

능동 진동제어용 전자기 액츄에이터 설계

A Design of Electromagnet Actuator for Active Vibration Control

이주훈† · 전정우* · 황돈하* · 강동식* · 최영규**

Joo-hoon Lee, Jeon-woo Jeon, Don-ha Hwang, Dong-sik Kang, Young-kiu Choi

Key Words : electromagnet(전자기), actuator(액츄에이터), active(능동), vibration(진동), control(제어)

ABSTRACT

In this paper, we address an actuator system, which suppresses the micro-vibration engaged by environment. The actuator system consists of two modules with a permanent and an electromagnet. In vertical mode, one module is upper the other is lower. For optimal control of alternating vibration, the rate of the attraction force and the repulsion force is exactly one. Generally, the repulsive force is smaller than the attractive force. For linear control of engaged vibration, the ratio of repulsive force and attractive force is designed to equal. The actuator system will be applied to an active vibration control system for precise vibration suppression.

In this paper, the actuator structure and its important sizes are calculated by RMS and FEM analysis.

1. 서 론

반도체 및 디스플레이 공정으로 대표되는 마이크로 및 나노공정에서는 가공, 측정, 검사 등과 같은 생산단계에서 다양한 정밀 장비들을 사용한다. 장비의 공정정밀도를 유지하기 위해서는 공정에 영향을 주는 진동의 제한이 필수적이다. 초정밀 기술이 급속히 향상되면서 공정장비의 정밀도는 더욱 높아지고 있으며 공정에서 필요한 진동제한치는 진동 표준에서 규정하고 있는 가장 높은 등급을 상회하고 있다. 정밀공정에서는 장비의 진동제한치를 만족시키기 위하여 다양한 수동 및 반자동의 진동 흡수장치를 적용하고 있다. 하지만 수동 및 반자동 진동 흡수장치들을 이용하여 초정밀급의 진동제한을 만족하기 쉽지 않고 정밀도가 높아질수록 필요한 비용 또한 기하급수적으로 늘어나게 된다.

본 논문에서는 초정밀 진동의 효과적인 능동제어와 다양 한 축 배치에 의한 최적의 발란싱제어가 가능한 액츄에이터 시스템을 제안한다.

2. 설계개념

2.1 자기부상시스템

자기부상시스템의 운동은 부상력(levitative force)과 추진력(propulsion force)로 이루어진다. 이동체와 고정체로 구분하여 한 축에는 영구자석을 설치하고 다른 한 축에는 전자석을 설치한다. 전자석에 인가하는 전류의 양을 조절하여 부상변위를 일정하게 유지하고 코일별 전류의 방향을 변경시킴에 따라 이동체에 추진력을 가하게되는 것이다.

본 논문에서 제시하는 전자기 액츄에이터는 자기부상시스템을 구성하는 두 가지 힘중에서 부상력 제어 개념을 적용하여 설계하였다.

그림 1은 자기부상의 원리를 보여주는 그림이다.

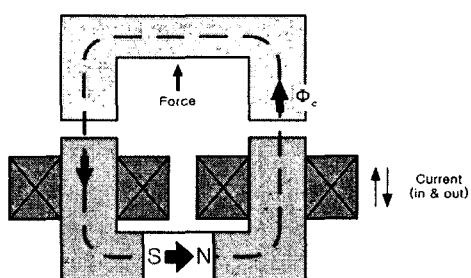


그림 1. 자기부상의 원리

* 한국전기연구원 산업전기연구단

E-mail : jhlee@keri.re.kr

Tel : (055)280-1448, Fax : (055) 280-1547

** 한국전기연구원 산업전기연구단

*** 부산대학교 전기공학과

자기부상방식은 이동체가 고정체로부터 부상되는 방식에 의하여 다음과 같이 두 가지방식으로 구분된다. 자기부상관점에서의 방식은 부상되어 상태를 유지하는 것이기 때문에 한가지 방식을 선택하면 되지만 본 논문에서 설계한 진동제어용 액츄에이터는 흡인과 반발을 진동에 따라서 반복하여 하기 때문에 두 가지방식이 번갈아 작용하여야 한다.

표 1. 자기부상방식의 종류와 특징

	반발식	흡인식
Actuator	초전도 마그네트 또는 영구자석 사용	상전도 마그네트 사용
장점	개루프 안정한 시스템 별도의 안정화 제어 기가 불필요 발열문제 없음	간단하게 6자유도 구현가능 감쇠 및 탄성계수 가변가능
단점	6자유도 제어는 불가능 감쇠 및 탄성계수 가변이 불가능	개루프 불안정한 시스템 별도의 안정화 제어 기 필요 발열문제
대책	6자유도 제어와 감쇠 및 탄성계수 가변위해 전자석 혼용	제어부담 덜고, 발열문제 해결위해 영구자석 혼용

일반적으로 자석의 흡인력(attractive force)은 반발력(repulsive force)에 비해 수배이상 크며 이로 인하여 수직 방향의 제어를 선형적으로 수행하기가 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 능동 진동제어의 관점에서 부하를 수직으로 미는 반발력과 당기는 흡인력의 밸런스를 맞추어 최적의 진동제어성능을 얻을 수 있도록 하는 데에 중점을 두었다.

그림 2는 일반적인 능동 진동제어방식을 위한 흡인력 및 반발력의 밸런싱 개념을 보여준다.

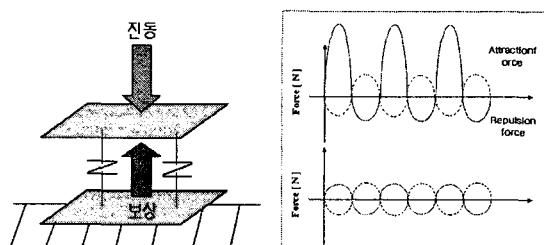


그림 2. 능동 진동제어와 힘의 균형

작용하는 진동은 중립위치를 중심으로 상하로 운동을 하는데 이때 액츄에이터는 반발력과 흡인력을 번갈아 인가하여야 한다. 수동방식 또는 반수동방식의 진동 흡수장치의 경우 스프링과 뱃평요소에 의하여 이의 비율이 결정될 뿐만 아니라 부하의 크기에 따라서도 바뀌게 된다.

흡인력이 반발력에 비해 크기 때문에 힘의 균형이 맞지 않는 것은 상하에 모두 철심형 액츄에이터를 설치하고 같은 전류를 인가할 때에도 마찬가지의 경우가 된다. 즉, 같은 힘의 진동에 대하여 작용하는 방향에 따라 다른 전류로 제어해야하기 때문에 근본적으로 선형적인 제어가 불가능하다. 따라서 흡인력과 반발력의 균형을 맞추어 액츄에이터를 설계하였다.

3. 액츄에이터 설계

3.1 구조설계

흡인력과 반발력의 균형이라는 관점에서 전자석만을 이용하는 철심형 액츄에이터는 배제하고 영구자석과 전자석을 혼용하는 하이브리드 형태의 액츄에이터를 설계하였다.

자력의 효율적인 이용과 제작의 편의성 등을 고려하여 액츄에이터의 형태는 원통형을 기본으로하여 그림 3과 같은 두 가지 방식을 고려하였다.

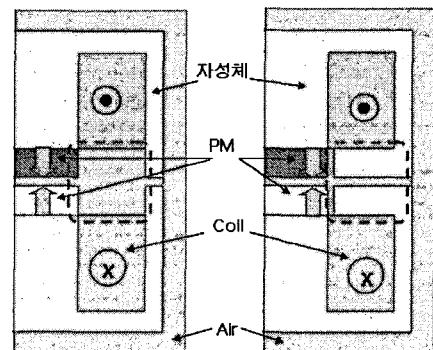


그림3. 영구자석과 전자석을 혼용한 진동 액츄에이터의 축대칭 모델

두 모델은 자속의 path 형태가 다른데 좌측모델은 side path를 통해 자속이 흐름으로 인해서 repulsive force에 기여하는 자속의 누설이 많고 attractive force에 기여하는 자속의 누설은 적은 특징을 보인다. 우측모델은 return path를 설치함으로써 repulsive force에 기여하는 자속의 누설을 줄인 형태로 상대적으로 attractive force에 작용하는 누설은 커진다. 따라서 return path와 영구자석사이의 간격을 최적화 하여 자속의 누설을 최소화 하여야 한다.

3.2 최적화설계

완성된 액츄에이터의 단면도와 대칭모델은 그림 4와 같다.

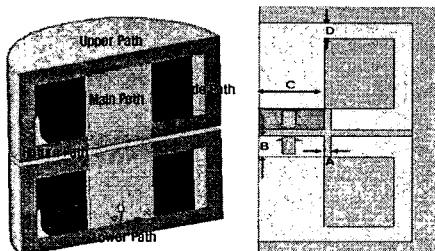


그림 4. Actuator 단면도 및 대칭모델

액츄에이터의 최적화 설계를 위해 필요한 네 가지 요소를 그림에서 볼 수 있다. Return path와 영구 자석간의 간격(A), 영구자석의 두께(B), main path의 폭(C)과 upper 및 lower path의 두께(D)가 그것이다. 이들 요인들은 발생력의 크기를 좌우하며 각 요인간 상호 작용하기도 한다.

그림 5는 각 요인들이 응답력에 끼치는 영향을 보여준다.

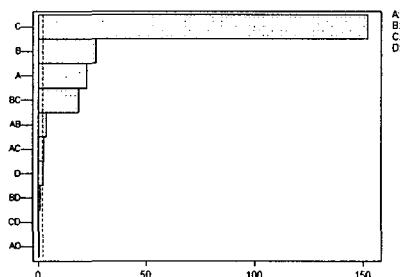


그림 5. 설계 요인들이 응답력에 끼치는 영향

또한 각 요인들의 범위에 따라 반응값이 얼마나 민감하게 반응하는가는 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 6으로부터 발생력의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소이면서 최적화 설계에 가장 민감한 요소는 main path의 폭임을 알 수 있다.

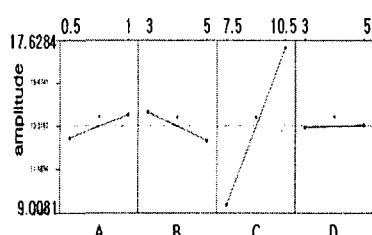


그림 6. 요소별 반응값에 영향을 주는 민감도

위와 같은 방법을 이용하여 액츄에이터 설계요소들의 사이즈를 결정하였으며 등포텐셜 분포를 해석하였다.

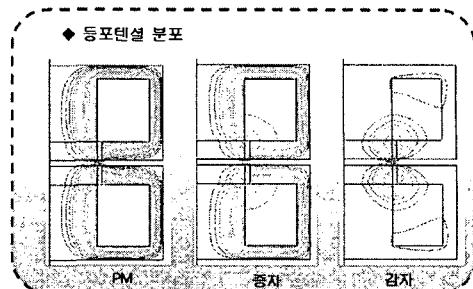


그림 7. 액츄에이터의 등포텐셜 분포

상하 두 모듈의 등포텐셜 분포해석에 의하여

$$Balance = \frac{repulsive\ force}{attractive\ force} = 1 \text{임을 알 수 있다.}$$

즉, 두 모듈간의 배치에 관계없이 반발력과 흡인력을 동일한 비율로 제어할 수 있도록 액츄에이터가 설계되었다.

4. 결론

수직 및 수평축 진동을 변형시키는 힘이 동일한 액츄에이터를 설계하였다. 본 설계를 최적화하기 위하여 단독 철심형과 영구자석 삽입형을 고려하였다. 또한 air gap return path, 영구자석의 크기, main path의 폭, upper 및 lower path의 길이 등 중요인자들이 반응값에 영향을 주는지를 평가하여 최적화 설계에 반영하였다.

후기

본 논문은 한국전기연구원이 원천기술개발사업의 일환으로 수행하는 ‘초정밀 능동 진동제어시스템 개발’과제의 일환으로 수행된 내용임.

참고문헌

- (1) 김성일, 홍정표, 2005, “반응표면법에 의한 최적설계”, 전기의 세계, 대한전기학회, pp.24~28.
- (2) 이주훈, 김용주, 손성완, 이홍기, 이세한, 최영규, 2004, “초정밀 자기부상 스테이지용 능동진동제어시스템 설계”, 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.121~124
- (3) J.H.Lee, D.H.Hwang, Y.J.Kim, S.H.Lee, Y.K.Chi, “Hybrid Magnetic Vibration Isolator and Feedback/Feedforward Vibration Control Algorithm Design for Magnetically Levitated and Driven Precision Stage System”, 49th Magnetism and Magnetic Materials, IEEE/AIP, 2004.