

## MEMS Design Flow Based on DFM Concept

韓承岬<sup>†</sup> · 吳博均<sup>\*</sup> · Mark da Silva<sup>\*\*</sup>  
(Seungoh Han · Park Kyoun Oh · Mark da Silva)

**Abstract** - MEMS design flow based on DFM concept is presented and applied to gyroscope design as a test case. It is proposed to contribute to the yield improvement by considering the process-related parameters from the design phase. After defining the performance requirements, the sensitivity analysis should be done on the draft design(s) to find out the key parameters related with the device performance. By doing so, TEG can be designed for the selected process and/or material parameters. Through a set of test runs, the process capability is characterized and the material properties are extracted using the TEG. Then we can estimate the virtual yield of the current process for the designed device by running Monte Carlo analysis where the process and/or material property variations are considered. The estimated yield will make us redesign the device to be more robust or improve the current process to have the smaller variations.

**Key Words** : DFM, MEMS, Design Flow, TEG, Monte Carlo Analysis

### 1. 서 론

지난 10여 년 간의 연구개발을 통해 국내의 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술은 가속도 센서, 초소형 자이로스코프, 압력센서 등과 같은 종래의 센서 응용을 포함하여 RF, optics, bio 등의 다양한 분야에서 괄목할만한 성장을 이룩하였으며 그 결과 몇몇 분야에서는 성공적인 상업화를 목전에 둔 상황이다. 그러나 일부에서는 연구개발 이후의 양산화 과정에서 부딪치게 되는 수율, 패키징, 그리고 신뢰성 등과 관련된 난제들을 해결하지 못함으로써 상업화가 지연되고 있는 것 또한 사실이다. 이와 같은 문제들을 공정, 설계, 또는 패키징 등에서 어느 하나만의 문제로만 인식하고 단방향적인 해결책을 모색하는 것은 문제의 일면만을 보는 것으로서 설계-공정-패키징 등이 복합적으로 작용하는 현실을 외면하는 것이다. 따라서 이와 같은 문제들의 빠른 해결, 나아가 예방을 위해서는 MEMS 소자의 설계 단계부터 제작 공정과 패키징 등의 영향을 복합적으로 고려하는 것이 필요하다.

이는 지금까지 이룩된 MEMS 분야에서의 설계/해석 기술 발전을 통해 가능해진 것으로서, MEMS 분야의 설계/해석 기술은 거시 세계에서 사용되던 기법들과 해석 프로그램들을

차용하던 초기 단계를 거쳐 현재는 복합장(coupled physics 또는 multiphysics)과 micro-scale이라는 MEMS의 특성을 반영한 전문 기법과 상용 프로그램들이 도입되어 활발하게 사용되고 있다. 해석 관점에서도 MEMS 소자의 성능과 관련된 point tool로서의 활용을 벗어나 이제는 관련된 물리 현상들 사이의 상호교환이나 시스템 차원에서의 해석 등으로 그 적용 범위가 넓어지고 있다.

이에 본 논문에서는 설계 단계에서부터 공정관련 변수들을 고려하도록 설계기술을 체계화한, DFM(Design For Manufacturing) 개념[1]을 적용한 MEMS 소자의 설계 절차를 제시함으로써 보다 효율적인 연구개발과 상용화에 기여하고자 한다.

### 2. DFM 개념에 기반한 MEMS design flow

MEMS 분야에서의 DFM 개념[2, 3] 적용은 이미 수년 전부터 논의되어왔던 것으로서 기존의 논문들에서는 MEMS 소자의 개발 과정을 (1) 기술적 요구사항 정립 단계, (2) 개념적 설계 단계, (3) 상세 설계 단계, 그리고 (4) 공정 단계로 나누어 분석하고 이들 상호간의 동시 설계(concurrent design)를 제안하였으며, 이와 관련되어 공정역량 분석과 재료의 물성 분석에 관한 TEG는 물론 이와 같은 동시 설계 진행을 위한 효율적인 연구개발 조직의 변경까지도 논의하였다. 이와 같은 내용들은 몇몇 설계 예를 통해 적용기법까지 제시하기는 하였으나 실무 설계자들이 실제로 MEMS 소자의 설계에 활용하기에는 여전히 추상적이고 그 범위가 광범위하기에 그림 1과 같이 보다 구체화하여 제시한다.

모든 연구개발의 출발과 동일하게, 그림 1에서 제안된 설

<sup>†</sup> 교신저자, 正 會 員 : 호서大學 融合技術研究所 專任講師 · 工博

E-mail : sohan@hoseo.edu

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 호서大學 機械工學科 正教授 · 工博

<sup>\*\*</sup> Exponent, Inc. Managing Engineer · 工博

接受日字 : 2007年 6月 12日

最終完了 : 2007年 7月 11日

계절차 또한 소자 또는 시스템의 특성과 성능을 명기하는 것으로부터 시작된다. 제시된 특성과 성능들을 토대로 이들을 만족시킬 수 있는 초기 설계안(draft design)을 도출하게 되는데, 이들 초기 설계안은 MEMS 소자의 특성상 공정기술과 큰 관련을 맺기 때문에 일련의 공정 순서들을 가정한다. 이들 공정은 (1) 개발자가 이미 확보한 기술일 수도 있고, (2) 확보된 기술에서 일부 공정단계를 수정하는 기술일 수도 있으며, (3) 새로운 공정기술을 구축해야 하는 것일 수도 있다. 하지만 현재의 개념적 설계 단계에서는 설계안-공정기술 조합의 타당성을 검토하는 것이 그 목적이므로 3가지 가운데 그 어느 것이라도 무방하다. 이때 초기 설계안의 도출과정에서는 성능에 대한 모의해석을 통해 요구되는 특성과 성능을 만족시키는지 확인하는 과정을 거치는데, 이것이 종래의 MEMS 설계자들이 주로 수행했던 해석내용에 해당한다.

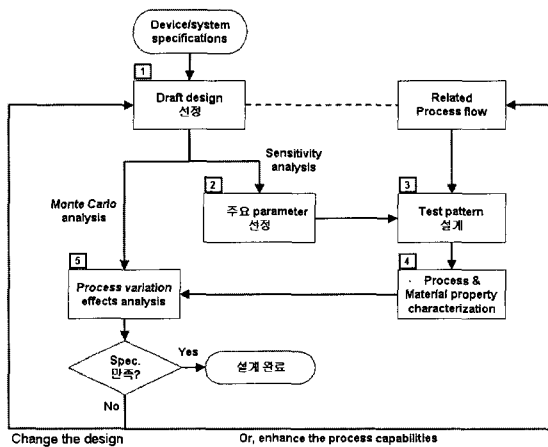


그림 1 DFM 개념에 기반한 MEMS 소자의 설계과정  
Fig. 1 Design flow of MEMS device based on DFM concept

일반적인 MEMS 소자의 설계 과정은 여기에서 끝나게 되지만 DFM 개념은 이제부터 적용되기 시작한다. 즉, 가정된 공정기술에서의 공정편차로 인해 공정결과와 재료의 물성은 어느 정도의 편차를 피할 수 없이 갖게 되므로 그와 같은 편차가 소자의 성능에 미치는 영향을 최소화하는 방향으로 설계가 진행되어야 하는 것이다. 이를 위해서는 먼저 설계된 MEMS 소자의 성능에 어떠한 종류의 공정특성 및 물성이 어느 정도나 영향을 미치는지 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 먼저 도출된 초기 설계안을 대상으로 민감도 해석(sensitivity analysis)을 수행하여 소자의 성능에 영향을 미치는 주요 인자들이 무엇인지 파악해야 한다. 그와 같은 주요 인자들 이외의 변수들은 비록 공정상의 편차가 크다 할지라도 소자의 성능에 미미한 영향만을 미치기 때문에 관심 대상에서 제외된다.

다음으로 가정된 공정이 선정된 주요 인자들과 관련하여 어느 정도의 편차를 갖는지 파악해야 한다. 전술한 (2)와 (3)의 경우와 같이 앞으로 공정개발이 필요한 경우에는 다 공정에 비추어 일반적으로 예상되는 공정편차를 가정하여 진행하며, (1)과 같이 현재 확보된 공정을 진행하는 경우에는 공정편차를 정량적으로 분석하기 위하여 시험소자(test pattern)들을 설계하고 이들을 사용하여 테스트 공정을 진행함으로써 공정 편차와 물성 변화량을 분석한다. 이들 시험소자들은 그

림 2와 같이 선폭, 증착되는 물질의 두께, 식각 깊이 또는 측벽 기울기 등의 공정 특성과 관련된 것일 수도 있고 탄성계수, 잔류 응력과 그 기울기, 전기 전도도, 열 전도도 등과 같은 물성 분석을 위한 것일 수도 있는데 선정된 주요 인자들의 종류나 사용되는 공정에 따라 그 형태와 크기를 달리하여 설계한다.

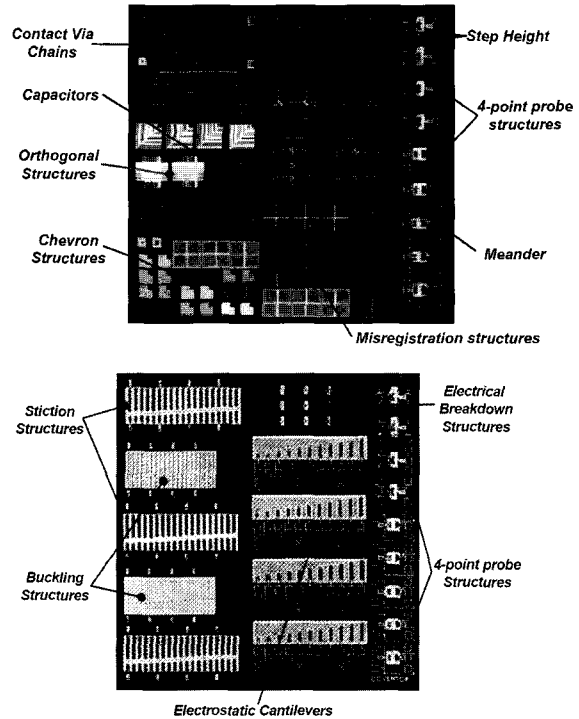


그림 2 공정분석을 위한 TEG(위)와 물성 분석을 위한 TEG (아래) [3]

Fig. 2 Process Characterization TEG (upper) and Material Property Characterization TEG (lower) [3]

이들 시험소자들은 대개 TEG(test element group)로 묶여 여러 종류의 인자들에 대해 동시에 공정이 진행되며 동일한 인자에 대해서 다수 개의 시험시편을 제작하여 그림 3과 같이 통계적으로 유의미한 결과를 얻도록 한다.

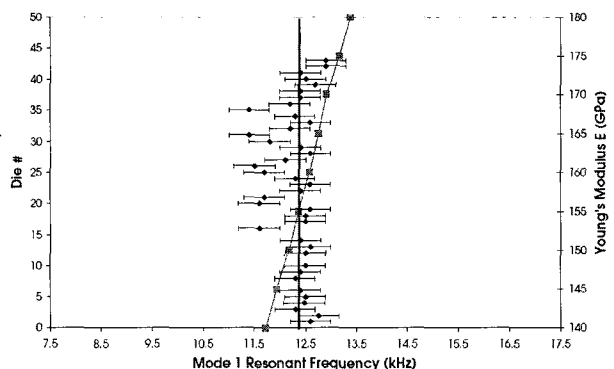


그림 3 머리빗 공진기를 이용한 Young 계수의 통계적 추출  
Fig. 3 Statistical extraction of Young's modulus using comb resonators

이들 TEG의 설계는 초기의 학문적 연구[4~6]를 통해 용도에 따라 표 1과 같이 다양한 형태들로 개발되었으며, MEMS 소자의 상용화 차원에서 각 기업들은 기존의 범용 시험소자들을 토대로 자신들의 제작공정에 맞는 TEG들을 자체적으로 개발하여 사용하고 있다.

표 1 시험소자들의 종류  
Table 1 Types of test structures

Line Width/Spacing	Chevron Structures
Layer Thickness	Step Structures
Side Wall Angle	Resonant Structures
Alignment	Alignment Structures
Impedance	TRL Measurements
Electrical Resistivity	Conductivity Lines
Sheet Resistance	Conductivity Lines
Contact Resistance	4-Point Probe Structures
Dielectric Permittivity	Fixed Plate Capacitors
High Frequency Impedance	TRL Measurements
Seebeck Coeff.	Bridges & Beams
Thermal Conductivity	Bridges & Beams
TCE	Cantilever Beams
Residual Film Stress	Doubly Supported Beams
Modulus	Arrays, Cantilever Beams,
Poisson Ratio	Bent Beam Gauges, Torsion
Longitudinal Stress	Beams, Gas Gauges,
Stress Gradient	Multilayer Beams, M-test
Stiction	Structures
Cyclic Fatigue	Cantilever Beams
Fracture Toughness	Torsion Beams
	Notch Structures

TEG를 사용하여 공정특성 및 물성 편차가 분석되면, 설계된 제품이 양산될 경우 그와 같은 공정 및 물성에서의 편차가 제품의 성능에서 어떠한 차이를 유발하게 되는지를 분석하기 위해 Monte Carlo 해석을 진행한다. Monte Carlo 해석 기법은 이미 다양한 분야에서 폭넓게 사용되고 있는 기법으로써 C 언어와 같은 범용 프로그래밍 언어 또는 Matlab™과 같은 high-level 프로그램을 사용하여 직접 구현하거나 관련 기능을 제공하는 상업용 프로그램을 이용할 수 있다. 이와 같은 해석을 통해 제작된 소자들의 성능 분포와 가상 수율을 예측하게 되는데, 물론 이때의 수율은 패키징 공정과 기타 모델링 과정에서 고려하지 못한 여러 변수들로 인해 실제 수율과 동일할 수는 없다. 하지만 공정 편차에 의한 영향을 설계 단계에서부터 고려할 수 있다는 측면에서 그 가치는 충분할 것이다.

이와 같은 수율 결과로부터 현재의 공정이 설계된 소자를 원하는 수율로 제작할 수 있는지 또는 앞으로 개발해야 하는 공정이 원하는 수율을 얻기 위해서는 어느 정도의 공정편차를 가져야만 하는지 평가하게 된다. 즉, 공정 개선이 필요한지의 판단 여부와 개선 목표를 정량화할 수 있는 토대가 된다. 동시에 공정개선을 통한 해결이 아닌, 현재의 공정편차를 감당할 수 있도록 초기 설계안을 변경함으로써 수율을 개선

하는 방안이나 공정과 설계의 동시 개선 등 다양한 해결책을 모색할 수도 있다.

### 3. 적용 예

제안된 설계기법이 실제 MEMS 소자의 설계에 어떻게 적용되는지를 예시하기 위해 그림 4와 같은 표면 미세가공 기술(surface micromachining technology)을 이용한 초소형 자이로스코프의 설계를 가정하였으며, 전술한 다양한 해석들을 수행하기 위해 MEMS 분야의 전용 상용 프로그램인 CoventorWare™를 사용하였다.

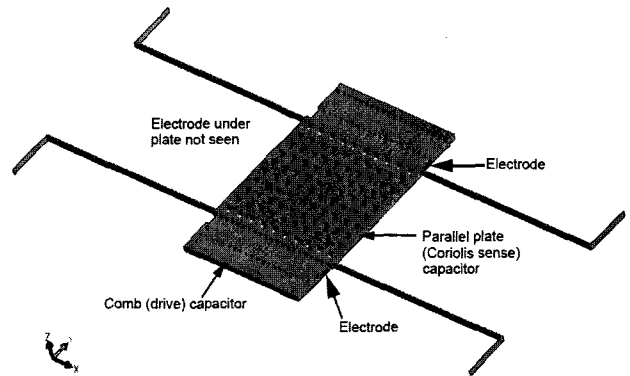


그림 4 적용 예로 사용된 자이로스코프 구조  
Fig. 4 Schematic view of a gyroscope as a test case

그림 4의 자이로스코프 구조는 10 μm 두께의 다결정 실리콘을 구조층으로 갖는 가상의 소자로서 머릿빗 구동이나 가속도 센서의 설계와도 관련될 수 있기 때문에, 많은 MEMS 소자의 설계에 참고가 될 것이다. 소자의 성능에 대한 요구 사항들로부터 초기 설계안 도출이 완료되어 그림 4의 구조가 선정되었다는 가정 하에서, 먼저 그림 5와 같이 민감도 해석을 진행하여 자이로스코프의 성능에 큰 영향을 미치는 가진(driving) 방향 공진 주파수와 관련된 주요 인자들을 분류하였다.

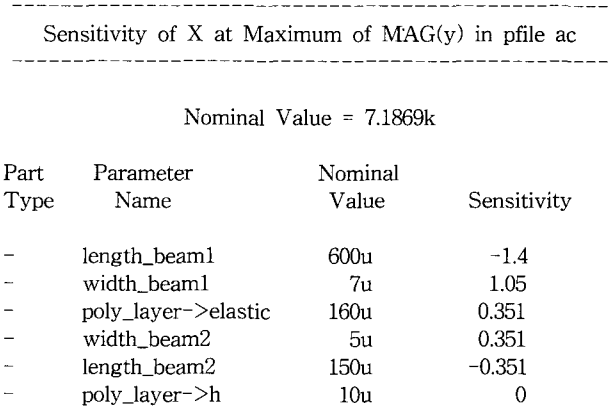


그림 5 자이로스코프에 대한 민감도 해석 결과  
Fig. 5 Sensitivity analysis result on the gyroscope

그림 5의 민감도 해석에 의하면 장축 지지빔의 길이(length\_beam1)와 폭(width\_beam1)이 주요 인자로 판명되었으며, 다결정 실리콘의 탄성도(poly\_layer->elastic)와 두께(poly\_layer->h), 단축 지지빔의 폭(width\_beam2)과 길이(length\_beam2)는 상대적으로 그 영향이 미미하여 무시될 수 있음을 알 수 있다. 이때 장축 지지빔의 길이는 공정에 의해 거의 영향을 받지 않는 인자인 반면 그 폭은 식각공정에서 큰 영향을 받을 수 있으므로 구조물의 선폭을 측정할 수 있는 시험소자를 설계해야 한다. 이와 같은 선폭변화를 분석하기 위해서는 일반적으로 그림 6과 같이 다양한 폭을 갖는 외팔보(cantilever) 또는 브릿지(bridge) 구조, Chevron 패턴, serpentine 패턴 등이 사용되며 SEM 분석 또는 광학적 측정을 통해 제작된 시편의 선폭을 측정하여 설계값과 비교함으로써 공정편차를 분석한다.

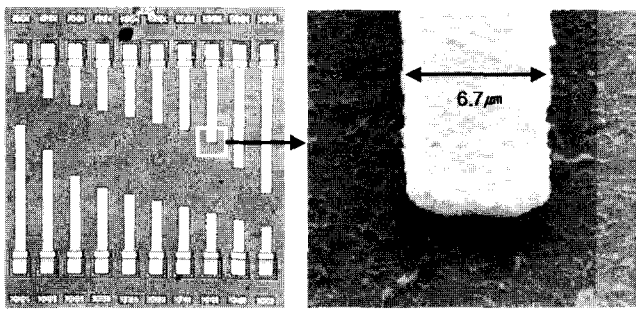


그림 6 외팔보 구조를 이용한 식각편차 측정  
Fig. 6 Etching variation measurement using cantilever array

시험소자들을 이용한 위와 같은 공정분석을 통해 제작공정의 식각 offset이, 설계 선폭의 10%에 해당하는 기준값 0.7 μm에서 0.3 μm와 1.1 μm의 ±3σ 값을 갖는 정규분포를 나타낸다고 가정하고 가상의 시편 500개들의 가진 방향 공진 주파수에 대한 Monte Carlo 해석을 진행하였으며 그 결과 그림 7과 같은 분포를 얻었다. 그림 7의 하단 그림과 같이, 가진 방향 공진 주파수의 초기 설계값인 7.167 kHz에 대해 ±0.5 kHz의 허용 오차범위를 가정할 경우 예상되는 가상 수율은 81.6%이며 설계자는 이 값이 향후의 packaging 공정 등을 고려할 때 적정 수율인지를 판단하게 된다.

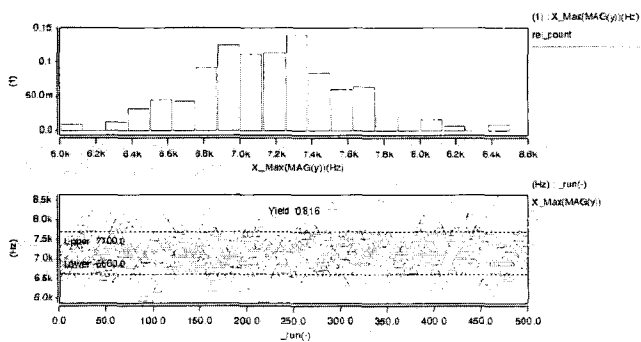


그림 7 가진 방향에서의 공진주파수에 대한 Monte Carlo 해석결과  
Fig. 7 Monte Carlo analysis result on the resonant frequency of the driving direction

만일 적정 수율에 미치지 못한다고 판단될 경우 전술한 바와 같이 공정 또는 물성에서의 편차(본 예의 경우 식각공정에서의 선폭변화)에 보다 둔감한 구조로 설계를 변경하거나 현 공정의 편차를 줄이는 방향으로 공정을 개선함으로써 수율 개선을 모색할 수 있으며, 이 과정에서 가상의 편차를 갖는 Monte Carlo 해석을 통해 공정개선의 목표를 정량화할 수도 있다.

상기 예에서는 단일 공정편차만을 고려하였으나 실제의 경우 여러 공정/물성 편차들이 복합적으로 소자의 성능에 무시할 수 없는 영향을 줄 수 있기 때문에, 이를 고려하기 위해 Monte Carlo 해석 또한 다중 loop 방식으로 진행하거나 전술한 과정들을 여러 인자들에 대해 반복해야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기계 설계 및 반도체 IC 설계에서 이미 폭넓게 활용되고 있는 DFM 개념을 MEMS 소자의 설계에 적용하기 위한 구체적인 설계 기법을 제시하였다. 제안된 설계 기법은 MEMS 소자의 성능에 관한 모의해석을 토대로 도출된 초기 설계안에 대해 (1) 민감도 해석을 통한 주요 인자의 선정, (2) 선정된 인자들과 관련하여 적정 TEG를 활용한 공정/물성 편차 분석, 그리고 (3) 추출된 공정/물성 편차에 기반한 Monte Carlo 해석의 3단계로 구성된다. 이를 통해 통계적 분포를 갖는 공정/물성 편차를 고려하여 MEMS 소자가 양산될 경우의 성능 분포와 이에 따른 가상 수율을 예측할 수 있으며, 이를 토대로 공정의 개선 여부와 그 정량적 목표를 제시하거나 공정/물성 편차에 둔감한 형태로 설계를 개선할 수 있다.

이와 같은 설계기법은 기존의 성능 예측에 국한된 MEMS 소자의 설계 범주를 공정/물성 편차와 같은 공정 능력을 통계적으로 고려하는 곳까지 확장시킨 것으로써, 이를 통해 양산화 과정을 설계단계부터 고려할 수 있도록 하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] D. M. Anderson, *Design for Manufacturability*, CIM Press, 1990.
- [2] M. G. da Silva, R. Giasolli, S. Cunningham, and D. DeRoo, "MEMS design for Manufacturability (DFM)," Sensors Expo & Conference, 2002.
- [3] G. Schröpfer, M. McNie, M. da Silva, R. Davies, A. Rickard, and F.-X. Musalem, "Designing manufacturable MEMS in CMOS compatible processes - Methodology and case studies," SPIE's Photonics Europe, pp. 116-127, 2004.
- [4] W. Fang and J. A. Wickert, "Determining mean and gradient residual stresses in thin films using micromachined cantilevers," J. Micromech. Microeng., Vol. 6, pp. 301-309, 1996.
- [5] P. M. Osterberg and S. D. Senturia, "M-TEST: A test chip for MEMS material property measurement

using electrostatically actuated test structures," J. MEMS, Vol. 6, No. 2, pp. 107-118, 1997.

- [6] R. K. Gupta, "Electronically probed measurements of MEMS geometries," J. MEMS, Vol. 9, No. 3, pp. 380-389, 2000.

## 저 자 소 개



### 한 승 오(韓承畝)

1973년 6월 14일생. 1996년 고려대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 마이크로머시닝 협동과정 졸업(석사), 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 호서대학교 융합기술연구소 전임강사. 관심분야: MEMS 및 나노소자의 해석 및 모델링, 지능형 센서 등.



### 오 박 균(吳博均)

1943년 10월 11일생. 1971년 한양대학교 기계공학과 졸업, 1981년 동 대학원 화학공학과 졸업(석사), 1985년 노스웨스턴대학교 기계공학과 졸업(박사). 현재 호서대학교 기계공학과 정교수. 관심분야: 공정장치 설계 및 열전달기기 설계.

### Mark da Silva

1989년 인도 Indian Institute of Technology(IIT) 항공공학과 졸업, 1992년 The Johns Hopkins University 기계공학과 졸업(석사), 1995년 The Johns Hopkins University 기계공학과 졸업(박사). 1997년~2000년 Coventor, Inc.에서 Application Engineer Manager로 근무. 현재 Exponent, Inc.에서 Managing Engineer로 재직중. 관심분야: micro 또는 nano system에서의 reliability modeling.