

ODS를 이용한 대형종의 맥놀이 지도 작성법

Beat Map Drawing Method for a Large Size Bell using ODS

박인석* · 이중혁* · 박선미* · 김석현†

Inseok Park, Jungheok Lee, Sunmi Park, Seockhyun Kim

Key Words : ODS(운행중 변형 형상), Transmissiblity(전달률), Beat map(맥놀이지도)

ABSTRACT

Beat map shows the distribution property of the beating sound in the bell structure. Using the beat map, beat control and beat estimation are available. To draw the beat map, mode pair parameters of the bell are required. However, in case of large bell which is struck by a heavy wooden hammer, it is very difficult to measure the excitation force and to obtain the mode pair parameters. In this paper, we determined the mode pair parameters of the bell from the transmissibility between the roving signal and reference signal, using ODS(operational deflection shape) method. The mode pair data are input to the theoretical model of the beat response and beating waves are generated on the bell circumference. All the numerical and beat map drawing procedures are automatized using Matlab. Finally, the reliability of the beat map generated by the program is verified.

기 호 설 명

ϕ_L, ϕ_H : L, H node 위상

θ^* : 원주상 타격 위치

θ : 측정 위치

ψ^* : 축상의 타격 위치

ω_{mma} : 모드쌍 평균 주파수

ζ_{mma} : 모드쌍 평균 감쇠비

ρ : 밀도

h : 셸 두께

1. 서 론

맥놀이는 서양종에서 듣기 힘든 한국 범종의 독특한 특성으로 소리가 작아졌다 다시 커지는 과정을 반복하여 종이 마치 살아서 숨을 쉬는 듯한 생명력

을 느끼게 한다. 이러한 맥놀이는 종의 주조 과정에서 불가피 하게 발생하는 질량 및 강성의 비대칭적 분포와 문양과 같은 인위적인 비대칭 요소에 의해 발생하는 모드쌍의 간섭이 그 원인이다.⁽¹⁾ 따라서 주조 후 이러한 비대칭성을 조절하면 맥놀이의 주기나 선명도의 조절이 가능하다.⁽²⁾ 실제 대형종은 주조 후 맥놀이 조율과정을 거치며, 이 과정을 통해 이전 보다 더 선명하고 편안한 맥놀이를 갖게 된다. 맥놀이 특성을 파악하기 위해서는 종의 각 부분에서 어떻게 맥놀이가 분포하는지를 보여주는 맥놀이지도가 필요하다.⁽³⁾ 맥놀이 지도를 그리기 위해서는 종의 정확한 모드쌍 변수를 알아야 한다. 그러나 커다란 당목으로 타종하는 대형종의 경우, 충격 해머를 사용하여 가진하는 것이 어렵다. 따라서 가진력의 측정이 어렵고 주조 현장에서 모드쌍 변수를 구하는데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 ODS (Operating Deflection Shpae) 를 이용하여 가진력의 크기를 모르는 상태에서 종의 충격응답만으로 모드쌍 변수를 구하고, 이로부터 맥놀이 지도를 자동으로 작성하는 프로그램을 개발하는 것을 목표로 한다. 주조 현장에서 실제 타종하에서의 응답신호만으로 모드쌍

† 교신저자; 정희원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
E-mail : seock@kangwon.ac.kr

Tel : (033)250-6372, Fax : (033)257-4190

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

변수를 추출하여 자동으로 맥놀이지도를 그려낸다면, 맥놀이를 조절하고 평가하는 데에 크게 도움이 될 것이다.

2. 범종 측정 및 결과

2.1 ODS 측정 방법

ODS의 측정은 시간영역방법과 주파수영역 방법으로 가능하다.^(4,5) 시간영역법은 랜덤 가진 하에 ODS를 측정 하는데 유용하다. 그러나 종의 경우와 같이 순간적인 충격 가진이고, 매 타격시 타격력이 일정하지 않은 경우에는 주파수영역법이 유리하다. 주파수영역법에서는 두 개 이상의 센서를 사용하는 데, 두개의 센서로부터 측정된 응답의 교차스펙트럼(Cross spectrum)이 식 (1)과 같이 표현된다.

$$G_{xy}(\omega) = F_x(\omega)F_y^*(\omega) \quad (1)$$

여기서 F_x 는 이동센서의 응답, F_y 는 기준센서의 응답을 나타낸다. 가진력의 크기에 무관한 응답 정보를 얻기 위하여 다음과 같이 기준센서 응답에 대한 이동센서 응답의 전달율(Transmissibility)을 이용하여 ODS를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{xy}(\omega) &= \frac{F_x(\omega)F_y^*(\omega)}{F_y(\omega)F_y^*(\omega)} \\ &= G_{xy}(\omega)/G_{yy}(\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

전달율은 가진력의 변화와 무관한 응답 정보를 얻을 수 있으나, Fig. 1과 같이 공진 피크가 사라지는 ‘flat spot’이 생기는 단점이 있다. 따라서 구조물의 공진 주파수를 확인할 때에는 여러 지점의 파워스펙트럼을 볼 필요가 있다.^(4,5)

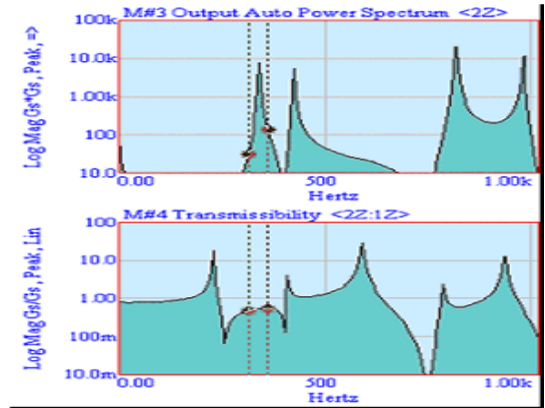


Fig. 1 Auto spectrum & Transmissibility

2.1 측정 결과

두 개의 가속도계를 사용하여 Fig. 2의 실제 종을 원주상 15도 간격으로 총 24등분 하고 당좌 위치를 기준점인 1번으로 하였다. 매 당좌 타격시 1번부터 24번 지점 응답의 기준점 응답에 대한 전달율을 측정하였다.



Fig. 2 Korean Bell

Table 1 Dimension of the Bell

Outside radius of Hadae	2549 mm
Thickness of Hadae	20~30 mm
Height	6540mm
Mass	106 Kg

측정 결과 Fig. 3과 같이 맥놀이를 만드는 n= 2 모드쌍의 분포와 각각의 모드변수를 Table 2와 같이 얻을 수 있었다.

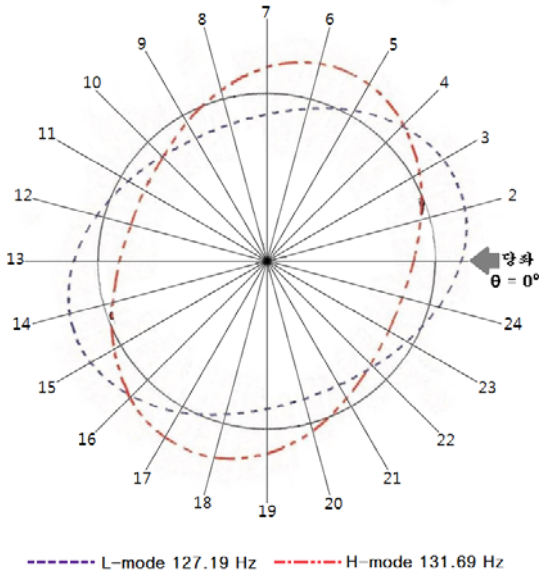


Fig. 3 (0,2) mode shape of the Bell

Table 2 Modal parameter of the Bell

Parameters	(0,2)mode
ϕ_L	1.23
ϕ_H	0.445
ω_{mnL}	799.19
ω_{mnH}	827.46
ζ_{mna}	0.000038

3. 맥놀이 지도 작성

3.1 모드쌍 맥놀이 응답 이론

미소 비대칭성을 갖는 종 표면의 반경방향 운동은 다음의 형태로 표시 가능하다.⁽³⁾

$$\dot{u}_3(\psi, \theta, t) = \sum_m \sum_n \sum_\gamma \frac{\hat{F}H_{3m}(\psi^*)H_{3m}(\psi) \cos n(\theta^* - \phi_\gamma) \cos n(\theta - \phi_\gamma)}{\rho h N_{mn}} \times e^{-\zeta_{mny} \omega_{mny} t} \cos(\omega_{mny} t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \omega_{mna} &= (\omega_{mnL} + \omega_{mnH})/2 \\ \zeta_{mna} &= (\zeta_{mnL} + \zeta_{mnH})/2 \end{aligned} \quad (4,5)$$

여기서, $-C_{mn}$ 은 모드 상수이며, 모드쌍의 주파수 쌍과 감쇠비쌍에 대해서는 식 (4,5)와 같이 평균치를 사용한다.⁽³⁾

3.2 맥놀이 지도 자동 작성 프로그램

맥놀이 지도란 종의 원주상에서 각 지점의 진동 모드별 맥놀이 파형을 방사형으로 배열 시킨 그림이다. 이 맥놀이 지도를 이용하면 방향에 따른 소리의 차이를 설명할 수 있고, 좋은 맥놀이가 나오는 위치를 찾아 낼 수도 있다. 현재 종의 진동 맥놀이 특성을 한눈에 파악할 수 있으므로, 맥놀이 조절 작업 및 조절 후 평가에 매우 유용하다. 이러한 맥놀이 지도를 측정을 통해 그리려면 많은 지점에서 진동이 나, 음향 파형을 측정한 후 모드별로 주파수 필터링을 해야 하기 때문에 매우 번거롭고 시간이 걸린다. 하지만 맥놀이 응답 식(3)과 ODS를 측정하여 얻은 Table 2의 모드변수를 사용하면, 실제와 근사한 맥놀이 지도를 현장에서 즉시 그려 낼 수 있다.

본 연구에서는 Matlab을 사용하여 식(3)의 맥놀이 파형을 θ 값에 따라 반복 연산하고, 그 결과를 원주상 일정 간격으로 배열해 주는 맥놀이 지도 자동 생성 프로그램을 개발하였다. Fig. 6은 개발된 프로그램의 창을 보인다. 프로그램의 신뢰도를 검증하기 위해 실제 종을 대상으로 n=2차 진동음의 맥놀이 지도를 비교한 결과를 Fig.7에 보인다. 자동생성 프로그램을 이용하여 그린 맥놀이 지도와 측정을 통하여 실험실에서 장시간을 소요하여 구한 지도는 거의 일치한다. 제시된 기법과 프로그램은 대형 범종에 아무런 제약 없이 적용 가능하므로, 향후 대형 범종의 주조현장에서 매우 효과적으로 활용 가능할 것이다.

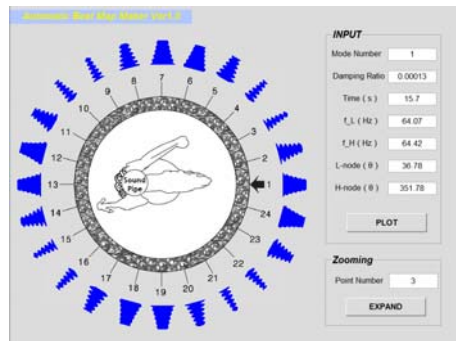
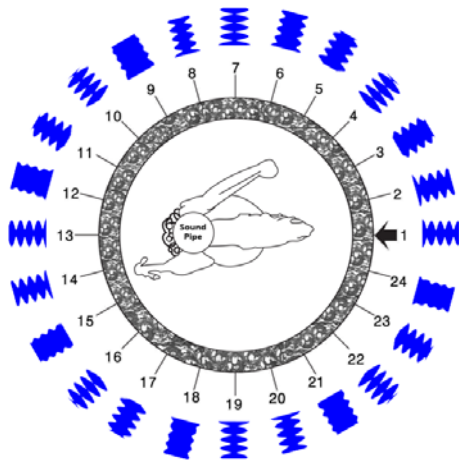
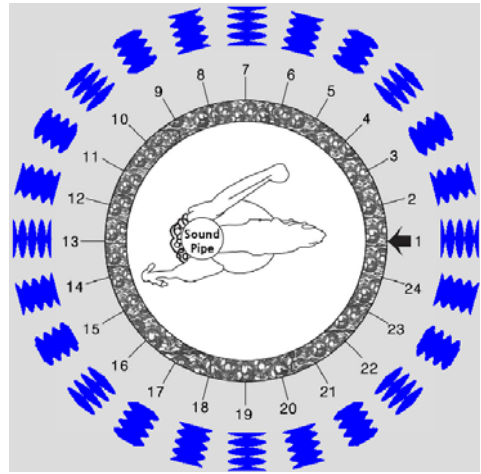


Fig. 6 Automatic Beat Map Drawing Program



(a) Experiment



(b) Analysis

Fig. 7 Beat map of (0,2) mode

4. 결 론

대형종의 맥놀이지도를 주조 현장에서 바로 그릴 수 있는 기법을 제시하였다. 대형종의 경우, 커다란 당목으로 타중하면서 타격력의 크기를 정확히 조절하거나 측정하기 어렵다. 전달율을 이용하여 ODS를 결정함으로써 종의 모드쌍 변수를 구하였다. 이 데이터를 모드쌍 맥놀이 응답식에 입력시키고, Matlab을 이용하여 자동으로 맥놀이 지도를 작성하는 프로그램을 개발 하였다. ODS법에 의하여 추출된 모드쌍 데이터와 개발된 프로그램으로 작성된 맥놀이 지도는 실험적으로 그린 맥놀이 지도와 거의 일치하였다. 개발된 기법 및 프로그램은 대형종의 주조현장에서 유용하게 활용 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, J. M., Cheon.S.H., Kim.S.H., Yum.Y.H, 1989, A Study on the Vibrational Characteristics of Korean Bells(I), Journal of the KSME, Vol. 13, No. 3, pp 397~403
- (2) Kim.S.H., Cui.C.X., 2008, A Study on the

Control of the Beat Clarity and the Beat Period in a Ring Structure, Journal of Sound and Vibration, Vol. 11, No. 18, pp 1170~1176

(3) Kim.S.H., 2003, Beat Map Drawing Method of Bell Type Structures and Beat Maps of the King Seong-deok Divine Bell, Journal of Sound and Vibration, Vol. 8, No. 13, pp 626~636

(4) Schwarz,B, Richardson,M, 1999, Introduction to Operating Delection Shape, Vibrant Tech. Paper No. 29(www.vibetech.com)

(5) Schwarz,B, Richardson,M, 2004, Measurements Required for Displaying Operating Deflection shape, Vibrant Tech. Paper No. 43(www.vibetech.com)