

첼로 브릿지의 진동 분석

Analysis of Vibration in Cello Bridge

최기상*

(Gi Sang Choi*)

*서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

(접수일자: 2006년 5월 8일; 수정일자: 2006년 7월 3일; 채택일자: 2006년 7월 24일)

바이올린 현악기에서 현의 진동은 브릿지에 의해 전판에 전달되어서 악기 몸통을 공명시킨다. 따라서 브릿지의 재질, 기하학적 형상, 설치 위치 등이 음색에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 첼로에서 현에 의해 변위가 가해질 때 브릿지 내부의 변형, 응력, 그리고 브릿지 다리에 의해 전판에 미치는 힘을 탄성학적으로 해석하고, 브릿지의 고유진동모드와 고유진동주파수 등을 구하였다. 또, 브릿지의 형상이 음색에 미치는 영향을 주파수 응답의 관점에서 측정하였다. 본 연구의 결과는 첼로에서 브릿지의 진동특성은 대단히 복잡하고, 그 재질, 형상 등이 음색에 큰 영향을 미치며, 따라서 브릿지의 형상을 변화시킴으로써 첼로의 음색을 조정하는 것이 가능함을 실험적으로 보였다.

핵심용어: 첼로, 브릿지, 탄성학, 진동, 주파수 응답

투고분야: 음악음향 및 음악심리 분야 (8.1)

Vibration of string is transmitted to the front plate through bridge to cause resonance of the instrument body in viol family string instruments. Therefore, the properties, geometrical shape, and positioning of the bridge are expected to have some effect on the sound color. In this study the strain and the stress in the bridge, and the force exerted on the top plate by the bridge as the string vibrates the bridge in cello are calculated through simulation based on the theory of elasticity. The modes of vibration and the characteristic frequencies are also found. Furthermore, the effect of geometric shape of bridge on sound color is studied in terms of frequency response. The results of this study show that the vibration characteristics of bridge is quite complex and the properties and the geometrical shape of bridge have significant effect on sound color, and therefore, the sound color of a cello can be controlled by changing the geometrical shape of bridge.

Key words: Cello, Bridge, Elasticity, Vibration, Frequency response

ASK subject classification: Musical Acoustics and Psychoacoustics (8.1)

I. 서론

바이올린, 비올라, 첼로, 콘트라베이스 등 바이올린 현악기는 활을 쳐면 현의 진동이 브릿지를 통해 몸통으로 전달되고 공명을 일으켜 소리를 낸다. 그림 1은 대표적인 바이올린 현악기인 첼로의 각 부분을 보여준다. 첼로는 공명을 일으키는 몸통, 현과 현을 지지하기 위한 목(neck), 튜닝 페그(tuning peg), 테일피스(tailpiece), 브릿지 등의 주요 부분으로 구성되어 있다. 이 중 몸통은 앞판과 뒤판 그리고 리브(rib)로 구성된다. 앞판은

스프러스(spruce)를 조각해서 아치형태로 만들어지며 2개의 f 홀을 가지고 베이스 바에 의해서 강화되고 사운드 포스트에 의해 지지된다. 앞판의 테두리는 단풍나무(maple) 소재의 6개의 블럭으로 구성된 리브에 접착되어 있다. 뒤판도 아치 형태로 조각된 단풍나무 소재이며 리브에 접착되어 있다. 사운드포스트는 앞판과 뒤판 사이에 끼워져서 앞판의 진동을 뒤판에 직접 전달하는 역할을 하며 필요에 의해 그 위치를 조절할 수 있다. 첼로의 대체적인 크기는 몸통 길이가 75cm, 개방현의 길이는 69cm 정도가 된다 [1-3].

첼로는 연주 시 활이 미끄러지면서 현을 진동시키면, 현의 진동은 브릿지의 진동을 일으키고, 이는 다시 앞판으로 전해져서 악기 전체를 울리게 되며, 첼로 몸통의

책임저자: 최기상 (simpson@uos.ac.kr)
서울시 동대문구 전농동 90 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
(전화: 02-2210-2526; 팩스: 02-2249-6802)

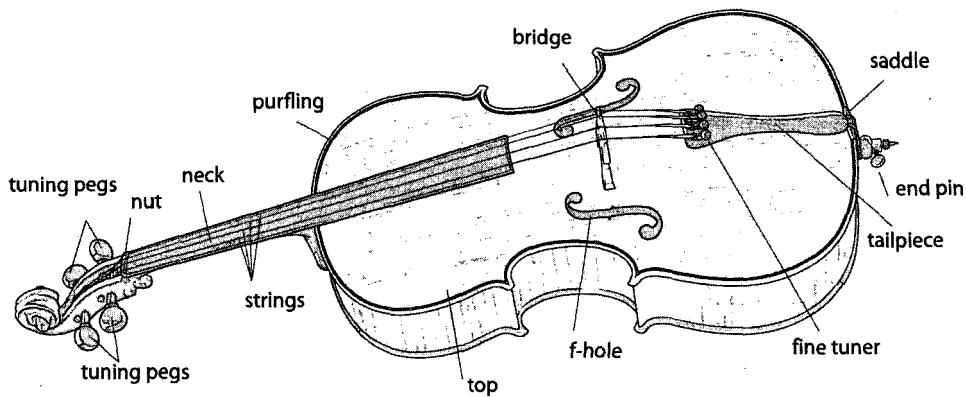


그림 1. 첼로의 부품들
Fig. 1. Cello parts.

진동은 주위의 공기를 진동시켜 소리를 내게 된다. 이때 몸통은 소리를 직접 방사하며, 또한 몸통이 공진하게 됨에 따라 소리를 증폭시키는 역할도 하게 된다.

악기의 음색 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 가장 크게 좌우되지만 현의 진동을 몸통에 전달하는 필터의 역할을 하는 브릿지도 악기의 음색결정에 일정한 역할을 한다고 볼 수 있다. 브릿지는 연주하기 알맞도록 현을 떠받쳐 주며 동시에 현의 진동을 악기의 앞판에 전달하는 역할을 한다. 따라서 브릿지의 재질과 형상이 악기의 음색에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [1-6]. 브릿지가 두꺼우면 강도가 높아서 현의 떨림이 몸통으로 적게 전달된다. 따라서 활로 현을 켤 때 힘이 들고 소리가 작아진다. 하지만 얇은 브릿지에 비해서 소리가 묵직하면서 부드러워진다. 반대로 브릿지가 얇으면 현의 진동이 민감하게 전달되어 소리가 커진다. 하지만 가벼운 소리를 내며, 강하게 보잉을 할 경우 소리가 찌그러지는 것으로 알려져 있다 [1,4].

현악기의 음향학적 특성을 바꾸고 향상시키기 위한 간단한 방법은 현을 교환하는 방법과 사운드 포스트의 위치를 바꾸는 방법이 있다. 현의 진동은 전적으로 브릿지에 의해 앞판에 전달되므로 브릿지의 진동특성은 악기의 음색에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 그러므로 브릿지를 바꾸거나 그 형상, 설치 위치 등을 바꾸는 것은 악기의 음색을 제어할 수 있는 쉬우면서도 효과적인 방법이 될 수 있다 [1,3].

본 연구에서는 첼로에서 현에 의해 변위가 생길 때 브릿지 내부의 변형, 응력, 그리고 브릿지 다리에 의해

전판에 미치는 힘을 탄성학적으로 해석하고, 브릿지의 고유진동모드와 고유진동주파수 [7-9] 등을 구하였다. 또한 브릿지를 관성, 탄성, 댐핑을 가지는 선형시스템으로 보고 실험에 의해 브릿지의 형상이 음색에 미치는 영향을 주파수 응답 [10,11] 이라는 관점에서 연구한다.

II. 시뮬레이션

브릿지에는 현의 인장력과 전판의 반작용력에 의한 수직압축력이 항상 작용한다. 또한, 악기 연주 시에는 활이 현을 켜면서 발생하는 압축력이 추가적으로 작용한다고 볼 수 있다 [7]. 본 연구에서는 브릿지를 2차원 탄성체로 보고 브릿지 상단부에 현에 의해 변위가 생겼을 때 브릿지 내부의 응력과 변위, 변형률을 계산하고 고유 모드의 형상과 주파수를 Matlab의 편미분방정식 툴박스를 이용하여 해석하였다.

일반적으로 목재는 기계적 강도의 편차가 크며, 이방성 재료로서 힘이 가해지는 방향이 나무결과 이루는 각도에 따라서 기계적 강도가 현격하게 달라진다. 브릿지의 재료로 쓰이는 단풍나무 (maple) 도 기계적 강도가 재료에 따라, 그리고 나무결의 방향에 따라 편차가 심하다 [3,5]. 시뮬레이션을 위해 표 1의 현악기용 목재의 기계적 강도특성 데이터 [3] 가 이용되었다.

표 1. 현악기용 목재의 기계적 특성
Table 1. Mechanical properties of woods used for string instruments.

Material	Density	Longitudinal Young's Modulus	Radial Young's Modulus	Shear Modulus
Spruce	460 kg/m ³	15 GPa	0.76 GPa	0.84 GPa
Maple	620 kg/m ³	10 GPa	2.0 GPa	1.7 GPa

표 2. 현이 브릿지에 0.1 mm 의 변위를 일으킬 때 브릿지 바닥에 미치는 제1 주응력 방향의 힘 (N)
 Table 2. The force (N) in the direction of the 1st principal stress, on the bottom of the bridge as the D string moves the bridge by 0.1mm.

	A string		D string	
	좌측다리	우측다리	좌측다리	우측다리
우측으로 움직일 때 (R)	-48.67	-99.84	-17.47	-66.46
좌측으로 움직일 때 (L)	-142.58	-56.16	-122.93	-20.12
차이(R-L)	93.91	-43.68	105.46	-46.33

그림 2에는 브릿지의 바닥을 고정하고 A 현의 위치에서 각각 0°, -45°, -90°, -135°, -180° 방향으로 0.1mm의 변위를 주었을 때 브릿지 각 부분의 변위를 화살표를 이용하여 나타내고 제 1 주응력 (1st principal stress)을 명도로 도사하였다. 이 그림에서 응력이 복잡한 분포를 보이고 여러 모서리 부분에서는 응력 집중현상도 일어나지만 변위는 비교적 단순하게 분포되어 있음을 보여준다. 또한 현이 우측으로 움직이면 좌측 다리의 응력은 작아지고 우측 다리의 응력이 커지지만, 현이 좌측으로 움직이면 좌측 다리의 응력이 증가하고 우측 다리의 응력은 감소하는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 좌측과 우측의 두 다리는 180° 다른 위상을 가지고 현의 진동 주파수와 같은 주파수로 첼로의 앞판을 진동시킨다는 것을 보여준다. 브릿지의 기하학적 대칭성을 고려하여 G 현과 C 현에 대하여는 생략하고, 같은 해석을 D 현에 대하여도 실시하였다. 그림 3에는 같은 조건에서 D 현의 위치에서 0.1mm의 변위를 주었을 때의 결과가 도사되어 있다. 현이 움직일 때 두 다리의 바닥에 미치는 힘이 표 2에 구체적으로 나타나 있다. A 현을 진동시킨 경우

우측 다리에 미치는 힘의 변화가 좌측 다리에 비해 크고, D 현을 진동시킨 경우는 그 차이가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

브릿지의 두 다리는 몸통에, 그리고 상단부는 4 현에 밀착되어 있으므로 브릿지의 진동은 몸체 및 4 현의 진동과 연동되어 있다. 하지만 브릿지, 몸통, 현의 진동을 동시에 해석하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 브릿지의 두 다리 및 4 현과의 접촉점들을 고정시킴으로써 몸통 및 4 현과의 연관효과를 배제하고 브릿지 만의 동특성을 알아 보았다. 보통의 브릿지와 중앙에 하트 형상 개구부가 없는 브릿지에 대하여 두 바닥과 상단부 4군데 현과의 접촉점이 고정된 것으로 보고 행한 진동 해석 결과가 표 3과 그림 4, 5에 나타나 있다. 표 3은 브릿지 진동의 모드 주파수를 보여준다. 또한, 그림 4과 5는 각각 보통의 브릿지와 하트 형상 개구부가 없는 브릿지의 모드 형상을 보여준다. 브릿지의 진동역학이 아주 복잡해서 모드 주파수가 230 Hz 부근의 낮은 주파수에서 높은 주파수까지 촘촘하게 분포되어 있으며, 모드 형상도 다양하고 복잡한 것을 볼 수 있다. 첼로에서 브릿지는 기

표 3. 브릿지의 고유모드 진동수 (Hz). (a) 하트 형상의 개구부가 있는 보통의 브릿지, (b) 하트 형상의 개구부가 없는 브릿지.
 Table 3. The mode frequency of the bridge. (a) Bridge with the heart-shaped hole, (b) Bridge without the heart-shaped hole.

Mode Nr.	(a)	(b)	Mode Nr.	(a)	(b)	Mode Nr.	(a)	(b)
1	231.8	238.0	21	553.3	568.7	41	706.9	728.3
2	248.0	248.7	22	556.5	592.9	42	707.1	732.7
3	298.9	307.6	23	567.7	599.4	43	718.9	741.7
4	324.1	326.5	24	586.6	611.1	44	726.1	747.3
5	337.1	345.9	25	598.6	611.4	45	727.1	756.7
6	345.4	348.5	26	602.8	621.7	46	730.1	760.0
7	347.4	372.6	27	619.5	635.6	47	742.5	761.1
8	364.4	393.7	28	620.1	639.5	48	745.8	762.1
9	375.9	409.2	29	622.6	647.2	49	755.1	770.8
10	383.5	425.7	30	632.0	656.2	50	760.7	771.0
11	398.7	439.0	31	645.1	660.9	51	763.5	791.9
12	434.0	454.6	32	656.0	666.1	52	769.0	794.4
13	443.0	456.6	33	656.2	677.5	53	773.3	798.3
14	452.6	496.2	34	658.2	681.9	54	786.1	800.1
15	486.9	499.3	35	660.5	682.1	55	787.1	809.7
16	487.6	507.3	36	670.1	690.7	56	791.2	811.4
17	492.9	528.6	37	679.2	692.2	57	792.6	816.9
18	498.8	540.6	38	679.4	707.2	58	806.3	822.2
19	527.2	544.4	39	688.0	713.2	59	809.2	828.3
20	532.7	560.9	40	693.2	718.6	60	812.8	829.6

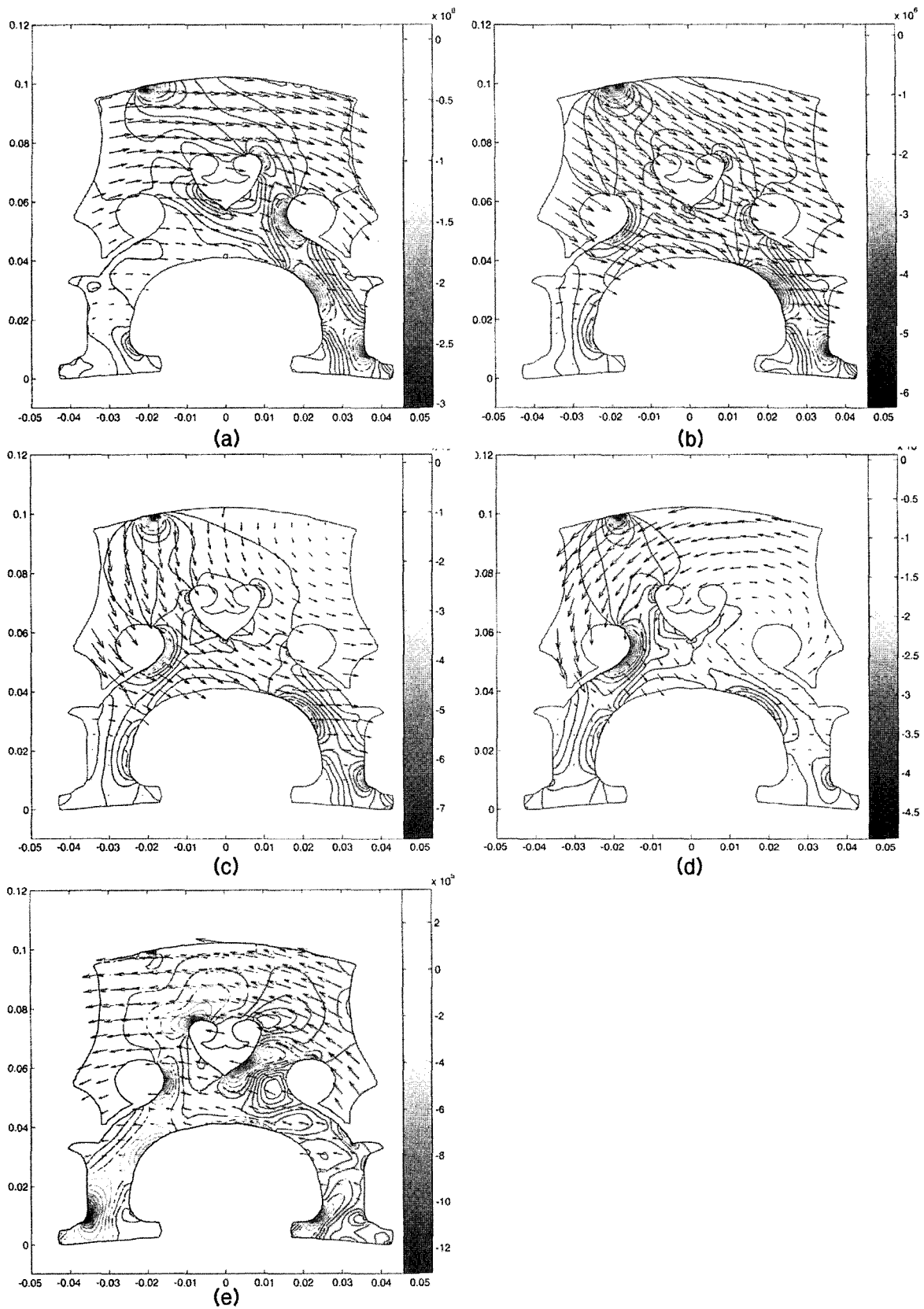


그림 2. 바닥이 고정되고 A 현에 의해 0.1mm의 변위가 생겼을 때 브릿지 각 부분의 응력과 변위. 명도와 등고선은 응력(Pa), 화살표는 상대적 변위를 나타낸다. (a), (b), (c), (d) 그리고 (e)는 각각 변위가 0°, -45°, -90°, -135°, 그리고 -180° 방향인 경우이다.

Fig 2. The internal stress and the displacement of the bridge as the A string moves the bridge by 0.1mm when the bottom of the bridge is fixed. The brightness represents the stress (Pa), and the arrows represent the relative displacement. (a), (b), (c), (d) and (e) represent the cases where the displacement is in the direction of 0°, -45°, -90°, -135°, and -180°, respectively.

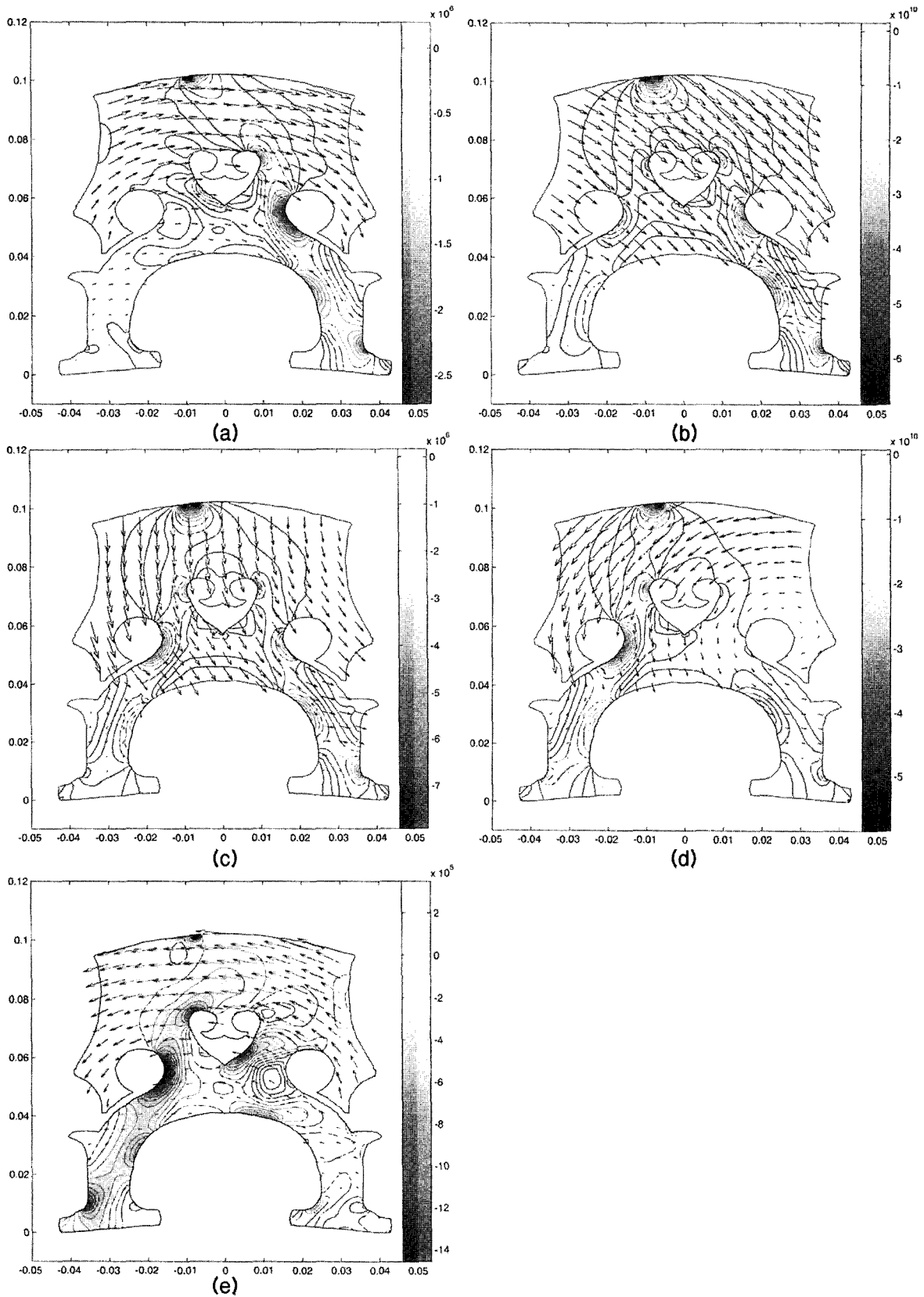


그림 3. 바닥이 고정되고 D 현에 의해 0.1mm의 변위가 생겼을 때 브릿지 각 부분의 응력과 변위. 명도와 등고선은 응력(Pa), 화살표는 상대적 변위를 나타낸다. (a), (b), (c), (d) 그리고 (e)는 각각 변위가 0° , -45° , -90° , -135° , 그리고 -180° 방향인 경우이다.

Fig 3. The internal stress and the displacement of the bridge as the D string moves the bridge by 0.1mm when the bottom of the bridge is fixed. The brightness represents the stress (Pa), and the arrows represent the relative displacement. (a), (b), (c), (d) and (e) represent the cases where the displacement is in the direction of 0° , -45° , -90° , -135° , and -180° , respectively.

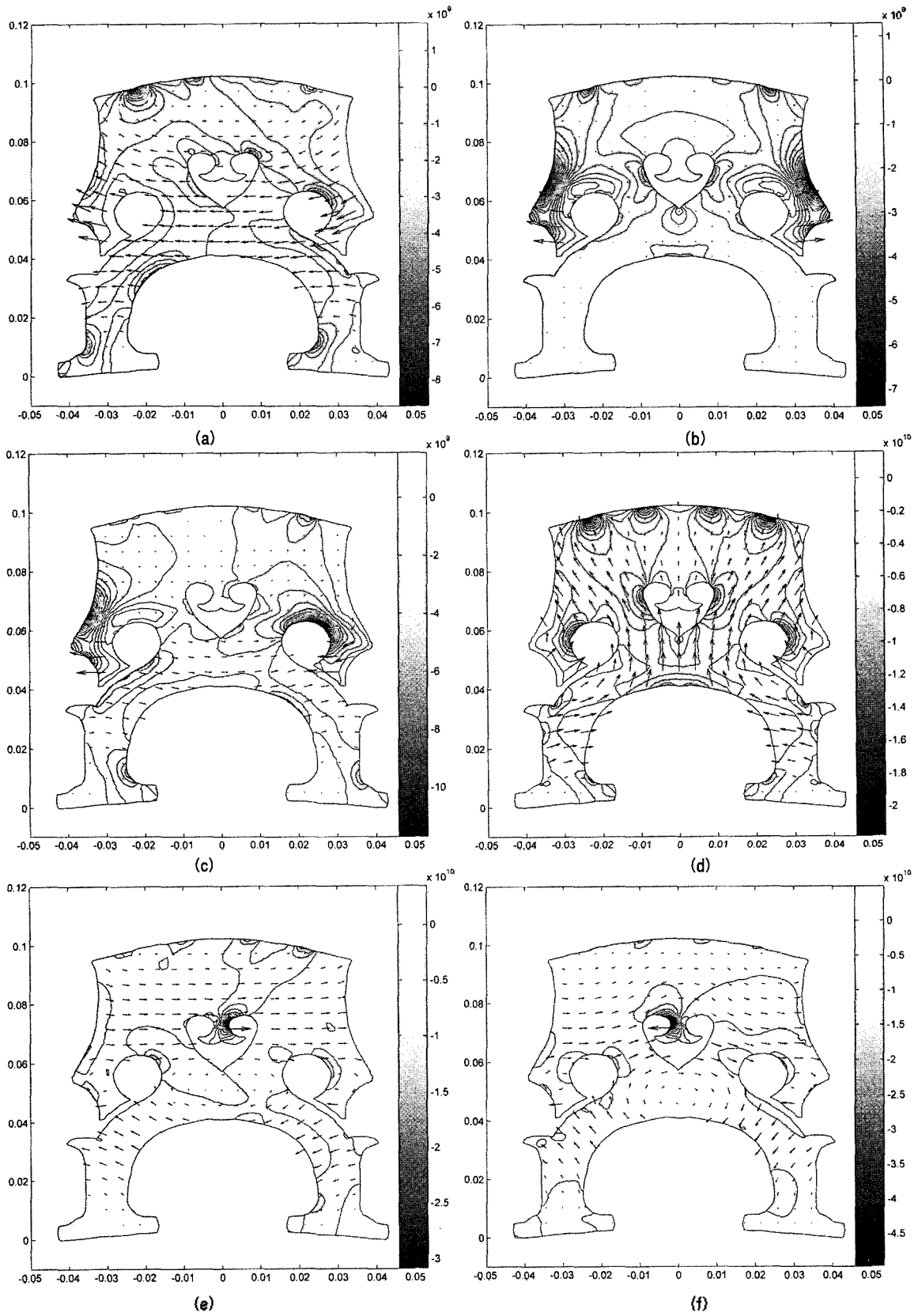


그림 4. 하트 형상의 개구부가 있는 보통 브릿지의 고유 진동 모드. 명도와 등고선은 응력 (Pa), 화살표는 각 위치에서의 변위를 나타낸다. (a), (b), (c), (d), (e) 그리고 (f)는 각각 제 1, 제 2, 제 3, 제 4, 제 5 그리고 제 6 모드를 나타낸다.

Fig 4. The mode of vibration in the bridge with the heart-shaped hole. The brightness represents the stress (Pa), and the arrows represent the displacement. (a), (b), (c), (d), (e) and (f) represent the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th and 6th mode, respectively.

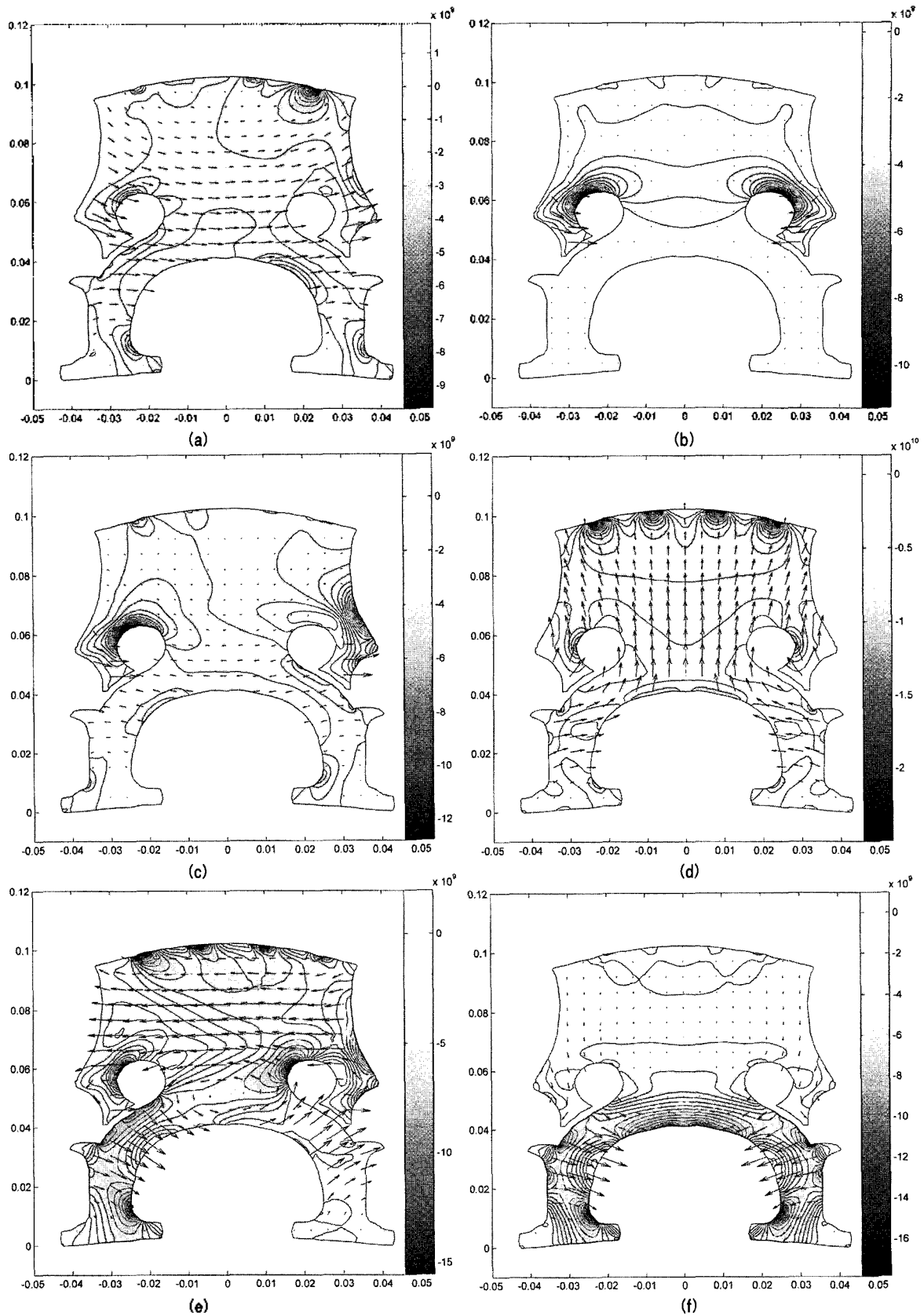


그림 5. 허트 형상의 개구부가 없는 브릿지의 고유진동 모드. 명도와 등고선은 응력(Pa), 화살표는 각 위치에서의 변위를 나타낸다. (a), (b), (c), (d), (e) 그리고 (f)는 각각 제 1, 제 2, 제 3, 제 4, 제 5 그리고 제 6 모드를 나타낸다.
 Fig 5. The mode of vibration in the bridge without the heart-shaped hole. The brightness represents the stress (Pa), and the arrows represent the displacement. (a), (b), (c), (d), (e) and (f) represent the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th and 6th mode, respectively.

본적으로 현에 의해 상단부의 홈 (groove)에 미치는 힘을 다리를 통해 정적으로 몸통의 전판에 전달해 주는 역할을 하지만, 브릿지의 진동 모드 주파수가 현의 진동 주파수 영역과 겹치면서 다양하게 존재하고, 모드 형상도 복잡해서 브릿지의 동특성이 첼로의 음색에 일정 부분 영향을 미치게 된다는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 4와 5를 비교하면 브릿지에 하트 형상의 개구부가 있을 때와 없을 때의 모드 형상에 차이가 많음을 알 수 있고, 표 3에서 나타난 것과 같이 모드 주파수도 변화한다. 이는 브릿지의 형상에 따라 브릿지의 동특성이 크게 달라지게 됨을 뜻한다.

III. 실험

브릿지의 주파수 특성을 측정하기 위한 실험장치를 설계 제작하였다. 실험장치는 그림 6에서와 같이 고정된 브릿지에 임펄스 해머로 충격을 가하고, 그 결과로 발생하는 진동을 브릿지 다리 하단에 설치된 가속도계로 픽업하였다. 임펄스 해머는 주파수 영역에서 10 kHz까지 평탄한 주파수 특성을 가지는 PCB 086D05 를 사용하였고, 가속도계는 3.20 pC/g 의 감도와 0.5 Hz-12 kHz 의 대역폭을 가지는 B&W 22200 전하가속도계를 사용하

였다. 가속도계 신호는 B&W 62300 전하증폭기를 통하여 증폭되어 200 kS/s 의 최고속도와 16 bit 의 해상도를 가지는 National Instrument DAQ 6016 USB 데이터 획득장치를 통하여 PC로 샘플링 되어 저장된다.

그림 7은 실험에 사용된 브릿지 3개의 정면도, 측면도이다. (a)의 브릿지는 가공을 하지 않은 상태이고, (b)는 앞면과 뒷면을 가공해 두께를 얇게 만들었으며, (c)의 브릿지는 양팔을 제거하였다. A 현의 위치에 임펄스 해머에 의해 충격이 가해졌을 때 브릿지 바닥에 설치된 가속도계 신호를 주파수 영역에서 본 그림이 그림 8에 도시되어 있다. 임펄스 해머는 10,000 Hz까지 평탄한 주파수 특성을 가지고 있으므로 가속도계에 픽업된 신호를 주파수 영역에서 본 이 그림이 브릿지의 주파수 특성이 된다. (a) 브릿지의 주파수 특성은 낮은 주파수에서 2,000 Hz까지의 영역에서 높게 나타나고, 2,700 Hz, 4,300 Hz, 6,600 Hz 에서도 피크 차를 나타내고 있다. 같은 종류의 다른 브릿지를 이용한 실험에서 브릿지에 따라 어느 정도 주파수 특성의 편차를 보였지만, (b), (c)에서와 같이 두께를 변화시키거나, 팔 부분을 제거하여 형상의 큰 변화를 주었을 때, 브릿지의 주파수 응답이 보다 크게 변화하였다. 특히 두 팔을 제거한 브릿지의 경우 4,000 Hz 부근의 높은 주파수에서 높은 피크 차가 나타났음을 볼 수 있다. 브릿지에서 두 팔은 현의

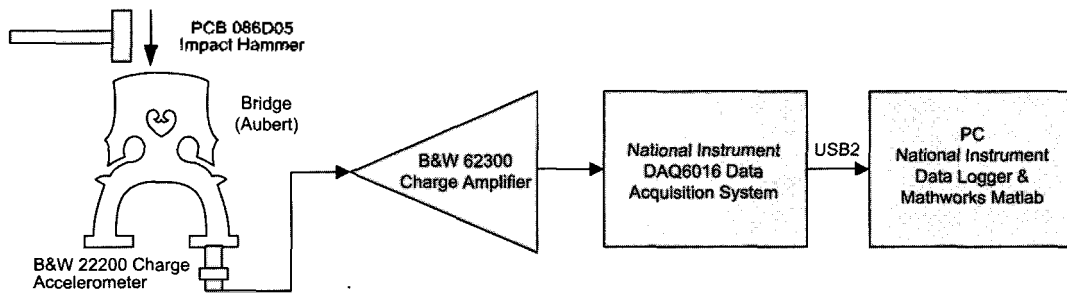


그림 6. 실험장치
Fig. 6 Experimental setup.

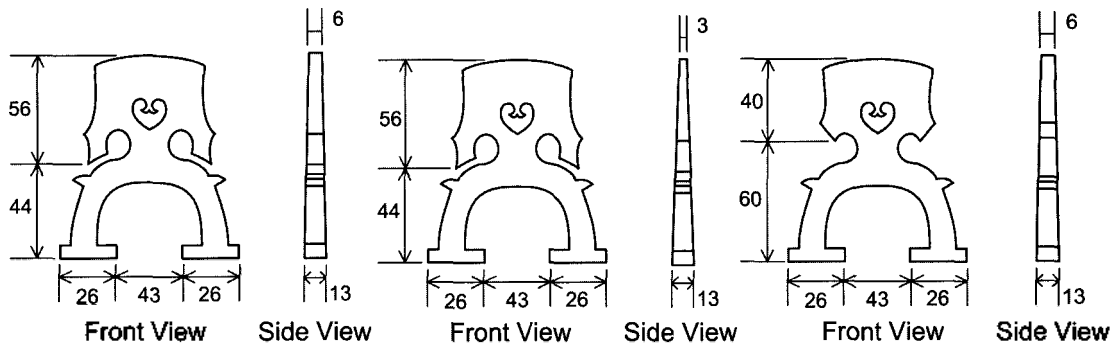


그림 7. 실험에 이용된 브릿지; (a) 원래의 브릿지, (b) 두께를 얇게 썬 브릿지, (c) 두 팔을 제거한 브릿지
Fig. 7. Bridges used in the experiment: (a) The bridge as purchased. (b) The bridge was made thinner. (c) The arms were removed.

진동이 다리까지 직접적으로 전달되는 경로 상에 있지 않으므로 두 팔을 제거하면 브릿지의 기계적 강도는 저하되지 않고 유효관성만 작아지게 되므로 고역특성이 강화되는 것으로 생각된다. 브릿지의 두께가 얇게 하는 것도 약간 고역의 주파수 특성을 강화시키는 효과가 있다.

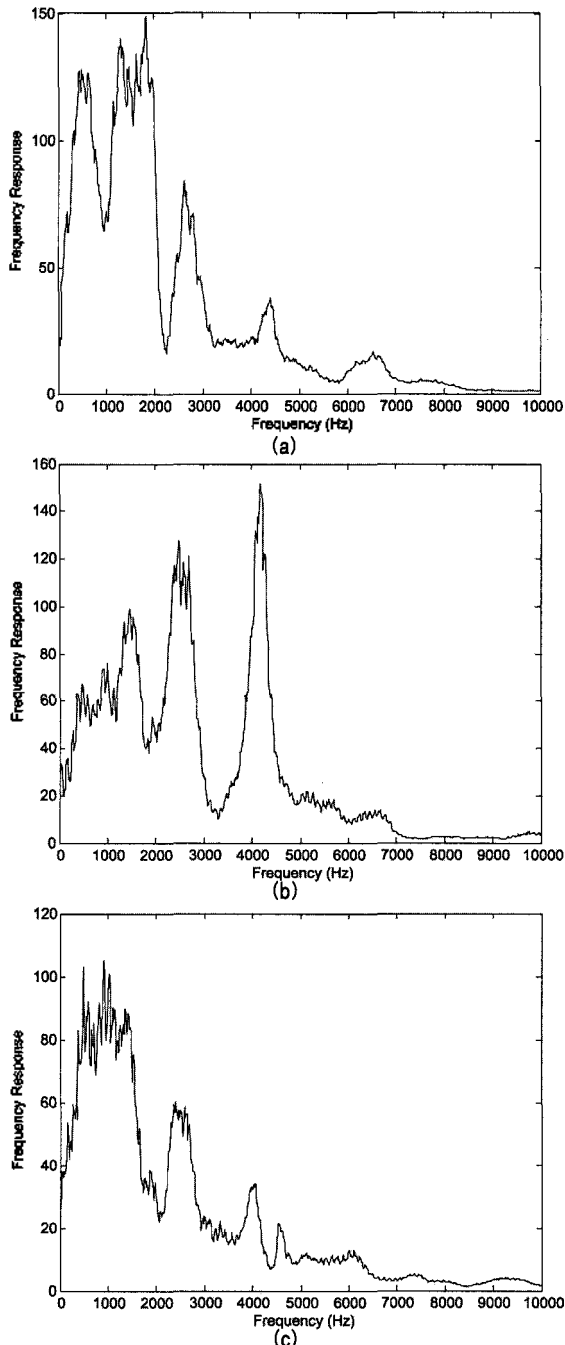


그림 8. A 현의 위치에 임펄스 해머에 의해 충격을 가해졌을 때 브릿지 바닥에 설치된 가속도계 신호의 주파수 특성: (a) 온전한 브릿지, (b) 팔 부분을 제거한 브릿지, (c) 두께를 얇게한 브릿지

Fig. 8. Frequency spectrum of the signal from the accelerometer attached to the bottom of the bridge as the impulse hammer hit the bridge on the position of A string: (a) The bridge as purchased. (b) The bridge was made thinner. (c) The arms were removed.

따라서 브릿지의 두께를 바꾸는 것으로 첼로의 음색을 효과적으로 바꿀 수 있다.

IV. 결론

첼로에서 브릿지의 형상은 음색에 큰 영향을 미친다는 것을 실험적으로 입증하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 브릿지의 좌측과 우측의 두 다리는 180° 다른 위상을 가지고 현의 진동 주파수와 같은 주파수로 몸통의 앞판을 진동시킨다.
- 2) 브릿지의 진동역학이 아주 복잡해서 모드 주파수가 230 Hz 부근의 낮은 주파수에서 아주 높은 주파수까지 촘촘하게 분포되어 있으며, 모드 형상도 아주 다양하고 복잡하다.
- 3) 브릿지의 진동 모드 주파수가 현의 진동 주파수 영역과 겹치면서 다양하게 존재하고, 모드 형상도 복잡해서 브릿지의 동특성이 첼로의 음색에 일정 부분 영향을 미친다.
- 4) 브릿지의 형상과 두께가 진동특성에 영향을 미치며, 따라서 브릿지의 형상과 두께를 바꾸는 것으로 첼로의 음색을 크게 바꿀 수 있다.

본 연구에서 첼로에서 브릿지의 두께, 형상 등이 음색에 큰 영향을 미치는 것을 실험적으로 입증하였다. 브릿지는 현을 적당한 높이로 고정시키기 위하여 상단을 짚아내고, 악기의 앞판에 밀착시키기 위하여 하단을 짚아내는데, 여기에 더해서 그 형상이나 두께를 바꾸는 간단한 작업으로 음색을 튜닝하는 것이 가능하고, 이러한 방법은 현을 바꾸거나, 사운드 포스트의 위치를 바꾸는 방법과 아울러 첼로의 음색을 튜닝하는 간단하고, 경제적인 방법이 될 수 있음을 실험적으로 보였다. 이러한 결론은 첼로 뿐 아니라 바이올린, 비올라, 콘트라베이스 등 다른 비올족 악기에 공통적으로 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 서울시립대학교 학술연구조성비 (과제번호: 20051005-1-1-002) 에 의해 지원되었으며 저자는 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

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/acvigu4/index.html>, 2002.
4. M. Hacklinger, "Violin timbre and bridge frequency response", *Acoustica*, **39**, 323-30, 1978.
5. 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.
6. W. Reinecke, "Übertragungseigenschaften des Streichinstrumentenstegs", *Calgut Acoust. Soc. Newsletter*, **19**, 26-34, 1973.
7. 정우양, 박선행, "바이올린용 소재의 진동모드 해석에 관한 연구, 제1보, 절삭방향 및 밀도에 따른 공진 주파수의 변화", *목재공학* **27** (3) 1-6, 1998.
8. E. V. Jansson, "Experiments with the violin string and bridge", *Applied Acoustics*, **30**, 2-3, 133-146, 1990.
9. 권주용, 정희석, "바이올린 플레이트의 도장처리가 흡습성과 진동모드에 미치는 영향", *목재공학* **27** (3) 16-25, 1998.
10. E. V. Jansson, "Violin frequency response - bridge mobility and bridge feet distance", *Applied Acoustics*, **65**, 1197-1205, 2004.
11. J. Alonso, E. V. Jansson, "Eigenmodes, input admittance and the function of the violin", *Acoustica*, **50**, 329-337, 1982.

저자 약력

◆ 최 기 상 (Gi Sang Choi)



1982년 2월: 서울대학교 기계공학과 (공학사)
1990년 5월: University of California, Berkeley
(Ph.D., Mechanical Engg.)
1991년 4월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터
공학부 교수
*주관심분야: Mechatronics, Distributed Control,
Musical Acoustics