

시스템함수를 실현하는 동적시스템의 물리구조에 관하여 On the physical structure of dynamic systems to implement a given system function

박 전수*(부산대 기계기술연구소), 김 종식(부산대 기계설계공학과)

Jeon Soo Park(Pusan Nat'l Univ.) and Jong Shik Kim(Pusan Nat'l Univ.)

ABSTRACT

This paper presents an attempt to find the physical structure of dynamic systems which achieves the behavior of a given system function. The scheme pursued by the paper would be regarded as synthesizing dynamic systems, and a method to synthesize them analytically is proposed by means of bond graph prototypes. The method proposed adopts several concepts used to synthesize networks in the electrical field, but yet demonstrates its own strengths such as the freedom from the causality assignment and determination of junction types. Also, it is shown that this method has further advantages in reticulating a given specification into feedforward and feedback expansions relative to electrical network synthesis and the method introduced by Redfield. The proposed method is examined through an example to trace the outline of the analytical synthesis of dynamic systems using bond graph prototypes.

1. 서 론

본 논문의 목적은 표준본드선도(bond graph prototypes)가 동적 시스템을 종합할 때 적용될 수 있는 가능성을 제시하는데 있다. 표준본드선도⁽¹⁾는 동적시스템의 고유한 물리적 특성 즉, 연결성(connectivity)과 인과성(causality)을 근거로 동적시스템의 일반적인 모델로 개발되어, 동적시스템의 모델링 및 주파수역 해석에 효과적으로 적용된 바 있다. 또한, 동적시스템의 종합문제는 시스템함수로 표현된 수학적식과 동가인 물리구조를 찾아내는 문제로서 그 결과의 유일성(uniquness)을 정의할 수 없는 만큼 다양한 방법이 존재할 수 있다.

본 논문에서 제시하는 동적시스템의 종합방법은 표준본드선도를 이용한 해석적 방법(analytical synthesis method)으로서 표준본드선도에서 쉽게 유도할 수 있는 영점 및 극점다항식과 종합하려는 동적시스템이 갖는 상대차수(relative order)에 관한 정보를 적절한 수학적 알고리즘을 이용하여 그 물리구조를 실현하는 방법이다. 이 방법은 종래의 회로망이론(network theory)에서 흔히 사용하던 수동시스템(passive system)에 대한 종합방법⁽²⁾ 및 Redfield⁽³⁾가 제안한 방법과 형태상으로는 비슷하지만, 동적시스템을 구성하는 각 이상화 모델들 상호간의 연결구조 및 인과관계를 할당하는데 거의 제약없이 사용할 수 있는 장점이 있다.

2. 회로망 종합 및 본드선도^(4, 5)

전기회로망의 종합은 일반적으로 요구되는 주파수역 성능사항을 보장하는 전기회로도 및 망의 완성에 있으며, 이의 성공적인 수행은 성능사항으로 표현된 시스템함수의 전개기법(expansion techniques)의 정확도와 효율성에 달려있다.

전형적으로, 전기회로망은 수동요소(passive elements) 즉, 에너지 저장요소(결량 및 스프링), 에너지 발산요소(감쇠기), 에너지 변환요소(트랜스포머, 자이레이터) 혹은 그 시스템의 연결성을 결정하는 에너지 집합요소, 그리고 주변장치에 전혀 관계없이 일정한 힘 또는 속도를 발생하는 이상적인 에너지 발생요소 뿐만아니라, 자기 스스로 에너지를 발생 혹은 증폭하는 능동장치(active devices)를 포함할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 요구되는 시스템함수의 기동은 수동요소들만으로 물리적 실현이 가능한 경우를 고려하기로 한다. 다시말하면, 주어진 시스템함수는 그 특성상 한정실함수(positive real function)의 요건⁽⁶⁾이 만족되어야 하며, 따라서 시스템함수의 입/출력 거동 및 안정도는 에너지 저장과 발산 메카니즘에 완전히 의존한다. 또한, 본 논문에서는 주어진 시스템함수가 종합될 시스템과 그 주위(surroundings)와의 최종적인 상호작용점에서의 입/출력 관계식을 강조하기 위해, 전기회로망 설계자에게 친숙한 임피던스(impedance) 및 어드미턴스(admittance)개념을 사용하기로 한다. 임피던스는 입력으로 전류(혹은, 일반화된 속도를 의미하는 흐름(flow))이 들어와서 출력으로 전압(혹은, 일반화된 힘을 의미하는 작력(effort))을 발생하는 시스템함수로서, 물리적상사 개념에 따라 거의 모든 에너지영역에서 똑 같이 사용할 수 있는 일반화된 주파수의존함수(generalized frequency-dependent function)로 이해할 수 있다.

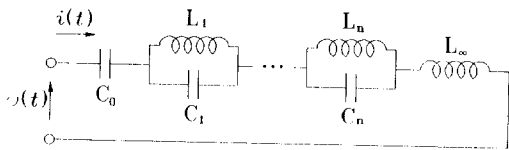
동적시스템의 종합을 위하여 회로설계자가 흔히 적용하는 전개기법은 부분분수전개(partial fraction expansion, PFE)와 연속분수전개(continued fraction expansion, CFE)이다. PFE와 CFE는 응용범위에 따라 각각의 장단점을 내포하고 있지만, 동적시스템을 종합할 때 주어진 시스템함수를 이미 잘 정의되어 있는

동적요소(질량, 스프링 그리고 감쇠기)중의 하나로 인식할 수 있을 때까지 계속하여 분해해 나간다는 점에서 비슷한 적용방법을 갖는다. 예를들어, 종합될 동적시스템의 주파수역 표현식 $F(s)$ 가 한정실함수의 조건을 만족한다면, 이 $F(s)$ 는 자신이 가진 각 고유주파수(natural frequency)에 대한 특성함수의 합으로 전개될 수 있다. 즉, 일반적인 관점에서 $F(s)$ 의 고유주파수가 0 부터 ∞ 까지 고루게 분포할 때 $F(s)$ 를 PFE 방법을 이용하여 다음과 같이 분해할 수 있다.

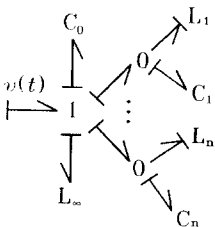
$$F(s) = \frac{k_0}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{2k_i s}{s^2 + \omega_i^2} + k_{\infty} s \quad (1)$$

식(1)에서, 첫번째와 세번째 항은 각각 0 및 ∞ 에서의 $F(s)$ 의 극점이며, 또한 두번째 항은 $F(s)$ 에 대한 n 개의 연속한 허수극점을 나타낸다. 그리고 식(1)의 각 항은 이미 잘 정의된 동적요소들을 이용하여 직접 실현이 가능하며, 특히 두번째 항의 각각은 감쇠효과가 전혀 없는 항이기 때문에 0와 ∞ 에서의 극점거동에 대한 동적요소인 스프링과 질량의 병렬연결(공통작용접합)임을 직관적으로 알 수 있다. 또한, 식(1)로 표시되는 동적시스템의 거동은 이 식을 구성하는 각 항의 거동을 중첩하여 얻으므로 직렬연결(공통흐름접합)을 이용하여 실현할 수 있다. 식(1)에 대한 하드웨어 배치 및 본드선도는 Fig. 1과 같으며, 흔히 이와같은 물리구조를 Foster 실현(Foster realizations)이라고 한다.

한편, CFE 전개방법은 종합한 시스템함수를 기본적인 동적요소들만의 구조로 나타내고자 할 때, 첫번째 극점을 ∞ 에서 분해한 후, 다음 극점의 추출을 위해 나머지 함수의 분모 및 분자항식의 위치를 서로 바꾸는 과정이 필요하다는 점에서 PFE 전개방법과 다르다. 예를들어, 만약 시스템함수가 임피던스 $Z(s)$ 의 형태로 주어졌다면, CFE 전개방법은 다음과 같이 적용된다. 먼저, 임피던스 $Z(s)$ 를 중첩의 원리(superposition principle)에 입각하여 두 임피던스 $Z_1(s)$ 와 $Z_2(s)$ 의 직렬연결로 분해한다. 이때, $Z_1(s)$ 는 이미 잘 정의되어 있는 이상화 모델중의 하나가 되며, 보통 ∞ 에 극점을 갖는 동적요소와 같다. 다음, $Z_2(s)$ 를 위와같

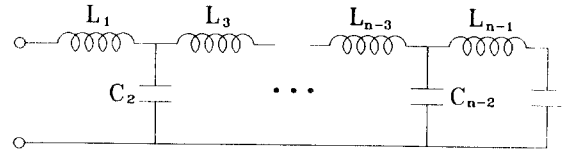


(a)

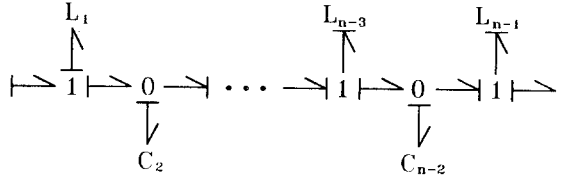


(b)

<Fig. 1> Foster realization (a) and its bond graph (b)



(a)



(b)

<Fig. 2> Cauer realization (a) and its bond graph (b)

이 분해하기 전에 이 함수의 임/출력의 역할을 바꾸어 $Z_2(s)$ 에 대응하는 어드미턴스 $Y_2(s)$ 로 변환한다. 끝으로, $Y_2(s)$ 에 중첩의 원리를 적용하기 위하여 두 어드미턴스 $Y_3(s)$ 와 $Y_4(s)$ 의 병렬연결로 분해한 후, 다시 $Y_4(s)$ 에 대응하는 임피던스 $Z_4(s)$ 로 바꾸고 처음과 같은 과정을 반복한다. 이와같은 과정을 모든 분해된 요소의 거동이 분명히 파악될 때까지 계속 수행한다면, 주어진 임피던스 $Z(s)$ 는 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$Z(s) = Z_1(s) + \frac{1}{Y_3(s) + \frac{1}{Z_5(s) + \dots}}$$

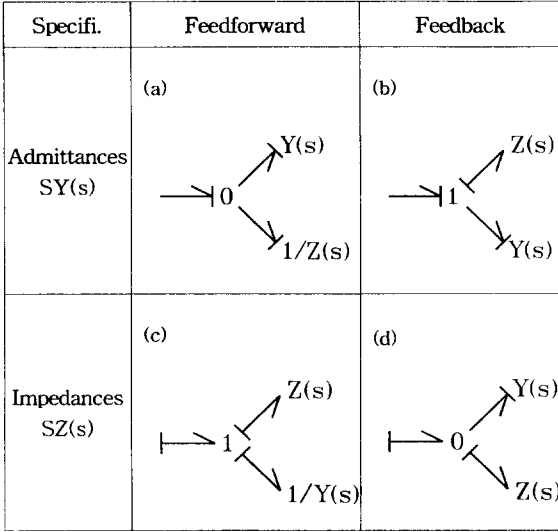
식(2)로 표시된 임피던스 $Z(s)$ 가 모든 주파수에서 동적거동을 하는 일반적인 시스템함수로 가정할 때, 첫번째 조건인 직렬연결(본드선도에서는 1-접합)을 만족하기 위하여 $Z_1(s)$ 는 미분성 인과(derivative causality)가 할당된 질량요소로 ∞ 에 극점을 갖게 된다. 이때, $Z_2(s)$ 는 1-접합의 구조조건에 따라 반드시 적분성 인과(integral causality)가 할당되어야 한다. 또한 두번째 전개 과정에서는, $Z_2(s)$ 가 $Y_2(s)$ 로의 변환에 따른 병렬연결(본드선도에서는 0-접합)을 보장해야 하므로 $Y_3(s)$ 는 적분성 인과가 할당된 스프링과 같은 동적요소가 된다. Fig. 2는 이와같은 CFE 전개방법에 의한 하드웨어 배치 및 본드선도를 나타내며, 흔히 이러한 물리구조를 Cauer 실현(Cauer realizations)이라고 한다.

3. 표준본드선도 및 동적시스템의 종합

3-1 표준본드선도

Fig. 3은 종합될 동적시스템의 거동이 각 에너지영역에서 피드포워드(feedforward)와 피드백(feedback) 구조의 결합형태로 기의 근사화될 수 있음을 감안하여, 표준본드선도의 4가지 일반적 모델을 목록화하여 나타내고 있다.

본드선도를 이용한 동적시스템의 종합은 요구되는 시스템함수를 이미 잘 정의된 기본적인 동적요소 즉, 1-포트 에너지 저장 및 발산요소와 2-포트 변환요소로 구성된 동적성분(dynamic component)으로 분해하여 각 성분들 사이의 동적상호작용이 물리계의 일반법칙에 위배되지 않도록 가장 알맞은 3-포트 접합



<Fig. 3> Bond graph prototypes for feedforward and feedback expansions

요소를 선정하는 문제로 귀착된다. 그러나, 동적시스템의 거동을 지배하는 접합성과 인과성은 개별적 특징이라고 보다는 서로의 깊은 관련속에서 각각 파악되어야 하기 때문에, 이와같은 기본 요소 및 접합요소의 결정은 때때로 동적시스템에 대한 풍부한 물리적 직관(physical intuition)을 겸비한 고급 기술자의 도움을 요구하기도 한다. 하지만, Fig. 3과 같은 4가지 표준본드선도가 동적시스템의 종합에 적용될 때는 흔히 직면하는 이러한 어려움을 쉽게 극복할 수 있을 것이며, 따라서 본 논문의 목적은 이에 대한 조직적인 접근방법을 밝히는 것이다.

반야 종합되어야 할 시스템함수가 오직 피드포워드 구조로만 실현 가능하다면, 이 시스템함수의 형태 즉, 어드미턴스(흐름의 작력에 대한 응답) 혹은 임피던스(작력의 흐름에 대한 응답)에 따라 그 분해구조가 유일하게 결정되어야 한다. 왜냐하면, 시스템함수가 어떤 두 성분의 피드포워드(또는 비결합)으로 분해될 때, 이 두 성분은 원래함수와 반드시 같은 차원이 되어야 하기 때문이다. 그래서 Fig. 3(a)와 (c)에서와 같이, 시스템함수가 어드미턴스일 때는 같은 작력을 입력으로 하는 두 성분이 0-접합에서, 그리고 시스템함수가 임피던스일 때는 같은 흐름을 받아들이는 두 성분이 1-접합에서 분해되는 구조가 되고, 이때 각 경우에 대한 수학적 표현식은 다음과 같다.

$$SY_f(s) = Y(s) + \frac{1}{Z(s)} \quad (4)$$

$$SZ_f(s) = Z(s) + \frac{1}{Y(s)} \quad (5)$$

여기서 $SY_f(s)$ 와 $SZ_f(s)$ 는 피드포워드 구조로 전개되는 시스템함수의 어드미턴스와 임피던스를 각각 의미한다.

한편, 시스템함수를 종합할 때 종합된 동적시스템의 각 성분은 일반적으로 서로 결합된 구조에서 응답형태가 결정되기 때문에, 피드포워드 및 피드백 구조를 함께 갖는 구조로 실현되어야 하는 경우가 많다. 물론, 이러한 경우에는 피드포워드 구조만

갖는 경우의 식(4)와 (5)와 같이 주어진 시스템함수는 각 성분의 합으로 분명하게 분해될 수 없을 것이다. 그러나 시스템함수를 피드포워드 및 피드백 구조로 종합할 때 Fig. 3(b)와 (d)와 같은 구조로 분해함으로써, 이미 참고논문(1)에서 밝힌 표준본드선도의 기본성질을 충분히 이용할 수 있다. 즉,

$$SY_f(s) = \frac{Y(s)}{1 + Y(s)Z(s)} \quad (6)$$

$$SZ_f(s) = \frac{Z(s)}{1 + Z(s)Y(s)} \quad (7)$$

이때, 식(6)과 같이 시스템함수가 어드미턴스일 때에는 $Y(s)$ 가 피드포워드이고 $Z(s)$ 가 피드백 성분은, 그리고 식(7)과 같이 시스템함수가 임피던스일 때에는 $Z(s)$ 가 피드포워드가 되고 $Y(s)$ 가 피드백 성분이 된다. 이제, 위에서 언급한 표준본드선도의 기본성질을 이용하여 주어진 시스템함수를 해석적으로 분해할 수 있는 종합방법을 설명하기를 한다.

3-2 해석적 종합방법(analytical synthesis method)

시스템함수가 식(4) 및 (5)와 같이 피드포워드 구조로만 분해될 때는 식들이 표시하는 바와같이 각 성분이 공통분모를 갖기 때문에 일반적으로 부분분수 전개법만으로도 충분한 결과를 보장 받을 수 있다. 그러나, 주어진 시스템함수를 피드포워드와 피드백 구조로 종합하고자 할 때는 식(6) 및 (7)이 복소 주파수(complex frequency)상에서 유일한 역함수를 갖지 못하기 때문에 전자의 경우보다 상대적으로 어려운 처리방법을 요구한다.

종합된 시스템함수 $SZ_n(s)$ 가 Fig. 3(d)와 같은 피드포워드 및 피드백 성분으로 각각 분해되는 경우를 생각해 보자. 이때, 식(7)에 나타난 바와 같이 피드포워드 성분 $Z(s)$ 는 분모와 분자에, 그리고 피드백 성분 $Y(s)$ 는 분모에만 있기 때문에 식(8)을 $Y(s)$ 에 대한 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y(s) = \frac{SZ_d(s)Z_n(s) - SZ_n(s)Z_d(s)}{SZ_n(s)Z_n(s)} \quad (8)$$

여기서 $Z_n(s)$ 와 $Z_d(s)$ 는 분해될 피드포워드 성분의 분자 및 분모 다항식이며, 또한 $SZ_n(s)$ 와 $SZ_d(s)$ 는 주어진 시스템함수의 영점 및 극점다항식을 각각 의미한다. 따라서 식(8)로부터 $Y(s)$ 는 $Z(s)$ 즉, $Z_n(s)$ 와 $Z_d(s)$ 이 어떻게 선택되는냐에 따라 달라지며, 그래서 식(8)을 만족하는 $Y(s)$ 와 $Z(s)$ 의 결정방법이 다양함을 알 수 있다.

본 논문에서는 식(8)의 해를 찾는 방법의 하나로 표준본드선도가 갖는 몇몇 유용한 성질을 이용한다. 즉, 두 동적시스템을 피드포워드 구조로 통합할 때 외부포트에서 평가되는 시스템함수의 상대차수(relative order)는 두 동적시스템 중 가장 낮은 상대차수와 같고, 피드포워드 및 피드백 구조로 통합할 때의 상대차수는 피드포워드 루프에 있는 시스템함수의 상대차수와 같다. 여기서, 상대차수는 동적시스템의 극점의 개수에서 영점의 개수를 뺀 수를 의미하며, 또한 통합(combination)은 분해(reticulation)와 대립되는 용어로서 동적시스템의 해석(analysis) 및 종합(synthesis)에 각각 대응하는 기본적인 개념이다. 따라서 $Z(s)$ 의 상대차수는 주어진 시스템함수의 그것과 같으며, 또한 각각 분해될 피드포워드 및 피드백 성분은 이 시스템함수의 차

수(order)보다 클 수 없다. 이러한 관찰결과를 식(8)에 적용하여 두개의 한정실함수인 $Z(s)$ 와 $Y(s)$ 를 구하기 위하여, 본 논문에서는 $Z(s)$ 의 분자다항식인 $Z_n(s)$ 를 주어진 시스템함수의 분자다항식인 $SZ_n(s)$ 의 인수(factor)가 되도록 선정하여 위 두 조건을 만족하게 한다. 즉, $SZ_n(s) = Z_n(s)SZ_m(s)$ 을 식(8)에 대입하여 $Z_n(s)$ 를 소거함과 아울러, 피드백 성분인 $Y(s)$ 의 분모다항식 $Y_d(s)$ 가 주어진 시스템함수의 분자다항식인 $SZ_n(s)$ 와 같아 지도록 한다.

$$Y(s) = \frac{Y_n(s)}{Y_d(s)} = \frac{SZ_d(s) - SZ_m(s)Z_d(s)}{SZ_n(s)} \quad (9)$$

여기서 $SZ_m(s)$ 는 $SZ_n(s)$ 에서 $Z_n(s)$ 를 제외한 나머지 인수로 표현된 다항식이다. 식(9)에서 결정해야 하는 것은 $Z_d(s)$ 뿐이다. 그리고 다항식 $Z_d(s)$ 의 차수는 이미 $Z_n(s)$ 가 선정되어 있기 때문에 주어진 시스템함수의 상대차수로부터 유일하게 결정할 수 있다. 이때, $Z_d(s)$ 에 포함된 각 계수들은 식(9)에 표시된 바와같이 $Y_n(s)$ 의 차수가 시스템함수의 극점다항식 $SZ_d(s)$ 의 차수보다 작아지도록 선정함으로써, 주어진 시스템함수 $SZ_n(s)$ 를 피드포워드 성분 $Z(s)$ 및 피드백 성분 $Y(s)$ 로 각각 분해한다.

이제, 이와같은 해석적 종합방법을 수치예를 통하여 알아보기로 한다. 종합될 시스템함수가 위피드스 형태로 다음과 같은 경우를 생각해 보자.

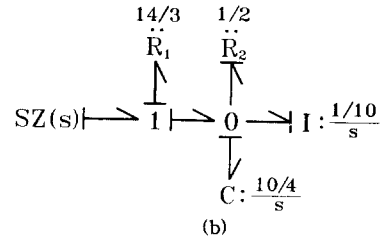
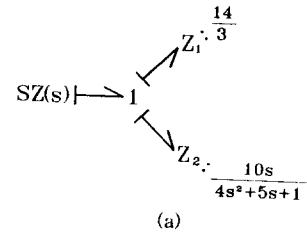
$$SZ(s) = \frac{56s^2 + 100s + 14}{12s^2 + 15s + 3} \quad (10)$$

식(10)은 수동필터(passive filter)를 설계할 때 흔히 기술되는 수학적 표현식으로서 노치(notch) 혹은 대역통과(band-pass)필터로 이해할 수 있다. 그리고 극점이 -0.25 와 -1 에 안정하게 배치되어 있고, 또한 감쇠특성으로 인하여 저장된 에너지가 발산하기 때문에 한정실함수의 요건을 만족하고 있다. 식(10)을 이미 잘 정의되어 있는 동적요소들의 모델로 종합하기 위하여 첫째, PFE와 같이 각 항의 합으로 표시할 수 있는 전개방법을 이용하여 Fig. 3(c)와 같은 피드포워드 구조로 분해한다. 그러나, 이 경우에는 분모 및 분자다항식의 차수가 같기 때문에 인위적인 나눔(synthetic division)을 통하여 달성할 수 있다. 즉,

$$SZ(s) = \frac{14}{3} + \frac{10s}{4s^2 + 5s + 1} \quad (11)$$

식(11)의 본드선도 모델은 Fig. 4(a)와 같다. 둘째, 식(11)의 두번째 항을 PFE 방법을 이용하여 첫번째와 같은 피드포워드 구조로 분해될 수 있는지를 조사한다. 이 경우에는 극점 -0.25 에서의 유수(residue)가 음의 값($-5/6$)이 되어 한정실함수의 조건을 만족할 수 없고, 따라서 식(11)의 두번째 항은 피드포워드 구조로 직접 분해될 수 없다. 셋째, 상대차수가 1인 식(11)의 두번째 항을 피드포워드 및 피드백 구조로 분해하기 위해 식(9)를 이용한다. 종합될 시스템함수의 영점다항식 $SZ_n(s)$ 가 $10s$ 이기 때문에 피드포워드 성분의 분자다항식 $Z_n(s) = 10$ 그리고 $SZ_m(s) = s$ 으로 선정되고, 이때 $Z(s)$ 의 상대차수가 시스템함수와 같이 반드시 1이 되어야 하기 때문에 식(9)에서 결정해야 할 $Z_d(s) = C_1s + C_0$ 가 됨을 알 수 있다. 즉,

$$Y(s) = \frac{(4 - C_1)s^2 + (5 - C_0)s + 1}{10s} \quad (12)$$



<Fig. 4> Bond graph synthesis for equation (10)

식(12)에 포함된 계수들의 선정은 동적시스템을 종합할 때 요구되는 기본개념인 차수가 낮은 함수로의 계속된 분해에 따라 상대적으로 쉽게 결정할 수 있다. 따라서 피드백 성분 $Y(s)$ 의 분자다항식에 있는 2차항을 소거하고, 또한 피드포워드 성분 $Z(s)$ 의 분모다항식 $Z_n(s)$ 을 단순화할 목적으로 $C_1 = 4$ 그리고 $C_0 = 0$ 로 선정한다. 즉,

$$Z(s) = \frac{10}{4s} \quad (13)$$

$$Y(s) = \frac{5s + 1}{10s} \quad (14)$$

그러나 식(14)의 $Y(s)$ 는 분자 및 분모다항식의 차수가 같기 때문에, 이 어드미턴스 함수는 Fig. 3(a)와 같은 두개의 피드포워드 성분으로 다시 분해되어야 한다. 즉,

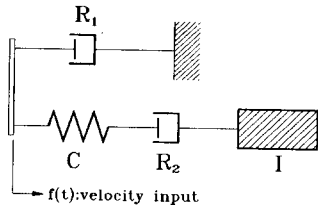
$$Y(s) = \frac{1}{2} + \frac{1}{10s} \quad (15)$$

결론적으로, 식(10)과 같이 주어진 시스템함수는 식(11), (13), 그리고 (15)로 종합될 수 있으며, 이는 본드선도의 에너지 저장 및 발산요소를 이용하여 Fig. 4(b)와 같은 물리적 모델로 구축될 수 있다. 또한, Fig. 4(b)와 같은 본드선도는 동적시스템의 물리구조를 직접 암시하기 때문에 각 에너지요소와 접합구조를 물리적으로 동기하여 Fig. 5와 같은 기계시스템으로의 실현을 달성할 수 있다.

<Fig. 4> Bond graph synthesis for equation (10)

<Fig. 5> Mechanical realization of the synthesized bond graph

이상에서 살펴본 바와같이, 표준본드선도를 이용한 동적시스템의 종합방법은 기존의 종합방법들과는 달리 동적시스템의 연결성과 인과성에 대한 분명한 물리구조를 제시해 줄 뿐만 아니라, 그 적용방법에 있어서도 다소 체계적으로 접근가능하다. 특히, 적당한 주파수역 특성이 요구되는 어떤 장치를 설계하고자 할 때, 첫 개념설계(conceptual design)단계에서 여러 가지 가능한 물리적 실현 모델을 구축해 볼 수 있기 때문에, 본 논문에서 제



<Fig. 5> Mechanical realization of the synthesized bond graph

시한 해석적 종합방법은 최적의 장치설계에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 표준본드선도를 이용하여 동적시스템을 종합하고자 할 때 사용될 수 있는 한가지 방법을 제시하였다. 이 방법은 기존의 회로망 이론에서 널리 사용되던 Foster 및 Cauer 실현 그리고 Redfield가 제안한 동적시스템 종합방법에서 다소 극복하기 어려운 문제들을 동적시스템이 갖는 고유한 물리적 특성 즉, 연결성(connectivity)과 인과성(causality)으로 해결하고자 한 첫 시도로 평가할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서 제시한 이 방법이 동적시스템의 종합시 적용된다면 첫째, 회로망 종합방법이 각 단계에서 반드시 이상화된 동적요소(dynamic elements)를 선정해야 하는 것과는 달리, 그 시스템의 기능적인 거동을 담당하는 동적성분(dynamic components)으로 분해하기

때문에 동적시스템에 대한 물리적 직관에 따라 그 적용절차가 다소 자유스럽다. 둘째, 이 방법은 Redfield 방법과는 달리 각 동적요소 혹은 동적성분들 사이의 연결성 및 인과성에 대하여 신중한 결정을 해야 할 부담이 없어 그 결과에 대한 신뢰도가 다소 높을 수 있다.

참고논문

- 1) J. S. Park and J. S. Kim, "A procedure to obtain zero and characteristic dynamics directly from bond graphs," submitted to KSME(in English), 1996.
- 2) G. H. Tomlinson, Electrical Networks and Filters: Theory and Design, Prentice-Hall(United Kingdom), 1991.
- 3) R. C. Redfield and S. Krishnon, "Dynamic System Synthesis With a Bond Graph Approach: Part I - Synthesis of One-Port Impedances," ASME J. of Dyn. Sys. Meas. and Control, Vol. 115, pp. 357-363, 1993.
- 4) D. Karnopp, D. Margolis, and R. Rosenberg, System Dynamics: A Unified Approach, John Wiley & Sons(New York), 1990.
- 5) 김종식, 박전수, "본드선도 모델링방법의 기본개념 및 그 적용 예," 대한기계학회지, 제33권, 제1호, pp. 22-32, 1993.
- 6) B. D. O. Anderson and S. Vongpanitit, Network Analysis and Synthesis: A Modern Systems Theory Approach, Prentice-Hall(New York), 1993.