

멀티-에너지 도메인 동적 시스템을 위한 본드 그래프/유전프로그래밍 기반의 자동설계 방법론

Bond Graph/Genetic Programming Based Automated Design Methodology for Multi-Energy Domain Dynamic Systems

서기성
Kisung Seo

서경대학교 전자공학과

요 약

멀티-도메인 공학시스템은 전기, 기계, 유압, 열등의 구성요소를 포함하고, 시스템 구성이 복잡하여 설계에 많은 어려움을 가지고 있다. 최적의 설계를 위해서는 각 도메인에 대한 통합된 설계 방법과 자동적이고 효율적인 탐색방법이 요구된다. 본 논문은 도메인에 독립적인 모델링 도구인 본드 그래프(Bond Graph)와 대규모 공간 해의 탐색에 적합한 진화 알고리즘의 일종인 유전 프로그래밍(Genetic Programming)을 결합하여 멀티 도메인 동적시스템에 대한 디자인 해를 자동적으로 생성해주는 설계 방법을 제시하였다. 제안된 설계방법의 효용성을 입증하기 위해서 3 가지 서로 다른 도메인을 가진 아나로그 필터, 전동프린터 드라이브, 에어펌프 시스템에 대한 설계 결과가 기술된다.

Abstract

Multi-domain design is difficult because such systems tend to be complex and include a mixtures of, electrical, mechanical, hydraulic, and thermal components. To design an optimal system, unified and automated procedure with efficient search technique is required. This paper introduces design method for multi-domain system to obtain design solutions automatically, combining bond graph which is domain independent modeling tool and genetic programming which is well recognized as a powerful tool for open-ended search. The suggested design methodology has been applied for design of electric filter, electric printer drive, and air pump system as a proof of concept for this approach.

Key Words : Evolutionary Design, Multi-domain, Bond Graph, Genetic Programming, Automated Design, Electric filter, Printer Drive, Air Pump

1. 서 론

멀티-도메인 동적 시스템은 전기, 기계, 전자장, 유체, 열 등과 같은 다수의 에너지 도메인을 포함하고 있다. 일례로 메카트로닉 시스템은 대표적인 멀티-도메인 시스템이며 전기, 전자와 기계분야가 결합된 시스템이다.[1] 이와 같은 시스템의 설계는 단일 도메인 시스템에 대한 전통적인 설계 방법으로는 한계가 있는 문제점을 가지고 있다. 또한 시스템이 복잡하고 해 공간이 구조적으로 제한되어 있지 않으며, 설계자의 경험에 많이 의존하는 디자인 특성상, 새로운 접근방법이 요구되는 실정이다.[2]

지금까지의 기존 접근법들을 보면, Koza등[3,4]이 유전 프로그래밍(Genetic Programming, GP)을 이용한 아나로그 필터와 OP 앰프, 컨트롤러, 그리고 안테나 등의 단일 도메인 시스템에 대한 자동적인 설계 방법이 제시하였고, 실제 존재하는 특허회로를 발견하는 큰 성과를 거두었다. 그러나 이 방법은 오직 단일 에너지 도메인에서만 동작되는 제한이 있다.

본드 그래프(bond graph)[5,6]는 멀티-도메인 시스템의 모델링과 해석에 적합한 도구로서 기계공학 분야에서 알려져 왔다. 설계와 연관된 것으로, 물리적으로 가능한 시스템에 대한 본드 그래프 모델을 수동으로 생성하는 규칙이 설명되었으며[7], 간단한 메카트로닉 운동 시스템을 설계할수 있는 컴퓨터 베이스 설계 도구에 본드그래프가 이용되었다[8].

그러나 대부분, 모델링이나 해석의 일부 프로세스에만 사용되고 있고, 일부에서 디자인 해의 생성에 이를 이용하려는 시도가 있었으나, 모델 일부분의 변형에 그치는 등 제한적이다[9].

본 논문에서는 이러한 멀티-도메인 시스템을 자동적으로 설계하기 위하여 멀티 도메인 시스템을 일관된 도구로서 해석할수 있는 본드 그래프와, 디자인 해의 공간이 매우 크고, 구조적으로 제한되지 않는(open-ended) 설계 특성을 만족시킬 수 있는 유전 프로그래밍(GP)을 결합한 설계 방법론을 제시하였다. 즉, 동적 시스템을 탐색에 적합한 형태인 본드 그래프로 모델로 변환한 다음, 유전 프로그래밍을 이용하여 원하는 성능 조건이 만족될 때까지 이 모델을 진화시켜서 디자인 해를 얻는 것이다.

개발된 설계방법이 멀티 에너지 도메인 시스템 설계에 적합함을 보이고자, 전기, 기계, 유공압 3 가지 서로 다른 도메인 시스템의 설계에 적용하였다.

접수일자 : 2006년 11월 18일

완료일자 : 2006년 11월 30일

감사의 글 : 이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00494)

2. 멀티 에너지 도메인과 본드그래프

2.1 멀티 에너지 도메인 시스템

본드 그래프(bond graph)는 모델링 도구로서 동적 시스템의 모델링과 해석에 대한 일관된 접근법을 제공한다. 본드 그래프는 모델링이 쉽고, 시스템의 특성을 명확히 나타낼 수 있으며, 동적 시스템의 상태방정식을 쉽게 유도할 수 있는 장점이 있다.[5]

그림 1에 서로 다른 에너지 도메인 시스템의 예와 대응되는 본드 그래프 모델이 나와 있다. 그림 1(a)의 간단한 전기 회로, 그림 1(b)의 기계적 질량-댐퍼-스프링, 그리고 그림 1(c)의 펌프와 저장용기로 구성된 유공압 시스템등의 서로 다른 에너지 도메인을 갖는 시스템들이 본드 그래프의 동일한 심볼로서 모델링됨을 알 수 있다.

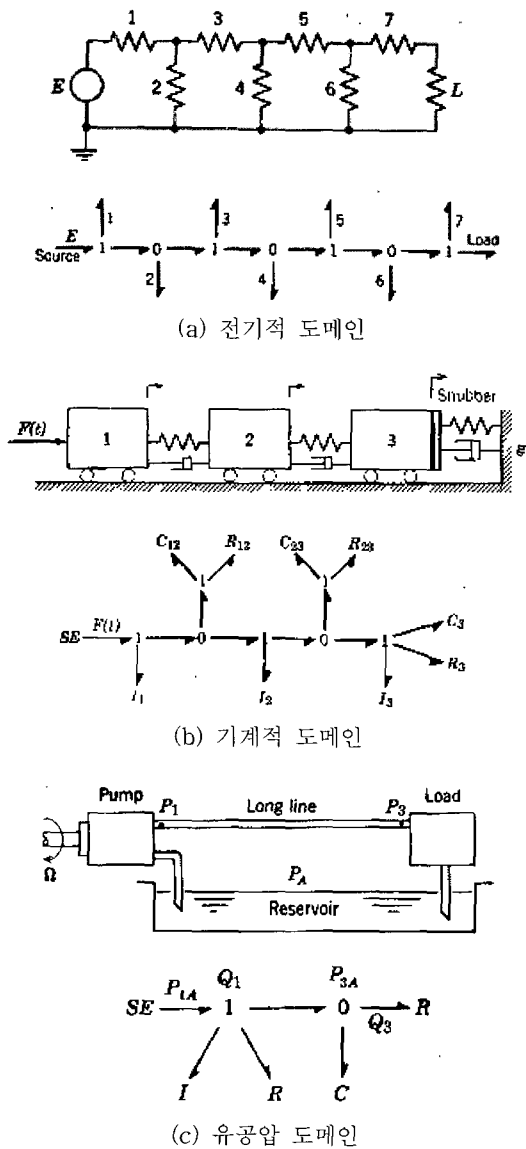


그림 1. 서로 다른 에너지 도메인 시스템 및 대응 본드 그래프 모델의 예

Fig. 1. Examples of different energy domain systems and corresponding bond graph models

2.2 모델링 심볼의 조합성

본드 그래프는 심볼의 집합으로 구성된 그래프로서 본드와 노드의 상호 연결된 조합으로 구성된다.(그림 2)

노드는 다음과 같이 몇가지 요소로 나누어진다. 첫째 에너지 발생요소로서 S_e 와 S_f 가 있다. S_e 는 작력 소스(effort source)로서 작력을 입력으로 가지며, 전압소스, 힘, 압력 소스등을 예로 들 수 있다. S_f 는 흐름 소스(flow source)로서 흐름을 입력으로 가지며, 전류소스, 속도, 유속을 예로 들 수 있다. 둘째, 에너지 저장 및 발산 요소로서, C, I, R 이 있다. C 는 캐퍼시턴스 요소로서 작력과 변위(displacement) 간의 정적인 관계가 존재한다. 물리적인 스프링, 전기적인 캐퍼시턴스가 이에 해당한다. I 는 인덕턴스 흐름과 모멘텀과의 정적 관계를 포함하며, 물리적인 관성과 전기적인 인덕턴스를 예로 들 수 있다. R 은 저항 요소로서 작력과 흐름간의 정적인 관계가 존재한다. 물리적인 댐퍼, 전기적인 저항이 이에 해당한다.

그리고 집합요소로서 0-집합(junction-0) 과 1-집합(junction-1) 이 존재한다. 0-집합에서는 작력변수가 연결된 모든 본드에서 공통이다. 1-집합에서는 흐름 변수가 연결된 모든 본드에서 공통인 성질을 가지고 있다. 이 밖에 에너지 변환요소로서 트랜스포머 TF 와 자이레이터 GY 가 있다

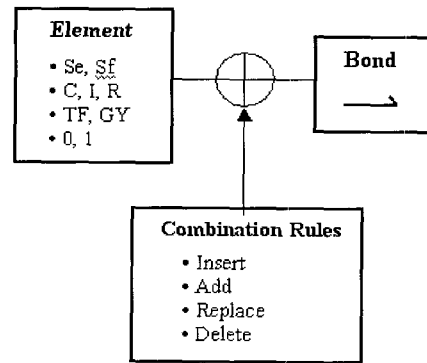


그림 2. 본드 그래프 생성의 조합특성
Fig. 2. The combinatorial nature of bond graph generation

3. 본드그래프와 GP 의 결합

3.1 GP(Genetic Programming)

유전 프로그래밍(GP)[3,4] 은 큰 부류에서 GA 와 함께 진화 연산(evolutionary computation)에 속하지만, GA 와는 몇 가지 다른 특징이 있다. 가장 큰 다른 점은 GA 가 개체를 표현할 때 스트링을 사용하는데 비해 GP 는 트리를 사용한다. 이때 트리에서의 각 노드가 하나의 함수를 나타내며, 각 개체는 함수의 집합, 즉 컴퓨터 프로그램으로 구성된다. 다시 말해 GP 는 각 개체가 직접 해를 표현하는 것이 아니라, 해를 생성해 주는 하나의 프로그램을 표현한다. 또 다른 차이점은 대부분의 GA 가 고정크기의 염색체를 사용하는데 비해 GP는 가변크기의 염색체를 사용한다.

3.2 본드 그래프와 GP 를 결합 설계 방법

본드 그래프(bond graph)와 GP를 이용하여 멀티 도메인 동적시스템에 대한 디자인 해를 자동적으로 생성해주는 개념

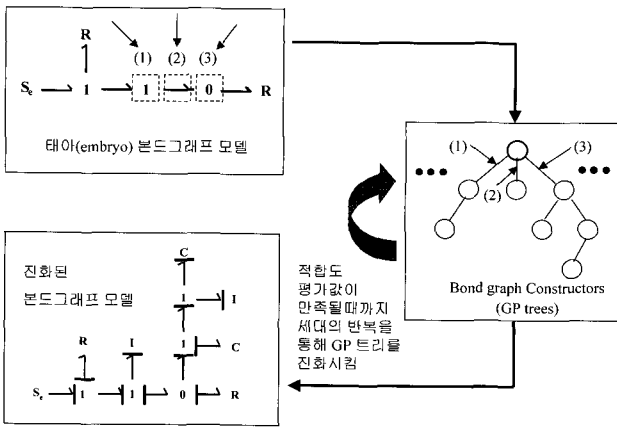


그림 3. GP 트리 개체로 표현된 본드 그래프의 진화과정
Fig. 3. Evolution process of bond graphs represented by tree individuals

도가 그림 3 에 나와 있다. 디자인 시 하나의 태아(embryo) 모델에서 출발하여 이 모델을 복수개의 트리 개체집단으로 진화시켜(evolve) 하나의 완성 된 디자인 해를 구하는 방법이다. 화살표로 지시된 숫자들은 수정가능 지점들을 나타내며, GP 트리의 가지에 대응된다.

본드 그래프 모델은 생성된 GP 트리에 따라 깊이 우선 탐색으로 GP 함수와 터미널을 특정 본드와 노드에 실행시킴으로서 성장될수(grow) 있다. 여기에서 사용된 GP 함수와 터미널에 대한 종류는 다음 표 1 과 같다. #Args 는 GP 트리의 노드함 함수가 가지는 가지의 수를 의미한다.

표 1. GP 함수와 터미널
Table 1. GP terminals and functions

Name	#Args	Description
add_C	4	Add a C element to a junction
add_I	4	Add an I element to a junction
add_R	4	Add an R element to a junction
insert_J0	3	Insert a 0-junction in a bond
insert_J1	3	Insert a 1-junction in a bond
insert_TF	3	Insert a Transformer in a bond
insert_GY	3	Insert a Gyrator in a bond
replace_C	2	Replace the current element with a C element
replace_I	2	Replace the current element with an I element
replace_R	2	Replace the current element with an R element
+	2	Add two ERCs
-	2	Subtract two ERCs
enda	0	End terminal for add element
endi	0	End terminal for insert junction
endr	0	End terminal for replace element
erc	0	Ephemeral random constant (ERC)

그림 4 에는 표 1의 GP 함수와 터미널들의 조합으로 생성될수 있는 임의의 GP트리 예가 나와 있다. 트리의 노드에서 사각형과 타원은 각기 다른 형(type)을 나타내며, 교차나 돌연변이등의 유전연산시 같은 형의 함수(터미널 포함)들 간에만 교체가 가능하다(strongly typed).

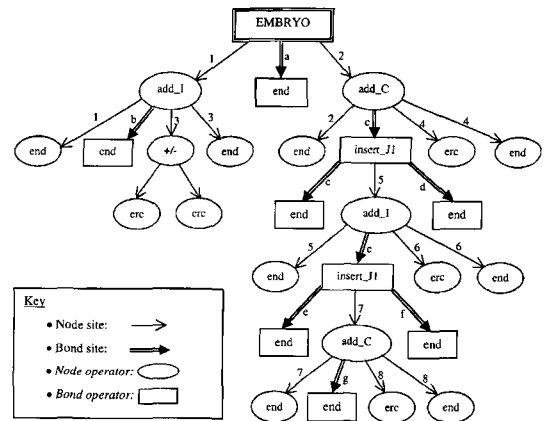


그림 4. GP 트리의 예
Fig 4. Example of GP tree

4. 적합도 평가

본드 그래프 모델을 해석하고 평가하여 시뮬레이션하는 과정은 다음의 두 과정으로 나뉜다

- 1) 인과관계 분석(causality analysis)
- 2) 상태방정식 구성(state equation formulation)

4.1 인과성(Causality) 검사

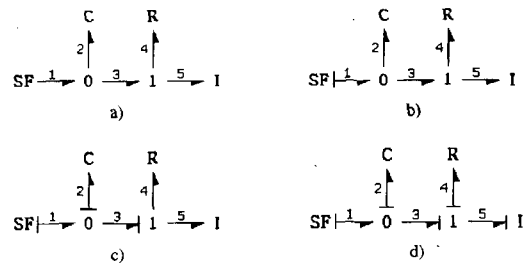


그림 5. Causality 지정 절차
Fig. 5. Assignment procedure of Causality

먼저 인과관계 분석(causality analysis, 자세한 내용은 [5] 참조) 에서는 요소간의 인과(causal) 관계와 힘의 흐름을 중심으로 모델의 인과관계성(causality)을 검사한다. 그림 3의 왼쪽 하단에 있는 본드그래프 모델에서와 같이 작은 막대 표시의(causal stroke 라고 하며 작력과 흐름의 결정) 위치 관계를 통해 위반 여부를 간단하게 판별할 수 있으며, 여기서 만족된 모델만 두 번째 과정인 상태방정식 구성(state equation formulation) 을 진행할수 있다. 따라서, 동적인 시뮬레이션이 가능하지 않은 모델은 과정 1에서 제거됨으로 전체적인 시뮬레이션 시간을 상당히 단축할수 있다.

[step 1] 임의의 Se 와 Sf 를 선택하고, 필요한 인과관계성을 설정한다. 이어서 모든 0, 1, TF, GY의 제한 규정을 이용하여 인과관계성을 확장한다. (그림 5b)

[step 2] step 1을 모든 에너지 소스에 대해서 실행한다.

[step 3] 임의의 C 나 I를 선택하고 정해진 인과관계성을 설정한다. 다시 이를 모든 0, 1, TF, GY의 제한 규정을 이용하여

여 인과관계성을 확장한다.(그림 5c)
 [step 4] step 3을 모든 C 와 I 요소에 대해서 반복한다.
 [step 5] 아직 설정되지 않은 임의의 R 요소를 선택해서 임의의 인과관계성을 설정한다. 다시 이를 모든 0, 1, TF, GY의 제한 규정을 이용하여 인과관계성을 확장한다.(그림 5d)
 [step 6] step 5을 모든 R 요소에 대해서 반복한다.

4.2 상태 방정식 도출

과정 2에서는 0,1-집합에서의 에너지 흐름의 함으로부터 얻어진 관계 행렬을 이용하여 상태방정식을 자동적으로 얻을 수 있다. 상태 변수는 본드그래프 모델로부터 대수적으로 결정되고, 상태방정식은 아래와 같이 유도될 수 있다.

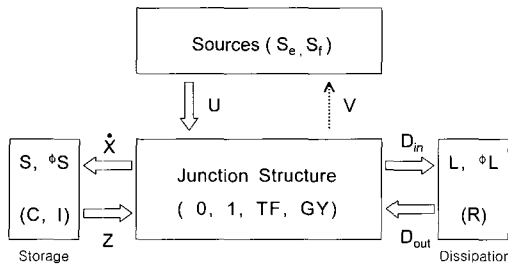


그림 6. 통합된 인과관계(causality) 및 시스템의 주요 벡터
 Fig. 6. Significant vectors for systems having integration causality

본드 그래프 모델로부터 상태방정식을 도출하는 방법은 다음과 같다. 그림 6 에서 storage field 에 대한 causality 관계는 다음과 같이 표현할 수 있고,

$$Z = S \cdot X \tag{1}$$

여기서, Z 는 상호에너지 벡터, X 는 에너지 벡터, S 는 정방행렬을 나타낸다. 그리고 dissipation field 에 대한 causality 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$D_{OUT} = L \cdot D_{IN} \tag{2}$$

여기서, D_{OUT} 은 출력벡터, D_{IN} 입력벡터, L 은 정방행렬을 나타낸다.

X와 D_{IN} 에 대한 집합(junction) 구조는 다음 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{X} = J_{SS}Z + J_{SL}D_{OUT} + J_{SU}U \tag{3}$$

$$D_{IN} = J_{LS}Z + J_{LL}D_{OUT} + J_{LU}U \tag{4}$$

여기서, X 는 X, 의 미분, U 는 소스 벡터, J 는 junction 구조에 내재된 제한규칙을 표현한다. 식 (2) 과 (4) 로부터 식 (5) 를 구할 수 있으며,

$$D_{OUT} = L(I - J_{LL})^{-1}J_{LS}Z + L(I - J_{LL})^{-1}J_{LU}U \tag{5}$$

(5)의 우변에 식 (1) 을 대입하면 식 (6)을 얻는다.

$$D_{OUT} = L(I - J_{LL})^{-1}J_{LS}SX + L(I - J_{LL})^{-1}J_{LU}U \tag{6}$$

식 (6) 과 (1) 을 식 (3) 에 대입하면 식 (7) 를 얻을 수 있다.

$$\dot{X} = [J_{SS}S + J_{SL}L(I - J_{LL})^{-1}J_{LS}S]X + [J_{SU} + J_{SL}L(I - J_{LL})^{-1}J_{LU}]U \tag{7}$$

이를 상태방정식 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU \tag{8}$$

$$A = [J_{SS} + J_{SL}L(I - J_{LL})^{-1}J_{LS}]S \tag{9}$$

$$B = [J_{SU} + J_{SL}L(I - J_{LL})^{-1}J_{LU}] \tag{10}$$

4.3 평가 계층도

본 연구에서 개발된 본드 그래프와 GP 기반 자동설계법의 또 다른 장점은 시스템을 평가하는데 상태방정식의 A,B,C,D 행렬이 쉽게 얻어지므로, eigenvalue 나 step 응답 등의 기본적인 해석 평가 뿐 아니라 이들로부터 파생될 수 있는 여러 가지 응용된 평가함수들도 용이하게 구성될 수 있다.(그림 7) 즉 다른 상업적인 시뮬레이터를 이용할지 GA/GP 등의 프로그램과 인터페이스 발생하는 여러 가지 어려움, 수행 속도의 저하, 그리고 수행 환경(OS 등)에 의존적인 문제점들을 원천적으로 해결할 수 있다.

Time Domain Application Analysis		Frequency Domain Application Analysis		
Eigenvalues	Step Response	Impulse Response	Bode Plot	Etc.
State Equation Formulation (A,B,C,D Matrices)				
Causality Analysis				

그림 7. 자동설계방법의 평가 함수 계층도

Fig. 7. The combinatorial nature of bond graph generation

5. 사례 연구

본드 그래프와 GP 기반 자동설계 방법론의 유용성을 보이기 위하여 다음 3 가지의 서로 다른 에너지 도메인을 가진 아나로그 필터, 전동프린터드라이브, 에어 펌프 시스템에 대한 설계 예를 설명한다. 본 논문에서는 설계의 최적화 보다는 개발된 자동설계방법론으로 멀티 도메인에 대한 일관성있는 설계가 가능함을 보이는데 초점을 둔다.

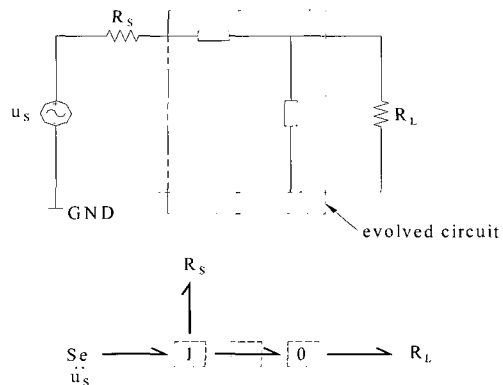


그림 8. 아나로그 필터 태아 모델

Fig. 8. Embryo model of analog filter

5.1 아나로그 필터(전기, 전자 도메인)

대역 통과 필터로서 설계 사양은 1KHz 와 100 KHz 사이

의 주파수 통과시키는 사양을 갖는다. 아나로그 필터의 태아 모델은 전원, 소스 저항, 로드 저항만으로 구성된 최소한의 구조이다(그림 8의 위).

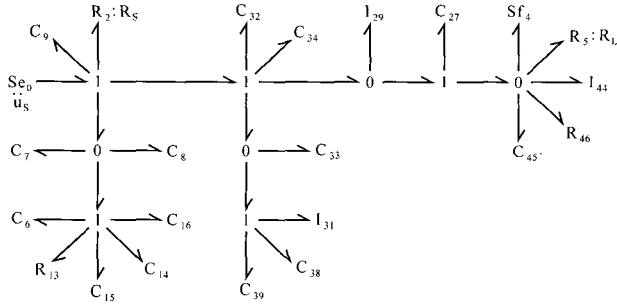


그림 9. 진화설계된 대역필터의 본드그래프 모델
Fig.9 Evolved bond graph of band pass filter

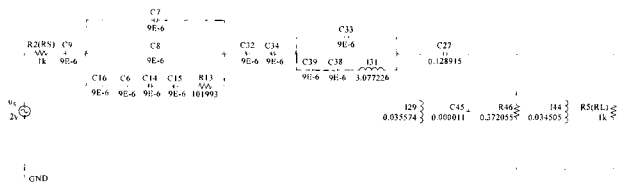


그림 10. 진화설계된 대역필터 회로
Fig. 10. Evolved band pass filter circuit

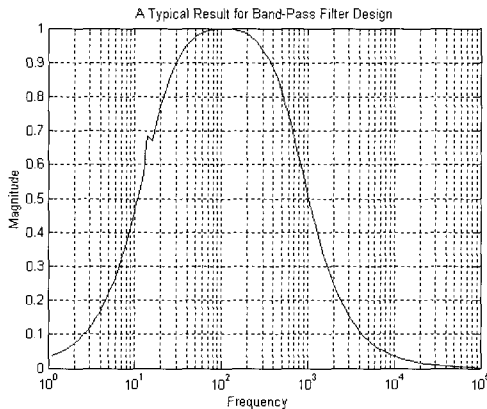


그림 11. 대역필터 회로의 주파수 성능
Fig. 11. Frequency response of band pass filter circuit

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. 그림 9 에는 제안된 설계방법에 의해 구해진 본드 그래프 모델이 나와 있고, 대응하는 대역 통과 필터 회로와(그림 10) 주파수 응답 그래프(그림 11) 에 나와 있다.

5.2 전동프린터 드라이브(기계적 도메인)

기계적인 도메인 문제로서 고전이 된 IBM 전동프린터의 프린팅시 진동문제를 감소시키는 것이 설계 목적이다. 기존의 주요 구조를 태아 모델로 사용하고, 중요 부분을 재설계한 결과가 나와있다. 그림 12의 점선 원으로 표시된 부분이 기존 구조에 새로이 진화설계된 부분이며 이에 대한 파라미

터 값이 하단 박스에 나와 있다. 그림 12의 본드 그래프로 얻어진 물리적인 실제 구현이 그림 13에 나와 있다. 그림 14 에는 재설계된 프린터 드라이브에 대한 진동 특성이 계단 응답에 대해서 약 30 ms 이후에는 거의 진동이 없음을 보인다.

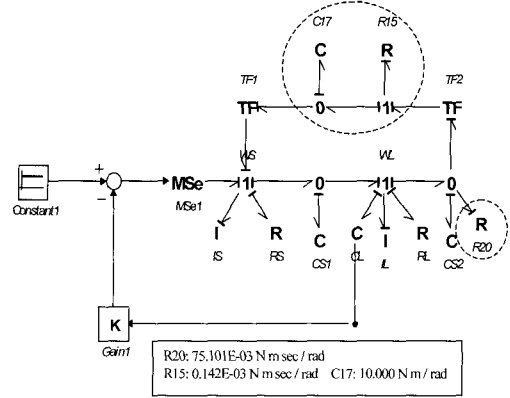


그림 12. 진화설계된 전동 프린터 드라이브 본드그래프 모델
Fig. 12 Evolved bond graph of electric printer drive

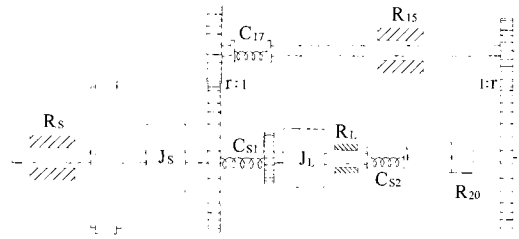


그림 13. 진화설계된 전동 프린터 드라이브
Fig. 13. Evolved electric printer drive

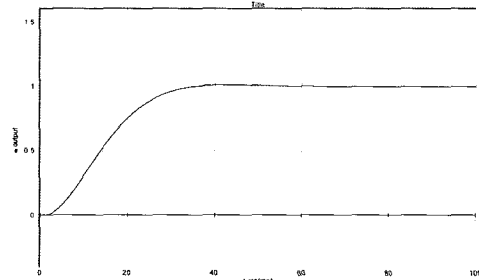


그림 14. 진동에 대한 계단응답
Fig. 14. Step response of vibration

5.3 에어 펌프(유공압 도메인)

유공압 도메인 문제로서 전자기에 의해 영향받는 피봇에 부착된 풀무를 조절하여 공기의 출력 흐름을 최대한 하는 것이 설계 목적이다.

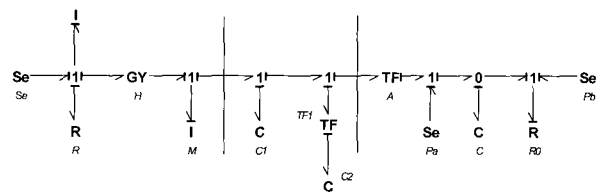


그림 15. 진화 설계된 에어 펌프 본드그래프 모델
Fig. 15 Evolved bond graph of air pump

그림 15의 설계된 본드 그래프 모델이 나와 있으며, 이에 대한 물리적인 실제 구현과 성능이 그림 16 과 그림 17 에 나와 있다.(자세한 내용은 [10] 참조)

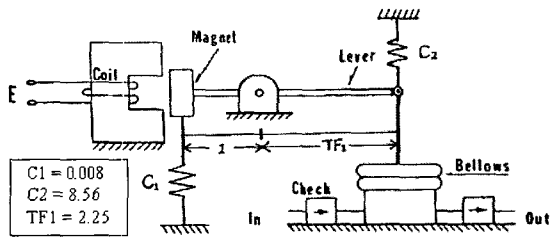


그림 16. 진화설계된 에어 펌프
Fig. 16. Evolved air pump

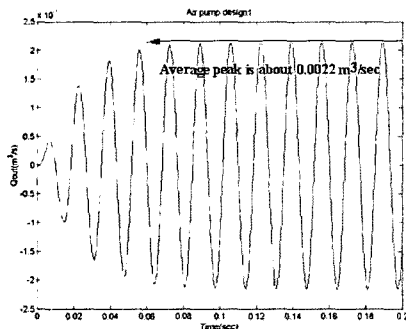


그림 17. 에어 펌프의 출력
Fig. 17 Outflow of air pump

6. 결 론

본 연구에서는 시스템이 복잡하고, 해 공간이 구조적으로 제한되어 있지 않으며, 멀티-도메인으로 구성된 동적시스템에 대해서, 기존의 단일 도메인 시스템에 대한 전통적인 설계 방법으로는 한계가 있는 문제점을 해결하기 위하여, 본드 그래프와 유전프로그래밍에 기반한 자동적인 멀티-도메인 시스템 설계 방법이 개발되었다.

진화적이고, 자동적인 설계 접근법의 유용성을 보이기 위하여, 다음 3 가지의 서로 다른 에너지 도메인을 가진 아나로그 필터, 전동프린터 드라이브, 에어펌프 시스템에 대한 설계 예에 적용되었고, 이를 통하여 멀티 도메인에 대한 일관성 있는 설계가 가능함을 보였다.

아직까지 자동설계전에 결정해야 될 태아 모델의 선택 방법, GP 함수의 정의, GP 탐색의 효율화, 그리고 얻어진 본드 그래프로부터 물리적 시스템을 구성하는 체계적 방법등이 향후 해결해야 될 문제들로 남아 있다.

참 고 문 헌

[1] K. Youcef-Toumi, "Modeling, Design, and Control Integration: A necessary Step in Mechatronics," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 1, no.1, 1996, pp. 29-38

[2] K. Seo, J. Hu, Z. Fan, E. D. Goodman, R. C. Rosenberg, "Toward an Automated Design Method for Multi-Domain Dynamic Systems

Using Bond Graphs and Genetic Programming," *Mechatronics*, Elsevier, Volume 13, Issues 8-9, 2003, pp. 851-885

[3] J. R. Koza, F. H. Bennett, D. Andre, M. A. Keane, *Genetic Programming III, Darwinian Invention and Problem Solving*, Morgan Kaufmann Publishers, 1999.

[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, 1997, pp.109-128

[5] D. C. Karnopp, R. C. Rosenberg, D. L. Margolis, *System Dynamics, A Unified Approach, 3rd Ed.*, John Wiley & Sons, 1999

[6] R.C.Rosenberg, "Reflections on Engineering Systems and Bond Graphs," *Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurements and Control*, V.115, p.242-251. 1993b

[7] 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

[8] 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

[9] 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.

[10] K. Seo, "Evolutionary Design for Multi-domain Engineering System - Air Pump Redesign," 퍼지 및 지능시스템학회 논문지, Vol. 16, No. 2, 2006, pp 228-233

저 자 소 개



서기성(Kisung Seo)

1986년 : 연세대학교 전기공학과 공학사
1988년 : 연세대학교 전기공학과 공학석사
1993년 : 연세대학교 전기공학과 공학박사
1993~1998년 : 서경대학교 산업공학과 조교수

1999~2003년 : Michigan State University, GARAGE (Genetic Algorithms Research and Applications Group), Research Associate
2003~2004년 : 서경대학교 전자공학과 조교수
2004~현재 : 서경대학교 전자공학과 부교수