

Hybrid F-NFC에 의한 저속 디젤 기관의 속도 제어 Speed Control for Low Speed Diesel Engine by Hybrid F-NFC

최교호·양주호

G. H. Choi and J. H. Yang

Key Words : Hybrid F-NFC(하이브리드 퍼지-뉴로 퍼지 제어기), Linear reasoning method(선형추론법), Membership function(멤버십 함수), Fuzzy rule base(퍼지 룰 베이스), Fuzzifier(퍼지화기), Defuzzifier(비퍼지화기)

Abstract : In recent, the marine engine of a large size is being realized a lower speed, longer stroke and a small number of cylinders for the energy saving. Consequently the variation of rotational torque became larger than former days because of the longer delay-time in fuel oil injection process and an increased output per cylinder. It was necessary that algorithms have enough robustness to suppress the variation of the delay-time and the parameter perturbation.

This paper shows the structure of hybrid F-NFC against the delay-time and the perturbation of engine parameter as modeling uncertainties, and the design of the robust speed controller by hybrid F-NFC for the engine. And, The Parameter values of linear equation are determined by RC-GA for F-NFS. The hybrid F-NFC is combined the F-NFC and PID controller for filling up each.

1. 서 론

근래의 선박용 디젤기관이 저속화, 장행정화, 소수 실린더화 추세로 됨에 따라 기계유압식 조속기로는 저속에서 속도제어가 힘들게 되고 운전 가능한 최저 회전속도도 높아지게 된다. 특히, 기관제작자들은 황천과 같은 열악한 해상환경 하에서 급격한 부하 변동이 있을 경우에도 적절히 대응하는 디지털 조속기의 이용을 적극 권장하는 추세이고 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 디지털 조속기의 연구개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 정¹⁾은 선박용 저속 디젤기관의 속도 변동에 따른 기관 파라미터와 토크 변동을 모델링 불확실성으로 고려한 강인한 속도제어기를 H_∞ 제어 설계기법으로 구하였다. 또한, 산업사회의 발달이 가속화되면서 고성능의 제어시스템 설계 및 구현이 필요하게 되고, 모델의 불확실성에도 강인한 성능을 발휘하는 제어기 설계문제가 중요한 요소로 부각되고 있다²⁾.

본 논문에서는 대형저속기관을 제어대상으로 하

고 불확실성과 비선형성을 취급하는데 효과적인 퍼지추론 구조를 기반으로 하는 F-NFS(Fuzzy inference based Neuro-Fuzzy System)을 모델로 한다.

즉, 퍼지 규칙의 후건부가 상수항을 포함한 선형식이며 넓은 범위에서 비선형 시스템을 잘 표현할 수 있는 선형추론모델(TSK model)을 이용하고, 이 선형식의 각 계수들을 실수코드 유전알고리즘(RC-GA)으로 구한 다음 F-NFC를 설계한다.

또한, F-NFC와 종래의 PID제어기를 결합하여 서로의 단점을 상호 보완한 하이브리드 F-NFC를 도입하여 속도 변동에 따른 기관 파라미터와 토크 변동에도 강인한 성능을 보이는 제어기 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기의 우수한 성능을 검증한다.

2. F-NFC(퍼지-뉴로 퍼지 제어기)

퍼지제어에서는 일반적으로 전문가의 정성적인 지식이 If-then 형식의 언어적 규칙으로 표현될 수 있기 때문에 모델의 구조가 이해하기 쉽다. 또한, 구조가 병렬형이며 논리형이기 때문에 정확한 모델에 근거하여 설계된 어떠한 종류의 제어기보다 자유도가 많고 적절한 설계가 이루어진다면 강인한

접수일 : 2005년 10월 26, 채택확정 : 2006년 11월 25일
최교호(책임저자) : 강원도립대학 동력기계시스템과
E-mail : ghchoi@gw.ac.kr, Tel : 033-660-3413
양주호 : 부경대학교 기계공학부

제어특성을 갖는다.

하지만, 퍼지규칙 베이스와 데이터 베이스를 전문가 지식이나 경험에 전적으로 의존하는 주관적 구성으로 인하여 이를 최적으로 설계한다는 것은 어려운 문제이다. 본 연구에서는 제어대상의 이상적인 출력을 위한 퍼지 규칙 후건부의 선형식 각 계수들을 실수코드 유전알고리즘(RC-GA)으로 구하고 이를 이용한 퍼지-뉴로 퍼지 제어기(F-NFC: Fuzzy-Neuro Fuzzy Controller)를 구성한다.

2.1 퍼지 제어 시스템

퍼지 제어는 퍼지 집합 이론을 제안한 미국 버클리대학의 Zadah 교수가 1973년에 시스템의 자동제어에 응용 가능성을 제시한 후, 1974년 Mamdani 교수가 증기 터빈 엔진의 제어에 최초로 응용하여 실용 가능성을 입증하였다³⁾.

퍼지 제어기의 구조는 Fig. 1과 같이 크게 퍼지화기(Fuzzifier), FRB(Fuzzy Rule Base)를 포함한 퍼지 추론부(Fuzzy Inference Engine), 그리고 비퍼지화기(Defuzzifier)로 구성된다.

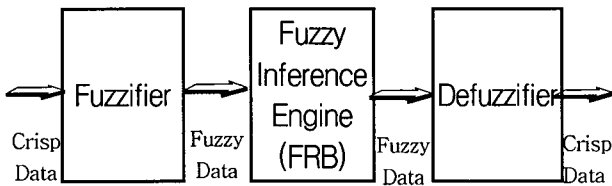


Fig. 1 Structure of fuzzy controller

퍼지화기는 Crisp data(수치적 정보)를 Fuzzy data(애매성이 내포된 정보)로 변환시켜주는 부분이고, 비퍼지화기는 퍼지화기의 반대기능을 하는 부분으로 퍼지추론부의 출력으로부터 보통의 수치 데이터를 얻어내는 장치이다.

비퍼지화기(Defuzzifier)로는 무게중심법(Center-of-gravity method), 평균중심법(Center-of-average method)과 최대치법(maximum method) 등이 있으며 직관적이고 가장 합리적이어서 무게중심법이 가장 많이 사용되고 있다. 비퍼지화는 퍼지추론부의 출력은 애매성을 내포한 결과이므로 기계에 의해 조작하기 위한 어떤 값(Crisp data)으로 변환하는 과정이다.

퍼지추론부(Fuzzy inference Engine)는 If-then으로 서술되어 입력과 출력의 관계를 언어적으로 표현하는 퍼지제어규칙부와 퍼지 관계 합성 연산을

통해서 입출력 관계로부터 현재 입력값에 대한 출력값을 연산하는 퍼지추론연산부로 나뉘게 된다.

퍼지추론방법에는 크게 직접법과 간접법으로 나뉘며, 직접법에는 직접추론법, 선형추론법, 간략추론법 등이 있다.

직접추론법은 Mamdani method(max-min method)와 Larsen method (max-product method)가 있다.

선형추론법(Linear reasoning method)은 sugeno가 제안한 방법으로 전건부가 퍼지 명제인 것은 직접추론법과 같으나, 후건부가 선형식으로 주어지며 TSK(Takagi-sugeno-Kang) 모델이라고도 한다²⁾. Adaptive기법을 사용 할 때 파라미터의 업데이트가 편리하기 때문에 최근에 많이 쓰이는 방법이다.

먼저, TSK 모델의 i 번째 퍼지 규칙은 식 (1)과 같다.

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \\ \text{, then } y \text{ is } \beta_{i1}x_1 + \beta_{i2}x_2 + \beta_{i0} \quad (1)$$

여기서, x_1, x_2 는 전건부(Antecedent) 변수로 퍼지 제어기의 입력이고, y 는 후건부(Consequent) 변수이며 퍼지 제어기의 출력이 된다. A_{i1}, A_{i2} 는 퍼지 변수들이다.

추론과정을 살펴보면, 주어진 입력에 대한 각 규칙의 전반부 적합도를 구하고, 그 적합도를 기초로 각 규칙의 추론 결과를 도출하고 후 최종 추론 결과를 구한다.

현재 입력이 x_1^0, x_2^0 일 때, 전반부 적합도는 식(2)와 같다.

$$w_i = h_{A_{i1}}(x_1^0) \times h_{A_{i2}}(x_2^0) \quad (2)$$

여기서, $h_{A_{i1}}, h_{A_{i2}}$ 는 A_{i1}, A_{i2} 의 멤버십함수이다.

각 규칙의 추론결과는 식 (3)과 같고, 전체 추론 결과는 식 (4)와 같다⁴⁾.

$$y_i = f_i(x_1^0, x_2^0) = \beta_{i1}x_1^0 + \beta_{i2}x_2^0 + \beta_{i0} \quad (3)$$

$$y^0 = \frac{\sum w_i f_i(x_1^0, x_2^0)}{\sum w_i} \quad (4)$$

2.2 퍼지 모델 동정

먼저, 제어대상이 정상적으로 제어될 때의 응답특성을 토대로 $E, \Delta E$ 와 ΔU 의 관계를 조사하고 이를 정규화 하여 Table 1에 나타내었다.

제어대상의 출력 특성을 감안하여 퍼지 규칙의 전건부 변수 E , ΔE 를 각각 7개로 퍼지 분할하고 그 멤버십함수를 Fig. 2와 같이 삼각형으로 정의하였다. 또한, 전건부 변수가 모두 영(zero)로 들어갈 때까지를 총 13개의 퍼지 규칙으로 정했고 이를 Table 2에 나타내었다.

후건부 선형식의 각 파라미터를 구하기 위하여 퍼지 규칙을 신경회로망(Neural Network)으로 표현하고 Table 1의 각 데이터를 RC-GA(Real-Coded Genetic Algorithm : 실수코드 유전알고리즘)의 학습데이터로 이용, 그 결과를 얻어 Table 3에 나타내었다.

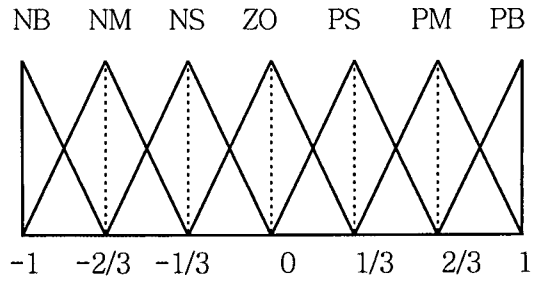


Fig. 2 Membership function of E , ΔE

Table 1 Learning data for RC-GA

		ΔE (출력편차의 변화분)										
		-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
E (출력편차)	-1.0	0	0	0	0	-0.873	-0.873	-0.87	0	0	0	0
	-0.8	0	0	0	0	-0.713	-0.711	-0.710	0	0	0	0
	-0.6	0	0	0	0	-0.557	-0.557	-0.558	0	0	0	0
	-0.4	0	0	0	0	-0.415	-0.425	-0.435	0	0	0	0
	-0.2	-0.872	-0.712	-0.552	-0.413	-0.226	-0.194	0	0.439	0.569	0.740	0.840
	0	-0.877	-0.708	-0.560	-0.428	-0.184	0	0.184	0.429	0.566	0.739	0.839
	0.2	-0.876	-0.704	-0.558	-0.443	0	0.185	0.216	0.419	0.563	0.738	0.838
	0.4	0	0	0	0	0.445	0.430	0.415	0	0	0	0
	0.6	0	0	0	0	0.557	0.559	0.560	0	0	0	0
	0.8	0	0	0	0	0.706	0.708	0.711	0	0	0	0
1.0	0	0	0	0	0.878	0.874	0.869	0	0	0	0	

Table 2 Fuzzy rule base of F-NFC

		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB				f_3			
	NM				f_7			
	NS				f_{11}			
	ZO	f_2	f_6	f_{10}	f_{13}	f_{12}	f_8	f_4
	PS				f_9			
	PM				f_5			
	PB				f_1			

* PB=Positive Big, PM=Positive Medium, PS=Positive Small, ZO=Zero, NB=Negative Big, NM=Negative Medium, NS=Negative Small

Table 3 Parameter values of linear equation f_i

R_i	$f_i = \beta_{i1}E + \beta_{i2}\Delta E + \beta_{i0}$		
	β_{i1}	β_{i2}	β_{i0}
1	0.397	-0.020	0.477
2	-0.009	0.472	-0.403
3	0.455	-0.001	-0.401
4	-0.005	0.500	0.339
5	0.359	0.036	0.365
6	0.039	0.353	-0.377
7	0.384	0.013	-0.358
8	-0.002	0.397	0.354
9	0.313	-0.104	0.285
10	-0.102	0.195	-0.327
11	0.146	-0.064	-0.345
12	-0.062	0.267	0.301
13	-0.337	-0.403	0.009

3. 하이브리드(Hybrid) F-NFC

공정 제어분야에서 가장 많은 부분을 차지하는 PID 제어의 장점은 1) 제어기 파라미터의 물리적 의미가 분명하고 2) 제어 시스템 설치 후 파라미터를 적절히 조절하는 것이 가능하다는 것이다. 그러나 단점으로는 1) 프로세스가 긴 지연시간(dead time)과 강한 비선형성을 내포하고, 2) 프로세스 자체 특성이 일정하지 않고, 3) 잦은 부하변동 및 프로세스 잡음이 존재하는 경우에 PID 제어기만으로는 만족한 결과를 얻을 수 없다.^{4),5)}

이에 반해, 퍼지제어기는 그 입출력관계가 일반적으로 비선형적이라는 사실과 선형제어기인 PID제어기에 비하여 큰 오차에 대한 처리능력이 뛰어나다는 것이다. 하지만, 오차가 매우 작을 때 오차에 둔감하고 특히 PID 제어기가 갖고 있는 적분동작기능

이 없다.^{6),7)}

따라서, 제어대상의 과도응답에서는 뉴로-퍼지 제어기의 장점을 최대한 이용하고 정상상태에서는 PID 제어기의 장점을 활용할 수 있게 하기 위해 이들을 융합한 하이브리드 F-NFS를 구성하여 그 제어기의 성능을 개선코자 하였다.

Fig. 3는 하이브리드 F-NFC의 블록선도이다.

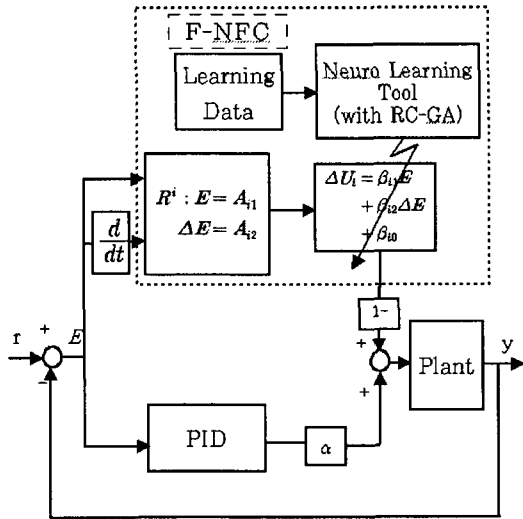


Fig. 3 Block diagram of hybrid F-NFS

Fig. 3과 같이 하이브리드 F-NFS는 PID 제어기와 F-NFC의 효과적인 합성을 위하여 하중계수(α)를 이용한다. 설정치와 공정 출력의 절대오차가 크면 α 가 작게 되어 퍼지제어기의 영향을 크게 하고 PID 제어기의 영향을 적게 하도록 α 의 멤버십 함수를 Fig. 4와 같이 삼각형 형태로 정의했다.

이와 같이 하중계수인 α 의 가중치로 부터 과도상태 부근에서는 F-NFC의 영향이, 정상상태 부근에서는 PID 제어기의 영향이 보다 강하게 나타나게 된다. 하중계수를 지난 합성 제어 출력은 식 (5)과 같다.

$$U = \alpha \cdot U_{PID} + (1 - \alpha) \cdot U_F \quad (5)$$

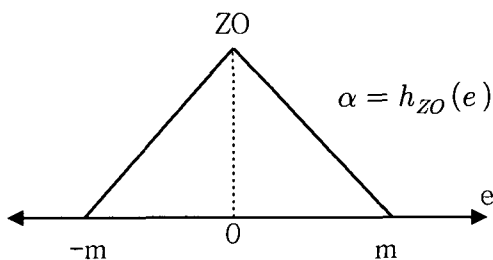


Fig. 4 Membership function of α

4. 시뮬레이션

본 연구에서 제어대상으로 한 대형 저속 디젤 기관은 그 계통을 크게 세 부분으로 나누어 모델링이 가능한데, 먼저 연료펌프의 래크를 조정하는 순간부터 증감된 연료가 분사될 때까지의 지연시간을 고려한 지연요소, 다음 실린더내로 분사된 연료가 착화 연소되어 기관축의 토크로 변화될 때까지의 연소계, 그리고 기관축의 토크에 의해 프로펠러가 회전하여 정상 회전속도에 도달할 때까지의 회전계로 나누어 대형 저속기관을 모델링 하였다.

먼저, 지연요소의 지연시간(Delay time : T_{dl})은 $e^{-T_{dl}s}$ 로 나타내는데 이를 1차 근사화하여 식 (6)로 한다.

$$G_{dl}(s) = e^{-T_{dl}s} \approx \frac{1}{1 + T_{dl}s} \quad (6)$$

연소계통은 1차계로 간주하고 게인을 K_c , 시정수를 T_c 라 하면 연소계의 전달함수 $G_c(s)$ 는 식 (7)로 된다.

$$G_c(s) = \frac{K_c}{1 + T_c s} \quad (7)$$

그리고 회전계도 1차계로 간주하고 게인을 K_r , 시정수를 T_r 라 하면 회전계의 전달함수 $G_r(s)$ 는 식 (8)로 된다.

$$G_r(s) = \frac{K_r}{1 + T_r s} \quad (8)$$

따라서, 연료 펌프의 래크 조정명령으로 부터 기관의 회전속도까지의 전체 전달함수는 연료 펌프 래크 조정명령을 $U(s)$, 회전속도 $\Omega_o(s)$ 라 하면 식(9)와 같이 된다.

$$\frac{\Omega_o(s)}{U(s)} = \frac{K_r}{1 + T_r s} \cdot \frac{K_c}{1 + T_c s} \cdot \frac{1}{1 + T_{dl}s} \quad (9)$$

본 연구에서는 선박용 대형 저속 기관으로 사용되고 있는 MAN B&W사의 4L80MC 저속 장행정 디젤기관을 제어대상으로 하였다. Table 4는 대상기관의 주요사양이며, 대상기관의 회전속도에 따른 각 파라미터는 Table 5와 같다.

Table 4 Specifications of the modeled engine

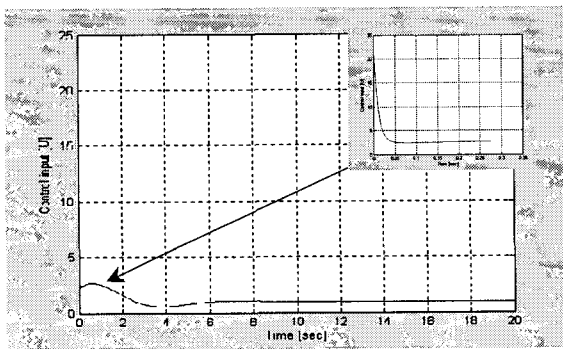
BORE × STROKE	800 × 2,592 [mm]
Pmean	18.4 [kgf/cm ²]
BHP (M.C.R)	15,880 [bhp] (at 83[rpm])
Moment of inertia	27,130.27 [kgf·m·s ²]
S.F.O.C	125 [g/bhp/h]

* M.C.R : Maximum continuous rating
 * S.F.O.C : Specific fuel oil consumption

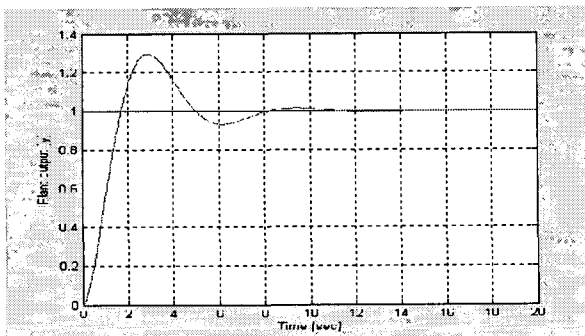
Table 5 Parameters of modeled engine

parameter \ [rpm]	50	60	70	80
T_{dl} [s]	0.6	0.5	0.43	0.38
T_c [s]	0.03	0.025	0.021	0.019
T_r [s]	2.859	2.381	2.041	1.785
K_c [bhp/mm]	58.19	81.87	103.23	122.47
K_r [rpm/bhp]	0.014	0.01	0.007	0.006

Fig. 5는 PID 제어기, Fig. 6는 F-NFC만으로 제어했을 때 각각의 제어입력과 시간응답이다. Fig. 7은 Hybrid F-NFC일 때의 응답이다.



(a) Control input U

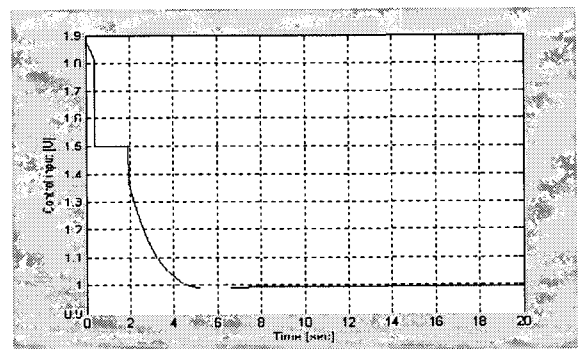


(b) Time response of plant output
 Fig. 5 Step response with PID controller

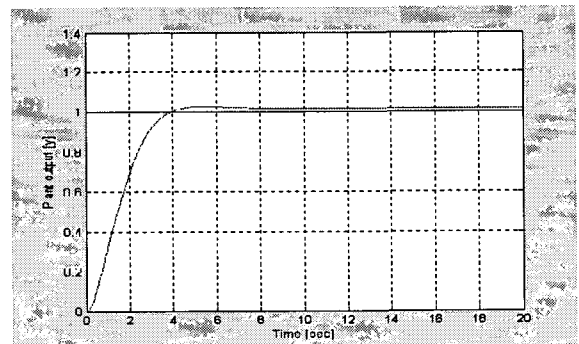
먼저, PID제어기의 경우를 보면 제어초기에 제어 입력이 매우 크게 나타나고, 응답 또한 큰 오버슈트를 보였다.

Fig. 6의 F-NFC만으로 제어를 하였을 경우에는 비교적 양호한 응답을 보이고 있지만 정상상태에서는 미소 편차(off-set)를 그대로 가지고 있음을 알 수 있었다.

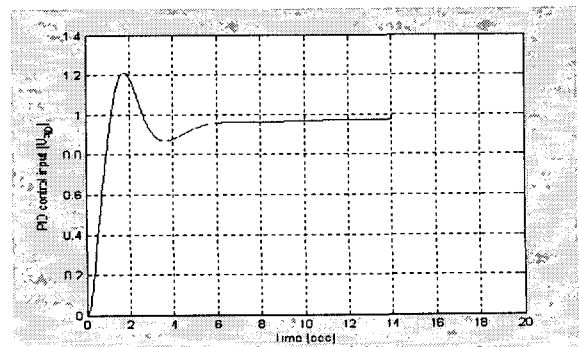
Fig. 7의 Hybrid F-NFC의 응답은 앞의 경우 응답에서 보여주었던 큰 오버슈트와 정상편차가 없이 바람직한 응답을 보였다.



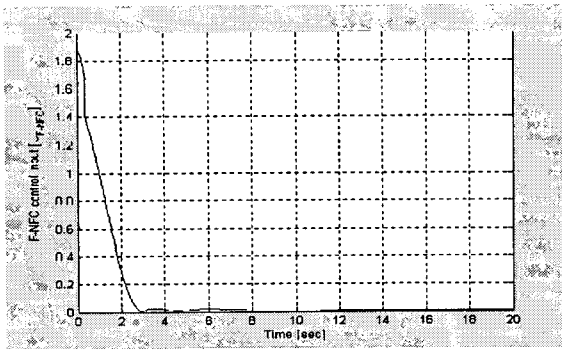
(a) Control input U



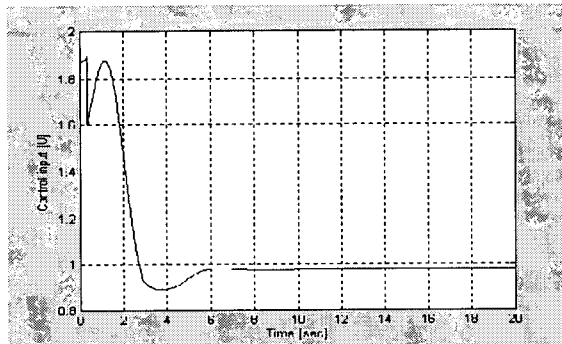
(b) Time response of plant output
 Fig. 6 Step response with F-NFC



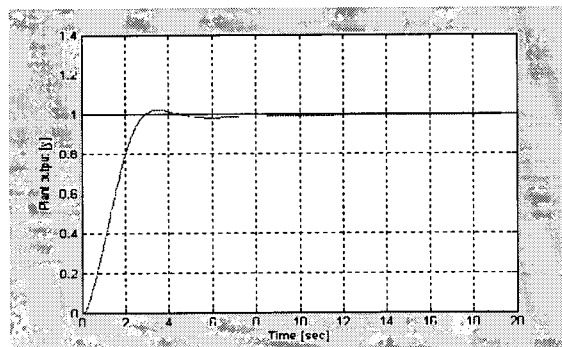
(a) PID control input U_{PID}



(b) F-NFC control input U_{F-NFC}



(c) Combined control input U



(d) Time response of plant output

Fig. 7 Step response with Hybrid F-NFC

5. 결 론

본 연구에서는 대형저속기관을 제어대상으로 하여 F-NFC와 PID제어기를 결합하여 서로의 단점을 상호 보완한 Hybrid F-NFC를 도입하여 속도 변동에 따른 기관 파라미터와 토크 변동에도 강인한 성능을 보임을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다.

속도 변동에 따른 기관 파라미터가 크게 변하는 데도 불구하고 특정 속도에서의 기관 파라미터에 대한 제어기에서도 양호한 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 특히 과도응답에서는 F-NFC의 장점을 최대한 이용하고 정상상태에서는 PID제어기의 장점

을 활용할 수 있게 하기 위해 이들을 융합한 Hybrid F-NFC의 우수한 성능을 검증할 수 있었다. 실제 시스템에 적용해 보는 것을 다음 과제로 남겨 둔다.

참고 문헌

1. 정병건, 1996, "선박용 디젤기관의 로바스트 속도 제어기 설계에 관한 연구", 부경대학교 박사학위 논문, pp. 1 ~ 16.
2. 김종화, 이원창, 강근택, 2003, "퍼지모델을 이용한 비선형시스템의 적응PID제어기", 퍼지및지능 시스템학회, Vol. 13, No. 1, pp. 85 ~ 90.
3. E. H Mamdani, 1974, "Applications of fuzzy algorithm for simple dynamic plant", Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, pp. 1585 ~ 1588.
4. 오성권, 2002, "컴퓨터지능", 내하출판사, pp. 70 ~ 105.
5. 오성권, 2002, "퍼지모델 및 제어시스템", 내하출판사, pp. 285 ~ 369.
6. 변증남, 1997, "퍼지논리 제어", 홍릉과학출판사, pp. 172 ~ 181.
7. 정진기, 오세영, 2002, "진화 연산의 성능 개선을 위한 하이브리드 방법", Vol.12 No.4, pp. 317 ~ 322.