

Self-Slaving을 이용한 원격측정 신호추적 기법 연구

A Study on a Tracking Method of Telemetry Signal using Self-Slaving

이성필*

Lee, Sung-Pil

ABSTRACT

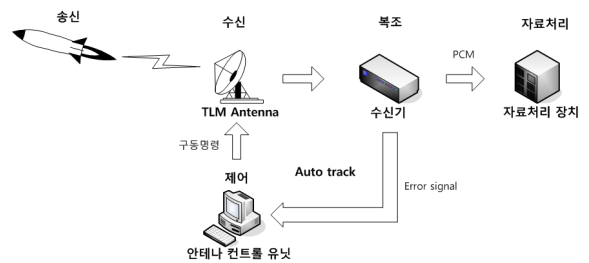
A telemetry ground station has a highly directional, parabolic tracking antenna to receive a weak telemetry signal from a target at a distance. The tracking antenna with narrow beam-width normally uses the auto-track method for the target tracking. This paper presents several issues in the auto-track method and introduces a new tracking method using Self-Slaving technique. Self-Slaving means that the tracking antenna is slaved to not data measured by RADAR but GPS/INS informations received by the telemetry system for pointing. The Self-Slaving method shows good performance in comparison with auto-track method.

주요기술용어(주제어) : Telemetry(원격측정), Auto-Track(자동추적), Pulse Code Modulation(PCM, 펄스 부호 변조), Half Power Beam Width(반치각), Refractive Index(굴절계수)

1. 머리말

원격측정(Telemetry)이란 원거리에 위치한 대상으로부터 무선통신을 이용해 정보를 획득하는 것으로 원격측정 대상의 내부에 여러 센서 및 전자장비들의 정보를 다중화 및 변조 후 송신하고 지상국에서 수신 및 처리하는 과정으로 이루어진다.

시험 비행체 개발과정에서는 비행시험을 통해 비행 중 발생하는 시험 비행체 내부 현상들에 대한 자료를 원격측정으로 수신한다. 수신된 자료는 수신신호 이득에 따라 비트오류 확률(BER : Bit Error Rate)을 가지며 PCM/FM 원격측정에서 NRZ-L 코드를 사용



[그림 1] 원격측정 지상국 기본 구성

할 경우 비트오류 확률은 식 (1)과 같다^[1].

$$BER = 0.5 \times e^{-(k \times S/N)} \tag{1}$$

여기서,

BER : 비트오류 확률

k : 수신기 대역폭 상수, 일반적으로 -0.55

† 2008년 4월 11일 접수~2008년 5월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : stratix@add.re.kr

S/N : 중간주파수(IF) 수신이득 [dB]

일반적으로 시험 비행체의 비행시험에서 원격측정 지상국은 비트오류 확률을 감소시키기 위해 이득이 높은 지향성 안테나를 사용하여 신호를 수신한다. 지향성 안테나는 메인 빔 범위 안의 신호원에 대해 높은 수신이득을 갖지만 메인 빔 범위 밖의 신호원에 대해서 낮은 수신이득을 가지므로 양질의 원격측정 자료획득을 위해 수신 안테나의 다양한 신호추적 기법이 사용된다.

본 논문에서는 시험 비행체의 원격측정 신호 추적 기법으로 가장 일반적인 자동추적(Auto-Track) 기법과 한계점을 분석하고, 그 한계점의 보완을 위해 새로운 Self-Slaving 추적기법의 비행시험 적용 및 분석결과를 제시한다.

2. 자동추적 기법

자동추적 기법이란 지향성 안테나의 메인 빔을 이용하여 추적대상의 신호강도를 분석하고 연속적인 위치추적을 수행하는 것이다. 이를 위해서 안테나의 지향각과 시험 비행체의 위치 사이의 오차를 검출하며, 검출방식에 따라 원추형주사(Conical Scan) 방식과 모노펄스(Mono-Pulse)방식으로 구분된다. 모노펄스 방식은 원추형 주사방식에 비해 기계적인 회전이 필요 없어 높은 신뢰성과 안테나 구조적인 특성으로 높은 수신감도를 얻을 수 있어 원격측정 추적기술로 가장 많이 사용되어 왔다. 근래에는 모노펄스 방식에서 하드웨어의 개선을 이루어져 SCM(Single Channel Mono pulse) 방식과 E-Scan 방식 등이 일반적으로 활용되고 있다^[2].

자동추적 기법은 시험 비행체의 위치에 대한 정보 없이 독립적으로 구동이 가능하며, 안정적인 추적상태가 유지되면 최고의 수신이득으로 신호를 수신할 수 있다. 그러나 자동추적 중 추적실패 상황이 발생하면 안테나가 임의의 방향으로 구동되어 신속한 재추적이 힘들다는 단점이 있다.

이러한 자동추적 실패 상황의 원인은 다음과 같은 원격측정 통신환경에 있다.

첫째, 반사파에 의한 수신신호 강도의 변화이다. 자동추적 방식은 신호강도를 이용하여 추적하므로, 반사파에 의한 수신신호의 간섭은 비정상적인 진동 및 추적실패의 원인이 된다. 비행시험은 위험성을 고려하여 주로 해상지역에서 수행되는데 특히 해면 반사파는 저고도에서 영향이 크며 비행시험 초기 및 종말 구간에 발생한다.

둘째, 송신신호 빔 형상에 따른 수신강도의 변화이다. 시험 비행체로부터 송신되는 빔의 형상은 시험 비행체의 장착 위치에 따른 구조적인 영향, 시험 비행체 후방 추진기관의 연소가스 등에 의해 영향을 받아^[3] 이상적인 무지향성 형상을 갖지 못한다. 따라서 시험 비행체가 비행 중 롤(Roll) 및 피치(Pitch)와 같은 자세운동을 하는 경우 수신감도의 급격한 변화를 발생시키고, 수신안테나가 송신 빔 형상의 널(Null) 구간을 지향하는 경우 수신신호가 매우 불량하거나 추적실패 상황이 발생한다.

이 같은 자동추적 기법의 한계점을 보완하기 위해 수신 안테나를 다수 배치하여 신호를 합성하거나, 탄도 계측장비를 통해 수신한 위치자료를 실시간 연동하는 Slaving 추적기법 등이 사용된다. 그러나 다수 수신안테나의 신호합성은 부가적인 비용이 소요되며, 저고도 및 고기동 비행구간에는 수신성능 개선효과를 기대할 수 없다. 또한 Slaving 추적기법은 단거리 및 저고도 구간에 계측오차가 높다는 단점이 있다.

3. Self-Slaving 기법

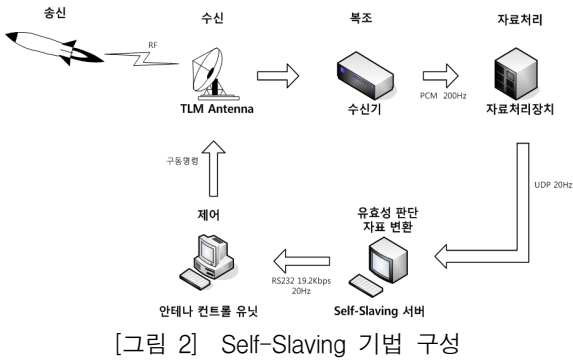
일반적으로 시험 비행체는 정밀 항법을 위해 GPS(Global Positioning System) 및 INS(Inertial Navigation System)를 이용한다. Self-Slaving은 시험 비행체 내부의 위치정보를 원격측정 신호로 수신하여 안테나를 구동하는 것이다.

Self-Slaving 기법은 일정수준 이상의 수신이득만 보장되면 안테나 구동에 필요한 정상적인 자료를 수신할 수 있는 통신환경에 둔감한 추적기법이다.

가. Self-Slaving 구성

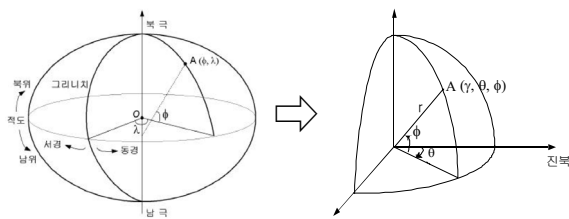
RF(Radio Frequency)로 안테나에 수신된 원격측

정 신호는 수신기를 통해 복조되어 PCM 신호로 바뀐다. PCM 신호로부터 실시간 자료처리장치에서 디멀티플렉스(Demultiplex)와 디코드(Decode)의 자료처리 과정을 통해 시험 비행체의 위치정보가 추출된다. 이 위치정보는 네트워크로 연결된 Self-Slaving 서버에 UDP(User Datagram Protocol) 패킷으로 전달되어 유효성 판단 후 시험 비행체의 방위각과 고각 정보로 변환된다. 변환된 방위각과 고각 정보는 시리얼 통신을 통해 안테나 컨트롤 유닛(Antenna Control Unit)에 전달되어 안테나를 구동한다.

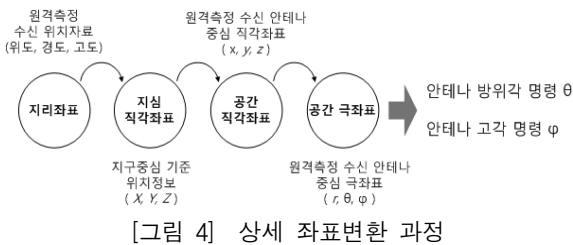


[그림 2] Self-Slaving 기법 구성

시험 비행체로부터 수신되는 위치정보는 WGS84 (World Geodetic System 1984) 모델에 따른 지리좌표(위도 ϕ , 경도 λ , 타원체고도)로 표현된다. 그러나



[그림 3] 지리좌표계의 공간 극좌표계 변환

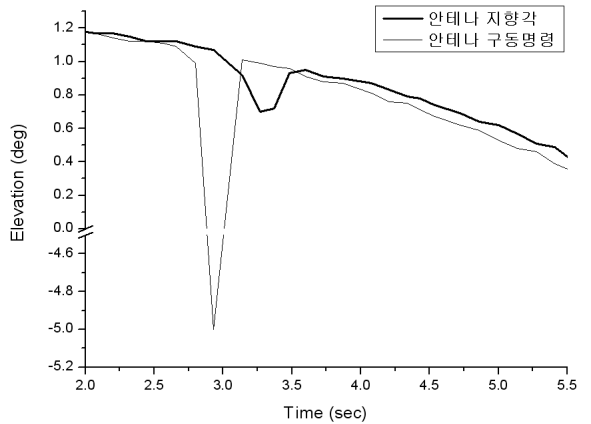


[그림 4] 상세 좌표변환 과정

수신 안테나는 고각과 방위각으로 추적대상을 지향하므로, 그림 3과 같이 수신안테나 중심 공간 극좌표로 변환이 필요하다. 좌표변환의 상세 과정은 그림 4와 같다.

나. 자료 유효성 판단

수신되어 복조된 원격측정 PCM 신호는 오류 확률을 가지고 있다. 원격측정 위치자료에 오류가 발생하면 안테나 구동명령도 오류가 발생한다. 그림 5는 원격측정 자료의 오류에 의한 Self-Slaving 오류를 나타낸다.



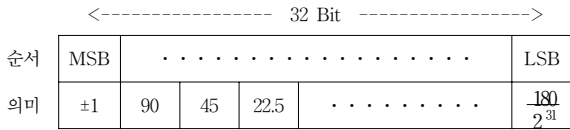
[그림 5] 자료 유효성 판단 전 Self-Slaving

수신자료 오류에 따른 오류명령을 제거하기 위해 추적대상의 예상궤적에 따른 유효범위를 설정하고, 수신 자료가 유효범위 내 자료로 판단될 경우 좌표변환을 수행하지만 유효범위 외 자료로 판단되면 이전 명령을 유지하게 하였다.

일반적으로 원격측정 자료에서 오류가 발생할 경우 정상값과의 차이가 큰 불연속적인 값이 나타나기 때문에 위 유효성 판단 방법이 효과적이라 할 수 있으며 이유는 다음과 같다.

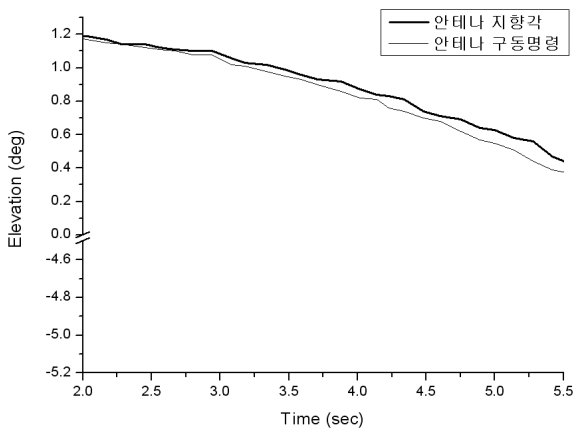
원격측정 위도, 경도 자료는 32비트의 2의 보수 형태로 표현한다. $\pm 180^\circ$ 의 범위를 표현하기 위해 부호 비트인 MSB(Most Significant Bit)부터 바로 아래에 위치한 비트는 $\frac{180}{2^1}$ 의 값을 의미하고 순차적으로 감소하여 $\frac{180}{2^{31}}$ 의 값을 가지는 LSB(Least Significant

Bit)까지 32비트로 표현한다. 그러므로 수신 범위를 한정함에 따라 MSB를 포함하여 상위 몇 개 비트를 특정한 값을 선택하는 효과를 갖는다.



[그림 6] 원격측정 PCM 32비트 변수 표현

유효성 판단 후 오류명령이 제거된 결과를 그림 7에 나타내었다.



[그림 7] 자료 유효성 판단 후 Self-Slaving

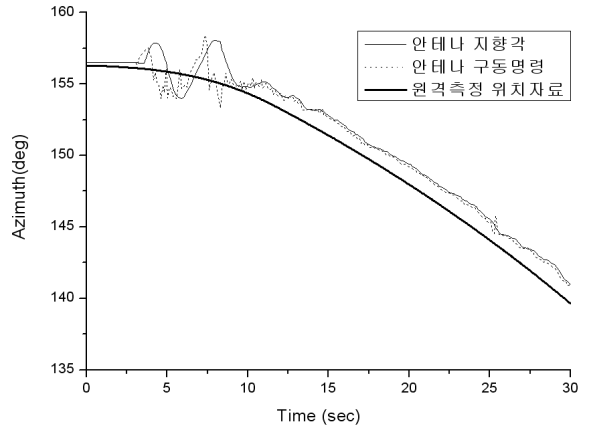
4. 비행시험 적용 및 분석

자동추적 기법으로 실제 비행시험을 수행한 결과와 비행시험 후 기록된 원격측정 자료를 재생하여 Self-Slaving 기법에 적용한 결과를 비교하였다. 또한 모의시험을 통하여 실제 비행시험에서 통신 두절상황에 대한 재추적 성능을 확인하였다.

가. 비행시험 자동추적 기법 적용

실제 비행시험의 자동추적 기법에 따른 안테나 구동 결과를 그림 8에 나타냈다. 가는 실선은 수신 안테나의 지향각을 나타내며 점선은 안테나의 구동명령이다. 굵은 실선은 실제 비행시험에서 수신된 원격측

정 위치자료를 수신 안테나 중심의 공간 극좌표로 변환한 값이다.

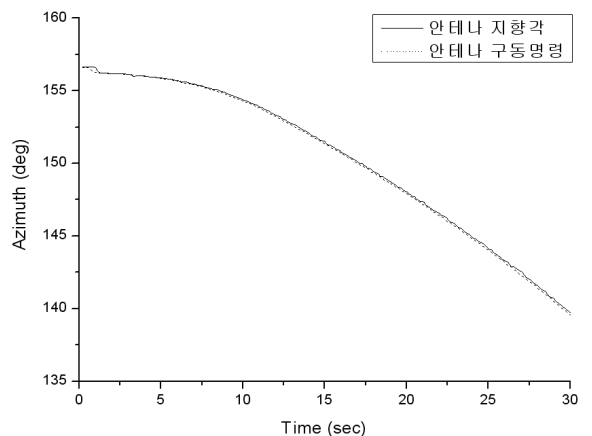


[그림 8] 비행시험 자동추적 결과(방위각)

그림 8에서 3.5초 지점에서 자동추적 기능을 시작하여 약 10초까지 불안정한 추적, 10초 이후 안정적인 추적 결과를 나타냈다. 결과를 통해 자동추적에서 통신환경의 영향으로 안테나 구동명령에 오차가 먼저 발생하고 오차명령에 따라 안테나가 구동됨을 알 수 있다.

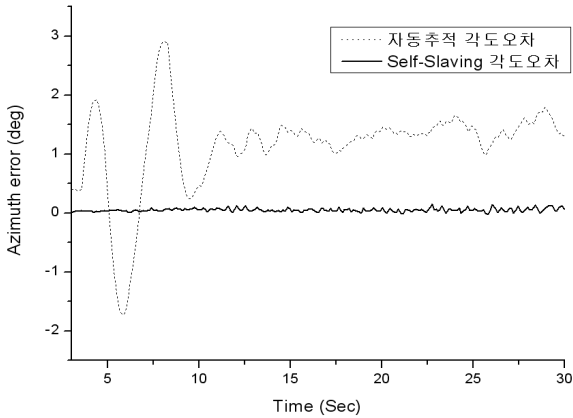
나. 비행시험 Self-Slaving 기법 적용

비행시험 결과 자료를 이용하여 Self-Slaving 기법 운용시 안테나 구동 결과를 그림 9에 나타냈다.



[그림 9] 비행시험 Self-Slaving 결과(방위각)

Self-Slaving 기법은 자동추적 기법과 달리 통신환경과 무관하게 오차가 적고 안정적인 구동명령을 생성하며, 그에 따라 초기 비정상적인 진동이 없고, 전반적인 각도오차가 감소하였음을 알 수 있다. 자동추적 기법과 Self-Slaving 기법에 추적 각도오차를 그림 10에서 비교하였다.



[그림 10] 추적기법에 따른 각도오차 비교(방위각)

다. 모의시험 Self-Slaving 기법 적용

모의시험은 비행시험시 발생할 수 있는 통신두절 상황에 대한 Self-Slaving 기법의 추적성능 검증을 위해 수행하였다. 모의시험에서 통신두절 구간은 약 14초~22초 구간이다.

그림 11에서 굵은 실선은 원격측정으로 수신된 위

치자료이며, 가는 실선은 안테나의 실제 지향각 그리고 점선은 안테나에 주어진 구동명령이다.

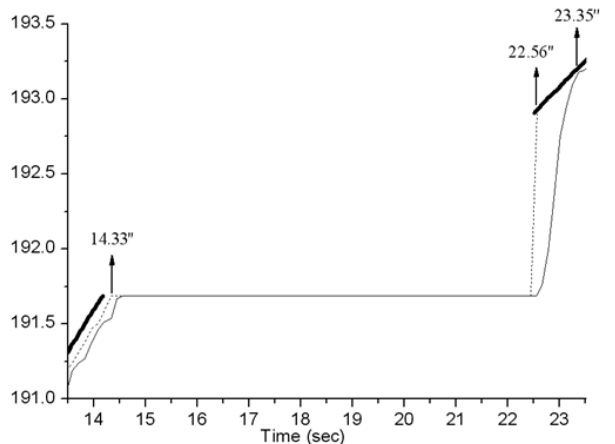
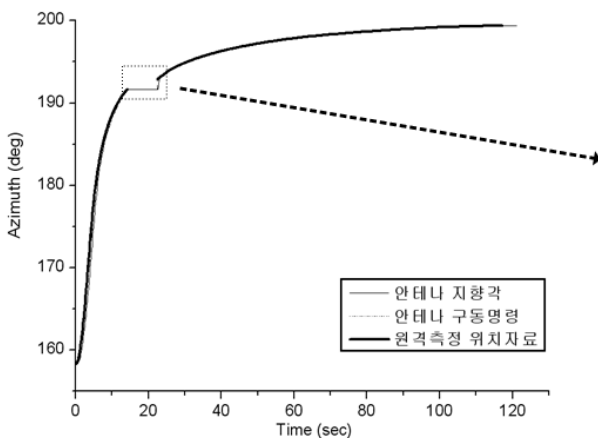
모의시험에서 원격측정 신호가 두절됨에 따라 원격측정 위치자료 수신이 정지되었다. 통신두절 상황에서는 PCM 프레임의 동기가 맞지 않으므로 유효성 판단을 통과한 마지막 자료가 송신되어 안테나 명령에 반영된 후 14.33초부터 고정된 명령이 유지되고, 22.56초에서 정상적인 위치자료가 수신됨에 따라 안테나의 구동명령이 재개되어 23.35초부터 각도오차가 0°에 가까운 정상적인 추적이 재개됨을 알 수 있다.

라. Self-Slaving 지연시간 분석

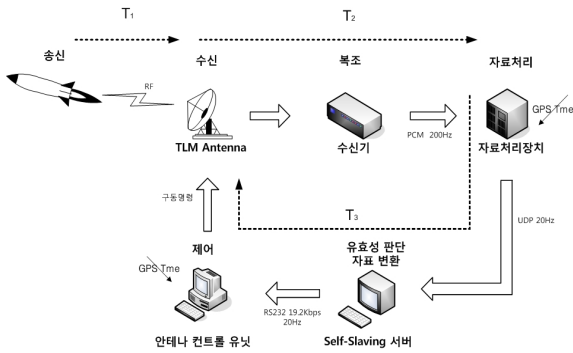
Self-Slaving 기법은 안정적인 추적성능을 보이지만 자동추적 기법보다 큰 지연시간을 가진다. 특히, 안테나 추적 각속도가 크게 요구되는 고속 비행체는 Self-Slaving 기법의 지연시간에 의한 각도오차가 더욱 증가할 것이다.

지연시간을 분석하기 위해 그림 12와 같이 지연시간을 전송특성에 따라 T_1 , T_2 , T_3 구간으로 분류하였다.

T_1 은 시험 비행체 위치정보가 송신되어 수신안테나까지 전송되는 전자기파에 의한 지연시간이다. 전자기파는 진공에서 빛의 속도로 전파되지만 실제 대기에서 속도는 굴절계수(Refractive Index)에 영향을 받으며 대기를 일정한 매질로 균일하게 분포하고 있음을 가정하면 식 (2)와 같이 표현된다.



[그림 11] 모의시험 Self-Slaving 결과(방위각)



[그림 12] 전송특성에 따른 지연시간 분류

$$v = \frac{C}{n} \quad (2)$$

여기서,

- v : 매질에 따른 전자기파 전파속도 [m/sec]
- C : 자유공간에서 빛의 속도 [m/sec]
- n : 매질의 굴절계수

매질의 굴절계수 n 은 식 (3)과 같이 표현된다^[4].

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (3)$$

여기서,

N : 전파 굴절률(Radio Refractivity)

전파 굴절률은 한반도 지역의 경우 9.5km 고도의 기상조건을 고려한 2월 평균값인 320, 8월 평균값인 360을 참고하여^[5] 한반도 지역의 굴절계수는 각각 1.00032와 1.00036으로 계산된다.

식 (2)를 참고하여 전자기파 지연시간 T_1 은 아래와 같이 계산된다.

$$T_1 = \frac{R \times n}{C} \quad (4)$$

여기서,

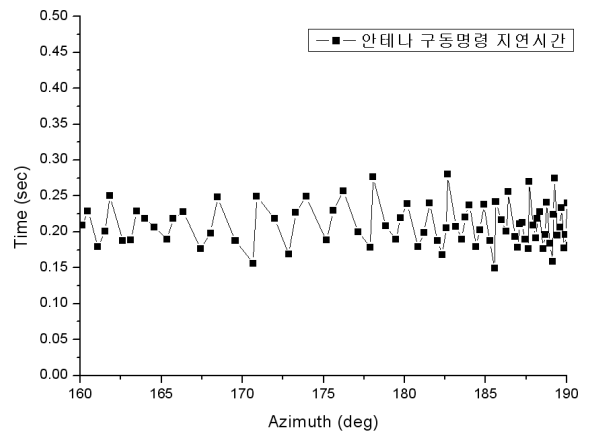
R : 송신과 수신간의 거리 [m]

식 (4)에 최대 300km의 송수신 거리를 가정하면,

2월 및 8월의 전파 굴절계수에 따라 약 1.00101ms와 1.00105ms로 계산되어 전송 지연시간은 약 1ms 라 할 수 있다.

T_2 는 원격측정 수신장비에 의한 지연시간으로 안테나에서 수신되어 수신기 및 컴바이너, 비트 동기화 장비(Bit-Synchronizer)등을 거친다. 위 장비들에 대한 지연시간은 전기적인 신호전송에 따른 지연시간으로 참고 문헌^[5]의 $3\mu s$ 측정 결과를 참고하였다.

T_3 는 자료처리장치에서 자료를 수신하여 안테나의 구동명령으로 전달되기까지의 지연시간이다. T_1 , T_2 구간처럼 전자기파나 전기적 신호의 전송에 따른 지연시간과 달리 컴퓨터를 이용한 처리에 따른 지연시간으로 상대적으로 크다. 모의시험을 통해 Self-Slaving 기법을 적용하여 안테나를 구동하고 원격측정자료와 구동명령 사이의 지연시간을 분석한 결과를 그림 13에 나타내었다.



[그림 13] Self-Slaving 기법의 지연시간

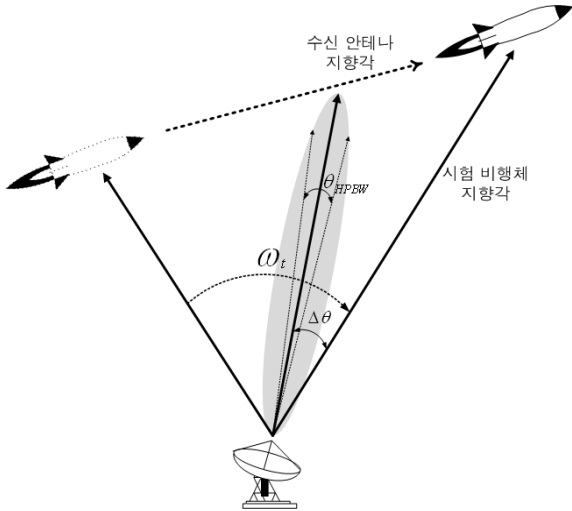
그림 13의 결과에 따라 위치정보가 구동명령으로 전달되기까지 지연시간은 최대 276ms로 측정되었다.

구간별 지연시간은 T_3 가 T_1 , T_2 에 비해 충분히 크므로 시험 비행체의 위치정보가 안테나의 구동명령으로 전달되는 총 지연시간 T_{delay} 는

$$T_{delay} = T_1 + T_2 + T_3 \cong T_3 \quad (5)$$

라 할 수 있다. 그러므로 Self-Slaving은 수신된 위

치정보가 최대 276ms 정도 지연되어 구동명령에 전달되고, 구동명령에 대해 페데스탈(Pedestal)의 구동 특성에 따라 안테나가 구동된다.



[그림 14] 지연시간에 따른 Self-Slaving 각도오차

Self-Slaving의 지연시간이 안테나 추적성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 14에서 ω_t [deg/sec]의 등각속도로 비행하는 시험 비행체를 Self-Slaving 기법으로 추적함을 가정하면 지연시간과 각도오차와의 관계는 식 (6)과 같다.

$$\Delta\theta = \omega_t \times T_{delay} \quad (6)$$

여기서,

- $\Delta\theta$: 각도오차 [deg]
- T_{delay} : 지연시간 [sec]

수신안테나가 메인 빔의 범위 내에서 신호를 수신하기 위해서 식 (7)의 조건을 만족해야 하고

$$\Delta\theta \leq \frac{\theta_{HPBW}}{2} \quad (7)$$

여기서,

- θ_{HPBW} : 반치각 [deg]

한편, 원격측정 파라볼릭 안테나의 반치각은 다음 식으로 계산된다^[6].

$$\theta_{HPBW} = \frac{70 \times \lambda}{D} \quad (8)$$

여기서,

- λ : 파장 [m]
- D : 안테나 지름 [m]

식 (6), (7), (8)을 참고하여 Self-Slaving 기법을 운용할 때 파라볼릭 안테나가 안정적으로 추적 가능한 시험 비행체의 한계 각속도는

$$\omega_{Self-slaving} = \frac{35 \times \lambda}{D \times T_{delay}} \quad (9)$$

여기서,

- $\omega_{Self-slaving}$: Self-Slaving 한계 각속도[deg/sec]

로 계산된다. 식 (9)를 이용하여 2.2GHz의 주파수에서 2.4m 파라볼릭 안테나를 Self-Slaving 기법으로 운용할 경우 메인 빔의 범위 내에서 안정적인 신호수신이 보장되는 한계 각속도는 약 7.205deg/sec로 계산된다.

위 계산된 바와 같이 Self-Slaving 기법은 지연시간으로 인하여 한계 각속도 이하의 추적대상에 대해서만 메인 빔을 이용한 수신을 보장할 수 있다. 따라서 수신 위치에 따른 추적 각속도를 미리 예측하고 한계 각속도 이내의 추적 각속도로 추적이 가능한 수신위치에서 Self-Slaving 기법을 사용하면 양질의 신호 수신이 보장된다.

5. 맺음말

본 논문에서 일반적인 추적기법인 자동추적 기법의 한계점을 제시하고, 그에 대한 보완으로 Self-Slaving 추적기법을 제안하였다.

Self-Slaving 기법은 통신장애 환경에서 자동추적

기법 결과보다 각도오차가 적고, 통신두절 환경에서 추적안테나가 안정적으로 동작함을 확인할 수 있었다. 그러나 Self-Slaving의 지연시간에 따른 정상적인 신호수신이 가능한 한계 각속도가 존재한다. 그러므로 비행시험 준비단계에서 시험 비행체 속도와 수신시스템의 특성을 참고하여 Self-Slaving 기법을 운용하기위한 최적 수신지점을 선정하는 것이 필요하다.

실제 비행시험의 통신장애 구간에서는 통신환경에 둔감한 Self-Slaving 기법으로 추적하고 통신환경이 양호하고, 고속비행 구간을 자동추적기법으로 병행하여 운용하면, 전 구간 안정적인 추적기법이 될 것이라 기대된다.

향후 Self-Slaving 기법의 지연시간에 따른 오차는 시험 비행체의 비행속도가 증가할 경우 영향이 커질 것으로 예상되므로 추적 각속도와 통신환경을 고려한 최적수신 위치 선정에 관한 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Range Commanders Council, "Telemetry Standard", Document 106-07 appendix C, p. C-1.
- [2] James H. Cook Jr. et al., "An Improved Scanning Automatic Tracking Antenna for Telemetry Applications", International Telemetry Conference 89-0823, pp. 271~281, 1989.
- [3] 오이석 외, "전파환경을 고려한 RF 신호세기 예측 시뮬레이터 개발", 국방과학연구소, DSTC-425-060392, p. 66, 2006.
- [4] Recommendation ITU-R P.453-7 "The Radio Refractive Index : Its Formula and Refractivity Data", 1999.
- [5] 서동수 외, "Implementation of Unmanned Telemetry Ground System using Microwave Link", International Telemetry Conference 03-01-06, pp. 94~95, 2003.
- [6] Range Commanders Council, "Telemetry Applications Handbook", Document 199-88, pp. 5.1-1.