

CPP를 갖는 선박 추진 시스템의 강인한 Decoupling 제어

김 영 복*, 변 정 환*

Robust Decoupling Control of Ship Propulsion System with CPP

Young-Bok Kim*, Jeong-Hoan Byun*

ABSTRACT

If a ship diesel engine is operated by consolidated control with Controllable Pitch Propeller(CPP), the minimum fuel consumption is achieved together with the demanded ship speed. For this, it is necessary that the ship is operated on the ideal operating line which satisfies the minimum fuel consumption and that the pitch angle of CPP and throttle valve angle are controlled simultaneously. In this point of view, this paper presents a controller design method for a ship propulsion system with CPP based on the decoupling control theory.

To do this, Linear Matrix Inequality(LMI) approach is introduced for the control system to satisfy the given H_∞ control performance and robust stability in the presence of physical parameter perturbations. The validity and applicability of this approach are illustrated by simulation in the all operating ranges.

Key Words : Decoupling Control(decoupling 제어), CPP(가변 피치 프로펠러), LMI(선형행렬부등식), Control Performance(제어성능), Robust Stability(강인한 안정성), Perturbation(섭동)

1. 서 론

선박의 기동성을 민첩하게 하고 디젤기관의 효율을 향상시키기 위해서 중·소형 선박 등에서는 디젤엔진, 감속기 및 프로펠러의 피치각이 조정 가능한 가변 피치 프로펠러(CPP : controllable pitch propeller)로 구성된 추진 시스템을 널리 채용하고 있는 실정이다. Fig. 1은 이와 같이 CPP를 장착한 선박의 항주곡선도(power covers)를 나타내고 있는데, 임의의 선속을 얻고자 할 때 목표선속을 얻기 위한 엔진 회전수와 CPP 피치각 사이

에는 다수의 운전점들이 존재함을 Fig. 1로부터 알 수 있다. 그러나 가장 작은 주기출력(연료 소비율)으로써 목표로 하는 선속을 얻기 위한 엔진 회전수와 CPP 피치각의 관계는 Fig. 1의 일점쇄선과 같이 주어지게 된다. 그러나 주기출력에 치명적인 손상을 입히는 경우를 피하기 위하여 일점쇄선의 좌측영역에서는 운전하지 않고 그 우측영역에서 운전이 이루어지도록 하고 있다. 따라서 실제로는 파선으로 나타낸 곡선이 최적항주곡선이 된다. 그런데 이러한 최적항주곡선도 선체저항 및 기상상태 등의 운전조건 변화에 따라 달라지게 되며 실제적인 문제로서 최적

* 부경대학교 공과대학 제어기체공학과

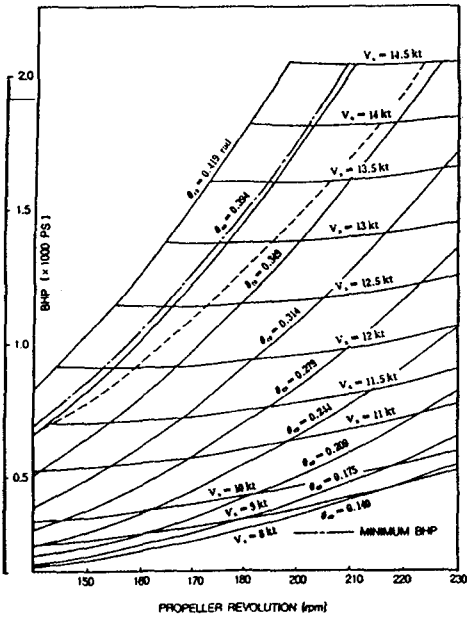


Fig. 1 Estimated power curves

항주곡선위에서 운전이 이루어지도록 엔진 회전수와 CPP의 피치각을 동시에 조정하는 것은 숙련자라 하더라도 상당히 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 종래에는 회전수를 일정하게 설정해 두고 CPP의 피치각만을 조정하여 목표 선속을 얻는 조작을 행하였다. 그러나 이와 같은 조작은 항해중의 고부하측에서는 큰 문제가 없으나, 저부하측에서의 연료소비율 증가가 큰 문제가 된다. 이러한 종래의 시스템에 대한 문제점을 다시 정리해보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 입 · 출력 상호간에 간섭이 생기며, 특히, 선속을 조정하기 위해 CPP의 피치각을 변화시키면 부하변동이 발생하는 등의 상호간섭 때문에 엔진 회전수가 급격하게 변동하게 되며 이것은 주기이외의 장치를 구동하고 있는 경우에는 바람직하지 못하다.
- (2) 엔진 회전수와 피치각 제어가 독립적으로 이루어지기 때문에 최적의 상태에서의 조작은 숙련자가 아니면 어렵다.
- (3) 조작상의 어려움 때문에 연료소비율 최소화라는 목적은 고려하지 않고 엔진 회전수를 일정하게 설정해 두고 피치각을 조정하는 방법과, 피치각을 일정하게 설정해 두고 엔진 회전수를 조정하는 방법을 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 회전수 및 CPP 피치각의 통합적 제어의 관점에서

decoupling 제어이론에 근거하여 입 · 출력 상호간의 간섭을 최소화하고, 운항조건 등의 변화에 따른 파라미터의 변동과 모델링 오차등의 불확실성에도 강인하게 대처할 수 있는 제어계를 설계한다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 설계된 제어계의 타당성을 검토한다. 또한 본 연구에서는 제어계 설계를 위해 수치적 최적화 기법의 하나인 LMI(선형행렬부등식)⁽¹⁻⁵⁾를 이용한다.

따라서, 본 논문에서는 선박 추진 시스템을 제어대상으로 하고

- (가) 입력과 출력간의 간섭 억제
- (나) 시스템의 물리파라미터 변동에 대한 강인성 보장
- (다) H_{∞} 노름 조건

등을 설계사양으로 둔다. 그리고 이것들을 동시에 만족시키는 피드백 제어칙을 LMI를 이용하여 구한 다음 그 타당성을 검토하고자 한다.

본 논문에서 사용하는 단어, 기호는 특별한 부가설명 없이는 한 다음과 같다.

$\|Z\|_{\infty}$: 전달함수 행렬 Z의 H_{∞} 노름
 이것은 $Z \in RH_{\infty}$ 일때 다음과 같이 정의 된다.

$$\|Z\|_{\infty} \triangleq \sup_{\omega} \sigma_{\max}(Z(j\omega))$$

여기서 $\sigma_{\max}(A)$ 는 A의 최대특이치, RH_{∞} 는 프로퍼(proper)인 실수 유리행렬의 집합이다.

2. 제어대상의 표현

2.1 모델링

본 연구에서 제어대상으로 하고 있는 선박 추진 시스템(디젤엔진+감속기+CPP)의 제원과 사용하는 기호는 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1 Main specification

PARTICULARS		DESCRIPTION
Engine	Output (MCR)	1,800 BHP
	Revolution	775 RPM
	NO. of Cylinder	6
	CYL. Bore	280 mm
	Stroke	320 mm
Intermediate Shaft	Dimension	180 mm(D) x 1818 mm(L)
	Weight	464 kg
Propeller Shaft	Dimension	215 mm(D) x 5660 mm(L)
	Weight	1860 kg
Propeller	Type	4 Blades CPP
	Dimension	2660 mm(D)
	Weight	1828 kg

Table 2 Summary of variables of physical system

Item		Specification
Inertia	(J)	177.44 kgms ²
engine (J_e)		
+ reduction gear (J_r)		
+ (propeller+shaft) (J_p)		
friction	(f)	0.102 kgms
Reduction gear ratio	(R_g)	1 : 3.2 (Astern)

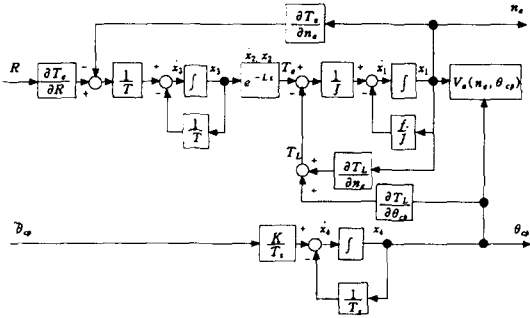


Fig. 2 Block diagram of controlled system

그리고 제어대상의 블록선도는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있고, 입력은 엔진 트로틀밸브 각도 R [rad]과 CPP 피치각 조절을 위한 유압 서보 밸브의 입력전압 $\hat{\theta}_{cp}$ [V]이고, 제어량은 엔진 회전수 n_e [1/s]와 CPP의 피치각 θ_{cp} [rad]로 했다.

내연기관은 고유의 특성상 시간지연 특성을 가지며, 연료 분사율은 트로틀밸브 각도와 엔진 회전수의 함수로 기술할 수 있다. 그리고 연소계통을 1차요소로 간주하면 연소계의 전달함수는 다음식과 같이 나타낼 수 있으며

$$T_e = \frac{1}{1+Ts} e^{-Ls} (g(R, n_e)) \quad (1)$$

여기서 T 는 시정수[s], L 은 시간지연[s], R 은 트로틀 밸브각도[rad]이다. 그리고 관성모멘트 J 는 기관축 및 프로펠러 등을 포함한 모든 회전체를 기관축 주위로 등가변환하여 나타낸다.

Fig. 2의 블록선도에서 사용한 각 기호 가운데 T_e, T_b 는 부하토크와 외란[Nm], n_e 는 엔진 회전수[1/s], V_a 는 선체속도[m/s]를 나타낸다. 그리고 T_s 는 CPP 구동용 액츄에이터인 유압 서보 시스템의 시정수[s], K 는 비례계인 [rad/V]을 나타낸다.

본 연구에서 고려하고 있는 비선형특성은 $T, K, \partial T_e / \partial R, J, \partial T_e / \partial n_e, \partial T_L / \partial n_e, \partial T_L / \partial \theta_{cp}, T_s$ 등이며, 이것들이 선박 추진 시스템에 있어서 비선형특성을 나타내는 대표적인 파라미터들이다.

이것으로부터 제어대상의 표현을 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_p x(t) + B_p u(t) \\ y(t) &= C_p x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 상태벡터, $u(t) \in R^m$ 는 입력벡터, $y(t) \in R^m$ 는 출력벡터이며, 본 연구의 제어대상인 선박 추진 시스템의 경우 $n=4, m=2$ 로서

$$\begin{aligned} A_p &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \left(\frac{\partial T_L}{\partial n_e} + f \right) & \frac{1}{J} & -\frac{1}{J} & \frac{1}{J} \frac{\partial T_L}{\partial \theta_{cp}} \\ 0 & -\frac{2}{L} & \frac{4}{L} & 0 \\ -\frac{1}{T} \frac{\partial T_e}{\partial n_e} & 0 & -\frac{1}{T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix}, \\ B_p &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T} \frac{\partial T_e}{\partial R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K}{T_s} \end{bmatrix}^T, \\ C_p &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 그리고 시간지연은 다음식과 같이 Padé의 1차 근사법으로 근사화 하였다.

$$e^{-Ls} = \left(1 - \frac{Ls}{2} \right) \left(1 + \frac{Ls}{2} \right)^{-1} \quad (4)$$

2.2 설계사양

제어계 설계를 행함에 있어서 고려하여야 할 설계사양을 다음과 같이 둔다.

- (1) 입 · 출력간의 Decoupling 달성

제어대상의 블록선도 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 입력은 엔진 트로틀밸브 각도 R 과 CPP 피치각 조절을 위한 유압 서보 밸브의 입력전압 $\tilde{\theta}_{cp}$ 이고, 제어량은 엔진 회전수 n_e 와 CPP의 피치각 θ_{cp} 이다. 이 그림에서 알 수 있는 것과 같이 엔진 회전수는 입력신호중의 하나인 CPP의 피치각에 의해 영향을 받는다. 즉 필요에 따라 CPP의 피치각을 조정하게 되면 부하토크의 변화로 인하여 엔진 회전수도 변하게 되며 이것은 결코 바람직하지 못하다. 따라서 본 논문에서는 CPP 피치각의 변화에 대해 엔진 회전수가 받게 되는 영향을 억제하도록 제어계를 설계한다.

(2) 물리 파라미터의 변동

물리 파라미터 변동을 계수행렬 A_p, B_p 의 파라미터 변동으로 생각하고 계수행렬을 행렬 폴리토프⁽¹⁾⁽³⁾형태로 생각하여 파라미터 변동에 대한 강인성을 보증한다.

앞서 기술한 바와 같이, $T, L, \partial T_e / \partial R, J, \partial T_e / \partial n_e, \partial T_L / \partial n_e, \partial T_L / \partial \theta_{cp}, T_s$ 등이 변동하는 파라미터이고 실험적 데이터로부터 각 파라미터의 변동범위는 다음과 같이 둔다.

$$\begin{aligned} 39.49 \leq \partial T_e / \partial R \leq 114.39, & 0.03 \leq T \leq 0.10, & 0.05 \leq L \leq 0.20, \\ 147.33 \leq J \leq 199.55, & 167.35 \leq \partial T_e / \partial n_e \leq 262.04, \\ 32.62 \leq \partial T_L / \partial n_e \leq 944.67, & 0.05 \leq T_s \leq 0.23, \\ 1285.13 \leq \partial T_L / \partial \theta_{cp} \leq 6431.41 \end{aligned} \quad (5)$$

이와 같이 물리 파라미터는 상당한 범위에 걸쳐서 변하므로 이것으로부터 시스템내의 파라미터 변동에 대한 제어계의 강인성이 요구됨을 알 수 있다.

(3) H_∞ 제어사양

본 논문에서는 정상상태에서 목표치와의 편차를 없애기 위해 Fig. 3과 같은 적분형 서보계⁽⁶⁾를 구성한다. 이

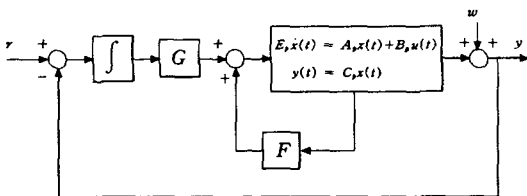


Fig. 3 An integral type servosystem

때 시스템의 외란 $w(t)$ 에서 출력 $y(t)$ 까지의 전달함수 G_{yw} 의 H_∞ 놈 $\|G_{yw}\|_\infty$ 를 최소화하고, 출력측의 저감도화를 달성하도록 강인한 안정성에 관한 사양을 부가한다. 따라서 (2)식의 시스템에 외란 $w(t)$ 을 부가한 확대계는

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \tilde{A}_p \tilde{x}(t) + \tilde{B}_p \tilde{u}(t) + \tilde{B}_w w(t) \\ \tilde{y}(t) &= \tilde{C}_p \tilde{x}(t) + \tilde{D}_w w(t) \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 표현된다. 여기서

$$\begin{aligned} \tilde{A}_p &= \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ -C_p & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_p = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}_p = [C_p \quad 0], \\ \tilde{B}_w &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T, \quad \tilde{D}_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

이고, $\tilde{x}(t) = [x(t) \quad v(t)]^T$, $\tilde{u}(t)$, $w(t)$ 는 확대계의 상태와 제어입력, 그리고 외란입력이다. 단, $v(t)$ 는 적분기의 출력벡터이다.

3. 제어계의 설계

본 연구에 있어서 제어계의 설계는 먼저 제어계에 대한 decoupling 제어를 행하고 외란과 파라미터 변동에 대한 강인한 안정성을 보장하는 순서로 수행된다.

3.1 Decoupling 제어⁽⁷⁻⁹⁾

3.1.1 Decoupling 조건

식(2)의 제어대상에 대해

$$u(t) = -Fx(t) + G\tilde{u}(t) \quad (8)$$

와 같이 피드백 제어칙을 구하면 페루프 시스템은

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A_p - B_p F)x(t) + B_p G\tilde{u}(t) \\ y(t) &= C_p x(t) \end{aligned} \quad (9)$$

로 표현된다. 여기서 $\tilde{u}(t)$ 는 새로운 입력벡터이고 Fig. 3의 적분기의 출력 $v(t)$ 와 같다.

이상으로부터 페루프 시스템의 전달함수행렬은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$G_c(s) = C_p(sI - A_p + B_p F)^{-1} B_p G \quad (10)$$

decoupling 제어란 전달함수행렬 $G_c(s)$ 의 대각요소가 0이 아닌 대각행렬이 되도록 하는 게인 (F, G)를 결정하는 것이다. 여기서 C_p 를

$$C_p = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix} : c_i (1 \times n) \quad (11)$$

와 같이 분할하고 각 c_i 에 대해서

$$\eta_i = \min \{j | c_i A_p^{j-1} B_p \neq 0\} \quad (12)$$

가 존재한다. 또한,

$$B_p^* = \begin{bmatrix} c_1 A_p^{\eta_1-1} B_p \\ c_2 A_p^{\eta_2-1} B_p \\ \vdots \\ c_m A_p^{\eta_m-1} B_p \end{bmatrix} \quad (m \times m) \quad (13)$$

로 두면 이것들로부터 다음의 Theorem에 의해 게인 (F, G)가 존재한다.

Theorem 1 (2)식의 제어대상에 대해 decoupling 제어가 가능하도록 하는 게인 (F, G)가 존재하기 위한 필요충분조건은

$$|B_p^*| \neq 0 \quad (14)$$

이다. 그리고, decoupling이 가능할 때

$$A_p^* = \begin{bmatrix} c_1 A_p^{\eta_1} \\ c_1 A_p^{\eta_2} \\ \vdots \\ c_m A_p^{\eta_m} \end{bmatrix} \quad (15)$$

로 두면 decoupling 제어가 가능하도록 하는 게인 (F, G)는 수없이 존재하지만 그 중의 하나는 다음과 같이 들 수 있다.

$$F = B_p^{*-1} A_p^*, \quad G = B_p^{*-1} \quad (16)$$

3.1.2 시스템의 안정화

3.1.1에 기술한 조건들을 만족하여 decoupling 제어가 가능하다고 하더라도 decoupling된 시스템은 점근 안정하다고 할 수 없다. 따라서 각 서브시스템내의 별도의 피드백 루프에 의해 안정화를 도모할 필요가 있다.

Theorem 2 안정한 decoupling 제어계의 설계가 가능하도록 하는 게인 (F, G)는 다음과 같이 주어진다.

$$F = B_p^{*-1} [A_p^* + \bar{F} S_a], \quad G = B_p^{*-1} \quad (17)$$

여기서 \bar{F} 는 페루프 시스템이 점근 안정하도록 하는 각 서브시스템의 피드백 게인이고 S_a 는 정칙인 행렬로 다음과 같이 주어진다.

$$S_a = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_1 A_p \\ \vdots \\ c_1 A_p^{\eta_1-1} \\ \hline c_m \\ c_m A_p \\ \vdots \\ c_m A_p^{\eta_m-1} \end{bmatrix} \quad (n \times n) \quad (18)$$

이상의 이론에 따라 본 연구에서 제어대상으로 하고 있는 선박 추진 시스템의 기준(공칭)모델에 대해 decoupling 제어가 가능할 것인지를 검토하였다. 그 결과

$$B_p^* = \begin{bmatrix} -6.378 & 143.886 \\ 0 & 5.559 \end{bmatrix} \quad (19)$$

이고 이것은 (14)식의 decoupling 제어 가능 조건인 $|B_p^*| \neq 0$ 을 만족하므로 decoupling이 가능함을 알 수 있다.

그러나 제어대상의 상태방정식과 전달함수의 차수가 같지 않으므로 행렬 S_a 는 정칙이 아니다.

따라서 시스템의 안정화가 가능하도록 새로운 정칙행렬 S_b 를 다음과 같이 정의한다.

$$S_b = \begin{bmatrix} S_a \\ W \end{bmatrix} \quad (20)$$

즉, $|S_b| \neq 0$ 이고,

$$WB_p = 0 \quad (21)$$

이 되도록 하는 적당한 행렬 W 를 선정한다.⁽⁹⁾

3.2 강인한 안정성의 보증

3.1절에서 구한 제어칙은 페루프계를 안정화하면서 decoupling 제어가 가능하도록 한다. 그러나 하나의 기준모델에 대해서 구한 제어칙이기 때문에 파라미터의 변동 등의 불확실성이 존재하는 경우에 있어서도 제어계의 안정성을 반드시 보증한다고 할 수 없다. 따라서 지금부터는 불확실성에 대한 제어계의 강인한 안정성 조건에 대해 고찰한다.

(6)식의 시스템 표현에서 불확실성을 포함하고 있는 계수행렬 \bar{A}_p, \bar{B}_p 를 α 를 파라미터로 하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \bar{A}_p(\alpha) &= \sum_{i=1}^k \alpha_i \bar{A}_i, \\ \bar{B}_p(\alpha) &= \sum_{i=1}^k \alpha_i \bar{B}_i, \\ \sum_{i=1}^k \alpha_i &= 1, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i=1, \dots, k. \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 $\bar{A}_i, \bar{B}_i, i=1, 2, \dots, k$ 는 단점(vertex)행렬이고 (22)식으로 나타내어지는 행렬의 집합을 행렬 폴리토프라 부른다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

Theorem 3 (6)식으로 표현된 시스템에 대해서 페루프계가 안정하고, 외란 $w(t)$ 에서 제어출력 $y(t)$ 까지의 전달함수의 H_∞ 노름이 $\|G_{yw}\|_\infty < \gamma$ 를 만족시키는 피드백 제어칙 K_{FG} 가 존재하기 위한 필요충분조건은

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_p X + X \bar{A}_p^T + \bar{B}_p Y + Y^T \bar{B}_p^T & \bar{B}_w & X \bar{C}_p^T \\ \bar{B}_w^T & -\gamma I & \bar{D}_w^T \\ \bar{C}_p X & \bar{D}_w & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

가 성립되도록 하는 정정대칭행렬(Positive Definite Symmetric Matrix) X 와 변수 Y 가 존재하는 것이다. 이 때, 피드백 게인 K_{FG} 는

$$K_{FG} = YX^{-1} = [F \ G] \quad (24)$$

로 주어진다.

3.3 제어계의 설계방법

입 출력간의 간섭을 억제하면서 제어대상의 파라미터 변동 및 외란에 대한 강인성을 보장하는 제어칙은 Theorem 1, Theorem 2 및 Theorem 3을 동시에 만족하는 것 중의 하나며 다음의 방법으로 구할 수 있다.

우선 Theorem 1과 Theorem 2의 조건을 만족하여 제어계가 안정함과 동시에 decoupling 제어가 가능하다고 가정한다. 즉 임의의 기준모델에 대해 안정한 decoupling 제어가 가능하도록 하는 피드백 게인(F, G)가 (17)식과 같이 주어졌다고 하자. 이 때, (24)식의 관계로부터

$$Y = [F \ G]X \quad (25)$$

로 둘 수 있으므로 (23)식의 Y 에 (25)식을 대입하여 다음의 Theorem을 얻는다.

Theorem 4 (6)과 (22)식으로 표현된 시스템에 대해서 decoupling 제어가 가능하고 페루프계가 안정하며 외란 $w(t)$ 에서 제어출력 $y(t)$ 까지의 전달함수의 H_∞ 노름이 $\|G_{yw}\|_\infty < \gamma$ 를 만족시키는 피드백 제어칙 K_{FG} 가 존재하기 위한 필요충분조건은

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_p X + X \hat{A}_p^T & \bar{B}_w & X \bar{C}_p^T \\ \bar{B}_w^T & -\gamma I & \bar{D}_w^T \\ \bar{C}_p X & \bar{D}_w & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (26)$$

가 성립되도록 하는 정정대칭행렬 X 가 존재하는 것이다. 여기서 $\hat{A}_p = \bar{A}_p + \bar{B}_p [F \ G]$ 이다.

3.4 제어계의 설계순서

위의 Theorem 1~ Theorem 4로부터 2.2절의 설계 사양을 동시에 만족하는 제어칙을 유도하는 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- Step 1. 파라미터 변동범위내의 임의의 모델에 대해, 안정한 decoupling 제어가 가능하도록 (17)식의 피드백 게인을 구한다.
- Step 2. 적당한 크기의 $\gamma(> 0)$ 를 설정하고, Step 1에서 구한 게인을 (26)식에 대입한다.
- Step 3. (22)식의 행렬 폴리토프로 나타내어지는 시스템의 모든 단점행렬에 대해서 (26)식의 부등식을 만족하는 해 $X(> 0)$ 가 존재하는가? 존재하면 Step 6으로, 존재하지 않으면 Step 4 로.
- Step 4. γ 를 증가시킨다.
- Step 5. 적절한 크기까지 γ 를 증가시켜가면서 Step 3, Step 4를 반복하여 해의 존재여부를 확인 한다. 이 때, 해가 존재하지 않으면 Step 1로, 존재하면 Step 6으로.
- Step 6. $K_{FG} = [F \ G]$ 로 두고 설계를 종료한다.

$$0.164 \leq \frac{1}{J} \left(\frac{\partial T_L}{\partial n_e} + f \right) \leq 6.412, \quad 6.4257 \leq \frac{1}{J} \left(\frac{\partial T_L}{\partial \theta_{cp}} \right) \leq 43.734$$

$$5 \leq \frac{1}{L} \leq 20, \quad 1673.500 \leq \frac{1}{T} \frac{\partial T_e}{\partial n_e} \leq 8734.670, \quad (28)$$

$$4.350 \leq \frac{1}{T_s} \leq 20.000, \quad 394.900 \leq \frac{1}{T} \frac{\partial T_e}{\partial R} \leq 3812.620$$

이것으로부터, 계수행렬 \bar{A}_p, \bar{B}_p 를

$$\bar{A}_p = \bar{A}_m + \Delta \bar{A}_m, \quad \bar{B}_p = \bar{B}_m + \Delta \bar{B}_m \quad (29)$$

와 같이 공칭부분 \bar{A}_m, \bar{B}_m 와, 불확실한 부분 $\Delta \bar{A}_m, \Delta \bar{B}_m$ 으로 분리해서 나타내기로 한다.

(가) 변동하는 파라미터의 기준치, 즉 공칭부분을 각각의 변동범위의 중간치를 취하여

$$\bar{A}_m = \begin{bmatrix} -3.289 & 0.006 & -0.006 & 25.080 & 0 & 0 \\ 0 & -25.000 & 50.000 & 0 & 0 & 0 \\ -5204.085 & 0 & -21.665 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -12.175 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B}_m = \begin{bmatrix} - & 0 & 2103.760 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.175 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (30)$$

로 나타내고 이것을 기준모델의 계수행렬이라고 한다. 이 때 불확실성을 포함한 계수행렬 \bar{A}_p, \bar{B}_p 는 다음과 같이 행렬 폴리토프로 표현된다.

$$\bar{A}_p = \sum_{i=1}^{32} \alpha_i \bar{A}_i \quad (31)$$

$$\bar{A}_i = \bar{A}_m \pm \begin{bmatrix} 3.124 & 0.009 & -0.009 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \pm \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 18.654 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\pm \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7.500 & -15.000 & 30.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \pm \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3530.585 & 0 & 11.665 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4. 시뮬레이션

본 절에서는 입 출력간의 간섭을 억제하면서 제어대상의 물리 파라미터의 변동에 대해 강인한 제어계를 구성하고 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증한다.

CPP를 갖는 추진 시스템을 전 영역에서 운전하는 경우, 시스템내의 파라미터가 크게 변하기 때문에 제어계의 강인성이 요구된다. 그래서 입·출력간의 간섭을 억제시키도록 하고 전 운전영역에서 강인성이 보장되도록 제어칙을 3.4절의 설계순서에 따라 유도한다. 각 파라미터들이

$$39.49 \leq \partial T_e / \partial R \leq 114.39, \quad 0.03 \leq T \leq 0.10, \quad 0.05 \leq L \leq 0.20,$$

$$147.33 \leq J \leq 199.55, \quad 167.35 \leq \partial T_e / \partial n_e \leq 262.04,$$

$$32.62 \leq \partial T_L / \partial n_e \leq 944.67, \quad 0.05 \leq T_s \leq 0.23,$$

$$1285.13 \leq \partial T_L / \partial \theta_{cp} \leq 6431.41 \quad (27)$$

의 범위에서 변동한다고 하자. (6), (7)식의 표현에서 계산의 편의상,

$$\frac{1}{J} \left(\frac{\partial T_L}{\partial n_e} + f \right), \quad \frac{1}{J} \left(\frac{\partial T_L}{\partial \theta_{cp}} \right), \quad \frac{1}{L}, \quad \frac{1}{T} \frac{\partial T_e}{\partial n_e}, \quad \frac{1}{T_s}, \quad \frac{1}{T} \frac{\partial T_e}{\partial R}$$

를 각각 하나의 파라미터로 생각한다. 이 때 (27)식의 각 파라미터의 변동치를 고려하면 다음과 같이 새로운 파라미터에 대한 변동범위를 나타낼 수 있다.

$$\bar{B}_p = \sum_{i=1}^{32} \alpha_i \bar{B}_i \quad (32)$$

$$\bar{B}_i = \bar{B}_m \pm \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.825 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \pm \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 7.825 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0 (i=1, \dots, 32) \quad (33)$$

안정한 decoupling 제어계를 설계하기 위하여 (17)식의 상태 피드백게인 F 중 \bar{F} 를 다음과 같이 둔다.

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

이 때 A_p^*, B_p^* 는 기준모델로부터 결정된다. 여기서 기준모델에 대해 안정한 decoupling 제어계 설계가 가능하도록 하는 게인 (F, G)를 구하였다고 하자. 그러나 이 게인이 파라미터가 변동할 경우에 있어서도 제어계의 안정성을 보장한다고 볼 수 없다. 따라서 확실한 파라미터의 변동에 대해서도 제어계가 강인 안정하기 위해서는 (31)~(34)식에 나타난 각 단점행렬 (\bar{A}_i, \bar{B}_i)

에 대해 Theorem 4의 행렬부등식을 만족하는 게인을 구하여야 한다.

결국 $\gamma = 21$ 일때 각 단점행렬 (\bar{A}_i, \bar{B}_i)에 대해 Theorem 4의 부등식의 해가 존재하였다. 이 때 공통의 해 $X (> 0)$ 는

$$X = \begin{bmatrix} 0.193 & -99.779 & -52.501 & 0.006 & 0.183 & 0.014 \\ -99.779 & 7.498 \times 10^4 & 3.331 \times 10^4 & -7.974 & -90.017 & -6.944 \\ -52.502 & 3.311 \times 10^4 & 2.092 \times 10^4 & -3.579 & -47.782 & -3.728 \\ 0.006 & -7.974 & -3.579 & 0.008 & 0.015 & 0.0014 \\ 0.183 & -90.017 & -47.782 & 0.015 & 2.487 \times 10^5 & 0.015 \\ 0.014 & -6.944 & -3.728 & 0.0014 & 0.015 & 2.487 \times 10^5 \end{bmatrix}$$

이며 상태 피드백게인 F 와 적분기의 게인 G 는

$$F = \begin{bmatrix} -0.212 & 0.001 & -0.004 & -0.718 \\ 0 & 0 & 0 & -0.110 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 5.351 & 6.302 \\ 0 & 0.279 \end{bmatrix} \quad (35)$$

로 결정된다. 단, \bar{F} 의 $f_1 = 1.300, f_2 = 10.000, f_3 = 3.000$ 이다.

(나) 응답특성

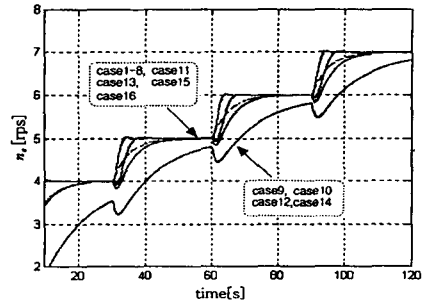
위와 같이 설계된 상태 피드백 게인 F 및 적분기의 게인 G 를 이용하여 decoupling 제어 및 전 운전영역에서 파라미터 변동에 대해 강인성이 보장됨을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

각 파라미터가 (27)식에 나타난 범위에서 변동하는 경우를 고려하여 Table 3과 같은 시뮬레이션 조건에서 시뮬레이션을 행하였다. 그 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 나타

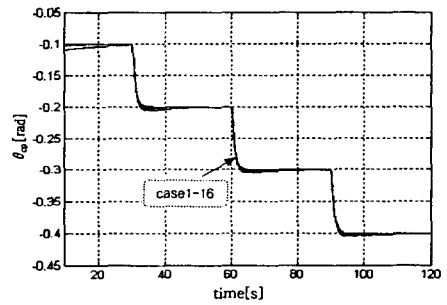
Table 3. Simulation conditions

Parameters (min-max)	J (147.33-199.55)	L (0.05-0.20)	T (0.03-0.10)	T_s (0.05-0.23)	$\frac{\partial T_L}{\partial n_s}$ (32.62-944.67)	$\frac{\partial T_L}{\partial \theta_{cp}}$ (1285.13-6431.41)	$\frac{\partial T_s}{\partial n_s}$ (167.35-262.04)	$\frac{\partial T_s}{\partial R}$ (39.49-114.39)
case 1	max	max	max	max	min	min	min	min
case 2	max	min	max	max	min	min	min	min
case 3	max	min	min	min	min	min	max	max
case 4	max	max	max	min	min	min	min	min
case 5	max	max	min	max	min	min	max	max
case 6	max	min	max	min	min	min	min	min
case 7	max	min	min	max	min	min	max	max
case 8	max	max	min	min	min	min	max	max
case 9	min	max	max	max	min	min	max	min
case 10	min	min	max	min	max	max	min	min
case 11	min	min	max	min	max	max	max	max
case 12	min	max	max	min	max	max	min	min
case 13	min	max	min	max	max	max	max	max
case 14	min	min	max	min	max	max	min	min
case 15	min	min	min	max	max	max	max	max
case 16	min	min	min	min	max	max	max	max

낸다. 여기서 Fig. 4는 간섭항이 없다고 가정할 경우의 스텝상의 목표신호에 대한 엔진 회전수 및 CPP 피치각의 출력 특성을 각각 나타내고 있다. 그리고 Fig. 5와 Fig. 6은 간섭이 존재할 때, 어떤 목표선속을 얻기 위하여 CPP의 피치각과 엔진 회전수를 동시에 조절할 경우이다. 특히 Fig. 5는 decoupling 제어를 행하지 않고 출력측으로 인가되어지는 외란의 영향을 억제하면서 제어 대상의 물리 파라미터의 변동에 대해 강인한 제어계를 설계한 경우의 시뮬레이션 결과이다.⁽¹²⁾ 이것으로부터 CPP의 피치각의 변화에 엔진 회전수가 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 이에 대해 Fig. 6은 decoupling 제어이론을 도입하여 설계된 제어계로 제어를 행한 경우의 출력 특성을 나타내고 있다. Fig. 6의 결과로부터 알 수 있듯이 피치각의 변화에 대한 간섭이 억제될 뿐만 아니라 제어 대상의 파라미터 변동에 대해서도 강인성이 보장됨을 확인할 수 있다. 따라서 운전조건의 변화에도 불구하고 엔진 회전수 및 CPP 피치각이 목표치에 오차없이 항상 추종하며 최적항추곡선상에서의 운전을 가능하게 한다.

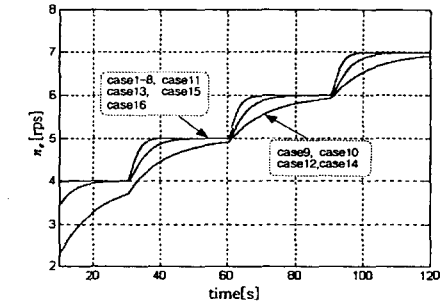


(a)

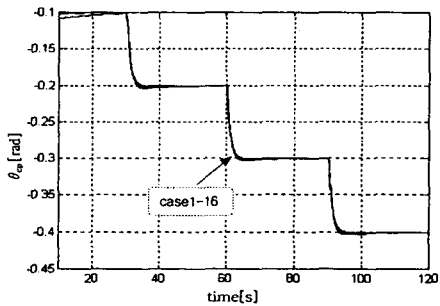


(b)

Fig. 5 Step Responses without Decoupling Control [(a) n_e [rps], (b) θ_{cp} [rad]]

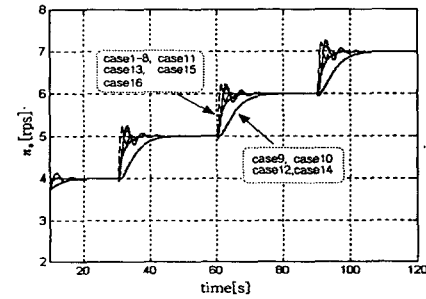


(a)

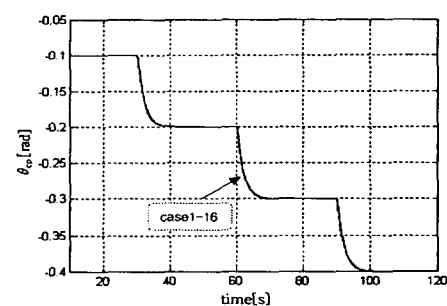


(b)

Fig. 4 Step Responses without Coupling Terms [(a) n_e [rps], (b) θ_{cp} [rad]]



(a)



(b)

Fig. 6 Step Responses with Coupling Control [(a) n_e [rps], (b) θ_{cp} [rad]]

5. 결 론

본 논문에서는 CPP를 갖는 선박 추진 시스템을 제어 대상으로 하고 연료 소비율 최소화를 위한 최적항주곡선 상에서 운전이 이루어 질 수 있도록 엔진 회전수 및 CPP 피치각의 통합적 제어의 관점에서 제어계 설계에 대한 고찰을 행하였다. decoupling 제어이론 및 LMI 설계기법을 이용하여 입출력 상호간의 간섭을 억제시킴과 동시에 H_∞ 노름 조건을 만족하면서 제어대상의 파라미터 변동에 대해 강인한 피드백 제어치를 구하였다. 그리고 광범위한 파라미터 변동에 대해 강인성이 보장됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 따라서 이결과는 운전조건의 변화에도 불구하고 엔진 회전수 및 CPP 피치각이 목표치에 오차없이 항상 추종하도록 하여 최적항주곡선상에서의 운전을 가능하게 한다.

참 고 문 헌

1. S. Boyd et al, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM, 1990.
2. I. Masubuchi, A. Ohara and N. Suda, "A Design of Robust Servosystems for Structured Uncertain Plants," *Trans. SICE*, Vol. 30, No. 9, pp. 1051-1059, 1994(in Japanese).
3. Ohara and Sugie, "A Synthesis of Control System Using χ^2 Optimazation," *Trans. ISICE*, Vol. 38, No. 3, pp. 138-146, 1994(in Japanese).
4. T. Iwasaki and R. E. Skelton, "A Complete Solution to the General H_∞ Control Problem : LMI Existence Conditions and State Space Formulas," *ACC*, pp. 605-609, 1993.
5. P. Gahinet and P. Apkarian, "A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ Control," *Int. J. Robust and Nonlinear Control*, Vol. 4, pp. 421-448, 1994.
6. Y. Fujisaki and M. Ikeda, "Synthesis of Two-Degree-of-Freedom Design of Optimal Servosystems," *Proc. 31st IEEE CDC*, pp. 3588-3589, 1992.
7. P. L. Falb and W. A. Wolovich, "Decoupling in the Design and Synthesis of Multivariable Control Systems," *IEEE Trans. on AC*, Vol. 12, No. 6, pp. 651-659, 1967.
8. E. G. Gilbert, "The Decoupling of Multivariable Systems by State Feedback," *SIAM J. Control*, Vol. 7, No. 1, pp. 50-63, 1969.
9. A. S. Morse and W. M. Wonham, "Status of Noninteracting Control," *IEEE Trans. on AC*, Vol. 16, No. 6, pp. 568-581, 1971.
10. K. Gu, M. A. Zohdy and N. K. Loh, "Necessary and Sufficient Conditions of Quadratic Stability of Uncertain Linear System," *IEEE Trans. on AC*, Vol. 35, No. 5, pp. 601-604, 1990.
11. H. Kogame and T. Mori, "An Exact Quadratic Stability Condition of Uncertain Linear Systems," *IEEE Trans. on AC*, Vol. 38, No. 2, pp. 280, 1993.
12. 김영복, "선박 추진 시스템의 엔진-CPP 통합적 제어에 관한 연구," 제어/자동화/시스템 공학회, 8월, 1998.