

A Brief Survey of Finite Element Method in Control Engineering Field

장 유 진*
(Yu Jin Jang)

Abstract – The FEM(Finite Element Method) is widely adopted numerical technique for finding approximate solutions of various engineering problems in which partial differential equations (PDEs) are involved. Although the original purpose of the FEM is focused on numerical analysis itself due to its heavy computation time, this method has been adopted into control engineering field during the last decade to improve product or system performance. In this paper, this trend is briefly introduced.

Key Words : FEM, Control engineering, Controller design, System identification, Control theory, Optimization.

1. 서 론

유한요소법(FEM: Finite Element Method)은 다양한 산업 현장 및 연구현장에서 편미분 방정식을 포함하는 다양한 공학문제들을 효과적으로 분석하게 도와주는 매우 유용한 수치 해석 방법이다[1-3]. 전통적으로 유한 요소법은 많은 계산 시간을 필요로 하며 이러한 특성으로 인해 관심 대상에 대한 물리적 현상 해석에 주로 적용되어 왔다. 그러나 최근 10여 년 사이의 문헌들을 조사해 보면 컴퓨터 성능향상에 힘입어 유한요소법이 주어진 대상 및 조건에 대한 단순 해석을 넘어 목적하는 제품 또는 시스템의 성능 향상을 위해 제어공학 분야와 연계되어 적용되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 크게 제어분야에 직접적으로 연계된 경우와 간접적으로 연계된 경우 및 최적화 알고리즘과 연계된 경우로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 최근 10여년 사이의 문헌을 통해 유한요소법이 제어분야에 응용된 사례를 유형별로 간략히 소개하고 제어분야에 보다 손쉽게 응용되기 위한 조건들을 고찰해본다.

2. 제어공학과 유한요소법

본 절에서는 유한요소법이 시스템 모델 구축 및 제어기 설계에 필수적으로 사용된 직접적 적용 사례와 제어시스템 특성파악을 위한 시뮬레이션 등에 사용된 간접적 적용사례 및 최적화 알고리즘과 연계된 사례를 살펴본다. 또한 제어분야에 손쉽게 적용하기 위한 조건들을 살펴본다.

2.1 직접적 적용

제품 또는 시스템이 목적하는 기능을 수행할 수 있도록 하기 위한 적절한 제어기 설계 또는 제어기 설계를 위한 시스템 모델링은 매우 중요한 사항이며 이 과정에서 유한요소법이 필수적으로 사용된 사례를 문헌에서 찾을 수 있다 [4-6], [12], [14], [17], [18], [20], [22], [24], [26-27], [30-32], [34].

압전 재료(piezoelectric material)는 인가되는 전압에 따라 외형의 크기가 변하고 그 반대의 과정도 가능한 소재이며 이를 이용하여 다양한 액추에이터(actuator)를 구성할 수 있다 [13]. 이러한 피에조 액추에이터(piezoelectric actuator)의 특성으로 인해 구조물의 외형 변형 제어 또는 진동 감쇠 제어에 사용되고 있다 [4], [17-18], [20]. [4]는 FEM을 이용한 수치계산 결과를 제어입력으로 직접 사용한 경우이며 한 개의 유연한 빔(beam)과 두 개의 바이모프 피에조 액추에이터 기둥이 연결된 구조물의 변위 제어를 위해 액추에이터를 FEM을 이용하여 모델링하고 원하는 만큼의 변위 변동을 발생 시키는데 필요한 힘을 FEM 모델에서 계산하였다. 그 후 계산된 힘을 내기 위해 필요한 액추에이터 입력 전압 값을 산출한 후 적용하여 구조물 변형을 제어했다. 또한 [17]에서는 트러스(truss) 구조의 진동제어를 위해 바(bar) 형태의 피에조 액추에이터를 사용했으며 각 모드별로 LQR 제어를 수행하는 IMSC (Independent Modal Space Control)기법을 이용하여 구조물의 진동을 감쇄시켰다. 이 과정에서 트러스 구조물을 FEM을 이용하여 모델링 한 후 제어기 설계를 위해 저차의 모달 스페이스(modal space)에서 상태방정식(state equation)으로 표현한 후 각 모드별 제어기를 설계하였으며 설계된 제어기와 연동하여 FEM 시뮬레이션을 수행하였다. [18]에서는 강체 운동(rigid body motion)과 유연체 운동(flexible body motion)이 커플링 되어 있고 피에조 센서/액추에이터가 적용된 시스템을 FEM을 이용해서 모델링 했으며 이를 이용해서 간단한 시스템 동역학 모델을 만들었고 SRF(strain rate feedback) 제어를 적용한 진동변화를 FEM

* 정 회 원 : 동국대학 정보통신공학과 조교수 · 공박

E-mail : season@dongguk.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 4일

최종완료 : 2009년 8월 7일

과 연동하여 시뮬레이션 하였다. [20]에서는 압전재료가 부착된 유연한 빔(flexible beam)으로 구성된 구조물의 진동을 제어하기 위해 압전 재료의 특성을 고려한 유한요소 모델을 만들고 이를 상태방정식 형태로 나타냈으며 이를 이용하여 LQG/LTR 제어를 설계하였다.

금속가공 분야에서도 FEM과 제어 기법을 유용하게 사용하고 있다 [5], [32], [34]. [5]에서는 금속을 V자 형상으로 구부리는 공정에 대한 사례를 소개하고 있다. 이 공정에서는 V자 틀에 금속을 올려놓고 펀치(punch)를 적절히 움직여 눌러야만 하며 금속의 두께와 물성에 따라 눌러주는 펀치의 힘과 거리가 제품 품질에 큰 영향을 준다. 숙련된 작업자가 수행하던 이러한 작업을 정확하게 자동으로 수행하기 위해 우선 몇몇 금속의 물성에 따라 FEM 분석을 통해서 펀치의 힘과 거리에 대한 관계를 나타내는 그래프를 얻고 이를 데이터베이스에 저장한다. 금속을 실제로 구부릴 때 측정되는 펀치의 힘과 거리 관계를 데이터베이스에 있는 시뮬레이션 결과와 비교한 후 제안된 적응필터를 이용하여 펀치의 힘과 거리 관계 그래프를 변형하고 이를 퍼지 제어기에 사용하여 매우 정확하게 금속을 V자 형상으로 구부릴 수 있었다. 또 다른 대표적인 금속 가공 기법으로 한 장의 판을 깊이 방향으로 눌러 이음매가 없는 용기 모양의 제품을 만드는 드로잉(drawing) 기법과 복잡한 형상의 부품을 만들 때 여러 형태의 프레스로 따로 가공해 용접하지 않고 강판을 튜브 형태로 만든 후 바깥에 금형을 대고 튜브 안으로 강한 압력으로 액체를 밀어 넣어 형상을 만드는 하이드로포밍(hydroforming) 기법이 있다. 드로잉 기법에서는 금속의 흐름을 조절하기 위해 다이(die) 면상의 소재에 압력을 부여하는 블랭크 홀더(blank holder)라는 판을 반드시 설치하게 된다. 소재 판을 다이에 대고 펀치를 깊이 방향으로 움직일 때 블랭크 홀더를 눌러주는 힘(blank holder force, 블랭크 홀더력)을 적절히 조절해야만 제품의 주름(wrinkle)과 파열(tearing)을 방지할 수 있다고 알려져 있으며 소재에 따른 펀치 스트로크와 블랭크 홀더력 사이의 관계에서 주름이 생기는 영역과 파열이 생기는 영역을 구분 할 수 있다. [32]에서는 주름이 생기기 시작하는 경계를 따라 블랭크 홀더력을 조절하면 흠 없는 제품을 생산할 수 있다는 점을 이용하고 있다. FEM을 이용하여 드로잉 과정을 나타냈으며 시뮬레이션을 통해 제품 가공 중에 주름이 생기기 시작하는 경계의 블랭크 홀더력의 프로파일을 찾아냈다. 이때 블랭크 홀더력은 주름에 대한 정보로 입력으로 받아 PID 제어를 통해 조절하였다. 하이드로 포밍 과정에서는 내부압력과 축 방향 피딩(axial feeding)을 잘 조절해야만 제품의 주름과 파열을 방지할 수 있다. [34]에서는 주름과 파열을 나타내는 신호를 입력으로 받아 내부 압력과 축 방향 피딩을 조절하는 퍼지제어기를 설계하였다. 이 과정에서 FEM을 사용하여 하이드로포밍 과정을 나타냈으며 퍼지 제어기와 연동된 FEM 시뮬레이션을 통하여 최적의 내부압력과 축 방향 피딩을 결정했다.

비선형 시스템 제어를 위해 FEM 기법이 응용되기도 하고 FEM 시뮬레이션과 연계한 예측제어 기법이 적용되고 있다 [6], [24], [27]. NARX(nonlinear autoregressive with exogenous input) 모델은 현재의 출력 값이 과거의 입력 값과 출력 값들의 함수 관계로 표현되는 시스템 모델로서 비선형 시스템을 표현할 수 있다. 이러한 NARX 모델은 과거의 입출력 값들이 분포하는 도메인에서 적절한 기저(basis)를

선택했을 때 single-layer feedforward neural network 형태의 linear parameterization으로 근사화 될 수 있다. [6]에서는 bilinear rectangular element를 사용한 FEM 기법을 해당 도메인에 대해 적용하여 NARX모델의 현재 출력 값을 과거의 입력 값들과 출력 값들의 다중 선형함수(multilinear function)로 표현되도록 하였다. 이러한 다중 선형성은 제어기 설계를 쉽게 할 뿐만 아니라 모델에 사용된 변수를 기본적인 최소 자승법(least square method) 알고리즘을 사용하여 식별할 수 있게 하는 장점이 있으며 차량 중 방향 제어(longitudinal vehicle dynamics control)에 적용하였다.

예측제어 기법(predictive control)은 시스템 출력이 특정 출력 패턴을 추종하도록 매 샘플링 순간마다 특정 길이의 미래 출력 값을 계산하고 추종해야 할 출력 값과의 차이를 최소화하는 제어입력을 계산하는 기법이며 많은 계산량을 필요로 하는 단점이 있지만 비선형 시스템 및 시간지연이 있는 시스템에서도 효과적으로 사용될 수 있기 때문에 선호되고 있다. [24]는 두꺼운 유리 튜브에서 얇은 유리 튜브를 생산하는 공정(glass forming process)에서 FEM을 이용한 예측제어 기법을 적용한 사례이다. 이 공정에서 두꺼운 유리 튜브 내의 압력과 가열된 튜브를 잡아당기는 속도를 적절히 조절해야하지만 유리의 두께와 튜브 직경 측정에 관련한 시간지연과 공정 자체 특성상 열역학 및 유체역학적인 요소가 포함되어 있어 제어기 설계에 어려움이 있다. 4차의 선형 모델이 있지만 시스템의 거동을 만족스럽게 표현하지 못하기 때문에 FEM을 사용하여 거동을 표현 하였으며 이를 이용하여 설정된 목적함수(cost function)를 최소화 하도록 예측제어를 설계하였다. 이때 제어입력 계산 시간과 제어성능 간의 적절한 조절(trade-off)이 가능하도록 디자인하였다. [27]은 웨이퍼(wafer)의 온도 제어를 예측제어 기법을 사용한 시스템은 칩(System-on-a-Chip)형태로 구현할 때 FEM이 적용된 사례이다. 제어기 계산에 필요한 수치연산을 부동소수점 연산대신 로그를 이용하여 구현했으며 이에 따라 수치 표현을 위한 정수(integer) 부분과 나머지 부분(fraction)의 비트수를 결정해야 한다. 또한 예측 제어기의 출력예측 범위(prediction horizon)와 입력제어 범위(control horizon)를 결정해야만 한다. 이 과정에서 출력예측 범위는 특정 값으로 고정하였으며 나머지 변수들은 웨이퍼의 온도변화에 대한 FEM 모델과 제어기가 연동된 시뮬레이션을 통하여 결정하였다.

능동 소음 제어 분야에서도 FEM을 이용한 사례가 보고되고 있다. [14]에서는 새로운 음원을 사용하여 능동 소음 제어를 수행하였으며 FEM을 이용해 사운드 필드를 상태방정식 형태로 표현하고 사운드 필드의 에너지 총량(total acoustic energy)을 시스템 전달함수의 놈(norm) 형태로 표현한 후 H_2 제어 이론을 적용하여 이를 최소화 되게 하였다.

제어기 설계를 위한 변수지만 실험적으로 측정이 어렵거나 불가능한 경우가 종종 발생할 수 있다. 영구자석을 사용하는 선형 전동기에서 이동자의 진행 방향으로 디텐트 력(detent force)이 작용하여 추진력에 영향을 미치고 기기 운전 시 진동의 형태로 나타나기도 한다. [22]에서는 이러한 디텐트 력을 보상해주기 위한 제어기 설계에 필요한 전류 및 위치에 따른 추진력을 FEM 시뮬레이션을 통하여 구했으며 테이블로 만들어 사용했다. 릴럭턴스 전동기는 고정자와 회전자의 상대 위치에 따른 릴럭턴스의 변화에 의해 생기는 릴

력턴스 토크에 의해 동기 운전하는 전동기이며 자속의 포화(saturation)와 철손(iron loss)을 고려하여 제어해야만 좋은 성능을 낼 수 있다. [31]에서는 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)에 대해 FEM과 Preisach 모델을 결합하여 포화와 철손의 영향을 고려한 분석을 수행하였다. 이 과정에서 센서리스 벡터제어(sensorless vector control)에 필요한 변수들을 간단한 RLSM (recursive least square method) 기법을 이용해 식별하였으며 식별된 변수들을 제어에 사용했다.

대상 시스템에 대한 원활한 제어를 위해서는 관심 대상에 대한 측정값을 얻을 수 있어야 하지만 이러한 작업이 불가능한 경우도 있다. 철강 산업의 필수 설비인 가열로에서 슬랩(slab)을 목표 온도로 균일하게 제어하고자 할 때 슬랩의 온도 정보가 필요하지만 측정이 불가능하다. [10]에서는 테스트용 슬랩에 온도측정 장치를 설치하여 얻은 온도 데이터와 FEM을 이용한 1D 모델에서 얻어지는 온도 데이터와의 차이를 최소화하는 가열로 내부의 조건들을 찾아내고 이를 이용하여 여러 종류의 슬랩과 조업조건에 따른 온도제어를 수행하였다.

[26]은 제어가 추종해야 할 제어입력 패턴을 디자인하기 위해 FEM이 사용된 사례이다. 지진에 대한 건물의 안전성 평가를 위해서는 실제 지진파형을 구조물에 인가하는 강제진동 실험이 매우 중요하다. 보통은 대형 진동대위에 구조물을 만들고 가진하는 형태를 취하지만 실규모 건축물에는 대형 진동대 제작의 어려움 등 여러 단점이 있다. [26]에서는 강제진동 실험을 위하여 대형 진동대를 제작하는 대신 건축 구조물 상층에 대용량 선형전동기를 이용한 복합 질량형 감쇠기(Hybrid Mass Damper, HMD)를 설치하여 편리하게 실험을 진행하였다. 이 과정에서 진동원인 HMD는 건물 상층에 위치하기 때문에 직접적으로 지진파형을 인가할 수 없다. 따라서 건물 하부에 실제 지진파형이 닿았을 때 나타나는 각 층의 가속도 파형을 재현하도록 HMD의 가속도 출력을 조절해야만 한다. 이를 위해 HMD를 이용하여 가진을 수행한 후 가속도와 변위를 측정하여 가진기로부터 구조물의 각 층 응답의 전달함수를 구성했으며 여기에서 얻어진 모드정보를 이용하여 구조물의 FEM 모델을 갱신하였다. 갱신된 모델에 기초하여 실제 지진파형에 대한 건축물의 응답을 해석적으로 얻었으며 이러한 지진 응답 중 특정 층의 목표 응답을 모사하도록 구조물의 역 전달 함수와 지반가속도를 이용하여 HMD가 구현해야 할 가속도 패턴을 얻었다.

[12]와 [30]은 제어기 설계에 사용되는 상태방정식 형태의 모델링에만 초점을 맞춘 사례이다. [12]에서는 하드디스크 액추에이터에 대해 FEM을 이용해서 진동해석(modal analysis)을 수행하고 MATLAB에서 이를 이용하여 서보 시스템 설계에 사용할 저차의 상태방정식을 만드는 과정을 보여주고 있다. [30]에서는 피에조 액추에이터가 설치된 어쿠스틱 박스(acoustic box)에서 진동 및 소음 저감 제어를 위한 시스템 모델링을 다루고 있다. 이를 위해 FEM을 이용하여 시스템을 모델링하고 이를 가공하여 상태방정식 형태의 시스템 모델을 만들어 냈으며 실험을 통해 검증했다.

2.2 간접적 적용

제어 시스템의 특성파악 및 실험 허용 범위를 찾기 위해 유한요소법이 사용된 사례를 문헌에서 찾을 수 있다 [8], [11], [16-17], [18], [23], [25], [28].

[8], [16], [25], [28]은 제어가 적용된 시스템의 특성파악을 위해 FEM 시뮬레이션을 수행한 사례이다. 선형유도전동기의 구조 때문에 발생하는 단부효과(end effect) 때문에 기존의 제어방식을 변형할 필요가 있으며 [8]에서는 FEM을 이용하여 기존의 선형 유도전동기 등가회로 모델에서는 표현이 불가능했던 물리량들을 직접적으로 계산했으며 제어가 적용된 시스템의 특성을 FEM과 연계하여 분석하였다. [16]에서는 전자광학 추적기 설계에 있어서 성능 예측을 위해 제어와 3D 구조물의 특성을 동시에 검증할 수 있는 시뮬레이션을 수행하였다. 이 과정에서 전자광학 추적기 구조물은 동역학 해석이 가능한 visual NASTRAN 4D를 이용했으며 이를 MATLAB과 연동하여 제어기와 같이 시뮬레이션 하였다. [25]에서는 전통적으로 제어기에 의해 제어되고 있는 컨버터를 이용한 모터 동작 시뮬레이션에서 기존의 간단한 수식모델을 이용한 분석에 비해 보다 정확한 분석을 위해 FEM 모델과 제어가 연동된 상황을 시뮬레이션 하였다. [28]에서는 시간지연이 거의 없는 매우 얇은 평판을 두 개의 히터를 이용하여 온도제어를 수행했다. 이 과정에서 히터들간의 열 간섭 현상을 명시적으로 모델링했으며 독특한 디커플링(decoupling)기법의 효용성을 FEM 시뮬레이션을 통해 검증했다.

[11]은 시스템의 안정성(stability) 검증을 위해 FEM을 이용한 사례이다. 버티플라이 모드라 불리는 하드디스크 내부 액추에이터의 기계적 공진은 PZT(piezoelectric transducer)를 이용한 센서를 통해 감지될 수 있으며 센서의 위치 변화에 따라 감지 민감도(detection sensitivity)가 조절된다. FEM을 이용하여 액추에이터를 모델링했으며 모드형상과 고유 진동수에 대한 데이터를 얻고 이를 이용하여 제안된 능동 감쇄(active damping) 시스템의 안정성을 검증하였다.

일반적인 제어기 설계 후 테스트 시 실험 허용 범위 설정을 위해 FEM을 이용한 사례도 있다. [23]에서는 초정밀 스테이지의 제어기 설계를 위해 계단응답을 이용해서 1차 시간 지연 시스템으로 모델링한 후 PID 제어기를 설계하였으며 실험 허용 범위 설정을 위해 FEM을 이용하여 초정밀 스테이지가 갖는 고유진동수와 항복 변위를 미리 예측하였다.

2.3 최적화 알고리즘과 연계

제어분야에서 최적화 알고리즘과 연계된 FEM 적용 예를 찾기는 쉽지 않지만 그 외의 분야에서는 매우 방대한 사례들을 찾을 수 있다. 먼저 제어분야에서 최적화 알고리즘과 FEM이 연계된 사례로서 [6], [10], [29], [33]을 들 수 있다. [6]에서는 전술한 바와 같이 FEM 기법에 의한 시스템 모델의 다중 선형성 때문에 시스템 변수 식별에 기본적인 최적화 알고리즘으로 최소자승법을 적용할 수 있었다. [10]에서는 테스트용 슬랩의 측정온도 데이터와 FEM을 이용한 1D 모델에서 얻어지는 온도 데이터의 차이를 최소화하는 가열로 내부의 조건들을 최소자승법을 적용하여 식별 하였다. [31]에서는 FEM과 연계하여 RLSM을 적용해서 동기형 릴럭턴스 전동기의 센서리스 벡터제어에 필요한 변수들을 식별하였다. 대상 변수가 많아지면 이런 간단한 방법을 적용하기가 곤란하다. [29]와 [33]에서는 새로운 최적화 알고리즘인 uDEAS (univariate Dynamic Encoding Algorithm for Searches)를 이용하였다. [29]에서는 강편 가열로 내부에서 강편이 가열되는 패턴을 예측하기 위하여 강편을 2D로 표현하고 비열 및

열전도도가 온도에 따라 변하는 상황을 설정했으며 강편 외부의 복사 열전달 계수를 가열로 내부 위치에 따른 함수로 가정하고 변수로 설정하여 FEM을 수행하였다. 이 과정에서 최적화 알고리즘인 uDEAS를 이용해서 실험 데이터와 FEM 모델의 계산 값의 차이를 최소화하는 변수들을 식별했다. [33]에서는 풍력발전기에 사용되는 표면 부착형 동기발전기를 주어진 풍속에 대해 연간 에너지 생산량을 최대화 하도록 영구자석의 자극각도, 고정자 치 폭, 회전자 요크두께, 고정자 슬롯 높이를 FEM과 uDEAS를 연계한 시뮬레이션을 통하여 찾아냈다.

제어분야 외에 FEM과 최적화 알고리즘이 적용된 사례는 매우 많지만 일부 사례만 소개하고자 한다. 먼저 [7]은 유전 알고리즘(genetic algorithm)이 적용된 사례이다. 전자기력을 이용한 액추에이터 설계 시 자석을 포함하여 액추에이터 주요 부분의 크기는 액추에이터가 낼 수 있는 힘의 크기에 큰 영향을 준다. [7]에서는 최대의 힘을 낼 수 있는 설계 변수의 크기를 유전자 알고리즘과 FEM을 연계한 시뮬레이션을 통해서 찾아내었다. 이 과정에서 유전자 알고리즘의 각 세대마다의 표준편차를 관찰하는 방법을 통해 설계변수 외에 다른 부분의 작은 크기 변동에 대해서도 강인한 액추에이터를 설계했다. 일반적으로 FEM 해석을 위한 대상 물체의 외형은 보통 전처리기(preprocessor) 단계에서 디자인된다. 따라서 최적의 로봇 구조를 디자인하는 과정에서 일반적으로 FEM 해석을 위한 로봇 외형을 자동적으로 변형시킬 수 없지만 [15]에서는 초기 디자인을 조금씩 자동으로 변경하고 디자인 목적의 달성 여부를 평가하는 매우 기초적인 최적화 과정을 상용 FEM 소프트웨어인 ANSYS의 APDL [41] 이라는 스크립트 언어의 기능을 이용하여 해결하였다.

2.4 손쉬운 응용을 위한 조건

전술한 사례들을 FEM 모델의 차원과 상용 FEM 소프트웨어의 사용 여부에 따라 표 1과 같이 구분 할 수 있다. 대부분 2D와 3D 모델을 사용했으며 상용 FEM 소프트웨어가 사용된 사례가 많다. 특히 3D 모델에서는 모두 상용 FEM 소프트웨어를 사용했다. 문제의 특성에 따라 많은 특화된 FEM 소프트웨어들이 존재하지만 범용 FEM 소프트웨어인 ANSYS와 FEMLAB을 사용한 경우가 많았다. FEM과 제어기 및 최적화 알고리즘을 연계하여 적용하기 위해서는 FEM 소프트웨어와 외부 프로그램이 상호 작용할 수 있는 통로가 있어야만 하며 ANSYS와 FEMLAB을 비롯한 여러 상용 소프트웨어에서는 그러한 기능을 제공하고 있다. 특히 제어기 개발 단계에서는 편리하게 복잡한 수학적 알고리즘들을 디자인 할 수 있는 개발 환경이 매우 중요하며 보통 MATLAB이 많이 사용된다.

상용 소프트웨어 중 IMAT [37]은 많은 상용 FEM 소프트웨어에서의 해석결과를 MATLAB으로 가져와서 사용할 수 있으며 FEMLAB [36], Structural Dynamic Toolbox [38], Visual NASTRAN [39]은 MATLAB 환경과 연동 가능하기 때문에 제어기 설계에 편리하게 응용 할 수 있다. 그러나 사용자가 직접 FEM 코딩을 수행해야만 하는 경우도 있을 수 있으며 이때에는 [9]에서와 같이 MATLAB만을 이용해서 코딩을 수행 할 수도 있지만 FEM 해석을 위해 필요한 메쉬(mesh)생성에 어려움을 겪을 수 있다. [19]에서는 힘의 평형 원리를 이용한 간단한 MATLAB용 메쉬 생성 기법을

다루고 있으며 이를 이용하여 간단히 메쉬를 생성 할 수 있다. [19]와 [21]에서 모두 적절한 특징(feature)에 기반한 메쉬 생성을 다루고 있으며 [35]에서는 현재까지 알려진 메쉬 생성기법을 체계적으로 소개하고 있다. 필요시 이를 참고하여 적절한 메쉬 생성 알고리즘을 디자인하여 사용할 수도 있다. 만약 MATLAB용 FEM 코드의 계산 속도가 문제가 된다면 [40]과 같은 FEM C++ 라이브러리를 이용하여 MATLAB과 연동되도록 디자인 할 수도 있다.

표 1 적용 사례 분류

Table 1 Classification of application cases

구분		적용 사례	
FEM 모델	1D	[9-10]	
	2D	[4-9], [14], [17], [18], [20], [22], [24-25], [29], [31], [33]	
	3D	[9], [11-12], [14-16], [23], [26-28], [30], [32], [34]	
상용 FEM SW 사용 여부	사용	ANSYS	[7], [11-12], [15], [23], [26], [28]
		FEMLAB	[10], [24], [27]
		NASTRAN	[16]
		COSAR	[30]
		LS-DYNA3D	[32]
		Abaqus	[34]
	기타	[5], [8], [20], [25], [31], [33]	
미사용	[4], [6], [9], [14], [17], [18], [22], [29]		

3. 결 론

최근 10여년 사이의 문헌들을 참고하면 FEM은 물리적 현상에 대한 단순 해석을 넘어서 목적하는 제품 또는 시스템의 성능 향상을 위해 제어공학분야와 연계되어 매우 유용하게 적용되고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 최근 10여년 사이의 문헌 중 제어공학 분야에 FEM이 적용된 사례를 유형별로 간략하게 소개했으며 제어분야에 보다 손쉽게 응용되기 위한 조건들을 살펴보았다.

참 고 문 헌

- [1] O.C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, "The Finite Element Method, Volume 1: The Basis, fifth ed.", Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] O.C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, "The Finite Element Method, Volume 2: Solid Mechanics, fifth ed.", Butterworth-Heinemann, 2000.
- [3] O.C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, "The Finite Element Method, Volume 3: Fluid Dynamics, fifth ed.", Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] D. Isobe, H. Nakagawa, "A parallel control system for continuous architecture using finite element method", Journal of intelligent material systems and structures, vol. 9, pp.1038-1045, 1998.
- [5] M. Yang, A. Katayama, K. Manabe, N. Aikawa, "An

- AI process control system with simulation database and adaptive filter for V-bending, *Intelligent Processing and Manufacturing of Materials*, vol. 1, pp.607 - 612, 1999.
- [6] J. Kalkkuhl, K. J. Hunt, H. Fritz, "FEM-based neural-network approach to nonlinear modeling with application to longitudinal vehicle dynamics control", *IEEE trans. on neural networks*, pp. 885-897, vol. 10, no. 4, 1999.
- [7] H. T. Wang, Z. J. Liu, T. S. Low, S. S. Ge and C. Bi, "A genetic algorithm combined with finite element method for robust design of actuator", *IEEE trans. on magnetics*, vol. 36, no. 4, pp.1128-1131, 2000.
- [8] S. C. Ahn, Jr, J. H. Lee and D. S. Hyun, "Dynamic characteristic analysis of LIM using coupled FEM and control algorithm", *IEEE trans. on magnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 1876-1880, 2000.
- [9] Y. W. Kwon and H. C. bang, *The finite element method using MATLAB 2nd ed.*, CRC press, 2000.
- [10] *FEMLAB Automatic Control Reference Manual*, COMSOL, 2000.
- [11] F. Y. Huang, T. Semba, W. Imano and F. Lee, "Active damping in HDD actuator", *IEEE Trans. on magnetics*, vol. 37, no. 2, pp. 847-849, 2001.
- [12] M. R. Hatch, *Vibration simulation using MATLAB and ANSYS*, Chapman & Hall/CRC, 2001.
- [13] C. Niezrecki, D. Brei, S. Balakrishnan, A. Moskalik, "Piezoelectric Actuation: State of the Art", *The Shock and Vibration Digest*, vol. 33, no. 4, pp.269-280, 2001.
- [14] T. Samejima and D. Yamamoto, "Active modal control of sound fields by finite element modeling and control theory", *Acoust. Sci. & Tech.* vol. 23, no. 6, 2002.
- [15] W. Shijun and Z. Jinjuan, "FEM optimization for robot structure", *IEEE ICIT*, pp. 510-513, 2002.
- [16] 한재권, 서상호, 윤시영, 광노진, 유병철, 배종인, "MSC. visual Nastran 4D 와 MATLAB 의 연동을 이용한 서보 메커니즘 시스템의 제어 성능 시뮬레이션", *MSC software Korea Users Conference*, 2003.
- [17] R. Carvalhal, S. D. Silva and V. L. Junior, "Modal control applications in intelligent truss structure", *ABCM symposium series in mechatronics*, vol. 1, pp. 304-310, 2004.
- [18] X. Wang and J. K. Mills, "A FEM model for active vibration control of flexible linkages", *international conference on robotics & automation*, pp. 4308-4313, 2004
- [19] Per-Olof Persson, "Mesh Generation for Implicit Geometries", Ph.D. Thesis, Department of Mathematics, MIT, 2004.
- [20] 채장수, 박태원, "유연 구조물에 대한 동역학 모델링 및 LQG/LTR 제어기 설계", *한국정밀공학회지 제 21권 제 2호*, 2004.
- [21] S. Wang, L. Yuan, J. Qiu and S. Wang, "Feature-based fuzzy control adaptive finite element mesh generation for electromagnetic fields", *IEEE trans. on magnetics*, vol. 41, no. 5, 2005.
- [22] R. Benavides and P. Mutschler, "Detent force compensation in segmented long stator permanent magnet linear drives using finite element models", 2005.
- [23] 박종성, 정규원, "초정밀 스테이지 설계 및 제어시스템에 관한 연구", *한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집*, pp.54-59, 2005.
- [24] T. Bernard, E. E. Moghaddam, "Nonlinear model predictive control of a glass forming process based on a finite element model", *International conference on control applications*, pp. 960-965, Munich, Germany, 2006.
- [25] S. Kanerva, J. Kaukonen, A. Szucs and T. Hautamaki, "Coupled FEM-control simulation in the analysis of electrical machines and converters", *EPE-PEMC*, pp. 1925-1930, Portoroz, Slovenia, 2006.
- [26] 이상현, 박은천, 윤경조, 이성경, 유은중, 민경원, 정란, 민정기, 김영찬, "실물 크기 구조물의 강제 진동실험 및 지진응답 모사를 위한 HMD 제어기 설계", *한국지진공학회 논문집*, 제 10권 제6호, pp.103-114, 2006.
- [27] L. G. Bleris, J. Garcia, M. V. Kothare, M. G. Arnold, "Towards embedded model predictive control for System-on-a-Chip applications", *Journal of Process Control*, vol. 16, pp.255-264, 2006.
- [28] I. Nanno, N. Matsunaga, S. Kawaji, "A new model with feedback structure for thermal process. and its application to decoupling control", *IEEE Industrial Electronics, IECON 32nd Annual Conference*, pp.507-512, 2006.
- [29] Y. J. Jang and S. W. Kim, "An Estimation of a Billet Temperature during Reheating Furnace Operation", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 43-50, 2007.
- [30] T. Nestorovic, J. Lefevre, S. Ringwelski and U. Gabbert, "Finite Element and subspace identification approaches to model development of a smart acoustic box with experimental verification", *PWASET*, vol. 20, pp.315-320, 2007.
- [31] H. -S. Kim, M. -K. Lee, Y. -H. Kim and J. -H. Lee, "The sensorless vector control characteristics analysis of synchronous reluctance motor using a coupled FEM & Preisach model", 2007.
- [32] W. R. Wang, G. L. Chen, Z. Q. Lin, S. H. Li, "Determination of optimal blank holder force trajectories for segmented binders of step rectangle

- box using PID closed-loop FEM simulation", Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 32, pp.1074-1082, 2007.
- [33] 정호창, 이철균, 김은수, 김종욱, 정상용, "DEAS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계", 조명·전기설비학회 논문지, 22권, 10호, pp. 24-33, October 2008.
- [34] F. Mohammadi, M. M. Mashadi, "Determination of the loading path for tube hydroforming process of a copper joint using a fuzzy controller", Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 43, pp.1-10, 2009.
- [35] Pascal Jean Frey and Paul-Louis George, Mesh Generation - Application to finite elements, WILEY, 2008.
- [36] Introduction to FEMLAB product:
[http:// comsol.com/products/](http://comsol.com/products/)
- [37] IMAT User's Guide,
http://www.ata-engineering.com/software/imat/all_doc/doc/index.html
- [38] Structural Dynamics Toolbox, SDTools,
<http://www.sdtools.com>
- [39] Third-Party Products & Services, MSC. visual Nastran 4D,
http://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35580.html
- [40] Workbook of applications in VectorSpace C++ library,
<http://www.vector-space.com/>
- [41] ANSYS APDL Programmer's Guide,
http://uic.edu/depts/accc/software/ansys/html/prog_55/g-apdl/AToc.htm

저 자 소 개



장 유 진 (張 惟 進)

1996년 한국 과학기술 대학교 전기전자 공학과 졸업. 1998년, 2002년 포항공과대학교에서 석사, 박사학위를 받음.

2000년~2005년 철강제어 연구센터 연구원. 2005년~현재 동국대학교 정보통신공학과 조교수.

Tel : (054) 770-2275

E-mail : season@dongguk.ac.kr