

상용코드 통합을 통한 미소기전집적시스템의 설계 소프트웨어 개발: DS/MEMS

허재성#, 이상훈*, 곽병만**

Development of Design Software for MEMS integrating Commercial Codes: DS/MEMS

Jae Sung Huh[#], Sang Hooch Lee^{*} and Byung Man Kwak^{**}

ABSTRACT

A CAD-based seamless design system for MEMS named DS/MEMS was developed which performs coupled-field analysis, optimal and robust design. DS/MEMS has been developed by means of integrating commercial codes and in-house code - SolidWorks, FEMAP, ANSYS and CA/MEMS. This strategy results in versatility that means to include various analysis model, corresponding analyses and approximated design sensitivity analysis and user friendliness that design variables are taken to be selectable directly from a CAD model, that the problem is formulated under a window environment and that the manual job during optimization process is almost eliminated. DS/MEMS works on a parametric CAD platform, integrating CAD modeling, analysis, and optimization. Nonlinear programming algorithms, the Taguchi method, and response surface method are made available for optimization. One application problem is taken to illustrate the proposed methodology and show the feasibility of DS/MEMS as a practical tool.

Key Words : MEMS(미소기전집적시스템), Optimal design(최적설계), Robust design(강건설계), Parametric CAD(파라메트릭 캐드), Integration and connection(통합과 연계)

1. 서론

1980 년대 이후 반도체 집적회로 제조공정을 이용한 박막 미세가공기술(IC-compatible surface micro machining technology)에 근거한 미소기전집적 시스템(Micro ElectroMechanical System-MEMS) 분야가 자리잡은 후, 다양한 미소기전집적시스템 장치들이 개발되고 있으며, 상용화되고 있다. 시간이

흘러감에 따라 미소기전집적시스템의 구조물 형상 및 작동 원리는 점점 복잡해지며, 충족되어야 할 설계 요건 역시 까다로워지고 있다.

지금까지의 다른 공학 분야처럼 미소기전집적 시스템 분야에서도 1980 년대 후반부터 자연스럽게 CAE/CAD 의 필요성이 대두되었고,¹ 1990 년대 부터는 상용프로그램이 나오기 시작하였다. 예를 들어, 1992 년에 3 차원 미소기전집적시스템의 기계

접수일: 2003 년 4 월 2 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일
교신저자: 한국과학기술원 기계공학과
E-mail: jshuh@khp.kaist.ac.kr, Tel: (042) 869-5004
* 한국과학기술원 기계공학과
** 한국과학기술원 기계공학과

전자 해석이 가능한 MEMCAD²가 발표되었고 현재 Coventor³사에 의해 상용화 되어있다. 미소 구동기(Micro actuator)에 대한 3차원 복합장 해석 소프트웨어인 SOLIDS⁴가 개발되었으며, Nagler⁵는 시스템 수준에서 파라메트릭 연구(parametric study)가 가능한 툴을 개발하였다. 정전기력을 이용하는 미소기전집적시스템에 대해 König⁶는 유한요소법과 경계요소법을 동시에 사용한 수치해석법이 타당함을 보였으며, Delfino⁷는 새로운 유한요소법을 제안하였다.

지금까지의 시뮬레이션 프로그램들은 복합장 해석이나 어떤 특정한 장치에 대한 최적설계만을 제공하였고, 미소기전집적시스템에서 일어나는 다양한 현상에 대한 해석과 자동화된 최적설계를 동시에 제공하는 시뮬레이션 도구는 아직 개발 초기 단계에 있다. 이러한 요구로 본 연구자들은 미소기전집적시스템에 대하여 파라메트릭 캐드(Parametric CAD)를 기반으로 복합장 해석을 포함하는 최적설계 및 강건설계를 수행하는 소프트웨어인 DS/MEMS를

개발하고 실제의 다양한 예제에 대해 적용을 하였다. 개발된 DS/MEMS는 기존의 상용 코드들을 체계적인 데이터 전달방식을 적용해 효율적으로 통합, 연계됨으로써 적용의 다양성과 사용자의 편의성을 확보하였다. 이 논문을 통해 DS/MEMS에 적용이 된 통합 형태와 그로 인한 전체 프로그램 구조와 특징을 소개하고 한 가지 적용 사례를 통해 이 소프트웨어의 실용성을 보이고자 한다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서 DS/MEMS의 구조, 통합방법과 특징이 기술되어 있으며, 3장에서는 미소 광 변조기(Micro-Spatial Light Modulator)에 대해 개발된 DS/MEMS의 데이터 이동방법과 최적설계의 만족스러운 결과를 기술하였다. 4절에는 결론에 대해 언급을 하였다.

2. DS/MEMS

2.1 DS/MEMS의 구조

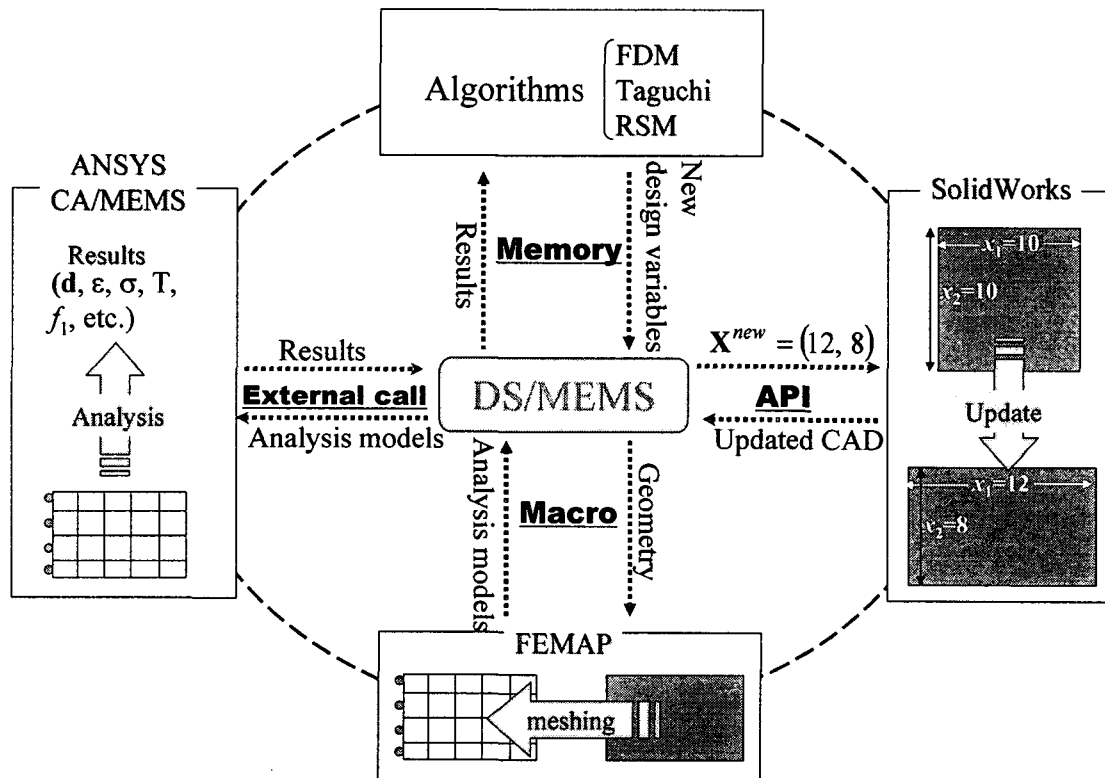


Fig. 1 Structure of DS/MEMS

본 연구에서는 1 장에서 설명한 기존 소프트웨어의 장벽을 뛰어넘기 위하여 기존의 상용 코드를 통합, 연계하여 새로운 소프트웨어인 DS/MEMS 를 개발하였다. Fig. 1 과 같이 DS/MEMS 는 4 개의 독립된 모듈들-파라메트릭 캐드 소프트웨어인 SolidWorks, 전·후처리기인 FEMAP, 해석 소프트웨어인 CA/MEMS 와 ANSYS, 그리고 다양한 설계 알고리즘들-을 데이터 교환의 방법으로 총괄하는 구조를 도입하였다. 각 모듈들의 특성을 고려하여 통합 방안과 데이터의 이동 형태를 결정하였으며 이는 Fig. 1 에서 도시화 되어있다. 즉, 다양한 상용코드들의 입·출력 데이터들이 자연스럽게 흘러가게 하나의 단일화된 연결통로이자 관리자인 DS/ MEMS 를 만들었다. 각각의 통합 및 연계방법 및 데이터 이동형태는 다음과 같다.

2.1.1 SolidWorks 의 통합 및 데이터 전달

SolidWorks 는 외부 프로그램을 통해 자기 자신에게 접근을 허락하는 Application Programming Interface(API)⁸ 기능을 지니고 있다. 이를 통해 SolidWorks 와 그에 접근하려는 외부 프로그램을 포함하는 새로운 형태의 소프트웨어 제작을 허락한다. 이러한 접근을 위해 Fig. 2 와 같은 많은 객체가 존재하며, 각 객체에 접근하여 기능을 수행하기 위한 수백 개의 함수가 또 제공된다. DS/ MEMS 는 특히 치수와 관련된 객체에 접근하여 정보를 취득하고 새로운 설계변수에 따른 새로운 캐드 모델의 자동 생성을 위한 일련의 과정이 프로그램화되어 있다. 그래서 Fig. 1 처럼 변수의 형태인 업그레이드된 설계변수를 객체함수의 전달인자로 하여 새로운 캐드 모델이 생성되고, 그 형상을 DS/MEMS 에 전달하도록 SolidWorks 를 통합하였다.

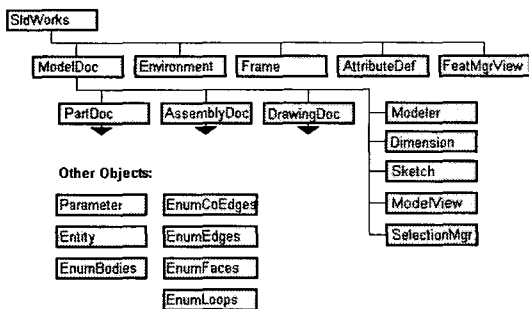


Fig. 2 Objects of SolidWorks API

2.1.2 FEMAP 의 연계

FEMAP 은 외부호출(external call) 명령과 프로 그래밍 파일이라는 매크로 기능을 이용하여 DS/ MEMS 에 연계하였다. 이로써 Fig. 1 처럼 최적화 과정에서 SolidWorks 에서 업데이트된 캐드 형상 데이터를 자동으로 해석 모델로 변경시켜준다. 이러한 과정에 대한 일련의 명령들은 프로그램 파일에 저장되어 있으므로 최적화 과정에서 사용자의 개입이 필요가 없다.

2.1.3 해석 프로그램과 알고리즘의 연계

DS/MEMS 는 ANSYS 와 CA/MEMS 를 외부호출 명령만으로 연계하여, Fig. 1 처럼 DS/MEMS 가 입력 파일을 이용하여 자동으로 이 두 프로그램을 배치(batch)작업 형태로 실행시킨다. 해석완료 후, DS/MEMS 는 해석의 결과 파일로부터 관심이 있는 성능척도들을 자동으로 추출한다.

DS/MEMS 는 최적 및 강건설계 알고리즘을 앞의 3 프로그램과 달리 내부에 완전히 통합하여 각 알고리즘이 DS/MEMS 의 하위 함수처럼 작동한다. 그리하여 결과 파일에서 얻어진 성능척도를 메모리로 호출하고 그에 대해 사칙연산을 하여 목적함수 및 제한조건에 해당하는 값을 계산한다. 그 결과를 메모리를 매개로 알고리즘에 전달을 하여 새로운 설계변수를 결과로 받는다. 이러한 일련의 데이터 전달도 DS/MEMS 에 의해 내부에서 자동으로 이루어지게 하여 사용자의 개입을 배제하였다.

2.2 DS/MEMS 의 특징

지금까지 설명대로 독립된 모듈의 통합을 통해 기존 시스템의 한계인 다양성과 각 모듈들이 제공하는 편의성을 그대로 유지할 수 있었다.

DS/MEMS 는 Fig. 3 (a)와 같이 SolidWorks 와 통합으로 최적설계의 모든 준비 과정을 윈도우와 파라메트릭 캐드 환경에서 가능하게 하여 편의성을 향상시켰다. 이로써 설계자는 다양한 미소기전집적시스템의 3 차원 캐드 모델의 제작 및 문제의 수식화를 윈도우 기반에서 할 수 있어 손쉽게 최적설계 및 강건설계의 결과를 얻을 수 있다. 특히, Fig. 3 (b)처럼 파라메트릭 캐드 모델의 치수에 대해 마우스 조작만으로 설계변수를 선택할 수 있게 하여 사용자의 편의성을 도모하였다. 이와 더불어, 설계 과정에서 설계 변수의 변화에 따른 캐드 모

델 생성의 오류를 방지하기 위하여 그 모델의 안전성을 파악할 수 있게 하였다.

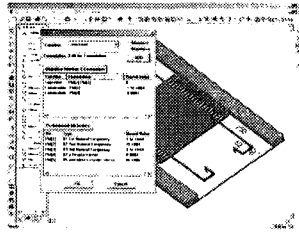


Fig. 3 (a) CAD and window environment

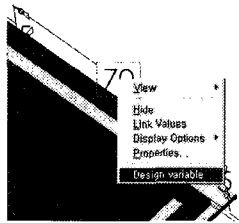


Fig. 3 (b) Selection of design variables

대부분 미소기전집적시스템의 센서 혹은 구동기(Actuator)의 작동 원리는 정전기력, 로렌츠 힘, 열팽창 계수의 차이에 의한 변형의 차(Thermal bimorph)효과에 의한 구조물의 변형을 통해서 이루어지므로, 복합장 해석은 미소기전집적시스템의 해석 및 설계에 있어서 필요 불가결한 요소이다. DS/MEMS 는 CA/MEMS 라는 자체 개발된 복합장 해석 코드를 통합하여 이 문제를 해결하였다. 현재는 열-기계, 정전기장-기계와 전자기장-기계 복합장 해석이 지원된다. 향후 새로운 복합장 해석 코드를 추가할 때, 이 해석모델만 업데이트하면 되므로 프로그램의 확장 측면에서도 유리하다.

이러한 복합장 해석은 그에 합당한 해석 모델을 필요로 한다. DS/MEMS 의 경우 구조해석은 유한요소 모델을 사용하지만 정전기장-기계 복합장 해석에서 필요에 따라 경계요소 모델과 유한요소 모델을 모두 요구할 수 있다. 이러한 다양한 해석 모델을 지원하기 위해 I-DEAS 나 Pro/E 처럼 통합 환경에서 캐드 및 해석 모델을 지원하는 시스템을 채택하지 않고, 캐드 소프트웨어와 독립된 전처리기인 FEMAP 을 사용하였다. 이로써 Fig. 4 처럼 캐드 모델과는 독립적인 해석 모델들의 생성이 가능하다. Fig. 4 (a) 는 마이크로 자이로스코프(Micro

Gyroscope)에 응용되는 빗살 구조물의 캐드 모델이고, 모드 해석을 위한 유한요소 모델과 정전기장-기계 복합장 해석을 위한 유한요소 및 경계요소의 중첩 모델은 Fig. 4 (b)와 같다. 이런 전처리기의 독립성을 추가함으로써 DS/MEMS 는 해석의 효율성과 다양성을 가지게 되었다.

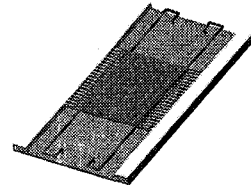


Fig. 4 (a) CAD model of micro-gyroscope

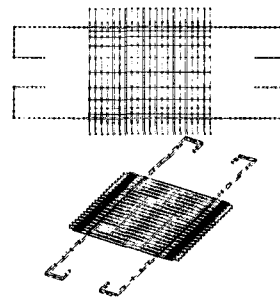


Fig. 4 (b) Analysis models independent on CAD

마지막으로, 설계자의 다양한 요구를 만족시키고 프로그램의 적용 범위를 넓히기 위해서 3 가지 최적화 알고리즘을 채택하였으며, 민감도 역시 해석적 방법이 아닌 근사화 방법인 유한차분법을 채택하여 다양성을 확보하도록 하였다.

2.3 최적설계 및 강건설계 알고리즘

2.3.1 유한차분법(Finite difference method)

유한 차분법은 함수의 구배(Gradient)나 헤시안(Hessian)을 근사적으로 계산하기 위한 수치적 방법으로 전방 차분법, 후방 차분법, 중앙 차분법이 있다. DS/MEMS 는 그 중에서 전방 차분법을 이용하며, 그 근사식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial b_i} \approx \frac{\Psi(b_1, \dots, b_i, \dots, b_n) - \Psi(b_1, \dots, b_i - \Delta b_i, \dots, b_n)}{\Delta b_i} \quad (1)$$

여기서 유한 차분량인 Δb_i 의 값은 설계자가 임의로 지정할 수 있으나, 설계 변수의 0.1~1.0% 범위에서 선택할 것을 권장하고 있다.¹⁰

이런 근사적인 민감도와 비선형 수학적 계획법을 이용하여 최적설계를 수행한다. DS/MEM 는 변형 가용 탐색법(Modified Method of Feasible Direction), 순차적 선형 계획법(Sequential Linear Programming) 과 순차적 이차 계획법(Sequential Quadratic Programming)의 3 가지 비선형 수학적 계획법을 제공한다.

2.3.2 다구찌 방법(Taguchi's method)

다구찌 방법은 1956 년 일본의 품질 공학자 G. Taguchi 박사에 의해 만들어졌으며, 공학 전반에서 제품 및 공정의 강건 설계 최적화에 사용이 되고 있다. DS/MEMS 에는 직교배열 실험으로 얻어진 자료를 분석, 최적 수준조합을 얻어내는 과정은 전통적인 다구찌 방법을 그대로 사용하면서, 설계 변수의 수준값 갱신 방법과 제한조건 해결을 위한 벌칙함수법을 도입한 축차적 다구찌 방법¹¹ 이 통합되었다.

설계변수의 수준값 갱신은 Fig. 5 처럼 설계 영역의 이동 및 축소의 방법을 통해 이루어진다. Fig. 5(a)의 경우 기존의 설계 영역에서 신호 대 잡음비

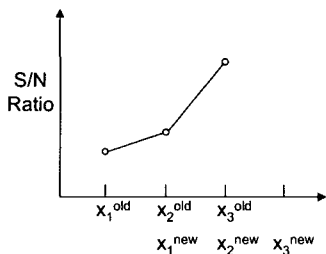


Fig. 5 (a) Translation

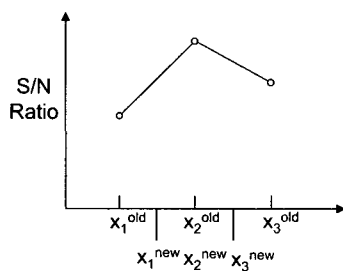


Fig. 5 (b) Reduction

가 X_1^{old} 가 가장 커서 새로운 설계 영역은 X_1^{old} 가 중간수준이 되도록 이동하게 되고, Fig. 5(b)처럼 X_2^{old} 가 최대값이면 설계 공간을 X_2^{old} 를 기준으로 축소하게 된다.

이 방법은 유한차분법을 이용한 비선형 수학적 계획법과는 달리 미분의 정보를 사용하지 않으므로 목적함수 등의 계산이 복잡한 경우 매우 효과적이다.

2.3.3 반응표면법(Response surface method)

반응표면법은 관심 있는 반응치가 여러 설계 변수들에 의해 영향을 받을 때 설계변수에 대하여 반응표면을 근사 모델링하고 해석하기 위한 유용한 수학적 통계적 기술들의 집합이다. 이 방법은 근사 반응 함수를 생성하기 위한 최소자승법, 근사화된 함수를 평가하기 위한 분산분석과 반응치를 구하기 위해 설계공간에 실험점을 선택하는 실험계획법으로 나누어진다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \epsilon \quad (2)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (3)$$

DS/MEMS 의 반응표면법 알고리즘은 위의 수식과 같은 1 차와 2 차의 회귀모델 계수를 추정하기 위하여 최소자승법을 사용하며, 이러한 근사회귀모델을 결정하기 위한 실험점은 부분조합법 중에 하나인 D-Optimal 계획법을 사용한다. D-Optimal 계획법은 실험점의 개수를 설계자가 임의로 설정할 수 있으며 적은 실험횟수로 비교적 정확한 근사를 할 수 있다. 그리고 비정규적인 설계영역도 고려할 수 있는 장점이 있다. D-Optimal 계획법에 대한 실험점의 선택기준은 실험점의 정보를 가지고 있는 행렬에 대하여 Maximize $|X^T X|$ 또는 Minimize $|X^T X|^{-1}$ 을 만족하는 실험점의 집합을 선택하는 것이다.¹²

이런 반응표면법은 민감도에 기초한 방법이 아니므로 다구찌 방법처럼 민감도를 구하기 힘들거나 불확실한 경우 기존의 방법에 비해 상당히

빠른 속도로 수렴하며 비선형 수학적 계획법보다 국소 최소점에 빠질 위험성이 적은 것이 특징이다.

3. DS/MEMS 의 적용 사례

3.1 미소 광 변조기(μ SLM)

위와 같이 상용코드들을 통합, 연계하여 개발된 DS/MEMS 가 실제 미소기전집적시스템에 대해 어떻게 적용이 되는지 미소 광 변조기를 통해 알아보자.

3.1.1 μ SLM 의 특징 및 해석모델

Fig. 6 은 미소 광 변조기(Micro Spatial Light Modulator)의 파라메트릭 캐드 모델이다. Fig. 6 의 상단 좌측의 그림에서 가장 위에 보이는 넓은 평판이 거울(Mirror)에 해당하는 부분이고 그 아래 거울을 구동하는 구조가 위치한다. 이 구조는 평판 및 평판을 지지하는 기둥 부분을 제거하면 Fig. 6 의 상단 우측처럼 보여진다. 이 μ SLM 은 ‘ Γ ’자 모양의 4 개 다리와 하나의 넓은 평판으로 구성되어 있고 기저(substrate)와 μ SLM 의 평판 사이에는 전극이 얇게 위치 한다. 이 전극에 40V 의 전압을 발생시키면, μ SLM 의 평판 부분과 전극사이에 정전기력이 유도되어 미소 광 변조기의 평판이 상하 병진 운동을 하게 된다. 좀 더 자세한 작동 원리 및 설계 요건은 Bifano¹³에 제시되어 있다.

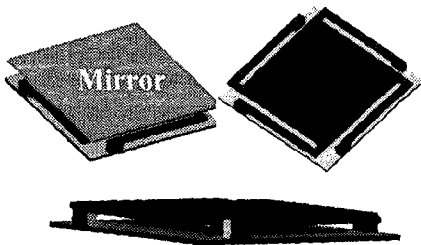


Fig. 6 Micro Spatial Light Modulator

이 시스템의 성능에 영향을 미치는 요소들은 두 전극 사이에서 발생하는 변위(Stroke), 최대 등가응력과 첫 번째 고유 진동수이다. 이런 함수 값은 정전기장-기계 복합장 해석과 모드 해석을 통하여 계산된다. Fig. 7 (a)는 복합장 해석을 위한 유한요소 모델과 경계요소 모델이 중첩된 해석 모델이며 Fig. 7 (b)는 모드 해석을 위한 유한요소 모델

이다. Fig. 7 (a)에서 전극은 경계요소만으로 모델링 되어 있으며 실제 구동부분은 유한요소로 모델링 하였다.

최적화 과정에서 격자는 초기해석에 사용한 메시 시드(mesh seed)를 이용하므로 격자 찌그러짐 현상이 발생할 수 있다. 그러므로 초기해석에서 최적화 과정에서 격자 찌그러짐이 가능한 적게 발생할 수 있도록 메시 시드를 부여하여야 한다.

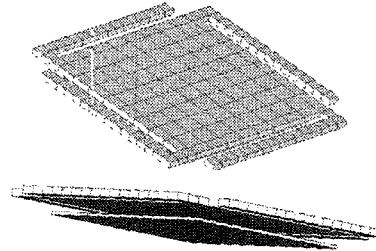


Fig. 7 (a) Model for electrostatic-mechanical analysis

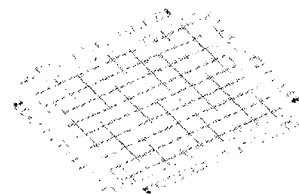


Fig. 7 (b) Model for modal analysis

3.1.2 최적화 준비과정

DS/MEMS 는 3 차원 파라메트릭 캐드 모델이 기본이므로 Fig. 6 과 같은 미소 광 변조기의 캐드 모델과 Fig. 8 과 같은 수식화만이 필요하다.

위와 같은 윈도우에서의 수식화는 DS/MEMS 내부에서는 Fig. 9 와 같은 과정을 거쳐 자동으로 이해되고 목적함수와 제한조건들이 계산된다. 즉,

Window Environment	
Obj. fn.	1000*(PM[1])
Const. 1	PM[2] > 120E3
Const. 2	PM[3] < 50E6
NO.	TYPE
PM[1]	z-axis displacement
PM[2]	First natural frequency
PM[3]	Max. von Mises stress

Fig. 8 Formulation on window

수식화로부터 필요한 해석 종류 및 해석 모델을 결정하고 해석하여 성능척도를 추출하고 그 함수값의 사칙연산을 통하여 목적함수 및 제한조건을 얻게 되는 것이다.

Inner Environment

1. Interpretation & Extraction: FE model for modal and electrostatic-mechanical analysis
2. Execution: ANSYS & CA/MEMS
3. Extraction from result files:
PM[1]=0.23E-7, PM[2]=121.2E3, PM[3]=23E5
4. Calculation: $f_1(x)=1000 \times (d_z)=0.23E-4$
 $g_1(x)=-f_1/120E3+1$
 $g_2(x)=\sigma_{von}/50E6-1$

Fig. 9 Interpretation, Extraction and Calculation

3.1.3 최적화 과정에서의 데이터 이동

미소 광 변조기는 최적화 과정에서 Fig. 10 과 같이 설계변수, 형상 데이터, 해석 모델 파일과 성능척도 데이터들이 DS/MEMS 를 통해 자동으로 관리 및 전달되게 하여 앞서 설명한 바와 같이 사용자의 수작업을 배제하였다.

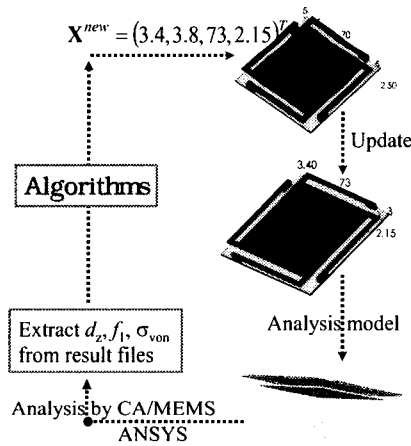


Fig. 10 Flow of data during optimization

이와 같은 자동화된 데이터의 이동은 통합화를 통하여 얻어진 결과이다. 그러므로 사용자는 Fig. 8 처럼 최적설계와 강건설계의 수식화에 해당하는 입력 데이터만을 입력하는 것으로 손쉽게 원하는 결과를 얻을 수가 있으며 아래에서 실제 최적설계 결과를 제시하고 있다.

3.1.4 최적설계 결과

위 문제를 수학적으로 정리하면 아래와 같다. 설계 변수는 이 구조물에서 스프링 역할을 하는 평판의 지지 보의 길이, 폭과 평판과 기저 사이의 간격으로 하였다(Fig. 11 참조).

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } d_z \\ & \text{subject to } f_1 \geq 120 \text{ kHz} \\ & \sigma_{von} \leq 50 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

d_z 은 병진 운동의 최대 변위, f_1 은 고유진동수 이고, σ_{von} 은 최대 등가응력이다.

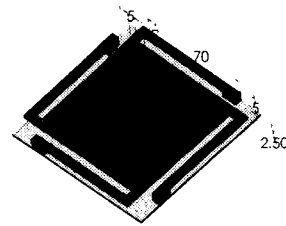


Fig. 11 Design variables

이 문제를 유한차분법(Finite difference method)을 이용하여 민감도를 계산하고 비선형 수학적 계획법의 한 방법인 변형 가용 탐색법(Modified method of feasible direction)을 사용하여 최적 해를 얻었다. 목적함수인 변위를 0.0569 μ m 에서 0.793 μ m 으로 최대화하면서 제한조건을 만족시키는 범위 내에서 시스템이 가능한 유연하게(flexible) 바뀔 것을 Fig. 12 의 최적설계에서 확인할 수가 있다. 즉, 지지 보의 길이는 증가하고 폭은 감소하였다. 제한 조건인 고유진동수와 최대 등가응력은 각각 178.4kHz 에서 129.5kHz 으로, 4.40MPa 에서 50.01MPa 으로 바뀌어졌다. 변위의 증가에 따라 최대 등가응력이 상응하게 증가하였으며 이 제한조건이 활성화되어 수렴을 하였다.

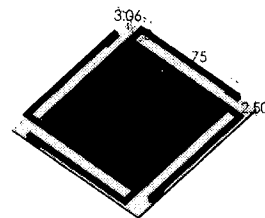


Fig. 12 Optimal design

4. 결론

파라메트릭 캐드와 윈도우 기반의 미소기전집적시스템의 설계를 위한 통합설계 솔루션인 DS/MEMS 에 대해 기술하였다. 독립된 상용 코드와 자체 개발된 코드를 통합하여 데이터 관리자 아래에 두어 편의성과 다양성을 획득하였다. 그 결과, 사용자들이 좀더 편한 환경에서 점점 복잡해지는 미소기전집적시스템의 다양한 해석과 최적설계 및 강건설계의 결과를 얻을 수 있게 되었다. 개발된 DS/MEMS 가 실제 예인 미소 광 변조기에 적용되는 과정을 보여주어 이 프로그램의 강점을 확인하고, 그 결과 역시 만족함을 보였다. 이러한 실제 예제를 통해 코드를 통합화하여 미소기전집적시스템용 통합설계 소프트웨어의 개발 전략에 많은 강점이 있음을 보였으며 기존 소프트웨어의 단점을 극복할 수 있음을 보여주었다.

후 기

본 연구는 G7 과제인 “MEMS 복합장 시뮬레이션 및 설계 기술개발에 관한 연구”와 “동시공학설계 개념에 의한 통합최적설계시스템 개발에 관한 연구”의 일환으로 지원받았음을 밝힙니다.

참고문헌

1. Buers, B., Peeters, E. and Sansen, W., "CAD Tools in Mechanical Sensor Design," Sensors and Actuators A, Vol. 17, pp. 423-429, 1989.
2. Senturia, D. Stephen, Harris, M. Robert, Johnson, P. Brian, Kim, Songmin, Nabors Keith, Shulman, A. Matthew and White, K. Jacob, "A Computer-Aided Design System for Microelectromechanical Systems (MEMCAD)," Journal of Microelectro Mechanical systems, Vol. 1, pp. 3-13, 1992.
3. www.coventor.com
4. Funk, M. Jorg, Korvink, G. J., Buhler, Johannes, Bachtold, Martin and Baltes, Henry, "SOLIDIS: A Tool for Microactuators Simulation in 3-D," Journal of Micro electromechanical systems, Vol. 6, pp. 70-82, 1997.
5. Nagler, Oliver, Trost, Micheal, Hillerich, Bernd and Kozłowski Frank, "Efficient Design and Optimization of MEMS by Integrating Commercial Simulation Tools," Sensors and Actuators A, Vol. 66, pp. 15-20, 1998.
6. Köing, Eva-Renate, Groth, Peter, Wacht, Gerhard, "New Coupled-Field Device Simulation Tool for MEMS based on the TP2000 CAD Platform," Sensors and Actuators A, Vol. 76, pp. 9-18, 1999.
7. Delfino, Federico and Rossi, Mansueto, "A New FEM Approach for Field and Torque Simulation of Electrostatic Microactuators," Journal of Micro Electromechanical Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 362-371, 2002.
8. www.solidworks.com
9. Youn, S. K., Kwak, B. M., Kwon, J. H., Chang, S. Y., Huh, J. S. and Kim, E. G., "Efforts in Developing Design and Simulation Tools of MEMS: DS/MEMS & CA/MEMS," Proceedings Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS, Vol. 4755, pp. 275-284, 2002.
10. Kwak, B. M., Han, J. S., Chang, J. H. and etc., "Development of CAD-Integrated Optimal Design System by Concurrent Engineering Design Concept," MOST, 2002-N-NL-01-C-008, 2002.
11. Lee, S. H., Kwak, B. M., "Development of an Optimization Algorithm based on the Taguchi Method," Proceedings of the KSME 2001 Spring, pp. 565-571, 2001.
12. Yeom, K. S., Huh, J. S., Kwak, B. M., "Development of a Structural Optimal Design Code Using Response Surface Method Implemented on a CAD Platform," Proceedings of the KSME 2001 Spring, pp. 580-585, 2001.
13. Bifano, Thomas, Bierden, Paul, Cornelissen, Steven, Dimas, Clara, Lee, Hocheol, Miller, Michele, and Perreault, Julie, "Large-scale Metal MEMS Mirror Arrays with Integrated Electronics," Proceedings of Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS, Vol. 4755, pp. 465-476, 2002.