論 文
53D-5-3

개선된 타부 탐색을 이용한 PID 제어기 설계

Design of PID Controller using an Improved Tabu Search

李 良 雨* · 朴 璟 勳** · 金 東 旭***
(Yang-Woo Lee · Kyung-Hun Park · Dong-Wook Kim)

Abstract - In this paper, we propose a design method of PID controller using an improved Tabu Search. Tabu Search is improved by neighbor solution creation using Gaussian random distribution and generalized Hermite Biehler Theorem for stable bounds. The range of admissible proportional gains are determined first in closed form. Next the optimal PID gains are selected by improved Tabu Search. The results of Computer simulations represent that the proposed Tabu Search algorithm shows a fast convergence speed and a good control performance.

Key Words : PID, Tabu Search, Tuning, Optimal, stable

1. 서 론

산업현장에서는 정교하고 안정적인 제어이론들이 개발 및 발전되었음에도 불구하고 구조가 간단하며 제어성능이 우수하고 제어 파라메터 조정이 비교적 쉽게 할 수 있는 PID 제어기를 많이 사용하고 있다. 비례제어, 적분제어, 미분제어를 단독으로 쓰거나 혹은 두 가지 이상을 결합하는 등 많은 형태로 사용되고 있다. 이러한 PID 제어기의 제어 파라메터를 좀더 정확하게 빠르게 선정하게 위하여 많은 방법 등이 제시되고 있다. 고전적인 방법으로 지글러 니콜스(Ziegler Nichols) PID 계수조정법 및 임계진동법이 제시된 후 Astrom과 Hagglund에 의해서 릴레이 실험에 의한 동조법 등 많은 방법 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 입력에 대한 응답이 느리고 안정된 시스템에서만 사용되는 등 많은 제한 사항이 존재한다[1][2].

한편 고차 시스템을 제어하기 위한 PID 제어기에 대해서는 특성 다항식의 안정도 조건을 보장하기가 어려우므로 PID제어기의 고유특성으로 인하여 시스템의 차수를 2차로 근사화하여 문제를 다루는 경우가 많다. 고차 시스템의 감쇠율을 흔히 모든 극이 위치하는 가장 작은 섹터 영역으로 정의하여 사용하지만 과도응답 특성과 극점 위치와의 관계는 아직 분명하게 밝혀지지 않고 있다.

또한 최적의 PID의 파라메터를 구하기 위하여 최적화 기법이 필요하다. 최적화 기법은 최급경사법, Newton Rapson법 등 수치적인 방법이 제시되어 왔다. 그러나 설계문제를 수리적인 형태로 정식화하는 것이 어렵고 설계변수가 많고 복잡한 목적함수를 가지면 최적인 해를 구하는 것이 어려웠다. 그래서 최근에는 특정 문제가 갖는 정보에 크게 구속되지 않고 빠른 시간에 근사 최적해를 찾고 다양한 문제에 적용 가능한 메타 휴리스틱(Meta Heuristic)이 발달해 왔다. 메타 휴리스틱 기법에는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm), 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing), 타부 탐색(Tabu Search:TS)이 있다[3][4].

그 중 타부 탐색은 일반적인 수치적 방법에 비해 국부 최소값에 빠질 위험이 적고 전역 탐색방법보다 대상문제의 정보와 탐색과정에 획득한 정보를 효율적으로 사용 가능하다. 또한 타부 탐색은 후보해 생성에 직접 관여함으로써 복잡한 문제에 대해 효율적인 탐색으로 빠른 수렴속도를 구현 할 수 있다. 그러나 이웃해 생성시 초기해가 원하는 최적해와 멀리 떨어져있으면 최적해에 접근하기 위하여 많은 탐색 과정과 시간을 요구하게 되어 탐색 성능이 떨어질 수 있다[5][6].

본 연구에서는 타부 탐색의 이웃해 생성방법을 개선하여 PID 제어기의 설계에 적용하였다. 우선 Datta의 Generalized Hermite Biehler 정리[7]를 이용하여 고차 PID 제어기의 안정한 파라메터 영역을 구한다. 그러나 이러한 안정한 영역만으로 시스템의 제동특성, 시간응답의 속응성 등을 알 수 없다. 그래서 이웃해 생성에 집적 관여하기 위한 가우시안 랜덤 분포적인 해 생성과 가중치 부여를 타부 알고리즘에 적용하여 성능에 개선을 보이고자 한다. 이러한 두가지 기법을 동시에 적용함으로써 성능과 안정성을 동시에 가지는 시스템을 설계한다. 위의 알고리즘을 고차 및 저차 시스템에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 그 타당성을 입증하였다.

* 正 會 員 : 東義大學 電氣工學科 敎授
** 正 會 員 : 東義大學 電氣工學科 博士課程
***學生會員 : 東義大學 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2003年 8月 19日
最終完了 : 2004年 3月 18日

2. 타부 탐색

타부 탐색은 최적화 기법의 하나로 인간의 기억과정을 이용하여 복잡한 해 영역에서 좋은 해를 얻기 위해 탐색을 유도하는 일반적인 휴리스틱 과정으로 다른 휴리스틱 과정을 제어할 수 있는 메타 휴리스틱이다. 이 방식은 보통의 Hill Climbing 탐색기법에 비해 국소 최적해에 빠질 위험이 적으면서 유전 알고리즘이나 시뮬레이티드 어닐링 등과 같은 전역적 탐색기법에 비허 대상문제에 관한 지식을 활용하기에 유리한 탐색기법이다.

타부 탐색은 다음의 기본적인 특징을 가진다. 첫째 유연한 성질이 있는 컴퓨터 기억구조를 사용하여 자세하게 역사적 검색정보와 기준개선을 이용하여 탐색한다. 둘째, 통제에 관련된 기술로 메모리구조에 관련한 메모리 구조를 사용하여 통제조건과 열망기준 사이에서 자유롭게 탐색한다. 마지막으로 탐색하지 않은 새로운 영역으로 다양하게 찾아 탐색한다.

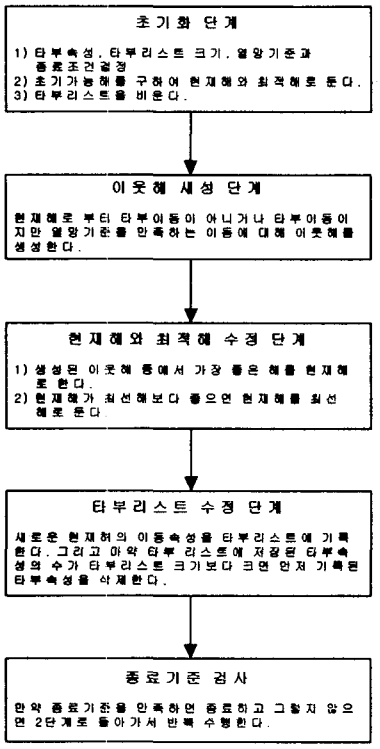

그림 1 타부 탐색의 순서도

Fig. 1 Flow Chart of Tabu Searc

그림 1은 일반적인 타부 탐색 순서도 이다. 전체해 영역 내에서 초기해를 선택하고 이를 현재해로 설정한 후, 현재해의 이웃해를 생성한다. 생성된 이웃해를 평가함수를 통해 평가하여 최적해를 선정한다. 그리고 선택된 해가 원하는 해이면 종료하고 아니면 해를 타부 리스트(Tabu List)에 넣고 현재해를 사용하여 위의 과정을 반복한다.

일반적으로 이웃해의 정의 및 크기는 대상문제나 탐색전략에 따라 달라진다. 이웃해 중에서 가장 좋은 평가값을 갖는 것이 현재해로 설정되며 이를 기준으로 계속적으로 탐색을 하여 정해진 반복 횟수에 도달하거나 해의 개선 정도가 일정수준 이하로 떨어질 경우에 탐색을 끝내게 된다.

새로운 후보해의 평가값은 Hill Climbing 탐색기법과 달리 현재해보다 좋지 못할 수도 있다. 그러므로 한번 후보해로 선정이 된 해는 탐색 중 해가 재 방문 될 수 있기 때문에 타부 리스트에 저장을 하여 재 방문되는 것을 막는다. 탐색의 진행 방향은 타부 리스트의 크기와 밀접한 관계가 있는데 타부 리스트의 크기가 클수록 이전에 탐색되었던 해가 오랫동안 재 탐색되지 않으며 이는 탐색공간을 다양하게 탐색할 수 있도록 하는 역할을 한다.

반면에 타부 리스트의 크기가 작으면 이런 제약이 약해지므로 한번 탐색했던 곳이라 하더라도 재 탐색될 확률이 높아 같은 탐색공간을 반복적, 세부적으로 탐색할 수 있도록 한다. 즉, 타부 리스트의 사용을 통해 한번 방문되었던 국소최적해를 재 방문하는 것을 방지할 수 있으며 탐색공간을 다양하게 또는 한 곳을 집중적으로 탐색할 수 있다.

3. 타부 탐색 알고리즘 구현

기존의 타부 탐색은 이웃해를 생성하는 경우 초기해 또는 기준해를 기준으로 일정한 비율의 범위를 정하여 그 지역내에서 이웃해를 생성한다. 이러한 타부 탐색은 초기해가 원하는 최적해와 멀리 떨어져있으면 최적해에 접근하기 위하여 많은 탐색 과정과 시간을 요구하게 되어 탐색 성능이 떨어질 수 있다. 또한 국부수렴 될 가능성이 커지게 된다. 그리고 PID 제어기 파라메터들을 선정하는 경우 안정하지 않는 영역의 값을 선택하면 시스템의 불안정하여 질 가능성이 크다.

따라서 본 연구에서는 위와 같은 제한사항을 감소시키고 탐색성능을 향상시키기 위하여 이웃해의 생성방법과 가중치를 부여 방법을 제시하였다. 또한 이웃해의 생성은 시스템의 안정성을 보장하는 범위 내에서 이웃해를 생성하도록 한다.

3.1 이웃해 생성

기존의 타부 탐색의 이웃해 생성은 그림 2와 같다. 이때 R 을 전체해 영역, S_0 를 현재해라고 하면 최적해가 S_0 에서 멀리 존재할 때 최적해에 접근하기 위하여 많은 탐색과정을 거쳐야 된다. 또한 접근 방향이 최적해에 가까이 가지 못한다면 국부 최소해로 수렴할 가능성이 크다. 이러한 문제점은 이웃해의 분포를 좀더 확장하여 해결할 필요가 있다.

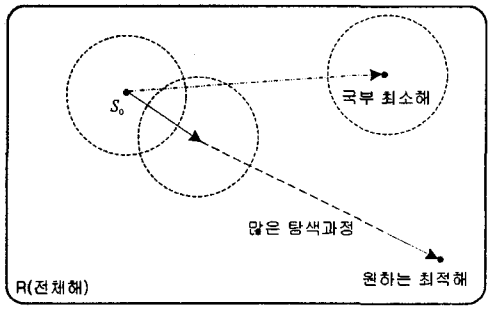

그림 2 단순 타부 탐색

Fig. 2 Simple Tabu Search

생성된 이웃해는 초기해 S_0에서 가까운 이웃해가 최적해가 될 가능성이 높으므로 새로운 이웃해는 그림 3과 같은 가우시안 랜덤 분포(Gaussian Random Distribution)를 가지도록 구성하였다. 가우시안 랜덤 분포를 갖는 이웃해 밀도함수 $f(x)$는 다음과 같이 주어진다.

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}}e^{-(x-a_x^2)/2\sigma_x^2} \tag{1}$$

여기서, a_x는 기준해, σ_x는 표준편차이다.

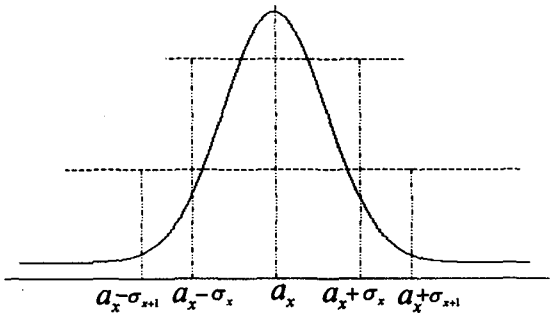

그림 3 가우시안 랜덤 분포 곡선
Fig. 3 Gaussian Random Distribution.

그림 3에서 a_x의 위치 즉 기준해 부근에서 이웃해의 밀도가 높고 a_x에서 멀어질수록 이웃해의 밀도가 낮아짐을 의미한다. 표준편차 σ_x의 크기에 따라 a_x의 근처에서의 해 퍼짐 정도가 결정된다. σ_x가 커지면 더 넓은 지역의 해 영역을 탐색가능하고 σ_x가 작으면 국소부분의 해를 탐색할 수 있다. 전체해 영역을 R, 이웃해 존재구간을 d라고 하고 $0 \leqq R \leqq 1$라고 가정하자. 여기서 이웃해 존재구간 d는 σ_x가 된다. 따라서 표준편차에 의한 이웃해의 범위를 나타내면 그림 4와 같다.

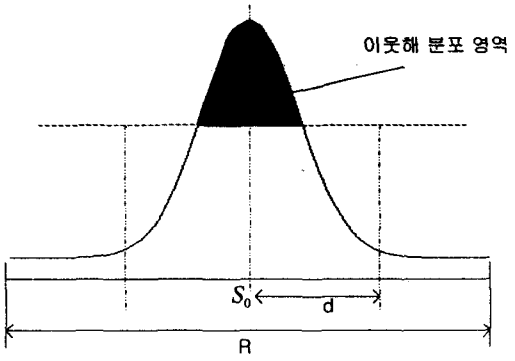

그림 4 표준편차에 따른 이웃해 범위
Fig. 4 Boundary of Neighbor Solutions According to Standard Deviation

3.2 안정적인 범위 선정

PID 제어기의 파라메터를 구하는 방법에는 Routh Hurwitz의 방법은 저차 시스템의 경우 쉽게 그 값을 얻을 수 있으나 고차 시스템의 경우 차수가 높아 계산이 아주 복잡하다. 따라서 Datta의 Generalized Hermite Biehler 정리를 이용한 알고리즘을 사용하여 안정한 영역의 PID 제어기의 파라메터의 영역을 구한다[7][8].

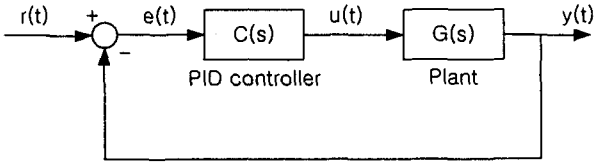

그림 5 PID 제어기
Fig. 5 PID Controller

PID 제어기를 갖는 폐루프 시스템의 구성은 그림 5와 같다. 여기서 플랜트의 전달 함수는 $G(s)$는

$$G(s)=\frac{N(s)}{D(s)}=\frac{a_n s^n+a_{n-1}s^{n-1+}\cdots a_1 s+a_0}{b_n s^n+b_{n-1}s^{n-1+}\cdots b_1 s+b_0} \tag{2}$$

이고 PID 제어기 $C(s)$는

$$C(s)=k_p+\frac{k_i}{s}+k_d s \tag{3}$$

이다. 여기서 k_p, k_i, k_d는 각각 비례, 적분, 미분상수이다. 이때 폐루프의 특성 다항식 $\delta(k_p,k_i,k_d)$는

$$\delta(s,k_p,k_i,k_d)=sD(s)+(k_i+k_d s^2+k_p s)N(s) \tag{4}$$

이다. Generalized Hermite-Biehler 정리를 이용하기 위하여 특성 다항식을 홀수, 짝수 차수로 분리하여 나타내면

$$N(s)=N_e(s^2)+sN_o(s^2) \tag{5-a}$$

$$D(s)=D_e(s^2)+sD_o(s^2) \tag{5-b}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 N_e, D_e는 짝수, N_o, D_o는 홀수 차수이다. 그리고 $N^*(s)$를

$$N^*(s)=N(-s)=N_e(s^2)-sN_o(s^2) \tag{6}$$

라 두고 $l(\delta(s,k_p,k_i,k_d))$를 특성다항식의 좌반부에 존재하는 근의 수, $r(\delta(s,k_p,k_i,k_d))$를 특성다항식의 우반부에

존재하는 근의 수, n과 m를 각각 특성다항식과 $N(s)$의 최고 차수라 두면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} &l(\delta(s,k_p,k_i,k_d)N^*(s)) - r(\delta(s,k_p,k_i,k_d)N^*(s)) \\ &= (\delta(s,k_p,k_i,k_d)) - r(\delta(s,k_p,k_i,k_d)) \\ &\quad -(l(N(s)) - r(N(s))) \end{aligned} \tag{7}$$

위의 시스템이 안정하기 위해서는 우반부에 근이 존재하지 않으면 안정하다. 따라서 $l(\delta(s,k_p,k_i,k_d))=n$이고 $r(\delta(s,k_p,k_i,k_d))=0$되면 안정하다. $s=jw$을 대입하고 특성 방정식을 정리하면

$$\delta(\delta(s,k_p,k_i,k_d)N^*(s)) = p(\omega,k_i,k_d) + jq(\omega,k_p) \tag{8}$$

가 된다. 여기서 $p(\omega,k_i,k_d)$와 $q(\omega,k_p)$는

$$p(\omega,k_i,k_d) = p_1(\omega) + (k_i - k_d\omega^2)p_2(\omega) \tag{9-a}$$

$$q(\omega,k_p) = q_1(\omega) + k_p q_2(\omega) \tag{9-b}$$

이고 P_1, P_2, q_1와 q_2는

$$p_1(\omega) = -\omega^2(N_e(-\omega^2)D_o(-\omega^2) - D_e(-\omega^2)N_o(-\omega^2)) \tag{10-a}$$

$$p_1(\omega) = N_e(-\omega^2)N_e(-\omega^2) + \omega^2 N_o(-\omega^2)N_o(-\omega^2)) \tag{10-b}$$

$$q_1(\omega) = w(D_e(-\omega^2)N_e(-\omega^2) + w^2 D_o(-\omega^2)N_o(-\omega^2)) \tag{10-c}$$

$$q_2(\omega) = w(N_e(-\omega^2)N_e(-\omega^2) + \omega^2 N_o(-\omega^2)N_o(-\omega^2)) \tag{10-d}$$

가 된다. 우선 k_p는 근궤적 방법에 의하여 구할 수 있다.

$$U(\omega) = D_e(-\omega^2)N_e(-\omega^2) + \omega D_o(-\omega^2)N_o(-\omega^2) \tag{11-a}$$

$$V(\omega) = N_e(-\omega^2)N_e(-\omega^2) + \omega N_o(-\omega^2)N_o(-\omega^2) \tag{11-b}$$

$U(\omega)$, $V(\omega)$를 각각 식 (11-a)와 (11-b)로 두고 근궤적 방법에 의하여 실수축 이탈점은 다음 식을 만족한다.

$$\frac{U(\omega)\frac{dV(\omega)}{d\omega} - V(\omega)\frac{dU(\omega)}{d\omega}}{U^2(\omega)} = 0 \tag{12}$$

식 (12)의 조건에 만족하는 실근을 구하고 그 근을 $U(\omega)+kV(\omega)=0$에 대입하면 k_p의 영역을 구할 수 있다. 그리고

$$p_f(\omega,k_i,k_d) = \frac{p(\omega,k_i,k_d)}{(1+\omega^2)^{\frac{n+m}{2}}} \tag{13}$$

$$q_f(\omega,k_p) = \frac{p(\omega,k_p)}{(1+\omega^2)^{\frac{n+m}{2}}} \tag{14}$$

라고 정의하고 k_p의 영역에서 고정된 k_p의해 $q(w,k_p)$의 근을 구할 수 있다. 그 근을 $\omega_0 < \omega_1 < \omega_2 < \cdots < \omega_{l-1}$라고 두면 이때 ω는 정의 실수이다. 이때 $i_0, i_1, i_2 \cdots, i_l$와 A_{k_p}를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} &i_t = sgn[p_{1f}(\omega_t)] \quad (t=1,2,\cdots,l-1) \\ &A_{k_p} = \begin{cases} i_0, i_1, \cdots i_l & \text{if } n+m \text{ is even} \\ i_0, i_1, \cdots i & \text{if } n+m \text{ is odd} \end{cases} \end{aligned} \tag{15}$$

이때 sgn은 signum이다. 고정된 k_p의 값에서 PID의 안정된 i_f의 모임을 $F_{k_p} = A_{k_p}(n-(l(N(s))-r(N(s))))$라고 하면 이때의 i_t를 $p(\omega_t,k_i,k_d)i_t$에 대입하면 안정하기 위한 k_i와 k_d의 영역은 $p(\omega_t,k_i,k_d)i_t > 0$에서 구할 수 있다. 이렇게 구한 게인의 영역을 이웃해 생성시 적용하여 항상 안정한 영역의 해 영역만을 탐색하도록 한다.

3.3 가중치 부여

가우시안 랜덤 분포로 이용하여 이웃해를 생성하여 탐색하면 탐색 성능을 개선할 수 있다. 그러나 만약 해 S가 최적값에 가까이 있다면 가우시안 랜덤 분포에서는 오히려 탐색 성능이 떨어질 수 있다. 따라서 성능 평가값에 대한 가중치를 부여하여 탐색 성능을 개선한다. 원하는 최적해가 가지는 성능 평가값을 J_f, 해 S가 가지는 성능 평가값을 J_s라 하고 가중치를 λ라고 하면

$$\lambda = \frac{J_f}{J_S} \quad (0 < \lambda < 1) \tag{16}$$

가 된다. 이웃해 존재구간을 d, 가중치에 의한 해의 범위를 D라 하면

$$D = d(1-\lambda) \tag{17}$$

가 된다. D에 의해서 탐색구간의 길이를 적절히 조절하여 탐색의 성능을 증가시킨다.

3.4 구 현

제안된 알고리즘의 전체 구성은 그림 6과 같다.

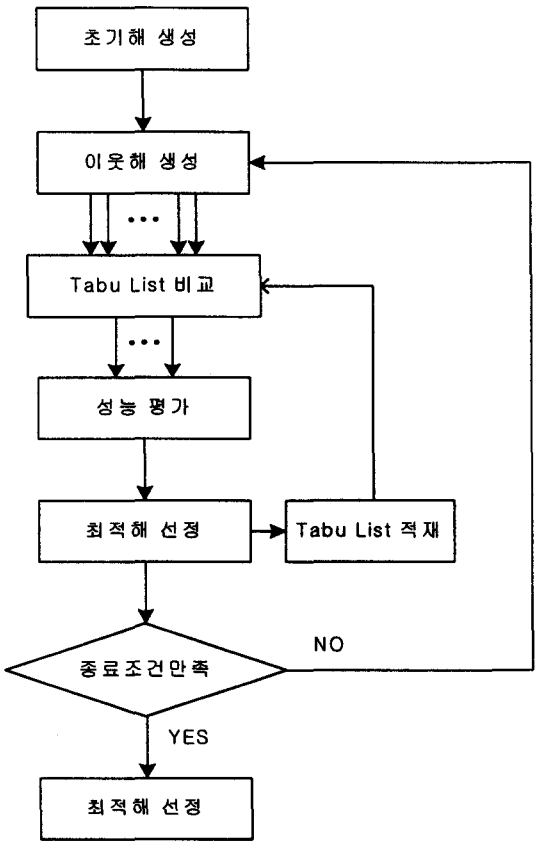

그림 6 타부 탐색 순서도.
Fig. 6 Flow Chart of Tabu Search

1) 초기해의 생성
초기해 S_0를 랜덤하게 생성한다.

2) 이웃해 생성
생성된 초기해 또는 최적해를 이용하여 가우시안 랜덤 분포을 이용하여 해를 생성한다. 해 생성시 안정한 범위 내에 존재하는 해를 찾는다. 그리고 생성된 해를 타부 리스트와 비교하여 타부 리스트에 존재하는 해를 제외시킨다.

3) 성능평가
위의 과정에서 생성된 이웃해 $N(s)$들을 각각 성능을 평가하여 성능지수(Performance Index : PI)를 산출한다.

4) 최적해 선정 및 타부 리스트 적재
각각의 이웃해의 성능지수를 비교하여 최적의 값을 찾는다.

5) 종료조건
선정된 최적해 S_{opt}가 종료 조건값 S_{fi} 이하가 되면 종료한다. 아니면 최적해를 사용하여 이웃해를 생성하는 2) 과정을 실행한다.

4. 시뮬레이션 및 결과

앞서 제안된 타부 알고리즘을 저차 및 고차시스템의 PID 제어기의 파라메터 동조에 적용하여 최적화 기법의 타당성을 검증한다. 또한 유전자 알고리즘과 비교하여 제안한 PID 제어기에 대한 성능을 평가하여 본다. 그림 7은 제안된 타부 탐색을 이용한 PID 제어기의 구조이다.

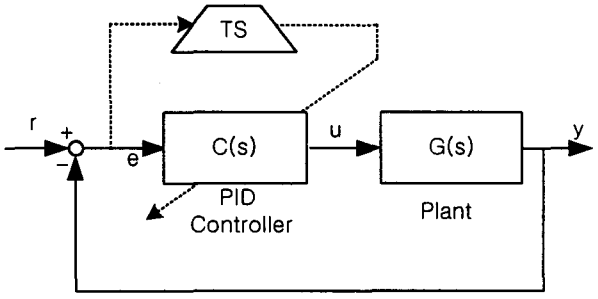

그림 7 타부 탐색을 이용한 PID 제어기
Fig. 7 PID Controller Using Tabu Search

4.1 고차 시스템

플랜트 전달함수 $G(s)$는 식(18)와 같다.

$$G(s)=\frac{s^3-4s^2+s+2}{s^5+8s^4+32s^3+46s^2+46s+17} \quad (18)$$

이며 k_p는 비례이득, T_i는 적분시간, k_i는 적분상수, T_d는 미분시간이고 제어기 출력 $u(t)$라고 하면

$$u(t)=k_p e(t)+\frac{k_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt+k_p T_d\frac{de(t)}{dt} \quad (19)$$

또한 $C(s)$는 식(3)과 같다. 또한 폐루프 시스템의 특성 다항식 $\delta(s,k_p,k_i,k_d)$는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 위의 시스템의 성능 평가를 위한 성능지수는 오차제곱적분(Integral of the Square of the Error : ISE)를 이용하였다. 이 때 성능지수 PI는

$$PI=\int_0^\infty e(t)^2dt \quad (20)$$

이때 $e(t)=r(t)-y(t)$이고 성능지수 PI가 즉 ISE값을 최소화하는 k_p, k_i, k_d를 찾는다.

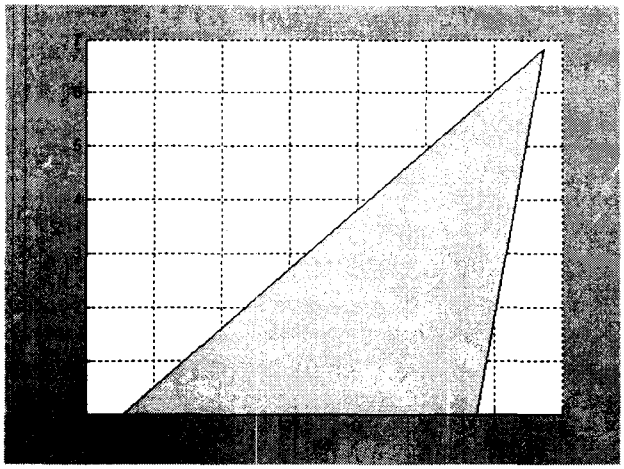

그림 8 $k_p = 1$일 때 k_i, k_d의 안정한 영역

Fig. 8 The Stabilizing Set of k_i, k_d Values When $k_p = 1$

이웃해의 안정한 범위를 구하기 위하여 Generalized Hermite Biehler 정리를 이용한 알고리즘을 사용하여 안정하게 하는 PID의 모든 파라메터를 구하면 k_p의 영역과 k_i, k_d의 영역을 나누어서 표현한다. $k_p = 1$인 고정된 값을 가질 때 k_i , k_d의 영역을 그림 8과 같이 다각형의 형태로 나타나며 이때 k_i , k_d의 영역 내에서 시스템은 안정하다.

다음은 k_p의 안정한 범위내의 전체 영역에 대하여 구한다. 식 (12)의 k_p의 영역은 근궤적법에 의하여 구하면 [8.5 4.2333]구간 내에서 안정하게 된다.

전체의 k_p의 영역에 대한 k_i , k_d의 영역을 구해보면 그림 9와 같다.

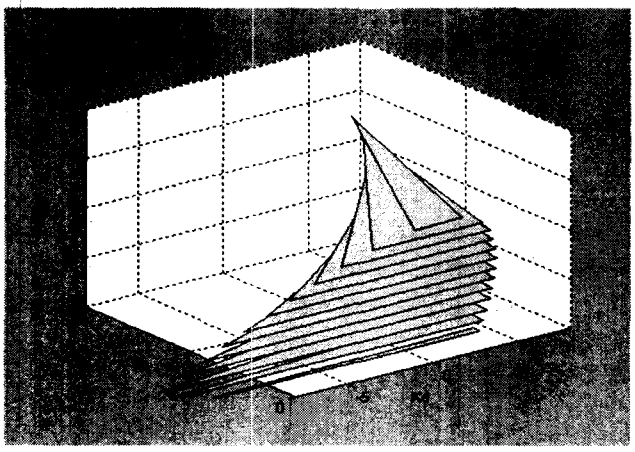

그림 9 안정한 영역에 대한 k_p, k_i, k_d

Fig. 9 The Stabilizing Set of k_p, k_i, k_d Values

위의 결과에서 k_p, k_i, k_d의 안정한 영역값을 이웃해 생성에 사용하여 최적화된 k_p, k_i, k_d의 게인 값을 구할 수 있다.

위의 결과를 타부 탐색과 유전자 알고리즘에 적용하여 비교한다. 여기서 사용되는 유전자 알고리즘은 단순 유전 알고리즘의 단일 모집단을 여러 개의 부분 모집단으로 나누어 분리시키고, 서로 분리된 각 부분 모집단이 독립적이면서 병렬적으로 진화해 가는 병렬 유전 알고리즘이다[9].

제안된 타부 탐색은 이웃해의 수가 10개이고 표준편차는 1로 설정한다. 그리고 최소의 ISE값을 나타내면 종료한다. 유전자 알고리즘은 집단수는 10, 세대수는 50, 교배확률은 0.8이고 돌연변이 확률은 0.2로 설정하였다. 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1 타부 탐색과 유전자 알고리즘에 의한 결과($\sigma = 1$)

Table 1 Results of Tabu Search and Genetic Algorithm ($\sigma = 1$)

	최적해 선정시간	최적평가값	k_p	k_i	k_d
타부 탐색	0.98[sec]	3.4	2.0513	2.1194	1.6813
유전자 알고리즘	54.9[sec]	3.6	1.1790	2.3551	1.6344

시뮬레이션한 결과 각각의 최적 평가값과 PID의 최적 계수를 알 수 있다. 또한 제안된 타부 탐색 알고리즘이 빠른 시간에 최적의 해를 생성함으로서 성능이 우수함을 알 수가 있다. 준편차가 커질수록 빠르게 최적해에 접근함을 알 수가 있다. 그리고 각 파라메터의 설정으로 각각의 평가되어 나온 PID 계수를 이용하여 step 응답을 보면 그림 10과 같다.

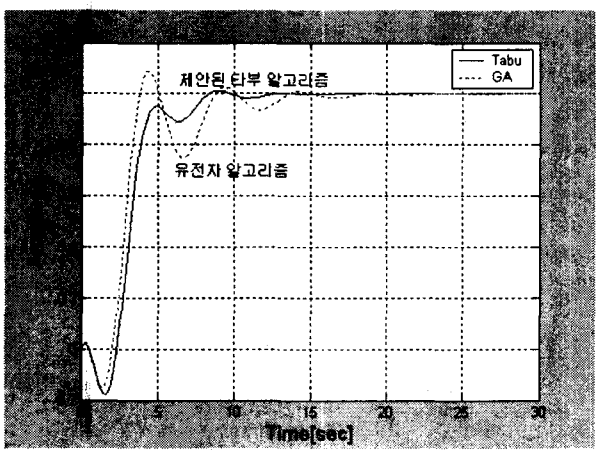

그림 10 타부 탐색과 유전자 알고리즘 step 응답

Fig. 10 Step Response of Tabu Search and Genetic Algorithm

그림 10에서 보면 제안된 타부 알고리즘이 우수한 성능을 가지는 것을 알 수가 있다. 그림 11은 제안된 타부 알고리즘의 오차와 ISE값을 나타내었다.

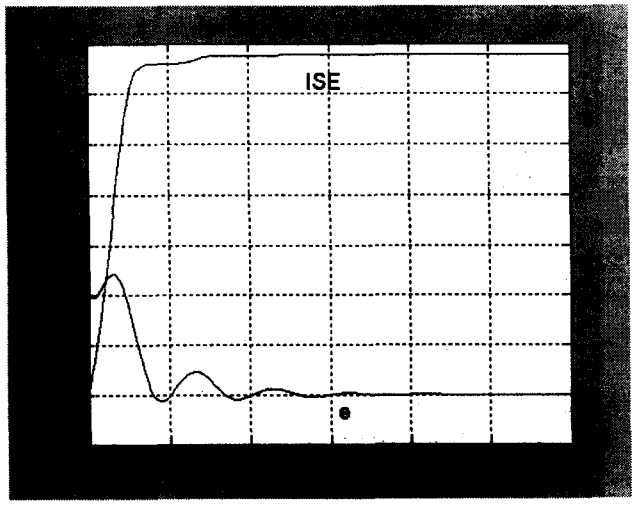

그림 11 타부 탐색의 오차 및 ISE
Fig. 11 Error and ISE of Tabu Search

4.2 저차 시스템

저차 플랜트 전달함수 G(s) 는

$$G(s) = \frac{10}{5s^2 + 60s + 100.1} \tag{21}$$

이다. 식(21)의 시스템을 위와 동일한 방법을 사용하여 제어기를 설계하고 PID 파라메터를 구하였다.

표 2 σ에 대한 성능 비교
Table 2 Comparison of Performance According to σ

	최적해 선정시간	최대값	k_p	k_i	k_d
일반 타부탐색	14.64[sec]	0.04	229.7	132.7	7.5
σ : 1	5.71[sec]	0.039	229.1	141.4	7.2
σ : 0.5	10.8[sec]	0.039	229.3	140.8	5.0
σ : 0.2	16.5[sec]	0.04	229.0	133.1	5.7

표 2는 표준편차에 의한 시스템의 파라메터이다.

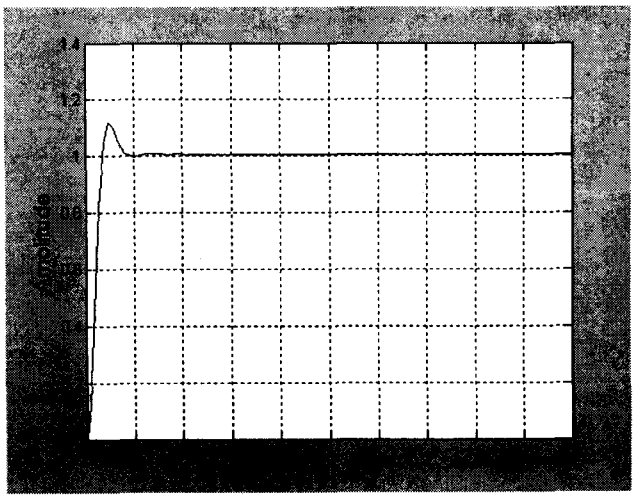

그림 12 Step 응답($\sigma = 1$)
Fig. 12 Step Response($\sigma = 1$)

그림 12는 제안된 알고리즘에 의하여 동조된 PID 제어기의 step 응답을 나타낸다. 제안된 타부 탐색을 사용하여 구한 최적 계수를 사용한 PID 제어기가 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 타부 탐색의 성능을 개선하여 최적의 성능을 가지는 PID 제어기의 설계에 관해 연구하였다. 제안한 방법은 이웃해의 산포도를 변화시켜 국부 해에 빠질 위험을 제거하고 빠르게 최적 해에 접근할 수 있게 가우시안 분포를 적용하고 표준편차를 조정하여 대상 시스템의 수렴속도를 단축 할 수 있었다. 그리고 Generalized Hermite Biehler 정리를 이용한 알고리즘을 사용하여 고차시스템의 안정한 PID 제어기의 게인값 영역내에서 이웃해를 생성하고 타부 알고리즘을 통하여 최적의 PID 제어기의 파라메터를 유도함으로서 안정하며 최적의 제어기를 설계하는 방법에 제안하였다. 그 결과 빠른 시간에 최적 해에 접근하여 수렴속도와 성능을 개선하였다. 또한 안정성을 판별하기 복잡하고 제어 파라메터의 값을 얻기에 힘든 고차시스템을 쉽고 간단한 방법으로 안정한 성능을 가지는 시스템 설계가 가능하였다. 이러한 두 가지를 적용함으로써 최적의 성능과 안정성을 동시에 가지는 시스템을 설계할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] K. Astrom and T. Hagglund, PID Controllers "Theory, Design, and Tuning Research Triangle Park", NC: Instrument Society of America, 1995.

[2] L. H. Keel, J. I. Rego, and S. P. Bhattacharyya, "A

New Approach to Digital PID Controller Design", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 48, No. 4, pp.687 692, 2003.

[3] D. Karaboga and A. Kalili, "Tuning PID Controller Using Tabu Search Algorithm", IEEE International Conference, Vol. 1, pp.134 136, 1996.

[4] Ahmet Kapllan, "Membership Function Optimization of A Fuzzy Controller Using Modified Tabu Search Algorithm", IEEE, NAFIPS Conference of the North American, pp.64 67, 1998.

[5] Maurizio Denna, Grancarlo Maui, and A. M. Zanaboni, "Learning Fuzzy Rules with Tabu Search An Application to Control" .IEEE Tran., Fuzzy system. Vol. 7, No. 2, pp.295 317, 1999.

[6] F. Glover Tabu Search Part I, ORSA Journal on Computing, Vol. 1, No. 3, pp.190 206 1989.

[7] A. Datta, M. T. Ho, and S. P. Bhattacharyya, "Structure and Synthesis of PID Controllers", London of IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July, 2002.

[8] J. J. Anagnost and C. A. Desoer, "An Elementary Proof of the Routh Hurwitz Stability Criterion", Circuits Systems Signal Process., No. 1, pp.101 114, 1991.

[9] Cantu Paz, E, "A Survey of Parallel Genetic Algorithms", Illigal Report No. 97003, 1997.

저 자 소 개

이 양 우 (李 良 雨)

1948년 10월 14일생. 1974년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1994년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1997~Univ. of Houston Visiting Scholar 1987년~현재 동의대학교 전기공학과 교수

Tel : (051)890-1664, Fax :(051) 890-1664

E-mail :ywlee@deu.ac.kr

박 경 훈 (朴 璟 勳)

1972년 5월 7일생. 1995년 동의대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1997년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : (051) 890-1937, Fax : (051) 890-1664

E-mail : khpark@deu.ac.kr

김 동 욱 (金 東 旭)

1975년 8월 5일생. 2002년 동의대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : (051)890-1937

Fax : (051)890-1664

E-mail : wci1614@hotmail.com