

주기관의 자켓 냉각수 시스템을 위한 캐스케이드 온도 제어

안중갑¹ · 소명옥[†]

(Received November 13, 2017 ; Revised January 16, 2018 ; Accepted July 20, 2018)

Cascade temperature control for jacket cooling-water system of two-stroke low-speed marine main diesel engine

Jong-Kap Ahn¹ · Myoung-Ok So[†]

요약: 일반적인 냉각수 온도 제어 시스템에서 이중 루프를 갖는 캐스케이드 제어는 외란에 의한 냉각수의 급격한 온도 변화를 억제시키고, 허용 범위 내에서 대응되는 온도가 빠르게 변화될 수 있도록 제어 시스템을 설계할 수 있다. 본 논문에서는 선박용 주기관 자켓 냉각수의 출구 온도뿐만 아니라 입구 온도가 함께 고려될 수 있도록 이중 루프 캐스케이드 PID 온도 제어 시스템을 설계하고자 한다. 온도 제어 시스템은 자동 모드 운전시 출구 온도 설정치는 고정되는 것으로 간주되며, 이때 제어기는 주기관 부하 변화로 형성된 외란에 의해 교란된 출력이 빨리 설정치로 회복되도록 조절하게 된다. 설정치와 자켓 냉각수 출구측 온도의 오차를 최소화시키고 되도록이면 빠른 시간에 설정치를 추종하여 안정화될 수 있도록 제어기 파라미터들을 동조한다. 이때, 강인한 최적화기법으로 많이 사용하는 실수코딩 유전알고리즘을 이용하여 제곱오차적분 성능지수를 최소화시키는 방향으로 탐색하고자 한다. 설계된 이중 루프 캐스케이드 제어 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 단일 루프 제어 시스템과 비교하여 정량적인 성능을 평가하고자 한다.

주제어: 선박 주기관, 자켓 냉각수 제어 시스템, 캐스케이드 제어, PID, 유전알고리즘

Abstract: In a typical cooling-water temperature control system, cascade control with two loops can control the sudden temperature change of the cooling-water caused by disturbances, and the control system can be designed so that the corresponding temperature can be changed rapidly within the allowable range. In this research, a cascade proportional-integral-derivative temperature control system with two loops was designed so that the outlet temperature, as well as the inlet temperature of the ship's main engine jacket cooling-water, can be considered together. The temperature control system was developed assuming that the outlet temperature set-point is fixed during automatic mode operation in which the controller quickly restores the disturbance output to the set point because of the disturbance created by changing the main engine load. The controller parameters were tuned to minimize the error between the set-point and the jacket cooling-water outlet temperature and to follow the set-point as soon as possible to stabilize. At this time, to minimize the integral squared error performance index, real coded genetic algorithms, which are widely used as a robust optimization technique, was used. The designed cascade control system with two loops evaluates the quantitative performance of a one-loop control system through computer simulation.

Keywords: Ship's main engine, Jacket cooling-water control system, Cascade control, PID, Genetic algorithm

1. 서론

선박용 주기관에서는 자켓 냉각수(jacket cooling water)가 너무 차가워지면 열충격을 일으켜 관련된 부품이 손상되고 실린더 라이너의 연소실 측에 생성된 산성(acids)의 응축수는 윤활 필름을 씻어 내어 부식을 일으키는 원인이 된다. 또한 냉각수가 너무 뜨거워지면 과열을 효과적으로 제거하지 못해 과도한 마모가 발생하고 냉각 시스템 내에 스케일 이 형성될 위험이 커진다. 이러한 이유로 냉각수 출구 온도

는 일반적으로 약 78-82[°C]로 유지되었다[1]. 그러나 최근에는 저속 운항 선박이 증가하면서 발생하는 실린더 라이너 저온 부식의 대응책으로 냉각수 출구 온도를 약 85[°C]로 설정하여 실제로는 88-90[°C]로 운전되고 있다[2][3].

일반적인 냉각수 온도 제어 시스템에서 출구 온도만을 고려한 단일 루프 제어가 만족할 만한 성능을 보여 준다면 표준 제어 시스템으로 사용될 수 있다. 그러나 출구측 설정치와 알람 제한치 사이의 차이를 현저하게 줄여주지는 못

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3258-6221>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: smo@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4248

¹ SEAWARD Ship Management, E-mail: JongKap.Ahn@seaward.kr, Tel: 051-714-0369

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한다. 이를 보완하기 위해 이중 루프를 갖는 캐스케이드 제어는 특히 외란에 의한 냉각수의 급격한 온도 변화를 억제시키고, 허용 범위 내에서 대응되는 온도가 빠르게 변화될 수 있도록 제어 시스템을 설계할 수 있다.

본 논문에서는 자켓 냉각수의 출구 온도 뿐만 아니라 입구 온도가 함께 고려될 수 있도록 이중 루프 캐스케이드 PID 온도 제어 시스템을 설계하고자 한다. 온도 제어 시스템은 자동 모드 운전시 출구 온도 설정치는 고정되는 것으로 간주되며, 이때 제어기는 외란으로 교란된 출력이 빨리 설정치로 회복되도록 조절하게 된다. 여기서는 주기관 부하 변화가 외란이다. 설정치와 자켓 냉각수 출구 온도의 오차를 최소화시키고 되도록이면 빠른 시간에 설정치를 추종하여 안정화될 수 있도록 제어기 파라미터들을 동조한다. 이때, 강인한 최적화기법으로 많이 사용하는 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded Genetic Algorithms)[4]을 이용하여 제곱오차적분(ISE) 성능지수를 최소화시키는 방향으로 탐색하고자 한다.

설계된 이중 루프 캐스케이드 제어 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 단일 루프 제어 시스템과 비교하여 성능을 평가하고자 한다.

2. 주기관 자켓 냉각수 시스템

Figure 1, Figure 2와 같은 주기관 자켓 냉각수 시스템은 해상에서 선박용 엔진의 냉각을 위해 증발식 조수기에 의해 만들어진 증류수를 냉각수로 사용하고 냉각수는 해수에 의해 냉각되는 중앙 냉각 시스템을 채택하고 있다. 자켓 냉각수 펌프에 의해 냉각수는 주기관의 실린더 라이너, 실린더 헤드, 배기 가스 밸브 및 과급기의 열을 제거하면서 통과하고 냉각기에서 냉각된 후 주기관으로 돌아온다. 이때, 냉각수의 온도는 3-Way 제어 밸브에 의해 정밀하게 제어된다. 냉각은 전용 냉각기를 사용하거나 저온 냉각 파이프 라인의 일부 물을 혼합하여 이루어진다. 냉각수 시스템의 누수를 즉시 발견하고 공기 배출 및 냉각수의 보충을 위한 팽창 탱크가 기관실의 높은 곳에 설치된다. 냉각수 중에 용존하는 기체는 탈기(deaeration)장치를 통해 제거된다. 그리고 주기관이 정지될 때 냉각수를 뜨겁게 유지시키거나 시동 전에 적절한 온도로 상승시키는 히터를 포함하고 있다[1].

2.1 일반적인 냉각수 온도 제어 시스템

Figure 1은 주기관의 자켓 냉각수 출구 온도만을 고려한 단일 루프 제어 시스템이다.

Figure 2는 주기관의 자켓 냉각수 입, 출구 온도를 모두 고려한 이중 루프 제어 시스템이다. 이는 제어기에서 생성된 제어 신호가 제어 밸브에 전달되어 좀 더 향상된 제어 성능을 보여줄 수 있다. 이를 위해서는 주기관의 입, 출구 냉각수 온도를 측정하기 위한 센서를 부착하고, 제어 밸브에서 주기관까지 냉각수 양을 가능한 최소화해야 한다.

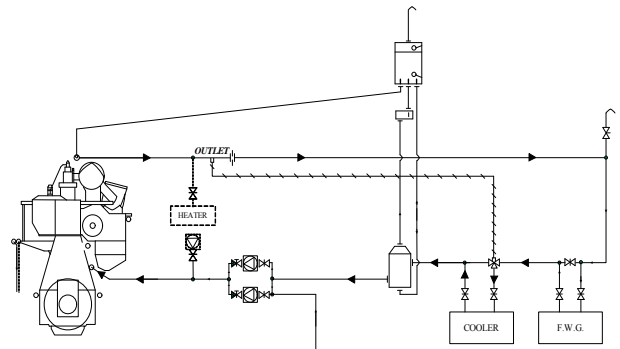


Figure 1: Jacket cooling water system with one loop control as a simple circulation system

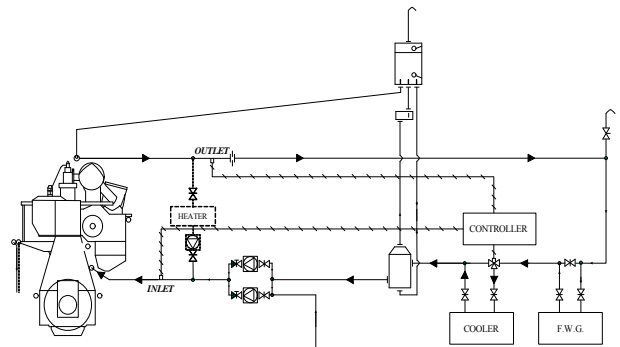


Figure 2: Jacket cooling water system with two loops cascade control as a simple circulation system

2.2 주기관과 열교환기의 모델링

셀-튜브 열교환기의 경우 3-Way 밸브로 유량을 조절하여 셀측 출구 온도를 조절할 때 이 밸브의 동작은 물리적으로 한계가 있을 수밖에 없으므로 제어기와 I/P 변환기 사이에는 가상의 포화기가 존재하는 것으로 간주되며, 이는 식 (1)의 비선형식으로 표시된다.

$$u_{sat} = \begin{cases} u_{min}, & u < u_{min} \\ u, & u_{min} \leq u \leq u_{max} \\ u_{max}, & u > u_{max} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, u 는 제어기의 출력이고, u_{min} 와 u_{max} 는 각각 u 가 포화기의 한계치를 벗어날 때 제한되는 최소값과 최대값을 의미한다.

제어기로부터 전기 신호를 받아 공기압으로 변환해주는 I/P 변환기와 이 공기압을 받아 셀측 유량을 조절해주는 3-Way 밸브는 식 (2)와 같이 근사 1차 시스템으로 쓸 수 있다.

$$U_a(s) = \frac{K_a}{1 + T_a s} U_{sat}(s) \quad (2)$$

여기서, $U_{sat}(s)$ 와 $U_a(s)$ 는 각각 포화기와 3-Way 밸브의 출력이며, K_a 와 T_a 는 각각 I/P 변환기가 결합된 3-Way 밸브의 이득과 시정수를 의미한다.

문제를 단순화하기 위해 열교환기 내의 유체 온도는 공

간적으로 균일하며, 입출력 유량은 같고, 열교환기 파라미터들은 일정하고 또 온도와는 무관하며, 단열이 잘 되어 있다는 가정 하에 물질과 에너지 보존법칙을 적용하여 집중정수계로 모델링하면 식 (3)과 같이 열교환기의 근사 방정식을 얻을 수 있다[5].

$$Y_c(s) = \frac{1}{1 + T_x s} [-K_x e^{-L_x s} U_a(s) + K_t T_{sin}(s)] \quad (3)$$

여기서, $T_{sin}(s)$ 는 각각 셀측 유체의 입구 온도이며, K_x , T_x 와 L_x 는 각각 열교환기의 이득, 시정수, 시간 지연이고, K_t 는 외란 모델의 이득이다. $Y_c(s)$ 는 엔진 냉각수가 통과하는 열교환기의 출구 온도이다. 특히 괄호 안 첫 번째 항의 음의 부호는 3-Way 밸브가 Air-to-Close(normal open)형이기 때문이고, 이로 인해 제어기의 출력이 커지면 반대로 온도가 내려가게 된다.

엔진의 경우에는 냉각수에 의한 냉각 과정 및 부하에 따른 가열 과정을 구분하여 처리하는 대신 L_e 과 K_e , T_e 에 의해 식 (4)와 같이 시간 지연이 있는 1차 지연 시스템으로 표현한다[6]. $Y_e(s)$ 는 자켓 냉각수의 엔진 출구측 온도이며, 외란은 적용되지 않은 상태이다.

$$Y_e(s) = \frac{K_e e^{-L_e s}}{1 + T_e s} Y_{ei}(s) \quad (4)$$

여기서, $Y_{ei}(s)$ 는 식 (5)와 같이 엔진 입구측 냉각수 온도이다. 조작 밸브에 주어진 조작 신호에 의해 변경되는 냉각수 량이 엔진에 영향을 미치기까지는 조작 밸브와 엔진 간의 배관 길이에 의한 시간 지연이 발생하며 L_p [sec]는 이를 나타낸다. 배관 길이가 D [m], 단면적이 A [m²], 통과 유량이 q_w [m³/h]이다[6].

$$Y_{ei}(s) = e^{-L_p s} Y_{c(s)}, \quad L_p = 0.36DA/q_w \quad (5)$$

3. 이중 루프 캐스케이드 PID 제어기

3.1 PID 제어기

PID 제어기는 구조가 간단하면서도 안정성이 높고 또 안티와인드업, 수동/자동 무충돌 전환 등의 부가 기능과의 결합이 용이하기 때문에 아직도 생산 현장에는 PID 제어기가 폭넓게 이용되고 있으므로 본 논문에서도 이를 이용한다[7].

본 논문에서 다루는 열교환기와 같이 음의 이득을 가질 경우에는 순동작의 제어기가 요구된다. 순동작 PID 제어기를 구현하는 방법으로는 오차 계산 시 설정치와 출력의 부호를 반대로 사용하는 방법을 채용한다.

열교환기의 셀측 출구 온도를 조절하기 위한 내부 루프와 주기관의 자켓 냉각수 출구 온도를 조절하기 위한 외부 루프를 위한 제어기는 현장에서 주로 채용하는 식 (6)과 같이 표현된 PID 제어 방법을 사용한다.

$$\frac{U_{PID}(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6)$$

여기서, K_p , K_i , K_d 는 각각 비례이득, 적분이득, 미분이득을 의미한다. $E(s)$ 는, 단일 루프 PID 제어 시스템에서는 엔진 냉각수 설정치와 출구측 온도차 $E_{1loop}(s)$ 를 나타내고, 이중 루프 캐스케이드 제어에서는 내부 제어 시스템의 설정치와 엔진 입구측 냉각수의 온도차 $E_{2loop}(s)$ 이다. $U_{PID}(s)$ 는 PID 제어기의 출력이다. Figure 3은 제어대상에 단일 루프 PID 제어 시스템이 결합된 블록선도이다.

3.2 이중 루프 캐스케이드 제어를 위한 주기관 부하의 피드포워드

주기관 자켓 냉각수 온도는 이중 루프 제어에 의해 조절될 수 있다. 이중 루프 제어의 내부 제어 시스템은 외부 제어 시스템에서 생성된 설정치에 따라 주기관으로 들어가는 자켓 냉각수의 입구온도를 3-way 밸브를 통해 조절하고 안정화시킨다. 외부 제어 시스템은 주기관으로부터 나오는 냉각수 온도를 조절하기 위해 약 85[°C] 설정치에 의해 출구 온도를 조절한다.

내부 제어 시스템의 설정치는 외부 제어 시스템에 의해 설정되는 출구 온도 설정치와 엔진 부하에 의해 변화되는 온도를 식 (7)과 조합하여 조절할 수 있다. 엔진 부하에 의한 온도 변화는 경험적으로 구한 것으로 약 5~15[°C]의 변화폭을 가지고 있다[8].

$$T_{is} = T_{os} - \Delta T_{ld} + \Delta T_{ml} \quad (7)$$

$$\Delta T_{ld} = \alpha + \beta \times \frac{E_{ld}}{100}$$

여기서, T_{is} 는 내부 제어 시스템의 설정치, T_{os} 는 외부 제어 시스템의 설정치(Y_{set}), ΔT_{ld} 는 주기관 부하 변화에 상응하는 온도로서 α 와 β 는 조절될 수 있는 파라미터이지만 각각 5와 10으로 선정할 수 있고 각 엔진에 대해서 개별적으로 선정하지 않아도 된다. 이는 경험에 의해서 구해졌다.[8] ΔT_{ml} 은 주기관의 자켓 냉각수 출구측 설정치(Y_{set})와 현재 주기관의 출구측 온도(Y)의 편차로서 외부 제어 시스템에 의해 수정 생성된 것이다. 그리고 E_{ld} 는 주기관의 부하를 나타낸다. Figure 4는 주기관 자켓 냉각수 온도 제어를 위해 제어대상에 이중 루프 캐스케이드 PID 제어 시스템이 결합된 전체 블록선도이다.

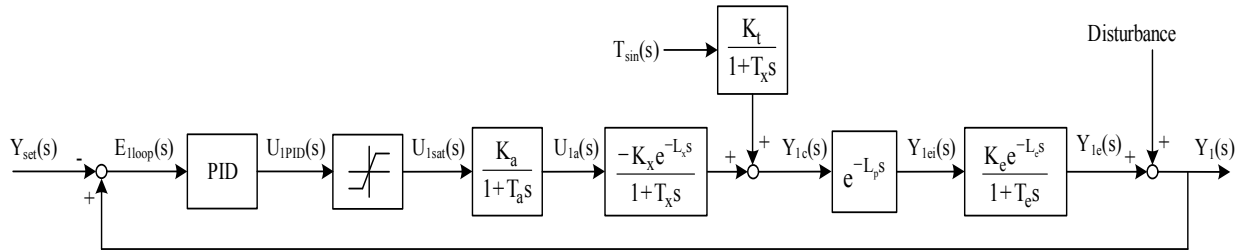


Figure 3: Overall PID control system for standard one loop control as a simple circulation system

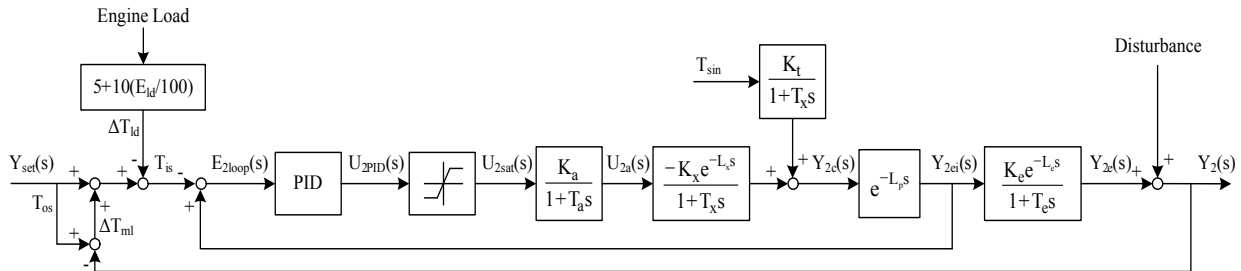


Figure 4: Overall cascade PID control system with two loops as a load feedforward

4. PID 제어기의 동조

제어기 동조는 전체 제어 시스템이 원하는 성능을 갖도록 적절한 방법으로 파라미터를 조정하는 것을 말하며, 식 (6)과 같은 1자유도 PID 제어기는 제어 환경에 따라 설정치 추종 성능 또는 외란 억제 성능이 최적화되도록 동조된다. 본 논문에서는 선박이 대양에서 항해하는 운전 특성을 고려하여 외란 억제 성능이 개선되도록 PID 제어기의 파라미터인 $\{K_p, K_i, K_d\}$ 을 최적화하는 문제를 다룬다.

외란으로 부하가 계단상으로 변경되는 동안 외란 억제 성능을 개선하기 위해 최적화 알고리즘인 RCGA에 의해 PID 제어기의 파라미터들은 동조된다. 비선형 다변수 최적화 문제를 풀기 위해 성능의 좋고 나쁨을 계량할 수 있는 평가 함수로 식 (8)의 제곱오차적분(ISE)을 사용하고 성능 지수가 최소가 되도록 구해진다.

$$J_{ISE}(\phi) = \int_0^{t_f} \sqrt{e^2(t)} dt \tag{8}$$

여기서, ϕ 는 $[K_p, K_i, K_d]^T \in \mathbf{R}^3$ 이고, $e(t)$ 는 외부 루프 제어 시스템의 온도 설정치와 주기관 냉각수 출구 온도 간의 오차이며, 적분시간 t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 값이다. 이때 RCGA의 연산자로서 집단의 크기는 20, 재생산계수는 1.8, 교배확률은 95%, 동적 돌연변이 확률은 20%가 사용되었다.

5. 모의실험 및 검토

앞서 제안한 표준형 PID 제어기 기반의 주기관 냉각수 온도 제어 시스템들의 유효성을 검증하기 위하여 모의실험을 실시하였다. 외란 제거 성능이 개선될 수 있도록 RCGA

에 의해 PID 파라미터들을 탐색하기 위한 모의실험은 동작점이 85[°C]인 것으로 간주해 이 부근에서 주기관의 부하를 30[%]에서 60[%]로 변경하면서 수행되었다. 이렇게 탐색된 파라미터들의 성능은 단일 루프 제어 시스템과 이중 루프 제어 시스템을 비교하여 검증한다. 그리고 동일한 제어기 파라미터들을 사용하여 외부 제어 시스템의 출구측 설정치 온도 변경에 대한 성능도 살펴본다.

5.1 모의 실험용 데이터와 제어기 파라미터

모의 실험에 사용된 열교환기[4]와 주기관[5]의 데이터는 Table 1과 같고, 샘플링 시간 h 는 0.01[sec], 포화기의 최소값 u_{min} 은 -100과 최대값 u_{max} 는 0으로 하였다.

PID 제어기의 파라미터들은 구간 $0 < [K_p, K_i] \leq 10, 0 \leq [K_d] \leq 100$ 에서 RCGA에 의해 탐색되었고, 얻어지는 파라미터들의 정밀도는 초기집단의 선택에 따라 달라질 수 있어 독립된 씨드(seed)로 생성된 초기집단으로 5회 모의실험을 실시하고 그 결과를 평균하였다. 각 제어 시스템들의 동조 결과는 Table 2에 나타내었다.

5.2 성능 비교

현장의 열교환기 시스템은 대부분 두 가지 모드, 즉 수동 모드와 자동 모드로 운전된다. 시스템의 기동, 정지, 비상 또는 필요시에는 수동 모드로 운전되고 나머지 대부분의 시간동안에는 자동 모드로 운전된다.

주기관 자켓 냉각수 온도의 경우, 주기관의 정상적인 운전동안 대부분 자동 모드로 설정치를 유지하면서 주기관 부하 변화에 따른 연소실의 온도 변화가 외란으로 작용하게 된다. 본 논문에는 외란의 변화에 따른 단일 루프 제어 시스템과 이중 루프 제어 시스템의 추정된 제어기 파라미터들을 이용하여 다음과 같이 모의 실험을 진행하고 서로를 정량적으로 비교하고자 한다.

Table 1: Heat Exchanger (HE) data for simulation.

descriptions	parameters	values
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 [sec]	L_x	1
HE disturbance gain	K_t	0.286
pipe time delay [sec]	L_p	4
engine gain	K_e	1
engine time constant	T_e	8
engine time delay [sec]	L_e	2

Table 2: Tuned parameters of the PID controllers for disturbance rejection

control system	PID controller		
	K_p	K_i	K_d
one loop	2.6940	0.0440	32.7480
two loops	4.9665	0.0400	40.9935

5.2.1 주기관의 부하 변화에 따른 외란 제거 성능

주기관의 전체 부하 영역에 걸쳐 자켓 냉각수 출구 온도 설정치가 85[°C]로 고정되는 시스템에서 주기관이 30% 부하로 유지되는 동안 부하를 60%로 증가시켜 연소실의 온도가 증가하게 되면 증가된 온도는 자켓 냉각수 온도에 영향을 미치게 된다. 이를 계단상으로 변경되는 외란으로 간주하였다.

Figure 5는 주기관 자켓 냉각수 출구 온도만을 고려한 단일 루프 제어 시스템과 주기관의 출구뿐만 아니라 자켓 냉각수 입구 온도를 함께 고려한 이중 루프 제어 시스템을 동일한 조건에서 외란 제거 성능을 비교 확인하는 응답을 구해 그린 것이다. Table 3은 이들을 정량화 시킨 것이다.

자동 모드 운전 시 설정치 $Y_{set}(s)$ 는 85[°C]에 고정되는 것으로 간주되며, 이때 제어기는 주기관 부하 변동으로 교란된 출구 온도가 빨리 설정치로 회복되도록 조절하게 된다. 각 방법의 외란 억제 성능을 정량적으로 계량하기 위하여 외란의 영향이 소멸되는데 걸리는 회복시간 t_{rcy} 와 IAE를 구한 것이 Table 3이다. 이때 t_{rcy} 는 $Y(s)$ 가 $Y_{set}(s)$ 의 2% 이내로 회복되는데 걸리는 시간을 의미한다. Table 3에서 보면 이중 루프 제어 시스템의 t_{rcy} 와 IAE가 단일 루프 제어 시스템보다 작아 전반적으로 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 이중 루프 제어 시스템의 경우 주기관 자켓 냉각수 입구 온도가 내부 루프에 의해 피드백 되면서 제어 밸브의 동작에 영향을 미치므로 단일 루프 제어 시스템보다 외란에 빠른 대응 속도를 보이고 있다.

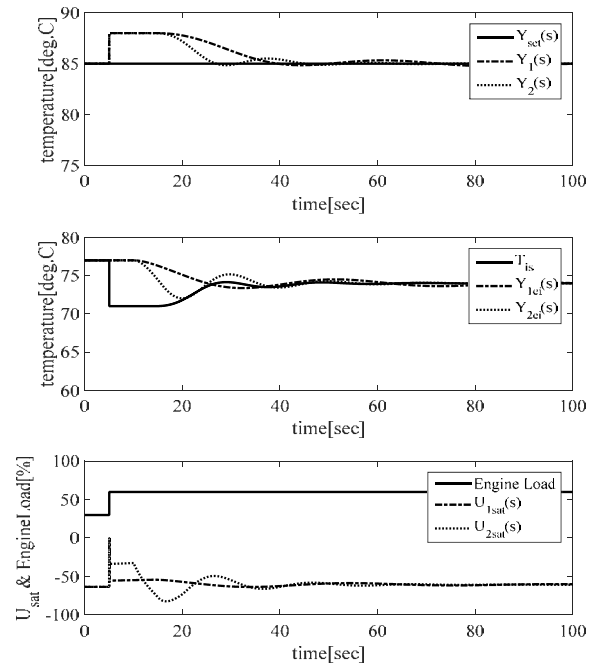


Figure 5: Disturbance rejection responses for cascade PID controller with two loop

Table 3: Performance of disturbance rejection depending on load change of main engine

control system	t_{rcy} [sec]	IAE
one loop	96.2064	80.4817
two loops	61.3358	56.6549

5.2.2 자켓 냉각수 출구 온도 설정치 변화에 대한 추종 성능

주기관의 전체 부하 영역에 걸쳐 자켓 냉각수 출구 온도 설정치가 85[°C]로 고정되는 시스템에서 주기관이 60% 부하로 유지되는 동안 자켓 냉각수 온도 설정치를 80[°C]로 감소시켜 설정치 추종 성능을 확인한다.

Figure 6은 주기관의 출구측 자켓 냉각수 온도 설정치 변경에 대한 단일 루프 제어 시스템과 이중 루프 제어 시스템이 변경된 기준 설정치를 추종해가는 것을 비교하기 위한 응답을 그린 것이다. 사용된 제어기 파라미터들은 외란 제거를 주목적으로 동조된 Table 2와 동일하다.

Figure 6에서 볼 수 있듯이 주기관이 60% 부하로 운전되는 동안 자켓 냉각수 출구 온도 설정치는 85[°C]에 고정되었고, 모의실험 시작 5[sec]에서 주기관 자켓 냉각수 출구 온도 설정치를 80[°C]로 감소시켰다. 두 시스템이 동일한 오버슈트와 함께 안정된 추종 성능을 보이고 있으나, 상승 시간과 정착 시간에서는 이중 루프 제어 시스템이 보다 빠른 응답 특성을 보이고 있다. 결과적으로, 변경된 설정치와 이를 추종하는 시스템의 응답이 보여주는 오차에서도 이중 루프 시스템이 보다 작은 누적 오차를 보이고 있다.

모의실험의 결과를 정량화 시킨 것이 Table 4이다.

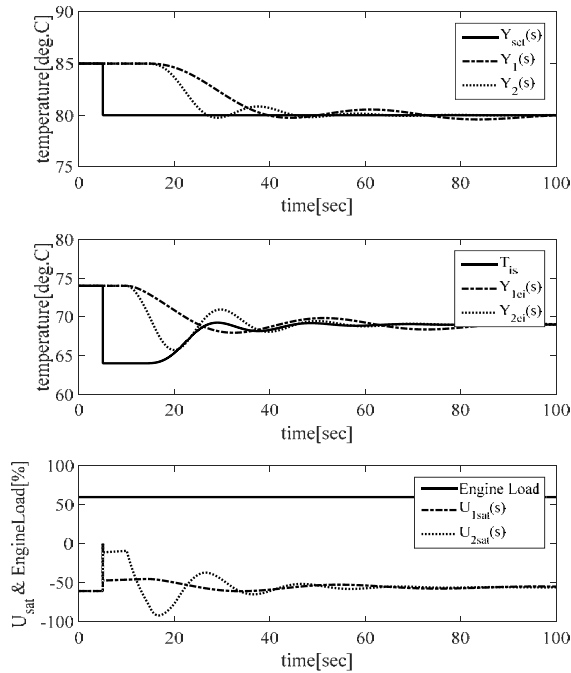


Figure 6: Set-point tracking responses when Y_{set} is step-wisely decreased from 85[°C] to 80[°C]

Table 4: Performance of set-point tracking response

control system	tracking performance			
	M_p	t_r	t_s	IAE
one loop	6.2500	15.5539	96.2635	134.2497
two loops	6.2500	7.4543	61.3319	94.5193

6. 결 론

본 논문에서는 외란으로 작용하는 주기관의 부하 변동에도 만족할만한 외란 제거 성능을 갖는 이중 루프 캐스케이드 PID 제어 시스템을 설계하였다. 이때, 내부 제어 시스템의 설정치는 외부 제어 시스템의 기준 설정치와 주기관의 부하 변동을 조합하여 생성되었다.

제안된 시스템의 제어기 파라미터들은 RCGA에 의해 목적함수 ISE를 최소화 시켜 외란 제거 성능이 좋도록 동조되었다. 제안된 이중 루프 제어 시스템은 단일 루프 제어 시스템과 정량적 비교를 통해 외란 제거 및 설정치 추종 성능이 보다 우수함을 알 수 있었다.

이후에는 제어 밸브의 포화를 고려하여 안티와인드업 기법이 추가되고 잡음에 의한 미분폭주 현상을 완화시킬 수 있는 제어 시스템을 연구하고자 한다.

References

- [1] 14_BPWaterCoolingsystem, http://www.marinediesels.info/Basics/cooling_the_engine.html, Accessed April 3, 2017.
- [2] MAN Diesel & Turbo, 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, 2012.
- [3] D. K. Kim, J. H. Lee, and K. H. Cho, "A study on performance comparison of jacket cooling fresh water system for marine diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 41, no. 1 pp. 8-14, 2017 (in Korean).
- [4] G. G. Jin and J. S. Ha "Genetic algorithms as optimisation tools and their applications," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 21, no. 2, pp. 108-116, 1997 (in Korean).
- [5] J. K. Ahn, G. B. So, J. Y. Lee, Y. H. Lee, M. O. So, and G. G. Jin, "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, vol. 20, no. 5, 2014 (in Korean).
- [6] S. M. Choi, "Configuration and analysis of a feed-forward control system for jacket cooling water temperature of marine prime diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 8, pp. 1303-1308, 2008 (in Korean).
- [7] K. J. Åström and T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning, NC, USA: ISA Press, 1995.
- [8] MAN Diesel & Turbo, Jacket Cooling Water Temperature Control, Copenhagen, Denmark: MAN, 05 October, 2012.