

# 능동 제어를 통한 판의 진동 국부화

## Active control of localizing vibration in a plate

김대성\* · 김기현\*\* · 유호민\*\* · 왕세명†

Daesung Kim, Kihyun Kim, Homin Ryu and Semyung Wang

### 1. 서 론

전자기기의 사용자 촉각인터페이스 향상을 위한 햅틱(Haptic)기술로서 대상체의 진동 국부화 기술이 연구 되어 왔다. 진동 국부화 기술 구현을 위한 능동제어는 다중의 진동원을 진동하는 대상체에 장착하여 진동원들의 입력을 진동 국부화를 목적으로 설계하는 방법이다. 이와 관련된 연구로 국부화 영역과 모서리에 위치한 진동 가진기들 간의 거리들을 각각 계산하여 그 거리들에 반비례하는 세기의 전압을 진동 가진기들에 인가하는 방식과, 거리들에 반비례하는 주파수들을 진동 가진기들에 각각 설정하는 방식이 제시되었다. 그러나 앞의 두 방식은 진동의 국부화가 구현되지 않아 생동감이 약한 단점과 정밀한 진동제어가 어려워 촉감을 전달하는 효과가 떨어지는 단점을 각각 가지고있다.

본 연구에서는 진동하는 대상체를 모서리가 모두 고정된 판으로 규정하고 판의 특정부분(국부화 영역)을 지정하면 그 부분에 진동이 국부화 되도록 다중의 진동원들의 입력가중치(크기와 위상)를 결정하는 제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 수치해석을 통하여 그 성능이 평가되었다.

### 2. 본 론

#### 2.1 문제 정의

Fig. 1은 판의 진동 국부화 문제를 위한 파라미터를 정의하고 있다.  $\vec{x}_n$ 의 위치에 다수의 진동원이 부착되어 있는 판에서 각 진동원들로부터 발생된 진동을 국부화 영역  $A_{target}$ 으로만 전달되도록 각 진동원

의 입력 가중치를 결정하는 것이 진동 국부화 문제이다. 입력 가중치 벡터는 다음 같이 표현된다.

$$\vec{w}_n = [w_1, \dots, w_n]^T \quad (1)$$

진동을 국부화 할 영역  $A_{target}$ 의 위치를 표현하기 위해 판의 측정점은  $\vec{x}_m$ 으로 나타내었다.

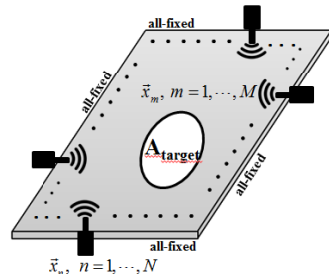


Fig. 1 진동 국부화를 위한 파라미터 정의

#### 2.2 제어 방법

Fig. 1에 묘사된 진동 국부화를 구현하기 위해서는 각 진동원들로부터 판으로 진동이 전달되는 특성을 먼저 규명해야 한다. 판의 전달 함수 예측 방법은 2.3절에서 다루고, 본 절에서는 n-지점에서 m-지점으로의 전달 함수 행렬을 다음 식과 같이 두고 제어 방법에 관해 논의 한다.

$$\vec{H}_{mn} = \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{1n} & \dots & H_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1} & \dots & H_{mm} & \dots & H_{mN} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1} & \dots & H_{Mn} & \dots & H_{MN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(1) 역 필터링<sup>(1)</sup>

역 필터링은 목표 응답( $\vec{T}_m$ )과 계산되는 응답( $\vec{H}_{mn} \cdot \vec{w}_n$ ) 간 오차의 최소화승 해를 만족하는 제어 기법으로 다음과 같은 목적 함수의 최적해이다.

$$\text{minimize } J = \vec{E}_m^H \vec{E}_m + \alpha \cdot \vec{w}_n^H \vec{w}_n \quad (3)$$

$$\vec{E}_m = \vec{T}_m - \vec{H}_{mn} \cdot \vec{w}_n \quad (4)$$

식(3) 우변의 첫 번째 항은 성능 오차의 자승이며,

† 교신저자; 광주과학기술원 기전공학부  
E-mail : smwang@gist.ac.kr  
Tel : (062) 970-2390, Fax : (062) 970-2384

\* 삼성전자  
\*\* 광주과학기술원 기전공학부

두 번째 항은 효과 패널티(effort penalty)를 나타내는 항이다.

(2) 조절된 대조 제어<sup>(2,3)</sup>

조절된 대조 제어를 위해 국부화 영역  $A_{target}$  을  $L$  로 재 정의하고  $A_{target}$  이외의 영역을  $C$ 로 정의한다. 그러면  $L$ 영역에서의 출력 벡터는  $\overrightarrow{H_{in} w_n}$ ,  $C$ 영역에서의 출력 벡터는  $\overrightarrow{H_{cn} w_n}$ 로 표현된다.

조절된 대조 제어는 입력파워와  $C$ 영역에서의 출력 파워에 구속되면서  $L$ 영역에서의 출력 파워를 최대화하는 최적화 문제로 다음 식과 같이 표현된다.

$$\text{maximize } P_L = \frac{1}{M_L} \overrightarrow{w_n^H H_{in}^H H_{in} w_n} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } P_\beta = \frac{1}{M_C} \overrightarrow{w_n^H H_{cn}^H H_{cn} w_n} + \beta \cdot \overrightarrow{w_n^H w_n} \quad (6)$$

2.3 판의 전달함수 예측

진동 국부화를 구현하기 위해서는 가진점  $\overrightarrow{x_n}$ 으로 부터 측정점  $\overrightarrow{x_m}$ 으로의 전달 특성  $\overrightarrow{H_{mn}}$ 이 규명되어야 한다.

(1) 고반향장에서의 전달함수 예측

Fig. 1의 판은 반사파의 간섭이 커져 신호 대 잡음비가 매우 떨어지는 고반향장에 해당된다. 이러한 신호 대 잡음비가 현저히 떨어지는 시스템은 Sine sweep 에 의한 시스템 예측이 권고되고 있으며, 이에 따라 Time-Delay Spectrometry를 이용하여 판의 전달함수를 예측하였다.

(2) 유한 요소 모델: 과도 해석

Sine 신호 입력에 대해 판의 진동을 묘사하는 유한 요소 해석은 주파수 응답 해석과 과도 해석이 있다. 주파수 응답 해석은 정적 해석과 사실상 다르지 않기 때문에 시스템의 위상 특성은 묘사하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 판의 동적 거동을 유한요소 과도 해석으로 묘사하였다.

2.4 제어 결과

Fig. 2는 설정한 국부화 영역 및 진동원들의 위치를 도시하고 있다. 현재의 시스템은 대칭이므로 판의 1/4 영역만을 국부화 영역 1~6으로 설정하였고, 진동원의 개수는 8과 24로 각각 설정하였다.

진동원의 가진주파수는 LGIT와 삼성전기에서 사용하는 선형 공진 모터의 주파수 160Hz와 175Hz로 결정하였고 제어방법은 조절된 대조 제어를 사용하

였다. Fig. 3은 제어 결과를 나타낸다.

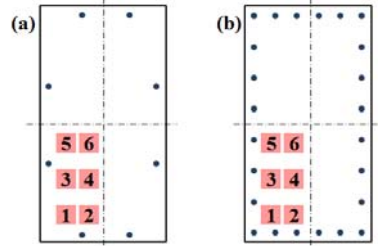


Fig. 2 진동 국부화 영역 및 진동원 설정 (a) 8개의 진동원 (b) 24개의 진동원

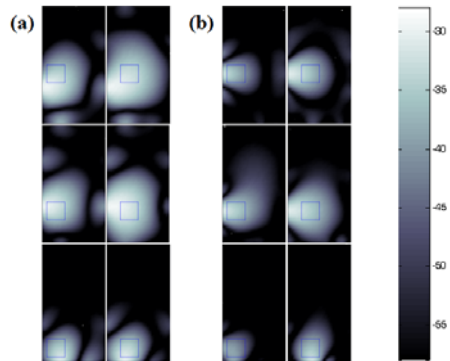


Fig. 3 진동 국부화 결과 (a) 8개 (b) 24개의 진동원

3. 결론

다중 진동원을 제어하여 다중 지점의 진동을 국부화 하는 문제를 정의 하였고, 조절된 대조 제어 기법으로 정의된 문제의 해를 제시하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 광주과학기술원 교수기본연구에 의하여 이루어진 연구로서 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] M.Tanter et al., "Time reversal and inverse filter", JASA 108(1), 223~234, 2000  
 [2] J.W.Choi et al., "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources", JASA 111(4), 1695~1700, 2002  
 [3] D.Kim. "Design and control of loudspeaker arrays for sound projection", GIST, Doctorial thesis, 8~12, 2012