

# RCGA와 퍼지기법을 이용한 선박용 가스터빈 엔진의 속도제어

소명옥<sup>+</sup>·이윤형<sup>++</sup>·진강규<sup>+++</sup>·정병건<sup>+</sup>·강인철<sup>++++</sup>

## Speed Control of Marine Gas Turbine Engines Using a RCGA and Fuzzy Technique

Myung-Ok So<sup>+</sup>, Yun-Hyung Lee<sup>++</sup>, Gang-Gyoo Jin<sup>+++</sup>, Byung-Gun Jung<sup>+</sup> and In-Chul Kang<sup>++++</sup>

**Abstract** : The system parameters of gas turbine engine tend to change remarkably in real operating condition. It means that operators have to consider environment and suitably control fuel flow. The conventional PID controller, however, can not guarantee good control performance in the aspect of system parameter change. This paper, therefore, proposes a scheme for integrating PID control and fuzzy technique to obtain the good performance of gas turbine engine speed control on the whole operating range. The effectiveness of the proposed fuzzy PID controller is verified through computer simulation.

**Key words** : Real-coded genetic algorithm(실수코딩 유전알고리즘), Gas turbine engine(가스터빈 엔진), PID controller(PID 제어기), Fuzzy model(퍼지모델)

### 기호설명

$K_D$  : Derivative gain  
 $K_I$  : Integral gain  
 $K_P$  : Proportional gain  
 $K_E$  : Gain of gas turbine engine  
 $R^i$  : ith fuzzy rules  
 $T_E$  : Gain of gas turbine engine  
 $u$  : Control input

### 1. 서론

가스터빈 엔진의 모델링은 크게 몇 가지 방법으로 연구되어지고 있지만 본 연구에서는 가스터빈 엔진을 선형시스템으로 가정하여 모델을 얻도록 한다<sup>[1],[2]</sup>.

그러면 가스터빈 엔진은 편미분을 포함한 수학적 모델로 표현하는 것이 가능하다. 이때 필요한 모델의 파라미터 값은 시운전 데이터를 통해 얻을 수 있다.

그러나 이러한 선형모델은 특정한 동작점 주변의 작은 변화에 대해서만 유효하기 때문에 모델로부터 얻을 수 있는 정보의 양이 제한된다.

이는 엔진에 어떠한 변화가 일어나면 편미분에 대해 새로운 값을 얻어야 하고, 이를 위해 분석이나 시험을 또 해야 한다는 것을 의미한다. 결국 이 방법을 사용하는 경우에는 일반적으로 하나 혹은 그 이상의 변수에 대하여 엔진의 동적 파라미터를 스케줄링 함으로써 선형모델이 동작점을 벗어나는 경우에도 타당한 모델이 되도록 고려해야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 가스터빈 엔진의 시운전 데이터를 통해 얻어진 선형시스템 모델을 동작점을 벗어나는 경우에도 타당성 있는 모델이 되도록 퍼지 모델링을 한다. 또한 얻어진 퍼지 모델에 대해 전체 운전 영역에서 안정한 속도제어를 행할 수 있는 제어기 설계에 관한 문제를 다룬다.

제안하는 제어기는 퍼지 PID 제어기로서 퍼지 모델에서 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic

+ 소명옥, 정병건(한국해양대학교 선박전자기계공학부), E-mail: smo@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4248

++ 이윤형, 안종갑(한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과)

+++ 진강규(한국해양대학교 IT 공학부)

++++ 강인철(한국해양수산연수원)

Algorithm : RCGA)을 통해 오프라인(Off-line)으로 동조된 지역 PID 제어기를 다시 피지결합하는 제어기이다. 이와 같은 방법으로 얻어진 피지 PID 제어기의 성능을 검토하기 위해 시물레이션을 실시하고, 비교 목적으로 지역 PID 제어기를 전체 운전 영역에 적용하여 제안한 방법의 유효성을 검토한다.

## 2. 선박용 가스터빈 엔진의 모델

### 2.1 모델링

가스터빈 엔진은 대단히 복잡한 장치로서 가스발생기, PLA 액추에이터, 미터링 밸브(Metering valve) 등으로 구성되어 있다<sup>[3],[14]</sup>. Fig. 1은 PLA 액추에이터의 실제모습을 보여준다.



Fig. 1 PLA actuator of a gas turbine engine

가스발생기는 가스터빈 엔진의 핵심장치로서 선형 시스템으로 가정하면 그 동력학적 모델은 다음 식으로 표시할 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$\frac{\Delta N(s)}{\Delta G_f(s)} = \frac{K_E}{T_E s + 1} \quad (1)$$

여기서,  $K_E$ 와  $T_E$ 는 각각 가스터빈 엔진의 이득과 시정수이며, 시운전 데이터를 참고하여 계산된 동작점에 따른 이득과 시정수의 일례는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Gain and Time constant

Operating point	Gain	Time constant
7000 [rpm]	4.57	3.76
8000 [rpm]	1.82	1.93
9000 [rpm]	0.98	0.93

가스터빈 엔진에 필요한 연료는 PLA 액추에이터와 미터링 밸브에 의해 조정되며, 이 둘을 합하여 통상적으로 액추에이터 시스템이라고 한다. PLA 액추에이터와 미터링 밸브의 동역학적 모델은 문헌의 모델과 같은 것을 사용하기로 한다<sup>[1]</sup>. 따라서 가스터빈 엔진 전체 시스템은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

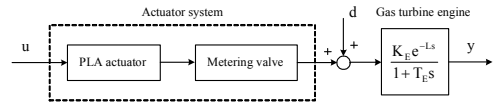


Fig.2 Gas turbine engine with actuator system

Fig. 2에서  $u$ 는 제어입력이며, 포화 입력 값은 23[V]이다. 가스터빈 엔진의 시간지연은 연소가스가 가스발생기 터빈에 도달하는데 걸리는 시간으로서 Table 2는 일례를 보여준다. 외란은 가스터빈 엔진에 공급되는 연료유량의 변화로 고려하였다.

Table 2 Time delays

Gas turbine engine speed	7000 [rpm]	8000 [rpm]	9000 [rpm]
Time delay	0.50	0.35	0.17

### 2.2 상태공간 표현

Fig. 2의 시스템을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t-L) \quad (2)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$$

여기서  $y$ 는 가스터빈 엔진의 회전수이고, 행렬  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ 와  $\mathbf{C}$ 는 적절한 차원을 갖는다.

## 3. 가스터빈 엔진의 피지 모델링

서론에서 언급하였듯이 가스터빈 엔진은 동작점의 변화에 따라 시스템 파라미터가 크게 변동하기 때문에 전 회전수 영역에서 동특성을 나타내는 모델이 필요하다. 이를 위해서 동작점 별로 얻은 선형모델을 피지결합하는 방법을 사용한다.

퍼지모델의 입력신호는 가스터빈 엔진의 회전수  $y$  이고, 퍼지분할에 사용된 퍼지집합은  $F^1, F^2, F^3$  이며 이들은 각각 저속, 중속, 고속을 의미한다. 이를 정의하기 위해서 (3)과 같은 가우스(Gauss)함수를 사용하였으며, 그 모양은 Fig. 3과 같다.

$$F^1(y) = \begin{cases} 1 & , y < m_1 \\ \exp\left(-\frac{(y-m_1)^2}{2(\sigma_1)^2}\right) & , y \geq m_1 \end{cases} \quad (3a)$$

$$F^2(y) = \exp\left(-\frac{(y-m_2)^2}{2(\sigma_2)^2}\right) \quad (3b)$$

$$F^3(y) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(y-m_3)^2}{2(\sigma_3)^2}\right) & , y \leq m_3 \\ 1 & , y > m_3 \end{cases} \quad (3c)$$

여기서  $m_i$ 와  $\sigma_i$  ( $i=[1,3]$ )는 각 소속함수의 평균과 표준편차를 의미한다.

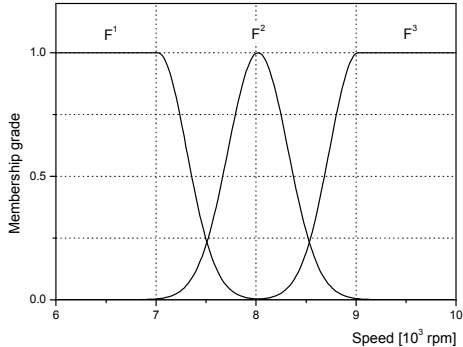


Fig. 3 Fuzzy partitions of the input space

따라서 퍼지결합한 퍼지모델은 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 Takagi-Sugeno 모델 형태로서 후건부는 제어대상의 국부적 입출력 관계를 나타낸다.

$$R^i: \text{If } y \text{ is } F^i, \text{ then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}^i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^i u(t-L^i) \quad (4)$$

$i \in [1,3]$

여기서  $R^i$ 와  $F^i$ 는 각각  $i$ 번째 퍼지규칙과 입력공간의 분할을 의미하며,  $\mathbf{A}^i$ 와  $\mathbf{B}^i$ 는 각 동작점에서의

시스템 행렬을,  $L^i$ 는 시간지연을 의미한다. 퍼지모델의 출력은 (5)와 같이 추론된다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho^i [\mathbf{A}^i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^i u(t-L^i)]}{\sum_{i=1}^3 \rho^i} \quad (5)$$

여기서  $\rho^i = F^i(y)$ 는  $i$ 번째 규칙의 기여도를 나타내며,  $F^i(y)$ 는  $y$ 에 대한 퍼지집합의 소속정도이고,  $\sum_{i=1}^3 \rho^i$ 는 항상 양수이다.

Fig. 4는 지금까지 설명한 가스터빈 엔진의 퍼지모델링을 그림으로 나타낸 것이다.

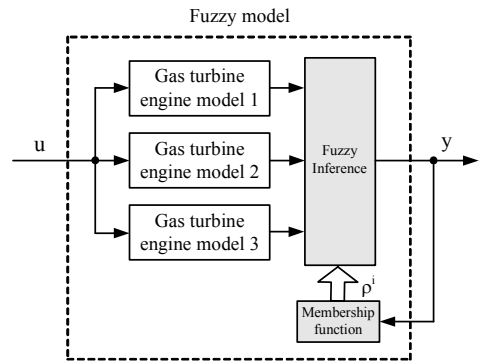


Fig. 4 Fuzzy model of a gas turbine engine

## 4. 퍼지 PID 제어기 설계

### 4.1 지역 PID 제어기 설계

최근에 와서 가스터빈 엔진의 제어에도 시스템의 복잡화와 다변수 제어의 필요에 의해 현대제어 개념이 고려된 새로운 제어 방법이 사용되기 시작되었다. 이는 기타 전자·제어분야에도 나타나고 있는 현상으로서 중앙연산장치(CPU)의 급속한 발달로 가능하게 되었다.

가스터빈 엔진도 이러한 현대제어 이론과 고성능 컴퓨터를 기반으로 하는 FADEC(Full Authority Digital Electrical Controller)이란 개념이 정착되기 이전까지는 통상적으로 PID 제어를 사용하였다<sup>[5]</sup>. PID 제어기는 현재까지도 산업현장과 선박 등

에서 가장 많이 사용되는 제어기로서 그 성능은 이미 검증된 제어기이다. 따라서 본 연구에서도 PID 제어기를 사용하기로 하며, 퍼지 PID 제어기 설계에 필요한 지역 PID 제어기는 유전알고리즘 사용하여 동조한다. 유전알고리즘은 염색체(Chromosome)의 유전자(Gene)가 최적화 문제의 해 벡터(Solution vector)와 일대일로 대응되는 실수코딩 유전알고리즘(Real coded genetic algorithm : RCGA)을 사용한다<sup>[6]</sup>. Fig. 5는 유전알고리즘의 원리를 보여주고 있다.

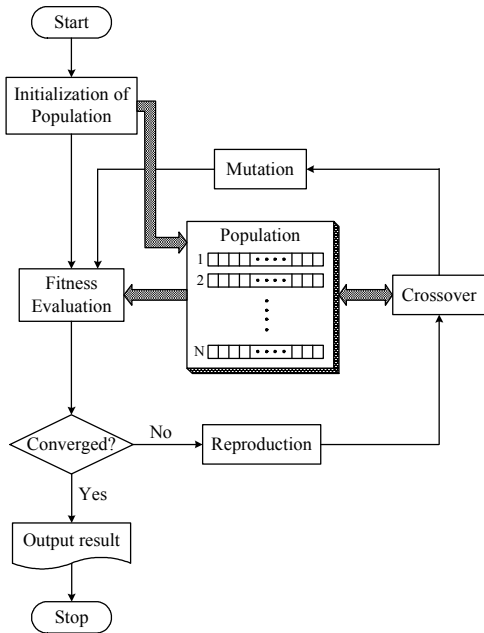


Fig. 5 Basic structure of GAs

Fig. 6은 회전수 설정치에 따라 지역 PID 제어기 동조과정을 나타낸다. 이때 개체의 적합도 평가를 위한 목적함수는 오차의 절대 크기를 취하여 양이나 음의 오차에 동일하게 별점을 부여하는 효과를 주는 IAE(Integral of the absolute error)를 사용하였으며, RCGA는 이 목적함수가 최소가 되도록 PID 제어기 파라미터를 탐색하게 된다.

$$J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (6)$$

(6)에서  $t_f$ 는 이 시간 이후의 적분 값은 무시해도 좋을 정도의 충분한 시간이 되도록 한다.

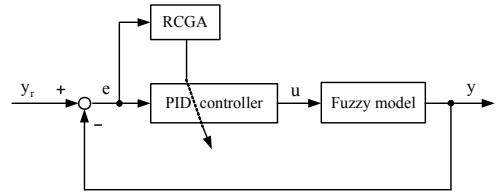


Fig. 6 Tuning of local PID controller using a RCGA

## 4.2 퍼지 PID 제어기 설계

퍼지 PID 제어기를 설계하기 위해서 먼저 가스터빈 엔진의 전체 회전수 영역의 동특성을 나타내는 퍼지 모델을 구하고, 이를 기반으로 RCGA를 사용해 지역 PID 제어기를 동조하였다.

이제 가스터빈 엔진의 회전수가 변화함에 따라 지역 PID 제어기 계수가 변경되도록 퍼지기법을 이용하여 게인 스케줄링(Gain scheduling)을 행한다.

따라서 이들도 “If-then” 규칙으로 결합할 수 있고, Takagi-Sugeno 모델 형태의 퍼지 제어기를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$R^i$ : If  $y$  is  $F^i$ , then  $u^i(t) =$

$$K_P^i e(t) + K_I^i \int e(t) dt + K_D^i \frac{de(t)}{dt} \quad i = [1, 3] \quad (7)$$

여기서  $u^i(t)$ 와  $K_P^i$ ,  $K_I^i$ ,  $K_D^i$ 는 각각  $i$ 번째 규칙에 대한 해당 제어기의 출력과 비례이득, 적분이득, 미분이득이다. 입력공간의 분할은 퍼지 모델링에 사용된 것과 동일한 소속함수를 사용하였다.

따라서 퍼지 PID 제어기의 출력은 다음과 같이 추론된다.

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho^i u^i(t)}{\sum_{i=1}^3 \rho^i} \quad (8)$$

여기서  $\rho^i$ 는  $i$ 번째 규칙의 기여도이다.

Fig. 7은 퍼지 PID 제어 시스템을 나타낸 것으로 지역 PID 제어기는 오차를 입력받아 각각의 제어입력을 내보내고, 이를 퍼지 추론하여 최종적인 제어입력을 얻게 된다.

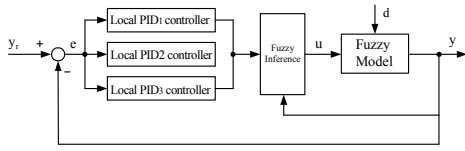


Fig. 7 Schematic diagram of the fuzzy PID control system

## 5. 시뮬레이션 및 검토

### 5.1 지역 PID 제어기 동조

퍼지 PID 제어기를 구성하기 위해서 사용되는 지역 PID 제어기는 RCGA로 최적동조하며, 동조과정은 Fig. 8에서 Fig. 10에 나타낸다. 동조 과정에 사용된 RCGA의 매개변수는 집단의 크기 30, 재생산 계수 1.8, 교배 확률 0.9, 돌연변이 확률 0.1이며, Table 3은 동조된 결과를 나타낸다.

Table 3 PID parameters on fuzzy model

speed parameter \	7000[rpm]	8000[rpm]	9000[rpm]
$K_P$	3.0418	3.0946	3.7924
$K_I$	1.3706	1.9826	2.3356
$K_D$	0.5461	0.3220	0.0002

시뮬레이션 결과 RCGA는 40세대 전후에서 최적의 PID 제어기 계수를 찾아내고 있다.

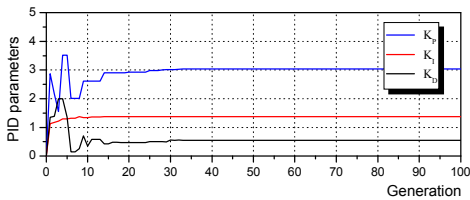


Fig. 8 Local PID1 controller parameter tuning using a RCGA

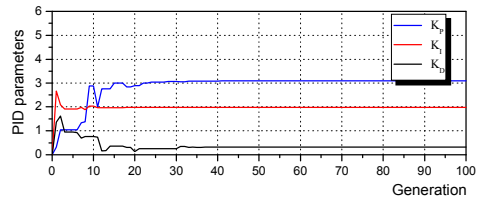


Fig. 9 Local PID2 controller parameter tuning using a RCGA

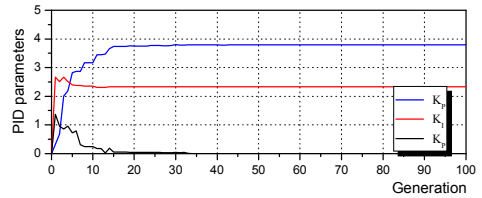


Fig. 10 Local PID3 controller parameter tuning using a RCGA

### 5.2 응답 실험

제안한 제어기의 성능을 검토하기 위해 퍼지모델에서 전체 운전 구간에 대해 회전수 설정치를 계단상으로 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 실시한다. Fig. 11은 퍼지모델에 대한 퍼지 PID 제어기의 추종 성능을 나타낸다. 계단상의 추종치 변경에 대해 제안한 제어기는 저속에서 약간의 오버슈트만 있을 뿐 전체 운전 구간에 대해 만족할 만한 응답 성능을 보이고 있다.

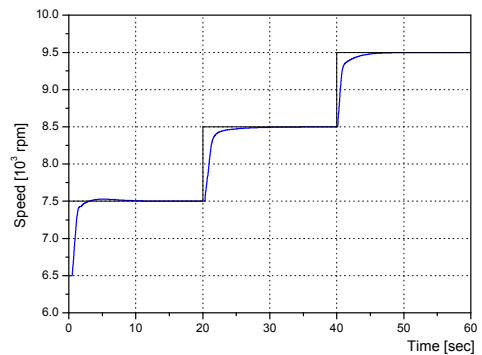


Fig. 11 Tracking performance of fuzzy PID controller

Fig. 12에서 Fig. 14는 비교 목적으로 퍼지 모델에 대해 지역 PID 제어기를 전체 운전 구간에 적용시킨 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 12는 저속에서 동조된 지역 PID 제어기로서 중속 운전 구간에서 30초가 넘는 상당히 늦은 정상상태 도달시간을 가진다. 중속에서 동조된 지역 PID 제어기를 나타내는 Fig. 13도 저속 운전 구간에서는 오버슈트, 고속 운전 구간에서는 늦은 정상상태 도달시간을 보인다. 고속에서 동조된 지역 PID 제어기 역시 저속과 중속 운전 구간에서 커다란 오버슈트가 발생하고 있음을 Fig. 14를 통해 확인할 수 있다. 특히 저속과 중속 운전 구간에서는 과도한 오버슈트가 발생하고 있다.

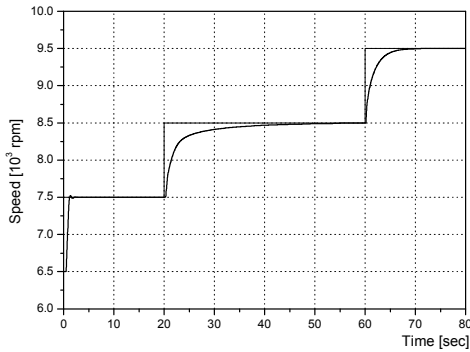


Fig. 12 Step response of local PID1 controller

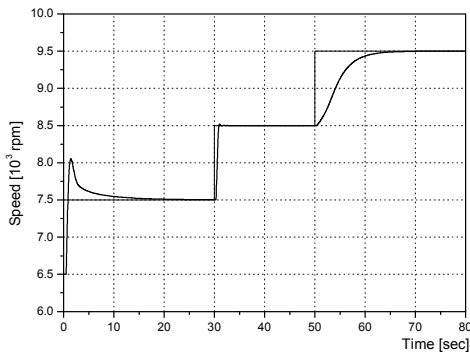


Fig. 13 Step response of local PID2 controller

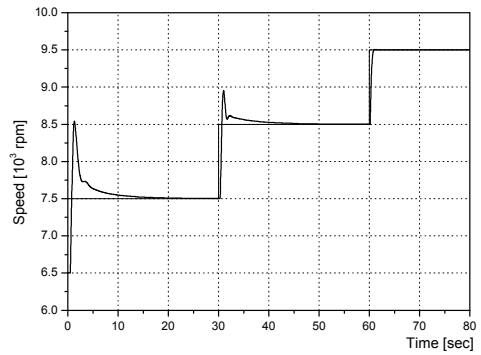


Fig. 14 Step response of local PID3 controller

마지막으로 가스터빈 엔진의 부하 변동에 대한 성능을 살펴보기로 한다. 부하 변동을 실험하기 위해 가스터빈 엔진이 정격 최대 출력인 9500 [rpm]으로 운전되고 있을 때 연료량의 2[%]에 해당하는 외란을 계단상으로 가하였다. Fig. 15는 퍼지 PID 제어기의 외란에 대한 시뮬레이션 결과로서, 외란에 대해서도 강인함을 알 수 있다.

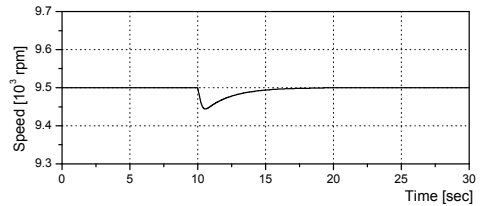


Fig. 15 Response of fuzzy PID controller to a step type disturbance

## 5. 결 론

가스터빈 엔진의 회전수 변화에 따른 시스템 파라미터 변동 때문에 하나의 고정된 파라미터를 가지는 지역 PID 제어기는 전 구간에서 좋은 응답특성을 가질 수 없다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 파라미터 변동에 적절히 대처할 수 있는 제어기를 설계하는 문제를 다루었다. 이를 위해 몇 개의 동작점에서 얻어진 선형 모델을 통해 퍼지모델을 구하고, 설정치 변화에 따른 지역 PID 제어기를 RCGA를 사용하여 동조하였

다. 그리고 이를 다시 피지결합하여 전체 운전 영역에서 만족할 만한 응답 특성을 가지는 피지 PID 제어를 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 제어기는 전 회전수 영역에서 좋은 응답 특성을 나타냄을 확인할 수 있었으며, 외란에 대해서도 안정된 응답을 나타내고 있다.

## 참고문헌

- [1] 이운형, 소명욱, 정병건, 진강규, 진선호, “RCGA에 기초한 선박 가스터빈 엔진용 PID 제어기의 동조”, 한국박용기관학회지, Vol. 29, No. 1, 2005
- [2] A. J. Fawke, and H. I. H. Saravanamutoo, “Digital Computer Methods for Prediction of Gas Turbine Response”, SAE-710550, 1971.
- [3] 홍용식, *가스터빈 엔진*, 청문각, 2001.
- [4] 홍용식, *가스터빈의 기초이론*, 청문각, 2002.
- [5] 손영창, 김승우, 지원호, “터보젯 엔진을 위한 강인성 궤환 제어기의 설계 : 시간영역 해석”, 한국추진공학회지, Vol. 2, No. 2.
- [6] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2000.