

# 유도조종기술 현황 및 전망

현대전에 있어서 유도무기의 역할은 어느 때 보다 강조되고 있으며, 최근의 무인비행기 및 로봇제어 기술 발전 등과 연관되어 유도탄의 유도조종 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 본 논문에서는 유도탄의 유도조종기술을 전반적으로 알아보고 기존의 유도조종 알고리즘 설계 방법들을 소개하였다. 또한 나날이 발전하는 부시스템 기술에 부응하여 향후 발전될 것으로 예상되는 유도조종기술의 연구 방향에 대하여 논하였다.

■ 황익호  
(국방과학연구소)

## 1. 개요

유도무기란 원하는 궤적을 따라 자율적으로 비행하여 표적에 도달하여 탄두 등으로 표적을 무력화시키는 무기체계이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 유도탄은 항법장치(navigation system), 탐색기(seeker system) 등의 센서와 제어핀 구동장치(control fin actuator system), 추력벡터제어장치(thrust vector control system), 유도탄의 전자제어를 위한 제어컴퓨터, 고체 로켓이나 엔진 등의 추진 시스템, 탄두 시스템 등 다양한 부 시스템들이 유기적으로 결합되어 구성된다.

유도조종시스템이란 유도탄이 안정적으로 원하는 궤적을 따라 목표로 비행하도록 하는 비행제어시스템을 의미한다. 유도탄을 제어하기 위해서 필요한 정보는 관성항법장치, 탐색기 등으로부터 획득하며, 지상 레이더 등을 이용할 수 있는 경우도 있다. 이 중에서 특히 관성항법장치(inertial navigation system)는 유도탄의 자세 및 위치, 속도 등을 측정하는 장치로서 유도탄 제어에 반드시 필요한 장치라 할 수 있으며, 이런 이유로 종종 항법유도조종을 하나의 용어로 묶어서 부르기도 한다.

그림 1은 유도탄 제어시스템의 전형적인 구조이다. 유도기법 또는 유도법칙이란 유도탄과 표적과의 상대기하 또는 비행하여야 할 기준궤적과의 상대기하를 이용하여 유도탄을 원하는 궤적으로 비행시키기 위한 유도명령을 산출하는 제어법칙으로서, 많은 경우에 유도명령은 비행체가 만들어 주어야 할 횡가속도(lateral acceleration) 명령이거나 유도탄의 비행자세 명령이 된다. 유도법칙을 올바르게 구현하기 위해서는 유도탄의 위치, 속도, 가속도 등의 정보와 표적의 위치, 속도, 가속도 정보를 동시에 알고 있어야 한다. 따라서 유도법칙의 입력은 관성항법장치, GPS, 탐색기, 지상레이더 등의 센서를 통한 유도탄 및 표적 정

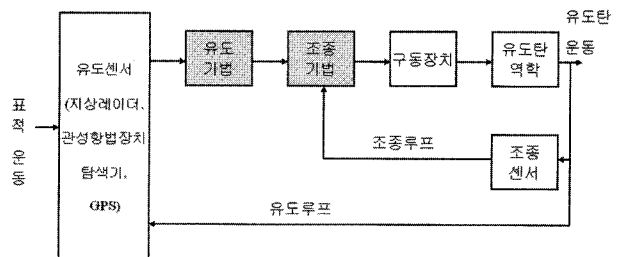


그림 1. 유도조종 루프

보가 되고, 출력은 유도명령이 된다.

조종기법이란 유도탄이 안정적으로 비행하며 유도명령을 추종할 수 있도록 하기 위하여 구성하는 제어기라 할 수 있으며, 이와 같이 구성된 제어루프를 조종루프라 한다. 이 조종루프는 제어핀(aerodynamic control fin) 등 제어 수단의 움직임에 따른 유도탄의 반응(response)을 모델링한 유도탄의 운동역학 모델에 기반하여 설계되는 제어루프라 할 수 있으므로, 안정성(stability), 강인성(robustness), 시간응답 성능 등 일반적인 제어루프 설계기준을 그대로 적용하여 설계된다. 조종루프의 입력은 유도탄의 운동상태를 측정하는 가속도계와 자이로스코프 등의 조종센서 측정치가 되며, 출력은 유도탄을 적절히 제어하기 위한 제어핀 조종명령이 된다. 조종명령은 구동장치에 인가되어 제어핀을 움직임으로써 유도탄이 원하는 기동을 하도록 만든다.

이상의 논의를 종합하면 유도조종이란 유도탄의 제어를 위한 외부루프와 내부루프의 개념으로 생각할 수 있으며, 다양한 제어이론이 적용될 수 있는 분야라 할 수 있다. 그러나 기본적으로 유도탄의 운동역학은 비선형 시변 시스템이므로 이러한 특성을 감안하여 설계할 수 있어야 한다. 특히 꼬리날개에 제어핀이 있는 공력제어 유도탄의 경우에는 유도탄의 운동역학이 비최소위상시스템(non-minimum phase system)의 특성을 가지므로 설계시 유의하여야 한다. 이 뿐 아니라 공간 및 비용의 제약으로 인하여 유도탄에 장착된 센서 시스템의 측정치가 유도조종에 필요한 모든 물리량을 다 측정할 수 없는 경우가 많으므로 이러한 경우에 대처할 수 있는 필터링 기법들도 요구된다. 본 논문에서는 이러한 유도조종기법들 및 관련 필터기법들에 대한 소개 및 향후 연구방향 등을 제시하고자 한다.

## 2. 고전적인 유도조종 기법

본 장에서는 지금까지 많이 적용되어 온 고전적인 유도조종루프 설계 방식에 대하여 소개하였다. 고전적인 유도기법은 주로 표적과 유도탄 간의 시선(line of sight)을 이용하여 설계되었으며, 조종기법은 PID 제어기로 대변되는 고전제어기법에 기반하여 설계되어 왔다. 여기서는 고전적 유도조종기법에 대하여 예를 들어가며 설명하였다.

### 2.1 고전적인 유도기법

유도법칙의 기본 목적은 유도탄을 표적에 명중시키는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 여러가지 유도법칙이 연구

되어 왔으나, 대략 지령유도(command guidance), 호밍유도(homing guidance), 항법유도(navigational guidance)의 세가지로 나눌 수 있다.

지령유도란 유도탄 외부에서 제공되는 지령신호 또는 표적 방향의 기준신호에 따라 유도탄이 유도되는 방식으로서, 외부에 표적과 유도탄을 동시에 추적하고 명령을 계산하여 송신하는 발사통제소와 유도탄 및 표적의 세가지 요소의 상호 관계에 의하여 유도가 수행된다. 이러한 방식으로는 시선지령(command to the line of sight) 유도, 비시선 지령(command off the line of sight) 유도, 빔라이딩(beam riding)유도, track via missile 유도 등이 포함된다.

이들 중 대표적인 것으로서 시선지령유도를 들 수 있다. 그림 2는 시선지령유도에 관련된 유도기하를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 지상통제소에서 유도탄과 표적을 동시에 추적하고, 유도탄이 지상통제소에서 표적을 바라보는 시선상에 위치할 수 있도록(그림의  $\Delta P$ 가 0이 될 수 있도록)하는 가속도명령을 만들어 유도탄에 송신함으로써 유도탄이 표적에 적중되도록 만든다.

이와 같은 시스템의 경우 유도탄은 표적정보획득을 위한 센서를 장착할 필요가 없으므로 저렴한 가격으로 전체 유도루프를 구성할 수 있으나, 지상통제소에 레이더 등 고가의 장비가 필요하며, 다수의 표적과 동시에 교전하기 어려운 단점이 있다.

호밍유도란 유도탄에 내장된 탐색기를 이용하여 표적의 정보를 획득하고 유도하는 방식으로서, 탐색기가 측정하는 표적 신호의 에너지매체의 근원에 따라 능동호밍(active homing) 유도, 반능동 호밍(semi-active homing) 유도, 수동호밍(passive homing)유도로 나뉜다. 이 방식은 지령유도법칙과 달리 유도탄과 표적간의 관계만을 고려하여 유도법칙이 결정되고 유도탄

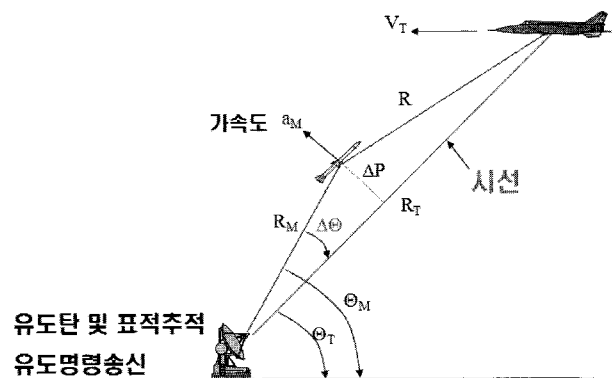


그림 2. 시선지령유도

에서 탐색기 정보를 이용하여 유도명령을 생성하고 표적으로 유도한다.

대표적인 호밍 유도법칙으로는 비례항법유도(PNG, Proportional Navigation Guidance)를 들 수 있는데, 2차 대전을 전후하여 연구가 시작되어 현재까지도 가장 많이 이용되고 있는 유도기법 중 하나이다. 그림 3은 비례항법유도의 개념을 표시한 것으로서 관성공간에서 유도탄과 표적간의 시선(line-of-sight)벡터의 방향이 변화하지 않으면 결국 유도탄이 표적에 적중한다는 사실에 근거한 것이다. 따라서 다음 식(1)과 같이 시선변화율  $\dot{\sigma}$  에 적절한 항법상수  $N$ 과 접근속도  $V_c$ 를 곱하여 계산시키는 유도명령을 이용하게 되며, 이 명령은  $\dot{\sigma}$ 를 0으로 만들어 결과적으로 시선벡터의 방향이 변화하지 않도록 만든다.

$$a_c = NV_c \dot{\sigma} \quad (1)$$

이와 같은 시스템의 경우 고정밀의 탐색기를 장착하여야 하므로 유도탄의 가격이 고가가 되지만, 많은 경우 발사통제소가 필요없이 발사후 망각(fire and forget)형태의 운용이 가능하게 되므로 동시에 다수의 유도탄을 상대하여야 하는 경우에 효과적이며, 유도탄을 발사한 후 안전한 곳으로 대피하여 아군의 피해를 최소화할 수 있는 장점이 있다.

항법유도는 발사전에 표적의 측정을 완료하여 정해진 표적의 위치를 근거로 하여 계산된 유도탄의 비행경로를 탑재 컴퓨터에 기억시키고, 유도탄이 측정한 자신의 위치를 이용하여 표적을 향하여 비행하도록 하는 유도방식으로서 주로 지대지 유도탄에 많이 이용되고 있다. 유도탄의 위치를 측정하는 방식에 따라 관성유도, 지측유도, 천측유도 등이 있다.

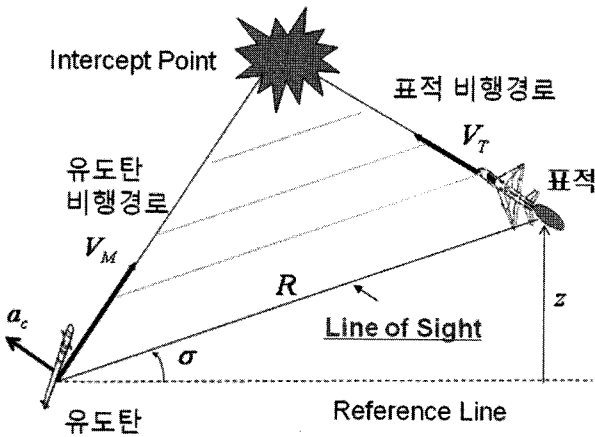


그림 3. 비례항법유도

## 2.2 고전적인 조종기법

전술하였듯이 유도탄의 조종루프는 유도탄을 안정적으로 비행시키기 위한 제어루프라 할 수 있다. 유도탄을 제어하는 방식은 여러 가지가 있을 수 있으나 대략 공력(aerodynamic force)과 추력(thrust vector)을 이용하는 두 가지 형태로 구분된다. 과거에는 추력벡터의 방향을 조절하는 기구를 소형화하여 만드는 것이 쉽지 않고 추력에 의한 유도탄의 자세변화가 공력에 미치는 영향 등에 대한 해석이 어려워 주로 공력제어를 많이 이용하였다.

고전적인 공력제어 조종루프 설계방법의 첫 단계는 풍동시험 등을 통하여 제어핀 변위에 따른 유도탄의 공력학적 특성을 확인하고 이를 이용하여 운동모델을 설정하는 것이다. 이 때, 유도탄 형상의 대칭성 및 롤 운동이 충분히 빠르다는 등의 가정을 이용하여 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)운동을 갈라내고(decoupling) 평형점(trim point)부근에서 선형화하여(linearization) 선형화된 롤, 피치, 요 운동모델들을 얻게 되며, 이러한 운동모델에 고전적인 PID 제어기 설계기법을 적용하여 조종루프를 설계한다. 그런데 이 모델들은 비행체의 속도, 자세, 고도 등의 비행조건에 따라 결정되는 다수의 평형점에 대하여 각각 구해지므로, 결국 최종적인 제어기의 형태는 이 모델들에 대하여 설계된 PID 제어기들을 이득계획법(gain schedule)에 의하여 보간하여 이용하는 형태로 귀결된다.

예를 들어 그림 4와 같이 유도탄 후미에 조종핀이 있는 경우를 살펴보자. 이 경우 유도탄은 피치 방향으로 횡가속도  $a_z$ 를 얻기 위하여 바람에 대하여  $\alpha$  만큼의 받음각(angle of attack)을 가지고 비행하게 되며, 꼬리날개는 이 자세로 유도탄이 비행할 수 있도록 유도탄의 꼬리부분을 누르는 힘을 발생시킨다.

이 경우 유도탄의 피치 운동에 대한 선형화된 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= Z_\alpha \alpha + q + Z_\delta \delta \\ \dot{q} &= M_\alpha \alpha + M_q q + M_\delta \delta \\ a_z &= V(\dot{\alpha} - q) = V(Z_\alpha \alpha + Z_\delta \delta) \end{aligned} \quad (2)$$

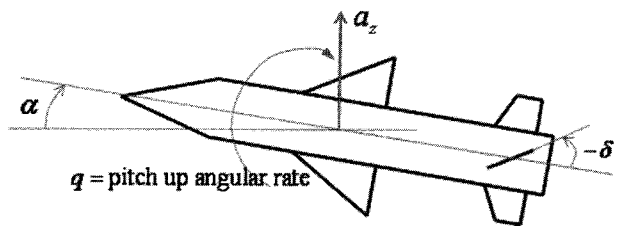


그림 4. 유도탄 꼬리날개 제어 메커니즘

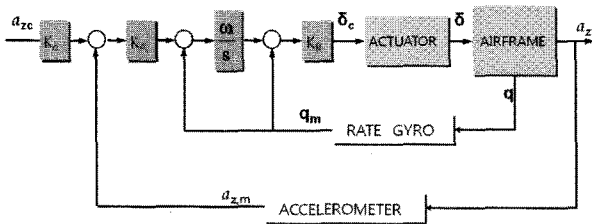


그림 5. 고전적인 가속도 루프의 구조

여기서  $\alpha$ ,  $q$ ,  $\delta$ ,  $a_z$ ,  $V$ 는 각각 유도탄의 받음각, pitch rate, 제어편의 각도, 횡가속도, 속도이며  $Z_\alpha$ ,  $Z_\delta$ ,  $M_\alpha$ ,  $M_q$ ,  $M_\delta$ 는 유도탄의 운동모델을 구성하는 공력계수로서 유도탄의 속도, 고도 등의 함수로 표현된다. 이와 같은 운동방정식을 이용한 전형적인 가속도 제어루프의 구조는 그림 5와 같다.

그림 5의 가속도루프는 전형적인 PID 제어기 형태를 취하고 있으며, 그 이득은 폐루프 시스템의 응답성능 및 안정도여유(stability margin)를 고려하여 설정한다.

### 3. 현대적인 유도조종 기법

현대제어이론이 발전하면서 고전적인 유도조종기법을 현대 제어이론의 관점에서 다시 조명하고 새로운 제어기법을 개발하려는 노력이 계속되어 왔다.

유도분야에서는 최적제어(optimal control)이론을 적용하여 유도루프를 해석하고 새로운 유도법칙을 개발하려는 노력이 많이 이루어졌다. 특히 고전적인 비례항법유도법칙을 최적제어 문제로 전환하여 해를 구함으로써 최적의 비례항법상수를 선정할 수 있었으며, 이를 발전시켜 표적이 기동(maneuver)하는 경우에 적용할 수 있는 APNG (Augmented Proportional Navigation Guidance), 비례항법유도 명령에 추가 항을 부가함으로써 입사각 조건이나 궤적 성형 조건 등을 고려할 수 있도록 만든 BPNG (Biased Proportional Navigation Guidance) 등의 새로운 유도법칙들이 제안되었다. 이와 같이 최적제어 문제의 틀 안에서 조종루프 시간지연, 유도탄 속도 변화, 최소 요격 시간, 최대 요격 속도, 생존성 향상을 위한 회피기동 등 다양한 제한조건을 고려한 유도법칙이 연구되고 있다.

현대적인 조종기법의 연구방향은 유도탄이 점점 고기동화되고, 다양한 조종수단이 발전함에 따라 발생하는 문제들을 해결하는 방향으로 진행되고 있다. 유도탄이 큰 기동 가속도를 만들기 위해서는 큰 받음각을 가져야 한다. 그러나 이 경우 유도탄 운동 특성의 비선형성이 매우 크게 발생하게 되며, 롤, 피치,

요 각축에 대한 상관(cross-coupling)도 매우 커지게 되므로 기존에 이용하던 고전적인 제어기법으로는 충분한 성능을 확보하기 힘들 뿐 아니라, 안정도 해석 조차도 매우 어려운 상황에 직면할 수 있다. 또한 추력제어기기의 발전으로 인하여 공력뿐 아니라 추력도 주요한 제어수단으로 이용할 수 있게 되었다. 현재까지 대부분의 추력제어는 공력제어가 어려운 발사초기단계에서 이용되어 왔으나, 보다 발전된 체계에서는 공력과 추력을 동시에 이용하여 제어하는 방식들이 적용되고 있다. 이러한 문제들은 결국 비선형 제어 문제와 다중입출력시스템(Multiple Input Output System)에 대한 제어문제로 귀결되며 최근에 개발된 다양한 현대제어이론들을 적용하기 위한 기반 연구가 진행되고 있다.

이와 같이 발전된 유도조종기법들을 적용하기 위해서는 유도탄의 비행상황 및 표적에 대한 정보가 많이 필요하다. 그러나 충분한 정보를 획득하기 위해서는 고가의 센서시스템 들을 추가로 장착해야만 할 수도 있고, 심지어 원하는 정보를 직접 측정하지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 현대 필터링 기법들이 많이 적용되고 있는 추세이다. 현대 필터링 기법은 측정하고자 하는 시스템의 모델에 기반한 상태변수 추정기로서 칼만필터가 대표적인 예이다. 필터링 기법을 잘 이용하면 최소의 센서시스템으로 최대한의 정보를 끌어낼 수 있으며, 심지어 직접 측정하지 못하는 상태변수라도 그것이 가관측(observable)하기만 하다면 시스템의 동력학적 특성을 이용하여 추정할 수 있다. 또한 측정센서의 오차 특성을 필터링에 반영함으로써 측정잡음을 크게 완화한 측정정보를 제공할 수도 있다. 이러한 필터링 기법은 유도탄의 발사시 자세를 추정하거나, 탐색기 정보를 이용하여 표적의 속도, 가속도를 추정하는 등의 용도로 활용되고 있으며, 다양한 항법센서들의 정보를 융합하여 최적의 항법해를 산출하는 데에도 적극적으로 이용되고 있다.

### 4. 유도조종기법 발전추세 및 결론

유도조종기법이란 유도무기에 대한 제어기법이므로, 그 발전방향은 유도무기의 발전방향과 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다. 이러한 관점에서 유도조종기법의 발전추세를 몇 가지 언급하고자 한다.

첫째로 현대 유도탄은 점점 고기동화 되어 가므로 이를 효과적으로 제어하기 위한 유도조종기법이 연구되어야 한다는 점이다. 유도탄이 큰 공력 가속도를 만들기 위해서는 고받음각

(high angle of attack)영역에서의 운용이 필요하며, 이 영역에서의 운용을 위하여 롤, 피치, 요 운동 상호간의 간섭을 효과적으로 해결하는 기술, 고반응각 영역에서의 공력 비선형성을 효과적으로 제어하는 기술 등이 요구된다.

둘째로 빠르고 기동이 심한 표적을 요격하기 위하여 현대 유도탄은 점점 더 민첩한 기동이 요구된다는 것이다. 유도탄의 기동 속도 향상을 위하여 적용되는 한 가지 방법은 추력제어와 공력제어를 동시에 이용하는 방법이다. 일반적으로 꼬리날개 제어편을 이용하여 공력제어를 수행할 경우 유도탄은 비최소위상 시스템의 특성을 보이는데 반하여 추력벡터 변화에 대한 유도탄의 운동특성은 최소위상 시스템의 특성을 보이는 등 두 가지 제어수단에 따른 유도탄의 운동 특성은 많은 차이를 보인다. 따라서 이러한 차이를 극복하고 두 가지 제어수단을 효과적으로 제어에 이용하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

셋째로 매우 견고한 표적을 공격해야 한다든지 또는 탄도탄 등과 같이 매우 빠른 표적을 요격해야 하는 상황에서 요구되는 다양한 제한조건을 만족시킬 수 있는 유도법칙의 연구가 필요하다. 이 문제는 유도성능과 관련된 여러 가지 제한조건을 포함하는 최적제어문제를 설정하고 그 해를 구하는 방식으로 연구되고 있으며, 이를 위하여 다양한 형태의 제한조건이 있는 최적제어문제들의 해를 효과적으로 구하는 연구 등이 수행되어야 할 것이다.

넷째로 유도탄에 장착된 센서정보를 통합하여 유도조종에 필요한 양질의 정보를 제공하기 위한 유도조종 필터링 기법에 대한 연구가 필요하다. 앞 장에서 설명하였듯이 발전된 현대 유도조종기법을 적용하기 위해서는 여기에 필요한 정보를 제공하기 위한 필터가 필수적이며, 이를 위하여 다양한 센서정보를 효과적으로 통합하여 필요한 정보를 획득하기 위한 유도조종 필터링 기술이 연구되어야 한다.

마지막으로 다수의 유도탄을 동시에 운용할 경우에 요구되는 유도조종기술이 필요하다. 최근의 로봇 및 무인비행체(unmanned air vehicle) 관련기술의 발전에 따라, 다수의 유도탄을 동시에 운용하거나 기타 무인비행체와의 협력작전의 형태로 유도탄을 운용하는 방안이 연구되고 있다. 이러한 방식의 운용을 위해서는 유도탄의 군집유도 및 네트워크 기반 필터링 기술 등의 연구 개발이 필요하다.

이상과 같이 고전적인 유도탄 유도조종기법과 근래에 연구되어 적용되기 시작한 현대유도조종기법들에 대하여 설명하고 향후 연구방향을 제시하였다. 유도탄은 현대전의 필수 무기체계로 그 중요도가 점점 더해지고 있으며, 보다 견고해지고 고기동을 수행하도록 변화하는 표적에 대응하기 위하여 지속적으로 발전하고 있다. 유도조종기법은 이러한 유도탄의 발전방향에 맞추어 함께 발전할 것으로 예상되며, 최근에 괄목할 만한 발전을 보이는 컴퓨터 기술과 센서기술, 로봇기술 등을 효과적으로 흡수하여 최소의 비용으로 최대의 효과를 얻을 수 있는 유도무기 체계발전에 기여할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] S. Arimoto, "Linear controllable systems," *Nature*, vol. 135, pp. 18-27, July 1990.
- [2] E. L. Fleeman, "Tactical Missile Design," *AIAA Education Series*, 2001.
- [3] J. F. Rouse, *Guided Weapons*, Brassey's London 2000.
- [4] P. Garnell, *Guided Weapon Control Systems*, Pergamon Series, 1980.
- [5] *Non-Line of Sight- Launch System*, Raytheon.
- [6] 조규필, 유도무기 유도조종 개론, 1<sup>st</sup> Ed. 1994, 2<sup>nd</sup> Ed., 국방과학연구소, 2000.
- [7] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, 3<sup>rd</sup> Ed. Vol. 176 Progress in Astronautics and Aeronautics, *AIAA Tactical Missile Series*, 1998.
- [8] 황익호, "항법유도조종 개론," 중앙대 전기전자공학 세미나 자료, 2008.

### ○ 저자약력



#### 황익호

- 1988년, 1990년, 1995년 서울 대학교 공과대학 제어계측공학과 공학사, 공학석사, 공학박사.
- 1995년~현재 국방과학연구소 유도조종부 책임연구원.
- 관심분야 : 유도조종기법, 추정론, 표적추적필터 등