

멀티피직스 시스템 해석과 구조 최적 설계

윤길호 | 경북대학교, 교수 | e-mail : ghy@knu.ac.kr

이 글에서는 최근 학계와 산업계의 관심이 집중되고 있는 멀티피직스 시스템(Multiphysics System)의 해석 방법과 이를 이용한 구조최적설계(Structural Optimization) 기법의 응용과 최신 기법에 대해서 소개하고자 한다.

CAE를 이용한 멀티피직스 시스템 해석

멀티피직스 시스템은 작동을 위하여 두 개 이상의 물리계가 서로 연성이 되어 있는 복합 물리계 시스템을 일컫는다. 대표적으로 기계 분야에서 일반적으로 많이 연구돼 왔던 열탄성(thermal/structure)과 유체/구조 연성(fluid/structure)시스템뿐만 아니라 의료기구나 지능형 자동차와 로봇 등에서 사용되는 다양한 센서와 액추에이터 등을 멀티피직스 시스템의 특별한 예로 들 수 있다. 특히, 한 개의 물리계 해석으로 시스템 해석이 가능한 기존의 일반적인 기계 시스템과는 달리 MEMS 등의 초소형 시스템에서는 시스템의 거동을 살펴보기 위하여 여러 물리계의 연성을 고려해야 한다는 점에서 대표적인 다물리계 시스템의 예로 들 수 있다. 또한, 현재에 그린 에너지 분야의 한 분야로 많은 관심이 집중되고 있는 연료전지 또한 화학, 전기, 유체가 연성이 되어 있는 다물리계 시스템의 하나이다. 이렇게 우리 생활에 밀접하게 쓰이고 있는 멀티피직스 시스템은 단일 물리계 시스템과 비교하여 엔지니어의 경험에 의존하여 설계(design)하기가 어려운 특성이 있다. 따라서, 원하는 작동을 하는 시스템을 설계하기 위해서 여러 물리현상의 연성해석이 필요하며 이를 바탕으로 하는 설계가 이루어져야 한다. 지난 몇 년간 국내외로 이러한 다물리계 시스템의 해석과 설계에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며 향후 이 분야에 대한 학계의 연구와 산업계의 투자가 증가할 것으로 예상된다.

멀티피직스 시스템을 효과적으로 해석하기 위해서 여러

가지 수치해석기법이 개발되었고 사용되고 있다. 이러한 기법들은 기본적으로 두 개 이상의 물리계를 어떤 순서로 해석하느냐에 따라 기법들이 분류된다. 대표적인 수치해석 방법으로는 각 물리계를 해석하는 순서와 연성하는 방법에 따라 일반적으로 스테저드 해석방법(Staggered analysis method)과 모노리스 해석방법(Monolithic approach)으로 분류할 수 있다. 그림 1에서 보듯이 해석적인 면에서는 기본적으로 비선형 시스템 해석이 필요하며 이에 따라 해석 시간이 비교적 많이 소요되어 병렬처리를 이용한 해석을 이용한 해석이 연구되고 있다.

전통적인 구조해석 분야와 비교하면 이미 프로그램 개발 회사간 경쟁이 심하고 시장이 포화가 된 구조해석 분야와 달리 멀티피직스 시스템의 해석 분야는 아직까지 신생 분야로 많은 연구 개발이 이루어지고 있는 상황이다. 또한 향후 몇 년 이내에 다물리계 시스템을 고려한 해석을 통한 제품 개발에 본격적으로 사용될 것으로 예측되기 때문에 CAE 프로그램을 개발하는 회사에서 시장을 선점하기 위하여 많은 관심을 기울이고 투자를 하고 있다. 현재 ANSYS, ADINA, ABAQUS, COMSOL 등의 대부분의 상용프로그램에서는 멀티피직스 시스템을 효과적으로 해석하기 위하여 각 다중 물리계에 특성화된 최적화된 해석 솔버를 자체 연구 개발하여 탑재하고 있다.

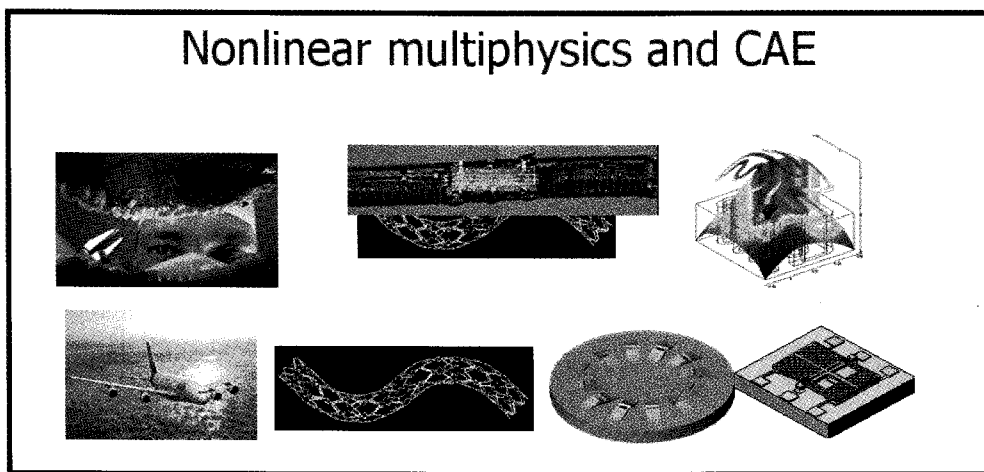
구조최적설계-위상최적설계

현대적인 의미의 구조최적설계란 CAE(Computer

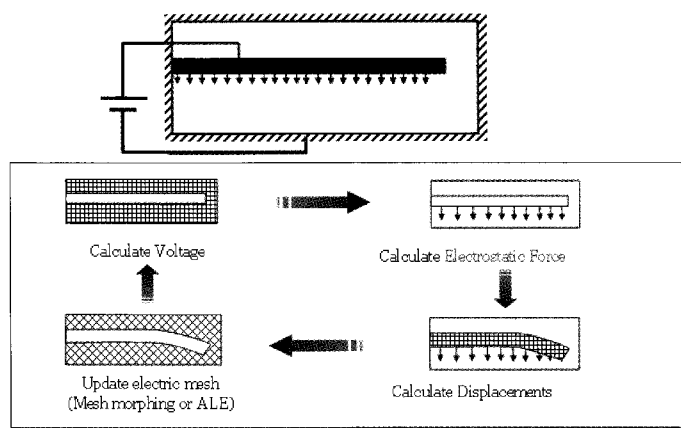
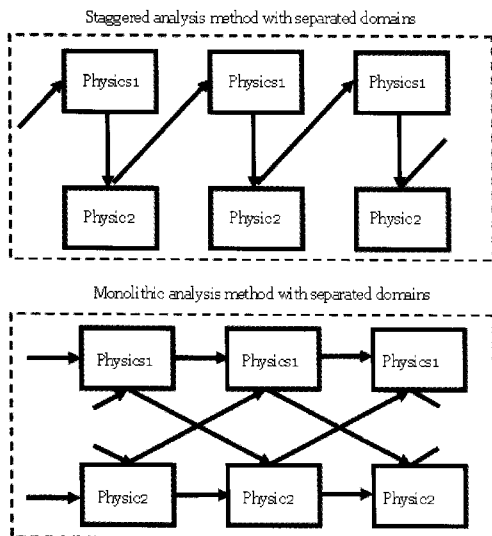
Aided Engineering)를 이용하여 주어진 물리적 조건에 대해서 정의된 목적함수와 설계제약조건을 만족시키는 설계변수를 수학적 이론에 기반한 구조화된 프로그램을 이용하여 최적의 값을 결정하는 설계기술을 의미한다. 설계 변수에는 구조물의 치수(size)나 형상(shape)도 가능하고 현재에는 위상(topology)과 재료 등까지 설계변수로 취급하여 구조최적설계를 하고 있다. 현재 학계에서는 이 위상 최적화 기법을 이용하여 다중 물리계가 연성이 되어있는 시스템의 위상최적화와 관련된 연구가 활발히 진행 중이

다.

특히, 위상최적설계(topology optimization)기법은 1980년도 후반에 Bendsoe와 Kikuchi가 제안한 후에 여러 가지 물리계가 연성되어 있는 최적화 문제에 적용되어 왔다. 이 방법은 치수최적화(size optimization)나 형상최적화(shape optimization)와 대비하여, 초기 위상(initial topology) 필요하지 않으면서 최적의 위상을 자동으로 설계할 수 있기 때문에 치수최적화나 형상최적화보다 더 좋은 설계를 할 수 있는 장점이 있다. 위상최적화의



(a) 다양한 멀티피직스 시스템의 예



(b) 정전기 시스템의 해석 방법과 다양한 수치 기법들

그림 1 멀티피직스 시스템

예로 그림 2(a)와 같은 경계조건과 하중이 존재할 때 그림 2(b-c)와 같이 기존의 치수최적화나 형상최적화와 다르게 위상최적화 그림 2(d)는 초기 위상과는 많이 다른 구조물을 얻는 것을 보여주고 있다.

위상최적설계 기법의 기본 방법은 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 설계 영역을 이산화(discretization) 하고 각 유한 요소(Element)에 설계 변수(design parameter)를 정의한다. 그 후에 이 설계변수를 0과 1 사이를 변화시켜가며 최적의 위상을 찾아가는 방법이다. 원래 문제는 0과 1을 찾는 정수최적화(integer optimization) 문제이지만, 해를 찾기 위한 해석 시간이 많이 필요하기 때문에 현재에는 0과 1 사이를 실수(real variable)로 완화한 방법(relaxation method)을 사용하여 최적화를 수행하고 있다.

위상최적화기법은 지금까지는 하중을 지지하는 강성 최대화 문제나 컴플라이언트 메카니즘 문제 등의 구조문제

에 많이 사용되고 있다. 현재 ANSYS, Nastran, Optistructure나 Genesis 같은 상용 소프트웨어들은 구조문제에서 사용하기 편한 위상최적화 기법을 제공하고 있다. 그림 3은 Altair에서 개발한 프로그램을 이용하여

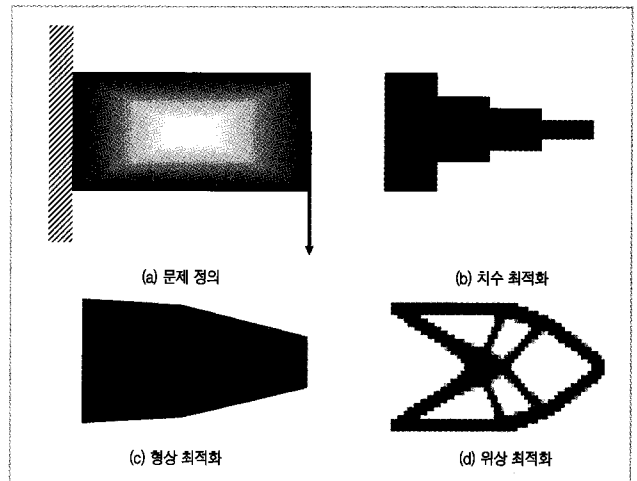


그림 2 구조 최적화

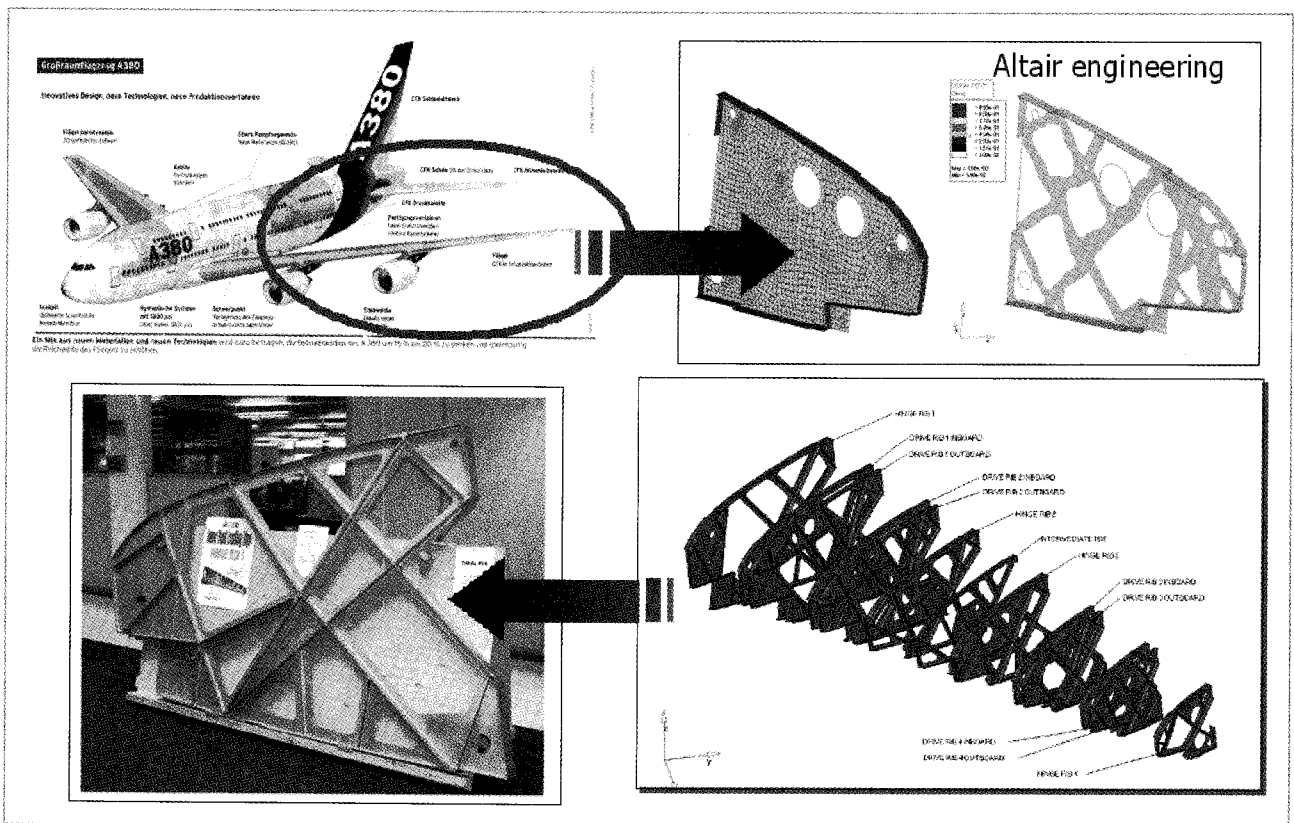


그림 3 위상최적화를 이용한 A380의 항공기 위상최적화 예제(Altair Engineering)

A380 비행기의 날개를 설계하기 위하여 구조최적설계를 이용한 성공적인 예제를 보여주고 있다. 이런 경향을 보면 이미 재료나 기하비선형 등을 고려한 특이한 구조문제가 아닌 이상 선형구조문제의 위상최적설계 연구는 더 이상 학문적인 가치가 없는 것으로 보이며 산업계에서도 위의 상용프로그램을 이용하여 기본 배경 지식이 있는 고등학교 수준의 사람들도 몇 번의 클릭만으로도 누구나가 쉽게 구조 최적화를 수행할 수 있다.

수치 해석에 기반한 멀티피직스 시스템의 구조 최적화

앞에서 살펴본 것과 같이 현재 많은 설계 현장에서 구조

최적설계와 수치해석 기법을 이용하여 신속한 설계의 개선을 이루고 있다. 하지만, 기존의 시스템보다 경험에 의한 설계가 어려운 멀티피직스 시스템에 적용하였을 때 얻어지는 장점이 크다는 것을 예상할 수 있음에도 불구하고 이론의 복잡성과 여러 가지 현실적인 이유로 아직까지 멀티피직스 시스템에는 많이 적용되고 있지 않고 있는 것도 사실이다. 하지만, 설계자/제작자의 경험과 직관에 기초를 두고 많은 시행착오에 의해 수행되는 방법으로는 새로운 기능을 갖는 다물리 복합 구조 시스템을 견실하게 설계하기도 곤란할 뿐 아니라, 설사 그런 설계를 하였다 하더라도, 비현실적으로 많은 노력과 경비가 필요하게 된다. 이에 현재 국내외로 많은 연구자들에 의하여 해석에 기반한 멀티피직스 시스템의 구조 최적화가 많이 연구되고 있다.

멀티피직스 시스템의 구조 최적화 설계를 하기 위해서는 먼저 새로운 개념의 최적설계기술을 적용해야 한다. 지금까지 개발되어 있는 대부분의 설계기술은 단일 물리법칙이 지배하는 설계문제에 한정되어 왔기 때문에 멀티피직스 시스템에 직접 적용할 때 많은 문제점들이 노출되고 있다. 이 뿐만 아니라 지금의 해석 기술만으로는 완전 연성된 물리현상을 묘사하기 어려운 설계 문제들도 많을 뿐 아니라, 설사 그러한 수치 해석 방법이 존재한다 하더라도 그 기술을 기존의 최적설계 기술에 그대로 접목시키기가 매우 어렵다. 특히 다물리현상이 관련된 최적 설계의 경

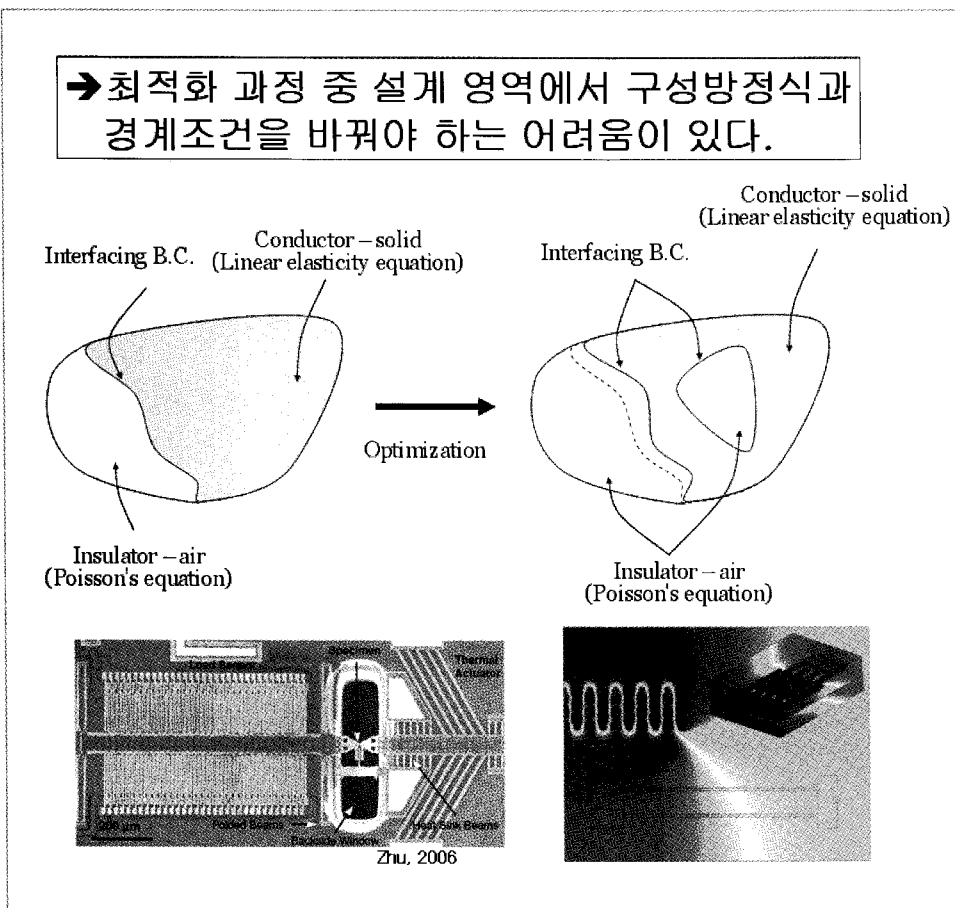


그림 4 정전기 시스템과 구조 시스템이 연성되어 있는 시스템의 위상최적화(위상최적화가 진행되면서 위상의 변화로 인한 구성방정식을 변화시켜야 하고 경계조건을 변화시켜야 하는 조건 때문에 구조최적화를 수행하기 어렵다.)

우, 설계문제 자체의 해 공간 자체가 매우 복잡하고 창의적이면서 제작성이 뛰어난 다물리 복합 구조 시스템을 찾기 극히 어렵다.

이런 설계상의 문제점들을 해결하기 위한 연구가 현재 진행 중으로 현재까지 전기/열/구조(Electric/ Thermal/Compliant), 음향-구조(Acoustic/Structure), 유체-구조(Fluid/Structure), 열-유체(Thermal/Fluid) 물리계가 연성이 되어 있는 시스템의 위상최적설계가 연구되었다.

여러 연구 중에서 대표적인 예로 그림 4와 5는 정전기 시스템(Electrostatic; Electric/Structure)의 위상최적설계의 예제를 보여주고 있다. 이 정전기 시스템은 전기장에 따라 쿨롱힘(Coulomb Force)을 이용하여 구조물을 구동하는 시스템으로 MEMS 시스템을 구동시키는 데 많이 쓰이고 있다. 이 시스템의 최적 위상을 설계하기 위해서는 설계변수에 따라 구성방정식이 변해야 하고 경계조건이 바뀌어야 하는 다양한 수치적인 어려움 문제가 있다. 그래서, 이 시스템을 위상최적설계하기 위하여 새로운 모노리스 해석이 최근에 개발해야 되었다. 기존의 해석 기법이 전기영역과 구조영역을 따로 나누어 해석하는 것이 비하여 새로운 해석 기법은 한 개의 영역에 전기와 구조영역을 같이 통합하여 해석하는 새로운 방법이다. 이를 이용하여 위상최적설계가 성공적으로 이루어졌으며 이 아이디어를 확장하여 음향-구조, 유체-구조 등이 연성이 되어 있는 시스템에서의 구조최적설계가 이루어지고 있다.

맺음말

사회가 점점 고도화되고 기술이 비약적으로 발전하면서 새로운 개념의 제품을 개발하기 위한 다 학제적

인 연구가 꼭 필요하다. 이런 측면에서 여러 개의 물리계가 연성이 되어 있는 멀티피직스 시스템은 앞으로 더욱 많은 발전이 이루어질 것으로 예상된다. 멀티피직스 시스템을 연구하고 효과적으로 사용하기 위해서는 전통적인 기계공학 분야에서뿐만 아니라 물리, 화학 등의 여러 학문의 분야를 받아들여서 연구를 하는 것이 필요한 시대가 되었다. 이를 가능하게 하기 위해서는 각 물리계의 정확한 이해가 필요하며 수학적인 지식을 바탕으로 다른 분야의 물리계를 이해하는 것이 좋다. 앞으로 다물리 시스템 설계 기법은 MEMS 등의 초소형 시스템뿐만 아니라 비행기 등 기존의 대형구조물의 성능을 더욱 향상시키는 데 이용될 것으로 예상되며 전혀 새로운 개념의 작동 방법을 이용한 설계를 가능하게 할 것이다.

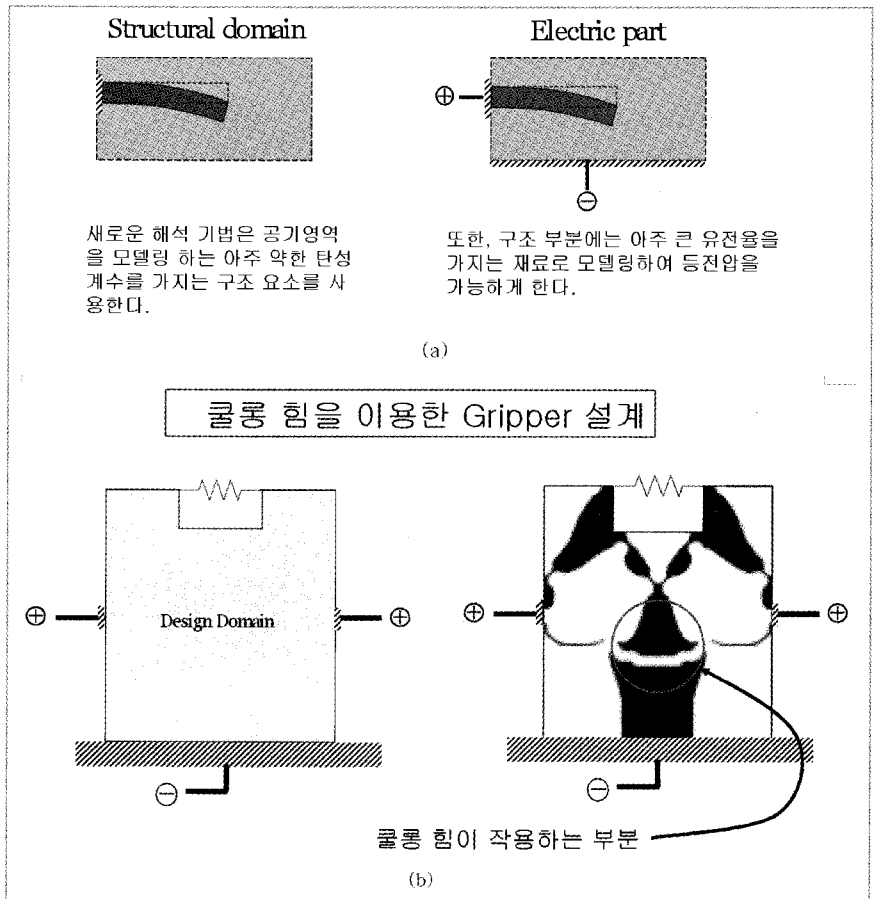


그림 5 새로운 해석 기법과 이를 이용한 정전기 시스템과 구조 시스템이 연성이 되어 있는 시스템의 위상최적화