

비공진영역과 공진영역에서의 능동 제어를 통한 판의 진동 국부화

Active control of plate for vibration localization in non-resonance and resonance frequency ranges

유호민* · 김기현* · 왕세명† · 김대성**

Homin Ryu, Kihyun Kim, Semyung Wang and Daesung Kim

1. 서 론

정보화 기기와 사용자간의 인터페이스를 담당하는 주요 장치로 터치스크린이 사용되고 있다. 그리고 터치스크린의 촉각적 인터페이스 향상을 위한 햅틱(Haptics)기술로 진동 국부화 기술이 연구되어 왔다. 진동 국부화는 대상체에 부착된 다수 진동원들의 능동제어를 통해 이루어지며, 진동원들의 입력 설계가 주된 문제이다.

정보화 기기가 다양한 만큼 진동 국부화 기술이 적용될 대상체의 진동특성도 다양하다. 하지만 사람이 진동을 지각하게 해주는 파치니언 소체는 10~500Hz 영역의 자극에만 반응을 하고, 제조사에서 생산되고 있는 진동모터들도 한 주파수에서만 작동하도록 국한되어있는 것이 대부분이다. 이처럼 진동 국부화가 이뤄질 주파수는 사람의 지각영역과 진동모터의 작동주파수로 한정되지만 진동 국부화가 적용될 대상체의 진동특성은 기기마다 다르게 나타난다. 그러므로 작동주파수에서 대상체의 진동 특성에 따라 다른 진동국부화 방식이 필요하다.

본 연구에서는 작동주파수가 대상체의 비공진주파수영역과 공진주파수영역인 경우로 나뉘, 진동하는 대상체를 모서리가 모두 고정된 판으로 규정하고 판의 특정부분(국부화 영역)을 지정하면 그 부분에 진동이 국부화 되도록 다중 진동원들의 입력을 결정하는 제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 수치해석을 통하여 그 성능이 평가되었다.

2. 본 론

2.1 문제 정의

Figure 1은 진동 국부화 문제를 위한 파라미터들이 정의하고 있다. $r_s^{(m)}$ 의 위치에 다수의 진동원이 부착되어 있는 판에서 각 진동원들로부터 발생된 진동을 국부화 영역(Target region) $r^{(n)}$ 으로만 전달되도록 각 진동원의 입력 f 를 결정하는 것이 진동 국부화 문제이다.

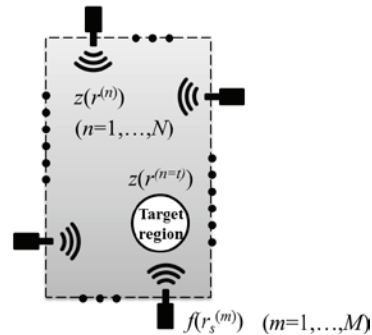


Figure 1 진동 국부화를 위한 파라미터 정의

2.2 비공진주파수영역에서의 진동 국부화

음장을 제어하는 기술 중 소리를 특정 영역에 집중시키는 공간 집중 기술이 있다. 진동 국부화 문제와 소리 집중 문제는 파동을 매질 중 특정 영역으로만 집중시킨다는 공통점을 가지고 있어 동일한 제어 방법을 적용시키는 것이 가능하다. 공간 집중 기술은 앞먹임 제어방식으로, 진동 국부화에 적용시킬 경우 진동을 발생시키는 진동원의 구동의 겹침으로 국부화된 진동을 만들어낼 수 있다. 대표적인 알고리즘으로 조절된 대조제어^(1,2) 기법이 있으며 $r_s^{(m)}$ 지점에서 $r^{(n)}$ 지점에서의 전달함수행렬을 G_{nm} 으로, 입력가중치벡터를 f_m 으로 두었을 때 전체 판에서의 출력벡터는 $G_{nm}f_m$ 으로, 국부화 영역에서의 출력벡터

† 교신저자; 정희원, 광주과학기술원 기전공학부

E-mail : smwang@gist.ac.kr

Tel: (062) 970-2390, Fax: (062) 970-2384

* 광주과학기술원 기전공학부

** 삼성전자

는 $\mathbf{G}_m \mathbf{f}_m$ 으로 표현된다.

조절된 대조제어는 입력과위와 전체영역에서의 출력과위에 구속되면서 국부화 영역에서의 출력과위를 최대화하는 최적화문제로 다음과 같이 표현된다.

$$\max P_T = \frac{1}{T} \mathbf{f}_m^H \mathbf{G}_m^H \mathbf{G}_m \mathbf{f}_m \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_N = \frac{1}{N} \mathbf{f}_m^H \mathbf{G}_{nm}^H \mathbf{G}_{nm} \mathbf{f}_m + \beta \cdot \mathbf{f}_m^H \mathbf{f}_m \quad (2)$$

조절된 대조제어는 각 구동원들의 응답으로부터 국부화된 최적의 응답을 얻기 위한 입력가중치벡터를 계산할 수 있다. 하지만 공진영역에서는 각 구동원들의 응답들이 해당 모드형상으로 모두 동일하게 나타나 원하는 응답을 얻기 위한 입력가중치벡터를 계산하는데 어려움이 있다. 따라서 이 방법은 비공진주파수영역에서의 진동 국부화에만 적절하다.

2.3 공진주파수영역에서의 진동 국부화

공진영역에서는 모드형상이 판의 응답으로 강하게 나타난다. 그러므로 공진영역에서는 판의 모드형상을 진동이 국부화된 형태의 형상으로 바꾸는 것이 진동 국부화에 효과적일 수 있다. 이를 위해 되먹임 제어 기술 중 고유구조지정법을 사용한다. 이 기법은 진동시스템에서 능동 모드 국부화^(3,4)라 하여 구조물에서 진동원 근처에만 진동을 한정시키는 기법으로 연구되어왔다. 변위를 되먹임 시킴으로써 시스템의 고유구조를 변화시킬 수 있고 이때 상태공간 제어 방법이 사용된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{h} \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad \mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{y} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{x} = [\mathbf{z} \ \dot{\mathbf{z}}]^T$ 로 나타나는 상태벡터, \mathbf{y} 는 출력벡터, \mathbf{u} 는 입력벡터, \mathbf{h} 는 외란벡터, \mathbf{A} 는 상태행렬, \mathbf{B} 는 입력행렬, \mathbf{E} 는 외란행렬, \mathbf{C} 는 출력행렬, \mathbf{K} 는 게인행렬이고, M 개의 센서와 액츄에이터가 나란히 배치되어있다고 가정한다. 폐로시스템의 상태방정식은

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{x} + \mathbf{E}\mathbf{h} \quad (4)$$

와 같은 고유값 문제는 다음과 같다.

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C})\boldsymbol{\phi}_i = \lambda_i \boldsymbol{\phi}_i, \quad i = 1, \dots, 2n \quad (5)$$

여기서 λ_i 와 $\boldsymbol{\phi}_i$ 는 폐로시스템의 고유값과 고유벡터이다. 식(5)는 다음과 같이 다시 쓰일 수 있다.

$$[\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I} \mid \mathbf{B}] \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\phi}_i \\ \mathbf{K}\mathbf{C}\boldsymbol{\phi}_i \end{Bmatrix} = \mathbf{0}, \quad i = 1, \dots, 2n \quad (6)$$

행렬 $[\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I} \mid \mathbf{B}]$ 을 \mathbf{S}_{λ_i} 라 정의하면 벡터 $\begin{Bmatrix} \boldsymbol{\phi}_i \\ \mathbf{K}\mathbf{C}\boldsymbol{\phi}_i \end{Bmatrix}$ 는 \mathbf{S}_{λ_i} 의 영공간이다. \mathbf{S}_{λ_i} 의 영공간은 특이값분해를 하였을 때 우특이벡터를 통해 구할 수 있고 이를 이용하여 폐로시스템의 고유벡터를 진동이 국부화된 형태로 바꾸주는 게인행렬 \mathbf{K} 를 구할 수 있다.

2.4 제어 결과

Figure 2는 설정한 국부화 영역과 센서 및 액츄에이터의 위치를 도시하고 있다. 국부화 영역은 왼쪽 아래 1/4 영역을 설정하였고 4개의 진동원을 사용하였다. 판의 비공진주파수인 50Hz와 2번째 고유진동수인 166Hz를 작동주파수로 하여 수치해석기법으로 각 제어방법의 결과를 비교하였다.

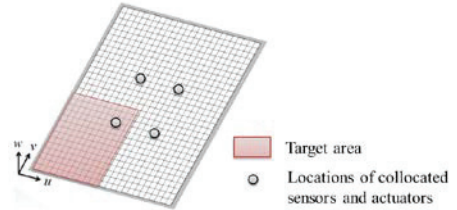


Figure 2 진동 국부화 영역 및 진동원의 위치

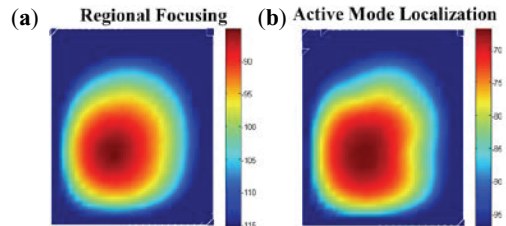


Figure 3 진동 국부화 결과 (a) 50Hz에서 조절된대조 제어 (b) 166Hz에서 고유구조지정법 적용 결과

3. 결 론

다중 진동원을 제어하여 진동을 국부화 하는 문제를 정의 하였고, 비공진주파수영역에서 조절된 대조 제어 기법과 공진주파수영역에서 고유구조지정법을 정의된 문제의 해로 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] J.W.Choi et al., "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources", JASA, 111(4), pp.1695~1700, 2002
- [2] D.Kim. "Design and control of loudspeaker arrays for sound projection", GIST, Doctoral thesis, pp.8~12, 2012
- [3] F.Shelley et al., "Active mode localization in distributed parameter systems with consideration of limited actuator placement, Part1: Theory", Journal of vibration and Acoustics, 122, pp.160~164, 2000
- [4] M.Rastgaar et al., "Experimental application of orthogonal eigenvector control of for structural vibration cancellation", JSV, 329(19), pp3873~3887, 2010