

# 실수코딩 유전알고리즘을 이용한 컨테이너 크레인용 제어기 설계

주 상 래\* · 진 강 규\*\*

## Design of a Controller for Container Cranes Using a Real Coding Genetic Algorithm

Sang-Rae Joo\* · Gang-Gyoo Jin\*\*

### Abstract

This thesis presents the design of a state feedback controller for container cranes under some design specifications. The development of the controller involves a series of constrained optimization problems. A real coding genetic algorithm is, therefore, proposed to solve these complex problems and the optimal region of its control parameters is obtained via a lot of simulation works. The responses of the proposed control system are compared with those of the unconstrained optimal control system.

### 1. 서 론

컨테이너 크레인은 구조상 복잡한 비선형 요소와 진자 운동특성을 가지므로 제어기 설계가 까다롭다. 관련한 연구를 살펴보면, Manson[1]은 천장크레인의 시간최적제어를 소개하였고, Sakawa와 Shindo[2]는 컨테이너의 이동궤적별로 흔들림 각도가 최소가 되도록 하였으며, Yasunobu[3]는 퍼지이론을 이용하여 크레인의 예진 제어기를 설계하였다. 컨테이너 크레인은 작업목적에 따라서 각종 제약조건이 다르므로 이를 만족하도록 제어기를 설계하는 문제는 복잡한 최적화 문제를 야기한다. 이때는 기존의 구배법에 기초한 탐색법으로는 해를 얻기가 어렵고, 유전알고리즘과 같은 진화알고리

\* 한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정

\*\* 한국해양대학교 자동화·정보공학부 교수

즘을 사용하여 해결할 수 있다.

유전알고리즘[4]은 자연의 진화원리를 알고리즘상에서 구현한 것으로서 다양한 최적화 문제 해결에 응용되고 있으며, 이진코딩과 표준 연산자가 가장 보편적으로 이용되고 있다[5]. 그러나 이진코딩을 제약조건이 따르는 문제에 적용하면 부적합한 해를 생성하므로 본 논문에서는 실수코딩 기법에 기초한 유전알고리즘을 제안하고, 최적의 매개변수 값을 구하였다.

제안한 유전알고리즘은 크레인 시스템의 최적 제어기 설계문제에 응용하였다. 시스템의 응답특성에 근거하여 제약조건을 위배할 때 그 정도에 따라 벌점을 추가하는 벌점전략을 도입하여 비제약성 최소화 문제로 변환하였다. 제안하는 방법을 기존의 최적 제어 기법과 비교하여 그 효용성을 확인하였다[6,7].

## 2. 컨테이너 크레인의 모델링

컨테이너 크레인 시스템의 선형 모델은 다음과 같이 표시된다.

$$\ddot{x} = -\frac{b_1}{M} \dot{x} - \frac{mg}{M} \theta + \frac{1}{M} F \quad (1a)$$

$$\ddot{\theta} = -g\left(\frac{M+m}{lM}\right)\theta - \frac{b_1}{lM} \dot{x} + \frac{1}{lM} F \quad (1b)$$

여기서  $x$ 는 트롤리의 이동거리,  $\theta$ 는 컨테이너의 진동각도,  $l$ 은 탄성로프의 길이,  $M$ 은 트롤리의 질량,  $m$ 은 컨테이너의 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $b_1$ 은 트롤리 휠의 마찰계수,  $F$ 는 트롤리에 가해지는 힘이다.  $F$ 를 제어입력  $u$ 라 하고 이를 선형화 하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (2a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (2b)$$

$$\text{단, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b_1}{M} & -\frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{b_1}{lM} & -g\left(\frac{M+m}{lM}\right) & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ \frac{1}{lM} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (2c)$$

여기서 상태벡터는  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ 와 같이 정의된다.

### 3. 실수코딩 유전알고리즘

#### 3.1 표현

k세대의 실수코딩 염색체는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{s}(k) = \mathbf{x}^T(k) = (x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_n(k)) \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{s}(k)$ 는 염색체,  $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ 는 해 벡터이고,  $n$ 은 벡터의 차원이다. 또,  $N$ 개의 염색체 개체로 구성되는 k세대의 집단은 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{P}(k) = \{\mathbf{s}_1(k) \ \mathbf{s}_2(k) \ \cdots \ \mathbf{s}_N(k)\} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{s}_i(k)$ 는  $i$ 번째 염색체,  $x_{ij}(k)$ 는  $i$ 번째 염색체의  $j$ 번째 요소이고,  $N$ 은 집단의 크기이다.

#### 3.2 개선된 유전 연산자

제안하는 유전알고리즘도 재생산(Reproduction), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)를 기본 연산자로 채용한다. 또한 한 세대에서의 최적 개체가 다음 세대에서도 생존하도록 엘리트전략을 채택하였다.

##### 3.2.1 재생산 연산자

자연선택 현상을 모방한 재생산 연산자는 유전알고리즘의 성능을 좌우하는 중요한 연산자이다. 루울렛휠 선택에 기초한 재생산 연산자가 폭넓게 이용되고 있지만, 이는 전적으로 선택확률에 의존함으로써 세대 초기에 초우량 개체가 존재하게 되면 준최적해(Suboptimal solution)에 조기수렴 하는 문제점이 발생된다.

이를 보완하기 위해 Pham과 Jin이 제안한 연산자를 채용하며[7], 이 연산자가 가지는 매개변수로서의 재생산 계수를 1차원의 가우시안 분포(Gaussian distribution) 안에서 선정하도록 개선한다. 이 연산자는 다음 단계를 통해 동작한다.

##### 3.2.2 교배 연산자

자연계의 성적 재생산을 흉내낸 교배 연산은 탐색공간상의 새로운 점을 찾기 위하여 교배급원으로 부터 아버지 염색체 쌍을 임의로 선택하고, 임의로 선택된 교배점 이후의 유전인자들을 서로 교환, 결합하여 자손을 생성한다. 본 논문에서는 교배점의 요소는 일차결합 형태로 변경되고, 교배점 이후의 요소들은 서로 교환되는 이진코딩 단순

교배[4]와 실수코딩 선형교배[5]를 결합한 형태의 교배연산자를 제안한다.

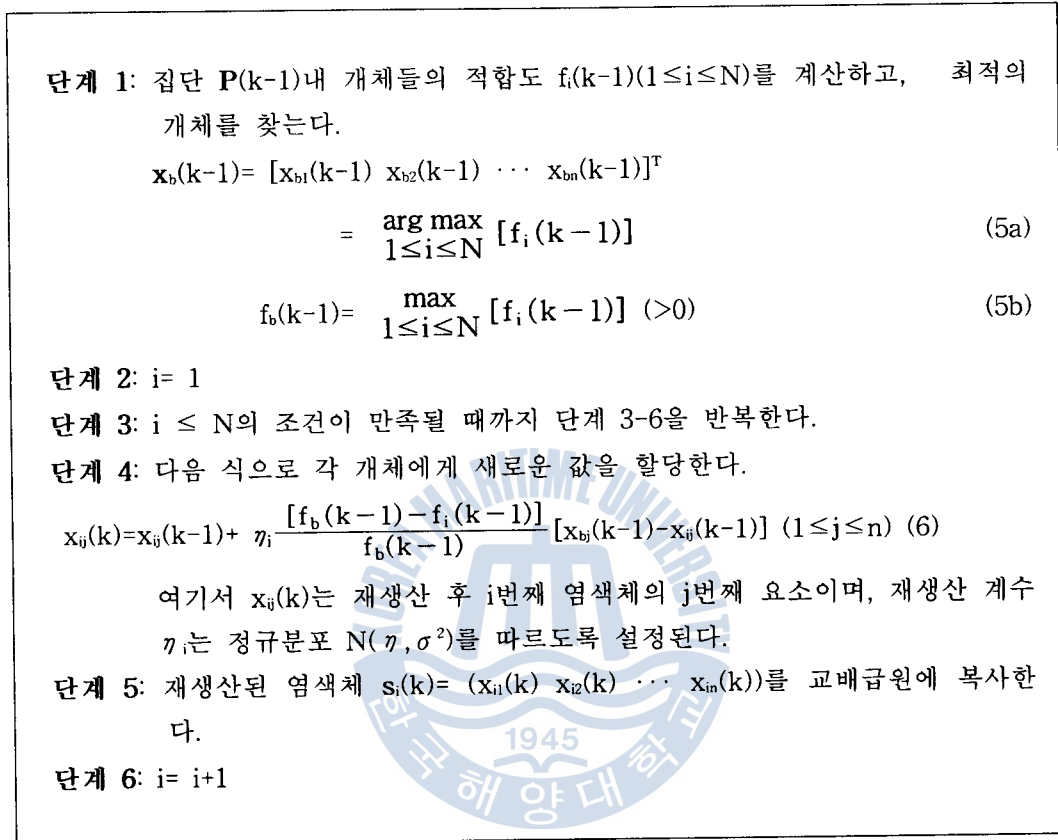


Fig. 1 Operation of gradient-like reproduction

### 3.2.3 돌연변이 연산자

유전알고리즘이 지역해(Local solution)나 사점(Dead corner)에 빠지게 될 경우에는 이로부터 벗어나게 하고, 더 넓은 영역을 탐색할 수 있도록 돌연변이가 필요하다. 실수코딩의 경우에도 돌연변이가 요구되며, 이 경우에는 기존의 연산자와는 다른 형태가 되어야 한다. 제안한 유전알고리즘에서는 균등 돌연변이[5]를 사용하는데, 특정 요소에 돌연변이가 일어나면 정의영역 하한치와 상한치 사이에서 임의로 발생된 난수값으로 치환하였다.

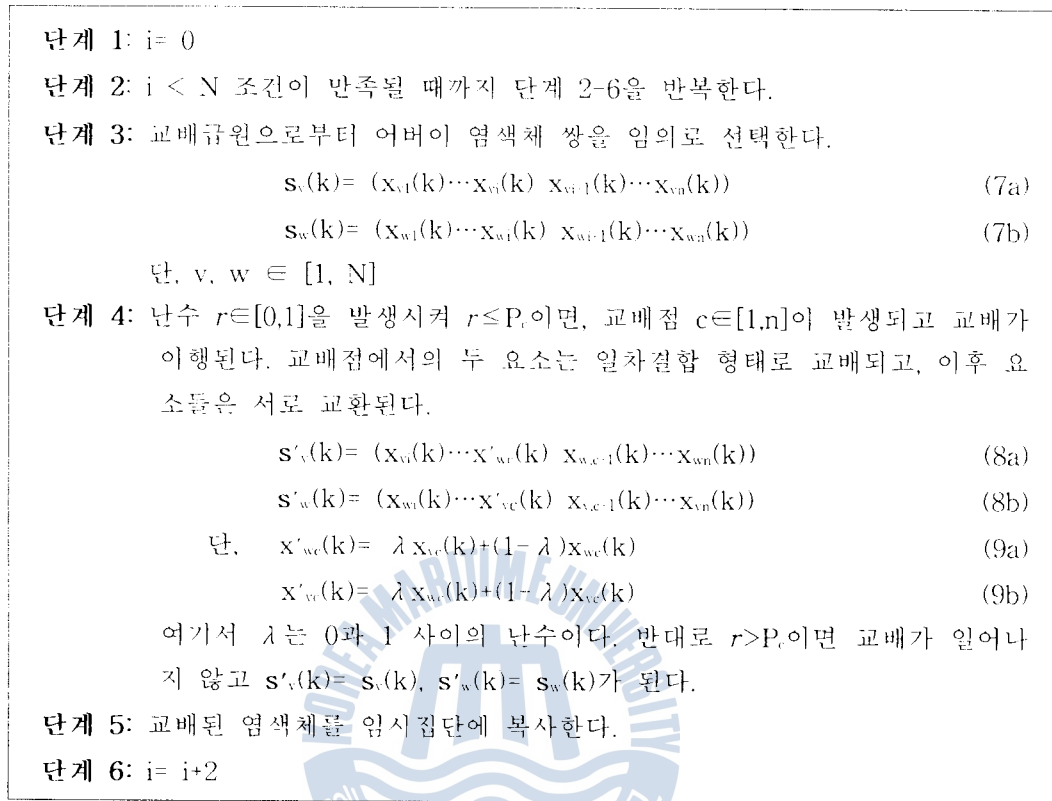


Fig. 2 Operation of the proposed crossover operator

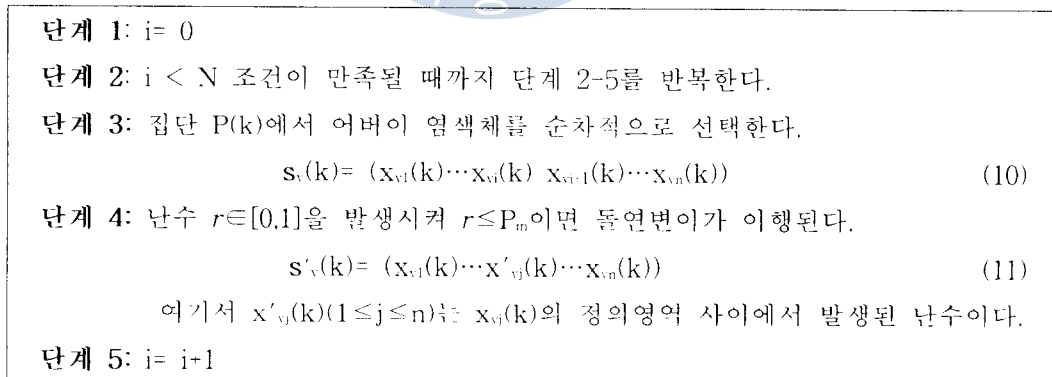


Fig. 3 Operation of the mutation operator

### 3.2.4 엘리트 전략

현 세대에서 최적 개체는 재생산에서 반드시 선택되지만 이후의 연산자를 거치는 동안 파괴될 수도 있다.

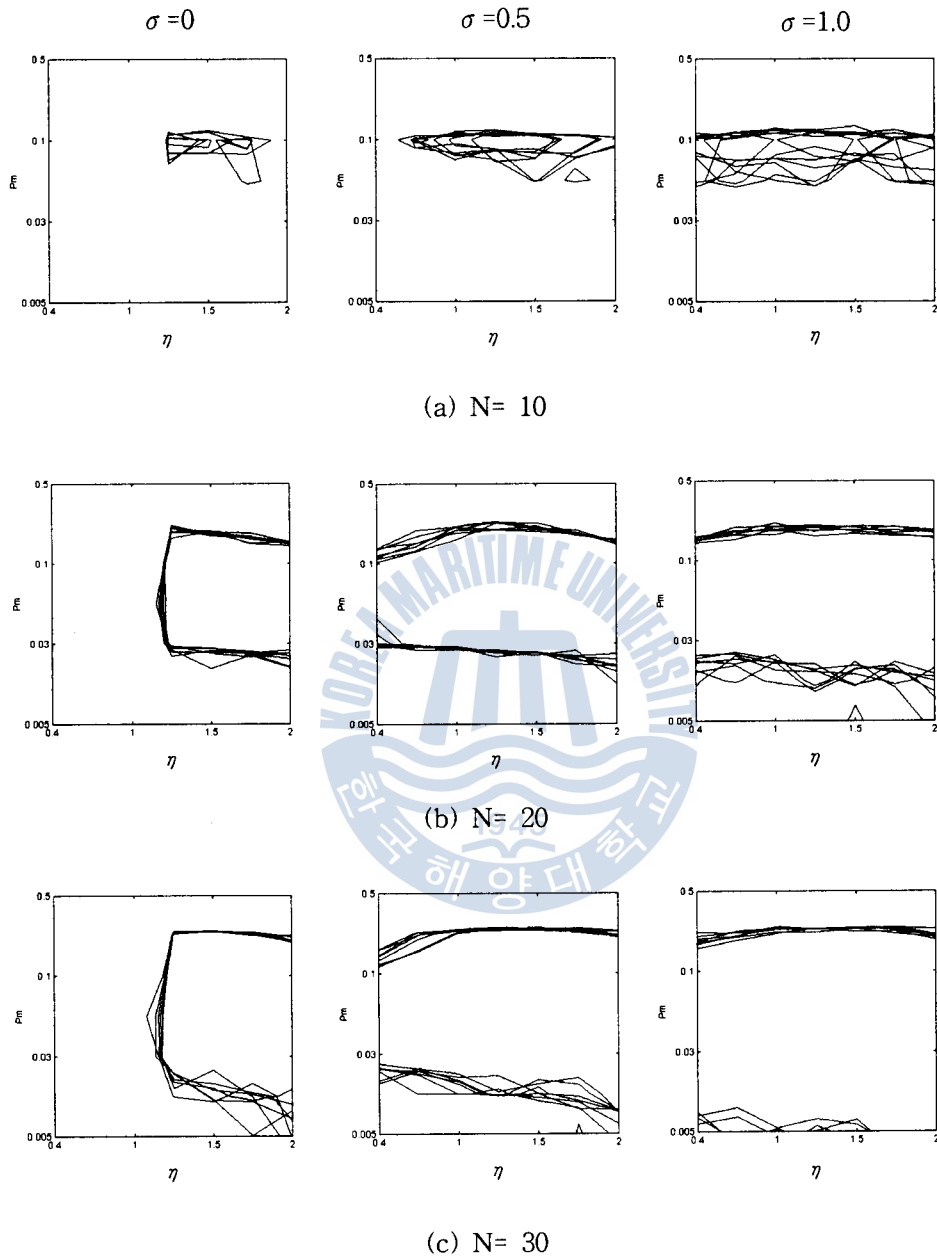


Fig. 4 Optimal region of the control parameters(98%)

최적 개체의 소멸은 좋은 유전인자를 잃게되는 요인이 되므로 다음 세대로 소멸되지 않고 전달되는 것을 보장해 주는 엘리트전략(Elitist strategy)이 필요하다. 이 전략

은 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있다가 만약 현 세대의 마지막 단계에서 최적 개체가 파괴되면 저장된 개체를 현 세대의 가장 약한 개체와 교환해 준다.

### 3.3 제어 파라미터의 설정

최적 제어 파라미터의 도출은 제어 파라미터를 변경하며 성능을 계측하는 것을 요구한다.

이를 위해 전 파라미터 영역의 성능을 계측하는 것은 현실적으로 대단히 어려운 문제이기 때문에 제한된 범위에서만 오프라인 전역 강인성을 계산한다. 이때 집단 크기  $N \in \{10, 20, 30\}$  3단계, 재생산 계수  $\eta_i$ 의 설정에 필요한 평균과 표준편차를 각각  $\eta \in \{0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0\}$  7단계와  $\sigma \in \{0, 0.5, 1.0\}$  3단계로 선정하였다. 또한 교배확률을  $P_c \in \{0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$  7단계, 돌연변이 확률을  $P_m \in \{0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5\}$  7단계로 선정하였다.

유전알고리즘의 성능은 초기집단의 선택에 민감하므로, 서로 다른 씨드(seed) 값으로 알고리즘을 10번 실행하고 얻어진 결과들을 평균하였다. 그 결과 Fig. 4는  $N$ 과  $\sigma$ 를 기준으로  $\eta$ 과  $P_m$ 을 변경하였을 때의 강인성이고, 등고선들은  $P_c$ 의 변경에 따른 그림이다. 그림에서부터 유추할 수 있듯이 최적의 제어 파라미터는 등고선을 포함한 내부 영역에 존재하며 안쪽으로 갈수록 강인성이 커짐을 알 수 있다.

## 4. 최적 상태 제어기 설계

계단상의 입력  $y_r$  변경에 트롤리의 이동거리  $y$ 가 정상편차 없이 추종하도록 다음 상태변수를 도입한다.

$$z = \int (y - y_r) dt \quad (12)$$

식 (12)을 사용하면 식 (2)는 확장 방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{B}} u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (13a)$$

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ z \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13b)$$

다음과 같은 목적함수를 선정하였다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\bar{\mathbf{x}}^T \mathbf{Q} \bar{\mathbf{x}} + ru^2) dt \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{Q}$ ,  $r$ 은 적절한 선택이 요구되는 행렬과 상수이다. 식 (14)를 최소로 하는 제어 입력은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} u &= -\mathbf{K} \bar{\mathbf{x}} \\ &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + k_2 \int (y_r - y) dt \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1 \ k_2]^T$ 는 궤환 이득행렬로서, Riccati 방정식의 해로부터 얻어진다. 시스템의 설계사양으로부터 다음 제약조건을 가정하였다.

$$M_p(\mathbf{K}) \leq 0 \% \quad (16a)$$

$$t_r(\mathbf{K}) \leq 25 \text{ sec} \quad (16b)$$

$$t_s(\mathbf{K}) \leq 40 \text{ sec} \quad (16c)$$

$$v_{\max}(\mathbf{K}) \leq 2 \text{ m/sec} \quad (16d)$$

$$\theta_{\max}(\mathbf{K}) \leq 2^\circ \quad (16e)$$

이러한 제약조건하에 식 (15)의 제어기 설계 문제는 제약성 최적화 문제가 되므로 비제약성 최적화 문제로 변환하기 위하여 벌점전략을 사용하였다.  $\mathbf{K}$ 를 찾는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반할 때는 그 위반 정도에 따라 벌점을 추가 하도록 하였다.

$$F(\mathbf{K}) = J(\mathbf{K}) + P(\mathbf{K}) \quad (17)$$

단,

$$P(\mathbf{K}) = \begin{cases} 0 & , \mathbf{K} \text{가 적합한 해일 경우} \\ w_1(0 - M_p(\mathbf{K}))^2 + w_2(25 - t_r(\mathbf{K}))^2 + w_3(40 - t_s(\mathbf{K}))^2 \\ \quad + w_4(2 - v_{\max}(\mathbf{K}))^2 + w_5(2 - \theta_{\max}(\mathbf{K}))^2 & , \mathbf{K} \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases} \quad (18)$$

여기서  $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$ 는 벌점상수로서 설계자에 의해 도입된다.

Fig. 5은 유전알고리즘을 이용하여 해를 찾는 과정을 블록선도로 나타낸 것이다.



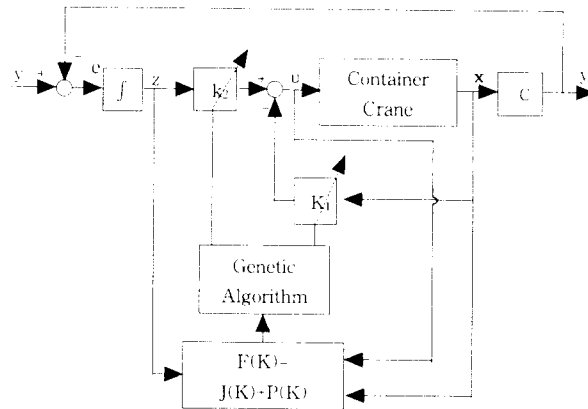


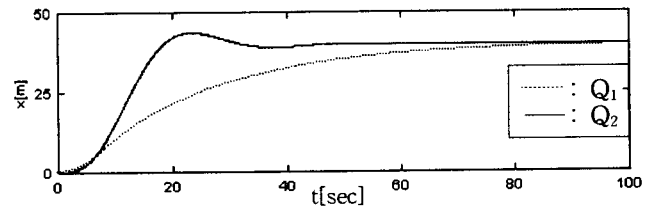
Fig. 5 Optimization of a constrained system

### 5. 모의실험 및 결과 고찰

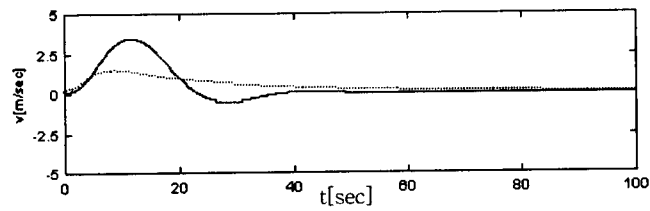
모의실험에는 현장에서 운용되고 있는 시스템 제원을 그대로 이용하였고, 먼저 비제약성 최적제어 문제를 풀기 위해 Q와 R은 시행착오적으로 선정되었는데 각각  $Q_1 = \text{diag}(q_{11} \ q_{22} \ q_{33} \ q_{44} \ q_{55}) = [5 \times 10^{12}, 5 \times 10^5, 1 \times 10^{11}, 5 \times 10^{15}, 1 \times 10^{10}]$ ,  $Q_2 = [1 \times 10^8, 1 \times 10^7, 1 \times 10^{10}, 5 \times 10^{17}, 1 \times 10^{11}]$ ,  $R = 50000$ 이다. 이 때 계산된 궤환 이득행렬은 각각  $K = [14900 \ 77500 \ 1424800 \ 2528400 \ 400]$ ,  $K = [11918 \ 46491 \ 85794 \ 2289 \ 447]$ 이었다. Fig. 6은 비제약성 최적제어 기법을 이용한 경우의 시스템 응답특성으로서 특정 요소의 제약조건을 만족하기 위해서는 다른 요소의 희생이 수반되는 것을 관찰할 수 있고, 각각  $M_p = 9\%$ ,  $t_r = 10.6\text{초}$ ,  $t_s = 29.8\text{초}$ ,  $\theta_{\max} = 3.1934^\circ$ 와  $M_p = 0\%$ ,  $t_r = 49\text{초}$ ,  $t_s = 82\text{초}$ ,  $\theta_{\max} = 1.7966^\circ$ 의 성능을 가지는데, 설계사양의 임의의 요소에 부합되지 못하였다.

제안한 방법으로 K를 탐색할 때도 Q와 R의 선정이 요구되는데 앞서 구한 이득 중에서 비록 속응성은 느리지만 오버슈트가 발생하지 않는  $Q_1$ ,  $R = 50000$ 를 택하였다. 한편 별점상수로는  $w_1 = 1 \times 10^{20}$ ,  $w_2 = w_3 = w_4 = 1 \times 10^{10}$ ,  $w_5 = 1 \times 10^{20}$ 를 적용하였고, 실수코딩 유전알고리즘의 제어 파라미터로  $N = 10$ ,  $\eta = 1.7$ ,  $\sigma = 1.0$ ,  $P_c = 0.9$ ,  $P_m = 0.1$ 을 설정하였다.

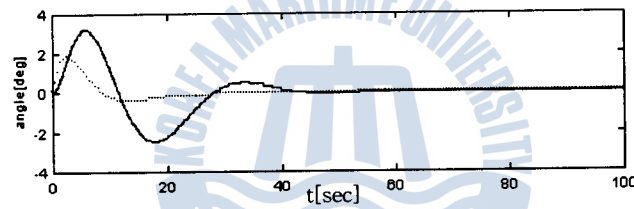
그 결과 궤환이득  $K = [6749.7 \ 40236 \ 99994 \ 119468 \ 404.83]$ 를 얻을 수 있었다. 이 값들을 시스템에 적용하여 응답을 얻고 이를 비제약성 최적제어 결과와 비교하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. 제안한 방법의 경우는 기존의 최적제어 방법보다 속응성이 빠르면서  $M_p = 0$ ,  $t_r = 21.7\text{초}$ ,  $t_s = 36.2\text{초}$ ,  $\theta_{\max} = 1.8312^\circ$ 로 제약조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있다.



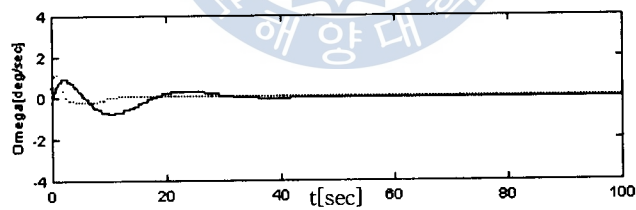
(a) Position



(b) Trolley velocity



(c) Container vibration



(d) Container vibration speed

Fig 6 Step responses of the unconstrained optimal control system

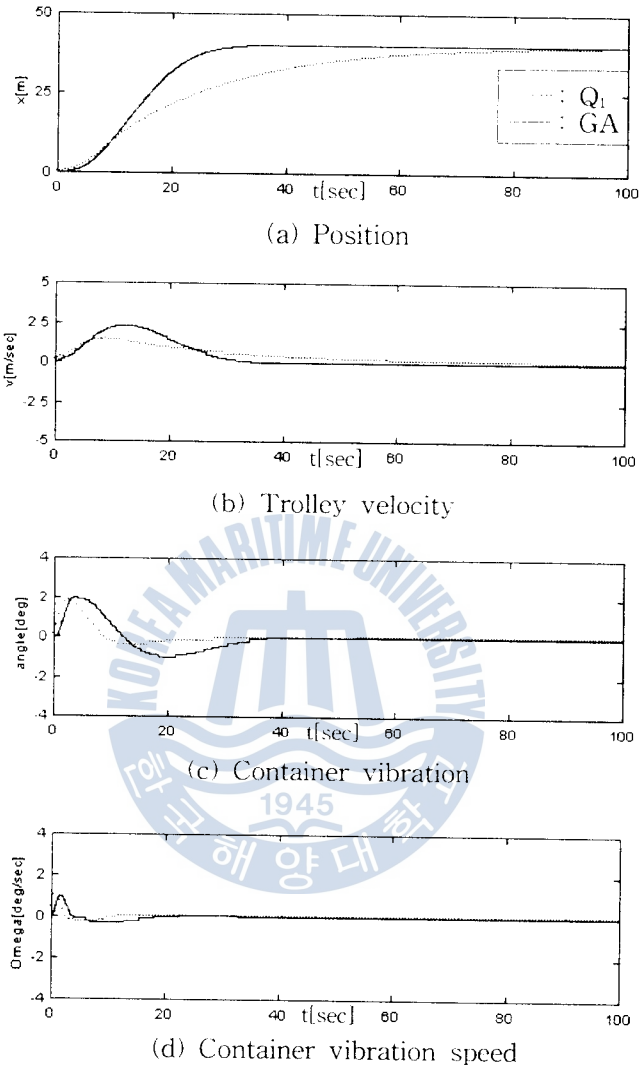


Fig 7 Response comparison of the unconstrained optimal control method and the proposed method

한편 외란에 대한 강인함을 보이기 위하여 시스템이 동작한 후 30초에서 트롤리를 계단상으로  $4^\circ$  움직였을 때의 응답특성을 나타낸 것이 Fig. 8이다. 외란이 인가될 경우를 보면 트롤리의 이동 중  $4^\circ$ 의 흔들림 외란을 부가한 경우에도 트롤리의 이동은 이와 무관하게 양호한 응답을 나타내었으며 컨테이너의 흔들림도 양호한 정상응답을 나타냄을 알 수 있었다.

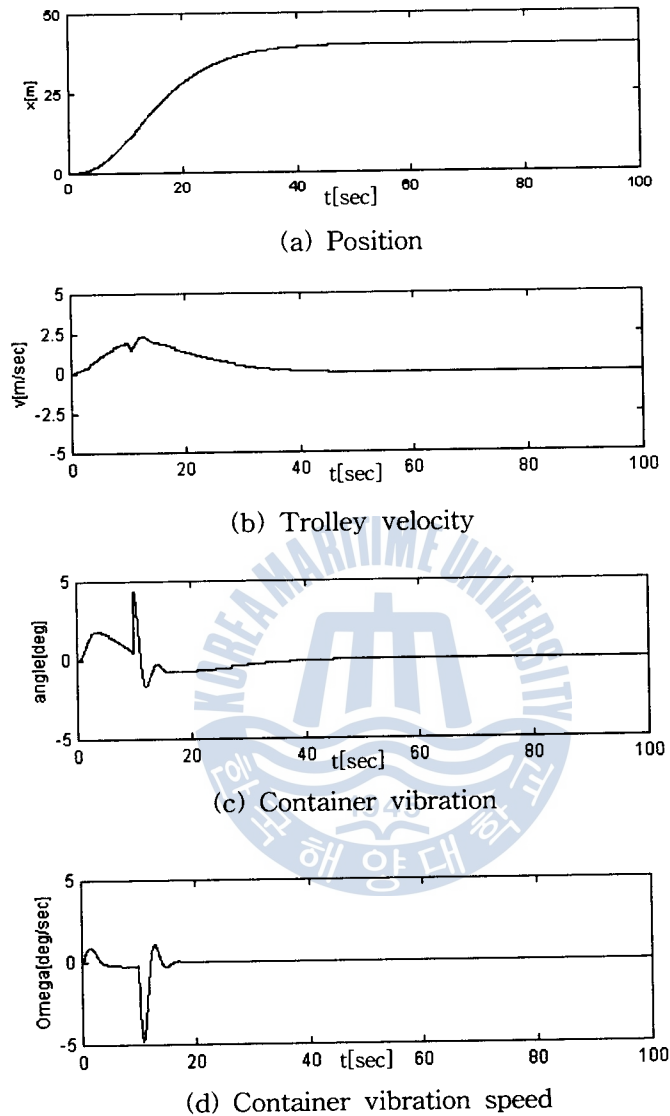


Fig 8 Response of the proposed system to a disturbance change

## 6. 결론

본 연구에서는 설계사양이 수반되는 컨테이너 크레인용 제어기를 설계하는 문제를 다루었다. 이를 위해 선형 모델을 얻고, 정상편차를 제거하기 위해 적분기를 추가하여 확장시스템 방정식을 유도한 후 상태 피드백 제어기를 설계하였다. 제어기 설계 시

발생되는 제약성 최적화 문제는 벌점전략과 유전알고리즘으로 해결하였다. 특히 제약 조건이 수반되는 문제를 해결하기 위해 실수코딩 유전알고리즘을 제안하고 최적의 성능을 가지는 영역을 구하였다.

제안된 방법의 효용성을 확인하기 위하여 기존의 최적제어 기법과 비교하였다. 그 결과 제안한 제어기의 성능은 설계사양을 모두 만족하면서 양호한 동작특성을 보였으며, 외란에 대해서도 강인함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. A. Manson, "Time optimal control methods arising from the study of overhead cranes," PhD Thesis, The University of Strathclyde, Glasgow, UK, 1977
- [2] Y. Sakawa and Y. Sindo, "Optimal control of container cranes," *Automatica*, Vol. 18, No. 3, pp. 257-266, 1982
- [3] S. Yasunobu, "Automatic container crane operation based on a predictive fuzzy control," *計測自動制御學會 論文集*(Japanese), Vol. 22, No. 10, pp. 1066-1073, 1986
- [4] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press, Michigan, 1975
- [5] M. Michalewicz, *Genetic algorithms + data structures= evolution programs*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992
- [6] K. A. De Jong, "An analysis of the behavior of a class of genetic adaptation systems", PhD. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975
- [7] G. Jin, "Intelligent fuzzy logic of processes with time delays," PhD Thesis, The University of Wales, Cardiff, UK, 1995

