

창발적 기계설계를 위한 컴퓨터기반 프레임워크

이인호[†] · 차주현* · 김재정**

(2001년 6월 16일 접수, 2002년 1월 24일 심사완료)

Framework for Innovative Mechanical Design Using Simulated Emergent Evolution

In Ho Lee, Joo Heon Cha and Jay Jung Kim

Key Words : Innovative Design(창의적 설계), Emergence(창발성), Artificial Life(인공생명), Evolutionary Computation(진화연산법), Building Block(빌딩블록)

Abstract

The framework, described in this paper, involves artificial evolutionary systems that re-produce aimed solutions through a simulated Darwinian evolution process. Through this process the framework designs structures of machines innovatively and emergently especially in the stages of conceptual and basic design. Since the framework simulates the evolution of nature, it inevitably involves processes that converse the natural evolution to the artificial evolution. For the conversion, based on several methods as the building block modeling, Artificial Life, evolutionary computation and the law of natural selection, we propose a series of processes that consists of modeling, evaluation, selection, evolution etc. We have demonstrated the implementation of the framework with the design of multi-step gear systems.

1. 서론

설계의 과정은 개념설계, 기본설계, 상세설계 그리고 생산설계의 여러 단계를 거쳐서 이루어진다.⁽¹⁾ 이들 단계 중 초기의 개념설계 단계에서는 설계의 목적을 달성하기 위해 해결해야 할 문제를 정의하고 좀 더 구체적으로는, 문제를 해결하기 위해 설계하는 대상의 구조와 기능에 대한 아웃라인을 결정한다. 이 과정의 설계 결과는 이후 여러 단계의 방향을 크게 좌우하기 때문에 매우 중요한 단계로 인식되어왔다.

본 논문에서는 개념설계 단계에서 설계대상이 가지는 구조의 아웃라인을 자동으로 설계하고 기본설계작업을 수행하기 위한 기계 구조물 대상의 프레임워크가 제안된다. 설계작업에 있어서 초기

단계의 중요성은 다양한 설계 방법론에 대한 연구를 이끌어내었고 최근의 급격한 컴퓨터 하드웨어의 발전을 바탕으로 이 연구들은 가시적인 성과를 얻어내기 시작했다. 이 자동설계 혹은 창의적 설계를 위한 연구 분야의 중요한 이슈 중 하나는 현재까지의 방식에서 벗어난 새로운 접근 방법을 개발하는 것이라고 할 수 있다. 이는 현재까지의 방법들은 '창의적인 설계'라기보다 미리 결정되어 있는 여러 해답 중에서 '선택'하는 방법에 한정되어 있고 당연한 결과로, 이들 '선택'은 복잡하고 명확하지 않은 대상으로 한 설계는 거의 불가능하다는 판단⁽²⁾에서 출발한 것이다.

기존의 방법들과 다른 방향의 접근 방법을 찾기 위해서, 본 논문에서는 진화생물학의 분야에서 자연의 설계 방법으로 해석되기 시작한 창발성(emergence)을 이용하는 설계 방법⁽³⁻⁶⁾을 앞서 언급한 이슈에 대한 새로운 접근 방법으로 이용하려 한다. 여기서 언급한 창발이란, 복잡하고 기대하지 못했던 행동이 단순한 일련의 규칙들의 조합으로부터 발생하는 현상을 의미한다.^(4,5) 생물학에 관한 최근의 연구는 복잡한 자연의 현상들을 단순한 규

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계설계학과

E-mail : ihlee@kist.re.kr

TEL : (02)958-5593 FAX : (02)958-5649

* 국민대학교 기계공학부

** 한양대학교 기계공학부

칙들의 집합으로 분해해 내어 창발적 설계의 가능성을 뒷받침하고 있다.^(7,8) 창발적이고 창조적인 설계의 예는 자연 속에서 무수히 찾아볼 수 있으며 이러한 사실로부터 우리는 자연의 설계를 모의적으로 수행하는 설계 접근 방법으로 공학 분야의 설계 대상을 창의적으로 자동설계하기 위한 방법론을 제안하려 한다.

앞서 언급한 바와 같이 창발성은 비록 우리가 하위레벨의 구성요소만을 조종할 수 있는 경우라 할지라도 우리가 복잡적이고 복잡하며 예상되지 못한 새로운 현상들을 만들어낼 수 있고 또한 아주 복잡한 구조를 가진 시스템을 설계할 수 있을 가능성을 보여준다는 점에서 중요한 의미를 지닌다. 이는 설계의 접근 방법에 있어서 상향식(bottom-up)의 합성적인(synthetic) 설계방식에 창발성을 적용하면 간단한 지식들의 조합으로부터 복잡하고 새로운 설계 결과를 얻어낼 수 있다는 기본적인 가정을 설정하는 것이 가능해진다는 의미와 같다.

본 논문의 근본이 되는 아이디어는 만약 자연에 존재하는 실제 생명체들을 모방해서 인공적인 계에 옮겨놓을 수 있다면 진화와 적응 같은 자연의 창발적 설계능력을 이용하는 새로운 창조적 설계방법 또한 개발해낼 수 있다는 것이다. 그런데 최근에 인공생명(artificial life, ALife)이라 불리는 일련의 연구들이 생명체가 만들어내는 것과 비슷한 행동들을 만들어내어 자연의 설계방식을 물리적으로 모방할 수 있도록 할 하나의 방향을 제시하고 있다.⁽³⁻⁶⁾ 또 하나의 일련의 연구인 이른바 진화연산법(evolutionary computation) 또한 인공의 계에 옮겨놓을 인공의 생명체들을 설계 목적에 맞는 결과로 진화하게 만들 중요한 한 도구로 사용될 것이다. 따라서 우리가 본 논문에서 제안하는 프레임워크는 인공생명과 앞에서 설명한 아이디어를 바탕으로 인공생명과 진화연산법 등의 방법들을 적용하여 창발적이고 창조적인 설계작업을 수행하게 된다. 모델링방법, 진화방법 및 설계 유도방법 등을 포함하는 더 자세한 설명이 본 논문에서 주어지며, 다만 기어장치가 우리의 프레임워크의 예제로 설계된다.

2. 관련 연구

Park 등은 컴퓨터 기반의 기계구조 설계를 위하여 기호 연산자 방법을 제안했다.⁽⁹⁾ 제안된 방법은 기계구조물을 표현하고 기능적 구조를 재구성할 수 있도록 하였다. Hoeltzel 등은 기계구조물을 설

계하기 위한 또 하나의 방법으로 지식기반 인공지능을 이용하였다.⁽¹⁰⁾ 두 연구에서는 합성적인 접근 방법이 자동설계의 도구로 성공적으로 적용되었다 이런 형태의 접근 방법은 이 분야의 연구에 기본적인 배경이 되지만 이들 방법의 설계 결과는 모두 설계대상에 대한 대략적인 개념만을 제공하고 제한된, 미리 짜여진 설계공간을 탐색한다.

컴퓨터를 기반으로 한 설계에 대한 다양한 연구가 진행되는 동안 생물학자에 의하여 창발적 설계라는 중요한 개념이 발견되어 자연이 설계하는 방법을 설명하게 된다. 이론신경생리학자인 Calvin은 지난 수백만년동안 어떻게 더더욱 높은 지능을 가진 뇌가 생물학적인 발전을 통하여 진화하게 되었는지를 설명하였다.⁽⁷⁾ 생물학자 Williams 또한 생명의 문제를 풀기 위하여 어떻게 생물의 기관들이 자연 속에서 진화해 나왔는지를 설명했다.⁽⁸⁾ 그는 생물학에 있어서 소위 '계획과 목표의 적응 프로그램'이라는 개념을 받아들인다. 다시 말하면, 유기체의 각각의 속성이 살아 남으려고 하는 노력에 어떤 방법으로는 관련되고 또한 유전자에 전달된다는 것이다. 두 저자들이 설명하고자 하는 것은 극도로 복잡한 자연의 설계 결과가 창발적인 진화와 자연선택에 의하여 이루어진다는 것이다. 다음의 Calvin의 인용문에서 그 의미를 이해할 수 있다.

「우리는 시계처럼 정밀한 물건은 훨씬 더 정밀한 시계 설계자를 필요로 한다는 식의 개념에 익숙하다. 그러나 다윈시대 이래로 우리는 정교한 것이 보다 단순한 출발점으로부터 창발할(실제로는 스스로 조직될) 수 있다는 것을 알게 되었다.⁽⁷⁾」

블록 모델링 방법은 본 논문에서 자연의 상향식 설계의 실제적인 구현 도구 중 하나가 된다. Gero 등은 특정한 패턴을 이끌어내기(evolve) 위하여 간단한 블록을 요소로 그 기본요소로 이용하였다.⁽¹¹⁾ Harmer 등은 설계 초기 단계에서 카탈로그화 된 요소를 선택하여 설계자를 지원하기 위한 방법을 제안하였다.⁽¹²⁾ 이런 종류의 접근 방법은 함수나 기하 정보 등을 요소와 함께 가지고 새로운 구조나 패턴을 거의 무한대로 만들어낼 수 있다. 최근에는 블록의 합성 방법으로 소위 자발적 조직화(self-organizing)라고 하는 인공생명과 일부 특성을 공유하는 방법의 유효성이 Matshuoka 등의 연구⁽¹⁴⁾와 Oda 등의 연구⁽¹⁴⁾에서 사례를 통하여 검증되고 있다.

3. 인공생명과 진화연산법

본 장에서는 인공생명과 진화연산법의 개념이 소개된다. 두 개념은 본 연구에서 강력한 도구들로 사용된다. 인공생명은 모델링 된 설계대상이 창발적으로 행동하도록 하는 도구로, 진화연산법은 모델링 된 설계대상의 자신의 변형을 만들어내도록 하기 위한 도구로 사용된다.

3.1 인공생명

인공생명은 생물학적인 현상에 놓여있는 기본적인 기능들을 추상화해서, 그리고 이들 기능들을 컴퓨터와 같은 다른 물리적 매체에서 재생산하여 새로운 조작과 실험들이 가능하도록 해서 생물을 이해하고자 하는 연구를 말한다.^(4,5) 인공생명의 가장 기본적인 가정은 어떤 인공적인 생명체들이 생명의 특정한 특성들을 가지고 있다면 이들 역시 생명으로 간주된다는 것이다. 이 가정을 기반으로 해서 인공생명은 우리에게 자연이 가진 강력한 설계의 능력들을 사용할 수 있도록 해준다.

인공생명이 우리에게 제공하는 가장 중요한 기본 특성은 창발성이라는 속성이다. 이미 언급한 바 있듯이, 창발성은 어떤 부분의 합보다 더 많은 무언가를 얻어내는 것이라고 할 수 있다. 창발적인 속성을 이끌어내는 창발성이라는 것은 주위의 복잡한 많은 현상들을 단순한 현상들의 상호작용으로 분해해 낼 수 있다는 것이다.^(4,5) 역으로, 창발성을 이용하면 다루기 쉬운 단순한 규칙들의 집합으로 새로운 복합적인 현상을 만들어 낼 수 있다.

3.2 진화연산법

진화연산법은 자연계에 존재하는 생물체의 진화에 일정부분 기반을 둔 몇몇의 컴퓨터 기법을 말하는 일반적인 용어이다.⁽¹⁵⁾ 실질적인 방법론으로 진화연산법은 유전 알고리즘(genetic algorithm), 진화 프로그래밍(evolutionary programming), 진화 전략(evolution strategies), 유전 프로그래밍(genetic programming) 등을 포함하는 컴퓨터상에 진화 과정을 시뮬레이션 하는 방법이다. 진화연산법의 기법들은 창조와 혁신을 포함하는 수많은 적용사례에서 더욱 증진적으로 사용되는 기법으로 건축설계, 기계설계, 구조설계, 다양한 공학문제의 혁신적 전략 등에서의 성공으로부터 그 잠재성이 증명되고 있다.

방법론적인 측면에서 진화연산법은 선발생-후평가(generate-and-test) 방법의 약한 인공지능 방법(weak AI method) 중 하나이다. 약한 인공지능 방법은 모든 문제 해결의 경우에 대하여 폭 넓게 적

용가능하고 확장 가능한 알고리즘 군을 말하며 선발생-후평가 방법은 약한 인공지능 방법들 중 가장 약한 특성을 가지는 것이다. 진화연산법의 이들 속성은 본 프레임워크가 제한되지 않은 넓은 해공간을 탐색하도록 해줄 것이다. 제안되는 프레임워크의 진화 과정은 자연이 그러한 것처럼 의도가 포함되지 않는(unintended, randomized) 변조과정과 선택의 과정으로 이루어진다.

4. 인공계에서의 설계 방법론

본 장에서는 자연의 창발적 진화를 인공의 창발적 진화로 바꾸어 이용하기 위해, 자연의 생태계에서의 설계에 사용되는 몇몇 방법들을 정의하고 이를 통하여 인공의 계에서의 사용하기 위한 방법들을 각각 제안한다.

4.1 자연계에서의 설계

자연은 인간이 하는 것처럼 설계를 하며 실제로 인간이 하는 설계와 비교될 수 없을 정도로 정교하고 강력하다. 그 한 예로, 개미와 같은 곤충이라 할지도 아주 복잡한 사회, 집 등을 만들어 내는 것을 볼 수 있다. 다윈리즘(Darwinism) 같은 최근의 생물학 연구들을 기반으로, 우리는 대상을 단순한 출발점으로부터 창발 하거나 자발적 조직화해나가도록 하기 위한 일련의 설계과정을 제안할 수 있었다.

자연의 설계에 대한 고찰에 의해 우리는 인공의 시스템에서 사용될 일련의 방법론들을 얻을 수 있게 되었다. 제안된 프로세스는 다음과 같은 네 개의 원칙과 방법들로 구성된다.

- **상향식의 합성적 설계:** 자연의 수행한 설계는 비록 매우 복잡해 보이지만 단순한 요소들을 상향식 접근 방법으로 합성해서 만든 결과이다.
- **유전자 조합의 변경에 의한 설계의 변경:** 생물의 진화는 생물의 구성요소의 정보인 유전자를 변경하여 이루어진다.
- **자연의 창발적 행동을 이용한 창발적 설계:** 자연의 설계는 그 구성 요소들간의 창발적인 행동에 의해 무수히 다양한 형태의 결과로 나타난다.
- **자연 선택에 의한 적자생존:** 적자생존의 법칙 즉, 상대평가에 의한 확률적 보상은 적합한 설계 결과를 유도해낸다.

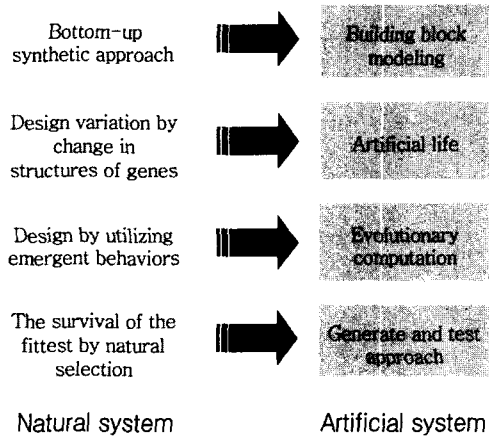


Fig. 1 Conversion of methodologies

4.2 인공계에서의 설계

자연의 설계방식에 이용되는 프로세스들을 크게 네 가지로 나누고 각각의 역할을 살펴보았다. 기계 구조물을 대상으로 할 본 연구에 있어서 이들 네 가지의 원칙은 각각의 역할에 대응하는 새로운 원칙으로 대체된다. 이것은 자연의 설계와 공학적 설계의 유사성을 바탕으로 만들어졌다. 네 가지 자연설계에 각각 대응하는 네 가지 원칙은 다음과 같다.

- **블록모델링:** 블록 모델링은 자연의 상향식 합성적 설계를 수행하기 위한 요소의 표현과 요소의 어셈블리를 표현하기 위한 도구로 사용된다.
- **인공생명의 창발성:** 인공의 시스템에서 자연의 설계의 기본 원동력인 창발적 행동을 이용하기 위해 사용된다.
- **진화연산법:** 설계대상의 구조화 속성에 변화를 주기 위한 방법이며 생명체의 유전자 변형의 방법을 대신한다.
- **선발생-후평가 방식:** 의도하는 설계 결과를 얻기 위한 방법으로 자연의 적자생존과 같은 선발생-후평가 방식으로 설계 대상에 적용된다.

자연의 설계에 대응하는 설계 방법 및 원칙의 대응을 Fig. 1에 다이어그램으로 표현하였다.

5. 창발적 설계를 위한 프레임워크

기계를 대상으로 구조를 창의적으로 그리고 자동으로 설계하기 위한 여러 연구는 많은 발전을 이루어 왔으나 만족할 단계에는 이르지 못하고 있다. 본 연구에서 제안하는 프레임워크는 이 문제

를 창발성이라는 개념을 도입하여 설계 결과가 한정된 영역에 속하지 않도록 하며, 기계 부품과 기계 부품의 조합으로 이루어진 구조물을 이전의 연구들로부터 발전시킨 모델링 방법으로 대체하는 방향으로 해결하려 한다.

5.1 창발적 설계의 개요

본 프레임워크의 설계방법은 적지않은 부분에서 다윈의 진화이론에 영감을 얻은 진화 계산법의 변형된 모습이다. 간단히 말하면 프레임워크에 의해 만들어지는 해는 프레임워크의 가상의 생명체들이 만들어내는 창발적 행동들의 상호작용에 의하여 진화하는 것이다.

프레임워크의 설계과정은 본 연구에서 기본요소블록(Elementary Cell Block; ECB) 이라고 이름 붙인 블록요소로 표현된 일군의 해(프레임워크의 인공의 시스템에 만들어질 인공 생명체)로 시작한다. 일련의 평가와 선택의 과정을 통하여 다른 해들보다 우수한 해는 그들의 적합도에 따라 선택되어지고 새로운 해를 구성하기 위하여 사용된다. 재생산 과정에서는 인공 생명체가 좀더 적합할수록 더 많은 재생산을 하도록 기회를 가지며 이 방법에 관해서는 본 장의 뒷부분에 설명된다. ECB 로 어셈블리되는 인공 생명체는 가상의 시스템에서 창발적으로 진화하기 위하여 인공생명의 연구에서 그 개념을 받아들였다. 공식화된 프레임워크의 개요는 다음과 같다.

Step 1. 시작 및 모델링:

- 설계대상의 부품을 ECB 로 모델링.
- 설계대상을 인공 생명체로 모델링.
- 설계목적과 제약을 반영할 가상 생태계 모델링.

Step 2. 평가와 선택:

- 인공 시스템에 존재하는 인공 생명체를 평가.
- 상대비교에 의한 적자생존.

Step 3. 재생산 및 진화:

- 적합한 개체에 재생산을 위한 기회를 확률적인 방법으로 보장.
- 기존의 설계대상의 구조와 속성을 변형.
- 계층적 진화 방법을 이용하여 구조와 속성에 대한 변형을 만들어냄.

Step 4. 종료 혹은 반복:

- 종료조건이 충족되는 경우에는 종료 후 설계 결과 리포트, 이외의 경우에는 설계과정 반복.

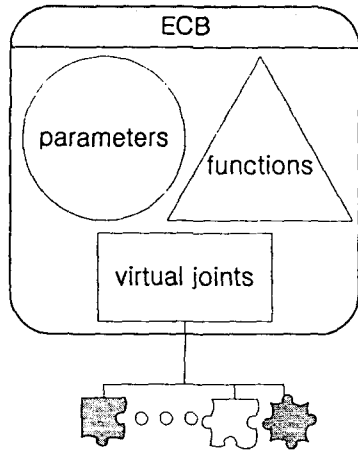


Fig. 2 Conceptual architecture of an ECB

5.2 블록의 모델링

인공 생명체들은 다세포생물이 세포의 조합인 것과 같이 블록의 조합으로 표현된다. 본 프레임워크에서 블록이나 세포의 역할을 수행할 요소로는 ECB 라는 기본요소의 개념이 제안되었다. 모든 설계 결과, 즉 인공 생명체들은 ECB 들의 합성물이다.

ECB 는 설계 결과를 나타내는 후보들이 항상 적합(feasible) 하도록 하기 위하여 인공 생명체들의 ECB 들은 물리법칙을 따르도록 만들어져야 할 필요가 있으며, 실제 기계부속품의 설계 정보들을 가져야 한다. 이를 위해서 ECB 들은 Fig. 2 의 ECB 다이어그램과 같이 파라미터, 함수 그리고 가상조인트의 세 종류의 인자로 구성된다. 각각을 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다.

- 파라미터(parameter): 실제 부품의 치수와 속성 등의 정보를 표현한다.
- 함수(function): ECB 가 가져야 할 각종 기능을 정의한다.
- 가상조인트(virtual joint): 부품들이 따라야 하는 물리법칙 등 조립교차 등을 정의한다.

5.3 구조의 모델링

ECB 라는 기본적인 블록을 이용해서 지금까지의 방법과는 다른 형태로 구조물을 생성해 낼 수 있다. 기존의 방법과의 비교를 통해서 차이점을 설명하면, 우선 첫째로, ECB 는 블록 개체 당 처리하는 정보량이 단순한 1byte 를 넘어서서 물리적인 관련을 가지는 다차원의 정보를 하나의 단위로 묶어서 가진다. 이것은 진화연산법의 한 방법인 유전 알고리즘이 바이너리 코드를 이용하는 것이나 Gero 등이 제안한 모델링 방법이 주로 형상만을

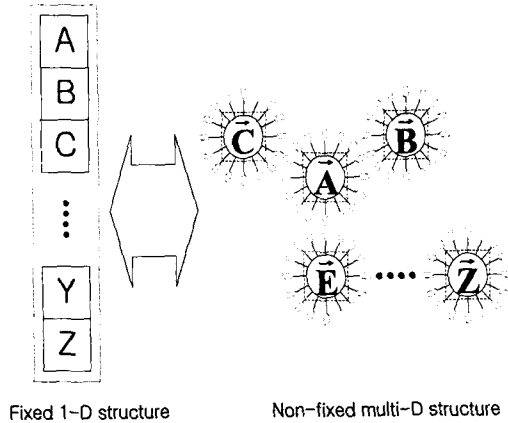


Fig. 3 Structures composed by GA vs. by ECB

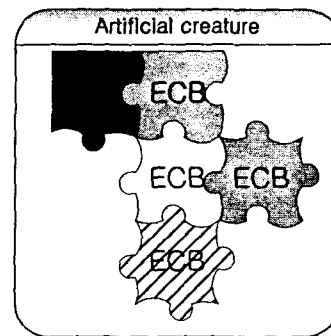


Fig. 4 Conceptual architecture of an artificial creature

표현하기 위해서 블록을 이용하는 것과 비교하면 그 차이를 쉽게 이해할 수 있다. 두 번째로 제안되는 구조가 다차원적이며 가변적이다. 이는 유전 알고리즘이 고정된 1 차원의 바이너리 코드로 구조를 표현하는 것과 비교하면 쉽게 이해할 수 있으며, ECB 가 가지는 다차원의 가상조인트를 통해서 가능하다. Fig. 3 은 본 모델링 방법에 의해서 제안되는 구조가 가지는 기존의 방법들과 비교한 차이점을 설명하기 위한 다이어그램이다. 왼쪽의 구조는 유전 알고리즘 등에서 이용하는 1 차원의 바이너리코드 형태의 구조를 나타내며 오른쪽의 구조는 본 모델링의 결과로 생성된 유연한 구조를 나타내고 있다.

Fig. 4 는 ECB 를 이용하여 인공생명체를 만드는 개념의 다이어그램이다. 그림에서는 이해를 돕기 위해서 ECB 가 직소퍼즐의 조각으로 표현되었다. 자연계에서 수많은 생명체들이 세포들의 조합에 의해서 만들어지듯이 인공의 시스템에서도 인공생명체가 다양하게 만들어진다. 우리가 원하는 설계 결과가 만들어지도록 하기 위한 진화방법과 평가 방법이 본 연구에 포함되었다.

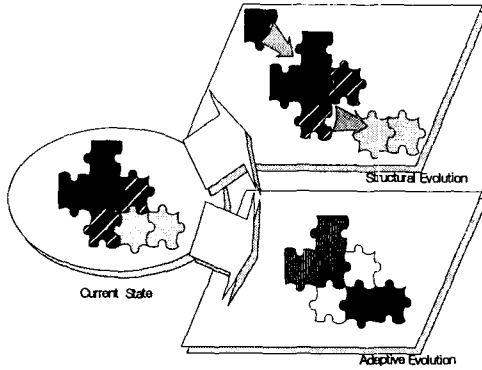


Fig. 5 Structural evolution vs. adaptive evolution

5.4 진화의 방법

단순히 선택과 재생산의 과정을 수행하는 것만으로는 우리가 원하는 새로운 개체를 만들어 낼 수 없으므로, 진화의 과정이 필요하게 된다. 프레임워크가 해공간 속의 새로운 점을 탐색하도록 하기 위해서 두 가지의 진화방법이 제안된다. 하나는 구조적 진화(structural evolution)이고 다른 하나는 적응적 진화(adaptive evolution)이다. 구조적 진화는 ECB 들로 이루어진 인공 생명체의 구조가 재구성되는 과정이다. 이것은 자연계에서 새로운 생물이 태어나는 진화의 과정에 해당한다. 적응적 진화는 각각의 ECB 들의 속성들이 변화하는 과정이다. 적응적 진화는 낙엽이 지는 등과 같은 환경에 대한 적응에 해당한다. 진화방법의 이원화는 인공 생명체의 다양한 변화를 시도해보기 위한 것이다. 상세한 설명은 다음과 같다.

- 구조적 진화:
 - 인공 생명체의 구조에 관련된 진화방법.
 - 돌연변이에 의한 거시적인 변화.
- 적응적 진화:
 - ECB 의 파라미터에 관련된 진화방법.
 - 파라미터의 변화에 의한 미시적 변화.

Fig. 5 는 두 가지 진화 방법을 설명하는 다이어그램이다. 그림에서 ECB 들은 직소퍼즐조각처럼 묘사되었다. 구조적 진화에서는 새로운 대상을 설계하기 위하여 새로운 조각들이 기존의 구조에 추가되거나 제거되거나 구조가 재조직된다. 적응적 진화에서는 새로운 대상을 설계하기 위해서 일부 조각의 속성이 변화한다.

두 종류의 진화 과정은 개개의 인공생명체 단

위에서 일어난다. 충분히 많은 수의 인공생명체 개체들이 하나의 세대를 형성하며 여러 세대를 거치면서 의도하는 설계 결과들을 발생시키게 된다. 한 세대를 이루는 인공생명체들 중 설계 목적에 좀 더 적합한 개체들은 평가를 거쳐서 개체수를 늘여나가게 되고 설계 목적에 적합하지 않은 개체들은 제거되게 된다.

5.5 평가 및 선택 방법

설계 목적에 적합한 속성을 지니고 있는 인공 생명체를 선택하기 위해서 먼저 그들을 평가해야 한다. 평가과정은 인공 생명체를 적합하고 효율적인 방법으로 유도하기 위한 것이다. 선택과정 및 평가과정의 원칙은 다음과 같다.

- 비교기반의 평가: 인공 생명체들은 적합성에 대한 상대 비교를 통해 매겨진 순위를 기반으로 하여 평가된다.
- 계층적 평가: 평가 과정은 구조적 진화 및 적응적 진화 각각에 대해 계층적으로 평가한다. 효율을 높이기 위해서 구조적 성능이 뛰어난 개체만이 적응성에 대한 평가를 받을 기회를 부여 받는다.
- 확률적 보상: 우수한 인공 생명체들은 적자생존의 법칙에 의거하여 더 많이 번성할 수 있는 확률적 보장을 받는다.

좀 더 실제적으로는, $G(c_i)$ 를 임의의 인공 생명체 c_i 에 대한 평가성적이라고 한다면 $G(c_i)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G(c_i)_{TOTAL} = G(c_i)_{STRUCTURAL} + G(c_i)_{ADAPTIVE}$$

$$(G(c_i)_{ADAPTIVE} = 0 \text{ if } G(c_i)_{STRUCTURAL} < R_T)$$

여기서,

$G(c_i)_{TOTAL}$ = 총 적응과정에 대한 평가점수

$G(c_i)_{STRUCTURAL}$ = 구조적 진화에 대한 평가점수

$G(c_i)_{ADAPTIVE}$ = 적응적 진화에 대한 평가점수

R_T = 임의의 threshold 순위

$G(c_i)_{TOTAL}$ 에 의한 자리매김에 비례하여 우수한 인공 생명체들은 경쟁자들에 비하여 더 많은 이득을 얻는다. 이 이득은 자신들의 특성을 복사한 후손들의 수로 나타난다. 후손들의 수 $N_{DESCENDANT}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$N_{DESCENDANT} = \left(1 - \frac{R_{c_i}}{N_{TOTAL}} \right) \times \alpha$$

```

function Emergent design algorithm(population, survivalRate):
begin
  for i from 1 to populationSize do
    fitness[i] := evaluate(population[i]);
    reproductionSize = getReproductionSize( fitness[i]);
    while not(Tester(bestof(population, fitness)))do
      begin
        select(population, fitness);
        reproduce(population, reproductionSize);
        slay(population, survivalRate);
        evolvePopulation( population );
        for i from 1 to size do
          fitness[i] := evaluate(population[i]);
          reproductionSize = getReproductionSize( fitness[i]);
        end;
        populationSize := numberof ( population );
        return bestof(population, fitness);
      end;
    end;
  end;
end;
    
```

Fig. 6 Outline of Emergent design

여기서,
 R_{Ci} = 인공 생명체 c_i 에 대한 평가 순위
 N_{TOTAL} = 현재 인공 생명체의 총 개체수
 α = 재생산율 상수

5.6 창발적 설계의 흐름

창발적 설계의 전체적인 흐름은 다음의 Fig. 6의 프로그램 개요를 통하여 알 수 있다. 다수의 개체군에 포함된 설계해인 각 인공생명 개체들은 먼저, 각 개체의 구조와 속성에 대한 진화를 수행하게 된다. 다음으로 이들은 전체적인 평가의 과정을 거치게 된다. 평가는 앞에서 말한 상대평가의 원칙을 따르므로 모든 개체의 설계 결과를 각각의 평가 항목에 따라 순위에 기초한 점수로 반영된다. 이 상대평가의 점수는 다음 과정에서 각 개체들이 재생산을 할 때 후손의 수를 결정하도록 이용된다. 위의 프로그램 코드에서 후손의 수는 reproductionSize로 전체 개체수는 populationSize라는 변수가 사용되었으며, survivalRate라는 일정한 생존비율을 두어 전체 개체수가 컴퓨팅 한계를 넘지 못하도록 조절하였다.

6. 사례연구

6.1 문제의 정의

본 장에서는 사례연구로 기어시스템의 설계를 보이고자 한다. 사례연구의 기어장치는 다음과 같이 설계되어야 한다.

- 기어장치는 모터, 축, 평기어 및 축각 90도의 직선베벨기어로 구성된다.

Table 1 Specification of gear system

ITEM	SPECIFICATION
Motor RPM	10000RPM
Output RPM	1RPM
Power	5kW
Material density	0.00783 g/mm ³
Allowable shear stress	20 kg/mm ²
Allowable bending stress	30 kg/mm ²

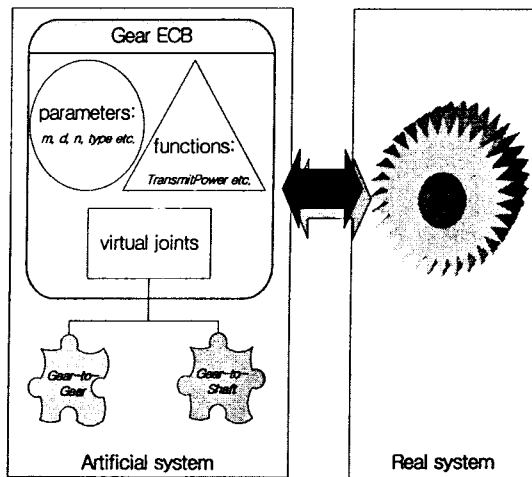


Fig. 7 Example of gear ECB

- 기어장치의 각 부품은 특정한 동력을 전달할 강도를 가져야 한다.
- 기어장치는 최소의 공간에 최소의 관성모멘트를 갖도록 해야 한다.

Table 1은 사례연구의 기어장치를 위한 상세한 사양을 표로 표현해서 나열하고있다. 임의로 전동에 의한 손실은 0%로 하고 기어들은 표준 기어모듈을 가지며 압력각은 20°이다.

6.2 부품 블록의 모델링

본 사례연구에서 우리가 모델링해야 할 ECB는 기어, 축 그리고 모터이다. Fig. 7은 그 한 예로 기어의 ECB를 보여주고 있다. 그림에서 ECB는 파라미터, 함수, 그리고 가상 조인트로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다. 기어 ECB는 기어모듈 m , 피치지름 d , 잇수 n 등등을 파라미터로, transmitpower(), reproduce() 등등을 함수로 그리고 Gear-to-Gear joint 와 Gear-to-Shaft joint를 가상 조인트로 가지고 있다. 기어 ECB 외에도 축과 기어 ECB가 Table 2에 제시되었다.

Table 2 Part modeling table

	MOICR	SHAFT	GEAR
PARAMETER	length	length	width
	diameter	diameter	pitch diameter
	RFM	RFM	gear type
	position	position	gear module
	etc.	etc.	number of teeth
			RFM
			position
			etc.
FUNCTION	AdaptPosition()	AdaptPosition()	AdaptPosition()
	CheckStrength()	CheckStrength()	CheckStrength()
	etc.	etc.	etc.
VIRTUAL- JOINT	Mtr-to-Shaft joint	Shaft-to-Gear joint	Gear-to-Gear joint
		Shaft-to-Mtr joint	Gear-to-Shaft joint

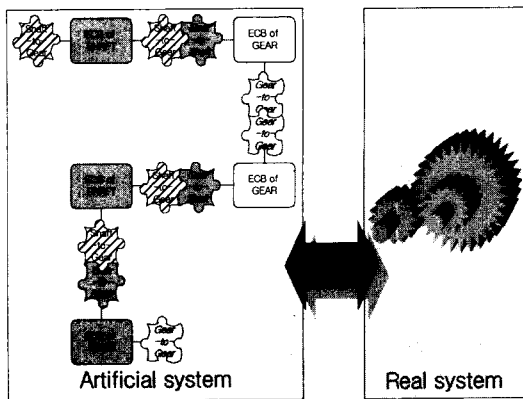


Fig. 8 Example of assembly

6.3 진화 및 평가

제안된 진화 방법에 의하여 인공 생명체는 프레임워크 내에서 진화 과정을 거치게 된다. Fig. 8은 ECB들의 조립을 예로 보이고 있다. 그림의 예는 축과 기어로 이루어진, 진화 시키려고 하는 후보 생명체의 하나이다.

인공생명체를 평가하기 위해서 각각의 구조적 진화와 적응적 진화를 평가해야 한다. 본 예제에서는 가상 기어장치의 출력 회전수를 구조적 적응의 결과를 측정하기 위한 요소로 정하고 있고, 축 및 기어의 강도, 기어장치의 체적 및 관성모멘트를 요소로 하여 평가한다. 전체 진화의 평가값 $G(c)_TOTAL$ 은 아래와 같다.

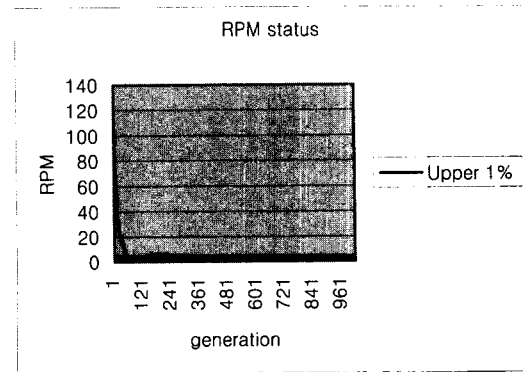


Fig. 9 End speed of upper 1%

$$G(c)_TOTAL = G(c)_STRUCTURAL + G(c)_ADAPTIVE$$

$$(G(c)_ADAPTIVE = 0 \text{ if } G(c)_STRUCTURAL < R_T)$$

단,

$$G(c)_STRUCTURAL = G(c)_{END_RPM}$$

$$G(c)_ADAPTIVE = G(c)_{STRENGTH} + G(c)_{INERTIA} + G(c)_{VOLUME}$$

$$R_T = 10\%$$

더 높은 평가를 받은 인공 생명체들은 비슷한 속성을 가진 더 많은 수의 자손들을 재생산 할 수 있다. 후손의 수 $N_{DESCENDANT}$ 는 다음과 같이 계산 된다.

$$N_{DESCENDANT} = \left(1 - \frac{R_{Cl}}{N_{TOTAL}}\right) \times \alpha$$

단,

$$100 < N_{TOTAL} < 1000000$$

$$\alpha = 10$$

6.4 설계 결과

프레임워크의 구현은 IBM PC 상에서 Visual c++로 구현되었다. 또한, 설계된 기어장치를 그래픽 화면으로 보이기 위하여 상용 모델러인 솔리드웍스를 사용하였다.

설계 결과는 많은 세대동안의 진화 과정을 거쳐서 완성된다. 다음의 Fig. 9는 설계 대상인 기어장치의 출력 회전수의 평가가 상위 1%에 속하는 우수한 인공생명체의 출력 회전수의 평균을 나타내는 그래프로 가로축은 세대의 변화, 세로축은 평균 출력 회전수의 변화를 나타낸다. 본 사례연구에서는 인공 생태계 내에서 한 세대가 가지는 개체의 수는 최소 10^4 개에서 최대 10^5 개로 조절되었다.

Table 3 Design result of gear equipment

No.	ECB	RPM	GEOMETRY INFORMATION			
1	Motor	10000	R:70	L:130		
2	Shaft	10000	R:2.71	L:21		
3	Bevel G	10000	R:8	W:9.249	m:1	z:16
4	Bevel G	3137.255	R:25.5	W:9.249	m:1	z:51
5	Shaft	3137.255	R:15.93	L:10.875		
6	Spur G	3137.255	R:32	W:6.845	m:2	z:16
7	Spur G	425.391	R:118	W:6.845	m:2	z:118
8	Shaft	425.391	R:8.412	L:0.1		
9	Bevel G	425.391	R:30	W:14.764	m:4	z:15
10	Bevel G	59.082	R:216	W:14.764	m:4	z:108
11	Shaft	59.082	R:14.751	L:4.346		
12	Spur G	59.082	R:37.5	W:48.8362	m:5	z:15
13	Spur G	10.187	R:217.5	W:48.8362	m:5	z:87
14	Shaft	10.187	R:25.9	L:24.3342		
15	Bevel G	10.187	R:68	W:88.789	m:8	z:17
16	Bevel G	1.574	R:440	W:88.789	m:8	z:110
17	Shaft	1.574	R:47.32	L:5.1		

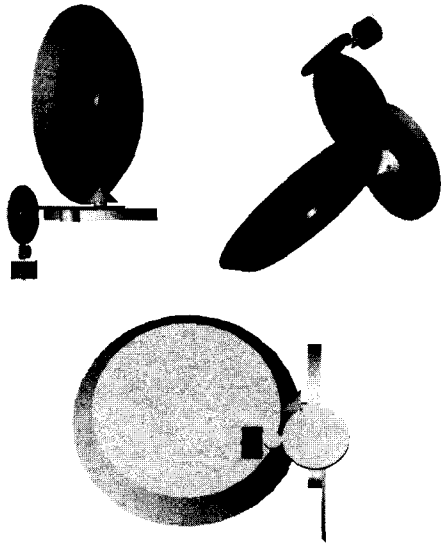


Fig. 10 Examples of design results

Table 3 은 5000 세대의 진화를 거친 후, 세대를 이루는 개체 중 가장 우수한 한 설계 결과의 예를 각 부품별로 나타낸 것이다. 단, 여기서 G는 기어를, R은 피치원의 반경을, L은 축의 길이를, W는 기어의 폭을, m은 기어모듈을 그리고 z는 기어 잇수를 의미한다.

위의 Table 3 에 나타난 설계결과는 설계요구를 충족하는 다양한 설계 결과 중 가장 우수한 하나의 예를 나타낸 것이다. 한 세대의 상위 몇 개체는 설계조건을 만족 정도가 오차 한계 내에 존재

하게 된다. 이 여러 개체들은 설계 조건을 만족하는 대안으로 역시 프레임워크를 통하여 제시된다. Fig. 10 은 Table 3 의 설계 결과를 포함하여 대안이 될 수 있는 다양한 설계 결과를 3 차원 모델링화 면으로 보여주고 있다.

7. 결론

본 논문에서 우리는 인공생명과 진화연산법을 기반으로 해서 기계 구조물을 대상으로 창조적인 개념설계와 기본설계를 수행하기 위한 프레임워크를 제안하였다. 프레임워크의 기본 개념은 자연의 창발적 진화를 인공적인 창발적 진화로 모방에 있다. 모방의 방법으로 우리는 모의 다윈적 진화를 통해서 목표로 하는 설계의 해를 재생산해내는 인공 생명체를 제안했다.

본 프레임워크에는 설계를 합리적이고 효율적으로 수행하기 위한 일련의 모델링, 평가와 선택 및 진화를 위한 과정들이 포함된다. 모델링 과정을 위해서는 블록 모델링의 한 변형으로 ECB의 개념이 제안되고, 진화 과정을 위해서는 적응적 진화와 구조적 진화라는 두개의 계층적인 진화방법이 제안되며, 평가와 선택의 과정을 위해서는 공식화된 규범들이 제안되었다. 이들 과정들을 통해서 프레임워크는 기계의 구조를 설계하게 된다.

본 프레임워크를 통한 설계의 방법은 기존의 방법들과는 다른 특징들을 지닌다. 먼저, 설계 접근 방법에 있어서 상향식의 합성적인 방법을 따르게 되며 이 과정에 인공생명을 이용한 창발적인 행동을 유도하게 된다. 이 특징들은 설계 결과들이 다양한 구조를 제안하도록 하기 위한 것이다. 또한, 합성적인 설계를 위하여 블록 모델링을 발전시킨 ECB의 개념이 제안되었다. ECB의 모델링은 자동설계를 위한 지금까지의 관련 연구의 모델링 방법과 비교해서 크게 두 가지 면에서 차이가 있다. 첫째, 블록이 가지는 정보가 실제 설계에 적합한 정도의 다차원적인 형태로 바뀌었다. 둘째, 블록을 조합하기 위한 연결고리가 다차원적인 형태로 바뀌었으며 이 연결고리를 통한 결합은 가변적이어서 더욱 다양한 구조를 제시할 수 있게 된다.

부가적으로, 본 논문에서 제안된 프레임워크의 효용성을 보이기 위하여 사례연구로 기어장치 설계가 수행되었다. 사례연구는 프레임워크의 각 과정들이 어떻게 작동하는지 그리고 어떻게 설계의 해가 얻어지는지를 보여준다.

참고문헌

- (1) Pahl, G. and Beitz, W., 1984, *Engineering Design*, The Design Council.
- (2) Rickel, J. and Porter, B., 1997, "Automated Modeling of Complex Systems to Answer Prediction Questions," *Artificial Intelligence*, Vol.93, Issue 1-2, pp. 201~260.
- (3) Cha, J.H., Lee, I.H. and Kim, J.J., 2000, "Computer-Aided Innovative Mechanical Design Framework," *Proceedings of FAN Symposium '00 in Tokyo*, pp. 405~410.
- (4) Levy, S., 1993, *Artificial Life: A Report from the Frontier Where Computers Meet Biology*, Sterling Lord Literistic Inc.
- (5) Langton, C.G., 1992, "Preface In C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen," *Artificial Life II*, Addison-Wesley, pp. 13~18.
- (6) 양보석, 이윤희, 김동조, 최병근, 2001, "함수 최적화를 위한 인공생명 알고리즘," 대한기계학회 논문집 A, Vol. 25, No. 2, pp. 173~181.
- (7) Calvin, W.H., 1996, *How brains think*, A Science Masters book.
- (8) Williams, G.C., 1998, *The Pony Fish's Glow: And Other Clues to Plan and Purpose in Nature*.
- (9) Park, R.K., Yokoyama, M. and Shinno, H., 1989, "A Basic Study of the Automated Generation of Machine Structures," *JSME(C)*. Vol.55, No. 514, pp. 1556~1561.
- (10) Hoeltzel, D.A. and Chieng, W.H., 1990, "Knowledge-Based Approaches for the Creative Synthesis of Mechanisms," *Computer-Aided Design*, Vol.22, No.1, pp. 57~67.
- (11) Gero, J.S. and Kazakov, V.A., 1995, "Evolving Building Blocks for Design Using Genetic Algorithm," *Advances in Formal Design method for CAD - Proceedings of IFIP95*, pp. 31~50.
- (12) Harmer, Q.J., Weaver, P.M. and Wallace, 1998, K.M. "Design-Led Component Selection," *Computer Aided Design*, Vol. 30, No. 5, pp. 391~405.
- (13) Matshuoka, Y. and Tsukada, Y., 1998, "Design Support System for Structural Forming Using Element Generation Method and GA," *Proceedings of JSME Design and system conference '98*, pp. 265~268.
- (14) Oda, J. and Qu, J.L., 1998, "Optimum Layout Technique for Large Scale Truss Structure Using Cellular Automata," *Proceedings of JSME Design and system conference '98*, pp. 269~272.
- (15) Koza, J.R., Bennett III, F.H., Andre, D. and Keane, M.A., 1999, *Genetic Programming III*, Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- (16) Dudley, D.W., 1984, *Handbook of practical gear design*, McGraw-Hill Book Company.