

MEMS 설계 및 해석 기술 동향

조 종 두* 시 호 문**

1. 서 론

1980년대 중반 이후부터 전세계적으로 MEMS 기술에 관한 학계 및 산업계의 관심이 고조되기 시작했다. MEMS 기술이 갖는 엄청난 경제적·기술적 파급효과로 인해 여러 선진국에서 MEMS 기술을 발전시키려는 노력을 해오고 있는 것은 주지의 사실이다. 특히 미국은 1987년부터 국가 주도의 MEMS 연구 프로젝트를 추진하고 있으며 일본, 네덜란드, 프랑스, 독일 등도 1980년대 초반부터 정부 및 대학을 중심으로 하는 MEMS 기술 관련 연구를 활발히 진행해오고 있다.

이러한 MEMS 기술은 설계 및 해석기술, 제작 기술, 조립기술(패키징), 응용기술 등을 총괄적으로 포함하는데 지금까지의 MEMS 관련 연구가 대부분 MEMS 소자의 제작기술에 관한 것이었다. 이러한 이유로 MEMS 제작기술은 괄목한 만한 발전을 거두었으나 다른 분야의 발전은 상대적으로 미약한 형편이다.¹⁾

MEMS 기술의 핵심적인 요소 중 하나인 MEMS 설계 및 해석 기술은 개발비용의 절감, 개발시간의

단축, 최적 설계 등을 가능하게 하기 때문에 매우 중요하다. 따라서 MEMS 설계 및 해석 기술과 관련한 세계적인 연구동향을 살펴보는 것은 매우 의미 있을 것이다.

여기서는 MEMS의 설계 단계와 각 설계 단계에서 요구되는 사항들을 간략히 소개하고, 이와 관련한 계산공학의 연구 동향을 살펴보고자 한다.

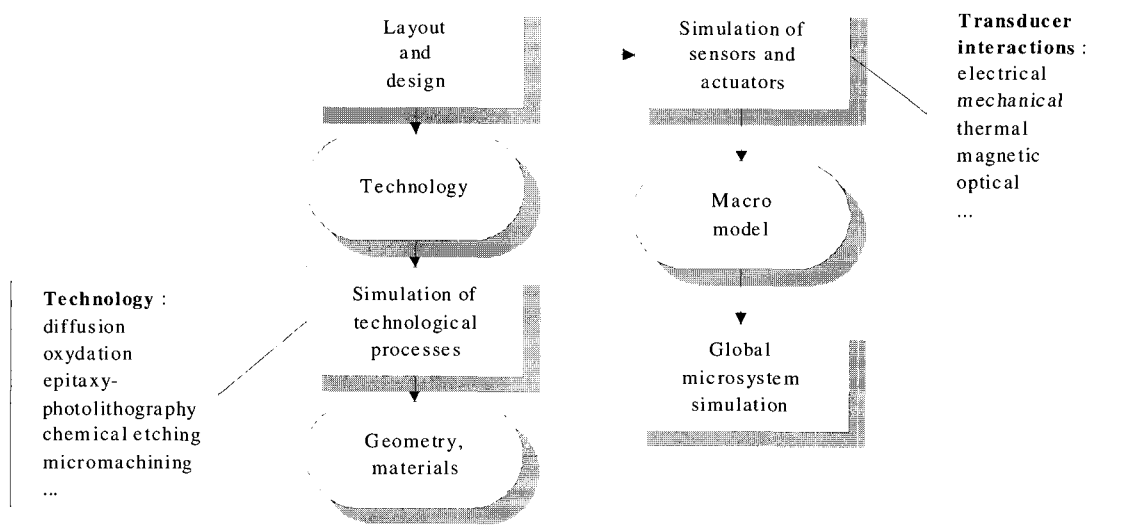
2. MEMS 설계 및 해석

MEMS의 해석은 해석 대상이 되는 구조물의 생성, 여러 물리적 현상의 연성효과를 고려할 수 있는 소자 단위의 특성 해석 및 시스템 수준의 작동 해석 등을 포함한다.²⁾ 따라서 MEMS의 해석은 해석의 대상이 명확하며, 대개의 경우 연성효과(coupling effect)를 고려할 필요가 없는 기존의 일반 구조물의 해석과는 구별되는 특징을 가지고 있다.

그림 1은 MEMS 해석의 대표적인 과정을 보여 준다. 이러한 일련의 해석을 위해서는 요구되는 해석 기술은 다음과 같다.³⁾ 첫째, 화학공정을 기본으로 하는 MEMS의 제조 공정을 통해 3차원의 매우

* 인하대학교 기계항공공학부 교수

** 인하대학교 대학원 기계공학과

그림 1 MEMS 의 일반적인 해석 과정²⁾

복잡한 MEMS 구조물이 제작된다. 따라서 이러한 MEMS 공정을 시뮬레이션 할 수 있는 계산기술이 요구된다.

둘째, 제조공정에 따라 변하는 MEMS 재료의 물성에 관한 데이터베이스의 구축이 요구된다. 재료의 물성에 관한 정보는 해석 결과의 신뢰도에 지대한 영향을 미치므로 매우 중요하다.

셋째, 여러 물리 현상이 연성된 효과를 충분히 고려할 수 있는 MEMS 소자 단위의 해석 기술이 요구된다. 대개의 경우 이 단계에서의 해석은 복잡한 기하학적 형상 및 연성효과 등으로 인해 상당한 시간을 요하게 된다. 따라서 이러한 점을 고려할 수 있는 새로운 모델링 기법의 개발이 요구된다.

넷째, MEMS 소자는 전기회로, 패키징 등의 여러 요소와 결합되어 하나의 제품을 형성한다. 따라서 시스템 단위의 MEMS 해석이 요구된다.

2.1 MEMS 구조물의 생성

식각, 증착, 확산, 산화 등의 복잡한 공정을 거쳐 생성되는 MEMS 소자의 3차원 형상을 예측하려는 연구가 활발히 진행되고 있는데 이것은 실제 제작에 앞서 MEMS 소자의 기하학적 형상과 여러 공정조건과의 상호 관계를 파악함으로써 최적의 공정조건을 도출하고 아울러 소자 단계에서의 설계를

위한 솔리드 모델을 생성하기 위해서이다. 이러한 연구는 주로 반도체 공정 시뮬레이터(TCAD : Technology CAD)의 기능을 확장하고 보완하는 방식으로 진행되고 있다.

스탠포드 대학의 TCAD 그룹에서는 반도체 제조공정 시뮬레이션을 위해 자체적으로 개발하였던 소프트웨어(SUPREM, PISCES)를 MEMS 소자의 구조생성 시뮬레이션에 응용하려는 연구를 진행하고 있다.⁴⁾ 이러한 연구 결과를 바탕으로 2000년 “GEODESIC” 이라는 3차원 MEMS 구조 생성 시뮬레이터를 개발하였다. 그림 2는 GEODESIC의 기본 구조를 보여준다.

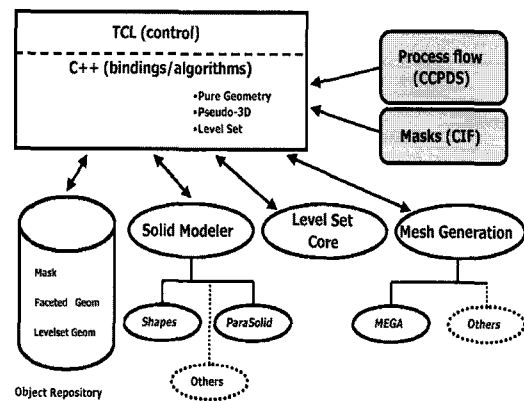


그림 2 GEODESIC의 아키텍처

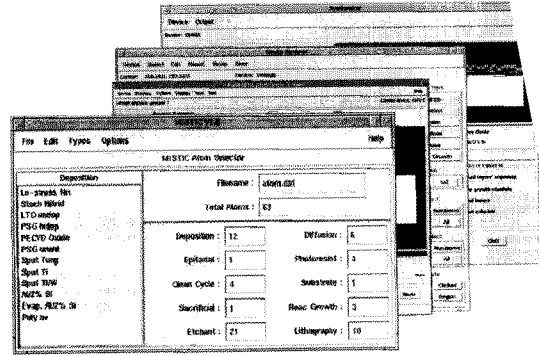
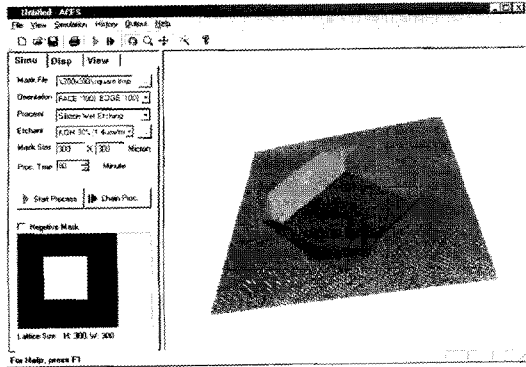


그림 3 ACES(좌)와 MISTIC(우)의 사용자 인터페이스

일리노이 대학에서는 이방성 에칭 시뮬레이터인 ACES를 개발하였다.⁵⁾ 이 소프트웨어는 매우 빠른 시뮬레이션 속도 및 여러 형태의 마스크 포맷정보를 수용할 수 있는 특징을 보유하고 있다.

1994년부터 미세 가공된 MEMS 소자의 구조 생성에 관한 연구를 활발히 해보던 버클리 대학에서는 1997년 네 개의 기본 모듈로 구성된 MISTIC을 발표하였다. 그림 3은 ACES와 MISTIC의 사용자 인터페이스를 보여준다.

이외에도 상당한 연구가 진행되고 있으며 보다 자세한 내용은 인터넷 사이트 <http://mass.micro.uic.edu>를 참고하면 된다.

2.3 MEMS 소자의 해석

1980년대 후반부터 감지기 및 작동기의 설계를 위한 다수의 해석 프로그램이 개발되기 시작하였으며 SESNSOR,⁷⁾ SENSIM,⁸⁾ CAEMEMS-D,⁹⁾ NM/SESES,¹⁰⁾ CoSolve-EMTM,¹¹⁾ MEMCAD,¹²⁾ IntelliSuite,¹³⁾ SOLODISTM¹⁴⁾ 등이 대표적인 것들이다.

SENSOR⁷⁾는 1992년 독일에서 개발된 해석 프로그램으로서 정전 용량형 감지기 및 압전저항 감지기의 최적 설계를 위해 개발되었다. CoSolve-EMTM¹¹⁾은 3차원 준정적 전기-기계적 연성 해석을 위해 995년 개발된 프로그램으로서 정전기장 및 변위 해석을 위해서 각각 FASTCAP 및 ABAQUS의 해석 기능을 이용한다. 그림 4는 CoSolve-EMTM을 이용한 비틀림 미소 미러(torsional micro-mirror)의 성능 해석의 예를 보여준다.

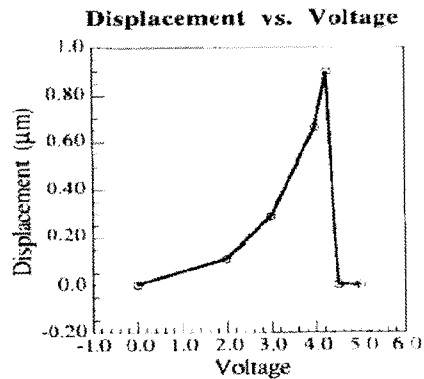
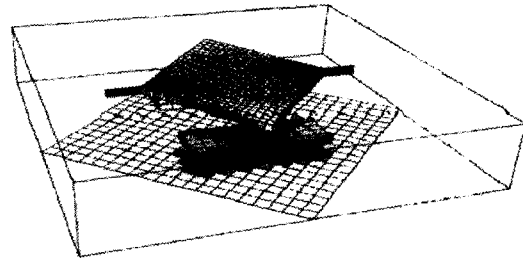


그림 4 CoSolve-EMTM을 이용한 정전용량형 마이크로 미러의 특성 해석

의 성능 해석의 예를 보여준다.

1992년부터 MIT와 Coventor사는 MEMS 해석용 소프트웨어인 MEMCAD¹²⁾를 개발하였다. MEMCAD는 CoSolve-EMTM의 해석 기능을 흡수 확장 한 것으로 마스크 레이아웃과 공정 정보로부터 MEMS 소자의 3차원 기하학적 모델을 생성하는 기능을 갖추고 있으며(MemBuilder) 전자기 해석, 기계적 해석, 및 미소 유동 해석 등을 수행할 수 있다. 그림 5는 MEMCAD 3.0의 구성을 보여준다. 그림 6은

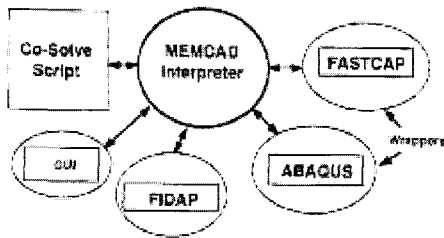


그림 5 MEMCAD 3.0의 구성

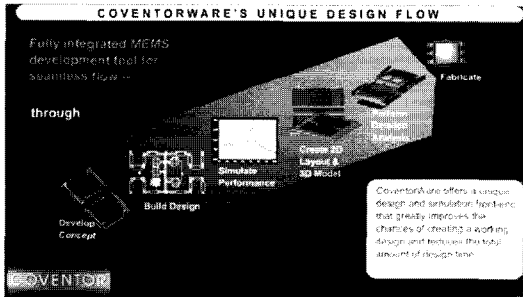


그림 6 MEMCAD를 이용한 MEMS 해석

MEMCAD에 의한 MEMS 해석 과정을 개략적으로 보여준다.

SOLIDIS¹⁴⁾는 마이크로 작동기의 3차원 복잡장 해석을 위해 개발되었으며 표면 정전기력, 압전효과 및 열-기계적 상호작용 등을 상당히 정확하게 고려할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 또한 해석의 효율성을 위해 각 물리적 영역의 해석 시 영역 분할 알고리즘(zone partition algorithm)을 사용하고 있다. 그림 7은 SOLIDIS를 이용한 마이크로 미러의 해석 사례와 영역 분할 알고리즘을 보여준다.

미국의 Corning IntelliSense사는 1998년 MEMS

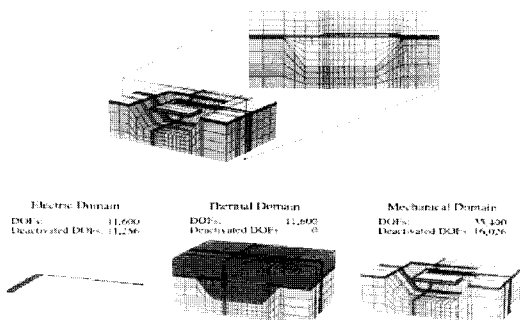


그림 7 SOLIDIS에 의한 압전 저항형 마이크로 미러의 성능 해석 및 영역 분할 알고리즘

IntelliSuite is the solution for the design, simulation and optimization of MEMS.

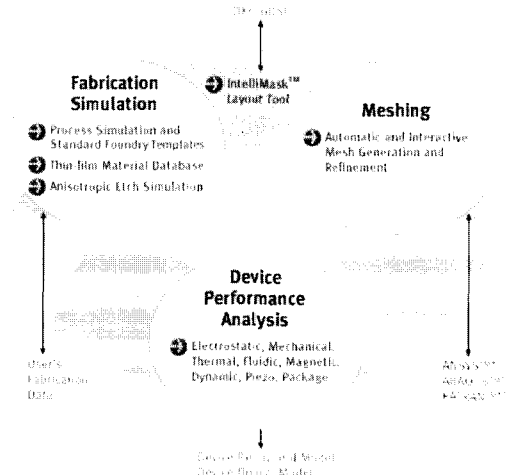


그림 8 IntelliSuite를 이용한 MEMS 해석

전용 해석 소프트웨어인 IntelliSuite¹³⁾를 출시하였다. 이 소프트웨어는 MEMCAD와 유사한 해석 기능을 가지고 있으며 Corning IntelliSense 사가 보유하고 있었던 공정 시뮬레이션 툴의 기능과 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS, ANSYS, PATRAN의 격자생성기능, 요소 해석 기능을 병합한 것이다. 그림 8은 MEMCAD에 의한 MEMS 해석 과정을 개략적으로 보여준다.

버클리 대학에서는 1992년 회로해석을 위해 개발 하였던 SPICE와 MNA(Modified Nodal Analysis)에 근거한 감차 모델링(reduced order modeling) 개념을 이용하여 MEMS 소자의 해석에 사용할 수 있는 SUGAR를 개발하였다.¹⁵⁾

ANSYS 사는 자사의 상용 유한요소 소프트웨어인 ANSYS의 Multi-physics 해석 기능을 각종 MEMS 소자의 거동 해석에 적용할 수 있도록 확장 개선하고 있으며 여러 해석 사례들을 발표하고 있다.¹⁶⁾

또 다른 상용 유한요소 소프트웨어인 Algor는 MEMS 해석을 위한 AlgorMEMS를 발표하였다.¹⁷⁾

AlgorMEMS는 Algor 자체에서 제공하는 Superdraw III를 이용하여 MEMS 구조물을 생성하고 Algor의 유한 요소 해석 기능 및 후처리 기능을 이용한다. 그림 11는 AlgorMEMS를 이용하여 원주 빗살 구동형 정전모터의 해석 실례를 보여준다.

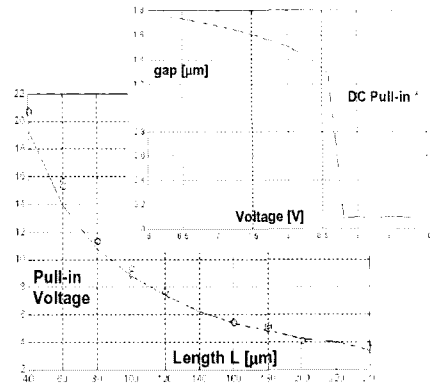
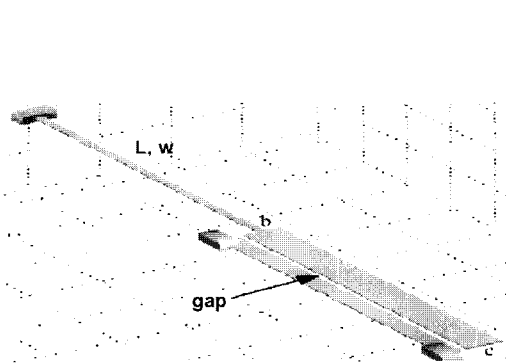


그림 9 SUGAR에 의한 정전형 캔틸레버의 해석 사례

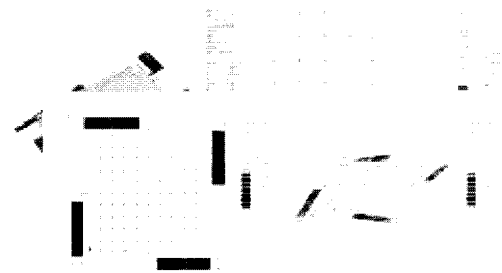
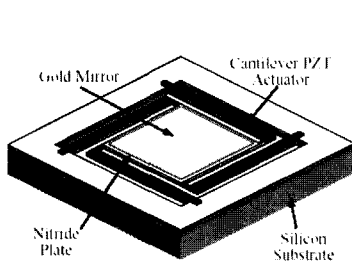


그림 10 ANSYS를 이용한 마이크로 미러의 특성 해석

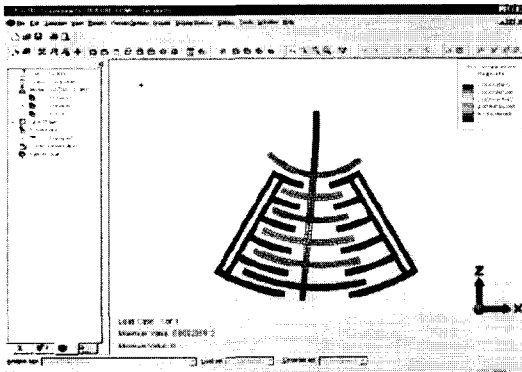


그림 11 AlgorMEMS를 이용한 원주 빔살 구동형 정전모터의 해석

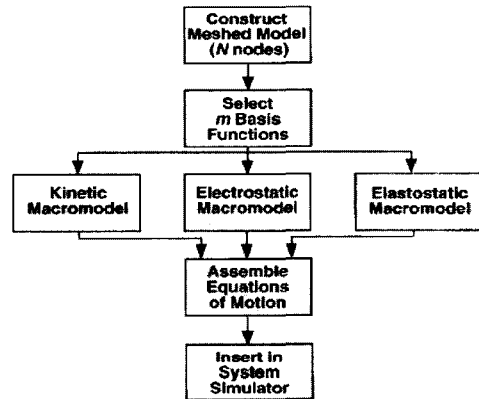


그림 12 S.D. Senturia et al.²⁰⁾에서 제안한 매크로 모델링 과정

2.4 시스템 모델링

시스템 수준에서의 MEMS 해석을 위해서 다양한 연구가 진행되고 있다. 먼저 전기-기계 영역의 상사성을 이용한 등가회로 해석기법이 고려되고 있는데 이것은 소자 단위의 MEMS 해석을 통해 얻어진 시스템의 동작 변수를 전기 회로 시뮬레이

터인 SPICE의 입력으로 사용함으로써 시스템의 동작 성능을 예측하는 것이다.¹⁸⁾ 그러나 SPICE 시뮬레이터를 이용한 등가회로 모델링 기법을 비선형적인 거동 특성을 보이는 MEMS 소자의 시스템 모델링에 적용하는 것은 매우 어렵다. 이런 모델링의 어려움으로 인해 HDL(Hardware Description

Language)를 MEMS 시스템의 비선형 모델을 구현하려는 연구가 진행되고 있다.¹⁹⁾

S.D. Senturia et al.²⁰⁾은 시스템 수준의 MEMS 시뮬레이션을 위한 MEMS 소자의 감차 비선형 동적 모델에 관한 연구를 진행하고 있다. 그림 12는 그들이 제안한 매크로 모델링 과정을 보여준다.

3. 맺음말

지금까지 MEMS 설계의 특징을 살펴보고 MEMS 해석의 각 단계에서 요구되는 계산기능 등을 요약하였다. 또한 MEMS 해석과 관련한 연구동향을 각 해석 단계별로 구분하여 살펴보았다.

통상적인 크기의 구조물 및 기계의 설계에 있어서의 전산 해석의 역할은 MEMS가 실용화되기 위하여 필수적으로 지속되어야 한다. 그러나 여기에는 복잡계에서 작동하는 미소구조물의 특성이외에도 MEMS에서 사용되는 기능성 재료를 비롯한 다양한 재료의 특성 및 구조의 심한 비선형성 등을 적절히 고려하기 위한 연구가 필요하다. 현재 개발되어 있는 외국 프로그램들도 아직 완성도가 매우 부족한 것으로 인식되고 있으며 약간의 시간차가 있지만 국내의 여러 연구실에서도 프로그램의 개발이 진행중이다.

참 고 문 헌

1. 조영호, "MEMS 기술개발현황 및 산업화 계획", *Journal of the KSME*, Vol. 41, No. 12, 2001, pp.32~37
2. Bartłomiej F. Romanowicz, "Methodology for the modeling and simulation of microsystems", Kluwer Academic Publishers, 1998
3. S. D. Senturia, "CAD challenges for Microsensors, Microactuators, and Microsystems," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, 1998, pp.1611~1626
4. N. Wilson, K. Wang, D. Yergeau and R. W. Dutton, "GEODESIC: A New and Extensible Geometry Tool and Framework with Application to MEMS", Technical Proceedings of the MSM 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, San Diego, CA, USA. March 27-29, 2000
5. <http://mass.micro.uiuc.edu/>
6. <http://www.eecs.umich.edu/mistic>
7. B. Folkmer, et al., "A simulation tool for mechanical sensor design(SENSOR)", *Sensors and Actuators*, Vol. A32, 1992, pp.521~524
8. K. W. Lee, K. D. Wise, "SENSIM: A simulation program for solid state pressure sensors", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-29, 1992, pp.34~41
9. S. Crary, Y. Zhang, "CAEMEMS: An Integrated Computer-Aided Engineering Workbench for Micro-Electro-Mechanical Systems," *Proceedings of the IEEE MEMS*, 1990, pp.113~114
10. J. G. Korvink, et al., "SESES: a comprehensive MEMS modelling systems", in *Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robotic Systems*, Osio, Japan, January, 1994, pp.22~27
11. J. R. Gilbert, et al., "3D coupled electro-mechanics for MEMS: applications of CoSolve-EM", in *Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, Amsterdam, Netherlands, 1995, pp.122~127
12. S. D. Senturia, R. M. Harris, B. P. Johnson, Songmin Kim, K. Nabors, M. A. Shulman, J. K. White, A Computer-Aided Design System for Microelectromechanical Systems(MEMCAD), *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 1, March 1992, pp.3~13
13. F. Maseeh, "IntelliCAD: the CAD for MEMS," WESCON/95. Conference record. 'Micro-electronics Communications Technology Producing Quality Products Mobile and Portable Power Emerging Technologies, 1995, p.320
14. J. M. Funk, J. G. Korvink, J. Buhler, M. Bachtold, H. Baltes, "SOLIDIS: A Tool for Microactuator Simulation in 3-D," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 6, No.

- 1, 1997, pp.70~82
15. <http://sugar.millennium.berkeley.edu/>
16. <http://www.ansys.com>
17. <http://www.algor.com>
18. Harrie A. C. Tilmans, "Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I: lumped-parameter systems(micromechanical)", Journal of Microelectromechanical Systems., Vol. 6, 1995, pp.157~176
19. C. -J. R. Shi, Alian Vachoux, "VIIDL-A Design Objectives and Rationale", J. M. Berg, O. Levia, J. Rouillard. Kluwer Academic Publisher, New York, Berlin, 1995
20. J. E. Mehner, et al., "Computer-Aided Generation of Nonlinear Reduced-Order Dynamic Macromodels - I: Non-Stress-Stiffened Case", Journal of Microelectromechanical Systems., Vol. 9, No. 2, 2000, pp.262~269 