

Tokamak 핵융합로의 적응 퍼지제어기 설계

A Design of an Adaptive Fuzzy Controller for the Tokamak Fusion Reactor

박 영 환*, 박 귀 태*,
Youn-Hwan Park*, Gwi-Tae Park**

요 약

본 논문에서는 동특성식이 비선형이며 불확실성을 갖는 Tokamak 핵융합로의 온도와 밀도 제어를 위한 적응 퍼지제어 알고리즘을 개발하였다. Tokamak 핵융합로 동특성식의 불확실성은 매개변수적이지 않고 상태의존적이다. 따라서 기존의 적응 비선형제어 방식으로는 다루기 힘든 어려움이 따른다. 제안된 적응 퍼지 제어기는 하나의 해결방법으로 사용될 수 있을 것이며 시뮬레이션을 통해 미리 지정된 운전영역 내에서는 만족할 만한 제어성능을 발휘함을 확인할 수 있었다.

Abstract

The paper demonstrates that an adaptive fuzzy controller can be used effectively for the control of the temperature and density of the Tokamak fusion reactor which is nonlinear and has dynamic uncertainties. The dynamic uncertainties are non-parametric but state dependent. Thus the conventional adaptive nonlinear control methods have difficulties to cope with the problem. The proposed adaptive fuzzy controller can be used as a solution and performs well in a predetermined local space. Simulation result verifies the effectiveness of the scheme.

I. 서 론

Tokamak 핵융합로는 고도의 안정성을 요구하는 반면에 정확한 수학적 모델링이 어려운 복잡한 비선형 계통이다. 그동안 Tokamak의 제어를 위해 PID 제어, 최적제어, 적응제어 이론을 적용하려는 시도가 있어왔다[1-3]. 그러나 이들은 계통의 비선형성과 불확실성이 고려되지 않은 근사화된 선형모델을 바탕으로 제어기를 설계하였기 때문에 만족할 만한 제어효과를 얻기가 힘들다. 따라서 핵융합로를 효과적으로 제어하기 위해서는 최근의 현대 제어 이론을 이용한 고성능의 제어 기법이 필요하다.

지난 수 년간 복잡한 비선형 계통을 제어하기 위한 방법으로 미분 기하 제어 이론(differential geometric con-

* 서남대학교 전기공학과

* Dept. of Electrical Eng., Seonam Univ.

** 고려대학교 전기공학과, 서울대학교 ERC-ACI 회원

** Dept. of Electrical Eng., Korea Univ.

rol theory)을 이용한 궤환 선형화 기법[4]이 주목을 받아왔다. 그러나 계통에 불확실성이나 모델링 오차가 존재하는 경우에는 동특성식을 정확히 알아야만 적용 가능한 궤환 선형화 기법을 실제계에 적용하는데 많은 제약이 있다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법중의 하나로 비선형 적응 제어이론(adaptive nonlinear control theory)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[5-10]. 비선형 적응 제어 이론은 궤환 선형화 기법과 적응 제어 이론을 합하여 매개변수 불확실성이 존재하는 비선형 계통을 효과적으로 제어하고자 하는 이론이다. 그러나 비선형 적응 제어 이론 역시 파라미터 불확실성(parametric uncertainty), 선형파라미터화(linear parameterization) 등 동특성식의 불확실성이 파라미터에 의존하여야하는 제한적인 가정이 필요하였다. 따라서 상태변수에 의존하는 동특성식의 불확실성을 갖는 Tokamak 핵융합로의 제어에는 어려움이 있다[11].

본 논문에서는 상태 의존 불확실성을 갖는 Tokamak 핵융합로에 적응 퍼지제어기[12]를 적용하여 성공적으로 제어함으로써 설계된 제어기의 유용성을 입증하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Tokamak 핵융합로의 원리와 모델링에 대해 기술하였고, 3장에서는 적응 퍼지제어기를 설계하였으며, 4장에서는 시뮬레이션 연구를 통해 제어기의 성능을 평가하였다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론과 후후의 연구 과제를 기술하였다.

II. Tokamak 핵융합로의 모델링

핵융합로의 가장 간단한 모델은 플라즈마 온도와 밀도의 공간 평균값(volume average)으로 표현된 다음과 같은 0차원 모델(zero dimensional model)로 주어진다[14].

A. 입자 평형식(particle balance equation) :

$$\frac{dn}{dt} = S - \frac{n}{\tau_p} \quad (1)$$

여기서 n = 입자(이온과 전자)의 밀도 [$10^{20}/m^3$]

S = 입자공급(supply of particle) [$10^{20}/m^3 s$]

τ_p = 입자 가둠 시간(particle confinement time) [s]

B. 에너지 평형식(energy balance equation) :

$$\frac{3d(nT)}{dt} = P_\alpha + P_{aux} - P_b - \frac{3nT}{\tau_E} \quad (2)$$

여기서 T = 플라즈마 온도 [keV]

τ_E = 에너지 가둠 시간(energy confinement time) [s]

P_α = 알파 입자 가열(alpha particle heating) [MW/m^3]

P_{aux} = 보조 가열(auxiliary heating) [MW/m^3]

P_b = Bremsstrahlung 방사 손실(radiation loss) [MW/m^3]

식 (2)의 P_α 와 P_b 를 T 와 n 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$P_b = cZ_{eff} n^2 T^{1/2} \quad (3)$$

$$P_\alpha = (n^2/4) \langle \sigma v \rangle E_\alpha \quad (4)$$

여기에서 $\langle \sigma v \rangle = 5.1 \times 10^{-22} [\ln(T_e) - 2.1] (m^3/s)$: 융합 반응도(fusion reaction rate)

$E_\alpha = 3.52[MeV]$: 알파 입자 에너지

$Z_{eff} = 1.5$: Z 의 유효값(effective value of Z)

식 (2)의 에너지 평형식으로부터 가열 항(heating power)인 $P_\alpha + P_{aux}$ 가 에너지 손실항인 $P_b + 3nT/\tau_E$ 에

다 크면 온도가 상승하고 작으면 온도가 내려감을 알 수 있다. 평형점에서 에너지 관계식은 다음과 같다.

$$P_x + P_{aux} = P_b + \frac{3nT}{\tau_E} \quad (5)$$

연소 조건(ignition condition)은 알파입자 가열 전력(alpha heating power)이 에너지 손실을 초과할 때이다. 즉,

$$P_x \geq P_b + \frac{3nT}{\tau_E} \quad (6)$$

위 식의 각 항들을 온도에 대해 도시해 보면 그림 1과 같다[14]. 그림에서 알 수 있듯이 평형점은 저온의 평형점 Tlow와 고온의 평형점 Thigh의 두 개가 존재한다. 보조 가열 전력(auxiliary heating power) Paux를 그림의 P2 이상으로 올리면 식 (6)을 만족하므로 연소가 일어나게 되어 플라즈마의 온도는 고온의 평형점 Thigh까지 올라가게 된다. 그러나 Thigh에서는 플라즈마 압력이 한계치(β limit)를 넘게 되어 더 이상 가두어 둘 수 없게 된다. 이를 피하기 위해 밀도를 낮추어 주는 방법이 있으나, 이 방법은 핵융합 전력(fusion power)이 경제적으로 아주 작아지게 된다(density limit). 따라서 플라즈마 온도를 일정한 한계치 Tc(19 KeV) 이하로 유지해 주어야 한다. 그러나 $T < T_c$ 의 온도에서 융합로를 운전하기 위해서는 그 운전점을 안정화시켜 주어야 하는데 이를 Burn Control이라 한다. Burn Control은 연료 주입률(fuel injection rate) S와 보조 가열 Paux를 조절해 줌으로써 가능하다.

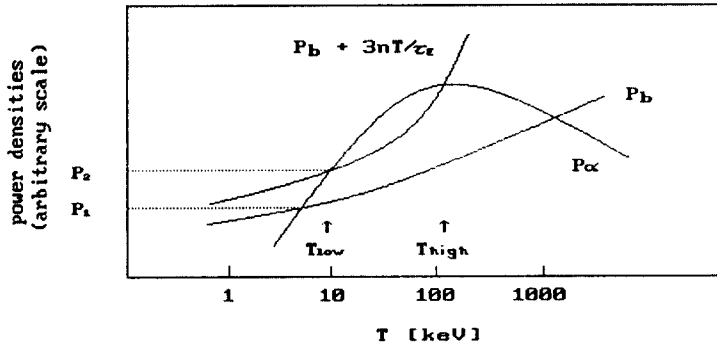


그림 1. 동력 밀도(power densities)의 플라즈마 온도에 따른 변동

III. 상태 방정식

핵융합로동특성식의 주요한 불확실성은 τ_p 와 τ_E 의 온도 T와 밀도 n에 대한 의존성이며 다음과 같이 가정한다 [12-13].

$$\begin{aligned} \tau_E &= \alpha n^l T^m \\ \tau_p &= \beta \tau_E \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 α , β , l, m은 미지의 상수이다. l과 m값은 $l=m=0$. 또는 $l=0$, $m=-1$ 또는 $l=-1$, $m=0.5$ 일 수 있다. 즉, 식(7)의 불확실성은 주로 이 l과 m값의 불확실성에 기인한다. 식 (1)-식 (4)의 동특성식으로부터 상태방정식을 유도하기 위해 다음 관계식을 이용한다.

$$\dot{d}(nT)/dt = \dot{n}T + n\dot{T} \quad (8)$$

$$\dot{T} = (1/n) d(nT)/dt - \dot{n}T \quad (9)$$

식 (1), (2)와 식 (9)를 결합하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{T} = \frac{1}{3n} (P_x + P_{aux} - P_b - \frac{3nT}{\tau_E}) - \frac{1}{n} (S - \frac{n}{\tau_p})T \quad (10)$$

임자 밀도 n을 상태변수 x_1 , 온도 T를 상태변수 x_2 , S를 제어입력 u_1 , Paux를 입력 u_2 로 선정하면 식 (1)과 식 (10)은 식(3), (4)와 결합하여 다음과 같은 MIMO(multi-input multi-output) 비선형 상태 방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}_1 = -C_1 x_1 + u_1 \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = C_2 \langle \sigma v \rangle x_1 - C_3 x_1 x_2^{0.5} - C_4 x_2 - \frac{x_2}{x_1} u_1 + \frac{100}{4.8 x_1} u_2 \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\alpha \beta x_1^m x_2^m}$$

$$C_2 = (3.52 \times 10^{23})/12$$

여기에서 $C_3 = 0.1042 Z_{eff}$

$$C_4 = \frac{1}{\tau_E} - \frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\alpha x_1^m x_2^m} - \frac{1}{\alpha \beta x_1^m x_2^m}$$

$$\langle \sigma v \rangle = 5.1 \times 10^{-22} [\ln(x_2) - 2.1]$$

식(11), (12)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = f_1(\bar{x}) + g_{11}(\bar{x})u_1 + g_{12}(\bar{x})u_2 \quad (13)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(\bar{x}) + g_{21}(\bar{x})u_1 + g_{22}(\bar{x})u_2$$

$$f_1(\bar{x}) = -C_1 x_1 \quad f_2(\bar{x}) = C_2 \langle \sigma v \rangle x_1 - C_3 x_1 x_2^{0.5} - C_4 x_2$$

여기서 $g_{11}(\bar{x}) = 1. \quad g_{21}(\bar{x}) = -x_2/x_1$

$$g_{12}(\bar{x}) = 0. \quad g_{22}(\bar{x}) = 100./ (4.8 x_1)$$

IV. 적응 퍼지 제어기 설계

비선형함수 $f_1(\bar{x})$ 와 $f_2(\bar{x})$ 를 추정하기 위한 fuzzy logic system 을 다음과 같이 설계한다. 먼저 x_1, x_2 의 운전 영역을 다음의 집합 U_i 로 정의한다.

$$U_i = \{(x_1, x_2) \mid 0.1 \leq x_1 \leq 2., 0.1 \leq x_2 \leq 20.\}$$

운전영역을 5×5 의 point로 나누고 다음과 같은 fuzzy rule base를 식(13)으로부터 만든다.

$$(R1) R_f^{(1,1)}: \text{If } x_1 \text{ is } \hat{0.1} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{0.1} \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(1,1)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(1,1)}$$

$$R_f^{(1,2)}: \text{If } x_1 \text{ is } \hat{0.1} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{5}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(1,2)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(1,2)}$$

$$R_f^{(1,3)}: \text{If } x_1 \text{ is } \hat{0.1} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{10}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(1,3)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(1,3)}$$

$$R_f^{(1,4)}: \text{If } x_1 \text{ is } \hat{0.1} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{15}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(1,4)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(1,4)}$$

$$\begin{aligned}
R_f^{(1,5)}: & \text{If } x_1 \text{ is } \hat{0.1} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{20}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(1,5)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(1,5)} \\
& \vdots \\
R_f^{(5,1)}: & \text{If } x_1 \text{ is } \hat{2} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{0.1}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(5,1)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(5,1)} \\
R_f^{(5,2)}: & \text{If } x_1 \text{ is } \hat{2} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{5}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(5,2)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(5,2)} \\
R_f^{(5,3)}: & \text{If } x_1 \text{ is } \hat{2} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{10}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(5,3)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(5,3)} \\
R_f^{(5,4)}: & \text{If } x_1 \text{ is } \hat{2} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{15}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(5,4)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(5,4)} \\
R_f^{(5,5)}: & \text{If } x_1 \text{ is } \hat{2} \text{ and } x_2 \text{ is } \hat{20}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(5,5)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(5,5)}
\end{aligned}$$

(R1)을 일반화시켜 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
(R2) R_f^{(L1, L2)}: & \text{If } x_1 \text{ is } F_1^{L1} \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^{L2}. \text{ Then } f_1(\bar{x}) = \theta_{1(L1, L2)} \text{ and } f_2(\bar{x}) = \theta_{2(L1, L2)} \\
& L1 = 1, 2, \dots, M1 \quad (M1=5) \\
& L2 = 1, 2, \dots, M2 \quad (M2=5)
\end{aligned}$$

여기에서 fuzzy set $F_i^{L_i}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
F_1^1 &= \hat{0.1}, F_1^2 = \hat{0.5}, F_1^3 = \hat{1}, F_1^4 = \hat{1.5}, F_1^5 = \hat{2} \\
F_2^1 &= \hat{0.1}, F_2^2 = \hat{5}, F_2^3 = \hat{10}, F_2^4 = \hat{15}, F_2^5 = \hat{20} \\
\mu_{F_i^{L_i}}(x_i) &= \exp[-((x_i - \bar{x}_i^{L_i})/\delta_i^{L_i})^2]
\end{aligned}$$

fuzzy rule base (R1)과 (R2)로부터 $f_1(\bar{x})$ 와 $f_2(\bar{x})$ 의 fuzzy model은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\hat{f}_1(\bar{x}) &= \sum_{L1=1}^{M1} \sum_{L2=1}^{M2} \theta_{1(L1, L2)} \left[\left(\prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^{L_i}}(x_i) \right) / \sum_{L1=1}^{M1} \sum_{L2=1}^{M2} \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^{L_i}}(x_i) \right) \right] \\
\hat{f}_2(\bar{x}) &= \sum_{L1=1}^{M1} \sum_{L2=1}^{M2} \theta_{2(L1, L2)} \left[\left(\prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^{L_i}}(x_i) \right) / \sum_{L1=1}^{M1} \sum_{L2=1}^{M2} \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^{L_i}}(x_i) \right) \right]
\end{aligned} \quad (14)$$

여기에서 $\theta_{i(L1, L2)}$, $i=1, 2$ 는 식(25)의 adaptive algorithm에 의해 추정되어질 (R2)의 $\theta_{i(L1, L2)}$ 값들이다. 이제 fuzzy basis function을 다음과 같이 정의하자.

$$\xi^{(L1, L2)}(\bar{x}) = \left[\left(\prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^{L_i}}(x_i) \right) / \sum_{L1=1}^{M1} \sum_{L2=1}^{M2} \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^{L_i}}(x_i) \right) \right] \quad (15)$$

그러면 $\xi^{(L1, L2)}(\bar{x})$ 로부터 $\prod_{i=1}^2 M_i$ dimensional vector $\bar{\xi}(\bar{x})$ 가 만들어지며 (14)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
\hat{f}_1(\bar{x} | \hat{\theta}_1) &= \hat{\theta}_1^T \bar{\xi}(\bar{x}) \\
\hat{f}_2(\bar{x} | \hat{\theta}_2) &= \hat{\theta}_2^T \bar{\xi}(\bar{x}) \\
\hat{f}(\bar{x}) &:= [\hat{f}_1(\bar{x} | \hat{\theta}_1), \hat{f}_2(\bar{x} | \hat{\theta}_2)]^T
\end{aligned} \quad (16)$$

Reference Model을 식(17)과 같이 안정한 고유치를 갖도록 선정하면 식(13)과 식(17)로부터 식(18)의 Error Dynamic Equation이 얻어지며 식(19)의 제어칙을 쓰면 최종적인 Error Dynamic Equation이 식(20)과 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{m1} \\ \dot{x}_{m2} \end{bmatrix} = A_m \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \end{bmatrix} + B_m \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = A_m \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + A_m \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + B_m \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{f}_1 - f_1 \\ \hat{f}_2 - f_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}^{-1} \left(- \begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \end{bmatrix} + A_m \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + B_m \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{s1} \\ u_{s2} \end{bmatrix} \right) \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = A_m \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{f}_1 - f_1 \\ \hat{f}_2 - f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s1} \\ u_{s2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

(가정 1) 운전영역 U_c 내에서 $\bar{f}(\bar{x})$ 의 norm이 아는 상수 f^u 에 의해 유계(bounded)된다.

$$\text{즉 } |\bar{f}(\bar{x})| \leq f^u \text{ for } \bar{x} \in U_c, \bar{f}(\bar{x}) := [f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x})]^T$$

(정리 1) Lyapunov function candidate V_c 를 식(21)과 같이 정의하고 supervisory control \bar{u}_s 를 식 (22)와 같이 설정하면 (가정1)을 만족시키는 불확실한 $\bar{f}(\bar{x})$ ($\bar{x} \in U_c$)에 대해 식(20)의 궤적에 따른 V_c 의 시간도함수는 $V_c > \bar{V}$ 일때 0보다 작거나 같게되어 식(23)을 보장할 수 있다.

(증명 : 부록 참조)

$$V_c := \frac{1}{2} \bar{e}^T P \bar{e} \quad (21)$$

$$\bar{u}_s = \begin{cases} -P \bar{e} [\beta_g / |P \bar{e}|^2] |\bar{e}| \|P\| (\|\hat{f}\| + f^u), & \text{if } V_c > \bar{V} \\ 0, & \text{if } V_c \leq \bar{V} \end{cases} \quad (22)$$

$$V_c \leq \bar{V} \leq \infty \quad (23)$$

식(23)으로부터 (따름정리)를 유도할 수 있다.

(따름정리)

$$|\bar{e}| \leq \left(2 \frac{\bar{V}}{\lambda_{p_{\min}}} \right)^{0.5}, \text{ for all } \bar{x} \in U_c$$

(증명) : 식(23)으로부터

$$V_c \leq \bar{V} \\ \frac{1}{2} \lambda_{p_{\min}} |\bar{e}|^2 \leq \frac{1}{2} \bar{e}^T P \bar{e} \leq \bar{V} \quad (24)$$

$$|\bar{e}|^2 \leq 2 \frac{\bar{V}}{\lambda_{p_{\min}}}$$

$$\therefore |\bar{e}| \leq \left(2 \frac{\bar{V}}{\lambda_{p_{\min}}} \right)^{0.5}, \text{ for all } \bar{x} \in U_c$$

한편 미지의 계수vector $\bar{\theta}_1$ 과 $\bar{\theta}_2$ 를 추정하기위한 적응칙(adaptive law)을 식(25)와 같이 정의하면 $\hat{\theta}_1$ 과 $\hat{\theta}_2$ 의 원소들을 식(26)과 같이 예상되는 범위이내로 크기를 bound시킬 수 있다[12].

$$\Theta := [\hat{\theta}_1 \quad \hat{\theta}_2]^T$$

$$\dot{\Theta} = -\gamma_1 P \bar{e} \xi^T(\bar{x}) \quad \text{if } (tr(\Theta\Theta^T) < M) \text{ or if } (tr(\Theta\Theta^T) \geq M \text{ and } \bar{e}^T P \Theta \xi(\bar{x}) \geq 0)$$

$$\dot{\Theta} = -\gamma_1 P \bar{e} \xi^T(\bar{x}) + [\gamma_1 \bar{e}^T P \xi(\bar{x}) / tr(\Theta\Theta^T)] \Theta \quad \text{if } (tr(\Theta\Theta^T) \geq M \text{ and } \bar{e}^T P \Theta \xi(\bar{x}) < 0) \quad (25)$$

$$tr(\Theta\Theta^T) \leq M \quad (26)$$

V, 시뮬레이션 결과 및 검토

본 장에서는 4장에서 설계한 제어기의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Confinement time τ_E 와 τ_p 는 이론에 따라 여러가지로 표현되는데 본 연구에서는 식 (7)로 표현된 confinement law의 불확실성을 다음과 같이 3가지 경우로 나누었다.

1) constant confinement law : $l = m = 0$

2) Bohm diffusion : $l = 0, m = -1$

3) neoclassical diffusion : $l = -1, m = 0.5$

시뮬레이션에서 사용한 동특성식의 상수들은 다음과 같다.

$$\alpha = 0.9, \beta = 3, Z_{eff} = 1.5$$

4장에서 정의된 운전영역 U_c 에 대한 f^* 는 가능한 l, m 값에 대해 식(11)-(13)으로부터 $f^* = 0.92 \times 10^3$ 으로 계산되었다. 그리고, 운전영역 U_c 에서는 식(19)의 G matrix가 nonsingular이다. 식(25)의 error norm bound는 $|\bar{e}| = 0.01$ 로 지정하였으며 이를 위해 $\bar{V} = 0.01, \lambda_{p_{min}} = 200$ 으로 정하였다. 식(25)의 파라미터 추종알고리즘의 파라미터 초기치는 (R1)에서 계산된 값을 사용하였다. 운전점(setpoint) ($n_0 [10^{20}/m^3], T_0 [keV]$)는 Density-Temperature 상평면(phase plane)에서 $A(1, 15) \rightarrow B(0.5, 15) \rightarrow C(0.5, 5) \rightarrow D(1.5, 5) \rightarrow E(1.5, 14) \rightarrow A'(1, 14) \rightarrow B'(0.6, 14) \rightarrow C'(0.6, 6) \rightarrow D'(1.4, 6) \rightarrow E'(1.4, 13) \rightarrow A''(1, 13) \rightarrow B''(0.7, 13) \rightarrow C''(0.7, 7) \rightarrow D''(1.3, 7) \rightarrow E''(1.3, 10) \rightarrow O(1, 10)$ 으로 변화시켰으며 그림 2-그림 6과 같이 지정된 error bound 0.01내에서 기준모델추종이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히 A-E에서는 $l = m = 0$, A'-E'에서는 $l = 0, m = -1$, A''-O에서는 $l = -1, m = 0.5$ 로 l 과 m 값이 변화하였음에도 불구하고 규정된 error bound이내의 추종제어는 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 제어입력, 그림 8은 파라미터 matrix Θ 의 trace 값, 그림 9는 confinement law 파라미터 l 과 m 의 시간적 변화를 각각 나타낸다.

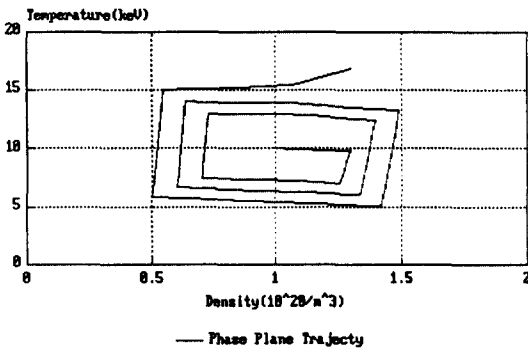


그림 2. Density-Temperature Phase Plane Trajectory

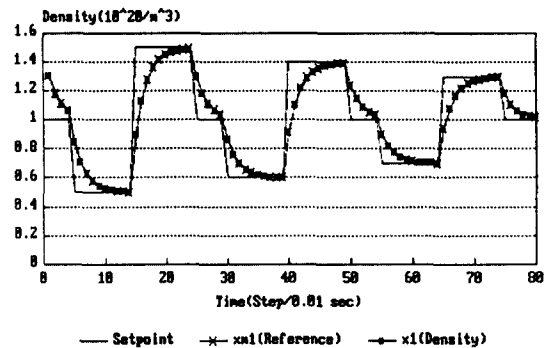


그림 3. Density Trajectory

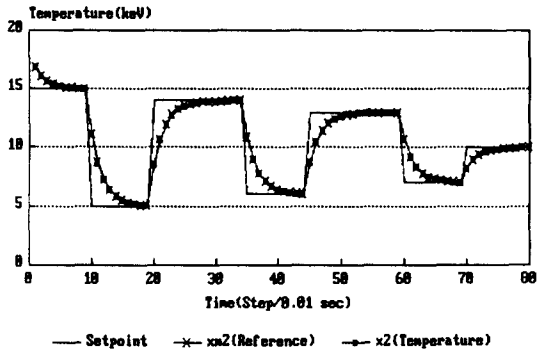


그림 4. Temperature Trajectory

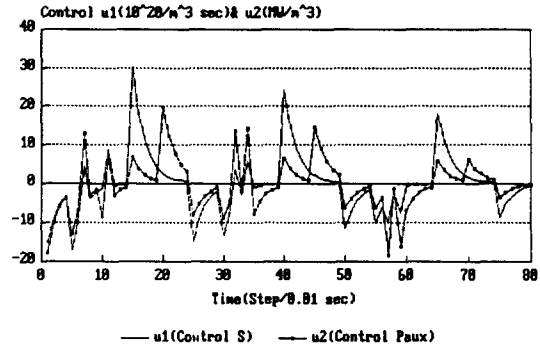


그림 7. Control Inputs $u_1(S)$ & $u_2(Paux)$

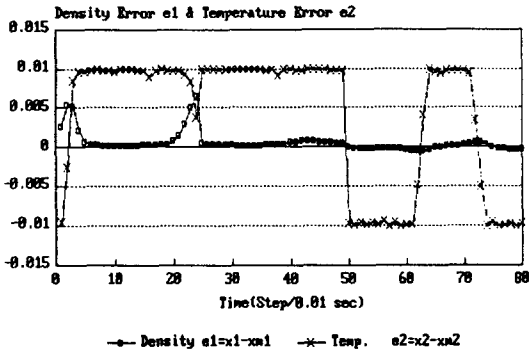


그림 5. Density & Temperature Tracking Error

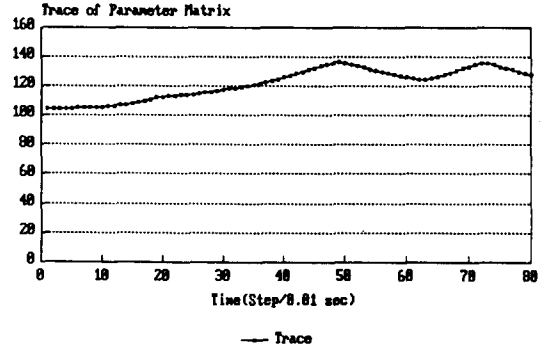


그림 8. Trace of Parameter Matrix

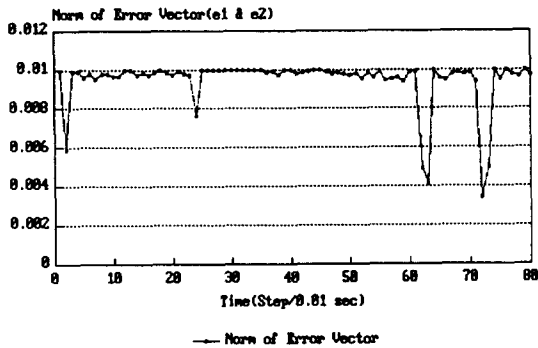


그림 6. Norm of Tracking Error Vector

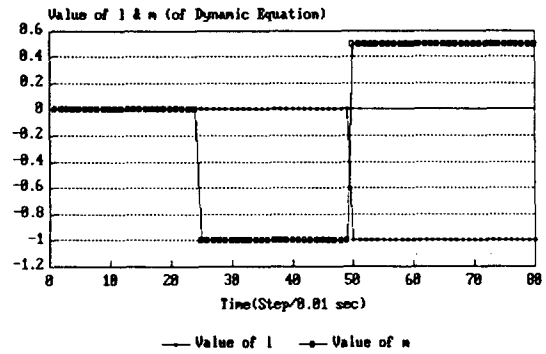


그림 9. Values of l & m (of Dynamic Equation)

VI. 결 론

본 논문에서는 Tokamak 핵융합로의 Burn Control에 적응 퍼지제어 이론을 적용하였다. 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 적응 퍼지제어 기법을 상태의존 불확실성을 갖는 비선형 계통인 핵융합로에 적용하여 원하는 제어성능을 나타냄을 보였다.
- 그러나 제어입력 S 와 P_{aux} 는 물리적으로 크기나 변화율이 제한되는 양이므로 제어입력이 제한되는 상황에 대한 연구가 더 필요할것으로 생각된다.

부록 :

$$\begin{aligned}
 V_e &= \frac{1}{2} \bar{e}^T P \bar{e} \\
 V_e &= \frac{1}{2} [\bar{e}^T (A_m^T P + P A_m) \bar{e} + 2\bar{e}^T P (\hat{f} - \bar{f}) + 2\bar{e}^T P u_s] \\
 &= -\frac{1}{2} \bar{e}^T Q \bar{e} + \bar{e}^T P (\hat{f} - \bar{f}) + \bar{e}^T P u_s \\
 &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} |\bar{e}|^2 + \bar{e}^T P (\hat{f} - \bar{f}) + \bar{e}^T P u_s \\
 &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} |\bar{e}|^2 + |\bar{e}| \|P\| |\hat{f} - \bar{f}| + \bar{e}^T P u_s \\
 &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} |\bar{e}|^2 + |\bar{e}| \|P\| (|\hat{f}| + |\bar{f}|) + \bar{e}^T P u_s \\
 &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} |\bar{e}|^2 + |\bar{e}| \|P\| (|\hat{f}| + |\bar{f}|) (1 - \beta_g), \beta_g > 1 \\
 &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} |\bar{e}|^2 \\
 &\leq 0
 \end{aligned}$$

$$\therefore V_e \leq \bar{V} \leq \infty$$

■ Q.E.D.

참 고 문 헌

1. G. T. Sager, "Tokamak Burn Control," B.S., Sandiago State Univ., 1983.
2. S. W. Haney, L. J. Perkins, J. Mandrekas, W. M. Stacey, Jr., "Active control of burn conditions for the international thermonuclear experimental reactor," *Fusion Tech*, vol. 18, Dec., 1990.
3. D. Anderson, T. Elevant, H. Hamnen, M. Lisak, J. Lorenzen, and H. Persson, "Burn control studies for NET/ITER."
4. A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, New York : Springer-Verlag, 2nd ed., 1989.
5. S. S. Sastry and P. V. Kokotovic, "Feedback linearization in the presence of uncertainties," *Int. J. Adapt. Control Sig. Proc.*, vol. 2, pp. 327-346, 1986.
6. S. S. Sastry and A. Isidori, "Adaptive control of linearizable systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 34, pp. 1123-1131, 1989.
7. D. G. Taylor, P. V. Kokotovic, R. Marino and I. Kanellakopoulos, "Adaptive regulation of nonlinear systems with unmodeled dynamics," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 34, pp. 405-412, 1989.
8. Campion and G. Bastin, "Indirect adaptive state feedback control of linearly parameterized nonlinear

- systems," *Int. J. Adapt. Control Sig. Proc.*, vol. 4, pp. 345-358, Sept., 1990.
9. I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic and R. Marino, "An extended direct scheme for robust adaptive nonlinear control," *Automatica*, March 1991.
 10. A. Teel, R. Kadiyala, P. V. Kokotovic and S. S. Sastry, "Indirect techniques for adaptive input-output linearization of nonlinear systems," *Int. J. Control*, vol. 53, pp. 193-222, Jan.
 11. 천희영, 박귀태, 박영환, 고진영, "입출력 선형화를 이용한 Tokamak 핵융합로의 적응제어기 설계," 대한전기학회 대한전자공학회 제어계측연구회 합동학술발표회 논문집, 1992년 5월.
 12. Li-Xan Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall International Editions, 1994.
 13. K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1989.
 14. T. J. Dolan, *Fusion Research: Principles, Experiments and Technology*, Pergamon Press, 1982.