등가 종 모델을 이용한 맥놀이 주기 조절법

Beat Period Tuning Method Using an Equivalent Bell Model

김석현[†], 이중혁

(Seock-hyun Kim[†] and Joong-hyeok Lee)

강원대학교 기계메카트로닉스공학과 (접수일자: 2012년 8월 6일; 수정일자: 2012년 8월 28일; 채택일자: 2012년 9월 19일)

로: 본 연구는 등가 종 모델을 이용하여 한국종의 맥놀이 주기를 조절하는 방법을 제시한다. 한국종이 갖고 있는 미세한 비대칭성은 하나의 원주 모드를 미세한 주파수의 차이를 갖는 모드 쌍으로 분리시키는데, 이 모드 쌍의 상호 간섭에 의해서 진동과 음향의 맥놀이가 발생한다. 등가 종은 축대칭 종에 등가 집중질량을 부착시킨 미소 비대칭 구조 물로, 실제 종의 모드 쌍과 동일한 모드 특성을 갖는다. 등가 종 모델은 회전 쉘 이론을 근거로, 유한요소해석을 통해서 구성된다. 맥놀이 특성을 변화시키기 위하여 국부적으로 요소 두께를 감소시킬 때, 등가 종을 이용하여 맥놀이 주기를 예측한다. 예측 결과는 시험 종에 대한 실험을 통해 그 타당성을 확인한다. 본 방법은 대형 종의 맥놀이 주기 조절에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있을 것이다.
 핵심용어: 미소 비대칭성, 맥놀이, 등가 종, 모드 쌍

투고분야: 구조음향 및 진동 분야(11)

ABSTRACT: This study proposes a method of an equivalent bell model in order to tune the beat period of a Korean bell. In a Korean bell having a slight asymmetry, each circumferential mode splits into a mode pair which has a slight difference in frequency, and the interaction of the mode pair makes a beat in vibration and sound. An equivalent bell model which consists of an axi-symmetric bell and an equivalent point mass, has the same mode property as in a real bell. The equivalent bell model is constructed by the finite element analysis based upon the theory of a revolutionary shell. Using the equivalent bell model, the beat period is predicted when the bell thickness is locally decreased to improve the beat property. The predicted result is verified by experiment on a test bell. The proposed method is useful to save the time required for tuning the beat period of a large bell.

Key words: Slight asymmetry, Beat, Equivalent bell, Mode pair

ASK subject classification: Structural Acoustics and Vibration (11)

I.서 론

성덕대왕신종으로 대표되는 한국종은 그 수려한 외관이나 역사적 배경뿐만 아니라, 우수한 소리 특 성으로 국내외에 널리 알려져 있다. 특히 한국종은 음향학적 측면에서 서양종이나 다른 동양종이 갖지 못 하는 독특한 요소를 갖는다. 맑고 조화로운 타격 음은 명동이란 음향학적 요소에 의하여 크게 증폭되 어 더욱 웅장하게 들린다. 또한, 미세한 비대칭 요소 들이 절묘하게 어울려 만드는 맥놀이는 종이 마치 살아서 숨을 쉬는 것처럼 느끼게 하고, 여음의 맥놀 이는 끊어 질 듯 이어지는 애절한 느낌도 준다. 이러 한 독특한 음향 특성에 관하여 많은 연구가 진행되 어 왔다. 염영하는 많은 한국종을 대상으로 진동 음 향적 특성을 조사하여 집대성하였다.^[1] 이병호는 한 국종의 타격음의 우수성을 정량화시켜 평가하는 방 법을 제시 한 바 있으며,^[2] 성덕대왕신종의 명동의 공명조건을 음향학적으로 처음 검토하였다.^[3] Hong 등은 한국종의 맥놀이 원인을 미소 비대칭링 모델을 사용하여 이론적으로 규명하였다.^[4] T. D. Rossing은 한국종의 소리를 발생시키는 진동모드를 서양종의

[†]**Corresponding author:** Seock-hyun Kim (seock@kangwon.ac.kr) Department of Mechatronics and Mechanical Engineering, Kangwon National University, Kangwon University road 1, Choonchun, Kangwondo, 200-701, Republic of Korea (Tel: 82-33-250-6372; Fax: 82-33-257-4190)

모드와 비교하였다.^[5] 김양한 등은 성덕대왕신종의 방사음을 측정하여 가시화시켰고,^[6] 명동의 공명 주 파수를 실험적으로 확인하였다.^[7] Kim 등은 미소 비 대칭 요소를 갖는 원통쉘의 맥놀이 응답을 정식화시 켰으며,^[8] 성덕대왕신종을 대상으로 맥놀이 지도의 개념을 제시하였다.^[9] Park 등은 등가 링 이론을 사용 하여 맥놀이의 강도와 주기를 조절하는 방법을 제시 한 바 있으며,^[10,11] 정원태 등은 종 내부 공명음이 외 부로 전달될 때의 주파수전달 특성을 이론적으로 규 명하고 실험적으로 검증하였다.^[12,13]

그러나 많은 연구에도 불구하고, 적절한 주기를 갖는 선명한 맥놀이를 만드는 것과, 최적의 공명조 건을 만족시키는 명동을 만드는 것은 아직 실용화되 지 못하고 있다. 특히 맥놀이는 주조 오차와 복잡하 게 분포하는 문양에 의한 비대칭성이 원인인데, 이 러한 비대칭성은 예측 및 설계가 어렵다. 따라서 맥 놀이 특성이 불만족스러운 경우, 주조 후에 종 내부 를 국부적으로 연삭하여 비대칭성을 인위적으로 변 경시키는 조절과정을 거친다. 이에 관련하여 종을 단순화시킨 등가 링을 이용하여 맥놀이를 조절하는 방법론이 제시된 바 있다.^[14] 그러나 실제 종의 제원 을 고려하지 못하여 주조 현장에서 직접 적용하는 데에는 한계가 있었다. 그 보완 대책으로, 본 연구에 서는 실제 종의 맥놀이 주기를 조절하는 방법을 제 시하고자 한다. 본 방법에서는 실제 종에 가까운 축 대칭 유한요소모델을 구성한 후, 측정된 주파수 쌍 과 모드 쌍 데이터를 만족시키는 등가 종 모델을 구 성하였다. 구성된 등가 종 모델을 대상으로 종의 하 단부에 연삭에 해당하는 두께 변화를 주어 맥놀이 주기의 변화를 예측하였다. 맥놀이 예측 결과는 실 제 종의 연삭 실험 결과와 비교하여 그 타당성을 검 증함으로써, 실제 종의 맥놀이 조절에 이용이 가능 하도록 하였다.

Ⅱ. 등가 종의 구성

2.1 시험 종의 유한 요소 모델링

성덕대왕신종의 축소 모형 종을 대상으로, ANSYS 13.0^[15]를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 축 대칭 유한요소해석 모델을 구성하기 위하여, 총 질 량과 체적을 정밀 측정하여 밀도를 구하였고, 종 높 이를 20 등분하여 위치별로 내/외경을 측정하고 평균 두께를 구하였다. 표면의 문양은 무시하고 원주상을 72 등분하여 총 1,872개의 2차 육면체 요소(HEX20)를 사용하여 종의 축대칭 기본 구조를 결정하였다. 청 동의 탄성계수는 재료 핸드북 데이터^[16]에 근거하되, 맥놀이를 만드는 1차 고유진동수 해석치가 측정치 에 근사하도록 미세하게 조정하였다. 그림 1은 주요 설계변수 값을 표시하며, 표 1에 주요 제원을 표시한 다. 표 1에서 외경 및 두께는 주조 오차 때문에 갖는 편차를 고려하여 원주상 22.5도 간격으로 측정하여 산술평균치를 구하였다. 그림 2는 원주상의 각 위치 에서 측정한 직경 및 두께의 분포를 보이는데, 직경 은 비교적 균일하나 두께는 변동 폭이 커 주조 오차 가상당함을 보인다.

2.2 시험 종의 모드 쌍 측정

종의 기본 구조는 축대칭 회전쉘에 다양한 비대칭 요소들이 부가된 구조로 볼 수 있다.



그림 1. 시험 종의 측면도 Fig. 1. Side view of the test bell.

出 1. 4	시험	헠 송의 제원				
Table	1.	Specification	of	the	test	bell

Total mass	1.1135 kg
Mass density	8955 kg/m ³
Young's modulus	127.5 GPa
Poisson's ratio	0.35
Height (h)	152.68 mm
Average thickness (t)	3.12 mm
Average diameter (D)	58.04 mm



그림 2. 시험 종의 비대칭성 Fig. 2. Asymmetric property of the test bell.

Donnel-Mushtary-Vlasov 쉘 이론에 근거하면, 회전 쉘에서 소리를 방사하는 반경방향 진동성분의 직교 모드 쌍 모델은 다음과 같이 표시 가능하다.^[17]

$$U_{mni}(z,\theta,t) = H_m(z)\sin n(\theta - \phi_i)\cos 2\pi f_i t$$

$$(i - I_i H)$$
(1)

$$(i - L, n)$$

$$\phi_H = \phi_L + \pi/2n \tag{2}$$

여기서, H_m(z)는 회전쉘의 높이 축에 따른 진동 형이고, $\sin n(\theta - \phi_i)$ 는 원주상에서의 진동형이다. 본 연구에서 맥놀이를 만드는 1차 진동모드에서는 n=2이다. 완전 축대칭일 경우 위상 φ_i에 무관하게 하 나의 고유진동수를 가지나, 미세한 비대칭성이 있을 때는 ϕ_L , ϕ_H 의 절점 위상을 갖는 L, H 모드 쌍과 f_L, f_H의 주파수 쌍으로 분리된다. 여기서 L 모드는 진동 모드 쌍 가운데에서 낮은 고유진동수를 갖는 진동모드이고, H모드는 높은 고유진동수를 갖는 모 드를 의미한다. 안성종 등은 종 표면에서 방사되는 음압도 식(1)의 분포를 가짐을 이론적으로 증명한 바 있다.[18] 이에 근거하여 본 연구에서는 타종시 종 표면에서의 방사음을 마이크로폰으로 측정하여 주 파수와 모드 데이타를 측정하였다. 가속도계를 사용 하지 않은 이유는 가속도계의 질량이 미세한 비대칭 성에 미치는 영향을 배제시키기 위함이다.

그림 3은 시험 종의 맥놀이를 만드는 1차 고유진 동수쌍을 보인다. 그림 3(a)는 L,H 모드 절점의 정중 앙을 타격하고 같은 지점에서 측정한 경우로, 두 주 파수 성분이 대등하게 발생하는 것을 보인다. 그림 3(b)



는 H모드의 절점을 타격하여L 모드만 진동시킨 경 우이고, (c)는L모드의 절점을 타격하여 H모드 진동





그림 4	. 시험 송의 1차 모드 쌍
	(a) 측정 장면, (b) 모드 쌍
Fig. 4	. 1st mode pair of the test bell.
	(a) Photo of measurement, (b) Mode pai

수만 발생시킨 경우이다. 1차 진동모드 쌍은 444.53 Hz와 451.17 Hz의 L,H 주파수를 가지며, 맥놀이 주기 는 이 두 주파수 차이의 역수인 0.15초로 상당히 빠른 편이다. 소형종의 경우, 작은 주조 오차도 상대적으 로 큰 비대칭성을 유발시키므로 맥놀이 주기가 짧은 경향을 보인다. 그림 4(a)는 모드 쌍 데이터를 측정하 는 장면이고, (b)는 절점 측정치와 식(1)을 사용하여 모드 쌍을 그린 결과이다. 모드 쌍의 절점 위치는 충 격 해머 신호와 마이크로폰 신호 사이의 주파수응답 함수로부터 확인하였고, 절점 부근에서는 세분하여 타격하면서 각각의 피크레벨이 최소가 되는 위치를 구하였다. 표 2는 1차 주파수 쌍과 모드 쌍의 절점 데 이터를 보인다. φ_L, φ_H는 각각 타격점(당좌)을 기준 (0°)으로 하는 L, H 모드의 절점 위상으로 절점은 모 드별로 90° 간격으로 위치한다. 표 2. 1차 모드 쌍의 주파수와 절점 데이타

Table 2. Frequency and node data of the first mode pair.

1st natural frequency calculated	451.20 Hz		
1st natural frequency measured (L mode)	444.53 Hz		
1st natural frequency measured (H mode)	451.17 Hz		
Beat period	0.15 sec		
L mode node ϕ_L	56.25°, 146.25°, 239.06°, 29.06°		
H mode node ϕ_H	8.44°, 98.44°, 196.06°, 78.44°		

2.3 등가 종의 구성

등가 종의 구성은 Rourke 등^[19]과 박한길 등^[10]에 의 하여 제시된 등가 링 이론에 근거한다. 등가 링 이론 에 따르면, 미소 비대칭 링과 동일한 모드 쌍 조건을 갖도록 축대칭 링에 한 개 이상의 집중 질량을 부가 하여 구성된다. 이러한 등가 링은 여러 개가 만들어 질 수 있으나, 모든 등가 링은 국부적으로 구조 변경 시킬 때, 모드 쌍의 변화가 동일하다는 것이 이론적 으로 증명된 바 있다. 박한길 등은 하나의 모드 쌍 조 건을 만족시키는 가장 단순한 등가 링으로, 축대칭 링에 하나의 집중 질량을 갖는 등가 링을 제시한 바 있다.[11] 이에 근거하여 본 연구에서는 맥놀이를 만 드는 1차 모드 쌍 조건을 만족시키도록, 하나의 집중 질량을 갖는 등가 종을 구성하였다. Hong은 링 이론 으로 원주상에 집중질량이나 컷을 부착하는 위치가 H 모드의 절점 φ_μ(L 모드의 배)가 되는 것을 밝혔 다.^[4] 또한, Kim 등은 원통쉘을 대상으로 리셉턴스 해 석법으로 이를 확인하였다.^[8] 이에 근거하여 등가종 에 필요한 집중 질량의 위치를 정할 수 있다.

등가 종이 실제 종과 동일한 모드 쌍의 배치를 갖 도록, 집중 질량을 Η 모드의 절점 가운데 하나인 $\phi_H = 8.44^{\circ}$ 에 부착하였다. 맥놀이 주기는 집중 질량 의 크기로 결정되는데, 이에 대한 이론 모델은 없다. 여기서는 측정된 맥놀이 주기와 동일한 값을 갖도록 유한요소해석을 통하여 찾았다. 그림 5는 종의 총질 량에 대한 집중질량의 비를 증가시키면서 L, H 모드 진동수 변화를 유한요소해석으로 구한 결과이다. 질 량비 증가에 따라 H 모드와 L 모드의 주파수 차이는



그림 5. 질량비에 따른 주파수 모드 쌍 Fig. 5. Frequency pair vs. the mass ratio.



그림 6. 등가 종 모델 Fig. 6. Equivalent bell model.

거의 선형적으로 증가하고, 이에 따라 맥놀이 주기 는 쌍곡선 형태로 감소한다. 해석으로부터 1%의 질 량비 즉 11.14 g의 집중질량을 $\phi_H = 8.44^{\circ}$ 에 부착할 때, 모드 쌍의 분포는 측정결과와 일치하고, 맥놀이 도실제 종과 동일한 0.15초의 주기를 갖는 등가 종이 되는 것을 확인하였다. Fig. 6은 완성된 등가 종 모델 을 보인다.

Ⅲ. 등가 종을 이용한 맥놀이 조절

종의 맥놀이 주기를 조절하기 위해서는 하대 내부 의 적절한 위치를 연삭해서 두께를 국부적으로 감소 시키는 방법이 보편적이다. 가장 두꺼운 하대의 두 께를 감소시키는 것이 인위적으로 비대칭성을 변화 시키는데 가장 효과적이기 때문이다. Lee 등^[20]은 보



tiking point (b)

그림 7. 두께 감소의 위치 (a) 등가 종 모델, (b) 시험 종 Fig. 7. Position of the thickness decrement. (a) Equivalent bell model, (b) Test bell.

신각새종을 대상으로 반복 연삭을 통하여 맥놀이 특 성을 조절한 바 있다. 등가 종 모델을 이용하면, 연삭 량을 시뮬레이션을 통하여 예측할 수 있으므로 반복 연삭에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있다. 판이나 링 요소 단면의 굽힘 강성은 두께의 3승에 비례하나 질량은 두께에 비례한다.^[17] 따라서 H모드 배(L모드 의 절점)의 요소 두께를 감소시키면 H모드의 강성 감소 효과로 진동수가 감소한다. 반면에 L모드의 강 성은 거의 변하지 않으므로 L모드 주파수는 유지된 다. 그 결과 두 진동수의 차이는 작아지고, 맥놀이 주 기가 길어진다. 반대로 L모드 배 위치의 두께를 줄 이면, 맥놀이 주기는 짧아진다. 본 연구에서는 그립 7과 같이 당좌(0°) 우측 146.25°에 위치한 H모드의 배 에서 하단으로부터 높이 40 mm, 폭 10 mm 요소의 두 께를 단계적으로 감소시켰다. 이에 따른 맥놀이 주 기의 변화를 유한요소해석을 통하여 예측하고 실험 적으로 검증하였다. 그림 8은 해석 및 실험 결과를 비 교한다. L 모드의 절점 부근을 연삭하므로, L 모드의 고유진동수는 거의 변하지 않는 것이 두 결과에서 잘 일치한다. H 모드의 강성이 감소하면서 고유진동 수가 감소하는 경향도 유사하다. 그러나 3번째 연삭 부터는 H 모드의 고유진동수는 실험에서 더 크게 감 소하고, L 모드 진동수도 측정치가 조금 더 감소한 다. 이 차이는 실제의 연삭 상태와 유한요소해석 모



그림 8. 국부적인 두께 감소에 따른 주파수 쌍 변화 Fig. 8. Frequency change by local thickness decrement.

델의 차이 때문으로 확인되었다. 그림 7(a)에서 보듯 이, 유한요소 해석에서는 두께 감소가 균일하나 그 림 7(b)의 연삭에서는 이 조건을 만족시키기가 어려 웠다. 회전 연삭 커티를 사용하면서 요소 중앙 부분 이 평균 연삭치보다 더 깊게 연삭되었고, 그 결과 H 모드의 강성은 해석에서보다 더 크게 감소하고 고유 진동수도 더 떨어지게 되었다. L모드의 경우는 연삭 요소가 절점 부근이라 그 효과가 작게 나왔다. 그림 9 는 연삭으로 두께가 3.0 mm~2.5 mm 범위에서 감소 하는 데에 따른 주파수 쌍의 변화와 맥놀이 주기의 측정 결과를 보인다. 국부적인 두께 감소로 1차 모드 가 가졌던 초기의 비대칭성이 점차 감소하면서 두 개의 피크가 점차 가까워지고, 그 결과 맥놀이 주기 가길어지는 것을 알 수 있다.

반대로 L 모드 배의 위치에서 동일한 연삭 작업을 수행한다면 맥놀이 주기를 짧게 만들 수도 있을 것 이다. 이러한 연삭은 동일한 효과를 내는 여러 절점 위치에서 나누어 수행함으로써, 구조적 안정성을 훼 손시키지 않고 주기를 조절할 수 있을 것이다. 일단 등가 종이 구성된다면, 시뮬레이션을 통하여 연삭 위치, 연삭부위의 면적 및 연삭 두께에 대하여 유용 한 정보를 얻을 수 있을 것이다.



그림 9. 국부 요소의 두께와 맥놀이 주기 (a) 두께=3.00 mm, 주기=0.15 sec, (b) 두께=2.71 mm, 주기=0.18 sec

- (c) 두께=2.64 mm, 주기=0.21 sec, (d) 두께=2.50 mm, 주기=0.26 sec Fig. 9. Thickness of the local element and beat period.
 - (a) Thickness=3.00 mm, period=0.15 sec, (b) Thickness=2.71 mm, period=0.18 sec, (c) Thickness=2.64 mm, period=0.21 sec, (d) Thickness=2.50 mm, period=0.26 sec.

본 방법은 대형종의 맥놀이 조절에 더 효과적이 다. 무게가 십 톤이 훨씬 넘는 대형 종의 맥놀이 조절 시에는 연삭량이 상당하므로 긴 시간이 필요하고, 연삭에 오류가 발생하면 바로 잡기가 매우 어렵다. 본 방법에 근거하여 등가 종을 구성한 후 시뮬레이 션을 통하여 소요되는 연삭량을 추정하여 조금씩 단 계적으로 연삭량을 늘려 간다면, 오류를 피하고 적 절한 주기의 맥놀이를 만드는데 소요되는 시간과 비 용을 크게 줄일 수 있을 것이다.

Ⅳ. 결 론

종의 여음의 맥놀이를 만드는 1차 진동모드의 모 드쌍조건을 만족시키기도록 축대칭 종형 구조물에 하나의 집중 질량을 갖는 등가 종 모델을 구성하였 다. 등가 종을 이용한 시뮬레이션을 통하여, 종 하대 의 요소 두께를 국부적으로 감소시켰을 때 맥놀이 주기의 변화를 예측하였고, 시험 종의 연삭 실험을 통하여 결과의 타당성을 검증하였다. 등가 종의 시 뮬레이션으로부터 요구되는 맥놀이 주기를 얻기 위 한 연삭 위치와 연삭부위의 면적 및 두께의 정보를 구할 수 있었다. 제시된 방법을 연삭량이 상당히 큰 대형 종의 맥놀이 조절에 적용한다면 연삭에 소요되 는 시간을 크게 줄일 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재 원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 (No.2011-0014645)임.

참고문헌

- 1. 염영하, "한국종의 연구," *한국정신문화연구원 연구 논총*, pp. 84-14, 1984.
- 이병호, "한국범종의 음향학적 해석," 한국음향학회 지, 1권, 1호, pp. 6-18, 1982.
- 이병호, "한국 범종의 음관과 명동," 한국음향학회지, 2권, 1호, pp. 1-10, 1983.

- J. S. Hong, J. M. Lee, "Vibration of circular rings with local deviation," *J. Applied Mechanics*, vol. 61, no. 2, pp. 317-322, 1994.
- T. D. Rossing and A. Perrier, "Modal analysis of a Korean bell," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 94, no. 4 pp. 2431-2433, 1993.
- 김양한, 김시문, "원통형 음향 홀로그라피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장 특성분석," 한국음향학회 지, 16권, 4호, pp. 94-100, 1997.
- 김양한, 박순홍, 김시문, "성덕대왕신종 내부 음장 및 울림통이 신종의 소리에 미치는 영향과 새로운 울림 통 크기의 제안," 한국음향학회지, 16권, 5호, pp. 60-67, 1997.
- S. H. Kim, W. Sodel, J. M. Lee, "Analysis of the beating response of bell type structures," *J. Sound Vib.*, vol. 173, no. 4, pp. 517-536, 1994.
- S. H. Kim, C. W. Lee, J. M. Lee, "Beat characteristics and beat maps of the King Seong-deok Divine Bell," *J. Sound Vib.*, vol. 281, no. 1-2, pp. 21-44, 2005.
- H. G. Park, S. H. Kim, Y. J. Kang, "Analytical method of beat tuning in a slightly asymmetric ring," *Journal* of Mechanical Science and Technology, vol. 21, no. 8, 2005.
- H. G. Park, Y. J. Kang, and S. H. Kim, "Dual mode tuning strategy of a slightly asymmetric ring," J. Acoust. Soc. Am., vol. 123, no. 3, pp. 1383-1391, 2008.
- 정원태, 강연준, 김석현, "보조공동과 간극을 갖는 원 통형 공동의 음향전달특성," *한국음향학회지*, 29권, 3호, pp. 173-183, 2010.
- W. T. Jeong, Y. J. Kang, S. H. Kim, "Acoustic transmission analysis on cavity resonance sound in a cylindrical cavity system : Application to a Korean bell," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 2, pp. 1547-1557, 2012.
- 김석현, 최승훈, "등가 링을 이용한 맥놀이 조절법," 한국음향학회지, 27권, 7호, pp. 365-371, 2008.
- 15. ANSYS Inc., ANSYS Release 13.0 Documentation, 2010.
- 16. http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulusd_773.html : ASTM B31.1-1995.
- W. Soedel, *Vibrations of Shells and Plates*, New York: Marcel Dekker, Inc. 1993.
- 안성종, 강연준, 김석현, 박성용, "미소 비대칭 원통 쉘의 음향 맥놀이 해석," *한국음향학회지*, 27권, 4호, pp. 183-190, 2008.
- A. K. Rourke, S. McWilliam, C. H. J. Fox, "Multi-mode trimming of imperfect rings," *J. Sound Vib.*, vol. 248, no. 4, pp. 695-724, 2001.
- J. M. Lee, S. H. Kim, S. J. Lee, J. D. Jeong, H. G. Choi, "A study on the vibration characteristics of a large size korean bell," *J. Sound Vib.*, vol. 257, no. 4, pp. 779-790, 2002.

▌ 저자 약력

▶ 김 석 현(Seock-hyun Kim)



1982년 2월: 서울대학교 기계설계학과 (공학석사) 1987년 8월: 서울대학교 기계설계학과 (공학박사) 1988년3월 ~ 현재: 강원대학교 기계메 카트로닉스공학과 교수 〈관심분야〉 자동차/철도차량 소음진동,

범종 진동 음향

▶ 이 중 혁(Joong-hyeok Lee)



2011년 2월: 강원대학교 기계메카트로닉 스공학과(공학사) 2011년 ~ 현재: 강원대학교 기계메카트 로닉스공학과(석사과정) 〈관심분야〉 철도차량 차음, 범종 진동 음향