

uDEAS를 이용한 히터 시스템의 IMC-PID 자동 동조 제어기 설계

Design of an Auto-Tuning IMC-PID Controller for a Heater System Using uDEAS

김만석 · 김조환 · 최민구 · 박종오 · 김종욱

Manseok Kim, Jo Hwan Kim, Min Koo Choi, Jong-Oh Park and Jong-Wook Kim

동아대학교 전자공학과

요 약

본 논문에서는 방사 및 연신 공정에 쓰이는 히터 시스템의 정밀온도 제어를 다룬다. 히터 시스템의 정밀온도 제어를 위해 자동동조(auto-tuning) IMC-PID 제어기를 최적화 기법인 uDEAS를 이용해서 설계하는 방법을 제안한다. 이를 위해 롤 히터의 측정 데이터로부터 히터를 근사 모델링하고, 이 모델로부터 안정성과 제어성능을 널리 만족시키는 최적의 IMC-PID 제어기 저역필터 값을 uDEAS로 동조한다. 마지막으로, 설계된 제어기를 DSP 키트를 사용하여 실험하였다.

키워드 : 자동동조, IMC-PID, 히터시스템, uDEAS

Abstract

This paper deals with the precise temperature control of the heater used at a weaving thread or a drawn process. For precise temperature control, we suggest a design method that is auto-tuning IMC-PID controller using an optimization method uDEAS. For this method, we model the roll heater from the measurement data and we automatically tune the low pass filter value of IMC-PID controller that satisfies stability and control performance. Finally, we implement the designed controller using DSP kit.

Key Words : Auto-Tuning, IMC-PID, Heater System, uDEAS

1. 서 론

일반적으로 원사제조 공정인 방사공정, 연신공정 등에서 온도제어는 매우 중요한 사항이다. 대부분의 원사제조공정에서 전기히터를 사용하고 있기에 전기히터의 제어 성능에 따라 원사의 질과 불량률이 크게 변하게 된다. 이러한 온도제어를 하기위해 기존의 PID 제어기를 많이 사용하고 있지만 최적의 제어성능을 갖는 동조계수를 찾기가 쉽지 않고, 운전자가 이득조정에 익숙하지 못하거나 운전조건 또는 동특성이 변화할 경우 재동조를 해야 한다는 어려움이 발생한다.

PID 제어기는 간단한 구조와 강인한 제어능력을 가지고 있기에 많은 제어기 분야에 폭 넓게 사용되고 있다[1]. 대부분의 PID 제어기 연구는 다양한 방법을 사용하여 제어기의 성능개선을 추구하거나, 비선형적이고 불확실한 시스템에 퍼지논리를 적용한 제어기에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

대부분의 PID 제어기 연구에서 이득의 설정은 전문가에 의해 시행착오적으로 이루어지고 있다. 따라서 이를 위해 많은 시간과 경비가 소요되기 때문에 PID제어기의 파라미터 자동동조 기법에 관한 연구는 매우 중요하다. 파라미터

를 모르거나 제어환경이 변하는 경우는 파라미터를 On-line으로 자동 조절하는 자동동조 제어기 방식이 다른 제어기에 비해 효과적이다[1].

PID 제어기는 외부로부터 외란 및 센서 변화 등의 영향에서는 만족할 만한 제어 성능을 얻기 힘들다. 따라서 잡음 등의 영향에 둔감한 제어기에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이와 같이 시스템의 강인성을 보장하는 제어 방법을 강인 제어라 하며, 그 중 한 가지 방법으로서 IMC(Internal Model Control) 구조를 갖는 PID 제어기를 설계하는 방법이 있다[2]. IMC는 일반적인 폐루프 제어 시스템의 내부에 동정된 모델을 포함하며 실제 시스템의 출력과 동정된 모델의 출력의 차를 이용하는 구조로 되어있다.

본 논문에서는 롤 히터를 사용하는 히터 시스템의 정밀 온도 제어를 위해 자동동조 IMC-PID 제어기를 수치 최적화 기법인 DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches)[3]의 한 종류인 uDEAS(univariate DEAS)[4]를 이용해 설계하는 방법을 제안한다. 이를 위해 원사제조 공정에서 사용되는 히터 시스템의 일부분인 롤 히터(Roll Heater)의 측정 데이터로부터 히터 시스템을 모델링하고, 이 모델을 이용하여 성능지수인 IAE(Integral of the Absolute Error)를 최소화 시키는 최적의 IMC-PID제어기 이득 값을 uDEAS를 사용하여 동조한다. 또한 그 성능을 검증하기 위해 같은 모델에 대해 Ziegler-Nichols 방법을 사용한 제어결과와 비교한다.

접수일자 : 2010년 11월 30일

완료일자 : 2011년 5월 22일

본 연구는 2009년 부산테크노파크의 산학공동연구지원 사업의 지원으로 수행되었습니다.

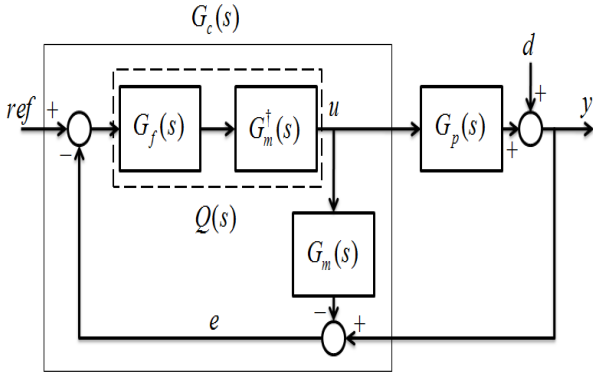


그림 1. 일반적인 IMC-PID 제어기의 구조.
Fig. 1. Organization of general IMC-PID controller.

2. IMC-PID 제어기

IMC 구조로 PID 제어기 설계 절차를 유도하기 위해 고려한 일반적인 IMC 구조는 그림 1과 같고 각각의 블록 다이어그램은 다음과 같다.

G_p : 제어대상 시스템 G_m : 시스템의 근사된 모델
 G_m^\dagger : Inverse model of G_m G_f : Low-pass filter

그림 1에서 보듯이 IMC 구조에서는 G_m 이 G_p 와 정확히 일치한다면 모든 제어신호 u 에 대해서 에러 e 는 외란 d 와 같다. 그리고 $G_f=1$ 이고 G_m^\dagger 가 G_p 의 정확한 역 모델이라면, 외란 d 는 완벽히 제거될 수 있다.

필터 G_f 는 공칭모델 $Q(s)$ 의 최소 위상 부분을 보상할 수 있도록 일반적으로 다음과 같이 선정한다.

$$G_f(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^n} \tag{1}$$

여기서 T_f 는 필터의 시간상수를 나타내며 설계해야 할 파라미터이다. n 은 G_f 의 차수를 나타낸다.

또한, 제어기 G_c 의 전달 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$G_c(s) = \frac{G_f(s)G_m^\dagger(s)}{1 - G_f(s)G_m^\dagger(s)G_m(s)} \tag{2}$$

본 연구에서는 $G_p(s)$ 를 1차 모델을 사용하여 다음과 같이 표현한다.

$$G_p(s) = \frac{K_m}{1 + s\tau_m} e^{-d_m s} \tag{3}$$

여기서 τ_m 은 시간상수(time constant)이며, K_m 은 정적 이득(static gain), d_m 은 무효시간(dead time)을 나타낸다. 이 때, G_m^\dagger 과 G_f 는 다음과 같다.

$$G_m^\dagger = \frac{1 + s\tau_m}{K_m} \tag{4}$$

$$\text{Delay system} = e^{-d_m s} \tag{5}$$

$$G_f = \frac{1}{(T_f s + 1)} \tag{6}$$

식 (5)는 비최소위상으로서 지수함수의 형태로 되어 있기에 연산하기가 상당히 복잡하므로 연산의 간소성을 위해 1차 파데 근사(Pade approximation)를 수행하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^{-d_m s} \approx \frac{1 - 0.5d_m s}{1 + 0.5d_m s} \tag{7}$$

식 (4) - (6)을 식 (2)에 대입하고, 식 (7)을 이용하면 다음 식이 성립한다.

$$G_c(s) = \frac{1}{K_m(d_m + T_f)s} \frac{\frac{\tau_m d_m}{2} s^2 + (\tau_m + \frac{d_m}{2})s + 1}{\frac{T_f d_m}{2(T_f + d_m)} s + 1} \tag{8}$$

PID 제어기의 전달함수는 식 (8)과 같이 분모의 다항식을 S 에 관한 2차식으로 만들어 주기 위해 Low pass filter를 추가시켜 식 (9)와 같이 만들고, PID 제어기 설계변수는 식 (8)로부터 식 (10)-(12)와 같이 유도할 수 있다.

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \frac{1}{(T_f s + 1)} = \left(\frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{\frac{T_i T_f s^2}{K_c} + \frac{T_i s}{K_c}} \right) = \frac{cs^2 + ds + 1}{abs^2 + as} \tag{9}$$

$$a = \frac{T_i}{K_c}, \quad b = T_f, \quad c = T_i T_d, \quad d = T_i$$

위의 식 (9)에서 각 이득들은 다음의 관계가 있다.

$$K_c = \frac{T_i}{K_m(d_m + T_f)} \tag{10}$$

$$T_i = d = \left(\tau_m + \frac{d_m}{2} \right) \tag{11}$$

$$T_d = \frac{\tau_m d_m}{2\tau_m + d_m} \tag{12}$$

위 식으로부터 IMC-PID 제어기의 설계변수는 T_f 이고, 이 값을 이용하여 PID 계수가 결정되어짐을 알 수 있다. uDEAS를 이용하여 상기 설계 변수를 설계하며 이에 대한 검증은 상기 내용에서 기술한 IAE 성능 지수를 최소화 하는 방법을 이용한다.

3. uDEAS

DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches)는 본 연구실에서 개발한 비선형 최적화 기법으로 비용함수(cost function)의 미분정보를 사용하지 않고 잘 계획된 컴퓨터 연산만으로 비용함수의 전역 최적화를 탐색하는 최적화 기법이다. DEAS는 이진 스트링의 최하위 비트에 0을 붙이고 복호화하면 이진 스트링의 복호화된 실수값보다 감소하고 1을 붙이고 복호화하면 이진 스트링의 실수값보다 증가하는 성질을 이용했다[3].

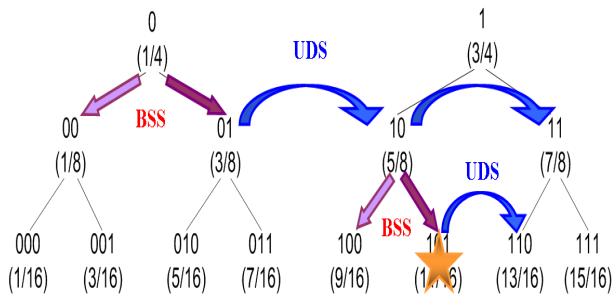


그림 2. BSS와 UDS의 1차원 지역탐색 원리.

Fig. 2. The local search principle of BSS and UDS on one dimension.

DEAS는 이진 스트링이나 이진 행렬로 표현되는 현재 해의 가장 오른쪽 비트(least significant bit, LSB)나 열(column)에 0과 1을 붙임으로써 탐색 방향을 찾고, 찾아진 방향에 대해 비용함수가 최소가 될 때까지 증가(INC, increment addition) 혹은 감소(DEC, decrement subtraction) 연산을 수행함으로써 주변 지역으로 탐색을 확장한다. 이러한 ‘방향 탐색-확장 탐색’이 결합되어 한 session을 이루고 탐색이 진행되므로 유전알고리즘에서 거론되는 심화탐색(exploitation)과 확장탐색(exploration)이 DEAS에서는 매 session마다 조화롭게 작용하게 된다.

일반적으로 DEAS는 크게 지역최적화(local search)와 전역최적화(global search) 과정으로 나눌 수 있으며, 지역최적화는 탐색점 주변을 면밀히 탐색하는 양분탐색(bisectional search, BSS)과 양분탐색에서 얻은 정보를 기반으로 이웃 영역을 확장 탐색하는 단향탐색(unidirectional search, UDS)으로 나눌 수 있다. 그리고 전역최적화를 위해서는 가장 용이하면서도 간단하게 구현할 수 있는 다중시작 기법을 채용했다[3].

DEAS는 지역 탐색을 위해 BSS와 UDS라는 탐색 루틴을 사용한다. BSS에서는 그림 3에서 보는 것처럼 이진 스트링에 0과 1을 붙여서 복호화하고 비용함수를 계산한 후 최적의 탐색 방향을 선택하는 과정을 수행한다. 그리고 UDS에서는 비용함수가 계속해서 감소할 때까지 BSS에서 계산된 최적 방향으로 확장된 탐색을 수행한다. 그리고 다중시작 기법은 임의의 시작점에서 지역최적화를 통해 지역해를 발견한 후 다시 임의의 시작점으로부터 지역최적화를 반복하는 방법으로 전역해를 찾는 전역최적화 방법이다. 이 방법에서 전역해는 탐색된 모든 지역해 중에서 최소인 것으로 선택된다.

DEAS는 그림 2와 같이 BSS와 UDS라는 기본 탐색원리는 유지하고 계산량의 차이와 이웃 행렬을 구성하는 방법에 따라 eDEAS(exhaustive DEAS)[5]와 uDEAS(univariate DEAS)[4], mDEAS(modular DEAS)[6]가 개발되었다. eDEAS는 가장 초기 알고리즘으로 개발되었고, 그 다음으로 각 변수 별로 BSS와 UDS를 생성하는 알고리즘인 uDEAS가 개발되었다. uDEAS는 모든 변수에게 동시에 변화를 주며 이웃행렬을 생성하는 방법 대신, 그림 3에서와 같이 나머지 변수는 고정된 채 한 변수에 대해서만 BSS와 UDS를 수행한 후 그 다음 변수로 진행시키는 방식으로 개선되었으며, x_1 부터 x_n 까지 생성된 이웃행렬의 총 수는 파라미터의 약 2배수에 불과하지만, 30차원의 고차 함수는 물론 저차의 테스트 함수에 대해서도 eDEAS와 거의 동등한 탐색 성능을 보였다. 그리고 다차원 문제나 비선형문제에

대해 탁월한 최적화 성능을 보였으며 DEAS series 중 가장 탐색 속도가 빠르다[4].

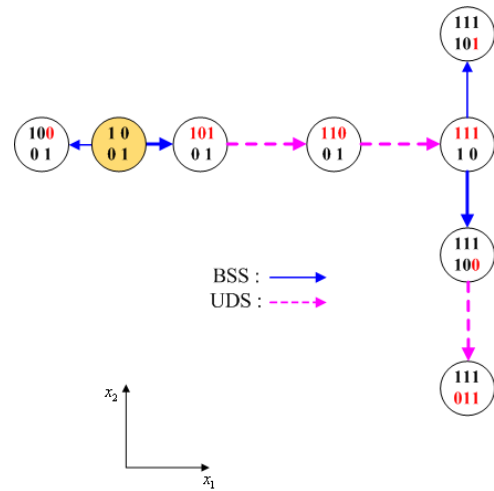


그림 3. 2차원에서의 uDEAS 지역탐색 원리.

Fig. 3. The local search principle of uDEAS on two dimension.

따라서 본 논문에서는 실시간 최적화를 위해 탐색 속도가 빠른 uDEAS를 이용하여 히터를 모델링하고 T_p 값을 찾는다.

4. PID Auto-tuning

4.1 히터 모델링

본 논문에서는 히터의 온도를 제어하기 위해 상온에서 롤 히터에 110V(AC)를 TRIAC 소자를 이용하여 PWM으로 인가되는 전원을 조절하며, 그림 4는 전원의 10%을 인가했을 때 측정된 온도-시간 그래프이다. 상온이 바이어스로 작용하므로 시간별 히터 온도는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$y(t) = g(t) * u(t) + y_0 \tag{13}$$

여기서 $g(t)$ 는 히터의 전달함수, y_0 는 상온을 나타낸다.

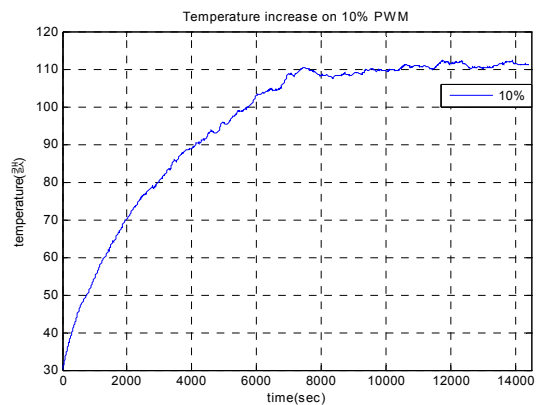


그림 4. 롤 히터의 스텝응답.

Fig. 4. Step response of the roll heater.

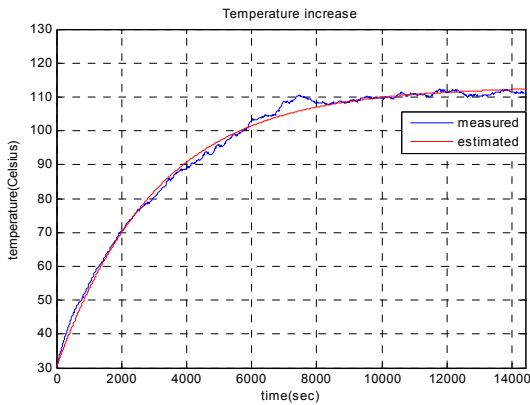


그림 5. 추정된 시스템의 스텝응답 비교.

Fig. 5. Comparison of step response with estimated system.

먼저 동조를 위해 제어 대상인 히터 시스템을 모델링한다. 이를 위해 일반적으로 많이 사용되는 3변수 파라미터 모델을 추정모델로 삼고 3개의 변수를 추정한다. 3변수 파라미터 모델의 전달함수는 식 (3)과 같다. 이를 스텝 입력에 대한 응답식으로 나타내면 다음과 같다.

$$y(t) = K_m \left(1 - e^{-\frac{t-d_m}{\tau_m}} \right) + y_0 \quad (14)$$

식 (14)에서 y_0 는 측정값으로부터 직접 구할 수 있다. 여기서 측정값은 그림 4의 값을 사용했으며 식 (14)에서 uDEAS로 찾아야 할 파라미터들은 K_m , τ_m , d_m 으로 총 3개가 된다.

최적화 기법을 사용하여 상기 파라미터를 결정할 때는 비용함수 값이 최소가 되도록 하여야 하므로, 다음 식과 같이 추정오차의 절대값의 합(IAE)을 비용함수로 사용한다.

$$J(K_m, \tau_m, d_m) = \frac{T}{N} \sum_{k=1}^N |y(t_k) - \hat{y}(t_k)| \quad (15)$$

여기서 $\hat{y}(t_k)$ 는 uDEAS로 추정된 파라미터를 이용하여 식 (14)를 계산한 값을 나타낸다. N 은 히터의 온도 측정점 개수를 나타낸다. T 는 시뮬레이션을 수행한 총 시간을 나타내며, 이는 적분을 이산적으로 표현하기 위해 사용한다.

uDEAS의 탐색 조건은 다음과 같이 정했다.

- 탐색 유형 : main search
- 초기 행 길이 : 3
- 최대 행 길이 : 10
- 랜덤 시도 횟수 : 20

uDEAS가 탐색한 최적 파라미터들은 다음과 같다.

$$K_m = 83.00, \tau_m = 3051.75, d_m = 0.00$$

그림 5는 상기 식 (14)를 uDEAS를 사용하여 추정된 히터 시스템의 온도와 실제 히터 시스템 온도를 비교한 것이다. 추정된 히터 시스템의 온도는 uDEAS로 최적화한 상기 파라미터들과 $y_0 = 30$ 을 식 (14)에 대입하고 계산하였으며, 추정된 값들과 비교 시 잘 근사화 되었음을 알 수 있다. 그리고 d_m 값이 0에 가까우므로 지연시간이 없는 모델로 근사한다.

또한, 10% PWM으로 측정된 데이터 값을 보상해 주기

위해 static gain K_m 에 10을 곱하여 100%의 PWM으로 환산하여 히터 시스템은 다음과 같이 무효시간이 없는 3-파라미터 모델로 근사화할 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{830.0}{(3051.75s + 1)} \quad (16)$$

4.2 제어기 동조

본 논문에서는 폐회로 시스템의 성능지수 IAE를 만족시키는 IMC-PID 제어기를 설계하기 위해 uDEAS를 이용해서 다음과 같이 수식화 된 비용함수를 최소화시키는 T_F 를 탐색한다[4].

$$J(T_F) = \frac{T}{N} \sum_{k=1}^N |r - y(t_k)| \quad (17)$$

모델 추정과 동일한 uDEAS 탐색조건으로 찾아진 T_F (0.025414)를 기반으로 식 (10), (11), (12)를 계산하여 각 파라미터를 대입한 IMC-PID 구조를 DSP 키트를 이용하여 실험한 결과를 그림 6에 나타내었다. 지연시간이 없으므로 $T_d = 0$ 가 되므로 제어기는 PI 제어구조가 되므로 IMC 기반 PID제어기의 동조공식에서 PI 제어공식을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

또한, 성능비교를 위해 Ziegler-Nichols PID 계수 조정법을 사용하여 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

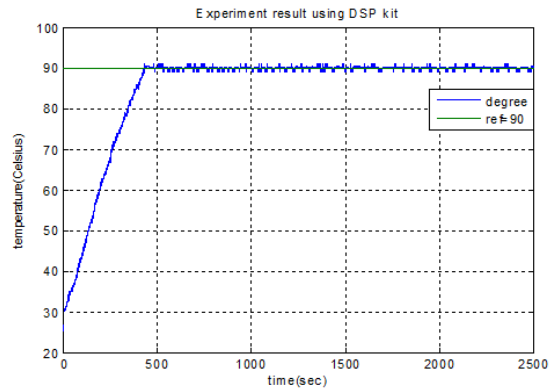


그림 6. uDEAS와 IMC-PID를 이용한 실험결과.

Fig. 6. Experiment result using uDEAS and IMC-PID.

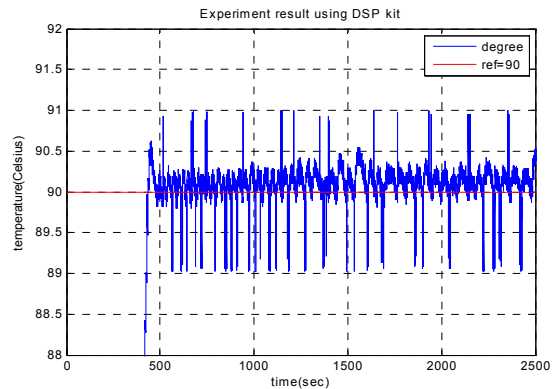


그림 7. 실험결과의 88-92(°C) 부분.

Fig. 7. 88-92(°C) part of Experiment result.

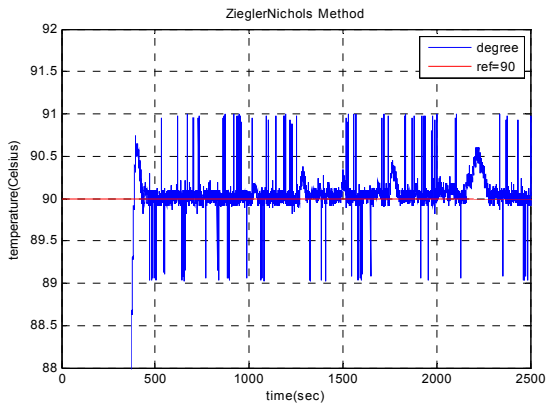


그림 8. Ziegler-Nichols 방법을 이용한 실험결과.
Fig. 8. Experiment result using Ziegler-Nichols method.

그림 7과 그림 8의 비교를 통하여 제안된 IMC-PID 제어기 동조법이 좀 더 강인하면서도 우수한 set-point following 성능이 있음을 알 수 있다.

5. 하드웨어

하드웨어 부문은 그림 9와 같이 크게 Main-Controller (IMC-PID 제어기), A/D 변환부, Analog 입력신호처리부 (RTD Signal conditioner와 Analog multiplex), 출력구동부(Output driver), Heater Assembly부로 구성된다.

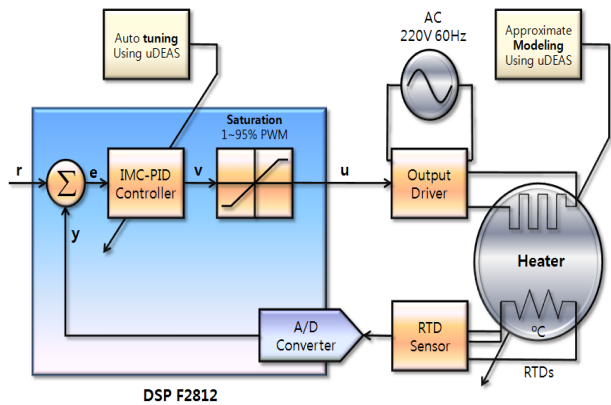


그림 9. 전체 하드웨어 시스템 구성도.
Fig. 9. Organization of whole hardware system.

IMC-PID 제어기 부는 TI 사의 DSP를 이용하여 그림 10과 같이 개발하였다. IMC-PID 제어기의 DSP에는 IMC-PID 제어 알고리즘과 자동동조 알고리즘을 탑재하였으며, A/D converter 보드를 통하여 온도 데이터를 검출하며, 동조된 제어신호를 PWM(Pulse Width Modulator) 신호를 통하여 히터 출력 모듈에 인가한다.

그림 11은 제어 Plant인 Roll 히터를 나타낸다. 출력 구동부는 대전력을 직접적으로 다루기 위해 MOC3063 Triac 소자를 사용한다. 그림 12는 제작된 출력 구동부와 파워 서플라이를 나타낸다.

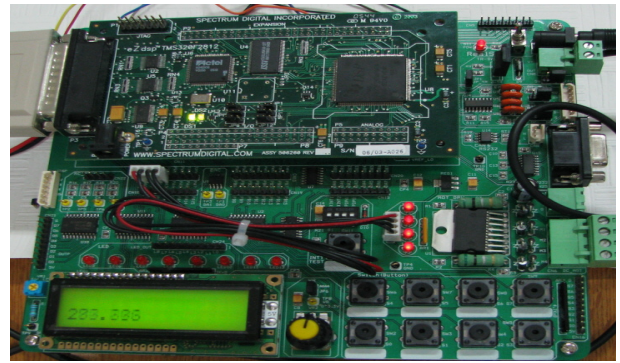


그림 10. DSP 2812(IMC-PID 제어기의 구동 시스템).
Fig. 10. DSP 2812(Driving system of IMC-PID Controller).



그림 11. 롤 히터.
Fig. 11. Roll Heater.

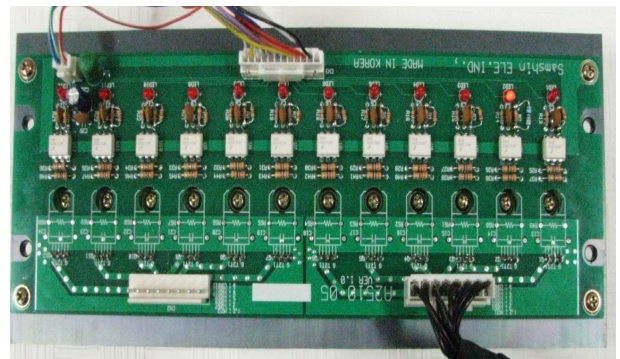


그림 12. PWM 출력 보드.
Fig. 12. PWM output driver board.

6. 결 론

본 논문은 롤 히터를 사용하는 히터 시스템의 정밀 온도 제어를 위해 자동동조 IMC-PID 제어기를 수치 최적화 기법인 uDEAS를 이용해 설계하는 방법을 제안했다. 먼저 3-파라미터 모델을 사용하여 롤 히터를 모델링 하였고, 모델링에서 추정해야 할 파라미터를 uDEAS를 이용하여 추정하였다. 또한 IMC-PID제어기의 이득 조정을 uDEAS를 이용하여 동조함으로써 기존의 PID제어기 보다 더 나은 성능을 보여주었다. 지연시간이 없으므로 IMC기반 PID제어기의 동조방법 중 PI 제어를 사용하였다. 이 논문을 바탕으로

로 향후에는 2가지 이상의 히터를 동시에 제어하며, 각각의 입력 값에 따른 정밀온도제어에 대한 연구를 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] K. J. Ångström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, International Society for Measurement and Control, 1995.
- [2] 임동균, 김창현, 서병설 “루프 형성 기법을 이용한 IMC-PID 제어기 설계,” *전자공학회 논문지*, 제42권 SC, 3호, pp.11-16, 2005년 5월.
- [3] J. -W. Kim and S. W. Kim, “Numerical method for global optimization: dynamic encoding algorithm for searches (DEAS),” *IEE Proc.-Control Theory and Appl.* vol. 151, no. 5, pp. 661-668, Sept. 2004.
- [4] J. -W. Kim, T. Kim, J. -Y. Choi and S. W. Kim, “On the global convergence of univariate dynamic encoding algorithm for searches (uDEAS),” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 571-582, Aug. 2008.
- [5] J. -W. Kim and S. W. Kim, “PID control design with exhaustive Dynamic Encoding Algorithm for Searches (eDEAS),” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 6, pp. 691-700, Dec. 2007. (SCIE)
- [6] 김태규, 김은수, 김종욱, “최적화기법인 mDEAS의 개발 및 이족 보행 시 최적 관절궤적 생성에의 적용”, *한국정보기술학회 하계학술대회*, VI-06-01 ~ VI-06-06, 부산, Korea, May 2008.

저 자 소 개



김만석(Manseok Kim)
2009년 : 동아대 전자공학과 졸업
2009년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사 졸업

관심분야 : 휴머노이드, 최적화알고리즘, PID-Control
Phone : 051-200-5579
Fax : 051-200-7712
E-mail : luhyoun@hotmail.com



김조환(Jo Hwan Kim)
2009년 : 동아대 전자공학과 졸업
2009년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사 졸업

관심분야 : 최적화알고리즘, 영상처리.
Phone : 051-200-5579
Fax : 051-200-7712
E-mail : kimhades@hotmail.com



최민구(Min Koo Choi)
2010년 : 동아대 전자공학과 졸업
2010년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사과정

관심분야 : 휴머노이드, 임베디드시스템
Phone : 051-200-5579
Fax : 051-200-7712
E-mail : choimk@hotmail.com



박종오(Jong-Oh Park)
2003년 : 동아대학교 박사 졸업
2008년~현재 : 동아대학교 전임교수
2005년~2008년 : 한국과학기술원 항공우주공학 연구원

관심분야 : 위성자세제어, 퍼지이론 및 응용, 전자회로설계
Phone : 051-200-6962
Fax : 051-200-7712
E-mail : jopark@kaist.ac.kr



김종욱(Jong-Wook Kim)
2004년 : 포항공대 전자전기공학과 대학원 박사
2004년~2006년 : 포스코 연구원
2006년~현재 : 동아대학교 대학원 전자공학과 조교수

관심분야 : 휴머노이드, 지능제어
Phone : 051-200-7714
Fax : 051-200-7712
E-mail : kjwook@dau.ac.kr