

구조물 진동제어를 위한 Immune Algorithm을 이용한 Active PID 제어기 설계

A Design of An Active PID control using Immune Algorithm for Vibration Control of Building Structure

이영진*, 조현철**, 이권순**

Young-jin Lee, Hyun-Cheol Cho, Kwon-Soon Lee

Abstract - In this paper, we propose an adaptive PID controller using a cell-mediated immune response to improve a PID control performance. The proposed controller is based on the specific immune response of the biological immune system that is cell-mediated immunity. The immune system of organisms in the real body regulates the antibody and the T-cells to protect an attack from the foreign materials like virus, germ cells, and other antigens. It has similar characteristics that are the adaptation and robustness to overcome disturbances and to control the plant of engineering application. We first build a model of the T-cell regulated immune response mechanism and then designed an I-PID controller focusing on the T-cell regulated immune response of the biological immune system. We apply the proposed methodology to building structures to mitigate vibrations due to strong winds for evaluation of control performances. Through computer simulations, system responses are illustrated and additionally compared to traditional control approaches.

Key Words : Active control, Building structure, Immune algorithm, PID control

1. 서론

건축물의 바람이나 지진등에 의하여 진동이 발생될 수 있으며, 이는 인간의 삶에 치명적인 문제를 야기시킬 수 있다. 때문에 이러한 건축물 제어를 위하여 여러 가지 제어기법들이 등장하고 있으며 여기에는 수동제어(passive control), 능동제어(Active control), 혼합제어(hybrid control) 등이 있다. 하지만, 이러한 방식들마다 장단점이 있고 또, 능동제어라 하더라도 주어진 주파수 대역내에서만 제어기가 효과적으로 작용하는 문제점등으로 지능알고리즘을 도입한 방법들이 소개되고 있다[1,2].

따라서, 본 논문에서는 외부의 침입(외란)에 대하여 적용적으로 대처할 수 있는 능력과 생체내부의 면역시스템을 보다 안정한 상태로 유지할 수 있는 역할을 하는 면역세포인 T-cell의 베카니즘을 응용하여 면역성을 갖는 제어기를 구성하여 건축물의 진동제어에 대해 능동제어기로 적용하고자 한다. 본 논문에서 구성한 면역 제어시스템(immune control system)은 상층부위에 제동시스템(damping system)이 부착된 건축물의 진동제어에 적용하여, 풍력이나 지진에 의해 발생되는 건축물의 응답변위를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나타내었으며, 기존의 선형제어기도 함께 적용하여 그 특성들을 비교 분석함으로써 본 논문에서 설계한 면역제어기의 우수성을

을 입증하고자 한다.

2. 면역알고리즘을 이용한 제어기설계

생체의 면역체계중 T 세포에 의한 세포성반응(Cell-mediated Immunity; CMIA)은 면역에 관련된 세포를 자극 또는 억제하거나, 병원균세포나 바이러스에 의하여 감염된 세포를 직접 죽이는 반응으로서 그 주요 반응 메카니즘은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다 [3].

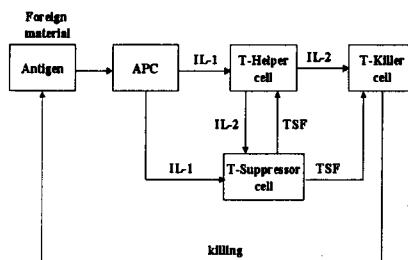


그림 1. A T-cells regulation mechanisms.

실제로 생체 면역반응체계는 너무 복잡하여 상당 부분의 처리 과정이 아직 명백히 규명되지 않고 있다. 하지만, 몇가지 가설과 이론을 근거로 우리는 이 반응에서 3가지 T세포가 매우 중요한 역할을 하며, 이를 3가지 T세포는 T_h (helper cell), T_k (killer cell), T_s (suppressor cell)이다. 또한, 이를 세포분자 동역학 이론으로부터 표현될 수 있는데[3], 이로부터 우리는 다음의 3가지 관계식을 얻

저자 소개

* 항공기능대학 전기예측과 조교수 · 공학박사

** Dept. of Elec. Eng., Univ. of Nevada-Reno, NV, USA,
박사과정

*** 동아대학교 전기공학과 교수 · 공학박사

을 수 있다[4].

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

$$TSF(\Delta T_k) = S_{\max} + \frac{S_{\min} - S_{\max}}{1 + \left(\frac{\Delta T_k}{C_s} \right)^{g_s}} \quad (2)$$

여기서, $P(\varepsilon)$ 를 세포활성화함수라 하며, $\varepsilon(t)$ 는 외부침입물질, H_{\max} 및 H_{\min} 은 각각 세포성장에 필요한 최대, 최소 반응량을 나타내는 것으로서 외부 침입량에 따라 비례적으로 증감한다. 또한, C_h 및 g_h 는 세포의 성장속도에 관한 파라미터이다.

또한, T_s 는 외부물질의 변화에 따라 TSF를 분비하여 T_b 및 T_k 를 억제하는 역할을 하는데, 실제로 면역반응체계에서 항원의 증감변화는 면역시스템의 T_k 및 T_b 의 변화를 가져오므로 T_s 는 T_k 의 변화량 ΔT_k 에 의존한다고도 할 수 있으며, 그때의 반응식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. $TSF(\Delta T_k)$ 는 세포억제함수이고, 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 억제세포의 성장속도에 관한 파라미터이다. 이상의 두 식 (2)와 (3)에 의하여 각 세포(T_b , T_s , T_k)들은 자극 혹은 억제를 받아 면역반응이 이루어진다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 제어기 설계를 보다 구체적이고, 간단한 형태로 구성하기 위하여 면역반응시 항원에 직접 대항하여 작용하는 것이 T_k 라는 사실에 초점을 둔다면, 그때, T_k 는 세포활성화함수 $P(\varepsilon)$ 및 세포억제함수인 $TSF(\Delta T_k)$ 에 의하여 조절되므로 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_k(t) = K_k \{ P(\varepsilon) - TSF(\Delta T_k) \} \quad (3)$$

여기서, T_k 는 T-killer 세포로서 $\varepsilon(t)$ 의 변화량과 T_b 및 T_s 의 조절량에 의존한다. 또한, K_k 는 T_k 의 성장요소이다.

이상의 면역반응 메카니즘은 이러한 T 세포의 조정 메카니즘인 식 (1)~(3)로부터 그 구조는 그림 2와 같이 다시 나타낼 수 있다 [4].

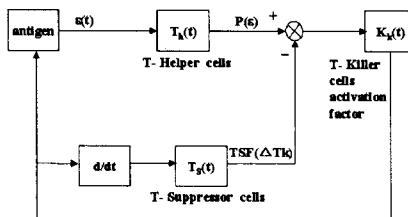


그림 2. A T-cell regulation mechanisms based on the CMI.

우리는 지금까지의 세포성 면역반응(CMIA)으로부터 PID제어기의 비례(P)항과의 유사성으로부터 면역반응식을 이용한 제어기의 설계가 식 (4)와 같은 형태로 가능해지리라 생각된다[4].

$$\begin{aligned} U_{IRC}(t) &= K_1 \{ P_P(e) - TSF_P(\Delta u) \} e(t) \\ &\quad + K_2 \left\{ P_A \left(\int e \right) - TSF_A(\Delta u) \right\} \int e(t) \\ &\quad + K_3 \{ P_D(\Delta e) - TSF_D(\Delta u) \} \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, K_1 , K_2 , K_3 는 제어이득의 스케일요소이고, 비례, 미분 및 적분의 각 요소에 대하여 $P(\cdot)$ 는 제어량의 활성화요소, $TSF(\cdot)$ 는 억제요소이며, 나머지 요소들과 조건은 참고문헌 [4]를 참조 바란다.

3. 건축 구조물의 모델

그림 3은 1자유도를 갖는 건축 구조물에 대한 현상학적 모델을 나타낸다[5]. 건축 구조물의 상층 부위에 부착된 제동시스템은 건축 구조물과 같은 주파수 또는 위상추이(phase shift)로 진동하여 외판에너지를 운동 에너지로 변환시킴으로써 진동을 억제한다.

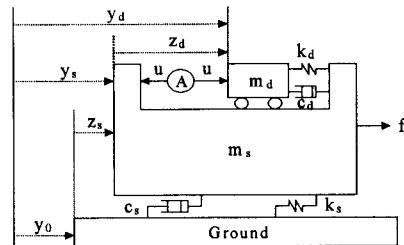


그림 3. SDOF structure with mass damper.

그림 3에서 m_s , c_s , k_s 와 m_d , c_d , k_d 는 건축 구조물과 제동시스템에 대한 질량, 제동, 탄성을 각각 나타낸다. 그리고, ④는 제어입력을 바탕으로 하여 제동시스템을 구동시키는 액츄에이터(Actuator)에 대한 기호이다. 이 모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{y}_s + c_s (\dot{y}_s - \dot{y}_0) + k_s (y_s - y_0) \\ + c_d (\dot{y}_s - \dot{y}_d) + k_d (y_s - y_d) &= f(t) - u(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$m_d \ddot{y}_d + c_d (\dot{y}_d - \dot{y}_s) + k_d (y_d - y_s) = u(t) \quad (6)$$

Fig. 4에서 $y_s = y_0 + z_s$ 이고, $y_d = y_0 + z_s + z_d$ 이므로 이 식을 식 (5)와 (6)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_s (\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s) + c_s \dot{z}_s + k_s z_s \\ - c_d \dot{z}_d - k_d z_d &= f(t) - u(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$m_d (\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s + \ddot{z}_d) + c_d \dot{z}_d + k_d z_d = u(t) \quad (8)$$

그리고, f 는 풍력에 대한 기호이고 \ddot{y}_0 는 지반가속도(ground acceleration)로서 지진에 대한 내용을 나타낸다. 본 연구에서는 지진에 대한 건축물의 진동제어를 다루었다.

4. 모의실험

설계된 제어기 성능비교는 진동 제어이론으로 많이 사용되고 있는 LQ 제어 및 PID제어기와 성능을 비교하였다. 각 제어기의 성능평가의 객관성을 부여하기 위하여 비교대상 제어기의 파라미터도 동일한 알고리즘으로 동조하였으며, LQ제어기의 경우는 MATLAB을 이용하여 구한 결과와 자동동조에 의한 결과 중 우수한 파라미터를 적용하였다.

CMIA PID 제어기 설계를 위하여 먼저, 억제량과 자극량을 결정하는 요소들 중 비선형적 요소를 가급적 줄이기 위하여 g_s 와 g_h 는 1로 두었으며, 최적 조정이 요구되는 CMIA PID 제어기의 파라미터로는 $P_s(e)$, $P_h(\int e)$, 및 $P_D(\Delta e)$ 각 함수의 H_{\max} 및 C_h 와 $TSF(\Delta u)$ 함수의 S_{\max} 및 C_s 를 포함하여 모두 8개의 파라미터를 최적 조정하여 제어기를 설계하였다. 파라미터의 최적조정은 IA을 이용하여 동조하였다[8]. 시뮬레이션에 적용된 지진에 대한 과정은 1940년 미국의 Imperial Valley에서 발생한 El Centro wave를 적용하였다[6]. 논문에 사용된 건축구조물에 대한 파라미터는 참고문헌[7]을 참조 바란다.

그림 4는 지진을 인가하였을 경우 각각의 제어기에 대한 건축물의 응답변위를 나타낸 것이다.

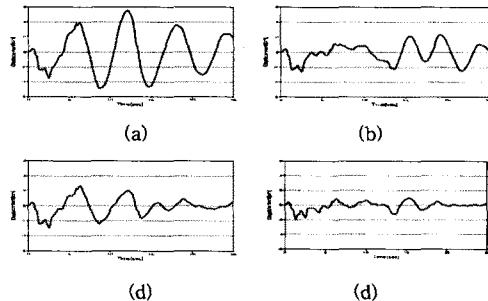


그림 4 Displacements for Earthquakes (a) Passive control(without control), (b) PID control, (c) LQ control, (d) CMIA adaptive PID control.

것으로 분석된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부(MOST) 지정 국가지정연구 실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Tani, H. Kawamura, and S. Ryu, "Intelligent fuzzy optimal control of building structures," *J. of Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, pp. 184-192, 1998.
- [2] J. Ghoboussi and A. Joghataie, "Active control structures using neural networks," *J. Engineering Mechanics*, Vol. 121, No. 4, pp. 555-567, 1995.
- [3] K. S. Lee, Mathematical Modeling and the Control of Immune Processes with Application to Cancer, Ph. D. Dissertation, Oregon State University, 1990.
- [4] 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," *Journal of Mechanical Science and Technology* Vol.19, No.1, pp. 300-311. 2005.
- [5] J. C. H. Chang and T. T. Soong, "Structural control using active tuned mass damper," *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 106, No. EM6, pp. 1091-1098, 1980.
- [6] 기상청, 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>.
- [7] 정해종, 김창화, 변정환, 양주호, " H_{∞} 제어기법에 의한 다층 층상 구조물의 진동제어에 관한 연구," *한국소음진동학회지*, Vol. 7, No. 5, pp. 803-810, 1997.

5. 결론

본 논문은 지진에 의해 발생되는 건축물의 진동을 억제하기 위하여 생명체의 면역시스템을 용용한 적용 PID제어시스템을 제안하였다. 제안한 적용 PID 제어시스템은 세포성 면역반응으로부터 유도되었으며, 제어기의 파라미터를 산출하는 진화알고리즘의 자동동조기로 구성된다. 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능이 LQ등 기존의 제어기보다 진동감쇄기능이 우수할 뿐만 아니라 제어에너지 측면에서도 개선된 것을 알 수 있었다. 특히, 논문의 지면상 나타내지는 않았지만, 제어량에 있어서도 LQ제어보다 거의 비슷하거나 적은 양을 산출하며, 이것은 제어에너지가 제동시스템에 효율적으로 인가되는