

## 면역시스템에 기반한 적응제어기 설계에 관한 연구

## A Design of Adaptive Controller based on Immune System

이 영 진\*, 이 권 순

(Young Jin Lee and Kwon Soon Lee)

**Abstract :** In this paper, we proposed two types of adaptive control mechanism which is named HIA(Humoral Immune Algorithm) PID and CMIA(Cell-Mediated Immune Algorithm) controller based on biological immune system under engineering point of view. The HIA PID which has real time control scheme is focused on the humoral immunity and the latter which has the self-tuning mechanism is focused on the T-cell regulated immune response. To verify the performance of the proposed controller, some experiments for the control of AGV which is used for the port automation to carry container without human are performed. The experimental results for the control of steering and speed of an AGV system illustrate the effectiveness of the proposed control scheme. Moreover, in that results, proposed controllers have better performance than other conventional PID controller and intelligent control method which is the NN(neural network) PID controller.

**Keywords :** immune system, cell-mediated immune algorithm(CMIA), humoral immune algorithm(HIA), autonomous guided vehicle(AGV), neural network identifier(NNI), PID control

## I. 서론

공학에서 어떤 시스템을 제어하기 위하여 제어기를 설계함에 있어서 시스템의 응답이 최적이 되도록 제어기 파라미터를 잘 조정하는 것이 요구된다. 이를 해결할 수 있는 종래의 방법은 그 성능을 수학적으로 직접 분석 및 평가하여 구하는 것이다. 제어 시스템의 최적화 설계에 이용된 종래의 기법은 크게 구배법(Gradient Method)과 직접법(Direct Method)이 많이 이용되었대[1]. 그러나, 이들 두 가지 기법은 모두 초기값 선정과 전역해(Global Solution)에 대한 수렴성 보장에 어려움을 내포하고 있다.

한편, 산업이 고도로 발달하여 시스템이 더욱 복잡해지고 다양한 운전 조건이 요구될 경우, 종래의 정량적인 기법만으로는 해결하기 어렵게 되었다. 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위하여 생체 정보처리 시스템(Biological Information Processing System)의 적응성, 진화 및 학습 능력을 활용한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm; GA), 진화 전략(Evolutionary Strategy; ES), 신경회로망(Neural Network) 등과 같은 지능형 제어기법 등이 많이 연구되고 있다. 면역 시스템(Immune System)도 또 다른 형태의 생체 정보처리 시스템으로서 우수한 정보처리 구조를 가지고 있음에도 불구하고 공학적 응용 사례가 그리 많지 않은 실정이다.

특히, 면역 시스템은 암(Cancer) 혹은 후천성 면역 결핍증(AIDS) 등과 같이 생명을 위협하는 각종 질병에 대하여 인체를 방어하고, 질병 감염에 대하여 치료하는 비선형 적응 제어의 좋은 예가 되고 있다는 연구 결과가 보고되고 있다[2-4]. Jerne의 척추동물 내부에 있는 항체의 규제에 대한 가설이 정립되면서 면역 시스템의 인식(Recognition), 기억

(Memory), 적응성(Adaptability)을 모델링(Modeling)하여 비선형 파라미터 최적화를 비롯한 각종 제어기 설계 등 그 응용 분야가 점차 많아지고 있어 그 활용 가치가 더욱 높다고 할 수 있다[5-9].

생체의 면역 시스템은 생체 내에 투입되는 항원(Antigen) 즉, 박테리아(Bacteria) 혹은 병원균 세포(Germ Cell)와 같은 외부 침투 물질을 인식하여 이를 방어함과 동시에 생체 내부의 안정된 상태를 스스로 조절해 나가는 진화적 생체 방어 시스템으로 알려져 있다[10]. 뿐만 아니라, 유전자 교배 및 번식 등을 통한 진화적 학습, 기억 및 인식 등의 능력을 함께 갖추고 있어 이를 활용한 공학적 응용 사례가 점차 많아지고 있으며, 최근에는 해의 탐색 능력이나 수렴 특성면에서 GA보다 그 성능이 우수하다는 연구결과도 보고되고 있어 그 활용가치가 더욱 높다고 할 수 있다[7].

이와 같은 특징을 갖는 면역 시스템의 연구동향은 크게 체액성 면역 반응과 세포성 면역 반응으로 나누어 생각할 수 있다. 먼저, 항원(Antigen) · 항체(Antibody) 반응에 바탕을 둔 체액성 면역 반응을 이용한 응용사례는 Jerne의 척추동물 내부에 있는 항체의 규제 가설을 바탕으로 한 인공 면역망(Artificial Immune Network)이 그 대표적인 예이며, 로봇의 행동 제어 등에 이용되고 있다[11].

또한, Jerne의 농도식에 기초한 항원과 항체간의 친화성(Affinity)과 클론 생성(Clonal Expansion)을 위한 유전자의 다양성(Diversity)을 바탕으로 한 HIA(humoral immune algorithm)도 개발되어 전력계통의 경제 급전문제, 순회 판매원 문제(Traveling Salesman Problem; TSP), 전자석의 최적 설계 등과 같은 최적화 문제에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있다[6-8]. 특히, 최근 전홍태, 이권순 등은 HIA를 이용한 실시간 제어기법을 소개하는 등 국내에서도 다양한 연구가 진행되고 있다[12,13].

체액성 면역 반응이 갖는 또 하나의 중요한 기능은 항체의 항원 인식을 통한 항원 · 항체 식별 기능으로서 Gilbert와

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 9. 20., 채택확정 : 2004. 10. 26.

이영진 : 항공기능대학 전기계측제어과(airlee@kopo.or.kr)

이권순 : 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부(kslee@daunet.donga.ac.kr)

※ 본 논문은 한국과학기술부(MOST)의 국가지정 연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

Routen은 영상 인식에 이를 적용하였으며, 이 외에도 Famer와 Forrest는 잡음이 있는 환경에서 공통 패턴을 감지하는 패턴 인식에 관해 보고하였다[14-16]. 더욱이 Hoffman은 면역 시스템과 신경 시스템을 비교하여 시스템의 동작 레벨에서 두 시스템의 많은 유사성을 보여 주면서 면역 시스템과 유사한 기능인 자극-반응 동작을 생성할 수 있는 대칭성 신경 회로망 모델을 가정하였다[17]. 이 외에도 Castro 및 Dasguptar의 개관 문헌을 참조하면 면역 시스템의 다양한 응용 분야를 접할 수 있다[4,18].

그리고, 또 다른 면역 시스템의 조정 메카니즘은 T 세포(T Cell)에 의한 세포성 면역 반응으로서, T 세포가 항원에 직접 반응하여 항원을 직접 제거하는 기능과 다른 세포의 생성을 촉진(Help) 및 억제(Suppression)하는 과정을 모델링하여 제어 분야에 응용하고 있다. 이에 관한 연구로는 Takahashi등이 세포성 면역 반응에 대한 메카니즘을 부분적으로 응용하여 피드백 제어기 설계에 적용한 사례가 보고되었으며, 최근 국내에서도 이권순 등이 T 세포에 의한 세포성 면역 반응의 면역성과 적응성을 알고리즘화하여 제어 기법에 응용한 연구를 수행하고 있다[13,19-21].

이러한 연구의 일환으로써, 본 연구에서는 면역 시스템의 특징인 확률적 인식(Probabilistic Recognition), 학습과 기억 능력, 그리고 면역 네트워크(Immune Network)의 조절 이론을 공학적인 관점에서 적용하여, 외부 환경에 강인하면서도 적응적으로 대응할 수 있는 새로운 제어 시스템을 개발하고자 한다. 즉, 면역 시스템이 가지고 있는 두 가지 특이적(Specific) 면역 반응인 체액성 면역 반응과 세포성 면역 반응에 초점을 두고 공학적 관점에서 제어 시스템으로 구성해 보고자 한다.

먼저, HIA는 항원·항체 반응에 기초를 둔 최적화 알고리즘으로서 적응성과 최적화 능력을 보유한 알고리즘으로 우수성을 인정받고 있다. 그러나, 여전히 종래의 최적화 기법과 같이 제어 환경 변화에 따른 재진화 과정이 필요하다는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이 문제점을 해결하기 위하여 HIA를 PID 제어기 파라미터 온라인(On-line) 미세 조정(Fine Tuning) 구조로 설계함으로써 종래의 동조기법에 비해 폭넓은 동작 범위를 가지고, 파라미터 변동 및 주위 외란에 강인할 수 있는 적응형 제어기를 제안하고자 한다.

또한, 세포성 면역 반응은 T 세포의 자기 조절 과정을 통한 면역 기능의 촉진·억제 및 항원에 대한 직접적인 공격에 관한 반응이다. 즉, T 세포는 촉진·억제, 파괴의 기능을 하는 세 가지 세포로 구성되어 외부 침입물질에 대하여 빠르게 반응하고, 내부 면역체계를 보다 빠르게 안정화시키는 기능을 독립적으로 함께 수행할 수 있다는 특성면에서 면역 시스템의 또 하나의 피드백 메카니즘이라 할 수 있다 [3,13,19]. 본 연구에서는 이러한 면역 시스템의 조절과정을 수학적으로 모델링하여 공학 분야의 제어 시스템으로 구성하였다.

설계된 제어 시스템 성능의 우수성과 실현 가능성을 평가하기 위하여 AGV(autonomous Guided Vehicle)의 주행 제어에 적용하고자 한다. 더욱이 이와 같이 복잡한 AGV 시스

템은 그 수학적 모델링 과정이 복잡하고, 시스템 파라미터의 불확실성을 항상 내포하고 있으며, 이러한 제어시스템 설계를 위해서는 보다 정확한 시스템 모델링과정이 요구된다. 본 논문에서는 이러한 문제도 함께 해결하기 위하여 AGV 모델링 시 과거의 정보를 학습하여 미래의 출력을 예측할 수 있는 기능을 가진 신경회로망을 이용함으로써, 종래의 복잡한 수학적 모델링 과정을 거치지 않고도 AGV의 동적 시스템을 보다 실제 시스템에 근사적으로 모델링할 수 있도록 설계하였다. 이상과 같이 본 연구에서 제안한 설계 과정이 다소 복잡한 부분도 내포하고 있지만, 면역시스템을 이용한 공학분야 제어기 설계에 관한 새로운 도전차원에서 논문을 기술하고자 하였다.

II. Immune system

1. 면역 시스템의 구조

생체의 면역 시스템은 크게 1차 방어와 2차 방어로 구분할 수 있다. 1차 방어는 표피(Integuments)로서, 사람의 몸은 피부와 점막으로 덮여 있어 효과적으로 외부의 침입 물질을 차단할 수 있다. 그러나, 이러한 1차 방어가 무너지게 되면 생체는 새로운 제 2의 방어선을 구축하여 보호기능을 수행하게 되는데, 이것을 2차 방어라 한다. 2차 방어는 다시 비특이적 방어(Nonspecific Defense)와 특이적 방어(Specific Defense)로 나눌 수 있다. 비특이적 방어는 직접적이고 즉각적이며, 화학물질과 특정한 백혈구(Leukocyte)들이 사용되는데 이러한 방어물질들은 항상 대기 상태에 있어 즉시 대응할 수 있는 특징을 가지고 있다.

피부의 히스타민(Histamine), 보체(Complement), 인터페론(Interferon)과 같은 화학적 반응과 식세포(Phagocytes) 및 염기성 백혈구(Basophil)에 의한 반응이 비특이적 방어 역할을 한다[13,22].

한편, 특이적 방어는 좀 더 복잡하고 방어물질들이 준비되는데 일정한 시간이 필요하며, 이러한 방어체계를 일반적으로 면역 반응(Immune Response)이라 한다. 그림 2는 생체의 면역 시스템 구조를 나타낸다. 이러한 면역 반응은 백혈구 중에서 일부 림프구(Lymphocytes)인 B 림프구(B Lymphocytes)와 T 림프구(T Lymphocytes)가 특이적 2차 방어체계를 구성한다. B 세포(B 림프구)는 골수(Bone Marrow)에서 생산되는 세포로서, 인간의 생체는 대략 1012개의 다른 종류의 B 세포가 존재하며, B 세포의 대부분은 항체를 분비하며,

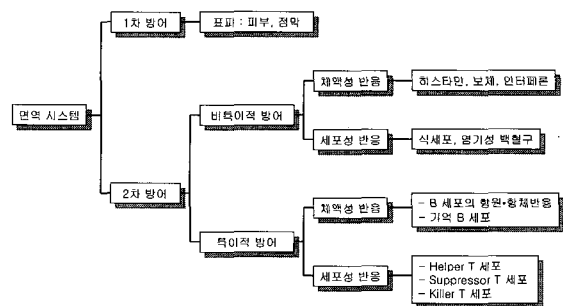


그림 1. 생체 면역 시스템의 구조. Fig. 1. A structure of biological immune system.

일부는 기억 세포(Memory Cell)로 활동한다. 이때, 생성된 항체는 인식된 항원과 결합하여 항원·항체 복합형을 형성함으로써 옅소닌 작용(Opsonization)을 통하여 대식 세포(Macrophage) 및 백혈구와 같은 식세포들의 식작용(Phagocytosis)을 촉진시켜 주는 역할을 한다.

특히, 기억 세포로 분화(Differentiation)된 B 세포는 면역성을 오래 지속시키는 역할을 하며, 다시 감염되었을 때 즉각적으로 반응할 수 있게 한다. 즉, 이와 같은 특이적 화학반응인 항체 분비 현상을 체액성 면역(Humoral Immunity) 반응이라 한다. 또 하나의 특이적 2차 방어체계를 구성하는 T 세포(T 림프구)는 흉선(Thymus)에 의해 생산되는 세포로서 크게 T-helper 세포( $T_h$ ), T-suppressor 세포( $T_s$ ), T-killer 세포( $T_k$ )와 같은 세 종류의 세포로 구성된다. 이들 T 세포는 바이러스나 발암성 물질 등에 의해 침범된 세포들에 직접 작용하는 세포성 면역(Cell-Mediated Immunity) 반응을 하며,  $T_h$  세포는 B 세포를 활성화시켜주고,  $T_s$  세포는 면역작용을 억제하기도 한다[13].

2. Humoral Immune Algorithm

면역 시스템의 항원·항체 반응에 기초한 HIA는 외부에서 침입하는 여러 가지 항원을 인식할 수 있는 능력을 가진 항체의 다양성과 항원·항체의 반응 정도를 나타내는 척도로서 다양성을 구현하기 위한 기반이 되는 친화성이 주요 특징이라 할 수 있다.

이러한 HIA는 확률론적 탐색을 수행하는 알고리즘으로서 기존의 다른 알고리즘과 같이 하나의 가능해를 가지고 최적화 과정을 수행하는 것이 아니라, 최적화를 병렬로 진행함으로써 해의 수렴성이 개선될 수 있다는 것이 특징이다. 또한, 다른 비결정론적 알고리즘과는 달리 최적해로의 수렴을 보장하기 위해 기억 세포를 이용하고 있으며, 항원에 대한 기대치의 계산에 의해 면역 시스템의 자기 조절(Self Regulation) 기능을 수행함으로써 내부 시스템을 항상 안정된 상태로 유지할 수 있다. 이러한 HIA를 최적화 문제와 대응시켜 보면, 항원은 최적화 문제의 제약 조건인 목적함수, 항체는 최적화 문제의 해, 항원과 항체의 친화도는 탐색된 해에 대한 목적함수의 평가값으로 대응될 수 있다. 즉, 이러한 HIA 과정은 항원의 인식, 항체의 생성, 기억세포의 분화 및 친화도에 따른 항체의 촉진과 억제 과정으로 설명될 수 있다[6,7].

즉, 면역 시스템의 항원(antigen), 항체(antibody) 반응에 기초한 HIA는 외부에서 침입하는 여러 가지 항원을 인식할 수 있는 능력을 가진 항체의 다양성(diversity)과 항원, 항체의 반응 정도를 나타내는 척도로서 다양성을 구현하기 위한 기반이 되는 친화성(affinity)이 주요 특징이라 할 수 있다. HIA에서 항원은 시스템에서 발생하는 오차함수나 평가함수로 대별될 수 있으므로 그림 2의 항원의 인식(recognition of antigens)은 시스템의 출력에 대한 센서로부터 얻은 신호와 설정값과의 오차로 나타낼 수 있다. 항체는 제어기의 매개변수로 PID 제어기의 경우에  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  의 비례, 미분, 적분이득을 의미하므로 항체의 생성과 기억세포로의 분화과정은 제어기 파라미터를 생성하고 이를 평가하여 시스템에 가장 적절한 값으로 동조하는 역할로 설명될 수 있다.

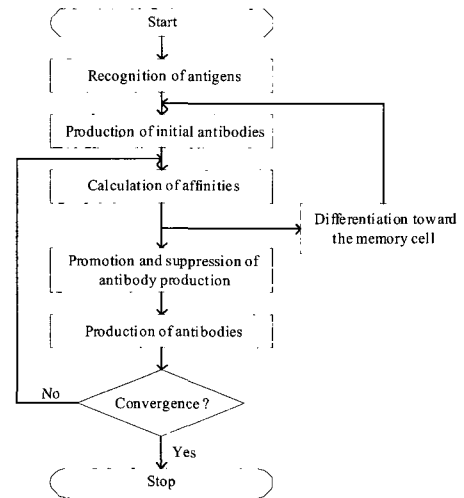


그림 2. HIA 플로차트.  
Fig. 2. Flowchart of HIA.

이때, 기억세포로의 분화시에는 항원과의 친화도가 높은 항체를 기억세포로 추가되는데 이는 오차를 보다 최소로 할 수 있는 제어기 파라미터가 저장됨을 의미한다. 하지만, 친화도가 높은 항체는 새로운 개체생성에서 다양성을 저하시키는 원인이 되므로 새롭게 추가되는 항체와 기억세포에 이미 저장되어 있는 항체들간의 친화도를 계산하여 친화도가 가장 높은 항체는 제거하기도 한다.

3. Cell-mediated Immune Algorithm

3.1 세포성 면역반응의 기본이론

세포성 면역는 대식 세포 및 T 세포와 관계가 깊다. T 세포는 크게 세부분( $T_h$ ,  $T_s$ ,  $T_k$ )으로 구성되며,  $T_s$ 는 면역 반응을 억제하고,  $T_h$ 는 도와주며,  $T_k$ 는 병원균을 직접 파괴하는 역할을 한다. 유사하게, 대식 세포는 T 세포와 협조하여 체액성 면역을 자극하고, 활성화된 대식 세포는 강한 식작용을 하기도 한다. 이외에도 보체는 대식세포, T 세포 그리고 항체를 도와 병원균을 직접 파괴하는 역할을 한다. 특히, T 세포는 체액성 및 세포성의 두 가지 면역 반응에 있어서 주요한 역할을 하는 면역 세포로서 주요 반응 매카니즘은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

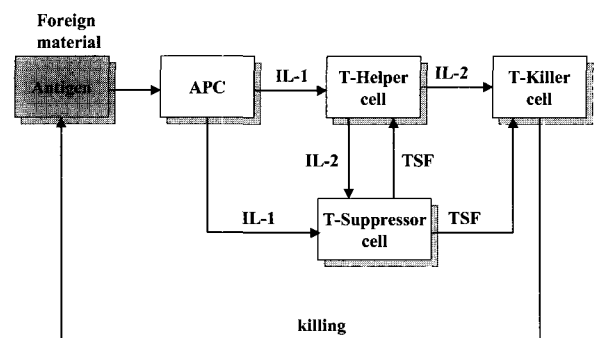


그림 3. The T-cells 조정 메카니즘.  
Fig. 3. The T-cells regulation mechanism.

그림 3에서 보는 바와 같이 외부로부터 항원(Ag)이 침입하게 되면, 이들로부터 감염된 사실을 알려주는 역할을 하는 항원 제시 세포(Antigen Presenting Cell; APC)가 인터루킨-1(Interleukin-1; IL-1)을 분비하여 그 정보를 Th에게 전달하게 되면,  $T_h$ 는 활성화되어 B 세포,  $T_k$  세포 및  $T_s$ 에 인터루킨-2(IL-2)를 분비하여 자극하게 된다. 또한,  $T_s$ 는 TSF(T-Suppressor Factor)를 분비하여  $T_h$ , B 세포,  $T_k$ 의 흥분을 억제시키는 억제 메커니즘의 역할을 한다. 이러한 일련의 조정 과정을 통하여 면역시스템은 안정된 상태를 되찾아 가며, 외부에서 침입된 물질로부터 자신을 지켜나가는 기능을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 면역 시스템의 자기 조정 과정을 기반으로 하여 동적 환경에서도 보다 적응성을 가지고 유연하게 대처할 수 있는 새로운 개념의 지능 제어 구조를 설계하고자 한다.

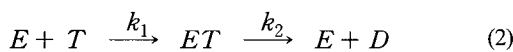
3.2 세포-분자 동역학 모델을 이용한 세포성 면역반응모델

세포 및 분자의 동역학(Cellular Molecular Kinetics) 모델은 모든 면역 반응의 기초가 되는데, 이는 보존 법칙이나 화학의 질량 작용 원리에 근거한 것으로서 이를 기초로 하여 면역 반응의 관계를 모델링할 수 있다. (1)은 세포-분자 동역학의 일반적인 모델을 나타낸다[2,3].

$$\frac{dX_i}{dt} = V_i(t) - \frac{X_i}{\tau_i} + P_i(\cdot)X_i + \sum_{j \neq i} 2P_{ji}(\cdot)P_{ji}(\cdot)X_j - \sum_{k \neq i} 2P_{ik}(\cdot)P_{ik}(\cdot)X_k \quad (1)$$

여기서,  $X_i$ 는 세포의 수,  $V_i(t)$ 는 외부(골수로부터 혈액을 통하여)로부터의 원천(Source)항을 나타내며,  $\tau_i$ 는 시정수(Death Time Constant),  $P_i(\cdot)$ ,  $P_{ji}(\cdot)$ ,  $P_{ik}(\cdot)$ 는 적당한 세포 성장 계수를 나타낸다.

또한, 항원과 면역 세포 사이의 상호 관계는 효소-기저 작용(Enzyme- Substrate Reaction)과 유사하게 설명될 수 있는데, 항원은 기저(Substrate), 면역 반응 세포는 효소(Enzyme)에 관련을 맺어 (2)과 같이 고려될 수 있다.



여기서, E = 면역 공격 세포(Free Immune Effector Cell)의 수

T = 항원의 수

D = 죽은 항원(Antigen Debris)의 수

ET = 면역세포와 항원이 결합된 수

$k_i$  = 비례상수

즉, 외부로부터 항원의 수가 T 만큼 출현하게 되면 생체 내의 면역 시스템에서는 항원 공격을 위한 면역 공격 세포의 수가 E 만큼 생성되어 항원을 공격하게 된다. 이러한 과정에서 항원과 면역 공격 세포는 상호 결합하여 항원 제거 작업이 이루어지는데, 이로부터 항원은 소멸되거나 제거됨으로서 세포성 면역 반응이 이루어지게 된다.

또한, 이러한 세포-분자 동역학에 근거를 두어 비선형 모

델인 암-면역 반응의 수학적 모델에 대한 보고가 되고 있다 [2,3]. 항원과 T 세포와의 면역 반응 과정도 세포-분자 동역학식으로부터 모델링될 수 있다. 즉, 세포성 면역 반응에서 가장 핵심적인 역할을 하는 요소는 T 세포로서 (1)과 (2)를 바탕으로 T 세포 반응 메커니즘만을 고려하여 보면 (3)과 같은 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= p_1x_1 - \frac{x_1}{\tau_1} - p_{31}x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} &= p_2x_2 - \frac{x_2}{\tau_2} - p_{31}x_2 \\ \frac{dx_3}{dt} &= p_3x_3 - \frac{x_3}{\tau_3} - p_{33}x_3 \\ \frac{dx_4}{dt} &= p_4x_4 - \frac{x_4}{\tau_4} - p_{24}x_4 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $x_1$ ,  $x_2$ , 및  $x_3$ 는 각각  $T_h$ ,  $T_k$  및  $T_s$  세포를 나타내고,  $x_4$ 는 항원을 나타낸다. 또한,  $p_i$ 는 각 세포 및 항원의 성장 계수이고,  $p_{33}$  및  $p_{24}$ 는 각각 다른 세포에 대한  $T_s$ 의 억제요소와  $T_k$ 가 항원을 제거하는 반응의 정도를 나타내는 세포 활성화 계수로서 이들 모두 면역 반응의 정도를 조절하는 역할을 한다.

III. Design of the Controller

1. 적응형 HIA PID 제어기 설계

일반적으로 PID 제어기는 비교적 구조가 간단하면서도 구현하기가 쉽다는 장점을 가지고 있으므로 현재 산업현장에서 널리 사용되고 있다. PID제어에 필요한 제어기 파라미터들의 설계를 위하여 고전적 기법에서부터 지능제어에 이르기까지 많은 방법들이 고안되어 적용되고 있다. 하지만 고전적 기법을 이용한 제어기 설계법이 간단함에도 불구하고 정밀하거나 적응성을 요구하는 곳에는 다소 부족하고, 지능제어기법의 경우에서처럼 비교적 넓은 범위에서 동작하지만 불확실성이나 비선형성이 강한 경우에는 다른 대책을 강구해야만 한다.

따라서 본 단원에서는, 이러한 종래의 문제점을 해결하고자 지능형 최적화 알고리즘인 HIA와 신경회로망 동정기법을 이용하고자 한다. 즉, 해의 탐색능력과 수렴특성이 우수한 HIA를 이용함으로써 파라미터 탐색능력을 향상시킬 수 있고, 더불어서 신경회로망 동정기를 이용함으로써 시스템 모델링의 복잡성과 어려움을 함께 해결하고자 하였다. 본 연구에서 제안되어진 제어기의 설계 과정은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

1) 고려되어진 시스템의 모델을 구하고, 오프라인으로 제어기 파라미터의 근사해를 구한다.

2) 시스템의 신경회로망 동정기를 설계한다.

3) HIA와 신경회로망 동정기를 결합하여 실시간으로 PID 제어기 파라미터를 미세 조정할 수 있는 적응형 PID 제어기를 설계한다.

그림 4는 이상의 설계과정을 도시화한 것이다.

이러한 설계과정을 AGV에 적용하면 먼저, AGV 시스템에 대한 동적 모델을 구하고 이를 바탕으로 PID 제어기의 초기 파라미터를 근사적으로 구한다.

그림 5는 이러한 초기 파라미터 추정과정이다. 한편, 그림 5와 같이 시스템을 직접 구동하기보다는 신경회로망과 같은 모델 등을 이용하는 것이 플랜트를 보호하는 차원에서 더 안전할 것이다[13,23]. 이때, 제어기의 파라미터의 탐색 과정은 HIA를 이용하여 그림 6과 같이 PID 제어기 파라미터인  $k_p, k_i, k_d$ 를 하나의 개체로 구성하여 유전자적 연산과정을 통하여 최적의 PID 파라미터를 결정하게 된다.

여기서  $i$ 는 전체 개체의 수를 나타내며, 제어기 각 파라미터의 표현은 실변수 표현법을 이용함으로써 2진 표현에 따른 개체 크기의 장대화와 같은 문제를 해결하였다. 이러한 오프라인 제어기 파라미터의 사전 동조는 추후 실시간 적용시 처음부터 광범위한 탐색으로 인해 자칫 제어 범위를 벗어나는 문제점을 해결할 수 있고, 초기 탐색 시간을 줄여 효율성을 보다 증대시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

이상과 같은 방법으로 HIA와 신경회로망 모델을 이용하여 1차적으로 제어기 파라미터가 동조되었으나, 실제 대상

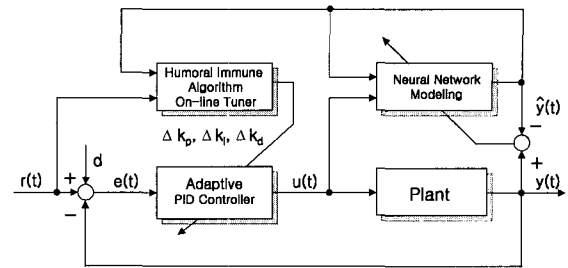


그림 7. HIA를 이용한 적응 PID 제어기.  
Fig. 7. The adaptive PID controller using HIA.

시스템을 신경회로망으로 동조 시에 시스템 동정 오차가 발생하게 되고, 이를 이용하여 제어기를 설계하게 되면 그 파라미터에도 시스템 모델링 오차가 포함되게 되므로 최적의 값이라 할 수 없다. 물론 보다 정확한 모델링을 구하여 많은 시간 동안 오프라인 자동 동조기를 구동하면 보다 나은 값을 얻을 수 있지만, 이는 실용적이지 못할 뿐만 아니라, 생산성을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 설사 최적의 값을 얻었다 하더라도 실제 플랜트 구동시 발생하는 여러 가지 불확실성으로 인한 요소가 작용할 때에도 최적의 설계가 되었다고 할 수 없다.

따라서, 오프라인으로 1차 동조된 파라미터를 기본으로 하여 그림 7과 같이 HIA를 이용하여 실시간으로 PID 제어기 파라미터를 동조하는 구조로 설계하였다.

이때, 온라인 파라미터 동조의 기본적인 개념은 정해진 샘플링(Sampling) 주기마다 탐색된 파라미터 중 최적의 값으로 갱신하는 것이다. 즉, 실제 시스템이 구동되는 동안 시스템에 가장 적절한 제어기가 되도록 제어기를 HIA의 유전자적 교배와 클론적 선택 과정을 통하여 적합도를 향상시켜 나간다. 그러나, 해의 탐색을 유전자적 연산과정에만 의존하게 되면 자칫 국소해에 빠질 우려가 있다.

따라서, HIA가 갖는 기억 기능을 이용하여 탐색 과정에서 생성된 개체군을 기억함으로써 종래의 최적화 기법보다 빠른 수렴성을 보장하며, 항상 최적의 상태로 제어가 될 수 있도록 하였다. 본 논문에서 적용한 PID 제어기의 경우 그림 7과 같은 온라인 HIA 동조기에 의한 보상신호  $\Delta u$ 를 고려하면 (4)와 같은 보상된 제어 출력을 얻을 수 있다.

$$u_{HIA PID}(t) = u_{PID}(t) + \Delta u(t) = (k_p + \Delta k_p)e(t) + (k_i + \Delta k_i) \int e(t) + (k_d + \Delta k_d) \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

2. CMIA를 이용한 제어기설계

본 연구에서는 세포성 면역 반응을 이용한 세포성 면역 알고리즘(CMI Algorithm; CMIA)을 이용한 제어기로 설계하기 위하여 몇가지 가정을 하기로 한다. 먼저, 실제 면역 시스템의 세포성 면역에서 항원에 직접 작용하여 이를 소멸 및 제거하는 역할을 하는 것이  $T_k$ 라 한다면, 나머지  $T_h$  및  $T_s$ 는 이를 도와주거나 억제하는 역할을 한다고 볼 수 있다.

따라서, 그림 3에서 t번째 시간에 외부로부터 침입물질인

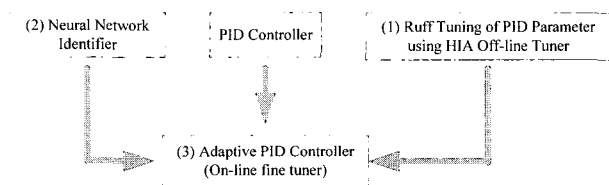


그림 4. HIA PID 설계과정.  
Fig. 4. Design procedure of adaptive HIA PID controller.

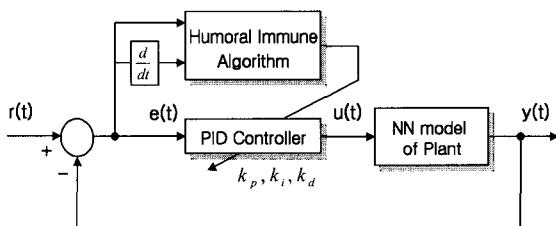


그림 5. 신경회로망 동정기를 이용한 자동동조구조.  
Fig. 5. The auto tuning scheme using neural network identifier.

Antibody 1	$k_{p1}$	$k_{i1}$	$k_{d1}$
Antibody 2	$k_{p2}$	$k_{i2}$	$k_{d2}$
Antibody i	$k_{pi}$	$k_{ii}$	$k_{di}$

그림 6. PID제어기 파라미터의 HIA 세대 구성.  
Fig. 6. The population structure of PID parameters.

항원  $\epsilon(t)$ 가 발생되면, 생체내의 APC에 의하여 외부물질의 발생을 면역 세포에 알리게 되고, 이로부터  $T_h$ 는 IL-2를 분비하여 (5)와 같은 활성화 함수에 따라  $T_s$  및  $T_k$ 을 자극하여 면역 반응을 돕는다[2,13].

$$P(\epsilon) = H_{\max} + \frac{H_{\min} - H_{\max}}{1 + \left(\frac{\epsilon(t)}{C_h}\right)^{g_h}} \quad (5)$$

여기서,  $P(\epsilon)$ 를 세포 활성화 함수라 하며,  $\epsilon(t)$ 는 외부 침입 물질인 항원,  $H_{\max}$  및  $H_{\min}$ 은 각각 세포 성장에 필요한 최대·최소 반응량을 나타내는 것으로서 외부 침입량에 따라 비례적으로 증감한다. 또한,  $C_h$  및  $g_h$ 는 세포의 성장 속도에 관한 파라미터이다.

또한,  $T_s$ 는 외부 물질의 변화에 따라 TSF를 분비하여  $T_h$  및  $T_k$ 를 억제하는 역할을 하는데, 실제로 면역 반응 체계에서 항원의 증감 변화는 면역시스템의  $T_k$  및  $T_h$ 의 변화를 가져오므로  $T_s$ 는  $T_k$ 의 변화량  $\Delta T_k$ 에 의존한다고 할 수 있으며, 이 때의 반응식은 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$TSF(\Delta T_k) = S_{\max} + \frac{S_{\min} - S_{\max}}{1 + \left(\frac{\Delta T_k}{C_s}\right)^{g_s}} \quad (6)$$

여기서,  $TSF(\Delta T_k)$ 는 세포 억제 함수이고,  $S_{\max}$  및  $S_{\min}$ 은 각각 억제세포 성장에 필요한 최대·최소 반응량을 나타내는 것으로서  $T_k$ 의 변화량에 따라 비례적으로 증감한다. 또한,  $C_s$  및  $g_s$ 는 억제 세포의 성장 속도에 관한 파라미터이다.

이상의 두 (5)와 (6)에 의하여 각 세포( $T_h$ ,  $T_k$ ,  $T_s$ )들은 자극 혹은 억제를 받아 면역 반응이 이루어진다. 또한, 제어기 설계를 보다 구체적이고, 간단한 형태로 구성하기 위하여 면역 반응시 항원에 직접 대항하여 작용하는 것이  $T_k$ 라는 사실에 초점을 둔다면,  $T_k$ 는 세포 활성화 함수  $P(\epsilon)$  및 세포 억제 함수인  $TSF(\Delta T_k)$ 에 의하여 조절되므로 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_k(t) = K_k \{P(\epsilon) - TSF(\Delta T_k)\} \quad (7)$$

여기서,  $T_k$ 는 항원 제거 세포로서  $\epsilon(t)$ 의 변화량과  $T_h$  및  $T_s$ 의 조절량에 의존하며,  $K_k$ 는  $T_k$ 의 성장요소를 나타낸다. 이러한, T 세포의 조정 메카니즘인 (5)~(7)로부터 그림 3의 면역 반응 메카니즘 구조는 그림 8과 같이 다시 나타낼 수 있다. 실제로 면역 반응 체계에서도 항원과 직접 작용하여 이를 소멸 또는 제거하는 역할을 하는 것은  $T_k$  세포 및 대식 세포와 같은 다른 몇몇 림프구들에 의하여 이루어지며,  $T_h$  및 B 세포는 이를 도와주는 역할을 한다. 결과적으로 외부로부터 침입한 항원을 공격하는  $T_k$  세포의 양은 외부로부터 침투하는 항원  $\epsilon(t)$ 에 의하여 결정되며, (5)와 (6)에 의하여 조절된다고 할 수 있다.

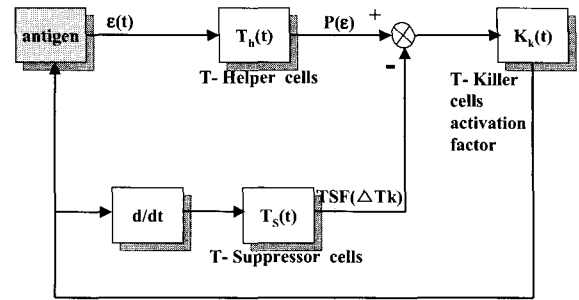


그림 8. CMI에 기반을 둔 T-cell 조정 메카니즘.  
Fig. 8. The T-cells regulation mechanism based on the CMI.

따라서, 이는 생체 내부에서 능동적으로 조절되어 외부로부터 침입한 항원을 제어하여 생체 내를 안정한 상태로 유지시켜 나가는 역할을 한다고 할 수 있다. 또한, (5)와 (6)의 세포 활성화 함수 및 억제 함수는 제어기의 성능을 결정하는 설계 파라미터로서 고려되어질 수 있으며, (7)의  $T_k(t)$ 는 항원과 직접 싸워 이를 제거하는 역할을 하므로 공학분야에서 시스템을 제어하는 제어량  $U(t)$ 로 고려될 수 있다. 이때,  $\Delta T_k$ 는 제어기의 제어량 변화인  $\Delta u(t)$ 로 생각할 수 있고,  $\epsilon(t)$ 는 시스템 출력 오차인  $e(t)$ 로 나타낼 수 있으며,  $T_k$ 의 성장 요소인  $K_k$ 는 제어기 스케일 요소 (Controller Scale Factor)로 고려될 수 있다. 지금까지의 세포성 면역 반응과 PID 제어기 비례(P)항과의 유사성으로부터 세포성 면역을 이용한 제어기의 설계는 (8)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$U(t) = K_p \{P(e) - TSF(\Delta u)\} e(t) \quad (8)$$

여기서,  $P(e)$ 는 제어량의 활성화 요소,  $TSF(\Delta u)$ 는 억제 요소,  $K_p$ 는 스케일 요소이다. 그러나, 실제로 산업 현장 및 많은 공학적 대상 물체는 비선형성과 외부의 주위 환경에 대한 영향을 받고 있기 때문에 나머지 적분과 미분항을 고려하는 경우가 많다.

따라서, 면역 반응의 비례 제어 개념의 유사성으로부터 PID 구조를 갖는 CMIA 제어기를 설계할 수 있다. 즉, 일반적인 PID 제어기로부터 (7), (8)의 면역 반응에 근거한 제어 구조를 적용하면, (9)와 같은 CMIA 제어량을 얻을 수 있다.

$$U_{CMIA}(t) = K_1 \{P_p(e) - TSF_p(\Delta u)\} e(t) + K_2 \left\{ P_i \int e - TSF_i(\Delta u) \right\} \int e(t) + K_3 \{P_D(\Delta e) - TSF_D(\Delta u)\} \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

여기서,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ 는 제어 이득의 스케일 요소이고, 비례, 미분 및 적분의 각 요소에 대하여  $P(\cdot)$ 는 제어량의 활성화 요소,  $TSF(\cdot)$ 는 억제 요소이며, 나머지 요소들은 (10)과 같다.

$$\int e(t) = \int e(t-1) + 0.5 T_s (e(t-1) + e(t)),$$

$$\Delta e(t) = (e(t) - e(t-1)) / Time_s,$$

$$\Delta u = (u(t) - u(t-1)) / Time_s,$$

$$Time_s = \text{sampling time.}$$
(10)

또한, 제어가 안정적인 영역 내에서 동작하기 위해서는 다음의 조건들을 만족해야 하며,  $K_1, K_2, K_3 > 0$ , 및  $P(\cdot) \geq 0$  이고,  $TSF(\cdot) \geq 0$ 의 조건을 만족하기 위해 각 항에 대하여  $H_{max}, S_{max} > 0$ ,  $H_{min}, S_{min} = 0$  및  $C_h, C_s > 0$ 이 되어야 한다. 즉, 이러한 조건하에서 제어 시스템은 수렴성과 안정성이 보장될 수 있다.

IV. 실험 결과

1. AGV 시스템

본 논문에서 고려되어진 AGV 시스템은 항만에서 컨테이너 수송차량인 UCT의 시뮬레이터로 제작된 20:1의 축소 모델로 제작되었다. 제작되어진 AGV 시스템의 구동과 조향은 DC모터로 제어되어지고 AGV 시스템에 탑재된 586 Pentium III 컴퓨터와 80196 마이크로 컴퓨터로서 수행되어진다. 제작되어진 AGV 시스템의 각 구성은 그림 9와 같다[13].

제작된 AGV 시스템에서, 주행에 필요한 정보는 CCD 카메라를 이용하여 얻을 수 있으며 충돌 안전장치로서 초음파 센서를 전후방에 각각 부착하였다. 조향과 주행은 각각 2대의 모터로 구동되며, 각각의 값은 포텐쇼미터와 엔코더로 측정되도록 제작하였다.

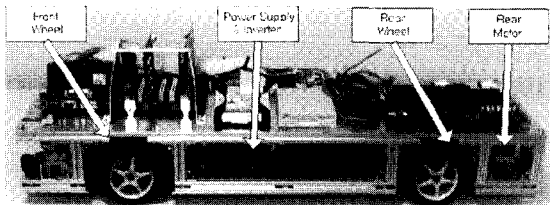


그림 9. AGV 시스템의 구조.  
Fig. 9. The configuration of AGV system.

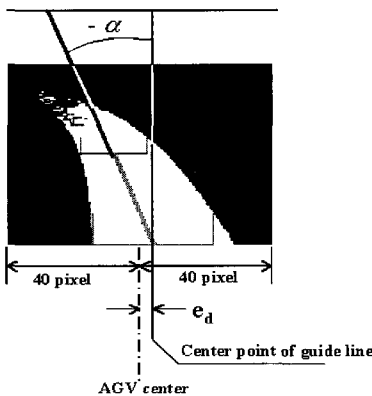


그림 10. AGV와 가이드라인과의 상대거리 및 각도.  
Fig. 10. The relative errors of distance and angle between AGV and guide line.

이와 같이 구성되어진 AGV 시스템의 구체적인 사양은 지면상 본 논문에는 수록하지 못하였으나 참고문헌[13]을 보면 잘 나타나 있다.

구성되어진 AGV 시스템은, 가이드라인과 AGV와의 상대적 위치와 각도에 대한 오차를 얻기 위하여 CCD 카메라를 센서로 활용하였고 실험에 사용된 경로는 흑색 배경에 백색의 가이드 라인으로 구성하였다[13].

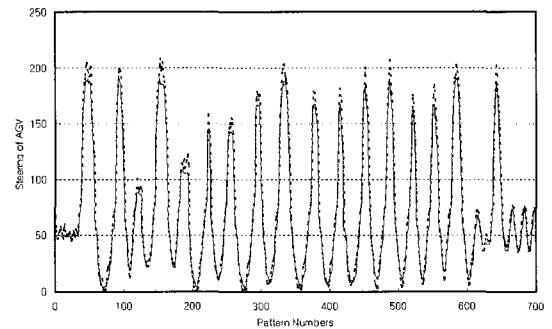
그림 10에서 나타난 것처럼, 영상정보에서 참조 조향각  $\delta$  을 결정하기 위한 상대적 거리오차  $e_d$ 와 각도오차  $\alpha$  을 구할 수 있다. 이때 조향각  $\delta$ 는 (11)로서 계산되어질 수 있다.

$$\delta = K \left\{ \left( \frac{e_d}{R_{speed}} \right) + (R_{speed} \cdot \alpha) \right\}$$
(11)

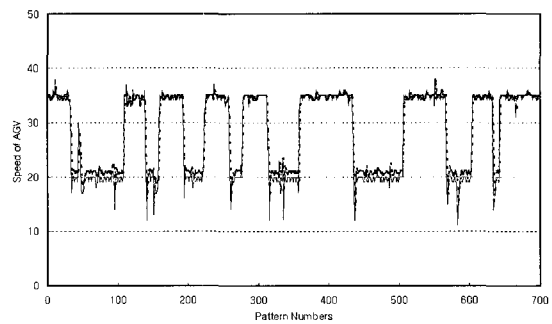
여기에서  $R_{speed}$  을 조절하여 AGV 시스템의 속도가 증가하면 거리오차보다 각도오차가 차지하는 비율이 증가하고, 속도가 감소하면 상대적으로 거리오차에 비중을 두어 계산하도록 하였다. 더불어서, 개인  $K$  에 피드포워드(feed forward)와 피드백(feedback) 되는 부분의 전체 값을 스케일링하여  $\delta$  를 구하도록 구성하였다.

2. AGV의 신경회로망 동정기 구현

AGV 시스템에 대한 신경회로망 모델링은 조향과 속도 시스템에 대하여 각각 모델링을 구현하였다. 시스템 동정을 위하여 신경회로망에 입력력되는 신호를 살펴보면, 먼저, 조향 시스템에 대한 입력은 12V에 대하여 256듀티비(duty ratio)를



(a) Steering parts



(b) speed parts

그림 11. 신경회로망 모델링 결과.  
Fig. 11. Results of neural network modeling.

갖는 PWM 값으로 하였고, 출력은 포텐쇼미터로부터 얻은 신호에 대하여 8비트 분해능을 갖는 A/D변환기를 적용하였다. 또한, 속도시스템의 경우에는 모터에 입력되는 PWM 값을 신경회로망 입력신호로 하였고, 신경회로망 동조를 위한 출력신호는 은 AGV의 속도 0.5[m/sec]에 대한 카운터 출력을 사용하였다. 학습에 사용된 패턴 수는 700개로 하였고, 신경회로망 동정기에 사용된 층수는 각각 3개로 하였으며, 학습율과 모멘트 계수 및 기울기 등의 기타 자세한 설계파라미터는 참고문헌[13]을 참조 바란다.

그림 11은 조향 및 속도부에 대한 모델링 학습 과정을 나타낸 실험 결과이다. 동정결과 조향부의 백분율 오차의 평균이 약 15%이지만, 실제 값의 최대값에서는 모델링 오차가 크게 나타났으며, 그 외의 경우는 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 또한, 속도부는 백분율 오차의 평균이 6.9%이며 음의 최대 값에서 오차가 다소 많이 발생한 것으로 분석된다.

3. 제어기의 구현

3.1 CMIA 제어기의 최적 설계

본 연구에서 제안한 CMIA 제어기는 설계시 고려되어야 하는 제어기 파라미터에 대한 최적의 조정이 요구된다. 그림 12는 HIA를 이용한 CMIA 제어기 파라미터의 자동동조 구조를 나타낸다.

CMIA 제어기 설계를 위하여 우선, 억제량과 자극량을 결정하는 요소들 중 비선형적 요소를 가급적 줄이기 위하여  $g_s$ 와  $g_h$ 는 모두 1로 두었으며, 최적 조정이 요구되는 CMIA 제어기 파라미터로는  $P_p(e)$ ,  $P(\int e)$ , 및  $P_D(\Delta e)$ 와 각 함수의  $H_{max}$  및  $C_h$ 와  $TSF(\Delta u)$ 함수의  $S_{max}$  및  $C_s$ 를 포함하여 모두 12개의 파라미터를 동조하여 제어기를 설계하였다. 제어기 파라미터 자동 동조를 위한 HIA에 필요한 세대수, 평가함수 등 상세 설계사양은 참고문헌[13]에 잘 나타나있다.

3.2 HIA PID 제어기의 구현

HIA PID 제어기를 설계하기 위하여 우선, AGV의 수학적 모델에 대하여 설계된 신경회로망 동정기를 통하여 HIA로 제어기 파라미터를 최적 조정한다. 그림 13은 AGV에 대한 신경회로망 동정과 HIA를 이용한 오프라인 동조기 구조를 나타낸다.

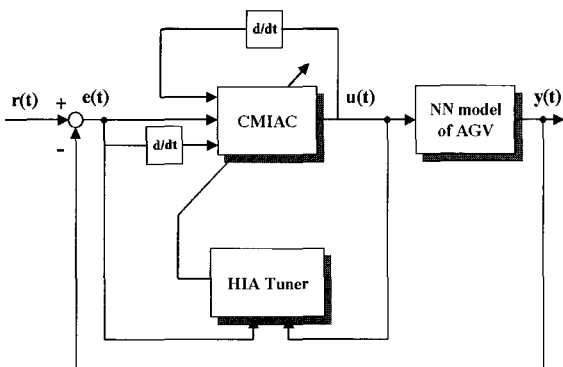


그림 12. HIA로 동조된 CMIA제어 시스템.  
Fig. 12. The HIA tuned CMIA control system.

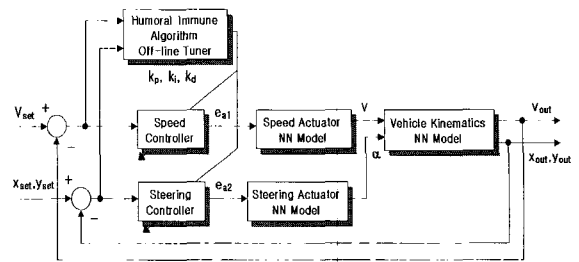


그림 13. HIA를 이용한 오프라인 동조구조.  
Fig. 13. The off-line tuning scheme using HIA.

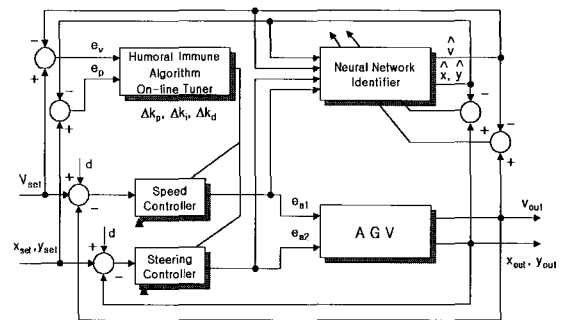


그림 14. AGV 시스템에 대한 HIA PID 제어구조.  
Fig. 14. The HIA PID controller for AGV system.

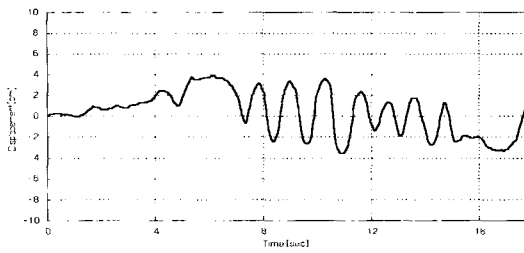
여기서, 제어기의 입력은 AGV의 주행에 필요한 속도 지령치와 주행 경로의 설정  $v_{set}$ 치인 x-y 좌표  $x_{set}$ ,  $y_{set}$ 이고, 플랜트 출력 벡터가  $y = \{v_{out}, x_{out}, y_{out}\}$ 일 때, 시스템의 출력 오차는  $e = \{v_{set} - v_{out}, x_{set} - x_{out}, y_{set} - y_{out}\}$ , 제어 입력은  $u = \{e_{a1}, e_{a2}\}$ 를 각각 나타내고 있다. 제어기 파라미터 자동 동조를 위한 HIA에 필요한 세대수, 평가함수 등 상세 설계사양은 참고문헌[6]에 잘 나타나있다. 이상과 같은 방법으로 최적 동조된 PID 제어 파라미터를 기본으로 하여 이를 온라인으로 동조할 수 있는 구조로서 AGV 제어를 위한 HIA PID 제어기를 그림 14와 같이 구성하였다.

본 논문에서는 매 샘플링 주기마다 온라인 동조기를 구동하여 시스템의 파라미터 변동, 외란 등의 변화에 따라 신경회로망 동정기와 HIA를 이용하여 제어 파라미터를 미세 조정할 수 있도록 구성하였다. 그러나 해의 탐색을 HIA에만 의존하게 되면 랜덤 탐색으로 인해 국소해에 빠질 우려가 있다. 따라서, 사전에 오프라인으로 동조된 값과 온라인 탐색 과정에서 얻은 우수한 파라미터를 기억하여 항상 최적의 값을 사용하도록 그 구조를 설계하였다.

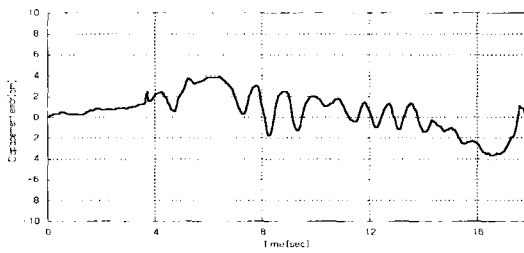
4. 실험 결과

제작되어진 AGV 시스템의 실제 주행경로는, 진폭은 1[m]인 정현파 경로로서 검정색 바탕에 폭이 약 1[cm]인 흰색 라인을 추종하도록 하였다. 또한 제작되어진 제어기의 구현은 AGV에 탑재된 컴퓨터에 제어루틴을 내장하고 주행정보는 CCD카메라로부터 입력 받도록 하였다. 속도와 조향 정보는 엔코더와 포텐쇼미터로부터 각각 발생된 신호를 마이크로프로세서에 입력하여 RS232 통신을 통하여 컴퓨터로 전달하도록 하였다. 제안되어진 제어기의 성능 평가를 위하

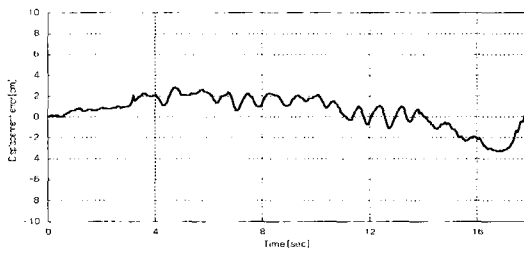




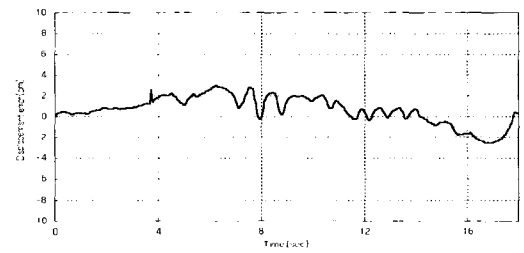
(a) PID 제어기



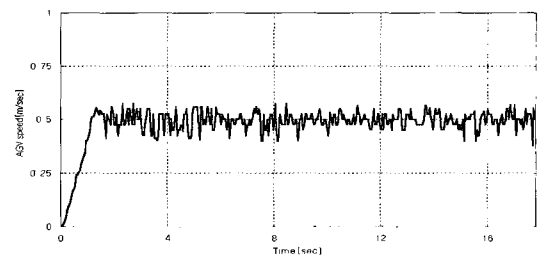
(b) NNPID 제어기



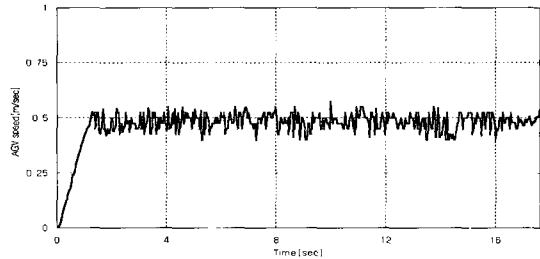
(c) CMIA 제어기



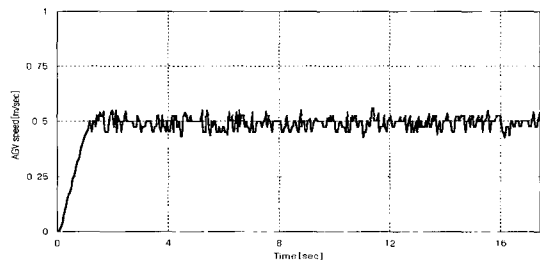
(d) HIA PID 제어기



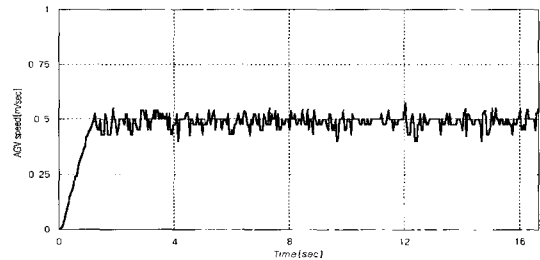
(a) PID 제어기



(b) NNPID 제어기



(c) CMIA 제어기



(d) HIA PID 제어기

그림 15. AGV 시스템의 변위오차.

Fig. 15. The displacement error of AGV system.

여 먼저 시뮬레이션을 실시하였으며, 본 논문에는 지면상 수록되지 않았지만 그 결과 우수함을 확인할 수 있었다[6,13]. 특히 비록 시뮬레이션이지만 유사 지능 알고리즘인 GA(Genetic Algorithm)와의 비교에서도 더 우수한 결과를 얻음으로서 면역시스템의 우수성을 확인할 수 있었다[24]. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실험을 해본결과 그림 15와 그림 16에서 보여지는 것처럼 고전 PID 및 NN을 이용한 PID 제어기와 비교하여 제안되어진 제어기의 성능을 비교 평가하였다. 제안한 HIA 적응 PID제어기의 미세조정은 매 50[msec]마다 새로운 PID 파라미터 값을 자기 동조하도록 구

그림 16. AGV 시스템의 속도.

Fig. 16. Results of driving speed for AGV system.

하였다. 또한, NNPID 제어기는 3층으로 구성된 다층 신경회로망 구조를 적용하였으며, 신경망 각층에 대한 설계자료는 참고문헌 [13]을 참조바란다. 그림 15와 그림 16에서는 약 25[kg]의 부하가 탑재된 상태에서 주행 속도를 0.5[m/sec]로 하였을 때의 PID, NNPID, CMIA, HIA를 이용한 PID 제어에 대한 주행 변위 오차 및 주행 속도를 나타낸다. 일정한 부하가 인가되는 상태에서 실험을 수행해 본 결과, 최대 변위 오차의 경우, 제안한 CMIA 제어가 PID 및 NNPID 제어에 비하여 각각 17%, 16% 정도 우수한 것을 알 수 있었다.

표 1. AGV의 주행실험결과(요약).  
Table1. Driving experiment results of AGV.

Response Characteristics		Controllers			
		PID	NNPID	CMIA	HIA PID
Speed control	Speed settling time [sec]	1.86	1.81	1.56	1.26
	Speed percent overshoot[%]	5.5	5.3	5.2	2.5
	Speed standard deviation[m/sec]	0.483 ±0.0397	0.494 ±0.0377	0.496 ±0.028	0.498 ±0.0310
	Control input RMS [V]	11.39	11.32	11.37	11.40
Steering control	Displacement error max. [cm]	3.91	3.85	3.25	3.02
	Displacement error RMS [cm]	2.10	1.90	1.53	1.50
	Control input RMS [V]	8.21	7.02	6.87	6.99

HIA PID 제어의 경우에는 23%, 22%가 각각 개선된 것으로 나타났다. 또한 주행시 평균적으로 발생된 변위 오차도, CMIA 제어가 PID 및 NNPID 제어에 비하여 각각 27%, 20%가 개선되었으며, HIA PID 제어의 경우 29%, 21%가 각각 개선되어 적응형 구조를 갖는 HIA PID 제어가 보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다. 주행 속도의 경우에는 PID 제어가 약 5.5%의 오버슈트가 발생한 반면 제안한 HIA PID 제어는 약 2.5%로서, 약 60%이상 개선됨을 알 수 있었다.

이상과 같이 부하 인가시에 대한 제어기 주행 실험 결과를 종합하면 다음 표 1과 같다. 최대 변위 오차와 속도의 표준편차가 무부하시보다 모두 크게 나타난 것은 부하로 인해 AGV 차체의 중량이 증가함에 따라 관성이 커지고 비선형적 요소가 많아서 나타난 것으로 분석된다. 특히 제안한 CMIA 제어기의 경우 제어 에너지를 최소화하면서 주행 성능이 평균 20%이상 개선됨을 볼 수 있는데 이는 면역 시스템의 억제 요소를 적용함으로써 불필요한 제어량을 스스로 억제하는 특성이 효과적으로 작용하였던 것으로 파악된다. 또한, 전체적인 주행 응답특성을 분석해보면 제안한 제어기 중 HIA PID 제어기가 가장 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 제어대상이 비선형적이고 주위 환경 변화에 따라 적응적으로 대처하는 것이 요구되는 시스템의 경우, 제어기 파라미터도 적응성을 가져함을 알 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 이러한 면역 시스템의 특징을 수학적으로 모델링하여 다음의 두 가지 관점에서 공학분야의 제어기로 설계하였다.

첫째, 체액성 면역 반응의 항원 · 항체 반응에 기초한 HIA를 도입함으로써 종래의 최적화 알고리즘의 개체 표현의 어려움과 협소한 탐색 공간의 문제점을 보완하고, 제어

환경 변화에 따른 재진화 과정을 없애기 위하여 적응형 실시간 제어 구조의 HIA PID제어기를 제안하였다. 더욱이, 진화적 생체모델을 바탕으로 HIA의 수렴 조건을 도출함으로써 HIA 탐색과정에서 최적해를 찾을 수 있는 수렴성과 다양성을 검증할 수 있었다.

둘째, 세포성 면역 반응에서 T 세포가 외부 침입 물질에 대하여 즉각적으로 반응하고, 내부 면역 체계를 보다 빠르게 안정화시키는 기능을 독립적으로 수행하는 자기 조절 기능을 세포-분자 반응식을 바탕으로 모델링하여 시스템 환경 변화에도 보다 적응적으로 대처할 수 있는 CMIA 제어기를 설계하였다.

이상과 같은 면역 시스템과 신경회로망 동정기법을 바탕으로 제안한 HIA PID 및 CMIA 제어기 성능의 우수성을 입증하기 위하여 AGV의 경로 및 속도 추정에 대한 실험을 수행하였다. 이러한 일련의 실험 결과를 통하여 제안한 제어기가 잘 동조된 PID제어기와 NNPID 제어기보다 그 성능이 우수함을 알 수 있었으며, 그 우수성과 특징을 요약하면 다음과 같다. 우선 AGV의 모델링시 신경회로망 동정기를 이용함으로써 과거와 미래의 입력력 정보를 이용한 예측기능을 활용하여 종래의 수학적 기법이 표현하기 어려웠던 시스템의 다양한 동특성을 보다 쉽게 학습할 수 있었다.

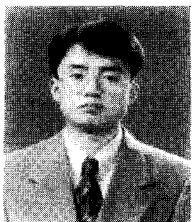
또한, CMIA 제어기 설계시 시스템 출력 오차, 오차의 변화분 및 제어량 변화분에 대한 세 가지 제어 활성화 요소를 적용함으로써 오차가 증가함에 따라 즉각적으로 반응하여 보다 안정된 응답 특성을 얻을 수 있었던 것으로 분석된다.

특히, CMIA 제어기의 제어량이 종래의 제어기 보다 약 20%이상 적게 입력되면서도 응답 특성이 개선된 것을 알 수 있다. 이러한 결과는  $\Delta u$ 를 이용한 제어량 억제 기능을 활용함으로써 적은 제어 에너지로도 효율성을 보다 향상시킬 수 있었던 것으로 분석된다. 그러나, CMIA 제어기를 설계함에 있어 가급적 제어기의 안정성을 유지하기 위하여 세포 성장 계수와 같은 비선형적 요소는 고려하지 않았지만, 향후 이러한 요소들도 고려하여 보다 면역 시스템에 가까운 제어기 설계가 필요할 것으로 생각된다. HIA PID제어기를 설계함에 있어서는 신경회로망 동정기를 이용하여 제어기 파라미터를 실시간으로 동조할 수 있는 구조로 설계함으로써 대상 시스템 파라미터의 불확실성과 외부 환경변화에 보다 적응적으로 대처할 수 있었던 것으로 분석된다. 특히, 지능형 알고리즘인 HIA를 이용함으로써 종래의 최적화 기법들에서 문제점으로 지적되었던 2진 표현에 의한 파라미터 표현의 어려움을 해결하고, 세대간의 친화성으로 인해 탐색 범위가 상대적으로 협소해져 국부해에 도달하는 문제점도 극복할 수 있었다. 뿐만 아니라, HIA의 기억 세포를 응용하여 시스템 변화에 따라 새로운 탐색 과정을 거치지 않고 기억된 우수한 세포군을 이용함으로써 종래의 알고리즘보다 탐색의 속응성을 향상시킬 수 있었던 것으로 분석된다.

참고문헌

[1] H. William, P. F. Vrian, A. T. Saul, and T. V. William, *Numerical Recipes*, Cambridge Pang-Han, 1986.

- [2] K. S. Lee, *Mathematical Modeling and the Control of Immune Processes with Application to Cancer*, Ph. D. Dissertation, Oregon State University, 1990.
- [3] R. R. Mohler, K. S. Lee, A. L. Asachenkov, and G. I. Marchuk, "A systems approach to immunology and cancer," *IEEE Trans. on Systems, man, and Cybernetics*, vol. 24, no. 2, pp. 632-642, 1994.
- [4] L. N. de Castro and F. J. Van Zuben, "Artificial immune systems: part I, II - a survey of application," *DCA-RT02/00*, Technical report, 2000.
- [5] N. K. Jerne, "The immune system," *scientific american*, vol. 229, no. 1, pp. 52-60, 1973.
- [6] 이영진, 서진호, 이권순, "신경회로망 동정기법에 기초한 HIA 적응 PID 제어를 이용한 AGV의 주행제어에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제21권, 제10호, 2004.
- [7] J. S. Chun, J. P. Lim, H. K. Jung, and J. S. Yoon, "Optimal design of synchronous motor with parameter correction using immune algorithm," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 610-615, 1999.
- [8] S. J. Huang, "Enhancement of thermal unit commitment using immune algorithms based on optimization approaches," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 21, pp. 245-252, 1999.
- [9] Castro, "Automatic detection of radial basis fuction : An Immunity-based approach," *International J. of Neural Network*, vol. 11, no. 6, pp. 523-535, 2002.
- [10] N. K. Jerne, "Idiotypic networks and other preconceived Ideas," *Immunological Reviews*, no. 79, pp. 5-24, 1984.
- [11] A. Ishiguro, T. Konodo, Y. Watanabe, and Y. Uchikawa, "A reinforcement learning method for dynamic behavior arbitration of autonomous mobile robots based on the immunological information processing mechanism," *Trans. of the Institute of Elec. Eng. of Japan C*, vol. 117-C, no. 1, pp. 42-49, 1990.
- [12] 서재용, 전홍태, 최호선, 이기섭, 김정호, "면역 시스템 기법을 이용한 에어컨의 온도 제어 시스템 설계," *한국 퍼지 및 지능시스템학회 추계학술대회*, pp. 321-324, 1999.
- [13] Y. J. Lee, J. H. Suh, and K. S. Lee, "An adaptive control of an autonomous guided vehicle system using cell-mediated immune algorithm controller and vision sensor," *KSME International Journal*, 2004(accepted).
- [14] C. J. Gilbert and T. W. Routen, "Associative memory in an immune-based system," *Proc. of the 12th National Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 852-857, 1994.
- [15] J. D. Farmer and N. H. Packard, "The immune system, adaptation, and machine learning," *Physica*, vol. 22D, pp. 187-204, 1986.
- [16] S. Forrest, B. Javornik, R. Smith, and A. S. Perelson, "Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system," *Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 191-211, 1993.
- [17] G. W. Hoffmann, "A neural network model based on the analogy with the immune system," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 122, pp. 33-67, 1986.
- [18] D. Dasgupta, *Artificial Immune Systems and Their Applications*, Springer, 1997.
- [19] K. Takahashi and T. Tamada, "Application of an immune feedback mechanism to control systems," *Int. Journal of JSME, Series C*, vol. 41, no. 2, pp. 184-191, 1998.
- [20] M. Kawafuku, M. Sasaki, and K. Takahashi, "Adaptive learning method of neural network controller using an immune feedback law," *Proc. of the 1999 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 641-646, 1999.
- [21] Y. J. Lee, J. H. Sohn, J. W. Lee, H. C. Cho, K. S. Lee, and M. H. Lee, "A design of IRC using immune response algorithm," *Proc. of the Int. Conf. on Mechatronic Technology*, pp. 184-189, 1999.
- [22] I. Roitt, *Essential Immunology*, Blackwell Scientific Publications, 1980.
- [23] G. Page, J. Gomm, D. Williams, *Application of neural networks to modeling and control*, Chapman & Hall, 1993.
- [24] 이영진, 이권순, 이장명, "면역알고리즘 적응 제어를 이용한 AGV 주행제어에 관한 연구," *대한전기학회지*, 49권, 4호, pp. 201-212, 2000.



이 영 진

1992년 동아대 전기과 졸업. 동대학원 석사(1994), 동대학원 박사(2000). 2000년~현재 항공기능대학 전기계측제어과 교수. 관심분야는 지능제어, 면역 시스템, 항만 자동화 제어, 시스템제어.



이 권 순

1977년 충남대 공업교육과 졸업. 1981년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 7월 Oregon State University 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(Ph. D.). 1996년 8월~1997년 8월 Virginia Tech. 전기 및 컴퓨터 공학과 Visiting scholar. 1995년 12월~1996년 1월 일본 전기통신대학 기계제어공학과 객원연구원. 1998년 1월~1998년 12월 대한전기학회 편집위원. 1982년 3월~현재 동아대학교 공과대학 전기전자컴퓨터공학부 교수.