(Hz)$$

가 된다 [2, 15].

그러나 한 끝은 고정하고 다른 한 끝에는 횡방향으로 선형의 탄성과 댐핑이 작용하는 경우에 대한 수치해석의 결과는 표 3에 나타난 바와 같이 현의 양 끝이 고정된

경우와 진동의 특성이 현저하게 달라짐을 보여준다. 양 끝이 고정된 경우 모든 모드주파수는 기본 모드주파수의 정수 배 형태가 되는데 비해서 한 끝은 고정되고 다른 한 끝에는 선형의 탄성과 댐핑이 작용하는 경우 모드주파수가 정확하게 기본주파수의 정수배 형태로 나타나지 않고 낮은 주파수에서 높은 주파수까지 불규칙적으로 분포하며, 각 모드의 댐핑계수도 상대적으로 더 큰 차이를 보이며 불규칙적으로 분포하는 것을 알 수 있다. 이 점은 운지된 현의 진동이 고정된 현에 비하여 다양한 모드가 얽혀서 나타나는 특징을 설명한다. 또한 이 점이 운지된 현의 소리를 개방현에 비하여 풍부하게 해주는 한 요인이라고 생각된다.

표 1. Thomastik-Infeld 첼로 현의 밀도 (단위 길이 당 질량) [4]
Table 1. Density for Thomastik-Infeld cello strings [4].

String	Dominant (Nylon core)		Spirocore (Spiral steel core)		Precision (Solid steel core)	
	Model No.	Density	Model No.	Density	Model No.	Density
A ₃	142	1.49 g/m	825	1.58 g/m	90	1.58 g/m
D ₃	143	2.70 g/m	827	3.42 g/m	93	3.46 g/m
G ₂	144	5.58 g/m	828	7.51 g/m	95	7.67 g/m
C ₂	145	12.28 g/m	829	16.26 g/m	98	16.86 g/m

표 2. Thomastik-Infeld 첼로 현의 권장 장력 [4]
Table 2. Recommended tension for Thomastik-Infeld cello strings [4].

String	Dominant (Nylon core)		Spirocore (Spiral steel core)		Precision (Solid steel core)	
	Model No.	Tension	Model No.	Tension	Model No.	Tension
A ₃	142	14.0 kgf	825	14.8 kgf	90	14.8 kgf
D ₃	143	11.3 kgf	827	14.3 kgf	93	14.5 kgf
G ₂	144	10.4 kgf	828	14.0 kgf	95	14.3 kgf
C ₂	145	10.2 kgf	829	13.5 kgf	98	14.0 kgf

표 3. 고정된 장력, 현의 길이, 현의 밀도, 그리고 경계점에서의 탄성계수와 댐핑계수 ($T = 14.8kgf$, $L = 0.69m$, $\rho = 1.49 \cdot 10^{-3}kg/m$, $K_m = 1.0kN/m$, $R_m = 2.0kN \cdot sec/m$)에 대하여 두 특성방정식 (9, 10)을 만족시키는 특성치 ω_t 와 α_t 그리고 ω_x 와 α_x
Table 3. Eigenvalues ω_t , α_t and ω_x , α_x that satisfy the two characteristic equations (9, 10) for fixed tension, length, density, spring constant, and damping coefficient ($T = 14.8kgf$, $L = 0.69m$, $\rho = 1.49 \cdot 10^{-3}kg/m$, $K_m = 1.0kN/m$, $R_m = 2.0kN \cdot sec/m$).

NO	1	2	3	4	5	6	7	8
$\omega_t/2\pi$	231	315	458	699	714	870	1210	1278
α_t	0.47	0.23	1.90	0.062	0.25	1.26	0.34	0.42
$\omega_x/2\pi$	0.762	1.039	1.511	2.306	2.356	2.870	3.992	4.216
α_x	0.00155	0.00076	0.00627	0.00020	0.00082	0.00416	0.00112	0.00139

NO	9	10	11	12	13	14	15	16
$\omega_t/2\pi$	1320	1462	1589	1825	1943	2026	2190	2354
α_t	0.24	0.17	0.54	0.17	0.10	0.27	0.89	1.56
$\omega_x/2\pi$	4.355	4.823	5.242	6.021	6.410	6.684	7.225	7.766
α_x	0.00079	0.00056	0.00178	0.00056	0.00033	0.00089	0.00294	0.00515

표 4. 현의 한쪽 끝에서의 탄성계수와 댐핑계수 K_m, R_m 의 변화에 따른 현의 진동주파수 ω_t 와 감쇠계수 α_t 의 변화
 Table 4. Variation of the frequency ω_t and the damping coefficient α_t of the vibration due to the change in the spring constant K_m and the damping coefficient R_m at the end of the string.

NO	K_m	R_m	$\omega_t/2\pi$	α_t	$\omega_x/2\pi$	α_x
1	200	200	226	0.46	0.746	0.00152
2	400	200	226	0.46	0.746	0.00152
3	600	200	227	0.45	0.749	0.00148
4	800	200	230	0.43	0.759	0.00142
5	1,000	200	231	0.47	0.762	0.00155
6	1,200	200	235	0.49	0.775	0.00162
7	1,400	200	237	0.47	0.782	0.00155
8	1,600	200	240	0.48	0.792	0.00158
9	1,000	40	233	0.39	0.769	0.00129
10	1,000	80	234	0.42	0.772	0.00139
11	1,000	120	231	0.43	0.762	0.00142
12	1,000	160	232	0.53	0.765	0.00175
13	1,000	200	231	0.47	0.762	0.00155
14	1,000	240	232	0.55	0.765	0.00181
15	1,000	280	231	0.64	0.762	0.00211
16	1,000	320	234	0.56	0.772	0.00185

표 4는 현의 한쪽 끝에서의 탄성계수와 댐핑계수 K_m, R_m 의 변화에 따른 현의 기본 진동주파수 ω_t 와 감쇠계수 α_t 의 변화를 보여 준다. 대체로 탄성계수 (K_m)가 증가함에 따라 진동의 주파수 (ω_t)는 약간 증가하는 경향이 있지만 댐핑계수 (α_t)에는 의미 있는 변화의 경향이 없음을 알 수 있다. 또 운지에 의한 댐핑계수 (R_m)가 증가하면 진동의 댐핑계수는 조금 증가하지만 진동의 주파수에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 연주 시 연주자가 현의 운지 압력을 변화시키면 운지점에서의 탄성계수와 감쇠계수를 변화시키는 효과가 있고 이에 따라서 수치해석의 결과가 나타내는 바와 같이 현의 진동 특성이 변화하게 된다. 따라서 연주자들이 소리를 화려하게 내기 위하여 사용하는 비브라토 기술은 손가락 끝의 압력을 빠르게 변화시킴으로써 운지점에서의 탄성계수와 감쇠계수를 변화시키는 효과가 있고 이는 또 진동주파수와 감쇠계수

등 진동의 특성을 비브라토의 주파수에 따라 상응하게 변화시키는 효과를 가져온다고 볼 수 있을 것이다.

IV. 실험

현의 진동을 측정하기 위한 실험장치를 설계하고 제작하였다. 실험장치는 그림 6에서와 같이 악기를 수평으로 설치하고 현을 보우잉 해서 그 결과로 발생하는 진동을 브릿지 상단의 현과의 접촉점 근처에 설치된 가속도계 (accelerometer)로 픽업할 수 있도록 제작되었다. 구체적으로 2.2 pC/g의 감도와 0.5 Hz-12 kHz의 밴드폭을 가지는 B&W 22200 전하가속도계 (charge accelerometer)가 진동의 측정을 위해 사용되었다. 가속도계 신호는 B&W 62300 전하증폭기 (charge amplifier)를 통하여 증폭되

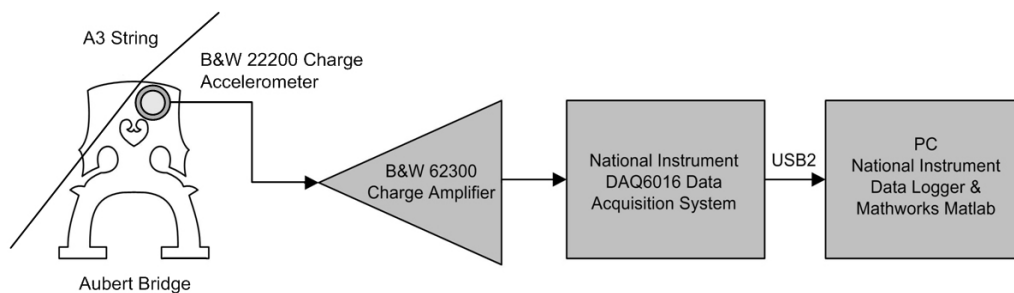
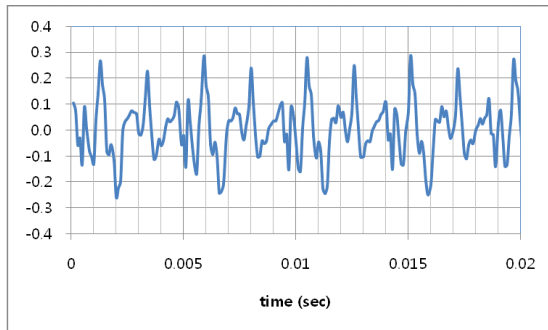


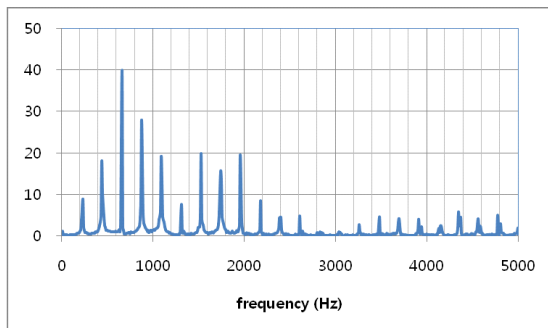
그림 6. 실험장치.
 Fig. 6. Experimental setup.

어서 200 kS/sec의 속도와 16 bit의 해상도를 가지는 NI 6016 USB 데이터 취득 패드 (data acquisition pad)를 이용하여 PC로 샘플링 되어 저장된다.

그림 7은 A₃ 현을 개방하고 보우잉 했을 때 가속도계 신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 본 것이다. 주파수 영역에서는 기본주파수 220 Hz에서 시작하여 2, 3, 4 배의 고조파의 피크 치가 나타나는데 특히 기본 주파수의 3배 고조파 피크 치가 가장 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 높은 주파수의 고조파 성분이 상대적으로 많기 때문에 첼로가 낮은 소리를 낼 수 있는 악기이면서도 화려한 음색을 가지는 한 요인으로 볼 수 있을 것이다. 그림 8은 A₃ 현의 장력을 약간 감소시키고 그 대신 너트 (nut)로부터 약 2.5 cm 떨어진 곳을 손가락으로 운지하여 A₃음을 냈을 때 가속도계 신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 본 그림이다. 운지된 현은 시간 영역에서 신호의 크기가 개방현에 비해 대략 3 dB 정도 낮는데 이는 운지점에서의 댐핑 때문으로 생각된다. 주파수 영역에서도 운지된 현에서 발생하는 음은 개방현과 상당히 다른 특성을 가지며 특히 높은 주파수 성분들이 상대적으로 강하게



(a)

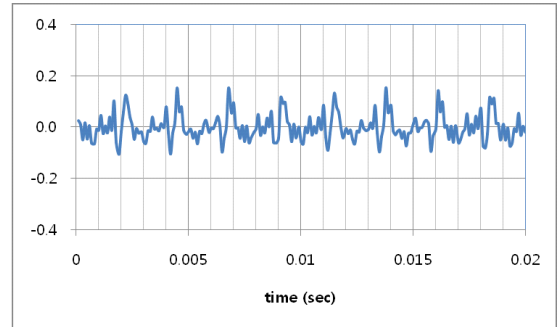


(b)

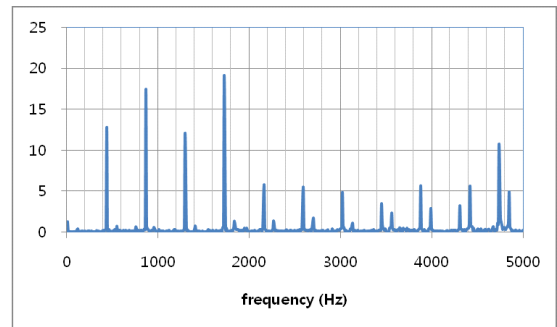
그림 7. 개방 A₃ 현을 보우잉했을 때 브릿지 상단에 설치된 가속도계 신호를 시간 영역 (a) 과 주파수 영역 (b) 에서 본 그림. (단, 센서신호 단위는 V임.)

Fig. 7. Signal from the accelerometer seen in the time domain (a), and in the frequency domain (b) when the open A₃ string was bowed. (Sensor signal is in Volts.)

나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 A₃현을 개방했을 때와 운지했을 때 가장 강한 주파수 성분으로 정규화한 고조파 신호의 크기를 나타낸 것인데 개방현은 제 3고조파 성분이 가장 강하게 나타나는 데 반해 운지된 현에서는 제 8 고조파 성분이 가장 강하고 제 4 고조파 성분도 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 두 경우 모두 기본 주파수



(a)



(b)

그림 8. 운지된 A₃ 현을 보우잉했을 때 브릿지 상단에 설치된 가속도계 신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 본 그림. (단, 센서신호 단위는 V임.)

Fig. 8. Signal from the accelerometer seen in the time domain (a), and in the frequency domain (b) when the fingered A₃ string was bowed. (Sensor signal is in Volts.)

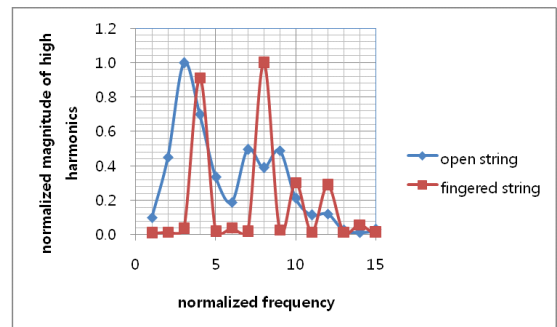


그림 9. A₃ 현을 개방하고 보우잉했을 때와 운지하고 보우잉했을 때 가장 강한 주파수 성분으로 정규화된 고조파 신호의 크기

Fig. 9. The magnitude of the high frequency peaks normalized with that of the strongest frequency component when the A₃ string was bowed open, and fingered.

표 5. 손가락의 압력에 따른 현의 진동 주파수와 진동에너지가 반이 되는데 걸리는 감쇠시간의 변화

Table 5. Variation of the frequency of vibration and the time required for half the initial magnitude of the signal, with varying finger pressure.

NO	1	2	3	4	5	6
Finger pressure	← lower, higher →					
Frequency (Hz)	221	220	224	228	229	232
Time for half energy (sec)	0.34	0.42	0.48	0.47	0.51	0.53

성분에 비해 고조파 성분이 강하게 나타나지만 이러한 경향은 운지된 현의 경우가 상대적으로 심하다. 이는 운지된 현의 청취느낌이 개방현에 비하여 고역이 상대적으로 강하게 들리는 것을 설명해 준다.

표 5는 손가락에 의한 압력을 변화시킬 때 진동의 기본 주파수가 어떻게 변화하는지를 보여준다. 수치해석의 결과와 비슷하게 압력이 높아짐에 따라 기본 주파수가 약간 높아지는 것을 볼 수 있다. 또 표 5는 손가락에 의한 압력을 변화시킬 때 진동의 진폭이 반으로 감소하는데 걸리는 시간의 변화도 보여준다. 손가락에 의한 압력이 낮을수록 감쇠가 빠르게 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 손가락 압력이 낮을수록 상대적으로 댐핑이 크고, 압력이 높아질수록 경계조건이 고정된 것과 비슷해지기 때문으로 생각된다. 이 점은 연주자가 운지 압력과 운지점의 위치를 수 Hz의 빠르기로 변화시키는 비브라토 기술의 경우 진동의 기본 주파수와 감쇠 등 진동의 특성이 비브라토 주파수에 따라서 변화하는 것을 설명한다.

주파수가 약간 높아지고 감쇠계수도 변한다. 이 결과는 연주 시 비브라토 기술을 이용하면 진동의 주파수와 감쇠계수가 계속 변화하면서 풍부한 소리가 되는 것을 부분적으로 설명해 준다.

이상의 결론은 첼로 뿐 아니라 바이올린, 비올라, 콘트라베이스 등 다른 비올족 악기 현의 진동에 대해서도 공통적으로 적용할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 수치해석의 결과가 실험의 결과를 좀 더 정확하게 예측하려면 운지된 현을 비선형적인 탄성과 댐핑 등을 포함 해서 더욱 엄밀하게 모델링 함으로써 개선할 수 있다고 생각되며 차후 연구과제가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 서울시립대학교 학술연구조성비(과제번호: 200704271043)에 의해 지원되었으며 저자는 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

V. 결론

본 연구에서는 개방현과 운지된 현의 진동을 비교해석하였다. 손가락 끝으로 운지된 현의 경계조건을 종방향으로 선형의 탄성과 댐핑이 작용하는 것으로 모델링하고 이 경우 현의 진동특성을 양단이 고정된 개방현의 경우와 수치해석을 통하여 비교분석 하였으며, 또 실험을 통하여 운지된 현과 개방현의 진동특성 차이를 측정하여 보았다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 운지된 현은 개방현과 진동특성이 크게 다르다. 즉, 경계조건이 현의 진동에 큰 영향을 미친다.
- 2) 운지된 현은 개방현에 비해 진동의 강도가 약하고, 여러 모드가 복잡하게 섞여있으며 높은 주파수의 성분이 상대적으로 크게 나타난다.
- 3) 운지된 현의 진동은 운지 압력이 높아지면 기본 모드

참고 문헌

1. R. Stowell, ed., The Cambridge companion to the cello, Cambridge Univ. Press, 1999.
2. L. Cremer, The physics of the violin, MIT Press, 1984.
3. E. V. Jansson, Acoustics for violin and guitar makers, 4th ed., available from <http://www.speech.kth.se/music/acvguit4/index.html>, 2002.
4. <http://www.thomastik-infeld.com/strings/>
5. J. Alonso, E. V. Jansson, "Eigenmodes, input admittance and the function of the violin", *Acoustica*, **50**, 329-337, 1982.
6. N. E. Molin, A. O. William, E. V. Jansson, "Transient wave response of the violin body", *J. Acoustical Society of America*, **88**(5), 2479-2481, 1990.
7. G. A. Knott, Y. S. Shin, M. Chargin, "A modal analysis of the violin", *Finite Elements in Analysis and Design*, **5**, 269-279, 1989.
8. E. Howie, Lloyd N. Trefethen, "Eigenvalues and musical instruments", *Journal of computational and applied mathematics* **135**, 23-40, 2001.

9. E. V. Jansson, "Experiments with the violin string and bridge", *Applied Acoustics* 30, 133-146, 1990.
10. N. Giordano, J. P. Winans II, "Plucked strings and the harpsichord", *Journal of Sound and Vibration*, **224**(3), 455-473, 1999.
11. C. O. Horgan, A. M. Chan, "Vibration of inhomogeneous strings, rods and membranes", *Journal of Sound and Vibration*, **225**(3), 503-513, 1999.
12. J. C. Schelleng, "The bowed string and the player", *Journal of the Acoustical Society of America*, **53**, 26-41, 1973.
13. M. E. McIntyre, R. T. Schumacher, J. Woodhouse, "On the oscillation of musical instruments", *Journal of the Acoustical Society of America* **74**, 1325-1345, 1983.
14. O. Inacio, J. Antunes, M. C. M. Wright, "Computational modeling of string-body interaction for the violin family and simulation of wolf notes", *Journal of Sound and Vibration*, **310**, 260-286, 2008.
15. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", 4th ed., John Wiley Sons, 1999.

저자 약력

• 최 기 상 (Gi Sang Choi)

1982년 2월: 서울대학교 기계공학과 (공학사)

1990년 5월: University of California, Berkeley (Ph.D., Mechanical Engineering)

1991년 4월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

※주관심분야: Mechatronics, Distributed Control, Musical Acoustics