



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

선박용 가스터빈 기관의 속도제어를 위한 비선형 PI 제어기 설계

Design of Nonlinear PI Controller for Speed Control of
Marine Gas Turbine Engine



2017 년 8 월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

이유수

본 논문을 이유수의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2017년 06월 18일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
초 록	vii
Abstract	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 동향	1
1.2 연구 내용 및 구성	3
제 2 장 가스터빈 기관의 속도제어시스템 모델링	5
2.1 가스터빈 기관의 속도제어시스템	6
2.1.1 속도제어시스템 설계시 고려 사항	6
2.1.2 속도제어시스템 구성 및 작동원리	6
2.2 가스터빈 기관의 속도제어를 위한 선형 모델링	7
2.2.1 모델링 기법	8
2.2.2 가스발생기	9
2.2.3 PLA 액추에이터	11
2.2.4 미터링 밸브	16
2.2.5 속도제어시스템의 상태공간 표현	18
제 3 장 파라미터 최적화를 위한 유전알고리즘	21

3.1 유전알고리즘	21
3.1.1 유전알고리즘의 기본구조	22
3.1.2 실수코딩 유전알고리즘	23
3.2 초기집단의 생성	23
3.3 기본 유전 연산자	24
3.3.1 재생산	25
3.3.2 교배	25
3.3.3 돌연변이	26
3.4 적합도 평가	27
3.5 적합도의 스케일링	28
3.6 엘리트 전략	28
3.7 종료조건	29
3.8 제약조건	29
제 4 장 RCGA 기반 비선형 PI 제어기 설계	32
4.1 비선형 PI 제어기의 이득 특성	32
4.1.1 비선형 비례 이득	33
4.1.2 비선형 적분 이득	35
4.2 속도 제어용 비선형 PI 제어기 설계시 고려 사항	36
4.3 제약조건을 고려하지 않은 비선형 PI 제어기의 최적 동조	37
4.4 제약조건을 고려한 비선형 PI 제어기의 최적 동조	39
제 5 장 시뮬레이션 및 검토	42
5.1 제약조건을 고려하지 않은 경우	42
5.1.1 모델 MD1에서 성능비교	42

5.1.2 모델 MD2에서 성능비교	45
5.1.3 모델 MD3에서 성능비교	47
5.2 제약조건을 고려한 경우	49
제 6 장 결론	54
참고문헌	55
감사의 글	58



List of Tables

Table 2.1 System parameters of a marine gas turbine engine	10
Table 2.2 Gain, time constant and time delay in models of gas turbine engine	11
Table 2.3 Parameters of an actuator system	15
Table 4.1 NPI parameters on gas turbine engine models	38
Table 4.2 Concerned constraints NPI parameters on gas turbine engine models	40
Table 5.1 Parameter values of controllers for gas turbine engine MD1	42
Table 5.2 Performance comparison of controllers for MD1	43
Table 5.3 Parameter values of controllers for gas turbine engine MD2	45
Table 5.4 Performance comparison of controllers for MD2	45
Table 5.5 Parameter values of controllers for gas turbine engine MD3	47
Table 5.6 Performance comparison of controllers for MD3	47
Table 5.7 Performance comparison of concerned constraints on gas turbine engine models	49

List of Figures

Fig. 1.1 GE 9HA.01 gas turbine engine	1
Fig. 2.1 Structure of marine gas turbine engine LM2500	5
Fig. 2.2 Speed control system of gas turbine engine	7
Fig. 2.3 Equivalent circuit of a DC actuator motor	12
Fig. 2.4 Block diagram of a PLA actuator system	16
Fig. 2.5 Principle of a fuel metering valve	16
Fig. 2.6 Block diagram of gas turbine engine system	17
Fig. 2.7 Block diagram of speed control system for gas turbine engine	20
Fig. 3.1 Operation of a genetic algorithm	22
Fig. 3.2 Modified simple crossover	26
Fig. 3.3 Dynamic mutation	26
Fig. 4.1 NPI control system	33
Fig. 4.2 $f_p(e)$ shapes to changes of a_p and c_p	34
Fig. 4.3 $f_i(e)$ shapes to changes of c_i	36
Fig. 4.4 Optimal tuning of NPI controller using a RCGA	37
Fig. 4.5 Tuning process for NPI parameters on gas turbine engine MD1	39
Fig. 4.6 Optimal tuning of concerned constraints NPI controller using a RCGA	40
Fig. 4.7 Tuning process for concerned constraints NPI parameters on gas turbine engine MD1	40
Fig. 5.1 Step responses, control inputs and gains of controllers for MD1	44

Fig. 5.2 Step responses, control inputs and gains of controllers for MD2	46
Fig. 5.3 Step responses, control inputs and gains of controllers for MD3	48
Fig. 5.4 Step response, control input and gains of concerned constraints NPI controller for MD1	50
Fig. 5.5 Step response, control input and gains of concerned constraints NPI controller for MD2	51
Fig. 5.6 Step response, control input and gains of concerned constraints NPI controller for MD3	52



선박용 가스터빈 기관의 속도제어를 위한

비선형 PI 제어기 설계

이 유 수

한국해양대학교

기관공학과

초 록

가스터빈 기관은 용적당 출력이 크고 신속한 시동이 가능하며 운전이 편리하여 열병합 발전플랜트와 우주항공분야에 많이 이용되고 있다. 해상용으로는 해군 함정에 추진 기관으로 사용되고 있다. 가스터빈 기관의 연구·개발에서 고려할 사항으로는 로터(rotor) 시스템의 극관성모멘트, 터빈 블레이드의 최고온도 그리고 압축기의 서지(surge)와 회전 실속(rotating stall), 폐색(choke) 등을 주요한 요소로 고려해야 한다. 특히 가스터빈 기관의 성능은 속도가 서지 경계선에 얼마나 근접할 수 있는지에 따라 결정된다. 즉, 서지가 발생하면 가스터빈 기관 내부에 심각한 동적 상호 간섭으로 인해 성능과 기관 자체에 악영향을 미치게 된다. 따라서 가스터빈 기관은 서지가 발생하지 않도록 속도를 제어하는 것이 필수적이다. 가스터빈 기관은 가스발생기와 출력 터빈으로 구성되어 있고, 가스발생기는 압축기, 연소기, 고압 터빈으로 이루어져 있다.

본 논문에서는 출력 터빈은 고려하지 않고, 가스터빈 기관의 핵심요소인 가스발생기만을 대상으로 하여 속도를 제어한다. 이를 위해 가스발생기의 선형 모델을 동작점에 따른 시운전 자료를 바탕으로 몇 개의 서브 모델을 얻는다. 다음으로 각 서브 모델에 대해 비선형 PI 제어기를 설계한다. 비선형 PI 제어기는 가스발생기의 속도 오차에 따라 제어기의 이득을 비선형적으로 변화시킨다. 이때 비선형 함수를 사용하고 내부의 파라미터들은 RCGA로 ITAE가 최소가 되도록 동조한다.

또한, 서지 발생을 방지하기 위해 오버슈트가 발생하지 않도록 하는 설계사양을 고려한다. 이처럼 제약조건 문제를 해결하기 위해 평가함수에 벌점함수를 추가하여

RCGA로 비선형 PI 제어기의 파라미터를 동조한다.

제안한 비선형 PI 제어기의 유효성을 확인하기 위해 세 가지 서브 모델에 Chen의 적응제어기, Z-N의 PID 제어기, 제안한 비선형 PI 제어기를 적용하여 계단상의 목표값 변화에 따른 시뮬레이션을 하여 응답성능을 비교한다. 또한, 설계사양을 고려한 비선형 PI 제어기도 계단상의 목표값에 따른 시뮬레이션을 통해 제약조건을 만족하는지 확인하여 그 유효성을 검증한다.

키워드: 가스터빈 기관; 비선형 PI 제어기; 실수코딩 유전알고리즘(RCGA); 서지



Design of Nonlinear PI Controller for Speed Control of Marine Gas Turbine Engine

Yu-soo Lee

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

The gas turbine engine has widely been used in various industrial fields, including cogeneration power plant and aerospace as it features a high output per unit volume, quick activation, and easy operation. It is also used as a propulsion engine for naval vessels. The key factors to be taken into consideration in research and development of gas turbine engine include the polar inertia moment of the rotor system, maximum temperature of the turbine blade, and the surge, rotating stall, and the choke of the compressor. In particular, the performance of a gas turbine engine depends on how close its speed can get to the surge boundary. That is, the occurrence of a surge makes a negative effect on the performance and the engine itself due to a serious dynamic interference inside the gas turbine engine. Therefore, it is essential to control the speed of a gas turbine engine to prevent surge from occurring. The gas turbine engine is composed of a gas generator, output turbine while the gas generator is comprised of a compressor, combustor, and a high pressure turbine.

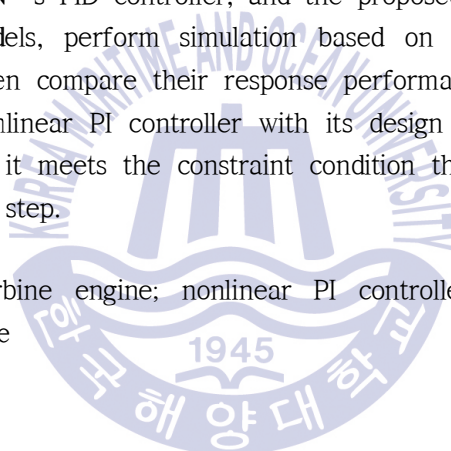
Against this backdrop, this study intends to control the speed for the gas generator only, which is a key element of a gas turbine engine with no consideration of the

output turbine. For this, several sub models should be obtained based on the commissioning data on the operating point in linear model of gas generator. Next, design a nonlinear PI controller for each sub-model. The nonlinear PI controller changes the gain of the controller in line with the rate error of the gas generator in a nonlinear manner. Make sure to use a nonlinear function and tune internal parameters in a way of minimizing ITAE with RCGA.

In addition, consider design specifications to prevent overshoot from occurring in order to ensure no occurrence of surge. And then, tune the parameters of nonlinear PI controller with RCGA by adding a penalty function to the evaluation function to resolve the constraint condition issue.

To verify the effectiveness of the proposed nonlinear PI controller, apply Chen's adaptive controller, Z-N's PID controller, and the proposed nonlinear PI controller to the three sub models, perform simulation based on the variation of target values on step and then compare their response performances. In addition, verify the validity of the nonlinear PI controller with its design specification taken into account to find out if it meets the constraint condition through simulations based on the target value on step.

KEY WORDS: gas turbine engine; nonlinear PI controller; Real-Coded Genetic Algorithm (RCGA); surge



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동향

현대적인 개념의 가스터빈 기관은 1791년 영국인 John Barber가 특허를 받은 것이 시작이며 1936년 미국의 Sun oil사의 정유소에서 석유정제에 이용되는 접촉분해장치(catalytic cracker)에 가스터빈 기관을 사용하면서 현재와 같은 원리와 구조가 실용화되었다. 초기의 발전용 가스터빈 기관의 효율은 28%~34% 정도로 매우 낮았으나 최근 2016년 6월에 건설된 프랑스 북부 부상(Bouchain) 복합화력발전소에서 LNG를 연소시켜 전력을 생산하는 GE사의 9HA.01 가스터빈 기관은 발전 효율이 62.22%로 그리고 향후 이와 같은 초 고효율 가스터빈 기관의 연구·개발은 계속해서 이루어 질 것으로 예상된다[1]-[2]. Fig. 1.1 은 부상 복합화력발전소에서 운용하는 GE사의 9HA.01 가스터빈 기관의 단면 사진을 나타낸 것이다.

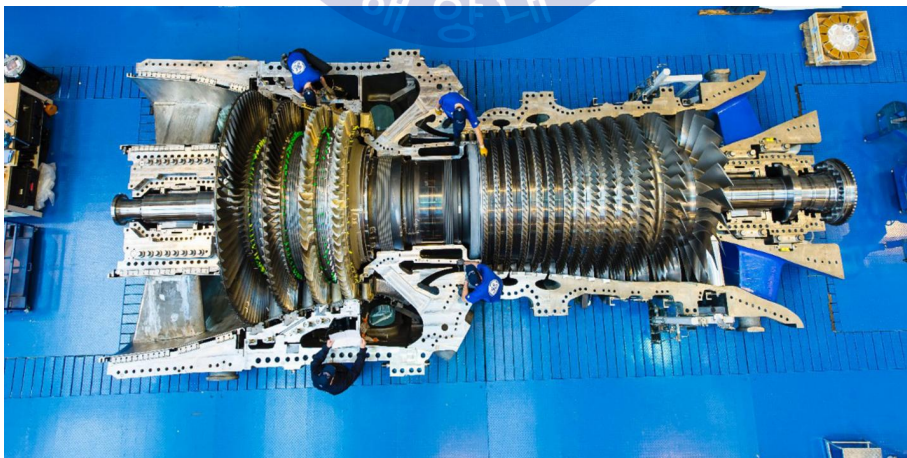


Fig. 1.1 GE 9HA.01 gas turbine engine

이처럼 가스터빈 기관은 용적당 출력이 크고 신속한 시동이 가능하며 운전이 편리한 장점으로 인해 열병합 발전 플랜트와 우주·항공분야에서 연구 개발이 많이 이루어 졌다. 한편, 해상 추진용으로는 주로 해군 함정에 이용되고 있으며, 상선에서는 저질 중유를 사용하면서 열효율이 50% 이상인 디젤기관이 개발되어 있기 때문에 가스터빈 기관을 거의 사용하지 않는다[1].

그러나 최근 가스터빈 기관 제작사들은 대형 크루즈선과 고속 페리들을 위해 소형이면서 고효율을 달성하고, 유해 배기가스 배출 제한 규정 등을 만족하는 가스터빈 기관을 생산하여 공급하고 있다.

최근 IMO(International Maritime Organization)의 주도로 EEDI(Energy Efficiency Design Index), 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 배출 제한 등의 환경규제를 충족하는 LNG와 LPG를 연료로 사용하는 추진 기관이 급부상하고 있다[3]. 이에 따른 연구로 GE사와 현대중공업이 공동으로 개발하는 COGES(Combined Gas turbine, Electric & Steam)시스템을 예로 들 수 있다. 이는 가스터빈과 증기터빈을 조합한 것으로 저부하에서 감소하는 가스터빈 기관의 효율을 버려지는 배기가스 폐열로 증기터빈을 구동하여 떨어진 효율을 회복시키는 복합발전 전기추진 시스템이다. 이들 제조사는 COGES 시스템을 174,000m³ 규모의 LNG운반선에 적용하고, 영국 로이드 선급 협회로부터 기본승인(AIP)을 받아 가스터빈 기관의 해상 추진에 대한 적용연구를 진행하고 있다. 또한, 기존의 기관 무게를 최대 60%까지 줄여 선박의 화물적재공간 증대 및 각종 환경규제에도 수용이 가능하여 차후 상선의 추진 시스템으로 확대 적용될 것으로 보인다[4].

가스터빈 기관의 연구·개발에서 고려할 사항으로는 로터(rotor) 시스템의 극관성모멘트, 터빈 블레이드의 최고온도 그리고 압축기의 서지(surge)와 회전 실속(rotating stall), 폐색(choke) 등이 있다. 특히, 속도가 서지 경계선에 얼마나 근접할 수 있는지에 따라 가스터빈 기관의 성능이 결정된다. 만약 서지가 발생하면 가스터빈 기관 내부에 심각한 동적 상호 간섭으로 인해 성능과 기관 자체에 악영향을 주므로 서지가 발생하지 않도록 가스터빈 기관의 속도를 제어하는 것이 필수적이다[5].

가스터빈 기관에 대한 최신 국내 연구는 주로 열전달 및 시스템 성능 해석 관련에 대해 이루어지고 있다[6]. 열전달 분야에서는 효율을 측정하는 기법이나 열전달 성능의 향상을 위한 형상 제안 등이 있고, 성능해석 분야에서는 실제 터빈 조건을 모사하는 평가시스템 구축과 사이클 개선을 위한 연구들이 주로 발표되고 있다.

국내에서는 선박용 가스터빈 기관에 대한 연구는 미미하였으나, 최근 환경규제로 인

한 그린십(green ship)의 대두로 인해 박 등[7]은 SOFC/GT 시스템 특성에 관한 연구를 통해 고체산화물형 연료전지와 가스터빈을 결합한 선박 부하용 전원 시스템을 연구하였고 더욱 많은 선박에서의 가스터빈 기관 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

그러나 가스터빈 기관의 제어에 관한 연구는 복합 기술이 요구되는 분야로 개발과 활용에 많은 투자와 기간이 소요되며 선진국에서 독점하고 있어 기술도입이 어려운 실정이다. 또한, 시뮬레이션을 위한 수학적 모델 외에는 대부분 사항이 공개되지 않아 연구·개발에 어려움이 많다.

국외에서의 가스터빈 기관 제어에 관한 연구로는 Mohamed 등[8]이 열효율 및 부하 주파수 제어 성능을 향상하기 위해 모델 예측 제어(MPC : Model Prediction Control)를 수행하기 위한 새로운 전략을 제시하였으며, Mansourabad 등[9]은 가스터빈 기관의 속도제어를 위해 하이브리드 PSO를 기반으로 한 Fuzzy PID 제어를 설계하였다.

국내에서는 김 등[10]이 다중 엔진 모델을 이용한 센서 고장허용 가스터빈 기관 제어를 설계하였고, 전 등[11]은 2축 터보팬 엔진의 축 회전수를 내장된 PI 제어기로 제어하며 고압축 회전속도와 저압축 회전속도를 모두 제어하는 2중 루프 조절기(double loop regulation)를 개발하였으며, 김 등[12]은 가스터빈 기관 제어기의 하드웨어 및 미들웨어를 개발하였다.

이와 같은 연구들은 주로 발전용이나 항공용 가스터빈에 국한되어 있으므로 여전히 선박용 가스터빈 기관의 제어에 관한 연구는 부족한 실정이다.

1.2 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 가스터빈 기관의 속도가 서지 경계선에 교차하지 않고 정밀한 속도제어가 가능하도록 기존의 선형 PI 제어기에 비선형함수를 사용하여 과도상태에서 보다 유연한 응답성능을 갖는 비선형 PI 제어를 설계한다. 그리고 제어기의 설계사양을 만족하면서 향상된 동적 특성을 갖도록 하는 제어기 이득은 실수코딩 유전 알고리즘(RCGA : Real Coded Genetic Algorithm)으로 탐색한다.

이와 같은 내용으로 본 논문은 총 6장으로 구성되어 있으며, 각 장에서 다루고 있는 내용은 다음과 같다.

제2장에서는 선박용 가스터빈 기관의 속도 제어 시스템에 관해 설명하고 수학적 모

델링을 수행하여 상태방정식으로 나타낸다. 제3장에서는 최적화 문제를 해결하기 위한 최적화 기법인 RCGA와 제어기 설계사양을 제약조건으로 취급하는 방법에 대해서 살펴본다. 제4장에서는 일반적인 비선형 PI 제어기에 대해서 알아보고 평가함수를 통해 제약조건을 고려하지 않은 비선형 PI 제어기와 제약조건을 고려한 비선형 PI 제어기를 설계한다. 제5장에서는 제안한 비선형 PI 제어기의 유효성을 확인하기 위해 Ziegler-Nichols에 의한 제어기 및 Chen의 적응제어기를 적용한 시뮬레이션을 실시하고 그 응답성능을 비교 및 검토한다. 또한, 제약조건이 있는 경우에도 동일한 방법으로 그 유효성을 검증한다. 마지막으로 제6장에서는 본 논문에서 최종적으로 얻어진 결론을 요약하고 정리한다.



제 2 장 가스터빈 기관의 속도제어시스템 모델링

선박용 가스터빈 기관은 대기 중의 공기를 흡입하고 압축하여 연소기로 보내주는 압축기(compressor), 내부에 연료를 분사하고 압축공기를 혼합하여 연소하는 연소기(combustor), 고온의 가스로부터 충분한 동력을 흡수하여 회전하고 압축기를 구동하는 고압 터빈(H.P turbine), 나머지 잔류에너지를 흡수하여 축동력으로 변환하는 출력 터빈(power turbine)으로 구성된다. Fig. 2.1은 본 논문에서 다루는 선박용 가스터빈 기관의 전형적인 구조를 나타낸 것이다.

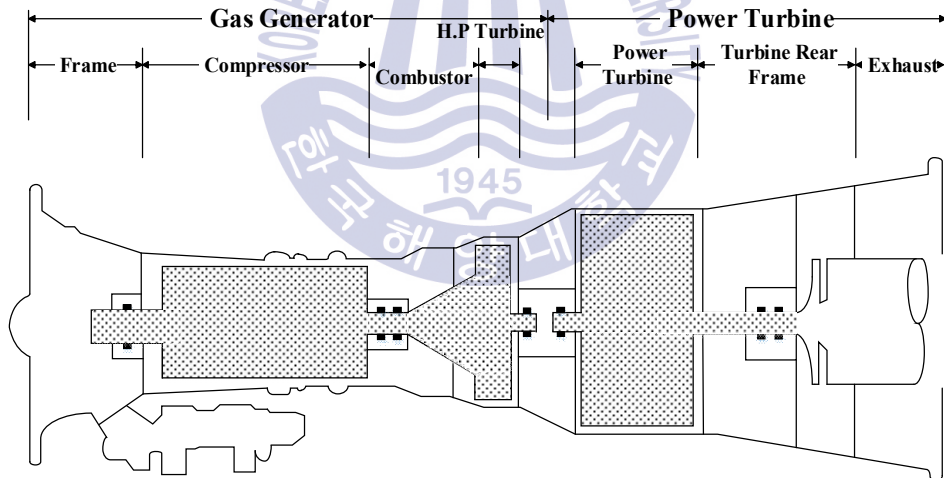


Fig. 2.1 Structure of marine gas turbine engine LM2500

2.1 가스터빈 기관의 속도제어시스템

선박용 가스터빈 기관의 주요 관심사는 추력과 그에 해당하는 선박 속도이다. 속도는 추력의 함수로서 축의 회전수와 관계되고, 회전속도의 측정이 추력의 측정보다 쉬워 회전 속도를 출력의 척도로 사용한다. 고압 터빈의 분당 회전 속도가 출력 터빈에 입력되어 가스터빈 기관의 속도를 제어하여 출력이 나온다[13].

2.1.1 속도제어시스템 설계시 고려 사항

가스터빈 기관의 제어 영역은 기관의 속도를 일정하게 유지하는 정상상태와 속도가 변화하는 과도상태로 구분할 수 있다. 정상상태에서는 가스터빈 기관의 속도와 터빈의 노즐 온도를 제어하여 출력을 유지하도록 해야 한다. 과도상태에서는 어떤 속도에서나 긴급 후진(crash astern) 조작이 가능해야 하며 최소 속도(dead slow)에서 전속 전진(full ahead)까지 속도 조종을 할 수 있어야 한다. 또한, 해상에서는 롤링과 피칭 등으로 인한 속도 변화에 따라 출력변동이 발생하여 갑작스러운 연료유 증가에 따른 회전수와 온도가 지나치게 올라가지 않도록 안정적으로 제어하는 것이 필요하다[13]. 따라서 연료량 제어시스템은 연료 유량을 계산하고, 가스터빈 기관의 과부하 보호를 위해 연료 액추에이터를 구동함으로써 가스터빈 기관의 속도를 제어하게 된다..

2.1.2 속도제어시스템의 구성 및 작동원리

가스터빈 기관의 속도 제어시스템은 펌프에서 공급된 연료를 조절하여 노즐로 공급하는 미터링 밸브, 입력 변화에 따른 미터링 밸브의 면적을 조정하여 연료유를 조절하는 액추에이터와 레버로 구성된다. Fig. 2.2는 가스터빈 기관의 속도 제어시스템을 나타낸 것이다[14].

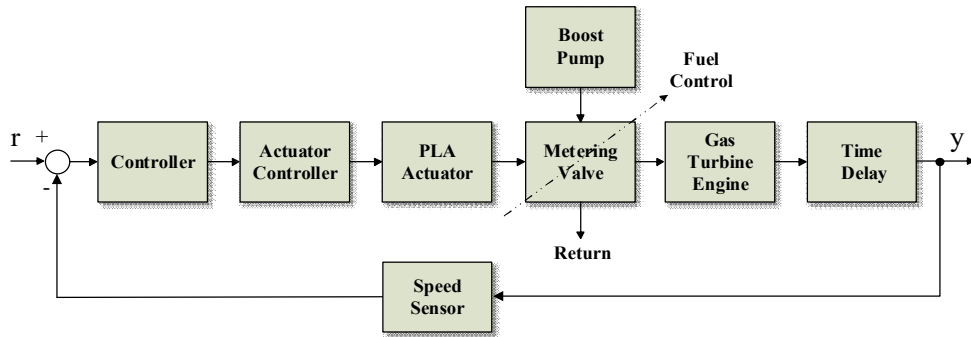


Fig. 2.2 Speed control system of gas turbine engine

가스발생기에 연결되어 구동되는 연료펌프는 연료유를 공급하고, DC 모터로 구동되는 PLA 액추에이터가 미터링 밸브를 조절하여 필요한 연료의 양을 연소기에 공급한다. 필요한 연료량은 목표값과 압축기 회전속도의 오차에 의해 계산되고 잉여분은 다시 연료펌프로 되돌려 보낸다.

2.2 가스터빈 기관의 속도제어를 위한 수학적 모델링

이 절에서는 가스터빈 기관의 속도를 제어하는데 고려할 사항과 속도 제어기 설계를 위한 수학적 모델링에 대해서 살펴본다. 본 논문에서는 속도 제어기를 설계하기 위해 필요한 수학적인 선형모델은 동작점에 따라 3개의 서브모델로 나누어 구한다. 그러나 수학적 모델은 실제 가스터빈에 대한 불완전한 묘사이므로 항상 오차가 존재하며 시스템 성능과 안정도에 영향을 미치므로 모델링 오차의 원인이 되는 다음의 대표적인 요소를 고려한다[15].

- 1) 고차 시스템을 낮은 차수 시스템으로 모델링
- 2) 응답이 빠른 액추에이터와 센서의 동역학을 무시
- 3) 굽힘이나 비틀림의 무시
- 4) 계산상 혹은 물리적으로 생기는 시간지연의 무시

또한, 출력 터빈은 고려하지 않고, 가스터빈 기관의 핵심요소인 가스발생기만을 대상으로 한다. 가스발생기의 비선형모델을 각 동작점에서 테일러 급수로 선형화하고, 가스터빈 기관의 동역학을 시정수와 편미분을 포함하는 단순한 수학적 모델로 나타낸다. 이때 각 구성요소의 파라미터는 실제 선박용 가스터빈 기관의 시운전 자료를 사용한다.

2.2.1 모델링 기법

일반적으로 플랜트를 모델링 하는 방법은 크게 다음의 두 가지 방법이 있다. 하나의 방법은 물리법칙으로부터 플랜트의 동특성을 표현하는 해석적인 방법이다. 또 다른 방법은 플랜트에서 추출한 실험적 데이터로부터 플랜트의 적절한 파라미터들을 구하는 실험적인 방법이다[16].

가스터빈 기관은 복잡한 비선형 시스템으로 각 구성 요소의 공기역학적·열역학적으로 거동특성이 달라지고, 이 특성이 가스터빈 기관의 동적 거동에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 가스터빈 기관의 상세한 모델을 얻는데 필요한 구체적인 정보가 부족하므로 정교한 모델을 만드는 것은 2.2절에서 언급했듯이 고려해야 할 요소가 많아 쉽지 않다. 그리고 열역학적 거동특성을 고려한 수학적 모델은 설계조건을 위해 주로 만들어져 가스터빈 기관의 저부하에서는 신뢰할 수가 없다. 너무 복잡한 수학적 모델은 연산 부담이 크므로 단순화된 모델을 사용하여 표현하는 것이 필요하다. 또한, 다양한 부하 조건을 시뮬레이션하기 위해서는 신뢰할 수 있는 모델이 필수적이다.

새로운 기관을 설계할 때 초기 비용을 줄이기 위해 가스터빈 기관의 성능을 탐색하기 위한 동적 모델이 필요하다. 크게 아날로그 모델, 하이브리드 모델 및 디지털 시뮬레이션 모델로 분류할 수 있다. 아날로그 모델은 20세기 초에 Larrowe, Spencer, Saravanamutto 등[17, 18] 의해 이용되었다. 이들은 가스터빈 기관의 아날로그 모델의 전체 작동 범위를 개발하였으며, 초기 단계 가스터빈 기관의 제어에 기여했다. 이후에 개발된 하이브리드 모델은 이러한 아날로그 가스터빈 기관 모델을 보다 정확하고 정교하게 개선하였다. 현재는 디지털 시뮬레이션 모델이 가스터빈 기관의 비선형성을 효율적으로 탐색하기 위해 널리 사용되고 있다[19, 20].

본 논문에서는 첫 번째 모델링 방법을 사용하며, 2.2절의 내용을 토대로 각 동작점에서 수학적 모델링을 하였다.

2.2.2 가스발생기

가스발생기의 회전수 변화는 고압 터빈에서 발생하는 힘과 압축기에서 소비되는 힘이 순간적으로 달라짐으로 발생한다. 다시 말해, 터빈과 압축기 사이의 토크 불균형으로 인해 가속과 감속이 일어나게 된다. 가스발생기 로터의 회전수 변화를 나타내는 방정식은 식 (2.1)과 같다[14].

$$R_{GG} \frac{d\omega}{dt} = \tau_T - \tau_C \quad (2.1)$$

여기서, τ_T 는 고압 터빈에서 발생된 토크, τ_C 는 압축기에서 소비된 토크, R_{GG} 는 극관성 모멘트, ω 는 각속도이다.

그리고 식 (2.1)의 우변을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_C = m_a c_{p1} \frac{T_2 - T_1}{\omega} \quad (2.2)$$

$$\tau_T = m_g c_{p2} \frac{T_3 - T_4}{\omega} \quad (2.3)$$

여기서, m_g 는 연소가스의 유량 [kg/s], m_a 는 압축기가 흡입하는 공기유량 [kg/s], c_{p1} 과 c_{p2} 는 각각 압축기와 터빈에서의 정압비열, T_i ($i=1,2,3,4$)는 각 스테이션에서의 온도를 나타낸다.

그러나 가스터빈 기관에서는 연공비(m_f/m_a)가 2~4% 밖에 되지 않기 때문에 편의상 $m_g = m_a + m_f \approx m_a$ 로 사용한다.

각속도와 분당 회전수의 관계를 이용하여 식 (2.1)을 연료유량 G_f 와 회전수 N 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$R_{GG} \frac{d\omega}{dt} = R \frac{dN}{dt} = f(N, G_f) \quad (2.4)$$

여기서, $R = \frac{R_{GG}\pi}{30}$ 이다.

식 (2.4)를 테일러 급수로 선형화하기 위해서 임의의 동작점 N_0, G_{f0} 부근에서의 미소 변화량을 $\Delta N_0, \Delta G_{f0}$ 라고 하면 N 과 G_f 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N = N_0 + \Delta N \quad (2.5a)$$

$$G_f = G_{f0} + \Delta G_f \quad (2.5b)$$

식 (2.5)를 식 (2.4)에 대입하고, 동작점 부근에서 테일러 급수로 전개하고 2계 편미분 이상의 항을 무시하면 다음과 같다.

$$R \frac{d\Delta N}{dt} = -\alpha \cdot \Delta N + \beta \cdot \Delta G_f \quad (2.6)$$

여기서, $\alpha = - \left. \frac{\partial f(N, G_f)}{\partial N} \right|_{\substack{N=N_0 \\ G_f=G_{f0}}}$, $\beta = \left. \frac{\partial f(N, G_f)}{\partial G_f} \right|_{\substack{N=N_0 \\ G_f=G_{f0}}}$ 이다.

Table 2.1은 본 논문에서 가스터빈 기관을 수학적으로 모델링하기 위해 필요한 파라미터들을 나타낸 것이다.

Table 2.1 System parameters of a marine gas turbine engine

Parameters	Descriptions	Values	Units
R_{GG}	Polar inertia moment of gas generator	283	[N · m ²]
LHV	Low Heating Value of fuel	10,200	[kcal/kg]
J	Mechanical equivalent of heat	4.2×10^3	[J/kcal]

식 (2.6)을 라플라스 변환하여 시간지연을 고려한 최종적인 가스발생기의 동역학적 모델은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta N(s)}{\Delta G_f(s)} = \frac{K_E e^{-Ls}}{T_E s + 1} \quad (2.7)$$

여기서, $K_E = \beta/\alpha$ 는 가스터빈 기관의 이득, $T_E = R/\alpha$ 는 시정수, e^{-Ls} 는 시간지연을 나타낸다.

Table 2.2는 동작점의 변화에 따라 이득 K_E , 시정수 T_E , 시간지연 L 을 나타낸 것이다. 가스터빈 기관에서의 시간지연은 연료가 연소기에서 연소하여 고압 터빈까지 연소가스가 도달하는 시간을 의미하고, 기존 연구[14]의 설정을 그대로 적용하였다.

Table 2.2 Gain, time constant and time delay in models of gas turbine engine

Models	Operating point	K_E	T_E	L [s]
		Gain	Time constant	Time delay
MD1	7,000 [rpm]	4.57	3.76	0.5
MD2	8,000 [rpm]	1.82	1.93	0.35
MD3	9,000 [rpm]	0.98	0.93	0.17

2.2.3 PLA 액추에이터

(1) 액추에이터 모터

PLA(Power Lever Angle) 액추에이터는 DC모터, DC모터와 기계적으로 연결된 미터링 파일럿 밸브를 상하로 작동시키는 레버로 구성된다. Fig. 2.3은 전기자 제어 DC 모터의 회로를 나타낸 것이다.

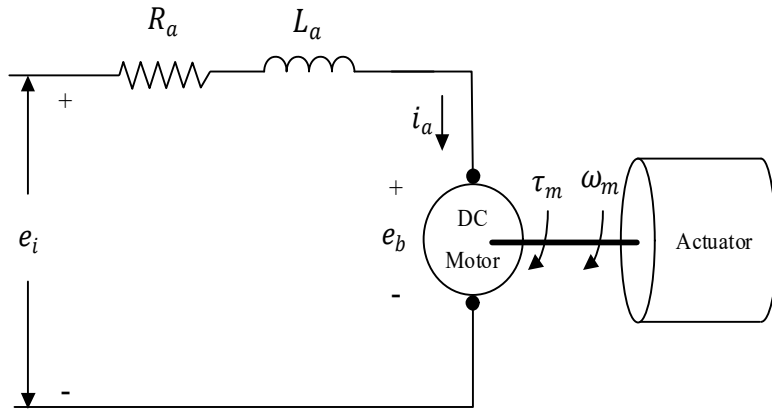


Fig. 2.3 Equivalent circuit of a DC actuator motor

전기자에 인가해 주는 전압을 조정하여 모터의 출력인 각속도를 원하는 값으로 조정할 수 있으며, 키로히호프 법칙을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[21].

$$L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + e_b = e_i \quad (2.8)$$

여기서, L_a 는 인덕턴스, i_a 는 전기자 전류, R_a 는 전기자 저항, e_b 는 역기전력, e_i 는 인가된 전압이다.

DC모터의 회전에 의해 발생하는 역기전력 e_b 는 회전속도에 비례하므로 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_b = K_b \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.9)$$

여기서, K_b 는 역기전력 상수, θ_m 는 모터의 회전각도이다.

식 (2.9)를 식 (2.8)에 대입하면 다음과 같다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + K_b \frac{d\theta_m}{dt} = e_i \quad (2.10)$$

모터 토크는 DC모터의 단자에 전압을 인가하면 전기자 전류 i_a 에 비례하여 발생하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_m = K_m i_a \quad (2.11)$$

여기서, τ_m 은 모터 토크, K_m 은 토크 상수이다.

식 (2.11)은 전기적인 양과 기계적인 양의 관계식을 나타내고, 모터 토크 τ_m 에 의한 운동방정식은 식 (2.12)와 같다.

$$J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + \tau_L = \tau_m \quad (2.12)$$

여기서, J_m 은 관성모멘트, B_m 은 마찰계수, τ_L 은 외부 부하 토크이다.

$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m$ 이므로 식 (2.10)과 식 (2.12)를 다음과 같이 3개의 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K_b}{L_a} \omega_m + \frac{1}{L_a} e_i \quad (2.13a)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B_m}{J_m} \omega_m - \frac{1}{J_m} \tau_L + \frac{K_m}{J_m} i_a \quad (2.13b)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (2.13c)$$

DC모터의 입력을 전압, 출력을 각속도로 하여 위 식 (2.13)을 전달함수로 나타내면 다음과 같다[22].

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_i(s)} = \frac{K_m}{L_a J_m s^2 + (R_a J_m + L_a B_m)s + (K_m K_b + R_a B_m)} \quad (2.14)$$

DC모터는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변화하는 장치로 전기적인 양과 기계적인 양에 대한 미분 방정식으로 나타낼 수 있다. 인덕턴스 L_a 의 경우 전류의 변화에 영향을 미치나 전류의 응답 속도는 회전자의 기계적 응답보다 현저하게 빠르다. 전기자 전류 i_a 에 대한 인덕턴스 L_a 의 영향은 매우 작으므로 무시하고 근사화 하면 다음 식 (2.15)와 같다.

$$i_a = \frac{1}{R_a} e_i - \frac{K_b}{R_a} \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.15)$$

위 식 (2.15)를 식 (2.13b)에 대입하여 정리하면 DC 모터의 동특성은 다음과 같은 2개의 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\left(\frac{B_m}{J_m} + \frac{K_m K_b}{J_m R_a}\right)\omega_m + \frac{K_m}{J_m R_a} e_i - \frac{1}{J_m} \tau_L \quad (2.16a)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (2.16b)$$

위 식 (2.16)에서 외부 부하에 의한 토크 τ_L 과 마찰계수 B_m 을 무시하고 전달함수로 나타내면 DC모터의 최종적인 모델 식은 다음과 같다[14, 22].

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_i(s)} = \frac{K_m}{R_a J_m s + K_m K_b} \quad (2.17)$$

(2) 액추에이터용 PI 제어기

액추에이터인 DC 모터의 속도제어는 내부 PI 제어기를 사용한다. DC 모터의 각도는 0 [rad]에서 1.53 [rad]까지 목표값 설정이 가능하고, 1.53 [rad]은 가스터빈 기관이 9,000 [rpm]으로 운전되고 있을 때의 각도이다. 이때 사용된 액추에이터의 각 구성품의 파라미터 값을 Table 2.3에 나타내었다. K_A 는 PLA 액추에이터 모터의 증폭기 파라미터, K_N 및 T_N 은 각각 내부 PI 제어기의 비례 이득과 적분 시간을 나타낸다.

Table 2.3 Parameters of an actuator system

Parameters	Descriptions	Values	Units
R_a	Armature resistance	0.25	[V/A]
L_a	Armature inductance	-	[H]
τ_m	Torque of a DC motor	-	[N · m]
τ_L	Torque of a load	-	[N · m]
θ_m	Rotor angle of a DC motor	-	[rad]
ω_m	Angular velocity of a DC motor	-	[rad/s]
B_m	Viscous-friction coefficient	-	-
K_m	Torque constant	0.42042	[N · m/A]
K_b	Back emf constant	0.42042	[V · rad/s]
K_{TH}	Feedback gain of a DC motor angle	10.1368	[V/rad]
K_{TG}	Feedback gain of tacho-generator	0.03184	[V · s/rad]
J_m	Inertia moment of a DC motor	0.002214	[N · m · s ²]
K_A	Gain of amplifier	10	-
K_N	Proportional gain	4	-
T_N	Integral time	0.5	[s]

Table 2.3의 파라미터들을 참고하여 PLA 액추에이터의 시스템을 나타낸 블록선도는 Fig. 2.4와 같다. u 는 본 논문에서 제안하는 NPI 제어기의 출력전압으로 물리적 한계를 표현하는데 있어 실제에 좀 더 접근하기 위해 포화기(saturator)를 고려하며 최대출력은 23[V]로 가정한다.

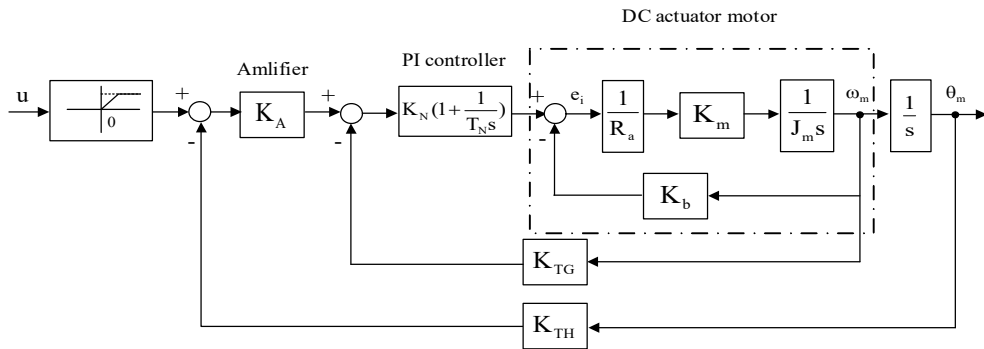


Fig. 2.4 Block diagram of a PLA actuator system

2.2.4 미터링 밸브

가스터빈 기관에 공급되는 연료 유량은 미터링 밸브의 오리피스 입·출구 압력 차이 (ΔP)와 PLA 액추에이터의 회전각에 따라 변하며, 최종적으로 미터링 밸브의 오리피스 면적(A_v)에 비례한다. 실제 가스터빈 기관의 연료 유량은 스피드밸브를 통해 입출구의 차압을 일정하게 유지하고, 오리피스의 면적(A_v)만을 조절하여 제어한다.

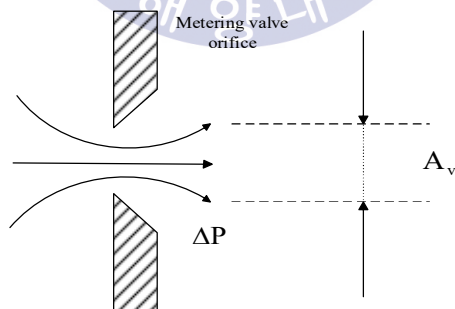


Fig. 2.5 Principle of a fuel metering valve

Fig. 2.5와 같이 PLA 액추에이터의 회전각 변화에 따른 미터링 밸브 면적 변화로 인한 연료량을 전달함수를 나타내면 식 (2.18)과 같다.

$$\frac{Q(s)}{\Theta_m(s)} = \frac{K_v}{T_v s + 1} \quad (2.18)$$

여기서, 미터링 밸브의 시정수 T_v 는 매우 작아 무시할 수 있고, 연료유량을 미터링 밸브의 개방면적에 따른 이득 관계를 나타내면 식 (2.19), 식 (2.20)과 같다.

$$q = K_v \theta_m \quad (2.19)$$

$$K_v = C_d \sqrt{\frac{\Delta P}{S_g}} A_v \quad (2.20)$$

여기서, C_d 는 유출계수, A_v 는 오리피스의 개방면적, S_g 는 연료의 비중이다.

본 논문에서 K_v 는 단순한 이득 값으로 사용하여 속도제어시스템에 적용한다. 또한, 선박용 가스터빈 기관의 외란은 일반적으로 항로에 따라 선체와 프로펠러의 외력과 부하변동에 따른 고압 터빈 출구압력의 변동 등에 의해 발생한다. 그러나 본 논문에서는 정상 상태를 벗어난 천이상태와 출력터빈을 고려하지 않고, 가스터빈 기관의 외란은 기관에 공급되는 연료 유량의 변화만을 고려하여 적용하였다[14, 22]. 지금까지의 과정을 통해 가스 발생기와 PLA 액추에이터를 포함하는 시스템의 블록선도는 Fig. 2.6과 같이 나타낼 수 있다.

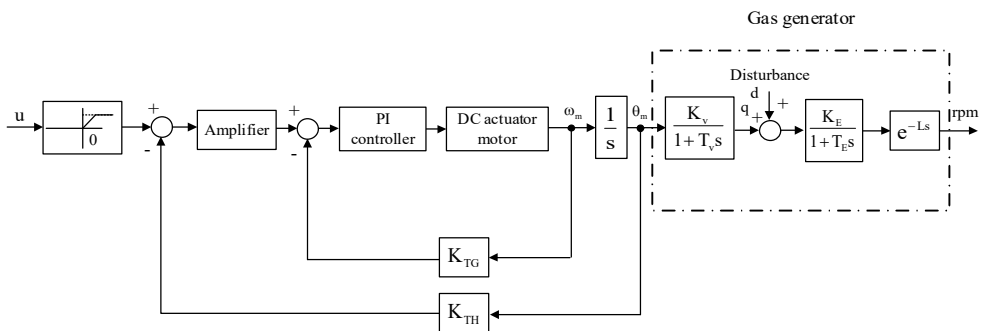


Fig. 2.6 Block diagram of gas turbine engine system

2.2.5 속도제어시스템의 상태공간 표현

가스터빈 기관의 속도제어시스템을 상태변수 x_1, x_2, x_3, x_4 를 도입하여 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = \frac{K_v K_E}{T_E} x_2 - \frac{1}{T_E} x_1 \quad (2.21a)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (2.21b)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & -\frac{K_A K_{TH} K_N K_m}{R_a J_m} x_2 - \frac{K_{TG} K_N K_m + K_b K_m}{R_a J_m} x_3 + \frac{K_m}{R_a J_m} x_4 \\ & + \frac{K_A K_N K_m}{R_a J_m} u \end{aligned} \quad (2.21c)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{K_A K_N K_{TH}}{T_N} x_2 - \frac{K_N K_{TG}}{T_N} x_3 + \frac{K_A K_N}{T_N} u \quad (2.21d)$$

여기서, x_1 은 시간지연을 포함하지 않은 가스터빈 기관의 분당 회전수, x_2 는 PLA 액추에이터 모터의 회전각, x_3 는 PLA 액추에이터 모터의 각속도이다.

위 식을 정리하여 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} u(t-L) \quad (2.22a)$$

$$y(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) \quad (2.22b)$$

여기서,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_E} & \frac{K_v K_E}{T_E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{K_A K_{TH} K_N K_m}{R_a J_m} & -\frac{(K_{TG} K_N K_m + K_b K_m)}{R_a J_m} & \frac{K_m}{R_a J_m} \\ 0 & -\frac{K_A K_N K_{TH}}{T_N} & -\frac{K_N K_{TG}}{T_N} & 0 \end{bmatrix}$$

$$, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_A K_N K_m}{R_a J_m} \\ \frac{K_A K_N}{T_N} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1000] \text{ 이다.}$$

Fig. 2.4와 Fig. 2.6을 참고하여 구성한 가스 발생기와 PLA 액추에이터를 포함하는 전체 가스터빈 기관의 속도제어시스템은 블록선도 Fig. 2.7과 같다.



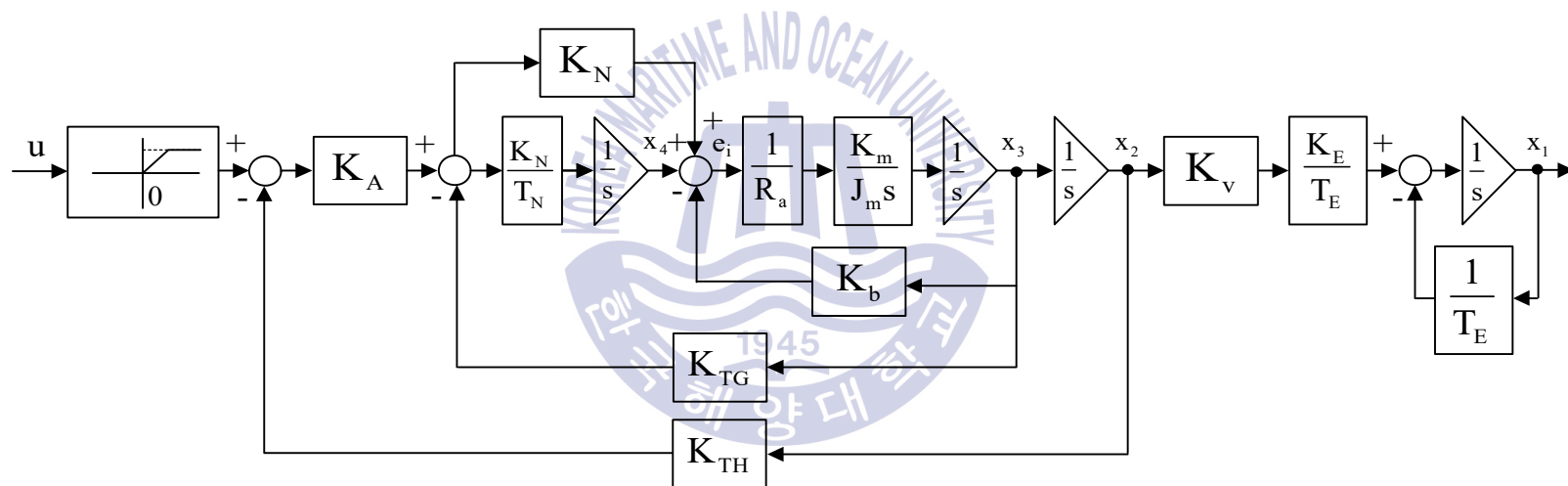


Fig. 2.7 Block diagram of speed control system for gas turbine engine

제 3 장 파라미터 최적화를 위한 유전알고리즘

본 장에서는 제안하는 가스터빈 기관의 속도 제어기의 이득 값을 최적으로 동조하기 위해 사용되는 도구로서 실수코딩 유전알고리즘(RCGA : Real-Coded Genetic Algorithms)[24]과 설계사양을 위한 제약조건에 대하여 설명한다.

3.1 유전알고리즘

유전알고리즘은 “결국 살아남는 종은 강인한 종도 아니고, 지적 능력이 뛰어난 종도 아니다. 종속에 살아남는 것은 변화에 가장 잘 적응하는 종이다” 라고 말한 찰스 로버트 다윈의 진화론의 원리를 컴퓨터 알고리즘으로 모방하여 문제 해결에 사용하는 대표적인 최적화 기법이다[24, 25]. 이는 1975년 Holland 교수[26]의 저서인 Adaptation in Natural and Artificial Systems를 발표하여 유전 알고리즘의 이론적 기반을 다진 이후로 Goldberg[27]에 의해 비약적인 발전을 이루었다.

유전알고리즘은 주어진 해 공간에서 최적의 값을 찾기 위해 ‘적자생존(survival of the fittest)’의 개념을 적용한다. 이를 위해 임의의 설정된 집단 혹은 세대는 상속되거나, 서로 간의 유전정보를 교환하고, 인위적인 진화(artificial evolution)를 일으킬 집단(해 집단)이 필요하며, 이 집단 안에서 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)와 같은 자연 진화기구를 모방한 유전 연산자가 적용된다. 자연의 법칙을 흉내 낸 유전알고리즘은 연속성(continuity), 미분 가능성(differentiability), 단봉성(unimodality)과 같은 다양한 형태의 탐색공간으로부터 자유롭고, 이득함수(payoff function)와 목적함수(objective function) 외의 탐색공간에 대한 사전지식을 요구하지 않으며, 매우 크고 복잡한 공간일지라도 전역해 쪽으로 수렴시키는 것이 가능하다. 또한, 기존의 탐색 기법[27]이 갖는 ‘결정적’ 보다 ‘확률적’이라는 특성을 가져, 더욱 강인한 탐색이 가능한 장점으로 인해 대표적으로 함수 최적화, 시스템

최적화, 조합적 최적화가 있고, 분류자 시스템, 그래프 분할, TSP 등의 많은 분야에서 응용되어 사용되고 있다[24, 25].

3.1.1 유전알고리즘의 기본 구조

유전알고리즘은 기본적으로 인위적으로 진화현상을 일으켜 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들로 초기집단을 만들고, 염색체(chromosome) 혹은 자연 파라미터(natural parameter)로 변환하여 사용한다. 이를 유전자의 역할을 반영하도록 이진 코딩(binary coding), 그레이 코딩(gray coding), 실수 코딩(real coding) 등의 여러 가지 코딩 방법을 사용하며 자연 생식과 진화원리와 같은 유전 연산자에 의해 최적해 쪽으로 개선한다. 유전알고리즘의 기본적 구조인 Fig. 3.1은 다음과 같다.

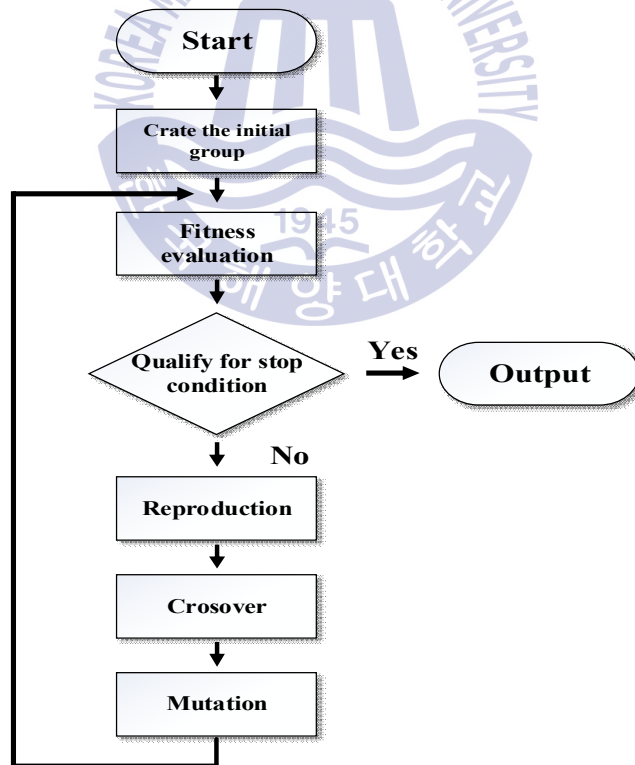


Fig. 3.1 Operation of a genetic algorithm

위와 같이 유전알고리즘은 크게 집단의 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5단계로 구분되어진다.

3.1.2 실수코딩 유전알고리즘

유전알고리즘은 보편적으로 염색체를 표현하는데 이진 코딩(binary coding)을 사용하여왔으나 탐색공간이 매우 크거나, 고정밀도의 해가 필요한 경우, 복잡한 제약 조건 존재 시에는 정밀도 향상을 위해 염색체의 길이를 크게 하려고, 결국 연산 부담으로 인한 오작동이 발생하여 때에 따라서 탐색할 수 없게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 실수를 그대로 사용하여 프로그래밍 간편하게 하여, 탐색 속도를 높이고 해의 정밀도 향상하며 제약조건이 있는 경우에도 적절한 응용이 가능한 실수코딩 유전알고리즘(RCGA)을 사용하도록 한다. RCGA는 염색체를 실수로 표시하기 때문에 염색체의 실수 유전자(gene)가 문제의 해 벡터와 일대일로 대응하여 실수코딩 염색체의 정의는 다음과 같다.

정의 3.1 (실수코딩 염색체)

실수코딩 염색체는 실수 값의 열로 표현된다.

$$s=(s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_i \ \cdots \ s_n) \quad (3.1)$$

여기서, $s_i \in \mathbb{R}$ 는 i 번째 유전자(요소), n 은 벡터의 차원을 나타낸다.

실수코딩을 사용함으로써 염색체의 길이는 벡터의 차원 n 과 일치하게 되고, 문제 공간에서 가까운 두 점은 표현공간에서도 서로 가깝게 된다.

3.2 초기 집단의 생성

RCGA는 염색체로 이루어진 집단(population)에서 모의진화를 수행될 초기 집단을 생성하는 절차가 요구된다. 세대를 거치면서 우성의 유전자를 보유하게 되며,

진화 도중 총체적 기억장소(integral memory)로 역할을 담당한다. 이 집단은 세대에서 식 (3.2)와 같다. N 으로 나타나는 집단크기(population size)는 세대가 변하더라도 항상 일정한 크기를 갖는 것으로 가정한다.

정의 3.2 (집단)

k 세대의 집단 $P(k)$ 는 염색체로 특징 지워지는 N 개의 개체의 집합으로 정의된다.

$$P(k) = \{s_1(k), s_2(k) \cdots s_i(k) \cdots s_N(k)\} \quad (3.2)$$

특히 초기 집단 $P(0)$ 의 생성방법은 무작위로 생성되는 무작위 초기화법 또는 경험을 기반으로 한 유도된 초기화법을 통해 생성될 수 있다. 전자는 난수발생기를 통하여 발생한 실수로 초기집단을 구성하고, 후자는 다른 간단한 탐색 알고리즘으로 해를 포함하는 근사적인 정의영역을 얻고, 이 안에서 균등확률로 점들을 선택해서 초기화시킨다.

본 논문에서는 무작위법으로 초기집단을 초기화하며, 가혹한 초기환경에서 전역해를 탐색해나가는 방법을 사용한다. 염색체 요소들은 난수발생기를 통하여 발생하는 정의영역 $x_j^L \leq x_{ij}(k) \leq x_j^U (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n)$ 내의 임의의 실수값으로 설정한다.

3.3 기본 유전 연산자

집단 내에서 모의진화를 일으키기 위해서 자연의 진화원리를 알고리즘으로 흉내 내어야 하며, 이를 위해 대부분 유전알고리즘에서 기본적으로 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자(genetic operator)를 사용한다.

3.3.1 재생산

재생산은 자연의 적자생존 또는 자연도태를 흉내 내는 인위적인 메커니즘으로 각 개체의 적합도를 기반으로 집단 내의 개체들을 선택하고, 새로운 집단을 형성하는 과정이다. 이를 통해 집단 내의 약한 개체들은 도태되고, 강한 개체가 선택되어 세대교체가 진행될수록 우성 유전자를 가진 강한 집단이 되도록 한다.

일반적으로 룰렛 휠 재생산 방법이 사용되나 선택절차의 특성상 초기 단계에서 개체군의 유전적 다양성을 잃을 수 있으므로 본 논문에서는 그 단점을 개선한 작은 염색체 집단과 실시간 응용 분야에 적합한 Pham과 Jin[28]이 제안한 구배와 유사한 재생산(gradient-like reproduction)을 사용한다.

3.3.2 교배

교배는 자연계 생물의 성적결합을 모방하여 알고리즘으로 흉내낸 것으로 이를 통해 부모 세대의 유전자가 임의로 서로 선택된다. 교배 연산자는 플랫 교배(flat crossover), 단순 교배(simple crossover), 산술적 교배(arithmetical crossover) 등이 있으며, 본 논문에서는 선택된 교배점 이후의 유전자를 서로 교환하여 자손을 형성하는 단순 교배와 교배점의 유전자를 식 (3.3)과 같이 일차 결합(linear combination)하여 자손을 생성하는 산술적 교배를 결합한 형태인 수정단순 교배[29]를 사용한다. 수정단순교배의 연산 결과를 Fig. 3.2와 같이 나타낸다.

$$\tilde{x}_j^u = \lambda x_j^v + (1 - \lambda) \bar{x}_j^u \quad (3.3a)$$

$$\bar{x}_j^v = \lambda x_j^u + (1 - \lambda) \bar{x}_j^v \quad (1 \leq j \leq n) \quad (3.3b)$$

여기서, \bar{x}_j^u 와 \bar{x}_j^v 는 집단에서 선택된 부모 염색체의 유전자, \tilde{x}_j^u 와 \tilde{x}_j^v 는 자손 염색체의 유전자, λ 는 곱인수(multiplier)로서 고정되거나 각 유전자마다 독립적으로 결정될 수 있는 0과 1사이의 난수이다.

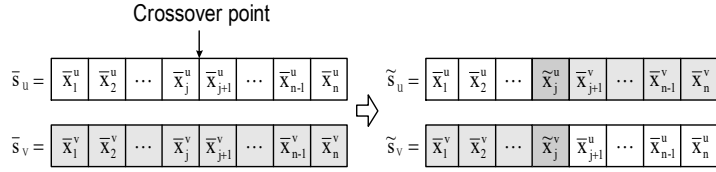


Fig. 3.2 Modified simple crossover

3.3.3 돌연변이

모의진화가 진행되는 동안 재생산과 교배로 인해 집단은 점차 해에 근접한 염색체로 되며, 이는 염색체들이 서로 닮아가게 되는 요인이 된다. 그러나 이러한 현상이 진화 초기에 발생하면 유전자의 다양성 결핍으로 지역해(local solution)나 사점(dead corner)에 빠질 수 있어 이를 극복하는 방법으로 균등 돌연변이(uniform mutation), 경계 돌연변이(boundary mutation), 동적 돌연변이(dynamic mutation) 등을 사용한다. 본 논문에서는 동적 돌연변이를 사용한다[30]. 동적 돌연변이 연산자는 세대 초기에 전 탐색공간을 균등한 확률로 탐색하고, 세대수가 증가하면서 탐색영역을 좁혀 지역적으로 탐색하여 돌연변이 확률을 다른 돌연변이 연산자보다 크게 선정하는 것이 가능하다. 다음의 Fig. 3.3과 같이 j번째 유전자에서 돌연변이가 일어나면 x_j 는 다음 식 (3.4)로부터 결정된다.

$$\tilde{s} = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \dots \ \tilde{x}_j \ \tilde{x}_{j+1} \ \dots \ \tilde{x}_{n-1} \ \tilde{x}_n] \Rightarrow s = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_j \ x_{j+1} \ \dots \ x_{n-1} \ x_n]$$

Fig. 3.3 Dynamic mutation

$$x_j \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k, \tilde{x}_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j + \Delta(k, \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^{(L)}), & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (3.4)$$

여기서, \tilde{x}_j 는 교배를 통해 염색체 내에서 돌연변이 확률에 의해 선택된 j번째 유전자, $\tilde{x}_j^{(U)}$, $\tilde{x}_j^{(L)}$ 는 각각 j번째 유전자의 상한값과 하한값, τ 는 0 또는 1을 취하는 난수이다.

위 식 (3.4)에서 $\Delta(k,y)$ 는 다음과 같다.

$$\Delta(k, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{k}{T}\right)^b \quad (3.5)$$

여기서, r 은 0과 1사이의 실수 난수, T 는 유전알고리즘의 최대 세대수, k 는 세대, b 는 불균형 정도를 나타내는 사용자에 의해 결정되는 매개변수이다.

3.4 적합도 평가

자연계에서 살아가는 생명체의 생존은 그 환경에 대한 적응 능력을 적합도로 반영한다. 이처럼 유전알고리즘은 최적해의 수렴 정도를 개체에 적합도 평가(fitness evaluation)를 함으로 반영한다. 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 통해 새로운 집단이 형성되고, 개체의 적합도는 목적함수에 의해 평가된다. 적합도의 크기에 따라 다음 세대에서 선택되고, 재생산되는 비율이 결정되게 된다. 이 과정에서 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 배려하기 위해서 적합도 함수는 최대화 문제로 표현되어야 하며, 음의 값을 갖지 않아야 한다. 따라서 최대화 또는 최소화 문제로 기술되는 목적함수로부터 적절한 적합도 함수는 다음과 같은 사상(mapping)을 통하여 나타면 다음과 같다.

최대화 문제 :

$$f(\mathbf{s}(k)) = F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (3.6a)$$

최소화 문제 :

$$f(\mathbf{s}(k)) = -F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (3.6b)$$

여기서, $f(\mathbf{s}(k))$ 는 적합도 함수, $F(\mathbf{x}(k))$ 는 목적함수, k 는 세대, γ 는 항상 $f(s) \geq 0$ 을 보장하는 상수이다.

γ 는 유전알고리즘의 성능에 직접적인 영향을 주므로 적절하게 선정한다. 그리고 일반적으로 탐색 공간 내에서 목적함수의 최소치를 알기는 쉽지 않아 γ 는 경험적으로 아주 작은 값으로 선정한다. 그러나 γ 를 초기에 잘 선정해도 진화 도중에 값이 고정되면 선택압(selection pressure)이 떨어져 적합도 함수의 스케일링(scaling)이 필요하게 된다.

3.5 적합도의 스케일링

유전알고리즘은 특히나 작은 집단을 취급할 때 개체집단의 적합도 평가는 그 성능에 큰 영향을 미친다. 만약 초기 세대의 집단에 초우량 개체가 출현하면 재생산 연산자는 이 개체를 여러 번 복제하게 되고, 그 결과 이들이 집단을 지배하게 되어 지역 최적점으로 급히 수렴하고, 반대로 후기 세대에는 집단이 강해져 개체들이 한 점 주위로 군집되어 좋은 개체와 더 나은 개체를 구별하기가 쉽지 않게 된다. 그래서 초기에는 유전자의 다양성을 충분히 유지할 수 있도록 개체간의 상대적인 적합도의 영향을 줄여주고, 후기에는 그 영향이 커지게 해서 선택압(selection pressure)을 일정하게 유지해야 한다.

위와 같이 하기 위해서 스케일링을 이용한 정규화 방법과 스케일링 원도 기법을 이용한 정규화 방법이 사용될 수 있다. 전자의 방법은 선형 스케일링(linear scaling), 시그마 절단(sigma truncation), 로그 스케일링(logarithmic scaling) 등이 있다. 후자의 방법은 과거 집단의 개수인 스케일링 원도 W_s 를 사용하여 선택압을 유지하는 것으로 γ 값을 과거의 다수 집단에서 발견한 목적함수 값으로 계속 변경해 주는 방법이다. Grefenstette[30]는 W_s 의 크기에 따라 세 가지 스케일링 모드를 제안하여, 광범위한 시뮬레이션 결과 $W_s=1$ 인 경우가 효과적이라고 발표하였다. 본 논문에서도 W_s 를 1로 선정한 스케일링 원도 기법을 사용한다.

3.6 엘리트 전략

유전 알고리즘에서 사용하는 구배와 유사한 재생산은 최적 개체의 생존을 보

장하지만, 연산하는 동안 파괴될 수도 있다. 엘리트 전략(Elitist strategy)은 한 세대의 최적 개체 소멸을 방지하는 방법으로, 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있으면서 모의진화를 수행한 후 최적 개체가 소멸한 것이 확인되면 현세대의 가장 약한 개체 또는 임의의 선택된 개체를 저장된 최적 개체와 교환하여 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장한다. 일반적으로 유전알고리즘의 성능을 개선하는 전략이다[31].

3.7 종료조건

유전알고리즘이 확률적인 탐색법으로, 어느 시점이 전역 해에 도달한 것인지 아는 것이 쉽지 않다. 그러나 구체적인 적용을 통해 유전알고리즘을 정해진 세대까지 모의진화 시키는 방법을 사용하여 만약 최종 세대까지 진화한 염색체가 만족할 만한 해에 근접하지 못하게 되면, 최종 세대수를 증가시켜 다시 모의진화를 진행하게 한다. 또 다른 방법으로 목적함수 값의 허용치를 정하고, 세대와 관계 없이 목적함수가 허용치 안에 들어오면 모의진화를 종료시키는 방법도 있다. 본 논문에서는 전자의 종료조건을 사용한다.

3.8 제약조건

최적화 문제에서 유전알고리즘을 적용할 때 주어진 문제에서 제약조건이 수반될 수 있고, 유전 연산자들이 염색체를 다루면서 부적합한 해를 생산할 수 있기에 제약조건을 어떻게 적용하는지 고려한다.

제약조건을 적용하는 방법에는 진화 도중 부적합한 염색체가 발생하면 모두 버리는 거부전략(rejecting strategy), 해독기(decoder)나 복구 알고리즘(repairing algorithm)을 사용하여 부적합한 염색체를 적합하게 수정하는 복구전략(repairing strategy), 염색체들의 적합성이 항상 유지되도록 문제에 따라 적절한 데이터 구조와 적합한 유전 연산자를 고안하는 유전 연산자의 보완 전략(modifying genetic operator strategy), 벌점 강도(penalty pressure)를 항상 일정하게 유지하는 고정 벌점전략과 제약조건을 위반한 정도 나 세대 진행에 따른 벌점 강도를 변경하는 가변 벌점 전략으로

구분하는 벌점전략(penalty pressure)이 있다.

본 논문에서는 위 벌점전략의 고정 벌점 전략[32]을 사용하여 제약조건을 고려한다. 벌점 전략은 제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해 공간에서 적합한 영역과 부적합한 영역으로 나누어지고, 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색할 시에는 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수 계산에 반영하여 제약조건이 따르는 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환한다. 대부분의 제어 시스템은 다음과 같은 요소들을 고려하게 된다.

- 1) 계단함수 입력에서 정의되는 최대오버슈트(M_p)
- 2) 지연시간(t_d)
- 3) 상승시간(t_r)
- 4) 정정시간(t_s)
- 5) 정상상태오차(e_{ss})
- 6) 제한된 입력(u)

이외에도 시스템 설계 시 요구되는 사항들을 추가하여 고려할 요소로 선정할 수 있다. 이러한 제약조건을 고려하여 가스터빈 기관의 속도제어를 위한 제어기 설계는 복잡한 제약성 최적화 문제로 바뀌고 그 해를 구하기 위해 유전알고리즘을 사용한다. 유전알고리즘이 제어기의 이득을 탐색하는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반(부적합한 영역을 탐색)할 경우에 이를 처리하기 위해 벌점전략을 사용하고, 그 위반 정도에 따라 벌점을 추가하도록 벌점함수 $P(\psi)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$F(\psi) = J(\psi) + P(\psi) \tag{3.7}$$

$$\text{단, } P(\psi) = \begin{cases} 0 & , \psi \text{가 적합한 해일 경우} \\ \sum_{j=1}^J w_j g_j^2(\psi) & , \psi \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases}$$

여기서, w_j 는 각 제약조건에 대응되는 설계자에 의해 선정되는 별점상수, $g_j(\psi)$ 는 ψ 의 조건을 만족하는 함수, $J(\psi)$ 는 ψ 에 종속되는 목적함수 값이다.

이를 통해 제약성 최적화 문제는 시스템의 방정식을 만족하고, $F(\psi)$ 를 최소로 하는 비제약성 최적화 문제로 바뀐다.



제 4 장 RCGA 기반 비선형 PI 제어기 설계

본 장에서는 우선 비선형 PI 제어기의 구조와 이득 특성에 대해서 설명한다. 그리고 제3장에서 다룬 RCGA를 사용하여 제어기 설계사양을 만족하는 가스터빈 기관의 속도 제어기의 설계방법과 제어기 이득 동조에 대해 알아본다.

4.1 비선형 PI 제어기의 이득 특성

Maxwell이 1868년 PID 제어에 관한 이론을 소개한 이후로 일반적으로 PLC에 내장된 PID 제어기능을 포함하면 산업현장에서 95% 이상이 PID 제어기를 사용하고 있다. 초고속 제어이론의 발달과 더불어 초고속 칩을 이용한 계산속도의 개선, 그리고 MMI(Man Machine Interface)의 도입 등으로 PID 제어기의 활용도는 더욱 확대되고 있으며, 가스터빈 기관의 속도제어에서도 FADEC(Full Authority Digital Electrical Controller) 사용 이전까지는 PID 제어기를 이용해 왔다[33].

PID 제어는 오차 신호에 대해 비례, 적분, 미분의 세 가지로 구성된 연산으로 제어기의 출력이 결정되므로 각 이득의 값을 설계사양에 적합하게 동조하는 과정이 필요하다. 그에 따른 성능을 개선하기 위해 다양한 방법이 연구되고 있으며 본 논문에서는 오차에 따라 제어기의 이득을 비선형적으로 변화시키기 위해 비선형 함수를 사용한 비선형 PI 제어기(NPI: Nonlinear PI controller)를 통해 가스터빈 기관의 속도를 제어하고자 한다.

일반적으로 NPI 제어기의 이득은 사용 목적 혹은 제어 환경에 따라 다양한 함수로 표현 가능하며 주로 시그모이드(sigmoid)나 쌍곡선(hyperbolic) 함수가 이용되고 있다. 본 논문에서는 단순하고 구현하기 쉬운 식 (4.1)과 같은 함수를 이용한다[34].

$$C(s) = K_p(e) + \frac{K_i(s)}{s} \quad (4.1)$$

여기서, $K_p(e)$, $K_i(e)$ 는 오차 e 의 비선형 함수로 시간에 따라 변하는 이득이다.

식 (4.1)은 Fig. 4.1과 같이 나타낼 수 있으며, $p(s)$ 는 제어 대상을 의미한다.

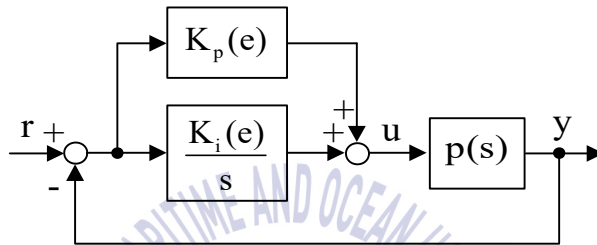


Fig. 4.1 NPI control system

4.1.1 비선형 비례 이득

비례 동작 u_p 는 비례 이득과 현재 오차의 크기에 따라 변하게 된다. 제어 응답 속도를 빠르게 하여 오차가 클 때는 비례 이득을 크게 하고, 응답이 정상상태에 거의 도달해 오차가 작을 때에는 계속하여 큰 비례 이득 값을 유지하게 되면 오차의 영향이 증폭되어 오버슈트와 진동으로 인해 불안정해지므로 이를 방지할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 이를 고려해 비선형 비례 이득 $K_p(e)$ 의 크기가 오차 e 의 크기에 따라 조절되도록 식 (4.2)를 사용한다.

$$K_p(e) = K_p f_p(e) \quad (4.2a)$$

$$f_p(e) = 1 - \frac{1}{a_p + (c_p e)^4} \quad (4.2b)$$

여기서, K_p 는 임의로 정해지는 양의 상수, $f_p(e)$ 는 두 파라미터 $a_p (\geq 1)$ 와 $c_p (> 0)$ 를

가지는 비선형 함수이다.

위 식 (4.2)를 보면 오차가 커지면 $f_p(e)$ 는 1로 수렴하고, 반대로 오차가 작아져 $e=0$ 이 되면 $(1 - \frac{1}{a_p})$ 로 수렴한다. a_p 와 c_p 는 각각 $f_p(e)$ 의 깊이와 폭을 결정하는 파라미터이며, 이를 통해 비선형 비례 이득 함수가 결정된다. $(c_p e)^4$ 에 의해 $f_p(e)$ 는 오차에 대해 대칭이며, $e=0$ 에서 완만하게 증가하여 이득 변화가 발생하지 않게 된다.

Fig 4.2는 a_p 와 c_p 값의 변화에 따른 $f_p(e)$ 의 변화를 나타낸 것이며, a_p 와 c_p 가 작아질 수록 $f_p(e)$ 는 작아져 모양은 깊어지고, 폭이 넓어진다.

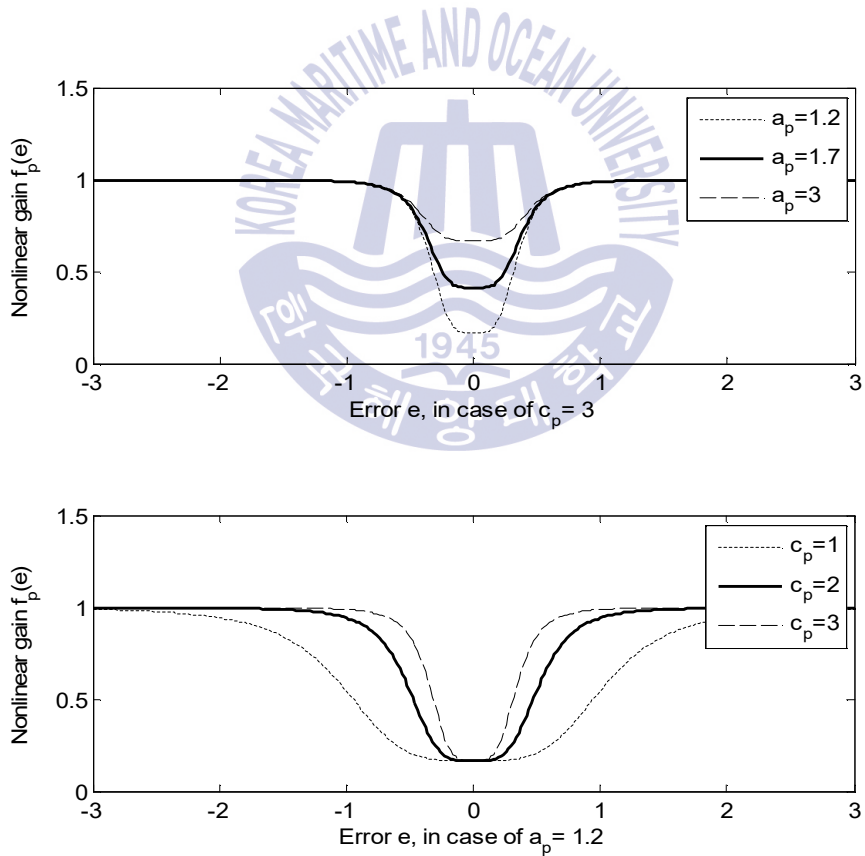


Fig. 4.2 $f_p(e)$ shapes to changes of a_p and c_p

4.1.2 비선형 적분이득

적분동작 u_i 는 누적오차의 절대값 크기 또는 적분 이득이 클수록 더 크게 된다. 누적 오차가 클 때 적분이득 값이 크면 오버슈트가 발생하고, 현재의 오차가 작아 비례 동작 u_p 가 영향을 주지 못할 때에도 계속 오차를 누적하여 정상상태 오차를 제거한다. 위 내용을 고려해 오차의 절대값이 클 때는 적분이득 값을 줄여 오버슈트 발생에 대비하며, 오차의 절대값이 작을 때는 적분이득 값을 크게 하여 정상상태 오차를 작게 할 수 있도록 식 (4.3)을 사용한다.

$$K_i(e) = K_i f_i(e) \quad (4.3a)$$

$$f_i(e) = \frac{1}{1 + (c_i e)^4} \quad (4.3b)$$

여기서, K_i 는 양의 이득, $f_i(e)$ 는 $c_i (> 0)$ 를 파라미터로 가지는 비선형 함수이다.

위 식 (4.3)에서 오차가 커지면 $f_i(e)$ 는 0으로 수렴하고, 반대로 오차가 작아져 $e=0$ 이 되면 1로 수렴하게 되어, $f_i(e)$ 는 0과 1 사이의 값을 가지게 된다. c_i 는 $f_i(e)$ 의 폭을 결정하는 파라미터이며, 이 값을 통해 비선형 적분 이득 함수가 결정된다. $(c_i e)^4$ 에 의해 $f_i(e)$ 는 오차에 대해 대칭이며, $e=0$ 에서는 완만하게 감소하여 급격한 이득 변화가 발생하지 않게 된다.

Fig. 4.3은 c_i 의 크기의 변화에 따른 $f_i(e)$ 의 변화를 나타낸 것이며, c_i 가 작아질수록 $f_i(e)$ 는 완만해져 폭이 넓어진다.

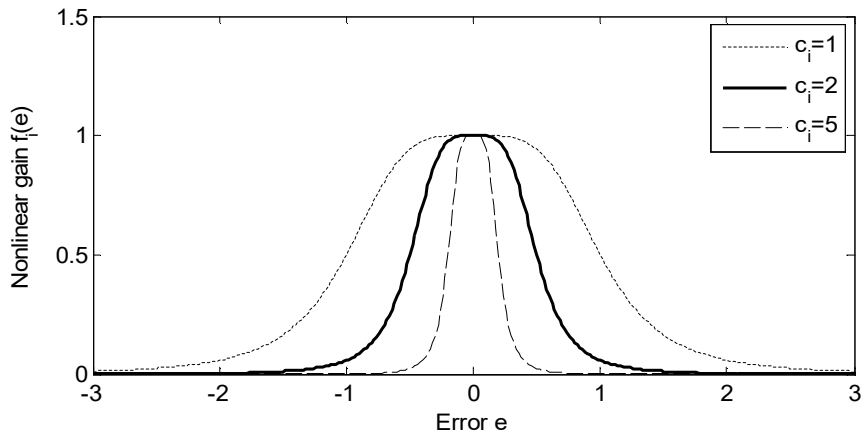


Fig. 4.3 $f_i(e)$ shapes to changes of c_i

4.2 속도 제어용 비선형 PI 제어기 설계시 고려 사항

가스터빈 기관의 속도제어기를 설계할 때 고려할 사항은 다음과 같다.

첫째는, 가스터빈 기관의 특성인 서지와 회전 실속으로 인해 작동 범위가 제한되므로 정상상태 및 과도상태에서는 반드시 일정한 서지 범위를 가져야 한다. 즉, 가스터빈 기관의 작동선에서 서지의 경계선까지의 일정한 여유 폭인 서징 마진을 가져야 함을 의미한다[35]. 서지의 방지를 위해 서지 경계선에 교차하지 못하게 하여 가스터빈 기관의 속도에 오버슈트가 발생하지 않도록 제어기를 설계해야 한다.

둘째는, 각 동작점에 대한 정확한 파라미터를 알기 힘들므로 선형화하는 과정에서 발생하는 모델 오차를 수정할 수 있어야 한다.

위의 두 가지 사항을 고려하여 본 논문에서는 앞서 설명하였던 비선형 비례 이득 및 비선형 적분 이득을 사용하여 정상상태 오차를 없애고 부하 변동에 따른 성능 저하를 개선하는 NPI 제어기를 설계하여 가스터빈 기관의 속도를 제어하고자 한다.

4.3 제약조건을 고려하지 않은 비선형 PI 제어기의 최적 동조

제어시스템의 성능을 향상하기 위해서 제어기의 이득을 적절히 조정하는 것이 필요하며, 수학적 혹은 실험적, 경험적 방법을 통해 구하는 과정을 동조(tuning)라 한다. 대표적인 동조 방법으로는 Zigler-Nichols(Z-N) 동조법, Astrom과 Haggglund의 릴레이(relay) 동조법, 내부모델 제어(IMC : Internal Model Control) 동조법 등이 이용된다. 특히 Z-N 동조법은 제어대상의 모델을 사용하지 않고도 응답 특성을 기초로 하여 이득을 동조하는 방법으로 가장 자주 이용되는 대표적인 방법이다. 본 논문에서는 RCGA를 이용하여 NPI 제어기의 시변 이득인 $K_p(e)$ 와 $K_i(e)$ 에 내재되어 있는 5개의 파라미터인 K_p , K_i , a_p , c_p , c_i 를 동조한다. 이 과정을 블록선도로 나타내면 Fig. 4.4와 같다.

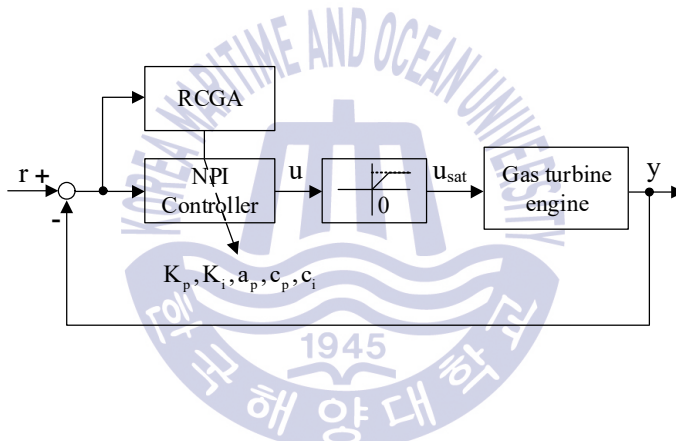


Fig. 4.4 Optimal tuning of NPI controller using a RCGA

비선형 제어기에 내재되어 있는 5개의 파라미터를 탐색하는데 있어서 제어시스템의 성능을 평가하기 위해 집단 내 염색체들 즉, 동조되는 파라미터의 적절성을 판단하도록 성능지수(목적함수)를 사용하여 적합도 평가를 한다. 성능지수로는 적분 절대 오차(IAE: Integrated Absolute Error), 적분 시간 절대 오차(ITAE: Integrated Time Absolute Error), 적분 제곱 오차(ISE: Integrated Square Error) 등이 있다. ISE는 오차의 제곱으로 오차가 클수록 가중치가 커지며, IAE와 비교하면 큰 오차를 줄이려는 경향이 더 크다. ITAE는 시간에 따라 가중치를 두고 있어 이를 최소화시키면 시간이 지남에 따라 진동과 같은 현상이 줄어들어 수렴이 훨씬 쉽게 이

루어질 수 있다[36].

본 논문에서는 ITAE를 목적함수로 사용한다.

$$ITAE: J_{ITAE} = \int_0^{t_f} t|e(t)|dt \quad (4.4)$$

여기서, $e(t)$ 는 설정값과 출력 간의 오차이고, 시간 t_f 는 이후의 적분값이 무시되어도 될 정도로 충분히 큰 시간 값이다.

3개의 동작점에서 구한 모델 MD1, MD2, MD3에 대해 평가함수가 최소값을 갖도록 RCGA로 동조한다. RCGA의 파라미터는 집단 크기 Psize=50, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.05$, 돌연변이 $V_m=5$ 를 사용하고, NPI 제어기의 파라미터 탐색구간은 $0.1 \leq K_p, K_i \leq 10$, $0.1 \leq a_p, c_p, c_i \leq 15$ 로 한다.

Table 4.1은 동조된 NPI 제어기의 파라미터를 정리하여 나타낸 것이고, Fig. 4.5는 모델 MD1에서 NPI 제어기의 파라미터를 탐색하는 과정을 나타낸 것이다.

Table 4.1 Parameters of NPI controller on gas turbine engine models

Parameters Models	K_p	K_i	a_p	c_p	c_i
MD1 7,000[rpm]	4.563	0.902	2.328	4.323	12.304
MD2 8,000[rpm]	5.775	2.232	1.757	4.512	9.93
MD3 9,000[rpm]	7.39	5.7329	2.492	7.939	12.991

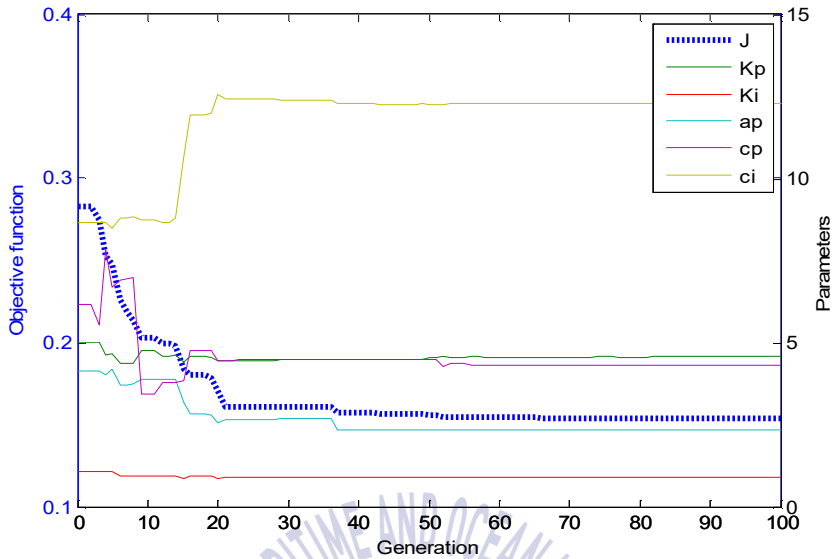


Fig. 4.5 Tuning process for NPI parameters on gas turbine engine MD1

4.4 제약조건을 고려한 비선형 PI 제어기의 최적 동조

제약조건으로 가스터빈 기관의 특성인 서지를 고려한다. 작동점이 서지한계선과 교차하지 않도록 하기 위해 오버슈트를 제약조건으로 한다. 수치상 비교목적으로 위해 최대 백분율 오버슈트(M_p)를 이용하여 별점함수 $f(\psi)$ 를 정의하면 다음과 같다.

$$f(\psi) = 0 \geq M_p \quad (4.5)$$

위 식 (4.5)는 3.2장을 참고하여 제약조건을 위반(부적합한 영역 탐색)하면 위반 정도에 따라 목적함수에 설계자가 미리 설정한 별점을 부가하도록 한다.

별점함수 $f(\psi)$ 가 추가된 ITAE 평가함수 식은 다음과 같다.

$$f_{ITAE}(\psi) = J_{ITAE} + w g^2(\psi) \quad (4.6)$$

여기서, w 는 설계자가 선정하는 제약조건에 대응되는 벌점 상수, $g(\psi)$ 는 ψ 의 조건을 만족하는 함수, J_{ITAE} 는 ITAE를 사용한 목적함수이다.

ITAE는 장시간의 과도현상에 대하여 벌점을 주는 매우 유용한 기준으로 사용되며 제약성 최적화 문제를 $f_{ITAE}(\psi)$ 가 최소로 되게 하는 비제약성 최적화 문제로 바뀌게 된다[37]. 위 과정을 블록선도로 나타내면 Fig. 4.6과 같다.

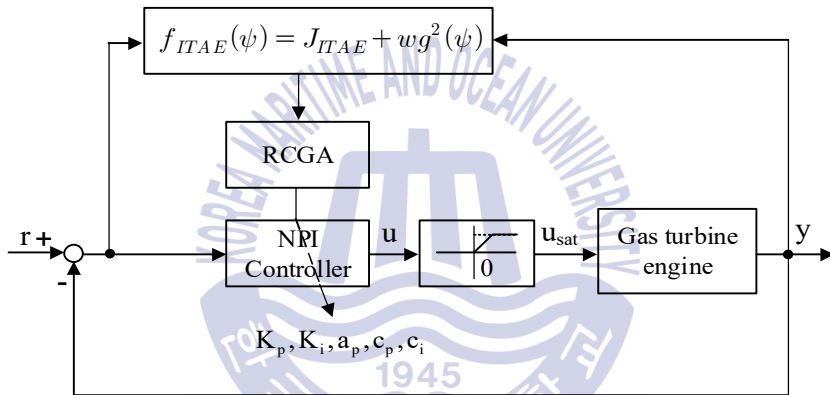


Fig. 4.6 Optimal tuning of constrained NPI controller using a RCGA

이와 같은 제약조건이 고려된 문제를 해결하기 위한 RCGA의 파라미터는 집단의 크기 P size=40, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.05$, 돌연변이 $V_m=5$ 를 사용한다. NPI 제어기의 파라미터 탐색구간은 $0.1 \leq K_p, K_i \leq 10$, $0.1 \leq a_p, c_p, c_i \leq 15$ 로 한다. M_p 의 벌점상수 w 는 1×10^{150} 으로 선정하였다. Table 4.2는 제약조건을 고려하여 동조된 NPI 제어기 파라미터를 정리하여 나타낸 것이고, Fig. 4.7은 모델 MD1에서 NPI 제어기의 파라미터를 탐색하는 과정을 나타낸 것이다.

Table 4.2 Concerned constraints NPI parameters on gas turbine engine models

Parameters	K_p	K_i	a_p	c_p	c_i
MD1 7,000[rpm]	3.804	0.725	4.236	13.681	8.45
MD2 8,000[rpm]	4.468	1.763	8.766	4.894	5.216
MD3 9,000[rpm]	7.038	5.164	12.565	4.145	11.136

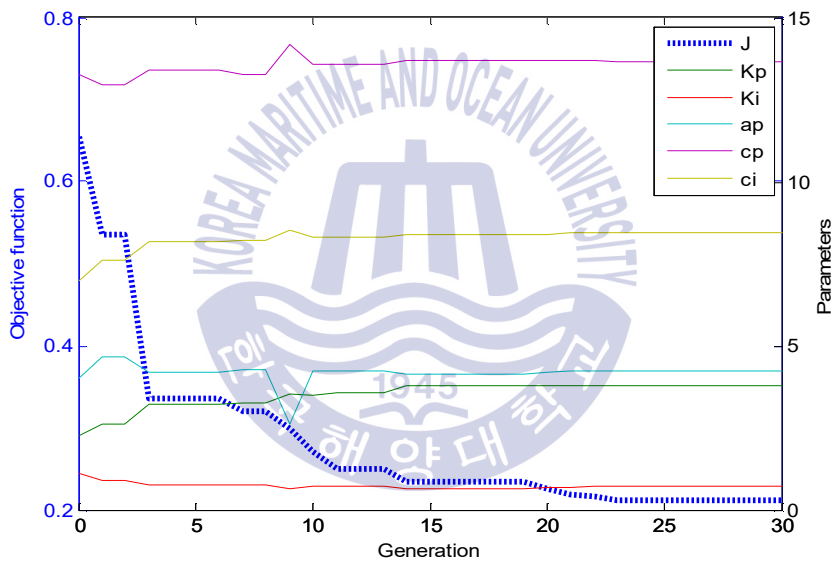


Fig. 4.7 Tuning process for concerned constraints NPI parameters on gas turbine engine MD1

제 5 장 시뮬레이션 및 검토

본 장에서는 제4장에서 제안한 NPI 제어기의 유효성을 검증하기 위해 가스터빈 기관의 서브 모델인 MD1, MD2, MD3를 대상으로 두 가지 형태의 시뮬레이션 실시한다.

첫째로, 제약조건을 고려하지 않은 경우 계단상의 목표값 변화에 대한 응답성을 확인한다. 비교 목적으로 제안한 NPI 제어기, Chen의 적응제어기, Z-N 동조법을 적용한 제어기를 세가지 모델에 적용하여 시뮬레이션 한다.

둘째로, 제약조건을 고려한 경우로서 제안한 NPI 제어기가 주어진 제약조건을 만족하면서 목표값을 잘 추종하는지 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증한다.

5.1 제약조건을 고려하지 않은 경우

5.1.1 모델 MD1에서 성능비교

Table 5.1은 동작점이 7,000[rpm]인 가스터빈 기관의 서브 모델 MD1에서의 NPI 제어기, Chen의 적응제어기 및 Z-N의 PID 제어기의 파라미터를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 5.1 Parameter alues of controllers for gas turbine engine MD1

Methods	Parameters							
	K_p	K_i	K_d	a_p	c_p	c_i	η	m
Proposed NPI	4.563	0.902	-	2.328	4.323	12.304	-	-
Chen	-	-	-	-	-	-	0.2	2
Z-N	5.874	6.087	1.415	-	-	-	-	-

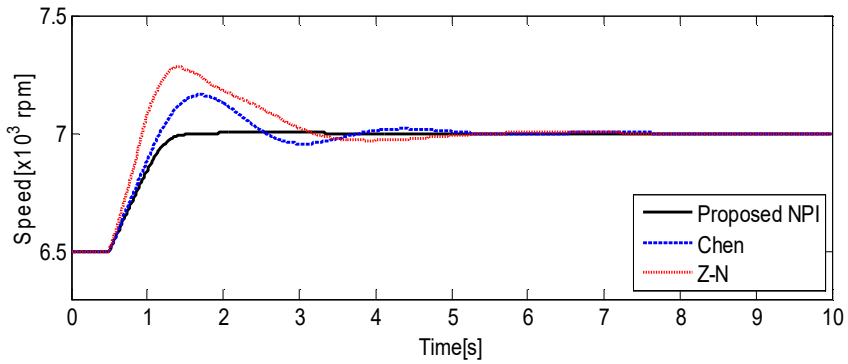
Fig. 5.1은 가스터빈 기관 모델 MD1을 6,500[rpm]에서 운전하다가 7,000[rpm]으로 계단상의 목표값을 변화시켰을 때의 계단 응답 및 제어입력, 그리고 제안한 NPI 제어기의 이득 변화를 나타낸 것이다. Table 5.2는 응답성능을 정량적으로 비교하기 위해서 백분율 오버슈트(M_p), 봉우리시간(t_p), 상승시간(t_r), 2% 정정시간(t_s), 절대 오차적분 IAE를 정리한 것이다.

Fig. 5.1과 Table 5.2를 보면 상승시간은 Z-N의 PID 제어기가 가장 짧으나 백분율 오버슈트가 가장 크고 정정시간도 길다. Chen의 적응제어기는 상승시간은 Z-N의 PID 제어기에 보다 길고, 제안한 NPI 제어기보다는 짧으나 여전히 백분율 오버슈트가 크고 정정시간이 길다. 제안한 NPI 제어기는 상승시간은 가장 길지만 감안할 수 있는 정도의 시간이며, 오버슈트가 거의 나타나지 않고 정정시간도 다른 제어기보다 훨씬 짧다.

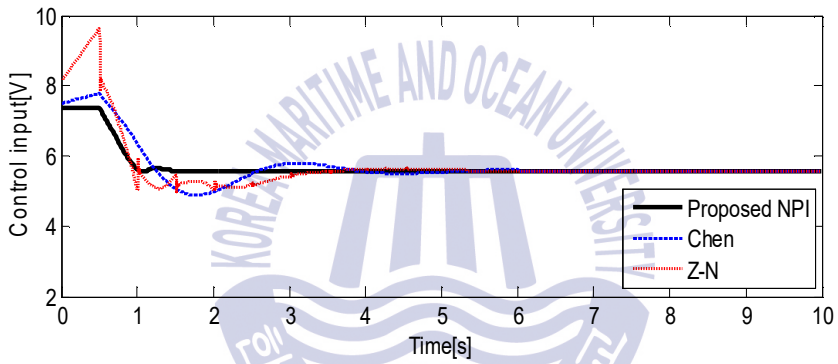
Table 5.2 Performances comparison of controllers for MD1

Methods	Performances				
	M_p [%]	t_p [s]	t_r [s]	t_s [s]	IAE
	Over shoot	Peak time	Rise time	Settling time	
NPI	0.2845	2.447	0.652	1.418	0.444
Chen	32.214	1.712	0.525	4.894	0.609
Z-N	56.194	1.414	0.349	4.984	0.748

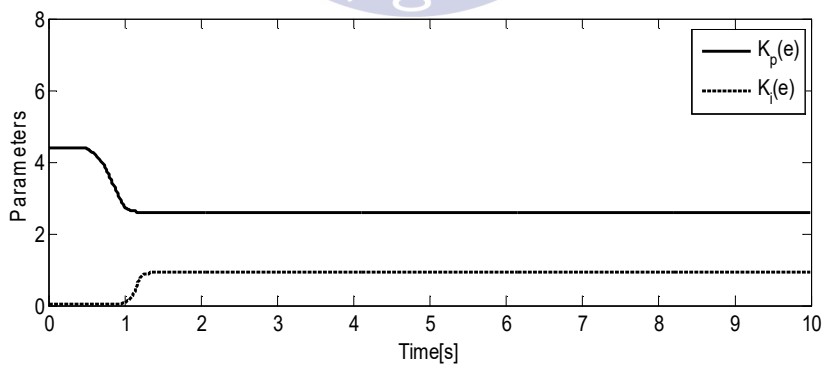
Including delay time 0.5[s]



(a) Step responses of controllers for MD1



(b) Control inputs of controllers for MD1



(c) Gains of NPI controller for MD1

Fig. 5.1 Step responses, control inputs and gains of controllers for MD1

5.1.2 모델 MD2에서 성능비교

Table 5.3은 동작점이 8,000 [rpm]인 가스터빈 기관의 서브 모델 MD2에서의 NPI 제어기, Chen의 적응제어기 및 Z-N의 PID 제어기의 파라미터를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 5.3 Parameter values of controllers for gas turbine engine MD2

Methods	Parameters							
	K_p	K_i	K_d	a_p	c_p	c_i	η	m
Proposed NPI	5.775	2.232	-	1.757	4.512	9.93	-	-
Chen	-	-	-	-	-	-	0.2	3
Z-N	6.87	9.814	1.202	-	-	-	-	-

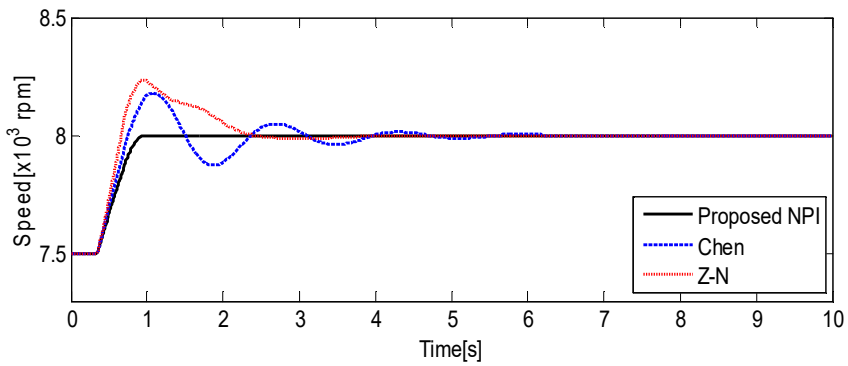
Fig. 5.2는 가스터빈 기관 모델 MD2를 7,500[rpm]에서 운전하다가 8,000[rpm]으로 계단상의 목표값을 변화시켰을 때의 계단 응답 및 제어입력, 그리고 제안한 NPI 제어기의 이득 변화를 나타낸 것이다. Table 5.4는 응답성능을 정량적으로 나타낸 것이다.

Fig. 5.2와 Table 5.4를 보면 전체적으로 MD1과 비슷한 경향을 보이고 있다. Z-N의 PID 제어기는 상승시간과 오버슈트의 측면에서는 Chen의 적응제어기와 비슷하나 정정시간이 짧다. 제안한 NPI 제어기는 상승시간은 여전히 약간 길지만 백분율 오버슈트가 거의 없고 정정시간은 다른 제어기보다 훨씬 짧다.

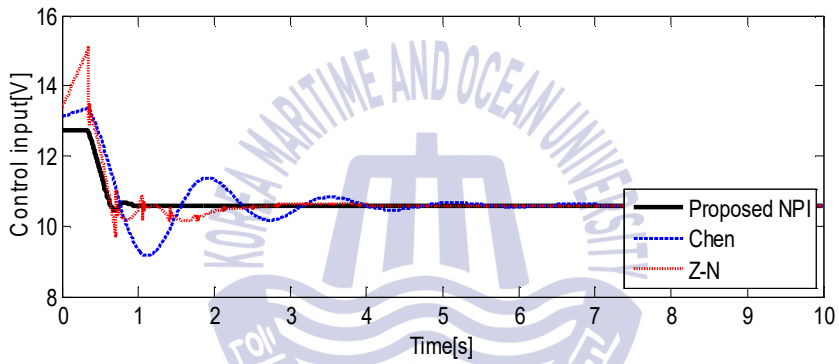
Table 5.4 Performances comparison of controllers for MD2

Methods	Performances				
	M_p [%] Over shoot	t_p [s] Peak time	t_r [s] Rise time	t_s [s] Settling time	IAE
NPI	0.0665	0.992	0.411	0.900	0.297
Chen	12.034	1.088	0.321	5.262	0.493
Z-N	15.612	0.966	0.247	3.461	0.476

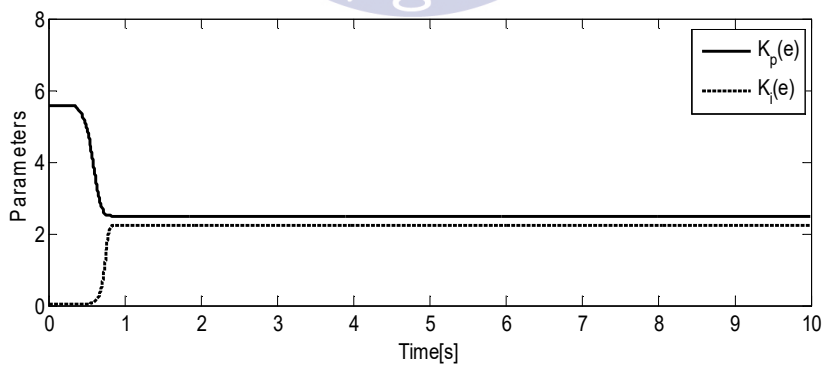
Including delay time 0.35[s]



(a) Step responses of controllers for MD2



(b) Control inputs of controllers for MD2



(c) Gains of NPI controller for MD2

Fig. 5.2 Step responses, control inputs and gains of controllers for MD2

5.1.3 모델 MD3에서 성능비교

Table 5.5는 동작점이 9,000 [rpm]인 가스터빈 기관의 서브 모델 MD3에서의 NPI 제어기, Chen의 적응제어기 및 Z-N의 PID 제어기의 파라미터를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 5.5 Parameter values of controllers for gas turbine engine MD3

Methods	Parameters							
	K_p	K_i	K_d	a_p	c_p	c_i	η	m
Proposed NPI	7.39	5.7329	-	2.492	7.939	12.991	-	-
Chen	-	-	-	-	-	-	0.2	4
Z-N	9.732	27.414	0.863	-	-	-	-	-

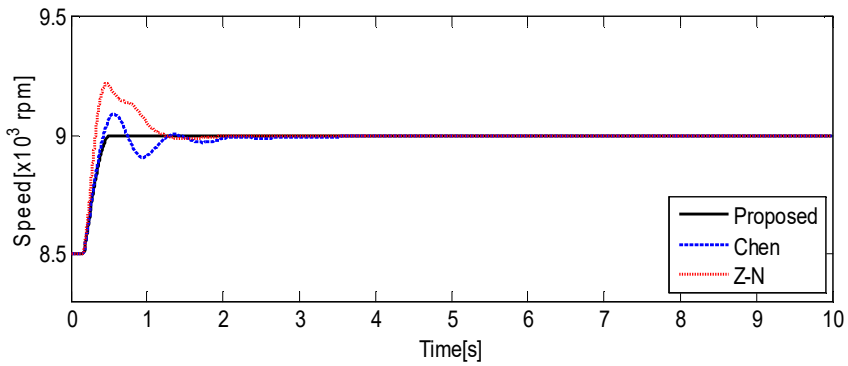
Fig. 5.3은 가스터빈 기관 모델 MD3를 8,500[rpm]에서 운전하다가 9,000[rpm]으로 계단상의 목표값을 변화시켰을 때의 계단 응답 및 제어입력, 그리고 제안한 NPI 제어기의 이득 변화를 나타낸 것이다. Table 5.6은 응답성능을 정량적으로 나타낸 것이다.

Fig. 5.3과 Table 5.6을 보면 전체적으로 MD1 및 MD2의 경우와 비슷한 경향을 보인다. 제안한 NPI 제어기는 상승시간은 Chen의 적응제어기와 비슷하고, 백분율 오버슈트가 거의 없으며 정정시간은 다른 제어기보다 짧다.

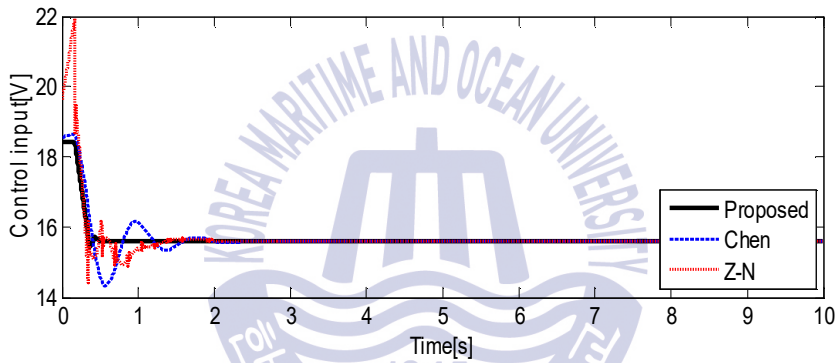
Table 5.6 Performances comparison of controllers for MD3

Methods	Performances				
	M_p [%] Over shoot	t_p [s] Peak time	t_r [s] Rise time	t_s [s] Settling time	IAE
NPI	0.0232	0.833	0.226	0.476	0.151
Chen	3.618	0.568	0.200	2.684	0.223
Z-N	8.85	0.473	0.123	1.744	0.235

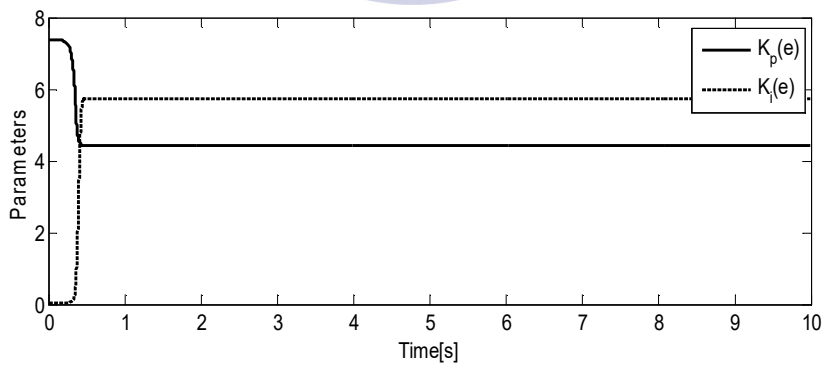
Including delay time 0.17[s]



(a) Step responses of controllers for MD3



(b) Control inputs of controllers for MD3



(c) Gains of NPI controller for MD3

Fig. 5.3 Step responses, control inputs and gains of controllers for MD3

Fig. 5.1 ~ 5.3에서 제어입력은 포화기의 제한 범위 안에서 동작하고 있으며 응답들은 시간이 진행됨에 따라 진동이 줄어들면서 목표값에 도달한다. 그리고 제어동작은 초기에만 많이 변하며 나중에는 일정하게 유지된다. 특히 제안한 NPI 제어기의 상승 시간은 약간 길지만 그 외의 모든 면에서 비교한 다른 제어기보다 우수함을 알 수 있다. 각 제어기의 응답성능은 백분율 오버슈트(M_p), 봉우리 시간(t_p), 상승시간(t_r), 2% 정정시간(t_s), 적분 절대 오차 IAE로 계산하여 비교하였다. IAE의 값은 적용한 모든 모델에서 제안한 NPI 제어기가 가장 작다.

5.2 제약조건을 고려한 경우

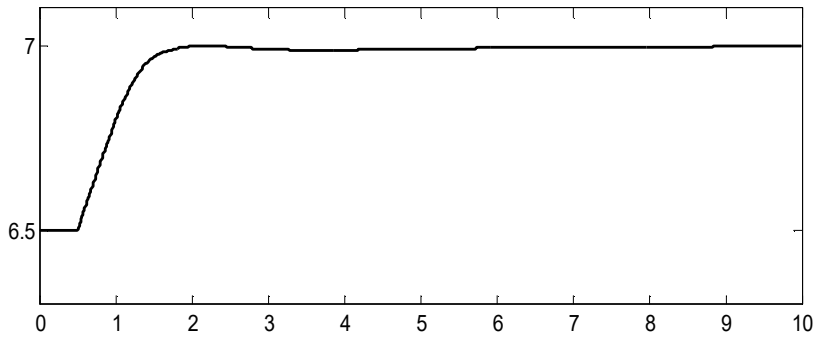
각 모델에서 오버슈트가 발생하지 않는 설계사양을 제약조건으로 고려한 경우 RCGA로 동조한 NPI 제어기의 파라미터는 제4장의 Table 4.2와 같다.

Fig. 5.4 ~ Fig. 5.6은 MD1, MD2, MD3에 제약조건을 고려한 NPI 제어기의 계단 입력에 따른 응답과 제어입력 그리고 NPI 제어기의 이득들이 제어동작 중에 변화하는 모습을 나타내었다. Table 5.7은 응답성능을 정량적으로 비교하기 위해서 백분율 오버슈트(M_p), 상승시간(t_r), 2% 정정시간(t_s), 적분 절대 오차 IAE를 정리한 것이다.

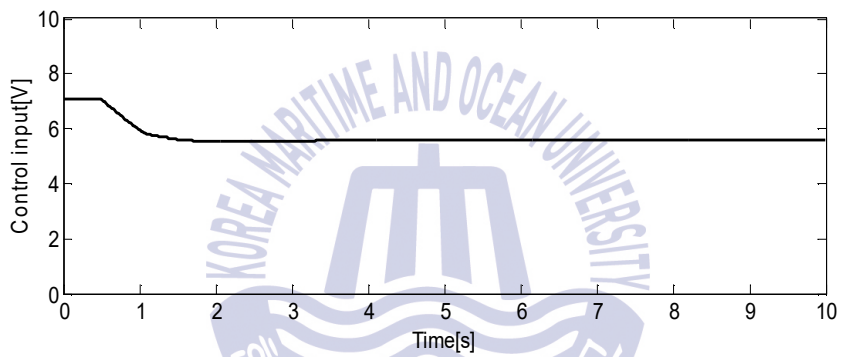
Table 5.7 Performances comparison of concerned constraints on gas turbine engine models

Parameters	M_p [%]	t_r [s]	t_s [s]	IAE
Models	Over shoot	Rise time	Settling time	
MD1 7,000[rpm]	0.0000	0.8198	4.5575	0.5297
MD2 8,000[rpm]	0.0000	0.6903	1.4201	0.3738
MD3 9,000[rpm]	0.0000	0.2660	0.6710	0.1669

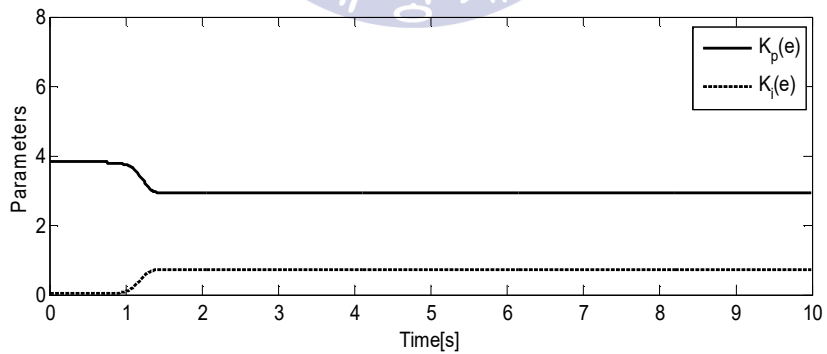
Including MD1 delay time 0.5[s], MD2 delay time 0.35[s], MD3 delay time 0.17[s]



(a) Step response of concerned constraints NPI controller for MD1

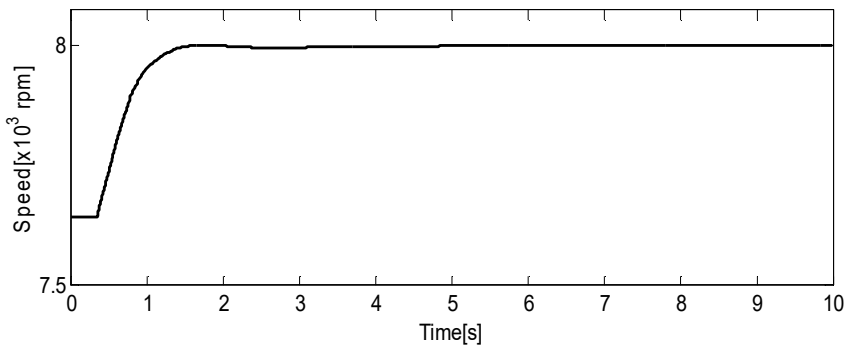


(b) Control input of concerned constraints NPI controller for MD1

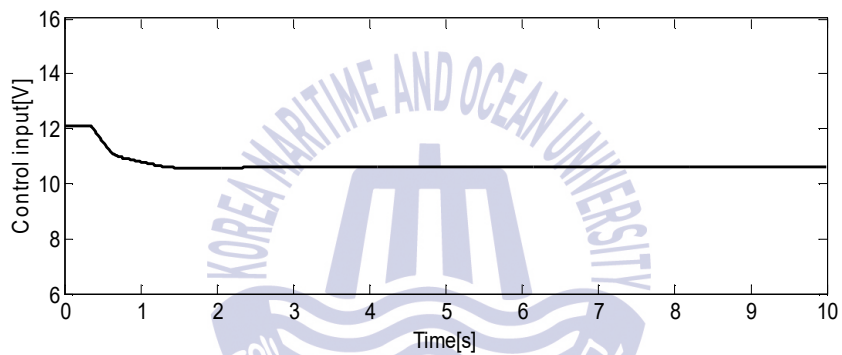


(c) Gains of concerned constraints NPI controller for MD1

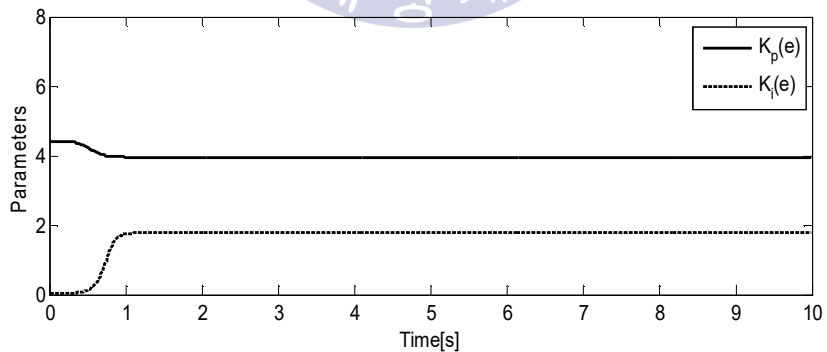
Fig. 5.4 Step response, control input and gains of concerned constraints NPI controller for MD1



(a) Step response of concerned constraints NPI controller for MD2

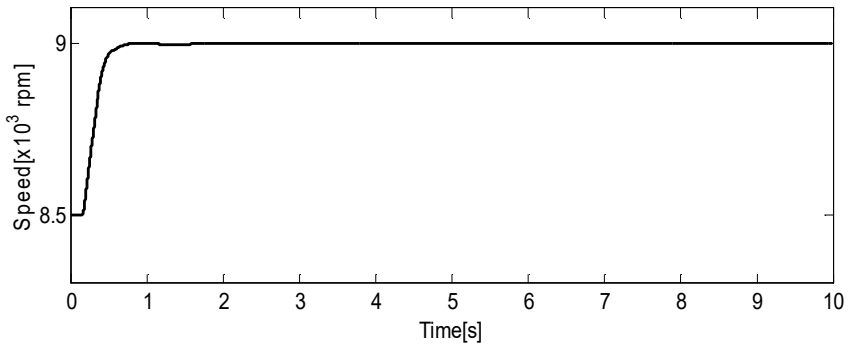


(b) Control input of concerned constraints NPI controller for MD2

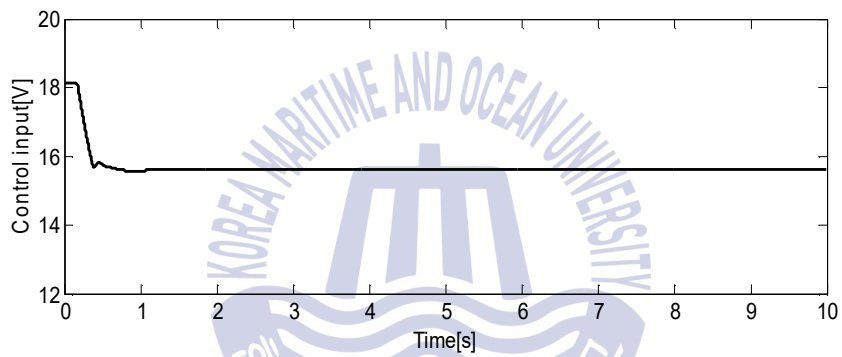


(c) Gains of concerned constraints NPI controller for MD2

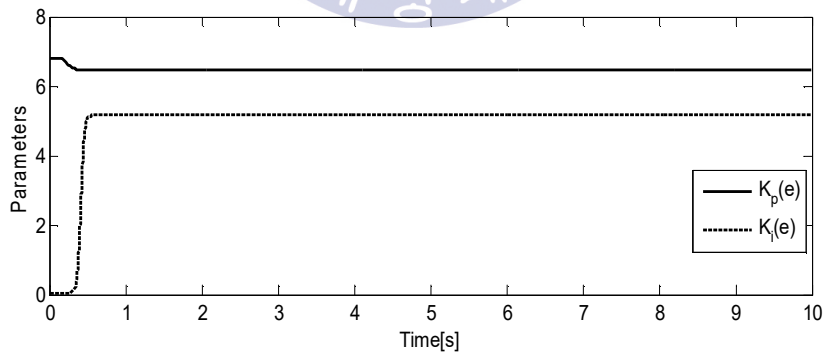
Fig. 5.5 Step response, control input and gains of concerned constraints NPI controller for MD2



(a) Step response of concerned constraints NPI controller for MD3



(b) Control input of concerned constraints NPI controller for MD3



(c) Gains of concerned constraints NPI controller for MD3

Fig. 5.6 Step response, control input and gains of concerned constraints NPI controller for MD3

위 Fig. 5.4 ~ 5.6을 보면 제어입력은 포화기의 제한 범위 안에서 작동하고 있으며 응답들은 상승시간과 정정시간은 다소 길어지나 백분율 오버슈트가 발생하지 않고 목표값에 도달하여 설계사양을 만족한다. 그리고 비선형 제어동작은 제약조건을 고려하지 않은 NPI 제어기와 마찬가지로 오차가 큰 제어동작 초기에 많이 변하며 오차가 0으로 수렴한 이후부터는 일정하게 유지되고 있다.



제 6 장 결론

본 논문에서는 선박용 가스터빈 기관의 속도제어 시스템을 수학적으로 모델링하고 비선형 PI 제어기를 설계하여 속도를 제어하였다. 세 가지 동작점에서의 가스터빈 기관의 수학적 모델 MD1, MD2, MD3에 대해 평가함수가 최소화 되도록 비선형 PI 제어기의 파라미터를 RCGA로 동조하였다.

제안한 비선형 PI 제어기의 유효성을 확인하기 위해 세 가지 모델에 Chen의 적응제어기, Z-N의 PID 제어기, 제안한 비선형 PI 제어기를 적용하여 계단상의 목표값 변화에 대하여 응답성능을 비교하였다. 제안한 비선형 PI 제어기가 다른 제어기보다 오버슈트와 정정시간 면에서 상당히 우수함을 확인할 수 있었다.

또한, 가스터빈 기관의 운전 특성을 고려하여 오버슈트가 발생하지 않도록 하는 설계사양을 고려하기 위해 별점함수를 평가함수에 추가하여 적용하였다. 별점함수가 추가된 평가함수 값이 최소가 되도록 RCGA로 비선형 PI제어기의 파라미터를 새롭게 동조하였다. 설계사양을 고려한 비선형 PI 제어기는 계단상의 목표값에 대하여 설계사양으로 주어진 오버슈트가 발생하지 않는 조건을 만족하지만 상승시간과 정정시간이 다소 길어지는 것을 확인하였다.

이후의 연구내용으로 가스터빈 기관의 각 동작점에서의 온도와 압력까지 고려한 모델링, 추가로 발생하는 외란에 대한 제어기 설계가 필요하다.

참고문헌

- [1] 전효중, 배종욱, 가스터빈, 효성출판사, 2004.
- [2] GE reports, “GE 가스터빈”, “<http://www.gereports.kr/>”, 2017.02.05.
- [3] 최우정, “액화천연가스(LNG)를 연료로 하는 친환경 선박 개발에 따른 기술평가 및 경제성 분석”, 한국해양대학교 대학원 박사학위논문, 한국해양대학교, 2014.
- [4] 나기천, 독자개발 ‘힘센엔진’ 시장점유 1위 질주… 수출확대 선봉장, 세계일보, “<http://www.segye.com/newsView/20160329003526>”, 2016.03.29.
- [5] 김세현, “터보샤프트 엔진의 천이 모델링 및 제어”, 세종대학교 대학원 석사학위논문, 세종대학교, 2008.
- [6] 안준, “2016년 가스·스팀터빈 분야 연구동향”, 한국유체기계학회 논문집, Vol. 20, No.2, pp. 89-92, 2017.
- [7] 박상균, 이주희, 박정대, 최재혁, “공급가스 유량에 따른 SOFC/GT 시스템 특성에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 39, No.7, pp765-772, 2015.
- [8] O. Mohamed, J. Wang, A. Khalil, M. Limhabrash, “Predictive Control Strategy of a Gasturbine for Improvement of Combinedcycle Power Plant Dynamic Performance and Efficiency”, Springerplus, 2016.
- [9] A. M. Mansourabad, M. T. H. Beheshti, M. Simab, “A Hybrid PSO Fuzzy PID Controller for Gas Turbine Speed Control”, International Journal of Control and Automation Vol. 6, No. 1, 2013.
- [10] 김중희, 이상정, “다중 엔진모델을 이용한 센서 고장허용 가스터빈 기관제어기 설계”, 한국추진공학회지, Vol. 20, No.2, pp56-66, 2016.
- [11] 전용민, 이장호, 김재환, 김병현, “가스터빈엔진 제어 알고리즘 개발사례”, 한국추진공학회 학술대회논문집, pp. 581-584, 2016.

- [12] 김태진 등, “가스터빈 기관제어기 하드웨어 및 미들웨어 개발”, 한국항공우주학회 추계학술대회, pp. 1958-1960, 2015
- [13] John B. Woodward, 박용 가스터어빈, 연경문화사, 2002.
- [14] 이윤형, “퍼지-PID 기법을 이용한 선박용 가스터빈 기관의 강인한 속도제어”, 한국해양대학교 대학원 석사학위논문, 한국해양대학교, 2004.
- [15] 김종식, 선형 제어시스템 공학, 청문각, 2001.
- [16] 신현재, 전기준, “실험을 통한 조준경 시스템 인식”, 제어로봇시스템학회 국내학술대회 논문집, Vol. 1, No.1, pp. 195-199, 1993.
- [17] Azmatulla Khan, “Simulation and Robust Control of Marine Gas Turbines,” , I IT, India, 2004.
- [18] H. I. H. Saravanamuttoo, Cohen.H, G. F. C. Rogers, “Gas Turbine Theory” , prentice hall, 2001.
- [19] E. Thirunavukarasu, “Modeling and Simulation Study of a Dynamic Gas Turbine System in a Virtual Test Bed Environment” , Bachelor of Engineering, Anna University, 2010.
- [20] M. Altosole, M. Figari, “Effective Simple Methods For Numerical Modeling Of Marine Engines In Ship Propulsion Control Systems Design” , Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, 2011.
- [21] 김봉직, “MATLAB/SIMULINK를 이용한 DC MOTOR의 모델기반 제어에 관한 연구” , 인하대학교 공학대학원 석사학위논문, 인하대학교, 2010.
- [22] 이윤형, 소명옥, “DC 모터의 GA 기반 파라미터 추정” , 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 38, No.6, pp.716-722, 2014.
- [23] C.J. Rubis, T.R. Harper, “The Naval Gas Turbine Ship Propulsion Dynamics and Control Systems Research and Development Program” , SNAME Transactions, Vol.90, pp. 321~338, 1982.
- [24] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2002.
- [25] 문병로, 쉽게 배우는 유전 알고리즘: 진화적 접근법, 한빛아카데미, 2016.

- [26] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975
- [27] D. E. Goldberg, *genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [28] D. T. Pham and G. Jin, “A hybrid Genetic Algorithm” , Proc. 3r World Conf. on Expert Systems, Seoul, Korea, Vol 2, pp. 748~757, 1996.
- [29] J. Matyas, “Random Optimization” , *Automation and Remote Control*, Vol.26, pp. 246~253, 1965.
- [30] J. J. Grefenstette, “Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms” , *IEEE Trans, Syst., Man, cybern.*, Vol.1, SMC-16, No. 1, pp. 122~128, 1986.
- [31] K. A. De Jong, “an Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptation Systems” , Ph.d. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, 1975.
- [32] A. E. Bryson and Yu-chi ho, *Applied optimal control*, Ginn and Company, London, 1969.
- [33] 채창현, *MATLAB을 활용한 선형제어시스템의 설계 및 실습*, 카오스북, 2013.
- [34] 소건백, “RCGA에 기초한 비선형 PID 제어기의 설계” , 한국해양대학교 대학원 석사학위논문, 한국해양대학교, 2014.
- [35] 손호재, 김수용, “보조동력용 마이크로터빈 엔진에 대한 과도성능 해석” , 한국추진공학회, Vol. 11, No.3, pp.20-28, 2007.
- [36] 한수희, 이영삼, 권보규, 권오규, 권욱현, *실감나게 배우는 제어공학*, 한빛아카데미, 2013.
- [37] 김민정, “외란제거용 PID 제어기의 RCGA 기반 동조” , 한국해양대학교 대학원 석사학위 논문, 한국해양대학교, 2007.

감사의 글

2년 전 대학원 석사과정 입학으로 시작하였던 공부를 지금에 와서 논문이라는 작은 결실을 보았습니다. 학부 졸업 후 4년간 승선 후 학업에 대한 열망으로 다시 해양대로 돌아와 2년간 공부를 하였습니다. 그동안 많은 분이 도와주시고, 관심을 주셔서 논문이 나오게 되었고, 그동안의 감사함을 이글로 짧게나마 전합니다.

먼저 학부 시절부터 챙겨주시고 이 논문의 시작과 끝을 보여주신 **소명옥 지도교수님**께 감사드립니다. 학업뿐 아니라 다방면으로 돌봐주심에 2년간 무사히 대학원 생활을 마칠 수 있었습니다. 논문 위원장님으로 논문 심사를 위해 시간을 내주시며 논문의 방향을 잡아주시고 깊이를 더해주신 **오세준 교수님**께 감사드립니다. 학부시절 연구실 지도교수님으로 만나게 되어 지금까지 격려와 기도로 도와주시고 보살펴 주신 **유희한 교수님**께 감사드립니다. 교수님을 통해 힘이 들고 어려울 때마다 기도로 하나님께 나아감을 배웠습니다. 복도에서 만날 때마다 인사하며 반겨주신 **오진석 교수님**과 현대제어 수업의 청강뿐 아니라 집필하신 책도 주시며 격려해주시신 **진강규 교수님**께 감사드립니다.

대학원 수업에서 어려웠던 전공과목을 기초부터 설명해주시고 세미나 발표를 통해 단련 시켜주신 **정병건 교수님**께 감사드립니다. 그리고 가스터빈과 선박엔진에 세심한 가르침을 주시고 조언해주신 **조권희 교수님**, 전기추진시스템 수업에서 관련 내용과 논문 작성법을 가르쳐주신 **이상태 교수님**과 선박에서의 모터 제어와 전기에 관해 쉽고 자세하게 가르쳐주신 **김성환 교수님**께 감사드립니다.

그리고 자동제어 연구실에서 부족한 저와 효성이를 기초부터 가르쳐 논문이 시작되고 마무리할 수 있도록 끝까지 돌봐주시며 신경 써주신 **안종갑 박사님**과 해양수산연수원 **이윤형 교수님**께 감사드립니다. 두분의 관심과 조언으로 논문이 완성되었습니다. Matlab과 논문작성에 관해 물어볼 때 언제든지 도와주고 알려준 **건백이 형**과 **소혜림**에게 감사함을 전합니다. 그리고 가끔 들러 격려해주신 해양수산연수원 **류기탁 교수님**과 동아리 선배이자 연구실 선배인 해양수산 연수원 **김종필 교수님**, 항만연수원 **안태수 교수님**, 겸임교수 **김하종 교수님**께 감사드립니다. 그리고 연구실 선배인 **우철이 형**, **석경이 누나**, 앞으로 열심히 공부하고 즐

업할 **전형진** 선배님, 후배인 **고건**, **강민**에게 감사드립니다. 함께 석사과정을 시작하여 2년동안의 대학원 생활을 잘 마무리한 **최효성**에게 고마움을 전하며 앞으로 항상 좋은일만 있기를 바랍니다.

실습선 한나라호 조교로 1년 4개월 근무하는 동안 부족한 저에게 많은 배려와 격려를 해주신 **이윤석** 선장님, **오세진** 기관장님, **이상일** 교수님, **전해동** 교수님께 감사드립니다. 그리고 한나라 기관부 식구였던 **정균식** 일기사님, 동기인 **손의남**, **백영수** 조기장님, 당직 메이트였던 **김삼열** 선생님, **최부간** 선생님, **이용권** 선생님, **주성룡** 선생님, **백현승** 선생님, **김구용** 선생님 외 한나라호에 계신 모든 조교, **갑판부**, **사주부** 선생님들께 감사드립니다.

20살 때 처음 해양대에서 만나 지금까지 10년 동안 저의 멘토이자 하나님을 알고 믿도록 이끌어주신 **항만연수원 장하용** 교수님과 영적 멘토인 **명진이** 형, **동현이** 형, **규민이** 형에게 감사드립니다. 그리고 네비게이트 선교회에서 항상 기도해 주시며 걱정해주신 **이순진** 선교사님과 **박경애** 자매님, 믿음 안에서 함께한 **병화** 형, **영준이** 형, **찬란이** 형, **이예찬**, **네비게이트** 자매님들에게 감사드립니다. 함께 아파트 생활을 했던 **이요셉**과 **허준열**에게도 고마움을 전합니다.

그리고 한나라호에서 만나 지금까지 옆에서 함께 공부하며 힘들 때나 기쁠 때나 서로 격려와 위로로 친동생처럼 저를 아껴준 **명보** 형에게 감사드립니다. 탈고 과정에서 큰 도움이 되었습니다. 대학원 생활 동안 격려하고 조언해준 **하식이** 형과 **권흠이** 형에게도 고마움을 전합니다. 그 외에 대학원 수업에서 함께 공부하고 도움주신 동문선배인 **현민이** 형, **김성완** 선배님, **황순규** 선배님, **전태열** 선배님, **김호성** 선배님 감사드립니다.

1년 반동안 제 건강을 책임져주며 체력을 길러준 **Crossfit Sechan** 식구들에게 감사함을 전합니다. 특히나 더 신경써준 **Jay** 코치님과 **대호** 코치님 감사드립니다.

학교에서 만나고 연락할 때마다 격려해준 해양대 동기들인 **장승원**, **조정호**, **김상현**, **윤성문**, **남용재**, **김민재**, **박옥태** 그리고 해양대 선배들인 **병찬이** 형, **재형이** 형, **묘진이** 누나에게 고마움을 전합니다. 해양소년단, 포항 영일만 동문 동기들과 휴가 때 마다 찾아와 격려해준 승선 중인 동문 선배인 **원진이** 형, **벽진이** 형 동기인 **배호림**, **이준희**, **홍순재**, **손민기**, **최영호**, **신용구** 후배인 **전영관**, **김동환**에게 감사드리며 항상 안전항해하길 바랍니다. 4년간 승선한 현대상선에서 제게 가르침을 주고 함께 동고동락하며 이끌어주었던 **필호** 형, **권준명** 감독님, 교육팀 **이상인** 기관장님, **민철이** 형, **동홍이** 형, **장원이** 형, 승선중인 **이영주** 일기사님, **정용** 일기사님, **임덕훈** 기관장님께 감사드립니다.

저를 낳아주시고 길러주신 사랑하는 **부모님**께 감사드립니다. 공부한다고 집에 가지도 자주 연락드리지도 못함에 항상 죄송할 따름입니다. 그리고 집에서 형 대신 부모님을 모시며 고생한 **동생 민수**에게도 고마움을 전합니다. 앞으로 가족이 될 내가 가장 사랑하는 **예비 신부 김민주**에게 감사드립니다. 주말에도 도서관이나 학교까지 찾아오면서도 짜증 한번 내지 않고, 격려하며 힘들 때 저에게 큰 힘이 되었습니다. 그리고 볼 때마다 격려해주시며 믿어주신 **예비 장인어른과 장모님** 그리고 **처제 김민성**에게도 감사드립니다.

이외에도 언급하지 못한 많은 분에게 감사함을 전합니다. 그리고 끝이자 또 다른 시작을 알리는 이 논문이 앞으로의 제 인생에서 하나의 발돋움이 되고 세월이 지나서는 큰 보물이 되길 바라며 마지막으로 하나님께 모든 영광 돌리며 이 글을 마칩니다.

