

## 주기관 자켓냉각수 온도를 위한 피드포워드 제어시스템의 구성과 분석

최 순 만†

(원고접수일 : 2008년 8월 25일, 원고수정일 : 2008년 10월 20일, 심사완료일 : 2008년 11월 14일)

### Configuration and Analysis of a Feed-forward Control System for Jacket Cooling Water Temperature of Marine Prime Diesel Engine

Soon-Man Choi†

**Abstract :** Keeping cooling water temperature higher within the allowable range helps marine engines to run in more efficient condition especially when the engine load is low. Temperature control of jacket cooling water in outlet side of main engine has been more widely adopted to ships these days for the purpose to reduce fuel consumption rate. But If the temperature sensor for the control loop is placed at the outlet of engine, it brings more difficulties in attaining stable and desirable properties due to dead times included in pipe length and engine itself comparing to the case where the measuring point is at the inlet side of main engine. In relation with this problem, Feed-forward control could be one of realistic solutions as it reveals good properties and requires less cost for system configuration. This study suggests a forward control system which leads to improved temperature control performances to disturbance signals which could arise from variation of engine load or weather condition. Two dead times in the modelling were described, considering pipe length between the actuator and the engine as well as the thermal process inside the engine. The results of analysis were shown by simulations to confirm responses under different conditions.

**Key words :** Feed-forward control(피드포워드제어), Jacket cooling(자켓냉각), Dead time(시간지연)

#### 1. 서 론

연료 절감을 위해 기관의 냉각손실을 줄이려 한다면 우선 냉각수 온도를 허용 범위 내에서 가능한 높게 유지하는 방법이 검토되어야 하나 자켓냉각수 온도를 기관의 입구측에서 일정히 유지하는 방

식은 저부하 시에 냉각수 온도를 필요 이상으로 낮추므로 냉각손실이 커지게 된다. 이에 대해 출구온도 일정방식은 저부하 운전특성이 좋아지고 엔진효율이 높아지는 장점이 있는 반면 온도의 제어특성은 입구온도 일정방식에 비해 상대적으로 나빠진다. 제어특성이 불량해지는 주된 이유는 조작기와

† 교신저자(한국해양수산연수원, E-mail:mindmind@chol.com, Tel: 051)620-5850)

센서의 사이에 엔진이 위치하여 이들 간의 거리가 멀어지는 한편 제어루프 내에 배관 길이에 따른 시간지연과 엔진 내부에서의 시간지연이 제어루프에 내포되기 때문인데 이로 인해 부하 변화 등과 같은 외란이 크게 작용할 경우 제어량인 출구온도가 과도한 오버슈트를 일으킬 위험이 있다. 이같이 시간지연을 포함하는 계에 대한 대응으로는 스미드 방식을 비롯한 여러 형태의 제어방법이 적용될 수 있겠으나<sup>[1]-[6]</sup> 제어장치가 복잡해져서 실용적이지 못하다. 대안의 하나로서는 현재 실 선박에서 통용되고 있는 기존의 PID 피드백 제어계에 외란 신호에 의한 피드포워드 제어를 추가시키는 방법을 생각할 수 있으며 이 경우에는 제어장치가 간단하면서도 외란의 영향을 효과적으로 억제할 수 있다는 점에서 좋은 결과가 기대될 수 있다.

피드포워드제어의 구성은 비교적 간단하여 제어기 설계에 대한 어려움은 적은 반면 제어대상과 외란에 대한 특성해석이 더 중요시된다. 이에 따라 산업계 각 부문에서 시간지연으로 제어가 쉽지 않은 플랜트들의 경우 개별 특성의 분석을 통해 피드포워드제어가 다양한 형태로 적용되어 왔다. 한편, 선박의 차के트 냉각수 계통 역시 온도제어의 어려움이 큰 곳이어서 현장의 해기사들이 곤란을 겪고 있으며 특히 출항시 엔진을 항해속력으로 증속하는 과정에서 고온 경보의 발생빈도가 높다. 그 주된 원인은 유탄유온도제어 등의 경우와 달리 배관 등에서의 시간지연이 제어루프 내에 큰 값으로 포함되어

계통의 제어 안정성을 해치기 때문이어서 피드포워드제어의 적용 필요성이 매우 큼에도 지금까지 이를 위한 직접적인 연구사례는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 차के트 냉각수 온도 제어의 현실적 문제 개선과 관련하여 이 계통의 기초적인 특성해석에 초점을 두었으며 이를 위해 시간지연 특성을 주기관 냉각수 입구배관에서의 시간지연과 기관내부에서의 시간지연 두 가지로 구분하여 피드포워드 제어계의 구성을 모델링 한 후 적절한 응답이 얻어지기 위한 피드포워드 제어의 출력신호가 어떠한 형태가 되어야 하는지를 해석하고 그 결과를 시뮬레이션으로 확인하기로 한다.

### 2. 제어계의 구성

Fig.1은 PID제어에 의한 차के트냉각수 온도제어계에 전달함수  $G_f$ 인 피드포워드제어기가 추가된 경우의 블록선도를 나타낸다.  $K_p, T_i, T_d$ 는 PID제어 계수이고  $K_a, T_a$  및  $T_s$ 는 조작밸브와 온도검출기에서의 정상이득과 시정수이다. 엔진의 경우에는 냉각수에 의한 냉각과정 및 부하에 따른 가열과정을 구분하여 처리하는 대신  $L_c$ 과  $K_c, T_c$ 에 의해 시간지연이 있는 1차지연 계통으로 표현한 후 이것에 부하와 냉각수 인입 유량의 차이가 입력신호로 작용하는 형태로 모델링하였다. 한편, 작동방향을 고려할 때 계수들의 부호는  $K_p < 0$ ,

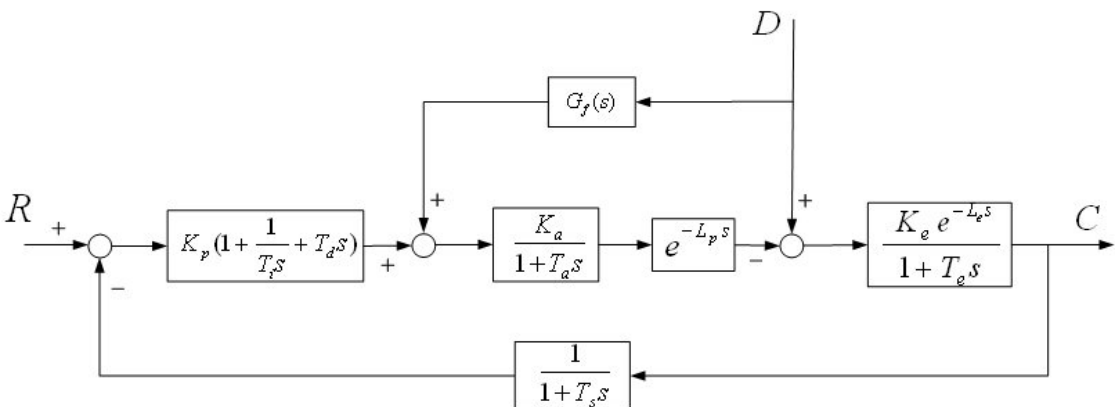


Fig. 1 Block diagram of the proposed control system

$K_a, K_f, K_e, K_s > 0$ 의 관계가 필요하다. 또한 조작밸브에 주어진 조작신호가 엔진에 영향을 미치기까지는 조작밸브와 엔진 간의 배관길이에 의한 시간지연이 발생하며  $L_p$ 는 이를 나타낸다. 배관길이가  $D[m]$ , 단면적이  $A[cm^2]$ , 통과유량이  $q_w[m^3/h]$ 이면  $L_p[s]$ 는 (1)과 같다.

$$L_p = 0.36DA/q_w \quad [s] \quad (1)$$

### 3. 피드포워드 제어기 $G_f$ 의 구성

Fig. 1로부터 외란이 없는 상태에서 입력  $R$ 에 크기  $r$ 의 계단신호가 인가될 때  $C$ 에서의 출력 정상치는 (2)에 의해 편차가 없이 입력 크기에 수렴함을 알 수 있다. 단,  $F_{RC}$ 는 피드포워드제어가 부가되지 않을 때의  $R$ 과  $C$  간 전달함수이다.

$$c(\infty) |_{d=0} = \lim_{s \rightarrow 0} r F_{RC}(s) = r \quad (2)$$

여기에서  $F_{RC}(s)$ 와 입출력 간의 개루프전달함수  $F_L(s)$ 는 다음을 나타낸다.

$$F_{RC}(s) = \frac{(1 + T_s s) F_L(s)}{1 + F_L(s)} \quad (3)$$

$$F_L(s) = \frac{K_p K_a K_e (1 + T_i s + T_i T_d s^2) e^{-(L_p + L_c)s}}{T_i s (1 + T_a s) (1 + T_e s) (1 + T_s s)} \quad (4)$$

또한  $D$ 와  $C$  간의 전달함수  $F_{DC}(s)$ 는 외란이  $G_f$ 를 거치는 신호부분과 이를 경유하지 않는 부분의 합으로 나타낼 수 있으며 (5)와 같다.

$$F_{DC}(s) = \frac{K_e (1 + T_a s) e^{-L_c s} + G_f(s) K_a K_e e^{-(L_p + L_c)s}}{(1 + T_a s) (1 + T_e s) (1 + F_L(s))} \quad (5)$$

$R$ 의 신호가 없는 조건에서 외란  $D$ 에만 크기  $d$ 의 계단신호가 인가되는 경우 나타나는 출력 정상치는 (6)에 의해 두 개의 성분 중  $G_f$ 를 거치는 부

분만 남는다.

$$c(\infty) |_{r=0} = \lim_{s \rightarrow 0} d F_{DC}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} d \frac{T_i}{K_p} s G_f(s) \quad (6)$$

출력이 입력  $R$ 에만 수렴하고 외란에 의한 출력 성분이 소멸되려면 (6)으로부터  $G_f$ 가 1차 이상의 적분항을 갖지 않아야 한다는 것을 알 수 있으며 따라서  $G_f$ 는 비례 및 미분항으로만 구성될 필요가 있다.

한편, 피드포워드제어를 위한  $G_f$ 가 작동하지 않은 상태에서 외란  $D$ 가 엔진에 인가될 때  $C$ 에 나타나는 출력 성분을  $C_{D1}$ 이라 하고 또한 이를 보상하는  $G_f$ 에 의한 피드포워드 신호가 조작기에 인가된 후  $C$ 에 나타나는 출력 성분을  $C_{D2}$ 라 하는 경우 피드포워드제어를 위해서는 양자가 서로 상쇄되어야 하므로 그 조건은  $C_{D1} = C_{D2}$ 이다. 따라서 Fig. 1로부터 주어진 조건을 관계식으로 나타내면 (7)을 얻는다.

$$\left[ \frac{K_e e^{-L_c s}}{1 + T_e s} - G_f(s) \frac{K_a K_e e^{-(L_p + L_c)s}}{(1 + T_a s)(1 + T_e s)} \right] D = 0 \quad (7)$$

(7)로부터  $G_f$ 를 구하면 (8)과 같으며 계인과 미분 및 시간지연 함수로 나타낸다.

$$G_f(s) = \left( \frac{1}{K_a} + \frac{T_a}{K_a} s \right) e^{L_p s} \quad (8)$$

이 결과는 (6)에서 설명하고 있는 외란의 영향이 소멸되기 위해 제시되는 조건 즉, 1차 이상의 적분항이 없어야 함을 충족시킨다. 그러나 (8)의 식에서 나타내는 지수표현은 음의 시간지연이므로 미래의 외란에 미리 대응해야 함을 의미하므로 실현 불가능하고 따라서  $G_f$ 는 (9)에 의한 비례 및 미분항에 의한 PD제어기로 구성하거나 혹은 (10)의 비례항에 의한 P제어만으로 구성하는 경우가 가능하다.

$$G_f(s) = K_f + K_d s = \frac{1}{K_a} + \frac{T_a}{K_a} s \quad (9)$$

$$G_f(s) = K_f = \frac{1}{K_a} \tag{10}$$

여기서  $K_f$ ,  $K_a$ 은 비례, 미분항의 계수이다. (9),(10)에서의 비례항  $K_f$  값은 조작기 계인의 역수이므로 조작기의 스펠조정의 의해 그 감도가 작아진 경우라면 피드포워드제어기의  $K_f$ 는 그 만큼 더 크게 조정하여  $K_f K_a = 1$ 의 관계를 유지할 필요가 있음을 나타낸다.  $L_p$  만큼의 역 시간지연은 실현할 수 없음에 따라 만일 외란이 정상상태에서  $\Delta D$ 의 크기로 정상상태에서 변한다면 피드포워드 제어기는 이 만큼의 시간동안 엔진에 미리 신호를 인가하지 못하게 된다. 이로 인한 편차발생 크기  $E_p$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_p = (1 - e^{-\frac{L_p}{T_c}}) \Delta D \cdot K_e \tag{11}$$

외란변화 후의 시간진행을  $t_d$ 라 할 때 외란발생 직후  $0 < t_d \leq L_e$  구간은 Fig. 1의 관계로부터 냉각수 출구 온도에는 변화가 나타나지 않는 무응답 구간이 된다.  $L_e < t_d \leq L_e + L_p$ 의 시간구간에서 외란에 의한 편차가 발생하고 그 크기는 (11)과 같다. 조작기에 가해진  $G_f$ 의 신호는 양 시간지연이 모두 지나야 엔진에 작용하게 되고 따라서  $t_p > L_e + L_p$ 의 시점부터 편차가 개선될 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 분석

$G_f$  제어기는 (10)의 비례동작으로 구성하고 엔진 입구측 배관은 작은 길이에서도 그 효과를 확인하기 위해 시간 지연  $L_p$ 가 2초 및 4초인 두 경우에서의 결과를 서로 비교해 본다. 배관 내경이 200mm 이고 펌프 토출량이  $60m^3/h$ 인 선박이라면 식(1)에서  $A = 314cm^2$ 이므로 이들 시간지연 크기는 각각

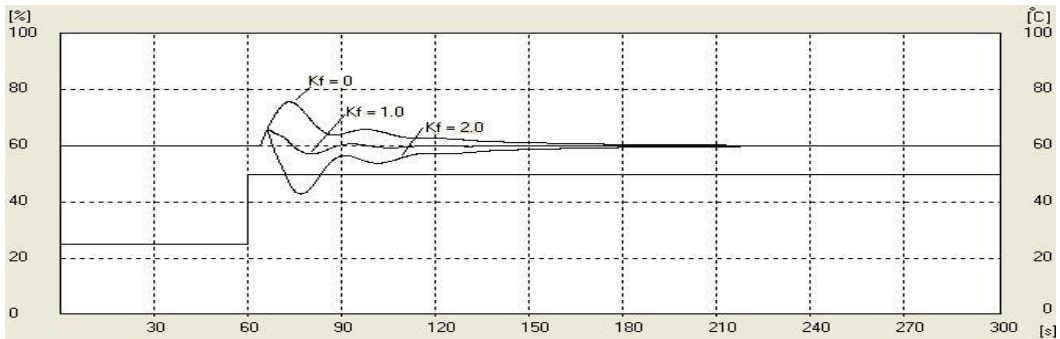


Fig. 2 Response to load variation (25%→50%) ( $L_p=2.0s$ ,  $L_e=4.0s$ ,  $T_c=8.0s$ )

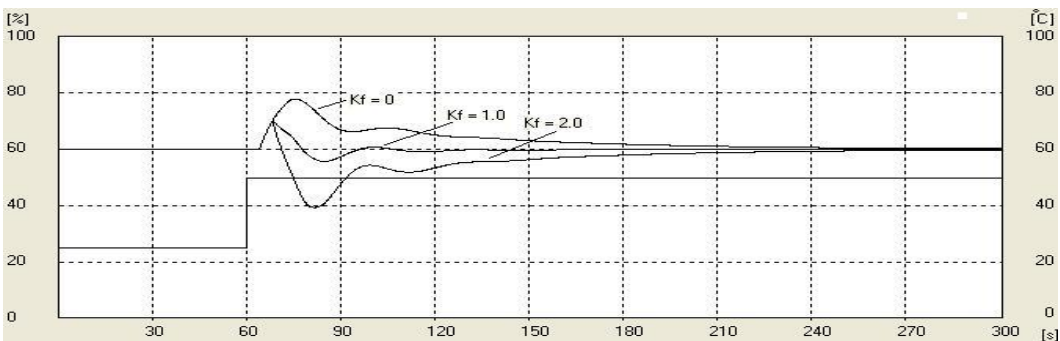


Fig. 3 Response to load variation (25%→50%) ( $L_p=4.0s$ ,  $L_e=4.0s$ ,  $T_c=8.0s$ )

배관길이 1m와 2m인 때에 해당한다.

Fig.2과 Fig. 3에서 계수는  $K_a=K_c=1$ ,  $T_a=T_s=0$ ,  $L_e=4.0s$ ,  $T_c=8.0s$  로 동일하게 주어졌으며 배관에 의한 시간지연만 차이가 있다. Fig. 2는  $L_p=2.0s$ , Fig. 3은  $L_p=4.0s$ 으로 주어진 조건이다. Fig. 2와 Fig. 3의 곡선은 모두 위와 아래의 두 부분으로 구분되어 있는데 위의 곡선은 냉각수온도의 제어량 변화를 시간에 따라 나타낸 것이며 설정온도 60도에서 편차가 없는 정상상태에서 출발하고 있다. 아래 곡선은 엔진부하의 크기를 [%] 단위로 나타낸 것으로 1/4부하 상태에서 시작된다. 이후 60초의 시점에서 부하가 정격의 1/4로부터 1/2로 계단상의 변화가 주어질 때 이에 대한 냉각수 온도의 응답 상태가 3 경우에 대해 동시에 비교되고 있는데 각각 피드포워드 게인  $K_f$ 를 0,1,2로 구분하였을 때의 온도 응답이다. PID 제어기에서의 조정 파라미터는 지글러-니콜스의 제 1법칙을 적용하여 각 경우 모두  $K_p = 1.2 T_c / (L_p + L_e)$ ,  $T_i = 2(L_p + L_e)$ ,  $T_d = 0.5(L_p + L_e)$ 의 관계가 되도록 설정하였으며 P동작은 음의 부호로 작용한다.

Fig. 2와 3 모두 부하가 증가하였음에도 60초와 64초 사이에서 온도 변화가 나타나지 않고 있는 것은 엔진 내부의 자체 시간지연이 4초이기 때문이다. Fig. 2의 경우 64초에서 66초 사이에 부하증가로 인해 냉각수 온도가 상승되고 있다. 66초 시점부터 피드포워드제어 신호가 작용하여 온도보상이 시작된다. 외란발생 직후 조작기에  $G_f$ 의 제어 출력이 바로 인가되었어도 배관의 시간지연 2초와 엔진내부의 시간지연 4초를 합해서 모두 6초의 시간을 거쳐야 하기 때문에 생기는 결과임을 알 수 있다. 그래프에서는 이 지점이 66초의 시점이며 이때가 되어서야 비로소 피드포워드 제어신호가 작용된다. 한편, Fig. 3의 경우는 64초에서 68초 사이에서 부하증가로 인해 냉각수 온도가 상승하고 있다. 이후 66초 시점부터 피드포워드제어 신호의 작용으로 온도보상이 되기 시작된다. 마찬가지로  $G_f$ 의 제어 신호가 배관의 시간지연 4초와 엔진내부의 시간지연 4초를 합해서 모두 8초의 시간을 거쳐야 하기 때문이다. 그래프에서는 이 지점이 68초의 시점이

며 이 때부터 피드포워드 제어신호가 작용된다.

외란이 가해진 후  $L_p + L_e$ 가 되는 시점 즉, Fig. 2에서는 66초의 시점이고 Fig. 3에서는 68초의 시점에 해당한다. 이 때 나타나는 편차 크기를 서로 비교하면 배관 길이가 긴 Fig. 3에서 훨씬 크며 그 이유는 (11)에서 표시한 식으로 설명될 수 있다. 한편 피드포워드제어기의 출력 크기와 관련하여  $K_f$ 의 설정 계인을 0,1,2인 경우로 나누어 응답을 서로 비교하였을 때 각각 부족보상, 적정보상, 과잉보상의 경우를 나타내 준다. 즉, 양 그래프 모두에서  $K_f = 1$ 일 때에 가장 양호한 응답결과를 나타내었으며 부족 및 과잉의 경우 편차는 모두 크게 증가되고 있다.

### 5. 결 론

주기관 자켓트 냉각수를 출구온도 일정방식으로 제어하는 경우 배관을 흐를 때 나타나는 시간지연과 엔진내부에서의 시간지연 특성이 제어루프에 함께 포함되어 악영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이로 인한 제어특성의 악화를 개선할 수 있는 피드포워드 제어계를 구성 및 모델링 하였으며 이를 기반으로 적절한 응답이 얻어질 수 있는 피드포워드 제어기의 조건을 해석하였다. 외란이 엔진에 가해진 경우 조작기와 엔진 간의 배관길이에 의한 시간지연 동안은 피드포워드제어기로부터의 보상신호가 엔진에 이를 수 없음을 따라 외란신호에 완벽히 대응하는 것은 불가능하였으며 한편, 시간지연이 지난 시점에서도 적절한 피드포워드제어기의 출력이 작용하면 외란의 세력을 효과적으로 저감시켜 응답특성을 크게 개선할 수 있다는 것을 제시하였다. 이러한 해석 내용을 시뮬레이션을 통해 확인한 결과 피드포워드 제어신호를 부가하는 경우가 부가되기 이전에 비해 온도의 응답특성이 크게 양호한 것으로 나타났으며 배관의 시간지연 동안 발생하는 편차의 크기 또한 수식으로써 설명될 수 있었다. 이와 함께 피드포워드제어기에서 요구되는 계인의 적절한 크기를 확인하였으며 게인 설정이 이것보다 작거나 큰 경우에는 피드포워드신호의 부족보상 및 과잉보상이 되어 응답이 나빠진다는 것을 알 수 있

었다. 차후 연구에서는 자케트냉각수 온도제어와 관련하여 P, PD제어에 의한 피드포워드제어기의 특성을 비교하고 제어한계에 대한 분석을 하고자 한다.

### 참고문헌

- [1] O.J.M. Smith, "A controller to overcome dead time", ISA J., Vol. 6, No.2, pp. 28-33, 1959.
- [2] Shafiei Z. and Shenton AT, "Frequency-domain design of PID controllers for stable and unstable systems with time delay", Automatica 33(12), pp.2223-2232, 1997.
- [3] Akira Kojima and Kenko Uchida Etsujiro Shimemura, "Robust stabilization problem for a system with delays in control", SICE. Vol. 29, No.3, pp.315-325, 1993.
- [4] Jong-Hae Kim., Eun-Tae Jeung. and Hong-Bae Park., "Robust Control for Parameter Uncertain Delay Systems in State and Control Input", Automatica, Vol. 32, No. 9, pp.1337-1339, 1996.
- [5] Miller K M., Witt N A J. and Russell M P., "Mathematical and Scale Model Platforms for Maneuvering Trials", *International Symposium on Maneuverability of Ships at Low Speed*, Ilawa, Poland, Oct. 1995.
- [6] H H Choi. and M J Chung., "Comments on quadratic stabilization of continuous time systems with state-delay and norm-bounded time-varying uncertainties", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, No. 12, pp. 1740-1742, 1997.

### 저자소개



최순만 (崔淳萬)

1955년 3월 30일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 석사, 1995년 동 대학원 박사, 현재 한국해양수산연수원 교수