

구조적으로 열린 공학 디자인을 위한 진화적 설계 방법론

Evolutionary Design Methodology for Topology Open-ended Engineering Design

서기성

서경대학교 전자공학과

Kisung Seo

Dept. of Electronics Engineering

Seokyeong University

E-mail : ksseo@skuniv.ac.kr

요 약

공학시스템의 설계 문제는 시스템 구성이 복잡하고, 구조적으로 열려있으며, 전기, 기계, 유압, 열등의 서로 다른 에너지 도메인 구성 요소를 포함한다. 최적의 설계를 위해서는 각 도메인에 대한 통합된 설계 방법과 자동적이고 구조적으로 열린 공간에 대한 효율적인 탐색방법이 요구된다. 본 논문은 도메인에 독립적이며 모델링과 해석에 장점을 가진 본드 그래프(bond graph)와 대규모 공간 해의 탐색에 접합한 진화 알고리즘의 일종인 유전자 프로그래밍(Genetic Programming)을 결합하여 멀티 도메인 동적시스템에 대한 디자인 해를 자동적으로 생성해주는 설계 방법을 제시하고, 제안된 설계방법의 효용성을 입증하기 위해서 이를 아나로그 필터 설계에 문제에 적용하였다.

1. 서론

공학 시스템은 전기, 기계, 전자장, 유체, 열등과 같은 에너지 도메인중 단일, 또는 복합된 형태이며, 시스템의 설계가 복잡하고 디자인 해의 공간이 구조적으로 제한되어 있지 않다는 특성을 포함하고 있다. 또한 설계를 위한 성능해석 방법이 복잡하고, 설계자의 경험에 많이 의존하는 디자인 특성상, 디자인의 정확성, 설계 기간의 단축, 그리고 새롭고 혁신적인 디자인을 위하여 자동적인 설계 방법의 필요성이 높아지고 있다. 특히, 최근 들어 메카트로닉 시스템과 같은 복합적인 에너지 도메인으로 구성되는 시스템의 설계 요구가 늘어나고 있어, 새로운 접근방법이 필요한 실정이다[1].

본 논문에서는 이러한 멀티-도메인 시스템을 conceptual level에서 자동적으로 설계하기 위한 새로운 방법론을 제시한다. 이를 위하여 두 가지 핵심적인 접근법을 사용하였다. 첫째, 멀티 도메인 시스템을 일관된 도구로서 해석할수 있는 본드 그래프(bond graph)[2]와, 둘째, 반복적이고

디자인 해의 공간이 매우 크고, 구조적으로 제한되지 않는(open-ended) 설계 특성을 만족시킬수 있는 진화연산의 일종인 유전자 프로그래밍(Genetic Programming, 이하 GP)[3]을 결합하여 적용하였다. 즉, 동적 시스템을 탐색에 적합한 본드그래프로 모델링한 다음, GP를 이용하여 원하는 성능 조건이 만족될 때까지 이 모델을 진화시켜서 디자인 해를 얻는 것이다.

지금까지의 기존 접근법들은, Koza등[4]과 같이 단일-도메인 문제를 대상으로 하였거나, 멀티-도메인 환경에 적합한 본드 그래프(bond graph)를 사용하는 사례도 있으나 대부분, 모델링이나 해석의 일부 프로세스에만 사용되고 있고, 일부에서 디자인 해의 생성에 이를 이용하려는 시도가 있었으나, 모델 일부분의 변형에 그치는 등 제한적이다.[5,6]

본 논문에서는 본드 그래프와 GP 를 결합시켜 구조적으로 열린 멀티-에너지 도메인 시스템을 위한 설계 방법론을 제안하고, 본드 그래프 생성을 위한 효율적인 GP 함수와 GP 탐색기법,

본드 그래프 모델의 성능해석을 위한 causality 검사루틴과 상태방정식의 자동적인 도출 과정을 구현하였다. 그리고 제안된 설계방법의 효용성을 입증하기 위해서 아나로그 필터 설계 문제에 적용 하였다.

2. 진화적 설계 방법과 본드 그래프

2.1 설계 방법

설계 방법의 흐름도는 다음 그림 1과 같다. 처음 문제를 정의하는 단계에서는 설계 목적과 제한조건을 기술한다. 표현(representation)은 가능한 디자인 해 공간의 형태나 특성을 추출할 수 있는 규칙이나 범위를 의미하는데, 본드 그래프 심볼과 이를 조합할수 있는 수단, 그리고 디자인의 시작점인 태아(embryo) 모델을 정의한다. 생성(generation) 단계는 후보해들을 생성하며 GP에 의한 유전 변이를 사용한다.

평가(evaluation)에서는 후보해들이 설계 문제의 목적과 제한조건을 얼마나 잘 만족시키는지 를 검사하며, 본드 그래프 모델로부터 2 단계 - 1) causality 검사, 2) 상태방정식 도출 - 의 과정을 수행한다. 평가에서 얻어진 지표를 기준으로 더 좋은 해를 탐색할수 있도록 안내(guidance) 전략이 GP에서 선택 메카니즘으로 구현된다.

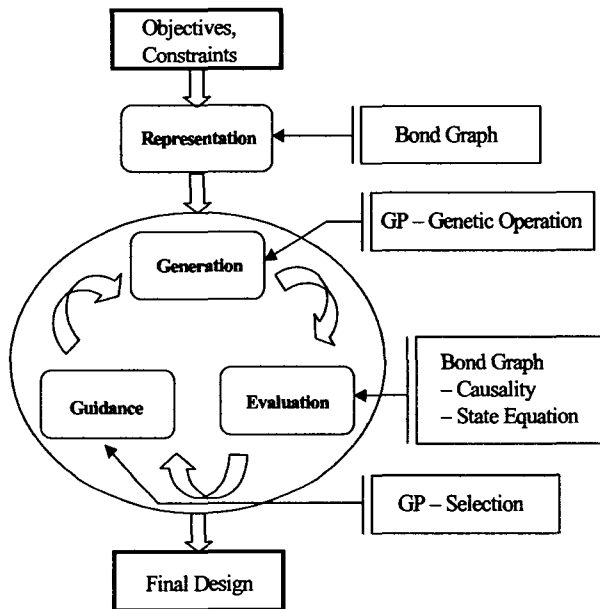


그림 1 진화적 설계 흐름도

2.2 본드 그래프

본드 그래프(bond graph)는 모델링 도구로서 동적 시스템의 모델링과 해석에 대한 일관된 접근법을 제공한다. 본드 그래프는 모델링이 쉽고, 시스템의 특성을 명확히 나타낼수 있으며, 본드

그래프 모델의 인과관계(causality)로부터 대수적인 연산을 통해 상태방정식을 쉽게 유도할수 있는 장점이 있다. 또한 컴퓨터를 이용하기 적합한 형태를 가지고 있다.[2]

본드 그래프는 본드(bond)와 노드의 상호 연결된 조합으로 구성되며, 다음과 같은 요소들이 있다. 에너지 발생요소인 S_e , S_f 와 에너지 저장 및 발산 요소로서, C, I, R, 그리고, 접합요소로서 0-접합(junction-0)과 1-접합(junction-1)이 존재한다. 이 밖에 에너지 변환요소로서 트랜스포머 TF와 자이레이터 GY가 있다.

다음 그림 2는 간단한 동적 시스템의 예이다. 단일 도메인 시스템의 예로써, 왼쪽은 스프링-댐퍼-질량으로 구성된 기계적 시스템이고, 오른쪽은 저항(R), 인덕터(L), 커패시터(C)로 구성된 RLC 전기회로이다. 가운데의 그림이 두 시스템의 등가적인 본드그래프 모델을 나타낸다.

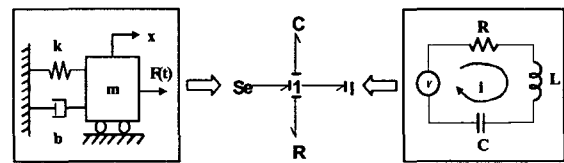


그림 2 간단한 동적 시스템의 예와 본드그래프 - 기계적 시스템, 전기 회로

본드 그래프 모델은 성능 해석시에 causality 검사와 상태방정식 도출의 2 단계로 나뉘어져 수행된다(그림 3).

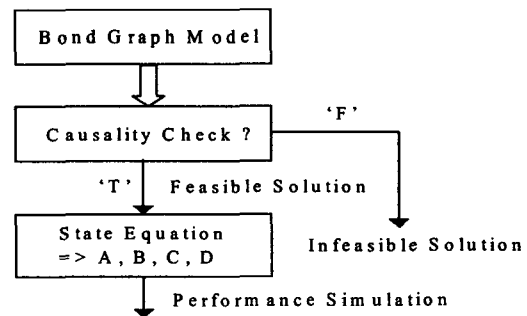


그림 3 본드 그래프 모델의 성능해석

GP를 통해 생성된 후보 모델에 대해서 첫 단계로 causality 검사를 수행하며, 여기에서 만족된 가능(feasible) 해만 두 번째 단계인 상태방정식 도출을 수행한다. 반면 만족되지 않는 불가능(infeasible) 해는 두 번째 단계를 거칠 필요 없이 바로 낮은 적합도를 부여받는다. 따라서 반복적인 설계과정에서 가장 시간을 소요하는 평가 부분의 연산시간을 대폭 줄일수 있다. 또한 상태

방정식의 A,B,C,D 행렬이 간단한 규칙으로부터 행렬연산을 통해 얻어질수 있으므로 연산시간이 적게 걸리고, 복잡한 성능해석 루틴이나 외부 시뮬레이터를 사용할 필요가 없다.

3. 본드그래프의 진화

3.1 본드 그래프 모델의 생성을 위한 GP 함수

후보 해를 나타내는 본드 그래프 모델은 기본적인 모델 구축 함수의 조합으로 이루어진다. 가능한 해를 모두 표현할수 있게 기본 GP 함수들이 정의되어야 하고, 이들 GP 함수의 조합에 의해서 디자인 해인 본드 그래프 모델이 표현된다. 본드 그래프 모델 생성을 위한 구체적인 GP 함수의 예는 다음과 같다. 먼저 본드에 작용하는 함수의 한 예로서 insert_J0 에 대한 설명이 그림 4에 나와 있다. 이 함수는 0-접합(0-junction)을 점선 사각형으로 표시된 수정가능한 지점(modifiable site)에 삽입한다. 결과로 새로운 접합-0 과 본드가 추가된다. 그림 5에는 기존의 1-접합에 R 노드를 추가하는 add_R 함수에 대한 설명이 나와 있다. 이 함수는 주어진 1-접합에 R 요소를 추가한다. R 요소의 파라미터 값은 ERC(ephemeral random constant)의 생성을 통해서 직접 값이 할당되거나, 몇 개의 값이 수치 연산을 통해 얻어질수 있다.

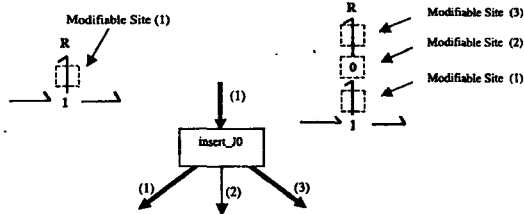


그림 4 insert_J0 function

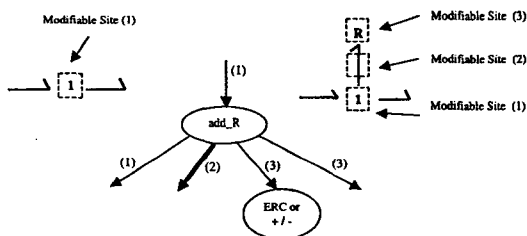


그림 5 add_R function

3.2 GP에 의한 본드 그래프 모델의 생성

본드 그래프 모델은 생성된 GP 트리에 따라 깊이 우선 탐색으로 GP 함수와 터미널을 특정 본드와 노드에 실행시킴으로서 성장될수(grow) 있다. 그림 6 에는 실제 생성된 GP 트리의 예가

나와 있다. 그림 7에서 점선 밖의 부분은 원래 주어진 태아모델중 고정된 부분이고, 점선내에서 가장 아래의 3개의 수정가능한 지점 - 1-접합(1₁) 과 0-접합(0₁) 및 그 사이의 본드(a) - 은 태아모델의 일부분이나 진화될수 있는 변형가능한 부분이다. 그림 6의 GP 트리를 깊이우선탐색으로 태아모델에 적용시켜 각 노드를 수행하면, 그림 7과 같은 본드그래프를 얻을수 있다.

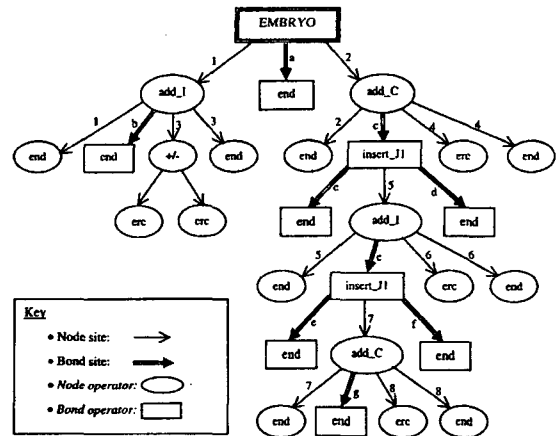


그림 6 GP 트리의 예

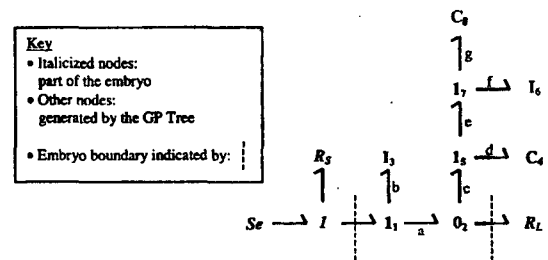


그림 7 그림 6의 GP 트리에 의한 생성된 본드그래프

4. 아나로그 필터 설계

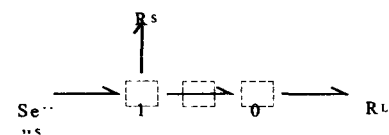
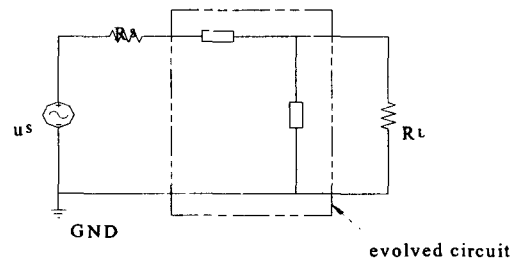


그림 8 아나로그 필터 태아 모델

제한된 진화적 설계방법을 아나로그 필터 설계 문제에 적용 하였다. 고역 통과 필터로서 설계

사양은 1KHz 의 차단 주파수를 갖는다. 아나로그 필터의 태아 모델은 전원, 소스 저항, 로드 저항만으로 구성된 최소한의 구조이다(그림 8의 위). 이에 대응하는 본드 그래프 모델이 그림 8의 아래에 나와 있다. 적합도는 대응 주파수 범위에서 100 개의 샘플링 점을 균일하게 선택하고, 이의 주파수 응답 크기를 목표값과 비교하여 오차를 최소화 하도록 하였다.

GP 파라미터는 다음과 같으며, GP 프로그램은 lil-gp[7] 코드를 수정하여 사용하였다.

- Number of generations: 100
- Population size: 9000
- Initial population: half_and_half
- Initial depth: 4-6
- Max depth: 50
- Selection: Tournament (size=7)
- Crossover: 0.9
- Mutation: 0.1

그림 9 에는 GP 진화연산에 의해 구해진 최종 세대에서의 본드 그래프 모델이 나와 있고, 대응하는 고역 통과 필터 회로가 그림 10에 나와 있다. 그림 11에는 이 회로의 주파수 응답이 나와 있으며 만족할만한 성능임을 알수있다.

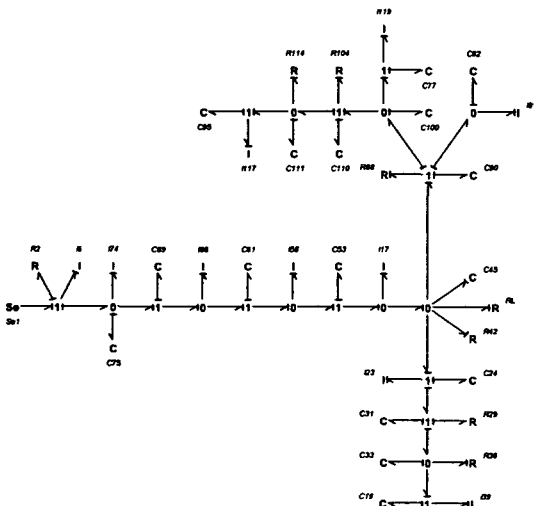


그림 9 설계된 본드 그래프 모델

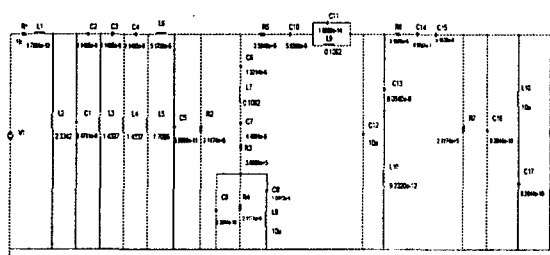


그림 10 구해진 고역 통과 필터 회로

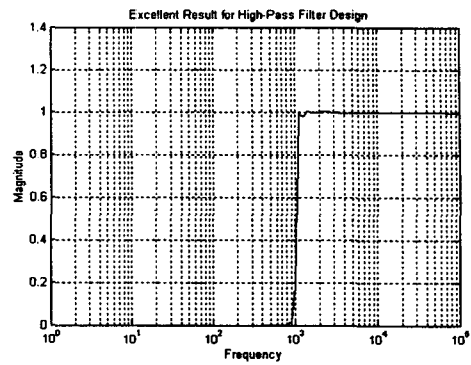


그림 11 고역 통과 필터의 주파수 응답

5. 결론 및 향후과제

구조적으로 열린 멀티-도메인 공학시스템을 자동적으로 설계하기 위해, 본 연구에서는 본드 그래프와 GP를 이용한 새로운 접근법이 제안되었고, 아나로그 필터 설계에 적용하여 효용성을 보였다. 향후 여러 가지 다른 에너지 도메인에 대한 적용 및 디자인 해의 표현 및 탐색 과정에서의 개선이 필요하다.

6. 참고문헌

- [1] E. Coelingh, T. J. A. de Vries, J. V. Amerongen, "Automated Performance Assessment of Mechatronic Motion Systems During the Conceptual Design Stage," Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Mechatronics, Okayama, Japan, pp.472-477, 1998
- [2] D. C. Karnopp, R. C. Rosenberg, D. L. Margolis, [1999] *System Dynamics, A Unified Approach, 3rd Ed.*, John Wiley & Sons
- [3] J. R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, 1992
- [4] J. R. Koza, F. H. Bennet, D. Andre, M. A. Keane, F. Dunlap, Automate Synthesis of Analog Electrical Circuits by Means of Genetic Programming, *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 2, pp.109-128. 1997
- [5] J. E. E. Sharpe, R. H. Bracewell, "The Use of Bond Graph Reasoning for the Design of Interdisciplinary Schemes", 1995 International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation, pp.116-121
- [6] E. Tay, W. Flowers and J. Barrus, "Automated Generation and Analysis of Dynamic System Designs", *Research in Engineering Design*, vol 10, 1998, pp. 15-29.
- [7] D. Zongker, W. Punch, *lil-gp 1.1 Users Manual*, Michigan State University, 1996