

## 면역반응 알고리즘을 이용한 구조물의 진동제어<sup>+</sup>

이 영진\* · 이 권순\*\*

A Vibration Control of the Structure using  
Immune Response Algorithm

*Y. J. Lee · K. S. Lee*

**Key Words :** 1자유도(Single Degree of Freedom, SDOF) 구조물, 진동제어(Vibration Control),  
능동제어(Active Control), 면역반응제어기(Immune Response Control, IRC), 세포  
성반응(Cell-Mediated Immune Response, CMI), 2자유도(Two Degree of Freedom,  
TDOF) PID 제어기, LQ 제어기

### Abstract

In the biological immunity, the immune system of organisms regulates the antibody and T-cells to protect the attack from the foreign materials which are virus, germ cell, and other antigens, and supports their stable state. It has similar characteristics that has the adaptation and robustness to overcome disturbances and to control the plant of engineering application. In this paper, we build a model of the T-cell regulated immune response mechanism. We have also designed an immune response controller(IRC) focusing on the T-cell regulated immune response of the biological immune system that include both a help part to control the response and a suppress part to adjust system stabilization effect. We show some computer simulation to control the vibration of building structure system with strong wind forces excitation also demonstrate the efficiency of the proposed controller for applying a practical system even with existing nonlinear terms.

+ 본 연구는 한국과학재단 지정 동아대학교 지능형통합망관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.

\* 정회원, 동아대학교 전기공학과 박사과정

\*\* 정회원, 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

## 1. 서 론

최근 건축자재의 발달과 시공기술의 발전으로 인하여 도시속의 빌딩이나, 항만 및 공항등에 설치된 시설물 및 관제타워와 같은 건축물들이 고층화, 대형화 및 유연 경량화 되어감에 따라 풍력이나 지진과 같은 환경적 외란에 더욱 민감해져 보다 견실한 건축물의 진동대책이 요구되고 있다. 특히, 도심지 속의 빌딩들에 비해 바다에 인접한 항만이나 공항 등에 설치된 높은 건축구조물들은 항시 바람에 의한 진동발생의 위험성을 안고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 능동제어시스템을 빌딩의 건축 구조물에 적용하여 진동을 억제하는 방법이 많이 연구되고 있는가 하면, 최근 국내에서도 바다에 인접한 영종도 공항의 관제탑에 진동저감을 위한 능동제어시스템을 적용하였다. 이러한 제어이론으로는 지난 십수년간 현대 제어이론의 발전으로 인하여 수학적 모델이 비교적 간단한 LQ/LQR, PID제어기를 비롯한 자동제어 등 여러 가지 제어이론들을 접목시킴으로서 다양한 능동제어시스템을 구성하고 있다[1]. 본 논문에서는 이러한 능동제어 시스템 개발의 일환으로서 생체의 면역체계를 모델링한 면역반응제어시스템을 1자유도 (single degree of freedom, SDOF)를 갖는 구조물의 진동제어에 적용하고자 한다.

지금까지 알려진 바에 따르면, 생체내에서 생물체의 행동을 결정하는 생체정보처리시스템 (biological information processing system)은 크게 뇌신경시스템(brain nervous system), 유전시스템(genetic system), 면역시스템(immune system), 내분비시스템(endocrine system)의 네 가지로 나누어 생각할 수 있다[2]. 그 중 유전시스템은 유전알고리즘(genetic algorithm)으로 뇌신경계는 신경회로망(neural networks)으로 각각 모델링되어 인공생명(artificial life)의 훌륭한 도구로서 다양한 분야에서 응용되고 있다[3,4]. 반면, 면역시스템과 내분비시스템에 관해서는 고도의 정보처리구조을 가지고 있음에도 불구하고 그 현상 및 원리가 명확히

규명되지 않아 공학적으로 응용된 사례가 그리 많지 않는 실정이다.

특히, 본 연구에서 다루고자 하는 면역시스템은 생체내에 투입되는 항원(antigen) 혹은 박테리아(bacteria) 및 병원균세포(germ cell)와 같은 외부침투물질을 인식하여 이를 방어하고 생체내부의 안정된 상태를 스스로 조절해 나가는 진화적 생체방어 시스템으로 보고되고 있다. 뿐만 아니라, 이러한 면역시스템은 다른 생체정보처리시스템과 같이 적응성, 학습, 기억 및 인식 등의 능력을 가지고 있어 이를 활용한 공학적 응용사례가 점차 많아지고 있어 보다 체계적인 연구를 통한 이론적 정립이 요구되고 있다[5,6].

생체의 면역시스템은 크게 체액성반응(humoral response)과 세포성반응(cell-mediated immune response, CMI)으로 나누어 생각할 수 있다. 먼저, 체액성반응은 항원·항체반응으로서 이를 이용한 응용사례는 Jerne[7]의 척추동물 내부에 있는 항체의 규제에 대한 가설을 바탕으로 한 인공면역망 (artificial immune network)이 그 대표적인 예이다 [2]. 또한, Jerne의 농도식에 기초한 항원과 항체간의 친밀성과 클론(clonal) 생성을 위한 유전자 진화를 통한 다양성에 바탕을 둔 면역 알고리즘 (immune algorithm)도 개발되어 전력계통의 경제급전문제[8], TSP문제[5], 전자석의 최적설계[9] 등에도 적용되고 있다. 이외에도 Dasgupta[10]의 저서를 참조하면 다양한 응용분야를 접할 수 있다.

이와 다른 또 하나의 면역반응체계로는 바이러스나 발암성물질 등에게 침범된 세포들에 직접 작용하는 세포성반응을 들 수 있는데, 최근 이러한 메카니즘을 부분적으로 응용하여 피드백 제어기 설계에 적용한 사례가 보고되고 있으나[11], 전체적인 메카니즘에 대한 안정성과 이론적 정립이 미흡한 상태로서 이에 대한 보다 체계적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 T-cell의 세포성반응모델을 이용하여 제어기를 설계하고자 한다. 또한, 제안한 제어기의 성능 평가를 위하여 1자유도 구조물에 풍력이 인가되었을

때의 응답변위를 컴퓨터 시뮬레이션으로 나타내었으며, 기존의 선형 제어기법과도 비교 분석하므로서 건축 구조물의 재진 대책에 대한 기초 연구가 되고자 한다.

## 2. 면역 반응의 수학적 모델링

### 2.1 면역 시스템의 구조

생체의 면역체계는 1차 방어선과 2차 방어선으로 크게 구분할 수 있다. 1차 방어선은 표피(integument), 즉, 피부의 히스타민(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 침입 물질에 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[7,12].

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

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

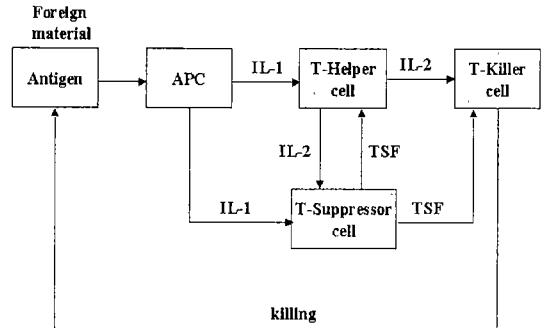


Fig. 1 A T-cells regulation mechanisms.

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 흥분을 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 [12]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.

$$\frac{dx_1}{dt} = p_1 x_1 - \frac{x_1}{\tau_1} - p_{31} x_1$$

$$\begin{aligned}\frac{dx_2}{dt} &= p_2x_2 - \frac{x_2}{\tau_2} - p_{31}x_2 \\ \frac{dx_3}{dt} &= p_{34}x_3 - \frac{x_3}{\tau_3} - p_3x_3 \\ \frac{dx_4}{dt} &= p_4x_4 - \frac{x_4}{\tau_4} - p_{24}x_4\end{aligned}\quad (1)$$

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 이를 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.

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

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  $\Delta T_k$ 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 세포억제함수인  $TSF(\Delta T_k)$ 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.

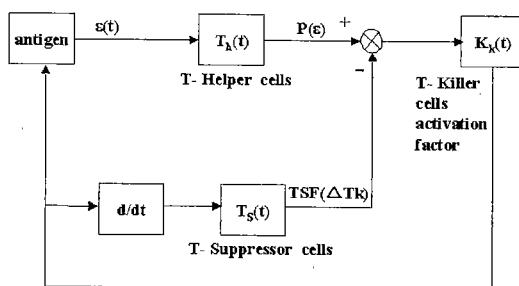


Fig. 2 A T-cell regulation mechanisms on the CMI.

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,  $\Delta T_k$ 는 제어기의 제어량 변화인  $\Delta u$ 로 생각할 수 있고,  $\varepsilon(t)$ 는 시스템출력오차인  $\Delta e$ 로 나타낼 수 있으며,  $T_k$ 의 성장요소인  $K_k$

는 제어기 스케일요소(controller scale factor)로 고려될 수 있다.

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

$$U(t) = K_p \{P(e) - TSF(\Delta u)\}e(t) \quad (5)$$

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 PID 구조를 갖는 면역반응제어기를 설계하고자 한다. 먼저, 일반적인 PID제어기의 구조는 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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.

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

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 억제요소이

며, 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.

### 3.2 Hybrid-ES 알고리즘을 이용한 IRC의 최적설계

본 연구에서 제안한 제어기는 설계시 고려되어야 하는 제어기 파라미터가 비선형 요소를 포함하고 있어 이에 대한 최적의 조정이 요구된다. 따라서, 먼저 설계된 제어기의 성능과 안정성을 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 자동동조로 최적의 파라미터를 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 제어기 성능을 평가하였다. 본 논문에서 적용한 Hybrid-ES는 ES(evolutionary strategy)와 SA(simulated annealing) 알고리즘을 복합적으로 적용하여 진화론적 탐색과 확률론적 탐색을 하므로서 향상된 해의 탐색능력을 가질 수 있도록 설계하였다[4].

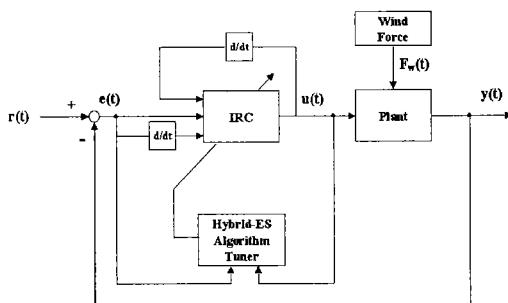


Fig. 3 Hybrid-ES tuned IRC system.

제어기 파라미터 자동동조를 위하여 사용된 SA법은 식 (8)과 같은 볼츠만(Boltzmann) 확률에 따라 비록 다음 세대의 자손이 우수한 생존확률을 가지고 있지 않더라도 우수한 자손이 다음세대의 부모로 선택될 수 있도록 하였다.

$$prob(t) = \exp(-\Delta E / T(t)) \quad (8)$$

여기서,  $\Delta E = f(x^{t+1}) - f(x^t)$ 이고  $f(x)$ 는 각 개체의 생존확률을 나타내며,  $T(t)$ 는 SA법의 쿨링 스케줄(cooling schedule)을 나타내는 것으로서 탐색시간을 빠르게 하기 위하여 다음과 같다[13].

$$T(t) = T_0 / \log(1+t) \quad (9)$$

그러나, 이러한 탐색이 국부해에 빠지지 않게 하기 위하여 식 (10)과 같이 각 개체군의 진화레벨에 따라 각 세대에 페널티를 적용하여 우수한 개체는 더욱 많은 자손을 낳을 수 있도록 하고, 그렇지 못한 개체는 도태시키도록 하였다.

$$P_i(t+1) = \Sigma P(t) \times Level_i \quad (10)$$

여기서,  $P_i(t+1)$ 은  $t$ 번째 세대에  $i$ 번째 개체군이 가질 다음세대의 개체수이고,  $\Sigma P(t)$ 는 현재세대의 모든 개체군의 자손 수이며,  $Level_i$ 는  $i$ 번째 개체군이 가지고 있는 진화레벨로서 식 (11)과 같다.

$$Level_i = \frac{S_i}{Total_S} \quad (11)$$

여기서,  $S_i$ 는 한 세대에서  $i$ 번째 개체군 중에서 다음세대에 살아남을 우수한 개체의 수이며,  $Total_S$ 는 모든 개체군에 대한  $S_i$ 의 총수를 나타낸다. 또한, 각 세대의 적합도는 시스템 위치오차와 제어에너지를 고려하여 다음과 같이 하였다.

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{ R_1 \cdot e^2(t) + R_2 \cdot u_{rms}^2(t) \} \quad (12)$$

여기서,  $e^2(t)$ 는 출력오차,  $u_{rms}^2(t)$ 는 제어 실효(RMS) 에너지이며,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 출력오차와 제어 에너지의 Scaling factor로서 경험적으로 결정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 사용한 SA 및 ES 알고리즘의 파라미터는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of the hybrid-ES algorithm.

parameters		values
ES	population size	10
	total generation No.	300
	mutation rate	25[%]
SA	Starting temperature	100[°C]

#### 4. 건축 구조물의 모델

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

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 액츄에이터(Actuator)에 대한 기호이다. 이 모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

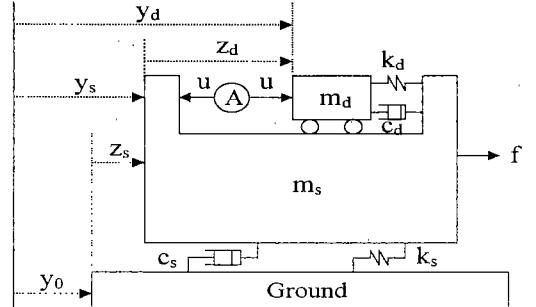


Fig. 4 SDOF structure with mass damper.

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

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

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

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

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

그리고,  $f$ 는 풍력에 대한 기호로서, 본 연구에서는 풍력에 대한 건축물의 진동제어를 다루었다.

#### 5. 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서 구성한 면역반응 제어기의 성능을 검토하기 위하여 1자유도의 건축 구조물에 능동제어기로 적용하였으며, 풍력이 인가되었을 때 발생하는 구조물의 변위를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 설계된 제어기 성능비교는 진동 제어 이론으로 많이 사용되고 있는 LQ 제어 및 고전적

PID제어기보다 외란에 대하여 보다 우수한 성능을 보이는 TDOF(2 degree of freedom)-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.

IRC제어기 설계를 위하여 먼저, 역제량과 자극량을 결정하는 요소들 중 비선형적 요소를 가급적 줄이기 위하여  $g_s$ 와  $g_h$ 는 1로 두었으며, 최적 조정이 요구되는 IRC 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. 시뮬레이션에 적용된 풍력에 대한 방정식과 과정은 식 (17) 및 Fig. 5와 같다[14].

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

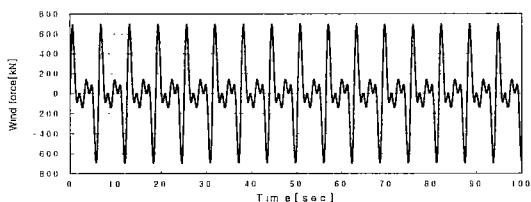


Fig. 5 Wind forces.

식 (17)에서  $\omega$ 는 풍력의 기본주파수이고,  $p$ 는 풍력의 크기를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는  $\omega$ 를  $1[\text{rad/sec}]$ 로 하였고,  $p$ 는  $43.4[\text{kN}]$ 으로 하였다. 또한, 적용된 구조물 모델의 파라미터는 Table 2와 같다.

Fig. 6은 풍력을 인가하였을 때 수동시스템, LQ 제어, TDOF-PID 그리고, IRC 제어기를 각각 적용하였을 경우에 대한 구조물의 응답변위를 나타낸다.

Table 2 Parameters of the building structure.

Factors	mass	damper	stiffness
	$m$ [Ton]	$c$ [kN-sec/m]	$k$ [kN/m]
damper	362	23.8	301
1 floor	$181 \times 10^2$	362	$181 \times 10^2$

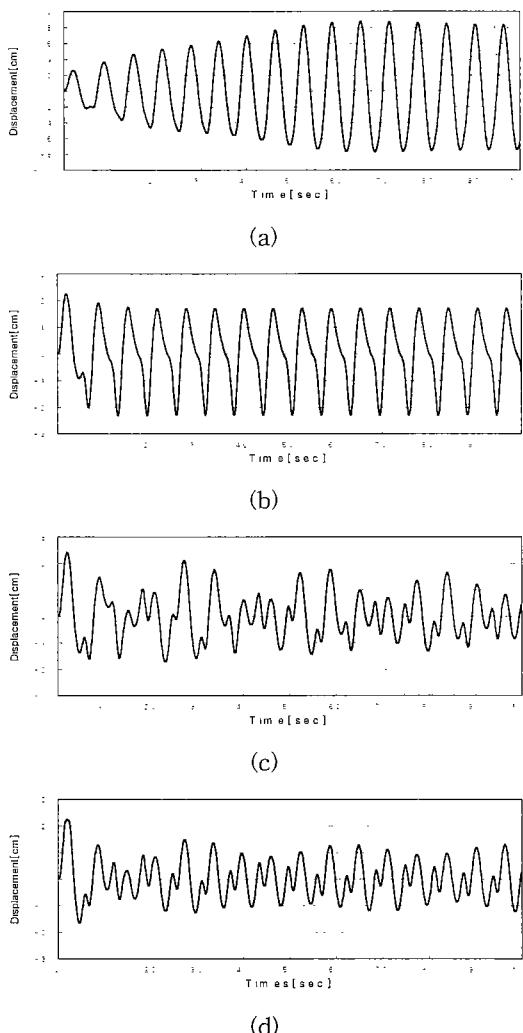


Fig. 6 Displacements for wind forces (a) Passive control(without control), (b) LQ control, (c) TDOF-PID control, (d) IRC control.

Fig. 7은 제어에너지의 파형을 나타낸 것이다.

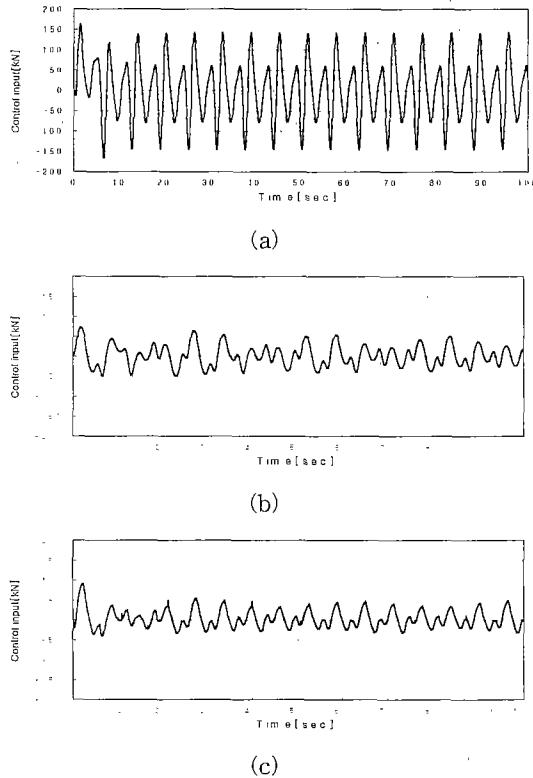


Fig. 7 Control forces (a) LQ control, (b) TDOF-PID control, (c) IRC control.

또한, Fig. 8은 PID제어기의 파라미터를 나타내는 것으로서 면역반응 알고리즘에 의하여 적응적으로 동조됨을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과, 수동제어와 비교시 각 제어기의 변위오차의 RMS값은 LQ제어의 경우 74%정도

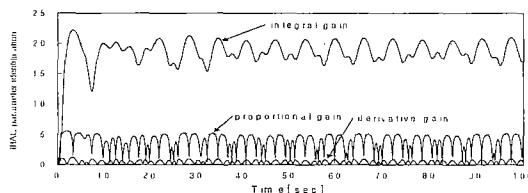


Fig. 8 Identification of PID controller parameters.

가 개선되었으며, TDOF-PID제어기의 경우는 82%, 제안한 IRC제어기는 84%정도가 각각 개선되었다. 또한, 제어량의 경우 LQ제어에 비하여 TDOF-PID제어는 64%, 제안한 알고리즘은 83%정도 개선된 것으로 나타났다. 이상에 대한 실험 결과를 요약하면 다음의 Table 3과 같다.

Table 3 Performances of controller.

Controller	Displacement	Control input
	RMS[cm]	RMS[kN]
Passive	1.534	-
LQ	0.385	42.96
TDOF-PID	0.276	15.21
IRC	0.239	7.21

## 6. 결 론

본 연구에서는 생체 면역반응체계를 모델링하여 이를 제어기 설계에 이용하였으며, 전축 구조물에 풍력과 같은 환경적 부하로 인해 발생되는 진동을 억제하기 위하여 능동제어기로 적용하여 보다 우수한 제어기설계에 대한 가능성을 보였다. 그리고, 기존의 진동제어에 널리 이용되고 있는 제어기와 수동제어기도 함께 적용하여 제어성능을 비교 분석하였다. 실험을 통해 제안한 제어기의 성능이 LQ등 기존의 제어기보다 진동감쇄기능이 우수할 뿐만 아니라 제어에너지 측면에서도 개선된 것을 알 수 있었다.

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.

## 참고문헌

- 1) Chang, J. C., and Soong, T. T., "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.
- 2) Ishiguro, A., Konodo, T., Watanabe, Y., and Uchikawa, Y., "A Reinforcement Learning Method for Dynamic Behavior Arbitration of Autonomous Mobile Robots Base 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.
- 3) Omatsu, S., Khalid, M., and Yusof, R., Neuro-Control and Its Applications, Springer, 1995.
- 4) Michalewicz, Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1994.
- 5) Endoh, S., Toma, N., and Yamada, K., "Immune algorithm for n-TSP", Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 4, pp. 3844-3849, 1998.
- 6) Forrest, S., Javornik, B., Smith, R., and Perelson, A. S., "Using Genetic Algorithms to Explore Pattern Recognition in the Immune System," Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 3, pp. 191-211, 1993.
- 7) Jerne, N. K., "The Immune System," Scientific American, Vol. 229, No. 1, pp. 52-60, 1973.
- 8) Huang, S. J., "Enhancement of Thermal Unit commitment using Immune Algorithms based Optimization Approaches," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 21, pp. 245-252, 1999.
- 9) Chun, J. S., Kim, M. K., and Jung, H. H., "Shape Optimization of Electromagnetic Devices using Immune Algorithm," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1876-1879, 1997.
- 10) Dasgupta, D., Artificial Immune Systems and Their Applications, Springer, 1997.
- 11) Takahashi, K., and Yamada, T., "Application of an Immune Feedback Mechanism to Control Systems," International Journal of JSME, Series C, Vol. 41, No. 2, pp. 184-191, 1998.
- 12) Lee, K. S., Mathematical Modeling and the Control of Immune Processes with Application to Cancer, Ph. D. Dissertation, Oregon State University, 1990.
- 13) Szu, H., and Hartley, R., "Fast Simulated Annealing", Physics Letters A, Vol. 120, No. 3, pp. 157-162, 1987.
- 14) 정해종, 김창화, 변정환, 양주호, "H<sub>∞</sub> 제어기법에 의한 다층 층상 구조물의 진동제어에 관한 연구," 한국소음진동학회지, Vol. 7, No. 5, pp. 803-810, 1997.