

Immunized PID 제어기를 이용한 항만 구조물의 진동제어에 관한 연구

이영진* · 이권순**

*항공기능대학 전기계측제어과 교수, **동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

A Study on Vibration Control of Port Structure using Immunized PID Controller

Young-Jin Lee* · Kwon-Soon Lee**

*Department of Electrical Instrument and Control, Korea Aviation Polytechnic College, Sachon Kyung-Nam 664-708, Korea

**Division of Electrical, Electronic, and computer engineering, Donga-A University, Busan 604-714, Korea

요약 : 본 논문은 생체시스템의 인공면역시스템을 이용한 Immunized PID 제어기를 구성하였으며, 상층부위에 제동시스템이 부착된 다층 건축물의 진동제어에 적용하였다. 인공면역시스템은 인체가 외부로부터 침투하는 바이러스, 병원균 등으로부터 보호하기 위하여 내부의 항체들이 이를 극복하기 위하여 행동하는 현상을 모델링한 것으로써 외란입력에 대한 적응성 및 강인한 응답특성을 가지고 있다. 본 논문에서 설계된 제어시스템은 항만의 건축물에 능동제어기로 적용하였으며, 바람이나 지진과 같은 환경적 부하로 인해 발생되는 건축물의 응답변위를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 그리고, 기존의 진동제어에 널리 이용되는 제어기도 함께 적용하여 제한한 제어기 성능의 우수성을 입증하고자 함과 동시에 인공면역시스템을 응용한 제어기 설계에 대한 비전도 제시하고자 한다.

핵심용어 : 진동제어, 면역알고리즘, PID 제어, 항만 구조물

ABSTRACT : In this paper, An Immunized PID(I-PID) controller based on cell mediated immune response is proposed to improve the control performance of the controller with PID scheme. And it is applied to the vibration of the building structure in the port with active damper systems. The immune system of organisms in the real body regulates the antibody and T-cells to protect the attack from the foreign materials which are virus, germ cell, and other antigens. It has similar characteristics that are the adaptation and robustness to overcome disturbances and to control the plant of engineering application. At firstly, we build a model of the T-cell regulated immune response mechanism. We have also designed an I-PID controller focusing on the T-cell regulated immune response of the biological immune system. Finally, we show that some computer simulations of the vibration control for the building structure system with wind force excitation. These results for the proposed method also show that it has performance than other conventional controller design method.

KEY WORDS : Vibration control, Immune algorithm, PID control, Port structure

1. 서 론

본 연구에서는 인공생명의 메카니즘 중 면역시스템과 유전시스템을 이용하여 건축구조물 진동제어기 설계에 관하여 다루고자 한다. 건축물의 진동제어(vibration control)는 일반적으로 외부 제어에너지의 유무를 기준으로 하여, 수동, 능동 그리고 혼합제어로 구분할 수 있다[1]. 수동제어(passive control)는 진동을 억

제하기 위한 외부 제어에너지를 필요로 하지 않으며, 건축물의 제동을 증가시키거나 건축물의 자연주파수를 이동시킴으로써 진동을 억제한다. 이 시스템은 설비장치가 간단하고 유지보수가 쉬운 장점은 있으나, 협대역(narrow band) 주파수의 외란에너지에만 효과적이므로 넓은 범위의 외란에너지(disturbance energy)에 대해서는 그다지 좋은 성능을 기대하기가 어렵다. 능동제어(active control)는 진동을 억제하기 위한 외부 제어에너지를 필요로 하며 외란에너지와 건축물의 응답을 계속적으로 모니터링(monitored)해야 한다. 능동제어는 수동에 비해 매우 효율적이며, 여러 가지 기능과 사양에 맞은 제어알고리즘을 사용

* 정희원, airlee@kopo.or.kr 055) 830-3482

** 정희원, kslee@daunet.donga.ac.kr 051) 200-7739

할 수 있는 장점을 가진다. 그러나, 이 시스템은 짧은 순간에 큰 제어에너지를 요구하기 때문에 단독으로 사용하기에는 경제적이지 못할 뿐만 아니라 비실용적이다. 따라서, 순수 능동시스템에 비해 적은 제어에너지를 요구하며, 수동과 능동의 장점으로 구성한 혼합제어(hybrid control) 시스템이 현재 많이 이용되고 있다[2,3].

현대 제어이론의 발달로 인하여 여러 가지 제어이론들이 연구 및 발표가 되고 있으며, 건축물의 진동제어에 많이 응용되고 있다. 그러나, 대부분 진동제어의 연구는 건축물의 비선형성을 무시하여 시스템을 설계하는 경향이 많다. 그 이유는 비선형 시스템에 대한 설계 및 해석이 어렵고, 수학적 표현이 매우 힘들기 때문이다. 따라서, 수학적 표현이 매우 단순하면서도 비선형 시스템에 대해서 동특성을 잘 내포할 수 있는 인공지능(artificial intelligent) 및 인공생명(artificial life) 메카니즘을 응용한 제어가 현재 활발히 연구되고 있다[3,4].

따라서, 본 논문에서는 외부의 침입(외란)에 대하여 적응적으로 대처할 수 있는 능력과 생체내부의 면역시스템을 보다 안정한 상태로 유지할 수 있는 역할을 하는 면역세포인 T-cell의 메카니즘을 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 입증하고자 한다.

2. 면역시스템

2.1 면역 시스템의 구조

생체의 면역체계는 1차 방어선과 2차 방어선으로 크게 구분 할 수 있다. 1차 방어선은 표피(integument), 즉, 피부의 히스티민(histamine)과 같은 화학적 반응에 의한 방어체계를 말하며, 2차 방어선을 일반적으로 면역시스템이라 하며, 여러 가지 림프구(lymphocytes)에 의한 특이적 방어체계를 말한다. 이러한 2차 방어선인 면역시스템을 담당하는 기본 요소는 B 세포(B 림프구)와 T 세포(T 림프구)라고 하는 두 가지 형태의 세포가 있다. B 세포는 항체를 분비하여 체액성 항체반응을 하는 것으로서 T-helper 세포(T_h)의 도움을 받아 클론선택(clonal selection)과정을 통하여 외부 침입물질에 대응하여 B 세포를 생성하며, 2차 면역반응의 중요한 역할로서 미래에 동일한 항원이 침투시에 즉각 반응할 수 있는 기억세포의 역할을 하기도 한다. 또한, T 세포는 세포성반응의 핵심 역할을 담당하는 것으로서 면역에 관련된 세포를 자극 또는 억제하거나, 병원균세포나 바이러스에 의하여 감염된 세포를 직접 죽이는 역할을 하기도 한다[5].

특히, T 세포는 이러한 두 가지 반응에 있어서 주요한 역할을 하는 면역세포로서 주요 반응 메카니즘은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

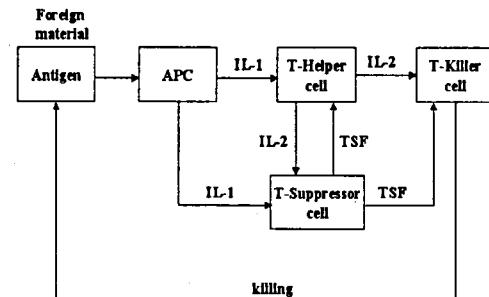


Fig. 1 A T-cells regulation mechanisms.

Fig. 1에서 보는바와 같이 외부로부터 항원(Ag)이 침입하게 되면, 이들로부터 감염된 사실을 알려주는 역할을 하는 APC(antigen presenting cell)가 인터루킨-1(interleukin-1, IL-1)을 분비하여 그 정보를 T-helper 세포에게 전달하게 되면, T-helper 세포는 활성화되어 B 세포, T-killer 세포(T_k) 및 T-suppressor 세포(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 홍분을 억제시키는 억제 메카니즘의 역할을 한다. 이러한 일련의 조정과정을 통하여 면역시스템은 안정된 상태를 되찾아 가며, 외부로부터 침입하는 물질로부터 자신을 지켜나가는 기능을 가지고 있다.

2.2 세포-분자 동력학모델을 이용한 CMI 면역반응 모델링

세포 및 분자의 동력학모델은 모든 면역반응의 기초가 되는데, 이는 보존법칙이나 화학의 질량 작용 원리에 근거한 것으로서 이를 기초로 하여 면역반응의 관계를 모델링 할 수 있다. 이러한 관계를 적용하면 세포-분자 동력학(cellular-molecular kinetics)에 근거를 두어 비선형 모델인 면역반응 수학적 모델을 만들 수 있으며, 이에 관한 자세한 사항 및 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 참고문헌 [5]에 자세히 기술되어 있다. 또한, CMI 면역반응에서 가장 핵심적인 역할을 하는 요소는 T 세포로서 세포-분자 동력학모델을 바탕으로 T 세포반응 메카니즘만을 고려하여 보면 다음과 같이 간단한 형태의 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_1}{dt} &= p_1 x_1 - \frac{x_1}{\tau_1} - p_{31} x_1 \\
 \frac{dx_2}{dt} &= p_2 x_2 - \frac{x_2}{\tau_2} - p_{31} x_2 \\
 \frac{dx_3}{dt} &= p_{34} x_3 - \frac{x_3}{\tau_3} - p_3 x_3 \\
 \frac{dx_4}{dt} &= p_4 x_4 - \frac{x_4}{\tau_4} - p_{24} x_4
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, x_1, x_2, x_3 는 각각 helper, killer 및 suppress T 세포를 나타내고, x_4 는 항원을 나타낸다. 또한, p_i 및 p_{34} 는 각 세포 및 항원의 성장계수이고, p_{31} 및 p_{24} 는 각각 다른 세포에 대한 T_s 의 억제요소와 T_k 가 항원을 제거하는 반응의 정도를 나타내는 세포활성화 계수로서 이들 모두 면역반응의 정도를 조절하는 역할을 한다.

3. 면역반응을 이용한 제어기 설계

3.1 면역반응 제어기 설계

실제로 생체 면역반응체계는 너무 복잡하여 상당 부분의 처리과정이 아직 명백히 규명되지 않고 있다. 이러한 문제점으로부터 본 연구에서는 면역반응 모델의 구체화를 위하여 세포분자 동역학 이론으로부터 얻어진 식 (1)의 세포성반응을 바탕으로 한 몇 가지 가정을 통하여 제어기 모델을 설계하고자 한다.

먼저, 실제 면역시스템의 세포성반응에서 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, Fig. 1에서 t번째 시간에 외부로부터 침입물질인 항원 $\varepsilon(t)$ 가 발생되면, 생체내의 APC에 의하여 외부물질의 발생을 면역세포에 알리게 되고, 이로부터 T_h 는 IL-2를 분비하여 식 (2)와 같은 활성화함수에 따라 T_s 및 T_k 를 자극하여 면역반응을 돋는다[6].

$$P(\varepsilon) = H_{\max} + \frac{H_{\min} - H_{\max}}{1 + \left(\frac{\varepsilon(t)}{C_h} \right)^{g_h}} \quad (2)$$

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_h 및 T_k 를 억제하는 역할을 하는데, 실제로 면역반응체계에서 항원의 증감변화는 면역시스템의 T_k 및 T_h 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.

$$TSF(\Delta T_k) = S_{\max} + \frac{S_{\min} - S_{\max}}{1 + \left(\frac{\Delta T_k}{C_s} \right)^{g_s}} \quad (3)$$

여기서, $TSF(\Delta T_k)$ 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_h , 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 세포 억제함수인 $TSF(\Delta T_k)$ 에 의하여 조절되므로 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_k(t) = K_k \{ P(\varepsilon) - TSF(\Delta T_k) \} \quad (4)$$

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

따라서, Fig. 1의 면역반응 메카니즘은 이러한 T 세포의 조정 메카니즘인 식 (2)~(4)로부터 그 구조는 Fig. 2와 같이 다시 나타낼 수 있다[6].

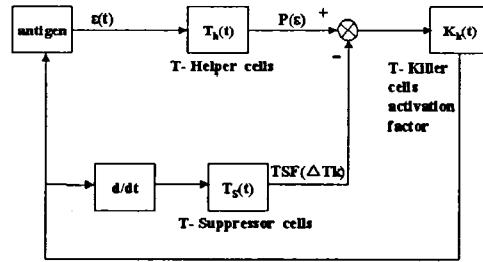


Fig. 2 A T-cell regulation mechanisms based on the CMI.

실제로 면역반응체계에서도 항원과 직접 작용하여 이를 소멸 또는 분쇄하는 역할을 하는 것은 T-killer 세포 및 대식세포와 같은 다른 몇몇 임파구들에 의하여 이루어지며, T-helper 및 B 세포는 이를 도와주는 역할을 한다. 결과적으로 외부로부터 침입한 항원을 공격하는 T-killer 세포의 양은 외부로부터 침투하는 항원 $\varepsilon(t)$ 에 의하여 결정되며, 식 (2)와 식 (3)에 의하여 조절된다고 할 수 있다. 따라서 이는 생체 내부에서 능동적으로 조절되어 내부로 침입한 항원을 제어하여 생체내를 안정한 상태로 유지시켜 나가는 역할을 한다고 할 수 있다. 또한, 식 (2)와 (3)의 세포활성화함수 및 억제함수는 제어기의 성능을 결정하는 설계 파라미터로서 고려되어질 수 있으며, 식 (4)의 $T_k(t)$ 는 항원과 직접 싸워 이를 제거하는 역할을 하므로 공학분야에서 시스템을 제어하는 제어량 $U(t)$ 로 고려될 수 있다. 따라서, ΔT_k 는 제어기의 제어량 변화인 Δu 로 생각할 수 있고, $\varepsilon(t)$ 는 시스템출력오차인 Δe 로 나타낼 수 있으며, T_k 의 성장요소인 K_k 는 제어기 스케일요소(controller scale factor)로 고려될 수 있다.

이제 우리는 지금까지의 면역반응으로부터 PID제어기의 비례(P)항과의 유사성으로부터 면역반응식을 이용한 제어기의 설계가 식 (5)와 같은 형태로 가능해지리라 생각된다.

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

(5)

여기서, $P(e)$ 는 제어기 활성화요소, $TSF(\Delta u)$ 는 제어기 억제요소, K_p 는 스케일요소로서 각각 고려될 수 있다. 그러나, 실제로 산업현장이나 많은 공학적 대상물체는 비선형성과 외부의 주위환경에 대한 영향을 받고 있기 때문에 나머지 적분과 미분항을 고려하는 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 면역반응의 비례제어 개념의 유사성으로부터 PID구조를 갖는 면역반응제어기를 설계하고자 한다. 먼저, 일반적인 PID제어기의 구조는 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{PID}(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

여기서, K_p , K_I 및 K_D 는 각각 비례, 적분 및 미분 이득항을 나타낸다. 따라서, 우리는 식 (4), (5), (6)으로부터 식 (7)과 같이 면역반응에 근거한 제어구조를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} U_{IRC}(t) &= K_1 \{ P_p(e) - TSF_p(\Delta u) \} e(t) \\ &\quad + K_2 \left\{ P_A \left(\int e \right) - TSF_A(\Delta u) \right\} \int e(t) \\ &\quad + K_3 \{ P_D(\Delta e) - TSF_D(\Delta u) \} \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

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 요소들은 다음과 같다.

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

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

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

$Time_s$ = sampling time.

또한, 제어기가 안정적인 영역내에서 동작하기 위해서는 다음의 조건들을 만족해야 하며, $K_1, K_2, K_3 > 0$, $P(\cdot), TSF(\cdot) \geq 0$ 및 $P(\cdot) \geq 0$ 이고, $TSF(\cdot) \geq 0$ 이기 위해서는 각 항에 대하여 $H_{max}, S_{max} > 0$, $H_{min}, S_{min} = 0$ 및 $C_h, C_s > 0$ 이 만족되어야 한다.

4. 건축 구조물의 모델

본 논문에서는 설계된 제어기의 성능평가를 위하여 상층부 위에 제동시스템(damping system)이 부착된 1자유도를 갖는 구조물을 이용하였다. Fig. 4는 1자유도를 갖는 건축 구조물에 대한 현상학적 모델을 나타낸다[7]. 건축 구조물의 상층 부위에 부착된 제동시스템은 건축 구조물과 같은 주파수 또는 위상차이(phase shift)로 진동하여 외란 에너지를 운동 에너지로 변환 시킴으로써 진동을 억제한다.

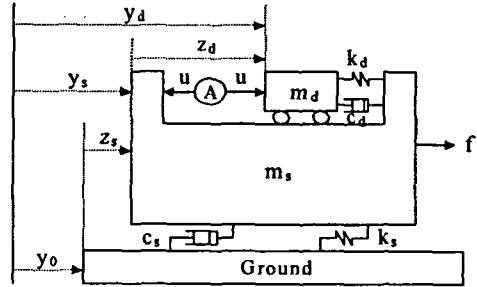


Fig. 4 SDOF structure with mass damper.

Fig. 4에서 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 액추에이터(Actuator)에 대한 기호이다. 이 모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{y}_s + c_s (\dot{y}_s - \dot{y}_0) + k_s (y_s - y_0) \\ + c_d (\dot{y}_s - \dot{y}_d) + k_d (y_s - y_d) &= f(t) - u(t) \end{aligned} \quad (13)$$

$$m_d \ddot{y}_d + c_d (\dot{y}_d - \dot{y}_s) + k_d (y_d - y_s) = u(t) \quad (14)$$

Fig. 4에서 $y_s = y_0 + z_s$ 이고, $y_d = y_0 + z_s + z_d$ 이므로 이식을 식 (13)과 (14)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_s (\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s) + c_s \dot{z}_s + k_s z_s \\ - c_d \dot{z}_d - k_d z_d &= f(t) - u(t) \end{aligned} \quad (15)$$

$$m_d (\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s + \ddot{z}_d) + c_d \dot{z}_d + k_d z_d = u(t) \quad (16)$$

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

5. 컴퓨터 시뮬레이션

설계된 제어기 성능비교는 전동 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.

I-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 Immune PID 제어기의 파라미터로는 $P_p(e)$, $P_A(\int e)$, 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 Immune Algorithm을 이용하여 동조하

였다[8]. 시뮬레이션에 적용된 풍력과 지진에 대한 방정식과 파형은 식 (17) 및 Fig. 5, 6과 같다[9].

$$f_i = \frac{i}{n} p(3 \sin \omega t + 7 \sin 2\omega t + 5 \sin 3\omega t + 4 \sin 4\omega t) \quad (17)$$

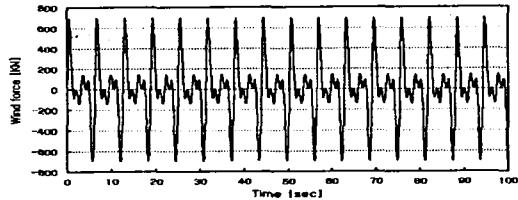


Fig. 5 Wind forces.

식 (17)에서 ω 는 풍력의 기본주파수이고, p 는 풍력의 크기를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 ω 를 1[rad/sec]로 하였고, p 는 43.4[kN]으로 하였다. 지진은 1940년 미국의 Imperial Valley에서 발생한 El Centro wave를 적용하였으며, 그림 6은 파형을 나타낸다[10].

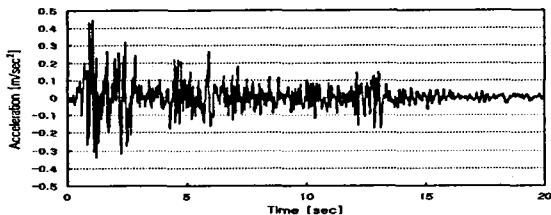


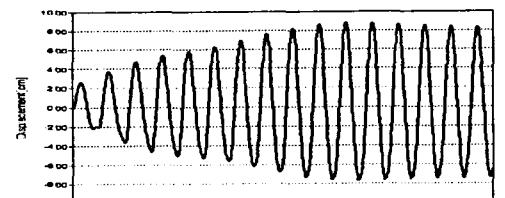
Fig. 6 El Centro wave.

본 논문에서 적용한 단층 건축물의 파라미터는 표 1과 같다.

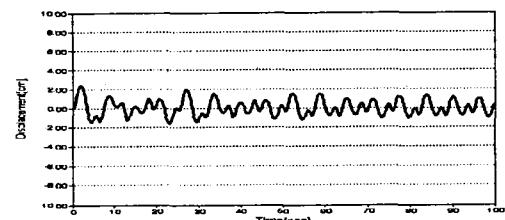
표 1. 건축물의 파라미터.

Floor	m [ton]	c [kN-sec/m]	k [kN/m]
Damper	172.8	76.98	843.97
1	345.6	490	3.40×10^5

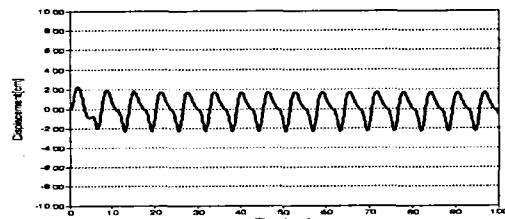
Fig. 7은 풍력을 인가하였을 때 수동시스템, LQ 제어, TDOF-PID 그리고,IRC 제어기를 각각 적용하였을 경우에 대한 구조물의 응답변위를 나타낸다.



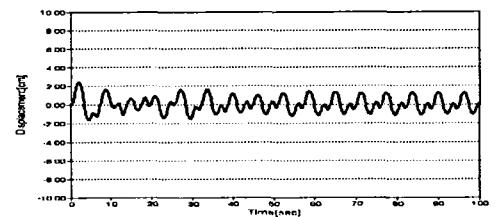
(a) Passive control(without control)



(b)



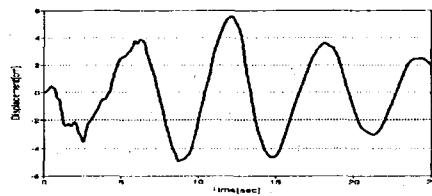
(c)



(d)

Fig. 7 Displacements for wind forces (a) Passive control(without control), (b) PID control, (c) LQ control, (d) I-PID control.

그림 8은 지진을 인가하였을 경우 각각의 제어기에 대한 건축물의 응답변위를 나타낸 것이다.



(a)

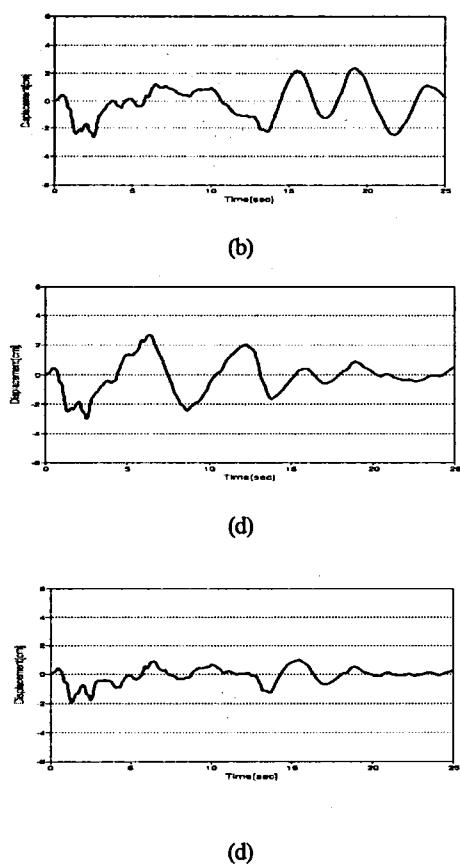


Fig. 8 Displacements for Earthquakes (a) Passive control(without control), (b) PID control, (c) LQ control, (d) I-PID control.

5. 결 론

본 논문은 풍력이나 지진과 같은 환경적 부하로 인해 발생되는 건축물의 진동을 억제하기 위하여 생명체의 면역시스템을 응용한 면역 PID제어시스템을 제안하였다. 제안한 면역 PID 제어시스템은 T-cell의 조정 메카니즘과 PID 제어기 그리고 제어기의 파라미터를 산출하는 진화알고리즘의 자동등조기로 구성된다. 시뮬레이션을 통해 제안한 제어기의 성능이 LQ등 기존의 제어기보다 진동감쇄기능이 우수할 뿐만 아니라 제어 에너지 측면에서도 개선된 것을 알 수 있었다. 특히, 논문의 지면상 나타내지는 않았지만, 제어량에 있어서도 LQ제어보다 거의 비슷하거나 적은 양을 산출하며, 이것은 제어에너지가 제동시스템에 효율적으로 인가되는 것으로 분석된다. 또한, 본 논문에서는 제어기 설계의 기초단계로서 가급적 제어기의 안정성을 유지하기 위하여 세포성장계수와 같은 비선형적 요소는 고려하지 않았지만, 향후 이러한 요소들도 고려하여 보다 면역체계에 가까운 제어기 설계가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다

참 고 문 헌

- [1] H. Iemura, et al., "Comparison of passive, active and hybrid control techniques on earthquake response of flexural structures," *Proc. of the U.S.-Italy-Japan Workshop/Symposium on Structural Control and Intelligent Systems*, pp. 117-125, 199
- [2] 허석, 이승범, 곽문규, 백광현, "적응형 PPF 제어기를 이용한 지능구조물의 실시간 능동진동제어," *한국소음진동공학회 논문집*, 제 14권, 제 4호, pp. 267-275, 2004.
- [3] 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.
- [4] J. Ghaboussi and A. Joghataie, "Active control structures using neural networks," *J. Engineering Mechanics*, Vol. 121, No. 4, pp. 555-567, 1995.
- [5] K. S. Lee, Mathematical Modeling and the Control of Immune Processes with Application to Cancer, Ph. D. Dissertation, Oregon State University, 1990.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Y. J. Lee and K. S. Lee, "A Design of Adaptive Controller based on Immune System," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 10, No. 12, pp.1137-1147, 2005.
- [9] 정혜종, 김창화, 변정환, 양주호, " H_{∞} 제어기법에 의한 다층 층상 구조물의 진동제어에 관한 연구," *한국소음진동학회지*, Vol. 7, No. 5, pp. 803-810, 1997.
- [10] 기상청, 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>.