

석사학위논문  
**Master's Thesis**

2축 자이로센서를 사용하는 차량 탑재용  
안정화시스템의 안정화 오차에 관한 연구

**A Study on Error Analysis of Vehicle-mounted Stabilization  
System Using 2-axes Gyro Sensors**

한국과학기술원



김중현 (金 中 賢 Joong-hyun Kim)

자동차기술대학원

**Graduate School of Automobile Technology**

한국과학기술원

**Korea Advanced Institute of Science and Technology**

**2008**

2축 자이로센서를 사용하는 차량 탑재용  
안정화시스템의 안정화 오차에 관한 연구

**A Study on Error Analysis of Vehicle-mounted Stabilization  
System Using 2-axes Gyro Sensors**

# **A Study on Error Analysis of Vehicle-mounted Stabilization System Using 2-axes Gyro Sensors**

Advisor: Professor Youngjin Park

By  
Joong-hyun Kim

Graduate School of Automobile Technology  
Korea Advanced Institute of Science and Technology

**KAIST**

A thesis submitted to the faculty of the Korea Advanced Institute of Science and Technology in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science in Graduate School of Automobile Technology.

Daejeon, Korea

June 6, 2008

Approved by

---

Professor Youngjin Park  
Major Advisor

2축 자이로센서를 사용하는 차량 탑재용  
안정화시스템의 안정화 오차에 관한 연구

김중현

위 논문은 한국과학기술원 석사학위 논문으로  
학위 논문 심사위원회에서 심사 통과 하였음.

2008년 6월 6일

심사위원장    박영진    (인)

심사위원    최세범    (인)

심사위원    임채욱    (인)

**A Study on Error Analysis of Vehicle-mounted Stabilization System  
Using 2-axes Gyro Sensors**

2축 자이로센서를 사용하는 차량 탑재용 안정화시스템의  
안정화 오차에 관한 연구

**Graduate School of Automobile Technology, 2008, 85p**  
**Advisor Prof. Youngjin Park.**

**Abstract**

In stabilization systems disturbed by base motion, attitude estimation process is very important, because stabilization performance depends on disturbance rejection capability based on attitude estimation. For the accurate stabilization, at least 3 states representing system's rotational motion are required to be measured or estimated, and transforming these states to global coordinates should be accompanied, in general. However in most practical cases of stabilization system mounted on a mobile vehicle, only 2-axes gyro sensor is used to sense the pitch and yaw angular rates of the system excited by vehicle motion.

In this study, we analytically derived stabilization errors to be generated in system with 2-axes gyro sensor based on some reasonable assumptions, and verified them through simulation with various vehicle motions in typical traveling conditions. Simulation results and analytic error formulas show that stabilization performances are almost same regardless of coordinates-transformation process, and biased roll angle is the major source of the accumulation of errors when 2-axes gyro sensor is used for stabilization system. In addition, we implemented a MATLAB based human-in-the-loop stabilization simulator to confirm the stabilization behavior by manipulation of human on a mobile vehicle.

# 목 차

Chapter 1. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	2
1.2 연구 목적 .....	5
Chapter 2. 2축 안정화제어 시스템 .....	6
2.1 시스템 구조 .....	7
2.2 시스템 모델링 .....	9
2.3 안정화 제어 구조 .....	10
Chapter 3. 자이로센서 신호처리 방법 .....	12
3.1 자이로센서를 이용한 자세 추정 .....	13
3.2 자이로센서 사용 및 측정신호 처리방법 .....	15
Chapter 4. 안정화 오차의 해석적 유도 .....	17
4.1 해석적 유도 과정 .....	18
4.2 해석적 모델 분석 .....	23
Chapter 5. 모의실험 .....	24
5.1 외란각 생성을 위한 차량 주행 모의실험 .....	25
5.2 자세 추정 성능 비교를 위한 모의실험 .....	27
5.3 안정화 성능 비교를 위한 모의실험 .....	28
5.4 모의실험 결과 분석 .....	31
Chapter 6. MATLAB 기반의 안정화 시뮬레이터 구현 .....	53
6.1 시뮬레이터 개략도 .....	54
6.2 안정화 제어 시현 .....	55
Chapter 7. 결론 및 고찰 .....	57

참고문헌 .....	60
부록 A .....	64
부록 B .....	65
부록 C .....	72
부록 D .....	77



# Chapter I

## 1. 서론



### 1.1 연구 배경

### 1.2 연구 목적



# 1. 서론

## 1.1 연구 배경

베이스의 움직임과는 무관하게 안정된 자세로 목표물을 지향하도록 하는 안정화 제어시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 작게는 카메라 렌즈의 손떨림 방지 기술에서부터 크게는 탱크 포신제어, 인공위성의 자세제어에 이르기까지 대상체의 자세를 안정화시키는 기술 모두 안정화제어의 범주에 포함되며, 안정화의 정확도 향상을 위한 제어 로직 개발과 더불어 저비용의 센서 사용 방법론이 안정화 구현에 있어 큰 이슈로 작용하고 있다.

안정화제어의 주된 목적은, 시스템을 원하는 방향으로 정확히 추종시키기 위해 베이스의 움직임을 비롯한 시스템에 작용하는 외란을 효과적으로 제거하는 것(disturbance rejection)에 있다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서 선박, 항공기, 차량 등 여러 이동수단에 탑재되는 안정화 제어 플랫폼의 경우 대부분 2축 또는 3축 짐벌(gimbal) 형태의 구동 메커니즘으로 설계되며, 구동기로 각 축을 회전시킴으로써 베이스 운동으로부터 유발된 회전운동을 보상하고 있다. 그런데 이러한 효과적인 외란 제거를 위해서는 시스템의 자세에 대한 정확한 추정(attitude estimation)이 선행되어야 한다. 자세 추정을 위한 센서로는 자이로센서(gyro sensor), 경사계(inclinometer) 및 가속도계(accelerometer) 등이 사용되고 있으며, 일반적으로 다음과 같은 특징을 갖는 것으로 알려져 있다.

자이로센서는 각속도를 측정하는 센서로서, 비교적 응답속도가 빠르고 사용 주파수 대역폭(bandwidth)이 넓은 장점이 있는 반면 가격이 비싸고 출력 각속도를 각도로 적분할 때 센서 잡음 등으로 인해 오차누적 현상이 발생하는 단점이 있다. 경사계는 중력 방향에 대해 기울어진 각도를 측정 하는 센서로서, 비교적 가격이 저렴하지만 사용 주파수 대역폭이 작아 빠르게 움직이는 물체의 자세를

추정하기에는 부적절하다. 가속도계의 경우, 두 개 이상의 가속도계에서 출력되는 가속도 신호를 비교함으로써 중력 방향에 대해 기울어진 각도를 계산하는 방식으로 자세 추정에 이용되지만, 병진운동(translational motion)에 의한 가속도 외란에 취약하다는 단점이 있다.[1~4]

따라서 이와 같은 각 센서들의 특징을 고려하여 안정화 시스템의 목표 지향 정확도(target pointing accuracy), 베이스의 운동 특성 및 플랫폼 제조 단가 등에 따라 특정 센서가 선별적으로 사용되거나 두 가지 이상의 센서가 융합되어 사용되고 있다.

그 예로서, 선박에 탑재되는 위성통신 안테나의 경우 파도에 의한 선체의 3차원 움직임, 즉 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 운동이 상대적으로 크지만 그 변화가 느린 외란 환경 하에 있다. 따라서 안정화 제어를 위한 자세 추정 센서로서 롤/피치 각 측정을 위한 2축 경사계와 요 각 측정을 위한 자이로컴퍼스(gyro-compass)가 사용되거나[5] 좀더 정확한 자세 추정을 위해 경사계와 2축 자이로센서가 융합(fusion)되어 사용되기도 한다.[4][6]

반면, 선박처럼 움직임이 크면서도 보다 정밀한 자세 제어가 요구되는 항공기에는 3축 자이로센서가 사용된다. 그러나 자이로센서가 단독으로 사용되기보다는 GPS나 가속도계 등 추가적인 센서가 융합되어 장시간 사용에 따른 자이로센서의 오차누적 문제를 해결하는 스트랩다운(strap-down) 방식의 자세 추정 센서가 일반적으로 사용되고 있다.[7~8]

한편, 지상에서 움직이는 차량의 경우는 노면의 불규칙한 정도 및 차량의 속도에 따라 다르지만, 현가장치 등의 기능으로 인해 일반적으로 주행 중 롤 / 피치 운동은 매우 작게 나타난다. 따라서 차량에 탑재되는 안정화 시스템의 플랫폼은 차량에 의한 피치 / 요 운동만을 보상할 수 있도록 대부분 선회(azimuth) / 고저(elevation) 구조의 2축 짐벌 구동 형태를 취하며, 시스템의 자세 추정을 위해 피치 / 요 각속도를 감지하는 2축 자이로센서가 사용된다.[11~14] 이때, 시스템이 지향하고

안정화되어야 하는 방향, 즉 목표 선회각 및 고저각은 일반적으로 시스템 기준 좌표계(local coordinates system)가 아닌 전역좌표계(global coordinates system) 기준으로 정의되므로 정확한 안정화 제어를 위해서는 자이로센서 출력 각속도도 전역좌표계 기준으로 변환되어 제어변수로 이용되어야 한다. 그러나 대부분의 시스템에서는 차량의 롤 / 피치 운동이 매우 작고 전역좌표계(global coordinates system)로의 실시간 좌표변환이 어려운 이유로 인해 2축 자이로센서의 출력신호를 추가적인 신호처리과정 없이 안정화제어에 그대로 이용하고 있다. [11][13]

그 동안 차량 탑재용 안정화 시스템의 연구는 주로 군사용 목적으로 진행되어 왔으며, 대부분의 연구가 차량의 움직임으로부터 유발된 외란의 정확한 보상보다는 불균형 질량, 시스템 강성, 비선형 마찰 등 시스템 내부의 외란 요소를 정확히 모델링하고 보상함으로써 안정화 성능을 향상시키는데 집중되어 왔다.[9~14] 그러나 고정확도를 요하는 안정화 시스템의 경우, 안정화 성능은 모델링의 정확성뿐만 아니라 센서 사용에 따른 자세 추정의 정확도에도 영향을 받는다. 더구나 차량 탑재용 안정화 시스템에 사용되는 센서는 고비용의 자이로센서로서, 실제 시스템이 양산될 경우 센서의 사용 개수 및 정확도에 따라 가격 경쟁력이 크게 좌우된다. 따라서 자이로센서 사용 개수와 측정된 신호의 처리방법에 의한 안정화 오차를 해석적 방법과 모의실험을 통해 예측이 가능하다면, 예측된 오차를 기반으로 안정화 시스템의 자세추정 센서를 선정하는데 일정한 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이러한 오차의 특성 분석을 통해 실제 차량 탑재용 안정화 시스템에 적용되고 있는 기존의 자이로센서 신호처리 방법에 대한 효율성의 검증도 가능할 것이다.

## 1.2 연구 목적

차량에 탑재되어 운용되는 안정화 시스템의 궁극적인 목적은 차량의 움직임과 관계없이 운용자가 향하고자 하는 방향으로 시스템을 정확하게 지향시키는 것이다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서는 실시간으로 변하는 시스템의 자세를 정확하게 추정(estimation)해야 하며, 추정된 정보를 이용하여 차량의 움직임으로부터 유발된 외란을 효과적으로 제거할 수 있어야 한다.

한 시스템의 정확한 자세 추정을 위해서는 대상 시스템의 세 가지 회전운동 정보를 모두 알아야 한다. 만약 이를 위한 자세추정 센서로서 자이로센서를 이용한다면, 3축 자이로센서를 탑재하여 시스템의 세 가지 각속도를 측정하는 방법이 타당하다. 그러나 기존의 차량 탑재용 시스템에는 자세추정 센서로서 2축 자이로센서가 사용되어 차량 주행에 따른 시스템의 피치 및 요 각속도만을 측정하며, 추가적인 신호처리 과정 없이 측정된 각속도 정보를 이용하여 해당 방향을 안정화하고 있다.

따라서 본 연구에서는 차량 탑재용 안정화 제어 시스템의 자세추정 센서로서 2축 자이로센서만이 사용될 경우 나타날 수 있는 안정화 오차를 적절한 가정에 입각하여 해석적으로 유도하고 차량의 다양한 주행 환경을 모사하는 시뮬레이션을 수행하여 해석적 모델의 타당성을 검증하고자 한다. 또한 안정화 오차의 비교, 분석을 통해 실제 차량 탑재용 안정화 제어 시스템에 적용되고 있는 기존의 2축 자이로센서 신호처리 방법의 효용성을 고찰하도록 한다.

# Chapter II

## 2. 2축 안정화제어 시스템

KAIST

### 2.1 시스템 구조

### 2.2 시스템 모델링

## 2. 2축 안정화제어 시스템

본 장에서는 전체시스템의 구조를 밝히고 시스템 구동 메커니즘을 소개한 후, 상용 소프트웨어를 이용하여 시스템을 모델링한 과정에 대하여 설명한다. 또한 본 시스템에 적용될 기존의 안정화 제어 알고리즘에 대해 간략하게 소개한다.

### 2.1 시스템 구조

본 연구에서는 차량 탑재용 시스템에 널리 적용되고 있는 2축 짐벌(gimbal) 구동 형태의 안정화 구조[18][19]를 고려하고 있다. 그림 2-1과 같이 안정화 제어 플랫폼은 크게 선회 구동부(azimuthal actuation part)와 고저 구동부(elevational actuation part)로 구성된다. 우선 선회 구동부에서 선회운동이 발생하고 그 위에서 고저 운동이 발생하는 2자유도 구조로서, 최종적으로 목표물을 조준하는 안정화 대상체(aimer)가 거치대를 통해 고저 구동부에 구속되어있다. 두 구동부 모두 전기모터에 의해 제어된다고 가정하였다. 또한 고저방향 구동축과 동일축선상 위치에 자이로센서가 장착되어 차량 움직임에 의한 대상체의 회전 각속도 정보를 측정하며, 각 구동부에는 엔코더가 장착되어 차량의 정면 방향에 대한 안정화 대상체의 상대 각속도를 측정할 수 있다고 가정하였다.

본 시스템의 구동 메커니즘은 다음과 같다.

운용자는 시스템이 장착될 차량의 내부 또는 외부에서 조이스틱을 이용해 운용자가 원하는 방향으로 안정화 대상체를 작동시킨다. 이 때, 운용자의 시야는 시스템의 고저 구동부에 구속되어 움직이는 비전카메라를 통해 제한된다. 즉, 운용자가 비전카메라를 통해 바라보는 방향은 항상 대상체가 향하는 방향과 일치하게 된다. 운용자의 조이스틱 조작 방향은 각 시스템에 각속도명령으로 작용하여 구동기인 모터에 의해 시스템의 선회 및 고저 구동부를 동작시키며, 이와

함께 안정화 대상체에 장착된 자이로센서에서 차량의 움직임에 의한 각속도 변화를 측정한다. 그런데 차량의 운동은 대상체의 안정된 자세유지를 방해하므로, 시스템의 선회 및 고저 구동부의 안정화 제어기를 통해 이러한 원하지 않는 움직임을 실시간으로 보상하여 안정화 대상체에 대한 차량 움직임을 최대한 억제함으로써 운용자가 향하고자 하는 방향으로 구조물을 작동시키는 것이 기본적인 구동 메커니즘이다. 단, 대상체의 3축 운동 중 롤 운동에 의한 영향은 보상하지 않으며, 자이로센서가 측정하지 못하는 병진운동 또한 본 연구의 범위에서 제외하도록 한다.

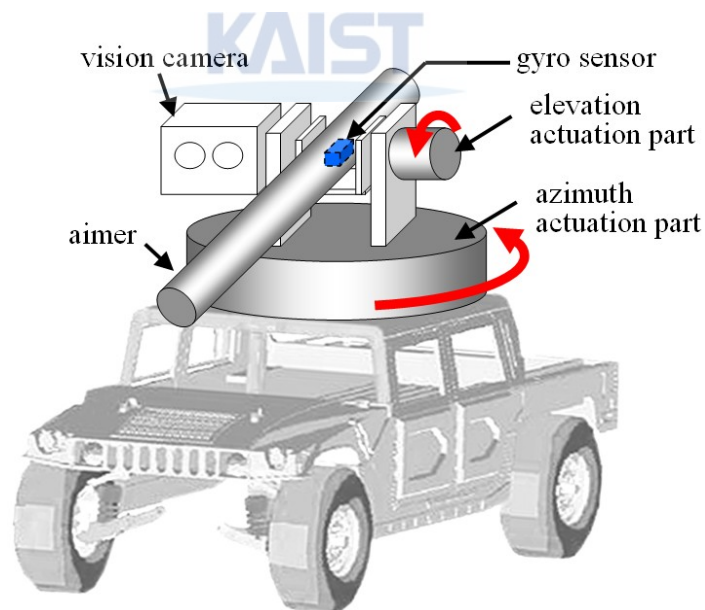


그림 2-1. 시스템 구조

## 2.2 시스템 모델링

안정화 시스템의 성능 비교에 앞서 MATLAB SIMULINK 기반의 동역학 시뮬레이션 툴인 SimMechanics를 이용하여 선회 / 고저 플랜트 모델과 차량모델 등, 시뮬레이션 수행을 위한 제반 환경을 모델링하였다.

SimMechanics에서 제공하는 SIMULINK 블록은 크게 세 요소로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 기계의 물체를 구성하는 Body 블록과 기준 좌표계가 되는 Ground 블록이고, 두 번째는 Body와 Body를 연결시켜주는 Joint 블록이며, 마지막은 Body 또는 Joint 의 속도, 가속도, 각속도, 각변위 등을 측정할 수 있는 Sensor 블록과 Joint 에 힘, 토크, 속도, 위치, 각속도, 각변위 등을 입력해줄 수 있는 Actuator 블록이다. 따라서 이와 같은 블록들을 이용하여 그림 2-2 와 같이 시스템을 모델링하였다.

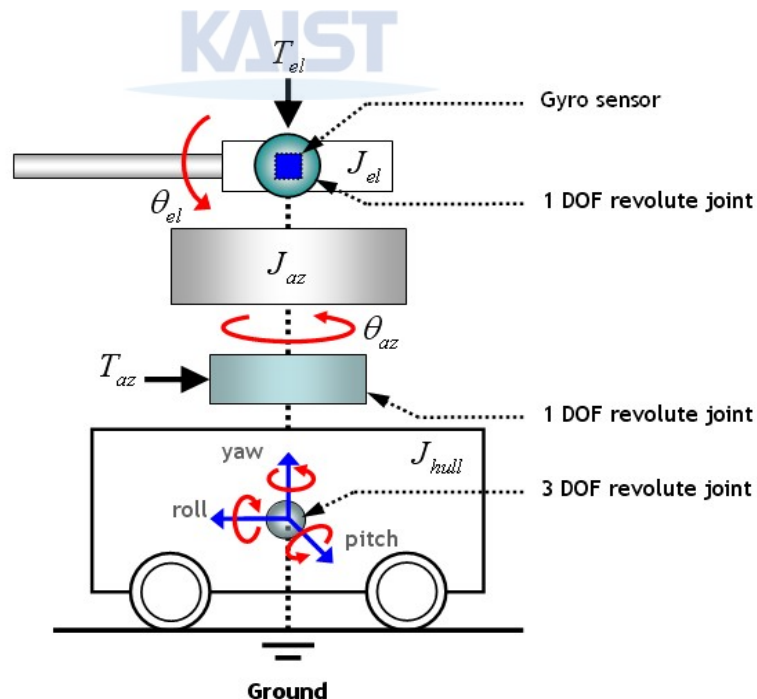


그림 2-2. SimMechanics를 이용한 플랜트 모델링



차체 및 선회 구동부, 고저 구동부의 Body는 각각 질량과 관성모멘트  $J_{hull}$ ,  $J_{az}$ ,  $J_{el}$  을 갖는 강체로 모델링하였으며, 각 Body 사이는 질량과 관성모멘트를 갖지 않는 이상적인 Joint와 Actuator를 연결하였다. 즉, Ground와 차체의 질량중심 사이에 3자유도 Revolute joint와 Actuator를 연결하여 Ground 기준의 차량의 롤, 피치, 요 운동이 가능하게 만들었으며, 차체와 선회 구동부 사이, 그리고 선회와 고저 구동부 사이를 1자유도 Revolute joint로 연결하여 Actuator를 통해 토크가 인가될 때, 선회운동이 발생하도록 하였다. 또한 고저운동의 회전축 중심에 Body sensor를 연결하여 고저 구동부에 고정된 좌표계 기준의 각속도를 측정하도록 함으로써 자이로센서 출력 신호의 물리적 특성을 잘 모사하도록 하였으며, 선회와 고저 구동부에 body sensor를 연결하여 상대각속도를 측정하는 엔코더의 역할을 하도록 하였다. 추가적으로 선회와 고저 부분 사이의 Actuator 구동 시 점성감쇠력(linear viscous damping force)이 작용하도록 모델링하였다. 단, 본 연구에서는 기계요소간 비선형 마찰(nonlinear friction) 영향은 고려하지 않았으며, 모든 센서의 출력은 측정잡음(measurement noise)이 없도록 모델링하였다. 모델링에 사용된 각 Body의 질량 및 관성모멘트, 점성감쇠력 등의 자세한 파라미터는 부록 A에 나타내었다.

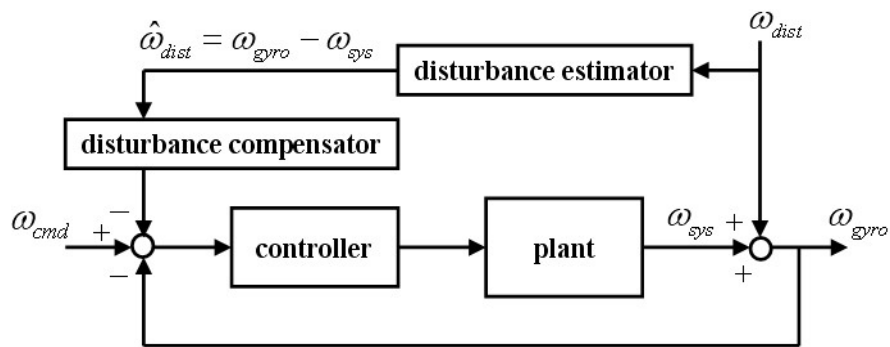
## 2.3 안정화 제어 구조

본 연구에서는 안정화 모의실험에 적용될 제어 구조로서 차량 탑재용 안정화 시스템에 널리 이용되는 외란제거에 효과적인 속도제어 개념의 알고리즘[20]을 적용하였다.

기본적인 제어 구조는 자이로센서의 출력 각속도( $\omega_{gyro}$ )가 선회 및 고저 방향의 각속도 입력( $\omega_{cmd}$ )을 추종하도록 하는 제어 방식이다. 즉, 자이로센서가 부착된 안정화 대상체(aimer)의 선회/고저 각속도를 운용자가 의도한 각속도로 추종시키는 구조이다. 그림 2-3의 블록선도에 나타난 바와 같이 대상체에 장착된 자이로센서의

출력 각속도가 피드백되고, 차량으로부터 시스템으로 인가되는 외란각속도를 실시간으로 추정하여(disturbance estimation) 선보상하는 피드포워드 기능이 더해져 외란이 제거되는 것을 알 수 있다.

전체적인 안정화 제어 구조 및 제어기 설계과정, 그리고 제어 시스템 특성 등을 부록 B에 자세하게 소개하였다.



$\omega_{cmd}$  : user's velocity command

$\omega_{gyro}$  : gyro sensor output angular rate

$\omega_{sys}$  : relative angular velocity of each part

$\omega_{dist}$  : vehicle-induced disturbance

$\hat{\omega}_{dist}$  : estimated disturbance

그림 2-3. 속도제어 알고리즘 블록선도

# Chapter III

## 3. 자이로센서 신호처리 방법

### 3.1 자이로센서를 이용한 자세 추정

### 3.2 센서 사용 및 측정신호 처리방법

### 3. 자이로센서 신호처리 방법

본 장에서는 자이로센서로부터 출력된 각속도를 이용하여 대상체의 자세를 추정하는 방법에 대해 살펴보고 안정화 오차의 해석적 유도 과정과 모의실험에서 고려될 자이로센서 사용 및 측정신호 처리방법에 대해 기술한다.

#### 3.1 자이로센서를 이용한 자세 추정

물리적 의미로서의 ‘자세(attitude)’라 함은 전역좌표계(global coordinates system)에서 정의된 물체의 롤, 피치, 요 각을 말한다. 그러나 자이로센서는 센서자체에 고정된 좌표계(local coordinates system) 기준으로 각 주축(principle axis)의 절대각속도를 출력하는 특징이 있다. 즉, 자이로센서가 탑재된 대상체가 연속적으로 운동을 하고 있다면, 센서에서는 전역좌표계 기준이 아닌 대상체의 운동에 따라 실시간으로 축중심이 바뀌는 물체 고정좌표계(body-fixed coordinates system) 기준의 절대각속도를 출력하게 된다. 이 때, 자이로센서의 종류가 단축일 경우 한 방향 각속도 성분만 출력되며, 2축일 경우 해당 두 성분의 각속도만, 그리고 3축일 경우 세 가지 각속도 성분  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ 가 모두 측정 가능하다.

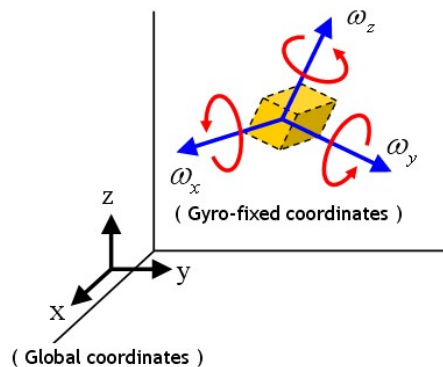


그림 3-1. 자이로센서 고정 좌표계 및 출력 각속도

따라서 자이로센서를 이용해 대상 시스템의 자세를 표현하기 위해서는 3축 자이로센서를 부착하여 시스템의 3축 각속도를 모두 측정해야 하며, 측정된 각속도를 전역좌표계 기준으로 변환하여(coordinates-transformation) 적분하는 작업이 필수적으로 수반되어야 한다. 이러한 좌표변환 방법에는 방향코사인 행렬을 이용하는 방법, 쿼터니언 방법(quaternion method), 오일러 각을 이용하는 방법(Euler angle method) 등이 있다. 이 중 오일러 각을 이용하는 방법은 짐벌(gimbal) 시스템의 출력에 해당되는 롤, 피치 및 요 각을 자이로센서 출력 각속도를 통하여 계산하는 방법으로서, 3개의 매개변수만을 사용하므로 계산량이 적고 물리적으로 이해가 쉽다는 장점으로 인해 안정화 제어 분야에서 많이 이용되고 있다. 그러나 피치각이  $\pm 90^\circ$  일 경우에는 짐벌 잠금현상으로 알려진 특이점 문제(singularity)가 발생하는 단점을 갖는다. 본 연구에서 다루는 시스템은 고저 구동각이  $\pm 90^\circ$  범위를 벗어나지 않는 것으로 가정하여 좌표변환시 오일러 각 방법을 이용하기로 한다.

만약 자이로센서에서 출력되는 각 축의 절대각속도를 각각  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  라고 하고, 그에 상응하는 롤, 피치, 요 오일러 각을 각각  $\phi, \theta, \psi$  라고 하면, 그 관계식은 식 (3.1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

대상체의 초기 자세를 알고, 자이로센서로부터 정확한 각속도가 측정된다면 식 (3.1)을 이용하여 대상체의 자세변화를 전역좌표계 기준에서 정확히 추정할 수 있게 된다.

### 3.2 센서 사용 및 측정신호 처리방법

본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 방법으로 자이로센서 출력신호를 처리하고자 한다. 각 방법에 의해 계산된 각속도는 2장에서 소개된 제어 알고리즘의 상태변수로 사용되며, 4장에 소개될 안정화 제어 모의실험을 통하여 그 성능이 비교될 것이다.

- (1) 3축 각속도( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) 측정 후 전역좌표계 기준의 오일러 각 변환
- (2) 2축 각속도( $\omega_y, \omega_z$ ) 측정 후 전역좌표계 기준의 오일러 각 변환
- (3) 2축 각속도( $\omega_y, \omega_z$ ) 측정 후 무변환

첫 번째 방법은 가장 일반적이고 이상적인 3차원 자세추정 방법으로서, 3축 자이로센서를 사용하여 3축의 각속도 정보를 모두 얻어낸 후 전역좌표계 기준의 오일러 각으로 변환하여 선회 및 고저 구동 제어에 이용하게 된다. 3축의 회전운동 정보를 모두 측정하여 변환하므로 세 가지 방법 중 가장 정확한 방법임은 틀림없으나 신호 처리를 위한 계산량이 상대적으로 많고 고비용의 3축 자이로센서를 사용해야 한다는 단점이 있다.

두 번째 방법은 2축 자이로센서를 이용하여 2축의 절대각속도를 측정한 후 오일러 각으로 변환하는 방법이다. 본 연구의 대상이 되는 시스템은 차량에 움직임에 의한 롤 운동은 제어하지 않고 요 및 피치 운동에 대응되는 선회 및 고저각 만을 제어하므로, 2축 자이로센서로서  $\omega_y, \omega_z$ 을 측정하는 센서가 적합하다. 따라서 본 방법을 사용할 경우, 식 (3.1)에서  $\omega_x = 0$  인 상태로 좌표변환이

이루어지고 이로부터 변환된 피치 및 요 오일러 각속도가 선회 및 고저 구동 제어에 이용된다. 본 방법은 자이로센서가 롤 운동을 측정하지 못함에 따른 오차의 누적으로 인해 3축 자이로센서를 이용하는 첫 번째 방법보다 다소 정확도가 낮을 것으로 예상되지만 3축 대신 2축 자이로센서를 사용하므로 가격이 저렴해진다는 장점이 있다.

세 번째 방법의 경우는 2축 자이로센서로부터 출력되는 2축 절대각속도를 좌표변환 없이 그대로 선회 및 고저 구동 제어에 이용하는 방법이다. 본 방법은 차량 탑재용 안정화 시스템에 가장 널리 이용되는 신호처리 방법으로서, 좌표변환 과정이 없으므로 세 가지 방법 중 계산량이 가장 적다는 장점이 있다. 그러나 시스템에 다소 큰 외란이 작용할 경우, 즉 시스템이 탑재된 차량의 3차원 운동이 심할 경우 좌표계 불일치로 인한 추정오차(estimation error) 증가로 인해 안정화제어 성능이 현저하게 감소할 것으로 예상된다.

# Chapter IV

## 4. 안정화 오차의 해석적 유도

### 4.1 해석적 유도 과정

### 4.2 해석적 모델 분석



## 4. 안정화 오차의 해석적 유도

본 장에서는 3장에서 논한 세 가지 자이로센서 신호처리 방법으로부터 추정된 자세 정보를 이용하여 각각 안정화 제어를 수행했을 경우, 3축 자이로센서를 사용하는 이상적인 방법에 의한 안정화 결과와 비교하여 2축 자이로센서를 사용하는 나머지 두 방법을 이용한 제어 결과 나타나는 안정화 오차를 해석적으로 유도한다.

### 4.1 해석적 유도 과정

본 유도 과정에서는 차량 주행 중 롤 각도가  $\pm 10^\circ$  이내로 미비하게 발생하여 다음과 같은 선형화가 가능하다는 가정에서 출발한다.

$$\sin \phi \approx \phi, \cos \phi \approx 1 \quad (\text{가정 1})$$

따라서 3장에서의 좌표변환 식 (3.1)은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \phi \tan \theta & \tan \theta \\ 0 & 1 & -\phi \\ 0 & \phi / \cos \theta & 1 / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

#### 4.1.1 3축 자이로센서를 사용하는 신호처리 방법에 의한 안정화 결과

3축 자이로센서의 출력 각속도를 전역좌표계 기준으로 변환하는 이상적인 방법을 이용했을 경우 나타나는 시스템의 롤, 피치 및 요 각속도는 식 (4.1)에 의해 다음과

같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \omega_x + \phi\omega_y \tan \theta + \omega_z \tan \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_y - \phi\omega_z \\ \dot{\psi} &= \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y + \frac{1}{\cos \theta} \omega_z\end{aligned}\tag{4.2}$$

식 (4.2)로부터 도출된 각속도를 기준으로, 나머지 두 신호처리 방법에서의 선회, 고저 안정화 오차  $\psi_{err}$ ,  $\theta_{err}$  를 계산하면 다음과 같다.

#### 4.1.2 좌표변환 과정이 수반되는 2축 자이로센서 신호처리 방법에서의 안정화 오차



본 신호처리 방법에서는 자이로센서가 시스템의 롤 운동을 측정하지 못하므로 해당 출력 각속도를  $\hat{\omega}_x = 0$  으로 가정하여 좌표변환을 수행한다. 따라서 본 방법으로부터의 안정화된 각속도는 식 (4.3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{\dot{\phi}} &= \hat{\phi}\hat{\omega}_y \tan \hat{\theta} + \hat{\omega}_z \tan \hat{\theta} \\ \hat{\dot{\theta}} &= \hat{\omega}_y - \hat{\phi}\hat{\omega}_z \\ \hat{\dot{\psi}} &= \frac{\hat{\phi}}{\cos \hat{\theta}} \hat{\omega}_y + \frac{1}{\cos \hat{\theta}} \hat{\omega}_z\end{aligned}\tag{4.3}$$

안정화 오차는 본 방법을 이용하여 안정화된 요 및 피치 각과 3축 자이로센서를 이용한 방법에서의 안정화된 요 및 피치 각과의 오차로서 식 (4.4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}\psi_{err} &= \hat{\psi} - \psi = \int (\hat{\dot{\psi}} - \dot{\psi}) dt \\ \theta_{err} &= \hat{\theta} - \theta = \int (\hat{\dot{\theta}} - \dot{\theta}) dt\end{aligned}\tag{4.4}$$

식 (4.2)와 식 (4.3)을 식 (4.4)에 대입하면 안정화 오차는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}\int (\hat{\dot{\psi}} - \dot{\psi}) dt &= \int \left( \frac{\hat{\phi}}{\cos \hat{\theta}} \hat{\omega}_y + \frac{1}{\cos \hat{\theta}} \hat{\omega}_z - \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y - \frac{1}{\cos \theta} \omega_z \right) dt \\ \int (\hat{\dot{\theta}} - \dot{\theta}) dt &= \int (\hat{\omega}_y - \hat{\phi} \omega_z - \omega_y + \phi \omega_z) dt\end{aligned}\tag{4.5}$$

이때 안정화 제어가 이상적으로 수행되어 두 방법으로부터 안정화된 피치 각이 거의 같아 (가정 2)가 만족되고, 두 방법의 자이로센서에서 출력되는 피치 및 요 각속도의 평균값(mean)이 근사적으로 같아 (가정 3)이 성립한다면,

$$\cos \hat{\theta} \approx \cos \theta \tag{가정 2}$$

$$\begin{aligned}\int (\hat{\omega}_z - \omega_z) dt &\approx 0 \\ \int (\hat{\omega}_y - \omega_y) dt &\approx 0\end{aligned}\tag{가정 3}$$

식 (4.5)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}\int (\hat{\dot{\psi}} - \dot{\psi}) dt &= - \int \frac{1}{\cos \theta} (\hat{\phi} \hat{\omega}_y - \phi \omega_y) dt \\ \int (\hat{\dot{\theta}} - \dot{\theta}) dt &= \int (-\hat{\phi} \hat{\omega}_z + \phi \omega_z) dt\end{aligned}\tag{4.6}$$

### 4.1.3 좌표변환 과정을 수반하지 않는 2축 자이로센서 신호처리 방법에서의 안정화 오차

본 신호처리 방법에서는 좌표변환 과정 없이 자이로센서에서 측정된 피치 및 요 각속도를 각각 고저 및 선회 각속도로 간주한다.

$$\begin{aligned}\tilde{\theta} &= \tilde{\omega}_y \\ \tilde{\psi} &= \tilde{\omega}_z\end{aligned}\tag{4.7}$$

따라서 식 (4.2)와 식 (4.7)로부터 선회 및 고저 각 안정화 오차를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\psi_{err} &= \int (\tilde{\psi} - \dot{\psi}) dt = \int \left( \tilde{\omega}_z - \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y - \frac{1}{\cos \theta} \omega_z \right) dt \\ \theta_{err} &= \int (\tilde{\theta} - \dot{\theta}) dt = \int (\tilde{\omega}_y - \omega_y + \phi \omega_z) dt\end{aligned}\tag{4.8}$$

이때, 3축 자이로센서를 사용하는 이상적인 방법에서의 자이로센서에서 출력되는 피치 및 요 각속도와 본 방법에서의 자이로센서 출력 각속도의 평균값이 거의 같아 (가정 4)가 만족된다면,

$$\begin{aligned}\int (\tilde{\omega}_z - \omega_z) dt &\approx 0 \\ \int (\tilde{\omega}_y - \omega_y) dt &\approx 0\end{aligned}\tag{가정 4}$$

본 방법에서의 안정화 오차는 식 (4.9)로 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned}\psi_{err} &= -\int \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y dt + \int \frac{\cos \theta - 1}{\cos \theta} \omega_z dt \\ \theta_{err} &= \int \phi \omega_z dt\end{aligned}\quad (4.9)$$

#### 4.1.4 유도된 안정화 오차 식 비교

좌표변환 과정이 수반된 2축 자이로센서 신호처리 방법으로 유도된 식 (4.6)에서, 만약 본 방법으로 롤 각을 추정할 때 이 값이 무시할 정도로 작은 값으로 계산된다면,

$$\hat{\phi} \approx 0 \quad (\text{가정 5})$$

결국 본 방법에서의 안정화 오차는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}\psi_{err} &= -\int \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y dt \\ \theta_{err} &= \int \phi \omega_z dt\end{aligned}\quad (4.10)$$

좌표변환을 수반하지 않는 2축 자이로센서 신호처리 방법에서도, 만약 피치 각( $\theta$ )이 특이점(singular points :  $\pm 90^\circ$ )에 근접하지 않는다면, 식 (4.9)의 선회 각 안정화 오차 식( $\psi_{err}$ )에서  $\int \frac{\cos \theta - 1}{\cos \theta} \omega_z dt$  항은 무시할 정도로 작은 값을 갖게 될 것이다.

$$\int \frac{\cos \theta - 1}{\cos \theta} \omega_z dt \approx 0 \quad (\text{가정 6})$$

따라서 본 방법에서의 안정화 오차는 다음과 같이 간단히 유도되며,

$$\psi_{err} = -\int \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y dt$$

$$\theta_{err} = \int \phi \omega_z dt$$

본 식은 식 (4.10)과 같은 형태임을 알 수 있다. 결국 2축 자이로센서를 사용하는 신호처리 방법에서의 안정화 오차 식은 좌표변환 유무와 관계없이 동일한 형태를 갖게 된다.

(가정 5)와 (가정 6)의 타당성은 안정화 모의실험 결과를 통해 검증할 것이며, 그 내용은 부록 C에 수록하였다.

## 4.2 해석적 모델 분석

두 가지 신호처리 방법으로부터 최종적으로 유도된 안정화 오차는 식 (4.10)으로서 동일한 형태를 지닌다. 따라서, 본 유도과정에서 설정한 가정들이 성립하는 상황에서는 2축 자이로센서를 사용하여 안정화 제어를 수행했을 때의 안정화 오차가 좌표변환 과정의 유무와 관계없이 동일하게 나타날 것으로 판단된다.

안정화 오차는 자이로센서가 측정하지 못하는 롤 각이 다른 각속도 정보와 연성되고 적분되어 유발되는 것으로 확인된다. 따라서 시간에 따른 롤 각의 평균값이 0이 아니라면(non-zero mean value), 즉 원선회 주행 등과 같이 차량이 한쪽 롤 방향으로 기울어진 상태로 지속 주행하는 상황이라면, 미측정된 롤 바이어스(bias) 값이 적분되어 시간에 따라 일정하게 누적되는 안정화 오차를 유발할 것으로 예상된다.

# Chapter V

## 5. 모의실험



5.1 외란각 생성을 위한 차량 주행 모의실험

5.2 자세 추정 성능 비교를 위한 모의실험

5.3 안정화 성능 비교를 위한 모의실험

5.4 모의실험 결과 분석

## 5. 모의실험

본 장에서는 안정화 제어 모의실험 환경을 위한 외란각 생성 과정을 살펴보고, 안정화 제어 모의실험에 앞서 안정화를 하지 않은 상태에서의 자이로센서 신호처리 방법에 따른 자세 추정 성능을 확인할 것이다. 이후 4장에서 유도한 해석적 모델의 타당성을 검증하기 위해 자이로센서 신호처리 방법에 따른 안정화 성능을 다양한 모의실험을 통해 비교 고찰하도록 한다.

### 5.1 외란각 생성을 위한 차량 주행 모의실험

차량에 탑재되는 군사 목적의 안정화시스템은 RRC-9이라는 안정화 범프로 (stabilization bump course) 위에서 실제 성능 실험이 이루어진다. 즉, 차량이 16km/h의 속도로 RRC-9 범프를 주행했을 때 차량에 탑재된 안정화시스템의 조준각 추종오차(regulation error)로써 안정화 성능이 평가된다.

본 연구의 안정화제어 모의실험에도 실제 성능 실험과 유사한 환경을 조성하기 위해 RRC-9 범프를 이용하였다. 다만, MATLAB SIMULINK 기반으로 진행되는 본 모의실험에서는 모델링된 시스템과 범프를 주행하는 차량모델을 동시에 구현할 수가 없으므로 다음과 같은 과정으로 모의실험을 위한 환경을 구성하였다.

우선 시스템에 작용할 3차원의 외란, 즉 차량의 3차원 회전운동을 생성하기 위해 차량 동역학 시뮬레이션 프로그램인 CarSim을 이용하여 RRC-9 범프를 모델링한 다음 프로그램에서 제공되는 Big SUV 차량모델을 시속 16 km의 속도로 정속주행시켰다. 이 때 차량의 질량중심에서 롤각, 피치각 및 요각을 측정한 후, 이를 SIMULINK 상에서 모델링된 안정화시스템에 작용하는 외란각으로 사용하였다. 외란각 측정시 샘플링 시간(sampling time)은 1 msec로 하였다.

차량 주행 모의실험은 차량의 진행방향에 변화를 주어 다음의 세 가지 주행



환경에 대해서 수행하였다. 이때 진행방향에 따른 노면의 요철 패턴은 RRC-9 범프로 형상을 그대로 따랐으며 차량의 주행속도는 16 km/h를 유지하도록 하였다.

- (1) 직진 주행 모의실험
- (2) 조화함수 형태의 주행 모의실험
- (3) 원선회 주행 모의실험

모의실험으로부터 생성된 롤, 피치, 요 외란각과 이에 해당되는 Power spectral density를 주행환경 별로 각각 그림 5-2, 5-3, 그림 5-4, 5-5, 그림 5-6, 5-7에 나타내었다. 각도를 degree로 환산하면, 세 가지 주행환경에서 나타나는 차량의 롤 및 피치 각은  $\pm 10^\circ$  이내로 나타나며, 주로 1Hz 부근의 주파수 대역으로 섭동하는 것을 알 수 있다. 이때 최대 롤 각도는 직진 주행에서는  $0.3^\circ$ , 조화함수 형태 주행에서는  $0.8^\circ$ , 원선회 주행에서는  $8.0^\circ$ 로 나타났지만, 최대 피치 각은 세 가지 주행 모두  $9.5^\circ$  정도로 유사하게 나타났다. 100초 동안의 롤 각 평균은 직진 및 조화함수 형태 주행에서는  $0.02^\circ$  정도로 작게 나타났지만 원선회 주행에서는 차량이 일정하게 기울어진 각도로 선회하므로 평균 롤 각이  $0.9^\circ$  정도로 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

차량 주행 모의실험으로부터 획득한 외란각의 특성을 표 5.1에 나타내었다.

		path type		
		straight path	harmonic path	circular path
maximum peak (degree)	roll	0.3	0.8	8.0
	pitch	9.5	9.5	9.3
	yaw	0.15	14.3	-
main frequency band (Hz)	roll	0 ~ 1	0 ~ 1.5	0 ~ 1.5
	pitch	1	1	1
mean value (degree)	roll	<b>0.026</b>	<b>0.022</b>	<b>0.905</b>
	pitch	0.51	0.50	0.37

표 5.1. 차량 주행 모의실험 데이터 특성

## 5.2 자세 추정 성능 비교를 위한 모의실험

안정화 모의실험에 앞서 5.1절의 세 가지 주행환경에서 생성된 차량의 롤, 피치 및 요 각 변화에 따른 자이로센서의 자세 추정 성능을 확인하기 위하여 모의실험을 진행하였다. 즉, 시스템을 차량에 고정시키고 선회 및 고저 방향 안정화 제어를 하지 않을 때 차량의 움직임을 따라 변하는 시스템의 자세를 센서가 어떻게 추정하는지, 3장에서 제시한 세 가지 신호처리 방법에 따른 롤, 피치 및 요 각의 추정 성능을 알아보았다.

본 모의실험에서는 시스템의 선회 / 고저 구동부가 움직이지 않고 차량에 고정되어있기 때문에 차량의 3차원 회전운동이 시스템에 그대로 전달되어야 한다. 따라서 3축 자이로센서를 이용해 각속도를 모두 측정한 후 오일러 각으로 좌표변환할 경우, 계산된 오일러 각은 차량에 의한 롤, 피치 및 요 각과 정확히 일치하여야 한다.

모의실험 결과 3축 자이로센서 출력 각속도를 오일러 각으로 변환하는 방법에서의 추정 성능은 모든 경우에서  $1\mu rad$  미만의 오차로 나타나 시스템의 자세 추정이 정확히 이루어지는 것으로 확인되었다. 반면, 2축 자이로센서를 사용하는 방법에서는 좌표변환 과정 유무에 따른 두 가지 방법 모두 시간에 따라 추정 오차가 누적되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 2축 자이로센서 출력 각속도를 좌표변환 하는 경우가 그렇지 않은 경우와 추정 성능이 유사하거나 더 좋을 것이라는 예상과 달리 좌표변환 여부가 추정 성능에 영향을 주지는 못하는 것으로 나타났다.

그림 5-8, 5-9는 차량의 직진 주행환경에서의 세 가지 신호처리 방법에 따른 센서의 추정 각(estimated angle)과 실제 각과의 오차(estimation error)를 보여주며, 그림 5-10, 5-11은 조화함수 형태의 주행환경에서의 센서의 추정 각과 오차를, 그림 5-12와 5-13은 원선회 주행 환경에서의 추정 각과 오차를 각각 나타내고 있다.

### 5.3 안정화 성능 비교를 위한 모의실험

본 절에서는 4장에서 유도한 안정화 오차의 해석적 모델을 검증하기 위해 모의실험을 진행하여 자이로센서 신호처리 방법에 따른 안정화 성능을 비교, 분석하였다. 3장에서 정의한 세 가지 신호처리 방법으로부터 추정된 각속도를 이용하여 선회 / 고저 각속도를 안정화 제어할 때 안정화된 각을 전역좌표계 기준에서 비교하였으며, 초기 기준각(initial reference angle)에 대한 오차를 성능의 지표로 보았다. 본 모의실험도 세 가지 주행환경에 대하여 진행하였으며, 선회 / 고저 방향 모두 0 각을 지향할 때의 안정화 성능과 고저 기준각만을 변화시킬 때의 안정화 성능을 각각 비교하였다.

#### 5.3.1 zero 각 지향 모의실험

안정화의 기본은 시스템에 작용하는 외란에 관계없이 시스템을 원래 상태 그대로 안정하게 유지시키는 것이다. 따라서 본 모의실험에서는 차량의 움직임에 의해 시스템에 지속적으로 외란이 작용하고 있는 상태에서 우선 초기 기준각을 선회 / 고저 방향 모두 0으로 하여 시스템으로 하여금 지속적으로 기준각을 지향하도록 하였다.

그림 5-14, 5-15, 5-16은 각각 직진 주행, 조화함수 형태 주행, 원선회 주행 시의 모의실험 결과로서, 자이로센서 신호처리 방법에 따른 위치추종 오차를 종합적으로 보여준다. 자세추정 모의실험 때와 마찬가지로 3축 자이로센서를 이용하는 경우에 위치추종 오차가 가장 작게 나타났고 2축 자이로센서를 사용한 경우 오차가 상대적으로 크게 나타나는 것이 확인되었다. 이때 안정화 제어에 따른 오차의 섭동(perturbation) 정도는 세 가지 신호처리 방법에서 거의 동일하지만 2축 자이로센서를 사용하는 두 방법에서는 오차의 섭동과 함께 일정한 추세(trend)로

오차가 누적되는 것을 알 수 있다. 직진 주행 모의실험에서는 이러한 오차의 누적이 거의 나타나지 않지만 조화함수 형태 주행 시에는 주기적인 추세(periodic trend)로, 원선회 주행 시에는 선형적인 추세(linear trend)로 오차 누적이 동반됨이 확인된다. 이러한 추가적인 안정화 오차 누적의 원인은 2축 자이로센서를 사용함으로 인해 측정하지 못하는 롤 운동의 영향임을 미루어 짐작할 수 있다.

모의실험 결과에서 볼 수 있는 특징은, 자세추정 모의실험 결과와 달리 2축 자이로센서를 사용할 때 좌표변환 과정의 유무와 관계없이 오차가 동일하게 발생한다는 것이다. 또한 주행 환경이 직진에서 원선회로 갈수록 누적 오차량이 크게 증가하는 것으로 확인되는데, 이러한 현상은 주행 중 시스템의 롤 각 평균값이 주 원인인 것으로 판단된다. 즉, 차량 움직임에 의한 시스템의 회전운동 중 측정되지 못한 롤의 평균값이 적분되어 오차의 누적을 초래한 것이다. 이러한 일련의 현상은 해석적으로 유도된 안정화 오차 모델의 특성과 일치함을 알 수 있다.

각각의 위치추종 오차를 그림 5-17에 정리하였다. 비교의 용이성을 위해 오차를 표준편차(standard deviation : RMS)와 100초 동안의 평균구배(mean gradient)로 구분하였다. 이 때 선형 추세를 갖는 평균구배 값은 최소자승 근사법(least-squares fit)을 이용하여 도출하였다.

### 5.3.2 고저 지향각 변화에 따른 안정화 성능 비교 모의실험

시스템의 고저 지향각 변화에 따른 안정화의 오차의 특성을 파악하고, 이를 해석적 오차 모델과 비교하기 위해 세 가지 신호처리 방법에 의한 안정화 성능 비교 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 시스템의 선회 지향 방향은 0 rad으로 고정시키고 고저 방향 지향각을 일정 각도씩 변화시켜가며 진행하였으며, 이때 안정화 오차는 초기 지향각 기준에서 이탈한 각도로 계산하였다. 지향각 변화 범위는  $\pm 1.1 \text{ rad}$  ( $\pm 63^\circ$ ) 이내로 하였다. 이와 같은 범위를 설정한 이유는, 본 연구에서 모델링한 시스템에서는 고저 각이 본 범위를 벗어나 특이점(singular point :  $\pm 90^\circ$ )으로 가까워질수록 잘못된 자세추정으로 인한 오차 이외에 제어기의 성능 부족이 추가적인 오차를 야기하는 것으로 확인되었기 때문이다.

모의실험 결과, 가장 악조건(the worst case)인 원선회 주행 시 나타난 안정화 오차를 표준편차와 평균구배로 구분하여 그림 5-18과 그림 5-19에 각각 나타내었다. 표준편차는 고저 지향각이 클수록 그 크기도 커지지만, 선회와 고저 방향 모두 센서 신호처리 방법에 관계없이 거의 동일한 크기로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 시간에 따른 누적오차를 표현하는 평균구배 값은 3축 자이로센서를 사용하는 신호처리 방법에서는 거의 0에 가깝지만, 2축 자이로센서를 사용하는 방법에서는 좌표변환 과정의 유무와 관계없이 고저 지향각이 증가함에 따라 같은 값으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이때, 선회 방향은 전체적으로 우함수(even function) 형태를, 고저 방향은 기함수(odd function) 형태를 갖은 것으로 확인된다.

## 5.4 모의실험 결과 분석

본 장에서는 다양한 차량 주행 환경을 기반으로 한 안정화 모의실험을 통해 해석적 오차 모델을 검증하고자 자이로센서 신호처리 방법에 따른 안정화 성능을 비교, 분석하였다.

모의실험 결과 3축 자이로센서를 사용할 경우 0.5 mrad 미만의 작은 섭동현상 (perturbation)이 있을 뿐 차량의 움직임과 관계없이 선회 및 고저 지향각이 잘 추종되는 것으로 확인되었다. 그러나 2축 자이로센서를 사용할 경우에는 좌표변환 과정의 유무와 관계없이 3축 자이로센서 사용 시와 동일한 섭동량과 더불어 시스템의 롤 운동을 측정하지 못함에서 기인한 오차가 누적되는 현상을 확인하였다. 이러한 오차 누적 현상은 주행 중 시스템의 롤 각 평균이 적분된 값이 주요 원인으로 판단된다. 고저 지향각 변화에 따른 안정화 오차의 확인 결과, 2축 자이로센서를 사용하는 경우 지향각이 특이점으로 가까워질수록 전체적인 누적 오차의 양이 지수함수적으로(exponentially) 증가하는 것으로 확인되었다. 이러한 형태의 모의실험 결과는 해석적 모델의 선회 방향 오차 식( $\psi_{err}$ ) 중  $1/\cos\theta$  항에 의한 물리적 특성을 잘 반영하고 있다.

$$\psi_{err} = -\int \frac{\phi}{\cos\theta} \omega_y dt$$

$$\theta_{err} = \int \phi \omega_z dt$$

그러나 피치 각 오차, 즉 고저 방향 오차( $\theta_{err}$ )의 경우 전체적으로 기함수 형태로 나타나 해석적 모델로 명확히 설명되지는 않지만 모의실험을 통해 얻은 데이터를 오차 식에 대입하여 계산한 결과 본 모의실험 결과와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 고저 방향 오차 식을 이루는 모든 변수를 오일러 각으로 표현하기 위해 식 (5.1)의 역좌표변환행렬(inverse Jacobian matrix)을 이용하여 정리한 결과 식 (5.2)를 얻을 수 있었다.

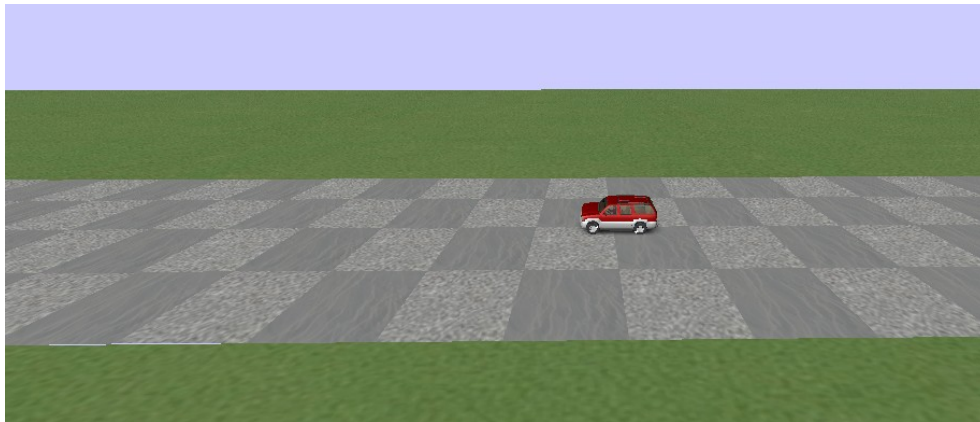
$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\phi \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\theta_{err} = \int (-\phi^2 \dot{\theta} + \phi \dot{\psi} \cos\theta) dt \quad (5.2)$$

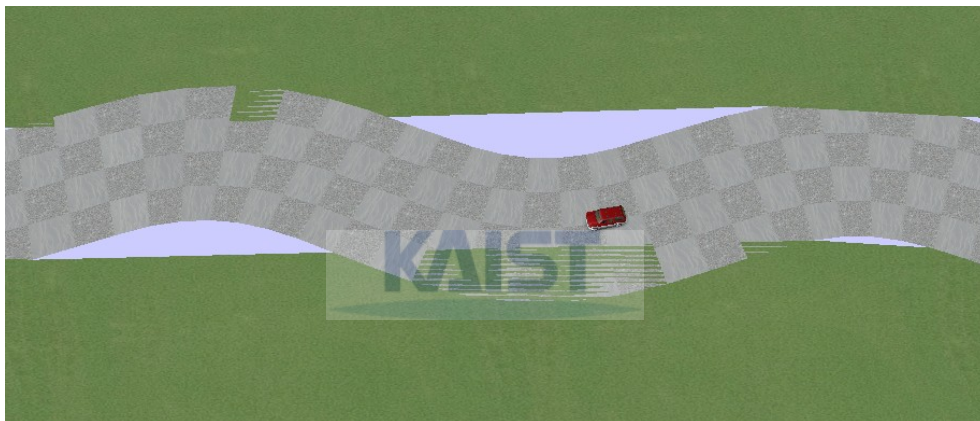
식 (5.2)를 이루는 변수에 모의실험으로부터 얻은 데이터를 대입하여 수치분석(numerical analysis)을 수행한 결과,  $-\phi^2 \dot{\theta}$  항은 오차에 거의 영향을 미치지 않고  $\phi \dot{\psi} \cos\theta$  항 중  $\phi \dot{\psi}$ 의 적분 값이 오차의 방향성과 크기를 결정하여 전체적인 오차의 거동을 기함수 형태로 만드는 것이 확인되었다.

그림 5-20은 본 모델을 통해 계산된 오차와 모의실험을 통해 나타난 누적 오차를 비교한 결과로서, 해석적 모델이 누적된 안정화 오차의 거동을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

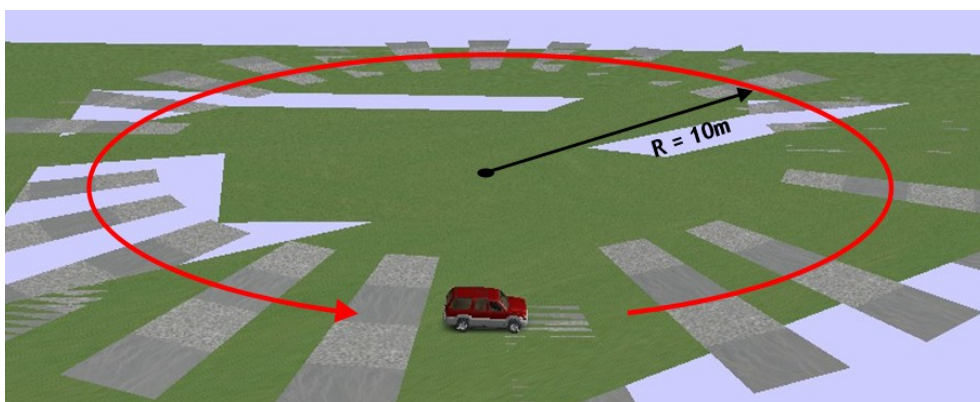
결국 해석적 유도과정에서 설정한 가정들이 차량 탑재용 안정화 시스템에 적용하기에 타당하고, 따라서 유도된 해석적 모델은 2축 자이로센서를 사용하는 차량 탑재용 안정화 시스템의 안정화 오차 특성 분석에 이용될 수 있다 하겠다.



(a) 직진 주행 모의시험



(b) 조화함수 형태의 주행 모의실험



(c) 원선회 주행 모의실험

그림 5-1. CarSim을 이용한 RRC-9 범프로 주행 모의실험



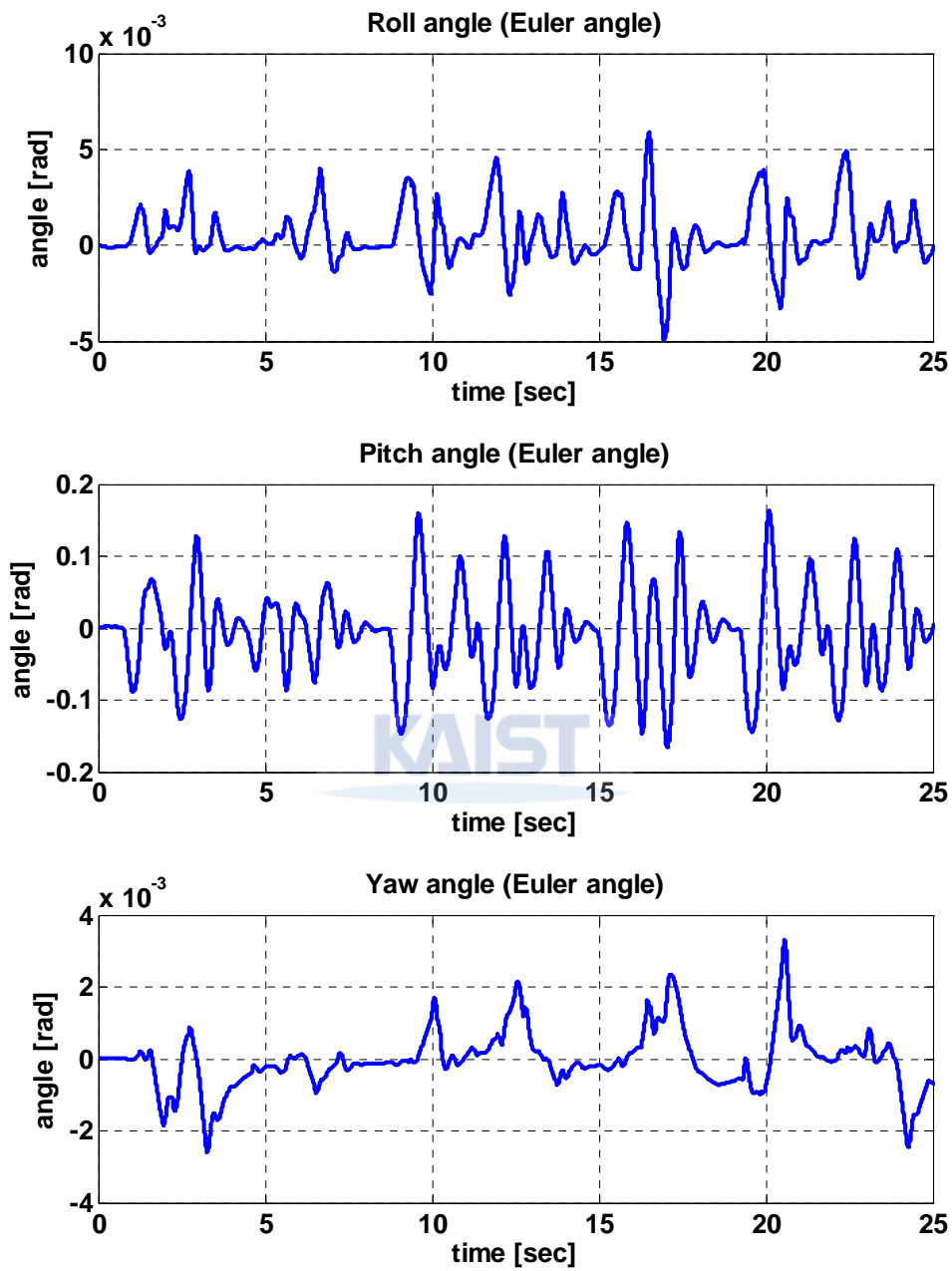


그림 5-2. 직진 주행 모의실험으로부터 생성된 외란각

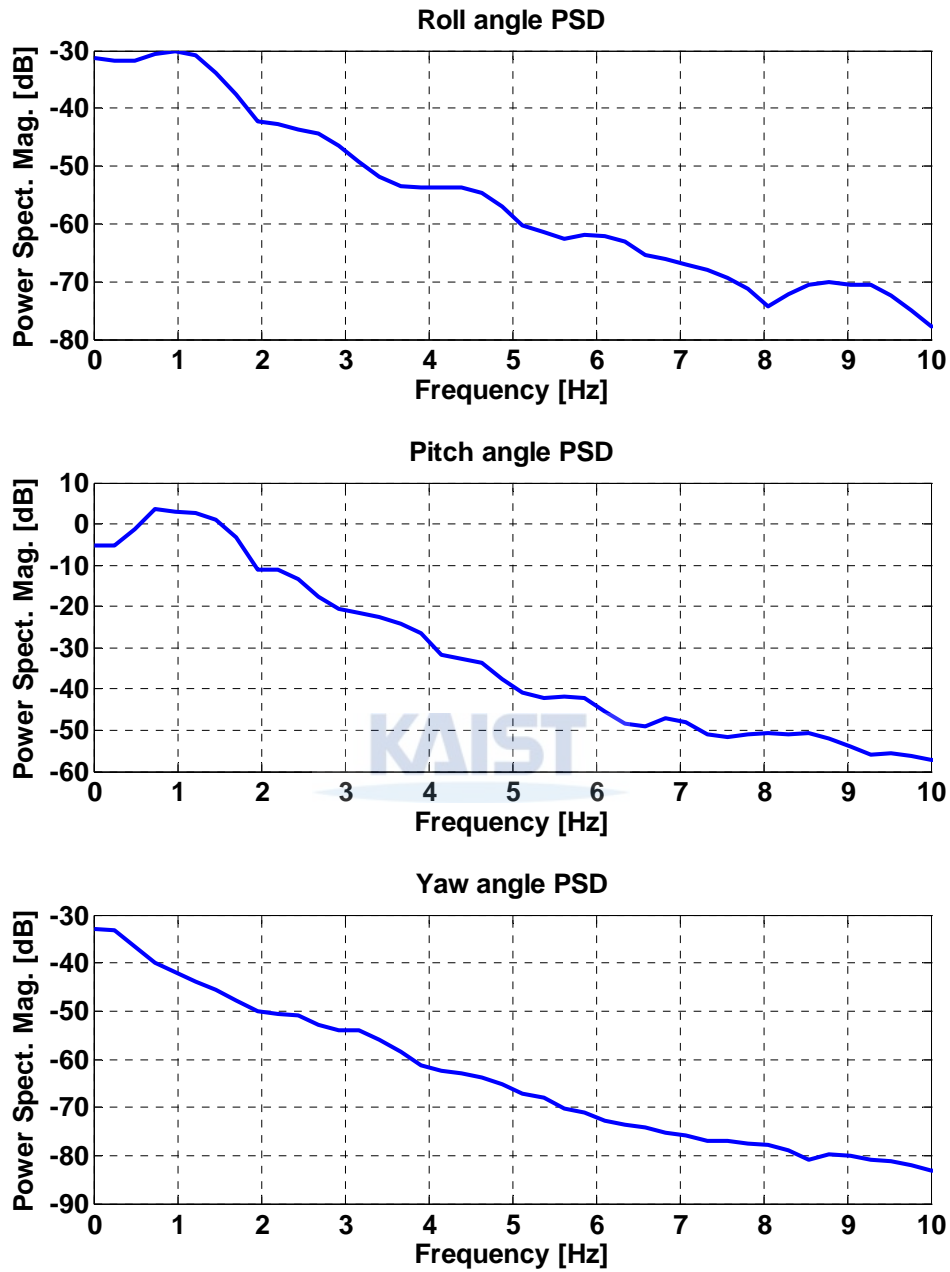


그림 5-3. 직진 주행 시 생성된 외란각의 주파수별 에너지 분포  
(PSD : Power Spectral Density)

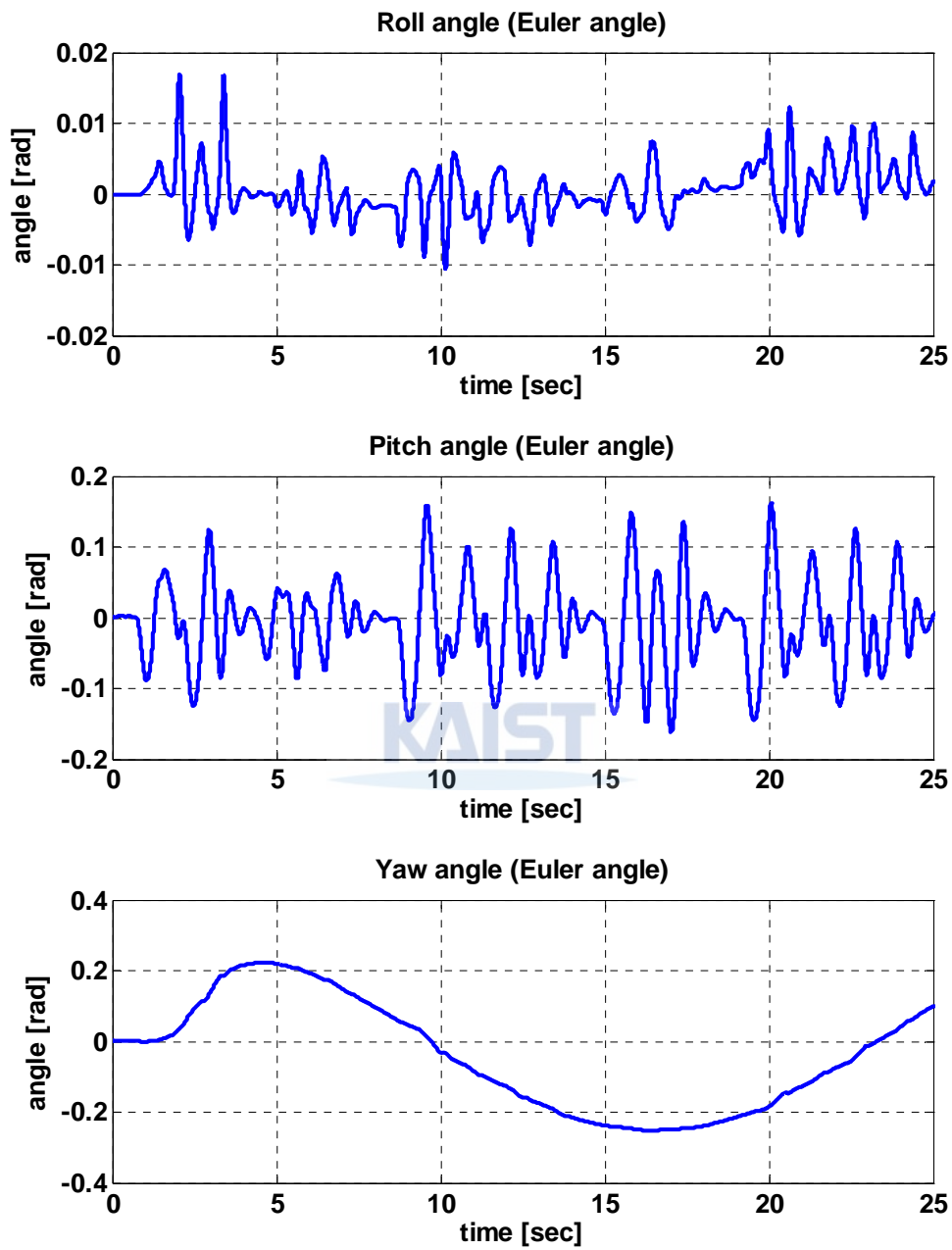


그림 5-4. 조화함수 형태의 주행 모의실험으로부터 생성된 외란각

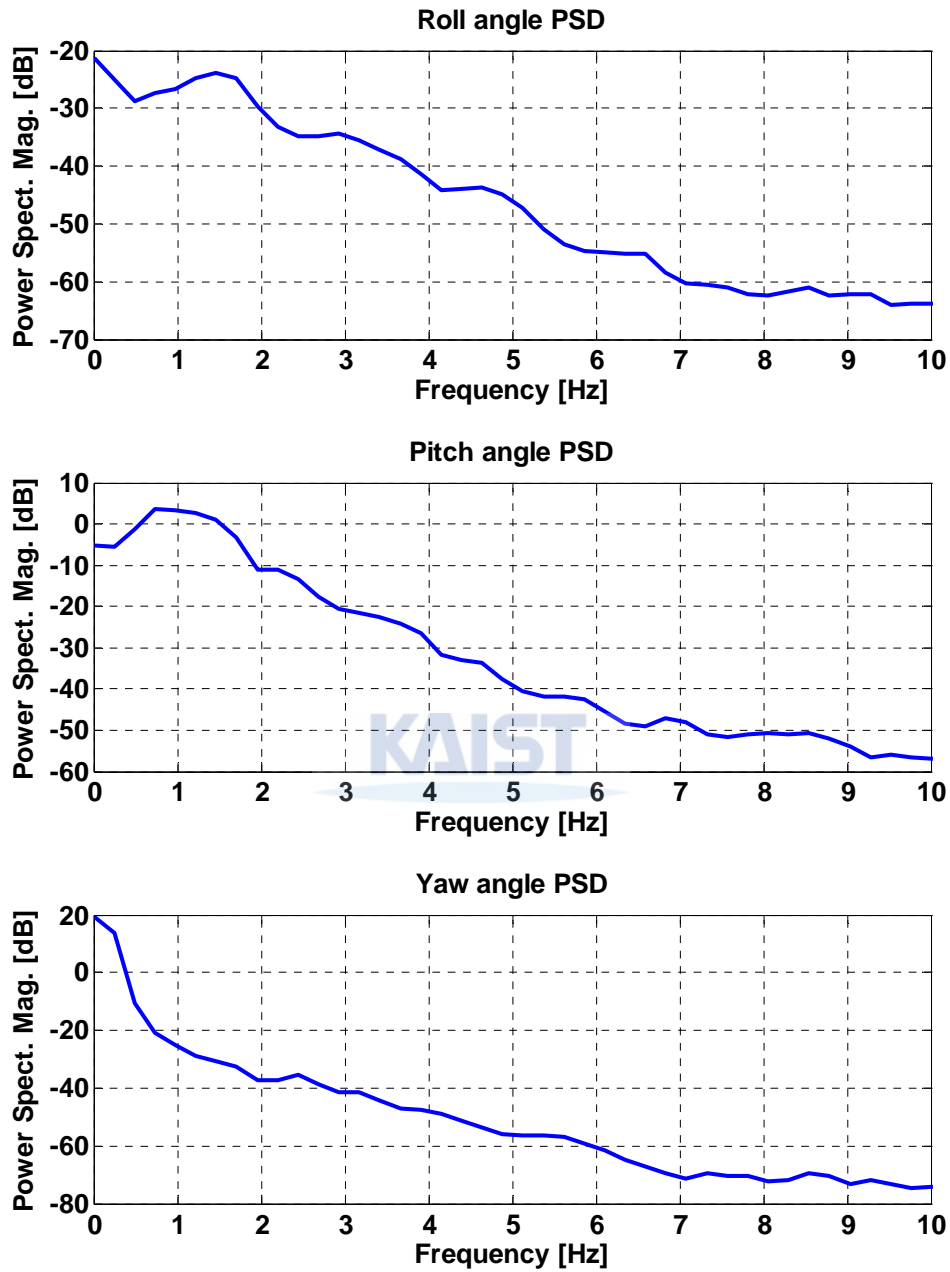


그림 5-5. 조화함수 형태의 주행 시 생성된 외란각의 주파수별 에너지 분포  
(PSD : Power Spectral Density)

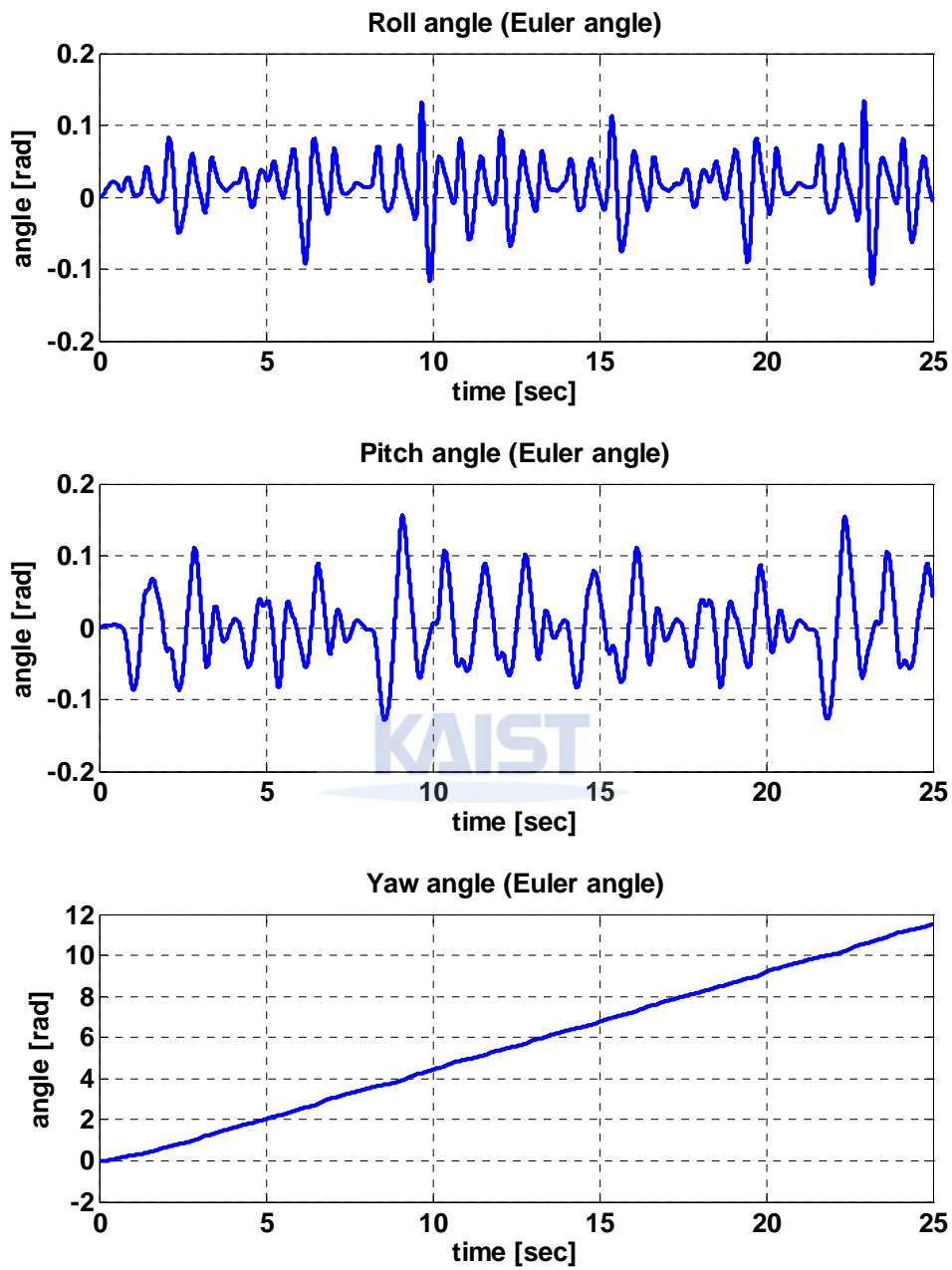


그림 5-6. 원선회 주행 모의실험으로부터 생성된 외란값

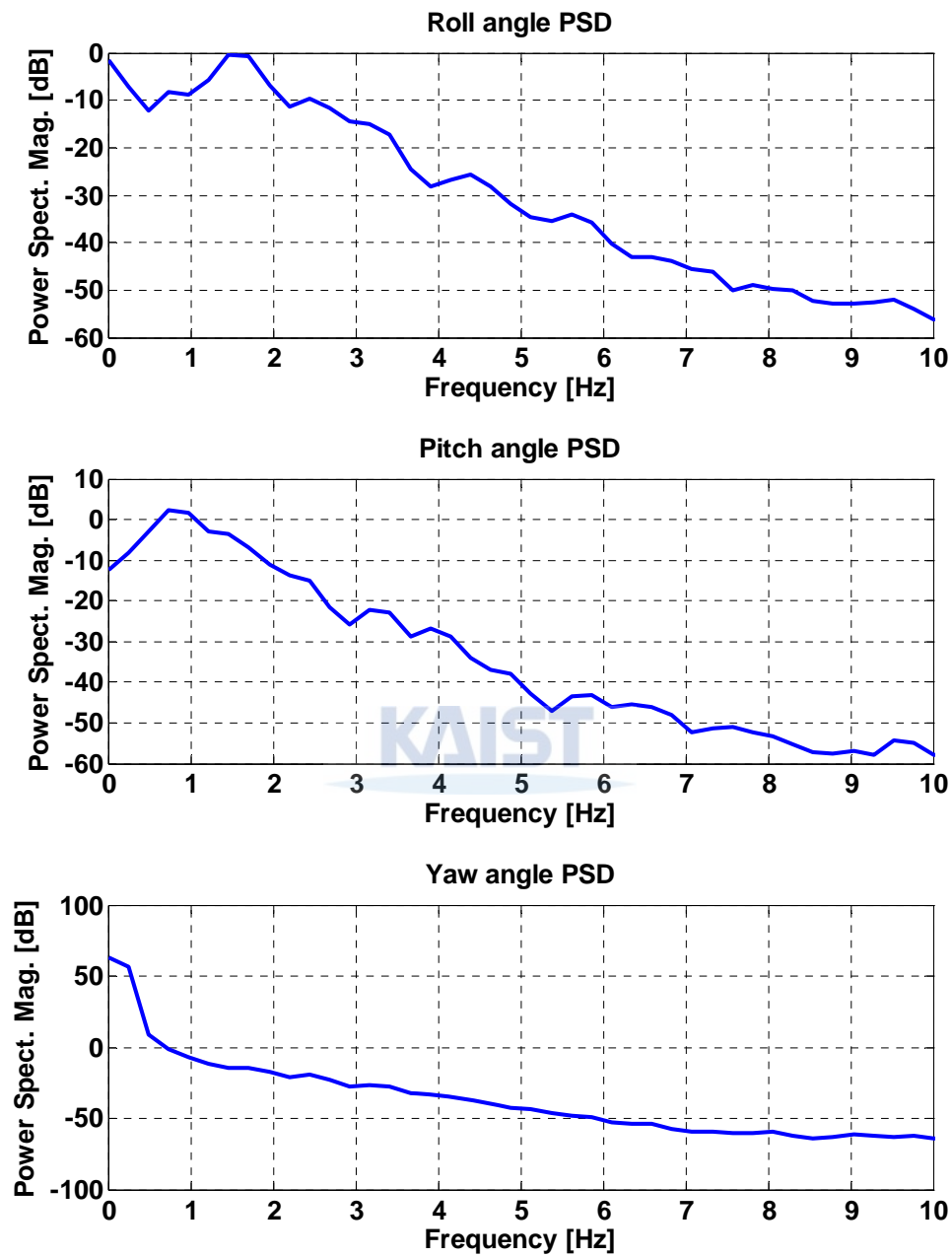


그림 5-7. 원선회 주행 시 생성된 외란각의 주파수별 에너지 분포

(PSD : Power Spectral Density)

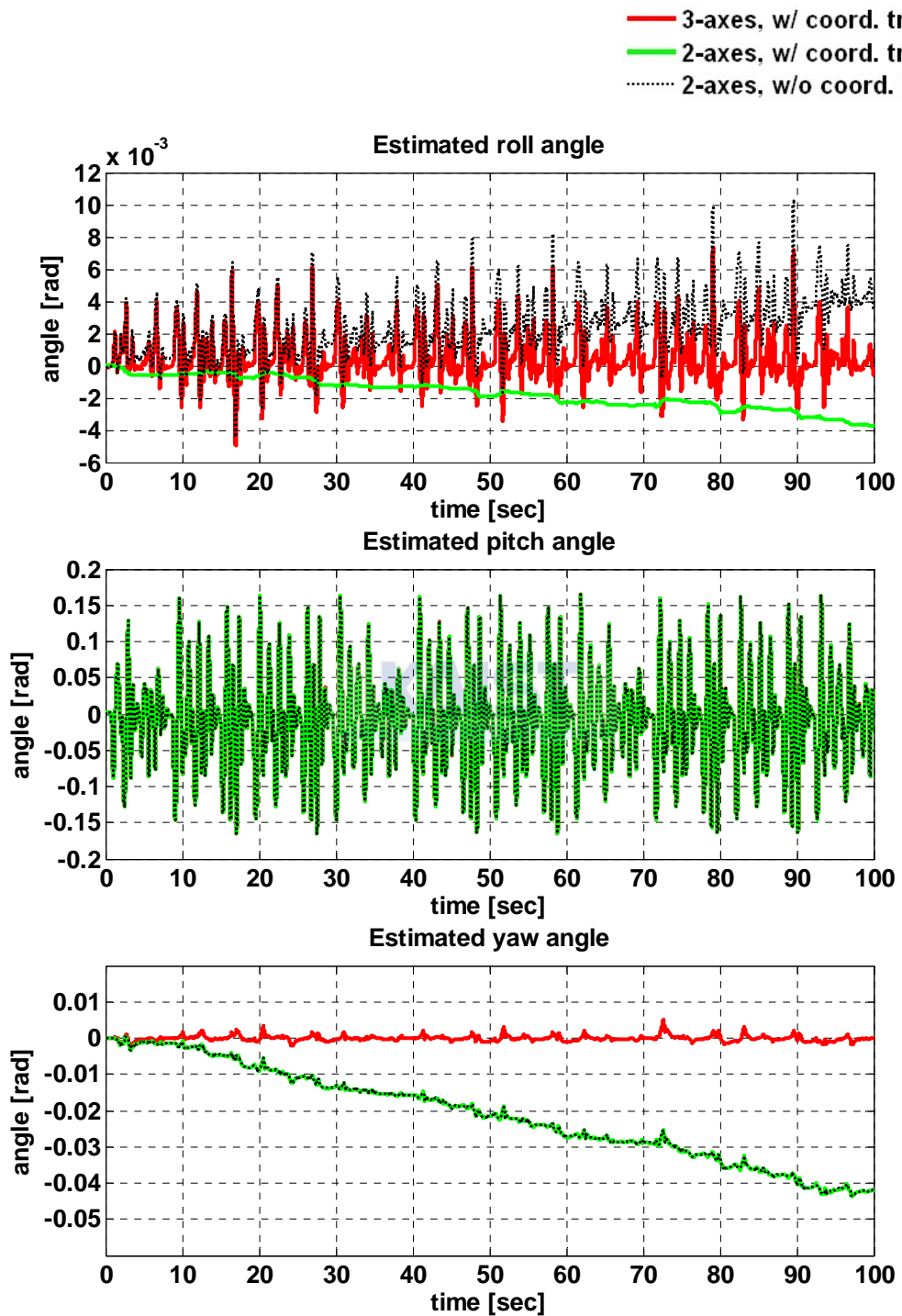


그림 5-8. 직진 주행환경에서의 추정 각

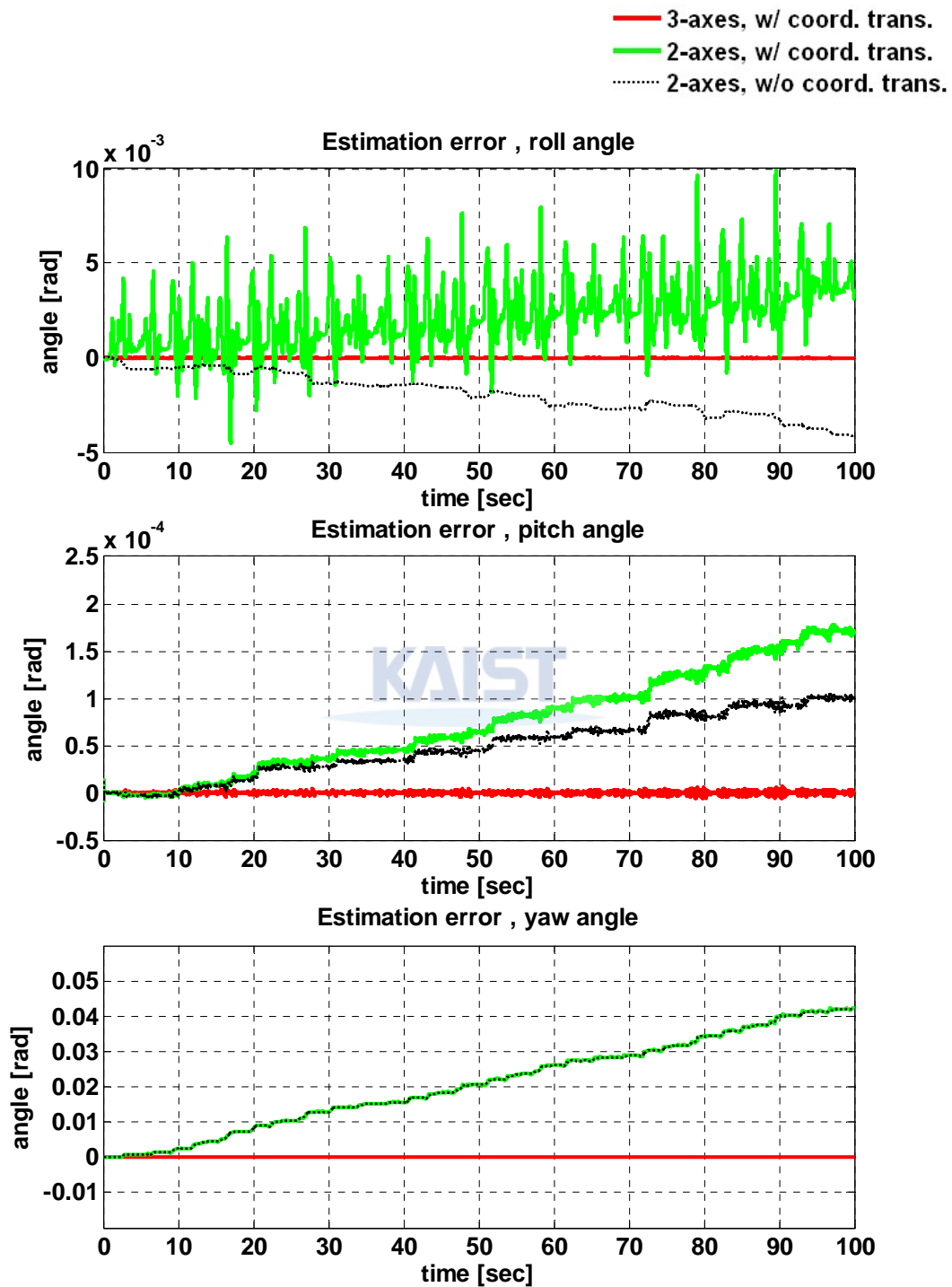


그림 5-9. 직진 주행환경에서의 추정 각 오차



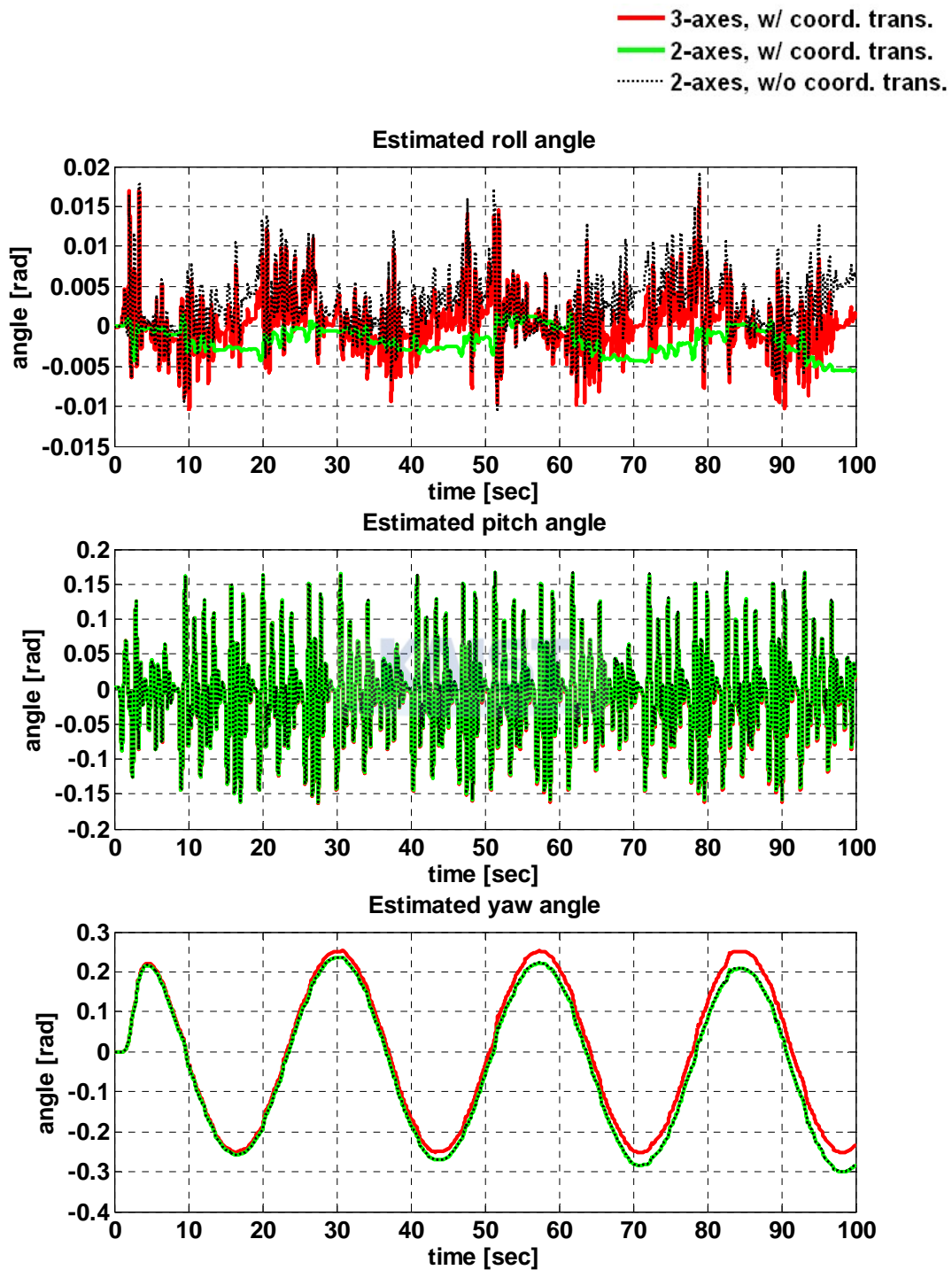


그림 5-10. 조화함수 형태 주행환경에서의 추정 각

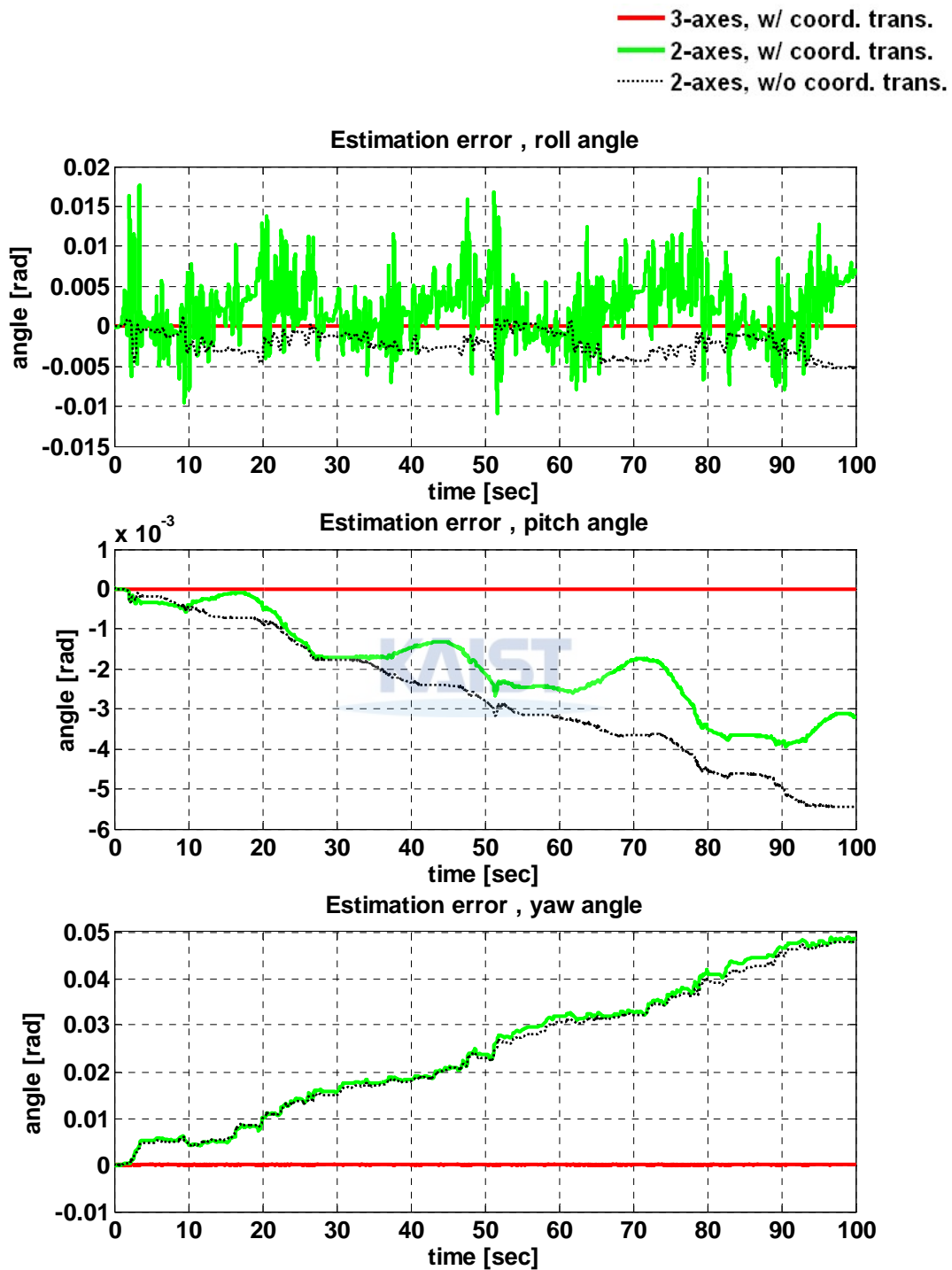


그림 5-11. 조화함수 형태 주행환경에서의 추정 각 오차

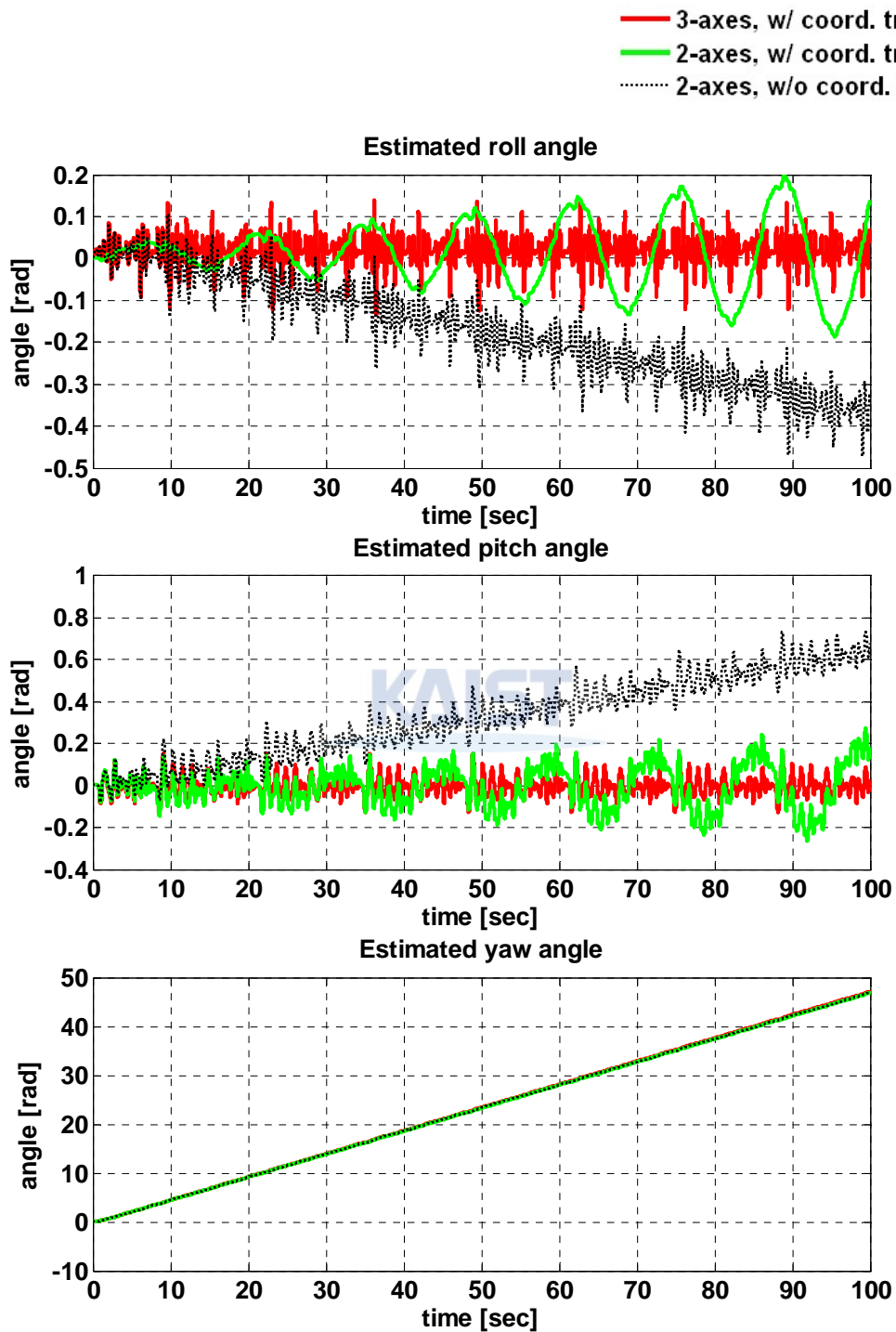


그림 5-12. 원선회 주행환경에서의 추정 각

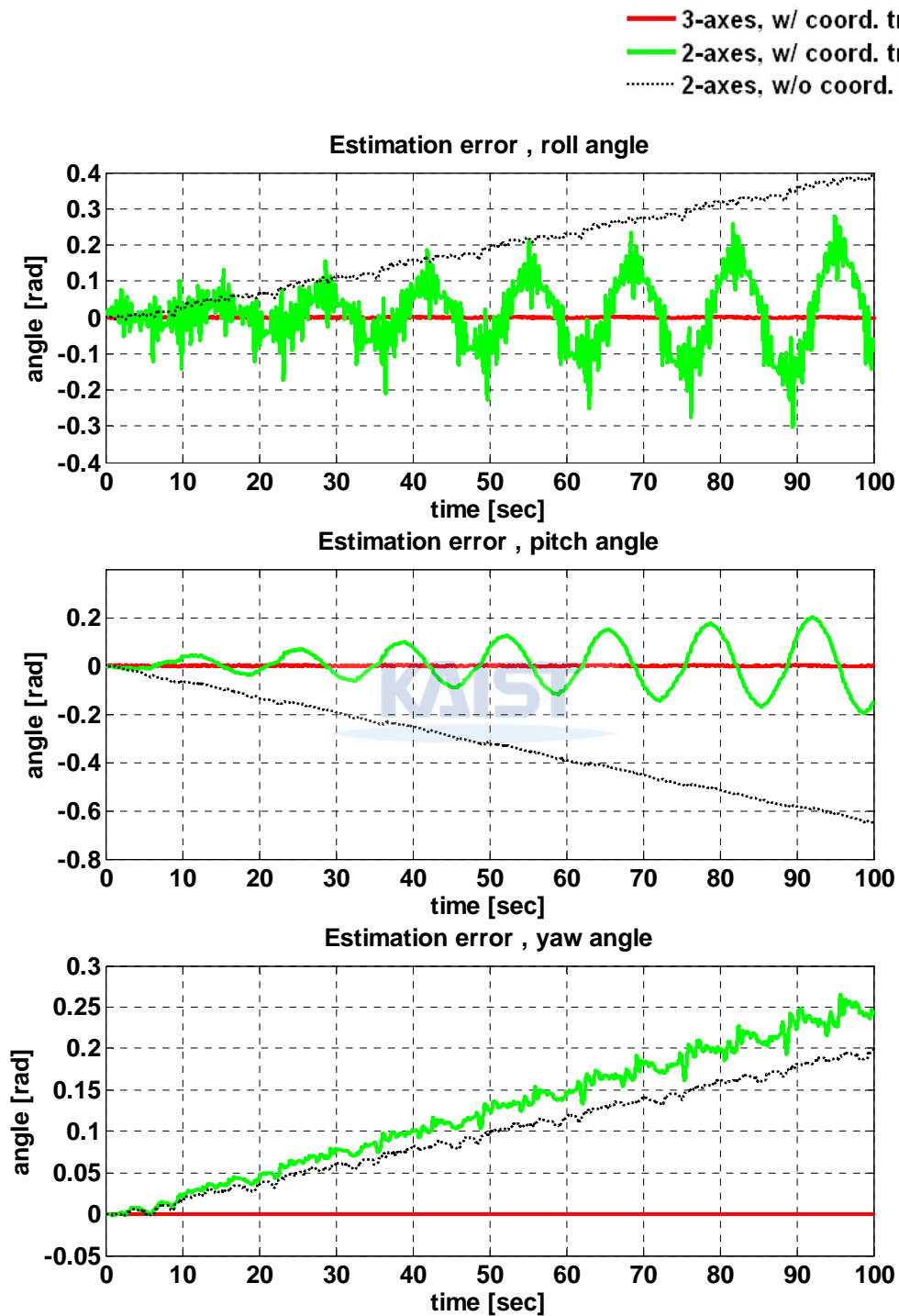


그림 5-13. 원선회 주행환경에서의 추정 각 오차

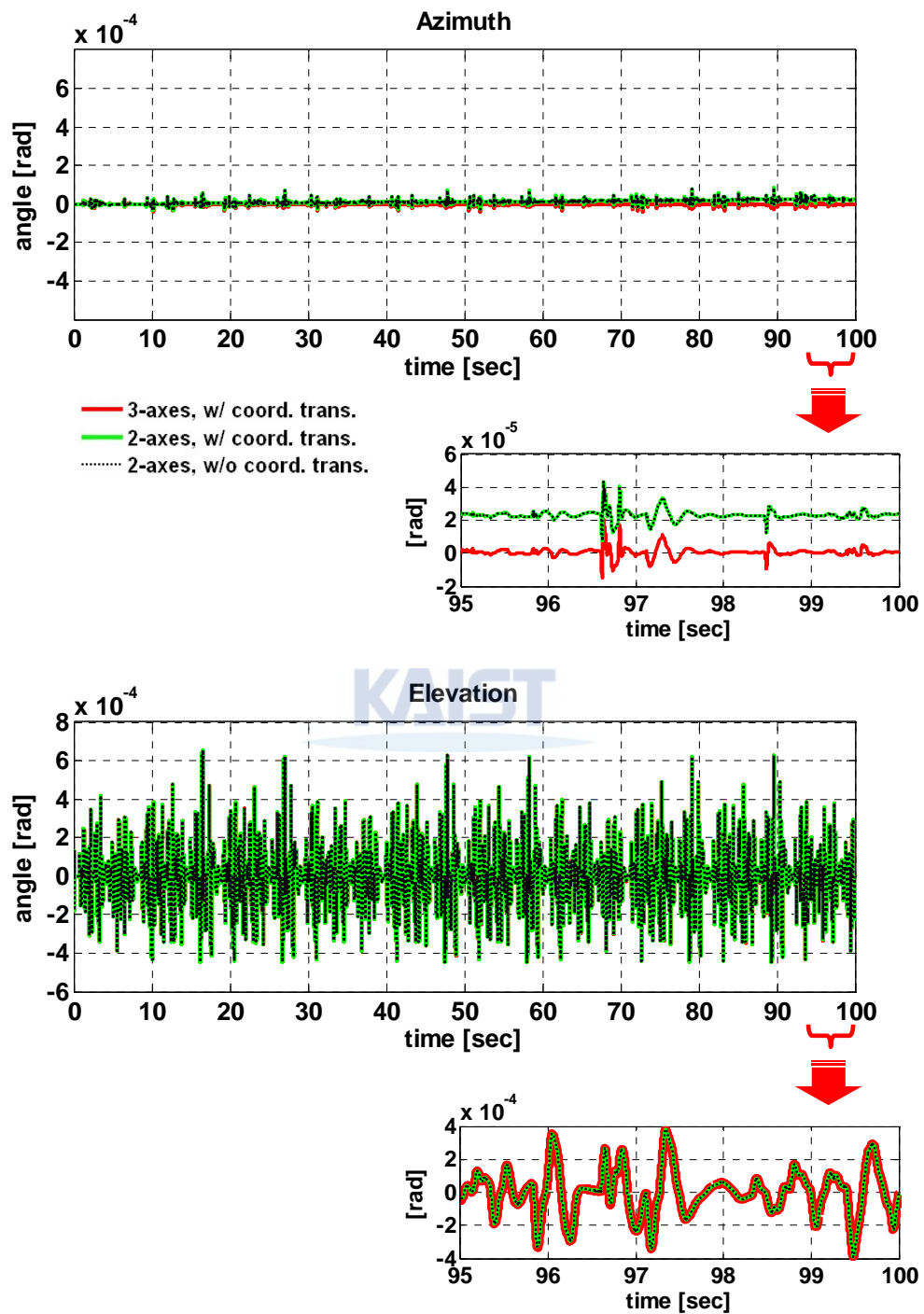


그림 5-14. 직진 주행 시 선회 / 고저 zero 각 안정화 제어 결과

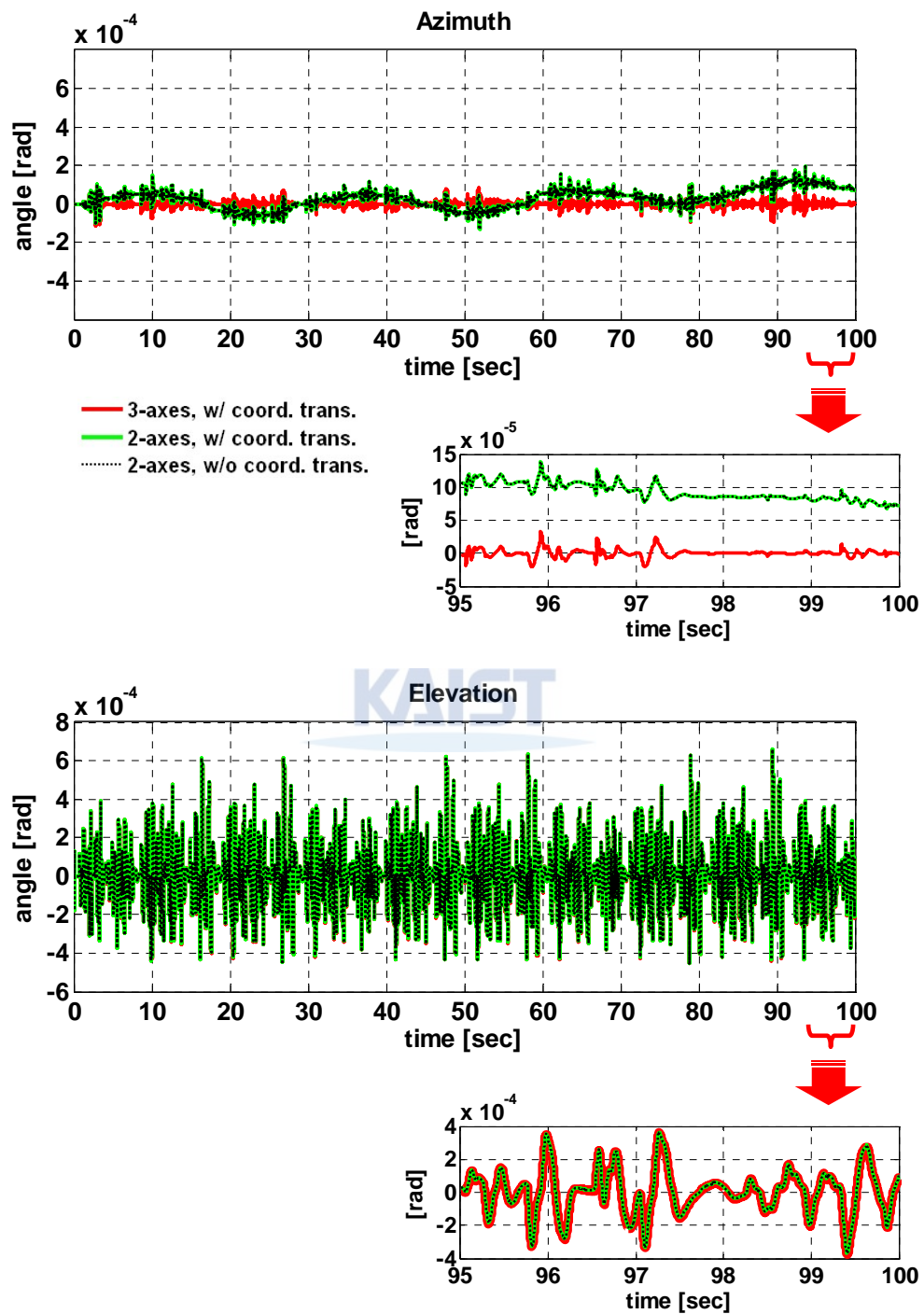


그림 5-15. 조화함수 형태 주행 시 선회 / 고저 zero 각 안정화 제어 결과

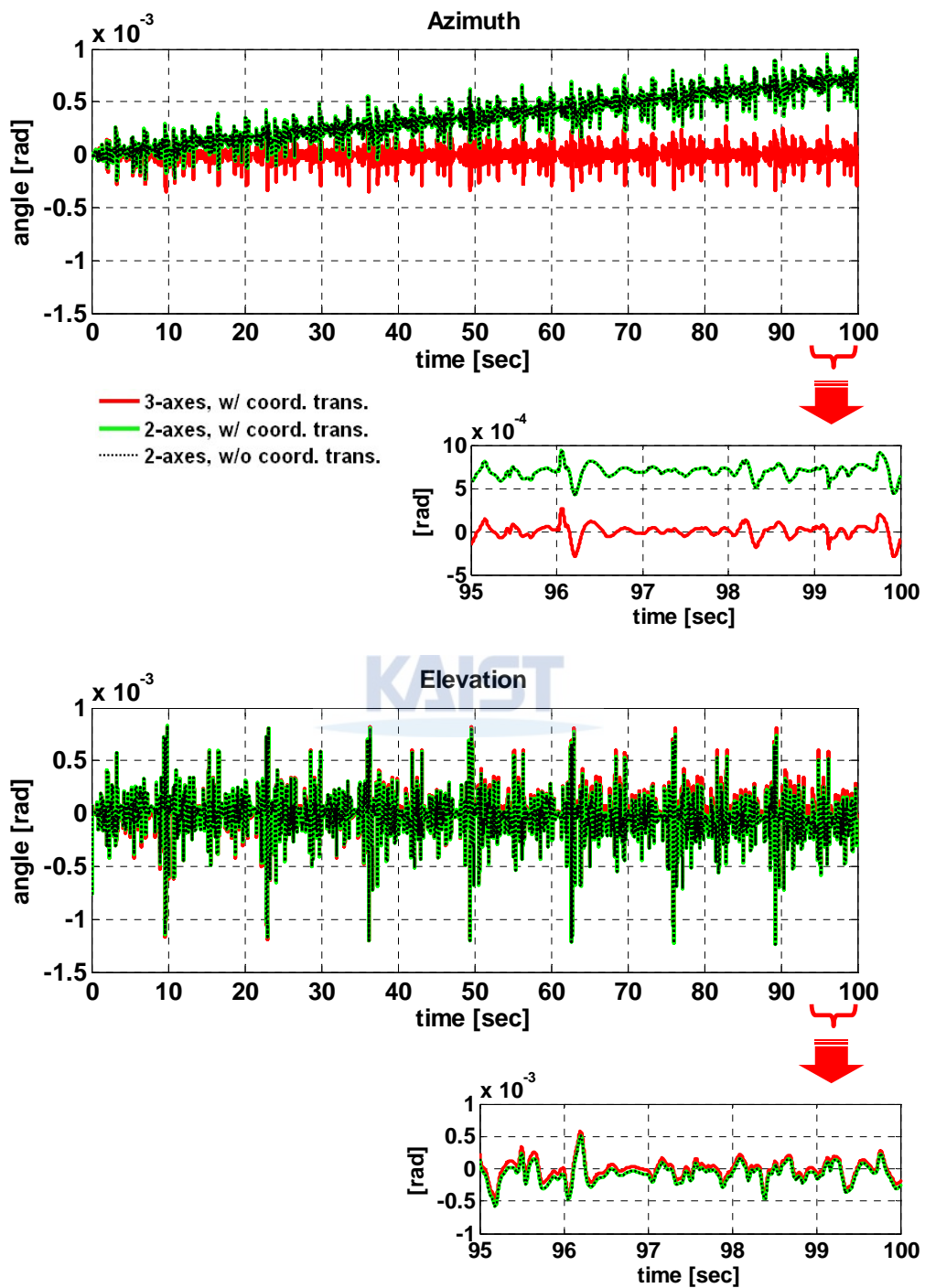
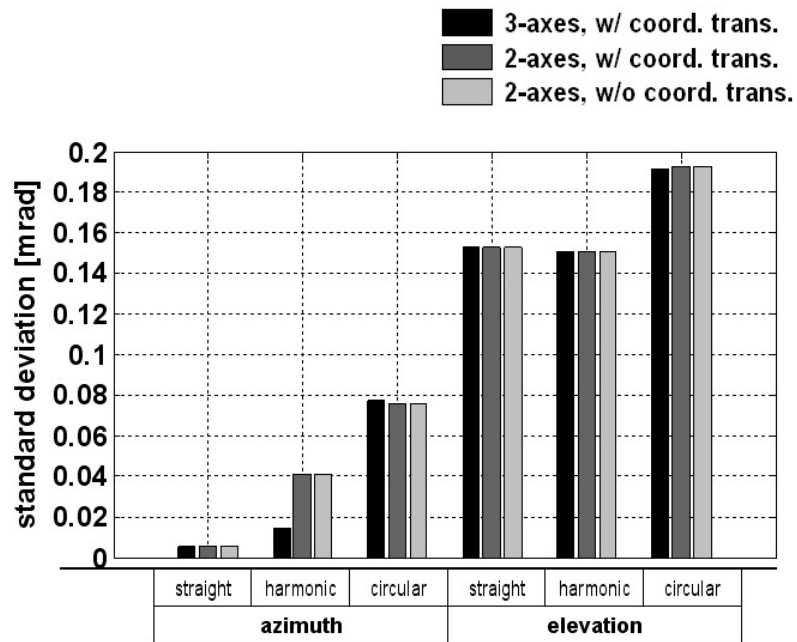
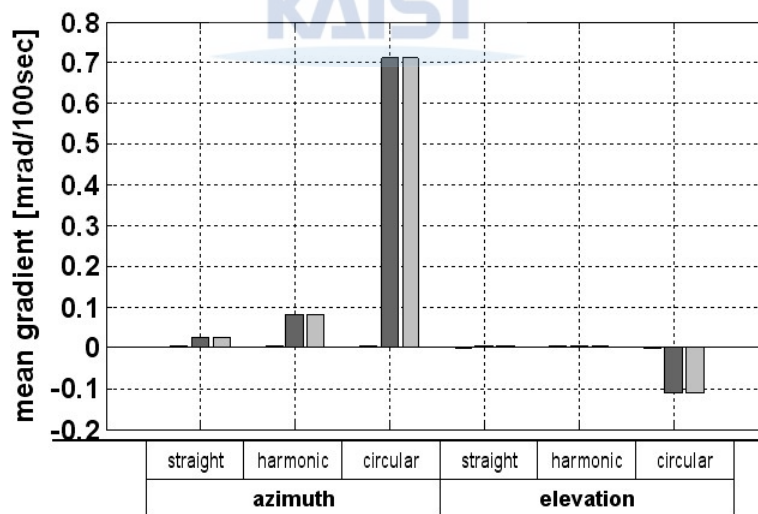


그림 5-16. 원선회 주행 시 선회 / 고저 zero 각 안정화 제어 결과



(a) standard deviation



(b) mean gradient

그림 5-17. zero 각 지향 시 자이로센서 신호처리 방법에 따른 안정화 오차 정리



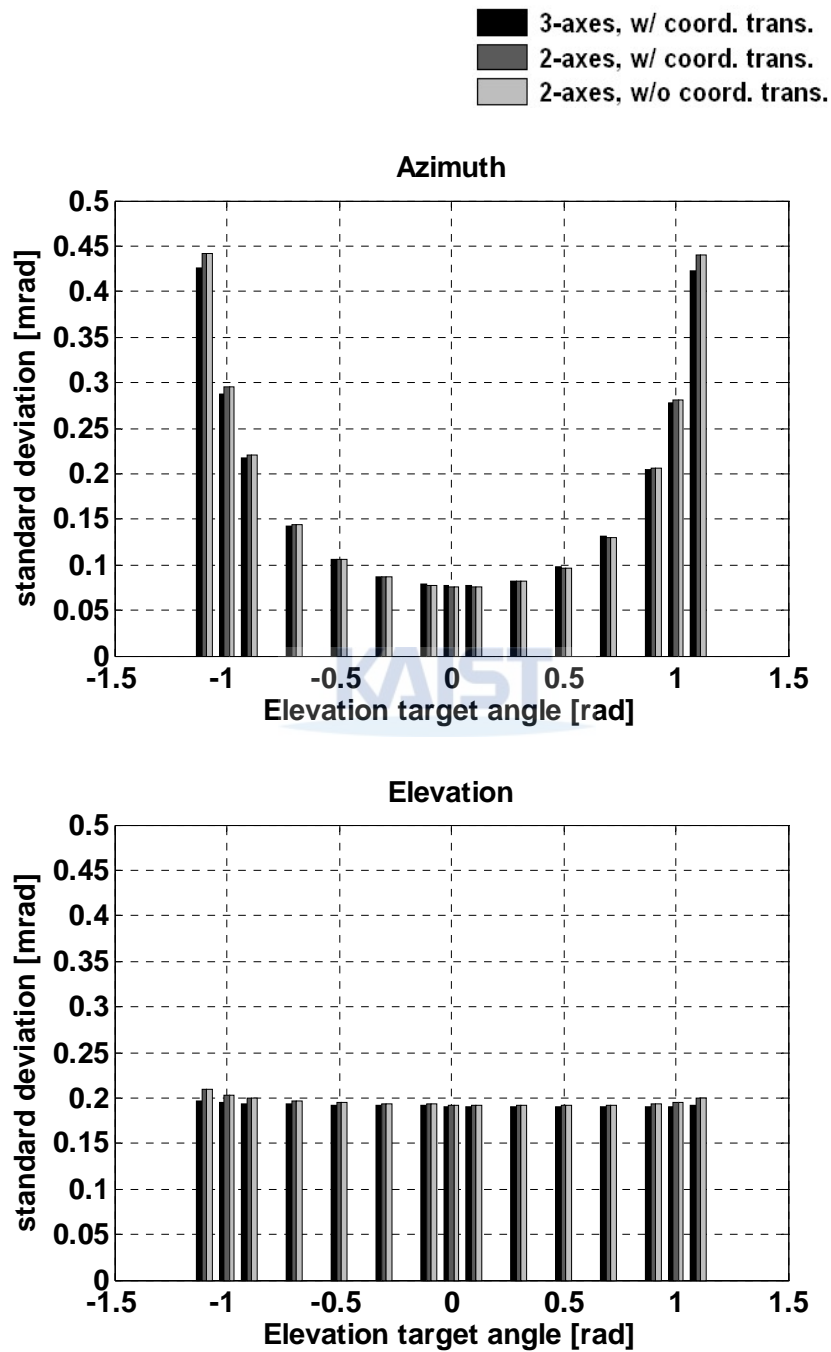


그림 5-18. 원선회 주행 시 고저 지향각 변화에 따른 안정화 오차의 표준편차

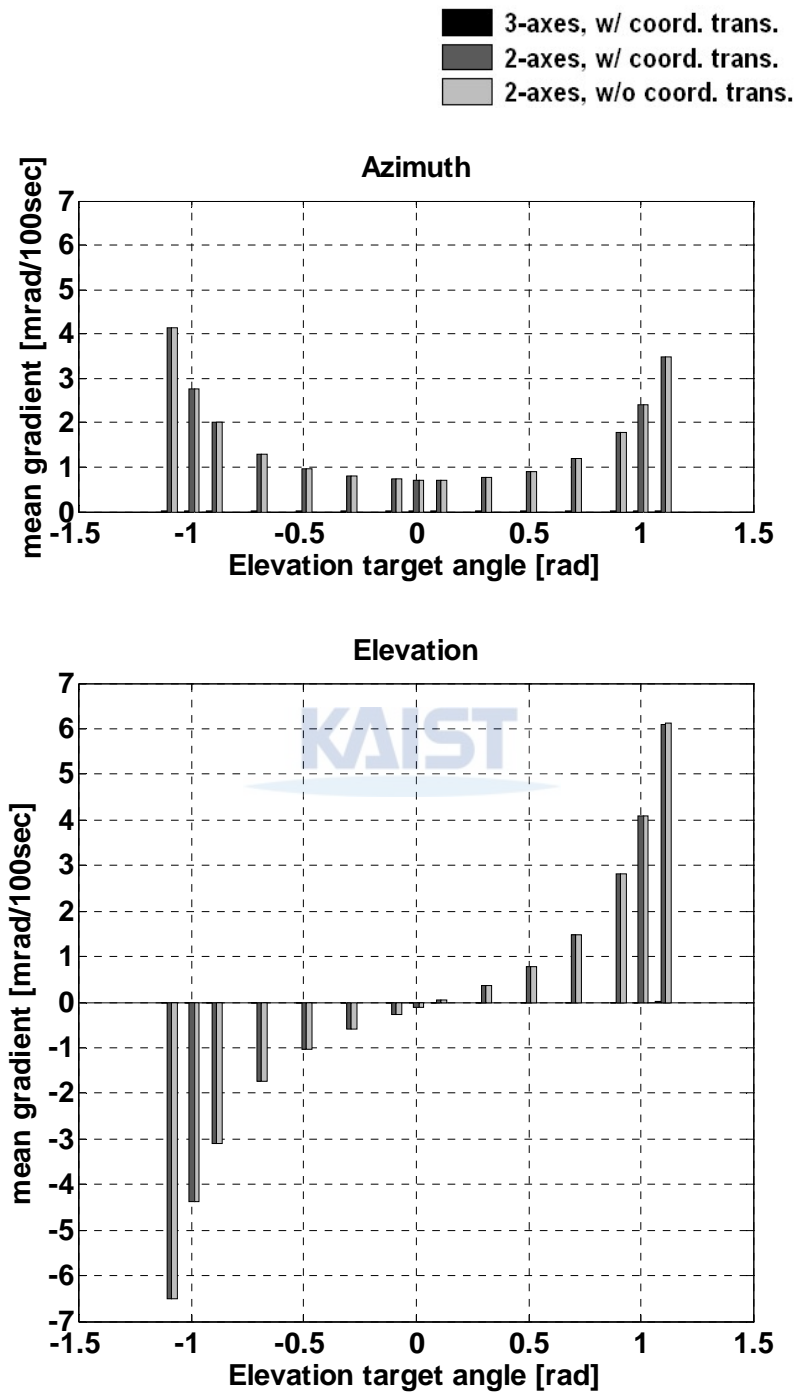


그림 5-19. 원선회 주행 시 고저 지향각 변화에 따른 안정화 오차의 평균구배

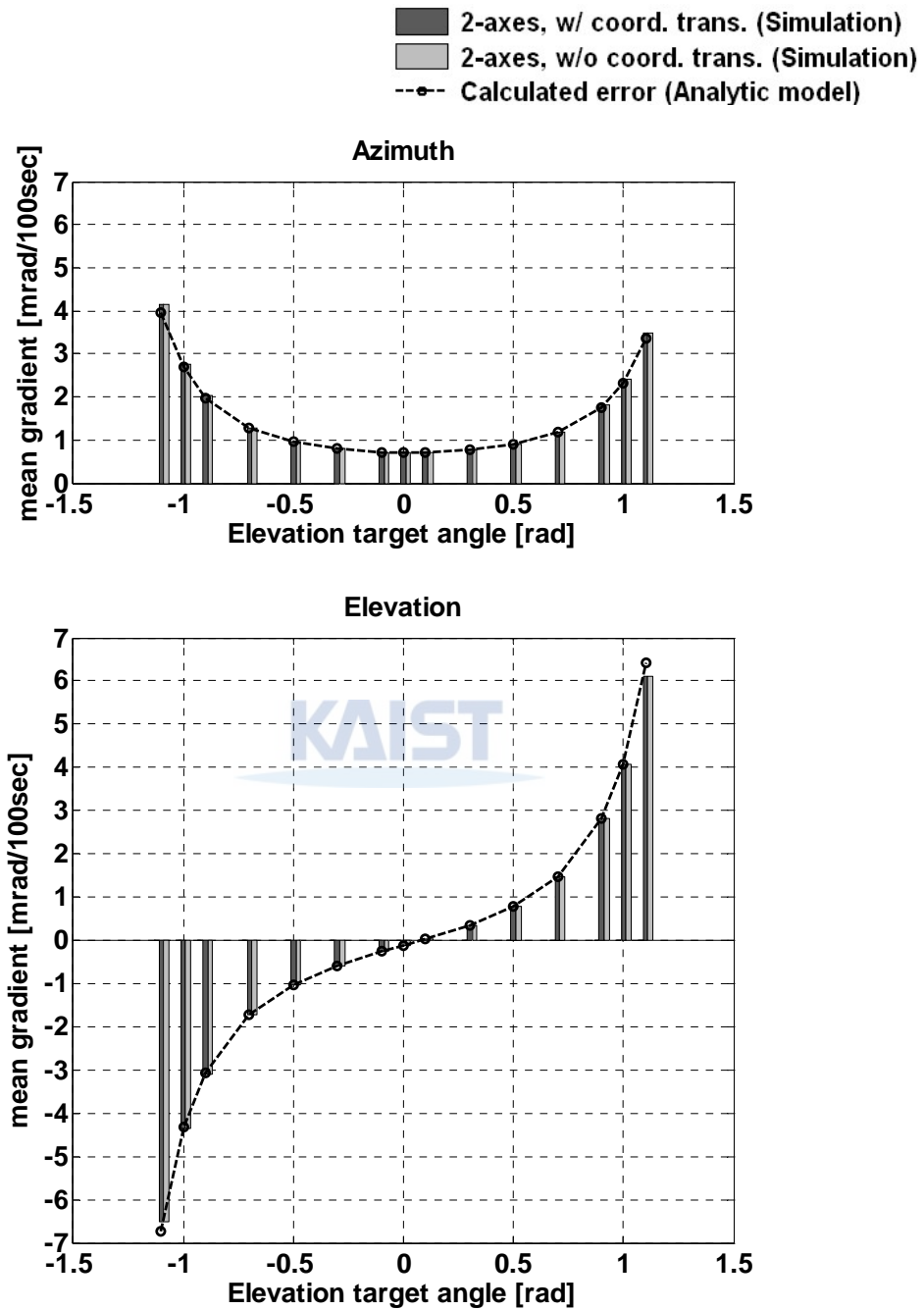


그림 5-20. 원선회 주행 시 고저 지향각 변화에 따른 모의실험 결과(누적 오차)와 해석적 모델을 통해 계산된 오차 비교

# Chapter VI

## 6. MATLAB 기반의 안정화 시뮬레이터 구현

### 6.1 시뮬레이터 개략도

### 6.2 시뮬레이터 시현

## 6. MATLAB 기반의 안정화 시뮬레이터 구현

5장까지의 연구 내용에서는 시스템의 목표 기준 각(target reference angle)이 고정된 상태로 제어되는 통제제어문제(regulating problem)만을 다루고 있다. 그러나 실제 시스템이 운용될 때는 목표방향이 고정되어 있는 상황과 더불어 목표물이 움직이거나 운용자의 매니퓰레이터 조작에 의해 지향방향이 실시간으로 변하는 추종제어문제(tracking problem) 또한 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서 논의된 안정화 알고리즘이 통제제어와 추종제어문제에 모두 적용되어 시스템을 안정화할 수 있는지 확인하기 위하여 사람이 조이스틱을 이용하여 구동방향을 조작하는 MATLAB 기반의 차량 탑재용 안정화 시뮬레이터를 구현하였다. 본 시뮬레이터에는 3축 자이로센서가 이용되는 이상적인 자세추정 방법을 적용하였다.

### 6.1 시뮬레이터 개략도



운용자는 시스템(aiming device)에 구축된 비전 카메라를 통해 항상 시스템과 같은 방향을 바라보며 조이스틱을 이용하여 시스템을 조종하는 것으로 가정하였다. 따라서 그림 6-1과 같이 Virtual Reality Toolbox를 이용하여 조이스틱 인터페이스와 비전 카메라의 시야(FOV : Field Of View)를 구현하고, 기 모델된 제어기와 SimMechanics 플랜트를 연결하여 전체 시뮬레이터를 구성하였다.

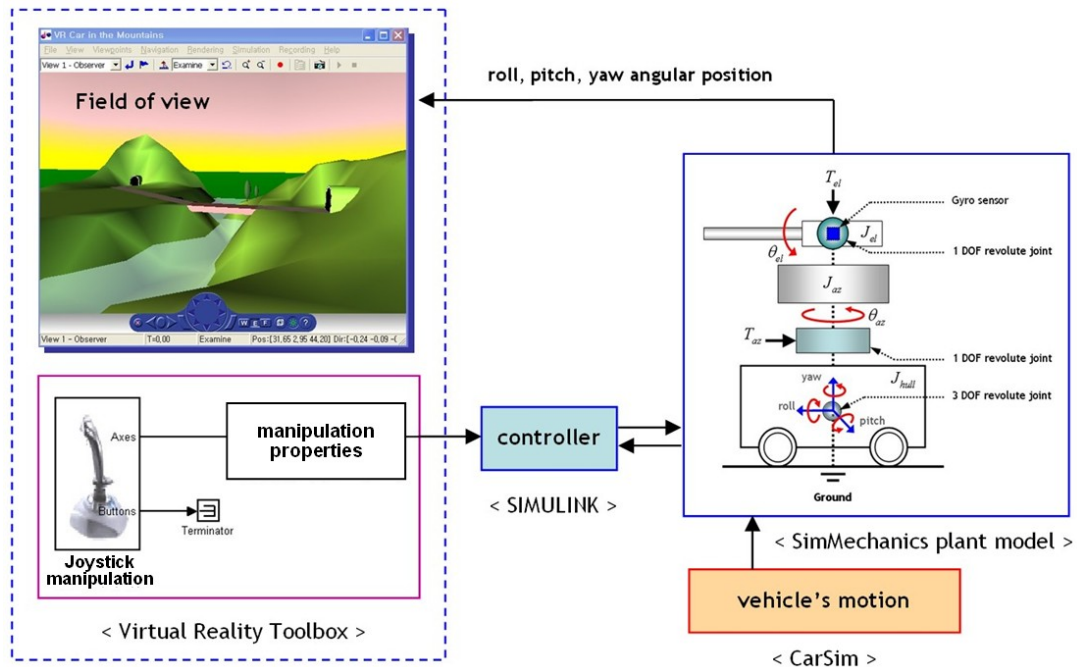


그림 6-1. 안정화 시뮬레이터 개략도

## 6.2 안정화 제어 시험

본 시험에서는 차량이 3차원 회전운동을 하며 제자리에서 회전하는 상황을 모사하였다. 그림 6-2은 안정화 제어가 되지 않은 경우 시간에 따른 차량과 안정화 시스템의 거동을 보여주며, 그림 6-3는 안정화 제어가 이루어질 때의 거동을 보여준다. 안정화 제어가 수행되지 않을 경우, 차량과 시스템이 체결되기 때문에 차량이 회전하며 움직일 때 시스템도 차량과 같은 운동을 하게 된다. 그러나 안정화 제어가 이루어지면 차량이 회전하더라도 선회 / 고저 방향의 안정화로 인해 시스템의 지향방향은 항상 일정하게 유지됨을 그림을 통해 알 수 있다.

아울러 조이스틱 조작에 의해 지향방향이 변하는 상황에서도 선회 및 고저방향의 안정화가 잘 수행되는 것을 FOV를 통해 확인하였으며, 따라서 본 안정화

알고리즘이 통제제어와 더불어 추종제어문제에도 잘 작동됨을 알 수 있었다.

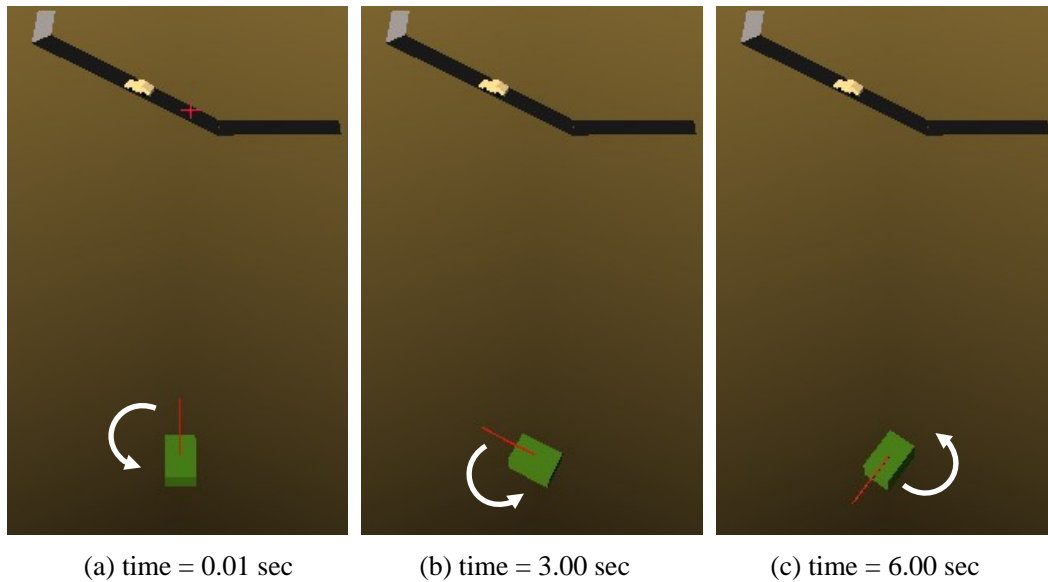


그림 6-2. 안정화 제어를 하지 않을 경우 차량과 시스템의 거동

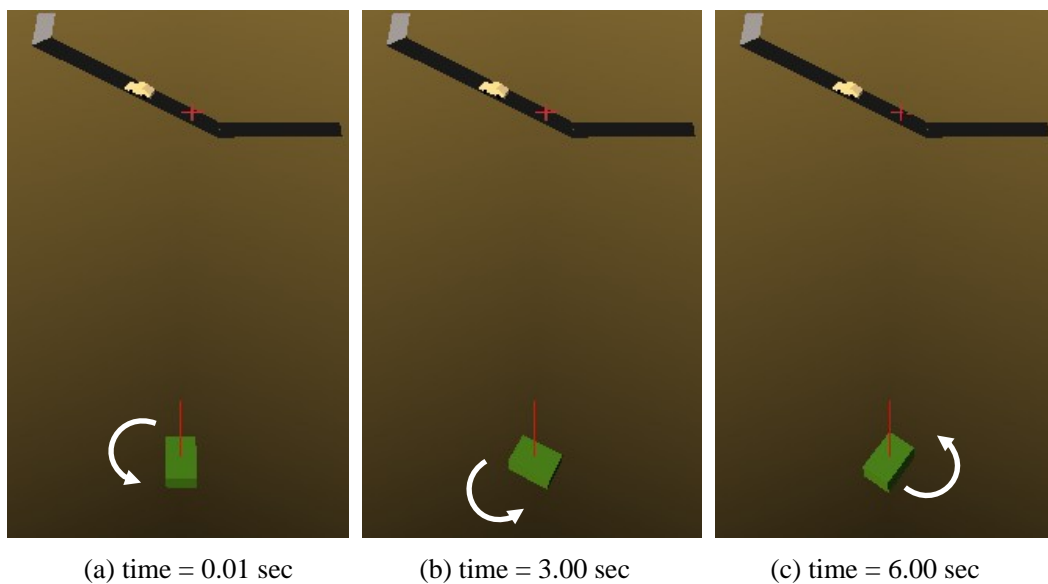


그림 6-3. 안정화 제어가 이루어질 경우 차량과 시스템의 거동

# Chapter VII

## 7. 결론 및 고찰





## 7. 결론 및 고찰

본 연구에서는 실제 차량에 탑재되는 2축 안정화제어 시스템의 대부분이 시스템의 자세추정 센서로서 2축 자이로센서를 사용하고 있고, 추가적인 신호처리 과정, 즉 전역좌표계로의 변환과정 없이 센서 출력 각속도가 안정화 제어의 상태변수로 사용되고 있는 현실에 착안하여 2축 자이로센서를 사용하는 차량 탑재용 안정화 시스템에서 나타나는 안정화 오차를 해석적으로 유도하였다. 그리고 유도된 해석적 모델의 타당성을 검증하기 위해 다양한 차량 주행 환경을 기반으로 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과는 해석적 모델의 안정화 오차의 특성을 잘 반영하고 있으므로, 본 모델이 2축 자이로센서를 사용하는 차량 탑재용 안정화 시스템에 적용될 수 있음을 확인하였다.

모의실험 결과를 분석한 결과, 고정확도를 요하는 안정화 시스템의 경우 자세추정 센서로서 3축 자이로센서가 필수적으로 사용되어야 함은 물론 출력 신호를 전역좌표계로 변환하는 과정도 반드시 수반되어야 함을 확인하였다. 그러나 만약 센서 비용과 시스템 구성 상의 문제로 2축 자이로센서가 사용되어야 한다면, 차량 주행 중 롤이 매우 작게 나타나고 롤의 평균값이 거의 0에 가까운 상황에서 시스템이 운용되어야 한다. 이러한 상황은 평탄한 도로나 지면요철이 심하지 않은 자갈길 등에서의 직진 주행 등을 예로 들 수 있다. 또한 2축 자이로센서를 사용할 때 좌표변환 과정의 유무에 따른 안정화 성능은 거의 동일한 것으로 확인되므로, 실시간으로 운용되는 시스템의 특성상 센서 출력 신호를 좌표변환하지 않는 방법이 계산량 감소 측면에서 더욱 유리할 것이라 판단된다.

본 연구에서는 추가적으로 조이스틱에 의해 시스템이 운용되는 human-in-the-loop 안정화 시뮬레이터를 개발하였다. 주행 중 차량 위에 탑재된 시스템의 움직임과 동일하게 모사된 환경에서 본 시스템에 적용된 안정화 알고리즘이 지향각 안정화 성능뿐만 아니라 추적성능 또한 보장함을 실시간 조이스틱 조작을 통해 확인하였다.

본 논문에서는 잘못된 자세추정으로 인해 발생하는 안정화 오차의 분석에 초점을 맞추었다. 그러나 실제 시스템 구현 시 센서잡음은 매우 큰 장애요소로 작용한다. 따라서 향후 센서잡음에 의한 안정화 오차의 해석 연구 또한 의미있는 연구가 될 것으로 사료된다.



## 참고문헌

- [1] Baerveldt, A.-J. and Klang, R. “A Low-cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter,” IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, pp. 391-395, 1997.
- [2] Lauro Ojeda and Johann Borenstein, “Improved Position Estimation for Mobile Robots on Rough Terrain Using Attitude Information,” Department of Mechanical Engineering, Technical Report UM-ME-01-01, 2001.
- [3] Maruthi R. Akella, James T. Halbert, and Gnana R. Kotamraju, “Rigid body attitude control with inclinometer and low-cost gyro measurements,” AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting in Santa Babara, CA, pp. AAS 01-140, 2001.
- [4] 박영진, “이동형 위성통신 안테나 자세제어 기술에 관한 연구,” 최종연구보고서, 한국전자통신연구원, 2004.
- [5] Mooncheol Won and Sung-Soo Kim, “Design and Control of a Marine Satellite Antenna,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 1, <Special Edition> pp. 473-480, 2005.
- [6] 오정환, 고운용, 정인, 황승욱, 신위제, “선박용 위성안테나의 Stabilized Pedestal 구조와 제어 알고리즘의 설계 및 구현에 관한 연구”, 한국통신학회 학술발표회 논문집, Vol. 16, No. 3, pp. 451-455, 1997.

- [7] Demoz Gebre-Egziabher, Roger C. Hayward, and J. David Powell, "A *Low-Cost GPS/Inertial Attitude Heading Reference System (AHRS)*," Position Location and Navigation Symposium, IEEE, pp. 518-525, 1998.
- [8] Takao Murakoshi, "Antenna stabilizing control system with strapdown 2 axis azimuth/elevation method," Proceedings of JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, Vol. 2003, pp. 339-340, 2003.
- [9] Michael T. DiRenzo and Mark W. Vandegrift, "Adaptive Control for Pointing and Stabilization of a Flexible Gun Tube," Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 5, pp. 4943-4948, 1997.
- [10] David J. Purdy, "Comparison of balance and out of balance main battle tank armaments," Shock and Vibration, Vol. 8, No. 3-4, pp. 167-174, 2001.
- [11] Dae-Ok Lee, Tae-Ha Kang, Hag-Seong Kim and Jung-Ho Ko, "A feedback linearization control technique based on iterative learning parameter identification for an electrically driven stabilized pointing system of heavy turreted vehicles," Proceedings of the 10th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Lisbon, Portugal, July 9-12, 2002.
- [12] 이대옥, 김학성, 안태영, "전차포 표적지향 시스템의 안정화·구동성능 향상연구," 한국군사과학기술학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 65-81, 1998.
- [13] 이대옥, 강태하, 김학성, 박광웅, "대부하 정밀 표적지향 안정화 시스템의 비선형 제어기법 연구," 한국군사과학기술학회지 Vol. 4, No. 2, pp. 157-178, 2001..

- [14] N. Coleman, M. Mattice and S. Banks, “*High Precision Weapon Control System Design*,” the 1st IEEE Conference on Control Applications, Vol. 2, pp. 726-731, 1992.
- [15] Kamil AFACAN, “*Modeling and control of a stabilization system*,” M.S. Thesis, METU, 2004.
- [16] Deepak Bapna, Eric Rollins, Alex Foessel, and Red Whittaker, “*Antenna Pointing for hight Bandwidth Communications from Mobile Robots*,” Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation Leuven, Belgium, pp. 3468-3473, 1998.
- [17] 이상학, “*자이로 센서 기술 동향*,” 기술동향분석보고서, KISTI, 2002.
- [18] N. Coleman, M. Mattice and S. Banks, “*High Precision Weapon Control System Design*,” the 1st IEEE Conference on Control Applications, Vol. 2, pp. 726-731, 1992.
- [19] James Debruin, “*Control Systems for Mobile Satcom Antennas*,” IEEE Control Systems Magazine, pp. 86-101, Feb. 2008.
- [20] James C. DeBruin, James M. B. Royalty, and Marty Wand, “*Feedforward stabilization testbed*,” Proceedings of SPIE, Vol. 2739, pp. 204-214, 1996.
- [21] Gene F. Franklin, J. David Powell and Abbas Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems - 4th edition*, Prentice Hall, 2002.
- [22] Donald T. Greenwood, *Advanced Dynamics*, Cambridge University Press, 2003.

[23] Sigurd Skogestad and Ian Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control*, John Wiley & Sons, 2005.



## 부록 A

### Modeling Parameters

- 표 A.1. 선회/고저 구동부

	Azimuth part	Elevation part
<b>Moment of inertia</b> [ kgm <sup>2</sup> ]	$J_{az} = \begin{bmatrix} 1.761 & 0 & 0 \\ 0 & 4.016 & 0 \\ 0 & 0 & 3.255 \end{bmatrix}$	$J_{el} = \begin{bmatrix} 2.146 & 0 & 0 \\ 0 & 6.255 & 0 \\ 0 & 0 & 7.732 \end{bmatrix}$
<b>Mass</b> [ kg ]	$m_{az} = 66.53$	$m_{el} = 76.61$
<b>Moment of inertia of actuating motor</b> [ kgm <sup>2</sup> ]	$J_{m_{az}} = 3.1 \times 10^{-4}$	$J_{m_{el}} = 3.1 \times 10^{-4}$
<b>Gear ratio</b>	137.6	114.7
<b>Viscous damping coefficient</b> [ Nms/rad ]	$B_{az} = 14.105$	$B_{el} = 1.782$

- 차체모델(hull) 관성모멘트 및 질량

$$J_{hull} = \begin{bmatrix} 846.6 & 0 & 0 \\ 0 & 3524.9 & 0 \\ 0 & 0 & 3524.9 \end{bmatrix} \text{ kgm}^2, \quad m_{hull} = 2257 \text{ kg}$$

## 부록 B

### < 안정화 제어 구조 및 제어기 설계 >

자이로센서 출력 각속도  $\omega_{gyro}$  와 기구의 상대각속도  $\omega_{sys}$ , 그리고 차량(hull) 좌표 기준의 외란각속도  $\omega_{dist}$  사이의 관계는 식 (B.1) 로 표현된다.

$$\omega_{gyro} = \omega_{sys} + \omega_{dist} \quad (B.1)$$

이를 다시 선회 및 고저 부분으로 구분하여 표현하면 아래 식과 같다.

$$\text{선회 : } \omega_z = \omega_{az} + \omega_{dist\_z}, \quad \text{고저 : } \omega_y = \omega_{el} + \omega_{dist\_y} \quad (B.2)$$

여기서  $\omega_z, \omega_y$  는 각각 자이로센서 기준의 요(yaw), 피치(pitch) 각속도이며,  $\omega_{az}, \omega_{el}$  는 각각 기구의 선회/고저 상대각속도를, 그리고  $\omega_{dist\_z}, \omega_{dist\_y}$  는 각각 차량좌표 기준의 요, 피치 외란각속도를 의미한다.

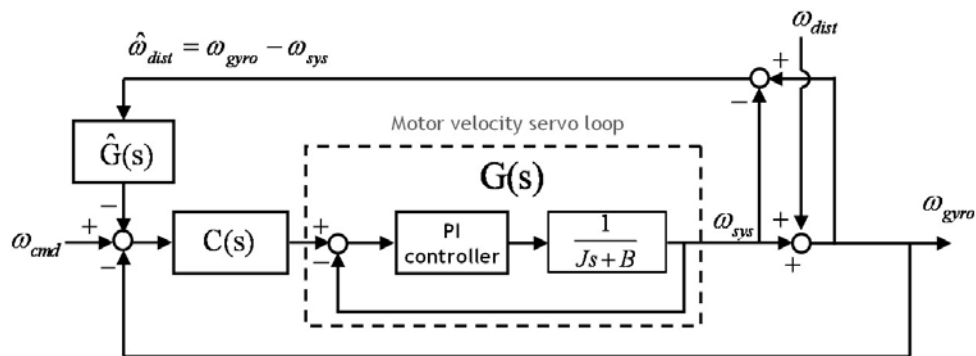


그림 B-1. 안정화 알고리즘 블록선도



식 (B.1)에서  $\omega_{gyro}$  와  $\omega_{sys}$  는 각각 자이로센서와 레졸버(resolver)로 측정 가능한 물리량이다. 따라서 측정잡음이 없는 이상적인 경우, 블록선도 B-1에 표현된  $\hat{\omega}_{dist}$  처럼 차량으로부터 시스템으로 인가되는 외란각속도를 실시간으로 추정하여 선보상할 경우 시스템에 작용하는 외란의 영향을 제거할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

우선 블록선도에 표시된 모든 상태변수들로부터 dynamic equation을 세우면

$$(1 + CG)\omega_{gyro} = \omega_{dist} + CG\omega_{cmd} - CG\hat{G}\hat{\omega}_{dist} \quad (B.3)$$

이 된다.

여기서 추종오차(tracking error) 및 외란추정오차(estimation error)를 각각

$$e \equiv \omega_{cmd} - \omega_{gyro}, \quad e_d \equiv \omega_{dist} - \hat{\omega}_{dist}$$

와 같이 정의하면, 식 (B.3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e = \frac{1}{1 + GC}\omega_{cmd} - \frac{1 - CG\hat{G}}{1 + GC}\hat{\omega}_{dist} - \frac{1}{1 + GC}e_d \quad (B.4)$$

식 (B.4)로부터 만약 차량으로부터의 외란 각속도를 정확히 추정할 수 있고  $\hat{G}$  을  $CG$  의 역(inverse)으로 설계한다면, 즉

$$\text{if. } e_d \approx 0 \text{ and } CG\hat{G} = 1$$

이면, 추종오차는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$e = \frac{1}{1+CG} \omega_{cmd} \quad (B.5)$$

따라서 제어기  $C(s)$  를 최적으로 설계할 경우 추종오차를 최대한 줄일 수 있다.

## B.1 극점 배치 기법을 이용한 제어기 설계

### • B.1.1 제어기 $C(s)$ 선정

제어기  $C(s)$  로는 P 제어기, PI 제어기, PD 제어기, PID 제어기 등을 고려할 수 있는데, 앞서 살펴본 전체 제어 구조상 다음 두 가지 사항을 만족하도록 하였다.

- 1) 속도명령  $\omega_{cmd}$  에 대한 자이로센서 각속도  $\omega_{gyro}$  의 정상상태 오차가 0이 되도록 한다.
- 2)  $CG\hat{G}=1$  을 만족시키기 위해  $\hat{G}(s)$  을 고려하여  $C(s)$  를 설계한다.

우선, 모터의 속도서보루프의 전달함수를 구하면 식 (B.6)과 같다.

$$G(s) = \frac{K_{pm}s + K_{lm}}{Js^2 + (B + K_{pm})s + K_{lm}} \quad (B.6)$$

또한 속도명령에 대한 자이로센서 각속도의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{[\omega_{gyro}](s)}{[\omega_{cmd}](s)} = \frac{CG}{1+CG} = \frac{C(K_{pm}s + K_{lm})}{Js^2 + (B + K_{pm})s + K_{lm} + C(K_{pm}s + K_{lm})} \quad (B.7)$$

식 (B.7)로부터 정상상태 오차를 없애려면  $C(s)$  가 PI 또는 PID 제어기로 설계되어야 함을 알 수 있다.

두 번째 사항을 만족시키기 위한  $\hat{G}(s)$ 의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{G} = \frac{1}{CG} = \frac{Js^2 + (B + K_{Pm})s + K_{Im}}{C(K_{Pm}s + K_{Im})} \quad (B.8)$$

위 식으로부터  $C(s)$  를 P 또는 PI 제어기로 설계할 경우 전달함수 분자의 차수가 분모의 차수보다 높게 되어 인과율의 원리(principle of causality)에 어긋남을 알 수 있다. 따라서  $\hat{G}(s)$ 의 전달함수를 고려하면 제어기  $C(s)$  을 PD 또는 PID 제어기로 설계해야 한다.

정리하면, 앞에서 제시한 두 가지 사항을 모두 만족하는 제어기로서  $C(s)$  는 PID 제어기로 설계되어야 한다. 따라서 PID 계인을 갖는 제어기  $C(s)$  는 아래와 같이 표현되며,

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

이에 따른 속도명령에 대한 자이로센서 각속도의 전달함수는 식 (B.9)와 같게 된다.

$$\frac{[\omega_{gyro}](s)}{[\omega_{cmd}](s)} = \frac{K_D K_{Pm} s^3 + (K_D K_{Im} + K_P K_{Pm}) s^2 + (K_P K_{Im} + K_I K_{Pm}) s + K_I K_{Im}}{(J + K_D K_{Pm}) s^3 + (B + K_{Pm} + K_D K_{Im} + K_P K_{Pm}) s^2 + (K_{Im} + K_P K_{Im} + K_I K_{Pm}) s + K_I K_{Im}} \quad (B.9)$$

또한 외란각속도  $\omega_{dist}$  에 대한 자이로센서 각속도의 전달함수는, 외란추정 후

선보상하는  $-\hat{G}\hat{\omega}_{dist}$  항에 의해 항상 0에 수렴하게 되는데, 이처럼 제어대상이 되는 자이로 센서 각속도가 외란각속도의 영향을 받지 않으려면 차량 움직임에 의한 외란의 정확한 추정(estimation)이 보장되어야 한다.

### • B.1.2 극점 배치 기법을 이용한 PID 제어기 설계

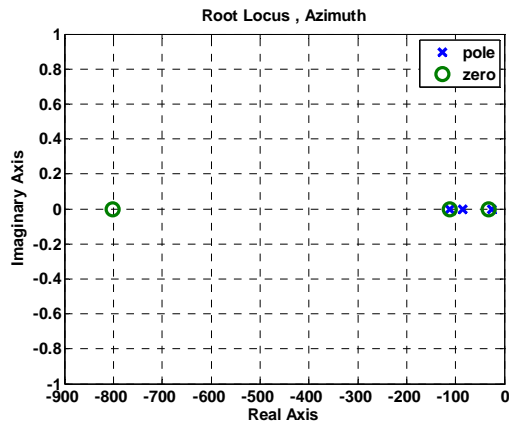
B.1.1 절에서 논의한 PID 제어기  $C(s)$  의 설계를 위해 극점배치기법을 적용하였다. 극점배치기법은 폐루프 시스템의 극점을 임의로 지정함으로써 시스템의 특성을 임의로 바꿀 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 시스템이 안정된 상태로 속도명령을 추종해야 하므로 정상상태 도달 시간이 다소 느리더라도 과도응답에서 채터링이 발생하지 않도록 감쇠비(damping ratio)가 1.0이 되도록 하였으며, 단위계단함수 응답의 정착시간(settling time)이 0.3초 이내가 되도록 극점을 배치하였다.

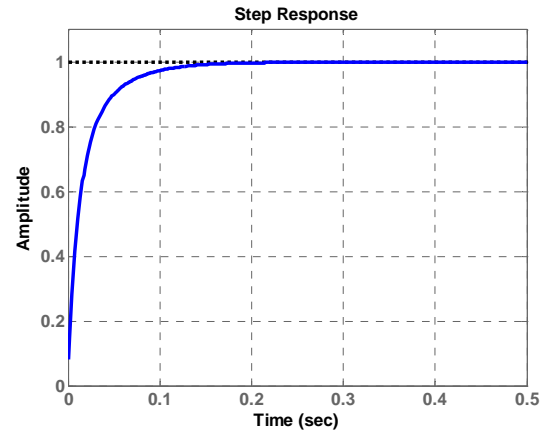
표 B.1에 선회와 고저 구동부의 PID 제어기 설계를 위한 극점배치 결과 및 동특성을 정리하였다. 또한 그림 B-2, B-3에 각각 선회 / 고저 구동부의 극점(poles)과 영점(zeros) 위치, 단위계단함수 응답,  $\omega_{cmd}$  에 대한  $\omega_{gyro}$  응답의 Bode 선도를 나타내었다.

	Eigenvalues	Damping ratio	Natural frequency rad/s (Hz)	Cutoff frequency rad/s (Hz)	PID gains
Azimuth part	-25.1	1.0	25.1 (4.0)	50.9 (8.1)	$K_p = 0.5164$
	-85.0	1.0	85.0 (13.5)		$K_I = 50.7586$
	-112.0	1.0	112.0 (17.8)		$K_D = 0.00057$
Elevation part	-25.1	1.0	25.1 (4.0)	43.5 (6.9)	$K_p = 0.7671$
	-78.0	1.0	78.0 (12.4)		$K_I = 50.4315$
	-130.0	1.0	130.0 (20.7)		$K_D = 0.0015$

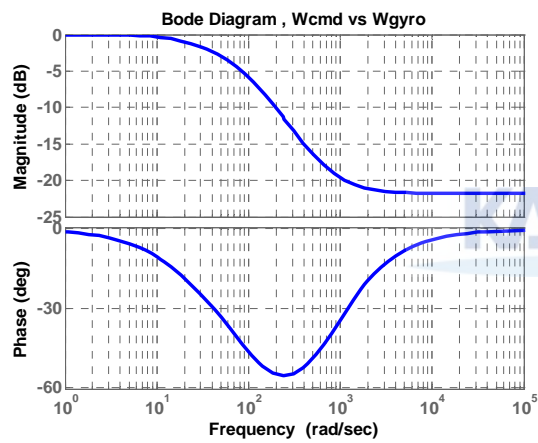
표 B.1. 선회 및 고저 구동부 제어기 설계를 위한 극점배치 및 동특성



(a)



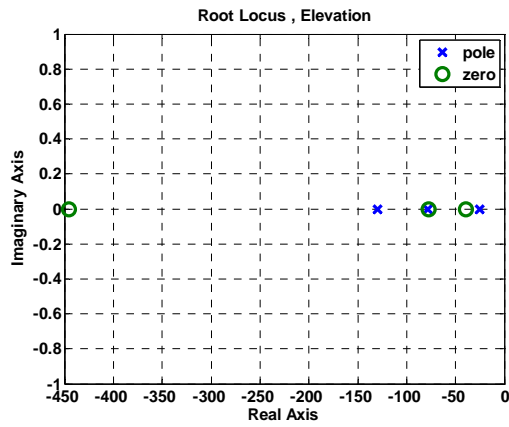
(b)



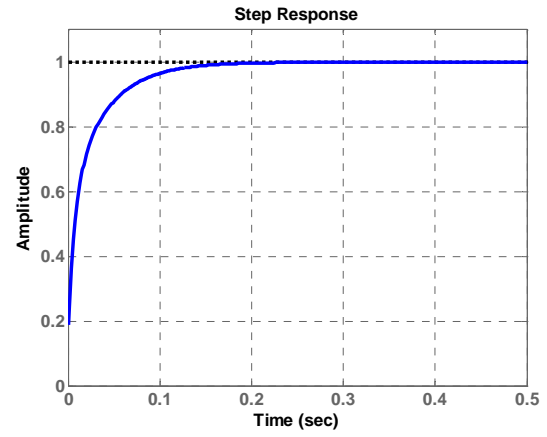
(c)

그림 B-2. 선회 구동부

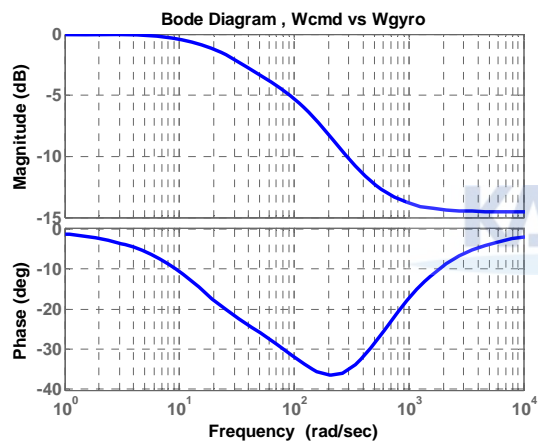
(a) 극영점 위치, (b) 단위계단함수 응답, (c)  $\omega_{cmd} - \omega_{gyro}$  Bode 선도



(a)



(b)



(c)

그림 B-3. 고저 구동부

(a) 극영점 위치, (b) 단위계단함수 응답, (c)  $\omega_{cmd} - \omega_{gyro}$  Bode 선도

## 부록 C

### < 안정화 오차의 해석적 유도과정에서 (가정 5, 6)의 타당성 검증 >

4장의 ‘좌표변환 과정이 수반되는 2축 자이로센서 신호처리 방법에서의 안정화 오차’ 유도 과정에서 식 (4.6)의 간단화를 위해 (가정 5)를 사용하였다.

$$\begin{aligned}\int (\hat{\psi} - \psi) dt &= -\int \frac{1}{\cos \theta} (\hat{\phi} \hat{\omega}_y - \phi \omega_y) dt \\ \int (\hat{\theta} - \dot{\theta}) dt &= \int (-\hat{\phi} \hat{\omega}_z + \phi \omega_z) dt\end{aligned}\tag{4.6}$$


$$\hat{\phi} \approx 0\tag{가정 5}$$

모의실험 결과, 실제 본 신호처리 방법으로부터 추정된 롤 각( $\hat{\phi}$ )은 3축 자이로센서를 사용하는 이상적인 방법에서의 롤 각( $\phi$ )에 비해 무시할 정도로 작게 나타났다. 그 예로, 가장 악조건(the worst case)인 원선회 주행 시 결과를 그림 C-1, C-2, C-3에 나타내었다. 100초 동안의 롤 각,  $\hat{\phi}$ 이  $10^{-5} rad$ 의 수준으로 매우 작은 값으로 추정되는 것을 확인할 수 있으며, 이 값은  $\omega_y$ 나  $\omega_z$  등 작은 값과 다시 곱해져 적분되므로 전체 오차에 미치는 영향은 거의 없다고 보아도 무방할 것이다.

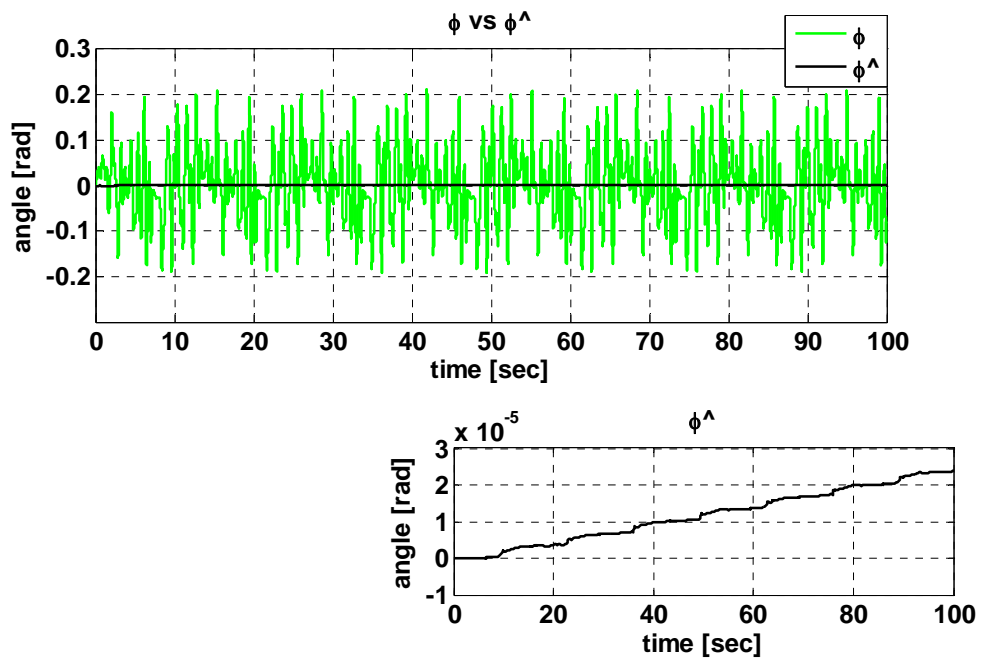


그림 C-1. 선회 0 rad / 고저 -1 rad 지향 안정화 제어 시 추정된 롤 각 비교

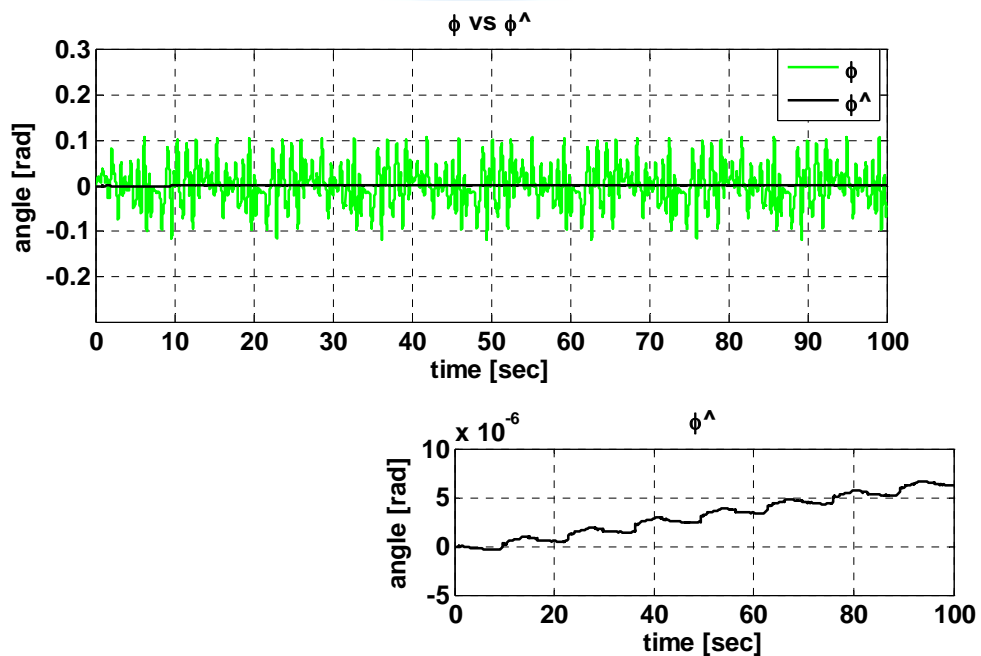


그림 C-2. 선회 0 rad / 고저 0 rad 지향 안정화 제어 시 추정된 롤 각 비교



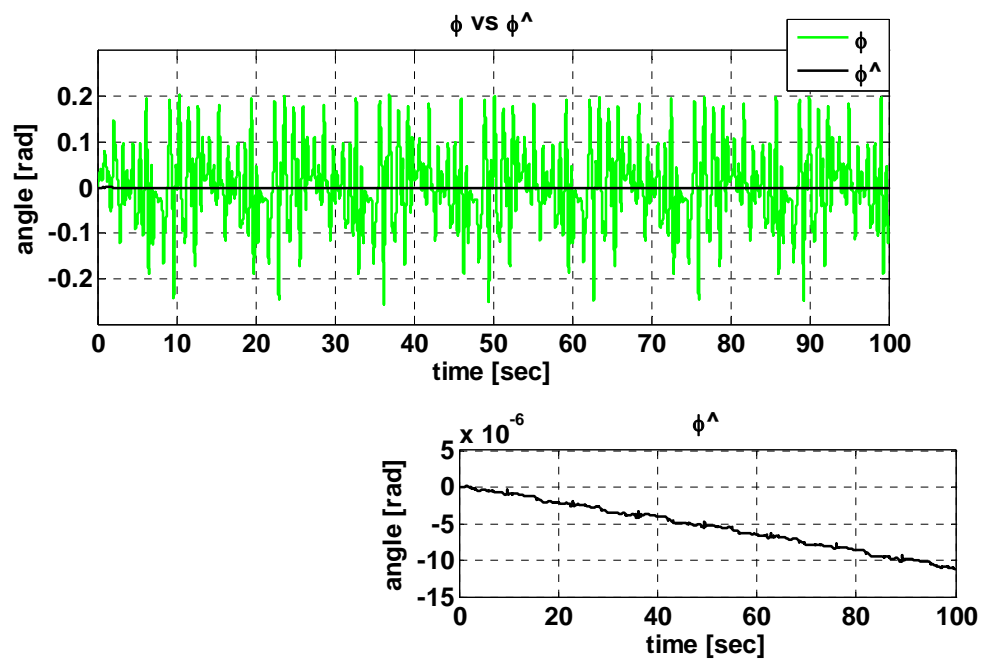


그림 C-3. 선회 0 rad / 고저 1 rad 지향 안정화 제어 시 추정된 물 각 비교

KAIST

‘좌표변환을 수반하지 않는 2축 자이로센서 신호처리 방법에서의 안정화 오차’ 유도 과정에서는 식 (4.9)에 (가정 6)을 적용함으로써 2축 자이로센서를 사용할 때 나타나는 안정화 오차가 좌표변환 과정의 유무와 관계없이 동일함을 보였다.

$$\begin{aligned}\psi_{err} &= -\int \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y dt + \int \frac{\cos \theta - 1}{\cos \theta} \omega_z dt \\ \theta_{err} &= \int \phi \omega_z dt\end{aligned}\tag{4.9}$$

$$\int \frac{\cos \theta - 1}{\cos \theta} \omega_z dt \approx 0 \tag{가정 6}$$

모의실험으로부터 얻은 상태변수 데이터를 이용하여 요 각 오차( $\psi_{err}$ )를 구성하는  $-\int \frac{\phi}{\cos \theta} \omega_y dt$  과  $\int \frac{\cos \theta - 1}{\cos \theta} \omega_z dt$  항을 계산한 결과,  $\int \frac{\cos \theta - 1}{\cos \theta} \omega_z dt$  값은 미비하게 나타나 오차에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 그 예로서 원선회 주행 시 결과를 그림 C-4, C-5, C-6에 나타내었다. 선회 / 고저 모두 0 rad을 지향할 경우 해당 항의 값은 거의 0으로 나타나며, 고저 지향각이 커질수록 섭동(perturbation) 정도만 증가할 뿐, 시간이 지남에 따라 전체 오차에서 차지하는 비중은 매우 작아져 (가정 6)이 타당함을 알 수 있다.

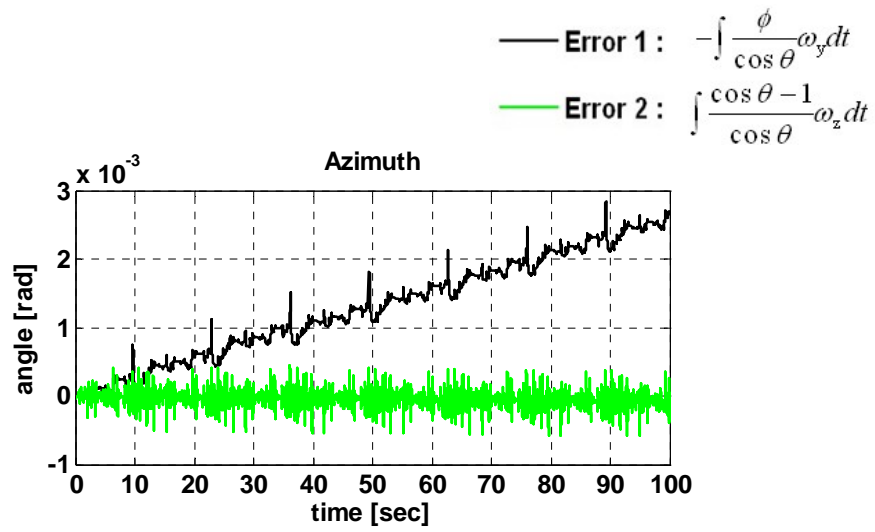


그림 C-4. 선회 0 rad / 고저 -1 rad 지향 안정화 제어 시 오차 항 비교

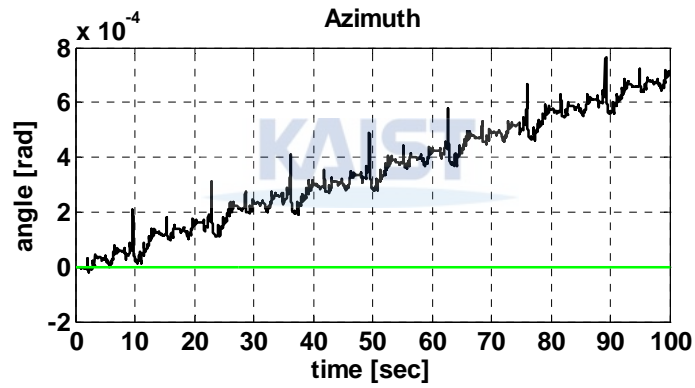


그림 C-5. 선회 0 rad / 고저 0 rad 지향 안정화 제어 시 오차 항 비교

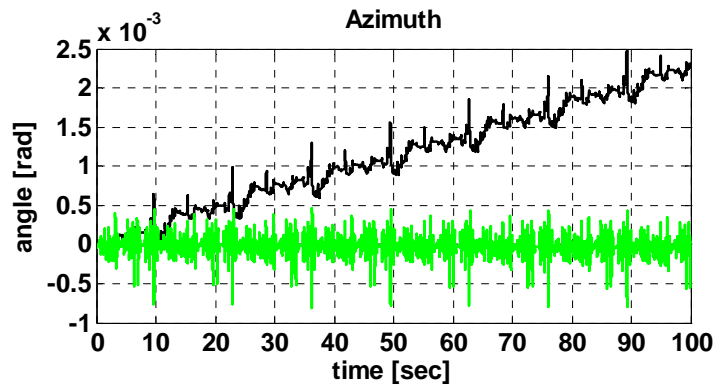


그림 C-6. 선회 0 rad / 고저 1 rad 지향 안정화 제어 시 오차 항 비교

## 부록 D

### < 자이로센서 offset noise에 기인한 drift 효과 제거 >

본 연구에서는 센서잡음이 없는 이상적인 조건에서의 안정화 오차 해석 및 모의실험에 집중하였다. 그러나 실제 환경에서는 센서잡음이 시스템의 성능에 미치는 영향을 무시할 수 없다. 특히 본 연구에서와 같이 자이로센서가 안정화 시스템에 이용될 경우, 출력된 각속도를 적분하는 과정이 항상 수반되기 때문에 센서잡음이 동반 적분되어 추가적인 안정화 오차를 유발하게 된다. 게다가 센서잡음이 offset noise일 경우에는 잡음의 평균값이 적분되어 시간에 따라 오차를 누적시키는 드리프트(drift) 현상을 야기하여 안정화 오차에 심각한 영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 드리프트 효과를 제거하기 위해 경사계나 가속도계, 비전센서 등을 추가적으로 사용하는 센서융합 방식이 다양하게 이용되고 있다.

그러나 본 연구에서는 간단한 고주파 필터(high pass filter)를 설계하여 자이로센서의 offset noise에 의한 드리프트 효과를 제거하고자 한다. 그림 D-1과 같이 기존의 모델에서 출력되는 자이로센서 신호에 잡음신호(N)를 추가하였으며, 잡음의 offset 성분을 제거하기 위한 고주파 필터를 되먹임 경로에 배치하였다.

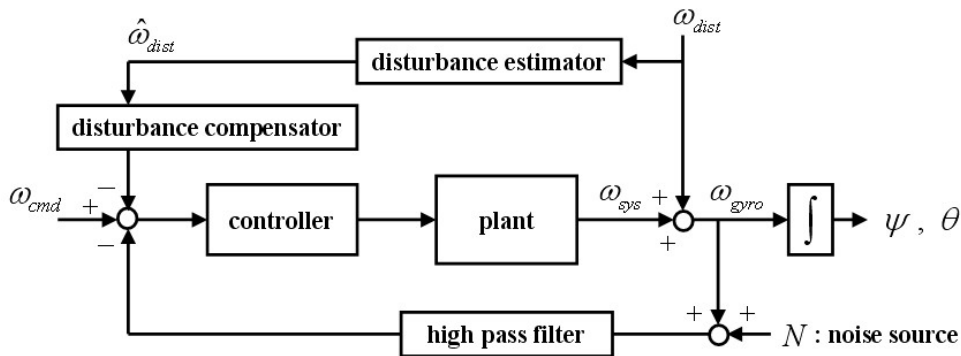


그림 D-1. 측정잡음 및 고주파 필터를 추가한 시스템 모델링

모의실험에는 직진 주행(straight path) 시 차량의 움직임을 시스템의 외란으로 사용하였으며 선회 / 고저 모두 전역좌표계 기준의 0 rad 으로 안정화하도록 하였다. 센서잡음의 특성은 평균값(offset)을  $5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ , 분산(variance)을  $1 \times 10^{-5} (\text{rad/s})^2$  으로 하였고, 필터로는 3차 고주파 필터(3<sup>rd</sup> order high pass filter)를 사용하였다. 사용된 센서잡음의 형태 및 고주파 필터의 동역학적 특징을 각각 그림 D-2와 그림 D-3에 나타내었다.

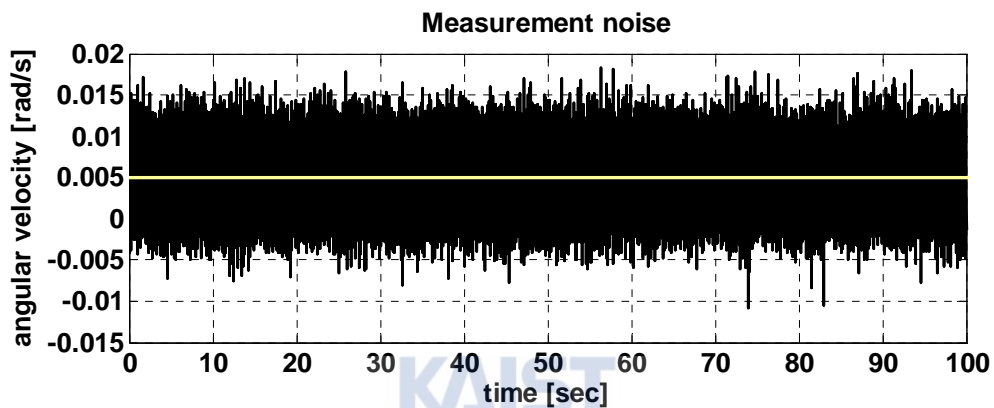


그림 D-2. 센서잡음 ( offset :  $5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$  , variance :  $1 \times 10^{-5} (\text{rad/s})^2$  )

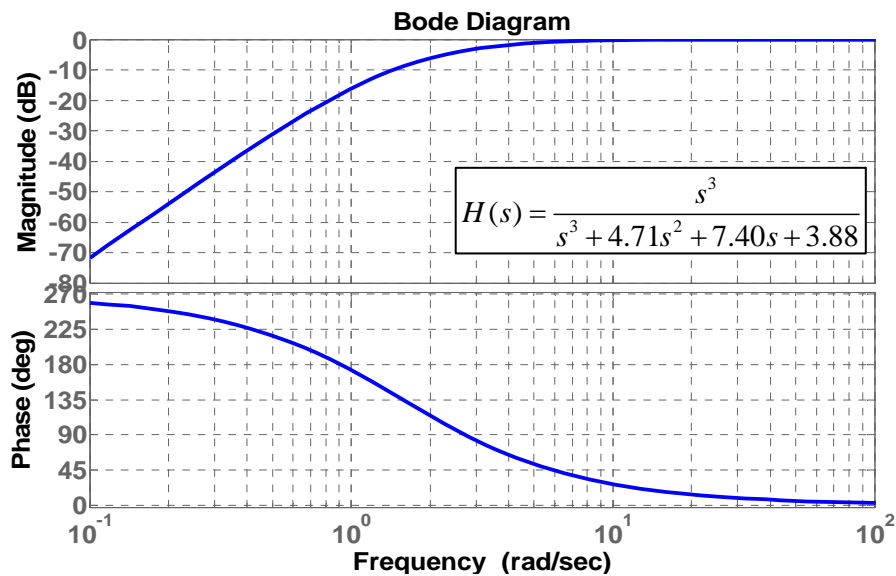


그림 D-3. 고주파 필터 특성 ( 3<sup>rd</sup> order , cut-off frequency : 0.5 Hz )

센서잡음이 없는 이상적인 조건에서는 그림 D-4 처럼 선회 / 고저 모두 0 rad 을 중심으로 지속적으로 안정화가 잘 수행되고 있음이 확인된다. 그러나 센서잡음을 적용하여 모의실험을 수행한 결과, 그림 D-5에 나타난 바와 같이 100초 동안 0.5 rad 정도의 오차가 발생됨을 알 수 있다. 이와 같은 누적오차, 즉 드리프트 양은 센서잡음의 offset 값인  $5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$  를 100초 동안 적분한 값과 동일하다.

드리프트의 주 요인인 offset 값을 제거하기 위해 자이로센서 출력 신호를 고주파 필터에 통과시킨 결과는 그림 D-6과 같다. 선회 / 고저 모두 초기 천이 구간(transient region)이 -12 ~ +5 mrad 정도로 존재하고 센서잡음에 의한 오차를 정확히 제거할 수는 없지만, 전체적으로 드리프트 현상이 제거되고 일정 시간 이후에는 안정화 오차가  $\pm 1 \text{ mrad}$  이내로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

본 모의실험에서는 간단한 구조의 고주파 필터로 자이로센서의 offset noise를 제거할 수 있음을 확인하였다. 그러나 만약, 자이로센서 출력 신호 중 필터 차단주파수 이하의 저주파 성분도 신호로써 유효한 값일 경우, 본 고주파 필터의 적용은 합리적이지 못하다. 필터를 사용함에 따라 유효한 출력 신호도 제거되기 때문이다. 따라서 보다 효율적인 센서잡음 제거를 위해서는 앞서 밝힌 센서융합 알고리즘이 적용되어야 할 것이다.

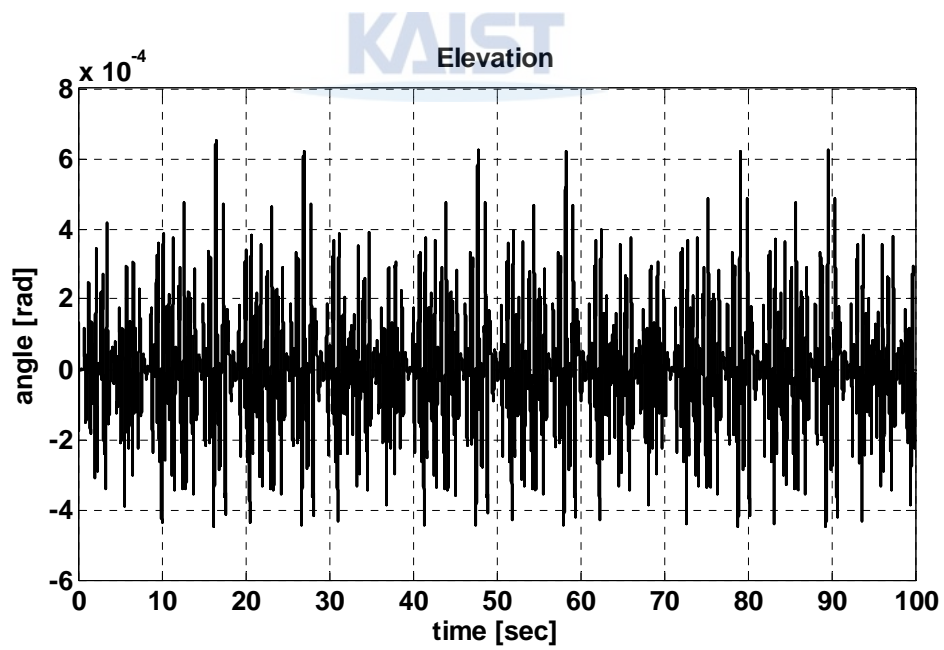
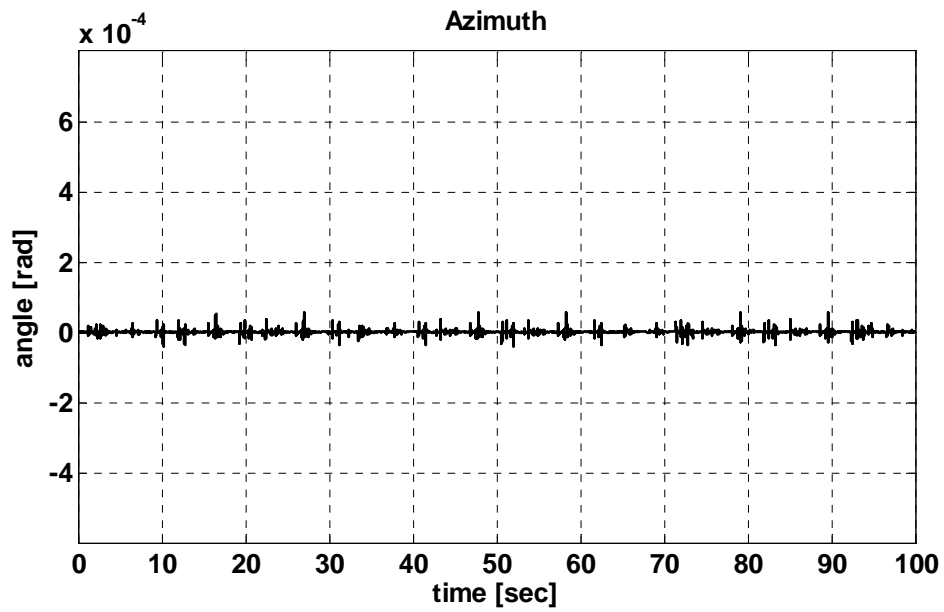


그림 D-4. 센서잡음이 없는 경우 선회 / 고저 안정화 결과

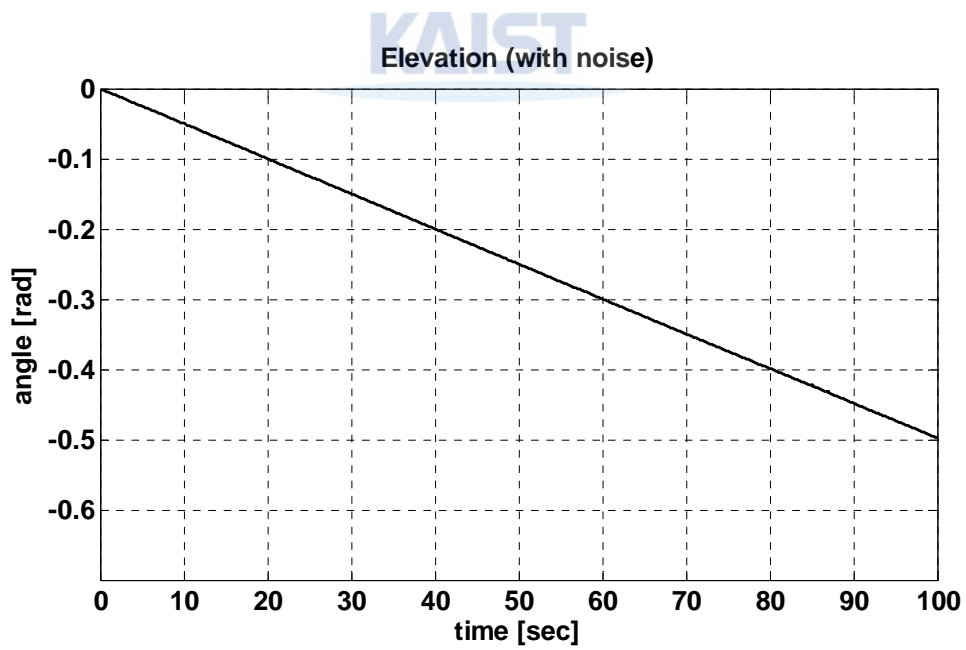
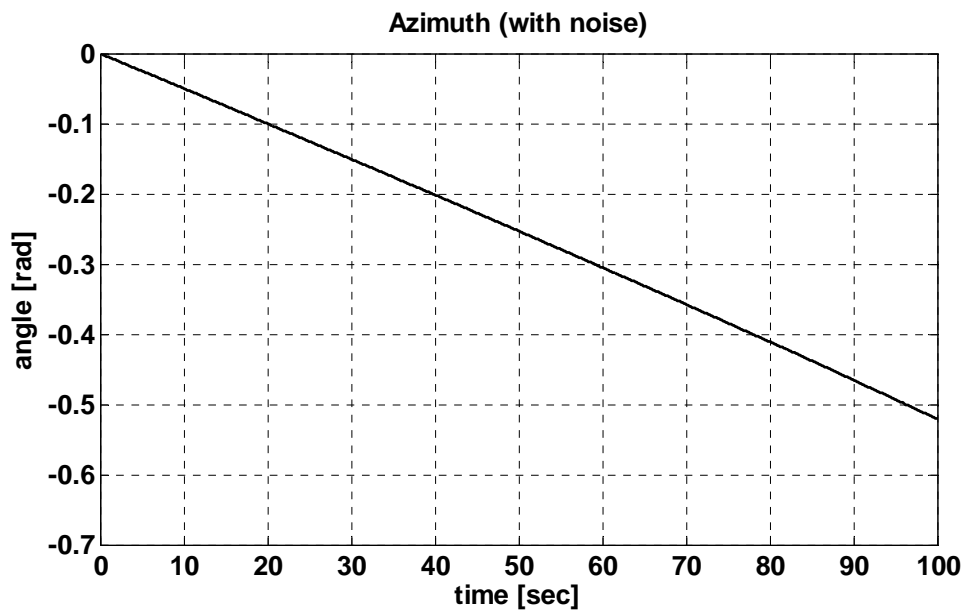


그림 D-5. 센서잡음에 의한 드리프트 현상



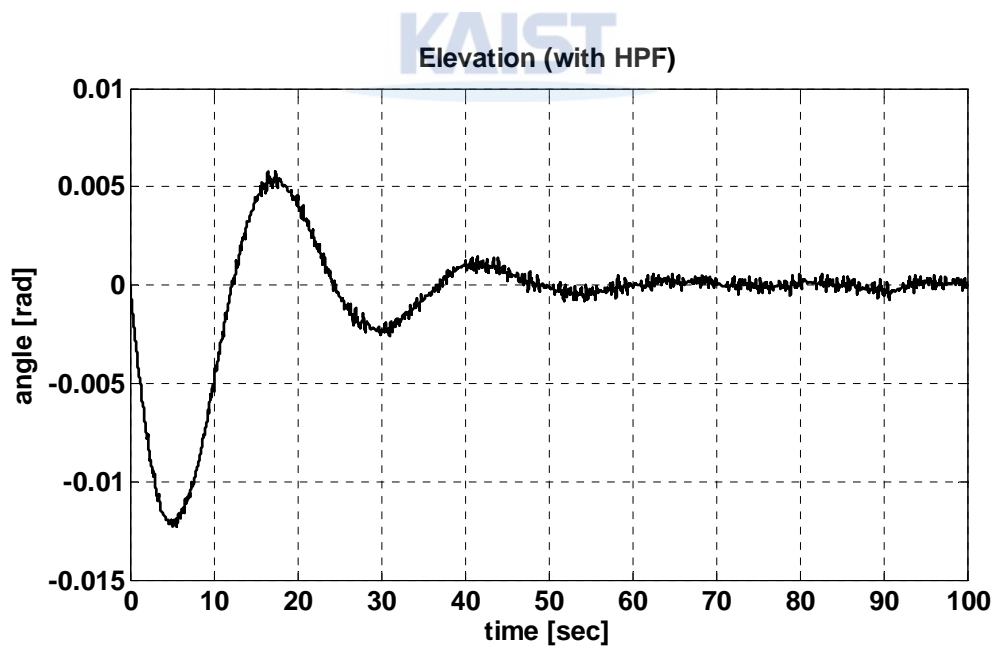
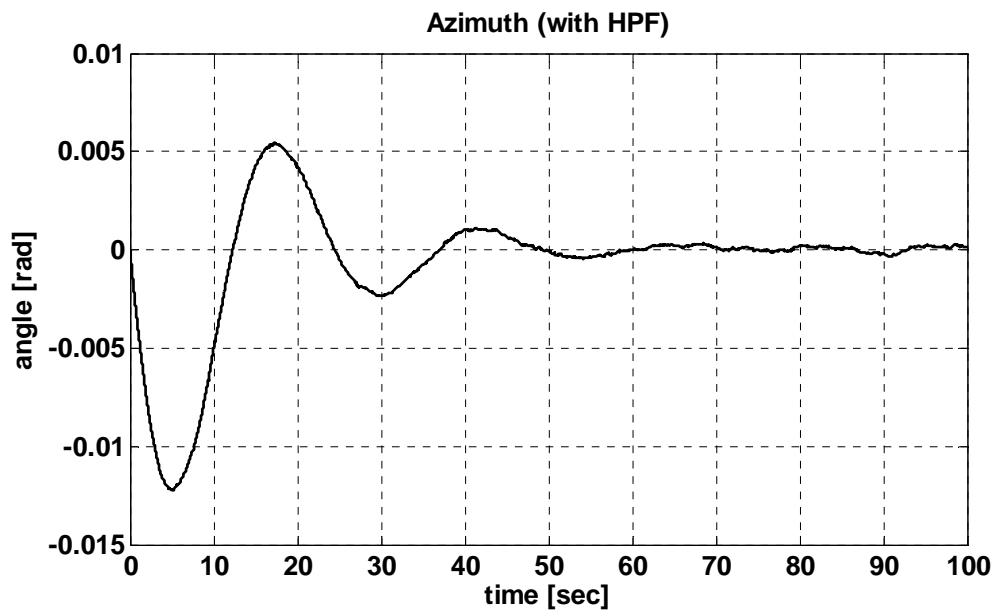


그림 D-6. 고주파 필터 적용 후 선회 / 고저 안정화 결과