pISSN 2671-9940
eISSN 2671-9924
J Korean Soc Fish Ocean Technol, 58(4), 359-366, 2022
https://doi.org/10.3796/KSFOT.2022.58.4.359

KSFOT FISHERIES OCEAN TECHNOLOGY
www.fishtech.or.kr
〈Original Article〉

부하추종 냉각수 시스템의 온도 제어를 위한 유전알고리즘 기반 비선형 PID 제어기 설계

이유수 · 황순규[1] · 안종갑[2*]
윈터투어 가스앤디젤 코리아 엔지니어, [1]대우조선해양 에너지시스템 연구개발부 책임연구원, [2]경상국립대학교 실습선 운영관리센터 교수

Genetic algorithm-based design of a nonlinear PID controller for the temperature control of load-following coolant systems

Yu-Soo Lee, Soon-Kyu Hwang[1] and Jong-Kap Ahn[2*]

Technical Expert, Global Customer Operation Experts, Winterthur Gas & Diesel Korea, Busan 46040, Korea
[1]Principal Researcher, Energy System R&D Department, DSME, Siheung 15011, Korea
[2]Professor, Training Ship Operation Center, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

In this study, the load fluctuation of the main engine is considered to be a disturbance for the jacket coolant temperature control system of the low-speed two-stroke main diesel engine on the ships. A nonlinear PID temperature control system with satisfactory disturbance rejection performance was designed by rapidly transmitting the load change value to the controller for following the reference set value. The feed-forwarded load fluctuation is considered the set points of the dual loop control system to be changed. Real-coded genetic algorithms were used as an optimization tool to tune the gains for the nonlinear PID controller. ITAE was used as an evaluation function for optimization. For the evaluation function, the engine jacket coolant outlet temperature was considered. As a result of simulating the proposed cascade nonlinear PID control system, it was confirmed that the disturbance caused by the load fluctuation was eliminated with satisfactory performance and that the changed set value was followed.

Keywords: Low-speed two-stroke main diesel engine, Jacket cooling water system, Nonliner PID controller, Cascade controller, Genetic algorithm

서 론

선사들이 연료비 절감을 위해 선택한 저속운항(slow steaming)은 선박용 저속 2행정 주기관의 저온부식 발생을 가속화 시켰다(Kim et al., 2017). 저온부식에 대응하

Received 28 October 2022; Revised 22 November 2022; Accepted 24 November 2022
*Corresponding author: JongKap.Ahn@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-9042, Fax: +82-55-772-9039
Copyright Ⓒ 2022 The Korean Society of Fisheries and Ocean Technology

고자 MAN에서는 JBB (Jacket Bypass Basic)와 LDCL (Load Dependent Cylinder Liner)시스템을 개발하여 각 엔진에 선별적으로 적용하였고, Wartsila에서는 Buffer system을 개발하여 상용화하였다(Kim, 2014; Jacobsen, 2014; Wartsila, 2014; Kim et al., 2017; WINGD, 2022). MAN의 LDCL시스템 중 WHR (Waste Heat Recovery) 시스템을 위한 EGB (Exhaust Gas By-pass) 시스템이 있는 엔진에는 재킷 냉각수 온도 제어를 위해 이중 루프 캐스케이드 제어시스템을 장착할 것을 제안하고 있다 (MAN, 2012). 본 연구에서 고려되는 LDCL시스템 중 이중 루프 캐스케이드 제어시스템에는 기본적으로 PID 제어기가 사용되고 있다. 제어 이론의 발달로 지능적인 기법들이 개발되었음에도 PID 제어기는 여러 산업분야에서 쓰이고 있다. PID 제어기는 다른 제어기보다 설계하기가 쉽고 기본적인 동조방법과 함께 다른 많은 동조방법이 소개되어 있기에 현장 적용 시 엔지니어들이 비교적 간단하게 취급할 수 있다(Åström et al., 1995; Aidan, 2009). 그러나 선형 PID (Linear PID: LPID) 제어기는 제어대상의 반응속도를 빠르게 하려고 이득을 크게 하면 오버슈트가 증가하고, 반대로 이득을 감소시키면 반응속도가 느려진다. 따라서 제어시스템의 반응속도와 오버슈트 간에 절충이 필요하게 된다. 이러한 부분을 다소 완화시키기 위해 전통적인 LPID 제어기의 구조에 비선형적인 방법을 적용시키는 연구 결과들이 발표되고 있다(Chen et al., 2011; Zhang and Hu, 2012; Korkmaz et al., 2012; So, 2014; So and Jin, 2018; Najm and Ibraheem, 2019).

본 연구에서는 기존의 표준형 LPID 제어기 구조에 각각의 이득이 오차에 따라 변하는 비선형 PID (Nonlinear PID: NPID) 제어기를 응용하고자 한다. 사용되는 NPID 제어기의 이득들은 제어기 작동 중 오차 또는 오차의 변화율을 바탕으로 수시로 변하게 된다. 본 연구에서 사용되는 NPID 제어기가 선박용 저속 2행정 주기관의 부하 변동에 따라 변화하는 재킷 냉각수의 출구 온도뿐만 아니라 입구 온도가 함께 고려되는 이중 루프 캐스케이드 제어시스템에 적용된다.

NPID 제어기의 각 이득들은 주기관 부하에 따라 변화되는 온도 설정치를 되도록 빠른 시간에 추종하고 안정화시켜 최소의 오차가 될 수 있도록 선정된다. 이때, 시간곱 절대오차적분(ITAE: Integral of the time weighted absolute error) 성능지수가 최소화되도록 최적화기법 중 실수코딩 유전알고리즘(RCGA: Real-Coded Genetic Algorithms)을 이용한다(Jin and Ha, 1997).

재료 및 방법

주기관 재킷 냉각수 시스템의 모델링

주기관의 경우에는 식 (1)과 같이 Choi (2008)가 제안한 1차 시간 지연 시스템을 이용하여 모델링한다.

$$Y_e(s) = \frac{K_e\, e^{-L_e s}}{1 + T_e s}\, Y_{ei}(s) \tag{1}$$

여기서, $Y_e(s)$는 주기관 재킷 냉각수의 출구측 온도, K_e는 이득이며, T_e는 시정수이다. $Y_{ei}(s)$는 주기관 입구측 냉각수 온도이다.

$$Y_{ei}(s) = e^{-L_p s}\, Y_{c(s),} \qquad L_p = 0.36DA/q_w \tag{2}$$

여기서, L_p [sec]는 조작 밸브와 주기관 간의 배관 길이에 의해 발생되는 시간 지연, D [m]은 배관 길이, A [㎡]는 배관 단면적, q_w [㎥/h]는 배관 통과 유량이다.

열교환기의 경우에는 식 (3)과 식 (4)의 근사방정식을 이용하여 모델링한다.

식 (3)은 3-Way 밸브의 물리적 한계에 의한 포화기를 표시한 것이다.

$$u_{sat} = \begin{cases} u_{\min}, & u < u_{\min} \\ u, & u_{\min} \le u \le u_{\max} \\ u_{\max}, & u > u_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

여기서, u는 제어기의 출력이고, $u_{\min}$과 $u_{\max}$는 제어기의 제한되는 출력을 나타낸다.

식 (4)는 유량 조절을 위해 사용되는 3-Way 밸브를 1차 시스템으로 표현한 것이다.

$$U_a(s) = \frac{K_a}{1 + T_a s}\, U_{sat}(s) \tag{4}$$

여기서, $U_{sat}(s)$와 $U_a(s)$는 각각 포화기와 3-Way 밸브의 출력, K_a와 T_a는 3-Way 밸브의 이득과 시정수이다.

식 (5)는 집중정수계로 가정하여 나타낸 열교환기의 근사방정식이다(Ahn et al., 2014). $Y_c(s)$는 열교환기를 통과하는 주기관 냉각수의 출구 온도이다.

$$Y_c(s)=\frac{1}{1+T_x s}[-K_x e^{-L_x s}U_a(s)+K_t T_{\sin}(s)] \quad (5)$$

여기서, $T_{\sin}(s)$는 셀측 유체의 입구 온도이며, K_x, T_x, L_x는 열교환기의 이득, 시정수, 시간 지연이다. K_t는 외란의 이득이다.

MAN (2012)에서는 주기관 실린더 라이너의 저온부식을 방지하기 위해 재킷 냉각수의 출구 온도를 저부하에서는 88~92 [℃], 고부하에서는 80~85 [℃]로 설정하고 있다. 또한, WINGD (2022)에서는 재킷 냉각수 출구 온도를 엔진제어시스템에 의해 조종할 때, 정상상태(steady state)에서는 설정치의 ±2 [℃], 과도상태(transient)에서는 ±4 [℃] 안의 범위에서 편차를 허용하고 있다.

주기관의 부하[%] 변동에 따라 재킷 냉각수 온도 설정치가 조정되는 제어시스템에서 고려되어야 하는 설정치 변경에 따른 변화율 대신 식 (6)과 식 (7)을 사용한다(MAN, 2012).

$$\begin{aligned} 0-50\% &: T_{is}=-0.1\times E_{ld}+85 \\ 50-75\% &: T_{is}=-0.5\times E_{ld}+105 \\ 75-100\% &: T_{is}=-0.1\times E_{ld}+75 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} 0-50\% &: T_{os}=90 \\ 50-75\% &: T_{os}=-0.4\times E_{ld}+110 \\ 75-100\% &: T_{os}=80 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, E_{ld}는 주기관 부하, T_{is}는 주기관 입구측 냉각수 온도 설정치, T_{os}는 주기관 출구측 냉각수 온도 설정치이다.

식 (8)은 주기관 부하를 외부 제어시스템으로 피드포워딩하여 NPID 제어시스템의 내부설정치를 계산하기 위한 것이다(MAN, 2012).

$$\begin{aligned} T_{is}(s)&=\gamma_2\times E_1(s)-\Delta T_{ld}(s) \\ E_1(s)&=T_{os}(s)-Y(s) \\ T_{os}(s)&=\gamma_1\times Y_{set}(s) \\ \Delta T_{ld}(s)&=\alpha+\beta\times\frac{E_{ld}(s)}{100} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $Y_{set}(s)$는 재킷 냉각수 출구 온도의 설정치, $Y(s)$는 재킷 냉각수 출구 온도, $E_1(s)$는 오차이다. $\Delta T_{ld}(s)$는 α와 β로 조절되는 주기관 부하 변화의 대응 온도이다. 각각 5와 10으로 선정할 수 있다(MAN, 2012). 본 연구에서 γ_1과 γ_2는 각 설정치를 적절히 선택하기 위해 사용되는 이득으로 모두 1로 선정하였다.

비선형 PID 제어기

식 (9)는 본 연구에서 사용되는 NPID 제어기를 주파수 영역으로 표현한 것이다(So, 2014). e는 시간에 따라 변화하는 오차 $e(t)$를 간략하게 표기한 것이다.

$$C(s)=\frac{U(s)}{E(s)}=K_p(e)+\frac{K_i(e)}{s}+K_d(e,\dot{e})s \quad (9)$$

여기서, 오차 e와 변화율 $\dot{e}$에 따른 $K_p(e)$는 비선형 시변 비례이득, $K_i(e)$는 비선형 시변 적분이득, $K_d(e,\dot{e})$는 비선형 시변 미분이득이다.

식 (10)은 오차에 따라 비례이득의 크기가 조절될 수 있는 비선형 시변 비례이득 $K_p(e)$ 함수이다.

$$K_p(e)=K_p g_p(e),\ g_p(e)=1-\frac{1}{a_p+(c_p e)^6} \quad (10)$$

여기서, K_p는 비례이득 상수, $g_p(e)$는 매개변수 a_p (≥ 1)와 c_p(>0) 그리고 오차에 따라 비례이득이 비선형적으로 변하는 함수이다.

식 (11)은 비선형 시변 적분이득 $K_i(e)$ 함수이다. 오차 $|e|$에 따라 적분이득 값을 조절하여 오버슈트를 억제하고 정상상태 오차를 줄일 수 있게 한다.

$$K_i(e)=K_i g_i(e),\ g_i(e)=\frac{1}{1+(c_i e)^6} \quad (11)$$

여기서, K_i는 양의 적분이득 상수, $g_i(e)$는 매개 변수 c_i(>0) 그리고 오차에 따라 적분이득이 비선형적으로 변하는 함수이다.

식 (12)는 비선형 시변 미분이득 $K_d(e,\dot{e})$이다. 오차와 오차의 변화율에 따라 미분 동작이 선택된다.

$$K_d(e,\dot{e}) = K_d g_d(e,\dot{e}),$$
$$g_d(e,\dot{e}) = \begin{cases} 1-\dfrac{1}{a_d+(c_d e)^6}, & e\dot{e}>0 \\ 1-\dfrac{1}{a_d}, & elsewhere \end{cases} \quad (12)$$

여기서, K_d는 양의 미분이득 상수, $g_d(e,\dot{e})$는 오차와 오차의 변화율 그리고 매개변수 $a_d(\geq 1)$와 $c_d(>0)$에 따라 미분이득이 비선형적으로 변하는 함수이다.

최적화 도구로써 유전알고리즘

유전알고리즘은 진화 원리, 유전학, 적자생존의 개념을 이용하여 알고리즘 형태로 구현한 최적화 탐색도구 중의 하나이다(Lee et al., 2005). 본 연구에서는 염색체가 실수로 표시되는 실수코딩 유전알고리즘을 사용한다(Jin, 2004). 본 연구에서 사용되는 주요 알고리즘은 다음과 같다. 초기 집단은 난수 발생기를 통해 무작위로 생성한다. 재생산은 구배와 유사한 재생산을 사용한다(Jin, 2004). 교배는 산술적 교배와 단순 교배를 결합한 수정 단순 교배를 사용한다(Jin and Joo, 2000). 동적 돌연변이 연산자를 사용해 세대 초기에는 모든 탐색공간을 균등한 확률로 탐색하게 된다(Janikow and Michalewicz, 1991). 유전자의 다양성을 위해 선택압을 일정하게 유지하는 Grefenstette (1986)의 스케일링 윈도우 기법을 사용한다. 또한, 최적의 유전자가 다음 세대로 전해지는 것을 보장하는 엘리트 전략을 사용한다 (De Jong, 1975). 유전알고리즘의 종료 조건은 탐색된 결과에 따라 최종 세대수를 증가시키는 방법을 사용한다.

유전알고리즘을 이용한 비선형 PID 제어기의 동조

식 (9)의 NPID 제어기는 제어 환경에 따라 전체 제어 시스템이 원하는 성능을 갖도록 적절한 방법으로 제어기 이득을 조정할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1의 부하 추종 주기관 재킷 냉각수 온도제어시스템이 외란의 영향을 받는 동안, 식 (13)의 ITAE가 최소화될 수 있도록 RCGA에 의해 NPID 제어기의 이득인 {K_p, K_i, K_d, a_p, c_p, c_i, a_d, c_d}를 최적화하는 문제를 다룬다. Fig. 1에서 선박의 추진 속도(주기관회전수)를 조정하거나 파도, 바람, 조류 등 외부환경에 의한 선박 추진 저항이 변하게 되면 주기관의 부하가 변한다. 주기관 부하 변동으로 연소온도가 변해 주기관 재킷 냉각수 온도제어시스템에는 외란으로 영향을 미치게 된다. 외란으로 주기관 부하가 변동되면 주기관 재킷 냉각수 온도제어시스템의 설정치도 부하에 따라 변하게 된다.

$$J_{ITAE}(\boldsymbol{\phi}) = \int_0^{t_f} t\,|e(t)|\,dt \quad (13)$$

여기서, $\boldsymbol{\phi}$는 $[K_p, K_i, K_d, a_p, c_p, c_i, a_d, c_d]^{\mathrm{T}} \in \boldsymbol{R}^8$이고, $e(t)$는 설정치와 출력 간의 오차로 주기관 출구측 온도오차이다. 적분시각 t_f에 대해 본 연구에서는 500세대까지 모의진화를 진행하였다.

결과 및 고찰

NPID 제어기 기반으로 설계된 선박용 주기관의 재킷 냉각수 온도제어시스템의 유효성을 검증하기 위하여 모의실험을 실시한다.

모의실험용 데이터

모의실험에 사용된 열교환기와 주기관의 데이터는 Table 1과 같고, 3-Way 밸브의 $u_{\min}$과 $u_{\max}$는 각각 [−100, 0]이다(Ahn et al., 2014; Choi, 2008).

NPID 제어기의 이득은 구간 $0.01 \leq [K_p, K_i] \leq 10$,

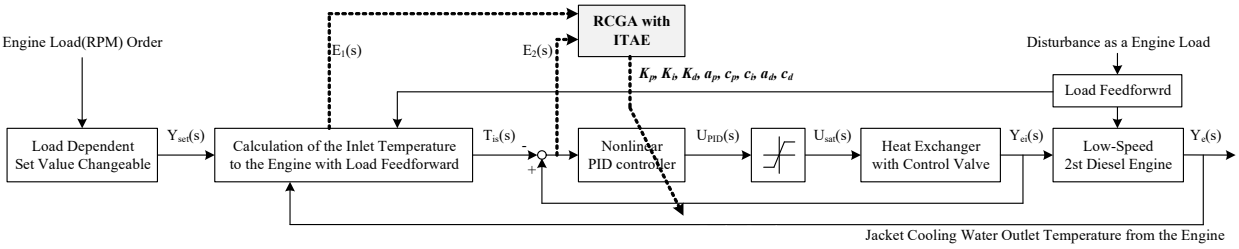

Fig. 1. Nonlinear PID temperature control systems with utilising engine load-following.

Table 1. Heat Exchanger (HE) and engine data for simulation

Descriptions	Parameters	Values	Unit
Actuator gain	K_a	0.021	
Actuator time constant	T_a	3	
HE gain	K_x	50	
HE time constant	T_x	30	
HE time delay	L_x	1	[sec]
HE disturbance gain	K_t	0.286	
Pipe time delay	L_p	4	[sec]
Engine gain	K_e	1	
Engine time constant	T_e	8	
Engine time delay	L_e	4	[sec]

Table 2. Tuned gains of the nonlinear PID controllers

K_p	K_i	K_d	a_p	c_p	c_i	a_d	c_d
2.2970	0.0511	18.0086	32.8234	47.2768	0.1358	39.1390	52.7801

$0.01 \le K_d \le 100,\ 1 \le [a_p, a_d] \le 100,\ 0.00001 \le [c_p, c_i, c_d] \le 100$에서 RCGA에 의해 탐색 되었다. Table 2는 탐색 결과이다. 제어기 이득 동조를 위해 주기관은 78 [%] 부하로 운전되는 동안 재킷 냉각수 출력측 온도 설정치 $Y_{set}(s)$를 80 [℃]에서 90 [℃]로 증가시키면서 제어기 이득을 동조하였다.

주기관 냉각수 온도 설정치 변경에 따른 추종 성능

Fig. 2는 자동모드 운전 시 주기관의 부하가 78 [%]로 유지되고 있을 때, 재킷 냉각수 온도 설정치 $Y_{set}(s)$를 80 [℃]에서 90 [℃]로 변경하여 설정치 추종 성능을 보여주는 것이다. 이때 조작 밸브의 포화 현상은 고려하지 않았다. NPID 제어기와 LPID 제어기의 성능 비교를 Table 3에 정리하였다. LPID 제어기 이득의 경우 NPID 제어기 이득을 동조할 때와 동일한 조건으로 RCGA를 이용해 동조되었다. LPID 제어기 이득 K_p, K_i, K_d는 각각 {3.1699, 0.0949, 23.6526}이다.

NPID 제어기가 LPID 제어기보다 작은 오버슈트를

Table 3. Performance for set value tracking of the NPID controller and the LPID controller

	Overshoot [%]	Peak time [sec]	Settling time [sec]	IAE
NPID	0.69	25.73	55.86	357.87
LPID	3.40	22.72	93.80	393.81

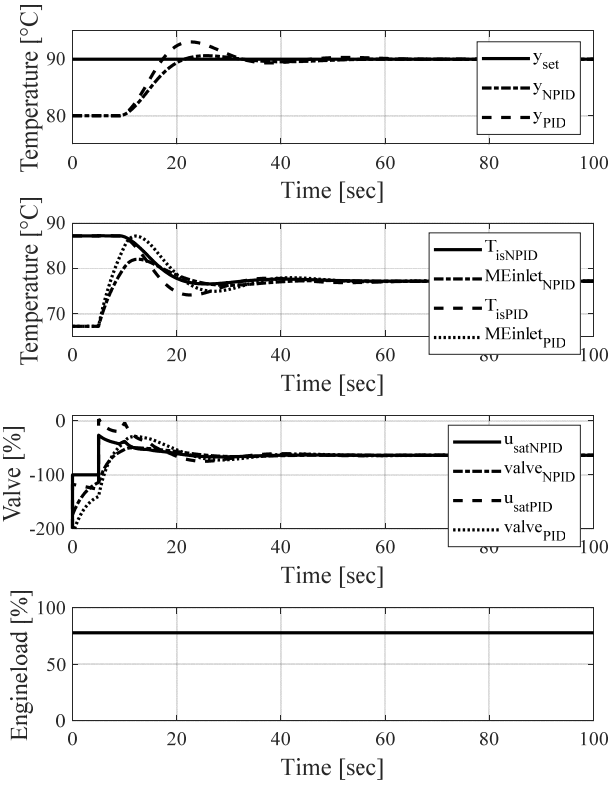

Fig. 2. Set-point tracking responses (80 [℃] → 90 [℃]).

갖는 성능을 보여주면서, 좀 더 이른 시간에 설정 온도로 정착되어 가는 것을 알 수 있다. 설정치를 변경하는 초기의 밸브 작동상태를 보면 포화한계를 넘어서 작동되고 있음을 확인할 수 있다. 이후의 모의실험은 NPID 제어기만으로 수행하며 이때 작동 밸브의 포화한계가 고려된다.

주기관 부하 변경에 따른 외란 제거 성능

Fig. 3은 주기관이 고부하 영역에서 재킷 냉각수 온도 설정치 $Y_{set}(s)$가 80 [℃]로 운전되고 있을 때 10 [sec] 경 부하를 10% 증가(75% → 85%)시켜 외란 제거 성능을 보여주는 것이다. 전체 시스템의 지연시간 9 [sec] 이후에 증가된 부하에 의한 온도상승을 억제해 가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 주기관이 저부하 영역에서 재킷 냉각수 온도 설정치 $Y_{set}(s)$가 90 [℃]로 운전되고 있을 때 10 [sec] 경 부하를 10% 증가(35% → 45%)시켜 외란 제거 성능을 보여주는 것이다. 전체 시스템의 지연시간 9 [sec] 이후에 증가된 부하에 의한 온도상승을 억제해 가는 것을 확인할 수 있다.

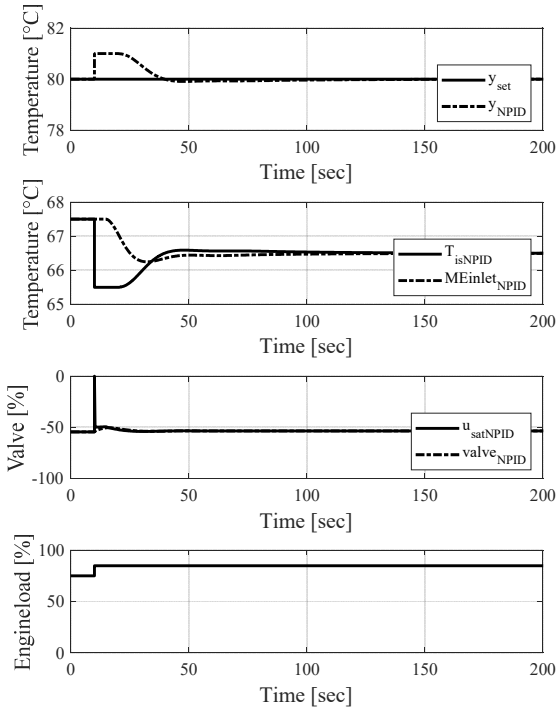

Fig. 3. Disturbance rejection responses when load increased 75 [%] to 85 [%] at the high load with steady set-point 80 [℃].

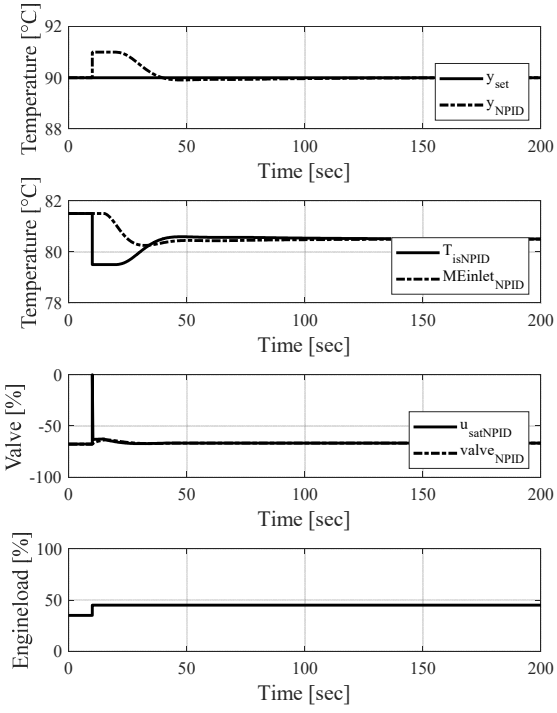

Fig. 4. Disturbance rejection responses when load increased 35 [%] to 45 [%] at the low load with steady set-point 90 [℃].

저부하영역과 고부하영역 모두에서 큰 오버슈트없이 만족할 만한 외란 제거 성능을 보여주고 있다. 외란으로 부하가 변경되는 초기의 밸브 작동상태를 보면 포화한계(100% full open)까지 제어기는 밸브에 명령을 주지만 밸브의 작동특성에 따라 실제 밸브작동은 포화한계에 도달하지 않고 제어기의 명령을 추종하고 있다.

주기관 부하 변경에 따른 설정치 추종 및 외란 제거 성능

Fig. 5는 주기관 재킷 냉각수 온도 설정치 $Y_{set}(s)$가 80 [℃]로 유지되고 있을 때, 주기관 부하를 75 [%]에서 60 [%]로 변화시켜 변경되는 설정치 86 [℃]를 추종해가면서 외란을 제거하는 성능을 보여주는 것이다. 감소한 주기관 부하를 피드포워드하여 주기관 입구측 재킷 냉각수 온도를 선제적으로 증가시켜(이 경우 주기관 부하가 감소하므로 주기관 연소실 온도가 내려갈 것을 예측하여 냉각수 온도는 상대적으로 높이는 명령을 수행하고 있다) 되도록 큰 온도 변화 없이 변경된 온도 설정치로 추종해가는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 주기관 재킷 냉각수 온도 설정치 $Y_{set}(s)$가 86 [℃]로 유지되고 있을 때, 주기관 부하를 60 [%]에서

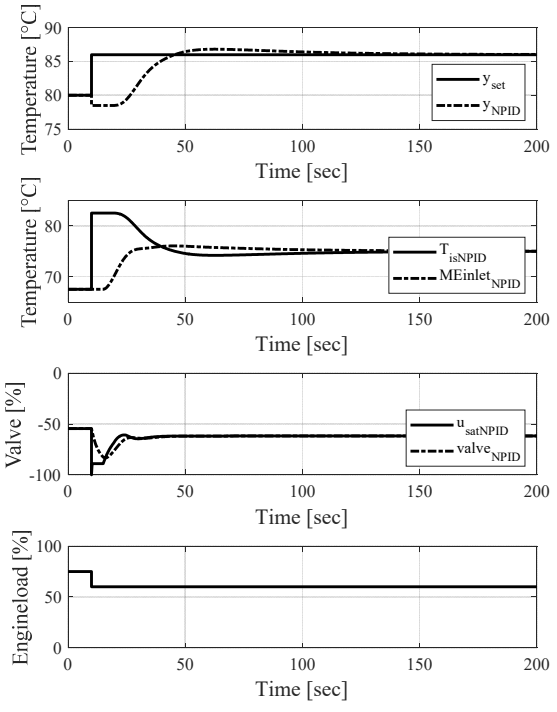

Fig. 5. Set-point tracking and disturbance rejection responses when engine load decreased 75 [%] to 60 [%] at the high load.

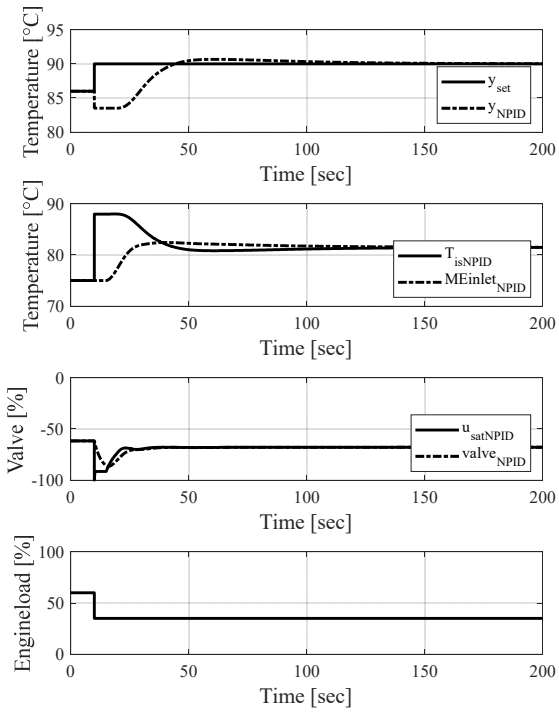

Fig. 6. Set-point tracking and disturbance rejection responses when engine load decreased 60 [%] to 35 [%] at the low load.

35 [%]로 변화시켜 변경되는 설정치 90 [℃]를 추종해가면서 외란을 제거하는 성능을 보여주는 것이다. 감소한 주기관 부하를 피드포워드하여 주기관 입구측 재킷 냉각수 온도를 선제적으로 증가시켜(이 경우 주기관 부하가 감소하므로 주기관 연소실 온도가 내려갈 것을 예측하여 냉각수 온도는 상대적으로 높이는 명령을 수행하고 있다) 되도록 큰 온도 변화 없이 변경된 온도 설정치로 추종해가는 것을 알 수 있다.

저부하영역과 고부하영역 모두에서 큰 오버슈트없이 만족할 만한 외란 제거 성능을 보여주고 있다. 부하가 변하여 온도 설정치가 변경되는 초기의 밸브 작동상태를 보면 포화한계(100% full close)까지 상당히 짧은 시간 동안 제어기는 밸브에 명령을 주지만 실제 밸브작동은 밸브의 작동특성에 따라 포화한계에 도달하지 않고 제어기의 명령을 추종하고 있다.

결 론

본 연구에서는 NPID 제어기를 적용시켜 선박용 2-st 저속 대형 주기관의 재킷 냉각수 온도를 제어하는 시스템을 설계하였다. 이때, 주기관의 변동되는 부하가 외란으로써 제어시스템에 피드포워딩 되고, 캐스케이드 제어시스템의 설정치를 변경할 수 있도록 고려되었다. NPID 제어기 이득을 선정하기 위해 RCGA를 이용하였고, ITAE를 평가함수로 사용하였다. 이때 평가함수는 주기관 재킷 냉각수 출구측 온도뿐만 아니라 입구측 온도를 함께 고려하였다. 설계된 이중 루프 캐스케이드 NPID 제어시스템을 모의 실험한 결과, 조작 밸브가 포화한계를 가지고 있음에도 불구하고 주기관의 부하 변동에 의한 외란에 적절히 대응하였고, 설정치 변화에도 만족할만한 성능으로 추종해가는 것을 확인할 수 있었다.

이후에는 해수 온도변화에 의한 열교환기의 온도변화를 고려하여 열교환기의 외란 제거를 위한 비선형적인 피드포워드 제어기 설계, 제어기 명령에 따른 조작 밸브의 포화를 고려하여 비선형적인 안티와인드업(anti-windup) 기법이 추가된 제어시스템, 그리고 미분폭주(derivative kick)를 완화시킬 수 있는 필터 도입을 추가적으로 설계하는 연구를 하고자 한다.

References

Ahn JK, So GB, Lee JY, Lee YH, So MO and Jin GG. 2014. PID control of a shell and tube heat exchanger system incorporating with feedforward control and anti-windup techniques. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems 20, 543-550. https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.14.0009.

Aidan O. 2009. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd Edition). Imperial College Press, 1-2.

Åström KJ and Hägglund T. 1995. PID controllers: theory, design and tuning (2nd Edition). ISA Press, 1-4.

Chen JP, Lu BC, Fan F, Zhu SC and Wu JX. 2011. A nonlinear PID controller for electro-hydraulic servo system based on PSO algorithm. Applied Mechanics and Materials 141, 157-161. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.141.157.

Choi SM. 2008. Configuration and analysis of a feed-forward control system for jacket cooling water temperature of marine prime diesel engine. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology 32, 1303-1308.

De Jong KA. 1975. An analysis of the behavior of a class

of genetic adaptation systems. Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor Michigan, 96-160.

Grefenstette JJ. 1986. Optimization of control parameters for genetic algorithms. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics 16, 122-128. https://doi.org/10.1109/TSMC.1986.289288.

Jacobsen SB. 2014. Cold corrosion control. MAN Diesel Course 2014 Busan, November 7, 6-7.

Janikow CZ and Michalewicz Z. 1991. An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithms. Proceedings of the 4th ICGA, San Diego, CA, USA, 31-36.

Jin GG and Ha JS. 1997. Genetic algorithms as optimisation tools and their applications. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology 21, 108-116.

Jin GG and Joo SR. 2000. A study on a real-coded genetic algorithm. Journal of Institute of Control. Robotics and Systems 6, 268-275.

Jin GG. 2004. Genetic algorithms and their applications. KyoWooSa, Seoul Korea, 149-261.

Kim DH. 2014. Prevention of the cold corrosion. MAN Diesel & Turbo Korea, 1-17.

Kim DK, Lee JH and Cho KH. 2017. A study on performance comparison of jacket cooling fresh water system for marine diesel engine. Journal of the Korean Society of Marine Engineering 41, 8-14. https://doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.1.8.

Korkmaz M, Aydogdu O and Dogan H. 2012. Design and performance comparison of variable parameter nonlinear PID controller and genetic algorithm based PID controller. 2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, 1-5. https://doi.org/10.1109/INISTA.2012.6246935.

Lee YH., So MO, Jung BG, Jin GG and Jin SH. 2005. RCGA-based tuning of the PID controller for marine gas turbine engines. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology 29, 116-123.

MAN Diesel & Turbo. 2012. Design update note - jacket cooling water system S/G50ME-B9.2 & 9.3 and all engines from 60 bore and above. Copenhagen, Denmark: MAN, 17 October, 1-2.

MAN Diesel & Turbo. 2012. Jacket cooling water temperature control. Copenhagen, Denmark: MAN, 05 October, Info. No.: 375633, Item Id.:5323487-4, 1-3.

Najm AA and Ibraheem IK. 2019. Nonlinear PID controller design for a 6-DOF UAV quadrotor system. Engineering Science and Technology, an International Journal 22, 1087-1097. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.02.005.

So GB. 2014. RCGA-based design of a nonlinear PID controller. Master thesis, Korea Maritime & Ocean University, 24-29.

So GB. and Jin GG. 2018. Fuzzy-based nonlinear PID controller and its application to CSTR. Korean J Chem Eng 35, 819–825. https://doi.org/10.1007/s11814-017-0329-1.

Wartsila. 2014. Ancillary system of W-X engine. WARTSILA, 12-24.

WINGD. 2022. Continuous low load operation (slow steaming). Winterthur, Switzerland, Service Letter SL-0009-3, 04 March, 1-4.

WINGD. 2022. Central cooling water system. Winterthur, Switzerland, Item ID PTAA036137, 1-3.

Zhang H and Hu B. 2012. The application of nonlinear PID controller in generator excitation system. Energy Procedia, 17(Part A), 202-207. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.084.