

새로운 최적화 기법 소개 : 인공면역시스템

양병학[†]

경원대학교 산업정보시스템공학과

Introduction to a Novel Optimization Method : Artificial Immune Systems

Byounggak Yang

Department of Industrial Engineering, Kyungwon University, Seongnam 461-701

Artificial immune systems (AIS) are one of natural computing inspired by the natural immune system. The fault detection, the pattern recognition, the system control and the optimization are major application area of artificial immune systems. This paper gives a concept of artificial immune systems and useful techniques as like the clonal selection, the immune network theory and the negative selection. A concise survey on the optimization problem based on artificial immune systems is generated. The overall performance of artificial immune systems for the optimization problem is discussed.

Keyword: artificial immune systems, clonal selection, negative selection, immune optimization

1. 서론

메타 휴리스틱의 여러 해법들은 생명계의 적응 현상을 컴퓨터 계산 과정에 응용하고 있다. 이미 잘 알려진 인공신경망, 진화 해법, 개미 해법 등이 그 예일 것이다. 또한 최근에는 자연계의 현상을 모방한 프랙탈 기하학(세포 진동자), 인공 생명, DAN 계산, 양자 계산 등이 자연 연산(Natural computing)의 방식으로 연구 되고 있다(De Castro 2006). 본 논문에서는 또 하나의 흐름인 인공면역시스템(Artificial immune system)을 소개하고, 지금까지 수행된 연구 결과를 문헌 조사를 통해 알아보고 최적화 분야에의 적용 가능성에 대하여 살펴보고자 한다.

인공면역시스템은 Hunt and Cooke(1996), Dasgupta(1997), McCoy and Devarajan(1997), Dasgupta(1999), Hofmeyr and Forrest(1999), Hofmeyr(2000)에 의해서 그 아이디어가 제시되었다. 그러나 본격적인 연구는 De Castro and Zurben(1999)의 연구로부터 시작 되었다고 할 수 있다. 그들은 면역시스템을 주목해야 할 이유를 다음과 같이 들고 있다.

- 독창성: 각 개체는 자신만의 면역시스템을 가지고 있다.
 - 외부 침입자 인식: 인체 외부에서 들어온 해로운 물질을 잘 인식하고 제거한다.
 - 변형 탐지: 인체에 처음으로 침입한 병원체에 대하여도 탐지 반응이 가능하다.
 - 분산 탐지: 면역 세포들은 온 몸에 분산되어 있고 중앙 통제를 받지 않는다.
 - 불완전(여유) 탐지: 병원체에 대한 완벽한 인식을 요구하지 않아서 시스템이 유연하다.
 - 학습과 기억: 병원체의 구조에 대해 학습하고 기억하여 재침입에 효과적으로 대응한다.
 - 면역시스템의 위와 같은 특성은 패턴인식문제에서 주어진 패턴을 항원으로 간주하거나 최적화 분야에서 주어진 제약식 또는 목적함수식을 항원이라고 간주하고, 그에 대응하는 패턴 인식 결과 또는 최적해를 적절한 항체라고 정의한다면 면역시스템 자체가 훌륭한 의사결정도구가 될 수 있다는 의미가 된다.
- 인공면역시스템은 기존의 진화 해법이나 신경망 해법처럼

이 연구는 2006년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

[†]연락처 : 양병학 교수, 461-701 경기도 성남시 수정구 복정동 산65 경원대학교 산업정보시스템공학과, Fax : 031-750-5273,

E-mail : byang@kyungwon.ac.kr

2007년 01월 접수, 2회 수정 후 2007년 04월 게재확정.

적용 범위가 다양하고 문제마다 적용하는 방법론도 다양한 것으로 알려져 있다. 본 논문은 제 2장에서는 De Castro and Zurben (1999)의 논문 내용을 중심으로 자연계 면역시스템의 일반적 성질을 설명하고 그로부터 파생된 인공면역시스템의 해법들에 대하여 설명한다. 제 3장에서는 최적화 분야를 중심으로 다양한 분야에서 인공면역시스템을 적용한 논문들을 조사하였다. 제 4장에서 최적화 분야에서 인공면역시스템 도입할 때의 장점과 단점을 토의하고 제 5장에서 결론을 제시한다.

2. 인공면역시스템(Artificial immune systems)

인체의 면역시스템은 대단히 효율적인 항원 인식과 항체 제조 능력을 가지고 있다. 인공면역시스템은 이러한 자연계의 면역시스템을 의사 결정 시스템으로 이용하려는 것이다. 자연계의 면역시스템에 대하여 알아보고 그로부터 파생된 인공면역시스템의 기법에 대하여 알아보자. <그림 1>은 인체의 항체 형성 과정을 설명하고 있다. 먼저 항원(Antigen)이 침입하면 인체는 현존하는 항체(Antibody) 중에서 침입한 항원에 가장 적합한 항체를 선택한다. 선택된 항체들은 항원을 공격하기 위해서 대량으로 복제(cloning)된다. 이 복제단계에서 항원과의 적합성을 높이기 위해 일부 항체는 돌연변이를 일으킨다. 면역시스템이 찾아낸 가장 적합한 항체는 더 이상의 돌연변이 변화를 중지하고 항원에 대항하는 혈장 세포 (Plasma Cell)를 생성하여 항원을 제거한다. 그리고 최종적으로 선정된 항체는 미래를 위하여 기억세포 (Memory Cells)에 저장된다.

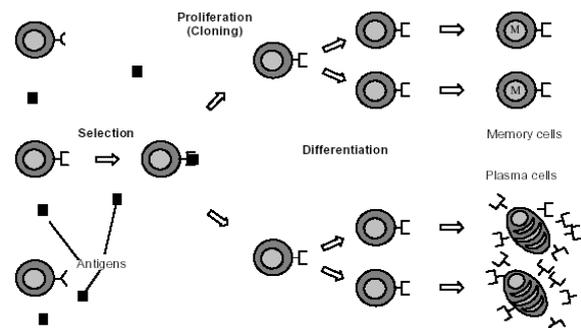


그림 1. 항원에 대응하는 적합한 항체를 선택하고 선택된 항체는 복제된다. 일부 복제된 항체들은 기억 세포에 저장되고 일부 항체들은 더 이상 복제 되지 않는 완성된 항체가 되어 항원을 공격한다(De Castro (1999)의 논문 중 <그림 8>에서 발췌)

2.1 림프 방어력

인체에 항원(antigen)이 침입하면 림프계에서는 두 가지 항체인 B세포와 T세포를 생성한다. B세포는 항원에 대하여 일차적으로 생성되며 주로 체액에서 활동한다. 또한 B세포는 T세포

의 활성화에도 기여를 하는데 T세포는 세포성 면역을 담당하고 있다. 각각의 B세포와 T세포는 특정한 항원에만 반응하는 수용체(receptor)를 표면에 갖게 되며 이를 통해 특정한 항원을 탐색하여 그 항원과 결합하게 된다. 인체에는 1억에서 1000억 개의 서로 다른 항체가 존재하는 것으로 알려져 있다.

2.2 복제선택(clonal selection)

우리 몸에 항원이 들어오면 면역시스템은 적합한 항체를 찾아 이를 복제한다. 이를 복제 선택이라 한다. 이때 각 항체의 복제 비율은 항원-항체간의 적합도(affinity) 비율을 기준으로 한다. 따라서 특정 항원이 들어오면 면역시스템은 스스로 학습에 의하여 항체의 비율과 항체의 총수를 조절하게 된다. 모집단 중에서 항원에 적합한 항체의 수는 증가하게 된다.

또한 특정 항체에 대한 침입 사실은 기억세포(memory cell)의 형태로 저장되어 제 2차 침입 시에는 빠른 시간에 적절한 항체를 생성하는 학습 능력을 가지고 있다. <그림 2>에서 항원 A가 최초로 침입하고 일정기간(lag)동안 면역시스템은 변화가 없었다. 적합한 항체 A를 생성하게 된 면역시스템에서 항체 A의 개체수가 급격히 상승했다. 주목할 점은 전체 항체의 수가 고정된 것이 아니어서 항체 A의 개체수가 증가하면 전체 항체 모집단의 개체수가 증가한다. 항원 A가 제거되면 항체 A의 개체수도 감소하게 된다. 이후에 항원 A와 B가 동시에 침입한 것을 가정하였다. 항체 A의 경우에는 1차 침입 시와 비교하여 반응시간이 단축되었다. 항체 B의 경우에는 1차 침입이어서 일정한 기간이 지나서야 개체수가 증가하였다.

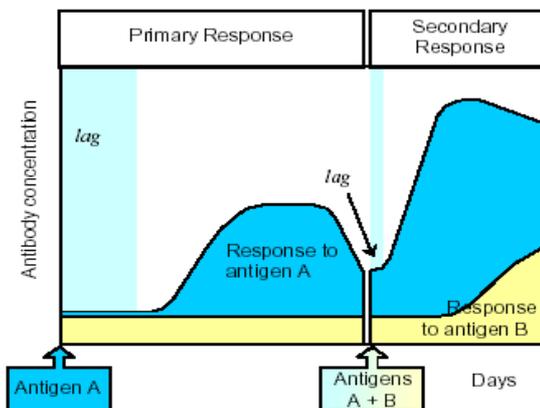


그림 2. 기억세포의 학습과 항체 집단수의 변화. 항원 A와 항원 B에 대응하는 항체들의 개체수를 시간의 흐름에 따라 표시하고 있다. 항체 A의 생성시간이 2차 침입시 단축됨을 알 수 있다(De Castro(1999)의 논문 중 <그림 9>에서 발췌)

2.3 적합도 성숙기(Affinity maturation)

적합도 성숙기란 항체의 적합도를 높이기 위한 항체 염색체

의 돌연변이 과정을 의미한다. 적합도 성숙기는 하이퍼돌연변이(hypermuation)와 수용체 조작(receptor editing)이라는 두 가지로 구성되어 있다. 우수한 항체를 복제만 한다면 항원에 적합한 새로운 항체를 찾을 수 없다. 면역시스템은 항체에 돌연변이를 일으켜서 항체의 다양성을 확보할 수 있으며 이를 통해 적합한 항체를 만들어 낼 수 있다. 하이퍼돌연변이는 복제된 항체 중에서 항원에 대한 적합도가 높은 항체에서는 낮은 돌연변이를 유도하고, 항체와의 적합도가 낮은 항체에 대하여는 높은 돌연변이를 유도하여 항원에 더 적합한 항체를 얻으려는 과정이다. 하이퍼돌연변이의 이러한 특성은 적합한 항체를 찾아주기도 하지만 필요 없는 항체나 유해한 자가 면역 항체를 생산하기도 한다. 이러한 유해 세포들은 파괴 절차(death process)에 의하여 일부분을 제외한 대부분이 제거된다. 수용체 조작이란 유해하다고 판정된 항체를 제거하지 않고 그 항체의 수용체를 완전히 다른 수용체로 만들어내는 과정이다. 수용체 조작은 돌연변이보다 더 적극적인 탐색 방법이다. 이 두 가지 방법에 의해 우수한 항체를 탐색하면서도 일부 열등한 항체를 모집단내에 유지시켜 다양성을 추구할 수 있게 된다. 일부 연구자들은 수용체 조작보다 적극적인 방법으로 백신요법을 도입하였다. 백신요법은 우수하다고 알려진 항체로부터 우수한 형질들을 추출하여 열등한 항체에 주입하여 항체를 개선하는 방법이다. De Castro(1999)는 복제 선택과 적합도 성숙기를 이용한 복제 선택 해법(Clonal selection algorithm)을 제시하였다. 그는 데이터 마이닝, 지식 탐색과 자료 계층화 등에 적용하였다. 복제 선택 과정을 최적화 문제에 따라 설명하면 다음과 같

다. 먼저 항원은 제약식과 목적함수식으로 설정할 수 있다. 문제의 해를 항체라고 정의할 수 있다. 최적해는 항원과의 적합성이 높은 항체이다. 제약식 항원과의 적응성은 제약식을 만족하는지의 여부, 목적함수 항원과의 적합성은 목적함수식의 값으로 정의할 수 있다. 항체를 표현하는 방식은 문제마다 달라질 수 있으나 기본적으로 진화해법에 사용하는 개체 표현식을 사용하면 된다. De Castro(1999)가 제시한 복제 선택 과정은 <그림 3>에 표시되어 있으며 자세한 절차는 다음과 같다.

- 단계1: 기억세포(M)와 현존하는 항체(Pr)들로부터 모집단 (P)를 구성한다.
- 단계2: 모집단 P에서 n개의 우수한 개체(Pn)를 선택한다.
- 단계3: n개의 우수해를 개체별 적합도의 비례하여 복제한다. 임의적으로 복제 모집단(C)의 크기는 증가한다.
- 단계4: 복제 모집단에 개체별 적합도에 따라 하이퍼돌연변이를 수행한다. 성숙된 모집단(C*)을 형성한다.
- 단계5: 성숙된 모집단 C*에서 개선된 개체를 선택하여 기억세포(M)를 구성한다. 모집단P의 일부개체는 C*에서 선택된 개선된 개체로 대체한다.
- 단계6: 모집단의 다양성을 위하여 일부 열등한 d개의 항체들은 모집단에 포함된다.

복제 선택 과정은 진화 해법의 과정과 유사하다. 그 차이점은 제 4장에서 다루기로 한다.

2.4 부정적 선택(Negative selection)

항원에 대한 항체 탐색과정에서 적합한 항체를 증식 시키는 것이 복제 선택이라면 적합하지 않은 유해한 항체들을 제거(deletion) 하거나 무효화(anergy)하는 것을 부정적 선택이라고 한다. 면역시스템은 T면역 세포 중에서 우리 자신의 몸을 공격하는 성향의 T면역 세포들을 찾아서 제거하고, 자신을 공격하는 성향이 약한 T세포들만을 유지시킨다. 부정적 선택에 의해서 항체는 제거되거나 또는 수용체 조작에 의해 새로운 항체로 변경된다. 일부 항체는 복제 선택이나 부정적 선택에 영향을 받지 않는 경우도 존재한다. 이를 복제 무시라고 한다.

Forrest(1994)는 부정적 선택을 기반으로 한 해법을 제시하였다. 그는 이 해법을 결함 탐지 문제에 적용하였다. 먼저 탐지해야할 상태를 자기 자신의 집합 S라고 정의하고, 이 S의 구성요소들 s는 시간에 따라 변할 수 있다. 이 상태가 의미 있게 변했는지 즉 결함이 발생했는지를 탐지하는 것이 목적이다.

- 단계1: 자기 자신의 집합 S를 구성한다.
- 단계2: 임의의 면역 세포의 집합 Ro를 구성한다.
- 단계3: Ro의 모든 항체 r중에서 S에 속한 s와 유사하지 않은 모든 r을 찾아내어 탐지 집합 R을 구성한다. 여기서 유사하지 않다는 것은 항체 r이 자신의 세포 s를 공격하지 않

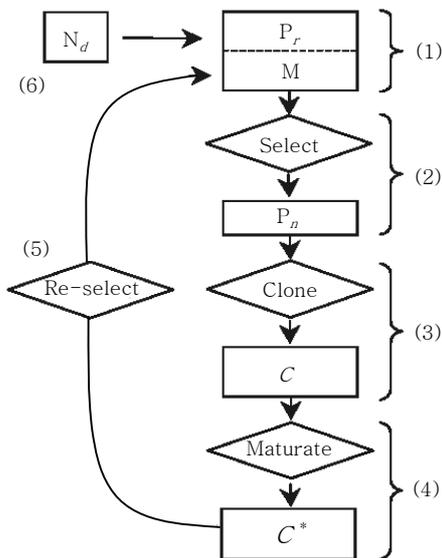


그림 3. 기본적인 복제 선택 해법. 자세한 단계별 설명은 본문에 제시하였다. Pr(현재 항체), M(기억세포), Pn(n개의 우수개체), C(복제 모집단), C*(성숙된 모집단), Nd (열등한 d개의 개체)(De Castro(1999)의 논문 중<그림 35>에서 발췌)

는다는 의미이며 수학적으로는 상보적인 관계로 함수화 할 수 있다.

단계4: 탐지 집합 R의 모든 항체 r이 S의 모든 요소 s와 유사하지 않은지 추적한다.

단계5: 어떤 한 요소 s가 항체 r과 유사하다면 S에 유의한 변화가 발생된 것으로 판정한다. 유의한 변화가 없으면 단계4를 반복한다.

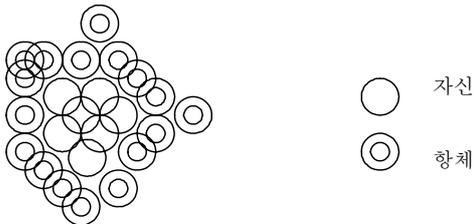


그림 4. 자신으로 표현된 현재의 상황에 중첩되지 않는 항체들을 구했다. 그 항체들은 현재의 상황이 변하는 경우 변형된 자신들과 중첩될 것이다. 이는 변형 탐지에 응용할 수 있다(Garrett(2005)의 논문중 <그림 1>에서 발췌)

<그림 4>에서 가운데 원들의 집합이 자기 자신의 집합 S이다. 랜덤하게 생성된 항체들을 2중원으로 표현했다. 항원과 중첩되는 항체들을 제거하면 항원들을 둘러싼 항체 집합이 구해진다. <그림 4>는 항원을 둘러싼 항체의 집합을 묘사하고 있다. 만약 자기 항원의 일부가 변한다면, 그래서 공간상의 위치가 변한다면 항체의 어느 하나와 중첩이 발생하게 된다. 이를 시스템은 변형으로 간주하게 된다. 이해를 돕기 위해 공간상에 원으로 표시한 항원과 항체는 문제에 따라 수학적 속성들로 표현할 수 있다. De Castro(1999)에 의하면 부정적 선택은 탐지 문제 외에 인공면역시스템에서 항체의 적합도를 높이는 방법으로도 사용될 수 있으며 절차는 다음과 같다.

- 단계1: 항원에 대응하는 초기 항체 집단을 형성한다.
- 단계2: 항체 선별: 집단내의 항체의 적합도를 판정한다.
- 단계3: 적합도 상속기: 하이퍼돌연변이와 수용체 조작을 수행한다.
- 단계4: 항체 개선법: 집단내의 항체의 적합도를 판정한다. 유효한 항체들은 복제를 실시한다. 무효한 항체들은 제거한다.
- 단계5: 종료 기준을 만족하지 못하면 단계 2로 간다.

2.5 면역 네트워크(Immune Network)

Jerne(1974)에 의해서 최초로 제시되었다. 면역시스템은 세포와 분자로 이루어진 네트워크 구조이며 이들은 항원이 없을 때에도 서로 인식하고 있다. 항원이 탐지되면 각 항체들은 그 정보를 소통시키고 항체 사이에 서로 반응하여 대응하고 있다. 침입한 항원은 그에 적합한 항체를 자극하고 자극 받은 항체

는 그에 대응하는 항체를 순차적으로 자극한다. 이런 정보는 전체 네트워크에 전달된다. 항체의 작용으로 항원이 소멸되면 면역 네트워크는 기억 세포를 만들어 내어 항원을 기억한다. 이 시스템은 기존의 신경망 네트워크(neural network)와 유사한 형태로 이해할 수 있다.

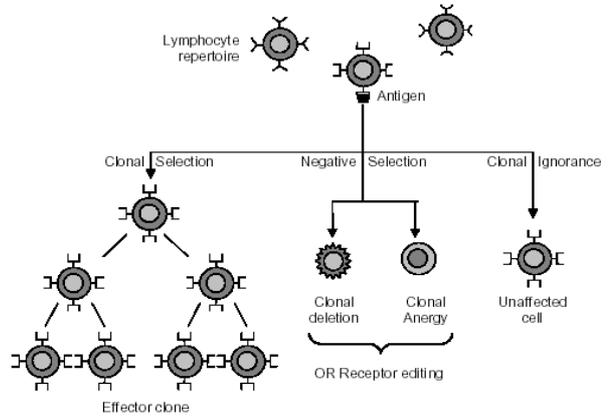


그림 5. 항체 생성 방법. 복제 선택: 면역시스템은 기존의 항체 중에서 항원에 가장 적합한 항체를 찾아내어 복제와 돌연변이를 이용하여 더 적합한 항체를 탐색한다. 부정적 선택: 적합하지 않은 또는 유해한 항체들은 제거되거나 무효화되고 일부는 수정된다. 복제 무시: 항체의 다양성을 위해 일부 항체는 복제 선택이나 부정적 선택을 수행하지 않고 항체 집단에 유지된다(De Castro (1999)의 논문 중 <그림 15>에서 발췌)

2.6 위험 이론(Danger Theory)

면역시스템은 무해한 외부 물질을 공격하지 않고, 유해한 내부 물질(암세포 등)은 공격하는 특성이 있다. 이는 면역시스템이 자기와 다른 물질을 탐지해 공격한다는 기존의 이론으로는 설명되지 않는다. Matzinger(2002)는 이런 현상을 세포들의 위험 탐지 신호에 근거한다는 이론을 제시하였다. 그는 어떤 물질 또는 세포가 위험하면 그 주위의 면역 세포들이 긴장하게 되고 이 신호가 전체 시스템에 전파되어 면역시스템이 작동한다는 이론을 제시하였다. 이 이론에 의하면 면역시스템은 대부분의 사소한 외부 물질에 관심을 보이지 않고 위험한 물질에 집중할 수 있는 효율성을 보여주고 있다. 수많은 메일 중에서 유해한 스팸메일을 탐지하는 문제(Secker 2003)와 같이 수많은 사소한 개체들은 무시하고 유해한 소수 개체들을 탐지하는 분야에 적용하려는 시도가 존재한다. 그러나 이 이론의 약점은 아직 위험 요소를 탐지하고 신호를 전달하는 동작 원리가 분명하게 알려져 있지 않다는 것이다.

2.7 최적화 적용 사례

인공면역 시스템은 TSP(Travelling salesman problem)에 적용한

사례(Endoh *et al.*(1998), Keko *et al.*(2003))를 중심으로 최적화 기법으로서의 인공면역시스템에 대하여 알아보자.

항체는 <그림 6>처럼 진화해법에서 많이 사용하는 경로순서에 의한 벡터를 사용했다. 벡터상의 점들을 따라가면 경로를 구성할 수 있다.

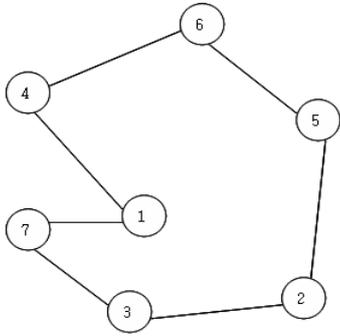


그림 6. TSP문제를 위한 항체와 항체에 의한 실제 경로 예

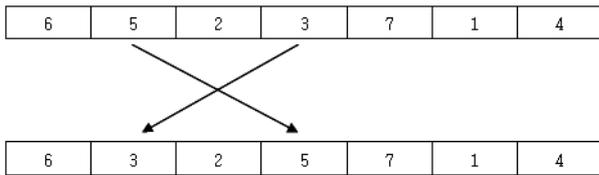


그림 7. 돌연변이에 의한 경로의 수정 예. 점5와 점3의 위치가 경로 상에서 서로 바뀌었다. 돌연변이의 방법은 다양하게 연구할 수 있다.

항체의 재생산: 면역시스템에서는 항체의 재생산에는 돌연변이만 사용한다. 그러나 실제 논문들에서는 진화해법의 교차연산을 사용하는 경우가 다수 있다. 우수한 항체를 선별하여 이를 복제하고 하이퍼돌연변이를 수행한다. 선별된 항체 중 적합도가 낮은 항체에서는 더욱 높은 돌연변이를 수행한다. 돌연변이 작업 후 해의 개선이 있으면 새로운 항체로 받아들

이고 해가 열등해지면 원래의 항체를 유지하거나 돌연변이를 다시 수행시킨다.

기억세포: 인공면역시스템의 항체 탐색 과정 중에서 발견된 항체 중에서 우수한 항체는 기억 세포에 저장된다. 기억 세포에 저장된 항체는 다음 세대에서 항체의 재생산시에 사용된다.

수용체 조작 또는 백신: 열등한 항체들은 적합도를 높이기 위해 수용체 조작 또는 백신처리를 한다. 수용체 조작은 지역 탐색과 같은 방식을 사용할 수 있다. 인공면역시스템에서 사용하는 백신처리를 알아보자. 백신은 우수한 항체에서 추출한 성분이다. 예를 들어 기억 세포에 존재하는 항체들을 분석하여 항체의 적합도를 높여주는 특성을 찾을 수 있다면 이 특성을 다른 열등한 항체에 주입할 수 있다. <그림 8>은 백신을 추출한 예이다. 기억세포에 존재하는 항체들을 분석한 결과 링크(1, 7), (2, 3), (4, 6), (5, 6)이 많이 발생했다고 가정하면 이들을 백신으로 추출하여 저장해둘 수 있다. 이 링크들은 사용하면 경로의 비용을 절약할 것으로 기대되는 링크들이다. 백신을 추출하는 방법은 이외에도 다양하게 존재할 수 있다.

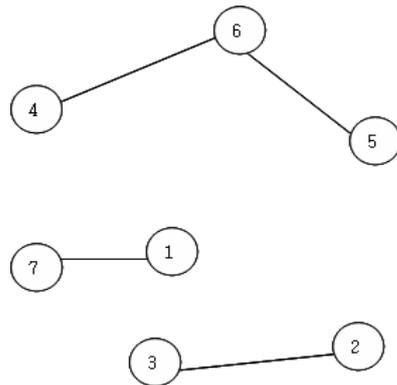


그림 8. 우수한 항체에서 다수로 발견되는 링크들을 백신들로 추출한 예. 링크(1, 7), (2, 3), (4, 6)과 (5, 6)이 백신으로 추출되었다.

만약 열등한 항체를 개선하려고 한다면 <그림 9>처럼 백신 중의 일부 링크를 열등한 항체에 강제로 주입시키고 가능해

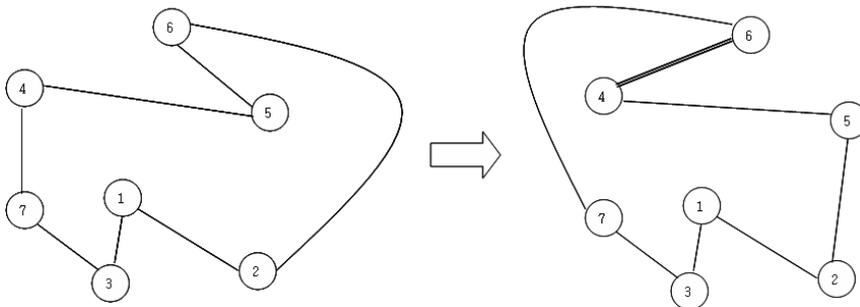


그림 9. 왼쪽의 경로에 백신에서 추출한 링크(4, 6)을 강제로 추가했다. 항체(1, 2, ⑥, 5, 4, 7, 3)에 링크(4, 6)를 추가하기 위해 점6을 점4와 점7사이로 이동하여 항체(1, 2, 5, 4, ⑥, 7, 3)을 구했다. 수정된 항체에 따른 경로가 오른쪽 경로이다.

수정할 수 있다. 즉, 항체(1, 2, ⑥, 5, 4, 7, 3)에 <그림 8>의 백신 중 링크(4, 6)를 선택하여 추가하기로 하자. 그러기 위해서 항체상의 점6을 점4와 점7사이로 이동하여 항체(1, 2, 5, 4, ⑥, 7, 3)을 만들었다. 그 경로가 <그림 9>의 오른쪽 경로이다. 결과적으로 원래의 경로에서 링크(5, 6), (6, 2)와 (4, 7)이 제거되고 링크(4, 6), (6, 7)과 (5, 2)가 추가되었다. 백신 처리 방법은 이 외에도 다양하게 개발할 수 있다.

3. 인공면역시스템의 적용 사례

인공면역시스템을 이용한 연구 결과를 알아보도록 하자. 먼저 기존에 나온 인공면역시스템에 대한 문헌조사 논문을 살펴보면 다음과 같다.

Dasgupta and Atttoh-Okine(1997)이 인공면역시스템이 정립되기 전인 1997년에 발표한 논문으로 면역 네트워크와 부정적 선택을 인공면역시스템으로 분류하였다. 적용대상으로는 바이러스 탐지, 변형 탐지, 결함탐지 등에 사용된 논문들을 다루었다.

Wang *et al.*(2004)은 인공면역시스템을 이용한 최적화 문제에 대해 조사하였다. 인공면역시스템을 유사 유전해법, 면역 네트워크, 복제 선택 세 가지로 분류하고 적용된 사례들을 분석하였다. 2004년에 발표된 연구 결과였지만 대부분의 논문은 2001년 이전의 초기 논문들이었다.

Garrett(2005)는 인공면역시스템의 독창성에 대하여 다음과 같은 3가지 항목으로 평가하였다.

- 해법의 표기 방식의 독창성
- 해법의 표현 방식의 독창성
- 해법의 수행 절차의 독창성

또한 해법의 효과성에 대하여 다음과 같은 3가지 항목으로 평가하였다.

- 해법으로 얻어진 해의 유일성
- 해법으로 얻어진 해의 우수성
- 수행속도

그는 문헌 조사를 통하여 인공면역시스템을 부정적 선택, 복제 선택, 면역 네트워크를 사용한 경우로 분류하고 각각의 경우에 대하여 해법의 독창성과 효과성을 분류하였다. 부정적 선택의 독창성과 효과성은 대체적으로 적절한 것으로 평가했다. 복제 선택은 독창성과 효과성에 대하여 대체적으로 적절하지만 해의 우수성은 면역 네트워크가 더 우수한 것 같다고 분석했다. 그가 분석한 논문들은 최적화문제 외에 결함 탐지, 패턴 인식 등의 경우를 망라한 것이었다. 그리고 해법의 수행 속도에 대하여는 복제선택과 부정적 선택의 경우에 다른 해법보다 더 우수하다는 증거를 찾기 어려운 것으로 평가했다.

Liu *et al.*(2006)은 인공면역시스템을 인공면역네트워크모형과 인공면역해법으로 분류하였다. 적용분야로는 제어, 보안, 결함탐지, 변형 탐지, 최적화로 분류하여 조사하였다. 최적화가 적용 대상의 일부였고 최적화라고 분류된 논문들도 사실상 계층화, 데이터 마이닝을 다루고 있었다.

기존의 인공면역시스템에 대한 문헌조사 논문들도 인공면역시스템을 이해하는데 도움이 되지만 최적화 분야에 적용하기에는 미흡하다고 판단된다. 따라서 최적화 분야에 적용된 인공면역시스템들에 대한 문헌 조사를 하게 되었다.

Chun *et al.*(1997)은 전자기기의 최적 설계문제를 인공면역시스템으로 해결하였다. 항체 재생산 방법으로 돌연변이와 유전해법의 교차 연산을 사용하여 인공면역시스템과 유전해법을 결합시켰다. 일반적으로 인공면역시스템의 특징은 항체의 돌연변이에 의한 해의 탐색인데 그들은 유전해법의 교차연산을 사용하였다. 이러한 방식은 인공면역시스템과 유전해법의 차이점을 불분명하게 하지만 많은 연구자들이 인공면역시스템에 교차 연산을 사용하고 있다. Tazawa *et al.*(1996)은 설비배치 문제에 유전해법과 면역시스템이 결합된 해법을 제시하였다. 그들은 유전해법에 복제선택기법을 추가하였다. 또한 모집단을 몇 개의 부분모집단으로 나누고, 부분모집단을 항체 복제집단으로 간주하였다. 각 부분모집단별로 복제선택을 수행하여 해의 다양성을 유지하려고 했다. 그들의 실험에 의하면 인공면역시스템으로 구한 해가 일반 유전해법으로 구한 해보다 우수했다.

Iceko *et al.*(2003), Keko *et al.*(2004)의 연구에서 인공면역시스템을 다른 방식으로 해석했다. 그들은 경로 문제에서 전통적인 유전해법을 적용했는데 이때 열등한 개체를 항원 내지 바이러스로 간주하였다. 그리고 이 바이러스를 제거하기 위한 조작을 백신이라고 정의하였다. 그들은 우수한 항체들을 분석하여 항체의 적합도가 높은 속성들을 추출하고 이를 백신이라고 정의하였다. 그리고 열등한 항체에 이러한 백신을 투여하고 항체를 수정하였다. 해를 개선한다는 점에서는 지역탐색과 유사하지만 우수한 항체에서 우수한 형질을 백신으로 추출하고 이를 열등한 항체를 개선하는데 사용한 점이 독특했다. 그러나 넓은 의미에서 백신은 수용체 수정의 한 방법으로 보인다.

Endo *et al.*(1998), Sun *et al.*(2004)은 유전해법과 유사한 인공면역시스템으로 TSP를 해결했다. Toma *et al.*(2001, 2003)은 에이전트를 이용한 면역시스템을 TSP문제에 적용하였다. Wang *et al.*(2005)의 연구는 인터넷 통신망의 경로 문제를 다루고 있다. 경로는 트리 형태로 나타나는데 항체는 네트워크의 트리로 구성하였으며 유전해법의 교차와 돌연변이를 사용했다. 인공면역시스템으로 백신 방법을 사용하였다. 그들은 우수한 항체를 분석하지 않고 주어진 통신 네트워크상의 한 점에서 가장 가까운 점을 찾고 그 두 점을 연결하는 링크를 백신으로 정의하였다. 모든 점에서 백신을 찾아 추출한 후 백신들 중 일부를 열등한 항체에 접종해서 열등한 항체를 개선하였다. Dong *et*

al.(2005)은 제약식이 있는 통신망의 최적 경로 문제를 인공면역시스템으로 해결하였다. 모집단내의 개체를 가능해 집단과 불가능해 집단으로 분류하고, 가능해를 항원, 불가능해를 항체라고 정의하였다. 항체에게는 복제 선택과 돌연변이를 실시하여 가능해인 항원으로 전환되도록 시도하였다. 항원과 항체 사이에 교차연산을 실시하여 항원의 적합도를 개선하려고 시도하였다. Wang et al.(2006)은 인터넷의 통신 경로를 최적화 하는 문제에서 인공면역시스템을 적용하였다. Ma et al.(2006)은 시간 제약이 있는 차량 경로문제에 대한 인공면역시스템을 유전 해법과 결합하여 제시하였다. 그들은 일반적인 유전 해법의 절차대로 해를 탐색하면서 인공면역시스템의 백신기능을 사용하였다. 이 논문에서도 한 점과 그 점에서 가장 가깝게 연결된 점으로 구성된 링크를 백신으로 정의하였다.

Hart et al.(1998)은 작업 일정계획을 위한 인공면역시스템을 도입하였다. 일정계획의 해가 항체를 이루도록 하였다. 그들은 몇 개의 라이브러리를 구성하였다. 라이브러리는 몇 개의 유전자로 구성되었는데 각 라이브러리에서 추출된 유전자들로 하나의 해를 구성하였다. 선별된 우수한 항체는 수천 개로 복제되고, 돌연변이를 거쳐서 우수한 항체를 구하는데 사용되었다. 그들은 자연 면역시스템에서 하나의 항체가 여러 가지 항원에 대응할 수 있으며 인공면역시스템에서도 이런 현상이 있을 수 있다고 주장하였다. 그래서 항원의 분산성과 항체의 적용 범위에 대한 실험을 실시하였다.

Engin and Döyen(2004)은 인공면역시스템을 흐름 작업(flow job) 일정계획에 적용하였다. 항체로는 작업의 순서로 구성된 문자열을 사용하였다. 복제 선택을 위하여 각 항체별 적합도를 평가하고 그 적합도의 총합을 구했다. 그리고 복제 선택 확률은 다음의 공식을 이용하였다.

$$\frac{\text{개체의 적합도}}{\text{개체 적합도의 총합}}$$

위의 확률에 의해 우수한 항체는 더 많은 복제를 할 수 있고 모집단의 수를 고정시켰으므로 열등한 항체는 모집단에서 제거되었다. 복제된 항체에 대하여 돌연변이를 수행하고 적합도가 개선되면 돌연변이를 항체로 받아들이고 적합도가 열등해지면 2차 돌연변이를 수행했다. 2차 돌연변이의 결과가 우수하면 받아들이고 열등하면 원래의 복제 항체를 항체로 유지했다. 모집단의 적합도가 증가함에 따라 돌연변이율을 낮춤으로써 하이퍼돌연변이 효과를 보도록 했고, 수용체 조작용을 위해 모집단내에 존재하는 열등한 항체들 중 일부는 제거하고 새로운 항체로 대체했다. Zuo and Fan(2005)은 일정계획문제를 위한 인공면역시스템을 제시하였다. 항체로는 유전 해법처럼 작업 순서를 벡터형태로 이용하였다. 선택된 항체에 돌연변이 작업을 수행하고 돌연변이 항체가 기존보다 우수하면 사용하고, 열등하면 다시 돌연변이를 수행했다. 선택된 항체들에 대하여 유전 해법의 교차연산을 실시하였다. Chai et al.(2006)은 백신 기법과 유전해법을 결합한 인공면역시스템을 일정계획문제에 적

용하였다.

Li et al.(2004)은 다목적계획법을 위한 인공면역시스템을 개발하였다. 해법 절차는 다음과 같다.

단계1: 최초 모집단 C를 형성하다.

단계2: 각 항체의 적합도를 평가한다. 각 항체별 적합도를 기준으로 항체를 복제한다. 복제된 항체에 대하여 돌연변이를 수행한다. 우수한 항체를 선택하여 기억세포집합(M)에 저장한다. 모집단 C에 M을 추가시키다. 모집단의 개체수는 이때 증가한다. 열등한 개체를 선택하여 모집단에서 제거한다. 모집단의 개체수는 감소한다. 랜덤하게 생성된 새로운 항체들을 모집단에 추가한다.

단계3: 종료 기준을 만족할 때까지 단계 2를 반복한다.

Yoo and Hajela(1999)는 다목적계획법에 면역 네트워크 기법을 도입하였다. 다목적계획법을 다루었지만 효용함수를 이용하여 단일함수로 변경한 후 유전해법을 도입한 형태이다. 기본적으로 유전해법을 적용했고 면역 네트워크로 항체 리스트를 생성하였다. Coello and Cartes(2002)는 다목적계획법에 복제 선택기법을 적용하였다. 그들은 모집단을 항원집단과 항체집단으로 분류하였다. 항원집단은 모집단내에서 구해진 파레토 최적해들로 정의했다. 항체에 대하여 복제선택을 실시하여 모집단을 개선하였고 모집단내의 개체들은 항원과 항체로 분류하여 매회 구해진 항원들은 외부기억장치에 저장하였다. Chan et al. (2005)은 다목적 계획법에 인공면역시스템을 적용했다. 개체에 대한 교차, 돌연변이, 하이퍼돌연변이를 수행했다. 해법 진행 중에 상위 50%의 개체를 선택하여 교차연산을 수행하고 그 결과로 구해진 개체들에 대하여 하이퍼돌연변이를 수행했다. 나머지 50%는 먼저 돌연변이를 수행하고 얻어진 개체중 상위 50%의 개체를 선택하여 교차연산을 수행하였다. Tan and Mao(2005)는 다목적계획법에 복제 선택을 기반으로 한 인공면역시스템을 도입하였다. 그들은 각 항체를 상대적으로 평가하기 위해 최우수해의 항체의 적합도(최대적합도)와 가장 열등한 항체의 적합도(최소적합도)를 저장하였다. 그리고 각 개체의 상대적 적합도는 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{\text{개체의 적합도} - \text{최소적합도}}{\text{최대적합도} - \text{최소적합도}}$$

이 상대적 적합도에 의해서 하이퍼돌연변이를 수행하였다.

Panigrahi et al.(2006)은 전력 시스템에서 부하를 분배하는 문제를 비선형계획법으로 수리모형화하고 이를 해결하기 위해 인공면역시스템을 사용하였다. 하이퍼돌연변이를 위하여 돌연변이율을 0.01에서 0.035까지 가변적으로 복제 항체에 적용했는데, 돌연변이율은 복제 항체의 적합도에 반비례하게 배정했다.

Tsukiyama and Fukuda(1997)는 반도체 생산라인을 통제하기 위해 각 생산 라인별로 에이전트를 형성하였다. 이 에이전트

들이 다른 에이전트들과 서로 소통하여 다른 생산라인들과 상호 작용하도록 하였다. 여기서 각 생산 라인의 통제 문제가 항원의 역할을 하고, 각 라인에서 제시한 해가 항체가 된다. 한 라인에서 발생한 문제는 다른 라인에서도 유사하게 발생함으로 각 라인에서 구해진 항체들은 에이전트를 통해서 저장되고 교환되어 필요한 라인에서 쉽게 사용할 수 있게 했다.

Ding *et al.*(2003)은 공급사슬에서 각 기업의 요구 상황을 처리하는 인공지능시스템을 도입하였다. 이들은 생체단위라는 개념을 도입했다. 이는 기존의 항체에 해당하는 개념이다. 그리고 이 생체 단위가 소규모로 연결된 것을 상위 단위라고 했다. 상위 단위들은 다시 서로 간에 연결되어 있다. 네트워크상에 모든 생체 단위가 직접 연결되지 않고 이와 같이 지역적으로 소규모로 연결되고 지역 그룹이 상위에서 연결되어 전체적으로 연결된 형태이다. 사용자의 요구 사항은 일차적으로 생체단위에서 처리한다. 만약 생체 단위가 처리하지 못하면 그 요구 사항은 상위 단위로 넘겨지고 여기서 처리하도록 시도한다. 여기서도 처리 되지 않으면 전체 네트워크로 처리사항을 위임하도록 구성하였다. 그들은 이 구조를 공급사슬상의 제품 구매 선택 모형에 적용하였다. 한 기업이 요구하는 제품에 대해 공급 가능한 하청업자와 공급가격에 대한 정보가 생체단위의 형태로 존재한다. 공급사슬상에 연결된 하청업자와 구매자의 관계가 상위 단위를 이루고 있다. 하청업자가 공급하는 제품의 가격은 시간에 따라 변하게 된다. 이런 변화는 생체 단위에서 처리한다. 또한 사용자가 요구한 제품에 대한 정보 역시 생체 단위가 대응한다. 만약 생체 단위가 처리하지 못하면 이것은 상위 단위에서 대응하도록 했다. 각 생체 단위는 최근의 환경 변화에 대한 최적해를 탐색하여 유지하고, 이 최적해에 대한 정보를 이웃한 생체 단위에 제공함으로 시스템은 언제나 이웃 생체 단위의 정보만을 참조하여 최적 의사 결정을 할 수

있도록 유도하였다.

Fang *et al.*(2006)은 에이전트를 기반으로 한 인공지능시스템을 작업흐름(Work flow) 시스템에 도입하였다. 그들은 시스템 내에 복제 통제 모듈(clonal control module)을 구축하였다. 이 모듈은 Nag라는 에이전트가 사용자의 요구 사항을 처리하도록 하였다. 자체적으로 처리하지 못한 상황은 지식 베이스에 저장하고 중앙 처리 모듈에 처리를 위탁한다. Sag라고 불리는 에이전트들은 Nag에이전트가 보내온 처리 요구사항에 대하여 이웃한 Sag들과 통신하면서 적절한 대응책을 제시한다. 여기서 Nag는 항원의 역할을 담당하며, Sag는 면역시스템에서 항체를 형성하는 기관에 해당한다.

이상에서 열거한 논문 중 Tsukiyama and Fukuda(1997), Ding *et al.*(2003)과 Fang *et al.*(2006)의 연구 결과는 인공지능시스템의 분산성을 잘 보여준다. 방대한 조직에서 발생하는 유사한 문제에 대한 해결책을 서로 공유하거나 분산된 의사 결정을 하면서 전체의 최적화를 이루어야 하는 경우에 인공지능시스템을 적용하였다.

Kumar *et al.*(2006)은 Maslow의 인간욕구 단계설을 인공지능시스템과 연결하였다. Maslow가 제시한 인간의 욕구는 잘 알려진 대로, 생리적 욕구, 안전의 욕구, 사회적 욕구, 성장의 욕구, 자아실현의 욕구로 발전한다. 그들은 인간욕구단계를 해의 최적해로의 접근욕구로 해석하였다. 즉, 단계별로 최적해로 접근하려는 욕구가 차이가 남을 설명하였다. 그들에 의하면 생리적 욕구단계란 주어진 문제에 따라 초기 항체를 형성하는 수준을 의미했다. 안전의 욕구단계에서는 항원에 대한 항체들의 적합도를 평가하는 단계를 의미한다. 사회적 욕구단계에서는 항체간의 관계를 정립하기위해서 우수한 항체들이 선택되고 복제된다. 성장 욕구 단계에서는 하이퍼돌연변이를 수행하여 항체들을 성장시키다. 성숙된 안전 욕구 단계를 형성하기

표 1. 최적화 분야에 적용된 인공지능시스템 기법 분류. 인공지능시스템을 적용한 논문 중 최적화 분야에 한정했다. 복합 유전 해법이란 유전해법을 중심으로 인공지능시스템의 기법을 이용한 경우이다.

	복합 유전 해법	복제 선택	면역 네트워크	위험이론
다목적 계획법	Yoo and Hajela(1999)	Li <i>et al.</i> (2004), Chan <i>et al.</i> (2005) Coello and Cartes(2002) Tan and Mao(2005)		
일정계획	Hart <i>et al.</i> (1998), Zuo and Fan(2005) Chai <i>et al.</i> (2006)	Engin and Döyen(2004) Kumar <i>et al.</i> (2006)	Tsukiyama and Fukuda(1997)	
경로문제	Iceko <i>et al.</i> (2003), Keko <i>et al.</i> (2004) Wang <i>et al.</i> (2005), Ma <i>et al.</i> (2006) Endo <i>et al.</i> (1998), Sun <i>et al.</i> (2004)	Dong <i>et al.</i> (2005), Wang <i>et al.</i> (2006)	Toma <i>et al.</i> (2001, 2003)	
공급사슬			Ding <i>et al.</i> (2003)	
최적설계	Chun <i>et al.</i> (1997), Tazawa <i>et al.</i> (1996)			
비선형계획법		Panigrahi <i>et al.</i> (2006)		
워크플로			Fang <i>et al.</i> (2006)	
탐지		Gaspar and Collard(2000) Forrest(1999)		Secker(2003)

위해서 우수한 일부 항체로 기억 세포를 형성한다. 마지막으로 자아실현 요구 단계에서는 열등한 항체들을 선택하여 수용체를 수정하였다. 세대가 진행됨에 따라 자아 실연의 욕구가 강해지도록 하였다. 그들의 이론은 해법 진행 과정에 따라 해의 수렴 속도에 대한 욕구를 달리해야 한다는 점을 강조한 것으로 평가 받을 만하다.

Gaspar and Collard(2000) 시간에 종속적인 패턴 추적 문제에 인공면역시스템을 적용하였다. 그들은 항체를 개선하기 위해 평가, 복제 선택, 모집(recruitment) 단계를 도입하였다. 복제 선택에서는 k토너먼트방법이 적용되었으며, 돌연변이가 사용되었다. 특히 시간에 종속적으로 패턴이 변하는 경우에 현재의 패턴이 과거에 이미 탐색한 패턴일 수 있다. 인공면역시스템의 기억 기능을 사용하여 이미 탐색되었던 패턴에 대하여는 빠르게 결과를 제시할 수 있었다.

4. 인공면역시스템 분석

진화 해법에 익숙한 연구자들은 인공면역시스템의 복제 선택이나 부정적 선택이 진화 해법과 유사함을 알 수 있다. 특히 개체를 표현하는 방식에서 기존의 진화 해법과 차이가 없는 논문들을 많이 볼 수 있으며 진화 해법의 특징인 교차 연산을 사용하는 논문도 발견 할 수 있었다. 본 장에서는 진화 해법과 인공면역시스템 간의 차이점과 유사점에 대하여 정리하였다.

개체 표현: 개체 표현은 기본적으로 진화 해법과 유사하다. 진화해법에서는 이진문자열과 실수 벡터 등이 사용된다. 인공면역시스템의 항체 역시 이진문자열, 실수, 정수와 문자열이 사용되며 DNA서열을 사용한 경우도 존재한다. 인공면역시스템에서 항체를 문제의 후보해, 항원을 목적함수식과 제약식으로 정의하면 된다. 그러나 문제에 따라서는 항원을 가능해로, 항체를 비가능해로 정의하거나, 다목적계획법의 경우에 항원을 파레토 최적해 항체를 후보해로 정의 하는 경우도 가능하다.

모집단: 진화해법에서 사용하는 모집단(population)과 유사한 저장소(repertoires)라는 용어를 사용하지만 많은 논문들에서는 모집단이란 용어를 혼용하고 있다. 모집단의 크기는 해법 진

행 중에 변할 수 있다. 기억세포와 모집단에 속한 항체 중 우수한 항체는 자가 복제를 통해서 수가 증가하고, 나머지 항체도 일시적으로 제거하지 않아서 모집단의 크기가 증가하게 된다. 항체성숙과정에서 우수한 항체만 살아남게 되어 모집단의 크기는 원래의 크기로 복구되는 과정을 반복한다.

복제 선택: 우수한 형질의 개체를 자기 복제하며 모집단의 수를 일시적으로 증가시키기도 한다. 교차연산에 비해 단순하고 우수한 형질의 개체를 확장할 수 있다. 복제 후 돌연변이 과정을 통해서 다양성을 추구한다.

하이퍼돌연변이: 복제 후 즉시 시행하는 돌연변이율을 개체의 적합도에 반비례하게 적용한다. 우수한 개체를 유지시키고 열등한 개체에서 더 많은 탐색이 일어나도록 한다. 돌연변이로 열등한 항체가 발생할 확률이 있음으로 돌연변이 후 평가를 통해 우수한 개체만을 선택하여 돌연변이의 항체 개선 효과를 높이도록 하였다.

기억 세포: 우수한 개체를 기억하고 재사용한다. 시간적으로 고정된 정적인 문제에서도 유용한 접근이지만 동적인 환경에서 적용하면 유용한 접근법이다. 차량배차문제와 같이 일정한 네트워크 구조에서 주문의 패턴만 변하는 경우에 과거의 일정계획을 기억 세포에 저장하여 이용하는 것은 매우 효율적인 방법으로 기대된다.

부정적 선택: 진화해법에서는 별 관심을 두지 않았던 열등한 개체들을 적극적으로 활용하거나 조작하도록 한다. 항체에 대한 재생산이나 해의 진화 등에 관여하지 않는다. 부정적 선택 기법은 진화 모형보다는 학습 모형에 더 근접한 기법이다.

분산성: 항체의 분산적인 성질을 이용하여 에이전트를 형성하고, 이 에이전트들이 서로 소통하여 전체 문제를 해결하는 분산적인 의사결정에 사용될 수 있다.

백신: 열등한 개체에 대한 조작을 허용한다. 우수한 개체들의 공통적인 특성을 추출해서 열등한 개체를 보충하는데 사용한다.

인공면역시스템과 진화해법과의 차이를 <표 2>에 제시하였다. TSP에 인공면역시스템을 적용한 네 가지 사례들을 분석해보면 인공면역시스템의 해가 우수하다고 보고한 논문은 Endo *et al.*(1998), Sun *et al.*(2004), Toma *et al.*(2001, 2003)이었다. 이

표 2. 진화해법과 인공면역시스템의 비교

	인공면역시스템	진화해법
해의 표현	속성 문자열(이진, 실수, 문자, DNA)	염색체 문자열(이진, 실수, 문자)
모집단	크기가 변형되는 저장소	일반적으로 크기가 고정된 모집단
개체의 주요 개선 방법	진화(하이퍼돌연변이)와 학습(부정적 선택, 면역네트워크)	진화(돌연변이, 교차)
개체의 부가적 개선 방법	수용체 조작과 백신	지역 탐색
개체간의 관계	면역네트워크에서의 항체간의 연결	교차연산
개체의 평가	적합도 함수와 인식 함수(부정적 선택)	적합도 함수
우수개체의 활용	기억 세포	엘리트 리스트

중 연산 속도에서도 우수했다고 보고된 논문은 Toma *et al.* (2003) 한 편이었다. 그들의 논문에 의하면 인공면역시스템이 진화해법보다는 빠르고 절약기법(Saving heuristic)보다는 느린 것으로 보고하였다. 인공면역시스템의 해법으로서의 효과성, 즉 찾아낸 해의 우수성과 해법 수행에 걸리는 시간에 대한 Garrett(2005)의 연구에 의하면 해의 우수성에 대하여는 조사된 논문들 중 우수한 결과가 나오는 경우가 많이 존재하였다. 그러나 모든 문제에서 인공면역시스템의 해가 기존의 방법보다 더 우수하다는 것은 아니었다. 연산속도의 우수성에 대하여는 부정적 선택이나 복제선택기법의 경우 명백하게 우수하다고 판정하지 못했다. 면역네트워크에 대하여는 연산속도가 우수한 것으로 보고하였다. 최적화 문제에서 인공면역시스템을 적용하기 위해서는 문제에 적합한 인공면역시스템을 설계하는 것이 중요하다고 판단된다.

면역시스템의 여러 가지 기법(복제선택, 기억세포, 부정적 선택, 수용체 조작, 백신, 면역네트워크 등)들을 진화해법, 신경망이나 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)과 같은 기존의 메타 휴리스틱 방법들과 혼성하여 사용한 논문들이 많이 존재한다. 이와 같은 접근법이 나온 이유는 기존의 메타휴리스틱의 장점과 인공면역시스템의 장점을 공유하기 위한 것으로 보인다. 자연계 면역시스템에 대한 성격이 아직도 미지에 싸여 있어서 새로운 연구 결과가 나오고 있다. 이러한 새로운 생물학적 연구 결과가 인공면역시스템의 효과성을 높여 줄 것이다. 인공면역시스템에서 면역네트워크는 에이전트를 이용한 분산적 의사결정 구조를 가지고 있다. 공급사슬관리와 같이 분산적인 시스템에서 전체의 효율을 최적화해야하는 문제에 면역네트워크의 분산적인 성격을 이용한다면 효과가 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

자연계를 모방하려는 해법의 연구 방향은 다양하다. 본 연구에서는 그 중에 하나인 인공면역시스템을 소개하고 있다. 먼저 1999년에 De Castro and Zurben이 발표한 인공면역시스템에 대한 기본 이론을 중심으로 자연면역시스템과 거기에서 파생된 인공면역시스템의 여러 가지 기법을 소개하였다. 다음으로 인공면역시스템이 적용된 여러 분야 중에서 최적화 분야에 적용된 논문들에 대한 문헌 조사 결과를 제시하고 인공면역시스템과 유사한 진화 해법과의 차이점과 인공면역시스템의 장단점에 대하여 정리하였다.

참고문헌

Chai, Y., Zhou, Y., Chen, Y., and Zhu, B. (2006), An Immune-Genetic Algorithm for Dynamic Job-Shop Scheduling, *Proc. of the Sixth World Congress*

on Intelligent Control and Automation, 2, 7338-7342.

Chan, F. T. S., Swarnkar, S., and Tiwari, M. K. (2005), Fuzzy goal-programming model with an artificial immune system (AIS) approach for a machine tool selection and operation allocation problem in a flexible manufacturing system, *International Journal of Production Research*, 43(19), 4147-4163.

Chun, J. S., Kim, M. K., and Jung, H. K. (1997), Shape Optimization of electromagnetic devices using Immune Algorithm, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 33(2), 1876-1879.

Coello, C. A. C. and Cartes, N. C. (2002), An approach to solve multiobjective optimization problems based on an artificial immune system, *Proc. of the First International Conference on Artificial Immune Systems*, 212-221.

Dasgupta, D. (1997), Artificial Neural Networks and Artificial Immune Systems: Similarities and Differences, *Proc. of the IEEE SMC*, 1, 873-878.

Dasgupta, D. and Attoh-Okine, N. (1997), Immunity-Based Systems: A Survey, *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 369-374.

Dasgupta, D. (1999), Immunity-Based Intrusion Detection System: A General Framework, *Proc. of the 22nd NISSC*.

De Castro, L. N. and Von Zuben, F. J. (1999), Artificial immune systems, Part 1, Basic theory and applications, Technical Report, TR-DCA 01/99.

De Castro, L. N. (2006), Fundamentals of natural computing: an overview, *Physics of Life Reviews*, In Press, Corrected Proof.

Ding, Y., Ren, L., Zhang, X., Gao, L., and Zhou, B. (2003), Mutual-coupled immune network-based emergent computation model for supply chain formation, *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 504-509.

Dong, W., Li, Y., and Qin, J. (2005), A New Immune Optimization Algorithm for Delay-constrained Multicast Routing Problem, *Proc. of International Conference on Neural Networks and Brain*, 1, 67-72.

Endo, S., Toma, N., and Yamada, K. (1998), Immune algorithm for n-TSP, *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 3844-3849.

Engin, O. and Döylen, A. (2004), A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system, *Future Generation Computer Systems*, 20, 1083-1095.

Fang, W., Wang, Q., Guan, T., Liu, J., and Wang, X. (2006), Artificial Immune System based Agent in Workflow Management Systems, *Proc. of the 10th International Conference on Computer Supported Cooperative Work*, 1-6.

Forrest, S., Perelson, A., Allen, L., and Cherukuri, R. (1994), Self-nonsel self discrimination in a computer, *Proc. of the IEEE Symposium on Research in Security and Privacy*, 202-212.

Garrett, S. M. (2005), How Do We Evaluate Artificial Immune Systems?, *Evolutionary Computation*, 13(2), 145-178.

Gaspar, A. and Collard, P. (2000), Two models of immunization for time dependent optimization, *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 113-118.

Hart, E., Ross, P., and Nelson, J. (1998), Producing robust schedules via an artificial immune system, *Proc. of the ICEC 1998*, 464-469.

Hofmeyr S. A. and Forrest, S. (1999), Immunity by Design: An Artificial Immune System, *Proc. of GECCO 1999*, 1289-1296.

Hofmeyr, S. A. (2000), An Interpretative Introduction to the Immune System, In *Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems*, (Eds.) I. Cohen & L. A. Segel, Oxford University Press.

Hunt, J. E. and Cooke, D. E. (1996), Learning Using an Artificial Immune System, *Journal of Network and Computer Applications*, 19, 189-212.

Iceko, H., Skok, M., and Skrlac, D. (2003), Artificial Immune Systems in Solving Routing Problems, *Proc. of EUROCON 2003*, 62-66.

Jerne, N. K. (1974), Towards a Network Theory of the Immune System, *Ann. Immunol. (Inst. Pasteur)* 125C, 373-389.

Keko, H., Skok, M., and Skrlac, D. (2004), Solving the Distribution Network

- Routing Problem with Artificial Immune Systems, *Proc. of IEEE MELECON 2004*.
- Kumar, A., Prakash, A., Shankar, R., and Tiwari, M. K. (2006), Psycho-Clonal algorithm based approach to solve continuous flow shop scheduling problem, *Expert Systems with Applications*, 31, 504 - 514
- Li, C., Zhu, Y., and Mao, Z. (2004), A Novel Artificial Immune Algorithm Applied to Solve Optimization Problems, *Proc. of 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 232-237
- Liu, F., Wang, Q., and Gao, X. (2006), Survey of Artificial Immune System, *Proc. of 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics 2006*. 1-5
- Ma, J., Zou, H., Gao, L. and Li, D. (2006), Immune Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows, *Proc. of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 3465-3469
- Matzinger, P. (2002), The Danger Model: A renewed sense of self, *Science*, 296(5566), 301-305.
- McCoy, D. F. and Devaralan, V. (1997), Artificial Immune Systems and Aerial Image Segmentation, *Proc. of the SMC 1997*, 867-872.
- Mori, M., Tsukiyama, M., and Fukuda, T. (1997), Artificial immunity based management system for a semiconductor production line, *Proc. of the IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference 1997*, 851-855
- Panigrahi, B. K., Yadav, S. R., Agrawal, S., and Tiwari, M. K. (2006), A clonal algorithm to solve economic load dispatch, *Electric Power Systems Research*, In Press, Corrected Proof.
- Secker, A., Freitas, A. A., and Timmis, J. (2003), A danger theory inspired approach to web mining, *Proc. of 2nd International Conference in Artificial Immune Systems 2003*, 156-167.
- Sun, W. D., Xu, X. S., Dai, H. W., Tang, Z., and Tamura, H. (2004), An immune optimization algorithm for TSP problem, *Proc. of SICE 2004 Annual Conference* 710-715.
- Tan, G. and Mao, Z. (2005), Study on Pareto front of multi-objective optimization using immune algorithm, *Proc of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 5, 2923-2928
- Tazawa, I., Koakutsu, S., and Hirata, H. (1996), An immunity based genetic algorithm and its application to the VLSI floorplan design problem, *Proc. of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 417-421.
- Toma, N., Endo, S., Yamada, K., and Miyagi, H. (2001), An immune optimization inspired by biological immune cell-cooperation for division- and-labor problem, *Proc. of Fourth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications*, 153-157.
- Toma, N., Endo, S., and Yamada, K. (2003), An immune co-evolutionary algorithm for n-th agent's traveling salesman problem, *Proc. of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 3, 1503-1508.
- Wang, X., Gao, X. Z., and Ovaska, S. J. (2004), Artificial immune optimization methods and applications-a survey, *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4, 3415-3420.
- Wang, X, Chen, M., Cheng, H., Huang, M., and Das S. K. (2005), Flexible QoS Multicast Routing Based on Artificial Immune Algorithm in IP/DWDM Optical Internet, *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, 3, 1631-1635.
- Wang J., Qin, J. and Kang L. (2006), A new dynamic multicast routing model and its immune optimization algorithm in integrated network, *Proc. of International Workshop on Networking, Architecture, and Storages*, 53-54.
- Yoo J. and Hajela, P. (1999), Immune network simulations in multicriterion design, *Structural Optimization*, 18(2), 85-94.
- Zuo, X. and Fan, Y. (2005), Solving the job shop scheduling problem by an immune algorithm, *Proc. of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 6, 3282-3287.



양병학

서울대학교 산업공학과 학사

서울대학교 산업공학과 석사

서울대학교 산업공학과 박사

현재: 경원대학교 산업정보시스템공학과 교수

관심분야: 물류관리, SCM, 메타 휴리스틱