

반도체 제조공장에 있어서의 정밀제진

박 영 필
(연세대학교 기계공학과 교수)

1. 머리 말

반도체 공장의 미진동 문제는 제품의 성능에 영향을 주는 주요한 인자로서 공기 청정문제와 함께 종래부터 반도체 제조공정에 있어서 중요시 되어왔다. 현재의 정밀 반도체공장장에서 요구되고 있는 미진동의 허용한계는 다른 분야에 비해 대단히 엄격한 실정이며 또한 반도체산업의 발전속도를 고려할 때 이 요구사항은 날로 엄격해질 것으로 예상된다. 따라서 반도체 제조장비의 설계시는 물론 반도체공장의 건설에도 이와같은 사항을 사전에 충분히 고려하여 초기부터 이에 대한 대책을 수립하여야 한다. 또한 장래는 보다 완전한 미진동 방진을 위한 대책의 수립에 필요한 신기술의 필요성이 더욱 증대될 것이다. 특히 반도체 제조분야에 있어서는 반도체 메모리가 매년 고집적화되고, 미세화됨에 따라 진동을 막기 위한 제진기술이 가일층 어려운 문제로 대두된다. 이러한 고집적화의 예를들면 반도체 메모리는 선폭 0.7~0.8 μm 의 4M DRAM과 0.3~0.4 μm 의 선폭을 가진 64M DRAM의 연구개발을 예상하여야 한다. 전자빔 묘화장치에서는 패턴의 중첩정밀도를 최소 패턴 선폭의 1/3~1/5 정도가 필요하므로 이때

의 필요정밀도는 0.1 μm 이하가 됨을 쉽게 예측할 수 있다.

한편 반도체공업이 앞으로 국내의 기간산업으로서의 역할을 담당할 것이 확실시되는 시점에 있어서 반도체공장의 원활하고 안정된 운용이 해당기업은 물론 사회적으로도 큰 영향을 미칠 것은 자명하다. 최근 이와같은 요구에 따라 미진동에 대한 내진기술과 반도체 제조장치의 안전운용을 위한 면진기술이 비상한 관심의 대상이 되어 국내외의 많은 기관에서 연구와 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

위와 같은 미진동의 제진 및 면진기술의 확립은 비단 반도체공장의 건설에만 국한되는 것이 아니라 다음과 같은 정밀측정기, 정밀가공 및 진동험오장비의 운용을 위한 건축물의 설계에도 필수적이다.

미진동 문제의 필요성은 크게 (1) 반도체 관련, (2) 광학장치 관련, (3) 정밀기기 관련, (4) 생명공학 관련 및 (5) 핵발전소 핵심부 관련으로 분류되어 고도화에 따라 그 중요성이 날로 증대될 것으로 예상된다.

미진동문제는 초기에 정밀가공이나 정밀측정분야로 부터 출발하였으나 현재는 광범위한 기술분야에 깊숙히 관련되고 있으며 앞으로 21세기의 정보화시대의 발전에 있어서는 결정적인 핵심기술이 될 것이

확실하다.

(1) 실리콘 단결정의 인발장비, (2) 초정밀 가공기, (3) 정밀정보기기 운용실, (4) 정밀광학기기의 운용실, (5) 광학식 측정기, (6) 표면조도측정실, (7) 초정밀 가공부품의 운용실, (8) 생명공학 관련 시설의 무진동실, (9) 핵발전소 핵심부의 진동제어 시스템 등 다양한 분야에 대한 미진동 구조해석 및 미진동 제어시스템이 개발되면, 국내에서는 처음으로 미진동에 관련된 신기술이 개발 축적되어 초정밀 공장구조의 경제적이고 효율적인 계획, 설계 및 시공기술의 국산화와 선진화가 이룩되고, 이 분야의 건설기술의 수출은 물론 경쟁국 및 경쟁사보다 기술우위에 위치하게 될 전망이다.

따라서 국내 건설분야에 있어서도 이러한 실정을 참작하여 미진동의 제진 및 면진기술을 빠른 시일 내에 확립하여 내후 국내 반도체 제조공장의 건설에 적극 활용하기 위한 대책을 수립해야 할 시점에 와 있으며 이러한 기술의 확립이야말로 국내 반도체 산업의 성공여부에 주요한 관건이 될 것이다.

2. 미진동 기준안

미소진동 영역에서의 진동 문제는 지진이나 공해라 할 정도의 진

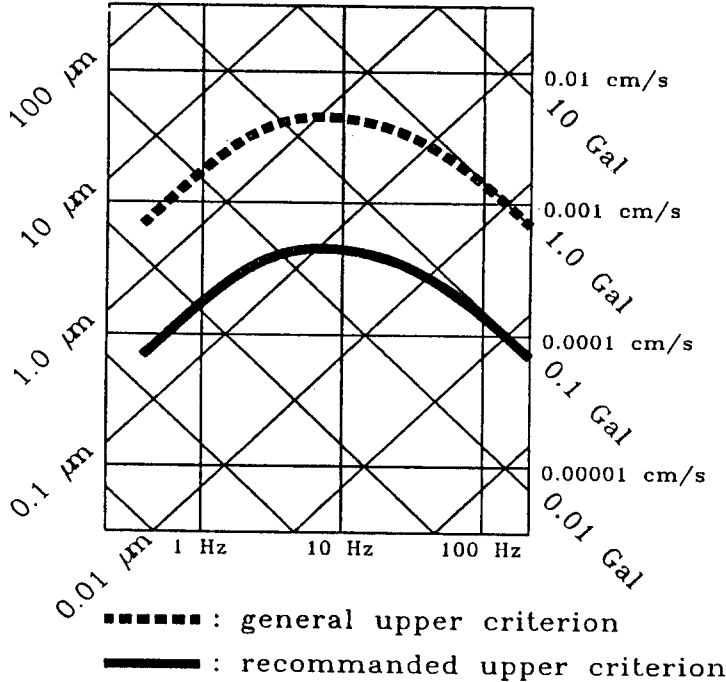


그림 1 미진동 허용한계

동과는 다른 차원을 갖는다. 즉 미진동은 인간이 거의 감지할 수 없고 정밀 계측기에 의하여 측정될 수 있는 진동을 말한다. 이러한 미진동은 일반적으로 다음과 같이 정의한다.

변 위 : 1 μm 이하
 가속도레벨 : 60 dB 이하

그러나 머리말에서 언급한 바와 같이 반도체의 고집적화 경향에 의하여 현재에도 위의 기준보다는 엄격한 실정이다. 또한 진동량을 일정한 수치로 규정하여 이를 미진동의 평가기준으로 정의하기에는 부족한 점이 있다. 그러므로 각 진동 주파수에 따라 진동량의 한계를 정하는 것이 타당하다.

미진동에 관한 규정으로서 과거에는 BBN(Bolt Beranek & Newman Inc.) 기준안과 FHA(Frank Hubach Associate Inc.) 기준안이 사용되어 왔으며, 미진동 기준안은 현재의 요구조건에 비추

어 볼때 보다 엄격한 기준이 필요하다. 미진동 기준안을 그래프로 나타내면 그림 1과 같다.

3. 정밀 제진을 위한 설계단계

종래의 일반적인 방진대책은 주로 진동발생원이나 진동협오기기에 있어서 개별적인 방진, 제진 장비를 설치하여 국부적인 효과를 얻었다. 이러한 방법만으로는 충분한 효과를 얻기가 어렵다. 점차 고정밀에 대한 요구가 증가되는 반도체 제조설비 기준에 있어서 국부적인 방진설비에 의해서는 부족한 점이 있다.

내부 외부 진동원에 대한 구조물의 진동응답을 효과적으로 제어하기 위해서는 구조물이 다음과 같은 특성을 가져야 한다.

첫째 : 강성을 크게 하여 진동변위를 가능한한 작게하고 고유진동수를 높게 설정하여 저주파수 영역

에서 공진이 발생하지 않도록 한다.

둘째 : 구조물이 적절한 감쇠성능을 가짐으로서 공진 주파수에서의 응답을 가능한한 작게 한다.

저진동을 실현하기 위한 공장의 설계단계를 보면 기본적으로 가진원과 진동 협오장비의 분리에 있다. 먼저 일반적인 건물은 진동에 대한 고려없이 정적강성에 주안점을 두어 설계 및 시공이 이루어지므로 가진원이 산재하는 제조설비의 진동에 의한 가진에 대하여 효과적으로 대처하기에는 불가능하다. 또한 건물의 일반적인 진동특성으로서 고유진동수가 매우 낮아 수 Hz에 위치하고 방진 및 제진설비시 고유진동수를 매우 낮게 설정하므로 공진의 소지가 있다.

국부적인 가진원에 의한 진동영향을 해결하기 위해서는 방진재의 선정 및 적용이 매우 중요한 문제임을 알수 있다. 그러므로 진동저감을 실현하는 우수한 방진재의 개발이 필요하다. 또한 더 나아가 방진재를 수동요소로 적용하였을 때의 문제점을 보완하기 위하여 능동제어기의 적용을 통하여 필연적으로 발생하는 진동에 의한 영향을 적극적으로 감소시키기 위한 노력을 기울여야 한다.

미진동에 대처하기 위한 설계과정으로서 다음과 같은 사항을 고려한다.

- (1) 저진동 건축구조물의 설계
 - 주변환경의 진동 영향 분석
 - 건물기초와 바다 사이의 진동 현상 규명
 - 고강성 구조물의 설계
- (2) 바닥구조의 선정
 - 다양한 바닥구조중 적절한 형태에 대한 연구
 - 작업자에 의한 진동 영향의 극소화
 - 무인공장에 대비한 작업 로

4. 방진재에 대한 연구

방진재로서 각종 스프링을 사용한다. 사용화된 스프링에는 다음과 같은 종류가 있다.

- (1) 코일 스프링(강, 철)
- (2) 방진고무, 적층고무
- (3) 고분자 복합재료 스프링
- (4) 유체 스프링(공압, 유압)

방진재의 사용시 기본적인 설치 개념은 진동계의 고유진동수를 가능한 한 낮게 설정하여 고유진동수 이상의 광대역에 대하여 진동절연 효과를 얻는 것이다.

이들 방진재에 대한 사용범위는 각기 다양하다. 즉 적용대상이 다르다는 것을 뜻한다. 기존의 진동절연 요소는 고유진동수가 비교적 높게 설정되어 저주파 영역의 진동에 효과적인 대처가 어려운 단점이 있으며, 제한된 에너지 저장능력으로 인하여 우수한 성능을 갖기 위해서는 부피가 커져야 하고 이 경우 정적강성 또한 문제시 되는 단점이 있다. 앞에서 열거한 스프링의 종류중, 미진동 분야에 대처하기 위해서는 적층고무와 공기스프링의 사용이 적절하다. 적층고무는 얇은 강판과 방진고무를 수겹 적층시킨 구조로서 설치방향에 대한 방진특성과 아울러 횡방향 진동에 대해서도 방진 성능을 가진다. 한편 공기스프링은 압축공기를 탄성물질로 사용하여 낮은 강성을 유지하면서 고하중의 경우 큰 정적변위를 필요로 하지 않으므로 그 성능 면에서 최상의 방진재로서 연구 및 사용되고 있다.

5. 능동제어 시스템의 개발

방진요소의 수동적 사용(진동특성이 설치 단계에서 결정됨)은 진동 대상의 변화 및 설비 단계의 오

류로 인하여 충분한 제진특성을 갖기에는 부족한 점이 있다. 또한 방진대의 기본설계 자체에서 발생하는 진동원에 대해서는 쉽게 요동할 수가 있다. 특히 제진의 관점에 있어서 저장성, 저감되는 고유진동수의 $\sqrt{2}$ 배 이상의 주파수 영역에서는 우수한 제진특성을 갖지만, 앞에서 언급한 문제점에 대해서는 전혀 대책이 없다고 하여도 과언이 아니다. 그러므로 이러한 취약점은 능동제어기의 적용을 통하여 해결할 수 있다. 능동작동기는 공기스프링의 공기압력을 직접제어하는 방법과 전자석 작동기, 피에조 액츄에이터, 보이스 코일 모터(VCM) 등과 같은 부가적인 작동기를 부착하는 방법으로 대별할 수 있다. 작동기의 선정은 제어대상의

크기에 의하여 결정되므로 각각의 경우에 대하여 적절히 대처하며 능동제어 시스템에 적용하는 제어법칙은 외란에 의한 응답을 최소화하는 감도 저감에 초점을 두어 설계한다.

5.1 공기스프링 제진대의 능동제어

본 연구실에서는 능동제진시스템으로 전자석을 이용하는 방식과 공기스프링의 압력을 제어하는 방식을 수행하였다.

공기스프링의 압력을 비례제어밸브를 이용하여 제어하는 방식을 보면 그림 3과 같다.

(1) 방진시스템의 수학적 모델링
제진대의 수학적 모델링은 대개의 경우 강체와 스프링 요소의 진

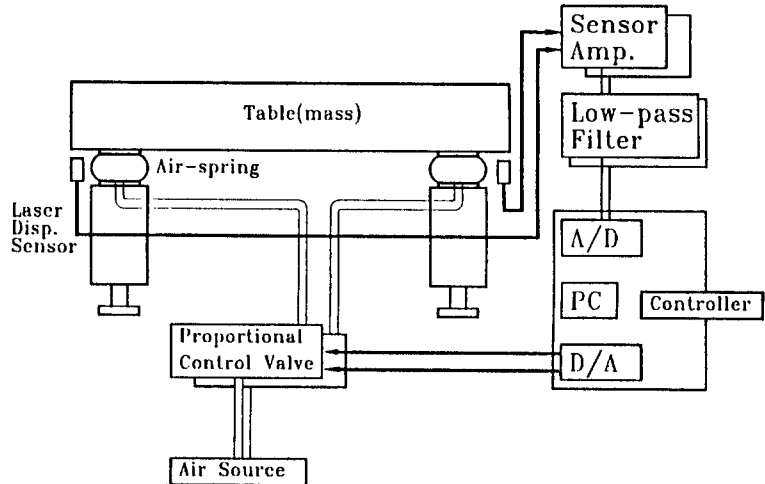


그림 3 공기스프링 제어계의 개략도

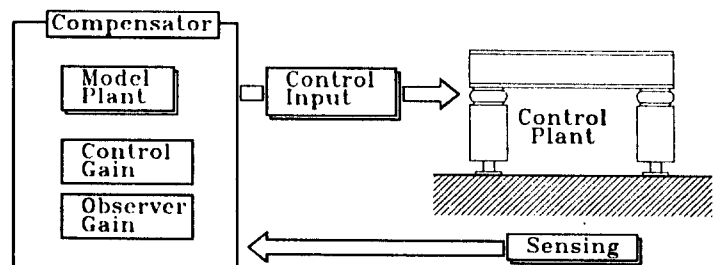
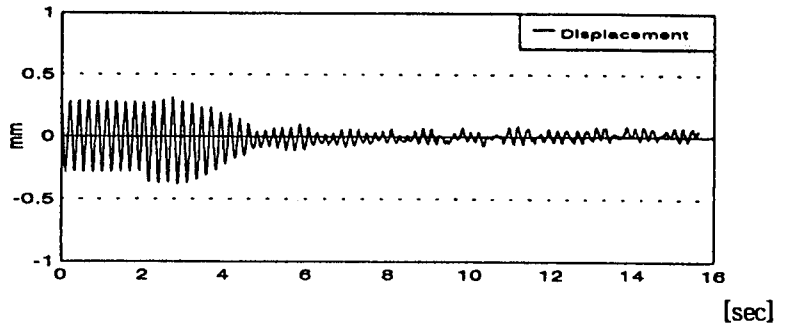


그림 4 되먹임 제어계의 블록선도

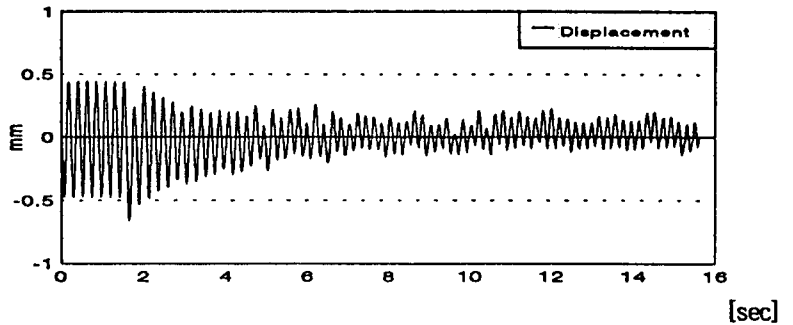
동으로 가정하여 해석하므로 매우 간단하다고 할 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 공기스프링과 비례제어밸브의 수학적 모델링은 압축공기 자체의 비선형 특성과 비례제어밸브의 작동원리가 간단치 않으므로 다음과 같은 방법을 사용하여 모델링하였다. 비례제어밸브와 공기스프링의 능동작용기 성분은 실제 작동영역에 대하여 실험적으로 부분전달함수(비례제어밸브-공기스프링 사이의 전달함수)를 구하여 방진시스템의 모델링을 하였다.

(2) 제어이론의 적용 - 최적제어 (LQG control), 퍼지제어 (fuzzy control)

제어이론으로는 다변수제어 (MIMO control)에 많이 사용되는 최적제어를 사용하였다. 이는 상태변수(state) 뿐만 아니라 제어입력

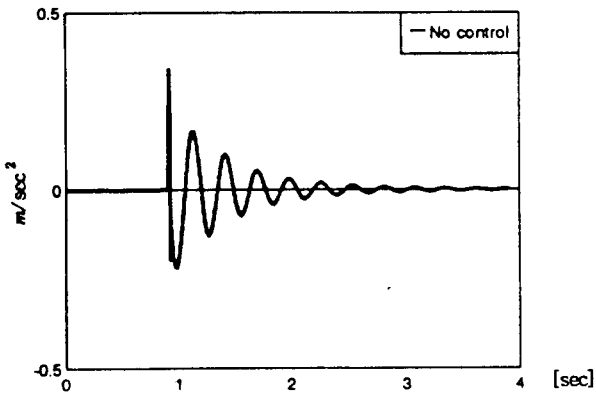


(a) LQG control

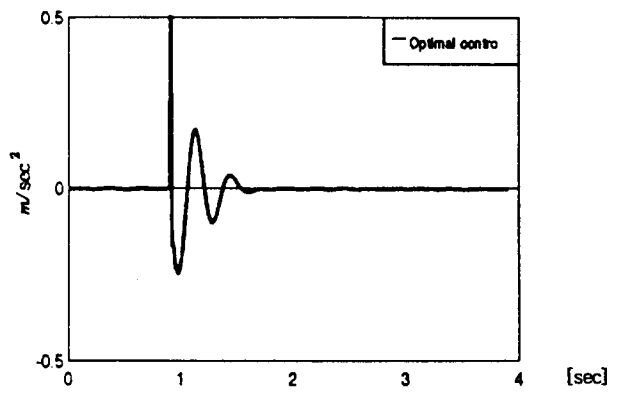


(b) Fuzzy control

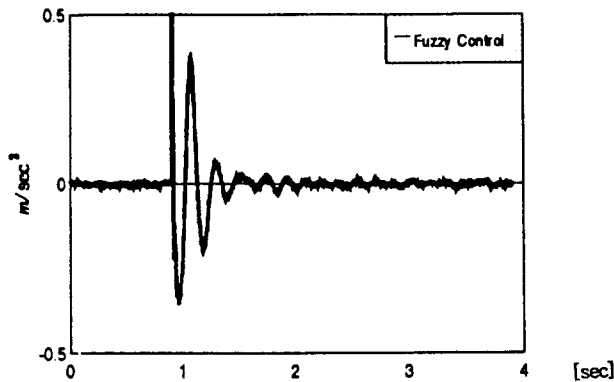
그림 5 공기스프링 제진대의 제어전후시의 변위



(a) Uncontrolled



(b) LQG control



(c) Fuzzy control

그림 6 공기스프링 제진대의 충격가진에 대한 가속도 응답

에 대하여 정량적인 평가가 가능하므로 작동기의 성능이 제한된 본 실험에서와 같은 제어에서는 장점을 가지고 있다. 또한 전상태(full state)의 측정이 불가능하므로 칼만필터(Kalman filter)를 관측기로 사용하였다.

제어대상의 수학적 모델링이 필요치 않는 퍼지제어를 적용하였다. 퍼지제어는 인간의 논리적인 면을 제어에 응용한 것이므로 수학적 모델링이 불가능하거나 모델링 불확실성(modeling uncertainty)이 내재되어 있는 계에 대해서는 그 활용도가 매우 높다고 할 수 있다.

(3) 디지털 제어기 구성

능동제어계의 운동방정식은 연속시간계(continuous-time system)이므로 개인용 컴퓨터를 이용한 제어기를 구성하기 위해서는 모델링의 이산화가 필수적이다. 또한 계의 고유진동에 비하여 이산화시 샘플링 시간을 충분히 작게 선정하여야

한다.

본 연구에서는 샘플링 주파수를 100 Hz로 하여 수치해석 및 실험을 하였다.

이산화된 계와 제어법칙에 의해 구한 제어이득(control gain)을 합성하여 그림 4와 같이 제어계를 구성하였다.

(4) 능동제어 성능의 실험적 평가
제진대의 능동제어시 성능평가를 위하여 (1) 주기적 가진 실험과 (2) 충격 가진 실험을 하였다. 그림 5의 결과는 공진 주파수로 편심모터를 회전시켜 가진할때의 제어 응답을 측정하였다. 최적제어 및 퍼지제어 모두 제어시점 이후 진폭이 현저히 감소함을 볼 수 있다.

그림 6의 결과는 제진대가 충격가진을 받을 경우의 가속도응답으로서 계의 감쇠비(decay ratio)가 제어하지 않은 경우는 대략 0.04임에 비하여 제어시 0.2~0.3으로 대폭 증가하였다.

6. 맺음말

국내 반도체 산업계의 현재 발전 속도에 비추어 보아, 현재의 4M DRAM의 개발성공과 더불어 가까운 시일내에 16M DRAM의 양산 단계에 와 있고 더 나아가 64M DRAM의 개발을 예상할 수 있다. 이와 같은 초고집적회로의 출현에 따라 이를 생산하기 위한 장비는 물론이고, 이를 설치하여 운용하는 반도체 제조공장에 대한 대책이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 향후 선진국에서 기술도입이 불가능할 것으로 예상되는 미진동 제어시스템 개발의 기초 계획안을 수립하고, 이를 통하여 반도체 공장의 수율을 높이는 궁극적 목적을 가지며, 반도체 생산공장의 구조설계 및 방진시공을 목표로 하여 관련 이론정립 및 미진동 제어시스템을 개발하는데 그 목적이 있다.

국제학술대회 안내

Fifth International Conference on Adaptive Structures

장 소 : Sendai, Japan

일 시 : 1994. 12.5-12.7.

일 정 : 초록마감(1994.5.31.)

논문마감(1994.11.10.)

분 야 : Adaptive Structures; Intelligent/Smart Materials and Structures; Sensors and Actuators; Controlled Structures; Vibration Control and Suppression; Structural Acoustic and Noise Control; Quasi-static Adjustment; System Identification; Space Robots; On-line Damage Detection; Pointing and Alignment Precision;

연락처 : Professor J. Tani, Institute of Fluid Science, Tohoku University, Katahira 2-1-1, Abaku, Sendai, 980, Japan; Fax: (+81) 22-223-2748

또는 한국과학기술원 기계과 이종원 교수 ; 전화 (042)869-3016