전자기 시스템의 결합문제 해석기술 동향 (V)

에너지 변환 기계
석 접근 방법과 결합 현상

문원규*

*한국항공대 기계공학과

1. 서 론

인간의 실생활에 가장 유용하게 쓰이는 가장 기본적인 에너지 형태는 물체의 운동을 일으키는 운동 (또는 기계적) 에너지이다. 육체적 노동의 대부분이 인간의 몸이라는 물체를 운동시키는 것이고 이러한 육체 노동의 많은 부분을 현재는 기계가 대신하고 있다. 인간의 몸을 포함하여 어떠한 기계적 일을 하는 물체는 실상 에너지 변환 기구라 할 수 있다. 운동과 관련된 기계적 에너지는 대체적으로 거의 저장할 수 없다. 그래서 유용한 일을 해주는 물체는 (인간이든 기계이든), 물론 에너지의 종류를 어떠한 식을 분류하는가에 따라 약간의 이견이 있겠지만, 에너지 변환을 일으키는 시스템이라 할 수 있다.

인간이 만든 에너지 변환 기계 중 가장 커다란 영향을 미쳤다고 생각되는 최초의 것은 현재 기계공학의 영역으로 간주되어지는 열기관 특히 증기기관이다. 열기관은 주로 (원자력의 경우를 제외하고) 화학적 에너지를 열 에너지로 바꾼 후 다시 열 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 변환 장치를 의미한다. 물리적 에너지의 정의는 역학에서부터 유래되었으나 주울의 실험과 열역학 법칙 등에 의하여 온도와 관계 있는 물리량으로 여겨왔던 열이 기계적 에너지와 동등한 것이라는 것을 인식하게 되었다. 또 열기관과 같은 환경을 만들어 주면 열에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있다는 것도 알게 되어 오늘날 다양한 종류의 열기관을 설계 제작하여 유용하게 사용하고 있다.

과학 기술의 발전은 다양한 형태의 물리현상들을 일으키는 원동력도 운동을 일으키는 원동력이 되는 에너지와 동일한 것이라는 것을 이론뿐만 아니라 실험적으로 밝혀내기에 이르렀다. 이 중에서 가장 큰 영향을 미친 에너지의 형태는 전기 에너지라 할 수 있을 것이다. 전기 에너지는 에너지 전달을 물체의 이동 없이 가능하게 하였을 뿐만 아니라 다양한 형태의 에너지로 쉽게 변환할 수 있다는 장점이 있다. 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시켜주는 기기로는 모터를 대표적인 예로 제시할 수 있는데 현대인의 생활에서 모터를 제거한다면 얼마나 많은 일이 멈추어야 할 것인가는 다시 말할 필요가 없으리라. 전기 에너지는 전구 등을 통하여 빛으로 변환되어 우리의 시야를 밝혀주며 전기난로 등을 통하여 인간을 따뜻하게 데워주고 냉방 기구 등을 통하여 시원한 여름을 가능하게 할 뿐 아니라 오디오에 의하여 인간이 원하는 소리를 발생시켜주거나 녹음해주는 일을 가능하게 한다. 중요한 것은 여기에 열거한 몇몇 예가 모두 에너지를 변환시켜주는 기계라는 것이다. 즉 인간에게 무엇인가를 해주는 기계는 대부분 에너지를 변환시키는 기계이고 이 기계 안에서 어떻게 에너지가 변환되는가를 올바로 이해하는 것이 그 기계를 올바로 설계하고 제작하고 사용하는 것이다.

불행하게도 현재의 교육체계와 학문의 틀은 이러한 다양한 물리 현상의 상호 작용에 대하여 손쉽게 이해하고 접근하도록 도와주기 힘들게 되어 있다. 그 근본적인 원인을 따져보면 역시 인간의 사고 방식에 기인한다고 할 수 있다. 복잡한 현상을 이해하기 위해서는 먼저 간단한 경우를 상정하여 분석이 필요하게 되는데 이 단계에서는 서로 분리될 수 없는 물리량들을 선정하여 이들의 변화에 따른 물리현상을 관찰하여 이해하고 모델을 작성한다. 이러한 분석 작업에 의하여 다양한 종류의 물리 현상을 서로 독립적인 다양한 종류의 이론으로 설명이 가능하게 되었다. 이러한 물리 현상의 분석적 모델링 작업이 모두 완벽히 끝나지 않았음에도 불구하고 엔지니어들은 서로 독립적으로 다루어져 온 물리 현상 들이 결합되어 나타나는 경우를 다루어야 한다. 여태까지 알려진 지식을 잘 활용한다면 이 다양한 에너지의 결합 현상에 대하여 꽤 정확한 모델을 작성할 수 있으나 앞서 지적했듯이 실상 이에 대한 교육과 관심의 부족으로 인하여 교육체계나 학문의 틀 등이 이를 더욱 힘들

게 만들고 있다. 왜냐하면 현대 과학기술은 모델의 정확도를 개선하기 위한 작업에 많은 업적을 축적하였기 때문에 물리현상의 한 단면에 (예를 들어 역학 또는 전자기학) 대하여 알려진 지식의 양이 엄청나게 되었고 이러한 분야별로 나누어져 있는 교육과 학문의 틀이 견고해져서 서로를 넘나들기 힘들다고 생각하게 되었기 때문이다. 그러나 앞서 밝힌 바와 같이 인간에게 유용한 기계는 다양한 에너지를 또 다른 에너지로 변환시켜주는 것이므로 여러 분야를 결합하여 모델을 작성하는 작업이 필요하다. 따라서 여러 분야의 지식을 이용하여 높은 정밀도를 가지는 모델을 작성하고 이를 기계 설계에 응용하기 위해서는 시스템의 측면에서 다양한 분야의 지식을 이용하고 결합하는 방식을 연구 개발하여 교육하고 활용하여야 한다.

어떤 시스템의 모델을 작성할 때에는 요소 기계에 대한 모델을 서로 결합할 수 있는 형태로 작성하는 것에서 시작하여 이를 통합하여 전체적인 응답특성을 살펴보는 방식으로 이루어진다. 이 때 에너지 변환이 일어나는 요소의 모델을 작성하는 것은 두 가지 종류 이상의 물리현상을 모두 이해해야 하기 때문에 어려움이 있다. 예를 들어 모터와 같은 기계와 전기적인 현상이 결합되어 있는 기기를 모델링하는 경우를 생각해보자. 독립적인 입장에서는 전기장과 기계 부품 등을 유한요소법 프로그램 등을 이용하여 각각에 대하여 꽤 정확한 모델을 작성할 수 있다. 그러나 모터의 특성상 기계적 운동은 전압이나 전류에 영향을 줄 수밖에 없다. 따라서 시스템 측면에서 올바른 해석을 하기 위해서는 독립적인 두 모델을 작성하는 것보다는 서로 결합(coupling)되어 있는 두 가지의 종류의 상태변수를 갖는 하나의 모델로 작성하는 것이 바람직하다.

지금까지는 이러한 결합(coupling) 현상의 영향이 작도록 시스템을 설계하고 운전조건을 설정하고자 노력하여 왔다. 모터의 예를 생각해보면 모터의 회전수와 부하가 일정하도록 운전 조건을 잡으면 주어진 힘 또는 회전력을 얻기 위하여 필요한 전류를 전자기력 해석으로부터 얻을 수 있다. 기계적 응답해석에 있어서는 운전 조건하에서의 전자기력을 독립적인 외력으로 가정하여 구조적 진동 문제 등을 해석할 수 있다. 그러나 운전 조건이 일정한 회전수와 부하가 아닌 경우에는 이러한 접근으로는 현상의 핵심을 잡을 수 없다. 이러한 때에는 기계와 전기적 상태 변수들을 함께 포함하는 결합된 (coupled) 모델이 필요하게 된다. 21세기에 요구되는 기계는 향상된 에너지 효율과 다양한 기능을 가진 것이다. 이를 위해서는 에너지 변환율이 높은 기계를 개발해야 하고 이의 운전조건도 다양한 요구에 맞도록 다양화될 것이다. 따라서 에너지 변환에 대한 정밀한 모델이 요구되리라 예상된다.

에너지 변환을 하나의 결합된 모델로 표현하기 위해서는 두 가지 종류 이상의 학문 분야에 능통해야 한다고 할 수 있다. 그러나 현실적으로 현장의 엔지니어가 두 가지 종류 이상의 학문에 능통하다는 것은 거의 불가능에 가깝다. 뿐만 아니라 각 요소의 정확한 모델은 매우 복잡하고 연속체 형태나 많은 수의 상태 변수를 요하므로 이러한 복잡한 모델들을 여러 개 결합하여 그 전체의 동적 거동을 본다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 각 요소의 모델을 전체 시스템의 측면에서 중요한 성질만을 표현하는 간소 모델(reduced model)로 축소하는 과정이 필요하게 된다. 그러나 간소 모델을 작성할 때에 유의할 점이 있다. 각 요소들의 간소 모델들은 서로 쉽게 연결이 되어야 한다는 점이다. 이것을 지키지 않고 간소 모델을 작성하면 쓸데없는 모델을 양산하는 결과를 가져올 수 있다. 따라서 시스템 동적 거동을 해석할 때에는 전체 시스템 거동의 해석을 위한 모델의 틀을 마련하고 시스템의 다양한 요소에 대한 간소 모델을 이 틀에 맞도록 작성하는 작업이 필요하다. 각 요소의 간소 모델은 각 분야의 해석기술로 작성할 수 있는 정확한 모델로부터 전체 시스템 거동에 영향을 미치는 현상을 포함하는 가장 간단하면서도 주어진 틀에 맞는 모델로 간소화시키는 과정으로부터 작성될 수 있을 것이다. 이러한 틀로 지금까지 널리 사용되어 왔던 것이 동등 전기회로 모델 방법이다. 여기서는 이와는 다른 틀로서 인정받고 있는 Bond Graph 방법에 근거하여 에너지 종류를 분류한 후, 에너지 변환 현상의 거시적 특징을 살펴보고 이를 통하여 에너지 변환 기계의 모델을 작성할 때 야기되는 상이한 물리량의 결합 문제(coupled problem)를 고찰해보고자 한다.

2. 에너지의 종류

우리는 흔히 화학적 에너지니 원자력에너지는 전기 에너지니 하는 이야기를 쓰고 듣는다. 그러나 정확한 구별을 위한 정의는 간단하게 표현하기 쉽지 않다. 더군다나 조금 더 자세한 분류로 열 에너지, 빛 에너지, 기계적 에너지, 음향에너지와 같은 용어를 사용할 수도 있다. 에너지 변환 시스템의 모델 작성에 도움이 되는 에너지의 분류는 우리가 물리 현상을 다루는 방식에서 출발하는 것이 가장 자연스럽다. 그것은 가장 적은 수의 물리적 상태변수로서 모델이 가능한 독립적인 물리적 현상을 하나의 에너지 종류로 정의하는 것을 의미한다.

예를 들어 생각해보자. 만약 체적이 일정하다는 기계적 조건이 주어진다면 순수한 열역학 시스템은 순수한 열 시스템이 된다고 할 수 있는데 그 이유는 그 시스템의 에너지의 양에 변화를 주는 것이 열의 출입뿐이기 때문이다. 그 시스템의 상태는 온도나 시스템의 엔트로피가 정해지면 결정되고 시스템의 성질은 온도와 엔트로피의 상관관계로 나타낼 수 있다. 전기 시스템이라면 어떻게 나타낼 수 있을까? 가장 간단한 전기 시스템은 저항이나 콘덴서(capacitor)와 같이 전압과 전류 또는 전하량 등을 상태변수로 선정할 수 있고 또 그들간의 관계로 그 성질을 표현할 수 있는 것일 것이다. 이와 같이 우리는 적당한 개수의 상태 변수들로서 독립적으로 설명할 수 있는 물리 현상을 하나의 에너지 영역으로 정의할 수 있다.

먼저 가장 근본이 되는 기계적 에너지를 결정하는 상태 변수를 생각해보자. 기계적 에너지는 위치에너지와 운동에너

지로 나누어 생각할 수 있는데 위치에너지를 결정하는 것은 물체의 위치나 변위이고 운동에너지를 결정하는 것은 물체의 운동량인데 위치의 변화율인 속도와 물체의 운동에 변화를 일으키는 힘은 에너지 변화율을 표현할 때 서로 짝을 이루어 사용된다. 에너지의 변화율은 힘과 속도의 곱인데 이를 운동하는 물체에서 보면 속도와 운동량의 변화율과의 곱으로 표현되어서 운동에너지를 결정하는 상태변수로 속도와 운동량을 선정한다면 운동에너지를 저장하는 물체의 성질을 속도와 운동량의 관계식으로 표현할 수 있게 된다. 또 위치에너지의 변화율은 힘과 속도 또는 위치의 변화율의 곱으로 표현할 수 있다. 이와 같이 어떤 형태의 에너지 상태를 결정하는 변수를 상태변수라 정의하고 에너지의 변화율을 결정하는 변수를 동력전달 변수(power variables)라 정의하면 기계적 현상은 크게 세 가지 종류의 성질을 가진 것들의 상호작용으로 생각할 수 있다. 하나가 위치에너지만을 소유할 수 있는 스프링과 같은 성질을 가진 것, 운동에너지만을 소유한다고 생각할 수 있는 질량과 같은 성질을 가진 것 그리고 댐퍼와 같이 기계적 에너지를 사라지게 하는 것 등이다.

예를 든 기계적 현상과 같이 모든 물리적 현상을 표현하기 위한 상태변수는 네 가지 종류로 분류될 수 있으며 어떤 시스템의 성질은 스프링과 질량, 저항과 같은 세 가지 종류의 성질로 대변되는 것들의 상호작용으로 표현할 수 있다는 가정이 Bond Graph의 시작점이다. 이 가정을 모두 받아들이지 않더라도 상태변수를 네 가지로 구분하는 것을 받아들이고 에너지 변화율을 결정할 때 짝이 되는 두 변수(동력전달 변수)를 중심으로 그를 적분 또는 미분하여 얻어질 수 있는 변수들을 하나로 묶어 이로 인하여 결정되는 에너지를 하나의 에너지 영역으로 정의한다면 에너지 분류를 위한 명확한 정의가 될 수 있다. 이를 이용하여 에너지 영역을 나누어 보면 표 1과 같이 영역을 쉽게 분류할 수 있다. 여기에서 속도변수(유동변수: flow variable)와 힘변수(effort variable)의 곱은 에너지 변화율이 되고 따라서 이 둘을 동력전달 변수 짝(power variables)이라 한다. 변위변수(displacement variable)은 속도변수의 적분형이고 운동량 변수(momentum variable)은 힘변수의 적분형이다.

3. 트랜스듀서

3.1 에너지 변환과 트랜스듀서

앞서 살펴본 바와 같이 대부분의 유용한 기계들은 내부에서 에너지 변환을 하여 우리에게 필요한 일을 해주는 것이다. 넓은 의미의 트랜스듀서 정의에 의하면 이러한 기기를 모두 트랜스듀서라 볼 수 있다. 전통적으로는 트랜스듀서의 좁은 의미의 정의가 흔히 채택되었다. 여기서 트랜스듀서를 좁은 의미의 정의와 넓은 의미의 정의를 정리해보자.

① 트랜스듀서는 전기적 에너지와 그 외의 에너지를 상호 변환시키는 기기를 의미한다.
② 트랜스듀서는 한 영역의 에너지를 다른 영역의 에너지로 변환시키는 기기를 말한다.

첫 번째 정의에 의하면 엔진이나 풍차 등은 트랜스듀서가 아닌 것이 되지만 두 번째 정의에 의하면 이들도 트랜스듀서의 일종이 된다. 핵심은 에너지 영역을 어떠한 식으로 나누는가가 가장 중요한 인자가 될 것이다. 필자의 개인적인 견해로는 첫 번째 정의가 널리 쓰인 이유는 크게 두 개이다. 첫째로는 대부분의 센서가 비전기적 물리량을 전압이나 전류 등과 같은 전기적 물리량으로 변환시키는 것이라는 점이고 둘째로는 구동기(actuator)의 경우를 살펴볼 때 엔진과 같은 동력기는 하나의 공학적 학문 영역 안에서 다룰 수 있지만 모터의 경우는 전기공학과 기계공학이라는 두 개의 학문 영역에 걸쳐있다는 점이다. 다시 말해서 열에너지와 기계 에너지의 통합 이론은 널리 숙지되고 있는 반면에 전기와 기계의 통합 이론은 공학도의 관심을 크게 끌지 못했다는 사실이 그 이유일 수 있다. 전기적 현상과 기계적 현상의 해석적 접근 방법이 다르기도 하지만 전기 현상의 응용이 매우 넓고 전기와 기계 에너지 변환은 모터나 압력 센서와 같이 특별한 응용 기기에 한해서 필요하기 때문에 통합적 사고에 의한 접근 방법이 크게 발달하지 않았을 수 있다.

여기서부터 우리의 관심 영역을 전기와 기계 에너지 변환 문제로 국한하여 살펴보자. 전기-기계 에너지 변환은 변환의 메카니즘에 의한 분류로 자기장을 통한 변환과 통하지 않는 변환으로 나누고 변환이 일어나는 스케일에 의하여 재료 내부에서의 변환과 기기의 요소들의 상호작용에 의한 변환으로 나누어 볼 수 있다. 자기장을 통하지 않는 변환은 정전력을 이용한 변환으로 마이크로폰이나 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)의 빗살형 정전 구동기 (electrostatic comb drive) 등에 사용되고 있다. 불행하게도 정전력은 우리가 일상 접하는 크기의 기기 안에서는 매우 작아서 센서가 아닌 구동기에 이용하기 어렵다. 자기장을 거치는 변환은 다양한 종류의 모터에 널리 사용되고 있다. 일반적인 모터는 재료 내부에서 변환이 일어나는 방식을 이용한 것이 아니라 주로 요소의 상호작용으로 변환

표 1. 에너지 영역과 상태 변수들

	Displacement Variable	Flow Variable	Effort Variable	Momentum Variable
기계 영역	변위 (위치) 변수	속도 변수	힘	운동량 변수
전기 영역	전하량	전류	전압	magentic flux linkage
유압 영역	유체 체적	유체 유량	압력	유체 momentum
열 영역	엔트로피	엔트로피 변화율	(절대) 온도	정의 안됨

을 야기 시키는 형태이다. 재료 내부에서 변환을 응용한 방식으로는 초음파 모터를 생각할 수 있다. 재료 내부에서 일어나는 에너지 변환은 변환과정에서 잃는 에너지가 거의 없어 에너지 효율이 매우 좋으나 얻을 수 있는 운동 범위가 매우 작아서 특별하게 장치를 고안하지 않으면 대부분의 경우 응용 범위가 매우 좁다.

3.2 Electromechanical Actuators

전기-기계 에너지 변환을 결합된 형태의 관계식으로 나타내면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$F_m = f_m(x_m, x_e)$$
$$F_e = f_e(x_m, x_e)$$

여기서 Fm, Fe, xm,과 xe의 첨자 e는 전기적 상태변수를 의미하고 m은 기계적 상태변수를 의미한다. 정전력을 이용하는 경우 Fm, Fe, xm과 xe는 각각 힘, 전압, 변위, 그리고 전하량이 된다. 그러나 모터나 솔레노이드와 같이 로렌쯔 힘을 이용하는 경우에는 Fm와 Fe는 기계적 힘과 전압이지만 기계적 상태변수인 xm는 변위와 운동속도 두 가지를 모두 포함한 벡터가 되고 xe는 전류이어야 한다. 이와 같이 두 가지 방식은 서로 다른 형태의 상태변수 관계식(constitutive equations)을 갖게 되는데 이를 확장하여 전기-기계 에너지 변환을 상태변수 관계식의 형태에 따라 분류하여 고려하면 거시적 시점에서 에너지 변환을 구조적으로 분석할 수 있다.

예를 들어 정전력을 이용하는 경우와 같은 형태의 상태변수 관계식을 갖는 에너지 변환은 전기적으로는 콘덴서와 같은 역할을 하고 기계적으로는 스프링의 역할을 하며 콘덴서 용량은 기계적 변위에 스프링 강성은 전하량에 영향을 받는 성질을 갖게 된다. 솔레노이드나 전기 모터와 같이 로렌쯔 힘을 이용하는 방식의 경우에는 기본적 전기적 성질은 유전자(inductor)의 특성을 기계적 성질은 스프링의 특징을 갖게 된다. 모터의 경우와 같이 내부의 자기유도계수(inductnace)가 변환되는 에너지의 양보다 작은 경우에는 기계적 출력 단자에 어떠한 성질의 기계 요소가 연결되는가에 의하여 더 큰 영향을 받는다. 따라서 모터와 같이 자기유도계수가 작은 경우에는 먼저 설명한 형태의 상태변수 관계식에서 변위 변수를 무시하여 간단하게 만든 상태변수 방정식을 사용하는 것이 더 유용할 수 있다. 두 가지 종류의 변환의 특징을 살펴보면 모터나 솔레노이드와 같은 에너지 변환 방식은 일정한 기계적 힘을 생성하고자 할 때 지속적인 에너지 소비를 필요로 하는데 반해서 정전력과 같은 방식은 어느 정도의 에너지를 공급하면 전기/기계적 손실이 없는 한 일정한 힘을 지속적으로 작용할 수 있다는 특징이 있다.

에너지 변환을 올바로 해석하려면 최소한 앞서 제시한 형태의 상태변수 방정식이 필요하며 이 방정식과 더불어 동적 상태 방정식을 유도해낼 수 있는 물리적 원리가 필요하다. 통합된 원리로는 Hamilton 역학과 에너지 접근 방식이 가장 유용하리라 예상된다. 잘 알려진 바와 같이 대부분의 경우 앞서 제시한 형태의 상태변수 관계식을 얻기란 매우 어렵다. 왜냐하면 기계적 운동에 의한 전기장이나 자기장의 변화를 주어진 기계적 운동의 상태변수에 따라 구하기 위해서는 복잡한 자기장 방정식을 반복하여 풀어야 하기 때문이다. 그러므로 이러한 상태변수 관계식을 구하는 방법을 개발하고 이를 컴퓨터 프로그램으로 만들어 에너지 변환 기계의 설계에 활용한다면 기존의 일반적인 형태의 모터를 빠르고 완벽하게 설계할 수 있을 뿐 아니라 새로운 형태의 모터 개발에도 많은 기여를 할 것으로 예상된다.

3.3 에너지 변환 재료

에너지 변환이 물질 내부의 미세한 구조에서 일어나는 재료가 있는데 이러한 재료는 구동기(actuator)나 감지기(sensors)에 응용될 수 있다. 이러한 에너지 변환 재료를 이용하려면 재료의 성질을 올바로 이해하고 이를 근거로 필요한 기능을 할 수 있는 구조를 만들어야 한다. 에너지 변환 재료로는 압전(piezoelectic), 압자기장(piezomagnetic), electrostrictive, magnetostrictive, shape-memory-alloy 재료 등을 들 수 있다. 이러한 재료들의 성질은 재료성질 구성 방정식(material constitutive equations)으로 표시하는데 연속체 변수로 표현되는 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 재료로 만든 에너지 변환 구조체의 해석은 연속체 모델에서 출발할 수밖에 없다. 앞서 지적했듯이 시스템 동적 성질을 해석하기 위한 모델은 lumped parameter를 상태 변수로 가지는 모델이 유용하므로 에너지 변환 재료로 만들어진 구조물을 어떻게 사용하는가에 따라서 적당한 상태변수를 정하고 연속체 모델로부터 원하는 상태 변수를 포함하는 간소 모델을 작성하는 것이 편리하다. 따라서 간소 모델 작성법에 대한 연구도 필요하다.

에너지 변환 재료를 이용한 구동기는 최대 변위가 매우 작아서 용도가 그렇게 넓지 못하다. 그러나 압전 재료로 이루어진 구동기를 SPM(Scanning Probe Microscopy)에 사용하는 것과 같이 변형에 의한 구동의 특징인 높은 위치 정밀도가 요구되는 경우에는 선택의 여지가 없다. 에너지 변환 재료를 이용한 구동기의 정밀도 향상을 위해서는 구조체의 정확한 모델이 요구되고 이에는 재료의 히스테리시스와 같은 성질도 포함되어 있어야 하는데 그러한 복합적인 모델을 작성하기 위해서는 많은 연구가 필요하다.

4. 에너지 변환 현상 해석과 응용 기계 설계

4.1 에너지 변환의 모델링

에너지 변환을 올바로 모델링하기 위해서는 앞서 살펴본 바와 같이 두 가지 종류의 에너지 변환 중 어느 것에 해당하는가를 이해하고 이에 따라서 중요 상태 변수를 선택한

다. 잘 알려진 바와 같이 연속체 모델로 정확하게 모델할 수 있는 부분은 수 개의 상태 변수로는 그 특성을 올바로 나타낼 수 없다. 따라서 전체 시스템 성질에 영향을 줄 만한 특성을 포함시키기 위하여 입력과 출력 변수들 이외의 요소 내부에만 국한된 상태변수를 포함하는 등 상태변수의 수를 늘려 정의해야 할 필요가 있을 수 있다. 그러한 내부 변수의 도입 필요성은 시스템의 특정 요소의 성질에 따라 결정된다. 상태변수를 결정하면 요소의 상태변수 구성 관계식을 작성해야 한다. 어느 에너지 변환이나 각 상태 변수들은 서로 결합되어 있고 그 결합 형태를 좌우하는 내부 변수들이 존재하므로 손으로 다룰 수 있는 간단한 해석 모델을 작성한다는 것은 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 복잡한 모델을 다룰 수 있고 수치해석도 할 수 있는 프로그램을 개발할 필요가 있다. 그러한 프로그램은 지금까지 개발되어 온 자기장 해석용 프로그램과 구조해석용 프로그램을 종합적으로 이용할 수 있는 프로그램이어야 할 것이다. 물론 기계적 운동을 시각화하여 보여줄 수 있다면 선형 모터를 개발하는 엔지니어에게는 매우 유용한 도구가 될 것이다.

이러한 해석 프로그램에서 이루어질 과정을 모터의 예를 들어 살펴보자. 자기장의 상호작용이 일어나는 자기극 사이의 간격이 변화가 없다는 가정 아래에서 운동자의 위치와 속도가 주어지면 자기장에 의하여 운동자에 작용되는 힘과 회전력의 크기를 복잡한 자기장 해석을 통하여 결정할 수 있을 것이다. 이러한 힘의 크기는 부가한 전류와 전압에 영향을 받게 되지만 전류와 전압의 크기가 자기장 분포 상태를 변화시키지 않는다고 가정하면 간소 모델을 작성할 수 있다. 즉 여러 위치와 여러 속도에 대하여 운동자에 작용되는 힘과 회전력을 구하여 내삽(interpolation) 방법을 사용하면 전체 시스템 거동 특성을 위한 모델을 작성할 수 있다는 것을 의미한다. 여기서 더 중요한 것은 모터에 요구되는 회전력 이외에 시스템 거동에 나쁜 영향을 주는 힘이 자기장의 분포 특성에 의하여 작용되며 이러한 힘들은 운동자를 엉뚱한 방향으로 움직이게 만들어 자기장의 분포에 영향을 줄 수 있다는 사실이다. 예를 들어 운동자와 고정자 사이에 매우 작은 간격은 상당히 작은 진폭의 진동에 의해서도 영향을 받을 수 있고 때로는 그 영향을 반드시 고려해야만 할 때가 있다. 이러한 경우에는 자기장에 의하여 발생하는 부수적인 힘의 영향을 독립적인 진동 모델에 외력으로 작용시키는 방법으로는 제대로 된 해석을 할 수 없게 된다. 이와 같이 에너지 효율이 높은 정밀한 기계를 만들기 위해서는 시스템의 정확할 모델을 만들어야 한다. 이에 필요한 것이 앞서 언급한 전기-기계 변수들의 결합 문제를 다룰 수 있는 도구의 개발이라 하겠다.

4.2. 커플링 효과를 고려한 동적 거동 해석

결합 현상을 올바르게 묘사할 수 있는 모델이라 하더라고 동적 거동해석이 불가능한 것이라면 의미가 없다. 예를 들어 현재 구조의 변형을 다루는 수치해석 용 프로그램들 중 많은 것들이 강체 운동에 의한 커다란 변위를 해석에 포함시킬 수 없게 되어 있다. 강체 운동의 비선형성을 포함시키면 모델이 너무 복잡하게 되어 다루기도 힘들고 컴퓨터 프로그램으로서의 효율성이 떨어지기 때문이다. 자기장 해석 프로그램도 마찬가지이다. 자기장 해석 프로그램에 구조해석 용 프로그램을 결합한다는 것은 필요성도 의문시될뿐더러 필요한 작업의 양도 엄청날 것이기 때문이다. 따라서 이러한 전기 기계의 결합 문제를 어떻게 다룰 것인가를 연구할 필요가 있다. 그 결과로 얻어지는 컴퓨터 프로그램은 에너지 변환 기기의 입력 변수에 따른 출력 변수를 예측할 수 있어야 할 것이고 또 전기 회로나 기계 요소들도 변환 기기와 함께 시스템 모델에 포함시킬 수 있어야 할 뿐 아니라 동적인 수치 묘사도 가능해야 한다.

5. 결 론

에너지 변환과 관련된 결합 문제는 물리 현상의 자연적인 형태이며 우리에게 유용한 많은 기계들이 이러한 에너지 변환의 결합 문제와 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러나 응용 과학의 학문 분류는 이러한 에너지 변환 현상을 보통 엔지니어들이 다루기 힘들게 만들었다. 특히 전기-기계의 결합 문제에 대한 이해는 모터와 같이 일상에서 널리 사용되고 있는 기계의 설계, 제작, 사용에 매우 중요하나 이러한 결합 문제를 올바르게 묘사할 수 있는 모델을 작성하는 방법은 공과대학에서 널리 교육되고 있지 않고 해석을 위한 도구에 있어서도 문제의 단면만을 볼 수 있는 것은 쉽게 찾아볼 수 있지만 결합된 모델을 시스템 해석에 맞게 작성할 수 있는 도구는 아직 개발되지 않았다. 따라서 이러한 도구의 개발이 요구되며 그 이전에 전기-기계 결합 문제를 효율적으로 다룰 수 있는 시스템 차원의 틀을 마련하는 연구가 선행되어야 하겠다.

이 글에서는 시스템 해석을 위한 틀로서 bond graph의 접근 방식을 제시하였다. Bond graph 접근 방식은 에너지를 여러 영역으로 나누어 한 영역 안에서는 비교적 간단한 구조로 동적인 성질을 표현할 수 있게 해준다. 또 전기-기계 결합 문제의 물리적 성격에 따라 몇몇 종류로 분류하여 이해할 수 있도록 하여서 시스템의 전체적인 모델을 작성하는 엔지니어가 각 요소의 모델을 물리적으로 이해할 수 있게 한다. 그러나 이러한 틀을 뒷받침할 수 있는 해석의 도구가 필요한데 그것은 에너지 변환을 현상적으로 설명할 때 도입되는 전기장이나 자기장의 작용을 해석하여 시스템 해석에서 상태변수로 사용해야 하는 전압이나 전류, 힘, 변위 등의 상태변수 구성관계식을 유도하는 과정에서 요구되는 것이다. 또 이러한 에너지 변환 과정의 모델과 기타 전기 또는 기계 요소들의 모델을 함께 묶어서 전체 시스템 모델을 작성할 수 있는 컴퓨터 프로그램의 개발도 향후 효율적이고 정밀한 구동기의 설계 제작에 반드시 필요하다.

참고문헌

[1] Paynter, H. M., *Analysis and Design of EngineeringSystems*, (MIT, Cambridge, 1961).

[2] Karnopp, D. C., Margolis, D. L., and Rosenberg, R. C., *System Dynamics* : A Unified Approach (John Wiley and Sons, New York, 1990).

[3] Woodson, H. H. and Melcher, J. R., Electromechanical Dynamics, (Krieger Publishing Co., 1968)

[4] Sashida, T. and Kenjo, T., *An Introduction to Ultrasonic Motors*, (Oxforx Science Publications, 1993)

[5] Dorey, A. P. and Moore, J. H., *Advances in Actuators*, (Institute of Physics Publishing, 1995)

[6] Busch-Vishniac, I. J.,and Paynter, H. M., "Bond Graph Models of Transducers," *Special issue of J. Franklin Inst.* (invited paper), pp663-673, vol.328,1991.

[7] Don Berlincourt, "Ultrasonic Crystals and Ceramics", Chapter 2 of *Piezoelectric Crystals and Ceramics* (Plenum Press, New York, 1971).

[8] Mason, W. P., *Physical Acoustics* : Volume I (Academic Press, New York, 1964).

저 자 소 개

문원규(文元圭)

1961년 3월 22일생. 1984년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 기계공학과 졸업. 1986년-1990년 한국원자력연구소 재직. 1995년 미국 텍사스 주립대 기계공학과 졸업(공박). 1996년-1997년 삼성종합기술원 재직. 1998년-현재 포항공과대학교 기계공학과 조교수. 주 관심분야: coupling 문제-구동기(actuator) 응용, MEMS, 음향 트랜스듀서.